

# 固体撮像素子 (CCD) による光学望遠鏡受光装置

高岸 邦夫\*・松岡 勝・太田 誠  
前 孝司\*\*・面高 俊宏\*\*\*

(1985 年 1 月 7 日受理)

## Astronomical Image Sensor Using Charge Coupled Device

By

K. TAKAGISHI, M. MATSUOKA, M. OHTA  
T. MAE and T. OMODAKA

**Abstract:** An astronomical optical detector using Charge-Coupled-Device (CCD) has been developed for performing image detection and photometry with the 60 cm telescope of KSC. The structure of the instrument (CCD camera) was simplified by using Peltier device for cooling the CCD to eliminate the thermal noise enough for long exposure time. A micro-computer system is employed in the control of the instrument and data processing.

The CCD camera has high performances in comparison with conventional photo-graphic emulsion. This is able to benefit from the high quantum efficiency, wide dynamic range and linearity intrinsic to the CCD. The test observing run with this CCD camera on the 60 cm telescope at KSC has demonstrated that a photometric sensitivity of 20th magnitude in W band (3800-7000 Å) is achieved in a 3600 sec exposure.

### 概 要

KSC の 60 cm 光学望遠鏡の受光部に使用するための CCD (電荷結合素子) カメラを開発した。CCD の冷却はペルチェ素子による電子冷却を採用し、装置の構造と取り扱いを簡単化した。装置の制御とデータ処理にはマイクロコンピュータを用いた。KSC での試験観

---

\* 宮崎大学工学部  
\*\* 現株式会社東芝  
\*\*\* 鹿児島大学教養部

測の結果、感度、雑音特性、直線性など実用的に十分な性能であることが確認できた。この装置により従来の写真撮像に比べて、広いダイナミックレンジにわたる高感度な測光が可能になった。1000秒の露光により18等級までの測光が可能であり、また3000～5000秒の露光により約20等級の星像を確認した。

## I. 序 論

最近のマイクロエレクトロニクスの発展により、天体の光学観測にも次々と新しい技術が導入されている。撮像素子に関しても、これまでの写真乾板や撮像管に比べて高性能の素子が登場してきている。CCD(電荷結合素子)もその一つで、1970年代の後半から天体の光学観測用撮像素子として注目されだした受光素子である。天体撮像用のCCDは、次のような優れた特徴を持っている。

1. 量子効率が高く、読み出し雑音が小さい。
2. ダイナミックレンジが広く、直線性が良い。
3. データのリアルタイム処理が可能である。
4. 小型軽量で、消費電力が小さい。

一方では、受光面積が小さいこと、熱雑音を抑えるため冷却が必要であること等が短所である。

このような特徴を生かした天体観測用のCCDカメラは、10年程前から世界の各地で開発が進められ、現在では暗いX線天体の光学的検出や銀河の輝度分布の観測などに用いられるようになってきている[1,2,3,4]。

我々はKSCの60cm望遠鏡でX線天体の光学観測を行なってきたが[5]、KSCでは天候や桜島の降灰のため光電測光ができない時も多く、また14等以下の暗い天体についても観測したいなどの要求もあった。そこでCCDを用いて小口径の望遠鏡でも使用でき、シンプルで使いやすい装置を目標にして、CCDカメラの開発を進めている。ここでは、KSCの60cm望遠鏡用として開発されたCCDカメラ装置の構成・性能と観測結果のいくつかの例について報告する。

## II. 装置の概要

本装置は、CCDとペルチェ冷却素子を収容する真空冷却チェンバー、CCDの駆動・制御回路用の回路ボックス、データの処理・記録を行うマイクロコンピュータの3つの部分で構成されている(図1)。

真空チェンバーと回路ボックスは、望遠鏡の焦点面に取り付けられ、約15mのケーブルでマイクロコンピュータに接続されている。

CCDはNECの $\mu$ PD3511Dを用いた。この素子は、TVカメラ用として開発されたもので、天体撮像用としては受光面の開口率が小さいことなど短所もあるが、駆動クロックの許容条件が大きい等使いやすい素子である。表1にこの素子の諸特性を示す。マイコンを除いたCCDカメラ本体の重量は約4kgで、KSCの60cm望遠鏡の主焦点での撮像

視野は  $11.8' \times 8.8'$  である。

以下に本装置の各部について述べる。

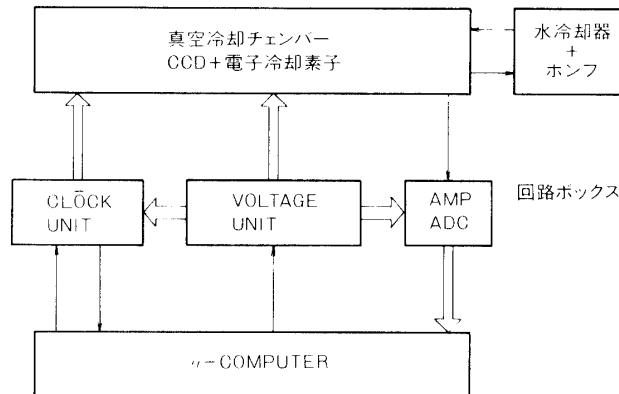


図 1 CCD カメラの構成

#### μPD 3511 D 諸元

画素数	水平384×垂直 490
画素サイズ	水平 23 mm×垂直 13.5 mm
転送方式	インターライン転送, 水平 2相垂直 4相駆動
有効撮像面積	水平 8.832 mm×垂直 6.625 mm
飽和露光量	0.3 lux · sec
ダイナミックレンジ	63 dB

