



## 第3章 測定機 & 観測装置

### Measuring-Machine & Instrument

写真乾板関連機器の変遷  
大型写真乾板測定機  
観測装置の変遷

- 『木曾観測所の超増感』 青木 勉
- 『乾板から CCD へ』 高遠 徳尚
- 『世界初のシュミット望遠鏡用  
グリズムの開発』 谷口 義明
- 『モザイク CCD 開発』 柏川 伸成
- 『KONIC 開発顛末記』 柳澤 顕史

# 匠

**馬頭星雲：** オリオン座三つ星の左端の輝星アルニタク（上中）から南（下）に細く伸びる散光星雲 IC434 の中ほど左から真っ黒な影がせりだしているが、これが有名な馬頭星雲である。IC434 は星間ガス雲が光っている散光星雲であるが、同じガス雲の端がめくれ込んで、散光星雲の光をさえぎり、そのシルエットが馬の頭の形に見えるため、馬頭星雲と呼ばれている。アルニタクの東（左）には、今でも星が生まれている散光星雲 NGC2024 がある。

撮影日：1989年1月12日、撮影番号：K6069、乳剤：コニカ SR1600、フィルター：なし、現像：ハイコンII 6分

# 写真乾板関連機器の変遷

シュミット望遠鏡は、大型写真乾板の使用を前提に設計されている。撮影された乾板は、現像処理を行わないと画像として得ることはできない。そして、現像処理を行い画像として見ることのできる乾板となっても、そのままでは単なる見えるアーカイブ媒体にしかならず、必要な物理データを得るためには測定機にかけなければならない。このように写真乾板はデータ化するまでに多くの手順が必要である。

木曾観測所では、当初より、乾板の検出器としての性能向上を図るため、超増感処理や現像処理の手法の開発、各種研究に必要な物理データを得るための測定機の開発を行ってきた。天体の位置を知るには、天体の XY 座標を正確に測る必要があり、また、天体の明るさを知るには天体の黒みの濃度を精密に測る必要がある。そして、そのデータを計算機に取り込み、計算処理で天体情報を導く。このため、観測所の測定機は全て、計算機取り込み可能な媒体を付属装置としてもっていた。

木曾観測所は 1978 年より全国共同利用に供したが、撮影済乾板は観測所の所有とし、保管・管理を観測所が行った。これは、14 吋ある写真乾板を測る測定機をそれぞれの機関が設置することは困難であることと、視野の広い写真乾板には膨大なデータが含まれており他課題の研究にも十分活用できることから専有期間を設け、撮影乾板の共同利用を行った。また、乾板はガラスベースできており、破損し易いことから、軽微な使用やバックアップ用にフィルムコピーの作成を行える装置も設置した。

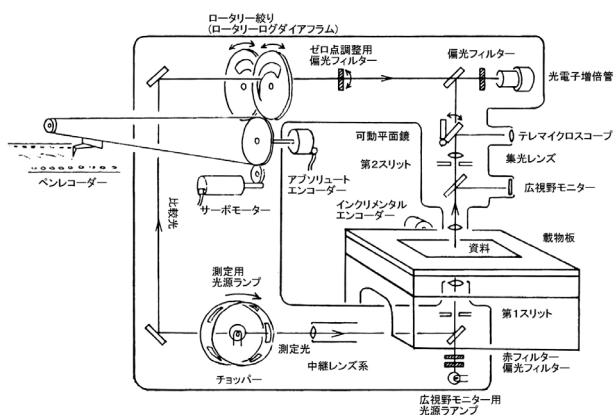
以下に写真乾板に関わる測定機及び処理装置の主なものの変遷を紹介する。



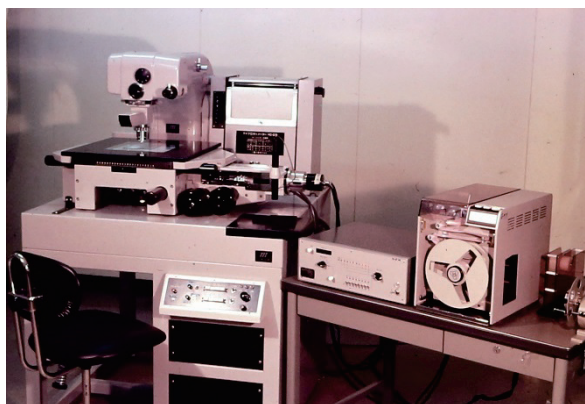
写真乾板関連機器の変遷

# 大型写真乾板測定機

シュミット望遠鏡の建設された当時の観測は、全て写真乾板を用いて行われた。天体同定など眼視による検出ですむ場合はよいが、定量的な解析用途では、計算機処理を必要とするため、計算機に取り込み可能なインターフェースを備えた測定機が不可欠であった。木曾観測所では、設立当初から磁気テープや紙テープ等へデータ記録できる各種測定機が設置されていた。時代とともに検出器も写真乾板から CCD 等の電子素子に移り変わり、使われなくなった測定機も多いが、木曾観測所の歴史を語るとき、大型写真乾板用の測定機を記しておく事は重要である。主要な測定機を以下に紹介する。



構造図



システム全景：左がマイクロフォトメータ本体。続いて右がデジタルユニット。一番右が紙テープパンチャー、最高3600字/分。

## 1. マイクロフォトメータ (1973年)

写真乾板は天体からの光を濃度として記録する。このため、写真乾板の濃度を正確に測定することで天体からの光の強さや分布を知ることができる。この測定機は、設定範囲をラスタースキャンすることができ、濃度値をペンレコーダ（アナログ）で記録するとともに、ペンレコーダに接続するエンコーダの数値（デジタル）を、バイナリーデータとして紙テープに記録できる。星のスペクトルスキャンだけでなく、銀河の光度分布測定にも盛んに使われた。

### マイクロフォトメータ仕様

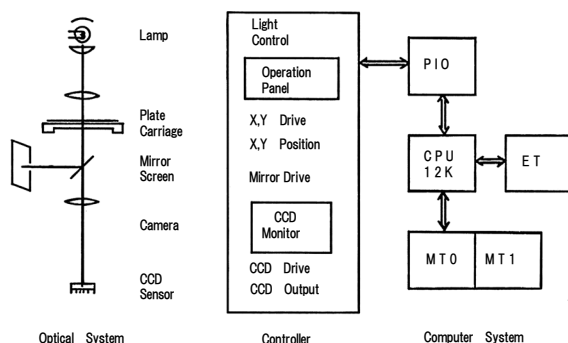
載物台サイズ:	50cm x 50cm		
測定範囲:	23cm x 23cm		
載物台駆動速度:	X 軸: 1.25、2.5、10、20mm/分 戻り速度 150mm/分 Y 軸: 0.05、0.1、0.2、0.4mm/分		
載物台読取:	インクリメンタル・エンコーダ 2μm		
スクリーンサイズ:	30mm 角		
光源:	10V 70W 角形フィラメント沃素電球		
検出器:	フォトマル(光電子増倍管)		
チョッパーサイクル:	525Hz		
第1スリット:	XY 0-2mm 両開き		
第2スリット:	XY 0-4mm 4枚独立		
最大測定濃度:	2.5D (2.0D ND Filter 挿入で 4.5D)		
アナログ出力:	ペンレコーダ出力 12.5, 25, 50, 100, 400mm/分		
デジタル出力:	紙テープ出力 10ビットエンコーダ出力を選択8ビット		
フルスケール	1	1/2	1/4
フルスケール黒み	2.88	1.44	0.72
最小読取黒み	0.0112	0.0056	0.0028
データ読取間隔:	1, 2, 5, 10, 20, 40 μm		
製作:	機械系: 三鷹光器 電子系: 新電子工業		

## 2. アイソフォトメータ (1977 年)

マイクロフォトメータ同様の乾板濃度測定機である。違いは、マイクロフォトメータは点で測定するのに対して、この測定機は乾板面を約 1cm 幅で測定する。付属の処理計算機により測りながら乾板上の天体の位置、明るさ、星と銀河の区別をリアルタイム処理する KIDS (Kiso Image Detection System) で乾板全面を約 30 分でスキャンする画期的な高速測定機であった。検出器は 1728 画素の一次元の CCD を用いている。濃度分解能は 10bit である。

アイソフォトメータ 仕様

載物台:	36cm x 36cm		
載物台読取:	2 $\mu$ m リニア・エンコーダ		
光源:	100V 650W ハロゲンランプ		
検出器:	1ライン CCD, 1728 画素, 13 $\mu$ m/画素 Fairchild 社 CCD121H		
載物台駆動速度:	Quick	Slow	(mm/分)
X 軸:	600	100-300	16, 32, 48,
Y 軸:	600	100-300	96
カメラ部倍率:	1倍	1/3 倍	
測定最高速度:	10kHz		
記録媒体:	2400 フィート磁気テープ		
製作:	機械系: 三鷹光器 電気系: 新電子工業		

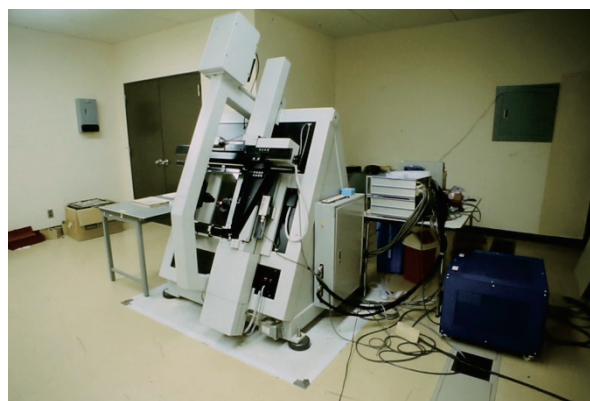
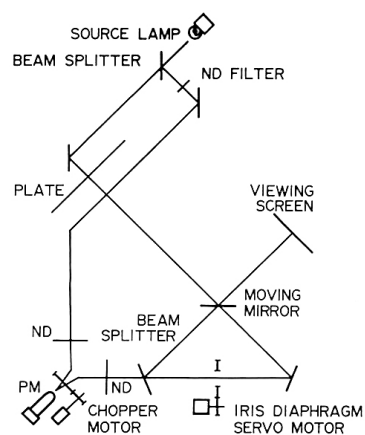


## 3. アイリスフォトメータ (1977 年)

星の光度等級を乾板上で求めるには、先ず星像直径を測定して、明るさの順番を知り、次にそれらの星像直径を光度等級に引き直すという手続きを経る。この測定機は、星の直径に相当する大きさを測ることができる。測定の際、光度等級が既知の星を含めて測ることで、内挿で未知星の光度等級を求めることができる。

アイリスフォトメータ 仕様

載物台:	36cm x 36cm		
載物台読取:	1 $\mu$ m リニア・エンコーダ		
駆動速度:	Quick	Slow	Fine (mm/秒)
X,Y 軸 共通:	10	1	リバーシブルモータと 偏心カム
光源:	AC10V 70W 角形フィラメント沃素電球		
検出器:	光電子増倍管 EMI 6256 B		
スクリーン倍率:	15cm 角		
スクリーン倍率:	10 倍 (FIELD)	30 倍 (IRIS)	測定時
記録媒体:	紙テープ		
製作:	機械系: 三鷹光器、池上電子、沖電気 電気系: 新電子工業		



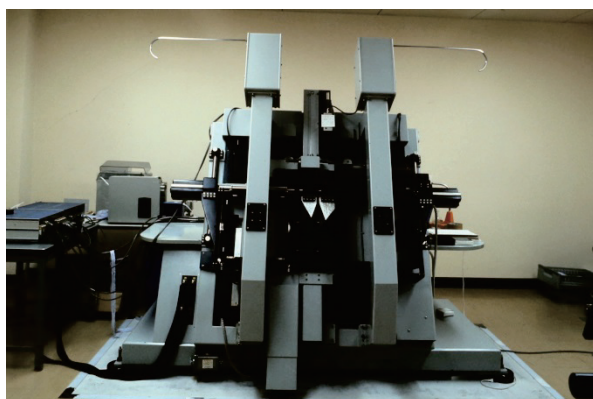
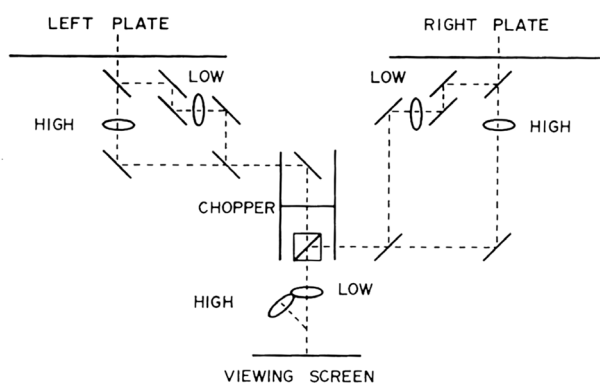


#### 4. ブリンクコンパレータ (1977年)

同じ天域を撮影した2枚の写真乾板の像を1つのスクリーンに交互に映す構造になっており、移動したり変光したりする天体の検出に威力を発揮する。2枚の乾板の視野ズレを、右載物台が微小回転、左が微小XY移動で合致させることができる。また、天体の位置を1μm精度で測定することもできる。彗星、小惑星、新星等の探査や位置測定に用いられた。

