

冷却CCDカメラによる観測入門

福島 英雄 (hideo.fukushima@nao.ac.jp)

(1) はじめに

冷却CCDカメラは、ひじょうに優れた天体撮像用カメラであり、単純に画像として記録するだけではなく、比較的簡単な測定により高精度なデータを得られることから、彗星の物理的研究のために貢献できる主要な観測装置である。1989年に初めて、アメリカのSBIG (Santa Barbara Instrument Group) 社から、アマチュア向けの低価格な製品 (ST-4) が発売されて以来、13年経った。その間、国内外を含めいくつかのメーカーが性能向上を目指し改良を重ねてきており、現在では、各社から測光観測にも十分な精度で実用できる製品が販売されている。価格は一見安くはなっていないが、一世代前のプロ用の製品と比較すると、それらと同等な高性能機種を当時では考えられない低価格で購入できるのである。

現在、冷却CCDカメラを使用し、常時、彗星観測をしている観測者は、国内では10人程しかいない。冷却CCDカメラの所有者は、少なく見積もっても200人以上ではないだろうか。今回の2大彗星の出現をきっかけとして、研究用に使用可能なデータを取得することができる観測方法を理解し採用していただきたい。初めてCCD観測をされる方々でも、天体観測の経験がある程度あり、望遠鏡とパソコンの操作ができれば、難しいことはない。たとえば、観測場所が光害のひどい都会の中心地であっても、しかも1分以内の短時間露出でも、暗くて淡い天体がフィルムによる写真撮影と比較にならないほど良く写ることに驚くだろう。この感激を忘れずにCCD観測を継続研究していただきたい。より大勢のベテラン観測者が育つことを期待している。

この項目では主に、筆者が常に行っている観測および画像処理、測定方法について具体的に解説する。

現在、筆者が彗星観測に使用している機材を紹介する。

望遠鏡：口径50cmカセグレン式望遠鏡 (三鷹光器GNF-50 / F12 / フォーク式赤道儀)

口径36cmシュミットカセグレン式望遠鏡 (セレストロンC-14 / F11)

口径12.5cm屈折望遠鏡 (BORG125ED、F6.4 / F4.0)

300mm望遠カメラレンズ (タムロンSP300mmF2.8ED)

広角カメラレンズ ($f=24\text{mm}$ 、 $f=8\text{mm}$)

移動観測用赤道儀：アトラクス (ビクセン / スカイセンサー)、GP (ビクセン)

冷却CCDカメラ：ST-1001E (SBIG)、ST-8E (SBIG)、ST-6 (SBIG)、CV-16 (MUTOH)

フィルタ：U、B、V、R、Iバンド (標準測光システム)

C_2 、 CO^+ 、Na、 H_2O^+ (ナロー・バンド)



図1 国立天文台（三鷹構内）に設置されている「口径50cm社会教育用公開望遠鏡」

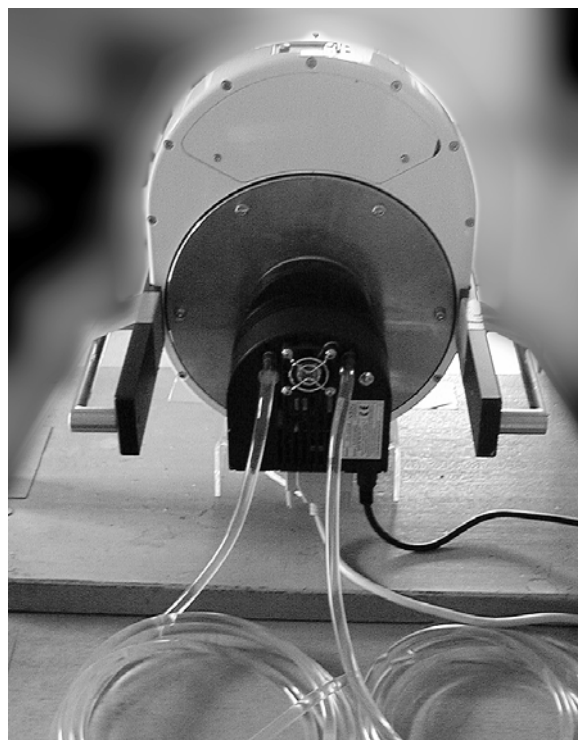


図2 6連装電動フィルタ・ホイールに連結したST-1001E（SBIG）

（2）冷却CCDカメラの構造と特性

CCDとは、「Charge Coupled Device」を略した名称で、日本語では「電荷結合素子」と呼ばれている。各画素に蓄えられている光量の情報を取り出す方法として、画素ごとの電荷を結合しながら一列に転送する構造のイメージセンサのことである。電荷の転送方式にはいくつかの種類、「フレーム転送方式」、「インターライン転送方式」、「フレーム・インターライン転送方式」、「XYアドレス方式」などがある。冷却CCDカメラは、基本的にフレーム転送方式と同様であるが、現在のほとんどの機種が「フルフレーム型」と呼ばれる方式である。一時的にフレーム・メモリ（マスクをかけた別のCCDなど）に蓄積せずに直接A/D変換される仕組みだと思われる。

