

# 1 - 彗星を知ろう

## 1 彗星とは何か

太陽系は、約 46 億年前に星間分子雲の中でできたと考えられています。分子雲は、主に水素からできているガスとホコリのようなサイズの鉱物片であるダストからできています。星間雲は、回転しながら収縮して円盤状になり、その中心に水素のかたまりの原始太陽が誕生しました。惑星などはそのまわりの円盤状になった星間雲から生まれました。ダストが星雲の赤道面に沈んで形成された円盤には、微惑星と呼んでいると呼ばれる大きさ約 10km の天体が無数に作られました。これは典型的な小惑星、彗星の大きさです。微惑星は、緩やかな衝突によって合体して原始惑星が作られ、さらに衝突・合体がすすみ惑星が誕生したと考えられています。

彗星は、太陽の周囲を細長い楕円軌道で公転しています。軌道の傾きが大きく、惑星の軌道を横切るものも多いのが特徴です。彗星の起源は、太陽系が形成されたとき、太陽系の外縁部にできた氷型の微惑星の生き残りと考えられます。この天体が、何らかの原因で太陽に向かって近づくと彗星となるのです。太陽系天体の多くは、誕生後に熔融したりして、元の物質の特徴が失われています。しかし彗星は、太陽系を作った当初の物質(始源物質)が冷凍保存されていると考えられ、太陽系誕生時の「化石」が彗星であるとも考えられています。

軌道から彗星を分類する場合、短周期彗星(周期が 200 年以下のもの)と長周期彗星(200 年以上のもの)に分けます。彗星の起源を軌道から考えたのがオランダの天文学者オールトです。周期の長い、ほとんど放物線に近い軌道の彗星を丹念に調べ、太陽からもっとも遠ざかる点(遠日点)が、数万天文単位付近に集中していることを発見し、ここが彗星の故郷であると考えたのです。現在、これは「オールトの雲」とよばれています(図 1)。

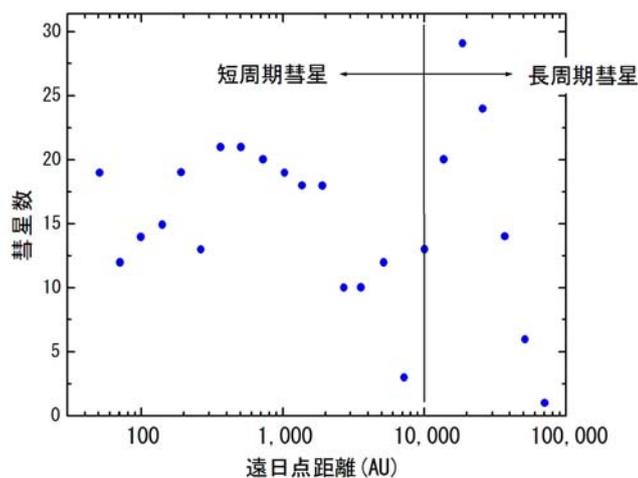


図 1 彗星の遠日点分布

10000 天文単位よりも遠いところに、遠日点のピークがあり、これがオールト雲であると考えられている。

一方、オールトよりも早く、冥王星のやや外側に彗星の故郷があると提案したのは、アイルランドの天文学者エッジワースです。短周期彗星が太陽系の惑星が存在する面(黄道面)に集中していることから、オールトのような球殻状の故郷ではなく、冥王星の外側に黄道面にそったベルト状の彗星の故郷があると考えました。アメリカの天文学者ジェラルド・カイパーも同様の考えを述べ、1992年に最初の該当する天体が発見ため、この彗星の故郷のことを、「エッジワース・カイパー・ベルト」とよんでいます(図2)。

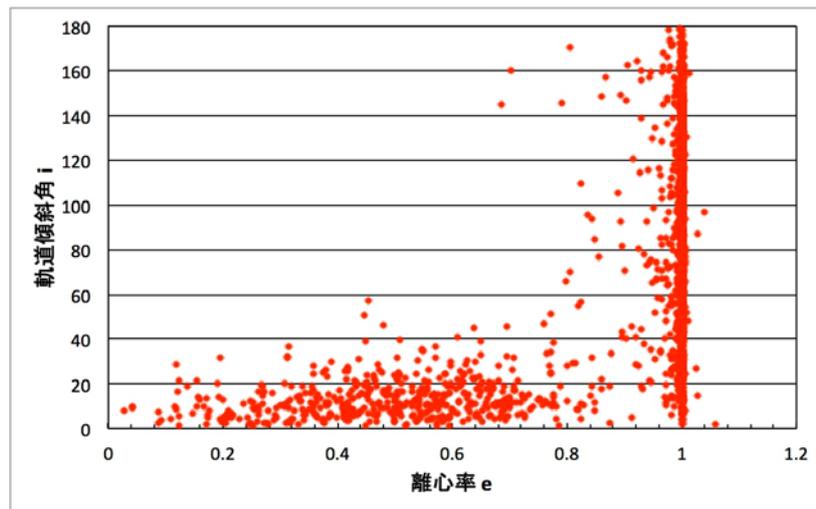


図2 離心率と軌道傾斜角の関係

離心率( $e$ )が  $0 < e < 1$  の天体は楕円軌道である。 $e=1$  は放物線軌道である。エッジワース・カイパーベルト天体は、 $e$  が小さい楕円軌道で軌道傾斜角( $i$ )が小さく黄道面に沿っている。オールト雲からの彗星は  $e$  が 1 に近く、 $i$  は等方的になっている。

## 2 彗星の構造

### (1) 核

彗星の正体は巨大な「汚れた氷の塊」です。星間雲の複雑なガスが凍ったものにダストが混じっています。彗星の本体を核とよんでいます。その氷成分の80%以上は水(H<sub>2</sub>O)、残りの20%は二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、一酸化炭素(CO)の氷です(図3)。微量成分として炭素、酸素、窒素に水素が化合した有機物分子も含まれています。ダストはホコリのようなサイズから砂粒、あるいはもっと大きな石ころサイズまで混ざっています。

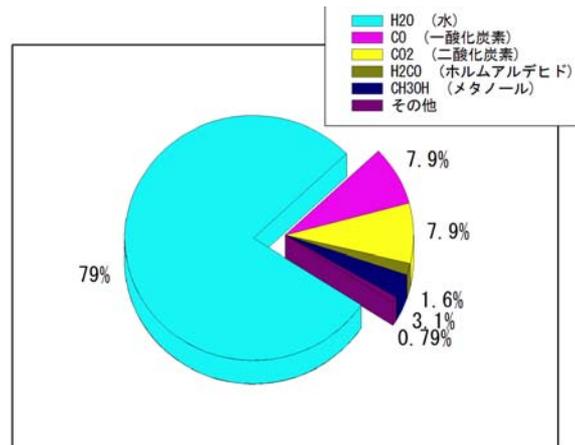


図3 彗星核の組成

### (2) コマ

彗星が太陽に近づくと、太陽から受ける熱でその表面は少しずつ融けていきます。液体の状態を経ないで、一気に気体となって蒸発します(昇華)。この気体(ガス)に引きずられるように、ダストも一緒に宇宙空間に出てきます。彗星から飛び出したガスの一部は、本体の核のまわりにぼやっとした薄い大気をつくり、ぼんやりとした丸い頭部として見えます。この大気を彗星のコマと呼びます。コマの直径は数万~数100万kmにもなります。主成分はC<sub>2</sub>、CNなどで、密度は小さく背景の恒星が見えるほどの希薄なガスです(図4)。