ブリンクコンパレータ 仕様

載物台:	36cm x 36cm		
載物台読取:	1μm リニア・エンコーダ		
載物台駆動速度:	Quick	Slow	(mm/分)
X 軸:	10	1	16, 32, 48, 96
Y 軸:	10	1	
右載物台:	±2° θ 回転		
左載物台:	±5mm xy 移動		
光源:	10V, 70W 角形フィラメント沃素電球		
スクリーンサイズ:	15cm 角		
カメラ部倍率:	1倍	1/3倍	
投影倍率:	L:7倍	H:35倍	
記録媒体:	紙テープ		
製作:	機械系: 三鷹光器	電気系: 新電子工業	

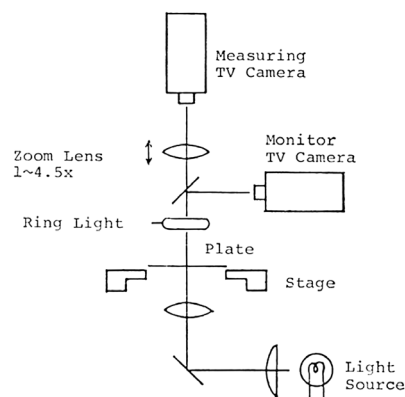


#### 5. TV式座標測定機 (1984年)

天体の位置を精密に求めるには、乾板上で、目的天体と位置標準星のXY座標をミクロン精度で精密に測り、計算機を用いて赤経、赤緯に変換する。この測定機はTVカメラで天体画像を取込み、画像処理により天体の重心位置を測定するものである。このため、天体の精密位置測定が個人誤差なく素早くできる。

TV式座標測定器 仕様

載物台:	40cm x 40cm			
載物台読取:	1μm リニア・エンコーダ			
載物台:	36cm x 36cm			
載物台読取:	1μm			
駆動速度:	Q	S1	S2	F(mm/秒)
X, Y 軸:	10	4	2	0.5
計測用TVカメラ:	C1000-01 浜松ホトニクス社			
輝度分解能:	8bit(1/256)			
位置分解能:	512 x 512			
位置計測装置:	輝度と座標から重心位置を求める			
製作:	機械系: 三鷹光器	電気系: 浜松ホトニクス		

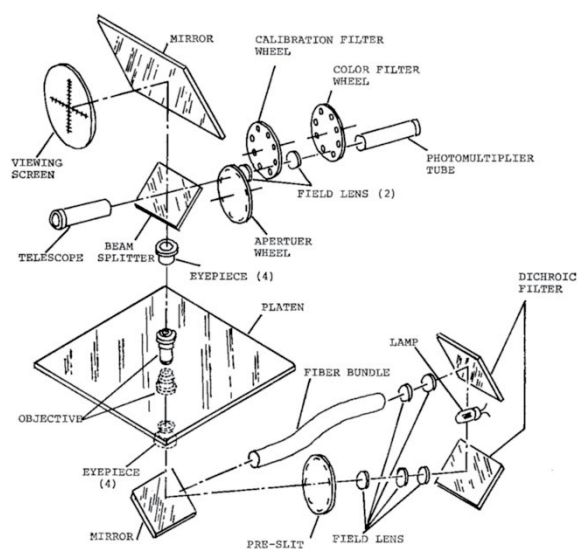


## 6. PDS マイクロデンシトメータ (1985年)

写真乾板の濃度を精密に測定する装置である。内蔵のマイクロプロセッサとパソコンを用いて、さまざまな方式の自動測定を行わせることができる。高い安定性を保証するため、架台は大理石でできており、総重量は 2 トンである。銀河データベースの作成のために導入されたが、アイソフォトメータの後継機として広く活用された。

### PDS マイクロデンシトメータ 仕様

型式:	2020 GMS (Perkin-Elmer 社製)
載物台:	50cm x 50cm
載物台読取:	1 $\mu$ m
載物台駆動速度: X, Y 軸:	0 ~ 200mm/sec
測定最高濃度:	5.0D
濃度分解能:	0.001D(12bit)
光源:	12V 150W タングステン電球
検出器:	光電子増倍管(浜松 R268)
濃度直線性:	$\pm 0.02D$
濃度安定性:	$\pm 0.02D$
最大サンプルレート:	50,000 data/sec
データ・バッファ:	15,200
記録媒体:	2400 フィート磁気テープ



光学系構成図



PDS システム全景



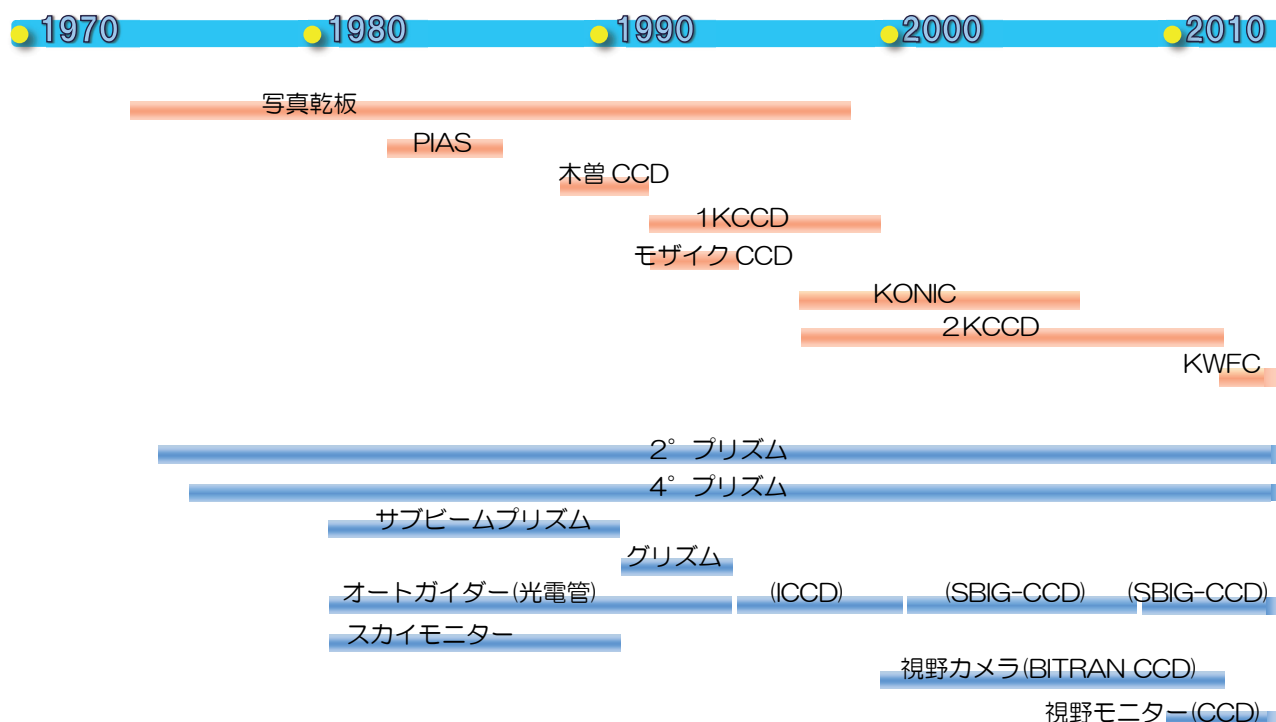
乾板の回転調整を行えるように改造した載物台(三鷹光器製)

## 観測装置の変遷

今や天体撮像の検出器といえば、CCD、CMOSをはじめとする半導体検出器であるが、木曾観測所が建設された時代はまだ写真乾板の時代であった。シュミット望遠鏡は大型の写真乾板を使って広い視野を撮影することを前提として設計された望遠鏡である。このため写真乾板が製造中止となる1990年代末まで写真乾板を使い続けた望遠鏡でもある。

写真乾板の製造の種類が次第に少なくなっていく1990年代前半より、1/2インチサイズのCCD（電荷結合素子）を用いたカメラの開発を行なってきた。このため、写真乾板の製造が中止されても大きな動揺もなく、固体撮像素子を用いたデジタルカメラでそれまで通り全国共同利用に供してきた。

固体撮像素子は写真乾板に比べ圧倒的に感度が高く、直線性も非常に良く、より遠くの暗い天体を観測したい天文学者の支持を集め、全国的に普及していった。ただ唯一欠点といえるのが、シュミットで用いるには検出器サイズがあまりにも小さいことであった。その後、検出器を複数並べるモザイクカメラの開発が始まり、湾曲するシュミット焦点に沿わせて正確にCCDを配置する技術や素子の並列駆動、高速読み出し等の手法が開発され、それらの技術がスローン・デジタル・サーベイやすばるの主焦点カメラへと受け継がれていったのは承知の通りである。このように広視野撮像装置分野で木曾シュミットが果たした役割は世界的にも大きい。このような役割を果たせたのは、シュミットの広い視野と木曾の暗い夜空が大きな要因であろう。以下に40年間の装置の変遷を紹介する。

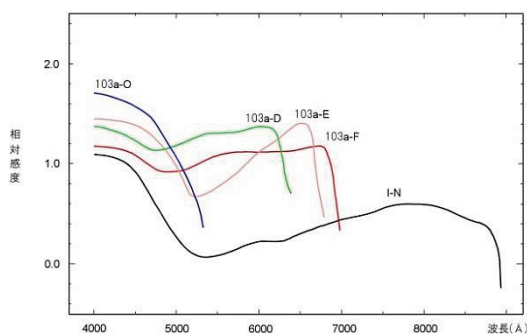


観測装置の変遷

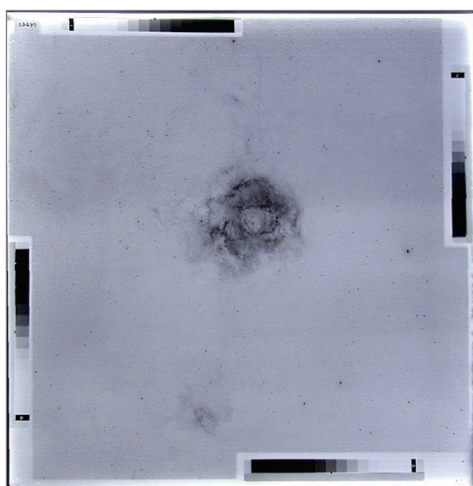


## 1. 写真乾板 (1974年)

木曾シュミット望遠鏡ができた時代、天体検出器としては写真乾板が唯一であった。サイズは 14 吋角、ガラスベースの 1mm 厚で、コダック社製のものが使われた。コダック社では天体観測に使われる各波長域に合わせた分光写真乾板を各種製造していた。乾板は波長感度域、粒状性により型番が付けられている。103a シリーズが最初の製造種で、その後、I からIVへと粒状性が細かくなった。また、型番の最後の文字が波長域を表す(表及び図参照)。粒状性が細かくなると分解能が上がるが、その分感度が低下する傾向があった。大半の観測波長域は、長波長側を乾板感度の減衰域で、短波長側をフィルターの透過域でカットして得ていた。1999 年までに 7039 枚が撮影された。



写真乾板波長感度特性図：代表的な写真乾板の波長感度特性を示す。



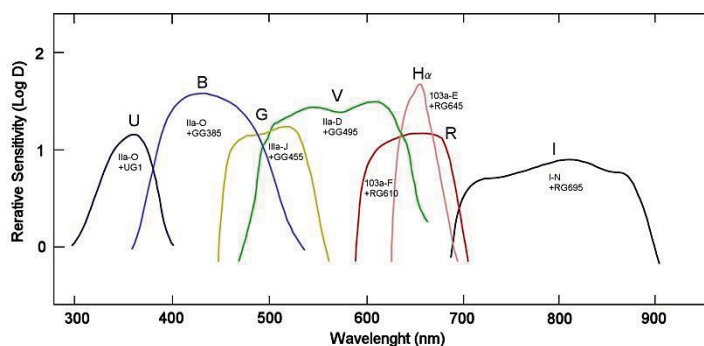
写真乾板及びホルダー：上の写真は撮影後、現像処理がされ、天体像として見られる様になった乾板である。乾板の撮影にあたっては、14kgあるホルダー(右写真)に入れ、望遠鏡に装填する。

乾板名 実効波長感度域 (Å)

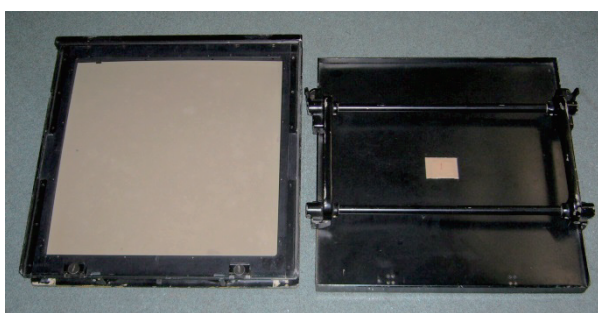
103a-O	2500 - 5000
103a-D	4500 - 6200
103a-E	5500 - 6500
103a-F	4500 - 6800
I-N	6700 - 8800
I-Z	8800 - 11500
II a-O	2500 - 5000
II a-D	4500 - 6200
II a-F	4500 - 6800
III a-J	4500 - 5500
IV-N	6700 - 8800

