

話題

微光天体観測への CCD カメラの応用

家 正則[†], 高遠徳尚^{††}
市川伸一[†]

天文学の世界では量子効率の高い CCD カメラが伝統的な写真乾板に今や取って代わろうとしている。観測天文学で用いる CCD カメラの特徴と性能について、国立天文台や東京大学理学部木曾観測所での実例をもとに紹介する。

1. まえがき

天文学には他の自然科学と際立った違いがある。それは、研究対象に働き掛けることができないということである。天文学者は宇宙からの様々な信号に目を凝らし、耳を澄ますしかない。だから、信号の検出器の性能には人一倍貪欲である。

19世紀後半に写真技術が確立し、天体観測はそれまでの客観性に乏しい肉眼観測から記録性の良い写真観測に変わった。1970年代末から、欧米の天文台で天体観測に CCD カメラを応用する試みが始まられた¹⁾²⁾が、1980年代が終わろうとする今、量子効率の良い CCD カメラは天体観測の主流となった感がある。

我が国では1981年ごろから天体観測用の CCD カメラの開発に着手し、当初は行間転送方式の CCD 素子をペルチエ冷却したカメラが試作された³⁾。1985年に東京大学東京天文台岡山天体観測所（現国立天文台岡山天体物理観測所）で、画面転送方式の素子を用いた本格的な液体窒素冷却方式の CCD カメラが実用化された^{4)~6)}のを機に、同観測所および東京大学東京天文台木曾観測所（現東京大学理学部木曾観測所）で様々な天体観測用 CCD カメラが開発され利用が進んでいる。1989年前期の利用実績では、岡山観測所にある国内最大の 188 cm 望遠鏡の場合、観測時間の 6 割以上が CCD 観測になるに至っている。

天体観測用の CCD カメラは、場合によっては光子数にして数十個というような極微光レベルの信号検出を目的とするため、通常のビデオカメラとは幾つかの点で使用法に違いがある。長時間の電荷蓄積、スロースキャン、冷却など、我々の用いているやや特殊な使用法をここに紹介し、読者諸兄のご批判ご助言を仰ぐ次第である。

2. 天体観測用 CCD カメラシステム

2.1 岡山天体物理観測所の CCD カメラ

写真 1 は岡山天体物理観測所の 188 cm 望遠鏡に液体窒素冷却型 CCD カメラを搭載したところである。このカメラには RCA 社の裏面照射型 CCD（写真 2）が使用されている。15 μm 角の画素 1024 × 640 個を有するこの CCD は、短波長光の感度を高めるため Si 層厚を 10 μm 程度に薄くしてある。天文学の世界では現在最も多用されている素子であり、量子効率は極めて高い（図 1）。単色光では Si 層での多重反射による干渉のため、画素間に 10% 程度の感度むらの縞模様が生じる（写真 3）。読み出し雑音は 50 電子相当とやや高めである。

液体窒素冷却方式では、液体窒素（−196°C）の熱伝導により −130°C 程度で熱平衡になるようにデュワーを設計し、CCD の取り付け部に小型ヒータを取り付けて温度制御を行う。岡山天体物理観測所の容量 1.5 l の液体窒素デュワーでは、ほぼ 1 昼夜にわたって一定温度に保つことができる。観測時には望遠鏡の向きに応じてデュワーの姿勢が変わるので、液体窒素の注入法やガス抜きパイプに若干の工夫がいる。

カメラ制御回路はパソコン（IBM-AT）で制御する。

† 国立天文台

†† 東京大学 理学部

"Application of CCD Cameras to the Astronomical Observations" by Masanori Iye, Shin-ichi Ichikawa (National Astronomical Observatory, Tokyo) and Naruhisa Takato (Department of Astronomy, University of Tokyo, Tokyo)

