0.1 中間赤外分光撮像装置 MIMIZUKU

0.1.1 装置コンセプト

地上大口径望遠鏡による熱赤外観測は、空間解像度が高いこと、また観測機会が多いことなどといった特徴を持ち、飛翔体観測装置とは相補的な関係にある。観測天文学では高解像度の観測は高感度の観測と並んで本質的に重要であり、熱赤外域での観測で地上望遠鏡の果たすべき役割は非常に大きいと言える。

しかしながら、熱赤外域では大気中の分子、とくに水蒸気のラインが多数存在し、観測の精度や感度を低下させる。これは、(i) 大気中の水蒸気のラインは天体からの放射を遮り、シグナルを低下させる、(ii) 水蒸気ラインのフラックスにより背景放射量が増大し、その揺らぎに起因するノイズ（ポアソンノイズ）を増加させる、だけではなく、(iii) 水蒸気ラインは激しく時間変動しており、チョッピングなどを用いても落せない高周波のスカイノイズがノイズとして乗ってしまう、からである。このため、地上観測を精度よく行うには水蒸気量が少ないサイトからの観測が必須となる。

TAO 望遠鏡は高山に建設されるため、熱赤外域の観測でも高い優位性を示すと考えられる。図 1 は大気の吸収のモデル計算の結果である。マウナケアと比較しても、N バンド (波長 8–13 μm) での透過率もさることながら、Q バンド (波長 16–26 μm) での透過率が非常によい事が分かる。また、波長 28 μm 以降には、マウナケアでは全く透過しない大気の窓が幾つか表れている。

我々は TAO 望遠鏡用の中間赤外観測装置 MIMIZUKU (Mid-Infrared Multi-mode Imager for gaZing at the UnKown Universe) の開発を進めてきた。この装置は 2-38μm という広い波長範囲をカバーする装置であり、TAO 望遠鏡の持つ熱赤外域での観測ポテンシャルを最大限活かした設計となっている。また Field Stacker という 2 視野を同時に観測できるシステムを世界で初めて実用化し、赤外線の時間変動も高精度で検出できるよう工夫されている。以下、この装置の特色・仕様についてまとめる。

0.1.2 装置の特色

MIMIZUKU の特徴は以下の三点に集約される。

- 熱赤外波長の 2-38μm という広い波長範囲をカバー
- 30μm 帯で 1 秒角と言う世界最高の解像度を達成
- Field Stacker による観測で高精度のモニタ観測を実現

以下、各項目の詳細について述べる。

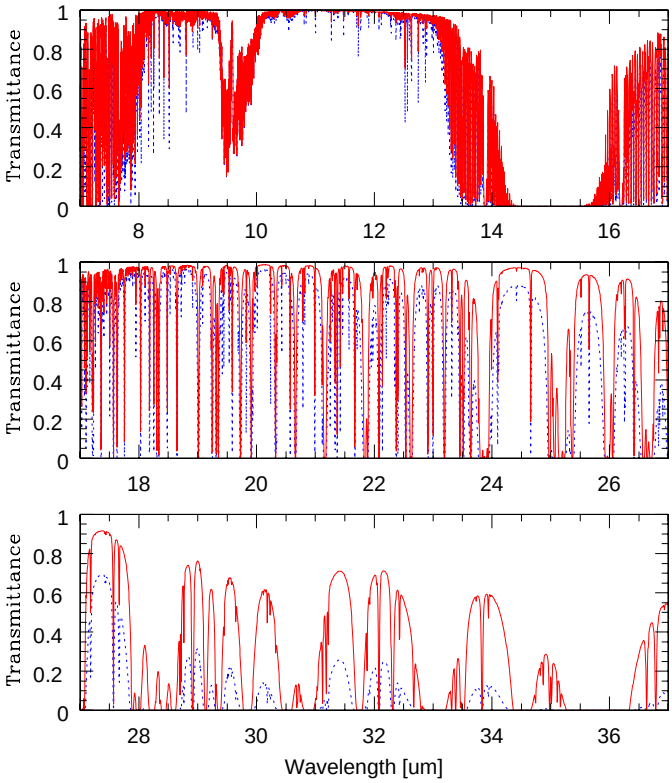

図 1: 大気透過率のモデル計算結果。赤が PWV=0.38mm、青が PWV=0.91mm であり、各々高度 5600m、4200m での水蒸気条件上位 10%に対応している。

広い波長範囲

MIMIZUKU 最大の特徴はその広い波長範囲にある。中でも波長 26-38μm（以後 30μm 帯と呼ぶ）は従来地上からは観測が不可能とされてきた波長域であり、世界中で現在 TAO サイトだけが観測できる波長帯である。我々は miniTAO 望遠鏡/MAX38 を用いた先行研究によって 30μm 帯での観測の方法を確立すると同時にその有効性を実証してきた。MIMIZUKU によってより詳細な観測ができるものと期待している。

