

2010年代の光赤外天文学

将来計画検討報告書

光赤外天文学将来計画検討会・編

カラーグラビア1

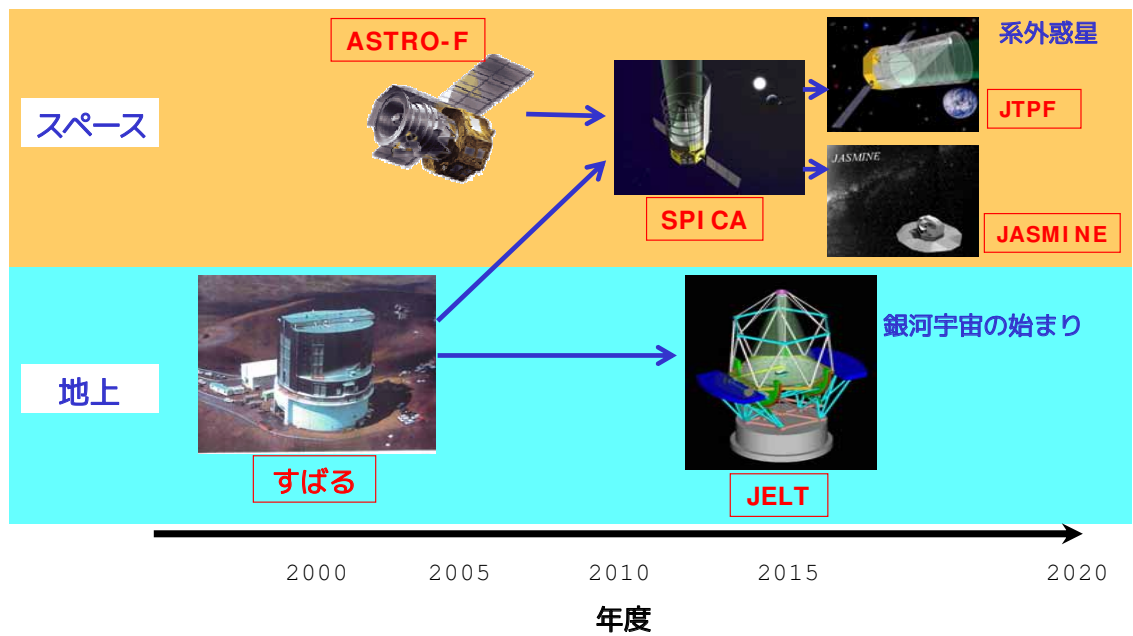


図 1: 光赤外線天文学のロードマップ (37 ページ)



図 2: 岡山天体物理観測所全景 (43 ページ)



図 3: 木曽観測所全景 (44 ページ)



図 4: 上松天体赤外線観測室 (44 ページ)



図 5: マウナケア山頂 (46 ページ)



図 6: すばる望遠鏡のドームと観測制御棟 (46 ページ)



図 7: すばる望遠鏡山麓施設 (ヒロベース) (45 ページ)

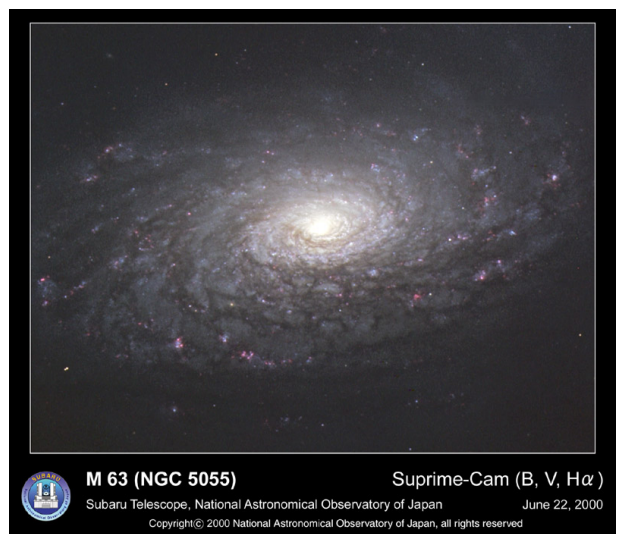


図 8: 主焦点カメラにより撮影した渦巻銀河 M63。視野の端でも画質の劣化が全く無いことが証明された。(46 ページ)

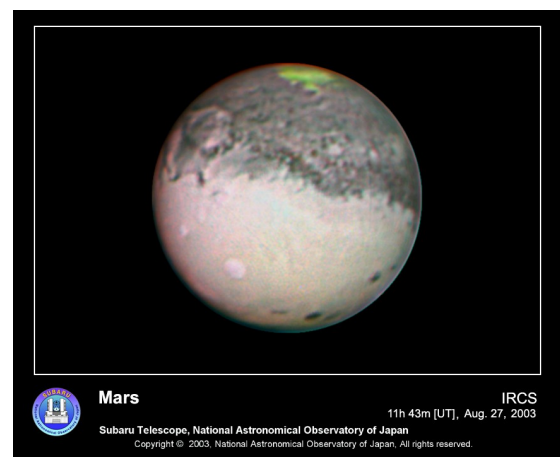


図 9: 地球最接近時の平成 15 年 8 月 27 日に、赤外カメラ IRCS で撮影した火星。(49 ページ)

すばる望遠鏡第一期共同利用観測装置



図 10: すばる望遠鏡の第一期共同利用観測装置。主焦点と2つのナスミス焦点に1つずつ。カセグレン焦点に5つ。この他にも持ち込み装置が主焦点、ナスミス、カセグレン焦点に1つずつ存在している。(47 ページ)

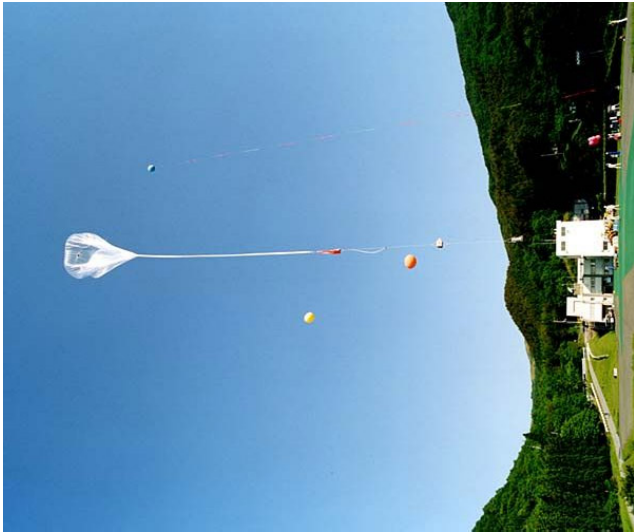


図 11: 科学観測用大気球の打ち上げ (宇宙航空研究開発機構提供) (51 ページ)

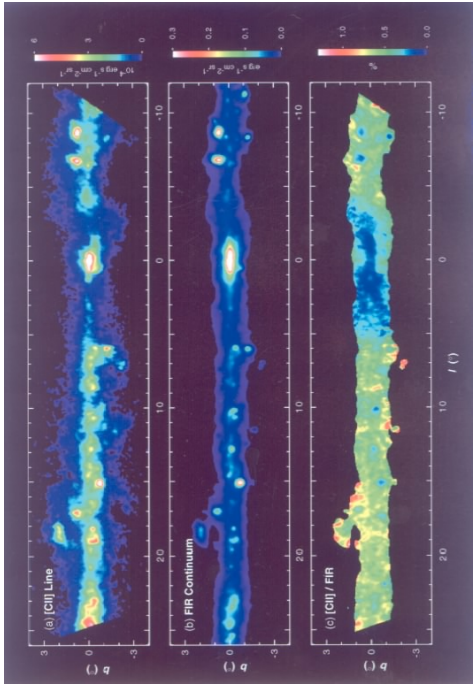


図 12: 遠赤外 [CII] スペクトル線で見えた銀河系の構造と、遠赤外線連続波の分布との比較 (52 ページ)

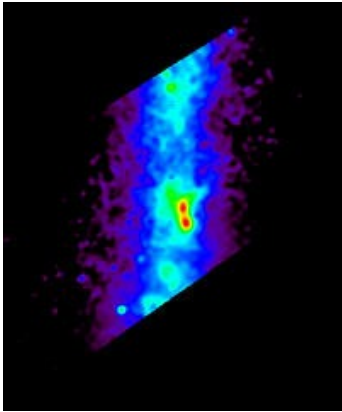
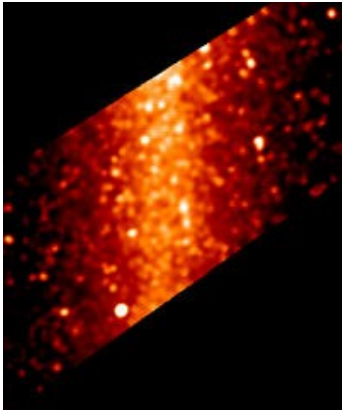


図 13: IRTS によって観測された $3\mu\text{m}$ 帯の連続波の分布 (左図、星をトレース) と $3.3\mu\text{m}$ feature の分布 (右図、PAH と呼ばれる有機物をトレース)(Tanaka et al. 1996) (2.21 ページ)



図 14: 観測ロケットの打ち上げ (宇宙航空研究開発機構提供) (52 ページ)

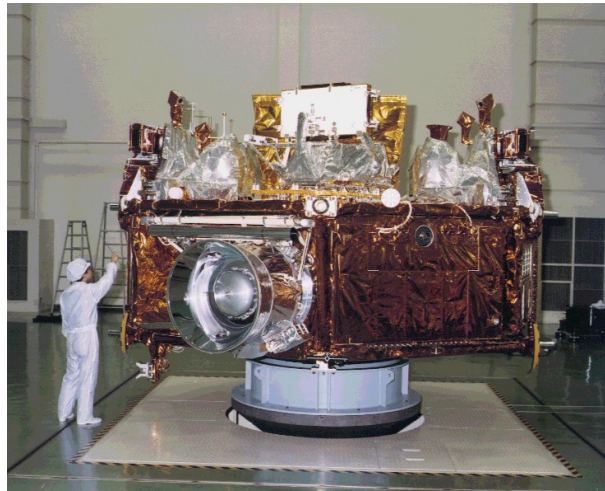


図 15: 多目的実験衛星 SFU に搭載された宇宙赤外線望遠鏡 IRTS (宇宙航空研究開発機構提供) (53 ページ)

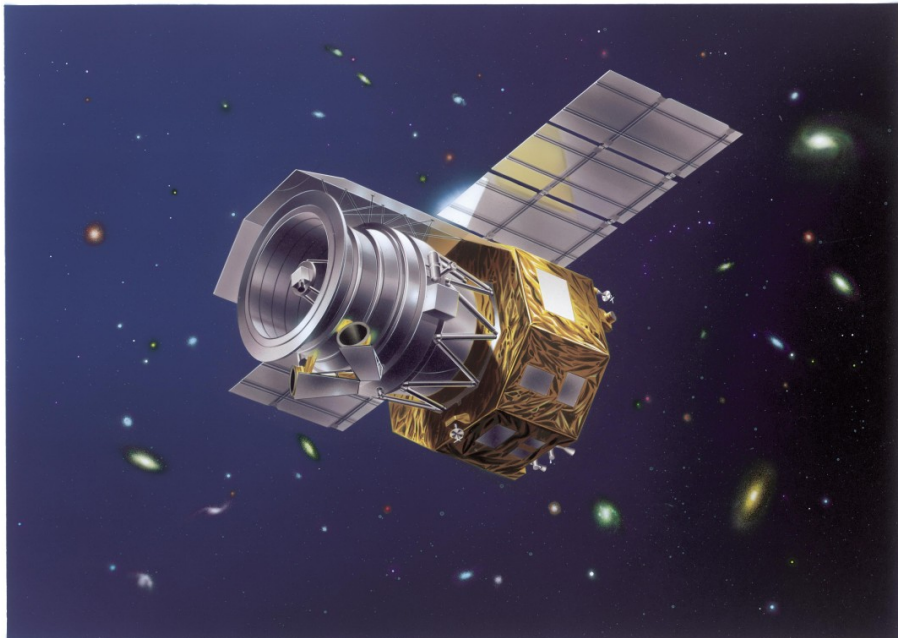


図 16: 軌道上の ASTRO-F(想像図) (54 ページ)

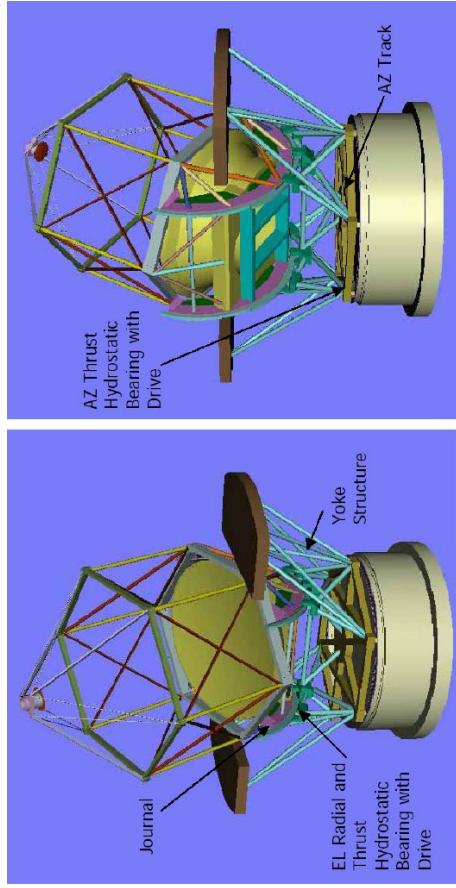


図 17: JELT 望遠鏡鳥瞰図 (199 ページ)

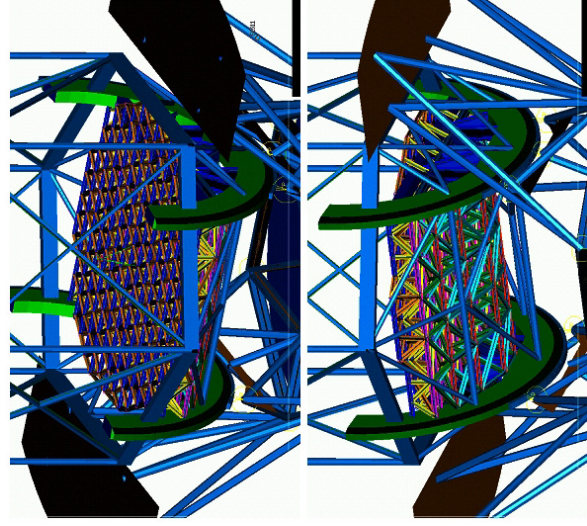


図 19: JELT 望遠鏡主鏡セル近傍の構造概観図 (203 ページ)

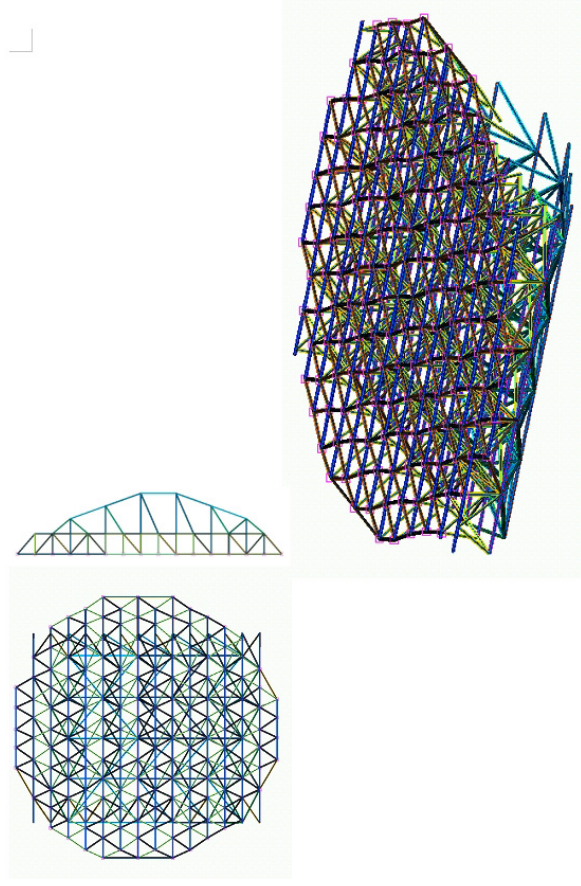


図 20: JELT 望遠鏡主鏡セル概観図 (203 ページ)

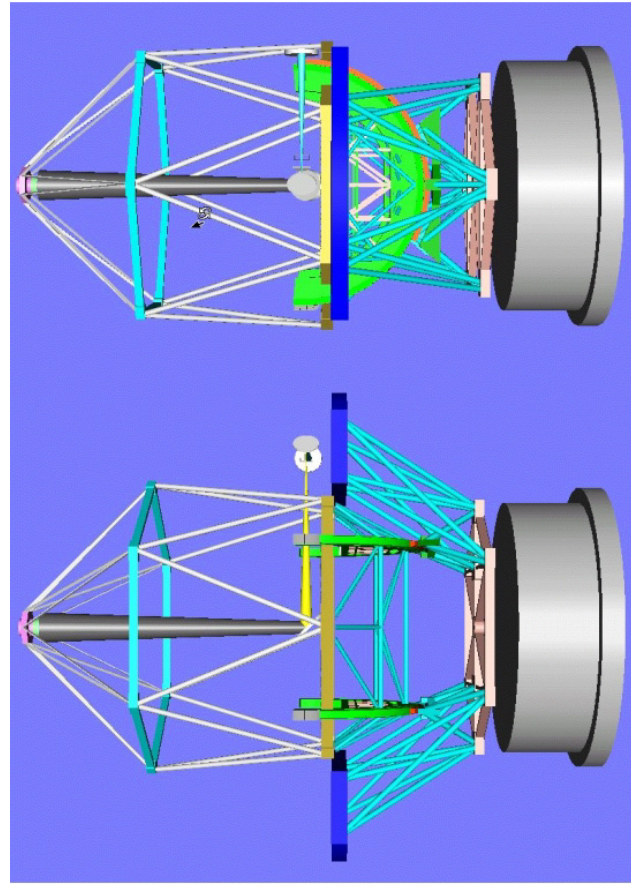


図 18: JELT 望遠鏡側面概観図 (202 ページ)

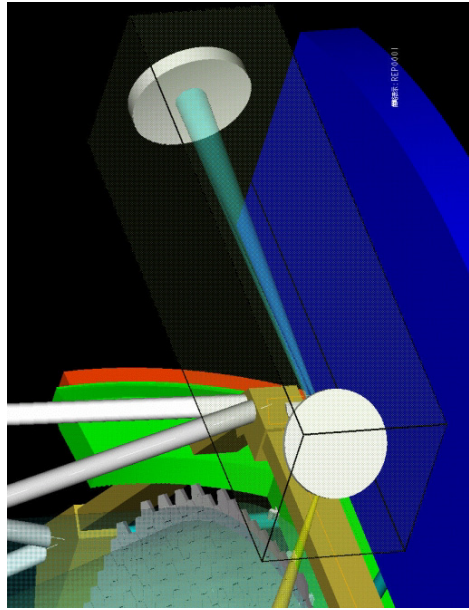


図 21: JELT 望遠鏡焦点面近傍拡大図 3 (204 ページ)

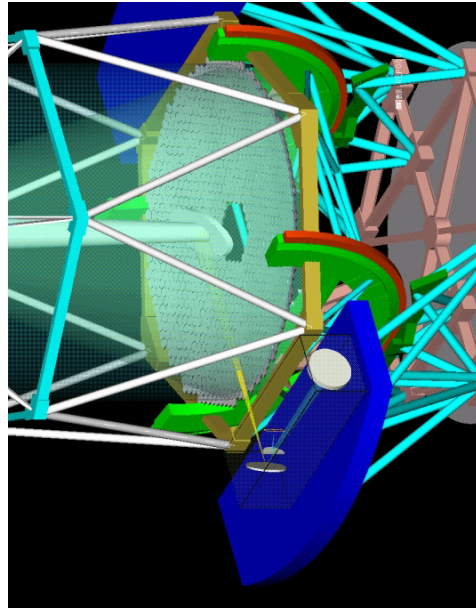


図 22: JELT 望遠鏡ナミス台周辺図 1 (204 ページ)

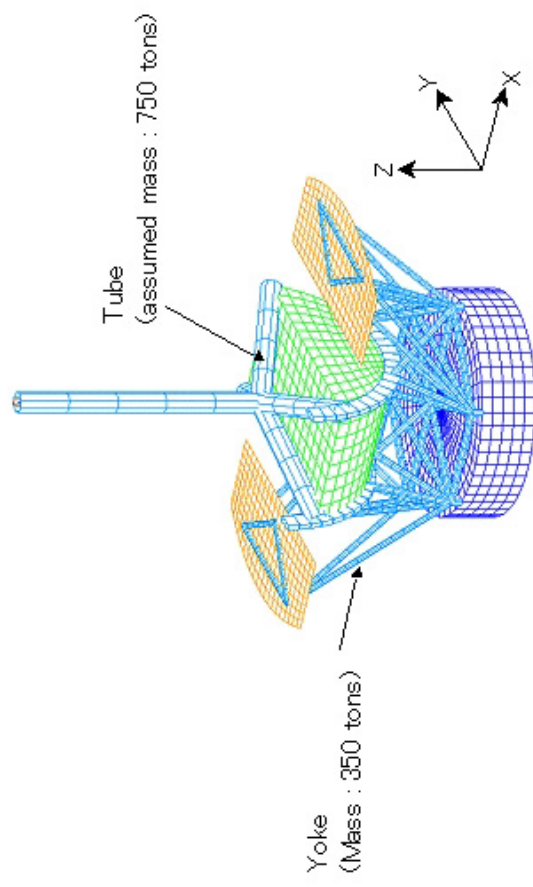


図 23: JELT 望遠鏡の固有振動数解析モデル (205 ページ)

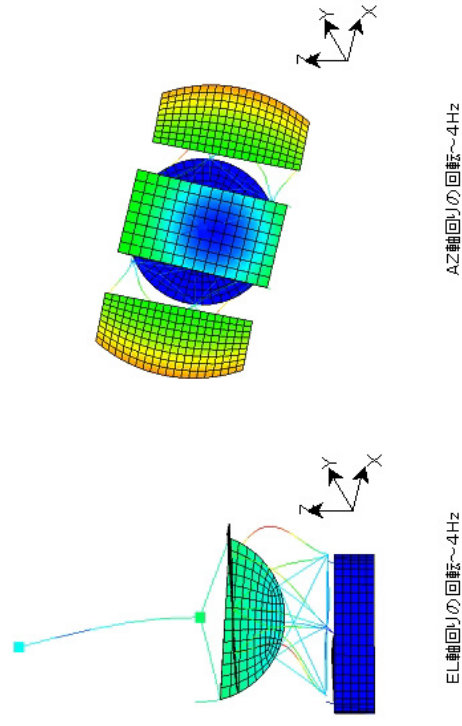


図 24: JELT 望遠鏡の制御ループに関連した固有振動数解析結果 (206 ページ)

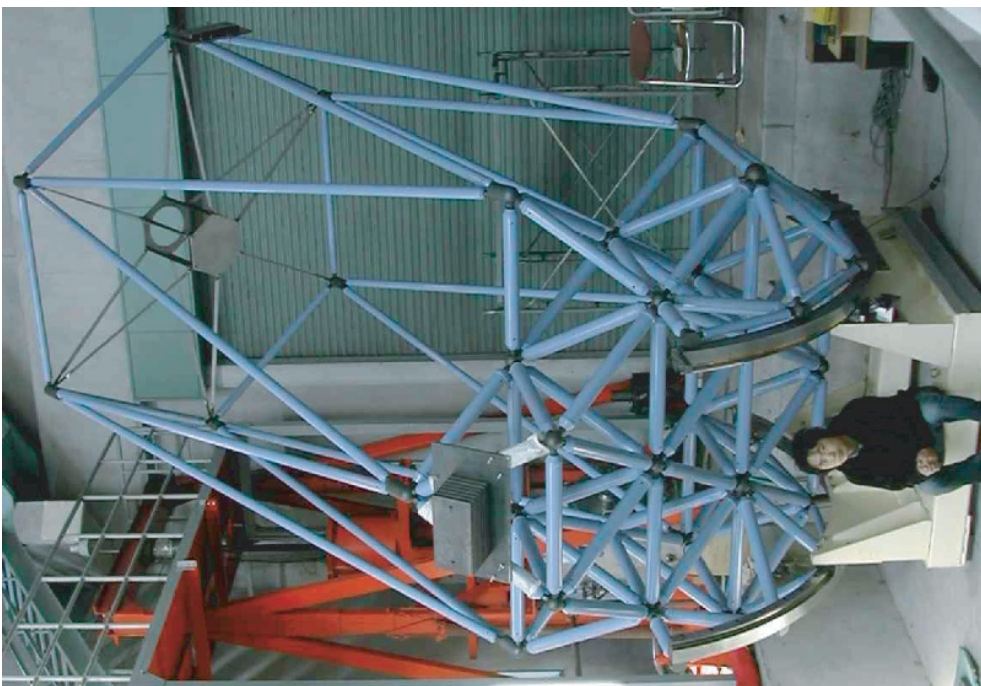


図 28: 名古屋大学で開発中の超軽量望遠鏡 (215 ページ)

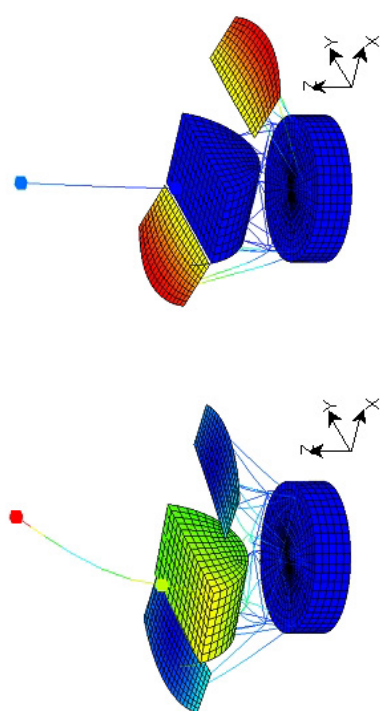


図 25: JELT 望遠鏡の制御ループに無関係な固有振動数 (206 ページ)

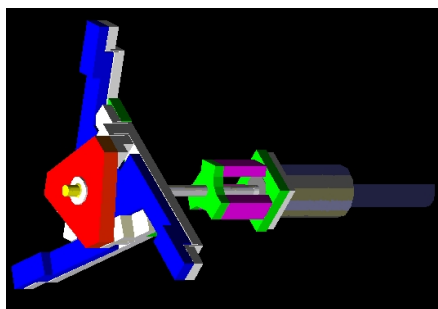


図 26: 京都大学で開発中の
新型アクチュエータ全体図
(217 ページ)



図 27: アクチュエータをトラス構造物に取りつけた写真
(217 ページ)

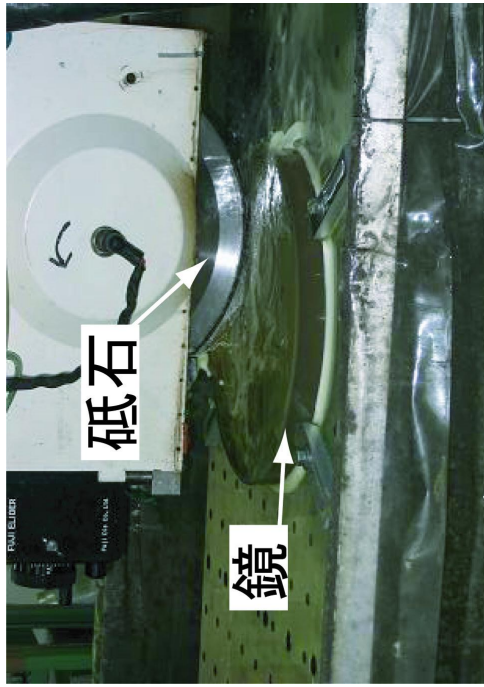


図 29: 研削加工の様子 (218 ページ)



図 30: 研削加工した 10cm ZPF の表面 (222 ページ)

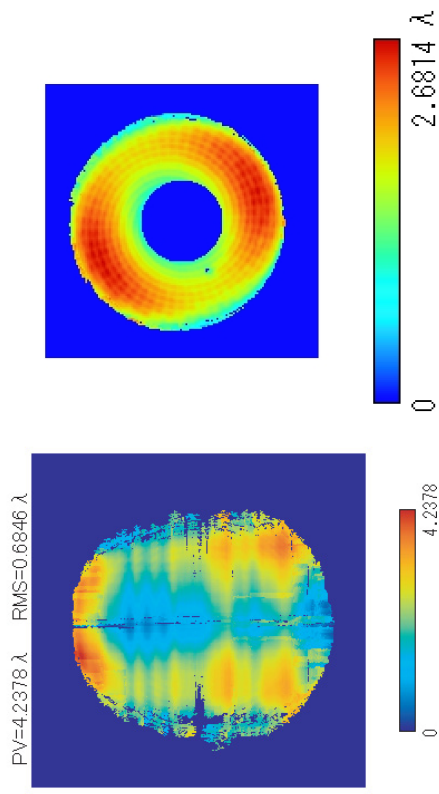


図 31: $\phi 300\text{mm}$ (左) と $\phi 100\text{mm}$ (右) の研削鏡の形状 (219 ページ)



図 32: ALMA サイト (中央の平原) と左に見えているのがチャントール山 (259 ページ)

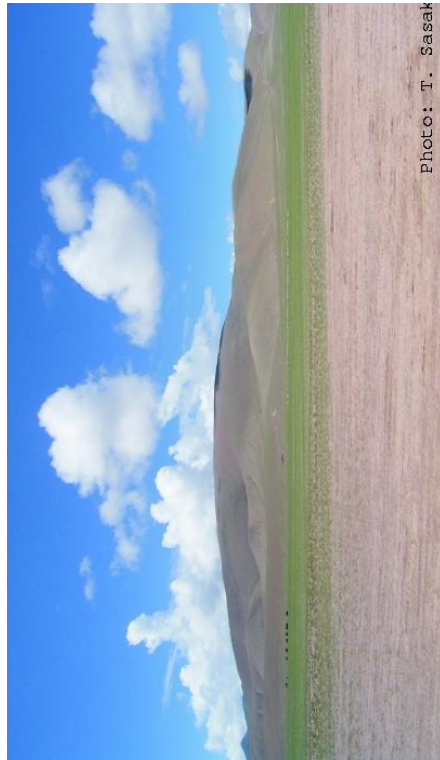


図 33: チベット、Oma 付近 (260 ページ)

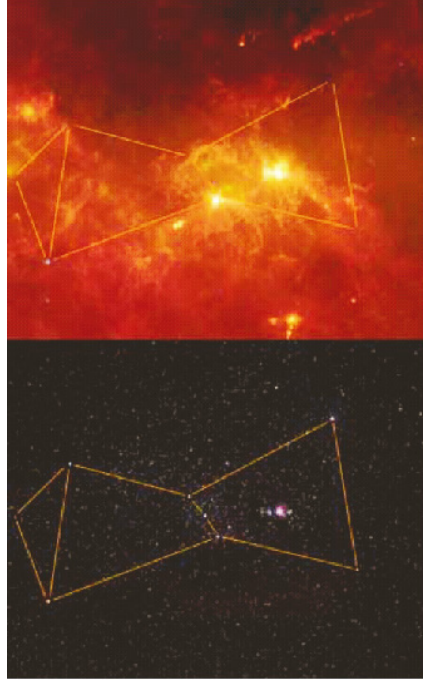


図 35: (左) 可視光で見たオリオン座と、(右) 遠赤外線で見えたオリオン座の比較。遠赤外線では、可視光線を吸収していた星間物質 (ダスト) が可視化される。これにより、星生成領域の分布が明確に描き出されている。(275 ページ)

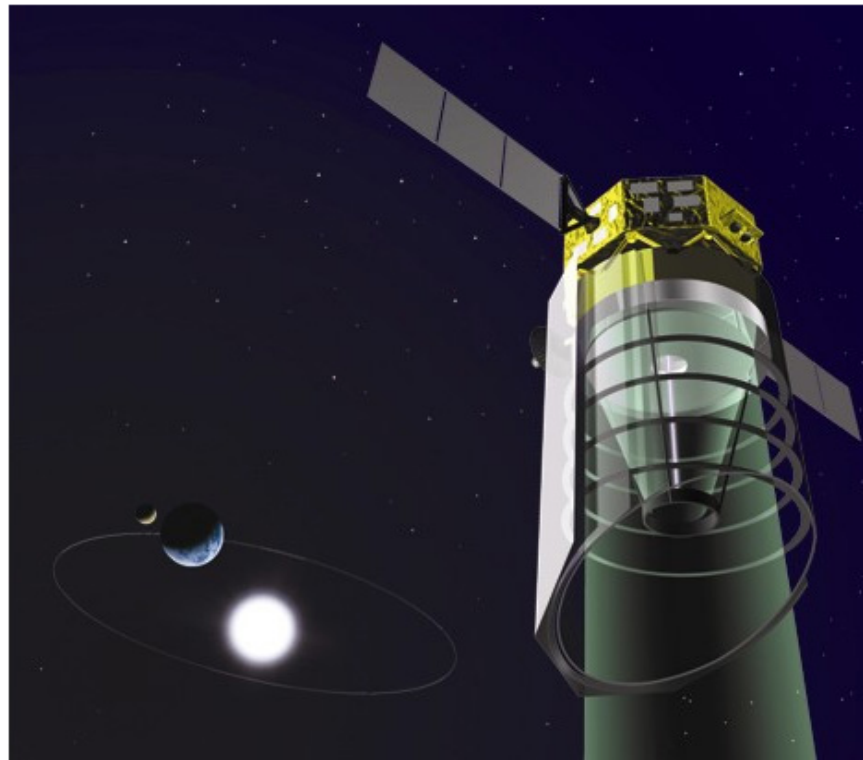
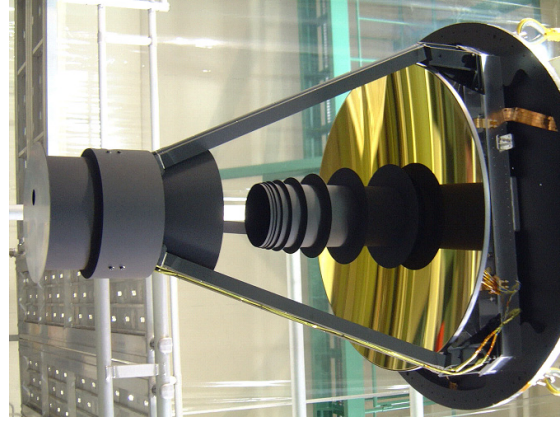


図 36: ASTRO-F フライト望遠鏡 (289 ページ)



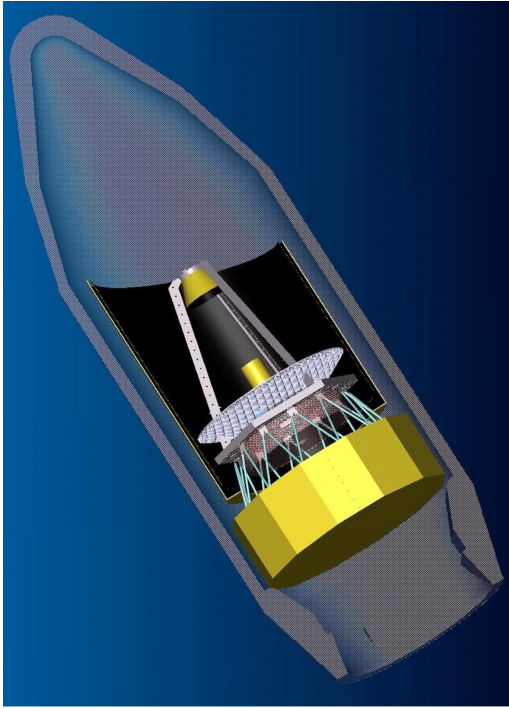


図 37: フェアリングに搭載された SPICA (292 ページ)

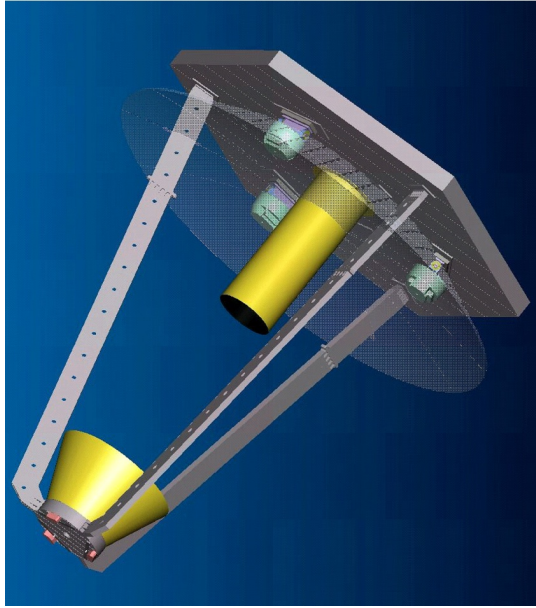


図 38: SPICA 望遠鏡システム概略図 (293 ページ)

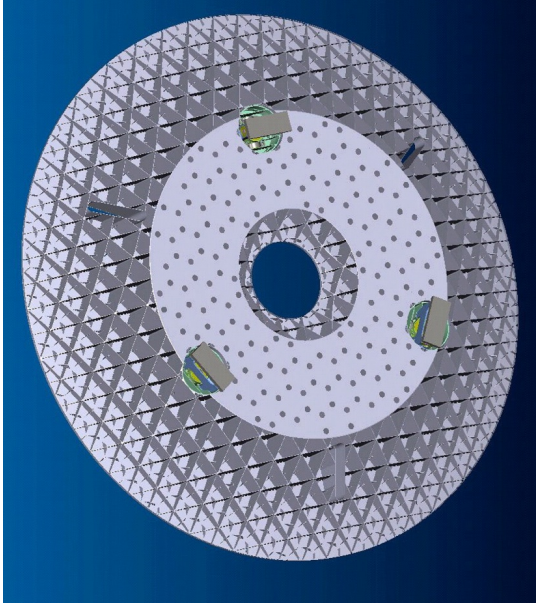


図 39: 裏から見た主鏡コンポーネント斜視図 (293 ページ)

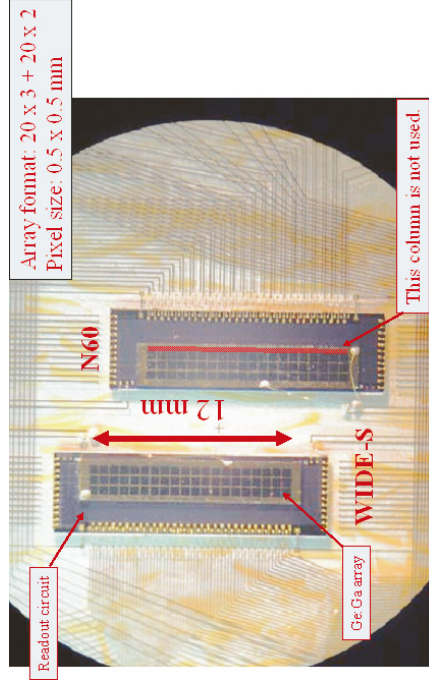


図 40: ASTRO-F 搭載 GeGa 遠赤外線アレイ検出器 (301 ページ)

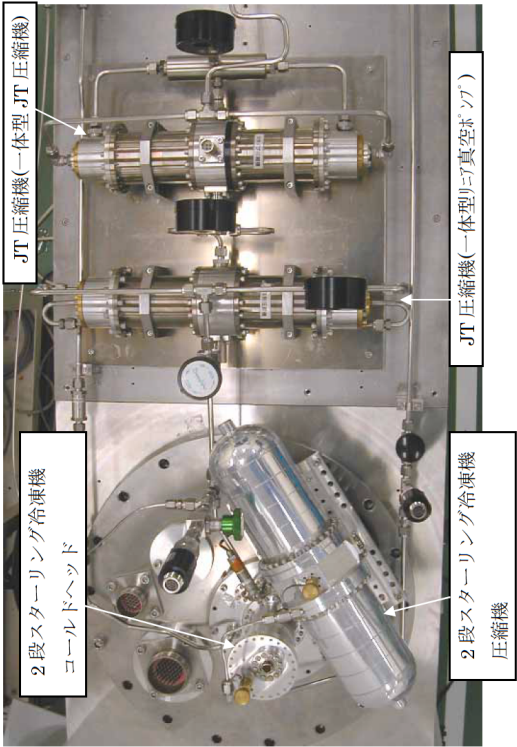


図 41: SPICA 用 1K 級冷凍機試作品 (311 ページ)

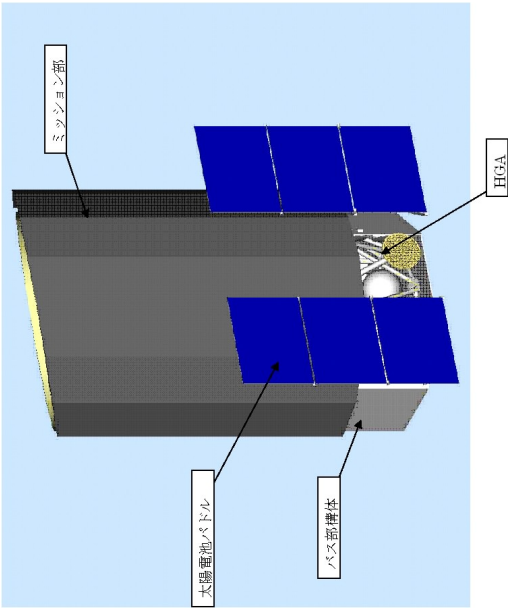


図 42: SPICA 衛星外観図 (284 ページ)

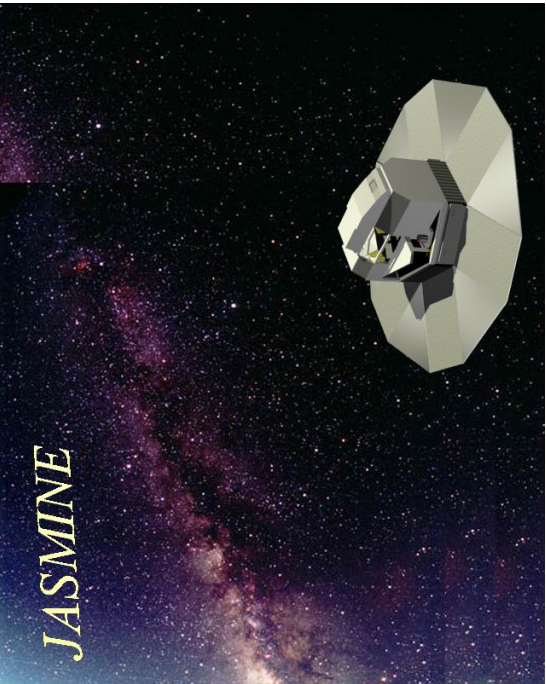


図 43: 天の川領域の星々の位置、年周視差 (距離)、固有運動を 10 マイクロ秒角の高精度で測定する赤外線位置天文観測衛星 (JASMINE)。(323 ページ)

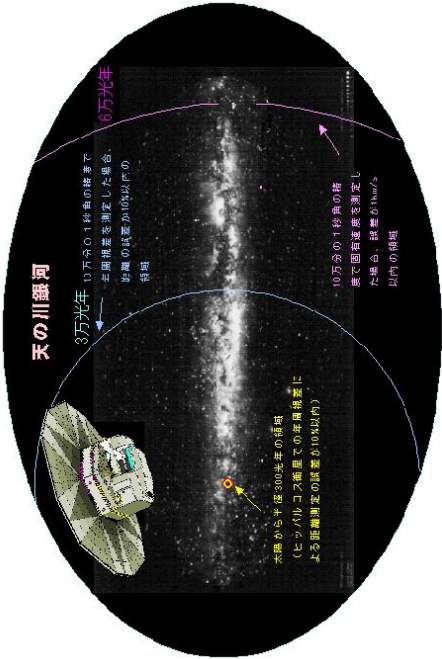


図 44: 10 マイクロ秒角という高精度アストロメトリ観測で見渡せる天の川銀河の領域。星までの距離を正確に知るためには年周視差の誤差が 10 % 以内である必要がある。この誤差で星までの距離が求められる領域は、銀河系中心を越えてバルジの全領域にまで及ぶ。(325 ページ)

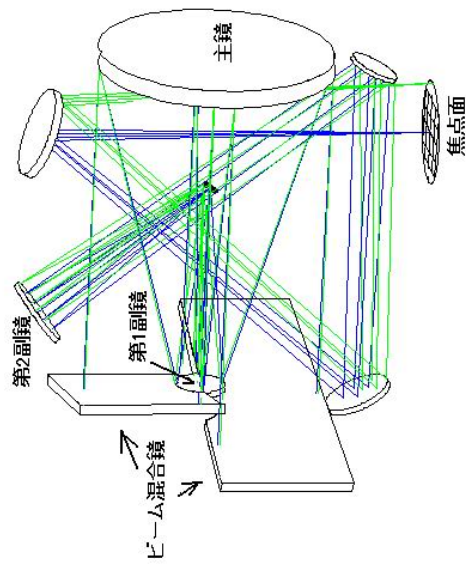


図 45: JASMIN 光学系。Korsch 系を改良した 3 枚鏡であり、Korsch 系に特徴的な中心視野の欠落が無いように工夫されている。長焦点、広視野ながら回折限界が達成できる光学系となっている。主鏡の前 (図の左側) にはビーム混合鏡とよばれる 2 枚の平面鏡があり、これにより大角度離れた 2 方向を同時観測し、星の位置決定を行う。(337 ページ)

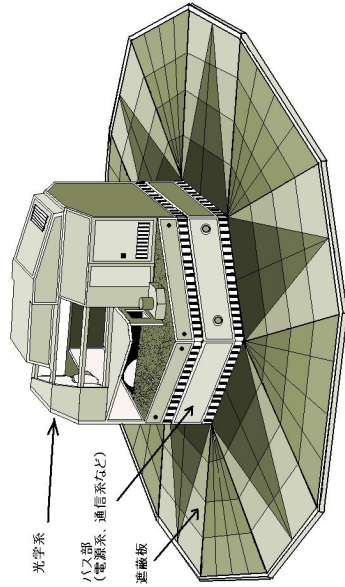


図 46: JASMIN の概観図。バス部の上に光学系を含むミッション部が設置される。JASMIN は高精度な熱的安定性が求められるため、ミッション部を太陽光から守る遮蔽板が設置され、裏面には太陽電池が張られる。(343 ページ)

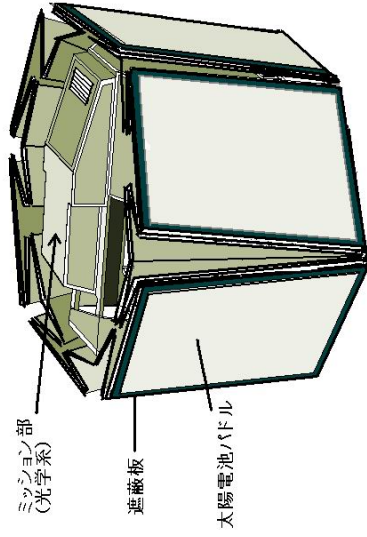


図 47: 遮蔽板を折りたたんだ様子。フェアリングに収める際には遮蔽板はたたまれる。打ち上げ後、展開される。(346 ページ)

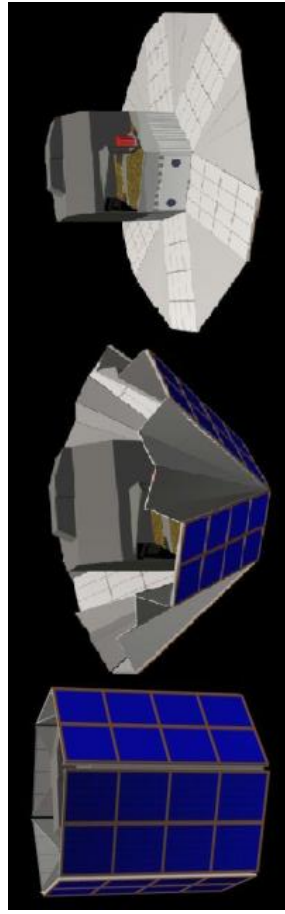


図 48: 折りたたんだ遮蔽板がフェアリングから出された後、展開される様子 (左から右へ展開される)。遮蔽板裏 (青い部分) には太陽電池が装備される (346 ページ)。

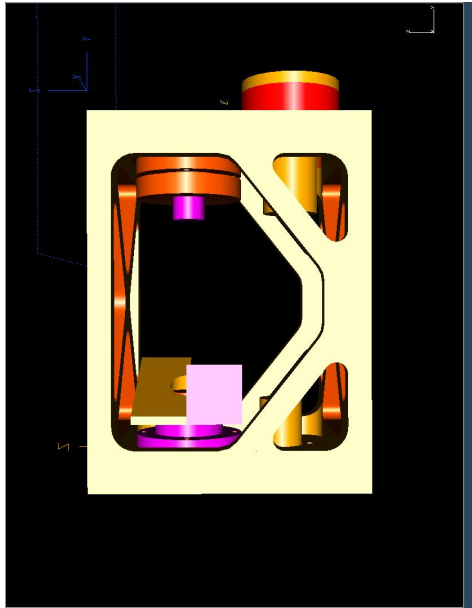


図 49: Nano-JASMINE 望遠鏡。超小型衛星として約2年後に打ち上げ、実際のスペースでJASMINE同様の手法で観測を行い(デモンストレーション)、JASMINEに必要な技術課題の実験・実証を行う。左にビーム混合鏡、右に主鏡が設置されている。大きさは約120×120×150mm、重さ2kg弱。(§ 6.9 参照)



図 50: Nano-JASMINE 望遠鏡用の主鏡・副鏡サンプル(アルミ金属鏡、非球面)。超精密旋盤により削り出し加工することで、研磨無しでλバンド使用に耐えられる表面粗さを達成している。(§ 6.9 参照)

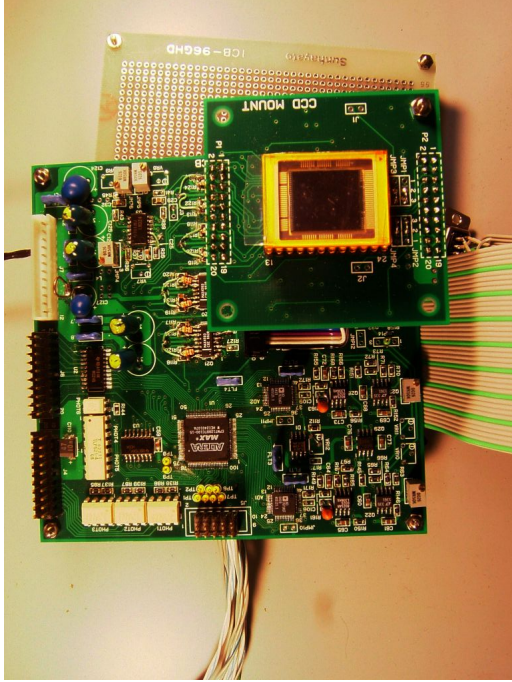


図 51: Nano-JASMINE 用 CCD の TDI 駆動用制御用ボード試作品。TDI 撮像や星像位置検出実験に向けて、読み出しパラメータの調整を行っている。(358 ページ)

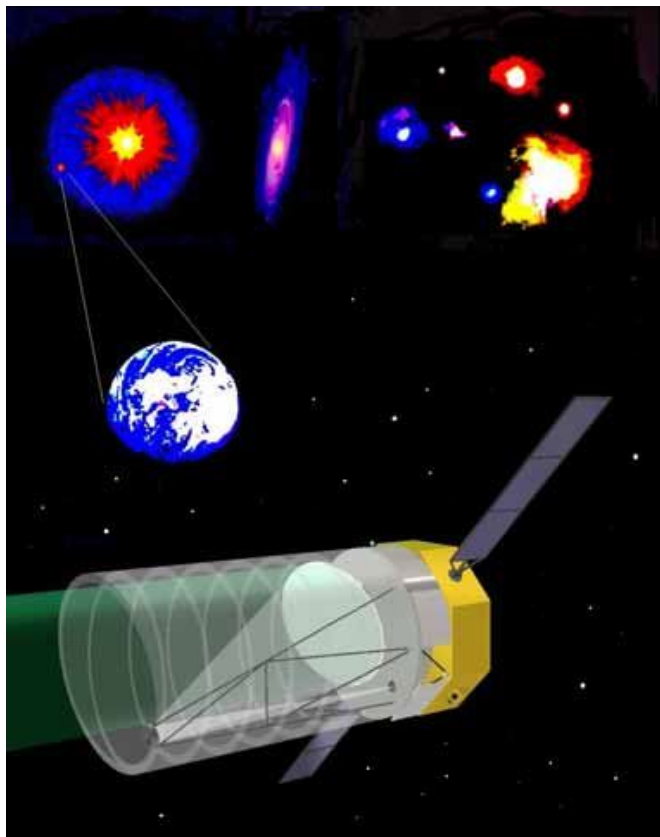


図 52: JTPF/HCST 衛星の想像図 (377 ページ)

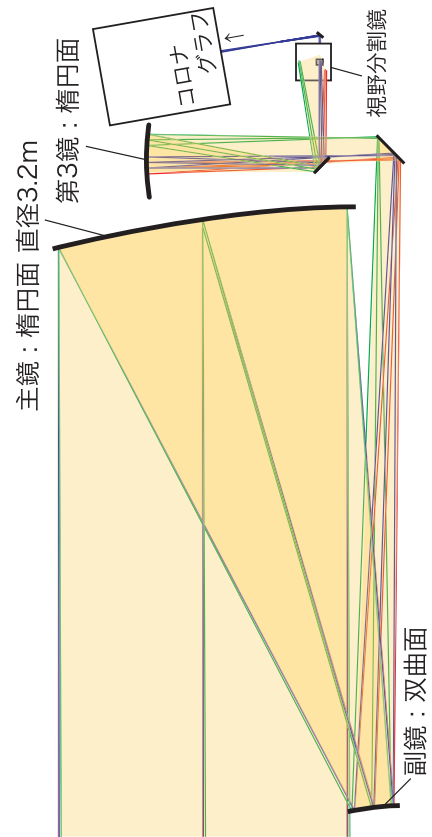


図 53: JTPF/HCST の光学系案 (378 ページ)

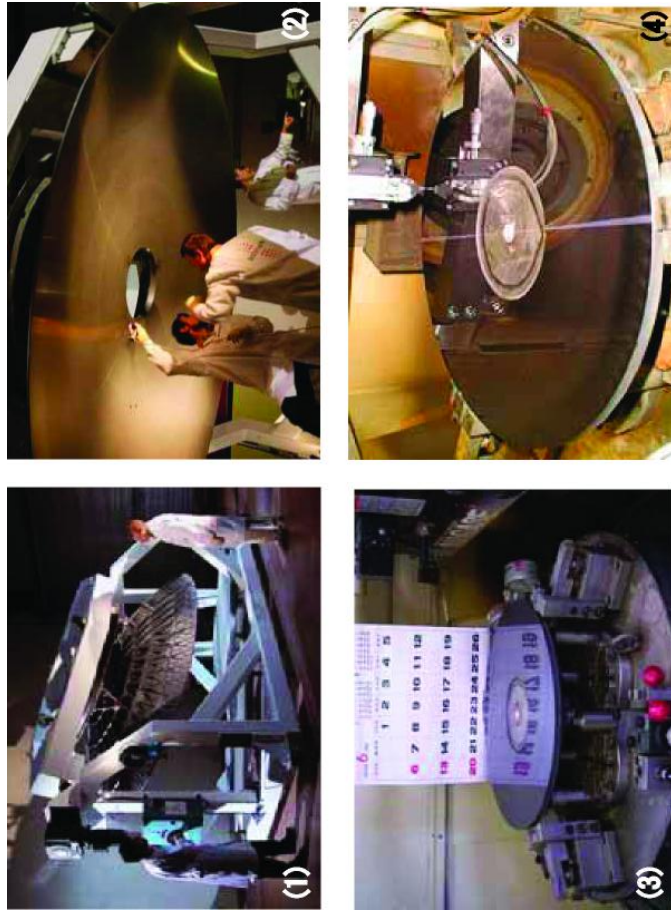


図 54: (1) ハーシェル望遠鏡用の焼結 SiC 口径 3.5m 主鏡 (2) 焼結された部分を超音波診断中 (3)ELID 研削で作成したリブ付き焼結 SiC の 360mm 鏡 (4) 接触型のプロファイラーによるオンマシン測定 (380 ページ)

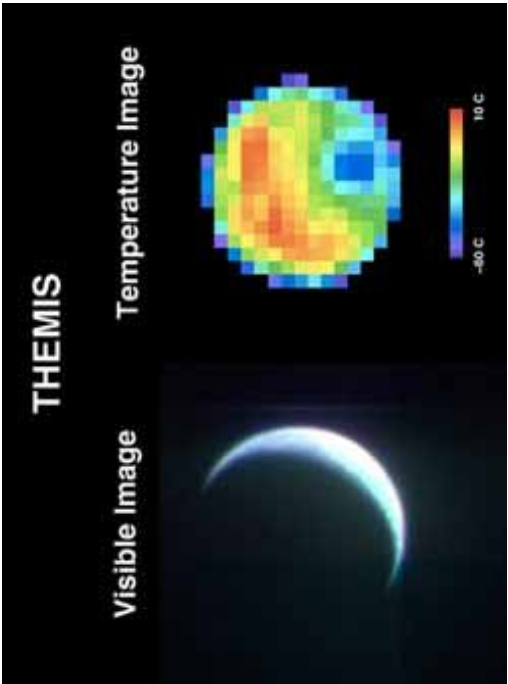


図 56: THEMIS 衛星から見た地球の可視光および赤外線画像 (367 ページ)

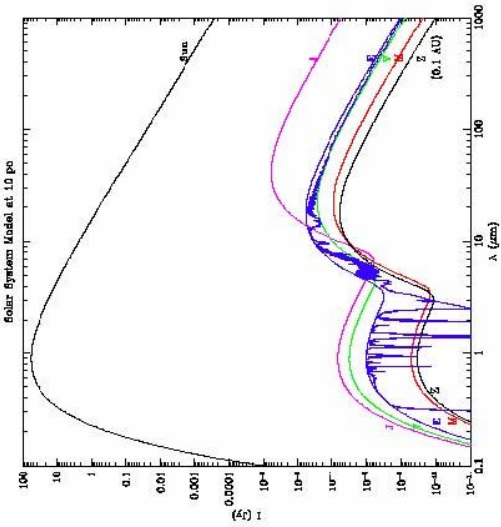


図 57: 10pc においた太陽系のスペクトルモデル。太陽 (Sun)、木星 (J)、地球 (E)、金星 (V)、火星 (M)、黄道光 (Z) が示されている。これらの天体のスペクトルは太陽からの反射光と惑星自らの熱放射の 2 成分から成る。(368 ページ)

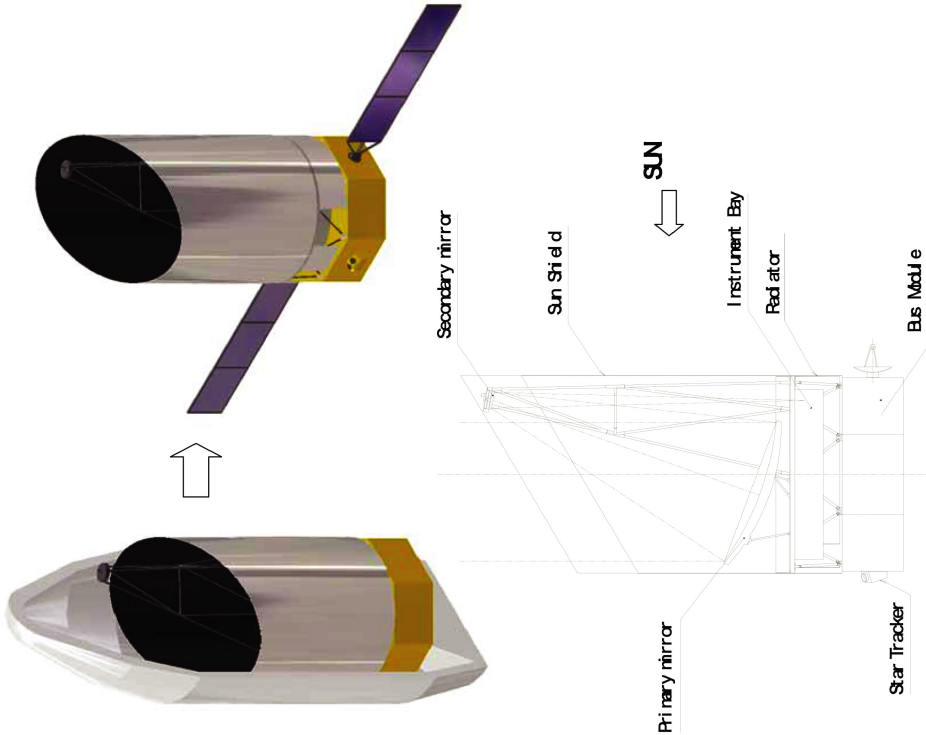


図 55: JTPF フェアリング収納状態と軌道上での外観 (389 ページ)

目次

第1章 序章	37
1.1 光赤外天文学将来計画検討会の活動	37
1.2 検討の総括	38
1.3 検討会活動日誌	38
第2章 光赤外天文学の過去・現在と未来	41
2.1 天文天体物理の歴史・意義	41
2.2 日本の光赤外天文学の来し方：地上編	43
2.2.1 岡山天体物理観測所	43
2.2.2 木曽観測所	44
2.2.3 上松天体赤外線観測室	44
2.2.4 ハワイ観測所	45
2.2.5 すばる望遠鏡の現状/将来と成果	45
2.2.6 国立天文台の組織改編	49
2.2.7 大学の活動と中小口径の望遠鏡	49
2.3 日本の光赤外天文学の来し方：上空編	51
2.3.1 空へ	51
2.3.2 宇宙へ	53
2.3.3 未来へ	55
第3章 次世代光赤外天文学のサイエンス	57
3.1 科学検討班の活動目標・経過	57
3.2 検討結果の要旨と必要観測仕様のまとめ	58
3.2.1 「宇宙論、構造形成」分野	58
3.2.2 「クエーサー、活動的銀河中心核」分野	59
3.2.3 「銀河、銀河団」分野	60
3.2.4 「銀河系、局所銀河」分野	62
3.2.5 「恒星物理、星形成、超新星、晩期型星」分野	63
3.2.6 「惑星系、太陽系」分野	64
3.3 宇宙論、構造形成	67
3.3.1 今後の方向性	67
3.3.2 基本定数の時間変化と宇宙論	68
3.3.3 ダークマター	76
3.3.4 初期天体	84
3.3.5 構造形成	86
3.3.6 宇宙論的アストロメトリ	88
3.3.7 班員構成、担当	89
3.4 クエーサー、活動的銀河中心核	90
3.4.1 今後の方向性	90

3.4.2	近傍から遠方の AGN における巨大ブラックホール質量の決定	90
3.4.3	近傍 AGN の中心構造の解明	91
3.4.4	クエーサー/AGN の進化： 深宇宙サンプルの確立	98
3.4.5	班員構成、担当	103
3.5	銀河、銀河団	104
3.5.1	次世代銀河天文学の方向性	104
3.5.2	初代天体の発見と宇宙電離史の解明	105
3.5.3	形成途上銀河の内部構造の解明	109
3.5.4	銀河形態、種族の起源の解明	113
3.5.5	宇宙大規模構造の形成と進化	119
3.5.6	クエーサー吸収線系と銀河の初期進化	122
3.5.7	活動銀河核と銀河形成との関わり	123
3.5.8	班員構成、担当	125
3.6	銀河系、局所銀河	126
3.6.1	今後の方向性	126
3.6.2	銀河系の形成と進化	127
3.6.3	矮小銀河の形成史とその意義	131
3.6.4	明るい銀河の形成史と形態	134
3.6.5	局所宇宙銀河の特異速度構造	140
3.6.6	次世代望遠鏡に望む性能 — 楕円銀河の星生成史の解明を目指して	140
3.6.7	班員構成、担当	144
3.7	恒星物理、星形成、超新星、晩期型星	145
3.7.1	今後の方向性	145
3.7.2	星形成	146
3.7.3	ディスクとハローの低質量星と超低質量天体	147
3.7.4	晩期型星の質量放出	151
3.7.5	恒星の元素組成解析	153
3.7.6	Ia 型超新星の起源に迫る—若い Ia 型超新星残骸中に連星系の痕跡を探る—	156
3.7.7	班員構成、担当	158
3.8	惑星系、太陽系	159
3.8.1	今後の方向性	159
3.8.2	原始惑星系ガス円盤の構造と進化	159
3.8.3	原始惑星系ダスト円盤の構造と進化	161
3.8.4	原始惑星系円盤の化学進化	163
3.8.5	惑星とガス円盤の相互作用	165
3.8.6	惑星の初期進化	167
3.8.7	太陽系外縁部の構造	169
3.8.8	系外惑星系	172
3.8.9	居住可能惑星	175
3.8.10	班員構成、担当	177
第 4 章	次期光学赤外線地上超大型望遠鏡	191
4.1	地上大型望遠鏡の科学的意義	191
4.1.1	科学的背景	191
4.1.2	宇宙論	192
4.1.3	活動銀河核	193

4.1.4	銀河形成・進化	193
4.1.5	銀河系、局所銀河	194
4.1.6	恒星	195
4.2	次世代地上大型望遠鏡ワーキンググループ	196
4.3	JELT 構想・基本仕様と光学系	196
4.3.1	基本仕様	196
4.3.2	光学系	196
4.4	望遠鏡構造	198
4.4.1	全体構造の基礎検討	198
4.4.2	固有振動数	200
4.4.3	高度軸受部・水平回転部	200
4.4.4	JELT 全体構造	201
4.4.5	鏡筒部・架台部	205
4.4.6	高度軸受部・水平回転部	210
4.4.7	副鏡支持機構	210
4.4.8	駆動機構	211
4.4.9	追尾制御装置	213
4.4.10	超軽量架台の試作開発	215
4.4.11	新型アクチュエータの開発	217
4.5	鏡面製作	218
4.5.1	超高精密研削装置	218
4.5.2	新素材セグメント鏡の開発試作	222
4.6	制御系ソフトウェアおよび計算機システム	228
4.6.1	JELT 制御系基本構想	228
4.6.2	各部制御系詳細	229
4.6.3	JELT 制御系開発に当たっての留意点	230
4.7	観測装置構想	232
4.7.1	近赤外広視野カメラ/多天体分光器	232
4.7.2	高分散分光器	233
4.7.3	中間赤外線観測装置 (仮称:Big-COMICS)	235
4.7.4	JELT で実現する偏光機能について	237
4.8	補償光学系	239
4.8.1	補償光学系とは	239
4.8.2	これまでの補償光学系	240
4.8.3	レーザーガイド補償光学系の開発	240
4.8.4	補償光学技術の進展	241
4.8.5	JELT 補償光学系の案	242
4.8.6	要素技術開発	244
4.9	ドーム	245
4.9.1	ドームに要求する機能	245
4.9.2	外的環境からの保護	246
4.9.3	風の擾乱対策	246
4.9.4	発熱抑制	247
4.9.5	シーイング劣化防止対策	247
4.9.6	望遠鏡運用・保守に必要な装置の収納	248
4.9.7	ドームのコスト	249

4.10	全体コストとスケジュール・体制	250
4.10.1	全体コスト	250
4.10.2	スケジュール	251
4.10.3	体制	251
4.11	海外の超大型地上望遠鏡計画	251
4.11.1	概要	251
4.11.2	TMT (Thirty Meter Telescope)	252
4.11.3	OWL (Overwhelmingly Large telescope)	252
4.11.4	GMT (Giant Magellan Telescope)	253
4.11.5	Euro50	254
4.11.6	その他	254
4.12	国際協力・国際協議	254
4.12.1	多国間国際協議の場合	254
4.12.2	個別グループ間協議の場合	255
4.12.3	国際協力へのスタンスと状況分析	256
4.13	建設地	256
4.13.1	サイト選定の重要性	256
4.13.2	サイトが満たすべき条件	257
4.13.3	サイトの評価方法	258
4.13.4	天文台建設に適した地域	258
4.14	光干渉計と単一望遠鏡の役割	262
4.14.1	光干渉計と巨大望遠鏡で得られる観測能力	262
4.14.2	光赤外干渉計による超高角度分解能観測のターゲット (図 4.96)	265
4.14.3	可視・赤外・電波の超高角度分解能プロジェクト (図 4.97)	266
4.14.4	将来の光干渉計への注目	267
4.15	まとめ	268
4.16	謝辞	268
第 5 章	次世代赤外線天文衛星 SPICA	271
5.1	ミッションの概要	271
5.1.1	宇宙史の解明: ビッグバンから生命まで	271
5.1.2	ASTRO-F への期待とその発展	271
5.1.3	SPICA ミッション	272
5.1.4	本文書の構成と位置づけ	274
5.2	宇宙史の解明: ビッグバンから生命まで	275
5.2.1	SPICA の特徴	275
5.2.2	宇宙史の解明にむけて: 重要課題	275
5.3	ミッションへの要求	280
5.3.1	波長領域	280
5.3.2	温度	280
5.3.3	望遠鏡の口径	281
5.3.4	ミッションへの要求	282
5.4	衛星システム概要	283
5.4.1	衛星全体の構成	283
5.4.2	ミッション部	285
5.4.3	バス部	285

5.5	望遠鏡システム	286
5.5.1	基本仕様	286
5.5.2	光学設計	288
5.5.3	鏡材料・望遠鏡システムの検討	289
5.5.4	SPICA 望遠鏡の開発	291
5.5.5	SPICA 望遠鏡案	291
5.5.6	試験計画	294
5.6	焦点面観測機器	298
5.6.1	中間赤外線撮像／分光装置	298
5.6.2	遠赤外線撮像／分光装置	300
5.6.3	サブミリ波撮像／分光装置 (オプション)	303
5.6.4	近赤外線撮像装置 (オプション)	305
5.7	冷却系	305
5.7.1	設計思想	305
5.7.2	冷却系仕様	307
5.7.3	機械式冷凍機	308
5.7.4	定常熱解析結果	313
5.7.5	固有値解析結果	314
5.8	ミッション運用概要	314
5.8.1	運用期間	314
5.8.2	軌道	315
5.8.3	観測運用	317
5.8.4	contingency	317
5.9	SPICA の国際的位置づけ	317
5.9.1	国際的役割分担	317
5.9.2	国際的ロードマップ	318
5.9.3	国際協力	318
5.10	日本の宇宙科学、宇宙開発における位置づけ	319
5.10.1	新しいカテゴリーの提案	319
5.10.2	宇宙開発の将来を拓く SPICA	320
5.10.3	新しい開発体制の提案	320
5.10.4	JAXA 統合効果としての SPICA	321
5.11	年次計画	321
5.11.1	年次計画	321
5.11.2	他のミッションとの関係	322
第 6 章	JASMINE 計画	323
6.1	JASMINE 計画の要旨	323
6.2	JASMINE の科学目的と意義	325
6.2.1	銀河系の力学構造	326
6.2.2	星形成	328
6.2.3	銀河系形成史	329
6.2.4	恒星物理学	330
6.2.5	惑星系形成	330
6.2.6	基礎物理	331
6.3	他の計画の中での位置付け	332

6.3.1	海外計画と VERA の紹介	332
6.3.2	銀河系モデルを用いた赤外線観測の評価	332
6.4	観測手法	334
6.5	観測装置	336
6.5.1	望遠鏡 (光学系)	336
6.5.2	検出器	338
6.6	衛星システム概要	340
6.6.1	軌道	340
6.6.2	姿勢系	341
6.6.3	熱構造	343
6.6.4	オンボード処理と通信系	344
6.6.5	打ち上げロケットと電力・重量	346
6.7	現在までの技術実証実験ならびに仕様検討のためのシミュレーター構築	347
6.7.1	地上での CCD をもちいた星像中心実験 [5]	347
6.7.2	JASMINE シミュレーターのフレームワーク構築	348
6.8	重要な技術検討課題	350
6.8.1	望遠鏡の素材と組み立て方式	350
6.8.2	検出器の開発と配列技術	352
6.8.3	指向安定性	352
6.8.4	ビーム混合鏡ならびに観測装置の熱変動制御とモニター	354
6.8.5	放射線耐用に関して	355
6.9	超小型衛星を用いた Nano-JASMINE 計画	356
6.9.1	概要	356
6.9.2	観測装置	357
6.9.3	衛星システム	359
6.10	今後の予定	359
6.10.1	体制、予算	359
6.10.2	スケジュール	362
6.10.3	最後に	362
第 7 章	JTPF (Japanese Terrestrial Planet Finder - 太陽系外地球型惑星探査)	367
7.1	はじめに - JTPF とは?	367
7.2	計画の背景: 系外惑星探査方法	368
7.3	観測ターゲット	372
7.4	目指すサイエンス (系外惑星の直接撮像・分光)	373
7.5	目指すサイエンス (広視野深撮像分光に基づくサイエンス)	374
7.5.1	なぜ多目的装置搭載が必要か?	374
7.5.2	広視野赤外線カメラによる初代天体の探査	375
7.6	目指すサイエンス (系外惑星誕生現場-原始惑星系円盤から残骸円盤へ)	375
7.7	HCST(ハイコントラストスペース望遠鏡) とは?	377
7.8	既存・今後のミッションとの比較	377
7.9	波長の選択	378
7.10	望遠鏡 1 (光学系)	378
7.11	望遠鏡 2 (主鏡)	380
7.12	スペース補償光学	381
7.13	スペースコロナグラフ	382

7.14	軌道	384
7.14.1	S-E L2 概要	384
7.14.2	打ち上げロケットおよび軌道上運用	385
7.15	観測運用	385
7.15.1	観測シーケンス	385
7.15.2	地上からの運用	385
7.16	衛星システム 1(電源・通信・姿勢制御)	386
7.16.1	電源系	386
7.16.2	通信系	386
7.16.3	信号処理系	387
7.16.4	姿勢軌道制御系	388
7.16.5	二次推進系	388
7.17	衛星システム 2(構造・熱制御)	388
7.17.1	構造系	388
7.17.2	熱制御系	389
7.17.3	重量、大きさ	390
7.17.4	打ち上げ条件	390
7.17.5	地上試験	390
7.18	観測装置および検出器	390
7.18.1	観測装置	390
7.18.2	検出器	390
7.19	干渉計への取り組み	391
7.19.1	ナール干渉計への取り組み	392
7.19.2	ナール干渉計応用手法への取り組み	393
7.20	国際協力・年次計画・体制	395
7.21	系外惑星科学のロードマップ(まとめにかえて)	396
第 8 章	全体計画の推進について	399
8.1	地上とスペース	399
8.1.1	空間分解能	399
8.1.2	視野	400
8.1.3	波長域	400
8.1.4	波長分解能	400
8.1.5	感度	400
8.1.6	中間・遠赤外線領域における比較	402
8.2	光赤外コミュニティのパワー	404
8.3	国際協力の在り方	405
8.3.1	光赤外分野のマスタープランについて	405
8.3.2	日本の(可視赤外)観測天文学の全体年次計画について	406
8.3.3	地上望遠鏡における国際協力の動き	407
8.3.4	宇宙科学における国際協力の重要性	407
8.4	教育・一般社会へのアピールとインパクト	410
8.4.1	大型プロジェクトの説明責任	410
8.4.2	知の開示と蓄積による社会還元	411
8.4.3	望遠鏡の特殊性と教育効果	411

付 録 A 付 録	413
A.1 すばる望遠鏡成果一覧	413
A.1.1 すばる望遠鏡観測成果論文引用度数から見た成果	413
A.1.2 科学成果ハイライト	415
A.1.3 すばる望遠鏡関係新聞記事、書籍	418
A.2 上空からの赤外線観測関係新聞記事一覧	423
A.3 名古屋大学赤外線グループ関係新聞記事一覧	427
A.4 日本の光赤外機器開発関連の研究費受給一覧	429
A.4.1 科学研究費	429
A.4.2 その他	437
A.5 日本の天文学界の執行予算推移，欧米との比較	439
A.5.1 主要各国の宇宙開発予算	439
A.5.2 主要各国の天文学予算	439
A.5.3 OECD 加盟国別科学技術予算	440

第1章 序章

1.1 光赤外天文学将来計画検討会の活動

日本の光学赤外線天文学研究者の研究連絡組織である光学赤外線天文連絡会 (GOPIRA) は、すばる望遠鏡が順調に運用を始めたのを受けて、すばる望遠鏡や ASTRO-F に続く次世代の光赤外天文学ミッションの検討を開始することを 2002 年に決議し、2003 年 1 月に光赤外天文学将来計画検討会を発足させた。

将来計画検討会¹は、全体会の下に、サイエンス検討班²、次期地上望遠鏡検討班³、スペース望遠鏡検討班⁴以下の三つ班を組織し、約 1 年余りの予定で検討を積み重ねることとなった。

検討経過と検討内容は、光学赤外線天文連絡会ワークショップやすばる望遠鏡ワークショップなど関連する研究会の場で、コミュニティに報告され、より広範な研究者の意見集約を諮った。

本報告書は、2005 年初の時点でこれらの検討結果をとりまとめたものである。次世代の光学赤外線天文学の発展を期して日本天文学会、および日本学術会議天文学研究連絡委員会、日本学術会議、総合科学技術会議などを通じてその構想を発表し、自然科学研究機構国立天文台や宇宙航空開発研究機構宇宙科学本部など計画の推進を担うべき、研究機関にその具体化の推進を求めるものである。

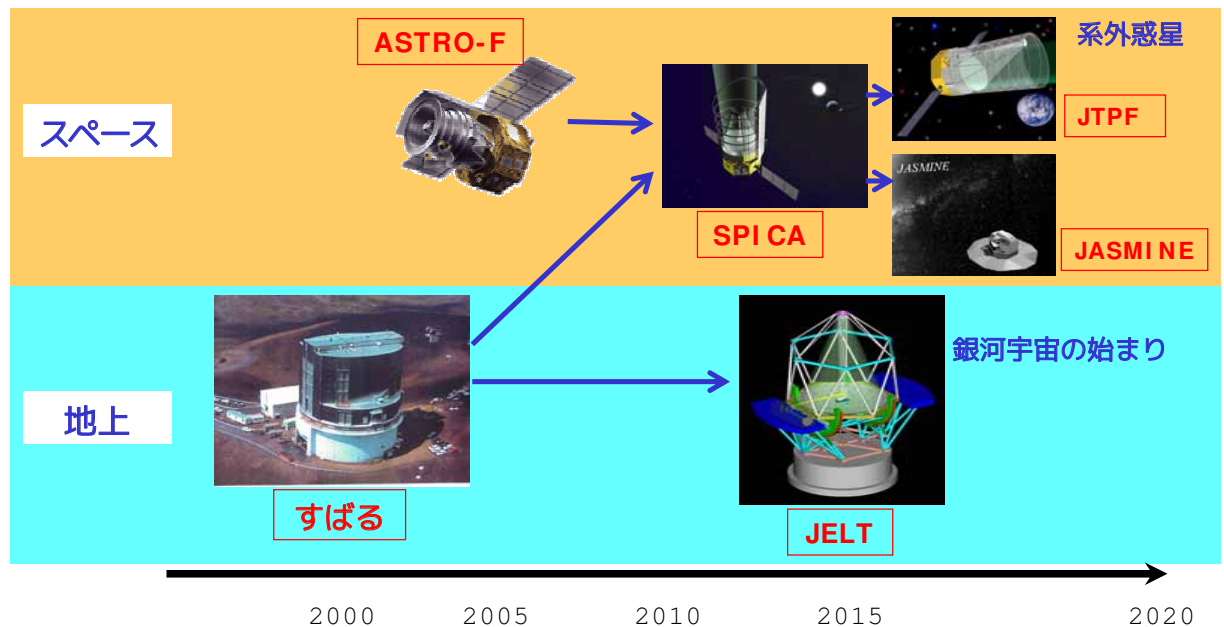


図 1.1: 光赤外天文学のロードマップ (カラー 3 ページ)

¹<http://optik2.mtk.nao.ac.jp/futureplan/futureplan.htm>

²<http://th.nao.ac.jp/science.wg/>

³<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/elt/>

⁴http://optik2.mtk.nao.ac.jp/hide/OptIRfuture_space.html

1.2 検討の総括

以下、これまで2年間の将来計画検討会の活動から得られた、今後の長期指針についてまとめる。

1. 可視光・赤外線地上観測は、すばる望遠鏡の成果をさらに発展させ、すばる望遠鏡を軸に拡がった観測的研究者層・装置開発者層を有効に活かすため、**次世代 30 m級望遠鏡 (仮称 JELT) 計画の具体化を進めるべきである**。国立天文台に内部措置としてではあるが、フェーズ A プロジェクト室の設置が決められ、本計画推進の母体となることが期待される。
2. 2005 年度打ち上げ予定の本格的なスペース赤外線観測衛星 ASTRO-F を軸に、次世代スペースミッションとしては **SPICA 計画を最重点計画として、具体化をはかるべきである**。加えて、JASMINE 計画と JTPF 両計画についても早期の計画実現をはかるべきであり、宇宙科学研究本部の理学委員会のもとに設置されている各 WG を軸に、計画推進が望まれる。
3. 研究者のボトムアップの提案に基づいたこれらの将来計画については、その科学的意義・技術的実現可能性・実施体制等を、**コミュニティの代表者や外部識者を含むピアレビューにより厳しく評価・審査して、より洗練された実現可能な計画にするべきである**。このような評価・審査システムは宇宙科学研究本部や国立天文台でも設置されており、コミュニティの協力の下、今後もこのようなシステムをより充実させ、有効な活用がなされることを強く希望する。
4. 今後、地上からの観測とスペースからの観測の協調的な取組が一層重要になることに鑑み、関連研究者が集結してこれらの次世代ミッションを実現できるように、**法人組織をつなぐ体制の枠組みを整備することが重要である**。上記スペース計画に対応したフェーズ A プロジェクト室が国立天文台においても設置されたことは、この意味でも重要である。
5. 長期的な計画を実現するためには、大学と共同利用研との関係をより太くし**大学の基盤整備**をより進めるための方策を講じる必要がある。
6. 次世代計画はいずれも、国際的プロジェクトとしての位置づけが必要となる。コミュニティの意向を尊重して、**国際協力を実質的に推進できる体制と枠組み**を整える必要がある。

図 1.1 は、以上を踏まえて、本報告書に記載した主要な将来計画を長期ロードマップとして概念的に整理したものである。

1.3 検討会活動日誌

- 2004/12/25-27 : 次世代天文学ワークショップ
- 2004/11/29 : 国立天文台プロジェクト週間、JELT プロジェクト室、系外惑星探査プロジェクト室の設置を決定
- 2004/10/28 : 世話人打ち合わせ
- 2004/10/22 : 東アジア天文学ミーティング
- 2004/9/28 : 学術会議、天文学研究者連絡委員会
- 2004/9/23 : 日本天文学会
- 2004/9/8 : 全体世話人会
- 2004/8/25 : 光学赤外線天文連絡会ワークショップ

- 2004/8/3 : 全体世話人会
- 2004/7/15-16 : OECD GSF 本会議 (パリ)
- 2004/6/21-25 : SPIE 国際会議 (グラスゴー)
- 2004/4/5-6 : OECD GSC 天文学大型計画に関するワークショップ (ワシントン)
- 2004/4/1 : 国立天文台に JASMINE 検討室 (プロジェクト室) を設置
- 2004/3/23 : 全体世話人会
- 2004/1/22-23 : ELT 国際ワークショップ
: 光赤外将来計画検討会・検討報告会プログラム すばるユーザーズミーティングに続けて
: 第 6 回光赤外天文学将来計画検討会⁵
- 2003/12/17 : 第 5 回全体コアメンバー会 ASTRO-F サイエンスワークショップに続けて
- 2003/12/12 : 全体世話人会
- 2003/12/5-6 : OECD GSF 天文学大型計画に関するワークショップ (ミュンヘン)
- 2003/8/21-22 : 光赤外将来計画シンポジウム (=第 4 回全体会議) ^{6,7}
- 2003/6/23 : 第 3 回光赤外天文学将来計画検討会全体会議⁸
- 2003/5/21 : 第 2 回光赤外天文学将来計画検討会全体会議⁹
- 2003/4/23 : 日本学術会議天文学研究連絡委員会にて活動報告
- 2003/1/22 : 第 1 回光赤外天文学将来計画検討会全体会議

⁵<http://optik2.mtk.nao.ac.jp/futureplan/040122a.htm>

⁶プログラム : <http://optik2.mtk.nao.ac.jp/futureplan/030821a.htm>

⁷電子集録 : <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/gopira2003/gopira.html>

⁸プログラム : <http://optik2.mtk.nao.ac.jp/futureplan/3rdws.htm>

⁹議事録 : <http://optik2.mtk.nao.ac.jp/futureplan/2ndws/>

第2章 光赤外天文学の過去・現在と未来

2.1 天文天体物理の歴史・意義

天文天体物理学は、我々の住むこの宇宙の成り立ちと法則を調べる学問である。太陽と月、そして夜空に輝く星々の運動を調べることは多数の古代文明でも行われていたことが知られている。例えばエジプトやマヤのピラミッドを調べると、方位や太陽の位置の季節変化を精密に測定できていたことがほぼ確実に推察される、という事実は有名である。ギリシア時代のヒッパルコス、精度の良い天体の位置測定を行い、また過去の記録も使って歳差を発見していた。16世紀末、デンマークのチコ・ブラーエは、角度にして約1分角の精度で天体の位置測定を行った。彼の惑星の運動の測定結果をもとにして、ケプラーが惑星の運動法則を見つけ、そして近代文明の基礎となったニュートン力学へと発展していった。1989年に打ち上げられたESA(欧州宇宙機関)のヒッパルコス衛星は、約1ミリ秒角の精度で近傍の恒星の位置を測定した。さらに次世代の位置天文衛星は10マイクロ秒角での測定を目指している。これはチコの測定に比べ実に600万倍の精度の向上となり、太陽系の大きさをはるかに越えて天の川銀河の半分近くまでの恒星の運動の測定を可能にしようとしている。可能な限りの精密な測定を行い、そこにある法則を見出す試みは、科学の基本であり、この営みは数千年の時を越えて脈々と行われてきているのである。

一方、古代より、人類は宇宙のなりたちを理解しようと努めてきた。その試みの跡は、例えば神話などの形で残されていると言えよう。時代を下って、ギリシア時代、エラトステネスは地球が丸いことを科学的測定に基づいて指摘していた。少数の例外はあったかもしれないが(古代インドの聖典「リグ・ベータ」には地球が球形であり、太陽が太陽系の中心であるという記述があるという)、有名なコペルニクスの地動説以前には、トレミーらの天動説が、人類の世界観の中心となっていたと言えよう。コペルニクスの地動説には新たな世界観の構築という、天文学の醍醐味が象徴されていると言える。

しかしながら、宇宙にはいつの時代も人類の想像を越えた驚きが隠されている。20世紀初頭、ハッブルは銀河が互いに遠ざかりあっていること、すなわち宇宙膨張を発見した。当時、アインシュタイン博士ですら、一般相対性理論の帰結として得られた膨張し続けるか収縮し続けるかしか答えの無い宇宙の姿、すなわち膨張する宇宙像を受け入れられず、宇宙膨張を止めるための宇宙項を導入し、後に後悔したという逸話は有名である。20世紀末から21世紀初頭、再び自然は新たな謎を我々に投げかけた。大型望遠鏡、宇宙望遠鏡を動員しての遠方の超新星観測や、衛星電波望遠鏡による宇宙背景放射のゆらぎの精密測定の結果、宇宙膨張は現在、物質に互いに働く重力で減速しているのではなく、逆に加速をしているという結論が得られた。アインシュタイン博士の後悔した宇宙項が実は存在し、現在の宇宙において、物質3割に対して宇宙項が7割を占めていれば説明ができる結果である。宇宙膨張を加速させているということは、新たなエネルギーが真空から湧いてきてみえ、また宇宙項は定数ではなく時間変化をしている可能性もあるので、ダークエネルギーと呼ばれるようになった。ダークエネルギーの謎は、もしかしたら新たな物理法則の発見、あるいは新たな世界観の転換へとつながる糸口なのかもしれない。もう一つの未解決の「暗黒(ダーク)」問題であるダークマター(重力相互作用は行うが、電磁相互作用は行わない物質)の存在が、スイスの天文学者ツビッキーにより最初に指摘されたのが1930年代であることを考えると、ダークエネルギー解明にどのくらいの時を要するのか、我々にはまだ想像がつかない。

さて、20世紀は宇宙膨張という新たな世界観が構築された世紀であったが、むしろ天体物理学の大発展の世紀であったと言った方がよりふさわしい。恒星はなぜ輝くのか、太陽のスペクトルに見られる特徴をどのように理解したら良いのか、といった疑問は大部分が解明されたと言える。

恒星の内部での核融合モデル、恒星大気モデルなどは、量子力学などの発展とともに飛躍的に進み、我々は恒星の生まれた時の質量がわかれば、その進化の過程で、どのような明るさでどのくらい輝くかを大部分の時期において予測できるようになった。例えば、太陽は現在壮年期であるが、あと50億年くらいたつと膨張を開始し、70億年くらいたつと、膨らんで地球の軌道にまで達するということが予想できる。また恒星のスペクトルにみられる重い元素の大部分は、かつて超新星爆発によって作られたこと、すなわち我々の体はかつては恒星のごく一部であったことも、確信を持って断言できる。あるいは恒星の終末の姿にはいくつかあり、例えば質量の小さい星は、白色矮星と呼ばれる電子の縮退圧で重力をやっと支えている、たいへん高密度の星となって冷えていくこともわかった。一方大質量の星は、核融合が進んだ最後は超新星爆発を起こし、その中心には白色矮星よりもさらに密度の高い中性子星やブラックホールが残る。これら高密度星、あるいはその連星も含めた系は、単に恒星物理の理解だけにとどまらず、降着円盤や宇宙ジェット、あるいはたいへん強い重力場の実験室として、物理法則による統一的理解が試みられている。

銀河の星間空間にはガスや塵も満ちている。ガスや塵は、濃いところから恒星が誕生し、進化し、晩年にはガスや塵を大量に放出したり、あるいは超新星としてガスや塵をまた星間空間に戻す。銀河において、物質が輪廻をしながら、少しずつ重い元素が生まれてきている。星の生まれ方は、銀河によっても異なってきた。たとえば大型の楕円銀河は、比較的早い時期にたいへん活発な星生成活動を行い、現在ではほとんどの冷たいガスを使い尽くしてしまっている。一方、渦巻き銀河などでは、星生成活動が円盤部分で長く続いている。これらの銀河がどのように生まれてきたかについて天体物理学は、完全に理解をしたとは言えないものの、おおまかなシナリオを描くことができるようになった。

すなわち約140億年前におきたビッグバンの後、宇宙はインフレーションと呼ばれる真空エネルギーの解放によるたいへん急激な膨張をし、非常に一様になった。その中に残存していたわずか10万分の1程度の濃い薄いが種となり、重力によって物質が集積し、やがて初代の天体(どのような天体であったかは謎であるが)を形成し、すばる望遠鏡で見つかった我々が知る最も遠い/あるいは昔の銀河の姿が約130億年前には見られるようになった。生まれたばかりの銀河では活発に星生成が行われ、物質が輪廻し、高密度天体も作られ、時には銀河同士が合体する。ゆらぎを種として、銀河の分布には密度の高いところと低いところが形成されていく。いわゆる宇宙の大規模構造の形成である。銀河の密度の高いところには、実は銀河よりもずっと大量の高温ガスも一緒に集まり、銀河団を形成する。大規模構造を地形に例えると、銀河団は山の頂であり、頂と頂を尾根が結び山脈をなす。山脈の間には、ボイドと呼ばれる銀河がほとんど存在しない、盆地とみなすことができる場所も形成される。そして我々の住む天の川銀河は、おとめ座銀河団の辺境にある、局所銀河群、少し低めの山の裾野に位置しているのである。

さらに我々の太陽系は、天の川銀河の円盤部分、銀河系中心から3万光年弱のところに位置しており、地球はその第三惑星である。地球はどのくらい特別な存在なのであろうか。銀河円盤で今も多数の星が生まれつつあることからすると、太陽の誕生はまったく不思議な現象ではない。さらに、現在惑星が見つかった恒星は約140個ある。観測の限界もあり、地球型惑星はまだ見つかっていないものの、惑星の存在は比較的当たり前現象であることは確認され、またかなり具体的に惑星形成論が進んでくるまでに至っている。

精密な観測技術と天体物理理論の進歩は、ビッグバンの後現在の宇宙の姿にいたるシナリオを想像による神話ではなく、科学的測定や理論によってほぼ構築できるようになった。ここには書ききれないほどの天体物理学の発見や進歩があったのである。

一方で、進歩すればするほど、多くの謎も生み出すこととなった。ダークエネルギーやダークマターのような物理学の基本的問題もあれば、宇宙のなりたちを総合的に理解する上で謎として残っている天体現象もある。これら現代の天文天体物理学の重要な研究課題については、この報告書のサイエンスの検討のところに詳細に述べられている。21世紀初頭にあってそれらの課題をどのようにして解明していけばよいか、またどのように人類の世界観と法則の理解をさらに発展させていけばよいかについて、長期展望を試みたのがこの光赤外将来計画検討会の活動である。とりわけ、光赤外線分野ではどのような望遠鏡や装置が必要となるか、それが本報告書の主題である。

2.2 日本の光赤外天文学の来し方：地上編

2.2.1 岡山天体物理観測所

岡山天体物理観測所の建設と東京天文台時代 —東京大学百年史(部局史 3, 1982 年発行) より(一部抜粋)

天体物理学の観測研究を推進するために、大反射望遠鏡を国内に設置する計画は、当時の台長萩原雄祐を中心に進められてきたが、昭和 28 年(1953 年)5 月、日本学術会議の総会決議を経て政府への要望が提出され、翌 29 年 6 月英国から 188 センチメートル反射望遠鏡を購入するための予算措置が国会で可決された。大望遠鏡がその性能を十分に発揮するためには、透明でゆらぎの少ない大気状態の場所に設置することが必要である。全国の気象資料の解析から、岡山県・静岡県・長野県内の三候補地が選定され、昭和 29 年末から約 1 カ年、毎月新月をはさむ 10 日間、この 3 地点に置かれた口径 10 センチメートルの同型望遠鏡による北極星の星像撮影が行われた。この試験観測の資料をもとに、他の諸条件をも考慮した結果、昭和 31 年 6 月、建設地は岡山県と決定し、試験観測地であった遙照山西方の竹林寺山(標高 372 メートル)が最適地であるという結論が、文部省より正式に発表された。望遠鏡の製作については、昭和 29 年より、藤田良雄を委員長とする「74 吋委員会」が台内に組織され、ドームその他の建設工事に関しては、東京大学内に台長を委員長とする「74 吋建設委員会」が作られた。昭和 32 年(1957 年)3 月には、「74 吋反射望遠鏡設置に関する覚書」が、岡山県知事と文部次官との間に交換され、敷地の無償貸与、土地造成、井戸の掘削、道路の拡幅・新設、電力線・電話線の架設などについて、県および地元の鴨方・矢掛・金光 3 町の協力活動が開始された。188 センチメートル(74 吋)望遠鏡は、カセグレン分光器 2 基、クーデ分光器 1 基とともに、英国グラブ・パーソンズ社よりの購入が決定し、昭和 30 年 2 月に 5 カ年の期限で契約を行った。91 センチメートル反射望遠鏡(36 吋光電反射赤道儀)は、昭和 32 年度から 3 年計画として日本光学工業株式会社で製作されることになり、製作に必要な諸種の研究・実験を行うために、「大口径望遠鏡の製作に関する委員会」が学内外の経験者数十名によって組織された(委員長は初め萩原雄祐、後に広瀬秀雄)。昭和 33 年(1958 年)12 月 17 日、現地でドームの起工式が行われ、この天文台を「東京天文台岡山天体物理観測所」と呼ぶことが、宮地政司台長から発表された。昭和 34 年度末には、まず両望遠鏡を容れるドームが完成した。188 センチメートル望遠鏡は、昭和 35 年 4 月、英国から神戸港に到着し、玉島港経由で竹林寺山に運搬された。グラブ社よりは技術者 3 名が派遣され、同年 5 月から組立てを開始、11 月に完成して引渡しを受けた後、望遠鏡および分光器の性能を調べるための実地試験が行われた。一方 91 センチメートル望遠鏡は、35 年 4 月に組立てが完了し、光電測光装置および電子冷凍受光器が 11 月に完備されて、試験観測に入っている。昭和 35 年(1960 年)10 月 19 日、観測所開所式が 188 センチメートル望遠鏡ドームの傍で挙行され、茅東大総長、三木岡山県知事も列席した。

昭和 37 年(1962 年)より本観測が開始された。新設の望遠鏡として、昭和 40 年(1965 年)度からの 3 年計画で、65 センチメートルクーデ型太陽望遠鏡が日本光学工業によって製作され、昭和 43 年 3 月に完成、試験観測を経て、昭和 45 年(1970 年)度から本観測に入った。観測所設立の翌年頃から、東南方約 20 キロメートルの水島臨海工業地区で操業が始まり、近隣市町村の発展と相俟って、人工灯火の散乱光、大気汚染による観測環境の悪化が憂慮されるようになった。そこで東京天文台では岡山県知事を通じて、水島地区工場関係者と連絡をとり、観測所の環境維持について協力を懇請してきた。

188 センチメートル望遠鏡は、建設当時世界第 7 位の口径を誇ったのであるが、近年諸外国で建造される大型望遠鏡の数はめざましく増加し、いまや 188 センチメートルの順位は三十位近くまで下落¹した。



図 2.1: 岡山天体物理観測所全景 (カラー 3 ページ)

¹1982 年の時点で

2.2.2 木曽観測所

木曽観測所は1974年(昭和49年)4月11日に東京大学東京天文台の5番目の観測所として開設されました。1988年(昭和63年)7月1日に東京天文台が国立天文台に改組されたのに伴い、木曽観測所は東京大学理学部附属天文学教育研究センターの観測所となりました。観測所の設立目的は以下の通りです。『木曽観測所は105cmシュミット望遠鏡による銀河系内外の諸天体の観測的研究、並びに夜天光の観測を行なう。木曽観測所は、全国の天文学研究者の観測研究にも供する。』105cmシュミット望遠鏡を主要設備とする木曽観測所は、設立以来全国の関連研究者に門戸を開放して実質的な共同利用に供する形で運営されてきました。1988年の改組により共同利用研究者のための旅費の予算措置がとられ、名実共に共同利用が認められました。



図 2.2: 木曽観測所全景 (カラー 3 ページ)

木曽観測所では開所以来長い間写真乾板が観測の主流でした。しかし、より深い広視野撮像観測に対する研究者の要求は強く、最新の固体撮像素子技術を導入して、微光天体を高感度かつ精密に測定する必要が生じました。このため、1987年に1KCCDカメラの開発が開始され、1993年度から共同利用に供されるようになりました。さらに、1993年度からは2KCCDカメラの開発計画がスタートし、1997年度から試験公開、1998年度からは一般公開が開始されました。現在は、この2KCCDと1997年度から公開されている近赤外線カメラKONICの2つがシュミット望遠鏡の主観測装置です。

木曽観測所では所内、所外を問わず年度毎に研究課題を募集します。課題は年間随時受け付けています。採択された課題に対し、観測所は3ヵ月毎に所外の研究者の来所希望日程を募り、所員の日程と調整して「共同研究予定表」を作成し、それによって研究を進めています。

2.2.3 上松天体赤外線観測室



図 2.3: 上松天体赤外線観測室 (カラー 4 ページ)

上松以前のわが国の赤外線観測は、手作り装置を岡山天体物理観測所に運搬して、銀河中心や晩期星の偏光観測実験を年間に数回行う程度であった。

上松天体赤外線観測室(図 2.3)は、1971、72年に、文部省科学研究費・一般研究A:物理学一般(総額1900万円)で建設された。ドーム建物は、別途、科研費に伴う営繕工事による。京都大学理学部物理第二教室・宇宙線研究室が、名古屋大学理学部(U研)の協力を得て、建設・運営した。1973年7月7日の開室から、1984年までの10年間、最も活発な観測が行われたが、その後は次第に使われなくなり、2003年11月に撤去した。初めの15年間に、レフェリー付雑誌に34編の論文を出版し、11名の博士を生んだ。少ない予算の中で、関係者の努

力で上松を軸に地上赤外線観測天文学が立ち上がったということは特筆に値する。

上松赤外線望遠鏡の主鏡は口径1.0mで、当初はジュラルミン塊を、曲率半径と同じ長さの鉄の角棒の先に、バイトの刃を取り付けて切削した“球面鏡”であった。1978、79年度に科学研究費一般研究Bを獲得して、鏡面の更新を行った。また、半波長板を回す方法を採用した偏光計を製作して、偏光の精度が0.05%となり、偏

光観測では世界に知られることになった。とりわけ星形成領域の散乱偏光や暗黒星雲の磁場偏光は当時の注目を浴びた。

検出器は当初は、硫化鉛 (PbS) と Ge:Ga ボロメーターであった。1970 年代後半から、インジウム・アンチモナイド (InSb) 単素子が主となったが、上松に導入したのは 1980 年であった。InSb 単素子クライオスタットを自作して、CVF 狭帯域測光、偏光器、ファブリペロー分光器を製作して組み合わせて観測に使った。1980 年代後半以降は上松で育った赤外線研究者が、マウナケア (UH88、UKIRT 日英協力) やワイオミングへの海外へ進出した。

2.2.4 ハワイ観測所

ハワイ観測所は、国立天文台 (National Astronomical Observatory of Japan, NAOJ) の観測所として、1997 年 4 月 1 日にハワイ島ヒロに研究実験棟の完成とともに発足しました。

ハワイ観測所では、日本からの赴任職員約 30 名、現地採用職員約 80 名の他に、出張職員、研究員、大学院生等を含め、常時 100 名以上が研究・開発・事務に従事しています。研究実験棟には、職員の研究室や事務室に加えて、すばる望遠鏡の大量データを高速処理するスーパーコンピュータ、最新の観測装置の開発と調整を行う実験室、観測装置の試験を行う光学シミュレータ等があります。

マウナケアは世界的にも貴重な自然と歴史をもつ山であり、自然保護区域として慎重な計画のもとでの開発が進められています。マウナケア山頂には、米国、英国、フランス、カナダ、オランダ等により現在までに 13 台の望遠鏡が設営され、過去 30 年にわたって、最先端の天文観測の基地として活動してきました。すばる望遠鏡の他に 8–10 m クラスの光学赤外線望遠鏡としてはケック望遠鏡 (2 台) とジェミニ望遠鏡があります。すばる望遠鏡の建設にあたってはハワイ大学と国立天文台との間で「運用および土地利用協定」が結ばれ、建設だけでなく共同利用運営についても密接な協力のもとで進められます。

2.2.5 すばる望遠鏡の現状/将来と成果

すばる望遠鏡は、ハワイ島マウナケア山頂に建設された、有効口径 8.2 メートルの大型光学赤外線望遠鏡である。マウナケア山頂は、地上の光学赤外線観測の観測地として求められる、以下の 5 つの条件

1. 晴天率が高い
2. 夜空が暗い
3. 空気が清浄で乾燥している

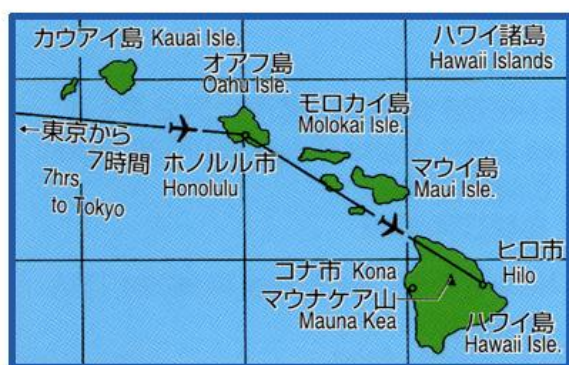


図 2.4: ハワイ島ヒロ



図 2.5: 山麓施設 (ヒロベース) (カラー 45 ページ)

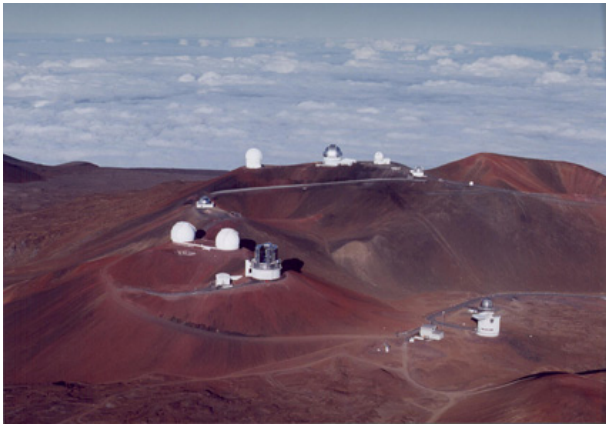


図 2.6: マウナケア山頂 (カラー 4 ページ)



図 2.7: すばる望遠鏡のドームと観測制御棟 (カラー 4 ページ)

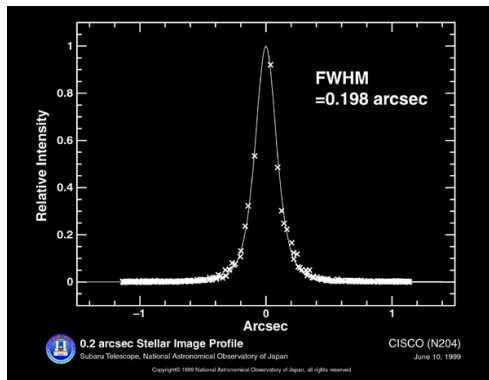
図 2.8: 赤外線カメラ (CISCO) で測定した波長 $2.04\mu\text{m}$ での星像断面図。星像直径が 0.2 秒角を切っていることから、非常に良い解像度であることを示している。

図 2.9: 主焦点カメラにより撮影した渦巻銀河 M63。視野の端でも画質の劣化が全く無いことが証明された。(カラー 4 ページ)

4. 上層大気の影響が少ない

5. 気温の変化が少ない

、を満たす地球上数少ない適地の一つである。すばる望遠鏡は、平成3年度より建設を開始し、平成10年12月24日に望遠鏡に初めて天体の光が通る「ファーストライト」を迎えた。平成12年9月17日に「完成記念式典」をおこない、同年12月からは、大学共同利用機関の責務である「共同利用」観測研究を開始し、内外の研究者による独創的な観測が進められている。

すばる望遠鏡の特徴を一言でまとめるとすれば、「単一主鏡として世界最大の8.2メートル望遠鏡で、結像性能が極めて良い望遠鏡」である。現在定常運用されている望遠鏡の中では、アメリカ合衆国の有効口径10メートルのケック望遠鏡2台に次ぐ大きさである。建設上の最大の難関であった厚さ20センチメートル、直径8.3メートルの主鏡は平成10年8月に完成した。最終研磨面は、平均誤差(r.m.s.)が鏡面能動支持補正後で12ナノメートルという、世界の大望遠鏡で未だかつてない超精密な鏡面を実現した。重さ23トンにも達する主鏡を表面精度50ナノメートル以下の誤差でどんな姿勢に対しても維持するため、すばる望遠鏡では「能動光学方式」による制御を導入し、261本の「アクチュエータ」というロボットの指が0.1秒毎にコンピュータ制御されることで目標を達成している。重さ550トンに達する望遠鏡の高性能制御のために、摩擦を極限に抑えるた

め静圧軸受を採用し、なめらかに駆動するために、超強力永久磁石と電磁石コイル部によるリニアモータを使用している。観測天体である星や太陽系内の惑星や彗星などの動きに合わせて、望遠鏡の機械部分で $1\mu\text{m}$ の単位で精度良く、しかも再現性良く制御する性能を実現している。

また星像をより良くするために、ドーム内部は夜間気温以下に冷却してドーム自身や地表から巻き起こる乱流を避け、水流実験などの結果を設計に取り込んだ円筒形のドームに自然風を流す工夫をこらした。こうした技術と努力の結果、ファーストライトから半年後には近赤外線の波長域で星像直径が 0.2 秒角を切る (図 2.8) という、地上望遠鏡では最高の解像度を実現し、当初掲げた総合性能を達成した。

主焦点の結像性能についても、星像直径が 0.3 秒角台までに達していることが確認されている (図 2.9)。また、3.6 メートルの CFHT 望遠鏡の主焦点カメラと比べて、得られた星像の真円度が優れていることも確認されている (図 2.10)。平成 12 年 12 月には、アダプティブ・オプティクス (= AO、補償光学) 装置が始動し、近赤外線域における理論的な限界解像度に迫る 0.073 秒角を実現した。

観測装置としては、平成 10 年から 12 年にかけて、8 台の特色ある共同利用観測装置 (図 2.11) を完成し、定常運用されている。また、波長帯域がガンマ線から中間赤外線までの、特徴ある持ち込み型の観測装置についても受け入れをおこなっており、科学的に大いに意味のある観測を遂行している。こうした高性能の観測装置の開発や、主鏡能動支持機構の開発、観測装置交換機構の開発、ネットワーク制御など技術的にも世界をリードするオリジナルなシステムを実用化させたことは、2 年ごとに開催される SPIE 国際会議等でも毎回高く評価されている。

共同利用は、1 年に 2 回、観測課題の公募を行い、すばる望遠鏡専門委員会の諮問をうけた「プログラム小委員会」によって審査され、実際に観測を行う課題が決定される。国内外の研究者からの先端的な観測研究提案が毎回約 200 件ほど寄せられる。この申請件数は採択件数の約 5 倍程度にものぼり、内外の専門家による厳正な審査の結果、全体の 2 割程度の課題のみを採択しており、非常に高倍率となっている。非常に高倍率の中で、より戦略的、かつ集中的に研究成果をあげるため、通常の利用観測プログラムに加え、S02A 期 (2002 年 4 月～2002 年 9 月) からは観測所主導の戦略的プログラムや特色ある大型プログラムも採択し、観測を遂行している。過去 7 期に渡る、2003 年度後期までの利用者数のまと

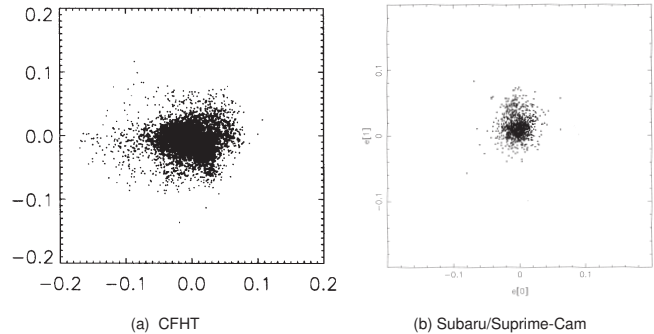


図 2.10: 取得された星像の新円度を示す楕円率の図。すばる望遠鏡の主焦点カメラ (Suprime-Cam) の方が、CFHT の主焦点カメラで得られる星像に比べて、真円度が優れていることが分かる。

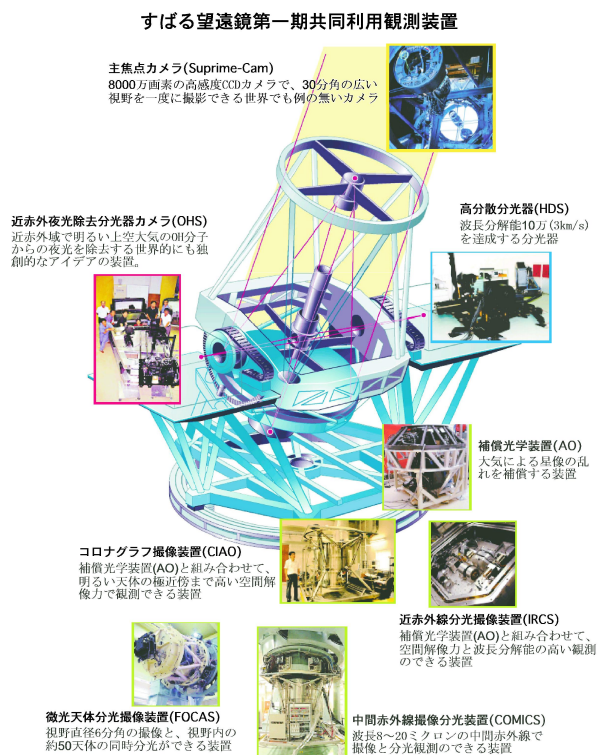


図 2.11: すばる望遠鏡の第一期共同利用観測装置。主焦点と 2 つのナスミス焦点に 1 つずつ、カセグレン焦点に 5 つある。この他にも持ち込み装置が主焦点、ナスミス、カセグレン焦点に 1 つずつ存在している。(カラー 5 ページ)

めを表 2.1 に示す。この表内の人数は、実際に課題が採択され、渡航して観測に当たった研究者の人数である。

2003 年度の共同利用の実績によると、天候不順により観測できなかった割合は、年平均で 17%、望遠鏡や観測装置の不調により観測に支障が生じた割合は 7%で、夜間の 76%の時間は実際の観測が履行されていることとなる。天候以外の要因で観測ができなかった割合は 8%にすぎず、複雑精緻な望遠鏡と多様な観測装置を駆使し、多くの観測モードを切り換える共同利用観測を実施していることを考えると、この実績は近隣の天文台からは驚異の目で見られている。初期に内外の共同利用観測者から寄せられた改善要望にもかなり対処が進み、概ね順調に共同利用課題の観測が実施されている。来訪観測者延べ数は S03B 期までで 753 名に達した。

研究面でも、内外の研究者による観測的研究が遂行され、共同利用観測装置を用いた世界最先端の研究成果が続々と上がり始めている。ファーストライト以後平成 16 年 6 月末の時点までにすばる望遠鏡による 182 編の学術研究論文が内外の英文査読専門学術誌に出版済みである。日本天文学会欧文報告誌上でも、すばる特集を 2 回組んでいる。学術研究成果については、各種国際研究集会で観測所を代表した報告を行ったり、研究者が個々に発表する機会も多く、国際学会発表論文は 335 編に及んでいる。また、ホームページを利用した公表についても力を入れている。すばる望遠鏡の利用者と観測所との接点として、毎年すばる利用者ワークショップを開催し、研究成果の相互報告や、望遠鏡運用方針、将来計画などに関する検討を行っているほか、台外委員を含むすばる望遠鏡専門委員会で、重要事項を決定しているほか、望遠鏡時間の配分は、プログラム小委員会が厳正に審査して行い、研究成果についても追跡調査をしている。数ある研究成果の中でも、ギネスブックを更新する最遠銀河の発見、ガンマ線バーストと極超新星の同定、重力レンズ効果による暗黒物質分布の研究、銀河計数による宇宙論、極赤銀河の発見、遠方の超新星探索による宇宙モデルの検証、遠方銀河団銀河の進化の研究、低質量星の光度関数の評価、金属欠乏星の元素組成の解析、原始惑星系円盤の観測などの研究は、国際的にも注目され、高く評価されている(付録 A.1 参照)。

すばる望遠鏡は、日本として初めて外国に設置した世界第一級の最先端研究施設であり、一般の人にも関心の高い宇宙についての研究成果が続出しており、新聞やテレビなどで非常に良く取り上げられてきた。最近の例では、平成 15 年の 8 月 24 日に、NHK の開発した超高感度ハイビジョンカメラをすばる望遠鏡に搭載して、地球最接近時の火星を撮影し、生中継の番組を通じて日本国内のお茶の間にすばるの画像を配信する試みをおこなった(図 2.12 と図 2.13)。

学術研究成果の論文発表に加えて、学会誌・科学雑誌・書籍などでその学術的意義を解説し、国立天文台広報普及室を通じて記者発表や天文台のホームページでインターネット公開を行ってきた。さらに様々な機会をとらえて小・中学校、自治体の科学館、公共セミナーなどでの講演会や展示会も積極的に行っている。ハワイ観測所でも地元の人への啓蒙活動など、日本とハワイの友好を促進するためさまざまな努力を払っている。最先端技術を開発駆使して建設したすばる望遠鏡に関連して相当数の特許も生まれ、すばるで開発された技術を活かした製品が社会に役立っている面も見逃せない。これらの努力については各種の受賞に見られるように社会的評価も高い。天文学の広報普及を通じた社会的貢献は自然科学分野の中でも極めて大きいといえよう。

	S00	S01A	S01B	S02A	S02B	S03A	S03B	小計
国立大学	26	30	39	44	49	57	86	331
公立大学	0	0	0	1	1	1	0	3
私立大学	1	2	8	4	4	3	7	29
国立研究機関	18	19	20	41	44	47	44	233
その他国内	3	3	1	2	2	2	6	19
海外	11	13	19	24	22	24	25	138
合計	59	67	87	116	122	134	168	753

表 2.1: 2003 年度後期までの機関別利用者数

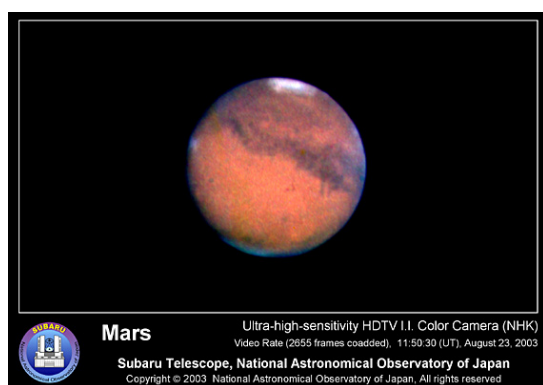


図 2.12: 地球最接近時の平成 15 年 8 月 23 日に、NHK 超高感度ハイビジョンカメラで撮影した火星。

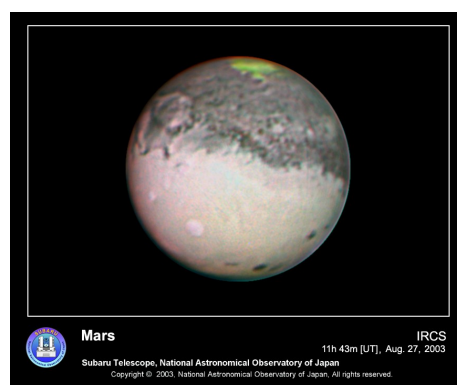


図 2.13: 地球最接近時の平成 15 年 8 月 27 日に、赤外カメラ IRCS で撮影した火星。(カラー 4 ページ)

さらに現在、3 台の第二期共同利用観測装置の開発が進められている。

近赤外多天体分光撮像装置 (MOIRCS) はカセグレン焦点に搭載され、視野 4×7 分角という広領域について波長 $2.5\mu\text{m}$ までの多天体分光を可能にする装置である。平成 16 年度秋にファーストライトを迎え、現在共同利用公開に向けて最終調整を行っている。

多天体ファイバー分光装置 (FMOS) は、主焦点に搭載され、視野 30 分角内の 400 個の天体について、波長 $1 \sim 1.8\mu\text{m}$ 帯の分光を可能にしている。平成 17 年度夏にファーストライトの予定で開発が進められている。

レーザーガイド補償光学系 の開発。次世代の天文観測技術の鍵となる補償光学をさらに発展させるため、2002 年度から科学研究費補助金特別推進研究の交付を得て、新補償光学装置の製作とレーザーガイド星生成システム (LGSAO) の開発に進めている。このシステムは現システムに比べて短い波長帯域まで解像力を改善することが可能になる。またこれまでは観測不可能だった、波面の乱れを検出する参照星の無い天域まで観測可能になり、補償光学を用いた観測の適用天域は数%から 80%以上に広がると見込まれている。

また、更なる長期的な展望の下で、第三期観測装置の検討や望遠鏡の機能拡張/性能向上について具体的な検討が始まっている。

2.2.6 国立天文台の組織改編

2004 年 4 月に全ての国立大学、国立大学共同利用機関が法人化されたが、国立天文台 (NAO) は、核融合研究所、分子研究所、基礎生物研究所、生理研究所と合同して自然科学研究機構 (NINS) を発足した。この法人化により、自然科学研究機構は国立天文台に比べ、予算・人員でおよそ 3 倍の大きな研究機構となった。

大学共同利用機関法人の一研究所となったが、国立天文台はその研究所名を継続し、その運営については引き続き政府からの毎年度運営費交付金の支給を受け、支援を受けることとなった。また国立天文台は内部組織をプロジェクトを軸とした組織に再編し、運営方針の転換を諮りつつある。

2.2.7 大学の活動と中小口径の望遠鏡

東京大学木曾観測所の他にも、大学を中心に建設し、研究目的で運用している光学赤外線望遠鏡がいくつかある。米国ハワイ州マウイ島ハレアカラ山の山頂では、東京大学の 2.0m 望遠鏡 (通称マグナム望遠鏡) が 2001 年より観測を開始している。国立天文台等との共同研究で、可視・赤外の 2 バンド同時観測装置を用いて変光する活動銀河核の多色測光から宇宙膨張の測定を行うというユニークな研究や、超新星の多色測光観測などが行

われている。また名古屋大学が中心となり、南アフリカに口径 1.4m の望遠鏡 IRSF (InfraRed Survey Facility) が 2000 年に完成し、3 色近赤外カメラ SIRIUS などにより、国立天文台や他大学との共同研究により星生成領域やマゼラン星雲の恒星の測光などで成果をあげている。国立天文台三鷹キャンパスにある口径 1.5m 赤外線シミュレーターは 1994 年より、すばる望遠鏡の第一期装置の一部の試験観測や、大学の観測装置の試験観測に活躍してきたが、2004 年度より広島大学に移管され、2005 年度より東広島市に移設後ガンマ線バーストの光学追跡観測などで活躍することが期待されている。その他、JAXA 宇宙科学研究本部には 1988 年に完成した 1.3m 望遠鏡があり、鹿児島大学にも口径 1.0m の望遠鏡が 2001 年に完成し、運用されている。さらに、2004 年には、名古屋大学太陽地球環境研究所が、マイクロレンズ効果を利用して新天体を探査するために、ニュージーランドに 1.8m 望遠鏡 MOA を設置した。

これら大学や研究所の中小口径の望遠鏡は、絞られた研究テーマに観測時間を集中投入することなどで大きな成果をあげつつある。

なお口径 2m 以下の中小口径望遠鏡は、上記以外にも各大学と公共天文台をあわせて日本国内に 40 台以上あり (理科年表「日本のおもな光学赤外線望遠鏡」参照)、研究活動、教育活動、一般公開などで活躍している。さらに、大学と公共天文台が深く連携して学生教育を行なうことも始まってきた。

2.3 日本の光赤外天文学の来し方：上空編

天文学研究の多くの分野において、赤外線全波長域における天体観測はいまや欠かすことのできない重要な研究手段である。しかしながら、技術的には地上からの観測が困難 (波長によっては不可能) であるという大きな問題をもっている。地上からの赤外線観測には制約が多く、赤外線全域にわたる高感度の観測のためには地球大気の影響のない宇宙からの観測が必須となる (詳しくは 8 章を参照)。

この節では、地球大気の影響を逃れるために飛翔体 (気球、観測ロケット、人工衛星) を用いて赤外線天体観測を行なって来た歩みを日本の活動を中心に紹介する。

2.3.1 空へ

気球観測

科学観測用の大気球は、高度 30km 以上の高々度まで観測機器を持ち上げることも可能である。この高度にまであがると、赤外線領域での大気の透過率は大きく改善される。さらに気球には、1t クラスの観測機器も搭載できることや、一晩という観測時間 (典型値、特別な環境では一ヵ月近く) を確保できることなどのメリットも大きい。したがって、大気球は多くの赤外線観測にとって魅力的なプラットフォームとなる。

1. 近赤外線観測：銀河構造 上空からの赤外線観測への日本の挑戦は、まず気球搭載赤外線望遠鏡を用いた近赤外線観測による銀河構造の研究から始まった。

我々の銀河系の構造を可視光線で調べようとしても、星間減光があまりに強いため不可能である。一方近赤外線までくれば、星間減光は可視光線のおよそ 1/10 になり、銀河系の構造を調べることが可能になってくる。しかしながら、近赤外線の多くの波長領域では地球大気の OH 夜光が強く、広いスケールでの観測を行うことは大変に困難である。

そこで波長 $2.4\mu\text{m}$ という OH 夜光の少なく、かつ星間減光も十分に小さい波長域が銀河構造の研究に選ばれた。しかしながら、この波長域では地上からの観測が困難である。そこで、気球搭載望遠鏡を用いた観測が京都大学のグループと、名古屋大学のグループとによって 1970 年代から 80 年代初頭にかけて活発に行われた。この 2 つのグループは競い合うようにして観測を行い、最終的には図 2.15 に示すように、銀河系が渦巻銀河であることを見事に描き出した。



図 2.14: 科学観測用大気球の打ち上げ (宇宙航空研究開発機構提供) (カラー 51 ページ)

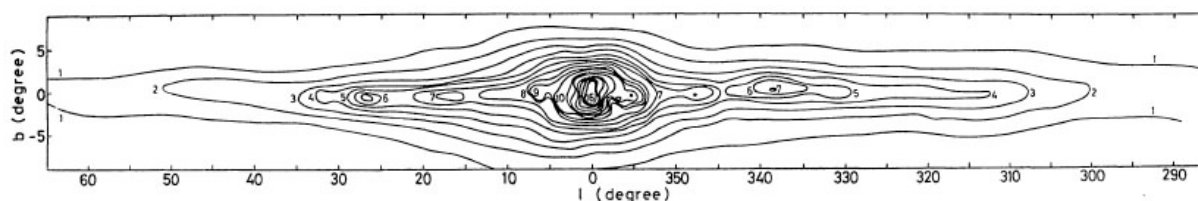


図 2.15: 波長 $2.4\mu\text{m}$ で観測された我々の銀河 (Hayakawa et al. 1981)

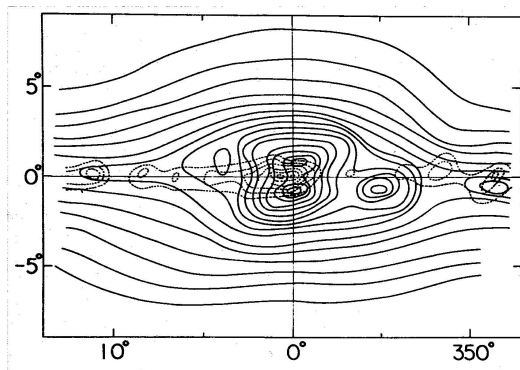


図 2.16: 我々の銀河系からの遠赤外線連続波 (細い線) と近赤外線連続波 (太い線) の分布。分布が反相関になっている部分がわかる。(Okuda 1981)

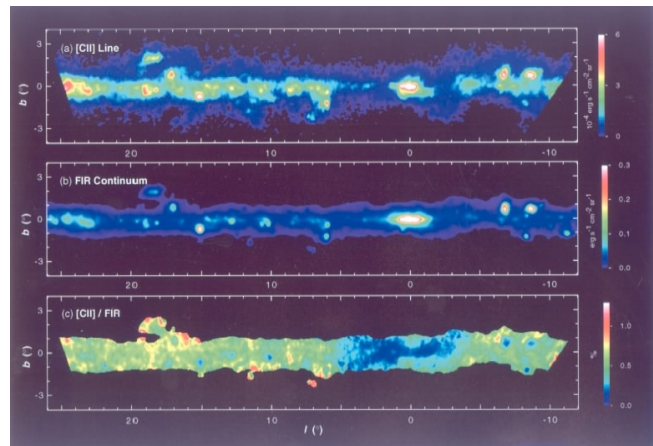


図 2.17: 遠赤外 [CII] スペクトル線で見た銀河系の構造 (上図) と、遠赤外線連続波の分布 (中図) との比較 (下図)(Nakagawa et al. 1998) (カラー 6 ページ)

