

彗星の位置観測

鈴木 雅之 < mtnsuzuki@ybb.ne.jp >

(1) はじめに

星々の間を日々移動していく彗星。一見複雑な曲線上を動いているかのように見える彗星の位置を、計算で予報（位置推算）できることは素晴らしいことである。位置予報がなければ、彗星を望遠鏡の視野に入れること自体が困難になり、彗星の観測そのものが成り立たなくなってしまう。彗星の位置を計算するためには彗星の軌道（6個の軌道要素（説明参照））が必要である。そして、その軌道を求めるためには、彗星の精密位置観測（以下、精測。Astrometry）が必要になるのである。

彗星が発見された時点では、現在の位置と、概略どちらの方向へどのくらいのスピードで移動中、ということしか分からない。数日の期間にわたって追跡され位置観測が行われると、放物線軌道を仮定した暫定軌道が求められる。その時点で、当面彗星が行方不明になることはなくなる。その後、位置観測が増えるにつれて軌道が改良されていくが、位置観測の期間（アーク：Arc）が伸びると先ず短周期彗星か否かがはっきりする。アークが更に伸びると、周期が何百年～何万年といった長周期の楕円軌道の彗星とか、離心率が1より僅かに大きな双曲線軌道の彗星とかが、はっきりしてくる。そうなると過去に遡った軌道の計算も可能になり、その彗星がもともと太陽系内の天体なのか、太陽系外からやってきたものなのかという彗星の起源についてのデータも得られるようになる。

このように、精測は彗星の位置予報を行うために必要であると同時に、軌道自体を精密に求めて彗星の起源などを知る等の研究のためにも必要な観測である。軌道の精度は、精測の精度に大きく左右される。精測の精度が良ければ、より早い段階で放物線軌道か楕円軌道かの判断がつくし、彗星に非重力効果が現われた場合にもそれをより早い段階で知ることができる。逆に、精度の良くない観測が多数含まれていると、この判断が遅れることにもつながるし、また、ある程度以上精度の悪い観測は、軌道が計算されるときには除かれて使われないことにもなる。

以下では、冷却 CCD カメラを用いて彗星の精測を行う場合、精度のよいデータを得るための主な留意点について述べる。また、最近の精測用ソフトや報告の方法についてもふれることにする。

(2) 1 ピクセルの画角

精測では 0.1 秒の角度の桁まで測定して報告する。そのため、CCD の 1 ピクセルの画角は 0.1 秒角にする必要があるかということその必要はなく、1 ピクセルの画角は 2 秒角前後あればよい。3 秒角台でも実用になる。これは、CCD の場合、周囲のピクセルのデータも用いて彗星の重心位置を計算すれば、重心位置をサブピクセルの精度で計算できるからである。

一見、1 ピクセルの画角を小さくすればするほど位置の精度が向上するかのよう思われがちであるが、そうではなく、画角がある程度小さくなったところで精度の向上が止まり、

そこから先は逆に精度が悪化してしまう。その原因は、シーイング、望遠鏡の収差、(望遠鏡の口径で決まる)光の回折による星像の広がり、赤道儀の追尾誤差、などを総合した星像の広がりが 1 ピクセルに比べてかなり大きくなってしまいうために、単に星像のボケが拡大されるだけの状態になり S/N も低下するからである。特にシーイングの影響は大きく、日本では通常は 2 秒角 ~ 4 秒角程度の星像の広がりになる。

このようなことから、1 ピクセルの画角を、大き過ぎもせず小さ過ぎもしないよう、バランスのとれた値にする必要がある。星像の直径 (FWHM 値 : ピーク強度の半分の強度で切断したときの直径) の 1/2 の値が理想と言われている。日本のアマチュアでは 2 ~ 3 秒角台にしている観測者が多い (注)。

9 μm ピクセル以下など、小さなピクセルサイズの CCD は、1 ピクセルの画角が上記になるようピニングして用いるとよい。ピニングを行なってピクセルサイズを大きくして使うと感度も向上し、暗い彗星が写りやすくなる。

(注) 1 ピクセルの画角が 2 ~ 3 秒角台のシステムで精度の良い測定が可能 [6] と言われているが、これより大きな画角での精測例もある。使用する撮像光学系やシーイングによっても恒星像の大きさ (秒角で表わした値) に差が出るため、これから精測を始められる観測者は、まずは手持ちの撮像光学系で恒星像の直径 (FWHM 値。秒角単位) の測定を試みるとよい (後述の精測ソフト Windows 版 Astrometrica でも測定可能)。その直径の 1/2 が 1 ピクセルの画角の理想値ということになる。また、手持ちの撮像システムで精測可能かどうかを実際に測定して試してみるのもよい。

(3) 冷却 CCD カメラ

日本のアマチュアの場合、精測用には、例えば以下のカメラが用いられてきた。

SBIG	ST-6、ST-7(E)、ST-8(E)、ST-9E
MUTOH	CV-04(II)、CV-16(II)
Apogee Instruments	AP-7、AP-8

ST-7/8(E) のように ABG (アンチ・ブルーミング・ゲート) あり/なし の両機種がある場合には、AGB なしの方が、輝星にブルーミングは生じるものの、感度が高い (短時間でより暗い天体まで写る) 点と、露光量とカウント値との間のリニアリティが良好な (光度測定にも使える) 点からは望ましいであろう。

(4) 望遠鏡の焦点距離

直焦点撮影に用いる望遠鏡の焦点距離 f と CCD の 1 ピクセルの画角 (rad) と 1 ピクセルのサイズ P との間には、 $f = P /$ の関係がある。焦点距離を mm、ピクセルサイズを μm 、1 ピクセルの画角を秒角で表わした場合には、 f (mm) = $206 \times P$ (μm) / (秒角) となる。この式を用いると、たとえば 18 μm ピクセルの CCD を用いた場合、1 ピクセルの画角を 2 秒角 ~ 3 秒角とするための望遠鏡の焦点距離は 1236 mm (3 秒角) ~ 1854 mm (2 秒角) であることが分かる。

(5) 時刻合わせ

撮影の前に先ず行うべきことは、撮影に使うパソコンの時計の時刻合わせである。精測の報告では、時刻は 0.00001 日 (= 0.864 秒) の桁まで必要なので、1 秒の精度で時計を合わせる必要がある。

時刻の誤差の測定位置への影響を考えると、例えば日々運動 0.5 度 (= 1.25 秒角 / 分) 程度のスピードの彗星の場合には、1 秒間に移動する角距離は 0.02 秒角なので時刻が 1 秒程度のずれであれば位置の 0.1 秒角には影響しない。しかし、地球に近づく天体では、日々運動 5 度 (= 12.5 秒角 / 分) を越えるスピードになる場合があり、この場合には天体が 1 秒間に移動する角距離は 0.2 秒角を越えるため、時刻を ± 0.5 秒の精度で合わせたとしても、測定位置に ± 0.1 秒角を越える誤差が加わり、0.1 秒角の桁に影響を与えることになる。このため、特に移動スピードの速い彗星の場合には、時刻合わせに細心の注意を払う必要がある。

時刻は電話による時報のほか、最近では電波時計、GPS、パソコンの時計の時刻をサーバーに合わせるような時計合わせのソフトも利用できるようになっている。これらの複数を利用して観測開始前にパソコンの時計を合わせ、また、観測途中や観測終了後にも時計の狂いがないかどうかをチェックすれば万全である。

尚、1 枚の CCD 画像から位置を求める場合、観測時刻としては撮影の中央時刻を採用しなければならない。使用している撮影ソフトと精測用ソフトを組み合わせる場合に最終的な観測時刻がこのように出力されるかどうかを一度チェックしておく必要がある。

(6) 撮影

CCD 画像からの測定では、明るい小惑星の場合には小惑星そのものの運動や追尾誤差等によって若干線を引いたように写った画像でも許容されるが、彗星の場合には非対称なコマの影響のため線を引いて写った画像からは正確な中心の位置 (核の位置) が求まらない。そのため、彗星の位置ズレがほぼ 1 ピクセル内に収まるように撮影する。

露出時間は、長すぎると彗星の運動によって線を引くので短時間露出で写す必要がある。例えば日々運動 0.5 度のスピードの彗星だと 1 分間の露出で彗星が 1.25 秒角動くので、1 ピクセルが 3 秒角のシステムでは露出時間が 2.4 分程度までということになる。彗星がピクセルの辺に対して斜めに移動している場合には若干の露出増加が可能である (45 度方向で 1.4 倍)。彗星の移動速度は時期によって刻々と変わるので、彗星の速度や明るさを考慮しながら露出時間を変えていく必要がある。明るい彗星では彗星中央部のピクセルが飽和しないよう露出時間を切り詰めなければならない。暗くて速度の速い彗星では、上記の露出時間では写らない又は S/N が悪くしか写らないという場合、彗星の移動に合わせて追尾を行うメトカーフガイドならば、露出時間を増やすことが可能である。赤道儀の追尾精度も、同じ理由で、1 ピクセル程度以内 (星像が流れない) のレベルのものが必要である。

1 枚ずつ撮影する場合には、彗星を撮影後すぐに彗星中心部を拡大表示して、中心とその周囲のピクセル (例えば 5×5 程度の領域) のカウント値を順次調べてみると良い。中心