CCDの性能向上は近年目覚しく、解像度は写真フィルムと同等になっている。大量生産されるものは価格が安く、イメージセンサとしてビデオカメラ、デジタルカメラ、携帯電話機内蔵カメラ、監視カメラなどに使用され、幅広く一般に普及している。最近のCCDは、ひじょうにノイズが低い製品が開発されている。しかし、CCDは、光が全く当たっていない状態でも、暗電流と呼ばれる熱的に発生する電流が生じ、画素ごとにレベルが異なる電荷信号が出力され、画像にはザラザラ・ブツブツのノイズとして現れる。この暗電流によるノイズを「暗電流ノイズ（ダーク・カレント・ノイズ）」という。露出時間が長くなるほど、たくさんのノイズが蓄積され、常温では、数秒間以上の露出をかけると、画像全体がノイズに埋もれてしまう。ホーム・ビデオカメラでスローシャッター機能がある機種では、1/4秒くらいの露出でもかなりザラついた映像になってしまう。ただし、最近、デジタルカメラの

一部製品では、3～5分間の露出まではノイズがあまり目立たず、天体撮像に十分実用できるものが開発された。これは、発生ノイズが極端に少ないCCDを採用しており、さらに自動で補正される、優れたノイズ・リダクション機能を持っているからである。これが使えれば、手軽に撮像できるのだが、現段階では、高精度な測光をするには問題があるだろう。

CCDは、冷却することにより暗電流が減る特性がある。CCDの温度を常温から8～10度下げると、暗電流は約半分になるといわれている。そこで考案されたのが冷却CCDカメラである。低温になるにつれ暗電流ノイズが少なくなるので、その分、長時間露出が可能となる。ただし、温度を下げるだけではノイズは完全にはなくなる。-100 付近まで冷却すると、暗電流ノイズはほとんど0レベル近くになるが、その他、電荷転送中や電荷信号伝送中に増幅、スイッチングなど電子回路で発生した電氣的ノイズは残っている。これらを「読み出しノイズ」と呼んでいる。読み出しノイズも、冷却すると次第にレベルが下がってくるが、減少の割合は比例せず、-40～-60 付近で頭打ちになるようだ。また、本来のノイズとは言えないが、入射光を完全に遮り露出時間を0秒で撮像した場合、バックグラウンドのレベルが0にならないように、電氣的に出力値を少し持ち上げ補正している。これを「バイアス」と呼んでいる。冷却CCDカメラの0レベルは、レベル値を0にしていない。暗電流、電氣的ノイズはピクセルごとにばらつきがあり、0レベルを0にすると、マイナスの値になるピクセルがあることになる。出力されるデータは、符号なし整数であるから、これでは都合がわるい。そのため、0レベルを少し持ち上げゲタをはかせている。その様子を図3に示す。バイアス値は、各社機種ごとに異なっている。参考までに、SBIG社製のほとんどの製品は、レベル・カウント値で約100に設定されている。

上記のノイズ成分を全て含めて、「ダーク・ノイズ」と定義する。光がまったく当たらない状態で撮像して得られる画像を、「ダーク・フレーム」と呼ぶ。画素ごとにノイズ量が異なるので、画像には、不規則なパターンでノイズ成分が含まれていることになる。冷却温度が同じであれば、ダーク・ノイズの分布とレベルは変わらないはずである。同じ条件でダーク・フレームを撮像して、その画像で引き算することによって、ノイズ成分を除去することができるのである。

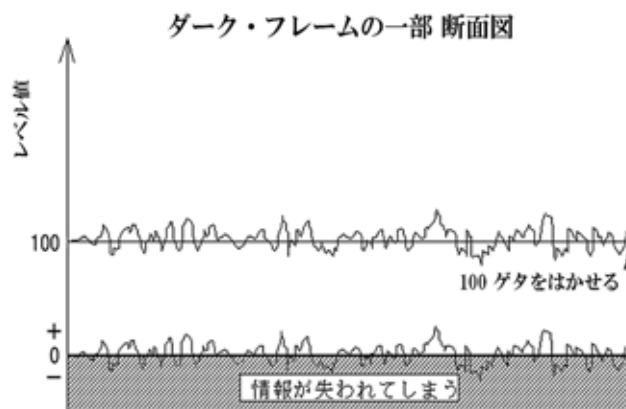


図3 バイアスの説明

CCDを冷却する方法は、ペルチエ素子（電流を流すと片面が冷え、反対面から放熱する半導体）をCCDチップの裏面に接続して冷やす構造の「電子冷却方式」、カメラ・ボディを魔法瓶のような構造にし、その器に液体窒素を注入して、液体窒素に浸かっている金属板を介して冷却する「液体窒素冷却方式」、液体ヘリウムを循環させる冷凍機を使用した「冷凍機冷却方式」の3種類がある。アマチュア向けの量産機種は、全てが電子冷却方式を

採用している。この方式では、冷却温度は外気温度からマイナス30～40 までが限界である。特にCCDチップの面積が大きい場合、1つのペルチエ素子だけでは能力不足なので、ペルチエ素子を2段に重ねている。特別注文として3段重ねも用意されている。また、ボディー周りを空冷フィン構造にし、熱気排出ファンを付け放熱効果に工夫を凝らしている。さらに、水を循環させ放熱を強化する水冷機能を併せ持った機種もある。その他の方式のカメラは、-100 以下に冷却できる能力がある。しかし、1500万円を超える高価な製品である。

CCDを冷却すればダーク・ノイズは減少するが、冷やすほど良くなるということではない。ノイズ減少率の頭打ちがあり、その他、-110～-120 以下になると、CCDの量子効率と電荷転送の効率が悪くなると言われている。液体窒素冷却方式では、逆に、ヒーターで暖めながら温度コントロールを行い、設定温度以下にさがらないようにしている。