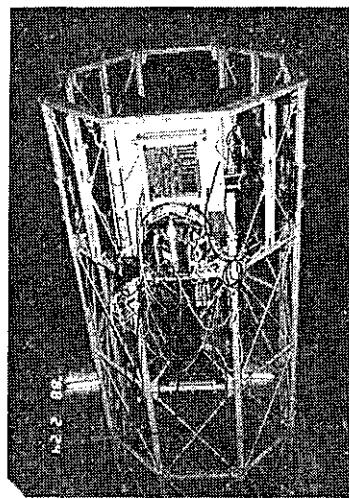


写真1 岡山天体物理観測所188cm望遠鏡に設置した液体窒素冷却型CCDカメラデュワー

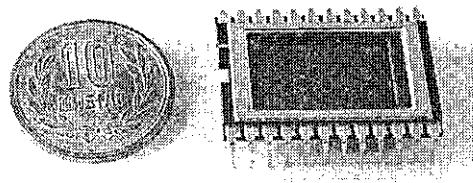


写真2 岡山天体物理観測所で使用しているCCD素子(RCA社製)

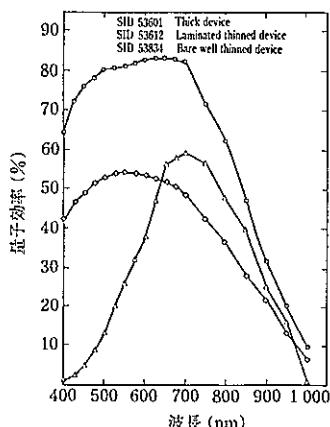


図1 RCA社のCCD素子の波長感度特性(欧州南天文台観測マニュアルより)

CCDの駆動波形はソフトコーディングする方式なので、他のCCD素子を駆動することもできる。現在、RCA社の1024×640画素のCCDと512×320画素の

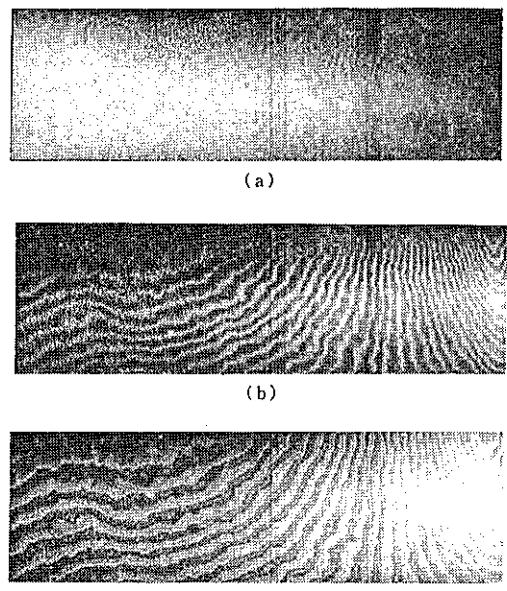


写真3 感度の非一様性(RCA素子に見られるフリンジ模様)

連続波光源を分光器に通して得た波長感度較正用画像、中心波長は(a)5000Å、(b)7000Å、(c)9000Å。波長幅はそれぞれ約100Å、右が短波長側。光源の最大強度が6000Å近辺にあるため画像の明るさに傾きがある。干渉フリンジの間隔は長波長ほど長くなっている。

CCD、それにTEKTRONIKS社の512×512画素のCCDをこのシステムで使用することができる。またこれらのCCDカメラは望遠鏡の主焦点での撮像観測、カセグレン焦点での銀河の分光観測、クーデ焦点での恒星の高分散分光観測用に用いることができるよう、環境を整備している。パソコンのハードディスクに取得した画像データは、観測終了後にまとめてミニコンピュータにGPIB転送して解析し、観測者の持ち帰り用磁気テープに出力する。

このCCDカメラの驚異的な性能は、その後の新たなCCDカメラ開発の大きな原動力となった。このカメラシステムが軽便で移動可能であるという利点を生かして、このシステムを1986、87年には木曾観測所に運び、シュミット望遠鏡によるCCD観測を初めて行った。これが木曾観測所でのCCDカメラ開発的具体なきっかけとなった。