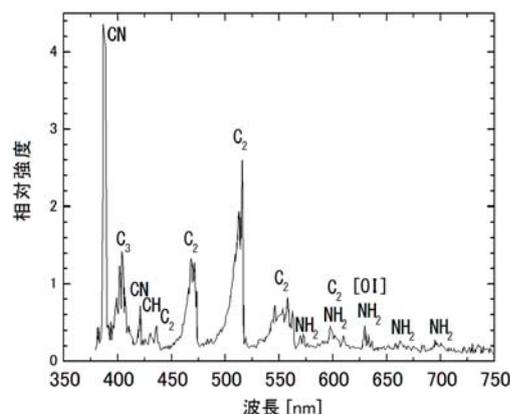


図4 コマのスペクトル

### (3) プラズマテイル

コマのガスの中には電気を帯びてしまうもの(イオン)があり、電氣的な力に影響を受けます。太陽からは太陽風という電気をもった粒子が絶えず流れています。この風が彗星のまわりのイオンになった分子を、太陽と反対側に吹き飛ばして、これがイオンの尾(プラズマテイル)を作ります。イオンの正体は、一酸化炭素イオン( $\text{CO}^+$ )、水分子のイオン( $\text{H}_2\text{O}^+$ )です。

### (4) ダストテイル

ガスと共に彗星を飛び出したダストは、サイズによって振る舞いが違ってきます。流星となるような mm サイズのダストは、彗星核からさほど離れていない位置に分布し、mm サイズより大きいダストは再び彗星に落下してしまいます。ダストテイル  $\mu\text{m}$  サイズの粒子が太陽光を反射して光っているものです。ダストは固体ですから、流されるスピードはイオンに比べてゆっくりで、そのためにダストの尾は細くはならず、かなりの幅を持った尾を作ります。

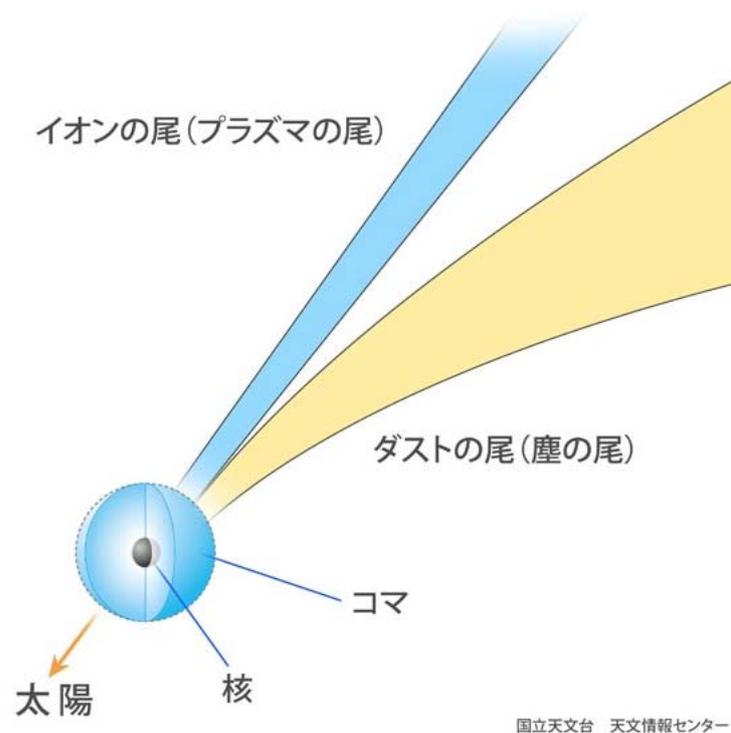


図5 彗星の構造

## 2 - 彗星の光度とは

### 1 彗星の光度変化

地球から見た天体の明るさは、どのように変化するのでしょうか。太陽の光を反射して光っていると考えましょう。太陽から離れていけば当たる光は弱いということになります。これは太陽からの距離(日心距離  $r$ )の2乗に反比例します。次に、地球からの距離(地心距離  $\Delta$ )が遠ければ暗く見えます。この関係も距離の2乗に反比例します(図6)。もう少し詳しく書くと、大きな天体ならばたくさんの光を反射します。また、その反射する割合(アルベド)も関係します。さらに、太陽の光が当たる角度も無視できません。一般に、惑星、小惑星などの場合は、ここまで考えれば十分です。ところが、彗星の場合は大きく異なります。

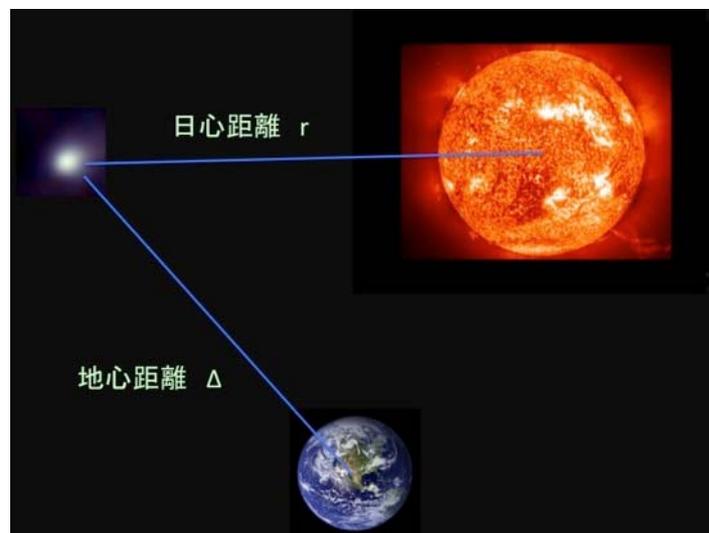


図6 彗星の位置関係

彗星核は水や二酸化炭素などの氷に大量のダストが含まれた「汚れた氷の塊」です。彗星が太陽に近づいて日心距離が近くなると、水や二酸化炭素が昇華していきます。氷ごとに昇華する温度が異なるため、太陽からかなり遠くところで離れたところで活発に活動(明るくなる)することもあります。コマの中では放出されたガスが、光化学反応などで更に分解されていきます。このようなことが、彗星の光度に大きな影響を与えます。さらに光度変化は、核の成分の割合(ガスとダスト比)、彗星核の形状や大きさ、自転周期、自転軸の公転方向に対する向き、核表面の地形なども加わり、極めて複雑なものとなります。逆に言えば、正確に求められた光度観測の結果には、彗星の本質を知るうえで重要な多くの情報が盛り込まれているわけです。そのためにも信頼性の高い正確な光度観測が重要なのです。

## 2 明るさと等級

天体の明るさは「等級 (magnitude)」という単位で表されます。1 等星と 6 等星が放出しているエネルギーの比は、100 : 1 です。5 等級の差が 100 倍のエネルギーの違いですから、1 等級の差では  $\sqrt[5]{100} \approx 2.512$  倍となる。1 等より明るい天体は 0 等、さらに明るければ -1 等、-2 等というように負の数となります。逆に 6 等より暗い天体は 7 等というように大きな数となります。-4 等は 1 等の 100 倍の明るさであり、11 等は 6 等の 1/100 の明るさです。光のエネルギーを正確に測ることができれば、5.1 等、5.13 等などと小数で表すことができます。明るさが  $L_1$ 、 $L_2$  の天体の等級が  $m_1$ 、 $m_2$  のとき、次のようなポグソンの公式が成り立っています。

$$\frac{L_1}{L_2} = (\sqrt[5]{100})^{m_2 - m_1} = 10^{\frac{2}{5}(m_2 - m_1)}$$

$$\log_{10} \left( \frac{L_1}{L_2} \right) = \frac{2}{5} (m_2 - m_1)$$

$$m_2 - m_1 = 2.5 \cdot \log_{10} \left( \frac{L_1}{L_2} \right)$$

等級がわかっている基準となる天体を標準星(比較星)と呼び、この明るさを測定して、求めたい天体の明るさと比較することにより等級を計算することができます。

## 3 彗星の光度式

彗星が太陽の光だけを受けて光っているとします。日心距離( $r$ )、地心距離( $\Delta$ )として、太陽からも地球からも 1 天文単位 (au : 太陽地球間の距離を  $1 \text{ au} = 1.495978707 \times 10^{11} \text{ m}$ ) の距離にあったと仮定し、そのときの明るさを  $H_0$ 、その時の等級を  $m_0$  と定義します。これを太陽系天体の場合の「絶対光度」と呼んでいます。光の強度は距離の 2 乗に反比例するので、明るさ  $H$  と、 $H_0$  との関係は、月の満ち欠けの様な位相角 (太陽・彗星・地球の成す角) の効果を  $F_\alpha$  として、

$$H = \frac{H_0}{r^2 \Delta^2} \cdot F_\alpha$$

と表せます。次に、彗星の場合はコマが発生するなど日心距離による変化が大変複雑で、その依存性が 2 乗則と限らないので、これを未知のパラメータ  $n$  とおきます。ここで、 $n$  の影響の方はかなり大きいので、とりあえず位相角  $F_\alpha$  の効果は無視することにします。すると、明るさ  $H$  を