次に、冷却CCDカメラの主な長所を示す。

- ・感度が高い。CCDの量子効率は、機種により差があるが、20～80%である。写真フィルムなど感光剤は、1%以下である。
- ・ダイナミック・レンジが広い（階調が豊富）。最近では、ほとんどの機種がA/D変換のビット数は16ビットであり、65536階調もある。写真の階調は、コントラストが強い高感度フィルムでは、約1000倍以下の光量差しか表現できない。
- ・写真フィルムのような低照度相反則不軌がなく、露出時間と出力輝度レベルは比例する。また、 γ （ガンマ）が1.0に近く、輝度特性は、ほぼ勾配45度の直線である。写真フィルムから測光するためには、基準光源でステップ・ウェッジなどを写し込み、濃度特性曲線を求め、測定した濃度を補正しなければならない。CCD観測ではその必要がない。
- ・天体の光度測定が簡単にでき、精度が良い。
- ・CCDの各素子の配列は正確で受光面の平面性が良いため、位置測定の精度が良い。
- ・個々の画素ごとに感度ムラがあるが、フラット・フィールドを撮像し補正することができる。それにより、同時に光学系の光量ムラとレンズやフィルタ面に付着したゴミのパターンも補正される。
- ・撮像した画像はデジタルで出力されるため、直接パソコンで処理をすることができる。
- ・撮像直後に画像をチェックできることから、短時間露出の試し撮りを行い、フォーカス合わせと構図合わせが確実にでき、また適正露出時間を決定することができる。

測光観測を高精度に行い、正確な測定結果を得るためには、使用するカメラの性能評価が大切である。メーカーが公表しているデータだけでは不十分である。ダーク・ノイズの冷却温度と露出時間の関係による変化、実際の冷却温度の時間的変動、それから、入射光量に対する出力レベル値の関係である輝度特性を求めておくことが必要である。同じ形式の機種でも製品ごとに特性は異なるので、個々のカメラごとに実験観測、測定をしなければならない。

ダーク・ノイズの特性を求めるのは、簡単である。CCDに光が当たらないようにカメラ前面に蓋をして（一部の機種は、機械式シャッターの設計が悪く、周囲が明るいと、直接の入射光は

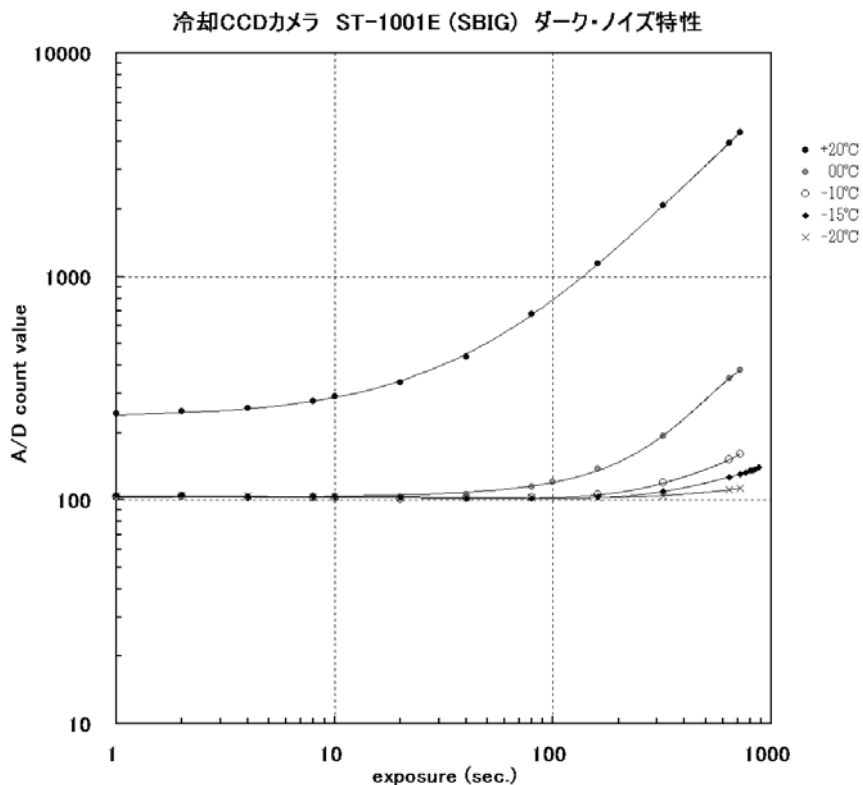


図4 ダーク・ノイズの特性(1)