### 1. 真空チェンバー

チェンバーは、直径 140 mm 厚さ 5 mm の銅円板と、直径 100 mm 深さ 45 mm のステンレス円筒容器とで構成されている。真空チェンバーの断面図を図 2 に示す。銅円板上には、三段重ねのペルチェ冷却素子と CCD が取り付けられている。ペルチェ素子の高温側を冷却するため、水冷却器で約  $5^{\circ}\text{C}$  に冷却した水をポンプで循環して銅円板を冷却している。この方法により外気温が高いときでも安定した CCD の冷却を可能にした。

ペルチェ素子による電子冷却を採用したことにより、真空チェンバーの構造と取り扱いを簡単化できた。KSC での観測条件（夜空の明るさ等）を考慮すると、 $-60^{\circ}\text{C}$  程度まで CCD を冷却すれば十分実用的なレベルまで熱雑音を小さくでき、装置の構造が複雑になり保守も煩雑な液体窒素を用いる必要はない。

CCD とペルチェ素子は熱絶縁されたステンレスの板バネで銅円板に圧着し、効率的な冷却を計っている。

CCD の温度測定は CCD のパッケージ表面に取り付けたサーミスタにより行っている。

CCD の端子、ペルチェ素子の電源端子、サーミスタ端子は、銅円板に付けたハーメチックタイプの D-SUB コネクタを通して外部と結合している。CCD 端子からの熱流入を小さくするため、コネクタと CCD 端子の結線にはマンガン線を用いた。

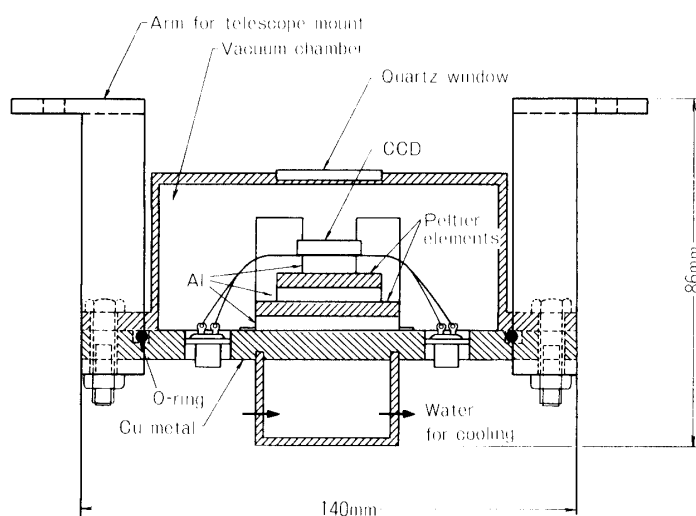


図2 CCD冷却チェンバーの概要

ステンレス円筒容器の光入射窓は、直径 30 mm の水晶ガラスである。またこの容器には、50 mm×50 mm のフィルターを着脱するためのアタッチメントを入射窓の外側に取付けることができる。

銅円板とステンレス容器は O リングを介してネジ止めし、CCD 表面への結露をさけるため  $10^{-3}$  Torr 程度まで真空引きし、十分にガス出しをした後にバルブで封じている。

水冷されたチェンバーに比べ外気温が高く湿度も高いときは、チェンバーと入射窓に露がつくことがある。この対策として、チェンバーの表面に断熱シートを張りつけ外気と遮断するとともに、入射窓の周囲にヒーターを張り付け入射窓の温度を外気温と同じ程度に保つことができるようにした。

## 2. 回路ボックス

回路ボックスは真空チェンバーと一体化して望遠鏡の主焦点に取付けるので、できるだけ小型軽量化を計る必要がある。そのため CCD の制御はマイクロコンピュータのソフトウェア制御を主とし、回路部の単純化を計っている。図3に回路ボックス内の制御回路のブロック図を示す。

回路ボックス内には CCD クロック発生回路、CCD 出力の増巾・A/D 変換回路、クロック電圧及びバイアス電圧の発生・制御回路が三枚のボードに分割して収容されている。論理素子は LS-TTL を用いた。

### (i) CCD クロック制御回路

CCD クロックの基本的なタイミング信号であるマスタクロックは、マイクロコンピュータで作られるが、回路の調整・テストの際にはボード内の発振器出力をマイクロコンピュータの制御により切替えて使用する。水平クロックパルス ( $\phi H_1, \phi H_2$ )、垂直クロックパルス ( $\phi V_1 \sim \phi V_4$ )、リセットパルス ( $\phi R$ ) 及びフィールド信号 ( $F$ ) はマスタクロックか

