

現在、使用可能な標準星カタログがこのシステムを採用しているからである。Johnson systemの R、I バンドは、現在、ほとんど使われていない。表 2 に比較参考のため示す。これらと区別するために、「U B V R c I c」、「U B V (R I) k-c」などの表記を使うこともある。

CCD観測用の標準星カタログを次に示す。

- UBVR Photometric Standards Around the Celestial Equator; Landolt, A. U. 1983, Astron. J. 1988, 439-460.
- UBVR Photometric Standards in the Magnitude Range 11.5<V<16.0 Around the Equator; Landolt, A. U. 1992, Astron. J. 104, 340-371
- CCD Photometry of M67 Stars Useful as BVRI Standards; Schild, R. E, P.A.S.P. 1995, 1021
- LONEOS / Johnson-Cousins BVRI photometry for faint field stars version, 11 Jul 2002

<http://www.tass-survey.org/tass/catalogs/catalogs.html>

<http://www.tass-survey.org/tass/catalogs/catalogs.html#loneos>

<ftp://ftp.lowell.edu/pub/bas/starcats/loneos.phot>

各バンド間の等級差として、U-B、B-V、V-R、V-Iが使われている。これらを色指数と呼ぶ。測光では、システムの変換係数、大気減光係数などの算出や天体の色について論ずる場合は、これが基準となるので、仕組みをよく理解しておく必要がある。太陽系天体は、基本的に太陽光の反射で光っている。太陽の色指数を補正した等級を用いることが多い。後の参考のため、ここに示しておく。

太陽の色指数： B-V = 0.665 V-R = 0.367 V-I = 0.705

測光用として実際に使用するフィルタを製作する場合、各バンドの分光透過特性は、決められた仕様である中心波長と半値幅だけを合わせても、標準の測光システムと同様にはならない。本来は、特性曲線の形も完全に一致させるべきである。しかし、同じような曲線形状を持つように製作すると、R、I バンドは問題ないが、B、V バンドは透過率が低くなるので、短波長域の感度が低い CCD カメラでは、観測効率が大幅に悪化する。最近では、露出時間を短縮しても S/N (シグナル対ノイズの比) が良好な画像が得られるように、透過率を上げた特性のフィルタを使用することが多くなった。図13は、筆者が使用しているフィルタの分光透過特性である。このようなバンド・パス・フィルタを製作するには、通常は2~3枚の色ガラスや材質の異なる光学ガラス板を組み合わせるにより透過波長を調整し専用接着剤で貼り合わせる製造法、他に、光学ガラス面に異なる種類の薄い多層膜を金属蒸着する製造法がある。後者は、蒸着を重ねた多層膜間で光が干渉するのを利用して特定の波長をカットする仕組みであり、干渉フィルタという。図13のフィルタ・システムがこのタイプであり、短波長域でも透過率がひじょうに良好である。ただし、特性曲線の形状が大きく異なるので、実際の測光結果としての等級は標準システムで観測