2. 遠赤外線観測 (1): 銀河系の塵の分布 一方銀河系自身は、その放射エネルギーの半分以上を塵の熱放射として、波長 $100\mu\text{m}$ 前後の遠赤外線領域において放射している。したがって、この波長領域での観測は銀河系の放射エネルギー分布、特に星が塵に包まれて生まれているような若い星生成領域の観測には欠かすことができない。

しかし、この波長の観測には技術的に2つの問題がある。一つは、やはり地球大気のために地上からの観測を行うことができないということである。もう一つは、検出器を極低温にまで冷却する必要があることである。

これらの困難を克服すべく京都大学のグループは、超流動液体ヘリウムで冷却した検出器を持つ気球搭載望遠鏡を70年代後半から80年代前半にかけて精力的に打ち上げ、銀河系の中の塵の分布を明らかにした。これを上記の近赤外線の分布と比べると、きれいに反相関が現れる。この成果は、1980年に開催された国際天文学連合シンポジウム96 “Infrared Astronomy” の集録の表紙を飾ることになる(図2.16)。

3. 遠赤外線観測 (2): 光解離領域 星生成領域での星間ガスのエネルギー収支の理解のためには、星間ガスの最大の冷却源である遠赤外線での炭素原子スペクトル線 ($[\text{CII}] : ^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}, 158\mu\text{m}$) の観測を欠かすことができない。この[CII]スペクトル線を広い領域にわたって観測するために、宇宙科学研究所のグループは超流動液体ヘリウムで冷却したファブリ・ペロー分光器を気球搭載望遠鏡と組み合わせ、1980年代後半から現在にいたるまで、数多くの観測を行なっている。その結果、銀河面全体にわたる[CII]スペクトル線の分布が初めて明らかになる(図2.17)など、大きな成果があがっている。

観測ロケット

大気球が到達できる高度は数十 km よりも低いところに限られる。一方小型の観測ロケット(図2.18)を用いると、高度 300 km 程度と人工衛星環境と同等の極めて優れた観測環境にまで到達することができる。ただし、観測時間が10分程度と短い時間に限られる。

この優れた観測環境を活かして、短い観測時間でも可能なユニークな観測が行なわれて来た。



図 2.18: 観測ロケットの打ち上げ (宇宙航空研究開発機構提供) (カラー 6 ページ)

1. 背景放射観測 観測ロケットを用いて最も精力的に行なわれたのは、宇宙初期の天体を捉えるための「背景放射」観測である。これは、名古屋大学を中心としたグループが近赤外線とサブミリ波の両長域において精力的に取り組んだ。サブミリ波の観測ではアメリカのカリフォルニア大学との協力も行なわれた。これらの観測の結果は必ずしも背景放射の有意な検出とはならなかったが、世界的にもユニークな観測であり、大きな注目を集めた。また、後の IRTS による背景放射観測の先駆けとなった。

2. 銀河ハローの正体を求めて ダークマターの正体は、現代天文学が明らかにすべき大きな課題の一つである。特に、ダークマターの存在が知られている「銀河のハロー」が低質量の星で構成されているどうかをしらべるため、宇宙科学研究所、名古屋大学、アメリカとの協力で観測ロケット実験を行った。その結果、図 2.19 に示すように、質量/光度比に大変に厳しい制限をつけることができた。

3. 冷却技術 ロケット観測は、技術開発にも活用された。

例えば、名古屋大学、筑波大学、宇宙科学研究所の協力で行なわれた S-520-3 号機の実験では、無重量下での超流動液体ヘリウムの取り扱い方法についての実証実験が行われ、衛星観測への道が開かれた。さらに、他のロケット観測において開発された冷却技術も衛星による赤外線観測を行なう上で鍵となるものであった。

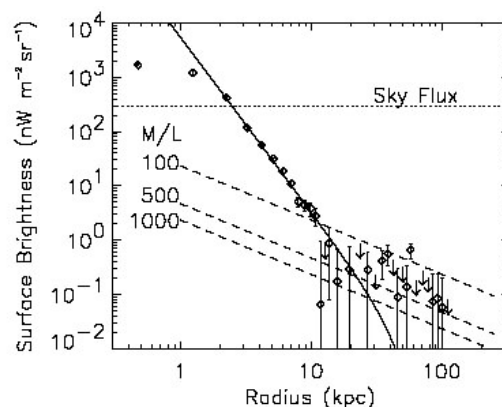


図 2.19: 銀河ハローは低質量の星 (MACHO) か? (Yost et al. 2000)

2.3.2 宇宙へ

日本初の赤外線天文ミッション IRTS

日本における最初の「宇宙からの赤外線天体観測ミッション」は、1995 年に打ち上げられた宇宙赤外線望遠鏡 IRTS (Infrared Telescope in Space) である。ただし、IRTS は独立した衛星ではなく、SFU (Space Flyer Unit) と呼ばれる多目的実験衛星に観測機器の一つとして搭載されていた (図 2.20)。

打ち上げは 1995 年 3 月に、種子島宇宙センターから HII ロケット 3 号機によって行われた。IRTS を搭載した SFU は、様々な実験を宇宙で行った後 1996 年 1 月に、スペースシャトルによって回収された。この回収にあたっては、日本人宇宙飛行士である若田光一が活躍した。

IRTS には極低温に冷却された口径 15cm の望遠鏡が搭載されており、拡散光の観測に最適化されていた。焦点面には 4 つの観測機を搭載し、波長 $1\mu\text{m}$ から $800\mu\text{m}$ という広い波長域をカバーしていた。IRTS は、搭載されていた液体ヘリウムが 90 リットルと少量であったために観測期間も一ヶ月弱と短いものであったが、その短い期間に PAH と呼ばれる有機物分子が我々の銀河系内に非常に広く分布することを明らかにし (図 2.21)、宇宙最初の星の光を近赤外背景放射として捉える (図 2.22) などユニークな様々な観測を行った。

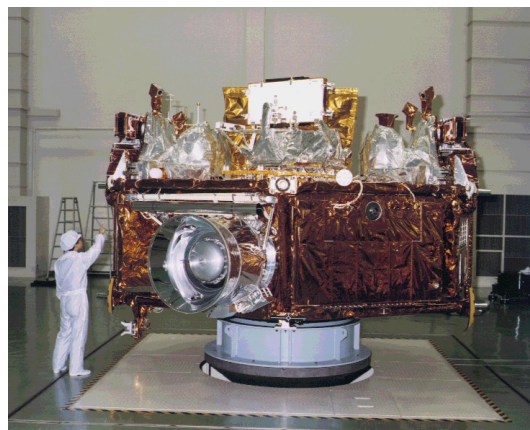


図 2.20: 宇宙赤外線望遠鏡 IRTS を搭載した多目的実験衛星 SFU (宇宙航空研究開発機構提供) (カラー 7 ページ)

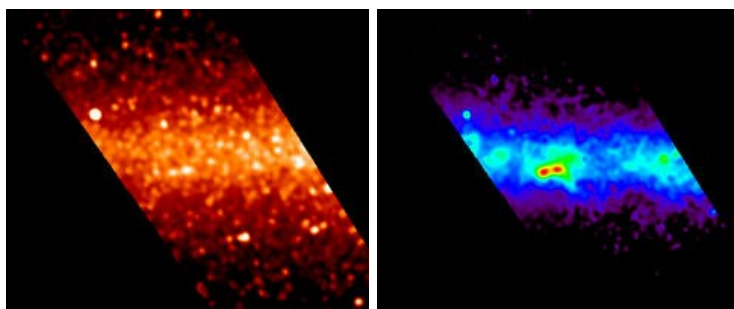


図 2.21: IRTS によって観測された $3\mu\text{m}$ 帯の連続波の分布 (左図、星をトレース) と $3.3\mu\text{m}$ feature の分布 (右図、PAH と呼ばれる有機物をトレース)(Tanaka et al. 1996) (13 ページ)

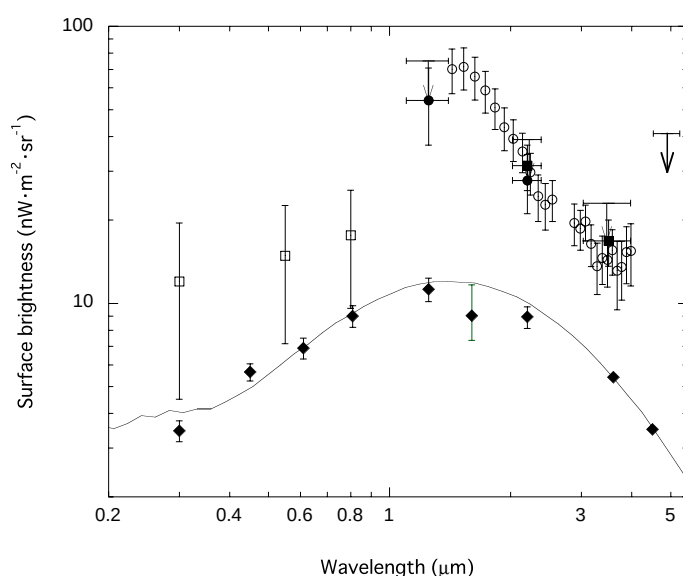


図 2.22: 白抜き○は、IRTIS によって観測された等方背景放射成分。この結果は、COBE/DIRBE の結果 (塗りつぶした四角と丸) と矛盾しない。ただし、銀河の重ね合わせの光 (ダイヤモンドと実線) よりも、IRTIS 観測値は、はるかに明るい。従来知られていなかった種族の天体の存在を示唆する証拠である。(Matsumoto et al. 2005)

なお、IRTIS の望遠鏡は絶対温度で 2K という極低温に冷却されていたが、検出器の一部は ^3He を用いた冷凍機により 0.3 K というより低温まで冷却されていた。この 0.3 K という温度は、2004 年末現在においても人類が宇宙で達成した最も低い温度の記録である。

究極のサーベイ衛星 ASTRO-F

現在日本では、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部を中心として ASTRO-F 衛星 (図 2.23) を開発中である。ASTRO-F には、IRTIS の望遠鏡 (口径 15 cm) から大幅にアップグレードされた口径 70 cm の冷却望遠鏡が搭載される。

ASTRO-F の目的の一つは、遠赤外線領域において全天にわたるサーベイ観測を行うことである。

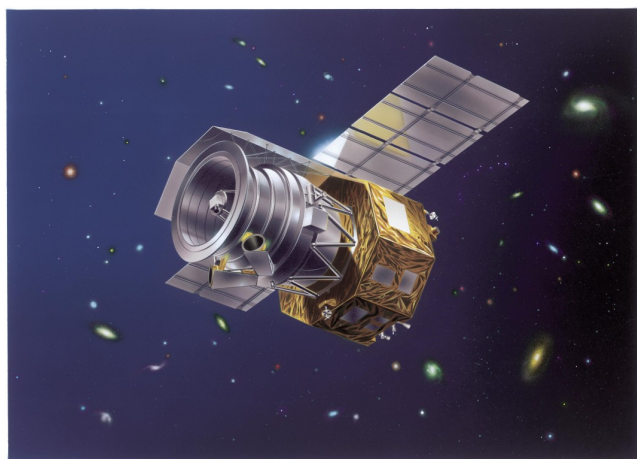


図 2.23: 軌道上の ASTRO-F(想像図) (カラー 7 ページ)

前述のように、遠赤外線全天サーベイ観測はすでに IRAS によって行われ、大きな成功を収めた。しかしながらその感度はあまり高くはなく、現代の天文学に課せられている重要課題の解明には残念ながら不十分である。そこで、IRAS 以後の 20 年にわたる赤外線検出器の進歩を利用して IRAS よりも数十倍高感度な究極の赤外線サーベイ観測を行おうとしているのが ASTRO-F である。

ASTRO-F は冷却技術にも新しい方式を採用している。前述のように、赤外線観測衛星では液体ヘリウムが蒸発してなくなってしまうことにより、衛星の寿命が決まっている。そこで少しでもこの寿命を長くするために、スターリングサイクルと呼ばれる機械式の冷凍器を導入することとした。ただし、冷凍機によって観測機器そのものを冷却するのではない。冷凍機で観測機器を囲む層を冷却することによって、ヘリウムタンクへの熱侵入を軽減しようとする設計である。この冷凍機の導入により、液体ヘリウムの寿命を飛躍的に延ばすことができると期待される。ASTRO-F の液体ヘリウム量は 170 リットルと IRTS の 2 倍弱であるが、寿命は 550 日と IRTS の 10 倍以上に延ばすことができる見込みである。

ASTRO-F は、宇宙航空研究開発機構の M-V ロケットによる 2005 年度の打ち上げを目指して開発中である。ASTRO-F の観測は数百万個を超える赤外線天体を検出し、天文学の広い範囲にわたって大きな影響を与えるものと期待されている。

2.3.3 未来へ

新しいミッション

日本が進めてきた IRTS、ASTRO-F という「サーベイ型」の衛星の成果に基づき、サーベイによって発見された新天体を詳しく調べる将来計画が検討されている。それが SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) 計画である。

また、赤外線による位置天文学というユニークな分野を開拓する JASMINE、さらに、地球型の系外惑星を検出しようという JTPF など、非常に魅力的なミッションもその先に提案されている。

これらについては章をあらためて詳しく述べる。

新しい体制

2003 年 10 月、宇宙開発の体制は大きく変化した。(旧) 宇宙科学研究所は、(旧) 宇宙開発事業団、(旧) 航空宇宙技術研究所と統合し、「宇宙航空研究開発機構」として新しいスタートを切った。

(旧) 宇宙科学研究所はこれまで大学共同利用機関として、関係大学・諸機関の研究者グループからの提案をもとに科学衛星・観測ロケット・大気球を用いた宇宙科学ミッション・飛翔実験を遂行してきた。新機関に移行した後も、「宇宙航空研究開発機構」は大学共同利用の機能を保持することとなった「宇宙科学研究本部」を窓口として関係大学・諸機関の研究者の自発的な発議により、「健全で活力のある」宇宙科学ミッション・飛翔実験をますます発展させていくことが求められている。

さらに、統合は新しい可能性も拓いている。従来の宇宙科学研究所の枠内では実行できなかったような多様な宇宙科学ミッションが、新しい宇宙機関への統合により可能とするような道を拓くべく、様々な可能性を模索しているところである。

第3章 次世代光赤外天文学のサイエンス

3.1 科学検討班の活動目標・経過

光赤外天文学の次期大型観測装置計画発案において、将来にわたって科学的にどのような主要課題に対して研究を進めるべきか、またそのためにどのような観測装置や観測方法が必要となるかを考察することが大変重要となる。そこで、当該目的に即した科学検討班を組織した。以下に、その活動状況と検討結果を記する。

本検討班の目標は、光赤外天文学の次期大型観測装置計画に関連して、今後10年から20年にわたって解決すべき天文学上の最重要課題を検討し、観測装置の性能や構成に対して提言を行なうことである。この科学検討班の活動を推進するために4名の世話人[千葉柁司(東北大学、班長)、杉山直(国立天文台)、土居守(東京大学)、児玉忠恭(国立天文台)]を置き、この世話人によって天文学の研究分野を「宇宙論、構造形成」、「クエーサー、活動的銀河中心核」、「銀河、銀河団」、「銀河系、局所銀河」、「恒星物理、星形成、超新星、晩期型星」、「惑星系、太陽系」の6つに大別して、各研究分野における将来計画検討のためのチーフを選定した(後述)。そして、日本天文学会が管理しているメーリングリスト(tennet)を通じて、各研究分野における検討メンバーを募り、総勢40名の天文学研究者の方々から協力を得ることになった。その後、各研究分野において個別に科学検討の活動を進め、さらに定期的に他の研究分野や地上望遠鏡検討班、スペース望遠鏡検討班との調整も行なった。また、本検討班メンバーに限らず一般の天文学研究者の意見も集約するために、数回にわたって開催された将来計画ワークショップにおいて検討状況の報告を行なった。

次節以降において、本科学検討班による検討結果を報告する。次節では各研究分野の検討要旨、次々節ではその詳細がまとめられている。

各研究分野のチーフ

宇宙論、構造形成	杉山直(国立天文台)
クエーサー、活動的銀河中心核	和田桂一(国立天文台)
銀河、銀河団	児玉忠恭(国立天文台)
銀河系、局所銀河	千葉柁司(東北大学)
恒星物理、星形成、超新星、晩期型星	茂山俊和(東京大学)
惑星系、太陽系	小久保英一郎(国立天文台)

活動経過の要旨

2002/12/26	サイエンスWG立ち上げのための準備会(世話人)
2003/01/20	サイエンスWG立ち上げ会(世話人、各研究分野チーフ、家)
2003/01/22	光赤外将来計画の第一回全体検討会
2003/01/31	サイエンスWG班員募集締め切り
2003/02/07	サイエンスWG班員の決定、WGとしての活動開始
2003/03/26	日本天文学会春季年会にて光赤外将来計画企画セッション
2003/08/21,22	光天連による将来計画シンポジウム(サイエンス検討の経過報告)
2004/01/22,23	将来計画ワークショップ(サイエンス検討の経過報告)
2004/10/31	サイエンス検討結果の報告書作成の完了

3.2 検討結果の要旨と必要観測仕様のまとめ

各分野における主要課題、ならびに検討を行なった各項目の要旨を以下に記する。

3.2.1 「宇宙論、構造形成」分野

主題：「宇宙の暗黒エネルギーと暗黒物質の解明」

次世代望遠鏡の大集光力を生かした観測によって、宇宙初期に迫る。高角度分解能の撮像、高分散の分光によって、物理学の根幹をなす物理定数の時間進化を調べ、ダークエネルギー・ダークマターの正体に迫り、そして、現在観測される宇宙の多様な構造がどのように形成されてきたのかを明らかにしていく。

1 基本定数の時間変化

微細構造定数 α の時間変化をクエーサー吸収線を用いて測定する。物理学の基礎となる重要な定数が過去においても一定だったのかを検証する重要な観測。「過去の宇宙は私たちと同じだったのか」 高分散分光が必要。

2 ダークエネルギー探査

WMAP や超新星探査によってその存在が明らかになったダークエネルギー。遠方の超新星探査、及び、実空間と赤方偏移空間での構造のゆがみ具合の違いを用いるアルコック・パチンスキー (Alcock-Paczynski) 効果を用いて、ダークエネルギーの時間進化などの性質を明らかにする。「宇宙を支配するエネルギーの正体に迫る」 広視野撮像と分光が必要。

3 ダークマター探査

水素、ヘリウムに比べ、5 倍以上存在している正体不明のダークマター。その正体に重力レンズ効果を用いて迫る。特に、コールド・ダークマターの予想と異なっている可能性のある、銀河の中心のカスプ構造、及びサブハローの検証に焦点を当てる。「ダークマターは冷たいか」 広視野撮像が必要。

4 ガンマ線バーストを用いた宇宙論

ガンマ線バーストは、とてつもなく明るい天体現象であり、実際に観測されているバーストの中にも、非常に遠方、ことによると赤方偏移 $z > 10$ からのものも含まれているかもしれないといわれている。ガンマ線バーストは深宇宙を見る新しい目として使える可能性を秘めているのである。可視光フラッシュの測定、追求分光観測、なかでもクエーサー (QSO) と同様な吸収線の測定は、QSO では届かない深宇宙の銀河間物質 (IGM) の状態の情報をもたらしてくれるかもしれない。H α の分光に関しては中間赤外での観測が必要となる。「深宇宙を見る新しい目ガンマ線バースト」 高速モニター、高分散分光、中間赤外での分光。

5 構造形成の時間進化

スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) やツー・ディー・エフ (2dF) によって、近傍の銀河分布、大規模構造は明らかにされつつある。しかし、このような構造がいつごろ作られはじめ、どのように進化してきたかは、まだ観測的には明らかになっていない。その進化を調べることで、また、ダークエネルギーの時間進化も明らかにできる可能性がある。可能な限り広い視野で、非常に深いサーベイを行う。「構造の誕生と進化」 大口径望遠鏡での広視野撮像、分光。

テーマ	観測ターゲット	望遠鏡形態	観測モード
微細構造定数の時間変化	遠方 QSO 吸収線	地上 > 8m	高分散分光 $20 - 150\mu\text{m}, R > 10^5$
Alcock-Paczynski テストでの ダークエネルギー探査	LRG のサーベイ	低赤方偏移:地上 ~ 8m 高赤方偏移:地上 ~ 30m	撮像、及び分光
CMB と大規模構造の 相関	銀河赤方偏移サーベイ (Hyper SDSS)	地上 ~ 20m	撮像、分光
重力レンズでの ダークマター探査	Lensed QSOs 探査	スペース > 3m	撮像、 $8 - 26\mu\text{m}$
	Lensed QSOs の 輝線マッピング	地上 > 20m	分光、 $1 - 5\mu\text{m}$ 、 $R > 1000$
	アーク状銀河像の 高分解能撮像	地上 > 20m	撮像 FWHM < $0''.02$
ガンマ線バーストに よる宇宙論	ガンマ線バースト 天体	地上 > 10m	分光、撮像 $R \sim 10000$
初期天体探査	輝線 ($\text{Ly}\alpha$, $\text{H}\alpha$, CIV)	地上 ~ 30m	赤外での分光、撮像 $R \sim 10000$

3.2.2 「クエーサー、活動的銀河中心核」分野

主題：「セントラルエンジンパラダイムの検証と巨大ブラックホール形成史の解明」

活動的銀河中心核 (AGN) の膨大なエネルギーの源は、超巨大ブラックホールへのガス降着と言われているが、近傍の AGN においても未だに中心核近傍は直接分解されていないため、その真の構造は今だに謎である。また、銀河形成過程において、巨大ブラックホールやクエーサーがどのように形成されてきたのか、それらが銀河形成や銀河間ガスに与える影響は、次世代の観測装置による遠方宇宙の観測により明らかにすべき重要な課題である。

1 近傍から遠方の AGN における巨大ブラックホール質量の決定

銀河中心には、 $10^6 - 8 M_\odot$ の巨大ブラックホール (BH) が存在すると言われており、近年、銀河バルジの質量とブラックホール質量の相関が指摘されている。しかし、巨大 BH の質量が高い精度で決定されているのは、我々の銀河中心を含め、少数の例しかない。セントラルエンジン・パラダイムの検証のためには、近傍から遠方まで、低光度から高光度までのさまざまな AGN において巨大 BH の存在を確認する必要がある。近傍 AGN については、輝線ガス領域の可視干渉計による高分解能観測により、ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) で達成される 10 倍の距離における AGN の中心部 1 パーセク以内の質量を決定する。遠方の AGN については、BLR と連続光の変動の時間差を用いたリバーベレーション・マッピングの手法により、 $z > 5$ のクエーサー (QSO) の巨大 BH 質量を決定する。これには、10 年以上の長期にわたって多数の AGN の近赤外分光モニタ観測が必要であり、専用望遠鏡による集中的観測が必要である。

2 近傍 AGN の中心構造の解明

AGN の構造は、巨大 BH、その回りの降着円盤、広・狭輝線領域 (BLR, NLR)、およびそれらを取り囲む遮蔽分子トラスから構成されると一般には考えられている。しかし、直接その空間構造が分解されていないため、このような描像が本当に正しいのか、正しいとしても近傍から遠方まで、全ての AGN に当てはまるのか?、個々の構成要素の構造や AGN の活動性との関連についてはまったく不明である。BLR 構造の直接分解には、最近傍の AGN でも少なくとも数ミリ秒角 (mas) の分解能が必要あり、可視干渉計が不可欠である。NLR 最深部の構造の解明には、偏光分光観測や近赤外域の高電離禁制線の観測が有効であるが、20m クラスの望遠鏡、 $R \sim 10^3 - 4$ の波長分解能が要求される。トラスについても、そのサイズ、構造は未だにモデルの域を出ていない。また、トラスに存在する豊富なガスは、AGN の活動性の源である質量供給や、1 型、2 型 QSO の存在比、X 線バックグラウンドの起源とも深く関連してい

るはずである。トーラスの全体構造および内部構造の解明にはミリ秒角スケールでの中間～遠赤外撮像及び分光観測が要求され、そのためにはスペースに大口径の赤外望遠鏡が必要である。

3 QSO/AGN の進化：深宇宙サンプルの確立

クエーサーや AGN の進化を探るためには、 $z > 3$ の高赤方偏移クエーサーの質の良い統計サンプルが必要である。特に $z \sim 6$ を越えてどこまでクエーサーが存在するか、はクエーサーの起源のみならず、銀河形成や銀河間ガスの再電離との関連でも解明されるべき重要な課題である。SDSS によるクエーサーのサンプルでは、限界等級が浅いために、高赤方偏移の低光度 AGN の光度関数についての統計的な議論はできない。また、AGN 形成に関連して興味を持たれている狭輝線 1 型セイファート銀河 (NLSy1) やガスが豊富な高赤方偏移で期待される吸収を強く受けたクエーサー (2 型 QSO) の高赤方偏移での探査は、AGN 進化の描像の確立に不可欠である。さらに、クエーサーの空間分布から、クエーサーの活動期間についての情報が得られる。これらの実現のためには、広視野の可視、近赤外カメラを備えた 8m クラスの地上望遠鏡を占有的に使用し、1000 平方度程度の超広天域を深い撮像、及び分光サーベイを行い、クエーサー/AGN のサンプルを得ることが重要である。

テーマ	観測ターゲット	望遠鏡形態	観測モード
近傍巨大 BH 質量の決定	近傍 AGN の輝線領域	地上干渉計 (基線長 ~ 1 km) 地上 30m + AO	可視分光 $R \sim 10000$, $1 \sim 0.1\text{mas}$
high- z 巨大 BH 質量の決定 M_{BH} vs M_{bulge} の z 進化	AGN の BLR と連続光の 長期間 reverb. mapping	地上 8m 専用 + AO	近赤外、可視分光 $R \sim 1000$, $\sim 100\text{mas}$
high- z AGN の光度関数	$z > 7$ の高光度 QSO $z > 5$ の低光度 QSO	地上 8m 専用 + 広視野カメラ + 8-多天体分光器	近赤外、可視撮像、分光 $R > 10^3$, $\text{FOV} > 1^\circ$, $\sim 100\text{mas}$
小/大質量降着率 AGN の探査	$z > 1$ の NL Seyfert 1	地上 8m 専用	可視、近赤外撮像分光 $\text{FOV} > 1^\circ$, $\sim 100\text{mas}$
$z > 1$ の 2 型 QSO の探査 (近傍 AGN 種族の z 進化)	X 線を含む多波長サーベイ 領域の近赤外 deep サーベイ	地上 8m 専用+ 広視野カメラ + 多天体分光器, マルチスリット赤外線分光器	近赤外撮像、分光サーベイ $R > 10^3$, $\text{FOV} > 1^\circ$ $\sim 100\text{mas}$
電離ガス空間構造の直接分解	近傍 AGN の BLR, NLR	地上干渉計 (基線長 ~ 1 km)	可視、近赤外狭帯域撮像、 偏光、近赤外分光、 $R > 10^3$, $\sim 0.1\text{mas}$
high- z AGN 電離領域の 化学組成	$z > 6$ AGN	地上 30m	近赤外分光 $R > 1000$, $\sim 100\text{mas}$
低光度 AGN の進化と構造： 長期モニター観測	10 万個以上 AGN スペクトル の長期時間変動 ($1 - 10\text{yr}$)	地上 4 – 8m 専用	可視、近赤外分光 $R > 1000$, $\sim 100\text{mas}$
QSO の起源 近傍 ULIRG との関係	近傍 ULIRG と QSO 母銀河：	地上 8m + AO	近赤外撮像 $\sim 100\text{mas}$
high- z ULIRG の正体 と QSO 形成	$z > 1$ の ULIRG	4m スペース	中間赤外分光
遮蔽分子トーラス構造の分解	近傍 AGN のダスト放射、 PAH 輝線	8 – 10m スペース	中間～遠赤外撮像、分光 $R > 1000$, $10 - 100\text{mas}$

3.2.3 「銀河、銀河団」分野

主題：「宇宙初期から現在までの銀河宇宙の歴史を具に描く時代絵巻の構築」

銀河、銀河団分野では、次世代光学赤外線望遠鏡によって、次の 4 つを目指す。

1. スペース望遠鏡による非常に深い赤外観測により、未踏の初期宇宙天体の探査を行ない、初代天体の誕生を目撃すること。

2. スペース望遠鏡による中間赤外から遠赤外の観測により、これまで可視光や赤外線では見付からなかったような新たな天体を探査し、偏りのない宇宙像を得ること。
3. 是迄見付かった微光遠方天体をスペースと地上の大型望遠鏡により分光し、銀河形成の物理を詳細に探ること。
4. スペースと地上の大型望遠鏡を駆使して、銀河の形態と星形成率を、時間、環境、銀河質量の3つの関数として詳細に調べあげ、銀河の形成とその後の進化を統一的に理解すること。

1 初代天体の発見と宇宙電離史の解明

スペース広視野撮像 (1 平方度以上)、分光フォローアップ ($\text{Ly}\alpha$ は地上、 $\text{H}\alpha$ はスペース)

宇宙で最も最初に生まれた天体の探究は、その華やかさに留まらず、初期宇宙の電離状態、物理状態を決定し、初期銀河形成を左右する重大要因であるので、次世代望遠鏡の目玉的なテーマであると言える。「原始ガスの収縮」、「最初の光」、「宇宙の再電離」の3大過程を観測的にとらえることが課題となる。

2 形成途上銀河の内部構造の解明

面 (IFU) 分光 ($\text{Ly}\alpha$, OII は地上、 $\text{H}\alpha$, NeII はスペース)

今日、すばる等の8–10m級地上大望遠鏡や、スペース赤外線望遠鏡、サブミリ望遠鏡などの活躍により、宇宙初期の多種多様な原始銀河が見つかるようになってきた(ライマン・ブレイク銀河、ライマン輝線銀河、極赤銀河、赤外線銀河、サブミリ銀河など)。しかし分光フォローアップが極めて困難なため、これらがどのような形成・進化段階にある銀河なのか不明である。次世代望遠鏡では、これら高赤方偏移銀河の分光を1kpcスケールで空間分解して行ない、形成途上銀河の物理状態を探り、銀河形成過程を実証的に明らかにすることが重要である。

3 銀河形態の起源の解明

スペース広視野撮像 (星質量、 $z > 2-3$ の形態)、地上 AO 撮像 ($z < 2-3$ の形態)、地上分光 (内部運動)

銀河の大局的な形成・進化過程において最も重要な課題の一つは、「形態」に代表される銀河の基本構造がどのように分化、獲得され、進化してきたのかを明らかにすることである。この過程は、銀河が構成単位天体(ビルディング・ブロック)の集積によって形成される過程と密接に関係していると考えられ、その解明には、遠方銀河の(1)視覚的形態、(2)質量集積(合体を含む)、(3)星の内部運動の3つの方面から整合的に取り組むことが必要である。

テーマ	観測ターゲット	望遠鏡形態	観測モード
初代天体の形成現場	Ly α (cooling), H $_2$, UV, Ly α (HII) at $z = 3 - 20$	スペース > 4m 地上 > 20m	狭帯域撮像 2 – 50 μ m
宇宙の再電離史	Ly α , H α , UV at $z = 6 - 20$	スペース 4m 地上 > 20m	狭帯域撮像 1 – 10 μ m
形成途中銀河の内部構造 星形成の局在、伝搬 ガスの流出入 球状星団の形成	Ly α , H α at $z = 3 - 7$	地上 > 20m スペース 4m	面分光 0.5 – 5 μ m
銀河基本構造の獲得 形態 (size, bulge/disk) 内部運動、質量 (TF/FP) 星形成 (b=SFR/⟨SFR⟩) 化学進化 (星形成史, 初期質量関数)	Ly α , H α , OII, 近赤外線バルマー輝線 at $z = 1 - 7$	スペース 4m 地上 > 20m	広視野撮像、 分光 0.5 – 10 μ m
矮小銀河の形成	OII, H α , NIR at $z = 1 - 10$	スペース 4m 地上 > 20m	撮像、 分光 1 – 10 μ m
宇宙大規模構造の形成 と銀河進化	近赤外線 at $z = 1 - 10$	スペース 4m	広視野撮像 1 – 10 μ m
AGN-銀河 関係	H α , 近赤外線 at $z = 1 - 20$	スペース 4m	広視野撮像 1 – 20 μ m
銀河間物質の進化	吸収線 at $z = 1 - 7$	地上 > 20m	分光 0.5 – 2.6 μ m

3.2.4 「銀河系、局所銀河」分野

主題：「恒星分離に基づく銀河の形成と進化の解明」

次世代光学赤外線望遠鏡によって、おとめ座銀河団の距離 (17Mpc) 以内に存在する様々なタイプの銀河を、銀河の骨格である個々の恒星に分離する。そして、高空間分解能撮像ならびに中・高分散分光を実施することによって、恒星系の種族 (年齢分布)、空間構造、化学元素組成、空間運動等を求め、個別銀河の形成史と進化史を明らかにする。

1 銀河系の大局的・化学動力学進化の解明

現在では太陽近傍の明るい星のみでしか、詳細な化学元素組成と3次元運動が得られていないので、これを銀河系全体に渡って獲得することによって、銀河系がどのような化学動力学進化を経てその構造が形成されたかを明らかにする。将来、GAIAによって $V \sim 20$ mag (バルジの転向点等級付近) までの暗い恒星の3次元運動が決定されるので、この等級に至るハロー星とバルジ星の高分散分光が重要となる。

2 矮小銀河における星形成史

矮小銀河は、銀河系のような明るい銀河のビルディング・ブロックとして、さらにそのような階層的合体による銀河形成の残骸として明るい銀河の周囲に存在する伴銀河として、銀河形成と進化の解明の鍵と考えられている。このような矮小銀河における星形成史・化学進化史を、ホスト銀河の特徴や銀河密度などの環境によってどのように変化しているかを明らかにする。恒星分離のための高空間分解能撮像、金属量と化学元素組成決定のために分光観測を必要。

3 円盤銀河の初期進化とハッブル系列の起源

円盤銀河がどのような過程を経て形成されたかを知る手がかりとして、その古成分であるハロー部の空間構造と化学動力学構造を調べる。そして、これらの情報が銀河円盤やバルジの特徴と関係しているか

を調べて、ハッブル系列の起源に関する新しい知見を得る。ハロー部の空間構造の検出、さらに恒星分離に基づく化学動力学構造の決定を必要。

4 楕円銀河における星形成史

楕円銀河がどのように誕生して現在に至ったか、特に、その星形成史が階層的合体仮説が予言するものなのか否か、銀河本体の質量や環境に依存するのか、等の根本的な問題を、恒星分離に基づく解析によって明らかにする。撮像と分光によって、恒星系の色-等級図、金属量分布と化学元素組成を得る。おとめ座銀河団とそれ以外にある楕円銀河を用いて、様々な環境下における星形成史を導く。

5 局所宇宙の質量構造

恒星分離が可能になると、その赤色巨星分枝の最も明るい部分 (TRGB) を同定することによって、銀河までの距離決定が可能になる。この方法は、セファイド変光星を持たない矮小銀河に特に有効であり、実際上すべての銀河に適用可能である。宇宙膨張からのずれ (特異速度) をおとめ座銀河団までのすべての銀河に対して求めることにより、局所宇宙の速度構造と質量構造を決定する。

テーマ	観測ターゲット	望遠鏡形態	観測モード
銀河系の初期化学進化	ハロー星の化学元素組成 バルジ星の化学元素組成	地上 (> 30m)	高分散分光 ($R = 40000$) 紫外 ~ 近赤外, $V = 20\text{mag}$
矮小銀河における星形成史	色-等級図、金属量、 化学元素組成	地上 (> 30m) スペース (> 4m)	撮像 (FWHM < $0''.007$) 高分散分光 ($R = 40000$) 撮像 (FWHM < $0''.05$) 中分散分光 ($R = 4000$) $0.4 \sim 2\mu\text{m}$, $1 \sim 5\mu\text{m}$
円盤銀河の初期進化と ハッブル系列の起源	ハロー部の空間構造 色-等級図 金属量と化学元素組成 球状星団の年齢と金属量	地上 (> 30m) スペース (> 4m)	撮像 (FWHM < $0''.007$) 高分散分光 ($R = 40000$) 撮像 (FWHM < $0''.05$) 中分散分光 ($R = 4000$) $0.4 \sim 2\mu\text{m}$, $1 \sim 5\mu\text{m}$
楕円銀河における星形成史 ハッブル系列の起源	恒星系の色-等級図、 金属量と化学元素組成 球状星団の年齢と金属量	地上 (> 30m) スペース (> 4m)	撮像 (FWHM < $0''.007$) 高分散分光 ($R = 40000$) 撮像 (FWHM < $0''.05$) 中分散分光 ($R = 4000$) $0.4 \sim 2\mu\text{m}$, $1 \sim 5\mu\text{m}$
局所宇宙の質量構造	TRGB 測光による距離決定、 特異速度の決定	地上 (> 30m) スペース (> 4m)	高空間分解能撮像 $0.4 \sim 2\mu\text{m}$, $1 \sim 5\mu\text{m}$

3.2.5 「恒星物理、星形成、超新星、晩期型星」分野

主題：「銀河の進化と元素の起源の解明に向けた恒星進化の素過程の解明」

1 大質量星および大規模星団の形成過程の解明

大質量星や大規模星団の形成は銀河進化に大きな帰還作用 (フィードバック) をもたらす重要な過程である。にもかかわらず、その観測的研究は小質量星の形成過程の研究に比べてかなり立ち後れている。この状況を打破するために距離 10kpc (3 万光年) 以内の大質量形成領域を 100 天文単位 (AU) 程度の分解能観測することを提案する。

2 星の進化の最終段階における質量放出の直接撮像

中小質量星の進化で残された大きな課題の一つである漸近巨星から惑星状星雲に至る質量放出の様子を直接撮像・分光によって観測し、非球対称性の起源などの謎に迫る。

3 恒星と惑星の境界探索

褐色矮星の発見から低質量星の研究は進展してきた。銀河系の星の質量関数を知る上で低質量星の探索は重要である。ここでは、円盤とハローでの低質量星探査を提案し、両者での質量関数に対する情報を与えることを目的とする。

4 星の化学組成から元素の起源

元素の起源は天体物理学の基本的な問題の一つである。近年の金属欠乏星の表面組成解析から個々の超新星での元素合成やその爆発機構のみならず星形成史の情報も得られることがわかってきた。現存の望遠鏡では困難な同位体組成比を測ることで中性子捕獲元素の起源などに関して突破口を開くことを提案する。また、第一世代星探査も検討する。

5 Ia 型超新星の起源

Ia 型超新星は連星系中の白色矮星が伴星からガスを降着し限界質量に達して爆発するというシナリオが有力である。爆発後 10 から数 100 年経った若い Ia 型超新星残骸の中にこの伴星を探し、シナリオの妥当性を検討することを提案する。

テーマ	観測ターゲット	望遠鏡形態	観測モード
大質量星の形成過程	大質量形成領域	地上 (南半球) > 30m	分光、撮像 (0.3 – 2.5 μ m) $R > 5000$, FOV > 10', FWHM < 0''.05 – 0''.10
質量放出の直接撮像	恒星風	~ 40 – 400m	撮像 (near-IR: ~ 2 μ m) FWHM 0''.01 – 0''.001
	分子ガス殻	~ 100m	撮像・分光 (near-IR: ~ 5 μ m) FWHM 0''.01(100pc で 0.1AU), 0.1 km/s
	ダスト殻	スペース干渉 (~ 600m)	撮像・分光 (mid-IR: ~ 30 μ m) FWHM 0''.01, 0.1 km/s
	冷たいガスとダストの殻	スペース干渉 (~ 6000m)	撮像・分光 (far-IR: < 400 μ m) FWHM 0''.01, 0.1 km/s
恒星と惑星の境界	銀河円盤での褐色矮星探査	地上 (8m)	AO コロナグラフ (J , H) $R \sim 300$, FOV 10'', FWHM 0''.3
		スペース (3 m)	コロナグラフ (0.5 – 1.6 μ m) $R \sim 300$, FOV 10'', FWHM 0''.3
		SPICA(3.5 m)	コロナグラフ (5 μ m) $R \sim 300$, FOV 10'', FWHM 1''
ハロー種族	低質量星と褐色矮星	地上 (2.4 m)	撮像サーベイ (0.4 – 1.0 μ m) $R \sim 0.3$, FOV 30' $\times$ 30', FWHM 0''.5
元素の起源	同位体組成解析	スペース	分光 UV(< 0.3 μ m)–可視光 超高分解能 ($R \geq 100,000$)
第一世代星探査		地上 (>25m) or 分光専用望遠鏡 (10m)	撮像・分光 高分解能 ($R \geq 30,000$), シーイング限界
Ia 型超新星の起源	若い Ia 型超新星残骸	地上 (> 30m)	分光 (0.3 – 0.4 μ m) $R > 300$, FOV > 10', FWHM < 0''.05–0''.1

3.2.6 「惑星系、太陽系」分野

主題：「系外惑星系を含めた一般的な惑星系の構造と起源の解明、ならびに惑星進化としての生命の起源の解明」

これからの惑星系天文学の大きな流れは、太陽系のみならず多様な系外惑星系も含めた一般的な惑星系の構造と起源の理解を目指すことである。そして、これまでは多くの場合、理論的にしかアプローチできなかった惑星系形成や惑星初期進化に、原始惑星系円盤や系外惑星系の観測によって実証論的にアプローチしていくこ

とだ。さらに、生命の起源について、それを惑星の進化現象としてとらえ、天文学的、惑星科学的に取り組んでいくことだろう。

1 ガス円盤散逸過程の解明

ガス円盤がいつどのように散逸するかは、最終的な惑星系の姿や惑星系形成の時間スケールを制限する。円盤の高空間分解観測により、ガス・ダストの空間質量分布、温度分布、ガスの電離度を明らかにする。そして、多数の円盤の系統的観測により、どのようにしてガスが散逸するのか明らかにする。

ガス円盤からの輝線、特に純回転水素分子輝線、を検出する観測はスピッツァー (Spitzer) 望遠鏡などにより本格化し、スピカ (SPICA) などの次世代赤外線衛星によって、さまざまな年齢・質量の主星の星周円盤が観測可能になる。直接に分解して観測するには、高解像度 ($0''.1 - 0''.01$ 以上) が必要とされ、単一鏡スペース赤外線望遠鏡では一般には困難である。限られた輝線に対しては、地上超大口径望遠鏡 (JELT) あるいは地上干渉計による赤外線観測も可能である。しかし、解像度・感度を総合すると、アルマ (ALMA) 望遠鏡によるサブミリ波・ミリ波の観測が近未来では最も有効であると期待される。

2 ダスト成長過程の解明

ダストからの微惑星形成を明らかにする。ダスト円盤の構造を遠赤外線による高分解能撮像観測や近赤外線域の高分散分光観測から明らかにする。さらに円盤内でのダストの循環/蒸発過程を解明するため、磁場の関与した星・円盤境界層を分光・偏光観測から明らかにする。そして光学観測からダスト・アグリゲートの物性を引き出す。

ガス円盤の場合と同様に、スペース赤外線観測への期待は大きい。また、ダスト円盤を散乱で観測する場合、系外惑星探査衛星 (JTPF) のような可視光における高解像度観測は非常に有効である。さらに、シリケートや氷などの代表的なダストフィーチャーは地上からも観測可能なため、地上超大口径を生かした高解像度赤外線観測あるいは高分散赤外線分光観測あるいは偏光観測はこの分野に不可欠である。

3 星周円盤化学の統一的理解

星周円盤の化学進化を明らかにする。古典的 T タウリ型星の円盤、弱輝線 T タウリ型星円盤、デブリ円盤などの星周円盤の密度分布、温度構造、ダスト進化、ガス進化を高感度、高空間分解能のダスト連続波観測と水素分子 (H_2)、一酸化炭素分子 (CO) およびその同位体の高空間分解、多輝線観測を組み合わせる。なるべく多様なフィーチャーをとらえるために、ALMA による観測とスペース赤外線・地上超大口径による観測は相補的・不可欠である。

4 惑星によるギャップ形成の理解

木星型惑星形成の兆候である原始惑星系円盤のギャップを観測する。ギャップ幅と惑星質量が独立に観測されれば、円盤の粘性率に制限を与えることができる。また、惑星質量が小さければ、ギャップ形成の最低惑星質量に制限 (上限) を付けられる。さらに、ギャップ幅を決めるメカニズムに制限が付けられる。スペクトルエネルギー分布 (SED) による間接的観測を超えて、円盤ギャップを直接観測するためには、高解像度撮像観測が不可欠である。スペース可視光あるいは地上超大口径あるいは ALMA による観測が必須となるだろう。

5 地球型惑星初期進化の観測的解明

さまざまな形成段階の地球型惑星 (大気組成、表面組成など) とその周囲環境を観測することによって、地球型惑星の大気と表面の進化を観測的に描き出す。地球型惑星の撮像・分光に特化した高コントラストスペース望遠鏡 (可視光または赤外線) の実現が必要である。

6 系外惑星物理学の展開

系外惑星の直接観測により、系外惑星の物理量を明らかにする。惑星の扁平率、自転、組成、衛星・リングの有無、磁場などの情報を取得する。木星型あるいは地球型惑星の撮像・分光に特化した高コントラストスペース望遠鏡 (可視光または赤外線) の実現が必要である。

7 中心星と惑星系の関係の統一的理解

系統的な観測によって惑星系の構造の中心星の質量、金属量、進化段階への依存性を明らかにする。また、連星系であるか、星団内にあるか、さらに銀河環境への依存についても明らかにする。この分野は8 – 10m クラスを含む既存の望遠鏡の有効活用が重要と思われる。

8 太陽系最外縁部の構造の解明

50AU 以上の外縁部の天体の軌道分布と物理特性を明らかにする。専用サーベイ望遠鏡により、軌道決定されたサンプルを増やし、大局的な構造を描く。さらに大型望遠鏡により物理観測を行なう。また、外縁部天体による背景の恒星の食を利用することによって、観測をカイパーベルト天体だけでなくオールト雲にまで広げる。

9 バイオマーカー探査

系外地球型惑星で生命活動もしくは地球のような惑星の兆候を示すバイオマーカーを観測する。惑星表面に液体の水分子 (H_2O) (海)、大陸、植物などを検出する。さらに大気の組成を観測し、生命関連物質を探す。地球型惑星の撮像・分光に特化した高コントラストスペース望遠鏡 (可視光または赤外線) の実現が必要である。

テーマ	観測ターゲット	望遠鏡形態	観測モード
ガス円盤散逸過程の解明	ガス、ダスト	地上 > 8m スペース (赤外) $\geq 1\text{m}$	分光、撮像
ダスト成長過程の解明	ダスト	スペース (赤外) $\geq 1\text{m}$	分光、偏光
星周円盤化学の統一的理解	ガス、ダスト	地上 > 8m スペース (赤外) $\geq 1\text{m}$	分光
惑星によるギャップ形成の理解	ガス、ダスト	地上 > 20m スペース (可視) $\geq 8\text{m}$	撮像
地球型惑星初期進化の観測的解明	地球型惑星	スペース (可視) > 3m スペース (赤外) 干渉計	分光、撮像
系外惑星物理学の展開	木星型惑星	?	分光、撮像
中心星と惑星系の統一的理解	惑星	地上 $\sim 8\text{m}$	分光、撮像
太陽系外縁部の構造の解明	EKBO 天体、彗星	地上 4 – 8m (専用)	撮像サーベイ、分光
バイオマーカー探査	バイオマーカー	スペース (可視) > 3m スペース (赤外) 干渉計	分光、撮像

第4章 次期光学赤外線地上超大型望遠鏡

4.1 地上大型望遠鏡の科学的意義

『より暗い天体を、より高い空間分解能で観測したい』という要求はいつの時代も飽くことが無い天文学者の夢である。そのような天文学者にとって、20世紀最後の10年間はまさに夢のような時代だった。それまで50年近くも5mに据え置かれていた望遠鏡の最大口径は最新の制御技術とあいまって一挙に2倍に引き上げられ、半導体技術の進歩により1980年代には信じられないような高い量子効率の検出器が続々と開発された。これによってその前の時代に比べて観測の効率が波長を問わず、一挙に10~100倍以上に跳ね上がり、それまでは全くの謎であった宇宙の構造や銀河の誕生と進化、それに星形成の現場が次々と明らかにされていった。

また、このような最先端の観測装置を装備した口径8m以上の望遠鏡が一台だけでなく世界中で10台以上も建設され、多くの研究者が熾烈な競争を繰り広げながら様々な興味のか切り口で最先端の観測をするという時代が到来したのである。

とくに、それまではほとんど夢物語としか思われていなかった宇宙初期の再電離期の天体が発見されたり、系外惑星系の形成現場が検出されるなどの成果は、高い空間分解能と大量の光の集光ができる8mクラスの望遠鏡があって初めて可能となるものだった。しかしながら、これらの観測は我々に新たな謎を提示し始めており、それを解くにはさらに高感度、かつ高解像度の観測が望まれている。

そのための次世代地上望遠鏡として提案するのが次世代超大型望遠鏡 (Japanese Extremely Large Telescope: JELT) である。これによって現在世界最大級のすばる望遠鏡の口径8mを一気に4倍近くの30mにまで拡大し、現在では不可能な観測を一気に実現するとともに、全く新しい宇宙の描像をも明らかにできると考えている。

4.1.1 科学的背景

JELTに期待される能力は、その巨大な口径を活かした

- 補償光学 (AO) と組み合わせた超高空間分解能観測
- 多量の光子を必要とする高分散分光

がメインになると考えられる。また、次世代の宇宙望遠鏡である JWST や SPICA が行う広視野かつ長波長 (可視 ~ 遠赤外線) のサーベイ観測のフォローアップという補完的な役割も期待される。これらのことを踏まえつつ、現在の研究から予想される、JELT によるサイエンスターゲットを以下に簡単にまとめる。詳細については、第3章を見ていただきたい。個々の参照箇所は、各セクション最後に示してある。

なお注意しないといけないのは、これらの予想は実際に JELT から生み出される成果の一部にしかないだろうということである。すなわち、JELT で実現されるような観測能力の大幅な向上は歴史的に見ても必ず全く新たな発見を生み出してきた。また、建設まで最前線の研究がさらに進み、全く新しい観測対象が続々と姿を現すと予想される。

過去の例として、1980年代から90年代にかけて計画・建設された8m~10mクラスの望遠鏡の計画提案書を引合いに出しておく。たとえば、すばる望遠鏡の提案書 [1] を見返してみよう。ここであげられている重要なサイエンスは以下の通りである。

- 宇宙論モデルの決定
 - Loh & Spillar テスト
 - Hubble Diagram
 - SN Ia による q_0 の決定
 - $\theta - z$ 関係
- 暗黒物質の探査
 - 銀河団スケールの天体までの M/L (質量光度関係) の導出
 - 高赤方偏移での大規模構造の探査
- 銀河の誕生と進化
 - 原始銀河の発見 ($\text{Ly}\alpha$ 、QSO 吸収線系)
 - ハッブル系列の起源
 - 銀河系の構造と進化
- 星・惑星系の誕生
 - 星間物質の分布と性質
 - ダストの起源と性質
- 分子雲の性質
- 原始惑星系円盤の形成と進化
- 惑星系の検出
- 原始星の性質
- スターバーストの研究
- スターバーストと活動銀河核の関係
- 太陽系内惑星の性質
- 宇宙における有機物と生命の起源
- 高密度天体
 - 活動銀河核の誕生と進化
 - 活動銀河核の構造
 - 重力レンズによる宇宙論パラメータの測定
- 恒星進化と元素合成
 - 種族 III の星の探査
 - 超新星による元素合成
 - 近傍星の星振による内部構造の解明

これを見ると、現在も活発な研究が行われている分野もある程度はカバーされているが、これ以降に大幅に進展があった分野は(当然ではあるが)含まれていない。

具体的には、Lyman Break Galaxies, Extremely Red Objects(EROs), サブミリ銀河などの高赤方偏移に見られている銀河や、ガンマ線バースト、さらにはダークエネルギーなどはまだ現れていない。活動銀河核でのブラックホール質量とバルジ質量の関係も知られていなかったし、惑星系形成・進化の関連では、視線速度法による多数の系外惑星の検出おろか、Hot Jupiter のような『異形の惑星』の惑星の形成が存在することは予想されていなかった。太陽系内天体でも、EKBO のような外縁部の天体の存在は認識されていなかったのである。

4.1.2 宇宙論

基本定数の時間変化

宇宙は定常状態にあるのではなく、ビッグバンに始まって膨張を続ける時空であるということはほぼ間違いないだろう。それでは、宇宙自身の性質を決定している物理定数は常に一定なのだろうか？ これを確認することは、物理法則の根底を確かめると言う意味からも非常に重要である。

その物理定数のひとつである微細構造定数の時間変動は、キューサー吸収線系の超高精度の分光観測によって測定することが可能である。しかしながら現在の地上望遠鏡では感度が不足しており、JELT を用いることによって効率良く観測を進めることが可能になると期待される。

もしもこの値に時間変化が観測されれば、宇宙論はおろか、素粒子の基礎理論にも非常に大きなインパクトをあたえることになるだろう。(3.3.2 章)

ダークマター探査

WMAP を始めとした様々な観測によって宇宙の質量の大部分はダークマターと呼ばれる目に見えない物質が担っていることが明らかになってきているが、これらがどのような分布をしているかは未だほとんどわかっていない。

CDM の予想では、明るい銀河のまわりに数多くのダークマタークランプが存在することが予想されるが、これは中間赤外線でクエーサーの重力レンズ像を観測することで明らかにできるだろう。また、クエーサーの輝線マッピングでも同様のことが可能であろう。しかしながら、現在の 8–10m クラスの望遠鏡では中間赤外線の撮像や、分光マッピングを行うためには感度が十分ではなく、JELT の能力が存分に発揮される観測となる。(3.3.3 章)

4.1.3 活動銀河核

近傍巨大ブラックホールの質量

活動銀河核のエンジンである巨大ブラックホールがどのように形成されたか、というのは極めて重要な問題であり、これを解明するには巨大ブラックホールの質量がどのように進化してきたか、を探ることが必須となる。

これをもっとも確実に明らかにするのは、近傍銀河核で行われてきた回転曲線を求めて中心質量を算出する、というものであるが、そのためには非常に高空間分解能での分光観測が必要となる。

JELT に可視補償光学を組み合わせることによって回折限界 ($\sim 0''.003$) の空間分解能を実現できれば、我々から 300Mpc までの活動銀河核について中心ブラックホール質量を正確に測定することが可能となり、これらのブラックホールの質量降着史を明らかにしてゆくことができるだろう。(3.4.3 章)

4.1.4 銀河形成・進化

初代天体の検出とその性質の解明

宇宙でもっとも初めに生まれた天体の探索は、現在の銀河天文学の『聖杯』と言っても良い、非常に重要な研究対象である。WMAP 衛星による宇宙背景放射の偏光観測によって、これら初代天体がおそらくは赤方偏移 $z = 10 - 20$ あたりで誕生したと考えられているが、具体的にどのような天体であったかは良くわかっていない。またこの初代天体は初期宇宙の物理状態を決定し、宇宙の再電離に関わっていて銀河形成にも大きな影響をあたえていると考えられており、その重要性ははかり知れない。

これらの天体の候補天体の選出には広視野の非常に深い近赤外撮像が必要になるため、次世代のスペースによって行われると予想される。しかしながら、その同定には近赤外 K バンドに赤方偏移してくる水素の $\text{Ly}\alpha(\lambda_{\text{rest}} = 1216\text{\AA})$ やヘリウムの $\text{HeII}(\lambda_{\text{rest}} = 1640\text{\AA})$ 輝線を用いることが必要となる。また、これらの輝線は物理状態を探るのにも重要であり、JELT による観測が必須となる。(3.5.2 章)

銀河形成の現場の観測

最近の多波長観測によって、 $z = 2 - 7$ において形成途中の銀河が数多く発見されてきており、次の段階はこれら銀河の形成過程を詳細に調べることである。そのためには静止波長可視 (観測波長赤外) で、実距離にして 0.1kpc レベル (角度にして $0''.01$) の高空間分解能の観測が必要となる。しかしながら、現在の 8m 級の望遠鏡とカメラではその詳細を迫るのに十分な感度と空間分解能は達成できていない。

JELT と補償光学に赤外面分光器を組み合わせることで、これら天体内部での星やガスの運動、電離/励起状態の詳細な分布を明らかにすることが可能であろう。(3.5.3 章)

銀河形態の起源の解明

銀河が、楕円銀河 (E) からレンズ状銀河 (S0) を経て渦巻銀河 (S) へと連なる、俗に『ハッブル系列』と呼ばれる分類に乗ることは 20 世紀初頭から良く知られている。またこの系列は単にその形状だけにとどまらず、その年齢などの銀河の物理的性質も反映している。しかしながら、このような銀河の形態がどのように生じて進化してきたかに関してはいまだに良くわかっておらず、銀河進化の解明にとっても非常に重要な問題である。

最近の研究によって、どうやら赤方偏移 $z = 3 - 2$ から $z = 1$ の時代の間に形態に劇的な進化があり、現在のような銀河が形成されたことが明らかになりつつある。しかしながら、銀河の形態を調べるのには静止波長で可視光の観測が必要であるために $z > 1$ の時代を調べるのには近赤外域での観測が必須で、同時に十分に高い空間分解能が必要になる。また、面輝度は $(1+z)^4$ で減少するため、広がった構造を調べるのには非常に高い感度が要求されることになる。さらに、力学構造を調べるのに分光観測を行う必要もあるだろう。

しかしながら現在の 8-10m クラスの地上望遠鏡ではそのための感度も空間分解能も不足している。

JELT と補償光学を用いることにより、近赤外域でこれら遠方銀河を 200kpc 程度で分解してその形状を詳細に調べることが可能となり、銀河の構造の詳細を一気に明らかにできると考えられる。(3.5.4 章)

キューサー吸収線系

キューサーの吸収線系は、背景のキューサーのスペクトルに写りこんだ吸収線によって検出されるため、銀河の種となる銀河間物質の情報を無バイアスで提供できる重要な天体である。

しかしながら、観測には非常に高い分散の可視/近赤外線分光観測が要求される。そのためには大量の光子が必要で、現在の 8-10m クラスの望遠鏡で観測できるものは全天でも明るいキューサーに限られてしまい、限られた情報しか得られていない。

JELT を用いることによって観測が可能な天体は一気に一桁以上増加すると期待され、銀河形成の初期段階を詳細に探ることが可能になると期待される。(3.5.6 章)

4.1.5 銀河系、局所銀河

銀河系の形成と進化

我々の住む銀河系はどのようにして形成され、進化してきたのだろうか？ それを調べるためには、年齢の古い(金属量の少ない)星や星団、それに年齢が古いと考えられている厚い円盤やバルジの星を調べる必要がある。すなわちこのような星の等級や色、金属量や化学組成、それにその軌道を調べることによって銀河系の進化を明らかにしてゆけると考えられる。

しかし、このようなデータは太陽近傍の星に限られている。これは現在の位置観測衛星や地上望遠鏡の感度が十分でないためである。しかしながら現在計画されている各種の位置観測衛星によって、十分遠方までの等級と色、それに軌道が明らかになる。これに、JELT を用いて金属量や化学組成の情報を付け加えることによって、我々銀河系の形成と進化を明らかにすることができるだろう。(3.6.2 章)

矮小銀河の形成史

現在の標準宇宙論の『冷たい暗黒物質』のモデルでは、銀河はまず小さな矮小銀河が形成され、その衝突合体によって大きな銀河が形成されていったと考えられている。このため、矮小銀河の形成進化をあきらかにすれば、この冷たい暗黒物質のモデルを検証することができる。現在、これら矮小銀河の個々の星を分解し、その色等級図を描き出すことによって星形成史を明らかにする手法で研究が進められている。

しかしながら現在観測可能な矮小銀河は銀河系近傍のものに限られており、その数は極めて限られている。また、個々の銀河の個性が強く、矮小銀河としての特徴を見出すまでにいたっていない。

JELT に可視用補償光学を組み合わせて $0''.01$ を切る分解能を達成することによって、おとめ座銀河団までの距離の矮小銀河の観測が一気に可能となり、大量のサンプルを用いることによって矮小銀河の星形成史を明らかにすることが可能となるだろう。(3.6.3 章)

楕円銀河の星形成史の解明

楕円銀河がどのように誕生し、進化をしてきたのかは良くわかっていない。楕円銀河自身も多様であり、それを説明する様々なシナリオが存在している。また、銀河系近傍には明るい楕円銀河は存在せず、個々の星の色等級図を用いた星形成史も明らかではない。

上でも述べたように JELT を用いることによって、おとめ座銀河団までの距離の銀河の星を分解することが可能となる。これによって多数の楕円銀河を星に分解し、それらの色等級図を描くことが可能になるだろう。それによって、楕円銀河の星形成史と現在観測されている観測量との直接比較が可能となり、楕円銀河の形成と進化が明らかにできるだろう。(3.6.4 章)

4.1.6 恒星

大質量星形成

大質量星は、星形成の中であって数はほんの一部ではあるものの非常に強い紫外輻射や恒星風を出すために周囲の環境への影響は非常に大きい。そのために分子雲中での星・星団形成を研究する上で重要な存在である。しかしながら大質量星の形成領域は太陽近傍には非常に少なく、その研究は進んでいない。

JELT を用いることによって遠方の大質量星形成領域をカバーでき、サンプルを増やすことによって大質量星形成の現場を明らかにしてゆくことができるだろう。(3.7.2 章)

晩期型星の質量放出

小中質量星はその進化の最終段階、特に AGB 期において激しい質量放出を行う。この晩期型星の質量放出の量は銀河系に放出される物質の大部分を担っており、物質の循環や銀河系の重元素汚染の進行を研究する上でも非常に重要である。しかしながらこの質量放出の理論的研究はまだあまり進んでおらず、そのメカニズムは良くわかっていない。

そこでまず、この質量放出の現場を直接観測する必要がある。それに必要な空間分解能は $0''.01$ 程度であり、JELT に補償光学を組み合わせることによって十分に達成できるだろう。(3.7.4 章)

恒星の元素組成

宇宙の第一世代の星 (種族 III の星) は、宇宙の物質進化だけでなく、銀河形成や再電離などの宇宙の歴史を探る上で非常に重要な存在である。特に種族 III の星が現在も存在しているか、は興味深いテーマであり、現在も極低金属星の探査が続けられている。しかしながらこのような星の存在数は非常に少なく、暗い星の高分散分光を行う必要があるために現在の 8–10m クラスの観測能力の限界に達しつつある。

JELT の非常に大きな集光能力によってこの限界を打ち破ることが可能となり、より暗い天体の高い精度のスペクトルを得ることによって極低金属星の探査が一気に進むと期待される。(3.7.5 章)

4.2 次世代地上大型望遠鏡ワーキンググループ

次世代地上大型望遠鏡検討ワーキンググループ¹ は約2年間に及ぶ検討の結果、その次世代超大型望遠鏡 (JELT: Japan Extremely Large Telescope) の構想をとりまとめた。その基本仕様を表4.1に示す。JELT構想は、その予算規模がこれまでの地上望遠鏡計画の規模を上回るものとなるため、国際協力による実現をも、その視野に入れてさらなる具体化を図る必要がある。このため、同様の構想検討を開始している米欧グループとさまざまな機会をとらえて情報交換を行い、可能な協力のあり方について構想段階、基礎開発段階から協議を始めている。

本WGでは、特に将来の国際協力での建設の場合重要となる、日本独自の新技術の開発に力を入れるべく、国内関連技術のサーベイを行い、次世代望遠鏡の実現において重要な基礎開発となる分野で、他国に例を見ないいくつかの新技術に着目し、その実用化の可能性の具体的検討を開始している。表4.2にWGが2005年1月の時点で取り組んでいる研究開発項目の一覧を掲げる。これらの開発の個々の項目については、以下に具体的に述べる。

4.3 JELT 構想・基本仕様と光学系

4.3.1 基本仕様

表4.1に地上班で検討している30m望遠鏡構想の基本仕様を示す。この仕様はサイエンス班の検討を受け、科学観測の実行に必要な機能を備える望遠鏡としてその実現性を技術的に検討するため設定したものである。なお、この設定は、今後の検討、および国際協力の枠組みに応じて変更の可能性があるものである。

M1	F/1.5, 分割鏡方式 30m 主鏡
セグメント鏡材	CFRP/ゼロ膨張ガラス/ゼロ膨張セラミック
光学系	三非球面鏡系
焦点	ナスミス焦点 ×2 または 4
視野	半径 10 分角
波長域	可視光から中間赤外線
観測装置	光学分光器、赤外線分光器, カメラ
ドーム	半径 50m

表 4.1: 次世代超大型望遠鏡 (JELT) 構想の基本仕様

表4.2には現在、進行中の開発・検討項目とその取り組みグループを示す。

4.3.2 光学系

光学系として副鏡を低空乱流層に共役の位置に配置できるグレゴリアン光学系も有力であるが、鏡筒が長くなりドームが大きくなるため、以下で述べる新しい発想の三非球面光学系を基本に検討を進めている。

三非球面光学系

図4.1に三枚の非球面鏡を用いることにより視野半径10分角にわたり実用上無収差で平坦な焦点面を与える光学系配置を掲げる[2]。この光学系の構成要素鏡を表4.3に示す。JASMINEで採用するKorsch系を基礎とする三非球面光学系と異なり、第三非球面鏡の倍率がほぼ1であり、広い視野を確保できる。

主鏡は口径比F/1.5、直径30mの楕円面鏡で1080枚の六角セグメント鏡から構成される。口径4mの双曲面副鏡と口径4mの平面折り曲げ第三鏡および第四鏡により、通常のナスミス焦点と垂直な方向に仮想像面ができるが、この像面を第五鏡となる三枚目の直径4m楕円面鏡で再結像して最終像面とする。

¹<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/elt/>

開発検討項目	検討グループ
カーボン強化プラスチック (CFRP) 鏡	三菱電機
ゼロ膨張セラミック鏡	太平洋セメント/国立天文台
超精密研削加工装置	ナガセ インテグレックス
レーザーガイド補償光学系	国立天文台
軽量トラス構造	名古屋大学
セグメント支持調整機構	京都大学, 三菱電機
光学設計	成相、家
直駆動モーター	三菱電機

表 4.2: 次世代超大型望遠鏡 (JELT) に関する基礎開発

二鏡系により生じる最初の仮想像面と最終像面とは基本的に同じ位置にできるため折り返された光線が重なるが、鏡像として視野が反転するため、円形視野の半分だけを使うことにすれば光線の重なりを避けることができる。第四鏡をもう一枚設置して、ナスミスプラットフォームの反対側も使えば、半円形視野が片方のナスミス焦点で二つ設置することができ、視野直径 10 分角のサンプリングが可能となる。

結像性能

これらの視野は実寸で半径 1m 級の大きさとなるので、各焦点に複数の観測装置を展開することができよう。将来的に装置が増えた場合には第三鏡で反対側のナスミスプラットフォームにも焦点を設け、装置を展開することができる。

厳密には光軸中心ではビームが二分するため、最大で光量の 50% がケラれることになるが、視野中心から、回折限界分だけ、実質的には 1mm 以上、離れればケラレ無しとなるので、実用的にはケラレなし光学系と考えて差し支えない。

図 4.3 に光線追跡で求めたスポット図を示す。光軸から半径 8 分角にわたるまで、スポットの拡がり は可視光での回折限界以内に収まることが分かる。

図 4.2 はこの光学系を三次元展開した CAD 図面である。ナスミスプラットフォーム上での、第四鏡から第六鏡、および最終焦点面の配置の拡大図を 図 4.4 に示す。

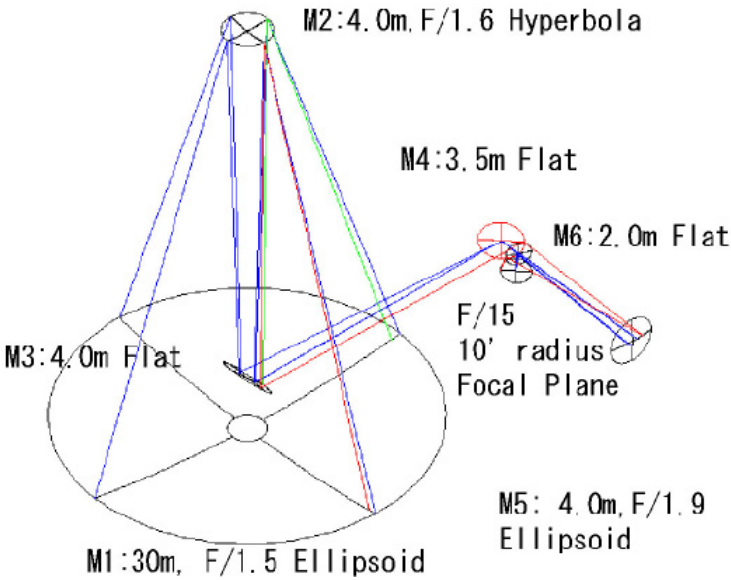


図 4.1: 三非球面 30m JELT 望遠鏡の光学系立体配置図

M1	30m 主鏡	楕円面鏡
M2	4m 副鏡	双曲面鏡
M3	不動点斜鏡 (主鏡上)	平面斜鏡
M4	ナスミス室折曲鏡	平面斜鏡
M5	4m 再結像鏡	楕円面鏡
M6	焦点取り出し鏡	平面斜鏡
FP	最終焦点面	

表 4.3: JELT 光学系構成要素

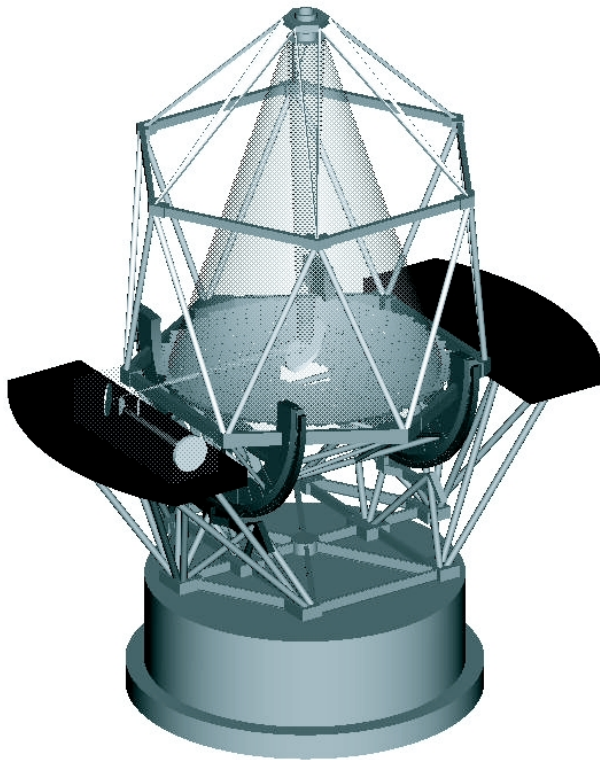


図 4.2: 30m JELT 光学系の CAD 配置図

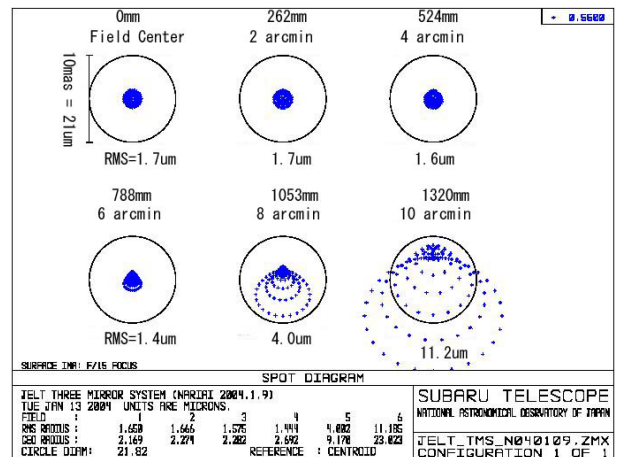


図 4.3: 三非球面光学系 JELT の焦点面における光線スポット図。視野半径 8 分角に至るまで 30m 望遠鏡の回折限界内にスポットが収まっていることに注目。

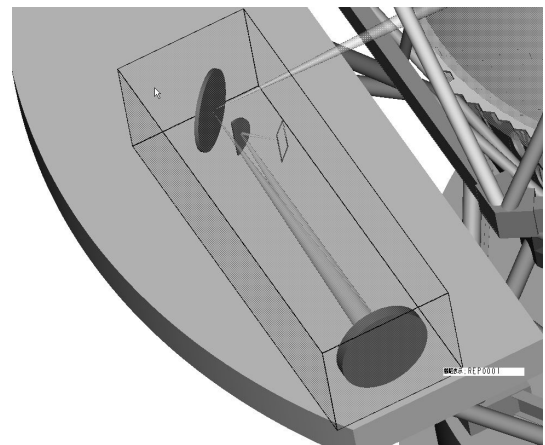


図 4.4: ナスミスプラットフォーム上の第四-第六鏡の配置図。

周辺光学系

望遠鏡架台と鏡筒構造は軽量化トラスで現在の 8m 級望遠鏡の構造の自然な拡張として組み上げることができる。口径 30m 望遠鏡の回折限界は 8m 級望遠鏡の回折限界より $1/3.75$ に小さくなることと、超高度補償光学系が実現するとこの超高解像度での観測が可能となることを考えると、大気分散補償光学系の仕様は現存の 8m 級望遠鏡用の大気分散補正光学系に比べて格段に厳しいものになるため、この検討も平行して進めている。

4.4 望遠鏡構造

4.4.1 全体構造の基礎検討

望遠鏡に限らず機械構造物は重力方向の変化により歪みを生じる。この歪みをなくすためには、構造物を非常に強固なものにする必要があるが、一般に強固にすればするほど重量を増してしまい、下手な構造物を作成すると逆に歪みを増やすだけになってしまう。特に、望遠鏡においては、天体の動きにあわせて望遠鏡を追尾させるため観測中は常に重力方向が変化するため、口径が大型化するにつれて望遠鏡自体の重量が増し駆動系の設計が非常に困難になることがある。

このような変形に対応するため、一般的に望遠鏡構造にはセルリエ・トラス構造が採用されている。これは、望遠鏡を傾けたときに生じる歪み量を積極的に利用することにより望遠鏡構造体の重量を軽くするための構造である。すなわち、架台から高度軸を通して支持されている円筒形 (または多角形) の断面をもつ強固な構造物であるセンターセクションに対して、望遠鏡を傾けたときに生じる主鏡位置の横ずれ量と、副鏡等を含めたすべてのトップリング全体の横ずれ量が同じ量になるように設計することによって実現される。

具体的にはセンターセクションに対して、円筒形の強固な構造物であるトップリング (筒頂外環) が三角形の組み合わされたトラス構造 (セルリエ・トラス) で保持されている。また、主焦点補正光学系や副鏡は、スパイダーと呼ばれる板状・棒状構造物により張力を加えてトップリングから吊り下げられている。副鏡等を含めたトップリング全体の重心面とセンターセクションを連結しているセルリエ・トラスは、滑節により接続されているため外力によって梁には曲げモーメントは生じない。そのため望遠鏡を傾けたときに、トップリングは軸線方向に垂直のまま横方向に平行移動する。主鏡も同様のセルリエ・トラス構造によりセンターセクションに固定されており、望遠鏡を傾けたときに横方向に平行移動するが、この平行移動量がトップリングと同じになるように設計されている。

このように、セルリエ・トラス構造は望遠鏡を傾けたときに生じる歪み量を積極的に利用する構造である。しかし、トップリングの重量を主鏡保持部を含めた全ての構造物とバランスを取るよう設計されるため、トップリングが非常に重くなってしまう。そのため、セルリエ・トラス構造を用いて超大型望遠鏡を建設するとしても望遠鏡自体が非常に重くなってしまうために、せいぜい口径 10m 程度が限界である。

そこで、野辺山の 45m 電波望遠鏡に見られるようにセルリエ・トラス構造を用いない望遠鏡を参考に超大型望遠鏡の構造の可能性について検討してみる。この望遠鏡で主鏡はトラス構造に似た構造で支持されており、望遠鏡自体はセンター・セクションではなく主鏡下部に取り付けられている R 状のレール構造で支持されている。そのため、望遠鏡を傾けた時に主鏡の横ずれはほとんど無視できる。

一方、電波望遠鏡ではトップリング全体は非常に軽く横ずれの量は無視できたが、光学・赤外線望遠鏡では副鏡等を含めたトップリング全体の重量が重い横ずれ量を無視することができない。そこで、トップリング全体の重量は増すが、副鏡自体が横方向に動くような構造にしておけば、セルリエ・トラス構造を用いなくても性能のよい望遠鏡を作成することができる。

このような概念を元に作成された望遠鏡の概念図が図 4.5 である。

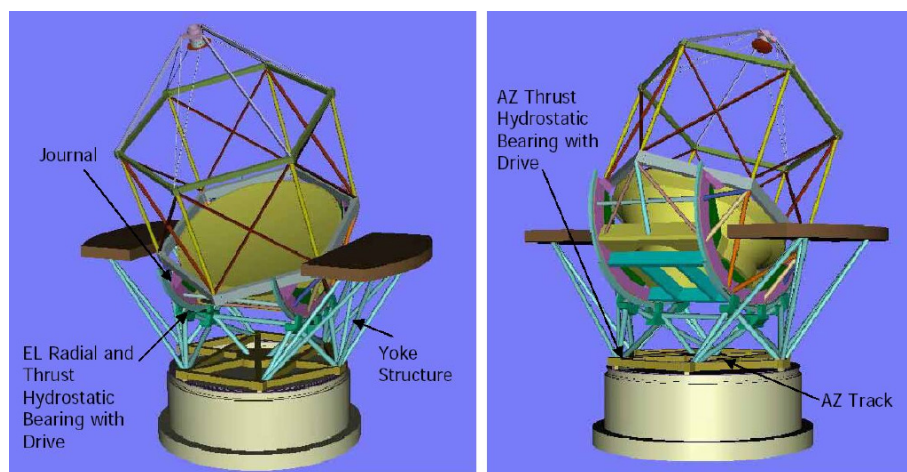


図 4.5: 望遠鏡の構造 (カラー 8 ページ)

4.4.2 固有振動数

望遠鏡が大型化するにつれて望遠鏡自体の重量が増すので、望遠鏡の固有振動数は小さくなる。図 4.6 は鏡筒長さと固有振動数の関係である。

4.4.3 高度軸受部・水平回転部

軸受の選定 ころがり軸受 (Rolling Bearing) は、大きな加重に対して回転運動をスムーズ、かつ精度良く駆動できる。そのため、小型の望遠鏡においては高度軸・経緯度軸の駆動部にころがり軸受を用いている (図 4.8)。

しかし、現在使われている最大径のころがり軸受は、トンネル掘削用の直径 7m の軸受程度で、これよりも大きなころがり軸受を作ることはほとんど不可能であるし、軸受自体が非常に重くなる。そのため、大型望遠鏡ではころがり軸受ではなく、静圧軸受け (hydrostatic bearing) が用いられており、日本の大型望遠鏡であるすばる望遠鏡でも静圧軸受を用いている。本計画においても、すばる望遠鏡と同じような静圧軸受を用いた駆動方法を考える。

図 4.7 は、静圧軸受の様子を表している [4]。静圧軸受によるサポートのギャップ量 (h) は、式 4.1 で与えられる。

$$h = \sqrt[3]{12 \frac{Q\eta l}{b\Delta p}} \quad (4.1)$$

ここで、 Q : 油流量, η : 油の力学粘性, Δp : 間隙における圧力損失, b : すきま, $b = 2(a_1 + a_2)$ である。

一方、ESO の 100m 望遠鏡計画である OWL 計画では、静圧軸受ではなく、ボギー台車²の使用を考えている。このボギー台車の利点は、(1) ベースレールの平面度が悪くても、自分自身で長さを変えられるため平面度の補正を行うことができること、(2) 従来の静圧軸受では望遠鏡の駆動は別途モータを用意して行うが、ボギー台車ではそれ自体で駆動をすることも出来る、の二点である。このボギー台車の手法はまだ具体的に使われたことがなく、技術的にも非常に複雑であり、下手に使うとかえって使い物にならない可能性があるので、JELT では使用しない。

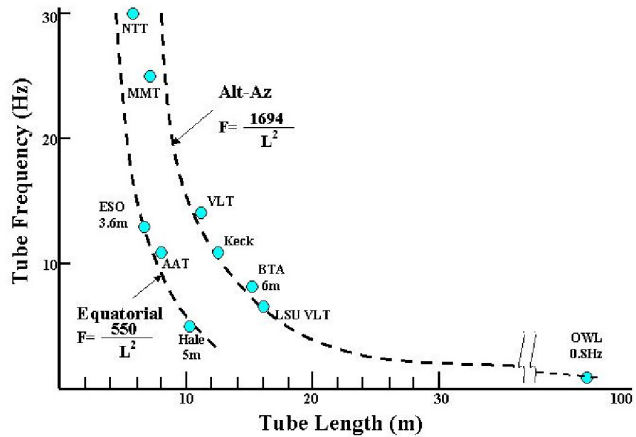


図 4.6: 望遠鏡のチューブの長さに対する固有振動数の関係 [4]

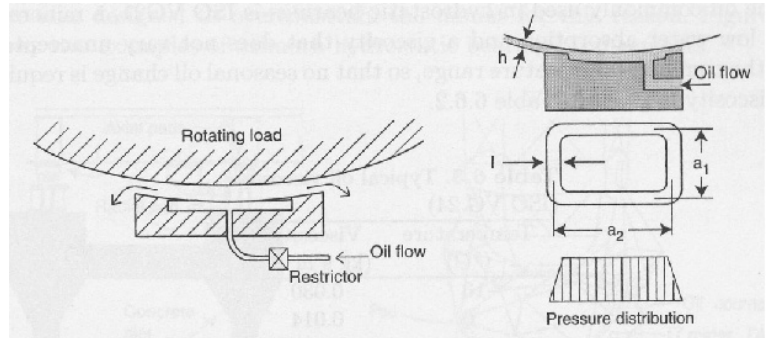


図 4.7: 静圧軸受の概念図

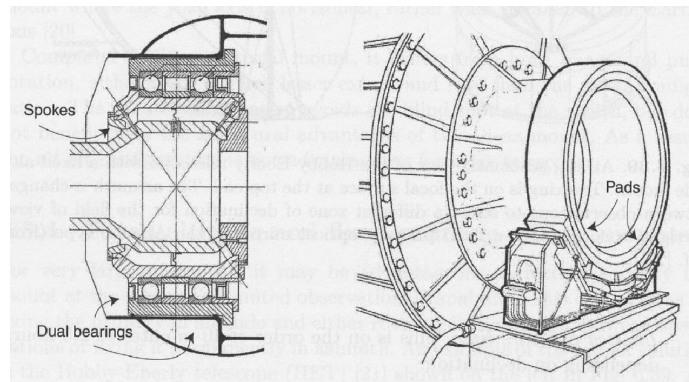


図 4.8: ころがり軸受の概念図 (左) と静圧軸受 (右)

²merging driver and bearing function into friction type mechanical devices

4.4.4 JELT 全体構造

表 4.4 に JELT 望遠鏡構造に対する要求仕様と設計値を示す。

表 4.4: JELT 望遠鏡構造に対する要求仕様と設計値

項目	要求仕様値	設計値
有効口径	20m 以上 (ノミナル 30m)	30m
セグメント径	–	対角 1m (6 角形) または扇形
光学系	グレゴリアン (もしくはカセグレン)	3 枚非球面鏡ナスミス焦点 $\times 2$
観測装置	カメラ, 分光器 (可視, 赤外各 1)	ナスミス焦点 $\times 2$
視野 (非ブロック視野)	5 分角以上	5 分角
視野 (補償光学視野)	1 分角以上@ $2\mu\text{m}$	1 分角 @ $2\mu\text{m}$
使用波長域	$0.39 - 5\mu\text{m}$	$0.39 - 5\mu\text{m}$
駆動範囲	高度角 $20^\circ - 88^\circ$	高度角 $20^\circ - 88^\circ$ (性能保証範囲)

また、構造設計例と望遠鏡概観図を図 4.9–4.17 に示し、その特長を以下に列挙する。

高度軸受部 剛性の高いホースシューを両側に配置し、ミラーセルの自重変形を抑えると同時に、高度軸周りに高剛性を保つ構成とした。

ホースシューの円筒面左右各々 2 点、合計 4 点を静圧軸受パッドでラジアル方向に支える。スラスト方向は、片側のホースシューを 2 個の静圧軸受パッドで挟み拘束する。このような支持方式により 5 自由度を拘束し、過拘束の無い支持を実現している。

今後、ホースシューとセルの重量配分を検討し、軽量化をさらに進める。

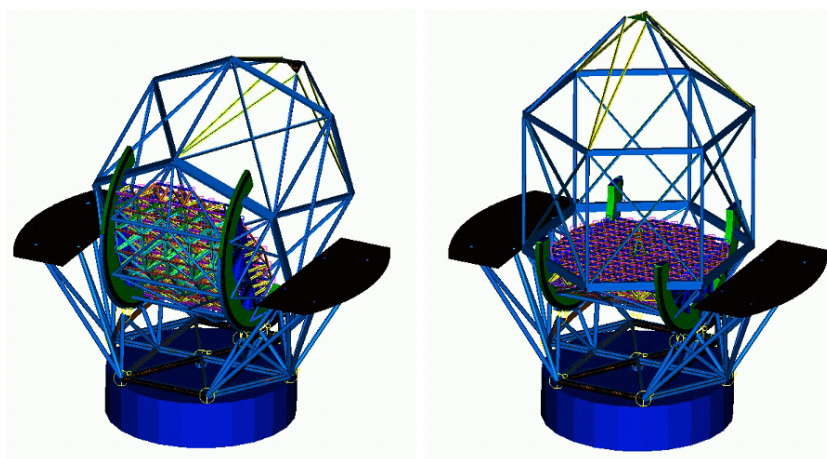


図 4.9: 望遠鏡概観図 (左 : 高度 25° 、右 : 高度 90°)

主鏡セル 主鏡セルの最大の課題は、鏡の支持点数が膨大となることである。支持点数は、対角 1m の六角鏡で 1 枚につき 3 点、鏡枚数 1000 枚で合計 3000 点となる。この課題を解決するひとつの方法として、米国の TMT 計画でクラスターと呼ばれているような複数枚の鏡をユニット化する手法が考えられる。クラスター構造を用いたとして、1 クラスターを構成する鏡枚数を 19 枚にしても 50 セットが必要となり、一つのクラスターを 3 点支持する場合、その支持点数は 150 個に及ぶ。この 150 点をいかに支えるかであるが、TMT 計画で採用されている 6 角形のパターンで支持する方法は構造上高い剛性を得るには適していない。そこで、主鏡を光軸周りに回転し、基盤目状の部材配置となるセル構造を実現し、少ない部材で高剛性を実現した。

今後の検討課題は、基盤目状の構造物とホースシューを如何に最適な構造で接合するかである。

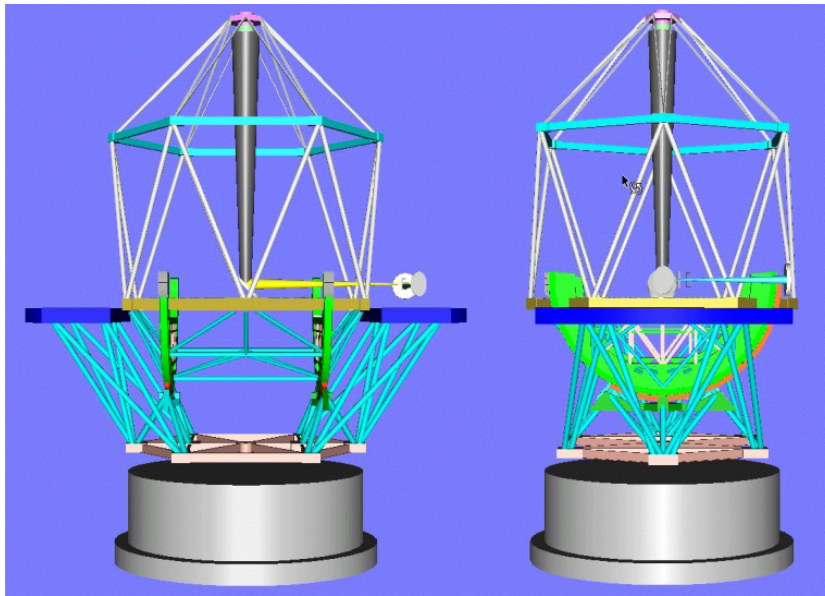


図 4.10: 望遠鏡側面概観図 (カラー 8 ページ)

鏡筒部 上部鏡筒構造については、一般的に行われているように一部をワイヤーで引っ張るような構造を用いず、自立して支持できる構造とした。この場合、スパイダーの断面形状を楕円としてケラレの最小化と高剛性化を両立させることが可能となる。

水平回転部 水平回転部は6点のスラスト静圧軸受パッドで支持され、中央に設けられたラジアル静圧軸受パッドで面内に拘束される。ここで、スラスト静圧軸受パッドは基礎に取り付けられたレール上面を滑る構造とする。一方エンコーダについては、レールの外あるいは内側に

磁石を取り付け、架台側にコイルアセンブリを設け、速度検出用テープ式エンコーダをレール側に取りつける。エンコーダのスキニングヘッドの取り付けられている架台とのギャップの、温度膨張差等による変動対策としてギャップ保持機構を設けることを検討する。また、駆動点と検出点を近づけ (いわゆるコロケーションを実現し) 制御帯域を高く取れるような配置とする。

ヨーク構造 すばる望遠鏡のヨーク構造を流用する。ナスマステーブル及び高度軸を支えるヨーク構造は、水平回転レール上のヘキサトラス構造体上に設けられた2組のトライポッドトラスにより構成される。この構造により、6つの節点が水平回転レールのうねりに追従して波打ったとしても高度軸スラスト圧への影響が少なく、また望遠鏡の指向軸変動を抑制することも可能である。以下の特長が挙げられる。

1. 高剛性

- 荷重が力点から作用点にダイレクトに伝わる。
- 望遠鏡の鏡筒と架台の自重を支える力が直接かつ直線状に静圧軸受パッドに伝わる
- 静圧軸受の油膜の剛性は非常に高くこの高剛性を活かした構造となっている。

2. 最少の構成部品点数であるため、組立が容易でコストパフォーマンスが高い。

3. 水平回転レールのうねり (製作誤差、経年変化などによる) の影響を吸収できる構造である。

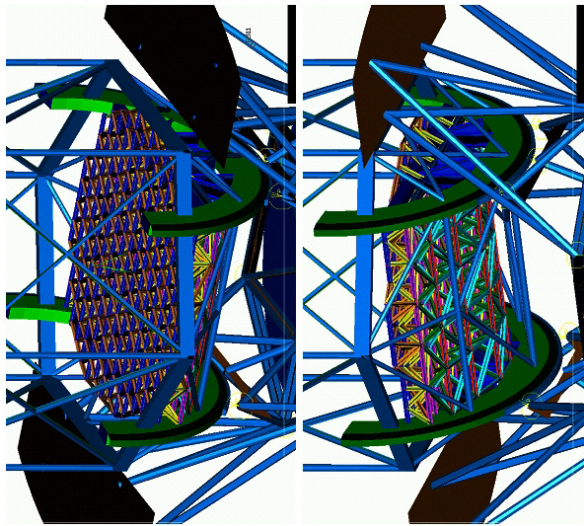


図 4.13: 主鏡セル近傍の構造概観図 (カラー 8 ページ)

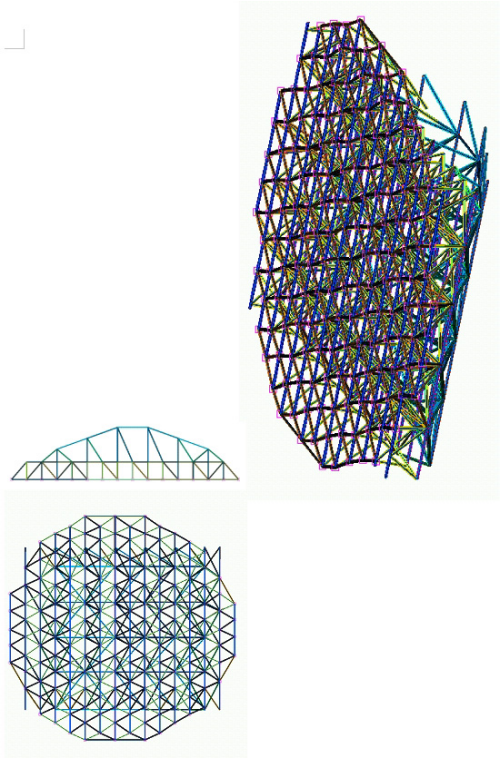


図 4.14: 主鏡セル概観図 (カラー 8 ページ)

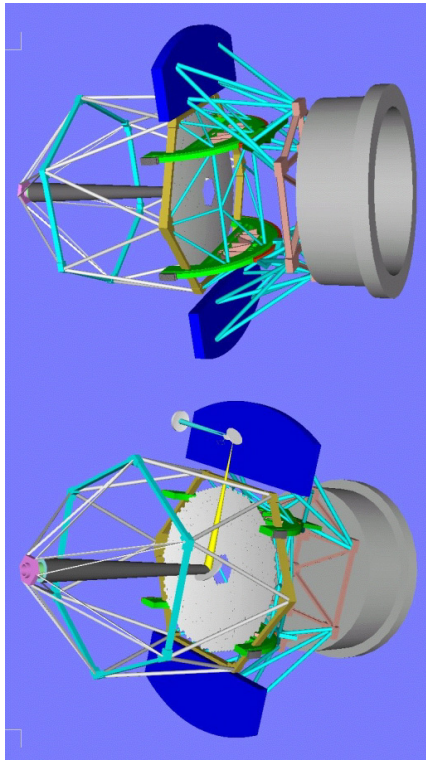


図 4.11: 望遠鏡鳥瞰・俯瞰図

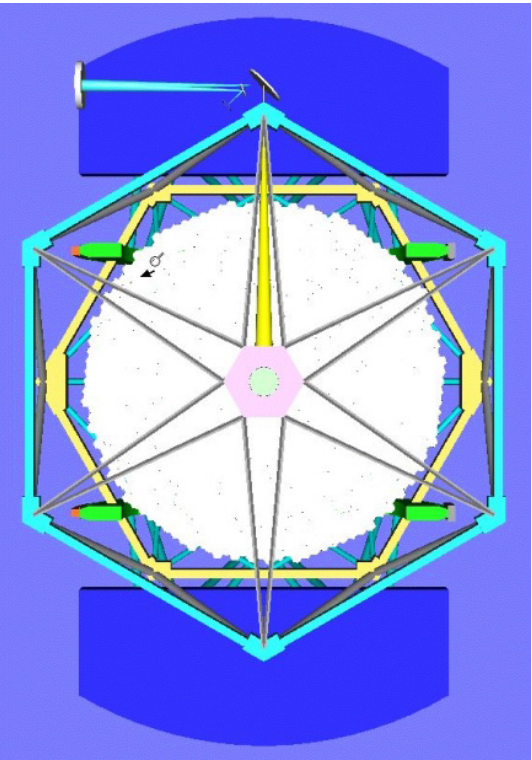


図 4.12: 望遠鏡平面図

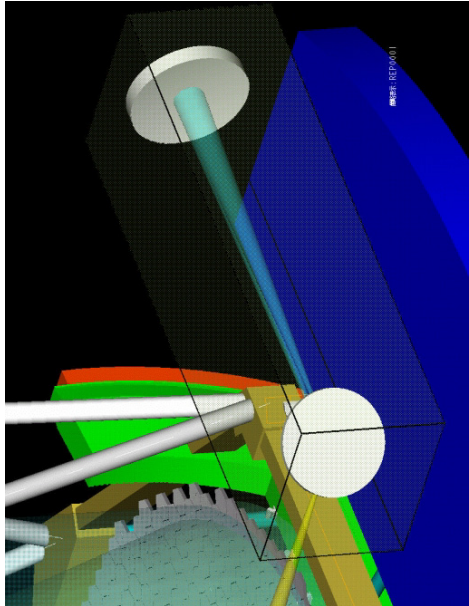


図 4.17: 焦点面近傍拡大図 3 (カラー 9 ページ)

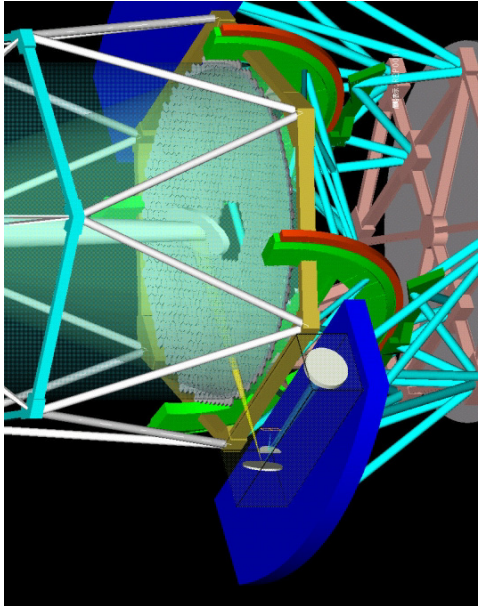


図 4.18: 望遠鏡ナスミスタ周辺図 1 (カラー 9 ページ)

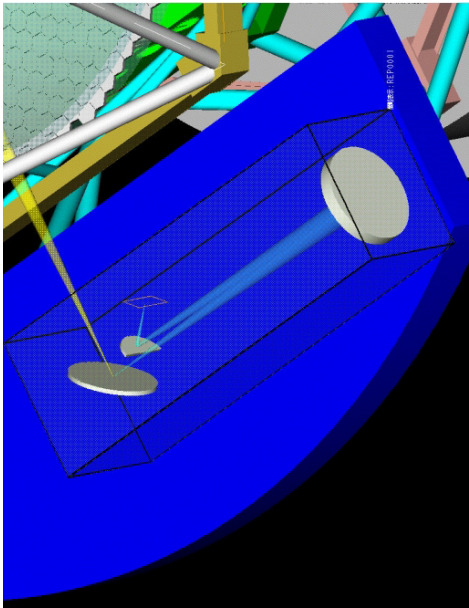


図 4.15: 焦点面近傍拡大図 1

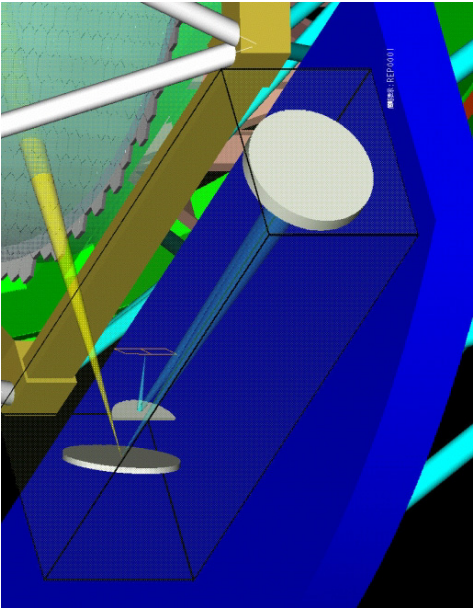


図 4.16: 焦点面近傍拡大図 2

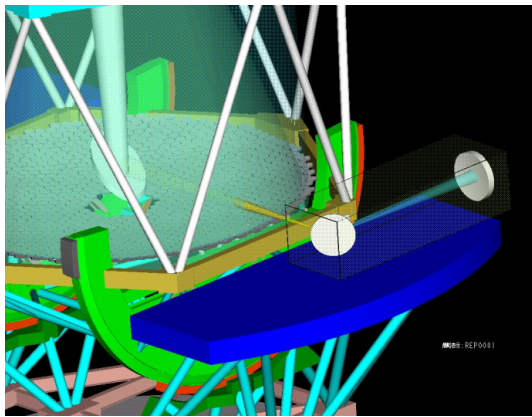


図 4.19: 望遠鏡ナスミス台周辺図 2

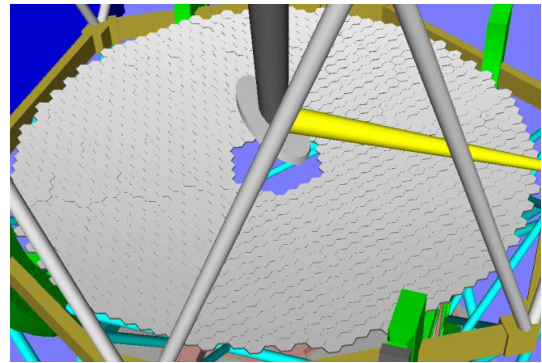


図 4.20: 第 3 鏡付近の拡大図

4.4.5 鏡筒部・架台部

簡略モデルによる固有振動数及び振動モードの検討

図 4.21 に示す解析モデルを用い、固有値解析並びに静解析 (静的加速度 $1g$ が作用する場合) を実施し、固有振動数、振動モード、自重変形を求め、基本構造の妥当性を確認した。

(1) 自重変形

静的加速度 $1g$ の条件下で変形量が最大となるのはナスミステーブルであり、その自重によりモーメントがかかるヨーク脚に最大荷重が発生する。

(2) 固有振動数と振動モード

主要部材の振動モードは、

- テーブルの並進方向、
- チューブの並進方向、
- 方位各軸 (Az 軸) 回りの回転、
- 仰角軸 (EI 軸) 回りの回転である。

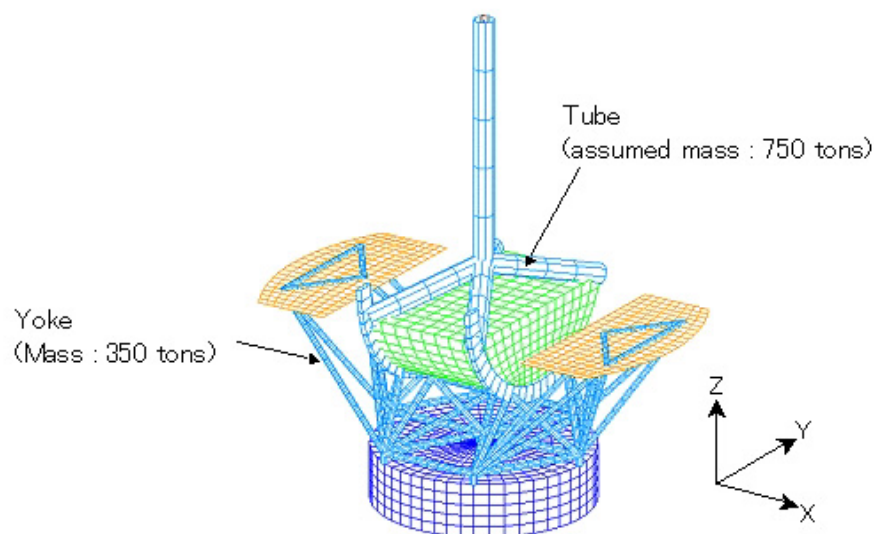


図 4.21: 固有振動数解析モデル (カラー 9 ページ)

1 次の振動モードはテーブルの並進であり、その固有振動数は2.3Hzである。また、チューブがゆれる振動モードで最も低次の固有振動数は3.2Hzであり、方位各軸回りは4.4Hz、仰角軸回りは4.5Hzとなった。

制御ループへの影響別に整理した振動モードを図4.22–4.23に示す。また、参考までに主なモードを図4.24–4.27、振動モード図を図4.28–4.32に示す。

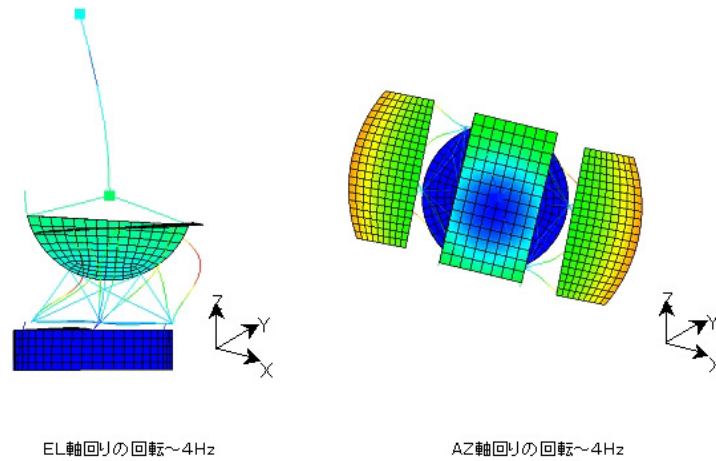


図 4.22: 制御ループに関連した固有振動数解析結果 (カラー 9 ページ)

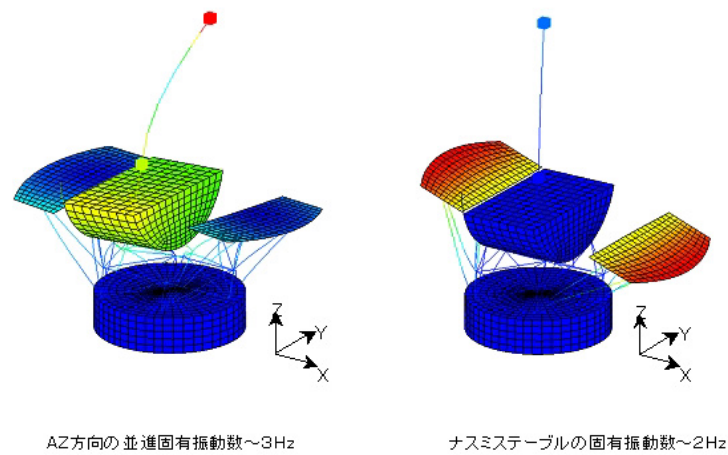


図 4.23: 制御ループに無関係な固有振動数 (カラー 10 ページ)

主要振動モード図

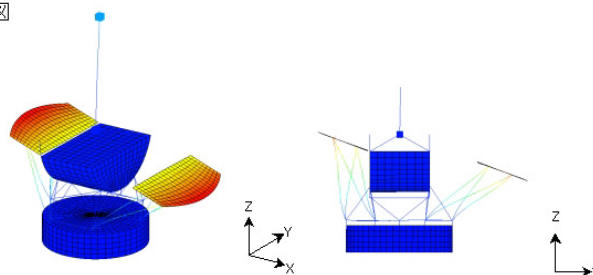


図 4.24: 主要振動モード図 (2.3Hz, テーブル並進方向振れ)

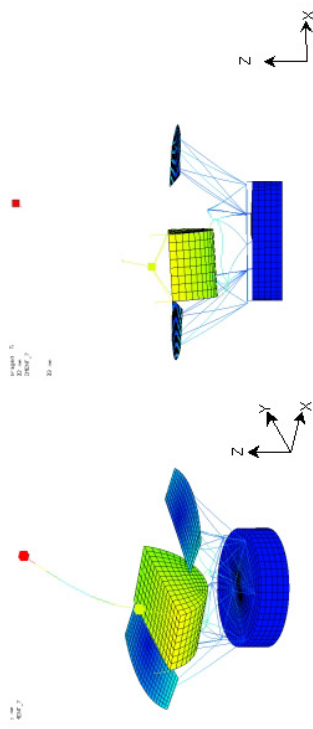


図 4.25: 主要振動モード図 (3.2Hz, チューブ並進方向振れ)

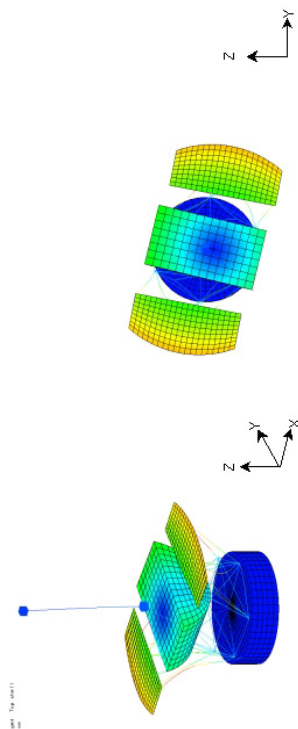


図 4.26: 主要振動モード図 (4.4Hz, 方位角軸 (AZ 軸) まわり振れ)

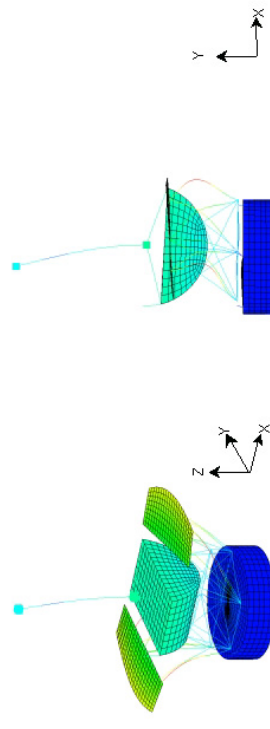


図 4.27: 主要振動モード図 (4.5Hz, 仰角軸 (EL 軸) まわり振れ)

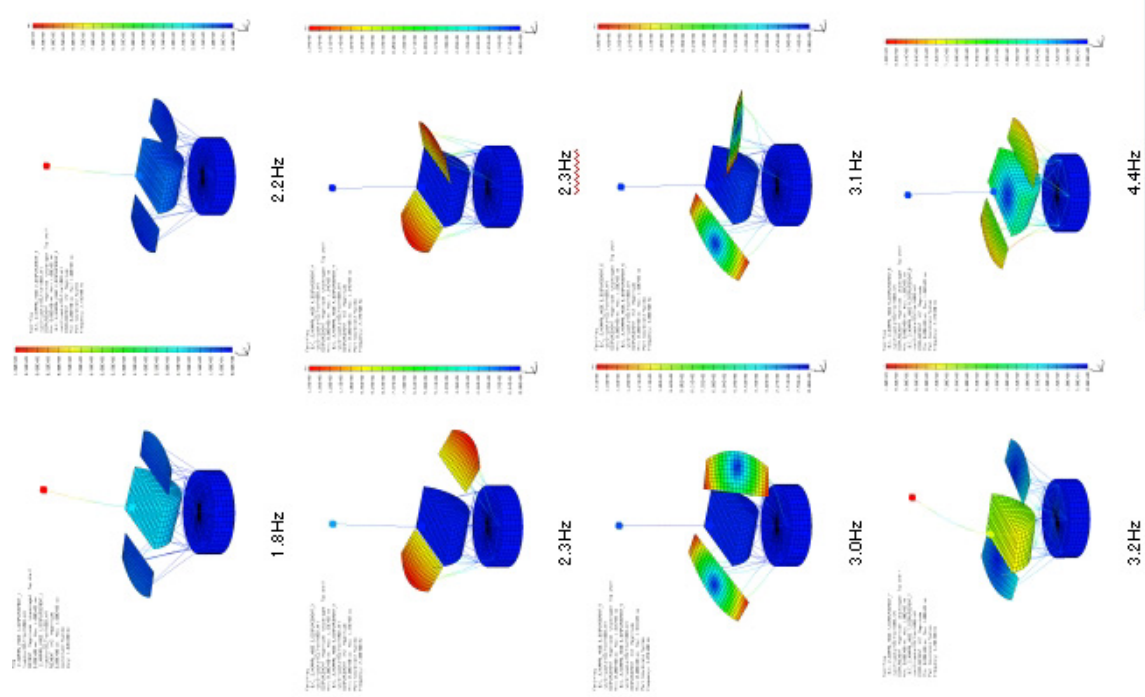


図 4.28: 振動モード図

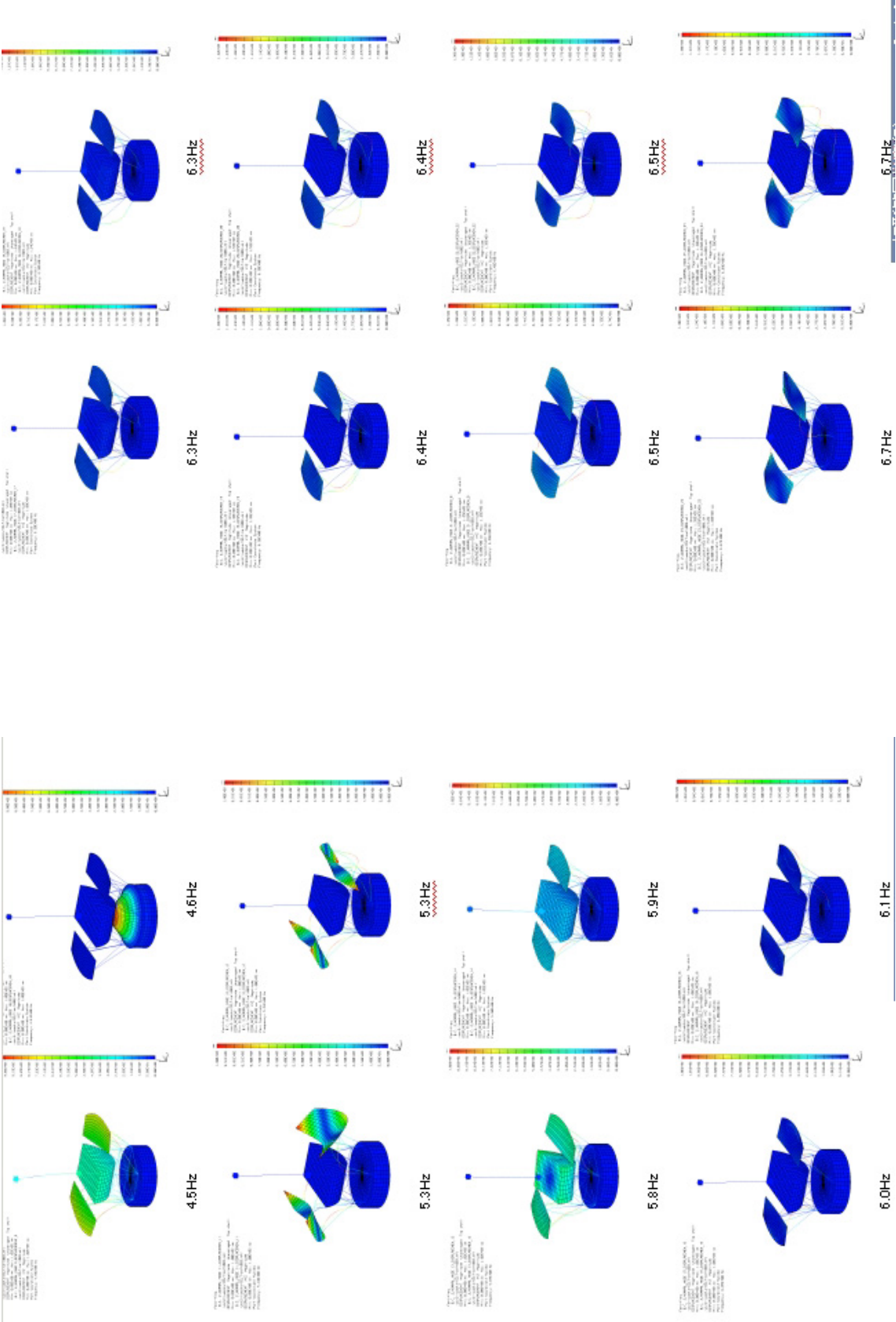


図 4.29: 振動モード図 (続き)

図 4.30: 振動モード図 (続き)

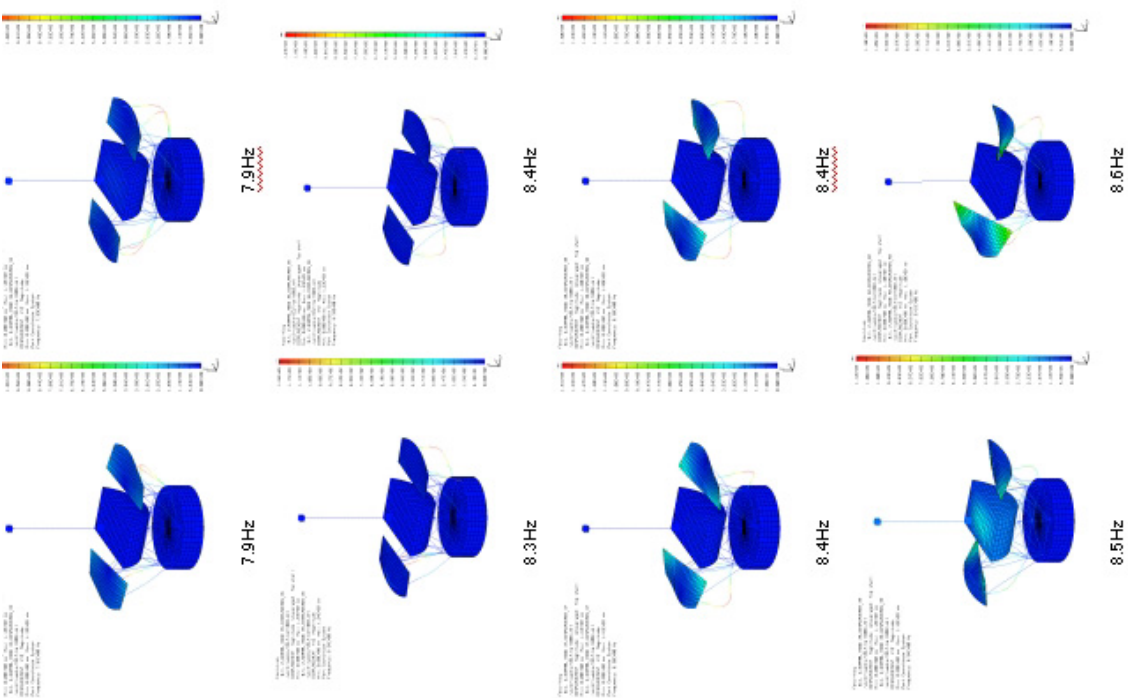


図 4.32: 振動モード図 (続き)

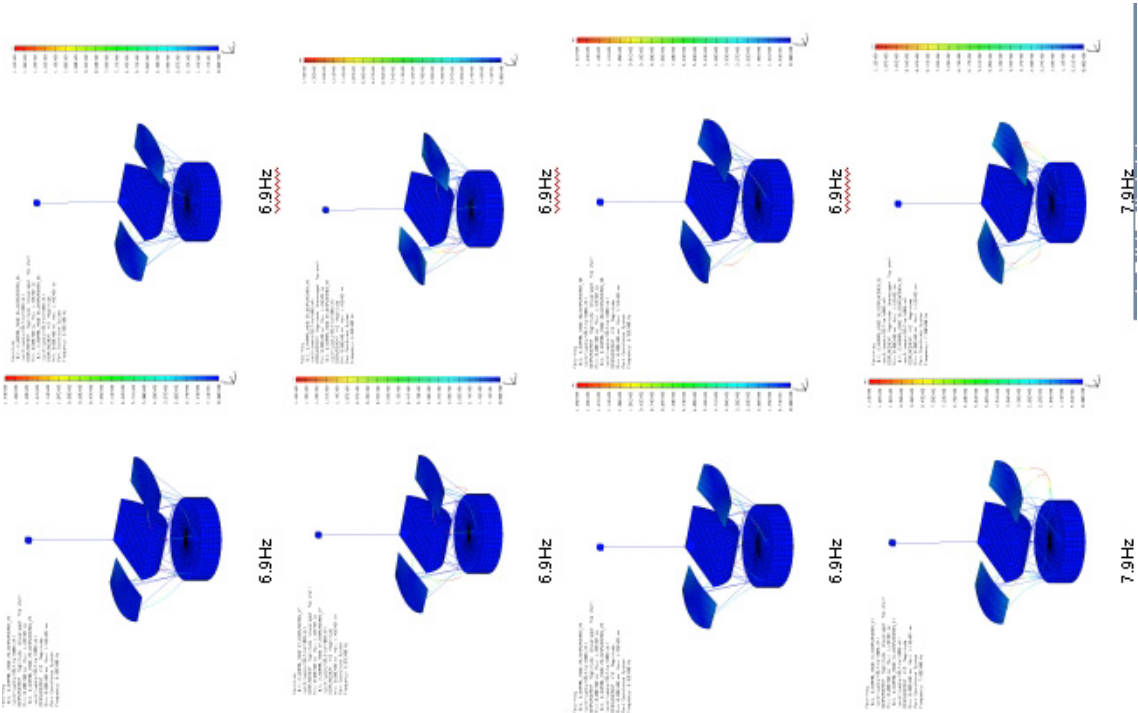


図 4.31: 振動モード図 (続き)

4.4.6 高度軸受部・水平回転部

高度軸受部

図 4.33 に高度軸受部の概念図を示す。ジャーナルは両側面と底面で静圧軸受で支えられる。側面の片側の静圧軸受ランナー面上方に駆動磁石を、その上に速度検出用テープ式エンコーダを設ける。固定側にはコイルアセンブリとエンコーダのスキニングヘッドを設ける。このように駆動点と検出点を近づけ(いわゆるコロケーションを実現し)制御帯域を高く取れるような配置とする。

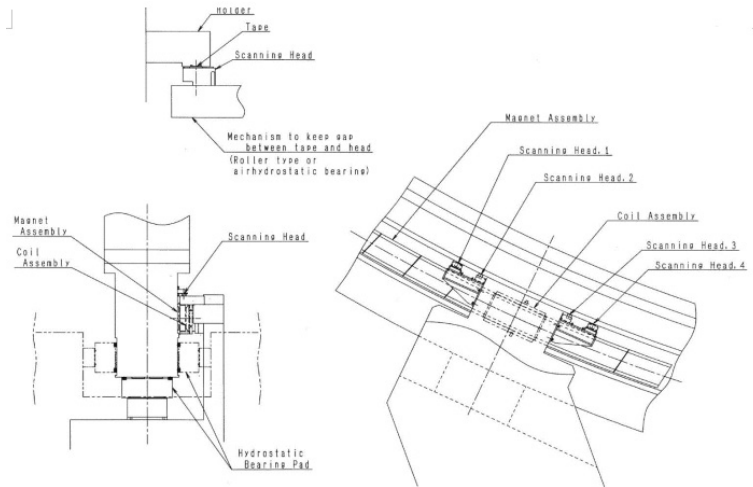


図 4.33: 高度軸受部概観図

水平回転部

図 4.34 に水平回転部の概念を示す。架台は静圧軸受パッドで支えられ、静圧軸受パッドは基礎に取り付けられたレール上面を滑る構造とする。レールの外あるいは内側に磁石を取り付け、架台側にコイルアセンブリを設け、速度検出用テープ式エンコーダをレール側に取り付ける。エンコーダのスキニングヘッドの取り付けられている架台との温度膨張差等によるヘッドのギャップ変動対策としてギャップ保持機構を設けることを検討する。高度軸の場合と同様、駆動点と検出点を近づけ(いわゆるコロケーションを実現し)制御帯域を高く取れるような配置とする。

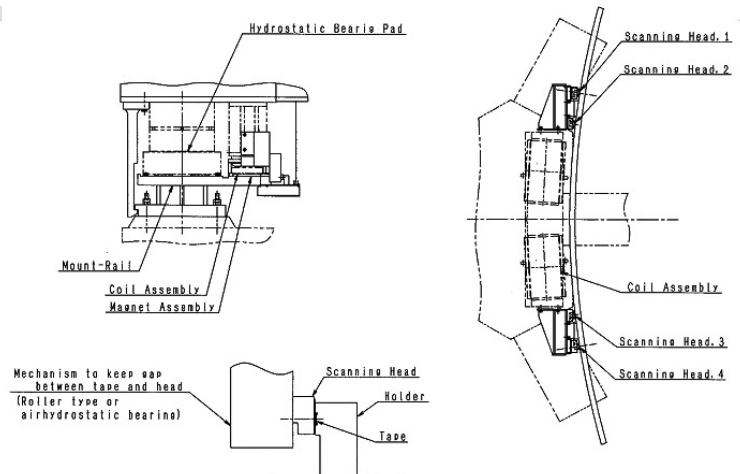


図 4.34: 水平回転部概観図

4.4.7 副鏡支持機構

副鏡支持方式原理のトレードオフ検討を図 4.36 に示す。図中左の方式は ESO VLT 等に採用されているシュベンジング支持方式で、裏面のアキシアル支持と外周のラテラル支持からなる。この方式の場合ラテラル支持機構を副鏡の外周にも設ける必要があり、赤外線観測の場合熱放射源になる。図中、中央の方式は、すばる望遠鏡の主鏡に採用されている支持方式で、鏡に穴を空

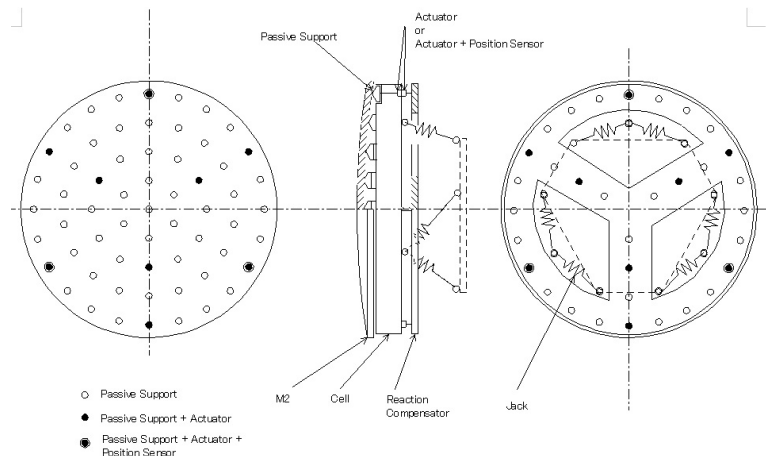


図 4.35: 副鏡支持機構の具体的な配置案

け鏡の板厚の中心でラテラル方向を支持する方式である。この場合、鏡の穴加工が必要で製作工程、コストに影響を与える。

図中右の方式はラテラル方向を2つの支持機構でささえ、その支持力の力線の交点が鏡の板厚の中心に位置するように配置したものである。この方式であれば無用の赤外熱放射もなく、鏡の穴加工も不要であり、この方式が好ましいと考える。

図 4.35 は副鏡支持機構の具体的な配置案を示す。パッシブサポートは45点、からなる。そのうち9点にティップティルト駆動アクチュエータを設ける。さらにその内の3点に副鏡の剛体位置を検出するセンサーをもうける。ミラーセルは6本ジャッキで6自由度位置決めする。ミラーセルの上側（副鏡と反対側）には反力コンペンセータを設け、副鏡駆動の反力をキャンセルする構造とする。次に副鏡支持機構の特徴について下記に列挙する。

多点駆動： 振動モードの腹の点にアクチュエータを配置することにより低次の振動モードの影響をなくし 等価的に副鏡の固有振動数をあげたことになり制御帯域を大幅に向上できる。

副鏡外周から支持機構を全くなくした構造： 赤外ノイズがない

コンパクトなアクチュエータで大推力：（すばる望遠鏡用ティップティルト駆動アクチュエータと同一タイプ）

- 最大推力：500N
- 大きさ：90mm ϕ × 高さ 60mm

JELT とすばる望遠鏡のティップティルト駆動アクチュエータへの要求の比較と必要なアクチュエータ個数を表 4.37 に示す。ティップティルト駆動アクチュエータへの JELT 要求仕様をすばるの場合と比較している。チョッピング周波数を 1Hz 程度とすれば必要なアクチュエータ数は 6~9 個程度で十分実現性があると考える。