等級  $m$  に置き換えて、

$$\frac{H}{H_0} = \frac{1}{r^n \Delta^2} = 10^{\frac{2}{5}(m_0 - m)}$$
$$\log_{10} \left( \frac{H}{H_0} \right) = \log_{10} \left( \frac{1}{r^n \Delta^2} \right) = \frac{2}{5}(m_0 - m)$$
$$m_0 - m = \frac{5}{2} \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{r^n \Delta^2} \right)$$
$$m = m_0 + 2.5n \log_{10} r + 5 \log_{10} \Delta$$

と書き直すことができます。この対数は底が 10 の対数ですから、省略して簡単に書いておきます。

$$m = m_0 + 2.5n \log r + 5 \log \Delta$$

これが彗星の光度式です。ここで  $m_0$  と  $n$  は、彗星ごとに決められる値で、 $m_0$  は彗星の規模を、 $n$  は日心距離による変化量を表しています。 $r$  と  $\Delta$  が決まれば、その時刻の  $m$  が求まることになり、彗星の光度予報はこの光度式を用いて行われています。発見初期で  $m_0$  と  $n$  が決まっていな  
い時には、 $n=4$  を仮定して、 $m$  から  $m_0$  を仮に決定し、その後の光度変化を予測しています。これは  $\log r$  の係数が 10 となることから、太陽光の反射(ダスト)と彗星の発光(ガス)の割合が、1 : 1 と仮定したことを意味しています。そのため、この時点での予報光度は、あくまで暫定的なもので、その後の光度観測の積み重ねによって、より確実な  $m_0$  と  $n$  を決定し修正していくことになるのです。

#### 4 光度式の求め方

彗星の光度式にある  $5 \log \Delta$  を左辺に移し、式の並び方を変えると、

$$m - 5 \log \Delta = 2.5n \log r + m_0$$

となり、 $m - 5 \log \Delta$  を  $y$ 、 $2.5n$  を  $a$ 、 $\log r$  を  $x$ 、 $m_0$  を  $b$  とすると、光度式は単純な  $y = ax + b$  の一次式の形になっていることがわかります。ですから、複数回の光度観測から「一次近似」をして、その彗星に固有の  $2.5n$  と  $m_0$  を決定することができます。データがたくさん集まれば、「最小2乗法」を使って精度よく求められます。Microsoft エクセルなどでは、散布図のメニューでグラフを描いておき、「近似曲線の追加」のメニューから「線形近似」を選択すればすぐに求められます。

光度式専用開発されたソフトウェアを用いれば、より簡単に観測データを整約することがで

きます。

Comet for Windows (吉田誠一氏制作、<http://www.aerith.net/project/comet-j.html>) は、観測時刻の  $r$  や  $\Delta$  など軌道要素から計算して位置推算表を作り、光度変化をグラフに表示するところまで、全てを自動で行ってくれる優れたフリーウェアです(図7)。

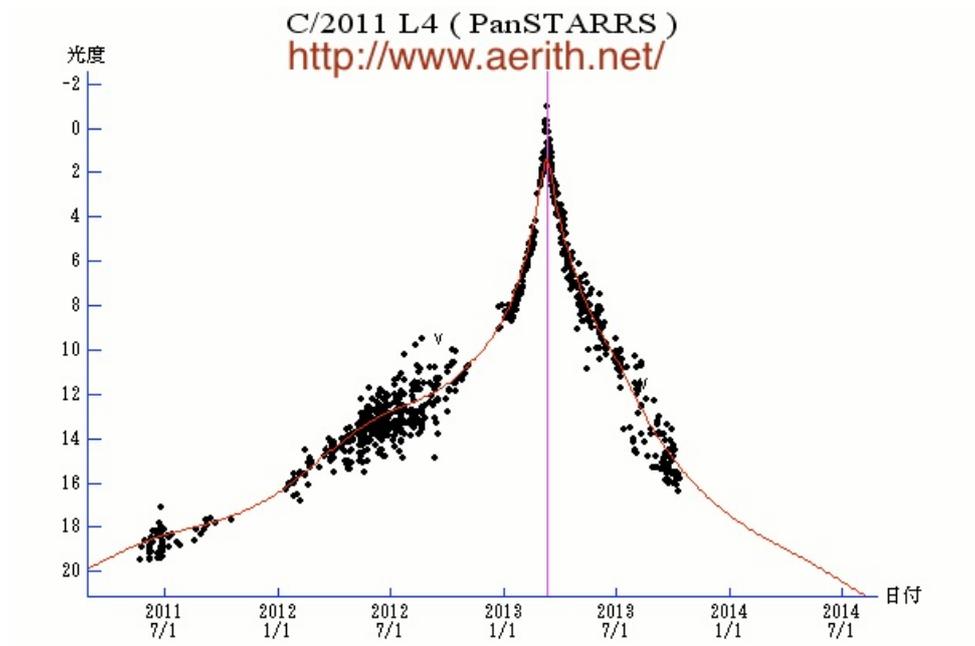


図7 彗星の光度変化の例  
パンスタース彗星

### 3 - 簡易的な彗星の明るさの見積もり

#### (1) 小学生でもできる？ 彗星の明るさ求め方

デジタルカメラの普及と性能の向上により、天体写真がより身近になってきました。そこで、この章ではできるだけ簡易的な方法で、彗星の明るさを求める方法を解説します。

この方法は、これまでの指南書ではおそらく触れられていない眼視観測で行っていた測光方法を写真に応用し、デジタルに対応させた新たな方法です。デジタルの彗星の測光の王道とは違いますが、「小学生でもできる彗星の明るさ求め（測光）」として、大きく観測の裾野を広げる可能性を秘めています。当然、この方法での測光の実績も積み重ねられていません。その意味では、これに取り組む皆さんの工夫や努力が、大きく活かされ貢献できる分野でもあります。また、彗星だけではなく新星や変光星の観察にも適応できます。是非とも取り組んでいただき、「小学生でもできる明るさ求め」の確立に寄与してください。

観測写真から測定した彗星の光度変化から、彗星の盛衰を考察することができますが、これには彗星の太陽からの距離、地球からの距離が大きく関与しています。また、撮影時の気象状況も影響を及ぼします。これらの影響を正しく見積もることにより彗星の素顔の一つが見えてきます。特にアイソン彗星は太陽に非常に接近し、突発的な明るさの変化も予想されますので、目が離せません。

#### (2) コンパクトデジタルカメラの固定撮影で彗星を撮る

デジタルカメラの性能の進化に伴い、デジタル一眼レフカメラではもちろん、ミラーレス一眼レフカメラやコンパクトデジタルカメラ（以下コンデジ）でも、星景写真や天体写真を撮影できるようになってきました。すべてのコンデジで星空がうまく写せるわけではありませんが、手軽に星空が写せるようになってきたことには、違いがありません。

最も簡単な星空の撮影方法は、カメラを三脚にしっかり固定して数秒程度露出をする、固定撮影と呼ばれる方法です。コンデジでどれくらい露出ができるかはカメラによってまちまちです。説明書や仕様表で露出（シャッタースピード）の項目を調べてみてください。露出時間を延ばし過ぎると、恒星が日周運動で線を引いて写ります。ズームをあまり望遠側にせず、感度を上げて10秒以内の露出が望ましいと思われます。