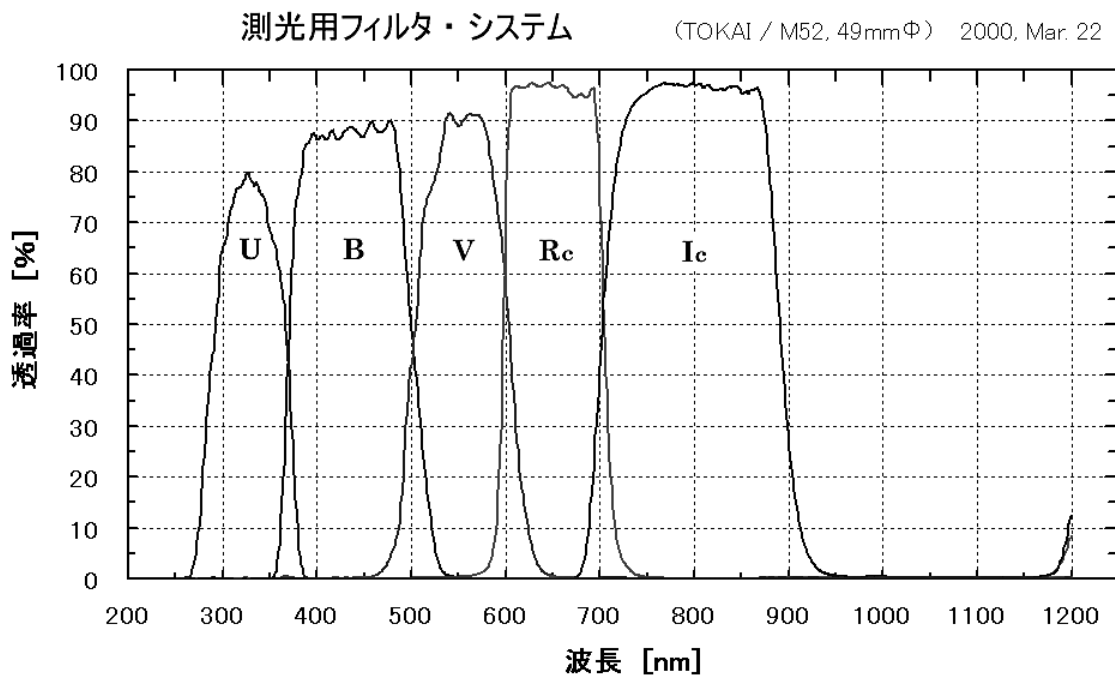


図13 筆者が使用している測光用フィルタの分光透過特性

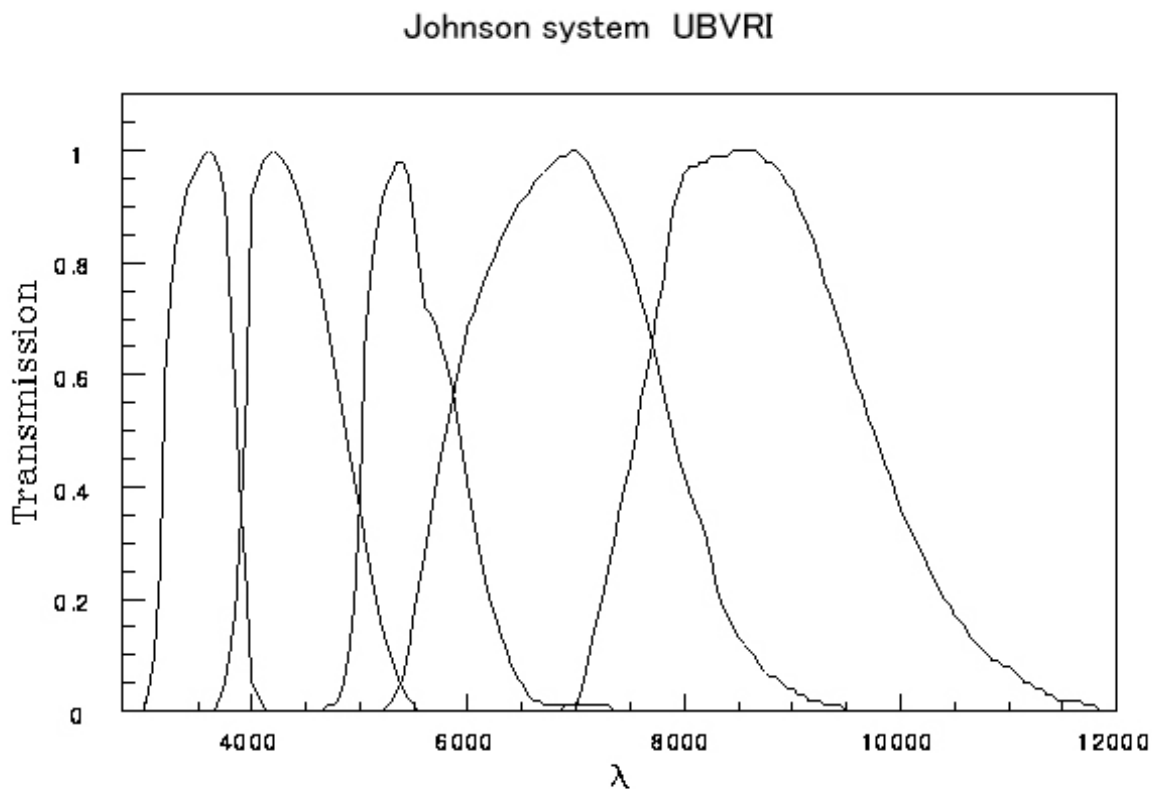


図14 Johnson system のフィルタ特性

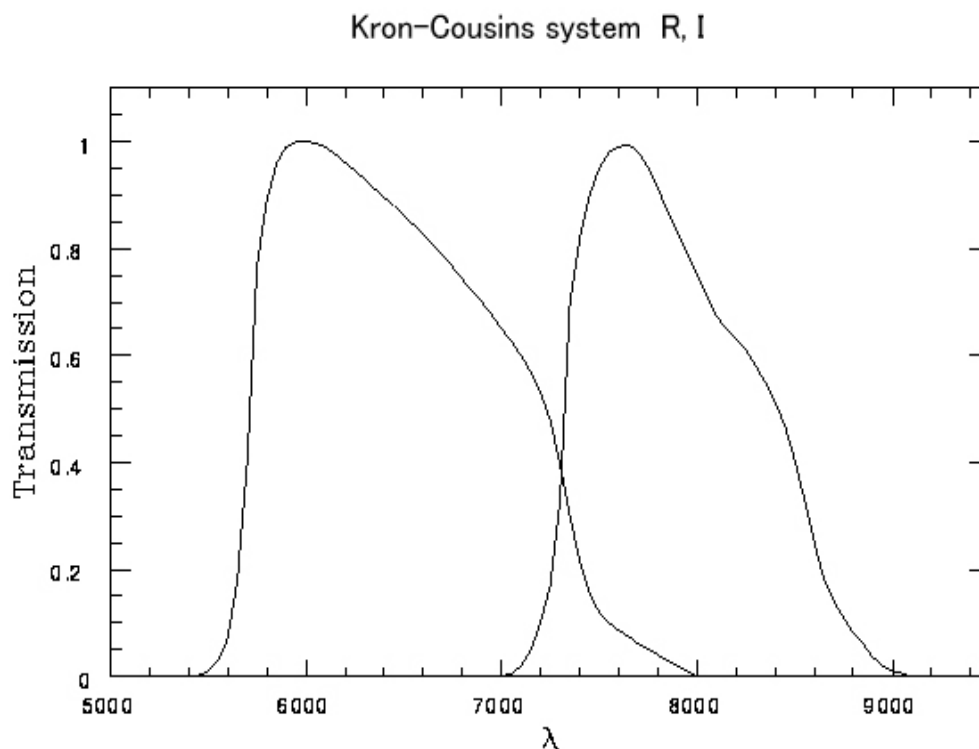


図15 Kron-Cousins system のフィルタ特性

した場合と比べ僅かな差が生じる。1/100等の精度が必要であれば、現システムを標準システムへ変換する必要がある。このシステム変換係数を求めるには、その目的だけで一晩中の観測時間が必要である。その後の測定・解析もかなりの時間を費やす。そうして得られた係数により補正する。「II-8 標準システムへの変換」を参照。

日本国内における彗星の測光観測における全光度の測光精度は、CCDカメラを用いても、観測条件が良好であっても、 ± 0.1 等程度である（筆者の経験では）。低空での観測は、さらに誤差が大きくなる。日本の気象条件は世界的に最悪であり、一見完璧な快晴であっても大気減光の度合いが安定していないのが一番の理由である。日本では、彗星に限らず、高精度な測光観測は、たいへん難しいものである。特に、彗星のコマはぼんやりした星雲状なので、淡いコマ周辺部の写り具合により、測定した等級が大きく変化してしまう。このような状況なので、彗星の測光観測では、苦勞して、標準システムへの変換を行っても、測光精度の誤差範囲内であり変換する価値がないのである。さらに、彗星は特有な輝線スペクトルがたくさんあるため、各バンド・フィルタの特性曲線の裾が少しずれただけで、輝線成分を受光する度合いが極端に変化する。このことから、システム変換係数は、彗星観測には必要がないと思われる。しかしながら、補正してみないと、どの程度の差があるのかわからないので、本来の研究解析における行程の一つとして経験することが大切である。なお、変換係数を求めておけば、輝線成分がない小惑星などの測光には有効である。

観測者、観測所それぞれの測光システムは独自なものであるが、それらの仕様特性を変更せず、同じ条件で継続観測を行なうことが重要である。数多くの異なる彗星を観測することによって、

相対的ではあるが、個々の彗星の色指数に関する特徴を解析すれば、これまでにない新たな結果が得られるかもしれない。

測光用フィルタは、量産品が天体望遠鏡販売店などで入手できる。価格は、B、V、R、I、4バンドのセットで7万円ほどである。天文雑誌の広告やインターネットで調べていただきたい。光学会社へ特別注文をすると、通常は1枚の価格が10万円とかなり高価になってしまう。その他、販売されているフィルタの中で、測光用と特性が似ているが、3色分解撮像カラー合成用のフィルタ・セットがある。これらは、厳密な測光には使用できない。この種の製品の多くは、大抵の場合、CCDカメラの感度がある波長域内（特に近赤外域）において必要波長域以外のリークがあるので注意が必要である。

通常は、複数のフィルタを交換しながらの観測となる。観測中に使用する全てのフィルタは、同じ厚さでなければ都合が悪い。フィルタ位置が集光する光束途中にある場合、フィルタは平行平面ガラスなので、厚さの約1/3の長さ分、焦点位置が後方にずれる。厚さが異なると、フィルタ交換のつどフォーカスを調整しなければならない。

フィルタ面にゴミが付着していると、それらのゴミのぼけた像が天体像と重なって写ってしまう。これは、ゴミの分布とパターンが変わらない限り、フラット・フィールドで補正可能である。しかし、フィルタ面がむき出しになる状態でのフィルタ交換方式では、どうしても新たなゴミが付着したり付いていたゴミが取れたりして、ゴミのパターンが変化してしまう。これでは、フラット・フィールドで補正しても、パターンを除去することが不可能となる。図2のような密閉されたターレット式のフィルタ・ホイールを使えば問題ないが、それ以外のフィルタ・ボックスでは、ゴミができる限り付着しないように心がけるしかない。交換のたびごとに、スプレー式のブローで吹き飛ばすのがよいだろう。汚れがひどい場合は、光学機器専用のクリーニング・ペーパーを使い、純度の高い無水エタノールを染み込ませ、キズを付けないように注意深く拭き取る。

(5) 実際の観測テクニック

この項では、筆者が実際に行っている、主に口径50cmカセグレン式反射望遠鏡を使用した彗星の観測方法を紹介する。参考にしていただきたい。小口径望遠鏡を運搬しての移動観測でも、基本は同様である。

(a) 彗星の撮像

・彗星位置の把握と観測計画

予め、インターネットなどから彗星の情報を入手し、「観測する価値がある」あるいは「観測したい」彗星が観測可能であるかを調べる。地平座標で、任意の日時、観測場所における彗星の位置関係を把握しておく必要がある。

これらの作業は、天文シミュレーション・ソフトを使用するのが便利である。筆者は、アストロアーツ社の「ステラナビゲータ」を使っている。図16は、ステラナビゲータによる2大彗星をシミュレーションした一例として、その表示画面である。明るい彗星は、大抵の場合太陽離隔が小さく、低空での観測となる。このソフトは、地平座標および星座早見モードで地上風景を表示

することができるので、観測場所周囲の障害物によって隠される時間帯を知ることができる。図16の地上風景は、望遠鏡を振りながら障害物をトレースすることにより高度と方位を測定して得られたデータから作成した樹木のシルエットである。写真撮影した画像をモザイク合成することによっても作成することができる。

彗星の光度情報を調べるには、

ICQ の速報のページ (<http://cfa-www.harvard.edu/cfa/ps/icq/CometMags.html>)

吉田誠一氏のページ (<http://www.aerith.net/comet/catalog/index-T-j.html>)

を参照する。

彗星の軌道面を地球が通過するときには、彗星軌道面上に広がっている淡いダストが見かけ上重なり濃くなることから、アンチ・テイルが見えることがあり、また、特異な構造が見られる場合があるので、軌道面通過の前後数日間には是非とも観測したい。ステラナビゲータにて、イオンとダストの尾を表示して（輪郭表示を選択）、赤道座標モードで彗星をトラッキングし月日を変えながら様子を見る。両方の尾の方向が一致するときが軌道面通過である。

・観測の準備

観測開始時刻の少なくとも30分前に、冷却CCDカメラの電源を入れ、カメラのコントロール・ソフトを起動しCCDの冷却を開始する。温度制御が安定するまで15~20分間ほどかかるので、余裕を持って準備する。冷却温度の設定は、使用しているCCDカメラの能力である外気温から何度まで下げられるかを把握しておき、負荷が90%を超えないようにする。制御を開始した直後は当然負荷100%であるが、次第に下がってくる。