にカウントの高いピクセルが1つあって、中心から離れるに従ってカウントが明らかに単調減少するようであれば撮影は成功で、その画像からは精度の良い測定が期待できる。ちょうど彗星の中心が複数ピクセルの境界上にある場合には、隣り合った2ピクセルまたは4ピクセルがほぼ同等のカウントということもあり得る。

しかし、追尾精度不良や風による振動などで、中心付近のピクセルのピークが2つや3つに分離していることが分かった場合や、背景の恒星が明らかに線を引いている場合には、その画像は測定には使わず、すぐに画像を撮影し直すべきである（自動で複数枚を連続撮影する場合には、枚数を多めに撮影しておいて、彗星中心部が良好に写っている画像を選んで測定することになる）。

尚、追尾は良好なのに、彗星中心付近のピクセルのピークが複数個写るという可能性もある。それは、彗星の中心が恒星と殆ど重なっている場合である。その場合には、その画像は測定には使わず、彗星が移動して恒星から離れたときに再度撮影すべきである。恒星と重なっているかどうかは事前に星図ソフト等で調べる事によっても把握できる。もちろん、彗星の核が本当に分裂してしまった場合にもピークが複数個写るであろう。

また、シーイングも追尾も良好なのに、彗星中心部のピークがあまりはっきりしない場合がある。これは各彗星固有の問題であり、中央集光度の小さい彗星はこうなりがちである。メトカーフガイド等を行って露出時間を伸ばすと改善される場合もあるが、改善されない場合には精測の精度も落ちる事になるが、仕方のないことである。また、極端な例として、彗星が崩壊した場合にはどこにもピークが見られなくなり精測が不可能になる。

撮影枚数は、観測者によっても事情は異なるが、少なくとも2個、できれば3個の精測値を得たいため、筆者の場合には3枚またはそれ以上撮影するようにしている。撮影時刻の間隔は、彗星の移動が分かる程度に間隔をあけている。（少なくとも最初と最後のフレームで移動がはっきり確認できることが必要。）移動の非常に遅い彗星の場合など、1夜では移動の確認が難しい対象の場合には、翌日以降にも撮影を行なって（つまり撮影の間隔が1日以上）移動を確認するということになる。

彗星そのものの撮影（ライトフレームの撮影）のほかに、ダークフレームの撮影とフラットフレームの撮影が必要である。撮影後の処理は、ダーク処理とフラットフィールド処理を行う（一次処理と呼ぶ）。そして、通常はこれら以外の処理は行わない。場合によっては測定時に測定ソフトに備わっている精度に悪影響を与えない処理（後述のDOS版Astrometricaの場合にはスムージング処理やメジアンフィルター処理）を行ってもよいが、それ以外の画像処理を行うと天体の重心位置が変わってしまい、精測の精度を悪化させるため注意が必要である。

（7）精測用ソフト

いくつかの精測用ソフトが知られているが、日本のアマチュアの多くが、オーストリアのHerbert Raab氏が開発したDOS版のAstrometrica（バージョン3；最終バージョンは3.26）を用いている。このソフトは測定の仕方に注意を払えば、彗星の精測にも安心して用いることができる。画像を1枚ずつ入力して表示させては、測定領域その他の条件を測定者

が指定しながら、対話形式で測定していく方式のものである。一度に多数の画像を自動で測定するようなことはできないが、個々の画像の状況に応じた細かな対応が可能になるため、彗星測定の場合にも安定した測定値を得る事が可能である。

Windows 版(バージョン 4 ;原稿執筆時点でのバージョンは 4.2.0.318)の Astrometrica は同じ Raab 氏が最近開発したものであるが、DOS 版とは全く別のソフトと言ってよいほど、測定法や使い勝手で違いがある。自動整約の機能など、自動化がかなり進んでいて、多くの場合 DOS 版に比べて測定の手間を省くことができる。自動化されているため、彗星のように非対称なコマの分布をもつ天体の中心を DOS 版のように精度よく求めることができるかどうか心配であったが、設定するパラメータの選択など使いこなす工夫により、彗星測定においても DOS 版と同等の位置精度を出すことが可能と思われる。現在もソフトの改良が進められており、原稿執筆期間中にもアップデートが行なわれ、新機能が追加されている。

以下、彗星の精測用ソフトとして、DOS 版 Astrometrica 及び Windows 版 Astrometrica [7]を用いる場合の、測定の留意点について述べる。

(8) DOS 版 Astrometrica を用いた測定

先ず、従来のソフトで定評のある DOS 版 Astrometrica を用いて彗星の精測を行なう際にキーポイントとなるような注意点について述べる。

<8-1> スケーリングと使用ピクセル数

DOS 版 Astrometrica を用いた彗星の精測の際に注意しなければならないことがある。このソフトでは、比較星と測定対象のそれぞれについてそれを取り囲むボックスのエリアを指定することによって重心計算に用いる領域を指定する。測定対象が恒星や小惑星の場合には星像を取り囲むようにボックスの大きさを指定するだけで精度よく測定できる。しかし測定対象が彗星の場合、もしこれと同じように単に彗星の中心部を取り囲むように適当な大きさのボックスを指定しただけで精測を行ったとすると、その精測値は大きな誤差を持つ可能性がある。

原因の 1 つはボックスが大きすぎる事である。彗星は非対称なコマや尾などの影響で中心に対して非対称な形をしている。そのためボックスが大きいと測定した光強度の重心位置は、真の彗星の中心位置から、コマ等の明るい方向にずれたものになってしまう。これを防ぐためには、核付近の小さな領域を指定する必要がある。但し、重心位置計算に使うピクセル数が少なすぎると逆に重心位置の計算精度が悪くなる。1 ピクセルの画角が 3 秒角前後のシステムでは、状況によって多少異なるが、例えば 3x3 ピクセル程度の領域を指定することで実用になっている。

重心計算の領域を核付近の小さなエリアに限定するだけで良いかということそうではない。原因の 2 つ目は、重心計算の領域をこの小さなエリアに限定すると、多くの場合(特に、明るい彗星の場合)には、そのままではボックスの中心を置いたピクセルの中心座標が殆どそのまま彗星の位置の測定値になってしまうため、1 ピクセルの精度しか得られないという事のためである。

しかし、この問題点は、選択した小さなエリア内の最小カウント値をあらためてゼロと置きなおすようなスケーリングによって解決することができる。

DOS 版 Astrometrica では、F7 キーがスケーリングのためのキーになっており、このキーを押すと、選択したボックス内の最小カウント値をゼロとみなした場合の重心位置を計算することができる。また、画像もそのように表示されるので、核近傍のピクセルのようすが見やすくなる。

以上の注意点を考慮した DOS 版 Astrometrica による彗星の測定の実際(彗星の位置を確定する部分のみ)は、例えば、次のようになる。(1 ピクセルが 3 秒角のシステムでは、測定対象の重心の X,Y 座標が 0.1 ピクセルだけ変わると測定位置が 0.3 秒角だけ変わることを入念に入れておくとよい。)

- ・ F8 キーを押して彗星付近を拡大表示させる(図 1)
- ・ 核近傍にボックスの中心を持っていき、F7 キーを押してスケーリング
- ・ ボックスを 3 × 3 まで小さくして、最大カウントのピクセルを中心に入れ、F7 キーを押してスケーリング(図 2)
- ・ その状態で、ボックスの大きさを少し大きくしても、重心位置計算に使用されるピクセル数があまり増えず、重心の X,Y 座標もあまり変わらないことを確認する
- ・ その状態(ボックスを少し大きくした状態)で、ボックスを上下左右に多少動かしても、重心の X,Y 座標が変わらないことを確認する。(図 3)
- ・ Enter キーを押して彗星の重心位置を確定させる。

尚、バージョン 3.26 では、F8 キーで拡大表示する場合に測定枠の大きさが大きすぎるとフリーズする現象が認められるため、測定枠の大きさを大きくしすぎないように注意する必要がある。



図 1 彗星の拡大表示



図 2 核近傍の表示とエリア設定



図 3 ボックスを上下左右に振ってみる

<8-2> DOS 版 Astrometrica で用いる星表

彗星の精測位置は、星表の比較星の位置を基準にして算出されるので、星表の位置精度がそのまま彗星の精測位置の精度に反映される。そのため、星表にはできるだけ位置精度の良いものを使用したい。DOS 版 Astrometrica で用いる星表としては、GSC1.1、GSC-ACT、USNO-A2.0、USNO-SA2.0 などが多く用いられている。

- ・ GSC1.1 (CD-ROM 2 枚組) は 15 等級までの約 1900 万個の天体が載っており、以前は販売店から入手可能であった為、これまでよく用いられてきた。
- ・ GSC-ACT は、Project Pluto [8] の Bill Gray 氏の研究によるもので、GSC1.1 の位置を ACT 星表を使って再校正して精度を向上させたもの。GSC1.1 に比べて位置精度が向上する [10] ので、最近では日本のアマチュアでも使っている観測者が多くなってきた。
- ・ USNO-A2.0 [11] は、約 5 億個の星が載っており、CD-ROM では 11 枚分 (6.6 GB) の膨大な星表。これもバージョン 2.0 では ACT 星表を使って校正され位置精度が向上した。
- ・ USNO-SA2.0 [11] は、USNO-A2.0 から 16~19 等級の約 5500 万個の星を均等な密度で抜き出した CD-ROM 1 枚分の星表。データ量が少ない点で扱いやすいが、16 等以下の暗い星が写っている画像のみで使用可能。