図1 固定撮影のようす

図1は、ミラーレス一眼レフカメラを使った、固定撮影のようすです。長く露出をするので星がぶれないように、しっかりとした三脚で固定することが必要です。シャッターを切るには、リリースやリモコンを使うか、セルフタイマーを使います。また、暗い対象ですので、昼間の撮影とは異なる注意点があります。それらの天体固定撮影のチェック要素を簡単にまとめたものが表1です。これらはあくまでも目安です。カメラ毎に設定できる

ことやその仕方は異なりますので、必ず試し撮影を行って、よく写る設定の組み合わせを見つけてください。特に無限大のピント合わせは、注意が必要です。そのカメラがピント無限大で固定できるかを確認してください。ほとんどの場合、星空でのオートフォーカスは機能しません。マニュアルでのピント合わせができるかどうか、事前の確認が必要です。

星空が写せるかどうかの最大のポイントは、①ピントを無限大に固定できること、②長時間（10秒前後）の露出ができること、③三脚にしっかりと固定すること、の3点です。

表1 彗星撮影時の注意点

No.	チェック項目	設定等内容	備考
1	カメラ三脚	なるべくしっかりとしたもの	撮影時のブレをなくす
2	露出時間 (撮影モード)	10秒前後(秒数指定できるもの) マニュアルモードで秒数指定ができない場合は、花火モードや夜景モードなど長時間露出ができる設定 露出は可能ならば2秒、4秒、6秒など数段階で撮影する	星像があまり流れない程度の露出
3	ISO感度	ISO800～ 設定可能な最高感度、または、1段階下の設定 指定できない場合はAUTO	最高感度に設定した場合、画像が極端に粗くなる可能性があるので注意
4	保存画像フォーマット	高画質のJPEG (処理ができる場合には、RAW)	簡易的な方法なのでJPEGでOK
5	ノイズ除去	設定できるものは、ONとOFFで写真を撮り判断 長時間露出のノイズ除去=ON、高感度のノイズ除去=OFFが目安です	ノイズ除去で星まで消えてしまうことがあるので注意
6	セルフタイマー	2秒～10秒など設定できる時間。短くてよい 電子レリーズやリモコン使用の場合は、設定なしでもよい	手でシャッターを切る際のブレを防ぐ
7	画角 レンズの焦点距離	広角から標準のレンズの視野で写す。35mm換算では広角～50mm程度 フレーム内に多くの星(比較星)を同時に写すことが大切(彗星だけのアップにしない)	彗星の他に必ず複数の星が写るようにする。 彗星が大きくなる方向が測光精度が高くなる
8	撮影枚数	短時間に同じ画角、同じ露出毎に～10枚程度撮影 (露出は数段階とる)	
9	時計合わせ	カメラの内部時計を秒単位でおよそ合わせておく	

コンデジで星空を撮影した場合、一眼レフカメラのそれと比べて、S/N比が低く画像が粗くなってしまいます。画像の粗さは背景がザラザラとしていることで判断が付きまします。この像の粗さは、天体の明るさ(等級)を測る上で妨げとなり、測光制度を下げる大きな要因となります。この短所を補う方法の一つが、枚数をたくさん撮り測定結果を平均する(中央値を取る)方法です。従って、撮影は1枚ではなく、必ず複数枚撮りましょう。短時間に同一フレームで数枚撮影します。これにより、ブレなどの撮影自体の失敗を、防ぐこともできます。



図2 星空の固定写真の例

### (3) 彗星の簡易測光

彗星の明るさの測定は、明るさが分かっている星と彗星の明るさ比較で行います。

測光解析には天文用の解析ソフト「マカリィ」が多く使われますが、ここでは、より多くの方がより簡単に測光できるように、便宜的な方法を用います。精度は落ちますが、より身近に測光ができることのメリットを優先させました。撮影枚数を増やしたり、露出を変えて撮影することなどにより、光度測定の数回を増やし精度を高めます。同じデータを何人かで別々に簡易測光するのも有効です。

#### (a) 彗星の何の明るさを測るのか

彗星は太陽からの距離や視線方向などにより、その見かけの姿が違って見えます。太陽に近づくとコマが明るく大きくなり、やがて尾が成長していきます。その彗星をどの方向から見るかによっても形、姿が変わってきます。このように見かけの姿が変わる彗星の明るさは、どこまでの範囲で明るさを求めるのかが重要になってきます。

この観測ではコマ光度という明るさを定義して、その明るさの変化を追う観測になります。

#### (b) 彗星の明るさの見積もり（簡易測光）

コマの明るさを測定し、等級で表すことが測光ですが、彗星だけを見てもすぐに何等級かは分かりません。そこで、周りに写っている同じくらい明るさの星の等級を調べ、彗星の明るさと比べることにより等級を推測します。明るさの基準にする星を比較星といいます。比較星を選ぶ時の注意点をまとめたものが、表2です。

表2 比較星を選ぶ時の注意

No.	項目	注意点
1	背景の明るさ	彗星の背景の明るさ（暗さ）となるべく同じ範囲の星を選ぶ 背景の明るさが違うと星、彗星の明るさも変わって見えてしまうことがあるので注意
2	比較星の明るさ	彗星と明るさが近い星を選ぶ (彗星より明るい星と暗い星)
3	比較星の数	できるだけ複数個の比較星
4	比較星の色	白～水色の星を優先（ない場合はその限りではない）

比較星は一つではなく、少し暗い星と少し明るい星の二つの星を1セットとします。ふたつの星の明るさを比べ、その明るさの差を数段階に分けて、彗星の明るさがどこになるかを判断し、等級を見積もります。

この簡易測光の方法を図3に示しました。図3では、比較星1と比較星2の間の明るさを5等分になるように見積もっています。

この時の彗星の明るさは、図下の式で表され、彗星は3.6等級になります。

階層を多くすると難しいため、2～3段階でも構いません。やりやすい階層に分けましょう。たとえば、図3の例で、彗星はちょうど中間の明るさ(2等分に分けた)と見積もれば、測光等級は3.7等級になります。

以上が簡易測光の原理です。理解できたでしょうか。

ここで注意が必要なことは、彗星が嬉しいことにマイナス等級になった場合、明るい比較星が取れなくなってしまうことです。この場合には、彗星の明るさの見積もりが大変難しくなりますが、少し暗い比較星を二つ選び、外挿で彗星の明るさを見積もります。

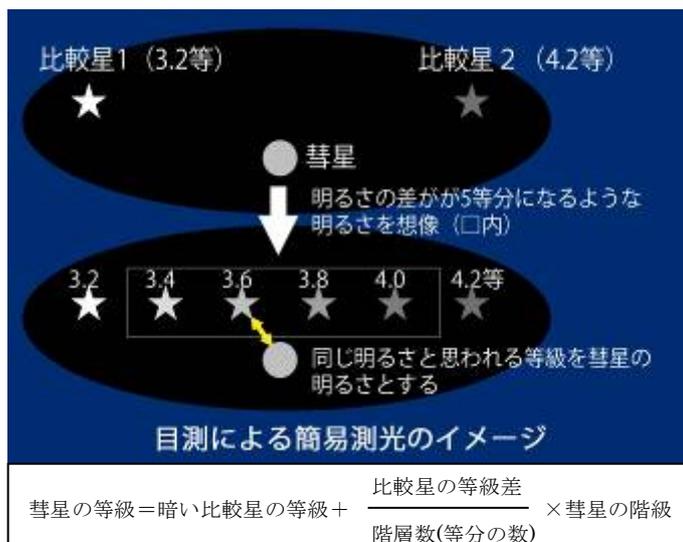


図3 目測による簡易測光のイメージ

### (c) 彗星簡易測光の手順

次に簡易測光の手順を見てゆきましょう。手順をまとめると次のようになります。

- ①彗星の写ったピンボケ写真から、彗星と明るさが近い複数個の比較星を決める
- ②比較星の既知の明るさを調べる
- ③比較星と彗星のコマの明るさを比較する  
パソコン上で、ピンボケの比較星と、彗星との明るさを比べる  
(\*詳しい方法は後述の(d)で述べる)
- ④彗星に一番近い明るさの少し暗い比較星、少し明るい比較星を判定する  
彗星と同じ明るさの比較星があれば、その等級を彗星の明るさとする
- ⑤少し暗い比較星、彗星、少し明るい比較星を比べ、目測で彗星の明るさが暗い比較星と明るい比較星のどちらに近いかを、2階層、3階層、4階層～で判断する  
(慣れるまでは、階層は少ない方がよい 2つの星の等級が近い場合は、階層が少なくてもよい)
- ⑥比較星の等級差と⑤で見積もった明るさ階級から彗星の明るさを見積もる