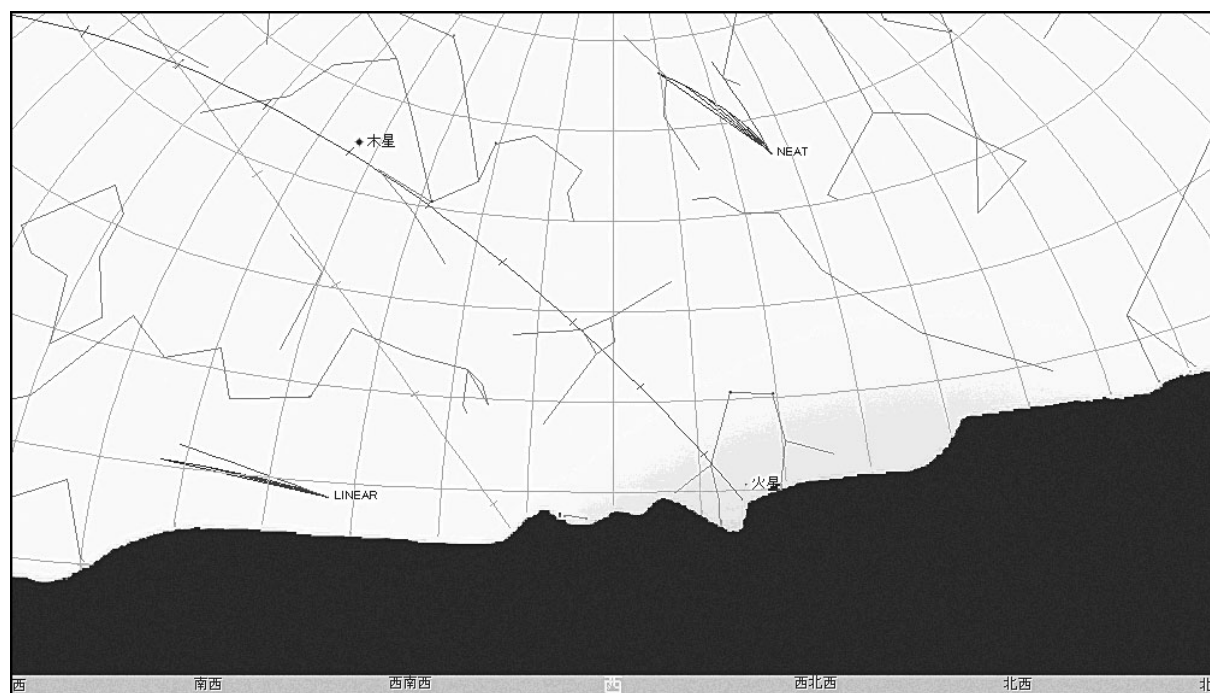


図16 ステラナビゲータによる2大彗星のシミュレーション

[2004年5月30日、19時37分 (JST) の国立天文台50cm望遠鏡から見た西空]

移動観測では、準備の早い時点でCCDの冷却を開始し、その後に望遠鏡のセッティングを行なうという段取りがよいだろう。

その他、本番観測前には、必ず、CCDカメラの窓ガラスとフィルタ面に付着しているゴミを取り除くこと。フラット・フィールドで補正しても、特に、フィルタ面上のゴミのパターンは、除去するのが難しい。

・フォーカス合わせ

最初に観測するバンドのフィルタをセットして、望遠鏡のフォーカスを合わせる。できる限り高度が高い3.5~4.5等(V)の恒星を導入し、フォーカス・モードにて1秒くらいの露出時間で連続撮影をしながらベスト・フォーカス位置を決定する。もし、星像のレベルが飽和した場合は、より暗い恒星を導入しなおす。露出時間が短いと、シンチレーションやシーイングの変化により乱れた星像が撮るたびに異なるパターンで写るので、最良位置を把握することが難しくなる。露出時間を長めにすると、いびつになっている像が平均化されるため、合わせやすくなる。フォーカス位置は、反射望遠鏡では主に鏡筒の熱膨張が原因で気温により変化する。50cm望遠鏡では、4年間の観測から気温とフォーカス・カウンタ値の関係を求め、多数のデータをプロットしフィッティングした近似曲線を描いたグラフを作成してある。たまにフォーカス・チェックを行なうが、普段の観測では、ドーム内の温度計の値によりグラフから読み取り、フォーカス・カウンタ値を合わせるだけである。このときに採用する気温は、予定している観測終了時の気温を経験による勘で予想して、観測開始時の気温との中間値を設定する。同日の観測途中では、再度のフォーカス調整を行なわないことにしている。その理由は、50cm望遠鏡はカセグレン式で、さらにフォーカス調整機構が副鏡を光軸方向に移動する方式であるため、フォーカス調整により焦点距離が変化するからある。

・彗星の導入と追尾

50cm望遠鏡の赤道儀はフォーク式であり(図1)、彗星をCCDの写野内へ導入するには、コンピュータ制御により、赤経、赤緯(視位置)を入力すると、自動で望遠鏡の向きを合わせてくれる。使用しているカメラ(ST-1001E)のCCDチップの1ピクセルのサイズは 0.024×0.024 mm、画素数は 1024×1024 ピクセルである。望遠鏡の焦点距離が6030mmなので、[式2]により、写野範囲は $14.01 \times 14.01'$ となる。赤道儀の自動導入精度は、 $\pm 1'$ 以内であるので、目的の彗星を確実に導入することができる。自動導入機能がない赤道儀の場合は、ファインダーで見ることができる明るい恒星を基準にして、目盛環を使って導くことになる。

彗星は、固有運動により天球上を足早に駆け抜けて行く。例外を除き、みかけの移動速度は、太陽に近くなるほど、また地球との距離が近いほど速くなる。彗星の移動に合わせた追尾を行わなければ、撮像した彗星像は移動方向に流れ、ぼけた像になってしまう。その対策として、昔から、ガイド望遠鏡を使用し手動による彗星追尾をしながら撮影する「メトカーフ法」と呼ばれるテクニックがある。現在では、アマチュア向けの製品として、コンピュータ制御による自動追尾ができる赤道儀が各社から販売されている。ただし、コンピュータ制御でも経緯台方式の架台は、イメージ・ローテータがなければ露出中に像が回転してしまうので、撮像観測には簡単に利

用できない。彗星の移動を自動追尾するためには、赤道儀の制御ソフトで、彗星の単位時間当たりの移動方向と移動量を与える必要がある。50cm望遠鏡では、24時間の移動量を入力する仕様である。

観測時刻を中心として、24時間（±12時間）の赤道座標における赤経と赤緯方向の移動量を求める。この作業は、ステラナビゲータを使用すると便利である。彗星の設定ウインドウにて移動量を最短の1日にして、彗星を表示すると移動を示す矢印が描画される。図17は、2004年5月30日のC/2001 Q4（NEAT）の例である。彗星頭部を囲んだ矩形がカメラの写野範囲（ $14.01 \times 14.01'$ ）なので、いかに移動量が大いかわかるだろう。移動量を示した矢印が画面から外れないぎりぎりまで画面を拡大し、計測モードのカーソルに切り換え、方向と長さを計測する。先に彗星の位置でマウスの右ボタンをクリックして、次に移動を示す矢印の先端位置でマウスの左ボタンをクリックする。すると、情報ウインドウに、赤経差と赤緯差が表示されているので、この値を採用する。ここで、符号を逆に勘違いすると逆方向に追尾することになるので、注意が必要である。赤緯方向はまず間違わないだろうが、赤経方向は間違いやすい。天体の情報としては、東へ移動している場合は+、西方向は-である。しかし、赤道儀の追尾にとっては、基本の恒星時追尾に対して逆方向に補正するので、符号が逆転する。その他、正確に移動天体を追尾するには、大気差による補正も含めなくてはならない。特に、 30° 以下の低空での観測では、深刻な問題となる。大気差の変化率を計算して、追尾補正量に加える。大気差は気象条件により大幅に変化するので、ただちに実際の値を求めるのは不可能であり、平均的な値を算出する近似式を使うことになる。天文年間（誠文堂新光社）に掲載されている。この計算式を使い、使用している望遠鏡の補正值を求める。表計算ソフトを利用すると、比較的簡単に組み込むことができ、便利に使える。