フィルター名 透過波長 (Å) 最大透過率 (%)

UG1	3100 - 3900	77
GG385	3850 - 27000	91
GG455	4550 - 27000	91
GG495	4950 - 27000	91
BPB50	4880 - 5300	57
RG610	6100 - 27000	91
RG645	6450 - 27000	91
RG695	6950 - 27000	100



乾板とフィルターの組み合わせ：天体観測で用いられる各波長域は、上図のような乾板とフィルターの組み合わせで得た。



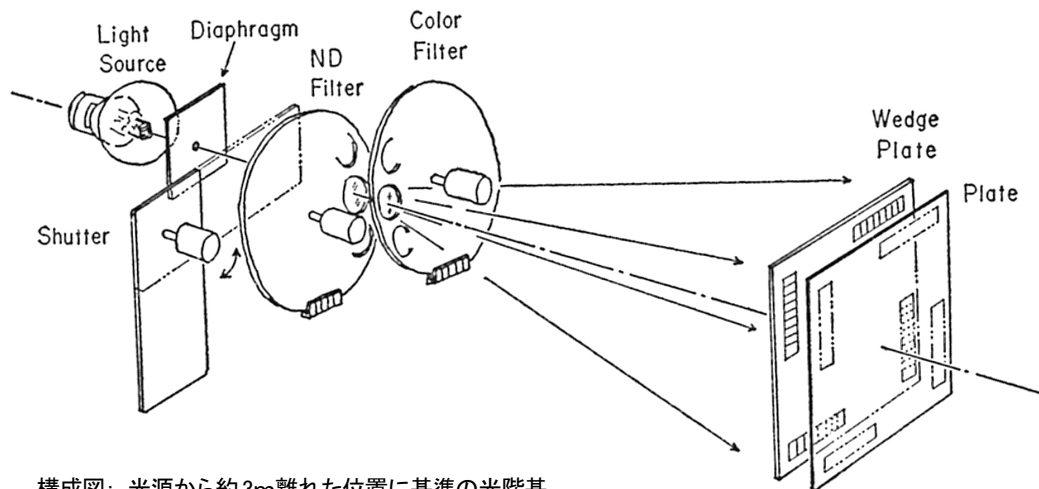


## 2. 大型写真乾板標準光階焼込装置 (1981年)

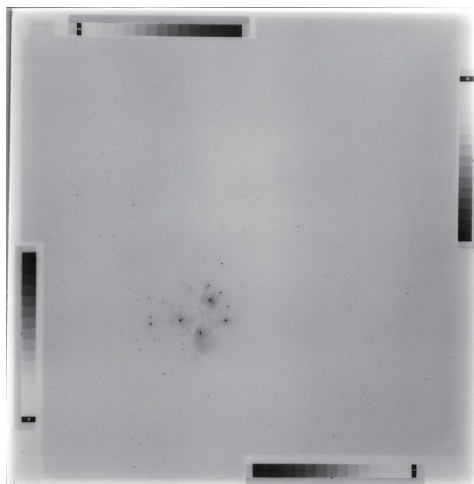
写真乾板の濃度（黒み）と天体から入射した光量の関係は乾板乳剤、露出時間、現像処理等で変化する。このため露出済の写真乾板の四隅に同じ色帯域、露出時間で光量比のわかっている光階を焼付けて現像を行うことで、光度と濃度の関係を導く。下の写真は標準光階が焼込まれた写真乾板と焼込み装置である。機械部分をメーカーに外注し、リモートコントローラを所員が製作した。乾板濃度から光度への変換は、マイクロフォトメータやPDSを始めとする濃度測定機で、天体と合わせて四隅の光階を測り、計算機の処理で行われる。

大型写真乾板標準光階焼込装置 仕様

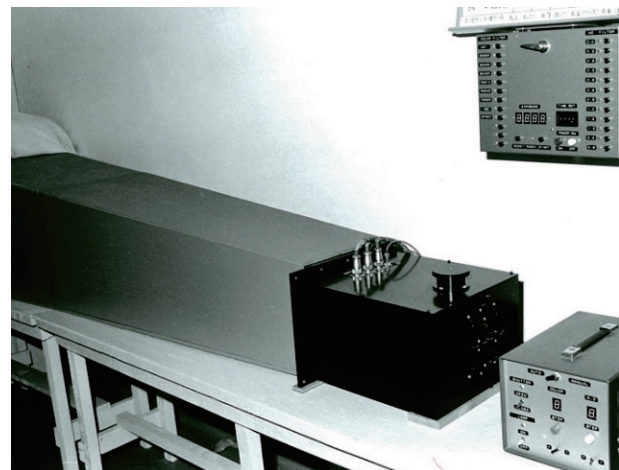
光階サイズ	10mm x 150mm 4種
光階ステップ数	15 (濃度 約 0.3D ステップ)
カラーフィルター数	12枚
NDフィルター数	12枚
スクリーンサイズ	36mm 角
露出時間	最大 9999 秒
光源	10V 70W 沃素電球
機械部製作	三鷹光器(株)



構成図：光源から約3m離れた位置に標準の光階基板を置き、それに乾板を密着させて露光する



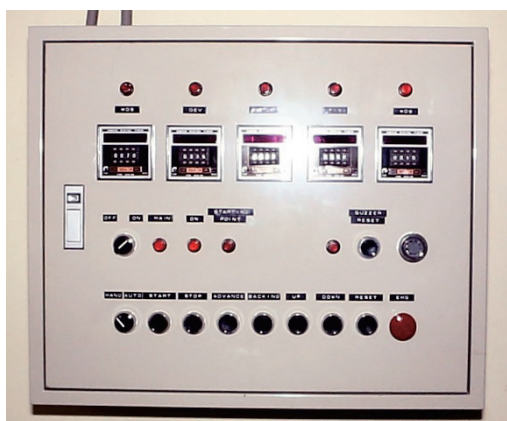
光階を焼込んだ乾板：四隅にあるのが焼き込まれたステップ状の光階である



装置全体写真：中央(黒い箱)が機械部で、右側上下がコントローラである

### 3. 大型写真乾板自動現像機（1983年）

105cm シュミット望遠鏡の撮影に用いる写真乾板は 14-inch（約 36cm）角で、厚さは 1mm と薄いため、取り扱いには細心の注意が必要である。当初、現像処理は全て手作業で行ったが、大型乾板であるため最適な現像を行うには、十分な熟練を要した。そこで、1983年に、手作業の軽減と乾板の均質化を目的としてガス攪拌型の自動現像機を製作した。現像処理で最も重要なことは現像液の攪拌である。均質な攪拌を行うため、ガスは直径 2cm 長さ 36cm のパイプに 8mm 間隔で直径 0.3mm の穴を開けたものを使用し、10 秒間隔で 1 秒間ガスを噴射するよう調整した。現像液の攪拌には酸化を抑えるために窒素ガスを、その他は圧縮空気をを用いた。

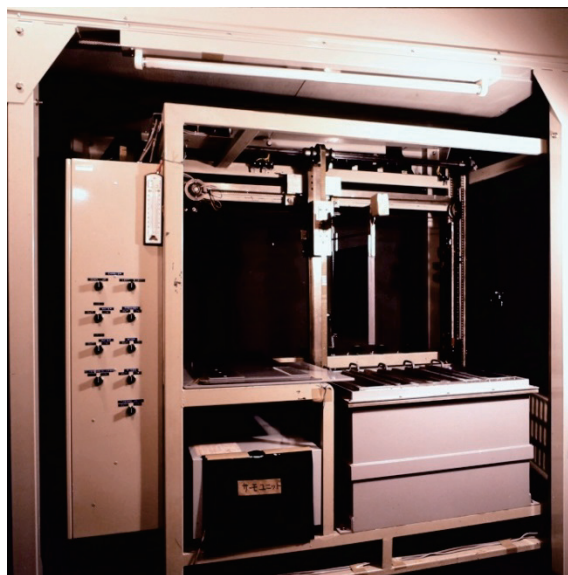


#### コントロール・パネル:

現像機全般の操作・設定を行う制御盤で、現像中の乾板に影響がないよう、暗室の前室に置かれている。上部にある5個のタイマーで、各槽の処理時間を設定することができる。

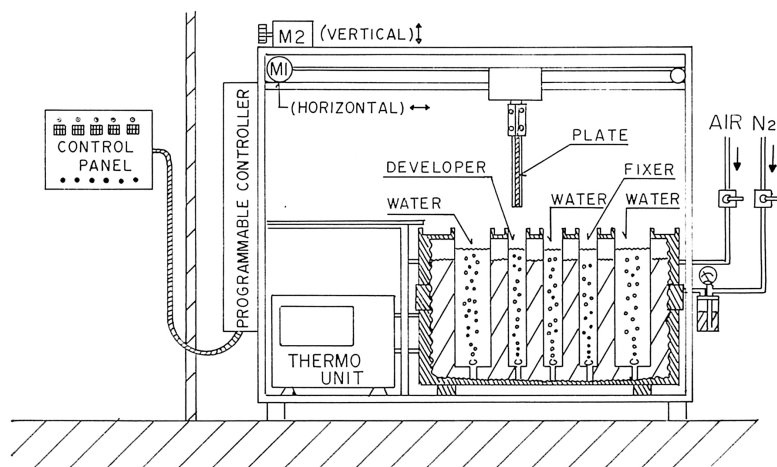
#### 自動現像機の仕様

浴槽数	5
現像槽の容量	8ℓ
処理時間設定範囲	0.1 - 999.9 秒
泡出し時間	1 秒
泡出し間隔時間	9 秒
槽の移動時間	6 秒
温度設定 (恒温槽により全槽一括)	20℃



#### 自動現像機本体:

自動現像機はプログラマブル・コントローラによって制御される。現像は乾板の入った現像枠をハンガーに掛けると、その後は左の槽から順番に薬液に浸しながら現像処理を進めて移動するようになっている。



#### 自動現像機の構造図:

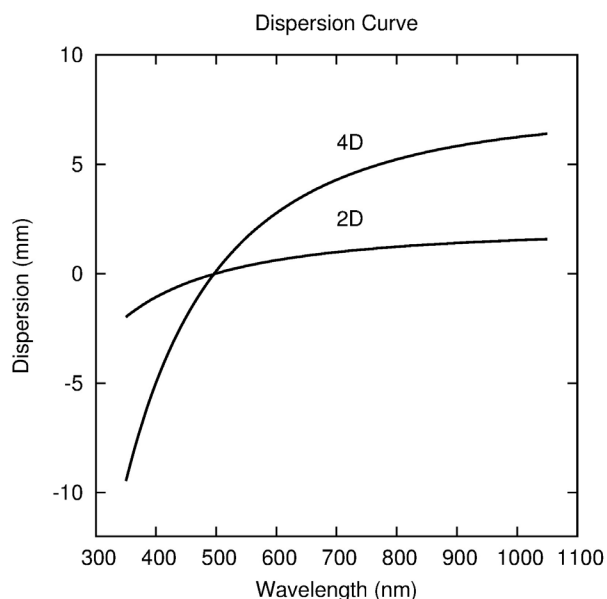
自動現像機は、図に示すようにコントロール・パネル、プログラマブル・コントローラ、現像液などを 20℃に保つ温度制御装置、写真乾板を上下左右に移動させることができるハンガー、現像液や定着液などを入れる薬液槽(計5槽)、薬液を攪拌するための窒素ガス(現像槽用)と圧縮空気を供給するガス配管などから構成されている。

#### 4. 対物プリズム (1975年)

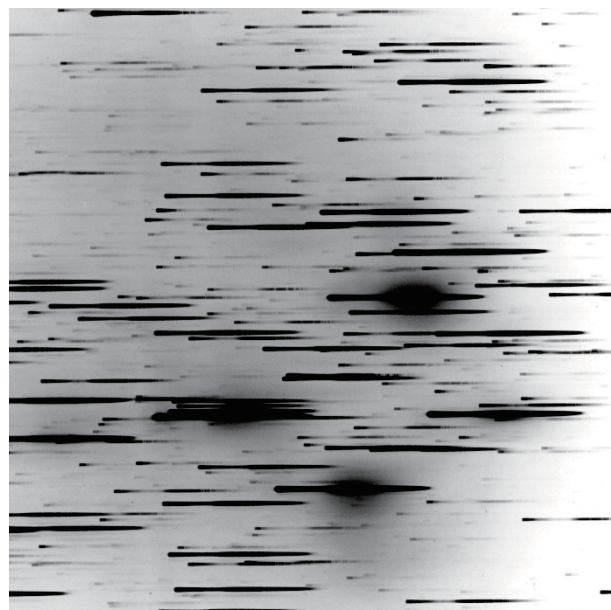
対物プリズムはシュミット望遠鏡先端に取り付ける。天体からの光に分散をかけ、焦点面の星像全てをスペクトル像とするものである。スリット分光と異なり、細かなライン分析はできないが、一度に多くの天体のスペクトルが得られるため、特徴的なライン使ったサーベイ観測に用いられた。プリズムは、近接する星のスペクトルの重りをさけるため、分散方向を90° 毎に変えられる回転リングに取り付ける。総重量は金枠を含め約 400kg あるため、ドーム付属のクレーンを使って交換作業を行う。