Configuration			
Necessity of Edge Support (Noise for IR Observation)	YES	NO	NO
Holes in M2	NO	YES	NO

図 4.36: 副鏡支持方式原理のトレードオフ

	Mass (kg)	Diameter (m)	Inertia (I) (kg·m ²)	Chopping Freq. (F) (Hz)	Chopping Amplitude (A) (arcsec)	Number of Actuator $\propto I \cdot F^2 \cdot A$
JELT	3200	4.0	3100	1	10	6~9
SUBARU	200	1.3	21	5	30	6

図 4.37: ティップティルト駆動アクチュエータへの要求比較

4.4.8 駆動機構

提案する駆動装置の特徴は下記の通りである。

- ダイレクトドライブシステム (DD) 方式
 - － ギア駆動方式と比較して低コスト。
- スムーズな駆動を実現
 - － 実績のあるすばる望遠鏡の駆動装置をそのまま適用可能。
 - － 高分解能：エンコーダの分解能 0.0005

次に DD システムの特長を列挙する。

- 一般的な DD の特長
 - － ゼロフリクション
 - － 高剛性
- すばる望遠鏡の DD の特長をそのまま引き継ぐ
 - － 低発熱・高トルク
- プラセオジム磁石を採用、高磁束密度を実現
- 低トルクリップル
 - － 磁石のスキューを最適化
 - － トルクリップルが最小となるコイル配置

参考までに DD 方式とギア駆動方式とフリクションドライブ方式との比較を図 4.38 に示す。外乱トルクとしてギア駆動方式ではアンチバックラッシュ状態にするために常に 2 個の歯車でトルクをかける必要があり低速時、特に起動時に大きなフリクションの変動となる。また歯形誤差も外乱となる。フリクション駆動方式でも同じくローラ間に与圧をかけるために同様のフリクション変動が発生する。また JELT の場合はローラを一体で加工できず分割せざるを得ないが、継ぎ目の影響がトルク外乱となる。DD システムの場合はこのようなトルク外乱が全くない。

一方、剛性について比較すると、ギア駆動方式とフリクションドライブ方式では機構の剛性の分だけ駆動装置の剛性が低下するが、DD 方式の場合はモータ以外の機構が存在せず剛性低下は全くない。

これらの観点から DD 方式であれば高い追尾精度を容易に達成可能である。コスト的にはギア方式ではギア加工が必要であるが、単位長さあたりのギア加工コストと磁石のコストを比較すると磁石のコストのほうが非常に低く、フリクションドライブ方式と大差無い。従い、総合的に判断し DD 方式を採用する。なお、表 4.5 にすばる望遠鏡の DD システムの諸元を示す。

ここで、下記に TMT 計画の Technical Report No.4 を参考にした DD システムに対する要求性能を示す。

1. Slewing requirement 360° Azimuth, 65° Elevation / 5min
2. $1''$ on sky 1 s
3. $10''$ on sky 3 s
4. $100''$ on sky 10 s
5. $1000''$ on sky 30 s

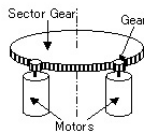
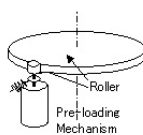
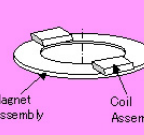
	Gear Drive	Friction Drive	Direct Drive (DD)
Configuration			
Torque disturbance	*High friction variation due to anti-backlash *Tooth shape profile error	Rolling friction variation	Zero disturbance
Stiffness	Stiffness reduction due to gear box	Stiffness reduction due to drive mechanism	Zero stiffness reduction
Satisfy tracking accuracy?	Difficult	Possible	Easy
Cost	High (due to machining of sector gear and on-sight alignment necessary)	Low	Moderate (cost of magnet per length lower than machining cost of sector gear)

図 4.38: DD 方式とギア駆動方式とフリクションドライブ方式との比較

Item	Performance
Maximum Torque	70,000Nm (7 ton·m)
Nominal Torque	23,000Nm (2.3 ton·m)
Cogging Torque	< 1%
Number of Coil Assembly	8 for Elevation, 4 for Azimuth
Radius of Coil Assembly Location	3.5m for Elevation 7.5m for Azimuth
Maximum Driving Force of Each Coil Assembly	2,600 N
Nominal Driving Force of Each Coil Assembly	870 N
Heat Dissipation of Each Coil Assembly	500W at Maximum Driving Force 55W at Nominal Driving Force
Dimension of Coil Assembly	530mm x 220mm x 50mm

表 4.5: すばる望遠鏡の DD システムの諸元

	Driving Force of Each Coil (N)	SUBARU		JELT		
		Number of Coil Assembly	Torque: Coil Driving Force (N) x Radius (m) x Number of Coil	Number of Coil Assembly	Torque: Coil Driving Force (N) x Radius (m) x Number of Coil	Required Torque
Elevation	2600	8	2600x3.5x8=73,000Nm (~7 ton·m)	4	2600x15x4=160,000Nm (~16 ton·m)	>100,000Nm (10 ton·m)
Azimuth	2600	4	2600x7.5x4=78,000Nm (~7 ton·m)	8	2600x16x8=330,000Nm (33 ton·m)	>200,000Nm (20 ton·m)

表 4.6: 超大型地上望遠鏡用 DD システムの諸元

6. 最大速度と最大加速度

- 最大駆動速度 (粗精度エンコーダ使用) : 1.2 °/s
- 最大追尾速度 (高精度エンコーダ使用) : 0.2 °/s
- 最大化速度 : 0.05 °/s²

7. 最大トルク

- 水平軸 : 1×10^5 Nm (~10 ton·m)
- 高度軸 : 2×10^5 Nm (~20 ton·m)

8. イナーシャ

- 水平軸 : 1×10^8 kg m²
- 高度軸 : 2×10^8 kg m²

これらの要求仕様に対し、すばる望遠鏡の DD システムに基づいて採用する JELT 用 DD システムの諸元を表 4.6 に示す。

4.4.9 追尾制御装置

超大型地上望遠鏡向け追尾制御装置は、基本的にすばる望遠鏡で開発した追尾制御装置を流用する。下記にその特長を示す。

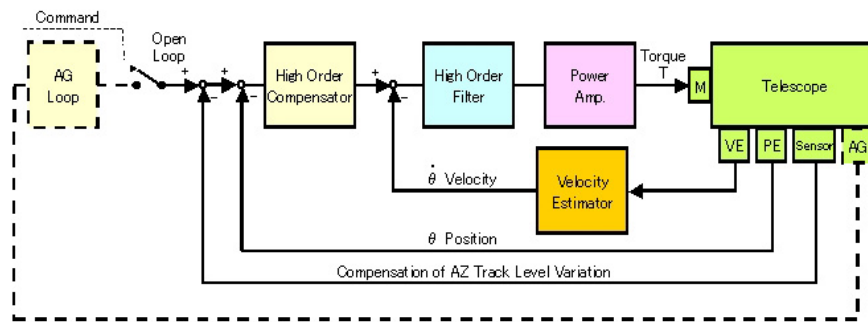


図 4.39: 超大型地上望遠鏡向け追尾制御装置のブロック図

1. 高制御帯域を得るための制御器の高次フィルター
2. 構造共振と反共振の補償
3. 制御器内の速度推定器
 - 通常速度の場合はエンコーダーからのパルスをカウントして速度を推定。
 - 超低速 (超低周波数) の場合、オブザーバーの推定器で速度を推定。
4. 構造モダル次数を縮退させたトータルシステム解析
5. 周波数応答関数に基づく構造設計
6. 予測制御の組み込み
 - スルーイング時の収束加速、ガイド時の収束加速、スルーイング、ADC 駆動、ImR/InR 駆動、ガイドプローブ駆動などの並行動作を可能とすること。

また、超大型地上望遠鏡向けに新たに以下の機能を追加する必要があると考える。

1. 風等の外部擾乱を抑制するための高次補償器 (H_∞ 制御)
2. 水平回転レールのうねりによる指向誤差に対する自動補償

これらの特長を有する追尾制御装置のブロック図を図 4.39 に示す。

4.4.10 超軽量架台の試作開発

名古屋大学と京都大学のグループはそれぞれ独立に口径 3.5m 級の軽量化望遠鏡を次世代望遠鏡開発の一環と位置づけて開発中である。名古屋大学ではトラスを組み上げて C 型マウントに搭載する形式で超軽量望遠鏡構造を試作し、その駆動に成功している。軽量化望遠鏡の重量は通常の望遠鏡の 1/5 以下である。京都大学のグループでは、3.5m 望遠鏡を 6 枚のセグメント鏡の合成で試作する計画を推進中であり、セグメント鏡の支持機構やアクチュエータの試作開発を進めている。これらの試作開発実績を JELT のセグメント鏡支持機構および望遠鏡トラス構造機構の実現に活かすことができる。

名古屋大学は平成 15 年度から直径 3m の鏡を搭載できる超軽量架台 (図 4.40) の開発を行っている。先述したように、次世代の巨大望遠鏡では従来の架台構造の単純なスケールアップを行うと重量が増大しすぎて自重に耐えられない構造になってしまう。また巨額の建設費を抑えるために、軽量で強固な新構造が求められている。現在同グループで開発している超軽量の望遠鏡構造は、世界中で考案されている巨大望遠鏡のデザイン (図 4.41) と共通する部分がある。これは超大型望遠鏡の 1/10 モデルとみなすことができ、この架台の開発は巨大望遠鏡の建設技術につながるものである。

以下にその特徴を述べる。

強度の向上

架台の目的は鏡と装置を保持しながら、誤差 0.5 以内という高い精度で天体を追尾することである。鏡の重さは望遠鏡のサイズに拠り、3m 規模でも 1 トン以上、巨大望遠鏡となれば 80 トン程度になる。このような大重量の鏡を正確に保持するために、鏡を載せる主鏡セルには高い強度が求められる。従来の望遠鏡架台では主鏡セルはフォークによって両端で吊るされる構造になっているため、主鏡セルが撓みやすい。一方、本架台では主鏡セルを真下から支持しているため、セルに撓みが発生しにくい強い構造となっている (図 4.42)。これにより同じ強度を保ちながら大幅な軽量化を図ることができる。また後述の軸受と組み合わせることで、フォークが高さと幅ともにコンパクトになり、望遠鏡全体を水平回転させる方位構造もコンパクトになった。

軸受

上記の主鏡セルの支持方式を可能にしたのが大きな円弧状の軸受 (C マウントベアリング) である。2 本の円弧状の軸受が主鏡セル全体を真下から包むように支持し (図 4.40 の下部の円弧状の部品)、あらゆる角度で安定した支持を可能としている。このような軸受と上記の主鏡セルとの組み合わせは、欧米が構想している巨大望遠鏡と共通する必須技術である (図 4.41)。一般の軸受けは輪軸を支えるものであり、本機のように直径 3m

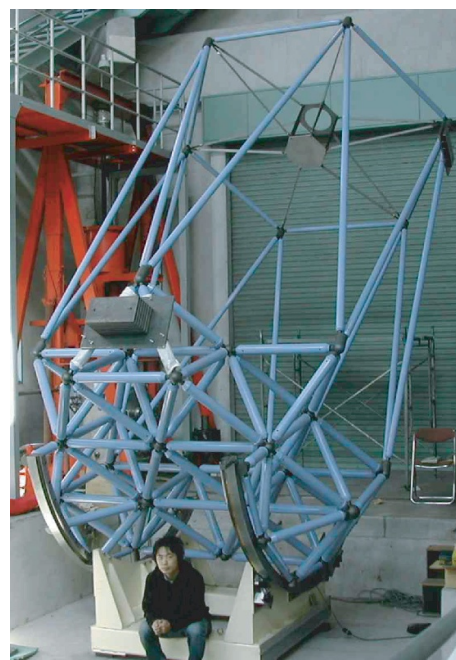


図 4.40: 開発中の超軽量望遠鏡

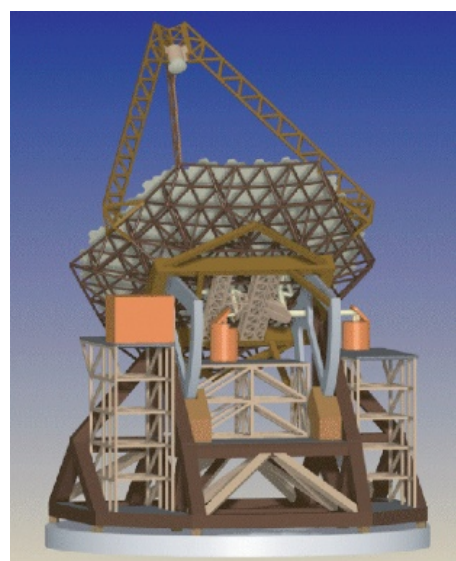


図 4.41: 欧米の 30m 望遠鏡計画

の軸受を必要とする構造は不可能であったが、近年、国内の軸受メーカーが開発した安価で高精度な軸受けを採用し、実現可能となった。

軽量化

本構造では軽量かつ強固なトラス構造でセルを製作した。従来の望遠鏡は箱型の構造で製作されており、いわば贅肉の多い構造であった。一方トラス構造は強度にとって必要な要素だけを抽出した効率のよい構造である。さらに本機で使用しているトラスはスタジアムの屋根などに使用される建築部材を利用した。トラス構造独特の煩雑な設計と加工は、このような製品化された廉価で高精度なトラスを利用することで解消した。このようなトラス構造は大きな電波望遠鏡において広く活用されてきたが、より高い精度が要求される光赤外線の望遠鏡では使われてこなかった、しかし将来の巨大望遠鏡においては必須の技術となる。

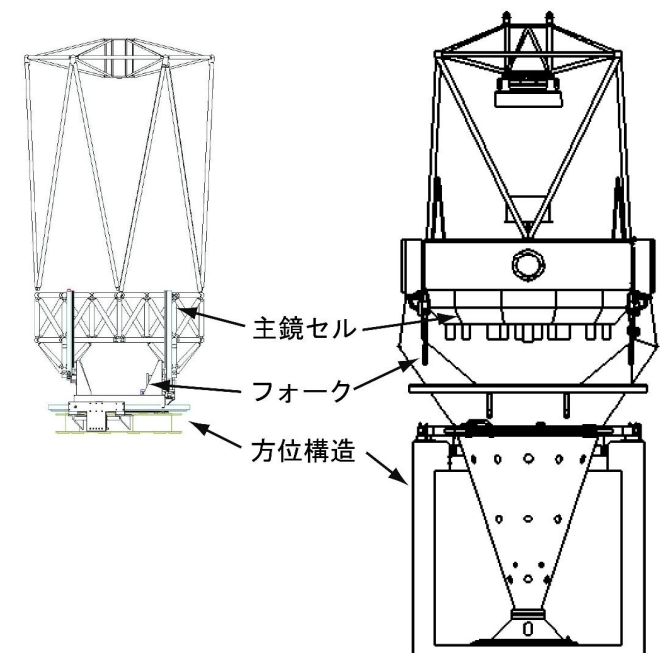


図 4.42: 同規模の望遠鏡との比較。左が超軽量架台、右が米国の WIYN 3.5m 望遠鏡。同規模の望遠鏡に対して高さが 1/2 近くにコンパクトになっていることがわかる。

巨大望遠鏡のために

このような構造を達成するにはいくつかの課題がある。まず、フォークから上方の鏡筒構造が長いため、不安定かつ上下の強度バランスが悪い構造になる。しかしながら近年の鏡研磨技術の進歩で明るい鏡の製作が可能となったため、鏡筒はかなり短くなり、実現化に大きく貢献している。また、セルリエ・トラス構造などこれまでの望遠鏡鏡筒では、望遠鏡を傾けて鏡筒が撓んでも光軸がずれないようにするため、前もって算出した強度で鏡筒を製作し、主鏡と副鏡の相対関係を保持する設計が採用されてきた。しかし本構造ではこの方式は採用することができないため、主鏡と副鏡の支持部分でずれを補正する技術を開発する必要がある。

C マウント軸受は、従来のものと違い 2 列の大きな円弧からなるため真円度と同軸精度を確保しにくい。従来の軸受では固定された軸が実在したが、本構造では回転軸は仮想的な存在となるため、現実には軸が駆動中に移動する可能性が大きい。そのため、制御に固有の補正を施す必要が出てくるであろう。巨大なトラス構造は接合点が多いため組み立て精度と、主鏡セルの回転運動に伴うガタの発生が懸念される。特にガタが発生した場合は主鏡の位置に誤差が生じるため、実用に耐えないものになってしまう。

現在、実験機においてはほとんどの課題を解決してきているが、今後更な大型化に伴う予期しうる問題と解決法を検討していく必要がある。

	本機	従来機
重量 (t)	4	30
高さ (m)	6.5	10 以上
価格 (円)	3000 万	数億

表 4.7: 従来機との比較

4.4.11 新型アクチュエータの開発

すばる望遠鏡のアクチュエータ・支持機構の製作経験を活かして、新しい軽量アクチュエータとセグメント調整測定メカニズムの検討を京都大学、三菱電機が独自に進めている。

口径 30m 級の望遠鏡を光学的極限 (回折限界) の性能で使用するためには、予想される望遠鏡構造物の機械的変形量 (数 mm) のストロークを持ち、使用波長の $1/20$ ($\sim 50\text{nm}$) の精度で各分割鏡の光軸方向の位置と傾きを制御する高精度アクチュエータシステムの開発が必要である。京都大学では口径 30m 級望遠鏡のプロトタイプとなる 3.5m 望遠鏡の建設を計画しており、同大学院理学研究科宇宙物理学教室でその 3.5m 分割鏡を支持するための高精度アクチュエータシステムの開発を行っている。開発中のシステムの概要を図 4.43 に示す。

リニアアクチュエータ (図 4.44) は、DC モータとハーモニックギアヘッド及びボールネジを組み合わせたもので、ストローク 10mm、分解能 70nm、繰り返し位置決め精度 500nm である。これをてこを用いて分解能を 10 倍に高めることにより、繰り返し位置決め精度 50nm を達成する。これによりストロークは 1mm となるため、30m 級望遠鏡にそのまま使用することはできないが、基本的設計概念は同様になるものと考えられる。非接触センサ (図 4.44) は、接地された導電面との間の静電容量を交流定電流を流すことにより測定するもので、測定レンジ 1mm、分解能 300nm のものを複数個取りつけて試験的に使用しているが、将来的には更に分解能の高いセンサが必要である。

てこ機構部分は、望遠鏡の姿勢やストロークの変化に対して関節部分にガタを生じないことが重要であり、油圧シリンダ方式や無関節てこ方式等が考えられるが、海外の大型望遠鏡計画でも検討されている無関節てこ方式を採用することにした。

図 4.45(左) で示されるように、てこ機構はアクチュエータ上部に位置し、3 本の無関節てこにより同軸上でリニアアクチュエータの駆動量を $1/10$ に減らす構造となっている。これを望遠鏡構造物を想定したトラス構



図 4.43: 高精度アクチュエータシステム概要

図 4.44: アクチュエータと非接触センサ写真

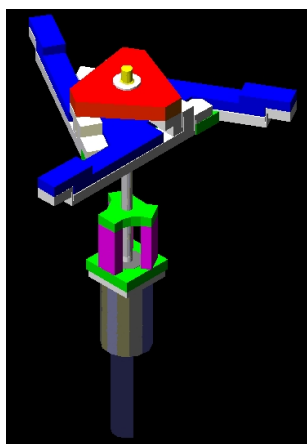


図 4.45: アクチュエータ全体図 (左) とトラス構造物に取りつけた写真 (右)

造の土台に取りつけたものが図 4.45(右) で、トラス構造の節目となるグローブ (球体構造物) を挟んで下側にリニアアクチュエータ、上側にてこの機構の配置となっている。現在、これに非接触センサを取りつけ、コンパクト PCI バス上のボードコンピュータより制御して位置測定をする試験を始めている。

4.5 鏡面製作

4.5.1 超高精密研削装置

鏡製作の現状

研磨による最大一枚鏡は米国アリゾナ大学において 8.4m まで達成されている。しかし、これ以上の大型鏡は計画されておらず、将来の大型望遠鏡は分割鏡方式で達成されることは世界の共通認識となっている。事実、現在計画中の全ての大型望遠鏡は、分割鏡の大きさや形状は多様であるものの、分割鏡方式を採用している。この分割鏡方式には、非軸対称の鏡面の製作と複数の分割鏡を 1 枚の大型鏡として機能させるための制御技術が大きな課題となるが、すでに同じく米国のケック 10m 望遠鏡 (36 枚の分割鏡) でその実用性は立証済みであり、将来の巨大望遠鏡への可能性は立証されている。

一方、わが国はこれまで 1m クラスの鏡までしか製作した経験が無い。国際競争力を考慮すると、鏡の製作技術では大きく出遅れている。しかし、巨大望遠鏡時代においては、巨大な一枚鏡ではなく、小さな非軸対称の分割鏡を多数製作する技術を開発できれば、一気にその差を縮め、十分に世界と対等の競争ができる。

30m 級の巨大望遠鏡の主鏡は、約 1000 枚の大きさ 1m ほどの非軸対称・非球面鏡 (分割鏡) を敷き詰める (図 4.46)。しかし伝統的な研磨技術では研磨機 1 台で、1 枚あたりおよそ 1 年と 5000 万円の期間とコストを必要とする。さらに本質的に通常の研磨法では軸対称の形状しか製作できないため、分割鏡を製作するにはいくつかの追加工程が必要となる。そこで我々は研磨に代わり研削という加工による鏡製作技術に注目している。

研削と研磨

研削では高速回転する砥石によって加工を行なう。砥石には細かく硬い砥粒が固定されている。その砥粒が断続的に加工物面を切削除去していく。砥石の位置は数値制御により運転され、自由曲面の加工が可能である (図 4.47)。

一方、研磨は非固定の砥粒を液体と共に加工面に押し当て、こすることで加工面を切削除去していく。形状を決定する切削量は押し付ける力、砥粒径や時間などパラメータが多いため、経験則や頻繁な形状測定が必要となる。さらに滑らかな曲面を成型するために加工物の回転も必須となる。そのため研磨では非軸対称な形状

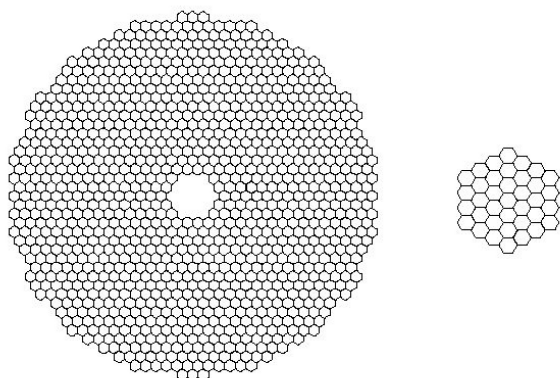


図 4.46: 左：30m 望遠鏡の分割鏡 (参考) 右：ケック 10m 望遠鏡の分割鏡

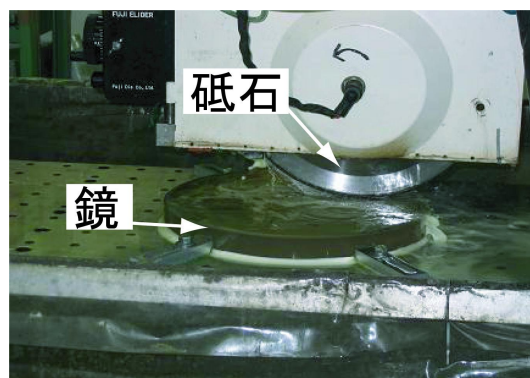


図 4.47: 研削加工の様子 (カラー 11 ページ)

は製作できない。現存の技術ではガラスをあらかじめ計算された応力で撓ませた状態で研磨を行い、終了後に応力を開放し、非軸対称の曲面を製作している。

光赤外線望遠鏡に要求される鏡の面精度は形状と表面粗さともに波長の 20 分の 1、つまり 30nm が要求される。これまで研削による鏡製作が行われてこなかった理由は、振動、環境温度の変化、材料や砥石の加工応力による変形などにより形状誤差が発生しやすく、一般に 10cm×10cm 以上の大きさの加工面では数 μm の形状誤差が発生するからである。

最新の研削技術

しかしながら近年における我が国の研削技術の進歩は目覚ましく、その加工精度は研磨と同等の数十 nm に迫りつつある。我々はその中でも特にナガセインテグレックス (株) の研削盤に注目している。この会社の開発した研削盤は $\phi 300\text{mm}$ 以上の加工範囲に対して分解能 1nm を達成している。研削盤そのものを除震台に載せ、二重の空調によって 0.1°C の温度管理を施すことで外乱を除去している。このような優れた環境は干渉法による形状測定においても大変有利である。われわれは現在ナガセと、鏡面研削に特化した更に大型の研削盤の開発を検討している。これまでに大型加工のニーズが無かったことが原因で $\phi 1\text{m}$ 規模の超精密研削盤は存在しない。この点においては現存の研削盤で十分な検討の後、大型化の意義を判断したい。また研削盤の価格は一台あたりおよそ 3 億円である。我々の目標としては一台の研削盤で分割鏡一枚を 1 週間以内で製作し、研削盤を複数台占有することで 1000 枚の鏡を 2 年程度で完成させたい。

なお米国の TMT 計画では、ケック望遠鏡の時とほぼ同じ技術を用いて、最短で 3 年間での鏡製作を目標としている。

これまでの試験

われわれはこれまでに理化学研究所大森素形材工学研究室と山形県工業技術センタとで 2 回の研削による試験鏡の製作を行った。

理研では非軸対称形状の加工も想定して、 $\phi 300\text{mm}$ の低膨張ガラスクリアセラム Z を回転させずに球面鏡に研削した。干渉測定可能範囲が全面のおよそ 70% で、その領域における形状精度は 4λ 程度であった (図 4.48)。測定範囲外は形状精度が低いために干渉像が得られなかった。

山形工業試技術センタでは $\phi 100\text{mm}$ のゼロ膨張セラミック (ZPF : 4.5.2 章参照) を回転研削と非回転研削による方式の二通りで研削加工した。回転研削は円形鏡面の外周部と内周部とで焦点距離 (曲率) が若干異なり二重焦点のような鏡になってしまった。外周と内側は共にそれぞれ鏡面精度 1λ 程度であったが、形状誤差がかなり大きかった (図 4.49)。非回転研削による研削は、砥石の条件出しや設備不足で不十分な加工であったため、再度試みる予定である。この試験の詳細は後述する。

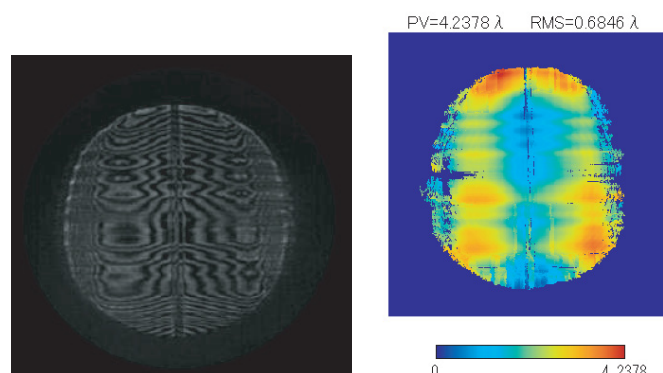


図 4.48: (左) $\phi 300$ 研削鏡の干渉縞 (右) $\phi 300$ 研削鏡の形状 (カラー 11 ページ)

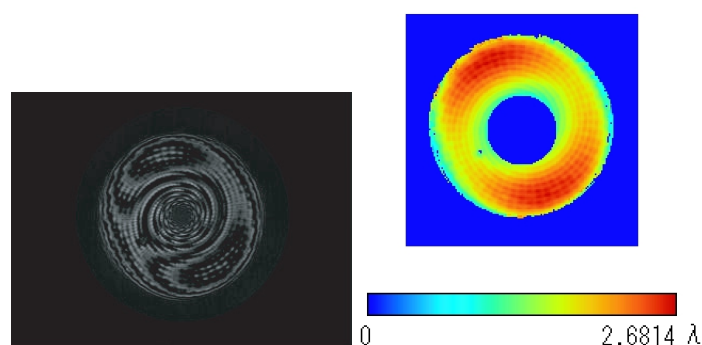


図 4.49: (左) $\phi 100$ 研削鏡の干渉縞 (右) $\phi 100$ 研削鏡の形状 (カラー 11 ページ)

計測技術

高精度な鏡の開発には加工・計測の2つが必要不可欠である。広い面積を持つ望遠鏡の主鏡形状の測定には干渉計が適している。干渉計を使用して球面・平面を測定することは容易である。またヌルレンズ³を用いることで軸対称な非球面の測定も可能である。実際、多くの望遠鏡の主鏡形状がヌルレンズ干渉計(図4.50左)で測定されている。しかし非軸対称な鏡面を測定するためのヌルレンズを製作することは難しい。今回、ヌルレンズにかえてCGH(Computer Generated Hologram)を使用した干渉計(図4.50右)を検討した。

CGHはガラス基板上に波長程度の間隔で透明・不透明の縞模様を刻んだ光学素子でありFZP(Fresnel Zone Plate)とも呼ばれる。原理は回折格子と同じで、縞模様1本ごとに1波長ずつずれた素源波が干渉することで新たな波面が形成される(図4.51)。回折格子の縞は等間隔であるため1次光の波面は傾いた平面となる。CGHでは縞の間隔・形状を変えることで任意の形状の波面を作り出すことができる。ヌルレンズのかわりにCGHを使うことで測定可能な面形状の自由度が大幅に増加する。また、複数のレンズで構成されるヌルレンズに比べて、単一の素子であるCGHは光軸調整が不要という利点も持つ。

超大型望遠鏡の主鏡は曲率半径が非常に大きい。干渉計は被検面の曲率中心付近に設置するため干渉計と被検面の距離が非常に長くなる。従って振動や空気揺らぎなど外乱の影響を受けやすい。特に振動の影響を減らすため以下に述べる2点の工夫を行う。

1. 被検面と参照面を共通のステージ上に配置する。振動があっても被検面と参照面が同じ運動をすれば測定への影響は相殺されて減少する。また被検光と参照光の光路長が等しくできるためレーザー発振波長の変動の影響も受けにくい。
2. 干渉縞の読み出しに必要な時間を短くする。位相シフト法で鏡面形状を復元するには最低3枚の干渉縞画像を取得する必要がある。これまでは1セットの干渉縞画像を取得するのに数秒の時間をかけていた。振動周期より十分に短い時間(1msec以下)での干渉縞画像取得を目指す。これを実現するため複数のCCDを同時に動作させる読み出し回路を開発する。

ナガセインテグレックス社 超高精度研削加工装置

ナガセインテグレックス社⁴は精密工作機械の製造会社であるが、我々は同社の超精密研削装置に注目した。

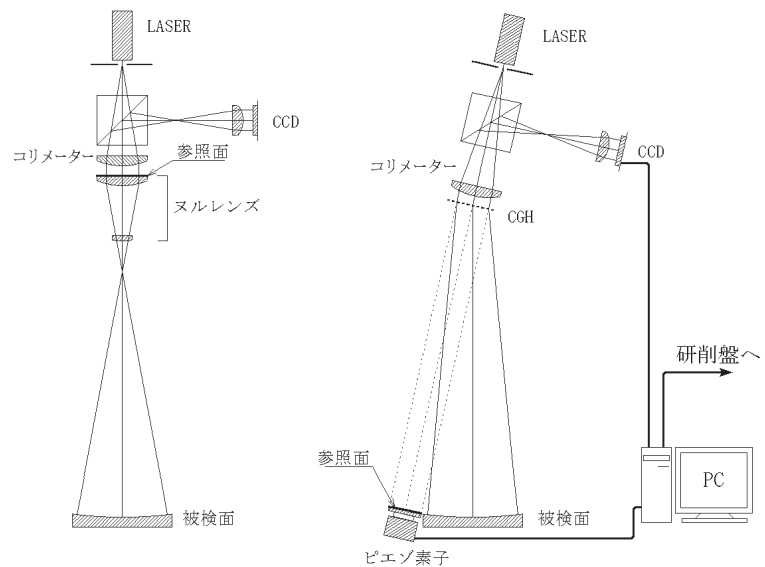


図4.50: (左)ヌルレンズ干渉計 (右)CGHを用いた干渉計

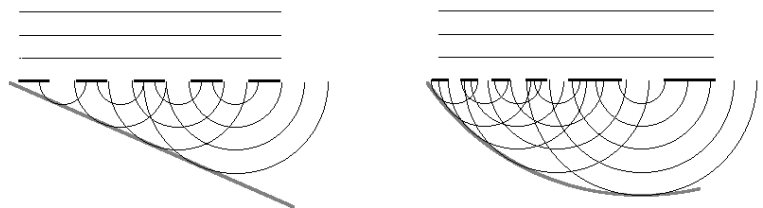


図4.51: (左)回折格子 (右)CGH

³入射された光の波面を被検面と同じ形状の波面に変換するレンズ。通常、球面レンズ1~3枚程度で構成される。

⁴<http://www.nagase-i.jp/new.top/html/top/tope.htm>

これは被工作物の駆動ステージの全ての軸に、すばる望遠鏡の望遠鏡駆動機構にも採用した静圧軸受を採用し、最高級装置では送り分解能 1nm という驚異的な安定性と精度で剛性度の高いサーボ送り機構を実現した (図 4.52)。この装置が驚異的な工作精度を達成しているもう一つの秘密は研削ヘッドのスピンドルを自動制御により実時間で安定化する機構を組み込んでいることにある (図 4.53)。

これらの新しい工夫を組み込んだ数値制御研削装置を厳密な温度制御と防振環境に設置することで、条件によっては 10nm レベルの加工精度を達成している。この装置を用いることで鏡の非球面研削加工工程を大幅に短縮し、研磨工程に要する時間も大幅に短縮できる可能性がある。

図 4.54 はこの研削装置で研削加工により生成したシュミット補正板である。これはすばる望遠鏡の第二世代観測装置である多天体ファイバー分光器 (FMOS) の赤外線分光器の中で用いるシュミット補



図 4.53: 研削ヘッド振動除去自動安定化装置 (提供: ナガセ インテグレックス).



図 4.52: 超高精度研削加工装置 (提供: ナガセ インテグレックス)

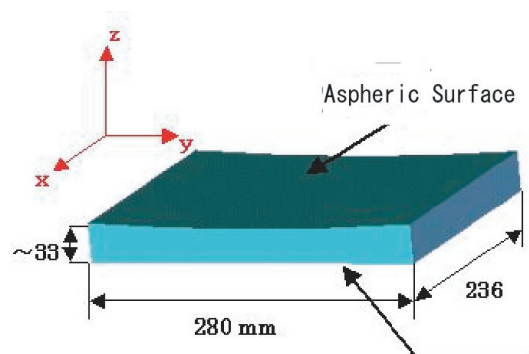


図 4.54: ナガセ社製超高精度研削加工装置で生成した非球面

正板であり、撮像用補正板にくらべて要求精度が緩いものの、研削のみで研磨をほとんど必要としないレベルの非球面を生成することができた。

この装置の可能性を見極めるため、この装置を導入した山形県工業技術センターとの共同研究として、天文台で製作した 10cm ゼロ膨張セラミック (ZPF: 4.5.2 章参照) 円盤を研削加工する実験を行った。同所に導入されているのは四軸駆動の研削装置で、防振・温度制御環境を整えた部屋に設置されたものである。この共同研究は同装置の立ち上げ試験を兼ねて 2004 年 5-6 月に実施した。面形状の計測は名古屋大学の佐藤修二教授のグループが開発したレーザー干渉計を研削装置に設置して、被検鏡を工作装置から移動せずにそのまま計測できるようにして行った。同装置での初加工であったにもかかわらず、ZPF 円盤を回転させながら研磨を行う

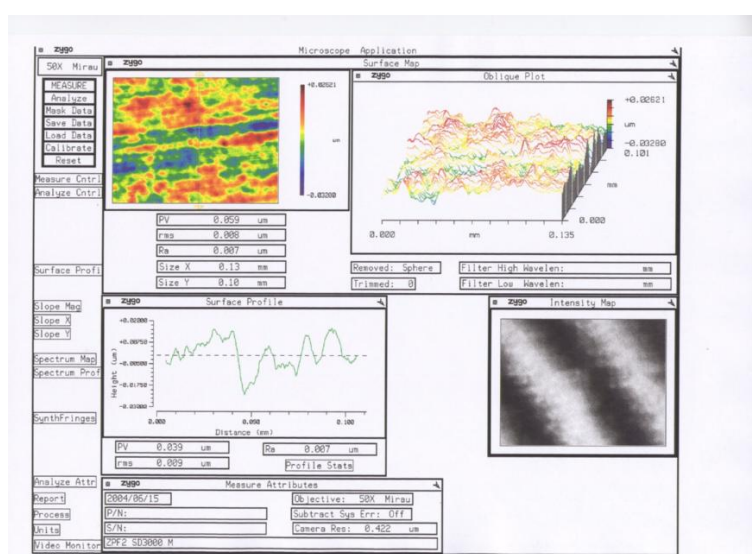


図 4.55: 山形工業技術試験センターにて球面加工した 10cm ZPF 鏡の表面形状誤差分布

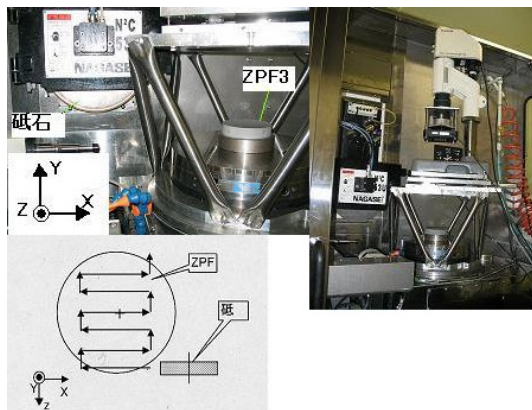


図 4.56: 非球面研削加工のためのラスタースキャンパス法による鏡面形成実験と研削ヘッドの軸ぶれ防止制御装置 (ナガセインテグレックス社提供)

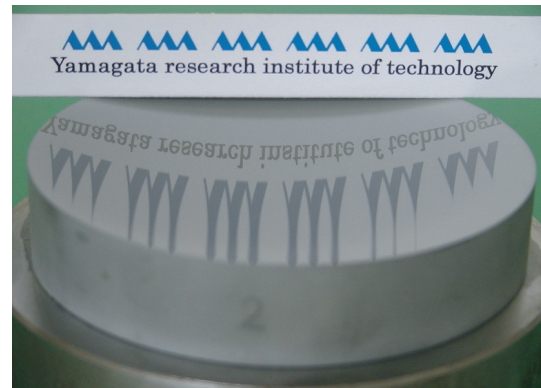


図 4.57: 研削加工した 10cm ZPF の表面.

方式で、研磨砥粒粉 #3000 で回転ヘッドを 30 mm/sec の速さで 0.1 mm ステップで送る NC 加工をしたところ、PV 誤差 3 λ 程度で曲率半径 300 mm の球面生成を行うことができた (図 4.57)。同心円で区切った円環領域内では形状誤差は 1 λ 以下であるが、中心部と外部の研削速度を調節しなかった今回の研削法では、中心部がやや深く削れたため、曲率半径が中心部と周辺部で若干異なる結果となり、全面での形状誤差が大きめにしている (図 4.55)。

非球面研削を実現するには鏡を回転せずにラスタースキャン的に被加工物を移動させて面形状形成を行う必要がある。このため、鏡を平行移動させながら同様に曲率半径 300mm の球面を形成する研削加工を別の 10cm ZPF 円盤を用いて行った (図 4.56)。この試験研削には、まだ加工物の送り速度、送りステップ、研削スピード、研削砥石の幅方向の曲率形状などの最適化の自由度があり、今回の初回での結果からだけでは、この技法の限界を見極めることはできないが、研削条痕の残留が認められた。この条痕は表面粗さにはほとんど寄与しないが、形状誤差には問題となるレベルであり、今後の最適化の継続が必要である。

次のステップとして ZPF 鏡の熱サイクル試験を検討中である。これは $\pm 50^{\circ}\text{C}$ 程度の熱負荷をかけた場合の 30cm 鏡の鏡面変形の様子を干渉計でモニターすることで、たとえばリブ構造の影が浮き上がるなどの問題が生じないかのチェックができよう。また、今回のような平板鏡材でなく、予め球面形状に整形した 1m 級 ZPF の試作焼結後 1 λ レベルに研削することも検討している。ZPF がガラスに代わる鏡材として、実用化レベルの素材であることが実証できれば、鏡材の選択枝が広がり、セグメントの大量生産に画期的なインパクトを与える可能性がある。

4.5.2 新素材セグメント鏡の開発試作

防湿加工カーボン強化プラスチック鏡

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) はゼロ膨張複合素材として、さまざまな利用がされているが、セグメント鏡として利用できれば、母型からの圧着整形により製作できるため、そのコストと工期を軽減できる可能性がある。CFRP の複製製法でセグメントをつくる場合には、ケック望遠鏡のような六角セグメント方式の非球面主鏡では、必要な母型の数がセグメント数の 1/6 に達するため、六角セグメントよりも扇形セグメント配置方式にしたほうが、製作効率は大幅に改善されるはずである。

ただし、CFRP は含水量が変化すると光学レベルでは変形することが知られており、この問題が克服できるかどうか、まずこの素材の利用可能性検討の鍵となる。

そこで、含水量変化による変形の定量的測定を行うことと、含水量変化を防ぐ防湿処理の可能性について試験を行った。具体的には含水変形量が少ない CFRP として知られるシアネート系 CFRP の表面に膜厚の異なる

るアルミニウム膜をコーティングしたサンプルや、アルミ箔を張り付けたサンプルを用意し、これらをベーク処理してまず完全に脱水したのち、マウナケア山頂のすばる望遠鏡ドーム環境に置き、精密計量天秤を用いて質量変化を計測することで含水量の変化を三ヶ月間追跡した。被検サンプルは 81g だが、超精密計量天秤としては 0.01 mg の測定分解能を持つものを用いた。測定開始日から含水量のゼロの CFRP は吸湿が始まり、ほぼ一ヶ月後に含水量がほぼ一定になった。

図 4.58 は測定開始から 1ヶ月後から 3ヶ月後までの含水量変化に伴う重量変化の様子を示したものである。横軸はマウナケア山頂でサンプルを開封して測定開始後の経過時間 (秒単位) の平方根でプロットしたものであり、1ヶ月後が 1610、3ヶ月後が 2804 に対応する。アルミ箔で防湿加工したサンプルの質量変化が一番小さかったが、それでも測定期間の 2ヶ月間に最大 0.0028% の質量変化が観測された。この質量変化振幅に対応するシアネート系 CFRP の変形量は約 0.22ppm に相当する。この値は ULE ガラスの温度幅 20°C の変化に伴う熱変形量 0.06ppm の約 4 倍に達する。今回の測定結果からは吸湿量変化に伴う変形量はアルミ箔接着加工を施しても、熱変形量の約 4 倍あり、アルミ蒸着を施した場合ではそれよりさらに変形量が大きいのので、防湿加工法としてはさらに工夫を検討する必要がある。しかし、CFRP の含水変形量の制御が全く不可能なレベルというわけでもない結果と考えることができ、今後の検討の必要性が認識された。

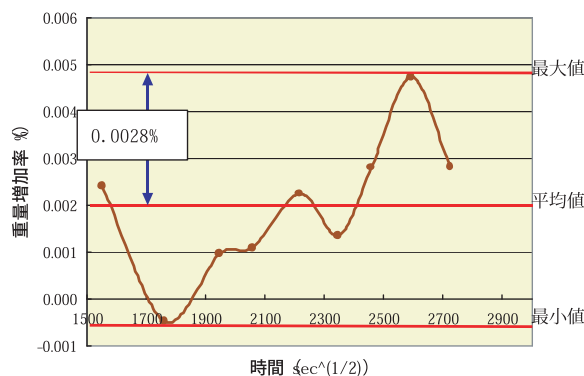


図 4.58: アルミ箔により防湿加工した CFRP 試験サンプルをマウナケア山頂の自然環境にさらした場合の含水量変化の測定結果。測定開始から 1ヶ月後から 3ヶ月後までの測定値の変動を示す。横軸は経過時間の平方根で示してあることに留意。

ゼロ膨張セラミック (ZPF) 鏡の開発

日本セラテック社⁵と太平洋セメント社⁶が開発したゼロ膨張セラミック素材 (ZPF) は、半導体製造工程のステージ用素材として開発されたものである。原材料である SiC、Si₃N₄、などを LAS(Li-Al-Si-O) 粉末に混合する混合比を調整して焼結することにより、ゼロ膨張となる温度を常温付近で任意の値に設定することができる。図 4.59 は熱膨張率の温度依存性を示す。この事例では 0°C での熱膨張率は約 10 ppb である。

表 4.8 に鏡材候補物質である CFRP (炭素繊維強化プラスチック)、SiC(シリコンカーバイド)、ガラス (Zerodur)、および ZPF (ゼロ膨張セラミック) の物性値を示す。ZPF は SiC に比べて熱膨張率が小さく、ガラスに比べて高剛性で曲げ強度が強い上に、研削・研磨が可能な素材である。ガラスより熱伝導率が大きいのので、外界の気温変化に追随しやすいということもメリットである。また、素材をゼロ膨張接着剤で接着したり、中空構造の軽量化整形も可能であるなど、セグメント素材として良い性質を備えている。ま

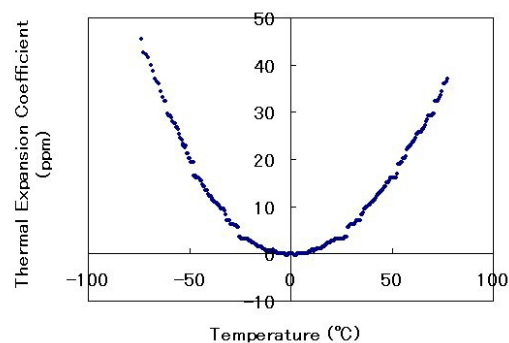


図 4.59: ZPF 熱膨張率の温度依存性 (太平洋セメント社のご厚意による)

経過時間と処置	形状誤差 (λ)
研磨直後	0.045
研磨 1.5 年後、加熱処理前	0.048
250°C 加熱処理後	0.050
2.0 年後	0.052
2.5 年後	0.042

表 4.9: Long-term stability of the ZPF surface

⁵<http://www.ceratech.co.jp>

⁶<http://www.taiheiyo-cement.co.jp/index.html>

パラメータ	記号	単位	CFRP	CMC	ガラス	ZPF
弾性率	E	GPa	120	400	90	150
比重	ρ	g/cm^3	1.5	2.65	2.53	2.54
熱膨張率	α	ppm/K	0.03	2.6	0.02	0.02
熱伝導率	Λ	W/K·m	50	125	1.6	5.3
比熱		J/kg·K	-	-	820	800
曲強さ		MPa	800	175	80	240
面粗さ rms		nm		7.4	1	4
比剛性	E/ρ		80	150	35	60
熱安定性	Λ/α		1700	50	80	260

表 4.8: セグメント鏡素材の物性値

た母型に合わせて焼結前に形状を球面に整形することも可能であり、研削量を最低限にすることが可能である。

太平洋セメント社は社内試験として $200 \times 25 \times 25$ mm の ZPF 柱を残留表面形状 $1/30 \lambda$ にまで研磨し(図 4.60)、長期安定性を測定するため半年ごとにその形状誤差を測定した。その結果を表 4.9 に示すが、途中で 250°C にまで加熱した場合でも、冷却後には形状が戻り、経年変化も見られなかった。

国立天文台は直径 100mm、厚さ 20mm の円盤をいくつか入手し、独自に研削・研磨性の試験を 2003 年に行った。この試験では、曲率半径 300mm の球面を研磨により生成し、アルミ蒸着を行った。球面加工は国立天文台天文機器開発実験センターの光学測定室にて行った。形状測定 of 面形状誤差はほぼ 0.1 波長レベルに達しており、表面の面粗さは約 10nm rms のレベルである(図 4.61)。

ニコンによる ZPF 研磨試験

ZPF 鏡の試作結果が良好だったので、引き続き直径 300mm、軽量化リブ構造の ZPF を試作した。軽量化円盤は 50mm 厚のハネカムリブ構造の両側に厚さ 10mm の円盤を張り付けた形で焼結生成したもので、肉抜き無しの円盤に比べると約 30% の軽量化が達成されている(図 4.62)。この軽量化構造 ZPF 円盤をニコン社に委託して曲率半径 2000mm の球面に研削・研磨したものが図 4.66 である。

光学鏡面を製作した経験豊かな同社の報告によると、ミラー素材としての研磨特性はかなり良い。研磨に要する工数(時間)から判断すると、SiC よりは加工はかなり容易(5 倍程度)だが、低膨張ガラスよりは難しい(2-2.5 程度)。研磨剤としてはダイヤモンドスラリーが適する。また、面形状精度 0.1λ の鏡面を比較的簡単に生成することができた(図 4.68)。以下に加工時の報告を掲載する。

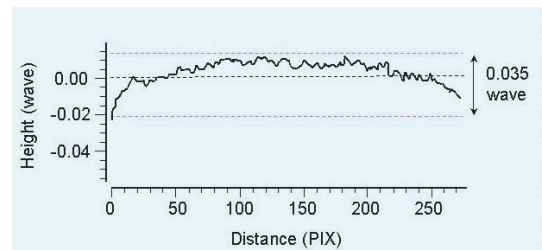


図 4.60: ZPF 研磨鏡面の形状誤差例 (太平洋セメント社提供)

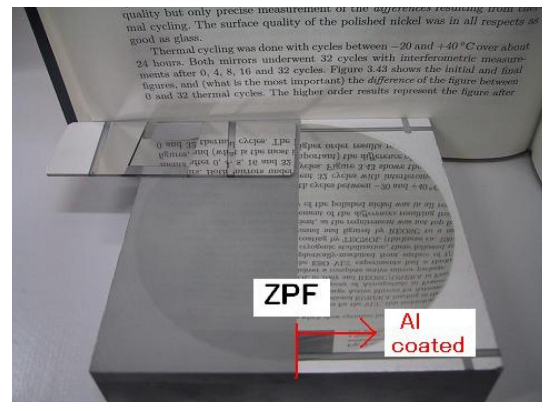


図 4.61: 研磨後アルミ蒸着した ZPF 鏡面

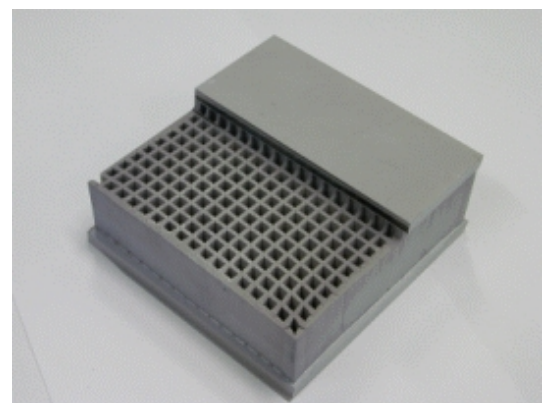


図 4.62: ハネカムリブ軽量化構造の 30cm ZPF 円盤

(a) **研削加工** はじめに素材の被研磨面が平面であったため、R2000 球面化研削加工を行なった。球面化研削加工は、まずガラス加工用カーブジェネレータにメタルボンドダイヤモンド砥石を装着し行なったが $\phi 244\text{mm}$ まで R2000 加工した時点で加工機が止まってしまい中断した。砥石と被研削面の接触長さが大きいこと及び、ガラス材に比べて硬度が高いため負荷抵抗が増大するためと考えられる。

このため金属加工機に小型の電着ダイヤモンド砥石を取り付けて残部分を加工した。加工上特に問題なく加工できた。R2000 では、肉抜き部のミラー面側の最小肉厚は約 5mm になる。

(b) **研磨加工** 研磨加工は研削加工面のスムージング → 研磨の順に行なった

1. スムージング

研磨の前段階加工として研削加工面のスムージングを行なった。オスカー型研磨機により、ダイヤモンドペレットにて仕上げた。特に問題はなし。

2. 研磨

- 研磨機：ワーク回転、揺動回転制御方式のオスカー型研磨機
- 研磨剤：1 次研磨 酸化セリウム+水
- 2 次研磨 (仕上げ) ダイヤモンドスラリー 0.25 μm +水
- 研磨皿：1 次研磨 $\phi 300\text{mm}$ 鉄 (3kg)、
- 2 次研磨 $\phi 200\text{mm}$ 鉄 (3kg)、 $\phi 270\text{mm}$ アルミ (1.9kg)。
肉抜き素材対応のために軽量化対策。
- ピッチ：アスファルトピッチ
- 研磨時間：1 次研磨 副作業を含めて 8H×5 日 = 40H
- 2 次研磨 (仕上げ) 8H×5 日 = 40H
- 研磨の推移

1 次研磨での面粗さはスムージングの粗さが除去された段階で 18nm rms。酸化セリウムでは、ある程度以上改善されなかった。ダイヤモンドスラリーによる 2 次研磨では 3nm rms 程度まで改善したがセラミック組織に粗い部位があり全体の面粗さを押し上げている。数 μm の変質層であり、研磨の促進により変化するのを確認できるのでスラリーの微細化 (スラリー 0.1 μm 程度使用) により粗さの改善はある程度は可能と思われる。

また、研磨での面出し工程では揺動幅を大きくすると周辺部が大きく当たりだして縁ダレを生じ、面精度が大きくダウンするなど、他の素材とは異なる現象が生じた。研磨皿の自重負荷が素材構造 (肉抜き構造) に影響し微細な変形を起こして 1 μm 程度のスロープダウンにつながった可能性も考えられる。



図 4.63: 加工前素材



図 4.64: スムージング加工



図 4.65: 1 次研磨



図 4.66: 研磨、コート後のミラー外観

名称	ゼロ膨張セラミック ZPF (Zero Expansion Pore Free Ceramic)
製造メーカー	日本セラテック
素材寸法	外径 300mm、厚さ 60.5mm 肉抜き軽量化素材
個数	1 個

表 4.10: 加工したゼロ膨張セラミック (ZPF) の基本仕様

SiC との加工時間の比較ではその硬さと前工程粗さ除去の難易性などから 5:1 程度と判断される。低膨張ガラスとの比較ではラッピング時のキズ制御の難易性から 2-2.5 倍程度の加工性と判断される。セラミック材としては研磨での減耗性、キズ制御などの点から同材での加工性はかなり良好なものと思える。素材構造による縁だれの可能性についてはムク材の研磨による検証を提案したい。

(c) **加工結果** 加工結果を表 4.11 に示す。

コート後の干渉計による面精度測定データと表面粗さデータを図 4.68-4.71 に示す。コートは Al+SiO₂ を施した。また、完成品の写真を図 4.66 に示す。

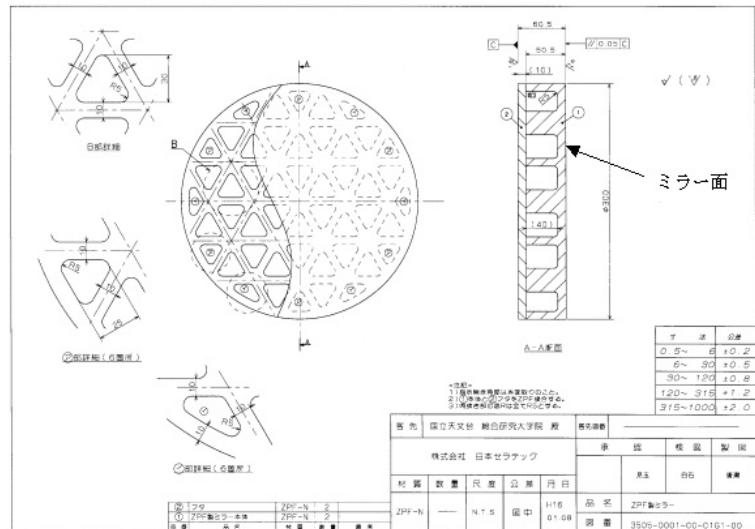


図 4.67: 素材形状寸法

項目	仕様	加工結果
面形状	球面	球面
曲率半径	R 2000mm 程度 (TBD)	R 2000mm
有効径	φ 280mm 以上	φ 280mm
面精度	λ/10 rms 以下 (目標値)	λ/16 rms
表面粗さ	3nm rms 以下 (目標値)	2.9nm rms

表 4.11: 研磨加工仕様と結果

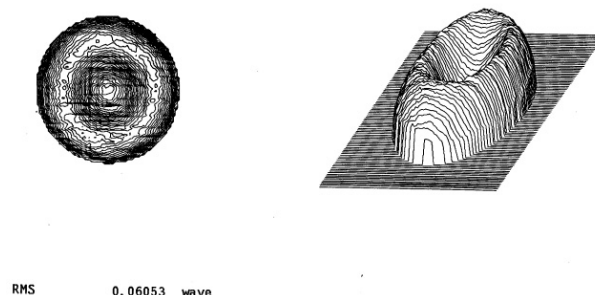


図 4.68: 面精度 (干渉計測定、マスク有効径 280mm、λ = 632.8nm)

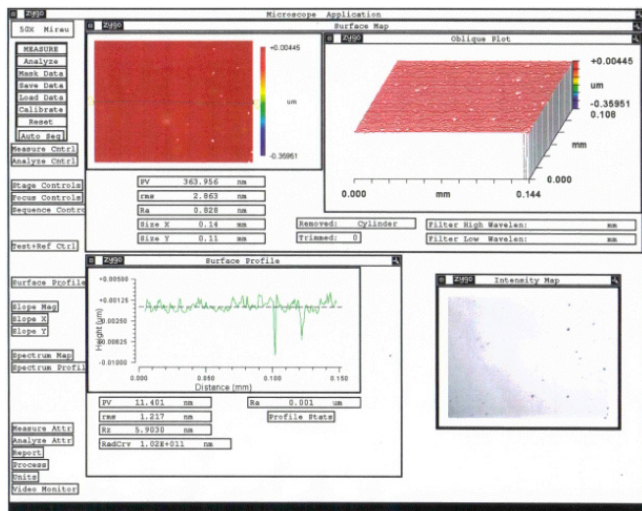


図 4.69: 測定範囲 0.14mm×0.11 mm での表面粗さ (Zygo 表面粗さ計、コート後)。2.9 nm rms だった。

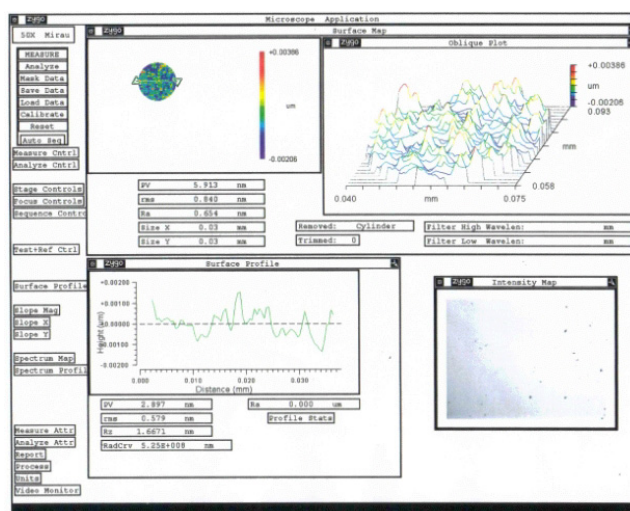


図 4.70: 測定範囲 0.03 mm×0.03 mm での表面粗さ (Zygo 表面粗さ計、コート後)。0.84nm rms だった。)。狭い範囲 (素材中の粒子の大きな部分を除いた) ではより滑らかな面となっている。

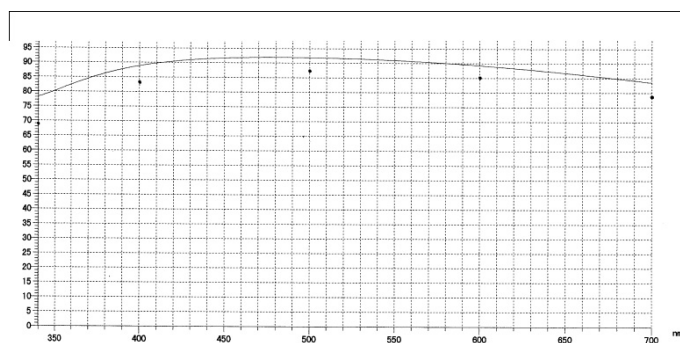


図 4.71: コート分光特性

4.6 制御系ソフトウェアおよび計算機システム

4.6.1 JELT 制御系基本構想

制御系ハードウェア

制御系ハードウェアの構成は基本的にすばる望遠鏡の構成と同様に設計、製作することを考えている。その構成は、

1. 望遠鏡、ドーム、保守運用装置に関する制御

遠隔制御すべき望遠鏡やドームの機械的駆動部、および熱や通風の制御装置を所定の結像性能を達成すべく計算機制御し、かつ状態の管理を行う機能を実現する。

2. 観測装置に関する制御

観測装置に付属する固有の制御部と共に観測装置の制御と監視、観測データの高速取得および所定の実時間処理を行う機能を実現する。

3. 観測の遂行と観測データを管理、解析・評価する観測統合制御

望遠鏡、観測装置の制御を統合的に管理し、観測データを取得、管理し、観測データ解析を含めて観測品質管理を行う機能を提供する。

からなる。

ドーム内の望遠鏡、観測装置を制御する 1、2 の制御装置および計算機類は、熱的に望遠鏡、ドームから隔離された制御棟に設置し、ドーム内への熱擾乱を極力避けるようにする。JELT の制御はすばる望遠鏡に比べてより複雑な制御が必要となるのはなかば自明であろう。分割鏡による鏡面位置制御・形状制御、多機能 AO に伴う可変型副鏡 (あるいは第 3 鏡以降の鏡) の制御、30m に達する主鏡サイズによる大気分散補正系の制御、風圧による望遠鏡構造への影響除去、(将来の) 干渉系としての制御、大熱容量としての主鏡及びドームの熱制御、観測装置焦点部への主鏡ビームのトラッキング制御等、各部のハードウェアの開発と平行しての制御系の設計・開発が必要となる。また、望遠鏡、ドーム、観測装置類が巨大化しているので、それらを安全、迅速に、かつ操作性良く取り扱うため、それらの保守運用のための専用装置の設計とその制御系開発も重要な課題である。

観測統合制御を司る 3. は、望遠鏡と離れた制御等に設置され、望遠鏡・観測装置操作者への操作インタフェースを提供するものである。汎用性の高い計算機システム、ネットワークで構成され、早いリプレイスサイクルにも対応できるようにする。

望遠鏡設置サイトの過酷な状況下での高精度観測を実現するため、信号ラインはできるだけ光ファイバ化し、耐ノイズ性を向上させることは、すばる望遠鏡の場合と同様に重要である。制御系は優れた保守性、安全性、運用性を実現するように設計、製作するが、そのためには、故障が発生した場合制御システムの階層 (レイヤ) ごとにあるいは部分構成要素ごとに独立して動作可能なシステム構成とする。人工頭脳的な手法を取り入れた自動点検で故障部位の切り分けを容易にし、迅速な

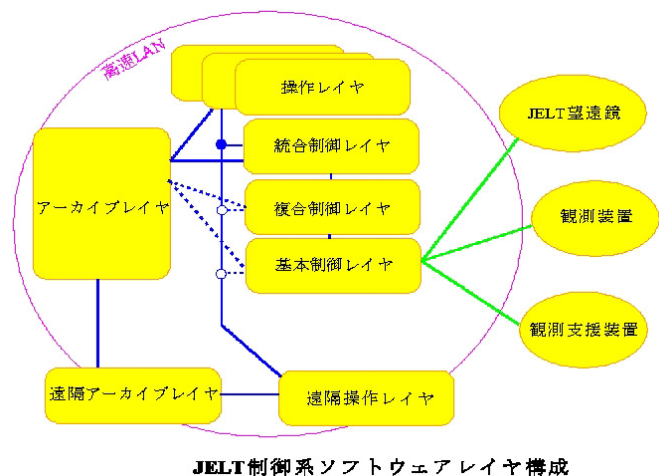


図 4.72: JELT 制御系ソフトウェアレイヤ構成

故障診断を実現したい。また、故障診断の結果から適切な対処方法を明確に指示し、故障要素の容易な交換により、故障復帰できるようなシステム構成を検討する。

日常的な機能更新や新規機能の開発にあたり、運用システムへの干渉がないように、運用システムと同等機能を持つサブシステムを準備しておくことは、すばる望遠鏡の経験からも重要である。

制御系ソフトウェア

制御系ソフトウェアは機能内容に従ったレイヤ構成を取る。個々の装置はそれに対応した要素を制御するための単体制御機能（基本制御レイヤ）を持ち、これらを統括して制御する統括制御用計算機システム上で動作するソフトウェアにより関連の制御装置と連携した複合制御機能（複合制御レイヤ）を持つ。これらの機能をより上位レベルで一元的に統括管理することによって基本構想を満たす統括制御用計算機システム上での総合機能（統合制御レイヤ）を実現する。実際の操作などはGUIの完備した操作端末計算機（操作レイヤ）で行う。取得されたデータをアーカイブし、画像解析を行う計算機群（アーカイブレイヤ）も必須である。

総合機能として望遠鏡システム（ここで望遠鏡システムと呼ぶのは、望遠鏡、ドーム、観測装置、一部の保守運用装置などを包括したものである）の運用には、二種類の運用モードを持つ。観測のための観測制御モードと保守・開発のための保守制御モードである。これらのモードは別途仕様が規定される観測装置およびそれら個々の観測装置が持つ装置固有の制御部と連携して機能する。

望遠鏡制御系には、複数の運用者が同時に部分運用あるいは状態監視に携われるものとするが、安全確保のため、相矛盾する運用命令が投入されても、人的物的な事故が発生しないよう、運用の管理機能を盛り込んだシステム設計を行う必要がある。

- (a) **観測制御モード** 観測制御モードについては、すばる望遠鏡での経験をふまえ、コマンド（制御指令、命令）発行により制御を行う会話型モード、スケジューラに運用シーケンスを事前登録して自動的あるいは半自動的に制御を行う登録型モードを設ける。また、観測時に使用する観測所常備のデータベースを整備する他、ユーザ持込みのデータを有効に活用できる機能を備える。

運用にあたり日常の望遠鏡、観測装置の観測前診断が必要となるが、そのための機能も製作しておかななくてはならない。

- (b) **保守制御モード** 保守制御モードとは、制御系のハードウェアおよびソフトウェアを保守し、それらを改良あるいは開発するためのモードである。保守制御モードには各制御装置およびその専用プロセッサの動作をローカルにチェックすることができるローカル保守モードと、ネットワークを通してシステム上でチェックできるネットワーク保守モードが必要である。また作業場所がマウナケア山頂と同等な高山が想定されるので、複雑な動作をする大型設備を統括的に保守するために保守運用機構状態管理機能を備える。それらの機能、保守すべき項目および停電時の対策について詳細をすばる望遠鏡の経験を元に今後詰めて行かなくてはならない。

特に、各制御装置が望遠鏡制御用計算機システムの直接制御下でない場合の保守作業を統括的に安全かつ確実に実行するための低レベルでの保守運用機構状態管理機能が必要である。この機能を実現するためには、各種保守運用機構の状態を監視し、作業時には望遠鏡制御用計算機システムと共に現場に設置された機構固有の制御部と連携して作業手順を示し、確認しながら作業を進めるなどの状態管理を行うことが必要になるが、そのための事前のシステム検討が必須となる。

4.6.2 各部制御系詳細

- (a) **望遠鏡制御系** 望遠鏡架台駆動制御装置、主鏡能動支持機構制御装置、副鏡等制御装置、視野回転・大気分散補正制御装置、焦点部制御装置、AO制御システム、分割鏡制御、可変型鏡、等の詳細は、各部の詳細の設計に伴って決められる。日常的な望遠鏡の診断が可能とする準備も必要である。

- (b) **ドーム制御系** 基本構造駆動機構制御装置、ドームシャッターおよび風速制御機構制御装置、熱制御機構制御装置、保守運用機構制御装置、等の詳細は、各部の詳細の設計に伴って決められる。
- (c) **観測装置制御系** 観測装置制御系は、観測目的に応じて望遠鏡の各焦点に装着される観測装置固有の制御部（別途仕様を規定する）と密接に連携する制御の一部を分担する観測装置制御部で構成される。観測装置インタフェースは JELT 用の標準を設ける。これらの観測装置制御系は、各観測装置の詳細の設計に伴って決められる。
- 日常的な観測装置の診断が可能とする準備も必要である。
- (d) **制御用計算機システム** 制御用計算機システムは望遠鏡制御用計算機システムおよび観測装置制御用計算機システムからなる。制御系の総合機能を満たした観測制御モードおよび保守制御モードを実現するために、両者は連携して天体観測に当たっての総合性能を達成できるシステムとする。また、計算機間にはローカル通信システムとしてドームおよび制御棟内にネットワーク網を構築して、観測に必要なデータベースの移送を行う。観測装置が生み出す大規模の画像データなどは観測装置制御用計算機システム経由でアーカイブ・データ解析計算機群（下記）に移送する。そのために多量のデータを高速に移送できるデータベースを設置する。
- 遠隔地からの、望遠鏡システムのモニター、試験、制御を可能とするリモート接続を、ネットワークの安全性を考慮の上構築する。
- ネットワーク診断を常時行い、異常時にはバックアップルートで報告できるシステム監視機能も実現しておく。
- (e) **アーカイブ・データ解析計算機システム** アーカイブ・データ解析計算機システムは、望遠鏡に取り付けた観測装置が生み出す大規模の画像データなどを観測装置制御用計算機システム経由で取得・処理する。取得データの実時間評価による観測スケジュールの実時間更新機能を実現することが可能なように、実時間データ解析機能を有し、観測遂行の上で、制御用計算機システムとの密な協調が可能なシステムとする。観測遂行に必要なデータベースを保持し、制御用計算機システムに必要なデータベースの移送を行う。
- 取得データの転送および観測用データベースの転送、およびリモート観測のための遠隔地との大量のデータを高速に移送できるデータベース、ネットワークは必須である。
- 取得データの観測者への配布サービスの準備も必須である。観測データの画像解析をどのレベルまで行って配布データとするかは今後の議論が必要である。
- (f) **観測支援装置制御系** 観測支援装置制御系は時刻装置、気象観測装置、スカイモニター、雲モニター、水蒸気量モニター、シーイングモニター、AO レーザ発射装置用環境モニター（航空機、他望遠鏡指向位置）、などからなる。これは観測時に必要となる情報を制御系に送付すると共に、観測条件の把握および判定のために必要な気象データおよびドーム構造内部の温度データなどを取得する。
- (g) **電源装置および配線付帯装置** 電源装置は交流無停電装置、非常用発電装置で構成され、望遠鏡本体（鏡筒・架台、制御系およびドーム構造）、観測装置、計算機類に必要な安定した電力を分配・供給すると共に、事故などによる商用電力の停電時に必要な電力を確保する。また、配線付帯装置は電力線および信号線の敷設に係わる分電盤、中間配線接続盤などで構成され、望遠鏡本体および観測装置と制御棟に設置される制御装置間を安全かつ確実に接続する。

4.6.3 JELT 制御系開発に当たっての留意点

上記の「JELT 制御系基本構想」に基づいて JELT 制御系を設計、製作するには、人員、時間とも相当量必要である。人員、時間の推定は今後さらに検討を詰めてから行いたい。製作は内製か外注製作かあるいはその両者混在になると思われるが、以下に JELT 制御系を設計、製作する上で留意する諸点をまとめておく。

1. 望遠鏡および観測装置の制御全般にわたって見通しを持った設計、開発製作、試験・立ち上げ、機能確認、運用を心がけること。そのための計算機システム設計グループの強い指導が必要である。
2. ソフトウェア製作に当たって、外部委託をする場合でも、設計から試験までの間、天文台側でトレースが可能なようにする。納入後の天文台主体のメンテナンスができるようにする。
3. ソフトウェアの著作権 (閲覧、改変) は天文台が (少なくとも半分は) 保持する。
4. 制御ハードウェアについて、その詳細図面 (図面、詳細寸法、部品) を天文台が独自に閲覧できるようにしておく。
5. 制御ハードウェア、ソフトウェアについては、可能な限り商用標準品を用い、更新時のスムーズな移行が可能なように留意する。商用標準品以外を用いる場合には、天文台との共同試験を経て天文台の了解を得る。
6. 制御系各部については 15 年以上の耐用年数を確保し、10 年サイクルでの更新が可能とする
7. 国際的に分業で設計、製作、試験をする場合でも、上記の天文台側の権利を確保する。
8. 望遠鏡および観測装置の制御ソフトウェア設計に当たっては、観測所運用指針を明確にした上で行う (観測者と制御操作者との関係等)。
9. 制御点数も多く、望遠鏡・観測装置が大型のためアクセスも困難であることが予想されるので、リモートでの制御機能の確認、リモートでの設定パラメータの変更及びその保存、が可能とする。
10. 望遠鏡および観測装置の制御系の試験、機能確認、運用時には、リモートでの実行が重要になるが、その場合でも制御系担当者以外からのリモート接続は最低限に限り、必要であれば (異常があれば) 外部接続の切断が即座に可能なシステム設計を心がける。
11. 望遠鏡および観測装置の制御系の設計、開発・製作時には、同時並行的な整合性のとれた開発が可能となるようにする。
12. 運用操作上重要である G U I は市場での開発進歩の度合いが激しいものであり、市場の進歩にあわせた更新が容易なように制御系本体とは別個に製作するべきである。また、各種パラメータなどはハードコーディングをしてはいけない。
13. 望遠鏡、ドーム、観測装置ハードウェアの設計、製作について、その初期の段階から制御系開発者が参加あるいはトレース可能としたい。

4.7 観測装置構想

観測装置はナスミスプラットフォーム上に展開する。三非球面光学系では直径 2m 程度の平坦な焦点面が提供されるので、同種または異なる複数の観測装置を配置してこれを有効利用する。最終焦点前にピックアップ鏡を挿入することにより焦点面の一部を別の観測装置にフィードすることもできる。基本的には装置交換は行わず、必要がある場合にのみ切り替え鏡の操作で装置を切り替えることとする。

4.7.1 近赤外広視野カメラ/多天体分光器

口径 30m 級の次世代望遠鏡の焦点面は直径 2m 程度に広がるものとなるため、冷却瞳を持つ再結像光学系が必要な赤外線の観測装置は、焦点面を分割することが必須となる。その場合、たかさんの入射窓を持つ一つの巨大な真空容器内部に、出来るだけ高密度で光学系を配置する方法と、真空容器を小さくして装置ごと積み上げる方法が考えられるが、装置開発やメンテナンスのし易い後者の方法を採用する。

真空容器は対角長 48cm、長さ 1.5m の六角柱の形状をしており、直径 32cm の入射窓を持つ (図 4.73)。内部にはコリメータレンズ系とカメラレンズ系があり、F/15 入射光を F/3 で検出器上に集光する 5:1 縮小光学系となっている。中間部は直径 5cm の平行光ができ、フィルター (5 種類) やグリズム (3 種類) を入れることが可能である。その中間の瞳位置には、望遠鏡主鏡像に合わせて自由に回転する冷却瞳が配置される。検出器は 2048×2048 素子の HAWAII2 アレイ (画素サイズ $18\mu\text{m}$) で、視野 2 平方分 ($1'4 \times 1'4$) をカバーする (画素スケール $0'04/\text{画素}$)。望遠鏡焦点面に相当する入射窓後方には、キャタピラ式の多天体分光用スリットシステムがあり、多天体分光の性能も持つ。

焦点面にはこの装置を 19 台並べ、直径 2m の焦点面の 23% に相当する 38 平方分の領域をカバーする (図 4.74)。全体を巨大なインストゥルメントローテータに載せて、天体追尾に伴う焦点面の回転に合わせて装置全体を回転させる。必要であれば、各装置の入射窓を 2 重にして非点収差補正の機能を持たせることにより、装置の台数を増やして更に観測視野を広げることも可能である。

一回の露出で 38 平方分がカバーされるが、視野をずらして 4 回の露出を行うと 148 平方分が観測でき (縦方向に少し隙間ができる)、6 回の露出を行うと隙間のない 172 平方分の観測を行うことができる (図 4.75)。

多天体分光用スリットは、狭いスペースに格納できるよう、キャタピラのように巻き込んで待避させることが可能な構造を持ち、それぞれのキャタピラ板の内部に移動可能なプレートが納められているものである (図 4.76)。スリットの可動部分は視野の左右半分のそれぞれ $1/3$ の部分で、スリット幅は可変、長さは 3mm ($1'4$) で、隣同士の上に 1mm のデッドスペースがあり、46 枚のキャタピラ板で視野全面を覆う。スリット位置は、キャタピラ板を一枚ずつ出していく際に、アクチュエータで位置決めし、その都度イメージを取得して位置確認をしながら自動で行うもので、全て配置するのに 20 分程度かかることが予想される。

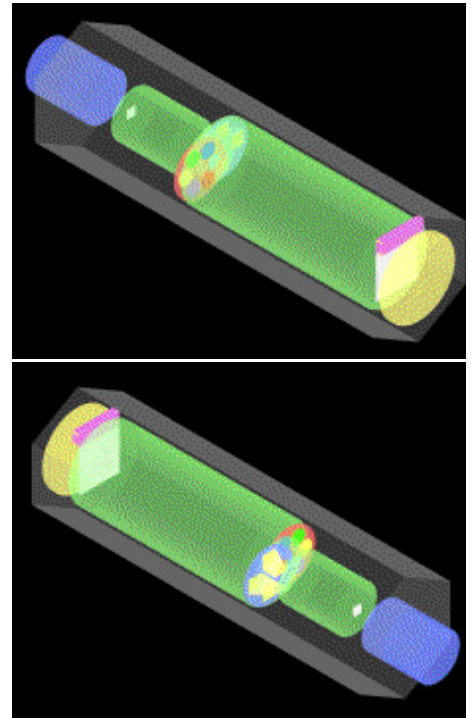


図 4.73: 近赤外広視野カメラ/多天体分光器装置概要

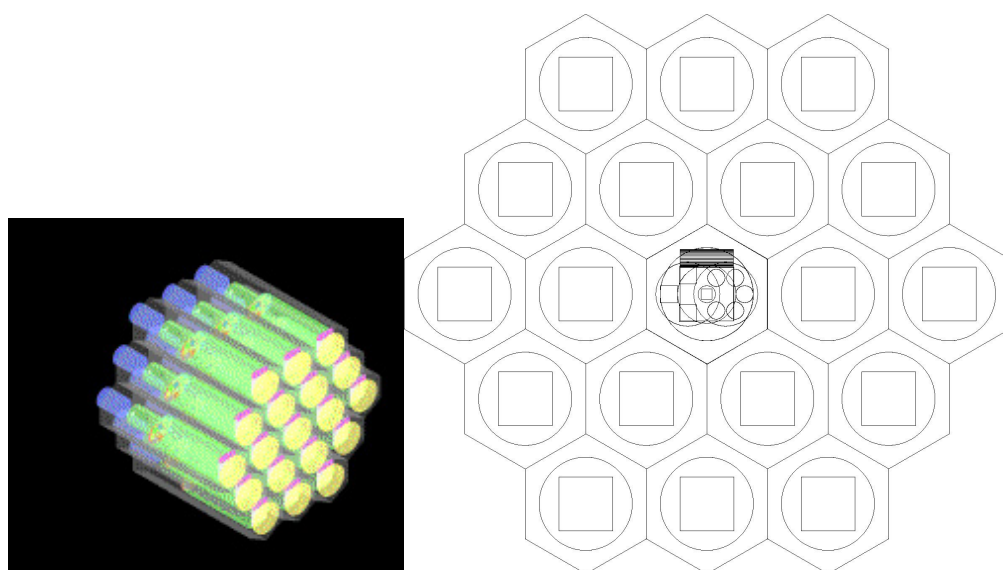


図 4.74: 装置の配置

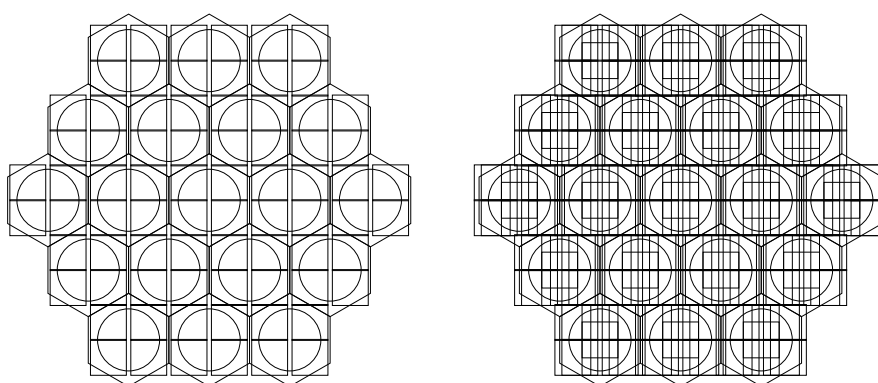


図 4.75: 観測方法 (左は4回、右は6回視野を変えて観測した場合)

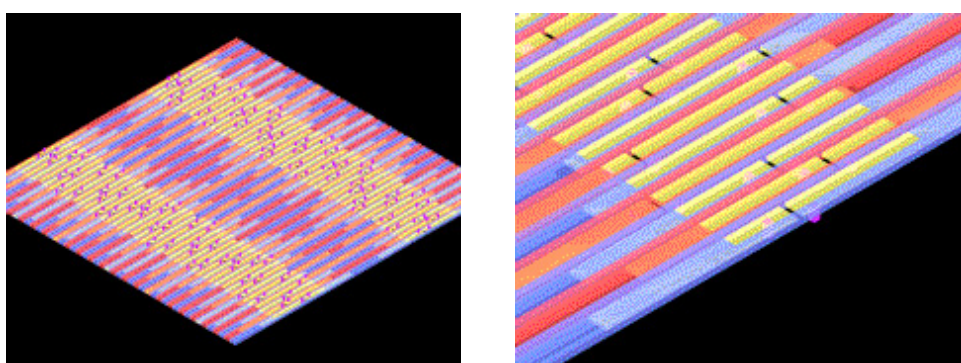


図 4.76: マルチスリット構造 (左は裏面全面、右は表面の拡大図)

4.7.2 高分散分光器

次世代大型望遠鏡で期待される高分散分光観測

集光力を要する高分散分光観測においては、地上大型望遠鏡が威力を発揮する。次世代大型望遠鏡で期待される研究として、以下のような観測が提案されている。

波長分解能 ($R = \lambda/\delta\lambda$)	> 100,000	星間 (銀河間) 物質、恒星 (同位体組成)
	50,000–100,000	恒星 (元素組成)、系外惑星探査
	10,000–50,000	恒星、銀河
波長域	紫外域 (3000–4000Å)	恒星 (金属線)
	可視域	(通常)
	近赤外域 (1–2.5 μ m)	QSO、低温度星
安定性	1m/s	系外惑星探査、星震学
	100m/s	(通常)
時間分解能 (検出器の読みだし時間など)	10 秒	(通常)
	1 秒	X 線連星
	< 1 秒	X 線連星?
多天体観測	10 天体	エシエル分光可
	> 100 天体	単一次数による観測
効率 (透過効率+検出器の効率)	最高 13%	HDS 並
	> 20 %	

表 4.12: 高分散分光器基本性能に関する検討事項

QSO 吸収線系

1. 微細構造定数の時間変化の測定：様々な赤方偏移 (z) における金属線の波長偏移の観測から求める。
2. ハッブル定数の測定：Lyman- α forest の速度変化 (z 変化) を 0.1 ms^{-1} の精度で 5–10 年間観測して、 z の関数としてハッブル定数を求める。

局所銀河群 局所銀河群に属する銀河を恒星に分離し、運動と組成を測定することで、その構造と形成過程を解明する。

銀河系、恒星 種族 III にいたるまでの低金属星の組成の測定、同位体組成の測定など

系外惑星 ドップラー法による探査のほか、惑星からの反射光の検出などにより惑星本体の情報をえる。

X 線連星 ブラックホールや中性子星の周囲の降着円盤からやってくる光を、高分散かつ高時間分解能で観測し、ブラックホール、中性子星周りの降着円盤の物理を解明する。

基本性能についての検討

高分散分光器に期待される基本性能として検討すべき項目を表 4.12 にあげた。それぞれの項目で、とりうる選択肢 (一部は目標) と、それぞれに対応する観測対象、関連する問題点をあげた。こういった観測に重点をおくかという点を基本にしながら、技術的な可能性、製作コストや運用といった観点も含めて仕様をつめていくことになろう。

技術的な検討事項

前節であげた基本性能を実現していくうえで、以下のような点で技術的検討が必要である。

1. 分光器サイズ 波長分解能を固定し、同じような分光器を作成することになると、分散素子、ひいては分光器全体のサイズは口径に比例して大きくせざるをえない。たとえば、すばる望遠鏡の高分散分光器である HDS と同じ性能をもった分光器を口径 30m の望遠鏡で実現しようとする、さしわたし 15m 以上の大型分光器となる。このように装置を大型化させることは、製作や運用の困難さだけでなく、安定性の確保・向上をはかるという意味でも問題が大きい。

これを避けるためには、いくつかとりうる方策がある。

補償光学の利用 星像のサイズを小さくすることができれば、そのぶん狭いスリットで観測できることになるので、小型の分光器で高い波長分解能を実現できる。すばる/HDS では 0".4 のスリット幅で約 100,000 の波長分解能となるが、仮に 0".2 の星像サイズが得られれば、分光器のサイズは半分になる。イメージライサを利用することも考えられるが、もう一つの方法は補償光学の利用である。ここで目標にするのは、必ずしも望遠鏡の回折限界のイメージを得ることではなく、星像が必要なだけ（あるいはできるだけ）小さくなればよい。

エマージョングレーティングの仕様 これにより、通常のグレーティングより、ある程度サイズを小さくすることが可能になる。

波長分解能の設定 波長分解能を必要以上に高くせず、効率的に装置を使えるように設定する。

2. 多天体観測機能 多天体観測機能は必要となると思われるが、エシエル分光器を採用する場合には、一度に観測できるのはせいぜい 10 天体程度になる。一方、単一次数の観測にすれば、100 天体程度の観測も可能になるが、観測波長域は狭く限られる。

多天体観測にはファイバーの利用が考えられるが、その開発が必要となる。ファイバーを利用することで、分光器の設置場所などには自由度が増す。

3. 時間分解能 高分散分光観測では、通常露出時間が長く、時間分解能の向上はあまり追求されてこなかったが、タイムスケールの短い現象の高分散分光観測によって、新しい研究分野が切り開かれる可能性がある。短い時間に光量を稼ぐという点では、大口径望遠鏡の能力を最も生かすことができる観測である。アバランシュ光ダイオードアレーなどの高速光子計数検出器を用いるか、読み出しが速く、効率のよい検出器の導入あるいは開発が必須である。

4. 透過効率の向上 大型望遠鏡の有効な使用のためには、装置の透過効率（および検出器の効率）も最大化する必要がある。HDS の効率（望遠鏡も含む）は、最高で約 13% であるが、その向上が期待される。クロス・ディスパーザにプリズムを使用するなどの可能性が考えられるが、そのためにも装置の大型化は可能な限り避ける必要がある。

4.7.3 中間赤外線観測装置 (仮称:Big-COMICS)

地上望遠鏡が 30m の時代には衛星の口径も 6–8m 級となり、撮像や低分散の分光においては感度の点で遙かに及ばない。従って、衛星ではできない相補的な機能を実現する必要がある。

高空間分解能撮像 (専用冷却 AO システム) ひとつの大きなメリットは、望遠鏡口径が大きいことによって回折限界での PSF が小さく、約 4 倍の解像力が達成できることである。しかし、これは望遠鏡口径だけでは達成されないで、工夫が必要となる。主鏡直径が 8.2m のすばる望遠鏡はベストサイトの一つであるマウナケアにあり、ドームにも工夫が施されていたこともあり、自然シーイングで 8m の回折限界の解像度をほぼ達成している。しかし、30m 望遠鏡では、AO なしでは回折限界の解像度を達成することができない。中間赤外線では常温の鏡の枚数が増えるとそれだけシステム放射率が上がりノイズが増加するので、最善の感度を達成するには冷却 AO システムが必要となる。中間赤外線は波長が長いので AO システムに必要とされる素子数は近赤外に用いるシステムに比べると圧倒的に少なくても良い。従って、専用の冷却 AO システムを開発してシステムとして内蔵するのが良いと思われる。冷却 AO システムで開発要素となるのは低温で動作する可変形鏡である。また、波面センサーは可視光に加えて近赤外線でも使えるようにするのが望ましい。

冷却瞳チョッピング 中間赤外線観測にはチョッピング手法が必要である。8m クラスの望遠鏡では、副鏡サイズが 1m 程度で通常の振動副鏡が用いられてきた。しかし、30m の JELT では副鏡サイズが 4m となるために、振動副鏡を開発するのは容易ではない。そこで、光学的に副鏡と等価となる瞳位置に (小さな) 鏡を設置し、そのミラーを振動させることによってチョッピングを実現する。この瞳ミラーも冷却されている必要があるので、低温で動作する振動システムを開発する必要がある。

冷却状態で交換可能なモジュール化 30m 望遠鏡では、装置の開発規模も大きくなり、頻繁に新しい装置を開発することが容易ではない。しかし、衛星に対してアドバンテージを大きくするには多くの観測機能を実現したい。そこで、各機能のモジュール化とそのホットスワップを実現する。モジュール毎に真空槽と冷却システムを持ち、大型のゲートバルブによってホットスワップを実現する。これにより、フレキシブルな運用と新たな機能の追加を容易にする。特に、AO システムと冷却瞳チョッピングはすべての観測システムに共通の機能であるので、モジュール化が有用な部分である。

近赤外線での撮像機能 中間赤外線放射の輝度分布は可視光や近赤外線などと異なる場合が少なくない。これは、観測対象が減光が大きい領域を対象としている場合や、星間物質・星周物質からの熱放射が星からの成分からよりも遙かに強い場合が多いことによる。従って、このような観測対象の研究のためにはその他の波長との同定が必要となる場合が多い。

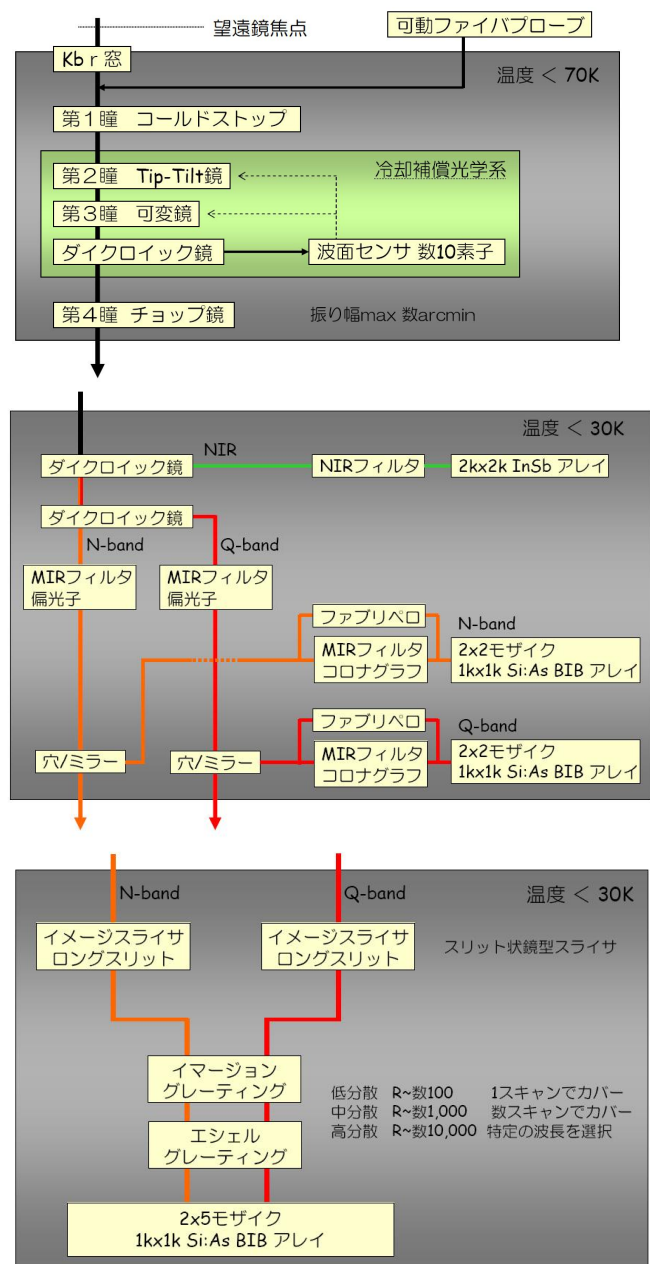


図 4.77: Big COMICS のブロックダイアグラム

表 4.13: 中間赤外線観測装置の基本性能のまとめ

装置概要	観測波長	7.5–27.5 μm 撮像分光 + 2–5 μm 撮像
	空間分解能	0'08 – 0'2 (AO あり)
撮像機能	視野	1' $\times$ 1'
	検出器構成	(2 $\times$ 2 モザイク 1k $\times$ 1k Si:As BIB 中間赤外線検出器) $\times$ 2 set 2k $\times$ 2k InSb 近赤外線検出器
	視野構成	N-, Q-, NIR-band 同時撮像
	その他の機能	ファブリペロー, 簡易コロナグラフ, 偏光撮像
分光機能	波長分解能	数 100–数 10,000
	スリット部構成	イメージスライサ, ロングスリット
	分散素子	イマージョン・エシェルグレーティング
	検出器構成	2 $\times$ 5 モザイク 1k $\times$ 1k Si:As BIB 中間赤外線検出器
	分光機能構成	N-, Q-band 同時分光
	その他の機能	偏光分光
観測補助装置		冷却瞳チョッピング 冷却補償光学 (副鏡 AO 非採用時) 標準星同時観測用可動ファイバープローブ

その場合に、別途、別波長の観測を行わなけ

ればいけないのは効率が悪い。また、画像の様子が異なるためにパターンのみからは厳密な位置決定ができない場合も考えられる。そこで、装置内に近赤外カメラを内蔵して、ダイクロイックミラーにより中間赤外線での観測領域を近赤外線と同時に撮像できるようにする。

全体の光学系ダイアグラムを図示 (図 4.77) する。

4.7.4 JELT で実現する偏光機能について

電磁波は、進行方向、強度、偏光の 3 つの基本要素を持っており、天文学的観測においては、これらを波長と時間の関数として認識することで、天体の物理情報を得ることが通例となっている。しかし、殆どの観測において偏光は扱われていないのが現状である。偏光は他の要素には無いベクトルの性質を保持しているため、これを無視すれば天体の情報の多くの割合を失うことにもなり得る。実際、太陽表面や星間空間の磁場構造の決定や、活動銀河核の統一モデルの構築など、偏光観測は天文学の多くの領域で目覚ましい成果をあげてきた。

通常、天体から運ばれる光の中で偏光成分は多くても 10% 程度であり、光の強度と同じ精度で偏光成分の強度を測定しようとする場合には、強度のみを観測する場合に比べて 10 倍以上の S/N 比を稼ぐ必要がある。 S/N 比が光子統計誤差で決まる場合には、実に 100 倍以上の光量を必要とすることになる。これまでの偏光観測が、明るい天体など比較的制限された用途にだけ用いられてきた要因の一つはここにあるといつてよい。このような観点から、広い面積に亘って一度に光を集めることができる次世代の超大型望遠鏡はより暗い天体での偏光測定、あるいはより高い波長分解能での偏光スペクトル測定など、偏光測定の活躍の幅を大きく広げてくれる。未知の宇宙を探るためのユニークなプローブとして、JELT においても偏光機能は是非実装しておきたい。

現代天文学で用いられる偏光器は、偏光変調器と偏光解析器の 2 つの要素で構成される。偏光変調器は入射光の偏光状態を変調させる光学系で、偏光解析器はどの偏光状態の光を検出器まで通過させるかを定める光学

系である。偏光解析器にビーム・スプリッターを入れて直交する2つの偏光成分を同時に測定することにより、大気や光学系内部で発生する減光の時間的変動や波長依存性を相対的にキャンセルして高い観測効率と偏光測定精度が得られている。具体的には、変調器にはアクロマティックな波長板、解析器には偏光プリズムが用いられている。よほどの技術革新が無い限り、この組み合わせは JELT 時代にも引き継がれるであろう⁷。

偏光測定を制限する主な要因は、望遠鏡や装置内部で発生する器械偏光である。これは反射鏡や光学素子の非一様性や非軸対称性により生じる。特に近年の大型望遠鏡にみられる明るい光学系では、光線の入射角が大きいことにより光学界面や薄膜による偏光も大きくなり、結果的に光軸から離れた場所で大きい器械偏光(最大数%)を生じ、広がった天体や多天体同時測定の妨げになっている。さらに、ナスミス焦点では平面反射鏡による大きな器械偏光(1.5–5%)が生じる。これらの器械偏光は、入射光の偏光状態や、入射角、膜面状態の時間変化などに複雑に依存するためその補正は容易ではない。この器械偏光が JELT では最もシビアな問題となると考えられる。装置の大型化により偏光素子のガラス材も大きいものが必要となるが、すでにモザイク化による大型の波長板プリズムは実用化されて広く成功しているため、それほど厳しい問題とはならないだろう。偏光プリズムについては、視野と分離角の兼ね合いで材質や厚さを選択すればよい(透過効率、価格等も二次的に考慮)。

そこで、JELT で偏光測定を行う場合について、器械偏光をいかに減らすかという視点に立って装置構成を考えてみる。

明るい光学系であることの不利 これについては良案は無く、唯一、光軸付近の光学対称性が良い領域のみを測定に用いる、すなわち、視野を制限するという対症療法があるのみである。一つの点光源のみの偏光分光観測を行う場合や、点光源ないしは拡がりの少ない面光源の偏光撮像はこれで十分に達成できる。このような「狭視野」偏光器であれば、明るい望遠鏡光学系への実装は比較的簡単である。望遠鏡視野全域にわたる偏光撮像を行うことは、サイエンスにより必要とする精度が異なるため一概には言えないが、通常の偏光測定で必要とする $\Delta p = 0.1 - 0.2\%$ 精度を安定して出すのは困難であろう。

ナスミス焦点の不利 過去に特に太陽望遠鏡において、ニュートン焦点やクーデ焦点における器械偏光をキャンセルするコンペンセーターの導入が様々に試みられてきたが、いずれも成功したとは言い難く、精度の高い偏光測定が単純には実現できないことは証明されていると言って良い。このようなナスミス焦点における偏光測定の実現へ向けた打開策は2通り考えられる。

1. 測定に用いる視野を光軸中心付近のみに狭め、(その困難性は既知であるものの敢えて) 偏光較正を綿密に行うことで一定の精度を保つ。本来の意味のナスミス焦点では平面鏡が一枚だけと単純な構成であることから、光軸中心では光学系のモデル化やその結果としてのキャリブレーションは比較的簡単であると予想される。較正法を確立し、エンジニアリング時間を定期的にとることで、一定精度(器械偏光の1/10程度)では達成可能であろう。このような試みは、近赤外域では AO を通じた観測で行われており、サイエンスによっては十分な精度($\Delta p \sim 1\%$)が達成されている他、可視でもガリレオ望遠鏡などの4mクラスの望遠鏡で R & D が始められている。しかし、通常のカセグレン焦点並みの精度を実現するのが容易では無いことは、これまでの試みで明らかであると言って良い。
2. 望遠鏡光学系の軸対称性が保たれたカセグレン焦点付近に偏光器を置き、その出射光をナスミス焦点に置かれた撮像器ないしは分光器へ導く。偏光器を出た光は、入射光の状態によらず、一定の完全偏光成分に分けられているため、扱いが簡単になる。光の導き方は、大きくわけて、平面鏡の組み合わせで実現する方法(カセグレン焦点付近に偏光器を置き、その出射光を一枚目の平面鏡で片側のナスミス焦点付近へ飛ばし、そこで二枚目の平面鏡によりもう片側のナスミス焦点へ入れてやる方法と、カセグレン焦点の手前に垂直に一枚目の平面鏡を入れて偏光器を通し、通常のナスミス焦点の第三鏡と同じ位置に二枚

⁷近年、光相関器、光インターコネクション、光波面補償などの分野において光波の位相を2次元的に制御するデバイスの開発研究が進められており、その進化と応用によっては、より単純な構成で、応答性が良い偏光器を実現できる可能性もあると考えられるため、そのフォローないしは R & D にも力を入れていきたい。

目の平面鏡を置いてナスミス焦点へ入れてやる方法の二通りがまず挙げられる) と、光ファイバーによって実現する方法とが考えられる。ただしファイバーは望遠鏡姿勢により効率が変化しやすいため、精度を出すのは難しい。いずれにしろ、この方法を用いる場合には、通常ナスミス焦点で用いる第三鏡を外し、その付近に偏光器と反射鏡を入れる必要があるため、機械的な制限が生じる。偏光素子の大きさを小さく保つためには、副鏡を変えて焦点距離を短くする必要もあるであろう。しかし、偏光器から撮像器ないしは分光器へ反射で光を導いて高精度の偏光測定を行う方法は確立されており、機械的な面がクリアされれば十分に達成可能であると考えられる。

以上をまとめると、カセグレン焦点での機器着脱が困難な JELT クラスの望遠鏡で、一定精度の偏光測定を行う装置像としては次のようになる。

1. 広視野の同時観測は不可能であり、点光源の偏光撮像ないしは偏光分光に限られる。
2. 点光源に限った場合には、十分な較正法を確立することで、通常ナスミス焦点においても偏光測定が可能であると思われるが、過去の報告から、その精度を保つには十分な較正情報を一定期間ごとに得る必要があり、観測効率が落ちる懸念がある。これは赤外域よりも測定精度を必要とするサイエンスが多い可視域の観測において致命的と成り得る。
3. カセグレン焦点並みの高精度の偏光測定を実現する代案として、ナスミス焦点の第三鏡を、偏光器と反射光学系ないしはファイバー光学と置き換えることにより、偏光解析が済んだ光をナスミス焦点へ導き、ナスミス焦点に置かれた撮像器・分光器によって測定する方法が考えられる。この方法は、大きな第三鏡を交換するという手間が必要になるが、偏光光学系としては既に確立されており、精度を保つのは比較的楽である。第三鏡を取り外すのが難しい場合、第三鏡の上に逆カセグレン光学系のようなもの (あるいはレンズ光学系) を入れる解もあるかもしれないが、非常に大きい光学系とせねばならず、実現が難しいだろう。

よって、JELT において偏光測定を行う装置の基本構想として、第三鏡とナスミス焦点の装置を一体と考え、それ全体を偏光装置として捉えた光学系を開発することで、高精度の偏光測定を実現する方法を提案する。望遠鏡光学系が明るいことから視野はあまり広くはとれず、点光源が主な対象となるが、第三鏡を外して偏光器と平面鏡 2 枚を組み合わせ、偏光解析済みの光をナスミス焦点へ導くこと、およびナスミス焦点の撮像器ないしは分光器にマッチさせたりレー光学系を導入することで、大口径を活かした暗天体の偏光撮像や偏光分光、ないしは高分散の偏光分光を可能とする高精度の偏光測定を実現することが可能になる。これを基本線として、可能性を探って行くのが良いだろう。第三鏡を外すのが難しければ、第三鏡の上 (副鏡側) に光学系を納める解を考えるか、あるいは純粹にナスミス焦点で最大限の偏光補正を行うことで一定精度での測定を実現する事を考えることになろう。後者については既存の望遠鏡を用いた R & D はすぐにでも可能である。

4.8 補償光学系

4.8.1 補償光学系とは

地上にある望遠鏡の観測では、大気に密度揺らぎがあるために望遠鏡に入る光の波面が乱されてしまう。このために、望遠鏡焦点で光が一点に集まらず、星像がぼやけてしまう。これをシーイングという。この影響は望遠鏡の口径が大きくなるほど問題になってくる。たとえば、すばる望遠鏡 8.2 m で光が理論通り完全に集まったとするとその空間分解能は波長 2.2 μm で 0''.06 になる

口径 (m)	分解能 (")		
	0.5 μm	2.2 μm	10 μm
1.88	0.055	0.24	1.10
8.08	0.013	0.056	0.26
30	0.0034	0.015	0.069

表 4.14: 望遠鏡の回折限界分解能の口径と波長による違い

(表 4.14)。それに対して、大気の揺らぎでの星像の広がりはこの波長で $0''.5$ なので、望遠鏡の性能を全く発揮できていないことになる。補償光学装置は、この光波面の大気ゆらぎによる乱れを高速の波面センサーで測定し、大気ゆらぎが変化しない間に、光路中に置いた形状可変形鏡を変形させて、ゆらぎを打ち消して波面の乱れを補正する装置である(図 4.79)。これによって、地上にある望遠鏡でも、ほぼ回折限界の分解能を得ることができるようになる。大気ゆらぎの変動は速いため、この補正は毎秒数 100 から数 1000 回もの速さで繰り返す必要がある。

補償光学装置の効果は、高い空間分解能が得られるようになるだけでなく、狭い領域に光を集めるので天体の検出感度も向上する。地上とスペースの望遠鏡とを比較すると、地上望遠鏡の方が同じ経費では口径が大きいものができるため、補償光学系を装備した地上望遠鏡の方が、より高い空間分解能を達成することができる。

4.8.2 これまでの補償光学系

補償光学装置は、1970 年代後半に米軍によって人工衛星を監視するために開発されたのが実用化の始まりであった。その後 1980 年代後半からは天体観測のための開発が始まり、米国やヨーロッパなどで、口径 3–4 m 級の望遠鏡で試験的に使われるようになった。その後 1990 年代の終わりにはすばる、ケック天文台など 8–10m 級の望遠鏡には必須の装置として本格的に取りつけられている。これらのシステムの補正素子数は数 10–数 100 素子であり、それによって達成される補正性能は、波長 $2\ \mu\text{m}$ の近赤外域で回折限界の 10–60% 程度である。これらのシステムは、現在は自然の星を参照星とするものが主流である。しかしその場合、観測したい天体の方向に波面測定用の参照星がない場合が多いので、観測する天体が限られるという問題がある。それを解決するために、観測天体の方向にレーザー光を照射し、上空に人工的に参照星をつくるレーザーガイド星技術が開発され、実用化が進みつつあり、ケック望遠鏡では 2003 年より観測を開始している。このレーザーガイド星としては、高度 90km にあるナトリウム原子層に波長 589nm のレーザーを照射し、共鳴散乱を起こし光らせる方式が一般的である。

4.8.3 レーザーガイド補償光学系の開発

国立天文台ではすばる望遠鏡の駆動素子数 36 のカセグレン補償光学系を実用化した補償光学グループがその実績を踏まえて、新たにナスミス焦点用の駆動素子数 188 の補償光学系と、補償光学系の利用範囲をほぼ全

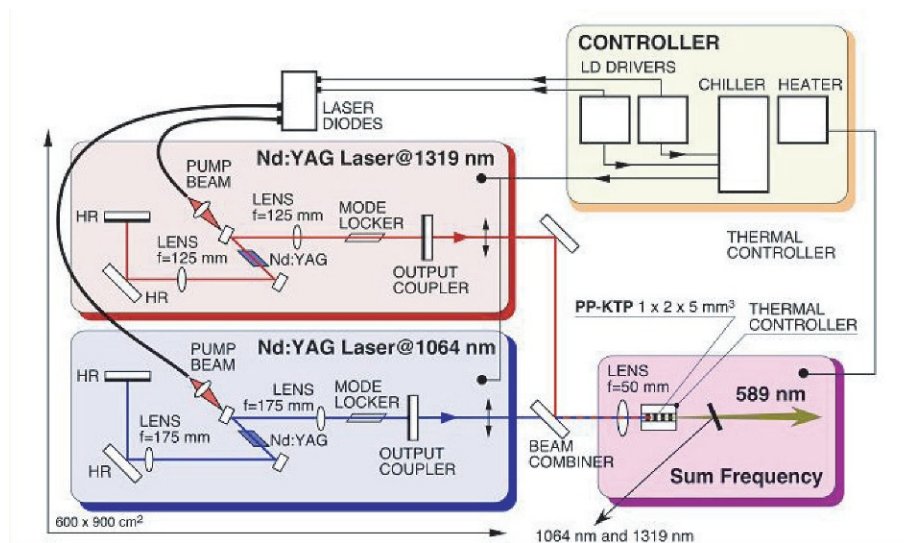


図 4.78: 国立天文台と理化学研究所が共同開発中のすばる望遠鏡用和周波全固体ナトリウムレーザーの試作機 (画像提供: 理化学研究所およびメガオプト社)

天に広げるためのレーザーガイド星生成システムの開発製作を、科学研究費補助金特別推進研究を受けて5カ年計画で推進している。

レーザーガイド星生成システムはナトリウム D 線 (588nm) で発振するパワーレーザーを観測したい方向に打ち、上空約 90km の高さにあるナトリウム層のナトリウム原子を励起し発光させることで、任意の方向に明るい人工星をつくり、この光を光源としてそれより下層の大気中の温度揺らぎに起因する波面誤差を実時間測定し、可変形鏡で波面誤差を補償するためのものである。鍵となるレーザーとして理化学研究所と共同で和周波固体レーザーを開発している。図 4.78 はそのプロトタイプ装置であり、波長 1369nm と 1064nm の YAG レーザー光を混合して和周波にあたる波長 589nm のレーザー光を発生する装置である。ちなみに JELT 光学系では第五鏡が上空 16 km に共役な配置となっており、これを可変形鏡にすることができれば Tropopause (～10km) の乱流による成分を補償することができよう。

4.8.4 補償光学技術の進展

現在、補償光学系は実用化の時代を迎え、任意の天体を観測するためのレーザーガイド星も実観測に組み込まれつつある。これからの補償光学系は 8–10m 望遠鏡での更なる高性能化と 30m 級の望遠鏡への応用を視野に入れ、観測目的に合わせて多様化の時代に入りつつある。これらは、かつてプリズム分光から始まった分光観測が、今や様々な形式の分光器を用いた観測へと発展しているのに対応する。これらの新しい補償光学系は、以下のように分類される。

1) ExAO (Extreme Adaptive Optics)

補正素子数を現在の 100–数 100 素子から 1000 素子以上 (8m 望遠鏡の場合) に増やし、波面誤差を減らすことにより星の周りのハローを落とす。これによって太陽近傍の星の周りにある太陽系外惑星の検出を狙う。これには、非常に明るいガイド星を使って、狭い視野での高い波面補正性能を追求する。これは、ハローを落とすことを目標とすることから高ダイナミックレンジ補償光学系とも呼ばれる。

レーザーガイド星は、自然のガイド星と違って無限遠にはない (90km)。そのため、天体からの光とは大気を通過してくる経路が違い、それが波面測定の誤差を生む。この ExAO では、極限まで波面誤差を減らす必要があるため、レーザーガイド星は使わない。

2) MCAO (Multi Conjugate Adaptive Optics)

補償光学系にはガイド星から角度が離れると補正性能が落ちるという欠点がある。観測天体から離れた方向にあるガイド星から来た光は、大気揺らぎのある高さでは、位置がずれてしまうので、波面測定および補正に誤差が生じる。これを解決するには、複数の方向 (例えば 5 箇所) にあるガイド星をレーザーで作ри、それぞれの星からの波面を測定し、その信号を統合することによって、大気揺らぎの立体的な情報を得る。その上で、複数の可変形鏡 (2–5 個) を空の複数の高さに対応する位置に配置し、それぞれの可変形鏡はそれに対応する高さにある大気揺らぎを補正するようにする。そのようにすると、広い視野

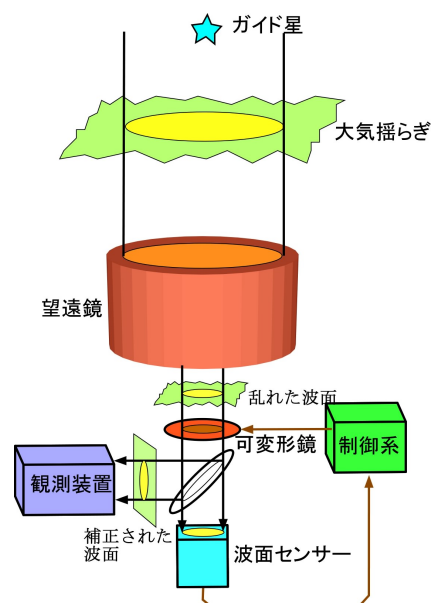


図 4.79: 補償光学系の概念図

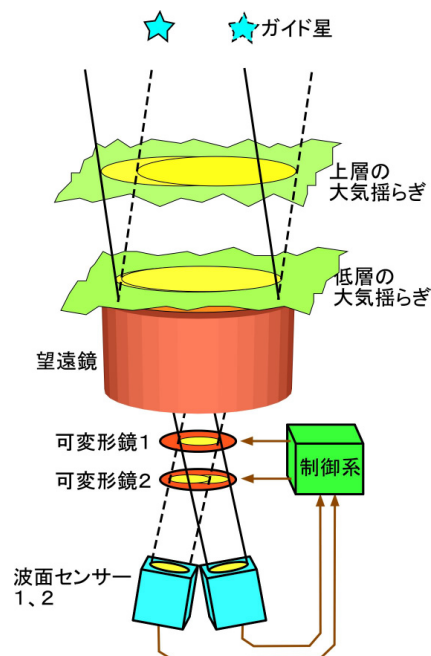


図 4.80: MCAO: マルチコンジュゲート補償光学系の概念図。複数のガイド星からの光を使って、大気揺らぎの立体的な情報を測定し、それに基づいて複数の高さにある大気揺らぎをそれぞれの可変形鏡で補正する。

に亘って回折限界の補正性能を確保することができる。この視野の広さは、単一ガイド星補償光学系の数 10 秒角と比べて、約 3 倍の 2 分角程度になる (図 4.80)。

3) MOAO (Multi Object Adaptive Optics、多天体補償光学系)

より広い範囲の補償光学系を MCAO 技術で作ろうとすると、広い視野をカバーするために補償光学系の光学コンポーネントのサイズが大きくなり、費用が莫大になってしまう。そのため、それぞれは狭い視野をカバーする小型の補償光学系を作り、補正したい天体ごとに補正をかける補償光学系 (MOAO) が検討されている。これによって数分～数 10 分角以上の視野にわたって補償光学系を使った観測ができるようになる。この場合、ガイド星から天体までの角度は視野が広い分平均して遠くなるので、波面測定の精度は落ちるが、それでもシーイングよりはるかに高い分解能を実現することができる。これも MCAO と同様複数のレーザーガイド星を用いる。

4) GLAO (Ground Layer Adaptive Optics)

大気揺らぎの約半分は地表付近に集中している。ガイド星から離れた角度からきた光でも、地表付近の大気揺らぎについては補正の誤差は生じない。そこで、地上付近の大気揺らぎのみを分離して、それを補正する。そうすると残りの波面誤差は上層の大気のみとなり、広い視野 (数-数 10 分角) に渡って、星像を 30 %程度小さくすることができる。これを実現するには、広い視野を確保できる補正光学系が必要で、望遠鏡の副鏡を可変形鏡にするのが適している (図 4.81)。通常はレーザーガイド星を想定しているが、ガイド星を見つける範囲が広いので自然ガイド星だけでよい可能性もある。GLAO の効果を推定するには地表乱流のスペクトルがコルモゴロフスペクトルから離れるスケールである Outer Scale を知る必要がある。

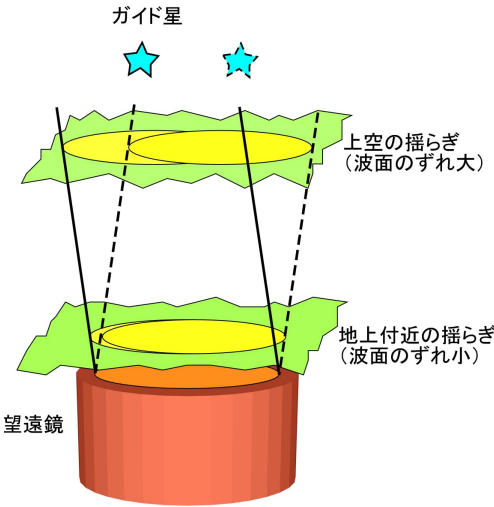


図 4.81: GLAO: グラウンドレイヤー補償光学系。大気揺らぎのうち大きな割合を占める地表付近の揺らぎだけを補正する。地表付近の揺らぎに対しては、角度が離れた星からの光でも測定誤差は小さいので、広い視野に亘っての補正が可能になる。

4.8.5 JELT 補償光学系の案

30m 級望遠鏡で使う補償光学系としては様々な可能性があるが、JELT 用に検討しているものは以下のとおりである。

表 4.15: JELT 用補償光学系と対応する観測装置

	観測装置	素子数	波長域 (μm)	空間分解能 ($''$)	ストレル比	視野
中間赤外補償光学系	撮像/分光	1000	7-30	0.07-0.20	0.9	2'
MCAO	撮像/分光	3000×3	1-5	0.007-0.03	0.6	30''- 2'
多天体補償光学系	分光	1000	0.5-5	0.1		20'
GLAO	撮像	1000	0.5-30	0.3		20'
ExAO(HDAO)	撮像/分光	30000	1-5	0.007-0.03	0.9	10''
可視光補償光学系	撮像/分光	10000	0.4-1.0	0.002	0.5	10''

1) 中間赤外補償光学系

波長 $7\mu\text{m}$ 以上の中間赤外域では 8m クラスの望遠鏡の時には補償光学系が無くても回折限界の星像を得ることができたが、30m になると補償光学系が必要になる。

その場合、できるだけ鏡の枚数を減らして、望遠鏡からの熱放射を減らすことが重要である。それを実現する方法としては、望遠鏡の副鏡を可変形鏡にする可変副鏡補償光学系と、可変形鏡を含めて補償光学系全体を冷却する冷却補償光学系がある。

可変副鏡補償光学系

可変副鏡は望遠鏡の副鏡を可変形鏡にするものである。通常の補償光学系では、焦点付近にビームを平行にする光学系を設け、そこに可変形鏡を置いて波面を補正するが、可変副鏡を用いると、そのような光学系が必要でないために、全体の鏡の枚数を増やすことなく補償光学系を実現でき、鏡からの熱放射が少ない補償光学系となる。また、可変形鏡のビーム径が大きいために、広い視野をカバーする補償光学系が実現できる。

これまで可変副鏡は、そのサイズが大きいために実現が難しかったが、最近になってアリゾナ大学の MMT 望遠鏡 (6.5m) や LBT 望遠鏡 (8.4m $\times$ 2) 用の直径 600mm、336 素子のものが実用化した。JELT の光学設計では副鏡の大きさは 4m であるため、この技術を発展させることによって、10000 素子程度までの可変副鏡の製作が可能である。

また、ガイド星からの角度が大きくなる時の星像の劣化の程度は波長に反比例して小さくなるために、中間赤外補償光学系では、マルチコンジュゲート技術を使わなくても、広い視野に亘って均一な星像が得られる。

冷却補償光学系

直径 4m の可変副鏡の製作が技術的に、もしくは予算的に困難な場合には、中間赤外観測装置の中に補償光学系を組み込む装置を製作する。技術的には、冷却しても動作する可変形鏡の開発が必要である。

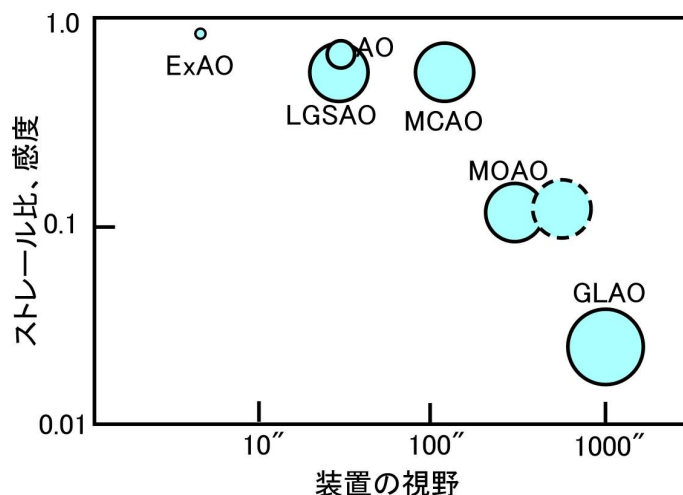


図 4.82: 各種補償光学系の補正性能と装置の視野の関係。装置の視野が大きい補償光学系は補正性能が低い傾向となる。補正性能、視野の数字は典型的な値を示しているため、実際はシステムごとによって異なる。また、円の大きさは、その補償光学系で観測できる天体の割合を示している。ExAO は全天で 100–1000 個しか観測できる天体がない。AO (自然ガイド星補償光学系) は全天の数 %、LGSAO, MCAO, MOAO, GLASO はほぼ任意の天体が観測できる。最近提案されている、MOAO, GLAO は回折限界性能というよりも、現在のシーイングリミットで観測している装置の感度を向上させるのが目的となっている。GLAO の視野は望遠鏡の視野でリミットされる。

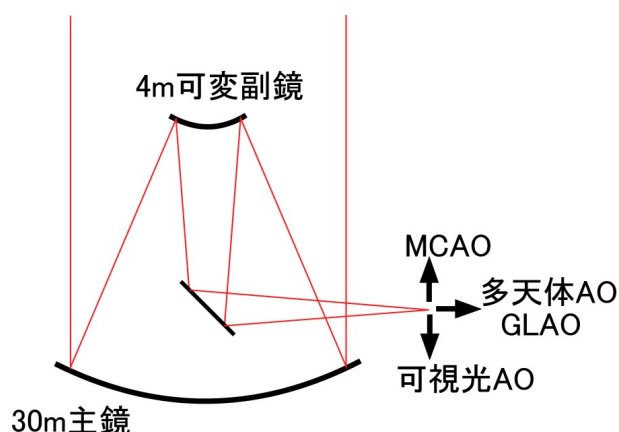


図 4.83: JELT 用補償光学系の配置概念図。ナスミス焦点位置の補償光学系は、ミラーもしくは場所によって切り替える。

2) MCAO (近赤外広視野観測用)

30m 望遠鏡でのマルチコンジュゲート補償光学系では、視野 2 分角に亘って波長 $1.65\mu\text{m}$ で回折限界性能を確保する。その為には、3000 素子の可変形鏡を 3 枚使って上空の大気揺らぎを 3 層に分割し、それぞれの大気揺らぎの補正を分担する。それをカバーする観測装置としては、近赤外カメラ、多天体分光器でアレイサイズは約 10000×10000 ピクセルとなる。

3) 多天体補償光学系

JELT のナスミス焦点は、20 分角の視野を持つ。これは、実サイズでは 2m という広い焦点面スペースがある。それを生かして、ナスミス焦点全面にわたって 100 台の補償光学系付き可視近赤外分光器を設置し、高分解能での同時分光観測を行えるようにする。

4.8.6 要素技術開発

JELT 補償光学系を実現するために必要な主要開発要素を以下にまとめる。

1) レーザー

固体レーザー

補償光学系用の 589nm の波長を出すレーザーとしてこれまでは色素レーザーが主流であったが、今は全固体レーザーがシステムをより安定に稼働できる、メンテナンスが容易である、小型化、長寿命にできるなど観点から主力となってきている。その一方式としては、 1032nm と 1316nm を発振する YAG レーザー光を非線形結晶に入れ、その非線形効果で和周波がちょうど波長 589nm になることを利用した、和周波レーザーが実用になりつつある。現在 20W (約 8 等星のガイド星を作る) のものが試験には成功しており、実用としては 10W 出力 (9 等星) のものが開発されつつある。MCAO への応用、及び JELT には、9 等星程度のガイド星が 5 個以上必要なため、全体では 50W 程度のレーザーが必要になる。

この他、光ファイバーを共振器として使う、ファイバーレーザーも新しい可能性として開発が始められており、これが実現すると非常に安価で小型のレーザーシステムができる。

レーザー伝送用光ファイバー

レーザーから出た光を、発射するための望遠鏡に導く方法として、光ファイバーを使うことが始められている。これによって伝送光学系の設置は非常に容易になる。しかし、コア直径が $10\mu\text{m}$ 程度のシングルモードファイバーに 10W の極めて強い光を通すことになるため、内部での非線形散乱によるロスが起こってしまう。それを解決する方法として、最近ではフォトリソグラフィッククリスタルファイバーというコアの周りに多数の穴を開けて、実効的に屈折率を下げ、クラッドを形成するファイバーを使う。この技術によって、コア径の大きなファイバーを製造することができ、光強度の密度を下げるができるようになる。

しかし、10W よりさらに大きい光を通すと、このフォトリソグラフィッククリスタルファイバーでも非線形散乱が起こってしまう。新しい技術として、光が通るコアを中空にしたフォトリソグラフィッククリスタルファイバーを使って、非線形散乱の影響をなくする中空フォトリソグラフィッククリスタルファイバーの開発が始められている。

2) 可変形鏡技術

可変副鏡

JELT では、副鏡の直径は 4m クラスの大型のものになる。可変副鏡はボイスコイルを使って駆動していることから現在のストロークは $50\mu\text{m}$ と他の可変形鏡よりは 1 桁近く大きく、ストロークについては他より有利である。大型化に関しては、厚み 2mm 程度で形状制御可能な大型薄鏡を作ることができるかが課題である。

多素子可変形鏡

通常の補償光学系は望遠鏡の焦点部の光をいったん平行にして可変形鏡を使って波面補正を行う。現在一般的に使われているものでは、941 素子のものまで作られている。現状では素子間隔が 5–7mm 程度である。そのままの素子間隔で素子数を 3000 素子まで増やすと、全体のサイズが大きくなってしまう。単一可変形鏡とちがって、これは他の光学系と組合せて用いるために、全体の光学システムが巨大になってしまう。それ故、素子間のピッチを狭くして、鏡をコンパクトに作ることが課題である。しかし、ピッチを狭くすると、圧電素子の強度を維持するためには、素子の長さを小さくしなければならないために、ストロークが小さくなってしまう。素子の製造技術、より大きい圧電係数の材料などの開発が必要である。

マイクロエレクトロニクス鏡

シリコン加工技術を使うので、多素子化が可能。1000 素子の試作鏡ができています。しかしサイズが小さいため、広い視野をとるのは難しい。また、1 素子あたりのサイズが小さいので、現状では短いストロークしかとれない。そのため、他の低次の可変形鏡と組み合わせる。用途としては、ExAO、MOAO に適している。

3) 波面センサー技術

高速、低雑音 CCD の開発

微弱な星からの光を使って波面を測定するためには、光検出器の雑音を極めて低くしなければならない。補償光学系の補正精度を上げるために補正素子数はこれまでの数 100 素子から、数 1000 素子以上に増える。そうすると、1 素子当たりの光量は減少する。かつ大気揺らぎの時間変動をより忠実に測定しないとイケないために、より高速での波面を測定する必要がある。それを実現する検出素子としては、読み出し雑音が $1e^-$ 以下の高速読み出しの CCD が開発されてきている。

現在達成されている性能は、 128×128 素子の検出器で、250Hz のフレームレートで雑音 $1e^-$ 以下の読み出しである。JELT 用には、画素数を 512×512 素子まで増やし、2000Hz のフレームレートで雑音 $1e^-$ 以下の読み出しのものを実現しなければならない。