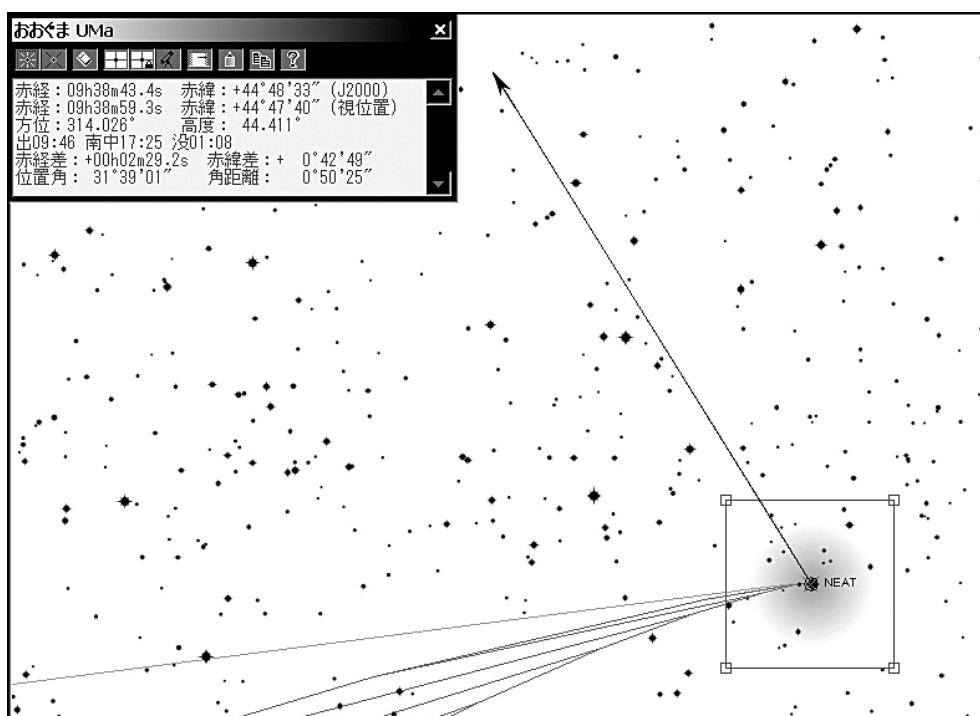


図17 ステラナビゲータによる彗星の移動量の測定 C/2001 Q4（NEAT）、2004年5月30日

彗星追尾にオートガイドは使用できるか？ 50cm望遠鏡には、口径9cmのガイド望遠鏡にST-6を取り付けたオートガイダーが同架されている。移動天体でなければ、30秒露出にて、約15等までの恒星がガイド星として使える。しかし、彗星をガイド星にして動作させるには、コマの集光が強くその中央部が十分に明るいことが必要である。オートガイダーは像の明るさの重心計算で動作しており、彗星は恒星間を移動していくので、明るめの恒星に接近すると、その恒星がガイド星に移り変わってしまう、あるいはガイドエラーとなることだろう。普通、コマの中央部だけの明るさは、全光度より3~4等ほど暗いことを考慮し見積もると、全光度が6~7等の彗星なら、なんとか追尾を続行するかもしれない。確実に彗星追尾をさせるには、全光度が3等以上の明るい彗星に限定されると思われる。

次に、構図合わせを行なう。彗星のコマ中心部が写野の中央付近に配置するのが通常の構図となる。ただし、その位置付近にCCDの不良ピクセルや目立つ光量ムラがある場合は、その場所から外すことが必要である。尾がある場合は、尾がなるべく長く写るように頭部をオフセットしたくなるが、コマの視直径が大きく写野範囲からはみ出すようであれば、やはり、核位置を中央に配置するべきである。これまでに、試し撮りをした画像は、捨てずにすべて保存しておくこと。後で役立つことがあるだろう。

・本番観測

段取りができたなら本番観測開始となる。露出時間は、彗星の最も明るい構造のレベルが飽和せず、かつ輝度特性の直線性（リニアリティ）が確保されている範囲内で決定する。1フレームの露出時間は、多くかけるほどS/Nが良くなるのだが、追尾精度や夜空の明るさの度合いにより限定される。50cm望遠鏡では焦点距離が長いため、追尾精度の問題で、露出時間は360秒が限界である。その他、夜空が明るいほどS/Nが悪化する。たとえば、東京都三鷹市と北アルプスの乗鞍岳での観測を比較すると、三鷹での観測において、乗鞍岳で得られた露出時間360秒の画像と同じS/Nの画像を得るには、たとえ一晩中12時間の露出をしても同等なS/Nになるには程遠いという感じである。光害がひどいなど悪条件下でも諦めずに、十分に露出時間をかけ撮像した複数フレームの画像があれば、それらを合成することによって、S/Nを大幅に改善させることができる。フレーム数を n とすると、簡略計算では、S/Nは $1/\sqrt{n}$ になる。できるだけたくさんのフレーム数を撮像したいところであるが、複数の彗星をいくつかのバンドで観測する場合、露出時間との兼ね合いもあり観測時間が制限される関係上、バンドごとに得られる枚数は、8~10フレームが限界である。

筆者の観測は、明るい彗星や特別な場合を除き、全てのバンドで撮像するのは困難であるので、最低限、VとIの2つのバンドは必ず撮るようにしている。筆者は、核近傍の微細構造とダストの分布を調べることを主な研究目的としているので、4つのバンドの内、観測する優先順位はI、V、B、Rとしている。Iバンドの波長域にはガス成分の輝線がほとんどないので、このバンドの画像は大部分がダストの構造であると言える。Vバンドでは、ダストとガスの両成分が混ざっている。そのことから、これら2つのバンドによる彗星像の明るさを比較すると、おおざっぱではあるがダストとガス成分の比を推測することができる。

実際の撮像法は、彗星の高度が高く余裕がある場合には、各バンドで8~10フレームを連続撮像している。高度が低い場合には、大気減光率が急激に変化するので、たとえばB、V、I⇒B、V、I⇒B、V、I・・・のように順番にフィルタを交換しながら1フレームずつ撮像し、各バンドの画像が8~10フレームずつ得られるまでループさせる手法を採っている。

露出時間はバンドごとに変更せず同じ設定として、S/Nが悪いBバンドは、時間的に余裕があり可能であれば、フレーム数を2倍以上確保するようにしている。

(b) 標準星の撮像

測光するためには、各バンドにおける基準となる光度情報が必要である。標準測光システムに準じて高精度で測定された恒星を「標準星 (Standard Stars)」という。それらのカタログが論文として数多く発表されている。これらは、インターネットで入手できる。

<http://cdsweb.u-strasbg.fr/Cats.html>

などで、検索していただきたい。

Johnson-Cousins systemのカタログは、一部を「測光用フィルタ」で紹介しているが、僅かしかない。実際、普段の観測で利用できるのは、さらにその内、次の2つに絞られる。

- UBVR photometric Standards in the Magnitude Range 11.5<V<16.0 Around the Equator; Landolt, A. U. 1992, Astron. J. 104, 340-371

(http://adac.mtk.nao.ac.jp/catalog_dir/CDS/cati/II/183/table2)

- LONEOS / Johnson-Cousins BVRI photometry for faint field stars version: 15 Jul 2003

(<ftp://ftp.lowell.edu/pub/bas/starcats/loneos.phot>)

Landoltのカタログは、大部分の標準星位置が赤道帯付近に集中している。LONEOSのカタログは、Landoltのリストほとんど全てが含まれ、その他、全天に渡って大量の標準星を拡張追加している。ただし、半数以下がRとIバンドの値がない。それでも、広範囲におよびLandoltより圧倒的に多数のデータが収録されている。

彗星撮像の合間に、これらのリストから適切な標準星を選択して撮像する。地上からの観測では、天体の高度と気象の変化が原因で、大気吸収による減光の度合いが変動する。それらの影響を最小限にするためには、最初の条件として、彗星を撮像した高度と同じ高度で標準星を撮像しなければならない。2番目に、彗星と標準星の撮像時刻をできる限り近づけること。3番目に彗星との距離が近い標準星を使うことである。彗星と同じくらいの高度の標準星に対して、彗星⇒標準星⇒彗星⇒標準星のように交互に撮像するのが理想的である。現実には、これらの条件を満たすような観測はたいへん難しい。大幅に妥協せざるを得ない。

筆者の観測手順は次のようである。夕方の西空低空での観測では、最初に彗星を優先順位1番のバンドで複数フレームを撮像する。次に、同じく西側に位置する同じくらいの高度の標準星を

Landoltのカタログから選択し、観測する予定のすべてのバンドを最低3フレームずつ撮像する。その後、バンドを変えながら彗星の撮像を続行する。すべてのバンドを撮り終えた後、余裕があれば、彗星の撮像中の平均高度と同じくらいの標準星を新たに探し、各バンドで撮像する。明け方の低空観測では、彗星の高度が上がってくる前に、同じ高度になるだろうと予想した標準星を先に撮像し、天文薄明が進む中、写る限界まで彗星を撮り続ける。

