

7 流星物質の母彗星からの分離

長沢 工(東大地震研)

流星群を構成する流星物質は、彗星から分離したものと信じられている。分離した物質は、1次近似としては、太陽を焦点とした楕円軌道上を運動する。したがって、軌道を周回して、母彗星から分離した点へ何回も戻ってくるものと一緒に考えることができる。このことは、地球で観測できる流星群の物質は、その母彗星が地球軌道とかなり接近した点で分離したものであることを意味する。

太陽から1天文単位ぐらいたる離れた点では、彗星から気化したガスが、およそ1km/sぐらいたる速さで、放射状に流出していると推定される。流星物質が、このガスの流れにのって母彗星から分離していくものと考えると、分離する物質の大きさや速さの見当をつけることができる。

母彗星の核、分離する流星物質の形を、ともに球で近似することにして、

$$\begin{array}{ll} \left. \begin{array}{l} \text{半径: } R \\ \text{質量: } M \\ \text{ガスの流出速度: } V \end{array} \right\} & \left. \begin{array}{l} \text{半径 } r \\ \text{質量: } m \\ \text{分離速度: } v \end{array} \right\} \\ \text{母彗星核の} & \text{流星物質の} \end{array}$$

とし、母彗星核表面付近のガス分子の数密度を N 、ガス分子/個の質量を α とする。さらにガス分子は、流星物質に弾性衝突をするものと仮定すると、分離速度 v は、母彗星核中心からの距離を x として、次のように書ける

$$m \frac{dv}{dt} = \pi r^2 (V - v)^2 N \frac{R^2}{x^2} - G \frac{Mm}{x^2}$$

この式を積分して、分離速度 v を、流星物質の半径 r の関数として求めることができます。

ひとつの一例として、母彗星核の半径 $R = 2\text{ km}$ 、質量 $M = 6 \times 10^{16}\text{ g}$ （平均密度が 1.77 g/cm^3 に相当）、核表面のガス密度 $N = 10^{13}/\text{cm}^3$ 、ガス分子の速さ $V = 1\text{ km/s}$ 、ガス分子/個の質量 $\alpha = 3 \times 10^{-23}\text{ g}$ （ H_2O を想定）とし、流星物質の密度を 1 g/cm^3 として計算すると、分離する流星物質の最大半径 $r_{\max} = 22.5\text{ cm}$ となり、分離速度 v は

$r(\text{cm})$	20	10	3	1	0.1	0.01
$v(\text{m/s})$	0.7	2.23	5.08	9.38	29.37	89.17

となる。通常観測される流星群の輻射点のひろがりを、この分離速度だけに起因する軌道のはらつきによつて説明するためには、ここで得られた分離速度は、ひと桁小さすぎる。

マイコンを利用した軌道計算 落合

M.S.S資料

最近は、電卓やマイコン等の小型電算機が安く手にはいきやすくなり、すでに、流星の軌道計算等も行われてゐる。私も日立ベーシックマスター レベルIIを利用して、流星の位置決定(此較差2ヶ切計測)と対地軌道(切断点4ヶ)までが完成し、IBMの2305による理大 Metacor 3, 4との比較をして、実際に自分で撮影して同時に存在した流星2つと他の1つを処理してみたので報告します。(レベルIIはMSS)

表ハレベルIIの結果 と 理大 Metacor 3 ビの比較
対地のみ 差

α 100°45'2 (0.004)	α 100°44'8
δ 9°07'4 (0.015)	δ 9°05'9
λ 139°95'714 (0.00205)	λ 139°95'917
φ 36°34'02 (0.0025)	φ 36°33'81
r 101.52 km (0.04)km	r 101.48 km

以上の様になり、少數毎1ケタ~2ケタ以下はまだでも意味がある、 λ , φ は10"以下でおさまる。特に、 δ はARC SINをケタ電卓で処理することから誤差が大きくなってしまう。

以上の誤差を考慮して丸めた結果は、

① 1980-12-14-21171075 J.S.T 東大和天ヶ丘村落合

R. P (α 112.38 δ 32.63)	
東大和 λ 139°38'68	φ 35. 4244 ⁴²⁴⁵ r 90.79
落合 λ 139°42'32	φ 35. 4244 ⁵⁰³⁴ r 65.26
	6139
落合 λ 139.3808	φ 35.6016 r 94.97
λ 139.4230	φ 35.6139 r 65.38

② 1980-12-14-2:18:19 奥大和天文台一等合

R.P (x 111° 75' S 32° 50')

東大和 139.6069 ♀ 35.7423 R 88.99

139.6327 ♀ 35.7553 R 72.28

等合 139.6080 ♀ 35.7486 R 88.21

139.6414 ♀ 35.7576 R 66.70

③ 1980-12-14-2:36:55 東大和天文台一等通大

東大和 139.3834 ♀ 35.7331 R 101.16

139.4573 ♀ 35.7415 R 62.91

等合 139.3823 ♀ 35.7329 R 101.71

139.4451 ♀ 35.7451 R 69.20

R.P (x 113° 87' S 32° 57')

* 測定から計算までの手順:

測定は、引き抜いたスリントを自作ライトボックスにあき、虫眼鏡で
つづく、「つづき法(引き抜き法)」を使用し、座標を設定しハーベ
で100分4mmまで読みとる。その後、星図と星表(SAO)から
位置を読み、Sを調べテニグして、レベル-2で、位置決定、R.P.
座地軌道を求める。この過程は、一回の同時に流すので、2~3
時間あれば処理できる。大学時代の1~2日かけて処理するよ
りもはるかに早くでき、まちがえてデータを入れてもすぐに入れ直せるので
とても便利である。社会人として、時間が少なければともには、不完全
なものである。今後、未処理の同時に流すや早い流すの位置、R.P.
をたてて、研究していきたい。また、R.P.決定プログラムも完
成して、1980年のSAOの1/4個へ早一流星から次の結果を
えどり = 1980×6cm 47 (x 112.544 S 32.541) ^{13/4}

保科 順一

東京理科大学天文研究部流星班における流星の軌道計算の現状と未來

現在(1983.12/12)では、流星の軌道計算を恒常的に行なえる機関、個人は、我々をおいて他になしのか現状です。現在どの様な過程で機能してゐるのか、そして今後どの様な見通しがあり、何ぞるのか、につけて簡単に述べたいと思つてります。

過去、我々が軌道計算に手を染めたのは1977年末に遡ります。当時のことは、現KDM会長の二見氏、MSS持ち回り幹事の一人の寺田亮氏に語、てもらう方が良いのでこの場では割愛させていただきます。

当時、理科大で「METEOR 3」と呼ばれる2点観測用プログラムが走っていました。測定法はコンピューターと呼ばれるX-Y座標測定機を使つていました。

当時は年間同時流星数も30ヶ程度でそれでも大変な労力が必要ですが、なんとか、計算が追いつきました。

その後、78年は月の關係でGEM群がため、79年はPer群がため、80年は天候不順で全体不調と続いたおかげでそれ程同時流星は増えず、助か、こしま、たのびすが…

その間、プログラム作りが進んで、「METEOR 4」と呼ばれる、現在活躍中の多点観測プログラムが出来上がりました。現行のVer 3.6となり一応設りと思われる所をすべてとれたと言ふ状態になるには、82年まで待たなければなりませんでした。このプログラムは「METEOR 3」を土台にどんどん拡張、追加していったためと、理論は寺田亮氏。プログラムの大部分は現在足立区立中学校教師をやつて、石川村中博志氏。最終バージョンは、私は、現在4年の寺田博氏によつて行なわれたなど、長期に渡つて、多く人數で立ち立てたが、ここで上げたことによつて、複雑怪奇なものになり現在、余人の立ちはだかりと云ふ言葉をもせりに立つてしまいました。私は現時点を明らかに誤りだらう在と云ふ点を一つ感じていますが、ちゃんと手を出せない内で、新プログラム作成を開始し、昨年秋には「METEOR 4」レベルのプログラムは完成しました。この時点でプログラムの巨大化に困難を感じていたのですが、そのまゝ次のレベルの調整に移り、私の卒研スクリプト途中で止つてます。

軌道計算は81'から測定に「大西法」を取り入れ、寺田博氏の人間離れした活躍と、當時日大文理4年の卒研で軌道計算をやってきた、幕合善志氏の活躍で積極的に向上し、それまでの計算にかかるなか、た、化石同時流星を発掘し計算するなど、二見花ざかりとなりました。

82'からは日大文理のコンピューター導入が実現もあり、事实上、寺田博氏が一人ですべてをこなすと言ふ状態が続つてます。

以上が、過去を含む、現状の解説です。

次に、軌道計算の中継きにつけて述べてみたいと思います。これを述べることによつて、現在の問題につけて考えてもらえると良いと思います。

フローチャート上には、いくつか結合子がありますが、現在計算と呼ばれる行動は、左右両方合わせてみると理解してください。要するに計算とは、観測のまとめから解析をひっくり返めて呼ばれているのです。現在大抵の流星は計算依頼で行なうことが多いので、かなり楽ではあります。計算されない化石流星は、分歧の5番目の「どうしても計算はしたいか?」と言う所にひっかかります。過去、理科大=KDMの時代は、かなり積極的にこちらから、それがの借用状を作成し、結果、結合子①の第1分歧「データはすべてそろったか?」にひっかかりかなりの数の同時流星が現在でも計算されぬままとなり、それがを送つてくれ

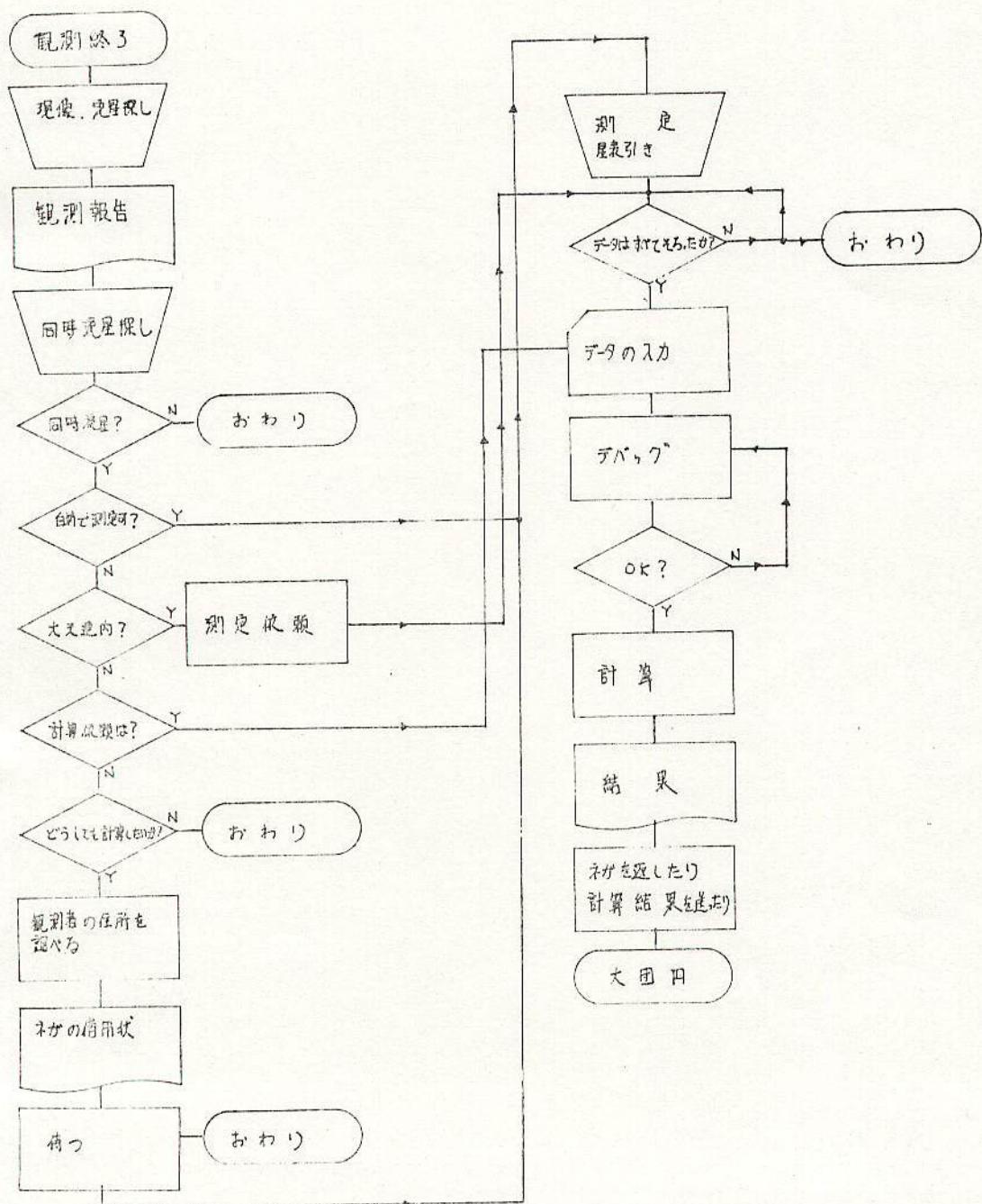
た方々の不評を買ってしまいました。現在では特に「しなければならぬ!」と思ひ立たない限り、金銭面もあり、借用状を書くと言う行動はしていません。

現在、普通の状態で計算できる流星数はおよそ年間30個が限界であると私は見てります。今後これ以上増えることはないと考えらわれる値です。しかししながらCPMはその版図を除々に広げていくでしょうし、観測者の技術(カメラの台数)の向上によって、同時に流星数は増す増す増え続け、年間100同時に流星はあと3年のうちに達成されると考えられます。その様な勢いで同時に流星が増えていっても、こちらの処理にはおのずから、限界があります。学生としての本分を二分れなう程度ではまだ新らしい方法が開発されないと、すべてを我々だけでこなすことは不可能です。他大学はと言ふと、我々の様に自由な機械を持つ所は無いつつて、もうこれはあきらめなければなりません。

今の所、最も効率の良い計算方法は計算依頼によって行なう計算だけの場合です。これだけであると、一日2,3個はできます。しかし問題は、測定を完全に終らせる。設備のある観測者は少なく、たまにいい星表を持っていないため、計算依頼ができる状態にはないことです。

今後、学園側の設備使用許可のレベルが増しますれば、天文研が電算機を使えなくなる日もそう遠いことではないと私は考えています。その日のために除々に「川端研」にシステムを移動して行こうとしています。

少なくとも来年3月までは大じょうぶですが、現一年生もぼちぼち計算をしてみようだし、来年一年ぐらりは、システムも使えるでしょうから、しばらくは、流星の軌道計算は我々で行なっていけるでしょう。



流星観測データの「分点変更」の方法

東京大学地震研究所 長沢 工

1. はじめに

皆さんがよく御存じのように、流星の輻射点の位置や軌道要素の表示には、いままで主として1950年分点を使ってきた。これを詳しくいうと、1950年のベッセル年初(B1950.0)における平均春分点、平均赤道で定義される座標系を使ってこれらの値を表示してきたのである。

しかし、1950年から35年余りが経過し、現在では2000年までに14年しかない。したがって、一般的に考えても、そろそろ2000年分点を使用してもいい時期になったと思われる。実をいうと、分点変更は既に世界の天文学全体の趨勢である。そして、位置天文学の分野ではすでに1984年の初めから2000年分点による表示を使い始めている。天体位置表、理科年表などを見ればわかるが、日本でも1985年から、その基準元期を2000.0に変更した。これは、具体的には、2000年1月1日正午UT(J2000.0)の平均春分点、平均赤道で定義された座標系による表示を意味している。

流星に関する分野でも、いままでは習慣的に1950年分点を使用していたが、このへんで2000年分点の使用に変更しないと、世界の大勢に遅れをとるおそれがある。私はここで、これから決定する輻射点や軌道要素などの表示に2000年分点を使用することをお勧めしたいのである。

2. 分点変更に伴う問題

こうして私は、流星観測、研究の分野でも2000年分点の使用をお勧めしたのであるが、これを実行するためにはいろいろの厄介な問題を処理する必要がある。たとえば、まず、2000年分点に対応した観測用星図をつくるなければならない。その星図なくして、一般の観測者にとっては、どうして2000年分点に対する結果がだせるであろうか。

そうしたいくつかの困難を乗り越え、いろいろ努力して2000年分点による表示を一部の人人が始めたとしても、ここ当分はどうしても1950年分点の表示と併用する時期が続くことになろう。そうすると、相互の比較などにいろいろの不便がおこることが想像される。こうした事態に対しては、すくなくとも、互いの数値を換算する手段をはっきりさせておく必要がある。

これらのことに対する手段のひとつとして、ここで私は、流星の輻射点位置、軌道要素を、B1950.0からJ2000.0の表示に換算する方法を示すことにしよう。あらかじめお断りしておくが、以下に述べる方法は、静止している点の位置を換算する手段であるので、恒星のように固有運動をもつものに対しては適用できない。

3. 輻射点位置の換算 (B1950.0 - J2000.0)

分点の変更、換算と簡単にいってきたが、実をいうと、これはそう単純な問題ではない。その何よりの原因是、B1950.0系とJ2000.0系とでは、基礎となっている種々の天文定数が違うことである。特に春分点の位置および西方移動速度が異なること、歳差の式が変わったことなどが重なりあって事情を一層複雑にしている。

それらのことに深入りする余裕はないので、ここでは詳しい説明を一切省略し、計算方式だけを示すこととする。

まず、B1950.0分点による輻射点の赤経、赤緯を (α_0, δ_0) 、J2000.0分点による赤経、赤緯を (α, δ) で示することにする。

最初に (α_0, δ_0) をつきの関係式で方向余弦 (L_0, M_0, N_0) に変換する。

$$\left. \begin{array}{l} L_0 = \cos \delta_0 \cos \alpha_0 \\ M_0 = \cos \delta_0 \sin \alpha_0 \\ N_0 = \sin \delta_0 \end{array} \right\} \quad (1)$$

このB1950.0分点に関する方向余弦は、つきの3行3列の行列Sを乗することで、J2000.0分点の方向余弦 (L, M, N) に換算できる。すなわち、

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ N \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} L_0 \\ M_0 \\ N_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ただし

$$S = \begin{pmatrix} 0.9999256782 & -0.0111820610 & -0.0048579477 \\ 0.0111820609 & 0.9999374784 & -0.0000271765 \\ 0.0048579479 & -0.0000271474 & 0.9999881997 \end{pmatrix} \quad (3)$$

である。

こうして計算された方向余弦 (L, M, N) から、J 2000.0 分点に対する (α, δ) は、

$$\left. \begin{array}{l} \tan \alpha = M/L \\ \sin \delta = N \end{array} \right\} \quad (4)$$

の関係ですぐに求めることができる。最初の (α_0, δ_0) と大きい差があるわけではないから、象限の決定はたやすい。

実例をひとつやってみよう。

ふたご座流星群のある流星の輻射点が、B 1950.0 分点に対して、

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_0 = 113^\circ .85 \\ \delta_0 = 32^\circ .47 \end{array} \right\}$$

であるとき、これを J 2000.0 分点に対する値に換算してみよう。

まず、(1)式で方向余弦を計算すると、

$$\left. \begin{array}{l} L_0 = -0.3411336 \\ M_0 = 0.7716291 \\ N_0 = 0.5368579 \end{array} \right\}$$

となる。つぎにこれに行列 S を乗ずる。その結果、

$$\left. \begin{array}{l} L = -0.3523447 \\ M = 0.7677517 \\ N = 0.5351734 \end{array} \right\}$$

が得られる。ここからすぐに、

$$\left. \begin{array}{l} \tan \alpha = 2.1789791 \\ \sin \delta = 0.5351734 \end{array} \right\}$$

が求まり、J 2000.0 分点に対する輻射点の赤経、赤緯として、

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = 114^\circ .65 \\ \delta = 32^\circ .36 \end{array} \right\}$$

が得られ、換算が完了する。この換算では、赤経が $0^\circ.80$ の増加、赤緯が $0^\circ.11$ の減少を示した。

4. 軌道要素の換算 (B1950.0-J2000.0)

軌道要素のうち、長半径 a 、離心率 e は分点の変更によって何の影響も受けない。換算を考えなければならないのは、昇交点黄経 Ω 、軌道傾斜角 i および近日点引数 ω である。

このうち Ω 、 i は軌道平面の位置を決める量である。したがって、変換の考え方としては、その Ω 、 i から B1950.0 分点で表示されている軌道平面の極（平面に直交する向き）の方向余弦を求め、それを輻射点の場合と同様にして J2000.0 の分点の表示に換算し、その極の位置を再び昇交点黄経 Ω 、軌道傾斜角 i に戻せばよい。また、 ω は、近日点の向きの方向余弦を J2000.0 に換算することから求めることができる。

以下、B1950.0 に対応する量に添字 0 をつけて具体的な変換法を述べていく。

Ω_0 、 i_0 にたいする軌道平面の極の黄道直交座標系での方向余弦 (l_0, m_0, n_0) は、

$$\left. \begin{array}{l} l_0 = \sin \Omega_0 \sin i_0 \\ m_0 = -\cos \Omega_0 \sin i_0 \\ n_0 = \cos i_0 \end{array} \right\} \quad (5)$$

である。また、近日点の向きの方向余弦 (a_0, b_0, c_0) は、

$$\left. \begin{array}{l} a_0 = \cos \Omega_0 \cos \omega_0 - \sin \Omega_0 \sin \omega_0 \cos i_0 \\ b_0 = \sin \Omega_0 \cos \omega_0 + \cos \Omega_0 \sin \omega_0 \cos i_0 \\ c_0 = \sin \omega_0 \sin i_0 \end{array} \right\} \quad (6)$$

である。

ここでまず、これらの方向余弦を赤道直交座標系の方向余弦 (L_0, M_0, N_0) および (A_0, B_0, C_0) に変換する。これは B1950.0 における平均黄道傾角 ϵ_0 を使って、

$$\left. \begin{array}{l} L_0 = l_0 \\ M_0 = m_0 \cos \epsilon_0 - n_0 \sin \epsilon_0 \\ N_0 = m_0 \sin \epsilon_0 + n_0 \cos \epsilon_0 \end{array} \right\} \quad (7)$$

また、

$$\left. \begin{array}{l} A_0 = a_0 \\ B_0 = b_0 \cos \epsilon_0 - c_0 \sin \epsilon_0 \\ C_0 = b_0 \sin \epsilon_0 + c_0 \cos \epsilon_0 \end{array} \right\} \quad (8)$$

で計算できる。ただし、 $\epsilon_0 = 23^\circ.445787$ である。

こうして得られた二組の方向余弦 $(L_0, M_0, N_0), (A_0, B_0, C_0)$ は、さきに(3)式で示した行列 S を使うことで J2000.0 系に換算することができる。つまり、

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ N \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} L_0 \\ M_0 \\ N_0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

および

$$\begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \\ C_0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

である。 $(L, M, N), (A, B, C)$ はもちろん、それぞれ軌道平面の極、近日点の向きに対する赤道直交座標系の方向余弦である。

こうして求めた J2000.0 系の方向余弦を、つぎに黄道座標系の値 (l, m, n) および (a, b, c) に変換する。それは J2000.0 に対する黄道傾角 ϵ を使って、

$$\left. \begin{array}{l} l = L \\ m = M \cos \epsilon + N \sin \epsilon \\ n = -M \sin \epsilon + N \cos \epsilon \end{array} \right\} \quad (11)$$

および

$$\left. \begin{array}{l} a = A \\ b = B \cos \epsilon + C \sin \epsilon \\ c = -B \sin \epsilon + C \cos \epsilon \end{array} \right\} \quad (12)$$

の関係で計算すればよい。ただし $\epsilon = 23^\circ 26' 21".448 = 23^\circ.4392911$ である。

ここまでくれば、あとは容易である。J2000.0 系に対する昇交点黄経 Ω 、軌道傾斜角 i は

$$\left. \begin{array}{l} \tan \Omega = -l/m \\ \cos i = n \end{array} \right\} \quad (13)$$

の関係から求めることができる。また、ここで得た i をつかって、近日点引数 ω は、

$$\sin \omega = c / \sin i \quad (14)$$

として計算できる。こうして得られた値は変換前と少ししか変わらないから、象限の決定に苦労することはない。なお、(12)式で求めた a, b は結果として不要であった。以上で換算は終了である。

これも実例をひとつやってみよう。

ふたご座流星群のある流星の軌道要素、

$$\left. \begin{array}{l} \Omega_0 = 261^\circ.82 \\ i_0 = 24^\circ.15 \\ \omega_0 = 325^\circ.00 \end{array} \right\}$$

を変換してみる。まず (5), (6) 式で、

$$\left. \begin{array}{l} l_0 = -0.4049644 \\ m_0 = 0.0582120 \\ n_0 = 0.9124775 \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} a_0 = -0.6346025 \\ b_0 = -0.7363503 \\ c_0 = -0.2346656 \end{array} \right\}$$

が計算できる。これを (7), (8) 式で赤道座標系に直せば、

$$\left. \begin{array}{l} L_0 = -0.4049644 \\ M_0 = -0.3096518 \\ N_0 = 0.8603020 \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} A_0 = -0.6346025 \\ B_0 = -0.5821860 \\ C_0 = -0.5082708 \end{array} \right\}$$

となる。

ついで、行列 S を使ってこれを J2000.0 系の値に変換する。その結果、

$$\left. \begin{array}{l} L = -0.4056511 \\ M = -0.3141842 \\ N = 0.8583330 \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} A = -0.6255761 \\ B = -0.5892319 \\ C = -0.5113318 \end{array} \right\}$$

が得られる。

これをさらに (11), (12)式で黄道座標系の方向余弦に直すと、

$$\left. \begin{array}{l} l = -0.4056511 \\ m = 0.0531669 \\ n = 0.9124804 \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} a = -0.6255761 \\ b = -0.7440058 \\ c = -0.2347548 \end{array} \right\}$$

になる。ここから、

$$\tan \Omega = 7.629763 \quad \cos i = 0.9124804$$

で、

$$\Omega = 262^\circ.533 \quad i = 24^\circ.150$$

が求められる。また、ここから、

$$\sin i = 0.4091204$$

であり、(14)式で、

$$\begin{aligned} \sin \omega &= -0.5738036 \\ \omega &= 324^\circ.984 \end{aligned}$$

が得られる。結果をまとめると、

$$\left. \begin{array}{l} \Omega = 262^\circ.53 \\ i = 24^\circ.15 \\ \omega = 324^\circ.98 \end{array} \right\}$$

である。

5. おわりに

以上のように、ここで私は分点の変更に対する輻射点位置、軌道要素の換算法を示した。こうして私はJ2000.0分点の使用をお勧めしたのであるが、それを実行するには、さきに述べたように、実はまだ不便な点がいくつもある。使い易い2000年分点用

の星図や星表が少ないことがその主な理由であるが、特に2000年分点に基づく観測用星図が不備であることが最大の問題点である。

現在はパーソナル・コンピューターが容易に使えるので、星の位置を換算したり、星図を描いたりすることは比較的簡単にできる。このあたりで、J2000年分点に対する、主要流星群の観測に便利な流星観測用星図を、新しく作ることを考えてもいい時期がきていると思うのであるが、どうであろうか。この紙面をかりて皆さんのご意見をお聞きしたい。

追記

一般に、黄道座標系で、B1950.0の方向余弦(l_0, m_0, n_0)をJ2000.0の方向余弦(l, m, n)に変換するには、 ϵ_0 、 ϵ による換算を含めたつぎの行列Tを直接に使った方が簡単である。すなわち、

$$\begin{pmatrix} l \\ m \\ n \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} l_0 \\ m_0 \\ n_0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

で

$$T = \begin{pmatrix} 0.99992568 & -0.01219172 & -0.00000773 \\ 0.01219172 & 0.99992567 & -0.00011344 \\ 0.00000911 & 0.00011333 & 0.99999999 \end{pmatrix} \quad (16)$$

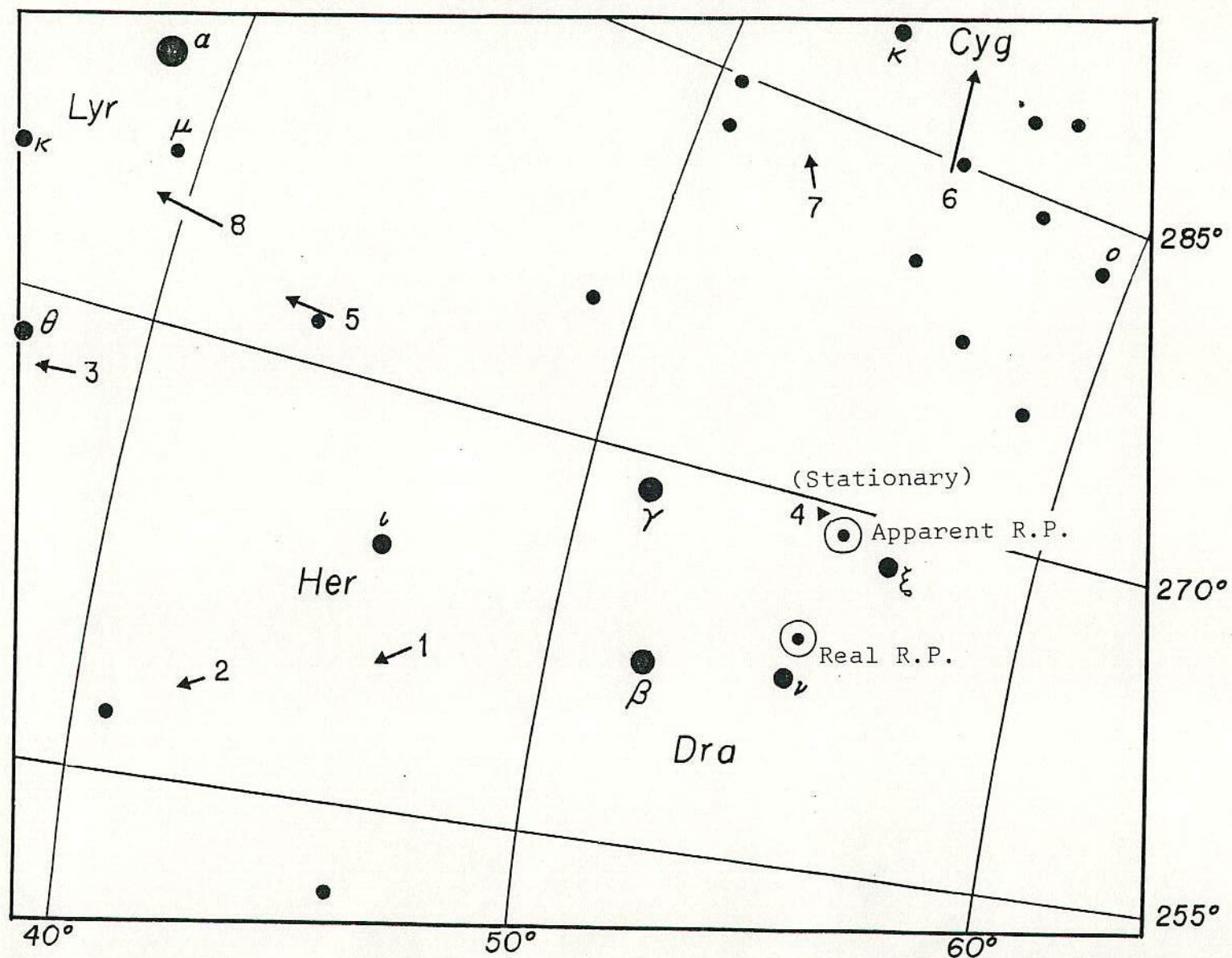
である。

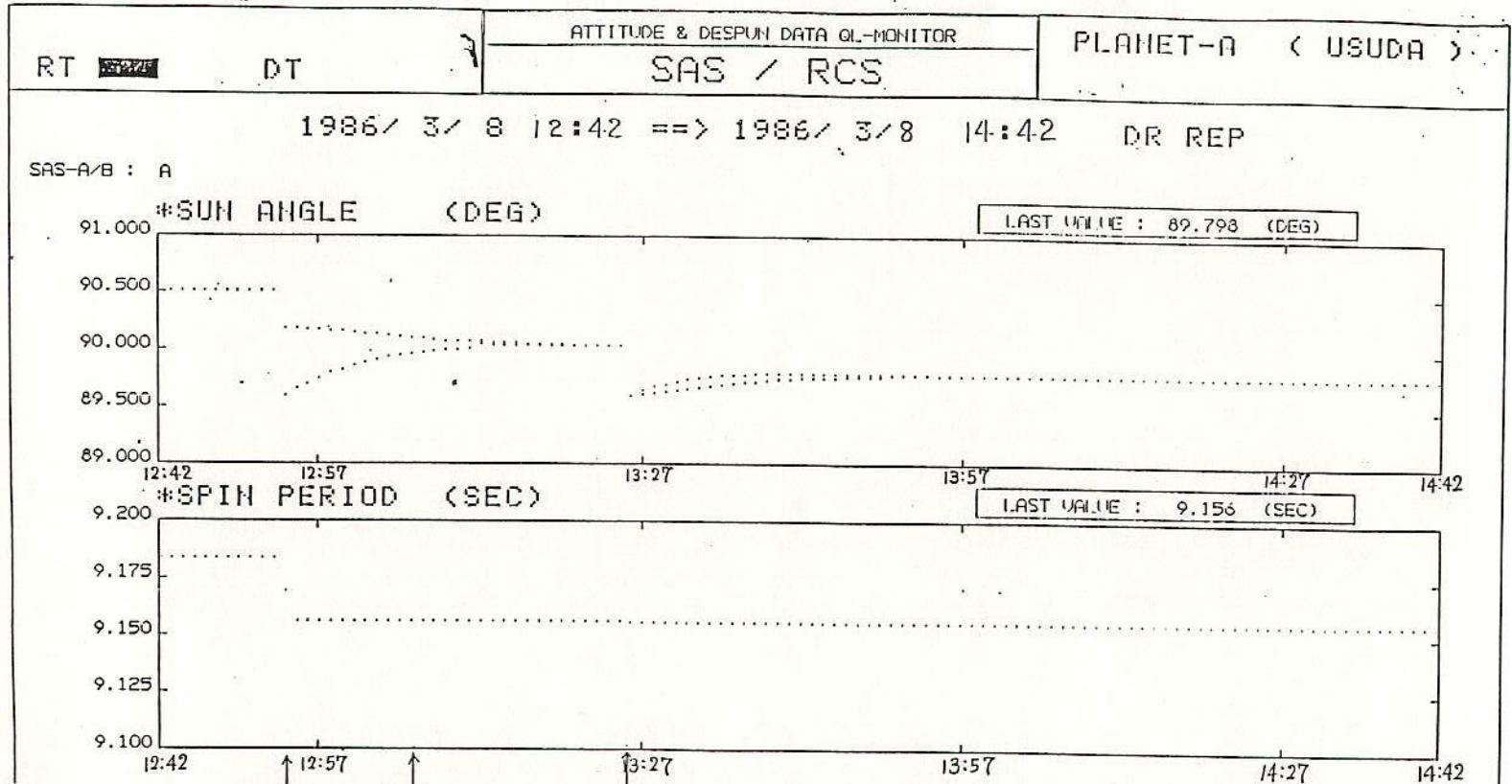
Table I
Data of recorded meteors

No.	Appearance time	mag.	Beginning point (J2000.0)		End point (J2000.0)		Path length	Duration time	Angular vel.	Remarks
			α	δ	α	δ				
1	10 ^h 40 ^m 02 ^s	1	262.25	46. ^o 70	261.58	46. ^o 10	0. ^o 76	0. ^s 17	4.5	
2	✓ 40 23	3	260.59	42.30	260.38	41.85	0.48	0.23	2.1	
3	19 ^h 41.03	3	268.67	38.33	268.88	37.54	0.81	0.30	2.7	
4	(JST) 46 03	1	269.11	55.28	269.21	55.30	--	0.30	--	stationary
5	46 33	2	272.07	43.47	272.33	42.72	0.77	0.37	2.1	
6	57 31	-1	284.37	55.94	288.45	55.51	2.42	0.97	2.4	
7	11 01 16	2	281.45	53.13	282.89	52.74	0.95	0.53	1.8	
8	23 04	2	274.74	40.51	275.34	39.35	1.25	0.50	2.5	

Radiant point	α	δ	σ		
	{ 266. ^o 81	54. ^o 62	0.72	(Apparent, Equal weight)	
	269.32	55.89	0.58	(Apparent, Unequal weight)	除4番
	265.15	55.32	0.38	(Real)	

東京天文台 SIT カメラ 視野 1985.10.8/9





初回衝突 最後予想時刻

12:54 13:06

姿勢変化 0.48°
スピントルク変化 0.027sec

初回衝突

13:26

姿勢変化 0.24°
スピントルク変化 0.001sec

Dust の重量 ~10μg

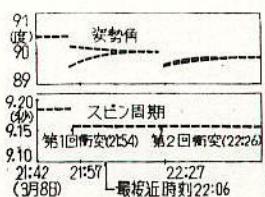
直径 ~0.2 mm (比重1とした時)

修正参考値

質量 ~0.002g

from MSS
MSS

1981 Apr 20 22h 15s



「すいせい」
日本のハレー「すいせい」星探査機としてはかなり大きくなりに二度衝突、グラリと撞れたが、故に近した八日午後十時過ぎ（日本時間）の前後で、ハレーのもの

「すいせい」
ハレー最接近前後2回
科学研究所が九日に行つたデータに成功した、といふ。

3-10

最接近時はハレーから見て日本が太陽の背後をいたため「すいせい」と共に見えなかつた。日本時間は、九日午前四時半、最接近直前を始めた。「すいせい」の状態を示すデータの中で、太陽方向に対する衛星の自転軸の角度（運動角）が一度から出だすイオンをじのえんことして、そのままでデータを収集してしまった。午後六時半で離れた時の二回にわたり、「すいせい」が撞れたことがわかつた。

二回とも運動装置が働き、撞時は三十分足らずでおさめられた。だが、この衝撃で運動角が〇・七度狂った。二回とも十分の二度の衝撃が「すいせい」の下の部分を衝撃したらしい。こんな小さななりで、も、秒速三三〇の速度が速度があつかるため、地上で走る場合、時速七十〇で逃げた強烈な衝撃があったのだといふ。

「すいせい」は最接近の前後に二回の方向転換装置によつて成功したと発表した。

「すいせい」は八日午後一時六分の最接近直前までハレーを取りまく水素濃度を観測、その後はイオンの観測を行つて、二回の方向転換装置によつて速度と方向を変えて地上的風の中ボールを賣いた時のように、左右に分かれて流れ、衝突の強さは時速數百キロ程度、硬式野球ボールが当たつたのとされたところでは、通常の五分ほど同じことなる。

3-11

「すいせい」が
太陽風を観測

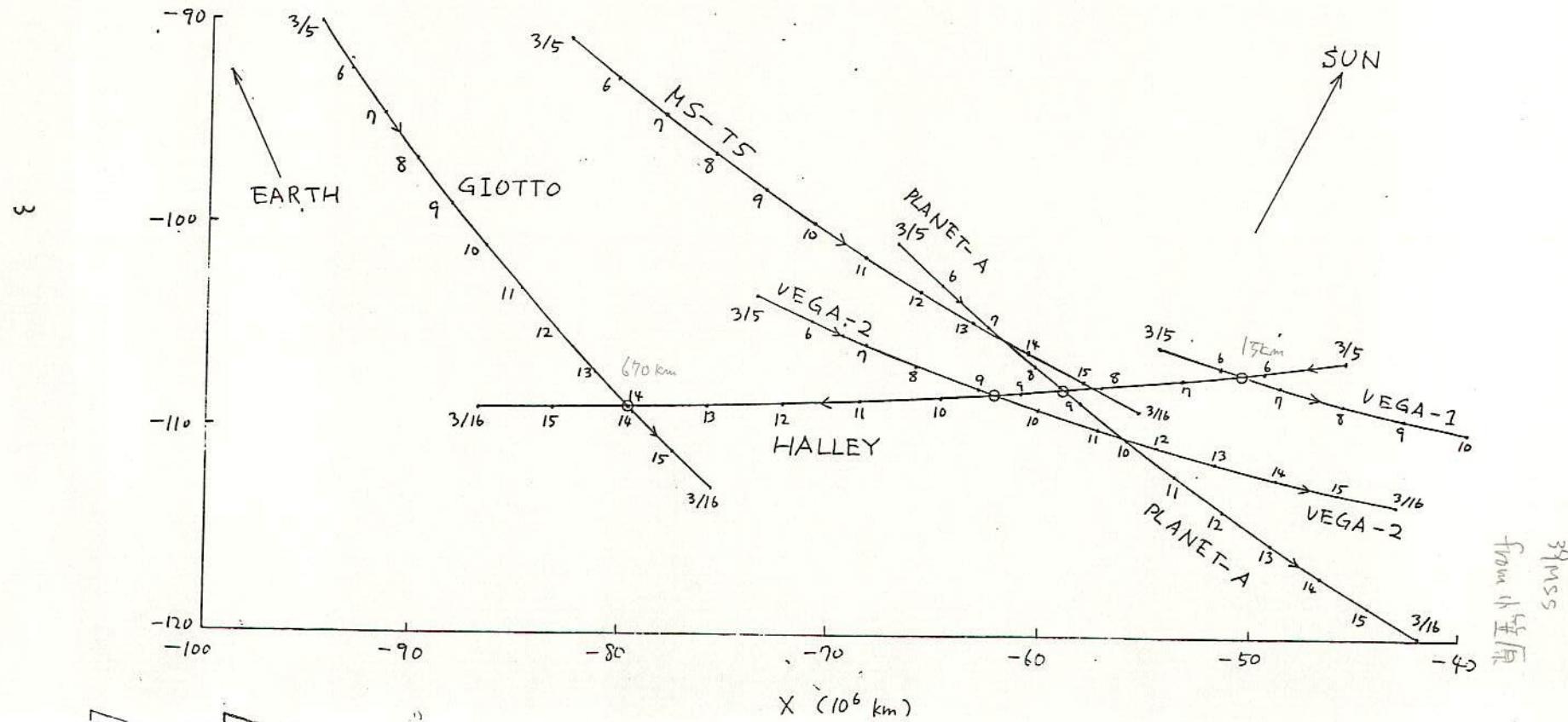
文部省宇宙科学研究所は、いた。ハレーは、また、ハレーから約四十万キロ以内では、太陽風に混じって、「すいせい」の星探査機がハレーに最も近づいた。これらのイオンが何であるかは解析中だが、水がオノ化したものや、さらにそれに水素が加わったものが中心といふ。ハレーからのイオンの量が減速されている様子をとらえることに成功したと発表した。

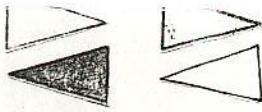
「すいせい」は八日午後一時六分の最接近直前までハレーが、その後の詳しい計算で、その後の重きを正確に推定した。これは、太陽風がハレーによって速度と方向を変え、地上の風の中ボールを賣いた時のように、左右に分かれて流れ、衝突の強さは時速數百キロ程度、硬式野球ボールが当たつたのとされたところでは、通常の五分ほど同じことなる。

TRAJECTORIES OF THE HALLEY EXPLORERS

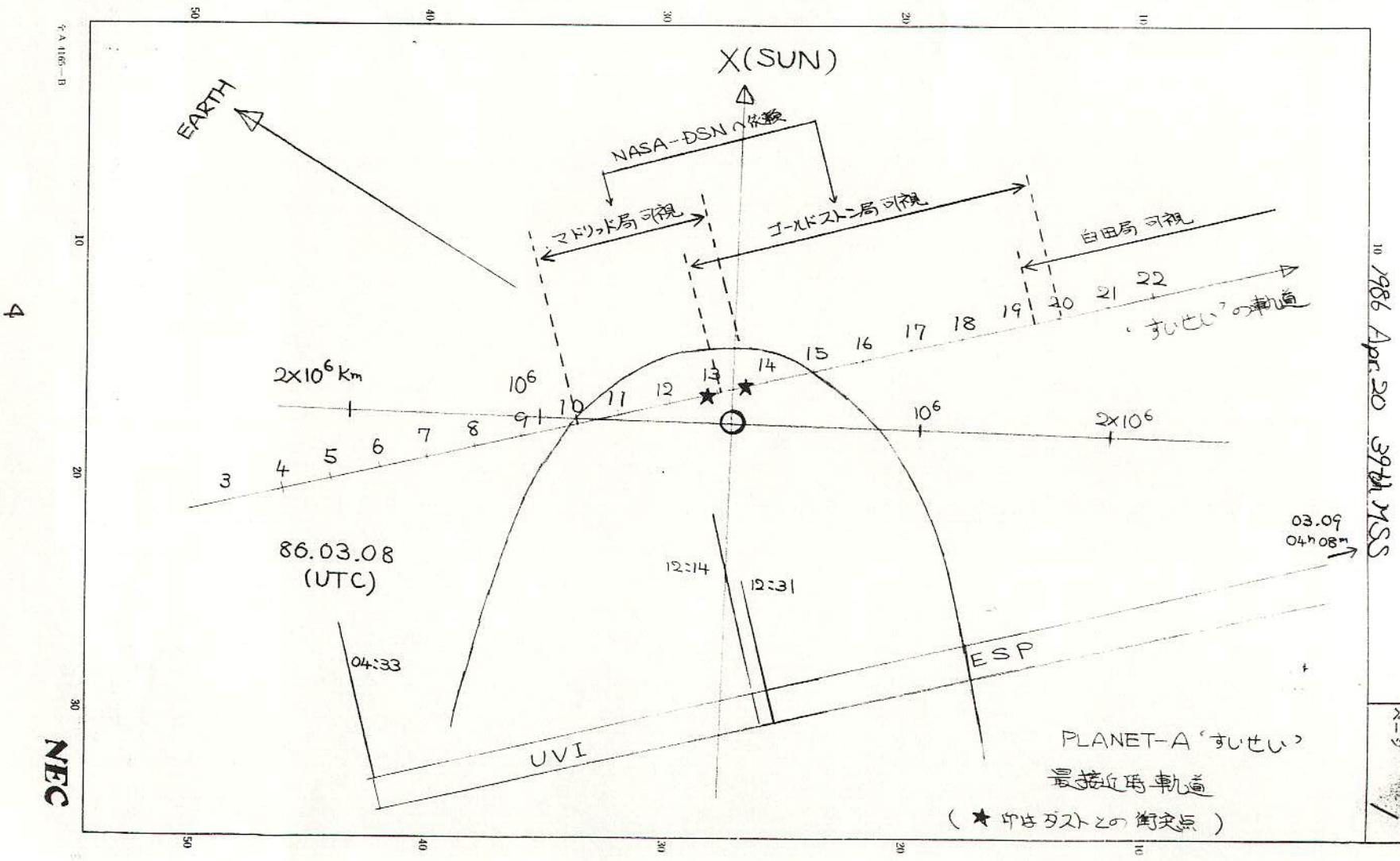
1986/3/5 — 1986/3/16

$$2 \times 10^6 \text{ km}$$





(宇宙科学研究所提供)



1985 Giacobini shower and comet Giacobini-Zinner part I.

H.Onishi 39th M.S.S.

Apr. 20, 1986

	1) Photo.	2) 1972d	1 - "	1) 天文回報 No. 523 2) 月刊天文 1986. 1
Ω	194.6	195.1314	-0.53	
i	30.0	31.7092	-1.72	
w	170.8	171.9065	-1.11	
e	0.611	0.715093	-0.1041	
a	2.56 a.u.	3.489 a.u.	-0.929 a.u.	

椭円軌道の軌道要素

 $(r_x, r_y, r_z, v_x, v_y, v_z)$: 日心黄道座標系

$A = r_y \cdot v_z - r_z \cdot v_y$

$dA = r_y \cdot dv_z - v_z \cdot dr_y$

$B = r_z \cdot v_x - r_x \cdot v_z$

$dB = r_z \cdot dv_x - v_x \cdot dr_z$

$C = r_x \cdot v_y - r_y \cdot v_x$

$dC = r_x \cdot dv_y - v_y \cdot dr_x$

$H = A^2 + B^2 + C^2$

$dH = 2 \cdot G \cdot dv_z + 2 \cdot F \cdot dv_y + 2 \cdot E \cdot dv_x$

$R = (r_x^2 + r_y^2 + r_z^2)^{1/2}$

$dR = 0$

$V = (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)^{1/2}$

$dV = V^{-1} \cdot (v_x \cdot dv_x + v_y \cdot dv_y + v_z \cdot dv_z)$

\Downarrow
 $a = \frac{1}{2/R - V^2}$

$e = \sqrt{1 - H/a}$

where $G = (r_x^2 + r_y^2) v_z - (r_x v_x + r_y v_y) r_z$

$F = (r_x^2 + r_z^2) v_y - (r_x v_x + r_z v_z) r_y$

$E = (r_y^2 + r_z^2) v_x - (r_y v_y + r_z v_z) r_x$

$i = \cos^{-1}(C/\sqrt{H})$

$\Omega = \tan^{-1}(-A/B)$

	dV_x	dV_y	dV_z
da	v_x/a^2	v_y/a^2	v_z/a^2
de	$\frac{1}{e \cdot a} \left(\frac{H \cdot v_x}{2a^3} - 2E \right)$	$\frac{1}{e \cdot a} \left(\frac{H \cdot v_y}{2a^3} - 2F \right)$	$\frac{1}{e \cdot a} \left(\frac{H \cdot v_z}{2a^3} - 2G \right)$
di	$\frac{1}{\sqrt{A^2+B^2}} \left(\frac{C \cdot E}{H} + r_3 \right)$	$\frac{1}{\sqrt{A^2+B^2}} \left(\frac{C \cdot F}{H} - r_x \right)$	$\frac{1}{\sqrt{A^2+B^2}} \cdot \frac{CG}{H}$
$d\Omega$	$\frac{1}{A^2+B^2} \cdot A r_z$	$\frac{1}{A^2+B^2} B r_z$	$\frac{-1}{A^2+B^2} (A r_x + B r_y)$

	$dV_x/m \cdot s^{-1}$	$dV_y/m \cdot s^{-1}$	$dV_z/m \cdot s^{-1}$
$da/a.u.$	-3.04×10^{-7}	3.08×10^{-6}	-1.88×10^{-6}
de	2.90×10^{-6}	-2.94×10^{-5}	1.80×10^{-5}
di/deg	1.99×10^{-4}	-7.36×10^{-4}	-1.23×10^{-3}
$d\Omega/deg$	-5.38×10^{-5}	1.99×10^{-4}	3.34×10^{-4}

これらの値は、 $\angle - " - 1.72$ を説明するためには小さすぎる。

example for $i = 6^\circ - 1.72$. $dV_z \sim 10^3 m/s$

④ \angle Photo. の誤差範囲

④ 木星 etc. の運動. Poynting-robertson effect.

→ 数値積分による追跡は可能か。

1. 13^h25 自己紹介

2. 14^h10 "Aqr オーストラリア遠征の話 重野

最初に述べたように、日の出1h前のRP高度が東京29°7' + 47°7"

特にD等級以上の中程の流星が激増するようだと話す。

3. 14^h35 ニューカレドニア流星と母彗星 Part I 大西洋

1985.10.8/9 & 11の同時流星の軌道要素と母彗星の軌道要素の
違いから、特にa, e, i, Ζの違いに注目し、母彗星からの放出速度の
推定を行った。木星の擾動等を考えないと误差が大きすぎたが、結果は
出方だった。次回までに数値シミュレーションを行いたい。

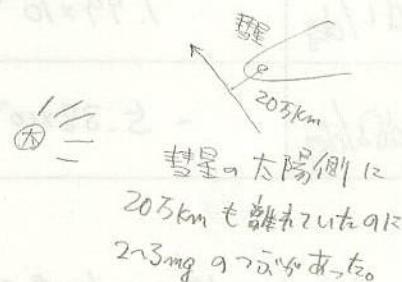
4. 15^h05 散在流星の年間変化 渡辺美和

1968年1月～1986年1月の筆者の観測の中から選び出した1307個の散在
流星から月別の年周変化を調べた。年周変化はたいへんあふらうが、1時間
当たりの流星数には相当ばらつきがあり、少ない月があると言つて必ずしも少ない
ときばかりでは無い事だ。

5. 15^h30 文献

6. 16^h25 11c-彗星探査機に衝突した時の店

2~3 mg程度かつてが73km/sで2度ぶつかった。



7. 16^h45 KPMからお知らせ

6月1日 総会

6月8日 東 集会

6月15日 東 オリエンテーション

6月22日 龍岡

8月22~24日(金~日) 流星合戦

次回 7月6日

軌道計算ファイルの標準化について

87/01/11 MSS

KPM 白川 健一

瀬戸内ネットなどKPM以外で組織的に流星軌道計算を行う所が出てきました。そこで双方でファイルを共有できるようにするために、ファイルの標準化の実現をすることになりました。以下にその方針と原案の一部を示します。

方針

- 1) 軌道計算の入口と出口である<单一流星><軌道計算結果>について標準化を行う。
- 2) 使用目的を明確にし内容の再検討を行う。
- 3) 扱い易い、柔軟なファイル構造を実現する。

<軌道計算結果>の内容

- 1) 出現時刻と共に太陽黄経も示す。（軌道要素を見た時分かりやすい。）
- 2) 計算に用いた乾板データとして、乾板誤差、流星の直線性、大円極とその誤差楕円を加える。
- 3) 対地軌道に、発光・消滅点、速さ の他に突入角、経路長を加える。
(天頂引力や、大気減速補正の影響を検定する時の参考になる。)
- 4) 軌道=位置、速度 という考え方を前面に出し直角座標の3成分で表す。
(シミュレーションや統計的に扱う時便利。)
- 5) 速度については、方向の誤差を放射点の誤差楕円で示し、速さの誤差も示す。
(絶対に必要。)
- 6) 軌道要素について双曲線軌道の場合、半主軸長を表示する。

<单一流星>の内容

内容的には、今までのもので問題無いと考えている。

ファイル構造について

- 1) テキストファイルにする。（分かりやすく、扱いやすい）
- 2) データベースとして機能し得る様なものにする。
- 3) ファイル中に識別子を設ける。
(数字の列が何を意味するかは、データ自身が教えてくれる。)
- 4) データの区切り記号として 空白、TAB、CR、",," を使う。
(データが文字列型の場合、空白とTABは無効)
- 5) 各行のセミコロン (";) 以後行末までを備考とする。

轨道計算結果サマリー (内容)

基礎データ 同時流星 I D N o
 出現時刻
 太陽黄経
 乾板数 {乾板 I D、観測者、
 乾板誤差、流星リニアリティー、流星大円極}

天球軌道 A R P

対地軌道 発光点、消滅点、速さ
 突入角、経路長
 位置、速度 [J系]
 位置、速度 [J系] (大気減速補正)

地心軌道 位置、速度 [地心赤道座標系] (日周運動補正)
 位置、速度 [地心赤道座標系]、T R P (天頂引力補正)

日心軌道 位置、速度 [日心赤道座標系]、R R P (年周運動補正)
 位置、速度 [日心黄道座標系]

軌道要素 太陽黄経、軌道傾斜角、近日点引数、近日点距離、
 離心率、長半径 (又は半主軸長)、周期

備考

観測者 ::= 観測者名、観測地
 観測地 ::= 観測地名、東経、北緯、高度
 流星大円極 ::= 赤経、赤緯、 σRA 、 σDEC 、 σRA_DEC
 発光点 ::= 東経、北緯、高度
 消滅点 ::= 東経、北緯、高度
 位置 ::= X、Y、Z
 速度 ::= V x、V y、V z、|V|
 * R P ::= 赤経、赤緯、 σRA 、 σDEC 、 σRA_DEC
 周期 = 0 (双曲線軌道)、> 0 (橢円軌道)

1η Agr, 1Ori 軌道要素の補足

MSC 44

1987. 7/15 MSC.

大西洋

	e	$\theta/\text{A.u.}$	ω/deg	Ω/deg	i/deg	$\omega - \Omega$	mag.	
A76003	1.8368	0.733	53.58	28	166.0	25.6	0	
A77002	0.9672	0.611	77.66	26.9	163.4	50.8	?	
A77003	0.8828	0.568	85.11	27.8	162.7	57.3	?	
A77040	0.9058	0.539	87.97	27.9	163.4	60.1	?	↙ Ori
A77050	0.9619	0.584	80.93	27.8	162.8	53.1	2	
A82003	0.9757	0.581	80.98	28.6	164.5	54.4	-4~-6	
Halley (1982)	0.967	0.587	111.8	58.1	162.2	53.7		comet H.
8701	1.019	0.633	105.2	43.3	163.8	61.9	2	
8702	0.912	0.565	94.5	43.3	163.3	51.2	2	
A82001	0.989	0.575	97.8	43.5	164	54.3	1~-2	
HV11862	0.958	0.560	95.4	42.4	163.5	58.1	?	↙ η Agr
TV0615	1.11	0.61	104.9	45.2	167.3	59.7	3.6	
TV0628	0.89	0.52	87.7	45.3	165.0	42.4.	5.0	

ORBITAL ELEMENTS OF FIREBALLS OF THE EUROPEAN NETWORK (Eq. 1950.0)

DATE	GMT	α	δ	Vg	a	e	a	ω	Ω	i
76 3 2	1912	274	70.6	12.15	0.980	0.130	1.127	154	341.977	22.4
77 6 1	2146	257.4	- 21.3	24.46	0.456	0.751	1.83	286.4	71.01	1.5
77 6 12	2350	137	59	8.8	0.968	0.38	1.57	146	81.476	10
77 9 14	1909	6	- 2	28	0.35	0.82	1.9	117	351.461	5
77 10 31	1826	77	51	40	0.25	0.81	1.3	313	217.837	73
78 4 8	2225	202.1	7.0	25.0	0.585	0.820	3.25	265.6	18.338	12.2
78 5 4	1954	173	46	(11)	1.00	0.69	3.2	189	43.605	10.6
79 1 6	2244	111.21	20.52	24.9	0.494	0.790	2.35	97.22	105.787	1.29
79 1 8	0343.6	233.1	48.8	41.4	0.9784	0.72	3.5	171.1	286.8584	71.6
79 5 27	2039	220.6	- 8.8	11.6	0.891	0.52	1.86	230	65.64	2.3
79 6 22	2201	264.1	- 28.8	21.6	0.649	0.781	2.96	79.9	270.416	3.7
79 10 19	2032	7.1	29.2	18	0.73	0.64	2.0	252	205.439	13 - - - Bieda
79 10 20	182551	316.1	39.8	14.0	0.9657	0.672	2.94	202.3	206.349	17.2 Comet
79 11 16	190953	68.24	24.58	31.33	0.262	0.873	2.06	305.28	233.369	3.89
80 1 19	0047	285.9	49.7	21.92	0.939	0.620	2.47	151.6	297.673	33.8
80 1 24	0029	139.7	15.7	32.03	0.287	0.885	2.50	304 or 124	300 or 120	0 ~ 0
80 2 25	2353	122	- 38	5.2	0.961	0.122	1.095	43	156.136	8.0
80 6 11	2125	236	- 20	13.3	0.86	0.59	2.1	54	259.72	0.2
80 10 3	23 ~ 24	341	- 2	15.2	0.86	0.8	4.0	227	190.45	2.0
80 11 18	011332	153.8	21.86	70.8	0.9845	0.92	13 ± 3	172.7	235.4483	162.2
80 12 28	221814	99	15	19.3	0.59	0.63	1.6	91	96.98	5
81 1 28	225819	138.5	14.1	26.4	0.430	0.793	2.08	105.8	128.618	1.8
81 1 29	182530	346.7	0.3	4.01	0.9561	0.225	1.234	147.4	309.11	0.68
81 1 30	223220	150.1	70.8	11.81	0.903	0.327	1.341	228.6	310.532	16.6
81 4 12	000457	342.7	70.14	20.5	0.939	0.70	3.1	147.8	21.579	29.6
81 5 6	2103	188.6	- 9.25	13.17	0.918	0.70	3.1	38.6	225.702	1.8
81 7 5	001140	289.7	- 7.8	27.79	0.448	0.835	2.72	283.18	102.478	14.93
81 8 6	010923	283.7	61.3	23.73	1.0024	0.590	2.45	194.4	133.0624	39.3
81 9 7	191700	45.1	39.6	64.5	0.738	0.98	0.03 ⁻¹	243	164.6296	138
81 11 3	180730	53	18	31.0	0.30	0.88	2.5	120 or 300	40.9 or 220.9	2 ~ 4
82 2 23	2134	168	7	33.6	0.3	(0.88)			300 or 120	334.5 or 154.5 (0)
82 3 2	2220	354.7	67.0	14.12	0.9768	0.656	2.84	164.4	341.570	18.5
82 3 23	1903	147.7	0.1	12.96	0.908	0.670	2.75	39.0	182.3700	4.25
82 3 23	213644	184.9	- 3.2	21.52	0.547	0.680	1.708	96.7	182.440	0.77
82 8 19	020957	352.49	20.28	50.4	0.198	1.0	0.05 ⁻¹	306.9	145.3364	84.7
82 10 20	200748	37.12	10.8	27.7	0.366	0.824	2.07	113.6	26.688	4.2
82 12 19	211503	313	51	13.7	0.983	0.62	2.6	175.5	267.187	18.7
82 12 22	0452	110	25.1	23.0	0.337	0.696	1.11	307	269.48	3.0
83 1 13	024103	122.1	- 3.0	30.5	0.420	0.83	2.5	105.1	111.892	26.2
83 4 13	2105	173.0	5.8	15.08	0.89	0.80	4.0	221.0	23.03	1.0
83 10 9	185521	320.91	4.06	10.079	0.9603	0.6355	2.635	205.74	195.4287	4.88
83 10 27	173437	288.1	49.73	15.29	0.9931	0.605	2.51	183.4	213.2557	22.4
83 12 4	170948	40.9	18.3	12.3	0.871	0.621	2.30	226.2	251.20	0.8
83 12 4	231235	76.34	19.39	24.9	0.479	0.787	2.25	99.52	71.8525	3.06
84 3 9	2220	159.4	32.37	14.88	0.849	0.631	2.30	231.3	349.0704	9.04
84 8 3	210553	230.97	3.81	6.57	1.0135	0.443	1.821	184.78	131.2512	3.92
85 2 3	224130	141.8	- 35.9	25.3	0.633	0.497	1.26	94	134.5858	39.4
85 2 18	0330	181.0	50.8	14.7	0.784	0.348	1.20	258	328.940	19.8
85 8 13	2332	311.8	- 11.8	10.35	0.820	0.398	1.362	71.2	320.1	0.27
85 8 16	231405	315.0	9.4	21.8	0.672	0.74	2.6	257.7	143.5265	17.0
85 8 20	223434	293.55	- 5.79	10.700	0.9225	0.5467	2.035	221.33	147.3678	4.72
85 9 21	1930 ± 40	296	55.0	24.9	0.974	0.94	0.07 ⁻¹	200	178.26	35.7
85 10 20	175333	332.95	- 1.89	10.16	0.9592	0.6748	2.949	204.63	206.7328	2.314

```
*****
*      A L B : 天文計算ライブラリー      *
*      ( for MS-C Ver3.00.17 )      *
* Ver 0.0    4th Jul. 1987 by S.Kenichi *
*****
```

関数一覧

時刻系に関するもの

ΔT :	double alb_dletat(y)	* [sec]
ET-UT	double y	: 西暦 [year]
MJD :	double alb_mjd(y, m, d, h)	* [day]
準ユリウス日	double y, m, d, h	: 年、月、日 (JST) : 時 (JST)
ET : 暦表時	double alb_et(h, dt) double h, dt	* [h] : 時刻(JST) [h] : ΔT [s]
T50 : 時刻定数	double alb_tc5(et, mjd) double et mjd	* [100BY] : 暦表時 [h] : MJD (世界時0時の値) [day]

分点変換・恒星視位置

分点変換準備	void alb_pre_nuu(mjd, et)	*
	double mjd, et	: [day], [h]
1950.0 -> 平位	void alb_fix_men(sv, dv)	
平位 -> 真位置	void alb_men_tru(sv, dv)	
真位置 -> 視位置	void alb_tru_apr(sv, dv)	
1950.0 -> 視位置	void alb_fix_apr(sv, dv)	
視位置 -> 1950.0	void alb_apr_fix(sv, dv)	
真分点 -> 1950.0	void alb_tru_fix(sv, dv) double sv[] double dv[]	: 入力ベクトル名 : 出力ベクトル名
歳差要素計算	void alb_pre_ele(t5, &z0, &th, &z) double t5 double *z0, *th, *z	* : T50 [100BY] : ξ_0, θ, Z [rad]
章動要素	void alb_nuu_ele(t5, dp, de, el)	*
	double t5, double *dp, *de, *el	: T50 [100BY] : $\Delta\psi, \Delta\varepsilon, \varepsilon_1$ [rad]
黄経変換	double alb_sun_lm(l5, t5)	* [rad]
1950.0->平均分点	double l5 t5	: 1950.0 分点の黄経 [rad] : 時刻定数 T50 [100BY]

その他

太陽位置	double alb_sun_pos(mjd, l, r, v) *	
	double mjd,	: ユリウス日(日の小数無効)
	*l ,	: 黄経 [rad]
	*r ,	: 動径 [au]
	v[]	: 赤道座標 [au]
大円極計算	void alb_gcpol(n, sp, dp)	*
	int n	: 方向余弦の数
	struct pole_ sp[]	: 極構造体の配列名
	struct pole_ *dp	: 極構造体へのポインタ
3 D 座標回転	void alb_tr3d(sv, mm, dv)	*
	double sv[]	: ベクトル名
	mm[]	: 変換行列名
	double dv[]	: ベクトル名

簡単な流星の軌道計算

東大地震研究所 長沢 工

I. 前提

- { a. 流星は地心の位置を通過したと考え、大気減速、天頂引力の影響は考えない。
- b. 地球は円軌道で等速であるとし、地球回転は考えない。

II. 必要なデータ

流星の輻射点位置 (α, δ)、流星の速さ v (対地速度),
観測時の太陽黄経 λ 。 (ただしこれだけ)

III. 計算

(1) 輻射点 (α, δ) を黄経、黄緯 (λ, β) に換算。

$$\begin{aligned} l_g &= \cos \delta \cos \alpha \\ m_g &= \cos \delta \sin \alpha \\ m_g &= \sin \delta \end{aligned} \quad \left. \begin{aligned} l_c &= \cos \beta \cos \lambda \\ m_c &= \cos \beta \sin \lambda \\ m_c &= \sin \beta \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{pmatrix} l_c \\ m_c \\ m_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon & \sin \varepsilon \\ 0 & -\sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_g \\ m_g \\ m_g \end{pmatrix} \quad \left. \begin{aligned} l_c &= l_g \\ m_c &= m_g \cos \varepsilon + m_g \sin \varepsilon \\ m_c &= -m_g \sin \varepsilon + m_g \cos \varepsilon \end{aligned} \right\}$$

$$\varepsilon = 23^\circ 43' 93'' \quad (\text{黄道傾斜角})$$

$$\tan \lambda = m_c / l_c \quad \left\{ \begin{array}{ll} l_c > 0^{\circ} & -90^{\circ} < \lambda < 90^{\circ} \\ l_c < 0^{\circ} & 90^{\circ} < \lambda < 270^{\circ} \end{array} \right.$$

$$\sin \beta = m_c$$

(λ, β) は求めなくてはいけない、 (l_c, m_c, n_c) がわかればよい。

$$\begin{aligned} m_c > 0 &\cdots \text{流星は降交点出現} \\ m_c < 0 &\cdots \text{'' 昇交点出現} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{二つとはつきり区別する} \\ \text{二つとはつきり区別する} \end{array} \right\}$$

(2) 日心黄道系での流星(地球)の位置 (x, y, z)

$$\begin{aligned} x &= -r_0 \cos \lambda_0 \\ y &= -r_0 \sin \lambda_0 \\ z &= 0 \end{aligned} \quad r_0 = 1.4959787 \times 10^8 \text{ km}$$

(地球軌道半径)

(3) 日心黄道系での流星の速度 ($\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$)

MSS-049 2.