**プリズム装填作業:** 総重量約 400kg のプリズムユニットは、ドーム付属のクレーンで吊り上げ、補正板手前のプリズム回転リングに取り付ける。リングは90° 刻みで回転させることが可能。



対物プリズム仕様	プリズム 1	プリズム 2
頂角	2°	4°
有効口径(mm)	1050	1050
厚み 最小-最大 (mm)	31-70	31-109
材質	BK7	F2
重量(kg)	121	245
ハルトマンコンスタント		
分散と直角方向(x)	0.623	1.409
分散方向(y)	0.586	0.694
屈折率(4358 Å)	1.527	1.642
H $\gamma$ バンドでの分散(Å/mm)	800	170
Aバンドでの分散(Å/mm)	3800	1000



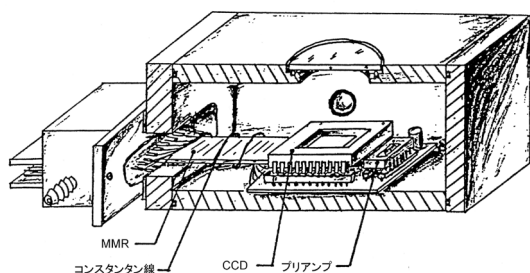
**4° プリズムで撮影したM45:** 4° プリズムとI-N乾板で撮影した「すばる」である。スペクトルは右側が短波長で左が長波長となる。短波長側はラインが十分確認できるが、長波長側は低分散となるため細かなラインの判別は難しくなる。しかし特徴的な、H $\alpha$ 輝線やCN、TiO等の吸収線の判別は可能であるため、Tタウ型星、M型星、炭素星サーベイ等に用いられ、多くのカタログを作成した。

**プリズムの波長分散特性図:** 左は2°と4°プリズムの波長分散を示した図である。図は、横軸が波長、縦軸が分散幅である。縦軸のゼロ点は、H $\beta$ 波長(4861 Å)を基準として描いたものである。短波長側の分散が大きい。



## 5. 木曾 CCD (1989 年)

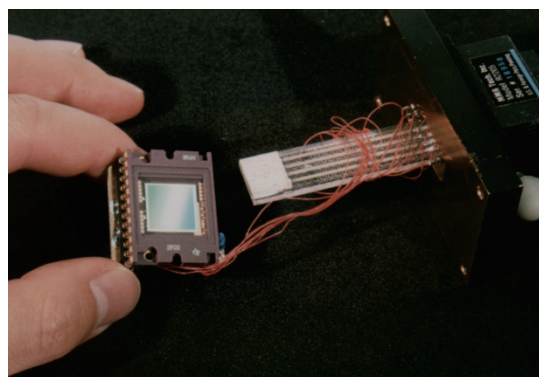
木曾観測所の最初の CCD カメラで、当時大学院生であった高遠徳尚氏を中心として開発された。撮影視野 12.5 分角で、乾板とは比較にならない程狭かったが、感度は乾板の 100 倍にも及ぶため、今まで撮影できなかった天体の観測が可能となった。ドリフト・スキャンを想定し、コンパクトなデューワー設計がされ、冷却器も窒素ガスのみで冷却できる MMR (Micro Miniature Refrigerator) を用いている。また、コントロール PC と望遠鏡側の CCD コントローラ間を光ケーブル 2 本で接続し、ケーブル本数を減らす試みもなされた。



**木曾 CCD の構造図：** 左側が窒素ガス冷却部とエレキコネクタを一体化したユニット。その先端に CCD を密着させて冷却する構造である。

### 装置仕様

検出器	日本 TI TC215 1024 × 1024 pixels
画素サイズ	12 μm × 12 μm
受光面サイズ	12mm × 12mm
画像スケール	0.75 arcsec/pixel
視野	12.5′ × 12.5′
動作温度	~170K
暗電流	≤2.5e <sup>-</sup> /pixel/hour (@170K)
バイアス	3000 ADU
読み出しノイズ	60~70e <sup>-</sup>
変換効率	1.2~1.5e <sup>-</sup> /ADU
量子効率	~62% (6500 Å)
1%の直線性保証範囲	<6.3 × 10 <sup>4</sup> e <sup>-</sup> (<45000ADU)
冷却方式	MMR Joule-Thomson 冷却器
温度コントローラ	MMR 専用コントローラ
カメラコントローラ	TAKATO コントローラ
A/D 変換	BB ADC76KG (16bit 59KHz)



**CCD と冷却器：** 右側、手に持っているのが CCD-TC215 で、中央白い部分が冷却部、ガラス製のフィンガーに CCD 用の信号線が巻かれている。窒素ガス冷却部とエレキコネクタが一体化されている。

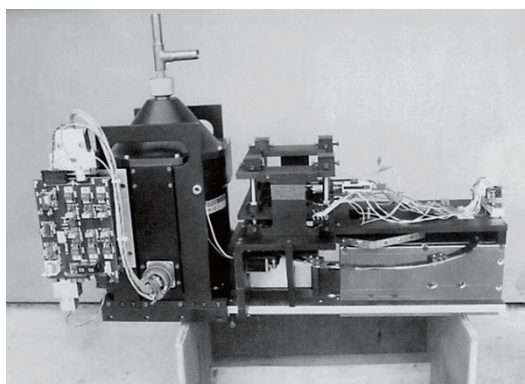


**木曾 CCD デューワー：** 手で挟んでいるのが真空バルブ。デューワー窓上部にシャッター、手との比較でわかるように非常にコンパクトなデューワーである。バルブ等の凸を含めた外寸は 150mm(W) × 130mm(L) × 70mm(H)。

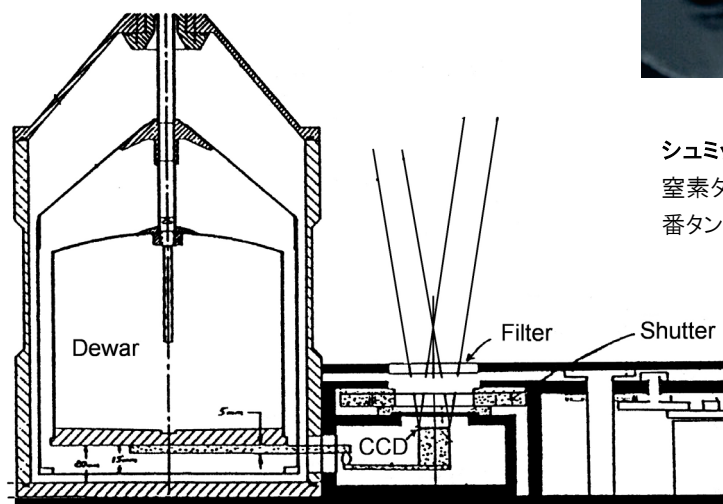


## 6. 1KCCD (1992 年)

観測所開発の CCD カメラ 2 号機である。木曾 CCD と同じ検出器を使い、冷却の安定をはかるよう液体窒素を用いた。CCD コントローラは、国立天文台（当時 東京天文台）の関口真木氏の考案した Messia を用いている。Messia に添付されないシャッター、フィルター、温度コントロールはボードを自作し、Messia 付属の I/O を使ってコントロールを行った。デュワー窓手前にシャッター、その上に 6 枚のフィルターターレットが置かれる（図参照）。オプションで、谷口義明氏考案のグリズムも取り付けられる。



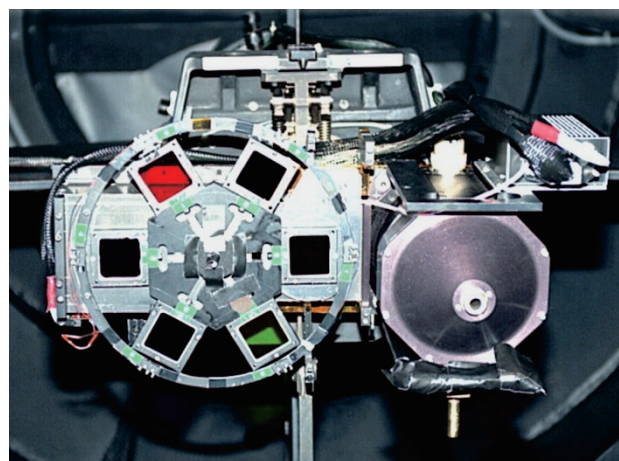
**グリズムユニット装填：** 分光用のグリズムユニットは、フィルターターレットと交換で取り付け。また、ユニットには傾き調整機構が組み込まれている。



**1KCCD の構造図：** 左側が液体窒素タンクで、タンク底よりコールドフィンガーにより受光部の CCD 素子を冷却する。

### 装置仕様

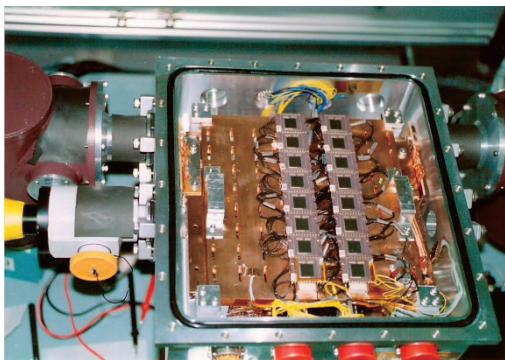
検出器	日本 TI TC215 1024 × 1024 pixels
画素サイズ	12 μm × 12 μm
画像スケール	0.75 arcsec/pixel
動作温度	~170K
視野	12.5' × 12.5'
暗電流	≤2e <sup>-</sup> /hour (@170K)
バイアス	5900 ADU
読み出しノイズ	13e <sup>-</sup>
変換効率	0.88e <sup>-</sup> /ADU
量子効率	~62% (6500 Å)
1%の直線性保証範囲	<3.52 × 10 <sup>4</sup> e <sup>-</sup> (<40000ADU)
標準フィルター	Johnson-Cousins UBVRI 5cm 角
フィルター交換	ターレット式 6 枚
冷却方式	液体窒素
温度コントローラ	自作コントローラ
カメラコントローラ	Messia I
A/D 変換	ANALOGIC ADC40316 (16bit 200KHz)
観測オプション	グリズム装着可能



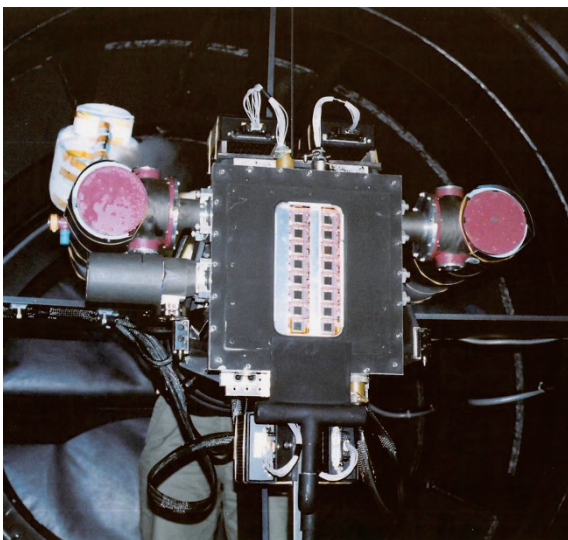
**シュミット焦点に装填した 1KCCD：** 右側が冷却用の液体窒素タンク。左には、6 枚のフィルターターレットがある。一番タンクに近いフィルター下に CCD がある。

## 7. モザイク CCD (1992 年)

CCD は写真乾板に比べ圧倒的な感度の良さでその存在感を確立しつつあったが、当時の技術では大型 CCD の製造が困難であったため、狭い視野での我慢を強いられていた。しかし、小型の CCD を複数並べて広視野化する試みを、東京天文台（現 国立天文台）の関口真木氏を中心とするグループが行った。観測所も開発に協力し、1991 年に 2 個の CCD によるモザイクカメラ、1992 年に 16 個のモザイクカメラとして完成した。この開発によって得られた検出器の正確な配置や高速並列読み出しの技術が、スローンデジタルスカイサーベイやすばるの主焦点カメラに応用された。



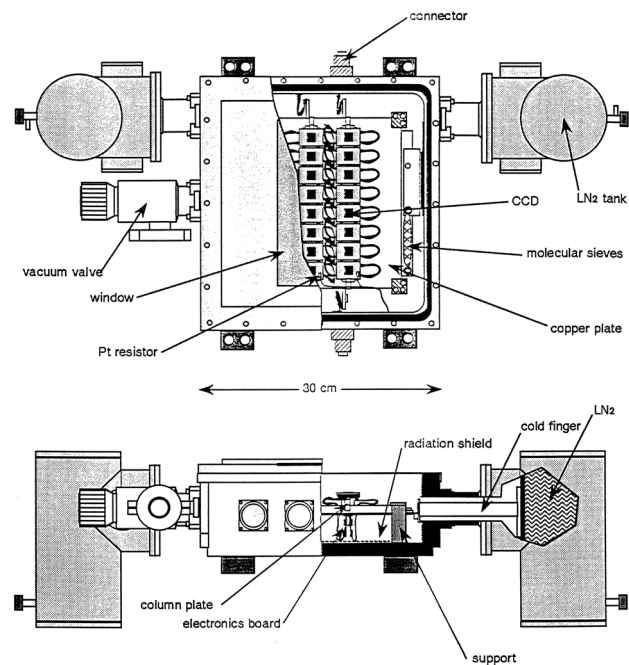
デューア内部：コールドプレート上に 16 個の CCD がシュミット焦点面に沿わせて並べられている。