標準星を撮像するときには、赤道儀が移動天体追尾モードで動作している場合は、それを解除することを忘れないように。

標準星の撮像は、明るい星を使うと露出時間の短縮になり、観測時間の効率アップとなる。ただし、明る過ぎても飽和してしまうので、注意が必要である。また、色指数が大きい星はカタログ値そのものの精度が悪いので、できるだけ使用しないほうがよい。筆者は、V-Iの絶対値が1.0を超える星は除外して、V等級が9~13等級の範囲の星を選択している。露出時間は、恒星像であるから、多少露出不足でもS/Nは十分であるので、各バンド共に120秒に統一している。

筆者は、彗星を撮像したときと同じ高度の標準星を検索する手段として、ステラナビゲータを利用して、Landoltのカタログ・リストを編集し、アディショナル・データ・ファイル(ADF)を作成追加してあるので、それらの標準星を追加天体として表示することができる。図18は、2004年5月10日の観測例として、C/2001 Q4 (NEAT) のための標準星を探すときの画面である。

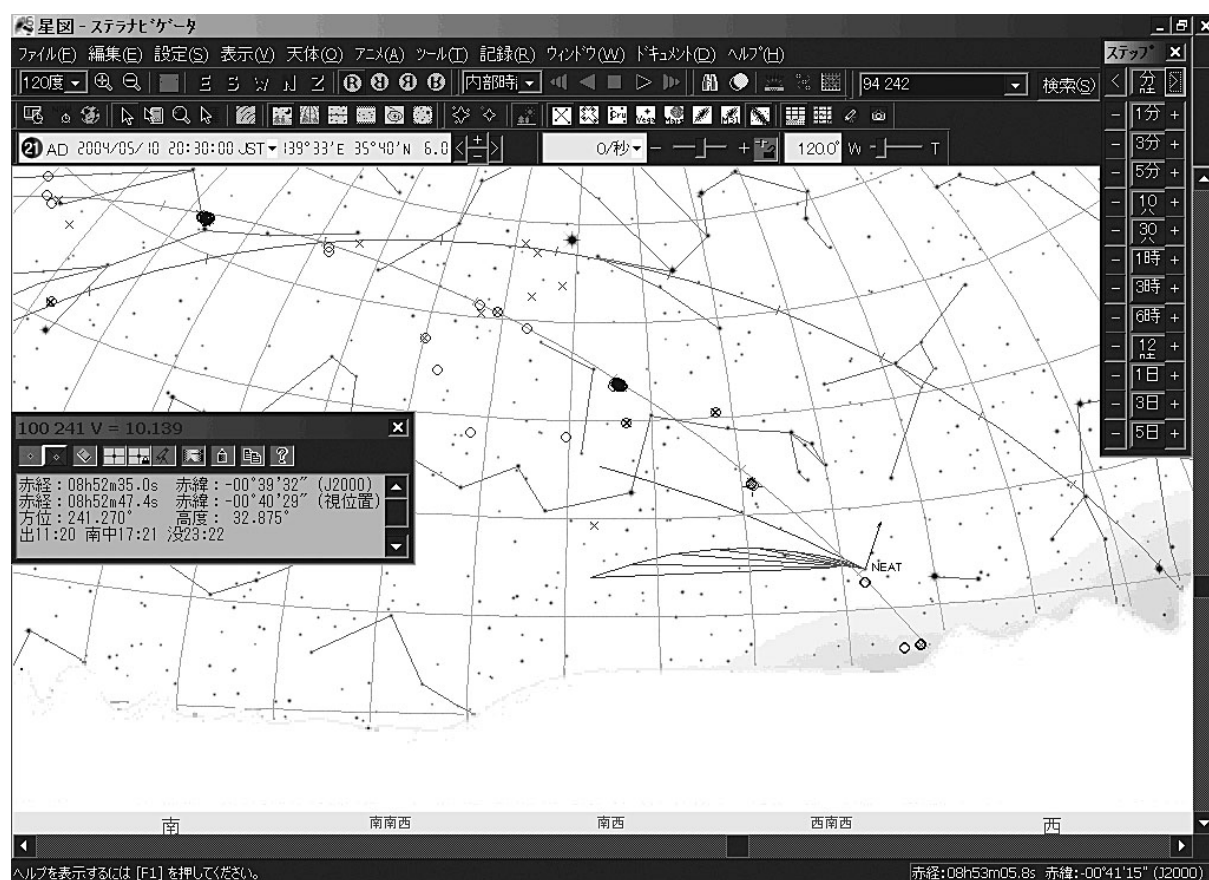


図18 ステラナビゲータによる標準星の選択例 C/2001 Q4 (NEAT) 用、2004年5月10日

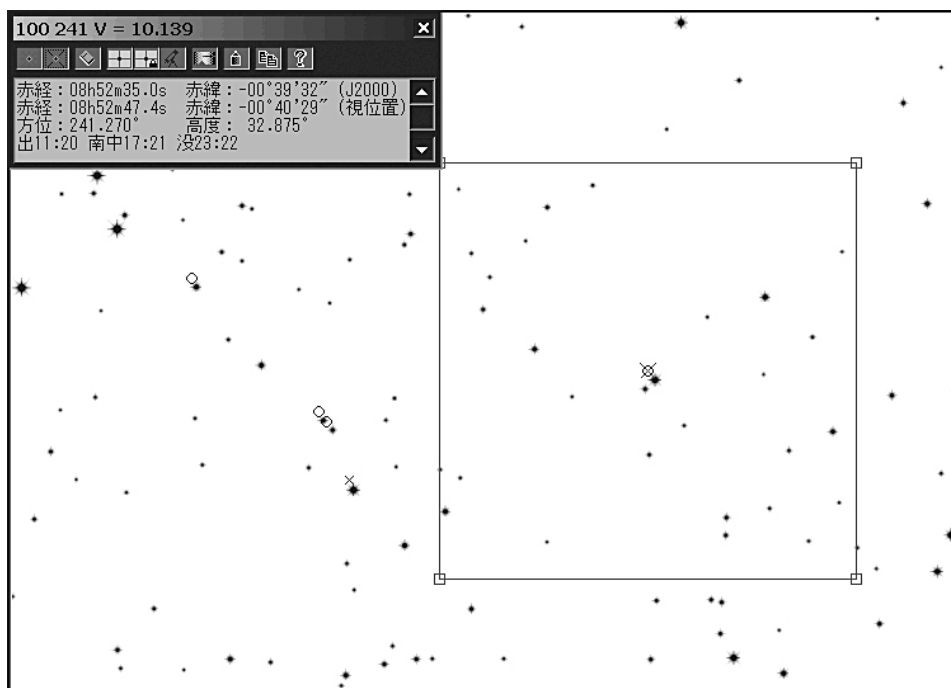


図19 ステラナビゲータによる選択した標準星付近の拡大表示

ADFファイルは、

```
Eq 0852.5833, -0039.533, mark 1, "100 241 V=10.139"
Eq 0853.2500, -0043.200, mark 11, "100 162 V= 9.150"
Eq 0853.3000, -0041.233, mark 1, "100 267 V=13.027"
```

のように、標準星カタログのファイルを元に、指定のフォーマットのテキスト・ファイル形式として作成する。テキスト・ファイルを列単位でコピー&ペーストができるエディタあるいは表計算ソフトを使用すれば、簡単にできる。表示されるマークは、1が○で11が×である。V-Iの絶対値が1.0以下の星を○とした。できあがったファイルは、名を” Landolt.adf” のように拡張子をadfにして適当なフォルダに置いておく。標準星データを星図画面に表示させるには、メニューの「天体」の下、「追加天体」で「データを追加」にて標準星のADFファイルを指定する。そして、図18のように、地平座標モードの広角表示にて、彗星を撮像した平均高度と標準星を撮像する平均高度がだいたい同じくらいになるような標準星を探し出す。みつけた候補は、標準星カタログのオリジナル・ファイルからその1行を検索抜き出し確認する。例として、SA100 241のデータを示す。

Star	α(2000)	δ(2000)	V	B-V	U-B	V-R	R-I	V-I	n	m	Mean Errors of the Mean					
											V	B-V	U-B	V-R	R-I	V-I
100 241	08 52 35	-00 39 32	10.139	0.157	0.101	0.078	0.085	0.163	53	43	0.00110	0.00069	0.00165	0.00055	0.00055	0.00082