精測位置の精度を向上させるために、できれば、GSC-ACT、USNO-A2.0、USNO-SA2.0 などの星表の使用が好ましい。尚、江崎裕介氏のサイト [5] には、門田健一氏作成の、GSC1.1 の CD から GSC-ACT のデータを作成するためのバッチファイルが掲載されている。

<8-3> 比較星の個数、配置、固有運動

DOS 版 Astrometrica では、比較星の個数は最大 12 個まで可能である。比較星の個数を N 個とすると、星表のランダムな位置誤差の影響は $1/N$ になるので、比較星の個数は多く採って星表のランダムな位置誤差の影響を小さくすることが望ましい。比較星個数は最低 6 個はほしく、8 個以上が望ましい。比較星の配置も目的天体の周囲にバランス良く採るのが理想である。このときの比較星の平均残差は、1 ピクセルの画角が 2 ~ 3 秒角台のシステムの場合には、星表の精度や画像の写りが良ければ 0.3 秒角程度以内になるであろう。1 ピクセルの画角がもっと大きなシステムや低空などで画像の写りが悪い場合には、平均残差はもっと大きな値になる。時として、複数の比較星の残差が異常に大きくなることがあるが、そのような場合には比較星のうちの 1 つが固有運動の大きい星である可能性が高い。このような場合には、固有運動の大きい 1 つの星を比較星の選択から除外すると残りの比較星残差が正常値まで小さくなる。

(注) 比較星の平均残差は、恒星状天体を測定する場合の精度の目安となる数字である。これから精測を開始しようとする観測者は、適当な位置を撮影した画像 (彗星を撮らなくてもよい) で恒星の位置測定を試み、比較星の平均残差を確認するとよい。使用した機材で達成可能な精測の精度のレベルを知ることができる。尚、彗星状天体の測定精度は、一般に、比較星の平均残差よりも悪くなる。

(9) Windows 版 Astrometrica を用いた測定

次に、新しいソフトである Windows 版 Astrometrica の特徴や用いる際の注意点について述べる。(但し、ソフトのバージョンが 4.2.0.318 までの結果である。)

<9-1> 軌道ファイルの入力

Windows 版 Astrometrica では、最新の天体の軌道要素は、ソフト内のコマンド(Download MPC0rb)を用いることによりインターネットで MPC のサーバーに接続してダウンロードする方式を採っている。このコマンドで彗星や小惑星の軌道要素ファイルの圧縮版が一括してダウンロードされ、ソフト内で復元されて読み込まれる。このうち小惑星の軌道ファイルは膨大で、原稿執筆時点では圧縮ファイルでも約 11 MB という大きなファイルである。このため、軌道ファイル全体のダウンロード時には、高速のインターネット通信環境での使用が望ましい。

最近、新コマンド(Update MPC0rb)が追加され、彗星などいくつかの種類の日体のみの軌道の更新が可能になった。このコマンドを使い彗星の軌道のみ(約 20 KB)を更新する場合には低速回線でも全く問題ない。

<9-2> アパーチャ半径の設定

DOS 版 Astrometrica では単純な重心位置計算によって天体の中心位置が計算されるのに対し、Windows 版 Astrometrica では PSF(Point Spread Function)-Fitting のアルゴリズム(星像の強度分布をガウス分布と仮定してフィッティングを行なう)によって中心位置が計算される。この計算に使う領域の大きさをアパーチャ半径(Aperture Radius)として設定するが、デフォルトでは半径 4 ピクセルが設定されている。アパーチャ半径の推奨値は星像の直径(FWHM 値)の 2 ~ 3 倍とのものであるので、多くの場合、半径 4 ピクセルというデフォルト値は推奨値に近い値になる。

しかし、この半径 4 ピクセルという値は、恒星や小惑星にとっては妥当な値であっても、非対称コマの影響を受ける彗星の位置測定(1 ピクセルが 3 秒角前後のシステムを想定)にとっては大きすぎる値だと思われる。この値は半径 2 ピクセルまで小さく設定できるので、条件によって最適値も異なるが、彗星の位置測定時には半径 2 ピクセルを採用して測定することをお勧めしたい。

<9-3> Windows 版 Astrometrica を用いた測定の流れ

彗星測定の一例として、彗星は手動(マウスクリック)で指定する Astrometric Data Reduction コマンドを用いる例と、彗星も自動検出する Moving Object Detection コマンドを用いる例とを示す。

どちらの場合にも、あらかじめ Program Settings 内の Program タグを選択し、Aperture Radius を 2 ピクセルに設定しておく(図 4)。Program Settings の内容は名前を付けて保存することが可能なので、使用機材や観測対象に応じて異なる設定を読み込んで使用することも可能である。

[例 1] Astrometric Data Reduction コマンドを用いる例

- ・ 同一視野の複数枚の彗星画像をロードする (Windows 版で入力可能な画像は FITS 及び SBIG ファイル)。
- ・ プリンクボタンをクリックすると新規のウィンドウが作られ、画像が順次切り換え表示されるので、彗星などの移動天体の確認に便利である。このときのアライメントは自動で行なわれる。
- ・ Astrometric Data Reduction ボタンをクリックする。天体名や赤経・赤緯を入力するボックスが現われる。
- ・ 測定する彗星名 (例えば、C/2002 V1) を入れて (図 5) Tab キーを押すと、軌道要素から計算された彗星の位置が赤経・赤緯を入力するボックスに表示されるので (図 6)、それによれば OK ボタンを押す。
- ・ すると、比較星のマッチングが行なわれる。成功すれば整約に使われた比較星が緑色の円で囲まれる。
- ・ マッチングに失敗した場合には、マニュアルでマッチングすることになる。表示される赤色の星のパターンと実際の画像の星とが重なるように、パターンの位置や回転角や焦点距離のパラメータを調節して、OK ボタンを押す (図 7)。
- ・ 比較星のマッチングが成功すれば (所望の個数以上の星が緑の円で囲まれた状態) (図 8) 彗星の測定に移る。
- ・ 下部に表示されるピクセルカウント値に注目しながら彗星中心付近にマウスカーソルをあ

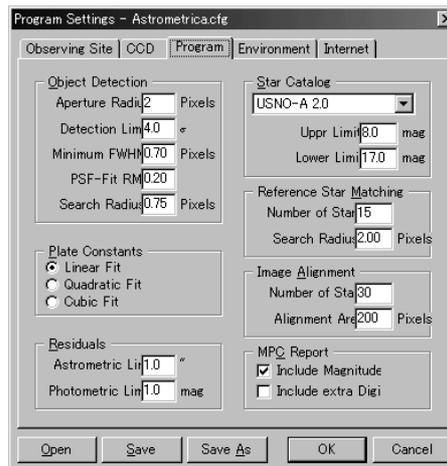


図 4 アパーチャのセット

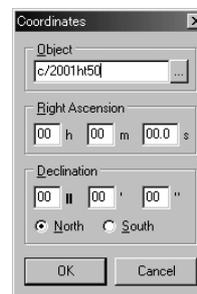


図 5 彗星名の入力

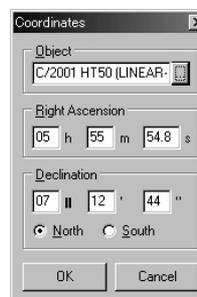


図 6 軌道要素からの彗星位置

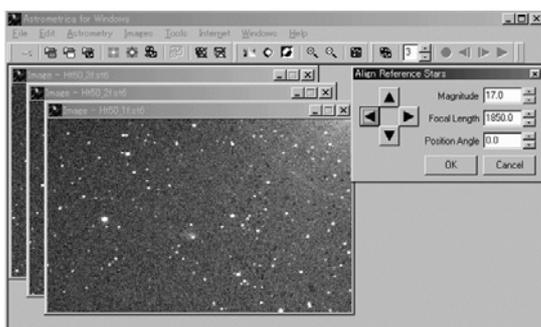


図 7 比較星のマニュアル マッチング

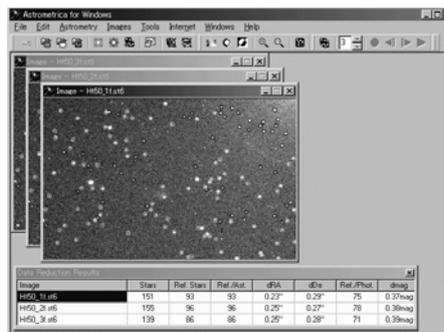


図 8 マッチングが完了したようす

て、クリックする。マウスカースールは矢印キーでも移動し、クリックの代わりに Enter キーを押してもよい。

(このときには拡大鏡(Magnifying Glass)で拡大表示させておくとやりやすい。また、明るい彗星の場合には、Background and Range コマンドで、log スケールでの明るさの表示を選択すると核付近のようすが分かりやすい場合が多い。)