比較の星の明るさは、ステラナビゲーター(アストロアーツ)などの天文ソフトで、調べることができます。6.5等級までの比較的明るい星であれば、フリーソフト「Stella Theater Lite」でも調べられます。図4はステラシアターで等級を調べているようすです。知りたい星にカーソルを重ねると、しばらく後に等級が表示されます。(これ以上暗い星を調



図4 ステラシアターでの等級調べ

べるには、有料バージョンが必要です。)

(\*簡易測光では(何も考えず)一般的なV等級(実視等級)を使います。)

#### (d) 彗星測光時の工夫(比較星をぼかす)

写真では星は点像に写り、彗星はぼんやりとした星雲状に写ります。点像の比較星と広がりがある星雲状の彗星(コマ)の明るさを、直接比べるのは困難です。そこで、写真をわざとぼかし、比較星を彗星のコマと同じくらいの大きさにして、明るさを比べます。写真撮影は、ピントのあった彗星との明るさを比べる

比較星をぼかす方法としては、

①写真撮影時にわざとピントをずらしピンボケで撮る

②ピントが合った状態で写真を撮り、後にコンピューター上でぼかす。

の2通りのやり方が考えられます。

(このほかに写真撮影時にぼかしフィルターを付けて撮ることも考えられます。)

①の場合は、ピントが合った写真とピンボケ写真の両方を撮影します。

②の場合は、コンピューター上で行うため、画像処理のソフトが必要です。フリーのソフトでは「PHOTO.NET」などがあります。しかし、ピントの合った恒星を、都合よくピンボケのようにぼかすのは、難しい作業です。一方、①の方法は、画像処理ソフトが要りませんのでより簡単です。ここでは、①の方法で解説を進めます。

撮影時にピントをぼかして撮る場合、どれくらいぼかせばよいのでしょうか。正解は彗星のコマと同じくらいです。ピントをずらす量の目安として、ピント $\infty$ (無限大)の位置のピントリングの位置が分かるように、あらかじめシールなどの目印を貼っておきます。試し撮りでこのピント位置から1mmずれると、2mmずれると等、それぞれのボケ具合を確かめておくことを勧めます。仮に当日まで試し撮りができなかった場合でも、昼間のうちに、 $\infty$ (無限大)の位置を記しておくことは必要です。これを行ってれば、当日でもボケ具合の確認ができます。デジタルカメラの非常に便利な点です。あまりピンボケにすると、暗い恒星が目立たなくなってしまいます。また、ピンボケ量が少ないと明るさの差が分からなくなってしまいます。図6の写真を参考にしてください。(露出時間に応じて多少の調整が必要かも知れません。)

それでは、撮影時の手順の整理をしましょう。

①ピントを合わせて複数の露出時間で撮る。

(\*ブレなどの失敗が考えられますので、最低各露出時間2枚以上撮るのが安全です。)

②ピントをずらし①と同様の露出で複数枚撮る。

アイソン彗星の観測時間帯は、明け方前の短い時間帯です。十分な観測(写真撮影)時間



図5 オリオン座(60秒露出)

がありません。できるだけスムーズに失敗なく行うためには、事前の練習が必要です。撮影順序をまとめたタイムテーブルも用意しておきたいものです。

### (e) 簡易測光の実例 (M42)

図5は、オリオン座の写真です。三ツ星の下(南)には、M42(オリオン大星雲)が写っています。このM42を彗星とみなし、その明るさを簡易測光で計測してみましょう。図5のようにピントの合った写真では、面積のある天体と点像の星の明るさを、目測で比べるのが難しいことが分かります。

そこで、写真のピントをわざとずらし、ピンボケで写真を撮り、星を丸い面積体にしませ。図6は、ピントをはずし、星をわざとぼかして撮ったオリオン座の写真です。

この写真を使いM42(オリオン大星雲)を簡易測光し、等級を測定します。

カラーのオリオン座の写真を見ると、オリオン大星雲は、ピンク色に写っています。周りの星々は、青白~白の星が多いため、単に明るさを比べるには、色が邪魔になっていることが分かります。そのため、カラー写真を白黒にします。(M42の場合赤っぽく写りますが、彗星の場合は緑青に写ります。)写真を白黒にするには、画像処理ソフトを使います。フリーソフトの「Paint.NET」などがあります。



図6 ピンボケで撮影したオリオン座(左)と白黒にして三ツ星、M42部分の拡大(右)

写真の中から比較星として使えそうな星を選び、その等級を調べます。(この例では参考になるように少し多く星の等級を調べました。)図6の左が等級を調べたものです。分かりやすいように部分拡大しています。

まずは、少し明るい星と少し暗い星を探します。M42 は、そのすぐ下のθ星（2.8 等級）よりも、ほんの少しだけ暗いことが分かります。このθ星を少し明るい星とします。次に、少し暗い星を探します。M42 の右上のη星（3.4 等級）が少し暗い星になることが分かります。

今度は明るいθ星と M42、η星の 3 つの天体の明るさをみます。M42 は、θ星とη星の中間の明るさ（3.1 等級）よりも、だいぶ明るいことが分かります。次は、この中間の明るさ（3.1 等級）とθ星（2.8 等級）の中間の明るさ（2.95 等級）を想像して、M42 と比べます。これは少し難しいですが、何となく M42 の方が明るい（2.9 等級）のではないかと想像できます。これ以上の明るさの比較を頭の中で行うのは困難ですので、この辺で明るさの比較を終了させます。

この結果、M42 の明るさは、簡易測光では 2.9 等級となりました。

#### （f）簡易測光結果の補正

幾つかの文献などで M42 の明るさを調べると、4.0 等級（ステラナビゲータ）、3.7 等級（メシエ天体アルバム（NewtonPress））、2.9 等級（Wikipedia）などと、約 1 等級の差があることが分かりました。

簡易測光の結果が、明るめになった原因のひとつは、データ写真を撮影したカメラにありました。このカメラは、天体用に H $\alpha$  領域が良く写るように改造されたカメラで、特に赤い星雲が良く写るものでした。つまり、測光した値は、緑に感度が高い V 等級（実視等級）と前提を置きながらも、実際には R 等級（赤）に偏っていた可能性が高かったのです。

このように、カメラの特性により簡易測光の結果が、ぶれることも考えられます。しかし、彗星は概して緑青色で、大きな色の変化はありませんので、明るさの変化をとらえるには、問題がないことが分かります。同じ観測機器（カメラ）で継続して撮影すればいいのです。

色などによる等級の偏りがあると考えられる場合には、G 等級で観測されたデータとの間で変換係数（ $k$ ）を求め、独自に簡易測光した値を  $M(G) = k M(\text{簡易測光値})$  の式で都度補正します。

## 4 - デジカメによる測光

### (1) デジタルカメラの画像形式

デジタルカメラの画像は、CMOS (CCD) の各ピクセル上にカラー画像を生成するための赤 (R)、緑 (G)、青 (B) のフィルターを4枚ひと組で並べ、そのデータを合成して画像を作成している(図 1)。そのため現像してしまうと、データはコンピュータで演算された画像になってしまう。