30μm 帯以外でも MIMIZUKU のカバーする波長帯には新しいデータをもたらすものが多く含まれている。波長 16-26μm は Q-band と呼ばれ、これまでもすばる望遠鏡などでは観測が行われており、惑星系円盤などで多くの興味深い結果が得られている。しかし Q-band も大気の吸収が激しく、標高 4,200m のマウナケアでなければ良

いデータは得られていない。翻って南半球には標高 3,000m を超える大型望遠鏡は存在せず[1]南天の興味深い天体については観測があまり行われていない。TAO は南半球最初の高標高大型望遠鏡になるので、そこでの Q-band 観測は興味深い結果をもたらすと思われる。波長 2.5-5.5μm も状況は似通っており、良質なデータ取得が強く望まれている。

世界最高の解像度

MIMIZUKU は波長 6μm 以上の中間赤外線域で TAO 望遠鏡の主鏡回折で決まる空間解像度を達成できる。30μm での解像度は約 1 秒角になる。この空間解像度を達成できるシステムは近未来の衛星計画を含めても TAO/MIMIZUKU 以外には存在しない[2]。30μm 帯は星・惑星系形成や恒星進化最末期天体の観測で最重要な波長のひとつであり、詳細な観測には高解像度の観測が欠かせない。その意味で TAO/MIMIZUKU の果たす役割は大きいといえる。

モニタ観測を実現

近年の衛星観測によって、中間赤外波長でも様々な天体で変光が検出され始めている。変光は直接観測がかなわないような領域の情報を含んでおり、またその時間スケールから宇宙の化学・物理現象に大きな制限をつけられることから、今後の観測が強く望まれている。しかしながら衛星観測は装置寿命が短く、望遠鏡占有時間も限られているため思うように観測が進められていない。

地上熱赤外線観測は長期間運用されることが多く、また望遠鏡時間も比較的フレキシブルであることから変光観測を進める上で重要なカギを握る。実際近赤外線までの波長では地上望遠鏡によって精力的に変光観測が進められている。しかし中間赤外線では変光モニタ観測は難しかった。これは中間赤外線波長では星は相対的に暗くなるため中間赤外線カメラの限られた視野内に他の天体が入ることが極めてまれになり、近赤外線で使われるような視野内相対測光が不可能であったためである。

MIMIZUKU は中間赤外線波長で視野内相対測光を実現するための視野合成システム（Field Stacker）を搭載している。このシステムは望遠鏡内の２つの視野を可動式のピックアップミラーで選択、それを１つの検出器上に落とし込むことで、離れた２つ（以上）の天体を同時に観測する機構である。これによって大気変動の影響を大幅

[1]南半球に存在する 6m 以上の望遠鏡は全て 3000m 以下の地点にあり、これよりも高高度に望遠鏡を建設する計画は TAO 計画だけである。

[2]JWST の中間赤外線装置は 30μm 帯をカバーしていない

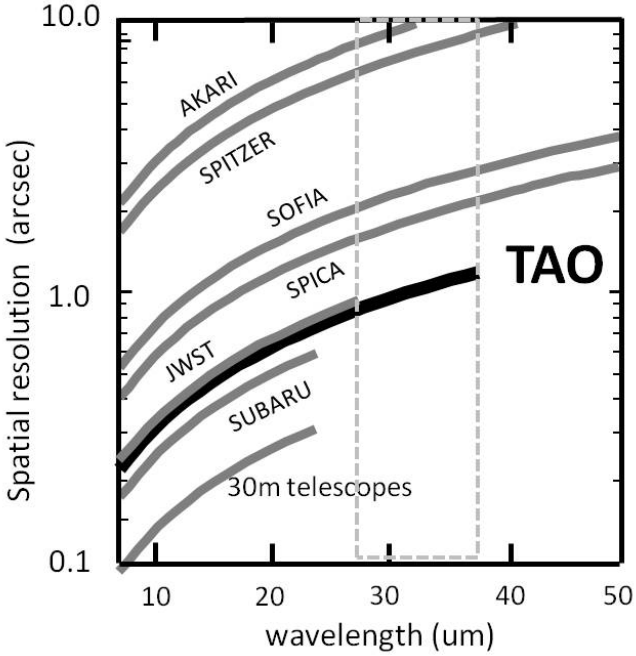

図 2: 赤外線域における各プロジェクトの空間解像度

に除去することができ、高精度でのモニタ観測が実現できるものと考えている。このような機構は世界的にも例がないものであり、非常に独自性が高い観測研究が行えるものと期待できる。