4) 高速制御技術

波面演算アルゴリズム

素子数が増えると、現在の行列の掛け算を行う制御方式では素子数の 2 乗に比例して演算量が増える。10000 素子もの補償光学系になると、CPU が今後高速化することを考慮しても、演算が間に合わなくなる恐れがある。そのため、波面演算そのものの精度を落とさずに、演算量を減らす技術が開発されつつある。行列の掛け算のかわりにフーリエ変換を利用する方法で、演算量が素子数にほぼ比例するので、多素子補償光学系では有効であると考えられている。

大気揺らぎの高さ分布を含めた 3 次元情報を使って波面を補正するための、トモグラフィー (断層撮像) 技術も JELT での補償光学系で、MCAO、MOAO などを実現するための鍵となる。

4.9 ドーム

4.9.1 ドームに要求する機能

望遠鏡の口径が 8m から 30m に拡大しても、それを収容するドームに要求される機能はかわらない。以下にその機能をまとめる。

1. 望遠鏡を外的環境 (天候、地震、衝突物、いたずら等) からの保護
2. 観測時の風の擾乱による望遠鏡構造への外乱の低減

要素技術	現在のレベル	JELT 望遠鏡用
レーザー	10–20W (色素、固体)	50W (和周波固体、ファイバーレーザー)
伝送用ファイバー	フォトニッククリスタル	中空フォトニッククリスタル
可変形鏡		
可変副鏡	600mm 径、336 素子	4m 径、3000–10000 素子
ピエゾ鏡	5–7mm 素子間隔、941 素子	2–5mm 素子間隔、3000 素子
MEM 鏡	10mm 角、1000 素子	3000–10000 素子以上
冷却鏡	無し	1000 素子
波面センサー検出器	128×128 素子、RON ⁸ <1e ⁻	512×512 素子、RON<1e ⁻
	250Hz	2000Hz
制御プロセッサ	汎用 CPU、DSP	DSP、FPGA
制御アルゴリズム	行列演算	FFT、スパース行列演算、トモグラフィ

表 4.16: JELT を実現するための補償光学系要素技術

3. 望遠鏡、制御システムおよび周辺機器などからの発熱抑制
4. ドーム内環境の総合制御としてのシーイング劣化対策
5. 望遠鏡運用・保守に必要な装置の収納
6. 運用・保守のための環境維持

4.9.2 外的環境からの保護

天候として、雨、雪、氷、風、高湿度など望遠鏡構造、駆動機構に大きな影響を及ぼすだけでなく、日常の運用・保守のためにもそれらに対して十分な対策が重要である。特に運用上雨漏りは日常的な頭痛の種であり完全な解決策はなく対処療法にならざるを得ないことを肝に銘ずべきである。積雪や結氷は望遠鏡運用に支障を来すだけでなく過度な加重のためドーム構造の安全、さらに保守員の安全などのため融雪に配慮した設計が必要である。風についても強風などに対する生き残り確率を考慮した設計が不可欠である。

地震についてはサイトの選択に大いに左右される。サイトの特性を調査して耐震設計を図る必要がある。

口径 30m 望遠鏡では主鏡のカバーは実地的でなく、望遠鏡の収納位置を工夫すると共に隙間のシーリングの徹底も塵対策には重要である。このようにドームの構造に防塵の考えを導入すべきではあるが、完全なものは期待できない。主鏡上の塵を日常的に除去する装置の考案が実地的であろう。

4.9.3 風の擾乱対策

風の擾乱は望遠鏡の追尾性能、その結果としての星像の劣化に直接影響をあたえる。すばる望遠鏡では風の擾乱 (運用平均風速 7m/s) が追尾性能に大きな影響を与えないように主鏡付近の風速を 1m/s 以下に抑制する方針をとった。たとえば強風時、開口部が風に正対しているとき、ウインドスクリーンを使用して風速を低減している。しかし、口径 30m ではウインドスクリーンの設置は機構上困難である。すばる望遠鏡の経験では、風向きによって通風口の開口率を変えることにより望遠鏡構造への風荷重をある程度制御できた。しかし、完

⁸RON:読み出し雑音

全なテストは行われていない。したがって、ドーム側面の通風口などの制御を通じて望遠鏡構造や主鏡面への風荷重の変化を抑制できる可能性があり、今後の大きな課題である。

4.9.4 発熱抑制

望遠鏡周辺の発熱による温度不均一状態はドーム内の屈折率の不均一をもたらし、星からの波面を乱す。このため星像の大きさは望遠鏡の回折限界とはならず、屈折率の不均一の程度に依存した大きさになる。8m する望遠鏡の波長 500nm での回折限界の星像の大きさは $0''.015$ であるのに対し、星像の実測値は平均 $0''.6$ ほどである。

する望遠鏡では望遠鏡も含め周辺の温度の不均一を抑制するため、制御システム、制御計算機群を別棟に移した。主鏡制御システムなど移動できない制御部分の発熱は冷却液との熱交換で排熱した。また、望遠鏡の構造体を周囲の温度に常時なじませるため断熱材で覆い、さらにその表面をアルミニウムの薄板で覆った。アルミニウムが周囲の温度になじみやすいからである。

次に大きな熱源としては日射と地熱がある。特に日射は影響が大きい。ドームの外壁を温度になじみやすい無垢のアルミニウムとし、その内側を断熱材をふきつけ熱の侵入を抑えた。しかし、それでも日射による熱の侵入は無視できず、流入熱量を捨てるという方針で空調装置を導入した。実際には日中のドーム内の温度を予想される夜間の温度に保持するという方針をとった。特に主鏡周辺の温度は夜間温度より 2°C 低い温度を目標とした。地熱については望遠鏡の水平駆動静圧軸受のオイルを冷却することで遮断した。また、観測装置からの発熱も無視できないので、装置を断熱壁で囲い発熱を冷却液と熱交換させることで排熱を図った。冷却液との熱交換で捨てられる熱は最終的にはダクトでドームから十分離れた外気に捨てられる。

以上のようにするでは、発熱源をなるべく作らない、発熱はダクトで遠くに捨てるという方針をとった。その結果、年間平均シーイングサイズは $0''.6$ とマウナケア山頂で最高を誇っている。

口径 30m 望遠鏡でも同様の方針を基本として、ドームに内包する望遠鏡、周辺機器、保守設備、観測装置などが明らかになってから具体的な対策を考えていくのが賢明である。

4.9.5 シーイング劣化防止対策

シーイング劣化の原因としては、上空大気、接地境界層、ドーム内環境の 3 つに大別される。上空大気については望遠鏡サイトの選定に際しての大きな決定要因であり、サイト選定の項で論じる。ここでは接地境界層とドーム内環境について述べる。

接地境界層は地面と自由大気境界であり、厚さは 15–30m 程度である。地面で空気の流れがゼロ、境界層では速度傾斜があって、その上部で自由大気につながる。さらに一般には夜間地面の温度は空気の温度より高く、境界層では空気は熱乱流状態と考えられる。する望遠鏡では乱流の強さが自由大気での星像の乱れと同等になる高さを実測して、望遠鏡の不動点 (高度軸高さ) をそれ以上の高さに設定した。実際にはドームの形によっては地表面の熱乱流層を望遠鏡光学系の高さまで巻き上げることがあるため、水流実験、計算機シミュレーションによりそのようなことが起こりにくいドーム形状 (柱形状: 図 4.84) を採用した。JELT でも同じ考え方でドーム形状を検討すべきであろう。

ドーム内環境については、すでに述べたように発熱を極力防ぎ、それでも不可避な発熱は積極的に排熱するという方針が適切と考える。そして、温度を均一にするのが最終目標であるから有効な対策を検討する必要がある。



図 4.84: する望遠鏡のドーム

ある。すばる望遠鏡では水流実験等で、自然風を取り入れ側面に窓を開けてスムーズに流してやるフラッシング法が有効と考えられたので採用した。現在、すばる望遠鏡を用いて、フラッシングがどの程度有効なのかの定量的な評価をしている段階である。その結果は JELT のドームの設計検討に大いに役に立つと期待される。

4.9.6 望遠鏡運用・保守に必要な装置の収納

望遠鏡の運用と保守の目的には、制御システム、制御計算機、機械加工室、電子工作室、観測装置保守・改良室、蒸着室、冷却システム設備室、部品等保管室、事務所が必要である。すばる望遠鏡では大型の蒸着設備、主鏡交換台車、主鏡洗浄装置など大型設備は望遠鏡を支えたピアの周辺の空間に収納した。

JELT でも常時発熱しない保守・運用装置や保管庫はこのような空間を利用するのが賢明である。一方で運用装置は常時発熱が伴うためドームとは別棟に収納するのがよい。

望遠鏡の保守作業として分割鏡の交換・再蒸着、主鏡の塵除去、観測装置交換のために設備が必要である。これらの収納空間は確保する配慮がいる。望遠鏡の保守にはクレーン設備は不可欠である。望遠鏡の構造に合わせて保守すべき仕事を洗い出し、それに必要なクレーンを検討する必要がある。とくにドーム回転部分に大型クレーンが必要かどうかは経費にも大きなインパクトがあるので、早急に検討する必要がある。また、大型クレーンを必要としない場合は望遠鏡建設用に外部クレーンを導入する必要があるだろう。ドームフラット機能の実現についても検討を要する。

運用・保守のための環境維持

ドーム構造の強度に関しては、サイトにおける強風の度合い、頻度、氷結の規模、積雪量、地震の規模など自然環境下で望遠鏡の設計寿命を何年とするか決める必要がある。そのためにはサイトにおける上記のデータを収集し、要求される設計寿命を考慮した耐久設計を行う。

日常の保守は人間が行うものであり、ドーム内の労働環境が観測条件と相容れない側面が強い。ある程度の忍耐は必要であるが、過度の忍耐はかえって保守の効率を落とし、ひいては人間の安全を脅かすものなので慎重な設計方針が望まれる。たとえば融雪装置など保守の自動化の導入など発熱抑制方針に反することも検討する必要があるだろう。また、建設地が 3500m 以上の高地となる場合、低酸素症の緩和のために酸素補給設備を備えた部屋を用意するなどの工夫も検討する必要がある。

JELT のドーム

すばる望遠鏡のドームはこれまで述べた方針に沿って設計、建設された。経費、技術の点から方針を 100% 実現できなかったが、考え方をなるべく取り入れた。

マウナケア山頂に設置する場合、現在の山頂リッジに大きなドームを配置することは困難である。また、ハワイ土着の人々にとって神聖な山頂に麓からも見える形でドームが林立することには、根強い抵抗もある。このため、山頂開発計画では新しいドームの設置場所を制限することやドームの形状が周辺景観とマッチするように配慮することが求められている。チリなどに設置する場合は、また違って制約が生じる可能性があるが、設置場所に応じた制約がかかることを忘れてはならない。



図 4.85: Kitt Peak の 4m 望遠鏡ドーム

JELT は補償光学技術を徹底的に使用するが、そのドームはやはり接地境界層の影響を最小限に止めるべきである。そのため、建設予定地の接地境界層の状態を実測して熱乱流が有意に小さくなる高さを求めることが必要である。その上で接地境界層の下層の気流が望遠鏡の光路に侵入しないような外形構造を考えるべきである。すばる望遠鏡の円柱構造や半球でもそれを支える高い円柱構造 (図 4.85) などが有効であろう。ただし、KPNO では円柱構造の高いドームとしているが、サイトのせいか必ずしもシーイングは良くないので、サイト選定が重要なことは言を待たない。以下ではこのような方針に基づいて 3 つの構造を提案する。

1) すばる望遠鏡タイプ

外形は円柱型 (図 4.84) でフラッシングの考えを取り入れ、側壁に窓を幾つか設置する。望遠鏡の鏡筒を側壁で隔離してドームと望遠鏡を共に回転させる。制御システムや制御計算機など別棟に納める。すばる望遠鏡とちがい巨大な主鏡蒸着装置は不要なのでピアーの下部を収納庫としてもよいし、外部環境としても良い。また、主鏡など巨大な構造の取り外しなどの作業がないので大型クレーンは必要ないだろう。

2) フランス太陽望遠鏡タイプ

フランスの太陽観測グループが採用した望遠鏡の開口部分のみ開けて天体の追尾にあわせて開口部を移動させる方式はなるべく機械構造を外気にさらさないためシーイング劣化防止に効果がある。ただし、ドームに 2 軸の駆動装置を導入することになるので 30m 口径のような巨大構造が作成可能か検討を要する。この場合でも接地境界層の影響を避けるために望遠鏡の鏡筒位置を高くする必要がある。

3) その他のドーム

30m クラスの望遠鏡のドームの直径は 100m ほどになり、このクラスになると大空間建築物 (図 4.86) という観点で考えることも必要であろう。これらの建築物は日本でも万博パビリオンや全天候型スタジアムなどで古くから発達してきた。これらの建築技術を流用することはコスト削減の可能性はある。ただし望遠鏡固有の問題点を克服するための試作、実験が欠かせない。厳しい自然環境での生き残り、開口部の設置、望遠鏡追尾などのための駆動部分の導入、熱制御システムの導入など具体的な検討項目の洗い出しから始める必要がある。以下に大空間建築の例を示す

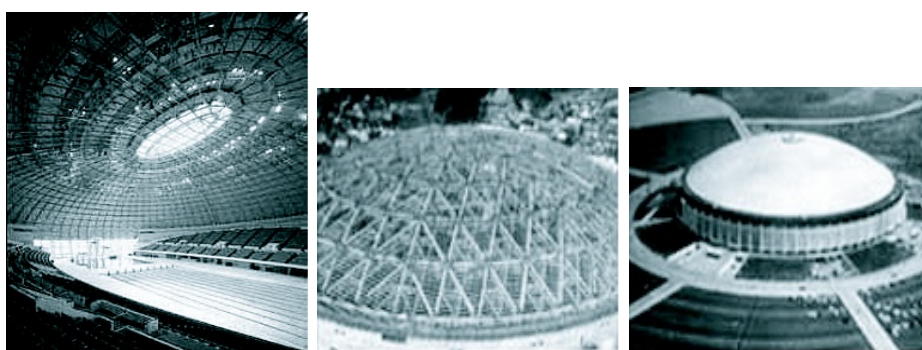


図 4.86: 直径 100m 規模の大空間建築の例
(建築会社の Web サイト^{9, 10}より)

4.9.7 ドームのコスト

ドームの具体案が無い時点でドームの建設コストは出せないが、8m 級望遠鏡の直径 40m ドームの建設コスト 30 億円を基に試算してみる。

⁹<http://www.taiyokogyo.co.jp/tm/index.html>

¹⁰<http://www.tomoe-corporation.co.jp/rittai/rittai-TOP.htm>

JELT の場合グレゴリアン副鏡を採用すると鏡筒の旋回半径は 45m。保守空間を考慮するとドーム直径は 100m。費用は 直径の自乗とすると、 $(100/40)^2 = 6.25$ 。これをすばる望遠鏡の場合の経費にかけると 187 億円。

もし、グレゴリアン副鏡を止めればドーム直径 70m 程度。その場合、92 億円。

できるだけドーム直径を小さくする努力が経費軽減につながることに留意する必要がある。100 億円以下に抑えたいのであれば、その他の大空間建築物を流用したドームの導入を真剣に検討する必要があるだろう。

4.10 全体コストとスケジュール・体制

4.10.1 全体コスト

30m 級望遠鏡の建設予算については、TMT グループが検討を開始しているが、予備検討では建設に約 7 億ドル、運用には約 4000 万ドル/年程度を目標としている。

JELT 建設予算の積算も現時点では、精度が不十分だが、個別要素について、すばる望遠鏡建設予算や、他の 8m 級望遠鏡建設予算を参考に粗積算すると、建設総額は開発費用込みで約 700–1000 億円と見積もられる。運用には建設予算の 5–10% 程度がかかると見込まれるので、建設期間を 10 年間、運用期間を 20 年間と見込むと総額で 30 年間に約 2000 億円が必要となる見込みである。建設予算のより精度の高い見積もりには望遠鏡の設計をさらに詰めねばならない。国際協力で総建設予算の 1/4 を分担すると仮定しても、建設予算として 250 億円、運用予算として年間 10 億円が建設参画への最低限の必要予算であろう。

年度	JELT イベント	関連事項
2003	予備検討開始, JELT-WG 発足	
2004	基礎開発開始	ALMA に日本が正式参画
2005	国立天文台内に JELT プロジェクト室設置	
2006	基本設計	
2007	基本設計、PDR	
2008	詳細設計	
2009	CDR、建設初年度	
2010	建設第二年度	
2011	建設第三年度	JWST 打ち上げ
2012	建設第四年度	ALMA 運用開始
2013	建設第五年度	
2014	建設第六年度	
2015	試験観測初年度	
2016	総合調整	
2017	運用初年度	
2018	運用第二年度	

表 4.17: JELT 計画スケジュール

4.10.2 スケジュール

予備検討と基礎開発には、今後最低3年間程度が必要であろう。建設予算は国際協力を前提とすると、その枠組みの合意にも時間がかかる。建設を最速で2007年度から開始したとして、6年後に主鏡の一部を用いた部分試験を開始し、全体完成を10年後と想定すると、2017年度までに観測装置や新世代の補償光学装置を平行して開発し完成させねばならない。楽観的スケジュール案を表4.17に示す。

4.10.3 体制

JELT構想の実現には米国、欧州などとの国際協力の可能性も視野に入れて推進する必要があるだろう。日米欧の国際協力で次世代大規模望遠鏡を建設することになる場合は、その前例となるALMA計画の推進体制が参考になるだろう。日本単独での事業とする場合も、国際協力で推進する場合も、国内体制は国立天文台が窓口となり、全国の大学等関連研究者のコミュニティの意向を吸い上げながら、意志決定してゆく枠組みを構築する必要がある。これについては、すばる望遠鏡の建設運用にコミュニティの窓口となっている光学赤外線天文連絡会(光天連)を強化することで対応できよう。

4.11 海外の超大型地上望遠鏡計画

4.11.1 概要

ケック、すばる、ジェミニ、VLTなど主要な8メートルクラスの望遠鏡が完成した1990年代末頃から、欧米を中心として口径30メートルを超えるような次世代の超大型望遠鏡の検討が開始された。

これらの望遠鏡計画ではこの10年で劇的に進んだ計算機/制御技術をふんだんに取り込んだ、非常に大口径、かつ高精度の望遠鏡計画となっており、以下のような共通の特徴を持つ。

- 口径の小さい(0.5–8m)鏡を多数組み合わせたセグメント鏡により、30mを超える大口径を得る
- 大気の影響による星像の広がりを補正する、補償光学(Adaptive Optics: AO)を導入し、可視から赤外線に渡る全波長帯で回折限界に迫る高空間分解能を達成する
- 全トラス構造によって、架台を大幅に軽量化する。

現在進行中の海外の望遠鏡計画の主なものは表4.18に示す。特に、米国のTMTとESOのOWLの両計画が欧米の大きな柱として進みつつあり、それ以外の計画についても活発に検討が行われている。

名称	口径	計画母体
TMT	30m	米国(AURA, ACURA, CELT Co.)
OWL	100m	欧州(ESO)
Euro50	50m	スウェーデン
GMT	20m	米国(カーネギー研究所、ハーバード大、スミソニアン天体物理学研究所、MIT、アリゾナ大、ミシガン大)

表 4.18: 世界の主な超大型望遠鏡計画

4.11.2 TMT (Thirty Meter Telescope)

アメリカでは、比較的早い時期よりカリフォルニア工科大学とカリフォルニア大学などのケック望遠鏡を建設したグループが次世代の30m望遠鏡としてCELT(California Extermely Large Telescope)¹¹の検討を進めていた。これはケック望遠鏡の建設の経験と技術をベースとして、その延長で建設を行うというものである。そのため、新規技術の導入には比較的慎重である印象がある。

一方、アメリカの大学連合であるAURA¹²が中心となって検討を進めた次世代の30m望遠鏡がGSMT(Giant Segmented Mirror Telescope)¹³である。これはより大胆に新技術を取り入れたもので、補償光学用の可変副鏡を取り入れたり、電波望遠鏡型の架台を提案したりしている。

また、カナダ大学連合ACURA¹⁴もハワイ・マウナケアにある4mのカナダ・フランス・ハワイ望遠鏡(CFHT)の後継として口径20–30mの望遠鏡VLOT(Very Large Optical Telescope)¹⁵の検討を進めていた。

2002年末に米国科学振興財団(NSF)の働き掛けによって、これら3計画が統合されたのがTMT(Thirty Meter Telescope)計画¹⁶である。最終仕様はまだ明らかになってきてはいないが、完成予想図を図4.87に示す。また、CELT案、GSMT案の仕様を表4.19に示す。

基本的にはリッチークレチアン光学系を採用するなど、ケック望遠鏡のスケールアップ的な設計思想で、それに細かい改良を加えている。1–1.5mのセグメントを400–1080枚組み合わせて、F/1–1.5の30m主鏡とするなど、他の大型計画と比べると現実的な仕様になっている。

2003年10月に米国ムーア財団から基礎開発研究費1700万ドルを獲得し、設計を進めている段階にある。今後数年で最終設計を取りまとめ、建設を開始する意向を示している。

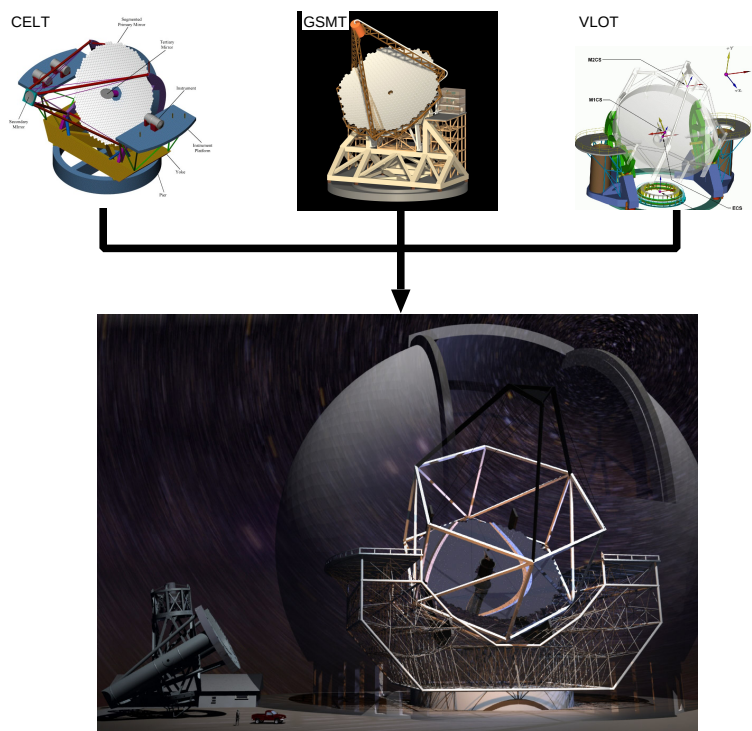


図 4.87: (上段)CELT, GSMT, VLOT の完成図。これらが統合されて TMT 計画となった。(下)TMT の完成予想図。左側は同スケールの 5m ヘール望遠鏡。

4.11.3 OWL (OverWhelmingly Large telescope)

ヨーロッパ南天天文台(ESO)は、これまでの望遠鏡の概念を捨て去った、全く新しいデザインで口径100メートルという巨大な望遠鏡の計画¹⁷を表明している。現在最大の光学望遠鏡の口径でさえ10m(ケック望遠鏡)であり、これを一気に10倍にしてしまうという無謀とも思える非常に野心的な計画である。

¹¹<http://celt.ucolick.org/>

¹²Association of Universities for Research in Astronomy

¹³<http://www.aura-nio.noao.edu/book/>

¹⁴Assosiation of Canadian Universities for Research in Astronomy

¹⁵http://www.hia-ihia.nrc-cnrc.gc.ca/projects/VLOT_e.html

¹⁶<http://tmt.ucolick.org/>

¹⁷<http://www.eso.org/projects/owl/>

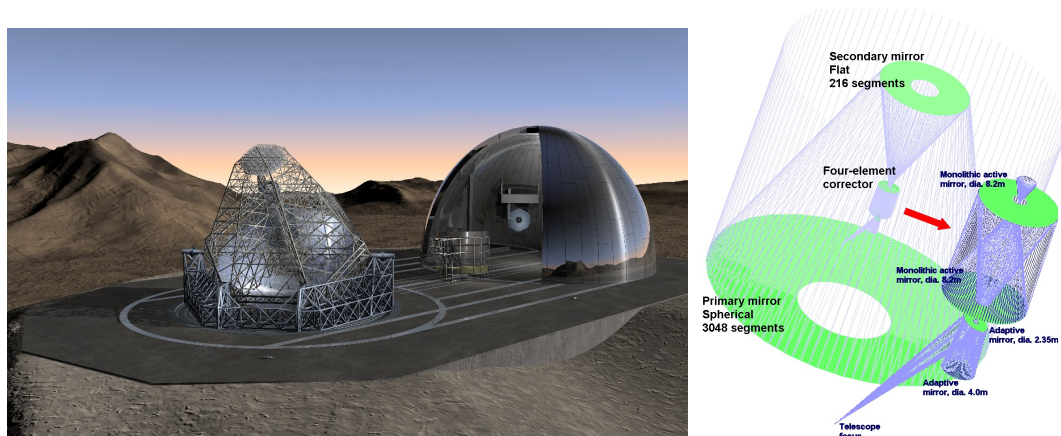


図 4.88: (左) OWL の完成予想図。奥に見えているのがドームである。(右) OWL の光学系

主鏡の 1.6m セグメントだけでも 3048 枚で、副鏡は 25.6m とこれまた巨大な平面鏡となっている。さらに、第 3,4 鏡に 8.2m の一枚鏡を使うなど、合計 6 枚の鏡を用いた光学系となっている (図 4.88 右)。また巨大な望遠鏡構造を支えるために、地面を半球状に掘って望遠鏡はそこに半分埋めこむというこれまでにない形状も特徴的である。主な仕様は表 4.19 に示した。

ただし、開発要素が非常に多く、現実的な建設のみとおしはまだ立っていない。個別の要素技術の検討を優先して行っている。

4.11.4 GMT (Giant Magellan Telescope)

南米・チリのラスカンパナス天文台に 6.5m のマゼラン望遠鏡を 2 台建設したカーネギー天体物理学研究所などのグループは、8.4m の鏡 7 枚を花びら型に並べて有効口径 21m の望遠鏡を建設する大マゼラン望遠鏡計画 (GMT)¹⁸を提案している。アリゾナ大学のミラーラボが現有する施設で製造可能な最大の単一鏡が 8.4m であることから、それを最大限に活用する、という発想を導入したと思われる。



図 4.89: GMT の完成予想図。左側は現在駆動しているマゼラン望遠鏡。

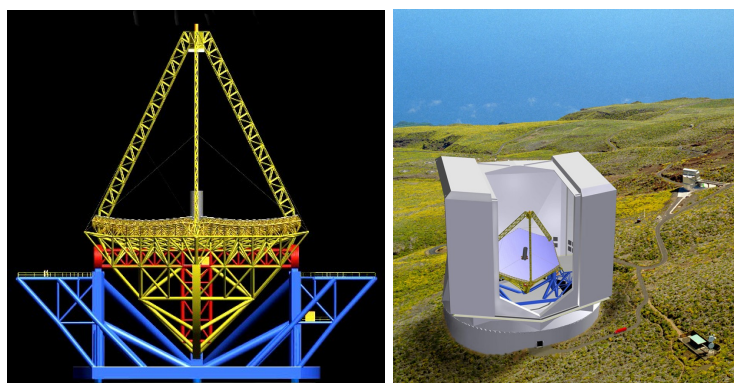


図 4.90: Euro50 の完成予想図。

¹⁸<http://helios.astro.lsa.umich.edu/magellan/>

この設計の利点としては、セグメントの数を減らすことによって回折限界像の PSF が非常にきれいになることが挙げられる。これによって、系外惑星の直接検出などが他の望遠鏡に比べて容易に行えるようになると予想される。

さらに、この望遠鏡2台をドームごと円形のレール上に搭載して干渉計とする 20/20 構想や、同じ望遠鏡を南極に建設する提案なども行われている。

4.11.5 Euro50

スウェーデンのルンド天文台を中心としたグループが 1995 年頃から ESO の OWL とは独立に検討を進めていたのが Euro50¹⁹である。これは既存の望遠鏡に近い設計で、カナリア諸島のラパルマ天文台に建設を想定している。

各種技術検討などを精力的に行っているのが特徴で、最終的には OWL との協力関係に移行するのではないかと推測される。

4.11.6 その他

これら以外にも複数の口径 20m を越す大型望遠鏡計画が提案されている。小規模なグループで検討されているものも含めると相当数に上ると見られるが、ここでは現在把握できる限りで簡単にまとめる。

- HDRT²⁰

ハワイ大学が CFHT 望遠鏡の次世代望遠鏡として構想しているもの。GMT と同様に大型 (6.5m) のセグメントを 6 枚並べて有効口径 20m 程度とし、PSF をきれいにし系外惑星探査などを行う。

- FELT²¹

米国マクドナルド天文台が計画している、30m 望遠鏡。HET や SALT と同様に高度軸を持たず、構造を簡素化することによって安価に建設することを目指している。

- CFGT

中国も 30m 望遠鏡構想 (Chinese Future Generation Telescope) を表明している。TMT や JELT と似た構想であるが、主鏡セグメントを扇形にして形状種類を減らす工夫などの提案がある。提案グループは現在 4m シュミット望遠鏡 LAMOST を建設中である。

4.12 国際協力・国際協議

4.12.1 多国間国際協議の場

OECD Global Science Forum 経済協力機構 (OECD : 本部パリ) は、加盟各国とオブザーバー参加国の科学政策担当官と財務担当官の出席を得て、国際協力で進める科学技術政策について意見交換を行うグローバルサイエンス (GSF) を定期的に開催している。2003 年の会議で「天文学における次世代超大型計画」が検討テーマの一つに採択された。このため、2003 年 12 月にミュンヘンで、2004 年 4 月にワシントンで GSF ワークショップが開催され、国際協力の構築のための枠組みづくりについて、意見交換がなされた。天文学はスペースからの観測と地上からの観測の役割分担があり、観測波長も X 線から可視光・赤外線、電波と手法が違うので計画が多様であるが、そのことを財務担当など分野外に理解してもらう必要がある一方、天文学サイドでも

¹⁹<http://www.astro.lu.se/%7Etorben/euro50/>

²⁰<http://www.ifa.hawaii.edu/users/kuhn/hdrt.html>

²¹<http://www.aura-nio.noao.edu/other/felt/FELT.80ct2000.ppt>

²² リッチー・クレチアン光学系

項目	TMT		OWL	GMT	Euro50
	CELT 案	GSMT 案			
予算	6 億ドル	5.55 億ドル	10 億ユーロ	-	-
主鏡口径	30m	30m	100m	21.4m	50m
主鏡セグメントサイズ	1m	1.5m	1.6m	8.4m	2m
主鏡セグメント数	1080	400	3048	7	618
主鏡 F 比	1.5	1	1.42	0.7	0.85
副鏡口径	3.956m	2m	25.6m	-	3.84m
副鏡形状	非球面	非球面可変形	平面	非球面可変形	楕円面可変形
光学系	R-C ²²	R-C	6 面光学系	グレゴリアン	グレゴリアン
合成 F 比	15	18.82	-	10	13.11
主鏡-副鏡間距離	39.4m	-	95m	-	46m
波長	0.3-28 μ m		0.32-12 μ m	-	0.35-20 μ m
望遠鏡重量	1356t	1400t	14800t	-	4500t
最低固有振動数	1.58Hz	5.8Hz	2.5Hz	-	2.67Hz
運用開始	2015 年		2021 年	-	2015 年前後

表 4.19: 主な超大型望遠鏡計画の仕様案

その関係と順番などを整理して説明する必要があることが議論された。米国の Decadal Report のような長期ロードマップの必要性が複数の参加者から指摘されたが、その準備は慎重に行う必要がある。これらのワークショップの検討結果を 2004 年 7 月にパリで開催された本会議で報告したが、国際協力の枠組み構築についてさらに情報交換し、検討することとなった。

SPIE セッション 望遠鏡や観測装置技術の国際会議として知られる SPIE は二年ごとに開催されてきた。家は 2000 年のミュンヘン会議、2002 年のハワイ会議、2004 年のグラスゴー会議でそれぞれ観測装置研究会の組織委員長をつとめ、他の組織委員長と全体会議の運営に参加した。この中で 2000 年の会議に次世代超大型望遠鏡に関する研究会の設置を提案し、2000 年の会議では望遠鏡研究会の一セッションとして、次世代超大型望遠鏡構想の複数のグループの検討の状況が初めて、議論された。その後、2002 年、2004 年の会議では次世代超大型望遠鏡専門の研究会が開催され、日本からも検討状況の報告をしている。

IAU 第九委員会 国際天文連合のコミッション九委員会では、次世代の超大型地上光学赤外線望遠鏡構想の実現に向けて、その科学目的を集中的に検討するため、2005 年秋に南アフリカで IAU シンポジウムを開催する準備を進めている。日本からは家がこのシンポジウムの組織委員として参加している。

Backscog 会議 2003 年秋にはスウェーデンにて、EURO50 構想のお披露目を兼ねた次世代超大型望遠鏡に関するワークショップが開催された。この会議には我が国からも六名が参加し、日本の検討状況や開発成果について報告し、各国の研究者との情報交換を行った。

4.12.2 個別グループ間協議の場

OWL 検討会へのオブザーバー参加 欧州グループは 100m 望遠鏡構想の検討をさまざまな形で進めている。特にその科学成果の検討会は 2001 年にはオランダで開催され、宇宙論、近傍銀河、星惑星系の三分科会に分かれて三日間の合宿を行い、次世代超大型望遠鏡で実現できるサイエンスを検討した。この会議には日本から家が参加し、その報告書のとりまとめに寄与した。

GSMT 科学作業班会合へのオブザーバー参加 ハワイ大学天文学研究所長のクドリツキ博士が GSMT サイエンス WG の委員長として、GSMT の推進白書を取りまとめる作業を 2002-2003 年度に行ったが、この間日本の JELT グループから会議へのオブザーバー参加の打診があり、家、唐牛、西村が適宜分担して三回の会議に参加し、情報交換を行った。

CELT グループとの協議 2004 年前半までは日米欧のどのグループも次世代超大型望遠鏡構想の検討は進めてきたものの、建設資金の獲得の目処は全く無い状態であった。手始めに 2003 年度から日米欧で具体的な開発研究のための開発予算の申請を各国政府、民間財団、国際組織などにする動きが活発化した。そのような中で、カリフォルニアの CELT グループがいち早く、ムーア財団という私的財団から開発研究資金の獲得に成功したため、次世代超大型望遠鏡に向けた開発・構想固めが動き始めた感がある。TMT 構想の基本設計の具体化と建設予算の見積もりを 2006、2007 年ごろまでに行う方向で検討が進められている。

4.12.3 国際協力へのスタンスと状況分析

次世代 30m 級望遠鏡計画は、予算規模が 1000 億円レベルとなるため、国際協力の可能性は常に前向きに考えるべきであろう。

主要グループの動向について情報収集に努めているが、各グループとも情勢は極めて流動的である。以下の記述はあくまで現時点での入手情報に基づく分析であることに注意する必要がある。

北米の TMT 構想はムーア財団による R&D 経費の寄付があり、プロジェクト体制が整いつつあり、機運が持ち上がっている。NSF も支援方向には変わりはないが、その規模などについてコミュニティの意向のまともりを見ているように見受けられる。四者合意を経て、プロジェクト室では概念設計に着手しており、2007 年度からの建設開始を目ざして活動を強化し始めている。我が国が参加するかどうかの検討を行うとすれば、時間的余裕は大きくないと思われる。

欧州は欧州南天天文台 (ESO) が検討してきた野心的な 100 m OWL 構想を軸にしているが、建設予算について新たな枠組みが早急に構築されない場合は、ALMA 計画の峠を越えた後に本格的な取り組みを行うことになるであろう。R&D については EU からの資金獲得により着手される状況になった。全体構想としては、北米の TMT 構想との融合を積極的に追求するよりは、TMT より後になってもより大型の次世代望遠鏡を欧州主導で実現したいという声が強いように見受けられる。だが、スウェーデンのグループを中心に検討を進めてきたより現実的と思われる 50m Euro50 構想との整理や、OWL のサイズ最適化の動きもあり、今後の情勢次第で大きな方向転換があり得るとと思われる。

中国は現在主要グループが 4m シュミット望遠鏡 LAMOST の建設に取り組んでいる状況の中で 30m CFGT 構想を打ち出しているが、予算規模や LAMOST の成否が見えない段階での本格的取り組みは困難なように思われる。韓国は独自の 8m 級望遠鏡構想などを検討中のようであり、いますぐ 30m 級望遠鏡構想に参画するという状況では無いように思われる。しかしながら、東アジア天文学シンポジウムなどを通じて日韓中台の連携の重要性について機運が高まりつつあり、アジアにおける連携の可能性も有力な一案として検討を続ける必要があらう。

4.13 建設地

4.13.1 サイト選定の重要性

望遠鏡を生かすも殺すも設置場所次第である。地球上で観測する限り、観測性能は地球大気の影響を強く受ける。望遠鏡の解像力は大気揺らぎの強さで決まり、背景光の強さは赤外線波長域では水蒸気量と気温に大きく左右される。解像力は補償光学系を使えば改善されるが、それも元々の大気揺らぎが小さければそれだけ良い性能が発揮できる。どんなに良い性能の望遠鏡を製作しても、設置場所が悪ければその性能を全く無駄にし

表 4.20: 天文台サイトとして考慮すべき主な項目

・ 夜間晴天率	・ 地上風速
・ シーイング	・ 風速・風向の変動
・ 可降水量	・ 地震
・ 大気揺らぎの高度分布	・ 気温の日・年較差
・ 大気揺らぎの時間スペクトル	・ インフラストラクチャー (道路、電力等)
・ 大気揺らぎの空間スペクトル	・ 地域住民・政府との協力関係
・ 赤外背景光	・ 紛争地域
・ 夜光・オーロラ	・ 航空機の経路 (将来に渡って)
・ 観測可能天域・期間	・ 周辺の開発状況
・ 砂塵・エアロゾル	・

てしまうことになる。また、一旦望遠鏡を建設すると、(特に大望遠鏡の場合) それを移動することは困難なので、望遠鏡の設置場所の選定は極めて重要である。

4.13.2 サイトが満たすべき条件

天文台サイトとして考慮すべき項目を表 4.20 にまとめた。夜間の晴天率及びシーイング (長時間露出した時の星像直径) が良いことはもちろんだが、補償光学が常識的に使用される大望遠鏡では、それだけでなく、大気揺らぎ (屈折率揺らぎ $\approx$ 温度揺らぎ) が起きている層の高度分布、揺らぎの速さ、揺らぎの空間スペクトル (特に低空間周波数側) が重要である。層の高度分布は補償光学で補正できる視野の広さに影響し、揺らぎの速さと低周波数側のスペクトルは、補償光学の設計の難しさ (制御の速さと補償量) に大きく影響する。良いサイトは、揺らぎが全体的に弱く、出来るだけ低高度に分布し、揺らぎの変動速度が遅く、低空間周波数成分が小さい場所である。また、これらの条件が時間変動しないことも、望遠鏡の設計上重要となる。

赤外線観測の場合、上記の星像だけでなく背景光の明るさが暗いことと、大気による吸収が少ないことが大切である。波長 $1.6\mu\text{m}$ までは OH 分子の発光、それより長波長では大気自体の熱放射が背景光の主成分である。したがって大気の厚さが薄く (高地)、気温が低い所ほど良いサイトと言える。大気の吸収は水蒸気によるものが支配的であるが、これも高地で低温の場所ほど水蒸気量が少ない。そのほかに CO_2 、 CO 、 O_3 などが赤外線域での吸収分子である。可視光域では背景光として、大気の日光のほかに、都市の人工光や極域ではオーロラを考慮しなければならない。

空の状態だけでなく地上の条件も、望遠鏡・観測装置には重要である。地上の風速が弱く、風向・風速の変動が少ないことは、大望遠鏡の構造設計の難しさを緩和する。また大きな地震が少ない事も、構造設計上重要である。気温の日変化・季節変化が少ないことは機器の調整を容易にする。

上記の自然条件の他に、人の活動に関わることも実際に建設を進めるうえで十分考慮する必要がある。リモート観測所にするとしても、定常的にある程度の人間が保守・改良の為のアクセス手段を確保できないといけない。また、建設地域の住民、政府と協力的な関係が築けるか、紛争地域ではないか等も、将来の拡張や安全にとって大切なことである。航空機の飛行経路に当たっていないか (将来も含めて)、鉱山等の開発予定が近くはないか (粉塵、都市の発展による光害等) など、あらゆる周辺情報を収集することが必要である。

4.13.3 サイトの評価方法

サイトを評価するには、十分な気象統計が必要である。そのため先ず人工衛星の過去のデータを利用して、晴天率、上空の風、水蒸気量等の分布を求め、地球上で優れたサイトを選び出すことが行われている。しかし衛星のデータを気象量に変換する際の不定性が入るため、実際の候補地でのモニターが必要不可欠となる。

- 晴天率

気象衛星のデータから、全世界から晴天率の良い場所を選定できる。候補地を選定したら、現地での可視/赤外線雲モニターでの地上からの実測が必要。

- 可降水量

1 μ m 付近の水蒸気の吸収や、サブミリ波での大気の光学的厚さから換算する方法が一般的。可降水量が 1mm を切るような場合は後者の方が正確。GPS を利用した方法もある。

- シーイング、大気揺らぎの高度分布・スペクトル

大気全層を通して見た場合のシーイングは Differential Image Motion Monitor (DIMM) で測定する。地表近くの乱流は揺らぎの大きな成分なので、DIMM での測定は出来るなら望遠鏡建設時の高さで行うのが望ましい。同じ場所でも地表からの高さが 2-3m 違うだけで測定結果は大きく変わる。従って DIMM だけの測定ではサイト間の比較は難しい。接地層の影響を同時に測定することが必要である。

揺らぎの高度分布が測定できれば、サイト間の比較はより正確になる。そのためには星のシンチレーション (明るさ揺らぎ) を利用した SCIDAR, MASS、音波の散乱を利用した SODAR あるいはバルーンによる直接測定を行う。SCIDAR は 2 重星を光源に使用するため、観測方向、時間が制限され、また高度 10km 程度の乱流層を測定するためには口径 1m 程度の望遠鏡が必要なため、測定は簡便ではない (最近では単独星を使った SCIDAR も考案されている)。MASS は小型で簡便なため、インフラの整っていない現地調査に有効であるが、低空の乱流に対して感度が低い。揺らぎの大きな成分である大気境界層を測定するためには、SODAR 等を併用する必要がある。SODAR も高さ 30m 程度より低空は不感帯なので、タワーに微熱乱流計等を設置して地表近傍の乱流を測定する。

乱流のスペクトルを測定するのは容易ではないので、補償光学の設計に重要な影響を与える次の 2 つのパラメーターをスペクトルの形を仮定して求めることが、一般に行われている。一つは大気揺らぎの変動の早さのスケール (coherence time) で、星のシンチレーションの大きさから測定する。もうひとつはコルモゴロフの 2/3 乗則が崩れる低周波数側の空間スケール (wavefront outer scale) で、複数の基線長で測定した星の動きから推定する。

また、乱流スペクトルの評価の上ではいわゆる outer scale を測る工夫の開発も必要であろう。

サイト間の比較を正しく行うためには、これらの測定装置の較正をしっかりとっておく必要がある。

4.13.4 天文台建設に適した地域

既存の 8-10m クラス望遠鏡の建設地や現在建設予定中のサイトは、次の 2 つのカテゴリーに分類される。

(1) 海洋中の孤立峰 (ハワイ・マウナケア、カナリー諸島ラ・パルマなど)

(2) 大陸西海岸の沿岸沙漠近くの高地 (チリ・アタカマ、セロ・パラナルなど)

最近になって南極の高地の調査が行われ始め、上記地域と同程度かそれより優れていることが報告されている。また Maidanak (ウズベキスタン) のように、大陸内部でも良いサイトがある可能性が示されている。



図 4.91: (左) : ALMA サイト (中央の平原) と左に見えているのがチャナントール山 (カラー 12 ページ) (右) : 南極ドーム C ²⁴

- マウナ・ケア** 10 台以上の望遠鏡が稼動している、現在の天文観測の中心地の一つである。典型的な海洋中の孤立峰である。標高が 4100m 以上あり、気温逆転層 (約 2000m) より十分上に位置するため、海洋上にあっても水蒸気量が少ない。晴天率はチリよりは劣る。インフラは十分に整備されているが、観測条件の良い稜線上はすでに望遠鏡が立ち並び、空き地は限られている。また自然環境保護の立場から新規の建造物の建設や、既存の施設の変更には制限がかけられている。
- チリ** チリ中・北部は中緯度高圧帯に位置し、また沿岸を寒流が流れているため乾燥した地域が広がっている。アンデス山脈の海岸側は標高も比較的高く、乾燥しているため ラ・シジャ、パラナル山、アタカマ等、マウナケアと並ぶもう一つの天文観測の中心地を形成している。
 アタカマのチャナントール地域は標高 5000m 近くの平坦の土地が広がっており、北米・ヨーロッパ・日本の国際協力による電波天文台 ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) の建設がはじまっている。そのためこの地域のインフラは十分に整備される予定である。ALMA は平坦地に設置されるが、この地域には標高 5500m を越すピークがいくつかあり、その中のチャナントール山 (標高 5700m) は東京大学が 6.5m 望遠鏡の建設候補地として調査を進めている。まだデータは少ないが、マウナケアと同等かそれより良いシーイングが期待できる結果が得られている。ボリビア側に近いパラナル山に比べて晴天率が少し落ちるようであるが、引き続き調査が必要である。
- アメリカ南西部およびメキシコ北部** この地域もチリと同様の理由で乾燥している。CELT のグループはマウナケア、チリ北部のほかにこの地域を候補地として検討している。また UNAM (メキシコ 6.5m) もメキシコ北部のサン・ペドロ・マルチルを候補地として調査している。
- ラ・パルマ** アフリカ・モロッコ沖のカナリー諸島にあるラ・パルマは、マウナ・ケアと同様に海洋上の孤立峰である。標高は 2400m と低い気温逆転層 (1500m) の上に出ているため、比較的水蒸気量は少ない。現在 GTC (Gran Telescopio Canarias, 10m セグメント鏡) が建設中である。サハラ砂漠に近いため、特に夏季にダストの影響を受ける (ダストは上空 3000m 程度まで巻き上げられる)。
- ウズベキスタン南東部** パミール、アルタイ山脈西端に位置し、1960 年代から天文台が設置されている。1990 年代後半にシーイングが再評価され、良いサイトとされる上記カテゴリーに属さない内陸でも、良いサイトがあることが広く知られるようになった。大気揺らぎがゆっくりしている (他の主要サイトの 2-4 倍) のが特徴的で、補償光学にとっては非常に有利である。
- 南極** 南極点は気温が極めて低いため大気が非常に乾燥しており、10 年以上前から赤外・サブミリ波の望遠鏡が設置され運用されている。しかしシーイングは悪いため、空間分解能を必要とする大望遠鏡には向いていない。ドーム C (東経 123°21', 南緯 75°06') はフランス、イタリアが共同で開拓しているサイトで、オーストラリアのグループがこれに協力している。標高 3280m で水蒸気量は非常に少ない。

²⁴<http://www.phys.unsw.edu.au/~tonyt/Domec/farview2.html> より



図 4.92: チベット、Oma 付近 (4460m) (カラー 12 ページ)

また南極の高地は下降気流の中にあり、晴天率は高く降雪量も少ない (10cm/年程度)。冬季のシーイングの測定も開始され、まだデータが少ないものの $0''.3$ を切る値が得られており、世界で最も観測条件の良いサイトである可能性がある。また、大気揺らぎを起す層が低空にあり、isoplanatic angle が大きく coherence time が長い。継続して調査が必要である。南極ではオーロラが背景光の原因となりうるが、ドーム C は現在の南磁極に近いのでオーロラの出現頻度は少ない。

ドーム C は岩盤が露出していないため、建設物は全て厚い氷床の上に建てなければならない。他の地域と違い、建物の沈下、移動等、南極特有の問題に対処する必要がある。また南極では観測可能な天域が南天に限られる事と、白夜で夏季は太陽が沈まないことも考慮する必要がある。目的を絞る必要がある。ドーム C へは飛行機でのアクセスが可能である。2005 年の冬からは越冬も可能となる予定である。

日本はドーム C より標高の高いところにあるドームふじ (東経 $39^{\circ}42'$, 南緯 $77^{\circ}19'$, 標高 3810 m) を運用しており、既に 9 年越冬している。ドーム C と同等かそれより良い可能性がある。但しドームふじはドーム C よりオーロラ帯に近いので、特に可視光では背景光の問題があると思われる。

- **その他の地域** 中国は国内で最良のサイトを選定する調査をはじめており、特に西チベットに着目している。日本もこの調査に協力している。チベット西部は標高 4000m 以上の高原が広がり、水蒸気量も比較的少ない。モンスーンの影響を受けるが、衛星のデータからは晴天率もインドのハンレ (晴天率 70%程度) と同等以上であることがわかっている。パミール、カラコルムによる乱流が問題となるが、良いサイトの可能性があるので今後の調査が必要である。

南極と同様の気象条件が期待できる場所として、グリーンランド氷床がある。標高は北部で 2000m 中央部で 3000m ある。南に行くほどオーロラの影響を受け易くなる。未調査の地域である。

サイト調査は時間と費用のかかる作業である。調査グループ間の国際的な協力が必要不可欠である。また、サイト調査の方法はグループ間で同じではなく、お互いの装置の較正が十分行われていないのが現状である。サイトの比較のためには、統一された「標準的」な手法の確立が必要と考える。

Site	Altitude (m)	Seeing ($''$)	Precipitable		Wind speed (地表, m/s)	Isoplanatic angle ($''$)	Coherence time (ms)	Outer scale (m)	References
			Water Vapor (mm)	Vapor (mm)					
ドーム-C ¹	3280	0.27	0.64		3.5	5.7	7.9	—	[3, 5, 15]
マウナケア ²	4180	0.5–0.7	1.7–3.0		5	1.9	2.7	(10–80)	[3, 6, 7, 15]
サン・ペドロ・マルチル ³	2830	0.59	2.4		5.3	1.6	6.5	27	[3, 12]
Maidanak ⁴	2600	0.69	—		2	2.30–2.48	12	25.9	[8]
アタカマ ⁵	5000–5700	(0.7)	1–2		7	—	—	—	[9, 10, 15]
ラ・パルマ ⁶	2400	0.76	3.4		2.8	1.3	6.6	≈15	[3, 13, 14]
パラナル ⁵	2640	0.66→0.82	3.1		6.6	1.9–2.6	2.4–5.2	22	[15]
パッチヨン ⁵	2725	0.83	—		—	2.1–2.8	4.8–5.4	36	[16]
ラ・シジャ ⁵	2347	0.89	—		4.6	1.26	—	25	[12]
サザーランド ⁷	1798	0.92	—		8	—	—	—	[11]
ハンレ ⁸	4500	<1.0	<2(Oct.–Apr.)		2.2 (夜間)	—	—	—	[18]
南極点 ¹	2835	1.8	0.25–0.47		4.5	3.2	1.6	—	[3, 5, 17]

1: 南極、2: ハワイ (米国)、3: パハ・カリフォルニア (メキシコ)、4: ウズベキスタン、5: チリ、6: カナリア諸島 (スペイン)、7: 南アメリカ 8: 西ヒマラヤ北部 (インド)

表 4.21: 天文サイトのシーイング比較。サイトごとに必ずしも測定方法が同じではないので、比較の際には注意が必要である。

4.14 光干渉計と単一望遠鏡の役割

干渉計とは、複数の望遠鏡で受けた電磁波を干渉させて高分解能画像を合成するシステムである。

4.14.1 光干渉計と巨大望遠鏡で得られる観測能力

感度 (口径) vs 解像力 (最大鏡面間隔) における位置づけ (図 4.93)

● 単一巨大望遠鏡 / 感度優先 (20m 以上の望遠鏡)

非常に暗い天体が多い深宇宙の探査や、高分散分光など、光子数の限界に挑む観測には、単一望遠鏡で口径が大きくできる限り、干渉計にせず単一望遠鏡のままが有利であり、安価でもある。電波では、SKA のようなものが相当する。

● 巨大望遠鏡 2 台の干渉計 / 感度も角度分解能も追求 (21m 望遠鏡を使用 : GMT20/20)

GMT20/20(4.11.4 章) しか計画が提案されていない、感度と角度分解能を両方上げる考え方。2 つの巨大望遠鏡を 1 つの補償光学のようにして動かす。単一望遠鏡の口径が限界に達したのちは、この方法が有力な手段の一つである。電波では望遠鏡数が多いが ALMA あたりに相当する。

● 大望遠鏡での干渉計 / 角度分解能優先でやや感度も (3m-10m の望遠鏡を使用)

現時点では、VLTI(8m 望遠鏡 4 台 120m 基線) とケック干渉計 (10m 望遠鏡 2 台 85m 基線) のみだが、AGN の観測が可能になってきた。また、OHANA 計画 (マウナケア山頂の CFHT 3.2m、ケック I&II 10m×2, Subaru 8.2m, Gemini 8m, IRTF 3.6m の最長 800m 基線を光ファイバーで結合) もある。電波では野辺山の Rainbow 干渉計あたりに相当する。感度が限界まで深く引き上げられた光干渉計 (レーザーガイド星+補償光学並みに制御を行い積分観測可能なもの) はまだ存在しない。

● 小望遠鏡での干渉計 / 角度分解能優先 (2m 以下の望遠鏡を使用)

明るい天体 (恒星) のみをターゲットとし、角度分解能確保と予算圧縮早期実現している。電波では VLBI

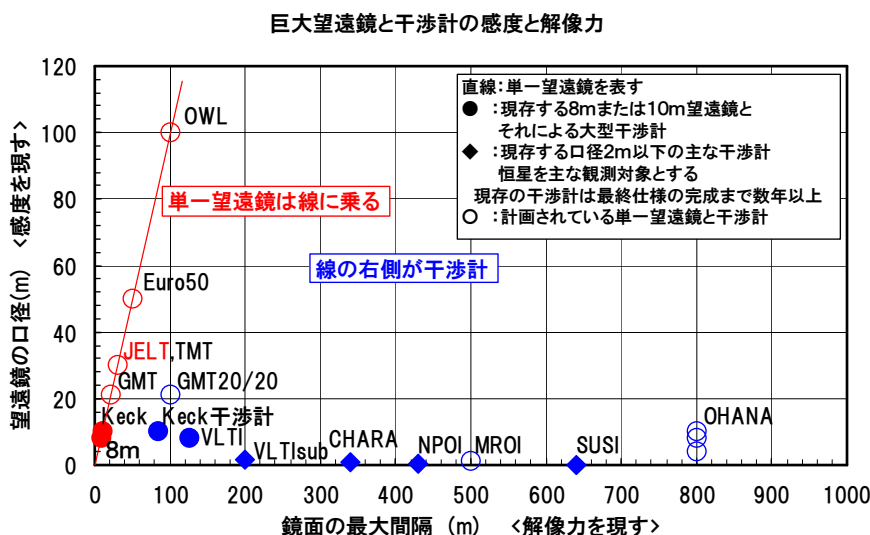


図 4.93: 大望遠鏡と光干渉計の現在と今後の計画 (感度 vs 解像力)。単一巨大望遠鏡は鏡面を密につめた状態で総鏡面積を増やす計画であり、光干渉計は総面積はともかく鏡面の最大間隔 (基線) を広げる計画である。天文学的な要求と予算的・技術的な実現可能性とで折り合いのつく方向へ進む。深宇宙探査など検出光子数の限界に挑む観測には JELT, TMT, Euro50, OWL などの単一望遠鏡が、感度と分解能を両方上げるには GMT20/20 が、やや明るい天体の超高角度分解能観測にはケック, VLTI, OHANA などの干渉計が、目玉的な計画と言える。

に相当すると考えると良い。主なものは、CHARA(1m6 台 320m 基線), NPOI(50cm6 台 430m 基線), MROI(1.4m10 台 500m 基線), SUSI(20cm11 台 640m 基線)。それぞれ最終完成に数年はかかる。

単一望遠鏡と干渉計の S/N 比較 (図 4.95)

算出方法 (図 4.94、表 4.22, 4.23) 単一望遠鏡では、開口を通過したすべての電磁波が焦点面に到達して干渉し、像が形成される。光干渉計も将来的には、補償光学のように全望遠鏡のからの波面を制御して同一焦点に集めて干渉させ、像面で開口合成をすることができるようになる。その際まんべんなく理想的なフーリエ成分のサンプリングがなされ、開口合成された PSF のコアができて裾野が滑らかにつぶれた状態になるとして、点光源の PSF(Resolution) コアへの光量と背景光の揺らぎの比が、口径や望遠鏡数・基線とともにどう変わるか相対的に評価した(干渉計の場合 PSF コア以外の場所の光子も利用すべきだが、それは入っていない)。また、スループットなど、その他の細かい条件ははすべて同一とみなしている。

単一望遠鏡の解釈 角度分解能は、口径の 1 乗に比例して上がる。ピーク強度は口径の 4 乗に比例するが、分解能面積が口径の 2 乗に反比例するため、その分解能内に星の総光子数が口径の 2 乗に比例して集中する。単位面積当たりの背景光は口径の 2 乗に比例するが点像の広がる面積内の背景光は口径の 0 乗に比例する。揺らぎも 0 乗のままである。結果的に、単一望遠鏡は鏡面が密に詰まっているため焦点面での光子が集中し、点光源には口径の 2 乗に比例して感度が上がる。

光干渉計の解釈 角度分解能は最長基線の 1 乗に比例して上がる。ピーク強度は総面積の 2 乗 (実質口径の 4 乗 = 口径の 4 乗と望遠鏡数の 2 乗) に比例するが、分解能面積が基線長の 2 乗に反比例するため、その分解能の星の光子数は実質口径の 4 乗に比例し基線の 2 乗に反比例する。分解能面積内の背景光は実質口径の 2 乗に比例し基線の 2 乗に反比例する。揺らぎは 1 乗ずつとなる。鏡面がまばらになるため光子が焦点面で分散する影響が出ると (等価的に) 考えてよく、光干渉計は複数の望遠鏡を離れた距離に比例して角度分解能が容易に上がるが、結果として、実質口径の 3 乗に比例し基線長の 1 乗に反比例し、同じ鏡面総面積を持つ単一望遠鏡に比べて感度が下がる。感度を犠牲にして超高角度分解能観測を行うのが光干渉計であることがわかる。

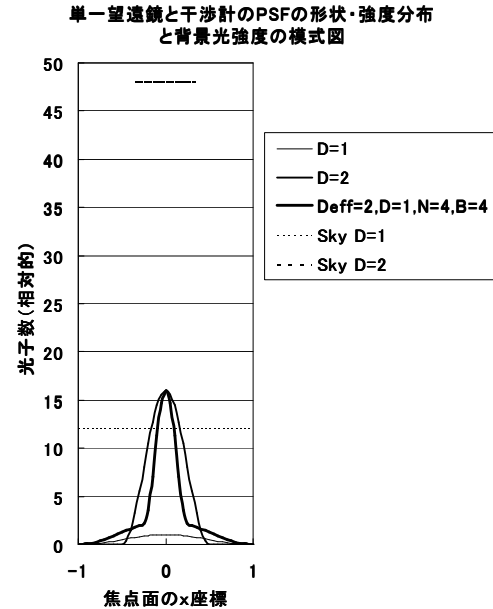


図 4.94: 単一望遠鏡と干渉計の PSF の形状と強度分布、背景光の強度

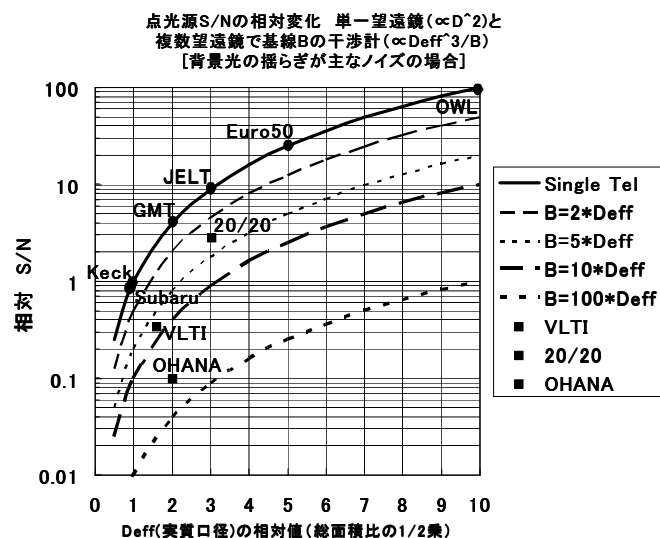


図 4.95: 単一望遠鏡と干渉計の S/N 比較

単一望遠鏡に比べて感度が下がる。感度を犠牲にして超高角度分解能観測を行うのが光干渉計であることがわかる。

単一望遠鏡と光干渉計の S/N の算出	単一望遠鏡	光干渉計	(コメント)
焦点上での小さい固定サイズピクセルから算出			
PSF のピーク強度	D^4	D_{eff}^4	信号強度
背景光の強度/単位面積	D^2	D_{eff}^2	
背景光の強度/単位面積 の揺らぎ	D^1	D_{eff}^1	ノイズ
各ピクセルでの S/N	D^3	D_{eff}^3	
PSF コアが広がるピクセル数	D^{-2}	B^{-2}	
ピクセル数による S/N 向上率	D^{-1}	B^{-1}	PSF コア内を合算
PSF コア内の光子による S/N	D^2	$D_{\text{eff}}^3 B^{-1}$	
焦点上での PSF コア分解能単位で算出			
星からの総光子数	D^2	$D_{\text{eff}}^4 B^{-2}$	PSF コア内の信号強度
背景光の強度/単位面積	D^2	D_{eff}^2	
PSF が広がるピクセル数	D^{-2}	B^{-2}	
PSF コア内の背景光	D^0	$D_{\text{eff}}^2 B^{-2}$	
PSF コア内の背景光 の揺らぎ	D^0	$D_{\text{eff}}^1 B^{-1}$	ノイズ
PSF 内の光子による S/N	D^2	$D_{\text{eff}}^3 B^{-1}$	

D : 口径, X : 望遠鏡の数, B : 最大基線長, $D_{\text{eff}}^2 = XD^2$, PSF : 点光源の焦点上での強度分布を現す関数

表 4.22: 単一望遠鏡と干渉計の S/N 比較

	Subaru (8.2m)	Keck (10m)	GMT (21m)	JELT (30m)	Euro50 (50m)	OWL (100m)	VLT (8m×4)	GMT20/20 (20m×2)
D	0.8	1	2.1	3	5	10	0.8	21
X	1	1	1	1	1	1	4	2
D_{eff}	0.8	1	2.1	3	5	10	1.6	3.0
B	0.8	1	2.1	3	5	10	12	10
S/N	0.64	1	4.4	9	25	100	0.34	2.8

表 4.23: 単一望遠鏡と光干渉計の S/N のパラメーター例 (10m 望遠鏡を 1 とする)。

分解能が上がると PSF コア外の光子が総光子数の多くを含むようになるので、それを考慮に入れば依存性が若干好転すると思われる。

- 単一望遠鏡の $S/N \propto D^2$
- 光干渉計の $S/N \propto D_{\text{eff}}^3/B$ (限界分解能の PSF コア内の強度だけで評価した場合)

単一望遠鏡と干渉計の共通限界

光干渉計は巨大望遠鏡における補償光学とよく似ており、大気揺らぎの測定と補正を必要とする。つまり、ミリ秒オーダーでの波面や干渉縞計測と制御、波面計測ができる明るさの (レーザー) ガイド星と、望遠鏡の

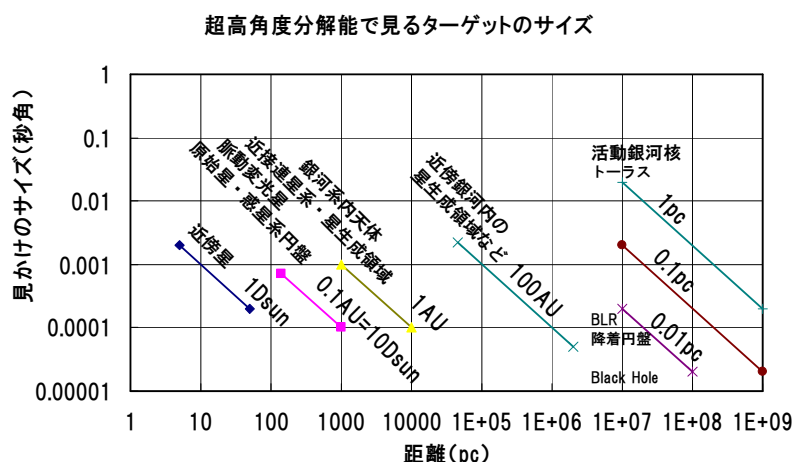


図 4.96: 光赤外干渉計による超高角度分解能観測のターゲット

指向や干渉縞検出ができる自然ガイド星の確保である。また、高い分解能で観測できる視野は AO またはそれより厳しく制限され、多層 AO と同じとして $2\mu\text{m}$ 帯で 2 分角程度の視野しか確保できない。

4.14.2 光赤外干渉計による超高角度分解能観測のターゲット (図 4.96)

- **天文学上の主な課題との関連** 光干渉計では、以下の 6 項目のうち、2, 5, 6 に関わる。
 1. 「宇宙の暗黒エネルギーと暗黒物質の解明」
 2. 「セントラルエンジンパラダイムの検証と巨大ブラックホール形成史の解明」
 3. 「宇宙初期から現在までの銀河宇宙の歴史を具に描く時代絵巻の構築」
 4. 「恒星分離に基づく銀河の形成と進化の解明」
 5. 「銀河の進化と元素の起源の解明に向けた恒星進化の素過程の解明」
 6. 「系外惑星系を含めた一般的な惑星系の構造と起源の解明、ならびに惑星進化としての生命の起源の解明」
- **恒星物理** 恒星表面や恒星周辺を分解することによる精密な恒星物理学が進展する
 恒星内部・進化的理論の検証 直径、有効温度、光度、距離、等の恒星基本パラメーターの精密化
 恒星大気モデルの検証 周辺減光、高速自転による扁平、重力減光、黒点、明るい斑点、分子斑点、広がった分子大気、分子の生成、AGB 星、Be 星などの質量放出現象、ダストの生成、脈動変光星の変化する直径・距離の決定、脈動理論の検証
 分光連星の軌道・距離・質量の決定、進化的理論の検証、連星などの質量降着・高エネルギー天体の核
- **星・惑星形成** 0.1AU ($=100\text{pc} \times 1/1000$ 秒角) の分解能で見る星・惑星生成領域
 ダスト円盤 表面温度、厚み、降着率、内縁半径、磁場との相互作用、惑星形成過程
 中心星 T Tau 星の進化的理論の検証
 近傍銀河内の星生成領域
- **AGN** 0.5pc ($=100\text{Mpc} \times 1/1000$ 秒角) の分解能で見る AGN 中心領域
 BLR(広輝線領域)の構造、ダストトラスの撮像
- **太陽系外の惑星の検出** 干渉計やナリングコロナグラフによって中心星の光を減らし、惑星を検出する
 高分解能ではないが、光の干渉する性質を使う

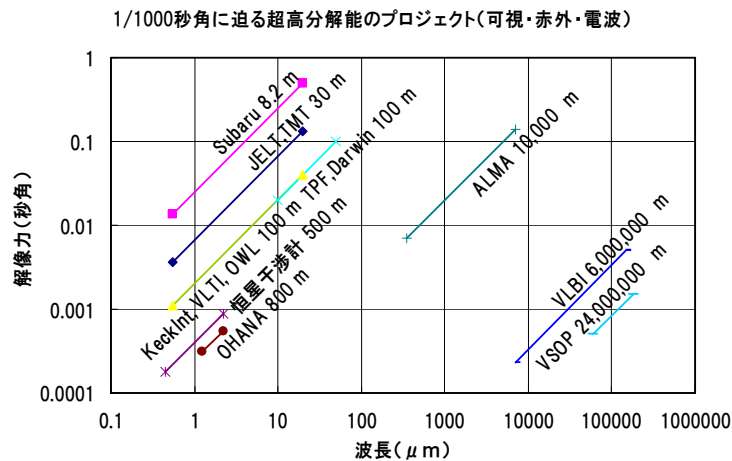


図 4.97: 可視・赤外・電波の超高角度分解能プロジェクト：光赤外干渉計や電波 VLBI が 1/1000 秒角以下を狙う

	0.5μm	2μm	20μm	0.35mm(850GHz)	7mm(115GHz)	6cm(5GHz)
分解能	可視光	近赤外	中間遠赤外	サブミリ波	ミリ波	センチ波
1″	0.1m	0.4m	4m	70m	1.4km	12km
0.1″	1m	4m	40m	700m	14km	120km
0.01″	10m	40m	400m	7km	140km	1200km
0.001″	100m	400m	4km	70km	1400km	12000km

表 4.24: 1 秒角 ～1/1000 秒角の分解能に必要な望遠鏡の口径・干渉計の基線長

4.14.3 可視・赤外・電波の超高角度分解能プロジェクト (図 4.97)

- 光赤外干渉計や電波 VLBI で、限定的なターゲットが 1/1000 秒角以下の分解能の観測にかかる。

必要な望遠鏡の大きさ

- 角度分解能 (ラジアン) = 波長/最大鏡面間隔
- 最大鏡面間隔 = 単一望遠鏡の場合は望遠鏡の口径、干渉計の場合は最大望遠鏡間距離 (基線長)
- 1/1000 秒角の角度分解能に必要な最大鏡面間隔
可視域で 100m、近赤外で 400m、サブミリ波で 70km、センチ波で 12000km。

可視赤外線領域と電波領域の違い

- 電波領域の干渉計
波長が長く角度分解能を得るために必要性が高い、技術的に容易で 1950 年代から発展、現在の主力望遠鏡は ALMA のように干渉計、VLBI 技術で地球規模の基線長がとれる各波長域で技術的な上限に近い大きな口径のアンテナを使用している

- 光赤外域の干渉計

1990 年以降、安価で早期実現できる小望遠鏡 (10cm~1.8m) による干渉計が発達中

0.01 秒程度の速い大気揺らぎのため速い読み出しが必要

現在のところ明るい恒星が主なターゲット

ケック干渉計 (10m 望遠鏡 2 台) と、VLTI(8m 望遠鏡 4 台) では、最も明るい AGN が観測可能

技術的上限に近い口径の望遠鏡は高価で、干渉計に多数使用できず単独使用と格差が生じる

将来、補償光学のように揺らぎを完全にロックして長時間積分をかけられれば限界は深くなる

- 共通点

基線長に対して口径が小さい場合 (小口径の光干渉計と電波 VLBI) は、分解能は高いが感度が低い

4.14.4 将来の光干渉計への注目

- 技術・予算と見合う適時のたびにブレークスルーが発生。常に準備状態でのいる努力が必要。
- GMT 20/20 がスタートするかどうかがキーになる。
- 現在は、太陽系外の地球型惑星検出の方向の開発が活発。スペースに注目。

4.15 まとめ

国立天文台は2004年4月に自然科学研究機構を構成する一研究所として新規発足した。地上大型望遠鏡WGは国内の望遠鏡関連新技術のサーベイを行い、次世代望遠鏡実現に有用な技術となりうる新概念、新技術の実用化可能性の検証を開始している。このうちのいくつかの技術が実用化されると超大型望遠鏡の建設を価格と工期の両面から現実的なものにしていく上で大きなステップとなると期待している。

具体的な開発項目としては

1. 非球面三枚を用いる無収差平坦像面広視野新光学系の検討
2. セグメント鏡素材として日本発の新素材であるゼロ膨張セラミック (ZPF) および防湿型炭素繊維強化プラスチックの試作開発
3. 超高精度研削加工装置によるセグメント鏡の研削工程大幅短縮の研究
4. セグメント調整用新型駆動アクチュエータの試作開発
5. レーザーガイド星生成システム用和周波全固体レーザーの開発

などに取り組み始めている。WGではこれらを総合して口径30m JELT構想を独自にとりまとめたが、計画規模が壮大であることに鑑み、次世代超大型望遠鏡構想の実現を国際協力の枠組みで推進することについても、十分念頭に置きながら推進に向け関係各方面のご支援を御願いするところである。

4.16 謝辞

本章をまとめるにあたり、特に下記の方々にご協力を頂いた。

国立天文台大坪政司氏、三ツ井健司氏、佐々木五郎氏、早野裕氏、斉藤嘉彦氏、名古屋大学佐藤修二教授、木野勝氏、福村香織氏、理化学研究所大森整氏、和田智之氏、斉藤徳人氏、メガオプト社赤川和之氏、山形工業技術センター田中善衛氏、金田亮氏、渡部光孝氏、三菱電機通信機製作所伊藤昇氏、大島丈二氏、太平洋セメント社石井守氏、日本セラテック社森山司郎氏、ナガセインテグレックス社山口政男氏である。

本章の執筆者一覧、担当

氏名	所属	主な担当章節
家 正則	国立天文台光赤外研究部	§ 4.2-4.5, § 4.8, § 4.10-4.12 § 4.15-4.16
土居 守	東京大学天文学教育研究センター	§ 4.1
本原 顕太郎	東京大学天文学教育研究センター	§ 4.1, § 4.11
成相 恭二	明星大学	§ 4.3
木村 仁彦	京都大学理学部物理学教室	§ 4.4
栗田 光樹夫	名古屋大学理学部物理学教室	§ 4.4, § 4.5, § 4.9
岩室 英史	京都大学理学部物理学教室	§ 4.4, § 4.7
臼田 知史	国立天文台ハワイ観測所	§ 4.3
佐々木 敏由紀	国立天文台ハワイ観測所	§ 4.6
青木 和光	国立天文台光赤外研究部	§ 4.7
片ざ 宏一	宇宙航空研究開発機構	§ 4.7
川端 弘治	広島大学理学部	§ 4.7
山下 卓也	国立天文台ハワイ観測所	§ 4.7
宮崎 聡	国立天文台ハワイ観測所	§ 4.7
安藤 裕康	国立天文台光赤外研究部	§ 4.9
高遠 徳尚	国立天文台ハワイ観測所	§ 4.13
高見 英樹	国立天文台ハワイ観測所	§ 4.8
西川 淳	国立天文台光赤外研究部	§ 4.14

参考文献

- [1] 「大型光学赤外線望遠鏡計画説明書」、1989 年 9 月、国立天文台
- [2] Nariai and Iye 2005, PASJ, in press.
- [3] Lawrence, J. et al. 2004, SPIE 5489-84
- [4] 「The Design and Construction of Large Optical Telescope」、Springer 出版
- [5] Aristidi et al. 2004, “Dome C Astronomy/Astrophysics Meeting,” CESR, Toulouse
- [6] Miyashita, A. et al. 2004, SPIE 5489-88
- [7] Takato, N. et al. 1995. JOSA A, 12, 958–963
- [8] Ehgamberdiev, S. A. et al. 2000, A&Ap Suppl., 145, 293–304
- [9] Giovanelli, R. et al. 2001, PASP 113, 789
- [10] Uraguchi, F. et al. 2004, SPIE 5489-89
- [11] Erasums 2000, South African Journal of Science 96,1–8
(<http://www.astro.caltech.edu/~erasmus/Projects/SALTsite/saaoproj.htm>)
- [12] Avila, R. et al. 2003, RevMexAA, 19, 121–124.
(<http://www.astroscu.unam.mx/rmaa/RMxAC..19/PDF/RMxAC..19resumen.pdf>)
- [13] (<http://www.ing.iac.es/Astronomy/development/hap/haphomepage.htm>)
- [14] (http://www.iac.es/proyect/CCam/IR_Sky/IR_Sky2.html)
- [15] (<http://www.eso.org/gen--fac/pubs/astclim/>)
- [16] (<http://www.gemini.edu/sciops/instruments/adaptiveOptics/Seeing.html>)
- [17] (http://www.atnf.csiro.au/pasa/16_2/valenziano/paper/node4.html)
- [18] (<http://crest.ernet.in/iia/iao/site.html>)

第5章 次世代赤外線天文衛星 SPICA

ASTRO-F に続く次世代の赤外線天文衛星として SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) を提案する。SPICA には、口径 3.5 m という大口径望遠鏡を極低温まで冷却して搭載し、中間～遠赤外線領域において感度と空間分解能とを画期的に向上させることを目指す。これにより、原始銀河の検出、太陽系外の惑星の直接検出など、天文学における重要課題に挑む。

SPICA の技術的な最大の特徴は、観測機器の冷却に放射冷却と機械式冷凍機を用い、従来の衛星で用いていた「冷媒による冷却を廃止」することである。これにより、衛星の大幅な軽量化が可能となり、その結果として大口径望遠鏡の搭載が可能になる。軌道としては、太陽 - 地球系のラグランジュ点の一つである L2 点周りのハロー軌道を候補として検討している。この軌道では、放射冷却が非常に有効に働けることが可能になる。

打ち上げには、H-IIA-202 ロケットの使用を想定している。2010 年代初頭の打ち上げを目指す。

5.1 ミッションの概要

5.1.1 宇宙史の解明: ビッグバンから生命まで

我々の宇宙は約 137 億年前にビッグバンで生まれた。その後の宇宙の進化の歴史の中で、現在の我々の世界を構成している各種の天体が誕生、進化してきたと考えられている。

しかし、それらの天体が「いつ」「どのように」誕生、進化してきたのかは、未だによくわかっていない。SPICA は、宇宙の歴史における「様々な天体の誕生と進化」という大きな謎に挑む。具体的には、以下の 3 つを最重要テーマとしてあげている。

1. 銀河の誕生と進化

宇宙は、誕生してからしばらく後まで、極めて「一様」であった。しかしながら、現在の宇宙は、銀河をはじめとする様々な天体で構成された、極めて「非一様」な様相を示している。SPICA は、高感度の赤外線観測により、最も初期の銀河の誕生をとらえ、現在の宇宙の「複雑さ」の起源と進化に迫る。

2. 星と惑星系の誕生と進化

宇宙の中で最大のエネルギー発生源は「星」である。SPICA は高い空間分解能を活かして、星の誕生の場を、銀河系の中のみならず、系外の銀河でも明らかにすることを期待されている。

さらに、SPICA は、太陽系外の惑星を直接に撮像、分光する可能性をもっている。太陽系外の惑星の直接検出は、我々の太陽系そのものを見直す大きな機会となるであろう。

3. 物質の進化

宇宙の多様性は、重元素によるところが多い。しかし、その重元素の多くは、固体に取り込まれ、一般には観測が困難である。SPICA はその豊富な分光能力を活かし、ガス相のみならず、固体相の観測も行ない、宇宙における物質の進化を明らかにする。

5.1.2 ASTRO-F への期待とその発展

ASTRO-F への期待

上記の 3 つのテーマに迫るには、スペースからの赤外線高感度観測が必要不可欠である。

スペースからの赤外線観測を進めるべく、我々は2005年度打ち上げを目指して、ASTRO-F 衛星計画を進めている。これは全天を観測することを主目的の一つとしたサーベイ観測衛星であり数百万個以上の赤外線天体の発見が期待されている。ASTRO-F は、いわば究極の赤外線サーベイ衛星である。

ASTRO-F の成果

ASTRO-F は、上記のように極めて強力な赤外線天文衛星であるが、限界もある。その最大のものは、空間分解能が不足していることである。例えば、ASTRO-F の最も長波長での空間分解能は $50''$ と人間の視力程度である。

空間分解能の向上のためには、大口径の望遠鏡が必要である。しかし、その実現は従来は困難であった。赤外線観測では、観測機の冷却が必要であるが、従来の赤外線衛星ではそのために用いる冷媒を用いていた。するとその冷媒の保持のために、大きなタンクと重い真空容器が必要となる。そのため、衛星が大きく重くなり、限られた重量のもとでは、比較的小口径の望遠鏡しか搭載できなかったのである。

ASTRO-F からの発展: Warm Launch 型の赤外線衛星

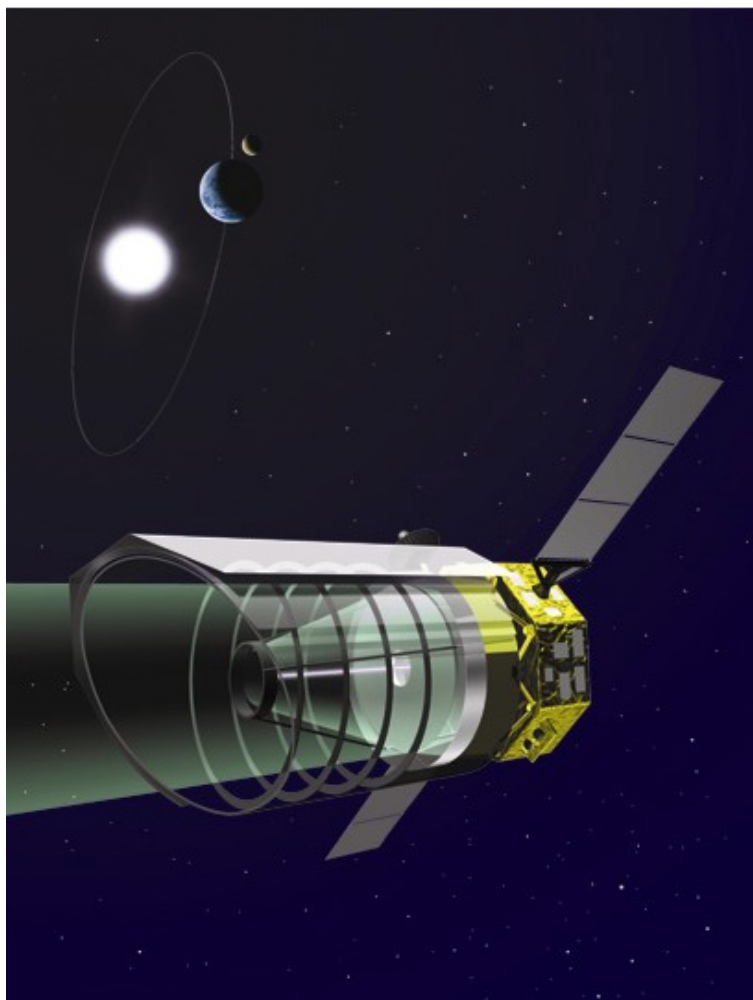
従来の赤外線衛星の「大きい、重い」という最大の欠点を克服するために、SPICA では、冷媒を搭載せず、打ち上げ時に観測器を冷却しない“Warm Launch”型の衛星を提案する。冷媒がなければタンクは不要になり衛星は小型化される。さらに、打ち上げ時に観測器が冷却されていなければ無骨な真空容器外壁は不要になり、衛星は画期的に軽量化される。これらの効果により、衛星全体の重量が同じでも、従来よりもはるかに大口径の望遠鏡の搭載が可能になるはずである。

5.1.3 SPICA ミッション

ミッション概要

SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) は、主に波長 $5-200\mu\text{m}$ の中間-遠赤外線領域において、今までにない高い空間分解能と、優れた感度をもった天文観測機器を搭載し、宇宙の進化、銀河の誕生と進化、星惑星系の誕生と進化などの重要な課題を解明しようとする、次世代の赤外線天文衛星ミッションである。

SPICA の観測機器の特徴は、口径 3.5m という大望遠鏡を、冷却した状態で観測に用いる点である。これを技術的に可能にするために、SPICA 観測系冷却システムでは前述のように全く新しい設計思想をとる。すなわち、従来の衛星で用いてきた冷媒による冷却にかわって、観測機器の冷却に放射冷却と機械式冷凍機を全面的に用いる。これにより、衛星の大幅な小型化と軽量化が可能となる。逆に言えば、限られ



た打ち上げ能力のもとで、大口径望遠鏡の搭載が可能になる。

この設計思想に基づく衛星の概念図を図 5.1 に、ミッションの仕様の概要を表 5.1 示す。

項目		値
特徴		中間-遠赤外線領域の高感度、高空間分解能観測 多目的観測用の天文台型衛星
望遠鏡	口径	3.5 m
	温度	4.5 K
	精度	波長 $5\mu\text{m}$ 以上で回折限界
観測波長域	コア波長域	$5 - 200\mu\text{m}$
	オプション	近赤外線、サブミリ波
観測機冷却	打ち上げ時	常温
	軌道上	放射冷却と機械式冷凍機で冷却
冷凍機	望遠鏡用	^4He JT 冷凍機 (4.5 K)
	遠赤外線観測器用	^3He JT 冷凍機 (2.5 K, 1.7 K)
総重量		2.6 t
軌道		太陽-地球系のラグランジュ点 L2 周りのハロー軌道
打ち上げ	ロケット	H-IIA-202
	時期	2010 年台初頭

表 5.1: SPICA Mission 仕様 (案)

軌道: S-E L2 ハロー

このミッションの軌道として、「太陽 - 地球」系のラグランジュ点のうち L2

(以下 S-E L2) (図 5.2) のまわりのハロー軌道を有力候補として検討している。S-E L2 ハロー軌道は、天体観測、特に赤外線天体観測にとっては、以下の理由から、大変に有利な軌道である。

1. 赤外線衛星の大敵であった地球の見かけの大きさが、非常に小さくなり、かつ太陽とほぼ同じ方向になるため、衛星への熱入力が大幅に減少し、放射冷却が有効に働く。
2. ある時点における観測不能天域が「太陽 - 地球」方向を中心とする特定の方向のみに限られるため、観測可能な天空の領域が広く、かつ長時間の積分が可能である。

特に SPICA にとって、上記 (1) の特徴は、冷却の観点から大変に重要である。

S-E L2 に、口径 3.5 m 程度の大望遠鏡を投入することは、H-IIA ロケットで十分に可能である。

2010 年台初頭の打ち上げを目指している。

SPICA の能力と国際的位置づけ

口径 3.5m の冷却望遠鏡は、赤外線観測のあらゆる分野で画期的な観測を可能にする。今までの冷却望遠鏡 (ASTRO-F を含む) が口径 1m 以下の望遠鏡しか搭載していなかったことを考えると、

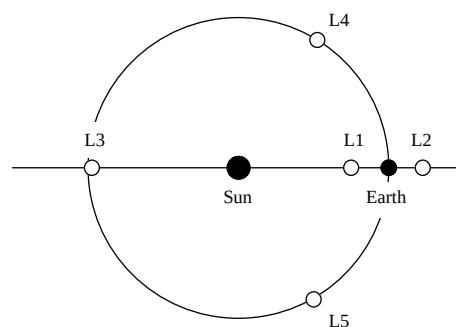


図 5.2: 太陽-地球系のラグランジュ点

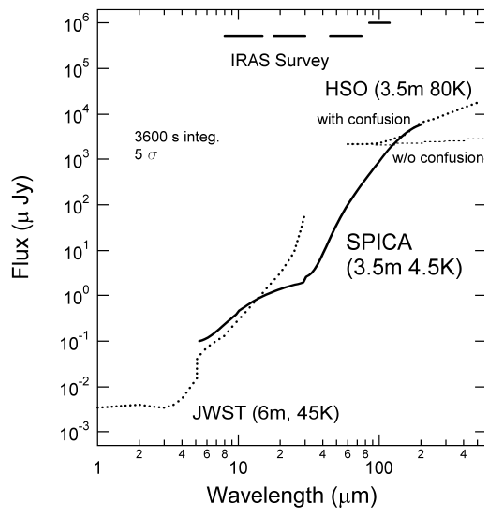


図 5.3: 21 世紀初頭に計画されている赤外線天文衛星ミッションの測光感度の比較。SPICA は、中間・遠赤外線領域において、他のミッションよりも 2 桁以上優れた感度を有する。

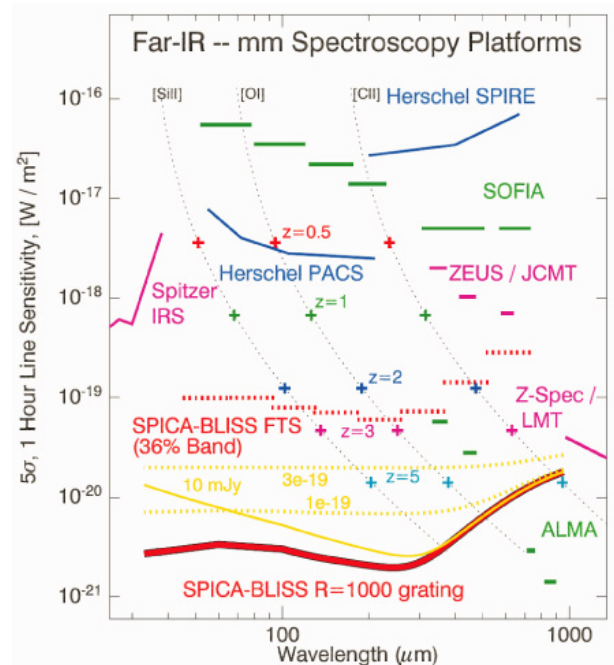


図 5.4: SPICA の分光感度 (長波長部分のみ)。同口径の Herschel と比べても 2 桁以上の感度向上が期待される。一部の波長では ALMA の感度すら上回る。

3.5 m という口径は画期的なジャンプである。口径の増大および積分時間の増大により、SPICA は非常に優れた感度を達成することができる (図 5.3, 5.4)。

特に、SPICA は、中間-遠赤外線領域での感度が高い。21 世紀初頭には、JWST (NASA), Herschel (ESA) といった大型の赤外線-サブミリ波ミッションが予定されている。しかし、これらの望遠鏡は SPICA の望遠鏡ほどには冷却されていない。したがって、中間-遠赤外線領域では、図 5.3 に示すように、これらの望遠鏡では、望遠鏡からの熱放射のゆらぎのために、感度が著しく劣化する。一方、SPICA では、冷却望遠鏡を搭載しているために、中間-遠赤外線領域でも感度の劣化はなく、他のミッションに比べて圧倒的に優れた感度を持つことができるのである。

このミッションが実現すれば、撮像を行うにしても、分光を行うにしても、従来とは全く質の異なるすばらしいデータが取得できる。これにより、冒頭に述べた大きな謎の解明に大きな前進をすることができるであろう。

5.1.4 本文書の構成と位置づけ

本章は、日本の光赤外線天文学の将来展望という観点から、SPICA の概要を記したものである。

なお、SPICA ミッションについては、別途プロジェクト提案書を並行して作成している。プロジェクトの内容のより詳細、またその目指す科学の具体的内容については、そのプロジェクト提案書を参照されたい。

5.2 宇宙史の解明: ビッグバンから生命まで

5.2.1 SPICA の特徴

我々の宇宙は約 137 億年前にビッグバンで生まれた。その後の宇宙の進化の歴史の中で、現在の我々の世界を構成している各種の天体が誕生、進化してきたと考えられている。

しかし、それらの天体が「いつ」「どのように」誕生、進化してきたのかは、未だによくわかっていない。SPICA は、

1. 銀河の誕生と進化
2. 星と惑星系の誕生と進化
3. 物質の進化

の研究を通して、「宇宙史の解明」という大きな課題に挑む。

宇宙史を解明するうえで、遠・中間赤外線（波長約 $300\mu\text{m}$ から約 $5\mu\text{m}$ ）で宇宙を観測することは、本質的に重要である。星・銀河などの天体からの光のエネルギーの約半分は星間物質に吸収され、遠・中間赤外線波長で再放射される。従って、この波長を欠くことは、宇宙の片面しか見ておらず、その正しい理解には遠く及ばないことを意味する（図 5.5）。また、20 世紀最後により観測可能になった系外惑星や褐色矮星などの超低質量天体は、最もホットな研究対象であるが、恒星にごく近いもの以外は基本的に低温天体であり、波長の長い赤外線観測が有利である。さらに、宇宙の果てにある遠方天体の観測は、その赤方偏移（ z ）のゆえに赤外線が有利であり、かつ、さまざまな z に対応できるためには、大気の窓の制限を取り払わなければならない。

SPICA は 2010 年代初頭に世界最高の遠・中間赤外線観測を可能にするミッションである。IRAS、ISO、SST、ASTRO-F の「正当な」後継機でもあり、これら先達ミッションの望遠鏡口径（従って、解像度）を一挙に 4 倍以上、感度は約 3 桁以上向上させる。また、SPICA は、豊富な分光機能を持ち、中間赤外線からサブミリ波にかけての各種の分子、原子、イオンのライン分光に威力を発揮する。さらに、コロナグラフのような高コントラスト装置を付加することによって、解像度・感度・コントラストの全てを提供することができる。このような従来に無い卓越した観測性能によって、SPICA は宇宙で最初の天体から惑星に至るまで、さまざまな天体を、その年齢・質量に関わらず観測対象とし、「宇宙史の解明」に迫ることのできる万能型の観測天文台となる。

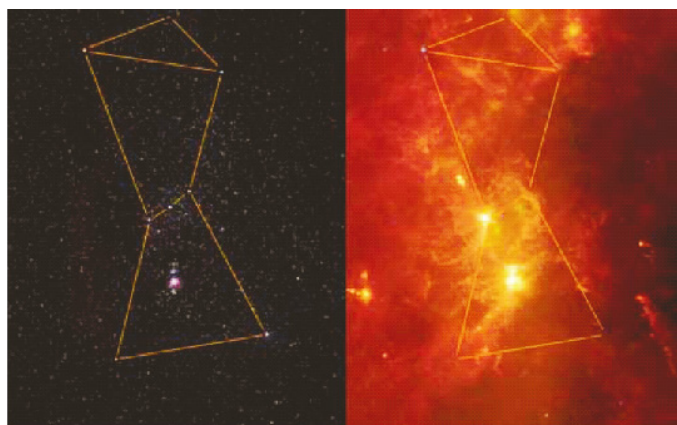


図 5.5: (左) 可視光で見たオリオン座と、(右) 遠赤外線で見たオリオン座の比較。遠赤外線では、可視光線を吸収していた星間物質（ダスト）が可視化される。これにより、星生成領域の分布が明確に描き出されている。（カラー 12 ページ）

5.2.2 宇宙史の解明にむけて：重要課題

SPICA チームでは、多様なサイエンスを検討するために SPICA サイエンスワーキンググループを結成した。このグループにより、SPICA のサイエンスの重要項目をまとめた。これは SPICA で可能になるサイエンスの提案であることはもちろん、その装置要求にもなっている。SPICA の特徴を活かし、可視光（すばる）、電波（ALMA）、X 線（ASTRO-E2, NeXT）など他波長の観測と協力しつつ、宇宙史の解明に向けて SPICA に期待されている科学的成果の最も代表的なものを、以下に概観する。

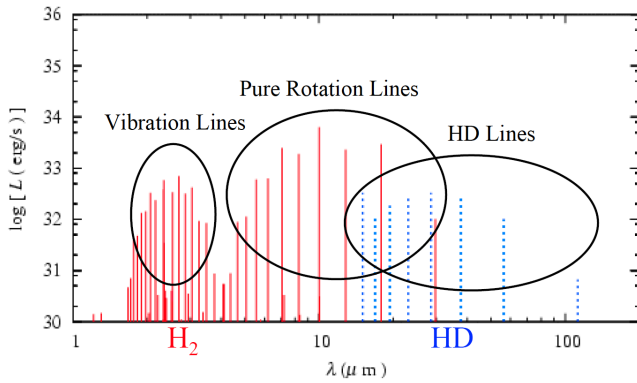


図 5.6: 種族 III の星の生成期に期待される水素分子輝線。実際には、これらの輝線が大きく赤方偏移して観測される。

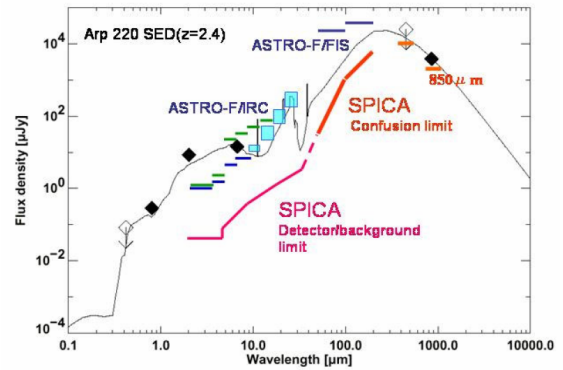


図 5.7: ASTRO-F (IRC : 500 秒および 10,000 秒 ; FIS : 全天サーベイ) と SPICA (1 時間、ただし遠赤外は銀河コンヒュージョン限界) の 5σ 点源検出限界と、 $z = 2.4$ においた Arp220 の SED とを比較した。

(1) 銀河の誕生と進化

1. 宇宙最初の日体を探る

宇宙進化のうでビッグバン以降宇宙の晴れ上がり（中性化）から最初の星・銀河形成までの時期は宇宙史の暗黒時代と呼ばれ、これまで観測的事実はほとんどなかった。しかし WMAP の観測結果から宇宙の再電離がかなり昔（赤方偏移 $z > 17$ ）に遡ることがわかったこと、近赤外宇宙背景放射の観測が宇宙最初の星の光である可能性が指摘されていること、などから、宇宙最初の星（種族 III）についての研究が急速に進みつつある。宇宙最初の星は水素とヘリウムのみからなるガスから形成されたが、その冷却は近赤外・中間赤外領域に存在する水素分子の振動・回転遷移によってのみなされたと考えられている（図 5.6）。このラインは中間・遠赤外領域に赤方偏移するため、SPICA によって初めて観測が可能になる。水素分子が直接観測出来れば宇宙最初の星形成の状況、大規模構造の形成過程等これまで謎とされていたことの説明が一挙に進むことが期待される。

宇宙最初の星は太陽質量の数百倍の大質量星と考えられ、そのほとんどはブラックホールとなるが、一部は超新星となって銀河間空間に重元素をまき散らし、新たな世代の星形成（種族 II）の種となる。種族 II の星形成においては間赤外線および遠赤外線領域に存在する各種重元素からの原子線、また宇宙塵の熱放射が重要であり、SPICA はその観測を通じて種族 II の星形成をトレースすることが出来る。

SPICA はこれらの観測を通じ、これまで謎となっていた宇宙史の暗黒時代の説明に大きな役割を果たすであろう。

2. 銀河・銀河団・大規模構造の進化を説明する

宇宙最初の天体は大質量星と考えられているが、種族 II の星形成とともに銀河、銀河団が形成され、また宇宙の大規模構造が成長する。この過程では星やブラックホールの集積化（マージング）が大きな役割を果たすと思われるが、その実体についてはいまだ観測的に確かめられていない。また、すばるで観測されたライマンブレイク銀河、X 線背景放射の起源と考えられている塵に埋もれた AGN、サブミリ波銀河など各種高赤方偏移銀河が知られているが、それらが宇宙史の上でどのような位置を占めるはいまだよくわかっていない。これらの説明には可視光、電波、X 線など各種波長域での総合的な観測が

必要であるが、赤外線領域での高強度赤外線銀河 (ULIRG、図 5.7 参照)、塵に埋もれた銀河、AGN 等の観測が決定的に重要な役割を果たすと思われる。SPICA では撮像および分光観測によって遠方の赤外線銀河の正体を明らかにすることが出来、各種高赤方偏移銀河の統一的な理解が進むとともに、大規模サーベイによって赤方偏移による銀河進化、大規模構造の成長等を観測的に明らかにすることが出来るであろう。

(2) 星、惑星系の誕生と進化

1. 星形成を探る

遠くの銀河を調べ、その進化を追うことは重要であるが、進化の果ての現在を調べることによって宇宙史は初めて完結する。銀河系の構造、星間物質と星形成など現在でも未知なことが多いのが現状である。

SPICA は大口径のため、感度が高く、また角分解能がこれまでと飛躍的に高いことが特徴である。これを活かし、IRAS, ISO, Spitzer, ASTRO-F をはるかに越える観測が可能となる。とりわけ分子雲コアから原始星の形成、星への進化に至る過程をトレースすることによって星形成とその進化の理解が確立されるであろう (図 5.8)。

また、SPICA はその高い感度のため、褐色矮星のような低温度、超低質量星の観測が可能である。天文学のかねてよりの課題である星形成における初期質量関数 IMF を SPICA は初めて確定することが出来る。

星間物質には各種元素と宇宙塵が存在し、星形成、星からの質量放出や超新星爆発を通じて銀河系内を循環している。赤外線領域には多くの原子線、分子線また宇宙塵の PAH や氷のラインなどが存在するため (図 5.9)、SPICA は銀河系内での物質の分布とその循環、しいては銀河系の進化を明らかにすることが出来る。

2. 惑星形成の追跡、系外惑星の直接探査

銀河系内天体の中でも惑星系はとりわけ興味深い SPICA の観測対象である。IRAS によって発見された原始惑星系円盤 (プロト星) はかなりの星に普遍的に見られることがわかってきており、惑星に進化する前段階と考えられている。SPICA はその高い角分解能から原始惑星系円盤を分解することが出来、その進化を追跡することが出来る。どのような年代の、どのような星に、どのような原始惑星系円盤が存在するかを系統的に調べることにより惑星形成のシナリオを確立出来るであろう。

SPICA はまた中間赤外領域でコロナグラフの機能を持つ。波長 $5\mu\text{m}$ では 10 パーセクの距離にある主星から 9 天文単位離れた「木星」の検出が可能である。系外惑星の直接観測が初めて SPICA でなされるとともに、将来の地球型惑星及び太陽系外生命の探査に道を開く端緒となるであろうことが期待されている。

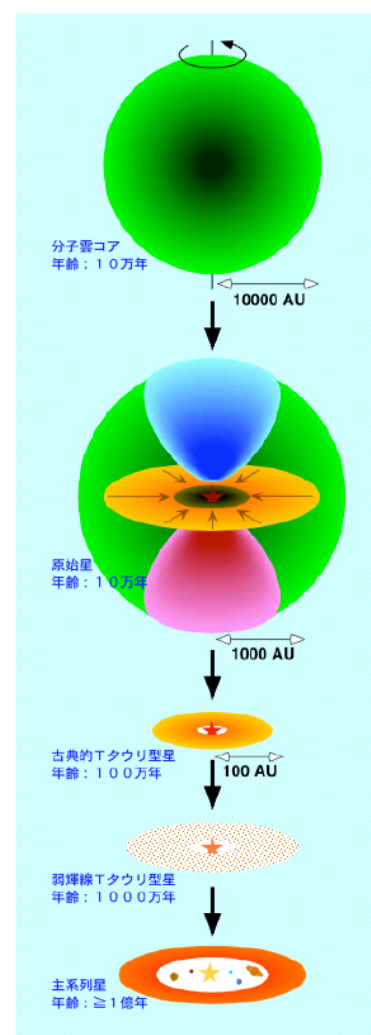


図 5.8: 低質量星の進化の模式図

(3) 物質の進化を探る

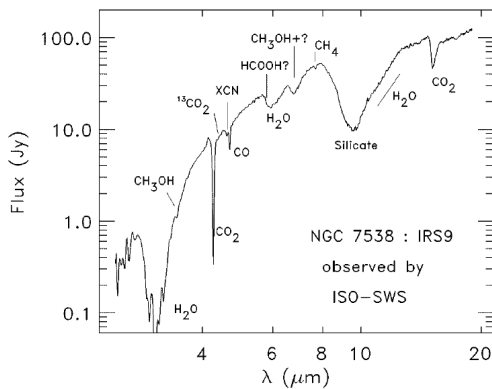


図 5.9: 赤外線領域に存在する数多くの水の feature (van Dishoeck & Blake 1998)

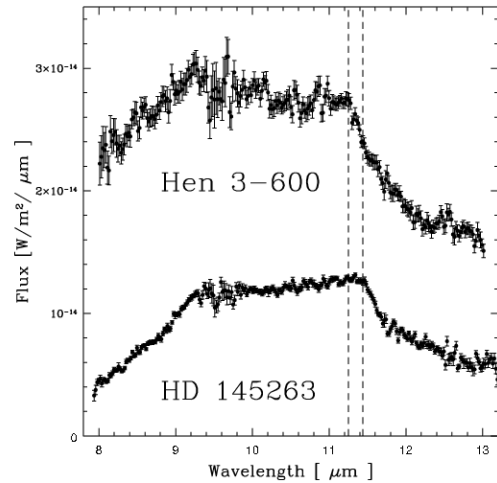


図 5.10: ベガ型星 HD145263 (下) と より若い T-タウリ型星 Hen 3-600A (上) のスペクトル。スペクトルの”肩”の波長の違いは、HD145263 のまわりに Fe-Mg-ケイ酸塩鉱物が存在しているためであると考えられ、ダスト組成の進化を示唆している可能性がある。

1. 物質の進化: ガスと固体

宇宙の元素の大半は水素とヘリウムであるが、宇宙の多様性を生んでいるのは、それ以外のいわゆる「重元素」である。この「重元素」のまた約半分は、ガスの状態ではなく、固体の状態で存在している。したがって、固体の解明なくしては、宇宙における物質の進化を語ることはできない。

ただし、一旦物質が固体となると、その分光観測は一般には難しくなる。しかし、赤外線領域であれば、図 5.9 に示すように、豊富なスペクトル・フィーチャーを用いて、固体の化学状態を探ることができる。

固体の化学状態は、その物理的な履歴も反映する。例えば、図 5.10 に示すように、「氷」が多く存在していれば、その固体が経験して来た温度環境の上限がわかる。

固体に関してもう一つ重要なことは、それが結晶質であるか、非晶質であるかという問題である。例えば、シリケートは、星間空間ではほぼ 100% が非晶質である。しかしながら、若い星の周りの円盤や、太陽系内の天体では、結晶質で見つかることがある。これは、この固体が結晶化がおこるほどの熱い温度環境を経て来たことを示している。

2. 太陽系の始源物質を求めて

物質の進化を探る上において、重要な位置を占めているのが、私達の太陽系の中の彗星、小惑星といった小天体である。これらは、太陽系の始源的天体であると見なされており、太陽系の歴史の解明において欠かすことのできない研究題材である。太陽系内天体の熱放射をとらえ、その組成を分光観測できる SPICA は、太陽系内の天体の観測にとっても非常に魅力的なプロジェクトである。

太陽系内天体の観測は、惑星探査など資料を直接に調べる学問手法と、天文学的というリモートセンシ

ング的な学問手法とをつなぐ架け橋でもある。この2つの手法が協力することにより、太陽系を題材にして、そこでの惑星系の進化、物質の進化の研究が飛躍的に進むことであろう。

5.3 ミッションへの要求

5.3.1 波長領域

前節で述べた「宇宙史の解明」という課題を達成するためには、どのような観測機器が必要であるかを、この章では議論する。

まず波長領域について議論する。宇宙誌史の解明を行なうためには、以下の3点に留意する必要がある。

1. 銀河の誕生と進化

- 遠方天体からの赤方偏移した信号をとらえる
- 塵による減光の影響無しに、銀河の活動性を探る

2. 星と惑星系の誕生と進化

- 塵に包まれた天体からの信号をとらえる
- 明るい中心星のまわりにある微弱な惑星からの信号をとらえる
- 原始惑星系円盤からの熱放射をとらえる

3. 物質の進化

- ガスだけではなく、固体の化学状態を調べる

上記の留意点は満たすためには、すべて赤外線、特に中間・遠赤外線での高感度の観測を行なうことが必要になる。

しかしながら、2010年代までに計画されている赤外線ミッションは、近赤外線 (JWST) やサブミリ波 (Herschel) に集中したものであり、上記の科学的要求を満たす物ではない。

そこで、SPICA では、(1) 科学的要求と、(2) 他のミッションにはない特徴を出すと言う2つの意味において、波長5 – 200 μm の中間・遠赤外線領域を最重要波長域と設定する。

5.3.2 温度

波長5 – 200 μm の中間・遠赤外線領域において、十分な感度を達成しようとする際に留意すべき点は、観測機器からの熱放射を、天体からの信号よりも低く抑えることである。これができないと、観測機器からの熱放射の揺らぎが観測限界を決めてしまうことになり、本来達成することができる感度にまで到達することができない。

図5.11に、天体からの信号強度と望遠鏡からの熱放射との比較を示す。天体からの信号としては、Zodiacal Emission (太陽系内の塵からの熱放射)、Cirrus (銀河系内の塵の熱放射)、CMB (マイクロ波宇宙背景放射) の3つの拡散放射を考えている。これらの天体からの信号よりも、望遠鏡からの熱放射が小さいことが、高感度観測には必須である。

しかしながら、極低温に冷却されていない望遠鏡では、望遠鏡の熱放射のほうが、天体からの信号よりも圧倒的に強大であることが図5.11から分かる。例えば、Herschelの温度である80 Kや、JWSTの温度である45 Kでは、望遠鏡からの放射が、天体からの信号に比べて、圧倒的に(波長によっては数桁)強い。

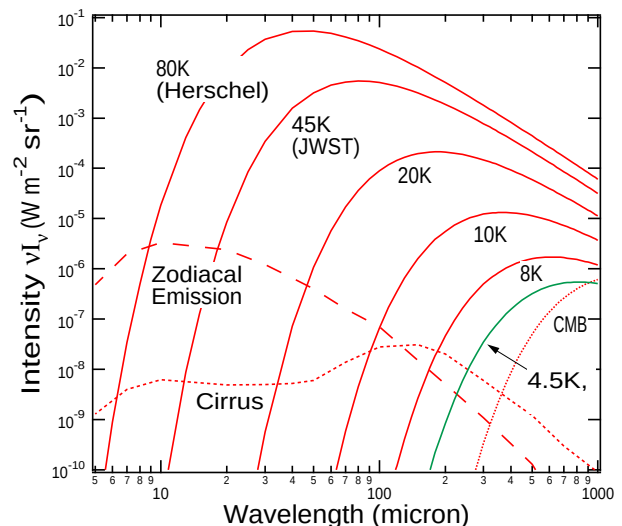


図 5.11: 天体からの信号強度 (点線) と望遠鏡からの熱放射 (実線) の比較。

この放射を抑えるためには、望遠鏡を冷却すれば良い。図 5.12 に、どの程度、望遠鏡を冷却すれば良いかを、波長 μm を例にとって示す。図 5.12 からわかるように、天体からの信号 (Cirrus) よりも、望遠鏡の熱放射をおさえるためには、望遠鏡を数 K 以下に冷却しなければならない。

このことから、高感度観測のために、SPICA では、望遠鏡を 4.5 K に冷却することとした。

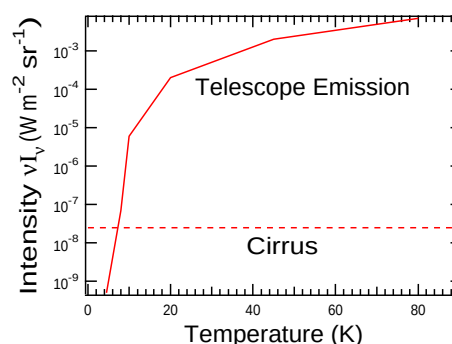


図 5.12: 波長 $200\mu\text{m}$ における、天体からの信号強度 (cirrus, 銀河内の塵の放射) と望遠鏡からの熱放射 (実線) の比較。望遠鏡からの熱放射を天体からの信号以下に抑えるためには、望遠鏡を数 K 以下に冷却しなければならないことがわかる。

5.3.3 望遠鏡の口径

次に、宇宙史の解明のためには、どの程度の口径の望遠鏡が必要であるかを議論する。望遠鏡の口径は、(1) 感度と (2) 空間分解能という 2 つの重要な観測性能を決めるものである。

銀河の誕生と進化

まず、感度と言う観点から、銀河の誕生と進化の解明を例にとって、どの程度の口径が必要であるかを議論する。

遠赤外線外線の広帯域撮像の感度は、ソース・コンフュージョン (source confusion) で決まっている。ソース・コンフュージョンの値は実際に天体がどのような光度分布をしているかに依存する。すなわち、ソース・コンフュージョンの測定そのものが、観測目的のひとつとなる。最近の Spitzer Space Telescope の観測結果を反映したソース・コンフュージョンの値の見積りを図 5.13 に示す。

遠赤外・サブミリ波領域では FIRAS/COBE および DIRBE/COBE により強い背景放射が観測されている。このうちサブミリ波の背景放射については、SCUBA によって観測されている赤方偏移 2 程度の銀河で説明出

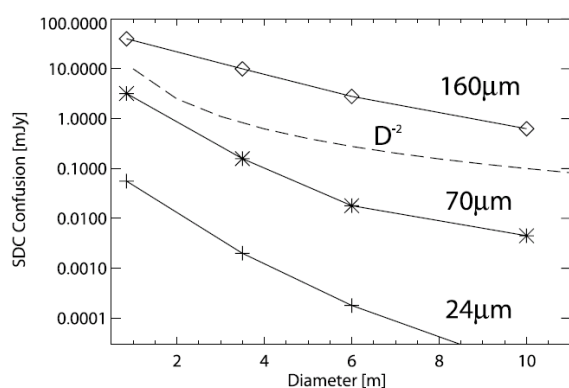


図 5.13: 遠赤外線の点源に対する感度。ソース・コンフュージョンが支配的なパラメータである場合を仮定。口径の関数として示す (Dole et al. 2004)。

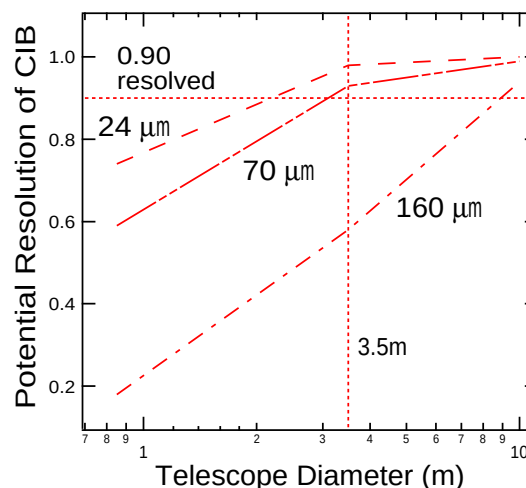


図 5.14: 赤外線背景放射が銀河の重ね合わせであるとして、どれくらいの割合が観測的に分解できるかを、望遠鏡の口径の関数として示したもの (Dole et al. 2004)。少なくとも 2 つの波長において、赤外線背景放射を 90 % 以上分解しようとする、3m 以上の口径の望遠鏡が必要である。

来ることがわかっている。しかし、遠赤外領域ではまだ銀河の重ね合わせでは背景放射を説明出来ていない。遠赤外線領域の背景放射の謎を解明することは、SPICA の大きな課題の一つである。

最近の Spitzer Space Telescope の結果をもとに (図 5.13 に示す confusion を仮定)、図 5.14 に、遠赤外線背景放射のどれだけの割合が銀河として分解できるかという見積りを示す。Spitzer や ASTRO-F では、口径が小さいために、背景放射の本質に迫ることは難しい。一方、口径 3m クラスの望遠鏡が実現すれば、波長 $70\mu\text{m}$ においても、背景放射の大半を分解することができることが分かる。 $24\mu\text{m}$ では、より小さな口径でも背景放射の大半を分解することができるが、 $24\mu\text{m}$ と $70\mu\text{m}$ では異なる種族の銀河を見ている可能性がある。したがって、遠赤外線外線の背景放射の源を探るためには、少なくとも 2つの波長において、赤外線背景放射を 90%以上分解する必要がある、そのためには、3m 以上の口径の望遠鏡が必要である。

系外惑星の直接検出

次に、空間分解能という観点から、系外惑星の直接検出を例にとって、どれだけの口径が必要であることを議論する。

SPICA で直接検出を目指すのは、中心星から離れた巨大ガス惑星である。ここでは、土星なみの距離 (10pc) をもつ惑星を対象とする。5.6 で議論されているように、SPICA に搭載するステラー・コロナグラフは、 $\theta_{\text{IWD}} > 3\lambda/D$ において 10^{-6} 以上のコントラストを達成することを目指している。最も短波長である $5\mu\text{m}$ で考えると、 $\theta_{\text{IWD}} \sim 1''$ ($3\text{ m} / D$) となる。

この分解能で、どれだけの星が観測対象となり得るかを考える。図 5.15 に、太陽近傍に主系列星がどれだけの数存在するかを、太陽系からの距離の関数として示す。ここでは、星のスペクトル型によらず、一定の割合 (例えば半数) で惑星が存在すると仮定する。すると口径 1m クラスの望遠鏡では、3pc までしか観測できないため、観測できる星はほとんどない。口径 2m クラスの望遠鏡になると、6pc まで観測可能となるため、星の数として 20 個弱、惑星としては 10 個弱が期待される。ただし、数の見積りには極めて不定性が高いため、惑星の数としては一桁代の小さな数となる可能性も高い。これでは、統計的な議論を行なうには、全く不十分である。

これが口径 3m クラスの望遠鏡になると、10pc の距離まで到達するため、星の数としては数十個となる。したがって、惑星系の検出数としても 10 個を十分に越えることが期待される。これだけの系外惑星が直接に検出されれば、統計的にも十分な議論ができるはずである。

したがって、系外惑星の検出という目的のためには、空間分解能という観点から、少なくとも口径 3m クラスの望遠鏡が必要である。

5.3.4 ミッションへの要求

上記の議論より、「宇宙史の解明」という科学的な目的の達成のためには、SPICA 望遠鏡として、以下の仕様が必要である。

1. 中心となる観測波長域は $5 - 200\mu\text{m}$ の中間・遠赤外線領域

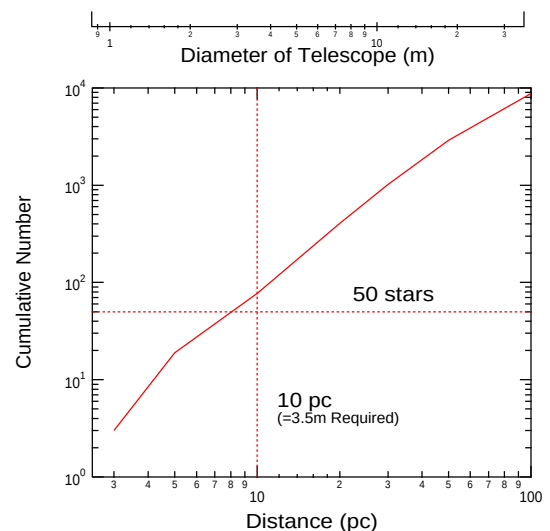


図 5.15: 太陽近傍の主系列星の数。ヒッパルコスカタログから算出。統計的に有意な数 (数十個以上) のサンプルを観測するためには、10pc 程度までの観測を行なわなければならない。そのためには、3m クラスの口径が必要である。

2. 望遠鏡の温度としては数 K 以下
3. 口径 3m クラス以上の望遠鏡

5.4 衛星システム概要

5.4.1 衛星全体の構成

構成

前節で議論された SPICA への科学的要求を満たすための SPICA ミッションの SPICA 主要諸元を表 5.2 に示す。SPICA 衛星システムの概要をまとめる。SPICA は、全重量 2.6 t の大きなシステムであり、H-IIA ロケットにより、太陽-地球系の L2 に投入することを想定してる。

図 5.16 に SPICA 衛星外観図を示す。熱的な要求から、衛星はミッション部とバス部が明確に分かれている。

主要項目	主要諸元	備 考
全体		
打ち上げ時期	2012 年頃	ミッションライフ 5 年
打ち上げロケット	H-IIA202 を想定 フェアリング：5S-H PAF：2360S	H-IIA202 打ち上げ能力 2.6±0.1ton
衛星寸法	φ3.8m×8.6m	
質量	打ち上げ時：2600kg (DRY 質量：2420kg)	
軌道	S-E L2 ハロー軌道 長半径：80 万 km 周期：約 6ヶ月	
消費電力	観測時 約 1.8k W	
ミッション部		
望遠鏡	口径: 3.5m 温度: 打ち上げ時は常温、観測時は 4.5 K 精度: 5 μm 以上の波長で回折限界の結像	
冷却方式	放射冷却 + 機械式冷凍機	冷媒を搭載しないことにより軽量化、長寿命化
焦点面観測装置	中間・遠赤外線の観測器を搭載 オプションとして近赤外線、サブミリ波観測器を検討中	ステラー・コロナグラフを含む
バス部		
太陽電池パドル	衛星固定／三次元展開パドル 2 翼 発生電力 BOL：2.7kW EOL：2.4kW 以上	
姿勢軌道制御系	STT-IRU ストップダウン型姿勢決定系 RW 高精度姿勢制御系（トルクバランス型）	
推進系	一液式ブローダウン 推薬量：180kg スラスタ構成：23N×4、3N×8	推薬量はハロー軌道投入まで、及び 5 年分の軌道・姿勢維持分を想定
C&DH	X バンド 1 波 DR 容量：48 G bytes	

表 5.2: SPICA 主要諸元

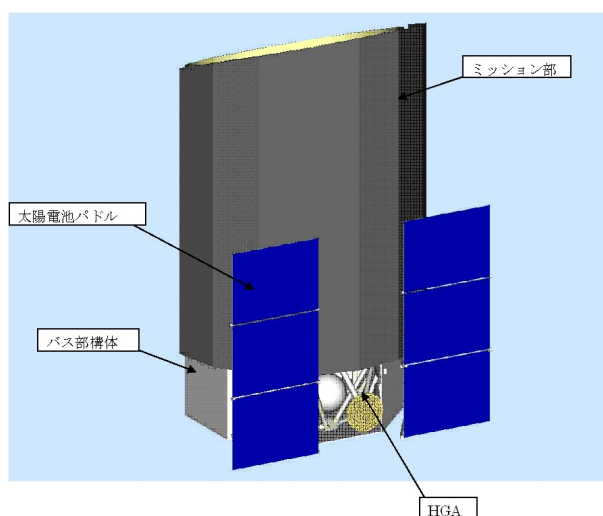


図 5.16: SPICA 衛星外観図 (カラー 14 ページ)

設計方針

SPICA は今までにない規模の科学衛星である。SPICA の開発において問題になると予想される主な項目を以下に列挙する。

1. ミッション部が巨大かつ極低温であるので、実環境に近い状態での試験検証が困難。
2. 姿勢精度要求が厳しい。
3. 衛星自体が巨大なシステムとなり、自ずと複雑なシステムになる。

これらの課題を克服するための設計の方針は次のように考えられる。

1. 衛星システムを可能な限りシンプルにする。
2. 試験検証方法を考慮した設計とする。
3. 非ミッション部は、可能な限り実績のある構成にする。

ただし、これらの設計方針を突き詰めると次のようなデメリットもある。

1. 衛星システムを過度にシンプルにすると、ミッションの汎用性を阻害する。
2. 地上における試験検証を優先すると、軌道上におけるミッション性能の低下を招く。
3. 実績のあるシステム構成にすると、先進技術にならない。

このように、設計方針の理想と実際とは相反する事が多い。従来の衛星より、大型化する SPICA においては、その傾向がより顕著に表面化すると思われる。

SPICA プロジェクトを、確実に進めていくためには、設計の早い段階で、各課題及び解決方法およびメリット・デメリットの関連性を明確にする必要がある。これを「問題の構造化」と呼ぶ。問題の構造化を行った上で、各種の問題解決方法論について、メリット・デメリットを把握した上で、可能な限り「シンプルで検証可能な衛星システム」の設計を進める。このようにバランスを考慮しつつ、「**試験検証をできる限り容易にし、無理な冒険をしないシンプルな衛星**」を、衛星システムの設計方針とする。

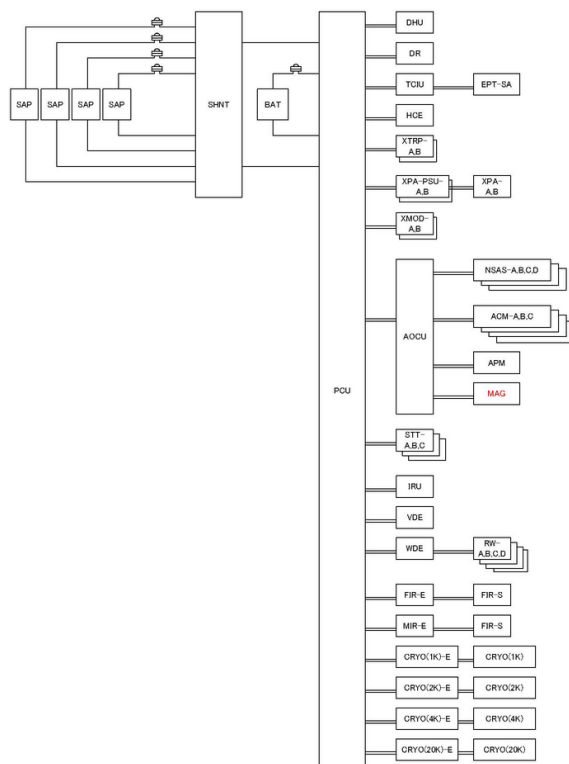


図7.4-2 SPICA電源系 系統図

図 5.18: SPICA 電源系系統図

5.5 望遠鏡システム

5.5.1 基本仕様

SPICA 望遠鏡は、口径 3.5m のリッチー・クレチエン系を基本にした設計であり、中間赤外線-遠赤外線の観測波長域に最適化することを目指す。この波長域では、望遠鏡自身からの熱輻射が背景放射ノイズとして支配的な寄与をするので、極低温に冷やされた望遠鏡システムを構成することが重要である。また、観測波長が長くなるにつれ、回折による空間分解能が劣化し、天体が分解できないことによるコンフュージョン・ノイズが検出限界に支配的になる。したがって、可能な限りの大口径化は、空間分解能の点だけでなく、感度の向上の点からも非常に重要である。極低温に冷却された大口径の宇宙望遠鏡は、中間赤外線-遠赤外線天体観測において理想的な観測手段を提供する。SPICA 望遠鏡は、軌道上での放射冷却と冷凍機の使用により、システム全体を 4.5 K まで冷却することを計画している。主鏡サイズ 3.5 m は、ASTRO-F 主鏡の口径が 70 cm、SST (シュピッツァー宇宙望遠鏡) が 85 cm であったことを考えると格段のサイズ拡大である。赤外線～サブミリ波の波長帯で現在、JWST(ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡) が 6.5 m 展開型の放射冷却による望遠鏡を計画しているが、SPICA は、さらに冷凍機による冷却を行うため、 $20\mu\text{m}$ より長波長側では多少、口径が小さくとも、JWST より高い感度が達成できる。この他、HSO(ハーシェル宇宙天文台) は遠赤外からサブミリ波帯の観測を行う衛星で、SPICA と同じ 3.5m の望遠鏡を搭載するが、これも放射冷却のみのため、中間赤外域から遠赤外域では SPICA が最大の性能を持つ。表 5.4 に SPICA 望遠鏡システムの基本仕様をまとめる。