地心黄道系での流星の速度

$$\begin{aligned} v_x' &= -v_{lc} \\ v_y' &= -v_{mc} \\ v_z' &= -v_{nc} \end{aligned} \quad \left. \right\}$$

日心黄道系での 地球の速度

$$v_e = 29.7847 \text{ km/s}$$

(地球の速さ)

$$\begin{aligned} e_x &= v_e \sin \lambda_0 \\ e_y &= -v_e \cos \lambda_0 \\ e_z &= 0 \end{aligned} \quad \left. \right\}$$

572

$$\begin{aligned} \dot{x} &= e_x + v_x' = v_e \sin \lambda_0 - v_{lc} \\ \dot{y} &= e_y + v_y' = -v_e \cos \lambda_0 - v_{mc} \\ \dot{z} &= e_z + v_z' = -v_{nc} \end{aligned} \quad \left. \right\}$$

(4) 軌道要素の計算

$$\begin{aligned} A &= y\dot{z} - z\dot{y} \\ B &= (z\dot{x}) - x\dot{z} \\ C &= x\dot{y} - y\dot{x} \\ D &= x\dot{x} + y\dot{y} + (z\dot{z}) \end{aligned} \quad \left. \right\} \begin{array}{l} \text{をよず計算} \\ () \text{はゼロ} \end{array}$$

$$\begin{aligned} h^2 &= A^2 + B^2 + C^2 \\ v^2 &= \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 \end{aligned}$$

$$\text{長半径 } a: \quad \frac{1}{a} = \frac{2}{r_0} - \frac{v^2}{\mu} \quad \text{から計算} \quad (\text{日心引力定数})$$

(a は天文単位で知りたいときは r_0 で割ればいい)

$$\text{離心率 } e: \quad 1 - e^2 = \frac{h^2}{\mu a} \quad \text{から計算}$$

$$\text{近日点距離 } q: \quad q = a(1 - e)$$

$$\text{軌道傾斜 } i: \quad \cos i = \frac{C}{h} \quad \text{から計算}$$

昇交点出現

降交点出現

$$\text{昇交点黄経 } \Omega: \quad \Omega = \lambda_0 \pm 180^\circ$$

$$\Omega = \lambda_0$$

$$\cos \omega = \frac{1}{e} \left(1 - \frac{h^2}{\mu r_0} \right)$$

$$\text{近日点引数 } \omega: \quad \cos \omega = \frac{1}{e} \left(\frac{h^2}{\mu r_0} - 1 \right)$$

$$D > 0 \quad 0^\circ < \omega < 180^\circ$$

$$D < 0 \quad 180^\circ < \omega < 360^\circ$$

$$D < 0 \quad 0^\circ < \omega < 180^\circ$$

$$D > 0 \quad 180^\circ < \omega < 360^\circ$$

$$D = 0 \quad \begin{cases} a > r_0 & \omega = 0^\circ \\ a < r_0 & \omega = 180^\circ \end{cases}$$

$$D = 0 \quad \begin{cases} a > r_0 & \omega = 180^\circ \\ a < r_0 & \omega = 0^\circ \end{cases}$$

周期 P:

$$a \text{ 天文単位で表す} \quad P(\text{年}) = \sqrt{a^3}$$

計算例

しぶんざ群

α	230°	
δ	49°	
v	43.1 km/s	
λ_0	283°	
l_x	-0.421707	
m_y	-0.502570	
m_z	0.754710	
l_c	-0.421707	
m_c	-0.160893	
m_e	0.892344	
	(降交点出現)	
x	-0.336522×10^8 km	
y	1.457637 "	
z	0 "	
v'_x	18.1756 km/s	
v'_y	6.9345 "	
v'_z	-38.4600 "	
e_x	-29.0213 "	
e_y	-6.7001 "	
e_z	0 "	
\dot{x}	-10.8458 "	
\dot{y}	0.2344 "	
\dot{z}	-38.4600 "	
A	-56.0607×10^8 km ² /s	
B	-12.9426 "	
C	15.7303 "	
D	3.9915 "	
h^2	35.5576×10^{18} km ⁴ /s ²	
H	5.96470×10^9 km ² /s	
v^2	1596.86 km ² /s ²	
a	5.001 A.U.	
e	0.8010	
θ	0.995 A.U.	
ι	74°.71	
Ω	283°	
ω	171°.39	
P	11.18 年	

オリオン群

	92°	
	17°	
	66.0 km/s	
	208°	
	-0.033375	
	0.955722	
	0.292372	
	-0.033375	
	0.993157	
	-0.111919	
	(昇交点出現)	
	1.320871×10^8 km	
	0.702319 "	
	0 "	"
	2.2028 km/s	
	-65.5484 "	
	7.3866 "	
	-13.9831 "	
	26.2983 "	
	0 "	"
	-11.7803 "	
	-39.2500 "	
	7.3866 "	
	5.1878×10^8 km ² /s	
	-9.7568 "	
	-43.5706 "	
	-43.1264 "	
	20.2051×10^{18} km ⁴ /s ²	
	4.49501×10^9 km ² /s	
	1733.90 km ² /s ²	
	21.984 A.U.	
	0.9766	
	0.515 A.U.	
	165°.77	
	28°	
	88°.96	
	103.08 年	

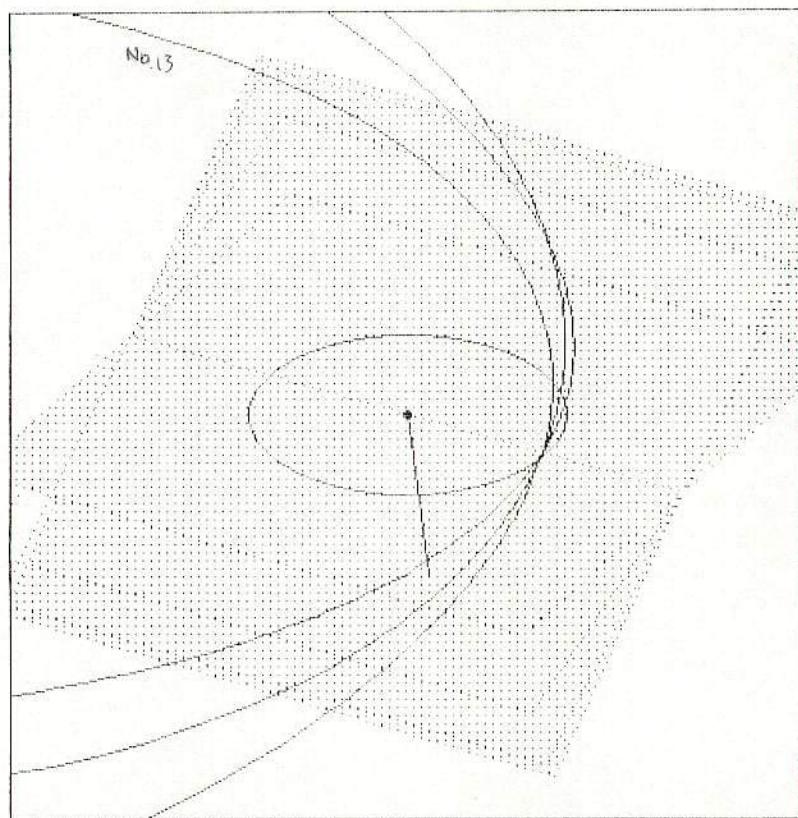
49 MSS

from 大垣

1985-11-18/19の3個の写真同時流星 村山 × 大垣

TN No.	ω (1950)	Ω (1950)	i (1950)	e	q (AU)	V_∞ (km/s)	Cor.R.P.(1950)	α	δ	Shower	KPM No.
13	174°6	235°9	162°5	0.919	0.986	71.9	153°68	+21°78	Leonid	8516	
14	157.9	236.0	147.4	0.886	0.954	69.1	148.94	+32.46	Nov.LMi?	8517	1.0
15	175.7	236.0	143.1	0.873	0.987	68.6	158.28	+32.19	Nov.LMi?	8518	1.5 <small>new</small>

詳しくは、Tokyo Meteor Network Rep.(1988) No.4,1.参照。



東大地震研究所 長沢工

1.はじめに

二つの観測点の位置がすでに決まっているとき、どの向きにカメラを向ければ軌道計算に都合がいいか（流星群と観測する場合と想定）。
重要なのは ④.速度の決定、⑤.位置の決定であり、これぞれについて考える。

2.速度の決定

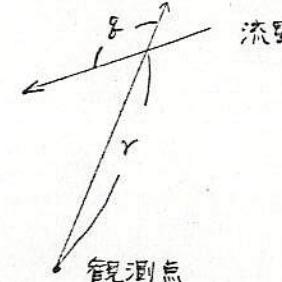
精度を高めると、切断点の見かけの間隔（天球上の角度）をなるべく大きくする必要がある。そのためには

- (1) 流星をなるべく横から見る
- (2) 流星をなるべく近くで見る

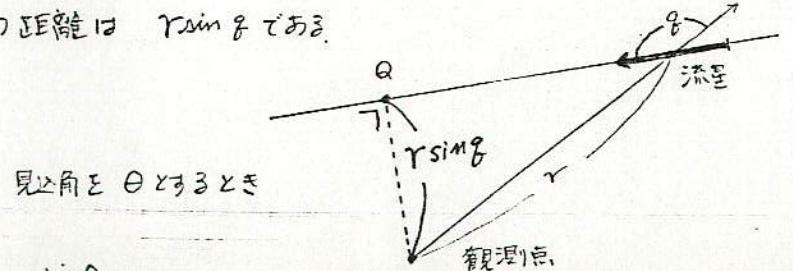
これが条件になると、観測方向と流星進行方向とのなす角を θ 、流星までの距離を r とすると

$$\frac{\sin \theta}{r}$$

とでるだけ大きくなるといい

3.位置の決定

流星位置を精度よく決めるには、二つの観測点からの見込角をなるべく 90° に近づけるとともに、やはり流星をなるべく横から見た方がいい。流星径路の延長で観測点からの観測方向と直交する点を P とすると、 P から観測点までの距離は $r \sin \theta$ である。



見込角を θ とするとき

$$\frac{\sin \theta}{r \sin \theta}$$

とでるだけ大きくなるといい

4.現実の計算法

観測点 A, B に対して 視線方向と流星進行方向とのなす角をそれぞれ θ_A, θ_B とし、流星までの距離を r_A, r_B とする。こうすると、空間上的一点 P_i に対する

$$\frac{\sin \theta_A}{r_A}, \frac{\sin \theta_B}{r_B}, \frac{\sin \theta}{r_A \sin \theta_A}, \frac{\sin \theta}{r_B \sin \theta_B}$$

と 4つの量の計算ができる。一般にこれを 2つ 1つ

$$\left(\frac{\sin \theta_A}{r_A}\right)^2, \left(\frac{\sin \theta_B}{r_B}\right)^2, \left(\frac{\sin \theta}{r_A \sin \theta_A}\right)^2, \left(\frac{\sin \theta}{r_B \sin \theta_B}\right)^2$$

を計算する方が都合がいい。このどれかが小さくなる方がよい。この4個のうち最小のものを S_i とする。（時刻を決めれば、観測点の位置から流星進行方向を計算できる）。地上 100 km の高さでいくつもの点 P_1, P_2, \dots, P_m について S_1, S_2, \dots, S_m を計算し、 S_i がもっとも大きくなる点をさがす。この点がカメラを向けるもの最も適当な点である。

実際の計算に当たっては 200×200 km の範囲を 10 km メッシュで計算して S_i を求めて、大きな点をさがし、つぎにその点の周囲の 20×20 km の範囲を 1 km メッシュで計算してそこでも S_i が大きな点をさがすといった方法を繰り返して 10 m ぐらの精度で表面の点をさがしている。

結局

- ①. 観測時刻を決め、流星の進行方向を計算する
- ②. 観測方向に最適の点をさがす
- ③. その点が 赤経、赤緯でどの方向にあるかを A, B それぞれの観測点に対して計算し、星図にプロットする
- ④. 30分くらい観測時刻をずらせて計算 --- プロットを繰り返す
- ということで、一晩のカメラの方向を決めることはできる。

5.おわりに

テレビカメラでより暗い流星を追跡する場合、あるいは小流星群を対照として写真観測をする場合、1個の流星の価値は 大流星群に比べてずっと大きい。なるべくよい軌道を求めることができるように、このような方法で観測方向をあらかじめきちんと決めておくことが今後非常に重要になると思われる。ここで述べた方法がベストであるかどうかはわからぬので、各自、より優れた方法を考えていけ。

SOMSS

r_A, r_B : 短い方がよ
 g_A, g_B : 90° = 近い方がよ

$r_A \sin g_A$: 短い方がよ

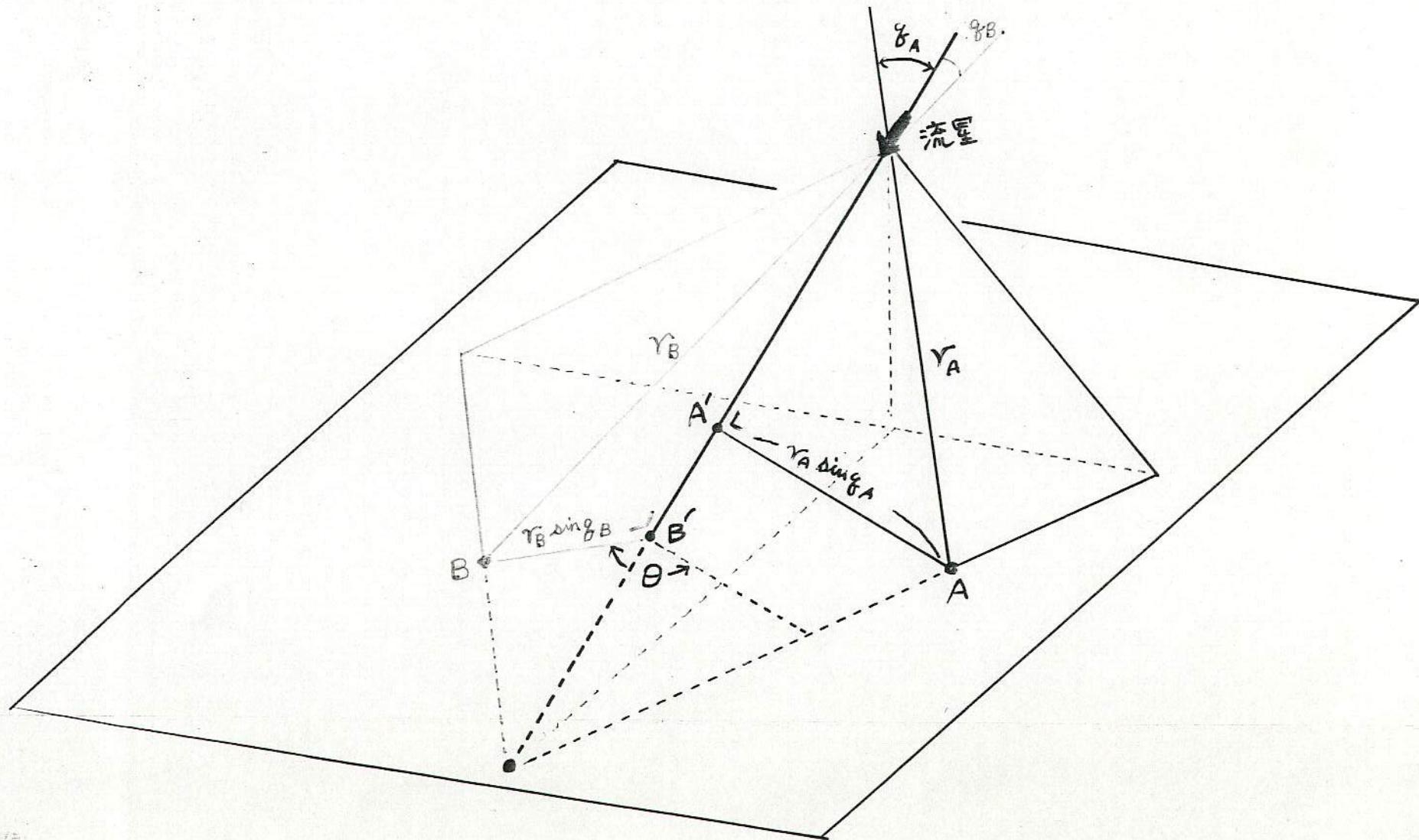
$r_B \sin g_B$

θ : 90° = 近い方がよ

$$\frac{\sin g_A}{r_A}, \frac{\sin g_B}{r_B}$$

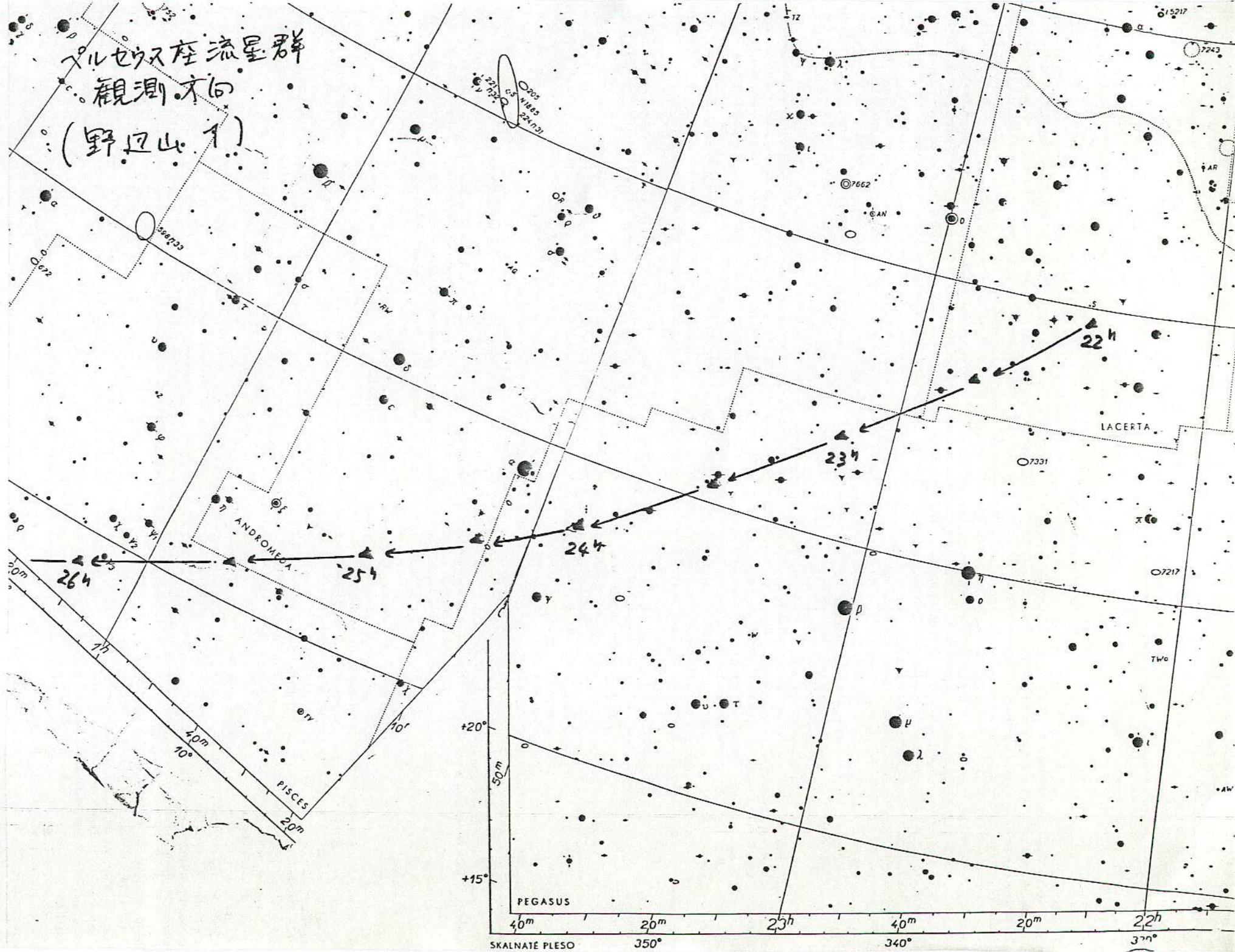
$$\frac{\sin \theta}{r_A \sin g_A}, \frac{\sin \theta}{r_B \sin g_B}$$

なるべく大きくする



MSS-050

MSS-050



眼視観測で得られた輻射点の軌道

渡辺美知(江東区木場5-8-6303)

§1はじめに。

眼視による流星観測で多くの輻射点が得られている。ところが、このデータを軌道に拡張して論議せいたことはあまりない。その要因としては、"確レガサ"を加味した輻射点リストが前で述べたことと、そもそも観測エラーの多く含まれている(=観測の軌道への属する"しゅうじゆ"からである)。このような構造下で輻射点リストは作られつつある(*1)今回これをベースに軌道要素による分析を試行してみたい。

§2方法

前述の輻射点リストとして Rediant Point of Visual Meteor (以下TK2と略す)を用いる。この中には'71~'80の向CNMSメンバーにより眼視で直接して観測された輻射点172個が含まれている。

後の問題とは速度が不明なことである。これに対しては40km/sの仮定をおいた。もちろん速度は速い仮定ほど遅い仮定に比べて大きな軌道が求められる割合が多い。ちなみにこの40km/sの仮定のもとでエラーとなる割合は約10%である。

軌道の求め方は長次法の簡便法(*2)によった。

§3分析

a , e などの値の決定は速度への依存度が非常に大きい。そのためもともと仮定の選択を用いてる限りその誤差の巾は大きく、決定分析にあまり意味をもたらさない。もちろん比較の問題だが、 α とか i についてはといらしい値をある程度は得ることが可能であり、今回これらについて図表にまとめてみる。

$\cos i$	1°	0.8	0.6	0.4	0.2	0°	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	計
8(AU)	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	172
a' 以下	5	3	3	1	5	7	3	3	8	8	47
$0.1 \sim 0.2$	5	1	3	3	3	2	2	3	1	1	24
$0.2 \sim 0.3$	3	1	1	1	2	4	5	1			18
$0.3 \sim 0.4$	1	1				4					5
$0.4 \sim 0.5$					1	1					1
$0.5 \sim 0.6$				2							2
$0.6 \sim 0.7$				1	1						2
$0.7 \sim 0.8$						2					2
$0.8 \sim 0.9$				2	1	1					4
$0.9 \sim 1.0$				1	1	3					5
計	15	8	14	9	17	17	10	7	9	8	112

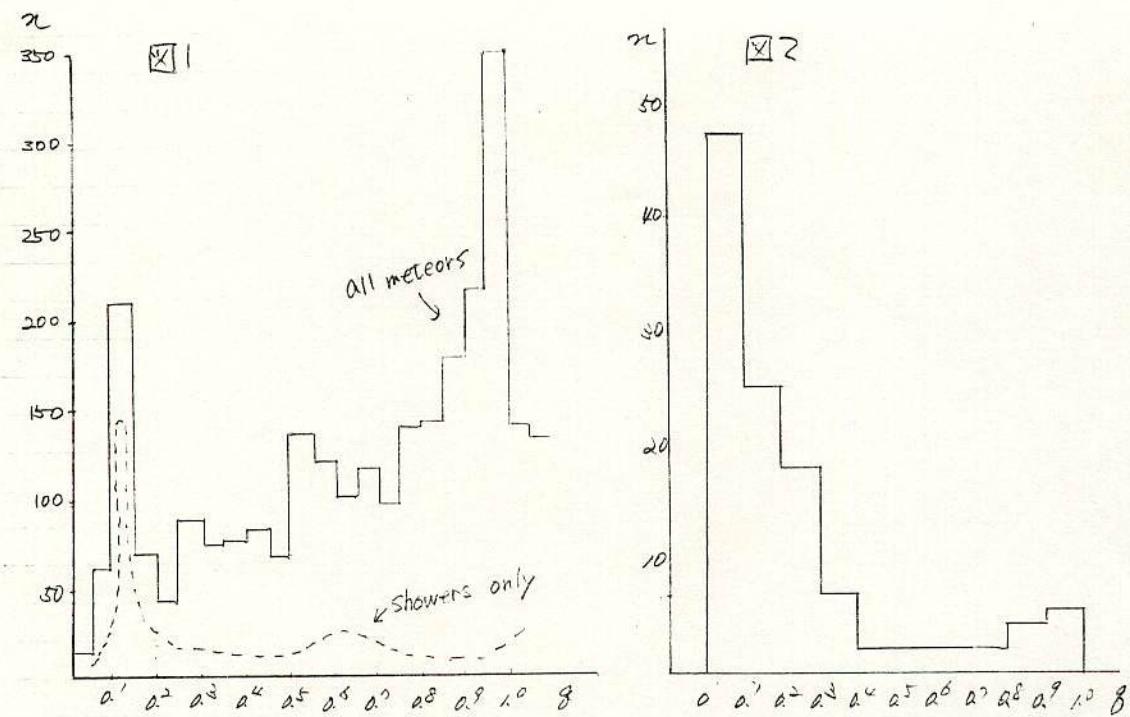


図2は8のヒストグラムである。図1はスーパー・ショットのデータであり、(※3)このうち縦軸における値を示したShowers onlyの値がほぼ図2と対応している。このことは τ vs g のグラフでもほぼ同様の傾向を示す。特にマクロ的RPMで図1のall meteorsでは1AU付近の shower RPMが特異して高い分を除けば g が大きくなるほど割合で n の値が大きくなることと図2は大きく異なっていることがわかる。

§4(とりあえず)おわりに
特に現時点でのコメントすべきことは多いが、眼視観測のデータを見て、際にしても、いつもどもRPMの位置ばかりで見るはできない。何とかのめりいデータ加工の方法を探はねば時にあると思う。またまた至るい分子が出てはいるが、もう少しなんとかしてみたい。

REFERENCE

- *1 高田達 Radiant Point of Visual Meteors (TK2) ('88.8.) (PP)
- *2 長沢工 簡単な流量の軌道計算 ('88.10) (#49 MSS)
- *3 R.E. McROSKY & A. POSEN Orbital Elements of Photographic Meteors

流星軌道計算における大気減速補正についての一考察

日高 英治

現在、各流星観測ネットワークで使われている軌道計算プログラムは、各種補正の方法、誤差の見積り等が異なり、それらの計算結果をお互い同じ土俵で議論することができない。限られた貴重な観測データをお互いに比較検討できるようにするには、大筋において同じ計算方法を用いることが望ましい。細かい所を言えばきりがないが、中でもその違いが最も問題となるのが大気減速補正の方法であると思われる。

今回、自分でプログラムを作成し、補正方法の違いが計算結果にどれだけ影響を及ぼすかを検討してみたのでその結果を報告する。

1. 流星軌道計算で行う各種補正

まず、一般的なプログラムで行われている軌道計算の概略フローチャートを図1に示す。今回は、太線で囲んだ補正についてのみ着目することとする。

観測データから日心軌道要素を求めるためには、フィルム整約（位置計測）での歪曲収差補正等を除けば、概ね次の5つの補正を行う。

- ① 星表位置（1950.0年分点）から視位置を求めるための補正
- ② 大気減速補正
- ③ 地球自転による速度補正
- ④ 天頂引力補正
- ⑤ 地球公転による速度補正

この中で、各プログラムにより方法の異なっているのが、①、②である。それらの相違を表1に示す。

表1 各プログラムにおける補正方法の相違

	「流星II」 注1)	KPM 注2)	METEOR. V61 注3)
①星表から視位置を求めるための補正	・固有運動 ・歳差 ・章動 ・年周光行差	・固有運動 ・歳差	・固有運動 ・歳差 ・章動 ・年周光行差
②大気減速補正	直線近似 ($V = a + b * t$) \downarrow V_0 (発行点速度) \downarrow 流星体の質量・密度・形状、大気密度等による補正 \downarrow $V - \infty$ (大気圏外速度)	補正なし V_{mean} (平均速度) \downarrow $V - \infty$ (大気圏外速度)	指數関数近似 \downarrow $V - \infty$ (大気圏外速度) $D = a + b * t + c * e^{(k * t)}$ $V = dD/dt = b + c * k * e^{(k * t)}$ $\therefore V_0 = b + c * k$ $V - \infty = b$
(補足) ①の補正を行う場所 (Meteor No. TN28 の計算例)	フィルム整約によって流星の切断点の赤経・赤緯を求めた後 観測放射点 (101.53°, 10.25°) V_{mean} 48.81 km/s	流星大円の極を求めた後 観測放射点 (100.67°, 8.72°) V_{mean} 43.19 km/s	フィルム整約を行う前 観測放射点 (101.54°, 10.25°) V_{mean} 48.82 km/s

注1) 恒星社厚生閣 アストラルシリーズ3 (斎藤、長沢編), 1984

注2) by K. Hoshina, H. Terada

注3) 筆者プログラム ('流星II' を改造)

この速度の値は、また軌道要素の i , ω , e 等に大きな影響を与える。速度を大きく見積もると、しばしば i , ω , e 等の値も引き上げ、 $e > 1$ となり、双曲線軌道になることも少なくない。

Meteor No. KPM8301 (しづんぎ群) の計算例では、直線近似による結果は、天文観測年表の値に比較して、 V , i , e 等が大き目に求まっている。

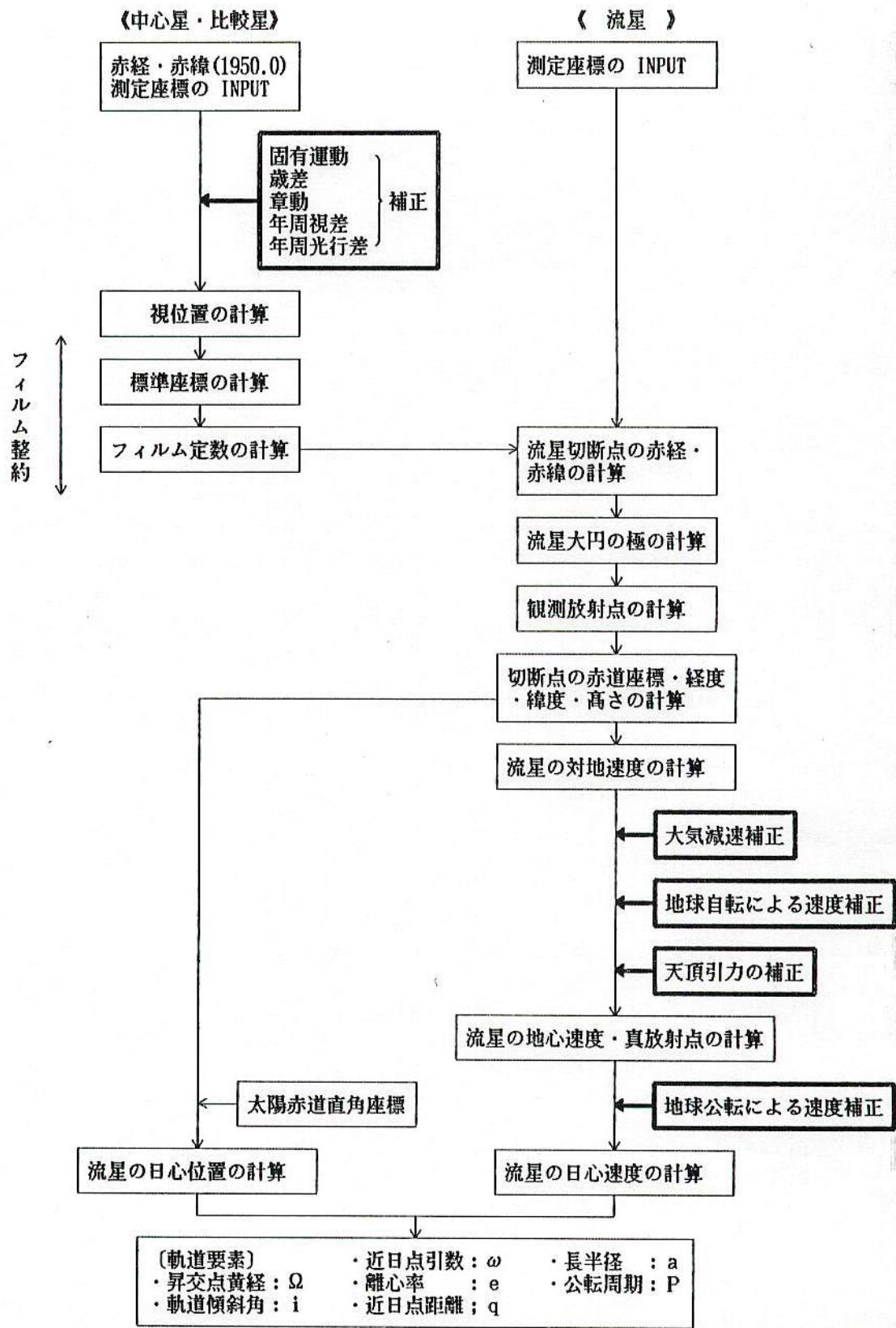


図1 流星軌道計算のフローチャート

視位置を求めるための補正については、章動・年周光行差の補正をするか否かの違いがあるが、概ね秒（" : degree）のオーダーであり、軌道要素にはそれ程大きな影響を与えない。次に、大気減速補正であるが、これは各プログラムによって大きな違いがあるので、次項で詳述する。また、本論からは外れるが、①の補正を行う場所が各プログラムで異なっている（表1参照）。この違いは、流星の出現位置が放射点に近い場合、精度不良のため、観測放射点・速度等の計算結果に大きな違いをもたらす原因となることがあるので、注意が必要である。Meteor No. TN28の例では、観測放射点で約2°、対地速度（平均）で約5 km/s もの差を生じている。（尚、このような違いが生じた流星は、筆者の計算ではこの1例のみ。）理論的には同じ結果が得られなければならないはずだが、コンピュータによる数値計算上、最小二乗法等を用いる過程でこの様な違いが生じてしまう様である。

2. 大気減速補正の違いによる V_0 , $V - \infty$ 、軌道要素の比較

流星体は、地球大気に突入すると摩擦でプラズマ柱を作り出して発光すると同時に減速する。従って流星の日心軌道を求めるためには、減速する前の大気圏外の速度を推定しなければならない。

観測データから得ることのできる速度は、各流星切断点間の平均速度である。これらの平均速度群から大気圏外での速度を求めるために、現在いくつかの方法が用いられている。その主なものを以下に示す。

(1) $V_{\text{mean}} \Rightarrow V - \infty$ (補正なし)

各切断点間で求めた平均速度の単純平均をとり、大気減速がないと仮定し、これを大気圏外速度 ($V - \infty$) とする方法。KPMのプログラム等はこれであり、大気減速補正是行っていない。

(2) 直線近似

速度が、時間 t に比例して減速すると仮定し、 $V = a + b * t$ で近似する方法。「流星II」ではこの方法を用いている。

〔参考〕-----「流星II」より抜粋

まず、観測で得られた各切断点間の速度を、 $V = a + b * t$ で近似し、発行点の速度 ($V_0 = a$) を求める。

次に、 V_0 を用いて、次式より大気圏外での速度 ($V - \infty$) を推定する。

$$V - \infty = V_0 \exp \left(\frac{C_s * \rho_a}{\alpha * \cos Z} \right)$$

$$\text{ここで } C_s = \frac{C_D * A}{m} * \left(\frac{m}{\rho_m} \right)^{2/3}$$

$$\alpha = 1.39 * 10^{-4}$$

m	流星の質量
ρ_m	流星の密度
ρ_a	大気の密度
C_D	抵抗係数
A	形状因数
Z	観測放射点の天頂角

(3) 指数関数近似

速度が、指数関数的に減速すると仮定し、 $D = a + b * t + c * e^{k*t}$ で近似する方法。ここで、Dは流星経路上の発行点から各切断点までの距離。速度Vは、

$$\begin{aligned} V &= dD/dt = b + c * k * e^{k*t} \\ V_0 &= b + c * k \quad (t = 0) \\ V - \infty &= b \quad (t = -\infty) \end{aligned}$$

となり、 V_0 , $V - \infty$ を一度に求めることができる。この方法は、Harvard, Prairie network(USA), European network (Cepheha, et al), Canada等で、発光継続時間の長い火球に適用されている。

以上3つの方法による計算結果の例を表2に示す。速度は、多くの場合、直線近似をした場合が最も大きくなり、指数関数近似による方法では直線近似と補正なしの間の値をとる。補正なしの場合は、当然速度は最も小さな値となる。

この速度の値は、また軌道要素の i , ω , e 等に大きな影響を与える。速度を大きく見積もると、しばしば i , ω , e 等の値も引き上げ、 $e > 1$ となり、双曲線軌道になることも少なくない。

Meteor No. KPM8301 (しぶんぎ群) の計算例では、直線近似による結果は、天文観測年表の値に比較して、 V , i , e 等が大き目に入っている。

表2 大気減速補正法の比較例
Meteor No. KPM8301 (しぶんぎ群) Date: 1983年 1月 3/4日

	補正なし	直線近似 (流星II)	指數関数近似			天文観測年 表
			k = 3	k = 10	k = 20	
V ₀ (km/s)	42.38	46.25	44.02	43.26	42.96	41
V-∞ (km/s)	42.38	46.68	44.81	43.28	42.96	—
真放射点 赤経 赤緯	228.83 47.71	228.54 47.76	228.65 47.74	228.76 47.72	228.78 47.71	230° 50°
昇交点黄経: Ω	282.31	282.32	282.32	282.31	282.31	283°
軌道傾斜角: i	72.62	77.15	75.28	73.63	73.28	71°
近日点引数: ω	167.67	170.47	169.47	168.42	168.17	171°
離心率 : e	0.5703	0.8460	0.7210	0.6245	0.6052	0.661
近日点距離: q	0.9751	0.9771	0.9764	0.9756	0.9754	0.978
長半径(AU): a	2.27	6.35	3.50	2.60	2.47	2.9

3. 指數関数近似におけるkの値について

指數関数近似では、観測値に曲線 $D = a + b * t + c * e^{(k*t)}$ を当てはめて、最小二乗法により定数 a, b, c を求めるが、k の値を何にするかで結果が大きく変わってくる。一般的に、k は 1 ~ 20 の値をとる。前述の例では、表2に k = 3, 10, 20 で計算した結果を示した。また、それらの観測値と指數関数曲線との関係を図2に示す。

Meteor No. KPM8301の例では、観測値(重みなし)と指數関数曲線との差を最小にする k はゼロに近い値となり、その k を採用すると V₀, V-∞ は不適当な大きな値となってしまう。これは、観測精度がよくなく観測値にはばらつきがあるためであると思われる。天文観測年表の値を考慮すると、この流星の k は 10 ~ 20 付近にあるようにも思えるが特定することはできない。

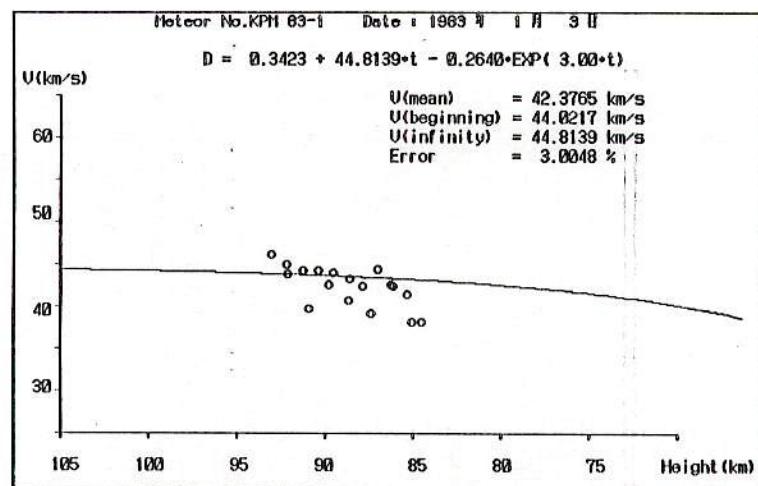
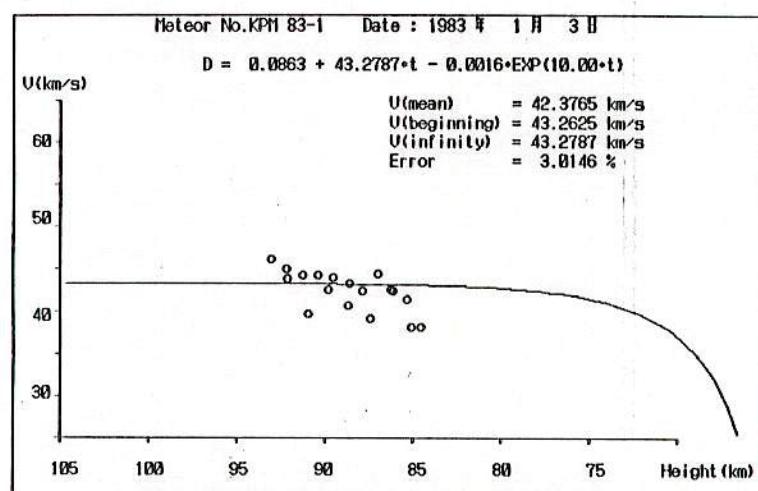
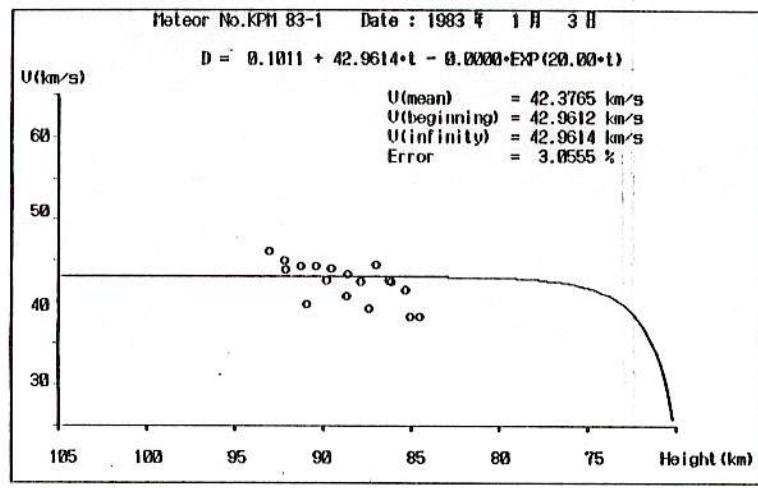
(また KPM8301 は明らかに大気減速をしているが、図2を見る限り指數関数曲線は必ずしも観測値にフィットしている様には見えない。しかし、仮にこれを直線近似してしまうと、表2に示すとおり V, i, e 等が大きすぎる値となってしまう。)

k が小さいと、より上空での減速が大きくなり、(つまり V₀ と V-∞ の差が大きくなり) V-∞ の値が大きくなる。また、k が大きくなると、減速域がより低空に移り、(つまり V₀ と V-∞ の差が小さくなり) V-∞ の値も小さくなる。

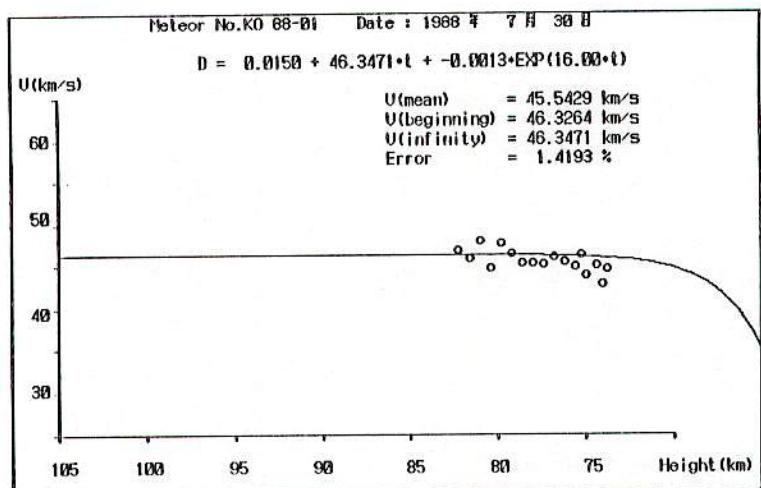
観測値に最もフィットするように、kまで含めて最小二乗法で求めることも可能だが、50mmレンズによる観測では精度に欠け、大きい時では観測値に1割程度のばらつきが見られるため、不良なデータに足を引っ張られ適切な結果が得られない場合がある。その場合は、何らかの方法で観測値に重みを付ける等の工夫が必要になる。

図3に、さらに6つの流星の計算例を示す。それぞれの k 値については、図中の式の EXP の中に示してある。この値は、単純に観測値との誤差が最小となるものを採用してある。図を見てもわかる様に各流星は発光継続時間が短く、観測値は必ずしも指數関数的な減速傾向を示していないため、これだけでは適当な k 値を決定することができない。こうして求められたそれぞれの流星の速度及び軌道要素を表3に示す。

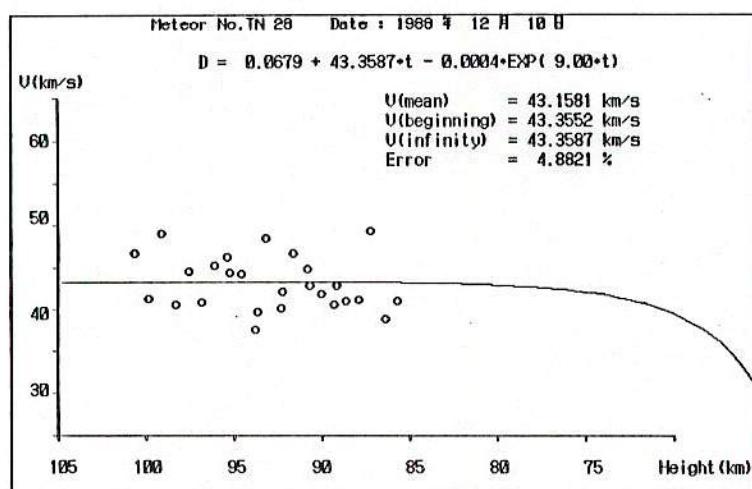
上空 80 km ~ 70 km 程度で消滅する継続時間の短い流星では、確かに大気減速をほとんど受けないものもあるかもしれない。この場合は、V_{mean} を V-∞ としてもほとんど問題ないと思われる。しかし、流星体が多かれ少なかれ大気減速を受けていることは確かである。そして、まだ k 値の決定法に問題を残しているが、指數関数近似による方法はうまく工夫すれば、大気減速の大小を問わず全ての流星に対し適用することができる補正方法であると思われる。参考までに、図4に他の観測者によって得られた指數関数的な減速を示している流星の例を示す。

a) $k = 3$ b) $k = 10$ c) $k = 20$ 図2 k を変えた指数関数近似例（しぶんぎ群）

a)



b)



c)

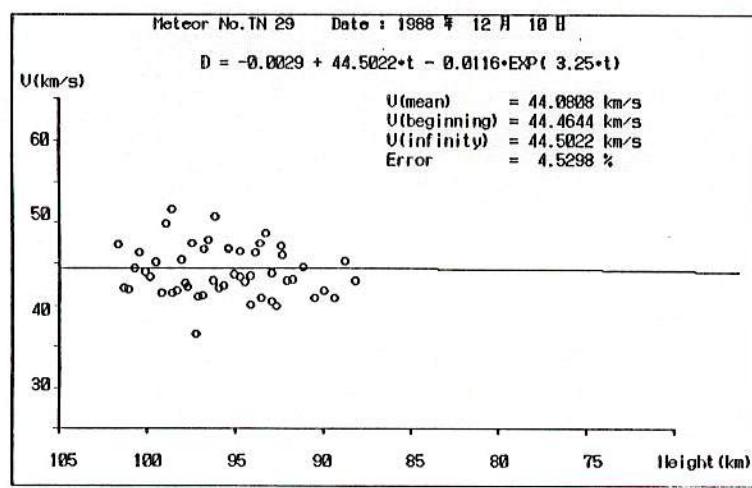
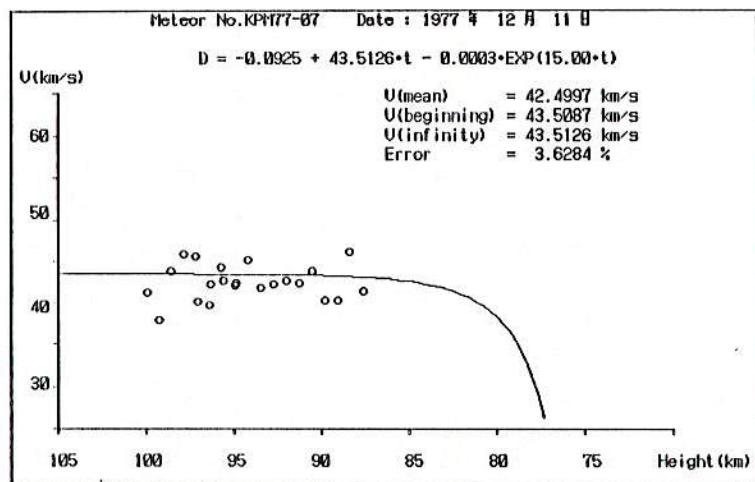
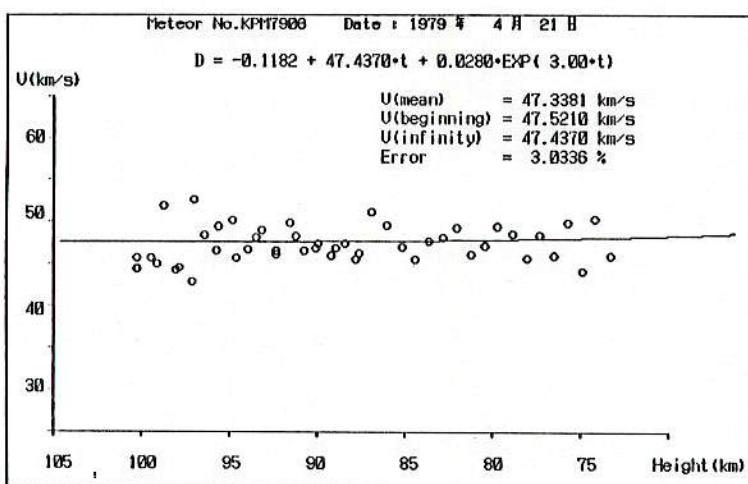


図3 流星大気減速の指數関数近似例

d)



e)



f)

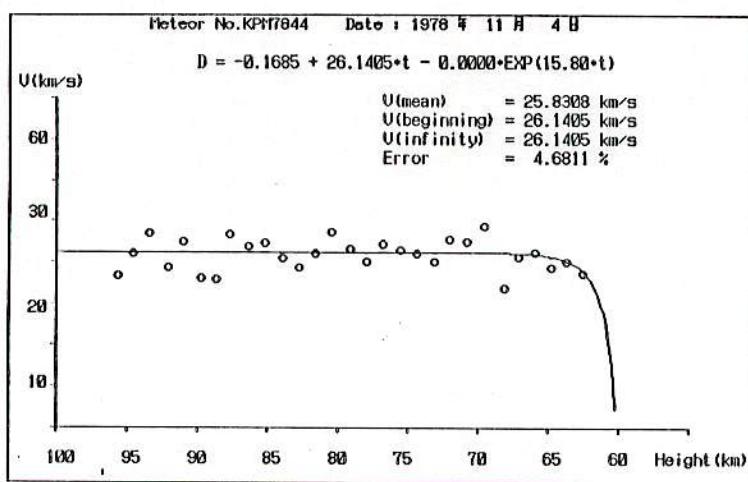


図3 流星大気減速の指數関数近似例 (つづき)

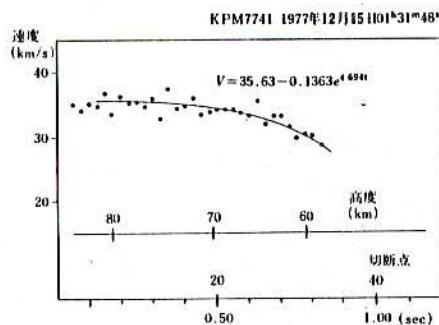
表3 軌道要素一覧表

Meteor No.	KO 8801		TN 28		TN 29		KPM 7707		KPM 7906		KPM 7844	
Date	1988/7/30		1988/12/10		1988/12/10		1977/12/11		1979/4/21		1978/11/4	
Time (UT)	16h 39m 30s		16h 8m 22s		17h 24m 14s		13h 23m 46s		16h 3m 56s		15h 55m 41s	
Shower	δ Aqr.		MON.		Sporadic		Mon.		Lyr.		S-Tau.	
No. of Breaks	16/3		22/6		34/19		15/9		36/13		30/3	
Duration	0.32 s		0.48 s		0.92 s		0.45 s		0.74 s		1.49 s	
Q	3.49 °		150.18 °		3.22 °		33.49 °		20.65 °		55.40 °	
H_B H_E	82.72 km 72.01 km		103.55 km 83.79 km		101.83 km 87.13 km		100.47 km 86.29 km		101.77 km 71.93 km		96.63 km 60.46 km	
Deceleration Correction	EXP	V_{mean}	EXP	V_{mean}	EXP	V_{mean}	EXP	V_{mean}	EXP	V_{mean}	EXP	V_{mean}
Corr. R.P. α (1950) δ	342.51 ° -14.39 °	342.50 ° -14.41 °	100.14 ° 8.24 °	100.13 ° 8.24 °	223.86 ° 50.31 °	223.90 ° 50.30 °	101.01 ° 6.99 °	101.03 ° 6.97 °	270.41 ° 32.86 °	270.42 ° 32.86 °	51.14 ° 13.42 °	51.11 ° 13.39 °
V_∞ (km/s)	46.33	45.54	43.36	43.15	44.46	44.08	43.51	42.50	47.52	47.34	26.14	25.83
$V - \infty$ (km/s)	46.35	45.54	43.36	43.15	44.50	44.08	43.51	42.50	47.44	47.34	26.14	25.83
Ω (1950.0)	307.17 °	307.17 °	78.30 °	78.30 °	258.35 °	258.35 °	79.02 °	79.02 °	30.55 °	30.55 °	41.51 °	41.51 °
i (1950.0)	39.31 °	36.98 °	35.63 °	35.36 °	72.72 °	72.28 °	37.72 °	36.39 °	78.88 °	78.79 °	4.69 °	4.63 °
ω (1950.0)	159.12 °	158.64 °	128.60 °	128.63 °	155.75 °	155.32 °	127.43 °	127.68 °	214.78 °	214.90 °	110.51 °	110.41 °
e	0.9927	0.9899	0.9986	0.9959	0.8113	0.7847	0.9956	0.9809	0.8731	0.8665	0.7516	0.7430
q (AU)	0.0369	0.0398	0.1857	0.1867	0.9458	0.9452	0.1948	0.1991	0.9214	0.9211	0.4171	0.4215
a (AU)	5.05	3.95	133.07	45.30	5.01	4.39	44.74	10.41	7.26	6.90	1.68	1.64

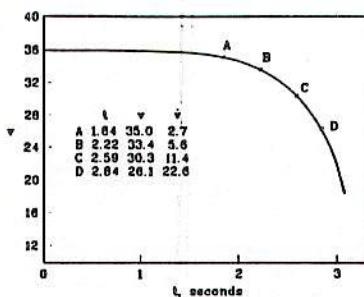
∞

MSS-1050

a)



b)



「流星II」より引用

Canada Network (Halliday et al.)

図4 指数関数的大気減速例（ふたご群）

k はいろいろな要因に依存していると思われる。例えば、流星体の質量・密度・形状・対地速度、大気密度、放射点の天頂角等。従って、もしそれらの要因をある程度推定できれば、つまり群流星のようなものであれば、精度のよい観測で k を確定し、その他の流星についてもその k を適用することができるかもしれない。

また、プログラムで指数関数近似を行う方法には次の2種類があり、それぞれでは異なる k の値が求まるので、単純に双方の k を比較するのには注意が必要である。

- (1) $D = a + b * t + c * e^{k*t}$ により、各切断点の発光点からの距離 D と経過時間 t で最小二乗法的に k を求める方法。 a , b , c は定数。このとき、 V は $b + c * k * e^{k*t}$ から求める。
- (2) $V = \alpha + \beta * e^{k*t}$ により各切断点間の速度 V と発光点からの経過時間 t で最小二乗法的に k を求める方法。 α , β は定数。

これらの k は理論的には同じ意味を持つが、 D と V という異なる値を使って観測値との差を最小にしようとすると、実際には求まった k の値に有意な差が生じてしまう。

4. 結論

以上の検討結果をまとめると次の様になる。

- (1) 大気減速補正を直線近似で行う方法（例えば、「流星II」）では、観測精度が良くない場合、 V_0 , $V-\infty$ を過大見積りする可能性が大きく、 $e > 1$ （双曲線軌道）となるケースがある。
- (2) 発光継続時間の短い（1, 2秒に満たない）流星については、その観測結果のみから適切な k 値を見出すことは困難である。この場合は、 $V-\infty$ を若干小さく見積もってしまう危険性はあるが、むしろ V_{mean} を $V-\infty$ とした方が無難である。
- (3) 発光継続時間の長い（2, 3秒以上）流星で、観測値に指数関数的大気減速が見られる場合は、 $D = a + b * t + c * e^{k*t}$ で近似し、 $V-\infty$ を求めることが望ましい。
- (4) k が流星体の速度、質量、密度、大気密度、放射点の天頂角等に依存するものであるなら、ある程度群によって決まった値をとる可能性もあり、発光継続時間の短い流星についても指数関数近似を使えるかもしれない。したがって、今後さらにデータを集めて検討する必要がある。

50 MSS
from 大英圖

A collection of radiant points, velocities and heliocentric orbital elements of 72 meteors photographed in Japan is presented in the list, which is except the Quadrantids, the Perseids, the Orionids and the Geminids.

Of these, 8 meteors belong to the α Orionids, 5 are Dec. Monocerotids, and the others are the members of Lyrids, π and δ Aquarids, Capricornids, κ Cygnids, Taurids, Leonids, ν Hydrids and the rest.

Most of the observations have been made by Kanto Photographic Meteor(KPM) Network, using 35mm-size camera with F.L.50mm lens, however, some were by the professional work of Tokyo Astronomical Observatory.

The meteors are almost contained within the catalogue of Ochiai(1985), however, elements for 25 meteors were revised values, most of which were re-measured or re-computed.

No.	Date				Corr. R.P. α (1950) δ	V_G (km/s)	V_H (km/s)	e	q (AU)	i (1950)	ω (1950)	Ω (1950)	Shower
	Yr	M	D	JST									
2	79	1	4	1 ^h 16 ^m 32 ^s	73°4 -34°5	15.1	38.1	0.63	0.95	19°6	26°1	102°3	
3	78	1	4	2 05 23	105.2 +18.4	23.2	36.0	0.674	0.572	3.0	92.2	102.6	
4	74	1	4	2 22 34	200.7 +18.2	30.8	33.1	0.809	0.104	79.7	359.5	282.6	
8	71	2	13	19 28 04	34.9 +37.3	11.4	40.8	0.857	0.986	6.0	175.3	323.8	
10	83	3	17	22 52 22	219.6 +31.4	41.5	41.9	0.981	0.612	61.1	257.2	356.0	
12	80	4	20	3 23 30	250.2 -51.5	21.7	22.9	0.608	0.283	27.1	154.4	209.8	
13	79	4	22	1 03 57	271.3 +32.7	46.4	41.2	0.926	0.911	78.9	216.3	30.6	Lyr
83	86	5	5	2 17 58	336.4 - 2.4	65.5	40.3	0.917	0.531	164.9	90.6	43.4	η Aqr
14	82	5	5	3 32 08	336.1 - 1.7	66.0	41.4	0.968	0.582	163.7	98.1	43.5	η Aqr
17	49	7	30	0 32 12	268.3 + 1.2	9.5	35.6	0.483	0.954	6.5	215.5	128.2	
18	81	7	30	23 22 07	305.9 -29.3	20.5	-	0.744	0.662	6.3	79.4	306.9	S-Cap
19	79	7	31	2 36 10	290.7 -14.5	16.3	38.0	0.704	0.800	3.6	239.0	126.6	α Cap
20	78	7	31	21 21 00	248. -18.	6.6	35.1	0.42	1.00	0.6	200.0	127.5	
21	65	7	31	23 51 00	249. +61.	17.8	37.0	0.59	0.97	28.	175.5	128.	
22	77	8	10	0 16 10	353.5 -23.6	41.8	39.0	0.954	0.180	51.2	133.2	316.5	
23	77	8	10	0 47 43	310.3 +25.2	24.6	37.3	0.698	0.704	30.1	253.8	136.5	
24	80	8	10	2 06 26	276.9 - 5.4	11.5	37.4	0.63	0.95	5.5	213.9	136.8	
25	77	8	10	2 52 41	51.6 +46.5	60.7	38.1	0.694	0.838	129.6	127.2	136.6	
26	80	8	12	0 41 47	310.5 -21.4	19.1	38.1	0.755	0.727	1.8	70.0	318.6	S-Cap
27	77	8	12	0 45 56	8.9 +67.8	46.4	38.6	0.702	1.013	85.3	181.0	138.5	
28	83	8	12	2 21 29	4.5 +15.2	59.1	41.2	0.984	0.244	142.7	302.1	138.0	
29	75	8	12	23 30 14	270.0 -29.2	13.9	36.4	0.531	0.974	1.4	27.6	318.8	
31	80	8	13	0 41 00	341.8 - 0.3	35.5	36.3	0.925	0.153	15.4	320.0	139.7	N- δ Aqr
32	69	8	13	1 30 59	338.7 - 5.3	15.8	38.4	0.743	0.826	1.5	124.6	319.4	
33	83	8	13	2 21 21	320.2 + 5.1	22.6	-	0.727	0.579	14.2	271.1	139.0	
35	75	8	14	0 31 28	308.3 -25.5	17.5	38.1	0.734	0.779	3.3	63.1	319.9	S-Cap
36	78	8	14	0 57 30	19.9 +23.9	60.8	36.7	0.741	0.537	148.5	275.1	140.1	
37	78	8	14	1 18 15	286.2 +47.2	21.5	38.7	0.699	0.956	31.9	206.8	140.2	κ Cyg
38	83	8	14	2 10 12	315.6 + 2.5	19.9	-	0.676	0.671	12.2	267.4	139.7	
39	83	8	14	2 20 34	30.4 +19.4	69.1	41.9	1.000	0.825	167.9	231.1	139.9	
40	78	8	14	3 02 35	284.2 +53.5	22.7	38.7	0.692	0.974	35.0	200.4	140.2	κ Cyg
42	75	8	14	23 31 47	4.3 -31.2	39.3	37.8	0.876	0.338	57.1	115.3	320.8	
43	76	8	17	21 33 00	315.4 -16.5	17.5	37.1	0.684	0.740	0.2	250.3	144.9	
45	80	9	15	21 01 00	333.1 + 1.5	17.2	38.5	0.747	0.785	5.8	240.9	172.4	
46	79	10	21	1 04 06	35.9 +10.1	27.2	36.5	0.805	0.387	4.3	111.8	26.3	S-Tau
47	79	10	21	1 26 09	41.2 +11.2	33.0	38.0	0.901	0.260	7.2	124.0	26.3	S-Tau
48	79	10	21	1 32 37	100.3 +35.3	72.0	45.5	1.26	0.798	157.8	230.0	206.3	ε Gem
49	77	10	21	2 48 19	102.2 +10.2	69.9	43.0	1.064	0.834	157.0	46.7	26.8	
52	78	11	4	23 17 46	13.1 -20.0	14.2	39.9	0.798	0.911	8.5	35.3	41.4	
53	78	11	5	0 55 41	52.9 +14.4	29.0	37.3	0.846	0.341	5.5	115.6	41.5	S-Tau

No.	Date	Corr.	R.P.	V_G	V_H	e	q	i	ω	Ω	Shower
	Yr M D	JST	α (1950)	δ	(km/s)	(km/s)	(AU)	(1950)	(1950)	(1950)	
55	80 11 17	2 54 ^m 52 ^s	150 ^o 6	-21 ^o 0	63.1	41.7	0.941	0.864	124 ^o 2	317 ^o 8	55 ^o 1
56	75 11 17	4 32 00	153.5	+21.1	71.4	42.4	1.031	0.984	163.8	165.5	233.4
57	64 11 17	5 07 07	153.0	+20.2	71.2	42.0	0.992	0.990	165.5	168.4	234.2
59	72 11 19	4 57 39	156.0	+21.0	71.0	41.7	0.938	0.979	162.4	169.1	236.6
61	77 12 10	23 52 52	87.2	+25.3	27.5	37.6	0.824	0.399	2.0	288.4	258.0
62	77 12 11	2 18 37	100.2	+ 7.9	42.5	42.3	0.998	0.185	37.1	128.7	78.2
63	77 12 11	3 12 04	150.1	+34.3	64.3	43.1	1.035	0.556	135.1	261.7	258.2
84	88 12 11	3 30 25	79.5	+16.3	21.8	37.0	0.72	0.564	5.	91.	78.5
64	77 12 11	22 23 44	100.8	+ 7.7	41.2	41.5	0.983	0.195	35.4	128.1	79.0
65	79 12 12	0 03 45	85.0	+30.9	27.2	38.1	0.827	0.441	7.6	282.7	258.6
66	76 12 12	0 53 09	129.0	+ 1.0	52.4	35.8	0.892	0.186	120.7	136.2	79.4
67	79 12 13	0 11 09	86.7	+27.4	28.1	38.7	0.855	0.420	4.2	284.1	259.5
68	77 12 13	22 18 16	80.1	+18.5	22.7	38.1	0.772	0.573	3.4	87.7	81.1
69	80 12 13	23 59 07	86.8	+17.2	28.9	38.4	0.830	0.462	6.0	99.8	81.4
70	72 12 14	0 04 00	89.2	+19.2	26.4	37.4	0.81	0.44	4.0	103.6	81.7
71	76 12 14	0 49 27	129.9	+ 1.4	59.2	42.1	0.990	0.255	129.1	119.3	81.4
72	77 12 14	1 58 08	101.6	+ 7.4	39.1	40.4	0.959	0.221	31.8	125.9	81.2
73	77 12 14	2 09 33	102.4	+ 6.1	40.5	41.1	0.979	0.218	36.8	125.5	81.2*
82	83 12 14	2 13 55	129.4	- 0.0	59.6	42.5	1.002	0.289	127.1	114.2	80.7
74	75 12 14	2 37 41	77.6	+18.0	24.7	39.5	0.862	0.581	3.9	84.6	80.7
75	77 12 14	2 52 50	103.8	+ 7.9	43.4	41.8	0.989	0.181	37.5	130.0	81.2
76	77 12 14	3 14 58	48.1	+17.4	10.9	37.2	0.569	0.892	0.2	41.2	81.8
77	80 12 15	1 03 29	183.9	+32.6	67.8	44.8	1.222	0.979	128.3	187.7	262.4
78	74 12 15	1 17 31	107.5	+68.9	9.9	29.2	0.272	0.682	11.7	296.1	261.9
79	79 12 15	2 20 45	256.5	+56.5	17.3	33.2	0.243	0.963	30.7	152.5	261.7
80	74 12 15	3 42 45	135.4	+55.6	35.6	33.6	0.698	0.396	59.3	297.0	262.1
81	73 12 23	2 05 55	145.0	+20.1	59.2	41.2	0.981	0.138	161.4	323.4	276.0

JST Japan Standard Time, =UT+9h.

/ not in concordance with the radiant and the orbital elements.

* corrected data, misprinted in the original list.

- 1) re-computed by Shirakawa(1988).
- 2) Nos.10 and 82 are TN(Tokyo Meteor Network) Nos.3 and 9, respectively, re-measured and re-computed by Ohtsuka(1989).
- 3) observed and measured by Iwate Group, computed by Midaka(1989).
- 4) =M35 by Hirose and Tomita(1950).
- 5) Watanabe and Nakano(1982).
- 6) re-measured and re-computed by Ohtsuka(1988).
- 7) Ogasawara, Terada and Nagasawa(1979).

The photographic meteors of Ochiai Nos.1,5,6,7,9,11,15,16,30,34,41,44,50,51,54,58 and 60 were listed in the original edition, however, they were omitted in this revised edition, because, Nos.6 and 51 were of visual observations, No.41, of which angle Q was only 0°3, was a Perseid meteor, and the other 14 meteors were without rotating shutters. The velocities and orbital elements of Nos.5, 15,50 were assumed in the original edition.

The meteor Nos.83 and 84 are in addition to the new edition, which are η Aquarid and χ Orionid, respectively.

References

- Hidaka,E.:1989, unpublished.
 Hirose,H. and Tomita,K.:1950, Proc. Jpn. Acad.,26,23.
 Ogasawara,M., Terada,M. and Nagasawa,K.(小笠原雅弘・寺田充・長沢工):1979, 日本文学会秋季年会.
 Ochiai,T.:1985, Werkgroepnieuws,13,88.
 Ohtsuka,K.:1988, Heavens,69,199 (in Japanese).
 - :1989, unpublished.
 Shirakawa,K.:1988, 46th Meteor Sci. Semin.
 Watanabe,K. and Nakano,S.(渡辺和郎・中野主一):1982, 星の手帳,Vol.15,110.

主な軌道カタログ

Harvard

Dushanbe

Odessa

Kiev

Czechos

Russia

流星の軌道計算の概要

大学天文連盟流星分科会 理科大神業 成田正巳

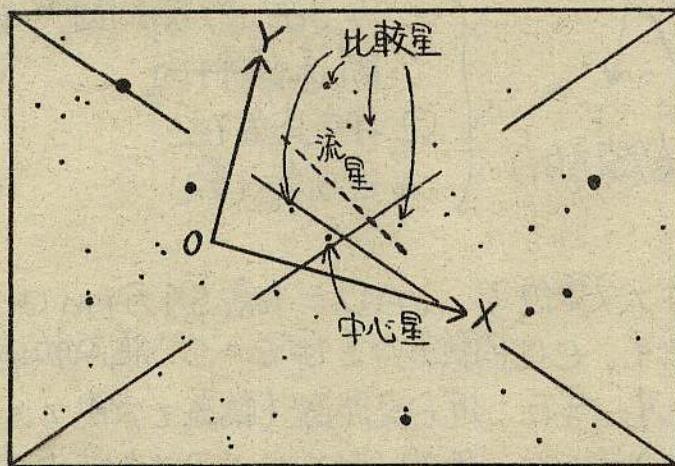
0 はじめに

これは流星分科会で作成中の流星の軌道計算のマニュアルの第0段階といえるもので、計算の概略を図で説明しようという意図で書いています。

“軌道計算を絵に描けば”

というテーマで行なった流星分科会でのセミが基盤になっていて、今までこのような計算をした経験のない人を対象に考えてあります。本格的な計算への手始めにでもなれば嬉しく思います。

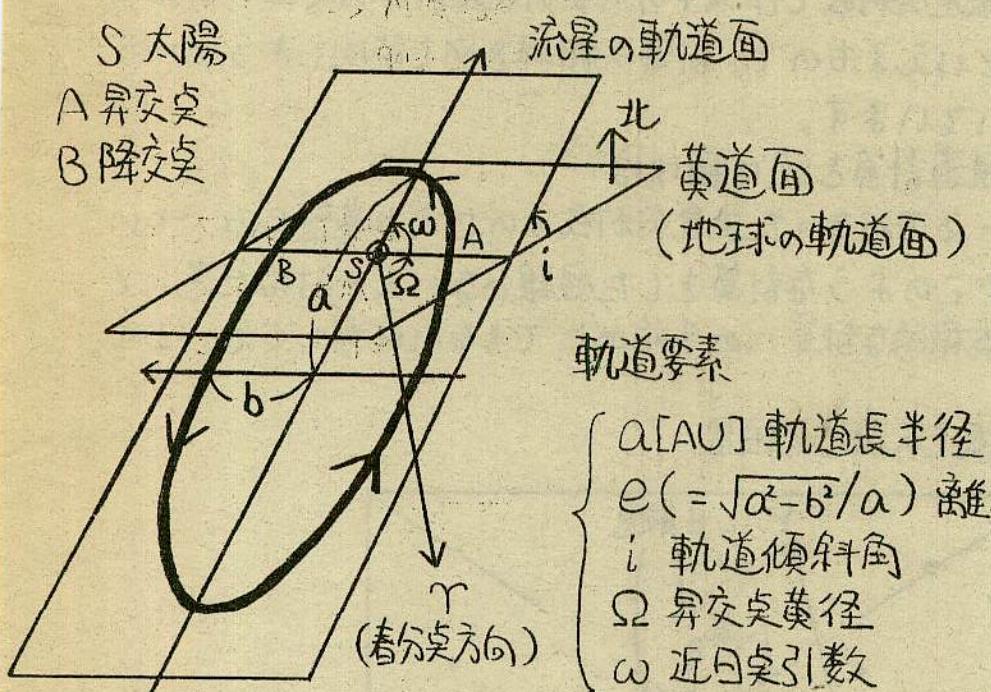
1 印画紙上の流星と恒星



上の図のように流星の写真が撮れたとします。恒星はガイド撮影により臭像になっていて、流星は回転シャッターにより像が細かく切断されているとします。図の対角線やXY軸は後から引いたものです。

まずは2本の対角線の交点の近く、つまり印画紙の中心付近にある恒星の内、その赤経と赤緯が星表に載っているものを一つ選んで中心星とします。カメラはこの中心星の方向を撮影し

での速度(大きさと方向)がわかり、その軌道の形、大きさ、太陽系における位置を知ることができます。このような流星の太陽系における軌道のことを日心軌道といい、次のような軌道要素によって表します。



[AU] というのは天文単位で、 $1 \text{ AU} = 1 \text{ 億 } 5 \text{ 千万 km}$ は地球と太陽との平均距離です。e は内軌道ならば $e = 0$ 、橋内軌道ならば $0 < e < 1$ になります。また、近日点距離(軌道と太陽との最短距離)は $r_p = a(1 - e)$ となり、周期(軌道を1周する時間)は、単位を年として $P = \sqrt{a^3}$ となります。

流星は上の軌道が地球の軌道と交わるところ、つまり昇交点か降交点で出現します。

5 おわりに

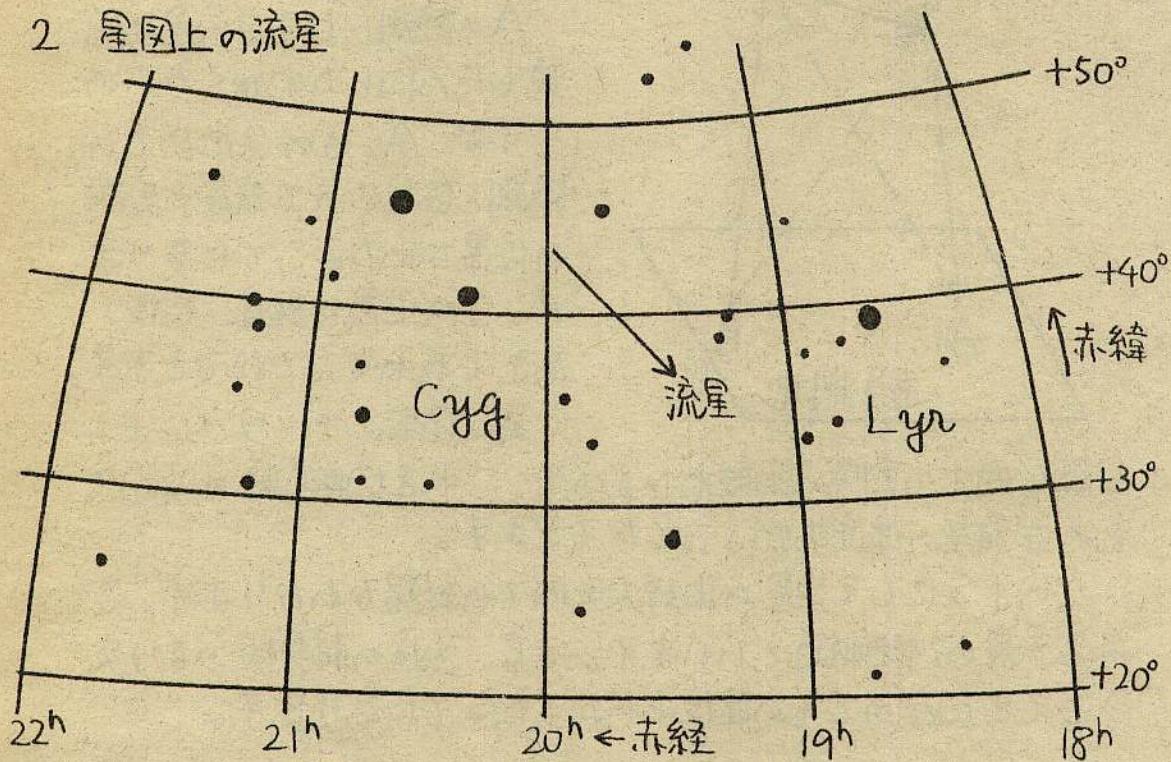
すい分簡単に書いてしまいましたが実際にはこんなに単純ではありません。だからこそおもしろいのですが……。それではまた。

ていたことになります。

次に流星のまわりにある恒星の内、中心星と同じように赤経と赤緯がわかる、ているものを10個くらい選び、比較星とします。比較星には1番、2番、…というように順番を付けておきます。なお、中心星や比較星は流星の位置を決めるためにとても大切なもののなので像がボケているものなどは除外しておきます。

以上のようにして中心星と比較星が決まつたら図のようにX軸とY軸をとつてXY座標系を作ります。実際には方眼シート(透明な方眼紙)を印画紙に重ねてプリントして罫線を入れます。これを用いて中心星と比較星のXY座標を全部読み取ります。

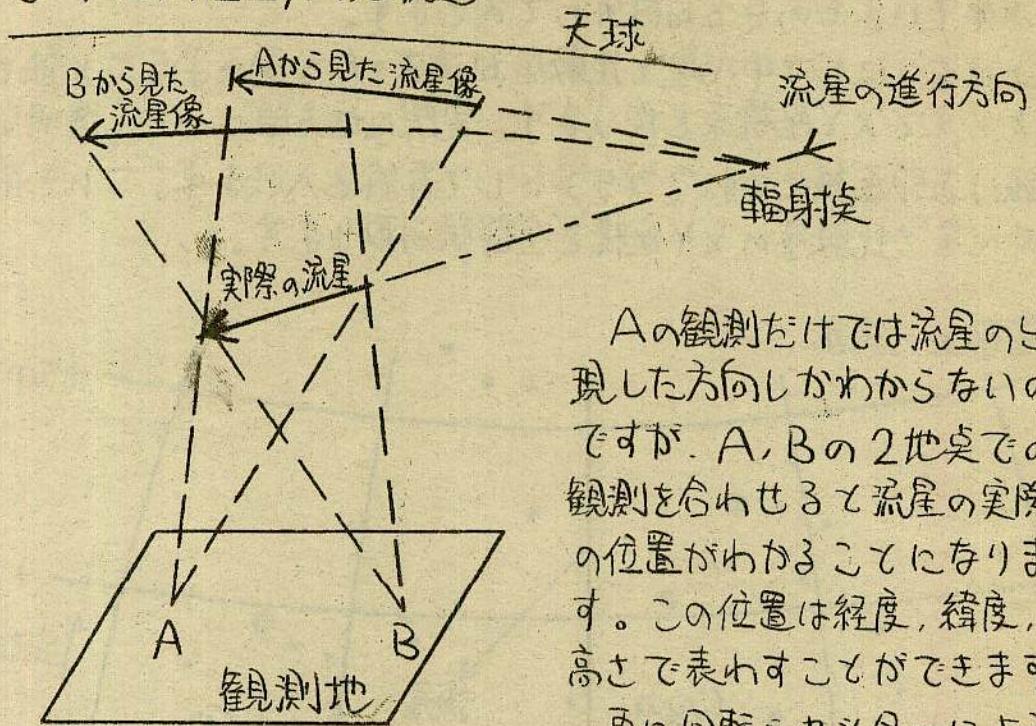
2 星図上の流星



1の印画紙の流星を上のように星図上に描いてみることにより、流星経路上の各々の赤経と赤緯が大体わかれります。これも、て正確に知るためには先程調べた比較星のXY座標と赤経、赤緯との間の関係を調べます。つまりXY座標がわかればそれを赤道座標に直すことができるようになります。

ここまでできたら、流星の各切断臭のX Y 座標を読み取ってそれを赤経、赤緯に直せば流星の印画紙上の位置が求まります。同じ流星でも観測地が異なれば赤道座標は違います。この違いにより流星の実際の位置がわからずのです。

3 流星の位置、対地軌道



Aの観測だけでは流星の出現した方向しかわからぬのですが、A,Bの2地卓での観測を合めせて流星の実際の位置がわかつることになります。この位置は経度、緯度、高さで表わすことができます。

更に回転シャッターによる

切断臭同士の実際の距離わかるので、これを切断肉眼の時間で割れば流星の速度を知ることができます。

このようにして流星の地球大気内での経路がわかれます。これを流星の対地軌道といいます。また、流星の輻射点つまり突入してきた方向とその速度もわかつたことになります。

4 流星の日心軌道

流星は太陽を1つの焦点とする楕円軌道上を運動しています。流星の出現時刻がわかれればその時の地球の太陽に対する位置もわかつるので、これから流星軌道上の1点（地球での出現位置）

流星の軌道計算

'89.10.29. MSS

大学天文連盟流星分科会 理科大神業 成田正巳

○はじめに

これは流星分科会で作成中の流星の軌道計算のマニュアルの準備として今年の分科会春合宿で配布した資料や、東京理科大学天文研究部で行なった研究発表会の予稿集に少し手を加えたものです。内容的にまだまだ不十分なので今後もって改良していきたいと思っています。

1 フィルム整約

まずは、フィルム上の位置測定の方法としてフィルム定数法について説明します。なお、中心星、比較星、流星の断支（またはその2支）の座標 (X_C, Y_C) , (X_i, Y_i) , (X_{Mj}, Y_{Mj}) は単位を [mm] として求められています。

(1) 測定座標 (x, y)

この方法では座標値を方向余弦にして扱うので、それに合わせるために原点を中心星の (X_C, Y_C) として、カメラの

焦臭距離 f [mm] をプリントのときの拡大率 k から

$$x = \frac{X - X_C}{kf} \quad y = \frac{Y - Y_C}{kf}$$

により (X_i, Y_i) , (X_{Mj}, Y_{Mj}) を測定座標 (x_i, y_i) , (x_{Mj}, y_{Mj}) に直します。

(2) 赤道座標 \rightarrow 標準座標 $(\alpha, \delta) \rightarrow (\xi, \eta)$

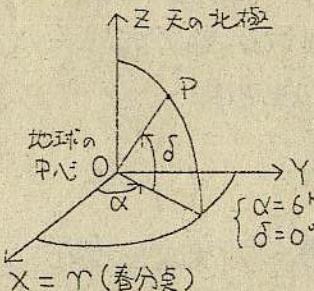


図1 赤道直交座標系

まず、赤道座標（赤経、赤緯）が (α, δ) である地球上の点 P の位置を図1の赤道直交座標系 O-XYYZ における方向余弦 (L, M, N) で表めます。それでは次のようになります。

$$L = \cos \angle POX = \cos \delta \cos \alpha$$

$$M = \cos \angle POY = \cos \delta \sin \alpha \quad (1)$$

$$N = \cos \angle POZ = \sin \delta$$

星表により全ての比較星の赤道座標 (α_i, δ_i) を調べて(1)式により方向余弦 $(L_i,$

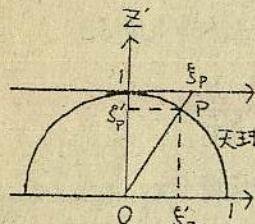


図3 天球の投影

ところで、中心星方向では力
メラのレンズの向きなので Y' 軸
の負の方向から見ると天球(半
径1)上の点 P がフィルム上で
は図3のよう平面に投影され
ていて、この平面上に X' 軸と同じ
向きをもつ軸をとると $s'_p/s_p = 1/s_p$ の関係が
あります。これと同様に Y' 軸については $s'_p/\eta'_p = 1/\eta_p$ となるので、結局フィルム上では

$$\xi = \frac{s'}{s} \quad , \quad \eta = \frac{\eta'}{s} \quad (4)$$

となります。(4)式により比較星のフィルム上における、つまり2次元標準座標系における方向余弦 (ξ, η) に直します。

(3) 測定座標 \rightarrow 標準座標 $(x, y) \rightarrow (\xi, \eta)$

測定座標、標準座標は共にフィルム上の直交座標なので両者の間に1次の関係があります。この関係は6個の未知定数 a, b, c, d, e, f を用いて次のように書くことができます。

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix} \quad (5)$$

この未知定数をフィルム定数といい、次のように最小二乗法により求めます。

(5)式において比較星の (x_i, y_i) と (ξ_i, η_i) は既に求められています。しかしそれぞれの値には誤差が含まれているので(5)式は正確とは成り立たず、 ξ と x, y の関係について考えると

$$\Delta \xi_i = \xi_i - (ax_i + by_i + e)$$

は0になりません。そこで $S = \sum (\Delta \xi_i)^2$ が最小になるような a, b, e を求めます。そのための条件は

$$\frac{\partial S}{\partial a} = \frac{\partial S}{\partial b} = \frac{\partial S}{\partial e} = 0$$

が成り立つことです。ここで

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 2 \sum x_i (ax_i + by_i + e)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 2 \sum y_i (ax_i + by_i + e)$$

M_i, N_i に直します。

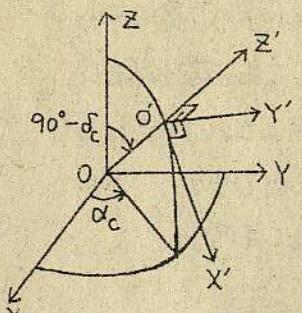


図2 3次元標準座標系

次に、図2のように赤道直交座標系 O-X'Y'Z'において中心星方向、すなはちカメラのレンズの方向を Z' 軸とし、これに垂直に X', Y' 軸とてて3次元の標準座標 O-X'Y'Z' をつくります。O-X'Y'Z' 系における点 O' の方向余弦は次のようになります。

$$\xi' = \cos \angle O'OX$$

$$\eta' = \cos \angle O'OY$$

$$\varsigma' = \cos \angle O'OZ$$

(2)

方向余弦 $(L, M, N), (\xi', \eta', \varsigma')$ の関係について考えてみます。図2より、O-X'Y'Z' を X' 軸について α_c 回転した後で Y' 軸について $90^\circ - \delta_c$ 回転することによって O-X'''Y'''Z''' に一致するので、この関係は次のようになります。
(長いので次ページに書きます。)

3

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \xi' \\ \eta' \\ \varsigma' \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos(90^\circ - \delta_c) & 0 & -\sin(90^\circ - \delta_c) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(90^\circ - \delta_c) & 0 & \cos(90^\circ - \delta_c) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha_c & \sin \alpha_c & 0 \\ -\sin \alpha_c & \cos \alpha_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ N \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \sin \delta_c & 0 & -\cos \delta_c \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \delta_c & 0 & \sin \delta_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha_c & \sin \alpha_c & 0 \\ -\sin \alpha_c & \cos \alpha_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ N \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \sin \delta_c \cos \alpha_c & \sin \delta_c \sin \alpha_c & -\cos \delta_c \\ -\sin \delta_c & \cos \delta_c & 0 \\ \cos \delta_c \sin \alpha_c & \cos \delta_c \cos \alpha_c & \sin \delta_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ N \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

(L, M, N) が S 比較用の標準座標 $(\xi', \eta', \varsigma')$ を求めます。

4

$$\frac{\partial S}{\partial e} = 2 \sum (ax_i + by_i + e)$$

となるので、結局条件は次のようになります。

$$[\xi x] = a[x^2] + b[xy] + e[x]$$

$$[\xi y] = a[xy] + b[y^2] + e[y] \quad (6)$$

$$[\xi] = a[x] + b[y] + em$$

同様にして η と x, y の関係について 2乗和 $\sum (\Delta \eta_i)^2$ を最小にする条件は

$$[\eta x] = c[x^2] + d[xy] + f[x]$$

$$[\eta y] = c[xy] + d[y^2] + f[y] \quad (7)$$

$$[\eta] = c[x] + d[y] + fm$$

となります。ただし比較星の個数は m で、 $[x] = \sum_{i=1}^m x_i$, $[xy] = \sum_{i=1}^m x_i y_i$, ... です。 (6) 式を a, b, e について、 (7) 式を c, d, f について解けばフィルム定数が求められます。以上で (x, y) と (ξ, η) の関係 (5) 式が決まります。これにより流星の (x_{Mj}, y_{Mj}) と (ξ_{Mj}, η_{Mj}) に直します。 $(6), (7)$ 式の 2 つを連立方程式の解法を次にまとめておきます。

(4) 建立一次方程式の解法

上の 2 つを連立方程式を解く際に、代数的に解いた後で係数を代入する方法とてとてもケタ落ち等により正確な解が得られないことがあります。そこで少しでも正確な解を得るために方法について簡単に説明します。これは掃き出し法 (Gauss-Jordan 法) と呼ばれますのです。