2.2 木曾観測所のCCDカメラ

木曾観測所の105cmシュミット望遠鏡(写真4)用に我々が1988年に新しく開発したジュール・トムソン冷却型CCDカメラシステムの構成を図2に示す。このカメラに使用している日本TI社のバーチャルフェ

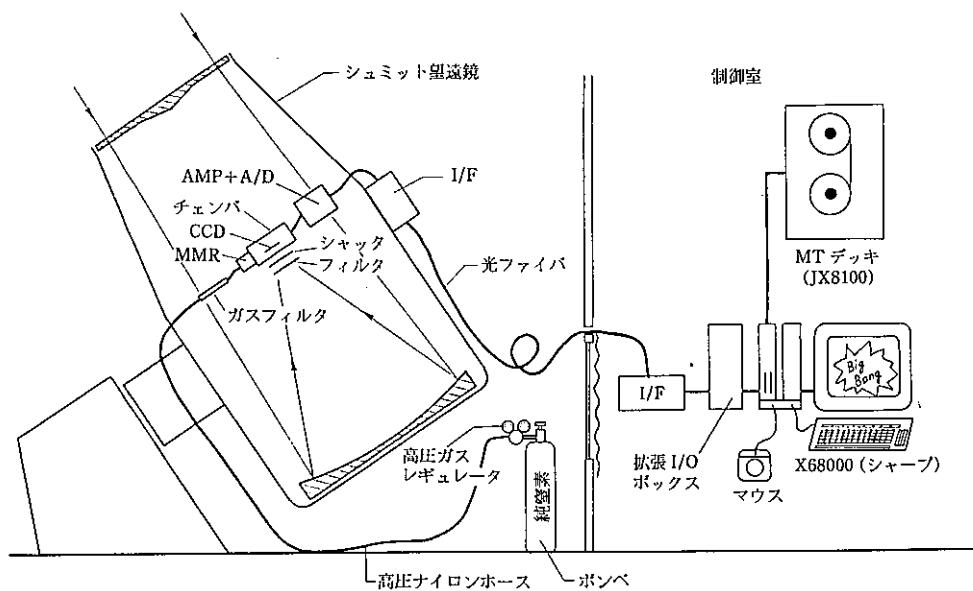


図 2 木曾観測所シュミット望遠鏡用ジュール・トムソン冷却型 CCD カメラシステム

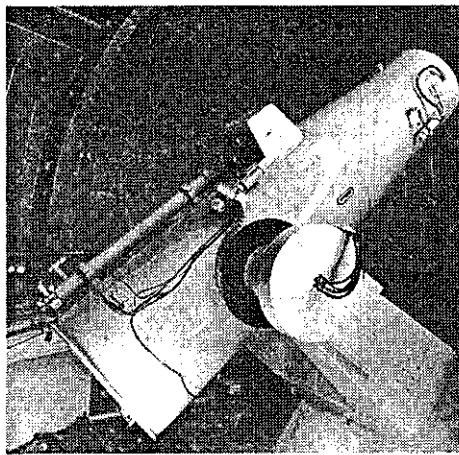


写真 4 木曾観測所 105 cm シュミット望遠鏡

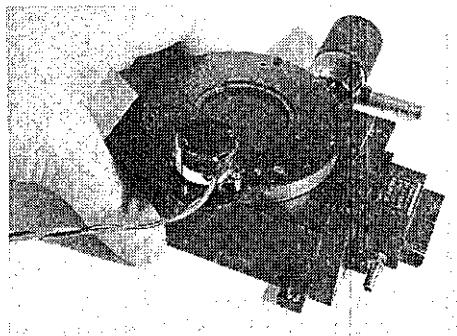


写真 5 ジュール・トムソン冷却型 CCD カメラ

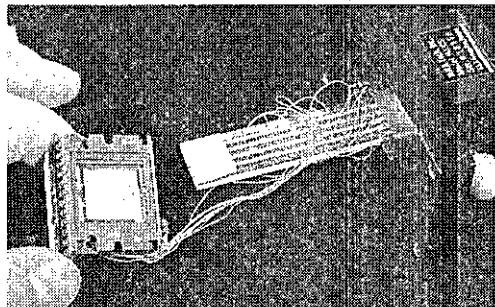


写真 6 ジュール・トムソン冷却器ヘッドにマウントした CCD 素子 (日本 TI 社製)