0.1.3 装置の仕様

本装置の仕様を表 1 にまとめる。

光学系

光学系は大きく分けて 4 つの低温部光学系と、常温部に設置された Field Stacker ユニットからなる。ブロック図を図 3 に示す。

光学系は入射窓およびフィルターを除いてすべて反射系で構成されている。これは 2μm から 38μm という広い波長範囲で使用するためである。また Field Stacker を用いるため、視野は 2arcmin 程度を確保する必要がある。

OVERVIEW		
観測波長域	2–38 μm	3 チャンネル
観測モード	バンドパスフィルターによる撮像 ロングスリット低分散分光 (R $\sim$ 200)	
サイズ	2m x 2m x 2m 約 2.3ton	
MIR-S Channel		
観測波長	6 – 26 μm	
検出器	Si:As 1024x1024 AQUARIUS	Raytheon 社製
Pixel Scale	0.11”/pix	
Field of View	2arcmin x 2arcmin 1arcmin x 2arcmin x2	w/o Field Stacker w/ Field Stacker
撮像フィルター	N-band filters ($\Delta\lambda \sim 1\mu$m) Q-band filters ($\Delta\lambda \sim 2\mu$m)	
分光モード	N-band : 7.5-13.5μm, R$\sim$230 Q-band : 16.5 – 25.5μm, R$\sim$160	w/ Ge-grism w/ Si-grism
スリット	0.3” or 0.6” (length 60”)	
Sensitivity (1sig1sec)	50mJy 130mJy 250mJy 650mJy	10μm imaging 20μm imaging N-band spectroscopy Q-band spectroscopy
MIR-L Channel		
観測波長	24 – 38 μm	
検出器	Si:Sb 128x128	or Si:Sb 1024x1024 (optional)
Pixel Scale	0.44”/pix	
Field of View	56” x 56” 28” x 56” x 2	w/o Field Stacker w/ Field Stacker
撮像フィルター	bandpass filters ($\Delta\lambda \sim 3\mu$m)	mesh filters
分光モード	26 – 38 μm, R$\sim$60	optional
スリット	1.2” (length 50”)	
Sensitivity (1sig1sec)	200mJy 400mJy 800mJy	30μm imaging 38μm imaging 30μm spectroscopy
NIR Channel		
観測波長	2 – 5.6 μm	
検出器	InSb 1024x1024 Alladin II	Raytheon 社製
Pixel Scale	0.11”/pix	
Field of View	2arcmin x 2arcmin 1arcmin x 2arcmin x2	w/o Field Stacker w/ Field Stacker
撮像フィルター	K, Ldash, Mdash	J,H, and narrowband filters (option)
分光モード	2.8 – 5.6μm R$\sim$ 180 Slit 0.3” x 60”	

表 1: TAO 望遠鏡用中間赤外装置 MIMIZUKU 仕様

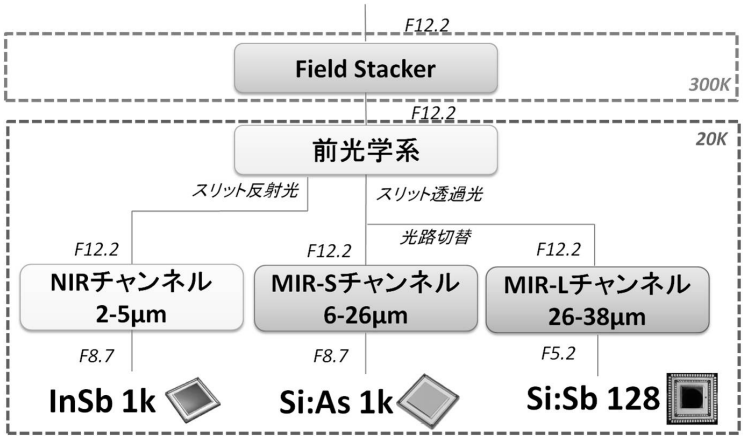

図 3: MIMIZUKU の光学系ブロック図

MIMIZUKU ではこのような光学系を軸外し共焦点非球面鏡で実現している。これは Chang らが 2006 年に提唱した光学系解であり、焦点を共有する２つの非球面である幾何学的な関係が成り立つときに広い範囲で良好な像が得られる、という性質を利用している。MIMIZUKU では低温光学系の Fore-opt, MIR-S, MIR-L, NIR の各々のチャンネルで２組ずつ、計８組１６枚の非球面鏡によって光学系が構成されている。

このような非球面鏡で構成された光学系は一般に製作・調整が困難である。特に軸外し量が大きい鏡は通常の旋盤では製作することができない。そのため MIMIZUKU では軸外し量が非常に大きい鏡についてはスローツールサーボを用いて製作を行った。また調整には光学系全体がすっぽり入るような大型三次元測定器を用い、これとレーザーを組み合わせて高精度かつ高効率な調整を実現した。結果常温状態で十分な光学性能を達成することを可視光を用いた実験で確認済みである。