SPICA 望遠鏡では、JWST のような展開型のセグメント鏡デザインを採用せず、1 枚鏡で 3.5 m 望遠鏡の実

<SPICA質量集計(2005.2.21)>					
ITEM		質量(kg)		目標質量(kg)	Margin(kg)
		単体	合計		
ミッション部			1801.5	1600.0	-201.5
冷却系			690.5	490.0	-200.5
	支持構造トラス	99.0	1	99.0	
	Shield	164.0	1	164.0	
	Sun Shield	180.5	1	180.5	
	鏡筒	247.0	1	247.0	
機械式冷凍機			243.0	200.0	-43.0
	1K級冷凍機	30.0	1	30.0	
	2K級冷凍機	30.0	1	30.0	
	4K級冷凍機	30.0	1	30.0	
	20K級冷凍機	30.0	1	30.0	
	1K級冷凍機トライバ	22.0	1	22.0	
	2K級冷凍機トライバ	22.0	1	22.0	
	4K級冷凍機トライバ	22.0	1	22.0	
	20K級冷凍機トライバ	14.0	1	14.0	
	台座			40.0	
	支持トラス			3.0	
望遠鏡(IRT)			648.0	700.0	52.0
	望遠鏡	448.0	1	448.0	
	光学ベンチ	200.0	1	200.0	
焦点面観測装置			200.0	200.0	0.0
	FPI	200.0	1	200.0	
機械式冷凍機排熱システム			20.0	10.0	-10.0
	ラジエーター			10.0	
	LHP	10.0	1	10.0	
バス部			718.4	810.0	91.6
電源系			108.3		
	SAP	38.2	2	76.3	
	BAT	16.0	1	16.0	
	PCU	9.0	1	9.0	
	SHNT	7.0	1	7.0	
COMMUNICATION S/S			30.3		
	HGA	7.0	1	7.0	
	APM	4.8	1	4.8	
	XLGA	0.1	3	0.4	
	XPA	2.9	1	2.9	
	XPA-PSU	1.0	2	2.1	
	XTRX	2.1	2	4.2	
	XSW	0.2	2	0.4	
	DPDT	0.2	2	0.4	
	XHYB	0.1	1	0.1	
	XDIP	0.6	2	1.1	
	X-MOD	3.5	2	6.9	
DHS			24.3		
	TCIU	2.0	1	2.0	
	DHU	3.7	1	3.7	
	DR	18.6	1	18.6	
LAUNCH S/S			2.2		
	EPT-SA	2.0	1	2.0	
	EPT-PS	0.2	1	0.2	
AOCS			93.9		
	AOCU	6.7	1	6.7	
	NSAS	0.9	4	3.6	
	IRU	11.0	1	11.0	
	STH	1.1	3	3.3	
	STT	2.9	3	8.7	
	MAG	0.2	1	0.2	
	ACM	0.1	3	0.3	
	RW	10.6	4	42.4	
	WDE	3.3	4	13.2	
	VDE	4.5	1	4.5	
PROPULSION S/S			120.0		
	IRCS	—	—	120.0	
WIRE HARNESS			40.0		
	IWHN	—	—	40.0	
STRUCTURE			299.4		
	トラス	—	—	114.8	
	ハニカムパネル	—	—	147.5	
	機構計装	—	—	27.0	
	その他	—	—	10.0	
THERMAL					
	HCE	5.7	1	5.7	
	TINT	—	—	54.2	
Total					
	DRY		2519.9	2420.0	-99.9
	FUEL		180.0	180.0	0.0
	WET		2699.9	2600.0	-99.9

表 5.3: SPICA 質量電力配分表

現を目指す。このことは望遠鏡システムの複雑さを取り除き、技術的な実現性・信頼性を高めることにもつながる。主鏡支持に対する設計ベースラインは、信頼性を高めるために、受動支持か、あるいは能動支持であって

もできる限りアクチュエータの数を減らすことである。また、副鏡には ASTRO-F でも実績のある焦点調整機構を設ける。望遠鏡システムの総重量は 700 kg 以下を目指しており、主鏡に割り当てられる重量は約 300 kg、面密度で 30 kg/m² となる。これは JWST (< 25 kg/m²) ほどではなくとも、ASTRO-F (27 kg/m²) や SST (28 kg/m²) に匹敵する軽量化である。

運用温度 4.5 K での望遠鏡の結像性能は、波長 5 μm での回折限界を目指す。これは総合透過波面精度で 350 nm rms に相当し、鏡の熱変形をいかに小さくできるかが鍵となる。さらに、中間赤外線でもコロナグラフ観測を行うため、表面粗さが十分に低く散乱特性が良好な鏡面を、4.5 K で達成することが求められる。ちなみに、HSO 望遠鏡の場合、運用温度 70 K での結像性能に対する要求は、波長 90 μm での回折限界であり (総合透過波面精度にして 6 μm rms)、SPICA 鏡は約 20 倍も高い波面精度が要求される。冷却のみならず、打ち上げ振動環境や軌道上での重力解放に対しても、望遠鏡の光学アラインメントが十分に保持されなければならないことは言うまでもない。

表 5.4: SPICA 望遠鏡システムの基本仕様

項目	仕様
光学系	Ritchey-Chretien 系
主鏡口径	3.5 m (一枚鏡) clear aperture: >3.4 m
運用温度	4.5 K
合成焦点距離	~ 18 m
視野径	~ 30 arcmin
主使用波長帯	5 – 200 μm
結像性能	波長 5 μm 回折限界
総合透過波面誤差	< 350 nm (rms)
鏡面荒さ	< 20 nm (Ra)
総重量 (光学ベンチを含む)	< 700 kg

このように SPICA は、従来にない大型の衛星搭載冷却望遠鏡計画であり、これまでのものとは全く別の新しい技術・概念の望遠鏡システムの開発が要求される。特に鏡には、軽量でかつ高剛性の設計が求められ、熱伝導が高く、低熱容量で熱膨張率の低い (熱変形の小さい) 材料が要求される。放射線耐性の検討も重要である。

5.5.2 光学設計

SPICA 望遠鏡は H-IIA のフェアリングに収まること条件として、主・副鏡間距離及び焦点位置をパラメータとし、どの程度の光学性能が予想されるかを波長 5 μm でのストレール比で評価し、検討した。ストレール比は光軸上及び、軸から 9', 20' の位置で評価した。中間赤外線の装置は光軸に近い位置に取り付けることと要求視野から、軸上及び 9' 位置でのストレール比を評価の指標とした。なおストレール比は各視野での最良像面で評価している。すなわち、像面湾曲は装置側でとりつけ位置を補正することを前提としている。

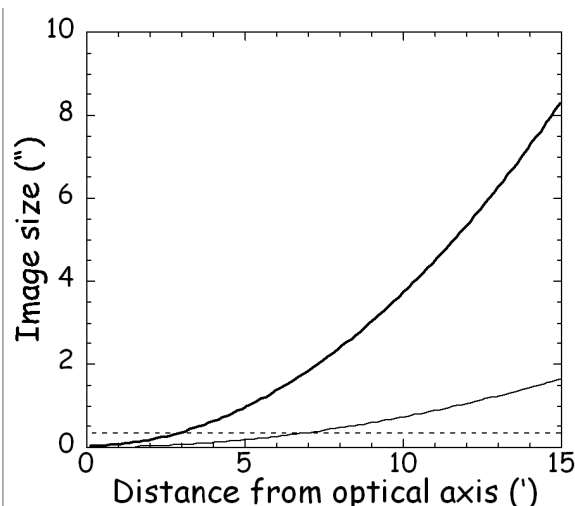


図 5.19: 結像サイズで表した SPICA 望遠鏡の収差。太線は像面湾曲による収差で、観測装置を最良像面におくことで補正する。細い実線は非点収差をまた破線は波長 5 μm での回折限界を表す。

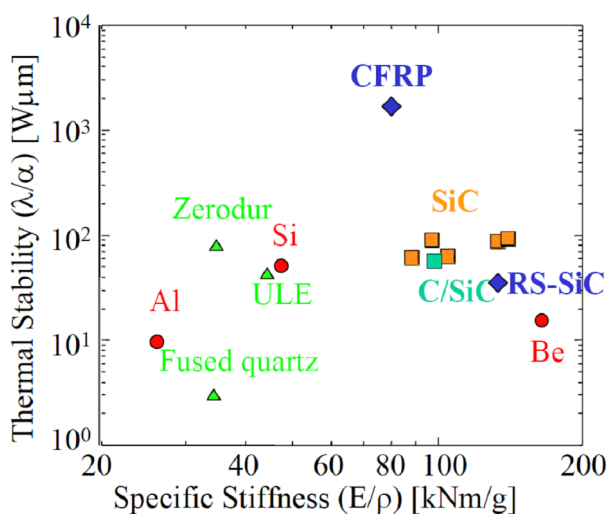


図 5.20: 候補となる鏡材の物性値。右上ほど軽量冷却鏡の材料として有利。

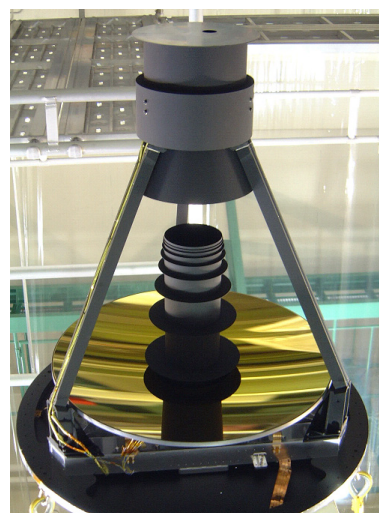


図 5.21: ASTRO-F フライト望遠鏡 (カラー 289 ページ)

主・副鏡間距離の長いもののほどストレーラ比は向上するが、これらのモデルについて、フェアリングとの関係を詳細に検討し、光学パラメータを設定した。最終的なパラメータでの像面湾曲の程度と非点収差を、図 5.19 に示す。

5.5.3 鏡材料・望遠鏡システムの検討

SPICA は、上記のように大型・冷却・衛星搭載用の望遠鏡を目指しており、この目的に即した鏡材の選定を行うことが重要である。SPICA の鏡材には、(1) 高剛性、(2) 軽量、(3) 冷却に対する安定性、(4) 高い研磨性などの特質が要求される。また、コロナグラフを搭載する予定であるため、低い鏡面粗さが達成されることも重要な条件である。図 5.20 に SPICA の候補となる代表的な鏡材料の物性値をまとめる。図 5.20 の横軸は、軽量化のしやすさを表す指標である、比剛性 (ヤング率と密度の比) を、縦軸には温度変化に対する安定性の指標である、熱伝導率と熱収縮率の比をプロットした。つまり、軽量冷却鏡材として、右上が望ましい材料である。

このような鏡材物性値の比較をもとに、これまで SPICA 望遠鏡システムとして、いくつかの構成が検討されてきた。各々の特徴を以下にまとめる。鏡材は必然的に図 5.20 で右上に位置するものとなった (古典的なガラス鏡を除いて)。

SiC 鏡

SiC は現在、打ち上げ準備中の ASTRO-F で望遠鏡の材料として用いられ、また Herschel 望遠鏡では 3.5 m の SiC 主鏡が用意されている。比重に対するヤング率が高く、剛性の高い鏡を設計することが可能である。温度安定性が優れており (熱変形が小さい)、実績がありデータも蓄積されている点で有利であるが、課題は、研磨性と大型化にあると考えられる。とくに焼結した SiC は表面に微小気孔が残るため、低い鏡面粗さを必要とする SPICA では問題となりうる。ASTRO-F では表面に CVD 層を付けることで、研磨性を高めたが、現在の設備では 3.5 m の CVD を行えるところはない。また、ブランクについても、現在、製作可能なものは 2 m 以下である。HSO では、融着 (brazing) により 3.5 m のブランクを製作する方法が開発されており、SPICA の要求精度 (5 μm 回折限界) を満たす材料が製作できるか検討することが重要な課題である。また、基本的に脆

性材料であるため、機械的信頼性に若干の不安が残る。高剛性の鏡が設計できるため、能動支持が必要でないシステムが実現できれば、大きな利点となる。

最近では、より高強度化された反応焼結型 SiC (RS-SiC) が鏡材として注目されており、NT-SiC と呼ばれる国内で開発された新素材については、CVD コートなしでも低い鏡面粗さを達成できることや、焼結時の収縮率が小さいことなどが確認されている。

C/SiC 鏡

C/SiC は、炭素繊維と炭素マトリックスを C/C 化した後、Si を含浸させ、炭素繊維分を残しながら SiC 化させたものである。炭素繊維が残るため、破壊靱性が高い材料で、機械的信頼性の高い設計が可能となる。また、機械切削も容易で、大幅な軽量化が可能であり、また複雑な構造 (ねじ等) を取り入れることが可能である。とくに後者によって、鏡面への熱変形の要因として極めて重要な主鏡支持構造を最適化ができることが、大きな利点となる。また Si 含浸の際にセグメントを接合できるため、大型化が容易である。一方、C/SiC は複合材料であるため、一様性の確保が技術的課題である。また温度安定性は SiC に比べ明らかに劣り、冷却鏡材としての実績も不十分である。さらに、表面に Si-SiC スラリーコートを施し、研磨性をあげるなどの工夫が必要である。

Be 鏡

Be は JWST での採用も決まり、これまでも IRAS、SST などの冷却望遠鏡の実績もある。極低温下での性能についても、年々、材料の開発が進んで改善されている。比重が小さく、ヤング率が高いため、軽量鏡としては有利な材料であるが、現在の設備では 3 m を越えるブランクの製造は不可能で、JWST のようにセグメント鏡を採用しない限り、SPICA に適用するのは難しい。また、これまで Be 鏡の開発がさかんであった米国も、最近では、環境・人体への影響が考慮され、SiC 系の代替材料へと移行する流れにある。

CFRP 鏡

CFRP 鏡はこれまでも波長の長い観測用の鏡としては採用されてきている。比重が小さく、剛性が高いため、軽量化には最も有効な材料である。また、曲げ強度と破壊靱性が非常に高いため、機械的信頼性は極めて高い。さらには、CFRP は熱膨張率を 0 近くにコントロールできるため、低温での応用にも有利と考えられる。このように、CFRP は次世代の新しい軽量冷却鏡材として、とても有望である。しかし、表面を直接、研磨することができないため、鏡面を作るにはレプリカ法などの技術に頼らねばならず、赤外域での応用には大きな開発要素が残っている。

鏡ガラスを用いた薄メニスカス鏡＋多点能動支持

ガラス材 (ULE、fused silica 等) は古くから鏡の材料として使われてきた実績があり、研磨性は十分に確立している。しかし、剛性が低いため、軽量化した場合、鏡面をそれ自身で支えることが困難となる。この問題を克服するには、積極的に薄い鏡にして、多点 (数 100 点) で能動支持を行うシステムが考えられる。この方式は JWST でも検討されたが、SPICA に応用した場合の最大の課題は、多数の能動支持機構を低温で正常に動作させることにありと考える。低温部に支持機構を置くことが要求されるため、複雑になるシステムを高い信頼性で動作させることが課題である。また本質的に薄ガラスなので、機械的信頼性には大きな不安が残る。

5.5.4 SPICA 望遠鏡の開発

前章での得失を考慮し、現在われわれは、SPICA 望遠鏡の鏡材として、SiC および、C/SiC 複合材の 2 つに候補を絞り、検討を進めている。前者のメリットである温度安定性と軽量冷却鏡としての実績、および後者のメリットである機械的信頼性と支持構造部などの加工性を重視した。SiC による望遠鏡は、住友重機・ニコソ・Astrium グループが提案しており、C/SiC 複合材による望遠鏡は三菱電機グループが提案している。

それぞれの詳細については次章以降で述べ、ここでは、C/SiC 複合材の小型試作鏡などに対して我々が行った評価試験の結果、および SiC については ASTRO-F での評価実績などについて簡単に紹介する。

C/SiC 複合材鏡

我々は鏡材料としての C/SiC の開発を、これまで三菱電機とともに進めてきた。図 4 には、C/SiC の一様性を上げた改善結果を示している。これまでいくつかの条件で、C/SiC のサンプルを試作し、極低温までの熱膨張率の測定や強度の測定を行ってきた。この結果、100 K 以下で、0.15 ppm/K 以下の材料を実現している。また小型平面鏡を試作して、常温と極低温での散乱特性を測定し、表面状態が温度により有意に変化しないことを確認した。さらに Si-SiC スラリーコートによって、表面粗さが 2.9 nm Ra にまで改善されることを確認した。

また、160 mm 試作球面鏡を複数枚試作し、C/C 化、Si 含浸、接合のプロセスをそれぞれ改善することに成功している。図 5 に、この球面試作鏡の 2 作目に対して行った、干渉計による極低温での面形状変化の測定結果を示した。この鏡は 3 セグメントの接合鏡であり、鏡面 Si-SiC スラリーコートは施していない。室温から 24 K で面形状の変形量は 60 nm (rms) であった。この変形量は、後述の ASTRO-F SiC 試作鏡に比べれば、まだかなり大きいですが、今後、より改善されたサンプルで低温面検を行う予定である。

SiC 鏡

ASTRO-F では、多孔質の SiC をコアに CVD の SiC を表面につけた、サンドウィッチ構造の SiC 材を用いて、0.7 m の軽量鏡を実現している。この開発にあたって、160 mm の球面鏡を試作し、液体ヘリウム温度までの冷却試験を行っている。図 6 に示すように、SiC 自身の冷却による変形は 8 nm (rms) 程度と非常に小さく、冷却望遠鏡の材料としての実力は実証されている。ASTRO-F 望遠鏡では、実際の低温での変形は SiC そのものではなく、鏡の支持部の構造に起因するものが大きかった。この結果は、SPICA においても、冷却変形を考慮した支持部の設計が重要であることを示している。

ASTRO-F で採用された CVD の SiC は、前章で述べたように現状では 3.5 m のブランクには適用できない。現在は、HSO 望遠鏡で採用している、融着した焼結 SiC による製作を検討している。焼結 SiC の場合、SiC の粒に起因する数 μm の大きさの孔が表面に存在することが分かっている。この影響は全散乱光の強度から 10 nm (rms) 以下の面粗さと等価と評価されているが、SPICA の要求精度との十分な検討が今後、必要である。融着焼結 SiC については、HSO 望遠鏡の開発のなかで試験データが蓄積されているが、要求精度が SPICA と比べて一桁以上低いため、今後は SPICA の要求精度での測定・評価が必要となる。特に HSO で採用されている能動支持機構なしのシステムが SPICA でも可能かどうか (自重変形が補正できるか) を十分に検討する必要がある。

5.5.5 SPICA 望遠鏡案

上記の考え方、試験成果に基づき、いくつか望遠鏡の具対案を検討している。ここではその一例について紹介する。

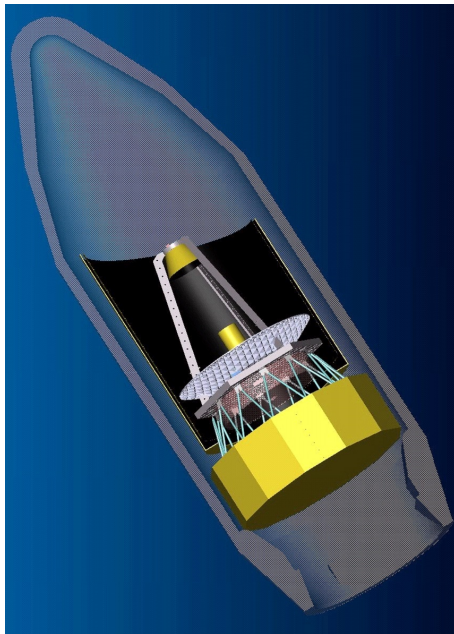


図 5.22: フェアリング搭載コンフィギュレーション (透視図) (カラー 13 ページ)

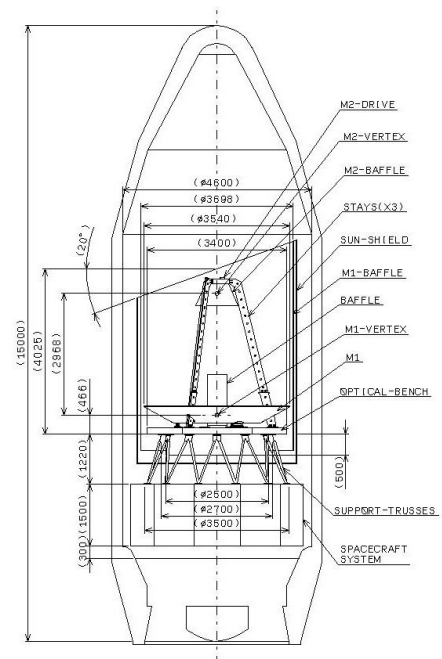


図 5.23: フェアリング搭載コンフィギュレーション (断面図)

望遠鏡システム概要

SPICA は図 5.22 及び図 5.23 に示すように、望遠鏡システム、観測装置、冷却システム、スペースクラフトにより構成され、増強タイプ 5S-H 型フェアリング内に搭載されて H-IIA ロケットで打ち上げられる。

そのキーコンポーネントである望遠鏡システムは、太陽放射を遮断するためのサーマルシールド等の冷却システムに覆われ、インターフェーストラスを介してスペースクラフトに支持される。

本望遠鏡システムは超軽量高剛性主鏡をパッシブに支持するというシンプルなシステムコンセプトに立脚している (図 5.24, 5.25)。

以下にその特徴的な要素について述べる。

低支持反力固定点

鏡インターフェース部回転 3 自由度と半径方向並進 1 自由度を開放した 3 ユニットを 120° 対称に配置してキネマティックマウントを構成する (図 5.26 参照)。新開発の低支持反力支持機構によりミスアラインメント、線膨張率の差による鏡と光学架台の相対変位等の外乱に対して波面への影響を極力排除することが可能である。

C/SiC 複合材料製超軽量・高剛性鏡

新開発の繊維強化複合材料 C/SiC の加工性、高靱性等の優れた特性を生かして超軽量高剛性鏡を実現する。さらに、固定点と鏡の I/F 部には C/SiC 複合材料製 I/F アダプタと金属製 I/F カップを採用し、固定点とのバイメタル変形の影響を極力排除することが可能である。

能動支持アクチュエータ (オプション)

3 本の能動支持アクチュエータで自重変形や熱変形等の低次モードの収差を効率よく補正することが可能である。focus と tilt の 3 自由度を有する副鏡駆動系との I/F 共通化によりリソースの削減と信頼性を向上する

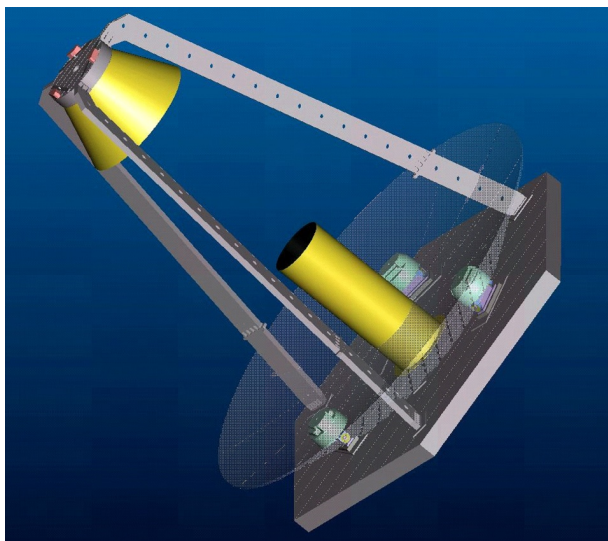


図 5.24: 望遠鏡システム概略図 1 (カラー 13 ページ)

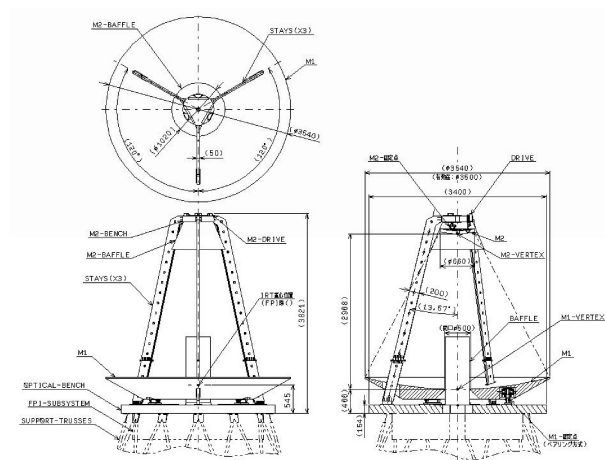


図 5.25: 望遠鏡システム概略図 2

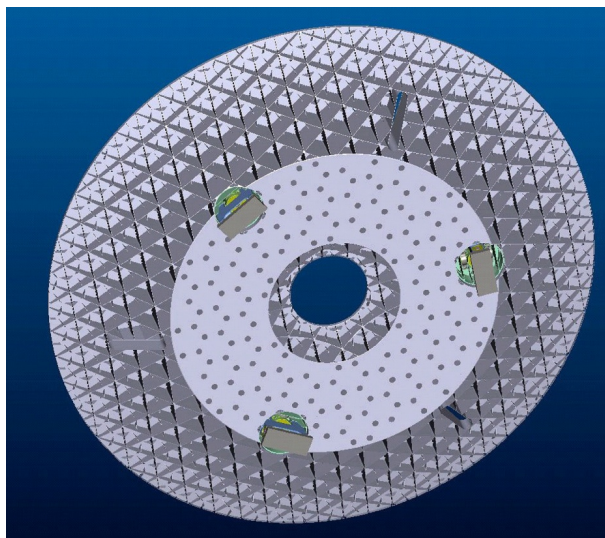


図 5.26: 主鏡コンポーネント斜視図 (裏面より)(カラー 13 ページ)

ことが可能である。

誤差配分

図 5.27 に望遠鏡システムの波面誤差配分を示す。詳細な構造・強度設計と波面解析の結果、前節で述べた仕様の達成の目処を得ている。

開発計画

FM 望遠鏡システムの開発に先立ち、その要素技術開発を目的とした BBM を実施中である。C/SiC 鏡材、低支持反力固定点機構を組み合わせた 700mm 鏡ユニットを試作、評価することにより、FM 開発に要求される製造技術、計測技術、組立技術等を習得中である。これらの手順並びに検証項目は、FM 開発で必要とされる要素技術を網羅するものである。

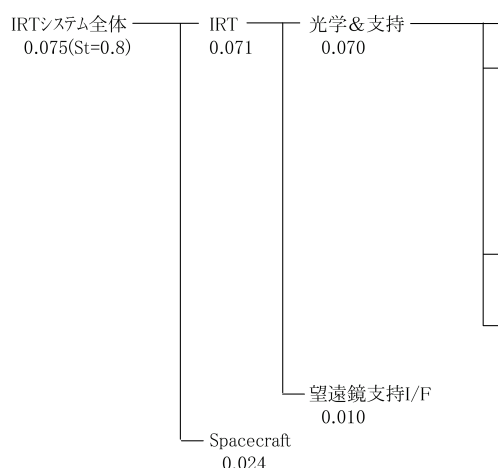


図 5.27: 望遠鏡システムの波面誤差配分

5.5.6 試験計画

打ち上げ前に地上で、3.5 m SPICA フライト望遠鏡の光学性能を、極低温で評価しなければならない。そのための試験方法を確立することは、SPICA 望遠鏡開発の大きな検討課題の一つである。ちなみに ASTRO-F 望遠鏡では、JAXA 宇宙科学研究本部に液体ヘリウム試験チャンバーを設置し、図 5.28, 5.29 のような構成で 10 K～常温までの光学測定を行った。光軸は鉛直方向に平行に向いている。干渉計と 5 軸調整ステージをチャンバー上部に設置し、望遠鏡の下側には 0.75 m ϕ 平面鏡を置いて光を折り返し、オートコリメートさせて望遠鏡の総合透過波面を測定した。今後も、フライト鏡の低温光学試験へ進むまえに、このチャンバーを使って、C/SiC 複合材の 0.7 m BBM 鏡や、NT-SiC の 0.7 mm 鏡などの低温光学性能が評価される予定である。

SPICA 望遠鏡でも、ASTRO-F と同様の試験方法で光学性能の評価が可能であろう。ただし、SPICA 主鏡は ASTRO-F に比べて径が 5 倍になるので、もはや上記の冷却試験装置は使えない。また、光軸が鉛直方向に平行に向いた構成では試験装置の高さが問題となり（単純にスケールアップすると約 20 m の高さ）、作業性も悪くなるので、光軸が水平になる構成で測定する予定である。ASTRO-F の場合のように、国内に望遠鏡試験装置を新たに製造することは、SPICA のサイズでは非現実的であると思われるので、以下では、JAXA 宇宙利用推進本部の 6 m ϕ 放射計スペースチャンバー（図 5.30）を改良して用いることを想定して、SPICA 主鏡単体および望遠鏡総合の低温光学試験計画を述べる。

重力補正マウント、横転台

まず、そもそも 3.5 m SPICA 望遠鏡を横転させ、光軸を水平方向に設定するためには、巨大な回転支持次具が必要である。また、横置きにした場合、重力による変形で、鏡面に強いアス変形が生じるので、重力補正マウントの開発が必須である。例えば、錘と滑車の組み合わせで、主鏡裏の複数点に力を加えて、重力変形を小さくすることなどが考えられる。副鏡トラスも下に傾いて、コマ収差が発生するので、副鏡を上を持ちあげられるような倒れ止め機構もこの補正マウントに付加しておく。なお、横転台は、この重力補正マウントごと、 ± 90 度の 2 方向に回せるようになっていなければならない。上下反転の 2 回の測定の差から、常温での無重力状態での総合透過波面を評価する。

極低温内部シュラウド

上記の 6 m ϕ 放射計スペースチャンバーのシュラウド内の供試体収容空間は 6 m 径 $\times$ 8 m 長であり、シュラウドは 100 K 以下まで冷える。この中にさらに内部極低温シュラウドを除振架台上に設置し、冷凍機で内部



図 5.28: JAXA 宇宙科学研究本部の液体ヘリウム試験チャンバー

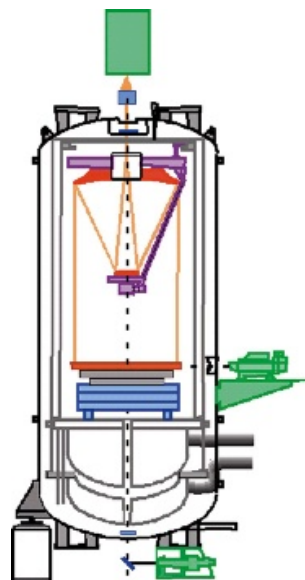


図 5.29: ASTRO-F 望遠鏡の低温面検の測定構成

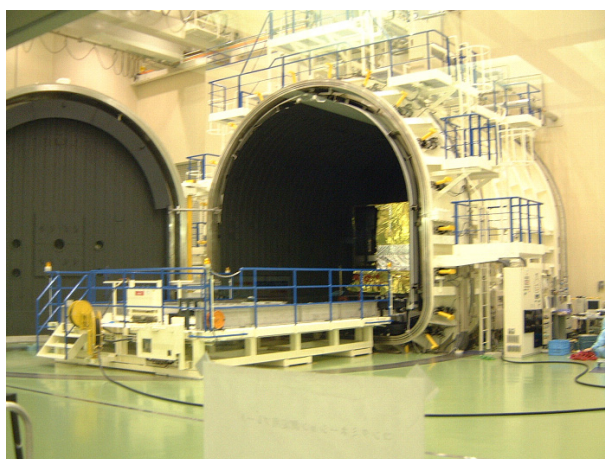


図 5.30: JAXA 宇宙利用推進本部の 6 m ϕ 放射計スペースチャンバー

シュラウドを 10 K 以下に冷やす。内部シュラウドのサイズは幅 4 m×高さ 4 m×長さ 5 m 程度。先端に延長シュラウドを付けて、長さ 8 m まで伸ばせるようにする。その中に設置される供試体は 10 K まで冷やされる。このような構成は、Marshall Space Flight Center で行われている JWST 関連の鏡の測定で実績がある。この設備は、X 線ビームラインのチャンバーの内部に極低温シュラウドを設けて、冷却鏡の光学試験用に改良したものであり、JWST フライトセグメント鏡の低温面検も行われる予定である。

ただし、これは 1 m クラスの鏡単体を 30 K まで冷やしたというものであり、我々のように SPICA 望遠鏡システム全体を 10 K まで冷やすというのは簡単ではない。冷凍機を用いて、現実的なパワーで一様にこの温度が達成できるかどうか検討する必要がある。

干渉計

干渉計による光学波面測定を行う場合、たびたび振動擾乱が深刻な問題となる。ASTRO-F 望遠鏡では、フリッジ・スキャンタイプの干渉計を用いたため、振動の影響を取り除くのにかなり苦労した。図 5.31 の試験装置全体を 4 本の除振脚でエアーによって完全に浮かせることで、何とか性能評価に耐えうる波面データを取得できた。一方、SPICA 望遠鏡では、ASTRO-F と同様の干渉計測定では、まともに波面データが取れないことが予想される。光学試験用にチャンバー内インターフェイス架台は独立基礎上に設置されているとは言え、エアーで完全に浮かせることは困難であり、冷凍機などの振動擾乱も問題になるであろう。最新のフェーズ・シフトを同時に行うタイプの干渉計を導入し、現実的な測定環境でまともな波面データが取れるような測定系の構築が必要である。

大型軽量平面鏡

図 5.28, 5.29 の ASTRO-F 望遠鏡試験構成にもあるように、望遠鏡の総合透過波面を求めるには、平面鏡によって光を折り返す必要がある。ASTRO-F では 0.75 m 無水シリカ鏡を用いたが、とても重く ($\sim 100 \text{ kg/m}^2$)、このようなガラス鏡を SPICA の試験で使用するのは困難である。新しい鏡材を用いて、できるだけ軽くて大きく、低温変形がとても小さい平面鏡が必要となる。使用温度は 100 K あたりが考えられる (10 K 以下にする必要はない)。軽量冷却鏡の実績から考えると SiC がベストであろう。3.5 m 超のものができれば理想的だが、現状は入手不可能である。その場合、低温ステージで鏡をシフトさせる必要があり、鏡が軽量であるほど都合がよいという点では、CFRP 鏡の可能性も探る必要がある。

低温光学試験を始めるにあたって、以上の 4 項目が、最重要な検討課題である。

主鏡単体の冷却面検

考えられる測定構成を図 5.31 に示した。主鏡用ヌルレンズは常温側に設置される。ヌルレンズと干渉計は共通の 3 軸シフトステージにマウントする。さらに、それぞれは独立の 2 軸チルトステージ上に設置される。主鏡インストール後の光学アラインメント調整は干渉計側ステージで行う。

干渉計と反対側から、アラインメントテレスコープを用いて光軸を調整する。主鏡カセ穴にピンホール付きターゲットを取り付ける。カセ穴ターゲットを用いて主鏡光軸の水準出しを行い、ヌルレンズ光軸のアラインメントターゲットに対して、光軸をアラインメントテレスコープに移す。さらに、アラインメントテレスコープ光軸を主鏡光軸、干渉計光軸に移す。

ヌルレンズを取り付ける際に主鏡面の曲率中心位置の測定が必要である。まずはヌルレンズをはずした状態で、干渉計に球面フィゾーをつけて鏡面を測定し、焦点位置をターゲットに移しこむ。折り返し鏡の付け外しによって、干渉計と平行に置かれた測距儀のレーザー光を主鏡光軸近傍に導入できるようにし、主鏡カセ穴ターゲットから焦点位置ターゲットまでの距離を測定、曲率半径を求める。ヌルレンズを取り付けるときは、平面フィゾーを用い、ヌルレンズ基準面に対し、干渉計の平行出しを行う。

冷却過程でも時々、球面フィゾー cat's eye・測距儀測定を行い、主鏡曲率半径の温度変化を追って、ヌルレンズ位置の再調整を行う。ヌルレンズ・折り返し鏡の付け外しの再現精度が悪い場合は、冷却サイクルを2回行い、1回目は主鏡曲率半径の測定とする。

望遠鏡の低温透過波面測定

考えられる測定構成を図 5.32 に示した。望遠鏡の透過波面形状の温度変化を、球面フィゾー干渉計からのレーザー光を平面鏡で折り返しオートコリメートさせて測定する。平面鏡は冷却による変形が十分に小さいことが期待され、極端に軽量なもの (たとえば SiC 鏡や CFRP 鏡) を使用する。平面鏡の径は大きいほど良い (~3.5m) が、現状、入手可能なサイズである 1m を想定した。図 5.32 のように一回の測定で、望遠鏡の一部の面を使った透過波面を測定し、平面鏡を 2 次元に平行移動させて波面をつなぎ合わせる。

現 SPICA 望遠鏡の設計で望遠鏡の長さ (バックプレート ~ 副鏡サポート) は約 4.0m であり、5m 長の内部極低温シュラウドに収まる。平面鏡側のシュラウド壁は柔軟性を持たせ、パッフル付きの 1m 径シュラウドと本体シュラウドとは柔に結合される。

望遠鏡は、重力補正マウント (副鏡トラス倒れ止めを含む) で、主鏡単体測定とは反対向きに取り付ける。平面鏡は 2 軸シフトステージ (駆動ストロークは 2.5m が必要) と 2 軸チルトステージにマウントする。駆動ステージは 100K で動作する。駆動ステージと平面鏡は熱絶縁し、平面鏡の温度はできるだけ下げる。望遠鏡を取り付ける前に、チャンバー前方から平面鏡面に対し水準出しを行い、望遠鏡を取り付けた後は、チャンバー後方から、副鏡サポート裏のアラインメントミラーを使って望遠鏡光軸の水準出しを行う。望遠鏡インストール後の微調整は平面鏡チルトおよび干渉計側ステージで行う。

1m 径の平面鏡を横移動させながら、約 40 個のポジションで 3.5m 開口を密にカバーする。得られた透過波面データをつなぎ合わせることで、望遠鏡開口面全面の透過波面を合成する。平面鏡シフトの際に発生するチルト量については、チャンバー側面および上方から直交方向に設けられたのぞき窓を通し、オートコリメータで平面鏡チルトモニターを行う。チルトモニター用のターゲットとして、約 2m 長の光学基準バーを 2 本、直交方向に取り付ける。これらは平面鏡取り付けマウントに対して固定される。移動毎に平面鏡チルト補正を行ったのちに、透過波面を測定する。

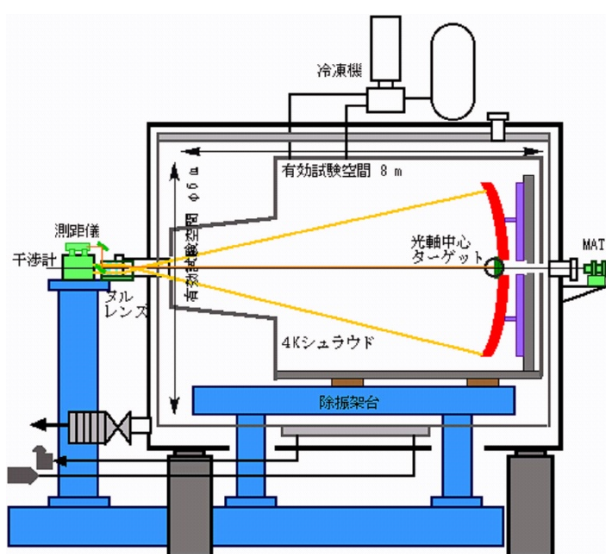


図 5.31: SPICA 主鏡単体の冷却試験の測定構成 (案)

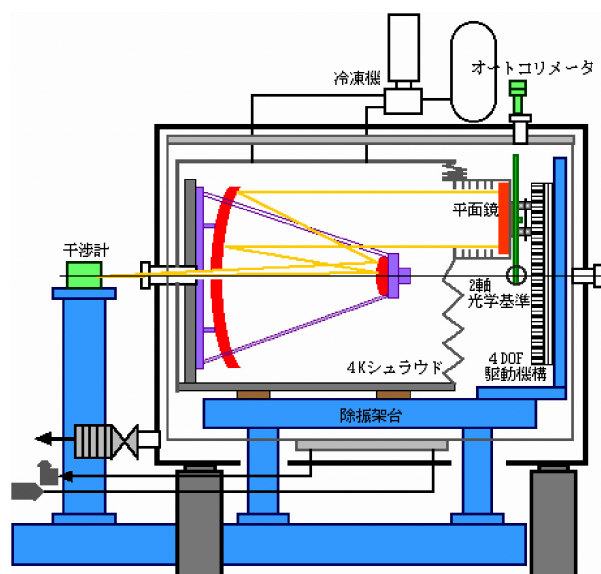


図 5.32: SPICA 望遠鏡システムの冷却試験の測定構成 (案)

5.6 焦点面観測機器

SPICA 焦点面観測装置については、現在、その仕様を固めるべく、活発な議論を行なっているところであり、その最終仕様は未だ固まっていない。ここでは、現状での代表的な案とパラメーターとを提示する。

5.6.1 中間赤外線撮像／分光装置

概要

中間赤外線領域 (波長 5 – 25 μ m) において、他のミッションでは不可能な高感度の観測を行う。観測対象としては、太陽系内天体から遠方の銀河まで、多種多様。

以下の 3 種類の観測モードを備える。

1. 回折限界の撮像

最も基本的な観測モード。Airy Disk を空間的に十分にサンプルする必要あり。

2. 一次元撮像 + 中分散分光

グレーティングによる中分散分光。一般的な輝線検出を目的とする。

一方高分散分光は、輝線プロファイルの分解、等価幅の小さい吸収線の検出などを旨とする。ファブリペローを加えた高分散分光とが行える。中分散分光は一般的な輝線検出を目的とする。一方高分散分光は、輝線プロファイルの分解、等価幅の小さい吸収線の検出などを旨とする。

3. コロナグラフ観測

太陽系外惑星系の検出などが目的。高いコントラスト、高い迷光除去比が要求される。

途中の光路の切替えにより、3 つのモードの切替えを行う。

観測器光学系は、再短波長での回折限界の像を結ぶ性能を有するとともに、高いコントラスト、高い迷光除去比を達成することを考慮する。

観測光学系の温度は 10 K 以下。ただし、検出器自身は 4 K 付近で ± 100 mK の温度制御を行う。

検出器

項目	仕様
観測波長域	5 – 25 μ m (SW 5 – 12 μ m) (LW 12 – 25 μ m)
検出器	Si:As
要求される温度	4 K
画素サイズ	30 μ m
アレイサイズ	1024 $\times$ 1024 ($\times 5$) (LW 用に 1 個。SW は 4 個を用いたモザイク)

主な観測モードとその仕様

1. SW 撮像モード

- 仕様

項目	仕様
波長域	5 – 12 μ m
画素サイズ	0''.18/pixel (回折限界 0''.36 @ 5 μ m)
視野	6'.1 $\times$ 6'.1
波長分解能	$\lambda/\Delta\lambda = 5$

- 検出限界 (1 時間積分、 5σ)

波長 バンド	Instrument Limit	Galaxy confusion limit
7 μ m	0.16 μ Jy	0.018 μ Jy
9 μ m	0.32 μ Jy	0.064 μ Jy
11 μ m	0.53 μ Jy	0.14 μ Jy

2. LW 撮像モード

- 仕様

項目	仕様
波長域	12 – 25 μ m
画素サイズ	0''.36/pixel (回折限界 0''.86 at 12 μ m)
視野	6'.1 $\times$ 6'.1
波長分解能	$\lambda/\Delta\lambda = 5$

- 検出限界 (1 時間積分、 5σ)

波長 バンド	Instrument Limit	Galaxy confusion limit
15 μ m	0.93 μ Jy	0.42 μ Jy
20 μ m	1.3 μ Jy	1.2 μ Jy
25 μ m	1.6 μ Jy	3.3 μ Jy

3. SW 分光モード

• 仕様

項目	仕様
波長域	5 – 12 μ m
モード	スリット (グレーティング) 分光+ 一次元撮像 or 多天体分光器 (Mi- cro Mirror Array 使用)
空間分解能	0''.18 (回折限界 = 0''.36 @ 5 μ m)
視野	6'/1 長の一次元イメージ (スリッ ト分光の場合)
波長分解能	$\lambda/\Delta\lambda = 2000$ オプションでより高波長分解?

• 検出限界 (1 時間積分、5 σ)

波長帯	ライン検出限界
5 – 8.5 μ m	$7.9 \times 10^{-21} \text{ W}^{-2}$
8.5 – 12 μ m	$4.4 \times 10^{-21} \text{ W}^{-2}$

4. LW 分光モード

• 仕様

項目	仕様
波長域	12-25 μ m
モード	スリット (グレーティング) 分光+ 一次元撮像 or 多天体分光器 (Mi- cro Mirror Array 使用)
空間分解能	0''.36 (回折限界 = 0''.86 @ 12 μ m)
視野	6'/1 長の一次元イメージ (スリッ ト分光の場合)
波長分解能	$\lambda/\Delta\lambda = 1000$ オプションでより高波長分解?

• 検出限界 (1 時間積分、5 σ)

波長帯	ライン検出限界
12 – 18.5 μ m	$4.1 \times 10^{-21} \text{ W}^{-2}$
18.5 – 25 μ m	$3.3 \times 10^{-21} \text{ W}^{-2}$

5. SW コロナグラフモード

• 仕様

項目	仕様
波長域	5 – 12 μ m
画素サイズ	0.05''/pixel (Diff Limit 0.36'' at 5 μ m)
視野	51'' $\times$ 51''
備考	Apodizing Occulting Disk, Lyot Stop 有

6. LW コロナグラフモード

• 仕様

項目	仕様
波長域	12 – 25 μ m
画素サイズ	0''.1/pixel (Diff Limit 0''.86 at 12 μ m)
視野	102'' $\times$ 102''
備考	Apodizing Occluding Disk, Lyot Stop 有

5.6.2 遠赤外線撮像／分光装置

概要

遠赤外線領域 (波長 50 – 200 μ m) において、今までのミッションよりも、はるかに高感度高分解能の観測を行う機器。観測対象は、低温の熱放射をとまなうもの全てであり、太陽系内天体から、遠方の銀河にまでわ

たる。

以下の 2 種類の観測モードをもつ。

1. 回折限界の撮像

最も基本的な観測モード。Airy Disk を空間的に十分にサンプルする必要がある。

2. 一次元撮像 + 分光

グレーティングのみによる中分散分光とファブリペローを加えた高分散分光とが行える。中分散分光は一般的な輝線検出を目的とする。一方高分散分光は、輝線プロファイルの分解、等価幅の小さい吸収線の検出などを旨とする。

途中の光路の切替えにより、2つのモードの切替えを行う。

観測器光学系は、再短波長での回折限界像を結ぶ性能を有する必要がある。

観測光学系の温度は 2.5 K 以下。ただし検出器は 2 種類搭載し、短波長用は 2.5 K $\pm$ 50 mK の温度制御、長波長用は 1.7 K $\pm$ 100 mK の温度制御を、それぞれ行う。

検出器

項目	バンド	仕様
観測波長域	SW	50 – 100 μ m
	LW	100 – 200 μ m
検出器	SW	Ge:Ga
	LW	Stressed Ge:Ga
要求される温度	SW	2.5 K
	LW	1.7 K
画素サイズ	SW	0.5 mm
	LW	1.0 mm
アレイサイズ	SW	128 $\times$ 128
	LW	64 $\times$ 64

検出器の例を図 5.33 に示す。

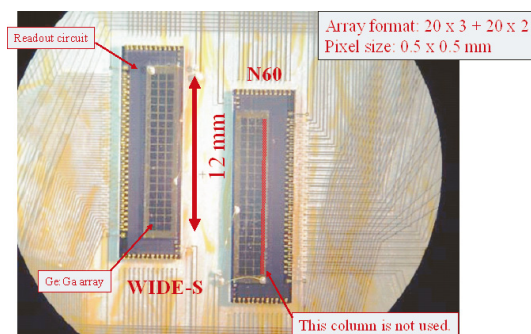


図 5.33: Ge:Ga 遠赤外線アレイ検出器 (ASTRO-F) (カラー 301 ページ)

観測モードと仕様

観測モード	項目	仕様
SW 撮像モード	画素サイズ	1''8/pixel (Diff Limit 3''6 at 50 μm)
	視野	3'8 $\times$ 3'8
	バンド数	3 程度
LW 撮像モード	画素サイズ	3''6/pixel (Diff Limit 7''2 at 100 μm)
	視野	3'8 $\times$ 3'8
	バンド数	3 程度
SW 分光モード	分光方法	スリット (グレーティング) 分光+ 一次元撮像
	空間分解能	3''6
	波長分解能	$R = 1,000$ (グレーティングのみ) $R = 20,000$ (ファブリペロー)
LW 分光モード	分光方法	スリット (グレーティング) 分光+ 一次元撮像
	空間分解能	7''2
	波長分解能	$R = 1,000$ (グレーティングのみ) $R = 20,000$ (ファブリペロー)

遠赤外線分光器としては、フーリエ分光器も検討している。その光学系の例を図 5.34 に示す。

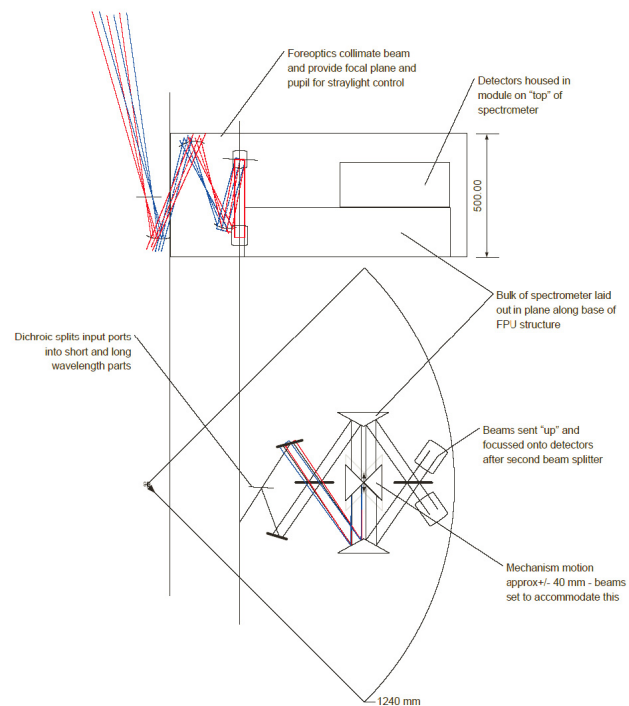


図 5.34: SPICA 用遠赤外線フーリエ分光器光学系

5.6.3 サブミリ波撮像／分光装置 (オプション)

概要

今までにほとんど観測がない短サブミリ波領域 (波長 $200 - 500\mu\text{m}$) において、先駆的な観測を行う機器。観測対象としては、近傍の極低温天体から、遠方の原始銀河にまでわたる。

以下の 2 種類の観測モードを持つ。

1. 回折限界の撮像

最も基本的な観測モード。Airy Disk を空間的に十分にサンプルする必要あり。

2. 一次元撮像 + 分光

グレーティングのみによる中分散分光を行う。

途中の光路の切替えにより、2 つのモードの切替えを行う。

観測器光学系は、再短波長での回折限界像を結ぶ性能を有する。

この波長の分光光学系の問題の一つは大型化することである。そこで、その問題を回避するために SPICA に向けて提案されているグレーティング方式 (ZSPEC) を図 5.35 に示す。

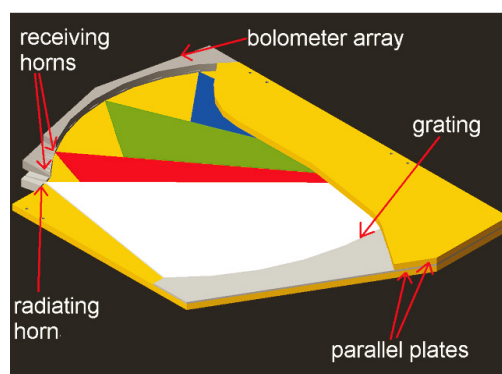


図 5.35: 長波長グレーティングを小型化する提案 (ZSPEC)

観測光学系の温度は 2.5 K 以下。ただし、検出器自身は、より低温を必要とする (下記参照)。

検出器

● 検出器: 案 1

項目	仕様
観測波長域	$200 - 300\mu\text{m}$
検出器	GaAs
要求される温度	1 K
アレイサイズ	64×64

● 検出器: 案 2

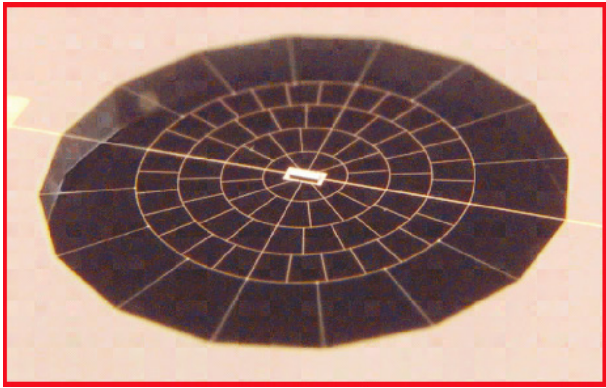


図 5.36: SPIDER web 型のボロメータ

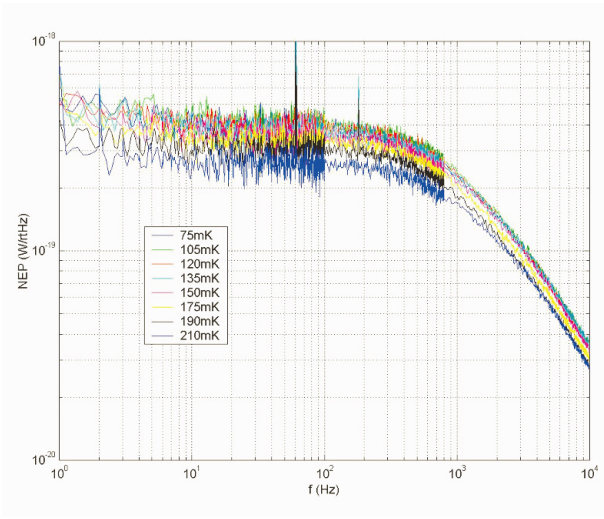


図 5.37: TES 型ボロメータで達成された NEP

項目	仕様
観測波長域	200 – 500 μ m
検出器	ボロメータアレイ
要求される温度	50 – 100 mK
アレイサイズ	32 × 32

SPICA 用ボロメータとして提案されている spider web ボロメータの構造を図 5.36 に示す。これは、赤外線に対しては十分な吸収効率をもちながら、宇宙線に対しての反応断面積を大幅に低減させたものである。

この方式の吸収体 を TES (Trasient Edge Sensor) と組み合わせて作動させ、図 5.37 に示すように、すでに 3×10^{-19} W Hz $^{-1/2}$ という非常にすぐれた NEP を達成している。

観測モードと仕様

観測モード	項目	仕様
高解像度モード	画素サイズ	5''/pixel (Diff Limit 14''at 200 μ m)
	視野	5'3 × 5'3
広視野モード	画素サイズ	15''/pixel
	視野	16' × 16'
分光モード	分光方法	スリット (グレーティング) 分光+ 一次元撮像
	空間分解能	15''
	波長分解能	$R = 300$

5.6.4 近赤外線撮像装置 (オプション)

概要

他の波長での観測を行っている時に、同時に近赤外線領域 (波長 $2 - 5\mu\text{m}$) において、撮像を行う機器。観測対象は多種多様。

以下の観測モードを持つ。

1. 高分解能の撮像

最も基本的な観測モード。 $5\mu\text{m}$ での回折限界を目指す。Airy Disk を空間的に十分にサンプルする必要がある。

観測器光学系は、 $5\mu\text{m}$ での回折限界像を結ぶ性能を有する。

観測光学系の温度は 30 K 以下。ただし、検出器自身は 30 K 付近で ± 1 K の温度制御を行う。

検出器

項目	仕様
観測波長域	$2 - 5\mu\text{m}$
検出器	InSb
要求される温度	30 K
画素サイズ	$30\mu\text{m}$
アレイサイズ	$1024 \times 1024 \times 4$ (4 個のモザイク)

観測モードと仕様

観測モード	項目	仕様
撮像モード	画素サイズ	$0''.18/\text{pixel}$ (Diff Limit $0''.36$ at $5\mu\text{m}$)
	視野	$6.1' \times 6.1'$
	バンド数	K (?), L , M , and Wide($K - M$)

5.7 冷却系

5.7.1 設計思想

従来型赤外線天文衛星の限界

中間-遠赤外線領域は、天文学的に重要な情報を含む波長領域である。そのため、この領域での詳細、高感度観測を可能にすべく、大口径の望遠鏡を搭載した天文台型衛星の実現が切望されていた。

しかしながら、従来の赤外線衛星の設計方針では、その実現は以下のような理由により従来は困難であった。

1. 観測機の冷却に用いる冷媒を保持するために、大きなタンクと重い真空容器が必要であった (図 5.38 左)。

そのため、衛星が大きく重くなり、限られた打ち上げ能力のもとでは、比較的小口径の望遠鏡しか搭載できなかった。

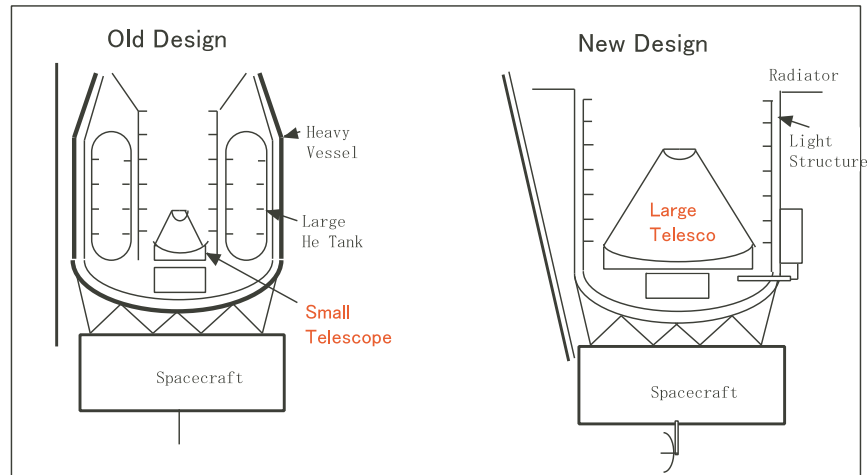


図 5.38: 冷却望遠鏡の 2 つの設計コンセプト。(左) 冷媒を用いる従来が他のコンセプト、(右) 冷媒を用いない新しいコンセプト

2. 地球近傍の軌道をとっていたために、地球光と太陽光とを避ける衛星運用が必要となり、そのために長時間の安定した露出が困難であった。

これらの欠点のため、従来の赤外線衛星では感度、空間分解能ともに不足であり、真の天文台型の衛星の実現が困難であった。

Warm Launch 型の赤外線衛星

従来の赤外線衛星の「大きい、重い」という最大の欠点を克服するために、SPICA では、冷媒を搭載せず、打ち上げ時に観測器を冷却しない“Warm Launch”型の衛星を提案する。冷媒がなければタンクは不要になり衛星は小型化される。さらに、打ち上げ時に観測器が冷却されていなければ、無骨な真空容器外壁は不要になり、衛星は画期的に軽量化される。これらの効果により、衛星全体の重量が同じでも、従来よりもはるかに大口径の望遠鏡の搭載が可能になるはずである (図 5.38 右)。

この概念に基づいた衛星の概念図を図 5.39 に示す。

軌道上での冷却

このミッションは、“Warm Launch”であるため、衛星が軌道に投入されてから観測器を冷却する必要がある。そこで、SPICA では、軌道上で以下の 2 つの方式を併用することにより、観測器を冷却する設計方針とした。

1. 放射冷却
2. 機械式冷凍機

特に 1. の放射冷却は重要であり、これを有効に働かせる構造と軌道とを選ぶ必要がある。このうえに 2. の機械式冷凍機を併用して、最終的には望遠鏡を 4.5 K まで冷却する。ただし、ほとんどの熱は放射冷却で捨てるため、望遠鏡の冷却に必要な冷凍機の能力はそれほど大きくはない。例えば、JEM 暴露部に搭載される SMILES 用にすでに開発されている JT 冷凍機の能力で、3.5m の望遠鏡を冷却することが十分に可能となる。

分類	項目	要求仕様	検討結果
1. 構造	(1) 形状	φ3.5m の望遠鏡を収納可能なこと	同左
		H-IIA ロケット包絡域内に格納可能なこと	同左
	(2) 剛性	機器最小固有値が以下を満足すること (横)18.0Hz 以上 (縦)36.0Hz 以上	解析値: (横)18.4Hz (縦)36.0Hz
	(3) 強度	終極荷重 (各軸 12G) を負荷した場合の各部発生荷重/応力が許容値以下となること	同左
	(4) 質量	1600kg 以下 (暫定:サンシールド除く)	1782kg
2. 熱	(1) 望遠鏡温度	5K 以下に冷却可能であること	同左
	(2) 4.5K ステージへの侵入熱	30mW 以下@4.5K	29.98mW 以下
	(3) バッフル温度	TBDK	9.4K 但しバッフル/鏡筒一体化の場合は 18.3K

表 5.5: 冷却系要求仕様

5.7.2 冷却系仕様

上記に述べた設計思想に基づき、この節では、観測系から見た冷却系への要求をまとめる。冷却系に対する要求仕様及び現状での設計検討結果を表 5.5 に示す。

現状では質量要求以外の項目について全て要求仕様を満足する結果が得られており、特に侵入熱評価/剛性評価にあたっては多節点数値モデルを使用した複数ケースでのパラメトリックスタディを実施することにより熱/構造要求を共に満足する解を得ることができた。

なお現状質量については目標値(1600kg:暫定)を超える結果となっているが、今後バッフル/鏡筒一体化等の検討を進めることにより目標値に近づけることは可能であると考えられる。

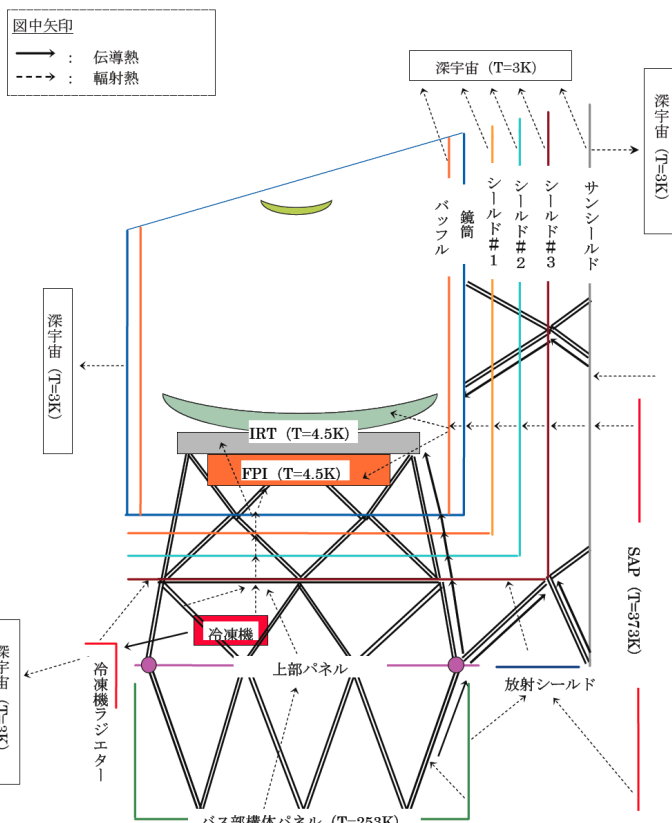


図 5.39: 軌道上での熱経路概念図

冷却方式概要

SPICAにおいては質量低減及び望遠鏡搭載能力拡大を図るため液体ヘリウム及びクライオスタットを使用せず、常温で打上げを行い軌道上で放射冷却と機械式冷凍機により冷却を行う“warm-launch”方式を採用する。

図 5.39 に軌道上での熱経路概念図を示す。FPI 及び望遠鏡は鏡筒内に設置されるオプティカルベンチにより支持され、4K 級冷凍機により 4.5K レベルに冷却される。さらに FPI 内の観測機器は 2K 級及び 1K 級冷凍機によりそれぞれ所定の温度に冷却される。オプティカルベンチは CFRP トラスにより鏡筒より断熱支持され、鏡筒及びバッフルは CFRP トラスにより #3 シールドより断熱支持される。またさらに #3 シールドは CFRP トラスによりバス部構体より断熱支持される。鏡筒及びバッフルは望遠鏡（主鏡及び副鏡）を囲むように設置され望遠鏡への熱侵入を低減すると共に、

深宇宙への放射冷却により 20K レベルに維持される。また鏡筒/パッフルへの熱侵入を低減するため、鏡筒外部には 3 層の放射シールド (#1~#3 シールド) が設置される。各シールドは側面部の一部を宇宙空間への放熱面としており、深宇宙への放射冷却が行われる。#3 シールド外部には侵入熱低減のため 30 層の MLI が施工され、さらに太陽光入射面にはサンシールドが設置される。サンシールド内側は侵入熱低減のため 30 層の MLI が施工され、さらに外側には銀蒸着 PEI を貼付した 30 層の MLI が施工される。また側面部 (太陽光が入射しない面) は宇宙空間への放熱面としており、深宇宙への放射冷却が行われる。

冷凍機は駆動時に発熱するため排熱システムが別途必要となるが、この排熱については現在 LHP(Loop Heat Pipe) 及びラジエータを使用したシステムが検討されている。冷凍機より発生した熱は LHP によりラジエータに熱輸送され、深宇宙に放熱される。

上記冷却方式により現状では望遠鏡への侵入熱量は 30mW 以下@ 4.5K となり、要求仕様を満足する見込みが得られている。

5.7.3 機械式冷凍機

要求仕様

SPICA の観測系は、望遠鏡部と焦点面観測系に分けられる。この焦点面観測系の検出器として、現在、異なった温度、冷却能力が要求されており、以下のものが、検討されている。

- Si:As (4K 付近、15mW 以下)
- Ge:Ga (2.5K、10mW 以下)
- Stressed Ge:Ga (1.7K、5mW 以下)
- GaAs (1K)
- Bolometer (100mK)
- In:Sb (30K)

各々の検出器の光学系に対しても異なった温度の要求があり、各温度レベルへの冷却は、1K 級、2K 級、4K 級及び 20K 級機械式冷凍機により冷却される。冷却部と冷凍機の間を関係を表 5.6 に示す。

冷却方式及び構造

各機械式冷凍機の冷却方式及び構造を図 5.40、5.41 に示す。

冷却方式及び概要

1K 級、2K 級及び 4K 級冷凍機は、2 段スターリング冷凍機を予冷機として、ジュール・トムソン (Joule-Thomson:JT) 効果を利用した JT 回路冷凍機であり、2 段スターリング冷凍機、JT 圧縮機、熱交換器、JT バルブ (オリフィス)、バイパスバルブ、冷却ステージ及び外部配管系により構成されている (図 5.40 フロー図参照)。また、各冷凍機の冷却方式、構成、消費電力、質量を表 5.7 に示す。

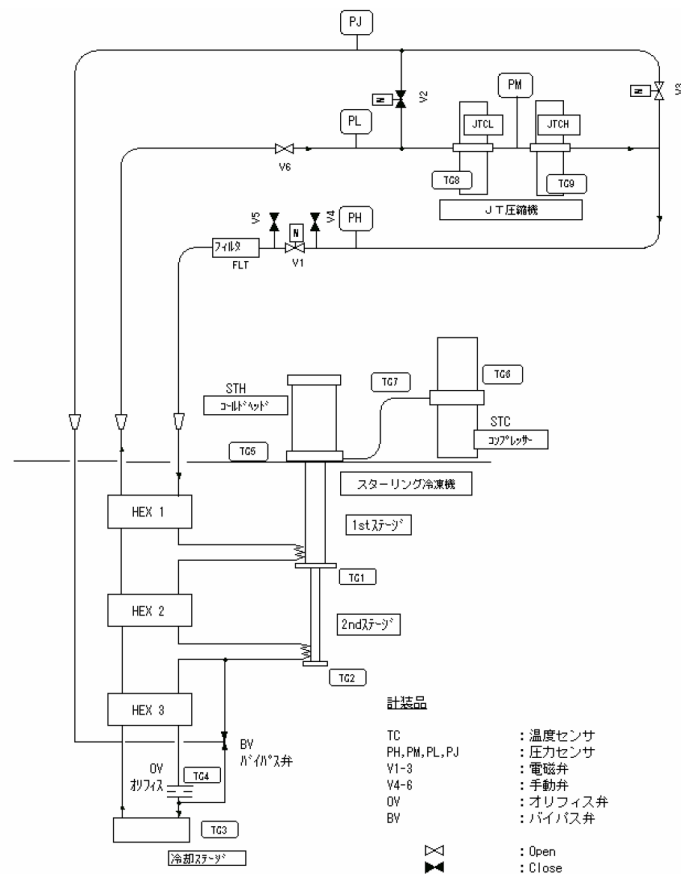


図 5.40: 2 段スターリング冷凍機 + JT 回路冷凍機 フロー図

表 5.6: 機械式冷凍機への要求仕様

			要求温度	1K 級冷凍機	2K 級冷凍機	4K 級冷凍機	20K 級冷凍機
望遠鏡			5K 以下	—	—	(予冷～) 侵入熱： 15mW 以下	予冷のみ (Heat SW 必要)
中間赤外線 撮像/分光装置	観測光学系		10K 以下	—	—	(予冷～) 侵入熱： 検出器に含む	—
	検出器 Si:As		4K 付近 ±100mK	—	—	(予 冷 ～) 15mW	—
遠赤外線 撮像/分光装置	観測光学系		2.5K 以下	—	(予冷～) 侵入熱： 検出器に含む	—	—
	検 出 器	短波長用 Ge:Ga	2.5K ±50mK	—	(予冷～) 10mW 以下	—	—
		長波長用 Stressed Ge:Ga	1.7K ±100mK	(予冷～) 5mW 以下： 侵入熱含む	—	—	—
サブミリ波 撮像/分光装置 (option)	観測光学系		2.5K 以下	TBD			
	検 出 器	(案 1) GaAs	1K	TBD			
		(案 2) Bolometer Array	100mK	TBD			
近赤外線 撮像装置 (op- tion)	観測光学系		30K 以下	TBD			
	検出器 In:Sb		30K±1K	TBD			
冷凍機実績				12mW@1.7K	15mW@2.5K	30mW@4.9K	300mW@20K

4K 級冷凍機 予冷用 2 段スターリング冷凍機と ^4He ガスを使用した JT(ジュール・トムソン) 回路冷凍機から構成される。この 4K 級冷凍機は、ISS/JEM/SMILES におけるセンサ冷却用 (20mW@4.5K) として開発されている。但し、SMILES はミッション期間が 1 年であるのに対し、SPICA は 5 年以上の長期ミッションとなることから、作動ガスの品質保持や圧縮機の安定運転といった冷凍機の信頼性向上が必須となっている。

1K 級冷凍機 上記 4K 級冷凍機をベースにして、1.7K でより高い飽和蒸気圧をもつ ^3He ガスを作動ガスに使用した JT 回路冷凍機の開発を進めている。冷却能力は、1.7K で 10mW を開発目標とし、試作品レベルでは、12mW(消費電力 180W 以下) を達成している。JT 回路に使用する JT 圧縮機では、1.7K を達成するために、配管圧力損失を考慮し、6kPa から、0.7MPa まで昇圧させる必要があり、2 段一体

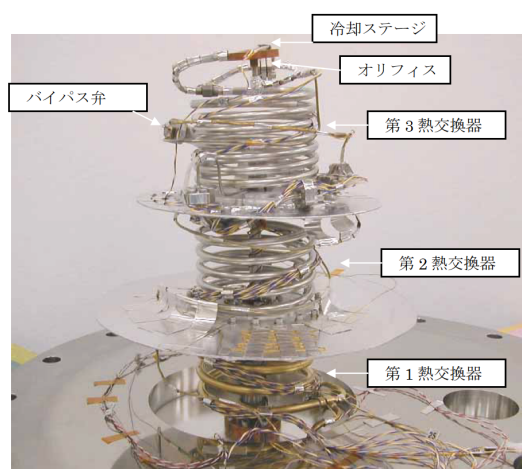


図 5.41: JT 熱交換器、冷却ステージ

型リニア真空ポンプと2段一体型リニア圧縮機による4段圧縮を行っている。試作した1K級冷凍機の写真を図5.41に示す。

2K級冷凍機 上記2K級冷凍機をベースにして、作動ガスとして ^4He 又は、 ^3He ガスを使用して冷却する。作動ガスについては、トレードオフが必要であり、それぞれの主な長所としては、 ^4He ガスの場合、JT圧力の高圧化により冷却能力向上が可能なこと、 ^3He ガスの場合は、飽和蒸気圧を高いので、JT圧縮機への負荷が低減されることが挙げられている。

機械式冷凍機	1K級冷凍機	2K級冷凍機	4K級冷凍機	20K級冷凍機
冷却方式	2段スターリング冷凍機(2ST)を予冷機としたJT回路冷凍機			逆スターリング
作動ガス	2ST: ^4He , JT: ^3He	2ST: ^4He , JT: ^3He or ^4He	2ST: ^4He , JT: ^4He	^4He
構成				
2段スターリング冷凍機	0.1W以上 @15K 1W以上 @100K	0.1W以上 @15K 1W以上 @100K	0.2W以上 @20K 1W以上 @100K	0.2W以上 @20K 1W以上 @100K
消費電力	100W以下	100W以下	100W以下	90W以下
JT圧縮機	一体型真空及び一体型JT圧縮機:各1台(TBD)	一体型真空及び一体型JT圧縮機:各1台(TBD)	低圧側及び高圧側JT圧縮機:各1台	—
吸入圧	8kPa以下	8kPa以下(TBD)	100kPa以下	—
吐出圧	0.7MPa以上	0.7MPa以上(TBD)	1.6MPa以上	—
流量	2.23mg/s以上	3mg/s以上(TBD)	6mg/s以上	—
消費電力	80W以下	80W以下	60W以下	—
熱交換器	型向流2重管式 熱交換効率97%以上 低圧圧力損失3kPa以下	型向流2重管式 熱交換効率97%以上 低圧圧力損失3kPa以下(TBD)	コイル型向流2重管式 熱交換効率97%以上	—
温度センサ	9ヶ	同左	同左	5ヶ
ヒーター	TBD	TBD	TBD	TBD
圧力センサ	高圧、中間圧、低圧、バイパス弁操作圧	同左	同左	—
電磁弁	3ヶ	同左	同左	—
フィルタ	1ヶ	同左	同左	—
質量	< 30kg	同左	同左	< 10kg

表 5.7: 各冷凍機の構成、消費電力、質量

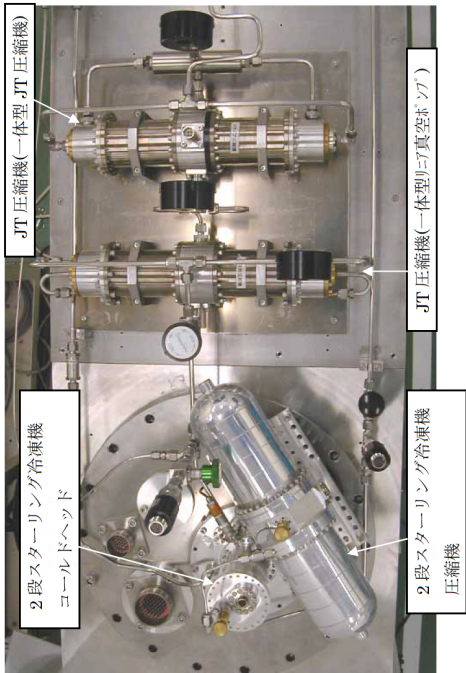


図 5.42: 1K 級冷凍機試作品 (カラー 14)

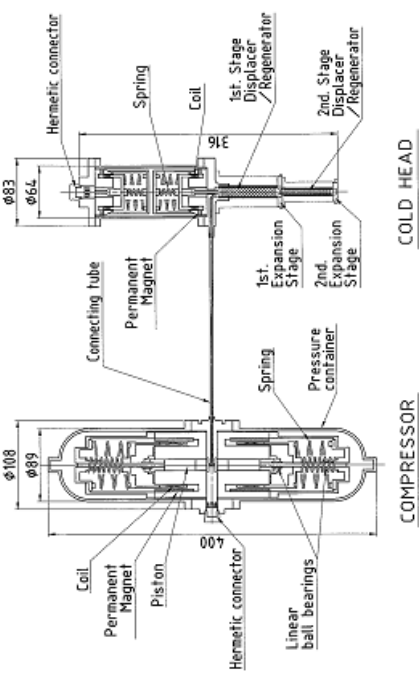


図 5.43: 2 段スターリング冷凍機構造図

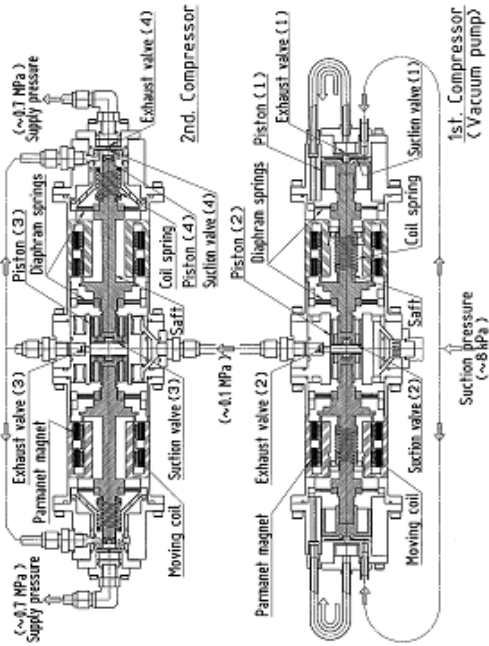


図 5.44: 1 K 級用 (2 K 級:TBD) J T 圧縮機試作品構造図

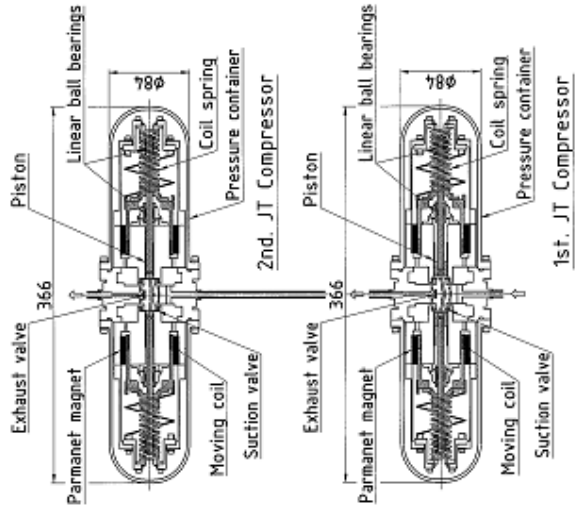


図 5.45: 4 K 級用 J T 圧縮機構造図

動作概要

2 段スターリング冷凍機 2 段スターリング冷凍機の圧縮機の構造は、ツイン対向型リニア駆動ピストン方式を採用しており、永久磁石内に電磁コイルと同期用バネが付いたピストンがセットされている。この電磁コイルに交流電流を流すことによりピストンの往復運動が得られ、このピストンを同一直線上で互いに反対方向に運動させることにより、低振動の運転が得られる。

コールドヘッドは耐圧円筒シリンダーの内部に2個の蓄冷器(再生熱交換器)を有しており、その蓄冷器を上下移動させる機構は圧縮機と同様のリニア駆動を採用している。

圧縮機のピストンと蓄冷器を90°の位相差で、正弦波状の動きをさせることにより、スターリングサイクルを近似的に実現し、冷却を行っている(図5.43に構造図を示す。)

JT 圧縮機 1K 用 JT 圧縮機試作品の構造、動作を以下に説明する。(図5.44 参照) 長寿命化を考慮し、圧縮ピストンはフラットスプリング(板バネ)によるクリアランスシール方式を、また、振動レベルを下げるために、1 段側、2 段側共にピストンのツイン対向配置を採用している。約 50Torr のヘリウムガスは外側の 1 段ピストン部の吸気弁より圧縮部に入り、1 段ピストンで圧縮され、排気弁より吐出される。1 段側を出たヘリウムガスは U 字パイプを通して真空ポンプ内部に入る。1 段、2 段の圧縮室を除いて真空ポンプケース内は 1 段吐出圧力となっている。真空ポンプ内のヘリウムガスは中央部の 2 段側ピストン部の吸気弁より圧縮部に入り、2 段ピストンで圧縮され、排気弁より約 0.1MPaA となり、吐出される。約 0.1MPaA のヘリウムガスは一体型 JT 圧縮機の内側の 1 段ピストン部の吸気弁より圧縮部に入り、1 段ピストンで圧縮され、排気弁より吐出される。1 段側を出たヘリウムガスは配管を通して外側の圧縮部に入る。1 段、2 段の圧縮室を除いて JT 圧縮機ケース内は 1 段吸入圧力となっている。1 段側を出たヘリウムガスは 2 段側ピストン部の吸気弁より圧縮部に入り、2 段ピストンで圧縮され、排気弁より約 0.7MPaA となり、吐出される。

図 5.45 に 4K 級冷凍機用 JT 圧縮機の構造図を示す。

4K 級冷凍機用 JT 圧縮機は、同じ圧縮比を持つ 2 台の圧縮機から構成されており、2 段スターリング冷凍機のコンプレッサーとほとんど同じ構造、及び駆動方式を採用しているが、吸込/吐出用のリードバルブが追加されている点が異なっている。1 台目で He 圧力を約 0.1MPaA から約 0.4MPaA まで昇圧し、2 台目でさらに約 1.6MPaA まで昇圧し、循環させている。(1K 級用 JT 圧縮機同様にフラットスプリングによるクリアランス方式も検討中である。)

冷却 JT 圧縮機で圧縮された He ガスはコイル型 2 重管式の第 2、第 2、第 3 熱交換器で戻りの低圧 He ガスと熱交換し、冷却され、さらにスターリング冷凍機の 1 段、2 段冷却ステージでも冷却される。この冷却された圧縮 He ガスは、オリフィス(約 20~30 μ m)において JT 効果(断熱自由膨張)により低圧のヘリウムミストとなり、液化 He 温度域での冷却能力を発生させる。(冷却温度は、He の飽和蒸気圧に対応する。) 未液化、蒸発した低圧 He ガスは圧縮 He ガスを冷却しながら昇温し、第 3、第 2、第 2 熱交換器の順に低圧側を通して常温となり、JT 圧縮機の低圧側へ戻り、再び JT 圧縮機で圧縮される。

実際の運転では、予冷時は He の JT 効果により温度が下がる領域(約 30K 以下)までは、第 3 熱交換器の高圧側をバイパスさせて、スターリング冷凍機で冷却ステージを冷却し、その後バイパスラインからオリフィスのラインに外部配管系の電磁弁操作により切り換えて、JT 効果を利用し各要求温度レベルまで冷却する。

4K 級冷凍機については、作動ガスに ^4He を使用しているが、1K 級冷凍機については、同流量で比較した場合、冷却能力としては減少するが、同じ飽和蒸気圧における温度が低い ^3He を使用することにより、1K 用 JT 圧縮機及び熱交換器の開発を可能にしている。

現状性能及び搭載化のための開発項目 各冷凍機の冷却性能は、初期性能としては、要求仕様を満たす能力が確認されているが、5 年の運用期間を考慮すると、搭載化に向けてさらに検討、開発が必要な項目が残っている。表 5.8 に現状性能及び搭載化のための開発必要項目を示す。

5.7.4 定常熱解析結果

熱解析結果を表 5.9 に示す。表においては各部温度を平均温度として示している。表より、4.5K ステージへの侵入熱は 29.98mW となり、目標値である 30mW 以下となる見込みが得られた。但し現状目標値に対してマージンがほとんどないため、今後さらに侵入熱を低減するため以下について引き続き検討を実施していく必要があるものと考えられる。

FPI 発熱量の低減化 現状 FPI 発熱量は暫定値として 15mW と見積もられているが、侵入熱量目標値 30mW の半分を占める数値となっている。この発熱量については今後 PI 殿にて詳細検討を実施頂き、低減化について御検討頂きたいと考える。

鏡筒温度の低減化 (バッフルとの一体構造検討) 4.5K ステージへの侵入熱は鏡筒からの支持構造トラス (CFRP サポート) による伝導が支配的となっており、この侵入熱量をさらに低減する必要がある。これについては現状構造上の制約 (剛性、強度) よりサポート形状/材質の変更は困難であるため、鏡筒及びバッフルを一体構造とし、鏡筒温度を低減することにより侵入熱量を低減する方法も一案と考えられる。この構造変更による侵入熱低減量は約 1.6mW と推定され有効な方法であると考えられるが、鏡筒/バッフル温度が約 18K となるため検出器に与える影響も考慮し今後検討を進める必要があるものと考えられる。

表 5.8: 現状性能及び搭載化のための開発必要項目

	1K 級冷凍機	2K 級冷凍機	4K 級冷凍機	20K 級冷凍機
構成	2ST+ ³ HeJT	2ST+ ³ HeJT or 2ST+ ⁴ HeJT	2ST+ ³ HeJT	2ST
同等品搭載実績	なし	なし	JEM/SMILES 200?年打ち上げ予定 運用 1 年	ASTRO-F 200?年打ち上げ予定 運用 1.5 年以上
要求冷却能力	5mW @ 1.7K	10mW @ 2.5K	30mW <5K	200mW @ 20K
運用期間、侵入熱を考慮した場合の必要初期冷却能力	10mW	15mW	50mW	200mW
実績値 (Top Data)	12mW	15mW(⁴ He)	20mW @ 4.5K, 30mW @ 4.9K	300mW
消費電力 (冷凍機ドライバ部除く)	< 180W	TBD	< 160W	< 90W
搭載化に向けた課題 JT 圧縮機低消費電力化 2ST 低温化	高効率化 方式の決定 ・2ST 低温化 → ⁴ He 有利	冷却能力 Up 対策 2ST 低温化 JT 圧縮機流量 Up JT 圧縮機高圧化	ヒートスイッチ	
	低圧駆動バイパス弁の開発 ³ He ガス精製 運用方法の確立			
	信頼性実証モデルによる連続運転評価 JT 圧縮機の低温化対策 (環境温度:200K(TBD)) バルブ要素開発試作 低温環境における冷却性能実証 JT 系サイジング検討 冷却性能向上 2ST による冷却性能向上の確認 耐振性に優れた自立型 JT 系の検討			
	5 年寿命に対する技術的な検討とその検証方法 冗長系の考え方: (例) 各冷凍機を 2 セット。軌道上でのガス交換他 冷凍機全体システムコンフィギュレーション			

5.7.5 固有値解析結果

固有値解析結果を表 5.10 に示す。表より、1 次固有値は縦横方向ともに要求仕様値以上となる見込みが得られた。但し現状では要求仕様値に対してマージンが少なくなっているため、今後以下について引き続き検討を実施していく必要があるものと考えられる。

5.8 ミッション運用概要

衛星システムの運用方法の概要について述べる。

5.8.1 運用期間

SPICA ミッションは、国際的天文台となり、数多くの画期的な観測を行うことが期待されている。また、近い将来に SPICA を全面的に上回るミッションが打ち上げられる可能性も低い。したがって、SPICA の観測運用は、できる限り長期間行いたい。

現在の検討では、初期の軌道投入時期を除いて、観測期間として最低 5 年間、できれば 10 年間を確保することを目標とする。したがって、寿命に限りのある要素は、冗長系等を採用することにより、システム全体で、上記の寿命を達成することを目標とする。

表 5.9: 定常熱解析結果

各部名称	温度 (K)	各部名称	温度 (K)
10. FPI	4.5	80. サンシールド	135.5
20. 主鏡	4.5	81. サンシールド MLI(太陽側)	217.1
22. 副鏡	4.5	911. 放射シールド冷却系内側	193.0
25. バッフル	9.4	910. 放射シールド冷却系外側	153.1
30. 鏡筒	22.4	912. 放射シールドバス外側	197.7
50. シールド #1	41.5	921. 上部パネル	244.1
60. シールド #2	60.6	931. 冷却系支持点	242.8
70. シールド #3	85.3	941. バス部トラス	252.6
71. シールド #3MLI	135.5	951. バス構体パネル	253.2
75. CFRP トラス中間	201.7	900. SAP	373.0
90'. 冷凍機ラジエータ MLI	193.5	冷凍機発熱	529W
90. 冷凍機ラジエータ	243.7	4.5K ステージ侵入熱	29.98mW
85. 冷凍機	284.4	4.5K ステージ侵入熱目標値	<30mW
81'. サンシールド MLI(反太陽側)	113.2		

* 各部温度は平均温度を示す

表 5.10: 固有値解析結果

方向	1 次固有値 (Hz)	要求仕様値 (Hz)
X(横)	19.9	18.0
Y(横)	18.4	18.0
Z(縦)	36.0	36.0

5.8.2 軌道

S-E L2 概要

このミッションの観測軌道としては、「太陽－地球」系のラグランジュ点のうちの L2 (以下 S-E L2) を想定している。

S-E L2 点は、天体観測、特に赤外線天体観測にとっては、以下の理由から、大変に有利な軌道である。

1. 赤外線衛星の大敵であった地球の見かけの大きさが、非常に小さくなり、かつ太陽とほぼ同じ方向になるため、衛星への熱入力が大幅に減少し、放射冷却が有効に働く。
2. ある時点における観測不能天域が「太陽－地球」方向を中心とする特定の方向のみに限られるため、観測可能な天空の領域が広く、かつ長時間の積分が可能である。

一方、この軌道にはいくつかの留意点もあるが、以下のように、大きな問題とはならない。

1. S-E L2 は摂動に対して不安定であるが、この周りに衛星を維持しておくために必要な制御量は極く小量である。具体的には、一年間あたりの制御量は、静止軌道の南北制御に必要な量の約 1/10 である。
2. S-E L2 は、地球から 150 万 km と遠方にあるが、比較的大きな重量が投入できる。同じ能力のロケットでも、投入方法によっては、静止軌道に投入するよりも重い衛星を S-E L2 に投入することが可能である。

実際の観測軌道は、S-E L2 点そのものではなく、そのまわりのリサージュ軌道またはハロー軌道とする。その理由は以下である。

1. 常時電力確保
2. 通信系の太陽電波との干渉の回避

観測軌道への投入

観測軌道への投入方法は、以下の観点から選択されねばならない。

- 衛星本体に、過度の負担 (構造的、電力的、熱的、機能的) を強いけないこと。
- 軌道投入が確実に行われること。
- 上記の条件を満たしながら、観測軌道にできる限り重い重量を運搬できること。

観測軌道への投入手順の詳細は、今後の軌道計画検討を待たなければならないが、現時点では、以下を想定している。

1. HIIA ロケットにより、衛星を中間的トランスファ軌道 に投入する。
2. 中間的トランスファ 軌道の遠地点において、アポジモーター (または衛星搭載推進系) により、S-E L2 への最終的な トランスファ軌道に移行。この過程において、有効であれば、月によるスイングバイ等も利用。
3. 衛星搭載推進系により、最終的トランスファ軌道から、観測軌道へと移行。

打ち上げから最終的な観測軌道への到達時間は、一般的には短いほうが好ましい。一方、観測系の放射冷却は、観測軌道に到達する前のトランスファ軌道から始められるが、それにはある程度の期間が必要である。上記の 2 つの条件を考慮し、打ち上げから最終的な観測軌道への到達時間は、1ヶ月から半年程度の間を想定している。

表 5.11: 次世代大型ミッションの比較

	SPICA	JWST	Herschel
望遠鏡口径	3.5 m	~ 6m	3.5 m
望遠鏡温度	4.5 K	80 K	<40 K
主たる波長域	中間・遠赤外線	近赤外線	サブミリ波
打ち上げ予定	2012	2011	2007

5.8.3 観測運用

SPICA は天文台型の衛星である。すなわち、無条件に全天をサーベイすることは行わず、特定の (ただし全天に分布する) 天体の詳細観測を中心に行う。

発生電力の確保、および観測系への熱負荷の軽減のため、SPICA がある時期に観測可能な天体は、太陽方向に直交した大円を中心として、 $\pm 30^\circ$ 程度の領域に含まれる天体に限られる。実際には、この観測可能領域のなかの特定天体の指向観測を行うことになる。ひとつの天体の観測は、1 時間から数日続く。すなわち、望遠鏡は、ひとつの方向を、これだけの期間見つづけることになる。

観測軌道投入までの初期の地上からの運用方法は、初期の衛星の手順に大きく依存するが、ここでは詳細に触れない。

観測軌道に到達した後の観測期間中は、ひとつの地上局からは 8 – 10 時間程度、適度に離れた 3 局があれば 24 時間中、地上とのコンタクトをとることが可能になる。

5.8.4 contingency

SPICA は、S-E L2 という地球から遠い軌道に投入されるため、運用途中での修理等は不可能である。HST がスペースシャトルを利用して修理されたケースとは異なる。したがって、まず衛星本体としては、故障をおこしにくい高い信頼性が要求される。さらに、想定される事故、ミスに対して、万全の備えが必要である。特に、初期の軌道投入には、長い時間が必要であるので、十分な信頼性確保が必要である。

5.9 SPICA の国際的位置づけ

5.9.1 国際的役割分担

SPICA は、単に日本の次期赤外線ミッションというだけでなく、世界の天文学観測戦略の一環を担う重要な国際ミッションである。

次の 10 年間には、表 5.11 に示すように、表 SPICA に加えて、ヨーロッパが Herschel Space Observatory (以後 Herschel) を、アメリカが James Webb Space Telescope (以後 JWST) を、それぞれ打ち上げる。

Herschel も JWST も非常に強力な観測機器ではある。しかしながら、どちらも中間・遠赤外線の波長域からすると、非常に温度の高い望遠鏡を備えている。これらの望遠鏡からの熱放射は、天体からの放射 (自然背景放射) に比べ、何桁も強い。したがって、これらの望遠鏡は、中間・遠赤外線の領域では、理想的な感度よりも何桁も感度が悪化してしまう。

一方、SPICA の最大の特徴は、望遠鏡を 4.5 K まで冷却することである。したがって、自然背景放射の揺らぎでしまる理想的な感度に近づくことができる。したがって、図 5.3 に示すように、中間・遠赤外線領域において、他のミッションよりも 2 桁以上優れた感度を有する。

表 5.12: 中間・遠赤外線ミッションの系譜

ミッション名	打ち上げ	推進母体	望遠鏡規模	望遠鏡温度
すでに打ち上げられたミッション				
ISO	1995	ヨーロッパ	0.6 m 単一鏡	2 K
SPITZER	2003	アメリカ	0.85 m 単一鏡	6-10 K
これから打ち上げられるミッション				
ASTRO-F	2005 年度?	日本	0.7 m 単一鏡	6 K
計画中のミッション				
SPICA	2012	日本	3.5 m 単一鏡	4.5 K
SAFIRE	2020 ?	アメリカ	10 m 分割鏡	< 6K
SPECS	2020 以降	アメリカ	3.5 m × 3 干渉計	<6K
Cosmic Vision の一環	2020 以降	ヨーロッパ	10 m クラス	< 6K
Cosmic Vision の一環	ヨーロッパ	3m クラス × ? 干渉計	< 6K	

このように、SPICA は、Herschel, JWST と相補的な関係にある。逆に言えば、赤外線領域を全てカバーするためには、これら3つのミッションが全て必要であるということであり、どのミッションが欠けても、天文学の観測上は大きな痛手となる。

このように、SPICA は国際的な戦略のなかで、重要な位置を占めているミッションである。

5.9.2 国際的ロードマップ

ここで、逆に中間・遠赤外線に最適化した冷却望遠鏡 (< 10 K) のミッションの世界的動向について、表 5.12 にまとめる。

すると、SPICA を境界として非常に大きなジャンプがおきていることが分かる。これは SPICA 以降のミッションが、SPICA 同様に冷媒を用いない冷却方式を採用しようとしており、それにより望遠鏡の大型化をはかっているからである。

しかしながら、SPICA がないとすると、表 5.12 には2つの大きな問題があることがわかる。

1. 1m 以下の望遠鏡の実績しかないところに、いきなり 10m 以上の望遠鏡を作ることが計画されており、技術的にも科学的にも飛躍が大きすぎる。
2. 次の欧米の計画は全て 2020 年以降であり、ミッションの間隔が長すぎる。これは、科学の進歩という面からも、技術開発という面からも、あまりにも間隔が長すぎる。

SPICA は、適正な規模の飛躍を、迅速に行うことを目指したものであり、まさに、この2つの問題を解決するものである。その意味においても、SPICA は世界の間中・遠赤外線コミュニティにとって、技術的にも科学的にも極めて重要なマイルストーンであるとみなされている。

5.9.3 国際協力

上記のような重要性に鑑み、SPICA は当然のことながら、国際ミッションとなる。すでに、具体的に国際協力が進められている。現在検討中の SPICA の概念設計は、この国際チームの共同作業の成果である。

サブミリ波観測機：アメリカとの協力

NASA/JPL のグループが中心となり (P.I. Matt Bradford, JPL)、SPICA にサブミリ波分光器を搭載することが検討されている。これは、BLISS (Background Limited SpectroScopy) という名前のプロジェクトとして、2004 年春に、NASA HQ に対して、プロポーザルを提出し、NASA の次世代観測機器の範疇である Hubble Origins Probes の一つとして、概念設計の予算が採択された。

遠赤外線分光観測機：ヨーロッパとの協力

Herschel の観測機器を開発しているグループが中心となり、遠赤外線の分光器を SPICA に搭載することが提案されている。

このグループは、Herschel の焦点面機器の一つである SPIRE を作ったチームが中心となり (P.I. Matt Griffin, Cardiff University, UK)、イギリス、フランス、オランダ、ドイツの 4 カ国によるコンソーシアムが形成されている。SPIRE の開発の経験を生かして、SPICA に分光器を搭載することにより、Herschel/SPIRE よりも 2 桁以上感度を向上させれるということで、技術的な継承の面でも、科学的な面でも、現在の彼らの活動の自然な延長として、SPICA が位置づけられている。

ヨーロッパから日本へのプロポーザルが 2005 年 3 月を目標に用意されている。ここで合意に至れば、各国への予算請求を行うことになっている。

近・中間赤外線観測機：韓国との協力

韓国との間では ASTRO-F に関して、ソフトウェアの開発を中心とした共同研究を行なって来た。この延長として、韓国としては SPICA のハードウェアの開発に参加したいという強い意向がある。すでにそのためのワーキンググループが韓国で形成され、日韓の研究者の相互交流が活発に行なわれている。

この活動をより一層推進するために、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部と韓国国立天文台 (当時、現在の Korea Astronomy and Space Science Institute) との間で、赤外線観測機器の開発を共同で進めることについて、LOA (Letter of Agreement) が 2004 年 7 月に交わされた。近・中間赤外線領域の撮像・分光装置が共同開発の候補の一つである。

5.10 日本の宇宙科学、宇宙開発における位置づけ

5.10.1 新しいカテゴリーの提案

SPICA は科学衛星として今までにない大きな規模のものである。これは科学衛星として新しいカテゴリーを提案するものである。

日本の従来の科学衛星は、打ち上げ手段がある程度固定されていたため、その大きさが、目的ではなく、打ち上げ手段で決まることが多かった。

しかしながら、本来、科学衛星の規模と言うものは、その目指すところにより決められるべきものである。その意味においては、目的に応じて、従来よりも大きな衛星も、小さな衛星も、どちらの方向にも多様性をもった規模の衛星が打ち上げられることが、健全な科学研究という観点からは望ましい。

2003 年の宇宙 3 機関の統合、および JAXA の誕生は、科学衛星の多様化へ可能性を拓きつつあるものであるといえる。今までは独立に開発されてきた M シリーズと HIIA シリーズのロケットが、統合後は JAXA として統一して運用されることになった。したがって、科学衛星としてもある程度打ち上げ手段を選ぶことができるようになることが期待される。すなわち、目的に応じて、科学衛星の規模を選ぶことができるようになる道が拓かれつつあるのである。

SPICA は、このような流れの中で、従来の科学衛星よりも「大きな」規模の衛星を提案するものである。打ち上げロケットとしても、M-V ではなく、HIIA ロケットを用いることを提案している。

宇宙からの天体観測にとって、口径の「大きな」望遠鏡を実現することは、あらゆる面において重要である。SPICA は、日本が「巨大望遠鏡を宇宙にあげる」という端緒を拓こうとするものである。日本の科学衛星が、さまざまな規模の多様性をもち、健全の発展をとげていけるよう、SPICA が一助となれば幸いである。

5.10.2 宇宙開発の将来を拓く SPICA

SPICA は、上記のように宇宙科学の将来を切り開くのみならず、宇宙開発の将来をも切り拓くことが期待されている。

従来の科学衛星の規模を超えるミッションを実現しようとするれば、宇宙科学で第一級の成果を挙げられるのは当然として、それにくわえて、日本の宇宙開発をも牽引していくことが求められることになる。

SPICA は、以下の2つの側面から、日本の宇宙開発の未来を拓くことに貢献したいと考えている。

1. 新生 JAXA の新しい可能性を示す

2003 年 10 月に、新しい宇宙機関 JAXA は誕生した。しかし、統合後 1 年以上経過したが、統合ならではの新しい可能性を提示するには、未だいたっていない。

SPICA が実現すれば、これは確実に、新しい宇宙機関ならではの可能性を示すことになる。さらに、SPICA がもたらすであろう宇宙の数々の迫力あるイメージは、多くの人々に、日本の科学技術の水準の高さを再認識させ、日本が自分自身への信頼をとりもどす一助となり得る。

2. 宇宙科学と宇宙開発の発展

SPICA は大型の望遠鏡を搭載するミッションである。そのために、軽量鏡や高精度姿勢制御技術など「鍵」となる重要技術を開発する。したがって、SPICA の実現は、同様に大型の望遠鏡を搭載する、将来の天文ミッション (例えば JASMINE や TPF) への直接の道を拓くものになる。

さらに、大型望遠鏡の需要は、天体観測にとどまらず、地球観測にも適用できる。SPICA の実現により、静止軌道からの高精度常時日本観測など、今までにはない全く新しいミッションへの道を拓くことになる。

このように、SPICA の実現は SPICA 単体に終わらず、日本の宇宙科学、宇宙開発の未来への重要な第一歩となるものである。

5.10.3 新しい開発体制の提案

SPICA のような大きなミッションになると、その実行体制についても新しい仕組みが必要となる。SPICA を契機として、(旧) 宇宙研の衛星開発方式と、旧 NASDA の衛星開発方式の良いところをくみあわせ、新しい衛星開発のモデルを提案することを目指している。

日本の宇宙科学衛星は、今までは、すべての研究者がとりしきってきた。限られた人数の熱心な研究者がチームのコアとなり、観測機器のみならず、衛星全体の開発をとりしきってきた。関与する人数が限られることから、比較的小型の衛星の開発に対して、この方式は大変に効率よく働いてきた。

しかしながら、衛星の規模が大きくなってくると、このいわば「家内制手工業」的な方法では対応できなくなっている。最近の M-V で打ち上げられている科学衛星は、まさに、この方式の限界に達してきている感がある。

SPICA は、従来の M-V クラスの衛星の規模を、超えるものである。したがって、従来の「家内制手工業」的な開発方法では、対応できないことは明らかである。

(旧) 宇宙開発事業団は、従来から大きな衛星の開発を、システム・エンジニアリングの手法を屈指して開発してきた。その経験は、SPICA の開発にあたって、大変に貴重なものである。

しかしながら、(旧) 宇宙開発事業団方式にも、いくつかの問題があることも事実である。特に、開発効率の観点からは、疑問である点も少なくない。例えば、膨大な書類の量などは、その一例である。そのため、(旧) 宇宙開発事業団方式では、(旧) 宇宙研方式に比べ、衛星開発のコストは、かなり高騰してしまうということは事実であった。

そこで、SPICA を JAXA としてとりくむ最初の科学衛星と位置づけ、(旧) 宇宙開発事業団のシステム・エンジニアリング的な手法をとりいれつつ、(旧) 宇宙研方式の機動性の良さを併せ持った開発方式を、SPICA では模索して行きたい。この成果は、今後の科学衛星の開発に生かされるのはもちろんのこと、JAXA 全体の衛星開発の仕方も、改善する力としていきたい。

5.10.4 JAXA 統合効果としての SPICA

我々は、**SPICA を統合 JAXA の試金石**としたいと考えている。JAXA に統合することにより、新しい可能性が開けたかどうかを、我々は問われている。新しい可能性を開くためには、科学衛星、試験衛星、実用衛星の枠を越えた協力体制が身を結ぶことが必須である。

SPICA の研究開発では、すでに統合前から、旧 NASDA との研究協力を進めてきた。具体的には、熱系の共同開発研究を現在の技術総合研究本部と、さらに軽量望遠鏡の開発については現在の利用推進本部との協力を、それぞれ進めてきた。

統合に伴い、この協力関係をより広範囲に進めることが合意されている。その方針は、「総合技術研究本部の赤外線天文衛星 (SPICA) 計画への技術協力について」(平成 16 年 2 月 3 日、第 15-9 回 総合技術研究本部宇宙部会) の中で、以下のように述べられている。

1. 総合技術研究本部は、SPICA 計画に全面的に協力する。
2. 総合技術研究本部内に「SPICA 計画協力チーム (仮称)」を構成し、SPICA 計画に関する技術協力を行なう。

これらの、JAXA 内他本部との協力では、まず人的・技術的リソースの有効活用をはかり、今までにできないミッションを可能にすることを目指す。同時に、特にバス部については、他衛星との共同開発により大幅なコスト削減および開発リスクの軽減をはかることを狙っている。

5.11 年次計画

5.11.1 年次計画

年度	作業内容
-2003 年度	最大の critical 要素の基本的実証
2004 年度	ミッション・プロポーザル作成
2004-2006 年度	本提案 (フェーズ A) 研究終了時まで全開発要素の TRL5 以上達成を目指す
2006 年度	PM 移行審査
2007-2009 年度	PM 製作、試験
2010-2012 年度	FM 製作、試験
2012 年度後半	打上げ

5.11.2 他のミッションとの関係

サイエンスの面はもちろん、技術的にも SPICA は ASTRO-F と関係が深い。ASTRO-F は、現状では 2005 年度内の打ち上げを目指している。この場合、2007 年度前半には、ミッションの主要部分が終了する予定である。このことから、

1. ASTRO-F のサイエンスの成果を、SPICA の設計に反映させられること
2. ASTRO-F 搭載機器の軌道上での性能評価の結果を、SPICA の設計に反映させられること
3. SPICA/PM フェーズの開始を、ASTRO-F ミッションの大半が終了した後に始めること

を考慮して、上記の年次計画を設定した。

第6章 JASMINE計画

6.1 JASMINE計画の要旨

夜空にきらめく天の川はその雄大さと美しさ故に、古来より人々を魅了してきた。現在では、天の川は星が約 2000 億個も集まった集団 (天の川銀河または銀河系と呼ばれる) の中で星が数多く集まっている部分 (円盤 (ディスク) 部分と銀河中央にあり膨らみのあるバルジ部分) であることが分かっている。我々の太陽系は、そのディスクの中に存在している (図 6.2 参照)。しかし、意外にもこの天の川の本当の姿はまだ分かっていない。それは太陽系近傍の星までの距離や星の運動しか分かっていないからである。もし、天の川銀河内の遠くの星までの距離や星の運動が分かれば、天の川銀河の厳密な構造や特徴が解明できる。つまり、距離と天球上の位置 (地球からみて星がある方向) によって

当然、星の空間分布が分かる。さらに、星の運動情報が加味されると、暗くて見えない星やダークマター (暗黒物質) の存在量や分布まで評価することが可能となる。また、天の川の構造以外に星の形成史の情報を加味すると天の川銀河の形成史を物語る情報を得ることができる。さらに、様々なタイプの星までの距離が正確に分かると、星の本当の明るさや星が出しているエネルギーが正確に分かる。この情報は、星の形成や進化、変光星や惑星系などの天体の研究にとっても重要であり、本当の明るさを使って、遠くの銀河までの距離を推測することもできる。このように、星までの距離や運動によって、天の川銀河の構成天体自体の解明が進む。また、重力レンズ効果、それによる一般相対論の検証など基礎物理学の発展への寄与も期待されている。

さらに、ここで強調しておきたいのは、天の川銀河を知るということは、他の銀河や宇宙初期での銀河の形成・進化を知る上でも重要な情報を知ることの意味する。天の川銀河は、多くの銀河の中のたった 1 つのサンプルにすぎないが、天の川銀河もこの宇宙で生まれ進化し、その形跡を中に留めている。さらに、星やダークマター等、宇宙に普遍的に存在する天体も天の川銀河は多く含んでいる。従って、天の川銀河を解明することは、天の川銀河内にある様々な構成天体の解明や、天の川銀河の構造や形成史を知ることにも留まらず、宇宙初期での銀河の形成や銀

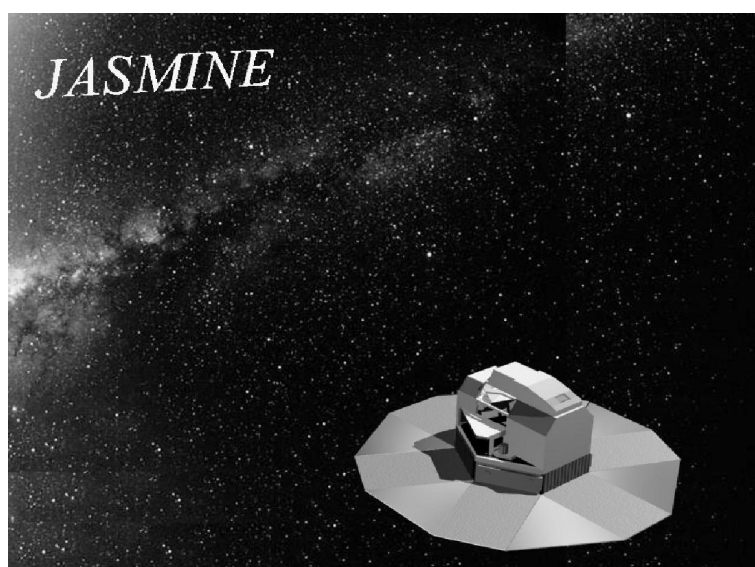


図 6.1: 天の川と JASMINE 衛星 (カラー 14 ページ)

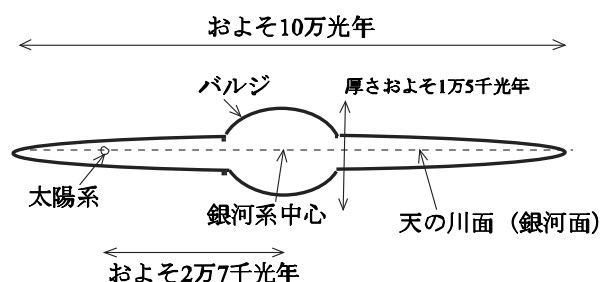


図 6.2: 天の川銀河の断面 (予想図)

河進化、そして宇宙そのものを解明することにもつながる。また、天の川銀河のみが、我々が近未来に詳細に観測し内部を詳細に知ることができる唯一の銀河でもある。

以上のように天の川銀河内の星の距離や運動を知ることが天文学にとっては貴重な基本情報となる。もちろん、星の色や視線速度、金属量などの星の基礎情報も必要な重要情報であるが、さらに星までの距離と視線に垂直方向の速度成分(横断速度)を高精度で求めることが必要なのである。

さて、星までの距離を正確に測定する方法は、三角測量である。つまり、地球が太陽の周りを公転し位置を変えることにより、星の天球上での位置がわずかにずれるが、そのずれ(年周視差)を測る。年周視差が小さいほど星は遠くにある。しかし、星は遠くにあるため、その視差はほんのわずかであり、正確に測定するのは大変困難である。例えば、地上では大気のゆらぎがあるため、精度には限度がある。そこで、1989年にヨーロッパ宇宙機関がヒッパルコス衛星という位置天文観測衛星を打ち上げ、いよいよスペースでの観測がスタートした。地上より飛躍的に精度が上がり、画期的であった。しかし、そのヒッパルコスでさえ、測定精度は1ミリ秒角であり、太陽系から300光年以内しか年周視差で正確に距離を測定できていない。天の川銀河の中心まで約2万7千光年もあるので、天の川銀河の全容解明にはほど遠い。そこで、JASMINE(ジャスミン)と呼ばれる赤外線位置天文観測衛星を計画し、ヒッパルコスより100倍の精度向上、つまり10万分の1秒角(地球からみ

項目	仕様
観測装置	
光学系のタイプ	3枚鏡系
主鏡の口径 D	1.5m
主鏡の有効面積 A	1.55m^2
ビーム混合鏡の数	2
ビーム混合鏡のサイズ	$1.5\text{m} \times 0.75\text{m}$
焦点距離 f	50.0m
アストロメトリ用視野面積	0.24°
検出器のサイズ	$4096 \times 2048\text{pixels}$
ピクセルのサイズ w	$15\mu\text{m}$
Pixel on Sky	61.9mas
λ/D のサイズ	2pixels
検出器の個数(アストロメトリ用)	98(7×14) 個
測光用バンド	z およびその他は未定
衛星仕様	
衛星の回転周期	4.96 時間
回転率	$72^\circ/5 \text{ /sec}$
歳差周期	36.9 日
星が1検出器を通過する時間(積分時間)	3.494sec
観測精度	
アストロメトリの精度	$10\mu\text{as}@z=14.0\text{mag}$
(位置測定)の限界等級	$z=17\text{mag}$
打ち上げロケット、軌道など	
打ち上げロケット	H-IIA(dual launch)、GX ロケットなど
軌道	太陽-地球の L2 ポイント 高高度略円軌道 地球ランデブー軌道
観測年数	5 年

表 6.1: JASMINE の仕様をまとめた早見表。JASMINE に関する詳細はホームページ¹をご覧ください。

¹<http://www.jasmine-galaxy.org/index-j.html>

て月面上の1円玉の直径程度に相当)の精度での天の川の星々の位置測定を目指している。さらに JASMINE では、天の川面上の遠くの星々を高精度で多く観測できるように、天の川面上に多く存在する塵による光の吸収を受けにくい近赤外線波長域での観測を行う。

もうすこし具体的に述べると次のような計画である。JASMINE 計画では、近赤外線 (z -band: $0.9\mu\text{m}$) によるアストロメトリ (位置天文) 観測を行い、銀河系内、特に銀河面、バルジなどのサーベイを行い、約1億個の星の位置、年周視差、固有運動 (固有運動とは、横断速度に対応するもので、天球上を星が1年あたりに動く角速度) を測定し、 z バンドで14等より明るい星に対しては、年周視差や位置の精度が10万分の1秒角 (固有運動は、10万分の1秒角/年) に達する。JASMINE は口径1.5m程度の主鏡及び副鏡等からなる赤外線望遠鏡を用いて観測する。さらに、 99.5° の角度方向離れた視野を同時に観測できるように、 49.75° で交差する2枚の平面鏡を設置する。このようにするのは、絶対的な年周視差を得るため等、グローバルなアストロメトリを構築可能とするためであり、位置天文観測衛星に特有の装置である。また、焦点面にはなるべく広視野を得るために、検出器を数多くならべる。衛星の打ち上げは今後約10年後を目標とし、検討開発を進めている。観測時間としては約5年間を想定している。打ち上げロケットは、未定だが、H-IIA ロケットの dual launch や GX ロケット規模でのフェアリングサイズを想定している。軌道は、太陽-地球がつくるラグランジュポイントのうち L2 を有力候補としているが、地球周回軌道も平行して検討している。衛星は、スピン回転し、連続的にスキャン観測する。この衛星のスピン軸は、銀極から 3.5° 傾け、スピン軸は銀極の周りを回転する。つまり、衛星はスピン回転しながら銀極の周りを歳差運動する。こうすることによって、JASMINE は銀河面方向を 360° 、そして銀緯方向は $\pm 3.5^\circ$ 内 (厳密には、 $\pm 4^\circ$ 内) のエリアを観測し、バルジとディスク面をサーベイする。

以上のように、JASMINE は、世界で唯一の近赤外線スペースアストロメトリ観測計画であり、銀河系の解明と天文学の様々な分野の基礎となる位置天文情報を高精度で得ることを目標とし、検討を進めているものである。

なお、表 6.1 に、JASMINE の現段階での仕様をまとめておいたので、ご参照されたい。

6.2 JASMINE の科学目的と意義

アストロメトリ (位置天文) 観測とは、天球上の星の位置、年周視差 (距離)、固有運動 (天球上における横断速度の角速度) を測定するものだが、この情報は、星の色や分光観測によって得られる星の視線速度や金属量といった情報を並んで非常に重要なものである。位置天文情報に視線速度の情報を加味すれば、星の6次元位相空間の情報が分かることになる。この情報を用

いれば、後述するように様々な天文学、宇宙物理学を展開することが可能となる。まさに、位置天文情報は銀河系内天体の物理情報、銀河系構造や銀河系の形成史、また銀河系の構成天体を知るための貴重な物理情報でもあり、位置天文観測は単なる星のカatalog作りではなく、天文学、宇宙物理学のための基本情報を提供するものであることを強調しておきたい。

高精度アストロメトリ観測で拓けるサイエンスについて具体的に考える。まず、構成天体の情報に関して言

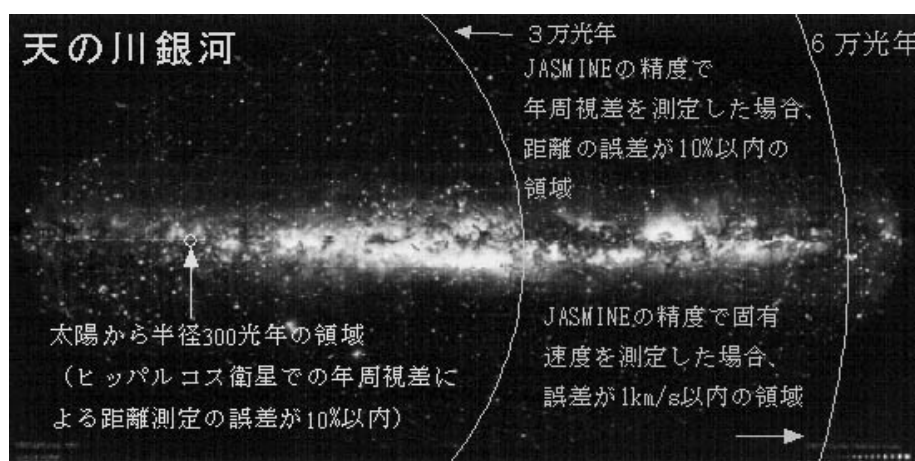


図 6.3: 高精度アストロメトリ観測で見渡せる天の川 (カラー 14 ページ)

えば、例えば年周視差によって、星までの距離が直接的に精度良く分かる。ただし、位置天文観測の現在の最高精度は、ヒッパルコス衛星によるもので (1000 分の 1 秒角)、まだ 100pc (約 300 光年) 以内の天体しか、年周視差は 10% 以内の誤差で求まっていない。これ以上の誤差があると、年周視差から距離に直すときにかなりの系統的な誤差が入り、距離は信頼できない。つまり、銀河系全体と比べれば、太陽系のごく近傍の距離や横断速度しか現在は精度良く求まっていないわけであり、精度良く調べられているタイプの星は限られている。そこで、銀河系を広く見渡すためには、ヒッパルコスより少なくともさらに 2 桁の精度向上となる、10 万分の 1 秒角の高精度で年周視差や固有運動を求める必要性がある (図 6.3 参照)。

そこまでの距離が精度良く求まると様々なタイプの星の物理情報を知ることが可能になり、恒星や星形成に対する知見が深まる。つまり、距離が分かれば星の本当の明るさやエネルギーが分かり、さらに星の色や金属量の情報が加味されれば、それらによって、恒星の進化や星形成の物理過程の解析が画期的に進展する。また、星の場所と運動が分かると、実は場所毎の星生成率や星の初期質量関数の推定までもが可能となる。まさに、場所毎の星形成史が分かってくる。さらに、新星や超新星までの正確な距離から真の放出エネルギーを知るとは、それらの物理状態の解明にとっても重要である。さらに、変光星など距離指標となる天体の本当の明るさが高精度で分かることは、距離指標の信頼性を高めることとなり、遠くの銀河までの距離、ひいては、遠くの天体の物理情報を知るための礎ともなる。また、連星の運動から連星系の物理情報も知ることが可能となり、恒星運動のふらつきからその恒星が惑星をもつかどうかの判断と惑星の質量情報等も知ることが可能となる。以上のように、銀河系内天体の位置天文情報により、恒星物理学、星形成、新星、超新星、連星、変光星、系外惑星等の研究に対して画期的な発展が期待できる。

次に、銀河系そのものを知る意義としては次のようなものが考えられる。JASMINE は近赤外線観測を行うメリットを活かし、銀河系のディスク面、バルジ、銀河中心付近のサーベイを中心に行う。前述したように、銀河の形成進化はまだ完全に解明されていない重要な問題である。特に銀河は多種多様であり、形だけでも渦巻き、楕円銀河等様々な形態が存在する。このような銀河自体やそれらの種類の違いがどのようにしてできたのかを解明することが大きな課題である。ところで、銀河には、ディスク (薄いディスクと厚いディスク)、バルジ、ハロー成分があることが分かっているが、実はその大きさ、形、構造、形成要因の詳細は未解決である。また、渦巻き銀河と楕円銀河の違いの一つは、ディスクとバルジ成分の明るさの相対的な違いである。従って、銀河の形態の違いを明らかにする上でも、形成過程の違いなどその特徴の違いの原因を明確にする必要がある。ところが、我々の天の川銀河はすべての成分をもっていると考えられ、さらに唯一、それらの 3 次元的位置情報および運動情報を精度良く測定できる対象でもある。天の川銀河が一般的だとすれば、天の川銀河の構造と形成史が分かれば他の銀河の形成進化を知る上でも重要な情報になる。そこで、銀河系の各成分、特に JASMINE では、様々な星が大量に存在し、まさに銀河系形成史の“化石”の宝庫と呼んでもよい (可視光だけでは観測できない) 銀河系のディスク、バルジの構造を明らかにすることによって銀河系の形成史を明らかにするとともに、銀河全般の形成進化の解明につなげることをサイエンスの大きな目的とする。

JASMINE によって拓けるより具体的な例としては以下のような項目が挙げられる (ただ、以下はいくつかの例であって、当然これだけでつづいているわけではない)。位置天文情報は、天文学、宇宙物理学にとって基本情報の一つであり、この情報を用いて、さらに様々な分野でのサイエンスの展開が可能であることを強調しておきたい。また、そのサイエンスの展開は、個々の研究者がまさに独創性を発揮すべき箇所でもあり、研究の推進を御願いたい)。

6.2.1 銀河系の力学構造

バルジ

バルジは、銀河の中心部に位置し、“ふくらみ”をもった構造である。ディスクよりは古い星の集まりであるが、金属量に関しては、多いものはディスクと同様の太陽程度であり、もっと少ないものまで幅広く分散している。単位質量あたりの角運動量は、ハローの星々と同様に小さい。このようにバルジの特徴は、ディスクともハローとも異なっている。また、いくつかの観測的証拠からバー構造になっていると考えられている (図

6.4 参照)。では、このようなバルジの形成史はどうなるのだろうか？ ディスクの不安定性で生じたものなのか？ ハローより以前に出来たのか、それとも後か？ はたまた、銀河の合体した後に生じたものなのか？ 矮小銀河が降ってきて、ディスクと同時に出来たのか？ それともバーの力学的進化として、ディスクのあとに出来たのか？ これらの問題は解明されていない。

前述したように、ディスクとバルジの関係は、銀河の形態分類に密着している。つまり、楕円銀河と渦巻き銀河との区分に関係している。従って、バルジ形成を明らかにすることは、銀河の形態の起源に解明につながる重要な課題である。この課題の解明のためには、バー構造になっているといわれているバルジの正確な形状、つまり、3 次元的な位置分布やバルジ内の天体の運動を知ることが必要であるが、これからはまさに JASMINE のような近赤外線による高精度なアストロメトリ観測によって提供されるものである。

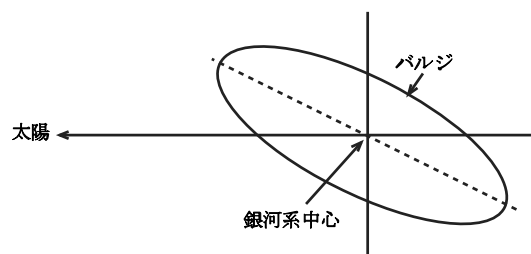


図 6.4: バルジのバー構造

自己重力多体系の (準) 平衡状態

バルジの力学構造を知ることが、(i) で述べたような銀河系や銀河の進化を知るためだけではなくてそれ自身が興味深いものである。つまり、自己重力多体系の (準) 定常状態の解明である。バルジは、楕円銀河にも形状などが似ており、バルジの力学構造の解明は、楕円銀河の力学構造の解明にもつながると期待される。さて、バルジはバーがあり、しかも figure rotation の存在が示唆されている。3 軸不等な形状で、なおかつ回転がある場合、力学構造としてはいかなる状態なのであろうか？ その重力ポテンシャルや個々の星々の軌道がどのようなものであり、どうして (準) 定常状態、もしくはそれに近い状態を維持しているのか、または非定常的に進化しているのか、非常に興味深い課題である。

薄いディスク (thin disk) と厚いディスク (thick disk)

我々の銀河系はハロー、バルジ構造以外にディスク構造をもっているが、ディスク構造も実際には、薄いディスクと厚いディスクと呼ばれる二つの構造に分けられると考えられているが、まだ不明な点が多い。そこで先ず、今後の高精度アストロメトリ観測によって、2つのディスクのサイズ等物理的特徴がより明確になるであろう。また、厚いディスクの形成原因や薄いディスクとの関係についても JASMINE によって、初めて太陽近傍よりはるかにはなれた場所での実際の星の空間分布や運動が正確に測られることによって、明らかになることが期待される。

銀河円盤の渦巻き (スパイラルアーム)

ディスク銀河にはスパイラルアーム構造が標準的に存在する。このスパイラルアームの物理状態、力学構造がどのようなものであるのか、すなわち物質波であるのか、それとも密度波であるか、といった事はいまだに十分には解決していない重要な問題のうちの一つである。ここで物質波というのは、アームを形成している物質がアームと共に運動し、アームの中の物質がいつでも同じアームに存在するという考え方である。この考え方は非常に簡単であるが、銀河中心程銀河回転の角速度が大きいためにダイナミカルタイム (力学的時間尺度) の数倍の時間スケールでアームが巻き込んでしまうという巻き込みの問題がある。この巻き込みの問題はディスク銀河にスパイラルアームが普遍的に存在する事と矛盾

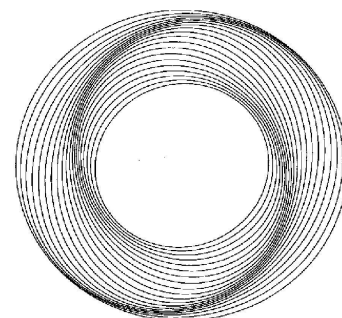


図 6.5: 密度波による渦巻き構造の発生

する。一方、密度波の考え方は密度の疎密波が、銀河面を伝わっていき、その密な部分がアームであるという考え方である (図 6.5 参照)。こちらは密度波の疎密の回転速度と銀河を形成する物質の回転速度は基本的に独立である。すなわち、銀河の物質は角半径ごとに異なる角速度をもって回っても、疎密波が各半径で等しい角速度をもって銀河物質の角速度とは独立に回っておれば巻き込みの問題を解決するなど、非常に有力な考え方である。いくつかの観測結果により、スパイラルアームは密度波であると思われるような間接的な証拠などもあり、密度波理論が広く信じられている。ところが一方でスパイラルアームが密度波である場合、銀河ディスク面上での星の運動はアームとの位置関係により正確に記述できるが、そういった個々の星の運動から直接的に密度波であることを検証されたことはまだない。これは密度波であるかどうかを検証するのに十分な精度をもったデータがまだないのが原因であるが、1990 年代にヒッパルコス衛星が観測をおこなって以来我々の銀河の個々の星の運動が正確にわかりつつあるし、今後さらに、JASMINE など、次世代の位置天文衛星があがるにつれて、さらに広範囲に銀河系の星の位置や運動がわかると期待できる。それゆえ、今後銀河のスパイラルアームが物質波であるのか密度波であるのかといったような事をはじめとしたディスクの力学構造を個々の星の運動から直接的に検証できる時代が来る。そうすれば、スパイラルアームの物理状態、力学構造の理解が飛躍的に進むことが期待できる。今後の位置天文観測の発展をにらんで、精度の良い観測データがそろった際には密度波かどうかを判別出来るようなスキームも開発されており [4]、あとは観測を待つだけである。