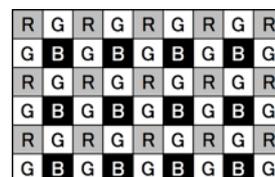


図 1 RGB バイヤー配列

そこで、デジタルカメラの生のデータ (RAW 形式ファイル) を現像せずに、直接、天体画像の解析に使用する FITS 形式のデータに変換する必要がある。このデータの抽出は、フリーウェアでは星空公団の作成した raw2fits.exe”、Christian Buil 氏の IRIS、市販ソフトのアストローツ社ステライメージなどで可能である。

星空公団 raw2fits (<http://www.kodan.jp/products.php>)

Christian Buil IRIS (<http://www.astrosurf.com/buil/>)

FITS 形式に変換されたファイルは、画像処理ソフトの定番である「マカリィ(国立天文台)」で、解析ができるようになる。

国立天文台 マカリィ (<http://makalii.mtk.nao.ac.jp/index.html.ja>)

### (2) 画像の階調とフォーカス

明るい恒星をマカリィのグラフ機能を使って、プロファイル(明るさの断面図)を描くと、中央部分が明る過ぎて飽和(サチュレーション)を起こしていることがある(図 2)。画像データは、最近の1眼デジタルカメラはそのほとんどが14bit 階調のA/D変換、16bit演算であるため、撮影された画像のカウント値の上限は14bit(約16000カウント)と考えて良い。これを超えると飽和してしまう。ところが、ここで気をつけなければならないのは、デジタルカメラは明るいものに対して、それを和らげる仕組み(アンチブルーミング)が働くため、上限に達していても、一見サチュレーションを起したように見えないことがある。そのため、露出を過度にかけないように、やや余裕をもった撮像をしておく。明るい恒星を比較星にしなければならない場合は、ピントを少し外すことで回避することができる。彗星は星雲状であるので、彗星のコマのサイズと同程度に恒星をボカして撮っておくと、正確な測定をすることができる。

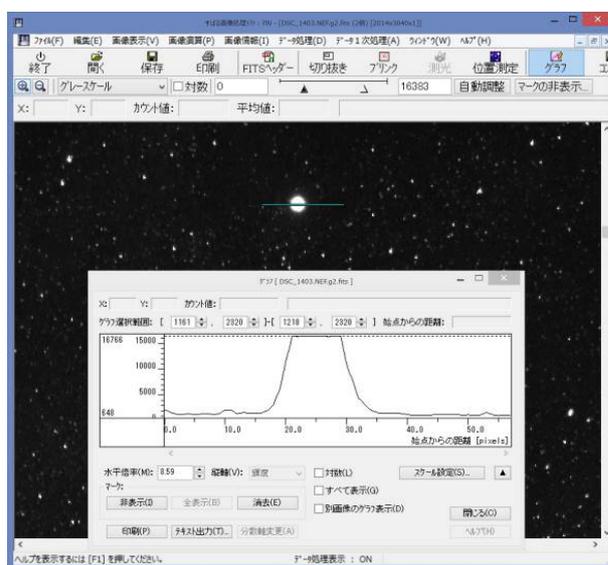


図 2 飽和した恒星のプロファイル

### (3) 画像の一次処理

正確な測定をするためには、画像のさまざまな補正をする必要がある。精度を多少悪くても明るさを測りたいという場合には、この章をスキップしてもよい。

#### (A) ダーク

デジタルカメラで撮影された画像は、カメラの中で生じる信号（ダーク画像：図 3）と空の明るさ（SKY）と天体の明るさが足し合わされて写っている（図 4）。つまり、天体の真の明るさとは、ダークとSKYを引き算したものである。簡単に考えると、SKYのカウントを測定して、天体の画像から引いてしまえば、ダークに相当する分も補正したと言える。ただし、ダークのピクセル毎の違いについては、これだけではダメである。

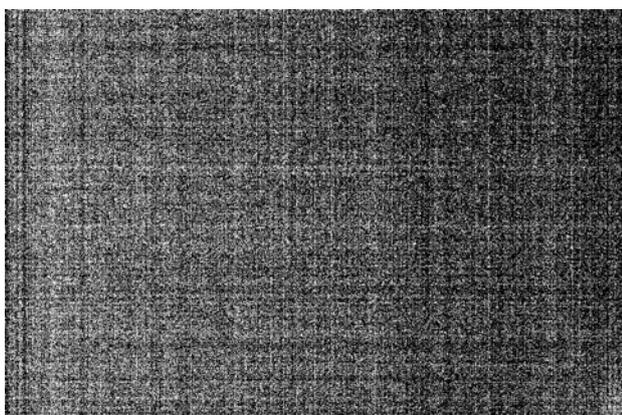


図 3 ダーク画像の例

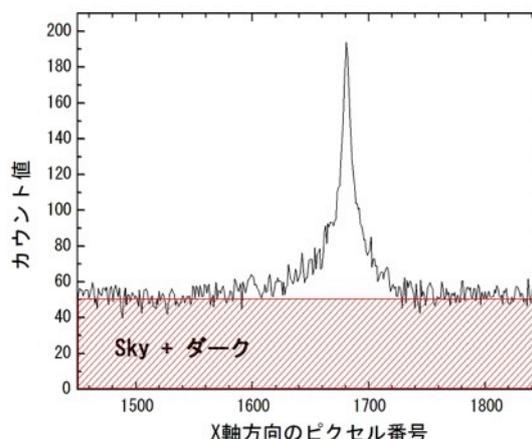


図 4 天体画像に含まれる SKY とダーク

#### (B) フラット

撮像素子(CMOS, CCD)は、数多く画素から成り立っている。画素ごとに少しずつ感度が異なる。また、レンズの周辺部では中心部より光量が落ちてくる。気になる事を言えば、素子についたゴミ、レンズの汚れなどもあり、得られた画像は、画素ごとに光の当たり方に対する反応が違ってくる。これを補正することをフラット補正と呼び、きちんと行う精度の高い測定ができる。

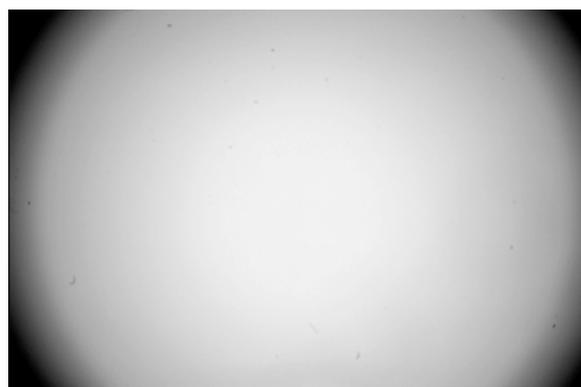


図 5 フラット画像の例

#### (C) ダーク、フラット補正画像の撮り方

ダーク画像はレンズの蓋をしたまま対象天体の露出時間、感度と同じ条件での露出をする。ただし、レンズキャップのみだと周りの光が入る可能性があるため、黒い布で覆ったほうがよい。

フラット画像は快晴の空の画像を使用する。均質な光が必要なので、アクリルなどで出来た半透明の板(散光版)を使うと良い（図 6）。レンズの違いはもちろんのこと、同じレンズであっても、絞り値、ズームレンズの場合は焦点距離、それとISO 値によって変化するため、その組み合わせ毎に取得する必要がある。フラット画像を撮った時のダークも、撮っておく必要がある。



図 6 フラット撮影の例

(D) ダーク、フラットの補正

この補正のことを一次処理とよぶ。必要なファイルが揃っていれば、画像処理ソフトのメニューに沿って処理できる。マカリィでは、「データ一次処理」で「共通ダーク・フラット」「個別ダーク・フラット」など選んで処理することができる。