- 彗星中央部の状態を表示するウィンドウが現われる(図 9)。測定位置(+印)が彗星の中心と合っているかどうかや、フィッティングがうまくいっているか等を確認し、良ければ彗星のパックされた符号(例えば C/2002 V1 の場合には、CK02V010)を入力して Accept ボタンをクリックする。不可ならば Reject ボタンをクリックして再測定を試みる。尚、符号の入力時には、入力部のすぐ横のボタンをクリックすると付近の天体の一覧表が表示されるのでその中から目的の彗星を選択すれば符号も自動的に入力され、符号入力の手間と間違いを避けることができる(図 10)。
- 残りの画像についても同様に彗星中心をクリックし、良ければ符号を入力して Accept ボタンをクリックする。
- 測定結果は MPCReport.txt ファイルに報告のフォーマットで入っているので、MPC への報告に利用できる。Astrometrica 終了後、報告メールの作成時にはこのデータをコピー/貼り付けし、必要に応じてヘッダー等の追加を行なった上で MPC に送信すればよい。

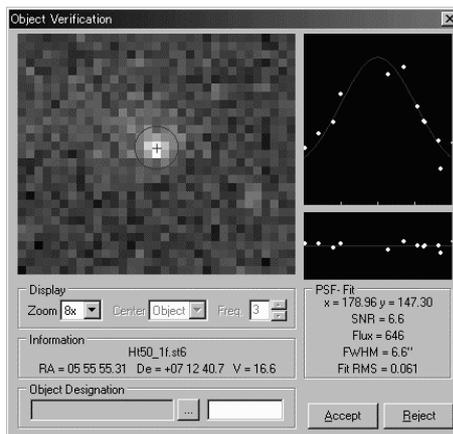


図 9 彗星中央部のフィッティング

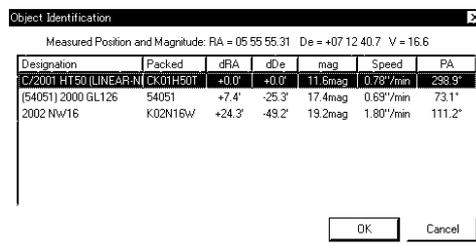


図 10 近傍の天体一覧ウィンドウ

ログも Astrometrica.log ファイルに記録され、より詳細な内容を知る事が可能である。(これらのレポートファイルやログファイルをソフト内で表示させておくと、ファイルが更新された時点で表示にも反映される。)

- (注 1) 彗星の光度を測定すると DOS 版では全光度とみなされるが、Windows 版では核光度である。
- (注 2) 比較星測定時にアパーチャ半径が 2 ピクセルではうまくいかない場合には、比較星測定時はアパーチャ半径を 4 ピクセルとして測定し、彗星測定の直前にアパーチャ半径を 2 ピクセルに切り換えて彗星を測定する、という測定法も考えられる。

[例 2] Moving Object Detection コマンドを用いる例

(このコマンドは新天体発見の手段としても有効)

- ・ 同一視野の 3 枚以上 (5 枚以下) の彗星画像をロードする。
- ・ Moving Object Detection ボタンをクリックする。天体名や赤経・赤緯を入力するボックスが現れる。
- ・ 天体名の入力からマッチング失敗時のマニュアル操作までは [例 1] の場合と同様。
- ・ 比較星のマッチングが成功すれば、ソフトは移動天体を検出し表示する。
- ・ 移動天体として目的の彗星を検出した場合には、測定位置 (+ 印) が彗星の中心と合っているかどうかや、フィッティングがうまくいっているか等を確認し、良ければ彗星のバックされた符号を入力して Accept ボタンをクリックする。符号入力時には、入力部の横のボタンを利用できることは [例 1] の場合と同様である。
- ・ その結果、ロードした 3 枚以上の彗星画像について一度に彗星位置が求められる。
- ・ 移動天体として、目的の彗星以外の天体が検出され表示されることもある。それらについても位置を測定する場合には、同様にチェックを行ったあと符号を入力し Accept ボタンをクリックする。検出される移動天体は既知の天体の場合もノイズの場合もあるが、未発見の天体が検出される可能性もある。
- ・ 測定結果は MPCReport.txt ファイルに報告のフォーマットで記録され、ログも Astrometrica.log ファイルに記録される。
- ・ 尚、比較星のマッチングには成功したが目的の彗星が自動検出されなかった場合、そのまま各画像の彗星をマウスでクリックすればよく、Astrometric Data Reduction の場合と同様に測定することができる。

<9-4> Windows 版 Astrometrica で使用する星表

Windows 版で使用できる星表は DOS 版の項で説明した、USNO-A2.0、USNO-SA2.0 の他に、最新の星表である USNO-B1.0 と UCAC1 を用いることができる。

USNO-B1.0 [11] は、USNO-A のあとに開発された最新の星表で、約 10 億個の天体の各々について、位置だけでなく固有運動のデータも含んでいる。データ量が 80 GB もあるので星表全体の配布はされていないが、赤経・赤緯を指定した狭いエリアのデータは USNO のサイト [12] から得る事ができ、それを Windows 版 Astrometrica で使用することが可能である (Astrometrica のホームページ [7] に記載があるが、web サイト [12] から、少なくとも位置 (赤経・赤緯) ・固有運動・光度のデータを含むような指定で恒星のデータを取得し、それを 'USNO-B.dat' という名前で保存しておけばよい) 。一方、USNO の UCAC 星表 [13] は、CCD を使って 16 等級までの恒星の位置が測定された位置精度の良い星表で、位置だけでなく固有運動のデータも含んでいる。これは現在進行中の星表である。UCAC1 は、2000 年 3 月、最初に発表された予備カタログで、赤緯がおよそ -15 度より南の南天をカバーするものである。UCAC2 は、2003 年に完成予定の星表で、赤緯が -90 度から +40 ~ 50 度までの範囲をカバーするようになる。尚、DOS 版では使用できた GSC1.1 と GSC-ACT は、Windows 版では使用できないので注意が必要である。

<9-5> その他の便利な機能

Windows 版では、その他に以下の機能が加わっている。

- ・ ダーク及びフラット補正機能：
ダーク画像、フラット画像を準備しておけば、ソフトの中でダーク処理、フラット処理を自動で行なってから測定することが可能。
- ・ 画像の加算機能 (Track and Stack)：
このコマンドでは、複数枚の画像を天体の移動スピードに合わせてずらして加算し、加算後の画像から位置を測定することができる。短時間露光の画像を複数枚用いれば、メトカーフガイドをしたのと同様な効果を期待できる。暗い天体、スピードの速い天体、芯のはっきりしない彗星などに効果がある。
- ・ MPC へのレポート送信機能 (Send MPC Report)：
ソフトの中からインターネットにつないで精測データのレポートを MPC(小惑星センター) に直接送信する機能。

(10) 彗星位置の残差

Astrometrica では、測定した彗星位置の、入力した軌道からの残差 (O-C; Residual) が出力される (DOS 版では画面と LOG ファイルに、Windows 版では LOG ファイルに出力される)。この残差そのものの大小は、精測の精度の良さを示す値とは一概には言えない。(観測・測定にエラーが無いと仮定すると) 残差が大きいことは、入力した軌道では観測を表現しきれなくなっていて、軌道の改良が必要であることを示していることでもあるからである。

精測の精度の良さを見るには、残差のばらつきの大小を見るべきである。

例えば、赤経の O-C が、各々 +1.2, +3.0, -1.5 秒角の 3 個の連続した観測は、残差のばらつきが 4.5 秒角の範囲であり、あまり精度の良い観測とは言えない。それに対し、O-C が各々 -16.5, -16.7, -16.8 秒角の 3 個の観測は、残差のばらつきが 0.3 秒角の範囲に入っているため、精度の良い観測である可能性が高い。

残差については、表 1 にまとめた。

(11) 一夜あたりの観測数

1 つの彗星についての一夜あたりの精測の個数に関してであるが、観測者によっても個数は異なるが概ね 2 個 ~ 5 個の範囲である。通常は 3 個あれば充分と考えられる [6]。発見後間もない天体や、地球に接近している高速移動天体を除くと、一夜あたりの観測数を増やしても軌道の精度は改善されない。それよりも、適度な日数の間隔をあげながら、継続的に長期間にわたって観測するのが軌道の精度を改善する観点からも望ましい。

(12) 精測の光度

精測においても彗星の光度を測定して報告する (光度は測定・報告しない場合もある)。彗星の光度には、コマの明るさも含めた全光度と、中心近傍の核 (のような部分) のみの光度の核光度とがある。

全光度は、DOS 版 Astrometrica を使って、光度測定時のボックスのサイズを彗星のコマ

を含む大きさに指定すれば測定できる。但し、コマの中に比較的明るい恒星が含まれている場合にはその恒星の明るさも含んだ全光度が測定されるので、その影響を除去する補正が必要になる。或いは、コマの中に恒星が含まれている場合には光度測定を見送る場合もある。光度測定時のボックスのサイズが小さいと暗めの全光度になる。

核光度は、Windows 版 Astrometrica で測定できる。彗星中心付近の、アパーチャ半径で指定したエリア内の部分のみの光度が測定される。この場合もアパーチャ半径が大きいと明るめの核光度に、小さいと暗めの核光度になる。(Windows 版 Astrometrica で、光度測定時のみアパーチャ半径を大きくして(30ピクセルまで可)光度測定することにより、全光度に近い光度を得る事も可能。)