銀河円盤の warp

我々の銀河系を含め円盤銀河の中には、銀河円盤が平坦ではなく、外側へいくほど銀河面に対し垂直方向に歪んだ、warp と呼ばれる構造を示すものがあることは古くから知られている (図 6.6 参照)。この構造は約半数の円盤銀河で観測されている普遍的な構造であり、銀河進化を考える上で重要でありながら、その成因については未だ良く分かっていない。また、これは銀河円盤の最縁部の構造であることから、warp のダイナミクスにはダークハローの構造、特にその形状に関する情報が含まれていると期待される。JASMINE では、このような銀河円盤部の外側の領域の高精度な位置天文情報を提供できるため、JASMINE による warp の解明が期待される。

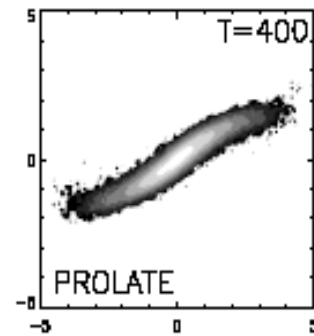


図 6.6: 銀河ディスクの warp。数値シミュレーションによる結果 [1]。

衛星銀河の衝突形跡

銀河の形成・進化のシナリオにおいては、銀河同士の衝突、合体が宇宙の初期では頻繁に起こり、銀河の進化に重大な影響を及ぼしてきていると考えられている。銀河系のような円盤銀河は楕円銀河と比べると、大規模な合体は起こっていないと思われるが、しかし、小規模な合体、つまり小さな衛星銀河が、我々の銀河系と衝突・合体を起こしていることは大いに考えられる。ところで、星の空間位置と運動情報により、衛星銀河に属している星を判定できる可能性がある。衛星銀河内の星の運動量や角運動量が初期条件を強く反映している可能性が数値シミュレーション等により示されているからである。したがって、高精度位置天文観測により、このような衛星銀河の衝突の形跡を直接とらえることが期待される。JASMINE は、ディスクやバルジにおける衛星銀河衝突の痕跡を (もし、それが存在しているとすれば) 探ることが可能であろう。

6.2.2 星形成

星の初期質量関数

銀河は、多数の星を主要天体として含む。そして、銀河の観測的性質は構成要素としてどういう質量の星がどれだけあるかに強く依存する。そればかりか、星は紫外線や可視光赤外線などの電磁波の放射源であるばか

りでなく、進化の最終段階における超新星爆発や質量放出などにより、銀河内のガスの進化に対して強く影響するが、その効果は星の質量によって大きく異なる。そのため、星の初期質量関数は、星形成率と並んで、銀河の形成・進化を研究する上で非常に重要なのである。

ところが、星の初期質量関数の研究はかなり不充分であると言わざるを得ない。観測的には、我々の銀河系の中での平均的な初期質量関数はある程度わかってきているが、星形成領域や環境効果による違いがあるかどうかについては依然として確たる答えは得られていない。また、理論的に初期質量関数を説明する試みは過去数十年間にわたって行われてきたにもかかわらず、いまだに説得力をもつ理論モデルは得られていない。そのため、銀河形成過程や初期進化を研究する場合や爆発的星形成が起きている他の銀河を研究する場合など、現在の我々の銀河系と大きく異なる環境下での星形成を知る必要がある場合に、どのような初期質量関数を用いるべきかははっきりしない。また、確固とした理論モデルの構築のためにも、星形成領域での違いの有無は重要な情報である。

さて、JASMINE によって、我々の銀河系の円盤部の星の質量関数は厳密に求められる。個々の星の距離がはっきり測定されるために、星団の場合の帰属問題などの問題がなくなる。また、サーベイされる星の個数が非常に大きいために、統計誤差の問題がほとんどなくなる。さらに、星形成は大半が巨大分子雲において集団的に起きていると考えられていることから、フィールド星も形成時には個々の星団として形成されたものが多いと思われる。JASMINE は、距離のみならず固有運動のデータももたらすために、星の位相空間での分布がわかる。星団が破壊されてフィールド星になっても位相空間では星団の名残をとどめている可能性が強い。このことを利用すると、フィールド星を用いても、星形成領域による初期質量の違いが存在するかどうかについての研究が可能になるだろう。これが可能になるとサンプル数が多いことや、銀河の星の多数を占める円盤部のフィールド星についての星形成時の環境効果が調べられることになり、その意義は大きい。

以上のように、非常に重要であるにもかかわらず、現在でも完全な理解にいたっていない星の初期質量関数の問題に対して、JASMINE のデータはブレイクスルーをもたらす可能性が十分にあると考えられる。

薄いディスク最外縁の構造

薄いディスク最外縁の構造について、JASMINE では他にないユニークな研究が可能になる。このような領域は「銀河形成期の星生成」を探る重要な対象であるだけでなく、星生成研究へのフィードバックをかけられるような、シンプルな環境を擁した星生成の“実験場”としても際立っている。例えば、thin disk の最外縁は、そこでの物理状況から、矮小銀河 (dIrr, blue compact dwarf galaxies など) や QSO の吸収線系 (DLA: Damped Lyman- α systems) などと同様の星生成環境にあると考えられる。これは、銀河系の歴史で言うと、「thick disk 形成期」の環境に近いと考えられる。そこで、JASMINE によって、thin disk 最外縁の星生成領域の同定が行われ、その研究がすすめられれば、“銀河形成期”の星生成の物理についての理解が大きくすすむと考えられる。JASMINE の結果だけでも、距離と固有運動から、thin disk 最外縁の星生成領域の起源についての知見が得られる。さらに、可視・赤外・電波によるフォローアップから、このような領域における基本的な星生成プロセスが明らかになるであろう。それはすなわち、DLA などに代表される高赤方偏移の QSO 吸収線系における星生成の詳細を「間近に」みることに等価といえる。また、このような星生成領域の観測を通じて、銀河半径に対する金属量の減少のカーブ (metallicity gradient) を $R_G \sim 25$ kpc 程度まで描くことができるようになれば、「銀河系全体におけるグローバルな星生成」のモデルを検証することができるようになり、われわれの銀河系の形成についての大きな知見が得られると考えられる。

6.2.3 銀河系形成史

銀河は、宇宙に多数存在する宇宙の大規模な構成要素であるが、その構造や起源に関しては、未知なることが多い。これは、銀河はその質量、明るさ、色、形態のどれをとってみても多種多様であり、その形成と進化には、ダークマターの重力収縮、ガスの熱的進化、星形成、銀河の衝突など様々な物理過程が複雑に絡んでいるからである。最近、深宇宙探査が進み、過去の多くの銀河の進化を直接観測できる時代となりつつある。

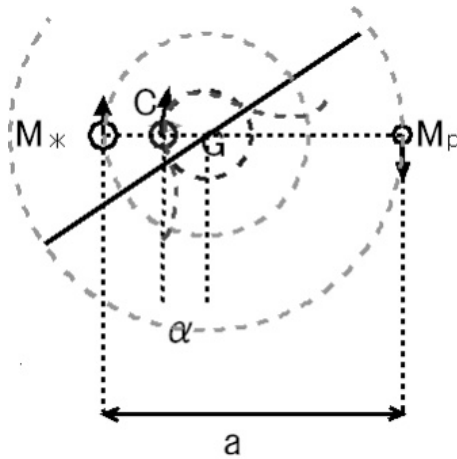


図 6.7: 惑星の存在による、恒星と惑星の光中心のふらつき運動。 M_p , M_* は、各々惑星と恒星。C はそれらの光中心。恒星と惑星の重心 G は、(年周運動の効果を除けば) 直線運動するが、光中心はその直線運動の回りをふらついている。その角度 α を測定できれば、惑星の存在や質量などが評価できる。

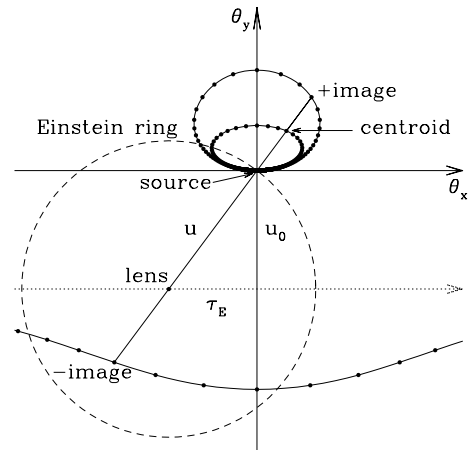


図 6.8: 位置天文学的重力レンズ効果。星の光中心がレンズにより楕円運動する [2]。

このように多数の銀河を観測し、その統計的特徴を解析することはもちろん重要だが、形成進化過程に関わる詳細な物理過程は直接的には窺い知れない。ところが、我々は天の川銀河（銀河系）という特徴的な渦巻き銀河の中に住んでいる。我々の銀河が一番詳細に研究できる銀河である。確かに一つの例に過ぎないが、我々の銀河が他の（渦巻き）銀河と比べてよほど特異ではないかぎり、銀河全体の形成・進化の解明にとって、この上もない研究対象であることは間違いない。まさに、銀河の形成・進化の化石を詳細に探ることが可能であり、すばる望遠鏡やハッブル望遠鏡などによる深宇宙探査と相補的なアプローチとして、銀河系の6次元位相空間分布情報を知り銀河系を解明することは意義深いものである。例えば、前述したように場所毎の星形成史と星の軌道や力学構造の情報を組み合わせることにより、銀河系自体の形成史が明らかになっていく。このような、銀河系形成史の“化石”を探ることがアストロメトリにより可能となる。

6.2.4 恒星物理学

銀河系内には数多くの様々な種類の星があり、それらの星の物理情報を知ることにより、恒星の進化に対する知見が深まる。例えば、距離が分かれば星の本当の明るさやエネルギーが分かる。様々なタイプの星の明るさを知ることによって、さらに星の色や金属量の情報が加味されれば、それらによって、場所毎の HR 図も正確に分かり、恒星の進化論が画期的に進展する。さらに、新星や超新星までの正確な距離から真の放出エネルギーを知るとは、それらの物理状態の解明にとっても重要である。さらに、変光星など距離指標となる天体の本当の明るさが高精度で分かることは、変光星自体の解析以外にも距離指標の信頼性を高めることとなり、遠くの銀河までの距離、ひいては、遠くの天体の物理情報を知るための礎ともなる。また、連星の運動から連星系の物理情報も知ることが可能となる。

6.2.5 惑星系形成

太陽系外惑星を探索する方法の一つとして、アストロメトリ（位置天文観測）による方法が挙げられる。すなわち、惑星による恒星運動のふらつきを測定する方法である。恒星と惑星が観測で分離できない場合は、恒星と惑星の光学中心のふらつきを実際は測定することになる（図 6.7 参照）。惑星がない場合は、天球上での恒星の運動は、一般には固有運動による直線運動と地球の年周運動に伴う楕円運動の組み合わせになるが、惑星が

ある場合は、惑星運動の効果により通常の組み合わせ運動からのずれが起こる。アストロメトリでは、そのずれが測定できるのである。恒星運動のふらつき自体は、恒星の視線速度からも測定できる (ドップラー法) が、ドップラー法と比べてアストロメトリによる方法では、1) 惑星軌道の inclination (軌道面と視線速度とのなす角度) に結果は依存せず、惑星の質量決定にこの不定性が入らない、2) 恒星の振動、回転の影響はない、などの長所があり、ドップラー法を補うものであり、有用な方法である。JASMINE の達成精度だと、仮に、ある恒星の質量を太陽質量とし、この恒星の周りに太陽系と同様な位置に木星と同じ質量の惑星があったとすると、この惑星系が我々から 100pc の距離にあっても 20% の誤差で恒星のずれを測定可能である。おそらく、サーベイ型観測で大量の星を観測する GAIA や JASMINE によって、多数の惑星系が検出できるであろう。

さらに、重力レンズ効果による、恒星の位置のずれ運動 (位置天文的重力レンズ効果) の測定によっても惑星系を検出することが可能である。この方法によれば、地球質量程度の惑星でも、それが存在することにより、惑星が存在しない場合の (重力レンズ効果による) 楕円運動に対して大きな歪みを生じさせる場合があり、JASMINE、GAIA の精度で十分検出可能である。

以上のように、今後のサーベイ型高精度アストロメトリ観測は、多くの惑星系を検出し、惑星系解明に貢献することが期待できる。

6.2.6 基礎物理

重力レンズ

時として、量的変化は質的变化をもたらす。実際、数マイクロ秒の精度に到達すると、マイクロ重力レンズはマクロレンズに変貌する。例えば、我々の銀河内の星もしくは MACHO が、LMC や銀河中心といった 10 kpc オーダーの距離にある光源に対して、レンズとして働く場合を考えてみる。重力レンズの典型的なスケールはアインシュタイン・リング半径で、角度にすると、およそミリ秒である。これは通常の光学望遠鏡での角度分解能の限界を大きく下回る。よって、明るさの変化だけが観測可能なので、いわゆる「光度曲線」だけでレンズに関する情報を決める必要があった。MACHO の場合、「相対速度 (の視線に垂直な成分)」、「レンズ質量」、「レンズまでの距離」、「視線に対する最近接距離」の 4 つのパラメータに対して、光度曲線は「増光率」と「増光時間」の 2 個の情報しか持ち合わせない。よって、パラメータ空間に縮退があった。これまでは、銀河の質量分布モデルを用いて、確率的に最も確からしい MACHO 質量の「推定」にとどまっていた。アストロメトリの観測量である光中心位置は、重力レンズ効果により楕円運動する (図 6.8 参照)。この楕円 (2 つのパラメータ) がサブミリ秒の大きさなので、高精度アストロメトリ衛星により観測可能である。その結果、レンズパラメータ間の縮退が解ける。つまり、MACHO 等のレンズパラメータ、特に、質量が確定できる。ケプラー運動による楕円運動は周期運動であるが、重力レンズによる楕円運動は全く違う。よって、多数回の観測をすれば、これらは区別出来る。なお、SIM、GAIA は可視光であるが、近赤外の JASMINE の場合、銀河中心方向のレンズに対して圧倒的に有利である。

一般相対論の検証

重力レンズ効果はもともと銀河の星によるものだけではない。我々太陽系の重力も大変重要である。太陽による重力レンズ (時間遅れ) は、およそ 1.7 秒の曲がり角を作る。現在では、VLBI 観測 (約 500 マイクロ秒の精度) により、アインシュタインの一般相対性理論が 0.01% の精度で確かめられている。数マイクロ秒では、0.0001% の精度で検証可能である。アインシュタイン理論の有力な対抗馬であるスカラー・テンソル理論は、多くの素粒子理論家によって精力的に研究されている「超弦理論」から、その低エネルギー極限での自然な帰結として示唆されている。そして、重力レンズ効果の精密測定によって、このスカラー・テンソル理論への強い制限を与える事ができるので、素粒子物理学へのインパクトも大きい。場合によっては、一般相対性理論からのずれという大発見の可能性も秘めている。この場合、アストロメトリという天文学観測によって、新しい物理学の扉を開く事になる。事実、低エネルギー極限とはいえ、スカラー・テンソル理論を地上の高エネルギー

加速器で検証するのは、特殊なシナリオ (高次元理論等) を持ち込まない限り、現時点のエネルギーレベルではとても期待できない。こうして、重力理論の検証に関して、JASMINE のような高精度アストロメトリは高い潜在能力を備えている。

基準座標系

アストロメトリの目的の1つに (むしろ、歴史的にはこれが最大の目的) 基準座標系の構築がある。GAIA もそうであるが、JASMINE の場合も、QSO の暗さでも高精度で位置測定が可能となる。そうなれば、自らの観測データのみで、絶対的な基準座標系を高精度で構築することが可能であろう。JASMINE は近赤外線での測定なので、今後の近赤外線での天体観測に対して、高精度の基準座標系を提供できることにもなる。また、ICRS の定義をもっと高精度で決めることも可能となる。

6.3 他の計画の中での位置付け

6.3.1 海外計画と VERA の紹介

前章で述べたように、今後はさらなる銀河系の解明、また宇宙距離指標の精度アップや恒星物理学などの画期的な発展を目標とし、ヒッパルコス衛星より高精度な位置測定が重要かつ必要であるが、そのような位置天文観測を目指した計画が世界ではいくつか進行中である。先ず、欧米のスペースアストロメトリ計画をまとめたものを表 6.2 に示した (ヒッパルコス衛星と JASMINE も比較のため含む)。各計画の詳細は、それぞれのホームページ^{2 3 4 5 6} を参照されたい。

なお、他の高精度位置天文観測計画としては、地上での電波観測ではあるが、国立天文台を中心として進められた VERA 計画が観測のフェーズに入ってきている。相対 VLBI であり、約 1000 個のメーザー源に対して、高精度での位置天文観測精度を目指している。この観測により、世界ではじめての 10 万分の 1 秒角の精度での測定が可能で、銀河系中心までの距離等の銀河系の基本定数が高精度で求められると期待されている。電波での観測であるため、GAIA や SIM のような可視光とは違って、ダストによる減光を受けずに、銀河系ディスク面やバルジを高精度で観測可能である。ただ、観測できるのがメーザー源の約 1000 個に限られ、星の周りのガスの観測であり、星自体を観測しているのではない。そこで、VERA に引き続き JASMINE により、可視光よりはダストによる減光の影響を受けにくい赤外線でバルジやディスクにある星自体を約 1 億個観測し、VERA で得られるであろう成果をさらに発展させることが期待されている。このように、日本では、バルジやディスクの解明という点において、VERA から JASMINE へという流れで独特で重要なミッションの展開が考えられる。

さて、欧米の位置天文観測衛星計画は可視光での観測であるが、JASMINE は近赤外線による観測を考えている。その理由は、近赤外線の方が、ダストによる減光の効果を受けにくいため、天の川面上の多数の星々の位置天文情報を高精度に測定できるからである。次小節では、天の川面付近の観測に対して、どれだけ JASMINE が可視光での観測と比べて有利かを説明する。

6.3.2 銀河系モデルを用いた赤外線観測の評価

²HIPPARCOS : <http://www.rssd.esa.int/hipparcos/>

³GAIA : <http://astro.estec.esa.nl/SA-general/Projects/GAIA/>

⁴SIM : http://planetquest.jpl.nasa.gov/SIM/sim_index.html

⁵JASMINE : <http://www.jasmine-galaxy.org/index-j.html>

⁶OBSS : <http://ad.usno.navy.mil/OBSS/>

計画	機関	装置	打ち上げ予定	星の観測数	限界等級	精度
Hipparcos	ESA	望遠鏡	1989	12 万	12	1mas@V=10
GAIA	ESA	望遠鏡	~2012	10 億 (全天)	20	10~20 μ as@V=15
OBSS	米国海軍天文台	望遠鏡	~2015	10 億 (ほぼ全天)	20	10 μ as@V=14
SIM	NASA	干渉計	~2009	1 万	20	4 μ as@V=20
JASMINE	日本	望遠鏡	~2015	1 億 (天の川面)	17	10 μ as@z=14

表 6.2: 欧米のスペースアストロメトリ計画との比較表

JASMINE による赤外線観測の意義は、バルジ、銀河面において十分な個数の星を観測することによって初めて評価されるものである。十分な個数とは、(1) GAIA と同じ位置精度で観測可能な個数と比較して、(2) サイエンスを展開する上で、という 2 つの意味あいを持つ。そこで、年周視差の誤差が 10% 以内で観測される星が、実際どのくらい観測可能であるかを銀河系モデルから評価してみた。前述したように、年周視差の誤差が 10%

を超えてくると、距離を求める際にいくつかの系統誤差が入り、距離を正しく求められなくなる。

さて、銀河系モデルとしては Cohen のモデル [3] を採用した。また、吸収の見積りには、COBE の DIRBE による最新データを取り入れ、より現実に近いモデルとなっている。このモデルでは星のスペクトルタイプとして 87 種類を考慮し、スペクトルタイプごとに分類された星の個数を目的のサイエンスに応じて求めることができる。Cohen のモデルでは $B, V, H, I, J, 12\mu m, 25\mu m$ の 7 種のバンドで星の数を計算することができ、さらに、我々に必要な z バンドについては、Cohen の B, V, H, I, J バンドのデータから各スペクトルタイプに対して評価した z バンドの星の明るさを用いて計算を行った。

z バンドで年周視差の誤差が 10% 以内で観測される星の個数を各距離で評価し、それらを、GAIA での V バンドで年周視差の誤差が 10% 以内で観測される星の個数と比較した。図 6.9 は、それらの 2 つのバンドにおける 1 平方度当たりの星の個数を、距離の関数として銀河中心方向について示したものである。図 6.9 より明らかなように、我々からの距離が遠くなればなるほど、近赤外での個数が可視光に比べて卓越することがわかる。また、JASMINE によって観測されるバルジ領域が図 6.10 に示されている。この領域 (銀緯方向の幅は $|b| \leq 4^\circ$ 、銀経方向の幅は約 30°) 全体で、年周視差の誤差が 10% 以内で観測される星の総数はおよそ 75 万個である。例えば、バルジの力学構造を精度良く構築するためには、大まかに言って 100 万個程度の星の数が必要と思われるが、近赤外線 (z -band) はその条件をクリアしそうである。しかし、GAIA では、バルジの星は 10 万分の 1 秒角の高精度では、同じ領域内でおおよそ 400 個程度 (但し、塵が少ないバーデの窓を除く。この狭い領域内では GAIA は 8000 個程度観測可能) しか必要な高精度で見えない。この点から言っても、近赤外線での測定を行う意義ははっきりと理解していただけたと思う。つまり、 $z \sim 14$ 等で、10 万分の 1 秒角の精度を出すように設定しておけば、GAIA と比較して個数が多いという点のみならず、バルジや遠方のディスク面の力学構造の解析 (に必要な星の数と精度) の点からいっても十分であることが分かる。

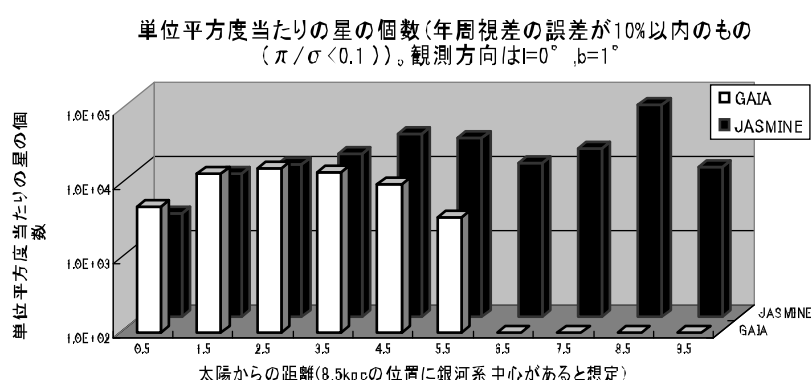


図 6.9: 銀河中心方向で、年周視差が高精度で観測されると期待される星の個数を距離の関数で示したもの。

また、近赤外線では、可視光に比べて星が多く見えるのは、サイエンスを展開する上では非常にメリットであるが、位置測定においてあまり星の密度が多すぎると、暗い星がノイズの原因となり、位置精度に悪影響を及ぼすことになる。そこで、コンフュージョンにより位置精度に影響が出てくる等級、つまりコンフュージョン限界で決まる限界等級を評価してみた。その結果、 z バンドのコンフュージョン限界による限界等級は 19 等級であり、10 万分の 1 秒角程度の精度で測定可能な 14 等級を大きく上回り、さらに位置測定が可能な等級である 17 等級をも上回っており、コンフュージョンは問題にならないと予想される。

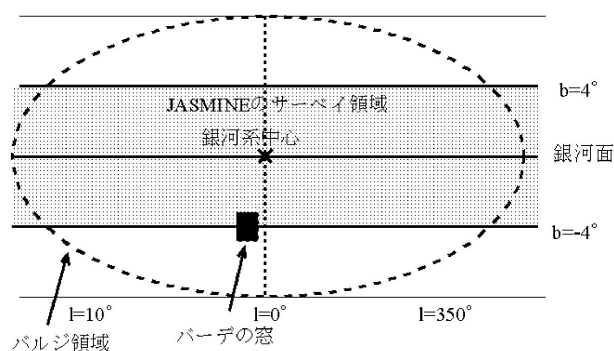


図 6.10: JASMINE によるバルジサーベイ領域。

6.4 観測手法

JASMINE はダストの影響を受けにくい z -band の波長 ($0.9\mu\text{m}$) を用いて銀河のバルジやディスクの星の位置、年周視差、固有運動といったアストロメトリパラメータを高精度で求める事を目標にしている。以下に、パラメータを求める手順を示す。

検出器上のみかけの星像位置決定 まず、銀河面を連続的にスキャンして観測する。サーベイする際、衛星を自転させるが、その自転の速度にあわせて検出器は TDI(Time Delayed Integration) モードを作動させる。すなわち、衛星の自転により星像が検出器上を通過していく事になるが、その通過する星像の速度にあわせて CCD の電荷を転送していく事により連続的にフォトン进行を積分する。この手法を用いないとスピンに伴って星の像が長く伸びてしまい、それを回避しようと短時間の露出時間で何度もデータを取り出そうとすると、読み出し毎のフォトン数が減少し、読み出しに伴うノイズの影響が大きくなりデータが悪化する。従って連続スキャンをするためには TDI が必要不可欠である。焦点面には $2k \times 4k$ のピクセル数をもつ検出器を 14×7 個ならべてあり、サーベイ方向には検出器が 7 個並んでいる (図 6.11 左)。

従って 1 回の視野通過につき 7 個の検出器で連続的に観測する事になる。光学系は星の PSF(Point Spread Function) が半径でおよそ 2 ピクセルになるよう定められているので、サーベイ方向に 5 ピクセル (サーベイ方向に垂直方向は PSF が 2 倍伸びているので 9 ピクセル) 取り出し離散化された観測データ (図 6.11 右) をもとに photon 重心を求める。さらにそれを星像中心実験の章 (§5.3.7) で説明する解析によって重心を補正して真の星像中心を決定する。

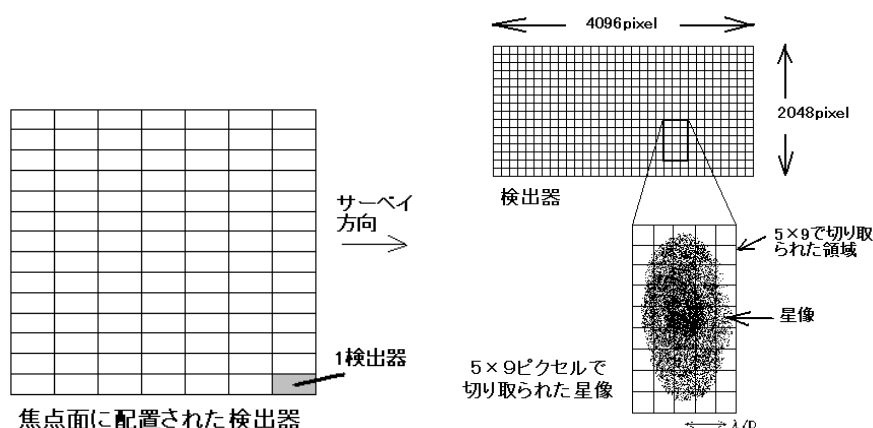


図 6.11: 焦点面での検出器の配置 (左) と検出器上での星像の切り出し (右)

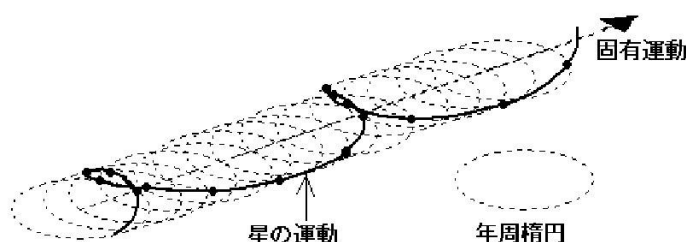


図 6.12: 星の運動

サーベイ領域 観測する大円はおよそ、銀河面近くであるが、正確には銀河面より 3.5° 傾けた大円上をサーベイする (図 6.20 上)。

また銀極より傾けた回転軸は銀極周りを歳差運動させることで様々な大円上を観測し、銀河面上 $360^\circ \times 7^\circ$ をサーベイする。(図 6.20 下を参照、詳細は姿勢の章で述べる)。以上のサーベイ観測を続ける事で、銀河面上の星々に対して1つの星ごとに望遠鏡視野を連続的に8回程度通過するが、そのまとまった通過が1年あたり10回程度ある。各星々は図 6.12 で示すように天球面上を固有運動で移動しながら年周運動をしているので最終的に5年間のデータをもとに、観測装置や衛星姿勢の変動モデルも加味して統計解析を行い、星の位置に加えて、固有運動、年周視差といった位置天文情報に関して10万分1秒の精度を達成する。

星の相対位置と衛星の姿勢の決定 以上が観測手法の流れであるが、銀河面を連続的にスキャンして観測する際、同じ大円上の大角度離れた2つの視野を同時に観測するところが位置天文観測特有の観測手法である。2方向同時観測を必要とする理由は以下の通りである。星の位置をいまだかつて無い高精度で求めようとする際、衛星の向き (望遠鏡の向き) も同等の高精度で決めなくてはならない。従来、衛星の向きを決める精度良い方法は、恒星カタログを用いるものであるが、このミッションはそのカタログの精度向上を目指すものであり、既存の精度が悪いカタログを用いることはできない。従って、この星の位置を今までに無い高精度で求める際には互いの星位置関係を利用して自己完結的に星の位置を求める必要がある。こういった高精度のアストロメトリを達成するためには上でも述べたように大角度離れた2つの視野を同時観測し、その2つの視野を含む大円上をサーベイする事が非常に重要である。更に、具体例を挙げて同時観測が必要となる仕組みを簡単に述べる。まず仮に1つの視野しか見ない時にどのような問題が発生するのかを考える。

今、一台の望遠鏡をある大円上でサーベイするように回転させ、その大円上の星を観測する事を考える。ここで、次の2通りの状況を考える。

1. 一様回転している衛星から星を観測するが、その星の分布は一様からサイン関数的にずれて、一周期の疎密があるとする。この時1周するごとに1周期分の星の疎密を観測する。
2. 衛星の回転が一様は回転せず、サイン関数的にずれており、星が一様に存在しているが回転ムラのため1周期分の疎密を観測する事となる。

両者の区別はまったくつかなくなる (図 6.13 左を参照せよ)。すなわち両者の状態の縮退が発生する。この時 99.5° 異なる方向を同時観測できるもう一つの望遠鏡があり、その両者のなす角 (ベーシックアングル) が不変ならば状況1の時は方角により実

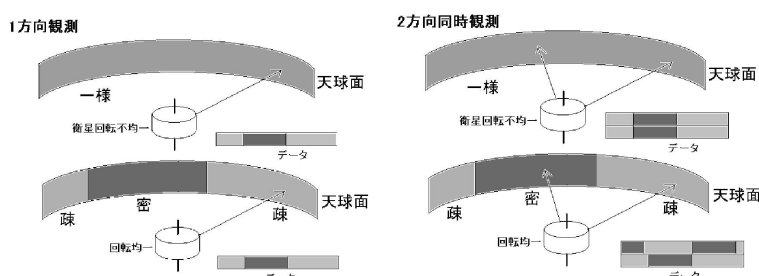


図 6.13: 1方向しか観測しない場合 (左) と2方向同時観測する場合 (右)

際に星の疎密が現れているので、一方の望遠鏡が疎を観測する時ももう一方は密を観測するというように疎密の位相はずれる。一方、状況2の場合、衛星回転により疎密が出来ているので、観測される疎密は2つの望遠鏡で一致する(図6.13 右を参照せよ)。このように2台の望遠鏡を用意することで両者の縮退が解ける。以上より、衛星の姿勢と同時に星の位置を決定する際には2台の望遠鏡が必要である。ただ、JASMINE は次の望遠鏡の箇所で述べるように、実際は2台の望遠鏡を用いることはしない。主鏡の前にビーム混合鏡とよばれるお互いに交差する2つの平面鏡を置き、大角度離れた2つの視野からの光跡を、1つの望遠鏡に入れる仕様を採用する。

6.5 観測装置

6.5.1 望遠鏡(光学系)

アストロメトリー観測では星の位置を正確に決定することが最重要課題である。従って、観測を行う光学系としては、位置決定精度を上げるために星像を数ピクセルにわたり分布させる必要があるので非常に長焦点であることが要求される。また、できるだけ多くの領域を調べることが必要であるので広視野であることが望まれる。アストロメトリー観測用光学系はこの相反する条件を満たす事が要求される。さらに、スペースでのアストロメトリー観測を行うためには光学系をロケットのフェアリングに収まるように打ち上げ可能なサイズまでコンパクトに抑える必要がある。以上の条件を満たす光学系を設計する事は容易ではない。

光学系として現在最も一般的に用いられるのは2枚鏡である。2枚鏡ではリッチー・クレチエン系が非常に良く調べられている。リッチー・クレチエン系は主鏡、副鏡ともに双曲面をもつ2枚鏡の系である。この光学系はシンプルでありながら、球面収差、コマ収差が同時に取り除かれるので、「すばる」をはじめとしてHSTなど多くの光学系に採用されており、光学系の主流となっている。

もちろんアストロメトリー用の光学系としても有力な候補のひとつである。しかし、リッチー・クレチエン系は像面湾曲が強くあらわれる事が知られている。特にここで考えているような長焦点では非常に強い像面湾曲が見られる。像面湾曲によく用いられる解決方法として補正レンズ系を入れる事が考えられるが、JASMINE 計画では非常に広視野を必要としているためこの像面湾曲を補正するのは相当困難である。また補正光学系のために発生する色収差を取り除く事も、幅広い波長を用いる場合には困難をとまう。バックフォーカスを伸ばし、像面湾曲を緩和させるという方法があり、製作の容易さなどを考慮すると有力な可能性の一つではあるが、口径が大きい光学系ではPSFが小さいので精度が要求されやはり困難である。ここでは像面湾曲を含めた収差を積極的かつ十分に補正可能な光学系を考えたい。

以上の観点から、3枚鏡の光学系を考える。光学系はリッチー・クレチエン系に比べて多少複雑になるが3枚光学系は2枚鏡に比べて自由度が増えるので球面収差、コマ収差に加えて像面湾曲も同時に補正できる可能性がある。さらに、補正レンズ系を用いずに補正が出来れば、色収差からも完全に解放される。そこで、我々は3枚鏡を基本にした光学設計を考えることにした。

3枚鏡の光学系として、Korschは1977年、モデルを一つ提案した。この光学系は比較的広視野で長焦点の光学系で、JASMINE の要求を満たす光学系の候補となり得る。実際、SNAP とよばれる超新星探査を目的とするNASAの衛星でもこれと同じ型のKorsch系の採用が予定されている。このKorsch系は2枚目と3枚目の鏡の間で一度焦点を結び、その後3枚目の鏡でもう一度焦点を結ぶ構造になっている。2枚目と3枚目の鏡の間で一度結ぶ焦点付近に光束を別の軸に出すための平面鏡が存在するために、このKorsch系の焦点面の中央で、像の欠落が存在する。Korsch系は広視野であるが、像面歪曲などの収差の小さい中心部が使えず、星の位置決定が重要なアストロメトリー観測には特に不利である。以上で述べたKorsch系の長所、短所を踏まえて、我々は長焦点、広視野でかつ視野中心の欠落のない光学系の検討をおこなった。

観測を行うための光学系の仕様要求を次に述べる。JASMINE として考えている光学系は主鏡の口径1.5mである。焦点距離に関しては検出器上で星像サイズが2ピクセルにわたるよう設計する必要がある。具体的には、Point Spread Function(PSF)の典型的なサイズである λ/D で2ピクセルになるよう設計する。そのため、焦点距離は非常に長く、50.0mとなる。焦点面に関しては、アストロメトリー観測用として、1画素15 μ mで

4k×2k の検出器を 98 (7×14) 個並べる。従って、焦点面サイズとしては 43.0cm×43.0cm となり実視野 $0.49^\circ \times 0.49^\circ$ となる。視直径 0.75° の範囲において回折限界で決まる良像が得られるようにする。焦点面は検出器を多数並べる事を考えているので、できるだけフラットが望ましいが、より良い性能をよりコンパクトにする可能性を探るため若干の曲率を許すことにする。また、アストロメトリー観測では星の位置を正確に決めることが重要であるので、像面歪曲はできるだけ小さいのが望ましい。以上でのべた仕様要求を満たす光学系の可能性を検討した。その検討した光学系の概観を図 6.14 に示す。

他の一般的な光学系と大きく異なる点は主鏡前方の第 1 副鏡あたりに二枚の交差する平面鏡があるが、これはビーム混合鏡とよばれるもので 2 つのフィールドを同一焦点面に取り込むものである。このビーム混合鏡は JASMINE 光学系特有のものであり、アストロメトリー観測に重要な役割を果たす。JASMINE 光学系の詳細な説明に移る前にまず、6.4 章でも少し述べたが、ビーム混合鏡について説明しておく。高精度グローバルアストロメトリーを実現するため大角度離れた 2 つの視野を同時観測する必要がある。この際 JASMINE では 2 台の望遠鏡を大角度離して設置するのではなく、1 台の望遠鏡の前に 2 枚の平面鏡を一定の角度を付けて光学系上半分と下半分に設置することで大角度離れた 2 つの視野を得る。以上のように 1 台の望遠鏡を用いてビーム混合鏡により 2 つの視野を観測する設計をしている理由は光学系が 1 つですみ、ミッション部が簡素化できる点や、焦点面を 2 つの視野が共有できる事で検出器個数が半減できる点に加え、2 つの視野の相対角を高精度に管理するにあたりビーム混合鏡だけに注意を払えば良いという事が上げられる。なお、同一検出器上に得られた 2 つの視野からの星はあとからのデータ解析で分離が可能である。

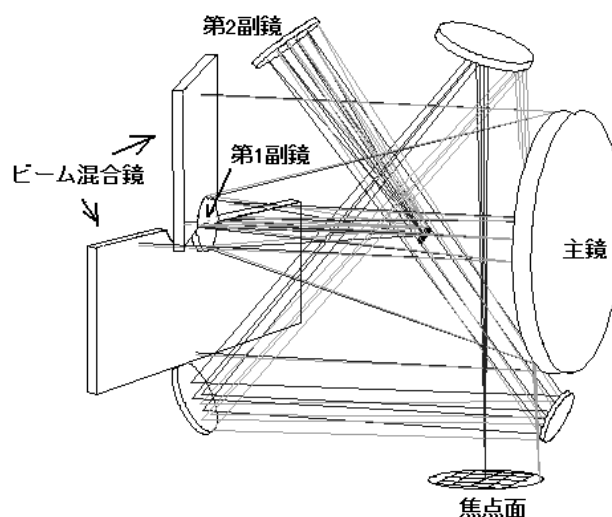


図 6.14: JASMINE 光学系の全体模式図 (カラー 15 ページ)

観測される 2 方向のなす角度、すなわちベーシックアングルは星の位置と衛星姿勢の変動を同時に解く際に生じる解の縮退が起こりにくい角度として定められる。すなわち、1 周に相当する 2π と、2 つの視野の間の相対角であるベーシックアングルとの比が小さな整数による分数で表されると縮退が起きるのでそういった角度をベーシックアングルとして選ぶ事を避ける必要がある。そこで以上でのべた縮退が出来るだけ起こらないように角度を検討した結果、 2π とベーシックアングルの比は分母、分子がそれぞれある初期値をもったフィボナッチ数列の極限值であることがわかった。その角度の一つは 99.5° であり、比較的縮退が起こりにくい角度のうちの一つである。そこで光学系のサイズなども考慮して、JASMINE ではベーシックアングルとして 99.5° を選ぶ。ビーム混合鏡の平面鏡はベーシックアングルの 2 分の 1 の角度、すなわち互いに 49.75° を成して設置される。

次に集光部分の説明に移る。この光学系は主に 1.5m の主鏡と 2 枚の副鏡の合計 3 枚の鏡より成る。主鏡、副鏡によりまず 1 度結像し、結像したところで、平面鏡により異なる軸へ光束を移す。その光束を再度第 3 鏡（凹面鏡）にて拡大しつつ検出器上で結像させている。第 3 鏡以降の光束はコンパクトにおさえるため、平面鏡にて 3 度折りたたんでいる。焦点面では若干の像面湾曲を許し、検出器を並べる時にある程度は吸収できるとする。

中心視野、 0.27° 、 0.375° の 3 方向におけるスポット図 (図 6.15) を示す。スポットサイズとの比較のため、エアリーディスクのサイズも同時に描かれてある。見ての通り、エアリーディスクのサイズに対して十分に小さくスポットが収まっており収差は非常に良好である事が読み取れる。

次にアストロメトリーで重要な像面歪曲について見る。次の図はグリッド歪曲を示しており、視野の歪み

従って、サーベイ観測においては必須の技術である。例えば SDSS(Sloan Digital Sky Survey) などでも TDI を利用している。TDI は、CCD では容易に実現可能であるが、赤外線アレイ型検出器の場合には新たな開発が必要となる。検出器側で連続観測用のモードが利用できない場合、2MASS で行われているように副鏡によるスキャンを行なう、望遠鏡自身をステップでポインティングするなどの代替方法が考えられる。副鏡によるスキャンは、光学系に新たな可動部分を設けることになる。副鏡の向きを正確にモニターしなければならないことと、副鏡の動きが衛星自身の姿勢にも影響を与えるため、衛星の姿勢制御、あるいはモニターの問題が発生する。望遠鏡自身、すなわち衛星自身をステップでポインティングする場合、同時にポインティング精度を確保する必要があり、また衛星が動いている状態ととまっている状態を交互に行うことから衛星の姿勢を高精度かつ安定にどこまで制御できるか慎重に検討する必要がある。また、連続観測モードで無い場合は、電荷を蓄えて一度で読み出すことになるので、読み出しに時間がかかるため観測のデューティーサイクルが減少し、またピークのデータ転送量が大きくなることに対処しなければならない。

ダストによる吸収の観点だけから考えれば、 K バンドなどもう少し長波長での観測が望ましい。しかしながら、我々の銀河系モデルを用いた評価によって、アストロメトリの目標精度を得られる星の数で比較すると、 K バンドでの観測と z バンドでの観測とはほぼ同数の星を観測できることが分かった。その理由として、目標精度を達成できる等級の範囲内であつて遠方では、 K 型あるいは M 型巨星が主として観測されるが、それらの星は z バンド付近で明るいことがあげられる。また、波長が長くなると、アストロメトリで同じ精度を得るためにはより多くの光子が必要となり、 K バンドでは、明るい等級しか目標精度を達成することができずに、観測される個数がその分少なくなるという理由が考えられる。また、検出器一個あたりの価格も z バンドに比較して K バンドのものは非常に高価になり、同じ予算で配列できる検出器の数は数十分の一に減ってしまい、この点からもアストロメトリの精度を得ることは難しくなる。 z バンドのものは通常の CCD と同じ原理で動作するため、現在天文で標準的に利用されている 2048×4096 ピクセルの大フォーマットのものが安価で製作可能である。さらに、現在開発されている K バンドで感度がある検出器には連続観測モードを実装したものが無く、この点が新たな開発項目となる。こういった点を考え併せると、現段階での近赤外線位置天文観測では z バンドが最適である。

現段階で我々が検討している検出器は、裏面照射型完全空乏 CCD という検出器である。この CCD は、通常の CCD のようにモノリシックなシリコン基板で作られるが、特殊なシリコン基板を使用することにより、可視光から波長 $1\mu\text{m}$ の近赤外線まで感度を有する新タイプの CCD である。原理は通常の CCD と同じものであるから、TDI モードを利用することが可能である。

完全空乏型の CCD とは次のような CCD である。CCD 検出器はシリコンの空乏層で光子を受光してこれを電気信号に変換する。この空乏層の厚みは通常は数十 μm 程度であるが、これを $300\mu\text{m}$ 程度に厚くすることにより、赤外線領域での感度を上げることとなる。一方、裏面照射型とは次のようなタイプのものである。通常の CCD では表面から光をあてるため、読み出しなどのために電子回路を実装することにより、受光面積が小さくなり、効率が低くなる。そこで、回路とは反対側(裏面)から光を照射することで、検出効率を向上するタイプのものである。

$1\mu\text{m}$ 帯で使用可能な CCD は、まだ開発段階にあり現時点で容易に入手が可能というわけではないが、国立天文台の宮崎聡氏を中心としたグループと浜松フォトリクス社が共同で現在すばる望遠鏡の主焦点カメラの更新のために開発が進められており(Hyper Suprime-Cam)、その開発は順調に進みつつある。現在開発中の z -band に感度がある CCD の感度曲線は、図 6.17 のようである。 $1\mu\text{m}$ での量子効率は約 80% 程度まで向上している。

ところで最近、開発中の CCD に裏面照射プロセスを施したところ、ダークカレントと呼ばれるノイズが増大した。しかしながら、イオン注入ゲタリングと呼ばれる技術があつて、このノイズを減少させることができることが知られている。この改良を施したところ、ノイズはかなり減少しており、実用化まではもう一歩というところまで近付いている。

小型のものであれば数年以内には実用可能なものが量産できるようになる見込みである。今後は、 2048×4096 ピクセルの大フォーマットの素子を設計、試作し、大型素子の組み立て技術を確認することが目標となる。

6.6 衛星システム概要

6.6.1 軌道

軌道を選定するにあたり、主に次のようなことを考慮しトレードオフする必要がある。

熱環境 地球から遠いほど、地球からの熱やその変動を受けずに安定している。更に太陽と地球はともに熱源となるので熱を管理するには同じ方向に見えている方が都合良い。

通信量 地球から遠いと大容量の通信が困難となる。つまり、通信アンテナを巨大にする必要や、振動が大きいパラボラアンテナを用いる必要が出てくる。

軌道保持制御 軌道を保持するためにどの程度の制御を何回程度行わなくてはいけないのか、ということも運用のしやすさ、持参する燃料の量の観点から重要な要点である。

打ち上げ重量 打ち上げロケットにより打ち上げ可能重量は変わるが、軌道によっても変わる。また、相乗りをする場合、相手の衛星からの影響もある。

打ち上げ機会 これも相乗りする場合には相手との組み合わせなどの影響を受ける。一般に、L2 などは打ち上げ機会が少ない一方、静止軌道など打ち上げ機会が多い。

高精度グローバルアストロメトリを達成するために大角度離れた2つの視野を同時に観測することが必要不可欠であるが、その二つの視野の角度を決めるビーム混合鏡は高精度に角度が一定に保たなければならない。従って熱変動を非常に嫌うため熱環境が安定していることがもっとも重要な項目のひとつである。熱環境の観点から、アストロメトリー観測の障害となる太陽、地球などは同一方向にあるのがよく、この場合、十分な観測時間を確保するためにも都合が良い。以上の観点から太陽－地球系のL2ポイントが有力候補となりえる(図6.18)。実際、ヨーロッパのアストロメトリー衛星であるGAIAもL2ポイントを軌道の候補としている。L2ポイントとしてハロー軌道とリサージュ軌道があるが、リサージュは、衛星から見て太陽と地球がほぼ同一方向に見えるという利点がある一方で地球による太陽の蝕の心配がある。ただし、GAIAでも行うように、適切に初期条件を選べばミッション期間中蝕が起こらないようにすることが可能である。従ってリサージュ軌道を有力候補とはしているが、なおさらに両軌道を検討中である。

さらに、L2ポイントは上で述べたように衛星から見て太陽地球がほぼ同一方向に見え、なおかつ地球から150万kmと離れているため熱的環境はかなり優れていると考えられる。また、JASMINEではz-band検出器を用いる計画であるのでおよそ170K程度の環境を予定しているが、これは放射冷却により容易に達成できる。その一方で150万km離れていることから通信のためのアンテナを巨大にする必要が出てくるという短所もある(機械振動がないフェーズドアレイと呼ばれるアンテナが使えずに、振動が予想されるパラボラアンテナを

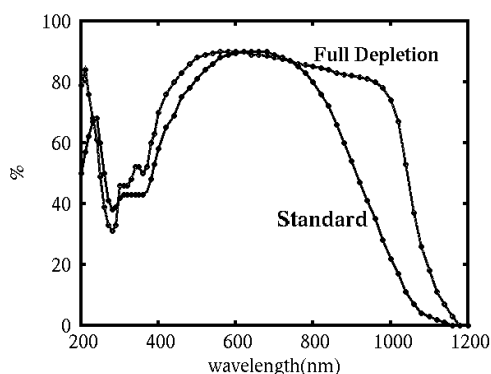


図 6.17: 検出器の感度曲線

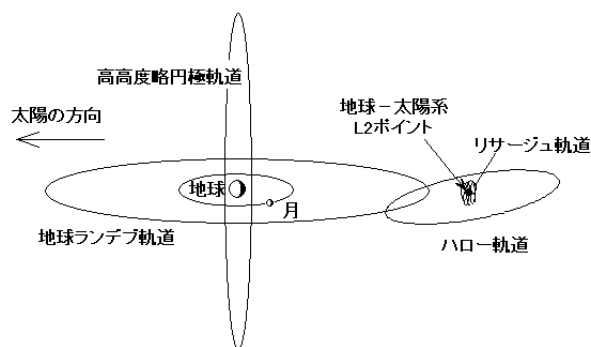


図 6.18: 様々な軌道

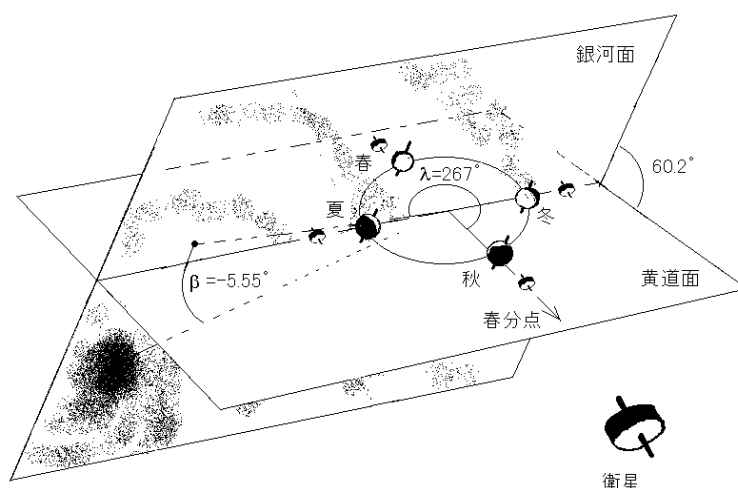


図 6.19: 銀河面と黄道面との関係及び、衛星、地球、太陽の位置関係

使わざるを得ない可能性も出てくる。詳細は、オンボード処理と通信系の小節を参照のこと)。更に、相乗りで行く場合、打ち上げの機会も少ないと考えられる。

一方、太陽－地球系の L2 ポイント以外の軌道でも、L2 ポイントより地球に近い軌道であったり、軌道が極めて安定である場合には、熱的環境が L2 に及ばないとしても検討する価値は十分にある。地球の軌道の長半径と等しい長半径をもち、地球と離心率がわずかに異なる軌道を選ぶと太陽のまわりを公転周期 1 年でまわる軌道が得られ、これを地球ランデブ軌道と呼ぶが、この軌道についても検討中である。この軌道は非常に安定で L2 ポイントの場合には数ヶ月に 1 度軌道保持制御が必要となる一方で地球ランデブ軌道ではミッション期間中にほとんど軌道保持制御が不要である。また、通信量についても L2 程厳しくはない。ただ、黄道面を通る軌道なので太陽が地球の影に入る蝕の問題があるが、わずかな傾斜角を持たせる事で蝕に入る頻度を 3 年に一度程度に出来る。すなわち、JASMINE ミッション期間中 1 回程度制御ですむ。さらに、黄道面に垂直な軌道面をもった高高度の地球周回軌道である高高度略円極軌道も検討中であるし、静止軌道も視野に入れて検討を行う。

以上、軌道に関しては未定だが、いくつかの重要な観点から十分なトレードオフを行い、検討を進めていきたい。

6.6.2 姿勢系

6.4 章の観測手法でも述べたように、JASMINE は銀河面およびバルジのサーベイを目標としているが、その一方で高精度のアストロメトリーを達成するためには大角度離れた 2 つの視野を同時観測しながらその 2 つの視野を含む大円上をサーベイする必要がある。以上の要件を満たしつつミッション期間で目標精度が達成できるようサーベイ方法を決定しなければならない。そこで、JASMINE では次のような方法をとる。銀河面を含めた銀緯 $\pm 3.5^\circ$ の範囲、すなわち、 $360^\circ \times 7^\circ$ の銀河面サーベイをおこなう。

銀河面サーベイを達成するために図 6.20(上) で示すように衛星の回転軸を銀極に対して 3.5° 傾け、1 周 5 時間の自転運動により銀河面から 3.5° 傾けた大円上サーベイをおこなう。このスピン軸を銀極周りで歳差運動をさせることにより、銀河面から 3.5° 傾いた様々な大円をサーベイすることになる。これにより、銀河面を含む銀緯 $\pm 3.5^\circ$ の範囲をすべてサーベイすることが出来て銀河面サーベイが達成される (図 6.20(下) 参照)。サーベイする銀河面は黄道面とおおよそ 60° の角度で交わっているため、夏と冬の年 2 回太陽は銀河面を通過することとなる (図 6.19 参照)。そこで、太陽が通過する前後、太陽がおおよそ銀緯 $\pm 45^\circ$ 以内に入る時には銀河面サーベイを一時中断し、その間太陽を含まない大円サーベイに切り替える計画である。観測可能期間は春と秋の年 2 回存在するが、それぞれの観測可能期間の前後には銀河面は観測できないがバルジはさらに観測できる期間が存在する。その時は銀河面は含まないがバルジを含む大円でサーベイする計画である。

大円サーベイにおける自転周期はおよそ5時間でおこなうものとする。これは目標とする等級の星が検出器を通過する間にフォトンが検出器の容量を超えずに、適切な量だけ積分できるように設定される。すなわち、用いる検出器と目標の等級によってこの自転周期は定まる。次に自転軸に関して、自転1回転する間に視野直径の4分の1程度ずつ視野がずれるように歳差運動させる(図6.21)。

すなわち、4周程度の間は同じ星を観測できるように歳差運動をさせる。視野をある程度重なり合うようにしながら歳差運動をおこなう理由は次の通りである。高精度アストロメトリーを行うためには、観測データから星の位置、衛星の姿勢を同時に解かねばならない。その際に一度観測した星を衛星が1周自転して戻って観測した時にちょうど 2π だけ回転したという事実を用いる(1周する数時間という時間スケールは1年の時間スケールに比べて十分に短いためその間に星がほとんど動かないという事を利用している)。以上の解析をおこなうためには少なくとも2周は同じ星を見なければならない。この観点でいえば、同じ星を観測する回数は多いほうが良いが、一方でミッション期間中のいろいろな時期で何度も観測しないと年周視差がうまく導出できないという問題もある。以上を考慮し現在のところ歳差運動はおよそ1ヶ月(36.9日)としている。

以上が基本的なサーベイ方法であるが、不幸にしてミッション機器が途中で不具合を起こしたとしても、その段階での一定の成果が得られるようサーベイ方法を検討し、様々なサクセスレベルを設定しておかねばならない。JASMINEは z -band 検出器を搭載する予定であるが、 z -band での銀河面のまとまったカタログは存在しない。そこで、初期段階で少しでも観測が出来ればそれは z -band のカタログとして役に立つであろう。更に、初期段階ではスピン軸を銀河極にあわせ銀河面が大円となるようにサーベイをおこなう事を検討している。すなわち歳差運動させずに同じ大円上を繰り返しサーベイし続ける。こうする事で、わずかな領域ではあってもそこでは高精度アストロメトリーが達成されるようになる。3ヶ月半で銀河面は $10\mu\text{as}$ の位置決定精度が得られる。それが成功したら次に上で述べたようにスピン軸を銀極から傾け歳差運動をさせながら大円サーベイをおこなう。この状態で1年半以上大丈夫であれば今度は位置決定だけでなく、年周視差が求まる。また引き続き5年ミッションが続けば目標である銀河面およびバルジが $10\mu\text{as}$ の精度で位置および年周視差などが求まる。

JASMINE のサーベイ方法はすでに成功を収めた位置天文観測衛星 Hipparcos や、現在検討が進められている GAIA と大きく異なる。Hipparcos や GAIA はすべて全天サーベイをおこなう。一般に全天サーベイは衛星のスピン軸と太陽のなす角度を一定に保ちながら自転させる。また、太陽の方向の周りにスピン軸を歳差運動させる。すると衛星が太陽の周りの公転するために、歳差運動の軸となる太陽方向が変化する効果と相まって、自然に全天サーベイが達成される。この場合、2つの利点がある。すなわち、太陽の方向と一定の角度をなして歳差運動させる事により、太陽方向と衛星回転軸の位置関係が変化せず、熱的に安定した環境が達成される。また、太陽からの熱輻射を利用して、自然な歳差運動が達成される。我々は銀河面サーベイをするが、銀河面

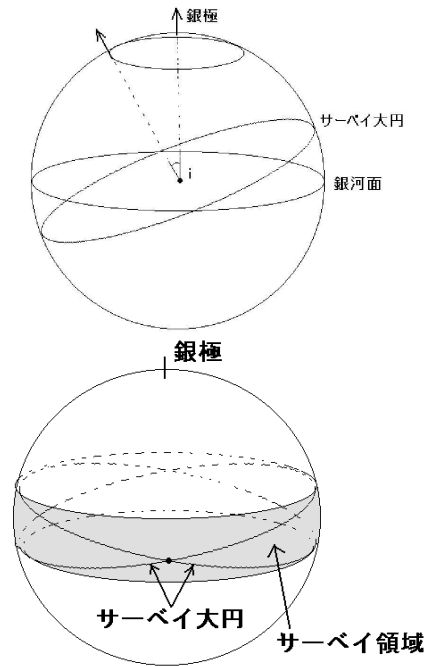


図 6.20: サーベイ方法の図(上)とサーベイ領域(下)

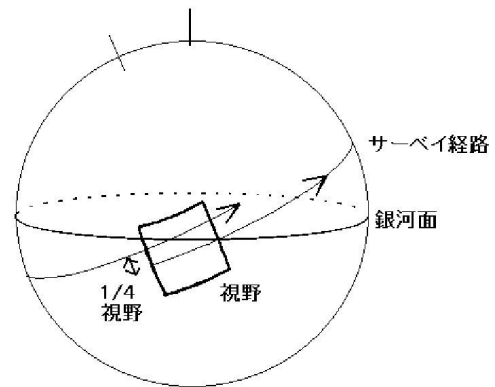


図 6.21: サーベイ領域の移動

は黄道面に対して 60° 傾いており、銀緯 $\pm 45^\circ$ 以上に太陽が存在する時のみ観測する事を考慮すると衛星のスピンの軸に対して太陽は 30° から 45° の範囲を変化する事になる。ここが Hipparcos や GAIA とのサーベイ手法の異なる部分である。この場合の熱設計は今後詳細に調べて、詰めていく予定である。

6.6.3 熱構造

JASMINE は光学系を中心とするミッション部を太陽から直接にける輻射から守る必要がある。特に高精度アストロメトリを行うためには大角度離れた2つの視野を同時観測するがその2つの視野の角度、すなわちベーシックアングルが自転する時間スケールである5時間で出来るだけ一定に保たなければならない。また z -band 検出器を用いているのでミッション部はおよそ 170K まで放射冷却させたい。そこで、ミッション部が十分に覆える程度に大きく開いた遮蔽板で常に太陽の影になるように衛星を姿勢制御し、太陽の熱から守る構造をとっている。(JASMINE 概観図 (6.22) 参照)。

次に温度変動に関して非常に安定な熱的環境を必要とする。ここで、実際にどの程度の熱設計が必要なのかを検討する。

$10\mu\text{as}$ という高精度アストロメトリーを達成するために何をどの程度の精度で温度制御することが要求されるかを考える。 $10\mu\text{as}$ の高精度アストロメトリーを実現するためにはビーム混合鏡の2つの鏡の相対角が衛星の自転の時間スケール (5 時間) で $10\mu\text{as}$ 以下の変動に抑える事が必要となる。5 時間より短い時間スケールでビーム混合鏡が振動してしまうと、その振動と衛星の姿勢の振動との縮退のため、精度よく星の位置決定が出来なくなる。

ここで、鏡面の温度ムラと相対角変動の関係について考える。鏡面法線方向の変動は、鏡面の場所ごとの温度ムラにより鏡の厚みが変化する事によって鏡面法線方向が変動する効果と、鏡の上面、下面の温度ムラによって反りが発生する事で鏡面法線方向が変動する効果がある。鏡面の場所ごとの温度ムラは厚み方向の温度ムラに比べて大きい事を考慮して (熱伝導性により鏡の厚み方向の温度ムラは鏡の場所ごとの温度ムラに比べて早く均される)、両者の効果は同程度である事が確かめられる。従って厚みの変動による鏡面方向の変動で典型的な鏡面法線方向の変動を取り扱う事が出来る。以上の事を考慮すると、最終的には全体で総合的に熱構造解析を行うことが必要であるが、第0次的な議論は以下で見積もられる式による議論でも可能である。鏡面の方向の変化 $\Delta\theta$ はおよそ、次のように表される。

$$\Delta\theta = \frac{D}{L}\eta\Delta T \quad (6.1)$$

ここで、 D 、 L はそれぞれビーム混合鏡の厚みと典型的長さを表す。 η は膨張係数、 ΔT は温度変化を表す。この関係式の正当性は数値実験でも確かめられる。

これによれば、例えば鏡の材質を SiC とすればおよそ、温度変動 ΔT は 10^{-3}K の範囲におさえれば鏡面方向変動、すなわちベーシックアングル変動は $10\mu\text{as}$ 以下に抑えることが可能である。それでは、次にどのような熱設計をすればビーム混合鏡に対して 10^{-3}K 程度の温度管理が可能かどうかを検討する。

いま、ビーム混合鏡に対して熱放出と熱入力が平均的につりあっており、熱入力変動 δF_{in} があつた時この δF_{in} がどの程度であれば温度変動が 10^{-3}K 程度におさえられるのかを数値解析した。SiC を用いた場合ビー

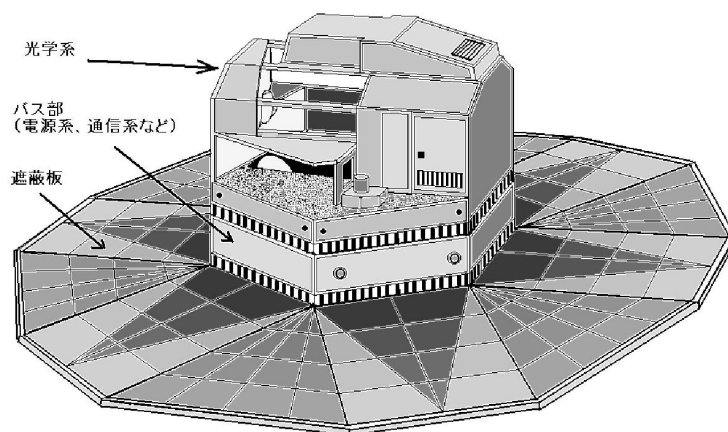


図 6.22: JASMINE 概観図 (カラー 15 ページ)

階層	bit/星像	ピーク	平均	一周期データ	備考
生データ		3.6Gbps(460MB/s)			
星像の数		6.3 万星/s	4500 星/s		
2D ウィンドー	720	43Mbps	9 Mbps	18 GB	
1D 情報に落とす	95	5.7Mbps	1.2Mbps	2.4GB	報告書

表 6.3: JASMINE データの階層、Mbps は 1024^2 bps、Gbps は 1024^3 bps、GB は 1024^3 B で計算。一日 24 時間通信可能とした値。

μ混合鏡の熱容量 $C = 7 \times 10^2$ [J/kg/K] と、密度 $\rho = 3 \times 10^3$ [kg/m³] である事を考慮して熱量の変化から温度変化を計算する。

計算結果は図 6.23 で示す。横軸は時間であり、3 本のグラフが描かれているが、ビーム混合鏡への熱入力と熱放射と温度を表している。破線 D で描かれたものは熱入力変動をあらわしている。変動量の振幅を 0.1W で与えている。この熱変動に対して混合鏡の温度が変動するが、その結果として温度の 4 乗に比例した熱放射がある。その熱放射の変動量は太線 E であらわされる。更に温度変動としては線 C で表される。見て分かるとおり温度はおおよそ 1mK の範囲で変動する。数値計算の結果によると、170K で衛星ミッション部を保つ場合、ビーム混合鏡における熱入力と熱放射はおおよそ 19W 程度でバランスし、熱入力変動 0.1W に抑えることができれば温度変動として 1mK 程度に抑えられる。結果として鏡の相対角の変動を 10μas 以下に抑えられる可能性がある。では実際に、0.1W の熱変動に抑えられるかは詳細な検討を要する。

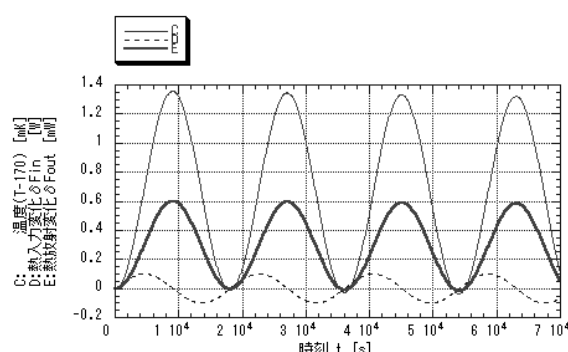


図 6.23: 熱変動

6.6.4 オンボード処理と通信系

JASMINE では、視野約 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ を 2048×4096 ピクセルの検出器約 100 個で観測する。視野全体のデータが約 3.5 秒で出力されるので、1 秒あたりに出力されるピクセル数は 2.3 億ピクセルとなる。ピクセルあたりの情報量は 16bit なので、生データは 3.5Gbps となる。JASMINE は、熱環境の問題から地球-太陽 L2 点等を候補とする地球から遠く離れた軌道で運用されるため、衛星からこれだけの大量のデータを地上に転送することは不可能である。このため、連続データ (動画) の中で星の位置の精密な解析に必要な最小限のデータを切り出して、地上に送る必要がある。JASMINE がメインターゲットとする銀河系バルジ付近では、 z バンドで約 17 等級までの星が一平方度あたり 50 万個程度存在する。JASMINE の視野面積と露出時間から、1 秒あたり 7 万個程度の星像が検出される計算となる。JASMINE では、星像として 5×9 ピクセルのウィンドウが解析に必要である。解析に必要な画像データは 1 秒あたり最も星の多いところで 300 万ピクセル程度、星の少ないところではその 1 桁強少なくなる。ピークで 50Mbps 程度、平均では数 Mbps で十分であると評価される。このウィンドウを切り出して地上に転送することで、衛星との通信が現実的な値となる。

表 6.3 に、上で評価した通信量に関するおよその数値を掲げた。平均値として 9Mbps 程度という値は一日 24 時間通信が可能であると仮定した数値であるが、実際には通信可能時間帯は地上の通信局から衛星が見えている時間帯である。従って、詳細は通信局を定めなければ評価できないが、一般的には通信可能時間帯は一日約 8 時間、通信レートがこの数値の 3 倍程度となる。仮に軌道を地球-太陽 L2 点とした場合に、30Mbps という通信帯域は、過去の実用衛星の実績から考えて不可能な値ではないが、二つの問題点を含む。

- 過去のサイエンスミッションでこのような広帯域が認められたことは無い
- 大型のパラボラアンテナを必要とする

この広帯域の実現方法としては、衛星に大型のパラボラアンテナを搭載して、常に地球の方向を向くように駆動して通信を確保することである。一方、JASMINE は姿勢精度要求が非常に厳しく、このような可動物を搭載することはデータの質を著しく低める原因となり得る。そこで、フェーズドアレイアンテナと呼ばれる電氣的に指向性を変化させることのできるアンテナを搭載することが望ましい。フェーズドアレイアンテナは、L2 点からの通信を考えれば帯域が 1Mbps 前後と小さい。さて、JASMINE の観測方式では、スキャン垂直方向の精度は確保できず、スキャン方向の精度だけが重要となる。星の二次元的な位置は、互いに交差する異なった大円方向にスキャンした場合のデータを併せて解析することで得る。従って、スキャン垂直方向については詳細な情報を地上に転送しなくても、観測精度に大きな影響は無いと考えられる。そこで、JASMINE ではさらに 9×5 ピクセルの星像ウインドーのデータのスキャン垂直方向 9 ピクセル分を積分し、スキャン方向の 5 個のデータとして転送することを考える。

この方式においても、表 6.3 で示すように一日 24 時間通信時間を確保できたときによりやく現実的な値となる (1.2Mbps)。実際には、衛星が地上局から見えている時間は、観測時間のおよそ 1/3 程度である。したがって、データ量をさらに 1/3 程度に減らす必要がある。このため、これらのデータを圧縮する。近年インターネットの普及にともなって、画像圧縮技術は飛躍的に進歩している。これらの技術によると、データは数十分の一の量まで圧縮できるが、それらは非可逆圧縮と呼ばれる技術で、圧縮画像からもとのデータに戻すことはできない。おおよその様子を見るだけであればこれでも十分だが、JASMINE の場合は多数回の観測結果をポアソンノイズも含めて蓄積して精度を向上させるため、可逆圧縮、すなわち圧縮データからもとのデータを完全に復元できる圧縮方法が必要である。文字情報であれば可逆圧縮でも数十倍程度の圧縮が可能であるが、画像情報などのバイナリーデータにおける圧縮では 1/3 程度が限界である。フリーソフトウェアなどの配布に用いられる圧縮形式は、バイナリーデータで 1/3 程度の圧縮を可能とするが、これらは大きなデータの圧縮には適するが、小さなデータの圧縮率は極めて低く、また膨大な計算量が必要とされる。そこで、圧縮手法を検討したところ、小さなデータでも 1/3 程度の圧縮が可能であり、かつ計算機資源をあまり使わない圧縮方法として、Golomb 符合化があることが分かった。この方法は、天文データに適しており、JASMINE で採用する圧縮手法の候補となり得る。さらに、主成分分析と呼ばれる手法を組み合わせることで、圧縮率を上げることを検討中である。

なお、以上の評価は地球 - 太陽 L2 点からデータを転送することを考慮し、現実的に転送可能なデータ量に落とすための考察である。軌道が地球周回軌道であれば、データ転送の上での問題点はほとんど無い。

以上のような通信量の評価から、JASMINE では衛星機上 (オンボード) で連続画像から星像を切り出す作業を行なう必要があることがわかった。この作業は、1 秒間に 2.3 億ピクセルのデータから最大 7 万個程度の星像を切り出す作業となる。オンボードでの星像検出手法には、大きく分けてピーク探索とテンプレートの適用の二通りの手法がある。

ピーク探索は、ピクセルデータからピークを探し、そのピーク周りが星像であるとして切り出すものである。この場合、主に放射線による星像ではないピークを拾ってしまう可能性があり、星像以外のピークをどの程度除去しつつ、星像はできるだけ沢山拾えるかというところが問題になる。ドイツで過去に計画されていた DIVA プロジェクトでは、この手法を採用する予定であった。ピークを探索する場合に、閾値をどう設定する

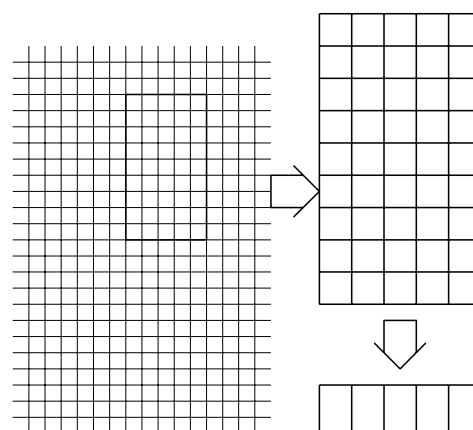


図 6.24: 検出器全体と Window、一次元方向の積分の関係。左側の図のような CCD のピクセルから星像の部分だけを切り出し (右上)、さらにスキャン垂直方向のデータを積分して (右下)、一つの星あたり 5 つのデータを送る。

かなど細かいパラメータの検討が必要で、今後詳細なシミュレーションを行なう必要がある。

テンプレートの適用は、予め光学系や検出器の特性などから計算された星像のテンプレートを用意して、このテンプレートに合う明るさのパターンを探すものである。この場合は、長期間のミッションの中で検出器の特性が変化したり、比較的明るさが近い連星系などテンプレートとの違いが大きな天体を星と認識しない可能性があり、このためにテンプレートとの一致性の評価の方法などについて、細かいパラメータの検討が必要となる。

6.6.5 打ち上げロケットと電力・重量

打ち上げロケットを何にするかは、軌道の選択、衛星質量、衛星が収まるロケットのフェアリングサイズなどに依存する。JASMINE は、サイエンスの目標達成の範囲内なるべく技術的、予算的に可能な現実性がある仕様検討を努力していく。そのため、なるべく打ち上げ費用が低コストであり、なおかつフェアリングが仕様要求に合い、選択する軌道まで運べる重量が大きくなる打ち上げロケットを選択する必要がある。その候補としては、もし H-IIA の dual launch の方が M-V ロケットよりも打ち上げコストが低いのであれば、H-IIA の dual launch が有力候補となる。さらに、H-IIA の dual launch の場合、軌道として仮に L2 ポイントを考えた場合、打ち上げ可能な重量は、もう一つの相乗りの衛星の軌道が L2 ではない別の軌道であることを考慮しても約 1.2 トンもある (M-V の場合は、約 0.5 トンである) というメリットがある。また、dual launch の場合で一番小さいフェアリングを選んだとしても、M-V のそれよりも容積は大きい。従って、JASMINE としては、H-IIA の dual launch は有力候補であるが、相乗りできる機会は少ないかもしれない。あと、現在開発中の GX ロケットも有力候補として検討中である。いずれも今後、十分な観点からトレードオフをしていく予定である。

なお、JASMINE の遮蔽板は大きいため、打ち上げ時には折りたたんでおく必要がある。そこで、ミッション部 (光学系) および、バス部は六角柱内に収め、6 つの側面に遮蔽板を折りたたんでおき、フェアリングに収納される。遮蔽板は軌道投入後、図 6.25 のように展開する。

展開前の遮蔽板の外側の部分、あるいは展開後の下側の部分に太陽電池を張り付け、電力を供給する。遮蔽板の面積が大きいため、現在の太陽電池のエネルギー変換効率 19% を考慮すると、通常処理で電源が不足することは考えにくい。しかしながら、衛星バス部の仕様が未定であること、フェーズドアレイアンテナを使用する場合は必要電力が投入軌道に強く依存するため、詳細は今後検討を要する。

重量は、投入軌道やロケットなどに依存する。現在、L2 点軌道、地球ランデブ軌道、高高度地球周回極軌道などを検討しているが、いずれも MV クラスで 500kg 程度、GX ロケットクラスで 1t 程度、H2A クラスで 2t 強の投入が可能である。

これから推定して、この三つのロケットのいずれでも打ち上げ可能な仕様とするのであれば、打ち上げ能力 500kg を考慮すればよい。従って、ミッション部・衛星バス部・打ち上げ用機構の合計重量を 500kg 以下に抑える必要がある。例えば GAIA の場合、ミッション部に利用できる重量は打ち上げ重量の約半分から 1/3 程度である。鏡の質量は、ミッション部質量の 1/6 程度となっている。500kg の打ち上げ能力の場合、鏡の質量を GAIA の例に従って単純に総重量の 1/12 程度とすれば、40kg 程度に抑える必要がある。現在軽量鏡技術はお

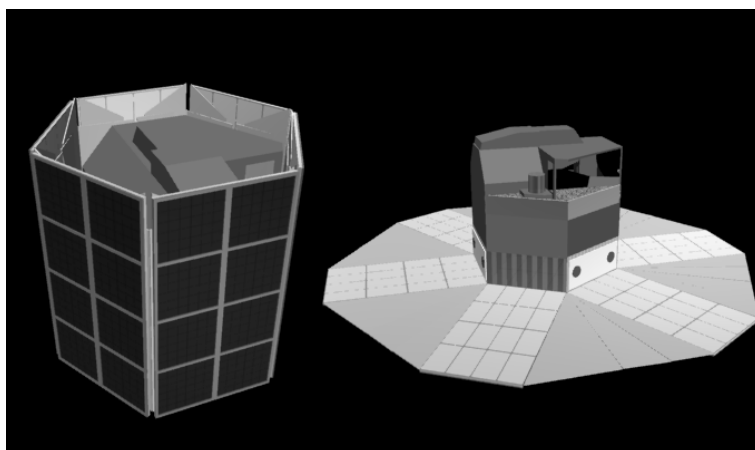


図 6.25: 遮蔽板の展開。打ち上げ時と軌道投入時における展開 (カラー 15 ページ)

よそ 12kg/m^2 程度まで進歩しているので、現在の仕様内ではほぼこの重量に収まると考えられる。また、HII-A dual launch あるいは GX ロケットを想定するなら、重量の制限は約 2 倍ゆるくなることになり、鏡の重量で 80kg 程度までの仕様が可能となる。

6.7 現在までの技術実証実験ならびに仕様検討のためのシミュレーター構築

6.7.1 地上での CCD をもちいた星像中心実験 [5]

星像中心決定は JASMINE 計画の最重要事項の一つである。この星像中心の解析の良し悪しが、そのまま JASMINE の精度に影響する。JASMINE では星の位置決定精度を $z = 14.0\text{mag}$ で $10\mu\text{s}$ と定めているので、この $10\mu\text{s}$ を達成するために 1 検出器、1 回の観測あたり 1 画素のおよそ 140 分の 1 の精度が必要となる。また、明るい星に関して言えば、300 分の 1 画素ないし、500 分の 1 画素以上の精度を出す事が原理的に可能となるため、そういった精度が解析から出せるのかどうか重要課題となる。そこで我々は地上で CCD 検出器を用いて高精度に星像中心位置を決定できるかどうかの実験を行っている。

実験装置は図 6.26 に示すように、長さ約 1m の光学ベンチ上に、擬似星光源、集光レンズ、CCD カメラをこの順に設置し、集光レンズによる擬似星光源の像を CCD 上に結像させる。擬似星は白色光を、5 行 5 列に並べた断面 $10\mu\text{m}$ の光ファイバー 25 本に導き、端面を光らせて作っている。用いた CCD は 1024×1024 画素で 1 画素 $10\mu\text{m}$ である。また、その CCD は光軸に垂直な方向に、 $1\mu\text{m}$ 以下の精度で位置を調節し、星像中心と CCD ピクセルの任意の相対位置関係を実現することができる。また、温度は 0°C に制御されている。集光レンズは口径 5cm、F 値は 2~4 だが、回折により像の大きさを複数の CCD ピクセルにまたがるように調整するため、直径 2.5mm 程度の絞りを入れる。また、実験で中心的に用いるのは F4 の光学系である。すなわち、絞りを入れた状態で F80 の光学系となる。また、概観は図 6.27 に表される。

さて、ここでは JASMINE 計画で用いるために開発したアルゴリズムを簡単に紹介し、そのアルゴリズムを用いて実験の解析をおこなった結果を示す。

ここで用いているアルゴリズムは検出器に貯められた星からのフォトンの重心を利用して求める方法(重心法)を基本としている。その理由は重心を求める事が容易であり、膨大な観測データを解析する際に有利である事、星の形、すなわち PSF の形をあらかじめ仮定しなくて良い事が挙げられる。ただし、PSF の形を仮定しないとはいえ、以下で述べる最小 2 乗法によるパラメータフィッティングの際、パラメータ k を通じて陰に PSF の形が与えられる。

この手法のポイントは観測される星たちが短い時間(具体的には、衛星が自転する数時間という時間スケール)では相対的位置関係を変えないが、測定される画素の場所により、重心間距離が変化する。この変化を逆に解析の際に利用し、真の星の中心を求めるという手法である。

・ コンフィグレーション (誤差は数 mm)

	ファイバー、レンズ間距離	レンズ、CCD 素子間距離
D=50mm, f=100mm (F=2)	77.0cm	10.8cm
D=50mm, f=150mm (F=3)	69.0cm	18.8cm
D=50mm, f=200mm (F=4)	57.3cm	30.5cm

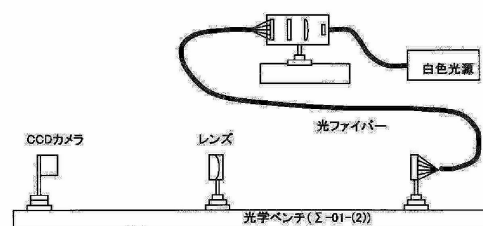


図 6.26: 実験装置コンフィグレーション



図 6.27: 実験装置外観

具体的な手順としてはまず、2つの星をピックアップし、その2つの星について星の重心を含むピクセルを中心に 5×5 ピクセル取り出し重心を求める。星のイメージにおける最頻値を中心として上下左右に2ピクセル数だけとり、領域を定める。すなわち、取り出された領域の一边のピクセル数は5で、奇数となる。以降、星像中心を決定するのはこの決められた領域内の情報のみを取り扱う。まず切り取られた領域を用いて photon の重心を求める。ここで求められた重心 (x_c, y_c) は真の中心の値 (x_a, y_a) とはずれている。そこで、真の中心と重心のずれ $x_a - x_c$ は重心のピクセル中心からのずれ、すなわち重心の座標 x_c に比例するとした1次の補正を行う。以上を仮定し、多くの観測データを得た後、多くの測定点を満たすパラメータ k を最小2乗法により求める。以上の手順に従って解析することで真の星像中心を見積もる事が出来る。

解析結果 星1の様々な座標での見積もられた2つの星の間の相対的距離をグラフにて示す(図6.28)。横軸は2つの星のうち、一方(星1)の座標を表したものである。1画素のうち、どこに重心があるかによって(横軸の値により)重心間距離(D)の値が大きく異なり、重心間距離をそのまま相対的距離として測定すると数分の1画素クラスの精度しか得られない。一方、上述のアルゴリズムにより、一次補正をおこない相対的距離を見積もると、プロット(E)をみて解るように、相対的距離の見積もった値は、1画素の何処で測定しようともかなりの精度で、ほとんど同じ値をとる事が解る。相対的距離の拡大図を図6.29に示しておく。さらに、各相対的距離測定値の分布図も図6.30に示しておく。

この拡大したグラフ(図6.29)ないし、測定値分布図(図6.30)から解るように2つの星の相対的距離の誤差はおよそ300分の1ピクセルの分散の範囲におさまっている。

以上から、アルゴリズムにより1次補正されるとJASMINEに必要な精度、すなわち、1検出器1回の観測につきおよそ300分の1画素という精度が達成される事が実験的に示された。

以上の実験は検出器上の2つの星の相対的距離を高精度に求めた実験である。しかしこれは光学系の像面歪曲などの影響を受けた星像間距離である。一般に光学系には像面歪曲が存在するのでこういった補正も今後は行わなければならない。すでにアルゴリズムは製作完了しているので、今後実験を進めていく予定である。またJASMINEでは最終的にTDIモードを作動させてデータの取得を行うので、より現実に即した状況で実験を行うため、TDIモードを稼働させての実験にも取り掛かっている。すでにTDIを用いての画像取得には成功したので今後はアライメントなどの調整をおこなって実験が出来るデータを取得できるよう進めているところである。

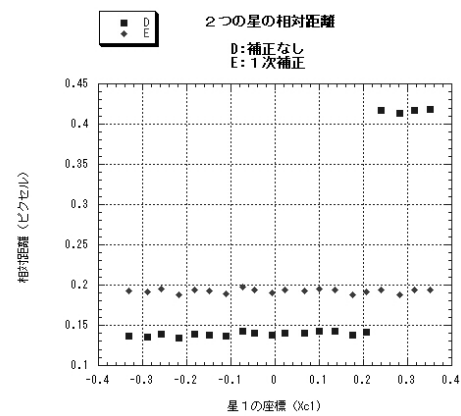


図 6.28: 星1の座標に対する2つの星の見積もられた相対的距離

6.7.2 JASMINE シミュレーターのフレームワーク構築

JASMINE プロジェクトは、衛星の仕様と得られるサイエンスの精度の関係が複雑となる。そこで、衛星の仕様と得られるサイエンスの成果を検討するため、全体を統合したシミュレーションソフトウェア-JASMINE Simulator-の構築をすすめている。

JASMINE のような人工衛星を用いた観測の場合、地上観測とは異なるいくつかの特徴がある。

- 装置の運用期間は搭載機器の機械的寿命や放射線による劣化などのため、地上観測機器に比べて極端に短い。この期間内に、効率的な観測を行う必要がある。
- 一度装置を宇宙に打ち上げてしまうと、予めプログラムで想定されている機器の調整以外は不可能である。何か予想外の不具合が発生しても、現場で修正することは不可能である。

分類する。これらのコンポーネントが持つ性質(属性)同士の関連(依存)のしかたは、検討の課題ごとに異なる。そこで、コンポーネントのもつ属性同士の依存性を、グラフィカルに容易に構築できる枠組が必要となる。

そこで、入口と出口が定義されていて中身に関係ない情報受渡しの手段を提供することが必要となる。検出器や光学系などのコンポーネントをまとめて扱えるような「モデル」という抽象概念を導入する。この「モデル」は、上で述べた「中身に関係無く入り口出口が定義された情報の受け渡し手段」を提供する「箱」に収められる。一つの箱は、「入口」から入ってきた情報をもとに必要な計算をして、「出口」へ出すべき必要な情報を用意する。実際にシミュレーションを行うには、シミュレーションに係わる「モデル」が収められた複数の箱を用意する。あるの「箱」の出口から別「箱」の入口へ情報を伝えるパイプ役の「線」を結ぶ。そうすると、線で結ばれた順番に従って、順次計算を進めて、最終的にほしい結果を出してくれる。

我々は、こういった枠組を作った後に、「箱」に収める「モデル」である検出器や光学系、データ転送、衛星軌道や振動擾乱源などをモデル化して、コンポーネントとして作り上げる作業を進めている。この抽象化によって、部品同士の組み合わせ方を柔軟にすることが出来る。我々のソフトウェアの設計図(UML図)は、図6.31に示す通りである。

6.8 重要な技術検討課題

6.8.1 望遠鏡の素材と組み立て方式

JASMINE で用いられる大型の鏡にはビーム混合鏡 $75\text{cm} \times 1.5\text{m}$ と主鏡 $1.5\text{m} \phi$ とがあり、いずれも古典的な手法で製作すると1トンを超える重量となり、このままでは打ち上げ不可能である。重量を減らし打ち上げコストを下げるのが最重要課題となる。そのため的大幅な軽量化の工夫が必要である。L2 軌道で撮像により高精度の位置決めを行うためには、重量以外にもこれら鏡に要求される機能があるので簡単にまとめてリストする。

回折限界に近い鏡面精度 プロジェクトとしては回折限界の数百分の一の位置分解能を目標とするが、重心の検出が主眼であるので、回折限界の数百分の一の鏡面精度は必要としない。しかし、鏡面精度の劣化による光子の散逸によって、観測効率が下がることは避ける必要がある。そのためほぼ回折限界に近い鏡面精度が必要である。

温度安定性 温度変化により結像の条件が変わることはある条件では致命的である。サンシールドなどの工夫によって環境として恒温の条件を整えるので、環境条件と総合して考慮する必要がある。動作温度で熱的に安定であることは非常に有利である。

低温条件 選択する観測波長により望遠鏡本体の動作温度が変わってくるが、システムとしては検出器の動作温度と同一温度で運用することが効率的・高性能であると考えている。従って、鏡面は極低温で光学性能を保持する必要がある。常温での研磨等を考慮すると光学性能の劣化にたいするなんらかの補償システムが必要となるかもしれない。

望遠鏡の大型鏡の軽量化の目的はアメリカの進める NGST など多くの計画されている光赤外の軌道望遠鏡、8m 級望遠鏡の次世代となる数十メートル級の望遠鏡への応用などがあり盛んに開発が進められつつあるのが現状である。口径、観測波長域など、ミッション毎に要求仕様が異なるのでそのまま JASMINE に適用することはできないが、共通要素も多くあるので、JASMINE での応用を考慮した上で現状での超軽量鏡開発の現状を概観することは意味がある。現状での開発は大きくふたつに分類される、一つは NGST の望遠鏡部分のコンペティションのための開発であり、比較的完成度は高い、これを応用して、JASMINE の仕様にあわせた開発を進めることが可能である。しかしながら、一見して構造が複雑で将来的にはより簡便な現在盛んに行われている開発が成功すれば代替される可能性は高い。早い時期での実現を目指す場合や、新材料の応用がうまく行かなかった場合には有力な超軽量鏡製作の手段となろう。ここでもう一つの開発とは、もともとは航空機器の耐高温材料として開発が進められていた、炭化硅素を主体とした鏡面としては新構造材料の開発である。現状では、新材料の製作法の開発が一段落というところで、光学材料の評価が進められ始めた段階で、研磨などさらに開発要素は多く、現状での JASMINE 適用への可能性が明らかになったわけではない。しかしながら、もともと構造材料としては実績のある材料なので、鏡筒と光学系を一体とした構造体を構成できる利点は大きく、材料のもつ高剛性とあわせ超軽量鏡材料としての魅力が大きい。

JWST(NGST の新呼称)の開発 1996 年に設定された JWST の光学系に対する要求条件は次のものであった。

- 波長範囲 1 – 5 μm (0.6 – 30 μm)
- 2 μm での回折限界を達成すること
- 30 – 60K で動作すること
- 面密度 15kg/m² 以下であること

これにもとづいて Ball, Kodak, Goodrich, University of Arizona, Coi などが開発を行った。材料としてベリリウム、熔融シリカ、ゼロデュア、ボロシリケートなどがそれぞれ採用された。いずれも、薄メニスカス鏡を用い軽量化をはかり、多数のアクチュエーターを軽量構造の上に配置し、アクティブに制御することにより必要な精度を達成するものである。これらにともなって、軽量マイクロアクチュエーターの開発や、極薄の鏡面の製作技術などが開発された。これらは今後に応用可能な斬新で興味深い技術である。

新材料の開発 JWST の開発とは別に、特に波長の長いサブミリ、赤外線などのスペース機器での応用を目指して、新材料を用いた、軽量鏡の開発が盛んに行われるようになってきた。これらは炭素系の高剛性材料を用いることにより軽量化を計るものである。日本での開発に限ってもカーボンカーボン、C/SiC, SiC, 反応焼結型 SiC, 焼結型 SiC, などがあり、それぞれの特徴がある。これらの材料は高硬度である利点はあるが、もろさ、鏡面用としての表面特性、温度特性など超軽量鏡としての適性が不明であり、基礎的な開発評価が実行されているのが現状である。Astro-F では SiC 構造体に SiC を CVD で形成して鏡面としている、また宇宙研の赤外天文衛星計画である SPICA でも、新素材の開発が進められている。

多様な材料を用いることが可能であるが、いずれも JASMINE 光学系に適用するための基礎材料がそろっていない。現時点では基礎的な評価開発、応用研究を進めることが必要である。今のところ各所で盛んに評価開発が進められているのでこれらとの連携を強めつつ、JASMINE でも固有の評価開発を進めることが必要であろう。また実用化の段階でも、各段階で要素技術の開発が必要となってくる。

この中で、反応焼結型 SiC は東芝で開発されている方法であるが、炭化ケイ素粉末と炭素粉末からなる成形体を作製し、これに熔融したケイ素を含浸して、炭素とケイ素を反応、炭化ケイ素を合成する方法である。粒径を制御することにより、強度を飛躍的に上げることに成功した。鏡面への応用は宇宙開発事業団(現 JAXA)のグループがおこなっており、CVD 処理することなく、研磨するだけで鏡面として用いることができそうである。鏡面性能を上げるためには、製作時の粒状径の操作により、Si 成分を極力少なくすることが肝要である。また、アルミ、銀、金などもガラスと同様の方法で蒸着可能であることが実証されている。この様に鏡面とし

ての性能は十分なものを備えていることが実証されつつあるが、高精度の構造体の形成や大型材料の製作についてはまだ開発が必要である。そこで、現在我々は、NEC 東芝スペース社および JAXA と協力し、この方式での鏡の製作の実験を開始した。当面は Nano-JASMINE 仕様、口径およそ 5cm の鏡で十分な鏡面精度および工作精度を確保できるかどうかについて実験する。JAXA では大型鏡を反応焼結型 SiC で製作する研究も進めており、この動向を見ながら本番 JASMINE に向けた検討も徐々に行なっていく。

6.8.2 検出器の開発と配列技術

アストロメトリ (位置天文学) における観測精度は、ほぼ鏡の大きさおよび検出器が見込む天球上の面積に比例する。従って、質の良い焦点面をできるだけ広く確保し、この中に密に検出器を配列することが重要となる。

検出器の配列技術は、地上観測にも重要な技術である。現在、国立天文台ハワイ観測所では、Hyper Suprime-Cam の開発を行なっており、ここではおよそ 200 個の CCD 検出器を焦点面に密に実装する技術開発を行なう予定である。この作業は、ハワイにおける他の作業のスケジュールの遅れによって多少遅れているが、近々始められる予定である。

検出器の配列のための技術開発の要素は、以下の点である。

1. 有効な視野を最大限確保するために、検出器間のすき間をできるだけ狭くする必要がある。
2. 多数の検出器の配置を容易にするため、検出器をパッケージに貼りつけた時の機械寸法のバラツキを最小限にする。

1. の要求のためには、受光面以外の部分を最小限にする必要がある (buttable type と呼ぶ)。目標不感領域の幅を 2mm に設定し、開発を行なう。

2. の要求は、具体的には受光面と底面の平行度、素子間の受光面の高さのばらつき、いずれもピクセルのサイズ程度、すなわち $\pm 15\mu\text{m}$ 以下とすることが目標となる。そのため、パッケージ素材としてシリコンと線膨張率が近い窒化アルミを選定し、試作品を作成した。研磨を終了した最終製品で、平行度で $\pm 5\mu\text{m}$ 程度に抑えられていることを確認した。高さについては、シートエポキシを用いると $50\mu\text{m}$ 程度のバラツキが出てしまうので、スクリーン印刷を用いた接着方法を検討し、目標の $\pm 15\mu\text{m}$ を達成した。

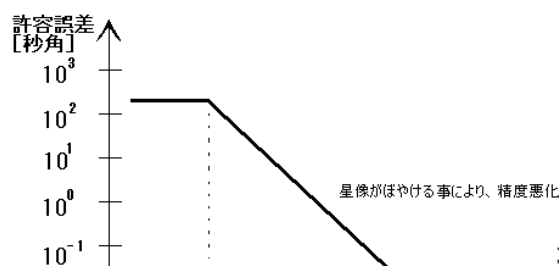
これら地上大フォーマット CCD 撮像装置に比較して、JASMINE において最も重要なことは、すべての CCD のピクセルの配列の方向を高い精度で揃えることである。JASMINE では、TDI を用いたスキャン観測を行うためである。ひとつの CCD 内両端でピクセルのおよそ 1/10 程度の精度内にこれらが配置される必要がある。一方で検出器間の隙間については、スキャン方向に関しては制限がゆるく、さらに、非常に F 比の大きな光学系を用いている関係で被写界深度が浅く、光軸方向の精度要求もはるかにゆるくなる。配列に関しては熱伝導率を確保したまま、いかに軽量化をはかり、打ち上げ時の機械強度を高めるための工夫が必要となってくる。地上での経験を参考にしながら、新たな JASMINE 用大フォーマット CCD 装置の開発が必要である。

今後、配列技術に関しては、焦点面への実装後の熱試験、振動試験などを行ない、人工衛星に搭載した場合においても観測地点で地上実装を行なった場合の目標精度を達成できるかどうかを確かめる必要がある。

6.8.3 指向安定性

衛星は主に太陽輻射による熱変形、更にジャイロ、高精度の姿勢制御をおこなうリアクションホイールといったバス部からくる様々な機械振動が常に存在し観測の妨げとなっている。精度の高い観測を行うためにこういった熱変形、機械振動から可能な限り守らなければならない。

そこで、我々が望む観測精度を達成するため必要となる熱変形、機械振動に対する制限がどの程度なのか問題となる。JASMINE では $10\mu\text{as}$ の精度で星



の位置を測定するが、指向精度が $10\mu\text{as}$ 必要であるという意味ではない。大角度離れた2つの視野を同時観測することで衛星の姿勢と星の位置を同時に解くこととなるので観測中の振動や熱変動も解析により解くことになる。したがって、星から来る光子が分散して目減りしてしまわない程度に振動や熱変動を抑えなければならない事が指向精度に対する条件となる。具体的には振動などによりエアリーディスクの10%、もしくはPSFのサイズ λ/D の20%以下に抑える事を条件とする。これはおよそ検出器上で1ピクセル程度の大きさに相当し、数値シミュレーションによれば、振動のない理想的な状況に比べて8%程度精度悪化する。また、ビーム混合鏡の相対角に関しては衛星の姿勢と星の位置を同時に解く時の基準となるので同時に解析的に解く一連のデータの時間スケール、すなわち自転の時間スケールである5時間で $10\mu\text{as}$ の精度が必要となる。

スピン軸精度

スキャン方向と検出器の画素列の角度誤差は星像が検出器のピクセル列をまっすぐにすすむ必要があるため、1検出器を通過する間に1ピクセル以上ずれないことが要求される。検出器はサーベイ方向には4Kピクセルあるので $1.4 \times 10^{-2}\text{deg}$ ($2.5 \times 10^{-4}\text{rad}$) 以下とする。

指向制御精度要求

観測手法のところでも述べたが、衛星は大円上をサーベイしながら、一周回るたびに4分の1視野 (0.12°) ずつずらしていく予定である。ただし、視野の10分の1程度ずれたとしても解析に影響はでない。したがって、絶対的な制御精度としては 0.05° あればよい。

指向安定度要求

指向安定度要求に関しては先程述べたように、星の像が振動によって広がってしまい光子が目減りしてしまう事のないようにする条件である。すなわち、星像が検出器上を通過する時間スケール (3.5s) で検出器上で1ピクセル以上ずれないための条件となる。この条件はサーベイ方向、サーベイ方向に垂直な方向共に同じ条件となる。1ピクセル以上ずれない条件をサンプリング間隔ごと、すなわち周波数ごとにまとめると次のようになる。

- サンプリング間隔 1.7sec 以下において、 $6.9 \times 10^{-6}\text{deg}$ 以下 (RMS 値)
- サンプリング間隔 1.7sec 以上 $1.3 \times 10^4\text{sec}$ 以下において、 $6.9 \times 10^{-6}/\text{sec}$ 以下 (RMS 値)
- サンプリング間隔 $1.3 \times 10^4\text{sec}$ 以上において、 $5.0 \times 10^{-2}^\circ$ 以下 (RMS 値)

上でのべた3つの条件のうち最後の項目は検出器通過時間スケール (3.5s) で検出器上で1ピクセル以上ずれないための条件ではなく、指向制御精度要求 (0.05°) から来ている。この低周波領域では指向制御精度より指向安定度要求値のほうが甘くなるので、指向制御精度要求が条件となっている。

ビーム混合鏡相対角

ビーム混合鏡相対角 49.75° (ベシックアングル 99.5°) をもって設置されている。この相対角の管理はアストロメトリー観測を行うのに非常に重要であり、位置決定精度に直接的に影響する。そこで、この相対角に対する要求を考える。ビーム混合鏡の相対角に関する条件に関しては衛星が自転する時間スケール (5h) で相対角が $10\mu\text{as}$ 以下で管理される事が条件となる。これをサンプリング間隔ごとにまとめると次のようになる。

- サンプルング間隔 7×10^{-4} sec 以下において 25mas 以下 (RMS 値)
- サンプルング間隔 5×10^{-4} sec 以上 1.7sec 以下において $17\mu\text{as}$ sec 以下 (RMS 値)
- サンプルング間隔 1.7sec 以上 5.0h 以下において $10\mu\text{as}$ 以下 (RMS 値)
- サンプルング間隔 5.0h 以上において $2\mu\text{as/h}$ 以下 (RMS 値)

ビーム混合鏡相対角に関しての 4 つの振動数領域での条件のうち、3,4 番目は 5 時間で $10\mu\text{as}$ ずれない条件であるが、2 番目の条件は高周波に行くに従い条件が甘くなっている。これは検出器上を星が 3.5s で通過する間積分されるので 3.5s スケールより細かい周波数の振動はならされる方向に働くためである (積分されたフォトンの重心のずれが重要である)。1 番目の条件は、星の像が振動によって広がってしまい目減りが起こらない条件の方が厳しくなるのでこれがビーム混合鏡相対角の条件となっている。

以上で述べた、指向安定度要求、ビーム混合鏡の鏡の相対角の精度要求を振動数ごとにグラフにまとめ、図 6.32 に示す。

以上からわかるように 5 時間スケールでのビーム混合鏡の相対角の管理が最重要課題となるであろう。すなわち、ビーム混合鏡の機械的な振動よりは、長周期の熱変動がもっとも影響し、慎重に取り扱わなければならない。また、それより長い周期のものはデータ解析の際に解くことが出来る。今後、ビーム混合鏡の温度管理が最重要課題となる (熱構造の章のところを参照)。

6.8.4 ビーム混合鏡ならびに観測装置の熱変動制御とモニター

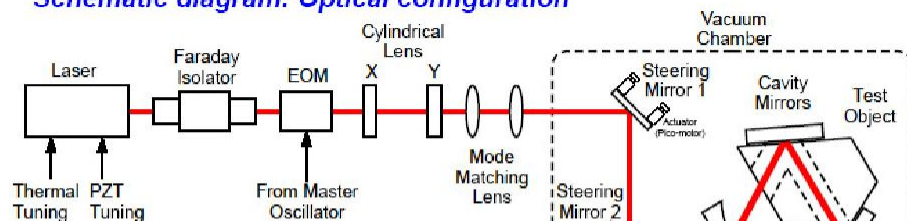
ベーシックアングルモニター

JASMINE での位置決定の目標精度 $10\mu\text{as}$ を達成するには、光学系や統計的に十分な数の光子数を集めることはもちろん重要である。また、JASMINE の特徴として、衛星の時々刻々の姿勢 (回転軸の方向や回転速度など) や搭載されている装置の向きに関する情報は、星の位置情報と一緒に解析によって解くことができるため、視野内に目標の星をいれ TDI 観測に支障のない範囲で回転軸と回転速度が制御できれば、それ以上に衛星自体の姿勢を高度に制御する必要が無いことも、JASMINE の観測を可能にするポイントとなる。しかしながら、これらの解析ではビーム混合鏡の相対角度が一定であることが必要である。この角度が目標精度 $10\mu\text{as}$ の範囲内で一定でなければ、これが解析の上での誤差として残るため、十分な精度が達成できない。解析方法を少し工夫することによって、角度の変動がモニター出来ていれば、角度が変動しても良い。しかし、このモニターもやはり $10\mu\text{as}$ の精度で行なわなければならない。

熱構造の箇所です述べたように、単純な熱構造モデルでの評価により、ビーム混合鏡に対する熱入力の変動が約 0.1W 程度に抑えられると、ビーム混合鏡の温度は 1mK に抑えることができ、ビーム混合鏡の相対角度変動は $10\mu\text{as}$ 以内に抑えることができることが分かった。コンピューターによるより詳細な熱解析は今後行なわれる予定である。一方で、 $10\mu\text{as}$ の角度安定性は従来達成されたことのないものであるため、コンピューターによるモデル化を裏付けるために、実際に構造物を作ってこの変動要求を達成できるかに関する実験が必要となる。このために、ベーシックアングルモニター実験を開始する予定である。更に、衛星機上でのモニターが必要になる場合も想定されるので、機上搭載も視野に入れた地上実験用モニター装置の開発を進める。まず、ビーム混合鏡の試作品が、予想される衛星振動や熱環境のもとでどの程度変動するかを地上で測定し、これが熱・構造計算から予測される値と大きく異ならないことを確かめる。角度の精密測定は、国立天文台の重力波干渉計のプロジェクトで実績があり、必要な装置の調達や組み立て、調整などは国立天文台重力波プロジェクト推進室の新井氏の協力を得て行なう。なお、角度モニターの開発に関して、宇宙科学研究本部の平成 16 年度戦略的開発研究費からサポートを頂いている。

角度モニターにはレーザー測定を用いるが、この手法にはいくつかの方

Schematic diagram: Optical configuration



法がある。事前の検討では、JASMINE の角度測定の精度要求からは波面検出器や、周波数安定化レーザーによる距離測定が適していると考えられる。そこで、新井氏の協力を得て、その原理を用いた光学系を例えば図 6.33 のように構築し、地上での測定を行なう。

波面検出 (Wave Front Sensing : WFS) の場合で、要求値の約 100 倍、1mas(ミリ秒角) を初期目標として設定する。実際に、重力波の干渉計で吊

られたミラーの揺れを WFS を用いて測定した結果、 $d\theta = 6\text{mas}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($f \sim 1\text{Hz}$) 程度の揺れが検出できており、測定精度はこの値より十分小さい。実際には固定されたビーム混合鏡は吊られた鏡よりも安定なはずである。一方で JASMINE で要求される数時間 (周波数にすると 10^{-4}Hz 程度) という低周波でのレーザーなど測定系の安定度が、重力波実験で実際に測定されている 1Hz 付近と比べてどうなっているかは不明で、今後実験で確認する必要がある。

角度の測定手段として、WFS は精度が高いが干渉を用いるため装置が複雑になる。精度が若干劣るが装置が単純化できる光てことと呼ばれる方法があり、こちらを用いた装置開発も並行してすすめる。機上搭載を視野に入れば、装置が単純であることは重要な要素となる。

WFS の手法に加えて、長さの変化で角度を測定する手法の場合についても検討した。こちらも初期目標として JASMIN の requirement の 100 倍というのは可能な範囲内である。光共振器で距離を測定するとして、共振器長が 1m では長すぎるので、より交差点に近い部位で測定することにして、共振器長 $L = 0.1\text{m}$ では長さ変動 $dL = 7 \times 10^{-12}\text{m}$ 程度となる。必要となる周波数安定度 ($d\nu = 2 \times 10^{-4}\text{Hz}$ に相当) は、レーザー単体では達成できそうに無いので、レーザー周波数を別の共振器で安定化するなどの工夫が必要である。

この場合、安定化用共振器の熱膨張などが問題となるが、OHARA ガラスの CLEARCERAM-Z HS という低熱膨張率ガラス (膨張係数 $0 \sim 1 \times 10^{-8}/\text{K}$) での簡単な試算の結果、温度の変化が 0.01K 弱以下である必要がある。0.1K の温度安定度であれば現在達成可能な範囲なので、今後の実験で目標値は可能な範囲であると考えられる。

6.8.5 放射線耐用に関して

日本でも従来多くの天文ミッションがあるが、データ処理の観点から JASMINE の従来のミッションと異なる大きな特色は、連続的スキャン観測にある。即ち、従来のミッションが静止画を撮影するミッションであったのに対し、JASMINE では動画を撮影するミッションになる。オンボード処理のところで示した通り、JASMINE のデータは焦点面イメージではなく星像を切り出して地上に転送される。この操作は一秒あたりで 2.3 億ピクセルの画像を処理し、この中から星像を数千個から 10 万個程度切り出す作業となる。この操作を衛星の上で行なう必要がある。これは、現在の地上のコンピューターであれば、パーソナルコンピューターレベルでも可能な範囲である。

しかしながら、宇宙環境では放射線が非常に多い。このため、宇宙で利用できる電子機器は放射線に耐えるように設計された製品でなければならず、特殊なものとなる。このような耐放射線部品は高価であるばかりで

なく、地上のコンピュータの目覚しい発展に取り残されている。地上の部品は集積度を上げることにより性能を向上してきたが、集積度を高くするとそれだけ放射線に弱くなるためである。2005 年ころ打ち上げを予定している ASTRO-F ミッションでは 80186 相当品が、また 2006 年ころ打ち上げを予定している SELENE ミッションでは SH-3 を三重冗長系にして使用している。プロセッサの速度を表す MIPS 値では、80186 は 1MIPS 以下、SH-3 は 50MIPS 程度とされているが三重冗長を行なうため 10MIPS 程度の処理能力しか出ないと思われる。地上のパソコン搭載の CPU は 1000MIPS を越える数値を出すのに比べて、宇宙用のプロセッサは処理能力の意味では非常に貧弱である。

JASMINE では、今後二通りのアプローチを並行して進める。一つは宇宙用の高速な CPU の開発動向を見極めることである。日本では旧宇宙開発事業団が開発を行なっているものがあり、試作品が既に完成している。この CPU は、処理能力でおよそ 200 ～ 300MIPS 程度は可能である。多くのミッションで利用することになれば、価格も廉価となり科学ミッションでの利用も視野内に入ってくる。もう一つは、複雑処理系と単純処理系に分離することである。複雑な処理を必要とする処理はそれほど多くないので、そこには低速の CPU を用いる。上記の SH-3 は宇宙環境では三重冗長にする必要があったが、東大阪の工場で民間の小型衛星を作るプロジェクトでは、もう一世代前の SH-2 を検討している。10MIPS 程度の処理能力がある。高速処理が必要な部分は星像を切り出す作業だが、単純なピーク探索に最も時間を要するので、ここには宇宙用 FPGA を用いる。

上で述べた計算処理に係わる半導体部品のほかに、CCD 検出器の放射線耐性も重要な検討課題である。特に、JASMINE で検討している CCD 検出器は空乏層が厚いため、放射線によるダメージを受けやすいと考えられる。CCD 検出器が放射線により影響を受けると、電荷転送率が変化する効果とホットピクセルが出来る効果がある。電荷転送率の変化は検出器の温度を上げてやることで回復できるため、例えば衛星にヒーターを搭載するなどの回避手段が考えられる。ホットピクセルが出来た場合は回避する手段が無いので、こちらの効果はシリコン基盤の製作手法およびデータ解析の両面から、この効果による悪影響を最小限に抑える工夫が必要となり、今後の課題となる。

6.9 超小型衛星を用いた Nano-JASMINE 計画

6.9.1 概要

超小型衛星 (20cm 立方程度のサイズで重さが数 kg 程度) をスペースに打ち上げ、実際の宇宙環境において、JASMINE 計画が提案している高精度天体位置測定方法やその技術課題の実証を行うことを目的とした Nano-JASMINE 計画を、JASMINE の技術実証の一環として検討している。具体的には、JASMINE の縮小版のミッション部を超小型衛星用に設計製作し、また JASMINE と同じタイプの z -band 用 CCD 検出器も開発し、超小型衛星に用いる。そして、衛星システムの設計開発、試作、実験、製作、試験、打ち上げ、運用、データ解析という大型衛星が行う一連の作業を短期間 (約 4 年間) で全く同様にいき、技術実証や問題点の洗い出しなどを行い、JASMINE 衛星の実現への礎を築く。さらに、超小型衛星による天文観測は初めての試みとなるが、超小型衛星自体も本開発を通じて技術の進展を目指し、より幅広く高度な他の天文観測等への利用性の拡張を目的とする。

さて、ヒッパルコスより 2 桁の精度向上を目標とするためには、観測手法や技術の革新が必要である。そのため、望遠鏡の大型化の他、星像中心を高精度で決定できるための光学系の工夫、さらにヒッパルコスと違って、CCD を用いて、その TDI モード (drift scan モード) を稼働し、星像中心の位置決定を高精度で行うことが必要である。これらの革新的な方法が実際のスペースでうまく実現するかどうかは、地上でも行える一部の限られた実験以外は、本番で試すしかない。しかし、中・大型衛星の場合、最初の段階から本番までは長時間かかり (10 年～15 年程度)、さらに莫大な経費がかかることから本番で試すのはかなりリスクも大きい。

そこで、最近急速に進展している超小型衛星を用いれば、安価で実現可能性が高く、また開発から運用まで短期間で行うことが可能であり、技術実証を早いタイムスケールで行うことが可能である。本計画では、このような目的で、超

軌道	太陽同期軌道 (候補)
自転周期	100 分
高度	300km - 800km
主鏡直径	5cm
焦点距離	167cm
視野	30 分角 × 30 分角

小型衛星を位置天文観測に応用するが、これは世界初の試みである。

さて、実際に 10cm~20cm 立方のサイズで重さが 1kg~10kg 程度の超小型衛星 (Nano-satellite) の開発が進展してきている。短期間での開発、製作、打ち上げ、運用を可能とし、また低コスト (例えば、バス部のみの衛星の試作、製作に 1000 万円程度、打ち上げ費用は、衛星 1kg 当たり約 100 万円で可能だった例もある) で実現可能である。学生の教育、技術実証、あらたな利用方法の拡張、新規分野の衛星計画参入のしきいを下げるなどを目的としている。日本では、東大と東工大などで開発が行われており、両大学は 2003 年 6 月 30 日にロシアにおいて超小型衛星の打ち上げに成功、現在も順調に運用を続けている。JASMINE チームでは、この東大が開発している CubeSat と呼ばれる超小型衛星を用いて、東大と共同開発を行っていく。本計画によって、超小型衛星用の姿勢制御や温度管理などさらに高度なシステム管理機能を開発し、今後の天文観測衛星等の科学衛星にも利用可能な高度な衛星システムを開発していく。

6.9.2 観測装置

Nano-JASMINE は、JASMINE の技術実証を行なうという目的から、できるだけ JASMINE と同じ設計図をそのまま小型化した形で設計したい。

- スピン回転する衛星
- 大角度離れた二つの視野を観測する
- z-band で感度がある検出器を用いた観測
- CCD の TDI モードによる観測を行なうこと
- 大円サーベイによる解析および年周視差の観測

という点は、JASMINE と同じである。しかしながら、小型であるために、全く同じように開発できない部分がある。それは、

- CCD のサイズ
- 投入軌道
- 結像光学系

の三点である。

CCD は、搭載面積などの問題から JASMINE と同じ素材、同じ手法のものを用いる予定である。しかし、望遠鏡のサイズが JASMINE の 1/30 程度であるため、焦点面の面積も 1/30 程度となる。そこで、ピクセル数は 1024×1024 のものを 1 個用いる仕様とする。

光学系は、JASMINE で有力視されている 3 鏡系を用いると、光部品とその支持機構が、非常に小さくなり製作困難となるので、2 鏡系を採用している。具体的には、図 6.34 のようになる。

光学系および望遠鏡筒は、JASMINE では反応焼結型 SiC を用いることとしている。この素材は現在開発中であり、一方 Nano-JASMINE は早期打ち上げに意味があるため、反応焼結型 SiC の開発が進むのを待つわけ

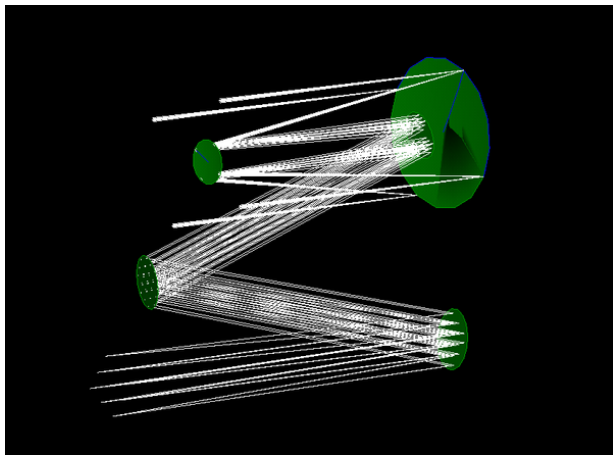


図 6.34: 光学システム概観

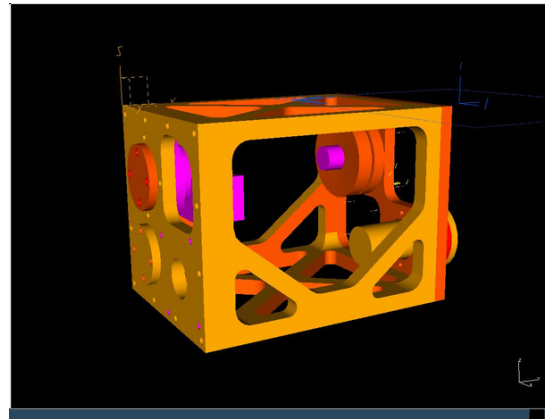


図 6.35: 望遠鏡の組み立て図。右奥に主鏡、左側にビーム混合鏡が取り付けられる。左手前下側の穴から光束を取り出し、鏡筒フレームの外側に設置した検出器に像を結ばせる。

には行かない。そのため、光学系素材としては、反応焼結型 SiC とアルミニウムの双方で検討し、反応焼結型 SiC が早期に開発できれば反応焼結型 SiC を、そうでなければアルミニウムで組み立てたものを打ち上げに使用することとなる予定である。

SiC を用いる場合の問題点は、SiC はいわゆる「焼物」であるために比較的簡単な構造しか作れないことが上げられる。どの程度複雑な構造が可能かについては、今後メーカーと相談しながら検討して行く。また、SiC の利点である硬さは同時に脆さにもつながる。

アルミ式望遠鏡の全体構造は、図 6.35 のようになる。全体は直方体形のフレームと基板に光学コンポーネントをネジ止めする形式で検討している。直方体の大きさは底面約 12cm 平方、長さ約 150cm となる。アルミニウムの熱安定性 (伝導率/膨張率) はガラスや SiC に比べて高いとは言えないが、望遠鏡全体を同じ材質で構成することで、温度環境が変化しても光学系が相似的に変化し、焦点調節機構等を簡略化できることが期待できる。また加工が楽であり、比較的複雑な形状の部品をを一体型で製作できる。何より、最近の超精密切削技術を用いることで、比較的安価で短時間に非球面鏡の加工が可能である長所がある。ただし、他の金属やガラス、セラミック等の材質に比べて軟らかい点の注意が必要である。

現在、超精密旋盤による主鏡・副鏡の加工、そしてフライカッ

トによる平面鏡 (3,4,5 鏡) とビーム混合鏡の加工を検討している。どちらも表面粗さは α バンド使用に耐えられるレベルであるが、加工時の歪みによる形状精度の悪化を抑えるのは易しくなく、部品取り付け形状や加工段取りについてメーカーと検討中である。

組み立て方法は、個々の部品の精度を確保するため、3 次元測定を行いながら調整を繰り返したうえで、ピンで分解後の再現性を確保することになる。具体的に光学系を設計するために、許容誤差などを計算しているので、今後は試作品を製作し、鏡面精度、組み立て精度ともこの許容誤差以内におさめるための製造方法や組み立て方法について検討する。

さらに CCD 制御基盤の開発と駆動試験に関して、TDI 駆動に対応した読み出しボードの開発、読み出し試験を行っている。図 6.36 は、試作した CCD 制御基盤とその実験用 CCD である。これを用いて、TDI 駆動による読み出しに成功した。現在、試作望遠鏡に取り付けて実際の星の撮像を目指して、細かいパラメータの調整を行っている。

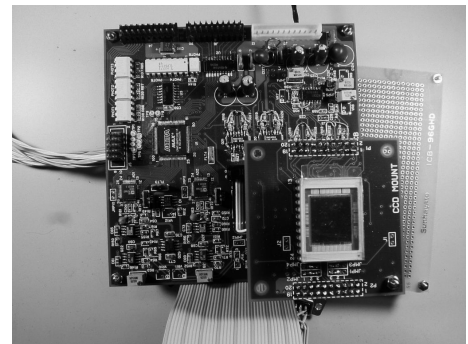


図 6.36: Nano-JASMINE 用 CCD の TDI 駆動用制御用ボード試作品。(カラー 16 ページ)

6.9.3 衛星システム

超小型衛星は相乗りが基本である。従ってシステムを一通りに決めてしまうことは打ち上げ可能性を減らすので是非とも避けたいところである。とはいえ、基本路線は必要であり、現段階で予定されている Nano-JASMINE のシステムを以下に列挙しておく。

- 軌道

Nano-JASMINE の軌道としては太陽同期軌道を候補とする。これは、Nano-JASMINE が他の衛星と相乗りで打ち上げられる性格上、打ち上げ可能性の高い軌道を考慮する必要があるからである。また、本番の JASMINE と同様熱的環境が比較的安定である事が望まれる。その点太陽同期軌道は何ヶ月にもわたり地球の影に隠れることなく軌道を回り続ける事が出来るので、影に隠れることによる急激な温度変動もなく非常に有望である。

- 姿勢

本番 JASMINE の場合、姿勢としてスピン軸を銀極方向から 3.5° 傾け大円サーベイを行いながら、スピン軸を銀極周りで歳差運動させることにより 銀河面を含む銀緯 $\pm 3.5^\circ$ の範囲をサーベイするが、Nano-JASMINE の場合、本番の JASMINE のような銀河面サーベイをおこなう事はしない。それは Nano-JASMINE が銀河面サーベイを行おうとすると選べる軌道にも制限が出てしまい、打ち上げの機会を減らす事になるからである。また、Nano-JASMINE は技術実証のための衛星であり、必ずしも銀河面をサーベイをする必要がない。しかし、JASMINE の観測手法の本質である大角度離れた大円上 2 方向の同時観測は Nano-JASMINE でおこなっておく事が重要である。そこで、銀河面にはこだわらず打ち上げられた軌道で選ぶことの出来る大円上をサーベイしながら観測する予定である。衛星のスピンに関しては、太陽同期軌道を選ぶ場合、自転周期を軌道上の衛星の公転周期である 100 分に同期させて常に地球を背にして観測できるようにする事が出来るため、その仕様を検討中である。この方法により地球が邪魔する事で観測時間が制限されるのを避ける事が出来、また、地球アルベドなどによる熱の影響などが軽減される。

- 指向安定性

検出器通過時間スケール 3s で 740mas 以下に振動を抑える。またベシクアングルに関しては自転の時間スケール 1h で 1mas に抑える。姿勢制御精度要求としては 0.05° を要求する。

- 通信量

データ解析としてはやはり JASMINE 同様に星像まわりを 5×9 ピクセルに切り取り星像中心を求める手法をとる。得られたデータ量としては 1 次元として取り出した場合、 3×10^2 bps であり、2 次元のまま取り出したとしても 1Mbps 程度なので通信量が問題となる事はないと思われる。

- 打ち上げ

打ち上げは 2007 年を目指して開発中である。打ち上げロケットとしては超小型衛星の第一号機が 2003 年 6 月にロシアから打ち上げられた事からも解るとおり、日本にこだわらず、ロシアなど、可能性のあるものはすべて視野に入れて出来るだけ早く打ち上げられるよう検討する。

6.10 今後の予定

6.10.1 体制、予算

先ず、JASMINE 計画に関する今までの経緯を簡単に記述する。

1997 年の国立天文台第三者評価委員会において、検討推進勧告を次のように受けた (国立天文台のホームページ内⁷を参照。)：ヒッパルコスの成果を踏まえて位置天文学の将来を見据えたとき、遠方のクエーサーに

⁷<http://www.nao.ac.jp/ReportJ/index230.html>

準拠した銀河スケールでの位置天文を進めるのが肝要だと考えられる。それには、スペースアストロメトリー計画が最も近道であり実現性も高いと考えられるので、その実現の可能性を真剣に検討すべきであろう。

その後、1999 年から、有志の少数メンバーにより、JASMINE 計画の検討を開始し、現在では国立天文台を中心とし、JAXA や大学のメンバーにより、検討、開発が進められている。その間、研究会、シンポジウムの開催や、学会、セミナー、国際会議での発表を通じて JASMINE に関する報告を広く行うとともに、国立天文台に設置された将来計画委員会のもとにアストロメトリ衛星ワーキンググループが形成され活動を行ってきた。また、光赤外将来計画委員会のもとのスペース班サブグループとして JASMINE グループも加入し、光赤外天文学分野の一員としても活動を行っている。さらに、科学衛星を実現するための正式ルートの第一歩として、JAXA 宇宙科学研究本部宇宙理学委員会において、ワーキンググループ設立が承認される必要があるが、JASMINE は 2003 年 10 月の宇宙理学委員会においてワーキンググループ設立をご承認いただいた。現在 (2005 年 2 月) のところのワーキンググループメンバーは、天文学、宇宙物理学研究者、宇宙工学研究者などを中心として、84 名で構成され、JASMINE へのご支援、ご協力をいただいている。以下、そのメンバーリストを示す。ご興味のある方には参加を是非御願いたい。

JAXA 宇宙科学研究本部 JASMINE ワーキンググループメンバー (2005 年 2 月時点 84 名)

★国立天文台

- JASMINE 検討室 : 郷田直輝、辻本拓司、矢野太平、菅沼正洋
- 天文機器開発実験センター : 小林行泰
- 光学赤外研究部 : 中島 紀、家 正則、安藤裕康、田村元秀、山田 亨、児玉忠恭
- ハワイ観測所 : 高遠徳尚、宮崎 聡、唐牛 宏
- スペース VLBI 推進室 : 井上 允
- 水沢観測所 : 河野宣之、花田英夫、真鍋盛二、鶴田誠逸、浅利一善、荒木博志、野田寛大、田澤誠一
- VERA プロジェクト室 : 本間希樹、官谷幸利
- 重力波プロジェクト推進室 : 新井宏二

★宇宙航空研究開発機構

- 宇宙科学研究本部 : 井上 一、川勝康弘、満田和久、堂谷忠靖、松原英雄、平林 久、岩田隆浩、峯杉賢治、小川博之、川口淳一郎、山川 宏、橋本樹明、齋藤宏文、山本善一、高橋忠幸、塩谷圭吾
- 総合技術研究本部 : 野田篤司、對木淳夫、小川 亮、上田裕子、歌島昌由、酒匂信匡、澤井秀次郎
- 宇宙基幹システム本部 JEM/ : 稲谷順司
- SMILES ミッションチーム

★北海道大学 : 日置幸介

★弘前大理学部地球環境 : 浅田秀樹

★東北大学大学院理学研究科天文学専攻 : 土佐 誠、千葉柁司

★群馬県立ぐんま天文台 : 奥田治之

★放送大学 : 宮本昌典

★独立行政法人通信総合研究所 : 細川瑞彦

★東京大学

○大学院理学系研究科天文学専攻 : 岡村正矩、尾中 敬、牧野淳一郎

○大学院理学系研究科物理学専攻 : 佐藤勝彦、須藤 靖

○大学院理学系研究科附属ビッグバン : 樽家 篤史

宇宙国際研究センター

○天文学教育研究センター : 吉井 讓、中田好一、小林尚人

○大学院総合文化研究科広域システム : 上野宗孝

宇宙地球科学専攻

○宇宙線研究所	: 安田直樹
○大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻	: 中須賀真一
★独立行政法人理化学研究所中央研究所計算宇宙物理研究室	: 戎崎俊一
★新潟大学理学部物理	: 西 亮一
★名古屋大学大学院理学研究科物理学	: 池内 了、芝井 広
専攻	
★三重大学教育学部	: 奥村晴彦
★長野工専	: 大西浩次
★亜州大学 (韓国)	: 笹尾哲夫
★京都大学	
○大学院理学研究科物理学宇宙物理学	: 山田良透、舞原俊憲、稲垣省五、長田哲也、金谷秀幸
専攻	
○大学院人間環境学研究科	: 阪上雅昭
★兵庫県立西はりま天文台	: 黒田武彦
★鹿児島大学理学部物理学科	: 面高敏宏

また、国立天文台では、平成 16 年度から内部の組織変更を行い、プロジェクト室制をスタートさせた。それに伴い、プロジェクト室の一つとして、JASMINE 検討室設置が正式に認可され、平成 16 年 4 月から運営をスタートしている。平成 17 年 2 月時点で常任メンバー 3 名、併任メンバー 10 名、研究員 1 名、外国人研究員 1 名、事務支援員 1 名で構成されている。

さらに、JASMINE では、内部でいくつかのワーキンググループが形成され (観測手法検討 WG、光学系・検出器検討 WG、シミュレータ WG、衛星システム検討 WG、星像中心決定実験 WG、オンボード処理 WG、Nano-JASMINE 検討 WG、角度モニター検討 WG、測光検討 WG)、日常的な活動とともに、定期的に検討会、勉強会を開催し、JASMINE の検討開発を進めている状況である。ちなみに、測光検討 WG は GAIA の測光検討 WG メンバーでもある在外の外国人メンバーもおり、国際的な協力のもとで進められている。現在のところ、これらの WG に参加している主要なメンバーは以下の通りである。

★国立天文台

○ JASMINE 検討室	: 郷田直輝、辻本拓司、矢野太平、菅沼正洋、Arunas Kucinskas
○天文機器開発実験センター	: 小林行泰、山内雅浩
○光学赤外研究部	: 中島 紀
○ハワイ観測所	: 高遠徳尚、宮崎 聡
○水沢観測所	: 河野宣之、花田英夫、鶴田誠逸、浅利一善、荒木博志、野田寛大、田澤誠一
○重力波プロジェクト推進室	: 新井宏二

★宇宙航空研究開発機構

○宇宙科学研究本部	: 川勝康弘、松原英雄、井上 一、岩田隆浩、塩谷圭吾
○宇宙利用推進本部	: 油井由香利
○総合技術研究本部	: 野田篤司、對木淳夫、小川 亮、歌島昌由、酒匂信匡、上田裕子

★東京大学

○大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻	: 中須賀真一、小野雅裕、相田彩夏
--------------------	-------------------

★京都大学

○大学院理学研究科物理学宇宙物理学	: 山田良透
専攻	
○大学院理人間環境学研究科	: 阪上雅昭、丹羽佳人

★新潟大学大学院	: 桑原 立
----------	--------

なお、予算としては、現在まで、主に科研費、東レ科学研究助成金、国立天文台研究推進経費ならびにプロジェクト経費、さらに宇宙科学研究本部戦略的開発研究費により、検討、基礎開発などを行ってきた。今後も 4、5 年間は科研費や国立天文台研究推進経費、宇宙科学研究本部の戦略的開発経費などの競争的資金に

応募しながら基礎開発、技術実証実験などを進めて行く予定である。その後、宇宙科学研究本部にミッション要求を行いたいと考えている。JASMINE 計画の予算としては、サイエンスの達成目標を見極めながら、なるべく安価に収まるように観測手法、衛星のミッション部、バス部の仕様を今後も真剣に検討して詰めていきたいと考えている。なお、Nano-JASMINE 計画は、打ち上げ費用も含めすべてで数千万円程度と見込んでいる。

6.10.2 スケジュール

次に今後のスケジュールとマイルストーンを表 6.5 にまとめる。もちろん、これは現在、目標としているスケジュールであり、今後の変更がありうることはご注意願いたい。

6.10.3 最後に

以上、JASMINE の概要、科学目的と意義、他の計画の中での位置づけ、観測手法、観測装置、衛星システム、今での技術実証実験等の結果、今後の技術的課題、体制、予算、スケジュールについて、各々簡単ながら一通りの説明を行ってきた。プロジェクトを完遂させるためには、人的パワー、予算、時間が十分に必要ではあるが、厳しく制限された状況のもとでも実現できるように一步、一步確実に前進していく所存である。例えば、望遠鏡サイズを縮小し、それに伴い予算規模も小さくして実現可能性をより高めるような新たな仕様を真摯に検討中である。今後ご支援、ご協力をお願い申し上げる次第である。

なお、本章の執筆分担者は、郷田直輝 (国立天文台 JASMINE 検討室)、山田良透 (京大理)、矢野太平、小林行泰、辻本拓司 (国立天文台 JASMINE 検討室)、執筆協力者は、西 亮一 (新潟大理)、小林尚人 (東大天文センター)、出田 誠 (国立天文台データ解析計算センター)、浅田秀樹 (弘前大理工)、高橋芳太 (京大基研)、官谷幸

年度	項目	審査など
2003		JAXA 宇宙科学研究本部宇宙理学委員会にて JASMINE ワーキンググループの設置承認 (2003.10.20)
2004	概念設計	国立天文台 JASMINE 検討室 (A プロジェクト室) が発足 (2004.4.1)
	基礎開発、技術的実証	
}		
~ 2007 ~ 2008	Nano-JASMINE の打ち上げ、運用	JAXA 宇宙科学研究本部宇宙理学委員会へのミッション提案、審査
	詳細設計、プロトモデル製作、試験	(国立天文台 B プロジェクト室設置申請)
}		詳細設計審査 (?)
	フライトモデルの製作、試験	試験後審査 (?)
~ 2015	打ち上げ (目標)	(国立天文台 C プロジェクト室設置申請)
}	5 年間のミッション	
~ 2019	データ解析	
~ 2021	データ公開	

表 6.5: JASMINE 計画の今後のスケジュールとマイルストーン

利 (国立天文台 VERA 観測所) 宮崎 聡、高遠徳尚 (国立天文台ハワイ観測所)、新井宏二 (国立天文台重力波プロジェクト推進室)、菅沼正洋 (国立天文台 JASMINE 検討室)、上田誠治 (総研大:H16.9 退学) の方々である。

参考文献

- [1] Ideta, et al. 2000, MNRAS, 311, 7331
- [2] R.Takahashi 2003, ApJ, 595, 418
- [3] Wainscoat et al. 1992, ApJS, 83, 111
- [4] Yano, et al. 2002 , A&A, 389, 143
- [5] Yano et al. 2004, PASP, 116, 667

第7章 JTPF (Japanese Terrestrial Planet Finder - 太陽系外地球型惑星探査)

7.1 はじめに - JTPF とは?