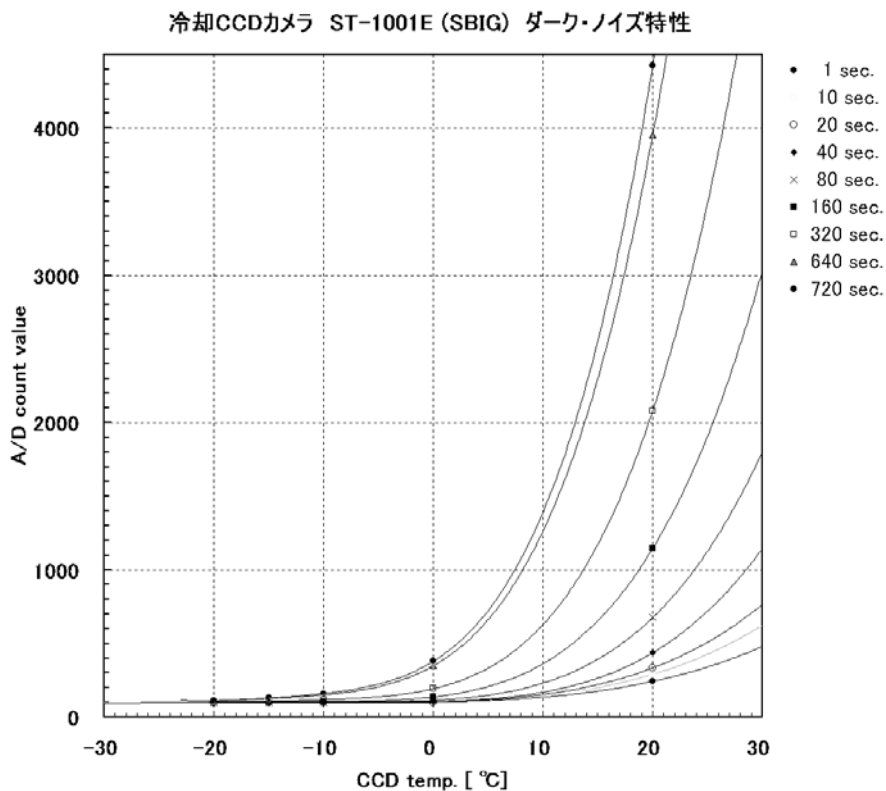


図5 ダーク・ノイズの特性(2)

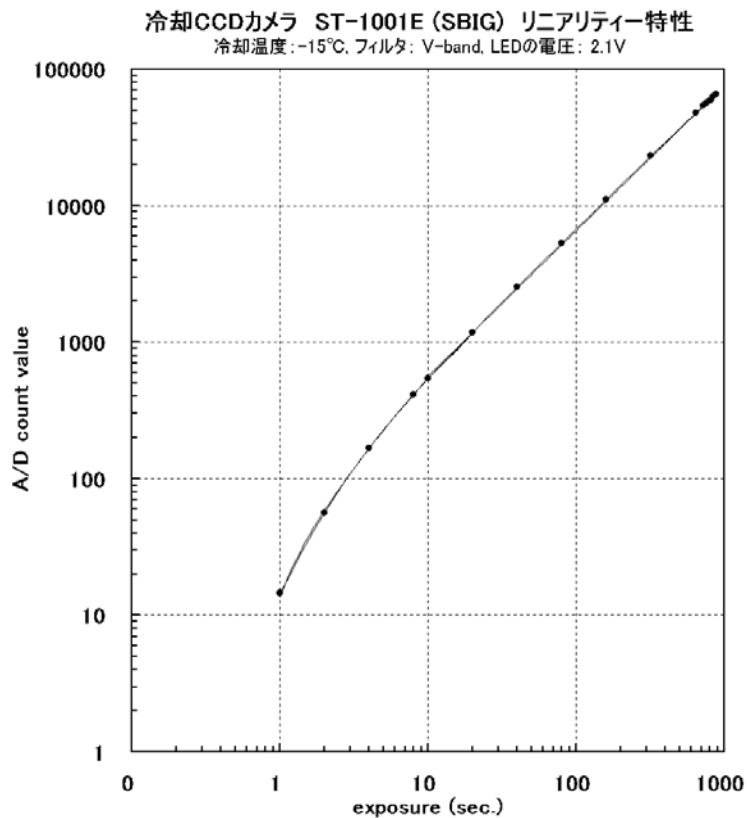


図6 輝度特性 (1)

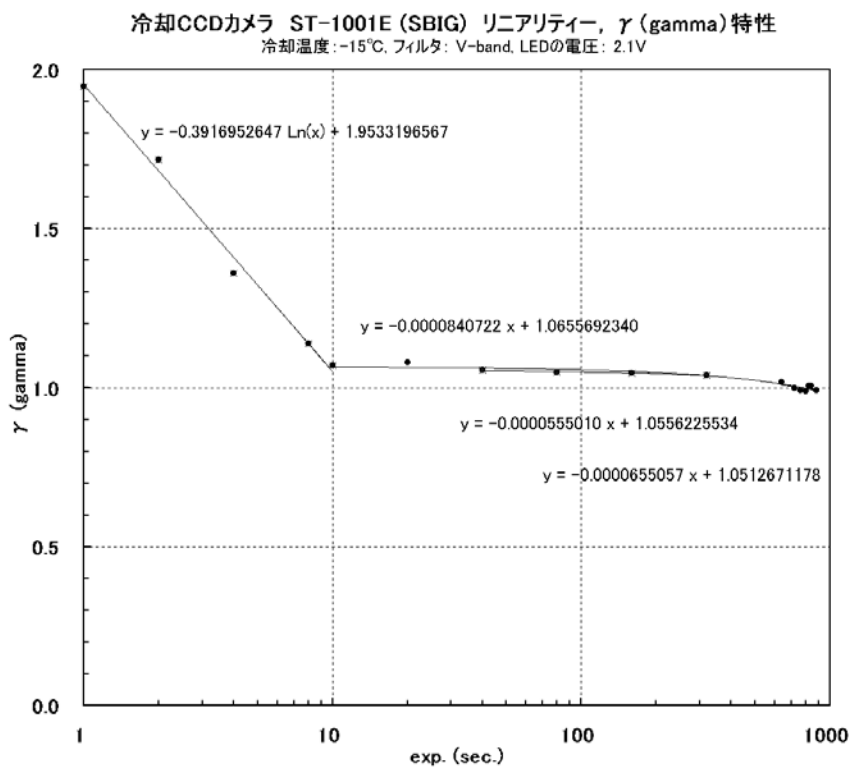


図7 輝度特性 (2)