シュミット焦点へ装填されたモザイク CCD カメラ：写真中央の窓越しに 8 個×2 列、計 16 個の CCD が並んでいる。両脇にある赤い容器は、液体窒素タンクである。

### モザイク CCD 仕様

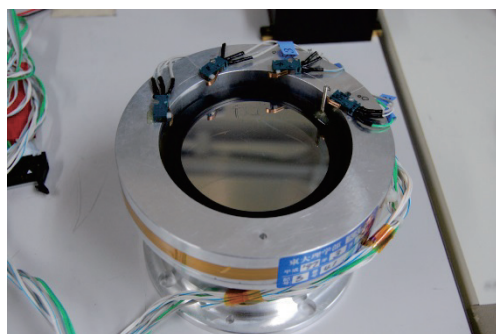
検出器	日本 TI TC215 1024 × 1024 16 個
画素サイズ	12 μm × 12 μm
画像スケール	0.75 arcsec/pixel
CCD 配置精度 (X,Y,Z)	3 μm (10 μm worst)
CCD 配置精度 z	10 μm (40 μm worst)
実効視野	0.42° × 1.70°
動作温度	~170K
暗電流	≤6e <sup>-</sup> /pixel/hour (@170K)
バイアス	~3800 ADU
読み出しノイズ	12~18e <sup>-</sup>
変換効率	1.3e <sup>-</sup> /ADU
量子効率	~62% (6500 Å)
1%の直線性保証範囲	<2.0 × 10 <sup>4</sup> e <sup>-</sup> (<15400ADU)
フィルター	Mould U, B, V, R, I, と SP620
冷却方式	液体窒素
温度コントロール	なし
カメラコントローラ	Messia I (モザイク改良型)



モザイク CCD 構造図：上は正面図、下が側面図である。両脇に液体窒素タンク、左側に真空バルブ、中央に 16 個の CCD が配置される。図では見えないが、16 個の CCD がシュミット焦点の湾曲に沿わせて精密に配置してある。また、大きなデューア窓材は、1mm 厚の強化ガラスが使われた。

## 8. KONIC (1997 年)

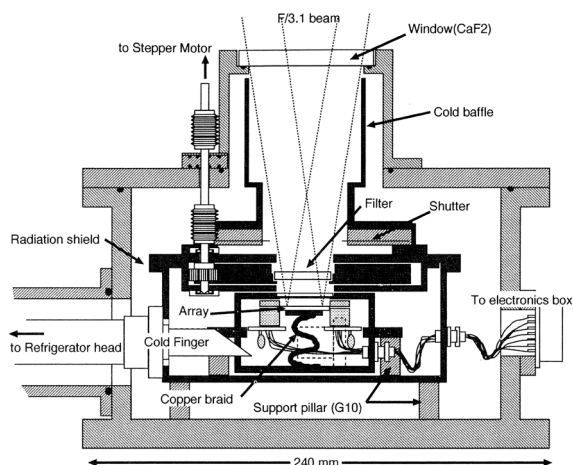
木曾観測所職員であった市川隆氏が中心となって開発した近赤外カメラ、通称 KONIC (Kiso Observatory Near Infra red Camera) である。国内最大サイズの三菱製近赤外アレイを用い、シュミット焦点と相まって、世界最大級の撮影視野 18.4 分角を誇った。近赤外域での空の明るさは変化するため、淡い天体の観測では空を同時に観測できることは大きなメリットである。「乙女座銀河団の赤外線観測によるハッブル定数の研究」や「ミラ型変光星の研究」等に用いられた。



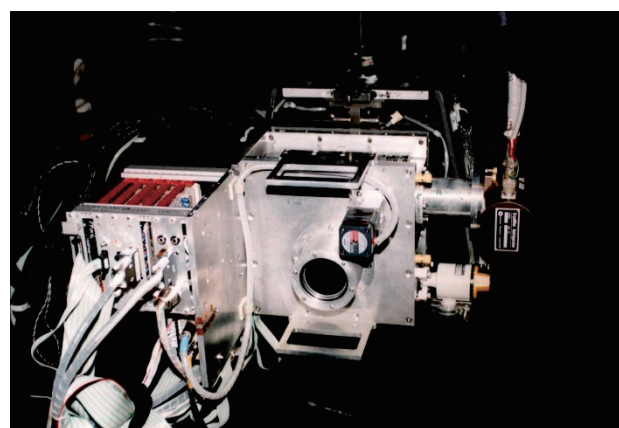
赤外用偏光フィルター：赤外用の偏光フィルターユニット、遠隔で 45 度毎の回転が可能。彗星観測に用いられた。

### 装置仕様

検出器	Mitsubishi 1040 × 1040 PtSi CDS
画素サイズ	17 μm × 17 μm
分解能	1.06 arcsec/pixel
開口率	0.53
動作温度	~60K
暗電流	≤ 12e <sup>-</sup> /sec(@56.5K)
バイアス	4200 ADU
CTIE を無視できる範囲	> 8000 ADU
読み出しノイズ	30e <sup>-</sup>
変換効率	6e <sup>-</sup> /ADU
量子効率	8.0 ± 0.9% @ 1.25 μm 4.5 ± 0.4% @ 1.65 μm 2.0 ± 0.3% @ 2.15 μm
1%の直線性保証範囲	< 3.5 × 10 <sup>5</sup> e <sup>-</sup> (< 60000ADU)
欠陥画素率	< 0.001%
標準フィルター	J, H, K short
冷却方式	冷凍器 (イワタニ・クライオミニ D-105) 1st. stage 5W @ 77K, 2nd. Stage 1W @ 20K
温度コントローラ	Lakeshore model 330
温度安定性	< 0.1K
カメラコントローラ	Messia II (赤外観測用改良型)
A/D 変換	ANALOGIC ADC4344M (16bit 1MHz)
観測オプション	偏光撮像観測も可能



デューワー内構造図：左側の冷凍機は、2ステージ構造となっており、第1ステージ側で黒く塗られ部分を冷却し、外部からの熱流入を防ぐ。その後、第2ステージ目で赤外チップの使用温度の 50K まで冷却する構造となっている。

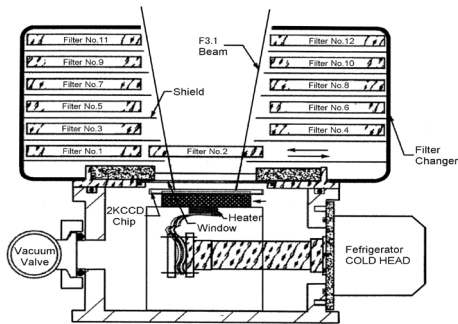


シュミット焦点に装填した KONIC：左からコントロールボード群、中央が本体で、丸く見えるのがデューワー窓。その右上がフィルター交換用のパルスモーターである。デューワー右側面下に真空バルブ、その上が冷凍器である。

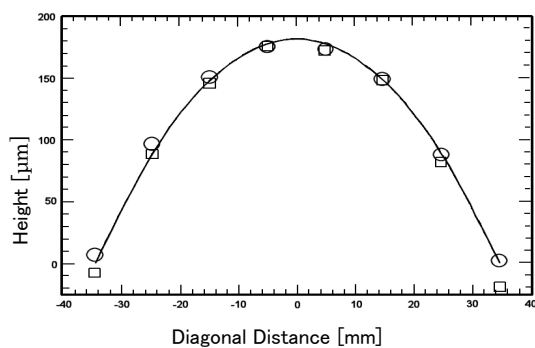


## 9. 2KCCD (1997年)

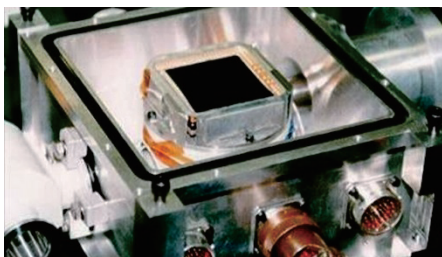
2KCCD は観測所開発の CCD カメラ 3 号機である。1 KCCD の視野 12.5 分角から、50 分角へと約 16 倍に拡大した。検出器は、SITE 製の TK2048E、裏面照射型の 2048×2048 画素の素子である。当時は、高感度化目的で素子表面のシリコン層を薄くするシンニング処理がされたが、均一な表面処理は難しく、光電面に厚みむらができた。しかし、このカメラに用いた CCD の形状測定では、その形状がシュミット焦点形状に見事に一致した。



2KCCD の構造図：上部がフィルター交換ユニットで、左右合わせて 12 枚が装填できる。下部がカメラ部で、上方に CCD チップ、左が真空バルブ、右が He 冷凍器である。



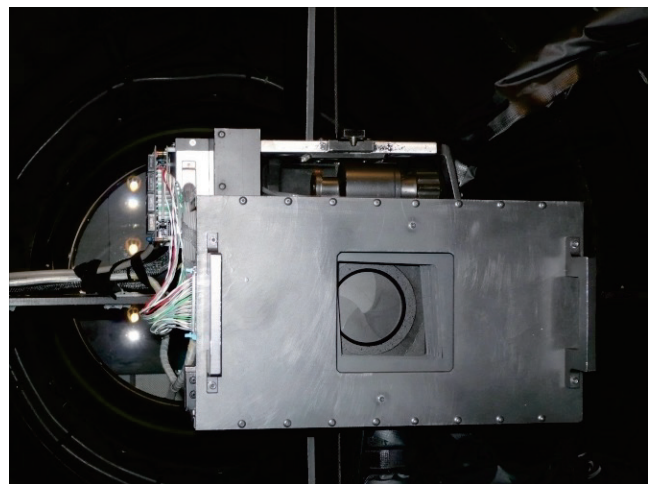
光電面形状測定図：○及び□は、光電面をレーザ変位計で角から対角方向に 2 箇所測った結果。曲線はシュミット焦点面形状であるが、その形状に驚くほどよく一致している。



デュー内部写真：デュー中央にあるのが CCD 素子。左が真空バルブ、右が冷凍器である。

### 装置仕様

検出器	SITe 製 TK2048E 2048 × 2048
画素サイズ	24 μm × 24 μm
受光面サイズ	48mm × 48mm
画素スケール	1.0 arcsec/pixel
視野	50′ × 50′
露出時間制限	5 秒 < 露出時間 < 60 分 (虹彩絞り型シャッター、宇宙船)
動作温度	~170K
暗電流	≤ 1e <sup>-</sup> /hour/pixel (@170K)
バイアス	4300 ADU
読み出しノイズ	40e <sup>-</sup>
変換効率	3.5e <sup>-</sup> /ADU
量子効率	~88% (6000 Å)
1%の直線性保証範囲	< 1.4 × 10 <sup>5</sup> e <sup>-</sup> (< 40000ADU)
データサイズ	FITS 形式 8MB/フレーム
標準フィルター	Johnson-Cousins UBVRI 10cm 角
フィルター交換	水平移動方式 12 枚装着可能
デュー窓材	HOYA-N50(φ 100mm)
シャッター	COPAL 製 φ 80mm
冷凍機	イワタニ S007: 8W@77K 空冷式
温度コントローラ	Lakeshore model 330M
カメラコントローラ	Messia III(1998/4-2000/9)、 MessiaIV(2000/11-2012/3)
A/D 変換	CRYSTAL CS5101A (16bit100KHz)



シュミット焦点に装填した写真：黒い横長の箱がフィルター交換ユニット。中央に見えるのが COPAL 製 φ 80mm のシャッターである。



# 木曾観測所の超増感

～ 観測効率の最大化を目指して ～

青木 勉 (木曾観測所)



1974年の開所以来20年近くに亘り、シュミット望遠鏡の観測には写真乾板が使用されてきた。写真乾板は感度が低いため、そのままでは長い露出時間を必要とすることになる。露出時間が長くなると失敗が生じ易くなり、一晩に観測出来る天体数も減る。このような場合には超増感処理を施し、感度を上げて観測効率を上げることが不可欠となる。

超増感とは露光前に写真乳剤に処理を施して感度を上げることであり、様々な方法がある。木曾観測所で行われてきた超増感は「フォーミングガス・ベーキング法」と「硝酸銀水溶法」の2種類である。以下ではそれぞれの増感法とその効果について紹介する。

フォーミングガス・ベーキング法は1976年にローズマリー・ヒル天文台のSmith、Schott、Leacockらによって提唱された。フォーミングガスは窒素92%、水素8%の混合ガスで、一般に市販されている。ガス増感感度は感度ムラが少ないことが特長で、シュミット望遠鏡で使われる大型写真乾板には特に有効である。また、フォーミングガスは水素のみを使った気浴法に比べて

安全で安価であることなど、利点が多い。木曾観測所でのフォーミングガス・ベーキング法の増感手順は、先ず、乾板を増感箱 (baking box) に入れ密封し、増感箱の空気をフォーミングガスに置換 (吸気間隔は10秒に設定し、15分間実施) する。その後、約60°Cの恒温器の中で乾板を2時間bakeする。その際、増感箱の中には温められた新鮮なフォーミングガスを2分間隔で繰り返し供給するようにしている (写真1参照)。