V等級は10.139、V-Iは0.163、理想的な標準星である。高度もほぼ同じである。

Landoltの標準星は、赤道帯に沿って均等に分布しておらず、部分的に集中している。そのた

め、同じ高度では使用可能な標準星が無いことが多い。その場合、西空では、高度が高めのものを選び、彗星の撮像を続行しながらちょうどよい高度になるのを待つ、あるいは、標準星の撮像を開始し高度が下がるまで連続撮像するか、どちらかであり迷うところである。日本の気象は不安定であるので、いつ雲に覆われるか心配である。後者の方針が無難であろう。彗星との高度差は、それほど厳密でなくても大丈夫であり、筆者のこれまでの経験では、高度 20° 以下では $\pm 2.5^{\circ}$ 、高度 $20\sim 40^{\circ}$ では $\pm 5^{\circ}$ 、高度 40° 以上では $\pm 10^{\circ}$ くらいの差があっても、大気吸収による減光の補正をすれば誤差の内と思われる。

これらのステラナビゲータでの操作中は、リアルタイム描画で動作していれば確実であるが、それ以外は現在時刻になっていることをそのつど確認すること。

標準星が決まれば、天体の情報ウインドウに表示されている視位置により写野に導入し、試し撮りを行なう。写野内への導入と構図の確認をするため、図19の例のように、ステラナビゲータの表示を赤道座標モードで写野範囲を十分に拡大して、恒星の設定でGSCを選択し最も暗い17.2等まで表示させる。この画面と試し撮り画像を比較すれば、目的の標準星を同定することができる。同定を行なうには、この他、DSS (Digitized Sky Survey) やLandolt (1992) の論文に掲載されているチャートなども利用することができる。

(c) ダーク・フレームとフラット・フィールドの撮像

一次処理を行なうために、ダーク・フレームとフラット・フィールドを撮像する。これらは、カメラの冷却温度制御の安定性が良好で変動が無視できるレベルであれば、設定温度が同じ場合、以前に撮像したダーク・フレームが使用でき、フィルタやガラス窓などに付着しているゴミのパターンが変化しなければ同様に別の日に撮像したフラット・フィールドを使用することができる。ただし、観測終了時に、一部の画像を試しに処理をして確認することが必要である。

SBIG社の最近の製品は、冷却制御がひじょうに優秀であるので、筆者は、同じ温度設定のダーク・フレームとフラット・フィールドを最低10フレームずつ撮像して、ダーク・フレームはメディアンをとったコンポジット、フラット・フィールドは加算平均でコンポジットしたものを作成しておき、いつでも一次処理ができるように、観測に使用しているパソコンのハードディスク内に保存している。

・ダーク・フレーム

SBIG社のコントロール・ソフト「CCDOPS」にてライト・フレームを撮像するとき、最初にダーク・フレームを1枚撮り、引き続きライト・フレームを撮り、その後、最初のダーク・フレームで補正してしまう「Dark Also」という自動モードがある（他のソフトも同様の機能がある）。便利ではあるが、このモードの使用は避けるべきである。1フレームだけのダーク・フレームでの補正であるので、もし、このときのダークが異常であれば取り返しがつかないことになる。

ライト・フレームを撮像したときと同じ露出時間で、また同じ冷却温度で、「Dark Only」のモードにてダーク・フレームを「Auto Grab」に設定し10フレーム連続撮像する。異なる露出時間の組がたくさんあると、それぞれの露出時間すべてのダーク・フレームを撮像しなければならない。そのため、かなりの時間がかかる。

ダーク・フレーム撮像モードではシャッターが開かないが、SBIG社のカメラなどシャッター周りの隙間から光が入り込む機種は、望遠鏡の筒先あるいはカメラの直前に完全に遮光できる蓋を装着する必要がある。フィルタ・ボックス周りの隙間も注意されたい。

・フラット・フィールド

明るさが均一な光束を望遠鏡へ入射して撮像した、感度ムラと光量ムラを補正するための画像を「フラット・フィールド」と呼ぶ。フラット・フィールドを撮像するには、主に次の3つの方法がある。

*ディフューザを使用する方法

望遠鏡の筒先に、乳白色あるいはスリガラス状の亚克力板を装着できるよう自作する。ディフューザとして役割の亚克力板が散乱した均一光束を生み出す。亚克力板は2～3mmの厚さが適当であり、2枚の亚克力板を20～30mmほどの間隔を開け配置すると、より均一な光束を得ることができる。

光源は、写真の引き伸ばし機やスライド・プロジェクタを使用するのが理想的である。亚克力板にフォーカスを合わせて、垂直に照射する。この方法は、屋外で行なうには問題があるので、やはり手軽な方法として天文薄明中の空に望遠鏡を向け撮像することになる。

*フラット板を使用する方法 (Dome Flat)

ドーム内壁などにフラット板(拡散反射板)を取り付け、フラット板に望遠鏡を向けたときに望遠鏡の筒先で影ができないように、電球の照明を均等な距離で2ヵ所以上設置しておく。調光器で電球の明るさを調整し撮像する。

図20は、50cm望遠鏡でのフラット・フィールド撮影方法である。フラット板は、厚さ20mmの発泡スチロールで表面をライトグレー色の艶消し塗料で塗装してある。照明はZライトに20ワットの電球を付け使用している。バンドにより露出時間が異なるが、各フィルタの露出時間は同一の20秒として、照明の光量を調整している。

*空を撮る方法 (Sky Flat)

ディフューザを使用せず、天文薄明中の空を撮像する。赤道儀の追尾駆動は停止しておく。この方法は、空が明るいと最短露出時間でも飽和してしまうし、空が暗くなると星が写ってしまうし、さらに空の明るさは時間の経過と共に急速に変化するので、最適なレベル値のフラット・フィールドを得るには、たいへん難しい。

フラット・フィールドの適正露出時間は、16ビットA/D変換の場合、全ピクセルの平均レベル値が15000～20000カウントになるのがちょうどよい。なお、フラット・フィールド用のダーク・フレームも撮像すること。

暗い夜空における観測では、極端な表現であるが、いいかげんに撮ったフラット・フィールドでもきれいに補正されているように見え、実際、十分に補正されたといつてよい。しかし、東京

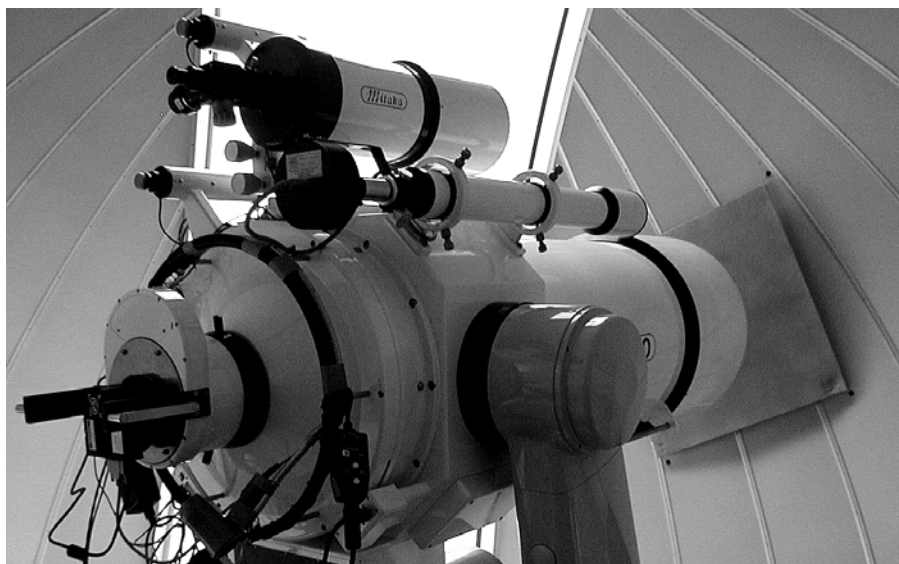


図20 フラット板を使ったフラット・フィールドの撮像

都三鷹市のような明るい夜空の場合は、ある程度の質を確保し補正できるフラット・フィールドを得るには、並大抵のことではできそうもない。

(d) フィルタを使用した観測の勧め

夜空が明るい三鷹市での彗星の多色測光観測は、以上のような観測方法のため、夜が長い冬季で一晩中観測しても、3～4個の彗星しか観測できないのである。もし、フィルタを使用しない観測方法を採用すれば、一晩で十数個以上のたくさんの彗星が撮像できるだろう。しかし、学術的な価値がほとんどないデータとなってしまう。彗星の数で勝負するのではなく、研究に使える確実なデータを取得することが大切だと思っている。是非とも、標準測光システムに近いフィルタを使用した観測を行なって欲しい。

(6) 画像処理

(a) パソコンと画像処理ソフト

冷却CCDカメラで撮像した画像は、そのままでは使い物にならない。最初に一次処理を行い、その後、必要に応じた各種処理を施すことにより、きれいに見える画像となり測定可能な画像ができあがる。