但し、精測によく使われる GSC、USNO-A、USNO-B、UCAC などの星表は、光度についての精度はあまり良くない。また、GSC では南天部分の星の光度は実際よりも暗めであるなどの問題もある [14]。従って、これらの星表を使い、DOS 版 または Windows 版 Astrometrica で求めて精測データに付けられる光度データはそれほど精度のよい値ではなく、参考程度の値である。筆者も精測に付けている光度は、この参考程度の値である。

一方で、より精度の良い光度を決定して精測の光度データとして報告している彗星観測者も日本には多い。その場合、光度の精度の良い星表 (Tycho / Tycho-2 星表、GSPC 星表、Landolt の標準星カタログなど) から光度比較星を選び、(彗星と同一写野に比較星がない場合が多いので) 彗星とは別に光度比較星の画像を撮影し、光度測定は Astrometrica を使わずにステライメージなど画像を扱うソフトの力を借りながら手作業で測光するという方法になる [14]。

(13) 精測データの報告

精測データの報告は MPC (小惑星センター) に報告する。今回は、直接米国の MPC に報告を行なう場合の方法について述べる。MPC のサイトにある Guide to Minor Body Astrometry (英文) [6] にも報告方法の詳細が述べられている。

<13-1> 報告用フォーマット (天文台用)

精測データの報告には 1 行 80 文字の専用フォーマット (MPC 観測フォーマット) を使用する。これは、MPC や MPEC で用いられているフォーマットである。1 行の中に、天体名、観測時刻、位置 (赤経・赤緯)、光度、観測地点の情報が含まれている。

フォーマットの概要 (彗星の場合) を表 2 に示す。

MPC のサイトのフォーマットページ (英文):

<http://cfa-www.harvard.edu/iau/info/OpticalObs.html> に詳細な記述がある。

また、江崎裕介氏のサイト [5] には、フォーマットの日本語による解説があり参考になる。

Astrometrica などの精測用ソフトを用いれば、精測の結果がこのフォーマットで得られる

ため、それをコピー / 貼り付けして使用すればよく、通常は自分自身がこのフォーマットで入力し直す必要はない。しかしながら、フォーマットの内容をよく把握しておくことが重要である。

このフォーマットは、観測地点を 1 ヶ所に固定して長期間位置観測を行う場合(例えば天文台・観測所など)を想定したものであり、その観測地点に対しては天文台コードという 3 桁のコードが与えられる。天文台用のフォーマットで初回に報告するとき(まだ天文台コードが決まっていないとき)には、天文台コードとして XXX を用いる。その際には、連絡先(氏名・住所・電子メールアドレス)、天文台名またはサイト名、天文台の経度(東経で、度・分・秒)と緯度(度・分・秒)と標高(m)、望遠鏡などの情報も含めて報告する。(Windows 版 Astrometrica では、天文台コードが XXX のときにはこれらの情報(天文台名以外)についても、事前にソフトに入力してあれば、報告用ファイルに出力される)

天文台コードが割り当てられた後には、その天文台での位置観測の報告には、割り当てられた天文台コードを使用する。80 文字のフォーマットのうち、最後の 78~80 カラムの 3 文字が天文台コードである。

現在の天文台コードの一覧と情報は、

<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/ObsCodes.html> にある。

観測報告の 1 行の末尾の 3 文字をみると、どの天文台で観測されたものかが一目で分かることになる。web ページの中には、天文台コード別の一定期間毎の精測の精度を計算して載せているページや、天文台コードの場所が地図上に表示されるページや、天文台コード別の NEA(地球近傍小惑星)の観測を集めたページなどもある。

<13-2> 報告用フォーマット(移動観測用)

MPC 観測フォーマットで用いる天文台コードは、位置観測用の固定した観測地点に対して与えられるものであるが、例えば移動観測時のように一時的にしか使用しない観測地点にも天文台コードを割り当てると、天文台コードの浪費になってしまう。

最近、MPC 観測フォーマットは、そのような移動観測者(Roving Observer)でも位置観測を報告することが可能なように拡張された。

(<http://cfa-www.harvard.edu/iau/info/RovingObs.html> に詳細が記されている。)

これによって、遠征先、旅行先、郊外の星の良く見える場所など、地球上のあらゆる場所で行われる位置観測を、天文台コードの取得なしに MPC に報告することが可能になった。

移動観測用のフォーマットを表 3 に示す。

- ・ 247 という移動観測専用の天文台コードを一律に使用する。
- ・ 80 文字 2 行が 1 組になったフォーマットである。
- ・ 1 行目のフォーマットは、15 カラム目が大文字の V になる他は、天文台用のフォーマットと同じ。
- ・ 2 行目は、15 カラム目が小文字の v、33 カラム目が数字の 1 になるほか、観測地点の

経度（東経）、緯度、標高（ m ）の値も含む。

という内容になっている。

<13-3> 報告のヘッダー

電子メールで直接 MPC に位置観測を報告する際には、天文台コード、観測者、測定者、望遠鏡、星表などの情報を、精測データよりも前に、メールの最初の部分に入れておく必要がある。これらの各項目は、それぞれ大文字 3 文字のキーワードに続いて入力する（1 行は 255 文字以内）。

キーワードの種類には、天文台コードを示す COD、連絡先を示す CON、観測者を示す OBS、測定者を示す MEA、望遠鏡等を示す TEL、星表を示す NET、コメントを示す COM、報告メールが MPC に届いたことを知らせるメールを要求する ACK などがある。

第 1 行目は必ず COD でなければならない。各キーワードは 1 カラム目から始めなければならない。OBS、MEA は各行の先頭に同じキーワードを用いて 2 行以上にわたっても構わない。

ヘッダーについては表 4 に示した。

詳細は MPC のサイトの Observational Details（英文）:

<http://cfa-www.harvard.edu/iau/info/ObsDetails.html> にある。

観測を天文台として報告する場合には、連絡先（CON）、望遠鏡（TEL）、星表（NET）を省略した場合にはその天文台用のデフォルトのデータが用いられるので省略可能である。移動観測用のフォーマットで報告する場合には、この 3 つは省略できない。測定者（MEA）が省略された場合には、測定者は観測者（OBS）と同じであるとみなされる。

Astrometrica では、報告用のファイルにこれらのヘッダーのうち基本的なものが出力されるので、それを利用することが可能である（他に必要なヘッダーは Astrometrica を終了後、エディタで追加すればよい）。

<13-4> 報告の例

表 5 に、ヘッダーと精測データの両方からなる、いくつかの報告例を示す。移動観測者用の報告例、天文台による初めての報告例、天文台による天文台コード取得後の報告例、を示すので参考にしていきたい。

<13-5> 報告に際しての注意

- ・ 報告は MPC（電子メールアドレスは mpc@cfa.harvard.edu）宛に行なう。
- ・ 本文に所定のフォーマットでの観測報告を記載する。添付ファイルでの報告は不可。
- ・ 米国への報告なのでタイトルにも本文にも日本語コードは一切含めないこと（文字化けして見える）。即ち、スペースも含めて全て半角英数字を使うこと（普通の ASCII テキスト

データ) Astrometrica の報告用ファイルからのコピー/貼り付けを行った部分に関してはこの条件を満たしているが、それ以外の部分や、エディタで追加・修正を行った部分に関しては特に注意すること。

- ・ 観測フォーマット部分は 1 行が 80 文字であり、また、ヘッダー部分は 1 行が最大 255 文字になる可能性もある(通常は、CON の行が最も長い)ため、送信時に自動で途中で折り返されないようにメールソフトの設定に注意すること。自分自身宛に観測報告のメールを送ってテストしてみるとよい。
- ・ メールソフトの表示がプロポーションナルフォントになっていると各々の文字の幅が異なるので観測フォーマットを表示したときにカラムの位置の判断を誤りやすい。そのため、表示には固定ピッチフォント(等幅フォント)を使うべきである。
- ・ メールはテキスト形式にすること。HTML メールは不可。テキストメールに HTML メールを添付するのも不可。
- ・ Windows 版 Astrometrica の MPC へのメール送信機能を使って送信することもできる。この機能を使えば、以上の条件を満たしたメール送信が可能である。コマンドを選択すると、送信メールの編集のウインドウが開き、本文にレポートファイル(MPCReport.txt)の内容が書き込まれる。このときに編集ができるので、ヘッダーを追加したり、一部の観測を削除することも可能である。CC での送り先を入力することも可能。ここで編集を行っても、ディスク上のオリジナルのレポートファイル(MPCReport.txt)自体は更新されない。
- ・ 彗星と小惑星とは分けて(別々のメールで)報告することが望ましい。彗星のみの報告の際には、電子メールのタイトルが ACK キーワードの行に COMET という文字を含めること。またはキーワード TYP(天体のタイプ)を使い、彗星のみの場合には TYP COMET または TYP CMT として指定してもよい。Guide to Minor Body Astrometry [6](英文)に詳細が記述されている。

<13-6> 今後の新しいフォーマットについて

現在は報告フォーマットの移行の時期にあたっているようだ。本原稿執筆期間中にもヘッダーについての MPC の web ページの内容が更新され、ヘッダーの 1 行の文字数が 80 文字以内から 255 文字以内へと変更された。連絡先(CON)の行も複数行に分割してよかったものが、1 行 255 文字以内に名前・住所・電子メールアドレスとも入れるように改められた。観測フォーマットそのものについても、21 世紀に相応しい形式に大きく変わる計画が進行中である。