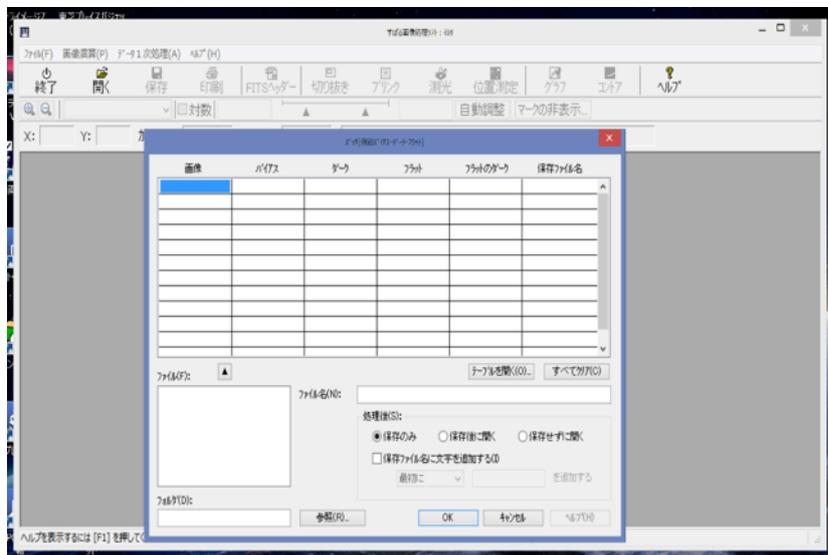


図 7 データ一次処理のダイアログ

ソフト内では、一次処理は次のように行われている。目的天体画像( $I_{obs}$ )、天体画像のダーク( $I_{dark}$ )、フラット画像( $I_{flat}$ )、フラット画像のダーク( $I_{flat\_dark}$ ) とし、一次処理の終わった画像を( $I_c$ )とすると、

$$I_c = (I_{obs} - I_{dark}) / (I_{flat} - I_{flat\_dark})$$

## 4 天体の測光

マカリの測光ツールでは自動的に対象天体(STAR)とバックグラウンド (SKY) の値を計算し対象天体の輝度(Count)を求めることができる(図 8)。また、その結果を CSV 形式やテキスト形式に出力することができる。

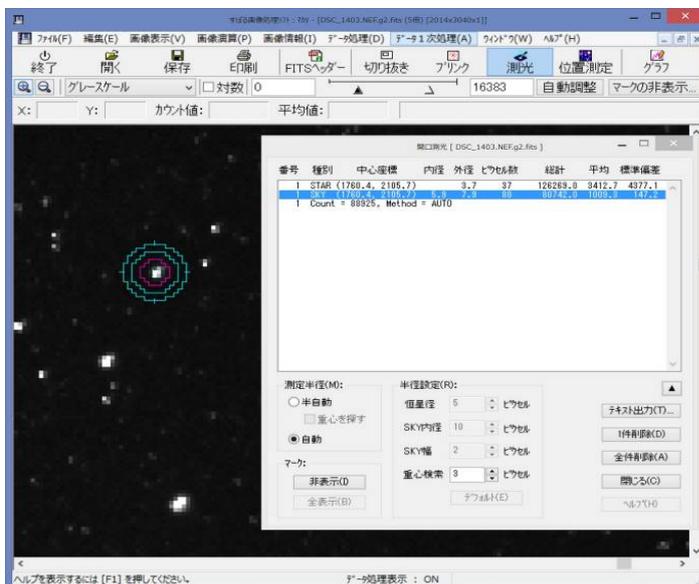


図 8 マカリによるアパーチャフォトメトリ

### (A) 彗星の測光

測光の対象天体のすぐ近くに他の天体がある場合(図 9)、測定値の STAR や SKY の値に影響を及ぼす事があり、正確な Count が得られないので注意が必要である。このような場合は、ソフト任せにせず、自分(半自動)で「恒星径」「SKY 内径」「SKY 幅」等を設定し出来るだけ正確なデータが取れるようにすることが必要である。

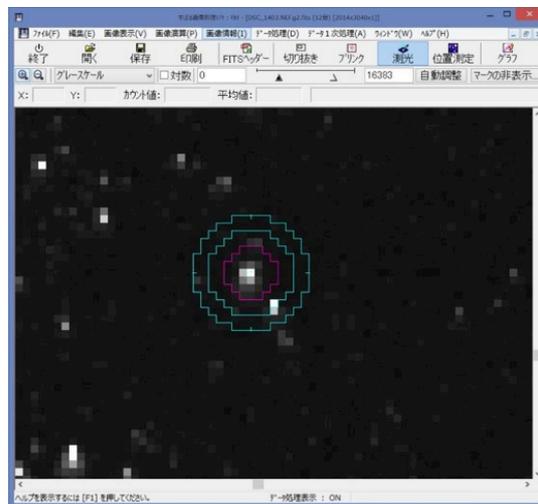


図 9 恒星(彗星の右下)が測光に影響を与える例

### (B) 広がったコマをもつ彗星の測光

成長した彗星の場合、コマの全光度を求める場合、マカリでは SKY の範囲はドーナツ状にしか取れないため、ソフトの機能で測光すると尾の部分を SKY のカウントの平均値に含んでしまうため SKY 値が大きくなり彗星のカウント値が少なくなる。そのため、SKY は内径を尾の影響が少なくなるまで大きくとるか、グラフ機能か矩形測光機能を使用して平均値を別に求め処理する必要がある。コマの大きさは、ここでは恒星径がコマの範囲ということになるので、表示レベルを調整し、恒星径を変えた値を複数とっておくとよい。以下の例は、内側から SKY 半径を 10 ピクセルずつ変化させた結果である。

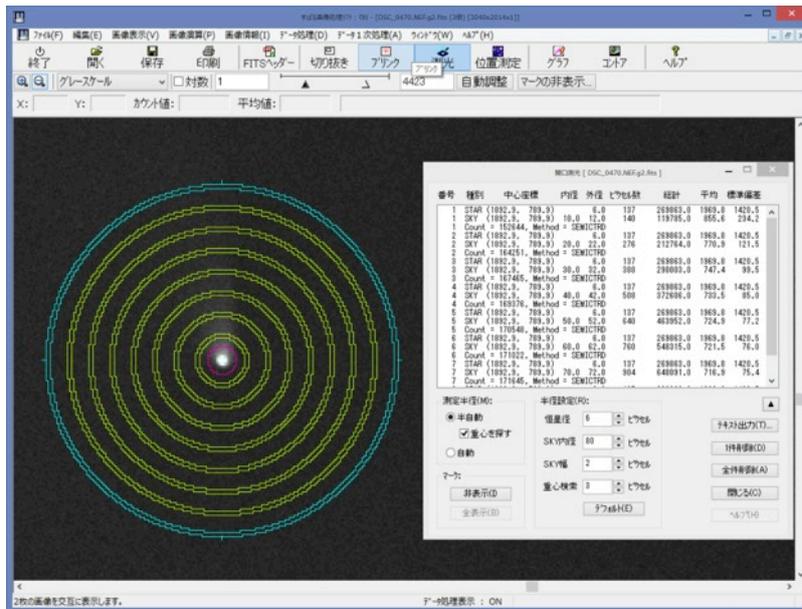


図 10 アパーチャを変化させた例

矩形測光でSKYを測定し、彗星コマのカウント値を求める場合、SKYは彗星のできるだけ近くで、コマの影響がない場所を複数とり、そのピクセル平均値をSKYとする。ここで、彗星のコマの平均カウント値からSKYの平均値を引いたままでは、彗星の明るさにはなっていない。コマ全体の明るさを求めるには、この値にコマのピクセル数に掛けて総カウント数を求める。