まず、 $(6), (7)$ 式を次のように書き直します。

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{14} \\ a_{24} \\ a_{34} \end{pmatrix}$$

ただし (6) 式の場合 (x_1, x_2, x_3) が未知数で

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [x^2] & [xy] & [x] \\ [xy] & [y^2] & [y] \\ [x] & [y] & m \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} a_{14} \\ a_{24} \\ a_{34} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [\xi x] \\ [\xi y] \\ [\xi] \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ e \end{pmatrix}$$

となります。

そして次のような形に書いて計算を進めます。

$$\begin{array}{cccc} x_1 & x_2 & x_3 \\ a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \end{array} \quad (1\text{行})$$

$$\begin{array}{cccc} a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \end{array} \quad (2\text{行})$$

$$\begin{array}{cccc} a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{array} \quad (3\text{行})$$

第1行を a_{11} (0でないようにする) で割り第4行とします。右上の(1)は1回の操作を行なったことを示します。

$$1 \quad a_{12}^{(1)} \quad a_{13}^{(1)} \quad a_{14}^{(1)} \quad (4\text{行})$$

今度は第4行に a_{21} を掛けて第2行から引いて第5行とします。

$$0 \quad a_{22}^{(1)} \quad a_{23}^{(1)} \quad a_{24}^{(1)} \quad (5\text{行})$$

同様に、第4行に a_{31} を掛け第3行から引いて第6行とします。

$$0 \quad a_{32}^{(1)} \quad a_{33}^{(1)} \quad a_{34}^{(1)} \quad (6\text{行})$$

以下は上と同じ操作を繰り返します。つまり、第5行を $a_{22}^{(1)}$ で割って第8行として、第4, 第6行から第8行にそ

れぞれ $a_{12}^{(1)}, a_{32}^{(1)}$ を掛けたものと引いて第7, 第9行とします。

$$\begin{array}{ccccc} 1 & 0 & a_{13}^{(2)} & a_{14}^{(2)} & (7\text{行}) \\ 0 & 1 & a_{23}^{(2)} & a_{24}^{(2)} & (8\text{行}) \\ 0 & 0 & a_{33}^{(2)} & a_{34}^{(2)} & (9\text{行}) \end{array}$$

同様にして計算を進めると次のようになります。

$$\begin{array}{ccccc} 1 & 0 & 0 & a_{14}^{(3)} & (10\text{行}) \\ 0 & 1 & 0 & a_{24}^{(3)} & (11\text{行}) \\ 0 & 0 & 1 & a_{34}^{(3)} & (12\text{行}) \end{array}$$

以上により、連立方程式の解は

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{14}^{(3)} \\ a_{24}^{(3)} \\ a_{34}^{(3)} \end{pmatrix}$$

と求められました。

上の手順において、割り算を行なうために0でないことが必要な値 a_{11}, a_{22}, a_{33} のことを極軸 (pivot) といいます。これが0になるとには方程式の順序や変数の順

となります。以上により流星の(L_{Mj} , M_{Mj} , N_{Mj}),
(α_{Mj} , δ_{Mj})が求められました。

(6) 精度の向上 — フィルム定数の再計算 —

(3)で最小二乗法を用いてフィルム定数を計算しましたが、この値には測定座標(x_i , y_i)の誤差が影響しています。今度はこの誤差を小さくする方法を考えます。

まず、 i 番目の比較星の位置が未知であるとして、その測定座標(x_i , y_i)から(5)式により標準座標(ξ_i , η_i)を求め、更(8), (9), (10)式により赤道座標(α'_i , δ'_i)を求めます。この(α'_i , δ'_i)と星表から調べた(α_i , δ_i)とは誤差のため一致しないので

$$r_i = \sqrt{(\delta'_i - \delta_i)^2 + (\alpha'_i - \alpha_i)^2 \cos^2 \delta_i}$$

は0になりません。この r_i を用いて比較星の測定の際の誤差は、標準偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum r_i^2}{m-3}} \quad m \text{ は比較星の個数}$$

で表されます。これにより位置測定の精度が示され、普通は $0' < 1'$ になります。このようにして求めた r_i と σ

を比較して、 r_i が σ よりも大き過ぎる場合には i 番目の比較星のデータは精度が低いとして棄却を行ないます。

このようにして誤差の小さい測定座標だけを用いることにより再度フィルム定数を計算し、(5)式を作ります。新しいフィルム定数により、もう一度 r_i と σ を求めて両者を比較し、必要ならば棄却を行ない上の過程を繰り返します。こうして得られた(5)式により流星の(x_{Mj} , y_{Mj})を(ξ_{Mj} , η_{Mj})に直し、更に(8), (9), (10)式により(L_{Mj} , M_{Mj} , N_{Mj})または(α_{Mj} , δ_{Mj})を求めます。これで1度から見た流星の位置は求まりました。

2 対地軌道の計算

天球上における流星の位置が求められたので、次にこれを地平座標(方位角, 高度)(A , h)に直して、更に2地点からの観測によって求めた(A , h)から流星の地球大気中における軌道である対地軌道を求めます。これは流星の発光現象を調べる際に必要なデータの1つになります。

(1) 赤道直交座標→地平直交座標 (L, M, N) → (l, m, n)
観測点Aを原点とする地平直交座標系 $A-xyz$ は図4の

序を変えます。このような操作を転置 (pivoting) といい、掃き出し法により連立方程式を解く際には非常に重要な手順になります。更に高い精度で解くためには調整 (scaling) を行なうことも考えなくてはならないのですが、ここでは触れません。後で示す文献を参照して下さい。

なお、 n 元連立方程式の場合には、掃き出しは次のようないくつかの計算を $k=1, 2, \dots, n$ について行ないます。

$$\begin{aligned}\alpha_{kj}^{(k)} &= a_{kj}^{(k-1)} / a_{kk}^{(k-1)} \quad (j=k, k+1, \dots, n+1) \\ a_{ij}^{(k)} &= a_{ij}^{(k-1)} - \alpha_{ik}^{(k-1)} a_{kj}^{(k)} \\ &\quad (i \neq k) \quad (i=1, 2, \dots, n) \\ &\quad (j=k, k+1, \dots, n+1)\end{aligned}$$

この掃き出し法はコンピュータにより計算するとき非常に有効になります。

(5) 標準座標 → 赤道座標 $(\xi, \eta) \rightarrow (\alpha, \delta)$

まずは (ξ, η) を $(\xi', \eta', \varsigma')$ に直すことから考えます。
 $(\xi', \eta', \varsigma')$ は方向余弦なので、 $\xi'^2 + \eta'^2 + \varsigma'^2 = 1$ が成り立つ。これと (4) 式により

$$\xi^2 + \eta^2 = \frac{\xi'^2 + \eta'^2}{\varsigma'^2} = \frac{1 - \varsigma'^2}{\varsigma'^2}$$

となり、これから $\varsigma' = 1/\sqrt{\xi^2 + \eta^2 + 1}$ となるので

$$\begin{pmatrix} \xi' \\ \eta' \\ \varsigma' \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2 + 1}} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

となります。流星の (ξ_{Mj}, η_{Mj}) を $(\xi'_{Mj}, \eta'_{Mj}, \varsigma'_{Mj})$ に直しておきます。

次に、 $(\xi', \eta', \varsigma')$ を (L, M, N) に直します。これは (3) 式の逆変換なので

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_c \sin \delta_c & -\sin \alpha_c & \cos \alpha_c \cos \delta_c \\ \sin \alpha_c \sin \delta_c & \cos \alpha_c & \sin \alpha_c \cos \delta_c \\ -\cos \delta_c & 0 & \sin \delta_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi' \\ \eta' \\ \varsigma' \end{pmatrix} \quad (9)$$

という式で表わされた関係により計算します。更に、 (L, M, N) を (α, δ) に直す場合には (1) 式により

$$\begin{aligned}\tan \alpha &= \frac{M}{L} \quad L \geq 0 \text{ で } \alpha \text{ は第1, 第4象限} \\ &\quad L < 0 \text{ で } \alpha \text{ は第2, 第3象限} \\ \sin \delta &= N \quad -90^\circ \leq \delta \leq 90^\circ\end{aligned} \quad (10)$$

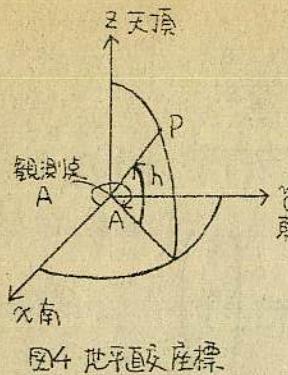


図4 地平直交座標

ようになります。地平座標が
(A, h)である天球上の点Pを
この地平直交座標系における方
向余弦(l, m, n)で表すと
次のようになります。

$$\begin{aligned} l &= \cos \angle PAx \\ &= \cos h \cos(360^\circ - A) \\ &= \cos h \cos A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m &= \cos \angle PAy \\ &= \cos h \sin(360^\circ - A) \\ &= -\cos h \sin A \end{aligned} \quad \begin{aligned} n &= \cos \angle PAz \\ &= \sin h \end{aligned} \quad (11)$$

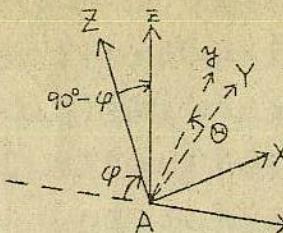
また、赤道直交座標系における方向余弦が(L, M, N)である天体を観測点Aでの(l, m, n)に直すことを考えま
す。そのため、観測点Aの(経度、緯度)を(λ, φ)と
して、日本標準時(JST)で表された時刻をTとすると、

Aの地方恒星時は

$$\Theta = (T - q^h)(1 + \mu) + \Theta_0 + \lambda$$

となります。ただし $\mu = 0.00273043$ で、 Θ_0 はグリニッジ

視恒星時で理科年表等により調べます。

図5 $(x, y, z) \rightarrow (x, y, z)$

(x, y, z) と (x, y, z) は図5のよ
うな関係にあります。つまり $A - XYZ$ を
 Z 軸について Θ 回転した後、
 Y 軸について $90^\circ - \varphi$ 回転す
ることで $A - xyz$ に一致します。
この座標変換を行列を用い
て表れると式(12)のよ
うになります。

これに流星の $(L_{Mj}, M_{Mj},$
 $N_{Mj})$ を代入して $(l_{Mj}, m_{Mj},$
 $n_{Mj})$ を求めます。

$$\begin{pmatrix} l \\ m \\ n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(90^\circ - \varphi) & 0 & -\sin(90^\circ - \varphi) \\ \sin(90^\circ - \varphi) & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta & 0 \\ -\sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (12)$$

また、(11)式により地平座標 (A, h) は

$$\begin{aligned}\tan A &= -\frac{m}{l} & l \geq 0 \text{ で } A \text{ は第1, 第4象限} \\ \sin h &= n & l < 0 \text{ で } A \text{ は第2, 第3象限} \\ & & 0^\circ \leq h \leq 90^\circ\end{aligned}\quad (13)$$

が計算することができます。

(2) 観測点の位置

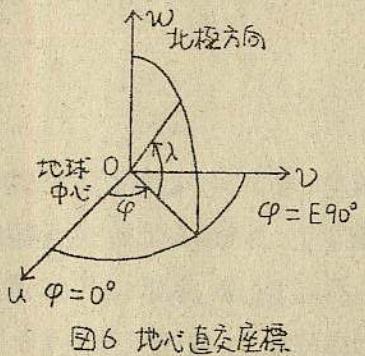


図6 地平直交座標

今度は観測点の位置を図
6のような地平直交座標系
 $O-uvw$ で表わすことを
考えます。なお、ここでは
観測点として A, B の 2 点
を考え。観測点 A では回転
シャッターにより流星の切
断点を求められます。観測点 A および B の(経度,
緯度, 海抜高度)をそれぞれ $(\lambda_A, \varphi_A, H_A), (\lambda_B, \varphi_B,$
 $H_B)$ として、地球の半径を R とすると A の地心座標は

$$\begin{aligned}u_A &= (R + H_A) \cos \varphi_A \cos \lambda_A \\ v_A &= (R + H_A) \cos \varphi_A \sin \lambda_A \\ w_A &= (R + H_A) \sin \varphi_A\end{aligned}\quad (14)$$

となります。同様にして B についても (u_B, v_B, w_B) を求めます。すると、A を原点
とする B の地平直交座標 (x_B, y_B, z_B) は
次の(15)式により計算することができます。

なお、地球半径 R は緯度により異なるので、精密な計算をする際には観測点 A と B
で同じ一の値にはなりませんが、日本で
は大体 $R = 6370 \text{ km}$ になります。

(3) 流星の対地軌道

以上に(1)、観測点 A から見た流星の切
断点の地平直交座標系 $A-xyz$ における方
向余弦 (l_{Mj}, m_{Mj}, n_{Mj}) および B から見
た流星(線像でもよい、つまり回転シャッ
ターにより切断されていないなくてもよい)
の像のなるべく離れた 2 点 S, T の方向余弦
 $(l_s, m_s, n_s), (l_t, m_t, n_t)$ と、そして
A, B の地平直交座標 $(0, 0, 0), (x_B,$
 $y_B, z_B)$ が求められました。次は流星の対
地軌道を求めて、流星経路上の各点の(経

$$\begin{aligned}x_B &= (u_B - u_A) \cos \lambda_A \sin \varphi_A + (v_B - v_A) \sin \lambda_A \sin \varphi_A - (w_B - w_A) \cos \varphi_A \\ y_B &= -(u_B - u_A) \sin \lambda_A + (v_B - v_A) \cos \lambda_A \\ z_B &= (u_B - u_A) \cos \lambda_A \cos \varphi_A + (v_B - v_A) \sin \lambda_A \cos \varphi_A + (w_B - w_A) \sin \varphi_A\end{aligned}\quad (15)$$

これが流星経路上の各点の地平直交座標(x_i, y_i, z_i)です。

今度は(x_i, y_i, z_i)を地心座標(u_i, v_i, w_i)に直します。ここでは観測点Aと原点にて、ていうので(15)式と並んで見ておの(18)式のようになります。

これより、各点の切換点の(経度、緯度、高さ)($\lambda_i, \varphi_i, H_i$)は

$$\tan \lambda_i = \frac{v_i}{u_i}$$

$u_i > 0$ で λ_i は第1, 第4象限

$u_i < 0$ で λ_i は第2, 第3象限

$$\tan \varphi_i = \frac{w_i}{\sqrt{u_i^2 + v_i^2}}$$

$$-90^\circ \leq \varphi_i \leq 90^\circ$$

$$H_i = \frac{w_i}{\sin \varphi_i} - R$$

(19)

により求めることができます。

以上により、流星の対地軌道の計算ができたことになります。なお、 H_i については発光点を $i=0$ 、消滅点を $i=m$ すれば

$$\begin{aligned} u_i &= x_i \sin \varphi_i \cos \lambda_i - y_i \sin \lambda_i + z_i \cos \varphi_i \cos \lambda_i + u_A \\ v_i &= x_i \sin \varphi_i \sin \lambda_i + y_i \cos \lambda_i + z_i \cos \varphi_i \sin \lambda_i + v_A \\ w_i &= z_i \sin \varphi_i + w_A \end{aligned} \quad (18)$$

i の増加と共に H_i は減少し、その値は $60 \sim 120 \text{ km}$ 程度になります。

3 おわりに

ここまで計算すれば流星の輻射度、大気中の進行速度、加速度はすぐに求められます。しかし日心軌道、つまり軌道要素を決定するためにはまだ、いろいろな過程があります。

参考文献

- ・対地軌道について 「流星にむかう」長沢工(地人書館)
- ・誤差評価について 「流星II」齊藤・長沢編(恒星社)
- ・各座標系について 「天体の位置計算」長沢工(地人書館)
- ・掃き出し法について 「数値解析」一松信(朝倉書店)
- ・解析幾何について 「綱形代数と解析幾何」
安達忠次(森北出版)

意見・質問等、ござんお願いします。

度、緯度、高さ) $(\lambda_j, \varphi_j, H_j)$ で表わすことを考えます。

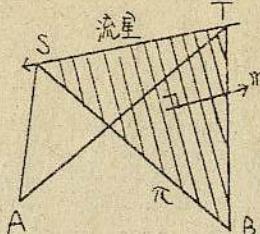


図7 平面π

まず、図7のような観測点B
および流星経路上の2点S, T
を含む平面πの方程式を求めま
す。平面πの法線ベクトルnは
 $\alpha = \vec{BS} = (l_s, m_s, n_s)$ およ
び $\beta = \vec{BT} = (l_t, m_t, n_t)$
の外積に等しいので、 $A - xyz$ における基本ベクトルを
 $\{i, j, k\}$ とすれば

$$n = \alpha \times \beta = \begin{vmatrix} i & j & k \\ l_s & m_s & n_s \\ l_t & m_t & n_t \end{vmatrix}$$

となります。これより $n = (p, q, r)$ とすれば

$$p = m_s n_t - m_t n_s \quad q = n_s l_t - n_t l_s$$

$$r = l_s m_t - l_t m_s$$

なので、平面πの方向余弦 (l, m, n) は

$$l = p / \sqrt{p^2 + q^2 + r^2}$$

$$m = q / \sqrt{p^2 + q^2 + r^2}$$

$$n = r / \sqrt{p^2 + q^2 + r^2}$$

となります。点B (x_B, y_B, z_B) が平面πの上にあるので、
この方程式のヘッセの標準形は次のようにになります。

$$lx + my + nz = lx_B + my_B + nz_B \quad (16)$$

次に、観測点Aおよび流星経路上の j 番目の切断点を通
る直線 g_j ($j=1, 2, \dots, n$) の方程式を求めます。直線 g_j
の方向余弦は (l_{Mj}, m_{Mj}, n_{Mj}) で点A $(0, 0, 0)$ を通す
ので t_i をパラメータとして

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + t_i \begin{pmatrix} l_{Mj} \\ m_{Mj} \\ n_{Mj} \end{pmatrix} = t_i \begin{pmatrix} l_{Mj} \\ m_{Mj} \\ n_{Mj} \end{pmatrix} \quad (17)$$

が求める方程式になります。この直線 g_j と平面πの交差
を求めれば流星の空間的位置がわかります。のために、
(17)式の (x_i, y_i, z_i) を (16)式に代入してこれを t_i に
ついて解けば

$$t_i = - \frac{lx_B + my_B + nz_B}{ll_{Mj} + mm_{Mj} + nn_{Mj}}$$

となり、これを再度 (17)式に代入すれば j 番目の交差の座
標 $(x_i, y_i, z_i) = t_i(l_{Mj}, m_{Mj}, n_{Mj})$ が求められます。

53 MSS

MSS 第53号(庚午) 1月 14日.

Tuttle-Giacobini-Kresák彗星に関する流星相関考察について

大島勝也 K. Ohtsuka (Tokyo Meteor Network)

P/Tuttle-Giacobini-Kresák が、昨年 2月 8日、近傍を通過する。この彗星は、昨年 11月に Gibson によって検出済である。この日の回帰である。この彗星が 1988年 12月、木星に 0.671 AU まで接近した後、
 $1.124 \text{ AU} \rightarrow 1.068 \text{ AU}$ となる。この為 P/TGK の近傍を通過する時に地球と遭遇すると、彗星の速度が小さくなる。以下のように計算される。
 (○と△の点は 1950.0 に算出)

① 4月 12日 ○ $22^{\circ} 1$ $d 114^{\circ} S + 2^{\circ} 2$ $V_g 9.0 \text{ km/s}$ $Z = 0.143 \text{ AU}$
 以上は 長谷川一郎博士による(東京流星観測網報 No.8, p.37, 1989
 及び PASJ Vol. 42, 1990 (in press)). 以下は筆における出現と設定である。

又 大島の計算では、以下の通り。上記の日と差はないが、この期間は生れ際である。
 ② 3月 26日 ○ $4^{\circ} 7$ $d 124^{\circ} 9$ $8+0.6$ $V_g 10.0 \text{ km/s}$ $d = 0.147 \text{ AU}$
 これは d が最も小さな点で、おおよそ東の出現を予想される。
 この彗星は度々遠日点附近で木星に encounter する。この為、これまでに Meter Stream がかなり多くなされている事が予想される(長谷川 1990).
 P/TGK は 1973年に ②にわたって急増した。予想より 9等級増光(4等級となり肉眼彗星になる)である。この増光機構等は、かなり良いのではないか。アストロ相当量放出されたとするで、彗星の出現が見られる可能性がある。ただし運動エネルギーが通常より大きめである。Dust が存在しないと予想されるが、彗星の速度が少ないと予想される為、被視測は TV 及び radar などとされる。予想被視測は 7月上旬から下旬を予測する。都市近郊における空気の流れが、やはり影響があると予測し、(同時に) meteor shower の存在を予測する。過去には P/TGK、及び 3月 26日からの meteor shower が被視測されている。

1978-3-5 $d 142^{\circ} 8 + 8^{\circ}$ HR3 Observer 黒田水前

83-3-5 $142 - 8^{\circ}$ HR3 川崎越山

1978.98 には P/TGK の return となる。P/TGK の近傍の軌道は以下の如く
 が予測される。3月 6日 $d 124^{\circ} 8-19^{\circ}$ $V_g 15 \text{ km/s}$ $d = 0.225 \text{ AU}$
 以下の外に他は obs. と書かれあるが、Obs. 2-8 地球の重力や自転の補正がされていない。
 (R.P. が異なる場合、2-8 と記す)。

MSS 平成2年(庚午)1月14日

② Orbits of Two Meteors of Dec 9, 1989

K. Ohtsuka & H. Tominaka
(Tokyo Meteor Network).

(Tokyo Meteor Network).

Orbital

Preliminary results of data of two meteors photographed on December 9, 1989 from Tokyo Meteor Network are given.

One was a member of a Hydrids and the other was a December x Orionid, as follows:

② T 89 12-01 1989-12-09.731(UT) xOrionid

No. of Breaks 60 (H) - 0 (D)

$$V_0 = 22.72 - 0.2005(\text{Exp}) 2.51 \cdot t \quad \sin Q = 0.933$$

$$\Omega = 77.13, i = 5.5, \omega = 77.5^\circ (\text{Eq. 1980}) \quad e = 0.735 \quad f = 0.658^\circ$$

The orbital data is similar to that of Asteroid (2201) Oljato.

$$\Omega = 76.39, i = 2.51, \omega = 95.77^\circ (\text{Eq. 1980}) \quad e = 0.711 \quad f = 0.621^\circ$$

③ T 89 12-02 1989-12-09.83832(UT) x Hydrid

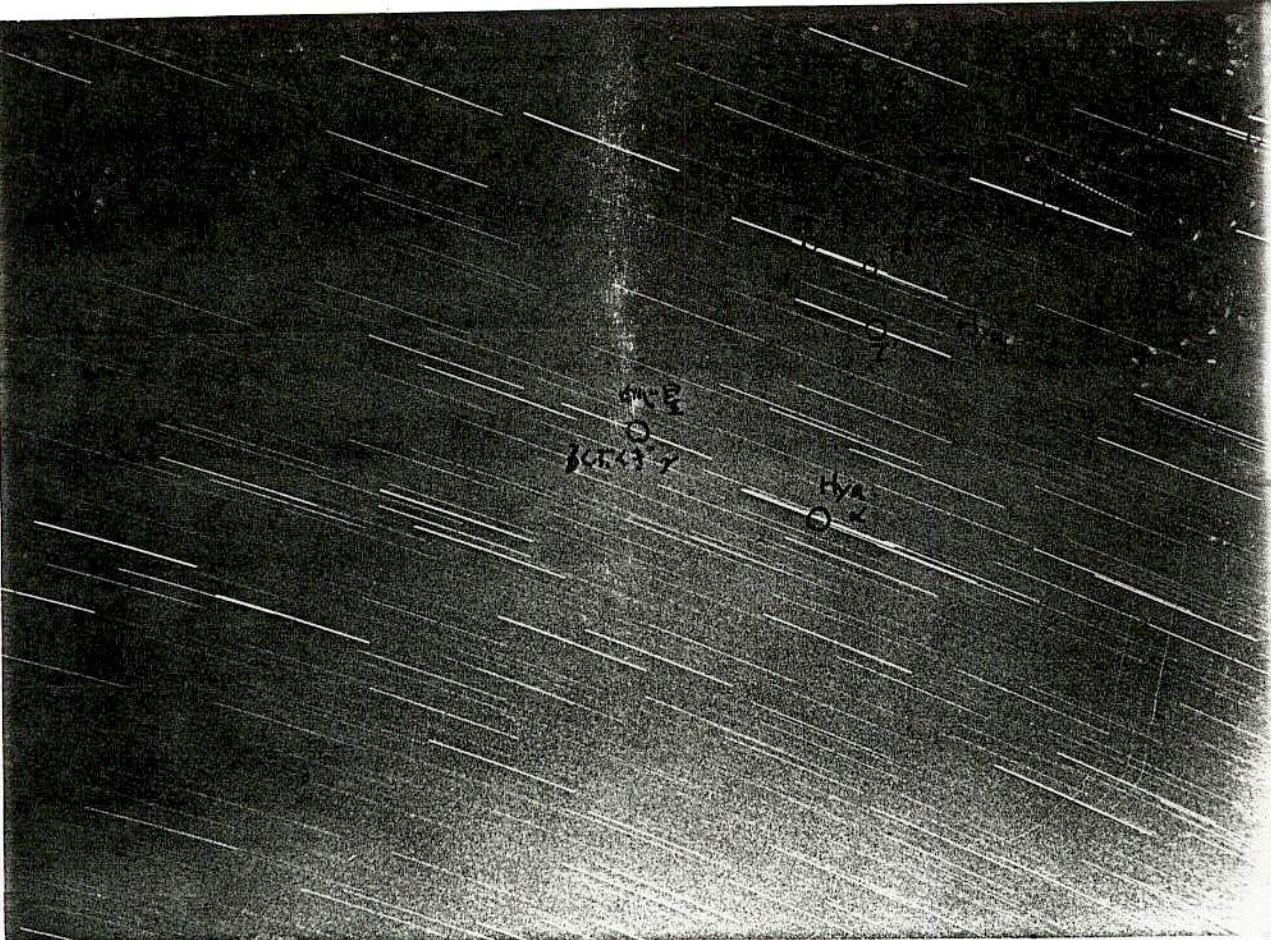
No. of Breaks 29 (H) - 26 (D)

$$V_{\infty} = 59.7 \text{ (mean)} \quad \sin Q = 0.744$$

$$\Omega = 77.18, i = 129.2, \omega = 119.5^\circ (\text{Eq. 1980}) \quad e = 0.995 \quad f = 0.274^\circ$$

Lindblad (1987) analyzed this stream by 7 photographic numbers

$$i_2 = 77.3^\circ, i = 127.4, \omega = 120.8^\circ (\text{Eq. 1980}) \quad e = 0.978 \quad f = 0.249^\circ$$



100^m/m F:z ↑

85 F:1.2 ↓

M55-053

『流星物質の流れ』の進化に関する考察（その1）
 — 惑星摂動計算プログラムの試作 —
 Eiji Hidaka

Study about Evolution of Meteoroid Streams (Part 1)
 — Attempt of Programming for The Planetary Perturbations —

Eiji Hidaka

1. はじめに

毎年ほぼ決まった日時に見られる流星群は、ある橢円軌道を描いて運動している『流星物質の流れ』の中を地球が横切るために生じると考えられている。したがって、流星群の性質・進化を知るためにには、『流星物質の流れ』の進化の様子を知らなければならない。

『流星物質の流れ』は、ビエラ彗星とビエラ（アンドロメダ座）流星群の研究等で知られているように、彗星等の橢円軌道を描く天体が、太陽に近づいた時に、そのエネルギーによって母天体から放出された物質によって構成されていると考えられる。それらの物質は、母天体を脱出する時の速度、方向等の違いにより次第に母天体から離れ、しまいには母天体の軌道上付近を埋め尽くし、連続した『流星物質の流れ』を形成するようになるのだろう。（Fig.1）

また、そうして形成された『流星物質の流れ』は、主に次の3つの効果により、さらに拡散・散逸していくと考えられている。（斎藤、長沢，1984）

- ① 惑星摂動
- ② 散在流星との衝突
- ③ Poynting - Robertson 効果（太陽の光圧）

これらの効果によって『流星物質の流れ』が進化していくことにより、観測される流星群においては、次のような変化が認められるはずである。

- ・ 出現時刻（極大日時）の変動
- ・ 活動期間の長期化、あるいは活動の消滅
- ・ HR (Hourly Rate) の減少
- ・ 輻射点の拡散、移動、分極、等

本研究では、上記の『流星物質の流れ』の散逸の原因となる3つの効果のうち、限視流星への影響が最も大きいと思われる惑星摂動について考察を行う。

今回は、まず本研究を進めていくために試作した惑星摂動計算プログラムの検証を、特徴あるいくつかの彗星の観測値と比較することにより行う。

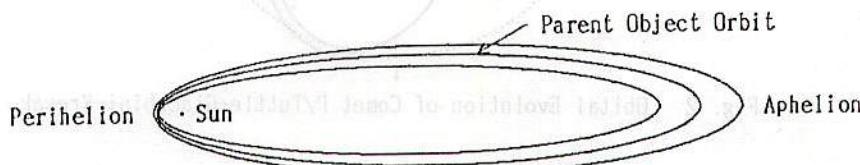


Fig. 1 Meteoroid Stream Orbit

2. 摂動計算の考え方

橢円軌道を描く天体の運動は、太陽のみの引力の支配下にあると仮定すると、二体問題としてケプラー運動で解くことができる。しかし、太陽以外の天体(ex. 惑星等)の引力が作用すると、その運動はケプラー運動からずれてくる。このずれを『摂動』という。この運動を正式に求めようとすると、互いに及ぼし合っている天体全てを考慮して運動方程式を立てなければならないが、3つの天体を考慮した運動方程式ですら、解析的に正しく解く

Comet P/Tuttle-Giacobini-Kresak は周期約 5.5 年の短周期彗星であり、軌道傾斜角がやや小さく遠日点が木星軌道にほぼ匹敵する。過去何回も木星に接近しているが、最近では 1975, 1988 年に木星にそれぞれ約 0.37, 0.67AU まで接近し、その軌道を大きく変えた経緯がある。

各回帰毎に観測から求めた軌道決定値 (Marsden, 1989) を Table 2 に、本プログラムより計算した予測値を Table 3 にそれぞれ示す。Table 3 の予測値は、1973年の観測からの軌道決定値を使って 4 回目の回帰までを摂動計算した結果である。また、Table 3 には、積分間隔を 1.25, 2.5, 5, 10 日で固定にして計算した場合 (Table 3 (a)(b)(c)(d)) と、2.5 ~ 10 日で可変にして計算した場合 (Table 3 (e)) の結果を併せて示す。

① 観測値 (O) と計算値 (C) の比較

- ・積分間隔を 1.25, 2.5 日固定とした場合の計算結果はほとんど同じであり、5 日固定とした場合は若干ずれが生じる。更に 10 日固定とすると、かなりずれが目立ってくる。0.3AU 程度の木星接近では、数回帰分の摂動計算は 2.5 日程度の積分間隔でほぼ問題ない。この 1 回帰分の計算に約 30 分を要する。

- ・積分間隔を 2.5, 5, 10 日の可変とした場合も、1.25, 2.5 日固定とした場合とほぼ同じ結果を得る。

- ・1973年～1978年の 1 回分の回帰（その間木星に 0.36AU まで接近）で見ると、O-C は T が 1.1 日、Peri. が 0.018° , Node が 0.005° , i が 0.004° , e が 0.0002, q が 0.001AU 程度である。惑星位置決定精度があまり良くなく (Table 8)、非重力効果等も考慮していない割りには、まあまあ一致していると言える。

② Comet P/Tuttle-Giacobini-Kresak の軌道進化

- ・水星、金星、地球、火星への接近は、木星に比べると顕著な摂動を与えない。

- ・上記各要素の増減のほとんどは、木星への 1 AU 以内の接近の際起こっている。

- ・1973年～1995年の間を見る限り、軌道要素のうち、Peri. と e は増加、Node と i と q は減少する傾向にある。

- ・1973年から 60 年後の 2033 年には、Peri. は 25° 増、Node は 25° 減、i は 4° 減、e は 0.026 増、q は 0.1AU 減となっている。1800 年～2000 年までの軌道進化の様子を Fig. 2 に示す (Belyaev, et al, 1986)。

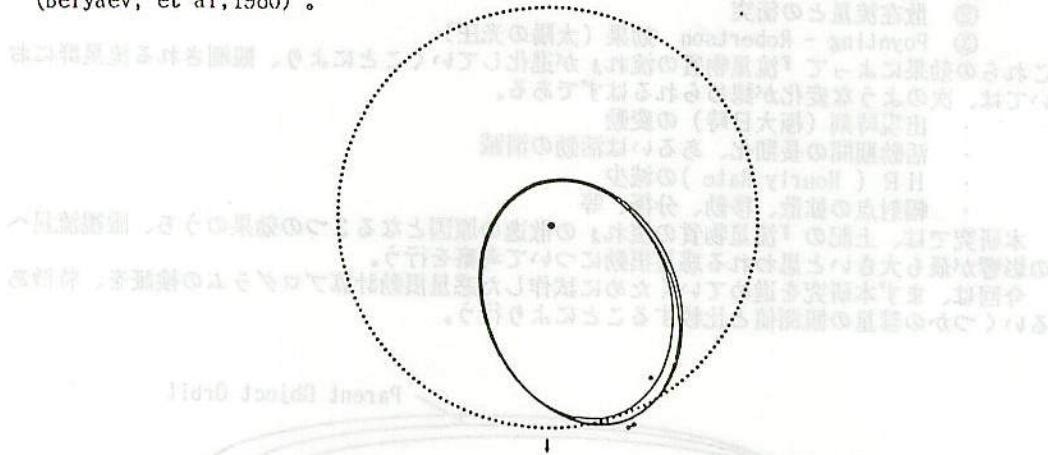


Fig. 2 Orbital Evolution of Comet P/Tuttle-Giacobini-Kresak

(2) Comet P/Oterma

Comet P/Oterma は周期約 8 ~ 20 年の短周期彗星（木星族、土星族）であり、軌道傾斜角が $2 \sim 3^\circ$ とかなり小さい。過去 1937, 1963 年に木星にそれぞれ約 0.165, 0.095AU まで異常接近し、その軌道を大きく変えた経緯がある (Belyaev, et al, 1986)。

観測から求めた軌道 (Marsden, 1989) を Table 4 に、本プログラムより計算した予測値を Table 5 にそれぞれ示す。Table 5 の予測値は、1950年の観測からの軌道決定値を使って合計 5 回の近日点通過までを摂動計算した結果である。積分間隔は 2.5, 5, 10 日の可変とした。

① 観測値 (O) と計算値 (C) の比較

- ・1950 年～1958 年の 1 回分の回帰（木星までの最接近 4.7AU）で見ると、O-C は T が 0.013 日、Peri. が 0.0005° , Node が 0.0002° , i が 0.0001° , e が 0.000012, q が 0.00003AU 程度である。木星に接近していないため、惑星位置決定精度があまり良くない割りには、かなりよ

メリット

- ① 式が単純で、各ステップ当たりの計算が少なくてすみ、計算時間が短い。

デメリット

- ① ある特定のステップから計算をはじめ、順番に次々に計算を進めていかなければならない。
 ② ステップ間隔を変更する際、そのための処理を必要とする。
 ③ あるステップでのエラーが、そのあとのステップでの計算に加算されてしまう。

Single-step Methodとは、各ステップ毎に前後のステップとは独立に全引力、位置等を計算する方法であり、次に示すメリット・デメリットがある。

メリット

- ① どのステップからでも計算を始めることができる。
 ② ステップ間隔を変更する際、特別の処理を必要としない。
 ③ あるステップでのエラーを、その後のステップに伝えない。

デメリット

- ① 計算が複雑であり、計算時間がかかる。

Multistep Methodの場合、確かに計算を進めるにつれてエラーを大きくする危険性があるが、ステップ間隔を短くし、その変更を最小限に抑えて、精度を上げて計算すれば、エラーを小さく抑えることができる。処理速度の遅いパソコンで摂動を計算することを考えた場合、使い方さえ注意すれば、Multistep Methodの方が向いていると思われる。

また、Multistep Methodとしては、Cowell's Method と Encke's Method の 2 つをあげたが、Cowell's Method は(2)式を積分して摂動量 x' , y' , z' を求める方法である。一方、Encke's Method は、(2)式から摂動を考えないケプラー運動の運動方程式を引いた式、

$$\frac{d^2x'}{dt^2} = -k^2 \left(\frac{x}{r^3} - \frac{x_0}{r_0^3} \right) + \sum_j k^2 M_j \left(\frac{x_j - x}{r_j^3} - \frac{x_j}{r_j^3} \right) \quad (3)$$

を積分して摂動量 x' , y' , z' を計算する方式である。ここで、 x_0, r_0 は摂動を考えない場合の被摂動体の x 座標と日心距離を表す。

Encke's Methodでは、Cowell's Method より太陽項がはるかに小さいため、太陽に近い場合には、Cowell's Method に比べ積分間隔を大きく取ることができ有効である。しかし Cowell's Method に比べ計算量が若干多くなり、さらに摂動が大きくなると、途中で一度軌道矯正 (Rectification) 処理をしなければならない不便さがある。長周期彗星のように短期間しか観測されない天体には、Encke's Method がよく用いられる。

ここでは、短周期天体を対象とすること、そして計算が単純であるという理由から Cowell's Method を採用した。

4. Cowell's Method による摂動計算プログラムの試作

プログラミングは、N88-BASIC で行った。処理の流れの概略をフローチャートとして付録 1 に示す。

プログラムは、以下の特徴を持つ。

- ① 水星から冥王星までの 9 つの惑星の全てあるいは一部の摂動を必要に応じて選択できる。
- ② 太陽あるいは惑星に特定の距離以下に接近した場合、自動的に積分間隔を短くし、逆に遠ざかると長くする。
- ③ 積分 (ステップ) 間隔は、2.5, 5, 10 日の値を自動的に選択、あるいは固定で設定できる。
- ④ 回帰の度に軌道要素を計算し、その間に各惑星に最接近した距離 (AU) を表示する。

これから、このプログラムを用いた試算例をいくつか示す。流星は軌道の決定精度が悪いため、いくつかの特徴ある彗星を試算に用いる。

(1) Comet P/Tuttle-Giacobini-Kresak

ことができないことがわかっている。

しかし、幸いなことに我々の太陽系は中心の太陽の引力（質量）が他の惑星に比べて非常に大きい（Table 1）ため、次の方法で近似的に解くことができる。

- ① まず、摂動を与える天体はないと仮定し、太陽との二体問題として解を求める。
- ② 次に、第3の天体により、この二体問題の解がどれだけ影響を受けるかを計算し、その値を補正して正しい解を求める。
- ③ もし、さらにこの他の天体があれば、次々にその天体による摂動量を求めて修正を重ねていく。

天体（ex. 惑星等）の運動方程式は、直角座標（x, y, z）により次式で表すことができる。

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -k^2 (m_s + m_0) \frac{x}{r^3} + \sum_j k^2 m_j \left(\frac{x_j - x}{\rho_j^3} - \frac{x_j}{r_j^3} \right) \quad (1)$$

ここで、 m_s 、 m_0 、 m_j はそれぞれ太陽、被摂動体、j番目の惑星の質量。kは万有引力の定数。 x_j 、 r_j 、 ρ_j はそれぞれ j 番目の惑星の x 座標、j 番目の惑星と被摂動体の距離、j 番目の惑星と太陽の距離。y、zについても同様。

この運動方程式において、第一項は太陽項、第二項の2つは摂動項と言いそのうち前者は直接項、後者は間接項と呼ばれる。ケプラー運動は、第一項のみで表される。また、実際の計算においては、質量mは太陽質量を単位として表す。 $m_s \Rightarrow 1$ 、 $m_0 \Rightarrow 0$ 、 $m_j \Rightarrow M_j$ として(1)式を書き換えると次式を得る。

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -k^2 \frac{x}{r^3} + \sum_j k^2 M_j \left(\frac{x_j - x}{\rho_j^3} - \frac{x_j}{r_j^3} \right) \quad (2)$$

Table 1 Mass and Semi-major Axis of Sun and Planets

Objects	Mass ($\times 10^{24}$ kg)	Semi-major Axis (AU)
Sun	1989100	
1 Mercury	0.33022	0.387098
2 Venus	4.8690	0.723330
3 Earth	5.9742	1.000001
4 Mars	0.64191	1.523679
5 Jupiter	1898.8	5.202603
6 Saturn	568.50	9.554910
7 Uranus	86.625	19.218446
8 Neptune	102.78	30.110389
9 Pluto	0.015	39.540039

3. 摂動計算方法の選択

摂動を計算する方法は、既にいくつか考えられているが、ここではコンピュータに適した方法について比較検討する。

数値積分により摂動を計算する方法としては、次の3つがよく知られている。（Roy, 1988）

- Cowell's Method
- Encke's Method
- Runge - Kutta Four (RK4)

最初の2つが Multistep Method、残りの1つが Single-step Method と呼ばれる方法である。

Multistep Methodとは、あるステップ(epoch)での全引力、位置等を計算するために、前の数ステップでの計算結果を用いる方法であり、次に示すメリット・デメリットがある。

Table 2 Orbital Elements from The Observations (Comet P/Tuttle-Giacobini-Kresak)

No	T	Epoch	Peri.	Node	i	e	q
1973 VI	1973 05 30.0873	1973 06 07	38.7791	165.1521	13.5964	0.632996	1.151919
1978 XXV	1978 12 25.7101	1979 01 07	49.3758	153.3262	9.9410	0.642927	1.123755
1990	1990 02 08.2082	1990 01 29	61.5842	140.8769	9.2300	0.655763	1.067981

Table 4 Orbital Elements from The Observations (Comet P/Uterma)

No	T	Epoch	Peri.	Node	i	e	q
1942 VII	1942 08 21.0859	1942 08 29	354.6747	155.1714	3.9897	0.144722	3.388893
1950 III	1950 07 16.4698	1950 07 18	354.7892	155.1300	3.9887	0.142763	3.404882
1958 IV	1958 06 10.5008	1958 06 06	354.8724	155.1093	3.9922	0.144488	3.387823

Table 6 Orbital Elements from The Observations (Comet P/Brooks 2)

No	T	Epoch	Peri.	Node	i	e	q
1911 I	1911 01 08.6259	1911 01 04	343.5121	18.7575	6.0643	0.468830	1.963023
1925 IV	1925 11 01.8058	1925 10 17	195.7010	177.7691	5.5496	0.487303	1.861677
1932 VIII	1932 10 09.5286	1932 10 20	195.8324	177.6983	5.5449	0.486080	1.870003

・1922年の木星への接近距離は、Belyaev et al, (1986)によると 0.086AU、本プログラムの結果では 0.098AU と 0.012AU の差がある。

② Comet P/Brooks 2 の軌道進化

- ・1886年に木星に0.001AUまで異常接近して土星族から木星族に捕獲され、以降地球から観測可能となった。
- ・1922年に木星に0.086AUまで異常接近し、軌道要素のうち Peri. と Node が約 150° 変わった。その他の軌道要素には大きな変化なし。

1800年～2000年までの軌道進化の様子を Fig. 4 に示す(Belyaev, et al, 1986)。

5. 結論

(1) 摆動計算プログラムに関して

- ① 太陽、木星等大惑星に異常接近しない限り、積分間隔は 2.5日より小さくとってもさほど精度は向上しない。
- ② 積分間隔を可変(2.5, 5, 10)としても、ほとんど精度を落とすことなく、計算時間を短縮することができる。ただし、頻繁に間隔を変えることは精度の低下を招く恐れがあるので、極力避ける方が良い。(間隔を短くする場合、各ステップの中間値の内挿を行うため)
- ③ 今回の試算では9惑星全てを考慮したが、木星族の彗星では、揺動に関与しているのはほぼ木星のみであり、水星～火星の揺動はほとんどきかない。
- ④ O-C は、木星に接近しないところ僅かであり、接近するにつれ徐々に大きくなる。
- ⑤ 惑星の位置決定精度が良くない(Table 8)ため、惑星に異常接近(0.1AU以下)すると、O-C が大きくなる可能性がある。
- ⑥ Cowell's Method は Multistep Method のため、精度を要求するならば、数回の回帰予測に使うなら良いが、数10回、数100回の回帰を予測してもエラーが蓄積されてしまい意味がない。
- ⑦ 積分間隔を可変(2.5, 5, 10)としても、短周期彗星の1回の回帰を計算するのに、30分程度を要する。

(2) 彗星軌道の進化について

- ① 木星に 0.1AU 以下に異常接近すると、土星族から木星族あるいはその逆、またはより大きな軌道へと捕獲が起こり得る。これにより、観測が可能になったり、見失ったりすることが起こる。
- ② 軌道傾斜角(i) が小さいものは、頻繁に木星接近が起こり、軌道が安定しない。逆に、軌道傾斜角(i) が大きいものは、木星に接近する確率が低く軌道が長期間に渡って安定である。
- ③ 各軌道要素には、短周期の変動と長期間に渡る(数100年～数千年?)の緩やかな変動があり、それらが重合わせている。

6. 今後の課題

- ① 惑星位置決定精度の向上
- ② 計算時間の短縮(⇒BASIC コンパイラの使用等)
- ③ 『流星物質の流れ』への揺動計算の応用
 - ・『流星物質の流れ』の軌道上の各粒子における揺動の影響の違い
 - ・軌道傾斜角の違いによる軌道の安定性(ex. 黄道群、逆行軌道流星群等)
- ④ 流星群の軌道進化の歴史とその母天体の究明
- ⑤ 地球に接近する彗星による関連流星の出現の予想

References

- Belyaev N.A., Kresak L., Pittich E.M. and Pushkarev A.N., 1986, Catalogue of Short-Period Comets, Astronomical Institute of Slovak Academy of Sciences
- Marsden B.G., 1989, Catalogue of Cometary Orbits, 6th Edition, International Astronomical Union
- Roy A.E., 1988, Orbital Motion, 3rd Edition, Adam Hilger, Bristol and Philadelphia
- 斎藤聰児, 長沢工編, 1984, 流星 II, アストラルシリーズ 3, 恒星社厚生閣

く一致している。

- ・1963年の木星への異常接近以降は、観測がなく 0-Cは不明。しかし、Belyaev(1986) の結果と良く一致している。
- ・1963年の木星への接近距離は、Belyaev(1986) によると 0.095AU、本プログラムの結果では 0.097AUと 0.002AUの差がある。

② Comet P/Otermaの軌道進化

- ・1937年に木星に0.165AUまで異常接近し、土星族から木星族に捕獲された。以降地球から観測可能となり、1942VII, 1950III, 1958IVの3回の出現が記録されている。
- ・1963年に木星に0.095AUまで異常接近し、再び土星族に戻ってしまい、見失われたと考えられている。1800年～2000年までの軌道進化の様子を Fig. 3 に示す(Belyaev, et al, 1986)

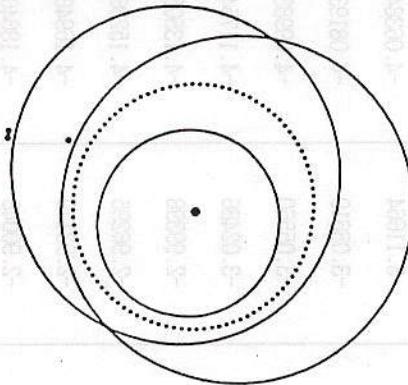


Fig. 3 Orbital Evolution of Comet P/Oterma

(3) Comet P/Brooks 2

Comet P/Brooks 2は周期 $27 \Rightarrow 7$ 年の短周期彗星(木星族⇒土星族)であり、軌道傾斜角が 6° と小さい。過去1886, 1922 年に木星にそれぞれ約0.001, 0.086AUまで異常接近し、その軌道を大きく変えた経緯がある(Belyaev, et al, 1986)。

観測から求めた軌道(Marsden, 1989)をTable 6 に、本プログラムより計算した予測値をTable 7 にそれぞれ示す。Table 7 の予測値は、1911年の観測からの軌道決定値を使って合計3回の近日点通過までを摂動計算した結果である。積分間隔は 1.25 日固定とした。

① 観測値(O)と計算値(C)の比較

- ・1911年の次の回帰予定である1918年は出現がなく、O-Cは不明。
- ・1922年の木星異常接近(0.086AU) 以降の計算値は、観測からの軌道決定値(Marsden, 1989)と大きくずれている。

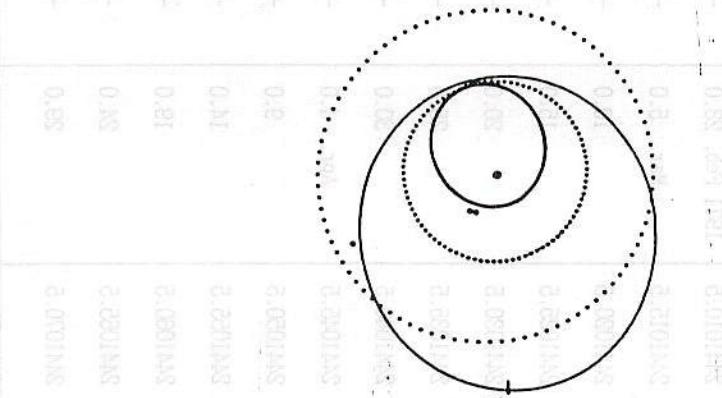


Fig. 4 Orbital Evolution of Comet P/Brooks 2

Table 8 Example of The Comparison of Jupiter Coordinates between Planetary Coordinates 1960-80 (HMSO) and Calculated Values

J.D.	Date	Equatorial Parpendicular Coordinates of Jupiter					
		Planetary Coordinates 1960-80 (HMSO)			Calculated Values (文部省宇宙講座)		
		x	y	z	x	y	z
2441010.5	1971 Feb. 28.0	-3.10973	-4.06845	-1.66936	-3.11664	-4.06384	-1.66742
2441015.5	Mar. 5.0	-3.07925	-4.08651	-1.67785	-3.08619	-4.08193	-1.67593
2441020.5	10.0	-3.04863	-4.10437	-1.68626	-3.05560	-4.09983	-1.68436
2441025.5	15.0	-3.01786	-4.12203	-1.69459	-3.02486	-4.11754	-1.69271
2441030.5	20.0	-2.98695	-4.13950	-1.70284	-2.99398	-4.13505	-1.70098
2441035.5	25.0	-2.95590	-4.15677	-1.71101	-2.96295	-4.15236	-1.70917
2441040.5	30.0	-2.92471	-4.17385	-1.71909	-2.93179	-4.16948	-1.71728
2441045.5	Apr. 4.0	-2.89338	-4.19073	-1.72710	-2.90048	-4.18640	-1.72530
2441050.5	9.0	-2.86191	-4.20741	-1.73502	-2.86904	-4.20311	-1.73325
2441055.5	14.0	-2.83030	-4.22389	-1.74286	-2.83746	-4.21963	-1.74111
2441060.5	19.0	-2.79856	-4.24016	-1.75062	-2.80574	-4.23595	-1.74888
2441065.5	24.0	-2.76669	-4.25623	-1.75830	-2.77390	-4.25206	-1.75658
2441070.5	29.0	-2.73468	-4.27210	-1.76589	-2.74191	-4.26797	-1.76419

1455-054

Table 3 Orbital Evolution Caused Planetary Perturbations (Comet P/Tuttle-Giacobini-Kresak)
 (b) 5 Days Fixed Time-interval

The Orbital Evolution Caused Planetary Perturbations by Solving The Equations
 of Motion Using a Cowell's Method

Object Name : COMET P/Tuttle-Giacobini-Kresak

Planets Using in Calculation : Mercury Venus Earth Mars Jupiter Saturn Uranus Neptune Pluto

Time-Interval : 5.00 day

Initial Orbital Elements :

T = 1973 5 30.0873 (ET)	[2441832.5873]
Peri. = 38.7791	e = 0.632996
Node = 165.1521	a = 3.138710(AU)
i = 13.5964	q = 1.151919(AU)
n = 0.17724637/Day	P = 5.560665 Year
Epoch = 1973 6 7.0 (ET)	[2441840.5]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.1229	0.7013	1.0388	0.8573	1.5442	0.3662	7.9088	17.2725	28.9983	29.1738

T = 1978 12 24.6206 (ET)	[2443867.1206]
Peri. = 49.3582	e = 0.643142
Node = 153.3208	a = 3.146083(AU)
i = 9.9453	q = 1.122706(AU)
n = 0.17662361/Day	P = 5.580499 Year
Epoch = 1978 12 28.0 (ET)	[2443870.5]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.1227	0.7013	0.7749	1.5510	1.3405	4.7426	8.5092	17.4939	28.7977	28.6998

T = 1984 7 26.1801 (ET)	[2445907.6801]
Peri. = 49.4971	e = 0.643241
Node = 153.2508	a = 3.145851(AU)
i = 9.9412	q = 1.122312(AU)
n = 0.17664313/Day	P = 5.579882 Year
Epoch = 1984 7 29.0 (ET)	[2445910.5]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.0668	0.6578	0.6707	1.1141	0.8873	0.6742	8.7313	17.6109	28.5198	28.6247

T = 1990 2 4.6377 (ET)	[2447927.1377]
Peri. = 61.4619	e = 0.656031
Node = 140.9869	a = 3.100802(AU)
i = 9.2388	q = 1.066580(AU)
n = 0.18050656/Day	P = 5.460455 Year
Epoch = 1990 2 8.0 (ET)	[2447930.5]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.0640	0.6653	0.6945	1.1294	0.5121	4.4351	7.8116	17.5691	28.2103	28.5911

T = 1995 7 23.5280 (ET)	[2449922.0280]
Peri. = 61.5559	e = 0.656698
Node = 140.9318	a = 3.098657(AU)
i = 9.2391	q = 1.063774(AU)
n = 0.18069400/Day	P = 5.454790 Year
Epoch = 1995 7 27.0 (ET)	[2449925.5]

MSS-054

Table 3 Orbital Evolution Caused Planetary Perturbations (Comet P/Tuttle-Giacobini-Kresak)
(c) 2.5 Days Fixed Time interval

The Orbital Evolution Caused Planetary Perturbations by Solving The Equations
of Motion Using a Cawell's Method

Object Name : COMET P/Tuttle-Giacobini-Kresak

Planets Using in Calculation : Mercury
Venus
Earth
Mars
Jupiter
Saturn
Uranus
Neptune
Pluto

Time-interval : 2.50 day

T = 1973 5 30.0873 (ET) [2441832.5873]
Peri. = 38.7791 e = 0.632996
Node = 165.1521 a = 3.138710(AU)
i = 13.5964 q = 1.151919(AU)
n = 0.17724637/Day P = 5.560665 Year
Epoch = 1973 6 7.0 (ET) [2441840.5]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.1228	0.6992	1.0383	0.8572	1.5957	0.3662	7.9087	17.2747	28.9980	29.1731

T = 1978 12 24.6199 (ET) [2443867.1199]
Peri. = 49.3582 e = 0.643142
Node = 153.3208 a = 3.146083(AU)
i = 9.9453 q = 1.122706(AU)
n = 0.17662364/Day P = 5.580498 Year
Epoch = 1978 12 28.0 (ET) [2443870.5]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.1223	0.6992	0.8151	1.5504	1.4011	4.8849	8.5480	17.4939	28.7975	28.7035

T = 1984 7 26.1788 (ET) [2445907.6788]
Peri. = 49.4970 e = 0.643240
Node = 153.2508 a = 3.145851(AU)
i = 9.9412 q = 1.122312(AU)
n = 0.17664315/Day P = 5.579882 Year
Epoch = 1984 7 29.0 (ET) [2445910.5]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.0666	0.6577	0.6707	1.1141	0.9721	0.6742	8.7307	17.6107	28.5198	28.6625

T = 1990 2 4.6358 (ET) [2447927.1358]
Peri. = 61.4617 e = 0.656031
Node = 140.9871 a = 3.100802(AU)
i = 9.2388 q = 1.066579(AU)
n = 0.18050660/Day P = 5.460453 Year
Epoch = 1990 2 8.0 (ET) [2447930.5]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.0639	0.6795	0.6945	1.1351	0.5121	4.5518	7.8116	17.5690	28.2103	28.5906

T = 1995 7 23.5249 (ET) [2449922.0249]
Peri. = 61.5558 e = 0.656699
Node = 140.9320 a = 3.098657(AU)
i = 9.2391 q = 1.063773(AU)
n = 0.18069404/Day P = 5.454789 Year
Epoch = 1995 7 27.0 (ET) [2449925.5]

//

Table 3 Orbital Evolution Caused Planetary Perturbations (Comet P/Tuttle-Giacobini-Kresak)
 (a) 10 Days Fixed Time interval

The Orbital Evolution Caused Planetary Perturbations by Solving The Equations
 of Motion Using a Cavelli's Method

Object Name : COMET P/Tuttle-Giacobini-Kresak

Planets Using in Calculation : Mercury
 Venus
 Earth
 Mars
 Jupiter
 Saturn
 Uranus
 Neptune
 Pluto

Time-interval : 10.00 day

Initial Orbital Elements :
 T = 1973 5 30.0873 (ET) [2441832.5873]
 Peri. = 38.7791 e = 0.632996
 Node = 165.1521 a = 3.138710(AU)
 i = 13.5964 q = 1.151919(AU)
 n = 0.17724637/Day P = 5.560665 Year
 Epoch = 1973 6 7.0 (ET) [2441840.5]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Satu.	Uran.	Nept.	Pluto
1.1236	0.7013	1.0156	0.8573	1.4322	0.3664	7.9088	17.2725	28.9983	29.1738

水の山日記
通園まで
近づき距離

T = 1978 12 24.6229 (ET) [2443867.1229]
 Peri. = 49.3586 e = 0.643144
 Node = 153.3208 a = 3.146095(AU)
 i = 9.9454 q = 1.122702(AU)
 n = 0.17662259/Day P = 5.580531 Year
 Epoch = 1979 1 7.0 (ET) [2443880.5]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Satu.	Uran.	Nept.	Pluto
1.1229	0.7013	0.6814	1.5514	1.1944	4.2984	8.5878	17.4956	28.7977	28.7008

T = 1984 7 26.1883 (ET) [2445907.6883]
 Peri. = 49.4976 e = 0.643242
 Node = 153.2509 a = 3.145852(AU)
 i = 9.9412 q = 1.122309(AU)
 n = 0.17664308/Day P = 5.579884 Year
 Epoch = 1984 8 8.0 (ET) [2445920.5]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Satu.	Uran.	Nept.	Pluto
1.0675	0.6579	0.6706	1.1139	0.6452	0.6744	8.7314	17.6109	28.5203	28.5911

T = 1990 2 4.6548 (ET) [2447927.1548]
 Peri. = 61.4632 e = 0.656033
 Node = 140.9863 a = 3.100821(AU)
 i = 9.2388 q = 1.066579(AU)
 n = 0.18050489/Day P = 5.460505 Year
 Epoch = 1990 2 18.0 (ET) [2447940.5]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Satu.	Uran.	Nept.	Pluto
1.0640	0.6994	0.6961	1.1411	0.4784	4.1781	7.8117	17.5693	28.2104	28.5911

T = 1995 7 23.5639 (ET) [2449922.0639]
 Peri. = 61.5570 e = 0.656695
 Node = 140.9311 a = 3.098616(AU)
 i = 9.2391 q = 1.063772(AU)
 n = 0.18069758/Day P = 5.454682 Year
 Epoch = 1995 8 1.0 (ET) [2449930.5]

Table 3 Orbital Evolution Caused Planetary Perturbations (Comet P/Tuttle-Giacobini-Kresak)
(d) 1.25 Days Fixed Time Interval

The Orbital Evolution Caused Planetary Perturbations by Solving The Equations
of Motion Using a Cawell's Method

Object Name : COMET P/Tuttle-Giacobini-Kresak

Planets Using in Calculation : Mercury
Venus
Earth
Mars
Jupiter
Saturn
Uranus
Neptune
Pluto

Time-Interval : 1.25 day

T = 1973 5 30.0873 (ET) [2441832.5873]
Peri. = 38.7791 e = 0.632996
Node = 165.1521 a = 3.138710(AU)
i = 13.5964 q = 1.151919(AU)
n = 0.17724637/Day P = 5.560665 Year
Epoch = 1973 6 7.0 (ET) [2441840.5]

Year 00-01 1 January-1973

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.1227	0.7313	1.0383	0.8572	1.6435	0.3662	7.9086	17.2808	28.9980	29.1731

T = 1978 12 24.6198 (ET) [2443867.1198]
Peri. = 49.3581 e = 0.643141
Node = 153.3208 a = 3.146077(AU)
i = 9.9453 q = 1.122706(AU)
n = 0.17662410/Day P = 5.580484 Year
Epoch = 1978 12 25.5 (ET) [2443868.0]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.1223	0.6992	0.8452	1.5504	1.4186	4.9811	8.5285	17.4939	28.7975	28.7134

T = 1984 7 26.1786 (ET) [2445907.6786]
Peri. = 49.4970 e = 0.643240
Node = 153.2508 a = 3.145850(AU)
i = 9.9412 q = 1.122312(AU)
n = 0.17664327/Day P = 5.579878 Year
Epoch = 1984 7 27.8 (ET) [2445909.3]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.0666	0.6567	0.6707	1.1140	1.0452	0.6742	8.7307	17.6107	28.5198	28.6995

T = 1990 2 4.6355 (ET) [2447927.1355]
Peri. = 61.4616 e = 0.656030
Node = 140.9871 a = 3.100792(AU)
i = 9.2388 q = 1.066579(AU)
n = 0.18050744/Day P = 5.460428 Year
Epoch = 1990 2 5.5 (ET) [2447928.0]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.0638	0.6716	0.6943	1.1322	0.5121	4.6561	7.8116	17.5690	28.2103	28.5906

T = 1995 7 23.5245 (ET) [2449922.0245]
Peri. = 61.5557 e = 0.656697
Node = 140.9320 a = 3.098642(AU)
i = 9.2391 q = 1.063773(AU)
n = 0.18069538/Day P = 5.454749 Year
Epoch = 1995 7 24.5 (ET) [2449923.0]

Table 3 Orbital Evolution Caused Planetary Perturbations (Comet P/Tuttle-Giacobini-Kresak)
(e) 2.5 ~ 10 Days Self-adjusting Time-interval

The Orbital Evolution Caused Planetary Perturbations by Solving The Equations
of Motion Using a Cavell's Method with a Self-adjusting Time-interval

Object Name : COMET P/Tuttle-Giacobini-Kresak

Planets Using in Calculation	Mercury	Venus	Earth	Mars	Jupl.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
Initial Time-interval :	2.5 day								
T	= 1973 5 30.0873 (ET)	[2441832.5873]							
Peri.	= 38.7791	e = 0.632996							
Node	= 165.1521	a = 3.138710(AU)							
I	= 13.5964	q = 1.151919(AU)							
n	= 0.17724637/Day	P = 5.560665 Year							
Epoch	= 1973 6 7.0 (ET)	[2441840.5]							
Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupl.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.1228	0.6992	1.0383	0.8572	1.5957	0.3662	7.9087	17.2784	28.9980	29.1731
T	= 1978 12 24.6199 (ET)	[2443867.1199]							
Peri.	= 49.3582	e = 0.643142							
Node	= 153.3208	a = 3.146083(AU)							
I	= 9.9453	q = 1.122706(AU)							
n	= 0.17662364/Day	P = 5.580498 Year							
Epoch	= 1978 12 28.0 (ET)	[2443870.5]							
Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupl.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.1223	0.6992	0.8151	1.5504	1.4011	4.8849	8.5878	17.4939	28.7975	28.7035
T	= 1984 7 26.1787 (ET)	[2445907.6787]							
Peri.	= 49.4970	e = 0.640240							
Node	= 153.2508	a = 3.145851(AU)							
I	= 9.9412	q = 1.122312(AU)							
n	= 0.17664316/Day	P = 5.579881 Year							
Epoch	= 1984 7 29.0 (ET)	[2445910.5]							
Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupl.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.0666	0.6577	0.6707	1.1141	0.9721	0.6742	8.7307	17.6107	28.5198	28.6625
T	= 1990 2 4.0356 (ET)	[2447927.1356]							
Peri.	= 61.4617	e = 0.656691							
Node	= 140.9871	a = 3.106802(AU)							
I	= 9.2388	q = 1.066579(AU)							
n	= 0.18050662/Day	P = 5.460453 Year							
Epoch	= 1990 2 8.0 (ET)	[2447930.5]							
Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupl.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.0639	0.6993	0.6945	1.1414	0.5121	4.5518	7.8116	17.5690	28.2103	28.5906
T	= 1995 7 23.5246 (ET)	[2449922.0246]							
Peri.	= 61.5558	e = 0.656699							
Node	= 140.9320	a = 3.098657(AU)							
I	= 9.2391	q = 1.063773(AU)							
n	= 0.18069405/Day	P = 5.454789 Year							
Epoch	= 1995 7 27.0 (ET)	[2449925.5]							
Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupl.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.0512	0.7017	1.0278	1.5446	0.4765	2.3214	4.2447	17.1513	27.7601	28.7325
T	= 2001 1 0.0095 (ET)	[2451909.5095]							
Peri.	= 62.0415	e = 0.659520							
Node	= 140.5543	a = 3.087039(AU)							
I	= 9.2394	q = 1.051074(AU)							
n	= 0.18171509/Day	P = 5.424139 Year							
Epoch	= 2001 1 3.5 (ET)	[2451913.0]							

MSS-059

(continued from page 1) and includes tables of celestial bodies and their orbital elements for the years 2006 through 2028.

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupl.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.0467	0.6881	1.2864	0.8376	0.5110	4.3873	7.3137	16.4285	27.2421	29.1628

T = 2006 6 2.8400 (ET) [2453889.3400]
 Peri. = 62.0640 e = 0.660602
 Node = 140.5348 a = 3.083677(AU)
 i = 9.2431 q = 1.046593(AU)
 n = 0.18201228/Day P = 5.415282 Year
 Epoch = 2006 6 6.5 (ET) [2453893.0]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupl.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.0485	0.6431	0.7495	0.8169	1.4507	4.3108	8.6365	15.6007	26.6526	29.8145

T = 2011 11 0.8620 (ET) [2455866.3620]
 Peri. = 62.0591 e = 0.660244
 Node = 140.5056 a = 3.085705(AU)
 i = 9.2400 q = 1.048386(AU)
 n = 0.18183293/Day P = 5.420624 Year
 Epoch = 2011 11 2.5 (ET) [2455868.0]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupl.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.0441	0.8104	0.3503	0.2077	2.0044	4.4136	8.6421	15.0006	26.0435	30.6358

T = 2017 3 30.8111 (ET) [2457843.3111]
 Peri. = 62.0316 e = 0.661161
 Node = 140.6150 a = 3.081308(AU)
 i = 9.2437 q = 1.044066(AU)
 n = 0.18222229/Day P = 5.409041 Year
 Epoch = 2017 4 2.0 (ET) [2457845.5]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupl.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.0493	0.6627	0.3503	0.2755	2.3855	4.4312	8.5808	14.8722	25.4936	31.5905

T = 2022 8 28.0399 (ET) [2459819.5399]
 Peri. = 62.0686 e = 0.659891
 Node = 140.4551 a = 3.084805(AU)
 i = 9.2364 q = 1.049169(AU)
 n = 0.18191251/Day P = 5.418252 Year
 Epoch = 2022 9 0.5 (ET) [2459823.0]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupl.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.0489	0.9838	0.9059	1.2483	2.1001	3.8607	5.6354	15.2456	25.0439	32.6134

T = 2028 1 26.2088 (ET) [2461796.7088]
 Peri. = 62.0587 e = 0.659995
 Node = 140.4395 a = 3.084694(AU)
 i = 9.2307 q = 1.048811(AU)
 n = 0.18192232/Day P = 5.417960 Year
 Epoch = 2028 1 27.5 (ET) [2461798.0]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupl.	Sat.	Uran.	Nept.	Pluto
1.0537	0.6983	1.3073	1.2441	1.4509	4.6230	5.8463	15.9063	24.7504	33.6874

T = 2033 6 29.8155 (ET) [2463778.3155]
 Peri. = 62.1852 e = 0.658797
 Node = 140.3350 a = 3.088111(AU)
 i = 9.2220 q = 1.053672(AU)
 n = 0.18162044/Day P = 5.426966 Year
 Epoch = 2033 7 2.0 (ET) [2463780.5]

14

Table 5 Orbital Evolution Caused Planetary Perturbations (Comet P/Oterma)
2.5~10 Days Self-adjusting Time-interval

The Orbital Evolution Caused Planetary Perturbations by Solving The Equations
of Motion Using a Cavell's Method with a Self-adjusting Time-interval

Object Name : COMET P/Oterma

Planets Using in Calculation : Mercury

Venus

Earth

Mars

Jupiter

Saturn

Uranus

Neptune

Pluto

Initial Time-interval : 2.5 day

T = 1950 7 16.4698 (ET) [2433478.9698]

Peri. = 354.7892 e = 0.142763

Node = 155.1300 a = 3.971926(AU)

i = 3.9887 q = 3.404882(AU)

n = 0.12450946/Day P = 7.915926 Year

Epoch = 1950 7 18.0 (ET) [2433480.5]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Satu.	Uran.	Nept.	Pluto
3.3878	3.0478	2.6986	2.4359	2.2109	4.7006	6.0116	15.1011	26.7675	30.8372

T = 1958 6 10.4874 (ET) [2436364.9874]

Peri. = 354.8719 e = 0.144500

Node = 155.1095 a = 3.960028(AU)

i = 3.9922 q = 3.387803(AU)

n = 0.12507103/Day P = 7.880705 Year

Epoch = 1958 6 13.5 (ET) [2436368.0]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Satu.	Uran.	Nept.	Pluto
5.4690	3.0319	2.6949	2.5455	2.2610	0.0970	5.5643	9.3599	21.9411	22.9642

T = 1983 9 4.3576 (ET) [2445581.8576]

Peri. = 53.1777 e = 0.249252

Node = 333.6624 a = 7.284690(AU)

i = 1.9543 q = 5.468967(AU)

n = 0.05012481/Day P = 19.662302 Year

Epoch = 1983 9 15.5 (ET) [2445593.0]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Satu.	Uran.	Nept.	Pluto
5.4629	5.1348	4.7452	4.4785	4.3418	3.7153	8.0591	13.5600	23.2020	21.6328

T = 2003 6 3.9239 (ET) [2452794.4239]

Peri. = 53.8068 e = 0.250224

Node = 333.3512 a = 7.286059(AU)

i = 1.9493 q = 5.462918(AU)

n = 0.05011459/Day P = 19.667884 Year

Epoch = 2003 6 12.5 (ET) [2452803.0]

Sun	Merc.	Venus	Earth	Mars	Jupi.	Satu.	Uran.	Nept.	Pluto
5.5747	5.1367	4.7452	4.5001	4.0505	0.6366	1.7293	14.0807	23.8456	26.4529

T = 2024 1 7.4516 (ET) [2460316.0516]

Peri. = 99.7167 e = 0.227280

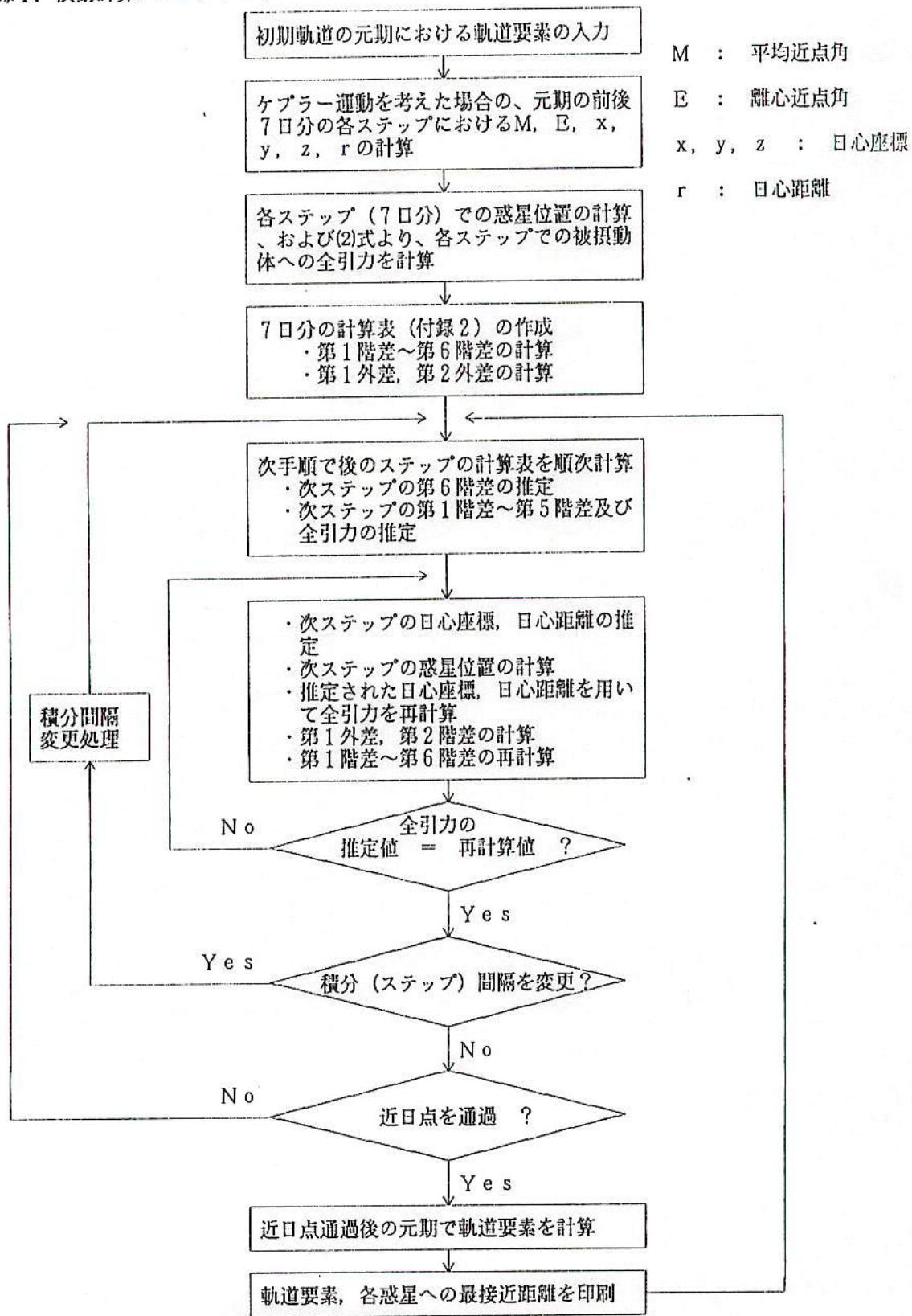
Node = 305.0745 a = 7.214426(AU)

i = 1.5643 q = 5.574734(AU)

n = 0.05086293/Day P = 19.378510 Year

Epoch = 2024 1 8.5 (ET) [2460318.0]

付録1. 摂動計算フローチャート



付録2. 計算表の例 (Comet P/Tuttle-Giacobini-Kresak)

Y	M	D	x	r	Sums		f(x)	Differences					
					2nd	1st		1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
73	5	23	-1.1022	1.1555	-11026677		52859	0	0	0	0	0	0
					373907	-1362		0	0	0	0	0	0
73	5	28	-1.0648	1.1522	-10652770		51497	-732	0	0	0	0	0
					425404	-2094		69	0	0	0	0	0
73	6	2	-1.0223	1.1525	-10227366		49403	-663	36	0	0	0	0
					474807	-2757		104	-10	0	0	0	0
73	6	7	-0.9749	1.1563	-9752559		46646	-559	25	0	0	0	0
					521454	-3316		129	-13	0	0	0	0
73	6	12	-0.9227	1.1636	-9231105		43330	-430	12	-13	0	0	0
					564784	-3746		142	-0	0	0	0	0
73	6	17	-0.8663	1.1742	-8666321		39584	-288	-11	2	0	0	0
					604368	-4034		142	-11	0	0	0	0
73	6	22	-0.8059	1.1881	-8061954		35550	-146	-11	3	0	0	0
					639918	-4180		130	-8	0	0	0	0
73	6	27	-0.7419	1.2050	-7422036		31370	-16	-19	3	0	0	0
					671288	-4196		112	-4	0	0	0	0
73	7	2	-0.6748	1.2248	-6750748		27173	95	-23	3	0	0	0
					698461	-4101		88	-1	0	0	0	0
73	7	7	-0.6050	1.2472	-6052287		23072	184	-24	2	0	0	0
					721533	-3917		64	1	0	0	0	0
73	7	12	-0.5329	1.2720	-5330753		19155	248	-23	2	0	0	0
					740689	-3669		42	3	0	0	0	0
73	7	17	-0.4589	1.2991	-4590065		15486	290	-20	1	0	0	0
					756175	-3379		22	4	0	0	0	0
73	7	22	-0.3833	1.3281	-3833890		12107	312	-16	0	0	0	0
					768282	-3068		6	4	0	0	0	0
73	7	27	-0.3065	1.3588	-3065608		9039	318	-12	-0	0	0	0
					777321	-2750		-6	4	0	0	0	0
73	8	1	-0.2288	1.3911	-2288287		6289	311	-9	-1	0	0	0
					783610	-2439		-15	3	0	0	0	0
73	8	6	-0.1504	1.4247	-1504677		3850	297	-5	-1	0	0	0
					787460	-2142		-20	2	0	0	0	0
73	8	11	-0.0717	1.4595	-717217		1708	277	-3	-1	0	0	0
					789168	-1865		-23	2	0	0	0	0

81

MS-05f

太陽系(流星群)

1987年四分儀座流星群の軌道の進化

大塚勝仁(東京歯大)・吉川 真(東大理)・渡部潤一(国立天文台)