遮るのだがシャッター板の付近に隙間があるため、反射散乱して回り込んできた光を受光してしまう。SBIG製のカメラがその構造なので注意が必要。) 冷却温度を変えながら(5 間隔に設定を変えるのがよい) それぞれの温度で露出時間を最短から15分くらいまで段階的に変えながら(対数で等間隔、1、2、4、8、16、32、60、120、240秒……のように倍・倍の設定がよい) ダーク・フレームを撮像する。光が当たらなくてもコスミック・レイ(放射線や宇宙線)がランダムな位置に写るので、撮る枚数は1枚ずつではなく、それぞれの設定ごとに最低6枚は必要である。10枚ずつあれば、申し分ない。後に、それぞれメディアン(中央値)を採ったコンポジット(合成)処理をした画像を測定する。詳しくは、「画像処理」の項で解説する。筆者が測定したSBIG社のST-1001Eのダーク・ノイズ特性を図4、5に示す。

冷却温度制御の安定性(時間的変動)を調べるには(冷却温度は、カメラ制御ソフトの画面に表示されており、またセーブした画像ファイルのヘッダーに記録されるが、値は正確ではなく信用できない。) 冷却能力の負荷が制御ソフトの画面に表示されているので、80~90%(* 90%を超えないように)になるように冷却温度を設定して、同じ露出時間でダーク・フレームを連続撮像する。CCDの温度が変わると、ダーク・ノイズのレベルが変化するので、その時間変化を解析すると、温度の変動をチェックできることになる。ここで、露出時間が短いと、温度差に対するレベルの差が小さ過ぎるため判定できないので、冷却温度が低い場合は、5分以上の露出時間が必要である。これでは、短時間の変動が検出できないが致し方ない。別に、温度設定を0くらいに高くして、1分露出くらいでやってみるのもよいだろう。撮像は、自動連続モードで行なうが、露出が終わりファイルのセーブが終了後すぐに次の露出を開始せず、インターバルを設定して20~30秒間ほど間隔をあけるようにする。温度制御を確実に働かせるためである。

輝度特性を求めるには、少し厄介である。まず、光量が変化しない光源が必要である。空の明かりなど自然光や電球、蛍光灯は変動がかなり大きいので、利用することができない。高精度な基準光源を使いたいところであるが、一般的に無理である。そこで、必要十分な精度で安定している光源としてLED(発光ダイオード)を利用する。緑色のものが適している。電源は、普通のDC電源では、高級な製品でも周期的な電圧あるいは電流の変動があるので使うことができな