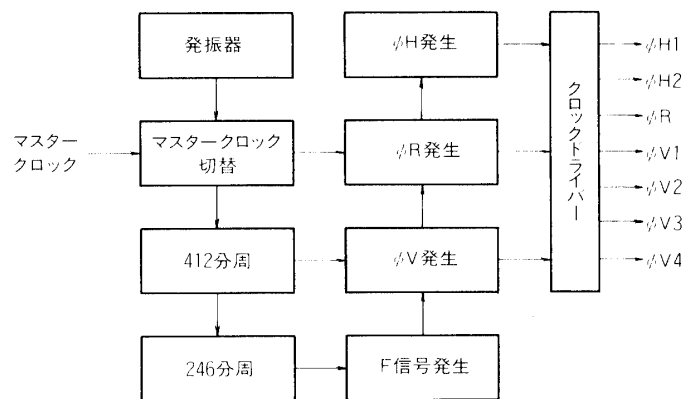


図3 CCD制御のブロック図

ら分周回路とゲートにより作られ、クロックドライバを通して CCD を駆動する。

垂直パルスとフィールド信号はマイクロコンピュータにも送られ、マスタクロックと画像データ読み出しの同期を取るのに使われる。

#### (ii) 増巾・A/D 変換回路

CCD 出力信号は高速差動アンプにより増巾 (約 10 dB) とレベルシフトされる。CCD の温度やバイアス電圧の調整により CCD の出力が変化するので、これに対応できるようにアンプのレベルシフト量と増巾率は可変とした。

差動アンプで増巾された信号は A/D 変換器に入り 12 ビットのデジタル信号に変換される。変換時間は  $2 \mu\text{sec}$  である。変換開始信号はマスタクロックから作られ、変換終了信号 (ADC Ready) はマイクロコンピュータに送られてデータ読み取りのタイミングを与える。

#### (iii) クロック/バイアス電圧発生・制御回路

$\mu\text{PD 3511 D}$  のクロックパルス電圧とバイアス電圧レベルは  $-6 \text{ V} \sim +15 \text{ V}$  まで 10 レベル必要であり、そのうちのいくつかは調整を要する。これらの電圧レベルはボード内の四端子電圧可変レギュレータにより発生調整を行なっている。またこの CCD に内蔵されているオンチップアンプの増巾率は大きいがあンプ部の消費電力も多い。そのためオンチップアンプ部の温度が高くなり、長時間の露光では熱雑音の分布にかたよりが生じる。このことをさけるためオンチップアンプの電源電圧を二段切替とし、露光中はマイクロコンピュータ制御により低電圧に保つこととした。冷却温度によっては電圧を下げ過ぎると正常な絵素信号の読み出しが行なわれないこともある。

### III. マイクロコンピュータによる制御とデータ処理

CCD の制御とデータ処理用のマイクロコンピュータには FM-11 (富士通) を用いた。システム構成を図 4 に示す。

ソフトウェアは高速処理のため CP/M-86 のアセンブラで作成してある。制御・データ処理の操作は全て対話形式のメニュー選択・パラメータ入力方式で行なっているので、観

測者はシステムのハード・ソフトを特別に意識した操作をする必要はない。

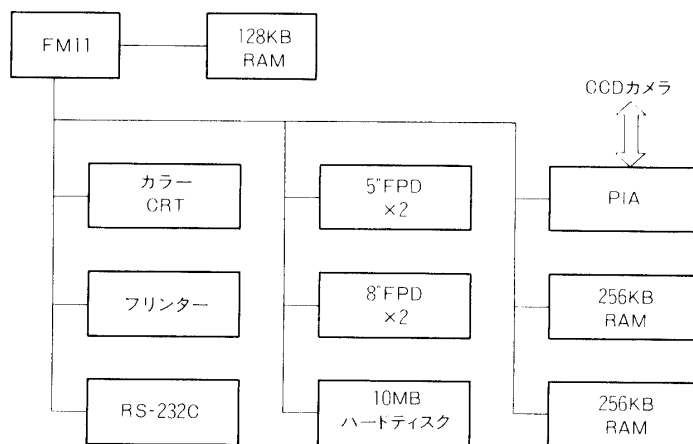


図 4 マイクロコンピューター構成

### 1. CCD カメラの制御・データ読み取り

CCD 回路ボックスとのインタフェースはペリフェラルインタフェースアダプタ (PIA 68 B 21) を通して行なっている (図 5)。KSC の 60 cm 望遠鏡のドーム内はリレーやモータからのノイズ発生が多いので、12 V レベルのドライバ/レシーバを用い、ツイストペア線ケーブルによって PIA と回路ボックスを結び、ノイズマージンを高めている。

回路ボックスからの制御信号のうち、ADC Ready 信号と V 信号は立上り/立下り検出型で F 信号はレベル検出型である。マスタクロックは ADC Ready 信号の立上りでセットされ、データの読み込み終了でリセットされる。一絵素のデータの読み込みサイクル時間は  $15 \mu\text{sec}$  で一画面全てを読み込むのに約 3 秒を要する。読み込みの開始・終了は F 信号のレベルと V 信号の検出数で同期をとって行われる。データの読み取りとマスタクロック・CCD クロックパルスのシーケンスを図 6 に示した。

露光時間は 1 秒単位で任意に設定することができ、また露光中の任意の時刻に露光を終了することも可能である。露光中は垂直・水平レジスタへのノイズの蓄積を防ぐため、CCD 絵素から垂直レジスタへの電荷転送のみを禁止し、垂直、水平のクロックパルスは連続して与えるようにした。