コットンルーム彗星母彗星

三月村山

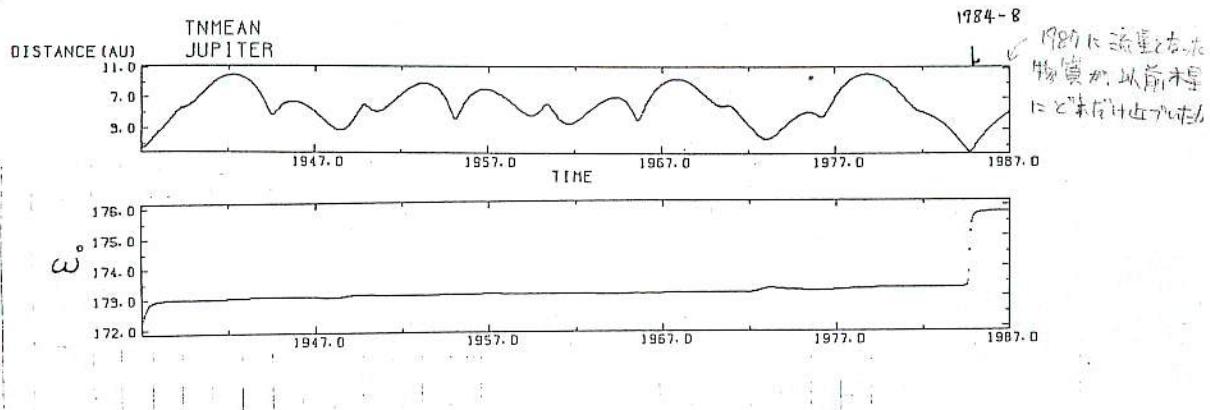
四分儀座流星群は周期約5年で、その軌道は近日点と遠日点付近でそれぞれ地球と木星の軌道と交差する短周期流星群に属するが、軌道傾斜角が約 70° という木星族短周期彗星には見られない特異性を有している。1987年の1月3日には平常より4倍も多い約200個/時間の同流星雨の出現が認められ、東京流星観測網(TMN)では同夜6個の群流星が2~3点から50mm火球カメラによって同時撮影され軌道決定された。過去の写真観測で同一夜に複数個の四分儀座流星が撮影され、精度良く軌道決定された例は少なく、1954年のHarvardのSuper-Schmidt CameraによるNASA-NMSUのeとaの値の違いは、流星速度決定法の誤りに起因する系統的誤差の導入によるものと考えられ、この速度を補正すればHarvardやTAOのデータと殆ど差がなくなるものと思われる。ところがTMNの結果はこれら3データと比較して ω が約 5° 大きく、明らかな有意差がなくなるものと思われる。この原因が惑星運動(特に木星)の影響によるものと予想し、1987年の平均的軌道要素を持つ流星体の運動方程式を、8次のRunge-Kutta法を適用して数値積分して、1987年の観測時より50年前に遡って計算したところ、1984年8月に木星に0.2AUまで接近し軌道が大きく変化した事、又、それ以前にはこの様な流星体の軌道は地球の軌道と交差しなかった事が判明した。さらに1987年の個々の流星体についても同じ方法で調査したが、木星との接近距離や時刻に多少の差はあっても、やはり同様な結果となった。これは明らかにこれまで観測された事がないものと考えられる。尚、今回の研究では流星体に及ぶP-R効果やYa-R効果などの非重力的運動を算入していないが、写真流星体の質量($\sim 1\text{ g}$)を考慮すれば、50年という比較的短い時間スケールに於いては全く無視しても差し支えないものと考えられる。

以上から1987年の四分儀座流星群の軌道の力学的進化が認められた訳であるが、今迄流星群の軌道は惑星の運動により進化する事が理論的に言及されてきたが、その直接的証拠が得られた観測は世界的にみても前例が無く、今回が初めてである。この様な現象は木星が四分儀座の遠日点に接近する度ごと(12年周期)に起こりうる事で、それ故に1999年にも同様な現象が観測されるかもしれない。四分儀座の太陽系空間に於ける構造を解明する為にも、今後も精度の良い写真データが蓄積されていく事を望む。

Table I. Mean Orbital Elements for Photographic Quadrantid Meteors(Equinox J2000.0)

Obs.	No. of Met.	Date(UT)	α	R.P. - δ	e	q (AU)	a (AU)	i	ω	Ω
Harvard	11	54- 1- 3.45886	230°3 +49°3	0.674	0.978	3.004	71°7	171°1	283°2	
S.D.		±0.05561	±2.3 ±0.9	±0.016	±0.003	±0.141	±1.5	±3.8	±0.1	
TAO	6	55- 1- 3.80128	230.7 +49.6	0.661	0.978	2.902	71.0	171.2	283.3	
S.D.		±0.04571	±2.0 ±1.1	±0.030	±0.003	±0.260	±1.5	±3.8	±0.1	
NASA-NMSU	3	76- 1- 4.36437	230.6 +49.5	0.635	0.978	2.69	70.6	171.2	283.5	
S.D.		±0.02327	±0.8 ±0.4	±0.021	±0.001	±0.16	±0.7	±1.1	±0.1	
TMN	6	87- 1- 3.79780	227.7 +50.2	0.672	0.982	3.01	72.4	175.8	283.1	
S.D.		±0.03137	±0.5 ±0.9	±0.023	±0.001	±0.22	±0.9	±1.8	±0.1	

Fig. 1. Short-term Orbital Evolution of 1987 Quadrantid Meteor Stream(Equinox J2000.0)



「流星物質の流れ」の進化に関する考察（その2）
 -四分儀座流星群流の木星摂動による力学進化-

日高 英治

Study about Evolution of Meteoroid Streams (Part 2)
 - Mechanical Evolution of Quadrantid Meteoroid Streams by Jupiter Perturbation -

Eiji Hidaka

1. はじめに

前回は、試作した摂動計算プログラムの概要紹介とその検証を行った。そこで一番の課題とした惑星位置決定精度の向上は、残念ながらまだ達成されていない。もう一つの課題であった計算時間の短縮は、MS-DOS BASIC コンパイラの使用により約半分にすることができた。

そういう現状においては、惑星に異常接近するケースや長時間の摂動計算は避けなければならない。そこで今回は、ある楕円軌道を描く流星群物質の流れがその軌道上を回転する間に、惑星摂動により各点の流星物質の軌道要素がどのように進化するかを調べることとした。計算例としては、四分儀座流星群の観測値を用いた。

2. 計算にあたっての前提条件

- ① 軌道要素に有意な差があるいくつかの観測値を、過去に遡って摂動計算し、それがほぼ一致する値を、その時点での流星群流の本流（摂動を受けて分岐ができる前の流れ）の軌道要素と仮定した。また、その時点を以降始点と呼ぶ。
- ② 始点は、大きな惑星摂動を受ける直前の近日点通過時刻（T）とした。
- ③ 本流は、幅を持たず、その流れを構成する流星物質は、始点においては単一の軌道上を連続して流れていると仮定した。
- ④ 近日点通過時刻以外の軌道要素は固定とし、近日点通過時刻のみを始点の前後に半周期分ずつずらし、分岐流計算の初期値（本流）とした。

3. 計算方法および手順

- ① 計算の始点と本流の軌道要素の初期値の決定
- ② 始点の前後へ10日間隔に半周期分ずらし、それぞれの点を近日点通過時刻とした軌道（他の軌道要素は始点の値を使用）の摂動を計算し、各点の一回帰後の近日点通過時刻での軌道要素を求める。
- ③ それ以後の摂動計算を続ける場合は、一回帰後の値を使い計算を進める。

4. 四分儀座流星群流の本流の決定

四分儀群の軌道が写真観測から精度よく求められたものとしては、Harvard(1954), TAO(1955), NASA-NMSU(1976), TMN(1987)の4例があるが、TMNの軌道は他の3つに比べ有意な差が認められる（大塚等、1990）。4つを代表して、TAOとTMNの過去約400年の軌道進化の様子を図1に示す。TMNで観測された流星物質は、1984年8月に木星に0.2AUまで接近してその軌道を変えている。その摂動以前の軌道は他の3つと若干差はあるが、計算の簡易化のため、今回はTMNの1984年の木星接近直前の近日点通過時刻での軌道要素を本流の軌道要素と仮定した。（表1）

尚、TAOとTMNの流星物質の軌道要素における近日点通過時刻（T）は、観測時刻をずらし、その軌道が観測時刻に地球に最接近するようにトライ・アンド・エラーで求めた。

表1 仮定した四分儀座流星群流の本流の軌道要素(B1950.0)

T	Peri.(ω)	Node (Ω)	i	e	η
1981 8 31.27	173.5°	282.7°	71.8°	0.669	1.002(AU)

5. 本流の力学進化の計算とその結果

まず、表1に示した軌道上に流星物質が連続して分布していると仮定し、近日点通過時刻だけを10日ずつ前後に半周期までずらした。そして、それらの各点が軌道上を一周して次の近日点に戻るまでの間に、木星との相対位置の違いにより、各点の摂動による影響がどのようにかわるかを調べた。各点の一周期後の近日点での軌道要素と木星との距離を図2に示す。

本流と木星の最接近は、TMNで観測された流星物質より僅かに20日だけ後れて起こっている。木星摂動による影響は、接近距離がおよそ1.5AU以内で受けており、0.8AU以内で特に大きい。また、当然ながら木星に上下どちらから接近するか、あるいは軌道の傾き具合により、前後の流星物質の影響の様子が変わる。

TAOで1955年に観測された流星物質は、TMNで観測された流星物質とはほぼ軌道上の反対方向にある。もし1955年に地球に衝突しなかったと仮定すると、図3に示す範囲では、1984.4.14と1989.2.17に近日点を通過する(図3)。摂動計算から求めたそれぞれの近日点通過時刻での軌道要素を表2に示す。図3と比較すると、ほぼ一致していることがわかる。

表2 TAO(1955)から計算した軌道要素(B1950.0)

T	Peri.(ω)	Node (Ω)	i	e	q
1984 4 14.62	172.1°	282.5°	71.4°	0.664	0.963(AU)
1989 2 17.00	172.0°	282.5°	71.5°	0.663	0.964(AU)

6. 考察

今回は、簡単のため單一本流モデルから一回帰分のみを計算したが、過去に遡って初期モデルを設定することにより、度重なる摂動を重ね合わせることで、より実際の流星群流に近い分布を得られるはずである。

もし、流星群流において過去のある時点に本当に本流なるものが存在するならば、この考え方を次のこととに応用することができる。

- ① 未来に出現する流星群流星物質の軌道予測
- ② 異なる軌道で観測された流星物質同志が同じ母天体起源であるか否かの検討
- ③ 母天体の究明

この考え方は、若い流星群や惑星摂動の影響を受けやすい流星群流について、その進化の概要を調べるときは、ある程度適用できるかもしれない。

しかし、一方流星物質はそれぞれ母天体からの放出方向・速度が違う上、その放出は摂動の影響を受けて軌道を刻々と変化している母天体から異なる時期に起こっている。従って、例え同じ母天体起源の流星物質であっても、単純な单一軌道の本流を持つとは考えられない。

今後は、母天体からの放出速度や方向を考慮し、ある程度軌道の幅を持った本流モデルを考えてみたい。

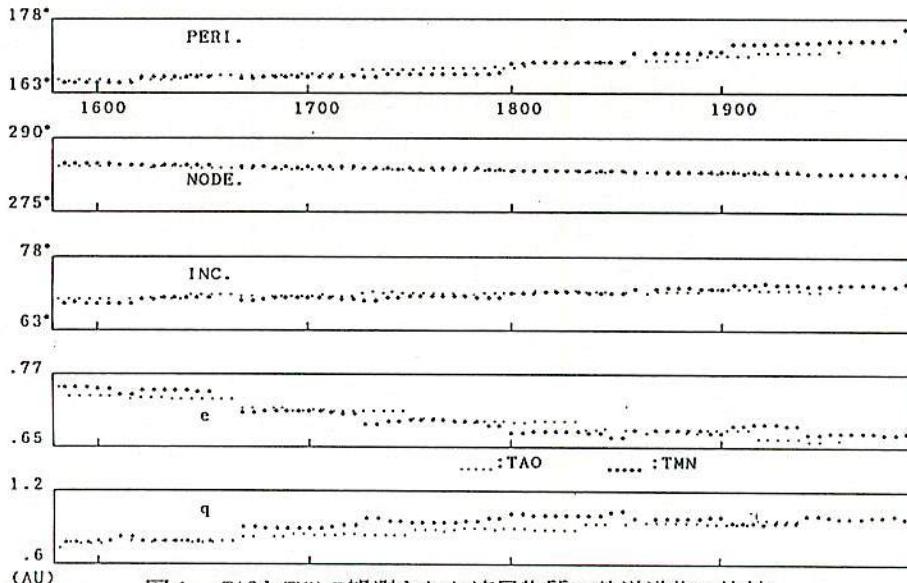


図1 TAOとTMNで観測された流星物質の軌道進化の比較

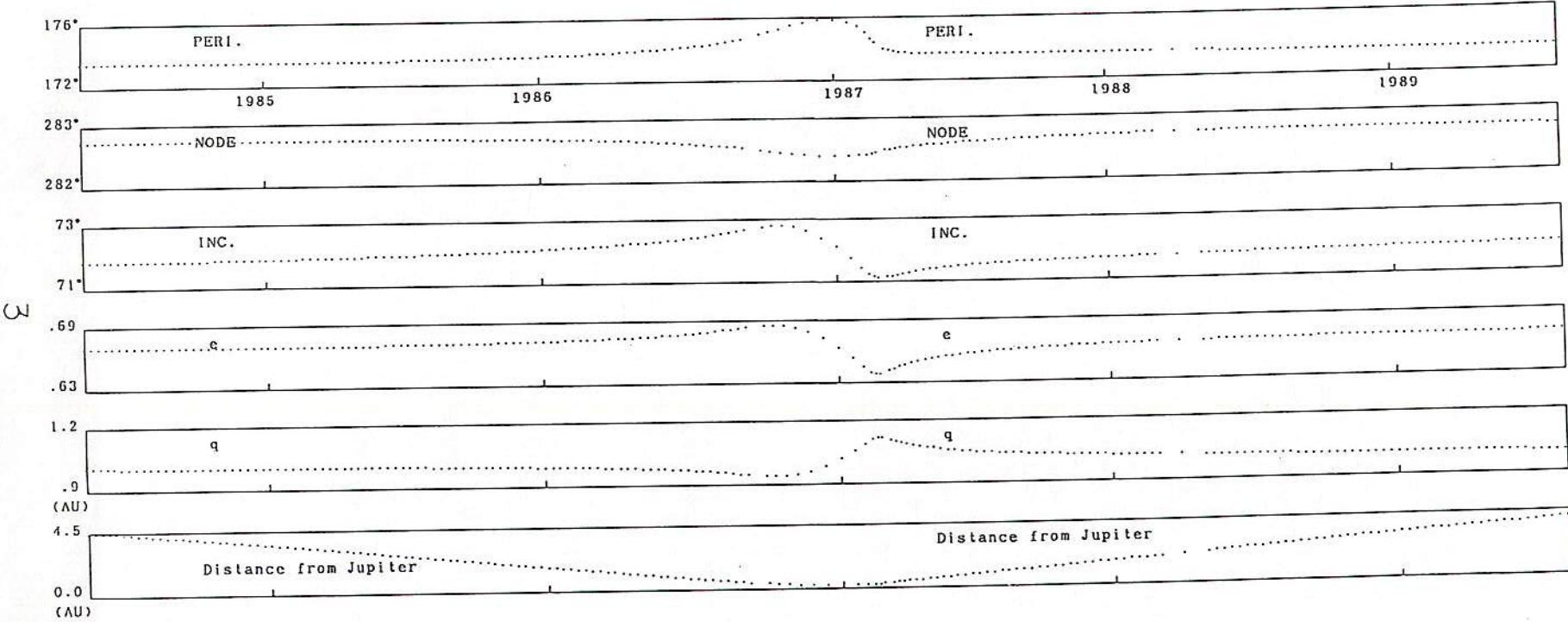


図2 本流各点の一回帰後の軌道進化と木星との最接近距離

MSS-055

MSS-055

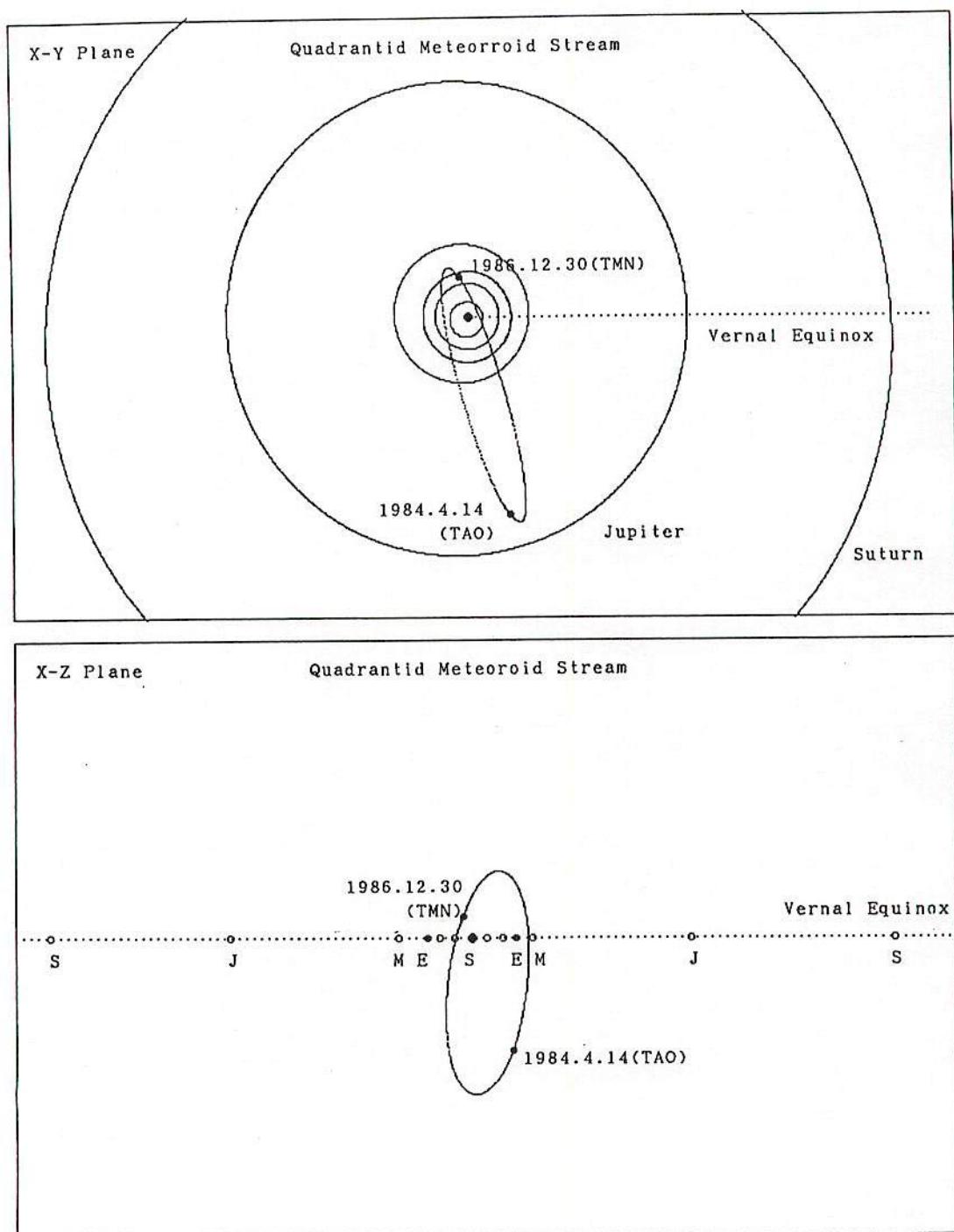


図3 TAOとTMNで観測された流星物質の軌道上の相対位置

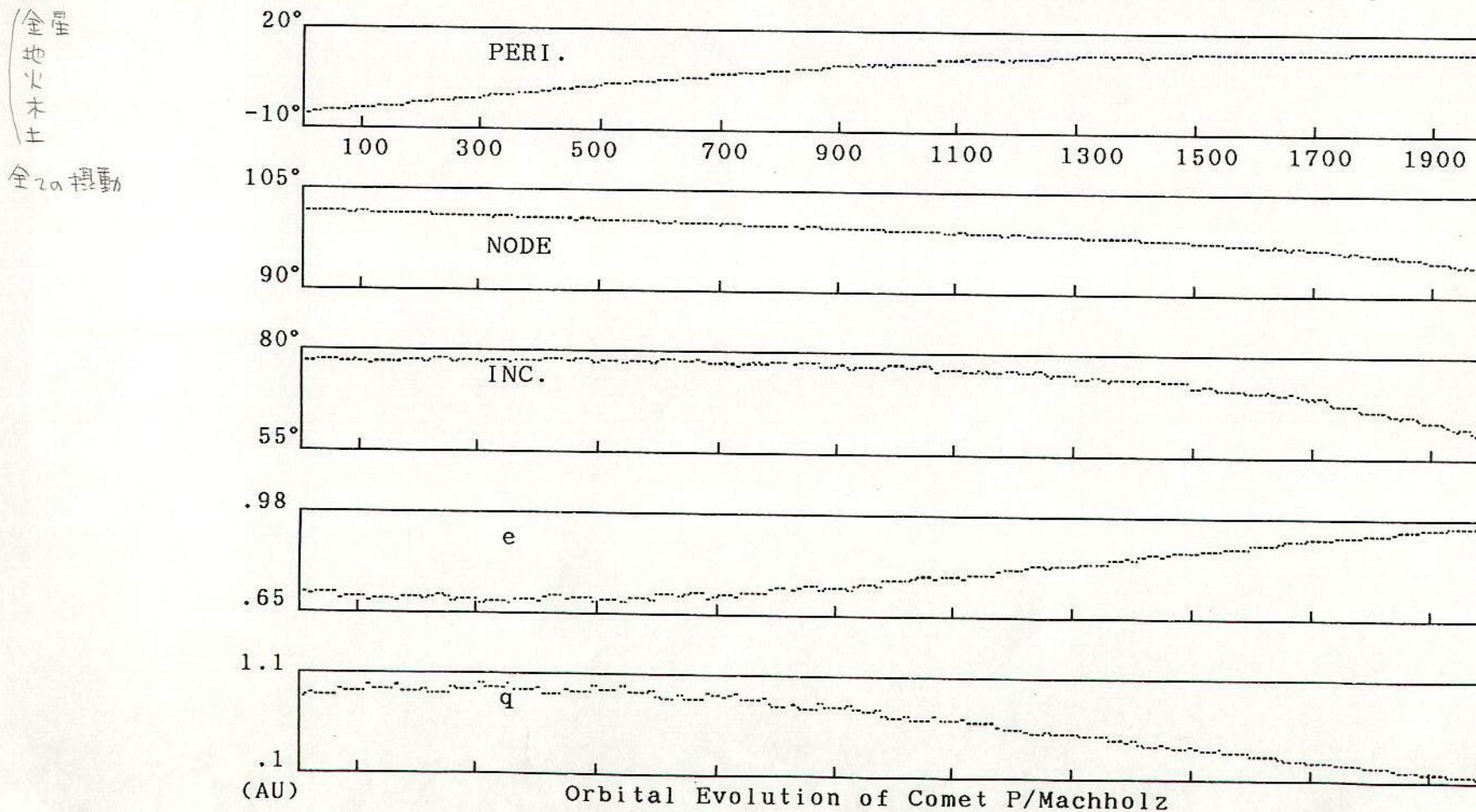
July 15, 1990

日高 英治

P/Machholzは1986年に検出された短周期彗星（約5.2年）であり、軌道傾斜角が大きく、近日点距離がかなり小さいという特異性を持つ興味深い彗星である。また、この彗星は四分儀座流星群の母天体ではないかとの報告もある。

特に Ω 、 ω 、 q の軌道要素が四分儀座流星群とは異なるため、過去の約2000年の軌道進化の様子をカウエルの方法による摂動計算で求めてみた。近日点距離約0.1AUと異常に小さいため、太陽付近では計算間隔を約0.3日とした。木星への異常接近はないため、この計算結果は大局的な進化の傾向を見る程度の信頼性はあると思われる。

下図からもわかるように、P/Machholzの軌道要素は4000～5000年程度の長い変動周期を持っている可能性が高く、その間に四分儀座流星群の軌道と接近することは考えられることではない。しかし、四分儀群流は流星群の出現期間が短いことからあまり分散していないと予想されるため、それほど遠い過去に母天体からの放出が起こったとは考え難く、その程度の期間で、惑星摂動のみの影響で軌道要素にこれほどの隔たりが生じたとも考え難い。また、P/Machholzがその軌道要素に長周期摂動を伴っていたにせよ、0.1AUもの距離まで太陽に接近しながら何万年、何十万年も存続し得たというのも疑問である。



KPM77022はNereusの子供か？

66th MSS 1993/04/11

小笠原 雅弘

1982年ヘリンによって発見されたアポロ型小惑星1982DBは、その後確認の観測がなされ(4660)Nereusと命名された。この小惑星へは、1990年代後半に探査機による接近観測がNASA、宇宙研で検討されている。

Nereusの軌道と地球の軌道は近接している為、関連する流星群が予想されていた。（長谷川他1992）たまたま、この輻射点表を見ていたとき、1977年小惑星関連の流星としてすでに報告したKPM77022のものと良く一致していることに気付いた。（小笠原他1979）

NereusとKPM77022の軌道を図1に示す。遠日点がずいぶん大きいことを除けば両者は大変良く似た軌道であることがわかる。

本当に77022は小惑星起源か

図2に 1972-1980年に KPMで捕らえた同時流星の発光点、消滅点高度を示す。この図を見ると 77022、7501の消滅点が著しく低いことがわかる。これらの流星が他のものに比べて壊れにくい性質を持っていると考えられる。

両流星とも写真測光が行われており、減速度をもとにした力学的質量と測光質量の比較を行っている。（方法について 流星II p73-86 参照）

その結果、図3に示すように 77022は $\rho=3.7\text{g/cm}^3$ 、7501は $\rho=2.1\text{g/cm}^3$ に近くそれぞれ普通コンドライト、炭素質コンドライトの密度と一致することがわかった。そんなことからも 77022 はNereusの子供と考えてもよいのではないだろうか。

1998年、NASAが打上げを予定している探査機NEARが、2000年にNereusに接近した時、普通コンドライト隕石と同じ表面特性を持ちクレータにうがたれた複雑な形状を我々は目にすることだろうか。

軌道要素	a	e	i	Ω	ω	π	R.A.	Dec
	A.U.						1950	
77022	2.07	0.569	0.16	81.8	41.2	123.0	48.1	17.4
Nereus	1.49	0.380	1.20	314.1	157.9	112.0	36	20 ~ 直径 300~400m

参考文献

長谷川、上山、大塚 1992 Pub. Astron. Soc. Japan, 44 p.45

小笠原、寺田、長沢 1979 日本天文学会1979秋季年会集録

図1 KPM77022とNereusの軌道

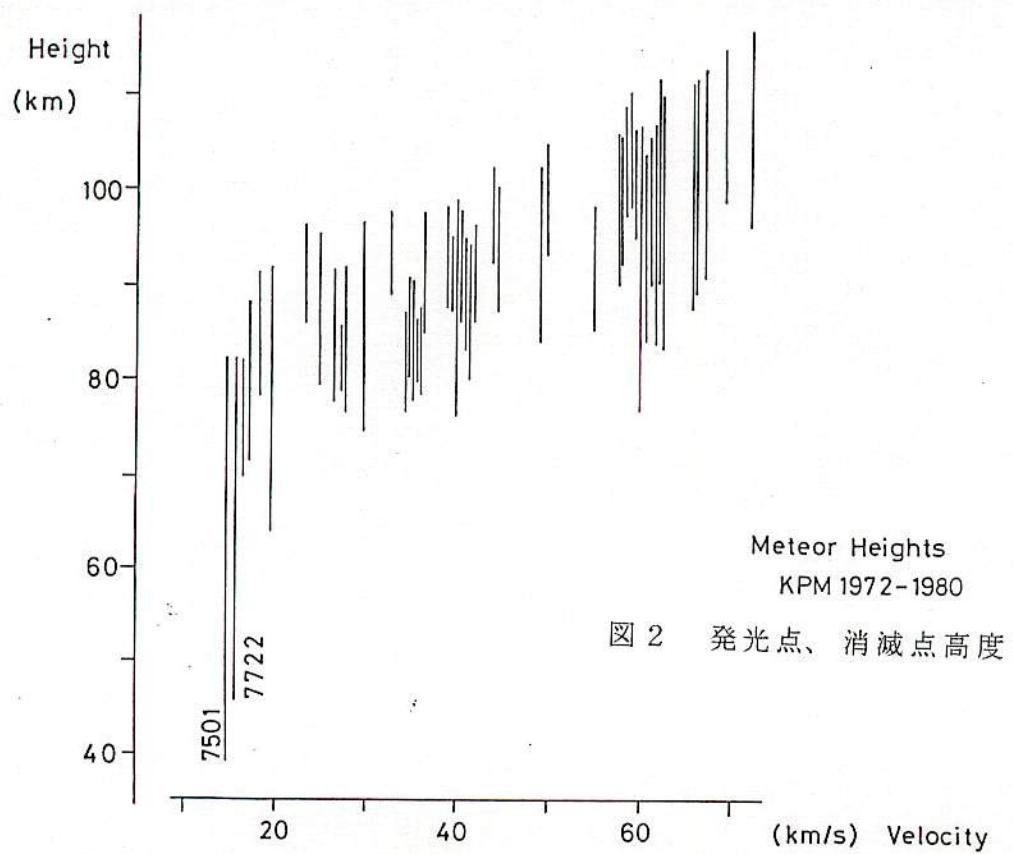
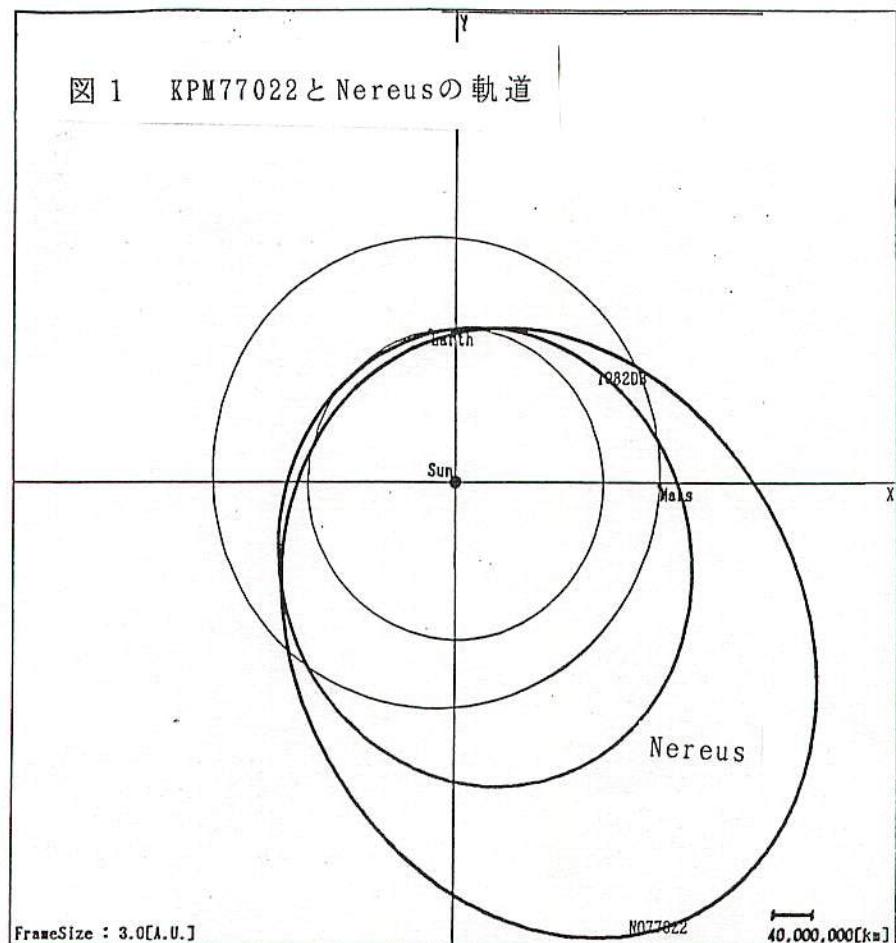
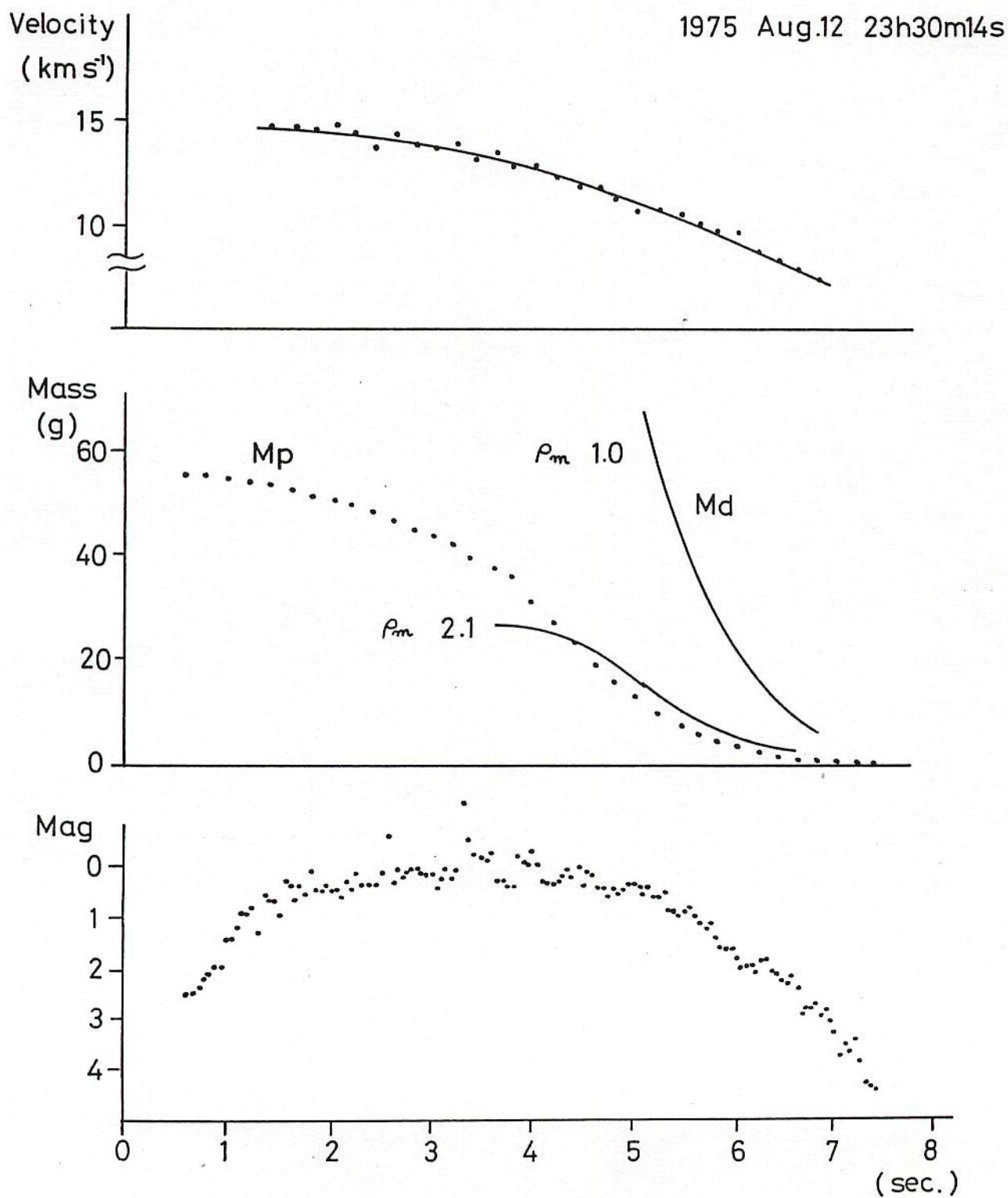


図3 力学的質量と測光質量の比較

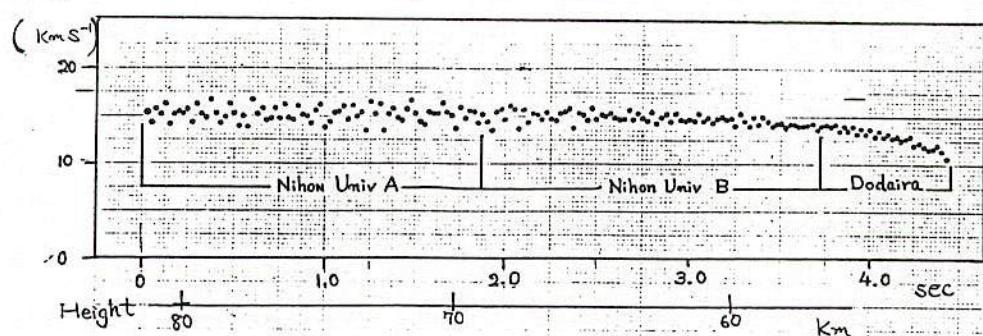
KPM 7501



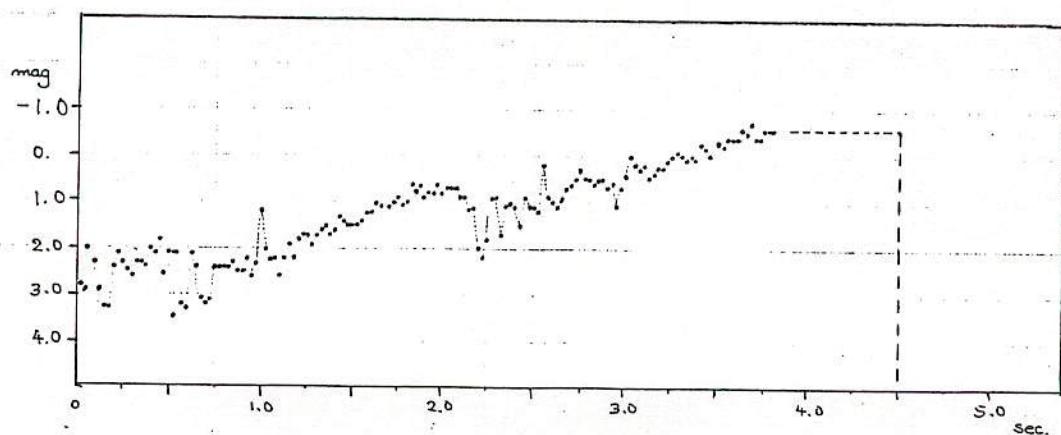
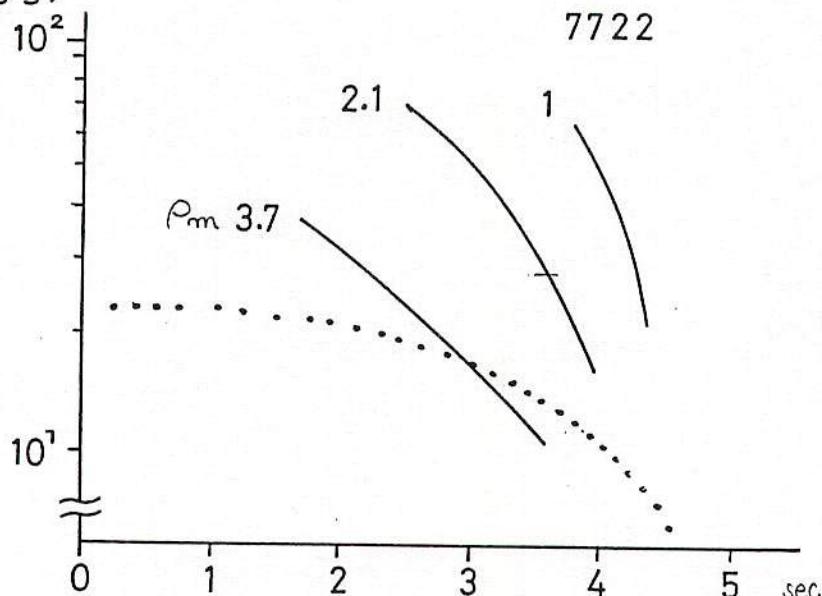
KPM 77022

1977 Dec. 14 03^h14^m58^s

Velocity



Mass

 $(\log g)$ 

輻射点表示用パソコン星図の開発
The PC star map for the meteor radiants

重野 好彦 (Shigeno Yoshihiko)
流星物理セミナー・
ワーキンググループ(MSS-WG)
211 川崎市木月住吉町 2024

要旨

軌道計算により求められた輻射点位置は、数字で表現されるため、直観的に分かりにくいと言う問題がありました。そこで輻射点位置を星図上に表示する、パソコンを利用した、グラフィック・プログラムを開発しました。

1.はじめに

流星物理セミナー・ワーキンググループでは、表1、2の通り290個の同時流星を観測しています。これらの同時流星軌道データは、早く正確に情報伝達を行うため、パソコン通信を利用しています。しかし、パソコン通信はグラフィックデータを簡単に送ることができないため、文字のみの伝達となってしまいます。そこで少しでもイメージをつかんでもらうために、図1の様な輻射点分布図を作成しています。しかし、これでは周りの恒星との位置の比較ができないため、あまり役に立ちません。そこで、パソコンのグラフィックを利用して星図を作画させ、その星図上に輻射点位置を表示させるプログラムを開発しました。これにより、輻射点分布が直観的に理解できる様になりました。また初心者の方にも見て理解しやすい星図ができましたので紹介します。

[Table. 1 MSS-WG Meteor Catalogue]

観測日 Date	個数 ID number	観測日 Date	個数 ID number	観測日 Date	個数 ID number
1992. 以前	P0 32	1993. 10. 24/25	I5 59	1994. 10. 14/15	IA 9
1992. 12. 30/31	I1 32	1993. 11. 15/16	I6 20	1994. 10. 22/23	IB 8
1993. 03. 20/21	I2 9	1994. 03. 06/07	I7 25	1994. 11. 16/17	IC 11
1993. 08. 12/13	I3 10	1994. 03. 17/18	I8 1	1995. 01. 06/07	ID 19
1993. 10. 11/12	I4 26	1994. 08. 12/13	P9 12	1995. 05. 06/07	IE 17
写真合計		IDの左の桁 P:写真観測 I:IIを利用したTV観測			
I I 合計		IDの右の桁 觀測ごとのナンバー			
全合計					

写真合計	44	IDの左の桁 P:写真観測 I:IIを利用したTV観測
I I 合計	246	IDの右の桁 觀測ごとのナンバー
全合計	290	

2.パソコン星図

星表としては、SAO星表を利用し、1950年分点を2000年分点に変換して使用しています。最微等級は眼視等級で6.0等級とし、恒星数は全天で5,108個です。また画面への投影法は、なるべく広い視野が投影できる様に、正積等角投影法を利用しています。よって流星経路は直線ではありません。

星図上の星座を折れ線で表示していますが、黄道12星座のみの表示となっています。理由は全天88星座の折れ線データを持っていないため、黄道12星座のみ、野外星図(誠文堂新光社)を参考にして、折れ線データを作成しました。

星図上の輻射点位置は流星のID記号で表示されています。ID記号文字の中心位置が真輻射点の位置になります。ID記号は、1回の観測ごとにそれぞれの流星に数字、アルファベット、カタカナの1文字で表現されます。よって星図上のID記号と軌道データのID記号とが対応が取れています。

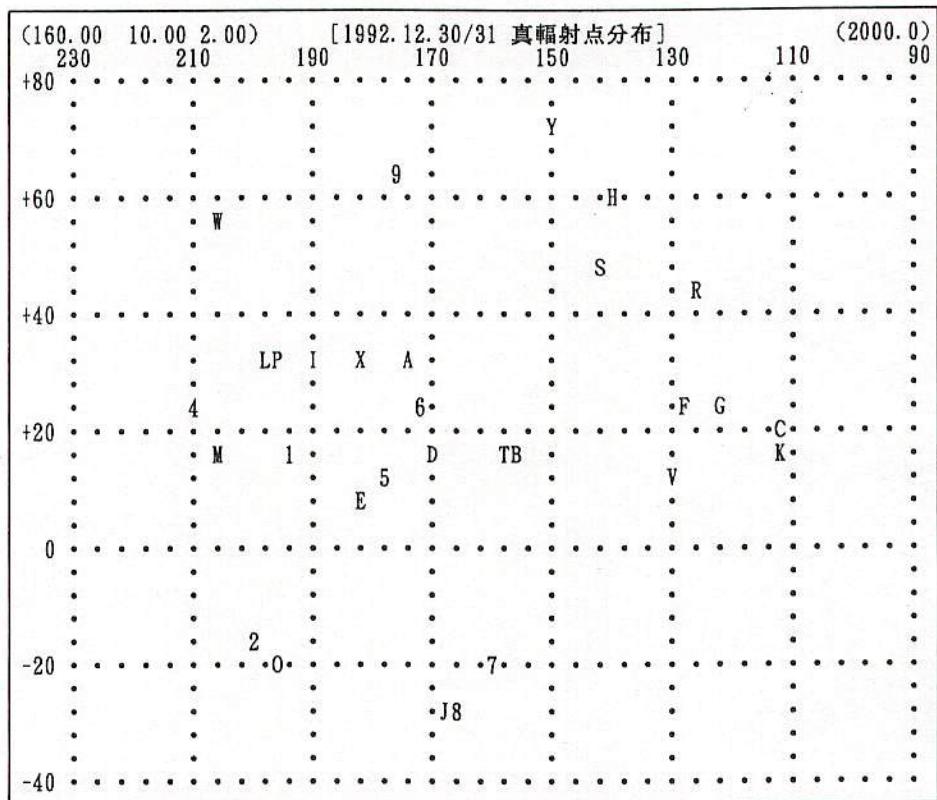
3、実際例

図1が従来の文字のみを利用した真輻射点分布図です。文字のみですから、パソコン通信で簡単に転送することができます。図2が同じ視野のグラフィック星図です。星座、恒星との位置の比較が非常にやりやすくなっています。

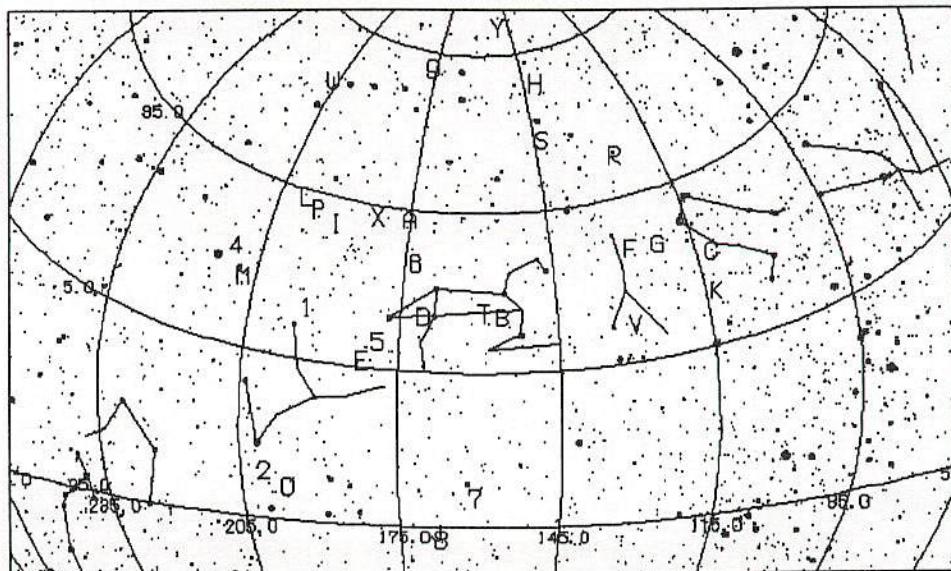
図3～8に、主な星図と真輻射点分布を紹介します。

4、流星物理セミナー・ワーキンググループ(MSS-WG)は、以下のメンバーで構成されています。重野好彦 戸田雅之 塩井宏幸 柳信一郎 進藤泰昭 田中正一 顧問:橋本岳真。

[Fig. 1]
True Radiants
1992.12.30/31
(2000.0)
MSS-ID : I1

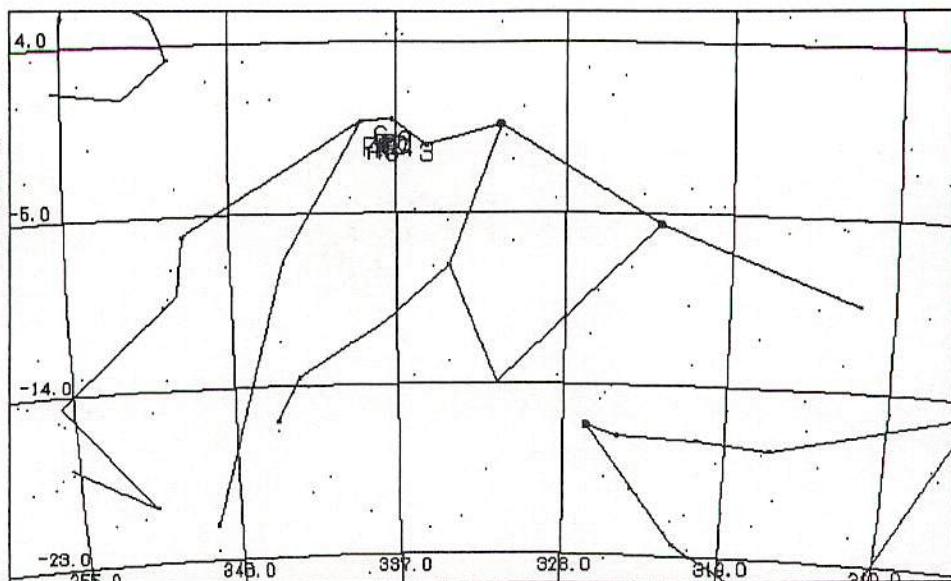


[Fig. 2]
True Radiants
1992.12.30/31
(2000.0)
MSS-ID : I1



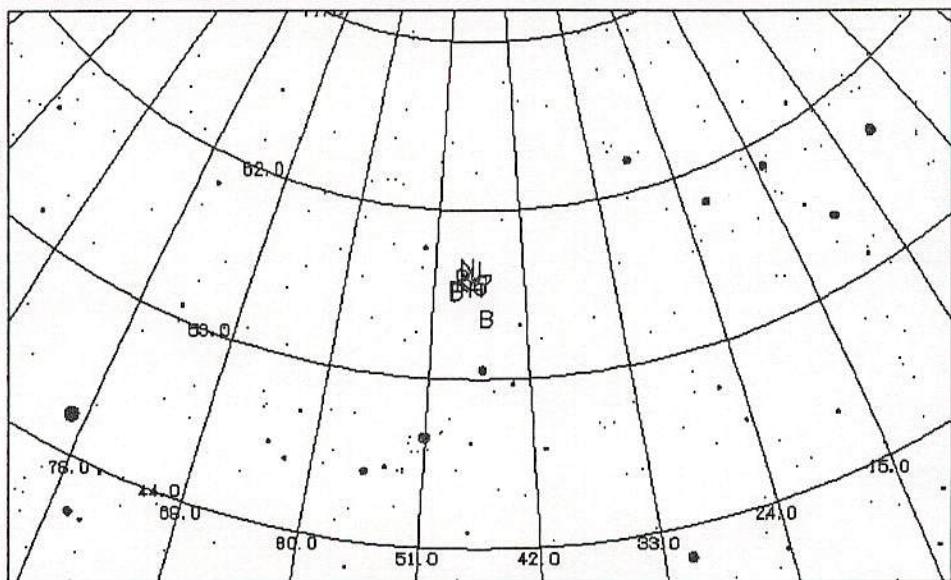
[Fig. 3]

η - Aqr.
 True Radiants
 1987.05.04/05
 1989.05.04/05
 1989.05.05/06
 (2000.0)
 MSS-ID : P0



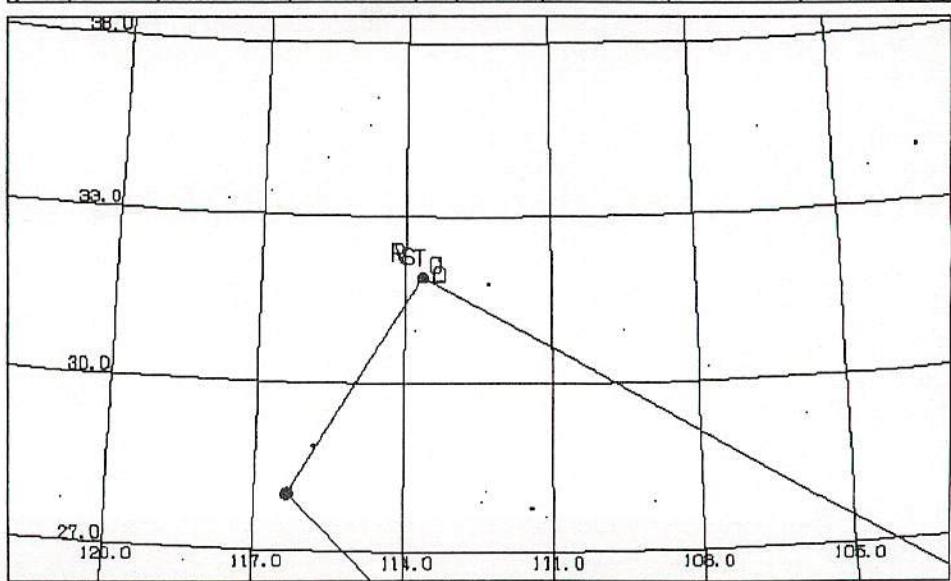
[Fig. 4]

Per.
 True Radiants
 1994.08.12/13
 (2000.0)
 MSS-ID : P9

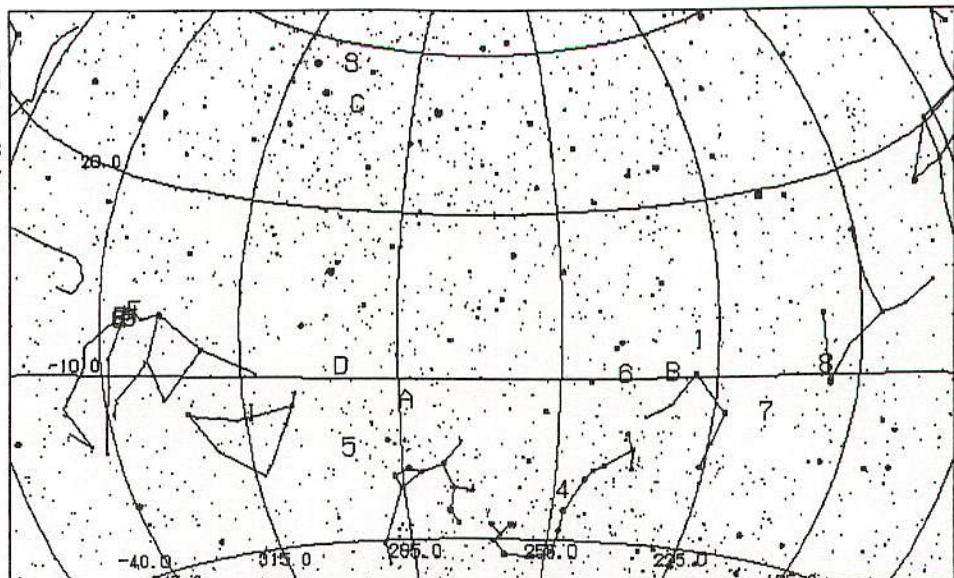


[Fig. 5]

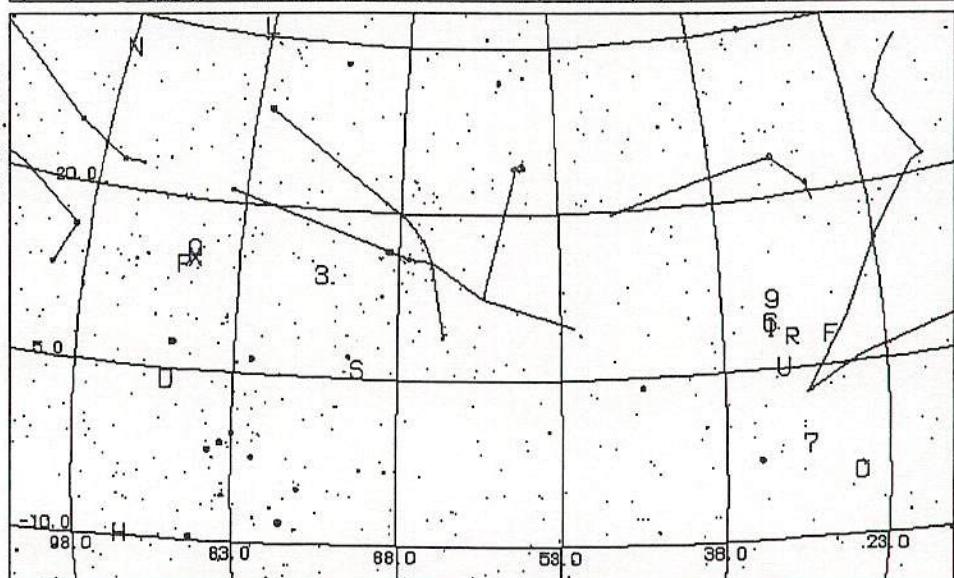
Gem.
 True Radiants
 1991.12.14/15
 (2000.0)
 MSS-ID : P0



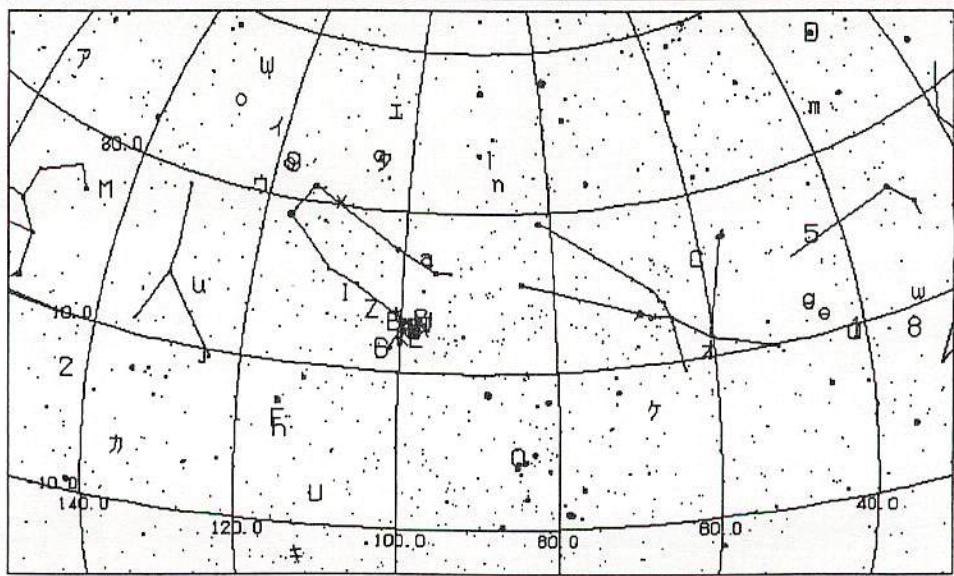
[Fig. 6]
 η -Aqr. etc.
 True Radiants
 1995.05.06/07
 (2000.0)
 MSS-ID : IE



[Fig. 7]
 ξ -Ori. ξ -Cet.
 True Radiants
 1993.10.11/12
 (2000.0)
 MSS-ID : I4



[Fig. 8]
 Ori. etc.
 True Radiants
 1993.10.24/25
 (2000.0)
 MSS-ID : I5



1995.10.15 第76回MSS
RVOでシミュレーションした「こいぬ群」の軌道

MSS-WG 塩井宏幸

重野良彦氏によって、輻射点と速度から軌道要素を計算するソフト「RVO」が作成されました。今回は、そのソフトを使用して、まだ軌道要素がよくわかつていない流星群である12月のふたご群の極大期を中心に活動する「こいぬ群」の軌道シミュレーションを、橋本岳真氏の1993年の調査を元に行ってみました。

1. こいぬ群の輻射点と速度

橋本氏が過去の観測を $\lambda - \odot - \beta$ 法を使用して集計した結果、「こいぬ群」には次の2つの輻射点の集中が見られる事がわかりました。いずれも、太陽黄経は極大 $\odot = 261^\circ$ を仮定されています。

$$\textcircled{1} \quad \alpha = 115^\circ \quad \delta = +5^\circ$$

$$\textcircled{2} \quad \alpha = 111^\circ \quad \delta = +12^\circ$$

速度については、Babazhanov & Oburubov(1987)のデータ

$VG = 35 \sim 44 \text{ km/s}$ の範囲を採用しました。

以上のデータを用いてシミュレーションを行った結果が、表1. 2. です。

表1. ①の軌道シミュレーション (図のSim-1)

LS	α	δ	VG	a	e	q	ω	Ω	i	λ	β
261	115	+5	35.0	1.08	0.885	0.125	149.3	81.0	41.7	237.1	19.9
"	"	"	36.0	1.14	0.894	0.121	149.2	81.0	44.0	237.8	20.8
"	"	"	37.0	1.20	0.902	0.117	149.0	81.0	46.4	238.5	21.9
"	"	"	38.0	1.27	0.910	0.114	148.8	81.0	48.8	239.3	22.9
"	"	"	39.0	1.36	0.918	0.111	148.6	81.0	51.2	240.1	24.0
"	"	"	40.0	1.46	0.925	0.109	148.3	81.0	53.7	240.9	25.1
"	"	"	41.0	1.58	0.932	0.107	147.9	81.0	56.2	241.8	26.2
"	"	"	42.0	1.74	0.939	0.106	147.4	81.0	58.8	242.7	27.4
"	"	"	43.0	1.94	0.946	0.105	146.9	81.0	61.4	243.7	28.7
"	"	"	44.0	2.19	0.952	0.105	146.3	81.0	64.0	244.7	29.9

表2. ②の軌道シミュレーション (図のSim-2)

LS	α	δ	VG	a	e	q	ω	Ω	i	λ	β
261	111	+12	35.0	1.29	0.908	0.119	148.0	81.0	24.8	231.4	12.8
"	"	"	36.0	1.37	0.918	0.112	148.3	81.0	26.3	232.0	13.5
"	"	"	37.0	1.47	0.928	0.106	148.7	81.0	27.8	232.7	14.0
"	"	"	38.0	1.59	0.937	0.100	149.0	81.0	29.5	233.4	14.7
"	"	"	39.0	1.74	0.945	0.095	149.3	81.0	31.2	234.1	15.3
"	"	"	40.0	1.93	0.953	0.090	149.6	81.0	33.0	234.8	16.0
"	"	"	41.0	2.17	0.961	0.085	149.8	81.0	34.9	235.5	16.7
"	"	"	42.0	2.50	0.968	0.081	150.1	81.0	36.9	236.3	17.4
"	"	"	43.0	2.96	0.974	0.077	150.3	81.0	39.0	239.1	18.2
"	"	"	44.0	3.67	0.980	0.073	150.5	81.0	41.2	237.9	18.9

結果は、いずれの輻射点とも速度の違いの影響が、軌道傾斜角に顕著に現れています。同じ速度で比較すると、軌道傾斜角は輻射点が黄道に近い②が①より約20度小さく、近日点黄経は輻射点の赤経が小さい②が①より約7度小さくなっています。また、軌道長半径は②が①と比べ、相対的に大きくなっています。

2. 関連天体の軌道との比較

橋本氏によると、こいぬ群は過去にP/Mellish(1917 I)彗星との関連が指摘されていましたが、現在では直接の関連はないと言われているようです。また、同彗星起源とされる、いつかくじゅう群の他に、ふたご群との関連を指摘する研究もあるようです。そこで、まず P/Mellish彗星の軌道から長谷川一郎先生の輻射点予想ソフトを使用して、輻射点と軌道要素を計算してみました。

P/Mellish(1917 I)彗星の軌道要素

Object	a	e	q	ω	Ω	i	λ	β
P/Mellish	27.6	0.9931	0.1902	121.32	88.67	32.68	214.5	27.5

同彗星からの予想輻射点と軌道

① e・qを固定して仮定した昇交点にて

LS	α	δ	VG	a	e	q	ω'	Ω'	i'	λ'	β'	R	Δ
263	104	+9	41.5	27.6	0.993	0.190	128.3	82.8	32.5	215.9	25.0	0.984	-0.064

②太陽黄経261度にて

LS	α	δ	VG	a'	e	q'	ω'	Ω'	i'	λ'	β'	R	Δ
261	102	+9	41.4	28.0	0.993	0.193	127.8	81.0	32.4	213.6	25.1	0.984	0.062

太陽黄経が2度しか異なるので、軌道はほとんど変わりませんでした。次に、いつかくじゅう群とふたご群の軌道要素を「流星群カタログ／塩井・重野」の基準軌道表から掲載します。

いつかくじゅう群の軌道要素

LS	α	δ	VG	a	e	q	ω	Ω	i	λ	β
261	106	+9	42	4.6	0.97	0.15	138	81	37	225	24

ふたご群の軌道要素

LS	α	δ	VG	a	e	q	ω	Ω	i	λ	β
261	112	+32	35	1.4	0.90	0.14	324	261	23	227	-13

これらの軌道要素を、図1.2.の軌道図にまとめて描きました。軌道図を見ると、いつかくじゅう群の母天体と言われるP/Mellish彗星は、同群の軌道と比べてかなり大きく、直接的な関連に疑問を感じます。いつかくじゅう群とこいぬ群の軌道は良く似ていますが、近日点黄経が10度～15度異なり、別群と思われます。しかし、いつかくじゅう群の分枝と考えてもよいのではないかとも思います。また、近日点黄緯が異なり、小惑星起源と考えられているふたご群との関連については良くわかりませんが、これら全体がひとつの超母天体から派生した複合体である可能性はあると思います。

3. 参考文献

橋本岳真, 1993, 「こいぬ座流星群の観測・研究史と活動状況」, 日本流星研究会論文集Vol. 3

図1. 黄道北極より

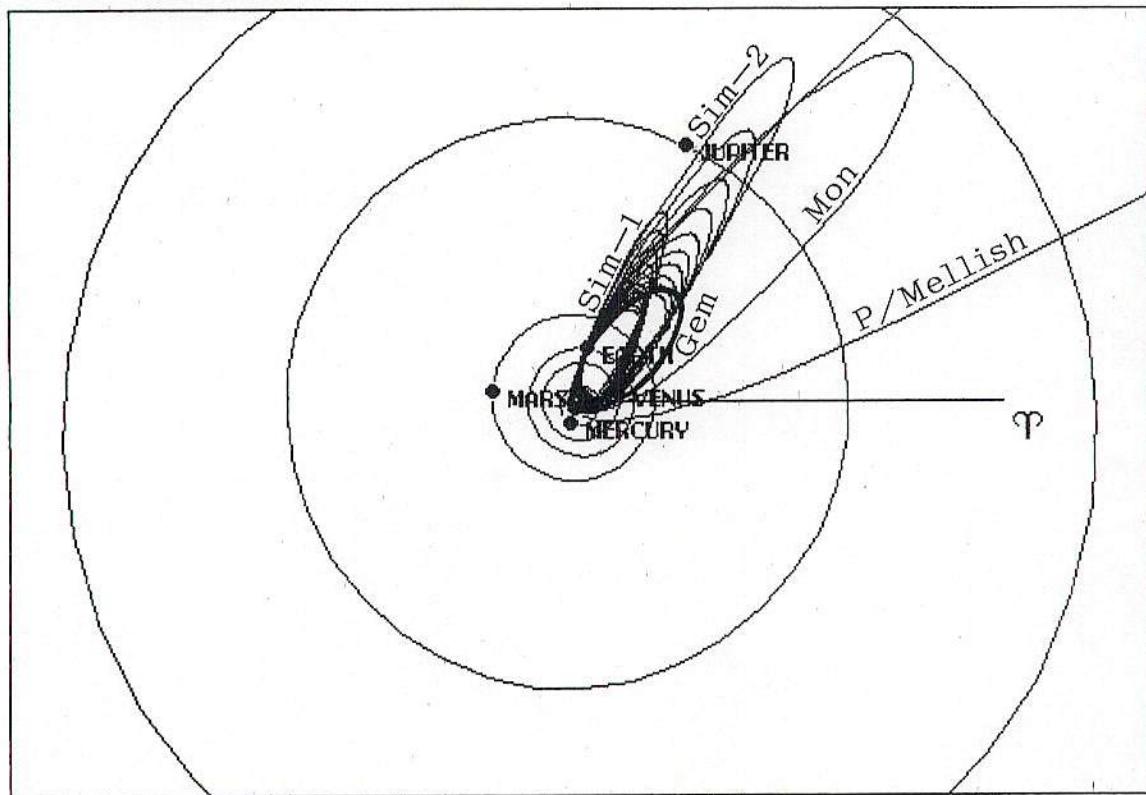
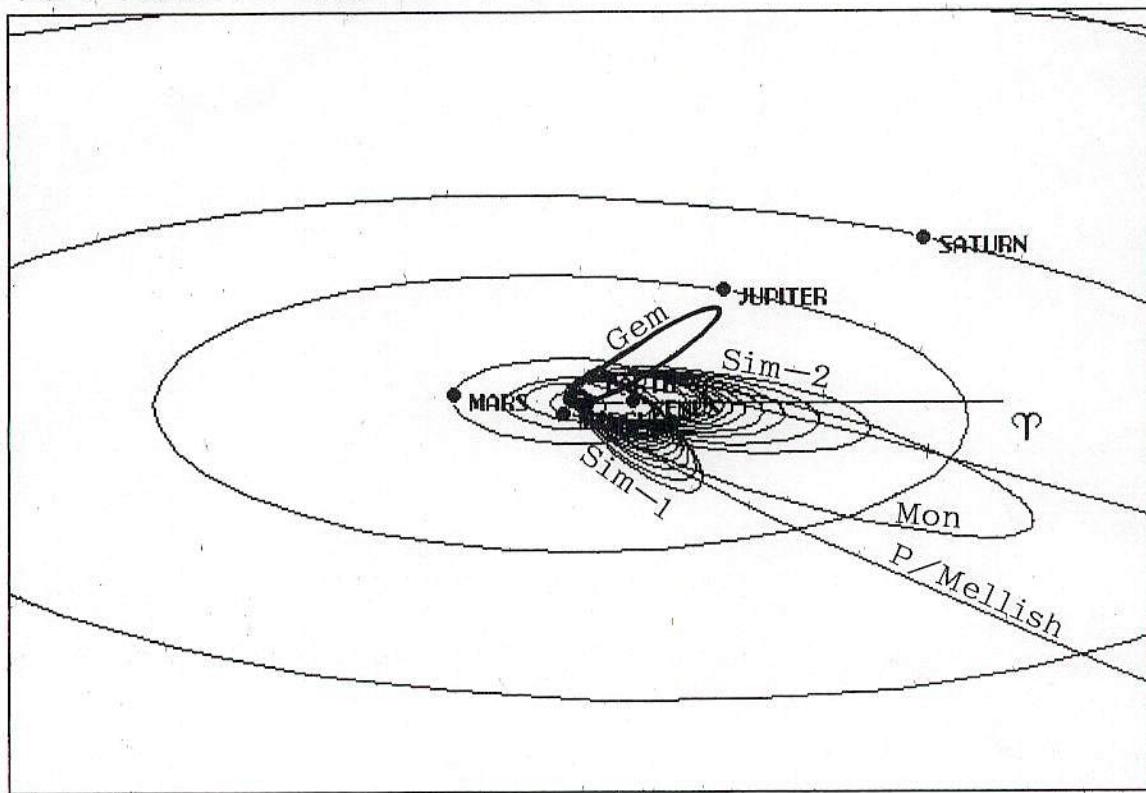


図2. 黄経270° 黄緯30° より



【おまけ1】

ヘル・ボップ彗星としぶんぎ群との関連について、NMS同報にて岡安裕之氏によって指摘されたのをきっかけに、長谷川一郎先生のソフトを使用して、同彗星からの輻射点予想をしてみました。

》 NMS同報 8/12B 岡安

	a (AU)	q	e	i	Ω	ω	P
>しぶんぎ	2.9	0.978	0.661	71	284	171	
>Machholz	3.00	0.126	0.958	60.1	94.5	14.5	5.24
>1491 I	-	0.761	1.0	73.4	280.2	164.9	-
>1995 01	164	0.913	0.994	89.4	282.5	130.7	3200

Hale-Bopp(199501)彗星からの流星の予想輻射点と軌道】

LS(月/日)	α	δ	VG	a	e	q	ω'	Ω'	i'	λ'	β'	R	Δ
282(1/4)	230	36	51.8	164	0.994	0.913	149	282	89	102	31	0.983	0.308

確かに、しぶんぎ群の極大と一致します。輻射点は、しぶんぎ群の位置より13度ほど南で、速度が10km/sほど速くなります。速度の違いは軌道長半径の違いが反映しています。ここしばらく、しぶんぎ群の観測時に注目してほしいと思います。

【おまけ2】

P/Schwassmann-Wachmann3彗星が9月中旬と10月上旬にバーストを起こしたというニュースがNMS同報で、橋本岳真氏によって報告されたのをきっかけに、同じく長谷川一郎先生のソフトを使用して輻射点予報してみました。

>	73P/Schwassmann-Wachmann 3 [= 1994w]												
>	From 106 observations 1979 Aug. 15-1995 June 20. (4) Kinoshita												
>	Epoch = 1995 Oct. 10.0 TT = JDT 2450000.5	M =	3.15494										
>	T = 1995 Sept. 22.89317 TT	peri.	= 198.77140										
>	e = 0.6948450	node	= 69.94720 (2000.0)										
>	q = 0.9327722 AU	incl.	= 11.42393										
>	a = 3.0567165 AU	n	= 0.18442566	P	= 5.34 years								

P/Schwassmann-Wachmann3(1994w)彗星からの流星の予想輻射点と軌道

No	LS(月/日)	α	δ	VG	a	e	q	ω'	Ω'	i'	λ'	β'	R	Δ
1	53(5/15)	209	21	14.0	3.06	0.695	0.933	216	53	11	269	-6	1.011	0.058
2	125(7/29)	170	25	13.1	3.06	0.695	0.933	143	125	7	268	4	1.015	-0.166
No	LS(月/日)	α	δ	VG	a'	e	q'	ω'	Ω'	i'	λ'	β'	R	Δ
3	70(6/ 1)	209	29	12.2	3.25	0.695	0.992	199	70	11	268	-4	1.014	0.060

No 1はe・qを固定して近日点前に降交点を仮定した出現、No 2は同じく近日点後に降交点を仮定した出現、No 3は出現日を彗星の降交点通過時に仮定してeを固定してqを地球軌道と降交点で交差するように仮定した出現の予想です。突発が予想されるのはNo 3ですが、来年の6月には彗星がすでに遠ざかってしまっているので、あまり期待できません。そのかわり、No 1～No 2にかけてだらだらとした出現を見せる（眼視で群活動がとらえられない程度）可能性があると思います。この時期には、うしかい座やかみのけ座付近で準黄道系の活動が入り乱れているので、眼視でそれらと分離するのは困難かもしれません、もし継続して観測されれば輻射点の西方移動が捕らえられるかもしれません。