ーズ表面照射型 CCD は $12 \mu\text{m}$ 角の画素 1000×1018 個を有する。この CCD は感度の波長依存性にうねりがあるものの、比較的短波長まで厚型としては高い感度を有する。飽和レベルが約 60000 電子相当と、容量がやや小さいのが玉にきずであるが、画素ごとの感度は極めて一様である。

新開発のジュール・トムソン冷却方式のデュワー(写真 5)では、110 気圧の純粋窒素ガスを極細管路に流し、管路の出口で 1 気圧まで断熱膨張するときの吸熱効果を利用して冷却する(写真 6)。熱設計に注意すれば、500 mW の冷却器で CCD を充分に冷すことがで

きる。このシステムでは通常 -100°C で使用している。不純物や水蒸気が混入すると管路が詰まるので注意を

要するが、液体窒素デュワーに比べてカメラを小型化できるのが特徴である。

カメラのそばに置く制御装置には、CCD 駆動回路、プリアンプ、積分型 2 重相関サンプル回路、16 ビット A/D 変換器がまとめられている。制御装置から 2 m 長のケーブルでつながれ望遠鏡の筒に取り付けられた外部制御装置には、汎用 I/O ポート、タイミング発生器、パラレル・シリアル変換器、シリアル・パラレル変換器が収められている。外部制御装置と観測室に置かれたパソコン X 68000 との間は 40 m の光ファイバケーブルで接続している。パソコンは露出の開始終了、データ取り込み、磁気テープへの格納などの制御、得られた画像のクイックルックなどを行う。

3. 天体観測で大切な CCD カメラの性能

3.1 量子効率

光化学反応を利用した写真乳剤は量子効率が約 1% しかないが、内部光電効果を利用した CCD は量子効率が最大約 80% 程度に達する(図 1)。天体からの貴重な光子を捕えるうえでこの違いは大きい。行間転送方式の CCD は開口率が低いうえに感光部から転送部へ電荷転送に問題があるものが多く、天体観測には最適とはいえない。

量子効率の 80 倍の違いは、望遠鏡口径の 9 倍の違いに相当する。パロマー山天文台の 5 m 望遠鏡が 1948 年に完成して以来、より大型の望遠鏡が建設されなかったが、この 40 年間は検出器の改良によって実質的な口径が増大した時代であったともいえる。

3.2 蓄積方式

天体観測用の CCD カメラでは、露出時間中に照射された光を電荷として画素内に蓄積し、露出終了後に 1 画面全体の情報を読み出す。この方が露出時間中に一度の読み出しで済むうえ、読み出し時にはビデオより遅いクロックを使えるので、読み出し雑音を低くできる。

長時間積分の場合には、2 次宇宙線のミューオンの曝射が問題になることがある。ただし、これは同じ画像を何枚か撮影して比較することにより解析段階で除去することが可能である。肉眼で見える最も暗い星が 6 等星である。明るさが 100 分の 1 になるごとに、5 等級ずつ等級は増えて行く。光害のない夜空の明るさは満月の面輝度の約 1000 万分の 1 であり、可視域でおよそ 1 平方秒角あたり 21 等星 1 個に相当する。1 m 級の望遠鏡で 20 等星を観測した場合の光量は、せいぜい 0.1 光子/秒・nm 程度にしかならない。天体が明るい場合は画素あたりの電荷量が飽和電荷量(数 10 万個程度)を越えないように露出時間を決める。暗い