MIMIZUKU は次節に述べる Field Stacker を搭載しており、ピックアップミラーの位置によって望遠鏡に対する装置の入射光方向が違ってくる。光学性能的にはこれは軸傾きの収差を生むことになる。これを軽減するため、MIMIZUKU のピックアップミラーは平面ではなく４次のポリノミナル面を採用している。ピックアップミラーが外側に行くと軸に対する傾きが大きくなるが、ポリノミナル面は焦点位置（視野中心にある）から離れるため、ミラーのパワーが増す。一方ピックアップミラーが軸ずれの小さい内側に来ると焦点に近づくため、ミラーのパワーは落ちる。これを利用して異なる軸傾きでも良好なスポットが得られるよう工夫をした。結果、TAO 望遠鏡視野φ 25arcmin 全域で 10μm でのストレール比 >0.82 (φ 24arcmin なら >0.9) という良好な性能を持つ光学系を構成することに成功している。

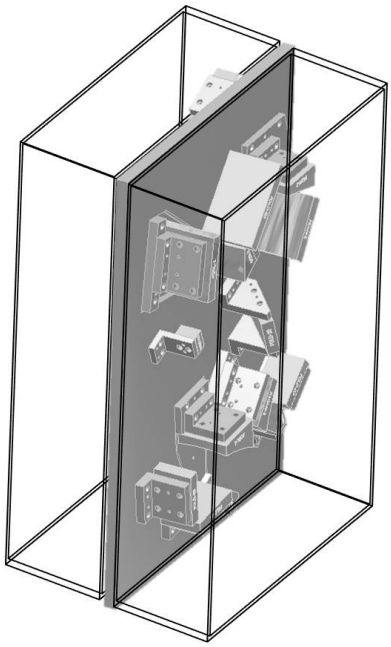

図 4: MIMIZUKU 低温光学系３次元イラスト

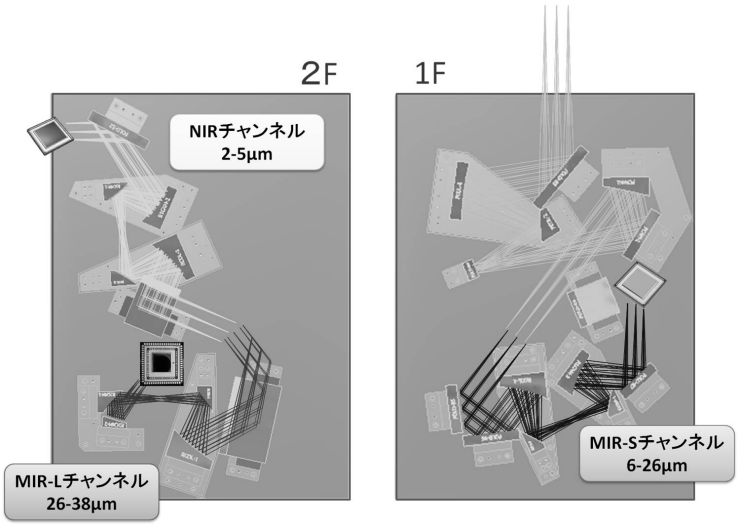

図 5: MIMIZUKU 低温光学系

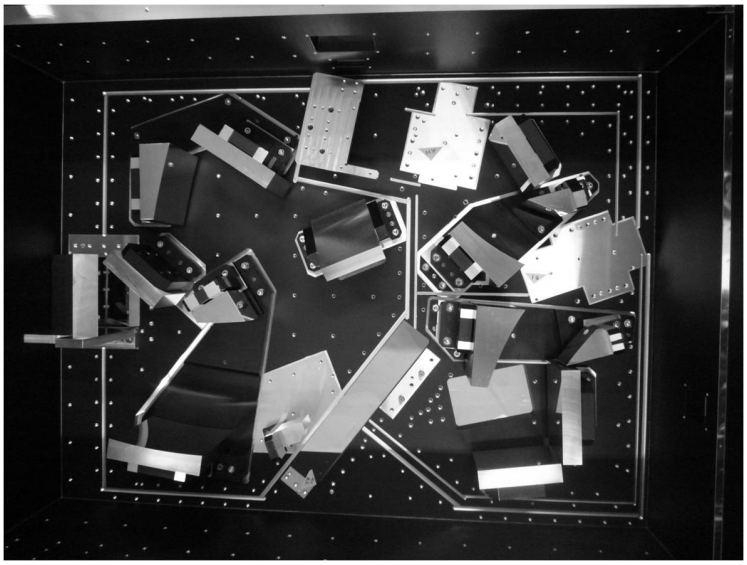

図 6: 調整を終えた MIMIZUKU 低温光学系

Field Stacker

MIMIZUKU の重要な機能の一つが、変光などのモニタ観測精度を向上させる二視野同時観測機能であり、これを実現するための機構が Field Stacker ユニットである。ユニットの概念図を下に示す。