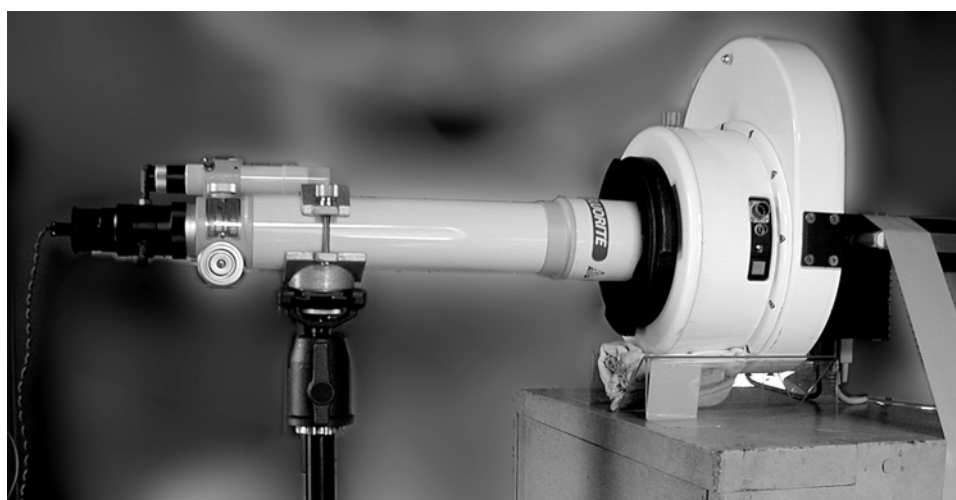


図8 LEDを光源に使用したCCDカメラの輝度特性を求める実験の様子

い。身近にある乾電池が意外と安定している。新品の単1乾電池（アルカリ）をいくつか並列に繋ぎ、可変抵抗を接続して電圧を調整する。発光ダイオードの耐入力電圧は普通2.1Vなので、それ以上の電圧をかけ電流が流れ過ぎると破損してしまうから注意すること。また、+ - を間違わないように。筆者の実験撮像方法を紹介する。図8の写真のように、小型の屈折望遠鏡を逆に使いコリメータとして代用した。屈折望遠鏡の接眼部の無限遠焦点位置に発光ダイオードを取り付ける（接眼レンズは使用しない）。フォーカスを調整するとLEDの光が対物レンズから放射される。周囲の光が鏡筒内に入り込まないように、隙間を黒いビニールテープなどでふさぎ十分に遮光しなければならない。次に、できるだけ均一な光束をCCDに当てるため、対物レンズのフード内にディフューザ（拡散板）を組み込む。これは、半透明乳白色である、トレーシング・ペーパーやスーパーマーケットのビニール袋などが利用できる。そして、対物レンズ・フードを、光軸センターを合わせて、冷却CCDカメラの前面に密着させる。これも、光漏れがないように十分に遮光する。フィルタは使わなくてもかまわないが、どこの波長で測定したかを明確にするため、Vバンドの特性に近いフィルタの使用を推奨する。準備ができれば、露出時間を1秒から15分くらいまで段階的に（対数で等間隔になるように）変えながら撮像する。最初に、テスト撮像にて光量調整を行なう。最も長い露出時間の画像全体の最大レベル値が飽和するぎりぎりの値（16ビットA/D変換ならレベル値が62000~64000/コスミック・レイを除く）になるように、LEDにかける電圧を調節する。補助としてディフューザの枚数を増やしつつ調整してもよいだろう。こうして得られた画像は、ダーク・フレームで一次処理を行ってから画像全体の平均レベルを測定する。コスミック・レイの除去補正も必要である。「画像処理」の項を参照。SBIG社のST-1001Eの特性を図6、7に示す。これらのグラフを見ると、入射光量（横軸）に対する出力レベル値（縦軸）の関係は、露出時間が10秒以下では比例していない。このことから、このカメラは、測光観測では、10秒以下の露出時間が使用できない。原因は、機械式シャッターにある。このカメラのシャッターは、遮光板を小型のモーターで回転させる構造であり、CCDの受光面積が大きいので遮光板も大きく、瞬時に開閉できないことによる。10秒以上の露出時間では、ひじょうに優れた特性であり、レベル値が飽和するまで、ほぼ傾き45度の直線である。図7のグラフは、縦軸に（勾配）をとったものである。多少ばらつきはあるが、10秒以下の露出時間のものを除外して平均をとると、値は1.026となった。実際の補正値は、別のグラフで、x軸をレベル・カウント値、y軸をとして、線形でフィッティングした次の数式を採用することにした。

$$y = -0.00000114 x + 1.06556923 \dots \dots \dots [式1]$$

この値は、測光観測における、等級を求める計算式に補正係数として組み込むことになる。

その他、CCDカメラの分光感度特性を入手する必要がある。実際に観測測定するためには、分光器などを使用しなければならないので一般的ではない。とりあえず、メーカーが公表しているデータを参考にすることになる。図9は、ST-8EとST-1001Eのメーカー・カタログによる特性である。

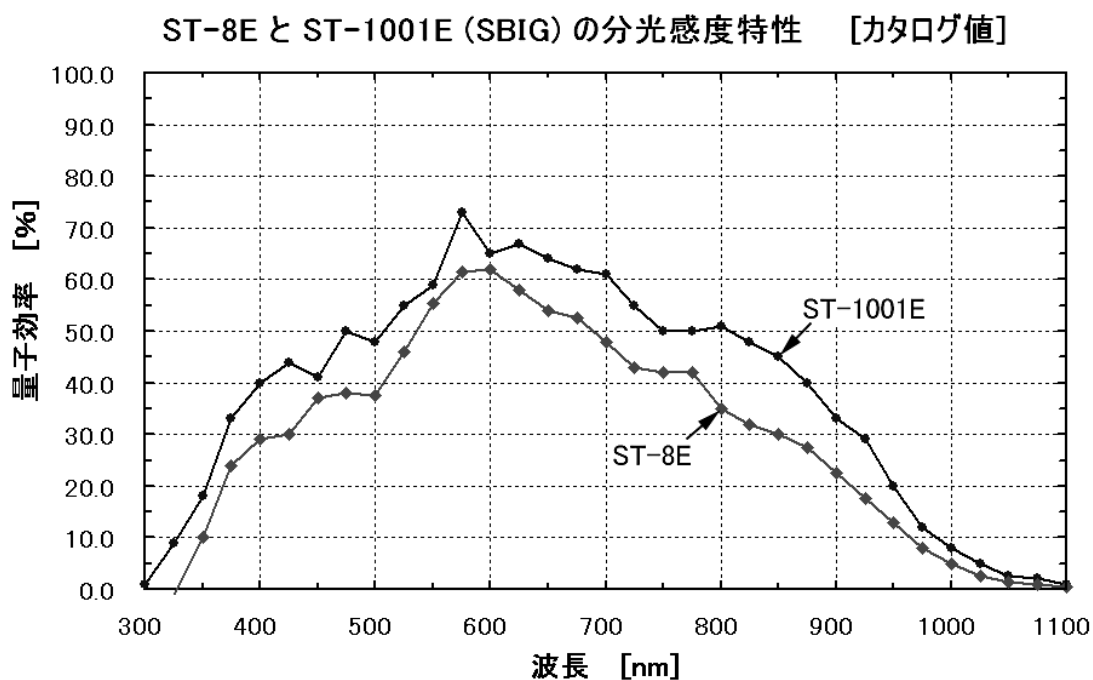


図9 SBIG社のST-8EとST-1001Eの分光感度特性 (CCDチップ単体のカタログ値)