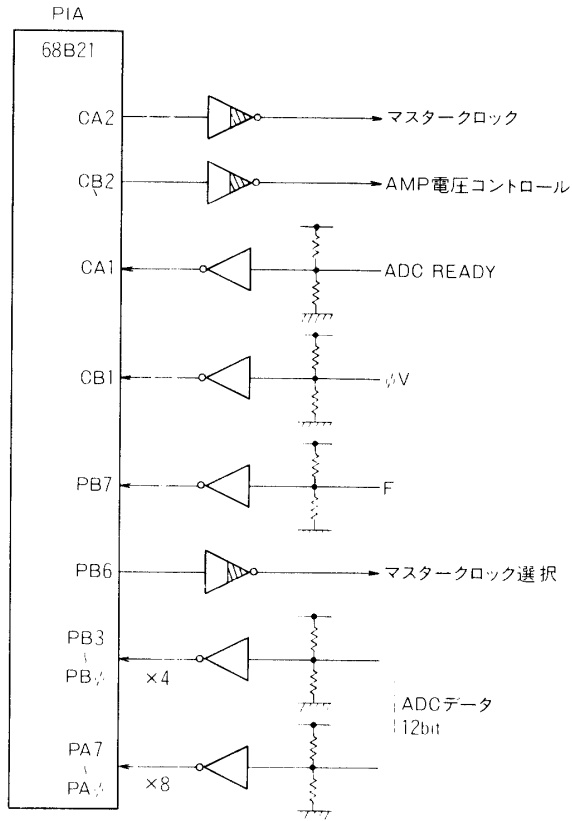


図5 CCD-FM 11のインタフェース

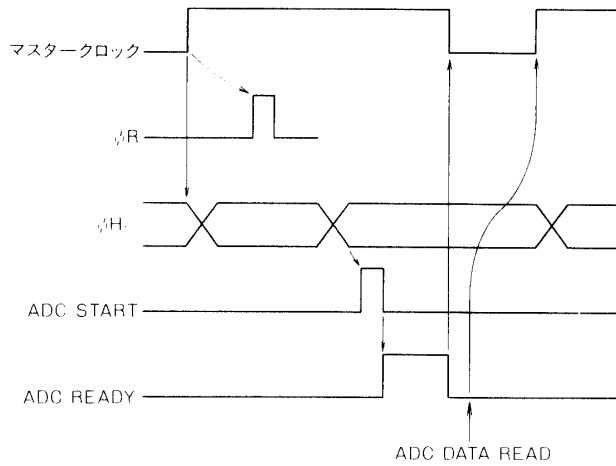


図6 データ読み込みとクロックのシーケンス

## 2. 画像データの表示・記録

メモリに読み込まれたデータはマイクロコンピュータのディスプレイに表示される。現在のところ8色(8階調)の表示しかできないが、将来は64階調程度まで表示できるように改良する予定である。表示の方法はブラック絵素(入射光をマスクした絵素)の出力レベルを用いて平均的なバックグラウンドを差引いた後、線形又は対数スケールで一絵素8色(階調)の表示を行う。表示の階調とデータ量の関係は任意に設定可能である。

画像データは、観測日時とコメントが付加されて、ハードディスク又は8インチフロッピーディスクに記録される。一画面のデータの記録には400KBを要するので、ハードディスクには19画面、8インチフロッピーには2画面分のデータを記録できる。露光からデータの記録までの処理の流れを図7に示す。

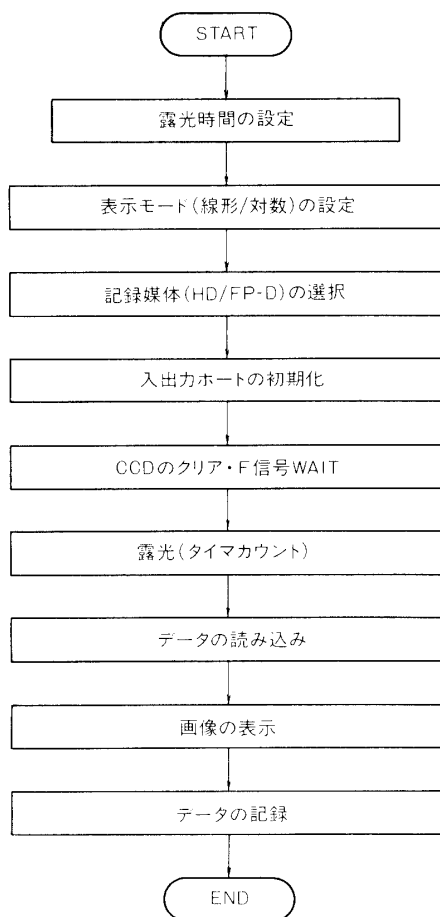


図7 CCDカメラによる観測からデータ記録までの流れ



### 3. データ処理

ハードディスク又は8インチフロッピーディスクに記録された画像データに対して現在までに、(i)画像中のObject(点源及び広がりをもった天体)の強度計算、(ii)画像データのダンプ、(iv)ハードコピーを行うプログラムが完成している。

強度計算とデータのダンプはディスプレイ上に表示された画像中の特定のObjectとSkyに対して行なわれる。Object(又はObjectとSkyの一組)の位置と大きさの指定は画面上でカーソルを移動して行う。

点源の強度計算の場合は、与えられた位置と像の大きさからその位置でのbackground(熱雑音+Skyの明るさ)を算出し、相対的な点源の強度を求めている。この計算は露光の直後に行うことができるので、同一画面上の比較量に対する相対的な等級は、観測直後に求めることが可能である。