ユニットは２つのピックアップミラーと１つの視野合成▽形鏡から成っている。ピックアップミラーは１軸ステージの上に乗っており、さらにそれが回転式のテーブルの上に搭載されている。これによって２つの離れた視野を視野合成▽鏡に集め、さらに低温光学系へと導く。望遠鏡焦点を▽鏡下端にあわせることで、視野のつなぎ目をできるだけ小さくしている。またピックアップ鏡はそれ自身の傾きを変えることができ、光軸が常に望遠鏡副鏡中心を見るように制御されている。これらユニットは MIMIZUKU の真空チャンバー上面に設置されている。ほこりよけカバーを外した状態の内部写真を図 8 に示す。

なお、視野合成▽鏡は電動で光路から退避させることも可能である。その場合は Field Stacker は用いられず、通常のカメラとして機能させることができる。

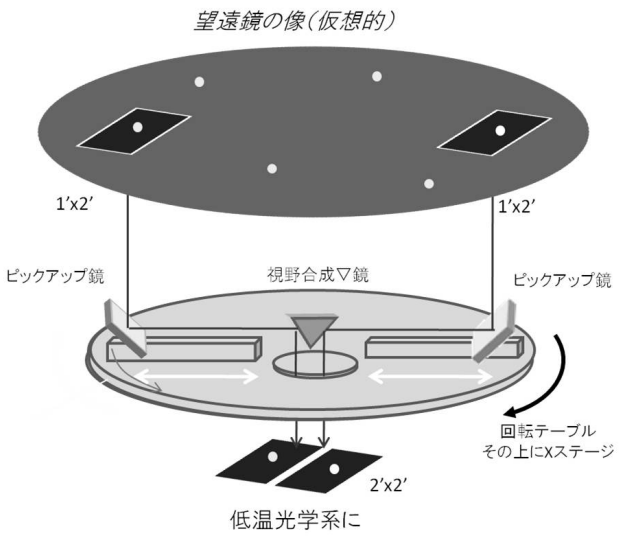

図 7: MIMIZUKU 視野合成 Filed Stacker ユニット概念図

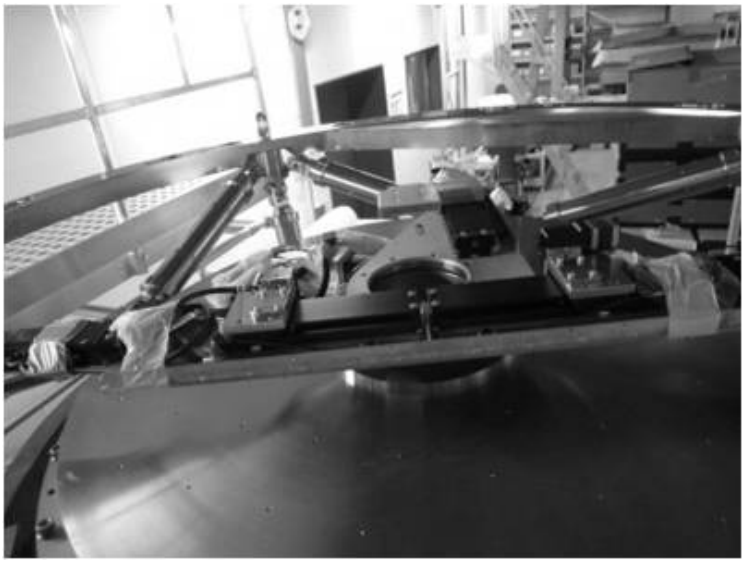

図 8: MIMIZUKU 視野合成 Filed Stacker ユニット写真

冷却チョッパー

地球大気や望遠鏡からの熱赤外背景放射は不規則に時間変動し、中間赤外線観測の測定精度に大きな影響を与える。地上中間赤外線観測では、この大気放射の変動を計

測、除去するために、頻繁に視野の切替えをするチョッピングと呼ばれる観測手法をとる。高精度の観測を行うには、数 Hz の周波数で天空上の $\sim 1'$ 離れた間を交互に観測 (チョップ) する必要がある。これまでのチョッピング観測は、望遠鏡の副鏡を振ることによって実現されてきた。しかし、近年の望遠鏡の大型化に伴い副鏡を高速・高精度に振動させるのが困難になりつつある。特に補償光学 (AO) 副鏡を採用する場合にはチョッピング副鏡との共存は難しい。そこで MIMIZUKU では低温で駆動するチョッピングユニットを低温光学系 Fore-opt 部に搭載することを考えている。