日頃から MPC の回報や web ページに注目して今後の変化に対応していく必要がある。しかし、観測フォーマットが新しい形式に変わったとしても、(例えばヘッダーで旧フォーマットである旨を指定すれば)しばらくの間は今の観測フォーマットで報告することが可能であるようだ。一方、精測用ソフトは新フォーマットに対応するように改良されていくであろう。

2 大彗星の出現がきっかけとなって、彗星の位置観測について執筆することになった。内容は、彗星の位置測定の際にポイントとなるような点について記述したつもりである。2 大彗星が明るく素晴らしい姿に成長することを期待するとともに、これを機会に精測を行なう観測者が増えることを願っている。

謝辞

原稿を査読いただき貴重なご意見をいただきました 江崎裕介氏、門田健一氏、佐藤裕久氏、榎野幾文氏、中村彰正氏 をはじめ皆様に感謝いたします。また、精測用の素晴らしいソフトを安価に提供してくださる Herbert Raab 氏に感謝いたします。

参考文献 及び web サイト

彗星の精測については [1] に詳しく述べられている。DOS 版 Astrometrica の使用方法については [1] の他に [2] で詳しく述べられている。[1] ~ [3] は発行後時間が経ったが、[4] は最近の事情も含めて DOS 版 Astrometrica での精測について解説している。[5] は [4] とほぼ同内容が公開されているほか、新たな記述も加わっている。[6] は MPC の web ページにあり、これから小惑星（又は彗星）の CCD による精測を始めようとしている人への手引きであり参考になる。[15] には精測関係の web ページへのリンクがある。下記の各文献中にも豊富な参考文献が記載されているので参照されたい。

- [1] 小島卓雄、「冷却 CCD による彗星 / 小惑星の観測（第 1 回）」、INTERACTIVE ASTRONOMY Vol.3
- [2] 小島卓雄、「精密位置観測用ソフト」、天文ガイド 1996 年 12 月号
- [3] 中村彰正、「位置観測」、ヘール・ボップ彗星観測ハンドブック、1996 年
- [4] 江崎裕介、「CCD カメラと Astrometrica による彗星観測の楽しみ」、天界 2002 年 5 月号
- [5] 江崎裕介氏のページ、
<http://www.asahi-net.or.jp/~eg5y-ezk/heavens/astrometry.html>
- [6] Guide to Minor Body Astrometry（英文）、
<http://cfa-www.harvard.edu/iau/info/Astrometry.html>
- [7] Astrometrica のホームページ（英文）、
<http://www.astrometrica.at/>
- [8] Project Pluto のホームページ（英文）、
<http://www.projectpluto.com/>
- [9] Project GUIDE のページ、（[8]を日本語に翻訳したサイト：甲田昌樹氏管理）
<http://www.asahi-net.or.jp/~fp6m-kud/>
- [10] 中村彰正、「GSC-ACT 星表の評価」、第 16 回小惑星会議、2000 年
- [11] USNO-A2.0, SA2.0, B1.0 星表関連のページ（英文）

- <http://ftp.nofs.navy.mil/projects/pmm/catalogs.html>
- [12] USNO-B1.0 のデータのサイト (英文)
<http://www.nofs.navy.mil/data/fchpix/>
- [13] USNO UCAC 星表のページ (英文)
<http://ad.usno.navy.mil/ucac/>
- [14] 中村彰正、「冷却 CCD による彗星 / 小惑星の観測 (第 2 回)」、INTERACTIVE ASTRONOMY Vol.4
- [15] 門田健一氏による精測関連の web ページへのリンク集 (英文)
<http://www.astroarts.com/ageo/link/index.html>

【 Astrometrica の入手方法 】

DOS 版 Astrometrica :

現在 Astrometrica は Windows 版に開発が移ったため、DOS 版は今後アップデートやサポートが行われませんが、Astrometrica のホームページ [7] から無料でダウンロードできるようになった。

Windows 版 Astrometrica (シェアウェア):

Astrometrica のホームページからダウンロードして 100 日間試用することができる。その後も使用したい場合には登録手続きを行ない、ライセンスを得て使用する。登録するとライセンス・キーがメールで送られてくるので、それをソフトに入力すると登録版として使用できるようになる(このライセンスはバージョン 4 の範囲内でソフトのアップデート後も有効)。登録料はライセンス 1 本につき 25 ユーロで、オーストリアの Raab 氏宛てに送金する。同時に、住所、氏名、電子メールアドレスを伝える必要がある。送金は例えば郵便局からの国際送金 (Postal Money Order) を利用すると送料は普通で 1000 円と比較的安価である。

【表 1】残差の見方

MPC や MPEC に軌道が発表されるときに、軌道計算に用いた観測の残差 (観測値と計算値との差) も同時に発表されることがある。例を用いて、残差の見方を簡単に説明する (データは全て架空)

(残差の例 1)

Residuals in seconds of arc

(略)

030416	347	0.2-	0.6+
030416	347	0.2+	0.9+
030416	347	0.4-	1.3+

(略)

1 列目は観測日、2 列目は天文台コード、3 列目は赤経の残差 (単位は秒角)、4 列目は赤

緯の残差（単位は秒角）である。この例では、2003年4月16日に天文台コード 347 で行なわれた 3 個の位置観測の残差が示されている。例えば 1 個目の観測は、赤経の残差が -0.2 秒角、赤緯の残差が +0.6 秒角である。

1 個目の観測についての残差は、位置の観測値と計算値が例えば次のような関係であるときに得られる：

	赤経	赤緯
観測値 (O)	12h 34m 56.78s	+66 度 34 分 56.7 秒
計算値 (C)	12h 34m 56.81s	+66 度 34 分 56.1 秒
観測値 - 計算値 (O-C)	-0.03s = -0.2 秒角	+0.6 秒角

赤経の残差の s 単位から秒角単位への変換は、 $15\cos$ を乗じて行なう。

(残差の例 2)

Residuals in seconds of arc

(略)

030416 347 0.2- 0.6+

030416 347 (1.8+ 2.9+)

030416 347 0.4- 1.3+

(略)

この例は、天文台コード 347 で 2003 年 4 月 16 日に行なわれた 3 個の観測のうちの 2 個目の観測が残差が大きいため軌道計算には使われなかったことを示す。軌道計算のときに除外された観測には()が付く。

(残差の例 3)

030416 347 1.8+ 5.6+

030416 347 2.2+ 5.9+

030416 347 1.6+ 6.3+

これは軌道計算に使われた観測の残差ではなく、精測を行なったときに精測用ソフトが表示した残差であるとする。(ソフトの実際の表示形式は少々異なるが、便宜上この表示を使った。) この残差を見て、直ちに精測の精度が悪いと思っはならない。ソフトに入力されている軌道からのずれであるから、アークが比較的短くまだ軌道が十分に精度良く決まていない段階では、その軌道を求めるときに使われた最終観測の日からある程度日数が経つと、彗星の位置が計算からずれてくるのは当然だからである。または、ソフトに入力されている軌道の有効桁数が少ない場合にはそれが残差に現われている可能性もある。さらに、精測用

ソフトでは摂動を考慮しない位置が計算されるとすると、惑星に近づいて摂動の影響を受けている天体では、軌道の元期(Epoch) から日数が経つと位置推算の精度が悪くなるためその影響が残差に現われている可能性もある。もしこれらの理由で計算値の方がずれているとするならば、3 つの観測とも計算位置のずれはほぼ同量になるはずである。この例では計算値が赤経で 2 秒角、赤緯で 6 秒角ほどずれている可能性がある事になる。そのため、精測用ソフトで表示される彗星の残差を見る場合には、残差の絶対値に注目するのではなく、残差のばらつきに注目すべきである。

この例の場合には、

赤経の残差のばらつきは、 $2.2 - 1.6 = 0.6$ 秒角

赤緯の残差のばらつきは、 $6.3 - 5.6 = 0.7$ 秒角。

ばらつきが比較的小さいので精度の良い観測である可能性が高い(もちろん、パソコンの時計が合っていなかったため時刻がずれていたとか、彗星位置測定時の測定枠(アパーチャ)が大きすぎたため非対称なコマの影響を受けて彗星の真の中心からずれた位置を求めていた、など観測が悪い可能性も残っているが・・・)。

【表 2】MPC 観測フォーマット(天文台用)(彗星の場合)

カラム

- 1 - 4 周期彗星の場合の登録番号(右詰で前にゼロがつく)
- 5 軌道のタイプを示す 1 文字(P は短周期彗星、C は一般の(長周期)彗星)
- 6 - 12 仮符号(パック形式)や一時符号。通常の符号の彗星の場合、12 カラム目は分裂していない彗星では 0、分裂した彗星では分裂核を示す英小文字。
- 15 CCD 観測では C、写真観測では P またはブランク、移動観測フォーマットでは V/v
- 16 - 32 観測時刻(UT、年月日(小数))
- 33 - 44 観測位置(赤経)(J2000.0)
- 45 - 56 観測位置(赤緯)(J2000.0)
- 66 - 71 観測光度 彗星の場合 71 カラム目が T は全光度、N は核光度。小数点は 68 カラム目。
- 78 - 80 天文台コード