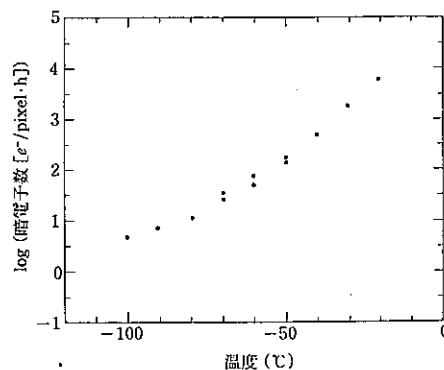


図 3 冷却時の暗電子発生率

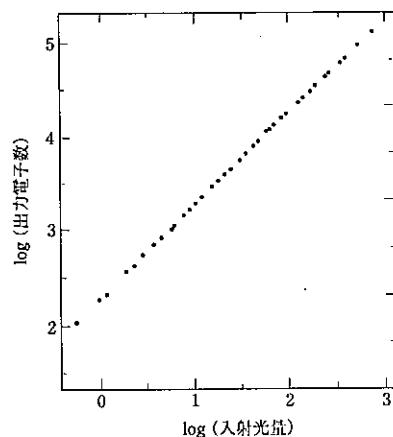


図 4 入出力線形性

場合は天体からの光子による電荷数が、読み出し雑音電荷数の 2 乗以上になるよう露出時間を決める。積分時間は目的と条件によるが、実際には数秒から 2 時間ぐらいに及ぶ。

3.3 冷却

長時間積分を行うには CCD 内部での熱量子の発生を抑えることが必要である。積分中は読み出しがアングルの電源をオフにして熱電子の発生を低くする。熱電子発生率は約 30°C の温度降下で 1 衍小さくなる(図 3)。理想的には積分時間中に積算された熱電子数が読み出し雑音電荷数の 2 乗以下になるよう冷却する必要がある。液体窒素温度まで冷却すると電荷の転送効率が劣化する場合があるので、通常は -120°C 程度で動作させる。

3.4 入出力線形性

入力光と出力電子数の関係を図 4 に示す。回帰直線の傾きは 0.991 であり、比例関係からのずれは、200~10000 電子の範囲で ±1% 以内に収まっている。

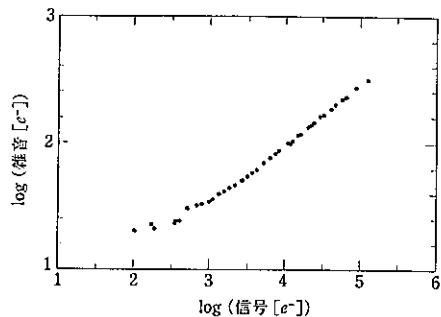


図 5 出力信号強度と雑音の関係

乳材写真に比べて線形性の良さとそのレンジの広さは圧倒的である。

3.5 読出し雑音

CCD データの雑音源としては、光電子の統計雑音、宇宙線によるスパイク雑音、熱電子の振る舞い、読み出し回路の雑音、感度むら補正の雑音などがある。充分な冷却を行えば熱電子雑音は無視でき、感度むら補正の雑音も補正用データの精度を上げることにより小さくできる。光子統計雑音は限られた光子数では避けられない。極微光天体の観測、特に分光観測では 1 画素当たりの光電子数が極めて少ないのであるが、このようなデータの質を左右するのは、したがって読み出し回路の雑音の大きさである。図 5 に木曾観測所の CCD カメラの雑音実測データを示す。岡山天体物理観測所では川上⁷⁾が日本 TI 社の素子で約 6 電子相当にまで読み出し雑音を小さくすることに成功している。読み出し雑音を 1 電子相当以下にすれば、CCD は究極の光検出装置となるであろう。

4. CCD カメラの威力

写真 7 にジュール・トムソン冷却型 CCD カメラで撮影した渦状銀河 M 51 の CCD 画像を示す。この画像は従来の写真観測では写らないような薄墨りのなかで撮影されたものであるが、わずか 3 分の露出でみごとに渦状構造が捕えられている。この CCD カメラにより、最近私達は光速の 87% で遠ざかっているクエーサーの近くに、ライマンアルファ輝線を放射していると思われる原始銀河の候補天体をいくつか同定した。