ヘル・ボップ関連

AD 1996/ 1/ 4 (Thu) 0:00 JST 15.0AU

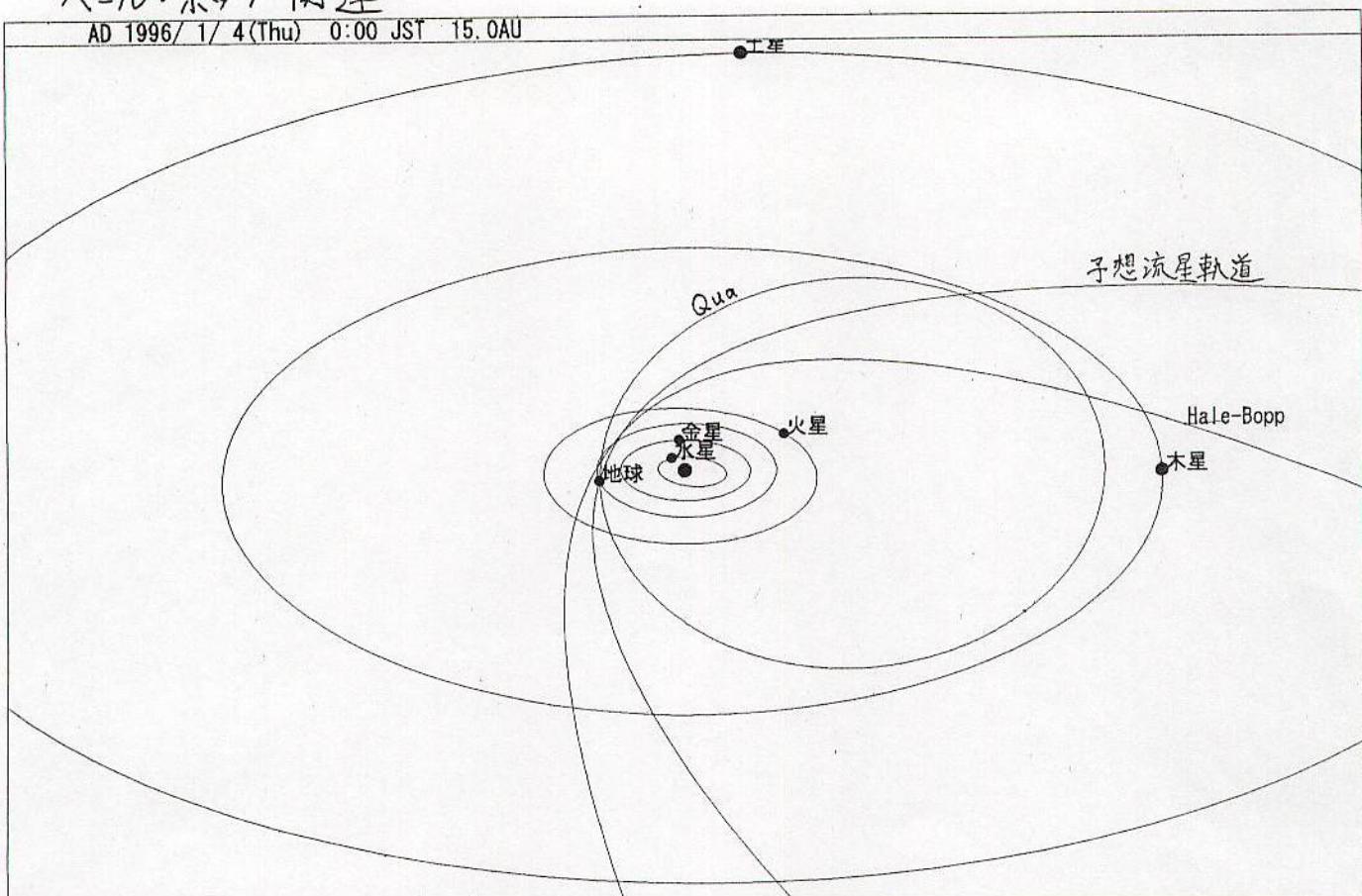
土星

予想流星軌道

Qua

Hale-Bopp

木星

火星
水星
金星
地球

P/シュワスマン-ワッハマン3 関連

AD 1996/ 6/ 1 (Sat) 0:00 JST 4.9AU

P/Schwassmann-Wachmann 3

火星

No. 2

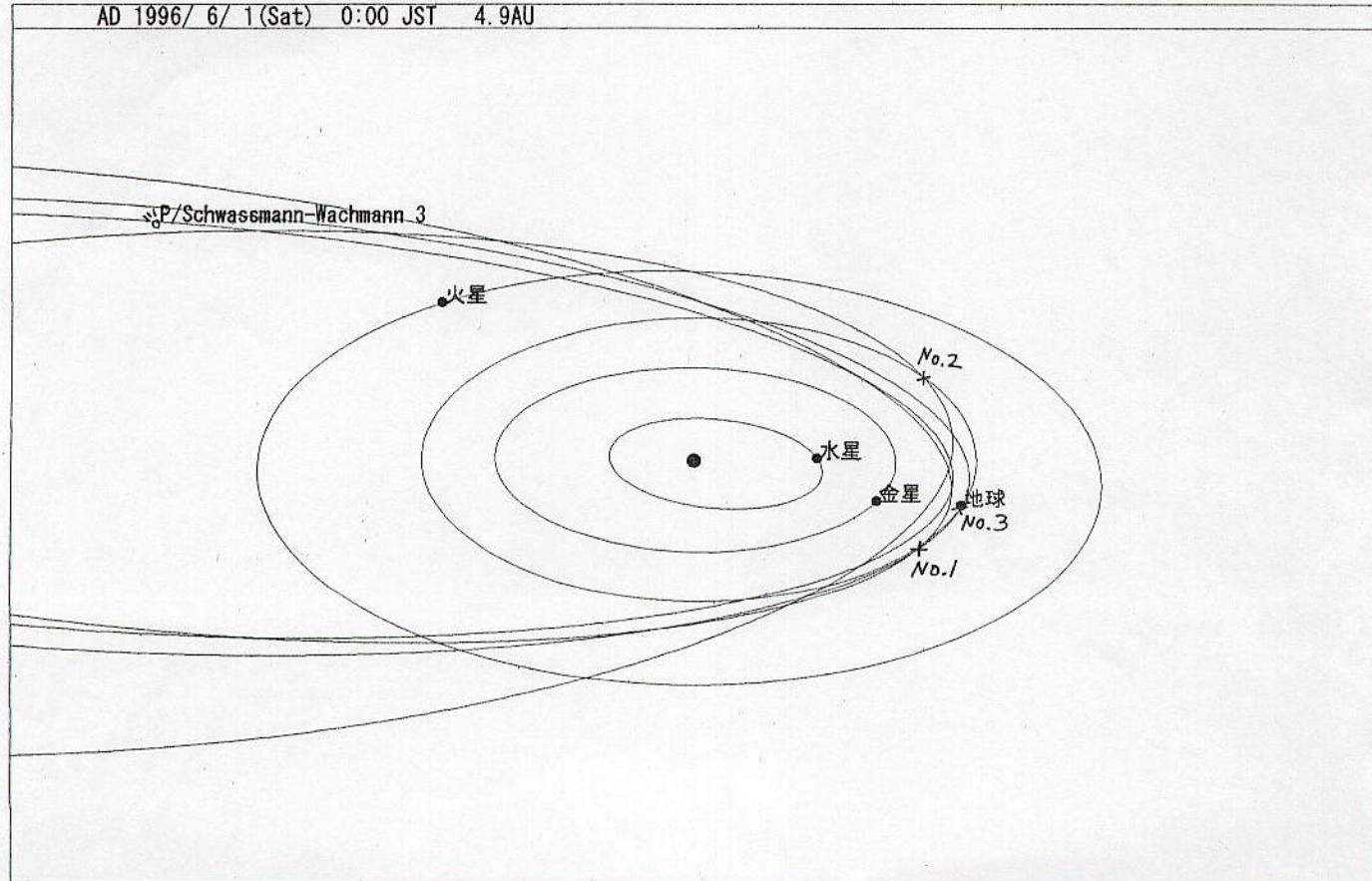
No. 3

No. 1

水星

金星

地球



輻射点と速度から軌道を求めるプログラムの開発

MSS-WG 重野好彦

1、はじめに

今まで、ありそうでなかったプログラムが、輻射点と速度から軌道を求めるプログラムです。このプログラムは、以下の目的で開発しました。

- ①正式な軌道計算で軌道を求めたが、誤差がありそうなので、輻射点や速度を少し変えてチェックをしてみたい。
- ②単点のTV観測や眼視経路記入観測で、おおよその輻射点と速度が分かっているときに、おおよその軌道を求めてみたい。
- ③輻射点と速度をいろいろと入れてみて、軌道がどのように変化するか、研究してみたい。

2、輻射点(R)と速度(V)から軌道(O)を求めるプログラム：RVOの使用方法

- ①このプログラムは、視輻射点、観測速度 または 真輻射点、地心速度 から軌道要素を求めます。
- ②輻射点、速度の他に、流星出現時刻、流星発光点の東経、北緯、高度が必要です。全てファイルで入力してください。
- ③視輻射点、観測速度のときは、地球の自転の補正、天頂引力の補正を行い、真輻射点、地心速度を求めてから、軌道要素を求めます。

- ①軌道データより前の行で、ENH= に続けて、流星発光点の東経(°), 北緯(°), 高度(km)を入力してください。(フリーフォーマットです)。
- ② ENH は、おおよその値でかまいません。
- ③ ENH は、流星ごとに変更可能です。
- ④真輻射点、地心速度のときは、ENH= 0 0 0 とすると、地球中心に対する軌道要素を求めます。視輻射点、観測速度のときは、必ず ENH の値が必要です。
- ⑤以下のフォーマットの軌道ファイルを対象にします。MSS-WG の要約軌道表です。出力ファイル名には拡張子として .RVO が付きます。
- ⑥指定した小数点位置を検出し、DATE UT RP 速度 を読み込んで軌道要素を計算します。小数点位置の該当しない行は、何もせずにそのまま出力します。
- ⑦16カラムに、小数点があると、それ以下の数字は時分秒ではなく、時分秒を日の単位に変換した値と見なします。この場合、小数点以下6桁まで読み取ります。
(例：1995年10月01日18時UT = 19951001 180000 = 19951001.750000)
- ⑧25～26カラムに、「視」の文字があるか、「真」の文字があるかで、入力データが 視輻射点、観測速度 なのか 真輻射点、地心速度 などを判断します。
- ⑨「視」「真」は、流星ごとに変更可能です。
- ⑩29～34カラムに、特に指示がないか、「(2000)」の文字があると 2000.0年分点、 「(1950)」の文字があると 1950.0年分点で入力、出力します。
- ⑪輻射点、速度 の精度を上げたいときは、小数点位置はそのままで、小数を2桁まで記載してください。

25～26カラム

ENH= 139.7 36.8 100	↓	29～34カラム
ID DATE UT 真RP(2000) SD 地速		
MSSP01 19830103 172135 229.1 48.1 .3 44.8		
-----	-----	-----
8 ~ 15 17~22 27 33		42 <--カラム

3、実際例

[例1、RVO軌道計算精度比較例]

しぶんぎ座流星群を例にして、入力データの有効桁数と計算結果の精度を比較テストした例です。①、②が視輻射点、観測速度を入力した例、③、④が真輻射点、地心速度を入力した例です。また輻射点、速度の有効桁数は①、③が小数点以下1桁、②、④が小数点以下2桁まで取っています。

「入力」がRVOへの入力データ、「出力」が計算結果です。視輻射点、観測速度は、真輻射点、地心速度に変換されます。正式な軌道計算結果と較べてください。

計算結果より、小数点以下2桁を取ると、かなり精度良く軌道計算されることが分りました。

	DATE	UT	視RP(2000)	SD	観速	a	e	q	ω	Ω	i
①入力	19830103	172135	227.8	48.2	.3	46.5					
出力	19830103	172135	229.1	48.1	.3	44.9	6.80	0.856	0.978	171.3	283.0 76.6
②入力	19830103	172135	227.80	48.16	.3	46.45					
出力	19830103	172135	229.10	48.11	.3	44.85	6.58	0.851	0.978	171.2	283.0 76.6
			真RP(2000)	SD	地速						
③入力	19830103	172135	229.1	48.1	.3	44.8					
出力	19830103	172135	229.1	48.1	.3	44.8	6.42	0.848	0.978	171.2	283.0 76.5
④入力	19830103	172135	229.10	48.11	.3	44.85					
出力	19830103	172135	229.10	48.11	.3	44.85	6.58	0.851	0.978	171.2	283.0 76.6
MSSP01	正式な軌道計算		229.10	48.11	.3	44.85	6.58	0.851	0.978	171.2	283.0 76.5

(注意: 見やすくするため a の前にブランクを入れています。
よって、フォーマットがRVO入出力のものと異なっています。)

[例2、4流星群のRVO軌道計算例]

4流星群のRVO計算例です。各群とも上段が視輻射点、観測速度を入力した例、中段が真輻射点、地心速度を入力した例、下段が比較のための正式な軌道計算例です。

「入力」がRVOへの入力データ、「出力」が計算結果です。視輻射点、観測速度は、真輻射点、地心速度に変換されます。正式な軌道計算結果と較べてください。

以下の例により、高速・中速、黄道系・逆行系、西経・南緯など様々な例のテストができました。

[しぶんぎ座流星群]

ENH= 139.7 36.8 100 (日光)

	DATE	UT	視RP(2000)	SD	観速	a	e	q	ω	Ω	i
①入力	19830103	172135	227.80	48.16	.3	46.45					
出力	19830103	172135	229.10	48.11	.3	44.85	6.58	0.851	0.978	171.2	283.0 76.6
			真RP(2000)	SD	地速						
②入力	19830103	172135	229.10	48.11	.3	44.85					
出力	19830103	172135	229.10	48.11	.3	44.85	6.58	0.851	0.978	171.2	283.0 76.6
MSSP01	正式な軌道計算		229.10	48.11	.3	44.85	6.58	0.851	0.978	171.2	283.0 76.5

[みずがめ座流星群]

ENH= 139 -20 115 (マウントアイ)

	DATE	UT	視RP(2000)	SD	観速	a	e	q	ω	Ω	i
③	入力	19890505	182351	337.40	-1.45	.1	67.42				
	出力	19890505	182351	337.63	-1.28	.1	66.12	21.1	0.972	0.590	99.0 45.4 164.2
				真RP(2000)	SD	地速					
④	入力	19890505	182351	337.63	-1.28	.1	66.12				
	出力	19890505	182351	337.63	-1.28	.1	66.12	21.0	0.972	0.590	99.0 45.4 164.2
	MSSPOE	正式な軌道計算		337.63	-1.28	.1	66.12	20.3	0.971	0.589	98.9 45.4 164.2

[ペルセウス座流星群]

ENH= -121.6 39.8 107 (カリファルニア)

	DATE	UT	視RP(2000)	SD	観速	a	e	q	ω	Ω	i
⑤	入力	19910812	111414	45.16	57.45	.1	60.61				
	出力	19910812	111414	45.12	57.71	.1	59.47	33.5	0.971	0.963	154.1 139.4 113.4
				真RP(2000)	SD	地速					
⑥	入力	19910812	111414	45.12	57.72	.1	59.47				
	出力	19910812	111414	45.12	57.72	.1	59.47	34.1	0.972	0.963	154.1 139.4 113.4

MSSPOL 正式な軌道計算 45.12 57.72 .1 59.47 32.4 0.970 0.963 154.1 139.4 113.3

[ふたご座流星群]

ENH= 139 36.4 99 (群馬)

	DATE	UT	視RP(2000)	SD	観速	a	e	q	ω	Ω	i
⑦	入力	19911214	174036	114.95	32.47	.0	35.33				
	出力	19911214	174036	113.94	32.29	.0	33.61	1.29	0.886	0.147	324.2 262.4 22.7
				真RP(2000)	SD	地速					
⑧	入力	19911214	174036	113.92	32.28	.0	33.61				
	出力	19911214	174036	113.92	32.28	.0	33.61	1.29	0.886	0.147	324.2 262.4 22.7

MSSPOS 正式な軌道計算 113.92 32.28 .0 33.61 1.29 0.886 0.147 324.1 262.4 22.7

(注意: 見やすくするため a の前にブランクを入れています。
よって、フォーマットがRVO入出力のものと異なっています。)

[例3、4 流星群の輻射点、速度強制変更後のRVO軌道計算例]

4 流星群の輻射点を東西北南に1度づつ変更してみた場合と、速度を±1km/sづつ変更してみた場合の軌道の変化の様子を示しています。各群とも1行目が正式な軌道計算により求められた輻射点と速度の例です。特に、速度1km/sの違いが、軌道に大きく影響を与える様子が分ります。

ID	DATE	UT	真RP(2000)	SD	地速	a	e	q	ω	Ω	i
MSSP01	19830103	172135	229.1	48.1	.3	44.8	6.42	0.848	0.978	171.2	283.0 76.5
輻射点1度東			230.1	48.1	.3	44.8	7.46	0.869	0.977	170.2	283.0 76.1
西			228.1	48.1	.3	44.8	5.65	0.827	0.979	172.2	283.0 76.9
北			229.1	49.1	.3	44.8	8.28	0.882	0.980	173.0	283.0 75.9
南			229.1	47.1	.3	44.8	5.26	0.814	0.976	169.3	283.0 77.1
速度1km/s高速			229.1	48.1	.3	45.8	11.7	0.917	0.978	171.5	283.0 77.4
低速			229.1	48.1	.3	43.8	4.46	0.781	0.978	170.8	283.0 75.6

MSSPOE 19890505	182351	337.6	-1.3	.1	66.1	19.7	0.970	0.590	99.0	45.4	164.2
輻射点 1 度東		338.6	-1.3	.1	66.1	41.3	0.986	0.567	96.8	45.4	164.8
西		336.6	-1.3	.1	66.1	13.2	0.953	0.613	101.3	45.4	163.7
北		337.6	-1.3	.1	66.1	33.5	0.982	0.587	99.0	45.4	162.3
南		337.6	-2.3	.1	66.1	14.2	0.958	0.594	99.2	45.4	166.2
速度 1 km/s 高速		337.6	-1.3	.1	67.1	-25.	1.024	0.608	102.4	45.4	164.5
低速		337.6	-1.3	.1	65.1	7.22	0.921	0.571	95.4	45.4	164.0
MSSPOL 19910812	111414	45.1	57.7	.1	59.5	36.1	0.973	0.964	154.2	139.4	113.4
輻射点 1 度東		46.1	57.7	.1	59.5	34.7	0.972	0.958	152.6	139.4	113.5
西		44.1	57.7	.1	59.5	38.6	0.975	0.969	155.8	139.4	113.3
北		45.1	58.7	.1	59.5	-59.	1.016	0.963	154.4	139.4	112.1
南		45.1	56.7	.1	59.5	14.0	0.931	0.964	154.0	139.4	114.7
速度 1 km/s 高速		45.1	57.7	.1	60.5	-18.	1.055	0.966	155.3	139.4	114.1
低速		45.1	57.7	.1	58.5	9.09	0.894	0.961	152.9	139.4	112.8
MSSPOS 19911214	174036	113.9	32.3	.0	33.6	1.29	0.886	0.147	324.1	262.4	22.7
輻射点 1 度東		114.9	32.3	.0	33.6	1.24	0.887	0.141	325.4	262.4	23.5
西		112.9	32.3	.0	33.6	1.34	0.885	0.154	322.8	262.4	21.8
北		113.9	33.3	.0	33.6	1.31	0.882	0.154	323.1	262.4	24.3
南		113.9	31.3	.0	33.6	1.28	0.890	0.141	325.1	262.4	20.9
速度 1 km/s 高速		113.9	32.3	.0	34.6	1.37	0.898	0.140	324.4	262.4	23.9
低速		113.9	32.3	.0	32.6	1.22	0.873	0.155	323.9	262.4	21.5

4、歳差、章動、年周光行差補正に関する考え方

本プログラムの目的のための精度としては、歳差補正だけで十分ですが、ここで、あらためて章動と年周光行差補正の考え方について、皆さんに質問をさせてください。

位置データの種類と分点に対する補正項目を表にしてみました。これで正しいでしょうか？特に、恒星時、太陽黄経、太陽赤道直角座標の年周光行差補正についてはどのように考えたら良いのでしょうか？瞬時から 1950 年分点に戻すときは、章動、年周光行差補正を取り除いて、平均位置にしてから、歳差補正をすればよろしいのでしょうか？1950.0 → 2000.0 のときは、歳差補正だけですよね？

位置データの種類	1950.0	瞬 時
比較星、輻射点位置	平均位置	歳差、章動、年周光行差補正を行い視位置を求める
恒星時	使わない	計算式から平均位置が出るので、章動補正を行う 年周光行差補正は？
太陽黄経	平均位置	表には平均位置が出ているので、章動の補正を行う 年周光行差補正は？
太陽赤道直角座標	平均位置	表には平均位置が出ているので、章動の補正を行う 年周光行差補正は？

平均位置：歳差だけ補正 真位置：章動まで補正 視位置：年周光行差まで補正

本プログラムの開発にあたり、寺田充さんに、ご助言をいただきました。ありがとうございました。

流星の軌道計算入門講座

0. はじめに

最近のTV観測などにより、二地点以上で観測された流星～同時流星の観測数が飛躍的に増える一方、軌道や輻射点を求めるための計算方法について解説した文献は、多くないようです。このため、このあたりで一度整理しておいたよいのではと考え、入門講座なるものを、始めます。

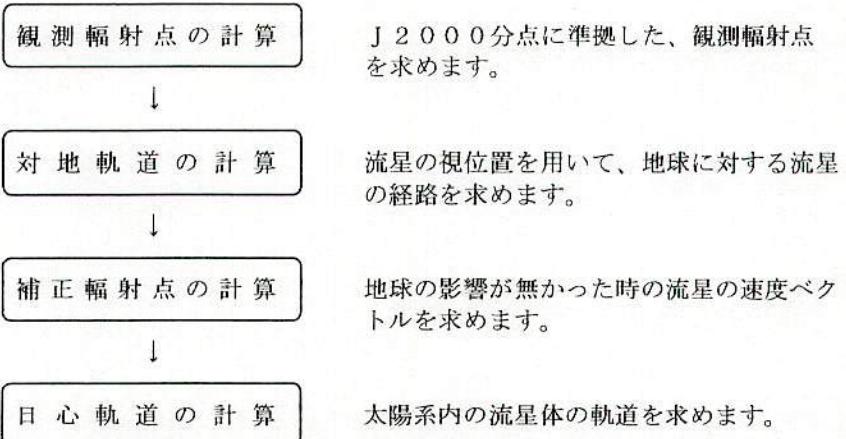
MSSの参加者の中には、このような話題は退屈だと感じる方も少なくないと考えますが、この講座の計算方法は、私なりの方法ですから、そのチェックのために耳を傾けてください。

また、計算を全くやったことの無い方は、同時流星が得られたあと、こんな処理がなされているということを知るよい機会だと思いますので、気楽に聞いてください。現在、一般的に使用されている計算方法の問題点に気がつかれるかも知れません。

この講座の計算方法は、概ね「流星II」に拠っています。

軌道計算の流れ

計算の手順は、つぎのようになります。



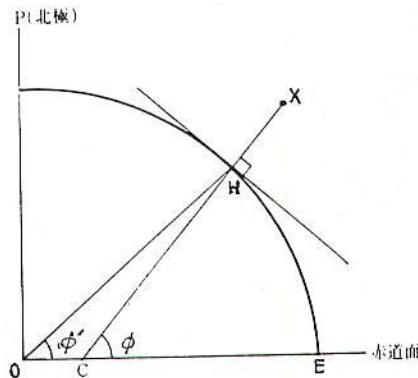
Draft

1. 流星軌道の表し方

1.1 対地軌道

対地軌道とは、流星の発光点・消滅点・切断点などの地表に対する位置のことで、一般的に「緯度」(Longitude)「経度」(Latitude)「高さ」(Height)によって表されます。

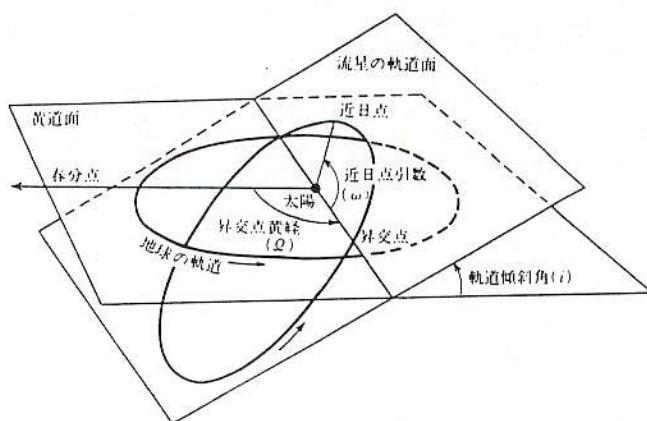
下図は、流星のある点と地軸を含む平面で地球を輪切りにしたもので、ここで、「緯度」というのは、地理学的緯度すなわち $\angle XCE = \phi$ のことです。



1.2 日心軌道

太陽系の中で、流星体がたどっていた道筋のことを日心軌道と言います。他の天体、惑星・小惑星・彗星などと同じように、以下の要素で表します。

軌道傾斜角 (i)	地球の軌道面（黄道面）と流星の軌道面とがなす角度
昇交点黄経 (Ω)	軌道が黄道面を南から北へ横切る点（昇交点）の黄経
長半径 (a)	軌道の長径の半分の長さ 単位は a.u.
離心率 (e)	軌道を示す二次曲線の離心率
近日点距離 (q)	軌道上で最も太陽に近づく点（近日点）の太陽からの距離 単位は a.u.
近日点引数 (ω)	太陽から見た昇交点から近日点までの角度 軌道面に沿って運動方向にはかる
公転周期 (P)	近日点を通過してから次に通過するまでの時間 単位は 年



Draft

2. 座標系のはなし

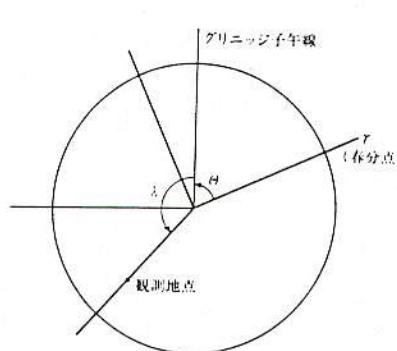
2.1 計算に使用される主な座標系

流星の軌道計算に使用される座標系は、天球の座標として、「赤道座標系」「黄道座標系」、位置の座標系として、「地球座標系」「太陽直角赤道座標系」があります。

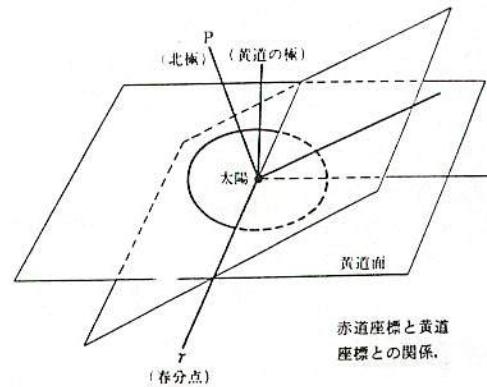
座 標 系	X 軸の方向	Z 軸の方向	長さの単位	原 点
赤道座標系	春分点	天の北極	—	—
黄道座標系	春分点	黄道の極	—	—
地球座標系	緯度=0 経度=0	北極	k m	地球の中心
太陽直角赤道座標	春分点	天の北極	a. u.	太陽の中心

↓
日心

太陽直角の場合は地球中心



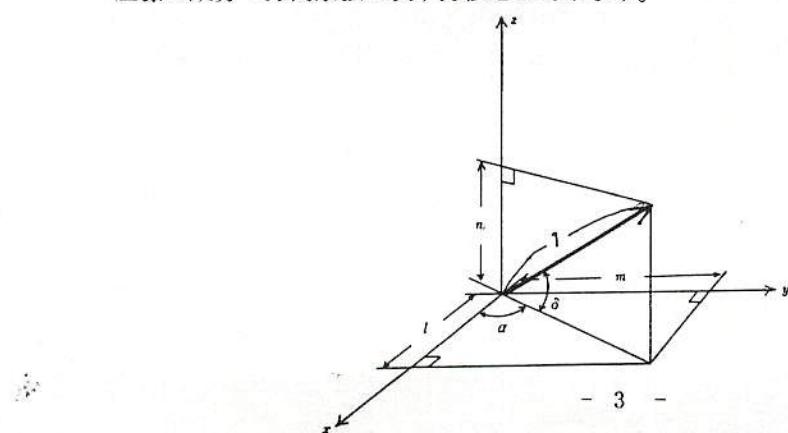
赤道座標と地球座標との関係
(北極方向から見た図)。



赤道座標と黄道
座標との関係。

2.2 方向余弦

天球上の点を表す方法として、極座標の角度で表す方法と、その点に向かう単位ベクトルの直角座標の成分～方向余弦で表す方法とがあります。



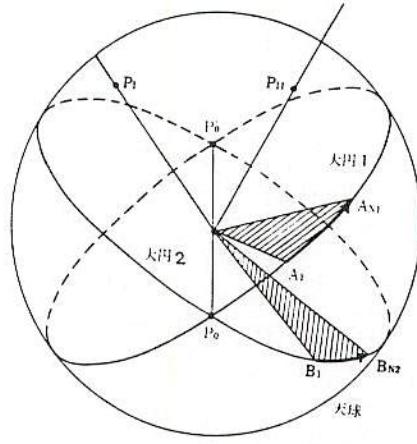
Draft

3. 観測輻射点の計算

球を平面で切った切り口～球と平面との交線のことを一般に「小円」といいます。特に、球の中心を含む平面で切った切り口のことを「大円」といいます。
天球上では、天の赤道・子午線・黄道などはすべて大円、赤道以外の赤緯線は小円になります。
大円を表すには、一般的にその極の方向を用います。
流星の軌道計算では、天球上の流星の経路を大円の一部として扱います。

3.1 観測輻射点

いま、A、B二つの観測地点で同時流星が撮影されたとします。A地点から見た流星の発光点をA₁、切断点をA₂、A₃・・・A_{n1-1}、消滅点をA_{n1}とします。同じく、B地点から見た流星の発光点、切断点、消滅点をB₁、B₂、・・・B_{n2}とします。
A₁～A_{n1}を含む大円を大円1、B₁～B_{n2}を含む大円を大円2とします。この大円1と2とは、2点で交わりますが、この一方が観測輻射点となります。



3.2 発光点、切断点、消滅点の方向余弦

それぞれの発光点、切断点、消滅点の赤経を α_{ij} 赤緯を δ_{ij} (j は観測地点の識別、 i は発光点、切断点、消滅点の識別、 $i=1, n_j$ 、 $j=1, 2$) はとすれば、各点の方向余弦(l_{ij}, m_{ij}, n_{ij}) は、次式により求められます。

$$\begin{aligned} l_{ij} &= \cos \delta_{ij} \cos \alpha_{ij} \\ m_{ij} &= \cos \delta_{ij} \sin \alpha_{ij} \\ n_{ij} &= \sin \delta_{ij} \end{aligned} \quad (3-1)$$

3.3 経路大円の極の方向余弦

流星各点の方向余弦から、その流星経路が含まれる大円（経路大円）の極を求めます。

まず、A点で観測された位置(A₁, A_{n1})の方向余弦(l_{i1}, m_{i1}, n_{i1})から、大円1の極(L_1, M_1, N_1)を求めます。

観測・測定された流星各点の位置が正確に大円1上にあれば、流星各点の方向と経路大円の方向とは、直角をなすはずです。すなわち、

$$l_{i1} \cdot L_1 + m_{i1} \cdot M_1 + n_{i1} \cdot N_1 = 0 \quad (3-2)$$

Draft

(l_{i1}, m_{i1}, n_{i1}) は、観測からわかっていますので、これから、 (L_1, M_1, N_1) を求めるのは、容易です。

ところが、実際は、観測・測定の誤差などから、(3-2) は成立しません。そこで、最も確からしい (L_1, M_1, N_1) を最小自乗法で求めます。

$$e^2 = \sum_i (l_{i1} \cdot L_1 + m_{i1} \cdot M_1 + n_{i1} \cdot N_1)^2 \quad (3-3)$$

として、この e^2 を最小にする L_1, M_1, N_1 を求めます。

これは、単純に以下の連立方程式を解くことにより求まります。

$$\frac{\partial}{\partial L_1} e^2 = 0, \quad \frac{\partial}{\partial M_1} e^2 = 0, \quad \frac{\partial}{\partial N_1} e^2 = 0 \quad (3-4)$$

$$\begin{aligned} [l^2] L_1 + [l m] M_1 + [l n] N_1 &= 0 \\ [l m] L_1 + [m^2] M_1 + [m n] N_1 &= 0 \end{aligned} \quad (3-5)$$

ここで、[] は、 i に関しての総和で $\sum_i (l_i^2)$ などの意味で使っています。

$X = L_1/N_1, Y = M_1/N_1$ として

$$\begin{aligned} [l^2] X + [l m] Y + [l n] &= 0 \\ [l m] X + [m^2] Y + [m n] &= 0 \end{aligned}$$

この X, Y を求めて、以下の式から大円 1 の極の方向余弦が求まります。

$$N_1 = \frac{1}{\sqrt{X^2 + Y^2 + 1}}$$

$$L_1 = X N_1 \quad (3-6)$$

$$M_1 = Y N_1$$

観測地点 B についても全く同様に、大円 2 の極の方向余弦 (L_2, M_2, N_2) を求めます。

3.4 観測輻射点の計算

観測輻射点は、大円 1 と大円 2 の交点です。この点は、大円 1 の極 (L_1, M_1, N_1) 及び大円 2 の極 (L_2, M_2, N_2) と直角方向にあります。観測地点が 2 点の場合、単純に外積を求めて直角方向を出してもいいのですが、多点観測も考慮して、大円 1, 2 を求めたのと同じ方法で、極～すなわち観測輻射点の方向余弦 (L_0, M_0, N_0) を求めます。

$$\begin{aligned} [L^2] X + [LM] Y + [LN] &= 0 \\ [LM] X + [M^2] Y + [MN] &= 0 \end{aligned} \quad (3-7)$$

ここで、[] は、 j に関しての総和で $\sum_j (L_j^2)$ などの意味で使っています。

Draft

このX Yを求めて、以下の式から大円の極（観測輻射点）の方向余弦が求められます。

$$N_0 = \frac{1}{\sqrt{X^2 + Y^2 + 1}}$$

$$L_0 = XN_0 \quad (3-8)$$

$$M_0 = YN_0$$

これから、観測輻射点の赤経、赤緯 (α_0, δ_0) は、次のとおりです。

$$\delta_0 = \sin^{-1} N_0$$

$$\tan \alpha_0 = M_0 / L_0 \quad 0^\circ \leq \alpha_0 < 360^\circ$$

また、大円1と2とがなす角度Qは、次によりもとめられます。

$$\cos Q = L_1 L_2 + M_1 M_2 + N_1 N_2$$

4. 視位置について

今までの観測輻射点までの計算は、赤道座標系を用いていました。この座標系には、いつの時点の春分点を基準にするかということで、いろいろな座標のとりかたがあります。

星図や星表などで一般に使われるのがJ2000.0という系で、西暦2000年1月1日12時(TD)の平均春分点を基準にしています。

また、実際に星が見える位置などを計算するために使用されるのが、視位置と言われるもので、星図の位置に固有運動の補正を行い、その時刻の春分点に準拠した座標系(J2000.0に歳差、章動の補正を行ったもの)を使用し、光行差や視差なども補正したものを使用します。

流星の軌道計算では、この視位置は、主として対地軌道を求めるときに使用します。また、視位置の計算のうち、恒星の固有運動補正は、位置測定の段階で済ませておく必要があります。

4.1 歳差の計算

修正ヨリウス日 (MJD)

流星出現日をY年M月D日(UT厳密にはTD)とすると、MJDは、次のように求められます。
M≤2のとき $M+12 \rightarrow M$ として $Y-1 \rightarrow Y$

$$MJD = INT(365.25*Y) + INT(Y/400) - INT(Y/100) + INT(30.59*(M-2)) + D - 678912 \quad (4-1)$$

力学時 (TD)

流星出現時刻をH時M分S秒 (JST) とすると、その時刻のTDは、

$$TD = (H - 9) + M/60 + (S + \Delta T)/3600$$

となります。 ΔT は、観測から求められる量で、毎年の予測値を使用して計算することが多いです。
1990年から2000年までの ΔT のおおまかな予測値は、以下の式で求められます。

$$\Delta T = 58 + 0.8*(Y-1990)$$

時刻引数 (T)

Tは、J2000.0から出現時刻までの時間を36525日単位に計った時間です。

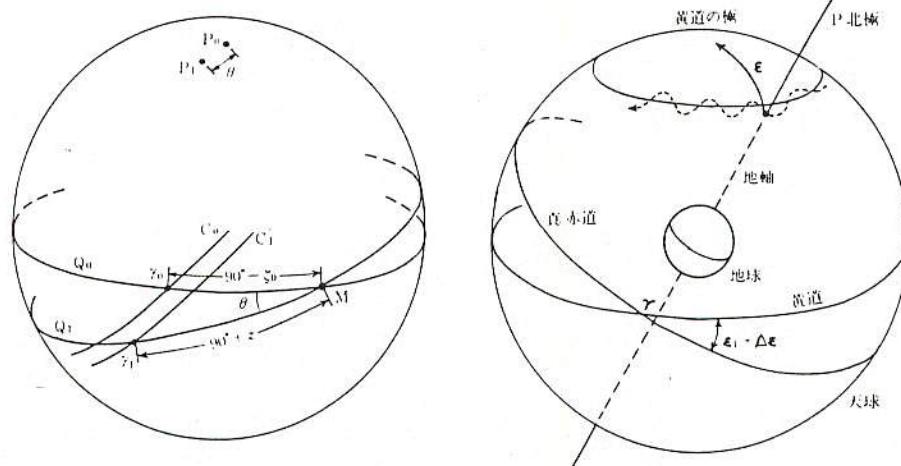
$$T = (MJD - 51554.5 + TD/24)/36525$$

Draft

 ζ_0, θ, z の計算

J 2000. 0における天の赤道を Q_0 、黄道を C_0 、春分点を γ_0 、天の北極を P_0 とし、出現時刻の天の赤道、黄道、春分点、天の北極を Q_1 、 C_1 、 γ_1 、 P_1 とすれば、図の ζ_0, θ, z は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\zeta_0 &= 0.^{\circ}6406 * T + 0.^{\circ}0001 * T^2 \\ \theta &= 0.^{\circ}5568 * T - 0.^{\circ}0001 * T^2 \\ z &= 0.^{\circ}6406 * T + 0.^{\circ}0003 * T^2\end{aligned}$$

歳差補正の行列 P の計算

J 2000. 0 分点の座標を出現時刻に歳差補正を行う座標変換は、以下の手順で行います。

- z 軸を軸として、反時計回りに座標を $(90^\circ - \zeta_0)$ だけ回転する。
- x 軸（この時点で M の方向を向いている）を軸として、座標を反時計回りに θ だけ回転する。
- z 軸（この時点で P_1 の方向を向いている）を軸として、反時計回りに座標を $-(90^\circ + z)$ 回転する。

この操作を行う行列 P は、以下のとおりになります。

$$P = \begin{bmatrix} -\sin z & -\cos z & 0 \\ \cos z & -\sin z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \zeta_0 & \cos \zeta_0 & 0 \\ -\cos \zeta_0 & \sin \zeta_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

P の要素は、次のとおりです。

$$P_{11} = -\sin z \sin \zeta_0 + \cos z \cos \theta \cos \zeta_0$$

$$P_{12} = -\sin z \cos \zeta_0 - \cos z \cos \theta \sin \zeta_0$$

$$P_{13} = -\cos z \sin \theta$$

$$P_{21} = \cos z \sin \zeta_0 + \sin z \cos \theta \cos \zeta_0$$

$$P_{22} = \cos z \cos \zeta_0 - \sin z \cos \theta \sin \zeta_0$$

$$P_{23} = -\sin z \sin \theta$$

$$P_{31} = \sin \theta \cos \zeta_0$$

$$P_{32} = -\sin \theta \sin \zeta_0$$

$$P_{33} = \cos \theta$$

Draft

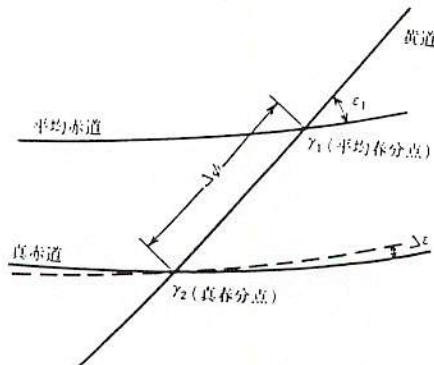
4.2 章動の計算

 $\Delta\phi$ 、 $\Delta\varepsilon$ 、 ε_1 の計算

$$\Delta\phi = 0.^w 0048 * \sin(1934^{\circ} * T + 235^{\circ}) - 0.^w 0004 * \sin(72002^{\circ} * T + 201^{\circ})$$

$$\Delta\varepsilon = 0.00256 * \cos(1934^{\circ} * T + 235^{\circ}) + 0.^w 0015 * \cos(72002^{\circ} * T + 201^{\circ})$$

$$\varepsilon_1 = 23.^{\circ} 43928 - 0.^{\circ} 01301 * T$$



章動補正の行列Nの計算

歳差補正後の座標（平均春分点に準拠した座標）に章動の補正を加える手順は、次のとおりです。

- ・x軸（平均春分点に向いている）を軸に反時計回りに ε_1 だけ座標を回転する。
- ・z軸を軸として反時計回りに $-\Delta\phi$ だけ座標を回転する。
- ・x軸を軸として反時計回りに $-(\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon)$ だけ座標を回転する。

この操作を行う行列Nは、次のとおりになります。

$$N = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon) & -\sin(\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon) \\ 0 & \sin(\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon) & \cos(\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Delta\phi & -\sin\Delta\phi & 0 \\ \sin\Delta\phi & \cos\Delta\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varepsilon_1 & \sin\varepsilon_1 \\ 0 & -\sin\varepsilon_1 & \cos\varepsilon_1 \end{bmatrix}$$

ここで、 $\Delta\phi$ 、 $\Delta\varepsilon$ は、微少な角度なので、 $\sin\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon$ （単位はラジアン） $\cos\Delta\varepsilon = 1$ などとし、さらに2次の項を省略するとNは、次のようにになります。

$$N = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\phi \cos\varepsilon_1 & -\Delta\phi \sin\varepsilon_1 \\ \Delta\phi \cos\varepsilon_1 & 1 & -\Delta\varepsilon \\ \Delta\phi \sin\varepsilon_1 & \Delta\varepsilon & 1 \end{bmatrix}$$

4.3 歲差・章動の補正

歳差・章動をまとめて補正するための行列Dを求めておきます。

$$D = N \times P$$

$$D_{11} = N_{11} * P_{11} + N_{12} * P_{21} + N_{13} * P_{31}$$

$$D_{12} = N_{11} * P_{12} + N_{12} * P_{22} + N_{13} * P_{32}$$

⋮

Draft

このDを用いて、J2000.0の方向余弦 (l_0, m_0, n_0) の歳差・章動補正後の方向余弦 (l_1, m_1, n_1) は、次のようにになります。

$$\begin{bmatrix} l_1 \\ m_1 \\ n_1 \end{bmatrix} = D \times \begin{bmatrix} l_0 \\ m_0 \\ n_0 \end{bmatrix}$$

4.4 光行差補正

地球の公転により、実際の恒星は、幾何学的位置から僅かにずれた位置に見える。このずれのことを光行差といいます。

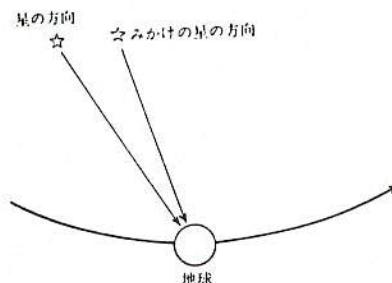
太陽黄経 λ_s

太陽黄経を以下の略算式で求めます。

$$\lambda_s = 280.^{\circ}47 + 36000.^{\circ}77*T$$

また真黄道傾斜角 ε はつぎのとおりです。

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \Delta \varepsilon$$



光行差補正

次の行列Aを流星各点について求めます。

$$A = \begin{bmatrix} 1 - l_1^2 & -l_1 m_1 & -l_1 n_1 \\ -m_1 l_1 & 1 - m_1^2 & -m_1 n_1 \\ -n_1 l_1 & -n_1 m_1 & 1 - n_1^2 \end{bmatrix}$$

視位置の方向余弦 (l, m, n) は、次のようにになります。

$$\begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \\ m_1 \\ n_1 \end{bmatrix} + \kappa A \begin{bmatrix} \sin \lambda_s \\ -\cos \lambda_s \cdot \cos \varepsilon \\ -\cos \lambda_s \cdot \sin \varepsilon \end{bmatrix}$$

κ は、光行差定数といい、 9.94×10^{-5} (ラジアン) です。

4.5 視恒星時の計算

視位置と直接関係ないが、視恒星時を求めておきます。

$$\begin{aligned} \text{グリニッジ平均恒星時} & \quad GMST = UT + 6.^{\mathrm{h}}69736 + 2400.^{\mathrm{h}}0513*T \\ UT & = JST - 9^{\mathrm{h}} \end{aligned}$$

$$\text{グリニッジ視恒星時} \quad GAST = GMST + 0.^{\mathrm{h}}00029 * \sin(1934^{\circ} * T + 235^{\circ})$$

Draft

78th MSS
寺田 充

流星の軌道計算入門講座 2

5. 対地軌道の計算

5.1 観測地点の赤道座標

観測地点の経度 λ 、緯度 ϕ 、標高 h は、地形図などを使用して調べます。必要とされる精度は、角度の1"の桁までです。

λ 、 ϕ 、 h を用いて、次の式により、地球の中心Oを原点とした赤道座標(X、Y、Z)が求められます。

$$N_A = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}$$

ここで、赤道半径 $a = 6377.397$
離心率の2乗 $e^2 = 0.006674372$

$$\begin{aligned} X &= (N_A + h) \cos \phi \cos (\lambda + \theta) \\ Y &= (N_A + h) \cos \phi \sin (\lambda + \theta) \\ Z &= (N_A (1 - e^2) + h) \sin \phi \end{aligned} \quad (4-1)$$

ただし、 θ : GAST (グリニッジ視恒星時)

この式により、観測地点A及びBの赤道座標(X1、Y1、Z1) (X2、Y2、Z2)を求めます。

5.2 対地軌道の計算

流星経路を含む直線

大気中の流星には、種々の力が働き複雑な運動をします。流星に働く主な力は、大気による抵抗と地球の引力です。大気による抵抗は、流星の進行方向とは逆向きに働き、進行方向を変化させません。

また、流星が発光しているあたりでは、大気の抵抗に比べて地球の引力は小さいため、普通、流星が発光している部分の経路を直線とみなすことができます。特に経路の長い流星や、大火球以外は、直線で表現して問題ないようです。

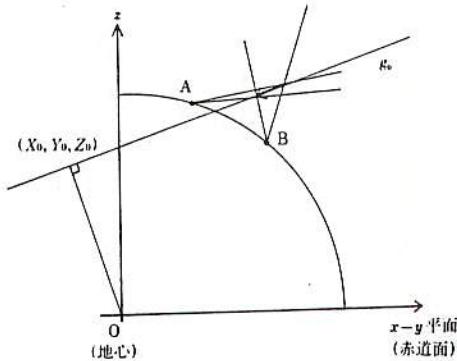
流星経路を含む直線 g_0 を次のように表します。

$$g_0 : \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \tau \begin{bmatrix} L_0 \\ M_0 \\ N_0 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

ここで、(L0、M0、N0)は、観測輻射点の視位置の方向余弦です。また、(X0、Y0、Z0)は、地球の中心Oから g_0 に下した垂線の足で、 τ は、パラメーターです。

(L0、M0、N0)は、既に求まっていますから、今のところ、(X0、Y0、Z0)が未知数です。

Draft



X₀, Y₀, Z₀の計算

観測地点Aをとおり、A点の流星大円上に向けて流星経路 g_0 に最も近づくような直線 g_1 を引きます。この直線 g_1 は、A地点から見た流星大円の極と直角方向になり、 g_0 とも垂直なため、次の様な式で表されます。（右辺第2項は、流星大円の極と輻射点の方向余弦の外積）

$$\begin{aligned} g_1 : \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} M_0 N_1 - M_1 N_0 \\ N_0 L_1 - N_1 L_0 \\ L_0 M_1 - L_1 M_0 \end{bmatrix} \quad (4-3) \\ &= \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} l_1 \\ m_1 \\ n_1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ここで、 (L_1, M_1, N_1) は、大円 1 の極の視位置の方向余弦で、C はパラメーターです。
同様に、観測地点 B についても直線 $g_2 \cdots g_j$ の方程式を求めます。

直線 g_1 及び $g_2 \cdots g_j$ と g_0 の距離を求め、その二乗和を最小にする (X_0, Y_0, Z_0) を求めます。まず、次の変換行列 R を用いて、座標の z 軸を観測輻射点に向けます。

$$R = \begin{bmatrix} N_0 & 0 & -k \\ 0 & 1 & 0 \\ k & 0 & N_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_0/k & M_0/k & 0 \\ -M_0/k & L_0/k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

$$\text{ただし, } k = \sqrt{1 - N_0^2}$$

この R を用いて g_1, g_2 を座標変換し x-y 平面上の射影をとると、次式のように表せます。

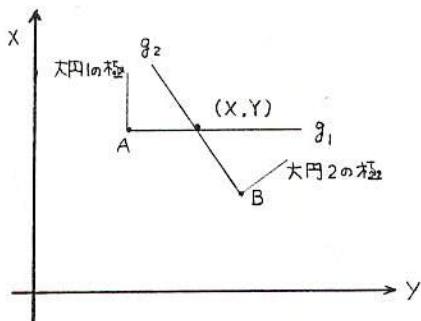
$$g_1 : y = a_1 \cdot x + b_1 \quad (4-5)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= l_1 \cdot R_{21} + m_1 \cdot R_{22} / (l_1 \cdot R_{11} + m_1 \cdot R_{12} + n_1 \cdot R_{13}) \\ b_1 &= (X_1 \cdot R_{21} + Y_1 \cdot R_{22}) - a_1 (X_1 \cdot R_{11} + Y_1 \cdot R_{12} + Z_1 \cdot R_{13}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{11} &= N_0 \cdot L_0/k & R_{21} &= -M_0/k \\ R_{12} &= N_0 \cdot M_0/k & R_{22} &= L_0/k \\ R_{13} &= -k \end{aligned}$$

Draft

同様に、 $g_2 \dots g_j$ についても、係数 a_j, b_j を求めます。
 Rを用いて座標変換すると、直線 g_0 は、点 (X, Y) で表せます。



点 (X, Y) と直線 g_j との距離 ε_j は、次のように表せます。

$$\varepsilon_j = \frac{|a_j \cdot X - Y + b_j|}{\sqrt{1 + (a_j)^2}} \quad (4-6)$$

さらに、 $E^2 = \sum_j (\varepsilon_j)^2$ とすれば、この値を最小にする (X, Y) は、

$\partial/\partial X \cdot E^2 = 0, \partial/\partial Y \cdot E^2 = 0$ により求めることができます。

すなわち、

$$\begin{aligned} \left[\frac{a^2}{1+a^2} \right] X - \left[\frac{a}{1+a^2} \right] Y &= - \left[\frac{a \cdot b}{1+a^2} \right] \\ - \left[\frac{a}{1+a^2} \right] X + \left[\frac{1}{1+a^2} \right] Y &= \left[\frac{b}{1+a^2} \right] \end{aligned} \quad (4-7)$$

これを解き、X, Yを求め、行列Rの逆行列でもとの赤道座標に戻すと、X0, Y0, Z0が求まる。

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = R^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

切断点の座標

流星の発光点、切断点、消滅点の座標を求めます。これらの点は、流星経路上の点ですから、直線 g_0 上にあります。式 (4-2) でパラメーター τ の値を与えれば、これらの点を特定することができます。

観測点Aで観測されたある切断点 A_i と観測地点Aとを結ぶ直線 g_{1i} は、次のように表せます。

Draft

$$g_{1i} : \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} l_{1i} \\ m_{1i} \\ n_{1i} \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

ここで、 (l_{1i}, m_{1i}, n_{1i}) は、 A_i の視位置の方向余弦です。

g_0 と g_{1i} との距離 L は、式(4-2)、(4-9)によって、次のように表せます。

$$\begin{aligned} L^2 &= (X_0 + \tau L_0 - X_1 - C l_{1i})^2 + (Y_0 + \tau M_0 - Y_1 - C m_{1i})^2 \\ &\quad + (Z_0 + \tau N_0 - Z_1 - C n_{1i})^2 \end{aligned} \quad (4-10)$$

これを最小にする C 、 τ は、 $\partial/\partial \tau \cdot L^2 = 0$ 、 $\partial/\partial C \cdot L^2 = 0$ により求まります。

$$\begin{aligned} \tau - C(l_{1i} \cdot L_0 + m_{1i} \cdot M_0 + n_{1i} \cdot N_0) &= L_0 \cdot X_1 + M_0 \cdot Y_1 + N_0 \cdot Z_1 \\ (l_{1i} \cdot L_0 + m_{1i} \cdot M_0 + n_{1i} \cdot N_0) \tau - C &= l_{1i} \cdot X_1 + m_{1i} \cdot Y_1 + n_{1i} \cdot Z_1 \\ &\quad - (l_{1i} \cdot X_0 + m_{1i} \cdot Y_0 + n_{1i} \cdot Z_0) \end{aligned} \quad (4-11)$$

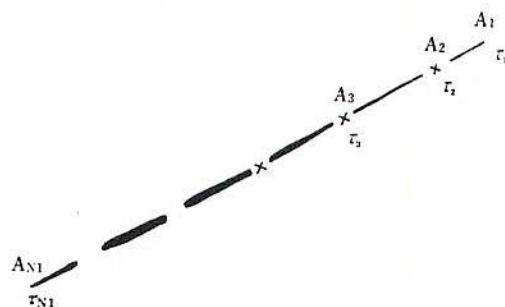
同様に他の切断点、他の観測地点の切断点の τ を求めることができる。これを τ_{ji} とすれば、流星の切断点の座標は、次の様に表せます。ここで j は観測点の識別子、 i は切断点の識別子です。

$$\begin{bmatrix} x_{ji} \\ y_{ji} \\ z_{ji} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \tau_{ij} \begin{bmatrix} L_0 \\ M_0 \\ N_0 \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

観測速度

i 番目の切断点と $i+1$ 番目の切断点の間の平均速度は、切断時間を T_j として、次の式で与えられます。

$$V_{ji} = |\tau_{j(i+1)} - \tau_{ji}| / T_j \quad (\text{km/s}) \quad (4-13)$$



流星の軌道計算入門講座 3

～大気減速補正～

今回は、軌道計算の流れから一時はずれ、大気減速補正の概要を説明します。

現在、軌道を求めている人の多くは、大気減速の補正を省略しています。これには、2つの原因があると思います。1つは、計算しやすくかつ妥当と思われる方法が無いからです。もう一つは、補正量が、観測速度の決定精度と同じ位の量であり、"誤差の範囲"とも考えられるからです。

この補正は、本来必要なものと考えられますので、いくつかの方法を紹介します。

1 数学的方法 ～ 流星の速度変化の回帰式により求める方法

流星発光中の速度変化の回帰式（普通、指數関数が用いられる）を外挿する方法です。大気減速補正の主流になっています。

流星の対地速度を以下の形の式に近似します。

$$v = a + b \cdot \exp(c \cdot t) \quad (1)$$

ここで、a、b、c は定数、t は時間です。

この、 $t \rightarrow -\infty$ としたときの v すなわち a を大気減速補正後の速度 V_{NA} とするものです。

式(1)の係数、a、b、c は、以下の手順で求めます。

a_0 、 b_0 、 c_0 を a、b、c の近似値とすれば、

$$a = a_0 + \Delta a, \quad b = b_0 + \Delta b, \quad c = c_0 + \Delta c$$

と表せる。 a_0 、 b_0 、 c_0 を仮定して、この Δa 、 Δb 、 Δc を求めればよい。

式(1)は、

$$\begin{aligned} v &= a + b \cdot \exp(c \cdot t) \\ &= (a_0 + \Delta a) + (b_0 + \Delta b) \cdot \exp((c_0 + \Delta c) \cdot t) \end{aligned}$$

観測された対地速度を v_i 、 $i=1, 2, 3, \dots, n$ 、時間を t_i 、 $i=1, 2, 3, \dots, n$ とすれば、残差の二乗和 E^2 は次のとおりとなる。

$$E^2 = \sum_{i=1}^n ((v_i - (a_0 + \Delta a) + (b_0 + \Delta b) \cdot \exp(c_0 \cdot t_i) \cdot \exp(\Delta c \cdot t_i))^2)$$

ここで、 $\exp(\Delta c \cdot t_i) \rightarrow 1 + \Delta c \cdot t_i$ $\Delta b \Delta c$ などの2次の微少量の項を省略すれば、

$$E^2 \approx \sum ((v_i - (a_0 + \Delta a + (b_0 + \Delta b) \cdot \exp(c_0 \cdot t_i) + b_0 \cdot \exp(c_0 \cdot t_i) \cdot \Delta c \cdot t_i))^2)$$

Draft

式を見やすくするために、 $p_i = v_i - (a_0 + b_0 \cdot \exp(c_0 \cdot t_i))$ 、 $q_i = \exp(c_0 \cdot t_i)$ とすれば、

$$E^2 = \sum ((p_i - (\Delta a + q_i \cdot \Delta b + b_0 \cdot q_i \cdot t_i \cdot \Delta c))^2)$$

となり、これを最小とする Δa 、 Δb 、 Δc は、 $\partial E^2 / \partial (\Delta a) = 0$ 、 $\partial E^2 / \partial (\Delta b) = 0$ 、 $\partial E^2 / \partial (\Delta c) = 0$ から、

$$\Delta a + [q] \Delta b + [q \cdot t] \Delta c = [p]$$

$$[q] \Delta a + [q^2] \Delta b + [q^2 \cdot t] \Delta c = [p \cdot q] \quad (2)$$

$$[q \cdot t] \Delta a + [q^2 \cdot t] \Delta b + [q^2 \cdot t^2] \Delta c = [p \cdot q \cdot t]$$

ここで [] は、 i についての総和を表します。

これにより、 Δa 、 Δb 、 Δc がもとまります。ただし、この値は、近似値のため、再度 $a_0 + \Delta a \rightarrow a_0$ 、 $b_0 + \Delta b \rightarrow b_0$ 、 $c_0 + \Delta c \rightarrow c_0$ として計算を行います。

2~3回これを繰り返すことで十分な精度の a 、 b 、 c 求めることができます。

2 単体モデルによる方法

流星体の超高層大気内の運動を簡略化したものとして、単体モデルがあります。これは、希薄な大気中を固い流星体が運動していることを表現したモデルです。

単位時間に断面積 F 、速度 v の流星体が希薄な大気中を移動するときに受ける単位質量あたり抵抗力 R は、

$$R = -C_d \cdot F \cdot \rho_a \cdot v^2 / m \quad (3)$$

ここで、 C_d は、抵抗係数、 ρ_a は大気密度、 m は流星体の質量です。
一般に、断面積 F は、

$$F = A \cdot (m / \rho_m)^{2/3} \quad (4)$$

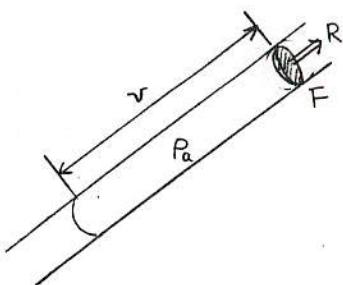
で表せる。ここで、 A は形状因数といわれる係数である。
流星体を球とすれば、

$$\frac{m}{\rho_m} = \frac{3}{4} \pi r^3$$

これから

$$r = \left(\frac{4m}{3\pi\rho_m} \right)^{1/3}$$

これから、断面積 F は、



Draft

$$F = \pi \left(\frac{4}{3\pi} \cdot \frac{m}{\rho_{\text{air}}} \right)^{\frac{2}{3}} = 1.029 \left(\frac{m}{\rho_{\text{air}}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

単体モデルを用いた大気減速補正

単体モデルを利用して、大気減速補正をおこないます。(3)式で、 $C = C_d \cdot F / m$ とすれば、

$$R = -C v^2 \rho a \quad (5)$$

ここで、大気密度 ρa は、簡略化した以下の形で表せるものとします。

$$\rho a = \rho_0 \exp(-\alpha h) \quad (6)$$

ここで、 h は高さ、 α は定数 ($1/\alpha$ を「スケールハイト」といいます) です。

(5)、(6)より、

$$R = -C v^2 \rho_0 \exp(-\alpha h) = d v / d t \quad (7)$$

$$\frac{1}{v^2} dv = -C \rho_0 \exp(-\alpha h) dt$$

ここで、 $dt = \frac{dh}{v \cos Z}$ (Z は、流星の入射角すなわち輻射点の天頂角) として無限遠から流星位置まで積分すると

$$\int_{VNA}^{VAP} \frac{1}{v} dv = \int_{\infty}^H \frac{C \cdot \rho_0}{\cos Z} \exp(-\alpha h) dh$$

$$\begin{aligned} \log VAP - \log VNA &= \frac{-C \cdot \rho_0}{\alpha \cdot \cos Z} [\exp(-\alpha h)]_{\infty}^H \\ &= \frac{-C \cdot \rho_0}{\alpha \cdot \cos Z} \exp(-\alpha H) \end{aligned}$$

$$\frac{\text{発光点速度}}{\text{補正後速度}} \frac{VAP}{VNA} = \exp\left(\frac{-C \cdot \rho_0}{\alpha \cdot \cos Z}\right) \quad (8)$$

3 補正例

1977年に観測されたふたご群の流星を例にとって補正をしてみます。この流星の対地速度は、次の回帰式で表されています。

$$v = 35.63 - 0.1363 \exp(4.694 t) \quad (\text{km/s})$$

($t = 0$ が発光点)

Draft

1で説明した数学的方法によると、直ちに $V_{NA} = 35.63 \text{ km/s}$ となります。

次に、2の方法で補正してみます。

VAP は、回帰式から 35.49 km/s

$C_d = 1$ 、 $A = 1.2$

Mを流星の明るさ（最大絶対光度=-2）、 $\cos Z = 0.94$ として流星の質量は、

$$m = \frac{1.0^{(6.72 - 0.4M)}}{6.84 v^4 \cos Z} \quad (\text{N-ペイの式})$$

$\rho m = 1 \text{ g/cm}^3$ として

$$F = 1.2 \cdot (m / \rho m)^{2/3} = 2.6 \text{ cm}^2$$

$$C = C_d \cdot F / m = 0.81 \text{ cm}^2/\text{g} = 0.081 \text{ m}^2/\text{kg}$$

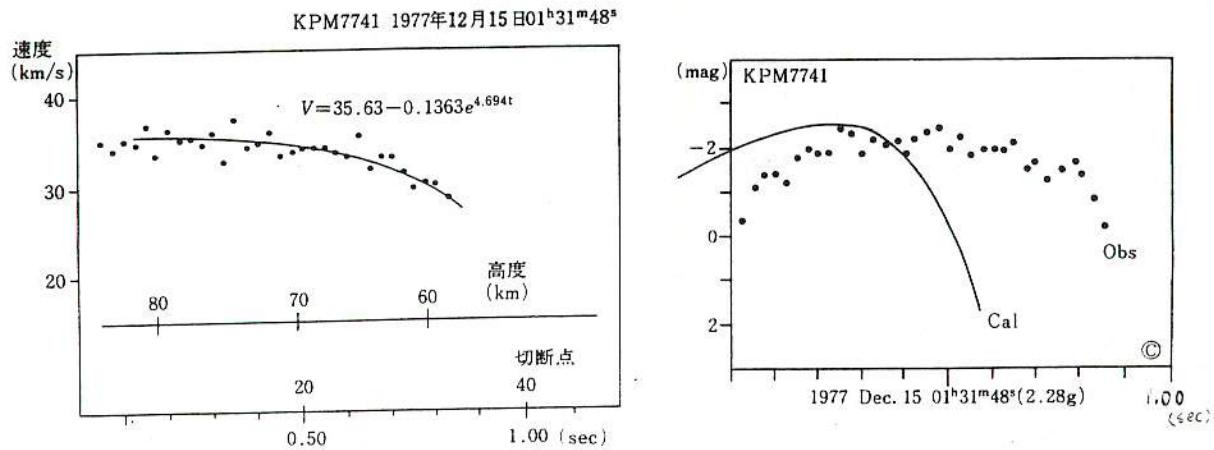
$$\rho a = 1.49 \exp(-1.44E-4 \times h) \quad \alpha = 1.44E-4 \text{ m}^{-1} \quad h \text{ は高さ (m)}$$

$h = 8.5 \text{ km}$ として $\rho a = 7.96E-6 \text{ kg/m}^3$

これにより、補正後の速度は、

$$V_{NA} = 35.49 / \exp(-0.081 \times 7.96E-6 / (1.44E-4 \times 0.94))$$

$$= \underline{\underline{35.65 \text{ km/s}}}$$



流星の軌道計算入門講座 4

6. 補正輻射点の計算

この項では、観測輻射点の方向余弦 (L_0, M_0, N_0) と流星の観測速度（速さ）から、地球の影響（地球の自転、大気による減速、地球の引力）をのぞいた流星体の地球の中心に対する速度を求めます。

6.1 発光点付近の速さ

流星体の速度に対する地球の影響を求めるにあたって、まず、流星の発光点近くでの速さを求めます。これは、流星が強く発光し始めたあとは、質量が大きく変化したり、流星体自体が碎けてバラバラになったり、電離したり物理的に大きく変化するため、運動が極めて複雑になると推定されるからです。強く発光する以前は、質量もほぼ一定と見なせ、流星体に働く主な力は大気の抵抗と重力の2つになり、扱いやすくなります。そのため、この状況に最も近い、発光点付近の速さを使用します。前項では、切断点間の平均の速さを求めましたが、これを発光点からの経過時間に関する回帰直線（曲線）を求め、 $t=0$ の時の速度を求めます。

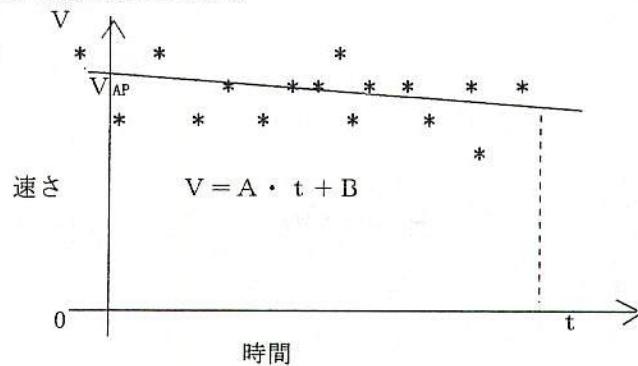
右の図は、直線に近似して V_{AP} を求めている例です。

直線の方程式は、

$$V = A \cdot t + V_{AP}$$

この係数 A は、以下のように求まります。

$$\begin{aligned} [t_2] A + [t] B &= [V_T] \\ [t] A + NB &= [V] \end{aligned}$$



ここで、 N は速さの数、 $[t_2] = \sum (t_2)$ などの意味です。これを解いて、係数 A 、 B を求めれば、発光点付近の速さ V_{AP} は、 $t=0$ として

$$V_{AP} = B$$

です。

また、観測速度の精度が高い場合、

$$V = a + b \cdot e^{x p} (c \cdot t)$$

といった指数関数に近似し、 $t=0$ から $V_{AP} = a + b$ とします。

この V_{AP} から赤道座標の成分を求めておきます。

$$\begin{aligned} (V_{AP})_x &= -V_{AP} \cdot L_0 \\ (V_{AP})_y &= -V_{AP} \cdot M_0 \\ (V_{AP})_z &= -V_{AP} \cdot N_0 \end{aligned}$$

Draft

6.2 地球の自転の補正（日周光行差補正）

流星の観測速度から、地球の自転の影響を取り除きます。

発光点の緯度、経度を (λ_{AP} , ϕ_{AP}) とすると、その地点の地球の自転速度は次式で与えられます。

$$V_r = 0.465 \times \frac{\cos \phi_{AP}}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi_{AP}}} \quad (\text{km/sec})$$

ここで、e はベッセル橢円体の離心率で
 $e^2 = 0.006674342$ です。

これを赤道座標の成分に分けて書くと

$$\begin{aligned} (V_r)_x &= V_r \sin(GAST + \lambda_{AP}) \\ (V_r)_y &= -V_r \cos(GAST + \lambda_{AP}) \\ (V_r)_z &= 0 \end{aligned}$$

となります。ここで GAST は、グリニッジ視恒星時で、4.5 で求めた値です。

これから、地球の自転の影響をのぞいた流星の速度 V_D が求まります。

$$\begin{aligned} (V_D)_x &= (V_{AP})_x - (V_r)_x \\ (V_D)_y &= (V_{AP})_y - (V_r)_y \\ (V_D)_z &= (V_{AP})_z \end{aligned}$$

日周光行差を補正した輻射点の方向余弦を求めておきます。

$$\begin{aligned} L1 &= -(V_D)_x / V_D \\ M1 &= -(V_D)_y / V_D \\ N1 &= -(V_D)_z / V_D \end{aligned}$$

6.3 大気減速補正

次に、単体モデルを利用した補正方法を用いて、大気の影響を取り除いた流星の速度を求めます。
 流星体の密度を ρ_m 、流星体の質量を m とすれば、流星体の断面積 F は、

$$F = A (m / \rho_m)^{2/3}$$

となります。

A は形状因数と呼ばれる数値で、球に近いとすると、 $A \sim 1.2$ となります。
 また、流星体の質量は、Hervey によると次式で表せます。（これは、発光中に大きな爆発などがない場合に使用できる式です。）

$$m = \frac{10^{(6.72-0.4M)}}{6.84V^4 \cos Z} \quad (\text{g})$$

Draft

ここで、Mは流星の絶対等級、Zは輻射点の天頂角で次により求めます。

$$\cos Z = L_1 \cos \phi_{AP} \cos(GAST + \lambda_{AP}) + M_1 \cos \phi_{AP} \sin(GAST + \lambda_{AP}) + N_1 \sin \phi_{AP}$$

さらに、抵抗係数を C_d (~ 1) として $C = C_d \cdot F / m$ と置き、減速補正後の速さを V_{NA} とする

$$\frac{V_D}{V_{NA}} = \exp\left(\frac{-C \cdot \rho_*}{\alpha \cdot \cos Z}\right)$$

となります。

ここで、 α は、大気のスケールハイトの逆数で、概ね $\alpha = 1.44E-4 (m^{-1})$ 、 ρ_* は、発光点付近の大気密度で、概略の値は、次の式で与えられます。

$$\rho_* = 1.49 \exp(-1.44E-4 \times H)$$

H: 流星の発光点の高さ (m)

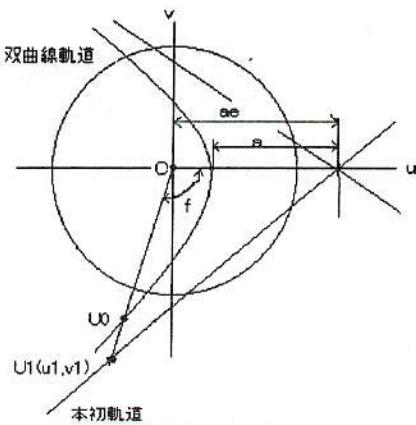
赤道座標系の成分を求めます。

$$\begin{aligned} (V_{NA})_x &= (V_D)_x / D \\ (V_{NA})_y &= (V_D)_y / D \\ (V_{NA})_z &= (V_D)_z / D \end{aligned} \quad D = \exp\left(\frac{-C \cdot \rho_*}{\alpha \cdot \cos Z}\right)$$

6.4 天頂引力の補正

地球付近のみの運動をみれば、流星体の軌跡は地球の中心（地心）を中心とした双曲線軌道になります。地球が無かった時の流星体の軌道（本初軌道）は、その双曲線の漸近線であり、流星体は、その線上を等速直線運動をしたとみなせます。天頂引力補正は、この等速直線運動の速度を求ることです。

これからしばらくの間、流星と地心を含む平面（基本座標とよび (u, v, w) で表します）上で考えます。 u 軸の向きは、双曲線軌道の主軸の向きです。



Draft

基本座標系で、漸近線を極座標 (ρ , θ) で表すと次のようにになります。

$$\rho = \frac{a e \sqrt{e^2 - 1}}{\sqrt{e^2 - 1} \cos \theta - \sin \theta}$$

双曲線上の点U0 (=流星) に対して、地心OとU0を結んだ直線と漸近線の交点をU1とします。このU1の位置 (u_1 , v_1) について、本初軌道上の流星体の速度 (V_{u1} , V_{v1}) を求めればよいことになります。

まず、地心距離 r を求めます。

$$r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$$

x 、 y 、 z : 流星発光点の赤道座標

次に、以下の値を求めます。

$$\begin{aligned} A &= y \cdot (V_{NA}) z - z \cdot (V_{NA}) y \\ B &= z \cdot (V_{NA}) x - x \cdot (V_{NA}) z \\ C &= x \cdot (V_{NA}) y - y \cdot (V_{NA}) x \\ \Gamma^2 &= A^2 + B^2 + C^2 \quad G = \text{SQR}(A^2 + B^2 + C^2) \end{aligned}$$

この値から双曲線軌道の半主軸 a 、離心率 e を求めます。

$$\frac{1}{a} = \frac{V_{NA}^2}{\mu} - \frac{2}{r} \quad a = 1 / (V_{NA}^2 / \mu - 2 / r)$$

$$e^2 = \frac{\Gamma^2}{\mu \cdot a} + 1 \quad e = \text{SQR}(G^2 / \mu / a + 1)$$

μ は、地心引力定数で $\mu = 398600.5 \text{ km}^3/\text{s}^2$ です。

つぎに点U0、U1の真近点離角 f を求めます。

$$\cos f = \frac{1}{e} \left\{ \frac{a(e^2 - 1)}{r} - 1 \right\}$$

$$\sin f = -\sqrt{1 - \cos^2 f}$$

これを漸近線の式に代入すれば、U1 (u_1 , v_1) はすぐに求まります。

Draft

$$u_1 = \frac{a e \sqrt{e^2 - 1} \cos f}{\sqrt{e^2 - 1} \cos f - \sin f}$$

$$v_1 = \frac{a e \sqrt{e^2 - 1} \sin f}{\sqrt{e^2 - 1} \cos f - \sin f}$$

双曲線軌道の平均運動 n を用いると、地球の引力が無いとき速さ $n a$ で等速直線運動をしたと考えられ、 $n^2 a^3 = \mu$ を用いて U1 での速度 (V_{u1}, V_{v1}) を求めます。

$$V_{u1} = n a \frac{1}{e} \quad m = \text{SQRT}(\mu / a^3)$$

$$V_{v1} = n a \frac{\sqrt{e^2 - 1}}{e}$$

これを、赤道座標に変換すれば、重力の影響を除いた流星の本初の位置、速度が求まります。

この座標変換は、次の手順で行います。

- ・ w 軸を中心に座標系を反時計回りに $-f$ 回転
- ・ v 軸を中心に座標系を反時計回りに ϕ'_{AP} 回転 (ϕ'_{AP} は発光点の地心緯度)
- ・ w 軸を中心に座標系を反時計回りに $-(GAST + \lambda_{AP})$ 回転

この変換を行う行列 M は、先に求めた "ABCΓ" などを用いて以下のように表せます。

$$M = \begin{pmatrix} \frac{x}{r} & \frac{Bz - Cy}{r\Gamma} & \frac{A}{\Gamma} \\ \frac{y}{r} & \frac{Cx - Az}{r\Gamma} & \frac{B}{\Gamma} \\ \frac{z}{r} & \frac{Az - Bz}{r\Gamma} & \frac{C}{\Gamma} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos f & \sin f & 0 \\ -\sin f & \cos f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

この M を用いて発光点の本初の地心座標 (x_1, y_1, z_1)、地心速度 Vg は次の通り表されます。

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} (Vg)_x \\ (Vg)_y \\ (Vg)_z \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} V_{u1} \\ V_{v1} \\ 0 \end{pmatrix}$$

Draft

補正輻射点 (α_c , δ_c) は、次の通り求められます。

$$\sin \delta_c = - (Vg) z / Vg$$

$$\tan \alpha_c = (Vg) y / (Vg) x \quad (0^\circ \leq \alpha_c < 360^\circ)$$

参考文献

- ・「本初軌道における流星の位置、速度」長沢工、東京天文台報 第19巻3冊
- ・「天体の位置計算（増補版）」長沢工、地人書館
- ・「天体軌道論」長谷川一郎、恒星社
- ・「流星II」恒星社厚生閣

$$M = \begin{pmatrix} \frac{x}{r} \cos f + \frac{Bz - Cy}{rG} (-\sin f) & \frac{x}{r} \sin f + \frac{Bz - Cy}{rG} \cos f & \frac{A}{G} \\ \frac{y}{r} \cos f + \frac{Cx - Az}{rG} (-\sin f) & \frac{y}{r} \sin f + \frac{Cx - Az}{rG} \cos f & \frac{B}{G} \\ \frac{z}{r} \cos f + \frac{Az - Bz}{rG} (-\sin f) & \frac{z}{r} \sin f + \frac{Az - Bz}{rG} \cos f & \frac{C}{G} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} FM(1,1) & (1,2) & (1,3) \\ (2,1) & (2,2) & (2,3) \\ (3,1) & (3,2) & (3,3) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} FM(1,1) \cdot u_1 + FM(1,2) \cdot v_1 \\ FM(2,1) \cdot u_1 + FM(2,2) \cdot v_1 \\ FM(3,1) \cdot u_1 + FM(3,2) \cdot v_1 \end{pmatrix}$$

流星の軌道計算入門講座 5

7 日心軌道の計算

前章では、地球が無かったとしたときの流星の本初の速度 V_g (V_{gx} , V_{gy} , V_{gz}) と地心位置 (x_1 , y_1 , z_1) を求めました。これをもとに太陽系内の流星の軌道（日心軌道）を求めます。

7. 1 地球の位置・速度

流星の日心位置、速度を求めるために、まず、地球の日心赤道座標を求めます。毎日の太陽の地心に対するXYZ座標は、暦に掲載されています。身近なものでは、「天文年鑑」や「天体観測年表」などです。これらは、毎日のDT0h ($DT = UT + \Delta T$) 値が載っていますので、流星出現時刻の値を補間などにより求めます。また、掲載されているのは地球に対する太陽の位置ですから、太陽に対する地球の位置は、符号を逆する必要があります。

地球の位置

流星が出現した日のDT0hをA0、その1日前をA-1、出現の1日後をA1、2日後をA2とします。流星の出現は、A0とA1の間ということになります。そのAiに対する地球の座標をX-1, X0, X1, X2とすると、 $n = (\text{出現時刻}(UT) + \Delta T) / 24$ とし、そのとき (時刻An) の地球の座標をXnとすれば、

$$X_n = X_0 + n * \Delta' 1/2 + n(n-1)/4 * (\Delta'' 0 + \Delta'' 1) \quad (7-1)$$

Δ' , Δ'' は次のように求めます。

時刻	座標	階差 (1)	階差 (2)
A-1	X-1		
A0	X0	$\Delta' -1/2$	$\Delta'' 0$
A1	X1	$\Delta' 1/2$	$\Delta'' 1$
A2	X2	$\Delta' 3/2$	

(7-1)により、X, Y, Z成分の座標 (x , y , z) をそれぞれ求めます。

地球の速度

地球の速度を求めます。まず、A-1に対する速度 V_{-1} は、

$$\begin{aligned} V_{-1} &= 0.5 * (-X_2 + X_0) \\ &\text{となります。同様に,} \\ V_0 &= 0.5 * (-X_1 + X_1) \\ V_1 &= 0.5 * (-X_0 + X_2) \\ V_2 &= 0.5 * (-X_1 + X_3) \end{aligned}$$

Draft

これを用いて、座標の時と同様に(7-1)から出現時刻における V_n を求めます。
速度もX、Y、Z成分について求めておきます。
単位をkm/sに換算します。Y、Z成分も同様な手順で計算します。

$$VGx = Vn * 1.49598 \times 10^8 / (3600*24)$$

これにより、地球の日心座標における位置と速度が求まりました。

7. 2 流星の日心速度

流星の日心速度 VH (VHX , VHY , VHZ) は、地球の位置と速度を用いて次のとおり求められます。

$$VHX = VGx + VGx$$

$$VHY = Vgy + VGy$$

$$VHZ = Vgz + VGz$$

また、流星の日心座標は、前項で求めた地球の座標をそのまま用いても差し支えありません。

7. 3 軌道要素

ガウスの引力定数 $k=0.017202$ AU/日、 1 AU= 1.49598×10^8 を用いて流星の速度の単位系をkm/s
から $AU/(1/k) \cdot 日$ に変換します。
 $km/s = 29.785 AU/(1/k) \cdot 日$ から

$$v_x = VHX / 29.785$$

$$v_y = VHY / 29.785$$

$$v_z = VHZ / 29.785$$

$$\text{また、 } r^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad \text{太陽-流星距離}$$

$$G^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

$$H = x \cdot v_x + y \cdot v_y + z \cdot v_z$$

これらの値を用いて、各要素を求めます。

$$\text{半長径 } a = 1 / (2 / r - G^2)$$

$$\text{離心率 } e = p = r^2 \cdot G^2 - H^2 \text{ として}$$

$$e = \sqrt{1 - p/a}$$

$$\text{近日点距離 } q = a(1 - e)$$

$$\text{公転周期 } P = \sqrt{a^3}$$

Draft

$$\begin{aligned} \text{さらに } A &= (x \cdot v_z - z \cdot v_x) / \text{SQRT}(p) \\ B &= (y \cdot v_z - z \cdot v_y) / \text{SQRT}(p) \\ C &= (x \cdot v_y - y \cdot v_x) / \text{SQRT}(p) \end{aligned}$$