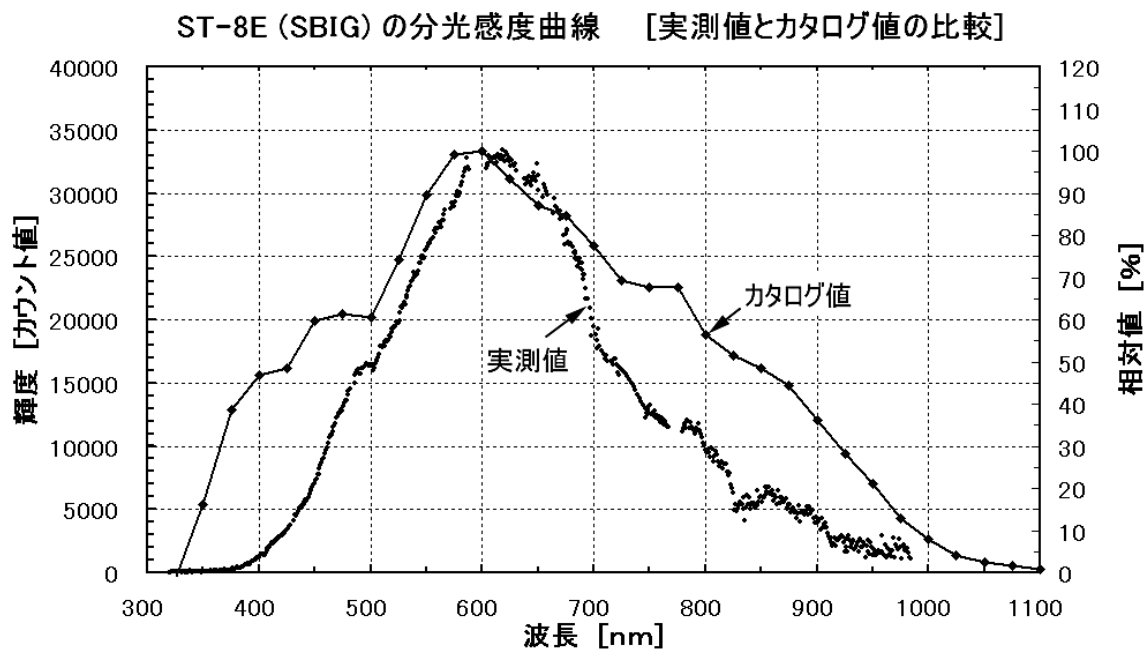


図10 SBIG社のST-8Eの分光感度特性 (実測値とカタログ値の比較)

CCDの分光感度特性は、数年前までの製品では、裏面照射型（価格が高かったので、アマチュア向け製品では装備されなかった）以外は長波長側に偏っており短波長域の感度がなく、Bバンドの観測は、フィルタの透過率も悪かったこともあり、感度不足のため不可能であった。さらに短波長側、Uバンドの波長域は全く感度がなかった。最近のCCDは、波長全体にわたる量子効率を上げつつ、ピークを短波長側へずらすことによって短波長域の感度を上げている。

図10は、ST-8Eの分光感度特性の実測値（相対感度）である。小型分光器にて、さそり座星のスペクトルを撮像し測定した。比較のため、カタログ値の特性もピークを合わせてスケールングしプロットしてみた。それぞれの特性は、ずいぶん大きな差があることがわかった。さそり座星のスペクトル型はB0であるが、分光標準星カタログの校正データにより補正しているため、大きな偏りはないはずである。なお、波長830nm付近の凹みは、地球大気による吸収線である。この違いは、カタログ値はCCDチップのメーカーが公表しているチップ単体の特性であり、カメラとして製品化されると、電気的な特性で変化するだろうし、使用した望遠鏡と分光器の光学系の特性が合成されているのが原因と思われる。

(3) 望遠鏡、カメラレンズの選択

冷却CCDカメラによる彗星の撮像観測に用いる望遠鏡など光学系の選択は、特別なものを用意する必要はない。ただ、写真フィルムと比較するとCCD受光面積がずいぶん狭いので、写る範囲を計算して把握しなければならない。受光面の大きさによる写野範囲、すなわち焦点面上の角距離を求めるには、角距離を $[\text{°}]$ とし、光学系の焦点距離を $f [\text{mm}]$ 、受光面上の長さを $L [\text{mm}]$ とすると、次式で計算できる。

$$= 2 \times \arctan ((L / 2) / f) \dots\dots\dots [\text{式2}]$$

観測目的により、光学系の焦点距離を決定することになる。この項目では、多くのアマチュア観測家が所有しているST-8E (SBIG) のCCDサイズ (13.8×9.2mm) のカメラを使用することを前提として解説する。

ジェット構造や核分裂など、核近傍の微細構造を捕らえるには、大口径・長焦点距離望遠鏡にかなうものはない。一般のアマチュア観測者は小口径で短焦点距離の望遠鏡の使用が大半となるので、大口径望遠鏡を使用できる方々は、世界的に数少ない貴重な観測として、この環境を有効に利用して観測を継続して欲しい。他の方々でも、彗星の全光度が1～2等級であれば、感度が高いという威力で、たとえ小口径で焦点距離が短くても、バーロー・レンズなど拡大光学系を使い、かなり拡大しても良像が撮像できる可能性が高い。ぜひとも挑戦していただきたい。