低温下で駆動するチョッピングユニットについては TAO 中間赤外線グループで開発を進めてきており、1 軸駆動のものは mini-TAO 用中間赤外線装置 MAX38 にも実装されている。MIMIZUKU ではこれを 2 軸に拡張したユニットを搭載したいと考えている。

MIMIZUKU 冷却チョッパーの諸源を表 2 に示す。

	MIMIZUKU 用	MAX38 用
チョッピング幅	max 30 arcsec 以上	max 50 arcsec
周波数	up to 6Hz	up to 6Hz
軸数	2 軸	1 軸
位置安定性	<< 1pix	<< 1pix
アクチュエータ	低温ピエゾ素子	低温ピエゾ素子
センサー	TBD	ギャップセンサー
ステータス	開発中	観測運用中

表 2: 冷却チョッパー仕様

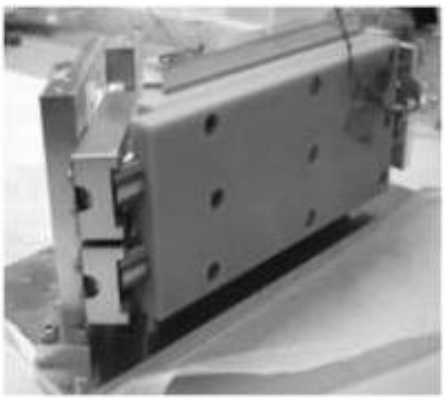

図 9: MAX38 で用いられている冷却チョッパーの写真

真空冷却系

MIMIZUKU は最長で 38 μm の波長までカバーする装置であり、検出器 (Si:Sb) 自身は 40μm まで感度を持つ。これらの波長域で光学系からの背景熱放射を十分下げるために、本装置は入射窓以降の全光学要素を 20 K まで冷却する。冷却には 4K1W の機械式 GM 冷凍機を 2 台用いる。冷却時には補助冷媒として液体窒素を用いており、24 時間程度で冷却が完了する。

MIMIZUKU には低温光学系内にピント調整機構が無いため、装置側からの焦点位置はチャンバーに対して固定されている。一方 Field Stacker はピックアップミラーの位置によって光路長が変わるため、そのままではピントを合わせることができない。この光路差を補正するため、MIMIZUKU は低温光学系全体を上下に駆動させるシステムを採用している。駆動にはパワーシリンダーを用いた。ストロークは 120mm、位置精度は 0.1mm である。ボールねじを用いたシステムの為、停電などのトラブル時でも装置が落下するようなことはない。

真空冷却系の概要イラストとその写真を図 10,11 に示す。

図 10: MIMIZUKU 真空冷却系　イラスト

低温機械駆動系

多彩な観測モードを実現するため、MIMIZUKU では低温部に幾つかの機械駆動系を設置する。これらはすべて低温モータによって駆動される。表 3 に低温機械駆動部の一覧を示す。

図 11: MIMIZUKU 真空冷却系の写真

光軸調整ユニット	光軸調整用のユニット	2 軸
Slit ユニット	スリットを交換するためのホイール スリット数 x7	1 軸
光線切替ユニット	光線を MIR-S と MIR-L で切り替えるユニット	1 軸
MIR-S フィルターユニット	MIR-S 用のフィルターホイール 7 穴 x2	2 軸
MIR-L フィルターユニット	MIR-L 用のフィルターホイール 9 穴 x1	1 軸
NIR フィルターユニット	NIR 用のフィルターホイール 9 穴 x2	2 軸
瞳レンズユニット	瞳撮像系用のレンズユニット	1 軸

表 3: MIMIZUKU 低温機械駆動系一覧

検出器

MIMIZUKU は各チャンネルに大型アレイ検出器を１つづつ、計３つの検出器を搭載した装置である。

主力チャンネルである MIR-S チャンネルには、Raytheon 社の 1024x1024 Si:As BIB 検出器 AQUARIUS を用いる。これは 2011 年現在最新最大の中間赤外用検出器であり、すばる望遠鏡用装置 COMICS 搭載の検出器（320x240）に比べ 10 倍以上のピク

セル数を持つ。このピクセル数のおかけで 2 視野を合成した観測でも、各視野十分な視野を確保することができる。

NIR チャンネルには同じく 1024x1024pix を有する AladdinII 検出器を用いる。これはすばる第一期装置で用いられていたものであり、最新検出器と比べほぼそん色ない性能を有している。InSb 検出器を用いることで SWIMS の観測波長と中間赤外線の間である 3-5μm 帯を高感度で観測する。

MIR-L チャンネルの検出器についても、1024x1024 フォーマット Si:Sb 検出器を検討している。しかしながらこのような大フォーマットの検出器は Si:Sb ではまだ完成したものは無く、現在メーカーにて開発が進められている状態である。今後も入手に努力する一方、既に入手・実用化している 128x128 Si:Sb 検出器をバックアップとして計画を進めている。