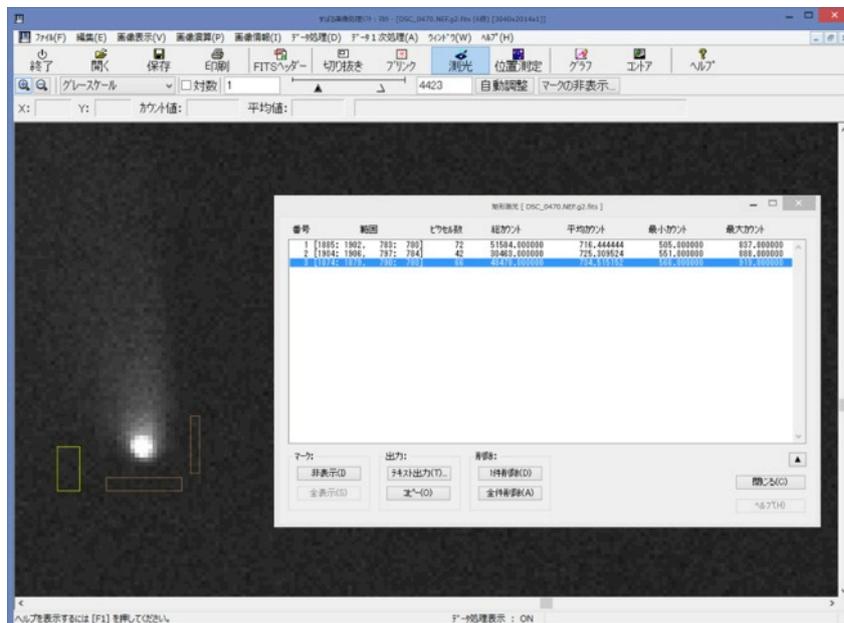


図 11 彗星の近傍の背景SKYを矩形で測光する

### (C) 等級への変換

マカリの測光機能によって得られた彗星のカウント値を等級に変換するためには、あらかじめ等級のわかっている恒星（標準星）と同じ条件で比較する。

標準星は Landolt's Standard Fields など代表的なものが、「comet handbook 2004」のホームページにある。

[http://pholus.mtk.nao.ac.jp/COMET/comet\\_handbook\\_2004/](http://pholus.mtk.nao.ac.jp/COMET/comet_handbook_2004/)

また、ステラナビゲータや Google sky の恒星情報も参考にするとよい。デジカメでは、RGB に色分解して測光したり、RGB すべてを合わせて測ったりすることができるが、人間の眼の感度に近い G を推奨する。撮像素子のベイヤー配列の中で他の色より 2 倍の画素があり、分光感度特性が標準測光の V 等級に似ているからである。カタログ中の比較星の等級は V 等級を利用する。

標準星は同じ画像に写っていることが理想だが、そのような都合の良い状態ばかりはないので、同じ日の近くの標準星で比較することも考えられる。その場合は、彗星を撮影した画像の露出時間と同じ露出時間の画像を使用する。

## 5 - 観測報告をして、データを共有しよう

### 1 観測結果の報告

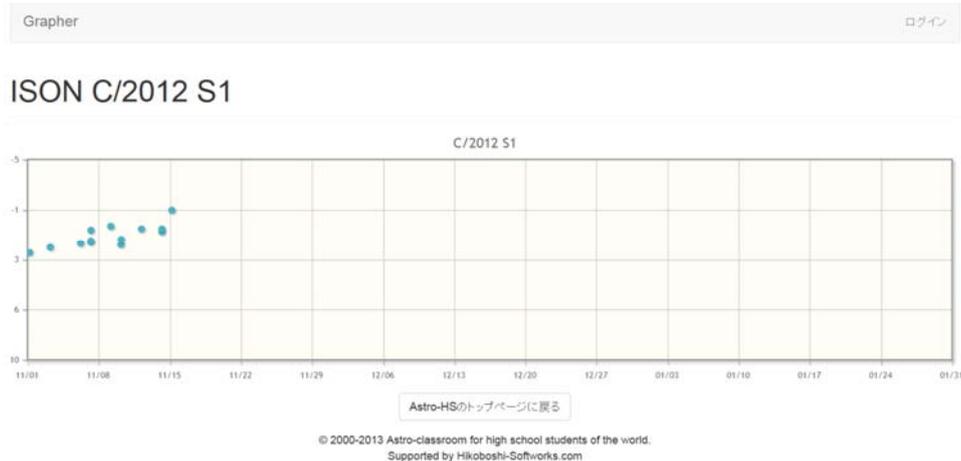
皆さんの観測によって得られたデータは Astro-HS で集約し参加グループ間で共有します。観測したらその結果を是非とも報告して下さい。報告の方法は下記の 2 通りあります。

#### (1) web フォームでの報告

彗星は日一日と明るさが変わっていき、それをネットワーク全体で追いかけることが今年度の Astro-HS の大きなテーマです。そこで、皆さんの観測結果をすぐに光度曲線に反映させ光度の変化を視覚的に追えるようにします。web フォーム上で観測日時と光度を入力して報告してください。

報告フォーム URL : <http://c2012s1.hikoboshi.org/>

web ページを開くと、下のような画面が出てきます。



右上の [ログイン] をクリックして、必要項目を入力してください。

アカウントは各グループの登録番号です（登録番号が分からない場合は Astro-HS の web ページ [http://www.astro-hs.sakura.ne.jp/school\\_list.html](http://www.astro-hs.sakura.ne.jp/school_list.html) を参照してください）。パスワードは各グループ共通で、下記になります。

pass : ison

正しくログインできれば、下のようなデータ登録画面が表示されます。

グループ名が合っているか  
確認してください。

Grapher ホーム 一覧 ← ここをクリックすると、  
入力したデータを編集できます。

ログイン中 [東京都立○x高等学校 天文部] ログアウト

### Home - 3000

追加

観測日時 2013年11月 01日 00時 00分 ← 観測日時

等級 1.3 ← 等級

自由入力欄

おも等にご利用ください

登録 ← 必要事項を入力したらクリック

Astro-HSDトップページに戻る

© 2009-2013 Astro-classroom for high school students of the world.  
Supported by Hikoboshi-Softworks.com

このページからデータを入力し、登録してください。自分たちのデータは黄色で、他のグループのデータは青色で表示されます。

## (2) データシートでの報告

観測が一通り終わった段階で、それまでの結果をまとめてデータシートに入力し、報告用アドレス宛に添付ファイルとして送付して下さい。データシートは web からダウンロードすることができます（現在、作成中）。報告用アドレスは下記の通りです。

[ison2013@astro-hs.sakura.ne.jp](mailto:ison2013@astro-hs.sakura.ne.jp)

## (3) 画像の報告

撮影された画像は上記アドレスに添付してデータと共に送ってください。撮影データは本文に下記の項目を記入してください。

- 撮影日時 撮影した露出時間の中央値をとり、秒の値まで
- 撮影場所（撮影地名、緯度、経度、標高など）
- 観測機器 焦点距離、F値、ISO値、露出時間
- 備考

画像のファイル名は AHXXXX-MMDDhhmmss (XXXX:登録番号、MMDD:月日、hhmmss:時刻) の形にしてください。データ量が大きい場合は、複数回に分けて送るか、CD-R (DVD-R) などにコピーして郵送で下記宛先まで送ってください。郵送の場合の送り先は、

〒254-0041 平塚市浅間町12-41 平塚市博物館 学芸担当 塚田 健 宛

です。郵送の場合、撮影データはテキスト形式で画像とともにメディアにコピーして下さい。

また、Facebook のアカウントをお持ちの場合は、高校生天体観測ネットワークの Facebook ページへの画像の投稿も受け付けます。スナップショットのようなものでも構いません。その場合も、可能な限り撮影データ（撮影日時や撮影場所など）をコメントとして入力してください。

## 2 情報提供・情報交換

高校生の皆さんや指導者の皆さんに直接情報を提供する手段として、ML に加え、Astro-HS の twitter のアカウントと Facebook ページを作成しました。Astro-HS 事務局からの情報提供に加え、参加グループ同士の情報交換にご利用ください。ぜひフォローをしていただければと思います。

[twitter アカウント：AstroHS2013](#)

[Facebook：高校生天体観測ネットワーク](#)