画面のハードコピーは、絵素毎の強度を3×4ドットのビット濃度に変換し、階調の濃淡の画像としてプリンターに出力される。

## IV. CCD カメラの特性・性能

以下では実験室及び試験観測で得られた本装置の特性・性能について述べる。

### 1. 熱雑音-温度特性

熱雑音とCCDの温度の関係を図8に示す。CCDの温度はパッケージの上面で測られた値である。この特性は熱雑音を $V$ 、温度を $T$ としたとき

$$\ln(V) = C + \frac{3}{2} \ln(kT) + \frac{E_g}{2kT}$$

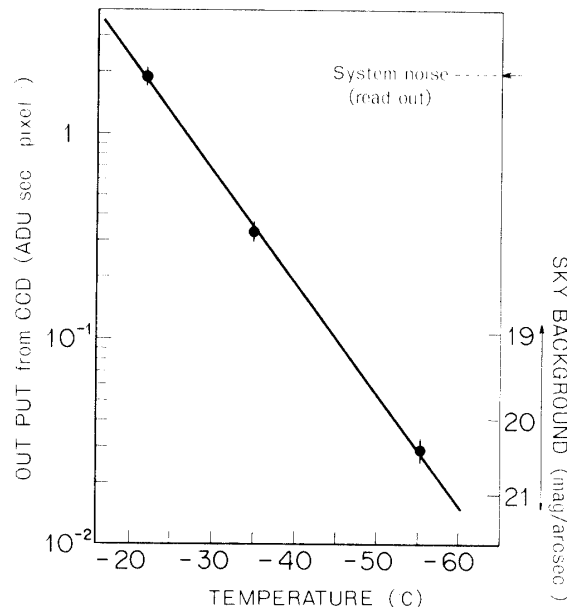


図8 CCDの熱雑音-温度特性

で表わされ、ほぼ予想通りの熱音-温度特性を示した。  $E_g$  はシリコンのエネルギーギャップ、  $k$  はボルツマン定数である。 図8の右側には KSC での夜空の明るさに対応する CCD 出力が示してある。  $-60^{\circ}\text{C}$  まで冷却すれば熱雑音は夜空の明るさより小さくなることがわかる。  $-60^{\circ}\text{C}$  での熱雑音は電子数に換算すると約 1 electron/(秒・絵素) である。

1時間以上の長時間の露光を行なうと CCD の周辺部と中央部の絵素の間での熱雑音の不均一性が現われてくる。 これは CCD の端子からの熱流入やオンチップアンプ部での発熱によるものである。

## 2. 入射光と出力の直線性・測光限界

入射光と出力の線型性をチェックするため、明るさのわかっている星を撮像したときの星の特級と CCD 出力の関係を図9に示す。 これは X 線新星 A 0620-00 の近くの星野を V, B フィルターをつけて 10 分間露光して得られたものである。 両バンドともに 5 等級以上にわたって良い直線性を示している。 V, B バンドのフィルターを付けたときの波長-感度特性は図10に示してある。

次に測光可能な限界等級を推定してみる。 星の等級は CCD 上で星像を作る絵素数  $m$ , 各要素の出力  $S_i$ , 露光時間  $T$ , 絵素当りの熱雑音  $b_{Ti}$ , Sky background  $b_{si}$  とすると

$$m = -2.5 \log \left\{ \sum_i^n (S_i - b_{Ti} - b_{si}) / T \right\} + C$$

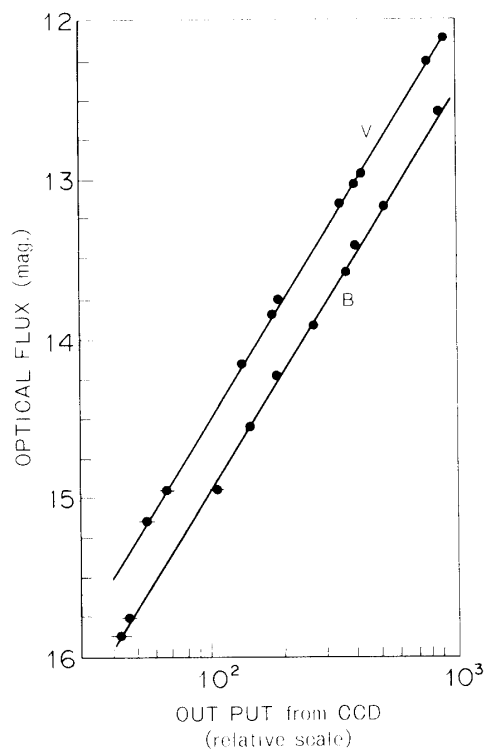


図9 入射光に対する CCD 出力の直線性

ここで  $C \approx 15.6$  (Vバンドの場合) の定数である。CCDの温度が  $-60^\circ\text{C}$  以下では KSC の Sky background は  $\overline{b_s} \approx 20 \text{ mag/arcsec}^2$  であるとする、 $\overline{b_T} \ll \overline{b_s}$  である。星像をつくる絵素数  $n$  はいろいろの条件で変化するが、通常  $n \sim 50$  程度とみてよい。バックグラウンドのバラつき、星像の写り方等を実際の観測例から推定し、 $T = 1000$  秒とすると  $m \approx 18 \text{ mag}$  を得る。さらに観測時間を長くしたときには、後で観測例の一つで示すように 20 等 (1時間) 程度までの撮像が可能である。しかしこのような場合には、熱雑音-温度特性のところで述べたように熱雑音の不均一性に対する処理が必要となる。なお長時間露出 (1.5時間までテスト) で CCD の電荷が広がって隣の絵素に漏れることはない。