写真1. Forming Gas 超増感装置

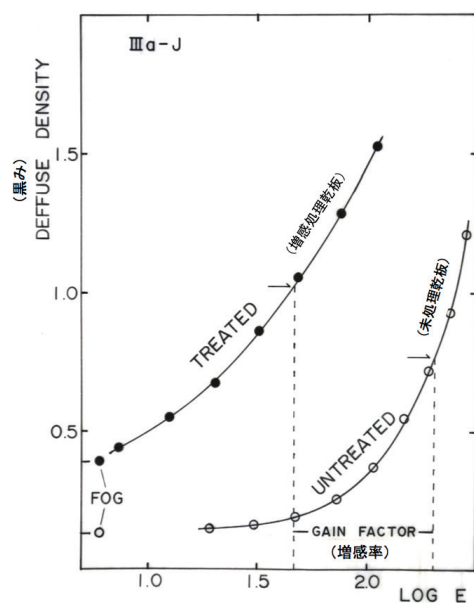


図1. IIIa-J 乾板の Forming Gas 超増感の例

超増感の効果について、IIIa-J 乾板を例にみても、2時間から2.5時間のbakingが最も増感率の高い値を示すことが分かった。(ここで、増感率とは、増感・未処理乾板とも同一乾板・同時露光・同時現像を行って、それぞれの特性曲線を得る (図1参照)。得られた特性曲線のfog densityからdiffuse densityで0.64上の黒みを与えるのに必要な露光量の比を増感率と定義している。) この処理で4倍近くも感度が上がることが分かった。感度が2倍上がると露出時間は半分になるので、観測効率は格段に良くなる。また、超増感処理された乾板は常温で空气中に放置すると、増感率は増感後2~3時間で急激に低下し、fog densityは時間とともに上昇することが実験で確認された。従って、超増感された乾板は極力空気に触れないよう窒素ガスを封入した増感箱に入れ、冷凍庫で保存することが重要になる。

この方法だと数ヶ月は保存が可能である。

次に硝酸銀水浴法について紹介する。この超増感法は古くから知られていたが、1976年に Jenkins、Farnell らによって再び注目されるようになった。この方法は、主に赤外用乾板 (I-N、IV-N) に用いられる。

木曾観測所での硝酸銀水浴法は1万倍に希釈した硝酸銀水溶液が入ったステンレス製のバットに写真乾板を入れ、バットごとロッキング式増感装置 (液の入ったバットを1分間に2回転の早さで回転させながら一定方向に25~30サイクルでロッキングさせ、くまなく溶液を攪拌する装置：写真2参照) に4分間浸す。



写真2. ロッキング式増感装置

次に純水で硝酸銀水溶液を洗い流し、バックリングが無い乾板についてはイソプロピルアルコールに2分間浸し (バックリングのある乾板は水切り剤のドライウエルに浸す) 5~10分程度で乾燥させる。浴増感法の場合、増感時や乾燥時に感度ムラが起きやすく、特にシュミットの大型乾板では場所ムラが目立つようになる。硝酸銀水溶液に浸す時は、乾板の膜面に付着したゴミを乾燥空気等で吹き落とし、液に浸す際には十分に攪拌する。また、乾燥処理を行う時は乾板に残っているアルコールや水滴などを十分に落とすことが肝要であり、乾燥は乾板全面に均質な空気を送りながら乾燥させることが必要となる。因に、バックリングが無い乾板はその後バックリングを刷毛で塗り15分程で乾燥させる。

硝酸銀水浴法で増感した I-N 乾板の保存は窒素ガスを封入した増感箱の中に入れ、-15°C以下の冷凍庫で保存する。しかし、保存の実験から増感後2日から3日後には増感率が2割程下がり、5日から後の変化はそれに比べ非常にゆっくりで、3割程下がったところで横ばい状態となる。一方フォグの値に関しては大きな変化はみられなかった。このことから浴増感した写真乾板はできるだけ早く観測に使用すべきである。

### あとがき

筆者が東京天文台の三鷹勤務から木曾観測所に配置換えになった1974年から、観測所として定常的な運用を始めるための多くの業務 (土木作業から大工さんまで) をこなす立上げ期間が始まった。それから1年以上が経過した頃から、望遠鏡の性能評価に必要なハルトマン板の制作や撮影乾板の測定などを行うようになった。そうした頃、浜島さんや野口さんから写真乾板の超増感の実験を進められた。今思うと、大変好運なお勧めであったと感慨深くなる。私はお陰で1977年のシュミット望遠鏡に関連した観測天文学シンポジウムで「Forming Gasによる超増感について」報告させて頂くことができたし、1978年 (昭和53年) には日本天文学会秋季年会で、「硝酸銀浴法による I-N 乾板の超増感実験」の発表を行うことができた。超増感を行うことで、写真乾板の感度が向上し、観測時間が短縮され観測効率を飛躍的に増大させることができる。そのことは、その後の仕事 (自動現像機の制作、シュミット望遠鏡の制御系の改修、観測装置のソフトウェア開発、MAGNUM 望遠鏡の観測システムの開発など) の種類によらず、「観測効率を高めること」が私の仕事の多くの部分を占め、ほぼ一貫したテーマになったのではないかと思うようになった。最後に、こうした環境に導いて頂いた諸先輩方に感謝を申し上げる次第である。

乾板	フィルター	処理方法	増感率
IIIa-J	GG-455	フォーミングガス、水素 8% Baking(60°C、2時間)	3.8
I-N	RG-695	硝酸銀 (10 <sup>-4</sup> ) 水溶液 ; 浸漬 (15~20°C、3分間)	5.0

表1. 木曾観測所における標準的な超増感処理

# 乾板からCCDへ

## ～ 観測所最初の CCD カメラ開発 ～

高遠 徳尚 (国立天文台 ハワイ観測所)



1987年初夏、大学院に入りたての私に、指導教官であった家正則先生から、「木曾用にCCDカメラを作らないか」と修士での研究テーマを示されたのが、事の始まりでした。もちろん家先生、岡村定矩先生、石田恵一先生をはじめとした先生方が周到にお膳立てして下さっていたのだと思いますが、若造の私はそんなことは想像だにせず、「好きなように作って良い」というありがたいお言葉に飛びついたのでした。

これに先立つ数年前から、岡山天体物理観測所にCCDカメラを導入するプロジェクトが、やはり家先生が中心となって進められており、また1987年5月には、岡山で試験していたCCDカメラを木曾観測所に取り付けての試験も行われました。これらの観測に私も学生アルバイトとしてお手伝い(全く役に立っていませんでしたが)していたので、CCDカメラがどういうものかは、何となく理解していました。それまでの写真乾板や電子撮像管に比べて、CCDは格段に高感度・高安定であることが特徴なので、木曾観測所用のCCDカメラ開発では、「日本で一番暗い星まで写るカメラ」を目標にしました。

初期のCCDは画素間の感度ムラが大きかったため、当時世界最深の画像は、CCDの電荷転送に合わせて望遠鏡を振って、コラム方向のすべての画素を使うことで感度ムラを低減する方式(ドリフト・スキャン、あるいはTDI)で得られたものでした。そこで、その方式をまねて、望遠鏡を振る替りにカメラを動かすことにし、そのためにカメラ自体を小型なものにすることにしました。CCD素子は日本テキサスインスツルメント社製のTC-215と決まっていた。

それからは、想像していた天文学科の学生像とは随分とかけ離れた生活となりました。もともと、小学生の頃に5球スーパーを組み立てたりしていた電気少年だったのですが、一から電子回路を勉強し直して、気が付けば鞆の中には天文関係の本は一冊も

なく、電子回路の本だけが詰まっていた、当時は充実していたトラ技の広告を舐めるように見ていました。ふと「こんなにも天文の勉強をしていなくて良いのか？」と不安になることもありましたが、とにかく毎日が充実していました。

木曾観測所の体制としては、データの計算機への取り込みと制御ソフトは青木勉さん、望遠鏡への取り付けやフィルター交換機構などの機械系は征矢野隆夫さん、樽沢賢一さんが担当して下さることになりました。部品の購入などは秋葉原で伝票買いができるようにして下さるなど、田中さんをはじめとする事務の方々も含めて、木曾観測所全体でサポートして下さっている感じが、そういう方面には鈍感な私にもひしひしと伝わってきました。



ドーム内の制御室でCCDカメラを操作する青木勉氏

望遠鏡焦点のカメラ部と制御室のコントローラーとの通信をどうしようかと困っていた時に、光ファイバーを教えてくれたのも観測所の方からでした。今でこそ光ファイバー通信は至極当然ですが、当時はまだ珍しいものでした。おかげで電気ケーブルの束を長い距離這わすことなく、光ファイバー2本ですっきり高速に繋ぐことが出来ました(本館とドームの間を車で運搬中に、積み方が悪くてファイバーを引きちぎってしまった時には焦りましたが)。



開発の後半は木曾観測所に泊まり込みで作業をすることが多く、ほぼ毎月一週間以上滞在させてもらっていたのではないかと思います。天文少年でもあった私としては、あこがれの木曾観測所で仕事（勉強）できるのが、内心嬉しくてしょうがなかったです。ポスドクで滞在されていた市川伸一さんに「自分の望遠鏡という実感がわいてきたか？」と言われて、「自分の望遠鏡」という響きに軽いショックと快感が走ったのを覚えています。

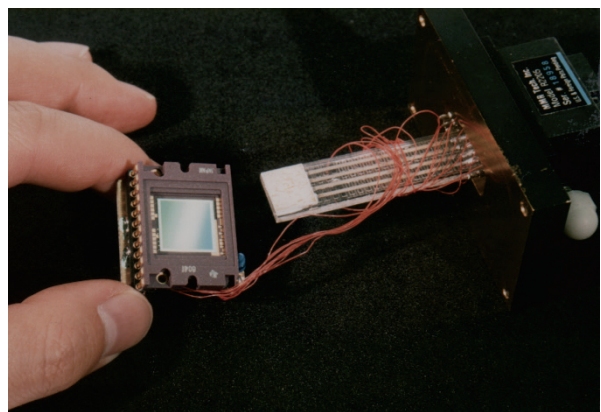
木曾観測所で運用していた画像解析パッケージ SPIRAL でわからないことあると、岡村先生や浜部勝さん、市川さんに尋ねるのですが、皆ご自分の仕事の手をピタッと止めてすかさず対応して下さいたのには、恐縮してしまいました。

昼休みには、玄関前のあの入り組んだ庭で野球をしたり（そこまでしてやるか？と思いましたが楽しかったです）、春はタラの芽、秋はキノコ狩りと、環境を生かしたアクティビティが充実していました。夜は当直の方や曇った時の観測者の方たちから、ためになるお話をいろいろ聞くことが出来ました。ある時、谷口義明さんから「あの合理的なアメリカ人がその後ドリフトスキャンをやっていないのには、理由があるはずだから、ちゃんと考えろ」と諭されました。確かに初期の CCD ではその効果がありましたが、我々が使っている TC-215 では画素ムラは十分に改善されており、ドリフトスキャンをしなくても通常の較正で十分な補正ができることがわかりました。結局ドリフトスキャンモードの開発はやら

ずじまいとなりました。

色々と紆余曲折はありましたが、木曾観測所の方々の全面的なご協力でも 1988 年の冬にはカメラとして無事完成し、狭帯域フィルターによる高赤方偏移銀河からのライマン  $\alpha$  輝線サーベイもどきを行うことが出来ました。この観測では結局原始銀河は見つかりませんでした。今から考えると、まだまだ限界等級が浅かったようです。点光源の感度向上にはシーイングサイズを小さくすることが必須であることを実感し、その後の補償光学系の開発への強い動機になって行きました。

ドリフトスキャンを念頭に置いて、超小型の冷凍機（高圧窒素ガスを断熱膨張させるタイプのジュールトムソン冷凍機で、駆動部が無い）を利用したデューワーを開発しましたが、ドリフトスキャンをしないうことにしたため、小型化のメリットはあまりなく、運用上の問題の方が大きくなりました。また自分の不注意でコントローラーボードを壊してしまったこともあり、その後は観測所の方々を中心に、機械式冷凍機を使った安定運用ができるカメラ、さらにシュミットの広視野を生かしたカメラの開発へと進んで行きました。



CCD (TC-215)と Joule-Thomson 冷却器

あれから 25 年たっていますが、今から振り返ると、その後に経験したことは、木曾観測所で学んだ 2 年間に何らかの形で経験していたことが多いです。その意味でも非常にありがたい教育を受けさせてもらったと、今でも感謝しています。翻って、当時御恩を受けた先生方を超える年齢で観測所に勤務している身として、ハワイ観測所が、木曾観測所で受けたような多角的に人を育てる環境になっているのか、改めて自問自答しているところです。