平均的な彗星は、光度が約8等級より暗い場合は、コマの視直径は5角以内であるので、焦点距離が3000mm以下なら、コマ全体を画像フレーム内に収めることができるだろう。それより明るくなると、コマ視直径は大きくなり、角距離20以上の顕著な尾が写ることが多いので、その分、焦点距離は短めがよいことになる。望遠鏡の形式はどれでもかまわない。しかし、選択するにも迷ってしまうものだ。筆者の判断では、通常の彗星観測は、CCDのサイズがST-8Eと同等

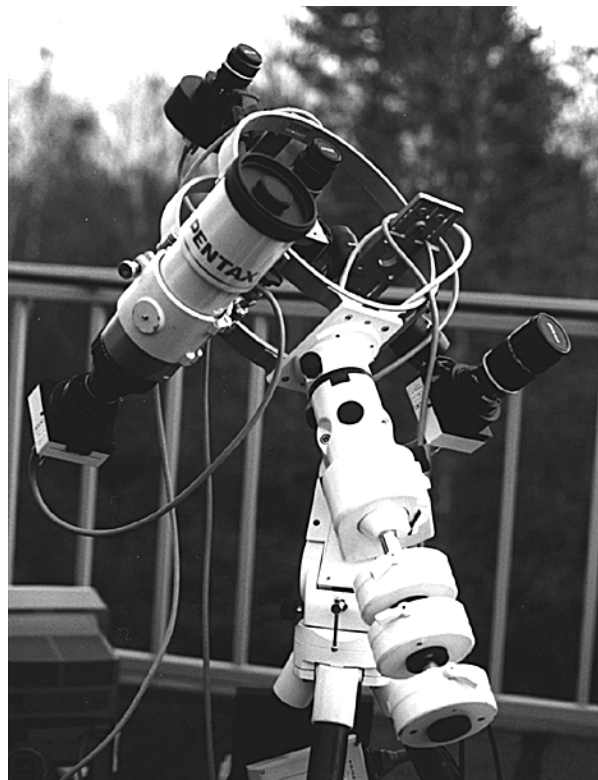


図11 筆者らがヘール・ボップ彗星を観測したカメラレンズ装着4連冷却CCDカメラ



図12 焦点距離180mmカメラレンズで撮像したヘール・ボップ彗星の尾
1997, Mar.9, 19h33m (UT)

ならば、1000~2000mmの焦点距離が適切だと思われる。

大彗星の長い尾全体を写すには、それなりに広角な光学系を必要とする。一眼レフカメラ用の交換レンズを利用するのがよい。冷却CCDカメラに交換レンズを取り付けるには、天体望遠鏡ショップからアクセサリとして販売されているカメラマウント・アダプターを使用する。このアダプターは、スライド式交換方式のフィルタ・ボックス構造になっている（望遠鏡へ取り付ける場合もこれを使用することを推奨する）。尾の長さが 10° 弱なら、ST-8Eに焦点距離105mmのレンズを装着すれば、視野角（対角）は、 9.04° となりちょうどよい。それ以上の長大な尾であれば、尾全体を1枚のフレームに収めるためには、より広角なレンズを使わなくてはならない。しかし、焦点距離が短くなると、分解能と極限等級が低下する。微細構造を犠牲にしなければ、特殊な観測を除いて、105mm以下の広角レンズの使用は勧められない。長めの焦点距離でも、構図を振りながら撮像し、後の画像処理にてモザイク画像として結合する手法がある。

その他の注意点として、CCDカメラは近赤外域まで感度があるので、純粋な反射系ではなくレンズを使用した光学系では、色収差のため、Iバンドでの観測や他のフィルタでも波長700~1100nmでリークがある場合、波長バンドによりフォーカス位置に差が生じ、また像がぼけることがある。色消しレンズの設計により度合いは異なるだろう。EDレンズなどは、フィルムによる

写真撮影や眼視観測の波長域では色収差がひじょうに少ないのだが、中には近赤外から赤外域で収差が急増する光学系もある。そのような場合は、700nmが50%の透過率として長波長側をカットする赤外カット・フィルタを使用すると対策できる。Iバンドの観測は反射系を使うべきであり、この波長域で色収差が大きく変化している場合は対処法がない。

(4) 測光用フィルタ

測光観測を行なうには、それぞれのバンドごとに決められている分光透過特性のフィルタを使用しなければならない。それぞれのバンドで定義された特性と同じ結果を得られる光学的特性を持つフィルタ・システムを測光システムという。

- U B V : Johnson
- R I J K L M N : 拡張Johnson
- R I : Kron-Cousins
- u v b y beta : Stroemgren

など、いくつかのシステムがある。

現在、冷却CCDカメラによる観測で使用されている標準測光システムは、表1のように。U、B、Vバンドは Johnson system (ジョンソン・システム) であり、R、Iバンドは Kron-Cousins system (クロン-カズンズ・システム) を採用している。Johnson-Cousins system、あるいは、Johnson-Kron-Cousins systemと呼ばれている。この複合システムが使われる理由は、

表1 冷却CCDカメラ用の標準測光システムのフィルタ仕様

バンド(色)	中心波長 [nm]	半値幅 [nm]	システム名称
U (紫外)	350	73	Johnson system
B (青)	440	73	Johnson system
V (実視)	550	84	Johnson system
R (赤)	650	100	Kron-Cousins system
I (近赤外)	800	150	Kron-Cousins system

表2 Johnson system のR、Iバンドの仕様

バンド(色)	中心波長 [nm]	半値幅 [nm]	システム名称
R (赤)	700	220	Johnson system
I (近赤外)	900	240	Johnson system