ここ数年、パソコンの高性能化は、めざましいものがある。10年ほど前までは、高解像度である大きなファイル・サイズの画像をパソコンで処理するには、かなり無理があった。CPUの演算速度が遅い、大容量のファイル保存装置がない、使いやすく優れた画像処理ソフトがないなどの理由である。そのため、当時は、研究機関などで共同利用できるワークステーションを使うのが前提となった。画像処理ソフトは、主にIRAFまたはIDLが使われていたが、パソコンの操作に慣れたユーザーにとっては、オペレーションを習得するのがたいへんであり、筆者の経験では、とても使いやすい環境とは思えなかった。

最近は、少し前のワークステーションより演算速度が速いパソコンが安価に購入できるようになり、MOドライブ、CD-R、DVDドライブなど大容量記憶装置も一般的になった。また、画像処理ソフトも安価で機能豊富な使いやすいものが幾つか登場した。その結果、ワークステーションやLinuxをインストールしたパソコンでIRAFなどを使用しなくても、Windowsパソコンにより本格的な画像処理や測定が可能となった。

ここでは、Windowsパソコンと市販の画像処理ソフトの使用を前提として解説を進めていく。

ファイル・サイズの大きな画像を短時間で処理するには、より高速な演算速度とより広いメモリ空間が欲しくなる。しかし、コンピュータ業界は3ヶ月ほどの早いサイクルでモデル・チェンジし高性能化が進んでいるため、購入時に最高速パソコンであっても、たちまち遅いパソコンになってしまう。少しでも高性能なものを購入しようと、待っていてもきりが無い。画像処理を円滑に行なうには、CPUの演算速度を重視するよりも、メモリをたくさん増設したほうが扱いやすく快適なシステムとなる。メモリは、最近価格が安いので、できれば最大限の増設(512MB以上)が望ましい。OSは、Windows 98以降であれば、どのバージョンでも問題はない。

現在、液晶ディスプレイが普及している。フルカラー表示が当たり前となり、見る角度の違いによる見え方の差が少なく、昔の製品と比べると格段に表示能力が優れている。しかし、天体画像は、輝度差が大きく狭い諧調範囲に明るさの変化が集中していることが多く、液晶ディスプレイでは微妙なグラデーションを表現することができない。フルカラー仕様だからといっても、擬似的なフルカラーであり、実質は1678万色の表示ができないのである。天体の微細構造、微妙なグラデーションを見るためには、ブラウン管式のディスプレイの使用を推奨する。また、高解像度のフルカラー・プリンターで印刷した結果と比較して、画面表示ができるだけ同様になるように、ディスプレイの明るさ、コントラスト、ガンマ、カラーバランスなどを調整しておくことが大切である。

画像処理用ソフトは、筆者の場合、4～5種類のソフトを、処理過程の段階に応じて使い分けている。その理由は、それぞれのソフトの仕様がずいぶん違うので、同種の処理を行なうにしても使いやすさが異なってくるためである。一つのソフトで全ての処理、測定を満足に行なえる製品は、未だに登場していない。

以下に、4種のソフト、「Astroart」、「MaxIm DL」、「StellaImage 4」、「Adobe Photoshop」の特徴を紹介する。

Astroart (Ver. 2.01)

イタリアのシェアウェア・ソフト販売会社「M. S. B.」で扱っている。インターネットにて情報を得られる。そして、デモ版をダウンロードすることもでき、オンラインで購入できる。価格は、200 US\$。アドレスは、

<http://www.msb-astroart.com/>

低価格ではあるが、ひじょうに機能豊富で、特に、一次処理を行なうのにたいへん使いやすい。また、星表データから星図が表示でき、この星図と連動して位置測定、光度測定を行なうのに便利である。

これらの情報は、筆者が使用している Ver. 2.01 であり、現在は Ver. 3 になっており、大幅に改良されていると思われる。

- * 冷却CCDカメラで得られたオリジナル画像をバイアス、ダーク・フレーム、フラット・フィールドで演算補正する一次処理を行なうため、PreProcessingウインドウにて、画像ファイルがハードディスク、MOドライブなどどこに入っていようとも、それぞれのファイルを複数いくつでも選択でき、それらを所定の枠内へマウスでドラッグ・コピーして実行するだけで、順次、自動で処理が終了する。この時に、同時に画像をコンポジットすることもできる。
- * 数多くのフィルタが用意されており、簡易的ではあるが画像復元処理であるデコンボリューション、その逆のコンボリューションができる。
- * 彗星の尾やジェット構造などを強調するのに適しているLarson-Sekanina法と呼ばれているローテーション・グラディエント処理が簡単にできる。
- * ソフトが入っているCD-ROMには、GSC (The Guide Star Catalog) とメシエ、NGC、ICカタログのデータも記録されており、星図表示ユーティリティにて画像ウインドウと並べて表示できる。GSCデータを使って、位置測定を半自動で行なうことができる。別に入手すると、USNO SAカタログにも対応している。
- * 画像ウインドウ中の任意の範囲をマウスでドラッグすることで指定し、その範囲内の面積、最小値、最大値、バックグラウンドのレベル値、平均値、合計値、標準偏差値を表示する。この機能を利用して天体の光度測定をすることができる。特に、淡く広がった大きな面積を持った星雲状天体が測定可能となっている。
- * 画像中の任意の2点間をマウスでドラッグすることにより、その直線上のプロファイルをグラフとして描いてくれる。また、数値データをテキスト・ファイルとして書き出す機能もある。
- * 画像のブリンク機能があり、ブリンクさせながら各画像の天体位置のずれを簡単に修正できる。3枚のフレームのブリンクも可能である。
- * 画像のアイソ・フォト（等輝度曲線図）が高速できれいに描画できる。
- * 3D立体図が描画できる。
- * 画像の画面表示上のコントラスト、明るさ、ガンマなど階調調整がきめこまかくでき、ひじょうに使いやすい。
- * 画像の読み込み、書き込みファイル形式は、FITSがデフォルトとして設定されており、その他、あらゆるフォーマットに対応している。ただし、FITSファイルの読み込みは32ビットに対応しているが、ファイルの書き出しは16ビット整数だけである。
- * 内部演算は、16ビット整数であるので、演算結果が溢れることがある。

MaxIm DL

最大エントロピー法を採用した画像復元処理を備えた唯一のWindows用ソフトである。カナダのCyanogen Production社から販売されている。価格は75000円と高めである。日本の代理店であるデータ・ダイナミクス (Data Dynamics/Tel. 0729-81-6332) から購入することができる。

- * このソフトは、大部分の基本的な処理は可能になっており、扱いやすい標準のソフトと言

える。しかし、一次処理を行なうには、①Astroartを使用するほうが処理時間の効率が段違いに優れている。というのは、1フレームずつの処理しかできない点にある。まず、フラット・フィールド各フレームのダーク・フレームの補正を済ませ、予め使用可能なフラット・フィールド画像を作成しておく。天体を撮像した複数画像を読み込み画面表示させ、対応するダーク・フレームとフラット・フィールドのファイルを指定し、1フレームごとに処理を行わなくてはならない。そして、処理した画像1フレームずつ、手作業でファイルとして書き出すというわずらわしさがある。

- * 本格的な画像復元処理、最大エントロピー法で処理できるWindows、またはDOS-Vパソコン用のソフトは他にはない。これが、このソフトの最大の特徴である。CPUの演算速度が遅いと膨大な処理時間がかかり、また、各種の入力パラメータの設定が微妙であり難しいものの、うまく復元処理が完了すると、絶大なる効果が期待できる。
- * コンポジット処理を行なう機能が優れている。確実に自動で重心計算し位置合わせをしてくれる。
- * アンシャープ・マスキング処理は、処理結果がS/Nをそれほど悪化させず（ノイズ成分をあまり強調しない）、またGeometric Mean Maskを有効にすると輝度差がある輪郭が暗く抜けるのを抑える効果が得られる。最も優秀であり、ひじょうに利用価値が高い。
- * 入出力可能な画像ファイルは、すべてのフォーマットに対応している。
- * 演算処理は、32ビット浮動小数点。