### V. 観測例

今回開発した CCD カメラで試験観測や実際の測光観測を KSC の 60 cm 望遠鏡で行ったいくつかの例を報告する。画角はすべて約  $11' \times 8'$  である。

撮像例として、かに星雲、球状星団 M3, NGC 4258 を図 11~図 13 に示した。

「てんま」衛星によって発見された X 線新星 V 0331+53 の撮像画面をプリンターへハードコピーしたものを図 14 に示す。この X 線星は、たまたま CCD カメラの試験観測中に発見の知らせを受け [6, 7] フィルターを付けない白色光で撮像したものである。

測光観測の例として、この V0331+53 と、Seyfert 銀河 NGC 4151 の中心核の光度変化の測光結果を図 15, 図 16 に示した [8]

長時間の露光例としては、ハレー彗星の検出を目的として、1時間の露光により撮像したのが図 17(a) である。比較のために同一視野のパロマーチャートを図 17(b) に示した。

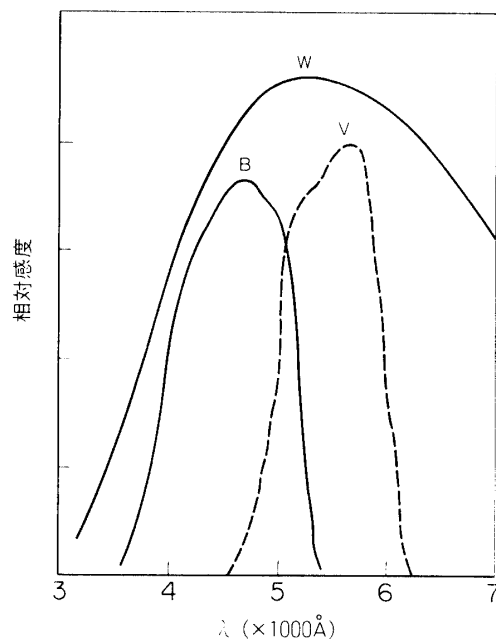


図 10 B.V バンドの波長感度特性



図 11 かに星雲, 1984年1月8日撮影, 露出時間 600 秒, フィルターなし

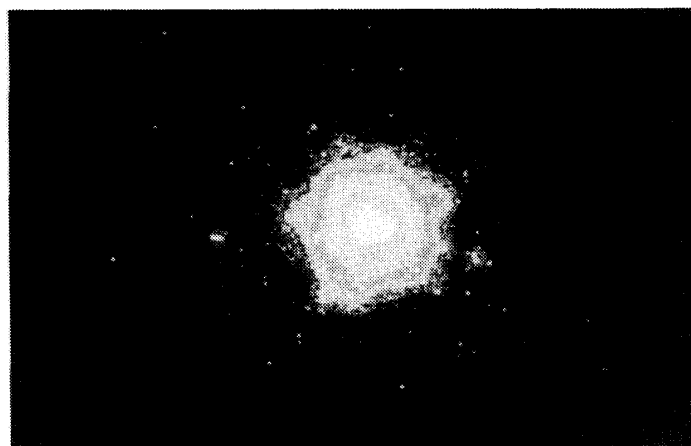


図 12 球状星団 M 3, 1984年5月1日撮影, 露出時間 600 秒, フィルターなし

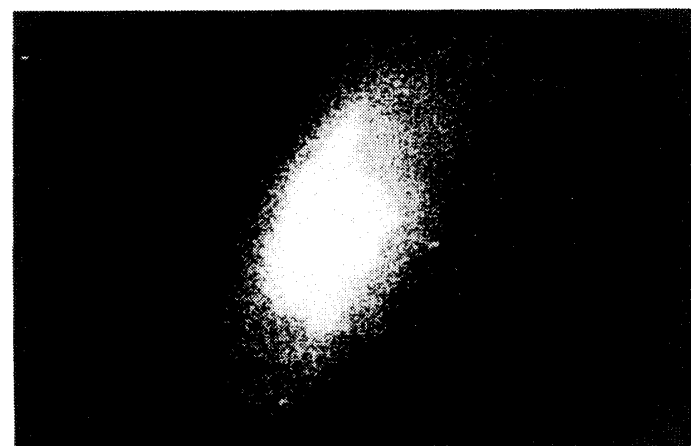


図 13 系外銀河 NGC 4258, 1984年5月1日撮影, 露出時間 300 秒, フィルターなし

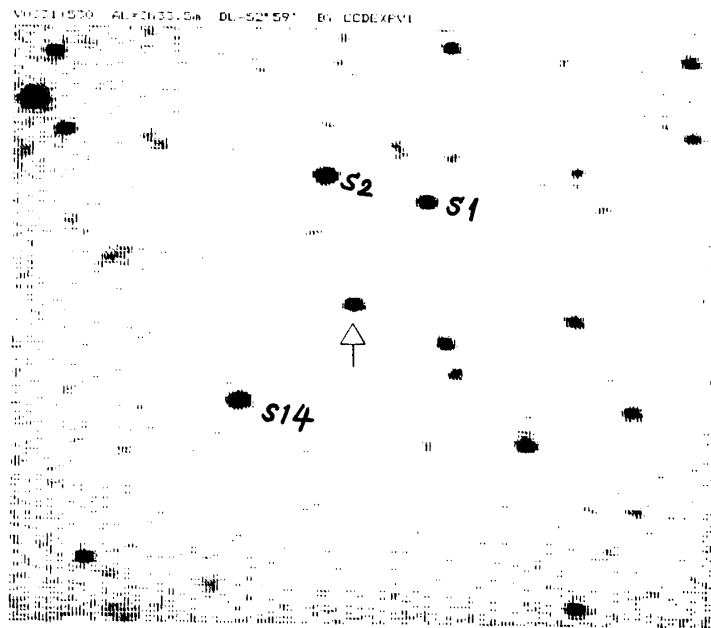


図 14 X線新星 V0331+53 (矢印) 附近の星野, 露出時間 1200 秒, 1983 年 12 月 9 日撮影, フィルターなし

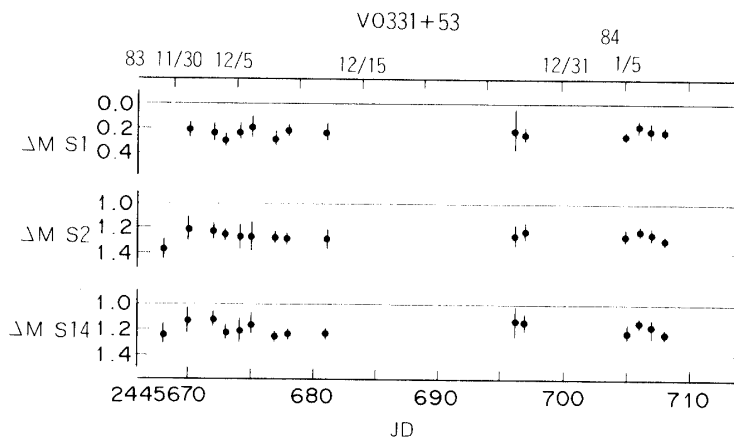


図 15 V0331+53 の相対光度変化 (比較星 S 1, S 2, S 14), フィルターなし, V=15.26 mag.