JTPF とは、地球型系外惑星検出を主たるサイエンスドライバーとして、さまざまな天文分野への応用を追求する日本の可視光・赤外線スペース天文衛星将来計画である。

系外惑星、すなわち我々の太陽以外の恒星を周回する惑星の存在は、1995年のドップラーシフト法による発見を契機としたその後の観測により揺るぎ無い事実となった。現在までに140個を超える木星型の巨大惑星が発見されている。この成功に勢いを得て、現在、スペース・地上において数多くの系外惑星検出計画が進行し、提案されている。ただし、その観測手法の多くが間接法と呼ばれるもので、**直接に惑星そのものの画像を得たり、スペクトルを調べたりするものではない**。言うまでも無く、次のマイルストーンは惑星そのものを直接的に観測することであろう。

木星のような巨大惑星の直接検出については、本格的に稼動し始めた8-10m 地上望遠鏡や近い将来の大型光赤外干渉計にとって最も重要な観測的課題とされている。しかし、地球のような、木星よりさらに軽く小さな惑星（ちなみに、木星は太陽の約千分の一、地球は木星の約三百分の一の重さである）を検出するのは、直接法は言うまでも無く間接法においてさえも難しい。だからこそ、系外惑星探査計画において、この最も困難だが重要なステップである「地球型系外惑星の直接検出」に真正面から挑戦する計画が求められている。すなわち、我々の近くにある太陽に似た恒星のまわりにおいて生命を育むことが可能な領域、いわゆる生存可能領域 (Habitable Zone) に位置する地球に似た大気を持つ惑星からの光を主星からの反射光、あるいは惑星自身の熱放射として直接に検出することのできる望遠鏡の実現である。

系外惑星直接検出を実現するためには、

- (a) 主星の反射光あるいは惑星自身の熱放射として暗い惑星を検出するだけの高感度、
- (b) 主星のすぐ近くにある惑星を見分けるための高解像度、さらに、
- (c) 暗い惑星が明るい主星のハロー (星像の裾野) に埋もれてしまわない高コントラスト、

の三者が同時に実現されなければならない (図 7.2 参照)。従来の宇宙天文観測では、このうちの感度・解像度あるいは波長が重視されていたが、(c) は新しい性能を追求するものと言えよう。これを天文衛星で実現するためには、大別して2つの方法があると考えられている (例えば [43, 44])。

一つは、**可視光の高コントラスト望遠鏡**の実現であり、3m クラス以上の口径のスペース望遠鏡において、

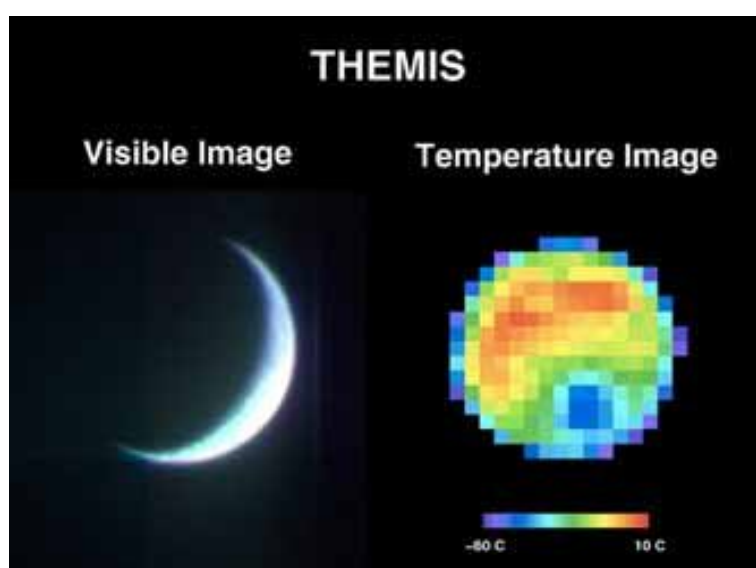


図 7.1: THEMIS 衛星から見た地球の可視光および赤外線画像 (カラー 18 ページ)

高コントラスト、クリーンな光学系、安定した星像を追及することである。二つ目は、主星と惑星のコントラストが惑星からの熱放射の寄与により3桁ほど緩和される中間赤外線観測を追求するものである。波長が長いいため、必要とされる解像度をスペースで達成するためには非現実的な大口径鏡が必要になり、干渉計タイプの望遠鏡が前提となる。さらに、干渉計において高コントラストを実現するために、干渉計の対称軸上の主星に対して位相がキャンセルするような**(中間赤外線) ナル干渉計**が提案されている [6]。

これ以外にも、地上の超大口径 (> 20m) 鏡で得られる圧倒的な高解像度を生かして、事実上の高コントラストを得てしまう可能性がある。しかしながら、この手法は大気揺らぎを克服するための高次補償光学 (Extreme Adaptive Optics) が大きな開発課題となっており、また、たとえ高いストレール比が得られたとしても安定した星像を実現するには、一般的にはスペースの方が有利と考えられている。

本提案書では、**同じような目的を持った NASA/TPF あるいは ESA/Darwin との国際協力を視野に入つつ、このようなスペース計画を実現するための道筋を概説する。**

なお、JTPF では中間赤外線干渉計も視野に入れているが、現在の検討はもっぱら可視光高コントラスト望遠鏡に集中しているため、本書では主に後者についてのミッション記述になっていることにご留意願いたい。

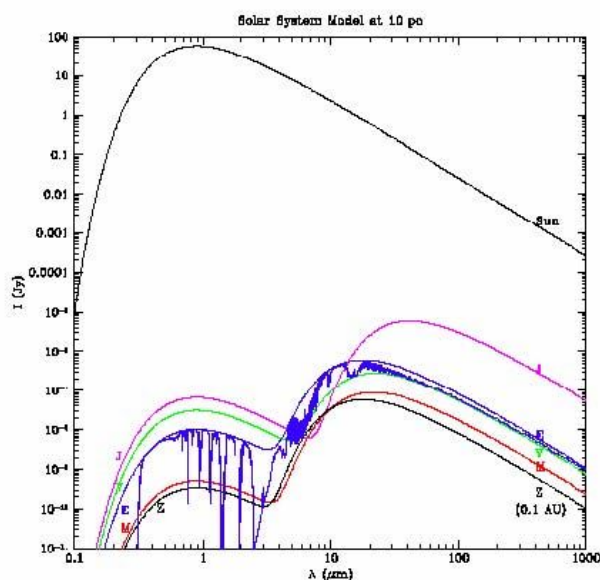


図 7.2: 10pc においた太陽系のスペクトルモデル [45]。太陽、木星、地球、金星、火星、黄道光が示されている。これらの天体のスペクトルは太陽からの反射光と惑星自らの熱放射の2成分から成る。惑星自体からの熱放射が寄与しはじめ、コントラストが多少とも緩和されるのは近赤外を越えた波長(約 $5\mu\text{m}$ 以上)であることに注意されたい。(カラー 368 ページ)

7.2 計画の背景：系外惑星探査方法

長い不毛の時代を経て、過去 10 年間でようやく系外惑星を(間接)検出する努力は報われてきた。中でも 1993 年のパルサーの周りの惑星の発見、1995 年の恒星の周りを周回する惑星の発見、2000 年の惑星による恒星掩蔽現象の発見は重要なマイルストーンとなるものである。本章では、系外惑星のさまざまな間接観測の現状を俯瞰する。

惑星の公転運動によって恒星自体も影響を受け、その位置や速度はふらつく。**アストロメトリ法**とは、このような惑星の周回運動による恒星の位置のふらつきを精密測定することによって惑星の存在を示す方法である。いくつかの系外惑星探査法の中で最も古くから試みられた。しかし、何十年にもわたる測定から示唆された系外惑星は ([48] ほか)、そのほとんどが別の観測者による追試で否定されてきた。その理由は、系外惑星検出に必要な位置測定精度が大気の揺らぎに比べるとはるかに小さいためである。例えば、約 33 光年 (10pc) 離れたところから太陽系を眺めると、木星の影響で太陽は 0.5 ミリ秒角ふらつく。地球の影響はさらに $1/300$ 小さく、地球による位置ふらつきを検出するためには数マイクロ秒角の精度が必要となる。このような高精度アストロメトリは大気の揺らぎの影響を受ける地上からは不可能である。さらに周期の長い、主星から離れた惑星の位置のふらつきを決定するためには非常に長い年月を必要とし、追観測が難しい。

観測精度の問題は大気揺らぎの無いスペースにおける観測で大幅に改善されると期待される。スペースアストロメトリにより地球型系外惑星の検出を目指すものとしては、2009 年頃の打上げを目指す NASA の SIM 計

画、2010 – 12 年頃の打ち上げを目指す ESA の GAIA 計画、2014 年頃の打ち上げを目指す日本の JASMINE 計画 (第 6 章参照) がある。この方法の成功例としては、ハッブル望遠鏡による Gliese876b の質量の決定がある [3]。

他方、惑星の公転運動による恒星の速度のふらつきを測定するのが**ドップラー法** (動径速度法) である。1995 年にスイスのメイヤーとケローズがペガサス座 51 番星においてスペクトル線のドップラーシフトの周期的変化を発見 [22] して以来、最も成功している手法である。たとえば我々の太陽系の場合、木星の公転による太陽の速度ふらつきは 13m/s であるため、巨大惑星の検出のための速度精度は数 m/s が要求される。現在は約 1– 数 m/s の精度が達成されている。

この方法により惑星質量の下限値、公転周期、公転速度、軌道の楕円度が求まる。当初はこのドップラーシフトが惑星に拠るものとする解釈に対して異論もあった [16]。しかし、ドップラー法で検出された惑星 HD209458 について、惑星が恒星の前面を通り過ぎることによる 2% レベルの明るさの微小変化を検出すること (**トランシット法**) に成功した [8]。ついに独立な 2 つの間接法によって惑星の存在が確認され、系外惑星という解釈は疑問を挟む余地の無いものになったのである。また、得られた半径 (1.4 木星半径) と質量 (0.7 木星質量) から、惑星が岩石惑星ではなくガス惑星であることも初めて示された。ちなみに、このトランシット観測はたった口径 10cm の望遠鏡を用いて行われた。

ドップラー法については、現在は精度の向上よりも、地上の大望遠鏡や専用望遠鏡でより遠方の恒星系を観測し、むしろサンプルを増やすこと、より軽い惑星の検出 (最近、ついに地球質量の約 10 倍の惑星が発見された)、長期間観測により周期の長い主星から離れた惑星をとらえること等に重点が置かれている (Keck/HIR ES、VLT/UVES、Subaru/HDS、ESO/HARP、Lick/Hamilton、OHP/Elodie、OAO/HIDES など)。また、太陽に似たスペクトル型以外の恒星 (巨星、若い星) にも注意が注がれている [33]。

トランシット法に関しては、地上においても巨大惑星を検出することが比較的容易に達成される (必要な測光精度はパーセントレベル) ため、小望遠鏡を用いたさまざまな地上観測が進行中である (TEP、ASP、Vulcan、STARE、EXPORT、super WASP など多数)。すばる望遠鏡の高感度・広視野を生かしたトランシット観測も行われている (山田ほか、private communication)。

トランシットに同期して分光観測を行うことにより、掩蔽時とそれ以外の時の Na 吸収線の深さの違いから惑星大気存在を示唆するデータもある [9]。さらに、Na 線の変化量に比べ、水素原子の変化量のはるかに大きいため、hot Jupiter で

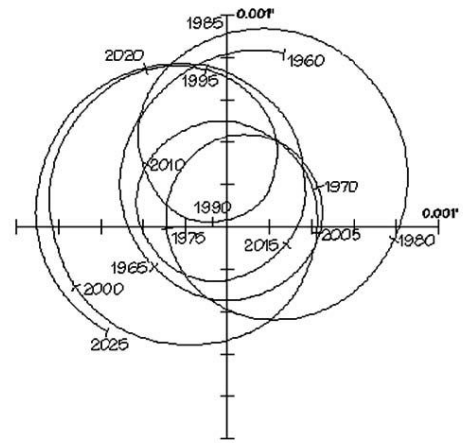


図 7.3: North ecliptic pole の方向の 10pc の距離から太陽系を眺めたときの、惑星の公転による太陽のふらつきのシミュレーション。1 目盛りは 0.2milli-arcsec (mas)。 (TOPS report より)

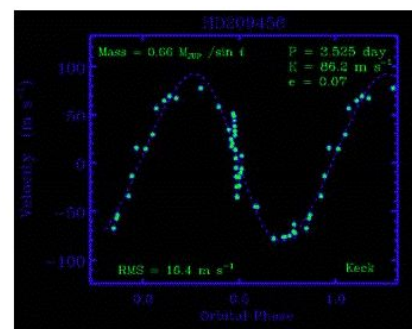
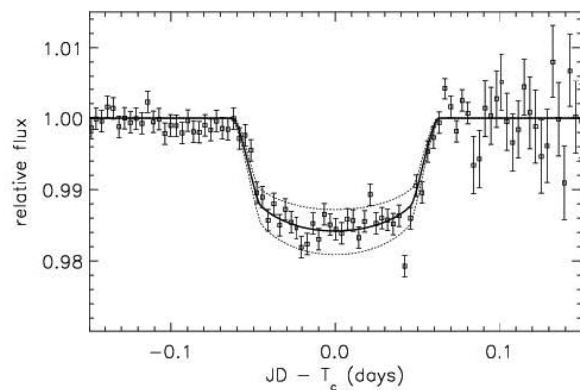


図 7.4: HD209458 の光度カーブ [8] とドップラー偏移観測。周期は 3.5 日。

は惑星大気が逃げている状況を観測しているという示唆も有る [49] が、各種の追観測が必要であろう。

最近、トランシット法によって最初に発見され、後でドップラー法により確認された惑星が報告された (OGLE-TR-56b, 113b, 132b [20, 5])。これらは全てドップラー法で発見された惑星より一段と周期が短く、全て $P =$ 一日台である。より中心星に近く高温であり、very hot Jupiter と呼ばれる新しいカテゴリーの惑星である。

トランシット法による地球型惑星の検出には約 0.01% というはるかに高い測光精度が求められるため、スペースから大気の揺らぎに邪魔されずに測定することが必要である。地球型惑星検出が期待されるスペーストランシット衛星としては、2006 年に打上げ予定の COROT (仏、10,000 個の恒星をモニター) や、2007 年を目指す NASA の Kepler (100,000 個の恒星をモニター) や ESA の Eddington (打上時期未定) などの計画がある。

間接的系外惑星検出法としてはこのほかにも、重力レンズやパルサータイミングを利用したものがある。

重力マイクロレンズにおいてレンズ天体に惑星が存在する場合、その増光曲線にスパイク状の非対称性が生じることが予想される。確実な系外惑星の例は長らく無かったが、ごく最近、OGLE (1.3m)/ MOA (0.6m) の I バンド観測において 7 日間の短い第 2 増光が見られた (OGLE 2003-BLG-235/ MOA 2003-BLG-52)。これを説明するためには、二重星のモデルで質量比が大きいものが必要となり伴星は木星質量の約 1.5 倍程度の惑星と結論されている。

地上で進行中の計画としては、OGLE、MOA、MPS、PLANET network などがある。

パルサー法においては、惑星の公転運動により、非常に正確な「時計」である中性子星からのパルスが周期的に変化することを利用する。この方法は非常に軽い天体まで検出することができる。パルサー PSR B1257+12 は (普通の星ではないが) 最初に太陽系外に惑星が発見された天体であり [50]、最近では合計 4 個の地球の数倍から月の 1/3 程度の (下限) 質量しかない「惑星」の存在が指摘されている。しかしながら、これまでに報告されているパルサー惑星は 2 個であり、全パルサーにおける割合は主系列星における惑星よりもはるかに小さい。パルサーの周囲という特殊な環境に居ることも含め、その成因は系外惑星の中でも特異なものではないだろうか。

惑星を特徴付けるスペクトルは短波長側では主星からの反射である。よって全ての惑星は偏光を伴う。これを検出するのが**偏光法**である。しかしながら予想される偏光度は 10^{-6} レベル程度しかなく (ちなみに、太陽を積分した偏光度は 3×10^{-7} 以下である)、偏光器は超高精度 (10^{-7}) なものが必要となる。そのためには、高速度で大気の変動に伴う偏光誤差を除去し、かつ、検出器の平坦性に伴う測光精度を克服するために、PEM (光弾性変調器) と単一素子 APD を利用した偏光器 (PlanetPol) が開発され、ほぼこの精度を達成している [18]。なお、この方法が成功すれば偏光自体は惑星そのものからの光なので、直接観測と言う事ができる (τ Boo で惑星反射光のスペクトルを分離したという報告が有るが確認されていない)。

このように、間接的手法による系外惑星検出はよ

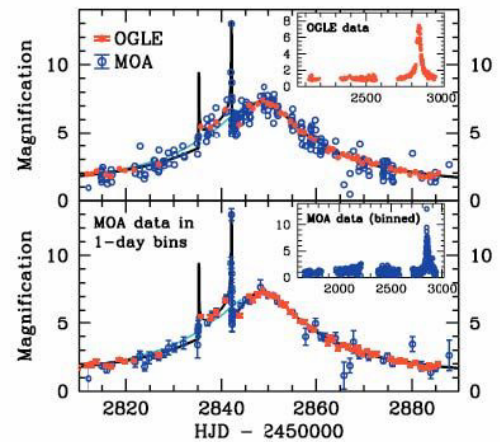


図 7.5: OGLE235/MOA52 の光度曲線. OGLE データが赤丸、MOA データが白抜き青丸 [4]。

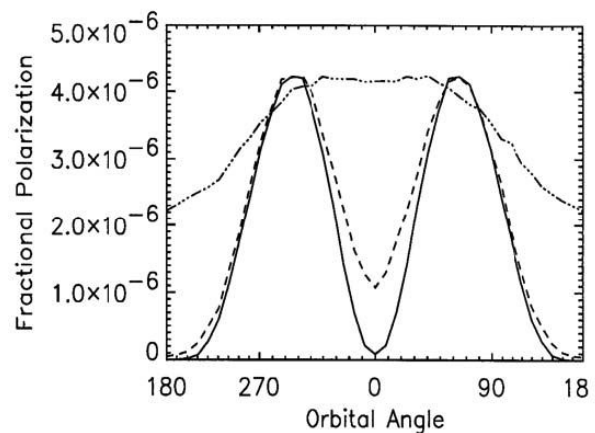


図 7.6: Close-in 巨大惑星の偏光のシミュレーション [35]。線の違いは軌道面の傾きに対応している (90、82、66、48、21°)。

うやく過去 10 年で成功を収めてきた。しかしながらドップラー法によって間接的に発見された系外惑星は多くの理論的・観測的問題を投げかけた。たとえば、木星は周期 12 年で太陽から約 5AU 離れた所を公転するが、発見された惑星には木星クラスのものが恒星から 0.1AU 以下の所をわずか数日で公転しているものが数多くある。主星に近い場合表面温度は 1000K を超えるため hot Jupiter と呼ばれている。また、円軌道から大きくかけ離れた軌道を公転する惑星も存在する。このような惑星の存在はこれまでの標準的な惑星形成理論では説明できない。観測的にも、短期間のドップラー法は公転周期の短く重い惑星を選択的に検出する問題点が指摘されている。より遠方に巨大惑星がある可能性の確認や太陽系に似た惑星系の存在確率を議論するのは今後の課題である。

直接的観測は、定性的・定量的な情報を得る上で、いかなる間接的観測よりも重要である。ドップラー法による観測では最も重要なパラメータである惑星の質量について下限値しかわからない。しかし、直接法で惑星の軌道と傾きを決めれば正確な質量が求まる。さらに、その測光・分光の情報から惑星とその大気の物理的情報を初めて得ることができる。複数の惑星が存在する場合、間接法の解釈は複雑になるが、直接撮像された画像の解釈は簡単である。しかし、系外惑星そのものを直接に観測した確実な例はまだ一つもない。従って、系外惑星を直接観測することが次の最も重要かつ緊急のステップなのである。そこで木星型・地球型それぞれの系外惑星の直接撮像に向かって熾烈な競争がスタートしている。

木星型巨大惑星のうち若い惑星は赤外線光度も明るくコントラストも比較的小さいため、補償光学を備えた 8–10m クラスの地上大望遠鏡あるいはハッブル望遠鏡の重要な直接観測対象となる。すばる望遠鏡でも赤外線コロナグラフ CIAO と補償光学 AO などによって近傍の星形成領域や近傍の比較的若い恒星に対してサーベイが進行中である。

さらに、中心星から非常に離れた巨大惑星が存在すれば、解像度は限られるが高感度の赤外線望遠鏡 (**スピッツァー望遠鏡**および **ASTRO-F**) でも検出できるかもしれない。

いわゆる hot Jupiter も赤外線でも明るく、コントラストも小さい (3–4 桁) が、中心星との角距離が小さいため、その直接観測のためには**大口径干渉計**が必須となる (VLT、Keck、LBT)。これらの地上大口径干渉計ではアストロメトリによる惑星検出 (木星 ~ 0.1 木星質量程度) も目指している。

JTPF の目指すサイエンスはその次のステップとしての**地球型系外惑星**の直接観測である。その際、最大の技術的課題は、主星と惑星の光度比の大きさ (**コントラストあるいはダイナミックレンジ**と呼ぶ) である。太陽系のような惑星系の検出を念頭に置いた場合、図 7.2 に示したように、地球型に限らず木星型惑星でさえも可視光～近赤外波長では 9–10 桁、中間赤外波長以上でも 6–7 桁のコントラストが必要となる。このような高コントラスト観測を実現するのが、可視光におけるコロナグラフを利用した高コントラスト望遠鏡と赤外線におけるナル干渉計望遠鏡である。

中間赤外線における (3–4 桁もの) コントラスト条件の緩和は、確かに赤外線における系外惑星検出にとって魅力である。しかし、波長が長い場合、同じ口径の望遠鏡を用いる限り低解像度の観測に甘んじなければならない。従って、単一大口径望遠鏡よりも比較的小さな望遠鏡を離して並べる干渉計が有利である。また、中間赤外線波長において超高感度を得るためには、地球大気・望遠鏡・観測装置の熱雑音から逃れるためにスペースに出ることが不可欠となる。そこで、系外惑星探索ミッションとしては赤外線スペース干渉計が有利であるというアイデアが出てきた。中間赤外線においては、地球大気に特徴的な酸素 ($9.6\mu\text{m}$ のオゾン) や水 ($6\sim 8\mu\text{m}$) の吸収バンドが比較的容易に検出できることも強調された。NASA/TPF の最初のアイデアもこれに基づいたものである。しかし、これにはいくつかの問題があることがわかった。一つは、恒星の周りには赤外線観測において雑音となる黄道光が意外に多くあり、惑星からの赤外光がこの背景光に埋もれてしまう可能性がある。黄道光の原因となるダストは惑星系形成の副産物であり、太陽系内外の両方においてその影響を避けることが難しい。もう一つの困難は、やはり赤外線スペース干渉計に伴う技術的な壁の大きさである。NASA/TPF の 1999 年当時のアイデアは、口径 3.5m の冷却望遠鏡を 4 台用意し、基線長 75m から 1km を確保する赤外線干渉計であった。波長域は $3\sim 30\mu\text{m}$ をカバーする。さらに、通常の干渉計と異なり、干渉計の対称軸位置にある恒星からの光に対しては山と谷とを重ね合わせてその光を打ち消し、そのすぐ近くにある惑星の光は打ち消さないナル干渉計とし、必要なコントラストも確保する (7.19 章参照)。**ナル干渉計**のための実験も進んでおり、実験室では単色光で 1/3500、白色光で 1/1000、望遠鏡 (AO 無し) でも 1/100 桁のコントラストが実現されて

いる。しかしながら、このような干渉計をスペースで実現するためにはまだまだ多くのハードルがある。

可視光高コントラスト望遠鏡のための技術の要は、望遠鏡の瞳面あるいは像面において、波面の位相あるいは振幅に対してさまざまな加工を行うという、**広義のコロナグラフ技術**である(7.13章参照)。太陽コロナグラフやステラーコロナグラフの多くで利用されている Lyot のコロナグラフ(像面に遮光マスク+瞳面にストップ)はその一つである。ただし、コロナグラフは後置光学系であり、これを有効に働かせるためには、望遠鏡から導かれる星像をなるべくクリーンにする必要がある。そのためには、望遠鏡そのものへの工夫(副鏡支持部分の影響を逃れるための軸はずし望遠鏡や分割鏡の不採用など)や、それだけでは取り除けない波面・振幅誤差の後置光学系による補正(**補償光学**の利用)が不可欠であると考えられる。現在稼働中の地上望遠鏡およびスペース望遠鏡は高コントラストの実現という見地では設計されていない。そこで、望遠鏡の設計から装置に至るまで、コントラストを最優先した設計の可視光ミッションを実現することによって、系外惑星検出はもとより、感度・波長・解像度といったもとのとは全く異なるパラメータである「高コントラスト」を生かした天文学を追求できる。

7.3 観測ターゲット

JTPF の目指すサイエンスは言うまでもなく系外惑星、特に地球型系外惑星、の直接観測である。後述の口径 3.5m 可視光高コントラストスペース望遠鏡(HCST)の場合は、約 20 pc 以内の地球型惑星と約 50 pc 以内の木星型惑星がターゲットとなる。ここでは、Hipparcos Main Catalog による TPF targets の考察[10]に基づき、JTPF の観測ターゲットを紹介する。

早期 A 型～中期 M 型までの星をカタログから選んだものが図 7.7 であり、2 重星や光度変化が大きいもの(0.1 等以上)を除くことにより 202 個のサンプルから成る。これらは全て 30pc 以内の恒星に対応している。

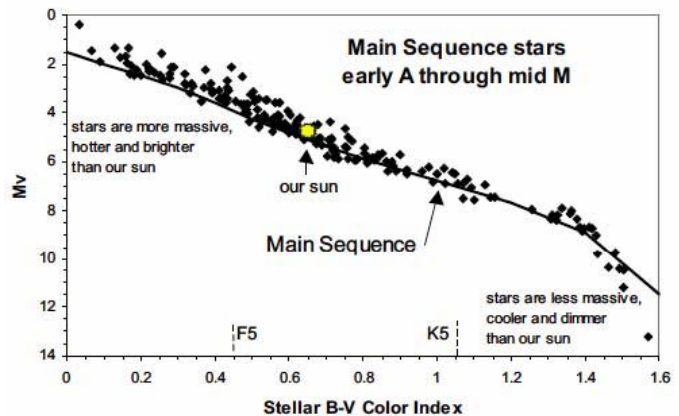


図 7.7: ヒッパルコスカタログから選んだ 202 個の A-M 型星(単独、無変光星)のサンプル [10]

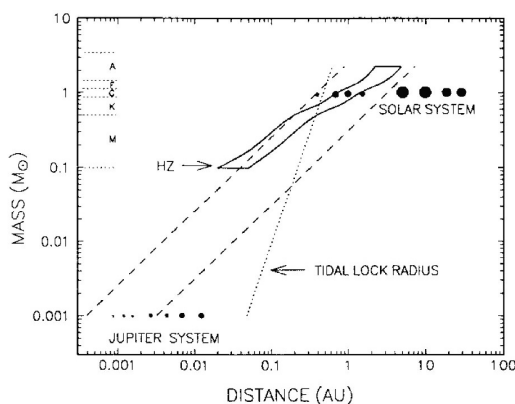


図 7.8: スペクトルタイプによる Zero-age main-sequence の Habitable Zone の分布

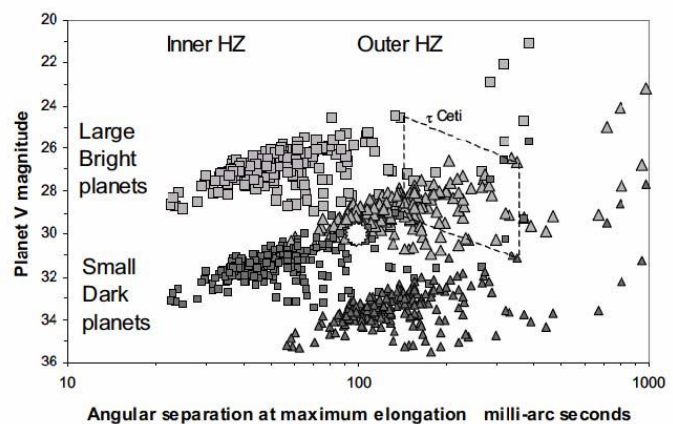


図 7.9: 惑星の期待される角距離と明るさの分布。角距離は 40 – 1000mas に、V 等級は 22 – 35 等に分布している。中心の点は太陽・地球を 10pc に置いたもの。

この個々の恒星の Habitable Zone (HZ)、すなわち、惑星の表面で液体の水が存在する領域を計算する事ができる [19]。その HZ の位置を主星からの角距離に直せば、惑星の最大角距離の分布が求まる。

いっぽう、惑星の期待される明るさは、主星の明るさ・惑星のアルベド・位相・惑星の大きさで決まる。たとえば、太陽・地球を半月の時に 10pc の距離から眺めると、惑星は $V = 29.6$ となる (光度比は 24.8 等)。明るさの最大の可能性として半径が地球の 2 倍でアルベドも 2 倍の惑星を想定し、その逆として半径が地球の 1/2 でアルベドも 1/2 という暗い惑星を想定すると、期待される惑星の明るさの範囲が求められる。先ほどの 202 個のサンプルに対し、期待される最大離角の範囲 (HZ の内側と外側) と惑星の明るさの最大・最小の組み合わせの 4 点をプロットしたものが図 7.9 である。JTPF では、この図の右上にあるターゲットから左下に向かって順次狙うことになる。

7.4 目指すサイエンス (系外惑星の直接撮像・分光)

直接撮像から得られる系外惑星の最も重要な物理量は質量である。明るさ・色・アストロメトリ等から独立に質量を求めることができる。

まず、惑星の明るさとその軌道距離と位相が求まれば、アルベドを仮定して質量を概算できる。ただし誤差は大きい。

また、惑星の色の情報 (図 7.10) から 4 つの惑星のタイプに分類する事ができ、従って、その質量を推定する事ができる。すなわち、(1) 大気無し惑星 (水星・火星) の表面アルベドは青色域で低く、波長と共に増加する。このような色を示す惑星の質量は小さいと推定できる。(2) 木星・天王星は赤色域でメタン・アンモニアの吸収が大きく低アルベドを示す。このような色を示す惑星の質量は大きいと推定できる。(3) 金星は全ての可視光波長で高アルベドだが、短波長でのみ低い。(4) 地球は非常に特徴的なアルベドの波長依存性を示す。青い惑星と呼ばれる所以たる、短波長でのレイリー散乱による高アルベドと雲の反射による緑・赤色域での平坦なアルベド波長依存性である。

さらに、惑星存在が確認できたものについては分光観測を行い、生命存在の指標となる分子や特徴 [可視光波長では O_2 (760nm)、 H_2O (940nm)、 CH_4 (890nm)、Rayleigh (400nm)、red edge (800nm) など] の有無を調べる (図 7.11 および図 7.10 の地球照のスペクトル参照)。

多量の酸素 (あるいはオゾン) とメタンの同時検出は最も確実な生命存在の根拠となる。多量の酸素 (あるいはオゾン) の存在だけでも明らかになれば生命存在の可能性となる。これによって、地球型惑星における生命の有無に関して初めて科学的な議論を行える直接観測データを与える。

直接観測は、質量以外にも多くの物理量を導出することができる。公転軌道や周期の情報は言うまでも無いが、その「変光」は多くの情報を含ん

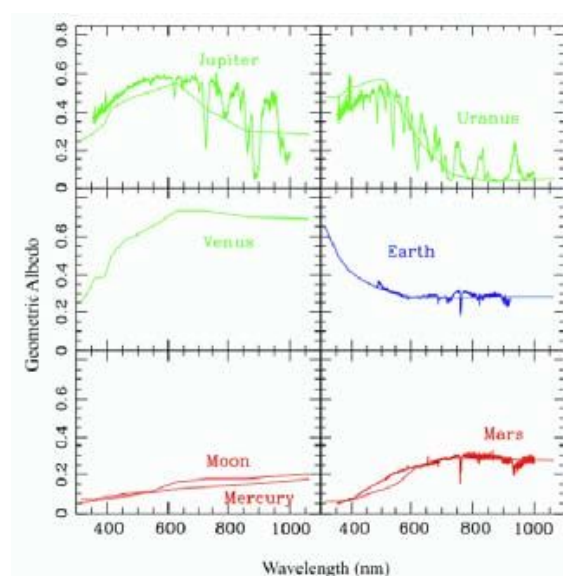


図 7.10: 太陽系内惑星のアルベド波長依存性 [7]

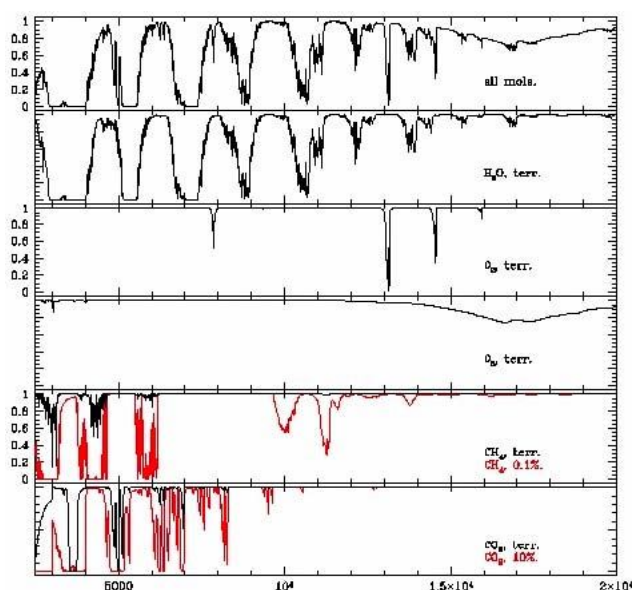


図 7.11: 可視光における biomarker 分子のスペクトル [45]

でいる [14]。例えば、系内惑星中、地球はその光

度変化が非常に大きい点で特徴付けられる。大陸と海洋と雲の反射率の違いによる日変化は 10 – 20% もあるため、10% 程度の変光精度の観測でもとらえる事ができるだろう。より長周期の光度モニターにより季節変化も示唆できるかも知れない。複雑な分光器も不要であり、変光観測は最も簡単に惑星表面を診断する方法と言える。

全く異なる見地としては、惑星表面の反射率が地質学以外の要因で制御される可能性も指摘されている。緑黄植物に含まれる葉緑素は $0.7\mu\text{m}$ より長い波長の光を反射する性質が有る (red edge)。これは光合成を阻害する赤外線を排除するために植物の細胞間のギャップが散乱を起こすように進化したためだと考えられている。従って、このような波長特性を示す惑星のスペクトルが確認できたならば、系外「植物」の存在について議論できる可能性がある。現在、月面に照り返された地球の光、すなわち、地球照の観測により red edge のスペクトルを確実に捕らえる試みが行われている (海老塚ほか、private communication)。

いっぽう、巨大惑星については、太陽系内巨大惑星と褐色矮星を併せた比較惑星分光学を展開できるだろう。

7.5 目指すサイエンス (広視野深撮像分光に基づくサイエンス)

JTPF は本来、軸外し光学系の採用により、副鏡スパイダーなどによる散乱・回折光を極力避け、コロナグラフの機能が十分発揮されるクリーンな PSF を得るところに特徴がある。しかし、工夫した光学系を採用することで、十分な焦点面視野を確保し、高解像度コロナグラフカメラ以外にも、広視野カメラなどを持つことによって、幅広い天文学の研究に用いることができる可能性がある。本章では、JTPF の口径、光学系、そして宇宙での観測環境を活かして、どのような分野での応用が望ましいか、また、可能であるかを検討する。

7.5.1 なぜ多目的装置搭載が必要か？

JTPF は、コロナグラフカメラによる系外惑星の直接検出を目的とし、その目的に最適化された望遠鏡・観測装置としての開発を目指している。一方で、非常に巨額の資金を要すること、また、このような大口径の可視・近赤外・宇宙望遠鏡は希少であることから、できるだけ幅広い天文学の分野での応用もまた目指すべきである。

宇宙空間からの観測環境は、高解像度、低背景光雑音で観測が可能であるため、様々な研究課題の遂行が可能である。銀河や星形成領域の高空間分解能観測、非常に暗い点源の検出、そして地上では熱放射や大気夜光、大気の吸収によって観測が困難な近赤外線波長帯で高感度の観測が実現出来る。

このような特徴を活かして、地上や、他のスペース将来計画と相補的となる観測装置を工夫して多目的な運用を可能にすることが望ましい。ハッブル望遠鏡以降の可視・近赤外線中口径望遠鏡としては、NASA の JWST 計画があるが、現在考案されている観測装置は、高解像度の面分光を主体とした、比較的視野の小さい (2 – 3 分角) ものである。そこで、これと相補的に、広視野での可視・近赤外線高解像度観測が実現出来れば、その性能はユニークなものになり、JWST と相補的となるだろう。実際、すばる望遠鏡主焦点カメラの成果で示されたように、初期宇宙における銀河分布には大きな非一様性があり、また、十分な統計的精度を稼ぐためには、暗い天体に対して広視野で走査観測を行うことの重要性が認識されている。

一方、JTPF 本来の特徴であるクリーンな PSF を活かした高解像度の観測を多目的に応用出来るような装置も魅力的である。今後の開発によって検出器読み出し雑音を極限まで小さくすることができれば、低背景光とあいまって、赤外線波長域における宇宙の 3.5m 望遠鏡による分光観測能力は地上の 10m 級望遠鏡にも匹敵するものとなりうる。高解像度用の赤外 3 次元分光器などは有用な観測装置となるだろう。

7.5.2 広視野赤外線カメラによる初代天体の探査

3.5m 可視・赤外線望遠鏡に 100 平方分角の広視野カメラを搭載して達成することができるサイエンスは多岐にわたる。多少、占有的に用いれば、数平方度の掃天観測も可能だろうし、また、領域によっては、惑星観測とパラレルに隣接する領域での深宇宙探査なども可能であろう。ここでは、スペース広視野カメラによって達成される課題のうち、代表的なものとして、初代天体の探査をあげたい。WMAP 衛星による背景輻射の偏光成分の観測や、 $z = 6$ のキューサー連続スペクトルの銀河間吸収の観測から、宇宙の再電離は、 $z = 6 - 20$ の間に行われたのではないかと推定されている。しかしながら、どのような天体の、どのような輻射により、宇宙が再電離されたのかは不明であり、これを観測的に明らかにすることは、初期宇宙の歴史を明らかにし、我々の起源をたどる、という問題においても非常に重要な研究だと考えられている。赤方偏移 $z = 15$ くらいで存在が予想される星形成銀河で、その紫外線光度が $10^{10} L_{\odot}$ 程度のものが存在すれば、輻射流束密度は 10 nJy 程度となり宇宙赤外 3.5m 望遠鏡での検出が可能である。宇宙の初期天体は、より大きなスケールの密度揺らぎのピークで形成され始めると考えられるので、このような天体をとらえるには数分角の視野では十分とは言えず、広視野であればあるほど望ましい。そこで、JTPF に三枚光学系などの工夫を採用し、焦点面に広視野を確保し、そこに HAWAII-II RG など波長 $5\mu\text{m}$ まで撮像可能な近赤外検出器を用いた広視野カメラを考えたい。ピクセルスケールは $0''.05$ 程度とし、 $10' \times 10'$ 程度の視野を持つカメラを用いれば、1 視野で数 $\times 10^5 \text{ Mpc}^3$ くらいの体積を観測することができるだろう。これによって、JWST では困難な深さ・体積で初期天体の探査を行うことができる。近赤外広視野カメラは他にも、銀河形態の起源の観測、高赤方偏移銀河の星質量分布の観測、あるいは星質量によって選んだサンプルによる銀河形成・進化の研究、Ia 型超新星探査による宇宙の加速膨張の検証、近傍矮小銀河の恒星分離測光、など、様々な応用が考えられる。JTPF の実現に当たっては、是非ともこのような可能性を考え、推進してゆきたい。

7.6 目指すサイエンス (系外惑星誕生現場-原始惑星系円盤から残骸円盤へ)

太陽質量程度の恒星とその周囲に惑星がどのようにして生まれるのかについて、1980 年代からの観測・理論の急速な進展の結果、以下のような「作業仮説」を持つに至っている：星は分子雲とよばれるガスとダスト (宇宙の塵) の集まりから生まれる。分子雲中の高密度コア (分子雲コア) が自己重力で収縮しはじめ重力エネルギーを外に解放し、原始星が誕生する。原始星の中心部分は高温化し収縮が止まり小さな核ができる。落下する物質がなくなると力学的平衡状態になるが、その後は準静的収縮が進み、中心温度が 1 千万度近くで水素核融合反応が起こり始め、一人前の恒星 (主系列星) となる。主系列になる前の段階の準静的収縮期の星は T タウリ型星として知られている。T タウリ型星のまわりには、物質の降着と回転により生じた円盤 (ディスク) が取り囲み、ほぼ太陽系のサイズ (100AU) を持っている。このディスクこそが惑星系形成の場であり (よって原始惑星系円盤と呼ばれる)、この中で惑星が生まれ (ダストから微惑星、原始惑星を経て惑星に至る)。いっぽう、円盤の物質は消失してゆく。

このような原始惑星系円盤の形態とその多様性は、すばる望遠鏡の現在の重要な観測テーマである。図 7.13 に示すような渦巻構造を持つ円盤など、 $0''.1$ (約 15AU) の解像度で円盤の微細構造 (フレア、溝、渦巻腕、リングなど) が散乱光により明らかになりつつある。ALMA では解像度がさらに一桁向上し、かつ、円盤自体の熱放射やガス輝線をとらえる事が出来るため、形態のみならず円盤の質量・速度構造について比類なき情報が期待される。

JTPF は、ALMA とほぼ同じ高解像度であるのみならず、その高コントラストを生かし

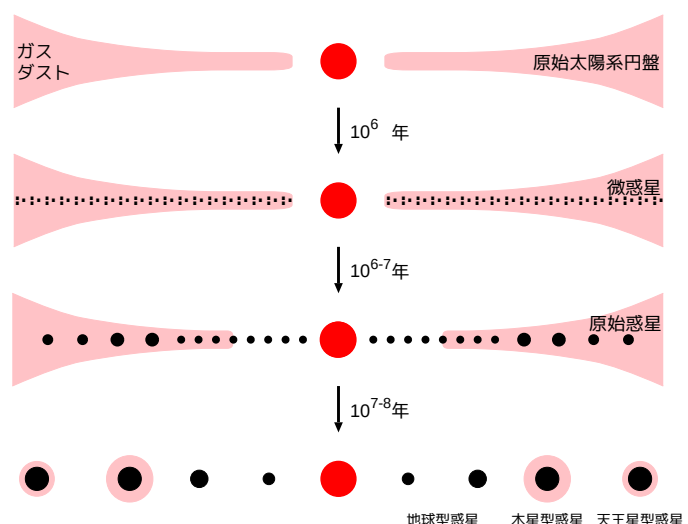


図 7.12: 若い星のまわりの星周構造の進化としての、原始惑星系円盤から惑星への進化の概念図 (いわゆる京都モデル; 小久保、private communication)

て、これらの円盤を散乱光で検出する。相補的な両方のデータにより惑星形成の場としての円盤とその進化について、図 7.12 のような作業仮説が観測的に検証されることになる。

いっぽう、赤外線天文衛星 IRAS の観測により主系列星のまわりでダストが遠赤外線を放出しているものが太陽近傍だけでも 100 例以上あることが発見された (ベガ型星)。このダストはディスクにおける惑星形成の残骸と思われ、直接に撮像する試みが精力的に行われた。しかし、ダスト円盤そのものの撮像に成功したのは、がく座 β 星をはじめ 2-3 例にしかすぎなかった。最近、高解像度サブミリ波観測や高感度中間赤外線観測により、いくつかのベガ型星のまわりでリング・ディスクに見える構造が発見された。

このダスト円盤は、当初は惑星形成の残骸と提案されたが、最近では微小天体の衝突により生じた第 2 世代円盤と考えられている。スピッツァー望遠鏡の A 型星をサンプルとする最新の観測によれば [32]、同じ質量・同じ年齢の天体でも赤外超過の量は大きく異なる。また、赤外超過を示すものについては、その割合は時間の逆数に比例して減少することが示されており、その形成原因に強い制限を与えている。

JTPF/HCST による高感度観測・高コントラスト観測は、スピッツァー望遠鏡や ASTRO-F サーベイで新しく発見されるこのような残骸円盤を散乱円盤として検出する。近傍 (10pc 程度) の円盤ではその形態を 0.1AU の解像度で描く事ができるため、惑星の存在による共鳴に伴う円盤構造の検出や、逆に、それにより惑星の間接的検出が可能になる。

ここに記述した以外の分野でも、高コントラストを生かした以下のようなテーマがありうる。今後、より多くの分野の方々によるサイエンス検討への参加を歓迎する。

- AGB の研究: 1kpc 以内の距離にある AGB からの星風・シェルの 20-200 星半径における構造。また、そのダスト生成領域の直接観測。
- BL Lac, radio loud AGN などの活動銀河核中心周りの領域の研究。
- 重力レンズ天体の研究。

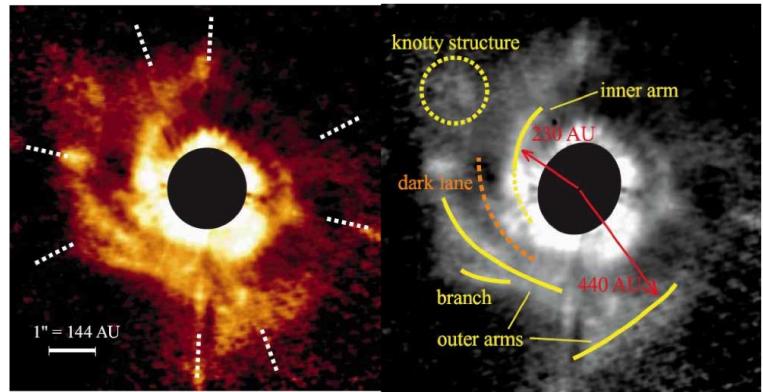


図 7.13: すばる望遠鏡と赤外線コロナグラフ CIAO が観測した AB Aur のうずまき円盤 [15]

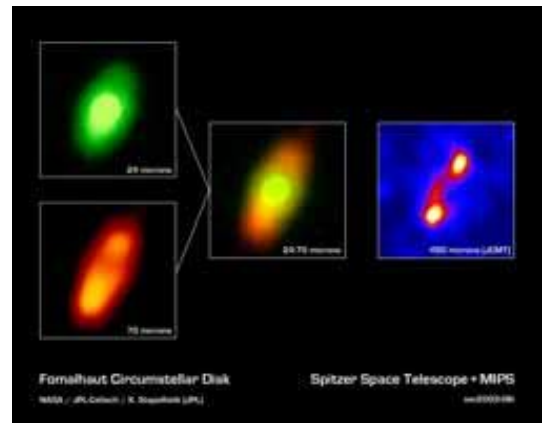


図 7.14: スピッツァー望遠鏡によるフォーマルハウト (ベガ型星) のダスト円盤の観測 [40]。

7.7 HCST(ハイコントラストスペース望遠鏡) とは?

JTPF ワーキンググループでは、これまでもっぱら可視光高コントラスト望遠鏡の概念設計とそのために重要となるコロナグラフ技術の検討を行ってきた。そこで、以下では主として可視光高コントラスト望遠鏡について述べる。

高コントラストスペース望遠鏡 (High-Contrast Space Telescope: HCST) の現在の仕様は表 7.1 のとおりである。

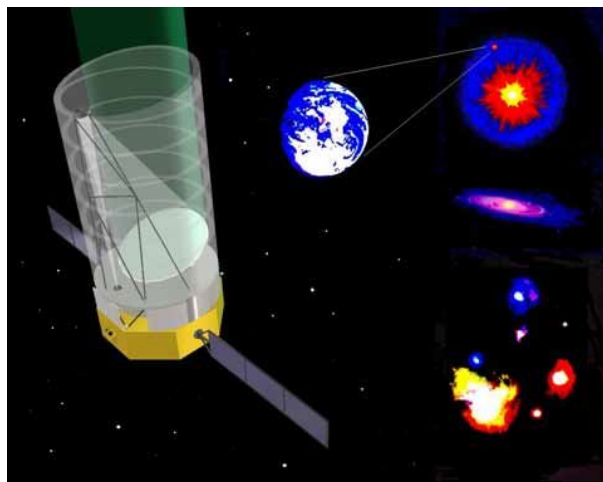


図 7.15: JTPF/HCST 衛星の想像図 (カラー 17 ページ)

7.8 既存・今後のミッションとの比較

JTPF/HCST は、Herschel、SPICA、JWST の各望遠鏡とはさまざまな意味で相補的なものである。表 7.2 にこれらの比較を示す。

Herschel、SPICA、HCST の口径はほぼ同じである。打ち上げ年度の違いは、波長が短波長化することによる技術的実現困難さのレベルを反映している。短波長化に伴い空間解像度が劇的に向上する。HCST の解像度は ALMA の解像度とほぼ同じである。

	JWST	SPICA	Herschel	HCST
口径	6m	3.5m	3.5m	3.5m
最適波長	1–5 μm	5–200 μm	60–500 μm	0.1–1 μm
解像度	0''.04–0''.2	0''.4–14''	4''–36''	0''.007–0''.07
打上予定	2011	2010	2007	2015

表 7.2: JTPF と他のミッションとの比較

望遠鏡	口径 3.5m 軸はずし単一鏡
波長	可視光・近赤外線が主で紫外線もカバー $\lambda_c = 0.5\mu\text{m}$, $\lambda\lambda = 0.1 - 5\mu\text{m}$
打上予定	2015 年
寿命	5-10 年
軌道	S-E L2
装置	可視近赤外コロナグラフ 広視野可視近赤外撮像分光装置 紫外線分光撮像器
主鏡	$< 25\text{kg/m}^2$, 重要空間周波数において $< 10\text{nm WFE}$
波面制御	重要空間周波数において $< 0.1\text{nm}$
高コントラスト	$> 10^9$ at $5\lambda/D$ ($\lambda > 0.4\mu\text{m}$)

表 7.1: HCST の仕様案

系外惑星検出の観点からは、Herschel はその直接観測には向かない。しかし、残骸円盤の検出など系外惑星検出に直接関連するサイエンスに威力を発揮する。

同様に、SPICA[26] も一般的な惑星直接検出のためには、その解像度は足りない。しかしながら、比較的近傍の、主星から離れた惑星を検出できる感度を持つため、適切な高コントラスト装置 (中間赤外線コロナグラフ) を搭載することによって、惑星の直接撮像と分光を行うことができると期待される [41]。

JWST はこれらの望遠鏡と比較すると口径が大きく、近赤外波長では惑星直接検出に必要な解像度を持つ。しかし、必要な高コントラストと高感度を実現するのが難しく、系外惑星直接検出ミッションと言うことはできない。

図 7.16 に、すばる望遠鏡、地上次期超大口径望遠鏡 (ELT)、JTPF/HCST、JWST の感度を比較した。8pc の距離にある地球のスペクトルも示してある。ELT は近赤外線までは補償光学が働くが、可視光ではまだ実現できないと仮定した。感度及び解像度から考えると、可視光・近赤外線のスペース中口径と近赤外線の地上超大口径は惑星検出に要求される性能を達成できる。しかし、後者は汎用望遠鏡において高コントラストを達成するためのクリーンでストレール比の高い光学系や安定した星像を得ることが実現できるかどうか鍵となる (例; [37, 13])。

JTPF/HCST では、これを主眼として望遠鏡と観測装置をある程度一体化しつつ設計することが重要である。

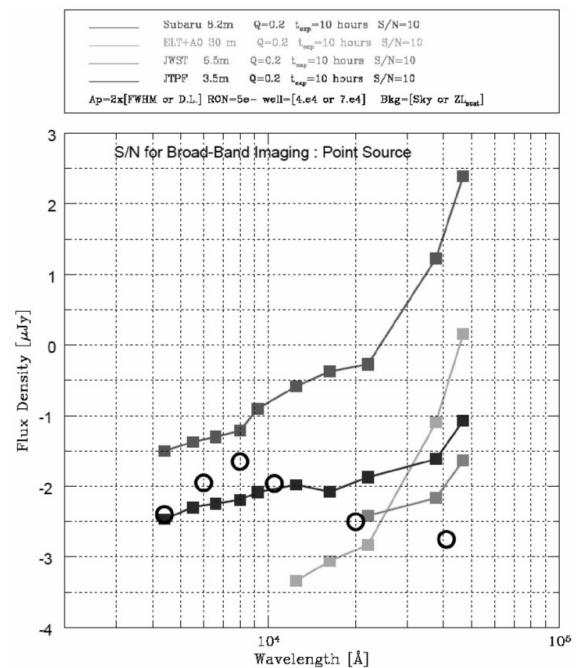


図 7.16: 感度の比較 (折れ線の右端で上から順に、すばる、地上 30m(近赤外 AO のみ有)、JTPF、JWST)。丸は 8 pc においた地球のスペクトル (SED)。

7.9 波長の選択

JTPF/HCST の観測波長は $0.5\mu\text{m}$ で最適化し $0.1 - 5\mu\text{m}$ で観測可能とする。 $5\mu\text{m}$ 以下では熱放射の寄与は少ないため (図 7.2)、この波長帯では波長が短いほど解像度が高くなるが、実現可能な鏡面精度とカバーした波長域などのバランスを考えた結果である。これにより、可視光・近赤外線だけでなく紫外線天文学への応用も可能となる。また、近赤外線がメインの JWST、中間・遠赤外線がメインの SPICA、サブミリ波がメインの Herschel と波長的に相補的となる。惑星が存在する領域として、主星から 10 pc にある天体の $1 - 30\text{AU}$ 領域を観測できることになる。これは波長 $0.5\mu\text{m}$ で $3 - 90\lambda/D$ に対応している。コロナグラフの種類によっては主星のごく近傍 (約 $1\lambda/D$) まで観測可能である。

7.10 望遠鏡 1 (光学系)

JTPF/HCST は、直径 3.5m 程度の軽量一枚鏡による軸外し望遠鏡とする方向で検討を行っている。口径の点では Herschel、SPICA に続く、一連の 3.5m クラス一枚鏡の短波長化と位置付けることができる。一枚鏡のメリットは、JWST のような分割鏡に比べ、クリーンな PSF が得られることである。軸外

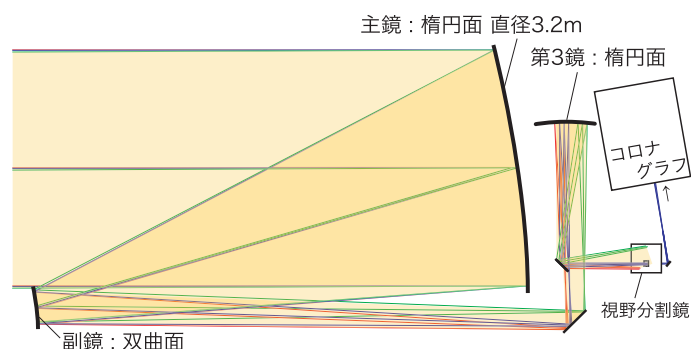


図 7.17: JTPF/HCST の光学系案 (ここでは口径 3.2m で設計してある) (カラー 17 ページ)

面	曲率半径	直径	軸外し量	次の面まで	非球面係数	6 次の係数
主鏡	15360.0	3280	2200	6657.50	-0.992766	4.582377×10^{-8}
副鏡	-2385.83	530	300	7157.50	-1.632791	0
折曲鏡 1	∞	-	-	2824.56	0	0
第 3 鏡	∞	780	0	2000.00	-0.698458	0
折曲鏡 2	∞	-	-	1770.61	0	0

表 7.3: 光学系パラメータ (長さの単位は mm)

し望遠鏡にすることで、さらにクリーンな PSF を狙うことができる。PSF がクリーンであることはコロナグラフ装置で惑星検出に必要な高コントラストを達成するための必須条件である。

鏡面精度は $\sigma \sim 5\text{nm}$ を仕様とするが、これでも惑星検出に必要なコントラストには達しない。そこで、特定の空間周波数における波面誤差をさらに小さくするために補償光学を利用する。これについては後述する。

JTPF/HCST には、コロナグラフ装置に加え、汎用の可視光 - 紫外線および近赤外線広視野カメラを搭載したいと考えている。視野の広い望遠鏡光学系としては、2 鏡系であるリッチー・クレチアン系が知られているが、この光学系には像面湾曲収差が残っているため、焦点面付近にフィールドフラットナーレンズを挿入する必要がある。しかし、紫外線から近赤外線に至る広い波長域を色収差なく屈折系で補正することは非常に難しいうえ、宇宙空間では使用できるレンズ素材に限りがある。

そこで、JTPF/HCST の光学系として、非球面 3 鏡系である成相系を利用して反射系のみの構成での設計を試みた。光学系案を図 7.17 に、各面のパラメータを表 7.3 に示す。

この光学系は主鏡が軸外し楕円面、副鏡は軸外し双曲面であり、この 2 枚でまず一度、収差の残った焦点を結ぶ。この一度目の焦点面付近に折曲鏡 1 を挿入して光路を折り曲げた後、第 3 鏡 (楕円面) が歪曲以外の 3 次収差をすべて補正する。この時点で残存収差は歪曲と 5 次収差のみになり、半径 15' という非常に広い視野を確保することが可能となる。

第 3 鏡で反射した後、瞳に相当する位置に折曲鏡 2 を挿入して検出器の方向に光線を取り出す必要がある。ここで、半径 15' の視野のうち半円形の部分しか使わないことにすると、折曲鏡 2 を光路をさえぎらないように配置することができる。図 7.18 は焦点面での視野分割の一案であるが、半円形の視野でも汎用広視野カメラに必要な視野の広さを十分に確保することができる。

図 7.18 には焦点面の代表的な位置でのスポットダイアグラムもあわせて示してある。半径 15' の半円形の視野の全面で $\text{RMS} \sim 0''.006$ の像を結び、JTPF/HCST の光学系案として十分な結像性能を持っていることが分かる。

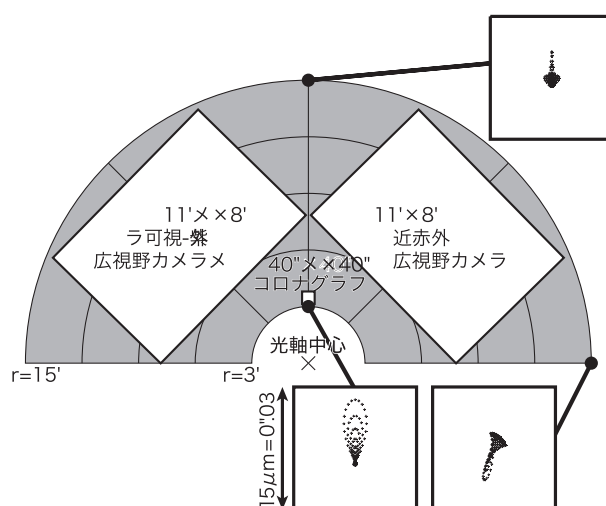


図 7.18: JTPF/HCST の焦点面配置案とスポットダイアグラム

7.11 望遠鏡 2 (主鏡)

JTPF の可視光望遠鏡案についてはクリーンな PSF が得られるように口径 3.5m の軸外し単一主鏡を持ち、 $0.1 - 1\mu\text{m}$ において回折限界 ($0''.007 - 0''.07$) を達成するために、鏡面の形状誤差が 5nm 以下 (rms、球面および補償光学にて補正可能な成分を除く)、表面粗度が 1nm 以下 (rms) であることが求められる。一方、赤外干渉計案についての詳細は未定であるが口径 $10 \times 2\text{m}$ 程度の短冊あるいは楕円形の鏡が 2 ~ 複数枚で構成された $10\mu\text{m}$ 帯の干渉計等が考えられる。

Hubble Space Telescope(HST) は主鏡が口径 2.4m、厚さ 300mm の ULE(極低膨張ガラス) の中空リブ構造で重量が約 800kg($180\text{kg}/\text{m}^2$)、総重量が 12 トンであり、スペースシャトルで打ち上げられ、軌道投入までのコストが約 2400 億円であった。しかし、欧州や日本単独の宇宙ミッションの場合にはロケットの打ち上げ能力により重量が 2.5 トン程度に制限され、HST の 2 倍の面積を持つ口径 3.5m 望遠鏡であっても主鏡の重量は 300kg ($30\text{kg}/\text{m}^2$) 以下であることが求められる。宇宙では重力による変形が無いものの、打ち上げ時の加速度に耐えなければならず、望遠鏡の主鏡は軽くて頑丈であることが要求されるために、様々な新素材や構造が開発されている。例えば、新素材として焼結シリコンカーバイド (SiC)、炭素繊維強化シリコンカーバイド (C/SiC)、高強度反応焼結シリコンカーバイド (高強度 RS-SiC)、ベリリウム、Carbon/carbon composite(C/C)、ゼロ膨張高剛性セラミックス (ZPF) 等が挙げられる。また構造についてはハニカムに代表される様々なリブ構造ミラー、超薄肉の石英、ULE や複合材料 (CFRP 等) のミラー+能動支持機構等が挙げられる。口径 6.5m の James Webb Space Telescope (JWST, $0.6\text{--}27\mu\text{m}$) が採用を予定している薄肉ガラス+能動支持機構 (KODAK 社が受注) は目標の鏡面形状精度や表面粗度を得ることが容易である。しかし、スペースシャトル等によるサービスミッションが期待できない場合には信頼性の点から能動支持機構の採用が困難である。

焼結 SiC は熱変形に対する安定性(熱伝導を線膨張係数で割った値： λ/α)と堅さ(ヤング率を密度で割った値： E/ρ)の両方の点について優れている。ESO が 2007 年に打ち上げを計画している口径 3.5m の Herschel Space Observatory(HSO, $60 - 670\mu\text{m}$) には焼結 SiC が採用され、Astrium 社では口径 3.5m、厚さ 200mm、重量 240kg の主鏡の製作に成功している(図 7.19-1, 7.19-2)。しかし、従来の焼結 SiC は焼結時に 10 - 20%程度の体積収縮が起こるため、鏡面やリブ構造をある程度以上薄くすることができなかった。さらに SiC はシリコンや窒化硼素と同様にダイヤモンドに次いで硬く脆い物質であるために、焼結後には通常の研削法等による鏡材軽量化のためのくり抜き加工や鏡面加工等に膨大な時間と労力を要する。C/SiC は SiC の粉末と短い炭素繊維

からなる圧粉体に溶融した金属シリコンを含浸させて SiC を生成させる新しいセラミックス素材である。SiC の生成を制御して残留させた炭素繊維により従来の焼結 SiC に対して破壊じん性が改善される上、反応焼結による体積変化が小さい。日本の次期赤外線宇宙望遠鏡計画である口径 3.5m の SPICA($2 - 200\mu\text{m}$) は焼結 SiC あるいは C/SiC のリブ構造ミラーを採用することが検討されている。焼結 SiC や C/SiC の素材には空隙や成分が異なる粒界が存在し、可視光において満足できる表面粗度を得るには CVD-SiC 膜等の表面処理が必要である。しかし、口径 3.5m の単一鏡に CVD 等の表面処理および鏡面加工方法の開発には困難が予想される。

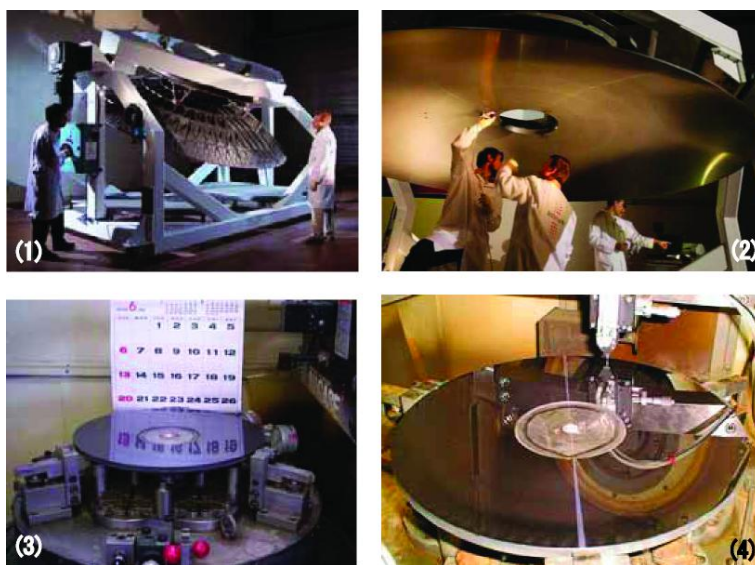


図 7.19: (1) ハーシェル望遠鏡用の焼結 SiC 口径 3.5m 主鏡 (2) 焼結された部分を超音波診断中 (3)ELID 研削で作成したリブ付き焼結 SiC の 360mm 鏡 (4) 接触型のプロファイラーによるオンマシン測定 (カラー 380 ページ)

高強度 RS-SiC は SiC と炭素の粉末からなる圧粉体に溶融した金属シリコンを含浸させ、SiC を反応焼結させる新しいセラミックス素材である。従来の焼結 SiC より、熱伝導とヤング率が大幅に改善された上、反応焼結による体積変化が $\pm 1\%$ 程度であり、圧粉体の状態で 2mm 以下の薄い鏡面やリブ構造の加工が可能であるために口径 3.5m の可視光用の主鏡の重量を 200kg (20kg/m^2) 以下にできると期待されている。さらに空隙がほとんど無く粒界が 100nm 以下の残留シリコンが散在する程度である。残留シリコンをさらに削減することにより紫外線においても満足できる表面粗度が得られる可能性があり、現時点において JTPF の主鏡用として最も有望な素材である。

ベリリウムは堅さ (E/ρ) の点では優れた素材であり、2003 年に打ち上げられた口径 850mm の Spitzer Space Telescope (3 – 180 μm) の主鏡にはベリリウムのリブ構造ミラーが採用された。しかし、線膨張係数が大きいために熱変形に対して不利であり、大口径の単一鏡には不向きである。また、ベリリウムには強い毒性があり、取り扱いには注意を要する。C/C も堅さ (E/ρ) の点では優れた素材であるが、方位により熱伝導率と線膨張係数が大きく異なる。C/C のみでは鏡面を得ることが困難であり、ニッケル (カニゼン) メッキ等の表面処理を施した後に切削、研磨加工を行う必要がある。ZPF は最近開発されたゼロ膨張高剛性セラミックスであり、堅さが焼結 SiC の半分程度であるものの、熱変形に対する安定性 (λ/α) が前出の素材の中で最も優れている。また、ZPF は焼結後にリブ構造の薄肉加工が容易であるために焼結 SiC より軽量化が期待できる。

従来の一般的な鏡面研磨法は加工圧力のために薄い鏡面のリブ構造ミラーの鏡面研磨加工が困難である。欧米や日本の光学メーカ等において様々な新しい鏡面加工法が開発されている。理化学研究所においても裏面から微小な圧力あるいは 1G の重力による鏡面の変形に対抗する圧力で接触した後にアクチュエータを油圧で固定するサポート治具、最新のナノレベルの制御が可能な精密加工装置、研削抵抗が極めて小さな ELID 研削加工法 ([30]: 図 7.19-3)、および接触式や干渉計による機上計測 (図 7.19-4) 等を組み合わせた SiC 軽量化ミラーのフィードバック加工法が開発が進められている [11, 12]。また、Keck 望遠鏡のセグメント鏡 (Zerodure) 用として開発されたイオンエッチングを応用した表面の修正仕上げ法 [1] がベリリウムや SiC 等に応用が検討されている¹。

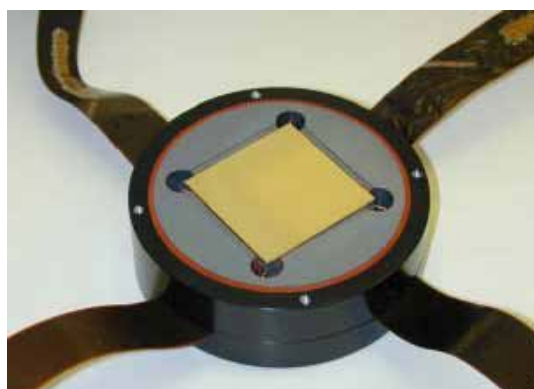
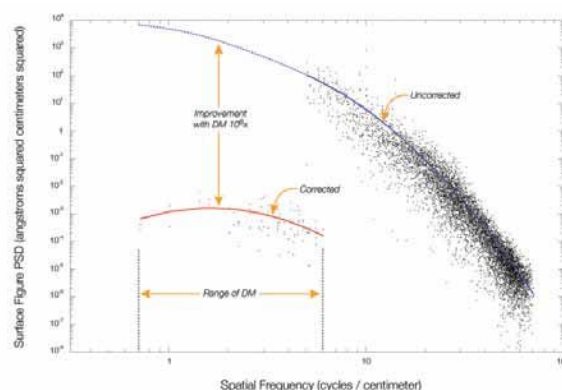
材質	密度 ρ [g/cm ³]	ヤング率 E [GPa]	線膨張係数 α (E-6) [K ⁻¹]	熱伝導率 λ [W/m · K]	E/ρ	λ/α	参考資料
Sintered SiC	2.90	310	2.60	150.0	107	58	[51]
C/SiC	2.70	230	2.30	125.0	85	54	[51]
RS-Si	3.10	400	2.60	156.0	129	60	[52]
Beryllium	1.84	303	11.50	180.0	165	16	[51], [53]
C/C	1.30-1.80	160, 100	1.50, 6.00	275.0, 75.0	100, 65	180, 13	[54]
CFRP	1.60	110	0.10	50.0	69	500	[51]
ZPF	2.54	150	0.02	5.3	59	265	[55]
Zerodure	2.52	93	0.05	1.6	37	32	[53]
ULE	2.20	67	0.03	1.3	30	43	[53]

表 7.4: 素材の機械的、熱的特性

7.12 スペース補償光学

JTPF/HCST においては補償光学が重要な開発要素となる。その理由は、主鏡精度はそのままでは惑星検出に必要なコントラストを達成するための $1/1000\lambda$ 以上に満たないためである。地上における補償光学が主に大

¹<http://www.mi.astro.it/docM/reports/ann2001/ren01/node52.html>

図 7.20: Xinetics 社の 42×42 素子可変鏡図 7.21: JPL における 21×21 素子可変鏡の性能のデモ [46]。波長 $0.63\mu\text{m}$ において波面誤差 $1/13000$ 。

気揺らぎによる波面誤差を補正するのに対し、スペース補償光学は鏡のリップルによる位相誤差および反射率の非一様性による振幅誤差などに対処する。JTPF/HCST では補償光学を利用して、惑星検出にとって重要な空間周波数 (csf) において高精度を達成する。その結果、csf においては $\sigma < 0.1\text{nm}$ となる。これは 100×100 素子以上の可変鏡 (DM) を利用すると達成可能と推定される。

すでに 42×42 素子が利用可能になっており (図 7.20)、JPL における実験では 21×21 素子の補償光学で 0.025nm を実現している。数百素子 $\times$ 数百素子の可変鏡の開発も計画されており、HCST の打ち上げまでにその利用は十分可能である。このような可変鏡のペアによって位相誤差と振幅誤差の両方を補償することができる。

7.13 スペースコロナグラフ

JTPF/HCST においては、波面補正された光に対し高コントラストを付加する技術が鍵となる。そのための光学技術を広義のコロナグラフと呼ぶことにする。コロナグラフは、もともと皆既日食時以外にも太陽コロナを観測するために考案された装置 [21] である。明るい天体の直ぐ近くの暗い天体を検出するための工夫を総称してコロナグラフとも言う。最近では太陽以外の恒星にも応用され (その場合ステラーコロナグラフとも呼ぶ)、広く科学的成果を収めている。代表例としては、がが座 β 星のダスト円盤の発見 [38]、低温褐色矮星 G1229B の発見 [27]、ハッブルによる HR4796A のダストリングの発見 [34]、すばるによる AB Aur の渦巻円盤の発見 [15] などがある。

コロナグラフには大別して「焦点面補正または瞳面補正」と「振幅補正または位相補正」の 4 通りの組み合わせがある。これら全てのコロナグラフを説明することは割愛するが、代表的なものを紹介する。

焦点面振幅補正の代表としては古典的 Lyot コロナグラフがある。これは単純な焦点面マスクと円形のアンダーサイズ瞳の組み合わせで、どのような装置にも適用することができる。しかしながら IWD (Inner Working Distance) が大きい ($> 3 - 5\lambda/D$) という欠点がある。

焦点面位相補正の代表としては Phase mask コロナグラフがある。中でも焦点面に 90° ごとに位相が π 異なる光学素子を置く 4-quadrant

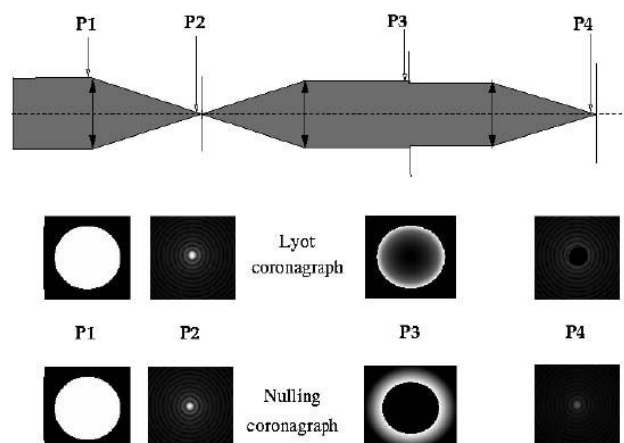


図 7.22: Lyot のコロナグラフ

phase mask コロナグラフは透過光学系では実現しやすい。しかし、中心天体を光軸上に保つ工夫が不可欠である。

最近では、Spergel pupil(図 7.24 中央)、ASA (Apodized Square Aperture、図 7.24 右) や PIAA (Phase-Induced Amplitude Apodization) などが提案されている。これらの瞳面補正による星像パターンを図 7.25 に示す。IWD は大きくなるが、 $5\lambda/D$ の距離で既に 10 桁を超えるコントラストを確保できている。

また、西川ら (2004) は干渉計とコロナグラフの組み合わせにより高コントラストが得られることを示している ([29]: 7.19 章参照)。

これらのうち、どれが JTPF/HCST にとって最適かの判断は今後の R&D を待たねばならないが、それぞれのコロナグラフに長所短所が有るため、最小限の複数のコロナグラフを利用可能な装置設計にしておくことが適当であると考えている。

地上用コロナグラフ (すばる望遠鏡用赤外線コロナグラフ CIAO) での経験も交えて、コロナグラフで重要なことを下記にまとめる：

- 小さな λ/D
- 障害物の無い視野
- 高いストレール比
- 小さな散乱
- クリーンで安定した Point Spread Function (PSF)

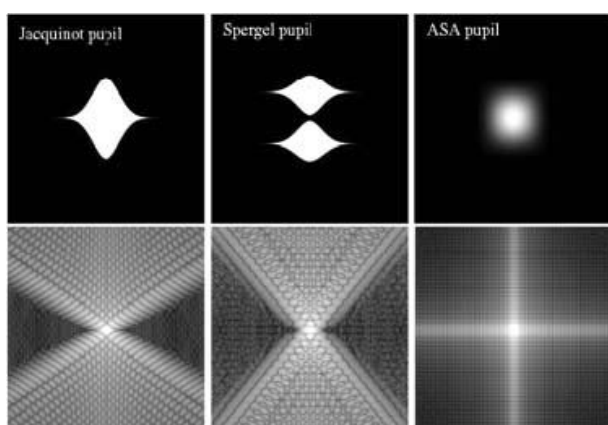


図 7.24: さまざまなコロナグラフ光学系 -瞳面補正- と得られる星像 [17]

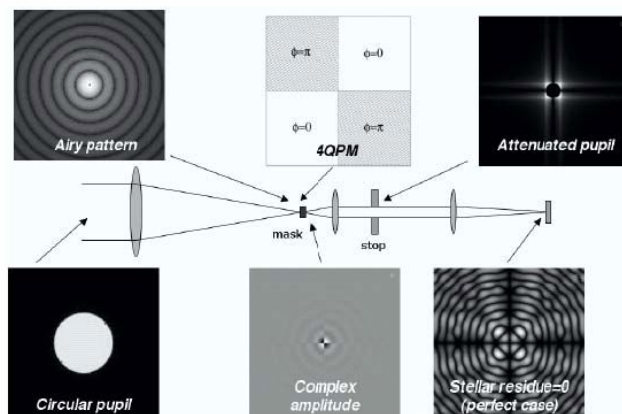


図 7.23: Four-Quadrant phase mask コロナグラフの原理図 [31]

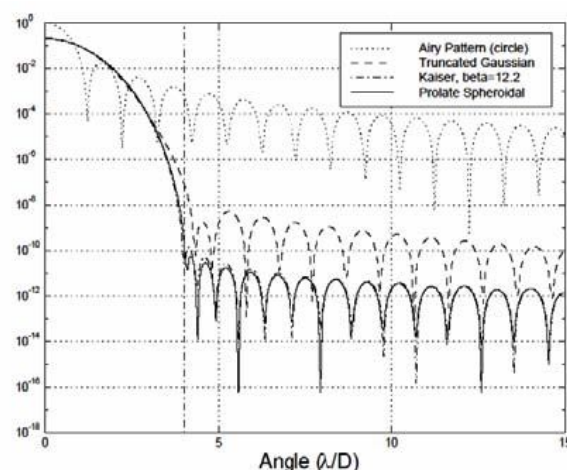


図 7.25: さまざまな瞳面コロナグラフによる星像の動径プロファイル。円形開口によるエアリーパターンでは $15\lambda/D$ の距離においても 4 桁強のコントラストしか得られないが、回転楕円面によるパターンでは特定の領域では $5\lambda/D$ の距離において 10 桁以上のコントラストが得られる。

- 複数のコロナグラフの実現
- コロナグラフ装置と望遠鏡とを一体化した設計

JTPF/HCST の口径 3.5m 軸はずし望遠鏡はまさにこれらの要求を満たしている。

スペースステラ-コロナグラフとしては、ハッブル望遠鏡に搭載された 3 種類のコロナグラフが存在する (表 7.5)。しかし、これらはいずれもオプション的に付加されたものであり、ハッブル望遠鏡の性能を 100% 生かしたコロナグラフになっているとは言いがたい。高コントラストを目指すためには、コロナグラフと望遠鏡とが一体となった設計が不可欠である。

7.14 軌道

7.14.1 S-E L2 概要

JTPF の観測軌道としては、太陽-地球系のラグランジュ点のうちの L2 (以下 S-E L2) を想定している。

S-E L2 は、天体観測、特に太陽系外惑星観測にとっては、以下の理由から大変に有利な軌道である。(1) 地球の見かけの大きさが非常に小さく、かつ太陽とほぼ同じ方向になるため、同じ姿勢での衛星への熱入力がほぼ一定になり、望遠鏡の温度安定性が向上する。(2) ある時点における観測可能な天空の領域が広く、かつ指向観測において長時間の積分が可能である。

一方、この軌道にはいくつかの留意点もあるが、以下のように大きな問題とはならない。(1) S-E L2 は摂動に対して不安定であるが、この周りに衛星を維持しておくために必要な制御量はごく少量である。具体的には、一年間あたりの制御量は静止軌道の南北制御に必要な量の 1/10 約である。(2) S-E L2 は地球から 150 万 km と遠方にあるが、比較的大きな重量が投入できる。同じ能力のロケットでも投入方法によっては、静止軌道に投入するよりも重い衛星を S-E L2 に投入することが可能である。

実際の観測軌道は、S-E L2 点そのものではなく、そのまわりのリサージュ軌道またはハロー軌道とする。その理由は以下である：(1) 常時電力確保、(2) 通信系の太陽電波との干渉の回避。

また、この軌道は 2010 年頃の打ち上げを目標として、JTPF より先行して検討が進められている次期赤外線天文衛星 SPICA でも採用されており、そのミッション運用のスキル (H-IIA での打ち上げ、軌道投入、軌道制御、姿勢制御) の大部分は JTPF においても活用できる。従って開発コスト、信頼性の面でも S-E L2 軌道は JTPF にとって有利である。

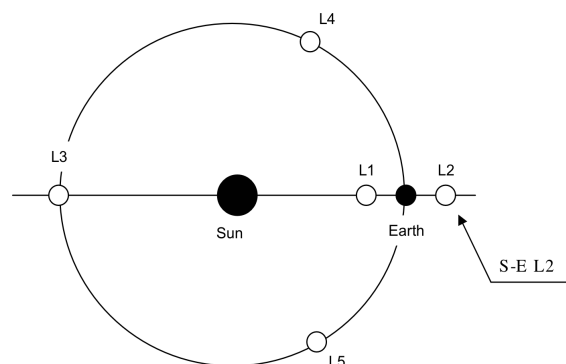


図 7.26: 太陽-地球系ラグランジュ点

装置	波長域	観測半径	解像度	主なターゲット
NICMOS	近赤外	> 0''.6	0''.2	若い木星型惑星
STIS	可視	> 0''.5	0''.1	円盤・ジェット
ACS	可視	> 1''.0	0''.06	系外銀河?
HCST	可視	> 0''.1	0''.03	地球型惑星
SPICA	中間赤外	> 1''.0	0''.3	遠方木星型惑星

表 7.5: HST コロナグラフと HCST および SPICA コロナグラフの比較

7.14.2 打ち上げロケットおよび軌道上運用

打ち上げロケット 観測軌道への投入方法は以下の観点から選択する。

- 衛星本体に、過度の負担 (構造的、電力的、熱的、機能的) を強いけないこと。
- 軌道投入が確実に行われること。
- 上記の条件を満たしながら、観測軌道にできる限り重い重量を運搬できること。

観測軌道への投入シーケンスの詳細は、今後の軌道計画検討を待たなければならないが、現時点では以下を想定している。

(1) H-IIA ロケットにより、衛星を中間的トランスファー軌道に投入する。(2) 中間的トランスファー軌道の遠地点において、アポジモーターまたは衛星搭載推進系により、S-E L2 への最終的なトランスファー軌道に移行。この過程において、有効であれば、月によるスイングバイ等も利用。(3) 衛星搭載推進系により、最終的トランスファー軌道から観測軌道へと移行。

打ち上げから最終的な観測軌道への到達時間は、短いほうが好ましい。打ち上げから最終的な観測軌道への到達時間は数週間を想定している。トランスファー軌道飛行中も、衛星の最低限の電力・機能を維持し、また、望遠鏡への太陽入射を防ぐよう、適切な衛星姿勢を維持する必要がある。

軌道保持 上記のように、実際の観測軌道は S-E L2 まわりのリサージュ軌道またはハロー軌道となる。しかしながら、上にも記したように、常に通信系の太陽電波との干渉を回避するためには、軌道保持の必要がある。そのためには、5m/s/year 程度の軌道制御が必要になる。

軌道制御は、衛星に搭載された推進系によって行う。ただし、その際観測機器の熱バランスが崩れないよう、姿勢変動を最小限にとどめることが望ましい。姿勢変動により熱バランスが崩れる場合、定常状態に復帰するためにどの程度の観測時間が失われるかを考慮し、軌道制御のタイミングを検討する必要がある。

7.15 観測運用

7.15.1 観測シーケンス

JTPF は天文台型の衛星である。すなわち、無条件に全天をサーベイすることは行わず、特定の、ただし全天に分布する天体の詳細観測を中心に行う。

発生電力の確保、および観測系への熱負荷の軽減のため、JTPF がある時期に観測可能な天体は、太陽方向に直交した大円を中心として $\pm 30^\circ$ 程度の領域に含まれる天体に限られる。実際には、この観測可能領域のなかの特定天体の指向観測を行うことになる。ひとつの天体の観測は、数時間続く。すなわち、望遠鏡はひとつの方向をこれだけの期間見つづけることになる。

7.15.2 地上からの運用

観測軌道に到達した後の観測期間中は、ひとつの地上局からは 1 日 8-10 時間程度、適度に離れた 3 局があれば 1 日中常に地上とのコンタクトをとることが可能になる。そこで、以下の 3 つの運用パターンが考えられる。(1) コマンド送信・テレメトリ受信ともに、ひとつの地上局のみ用いて運用を行う。したがって、一日の 1/3 の可視中はコマンド・テレメトリ送信ともに、ほぼリアルタイムで行うことができるが、非可視中は、プログラムにしたがった自動的観測および、観測データの蓄積が必要になる。(2) コマンド送信はひとつの地上局のみで行うが、テレメトリ受信は複数の地上局を用いる。したがって、観測はプログラムにしたがって自動的に行う場合が多いが、観測データの送信はほぼリアルタイムで行うことができる。(3) コマンドの送信・テ

レメトリの受信ともに、少なくとも 3 つの局を用いて非可視時間をほぼゼロとする。したがって、観測データをほぼリアルタイムで地上に送信しながら、リアルタイムでコマンドを送信することができる。

現状では、上記のうちの (1) をデフォルトとする。ただし、(2)、(3) との比較検討により、制約事項が多い場合は、地上運用方針の見直しを行う。

7.16 衛星システム 1(電源・通信・姿勢制御)

7.16.1 電源系

電源系構成 電力は以下の種類の電源から確保する。

- 太陽電池パドル系
- バッテリー系

定常観測期間中は日陰には入らないため、常に太陽電池パドル系から電力を供給する。観測中は基本的には太陽電池パドル面が太陽方向に直交するように姿勢が保たれるが、観測によっては、この位置から最大度まで衛星が傾斜される。この状況でも、十分な電力が確保されるのであれば、太陽電池パドルは衛星本体固定で良い。

上記に加え、以下の状況時の電力確保のためにバッテリー系を搭載する。

- 初期打ち上げ時
- 初期軌道制御時
- 観測期間中の軌道制御時
- 姿勢異常時

項目	電力
温度制御系	500W
焦点面観測機器制御系	200W
衛星システム系	800W
合計	1500W

これらの事態に備えて、バッテリー系の容量は十分なものを確保する必要がある。

表 7.6: JTPF の電力消費量

電力 定常観測時での電力消費量の概算見積りは表 7.6 の通りである。観測中の電力消費量はほぼ一定値が保たれる。

7.16.2 通信系

機能 通信系には以下の 3 つの機能が必要である。

1. **コマンド受信** 通常のリアルタイム運用に加えてスケジュール観測のためのプログラムを受け取る。
2. **テレメトリデータ送信** 衛星の HK データを送る低速回線と、観測データを送る高速回線の 2 系統をもつことが望ましい。
3. **レンジング応答**

地上局アンテナ JTPF 運用のためには臼田 64m クラスの地上局を用いる。

周波数帯 未定

機上アンテナ構成 以下の3つの役割をもつアンテナが必要。

1. 地球近傍において、どのような姿勢においても回線を確保するアンテナ。コマンド受信・テレメトリ送信の両者に用いる。
2. 観測軌道において、どのような姿勢においても最低限の回線を確保するアンテナ。一部のコマンド受信、HK テレメトリの送信に用いる。
3. 観測軌道において、観測姿勢時に高速回線を確保するアンテナ。多くのコマンド受信、観測データの送信に用いる。

上記と1と2は、1系統のアンテナが兼ねても良い。

7.16.3 信号処理系

機能/構成 信号処理系は、衛星全体を司る中央信号処理系に加えて、各主要要素ごとに処理系をもつ分散型のシステムを想定する。以下のような信号処理系要素を想定している。

1. 中央信号処理系
2. データレコーダー系
3. 電源信号処理系
4. 姿勢、軌道制御信号処理系
5. 焦点面観測機器信号処理系
6. 熱制御系信号処理系
7. 通信系信号処理系

以下では、このうちの代表的な処理系である「中央信号処理系」と「焦点面観測機器信号処理系」について述べる。

中央信号処理系 中央信号処理系に求められる基本機能は以下である。(1) コマンドをデコードし、該当機器に必要なコマンドの配信を行う。(2) 各機器からデータを集め、テレメトリデータを編集する。(3) 各機器から集めたデータをデータレコーダーに送る。(4) 各機器からのデータに基づき、衛星基本状態の判断を行う。異常と判断した際には、衛星全体が致命的な状況に陥らないよう適正な処理を行う。

焦点面観測機器信号処理系 焦点面観測機器信号処理系に求められる基本機能は以下である。(1) 焦点面観測機器が必要な信号、クロックなどを供給する。(2) 焦点面観測機器が発生する信号を収集する。(3) 必要とあれば信号を圧縮し、そのうえで中央信号処理装置にデータを渡す。(4) 焦点面観測機器が異常な動作を行った場合には、システムに致命的な影響を与えないような処理を行う。

データ発生レート 信号処理系の設計にあたっては扱うべき信号量を見積もる必要がある。最も大量のデータを発生する可能性があるのは焦点面観測機器である。

7.16.4 姿勢軌道制御系

機能 姿勢軌道制御系に求められる機能は、衛星の運用内容により以下のように大きくかわる。

1. **初期軌道投入時** 軌道変更運用に必要な衛星の姿勢を維持し、それを確認しながら軌道変更を行う。異常を検出した際には、システムが致命的な状況にならないようにすぐに対処。
2. **定常観測時** 非常に高い精度の衛星姿勢を維持。異常時には、自律的に太陽電池パドルを太陽にむけて回転するセーフホールドモードに移行。
3. **観測軌道維持制御時** (1) に同じ。

軌道姿勢制御系は、上記の機能を満たすために必要なセンサー系、アクチュエータ系を搭載したうえで軌道姿勢制御系信号処理装置により、自律的に制御を行う。

観測姿勢制御精度 観測時には極めて高い姿勢制御精度が必要となる。以下に、HCST の要求する姿勢制御精度を観測機器に分けて記す。

焦点面観測機器	姿勢安定性	絶対指向精度
可視近赤外コロナグラフ	0'03 rms/1min	誤差 1'' 以下
広視野可視近赤外撮像分光装置	0'03 rms/1min	誤差 1'' 以下
紫外線分光撮像器	0'03 rms/1min	誤差 1'' 以下

姿勢制御系と観測系との役割分担 これらの姿勢制御精度要求を衛星姿勢制御系のセンサーとアクチュエータのみで達成することは困難である。高精度・高周波数の指向制御は観測系からの信号と可動鏡を用いて行う必要がある。

- 低周波数・低精度は、姿勢制御系独自 (センサとアクチュエータ) で制御を行う。
- 高周波数・高精度の制御信号は、観測系からの信号を基にする。
- 高周波数・高精度の指向制御は、観測器系のティップティルト鏡により行う。

7.16.5 二次推進系

二次推進系に最低限必要な機能は以下である。(1) 中間トランスファ軌道から最終トランスファ軌道への移行 (別途アポジモーターを用意する案との比較が必要)。(2) 最終トランスファ軌道から観測軌道への移行。(3) 観測軌道の維持。(4) 姿勢制御系リアクションホイールのアンロード。

これらの機能に求められる推力は項目ごとに大きく異なるため、複数の 2 次推進系の組合せが必要となる可能性もある。

7.17 衛星システム 2(構造・熱制御)

7.17.1 構造系

JTPF 全体構造を図 7.27 に示す。

衛星バス構造 衛星バス構体はスラストチューブとハニカムパネルで構成され、HCST の荷重を直接ロケットに伝える構造とする。構造系は打ち上げ環境条件を満たすとともに、姿勢制御に必要な剛性をもたなければならない。

HCST 構造 HCST の構成を以下に示す。材料は暫定案であり、今後温度変化による光学特性を考慮して選定する。またサンシールド伸展機構は、光学系を見直し、主鏡～副鏡間距離を短くすることにより不要になる可能性もある。

1. **光学ベンチ** SiC または主鏡と線膨張係数を合わせた CFRP 成形品。衛星バスより CFRP トラスにより支持される。
2. **主鏡** SiC 製 3 点を光学ベンチより CFRP トラスにて支持する。
3. **副鏡バックストラクチャ** SiC または主鏡と線膨張係数を合わせた CFRP 成形品。光学ベンチより CFRP トラスにより支持される。
4. **副鏡** SiC 製。3 点を副鏡バックストラクチャより CFRP トラスにて支持する。
5. **サンシールド** アルミシエル。外表面は最外層を銀蒸着テフロンとした MLI により断熱される。ベンチ打ち上げ時はロンチロック機構により衛星バスに固定され、打ち上げ後伸展して望遠鏡を太陽光、地球光から遮蔽する。軌道上では光学ベンチから支持される。

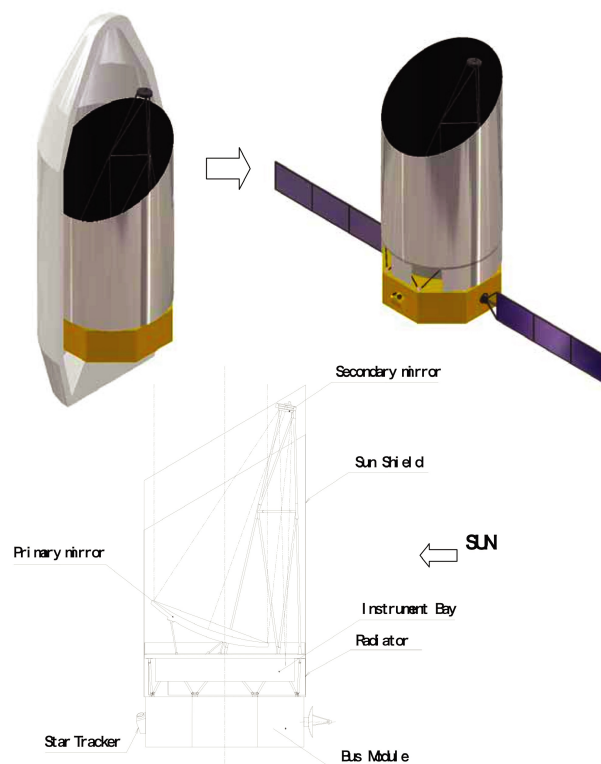


図 7.27: JTPF フェアリング収納状態と軌道上での外観 (カラー 18 ページ)

7.17.2 熱制御系

衛星システム部と HCST とは、お互いにできる限り断熱を施し、各々独自に熱制御を行うものとする。HCST は 1mK/hour 以下の温度安定性が要求される。太陽および地球に対する姿勢が一定の場合は熱入力が一定となるため、最終的には温度は安定するが、実際には観測対象を変更する際には姿勢変化し、熱入力も変動する。アクティブな熱制御を行わない場合は、姿勢変化後、定常状態になるまでの数時間から数日が観測時間のロスとなる。HCST では、以下のようにアクティブ熱制御を行うものとする。(1) 光学系はサンシールドで覆い、直接に太陽、地球、衛星バス、および太陽電池パドルを見ないものとする。(2) サンシールド最内面は、サンシールド最外面から断熱され、ヒーターで 20°C 前後に温度コントロールする。(3) 検出器冷却用の冷却器の排熱は太陽方向の反対面に設けたラジエーターにより行う。(4) 衛星システム部の HTST 取付面も HCST に対して、熱負荷とならないよう 20°C 前後に温度コントロールする。

項目	重量
望遠鏡システム	700kg
焦点面観測機器	300kg
冷却系	100kg
観測系構造	500kg
衛星システム	600kg
2 次推進系 (含む燃料)	400kg
合計	2500kg

表 7.7: JTPF/HCST の重量内訳

7.17.3 重量、大きさ

H-IIA ロケット/静止軌道 2t クラスにより打ち上げることを想定する。フェアリングとしては、開発中の HTV 混載キャリア形態フェアリングの利用を想定する。衛星の重量・大きさは、これらの外的条件により決められる。想定される重量内訳は表 7.7 のとおり。

7.17.4 打ち上げ条件

H-IIA ロケットの打ち上げ環境条件、およびその後の軌道変更時の環境条件に耐えること。

7.17.5 地上試験

JTPF/HCST は、軌道上の熱環境をできる限り地上試験での環境に近い状態に制御する。従って、HCST は地上において真空チャンバーなどの特殊な熱環境シミュレーション設備を用いることなく十分な機能試験が実施できる。システム試験は、H-IIA により打ち上げられる衛星に準じた試験を実施する。

7.18 観測装置および検出器

7.18.1 観測装置

大別して以下のような 3 種類の装置が必要となる。

可視光コロナグラフ装置 系外惑星検出の鍵となる装置である。撮像・分光装置に高度コロナグラフ機能を持たせたものとする。視野は約 $40''$ ($0.01/\text{pixel}$)、波長は $0.2 - 2.5\mu\text{m}$ ($0.2 - 1.0 - 2.5\mu\text{m}$) をカバーする。検出器は、 $4K \times 4K$ 素子以上の CCD と HgCdTe または InSb array を前提とする。

広視野可視光・近赤外装置 撮像・グリズム分光を持つもので、視野は約 $15'$ をカバーできる。波長は $0.2 - 5\mu\text{m}$ が目標だが、 $2.5 - 5\mu\text{m}$ までは別途カメラが必要となる。検出器は $8K \times 8K$ 以上のモザイク (CCD と HgCdTe または InSb) が必要となる。

紫外線装置：未定 波長は $0.12 - 0.32\mu\text{m}$ をカバーする。波長分解能は約 20000 が必要と考えるが、今後サイエンス要求をまとめる必要がある。

7.18.2 検出器

太陽系に広がる惑星間塵 (黄道ダスト) による太陽光の散乱及び熱再放射は、大気圏外部からの宇宙観測において大きな表面輝度を持つ。 $1 - 4\mu\text{m}$ の近赤外線波長帯においては惑星間塵の散乱成分と熱再放射成分の谷間にあたることから、宇宙からの観測時の背景光が最も暗くなる波長領域である。この結果上記の波長領域では極めて高感度な観測を実現できるとともに、主要なノイズ源となりうる検出器性能への要求水準が厳しくなる。特に近赤外線観測時の主要なノイズ源は、地上観測の場合大気や望遠鏡からの背景光や検出器自身の読み出しが主成分となるが、宇宙環境では背景光のレベルが低いことから長時間の露出が可能となり、検出器の持つ暗電流が支配的なノイズ源となる。

現在宇宙からの観測装置に搭載する可視光 CCD の開発については、E2V 社の独壇場になりつつある。2004 年現在で入手可能な CCD のフォーマット及びタイプは背面照射型 2048×4096 画素の Three side battable のタイプであり、これをモザイク化することにより $8K \times 8K$ 以上の規模を持つ可視光 ($< 1\mu\text{m}$) カメラを構成することが可能である。また暗電流 ($\sim 0e^-/\text{s}@ \sim 120K$)、読み出しノイズ ($< 3e^-$)、量子効率 ($> 85\%$) などの特性も十分に仕様を満たすものが入手可能である。ただし納期と価格については非常に深刻な問題であることが

無視できないとともに(宇宙搭載品レベル)、宇宙放射線耐性に関しては必ずしも十分な性能には達していない事が問題である(1素子が1億円を超える価格が提示されている)。また現状における E2V 社の CCD のレベルではミッション後半において大幅な性能の劣化は避けられないことが予想され、特に暗電流及びホットピクセルの劇的な増加と、CCD 内の電荷転送効率の劣化によるダイナミックレンジの低下が深刻である。前者の問題は動作温度を下げることで解決することが可能であるが、後者については鉛などによる重量物でのシールドによる劣化時間の遅延以外に有効な手段が見つかっていないことは深刻である。また E2V 社により供給される宇宙仕様の CCD はフレーム転送型に限られているため、シャッターの併用が必須であることにも注意が必要である。シャッターを必要としないタイプの CCD で宇宙での使用を前提とした物は、ISAS/JAXA PLANET-C グループが三菱電機株式会社と共同開発を行っているものがあるが、フォーマットサイズが $1\text{K} \times 1\text{K}$ と小さく、量子効率も十分な領域に達していない(量子効率はピーク波長で 50% 程度にとどまる)。

一方 $1-5\mu\text{m}$ 帯をカバーする近赤外線検出器は、JWST 計画の一端により InSb、HgCdTe(HAWAII-II-RG) の二種類のタイプの検出器について夫々 Raytheon Vision System および Rockwell により開発が行われてきている。両者とも 2048×2048 画素のフォーマットサイズを持つ検出器が開発され、それらの検出器について米国内の四つの研究機関(Univ. of Hawaii, Univ. of Rochester, NASA Ames, STScI/JHU)により独立に評価が進められた。両者とも読み出し雑音の点において十分な評価結果($< 10e^-/\text{pixel}$)を得たが、InSb 検出器の持つ暗電流の大きさが不利な点となり、HgCdTe タイプの検出器が JWST 計画の搭載用検出器として最終選考され開発が継続されている(暗電流の典型値は各々 InSb; $35e^-/\text{pixel/s}$ @ 30K, HgCdTe; $5 \times 10^{-3}e^-/\text{pixel/s}$ @ 40K)。JTPF 計画においては微弱な天体を検出するという側面と、高い画像ダイナミックレンジを要求するという側面の両方を有している。スペース環境で高い空間分解能を持つ近赤外線観測を行う際には、観測時の背景光レベルが極めて低く、検出器自身の暗電流によるノイズが支配的になり、極限的に微弱な天体を観測する際には HgCdTe タイプの検出器が一般的に有利である。しかし観測装置冷却の点において優れた技術をする日本の計画としてとらえた場合、InSb 検出器についても同程度まで暗電流を抑えた運用を実現することが可能である(但し検出器を 13K 程度まで冷却することが前提となる)。また HgCdTe 検出器の場合、基板材料が赤外線波長で透明であることが検出器内部の散乱光を引き起こす問題を有していることが大きな問題であり、JTPF 計画で要求する極限のダイナミックレンジを持つ観測に大きな制限を与えるものである。これに対して InSb 検出器は検出器の基板材料(InSb)自身が赤外線の光を完全に吸収するため内部散乱の問題が無く、非常に大きなダイナミックレンジを持つ画像を取得することに秀でている。

これらのことを総合して JTPF に搭載される近赤外線検出器は、InSb 検出器を第一候補として検討を進めることが好ましいと考えられる。InSb 検出器については、先に挙げたように JWST への搭載を目標に $2\text{K} \times 2\text{K}$ 素子の開発が既に完了している。単体の検出器として、 $2\text{K} \times 2\text{K}$ 以上のフォーマットサイズの実現することは検出器内に使用されている二種類の半導体(Si, InSb)の持つ熱膨張率の差から製作上の限界が報告されている。このため JTPF 化に向けて InSb 検出器のモザイク化が必要となり、宇宙への打ち上げに耐え、光学的な精度も実現できるモザイク技術の開発が必要である。また現在 Raytheon により開発が行われている InSb 検出器は 30K での動作に最適化されたものであり、暗電流が小さくなる温度領域($< 15\text{K}$)での動作に最適化されていないため、JTPF に向けて Raytheon との共同開発を進める必要があると考えられる。

7.19 干渉計への取り組み

本提案書では、JTPF の目的を実現する手法として、もっぱらスペース可視光高コントラスト望遠鏡(HCST)の記述を行ってきた。しかしながら、**赤外線干渉計を実現するために必要なオリジナルな検討および技術開発**も行われている。本章では、このような干渉計への取り組みについて説明する。

7.19.1 ナル干渉計への取り組み

ナル干渉計では、恒星の光を打ち消し合う干渉状態にして、恒星光のサイドローブを抑えて微弱な系外惑星を直接検出する。ナル干渉の場合、2つのビームの間で位相を π ずらす必要がある。このとき問題となることは、いかにして白色光で π の位相シフトを実現し、ナル干渉を達成するかである。我々は、幾何学的位相変調によるナル干渉計を提案し実験を行っている [2]。

図 7.28 のように、二台の望遠鏡からなる天体干渉計を考える。被観測天体の方向によって、二つの望遠鏡で受ける光には光路差が生じる。この光路差は遅延線によって補正され、各々の望遠鏡で受光された光は光路差ゼロで干渉させられる。これが通常の天体干渉法であるが、ここで、一方のビームに π の位相シフトを与えると、光軸上にある天体からの光は打ち消し合う干渉を起こす。光軸からずれた方向から来る光には光路差が残るために、完全に打ち消し合う干渉とはならない。したがって、恒星光を打ち消し合う干渉状態にして、系外惑星光を検出できるようになる。

白色光に対して π の位相差を与える最も効率的な方法は、反射を利用して電場を反転させることである。

しかし、2つの望遠鏡からの光をそれぞれ同じように光学素子を反射・透過させるようにしなければ深いナル干渉を実現できない。Serabyn らは RSI(Rotational Shearing Interferometer) を用いる方法を提案した [36]。彼らの方法に限らず、反射を利用する π 位相シフト法では、天体干渉計の中に何らかの干渉計を組み入れることになる。また、 π 以外の位相変調は無理である。多素子(望遠鏡が三台以上)干渉計では π 以外の位相シフト量でナル干渉が可能となる場合がある。

馬場らは、白色光で任意の位相シフトが可能となる幾何学的位相変調に着目した。図 7.29 が、天体干渉計に幾何学的位相変調器(GPM:geometric phase modulator)を組み入れた図である。天体からの入射光は、偏光板 P1,P3 によって同一の直線偏光($\theta = 45^\circ$)成分となる。そして、偏光板によって、それぞれ、望遠鏡 1 からの光は S 偏光に、望遠鏡 2 からの光は P 偏光にされる。ビームコンバインされた後に、1/4 波長板 QWP と半波長板 HWP で構成される幾何学的位相変調器に入れられる。

幾何学的位相とは、偏光状態を循環的に変化させたときに得られる位相である。偏光状態は図 7.30 のようにポアンカレ球上の点で表すことが出来る。望遠鏡 1 からの S 偏光の光は、最初の 1/4 波長板で円偏光となる。次に半波長板の角度が θ とすると、 2θ だけ傾いた直線偏光を経由して逆回りの円偏光となる。そして 2 つ目の 1/4 波長板で元の S 偏光に戻る。このとき、ポアンカレ球面上に張られた立体角の半分、すなわち、この場合 2θ の位相が付加される。望遠鏡 2 からの P 偏光の光も同様に、幾何学的位相変調器から出るときは P 偏光となるが、 -2θ の位相が付加される。ここで負の符号は、ポアンカレ球面上での循環ループが S 偏光の場合と逆回りとなっているためである。最終的に、P 偏光と S 偏光には 4θ の位相差がつく。半波長板の回転角 θ を調整することで任意の位相差が得られる。偏光板 P5($\theta = 45^\circ$) によって、P 偏光と S 偏光とが干渉するようになる。ここで、 $\theta = \pi/4$ とすると、二つの望遠鏡からの光に π の位相差がつきナル干渉となる。

幾何学的位相変調によるナル干渉の実験を 2 通り行った。1 つは、図 7.29 の理想的な場合に相当する実験である。もう 1 つは、天体干渉計の各アーム毎に幾何学的位相変調を行うシミュレーション実験である。なお、以下の実験で使用した幾何学的位相変調器での波長板は、波長依存性の少ないフレネルロムとした。

図 7.31 では、恒星光をキセノンランプでシミュレートし、二つの望遠鏡からの P 偏光、S 偏光が光路差ゼロで合波されたとしている。惑星光(ハロゲンランプ)は有限の光路差をつけられてから幾何学的位相変調器に入射する。実験結果を図 7.32 に示す。(a) は強めあう干渉状態であって、透過率が 10^{-4} の濃度フィルターを CCD カメラの前に挿入して撮像された。ここでは、惑星モデル光は検出されていない。(b) は幾何学的位

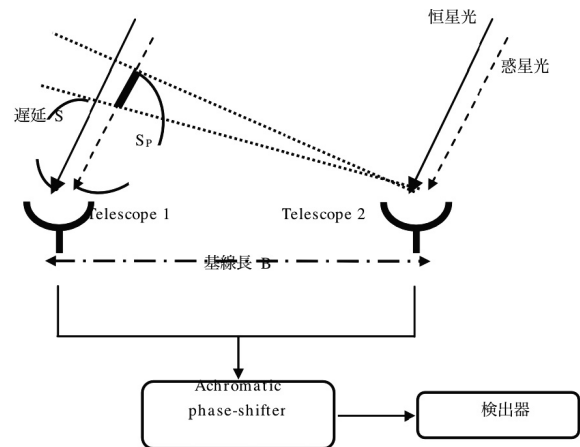


図 7.28: ナル干渉計

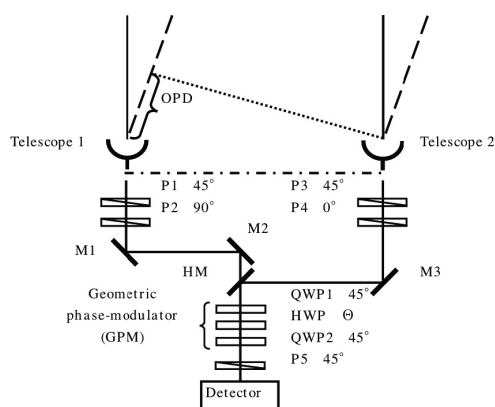


図 7.29: 幾何学的位相変調型ナル干渉計

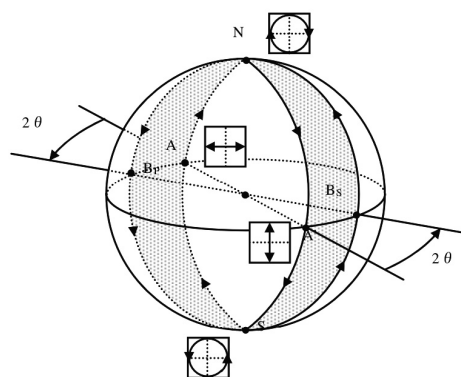


図 7.30: ポアンカレ球上での偏光状態変化のループ

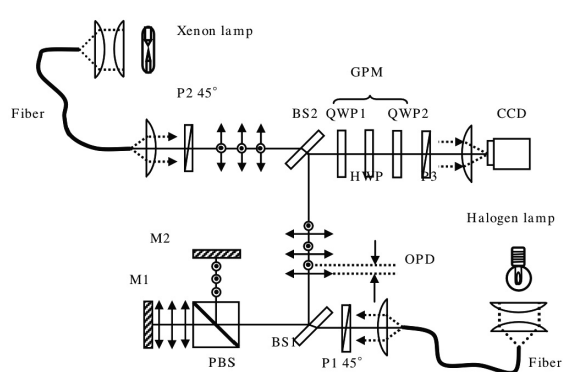


図 7.31: 幾何学的位相変調型ナル干渉実験系

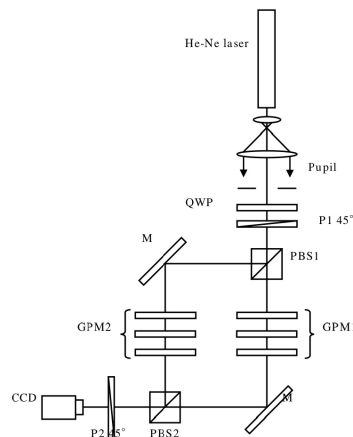


図 7.33: 各アーム毎の幾何学的位相変調実験

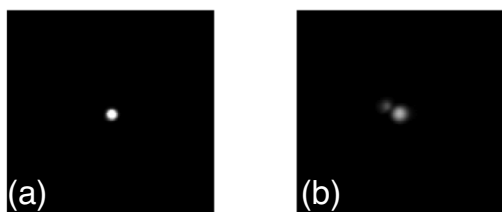


図 7.32: 実験結果

相変調器の半波長板を回転させることによって、ナル干渉状態にした結果である。惑星モデル光が検出されている。この実験における消光比は 1.7×10^4 であった。

次に、幾何学的位相であれば天体干渉計の各アーム毎に任意の位相変調が可能であることを実証するために、図 7.33 に示す光学系で実験を行った [23]。ここでは、He-Ne レーザーを恒星モデル光としている。マッハツェンダー干渉計の各アームでの光が 2 つの望遠鏡からの光に対応している。例えば、幾何学的位相変調器 GPM1 で 150° 、GPM2 で -30° の位相変調を行うと、2 つのビームで位相差が π となりナル干渉を起こす。このような実験で得られた消光比は 0.8×10^4 であった。

7.19.2 ナル干渉計応用手法への取り組み

高いダイナミックレンジを得る 3 種の方法：

- ナル干渉計 (nulling interferometer)
- 発展的なコロナグラフ (advanced coronagraph)
- 瞳改良法 (modified pupil method)

それぞれ、恒星に近接した非常に暗い惑星を直接検出するための方法で、各面での電場波面の操作法は細分化して表にまとめた。

方法	瞳面 ²	焦点面	リオストップ ³	中心星光量減衰効果
ナル干渉計	位相反転干渉	—	—	星強度全体
ナリングコロナグラフ	(強度分布操作)	部分位相反転	絞り	強度と PSF ⁴ 分布
バンド制限コロナグラフ	—	強度分布操作	絞り	強度と PSF 分布
瞳形状の改良 ⁵	強度分布操作	遮蔽円盤	絞り	PSF 分布
瞳透過率分布の改良 ⁵	強度分布操作	遮蔽円盤	絞り	PSF 分布

表 7.8: 高いダイナミックレンジのための手法の各面での操作

ナル干渉計と瞳改良法の組合せ (オリジナル)

新たな方法として、西川ら ([29]: 図 7.28) は、ナル干渉計と瞳改良法の組合せについて検討した。ナル干渉計により中心星強度を落とし、さらに瞳改良法で PSF の裾野を落とすことで、単独の方法よりダイナミックレンジが取りやすく、PSF コアも小さくなり、惑星検出がし易くなることが示されている。この方法は、波長が短く回折限界像サイズが星と惑星間分離より十分小さい、可視近赤外線のコロナグラフ望遠鏡の前置光学系として、ナル干渉計を設置する方法である。

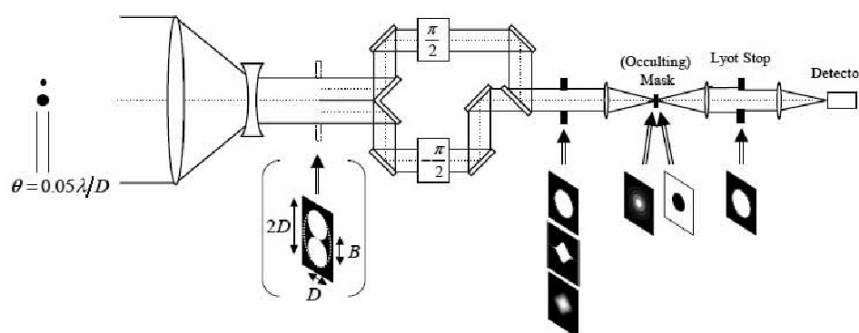


図 7.34: ナル干渉計と瞳改良法の組合せ [29]。単一望遠鏡内に 2 つの開口を確保し、前置ナル干渉光学系により中心星の強度を落とし、さらに、瞳改良法を施した望遠鏡で PSF のハロー成分を落とし、単独の方法より惑星の検出を容易にする。

その他の可能性

1. 西川ら [29] は、その他にも 3 種の方法の未知の組合せにより、さらにダイナミックレンジを得るのに適している方法の可能性があると議論している [24]。

²望遠鏡の光の取り入れ口、開口面

³再結像された 2 次瞳面

⁴Point Spread Function、星の 1 点から出た光の焦点面での強度分布を現す関数

⁵瞳改良法では、瞳形状の変更と透過率分布の操作 (Apodization) がある。(両方可)

2. 瞳改良法の Apodization では、Guyon の Phase-Induced Amplitude Apodization 法 [17] が PSF コアのサイズが現時点で最も小さく優れていて、前述のような組合せにも使えるが、それを実現する光学系を製作するのが難しいと言われている。
3. ナル干渉計、コロナグラフ、瞳改良法は、いずれも可視光域で使うには、 10^{-10} のコントラストのために $\lambda/1000$ の鏡面精度が必要とされ、各国で実現方法が開発中である。
4. 最近の AO 技術によると、 $\lambda/1000$ で鏡をある形状に制御を駆けることにより、中心星の近傍のある領域で、 10^{-9} まで回折光を抑制した結果の報告がある [47]。
5. 特にコロナグラフでは、高いダイナミックレンジをどのような範囲でどの手法を使って実現するのが最適かは、今後も多岐にわたる発展の余地がある。選択を迫られる時期になるまでの間、アイデアを出していけば、我々の寄与が可能な箇所である。

7.20 国際協力・年次計画・体制

JTPF は巨大な計画であり、国際協力を視野に入れた計画立案が重要である。地球型系外惑星探査自体は、赤外線干渉計を前提とした NASA/TPF と ESA/Darwin の計画が数年前から詳細検討が始まっていたが、最近ではコロナグラフも含めてインテンシブな検討が進んでいる。JTPF は、これまでは IACG (Inter-Agency Consultative Group for Space Science) を通した協力を進めており、日本側の系外惑星ミッションへの関心の意味は既に示されている。いっぽう、NASA/TPF と ESA/Darwin は R&D phase における相互協力を約束済みである。今後の協力のためには両者との協定書の締結が必要である。

NASA は TPF に関して、当初は赤外線干渉計の検討からスタートしたが、技術的検討を進める上で可視光コロナグラフの選択も視野に入れはじめ、これらのうち、一つを選択することを考えていた。しかし、ごく最近 (2004 年 1 月)、NASA はコロナグラフ (TPF-C) と干渉計 (TPF-I) の両方を追求することを決定した。特に、TPF-C は口径 $4\text{m} \times 6\text{m}$ の望遠鏡を 2014 年頃に打ち上げる計画であり、JTPF/HCST 計画との重複が大きい。今後、TPF-C との国際協力を急速に詰める必要が有る。ただし、National Academy of Sciencesからは、両方のミッションを進めることへの問題も指摘されている。

国際協力の形態としてはいくつかの解が考えられる。

一つは、ミッションそのものへの参加可能性である。これは、NASA/TPF-C をポストハッブル宇宙望遠鏡ととらえ、光赤外コミュニティとしての大規模な参加となる。ALMA のように相手機関と対等の参加となるため、数百億円程度のコストが必要になるだろう。

二つは、ミッションの一部への参加である。これは、NASA/TPF-C の限られた部分 (観測装置の一つなど) を請け負うが、主体は相手機関となる。この解は、光赤外コミュニティの前面参加ではなく、系外惑星科学や本提案書に記述した関連するサイエンス (系外銀河・晩期型星なども当然含む) に興味あるグループが JTPF ワーキンググループとして参加する場合となる。コストとしては数十億円程度と予想される。

三つは、ミッションをサポートするための寄与を行う可能性である。これは、系外惑星直接観測のための地上・スペース観測を TPF チームと協力して行うものである。コストの寄与はミッション全体の予算から見ると小さいため、例えば、望遠鏡時間を確保すること等は難しくなる。第 2 の地球の発見という一つの目的のために出来る寄与をする、という立場である。

どのような形態で協力を進めるか、今後の議論をもとに、WG としての合意を目指す。

JTPF/HCST を独立したミッションとする場合、現時点でのおおまかな年次計画としては、2003 – 2005 年は概念設計、2006 – 2008 年は基本設計及び基礎開発にあてて。この時点までに TPF/Darwin との国際協力の形態を決定する必要がある。その後、2009 – 2015 は最終設計及び製作、2015 年に打上げ、2015 – 2025 年に運用、というイメージとなる。赤外線干渉計のアーキテクチャーの場合は 2020 年以降の打上げとなるだろう。

JTPF の検討母体としては、宇宙科学研究本部理学委員会の承認を得た JTPF ワーキンググループと国立天文台のワーキンググループ (任意) である。JTPF ワーキンググループのメンバーは以下のとおりである。また、今後とも多くの方の参加を歓迎する。

芝井広 (名大; 発起人、代表)

松本敏雄 (宇宙研; 発起人)

田村元秀 (天文台; 発起人)

★国立天文台	: 青木和光、ABE Lyu、有本信雄、大石奈緒子、海部宣男、GUYON Olivier、郷田直輝、小久保英一郎、関口朋彦、中島紀、中島康、西川淳、林正彦、観山正見、森野潤一、山田亨、吉田二美、和田桂一
★宇宙航空研究開発機構	: 石黒正晃、塩谷圭吾、奥村真一郎、片坐宏一、北村良実、中川貴雄、中村良介、長谷川直、松原英雄、村上浩、村田泰宏、矢野創、吉川真、和田武彦
★北海道大学	: 馬場直志、山本哲生
★新潟大学	: 西亮一
★茨城大学	: 岡本美子
★東京大学	: 阿部豊、上野宗孝、太田泰弘、尾中敬、小谷隆行、佐々木晶、須藤靖、関根康人、土井靖生、林祥介、深川美里、牧島一夫、柳田健之
★東京工業大学	: 井田茂、田中秀和
★理化学研究所	: 海老塚昇
★明治学院大学	: 高橋順子
★横浜国立大学	: 小林憲正
★名古屋大学	: 春日敏測、栗田光樹夫、佐藤修二、長嶋千恵、渡辺誠一郎
★神戸大学	: 相川祐理、伊藤洋一、大朝由美子、佐藤文衛、田口優介
★ICS, UK	: 高木俊賜

7.21 系外惑星科学のロードマップ (まとめにかえて)

日本における系外惑星観測にはロードマップが必要である。2000 年より稼働し始めたすばる望遠鏡は若い系外惑星および原始惑星系円盤の直接観測を狙い、2005 年打上げ予定の ASTRO-F は系外黄道光と褐色矮星の観測において重要な寄与をもたらすだろう。2010 年打上げ予定の SPICA により、主星から離れた系外惑星の撮像・分光が可能になるだろう。そして、より一般的な惑星の観測は、TPF-I & Darwin の狙う赤外線干渉計あるいは JTPF/HCST 及び TPF-C の狙う可視光コロナグラフでようやく実現可能となる。