写真 8 は乳剤写真と CCD の威力の違いを示す天体写真の一例である。写真は銀河系の北極方向で、12 × 8 分角である。この方向は星数が少なくて宇宙の果てを見るのに適した方向である。上の乳剤写真は天体写真の最高傑作といえるパロマー写真星図であり、約

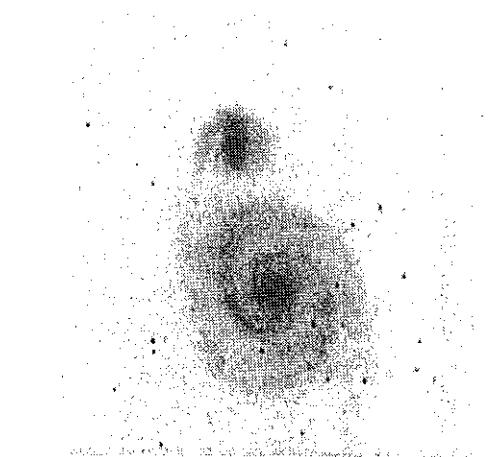


写真 7 木曾 CCD システムで撮影した渦巻き銀河 M 51 (赤色バンド、3 分露出)

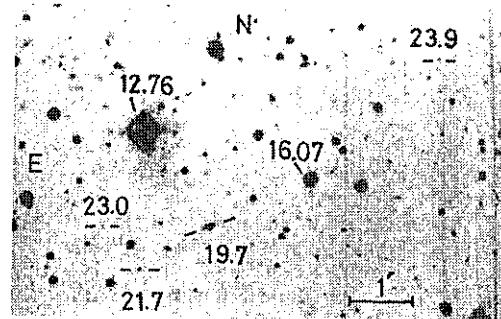
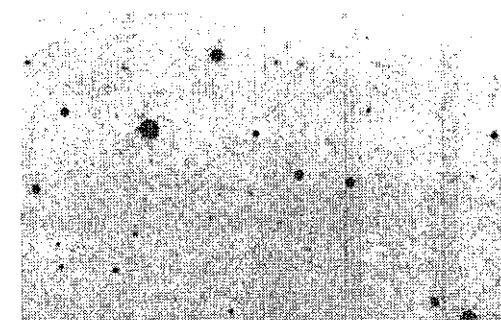


写真 8 岡山 CCD システムを用いて木曾観測所で撮影した北銀極天域(下)。乳剤乾板で撮影された同じ天域の写真(上)と比べると CCD の威力が歴然とする。

21 等級の星まで写っている。同じ天域を木曾観測所のシュミット望遠鏡に液体窒素冷却型 CCD カメラを取り付けて撮影したのが下の写真である。これには約 10 倍以上暗い 24 等級の天体まで写っている。このような観測から宇宙の果ての銀河の明るさや個数密度を調べることができる⁸⁾⁹⁾。

5. これから CCD カメラ

天体観測用の CCD 素子をカスタムメードで生産すれば、読み出し雑音が 1 電子以下の CCD カメラを作ることも可能であろう。このような CCD は可視域の究極の検出器といえよう。広角のシュミット望遠鏡用の 36 cm 角の写真乾板と比べると、CCD は受光面積ではまだ勝負にならない。TEKTRONICS 社では 5 cm 角の CCD を開発したが、当然ながら歩留まりが悪く、天文ではまだ試作の域を越えていない。Si ウエハー全体を 1 個の CCD として機能するように設計することも考えられているが、多数の CCD 素子をモザイク状に並べて受光画面を大きくすることは比較的容易である。

もうひとつ特筆すべきなのは、近赤外線で CCD カメラに似た半導体カメラが近年急速に進歩していることである。InSb, HgCdTe, PtSi などの半導体を用いた 2 次元カメラの登場により、今までの CCD の波長域 0.3~1.0 μm が 1.0~5.0 μm にまで拡張されようとしている。せいぜい数チャンネルの測光器を用いていた赤外線での観測が、この 1~2 年で、急に「赤外写真」が撮れる時代になったのである。