昇降点黄径 (Ω) 軌道傾斜角 (i)

$$\begin{aligned} \sin i \cos \Omega &= A \cdot \cos \epsilon - C \cdot \sin \epsilon \\ \sin i \sin \Omega &= B \\ \cos i &= A \cdot \sin \epsilon + C \cdot \cos \epsilon \end{aligned}$$

ここで、 $0 \leq \Omega < 360$ **近日点引数 (ω)**次の f を求めます。

$$\begin{aligned} e \cos f &= p / r - 1 \\ e \sin f &= \text{SQRT}(p) H / r \end{aligned}$$

流星出現時刻の太陽黄径 LH を用いて

$$\begin{aligned} \Omega \hat{=} LH + 180 &\text{ ならば } \omega = -f \\ \Omega \hat{=} LH &\text{ ならば } \omega = 180 - f \end{aligned}$$

参考文献

- 「天体軌道論」 長谷川一郎、恒星社

流星の軌道計算入門講座6

8. 計算例

今までの計算方法の解説に沿った形で、計算例を作成しました。
計算に使用したデーターは、「流星2」のものを使用しています。
ただし、「流星2」は、分点が B1950ですから、それを J2000に変換して
使用しました。

流星出現時刻 1982年12月14日 23h43m13s

観測地点A (相模湖) $\lambda=139.1310^{\circ}\text{E}$, $\phi=35.5369^{\circ}\text{N}$, $h=453\text{m}$
観測地点B (三門) $\lambda=140.3692^{\circ}\text{E}$, $\phi=35.2794^{\circ}\text{N}$, $h=40\text{m}$

8.1 観測輻射点の計算

発光点・切断点・消滅点の方向余弦 (J2000)

A (相模湖)

	赤経			赤緯			方向余弦		
	h	m	s	,	"	"	l0	m0	n0
発光点	6	46	42.0	20	11	59	-0.189914	0.919079	0.345292
切断点1	6	46	14.0	20	4	57	-0.188181	0.920155	0.343371
切断点2	6	45	27.4	19	51	4	-0.185334	0.922138	0.339577
切断点3	6	44	34.1	19	37	40	-0.182015	0.924141	0.335907
切断点4	6	43	40.5	19	23	33	-0.178672	0.926190	0.332036
切断点5	6	42	48.3	19	7	41	-0.175435	0.928357	0.327682
切断点6	6	41	53.8	18	52	54	-0.172009	0.930422	0.323615
切断点7	6	40	54.8	18	36	49	-0.168281	0.932632	0.319186
切断点8	6	39	55.8	18	20	31	-0.164543	0.934825	0.314686
切断点9	6	38	54.6	18	3	6	-0.160644	0.937108	0.309874
切断点10	6	37	52.0	17	44	33	-0.156651	0.939464	0.304742
切断点11	6	36	47.1	17	26	50	-0.152467	0.941731	0.299828
切断点12	6	35	35.5	17	6	58	-0.147827	0.944208	0.294310
切断点13	6	34	28.0	16	46	31	-0.143449	0.946637	0.288619
切断点14	6	33	18.1	16	26	26	-0.138876	0.949006	0.283021
切断点15	6	32	4.3	16	5	48	-0.134014	0.951402	0.277261
消滅点	6	31	10.2	15	50	1	-0.130440	0.953174	0.272846

B (三門)

	赤経			赤緯			方向余弦		
	h	m	s		"		l 0	m 0	n 0
発光点	2	13	37.5	26	37	23	0.746277	0.492199	0.448119
切断点1	2	12	21.6	26	28	13	0.749984	0.488719	0.445733
切断点2	2	9	13.9	26	7	45	0.758812	0.479849	0.440397
切断点3	2	6	7.2	25	45	10	0.767708	0.471002	0.434490
切断点4	2	3	10.8	25	25	9	0.775847	0.462403	0.429237
切断点5	2	0	5.0	25	2	32	0.784450	0.453285	0.423285
切断点6	1	56	58.9	24	39	16	0.792994	0.444015	0.417146
切断点7	1	53	58.3	24	17	2	0.801113	0.434841	0.411256
切断点8	1	51	1.0	23	54	35	0.809012	0.425718	0.403295
消滅点	1	49	10.4	23	40	17	0.813901	0.419963	0.401492

経路大円の極の方向余弦

A (相模湖)

[l^2]	=	0.456922	大円極1の方向余弦
[lm]	=	-2.586299	
[ln]	=	-0.872428	
[m^2]	=	14.874420	
[mn]	=	4.964149	L1= 0.787110 M1= -0.067751 N1= 0.613081

この係数により連立方程式を解いて

$$\begin{aligned} X &= 1.283860 \\ Y &= -0.110509 \end{aligned}$$

B (三門)

[l^2]	=	6.089434	大円極2の方向余弦
[lm]	=	3.560567	
[ln]	=	3.316442	
[m^2]	=	2.096329	
[mn]	=	1.949924	L2= -0.086540 M2= -0.595746 N2= 0.798497

この係数により連立方程式を解いて

$$\begin{aligned} X &= -0.108378 \\ Y &= -0.746083 \end{aligned}$$

観測輻射点の計算

[L^2]	=	0.627031	観測輻射点の方向余弦
[LM]	=	-0.001772	
[LN]	=	0.413460	
[M^2]	=	0.359503	
[MN]	=	-0.517238	
この係数により連立方程式を解いて		L0= -0.3507835 M0= 0.76839781 N0= 0.53527166	観測輻射点
X	=	-0.655337	$\alpha_0 = 114.54 \text{ (deg)}$
Y	=	1.435529	$\delta_0 = 32.36 \text{ (deg)}$
			$\cos(Q) = 0.4618$
			$Q = 62.5 \text{ (deg)}$

8.2 視位置の計算

力学時

$$\Delta T = 51 \text{ 秒として}$$

$$TD = 14.7344$$

時刻引数

$$T = -0.1704692$$

 ξ_0, θ, z の計算

$\xi_0 =$	-0.1092 (deg)	-0.001906 (rad)
$\theta =$	-0.0949 (deg)	-0.001657 (rad)
$z =$	-0.1092 (deg)	-0.001906 (rad)

歳差補正行列

$$P = \begin{pmatrix} 0.9999914 & 0.0038117 & 0.0016567 \\ -0.0038117 & 0.9999927 & -0.0000032 \\ -0.0016567 & -0.0000032 & 0.9999986 \end{pmatrix}$$

章動補正行列

$$\begin{aligned} T &= -0.1704692 \\ \Delta\phi &= -0.00487 \text{ (deg)} & -0.000085 \text{ (rad)} \\ \Delta\varepsilon &= -0.00049 \text{ (deg)} & -0.000009 \text{ (rad)} \\ \varepsilon_1 &= 23.395 \text{ (deg)} & 0.408320 \text{ (rad)} \end{aligned}$$

$$N = \begin{pmatrix} 1.0000000 & 0.0000781 & 0.0000338 \\ -0.0000781 & 1.0000000 & 0.0000086 \\ -0.0000338 & -0.0000086 & 1.0000000 \end{pmatrix}$$

歳差・章動補正行列

$$D = \begin{pmatrix} 0.9999910 & 0.0038897 & 0.0016905 \\ -0.0038898 & 0.9999924 & 0.0000053 \\ -0.0016904 & -0.0000119 & 0.9999986 \end{pmatrix}$$

歳差・章動補正後の流星切断点の方向余弦

A (相模湖)

	l1	m1	n1
発光点	-0.185754	0.919813	0.345601
切断点1	-0.184019	0.920881	0.343678
切断点2	-0.181171	0.922854	0.339878
切断点3	-0.177851	0.924844	0.336203
切断点4	-0.174506	0.926880	0.332326
切断点5	-0.171269	0.929034	0.327967
切断点6	-0.167842	0.931086	0.323895
切断点7	-0.164112	0.933281	0.319459
切断点8	-0.160373	0.935460	0.314952
切断点9	-0.156474	0.937727	0.310134
切断点10	-0.152480	0.940068	0.304995
切断点11	-0.148296	0.942318	0.300074
切断点12	-0.143655	0.944777	0.294549
切断点13	-0.139277	0.947189	0.288850
切断点14	-0.134705	0.949541	0.283244
切断点15	-0.129843	0.951918	0.277476
消滅点	-0.126270	0.953675	0.273055

B (三門)

	l1	m1	n1
発光点	0.748943	0.489295	0.446851
切断点1	0.752632	0.485800	0.444459
切断点2	0.761416	0.476896	0.439108
切断点3	0.770267	0.468015	0.433186
切断点4	0.778364	0.459384	0.427919
切断点5	0.786922	0.450233	0.421953
切断点6	0.795419	0.440929	0.415800
切断点7	0.803492	0.431724	0.409896
切断点8	0.811346	0.422570	0.403922
消滅点	0.816206	0.416796	0.400110

光行差補正

$$\begin{aligned}\lambda_s &= 263.45 \text{ (deg)} & 4.5981 \text{ (rad)} \\ \epsilon &= 23.39 \text{ (deg)} & 0.4083 \text{ (rad)}\end{aligned}$$

A (相模湖) 発光点の光行差補正行列

$$A = \begin{pmatrix} 0.9654955 & 0.1708588 & 0.0641968 \\ 0.1708588 & 0.1539448 & -0.3178885 \\ 0.0641968 & -0.3178885 & 0.8805597 \end{pmatrix}$$

この他の切断点等についても、同様に行列をもとめます。
これをもとに、流星切断点の視位置の方向余弦を求めます。

流星切断点の視位置の方向余弦

A (相模湖)

	l	m	n
発光点	-0.185847	0.919796	0.345596
切断点1	-0.184113	0.920865	0.343672
切断点2	-0.181265	0.922838	0.339873
切断点3	-0.177944	0.924828	0.336198
切断点4	-0.174600	0.926864	0.332321
切断点5	-0.171363	0.929019	0.327962
切断点6	-0.167936	0.931071	0.323890
切断点7	-0.164206	0.933266	0.319455
切断点8	-0.160468	0.935445	0.314948
切断点9	-0.156569	0.937713	0.310131
切断点10	-0.152575	0.940054	0.304992
切断点11	-0.148390	0.942305	0.300071
切断点12	-0.143750	0.944764	0.294546
切断点13	-0.139373	0.947176	0.288847
切断点14	-0.134800	0.949528	0.283242
切断点15	-0.129939	0.951906	0.277474
消滅点	-0.126366	0.953663	0.273053

B (三門)

	l	m	n
発光点	0.748894	0.489338	0.446885
切断点1	0.752583	0.485843	0.444493
切断点2	0.761369	0.476939	0.439143
切断点3	0.770222	0.468057	0.433221
切断点4	0.778320	0.459427	0.427954
切断点5	0.786879	0.450275	0.421987
切断点6	0.795378	0.440971	0.415834
切断点7	0.803452	0.431766	0.409931
切断点8	0.811307	0.422612	0.403956
消滅点	0.816168	0.416837	0.400145

視恒星時の計算

$$\begin{aligned}\text{グリニッジ平均恒星時} & \quad \text{GMST} = 20.2829 \\ \text{グリニッジ視恒星時} & \quad \text{GAST} = 20.2826\end{aligned}$$

8.3 対地軌道の計算

観測地点の赤道座標

観測地点A

$\lambda =$	139.131	$\phi =$	35.5369	$h = 453 \text{ (m)}$
	NA =	6389.803		
	X1 =	600.353		
	Y1 =	5165.243		
	Z1 =	3689.402		

観測地点B

$\lambda =$	140.3692	$\phi =$	35.2794	$h = 40 \text{ (m)}$
	NA =	6389.725		
	X2 =	490.123		
	Y2 =	5193.177		
	Z2 =	3665.867		

観測輻射点の視位置

切断点と同様に観測輻射点、大円の極の視位置（方向余弦）を求めます。

観測輻射点の視位置

L0 =	-0.346970
M0 =	0.769735
N0 =	0.535835

大円の極（A）の視位置

L1 =	0.787837
M1 =	-0.070804
N1 =	0.611801

大円の極（B）の視位置

L2 =	-0.087605
M2 =	-0.595386
N2 =	0.798649

X0, Y0, Z0の計算

$k = 0.844323$

$$R = \begin{pmatrix} -0.220199 & 0.488500 & -0.844323 \\ -0.911660 & -0.410945 & 0.000000 \\ -0.346970 & 0.769735 & 0.535835 \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{ll} l1 = 0.508864 & l2 = 0.933778 \\ m1 = 0.634427 & m2 = 0.230166 \\ n1 = -0.581859 & n2 = 0.274013 \end{array}$$

これらから

$$\begin{array}{ll} X = -703.998 \\ Y = -2691.002 \end{array}$$

変換行列Rの逆行列は

$$R^{-1} = \begin{pmatrix} -0.220199 & -0.911660 & -0.346970 \\ 0.488500 & -0.410945 & 0.769735 \\ -0.844323 & 0.000000 & 0.535835 \end{pmatrix}$$

(X, Y, 0) を赤道直角座標に変換してX0, Y0, Z0の座標が求まります。

$$\begin{array}{lll} X0 = 2608.299 \\ Y0 = 761.950 \\ Z0 = 594.401 \end{array}$$

流星経路上の点 (X0, Y0, Z0) と方向 (L0, M0, N0) が求まり、経路の赤道座標での方程式が決定できました。

切断点の座標

経路上の位置を決めるパラメータ τ を流星各点について求めます。
この τ をもとに、各切断点の赤道座標、地表に対する位置などを
求めます。

	赤道座標			緯度	経度	高度	速度	パラメーター
	X	Y	Z	λ	ϕ	h	(km/s)	τ
A (相模湖)								
発	581.60	5258.08	3724.29	139.449	35.324	99.31		5841.136
1	581.94	5257.33	3723.77	139.444	35.324	98.43		5840.164
2	582.54	5255.99	3722.84	139.436	35.323	96.86	34.77	5838.425
3	583.15	5254.65	3721.90	139.428	35.323	95.29	34.90	5836.68
4	583.75	5253.31	3720.97	139.420	35.323	93.72	34.83	5834.939
5	584.37	5251.94	3720.01	139.412	35.323	92.11	35.61	5833.158
6	584.95	5250.64	3719.11	139.404	35.322	90.59	33.61	5831.478
7	585.56	5249.29	3718.17	139.396	35.322	89.00	35.23	5829.717
8	586.16	5247.97	3717.25	139.388	35.322	87.46	34.25	5828.004
9	586.76	5246.63	3716.32	139.379	35.322	85.88	34.87	5826.261
10	587.37	5245.28	3715.38	139.371	35.321	84.30	35.17	5824.502
11	587.95	5243.99	3714.48	139.363	35.321	82.78	33.49	5822.828
12	588.58	5242.60	3713.52	139.355	35.321	81.16	35.90	5821.033
13	589.17	5241.29	3712.60	139.347	35.320	79.62	34.28	5819.319
14	589.74	5240.01	3711.71	139.339	35.320	78.12	33.10	5817.664
15	590.32	5238.74	3710.82	139.332	35.320	76.63	33.09	5816.009
消	590.74	5237.81	3710.18	139.326	35.320	75.55		5814.806

B (三門)

発	583.39	5254.11	3721.53	139.425	35.323	94.66		5835.985
1	583.65	5253.54	3721.13	139.421	35.323	93.99		5835.239
2	584.27	5252.16	3720.17	139.413	35.323	92.36	35.93	5833.442
3	584.90	5250.76	3719.19	139.405	35.322	90.73	36.26	5831.629
4	585.48	5249.47	3718.29	139.397	35.322	89.21	33.56	5829.951
5	586.10	5248.10	3717.34	139.388	35.322	87.60	35.64	5828.169
6	586.72	5246.72	3716.38	139.380	35.322	85.99	35.70	5826.384
7	587.31	5245.40	3715.46	139.372	35.321	84.44	34.32	5824.668
8	587.90	5244.10	3714.56	139.364	35.321	82.92	33.73	5822.981
消	588.27	5243.29	3714.00	139.359	35.321	81.97		5821.928

1、はじめに

輻射点と速度から軌道を求められるのなら、軌道から輻射点と速度も求めたくなります。そんなプログラムがORVです。RVOとORVは1つのプログラムに入っています。プログラム名は、rvo.exeです。

2、ORVの使用方法

- 1) ORVのときは、必ずファイルの1行目に「ORV」の文字を入れてください。
- 2) 指定した小数点位置を検出し、e q ω Ω i を読み込んで Rad VG を計算します。
- 3) 分点は2000年分点のみです。
- 4) SDの項目には、地球と基準軌道との距離が、1/1000 AU 単位で出力されます。
- 5) ORV計算は、軌道が地球と交差するように軌道要素を変化させています。よって、軌道要素の出力も変化しますが、出力を変化させたくないときは、ファイルの2行目以降に「ORBIT=FIX」の文字を入れてください。
- 6) 入力ファイルフォーマットには以下の5種類があります。
- 7) 入力1は軌道要素のみ指定、入力2は年を指定、入力3は年月日時分秒を指定、入力4は年月日（時分秒を日の小数以下）を指定、入力5は太陽黄経を指定。

ORV

ORBIT=FIX

ID	DATE	UT	Co. Rad(2000)	SD	VG	a	e	q	ω	Ω	i
入力1						20.3	0.971	0.589	98.9	45.4	164.2
入力2	1989					20.3	0.971	0.589	98.9	45.4	164.2
入力3	19890505	182351				20.3	0.971	0.589	98.9	45.4	164.2
入力4	19890505.	766563				20.3	0.971	0.589	98.9	45.4	164.2
入力5		45.40				20.3	0.971	0.589	98.9	45.4	164.2
						-	-	-	-	-	-
カム	→	16 20				51	57	65	71	77	

3、実際例

[例1、ORV計算 入力フォーマットによる違い]

ID	DATE	UT	Co. Rad(2000)	SD	VG	a	e	q	ω	Ω	i
1) 入力1のときは、輻射点、速度、距離と推定太陽黄経が2行出力されます。											
出力(降交点側)	45.43	337.7	-1.3 000	66.1	20.3	0.971	0.589	98.9	45.4	164.2	
出力(昇交点側)	207.31	94.4	16.2 084	66.8	20.3	0.971	0.589	98.9	45.4	164.2	
2) 入力2のときは、加えて推定観測月日時が2行出力されます。											
出力	19890505	20	337.7	-1.3 000	66.1	20.3	0.971	0.589	98.9	45.4	164.2
出力	19891020	14	94.4	16.2 084	66.8	20.3	0.971	0.589	98.9	45.4	164.2
3) 入力3のときは、その時刻に於ける輻射点、速度、距離が出力されます。											
出力	19890505	182351	337.7	-1.3 001	66.1	20.3	0.971	0.589	98.9	45.4	164.2
4) 入力4のときは、その日に於ける輻射点、速度、距離が出力されます。											
出力	19890505.	766563	337.7	-1.3 001	66.1	20.3	0.971	0.589	98.9	45.4	164.2
5) 入力5のときは、その太陽黄経に於ける輻射点、速度、距離が出力されます。											
出力		45.40	337.7	-1.2 001	66.1	20.3	0.971	0.589	98.9	45.4	164.2
基準	19890505	182351	337.6	-1.3 .1	66.1	20.3	0.971	0.589	98.9	45.4	164.2

[例2、さまざまなORV計算例]

ORV
ORBIT=FIX

ID	DATE	UT	Co. Rad(2000)	SD	VG	a	e	q	ω	Ω	i
<Qua>	1983					6.58	0.851	0.978	171.2	283.0	76.5
出力	19830103 17		229.1	48.1 000	44.8	6.58	0.851	0.978	171.2	283.0	76.5
出力	19831230 19		217.9	54.3 017	44.5	6.58	0.851	0.978	171.2	283.0	76.5
基準	19830103 172135		229.1	48.1 .3	44.8	6.58	0.851	0.978	171.2	283.0	76.5
< η Aqr>	1989					20.3	0.971	0.589	98.9	45.4	164.2
出力	19890505 20		337.7	-1.3 000	66.1	20.3	0.971	0.589	98.9	45.4	164.2
出力	19891020 14		94.4	16.2 084	66.8	20.3	0.971	0.589	98.9	45.4	164.2
基準	19890505 182351		337.6	-1.3 .1	66.1	20.3	0.971	0.589	98.9	45.4	164.2
<Per>	1991					32.4	0.970	0.963	154.1	139.4	113.3
出力	19910812 11		45.2	57.8 000	59.4	32.4	0.970	0.963	154.1	139.4	113.3
出力	19910907 23		55.2	53.1 172	62.8	32.4	0.970	0.963	154.1	139.4	113.3
基準	19910812 111414		45.1	57.7 .1	59.5	32.4	0.970	0.963	154.1	139.4	113.3
<Gem>	1991					1.29	0.886	0.147	324.1	262.4	22.7
出力	19911006 06		169.3	8.5 396	32.8	1.29	0.886	0.147	324.1	262.4	22.7
出力	19911214 17		113.9	32.3 001	33.6	1.29	0.886	0.147	324.1	262.4	22.7
基準	19911214 174036		113.9	32.3 .0	33.6	1.29	0.886	0.147	324.1	262.4	22.7
Halley	1986					17.9	0.967	0.591	111.4	58.4	162.3
出力	19860507 07		338.5	-2 061	66.0	17.9	0.967	0.591	99.0	46.6	162.7
出力	19861021 18		95.5	16.0 154	66.8	17.9	0.967	0.591	80.0	28.2	164.8
Swift	T 1992					137	0.964	0.958	153.0	139.4	113.4
出力	19920811 15		45.8	57.7 001	59.4	26.6	0.964	0.958	152.7	139.3	113.4
出力	19920909 08		58.0	52.5 188	63.1	26.6	0.964	0.958	205.7	167.0	125.6
HalBop	1996					321	0.997	0.918	130.4	282.5	89.3
出力	19960103 07		230.0	36.5 130	51.8	306.	0.997	0.918	150.1	282.2	89.3
出力	19961230 03		199.5	52.7 130	50.5	306.	0.997	0.918	209.9	278.7	86.2
Hyakut	1996					653	1.000	0.230	130.2	188.0	124.9
出力	19960728 08		70.9	29.5 676	60.8	.000	1.000	0.230	56.8	125.6	157.7
出力	19960323 22		224.0	-34.0 191	58.3	.000	1.000	0.230	122.6	183.6	125.1

[ソフト／ハードの通信販売]

以上のRVO及びORVは、PC98及びDOS/V機のDOS上で動作します。ご希望の方は、1) 90円切手を貼った返信用封筒、2) フォーマット済みフロッピードライブ3.5インチ1枚を、重野までお送りください。費用はいりません。無料です。

またこのプログラムは、以下のパソコン通信に登録しています。パソコン通信をされている方は、ダウンロードしてください。フリーウエアです。

- 1) KPM-BBS : ファイルライブラリー astro
- 2) NIFTY-Serve : FSPACE-LIB01 - プログラム集 (実行ファイル&ソース)

[水晶制御DC・ACインバータ]

4連カメラの回転シャッター用モーターの制御などで、AC100v(50/60Hz)が必要です。しかしフィールドでは電源が取れません。そこでDC12vのバッテリーからAC100vを作り出す必要があります。一般に市販のDC・ACインバータは周波数が正確ではありませんので、モーターの制御には使えません。そこで水晶制御DC・ACインバータを作成しました。25,000円です。

[II鏡筒ホルダー]

「イメージインテンシファイア(II)+ビデオ観測をやってみたいが、機器の組み立てが大変だ」という方、II+ビデオ観測のために考案した、II鏡筒ホルダーができています。簡単なパンフレットもあります。34,000円です。

デルフト社製II、15万円で入手できます。品質はハマツ以上と豪語しています。IIだけでもご協力します。

☆☆ ご連絡ください.... 211 川崎市木月住吉町 2024 重野好彦 ☆☆

つくば隕石の突入速度(V_∞)の検証

司馬康生・下田 力・伊藤大雄・福井敬一・重野好彦

要旨

つくば隕石の落下速度を、その観測データ及び落下物理的面から検討した。その結果、報道された $V_\infty = 16[\text{km/s}]$ という突入速度は過小見積の可能性が高い。つくば隕石の軌道はこれまで計算された隕石軌道とは違い、より大きな軌道を持っていた可能性がある。

はじめに

1996年1月7日16時21分(JST)に茨城県つくば市とその周辺に落下したつくば隕石は、晴天のため多くの人が観測し、多くの報告が寄せられた。しかもその中には世界で初めてと思われる昼間の隕石落下写真も含まれ、目撃報告と併せて、かなり信頼できる落下経路が推定できた(伊藤他 1996)。しかしその反面、速度の決定は極めて困難だった。

一般に、隕石の落下速度はその少しの違いがその軌道にかなりの違いを生じさせる。従って、隕石の起源を求めるためには精度良い速度の推定が欠かせない。

2月14日に、つくば隕石研究の中心的立場に位置した、つくば市内の通産省地質調査所において、この隕石についての検討会が開かれ、その結果が記者会見として発表された。その中ではこの隕石の突入速度が $16[\text{km/s}]$ であるとされ、その起源が小惑星帯にあると報道された。しかし、その決定の根拠については疑問が含まれる。すなわち、そのデータは村山定男氏によってもたらされた事が国立科学博物館の米田成一氏から、司馬への私信の中で判明したが、一方、中野主一氏による計算結果が村山氏にもたらされたことが(中野 1996)によって公表された。これらから、 $16[\text{km/s}]$ という速度の推定、小惑星帯起源という説は中野主一氏から発せられたものと考えられる。そして、中野氏による推定方法は、統計的方法である。すなわち、この時期、この方向から飛来する流星の軌道は統計的に小惑星帯から飛来するものが多い、という一般論であり、特につくば隕石に対する観測による根拠があつて決定されたものではない。

これまで落下した隕石の中で、正確な速度決定によって軌道が決定がされた4つの隕石(Pribram, Lost City, Innisfree, Peekskill)の起源が全て小惑星帯からの飛来であることからも、統計的につくば隕石も同様に考えることは自然であるが、確実なものとは言えない。もし、つくば隕石の直接の観測データに基づきその速度が推定され、その起源が解明されるなら、より信頼性が高い。ここでは、つくば隕石の火球観測データに基づき、その速度と、起源について検討したい。

眼視観測による速度

撮影された写真から速度を求める事は、昼間のためにそのシャッター速度が速すぎて不可能だった。従って、観測から速度を求める方法は眼視観測による経路と、継続時間の報告から計算するほかない。NMSへの眼視観測報告の中で、経路と継続時間の両方のデータが揃っていたのは23件(司馬 1996a, b, c)だった。火球経路は(伊藤他 1996)による方向であるとし、報告された見かけの経路はその一部分であるとし、観測されたであろう経路長と継続時間の関係からその速度を推定したものが表1である。なお、隕石の大気減速は無視し、報告経路が(伊藤他 1996)による実経路と比べて特に差の大きい3件は除いた。

残念ながら眼視観測による継続時間の推定は大きな誤差を伴う。更に、大気減速によって、初速より充分減速した経路末端部分だけを観測した人も多い。例えば、橋爪氏の観測値は一般に言われる、消滅点付近の速度が $4[\text{km/s}]$ 以下のときに隕石落下の可能性が高い、という数値そのものに見える。しかし、観測数は多く得られ、その結果は、初速度は $16[\text{km/s}]$ より速い可能性が高い。

表1 眼視観測による速度

観測者	観測地	観測経路長 [deg]	観測時間 [s]	速度 [km/s]
高橋清利	福島県国見町	5	40	2~3 13~20
玉木聰	新潟県妙高高原杉の原	55	99	3 33
大宮英男	新潟県糸魚川市早川	12?	45	2~3 15~23
坪井 宏	新潟県黒崎町木場地内	18~31	133	10 13
樺村信也	富山県黒部市若栗	10~15	115	3~4 29~38
森 和雄	長野市吉田	44	55	2~3 18~28
小林和宏	長野市信濃町	67	143	5~6 24~29
成尾誌穂 他	長野県朝日村	69	133	3.6~5.5 24~37
辻 庸一	埼玉県毛呂山町	100	148	3 49
橋爪貞美	茨城県つくば市	33	20	5 4
山本哲也	茨城県つくば市新井	40?	45	2~3 15~23
小林正人	東京都日野市多摩平	20~25	35	2~3 12~18
渡辺 裕	東京都府中市	45	48	3? 16
麻生 他	神奈川県藤沢市円行	64	68	5 14
白石	神奈川県鎌倉市雪の下	16~20	30	1~2 15~30
高井	神奈川県寒川町	26?	39?	5? 8
明田	神奈川県茅ヶ崎市堤	38~69	57	2 29
栗原	神奈川県藤沢市遠藤	17~19	43	1~2 22~43
井上	神奈川県茅ヶ崎市新栄町	38~43	60~69	5? 13
山本義秀	静岡市登呂	23	63	1~2 32~63
合計(幅のあるものは中央値)		1423.5		71.55
合計20件		平均速度 = 19.9 ± 4.5 [km/s]		

物理的な検討

大気に突入する隕石は、大気との衝突で熱を発し、光を放つと共にその成分を蒸発させる。また、激しい大気との衝突はその表面に大きな圧力を及ぼし、分裂を起こすことが多い。そして、その衝突の激しさは、突入した隕石の運動エネルギーによって特徴づけられる。運動エネルギーは、その質量と、速度の2乗に比例するため、隕石落下の物理では速度が最大の影響力を持っている。すなわち、隕石落下において発生した光の量、消滅点高度、落下質量、隕石の硬さと分裂との関係など、速度の影響下にある物理諸量がわかるなら、精度良い突入速度の推定が可能である。しかし、これらの方法は、写真などによる充分な観測が無ければ決定できない物理量が多いために困難である。しかし、つくば隕石に対しては、幸いにもその隕石雲の発生点が正確に決定された。隕石雲の発生は、この地点で最も大量の隕石成分が蒸発して大気中に放出されたことを意味し、最も蒸発が激しかった高度、すなわち最大光度となった地点がわかったことになる。また、最大光度は眼視観測から-15等～-20等の間と見積もる。また、石田哲美氏の写真の暫定的な測定から、光度は-15等より明るかったと推定される。長谷川隆氏はテーブルの反射光から光度を-16～-17等と推定している。一方、摩耗割合を特徴づける数値である摩耗係数 σ は Pribram 隕石、Lost City 隕石に対して与えられている(McIntosh 1970)。また、長沢工は摩耗係数について $0.03[\text{s}^2/\text{km}^2] \pm 2$ 割程度であろう、としている(長沢 1981)。これらを参考に摩耗係数を $0.005 \sim 0.045[\text{s}^2/\text{km}^2]$ の範囲に対して単純アブレーションモデルを使ってシミュレーションした結果が次の表である。計算では、最大光度となる高度が、隕石雲の発生高さ=24km台後半に一致するよう、突入速度と、突入質量を前後させた。判定は、光度が-15等から-20等の間にあるか、もしくは、落下質量が0.9kg以上有るか、による。

表2 つくば隕石の物理シミュレーション

	例1	例2	例3	例4	例5	例6	例7	例8	例9	例10	例11	例12	例13	例14	例15
初速度 V_∞ [km/s]	16	16	16	18	18	18	20	20	20	22	22	22	24	24	24
摩耗係数 σ [s^2/km^2]	0.005	0.030	0.045	0.005	0.030	0.045	0.005	0.030	0.045	0.005	0.030	0.045	0.005	0.030	0.045
突入質量 M_i [kg]	200	1500	4000	220	2500	8000	290	4000	13000	350	6000	22000	430	11000	32000
落下質量 M_f [kg]	105	33	9.3	97	19.1	3.3	104	9.1	0.78	100	3.5	0.15	97	1.50	0.02
最大光度 $\text{Mag}(\max)$ [mag]	-11.6	-15.1	-16.3	-12.3	-16.1	-17.5	-13.2	-17.1	-18.5	-13.8	-17.8	-19.7	-14.4	-18.8	-20.1
消滅点高度 h_e [km]	9.2	9.9	11.3	9.1	10.3	12.0	8.5	10.8	13.0	8.2	11.9	14.0	8.0	12.3	15.1
判定	×	△	○	×	○	○	×	○	×	×	○	×	×	○	×

この結果は、突入速度が $16[\text{km/s}]$ より速い可能性がより高いように思われる。もし、回収された質量、約 0.9kg の、地上に落下した質量に対する割合がわかるなら、更に速度領域が限定される。

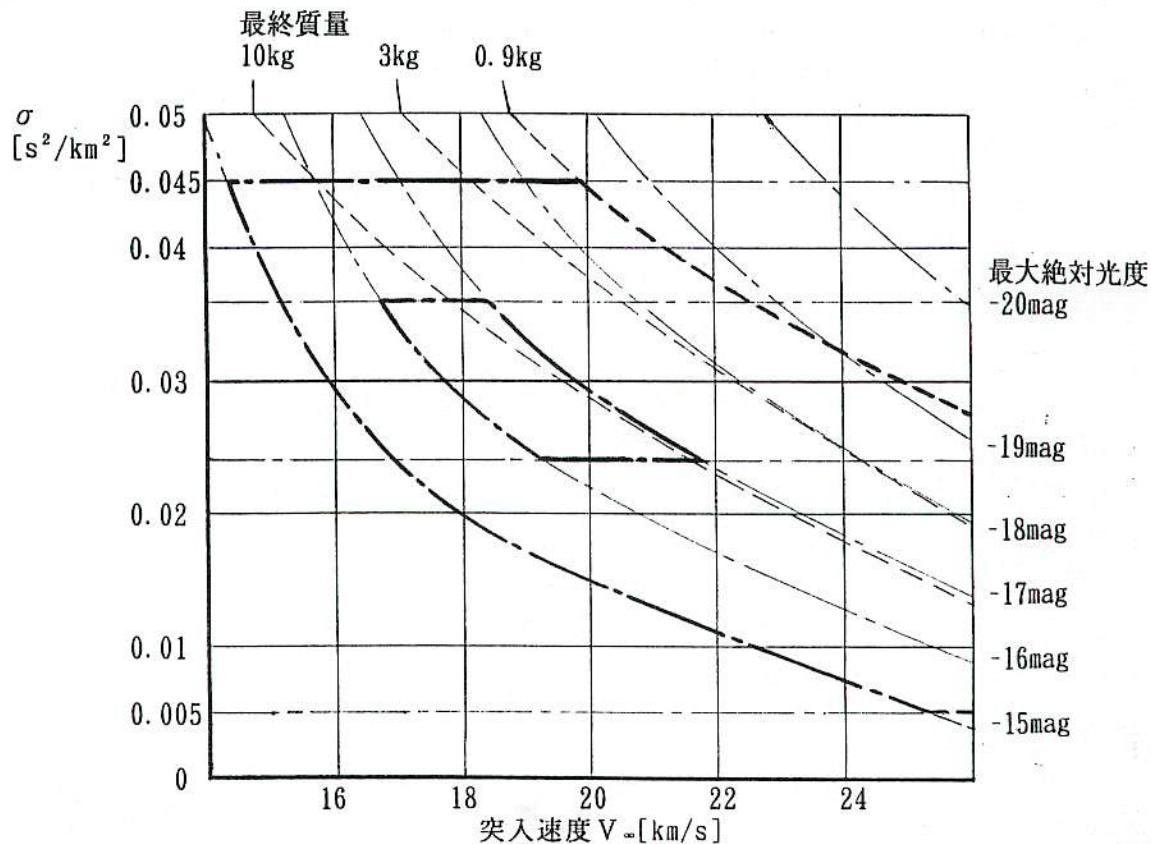


図1 つくば隕石の突入速度 V_∞ と磨耗係数 σ

外側の太線で囲まれる領域は実現可能領域
内側の領域は(長沢 1981)で指摘の $\sigma=0.03\pm2\text{割}$ と
長谷川隆氏による推定光度(-16~ -17等)によって
囲まれる領域

一方、つくば隕石は多数に分裂したことから、大気との衝突が激しかったと考えられる。これは、大量のダストが放出されて、隕石雲を形成した事と整合する。すなわちここからは、つくば隕石は大気内に高速突入したと考えるのが無難である。しかし、隕石の破碎と硬さの関係から速度を定量的に推定する事は困難である。すなわちつくば隕石の硬さを試験する事は次の面で難しい。資料を破壊する事の困難さに加え、たとえその一部に対して試験できても、今回の隕石が複数の種類の成分から成ると共に、一部成分は宇宙空間での衝突痕跡である亀裂をその内部に含むため、精度良いデータが得られるとは思えない。

つくば隕石の起源

ここまで検討してきた結果は全て面から、 $V_\infty=16[\text{km/s}]$ という突入速度が、過小見積ではないかという疑いを持たせる。そこで、推定される速度に対する軌道を次に示す。ここでも経路は(伊藤 他 1996)による。得られた結果は、つくば隕石の軌道が、これまで観測されている典型的な隕石軌道=遠日点が小惑星帯のメインベルト付近になるものとは違い、遠日点が木星軌道付近もしくはさらに遠くであったかもしれないことを示唆している。

表3 つくば隕石の軌道

初速度 V_∞ [km/s]	修正輻射点 α (2000) δ [deg] [deg]	地心速度 VG [km/s]	軌道半長径 a [AU]	離心率 e	近日点距離 q [AU]	近日点引数 ω [deg]	昇交点黄經 Ω [deg]	軌道傾斜角 i [deg]
16	312.1 -13.0	11.9	1.98	0.562	0.864	131.6	286.4	1.6
18	313.7 -11.2	14.5	3.09	0.723	0.854	133.4	286.4	2.4
20	314.7 -10.0	16.9	7.16	0.882	0.845	134.4	286.4	3.0
22	315.5 -9.2	19.3	-21.	1.040	0.837	135.0	286.3	3.6
24	316.0 -8.6	21.5	-4.1	1.200	0.829	135.3	286.3	4.1

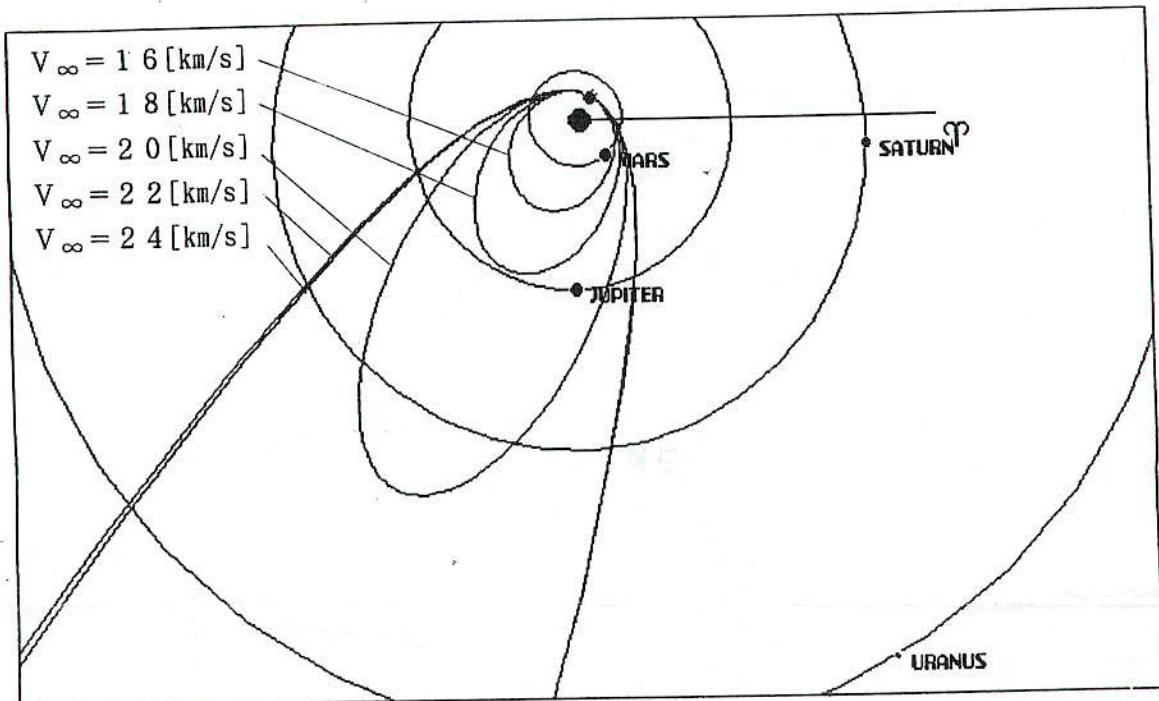


図2 つくば隕石の軌道

参考文献

- McIntosh, B. A. 1970 Oct. J. Roy. Astron. Soc. Canada Vol. 64, No. 5, p. 267-281
 長沢工 1981年 月刊地球 Vol. 3, No. 9, p. 588-596
 司馬康生 1996年 a Mar. 天文回報 No. 664, p. 17-21
 司馬康生 1996年 b May. 天文回報 No. 666, p. 12-13
 司馬康生 1996年 c Jun. 天文回報 No. 667, p. 9-10
 中野主一 1996年6月 天文ガイド p. 100-104
 伊藤大雄, 司馬康生, 下田力, 福井敬一 1996年8月 きときと流星会議予稿集

found. From the nature of the fireball event it was apparent that the meteoroid was fragmenting along its path. Since the surface to mass ratio S of the fragments is always higher than that of the total body, the effective end-point height of a group of fragments could be considerably higher than that for the single body. McCrosky and Ceplecha (1969) have proposed this as an explanation of the Pribram fireball-meteorite behaviour.

The end-point height of the April fireball as determined by McIntosh and Douglas from visual observations is less than half the value deduced from the photographic path. Since we feel that the visual observations were treated as objectively and quantitatively as possible, this provides a classic example of the unreliability of visual observations.

Millman (1969) has examined the orbits of 25 meteorites with visually observed fireballs. Although the data are heterogeneous, reasonable end-point heights are given for about 20 of them. In figure 10 we have plotted these heights versus S_t , calculated from (6) assuming $\rho_m = 3.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. Since most of these meteorites consist of several fragments we have plotted both the total mass and the mass of the largest fragment. Theoretical curves similar to figure 6 are also shown. They have been reduced to terminal mass through equation (7) for $v_i = 17 \text{ km/s}$ and $v_t = 3 \text{ km/s}$. The observed end-point heights are widely scattered about the theoretical curves and provide no information about the most probable value of σ . We have also plotted on the graph the values for the Lost City and Pribram meteorites. The Pribram event is particularly interesting because the original mass fragmented sufficiently early that many individual trajectories appear in the photographs and Ceplecha has been able to associate the recovered individual meteorites with specific trajectories. Thus there is a range of masses and end-point heights. The largest recovered mass of 5 kg, if associated with the main trajectory would appear in figure 10 as the dashed triangle P_5 . However, Ceplecha has speculated that there must be an unrecovered meteorite of about 100 kg. This would put the point at the position marked P_{100} . The 5 kg mass is then associated with a different trajectory and moves to position L (Luhy meteorite). The other recovered fragments are shown as V —Velká, H —Hojšín, D —Dražkov. Only the Hojšín lies outside the region of the theoretical curves; but Ceplecha states that this one is only a part of an individual for which the remaining pieces were not recovered. The position of the entire Hojšín meteorite would undoubtedly move to the left were its total mass known. Thus it appears that all the Pribram meteorites and the Lost City are consistent with the predictions of simple theory. It should be kept in mind that the theoretical curves of figure 10 were drawn for specific nominal values of v_i , v_t , 0, etc., which do not correspond identically to the values for these meteorites.

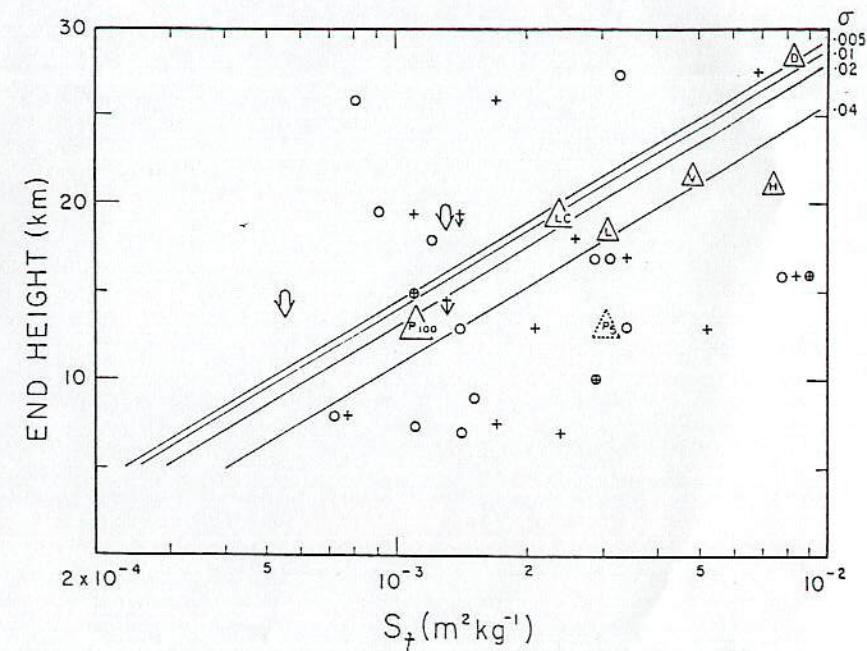


FIG. 10—End-point heights versus the terminal value of meteorite surface/mass. Visually observed end-heights of some fireballs which have dropped meteorites are indicated by: circles, total recovered mass, and crosses, mass of largest fragment. Photographic end-heights of Lost City and Pribram meteorites are shown by triangles. Lines are the prediction of the simple theory.

Conclusions: The predictions of very simple theory concerning the flight of a large meteoroid through the lower atmosphere have been examined. The fraction of original mass which survives depends on the initial velocity and on a parameter σ which has yet to be determined accurately. The height at which luminosity ceases is most strongly dependent on initial mass, or more specifically, surface-to-mass ratio. Although fireball end-point height seems to be a sensitive indicator of whether or not meteorites are likely to be found, its usefulness is restricted to photographed fireballs. For visual observations it is probably too sensitive, since a variation of only a few kilometers may mean the difference between a sizeable meteorite and a few fragments only. Visual observations are in most cases not sufficiently reliable. The possibility of low density meteoritic material, of fragmenting meteoroids, of the buildup of a gaseous and shock waves in front of the meteoroid, add greatly to the complexity of the problem and have not been considered here.

[D, D' 判定式の改良アイデア]

重野好彦

D' 判定は D 判定に対して以下の改良を行ったため、離心率の差、近日点距離の差に対するウェイトが大きくなってしまいました。しかし軌道傾斜角の差、近日点方向の差のウェイトを大きくした方が軌道の類似性をより的確に表すことができるのではないかと言う塩井宏幸氏の指摘があり、これを例題で検討してみました。

[説明1. D, D' 判定の説明]

< D 判定の説明 >

D 判定は 2 つの軌道要素間の類似度を調べる方法です。多くの実データへの当てはめ結果から、約 $D=0.2$ 以下を同一群とみなします。

< D' 判定の説明 >

D' 判定は、D 判定に改良を加えた方法で、主な改良点は以下の通りです。

- a) 近日点黄経間の角度の代りに、実際の近日点方向間の角度にした。
- b) 判定式の 4 項それぞれの値が、0 ~ 1 の間の値を取る様に 4 項それぞれにウェイト付けし、判定値に平等に影響を与える様にした。D 判定では、離心率の差、近日点距離の差は 0 ~ 1 の値、sin 軌道面間の角度、sin 近日点黄経間の角度は 0 ~ 2 の値を取っていたため、項目によって判定値に与える影響が異なっていた。
- D' 値は D 値の 1 / 2 程度になることが多く、約 $D'=0.1$ 以下を同一群とします。

[D, D', S, D' 10 判定の計算式]

D 判定	$D^2 = \text{離心率の差}^2 + \text{近日点距離の差}^2 + \sin(\text{軌道面間の角度})^2 + \sin(\text{近日点黄経間の角度})^2$	S 判定	$D^2 = \text{離心率の差}^2 + \text{近日点距離の差}^2 + \sin(\text{軌道傾斜角間の角度})^2 + \sin(\text{近日点黄経間の角度})^2$	*0.1 *0.1
D' 判定	$D^2 = \text{離心率の差}^2 + \text{近日点距離の差}^2 + \sin(\text{軌道面間の角度})^2 + \sin(\text{近日点方向間の角度})^2$	D' 10 判定	$D^2 = \text{離心率の差}^2 + \text{近日点距離の差}^2 + \sin(\text{軌道面間の角度})^2 + \sin(\text{近日点方向間の角度})^2$	*10 *10

ID	DATE	UT	Co. Rad(2000)	SD	VG	a	e	q	ω	Ω	i	D	D'	S	D' 10	
MSSIIIP	19960103	192651	228.7	49.4	.2	41.9	3.19	0.693	0.980	172.8	282.8	73.1	0.06	0.03	0.04	0.05
MSSIIP	19960103	191839	228.7	47.4	.3	42.3	2.85	0.658	0.976	168.7	282.8	74.6	0.07	0.02	0.07	0.07
MSSIIH	19960103	190613	233.0	47.0	.3	41.0	2.80	0.655	0.965	162.5	282.8	71.8	0.11	0.03	0.07	0.11
MSSIIQ	19960103	193105	228.8	52.8	.2	38.8	2.54	0.613	0.983	178.5	282.8	67.9	0.11	0.05	0.06	0.11
MSSIIM	19960103	192051	228.4	50.3	.3	39.2	2.21	0.555	0.981	174.0	282.8	69.9	0.11	0.09	0.04	0.10
MSSIIF	19960103	184808	230.4	50.0	.3	38.6	2.17	0.548	0.979	170.6	282.7	68.6	0.12	0.09	0.06	0.11
MSSIIS	19960103	173339	218.0	50.8	.7	46.3	6.56	0.851	0.978	188.7	282.7	79.7	0.33	0.15	0.17	0.30
MSSIIII	19960103	191125	199.4	55.9	.4	46.3	9.68	0.908	0.888	217.2	282.8	78.3	0.68	0.26	0.24	0.67
MSSIIN	19960103	192423	219.1	37.6	.2	40.0	1.03	0.108	0.922	110.9	282.8	81.7	0.70	0.73	0.41	0.85
MSSIIS	19960103	180719	203.4	33.4	.6	47.1	1.03	0.139	0.891	256.8	282.7	101.0	0.92	0.70	0.81	1.03
MSSIJ	19960103	191221	198.8	13.2	4.1	67.9	5.84	0.832	0.983	182.5	282.8	146.0	1.24	0.43	0.97	1.33
MSSIIS	19960103	172333	182.7	31.1	.3	58.8	3.29	0.796	0.672	253.5	282.7	120.0	1.31	0.47	1.14	1.35
MSSIIC	19960103	182322	178.1	27.2	.7	61.1	4.69	0.874	0.592	261.6	282.7	128.6	1.52	0.57	1.29	1.58
MSSIIE	19960103	184502	125.3	-3.0	.6	17.1	.877	0.519	0.422	132.2	102.7	15.2	1.85	0.77	1.90	2.08
MSSIIS	19960103	162530	170.3	15.3	.8	17.8	.587	0.760	0.141	349.6	282.6	12.1	1.92	1.06	2.18	2.47
MSSIIB	19960103	181829	193.4	-27.1	3.2	69.3	-29.	1.031	0.910	328.6	102.7	145.6	1.96	0.85	1.08	2.59
MSSIIS	19960103	172047	165.0	-14.4	5.0	61.8	2.35	0.732	0.631	81.2	102.7	140.1	2.21	0.90	1.35	2.78
MSSIIG	19960103	185719	167.2	-1.3	2.2	56.1	1.07	0.727	0.293	131.9	102.7	163.6	2.32	1.01	1.98	2.75

ID	DATE	UT	Co. Rad(2000)	SD	VG	a	e	q	ω	Ω	i	D	D'	S	D'10	
H11862	19540503	104932	336.2	-1.6	-	65.5	13.2	0.958	0.560	95.2	43.1	163.5	0.00	0.00	0.00	0.00
MSSP07	19890504	184614	337.3	-1.3	.2	66.0	26.3	0.978	0.575	97.5	44.4	163.9	0.03	0.02	0.02	0.03
MSSP08	19890504	184935	337.1	-1.7	.2	65.8	14.8	0.961	0.576	97.2	44.4	164.4	0.03	0.02	0.02	0.03
MSSPOI	19890505	192421	337.7	-1.5	.0	65.8	11.8	0.951	0.583	97.7	45.4	164.7	0.03	0.02	0.02	0.04
MSSPOC	19890504	194509	337.2	-1.5	.1	65.2	8.50	0.934	0.560	94.6	44.5	164.0	0.04	0.02	0.04	0.04
MSSPOE	19890505	182351	337.6	-1.3	.1	66.1	20.3	0.971	0.589	98.9	45.4	164.2	0.04	0.03	0.03	0.04
MSSP06	19890504	183518	336.4	-1.2	.1	65.9	14.2	0.958	0.590	98.7	44.4	163.1	0.05	0.03	0.04	0.05
MSSPOG	19890505	183112	337.7	-0.9	.0	65.0	6.98	0.919	0.565	94.7	45.4	163.2	0.06	0.03	0.05	0.05
MSSPOH	19890505	183629	337.6	-1.6	.4	65.0	6.48	0.912	0.568	94.9	45.4	164.5	0.07	0.03	0.05	0.06
MSSPOB	19890504	193400	337.2	-1.5	.3	64.8	6.50	0.915	0.553	93.2	44.5	163.8	0.07	0.03	0.06	0.06
MSSPOF	19890505	182648	338.3	-1.5	.1	65.1	7.88	0.929	0.556	93.9	45.4	164.8	0.07	0.03	0.07	0.07
MSSPOD	19890504	200504	336.6	-1.4	.4	64.4	5.10	0.891	0.559	93.1	44.5	163.4	0.09	0.04	0.07	0.07
MSSPOA	19890504	192637	338.0	-1.7	.4	63.9	4.79	0.892	0.518	88.2	44.5	164.6	0.16	0.07	0.15	0.15
MSSP09	19890504	192237	250.1	-10.1	.0	43.8	9.88	0.988	0.118	321.0	44.4	39.4	2.56	1.03	1.81	2.61
MSSP05	19890502	185906	221.5	-30.1	.1	29.8	4.54	0.899	0.458	98.8	222.5	14.5	2.73	1.00	1.87	3.14

ID	DATE	UT	Co. Rad(2000)	SD	VG	a	e	q	ω	Ω	i	D	D'	S	D'10	
						0.947	0.951	155.	141.	112.		0.00	0.00	0.00	0.00	
MSSPOL	19910812	111414	45.1	57.7	.1	59.5	32.4	0.970	0.963	154.1	139.4	113.3	0.04	0.02	0.03	0.04
MSSPOM	19910812	111545	46.7	58.8	.1	58.6	19.2	0.950	0.951	150.9	139.4	111.5	0.06	0.02	0.01	0.07
MSSPON	19910812	113230	45.3	57.6	.2	59.7	76.8	0.987	0.963	154.1	139.4	113.7	0.06	0.03	0.03	0.05
MSSPOK	19910812	110730	50.0	55.8	.1	60.7	73.5	0.987	0.934	147.3	139.4	117.0	0.16	0.05	0.12	0.15
MSSPOJ	19910812	100230	353.1	65.8	.0	46.6	9.25	0.892	0.997	195.1	139.3	81.7	0.83	0.26	0.53	0.83

ID	DATE	UT	Co. Rad(2000)	SD	VG	a	e	q	ω	Ω	i	D	D'	S	D'10	
						0.897	0.141	324.3	261.	23.3		0.00	0.00	0.00	0.00	
MSSPOQ	19911214	163722	113.3	31.9	.1	34.3	1.37	0.895	0.144	323.8	262.3	22.4	0.02	0.01	0.02	0.02
MSSPOT	19911214	180215	113.7	32.3	.0	34.2	1.35	0.893	0.145	323.9	262.4	23.1	0.02	0.02	0.02	0.02
MSSPOS	19911214	174036	113.9	32.3	.0	33.6	1.29	0.886	0.147	324.1	262.4	22.7	0.03	0.02	0.02	0.03
MSSPOV	19911214	192909	114.0	32.3	.3	33.7	1.29	0.886	0.147	324.1	262.4	22.8	0.02	0.02	0.02	0.03
MSSPOR	19911214	171658	114.1	32.4	.1	33.3	1.26	0.882	0.149	324.2	262.3	22.6	0.03	0.03	0.02	0.04
MSSPOO	19911214	161505	113.3	32.1	.1	33.5	1.30	0.884	0.151	323.5	262.3	21.7	0.03	0.04	0.03	0.05
MSSPOP	19911214	162424	102.8	7.2	.1	40.7	14.7	0.986	0.212	125.5	82.3	34.0	1.01	0.44	0.31	1.25
MSSPOU	19911214	181037	139.1	34.7	.3	57.8	35.5	0.993	0.238	301.5	262.4	121.4	1.56	0.71	1.50	2.10

ID	DATE	UT	Co. Rad(2000)	SD	VG	a	e	q	ω	Ω	i	D	D'	S	D'10
MSSIL7	19960422.	165101	268.8	81.2		0.475	0.998	167.7	32.9	24.0		0.00	0.00	0.00	0.00
-11882	19540504.	26	67.7	83.1		0.54	0.97	154.0	43.7	20.0		0.13	0.07	0.09	0.13
-07164	19530409.	42	151.4	79.8		0.52	1.00	177.0	19.7	16.0		0.17	0.07	0.16	0.18
-11196	19540428.	42	82.8	77.0		0.47	0.98	157.0	38.7	14.0		0.18	0.06	0.20	0.18
-11208	19540430.	14	76.9	78.1		0.43	0.98	154.0	39.7	14.0		0.19	0.08	0.22	0.20
-11884	19540504.	29	142.3	75.8		0.49	1.00	166.0	43.7	14.0		0.20	0.06	0.23	0.20
-07265	19530413.	31	193.5	54.7		0.46	0.98	203.0	23.7	15.0		0.27	0.09	0.44	0.28
-07179	19530410.	25	186.6	52.7		0.45	0.98	203.0	20.7	13.0		0.28	0.09	0.41	0.28

ID	DATE	UT	Co. Rad(2000)	SD	VG	a	e	q	ω	Ω	i	D	D'	S	D'10
MSSILD	19960422.	175700	246.6	79.0		0.314	1.003	171.9	32.9	18.5		0.00	0.00	0.00	0.00
-07203	19530411.	16	201.4	67.7		0.37	1.00	193.0	21.7	16.0		0.11	0.09	0.16	0.13
-10488	19540406.	39	206.4	58.8		0.34	0.97	207.0	16.7	17.0		0.15	0.06	0.30	0.15
-10514	19540407.	35	154.2	76.8		0.37	1.00	180.0	17.7	12.0		0.15	0.09	0.17	0.16
-11865	19540503.	45	241.2	61.9		0.34	1.00	194.0	42.7	23.0		0.20	0.08	0.51	0.21
@10342	19540326.	28	130.3	72.8		0.35	1.00	183.0	5.7	9.0		0.22	0.09	0.33	0.23
-12326	19540531.	28	212.5	85.8		0.35	0.98	152.0	69.7	20.0		0.23	0.09	0.31	0.25
@06882	19530314.	30	114.2	64.9		0.35	0.99	187.0	353.7	7.0		0.28	0.10	0.46	0.29

【しし座流星群の活動期間の考察(第1報)】

重野好彦 塩井宏幸

クロンクのミーチャーシャワーズによると、しし座流星群の活動期間は11月14～20日となっています。一方、塩井の流星群カタログによると9月30日～12月14日となっており、大きく異なっています。NMSへの眼視観測の報告を見てもクロンクよりは長いようです。そこで活動期間を調べるためにTV同時観測を続けています。まだ確認はありませんが、クロンクの結果は短すぎるようにも感じます。しかし流星数があまりに少なく、判断を難しくしています。

[表1. しし座流星群に似た流星の輻射点と軌道要素]

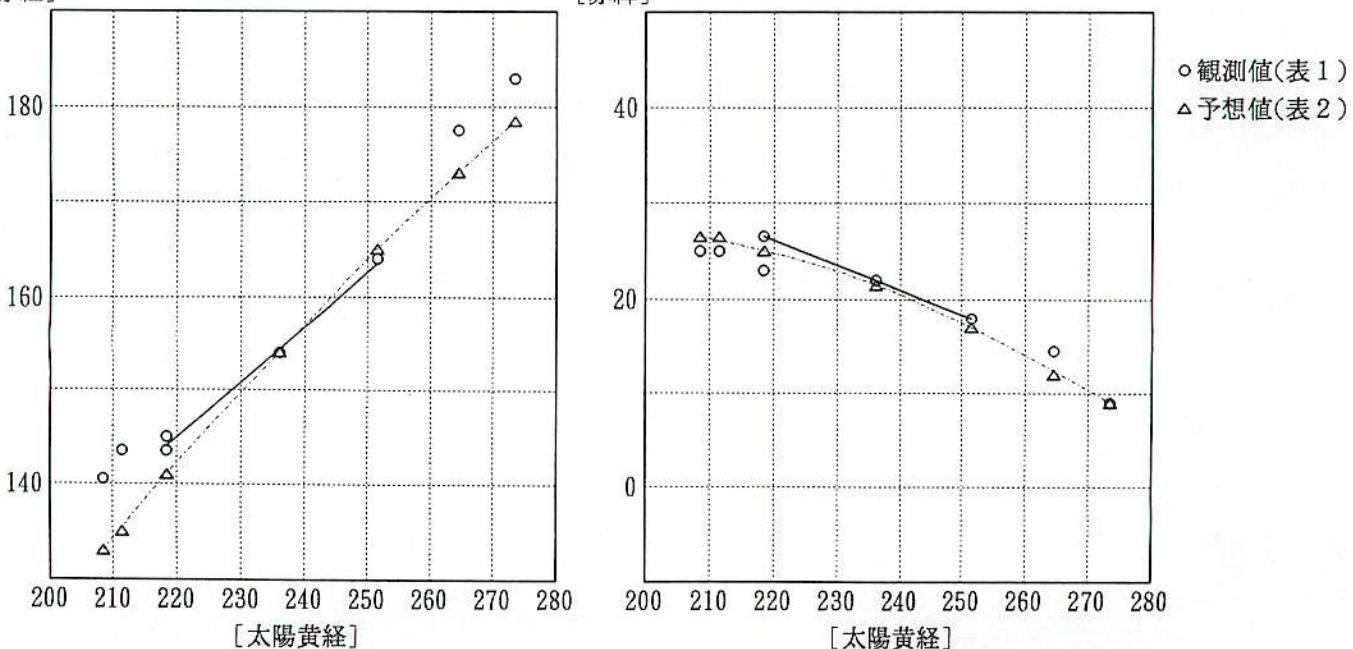
ID	DATE Y M D	UT H M S	S. long deg	Co. Rad(2000) α deg	SD δ deg	VG deg	SD km/s	a AU	e	q AU	ω deg	Ω deg	i deg	Obs Mag	Hb km	He km	
MSSIRx	19961021	192029	208.724	140.6	25.1	.5	64.2	1.3	2.10	0.663	0.710	106.3	208.7	161.4	4.5	104+	91.4
MSSI5M	19931024	170941	211.397	143.4	24.8	1.3	67.1	4.5	4.31	0.822	0.766	119.5	211.4	161.3	6.5	115.6	108-
MSSIXT	19971031	184813	218.421	144.9	26.3	1.5	68.8	3.1	5.93	0.847	0.908	144.4	218.4	159.1	6.5	112.4	105.4
MSSIXZ	19971031	185652	218.427	143.5	23.2	.3	63.6	1.0	1.54	0.452	0.846	121.7	218.4	164.1	4.8	115.0	95.6
MSSIF4	19951118	172802	235.956	153.8	22.0	.4	73.1	2.7	-7.14	1.138	0.987	175.3	236.0	162.5	6.3	103.7	91.7
MSSIFF	19951118	180041	235.979	154.2	21.5	.3	70.1	.8	6.94	0.858	0.985	172.6	236.0	162.4	5.5	104.9	92.7
MSSIFFP	19951118	182800	235.998	154.2	22.2	.4	71.8	2.3	-42.5	1.023	0.986	174.3	236.0	161.7	2.0	123.0	109-
MSSIZj	19971203	190045	251.692	164.1	18.2	.5	71.1	1.5	18.2	0.947	0.975	192.2	251.7	161.8	5.3	113.1	100.1
MSSIGA	19951216	194342	264.435	177.7	14.6	1.3	70.4	4.6	10.7	0.908	0.978	189.0	264.4	158.4	5.3	104.2	95.0
MSSIHD	19951225	174841	273.521	183.0	9.2	1.4	70.3	3.3	7.09	0.864	0.964	196.7	273.5	163.1	6.0	105.0	92.2

[表2. テンペルタット彗星の軌道と表1の各時刻に於ける輻射点予想]

ID	DATE	UT	Co. Rad(2000)	SD	VG	a	e	q	ω	Ω	i	(輻射点予想方法 は、長谷川一郎 qアジャストメント法)
55P/Tempel-Tuttle						10.3	0.904	0.982	172.6	235.1	162.7	
Rx	19961021	192029	133.2	26.6	147	69.9	9.58	0.904	0.920	147.3	208.7	164.5
5M	19931024	170941	135.4	26.3	130	70.0	9.69	0.904	0.931	149.9	211.4	164.2
XT	19971031	184813	140.9	25.2	087	70.2	9.94	0.904	0.954	156.6	218.4	163.4
FF	19951118	180041	154.0	21.5	005	70.7	10.3	0.904	0.985	173.4	236.0	162.7
Zj	19971203	190045	164.8	16.8	080	70.8	10.2	0.904	0.981	188.5	251.7	163.4
GA	19951216	194342	173.1	12.4	144	70.8	9.93	0.904	0.954	200.8	264.4	165.0
HD	19951225	174841	178.7	8.8	194	70.6	9.60	0.904	0.922	209.7	273.5	166.5

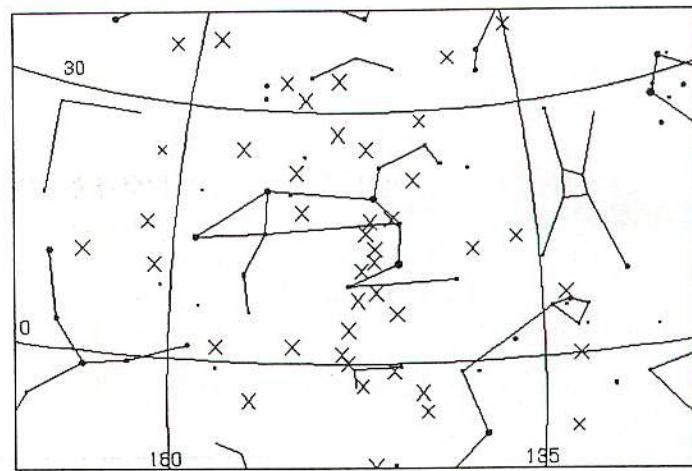
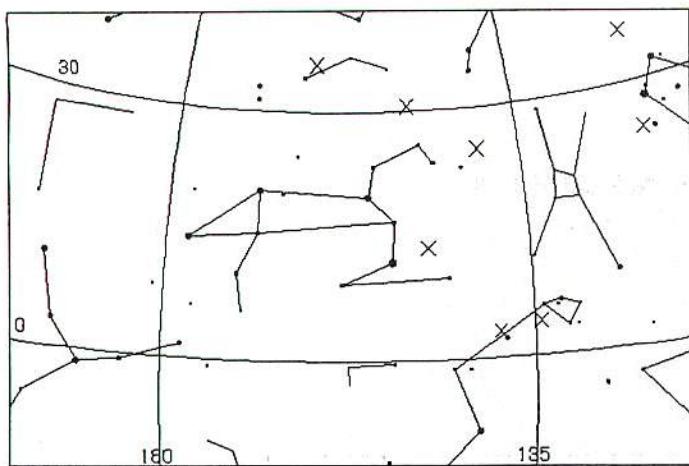
[赤経]

[赤緯]



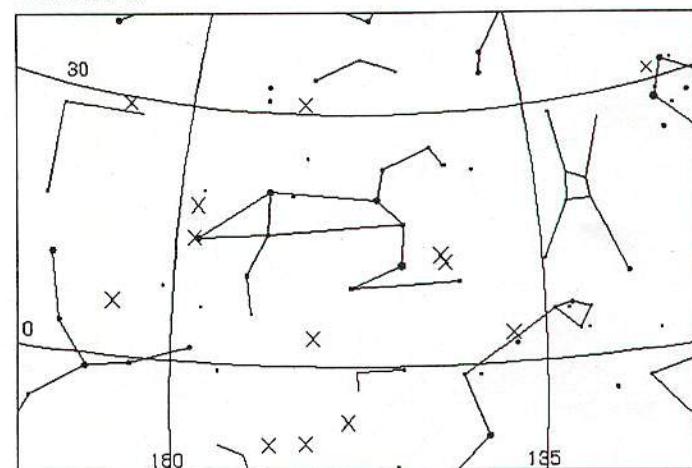
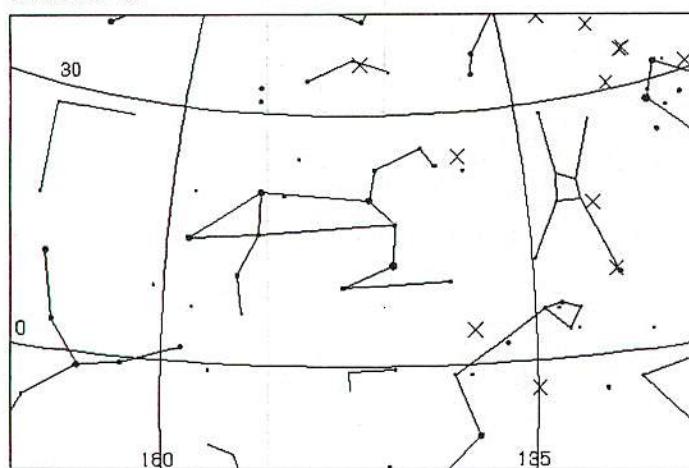
[図1. 輻射点移動の様子]

MSS-085



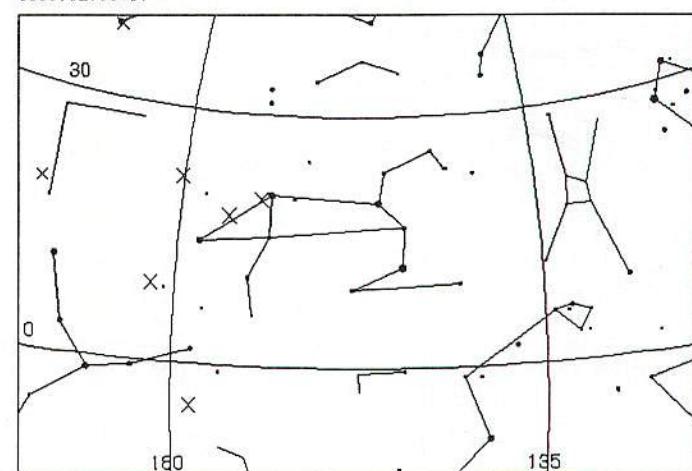
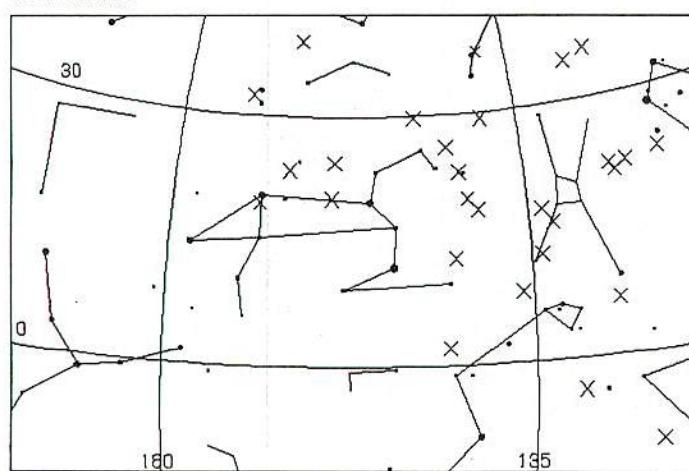
1996.10.21/22

1997.12.03/04



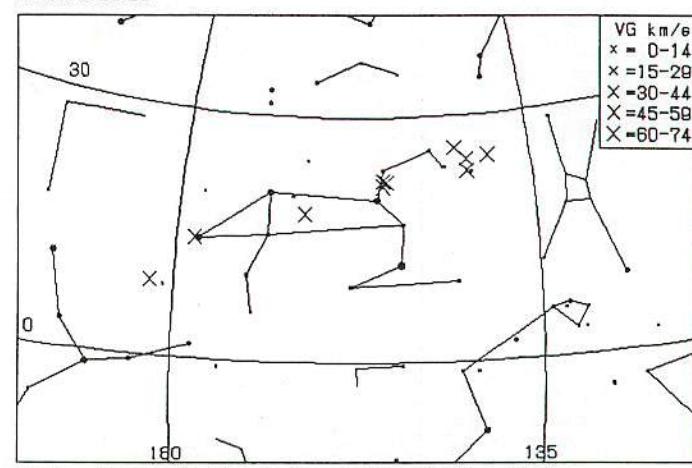
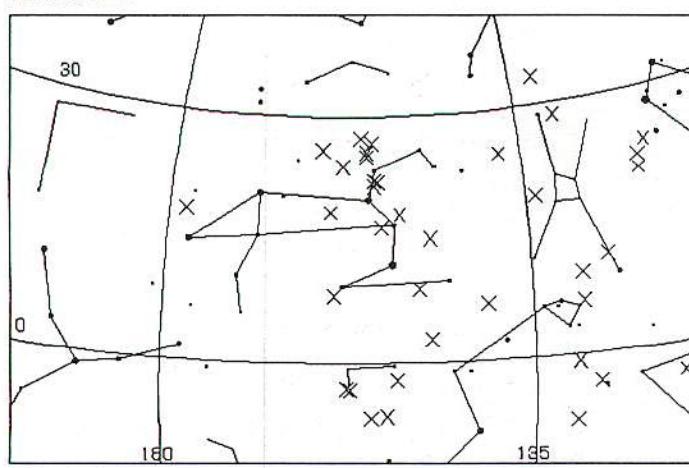
1993.10.24/25

1995.12.16/17



1997.10.31/01

1995.12.25/26



1995.11.18/19

10.21 + 10.24 + 10.31 + 11.18 + 12.03 + 12.16 + 12.25

1997年に、しぶんぎ群の大出現が見られた理由

平成10年6月28日 まる東集会 岡安裕之

(序)

まず、しぶんぎ群の謎を列挙します。

- 1 同じ太陽黄経を観測しても、出現数に差がある。
- 2 283.1度と283.4度に極大がある。どうして二つも極大があるのか。
- 3 1997年にアラスカで大出現が観測された。その理由は？

その全てを解決するモデルを提示しましょう。

(しぶんぎ群の構造モデル)

木星が黄経283.1度付近を通過する度にダストを捉える。捉えられたダストの塊は彗星のようにふるまい、母彗星と同じように地球に接近する度に多くのしぶんぎ群を飛ばす。ダストの塊を、『影彗星Q』と仮に呼ぶ。

また、ほぼ12年に一回木星によって新しい影彗星Qが形成され、しぶんぎ群の軌道を飛行しはじめる。影彗星は木星と3:7の会合周期の関係にあるため、7回目の木星付近への回帰時に木星に接近し擾動を受けて軌道が変化し、しぶんぎ群としては観測されなくなってしまう。

(根拠)

影彗星Qが、地球軌道を通過した日を計算する。

使用軌道要素：1987年にTMNによって得られたしぶんぎ群

a	e	q	ω	Ω	i
2.961	0.668	0.9822	175.8	283.0641	72.2

1925年から1996年まで計7回の影彗星Qの生成について計算し、地球軌道への接近日と地球の遭遇日との差（日差）を求め、接近表を作成した。日差の絶対値の小さい順にソートしてみて驚いた。今まで日本で観測されたしぶんぎ群の大出現が、全て日差の短いということで説明出来てしまった。

283.4度の大出現は、全て地球軌道への接近回数が7回目のものだった。

泉さんが1997年にアラスカで観測された大出現は、影彗星Q1984の3回目の地球接近が起こしたものであった。

(結び)

影彗星Qを発生させるには、黄経283.1度の木星軌道付近に大量のダストがなくてはいけません。実はヘル・ボップ彗星の軌道が、その近くを通過しています。ヘル・ボップ彗星がダストの供給源、と私は考えます。

(参考文献)

K.Ohtska,M.Yoshikawa,J.Watanabe.PASJ.,47,480(1995)

彗星Qの、地球への接近表					
大出現 ☆ : 283.1度 ☆☆ : 283.4度					
順位	木星接近	地球接近	日差	接近	コメント
1	1937	1965	-4	6	データなし
2	1984	1987	7	1	☆
3	1949	1982	12	7	☆☆
4	1984	1992	-28	2	☆ FRO
5	1937	1960	31	5	データなし
6	1937	1970	-39	7	☆☆
7	1972	1975	-44	1	☆
8	1949	1977	46	6	データなし
9	1960	1994	62	7	☆☆
10	1984	1997	-63	3	☆ 泉さん
11	1972	1980	-79	2	☆ FRO
12	1949	1972	81	5	データなし
13	1925	1958	-89	7	☆☆
14	1960	1963	-94	1	データなし
15	1960	1989	97	6	
16	1972	1985	-113	3	
17	1949	1967	116	4	データなし
18	1960	1968	-129	2	
19	1960	1984	132	5	
20	1972	1990	-148	4	
21	1949	1962	151	3	データなし
22	1960	1973	-164	3	データなし
23	1960	1979	166	4	
24	1972	1996	182	5	

出るか？出ないか？

一氣になる1998年のジャコビニ流星群

渡辺美和(Yoshikazu WATANABE 松戸市八ヶ崎4-46-2)

1. はじめに

私達が生きて来た20世紀には、世界的に記録され流星が本当に雨アラレと降り注ぐようなみごとな流星の大出現というものは、まだ実に3回しかない(1時間当たり数千個以上流星が見られたものをここでは大出現と定義しておこう)。その1回は、1966年にアメリカで見られたしし座流星群の一大ページェント、そして残る2回はともにジャコビニ流星群によるものだ。

このジャコビニ流星群も、過去に色々な話題を提供している。そして1998年に再びその母天体を回帰させる。果たして、今回は流星の雨を見てくれるだろか。

2. ジャコビニ流星群とは？

流星群の名称は通常では輻射点の近傍の明るい星の名前かその星座が用いられる。このジャコビニ流星群にも「りゅう座γ流星群」という名称があるが、日本では例外的に母彗星の名称が、それも略して、用いられることが多い。

母彗星は周期6.6年のジャコビニ・ツインナー彗星で、ほぼ2周期ごとに彗星と地球が接近する。この流星群には多くの特徴がある。なによりも、この接近時しか集中した出現を見せないことだ。つまり流星物質は軌道上に拡散していない。そして、非常にゆっくりと流れる。活動期間は10月9日の極大をはさむわずか2~3日。極大時以外はこの群の活動を特定できるほどの数を見せるることは少ない。輻射点はりゅう座にあり、日本では周極星の範囲ぎりぎりの位置に見える。

2. 流星大出現の歴史

この流星群の出現予想が初めて提示されたのは1915年。だがこの時は地球軌道と彗星軌道がごく接近しながらも、大出現には遠く及ばなかった。しか次の機会の1933年には、ヨーロッパで突如大出現をみせたのである。そして13年後の1946年、またしてもジャコビニは大きな流星の嵐を地上に降り注がせた。

次のチャンスの1959年、世界のどこでもこの群の派手な活動は目では見られなかつた。そして1972年、この年は接近の条件が良く、更に期待は高まつた。日本でも多くの観測者が遠征し注目した。だが、大流星雨は観測されなかつたのだ。

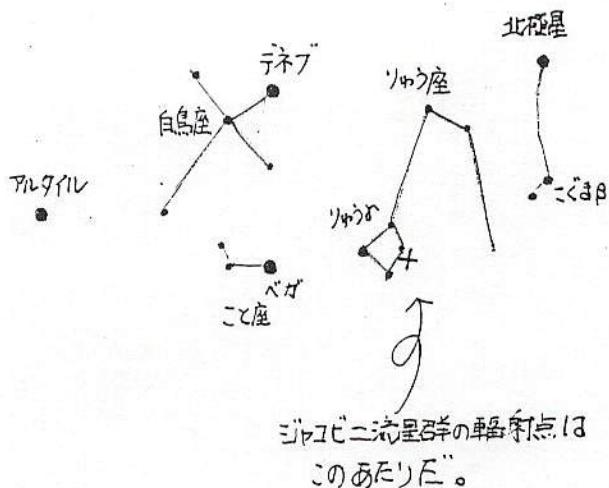
そして再び巡った13年後の1985年10月8日、今度はそれほどの期待はされず、その夜を迎えた。予想極大は日本時間22時頃。1972年当時の観測者も

ジャコビニ流星群観測集計 (ラムカ望遠鏡・写真計数) No. 1
年 Year: 1972 観測者 Observer: 渡辺美和 (Watanabe Yoshikazu) 経度 Longitude: 145° 31' 13"
月 Month: 10 観測地 Locality: 北海道恵庭市 宮谷山

日付 Date	開始 Begin	終了 End	時間 Period	方 向 Direction	流星数 Meteors	Giant's		Giant's	Giant's	備考 Remarks	
						Giads	Sporadic				
8/9 20:00	20:30	30m	N. 45°	0 1 3	3	0.0	0.9	0.0	6.0	0	
20:30	21:00	~	" "	1 4	5	2.0	*	2.2	*	*	
21:00	21:30	~	" "	1 5	6	2.0	*	2.2	*	*	
21:30	22:00	~	" "	1 2	2	0.0	0.9	0.0	6.0	0	
22:00	22:30	30m	" "	0 1	1	0.0	*	0.0	*	*	
22:30	23:00	~	" "	1 2	3	2.0	*	2.2	*	*	
23:00	23:30	~	" "	1 2	3	2.0	*	2.2	*	*	
23:30	24:00	~	" "	1 3	4	2.0	*	2.2	*	*	
00:00	00:30	~	" "	0 5	5	0.0	*	0.0	*	*	
00:30	00:45	~	" "	0 1	1	0.0	*	0.0	*	*	
00:45	01:00	~	" "	0 2	2	0.0	*	0.0	*	*	
01:00	01:30	20m	N. 45°	1 1 2	3.0	0.9	3.3	0.6	10.0	0	
01:30	02:00	20m	~	0 8	8	0.0	*	0.0	*	*	
02:00	02:30	~	" "	0 2	2	0.0	*	0.0	*	*	

備考 Remarks: S (視相), * (視野の中心で見得る最大星の光度), CL (雲量),) (月令), 日本流星研究会

ラムカ観測 霊遠鏡観測 写真計数観測
 直径: 66cm 器 様: cm・反・屈・反 カメラの種類: , F= , f= =
 高さ: 87cm 倍率: (アイピース:)
 視野: 41° 実視野: フィルム:
 その他: 北極中心 45°の斜角 その地: - 1 - 現像: その他:
 JST 5分おきの call. ラムカ台も記入。



まだ多くが現役で、当日の観測スケジュールを密かに実行しつつあった。だが、またしてもジャコビニ群は多くの観測者の裏をかいた。流星の嵐とまでは到達できなかつたものの、日本の空でHR 100を越す大きな出現を見せたのである。でも、特有の遅い流星は予想の時刻を待たず、太陽が沈むとともに、夕方の空で活動した。予想された22時頃にはすでにわずかな流星しかみせていかなかったのだった。

3. 流星大出現の条件

過去の状況と彗星との関連を以下に一欄で示してみよう。なお表はすべての回帰を示しているわけではない。また、彗星軌道と地球との距離では+は彗星軌道が地球より外側（単位：天文単位）を表し、彗星通過後の二つ数では、+が彗星通過後に地球が彗星軌道と接近することを意味する。

年	彗星軌道と 地球との距離	彗星通過後の 日数	流星出現状況
1926	-0.0005	- 70	HR 10程度
1933	+0.0054	+ 80	大出現
1946	+0.0014	+ 15	大出現
1959	-0.0595	- 21	ほとんど出現せず
1972	-0.0007	+ 59	ほとんど出現せず
1985	+0.033	+ 27	> HR 100
1998	+0.039	- 60	?