表 4 に検出器の諸源をまとめておく。

	MIR-S	NIR	MIR-L	
名称	Aquarius	AladdinII	–	–
Type	Si:As BIB	InSb	Si:Sb BIB	
Format	1024x1024	1024x1024	128x128	1024x1024
Pixel Size	30mum	27μm	75μm	(30μm?)
Pixel Scale	0.11”/pix	0.10”/pix	0.44”/pix	0.18”/pix
Well	1e7 e-	1e5 e-	1e7 e-	?
Temperature	7K	50K	5K	5K
Manifactured by	Raytheon	Raytheon	DRS	DRS

表 4: MIMIZUKU 検出器諸源

電気回路部

地上望遠鏡における中間赤外線観測では背景光によるサチュレーションを避けるため検出器を高速で駆動・読み出しすることが必須となる。MIMIZUKU MIR-S チャンネルの場合は 1024x1024pix を <10msec で読みだす事になり、リセットレベル測定も考慮すると 64ch で 1pix を 0.3μsec で読みだす必要がある。

このような高速駆動を必要とする一方、MIMIZUKU は真空チャンバーが巨大 (∼1m) であり低温部の検出器と常温部の駆動・読み出し回路の間のケーブル長は数 m にもなる。ケーブル長が長くなるとその浮遊容量によって高周波の信号が伝わらなくなるため、そのままでは上で述べたような高速な駆動・読み出しは不可能となる。そこで MIMIZUKU では低温（7K）の検出器と常温回路の間の低温部分（20K）にバッファ回路を設置する。低温でのバッファ回路は主に衛星などを対象に研究が進められてい

るが、このように多チャンネルのものはほとんど例がない。我々は市販の GaAs FET を低温駆動することでこれを安価に実現したいと考えている。

また高速での検出器読み出しは膨大な量のデータを発生する。MIMIZUKU で発生するデータを全て保存すると、1 時間あたりのデータレートは 150Gbyte、一晩の観測で 1 Tbyte のデータが発生することになる。これは 1 装置が扱う量としては莫大である。これを回避するため MIMIZUKU ではデータの演算処理をリアルタイムで実行する。これによってデータを 1/10 から 1/100 程度まで減少させる。

電気回路、とくにアナログ系電気回路については、MAX38 や ANIR、木曽観測所新広視野カメラ KWFC などで十分実績のある回路を改良して用いる。デジタル部分についても MAX38 などで採用した Linux+市販 IO ボードの組み合わせで対応する予定である。

0.1.4 その他新規技術

メッシュフィルター

中間赤外線装置開発で最大の問題のひとつは波長選択フィルターである。科学観測には正確精密な波長選択が欠かせないが、 従来の多層膜コーティング法では中間赤外線波長、特に 30μm 帯では、思い通りの波長選択を行うフィルターは製作できない。これは、この波長で透明な物質が非常に限られたものしかなく屈折率の選択肢が狭いこと、さらに低温で使用するため熱収縮の影響も考えねばならず、張り合わせ物質の組み合わせパターンがさらに限られていること、という原理的な問題に起因している。この状況を打破するには、別の物理に基づいたフィルター開発が必須である。

我々のグループでは 2006 年度より干渉膜多層コーティングとは原理が全く異なる「メタルメッシュフィルター」の開発研究を進めてきた。メタルメッシュフィルターとは金属格子の光干渉や金属表面プラズモン・ポラリトン効果を用いて選択的な波長透過特性を実現したものである。第一世代メッシュフィルターとして、金厚膜（厚さ約 2 ミクロン）で自立するメッシュフィルターの設計・製作を行った。単波長側のリークを実用レベルまで抑えるため、膜は 1mm 程度話して非平行に 4 枚重ねて利用することとした。結果、31μm、37μm に透過ピークをもつ R∼10 程度のフィルターを作ることに成功した。４枚を重ねた透過率（ピーク値）は各々80%、55%と良好な性能を有している。このフィルターは miniTAO 用中間赤外線カメラ MAX38 に搭載し、観測に使用している。