国立天文台ではハワイ島のマウナケア山頂（4200 m）に直径 7.5 m の大型光学赤外線望遠鏡（略称 JNLT）の建設を計画している。宇宙の果てを見るためのこの望遠鏡には、これら最先端の CCD カメラが据え付けられ、次々に我々の予想し得ない宇宙の秘密を明かして行くことになる。 (1989 年 10 月 31 日受付)

[参考文献]

- 1) S. Markus, R. Nelson, and R. Lynds: "Preliminary Evaluation of a Fairchild CCD-211 and a New Camera System", in Instrumentation in Astronomy III, ed. D. L. Crawford, Proc. SPIE, 172, pp. 207-231 (Jan. 1979)
- 2) P. R. Jorden, D. J. Thorn, and I. G. van Breda: "Royal Greenwich Observatory (RGO) Charge-Coupled Device (CCD) Camera", in Instrumentation in Astronomy IV, ed.

- D. L. Crawford, Proc. SPIE, 331, pp. 87-95 (Mar. 1982)
- 3) 川上 肇, 田中 浩, 尾中 敏, 沖田喜一, 乗本祐慈, 清水康広, 清水 実, 西村史朗, 平山智啓: "CCD (固体撮像素子) を用いた画像検出器", 東京天文台報, 20, 3, pp. 499-518 (Oct. 1985)
 - 4) 家 正則, 佐々木敏由紀, 渡辺悦二, 沖田喜一, 岡田隆史, 湯谷正美, 田中 浩: "液体窒素冷却型 CCD カメラシステム", 東京天文報, 21, 2, pp. 140-166 (June 1988)
 - 5) 家 正則, 辻 隆, 佐々木敏由紀, 渡辺悦二, 西村史朗: "倍密度 CCD 素子の性能と高分散分光", 東京天文台報, 21, 2, pp. 179-187 (June 1988)
 - 6) 家 正則, 市川伸一, 岡村定矩, 野口 猛, 浜部 勝, 青木 勉, 征矢野隆夫, 樽沢賢一, 石田恵一, 岡田隆史: "木曾シュミット望遠鏡による CCD 撮像", 東京天文台報, 21, 2, pp. 188-196 (June 1988)
 - 7) 川上 肇, 乗本祐慈, "新カセグレン分光器の検出器 (TI 1024×1024 CCD)", 岡山ユーザーズ・ミーティング, 5, pp. 75-78 (Aug. 1988)
 - 8) M. Iye, S. Ichikawa, T. Sasaki, S. Okamura, and H. Kawakami: "CCD Photometry of SA57", Tokyo Astron. Bulletin, 2nd Ser., No. 278, pp. 3221-3227 (1987)
 - 9) M. Iye, S. Ichikawa, S. Okamura, and N. Takato: "Search for Primordial Galaxies", in Big Bang, Active Galactic Nuclei and Supernovae, eds. S. Hayakawa and K. Sato, Universal Academy Press, pp. 187-188 (1989)



家 正則 昭和 52 年、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。東京大学東京天文台助教授を経て、国立天文台助教授、天体観測用 CCD カメラの実用化、能動光学方式による鏡面制御望遠鏡の開発などを手がけ、ハワイ島に 7.5 m 径の大型望遠鏡の建設を企画している。専門は銀河物理学、理学博士。



高遠 徳尚 東京大学大学院理学系研究科博士課程（天文学専攻）在学中。原始銀河の探査および観測装置の開発を行っている。



市川 伸一 昭和 62 年、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了（天文学専攻）。東京大学大学院研究生、日本学術振興会特別研究員を経て、平成元年より、国立天文台助手。研究分野は可視域での観測天文学。最近は CCD による銀河団の撮像観測に力を入れている。理学博士。