「流星に向かう」 p 106 に追補

この一覧からは彗星軌道が地球より外側という条件で接近し、彗星が通過したあとに地球がその場所を通る場合に流星の大出現があるように見える。ただし85年の例はそれまで考えられていた接近条件より距離が離れすぎていた。

これらから推定すると決して98年の出現には大きな期待をいだくことはできないと思われる。だが、この流星群は1972そして1985年と予想のウラハラという特性を示してきた。距離の大きさも1985年とほぼ同レベルである。

4. 観測はぜひしたい

この流星群の輻射点は赤経262赤緯+56付近にある。りゅう座のγ星の近く、こと座のベガの北にある。今後母彗星の検出によって変更があるかもしれないが、98年の極大予想は10月9日午前6時だ。当日の東京での日の出は05:42、そして午前4時頃、輻射点はごくわずかな時間、地平線下に隠れてしまう(この点については観測地の緯度により大きく異なる)。

しかしの陰に隠れてしまいがちだが、今年はともかくフォローしたい流星群だ。

【特異小惑星と輻射点予報】

重慶好音

ID : 小惑星名/番号

DATE , S. Lng : 出現日, 太陽黄経

SD : 地球と小惑星軌道との距離(1/1000AU単位) a, e, q, ω , Ω , i : 小惑星の軌道要素

ID	DATE	S. Lng	Co. Rad(2000)	SD	VG	a	e	q	ω	Ω	i	91VK	0217	328.3	353.9	15.4	051	9.8	1.84	0.507	0.909	173.2	295.1	5.4	
96AP1	0102	280.3	349.5	-31.7	029	7.9	1.92	0.496	0.967	323.8	118.0	5.5	Pan_4450	0220	329.3	157.4	18.4	028	18.5	1.44	0.586	0.596	291.4	312.3	5.5
Alinda_887	0102	280.7	28.0	-33.6	119	9.0	2.49	0.563	1.087	350.1	110.7	9.3	98DX11	0220	331.0	24.6	40.6	011	9.1	2.50	0.606	0.986	162.2	335.0	6.5
93EA_5693	0102	280.7	272.7	-30.9	005	18.8	.935	0.095	0.846	352.6	329.3	12.3	Quetzacoat	0221	331.8	77.4	-45.6	114	13.9	2.54	0.574	1.081	347.9	163.1	20.4
93BX3	0107	285.5	18.0	-1.6	050	3.8	1.40	0.283	1.004	289.8	175.7	2.8	92AX?	0226	336.7	124.3	-25.2	137	10.1	1.64	0.500	0.818	105.5	11.0	7.4
80AA	0108	287.2	6.0	29.2	071	6.3	1.89	0.444	1.053	168.3	299.2	4.2	92FE	0226	336.8	318.1	-6.0	035	11.9	.927	0.405	0.551	82.3	312.2	4.8
Aten_2062	0110	288.7	134.0	-46.5	122	10.4	.967	0.183	0.790	147.9	108.7	18.9	91DB	0227	338.5	131.8	-19.5	158	11.4	1.72	0.402	1.027	51.0	158.5	11.4
93BW2	0113	292.2	319.7	-77.1	101	14.1	1.33	0.304	0.926	287.2	121.2	21.8	88EG	0228	338.8	340.1	-15.1	025	14.9	1.27	0.499	0.636	241.5	182.9	3.5
Nereus4660	0113	292.7	18.4	18.1	032	4.8	1.49	0.360	0.953	157.9	314.8	1.4	96FT1	0301	340.0	357.6	8.2	025	9.0	1.46	0.401	0.875	93.7	12.5	2.7
95DV1	0115	294.3	357.7	-9.5	054	9.8	3.13	0.692	0.964	284.0	172.3	3.7	96RG3	0302	340.7	359.6	-9.3	002	14.4	2.00	0.605	0.790	299.9	158.5	3.6
Toro_1685	0115	294.4	297.8	2.0	055	12.7	1.37	0.436	0.771	126.9	274.4	9.4	94XM1	0304	342.1	12.5	3.5	097	10.6	2.01	0.554	0.896	42.0	77.2	5.6
98BT13	0118	296.0	28.1	4.2	016	7.7	2.48	0.598	1.000	353.2	123.4	1.4	90SS	0304	342.8	334.2	45.7	103	14.1	1.70	0.475	0.894	115.9	0.0	19.4
94WR12	0117	296.1	155.3	-1.1	094	9.5	.754	0.405	0.448	205.6	63.1	7.1	50DA	0305	343.9	164.5	38.9	050	13.9	1.68	0.502	0.839	224.3	357.0	12.1
Hathor2340	0117	296.9	144.3	15.2	101	13.0	.844	0.450	0.464	39.8	211.7	5.8	96BG1	0306	344.6	178.9	-11.8	026	8.2	.900	0.270	0.657	150.5	140.1	3.7
91VE	0117	297.3	143.6	10.0	101	20.9	.891	0.664	0.299	193.4	62.1	7.2	96TC1	0308	347.0	180.2	17.9	079	24.0	1.87	0.720	0.523	258.9	5.0	14.5
93OM7	0119	297.7	276.2	51.7	086	14.8	1.34	0.233	1.028	142.4	297.7	26.0	92BF	0308	347.5	193.9	15.7	067	8.7	.908	0.272	0.661	336.2	315.6	7.3
94PC1	0119	297.9	115.1	-49.3	001	19.7	1.35	0.328	0.904	47.5	118.0	33.5	90UN	0309	348.2	359.4	9.6	022	12.7	1.71	0.528	0.807	97.0	8.5	3.7
92QN	0118	298.0	120.3	35.2	136	10.5	1.19	0.359	0.763	202.1	356.1	9.6	96FR3	0310	348.6	339.8	-1.4	093	25.7	2.17	0.796	0.442	34.9	28.7	8.3
91BA	0118	298.3	110.2	18.5	000	18.0	2.24	0.682	0.713	70.7	118.9	2.0	Ubasti4257	0310	349.4	359.0	-62.6	205	24.7	1.65	0.468	0.876	278.9	169.3	40.7
93TZ	0120	298.9	330.0	-13.5	071	11.2	2.02	0.563	0.884	231.1	203.8	4.2	Seneca2608	0311	349.6	126.7	-26.9	120	13.8	2.49	0.581	1.044	33.9	169.6	15.3
98CS1	0120	299.5	120.0	7.2	018	17.5	1.47	0.567	0.634	97.0	111.5	7.6	94EU	0313	351.7	9.6	46.0	039	6.1	1.37	0.275	0.995	145.7	351.7	6.5
98GL10	0121	300.7	33.0	1.1	163	8.5	3.08	0.657	1.057	287.0	193.5	8.6	95SA	0315	354.0	142.6	-31.7	013	18.1	2.44	0.648	0.860	50.9	172.0	20.4
96MO	0122	301.4	97.6	9.5	073	11.3	1.79	0.512	0.873	4.4	165.1	6.1	98BZ7	0315	354.1	143.1	4.3	099	11.3	2.04	0.555	0.907	102.8	112.5	6.5
93BD3	0123	302.4	30.0	18.8	038	5.0	1.64	0.375	1.022	168.4	314.0	0.9	90TG1	0315	354.4	157.4	-6.8	080	17.8	2.49	0.692	0.764	33.3	205.1	9.1
90BA	0123	302.6	27.1	27.2	006	4.6	1.74	0.338	1.152	170.7	312.0	2.0	94ES1	0316	354.9	180.0	1.9	001	18.7	1.39	0.588	0.572	280.0	353.4	1.2
93VD	0124	303.0	149.0	14.1	031	16.7	.891	0.526	0.422	252.2	6.8	2.1	92SK	0317	355.3	192.4	41.4	065	12.1	1.25	0.325	0.843	233.5	9.1	15.3
Eros_433	0123	303.1	328.3	70.6	149	6.7	1.46	0.223	1.133	178.6	304.4	10.8	94FA	0317	355.8	5.7	63.6	049	9.8	1.74	0.416	1.014	154.6	355.8	13.1
91AQ	0125	304.7	132.3	20.8	034	24.4	2.22	0.777	0.496	239.7	342.7	3.2	93VA_7350	0318	356.3	14.3	-12.3	086	10.2	1.36	0.391	0.825	336.5	133.2	7.3
96BT	0127	306.6	155.6	18.0	032	28.1	1.11	0.799	0.222	327.9	296.9	10.9	Midas_1981	0318	357.2	213.0	33.1	003	28.4	1.78	0.650	0.622	267.7	357.1	39.8
89DA	0129	308.7	28.7	37.8	073	7.6	2.16	0.545	0.983	139.4	349.4	6.5	Ptah_5011	0320	359.0	4.3	23.1	027	12.5	1.64	0.500	0.818	105.5	11.0	7.4
89QF	0130	310.2	138.1	23.8	038	12.9	1.15	0.413	0.676	239.5	344.9	3.9	94GL	0323	2.0	304.9	-27.4	017	9.9	.683	0.505	0.338	179.1	197.2	3.7
98DV9	0201	310.8	54.7	-26.8	005	7.8	1.80	0.450	0.990	0.9	139.9	8.7	6743	0323	2.1	5.8	23.9	022	13.4	1.64	0.500	0.818	105.5	11.0	7.4
95CS	0204	313.9	308.7	-21.5	001	25.3	1.94	0.776	0.436	252.2	135.7	2.6	Geographos	0323	2.3	192.9	32.4	099	11.6	1.25	0.335	0.828	276.8	337.4	13.3
98BR26	0204	314.0	116.2	-10.8	014	13.7	1.64	0.489	0.839	61.6	130.3	12.3	Mithra4486	0324	2.5	172.1	4.4	051	17.2	2.20	0.663	0.743	168.6	82.5	3.0
94EK	0205	315.8	327.2	-0.1	034	15.7	2.00	0.607	0.786	97.7	334.5	5.8	Asclepius	0324	2.6	358.8	-14.7	003	10.7	1.02	0.357	0.657	255.1	180.5	4.9
92DU	0207	318.3	281.2	55.5	153	13.1	1.16	0.175	0.957	121.6	338.0	25.1	96XZ12	0327	5.9	198.5	-11.9	090	15.9	.989	0.515	0.480	55.7	251.7	5.9
Adonis2101	0208	318.8	312.8	-16.3	013	24.7	1.87	0.765	0.441	42.3	350.7	1.4	95FF	0328	6.2	12.3	4.1	003	18.9	2.34	0.713	0.673	290.2	178.7	0.7
93QA_7025	0209	319.0	28.9	-51.4	063	8.7	1.48	0.315	1.011	323.3	146.7	12.6	94UG	0328	7.2	177.7	25.2	007	6.7	1.23	0.246	0.925	225.9	12.4	4.5
Nereus4660	0212	322.4	2.6	9.7	003	6.1	1.49	0.360	0.953	157.9	314.8	1.4	Bacchus	0328	7.2	351.4	21.2	073	11.0	1.08	0.349	0.701	55.2	33.2	9.4
96GQ	0213	323.7	55.0	16.9	023	6.9	2.12	0.525	1.006	58.1	85.6	0.9	93FA1	0328	7.4	77.4	-56.5	024	12.0	1.43	0.289	1.014	343.5	187.4	20.5
90SM	0213	324.3	148.2	-0.5	022	25.6	2.13	0.771	0.486	105.7	138.1	11.5	Aristaeus	0330	9.4	30.5	-38.0	016	17.6	1.60	0.503	0.794	290.7	191.4	23.0
93VB	0216	326.0	8.5	-16.7	000	9.8	1.91	0.519	0.918	322.6	146.0	5.1	95FX	0402	12.0	129.8	-47.4	063	15.2	2.27	0.548	1.027	27.0	188.8	21.8
Aten_2062	0218	327.7	144.2	-40.5	213	9.5	.967	0.183	0.790	147.9	108.7	18.9	94GK	0404	13.6	19.5	21.7	003	15.3	1.99	0.614	0.771	111.6	15.4	5.7
Camillo	0218	328.0	220.5	-86.7	079	29.9	1.41	0.302	0.986	312.2	148.0	55.6	90HA	0404	13.7	31.5	3.9								

91DG	0404	14.3	158.9	-31.4	048	10.4	1.43	0.363	0.909	63.1	180.3	11.2	89JA	0524	61.7	233.7	21.8	029	13.9	1.77	0.484	0.913	231.9	61.6	15.2
95EK1	0405	14.6	201.0	1.3	050	25.1	2.26	0.776	0.507	296.5	355.7	8.8	Betulia	0525	62.4	306.9	61.6	130	29.4	2.20	0.490	1.119	159.3	62.4	52.1
91GO	0405	15.0	10.4	21.8	030	18.8	1.96	0.661	0.663	88.6	25.0	9.7	91TB2	0524	63.1	52.5	14.3	124	27.6	2.40	0.836	0.394	195.6	297.2	8.7
Amor_1221	0408	17.3	106.0	-29.0	121	8.5	1.92	0.436	1.083	26.3	171.5	11.9	84KB	0525	63.1	58.4	18.5	081	23.3	2.22	0.764	0.522	336.5	169.9	4.8
91FB	0409	19.1	181.1	30.4	122	12.1	2.37	0.562	1.037	218.4	19.1	9.2	96JG	0525	63.3	242.4	-13.1	016	20.0	1.81	0.661	0.612	279.7	53.4	5.3
94GV	0410	19.8	69.0	24.1	000	8.1	2.01	0.519	0.967	154.1	19.8	0.5	92HF	0526	64.8	243.7	-39.5	123	18.3	1.39	0.562	0.609	128.1	213.6	13.3
96AJ1	0411	20.8	216.7	-13.8	041	27.0	1.30	0.777	0.291	238.4	91.0	2.5	79XB	0528	65.7	51.5	51.7	164	23.2	2.26	0.713	0.649	75.5	86.0	24.9
98EP4	0411	21.0	191.6	15.1	063	11.8	1.58	0.450	0.870	266.0	253.2	7.3	Cuno_4183	0528	66.5	74.4	14.3	092	17.0	1.98	0.638	0.718	235.2	295.9	6.8
Seneca2608	0413	22.5	109.0	-29.0	152	10.7	2.49	0.581	1.044	33.9	169.6	15.3	95LA	0530	67.8	172.7	-36.4	024	9.3	2.12	0.519	1.021	17.5	247.8	8.7
93HD	0413	22.6	15.6	-1.3	000	21.0	1.45	0.664	0.485	253.1	202.5	5.7	5025	0530	67.9	60.2	22.5	104	28.5	4.20	0.895	0.439	149.9	356.6	6.2
86PA_4034	0414	24.0	18.0	-9.2	142	13.7	1.93	0.459	1.043	125.8	261.8	2.2	93EA_5693	0531	68.5	256.0	-16.5	043	18.8	.935	0.095	0.846	352.6	329.3	12.3
98HH1	0415	24.0	106.3	-36.6	047	11.6	2.18	0.518	1.050	359.3	203.8	16.1	93PC	0601	70.0	61.7	20.5	073	14.3	1.15	0.475	0.607	168.1	337.6	4.2
93VW_6611	0416	25.2	51.1	-6.1	067	11.3	1.70	0.484	0.874	280.9	231.3	8.7	96TP6	0602	70.5	222.7	7.8	086	13.1	2.59	0.641	0.927	249.9	40.2	9.3
83TF2?	0417	26.3	18.0	30.2	078	21.4	1.84	0.278	1.328	108.6	117.9	11.4	86JK	0602	71.0	220.8	-10.0	005	13.6	2.80	0.680	0.894	232.6	62.7	2.1
Orpheus	0418	27.2	36.1	4.5	014	8.7	1.21	0.323	0.819	301.6	189.8	2.7	98KJ17	0604	72.5	164.1	52.2	026	8.6	1.99	0.483	1.030	163.8	76.2	9.1
Antinous	0417	27.2	199.4	30.1	213	15.0	2.26	0.606	0.891	267.0	347.5	18.4	98HL3	0607	76.1	257.	-23.	047	11.	1.13	0.363	0.718	188.1	163.7	2.6
Seleucus	0418	28.1	118.0	-10.5	101	7.1	2.03	0.458	1.102	349.2	218.8	5.9	94CC	0608	76.4	212.2	-32.5	018	8.6	1.64	0.417	0.954	24.6	268.9	4.6
94GL	0419	28.7	268.0	-31.1	013	10.0	.683	0.505	0.338	179.1	197.2	3.7	01jato2201	0609	77.9	79.9	26.9	010	20.2	2.17	0.712	0.626	96.1	76.8	2.5
91DB	0419	28.9	118.7	-20.0	153	6.9	1.72	0.402	1.027	51.0	158.5	11.4	98KY26	0610	78.5	222.3	-4.9	003	4.3	1.23	0.202	0.984	209.2	84.5	1.5
93HP1	0425	34.3	81.9	56.1	007	9.2	1.98	0.509	0.973	151.7	37.1	8.0	98LE	0611	80.4	269.9	-32.9	062	23.1	1.52	0.700	0.456	132.5	237.9	9.2
Poseidon	0426	34.4	30.9	17.8	199	20.0	1.84	0.679	0.588	15.5	108.2	11.9	98BZ7	0613	81.0	114.4	38.5	060	11.6	2.04	0.555	0.907	102.8	112.5	6.5
Hermes	0428	37.2	30.8	23.2	002	18.4	1.64	0.624	0.618	91.9	34.7	6.1	94XD	0614	82.6	258.2	-16.8	020	20.8	2.35	0.727	0.641	248.0	97.6	4.3
98HJ3	0429	38.5	218.	-23.	013	24.	1.98	0.744	0.507	92.9	224.9	6.6	98MS2	0615	83.0	102.3	-37.5	081	12.9	1.73	0.402	1.035	320.0	268.6	19.2
98HM1	0430	39.0	192.	-18.	016	9.	1.40	0.357	0.902	69.4	202.5	3.2	Icarus1566	0615	83.3	48.8	31.7	037	29.2	1.08	0.827	0.187	31.3	88.1	22.9
96SK	0501	40.2	34.6	11.6	013	24.5	2.43	0.797	0.494	283.4	198.3	2.0	910A	0615	84.0	167.5	-14.9	065	8.3	2.51	0.587	1.036	317.3	306.6	5.5
96FG3	0501	40.4	223.5	-17.6	034	11.0	1.05	0.349	0.686	23.3	300.6	2.0	91BA	0615	84.3	93.6	26.3	020	18.0	2.24	0.682	0.713	70.7	118.9	2.0
96TD9	0502	41.2	296.4	-24.8	023	11.8	1.33	0.404	0.795	89.5	206.4	5.0	89UR	0617	85.1	79.6	0.7	094	11.5	1.08	0.356	0.696	289.3	234.6	10.3
92LC	0502	41.4	35.8	45.1	114	19.6	2.52	0.705	0.744	90.6	61.1	17.8	91JR	0618	86.9	211.1	49.8	078	6.3	1.40	0.260	1.039	207.0	60.2	10.1
96MO	0503	42.1	65.2	11.2	090	11.2	1.79	0.512	0.873	4.4	165.1	6.1	96AW1	0619	87.5	261.1	-14.6	042	14.7	1.53	0.519	0.735	228.5	117.9	4.7
81VA_3360	0506	44.7	213.5	-41.8	150	23.9	2.47	0.743	0.633	60.6	245.5	21.7	92FE	0620	88.7	288.6	-30.0	059	11.9	.927	0.405	0.551	82.3	312.2	4.8
Anteros	0506	44.9	125.3	-36.6	078	5.8	1.43	0.256	1.064	338.2	246.5	8.7	91JW	0620	89.0	267.8	22.2	089	5.2	1.04	0.118	0.915	301.8	54.1	8.7
82TA_4197	0506	45.0	34.7	26.4	124	23.9	2.30	0.773	0.523	119.3	10.1	12.2	Dionysus	0622	90.2	227.6	34.8	033	11.1	2.20	0.543	1.003	203.7	82.4	13.6
94RC	0508	46.6	198.7	-0.7	071	12.2	2.21	0.592	0.905	284.4	346.2	4.7	98BY7	0628	96.0	114.4	28.3	029	15.8	2.27	0.651	0.794	89.0	123.3	3.6
90UQ_5189	0509	47.8	213.0	-12.9	063	12.7	1.55	0.478	0.810	159.5	135.4	3.6	95NA	0628	96.2	218.1	-65.8	062	10.2	1.70	0.395	1.027	33.8	276.2	12.7
96FQ3	0509	48.0	143.5	13.3	068	6.5	2.03	0.470	1.075	79.5	148.5	1.1	88XB	0629	96.5	268.8	-16.8	021	13.4	1.47	0.482	0.761	279.9	73.6	3.1
91EE	0510	48.8	202.2	-21.9	148	14.6	2.25	0.624	0.844	115.1	169.1	9.8	91JX	0628	97.3	185.2	-7.3	036	8.1	2.52	0.598	1.011	64.9	212.5	2.3
98HE3	0511	50.1	251.	-16.	004	13.	.879	0.443	0.490	309.0	53.9	3.4	83LC	0631	98.4	264.0	-21.9	023	17.4	2.63	0.709	0.766	184.8	159.6	1.5
88TA	0512	51.3	215.3	-19.4	026	12.9	1.54	0.479	0.803	104.6	195.2	2.5	95CS	0702	100.0	289.2	-20.1	027	25.3	1.94	0.776	0.436	252.2	135.7	2.6
Apollo1862	0512	51.3	231.8	-7.9	030	17.3	1.47	0.560	0.647	285.7	35.9	6.4	94CK1	0703	100.4	272.8	-28.9	059	16.9	1.90	0.620	0.720	27.6	328.9	4.4
93KA	0517	55.9	111.4	-27.5	005	4.5	1.26	0.197	1.008	341.8	235.9	6.1	96MQ	0703	101.0	200.8	-25.0	025	8.3	2.42	0.575	1.027	28.2	263.1	3.5
90UA	0517	55.9	223.1	-15.0	012	14.9	1.72	0.553	0.770	204.2	102.5	1.0	73NA	0703	101.1	14.8	68.6	088	38.3	2.43	0.638	0.881	118.2	101.1	68.0
91FB	0518	57.1	167.7	41.0	098	8.7	2.37	0.562	1.037	218.4	19.1	9.2	92QN	0605	104.4	107.9	14.0	156	10.3	1.19	0.359	0.763	202.1	356.1	9.6
94CJ1	0519	57.2	150.9	4.4	036	4.7	1.49	0.326	1.005	64.9	172.4	2.3	Adonis2101	0708	105.3	295.2	-22.0	023	24.7	1.87	0.765	0.441	42.3	350.7	1.4
96VB3	0519	57.2	226.1	-20.7	041	15.2	1.63	0.544	0.741	132.7	180.6	2.8	Dionysus	0708	105.6	217.0	39.9	099	10.3	2.20	0.543	1.003	203.7	82.4	13.6
97XF11	0519	57.4	226.7	-26.2	029	14.1	1.44	0.484	0.744	102.5	214.1	4.1	90MF	0709	107.0	248.5	-23.8	032</							

91BN	0711	108.9	271.6	-34.1	020	10.0	1.44	0.398	0.869	80.3	269.4	3.4	78CA	0905	161.4	194.4	68.0	018	15.0	1.13	0.215	0.883	102.2	161.3	26.1
94AW1	0713	110.5	66.9	-67.7	020	12.6	1.10	0.075	1.021	37.0	290.5	24.1	91TF3	0905	161.9	176.5	-44.5	105	12.0	2.04	0.531	0.957	303.2	6.7	14.1
86TO_3753	0717	113.5	94.5	50.5	082	18.2	.998	0.515	0.484	43.7	126.4	19.8	95YR1	0907	163.6	149.9	13.8	055	30.2	1.76	0.844	0.275	110.8	106.7	3.7
94UG	0719	115.5	136.6	11.1	078	6.2	1.23	0.246	0.925	225.9	12.4	4.5	86PA_4034	0907	164.0	347.6	18.3	020	14.3	1.93	0.459	1.043	125.8	261.8	2.2
97BR	0721	118.0	173.9	67.5	014	11.6	1.34	0.306	0.927	133.7	116.8	17.2	90SM	0907	164.3	164.4	18.7	091	25.5	2.13	0.771	0.486	105.7	138.1	11.5
98CS1	0724	120.6	124.8	32.6	021	17.5	1.47	0.567	0.634	97.0	111.5	7.6	94RB	0911	167.3	11.3	-59.3	067	19.2	2.47	0.637	0.897	52.5	339.7	26.6
Ivar_1627	0724	120.8	223.4	29.8	111	7.3	1.86	0.397	1.124	167.5	133.3	8.4	96EN	0911	167.9	195.8	64.7	050	22.9	1.51	0.431	0.857	125.1	164.3	38.0
92LR	0724	120.9	205.5	-15.6	033	5.7	1.83	0.409	1.082	67.3	233.2	2.0	93HD	0912	168.4	354.8	4.3	057	20.9	1.45	0.664	0.485	253.1	202.5	5.7
91VA	0725	122.4	275.8	-20.9	115	7.7	1.43	0.352	0.926	313.5	37.6	6.5	79VA_4015	0912	168.7	279.3	-25.8	048	8.6	2.64	0.662	1.000	90.9	271.0	2.8
94VH8	0727	123.1	277.0	-22.2	059	9.5	1.62	0.439	0.910	313.6	38.5	3.3	Bacchus	0912	168.9	2.6	-18.9	117	10.7	1.08	0.349	0.701	55.2	33.2	9.4
90TG1	0728	125.2	142.0	18.1	157	17.3	2.49	0.692	0.764	33.3	205.1	9.1	96EO	0912	169.0	16.8	-46.4	053	15.4	1.34	0.401	0.804	64.5	356.6	21.6
Ra-Shalom	0801	128.4	102.2	45.2	194	12.8	.832	0.437	0.469	356.0	170.9	15.8	Orthos2329	0913	169.6	219.5	45.6	127	18.3	2.40	0.659	0.820	145.8	169.5	24.4
94CN2	0802	128.8	273.0	-17.9	013	7.7	1.57	0.395	0.952	248.2	99.3	1.4	91RB	0914	171.3	10.9	-38.2	052	16.5	1.45	0.484	0.749	68.7	359.6	19.5
82BB_3103	0803	130.0	300.4	30.6	104	14.5	1.41	0.355	0.907	253.8	129.9	20.9	Hephaistos	0915	171.6	158.5	0.6	126	29.1	2.17	0.833	0.362	208.4	28.4	11.8
93DQ1	0807	133.8	171.8	-43.3	036	9.3	2.04	0.492	1.035	344.6	313.8	10.0	84QY1	0915	172.0	6.1	11.9	142	35.5	2.97	0.917	0.246	335.4	144.1	15.5
97TC25	0807	133.8	262.1	-28.6	003	9.7	2.53	0.615	0.976	321.6	17.9	0.2	Midas_1981	0921	177.2	142.8	-29.6	048	28.4	1.78	0.650	0.622	267.7	357.1	39.8
94RC	0809	135.4	160.9	-4.4	042	12.3	2.21	0.592	0.905	284.4	346.2	4.7	92NA	0920	177.5	258.9	-65.1	023	9.4	2.39	0.560	1.052	7.9	349.6	9.8
74MA	0809	135.8	351.3	-36.9	176	30.1	1.79	0.763	0.424	126.7	302.5	38.0	90MF	0921	178.2	215.3	-7.5	017	8.7	1.75	0.456	0.950	113.8	210.7	1.9
900S	0812	138.9	249.7	-24.9	010	9.8	1.67	0.460	0.903	19.6	348.6	1.1	Toutatis	0924	180.4	330.0	-11.3	007	12.0	2.51	0.634	0.920	274.8	128.2	0.5
Aten_2062	0813	139.9	187.6	66.5	180	9.9	.967	0.183	0.790	147.9	108.7	18.9	90UQ_5189	0924	181.0	195.0	0.5	045	12.8	1.55	0.478	0.810	159.5	135.4	3.6
98EP4	0813	140.0	151.3	-0.6	074	11.8	1.58	0.450	0.870	266.0	253.2	7.3	92SL	0925	181.1	231.3	-62.9	100	7.1	1.64	0.334	1.093	344.5	1.1	8.6
Mithra4486	0814	140.7	155.0	13.6	045	17.3	2.20	0.663	0.743	168.6	82.5	3.0	97TC25	0925	181.2	230.9	-19.4	001	9.6	2.53	0.615	0.976	321.6	17.9	0.2
98KY26	0821	140.7	186.0	2.9	023	4.3	1.23	0.202	0.984	209.2	84.5	1.5	90VA	0924	181.4	184.4	33.9	144	10.6	.985	0.279	0.710	34.3	216.4	14.2
89UQ	0814	140.9	126.3	23.0	014	7.6	.915	0.265	0.673	14.9	178.4	1.3	79VA_4015	0925	181.9	268.4	-23.2	049	8.2	2.64	0.662	1.000	90.9	271.0	2.8
89RC	0814	141.1	235.5	16.4	115	8.2	2.31	0.514	1.124	181.1	140.3	7.4	81ET3_3122	0925	182.0	103.9	-83.3	178	12.6	1.77	0.423	1.021	27.6	336.2	22.2
87SF3	0815	141.5	229.6	-6.5	053	7.4	2.25	0.534	1.050	133.7	187.7	3.3	96TC1	0926	182.2	169.5	-14.1	013	24.0	1.87	0.720	0.523	258.9	5.0	14.5
870A	0815	141.7	322.6	-2.9	100	18.0	1.50	0.595	0.605	235.4	180.3	9.0	Anza_2061	0927	183.9	269.9	-6.5	053	7.4	2.27	0.537	1.048	156.4	207.8	3.8
91AQ	0815	142.1	139.2	12.3	020	24.5	2.22	0.777	0.496	239.7	342.7	3.2	91XA	0928	185.5	310.6	-25.8	087	8.3	2.27	0.569	0.979	308.4	77.2	5.3
89QF	0816	142.4	139.1	7.5	026	12.9	1.15	0.413	0.676	239.5	344.9	3.9	94EK	0930	186.2	357.7	-13.0	055	15.7	2.00	0.607	0.786	97.7	334.5	5.8
Toro_1685	0817	143.3	324.6	-30.7	126	12.3	1.37	0.436	0.771	126.9	274.4	9.4	83RD_3551	0930	186.9	271.7	20.3	079	8.4	2.09	0.487	1.073	193.1	174.0	9.5
94PM	0817	144.0	335.6	7.1	022	26.1	1.48	0.753	0.366	303.3	140.1	18.0	88TA	0930	187.0	199.7	-1.7	006	12.9	1.54	0.479	0.803	104.6	195.2	2.5
93UA	0819	145.7	283.8	-31.6	071	9.0	2.03	0.526	0.960	330.1	27.2	4.6	Cuyo_1917	1003	188.5	290.9	43.8	074	18.0	2.15	0.504	1.066	194.3	188.4	23.9
98HM1	0819	145.9	171.	11.	047	9.	1.40	0.357	0.902	69.4	202.5	3.2	89VB	1002	188.6	274.8	-33.7	020	6.3	1.87	0.461	1.005	329.6	38.9	2.1
Asclepius	0820	146.4	333.6	0.5	049	10.6	1.02	0.357	0.657	255.1	180.5	4.9	96TD9	1003	189.4	200.8	5.1	026	11.8	1.33	0.404	0.795	89.5	206.4	5.0
88EG	0821	147.7	330.8	-6.1	036	14.9	1.27	0.499	0.636	241.5	182.9	3.5	79VA_4015	1004	190.3	261.8	-21.3	048	8.5	2.64	0.662	1.000	90.9	271.0	2.8
Khufu_3362	0821	148.1	140.4	33.2	014	15.3	.989	0.469	0.526	54.9	152.6	9.9	94ES1	1006	192.3	186.7	-4.7	007	18.7	1.39	0.588	0.572	280.0	353.4	1.2
Geographos	0822	148.3	141.2	-23.4	038	11.8	1.25	0.335	0.828	276.8	337.4	13.3	90UA	1010	195.8	204.7	-10.4	017	14.8	1.72	0.553	0.770	204.2	102.5	1.0
94CC	0823	149.4	180.9	-10.8	071	8.3	1.64	0.417	0.954	24.6	268.9	4.6	91TU	1010	196.1	328.8	26.6	006	7.5	1.42	0.333	0.945	220.9	193.6	7.7
72RB	0823	149.9	239.7	3.8	099	7.2	2.15	0.486	1.105	152.4	177.5	5.2	94CN2	1014	200.6	234.9	-20.9	025	7.6	1.57	0.395	0.952	248.2	99.3	1.4
92UY4	0824	150.0	264.6	-34.5	023	8.9	2.65	0.619	1.009	37.3	309.3	2.8	97TZ16	1015	201.3	7.2	-7.1	008	13.7	2.00	0.594	0.813	66.9	14.2	3.8
96GT	0824	150.0	317.3	-15.0	068	12.7	1.68	0.516	0.810	327.6	67.7	8.9	Cuyo_1917	1015	201.5	275.7	52.3	100	15.0	2.15	0.504	1.066	194.3	188.4	23.9
96PC1	0826	152.0	14.0	-69.5	089	16.1	1.84	0.451	1.010	45.6	326.5	25.1	91TB2	1017	203.5	30.8	12.0	150	27.5	2.40	0.836	0.394	195.6	297.2	8.7
Castalia	0827	153.3	353.5	-19.9	021	15.1	1.06	0.483	0.549	121.2	325.7	8.9	96SK	1018	203.8	25.1	12.8	003	24.5	2.43	0.797	0.494	283.4	198.3	2.0
81ET3_3122	0831	156.3	23.0	-76.3	047	14.1	1.77	0.423	1.021	27.6	336.2	22.2	93UA	1018	203.8	243.0	-39.7	005	9.3	2.03	0.526	0.960	330.1	27.2	4.6
91CS	0930	156.9	322.6																						

80PA_3908	1021	207.6	293.7	-14.1	056	6.2	1.93	0.459	1.043	125.8	261.8	2.2	Sisyhus	1127	243.8	183.1	-65.5	126	26.3	1.89	0.539	0.873	293.0	63.7	41.2
Ra-Shalom	1022	208.1	48.9	43.3	169	12.9	.832	0.437	0.469	356.0	170.9	15.8	96FG3	1127	244.1	236.6	-17.0	028	11.0	1.05	0.349	0.686	23.3	300.6	2.0
90SP	1022	208.3	33.1	-26.6	072	11.8	1.36	0.387	0.830	48.0	45.9	13.5	94XD	1129	245.9	247.6	-27.6	039	20.8	2.35	0.727	0.641	248.0	97.6	4.3
93TZ	1022	208.3	355.4	12.0	006	11.4	2.02	0.563	0.884	231.1	203.8	4.2	88XB	1129	246.3	251.8	-29.8	007	13.4	1.47	0.482	0.761	279.9	73.6	3.1
95EK1	1023	209.0	199.9	-17.5	085	25.0	2.26	0.776	0.507	296.5	355.7	8.8	89UR	1129	246.6	67.8	47.9	037	11.8	1.08	0.356	0.696	289.3	234.6	10.3
93VD	1025	210.9	186.3	-5.5	017	16.7	.891	0.526	0.422	252.2	6.8	2.1	91JW	1130	247.1	222.4	-71.2	034	5.8	1.04	0.118	0.915	301.8	54.1	8.7
95FF	1026	211.8	22.9	10.5	006	18.9	2.34	0.713	0.673	290.2	178.7	0.7	96XZ12	1201	248.1	231.9	-9.4	006	16.1	.989	0.515	0.480	55.7	251.7	5.9
98HL1	1026	212.0	248.	55.	041	11.	1.24	0.185	1.013	148.4	213.8	19.6	91VL_5143	1201	248.7	76.9	27.3	140	25.4	1.84	0.771	0.419	226.4	310.7	9.2
Poseidon	1027	212.6	33.4	8.8	198	19.9	1.84	0.679	0.588	15.5	108.2	11.9	91VK	1201	248.9	28.8	26.5	067	9.7	1.84	0.507	0.909	173.2	295.1	5.4
91GO	1027	212.9	33.1	-3.8	023	18.8	1.96	0.661	0.663	88.6	25.0	9.7	Cerberus	1202	249.2	78.9	46.4	168	15.7	1.08	0.467	0.576	325.1	213.0	16.1
97XF11	1027	213.4	219.9	-5.9	001	14.1	1.44	0.484	0.744	102.5	214.1	4.1	94CK1	1202	249.3	256.7	-21.3	075	16.8	1.90	0.620	0.720	27.6	328.9	4.4
91VA	1027	213.5	229.7	-46.0	008	8.5	1.43	0.352	0.926	313.5	37.6	6.5	91FA	1203	251.2	340.3	-7.8	054	5.9	1.98	0.447	1.094	91.8	339.5	3.1
82TA_4197	1028	213.8	39.9	1.5	086	24.1	2.30	0.773	0.523	119.3	10.1	12.2	93VB	1204	251.7	35.4	8.5	084	9.4	1.91	0.519	0.918	322.6	146.0	5.1
91VE	1028	214.4	185.9	-9.5	058	21.1	.891	0.664	0.299	193.4	62.1	7.2	97US2	1205	252.0	74.1	18.0	006	20.1	1.67	0.662	0.566	99.8	66.4	3.2
96RG3	1030	215.6	16.9	12.1	052	14.3	2.00	0.605	0.790	299.9	158.5	3.6	89UQ	1205	252.7	91.0	24.8	021	7.5	.915	0.265	0.673	14.9	178.4	1.3
94VH8	1030	215.7	238.0	-32.5	003	9.6	1.62	0.439	0.910	313.6	38.5	3.3	94XL1	1205	252.7	177.9	44.2	036	15.5	.671	0.526	0.318	356.5	252.7	28.2
Epona_3838	1031	217.0	209.2	16.8	180	26.9	1.51	0.702	0.449	49.5	235.8	29.3	90HA	1206	254.2	53.5	22.4	062	15.8	2.57	0.696	0.728	308.3	184.8	3.9
Hermes	1031	217.5	38.9	4.5	003	18.4	1.64	0.624	0.618	91.9	34.7	6.1	92HF	1206	254.4	251.2	-5.8	150	18.1	1.39	0.562	0.609	128.1	213.6	13.3
91XA	1104	220.9	284.6	-41.5	054	8.6	2.27	0.569	0.979	308.4	77.2	5.3	94XM1	1210	257.5	49.9	-0.8	001	11.1	2.01	0.554	0.896	42.0	77.2	5.6
54XA	1105	222.0	184.6	9.3	035	8.0	.777	0.345	0.509	57.3	191.0	3.9	83VA	1211	257.6	38.9	-45.7	173	12.9	2.61	0.693	0.801	11.7	77.5	16.2
90UN	1106	222.9	28.6	3.2	036	12.7	1.71	0.528	0.807	97.0	8.5	3.7	95DV1	1210	257.8	16.2	8.1	063	9.7	3.13	0.692	0.964	284.0	172.3	3.7
93KA2	1106	223.4	44.0	20.5	015	23.9	2.23	0.775	0.502	261.3	239.6	3.2	97XE10	1211	258.0	31.5	19.5	015	7.6	1.87	0.476	0.978	24.7	72.8	6.3
93PC	1107	223.8	48.8	14.6	066	14.3	1.15	0.475	0.607	168.1	337.6	4.2	88VP4	1211	258.0	56.5	43.3	086	16.4	2.27	0.653	0.786	216.4	282.3	11.5
83TF2?	1108	224.6	44.7	-1.9	151	21.1	1.84	0.278	1.328	108.6	117.9	11.4	Toutatis	1214	261.5	296.8	-22.2	006	11.9	2.51	0.634	0.920	274.8	128.2	0.5
91BN	1108	225.2	242.9	-12.7	042	9.9	1.44	0.398	0.869	80.3	269.4	3.4	Phaethon	1215	262.4	114.3	31.7	022	33.7	1.27	0.890	0.140	321.8	265.6	22.1
97UR	1109	226.0	322.5	3.6	018	4.4	1.46	0.314	1.004	199.9	214.2	2.3	98HL3	1215	262.7	260.	-24.	045	11.	1.13	0.363	0.718	188.1	163.7	2.6
5025	1109	226.1	50.1	14.4	082	28.5	4.20	0.895	0.439	149.9	356.6	6.2	Nereus4660	1217	264.3	36.2	19.7	019	6.1	1.49	0.360	0.953	157.9	314.8	1.4
83LC	1110	227.6	240.1	-19.4	024	17.4	2.63	0.709	0.766	184.8	159.6	1.5	92LC	1216	264.4	78.1	-6.6	120	19.6	2.52	0.705	0.744	90.6	61.1	17.8
96VZ4	1112	229.1	67.3	-62.6	044	14.5	1.61	0.363	1.024	15.3	49.1	24.3	6344	1218	265.3	312.1	-14.8	080	10.3	2.62	0.641	0.940	232.6	185.0	4.6
Apollo1862	1112	229.3	223.4	-27.9	026	17.3	1.47	0.560	0.647	285.7	35.9	6.4	79XB	1219	266.1	88.5	-12.4	041	23.5	2.26	0.713	0.649	75.5	86.0	24.9
91TT	1112	229.3	284.7	55.8	148	6.8	1.19	0.161	1.002	217.8	192.5	14.8	91TU	1219	267.1	303.4	-7.8	126	6.3	1.42	0.333	0.945	220.9	193.6	7.7
84KB	1114	231.2	51.0	21.6	073	23.3	2.22	0.764	0.522	336.5	169.9	4.8	01jato2201	1223	270.5	87.0	19.6	001	20.2	2.17	0.712	0.626	96.1	76.8	2.5
90OS	1115	231.6	257.9	-24.8	070	9.7	1.67	0.460	0.903	19.6	348.6	1.1	Khufu_3362	1224	270.6	105.9	14.2	152	14.7	.989	0.469	0.526	54.9	152.6	9.9
96FT1	1116	232.6	32.0	4.6	030	9.0	1.46	0.401	0.875	93.7	12.5	2.7	82XB_3757	1224	272.0	10.2	-19.8	037	6.2	1.84	0.446	1.017	17.0	75.1	3.9
96GD1	1116	233.1	206.9	-56.0	083	14.0	1.18	0.348	0.769	293.6	38.2	18.1	95YR1	1225	272.4	110.6	19.5	016	30.1	1.76	0.844	0.275	110.8	106.7	3.7
6743	1116	233.5	42.1	0.5	092	13.1	1.64	0.500	0.818	105.5	11.0	7.4	Tantalus	1227	274.4	134.4	-45.2	046	33.9	1.29	0.299	0.905	61.6	94.4	64.0
93KH	1117	234.1	223.0	-58.6	002	11.0	1.23	0.311	0.850	293.6	54.5	12.8	92YD3	1227	274.4	254.9	63.3	023	14.7	1.17	0.137	1.006	173.6	274.4	27.1
Ptah_5011	1118	235.0	42.0	0.8	089	12.2	1.64	0.500	0.818	105.5	11.0	7.4	80WF_4688	1227	274.5	351.6	27.1	115	7.4	2.23	0.516	1.081	213.4	241.6	6.4
92BF	1118	235.4	216.5	-10.1	123	8.1	.908	0.272	0.661	336.2	315.6	7.3	97YM9	1227	275.0	86.7	-37.8	034	4.9	1.10	0.104	0.982	51.0	95.2	7.9
96BG1	1119	235.8	214.1	-15.0	063	8.0	.900	0.270	0.657	150.5	140.1	3.7	96GT	1229	276.4	294.6	-30.6	032	12.8	1.68	0.516	0.810	327.6	67.7	8.9
98HJ3	1119	235.9	231.	-11.	022	24.	1.98	0.744	0.507	92.9	224.9	6.6	54XA	1229	276.6	141.1	16.3	067	7.8	.777	0.345	0.509	57.3	191.0	3.9
6344	1120	237.5	323.0	-0.8	081	8.4	2.62	0.641	0.940	232.6	185.0	4.6	89AZ	1229	276.8	292.7	12.4	067	11.9	1.64	0.467	0.876	111.6	295.8	11.8
Orpheus	1121	238.8	46.2	24.1	035	8.6	1.21	0.323	0.819	301.6	189.8	2.7	96AJ1	1229	277.0	257.4	-25.0	005	26.9	1.30	0.777	0.291	238.4	91.0	2.5
89UP	1123	240.3	356.7	-24.7	008	6.8	1.86	0.472	0.984	17.4	53.3	3.9	95CR	1230	278.1	243.7	-20.0	062	29.6	.906	0.868	0.120	322.1	343.1	4.0
96JG	1123	240.5	236.8	-28.2	011	20.0	1.81	0.661	0.612	279.7	53.4	5.3	Cuno_4183</td												

【特異小惑星と関連する眼視輻射点】

- 1) 検出：観測日の差が7日以内 + 輻射点の距離が7度以内
 2) *：観測日の差が5日以内(1点) + 輻射点の距離が5度以内(1点) +
 速度差が1.7倍以内(1点) (ただし速度観測のあるものの中で)

ID	DATE	S.Lng	Co.Rad(2000)	SD	VG	Str.	DATE(JST)	AppRad(2000)	WD	Vo	S.Long	N	HR	V	Obs.
94WR12	0117	296.1	155.3	-1.1	094	9.5									
40Sex	19750114.75		162.0	-2.0	-	.	294.299	5	-	V	上山泰巨				
92QN	0118	298.0	120.3	35.2	136	10.5									
32Lyn	19750117.63		113.0	39.0	-	.	297.232	5	-	V	上山泰巨				
91BA	0118	298.3	110.2	18.5	000	18.0									
Gem	19850114.58		107.0	20.0	7	.	294.572	4	-	V	岡雅行				
ζ Gem	19970114.59	*3	108.0	21.0	2	26.0	294.507	4	4.0	V	長田和弘				
ζ Gem	19710118.5		105.0	20.0	-	.	298.150	4	-	V	古田広文				
ρ Gem	19850125.63	*1	113.0	22.0	-	46.0	305.821	4	-	V	野村茂樹				
96MO	0122	301.4	97.6	9.5	073	11.3									
Ori	19930119.48		94.0	15.0	3	.	299.509	4	-	V	佐藤広実				
91AQ	0125	304.7	132.3	20.8	034	24.4									
δ Cnc	19730131.5		134.0	22.0	-	.	311.863	5	-	V	古田広文				
ν Cnc	19730201.58		135.0	23.0	-	.	312.960	5	-	V	富岡啓行				
89QF	0130	310.2	138.1	23.8	038	12.9									
ζ Cnc	19750125.6		134.0	29.0	-	.	305.341	4	-	V	殿村泰弘				
δ Cnc	19730131.5		134.0	22.0	-	.	311.863	5	-	V	古田広文				
ν Cnc	19730201.58		135.0	23.0	-	.	312.960	5	-	V	富岡啓行				
98BR26	0204	314.0	116.2	-10.8	014	13.7									
20Pup	19720128.5		120.0	-14.0	-	.	308.062	7	-	V	中井祥二				
90SM	0213	324.3	148.2	-0.5	022	25.6									
α Sex	19750217.56		152.0	2.0	-	.	328.608	2	-	V	富岡啓行				
30Sex	19710218.5		154.5	1.0	-	.	329.588	1	-	V	柴田宏				
Pan	4450	0220	329.3	157.4	18.4	028	18.5								
α Leo	19770219.73	*1	157.0	13.0	-	46.5	331.289	3	-	V	殿村泰弘				
α Leo	19830220.63	*2	155.0	12.0	2	29.0	331.657	4	-	-	豆田勝彦				
全16件															
95CR	0222	332.1	184.8	0.0	013	29.7									
η Vir	19740228.73		187.0	-1.5	-	.	340.115	1	-	V	石川昌				
98BY7	0222	332.2	136.6	9.5	030	15.8									
ε Hya	19930217.55	*1	131.0	8.0	2	60.0	328.987	8	-	V	関口孝志				
50DA	0305	343.9	164.5	38.9	050	13.9									
ν UMa	19920227.55		167.0	36.0	-	.	338.308	4	2.0	V	薮保男				
96BG1	0306	344.6	178.9	-11.8	026	8.2									
θ Crt	19770312.65		173.5	-8.5	-	.	352.269	1	-	V	余田義彦				
96TC1	0308	347.0	180.2	17.9	079	24.0									

11Com	19710301.6		178.0	17.0	-	.		340.761	5	-	V	薮保男			
93Leo	19940304.52	*1	176.0	22.0	0.5	46.0		343.782	3	3	V	長田和弘			
24Com	19780305.75	*1	186.0	18.0	-	53.0		345.116	7	-	V	草加俊司			
β Leo	19730310.68		175.0	16.0	-	.		350.339	6	-	V	有馬甲			
β Leo	19830314.64	*2	178.0	15.0	2	33.0		353.722	4	-	V	森山真久			
2Com	19830314.64	*1	180.0	21.0	7	60.0		353.722	4	-	V	森山真久			
92BF	0308	347.5	193.9	15.7	067	8.7									
ε Vir	19940306.73	*1	188.5	17.0	3	46.0		345.996	7	7.0	V	塙井宏幸			
α Com	19780310.74	*2	197.0	17.0	2	33.0		350.108	7	-	V	清水真澄			
ε Vir	19800311.63		194.0	12.0	1	.		351.485	5	-	V	余田義彦			
α Com	19700312		194.0	19.0	-	.		351.422	7	-	V	吉本保			
ε Vir	19720315.7		195.0	14.0	-	.		355.600	5	-	V	有馬甲			
98BZ7	0315	354.1	143.1	4.3	099	11.3									
α Sex	19770312.65		147.0	5.0	2.5	.		352.269	4	1.1	V	余田義彦			
90TG1	0315	354.4	157.4	-6.8	080	17.8									
β Sex	19770312.65		158.0	-1.0	3	.		352.269	4	-	V	余田義彦			
94ES1	0316	354.9	180.0	1.9	001	18.7									
η Vir	19740313.50		185.0	.0	-	.		352.891	2	-	V	竹内雄幸			
Vir	19710318.6		185.0	5.0	-	.		357.744	3	-	V	西山浩一			
η Vir	19750318.63		182.0	-4.0	-	.		357.745	6	-	V	殿村泰弘			
ν Vir	19760320.55		175.0	6.0	-	.		.391	4	-	V	大石厚志			
Vir	19820321.66		185.0	-1.0	2	.		.958	3	-	V	塙谷一昭			
ο Vir	19930322.46		181.0	8.0	2	38.0		1.931	3	-	V	長田和弘			
β Vir	19740323.64		178.0	4.0	-	.		2.978	3	-	V	殿村泰弘			
π Vir	19740323.67		179.0	8.0	-	.		3.007	2	-	V	石川昌			
92SK	0317	355.3	192.4	41.4	065	12.1									
α CVn	19830311.57		193.0	36.0	3	35.5		350.658	3	-	V	森山真久			
Geographos	0323	2.3	192.9	32.4	099	11.6									
γ Com	19740323.58	*2	190.0	30.0	-	46.0		2.918	5	-	V	渡辺美和			
Mithra4486	0324	2.5	172.1	4.4	051	17.2									
χ Leo	19940319.63		170.0	4.0	2	.		358.867	3	-	V	薮保男			
λ Leo	19750319.67		169.0	4.0	-	.		358.779	4	-	V	小林正人			
ν Vir	19760320.55		175.0	6.0	-	.		.391	4	-	V	大石厚志			
α Leo	19750321.71		168.0	4.0	-	.		.806	1	-	V	小林正人			
β Vir	19740323.64		178.0	4.0	-	.		2.978	3	-	V	殿村泰弘			
Vir	19710325.6		178.0	7.0	-	.		4.694	5	-	V	山崎清剛			
χ Leo	19740329.86		168.0	6.0	-	.		9.137	4	-	V	山崎清剛			
96XZ12	0327	5.9	198.5	-11.9	090	15.9									
Vir	19710320.6		204.0	-8.0	-	.		359.732	4	-	V	堀要			
Vir	19770325.57		197.5	-5.0	6	.		5.115	4	-	V	落合孝志			
α Vir	19730326.54		203.0	-8.0	-	.		6.106	3	-	V	富岡啓行			
Vir	19950403.71		201.0	-8.0	-	.		13.546	6	-	V	藤原貴生			
94UG	0328	7.2	177.7	25.2	007	6.7									
ζ Leo	19700327		175.0	21.0	-	.		6.328	1	-	V	関政男			

1980-555

MSS-080

α Peg	19810831.53	346.0	18.5	-	.	158.278	1	-	V	川崎康寛	95FF	1026	211.8	22.9	10.5	006	18.9							
α Peg	19810901.52	347.0	15.0	-	.	159.237	3	-	V	吉田孝次	η Psc	19701020		18.0	15.0	-	.	206.594	3	-	V	竹内雄幸		
Peg	19830908.71	*2	347.0	23.0	2	46.0	165.711	4	-	V	高村俊彦	ν Psc	19901020.63	*1	28.0	6.0	6	27.5	207.098	6	1.3	V	橋本岳真	
α Peg	19740910.52	348.0	18.0	-	.	167.772	5	-	V	薮保男	ξ Cet	19901022.60		28.0	7.0	7	.	209.058	4	-	V	司馬康生		
93HD		0912	168.4	354.8	4.3	057	20.9				η Psc	19831029.60		23.0	14.0	3	.	215.825	3	-	V	富岡啓行		
γ Psc	19830908.58	351.0	3.0	-	.	165.585	4	-	V	司馬康生	Poseidon	1027	212.6	33.4	8.8	198	19.9							
θ Psc	19850914	352.0	6.0	4	.	171.332	6	-	V	司馬康生	ν Psc	19901020.63	*1	28.0	6.0	6	27.5	207.098	6	1.3	V	橋本岳真		
θ Psc	19880914.57	*3	353.0	7.0	-	27.5	172.113	6	-	V	榎原友治	ξ Cet	19901022.60		28.0	7.0	7	.	209.058	4	-	V	司馬康生	
ω Psc	19760917.54	359.0	8.0	-	.	175.079	3	-	V	富岡啓行	μ Cet	19711023.6		40.0	11.0	-	.	209.919	8	-	V	鈴木義雄		
Psc	19870918	348.0	5.0	2	.	174.729	4	-	V	作間幸太郎	S_Tau	19811023.69		39.0	10.0	-	.	210.445	4	-	V	落合孝志		
γ Psc	19950918.46	*1	350.0	2.0	1.5	26.0	175.127	3	1.5	V	長田和弘	γ Cet	19761024.67		36.0	9.0	-	.	211.702	4	-	V	泉潔	
84QY1		0915	172.0	6.1	11.9	142	35.5				ξ Cet	19701101		32.0	5.0	-	.	218.563	3	-	V	薮保男		
ε Psc	19910911.63	*2	10.0	7.0	3	27.5	168.505	4	-	V	作間幸太郎	91GO	1027	212.9	33.1	-3.8	023	18.8						
Psc	19850912		12.0	11.0	15	.	169.385	7	-	V	司馬康生	Cet	19871027.56		28.0	.0	-	.	213.767	3	-	V	司馬康生	
86Peg	19770917.74		1.4	13.9	-	.	175.032	4	2.7	-	殿村泰弘	58Cet	19701102		31.0	-6.0	-	.	219.564	5	-	V	佐藤元	
ω Psc	19760918.58		5.0	5.0	-	.	176.094	9	-	V	富岡啓行	82TA	4197	1028	213.8	39.9	1.5	086	24.1					
51Psc	19790919.58		5.0	5.0	-	.	176.323	4	-	V	富岡啓行	γ Cet	19821022.65		42.0	6.0	4	.	209.157	6	-	V	土田正夫	
34Psc	19770919.71		2.8	10.5	1.2	.	176.956	3	-	-	殿村泰弘	S_Tau	19811023.69	*2	43.0	7.0	3.8	25.0	210.445	7	-	V	電気通信大学	
42Psc	19770919.71		4.4	13.0	-	.	176.956	1	-	-	殿村泰弘	Cet	19841102.63	*3	41.0	1.0	2	23.5	220.601	4	2.4	V	岩本俊一	
Psc	19960922.69	*2	2.0	10.0	5	25.0	179.991	3	2.4	V	泉潔	96RG3	1030	215.6	16.9	12.1	052	14.3						
Cuyo_	1917	1015	201.5	275.7	52.3	100	15.0				72Psc	19701023		15.0	16.0	-	.	209.578	3	-	V	竹内雄幸		
ν Dra	19851008.51		266.0	55.0	3	.	195.365	4	-	V	福岡天文G	η Psc	19831029.60		23.0	14.0	3	.	215.825	3	-	V	富岡啓行	
γ Dra	19851008.52		277.0	55.0	5	.	195.375	13	-	V	高梨雅彰	Hermes	1031	217.5	38.9	4.5	003	18.4						
γ Dra	19851008.58		278.0	53.0	-	.	195.434	7	-	V	高知G	γ Cet	19761024.67		36.0	9.0	-	.	211.702	4	-	V	泉潔	
91TB2		1017	203.5	30.8	12.0	150	27.5				ξ Cet	19701101		32.0	5.0	-	.	218.563	3	-	V	薮保男		
ξ Cet	19931010.51	*2	33.0	9.0	2	29.0	197.294	3	-	V	上村敏夫	Cet	19841102.63	*3	41.0	1.0	2	23.5	220.601	4	2.4	V	岩本俊一	
N_Psc	19931010.51	*1	24.0	13.0	7	45.0	197.294	4	-	V	上村敏夫	90OUN	1106	222.9	28.6	3.2	036	12.7						
ξ Cet	19931011.69	*2	34.5	9.5	4	25.0	198.461	6	3.1	V	塙井宏幸	ξ Cet	19701101		32.0	5.0	-	.	218.563	3	-	V	薮保男	
ζ Ari	19821011.73	*2	29.0	15.0	-	31.5	198.318	3	-	V	越山展行	93KA2	1106	223.4	44.0	20.5	015	23.9						
ξ Cet	19931012.48	*2	33.0	7.0	2	38.0	199.243	3	-	V	長田和弘	N_Tau	19961101.59	*2	50.0	21.0	7	27.5	219.483	3	2.6	V	長田和弘	
Ari	19851014.63	*2	35.0	16.0	5	29.0	201.420	4	-	V	吉川忠志	49Ari	19731103.63	*2	44.0	26.0	-	33.0	221.425	5	-	V	西嶋恭司	
Ari	19961016.48	*3	28.0	12.0	3	38.0	203.432	3	1.4	V	長田和弘	N_Tau	19911103.63	*3	48.0	22.0	2	29.0	220.810	5	2.5	V	橋本岳真	
Ari	19961017.44	*3	30.0	11.0	4	38.0	204.385	3	1.5	V	長田和弘	全14件												
ν Psc	19901020.63	*2	28.0	6.0	6	27.5	207.098	6	1.3	V	橋本岳真	93PC	1107	223.8	48.8	14.6	066	14.3						
全17件												N_Tau	19941102.72	*1	53.0	19.0	2	30.0	220.131	5	1.8	V	塙井宏幸	
96SK		1018	203.8	25.1	12.8	003	24.5				S_Tau	19851112.60	*2	53.0	13.0	-	33.0	230.354	4	-	V	伊藤修		
ζ Ari	19821011.73	*2	29.0	15.0	-	31.5	198.318	3	-	V	越山展行	全39件												
ξ Cet	19771015.5		28.0	8.0	-	.	201.870	3	-	V	及川聖彥	83TF2?	1108	224.6	44.7	-1.9	151	21.1						
Ari	19961016.48	*3	28.0	12.0	3	38.0	203.432	3	1.4	V	長田和弘	Cet	19841102.63	*2	41.0	1.0	2	23.5	220.601	4	2.4	V	岩本俊一	
Ari	19961017.44	*2	30.0	11.0	4	38.0	204.385	3	1.5	V	長田和弘	5025	1109	226.1	50.1	14.4	082	28.5						
ξ Cet	19901022.60		28.0	7.0	7	.	209.058	4	-	V	司馬康生	N_Tau	19941102.72	*1	53.0	19.0	2	30.0	220.131	5	1.8	V	塙井宏幸	
Ra-Shalom		1022	208.1	48.9	43.3	169	12.9				S_Tau	19941102.72	*1	56.0	13.5	2.5	30.0	220.131	4	1.4	V	塙井宏幸		
θ Per	19791022.63		40.0	46.0	5	.	208.906	4	-	V	高梨雅彰	S_Tau	19851112.60	*3	53.0	13.0	-	33.0	230.354	4	-	V	伊藤修	
ρ Per	19811023.54		46.0	39.0	-	.	210.295	3	6.0	V	植原敏	全42件												
δ Per	19771023.6		52.0	45.0	-	.	209.919	4	-	V	竹内雄幸													

MSH-05546

α Gem	19931211.71	*3	113.0	32.0	4	39.5	259.764	6	5.0	V	佐藤孝悦
β Gem	19931211.73	*3	118.0	30.0	2	46.5	259.784	3	3.0	V	佐藤孝悦
α Gem	19811212.56	*2	115.0	35.0	5	60.0	260.705	6	7.5	V	川崎康寛
α Gem	19851212.60	*2	113.0	30.0	5	60.0	260.716	7	-	V	富岡啓行
α Gem	19921214.51	*3	117.0	30.0	4	29.0	262.868	5	-	V	長田和弘
α Gem	19961214.61	*3	113.0	33.0	2	39.5	262.945	4	6.0	V	佐藤孝悦
β Gem	19931218.65	*3	115.0	27.0	0	27.5	266.826	3	0.6	V	橋本岳真
ι Gem	19921222	*1	113.0	26.0	2	45.0	270.493	7	-	V	飯山青海
α Gem	19861222.71	*2	119.0	31.0	10	33.0	270.741	4	1.3	V	愛媛大学G
全211件											
92LC		1216	264.4	78.1	-6.6	120	19.6				
η Ori	19951215.56	*1	81.0	-2.0	4	53.0	263.151	7	3.4	V	長田和弘
Oijato	2201	1223	270.5	87.0	19.6	001	20.2				
ν Ori	19801216.64		90.5	14.0	-	.	265.119	3	-	-	黒田弘章
ν Ori	19761218.74		93.0	17.0	-	.	267.276	3	-	V	渡辺美和
η Gem	19741220.60		88.0	25.0	-	.	268.673	2	-	V	大江和彦
χ Ori	19771220.75		90.0	24.0	4	.	269.066	3	-	V	丹羽雅彦
ζ Tau	19921222	*3	83.0	20.0	4	31.5	270.493	7	-	V	飯山青海
η Gem	19921222	*2	93.0	20.0	6	27.5	270.493	3	-	V	飯山青海
ζ Tau	19801227.55		87.0	25.0	-	.	276.227	3	-	V	薮保男
ζ Tau	19941230.47		80.0	22.0	2.5	53.0	278.602	4	3.4	V	長田和弘
Khufu_3362	1224	270.6	105.9	14.2	152	14.7					
λ Gem	19761218.68		109.0	16.0	-	.	267.215	3	-	V	丹羽雅彦
λ Gem	19721229.65		110.0	18.0	-	.	278.418	5	-	V	継松和也
95YR1		1225	272.4	110.6	19.5	016	30.1				
λ Gem	19761218.68		109.0	16.0	-	.	267.215	3	-	V	丹羽雅彦
ι Gem	19921222	*2	113.0	26.0	2	45.0	270.493	7	-	V	飯山青海
λ Gem	19721229.65		110.0	18.0	-	.	278.418	5	-	V	継松和也
92YD3		1227	274.4	254.9	63.3	023	14.7				
η Dra	19920103.83	*1	254.0	58.5	2	46.0	282.808	4	-	V	塙井宏幸
54XA		1229	276.6	141.1	16.3	067	7.8				
\circ Leo	19820102.72		145.0	13.0	-	.	282.256	3	-	V	下田力
ξ Leo	19810103.75		138.5	12.0	-	.	283.566	4	-	V	落合孝志
ζ Leo	19731222.77		142.0	13.0	-	.	271.143	7	-	V	土田正夫
κ Cnc	19701229.8		137.0	11.0	-	.	278.078	4	-	V	河越彰彦
η Leo	19761231.79		147.0	17.0	-	.	280.574	3	-	V	伊藤繁治
Cuno_4183	1231	279.2	91.2	36.0	034	17.2					
ν Aur	19750105.60		86.0	35.0	-	.	284.972	4	-	V	薮保男
ν Aur	19751226.49		87.0	38.0	-	.	274.412	1	-	V	伊藤繁治
ν Aur	19711231.6		85.0	36.0	-	.	279.648	3	-	V	河越彰彦

MSS-080

ダストトレイルとダストバンドの紹介(IRASの観測結果から)

橋本岳真

●ダストトレイル(dust trail)

短周期彗星の軌道に沿って分布するミリメートルクラスの大きなダストの帯。主に母彗星の後方に伸びており、前方にはあまり伸びていない。幅は数万～数十万 kmで、数年～数百年で形成されたと推定されている。そこから検出されたダストの直径は1mm以上($\beta \leq 10^3$)で、その放出速度は数 m/sと推定されている(今回観測された一番顕著な Tempel 2 彗星のダストトレイルでは彗星軌道の前方で6mm以上のものも検出されている)。IRASによって Churyumov-Gerasimenko, Encke, Gunn, Kopff, Pons-Winnecke, Schwassmann-Wachmann 1, Tempel 1, Tempel 2 の各彗星のダストトレイルが検出されている。

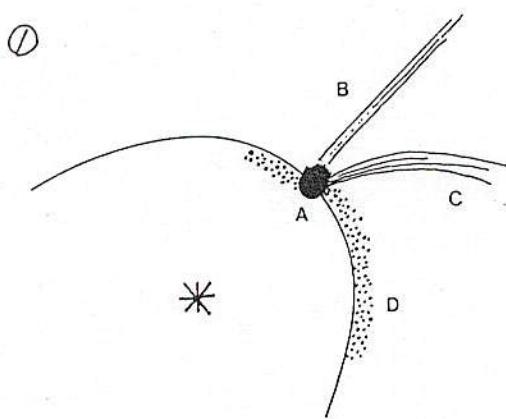


FIG. 1. Comets generally exhibit a variety of phenomena at visual wavelengths, including (a) the coma, (b) an ion tail, and (c) a dust tail. At thermal wavelengths a new phenomenon becomes apparent: (d) the dust trail, consisting of large particles moving slowly away from the nucleus along orbital paths very close to that of the parent comet.

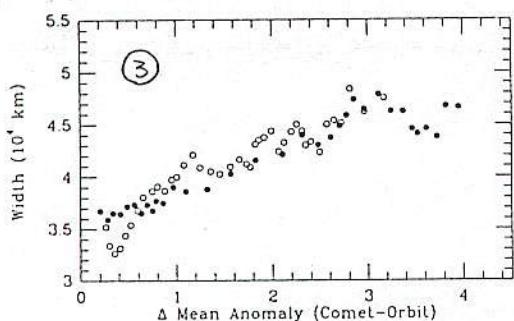


FIG. 10. The width of the trail corresponds to the full width at half-peak radiance of the deconvolved Gaussian used to model the in-scan profile of the trail. Observations were made during July/August 1983 during HCON 1 (open circles) and HCON 2 (closed circles).

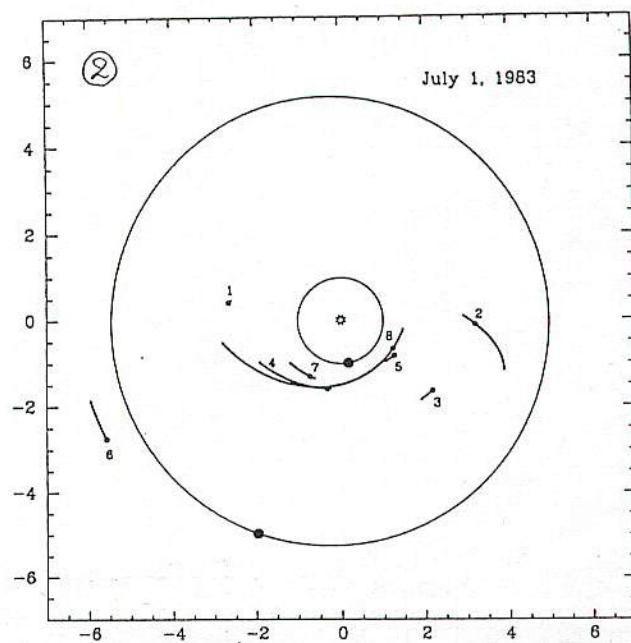


FIG. 6. The location of the observed dust trails projected onto the ecliptic plane on July 1, 1983. The orbits and positions of the Earth and Jupiter are also shown. The trails are (1) Churyumov-Gerasimenko, (2) Encke, (3) Gunn, (4) Kopff, (5) Pons-Winnecke, (6) Schwassmann-Wachmann 1, (7) Tempel 1, (8) Tempel 2. Large dots within the trails indicate the positions of the comet nuclei.

(8)

TABLE II
ASTEROID FAMILY MODEL DUST BAND PARAMETERS

Family	a	δa	e	δe	e_f	i	δi	i_f	Ω_f	ω_f
Themis	3.137	0.025	0.153	0.009	0.038	1.420	0.223	1.22	97.8	8.7
Koronis	2.875	0.018	0.049	0.006	0.037	2.118	0.081	1.16	96.1	6.2
Nysa	2.446	0.020	0.162	0.009	0.036	3.205	0.154	0.93	86.9	351.7
Flora	2.193	0.008	0.138	0.006	0.048	5.024	0.452	0.61	43.4	338.2
Eos	3.015	0.006	0.071	0.008	0.037	~0.26	~0.27	~0.20	97.1	7.6
Io	2.650	0.035	0.143	0.009	~0.06	13.36	0.240	1.06	93.9	~32
Maria	2.550	0.013	0.089	0.009	0.035	15.21	0.170	1.03	91.0	354.2

(4)

TABLE III
Observations and Characteristics from Individual Scans

Trails	$R(\text{AU})$	$\Delta(\text{AU})$	$d(^{\circ})$	$\Delta\theta(^{\circ})$	$F_{\nu}(12 \mu\text{m})$ (MJy/sr)	$F_{\nu}(25 \mu\text{m})$ (MJy/sr)	$F_{\nu}(60 \mu\text{m})$ (MJy/sr)	$F_{\nu}(100 \mu\text{m})$ (MJy/sr)	$W(10^3 \text{ km})$	$T(\text{K})$	$\tau \times 10^{-9}$	$e/(1 - A)$
C-G	2.278	2.098	26.2	0.41	0.15 ± 0.05	0.36 ± 0.08	0.14 ± 0.03	—	50 ± 9	210 ± 15	1.8 ± 0.2	0.6 ± 0.2
Encke	3.926	3.779	14.9	52.8	—	0.07 ± 0.01	0.06 ± 0.01	—	680 ± 71	147 ± 15	1.3 ± 0.1	0.8 ± 0.2
Gunn	2.681	2.473	22.2	0.82	0.22 ± 0.06	0.97 ± 0.08	0.55 ± 0.03	—	111 ± 25	183 ± 12	7.7 ± 0.9	0.8 ± 0.2
Kopff	1.577	0.953	38.0	0.53	1.04 ± 0.14	1.19 ± 0.20	—	—	47 ± 26	248 ± 20	4.9 ± 1.0	0.6 ± 0.2
P-W 1	1.531	1.155	41.6	0.94	0.31 ± 0.06	0.52 ± 0.06	—	—	40 ± 14	236 ± 19	2.2 ± 0.1	0.8 ± 0.2
S-W 1	6.287	6.281	9.24	0.96	—	0.11 ± 0.02	0.15 ± 0.02	0.10 ± 0.02	769 ± 127	108 ± 18	7.6 ± 1.2	1.1 ± 0.9
Tempel 1	1.517	1.149	41.9	0.29	0.36 ± 0.05	0.59 ± 0.07	0.31 ± 0.06	—	68 ± 10	227 ± 16	3.9 ± 0.1	1.0 ± 0.3
Tempel 2	1.460	1.086	44.1	0.37	2.44 ± 0.09	3.93 ± 0.14	1.54 ± 0.05	—	31 ± 1	248 ± 8	13.8 ± 0.3	0.8 ± 0.1

TABLE IV
Trail Extent and Derived Characteristics

Trails	$\Delta\theta_-$ (°)	$\Delta\theta_+$ (°)	v_{peri} (m/s)	v_{ap} (m/s)	Age ($\beta = 10^{-3}$) (Years)	Age ($\beta = \beta_{min}$) (Years)	Period (Years)	M_{trail} log(g)	dM/dT^a (IRAS)	dM/dT^a (K&K)	IRAS K&K	Dust Gas
C-G	0.1	1.1	2.4	0.6	2.6	11	6.6	11.5	13.1	12.6	3.4	4.6
Encke	13.	80.	40.	3.3	19	21	3.3	14.2	14.9	14.5	2.6	3.5
Gunn	0.3	5.9	3.0	1.6	27	74	6.8	13.2	13.8	13.4	2.7	3.6
Kopff	0.5	17.	2.9	0.9	47	158	6.4	13.1	13.5	13.5	0.9	1.2
P-W	0.2	2.6	3.0	0.7	5.5	21	6.4	11.9	13.2	12.9	1.8	2.4
S-W 1	0.0	9.6	5.2	4.7	114	148	15.	14.5	14.5	14.4	1.2	1.6
Tempel 1	1.0	6.2	4.5	1.4	14	38	5.5	12.6	13.4	13.0	2.7	3.5
Tempel 2	5.4	60. ^b	2.2	0.7	140.	665	5.3	13.9	13.7	13.4	2.2	2.9

^a The units are log(g/century).^b The Tempel 2 trail is seen to extend 37° on the IRAS Skyflux Plates; however, lower spatial resolution images constructed from the Zodiacal History File (Sykes 1988b) show the trail extending 60° of mean anomaly behind the comet (Sykes et al. 1990).