進捗報告のために作成した「木曾 CCD レポート」。約 1 年半の間に不定期に 10 号レポートした。



# 世界初のシュミット望遠鏡用グリズムの開発

～ 木曾スピリットが今の私を ～

谷口 義明（愛媛大学 宇宙進化研究センター長）



## 1. はじめに

木曾観測所 40 周年、誠におめでとうございます。これに伴い、木曾観測所から 40 周年記念出版への原稿の寄稿の以来を受けました。テーマはグリズムの開発についてです。私が木曾観測所の所員としてグリズムの開発を行っていたのは、今からざっと 25 年前。つまり、四半世紀も前のことです。果たして当時の資料が残っているかどうか、まずは確認してみました。すると書棚の片隅に『世界初のシュミット望遠鏡用グリズム分光システム』という懐かしいファイルを発見することができました（図 1）。木曾観測所を離れ、東北大学、そして愛媛大学への異動があり、その都度不要と思われるファイルを処分してきたのですが、奇跡的にグリズムの資料は残っていたわけです。これもやはり何かの縁だと思い、筆をとることにした次第です。



図 1. グリズム開発の資料をまとめたファイル。愛媛大学宇宙進化研究センター長室にて撮影。

## 2. CCD 革命

観測には測光、撮像、分光など、いくつかのモードがあります。シュミット望遠鏡の場合、広い視野を生かした天体の探査が主たる目的なので、最も一般的な観測モードは撮像です。一方、対物プリズムを用いれば、強い輝線を放射する天体や、特徴的な

スペクトルエネルギー分布を持つ天体の探査もできます。これは分光モードの観測になりますが、波長の校正ができないので、天体物理学的な研究には不向きです。あくまでも、特徴的な天体の探査ができるということです。私自身は分光観測の方が好きなので、シュミット望遠鏡でどのような観測をすれば良いか、思い悩んでいた時期がありました。

私が木曾観測所に赴任した 1987 年、大きな出来事がありました。それは CCD カメラの導入です。写真乾板に比べると量子効率が圧倒的に高く、暗い天体の観測に向いています。ただ、観測できる視野は非常に狭く、シュミット望遠鏡の特長を生かすことはできません。しかし、とにかく使ってみようということで CCD カメラのテストが行われるようになりました<sup>1</sup>。CCD カメラをシュミット望遠鏡の主焦点部に設置することになりますが、フィルターはカメラの直前に入れることになります。カメラ自体が小さいので、フィルターのサイズは 5cm 角程度で済みます。今までは写真乾板と同サイズ（36cm 角）であったことを思うと、ずいぶんと簡便です。その構造を見てふと思いつきました。『フィルターの代わりにグリズムを入れたら分光器になる！』そのアイデアを所員の方々に相談したら『やってみたら』と言われ、やることになってしまいました。木曾観測所は包容力のある天文台だということです。

## 3. 世界初のシュミット望遠鏡用グリズムに挑む

私はユーザータイプの研究者だったので、光学設計は初めてでした。いったいどうしたらよいのかと悩んでいたら、成相恭二先生（東京大学・天文学教

<sup>1</sup> この時の英断がすばる望遠鏡の主焦点広視野カメラ **Suprime-Cam** の開発につながったことは特筆すべきことだと思います。もしシュミット望遠鏡に CCD カメラを使おうと思わなかったら、今の日本の光赤外線天文学の発展はなかったからです。木曾スピリットに深く感謝する次第です。

室) が助けて下さいました。自作の光学設計ソフトを提供して頂き、それを使ってようやく設計したことを覚えています (図 2)。島津製作所からグリズムが届けられた時は、本当に感動しました (図 3)。

サイズ : 50 mm × 50 mm  
 刻線数 : 125 本/mm  
 プレーズ波長: 6563 オングストローム  
 プレーズ角 : 4.70°  
 プリズム頂角: 5.57°  
 分散 : 975 Å/mm  
 CCDカメラからの距離: 80 mm

グリズムの仕様を図示したものを下に示します。

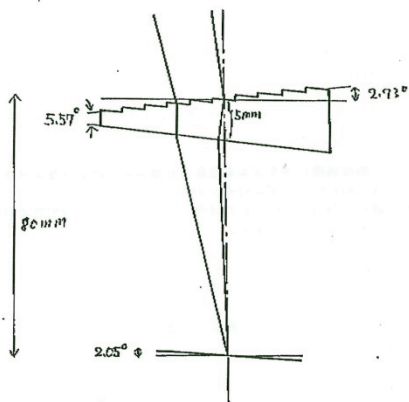


図 2. シュミット望遠鏡用グリズムの光学設計図

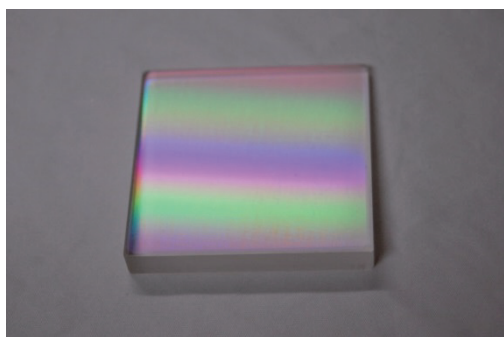


図 3. 世界初のシュミット望遠鏡用グリズム

なにしろ、世界初のシュミット望遠鏡用のグリズムです。グリズムの良いところはゼロ次像も写ることです。一次のスペクトル像だけでは波長校正ができませんが、ゼロ次像があると波長校正が可能になります。対物プリズムではできなかったことができるのです。

早速、CCD カメラに取り付けて試験観測を始めました。まずは強い輝線天体が良いだろうということで、銀河系内の惑星状星雲を観測することにしました。どのような天体が良いか、田村真一先生 (東北大学・天文学教室) に伺い、M 1-6 を選んで観測してみました。CCD カメラ+グリズムの組み合わせは写真乾板+対物プリズムに比べて切れ味鋭く、見事

に輝線を捉えることができました (図 4 及び図 5)。味をしめて、いよいよ研究ターゲットである遠方

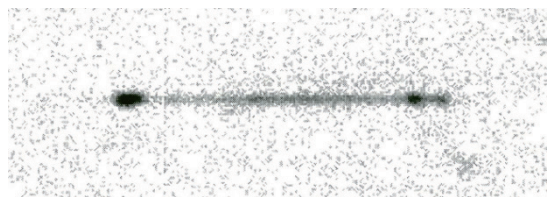


図 4. 惑星状星雲 M 1-6 のグリズム画像。波長は左の方が長く、右に見える 2 本の輝線は Hβ と [OIII]、左の明るい輝線は Hα + [NII]。

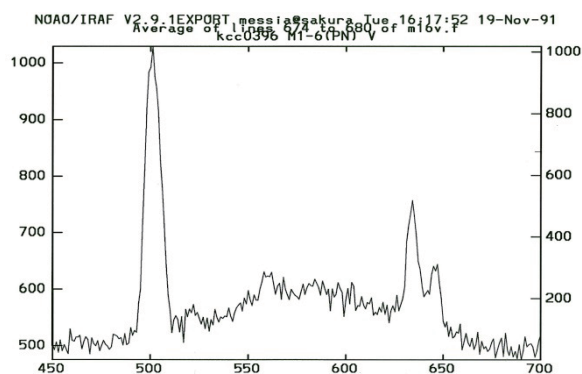


図 5. 図 4 の M 1-6 の一次元スペクトル。波長は左の方が長い。

のクエーサーを観測してみることにしました。可視光の等級は 20 等ぐらいのクエーサーでしたが、残念ながらライマン α 輝線を捉えることはできませんでした (図 6)。しかし、今から四半世紀も前のことです。口径 1 m 足らずの望遠鏡で赤方偏移  $z=4$  を超えるクエーサーの観測に挑戦していたわけで、我ながら凄いことだったのだと思います。これも木曾スピリットのご利益であり、今の自分があるのはま

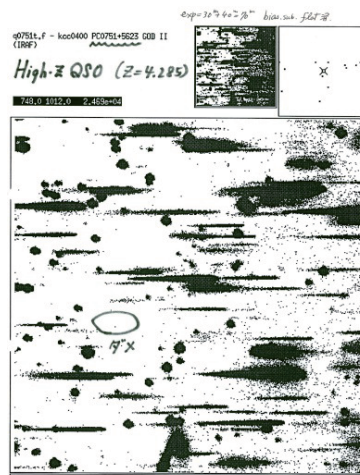


図 6. 赤方偏移  $z=4.285$  のクエーサー PC 0751+5623 の観測画像。“ダメ”と○印で囲ってある場所にライマン α 輝線が写るはずであった。

さに木曾観測所で働いた経験があるからだとしみじみ感じ入っているところです。木曾観測所のますますの発展を祈念して筆を置くことに致します。



# モザイク CCD 開発

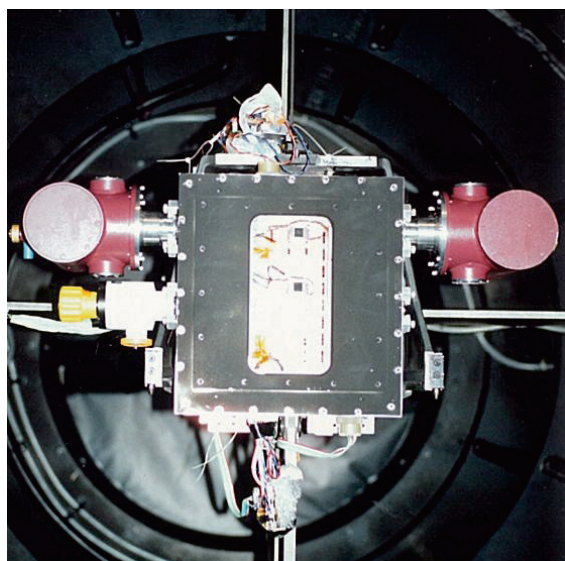
～ 世界のモザイク CCD は木曾から始まった ～

柏川 伸成 (国立天文台 TMT 推進室)



木曾観測所。そこは日本で初めてモザイク CCD が開眼した場所です。可視でも赤外でも検出器のモザイク化は今となっては当たり前になっていますが、CCD が天文学に応用されるようになって間もない 1990 年代当初はまだ確立していなかった技術で、検出器の正確なアラインメント、デュワーの大型化、並列高速読み出しなどが課題でした。これらの技術はその後、スローンデジタルスカイサーベイの多色カメラやすばるの主焦点カメラに応用され発展したこ

見えてきたのを今でも覚えています。その時、そこがその後何回も通う場所になるうとは全く思いませんでした。



木曾シュミットに取り付けられたモザイク CCD カメラ 1 号機。1000 x 1000 画素のたった 2 枚の CCD で 1991 年ファーストライトを迎えました。

とはみなさんご存知の通りだと思いますが、当時世界でも良質の広視野写真乾板を生産していた木曾でこの広視野 CCD カメラが誕生したことは必然というてよいでしょう。

木曾のシュミット望遠鏡は、私にとっては大学院に入って初めて目にした大望遠鏡です。初めて木曾観測所に行った時、荘厳な入口の太い鎖を解き放ち、延々と続くであろうかと思われるアプローチを抜けた先に、古めかしいでもどこか威厳のあるドームが



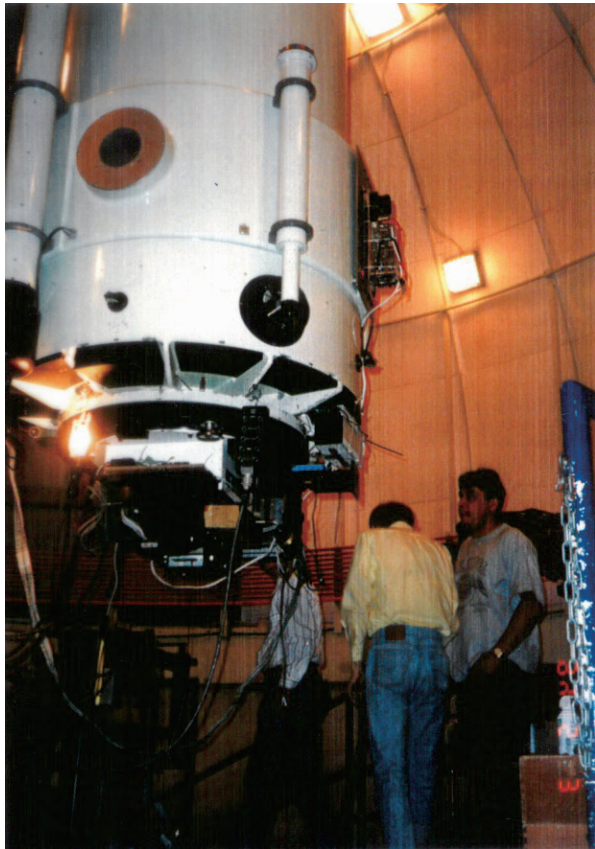
右から土居守、岡村定矩、関口真木、筆者の初期モザイク CCD カメラ開発メンバー。みんな若かったですね。大型デュワーを木製の「おみこし」に載せて木曾と三鷹を往復しました。

モザイク CCD カメラは、当時国立天文台教官だった関口真木さんが中心となって、木曾観測所所属だった岡村定矩さん、東大の大学院生だった土居守さんと、右も左もわからずに天文の世界に入って来た私とで開発が続けられました。この冊子を読んでいる方なら『木曾オリオン』でご存知、青木勉さん、征矢野隆夫さん、樽沢賢一さんらに手厚いサポートを受けながら開発は進みました。思い返すと、今となっては使われなくなってしまった油拡散真空ポンプを使っていたし、冷却も液体窒素でした。開発初期にはデュワーの冷却容量が十分ではなかったので、液体窒素を市販のじょうろに入れて 2 時間おきに望遠鏡によじ登り内部に入って補給したものでした。今となっては牧歌的な観測でしたが、自分のやる事がダイレクトに機器操作や観測に反映されるのは、すばるなどでは味わえない醍醐味です。