系外惑星探査は天文学だけではなく惑星科学・地球科学・生物

学・工学などの諸分野の興味をとらえる研究テーマだろう。今後により多くの人々の参加・協力を得て検討を進めたい。

本提案書の執筆者・編集者は以下のとおりである：田村元秀、長嶋千恵、山田亨、海老塚昇、上野宗孝、中川貴雄、村上浩、西川淳、芝井広、馬場直志、中島康。



図 7.35: 太陽系外惑星科学のロードマップ案。

参考文献

- [1] Allen et al. 1992
- [2] Baba, N. et al. 2001, *Opt. Lett.* 26, 1167
- [3] Benedict et al. 2002, 581, L155
- [4] Bond, I. A. et al. 2004, *ApJ*, 606, L155
- [5] Bouchy et al. 2004, *A&A*, 421, L13
- [6] Bracewell, R. 1978, *Nature*, 274, 780
- [7] Brown, B. A. et al. 2002, preprint
- [8] Charbonneau, D. et al. 2000, *ApJ*, 529, L45
- [9] Charbonneau, D. et al. 2002, *ApJ*, 568, 377
- [10] Ebbets, D. et al. 2003, *Proc. SPIE*, 4860, 120
- [11] Ebizuka, N. et al. 2003, *Proc. SPIE*, 4842, 329
- [12] Ebizuka, N. et al. 2004, *Proc. SPIE*, 5487, in press.
- [13] Feldt, M. et al. 2003, *Proc. SPIE*, 4860, 149
- [14] Ford, E. B. et al. 2001, *Nature*, 412, 885
- [15] Fukagawa, M. et al. 2004, *ApJ*, 605, L53
- [16] Gray, D. 1997, *Nature*, 385, 795
- [17] Guyon, O. 2003, *A&A*, 404, 379
- [18] Hough, J. H. et al. 2003, *Proc. of the SPIE*, 4843, 517
- [19] Kasting, J. F. et al. 1993, *Icarus*, 101, 108
- [20] Konacki, M. et al. 2003, *Nature*, 421, 507
- [21] Lyot, B. 1939, *MNRAS*, 99, 580
- [22] Mayor, M., Queloz, D. 1995, 373, 355
- [23] Murakami, N. et al. 2004, *Opt. Commun.*, 237, 9
- [24] Murakami, Nishikawa, Baba, in preparation.
- [25] Nagashima, C., Nariai, K. et al. in preparation.
- [26] Nakagawa, T. et al. 2000, *ISAS Report SP-14*, 189

- [27] Nakajima, T. et al. 1995, *Nature*, 378, 463
- [28] Nisenson, P., Papaliolios, C. 2001, *ApJ*, 548, L201
- [29] Nishikawa, J. et al. 2005, *A&A*, in press.
- [30] Ohmori, H. 1992, *International Journal of Jpn. Soc. Prec. Eng.* 26, 273
- [31] Rouan, D. et al. 2003, *Proc. SPIE*, 4860, 192
- [32] Rieke et al. 2004, in preparation.
- [33] Sato, B. et al. 2004, *ApJ*, 597, L157
- [34] Schneider, J. et al. 1999, *ApJ*, 513, L127
- [35] Seager, S., Whitney, B. A., Sasselov, D. D. 2000, *ApJ*, 540, 504
- [36] Serabyn, E. et al. 1999, *Appl. Opt.*, 38, 7128
- [37] Sivaramakrishnan, A. et al. 2001, *ApJ*, 552, 397
- [38] Smith, B., Terrile, R. 1984, *Science*, 226, 1421
- [39] Spergel, D. A. 2002, *astro-ph/01011142*
- [40] Stapelfeldt et al. 2004
- [41] Tamura, M. 2000, *ISAS Report SP-14*, 1
- [42] Tamura, M. et al. 2000, *SPIE*, 4008, 1153
- [43] Tamura, M. et al. 2002, 第 3 回宇宙科学シンポジウム集録
- [44] Tamura, M. et al. 2003, 第 4 回宇宙科学シンポジウム集録
- [45] Traub, W. A., Jucks, K. W. 2002, *AGU Geophysical Monograph*, 130, 369
- [46] Trauger, K. et al. 2002, *Proc. SPIE*, 4854, 1
- [47] Trauger, K. et al. 2004, *Proc. SPIE*, 5487, 1330
- [48] van de Kamp, P. 1969, *AJ*, 74, 238
- [49] Vidal-Madjar, A. et al. 2003, *Nature*, 422, 143
- [50] Wolszczan, A., Frail, D. A. 1992, *Nature*, 355, 145
- [51] http://www.rssd.esa.int/SA-general/Projects/NGST/WH/ESA_paytel.pdf ; NGST Payload Study, General Technology Considerations
- [52] http://www.toshiba.co.jp/tech/review/2003/05/58_05pdf/f05.pdf ; 須山章子・伊藤義康・香山晃、加藤雄大、“高強度反応焼結炭化ケイ素セラミックスの開発”、東芝 FC report 18, No. 3, 62-64, 2003
- [53] <http://www.hia-ihc.nrc-cnrc.gc.ca/VLOT/Reports/XLT-SiC.pdf> ; Primary Mirror Substrate Materials for the XLT Telescope: A comparison of various options including Silicon Carbide, National Research Council, Herzberg Institute of Astrophysics, 1 August, 2001
- [54] http://www.goodfellow.com/csp/active/static/A/C_41.HTML ; Material Information Carbon-Carbon Composite
- [55] <http://www.taiheiyo-cement.co.jp/rd/rd/5crmelc/502.html> ; ゼロ膨張高剛性セラミックス (ZPF)

第8章 全体計画の推進について

8.1 地上とスペース

光赤外天文学の将来を考えると、「地上か、スペース (宇宙望遠鏡) か」、という問いかけ自体を前提とするのはナンセンスではある。当然ながら、手段とは、本来の目的に見合ったものとして考えられるべきであるからである。

ただし、この問題を具体的に考えてゆくことで、どのような問題にどちらの手段がより有効か、という点について考察を加えることができる。また、実際に将来計画を実現してゆく上で、具体的な人的資源の配分、遂行能力、そしてさらに未来への計画的な発展を視野に入れて考えてゆく上では、いずれ、避けては通れない設問にもなるのではないだろうか。短期的に見れば、宇宙望遠鏡の実現には莫大なコストと、その規模に見合った十分な開発・運用能力が必要で、一朝一夕に実現出来るものではない。が、一朝一夕にできるものでないからこそ、将来を見つめた段階的な取り組みを始める必要もあるだろう。

今回の将来計画の検討では、目的を特化したものを除く汎用望遠鏡のたたき台としては、地上 30m 大型望遠鏡と、中口径 (3.5m) 宇宙望遠鏡が考えられている。本稿では、主としてこれらのケースを例として、空間分解能、視野、波長分解能、そして感度について、その得失をまとめて議論する。まず、波長 $0.3 - 5\mu\text{m}$ の可視・近赤外線波長域について、地上望遠鏡とスペース望遠鏡との比較を行なう。続いて、SPICA が観測対象としている $\lambda > 5\mu\text{m}$ の中間・遠赤外線波長域について、同様の議論を行なう。ここでは、JASMINE に代表されるような目的・あるいは特徴を絞ったタイプの課題は省略する。

他にも、例えば地上大型の場合には、巨大で複雑な観測装置を取り付け常時メンテナンスできるが、宇宙望遠鏡の場合は装置のサイズ・重量・構造により制限が大きく、また一般的に寿命も短い、などの得失があることにも留意すべきである。ここで述べるのは、天文学目的のための基本的な性能という意味での比較である

8.1.1 空間分解能

今後 20 - 30 年の光赤外天文学の観測的研究に、高空間分解能は必須の要求事項である。高赤方偏移では銀河の探査が進み、単に銀河を検出し、その統計的性質を求めることから、より詳細な性質、銀河の形成・進化の過程を調べることが必要となる。また、一般に高赤方偏移天体は、近傍銀河などと比べてもコンパクトなものが多く、初期宇宙天体の探査にも高解像度のメリットは大きい。遠方超新星探査や、高赤方偏移クェーサー・ γ 線バーストを背景光とする銀河間ガスの研究など、点源の検出・分光には、高解像度は、より本質的に重要である。また、近傍銀河についても、個々の星をできるだけ分解して、その色・光度・スペクトル分布を求めることが重要な課題となるだろう。系外惑星の直接検出にも、高ダイナミックレンジに加え、高空間分解能は本質的役割を果たす。

この点で、スペース中口径望遠鏡は、安定した高解像度を補償する点で、大変有用である。広視野に渡る点源・コンパクトな天体の探査、広視野において多数の天体を同時に解像して研究する場合、などに威力を発揮する。

一方、地上大口径望遠鏡は、補償光学により、回折限界に近い像を達成した場合には、高い空間分解能を得ることができる。小スケール ($< 0''.1$) で強い構造を持った天体を解像して撮像・分光する場合や、とくに、点源 (に近い天体) の検出に優れている。また、高 S/N で高分散分光を行う場合などにも大きなアドバンテージがある。また、中間赤外線波長帯では、3 - 4m の宇宙望遠鏡では回折限界による制限が大きい、地上 30m

級望遠鏡の場合には、このような長波長帯でも非常に高い解像度を得ることができる。ただし、望遠鏡製作技術にも増して今後の補償光学技術の発展が重要になること、天候に対する安定性、可視光など短波長側での動作などの不利な点にも留意するべきである。

8.1.2 視野

すばる望遠鏡主焦点カメラの活躍が証明するように、大望遠鏡の集光力と広視野撮像の組み合わせは、高赤方偏移の銀河など希少で暗い天体の探査や、超新星探査に代表される暗く希少な点源の探査、銀河の形態を環境によって調べる研究、重力レンズによる質量マッピング、そして近傍銀河を星に分解して行う測光観測などに非常に大きな威力を発揮することが、現在ではよく理解されている。

宇宙望遠鏡の場合、数十分角の広視野を確保することは現在の技術でそれほど難しくはないだろう。安定した高解像度と、広視野を同時に満たすことができるメリットは非常に大きい。現在の技術でも、100 – 200 平方分角程度の可視・近赤外線カメラは実現可能であると考えられる。この広視野＋高解像度で、より高精度のアストロメトリも達成出来るだろう。

地上の大口径望遠鏡の場合には、視野の確保は補償光学技術、とくに MCAO と呼ばれる複数の光源を用いて大気ゆらぎの三次元分布を立体的に把握し補償する技術や、広視野の中で局所的に複数の天体の周辺だけで高解像度を達成する技術などの発達に大きく依存している。一般的には、地上 30m 級望遠鏡＋補償光学の組み合わせで得られる視野は、典型的には数秒 – 10 数秒角、MCAO などが理想に近い形で働く場合には長波長では数分角の視野を確保することができる可能性がある。

8.1.3 波長域

観測波長域については、以下の感度の節でより具体的に述べるが、宇宙望遠鏡は、低熱背景雑音の環境が得られ、また、大気吸収の影響も無いので、波長 1 μm より長い近赤外線で大きなゲインがある。

地上大型望遠鏡も補償光学は長波長でより有効であると考えられるので、点源について非常に大きな感度を達成出来るのは近赤外波長域である。ただし、0.1 秒角を超えて広がった天体の場合には、背景光の影響が無視出来なくなり、高感度は達成出来ない。中間赤外線帯では、高解像度のみを活かした比較的明るい天体の観測が主体となるだろう。

宇宙望遠鏡のデメリットのひとつには、フィルタなどのフレキシビリティが制限されてしまうことがあるだろう。すばる望遠鏡で行われているような、多数の狭帯域・中帯域フィルタを運用することは一般に難しい。チューナブルフィルターなどの開発が重要である。

8.1.4 波長分解能

高分散分光観測の場合には、地上大望遠鏡の集光力が大きな威力を発揮する。特に、背景光雑音も少ない可視波長域では、中口径宇宙望遠鏡に比べて、100 倍以上の感度を達成することができるだろう。また、補償光学により点源に対して回折限界に近い像が得られるような場合には、宇宙望遠鏡よりも大きな性能を発揮するだろう。

宇宙望遠鏡は、広視野にわたって安定した高解像度を得られるので、スリットレス分光により、コンパクトな比較的明るい天体を一度に多数低分散分光を行う、などの場合には大きなゲインがある。

8.1.5 感度

以下の図には、撮像、分光それぞれの場合について、すばる望遠鏡、JELT などの 30m 級地上大型望遠鏡、それに近赤外線のみで補償光学を取り付けた場合、そして JTPF などの 3.5m 中口径宇宙望遠鏡の感度を比較したものを挙げておく。

観測装置を含めた効率はすべて等しく 20%、読み出しノイズもすべて等しく $5e^-$ としている。1 時間の積分で $S/N = 10$ となる場合を考えているが、積分は full well を考慮して複数回の読み出しを考えている。点源に対する感度は、それぞれの望遠鏡・波長帯での回折限界を考慮し、その 2 倍の直径を持つアパーチャを使用した。ただし、すばるの場合は、大気の影響を受けると言うことで、FWHM=0".5 (可視) および 0".4 (近赤外) とし、 $2 \times \text{FWHM}$ を直径としている。ピクセルスケールは、可視、近赤外でそれぞれ統一し、ほぼ中間

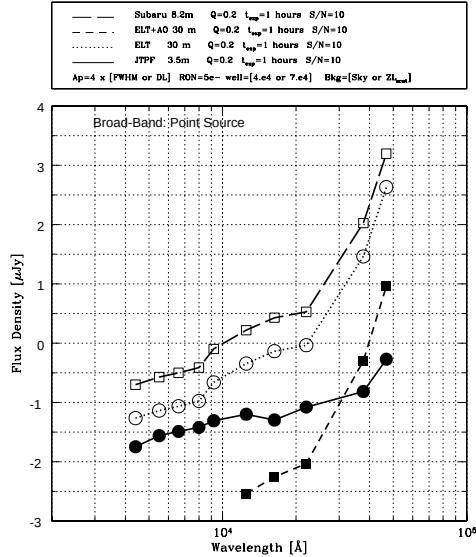


図 8.1: 広帯域フィルタを用いた撮像観測における点源についての感度の比較。すばるに相当する 8.2m 望遠鏡、30m 級地上大型望遠鏡、それに補償光学 (近赤外線) を取り付けた場合、そして JTPF を想定した 3.5m 宇宙望遠鏡を考えている。

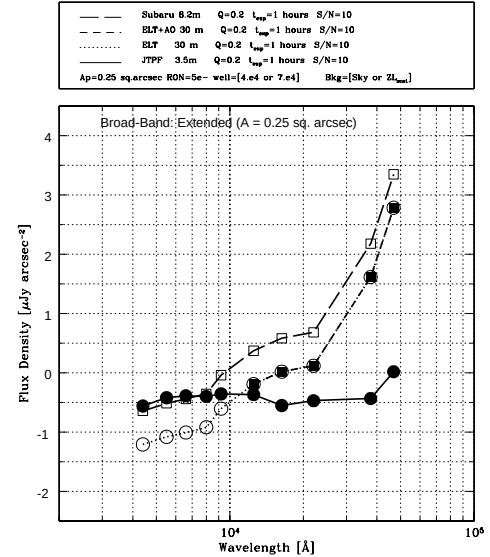


図 8.2: 図 8.1 に同じだが、広がった天体に対するもので、縦軸は 1 秒角あたりの表面輝度で表している。測光アパーチャは 0.25 平方秒角で、1 時間積分・ $S/N = 10$ となる値。

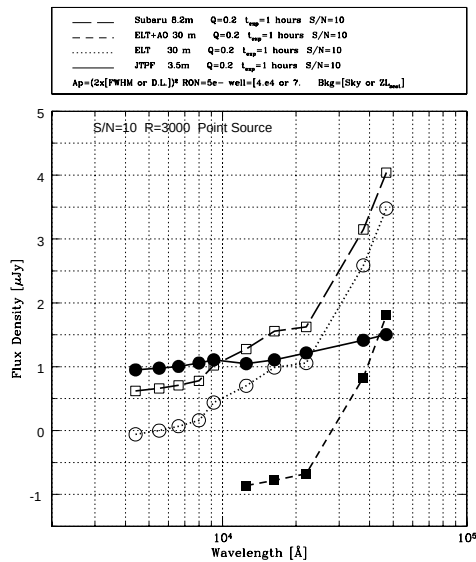


図 8.3: 図 8.1 に同じだが、 $R = 3000$ の分光観測において、点源に対するもの。アパーチャは回折限界の 2 倍程度のスリットを想定し、同じ空間方向のサイズを考えている。1 時間積分・ $S/N = 10$ となる値。

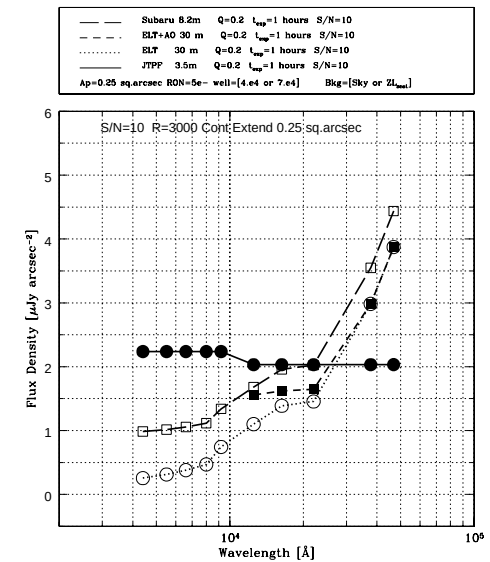


図 8.4: 図 8.1 に同じだが、 $R = 3000$ の分光観測において、広がった天体に対するもの。アパーチャは回折限界の 0.4 秒角のスリットを想定し、同じ空間方向のサイズを考えている。1 時間積分・ $S/N = 10$ となる値。縦軸は 1 秒角あたりの表面輝度に直した値。

	地上 30m 級望遠鏡+補償光学	3.5m 級宇宙望遠鏡
空間分解能 ($1 - 5\mu\text{m}$)	$0''.002 - 0''.1$	$0''.05 - 0''.2$
視野	0.1 – 5 平方分角	~ 200 平方分角
波長域	AO によるが主に近赤外	可視 ~ 中間赤外
波長分解能	高分散分光で威力	赤外低分散分光で威力
可視広視野撮像	×	○
可視高解像度撮像	(AO 次第)	○
近赤外広視野撮像	×	◎
近赤外高解像度撮像	◎	○
可視高分散分光	○	×
可視低分散分光	○	×
近赤外高分散分光	◎	×
近赤外低分散分光	△	○

表 8.1: 地上大望遠鏡と中口径宇宙望遠鏡の比較

的な波長で適切にサンプリングすることを考えた現実的なものに近い値を用いている。背景光ノイズは、地上はマウナケアの場合、宇宙は HST の観測で求められている黄道光 (散乱光) の値を用いている。

すでにおおよその位置が知られている天体の分光観測、とくに可視波長域の観測と、点源分光観測では地上望遠鏡がアドバンテージを持ち、天体の探査や広視野のパノラミックな研究、そして波長 $2 - 5\mu\text{m}$ 帯での撮像・低分散 ($R < 1000$) 分光観測では、宇宙望遠鏡がアドバンテージを持っている。明らかに、両者は相補的である。例えば、初期宇宙の天体の探査には、ある程度大きな視野を持った宇宙望遠鏡が必須だが、そのような天体の波長 $2\mu\text{m}$ 以下での精度の良い測光、分光観測は地上大型望遠鏡が必要である。

以下は、あくまで現在の知見に照らした場合の、両者の得意とする研究課題の比較である。無論、個々に挙げた以外の例が数多くあるだろう。

中口径宇宙望遠鏡に適した研究課題 高赤方偏移、初期宇宙 ($z = 5 - 20$) の広視野銀河探査、中間的赤方偏移の銀河の静止系可視での撮像、遠方超新星の探査、重力レンズマッピング、分光観測、近傍銀河の星種族の撮像的研究、中間赤外線波長帯での研究など

地上大望遠鏡に適した研究課題 初期天体候補の撮像的研究、近傍の星から遠方の銀河、キューサー、ガンマ線バーストまで、点源に近い天体の高分散分光、遠方銀河を解像して行う可視~近赤外短波長 ($2\mu\text{m}$ まで) での分光観測など

8.1.6 中間・遠赤外線領域における比較

前節までは、波長 $0.3 - 5\mu\text{m}$ の可視・近赤外線波長域について、地上望遠鏡とスペース望遠鏡との比較を行なって来た。この節では、より長波長 ($\lambda > 5\mu\text{m}$) の中間・遠赤外線領域において、地上望遠鏡とスペース望遠鏡との比較を行なう。この波長域では、スペース望遠鏡が圧倒的に有利となる。

地球大気の影響

天文学研究の多くの分野において、波長 $5 - 1000\mu\text{m}$ の中間・遠赤外線領域における天体観測は、いまや欠かすことのできない重要な研究手段である。しかしながら、技術的には、地上からの観測が困難 (波長によ

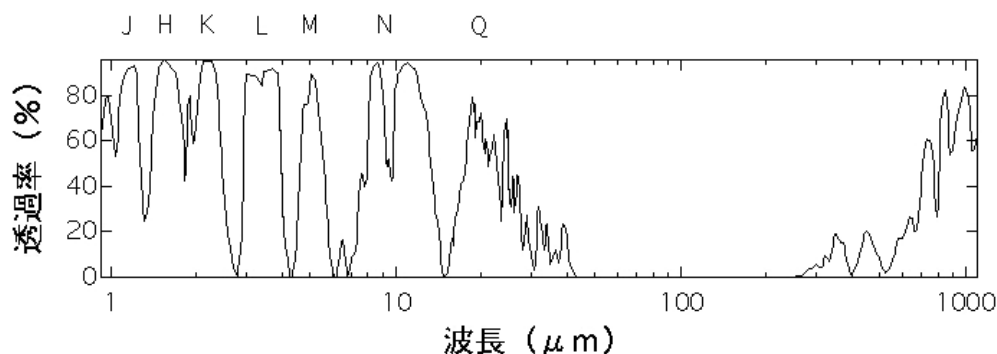


図 8.5: 地球大気透過率。マウナケア山頂を想定。

ては不可能)であるという大きな問題をもっている。

この波長域においても、特定の波長では、地上からでも赤外線観測は可能である。

図 8.5 に、地球大気透過率を示す。中間赤外線領域では、ところどころ透過率の良い大気の「窓」があり、これらの「窓」を通してならば、地上からでも観測を行うことができる。

しかしながら、「窓」のあいている波長は限られている。特に、低温天体の観測に欠かすことのできない波長 100 μm 前後の遠赤外線領域は、地上からでは全く観測することができない。

さらに、「窓」があいている波長域でも、透過率は 100 % ではなく、大気による吸収・放射がある。特に、放射の影響は深刻である。図 8.6 に示すように、その強度は、天体からの信号よりも数桁ほど強い。そのため、大気の放射があると、そのゆらぎにより、感度は著しく劣化する。

このように、中間・遠赤外線領域では、地上からの観測は、以下の欠点をもつ。

1. そもそも観測不可能な波長が多い
2. 観測が可能な波長でも高感度の観測は不可能である

したがって、地上からの中間・遠赤外線観測には制約が多く、波長域全域にわたる高感度の観測のためには、地球大気の影響のないスペースからの観測が必須となる。視野の広さ、波長分解能などのパラメータによらず、常にスペースからの観測が、この波長域では圧倒的に有利である。

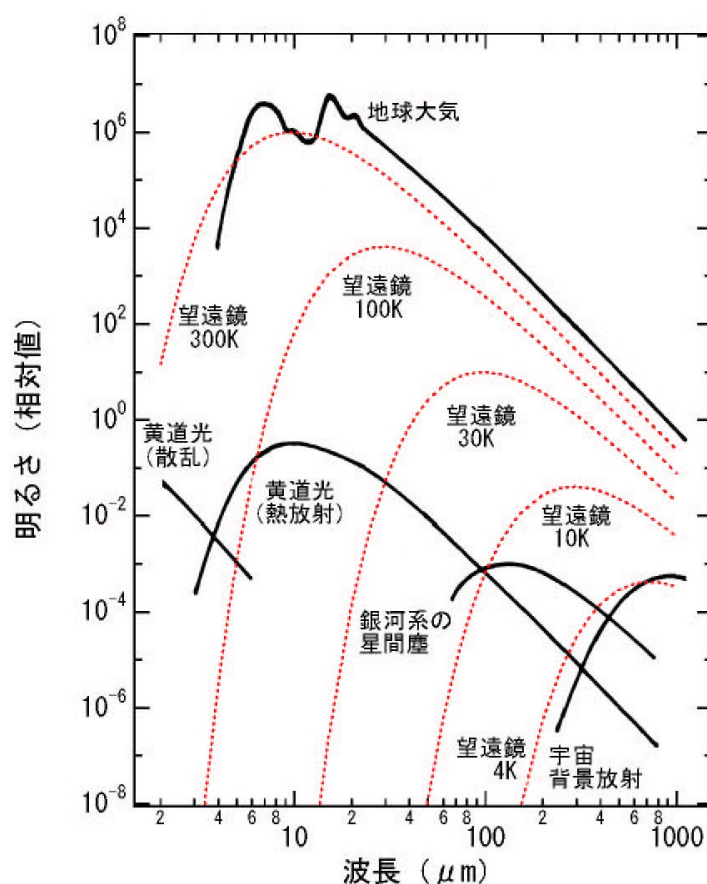


図 8.6: 地球大気の放射 (実線) および望遠鏡からの放射 (点線) を温度の関数として示す。あわせて天体からの拡散成分強度を示す (実線)。高感度観測のためには、前者の 2 種類の放射成分が、天体からの拡散成分を下回ることが望ましい。

冷却望遠鏡の必要性

図 8.6 は、もう一つ重要なことを示している。それは、望遠鏡自身が強大な「余分な赤外線」の源になりえるということである。もし望遠鏡が常温にあるとすると、この「余分な赤外線」は、検出したい天体からの信号よりも何桁も強い放射となってしまう。

「余分な赤外線」放射である「望遠鏡からの放射」を減らすためには、望遠鏡を冷却してしまうことが最も効果的である。ただし、中途半端な冷却では効果が低く、観測している波長が、黒体放射のウィーン領域に来るまで望遠鏡を冷却して、はじめて、ノイズ低減の効果が大きくなる。そのため、どのような温度まで冷却するかは、観測波長によって大きく異なる。たとえば波長数 μm の近赤外線領域では、液体窒素 (1 気圧での沸点が 77 K) による冷却でも効果が絶大であるが、 $100\mu\text{m}$ 近辺で高感度の観測を行おうとすれば、液体ヘリウム (1 気圧での沸点が 4.2 K) による冷却が必須となる。

望遠鏡を含む観測系全体を冷却することは、大気中では非常に困難である。何らかの窓がなければ、大気が凍りついてしまうし、窓を使えば、それがまた「余分な赤外線」を放射することになる。

一方、スペースに出れば、観測系全体を冷却することは、原理的には容易になる。真空断熱を行うことも容易であるし、窓も不要であるからである。この観点からも、中間・遠赤外線観測は、スペースから行うことが強く望まれるのである。

8.2 光赤外コミュニティのパワー

日本の光赤外天文学分野の歩みについては第 2 章にまとめられている。天文学全体の研究者人口と研究開発経費は過去 20 年間で明らかに増加してきた。天文学・宇宙物理学界の中での光赤外天文学コミュニティのパワーが大きく成長してきたことは、例えば図 8.7 に示した光赤外天文学研究者に交付された文部科学省科学研究費補助金の年間総額の推移を見ても明らかであろう。

光赤外天文学研究者人口の増加に関する具体的な数値資料などが整備できていないので、詳細な分析は現時点ではできないが、A.4 章に掲載した「採択された研究課題の一覧」を見ると、観測的研究に加えて技術開発や装置・望遠鏡製作などの課題も多く、この四半世紀で日本の光赤外線天文学コミュニティがユーザーの世界から、世界最先端の装置を作り、それを駆使して観測的天文学を行う集団に成長してきたことが伺われよう。

この流れをすばる望遠鏡の建設とその様々な観測装置の開発製作のプロジェクトやスペース赤外ミッションが大きく前進させたことは疑いの余地がない。このような開発実績を積んだ若手が次世代の観測装置や望遠鏡を構想し、製作する中核となることは間違いなく、これらの若手が主要大学の天文学教室や物理学教室に新しい芽を膨らませるグループを形成しつつあることは、大変心強い。

今後の国際的同事業を推進する上では、技術的要素だけでなく広い国際的な視野を備え、国際的に渡り合える活力を有する複数の若手の出現が鍵であるが、実際そのような実力と意欲を備えた若手が多数輩出している。

さらに、将来計画で言えば、2004 年に法人化を迎えた国立大学でも、中規模の計画の提案が行われている。

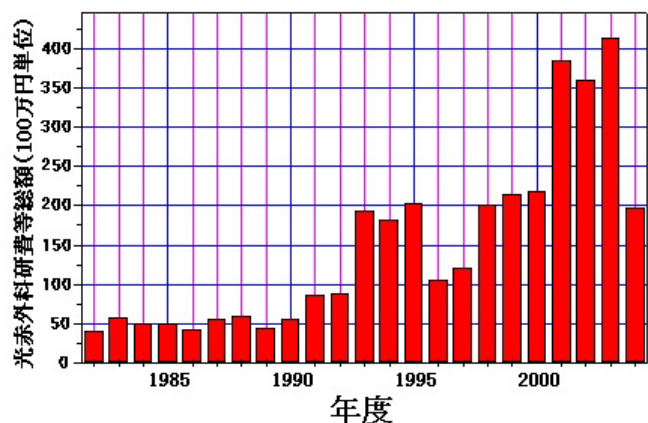


図 8.7: 光赤外天文学関係者に交付された科学研究費補助金等の年間総額の推移 (1981-2004 年度)。詳細は A.4 章にまとめられている。

例えば東京大学では京都大学の協力を得て、チリ共和国アタカマ高地に 6.5m 望遠鏡の赤外線に特化した望遠鏡を建設しようと提案している。設置予定サイトであるチリ・アタカマのサイトは高度 5600m を越え、大気が観測の妨げとなりやすい赤外線観測においては現段階で地上最高の場所と言える。また高い空間分解能と赤外線観測性能を両立させるため、能動光学副鏡を装備するなどの工夫を行う。これにより未開拓であった波長帯や対象を開拓していく萌芽の研究や、大規模なサーベイ観測を行って人類の知的財産の一角を担う成果を出すことをめざしている。具体的には、例えば超新星や活動銀河核・クエーサーの近赤外線分光観測を大規模に行い、宇宙背景放射や超新星観測で存在が指摘されているダークエネルギーの問題に迫る。近赤外線領域では、深く広い撮像サーベイ観測を行い、様々な天体の基本的なデータベースを構築でき、中でも遠方の銀河の進化しつつある姿を静止系での可視光領域で統計的に明らかにしていくことができる。中間赤外線領域では現状のスペース赤外線望遠鏡では実現できない高い空間分解能や集光力を活かし、原始惑星系残像円盤の姿を明らかにしたり星周構造を分光学的に調べる。東京大学、京都大学だけではなく、日本全国の研究者と共同研究を行うことにより、多くの様々な新しいアイデアを生かす形にしようという計画である。

一方、天文学の進展を図るに必要な車輪の両輪である技術開発研究の展開や機動性を活かすような観測研究課題にあって、特に技術開発研究については、国内産業との密接な係わりという意味でも国内に比較的大型の実験望遠鏡が必要である。この目的のために、技術的側面の研究開発に重点をおいた 3m 級の望遠鏡を国内に設置する計画も提案されている。建設にあたっては、京都大学を中心に、国立天文台岡山天体物理観測所、名古屋大学の関連研究グループが共同で推進する。この望遠鏡では、6.5m 望遠鏡やすばる望遠鏡、そしてさらに将来の次世代望遠鏡や衛星望遠鏡を想定し、またこれらに装着する観測装置の開発にむけての新しい技術開発・研究を行う。とりわけ現段階で目玉となっている研究課題は、研削による鏡面製作、分割鏡の新方式制御で、共にユニークで世界の最先端を目指す。むろん、国内にある大学望遠鏡という意味で、機動性を活かした科学的研究課題の展開にも活躍が期待される。科学的研究課題としては、突発天体の即時観測、高速測光や高エネルギー分野との同時観測によるコンパクト天体の物理の解明、超高分散分光による星間物質研究の新局面の開拓等をめざしている。

長期展望との関係で言えば、3m 級望遠鏡は 30m 級望遠鏡の建設に直接関係した開発や試験研究を進める上でたいへん重要であり、また 6.5m 望遠鏡は望遠鏡や観測装置の開発・製作等を通じて 30m 級望遠鏡との共通要素も多いほか、中間赤外線領域などにおける装置開発・技術開発を中心に SPICA へむけた共通の開発要素がある。

その他 2.2.7 節にも一部あげたように、大学からも中小規模の計画が提案され、あるいは実施されつつあり、これら大学の計画が様々な規模で推進されることにより、新たに入ってくる若手研究者の卵を含め、研究の裾野が広がり、若手が育成され、大型計画への人材供給などにおいてたいへん重要な役割を果たすことが期待される。

8.3 国際協力の在り方

8.3.1 光赤外分野のマスタープランについて

地上計画とスペース計画は予算の窓口が異なるとはいっても、次世代計画総額が大きくなることを考えると地上とスペースの両方を見渡した全体構想を提示できるのが望ましい。このことは OECD のグローバルサイエンスフォーラム G S F でも勧告されたことである。光赤外線コミュニティの地上計画とスペース計画に関するロードマップ、さらには電波・X線コミュニティや広義の宇宙物理学界全体としてのロードマップを形成し、オーソライズしてゆく筋道を再構築することが急務であり、その具体案提示することは学術サイドに課せられた大きく重要課題である。

2004 年 8 月の時点で具体的な検討が進んでいるプロジェクトについて、その希望的予算規模・年次計画を持ち寄ってみた。予算見積額の精度は検討レベルによりまちまちであることと、建設開始年度・建設所用期間も希望的スケジュールであるので、本報告書にはこの表は掲載しないが、経験上実際には希望的スケジュールよりは遅く始まり、長くかかり、コストもより高くなるものとなると見るのが安全であろう。

地上計画はライバル望遠鏡も複数存在する中で、すばる望遠鏡の特徴を活かした効率的な運用を目指し、運用経費の一部を次世代のために投資できるように工夫することが肝要である。この観点は既に ALMA 計画の推進のため実施されているが、ALMA 計画を推進中で確実に次世代の光赤外地上計画やスペースミッションへの道を拓いてゆくことが極めて重要であろう。次世代の計画は日本単独ミッションの可能性も模索しながら、その一方で国際協力での推進を積極的に考えるべきであろう。パートナーの同定、役割分担、など集中的な検討をここ数年で進めることが肝要である。

本書でとりあげたスペース三計画はいずれも、重要な計画であるが、スペースミッションの推進を予算的に実現可能なものにするためには、その規模・年次計画についてさらに詳細な検討を進め順次実行する形にするか国際協力を推進することが必要であろう。また、推進母体となる宇宙科学研究開発機構と国立天文台や諸大学との連携協力のあり方をより推進に適したものに見直してゆく作業も重要である。

8.3.2 日本の(可視赤外)観測天文学の全体年次計画について

「すばる望遠鏡と ASTRO-F 衛星以降の日本の可視光赤外線大プロジェクトはどうあるべきか？」そもそもこの問いが、この将来計画検討の出発点であったと言って良いだろう。両者は、過去約 20 年の光赤外コミュニティの努力の結晶であり、日本の可視光赤外線観測設備が文字通り世界に比肩することを達成した記念すべきマイルストーンである。それだけに、求められるサイエンスリターンも多大であり、コミュニティとしては現在から今後数年にかけて、全力を挙げてその活用と保守に時間を割くことを求められている。だが、巨大サイエンスの継続を望むならば、その時間サイクルの長さから考えて、既に 10 – 20 年後のプロジェクトを策定しなければならない時期にあることは間違い無く、地上・スペースとも、世界的には既にこのような検討が開始されて数年が経過している。欧米に比べて依然マンパワーや予算で劣る日本のコミュニティで将来計画の議論が遅れたことは、このような状況にあっては仕方が無いことであろう。

しかしながら、これらの設備を開発・活用していく上で得られた経験を、次期プロジェクトに活かしたいという要望やより高レベルのサイエンスへの要求が、日本の経済状況や組織の改変の中で芽生えた危機感にも後押しされ、今回のようなまとまった将来計画案の策定に結びついた。

コミュニティの中での将来計画の議論においては、地上・スペースのどちらを選択するかという論争もあった(8.1 節参照)が、現段階では、当面どちらも追求したいという結論にのっとり、地上で 1 つ (JELT)、スペースで 3 つ (SPICA/JASMINE/JTPF) の大プロジェクトが提案されている。各プロジェクトの総予算は、小さいものでも約 200 億、大きなものは約 1000 億円の巨大プロジェクトである。

本計画書はこれらの計画に優劣をつけるものではない。また、それぞれの計画とも、いわば Phase A あるいはそれ以前の段階にあり、この時点で決断すべきものでもない。しかしながら、タイムラインが重なっているものについては、複数の計画が走ることは、予算的にも難しいことは指摘されるべきである。

これらの計画のおおもとは、我々がサイエンスを進めてゆく上で必要不可欠な望遠鏡としての要求から出発している。コミュニティが今後 10 – 20 年のタイムスケールで、どのようなサイエンスに取り組みたいのかを明確に打ち出せれば、自然と解は見えてくるはずであった。ひとつの解にまともになくとも、いくつかの解を包含する汎用望遠鏡が提案できればよい。しかしながら、この提案書に記述された様々なサイエンスから自明のように、汎用望遠鏡だけでは全ての重要なサイエンスを進められないことも事実である。また、地上・スペース共それぞれの長短を考慮した設計となるため、そもそも真の汎用望遠鏡の実現は有り得ないと思えるべきであろう。

これらの問題をどのように解決すべきであろうか？ 一つの鍵は国際協力である。予算とマンパワーの問題に対しては、適切な海外パートナーを探し、障壁を下げるのがベストであろう。特に、全てのサイエンス要求を満たす装置が存在しない状況では、これが最適と思われる。提案されている全てのプロジェクトに対し、たとえば国際協力による予算削減を目指してもらえれば、全プロジェクトの実現性は大きくなる。

プロジェクトを並立させるならば、個々のプロジェクトレベルにおいても決められたパイを割り分けるだけでなく、予算を増やす努力も必要であろう。地上・スペースとも、最近、組織・体制が大きく変化したため、

それに対応するのがたいへんな時期であるが、本来はそれを機に新たな展開を目指せる可能性もある。光赤外分野は、他の波長ほど他の科学分野との交流が進んでいないように見えるが、今後はそのための積極的働きかけも必要になるだろう。予算枠を開拓するという意味では、企業や一般の人々の理解を得ることによって、競争的経費以外でプロジェクトを進めるという解を、真剣に模索すべき時期に来ているのかもしれない。

別の解としては、あれもこれも日本主体に進めるというスタンスを諦め、日本が主導的に進める事が意味の有るプロジェクトに絞ってしまう手もある。その場合、そのプロジェクト実現の要(おそらく技術)を日本が持っているかいないかが判断基準になるのではないだろうか。提案されているプロジェクトは全て複雑な技術の組み合わせであることは間違いないが、個々のプロジェクトにおいて真の技術基盤を明確にする必要があるだろう。ただし、この解を選択する場合でも、選ばれたプロジェクトでは実現できないサイエンスを切るのではなく、ある程度の予算を持って海外計画に(主導的ではないが)参加する状況を作ることが必要であろう。

巨大プロジェクトは本当に我々の解なのだろうか? 巨大プロジェクトへの要望が高いことはこれまでのコミュニティにおける議論からも事実であると言えるが、今後、小規模のプロジェクトと並行して、どのようにそれらを推進すべきか、この点も実はコミュニティレベルでは議論し尽くされていない。特に、現在は、すばる望遠鏡や ASTRO-F という巨大プロジェクトでまだ忙しいというタイミングで、かつ、それらを支える大学基盤施設の強化という点が注目されていることもあり、次期計画検討のためのマンパワーが分散されている。次期巨大プロジェクトの選択は、今後の我々の天文学の進め方を決めるものでもあり、本提案書をきっかけに、よりいっそうの議論が進むことを期待する。その中で、有望な次期プロジェクトが浮上してくることが望ましいと考える。

8.3.3 地上望遠鏡における国際協力の動き

すばる望遠鏡などを軸に 1990 年代から表 8.2 のように様々な国際協力が具体化し、成功してきている。

21 世紀にはいり、8m 級望遠鏡が複数稼働を開始し、地上大型光赤外線望遠鏡とハッブル宇宙望遠鏡との、観測研究上の大変良い相補関係が実証されてきたなかで、次世代の超大型望遠鏡をどう実現するか議論がさまざまなレベルで始まっている。

ミリ波サブミリ波望遠鏡 ALMA の建設が日米欧三極の国際プロジェクトとして本格化したことにも、21 世紀の超大型計画の実現の一つの方向性が示されている。国際共同事業は、いろいろな実際の困難はあるものの予算規模の拡大とともに避けて通れない選択枝となりつつある。

地上 8m 級望遠鏡間でも、これまでの良きライバル関係をさらに緊密な良きパートナー関係にレベルアップする機運が高まり、さまざまなレベルでの協力関係が具体的に試行されつつある。ハワイ島マウナケア山頂で肩を並べる、すばる望遠鏡、ジェミニ望遠鏡、ケック望遠鏡の三者の間でも、望遠鏡時間のバスター、次世代観測装置の共同開発や役割分担などの検討が始まっている。

日米間、日欧間、また東アジア諸国との情報交換や長期ロードマップに関する話し合いも非公式レベルで活発化している。

8.3.4 宇宙科学における国際協力の重要性

ここでは、飛翔体を用いて行う宇宙理学、宇宙工学研究をまとめて、「宇宙科学」と呼ぶこととする。

宇宙科学にとって、国際協力は大変に重要である。宇宙科学は、巨大科学であり、もはや単独の国において、すべての分野をカバーすることはできない。したがって、宇宙科学の効率的な遂行のためには、国際協力は欠かせることができない。国際協力により、仕事を分担することにより、一国では手に余るような大規模な計画も実現可能となる。また、お互いの技術や経験を持ち寄ることにより、より充実した観測が行えるようになる。さらに、いくつかの人工衛星での観測や地上での観測を同時に行うことにより、単独の観測だけでは分からない、宇宙のダイナミックな姿も明らかになってきている。

プロジェクト名	国内グループ	国際協力の相手国
近赤外線分光撮像装置 (IRCS)	国立天文台	ハワイ大学 (アメリカ)
夜光除去分光装置 (OHS)	京都大学	ハワイ大学 (アメリカ)
多天体分光装置	国立天文台・京都大学	オーストラリア、イギリス
SDSS 計画	東京大学、国立天文台	アメリカほか
超新星宇宙論計画	東京大学	アメリカ
赤外線検出器開発	国立天文台	アメリカ他
1.5m 赤外線望遠鏡	名古屋大学	南アフリカ
マグナム望遠鏡	東京大学	ハワイ大学 (アメリカ)
ほか		

表 8.2: 具体的な国際協力例

国際協力の実績 上記の重要性に鑑み、日本の宇宙科学も、積極的に国際協力に取り組んできている。日本が中心になって行ってきた宇宙科学の人工衛星も例外ではなく、そのほとんどが国際協力ミッションとなっている。特に、最近のミッションは、表 8.3 に示すように、全て国際協力ミッションとなっている。

また、表 8.4 に示すように、今後 3 年間に打ち上げられる宇宙科学ミッションも、すべて国際協力ミッションである。

Mission 名	打上年	ミッション目的	国際協力の相手国
ようこう	1991	太陽観測	アメリカ、イギリス
GEOTAIL	1992	地球磁気圏観測	アメリカ
あすか	1993	X 線天文観測	アメリカ
SFU/IRTS	1995	赤外線天文観測	アメリカ
はるか	1997	工学実験、 電波天文観測	アメリカ、カナダ、 ヨーロッパ、オーストラリア
のぞみ	1998	火星探査	アメリカ、フランス、カナダ、 スウェーデン、ドイツ、ESA
はやぶさ	2003	工学実験、 小惑星サンプルリターン	アメリカ、オーストラリア

表 8.3: 1990 年以降に宇宙科学研究所が中心になって打ち上げた宇宙科学ミッションの国際協力

Mission 名	打上年度	ミッション目的	国際協力の相手国
ASTRO-EII	2005	X 線天文観測	アメリカ
ASTRO-F	2005(目標)	赤外線天文観測	イギリス、オランダ、韓国、ESA
SOLAR-B	2006	太陽観測	アメリカ、イギリス、ESA

表 8.4: 今後 3 年以内に宇宙航空研究開発機構が中心になって打ち上げる宇宙科学ミッションの国際協力

IACG を通しての活動 宇宙科学の活動における各国間の国際協力を促進するために、アメリカ合衆国、西ヨーロッパ(当時)、ソ連および東欧諸国(当時)、および日本は、1981年に、IACG (Inter-Agency Consultative Group for Space Science) を結成した。これは、表 8.5 に示すように、国そのものではなく、各国、地域を代表する以下の4つの「宇宙機関」が参加したものである。日本の代表は、宇宙開発事業団(当時)ではなく、宇宙科学研究所(当時)であった。

IACG の活動は、特定の分野の問題を議論する Task Groups, Working Groups を通してや、特定の科学的目的のためにキャンペーンを通じて行われている。最近の Task Groups や Working Groups で、天文に係るものとしては、以下が挙げられる。

- Task Group on “Large X-ray Observatories”
- Task Group on “Large optical-IR interferometers”
- Working Group on “Search for Textra-Solar Terrestrial Planets”
- Working Group on “International Living With a Star programme”

一方、過去に行なわれたキャンペーンでは地球物理関係のものが多く。

将来の国際協力にむけて

真の国際協力のために 国際協力には、以下の2つの重要な側面がある。

1. 相補性
2. 競争

そもそも国際協力の目的は、科学探求のためのミッション／プロジェクトを成功させ、最大の科学的成果を引き出すことにある。そのために、日本の必ずしも得意としない分野において、その分野のトップレベルのチームと仲間として手を組む。これが「相補性」である。

一方、上記のような相補的な協力が成立するためには、日本側にも、世界でトップの研究レベルと、それを支える独自の技術が必要である。これらなくしては、対等の国際協力は成立し得ない。競いあって、その上でお互いに足りない点を補足しあうことで、はじめて双方にメリットが生じる。「競争」なくして、真の共同研究はあり得ないのである。

国際協力を有効に活用するためには、この「相補性」と「競争」という、時には矛盾もする2つの要素を、両立させていく必要がある。

戦略上の問題点 世界にまたがって、宇宙科学プロジェクトの調整を行うための機関としては、IACG が唯一のものである。しかしながら、最近では、IACG の活動そのものがほとんど休止状態にある。そのため、国際協力は、IACG に代わって、2国間の協力関係によって進められることが多い。そのため、世界的視野にたった協力関係をたてるのが難しい。

国、地域	機関名
アメリカ合衆国	NASA (The National Aeronautics and Space Administration)
西ヨーロッパ(当時)	ESA (European Space Agency)
ソ連および東欧諸国(当時)	IKI (Space Research Institute)
日本	ISAS (The Institute of Space and Astronautical Science)(当時)

表 8.5: IACG 加盟機関

長期的展望を持ち、世界的視野から、宇宙科学における国際協力、国際的役割分担の議論ができる枠組みの設立が強く望まれる。

さらに、天体観測の分野では、宇宙科学ミッションのみならず、地上の観測機器も巨額な費用を必要とするようになってきたため、これらの両者を含めた包括的な議論が必要である。

制度上の問題点 国際協力の遂行にあたっては、制度上で解決されるべきことも多い。特に、法律の体系の異なる国と国との間で、協定を結ぶことになるので、どこかで法律的な齟齬が生じる。このために、国際協力が頓挫することも少なくない。

この法律的な齟齬を解決するための、国際的な枠組みは未だない。多くは当事者同士の交渉により、ケース・バイ・ケースで解決の道を探っているのが現状である。国際法的な観点にたち齟齬を解決する努力をする枠組みの設立が望まれる。

上記のような交渉にあたっての日本側の最大の問題は、実質的な交渉を行なう機関と、責任・権限をもつ機関とが異なることである。国と国との外交交渉を行う権限は、本来外務省にある。しかし、外務省が、このような研究上の交渉を行うことは現実には難しい。したがって、外交交渉にあたっては、複数の機関にまたがった意思疎通が必要となる。これは、迅速な意思決定を困難とし、交渉に不必要に長い時間を必要としてしまう。

さらに、上記のような交渉にあたっては、法律的な知識が要求される。したがって、特に 対 NASA の場合は、法律の専門家である弁護士が相手方の交渉の席に着く。しかしながら、日本では、ほとんどの場合、法律の素人である研究者が交渉の席についてきた。これでは、公平な議論が成立するとは思えない。日本の国として、国際協力をサポートする枠組みを設立する必要がある。

8.4 教育・一般社会へのアピールとインパクト

本稿では、大型プロジェクト一般論として、社会への影響と使命、および天体望遠鏡であることの特異な側面について述べてみたい。

8.4.1 大型プロジェクトの説明責任

科学研究に限らず、宇宙開発や原子力発電などの応用技術であっても、それが大型となるに従って、投入される予算額は非常に膨大なものとなり、それだけプロジェクトの意味づけや社会的な責任が大きくなっていくのは自然である。それは予算を支出する側が政府を通じて一般市民、すなわち納税者であり、クライアントへの十分な説明責任が果たされるべきであるという、当然の構図になっているからである。

しかしながら、それではこの構図に従った説明責任が、十二分に果たされているか、という点に関しては、しばしば疑問を感じる場合がままある。その理由はきわめて現代的な学問研究現場の変容に起因している。

古い科学史を紐解けばわかるように、もともと学問は貴族や金持ちの道楽の側面から始まっている。ガリレオなどの著名な自然科学者も、お金持ちの集団に雇われていたわけで、その成果はある意味で直接、目に見える形で雇い主に還元すれば話は済んでいた。また、自ら星占いなどを生活の糧にしつつ研究していた天文学者もいた。彼らは自ら稼いだお金を自分の研究に投資しているわけで、いわば天文学の研究そのものが「趣味」なのであり、知の蓄積に寄与したにせよ、社会に対してなんら説明責任もなかったと極言することができる。

ところが現代社会ではまったく違った状況が現出している。社会は変容し、ある意味で豊かになったために、知的好奇心そのものを社会全体が共有することになった。税金によって大学が運営されはじめ、学者が公務員化、あるいはサラリーマン化していった。しかし、組織化がすすみ、効率的になればなるほど、本来の雇い主が社会であるという構図が見えにくくなりつつある。説明は予算配分を握る官庁あるいは議員にすればよい、という近視眼的な努力がしなくなると、本来のクライアントである社会あるいは一般市民にまで目が届かなくなってしまうのである。こうなるとプロジェクトの発展が、社会の要求からはずれ、産業・官・学の閉じた世界での意志決定に従うようになって、社会の倫理や常識から乖離することが危ぶまれる。

したがって、大型プロジェクトでは常に社会への説明責任を果たすべく、その体制を整えるべく努力すべきである。本計画は、まぎれもなく大型プロジェクトであり、その計画の当初から、広報・重視していることを、まずは注記したい。

8.4.2 知の開示と蓄積による社会還元

もうひとつ、この種の大型プロジェクトは明らかに新しい知の最前線を開拓する。学者は常に、この知の最前線で活躍する。そして新しい知を発見し、生み出しては、将来世代の人類の財産として蓄積していくわけである。同時に新しい知見について情報を公開することが必須である。どんなに素晴らしい発見でも、それが他に知らされなければ蓄積とならず、個人とともに消えていってしまう。知を受け継いでもらうため、われわれ科学者は学術論文を書く。学術論文として発表すると、その知は少なくとも同業の学者の目に留まり、未来へと伝わる。

ところが、最近は学者、特に科学者の使命が学術論文を書くことになってしまった観がある。もちろん、研究成果をしっかりと査読システムがある学術雑誌に書くのは大事である。だが情報公開という観点から、原点に戻って考えてみると、学術論文や学会発表ばかりが最良の方法とは限らないことがわかる。学術論文に触れるのは、世界的に数えるほどの少数の同業者だけだからである。

見いだされた知を広く、かつ正しく知ってもらうためには、一般向けの著書やメディアの活用が考えられる。また、学校教師や科学館学芸員が、科学研究の熱意を伝える能力を持っていることも期待したい。彗星研究の場合には、その学術論文が、世界中のせいぜい百人程度の同業者にしか読んでももらえないのに対して、一般書は数千人の読者を、あるいは場合によっては万人を越える人への知の伝達となる。教師や学芸員の継続的な活動も、多くの人への働きかけという目標に対して効果的になる。新しい知の共有こそが科学の目指すところであろう。科学は万人のためにあるのであって、学者同士の同好会的な閉鎖社会だけで閉じていいものではない。

もちろんホームページの発信や一般書の出版は良心的な査読システムが無いことがしばしば問題とはなることは否めない。だからといって、こういったメディアへのアクセス、それらを通じての知の蓄積と情報公開を、学者が躊躇していい理由には成らない。

本プロジェクトでは、完成してからの成果だけではなく、技術的に困難な仕事を乗り越えるため、新しい技術や発明がプロジェクトの推進と共に生み出されることが考えられる。これらのあたらしい知見は、特許や実用新案といった適切な形で公開されることが期待される。宇宙開発と同様に、新しい産業へのインパクトが生み出されることは確かである。

8.4.3 望遠鏡の特殊性と教育効果

主に知的好奇心に立脚する科学プロジェクトである望遠鏡計画は、他のプロジェクトにない特殊性を持つ。それは成果が人間の精神世界に大きなインパクトを与えるという点であろう。宇宙という、われわれが考え得る、あるいは見聞できる最も雄大かつ深遠な世界を垣間見たい、という社会の好奇心の集約としての大型望遠鏡計画は、その目的からして、教育的である。国立天文台では、1998年にハワイ島マウナケア山に当時としては世界最大級の天体望遠鏡すばるを完成させた。直後から、上述したような説明責任を果たす一環としての広報活動を重視してきた。もちろん、宇宙科学におけるNASAの例を見ればわかるように、いささか行き過ぎの観もあるものの、予算とマンパワーとをふんだんにつぎ込むことは無いものの、視覚に訴えられるという特殊性を十分に生かして、独自の視点と方法で、広報活動に大きく踏み出した。学者ギルドだけの世界では考えられないような大胆な企画を実施していった。まず、映像技術の専門家集団であるNHKに協力を依頼し、高感度カラーハイビジョンカメラを設計・開発し、これをすばる望遠鏡に取り付けたのである。これによって、世界最高のクオリティの天体の動画像を、日本のお茶の間に流し込むことに成功した。このような英断はアメリカでもヨーロッパの同等クラスの最新鋭望遠鏡では経験がない。誰もが初めてみるような映像に、われわれ天文学者でさえ固唾をのんだ。その感動と興奮とは、ファーストライトイベントを通じて、あるいは放送を通

じて日本国中に伝わり、すばる望遠鏡そのものの認知度を上げたばかりではなく、子供たちを含めて多くの人の天文学への興味を刺激して余りあった。その後も、イベント毎にカメラが活躍し、2003年の火星大接近時には生中継を行ったり、専門的観測装置によって得られた科学的データを、高校生に提供するなど、世界的に希有な事業を連発している。科学技術立国を目指す国是を持つ日本として、このように大型プロジェクトが大きな教育効果をもたらすべきだが、視覚に訴えられるという特殊性をうまく生かしたものであることは間違いない。その結果として、すばる望遠鏡はサイエンスのビッグプロジェクトとしては通常であれば到底考えられないような賞（東京ファッション協会：ファッションクリエイション大賞、文芸春秋社：菊池寛賞）の数々に輝いている。

一方、すばる望遠鏡プロジェクトの本拠地であるハワイ観測所には、広報担当として採用された人員が日本人一名、外国人一名がいる。彼らの活躍もさることながら、所長の英断、観測所全体が広報活動の重要性を認識して協力する体制を整えたこと、そして国立天文台本部に、天文情報公開センターという研究所としては異例の広報教育組織がバックアップしたこと、それらの重要性を天文学のコミュニティ全体が認識して許容したという状況がなければ、このような状況は実現できなかったであろう。すばる望遠鏡の独自の広報活動のスタートは、これこそ日本の天文学者全体の発想の転換を示すものとして日本の科学史に書きとどめられるはずである。

さて、次期大型プロジェクトで完成を見るであろう望遠鏡は、すばる望遠鏡の比ではない。そして同様に宇宙の奥底を見るべき天体望遠鏡である。これまで培ってきた広報教育手法を駆使して、更に大きな感動と興奮をクライアントである社会へ還元できるのは間違いない。

付 録 A 付 録

A.1 すばる望遠鏡成果一覧

A.1.1 すばる望遠鏡観測成果論文引用度数から見た成果

すばる望遠鏡による研究成果論文は2004年6月30日時点で、英文査読誌掲載論文総数182編、国際研究会集録などに公表した論文総数335編、合計517編に達する。

表 A.1 は2000年1月以降にすばる望遠鏡を用いた観測成果査読誌論文（2004年6月末までで183編）について、2005年2月28日の時点でその引用度数調査を行った結果の上位20位までの査読論文のリストである。一般に引用度数は出版後数年でピークを迎える傾向があるため、注目度の高い論文でも出版して未だ日の浅いものはこのベスト20に入ってくる。だが2003年度出版にも拘わらずこのリストに入っている論文を始め、下位にも伸び率の高い論文があり、遅れて共同利用に入っている他の装置を用いた観測成果論文などが今後このリストに浮上してくることが期待される。今後、本リストを随時更新し分析する必要がある。このリストから次の三つの傾向が伺われる。

1. 主焦点カメラ (SuprimeCam)、赤外線カメラ (CISCO)、微光天体分光撮像装置 (FOCAS) を駆使した論文の成果に注目が集まっている。
2. すばる望遠鏡の高結像性能と主焦点カメラの広視野深撮像機能を活かした、遠方宇宙の銀河の一連の系統的観測成果 (*) が最も高く評価されている (総引用数 423 件)。
3. 微光天体分光装置の偏光分光観測機能を駆使して、Ic 型超新星とガンマ線バースターの関連性を証明した一連の論文 (**) も脚光を浴びている。

また図 A.1 は、すばる望遠鏡をはじめとする主要8m級望遠鏡が、その運用開始後の最初の5年間で出版した科学論文の学界への貢献度を解析した結果である。具体的には研究成果の査読論文について、その引用度数を同年の *Astronomical Journal* 誌掲載論文の平均被引用度数で割ることにより、年代や経過年数による引用論文数の差を校正した指標を論文インパクト指数と定義し、その年の各望遠鏡による研究論文の論文インパクト指数の総和を取り、使用した望遠鏡数で割って、望遠鏡総インパクト指数としたものである。この指標によれば、すばる望遠鏡の最初の4年間の科学的業績はケック望遠鏡の初期成果に比肩しており、VLT やジェミニ望遠鏡を凌駕していると見ることができる。

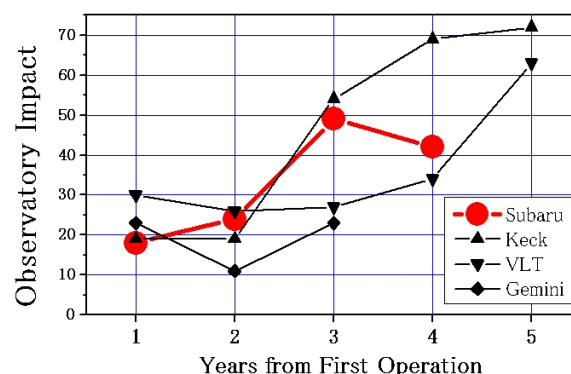


図 A.1: 主要 8m 望遠鏡の初期 5 年間の総インパクト指数分布 (D. Crubtree 2005)

すばる関連論文引用件数トップ20				タイトル
ランク	著者	装置	掲載誌	
1	Hu, E.	CISCO	ApJ, 568, L75 (2002)	“A Redshift $z = 6.56$ Galaxy behind the Cluster Abell 370”
2	Mazzali, P.	FOCAS	ApJ, 572, L61 (2002)	“The Type Ic Hypervnova SN 2002ap”
3	Kodaira, K.	Scam / IRCS / FOCAS	PASJ, 55, L17 (2003)	*“The Discovery of Two Lyman α Emitters beyond Redshift 6 in the Subaru Deep Field”
3	Miyazaki, S.	Scam	PASJ, 54, 833 (2002)	“Subaru Prime Focus Camera – Suprime-Cam”
5	Ouchi, M.	Scam	ApJ, 582, 60 (2003)	*“Subaru Deep Survey. II. Luminosity Functions and Clustering Properties of Ly α Emitters at $z = 4.86$ in the Subaru Deep Field”
6	Maihara, T.	CISCO	PASJ, 53, 25 (2001)	“Subaru Deep Survey I. Near-Infrared Observations”
7	Barger, A.	CISCO	AJ, 126, 632 (2003)	“Optical and Infrared Properties of the 2 Ms Chandra Deep Field North X-Ray Sources”
8	Kobayashi, N.	IRCS	Proc. SPIE, 4008, 1056 (2000)	“IRCS: infrared camera and spectrograph for the Subaru Telescope”
9	Kodama, T.	Scam	ApJ, 56, L9 (2001)	*“The Transformation of Galaxies within the Large-Scale Structure around a $z = 0.41$ Cluster”
10	Kashikawa, N.	FOCAS	PASJ, 54, 819 (2002)	“FOCAS: The Faint Object Camera and Spectrograph for the Subaru Telescope”
12	Martín, E. L.	IRCS	ApJ, 561, L195 (2001)	“Four Brown Dwarfs in the Taurus Star-Forming Region”
13	Ajiki, M.	Scam / FOCAS	ApJ, 576, L25 (2002)	*“A New High-Redshift Ly α Emitter: Possible Superwind Galaxy at $z = 5.69$ ”
13	Totani, T.	CISCO	ApJ, 559, 592 (2001)	“Near-Infrared Faint Galaxies in the Subaru Deep Field: Comparing the Theory with Observations for Galaxy Counts, Colors, and Size Distributions to $K \sim 24.5$ ”
13	Kawabata, K. S.	FOCAS	ApJ, 593, L19 (2003)	**“On the Spectrum and Spectropolarimetry of Type Ic Hypervnova SN 2003dh/GRB 030329”
13	Ouchi, M.	Scam	ApJ, 558, 83 (2001)	*“Clustering Properties of Galaxies at $z \sim 4$ in the Subaru/XMM Deep Survey Field”
13	Cowie, L. L.	CISCO	ApJ, 551, L9 (2001)	“Detecting High-Redshift Evolved Galaxies as the Hosts of Optically Faint Hard X-Ray Sources”
13	Trentham, N.	Scam	MNRAS, 335, 712 (2002)	“The faint end of the galaxy luminosity function”
18	Jewitt, D.	CISCO	AJ, 122, 2099 (2001)	“Colors and Spectra of Kuiper Belt Objects”
19	Hamana, T.	Scam	ApJ, 597, 98 (2003)	*“Cosmic Shear Statistics in the Suprime-cam 2.1 Square Degree Field: Constraints on Ω_m and σ_8 ”
19	Motohara, K.	CISCO	PASJ, 53, 315 (2002)	“CISCO: Cooled Infrared Spectrograph and Camera for OHS on the Subaru Telescope”

表 A.1: 2005 年 2 月 28 日時点での、すばる望遠鏡観測成果論文トップ20

A.1.2 科学成果ハイライト

最も遠い銀河のギネスブックをすばるが独占

すばる深探査観測計画で波長 9200Å の狭帯域フィルターを用い、赤方偏移が 6.6 付近にあるライマン α 輝線銀河の探査を行った。その結果人類観測史上、最も遠方にある銀河を複数個発見した。

これは、10 万個におよぶ天体の測定から絞り込んだ約 80 個の候補天体の一部を FOCAS 装置で分光観測して、そのうちの 8 個が赤方偏移 6.6 にある輝線銀河であることを示したものである。図 A.2 にその一例を示す。重力レンズ増光効果を受けていない一般のフィールドで、このように遠方に位置する銀河が複数個見つかったのは初めてである。これらの銀河は宇宙ができてから 9 億年程度の時代の若い銀河であり、銀河の誕生と進化のようすの解明が今後期待されている。

表 A.2 は 2004 年 8 月 28 日の時点での確認された最も遠い銀河のランキング表である。太字がすばる望遠鏡の単独成果、オレンジがすばる望遠鏡の共同成果で、上位 10 天体中 9 個までをすばる望遠鏡が独占している。これは、遠い銀河の探索に有効な広視野主焦点カメラを備えた 8m 級望遠鏡はすばる望遠鏡が唯一のものであること、すばる望遠鏡の高い結像性能が遺憾なく発揮されたこと、そしてこの観測計画に観測所を挙げて力を入れているためである。すばる望遠鏡による赤方偏移 4 から 7 に迫る遠方 (それだけ過去) の宇宙の一連の系統的な観測研究は国際的にも高く評価されている。

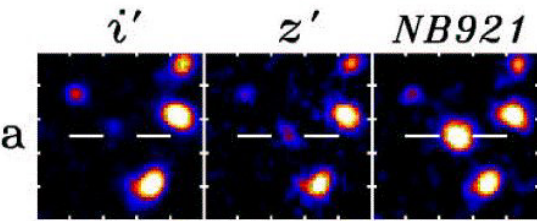


図 A.2:

No.	名前	赤方偏移	使用望遠鏡	論文	
1	SDF	J132522.3+273520	6.597	すばる	Taniguchi, Y. et al.
2	SDF	J132432.5+271647	6.58	すばる	Taniguchi, Y. et al.
3	SDF	J132518.8+273043	6.578	すばる	Taniguchi, Y. et al.
4	SDF	J132418.3+271455	6.578	すばる	Kodaira, K. et al.
5	HCM-6A*	J023954.7-013332	6.56	Keck/すばる	Hu, E. et al.
6	SDF	J132408.3+271543	6.554	すばる	Taniguchi, Y. et al.
7	SDF	J132352.7+271622	6.542	すばる	Taniguchi, Y. et al.
8	SDF	J132415.7+273058	6.541	すばる	Kodaira, K. et al.
9	SDF	J132353.1+271631	6.54	すばる	Taniguchi, Y. et al.
10	LALA	J142442.2+353400	6.535	KPNO/Keck	Rhoad, J. E. et al.
未公認参考記録					
A1835*	#1916(ノイズ?)	10?	HST/VLT	Pelló, R. et al., Weatherley, S. J. et al.	
A2218*	無名 (スペクトル無し)	6-7?	HST/Keck	Kneib, J. P. et al.	

* 銀河団の重力レンズ効果を受けて増光している天体

表 A.2: 確認された遠方銀河ベスト 10 (2004/8/28 現在)

ハッブル宇宙望遠鏡を越えた性能

図 A.3 はファーストライト直後に得たすばるの画像（左：赤色画像、星像サイズ 0.45 秒角）を露出時間のほぼ同じハッブル宇宙望遠鏡の画像（右：赤色画像、星像サイズ 0.2 秒角）と比べたものである。ゆらぐ大気を通しての観測というハンディにも拘わらず、ハッブル宇宙望遠鏡と同等の限界等級までの感度と画質が得られることが証明された。天体の分光観測では、集光力で 12 倍勝るすばる望遠鏡が、ハッブルを凌ぐ観測を可能にする。

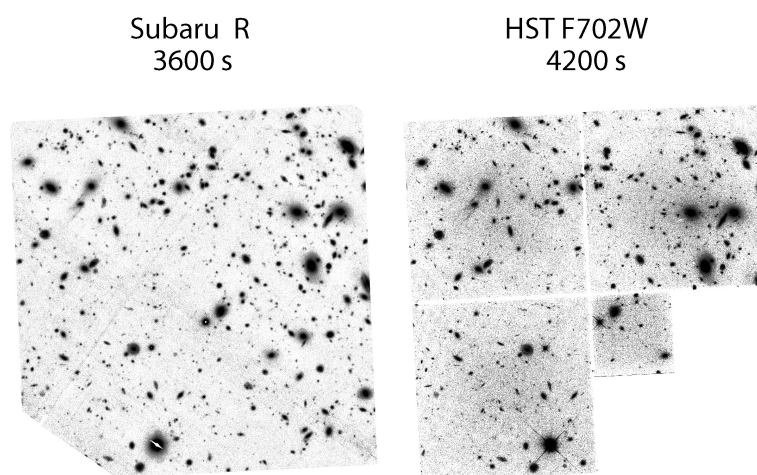


図 A.3: 約 40 億年彼方の銀河団 A851 のすばる望遠鏡による画像とハッブル宇宙望遠鏡による画像

宇宙の果てまでの銀河の 90%を見通す

図 A.4 は、近赤外線カメラを用いたすばる深探査観測により、数え上げた銀河の等級別計数値である。宇宙の果てまでの銀河として見える天体の 90%が確認された。これらの天体からの光を積算しても、別の観測から求められている背景放射強度に満たないことが分かり、新たな謎として提起されている。

ガンマ線バースターの解明

ガンマ線バースター GRB 030329 の位置に現れた光学天体を、発見から約 40 日後に FOCAS で分光観測した。そのスペクトルに見られる超新星成分（SN 2003dh：黒線）が爆発後 40 日程度の極超新星のそれと酷

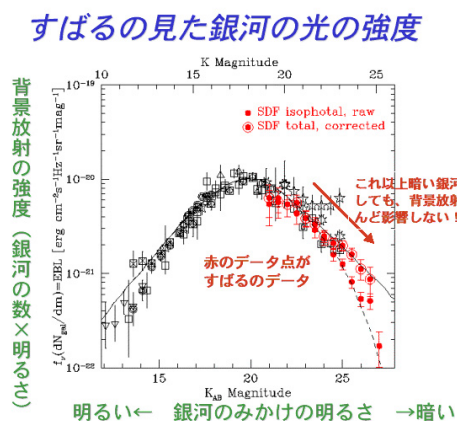


図 A.4: 近赤外線による銀河計数結果

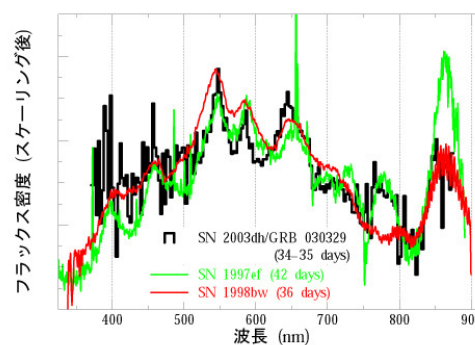


図 A.5: ガンマ線バースターのスペクトル

似していることから、ガンマ線バーストが、大質量の重力崩壊型超新星であることが初めて明確に示された。
図 A.5 の超新星のスペクトルから爆発日時を逆算することができた。

遠方銀河の超新星による宇宙論

東京大学、国立天文台を中心とする研究グループは、すばる望遠鏡の主焦点カメラを使い、遠方銀河において 18 個の超新星を発見した (図 A.6)。主焦点カメラの一視野に 12 個もの超新星が写っており、これほど数多くの超新星を一度に発見したのは、世界で初めてである。今回発見された超新星は宇宙が現在の半分の大きさだったころの宇宙膨張の様子を解明するのに適した距離にあり、今後の追跡観測によって「現在の宇宙が加速膨張しているのか」という、宇宙の枠組にかかわる問題に答えを出せると期待されている。

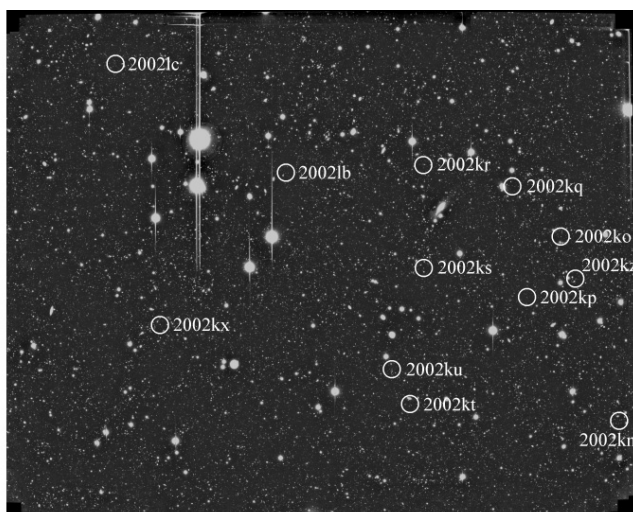


図 A.6: 12 個の超新星を同時に発見した主焦点カメラの画像



図 A.7: ぎょしゃ座 AB 星の周りに検出された惑星系誕生の現場

すばるが写し出した、うずまき状の惑星誕生現場

国立天文台・東京大学・神戸大学・茨城大学・宇宙航空研究開発機構からなるチームは、コロナグラフ撮像装置 (CIAO) と波面補償光学装置 (AO) を用いて、おうし座星形成領域にある多数の若い星を撮像するプロジェクトを進めている。このプロジェクトの一環として、ぎょしゃ座 AB 星 (AB Aur、距離 470 光年) と呼ばれる年齢約 400 万年の星を観測したところ、そのまわりの原始惑星系円盤が、中心の星からの赤外線を反射して輝いている様子を捉えることに成功した (図 A.7)。

A.1.3 すばる望遠鏡関係新聞記事、書籍



図 A.8: すばる望遠鏡新聞報道から



図 A.9: すばる望遠鏡新聞報道から



図 A.10: すばる望遠鏡新聞報道から



図 A.11: すばる望遠鏡新聞報道から

すばる関連の図書・ビデオから



図 A.12: すばる望遠鏡関連書籍から

A.2 上空からの赤外線観測関係新聞記事一覧

日本の宇宙科学の評価
1994年11月

英国の科学専門誌「ネイチャー」の最近号に、日本の文部省・宇宙科学研究所（相模原市）の組織と実績を高く評価する記事が紹介された。

執筆者は同誌のジョン・マドックス編集長で、宇宙科学研究所（ISSA）の第三者評価委員会の一員。

マドックス編集長は、同研究所が世界で最高レベルの創造的な組織に育

日本の宇宙科学研究所

ネイチャー編集長が絶賛

「立派な研究所となるためのレシピ」と題する記事の中で宇宙科学研究所のエクス線天文衛星など過去二十二年間に打ち上げ実績を称賛して

1994年11月13日 産経新聞夕刊



▲じょうぎ座 赤外線観測された銀河の一部。白い部分のエネルギーが強い
▲コンパス座

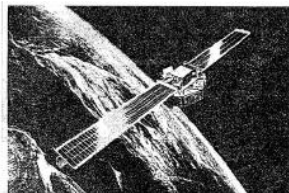
天の川の星誕生マップ

宇宙科学研究所の「スウェーデン・ヘリウム」が、天の川の星誕生マップを完成させた。このマップは、天の川の星誕生の中心部を、赤外線観測で探査した。このマップは、天の川の星誕生の中心部を、赤外線観測で探査した。このマップは、天の川の星誕生の中心部を、赤外線観測で探査した。

1995年5月11日 読売新聞

気球赤外線望遠鏡
1995年5月

「スウェーデン・ヘリウム」が、天の川の星誕生マップを完成させた。このマップは、天の川の星誕生の中心部を、赤外線観測で探査した。このマップは、天の川の星誕生の中心部を、赤外線観測で探査した。

赤外線銀河を探る
イモリ産卵にも挑戦

「ミウラ折り」の展開楽しみ

1995年7月13日 朝日新聞夕刊

宇宙実験室
1995年7月

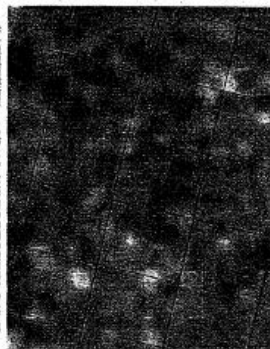
工夫で高性能
1997年8月

1997年8月1日 朝日新聞夕刊

科学の目

赤外線望遠鏡
衛星—S.O.

とらえた



が起きているとみられる銀河（川島公明・国立天文台助教提供）

[illegible]

だけ助る」在外線を出すのは、大體の處が裏生じつつあるから、なない」といふ。奥田教授は「百餘年前とて」の宙の始まりに近い時期に銀の星の形成が非常に大に出現したと述べていることが分かった。いろいろの證據で觀測して銀河形成の力ミズムを解明していきたい」と語つていた。

1997年8月26日 朝日新聞夕刊

ISOの成果
1997年8月

2003年打ち上げの赤外線天文衛星「アストロF」開発順調

(一〇)三巻に打ち上げられる文部省宇宙科学研究所(宇宙研)の次男英之介博士(アストロロ)の間接が描かれてゐる。打ち上げの機動に際せられることが、その直接試験も同時に終つた宇宙の全力を獲得して外縁を出て未知の宙間や星を発見し、地球をつくるのが目的で、数億万歳の新しい世界を自分たち青年達の手で築くといふ。エクス・マテラ大演説「アストロロ」は今年、Mロケットの事故に打ち上げられ敗れただけに期待は大変だ。(永井 理)

見に期待

未知の銀河、星発見に期待



海外研究人文座「アストロイド」の活動記録
津波川根和雄氏の文芸書宇宙科学研究所

半年かけ全天の天体観測
地上でできぬ観測可能

2000年6月27日 中日新聞

アストロF開発進む
2000年6月

1997年8月26日 朝日新聞夕刊

A.3 名古屋大学赤外線グループ関係新聞記事一覧



2000 年 2 月 3 日：読売新聞



2001 年 2 月 7 日：中日新聞

暗黒星雲「向こう側」くっきり

名古屋大学理学部では、これまで観測できなかった、からんタ・ネット上公開の光赤外線天文学研究所が、暗黒星雲の姿を望遠鏡とカメラで撮影した。天文のグループは、近赤外線カメラで観測した。観測には、銀河系から約2万8000光年先の暗黒星雲「R213」を観測した。観測の結果、暗黒星雲の中心部に、明るい星の集まりが確認された。これは、暗黒星雲の中心部に、星の形成が行われている証拠と見られる。観測の結果、暗黒星雲の中心部に、星の形成が行われている証拠と見られる。観測の結果、暗黒星雲の中心部に、星の形成が行われている証拠と見られる。

短い方が青、緑、赤色の色を付け、星の形成が行われている証拠と見られる。観測の結果、暗黒星雲の中心部に、星の形成が行われている証拠と見られる。観測の結果、暗黒星雲の中心部に、星の形成が行われている証拠と見られる。

名大など近赤外線撮影

より強い能力があり、暗黒星雲の中心部に、星の形成が行われている証拠と見られる。観測の結果、暗黒星雲の中心部に、星の形成が行われている証拠と見られる。観測の結果、暗黒星雲の中心部に、星の形成が行われている証拠と見られる。

2003年2月8日：中日新聞

見つけたよ！星の赤ちゃん

名古屋大学と国立天文台などの研究グループは、電波望遠鏡で観測した暗黒星雲の中心部に、星の形成が行われている証拠と見られる。観測の結果、暗黒星雲の中心部に、星の形成が行われている証拠と見られる。観測の結果、暗黒星雲の中心部に、星の形成が行われている証拠と見られる。

この暗黒星雲の内部に、星の形成が行われている証拠と見られる。観測の結果、暗黒星雲の中心部に、星の形成が行われている証拠と見られる。観測の結果、暗黒星雲の中心部に、星の形成が行われている証拠と見られる。

2004年3月21日：しんぶん赤旗

名大の光・赤外線天文学研究が、暗黒星雲の中心部に、星の形成が行われている証拠と見られる。観測の結果、暗黒星雲の中心部に、星の形成が行われている証拠と見られる。観測の結果、暗黒星雲の中心部に、星の形成が行われている証拠と見られる。

名大が南アフリカ共和国に設置した近赤外線望遠鏡と近赤外線3色カメラ「SIRIUS」で、銀河系の中心部を観測。画像の範囲は横2500光年、縦1000光年。近赤外線3つの波長に青、緑、赤の光を当て、鮮明なカラー画像で再現することに成功した。観測の中心を務めた同大学院博士課程2年、西山正吾さん(26)によれば、範囲内で検出された星の数は約1000万個。星が密集しているオレンジ色の最中心部を除いて、1つ1つの星の姿がはっきり分かるという。同大の長田哲也助教授は「観測データを詳細に調べることで銀河系中心部の構造や、星の誕生、死滅の様子などを解き明かす手がかりになる」と話している。

銀河系のまん中名大が撮影成功

2万8000光年先へ見えた。地球がある太陽系は銀河系の端にある。中心部は、いて座方向で地球からの距離は約2万8000光年。中心部までには可視光線を吸収する暗黒星雲が大量にあり、光利用の観測はできない。同グループは暗黒星雲の影響をほとんど受けない近赤外線に着目。2002年から03年にかけて、成果を発表する。

2004年3月21日：中日新聞

A.4 日本の光赤外機器開発関連の研究費受給一覧

A.4.1 科学研究費

このリストは、1985 年度以降の光赤外天文学の機器開発関連で獲得された科学研究費をぎょうせいの『文部(科学) 省科学研究費補助金採択課題・公募審査要覧(科学研究費研究会・編)』から抽出し、さらに光赤外線天文学コミュニティからの情報をもとに作成された。

なお、抽出には編集委員の独断が入っていることと、リストとしては完全なものではないことに十分に注意されたい。

年度	種別	予算額 (千円)	研究代表者	タイトル
1980-1982	一般 A	24,800	奥田 治之	気球搭載赤外望遠鏡による星間空間における物理現象
1980-1981	一般 A	26,600	小暮 智一	狭帯域写真測光による星間雲の研究
1980-1981	一般 B	8,800	土屋 淳	天文学用光干渉計の実験
1980	一般 C	2,800	高窪 啓弥	オリオン星雲の光電分光測光
1980	一般 C	2,200	佐藤 修二	近赤外域表面輝度分布の観測による系外銀河の研究
1980-1982	試験 2	6,300	高瀬 文志郎	大型写真乾板処理システムの開発
1980	試験 2	500	奥田 治之	軽量、高精度反射鏡の製作
1981	総合 B	3,000	小暮 智一	光学望遠鏡の基本性能と極限的観測条件の研究
1981-1982	一般 A	20,700	西 恵三	真空紫外(斜入射) 領域に於ける絶対測光及検出器の絶対校正に関する研究
1981	一般 C	2,500	佐藤 修二	銀河系深部の赤外線源の物理状態の測光、分光観測
1981	試験 2	4,760	舞原 俊憲	天体遠赤外線の分光観測装置の開発
1981	奨励 A	850	渡辺 鉄哉	恒星紫外高分散分光観測の基礎研究
1982	総合 B	2,600	山下 泰正	天体からの光と赤外放射の検出装置の開発と光学望遠鏡の構造
1982-1983	一般 A	23,100	清水 実	高性能カセグレン分光器による微光天体の観測的研究
1982-1983	一般 B	6,400	野口 邦男	近・中間赤外測光・分光器の開発
1982-1983	一般 B	6,500	小暮 智一	固体素子撮像法による星間雲の表面測光
1982	一般 C	1,800	佐藤 修二	銀河系深部の赤外線源の赤外域偏光観測による磁場構造の研究
1982	奨励 A	800	村上 浩	銀経 351° ~ 354°、銀緯 1° の近赤外線源の気球観測
1983-1984	一般 A	39,300	山下 泰正	フーリエ分光法による天体赤外スペクトルの研究
1983-1985	一般 A	36,000	松本 敏雄	赤外線による観測的宇宙論の研究
1983-1984	一般 B	6,300	奥田 治之	遠赤外原子・分子線を使った銀河構造の研究
1983-1984	試験 1	10,000	阪井 清美	スペースにおける天体赤外・遠赤外観測機器開発のための多目的フーリエ分光装置の試作
1984-1985	一般 B	6,700	磯部 しゅう三	星像改良を行った干渉計による星の視直径および二重星の角距離の決定
1984	一般 C	2,500	長谷川 博一	近赤外域掃天観測による暗黒星雲と星の生成領域の研究
1984	一般 C	1,800	高岸 邦夫	電荷結合素子 (CCD) を用いた天体観測用カメラの開発
1984-1985	試験 1	4,100	村上 浩	近赤外線検出器アレイの開発
1985-1986	一般 A	29,600	家 正則	CCD(固体撮像素子) による微光天体の測光・分光学的研究
1985-1986	一般 B	7,500	長谷川 博一	ハレー彗星の赤外線観測
1986-1988	一般 A	26,200	中村士	スペーステレスコープのためのデータ解析法に関する研究
1986-1988	一般 A	20,700	舞原 俊憲	高解像度赤外線観測による星生成領域と銀河中心核の内部領域の研究
1986-1987	一般 B	5,600	野口 邦男	一次元配列素子を用いた冷却グレーティング分光器の開発と天体赤外線スペクトルの観測
1986-1987	一般 B	6,700	佐藤 修二	星の生成領域における偏光現象の研究
1986	一般 C	2,000	村上 浩	1mm 波帯天体観測へのフーリエ分光器の応用

年度	種別	予算額 (千円)	研究代表者	タイトル
1986-1987	試験 (1)	13,000	山下 泰正	大望遠鏡系の制御に関する試験研究
1987	総合 A	5,000	湯田 春雄	次期大型検出器の基礎研究
1987-1988	一般 B	7,600	家 正則	高感度低雑音カメラによる銀河の分光学的研究
1987-1989	一般 B	7,200	田中 培生	赤外二次元アレイ測光器による星形成領域の研究
1987	一般 C	1,600	中桐 正夫	多天体同時分光器による星団構造の研究
1987-1988	試験 (1)	22,200	成相 恭二	非球面を用いた明るい分光器用カメラの試作と検査
1987	海外学術	15,500	成相 恭二	ハワイ島マウナケア山頂北西地域における天文観測条件の調査研究
1988	総合 B	2,800	小暮 智一	大型望遠鏡による微光天体の精密観測法の研究
1988-1990	一般 B	11,600	石黒 正人	大型光学望遠鏡による回折限界像の形成法に関する研究
1988	一般 C	1,200	芝井 広	気球遠赤外観測による星間ショック領域の研究
1988-1989	試験 (1)	9,800	松本 敏雄	赤外線検出器の多素子化技術の開発
1988-1989	試験 (1)	7,400	磯辺 しゅう三	高速フーリエ変換のための空間光変調システムの実験開発・研究
1988	海外学術	3,500	家 正則	大型光学赤外線望遠鏡 (JNLT) 計画に関する海外調査
1988	海外学術	1,900	成相 恭二	ハワイ島マウナケア山頂北西地域における天文観測条件の調査研究
1988-1989	海外学術	5,300	奥田 治之	気球赤外線望遠鏡による銀画面の遠赤外線分光観測
1988-1990	海外学術	6,500	松本 敏雄	宇宙赤外線のロケット観測
1989	総合 B	1,200	奥田 治之	赤外線による銀河・宇宙の創成と進化の研究
1989-1990	一般 B	5,300	野口 邦男	赤外線分光観測による低温度星の研究
1989-1990	一般 C	1,600	馬場 直志	高空間分解能天体分光システムの開発
1989-1990	一般 C	2,600	谷口 義明	アダプティブ・オブティックスのための高速星像検出カメラの実験的研究
1989	一般 C	1,900	小林 行泰	宇宙研赤外線観測装置によるショックの構造と進化の研究
1989-1990	試験 (1)	9,400	小平 桂一	大型望遠鏡鏡面の高速制御システムの開発
1989	国際学術	4,000	家 正則	大型光学赤外線望遠鏡 (JNLT) 及びその観測装置計画に関する調査研究
1990	総合 B	1,700	磯辺 しゅう三	干渉法による高分解能新技術の開発とその天体観測への応用
1990-1993	一般 A	30,100	奥田 治之	[CII] 158 μ m 線による銀河構造の研究
1990-1992	一般 B	7,800	唐牛 宏	新型同時分光装置による銀河集団の運動の研究
1990-1991	一般 C	2,400	小林 行泰	宇宙研赤外線観測装置による銀河系磁場構造の研究
1990	一般 C	2,400	佐藤 紳司	ボロメーター・ペアによる超高感度赤外線検出システムの開発
1990-1992	一般 C	1,900	西村 史朗	天体画像解析システムの形成に関する研究
1990-1991	試験 A	36,700	牧田 貢	モザイク回折格子の試作研究
1990-1991	試験 B	7,400	関口 真木	大型モザイク CCD カメラの試作と画像再構成の研究
1991-1994	重点領域 (1)	35,400	舞原 俊憲	赤外線分光観測による星間塵の組成の研究
1991-1994	重点領域 (1)	50,700	佐藤修二	暗黒星雲における磁場構造の研究
1991-1992	重点領域 (2)	6,300	田中 培生	水素分子輝線イメージング観測による光解離領域の研究
1991	重点領域 (2)	2,900	金森 英人	半導体レーザーを用いた赤外天文観測のための高分解能分光検出システムの開発
1991-1992	重点領域 (2)	4,100	松原 英雄	高銀緯星間雲からの遠赤外 [C II] スペクトル線観測装置の開発
1991	重点領域 (2)	3,700	小倉 勝男	CCD シュミット望遠鏡観測によるハービック・ハロー天体の広域探査
1991-1994	重点領域 (2)	52,500	奥田 治之	気球による星間 C ⁺ 線の銀河面サーベイ
1991-1992	一般 B	6,600	舞原 俊憲	高赤方偏移銀河の赤外線分光観測
1991-1992	一般 C	2,000	馬場 直志	波面制御ファイバーフィード天体干渉計に関する研究
1991-1992	一般 C	1,800	市川 隆	近赤外線波長域での撮像観測に基づく距離基準銀河の基本構造の研究

年度	種別	予算額 (千円)	研究代表者	タイトル
1991-1993	一般 C	2,000	山下 卓也	中間赤外線グレーティング分光器による星生成領域の構造と進化の研究
1991	奨励 A(萌芽)	800	松原 英雄	高感度積分型遠赤外線検出器系の開発
1991	奨励 A	800	中川 貴雄	遠赤外 [C II] スペクトル線イメージング分光観測
1991-1992	試験 B(1)	13,500	家 正則	アダプティブ・オプティクス (補償光学) 装置の試作研究
1991-1993	特別研究員	3,500	岩室 史英	OH 夜光除去スペクトログラフの開発
1991-1992	国際学術	12,000	奥田 治之	遠赤外 [C II] スペクトル線による銀河構造の研究
1992-1994	一般 A	21,000	家 正則	トモグラフィー (断層写真) 補償光学による高解像観測の研究
1992-1993	一般 B	6,800	芝井 広	二次元遠赤外カメラによる星間ガスの放射機構と形態の研究
1992	一般 C	1,900	野口 邦男	低温度星の赤外輻射スペクトルの観測的研究
1992-1993	一般 C	2,800	大谷 浩	スペクトロネビュラグラフによる標準的ガス星雲の詳細 3 次元分光観測
1992	一般 C	2,000	安藤 裕康	近赤外分光観測による激変星の研究
1992	奨励 A	900	三浦 則明	補償光学系により部分補償され多天体像からの高解像イメージング
1992	奨励 A	900	長田 哲也	赤外線分光観測による活動銀河核の研究
1992	試験 A	28,700	村木 綏	紫外領域用大口径イメージインテンシファイアーの開発
1992-1993	試験 B	6,400	馬場 直志	天体スペckル分光カメラの開発
1992-1994	試験 B	20,300	松本 敏雄	天体観測用中間赤外線検出器の開発
1992-1993	特別研究員	3,000	小林尚人	赤外線分光観測および分光偏光観測による銀河系内の星間塵の組成と進化の系統的研究
1992-1993	特別研究員	2,923	上野宗孝	近赤外線広域サーベイ観測に基づく銀河構造の解明
1993-1995	特別推進	320,000	福来 正孝	広領域宇宙地図の作製と宇宙論の実証的研究
1993	重点領域 (2)	1,400	上野 宗孝	近赤外線カメラによる銀河面内暗黒星雲のサーベイ
1993	重点領域 (2)	2,300	田中 培生	赤外シミュレータ搭載 10 分角カメラの設計・製作
1993	重点領域 (2)	3,700	片ざ 宏一	地上望遠鏡からの中間赤外線スペクトル観測のための基礎開発
1993	重点領域 (2)	1,500	長田 哲也	3 ミクロン帯ブリズム分光偏光観測による星形成領域の研究
1993	重点領域 (2)	1,200	渡部 潤一	ガンマ線バースターの光学観測の試み
1993-1994	総合 A	13,400	家 正則	擾乱媒質中の波動伝播と補償光学
1993	総合 B	1,800	奥田 治之	スペースからの赤外線観測による共同研究
1993-1994	総合 B	1,100	小平 桂一	「大望遠鏡の観測装置」国際会議にかかわる総合研究
1993-1995	一般 B	7,200	谷口 義明	近赤外ブリズム分光システムの開発と輝線天体の観測的研究
1993-1994	一般 B	6,800	舞原 俊憲	銀河形成と初期進化の赤外線観測
1993-1994	一般 B	7,400	中川 貴雄	近傍星間雲の遠赤外線分光広域観測
1993-1994	一般 C	2,100	馬場 直志	位相シフトを利用した天体の高解像再生の研究
1993	奨励 A	1,000	長田 哲也	活動的銀河核の 3 ミクロン・バンプの観測的研究
1993	奨励 A	900	佐々木 実	マイクロレンズアレイ多瞳分光器による楕円銀河の撮像分光観測
1993-1995	試験 B(1)	19,000	佐藤 修二	低バックグラウンド放射赤外線望遠鏡の試作と評価
1993-1994	国際学術 (共同研究)	6,000	岡村 定矩	数値情報化された探査に基づく北天銀河地図の作成
1993-1995	国際学術 (大学間協力)	6,000	小平 桂一	大望遠鏡の観測装置の共同開発研究
1993-1994	特別研究員	2,600	柏川 伸成	モザイク CCD カメラによる宇宙大規模構造の研究
1993-1995	特別研究員	2,700	杉山 光児	恒星・惑星系の形成についての観測的研究と赤外線観測装置の開発
1993-1995	特別研究員	1,400	西原 英治	近赤外分光観測による活動銀河の研究
1994	総合 B	1,500	奥田 治之	スペースからの赤外線観測による共同研究

年度	種別	予算額 (千円)	研究代表者	タイトル
1994-1996	一般 A	34,600	松本 敏雄	銀河ハローの赤外線観測
1994-1996	一般 A	32,200	奥田 治之	銀河面の遠赤外マルチラインサーベイ
1994-1995	一般 B	6,700	松原 英雄	中間赤外分光観測による明るい赤外銀河の放射機構の研究
1994-1995	一般 B	7,200	西村 徹郎	高分解能冷却型ファブリ・ペロー干渉器による中間赤外線撮像観測技術の開発
1994-1995	一般 C	2,100	野口 邦男	天体赤外線スペクトル観測による星周塵の構造進化の研究
1994	一般 C	1,600	安藤 裕康	新 CCD による広域スペクトル観測
1994	一般 C	2,100	佐々木 敏由紀	活動銀河核時間変動の偏光分光モニター観測による統一モデルの検証
1994	一般 C	1,800	小林 行泰	赤外線撮像観測による銀河進化と宇宙構造の研究
1994	一般 C	1,900	山下 卓也	広視野赤外カメラによる巨大分子雲全域の赤外輝線観測
1994	奨励 A	900	吉田 重臣	干渉フィルターによる銀河系内星雲の電離構造の研究
1994	奨励 A	1,200	平原 靖大	フーリエ変換赤外分光法による星間分子の振動回転スペクトルの観測的研究
1994-1995	試験 B	8,500	市川 伸一	天体画像データベースの構築と研究支援システムの開発
1994-1996	試験 B	11,000	尾中 敬	衛星搭載冷却赤外線望遠鏡を目標とした高精度軽量鏡の試作・開発
1994	特別研究員	900	加藤 太一	コンパクト天体における降着現象の観測的研究
1994-1997	特別研究員	5,000	臼田 知史	近赤外線スペクトル観測によるスターバースト銀河の研究
1994-1996	特別研究員	2,700	峰崎 岳夫	近赤外線での広帯域撮像測光による銀河の構造と進化の研究
1995-2001	COE 形成 (分担)	338,000	吉井 穰	初期宇宙の探求 : 活動銀河核の多波長モニター観測による宇宙パラメータの決定
1995-1996	総合 A	4,700	浜部 勝	天文学用データ解析システムの総合研究
1995	総合 B	1,100	奥田 治之	スペースからの赤外線観測による共同研究
1995-1998	一般 A	33,900	佐藤 修二	動的スペクトル観測による星形成過程の研究
1995-1996	一般 C	2,100	馬場 直志	2 波長スペックルによる高空間分解能撮像法の研究
1995-1996	一般 C	2,300	高遠 徳尚	天文シーイングと局所大気ゆらぎの相関の測定
1995	一般 C (萌芽)	2,000	吉井 穰	活動銀河の多波長モニター観測による距離決定法
1995	一般 C	2,400	吉田 重臣	広視野 CCD カメラを用いた大規模星生成領域における前主系列星のディープサーベイ
1995	奨励 A	900	片ざ 宏一	原始惑星系円盤の中間赤外線分光観測
1995	奨励 A	1,200	平原 靖大	赤外アレイ検出器を用いた星間分子の高分解能振動回転スペクトル観測装置の開発
1995-1996	試験 B(1)	7,500	長田 哲也	全冷却広視野赤外線カメラの開発
1995-1996	試験 B	14,700	常田 佐久	高精度スペース光学望遠鏡の主要要素技術の開発
1995-1996	試験 B	7,500	舞原 俊憲	赤外線エッセル型回折格子の開発
1995-1996	基盤 A (試験)	17,400	家 正則	究極の可視光検出器 (裏面照射大型薄膜 CCD) の試作
1995-1996	国際学術 (共同研究)	7,200	佐藤 修二	偏光を用いた星間微粒子の研究
1995-1996	国際学術 (共同研究)	6,200	舞原 俊憲	赤外線分光観測による初期宇宙における銀河形成過程の研究
1995	特別研究員	1,500	岩室 史英	OH 夜光除去スペクトログラフによる初期銀河の研究
1995-1997	特別研究員	2,700	宮田 隆志	中間赤外分光撮像装置の開発とそれによる星周ダストの観測研究
1996-1998	基盤 A	11,500	奥田 治之	スペース赤外線観測による銀河、星の形成と進化
1996-1998	基盤 A	26,600	芝井 広	大光度赤外線銀河の全光度の決定とエネルギー源の研究

年度	種別	予算額 (千円)	研究代表者	タイトル
1996-1997	基盤 A (試験)	8,500	佐藤 修二	赤外線センサーの評価システム
1996-1997	基盤 B	6,500	舞原 俊憲	系外銀河ハローの赤外測光による質量分布の観測的検証
1996-1997	基盤 B	5,600	村上 浩	高感度天体観測用サブミリ波検出器の開発
1996-1997	基盤 B	6,800	松岡 勝	トランジェント天体観測用超広視野望遠鏡システムの開発
1996	基盤 C	2,100	片ざ 宏一	原始惑星系円盤の N バンド分光観測
1996	基盤 C	2,200	長田 哲也	銀河面で星間減光を強く受けた大質量星の探査
1996-1997	基盤 C	1,800	佐々木 敏由紀	大規模銀河偏光サンプルによる銀河磁場構造の研究
1996-1997	基盤 C	2,100	野口 邦男	漸近分枝星の進化と銀河内分布の観測的研究
1996	萌芽	1,700	吉澤 正則	光赤外線干渉計における超精密光学アンカー
1996	奨励 A	1,000	岩室 史英	宇宙初期における電波銀河の赤外線観測
1996	奨励 A	1,000	田村 元秀	低質量・低温の星の探索－褐色矮星の観測的研究
1996-1998	国際学術 (共同研究)	15,000	池内 了	広域銀河探査に基づく宇宙研究
1996-1998	国際学術 (共同研究)	14,400	海部 宣男	大望遠鏡の観測装置の共同開発研究
1996-1997	特別研究員	1,800	和田 武彦	近赤外線変光星サーベイによる銀河構造の解明
1996-1997	特別研究員	1,700	奥村 真一郎	電離水素領域の近赤外分光観測による大質量星形成過程の研究
1996-1998	特別研究員	2,700	友野 大悟	中間赤外線における地上高精度観測技術の開発とそれによるダストの観測
1996-1998	特別研究員	2,700	巻内 慎一郎	赤外銀河分光観測のための遠赤外線 2 次元圧縮型 Ge:Ga アレイ検出器の開発
1996-1998	特別研究員	3,600	西原 英治	近赤外多目的カメラによる高赤方偏移クェーサーの観測的研究
1997-1998	基盤 A	22,600	西村 徹郎	冷却ファブリ・ペロー干渉器と二波長同時カメラによる大望遠鏡の赤外線検出限界の追求
1997-1998	基盤 A (展開)	29,500	長田 哲也	天文観測用 InGaAs 二次元アレイ検出器の試作
1997-1998	基盤 B	8,700	市川 隆	近赤外線での撮像観測に基づく銀河の構造と進化の研究
1997-1998	基盤 B	11,900	長田 哲也	銀河系内 3.3 ミクロン輝線バンドの分布の研究
1997-2000	基盤 B	10,500	大谷 浩	高空間分解三次元分光にもとづく銀河活動の研究
1997-2000	基盤 B	13,700	満田 和久	マイクロマシーニング技術を応用した X 線・赤外線検出器の開発
1997-1999	基盤 B	10,100	中川 貴雄	遠赤外線分光観測による銀河中心領域での星間雲の状態と星生成活動の研究
1997-1999	基盤 B	11,200	田村 元秀	太陽系外の巨大惑星の直接検出に向けて
1997-1998	基盤 B (展開)	12,100	常田 佐久	高精度スペース光学望遠鏡の精密可動メカニズムの開発
1997-1999	基盤 B	13,500	佐々木 敏由紀	究極の透過型回折格子 (グリズム) の試作
1997-1998	基盤 C	3,100	岩室 史英	遠方宇宙における初期形成銀河の赤外線分光観測
1997-1998	奨励 A	2,000	川田 光伸	衛星搭載を目指した撮像型遠赤外線フーリエ分光器の開発
1997-1998	奨励 A	2,600	西川 淳	光赤外干渉計用遅延線の加速度抑制方法の研究
1997	特別研究員	900	今西 昌俊	近赤外線分光観測による活動銀河核の研究
1997-1999	特別研究員	2,700	本原 顕太郎	すばる OHS 用、冷却赤外分光カメラ CISCO の開発的研究
1998-2001	特定領域 A (計画)(1)	48,800	芝井 広	金属欠乏状態星間物質の遠赤外観測
1998-2001	特定領域 A (計画)(2)	95,800	佐藤 修二	高解像度赤外線観測によるマゼラン雲中の星団形成の研究
1998-2001	特定領域 A (計画)(2)	70,500	林 正彦	赤外線カメラによる星・惑星系形成領域の研究

年度	種別	予算額 (千円)	研究代表者	タイトル
1998-2001	基盤 A(1)	24,300	谷口 義明	すばる望遠鏡による銀河の形成と進化の観測的研究
1998-2001	基盤 A	35,100	吉井 穰	活動銀河核の多波長モニター観測による距離の決定
1998-2001	基盤 A	33,000	佐藤 弘一	光赤外干渉計による恒星・恒星周辺現象の精密観測に関する研究
1998-2000	基盤 A (展開)(1)	12,700	芝井 広	高感度センサー用極低温電子回路の試作研究
1998-2000	基盤 B	13,500	土居 守	マルチ・スキャン型ファブリ・ペローによる多天体分光撮像
1998-2000	基盤 B	13,400	尾中 敬	赤外線衛星搭載用中口径冷却シリコンカーバイド軽量鏡の開発
1998-2000	基盤 B (展開)	11,000	松原 英雄	冷却中間赤外カメラ用高性能レンズの開発
1998-1999	基盤 C	4,000	関口 真木	近赤外観測による銀河系内のセファイド変光星の距離の精密決定
1998-1999	基盤 C	3,400	村上 浩	高分子材料を用いた軽量光学系の基礎開発
1998-2000	基盤 C	3,000	吉田 篤正	広視野望遠鏡による γ 線バースト afterglow の可視光観測
1998	基盤 C (企画調査)	2,900	芝井 広	赤外線銀河計数による銀河スケール星生成史の研究
1998	基盤 C (企画調査)	2,900	松本 敏雄	次期赤外線天文衛星の概念設計
1998-1999	奨励 A	2,400	平原 靖大	分子分光学的手法による惑星系始源物質の蒸発素過程に関する研究
1998-1999	奨励 A	2,300	菅井 肇	マイクロレンズアレイを用いた近赤外線三次元分光器の製作
1998-1999	奨励 A	2,500	宮崎 聡	広視野 CCD カメラの開発及び重力レンズ効果を利用した深宇宙探査
1998-1999	国際学術	8,200	吉井 穰	活動銀河核の多波長モニター観測による距離の決定
1998-1999	国際学術 (共同研究)	3,700	舞原 俊憲	すばる望遠鏡による赤外ディープサーベイの共同観測
1998-1999	特別研究員	1,800	中島 浩二	補償光学系を用いた観測における画像処理及びデータ解析法の開発
1999-2001	基盤 A	34,800	芝井 広	近傍銀河星間物質の遠赤外分光観測による診断
1999-2000	基盤 A	28,000	海部 宣男	すばる望遠鏡の次世代観測装置の国際共同開発研究
1999-2001	基盤 B	13,600	尾中 敬	系外銀河の中間赤外線スペクトルと中間赤外有機物バンドの定量的研究
1999-2000	基盤 B	15,100	佐藤 修二	広波長帯偏光撮像によるフロキュラントな渦巻き銀河の研究
1999-2001	基盤 B	8,100	岩室 史英	多天体赤外ファイバー分光システムの開発と銀河形成の観測的研究
1999-2000	基盤 B	4,300	佐藤 修二	マゼラン望遠鏡赤外線サーベイ計画
1999-2001	基盤 B	6,600	池内 了	スローン・デジタル・スカイ・サーベイによる天文学研究
1999-2001	基盤 B (展開)	9,600	市川 隆	近赤外線モザイクカメラの開発
1999-2001	基盤 C	3,800	川田 光伸	高波数分解能を目指した遠赤外線冷却フーリエ分光観測装置の開発
1999-2001	基盤 C	1,900	佐々木 実	マイクロレンズアレイ多瞳分光器による惑星状星雲の撮像分光観測
1999-2000	基盤 C	2,900	市川 伸一	大規模天体画像データの高効率解析法の研究
1999-2000	基盤 C	3,400	村上 浩	高分子材料を用いた軽量光学系の基礎開発
1999	基盤 C (企画調査)	2,300	家 正則	8m 級望遠鏡による 21 世紀の天文学
1999-2000	萌芽	2,200	大谷 知行	超伝導トンネル接合素子を用いた可視光 1 光子分光検出器の基礎開発

年度	種別	予算額 (千円)	研究代表者	タイトル
1999-2000	奨励 A	2,200	峰崎 岳夫	近傍活動銀河核の可視・赤外線同時モニター観測によるダストトーラスの構造の解明
1999-2000	奨励 A	2,000	土井 靖生	遠赤外線多素子検出器の開発
1999-2000	奨励 A	2,300	金田 英宏	宇宙観測用半導体 Ge:Ga 検出器の遠赤外線応答特性の研究
1999-2000	奨励 A	2,200	小林 尚人	銀河系最外縁における星生成と銀河回転曲線の研究
1999-2001	特別研究員	2,700	古澤 久徳	15 色同時撮像カメラによる銀河のスペクトルエネルギー分布の研究
1999-2001	特別研究員	4,100	度會 英教	ASTRO-F 搭載近中間赤外カメラの開発と中間赤外による銀河中心分光サーベイ
1999-2000	特別研究員	1,800	村上 浩	ASTRO-F 計画における銀河サーベイ計数観測の観測戦略の研究
2000-2002	基盤 A	40,300	関口 真木	スローン・デジタル・スカイサーベイによる銀河天文学
2000-2003	基盤 A	22,900	田村 元秀	星形成領域における円偏光と生命のホモカイラリティー
2000-2001	基盤 B	15,700	川良 公明	南天 CCD サーベイによる高赤方偏移クエーサーの探索および銀河形成進化の観測的研究
2000-2002	基盤 B	16,500	小池 千代枝	宇宙塵候補物質の遠赤外での光学的性質の測定と赤外線天文学への応用
2000-2002	基盤 B	12,700	中川 貴雄	銀河中心領域の広域にわたる高い空間分解能での遠赤外線分光観測
2000-2002	基盤 B	14,900	松原 英雄	ミリ波広域分光観測による宇宙初期の星生成史の解明
2000-2002	基盤 B	16,400	大谷 知行	超伝導トンネル接合素子を用いた紫外線 1 光子分光検出器の開発
2000-2002	基盤 B	12,500	河合 誠之	ガンマ線バースト即時観測用ロボット望遠鏡システムの開発
2000	萌芽	2,000	西川 淳	すばる望遠鏡を他の大型望遠鏡と光学的に結合する光学素子の研究
2000-2001	奨励 A	2,100	石垣 剛	厚いホログラムを利用した天体観測用回折格子の開発
2000-2001	奨励 A	2,500	平原 靖大	DIB の解明のための炭素クラスター負イオンのレーザー誘起蛍光分光
2000-2001	特別研究員	2,000	長嶋 千恵	近赤外 3 色同時撮像カメラ SIRIUS による銀河中心近傍の球状星団の探索
2000-2002	特別研究員	3,000	永山 貴宏	赤外 3 色カメラによる銀河アトラスの作成
2000-2001	特別研究員	1,700	尾中 敬	銀河星間物質の中間赤外線による研究と赤外線カメラ (IRC) の開発
2000-2002	特別研究員	3,900	中島 康	近赤外線サーベイによるマゼラン星雲における星団形成の研究
2001-2003	基盤 A	44,070	尾中 敬	衛星搭載用大口径軽量冷却望遠鏡の開発
2001-2003	基盤 B(展開)	10,600	馬場 直志	幾何学的位相変調によるナル干渉計の開発
2001-	基盤 B (海外学術)	12,600	長田 哲也	南天の銀河面の高解像赤外線探査
2001-2003	基盤 C	3,700	廣田 朋也	光赤外線望遠鏡用撮像装置の開発と VERA 観測天体の長期間多波長モニター
2001-2003	基盤 C	2,500	泉浦 秀行	超高分解能光学域スペクトルに基づく赤色巨星の質量放出の研究
2001-2002	基盤 C	1,800	郷田 直輝	高精度アストロメトリ観測で解き明かす銀河の構造と形成
2001-2002	奨励 A	2,000	土井 靖生	遠赤外線大規模 2 次元アレーの基礎開発
2001-2002	奨励 A	2,200	大坪 政司	軽量可変形鏡の開発
2002-2006	特別推進	451,000	家 正則	レーザーガイド補償光学系による遠宇宙の近赤外高解像観測
2002-	学術創成	173,700	河合 誠之	ガンマ線バーストの迅速な発見、観測による宇宙形成・進化の研究
2002-2003	基盤 A	39,600	芝井 広	宇宙観測アレイセンサー用高機能極低温電子回路の製作
2002-	基盤 A	34,400	舞原 俊憲	光ファイバーによる多天体面分光型スペクトログラフの開発と銀河形成史の研究

年度	種別	予算額 (千円)	研究代表者	タイトル
2002-	基盤 A	42,200	吉田 道利	超広視野赤外カメラによる短周期ミラ型星の完全サーベイ
2002-	基盤 A	38,500	小林 行泰	新動作モードに対応した赤外線アレイ検出器の開発
2002-	基盤 A (海外学術)	23,100	吉井 穰	活動銀河核の新しい距離測定法の確立と宇宙論的パラメータの測定
2002-	基盤 B	14,400	市川 隆	近赤外線撮像多天体分光観測装置の開発と high-z 領域での階層構造進化の研究
2002-	基盤 B	13,500	安藤 裕康	すばる望遠鏡を用いた太陽系外惑星の直接探査
2002-2003	基盤 C	3,200	杉谷 光司	最も近い星形成領域における T タウリ型星の系統的サーベイ
2002-	基盤 C	3,200	中島 紀	褐色矮星の系統的探索
2002-2003	若手 B	4,000	本原 顕太郎	赤外線狭帯域フィルタセットによる高赤方偏移電波銀河の輝線雲の研究
2002-2003	若手 B	3,400	和田 武彦	スペース天文用赤外線画像センサ開発のための基礎研究
2003-2007	特定領域 (計画)(2)	144,200	長田 哲也	純回転輝線の観測による星間空間中の温かい水素分子数の決定
2003-2007	特別推進	160,000	芝井 広	遠赤外線干渉計を用いた高解像撮像による星形成現象の詳細研究
2003-2006	基盤 A	26,700	土居 守	Ia 型超新星分光測光サーベイによる宇宙膨張の精密測定
2003-2006	基盤 A	25,870	中川 貴雄	スペース赤外線観測で探る惑星系の進化：円盤から惑星へ
2003-2006	基盤 A (海外学術)	21,000	川良 公明	東京大学アタカマ天文台 6.5m 望遠鏡最適地のための大気赤外線環境の調査
2003-	基盤 B	9,900	谷口 義明	近赤外深宇宙探査による宇宙の暗黒時代と宇宙再電離源の研究
2003-	基盤 B	10,600	長田 哲也	南アフリカ 1.4m 望遠鏡による赤外線での銀河中心サーベイ
2003-2004	基盤 B	16,200	宮崎 聡	超広視野カメラ HyperSuprime によるダークマター分布探査
2003-	基盤 B	11,700	郷田 直輝	近赤外線高精度位置天文観測のための新手法の研究
2003-2004	基盤 C	3,200	菅井 肇	面分光を用いたライナー輝線領域の研究
2003-2004	若手 B	3,800	宮田 隆志	実験室におけるダスト放射測定システムの開発
2003-2004	若手 B	3,200	金田 英宏	宇宙観測用半導体 Ge:Ga アレイ遠赤外線検出器の過渡応答メカニズムの全容解明
2003-2004	若手 B	3,700	恵藤 浩朗	究極の宇宙望遠鏡用ミラー (大型 SiC 超軽量ミラー) の開発
2003-2004	若手 B	3,600	鳥居 研一	ガンマ線バーストの早期残光観測
2004-	特定領域 A (計画)(2)	73,400	尾中 敬	遠・中間赤外線観測による星周円盤ダスト進化の解明
2004-	特定領域 A (計画)(2)	47,300	田村 元秀	光赤外大口径望遠鏡・干渉計による原始惑星系円盤の観測と系外惑星探査
2004-	特定領域 A (計画)(2)	28,600	村上 浩	系外黄道光観測に向けた赤外線検出器技術の開発
2004-2007	基盤 A	11,100	松原 英雄	超極赤銀河の多波長探査による銀河進化の研究
2004-	基盤 B	5,600	田村 元秀	広域赤外線掃天観測による星の質量の起源の解明：星形成領域における IMF
2004-	基盤 C	1,600	有本 信雄	楕円銀河の形成現場の直接的検証とその起源の解明
2004-	基盤 C (企画調査)	4,510	中川 貴雄	赤外線天文衛星 ASTRO-F による星形成史解明のための国際共同研究
2004-	基盤 C	1,100	上野 宗孝	宇宙における超微弱光検出用赤外線検出器の開発
2004-	若手 A	10,600	小林 尚人	新型赤外線高分散分光器による高赤方偏移における銀河間物質の進化の研究
2004-	若手 B	1,900	峰崎 岳夫	可視赤外線精密モニター観測による活動銀河核のダストトラスの研究
2004-	若手 B	2,400	永田 伸一	極端紫外線領域の偏光変調器の開発

年度	種別	予算額 (千円)	研究代表者	タイトル
2004-	特別研究員	1,000	栗田 光樹夫	新技術による超軽量・廉価な望遠鏡架台の開発

A.4.2 その他

年度	交付機関など	種別	予算額 (千円)	研究代表者	タイトル
1991	名古屋大学	基盤重点設備費	63,139	松本敏雄	スペースアストロノミー設備
1992	東レ科学技術振興財団研究助成		17,000	岡村 定矩	広視野モザイク CCD カメラによる宇宙構造と銀河進化の研究
1993	東京大学	特定研究経費	5,700	市川 隆	大型赤外線撮像装置の開発と近傍銀河の構造と進化の研究
1994-1996	総研大	グループ研究	24,930	家 正則	波面補償光学とその応用
1996	国立天文台	共同開発研究	?	吉井 穰	MAGNUM 広視野 CCD カメラによる重力レンズ効果を用いた深宇宙探査
1993	東京大学	基盤重点設備費	9,700	岡村 定矩	多波長観測による銀河進化
1996-1997	国立天文台	共同開発研究経費	6,580	市川 隆	近赤外線モザイクカメラの開発
1997-2000	東レ科学技術振興財団研究助成		20,000	吉井 穰	活動銀河核の多波長モニター観測による距離の決定
1998	東北大学	大学院重点特別経費	17,000	市川 隆	超大型赤外線撮像装置による宇宙論研究
1998-2000	国立天文台	すばる R&D 経費	10,000	岩室 史英	OHS ファイバー分光器
1999	東北大学	教育基盤設備充実経費	9,480	市川 隆	近赤外線広域天体撮像システム
1999	東北大学	理工系教育高度化設備費	14,000	市川 隆	天文教育用ネットワーク望遠鏡
1999-2001	住友財団基礎科学研究助成		2,500	西川 淳	すばる望遠鏡を他的大型望遠鏡と光学的に結合する技術の開発
2000-2001	日本学術振興会	未来開拓 FS 研究	90,061	芝井 広	次世代フォトン計測センサーの試作
2000-2002	三菱財団自然科学研究助成		8,000	土居 守	ダイクロミックミラー型分光器による高効率天体観測の研究
2000	国立天文台	共同開発研究	2,200	馬場 直志	偏光干渉法に基づくナル干渉計の開発
2001-2003	宇宙科学研究所	搭載機器基礎開発費	9,450	尾中 敬	中間赤外線分光素子の開発
2001-2003	宇宙科学研究所	搭載機器基礎開発費	8,600	土井 靖生	天文観測用遠赤外線キロピクセルカメラの開発
2001-2003	宇宙科学研究所	搭載機器基礎開発費	2,200	芝井 広	超低消費電力極低音読み出し回路の開発
2001-2003	宇宙科学研究所	搭載機器基礎開発費	5,650	松浦 周二	テラヘルツ帯における超広帯域ヘテロダイン検出システムの開発
2001	国立天文台	共同開発研究	2,100	馬場 直志	液晶による干渉型ステラコログラフの開発
2001	名古屋大学	大学院最先端設備費	105,000	芝井 広	高精度観測機器開発システム
2002-2004	科学技術振興調整費		159,304	松本 敏雄	スペース・オプティクス of 広域展開
2002-2004	科学技術振興調整費		46,239	家 正則	スペース・オプティクス of 広域展開
2002-2004	科学技術振興調整費		16,254	尾中 敬	スペース・オプティクス of 広域展開
2002-2003	国立天文台	共同開発研究	2,030	杉谷 光司	広視野グリズム分光撮像装置への VPH グリズムの実用化研究
2002	国立天文台	大学支援経費	3,000	岩室 史英	岡山における近赤外 tip-tilt 評価試験

年度	交付機関など	種別	予算額 (千円)	研究代表者	タイトル
2002-2004	宇宙科学研究所	搭載機器基礎開発費	12,000	常田 佐久	C/C 複合材料鏡の開発
2002	大幸財団	学術助成	4,100	杉谷 光司	最も近い星形成領域における T タウリ型星の系統的サーベイ
2003	国立天文台	共同開発研究	2,550	岩室 史英	大型ハニカム鏡制御法の開発
2003	国立天文台	大学支援経費	7,000	岩室 史英	ハニカムセグメント鏡制御試験
2003	国立天文台	大学支援経費	2,000	馬場 直志	太陽系外惑星の直接探査用ナル干渉装置の開発
2003-	東レ科学技術振興財団研究助成		10,000	郷田 直輝	銀河系とは何か? ~6 次元位相空間分布の高精度観測のための基礎開発 ~
2003	住友財団基礎科学研究助成		1,500	杉谷 光司	最も近い星形成領域の T タウリ型星の系統的サーベイ
2004-	宇宙科学研究所	搭載機器基礎開発費	3,080	田村 元秀	スペース・ステラコーロナグラフの開発
2004-	宇宙科学研究所	搭載機器基礎開発費	3,120	金田 英宏	BIB 型ゲルマニウム遠赤外線検出器の国内開発実現に向けての基礎実験
2004-	宇宙科学研究所	搭載機器基礎開発費	1,500	片ざ 宏一	回折限界イメージスライサーの開発
2004-	宇宙科学研究所	搭載機器基礎開発費	2,650	高橋 幸弘	小型衛星搭載用・惑星専用宇宙望遠鏡のための光学基礎技術開発
2004	国立天文台	共同開発研究	1,000	岩室 史英	分割鏡位置制御試験システムの開発
2004	国立天文台	共同開発研究	2,250	馬場 直志	太陽系外惑星を直接分光する装置の開発
2004	国立天文台	共同開発研究	3,440	高橋 英則	冷却チョッパに用いる高精度低温アクチュエータの開発実験
2004	国立天文台	共同開発研究	2,600	本原 顕太郎	次世代多天体分光器用マクロシャッタアレイの開発
-	企業寄付金		100,000	吉井 穰	MAGNUM 望遠鏡運用

A.5 日本の天文学界の執行予算推移, 欧米との比較

A.5.1 主要各国の宇宙開発予算

国名	人口	GNP	宇宙開発予算	国民あたり	対 GNP 比	備考
	千人	百万ドル	百万ドル	ドル	%	
ESA (15ヶ国)	380,107	8,893,974	4,433	11.7	0.050	2002 年 ¹
オーストラリア (CSIRO)	19,730	398,157	426	21.6	0.107	1999 年 ²
日本 (JAXA)	127,654	3,983,495	2,460	19.3	0.062	概算値
韓国 (KARI)	47,700	476,689	1.35	0.03	0.0003	2003 年 ³
カナダ (CSA)	31,510	735,965	195	6.2	0.026	1999 年 ⁴
アメリカ合衆国 (NASA)	294,043	10,445,600	14,500	49.3	0.139	2002 年

A.5.2 主要各国の天文学予算

国名	人口	GNP	天文学研究予算	国民あたり	GNP 比	備考
	千人	百万ドル	百万ドル	国民あたり	%	
イタリア	57,423	1,184,171	240	4.2	0.02	1999 年 ⁵
フランス	60,144	1,431,204	278	4.6	0.02	1999 年 ⁵
ドイツ	82,476	1,984,002	295	3.6	0.01	1999 年 ⁵
オーストラリア	19,730	398,157	21	1.1	0.005	1999 年 ⁵
カナダ	31,510	735,965	22.7	0.7	0.003	1999 年 ⁵
英国	59,251	1,566,787	110	1.9	0.007	2000 年 ⁶
日本	127,654	3,983,495	120	0.9	0.003	2002 年 ⁷
アメリカ合衆国	294,043	10,445,600	1649	5.6	0.02	2004 年 ⁸

¹http://www.esa.int/esaCP/GGG4SXG3AEC_index_0.html

²http://spaceinfo.jaxa.jp/db/kaihatu/kan/kikan_j/csiro_a_j.html

³<http://www.kari.re.kr>

⁴http://spaceinfo.jaxa.jp/db/kaihatu/kan/kikan_j/csa_a_j.html

⁵<http://www.casca.ca/lrp/ch3/en/chap314.html>

⁶<http://www.nmm.ac.uk/site/request/setTemplate:singlecontent/contentTypeA/conWebDoc/contentId/2418>

⁷科研費、国立天文台予算、ASTRO-F、SOLAR-B の総計

⁸NSF(\$204M)+NASA(\$1445M): <http://www.aaas.org/spp/rd/05pch15.htm>

A.5.3 OECD 加盟国別科学技術予算

国名	人口	GNP	R&D 歳出			R&D 執行		
			総額	企業	政府	企業	大学	政府
	千人	百万ドル	百万ドル	%	%	%	%	%
スウェーデン	8,877	240,313	10,221	71.9	21.0	77.6	19.4	2.8
フィンランド	5,207	131,498	4,761	69.5	26.1	69.9	19.2	10.4
デンマーク	5,364	172,046	3,962	61.5	28.0	69.3	23.1	7.0
ベルギー	10,319	245,624	6,053	64.3	21.4	73.7	19.2	6.0
ルクセンブルク	453	20,986	364	91.0	7.7	92.6	0.2	7.1
オランダ	16,149	417,843	8,684	51.8	36.2	58.2	27.0	14.2
アイルランド	3,956	122,481	1,317	66.0	22.5	69.7	22.4	7.9
ハンガリー	9,877	51,833	1,446	29.7	58.5	35.5	25.2	32.9
チェコ共和国	10,235	69,507	2,001	53.7	42.1	61.1	15.6	23.0
スロバキア共和国	5,402		381	53.6	44.1	64.3	9.1	26.6
ポーランド	38,588	189,276	2,434	31.0	61.1	21.4	33.5	44.9
イタリア	57,423	1,184,171	16,351	43.0	50.8	49.1	32.6	18.4
フランス	60,144	1,431,204	36,678	54.2	36.9	62.2	19.5	16.9
ドイツ	82,476	1984,002	54,284	65.1	32.1	69.1	17.1	13.8
オーストリア	8,116	204,028	4,616	40.8	40.4	63.6	29.7	6.4
ポルトガル	10,062	121,664	1,775	31.5	61.0	34.4	35.6	19.8
スペイン	41,061	635,115	9,387	48.9	39.1	54.6	29.8	15.4
ギリシア	10,976	132,788	1,210	29.7	46.9	32.7	44.9	22.1
英国	59,251	1,566,787	31,037	45.7	26.9	67.0	22.6	8.9
EU25ヶ国	453,387	8,921,166	198,597	55.4	34.7	64.0	21.5	13.6
アイスランド	289	8,449	253	46.2	34.0	57.2	16.1	24.5
トルコ	71,325	183,120	2,910	42.9	50.6	33.4	60.4	6.2
スイス	7,169	267,419	5,507	69.1	23.2	73.9	22.9	1.3
ノルウェー	4,533	169,779	2,598	51.6	39.8	57.4	26.8	15.8
オーストラリア	19,730	398,157	7,810	46.3	45.7	47.5	26.8	22.9
ニュージーランド	3,876	58,550	978	37.1	46.4	36.5	30.3	33.2
日本	127,654	3,983,495	106,838	73.9	18.2	74.4	13.9	9.5
韓国	47,700	476,689	23,550	72.2	25.4	74.9	10.4	13.4
カナダ	31,510	735,965	18,447	44.3	34.0	53.7	34.9	11.2
メキシコ	103,457	637,200	3,565	29.8	59.1	30.3	30.4	39.1
アメリカ合衆国	294,043	10,445,600	284,584	63.1	31.2	68.9	15.8	3.0
合計			648,988	62.3	29.9	68.0	18.1	11.0

2010年代の光赤外天文学

将来計画検討報告書

2005年3月10日 印刷

2005年3月20日 発行

発行者 光赤外天文学将来計画検討会検討報告書編集委員会

編集委員長 家 正則 (国立天文台)

編集委員 本原 顕太郎 (東京大学)

児玉 忠恭 (国立天文台)

土居 守 (東京大学)

千葉 枢司 (東北大学)

中川 貴雄 (JAXA)

郷田 直輝 (国立天文台)

田村 元秀 (国立天文台)

印刷所 株式会社 ワークワン

〒 229-1124 神奈川県相模原市田名 10213-6

Tel. 042-778-6765

表紙デザイン 馬淵 晃 (馬淵デザインオフィス)

<http://www1.odn.ne.jp/mdo/>

Tel. 03-3351-3748