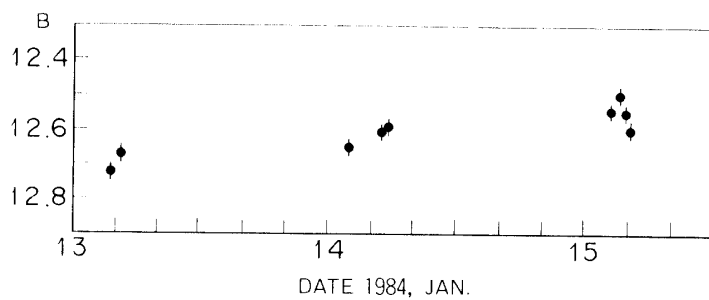


図 16 NGC 4151 の中心核の光度変化, B フィルター

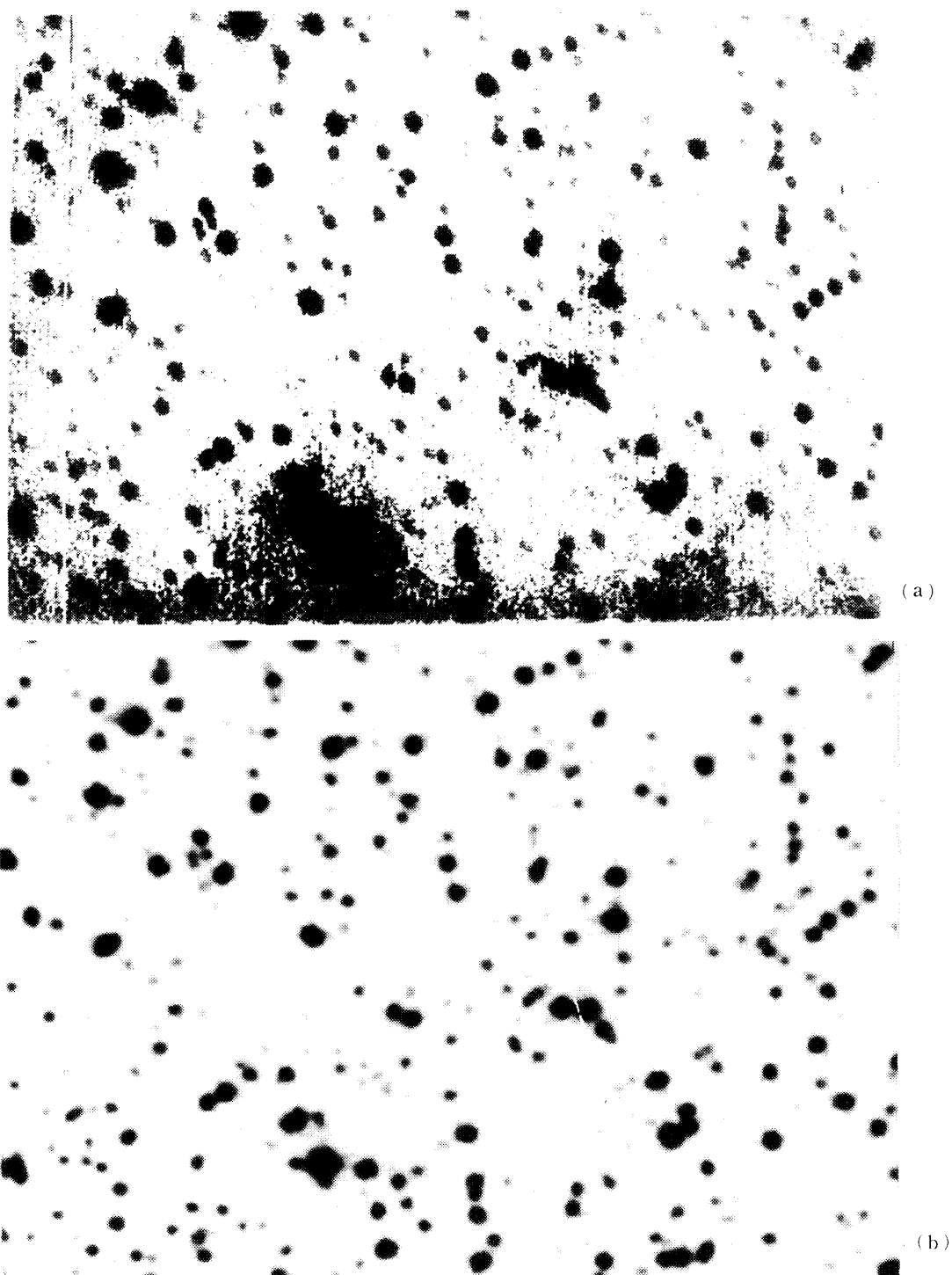


図 17 a) 1984年10月21日 U.T 17時のハレー彗星の予想位置 ( $\alpha = 6\text{ h}43\text{ m}02$ ,  $\delta = 12^\circ 26'88$ ) の星野, 露出時間 3600 秒, フィルターなし. なおハレー彗星は確認できなかった (B=20 等星より暗かった).

b) a)と同じ位置のパロマーチャート (B フィルター).

## VI. おわりに

これまで述べてきたように、実用的性能を備えた光学望遠鏡用 CCD カメラが開発できた。今後の問題点としては、この報告ではふれなかった CCD の絵素間での感度のバラツキの補正や、V バンドより長波長 (R バンド) でのテストを行う必要がある。また裏面入射型の CCD を使って感度をさらに高めることも必要であろう。さらにデータ処理能力、特に画像処理の能力を充実して星の測光だけではなく多くの観測対象に対して使用できる装置に仕上げていきたいと考えている。

X 線検出器用としての CCD を用いる場合、冷却はペルチェ素子で可能である。X 線光子 1 個 1 個のエネルギーを知るため同一絵素に 2 個以上の X 線光子が入射しない速度で読み出す必要がある。1 秒毎に読み出したとしても  $-60^{\circ}\text{C}$  まで冷却すれば問題はない。 $-60^{\circ}\text{C}$  の熱雑音は絵素当り、1 秒間で 1 電子と予想された (IV.1.)。この場合問題となる雑音は読み出しに伴う雑音である (約 50 電子数)。このため X 線用としては読み出し雑音の少い (市販 CCD では 10 電子数のものもある) CCD を選ぶことが必要である。