このように自立金膜によるメッシュフィルターは良好な性能を達成しているが、膜自身の強度が弱く、大型化が難しいという問題があった。そこで現在は第二世代の

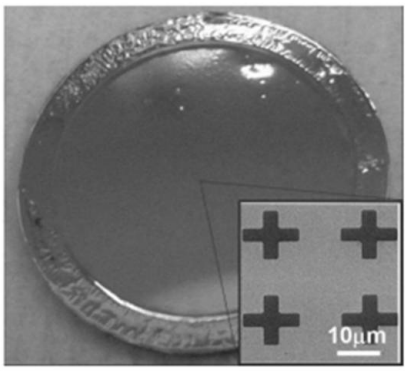

図 12: 30μm 用メッシュフィルター（金膜自立型）の写真

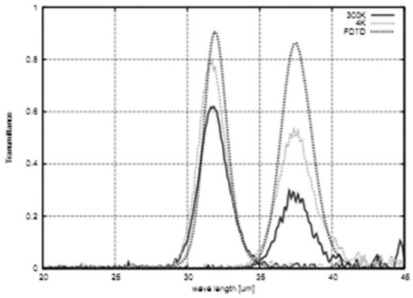

図 13: 30μm 用メッシュフィルター（金膜自立型）の透過率特性。４枚重ねでの性能

メッシュフィルターとして高強度のフィルター開発に取り組んでいる。例えば SiC あるいは SiN メンブレンによって格子構造を構成し、その表面に金を付着させたフィルターは、金膜よりも強度を向上させながら、金膜フィルターと同様の波長透過特性を示すことが明らかとなっている。このようなフィルターは MIMIZUKU のみならず SPICA や TMT など将来の大型装置でも不可欠なものであり、開発を続けていきたいと考える。

モスアイ

シリコンは長波長まで吸収がほどんとなく、また加工性にも優れているので、中間赤外線波長で透過光学部品を製作するのにもっとも有望な材料である。しかしながらシリコンは屈折率が高く (3.42)、反射ロスが非常に大きい。例えば平行平板を透過するとその反射量は 46%にも達する。微小な光を捕えるためには、反射防止を実現す

ることが必須となる。しかしながら前節でも述べた通りこの波長で干渉膜を実現するのは技術的に非常に難しい。

これに代わる反射防止技術として我々はモスアイとよばれる構造の開発を進めている。モスアイは波長の半分程度の突起を表面に構成することで屈折率の階段的変化を無くし、反射を抑える技術である。モスアイは可視光など短波長の光に対しては実用化が進んでいるが、我々がターゲットとする 30μm 帯用としては高さが高い突起が必要であり、新規開発を行わねばならない。

我々は 2009 年から中間赤外線用モスアイの開発を行っている。2011 年までの研究で平面上にモスアイを構成する方法を確立、実際に一面あたりの反射率を 2%程度まで減らすことにも成功している。また電磁界シミュレーションによって反射が残ってしまう原因についても明らかにした。さらに平面ではなく曲面あるいは階段面にモスアイを構成する方法についても検討、試作が進んでいる。

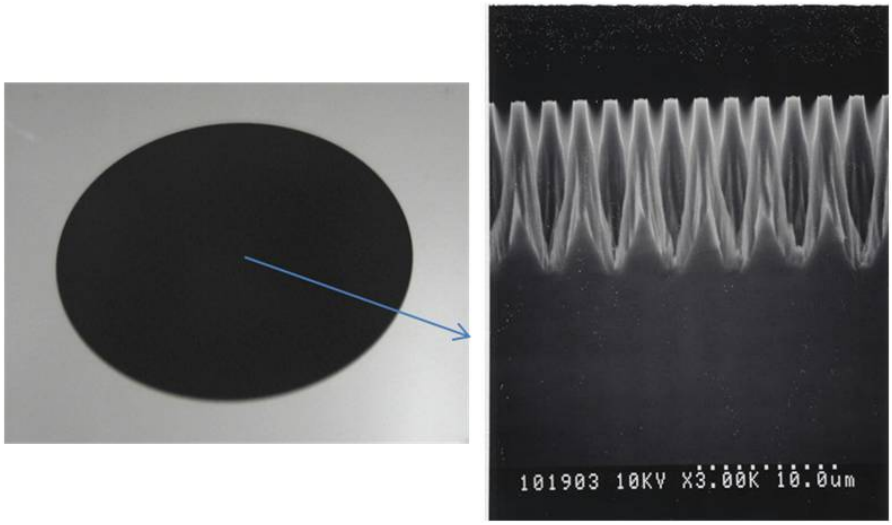

図 14: 30μ に対応したモスアイの写真

30μm 帯におけるモスアイ技術が確立すれば、MIMIZUKU 光学系のうち MIR-L チャンネルの一部をモスアイ付レンズを用いた透過光学系に交換することも可能である。透過光学系は現在の反射系による設計よりも視野が広く取れるので、MIR-L チャンネルを 1024x1024 アレイに変更する際に威力を発揮する。また、階段面にモスアイを作ることができれば、モスアイ付のグリズムも実現できる。このような高効率のシリコングリズムは 30μm 帯のみならず、20μm 帯観測でも非常に有用なものである。このほかにもモスアイは非常に広い波長でのアプリケーションが考えうる技術であり、

今後も開発を進めていきたい。