StellaImage 4

唯一、日本製の本格的画像処理ソフトである。アストロアーツ社製で、価格は29,800円。機能は豊富で、演算は64ビット浮動小数点である。

<http://www.astroarts.co.jp/>

バージョンアップを重ねており、Ver. 4になり、画像の表示速度、処理速度が大幅に高速化された。機能はさらに増え、利用価値の高い製品である。

- * 一次処理を、バッチ処理にて、ファイルから読み込みファイルへ書き出しができる。同一条件で撮像した多数フレームの処理の効率がアップする。
- * 「デジタル現像」という処理にて、8ビット画像への切り出しを行なうと、輝度差が大きい天体は、たいへん満足な表現が得られる。最も明るい部分から最も暗く淡い部分まで同時に見ることができる。ただし、コントラストは低下する。彗星の核近傍の構造を見るためには最適な処理である。
- * 「LRGB 4元カラー合成」が簡単にできる。
- * 扱える画像ファイルのフォーマットは、FITSをはじめほとんど全ての形式に対応している。
- * Ver. 4から、測光のための測定が円形範囲で測れるモードが追加され、ひじょうに使いやすくなった。従来の矩形範囲での測定も使用できることから、測光に関する測定作業において最も優れたソフトである。

- * 移動天体のコンポジットにおいて、彗星の像が淡く重心が正確に決まらない場合、地球上の移動量から計算し恒星像を基準に彗星像の位置合わせを自動で行なう「メトカーフ法」の機能がある。
- * 重心位置では位置合わせが不可能な画像でも、天体像の位置を一致させる相互相関関数を使った演算処理機能がある。
- * ローテーション・グラディエント処理が簡単にできる。

Adobe Photoshop

Adobe社の製品で、価格は9万円ほどと高いが、最も扱いやすく優れたフォトタッチ・ソフトである。処理速度もひじょうに高速である。公開用画像作成の仕上げ処理に威力を発揮する。

モニタ調整ユーティリティも付属しており、ディスプレイの明るさ・コントラスト調整が簡単に確実にできる。

(b) 1次処理

CCD画像にはノイズ成分とCCDの感度むら、またレンズやフィルタに付着したゴミなどによるパターンも含めて光学系の光むらが合成されている。一次処理とは、ノイズと光むらの成分を取り除く画像演算処理のことである。

光がCCDに当たらないように機械式シャッターを閉じたまま露出時間0秒で撮像するとCCDのピクセルごとのゲタをはかせたレベル値と電気ノイズだけが写る。これをバイアスと呼ぶ。ただし、冷却温度は一定に保つ必要がある。天体を写した画像（ライト・フレームと呼ぶ）からバイアスを引き算することでノイズ成分がきれいに補正できる。

電子式冷却CCDカメラの場合は、CCDの冷却温度がせいぜい外気温度からマイナス40～50℃程度までしか冷えないため、暗電流ノイズが高いレベルで残っている。露出時間が長いほど、また温度が高いほど、暗電流ノイズのレベルが増えるので、天体を撮像した時と同じ露出時間と冷却温度でシャッターを閉じたまま撮像したものをダーク・フレームと呼ぶ。これもライト・フレームから引き算することで、補正することができる。ダーク・フレームにはバイアスの成分が含まれているので、ダーク・フレームの補正を行えば、バイアスでの補正は必要ない。

CCDの感度むらと光学系の光むらを補正するための画像をフラット・フィールドと呼ぶ。補正するには、ライト・フレームをフラット・フィールドで割り算する。CCD撮像画像データは、大部分が16ビットの符号なし整数値である。整数データの場合、割り算すると少数点以下の小さな数値の実数となる。値が実数のままでは、もともと整数として扱っている画像と演算処理するのが不便であるので、符号なし整数データに戻す必要がある。実際、画像処理ソフト内部でのフラット・フィールド補正演算は、割り算した実数値にフラット・フィールドの全画面（全ピクセル）の平均値をかけ算している。

実際、補正に使用するそれぞれのフレームは、コスミック・レイや電氣的ノイズが不規則に写り込むので、複数フレーム（最低10フレームは欲しい）を合成したものを作成しておく。

ダーク・フレームは、各フレームの平均レベルがほとんど変化しないので、メディアン（中央

値)をとった合成を行なう。メディアンで合成すると、一つのフレームだけに写ったパターンがきれいに消えてくれる。

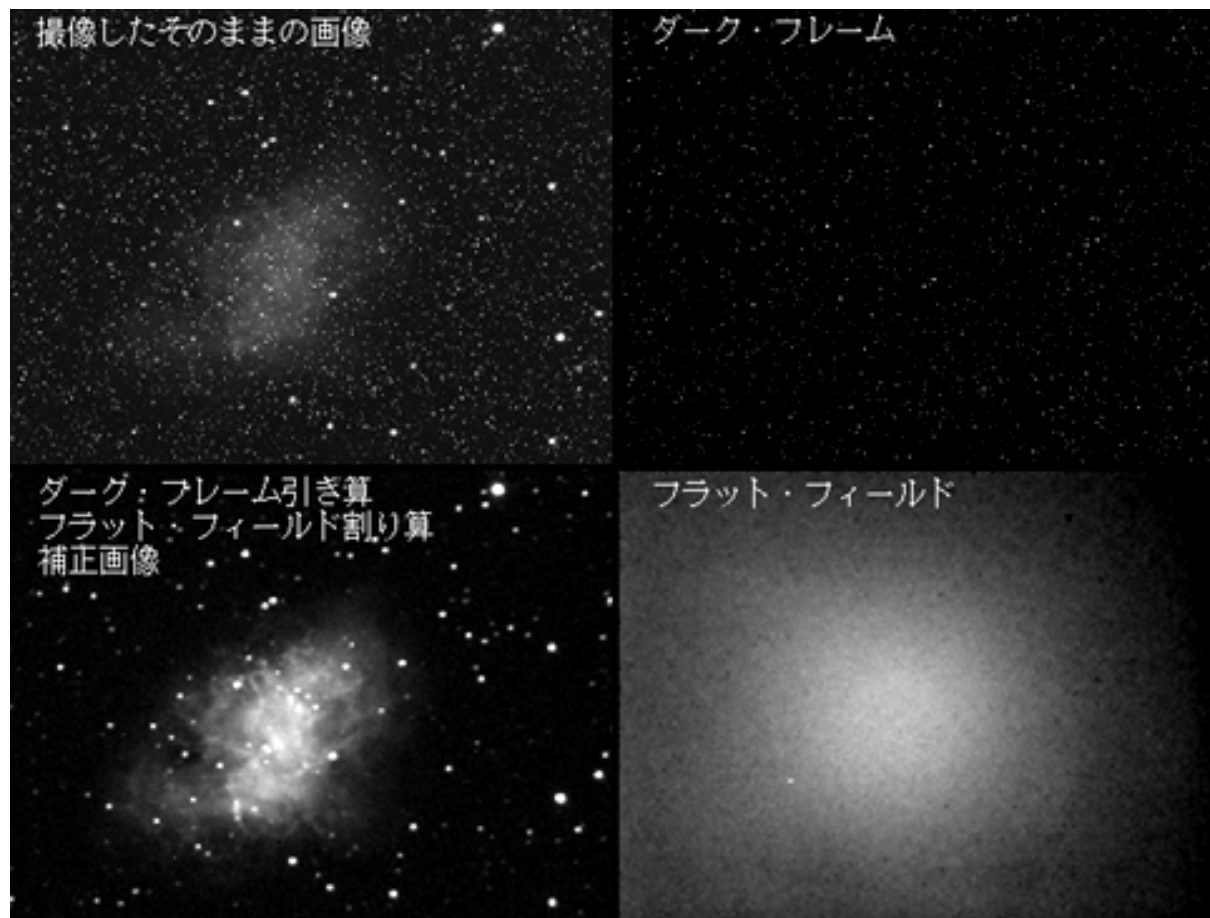


図21 一次処理の効果

フラット・フィールドは、各フレームのレベルが全て異なるので、全フレームの平均レベルを一致させないとメディアンでの合成は効果がない。処理時間がかかるので、筆者は加算平均を採用している。まず、フラット・フィールドの各フレームをダーク・フレームで引き算処理する。その後、加算平均でのコンポジット処理を行なう。図21に、電子冷却式CCDカメラで撮像したそれぞれのフレームと処理後の効果を示す。

(c) 1次処理以降の処理

- ・階調調整 (明るさ、コントラストを調整して8ビット画像に切り出す)

撮像した画像は、16ビット・データのレベル値そのままでは、ディスプレイ表示画像として表現することはできない。全階調範囲の内、限られた輝度分布の一部を切り出すことによる階調調整をしなければならない。天体画像は、対象による違いはあるが、バックグラウンドとほとんど同じレベルの極淡い構造から、対象天体の最高輝度値まで、さらに、同視野に対象天体より明るい恒星が写ることもあり、非常に階調が豊富で輝度差が大きい。その反面、必要とする階調範囲は、ほんの一部分に過ぎない。この調整がすべての画像処理において基本中の基本となる。