モザイク CCD の開発は、木曾と三鷹との間を往



復しながら試行錯誤が続けられました。木曾での思い出というと、関口さんといっしょに観測所敷地内の茂みに立ち入り、きのこをたくさん取ったことを思い出します。どれが食べられるきのこでどれが食べられないか。論文はそっちのけでガイドブックを目に穴があくほど読んだ記憶があります。観測時間は豊富にいただいて、そのうち私1人だけで観測す



チリ・ラスカンパナス天文台の 1m 望遠鏡にとりつけられたモザイク CCD カメラ。



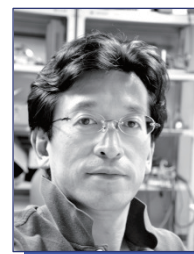
WHT にモザイク CCD カメラを持ち込んで共同研究者との記念撮影。

ることもありました。ドーム、望遠鏡の制御から観測装置の運用まで何から何まで自分1人でやらなければなりません。ある晩、全く晴れないので地下の観測待機室に行ってゴルゴ 13 を読みながらラーメンを食べました。休憩が終わって観測室に戻ってみると、ドーム内に雨が降っていたなんてこともありました（もう時効ですよ）。

木曾で開発されたモザイク CCD はその後カナリア諸島のウィリアムハーシェル望遠鏡、チリ・ラスカンパナス天文台のスウォープ望遠鏡に取り付けられ、このカメラとともに旅をした私に世界の広さを教えてくれました。関口さんは木曾のこのカメラで超新星を見つけて宇宙論パラメーターに制限を与えようとしていましたが、ある晩、明るく輝く超新星候補を見つけたことがあります。関口さんはそれをIAUに報告するかどうか、追観測をどうするか悩んで一晩中木曾観測所の廊下をうろうろ往復していたのを覚えています。もしあの後、われわれが本格的に超新星探査に乗り出していたら、ダークエネルギーを見つけた場所は木曾観測所になっていたかもしれません。一方、私はこのカメラを使ってキューサーサーベイを計画しその一部で修士論文を書かせてもらいました。当時はサーベイとしての基礎技術を確立するのに精一杯で新しいキューサーを発見することはありませんでした。優しくも厳しい土居さんには 20 年たってお互いいい年になった今でも「柏川くん、まだキューサー見つけてないじゃないか」と叱咤激励されています。そんな私が紆余曲折を経て今、すばる望遠鏡の HSC を用いて高赤方偏移キューサー探査を始めようとしていることに何か因果を感じます。私の修士論文の謝辞の最後には「モザイク CCD の開発に携われたこと、そしてその未来への可能性に期待をかけることができる現在に感謝します」とあります。その未来への期待は今も続いているのです。

# KONIC 開発顛末記

柳澤 顕史 (国立天文台 岡山天体物理観測所)



KONIC (Kiso Observatory Near Infrared Camera) は、木曾観測所が 1996 年に共同利用に公開した近赤外線カメラ(1–6  $\mu\text{m}$ )で、18.4 分角四方の視野を J,H,Ks バンドで撮像できる装置である。当時入手可能な世界最大フォーマットの PtSi 1040  $\times$  1040 アレイをシュミット光学系の主焦点に据えるというアイデアを実現したもので、KONIC の視野は近赤外では当時の世界最大級であった。私は、大学院生としてこのカメラ・プロジェクト参加し、共同利用公開後、岡山に赴任するまでの 1 年余り観測者のサポートを行った。当時の時代背景に触れつつ KONIC の開発および PtSi アレイの評価についての顛末を紹介したい。

## ●PtSi アレイの登場

その名は、白金シリサイド・ショットキーバリア型ダイオード(PtSi)2 次元アレイ、KONIC の画像センサとして搭載された検出器である。これは、感光部に PtSi を使用した裏面照射型インターライン CCD の一種で、三菱電機が民生用途に開発した製品である。すでに 512  $\times$  512 画素の PtSi アレイは同社の赤外カメラに組み込まれて発売されており、1040  $\times$  1040 画素のアレイが完成したばかりだった。

PtSi アレイは民生用途の画像センサとして理想的な特徴を持っていた。成熟したシリコン技術を基盤として製作された PtSi アレイは、画素感度のばらつきが少なく、欠陥画素が殆どなく、大フォーマット化が容易であり、歩留まりが高く(安価)で、大量生産が可能だったのである。ショットキーなの

で原理的に感度は低かったが、常温の物体は明るく輝いているので、欠点にはならないのである。

この PtSi アレイに、天文業界が関心を寄せたのは 1990 年代初頭のことである。きっかけは、その頃、博士課程の上野宗孝さん(京都大学)と伊藤昌尚さん(東京大学)が素子数 512  $\times$  512 の三菱製 PtSi アレイを使用した天文観測用カメラの開発に成功したことにある。同カメラで取得した広視野画像は、赤外 2 次元アレイによる観測が一般的ではなかった当時の日本に強い印象を与えたのである。

このカメラの成功を受けて、PtSi アレイは、すばる望遠鏡主焦点近赤外モザイクカメラの筆頭センサ候補として提案され、すばる望遠鏡に関心を寄せる研究者に広く認知された。HgCdTe や InSb などのセンサは、感度は高いが、素子数が少なく(256  $\times$  256 が最大)、歩留まりが悪い(高価)ことも手伝って入手が困難であった。そのため、感度は低いが入手が容易な PtSi はモザイク化には都合よかったのである。その一方で、実際の観測による実用性の裏付けはまだ乏しく、どのくらい天体観測に有望なのか、その評価が望まれていた。そんな時期にスタートした KONIC は、PtSi アレイを撮像の観点から評価する役割を担うことになった。

## ●KONIC の開発 : アレイ駆動回路が準備できるまで

KONIC の開発は、1993 年にスタートした。装置 PI は市川隆さんで、私(D1)と伊藤信成さん(M2)がこの装置プロジェクトに参加し、それぞれ電気・

制御系と熱・機械系を分担した。柳澤の課題は、主として PtSi 1040×1040 検出器を動かして画像を得ることであった。市川さんの計らいで、MessiaII+ と呼ばれるアレイ駆動システムに、フロントエンドのアナログ回路を付け足すことでアレイの駆動をする方針は決まっていた。そこで、片ざ宏一さん（東京大学）の指導を受けつつ、PtSi アレイの駆動回路を準備することになった。

その取り掛かりの際に、片ざさんから「検出器駆動なんて簡単で、必要なことは1週間もあれば教えられるけど、その知識が身につくまで3年かかるよ」と言われた。博士課程からの手習いで、しかも天体観測に応用できるかどうかも知られていない検出器を試そうとしている、お気楽な大学院生の行く末を心配して諭してくださったのであろう。それからの日々は“初めて”への対処が大変で、当初、円形脱毛症を患ったこともあったが、どうにかミッションの全体像が見えてきてからは人並の困難を楽しむ余裕がうまれた。とはいえ、開発の終了まで決して順調に進んだわけではなく、閉塞状況を抜けるたびに、前向きな気持ちを取り戻す、そんな機会を重ねた日々であった。

当初用意したフロントエンド回路では PtSi 512 アレイは駆動できたけど、PtSi 1040 アレイは駆動できない、といった幾つかの課題を克服し、翌年 10 月 28 日、ついに PtSi 1040 アレイの冷却駆動に成功（図 1 参照）、翌月には木曾シュミット望遠鏡に取り付けて球状星団 M15 のファーストライト画像を得ることに成功した。「とうとう画像が撮れたねえ」と、隣で安堵の笑みの市川さんと伊藤さん。木曾観測所の制御室で互いに顔を見合わせた忘れえぬシーンである。この時は、ノイズが高すぎてノイズレベルがわからない状態だったが、3 か月の奮闘の末、とうとう原因を突き止めてノイズを 60 電子まで落とし、ようやく検出器評価の可能な“まとも”な駆動回路が出来上がった。

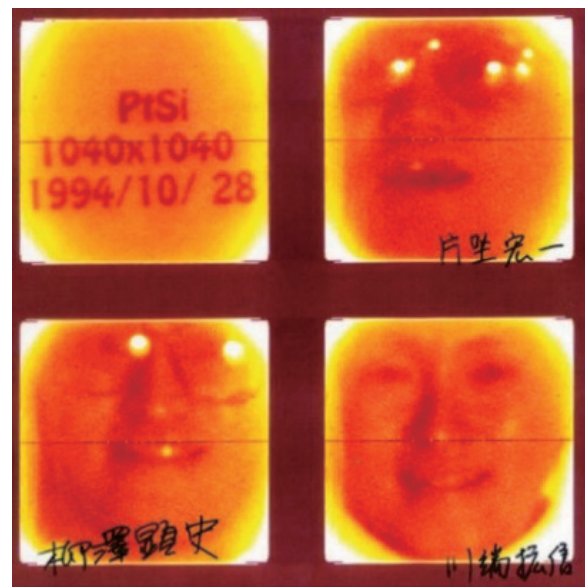


図 1: 単レンズで撮影した実験室ファーストライト画像

#### ●PtSi 1040×1040 アレイの評価

観測を始めると、検出器固有の新しい課題が次々に見つかった。転送チャンネル方向画像がゆがむ、画像の下半分に横縞が発生しフラットでも取れない、画像の上半分には小さな穴が多数あいていて背景高レベルに応じ転送チャンネル方向に場所が移動する、読み出しアンプやスキャナー回路からの発光がスカイレベルを超えている、読み出し中の温度変動が大きい、縦・横転送方向に特徴的な十字パターン（splash）が発生する、PSF の裾野がシーイングを超えて広がっている、などである。困った。これ以上は手に負えぬ。

PtSi アレイの貸与にあたって、貸与をうけた個々の研究室が、三菱側に直接問い合わせを行うことはできない約束になっていた。おそらく、PtSi アレイに関わる研究室で情報共有を期待し、三菱側の負担を最小限とする目的があったと思われる。しかし当時、情報共有が実現する雰囲気はなかった。いずれにせよ我々素人では埒があかないので、思い悩んだ末に思い切って PtSi アレイの開発者である三菱 LSI 研究所の木股雅章さんを 3 人で訪ねた。1995



年6月のことである。

面会当初は両者ともに堅い雰囲気だったが、木曾における取り組みと、浮かび上がった課題を説明するうちに、次第に質問が飛び出しはじめた。低照度下における駆動が期待通りでない事が興味を刺激したのか、木股さんは次第に相手を崩し「何が起きるとんやろうなあ」と腕組みしながら一緒に解決方法を考えてくださり、様々な示唆と提案を下さった。その後、木股さんは天文用に貸与したアレイが、どういう状況になっているのか心配していたのです、とおっしゃった。組織同士の外向きの顔と、現場の顔が違うことを知った初めての経験でもあった。

こうして三菱との交流が始まり、相談・報告をするチャンネルができたおかげで1996年には半分余りの課題に目途がついた。そこで、KONICを共同利用に供して、評価結果をSPIEで発表した。奇しくも、片ざさんの言うとおりの、3年が経過していた。

その後の取り組みを含めて、私が出した主要な結論は次の通りである。

- 民生用途の三菱 PtSi 1040×1040 アレイは、 $3\text{-}5\mu\text{m}$  帯に最適化されているため、 $1\text{-}2\mu\text{m}$  帯では量子効率 2-4%に留まっている。しかし PtSi 膜厚を厚く(13nm 以上)、反射防止膜厚を薄く(350nm)することで5倍の感度向上が期待できる。
- PSF の裾野はシーイング(Moffat 関数)より広がっている。これは、PtSi 膜で反射された入射光が Si 基板内で吸収を受けるまで広がるためである。  
Splash は PtSi 膜が方形状のアレイ配置になっており、入射光が干渉することで発生している。これは検出器の感度向上と、Si 基板を薄く削ることで緩和できる。
- 低照度下では、縦転送チャンネルの転送効率低下が認められる。ただし、一度転送チャンネルの

凸凹を電荷で埋めてしまえば転送効率の低下はなくなる。チャンネルに電荷を注入する仕組みが必要である。

- 発光や横縞などのコスメティクス上の問題は、制御の工夫で解決できた。検出器パッケージの放熱特性を改善して温度変化を 0.02K 以下に抑えられた。

つまり、天文用に最適化した PtSi アレイは HgCdTe, InSb の 1/3 程度になるだろう、明るい天体を対象とした研究課題には問題なく使用できる、ということだ。

こうした結論を得ようとしている 1996 年夏、HAWAII アレイ (HgCdTe 1024×1024) が登場し UH の QUIRC で実用化された。世間は PtSi アレイに再び関心を寄せることは無く、天文用に最適化された PtSi アレイは、この世に姿を見せることは無かった。

本装置の開発にあたっては、木曾観測所をはじめ、東大天文センター、三菱電機の皆様に様々な支援をしていただいた。当初の目標である KONIC の実用化は、皆様の支援なしには実現できなかった。御礼を申し上げずに今日に至った非礼をお詫びするとともに、紙面を借りて感謝をお伝えしたい。