## 謝 辞

最後に本装置の制作にあたっては宮崎大学工学部の徳永徹治君には多大の助力をいただいた。東京天文台の菊池仙、石田蕙一両氏にはフィルターその他多くの援助をいただいた。また試験観測にあたっては宇宙科学研究所の榮楽正光氏の御助力に負うところが大きい。これらの方々に深く感謝の意を表したい。さらに本装置のために CCD 素子を提供していただいた日本電気株式会社中央研究所の白木広光氏にも合わせて感謝する次第である。

なお本研究の 1 部は著者の 1 人 (高岸) が、昭和 59 年度流動研究員 (日本学術振興会) として宇宙科学研究所に滞在して行ったものである。ここに関係者各位に感謝を表す。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] G. R. Ricker, M. W. Bautz, D. Dewey and S. S. Meyer, SPIE Proceedings 290 (1981), 190.
- [ 2 ] S. S. Meyer and G. R. Ricker, Appl. Digital Image Processing to Astronomy, ed. Elliott, D. (NASA/JPL, SPIE 264), (1980), p 38.
- [ 3 ] J. E. Gunn and J. A. Westphal, SPIE Proceedings 290 (1981), p 16.
- [ 4 ] P. Young, J. E. Gunn, J. Kristan, J. B. Oke and J. A. Westphal, Ap. J. 241, 507 (1980).
- [ 5 ] K. Takagishi, J. Jugaku, M. Eiraku and M. Matsuoka, ISAS RN 143 (1981).
- [ 6 ] K. Kodaira et al., PASJ 37, 1, (1985).
- [ 7 ] Y. Tanaka et al., IAU Circ. No. 3891, (1983).
- [ 8 ] M. Matsuoka and T. Ikegami, "X-Ray and UV Emission from Active Galactic Nuclei", MPI, Garching July 9-13, 1984, pp. 108-110.