他のカラムはブランク(スペース)。光度は報告しない場合には省略可。

IAU のサイトのフォーマットのページ(英文)に、より詳細に記されている。

<http://cfa-www.harvard.edu/iau/info/ObsFormat.html>

以下に例を示す。

カラム													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890													
CK02T070	C2003	03	21.52715	04	24	20.23	+27	02	00.6		14.9	T	347
PK01M07D	C2001	11	27.44015	21	49	45.53	-28	08	37.8		12.6	T	347
0024P	C2001	04	22.48655	05	38	11.49	+30	20	02.7				347

意味：

- 1 行目は 彗星 C/2002 T7 (パックされた仮符号は CK02T070)の CCD 観測
 観測時刻 2003 年 3 月 21.52715 日(UT)、赤経 04h 24m 20.23s、 赤緯 +27 ° 02 00.6
 全光度 14.9 等、 天文台コード 347
- 2 行目は 周期彗星 P/2001 MD7 (パックされた仮符号は PK01M07D)の CCD 観測
 観測時刻 2001 年 11 月 27.44015 日(UT)、赤経 21h 49m 45.53s、 赤緯 -28 ° 08 37.8
 全光度 12.6 等、 天文台コード 347
- 3 行目は 周期彗星 24P の CCD 観測
 観測時刻 2001 年 4 月 22.48655 日(UT)、赤経 05h 38m 11.49s、 赤緯 +30 ° 20 02.7
 光度の報告なし、 天文台コード 347

【 表 3 】 移動観測用のフォーマット

- ・ 天文台コードは一律に 247 を使用。
- ・ 1 行 80 文字で 2 行のフォーマット。2 行ともに天文台コードの 247 を入れる。
- ・ 1 行目は 15 カラム目に "V" (大文字) を入れるほかは通常の (天文台用) フォーマットと同じ。
- ・ 2 行目は以下のフォーマットになる：

カラム	
1 - 14	1 行目の 1~14 カラムと同一
15	'v' (小文字)
16 - 32	1 行目の 16~32 カラムと同一
33	'1' (数字)
34	ブランク (スペース)
35 - 44	観測地点の東経 (適切な精度まで。一般には小数第 4 位まで。) 小数点は 38 カラム目。

45	ブランク (スペース)
46 - 55	観測地点の緯度 (北緯は+, 南緯は-。適切な精度まで。一般には小数第 4 位まで。) 符号は 46 カラム目。小数点は 49 カラム目。
56	ブランク (スペース)
57 - 61	観測地点の標高 (メートル単位)。右詰めで先頭にゼロは付けない。
62 - 77	ブランク (スペース)
78 - 80	'247'

例を示す。

1	2	3	4	5	6	7	8
1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890							

CK05H080	V2005 05	12.56789	10 23 45.67	+12 34 56.7		15.8 N	247
CK05H080	v2005 05	12.56789	1 139.5432	+36.5678	123		247

意味：

彗星 C/2005 H8 (架空の天体) の移動観測のフォーマットによる報告

観測時刻 2005 年 5 月 12.56789 日(UT)、赤経 10h23m45.67s、赤緯 +12° 34 56.7

核光度 15.8 等

観測地点 東経 139.5432°、北緯 36.5678°、標高 123m

【 表 4 】 ヘッダー部

(MPC のサイトの Observational Details (英文) :

<http://cfa-www.harvard.edu/iau/info/ObsDetails.html> に詳細な記述がある)

電子メールで観測を報告する際には、毎回、観測者・測定者・望遠鏡・星表などの情報を、精測データよりも前に含める必要がある。これらは、以下の 3 文字のキーワードで始まるヘッダーの中に記述する。

- ・ 第 1 行目は、COD に続けて 3 文字の天文台コード (1 行目は必ず COD)。
- ・ 2 行目以降は、任意の順番でよい。

CON に続けて連絡先 (1 名のみの氏名・住所・電子メールアドレス)

OBS に続けて観測者 (複数名も可)

MEA に続けて測定者 (複数名も可)

TEL に続けて望遠鏡の詳細

NET に続けて整約に使った星表の略名

COM に続けてコメント

TYP に続けて報告する天体のタイプ (但し、天体のタイプが 1 種類の場合)

彗星の場合は COMET または CMT

- ・ 報告メールを受領した旨を知らせる(自動の)返信メールを受け取りたい場合には、ACK というキーワードを追加する。ACK に続ける文字列は自由。
TYP キーワードで天体のタイプを指定する代わりに、ACK に続く文字列に、または報告メールのタイトルに天体のタイプを示す文字列を含めても良い。この場合、彗星を示す文字列は、COMET である。
- ・ ACK を使った場合、デフォルトではメールの発信元に受領のメールが返信される。受領メールの送信先を直接指定したい場合には、ACK に加えて、AC2 でメールアドレスを指定する。このときのメールアドレスの数は、AC2 の 1 行が 255 文字以下になるならば、複数指定しても構わない。

(注意)

- ・ 全ての行は 255 文字 (カラム) 以下。
- ・ キーワードは大文字で 1 カラム目から始まる。
- ・ OBS, MEA は、各行の先頭にキーワードを繰り返すことにより、2 行以上にわたって記述してもよい。
- ・ 氏名はイニシャル + 苗字 で表し、イニシャルと苗字の間にはスペースを入れる。
- ・ 氏名は大文字と小文字を混ぜて表す。複数名の場合にはコンマで区切る。1 人の氏名の途中では改行しない。
- ・ 望遠鏡については、口径、F 数、望遠鏡のタイプと、CCD 使用時にはその旨を記載する。
- ・ CCD を使用した場合には、CCD のメーカー名や機種は記載せずに、+ CCD とだけ記載する。

例えば、

1.0-m f/4.3 reflector + CCD (意味: 口径 1.0m F4.3 の反射望遠鏡に CCD カメラを使用)

0.28-m f/6 Schmidt-Cassegrain + CCD (意味: 口径 28cm F6 のシュミットカセグレンに CCD カメラを使用)

- ・ 連絡先 (CON) を指定する場合には、1 行 255 文字以内の中に氏名・住所・電子メールアドレスの 3 つとも記載すること。CON の行を省略すると、その天文台のデフォルトの連絡先が使用される。天文台での観測で、特に連絡先の変更がない場合には、CON は省略するのが望ましい。
- ・ 連絡先 (CON) のなかの電子メールアドレスは、角カッコ [] でくくること。(但し、AC2 の行の電子メールアドレスにはカッコを付けない)

(ヘッダーの例 1)

COD 500

CON T. Suzuki, 4-3-2 Suisei-cho, Utsunomiya, Tochigi, 321-1234 Japan

[ab12@efg.hij.ne.jp]

OBS T. Suzuki

MEA T. Suzuki

TEL 0.50-m f/3.0 reflector + CCD
NET GSC-ACT
ACK COMET OBS on Mar.27, 2003

天文台コード 500 を持つ天文台（架空）での彗星の観測を T. Suzuki 氏（架空）が報告する場合のヘッダーの例。この例では、連絡先、観測者、測定者とも T. Suzuki 氏である。機材は 50cm F3.0 の反射望遠鏡に CCD を使用。星表は GSC-ACT。ACK があるので、メールが届くと返信が返ってくる。また、ACK の行に COMET の文字があるので、彗星のみの観測である。天文台での観測で連絡先（CON）がデフォルトと同じ場合には、CON は省略してよい（省略したほうがよい）。

（ヘッダーの例 2）

COD 500
OBS T. Suzuki
ACK Batch 042: COMET

この例は、最小のヘッダー数で構成した例である。天文台コード 500（架空）での彗星の観測。CON, TEL, NET は省略されているが、この天文台コードのデフォルトのデータが使われる。観測者は T. Suzuki 氏、測定者は省略されているので観測者と同じであるとみなされる。ACK の行に COMET があるので、彗星のみの観測である。

（注）

- ・ CON, TEL, NET の書き方は、最近の MPC が参考になる。（TEL は MPEC にも載っている）
- ・ 移動観測の場合には、COD 247 である。その場合、CON, TEL, NET は省略しない。
- ・ 天文台での観測で初回報告時（まだ天文台コードが決まっていないとき）には、COD XXX である。この場合にも、CON, TEL, NET は省略しないほか、COM で天文台の名前（または、サイトの名前）と天文台の経度・緯度・標高を伝える。

【表 5】 報告例

報告例 1（移動観測者）

この例は、彗星 C/2005 H8（架空の天体）を A. Sato さんが観測・測定し、2 個の測定値を移動観測のフォーマットで報告する場合の例。観測地点は 2 個とも、東経 139.5432 度、北緯 36.5678 度、標高 128m。移動観測専用の天文台コード 247 を使い、2 行 1 組の移動観測用のフォーマットを使う。

COD 247
CON A. Sato, 5-4-3 Mokusei-cho, Utsunomiya, Tochigi, 321-0123 Japan [ab43@efg.hij.com]
OBS A. Sato

MEA A. Sato
 TEL 0.20-m f/6.0 reflector + CCD
 NET GSC-ACT
 ACK COMET No.112343

CK05H080	V2005	05	12.56789	10	23	45.67	+12	34	56.7	15.8	T	247
CK05H080	v2005	05	12.56789	1	139.5432	+36.5678			128			247
CK05H080	V2005	05	12.57654	10	23	46.54	+12	34	50.3	15.7	T	247
CK05H080	v2005	05	12.57654	1	139.5432	+36.5678			128			247

報告例 2 (天文台 ; 初回の報告)

これは、天文台が初回に報告する場合の例である。天文台コードは XXX を使う。コメント (COM) の行で、天文台 (又はサイト) の名前、天文台の経度・緯度・標高を記す。例では、天文台名は Utsunomiya-Kinsei 、位置は東経 139 度 56 分 54 秒、北緯 36 度 32 分 50 秒、標高 163m である (このときの経度・緯度は度の小数ではなく、度・分・秒で示す) 。連絡先・観測者・測定者とも T. Tanaka 氏、星表は USNO-A2.0、望遠鏡は 20cm F10 シュミットカセグレンで CCD 撮影。ACK の行に COMET があるので彗星のみの観測。AC2 で受領メールの送信先を指定している。

(C/2001 HT50 の観測であるが、下記の精測位置は数字を書き換えてあるため不正確)

COD XXX
 COM Observatory name: Utsunomiya-Kinsei
 COM Long. 139 56 54 E, Lat. 36 32 50 N, Alt. 163m
 CON T. Tanaka, 1-5-7 Kinsei-cho, Utsunomiya, Tochigi, 321-1123 Japan
 [mt12@abc.def.ne.jp]
 OBS T. Tanaka
 MEA T. Tanaka
 NET USNO-A2.0
 TEL 0.20-m f/10 Schmidt-Cassegrain + CCD
 ACK MPCReport file updated 2003.03.27 20:46:03 COMET
 AC2 mt12@abc.def.ne.jp

CK01H50T	C2003	03	21.50166	05	55	56.31	+07	13	40.7	16.4	N	XXX
CK01H50T	C2003	03	21.50763	05	55	55.90	+07	13	43.9	16.6	N	XXX
CK01H50T	C2003	03	21.51494	05	55	55.36	+07	13	47.8	16.5	N	XXX

報告例 3 (天文台 ; コード取得後)

天文台コードが割り当てられた後の報告例。

天文台コード 347 での、C/2002 V1 の観測。

COD 347

OBS M. Suzuki

MEA M. Suzuki

NET GSC-ACT

TEL 0.20-m f/10 Schmidt-Cassegrain + CCD

ACK OBS of COMET on Feb.1

CK02V010	C2003 02 01.38809 23 00 33.15 +07 06 54.3	347
CK02V010	C2003 02 01.39074 23 00 32.56 +07 06 51.8	347
CK02V010	C2003 02 01.39297 23 00 32.07 +07 06 49.2	347

【参考】彗星の軌道要素

彗星の軌道は、惑星による引力 (摂動) の影響を無視すれば、太陽を含む平面内にあり、軌道の形は太陽を焦点とする 2 次曲線 (円錐曲線 : 円錐を任意の平面で切断したときの切り口の形状) である。この、彗星軌道を含む平面 (軌道面) を指定するのに 3 つの角度要素 : 近日点引数 (Peri. や で表わす)、昇交点黄経 (Node や で表わす)、軌道傾斜角 (Incl. や i で表わす) (いずれも単位は度) を使用する。また、軌道の形 (2 次曲線の形) を指定するのに離心率 (e で表わす) というパラメータを使用する。 $e = 0$ は円、 $0 < e < 1$ は楕円、 $e = 1$ は放物線、 $e > 1$ は双曲線を意味する。軌道の大きさを指定するパラメータが近日点距離 (q で表わす) で、近日点 (彗星が太陽に最も近づく点) での彗星 - 太陽間の距離 (単位は AU (天文単位)) を示す。更に、彗星がある時刻に軌道上のどこにいるのかを指定しなければならない。これを指定するパラメータが近日点通過時刻 (T で表わす) であり、彗星が近日点を通過する時刻を指定する。以上の 6 つのパラメータ : T , q , e , Peri., Node, Incl. が彗星の軌道要素であり、これらの軌道要素が決まれば、彗星の任意の時刻の位置を計算で求めることができる。以下に、MPC や MPEC で表示されるのと同様な形式でいくつかの架空の彗星の軌道要素を示す。

(A)

T 2003 May 10.1234 TT

q	1.234567	(2000.0)	P	Q	
		Peri.	170.1234	0.9200839	-0.2866552
		Node	210.9876	0.3146304	0.9467946
e	1.0	Incl.	31.2345	0.2333523	-0.1463174

(A) は放物線軌道の例である。2 列目に 3 つの角度要素、1 列目にそれ以外の 3 つの要素が示されている。右側の 2 列の P, Q という 6 個の数字であるが、これらはベクトル定数と呼ばれるパラメータであり、6 個の数字でこの彗星の軌道面を表わしている。3 個の角度要素 : Peri., Node, Incl. と 6 個のベクトル定数 $P(P_x, P_y, P_z)$, $Q(Q_x, Q_y, Q_z)$ とは、何れもこの彗星の軌道面を異なる形式で表現したものであり、同じ内容である。角度要素とベクトル定数とは互いに変換できる。

(B)

T 2003 Mar. 25.4321 TT

q	1.34567	(2000.0)	P	Q	
n	0.128324	Peri.	345.6789	-0.3334595	-0.9029376
a	3.89282	Node	123.1234	0.8936965	-0.3943200
e	0.65432	Incl.	18.8888	0.3001856	0.1709253
P	7.68				

(B) は短周期彗星の例である。(A) と比べると、1 列目に n , a , P という量が加わっている。 n は平均日々運動と呼ばれ、1 日当たり彗星が楕円軌道上を移動する平均の角度である (単位は度/日)。 a は軌道半長径と呼ばれ、楕円軌道の長軸方向の半径である (単位は AU)。 P は彗星の公転周期 (単位は年) である。(A) に比べて軌道要素の数が増えたように見えるが、独立なパラメータの数は 6 個で変わらない。

$$a = q / (1 - e)$$

$$P = a \cdot a$$

$$n = 0.98560767 / (a \cdot a)$$

によって、 q と e から a , P , n の値を計算することができる。位置推算のソフトでは、楕円軌道の場合、 q の代わりに a を入力するものもある。

(C)

Epoch 2003 June 10.0 TT = JDT 2452800.5

T 2003 Apr. 14.5678 TT

q	1.812345	(2000.0)	P	Q	
n	0.0623233	Peri.	26.1234	-0.2788835	-0.9587272
a	6.300412	Node	80.1111	0.8709437	-0.2767979
e	0.712345	Incl.	3.2222	0.4045751	-0.0650011
P	15.8				

(C) も短周期彗星の例であるが、これは摂動を考慮した場合の軌道であり、(B) と比べると Epoch の 1 行が加わっている。惑星からの引力 (摂動) を考慮すると、厳密には彗星の軌道は時間とともに徐々に変化していく。そこで元期 (Epoch で表わす) を指定し、その軌道がいつの時点のものかを指定する。

(D)

Epoch 2003 June 10.0 TT = JDT 2452800.5

T 2003 May 12.3456 TT

q	0.777777	(2000.0)	P	Q
z	+0.003016	Peri. 166.7890	0.6752206	-0.6885908
	+/-0.000006	Node 240.0012	0.6459580	0.7250863
e	0.997654	Incl. 17.7778	0.3561115	-0.0096167

(E)

Epoch 2003 June 10.0 TT = JDT 2452800.5

T 2003 Feb. 1.2345 TT

q	0.765765	(2000.0)	P	Q
z	-0.001030	Peri. 76.5432	-0.0345100	0.9184204
	+/-0.000020	Node 205.6789	-0.7787031	0.2224639
e	1.000789	Incl. 65.4321	0.6264428	0.3271296

(D) と (E) は、放物線に近い軌道の例である。 z は a の逆数($z=1/a$;単位は $1/AU$) であり、その下の行に z の精度が示されている。 z が正の場合は楕円軌道、負の場合は双曲線軌道である。この例の場合には、(D) は長周期の楕円軌道(周期は約 6000 年)で (E) は双曲線軌道である。(但し、(E) が双曲線軌道だからといって太陽系外からやってきたと結論付けることはできない。(E) が双曲線軌道であるのは 2003 年 6 月 10 日時点の軌道である。以前は楕円軌道であったものが、惑星の摂動を受けたために双曲線軌道になった可能性もある。それを確かめるためには、十分に過去に遡った軌道を計算して(過去軌道)、その軌道が双曲線軌道かどうかを確認する必要がある。)

尚、軌道の決定に用いた位置観測の個数と期間(アーク)については、軌道要素の下の行に例えば次のように示される。

From 101 observations 2003 Apr. 28-May 23.

(意味: 2003 年 4 月 28 日から 5 月 23 日までの期間の 101 個の位置観測から決定した軌道)

From 132 observations 2003 Feb. 11-May 8, mean residual $0''.5$.

(意味: 2003 年 2 月 11 日から 5 月 8 日までの期間の 132 個の位置観測から決定した軌道であり、この期間の観測位置と軌道から計算した位置との平均残差は 0.5 秒角)