●ダストバンド(dust band)

黄道面に沿って分布するミクロンクラスの大きなダストの帯。黄緯で分類される。IRAS によって α , β , γ , E, F, G, H, J, K, M, N などの各バンドが検出されている(A,B,C,D は後にタイプIIのダストトレールとされた。I, L がないのは英語では紛らわしい文字だからだろう)。各ダストバンドはそれぞれ対を成していて(α , β , γ , E/F, G/H, J/K, M/N)、いくつかの小惑星族に関係があるらしい。検出されたダストの直径は 10~100 μ m で主に小惑星どうしの衝突によって形成されたと推定されている。

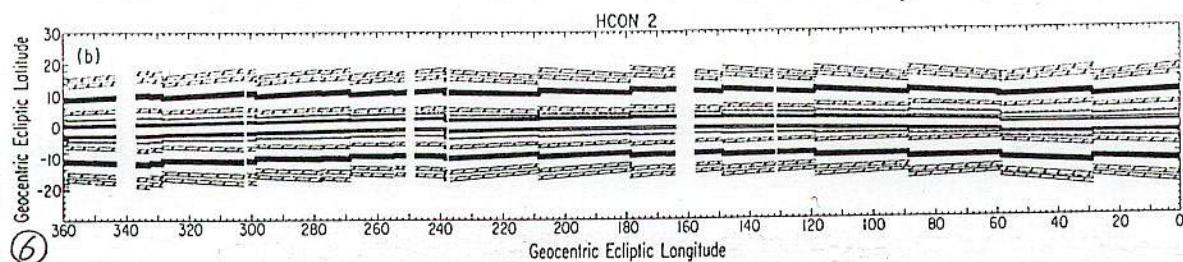


TABLE I
STRUCTURES IDENTIFIED IN ZODY IMAGES

Name	Geocentric Ecliptic Latitude (HCON 1 and 2)	Comments
α	±(0 to 2.5)	Possible association with Themis asteroid family (Sykes 1986).
β	±(1 to 3.5)	Well-defined in Skyflux Maps. Possible association with Koronis asteroid family (Sykes 1986).
γ	±(8.5 to 11.5)	Possible association with Eos asteroid family (Dermott et al. 1984).
A	3.5 to 7	Partial band (Sykes 1986). Probable trail (this Letter). The western end (HCON 2) is observed at 60° geocentric ecliptic longitude (GEL) and (HCON 3) at ~125° (longitude of Earth ~156° and ~37°, respectively). The eastern end is observed at 160° longitude (HCON 2) (not observed in HCON 3 due to death of IRAS).
B	-3.5 to -7.5	Dust trail (HCON 1 and 2). GEL 111° to 155°.
C	4 to 7	Dust trail (HCON 3). GEL 99° to 157°.
D	-3.5 to -5.5	Dust trail (HCON 3). GEL 215° to 242°.
E	4 to 6	Possible pair with F.
F	-4 to -6.5	Possible pair with E. Best resolved over GEL 270° to 360° HCON 2.
G	6.5 to 8	Possible pair with H.
H	-5.5 to -8.5	Possible pair with G. Best resolved over GEL 310° to 360° HCON 2.
J	12.5 to 15	Probable pair with band K. Possible association with Io asteroid family (Sykes 1988b).
K	-13 to -16	Probable pair with band J. Possible association with Io asteroid family (Sykes 1988b).
M	15 to 17.5	Probable pair with band N. Seen to latitude 21 (HCON 3).
N	-17 to -20	Probable pair with band M. Seen to latitude -22 (HCON 3).

<参考文献>

- 1) Eaton, N., Davies, J.K., Green, S.F., 1984, The anomalous dust tail of comet P/Tempel 2, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.211, P.15P-19P
- 2) Sykes, M.V., Lebofsky, L.A., Hunten, D.M., Low, F., 1986, The discovery of dust trails in the orbits of periodic comets, Science, Vol.232, P.1115-1117
- 3) Sykes, M.V., 1988, IRAS observations of extended zodiacal structures, Astrophysical Journal, Part 2 - Letters, Vol.334, P.L55-L58
- 4) Sykes, M.V., 1990, Zodiacal dust bands - Their relation to asteroid families, Icarus, Vol.85, P.267-289
- 5) Sykes, M.V., Lien, D.J., Walker, R.G., 1990, The Tempel 2 dust trail, Icarus, Vol.86, P.236-247
- 6) Sykes, M.V., Walker, R.G., 1992, Cometary dust trails. I - Survey, Icarus, Vol.95, P.180-210

Q: 地球軌道と交差するように ω を変える(これは変えない)

→ 任意の ω を仮定し ω_i を求める

B: " " ω を変える(ω と ω_i の変化量が最小となるように)

ω のみ変化

W: 軌道主軸線の回転により地球軌道と交差させる



ω のみ変化

輻射点推定法の比較

流星物理セミナーーキンググループ(MSS-WG) 重野好彦

MSS-91

Abstract

Predicted meteor radiant: 6 kinds of Meteor Radiant prediction methods are introduced. 4 meteor streams were predicted from 3 parent bodies (Swift-Tuttle, Phaeton and Halley). The error between the observed value and the predicted value was several degrees.

1. はじめに

母天体の軌道要素から流星群の輻射点を推定する方法が数種類報告されています。しかし、それらの論文から計算プログラムを作成することは容易ではありません。そのため、幾つかの推定方法をプログラム化し、公開しているホームページがあります[1] (Neslusan et al. 1988)。このプログラムで扱っている推定方法は以下の6種類です。このプログラムを使用して、推定結果の比較を行ったので報告します。

軌道面を 変えない	Q : 近日点距離の変化(q-adjust.)	線	[2] (Hasegawa 1990)
	B : 近日点距離と離心率の変化	[3, 4]	(Svoren et al. 1993, 4)
軌道面を 変える	W : 近日点引数の変化(軌道主軸の回転)	[5]	(Steel, Baggaley 1985)
	A : 軌道主軸の回転	[3, 4]	(Svoren et al. 1993, 4)
軌道面を 変える	H : 近日点引数と軌道傾斜角の変化(ω -adjust.)	[2]	(Hasegawa 1990)
	P : 速度ベクトルの平行移動	[6]	(Porter 1952)

2. 極大時の太陽黄経を推定した輻射点計算

上記プログラムを使用して、Swift-Tuttle, Phaeton, Halley の軌道要素から推定した輻射点と流星群の軌道要素を表1に示します。ID記号の前後に付いている「-」は近日点通過前への接近、「+」は近日点通過後への接近を表します。「SD」は地球と母天体軌道間の距離を1/1000AU単位で表したものです。表1の4流星群は、地球と母天体軌道間の距離が近い順に示しました。各表で1行目が母天体の軌道。最後行の「IMO」は、極大時に於ける観測結果です[7](Rendtel et al. 1995)。

上記プログラムでは Q法, B法, W法は、昇/降交点黄経に於ける輻射点を推定するため、地球と母天体軌道間の距離が遠い場合、実際とかけ離れた推定値となります。一方 A法, H法, P法では、推定した極大時の輻射点を求めるため、良い結果が得られています。

3. 任意の太陽黄経での輻射点計算

地球が母天体軌道にかなり接近している場合の輻射点推定は、どの方法でも良い結果が得られます。逆に、地球が母天体軌道から離れている場合の推定結果が良いかどうかが推定方法の特徴を表します。そこでプログラムを改良し、太陽黄経を任意に設定して観測結果との比較を試みました。計算方法は Q法, P法です。比較のため観測結果として IMOの以下の式を使用しました[7](Rendtel et al. 1995)。

$$\begin{array}{ll} \text{Per} & A. = 46.2 + 1.4 * (\text{S.L.} - 140.1) & D. = 57.4 + 0.18 * (\text{S.L.} - 140.1) \\ \text{Gem} & A. = 112.3 + 0.97 * (\text{S.L.} - 262.0) & D. = 32.5 - 0.08 * (\text{S.L.} - 262.0) \\ \eta \text{Aqr} & A. = 338.0 + 0.9 * (\text{S.L.} - 45.5) & D. = -1.0 + 0.4 * (\text{S.L.} - 45.5) \\ \text{Ori} & A. = 95.0 + 0.65 * (\text{S.L.} - 208.0) & D. = 16.0 + 0.11 * (\text{S.L.} - 208.0) \end{array}$$

図1～4に比較結果を示します。Per, Gemでは極大時から離れるほど、推定値が観測結果と離れていく様子が分ります。 η Aqr, Oriでは極大時に於いても地球と母天体軌道との距離が大きく離れています。それにもかかわらず、Q法では極大時及び極大前後に於いて良い一致を示しています。

4. まとめ

以上の結果から、地球と母天体軌道間の距離が0.1AU程度離れていても、数度の誤差で輻射点が推定できることが分りました。よって新彗星による流星群の予報に十分利用できます。また流星群や観測時期によって推定方法を使い分けると、より正確な輻射点推定ができることが分りました。本報で使用したプログラムは橋本岳真氏にご紹介いただきました。また長谷川一郎先生にコメントをいただきました。感謝いたします。

A: 軌道主軸回りの回転(これは変えない)(ω を ω_i 変化)

その点を極大とし ω を ω_i あてはめる

H: 太陽黄経を少しづつ変化させ「太陽・地球軌道間の距離 = 太陽・母天体軌道間の距離」となる位置を探す

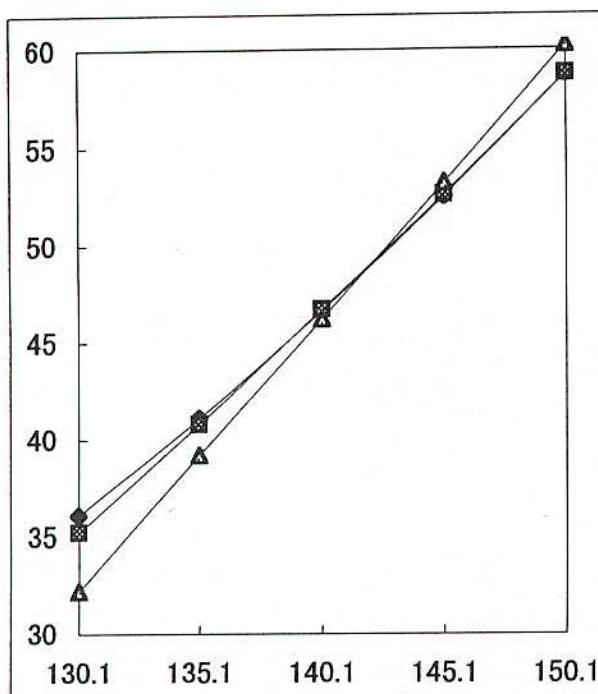
P: 地球軌道と母天体軌道の最接近点を極大とするその点の母天体の速度ベクトルをそのまま地球位置にあてはめる

[Table 1 Predicted Meteor Radiants Associated with Parent Bodies]

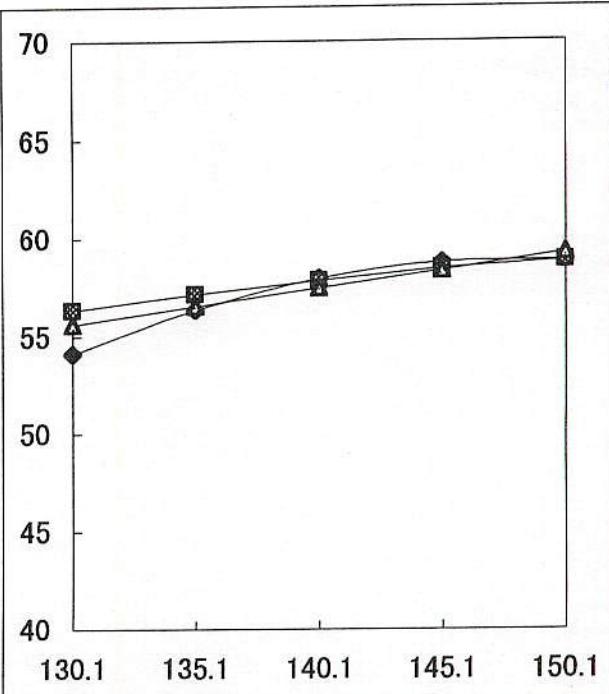
ID	DATE(UT)	S. L.	Co. Rad(2000)	SD	VG	a	e	q	ω	Ω	i
Per: 109P/Swift-Tuttle			001			26.6	0.964	0.958	153.0	139.4	113.4
Q+	20000811.799	139.4	45.8	57.7	001	59.4	26.6	0.964	0.959	153.0	139.4
B+	20000811.799	139.4	45.8	57.7	001	59.4	26.6	0.964	0.959	153.0	139.4
W+	20000811.799	139.4	46.0	57.7	001	59.4	26.6	0.964	0.958	152.7	139.4
A+	20000811.799	139.4	46.0	57.7	001	59.4	26.6	0.964	0.958	161.4	139.4
H+	20000811.678	139.3	45.8	57.7	001	59.4	26.6	0.964	0.958	152.7	139.3
P+	20000811.790	139.4	45.8	57.7	001	59.4	26.6	0.964	0.959	153.0	139.4
IMO	20000812.5	140.1	46.2	57.4							
ID	DATE(UT)	S. L.	Co. Rad(2000)	SD	VG	a	e	q	ω	Ω	i
Gem: Phaeton(3200)			022			1.3	0.890	0.140	321.8	265.6	22.1
-Q	20001217.250	265.6	115.9	31.9	104	34.1	1.4	0.890	0.157	321.8	265.6
-B	20001217.250	265.6	115.7	31.7	104	34.6	1.5	0.897	0.153	321.8	265.6
-W	20001217.250	265.6	118.0	31.1	104	33.8	1.3	0.890	0.140	325.2	265.6
-A	20001213.562	261.9	114.2	32.5	022	33.9	1.3	0.890	0.140	325.2	261.9
-H	20001214.113	262.4	114.3	31.7	024	33.7	1.3	0.890	0.140	325.2	262.4
-P	20001214.240	262.5	115.0	32.5	026	33.9	1.3	0.890	0.140	325.2	262.5
IMO	20001213.7	262.0	112.3	32.5							
ID	DATE(UT)	S. L.	Co. Rad(2000)	SD	VG	a	e	q	ω	Ω	i
η Aqr: 1P/Halley			066			17.8	0.967	0.587	111.8	58.8	162.2
Q+	20000519.486	58.8	346.0	3.8	162	67.1	21.2	0.967	0.699	111.8	58.8
B+	20000519.486	58.8	346.2	3.9	162	67.3	45.2	0.985	0.696	111.8	58.8
W+	20000519.486	58.8	349.8	4.8	162	65.8	17.8	0.967	0.587	98.4	58.8
A+	20000505.187	45.0	337.2	-1.0	070	66.0	17.8	0.967	0.587	98.6	45.0
H+	20000506.429	46.2	338.2	-3	066	65.9	17.8	0.967	0.587	98.6	46.2
P+	20000508.058	47.8	338.9	1.5	067	65.8	17.8	0.966	0.601	100.2	47.8
IMO	20000505.7	45.5	338	-1							
ID	DATE(UT)	S. L.	Co. Rad(2000)	SD	VG	a	e	q	ω	Ω	i
Ori: 1P/Halley			154			17.8	0.967	0.587	111.8	58.8	162.2
-Q	20001120.826	238.8	117.4	14.3	814	63.0	9.8	0.967	0.322	111.8	58.8
-B	20001120.826	238.8	120.7	13.3	814	61.6	2.9	0.878	0.355	111.8	58.8
-W	20001120.826	238.8	125.9	10.6	814	67.1	17.8	0.967	0.587	79.9	58.8
-A	20001019.209	206.1	93.0	15.4	159	66.6	17.8	0.967	0.587	80.5	26.1
-H	20001021.804	208.7	95.8	16.0	154	66.8	17.8	0.967	0.587	80.5	28.7
-P	20001024.066	211.0	97.9	19.3	159	66.9	17.8	0.968	0.567	82.7	31.0
IMO	20001021.1	208.0	95	16							

References

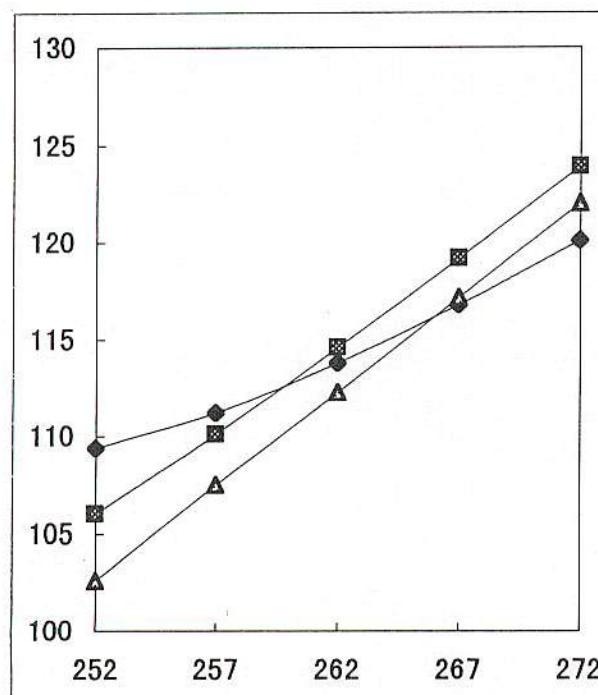
- [1] Neslusan L., Svoren J., Porubcan V., 1998, A computer program for calculation of a theoretical meteor-stream radiant, Astron. Astrophys., 331, pp. 411-413. (<ftp://auriga.ta3.sk/pub/meteors/radiant/>).
- [2] Hasegawa I., 1990, Predictions of the Meteor Radiant Point Associated with a Comet, Publ. Astron. Soc. Japan, 42, pp. 175-186.
- [3] Svoren J., Neslusan L., Porubcan V., 1993, Applicability of meteor radiant determination methods depending on orbit type. I. High-eccentric orbits., Cntrib. Astron. Obs. Skalnate Pleso, 23, pp. 23-44.
- [4] Svoren J., Neslusan L., Porubcan V., 1994, Applicability of meteor radiant determination methods depending on orbit type. II. Low-eccentric orbits., Cntrib. Astron. Obs. Skalnate Pleso, 24, pp. 5-18.
- [5] Steel D.I., Baggaley W.J., 1985, Collisions in the Solar System-I. Impacts of the Apollo-Amor-Aten asteroids upon the terrestrial planets., Mon. Not. R. astr. Soc., 212, pp. 817-836.
- [6] Poter J.G., 1952, Comets and Meteor Streams, Chapman and Hall Ltd. London.
- [7] Rendtel J., Arlt R., McBeath A., eds., 1995, Handbook for Visual Meteor Observers, IMO Monograph no. 2.



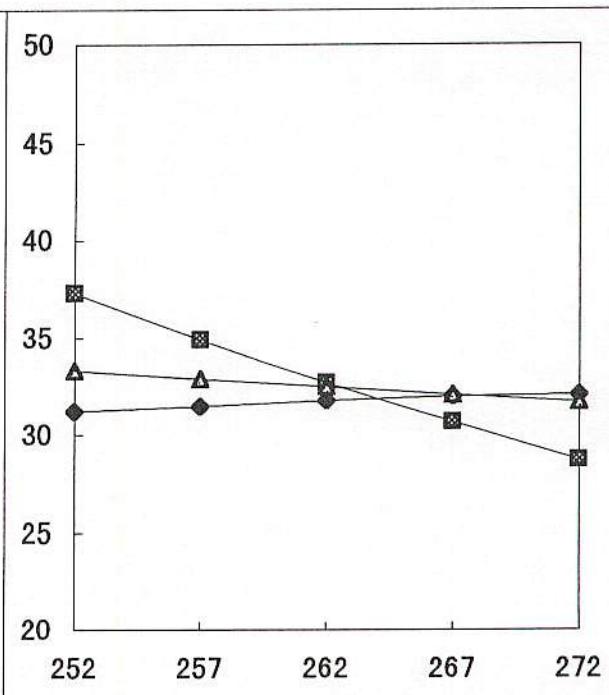
[Fig. 1-1 P per Solar-Long. : R.A.]



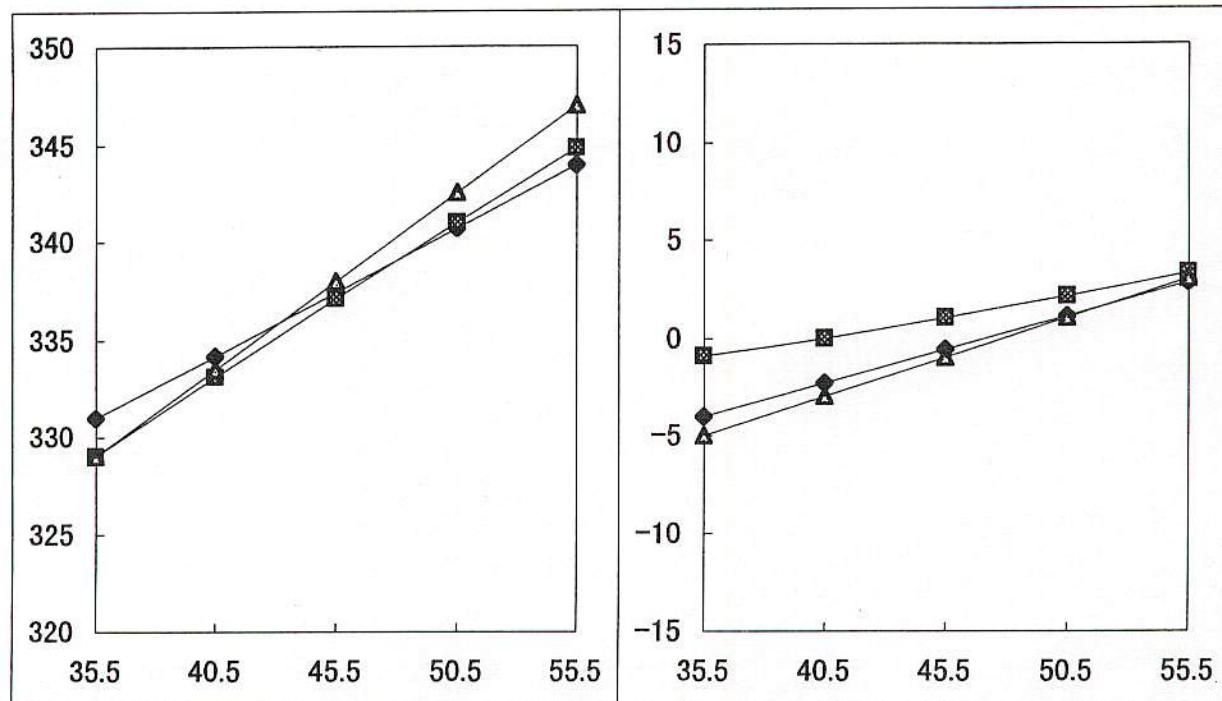
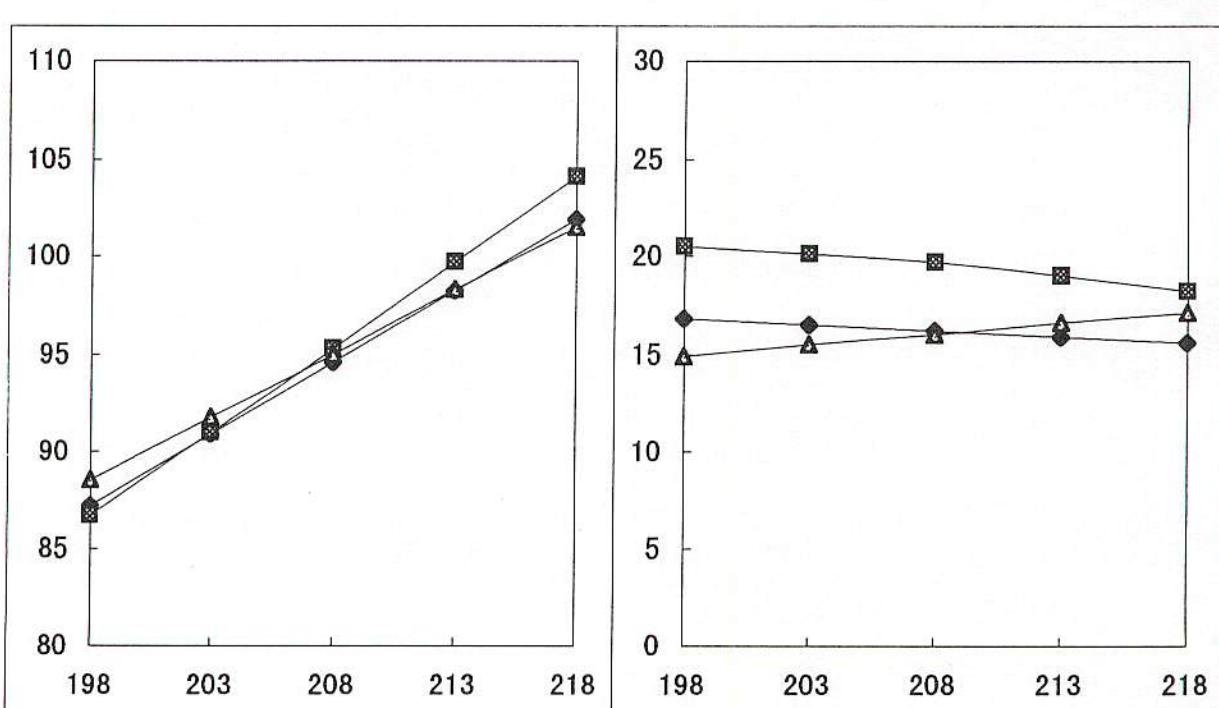
[Fig. 1-2 P per Solar-Long. : Dec.]



[Fig. 2-1 G em Solar-Long. : R.A.]



[Fig. 2-2 G em Solar-Long. : Dec.]

[Fig. 3-1 η Aq r Solar-Long. : R.A.][Fig. 3-2 η Aq r Solar-Long. : Dec.]

[Fig. 4-1 Ori Ursa Majoris R.A. vs Solar Long.]

[Fig. 4-2 Ori Ursa Majoris Dec. vs Solar Long.]

しぶんぎ群とヘール・ボップ彗星 - 木星引力によるダストの軌道変化 -

内山茂男

1. はじめに

ヘール・ボップ彗星（以下HB彗星）の軌道と木星軌道は非常に接近する。さらに、しぶんぎ群の遠日点もこの接近地点に近い。このため、HB彗星軌道上に大量のダストがあり、その一部が、木星の引力で一気にしぶんぎ群の軌道に変わってしまふんぎ群が作られたのではないかという話も出ている。

そこで、HB彗星軌道上のダストが木星の引力により、一気にしぶんぎ群の軌道に変化することが可能なのかを、エクセルを用いた数値計算によって調べてみた。さらに、木星による軌道変化の一般的な傾向傾向や、地球による軌道変化についても検討した。

2. エクセルによる計算方法の流れ

(1) HB彗星軌道要素と木星軌道要素を入力。

ここで、HB彗星軌道要素は木星接近前の軌道を用いた。

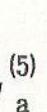
(天文ガイド1995年12月号(元期1995年11月19日)より)



ただし、T（近日点通過）は木星に接近する値を検索して、そのあたりで入力。

(2) 軌道要素からある時刻T₀におけるダストの位置と速度を求める。(3) (2)の位置と速度から、時刻T₀ + t/2におけるダストの近似位置を求める。(4) 軌道要素から、時刻T₀ + t/2における木星の位置を求める。

(5) (3)から、ダストに働く太陽引力を、(3)(4)からダストに働く木星引力を求め、



それらによって生じるダストの加速度を求める。

(6) 時刻T₀ → T₀ + t (= T₁) の間、(5)の加速度が働いているものとして、(2)(5)より、時刻T₁におけるダストの位置と速度を求める。

(7) (3)～(6)をくり返す。ただし、(3)の近似位置の計算には、前の(5)で求めた加速度も利用する。

(8) ダストが十分木星から離れたら、そのときの位置と速度から軌道要素を求める。

*計算は、木星がHB彗星の軌道に接近する300日前から300日後まで行った。計算間隔tは、木星から離れていくときには1日とし、木星に接近するにつれて、0.05日まで段階的に変化させた。

*さらにダストの近日点通過Tを変え、それぞれ軌道がどのように変化するのかを調べた。

3. 結果

表1. HB彗星軌道上のダストの軌道変化

ΔT	q	e	ω	Ω	i	a	P	降交点日心距離	
-50	0.9091	0.9914	131.96	282.44	90.41	106.01	1091	1.0973	↑ 木星よりも早く通過したダスト
-20	0.9018	0.9834	131.70	282.42	92.65	54.34	401	1.0812	1. 減速され橢円軌道になる。
-10	0.9060	0.9703	132.45	282.39	96.20	30.47	168	1.0787	2. 木星に近づいた方が周期は
-5	0.9729	0.9427	132.32	282.36	102.24	16.98	70	1.1562	短くなるが、地球軌道から
-3	1.1611	0.9004	129.58	282.34	107.22	11.65	40	1.4021	離れる。
-2	1.4955	0.8425	123.74	282.32	109.02	9.49	29	1.8769	3. 軌道傾斜角が大きくなる。
-1	2.5352	0.7401	101.62	282.32	103.61	9.75	30	3.8392	↓
0	3.6792	1.1753	62.50	282.35	81.70	-20.99	-	17.4982	# 木星に非常に接近したダスト
1	2.6626	1.3808	80.72	282.39	68.55	-6.99	-	8.1565	↑ 木星よりも遅く通過したダスト
2	1.8379	1.2110	100.25	282.41	68.77	-8.71	-	3.3431	↑
3	1.4599	1.1258	110.84	282.41	71.68	-11.60	-	2.2159	軌道傾斜角は小さくなるが、
5	1.1760	1.0638	119.95	282.41	76.56	-18.44	-	1.5852	双曲線軌道になる。
10	1.0126	1.0265	126.00	282.42	82.13	-38.24	-	1.2798	
20	0.9558	1.0109	128.44	282.43	85.45	-87.48	-	1.1802	
50	0.9309	1.0025	129.65	282.44	87.54	-378.34	-	1.1368	
HB	0.9177	0.9971	130.36	282.47	88.91	311.57	5500	1.1137	
Qua	0.978	0.661	171	284	71	: 天文観測年表より		0.983 ← ダスト降交点での地球の日心距離	

(ΔT : 木星に非常に接近したダストとのTの日数差)

4. 木星軌道の北側を通るダストの軌道変化

H B彗星の軌道は木星軌道のすぐ南側を通過し、その結果が、表1の通りである。しぶんぎ群ができるだけなく、地球軌道に交差することもなかった（惜しいものはあるが）。しかし、木星の北を通過するダストは、木星引力により地球軌道に交差する軌道ができる。そこで、H B彗星の ω ($=130.36065^\circ$) を少し変え（表2の ω_0 ）、木星軌道の北を通し、木星引力により地球軌道に交差するものを搜した。

表2. 地球軌道に交差する軌道（降交点での日心距離が 0.9833AU となるもの）

ω_0	ΔT	q	e	ω	Ω	i	$RP\alpha$	δ	V_∞	P
130.5	- 7.449	0.8413	0.9658	134.92	282.40	98.55	229.0	28.3	55.1	122
	- 0.5481	0.4464	0.9268	277.76	45.89	179.97				15
	+ 0.0395	0.8590	0.9250	317.48	102.32	113.32	190.5	-45.0	59.8	39
130.6	-10.093	0.8380	0.9749	134.48	282.42	95.81	230.7	29.1	54.2	193
	+ 4.515	0.8076	1.0492	130.62	282.36	72.45				
130.7	-11.688	0.8368	0.9788	134.33	282.43	94.62	231.4	29.5	53.8	248
	+ 6.789	0.8158	1.0299	131.62	282.36	78.82				
130.8	-12.814	0.8363	0.9812	134.29	282.44	93.89	231.9	29.8	53.5	297
	+ 8.575	0.8196	1.0217	132.11	282.36	81.44				
しぶんぎ群	0.978	0.661	171	284	71		231.1	49.4	40.5	

やはり、橢円軌道ができると軌道傾斜角が大きくなってしまい、軌道傾斜角が小さくなると双曲線軌道になる。

参考までに、これらの橢円軌道との交点を地球が通過するのは、1999年の場合は1月3日15時（J S T）頃である。ただし、木星がH B彗星軌道との最接近位置を通過したのは、最近では1996年6月29日19時（J S T）であり、これによって軌道変化させられた表2のダストが地球軌道を通過するのは1997年8月21日頃である。

5. 木星による速度変化（スイングバイ）について

ダストが木星に近づく時には、ダストを加速し、木星から遠ざかる時にはダストを減速をさせる。太陽からの引力よりも木星からの引力のほうがずっと大きい範囲では、ダストは木星に対して双曲線軌道を描くようになる。したがって、「木星に対する相対速度（木心速度）の大きさ」は、木星に近づく時と木星から遠ざかる時で等しい。

$$\Rightarrow |\vec{V}_D - \vec{V}_J| = |\vec{V}'_D - \vec{V}_J|$$

ただし、 \vec{V}_D : 木星接近前のダストの速度

\vec{V}'_D : 木星接近後のダストの速度

\vec{V}_J : 木星の速度

よって、 \vec{V}_D と \vec{V}'_D の関係は、右図のようになる。すなわち、 \vec{V}'_D の先端は、 \vec{V}_J の先端を中心とする球面上のみを移動する。

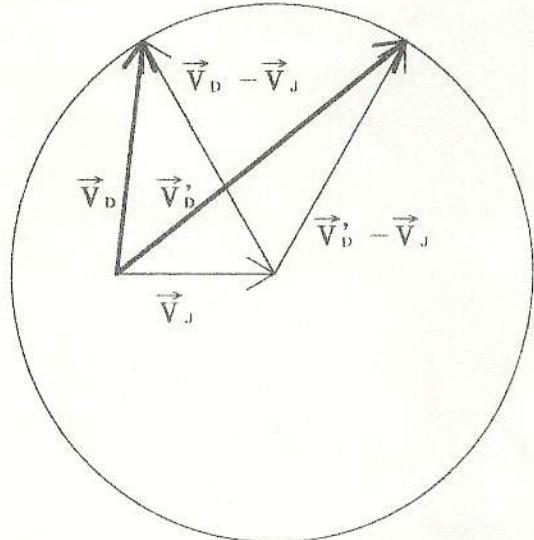
木星によるスイングバイを、2回以上行っても、 $|\vec{V}'_D - \vec{V}_J|$ は初めと変わらないので、同じことである。

\Rightarrow ダストが木星に近づくとダストの速度方向が変化する。このときの速度方向が木星の速度方向に近づけば加速、木星の速度方向から遠ざかれば減速する。

一般的には、減速するためには軌道傾斜角が大きくなる場合が多いが、軌道傾斜角が小さくなつて減速することもある。しかし、H B彗星の場合は、軌道傾斜角がほとんど 90° なので、進行方向が立体的にどの方向へ変わつても、減速するためには軌道傾斜角が大きくならざるを得ない。

6. 木星スイングバイに関する結論

しぶんぎ群はH B彗星に比べて、軌道長半径が小さく（すなわち、同じ日心距離では速度が遅く）、軌道傾斜角が小さい。このため、H B彗星の軌道から、木星の引力だけで“しぶんぎ群”的轨道を作ることはできない。



7. 補足資料 Tisserand invariant 値 (T値)

$|\vec{V}_D - \vec{V}_J|$ はあまり変化しないはずである。そこで、 $|\vec{V}_D - \vec{V}_J|^2$ を求めてみた。

ただし、簡単のために次の仮定のもとで求めてみた。

1. 木星は半径 a_J の円軌道を運行する。

2. 接近は木星軌道面に対する昇交点または降交点で起き、その時の日心距離は、 a_J である。

結果は次の通りである。

$$|\vec{V}_D - \vec{V}_J|^2 = GS \cdot \left(\frac{3}{a_J} - \frac{1}{a} - 2 \cdot \frac{(a (1 - e^2))^{1/2}}{a_J^{3/2}} \cdot \cos i \right)$$

GS : 日心重力定数、 a : 天体の軌道長半径、 e : 天体の離心率、 i : 天体の木星軌道面に対する軌道傾斜角
なお、昇交点黄緯 Ω は、あまり変化しないはずである（軌道傾斜角が小さい場合には、少し軌道が変化しただけでも Ω が大きく変化することあり）。

木星の摂動でも、値があまり変化しないといううるもので、Tisserand invariant 値 (T値) というものがある。
この T 値は、 $T = \frac{1}{a} + 2 \cdot \frac{(a (1 - e^2))^{1/2}}{a_J^{3/2}} \cdot \cos i$

であるから、上の $|\vec{V}_D - \vec{V}_J|^2$ の、定数部分を除いたものであることがわかる。

8. 木星と地球の両方に大接近し、しぶんぎ群を作った可能性

木星の引力だけではしぶんぎ群は作れない。そこで、木星と地球の両方に大接近した場合を検討した。

(1) H B彗星軌道上のダストが、木星と地球の両方に大接近した場合

ダストの拡散が進み、大流星群は作れない。

(2) H B彗星の分裂核が木星と地球に大接近し、しぶんぎ群の母彗星になった可能性。

2-A. 木星接近で減速し逆行軌道となり、地球接近で軌道傾斜角71度になる可能性。

木星接近での最も減速した場合は、 $i = 180^\circ$ (完全な逆行軌道) で、 $a = 3.55$ 。これでは減速不十分。さらに地球接近で順行にするとときに加速してしまう。しぶんぎ群は作れない。

2-B. 木星接近で加速し軌道傾斜角が小さくなり、地球接近で減速し軌道傾斜角を71度にする可能性。

木星接近時にわずかに加速するだけで、軌道傾斜角を十分小さくすることは、表3のように可能。

表3. 木星接近時の軌道変化計算例 (地球軌道に交差するもの)

ω_0	ΔT	q	e	ω	Ω	i
130.55	+ 3.031	0.7966	1.0766	129.34	282.35	62.76
130.59	+ 4.244	0.8061	1.0528	130.44	282.35	71.22

・ 地球スイングバイで十分変化させることができるか。

対地速度 v_g は、地球接近前後で変化しない。また、対地速度ベクトルの角度変化 θ は、対地速度の大きさと地球最接近距離 q_E で決まる。 $q_E = 6500[\text{km}]$ の場合の計算結果を表4に示す。

しぶんぎ群は対地速度 $v_g = 40.5[\text{km/s}]$ 。

$V_E = 30.28[\text{km/s}]$, $V_Q = 38.71[\text{km/s}]$

$\theta = 4.23^\circ$ とする

↓

1回の接近での減速の限界

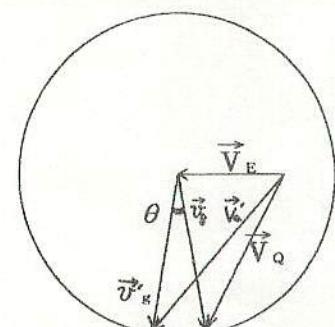
$40.80 \rightarrow 38.71[\text{km/s}]$

放物線軌道のこの点での速度 : $42.48[\text{km/s}]$

よって、1回の地球スイングバイでは十分に軌道を変化させることができない。

表4.

$v_g [\text{km/s}]$	θ°
10.0	44.68
20.0	15.28
30.0	7.31
40.0	4.23
50.0	2.74
60.0	1.92
70.0	1.42



9. まとめ

木星の引力だけで、H B彗星のダストがしぶんぎ群を作ることはできないことがわかった。また、仮にH B彗星の分裂核が存在して、木星と地球に大接近するという非常に確率の低いケースでも、しぶんぎ群を作ることはできないことがわかった。地球による軌道変化を何度も行うとしぶんぎ群の軌道を作れる可能性はあるかもしれないが、現実的ではないだろう。H B彗星としぶんぎ群が関係する可能性は非常に低いと考えられる。

1998年しし群の極大期における精密な輻射点分布と平均軌道

----- 98 しし群写真観測網の観測結果 -----

Precise radiant distribution and the averaged orbit of 1998 Leonid meteors at the time of its maximum activity

----- Results obtained by the Japanese photographic observation network -----

伊藤大雄¹⁾・司馬康生²⁾ Daiyu Ito¹⁾ and Yasuo Shiba²⁾

1) 98 しし群東日本写真観測網事務局, N M S

青森県弘前市境関字富岳 8-3-12 nfd46051@biglobe.ne.jp

2) 98 しし群西日本写真観測網事務局, N M S

兵庫県明石市相生町 2-2-7-404 kqc43540@biglobe.ne.jp

1998年11月17/18日に撮影された43流星の軌道を計算し、精度の高い25流星の輻射点と18流星の軌道要素を解析した。輻射点は、太陽黄径235°での値に換算すると全て赤経153.31~153.69°、赤緯+21.63~+22.15°の比較的の狭く南北に長い範囲に分布し、明るい流星ほど輻射点が北上する傾向が認められた。平均軌道を求めたところ、a, i, ωは母彗星に極めて近い値であったが、qは母彗星より有意に大きかった。

はじめに

1998年は、しし座流星群の母彗星であるテンペル・タットル彗星の回帰年にあたっていた。またしし座流星群は、1995~1997年には太陽黄径235.2°付近に活動のピークが検出されていたが、1998年はこの部分を日本から観測可能であったため、大出現の期待も持たれていた。日本流星研究会では、効率的に流星を多点観測して軌道データを得るために、全国のアマチュア天文家に呼びかけて「98 しし群写真観測網」を組織し、流星嵐に備えた。日本では期待された大出現はなかったものの、従来にない多数の輻射点・軌道データと、興味深い知見が得られたので報告する。

観測方法

観測網では、全国に約10個の協定観測空域を設定し、11月16/17日~18/19日に、各参加者が指定された協定観測空域を撮影することとした。観測網への参加者は58名で、150台以上のカメラが準備された。16/17日は悪天候のため、18/19日は参加者が少なかったため、共に多点観測流星は得られなかつたが、17/18日は71流星が多点(2~8地点)より撮影された。このうち、1地点以上で回転シャッターが使用され、日心軌道まで計算可能なものが50流星・138画像あった。

フィルム整約と軌道計算

写真観測網では、上記の50流星・138画像を整約の対象としたが、様々な事情から最終的に整約されたのは43流星・106画像であった。この106画像に関して、使用カメラの焦点距離は8mmから105mmまで多岐にわたつたが、50~58mmが72%を占めた。またガイド撮影率は67%、回転シャッター使用率は57%、撮影者(50音順)は今村治G、上田久、岡田光典、奥村茂実G、小和田稔、加藤(TMN)、越山展行、小関正広G、小林弘忠、阪口満栄、下田力、菅野松男、高畠徹、富岡啓行、布村克志、平川寛之、福井敬一、室石英明、薮保男、渡辺誠の各氏と伊藤であった。

フィルム整約は、上田久、大塚勝仁、奥村茂実、下田力の各氏と伊藤及び司馬が行った。比較星と流星のX, Y座標の読み取りには、主としてパソコンの画像解析ソフトを使用した。比較星の位置精度は、焦点距離が50~58mmの場合、ガイド撮影で平均30''、固定撮影で平均49''であった。

軌道計算は大塚勝仁氏が行った。流星の大気圏外速度は、個々の流星ごとに発光中の速度の経時変化から大気減速のパラメータを推定した上、観測速度に大気減速補正を行つて計算したが、精度不良等のために補正が不可能な場合は、平均観測速度を大気圏外速度とみなした。

輻射点の位置決定誤差△RPは、2地点観測の場合、次の式で評価した。

$$\Delta RP = \{(E_1 d_1 / l_1)^2 + (E_2 d_2 / l_2)^2 + 2 E_1 E_2 d_1 d_2 | \cos Q | / (l_1 l_2)\}^{0.5} / \sin Q$$

但し、 E_i , d_i , l_i はそれぞれ地点 i における比較星位置の標準誤差、

輻射点から発光点までの角距離、発光点から消滅点までの角距離

である。またQは地点1と地点2の交差角である。3、4、5地点観測の場合は、それぞれ3、6、10個の2地点観測と見なして位置決定誤差を複数個求め、最小の値を採用した。

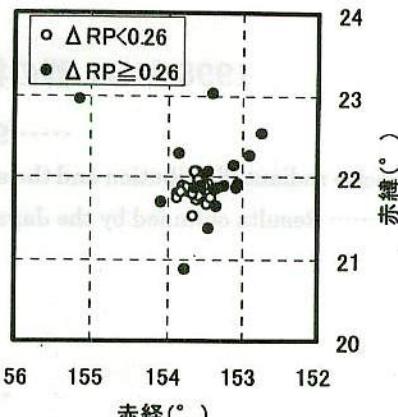
結果及び考察

(1) 輻射点

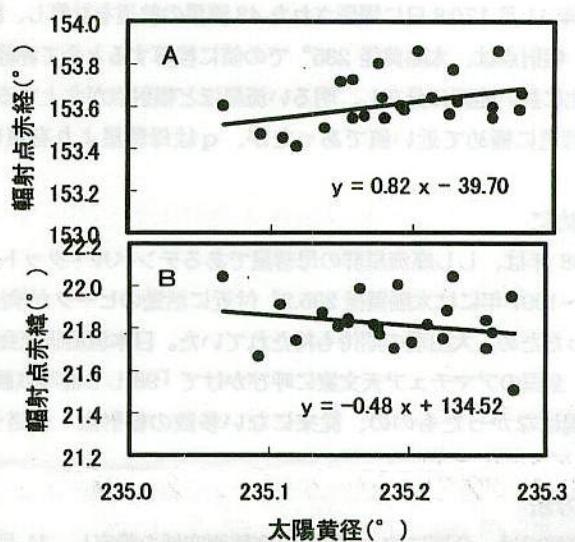
43流星全ての修正輻射点（天頂引力の補正を行った輻射点）の分布を、精度の高い25流星($\Delta RP < 0.26^\circ$)と精度の低い流星に区分の上、第1図に示した。輻射点はかなり広い範囲に散在しているが、精度の高いものに限ると、はるかに狭い範囲に集中した。この25流星の対地経路・輻射点等を第1表にとりまとめた。

ところで、我々の観測期間は5時間程度であるが、理論上、輻射点は観測期間中にわずかに南東に移動するはずである。そこで、観測期間における輻射点赤経及び赤緯の経時変化を検討したところ、第2図に示すように、輻射点は太陽黄径 1° あたり東へ 0.82° 、南へ 0.48° の割合で移動していることが伺われた。この移動速度は理論上の移動速度に近く、充分信頼できる値と思われた。

そこで、第2図で得られた輻射点の移動速度を用いて、精度の高い25流星の輻射点位置を太陽黄径 235° での位置に補正し、改めて第3図に示した。輻射点移動の補正を行うと、全ての輻射点は赤経方向に 0.35° ($153.31 \sim 153.69^\circ$)、赤緯方向に



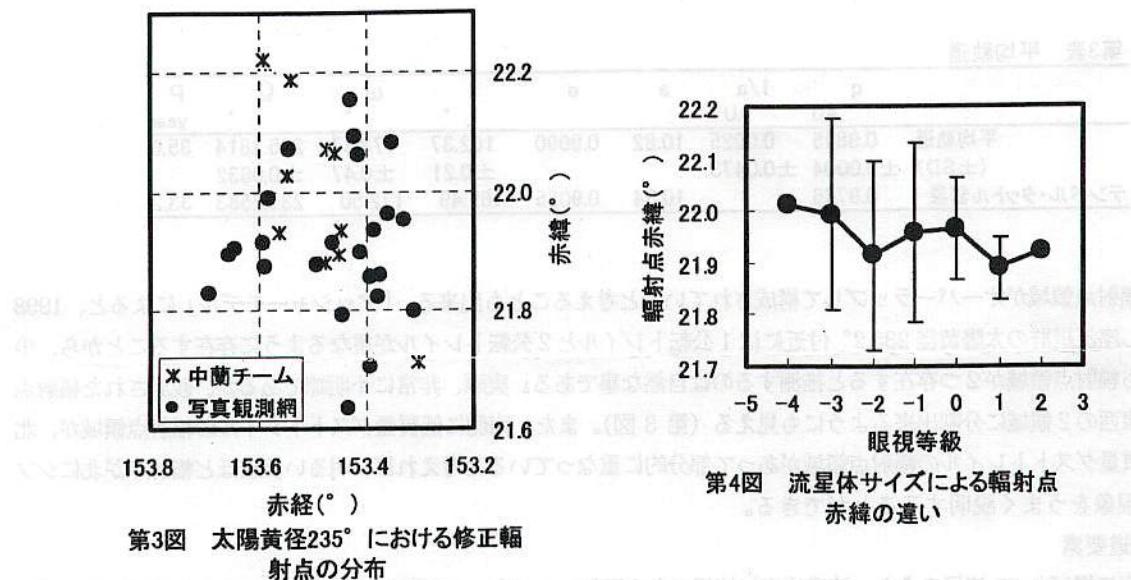
第1図 修正輻射点の分布



第2図 輻射点赤経(A)及び赤緯(B)の経時変化

第1表 対地経路・輻射点

	出現時刻(UT)					輻射点高度	眼視光度	発光高度	消滅高度	最大交差角	修正輻射点(2000)			観測地点数
	M	D	H	M	S						α	δ	誤差	
98EPN01	11	17	14	45	7	9.0	0	117.80	99.85	46.4	153.60	22.04	± 0.08	2
98EPN02	11	17	15	22	17	14.9	-2	115.53	96.84	63.3	153.47	21.66	± 0.09	2
98EPN05	11	17	15	44	47	20.2	-1	114.23	101.21	91.9	153.45	21.91	± 0.11	4
98EPN08	11	17	15	59	0	22.1	0	115.95	98.59	67.8	153.41	21.74	± 0.16	2
98EPN10	11	17	16	25	20	28.2	0	115.02	96.52	94.5	153.50	21.87	± 0.11	3
98EPN12	11	17	16	53	13	33.0	1	117.99	99.23	95.1	153.54	21.82	± 0.11	3
98EPN13	11	17	17	4	37	35.7	-2	114.08	95.59	96.2	153.55	21.98	± 0.05	4
98EPN14	11	17	17	19	4	37.1	2	113.14	100.76	79.1	153.80	21.81	± 0.26	2
98EPN15	11	17	17	23	9	39.5	0	112.74	97.87	50.0	153.64	21.79	± 0.26	2
98EPN20	11	17	17	39	34	41.8	1	112.05	100.43	111.5	153.60	21.70	± 0.09	3
98EPN21	11	17	17	42	56	42.8	0	114.39	92.16	10.6	153.58	22.02	± 0.14	2
98EPN22	11	17	17	43	39	43.2	0	113.85	93.46	77.7	153.58	22.00	± 0.16	3
98EPN23	11	17	17	58	1	45.5	0	113.85	93.61	77.5	153.86	21.73	± 0.22	3
98EPN25	11	17	18	12	47	49.0	-2	115.70	94.16	89.4	153.64	21.81	± 0.05	2
98EPN28	11	17	18	30	12	51.6	0	120.84	101.64	38.3	153.56	21.75	± 0.15	3
98EPN32	11	17	18	38	57	53.0	-1	116.27	95.07	37.0	153.62	22.04	± 0.19	4
98EPN34	11	17	19	13	54	61.2	-7	130.14	79.04	79.2	153.54	21.83	± 0.09	3
98EPN35	11	17	19	14	23	61.4	-3	129.03	92.69	91.3	153.59	21.70	± 0.06	5
98EPN37	11	17	19	20	10	62.0	0	115.88	96.32	90.9	153.86	21.78	± 0.09	2
98EPN39	11	17	19	41	53	65.1	-3	114.22	86.51	83.3	153.58	21.95	± 0.20	3
98EPN40	11	17	19	43	25	66.9	-1	117.33	95.45	37.1	153.66	21.50	± 0.21	2
98WPN15	11	17	16	42	5	26.7	-3	122.37	84.77	24.6	153.71	21.80	± 0.10	3
98WPN18	11	17	16	52	0	29.1	1	116.49	95.38	86.7	153.72	21.84	± 0.16	2
98WPN24	11	17	17	24	45	37.9	-1	119.56	94.43	39.5	153.54	21.77	± 0.14	2
98WPN30	11	17	18	33	5	48.9	-4	118.97	85.19	80.9	153.77	21.88	± 0.16	3



第3図 太陽黄径 235° における修正輻射点の分布

0.52° ($+21.63 \sim +22.15^{\circ}$) の比較的狭く南北に長い領域に分布した。平均輻射点位置は赤経 $153.47 \pm 0.11^{\circ}$ 、赤緯 $+21.92 \pm 0.12^{\circ}$ と計算された。この平均輻射点位置や輻射点集中領域の形状は、当夜中国で観測した中国・オランダ流星研究会合同チーム（以下中蘭チーム）の報告とほぼ一致した。

次に、流星のサイズに依存した輻射点シフトを検討するため、眼視等級別に輻射点赤緯を集計した結果を第4図に示した。中蘭チームは、明るい流星ほど輻射点が北にシフトする傾向があると報告しているが、我々の観測でも、-4等から2等の範囲において、不明瞭ながら同じ傾向が認められた。なお、眼視等級による輻射点の東西方向へのシフトは明らかでなかった。

今回我々が観測した $0.35 \times 0.52^{\circ}$ という輻射点領域の広がりは、IAUに登録されている前回回帰時の広がりより明らかに小さい。また、中蘭チームは輻射点集中領域から 1° 程度離れた場所にまで 2~3 個の輻射点が散在する結果を得ているが、我々の場合、輻射点が集中領域から外れるのは精度が低い流星に限られていた。このように海外で得られた輻射点領域が我々より大きい原因は明らかでないが、観測精度の低い流星も含めて議論されるためかもしれない。

一方、日本で写真観測された 1991 年及び 1992 年のペルセウス座流星群突発出現や、1996 年のしし座流星群サブピークの輻射点領域と比べると、今回得られた輻射点領域は明らかに大きい上、不規則な形状を呈していることから、

第2表 速度と軌道要素

	速度			速度決定使用 切断数	軌道要素				
	V _G km s ⁻¹	V _H km s ⁻¹	V _∞ km s ⁻¹		q AU	1/a AU ⁻¹	I °	ω °	Ω °
98EPN01	70.14	40.89	71.35	71	0.9842	0.1383	161.94	171.97	235.0666
98EPN02	70.54	41.22	* 71.75	16	0.9843	0.1074	162.69	172.13	235.0931
98EPN05	70.13	40.85	71.35	54	0.9847	0.1416	162.23	172.41	235.1092
98EPN08	70.72	41.40	* 71.93	25	0.9848	0.0904	162.62	172.61	235.1193
98EPN10	70.72	41.43	* 71.91	33	0.9848	0.0881	162.38	172.57	235.1379
98EPN12	70.28	40.99	* 71.46	36	0.9845	0.1287	162.35	172.24	235.1577
98EPN13	71.36	42.08	* 72.52	74	0.9850	0.0266	162.29	172.95	235.1659
98EPN20	70.26	40.56	71.42	16	0.9842	0.1317	162.50	172.01	235.1906
98EPN28	70.15	40.85	* 71.24	26	0.9845	0.1418	162.43	172.25	235.2260
98EPN32	71.56	42.29	72.63	26	0.9851	0.0069	162.19	173.10	235.2323
98EPN34	71.50	42.20	* 72.52	35	0.9851	0.0157	162.56	173.12	235.2568
98EPN35	71.30	41.99	* 72.32	64	0.9848	0.0356	162.69	172.72	235.2569
98EPN37	70.19	40.92	* 71.22	15	0.9837	0.1359	162.21	171.52	235.2609
98EPN39	70.47	41.19	* 71.47	30	0.9850	0.1105	162.15	172.81	235.2762
98WPN15	70.53	41.25	* 71.73	54	0.9839	0.1047	162.32	171.80	235.1499
98WPN18	71.19	41.91	* 72.37	23	0.9842	0.0434	162.38	172.13	235.1571
98WPN24	70.84	41.54	72.01	15	0.9847	0.0779	162.54	172.52	235.1801
98WPN30	70.14	40.88	* 71.27	10	0.9840	0.1394	162.10	171.78	235.2283

* : 大気減速を補正

第3表 平均軌道

	q	1/a	a	e	I	ω	Ω	P
	AU	AU ⁻¹						year
平均軌道	0.9845	0.0925	10.82	0.9090	162.37	172.37	235.1814	35.6
(±SD)	±0.0004	±0.0473			±0.21	±0.47	±0.0632	
テンペル・タットル彗星	0.9766		10.34	0.9055	162.49	172.50	235.2583	33.2

複数の輻射点領域がオーバーラップして構成されていると考えることも出来る。「アッシュヤーモデル」によると、1998年のしし座流星群の太陽黄径 235.2° 付近には 1 公転トレイルと 2 公転トレイルが重なるように存在することから、少なくとも輻射点領域が 2 つ存在すると推測するのは自然な事である。実際、非常に不明瞭であるが、観測された輻射点領域は東西の 2 領域に分割出来るようにも見える（第 3 図）。また、南側に低質量ダストトレイルの輻射点領域が、北側に高質量ダストトレイルの輻射点領域があつて部分的に重なっていると考えれば、明るい流星ほど輻射点が北にシフトする現象をうまく説明することができる。

（2）軌道要素

第 1 表に掲げた 25 流星のうち、速度決定に使用できる回転シャッターの切断数が 10 個以上ある 18 流星について、軌道要素を第 2 表に示した。表に掲げた 18 流星のうち、5 流星は大気圏外速度の算出に際して、大気減速の補正を行わなかった。また、18 流星の平均軌道要素を求め、母彗星と比較して第 3 表に示した。平均軌道要素のうち、近日点距離 q (0.9845 ± 0.0004 AU) は母彗星のそれ (0.9766 AU) より有意に大きかった。この点については、中蘭チームの観測でも、1996 年の日本の観測でも同じ結果が得られている。軌道半長径の逆数 $1/a$ (0.0925) は、変動係数が 51% にも達し観測精度の向上が望まれるが、これから計算される軌道周期は 35.6 年で、母彗星のそれ (33.2 年) に極めて近かった。軌道傾斜角 i や近日点引数 ω は、共に母彗星のそれより 0.1° 小さかったが、有意な差ではなかった。

ID	a	i	ω	飛来船		距離		
				用語式	英語	m	km	km
1998-D23	18.17	80.50	200.0	235.0	17	28.0	28.0	11.0
1998-D25	61.57	68.30	200.0	235.0	31	35.1*	35.1	16.0
1998-D26	18.17	68.30	200.0	235.0	32	35.1*	35.1	16.0
1998-D27	18.17	68.30	200.0	235.0	33	35.1*	35.1	16.0
1998-D28	18.17	68.30	200.0	235.0	34	35.1*	35.1	16.0
1998-D29	18.17	68.30	200.0	235.0	35	35.1*	35.1	16.0
1998-D30	18.17	68.30	200.0	235.0	36	35.1*	35.1	16.0
1998-D31	18.17	68.30	200.0	235.0	37	35.1*	35.1	16.0
1998-D32	18.17	68.30	200.0	235.0	38	35.1*	35.1	16.0
1998-D33	18.17	68.30	200.0	235.0	39	35.1*	35.1	16.0
1998-D34	18.17	68.30	200.0	235.0	40	35.1*	35.1	16.0
1998-D35	18.17	68.30	200.0	235.0	41	35.1*	35.1	16.0
1998-D36	18.17	68.30	200.0	235.0	42	35.1*	35.1	16.0
1998-D37	18.17	68.30	200.0	235.0	43	35.1*	35.1	16.0
1998-D38	18.17	68.30	200.0	235.0	44	35.1*	35.1	16.0
1998-D39	18.17	68.30	200.0	235.0	45	35.1*	35.1	16.0
1998-D40	18.17	68.30	200.0	235.0	46	35.1*	35.1	16.0
1998-D41	18.17	68.30	200.0	235.0	47	35.1*	35.1	16.0
1998-D42	18.17	68.30	200.0	235.0	48	35.1*	35.1	16.0
1998-D43	18.17	68.30	200.0	235.0	49	35.1*	35.1	16.0
1998-D44	18.17	68.30	200.0	235.0	50	35.1*	35.1	16.0
1998-D45	18.17	68.30	200.0	235.0	51	35.1*	35.1	16.0

2201 Oljato のダストトレイルと χ Ori 群

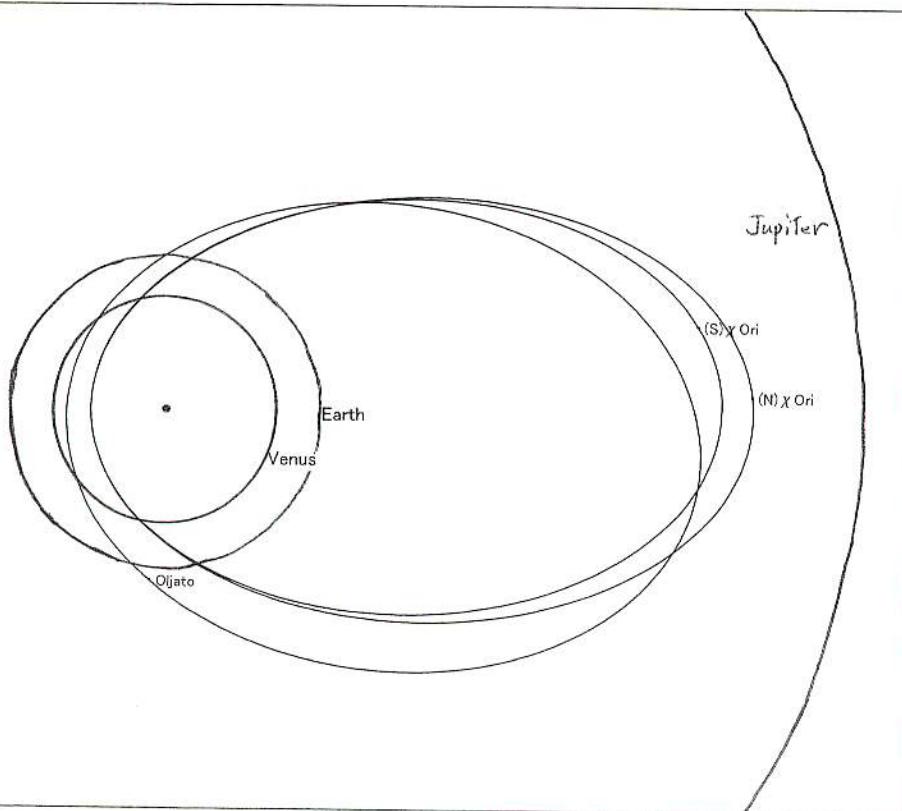
橋本岳真

ダスト・トレイルが撮影された彗星 2004年9月14日現在

2P/Encke (エンケ)	67P/Churyumov-Gerasimenko (チュリュモフ・グラシメンコ)
6P/d'Arrest (ダレスト)	81P/Wild 2 (ヴィルド第2)
7P/Pons-Winnecke (ポン・ウィンネック)	94P/Russell 4 (ラッセル第4)
9P/Tempel 1 (テンペル第1)	116P/Wild 4 (ヴィルド第4)
10P/Tempel 2 (テンペル第2)	118P/Shoemaker-Levy 4 (ショーメーカー・レビー第4)
22P/Kopff (コブフ)	122P/de Vico (デヴィコ)
29P/Schwassmann-Wachmann 1 (シュワスマン・ワハマン第1)	123P/West-Hartley (ウェスト・ハートレイ)
36P/Whipple (ホップブル)	127P/Holt-Olmstead (ホールト・オルムステッド)
40P/Vaisala 1 (ヴァイサラ第1)	155P/Shoemaker 3 (ショーメーカー第3)
53P/van Biesbroeck (ファンビースブルック)	157P/Tritton (トリトン)
57P/du Toit-Neujmin-Delporte (ドゥトイット・ニエウミン・デルポルト)	2201 Oljato (オルジャイト) ※小惑星
65P/Gunn (ガン)	P/2003 S2 (ニート)

Comet	Space-based Detection	Ground-based Detection	References
2P/Encke	IRAS, ISO	KPNO 2.3m	1, 3, 7
7P/Pons-Winnecke	IRAS	-	1
9P/Tempel 1	IRAS	-	1
10P/Tempel 2	IRAS	-	1
22P/Kopff	IRAS, ISO	Kiso 105cm Schmidt, Palomar 200"	1, 2, 4, 8
29P/Schwassmann-Wachmann 1	IRAS	-	1
65P/Gunn	IRAS	-	1
67P/Churyumov-Gerasimenko	IRAS	Palomar 200"	1, 5
81P/Wild 2	-	Kiso 105cm Schmidt	6
122P/de Vico	Ulysses and Pioneer (indirectly)	-	10
2201 Oljato	Pioneer (indirectly)	-	9

(1) Sykes & Walker 1992 (2) Davies *et al.* 1997 (3) Reach *et al.* 2000 (4) Ishiguro *et al.* 2002 (5) Reach *et al.* 2003 (6) Ishiguro *et al.* 2003 (7) Lowry *et al.* 2003 (8) Lowry & Weissman 2003
 (9) Russel 1990 (10) Jones *et al.* 2003



[2201 Ojato & Ζ Ori 対の関係を指摘した論文]

Drummond, J. D., 1982

Babadzhanov, P. B., and Obrubov, Yu. V., 1983

Olsson-Steel, D., 1988

Hasegawa, I., 1992

極大 12/10

Meteor Showers: A Descriptive Catalog

	ω	Ω	i	q	e	a	α	δ	VG
N.	275.5	261.0	2.4	0.528	0.739	2.02	82 +23	23	
S.	101.5	77.9	6.0	0.460	0.798	2.28	88 +20	24	
.....									
N1964	93.7	78.6	4.6	0.556	0.70	1.852	113 +33	35	(Gem)
S1973	109.0	77.5	2.6	0.420	0.765	1.790			
S1976	278.7	257.5	0.2	0.515	0.711	1.783			
Ojato	96.2	76.6	2.5	0.623	0.713	2.17			

2004年のポン・ワインネック流星群の予報に至った経緯

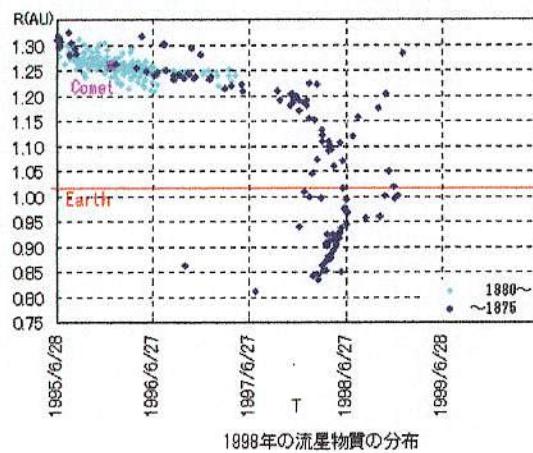
佐藤 幹哉 (F A S 府中天文同好会・日本流星研究会)

2004年6月23日、ポン・ワインネック流星群が突発出現した。その規模は、前回出現した1998年と比較すると小規模であったが、まとまった出現は6年ぶりであった。

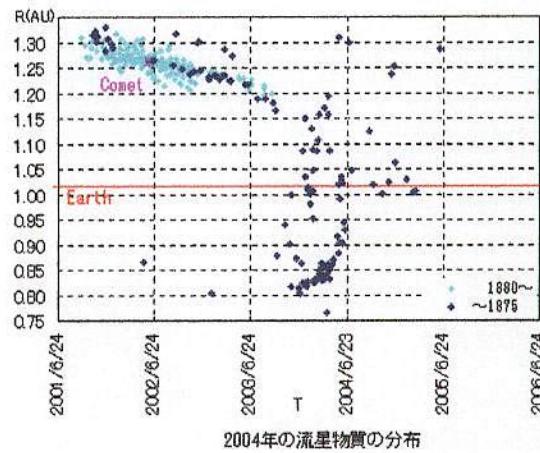
今年の出現については、私を含め世界で数名の研究者により、ある程度の出現が予報されていた。今回、私が2004年のポン・ワインネック流星群の出現を予報するに至った経緯について、その概略を簡単に発表する。

1. Excelによる概略計算 (HP掲載 2001.6)

本群の1998年の大出現は、当時誰にも予想できない出現であった。また1998年はジャコビニ群が予想以上に大出現し、アッシャーらによるしし群の予報手法が話題になった。その中で、まず表計算ソフト「Excel」(マイクロソフト)を使用し、木星による摂動から出現予報ができるか、検討を開始した。



1998年の流星物質の分布



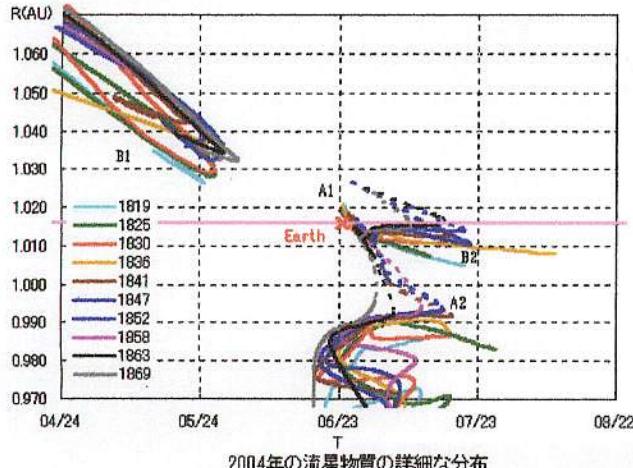
2004年の流星物質の分布

X軸：降交点通過時刻(T) Y軸：降交点通過時の太陽との距離(r)

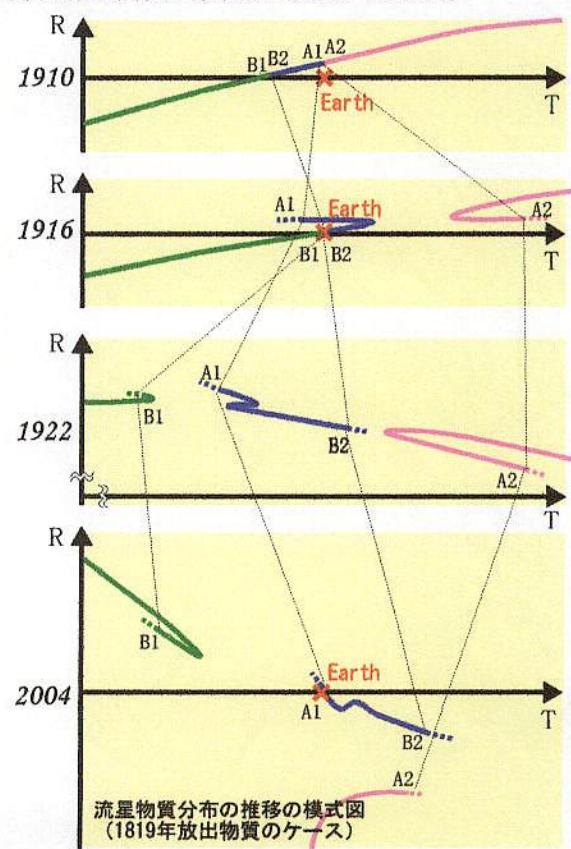
結果から、彗星よりも2年ほど遅れて周回し、地球軌道付近に分布する流星物質の存在が示された。これが1998年の大出現につながったと推測された。また2004年もほぼ同様の分布で、同様の出現が期待されるものであった。

2. NIPEによる詳細計算 (HP掲載 2003.12)

続いてさらに良い精度での計算を行うため、数値積分による惑星シミュレーションソフト「NIPE」を取り入れた。この結果、2004年に地球に接近する物質は、1910年および1916年に地球へ接近し、地球の摂動で乱されている部分だと判明した。このため物質の分布が引き延ばされており、大出現になる可能性は疑わしいと判断された。しかし2004年6月23日宵～夜半の出現は期待される結果を得た。



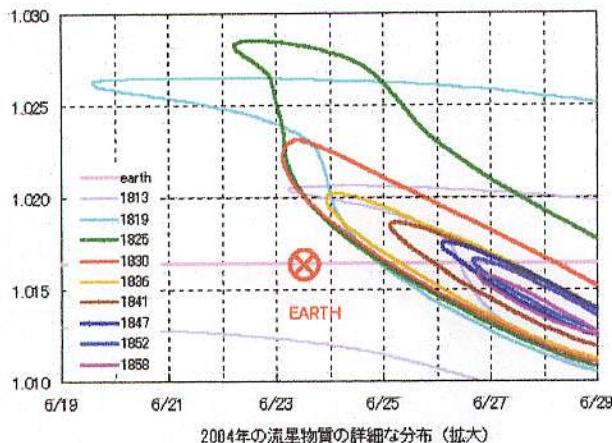
2004年の流星物質の詳細な分布



流星物質分布の推移の模式図
(1819年放出物質のケース)

3. INTEGRATによる詳細計算 (HP掲載 2004.5)

その後、同様の精度で計算ができる「INTEGRAT」(小惑星軌道要素の元期変換ソフト)を入手した。「NIPE」よりも数倍の速度が出るようになったため、より詳細な計算を行った。



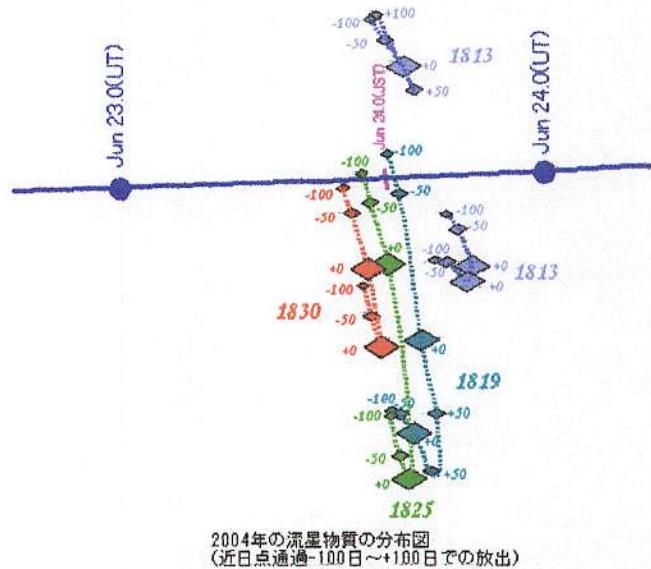
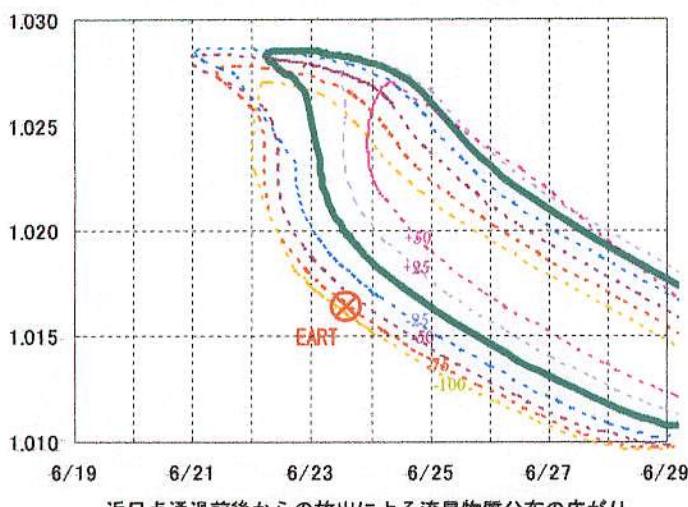
放出年	放出速度 [m/s]	日付	時刻 (JST)	距離 [AU]	輻射点		速度 [km/s]
					α	δ	
1830	8.155	6/23	22:45	+0.0033	223.0	+47.1	14.14
1825	8.834	6/23	23:46	+0.0031	223.0	+47.0	14.13
1819	10.377	6/24	01:32	+0.0062	223.4	+47.2	14.10
1813	13.290	6/24	04:32	+0.0034	223.1	+46.9	14.10

結果、1813年～1830年の4放出で地球軌道と接近することが判明した。各トレールの軌道面を地球が通過する時刻は、6月23日22時～24日4時台となった。

また1836年以降も、分布の広がり次第では出現する可能性があると思われた。

4. 近日点通過前後の放出の検討 (HP掲載 2004.6)

これまでの方法の結果では、流星物質が地球に遭遇する証明にならない。このため近日点の前後からの放出を行い、流星物質の分布の広がりを推定した。放出方向は、彗星の運動方向とその真逆方向(軌道の接線方向)とした。



近日点通過前後の放出による流星物質分布の広がり
(1825年のケース)

2004年の流星物質の分布図
(近日点通過-100日～+100日での放出)

放出年 ※1	放出時期 [日]	放出速度 [m/s]	予想極大 (JST)	太陽黄経 (J2000.0)	α	δ	速度 [km/s]	活動度 ※2
1836	-200	17.5	6/23 20:26	92.273	222.38	46.78	14.13	8.4%
1830	-104.59	13.57	6/23 21:30	92.315	222.47	46.81	14.14	21.9%
1825	-74.04	12.72	6/23 22:45	92.365	222.43	46.75	14.13	30.4%
1819	-59.35	13.81	6/24 00:31	92.435	222.45	46.71	14.12	39.8%

※1：近日点通過の年（実際の放出年は前年となるものがある）

※2：近日点通過距離を基準にした放出時期における彗星の推定活動度（距離の二乗に反比例すると仮定）

この結果、近日点通過前に放出させた場合、より地球と接近するようになることがわかった。この結果より、出現規模の推定は難しいが、23日の本群の出現は確実と推測された。また極大と推定される時刻は表の通りであった。(1836年については前日にNMS同報に追加して報告。)

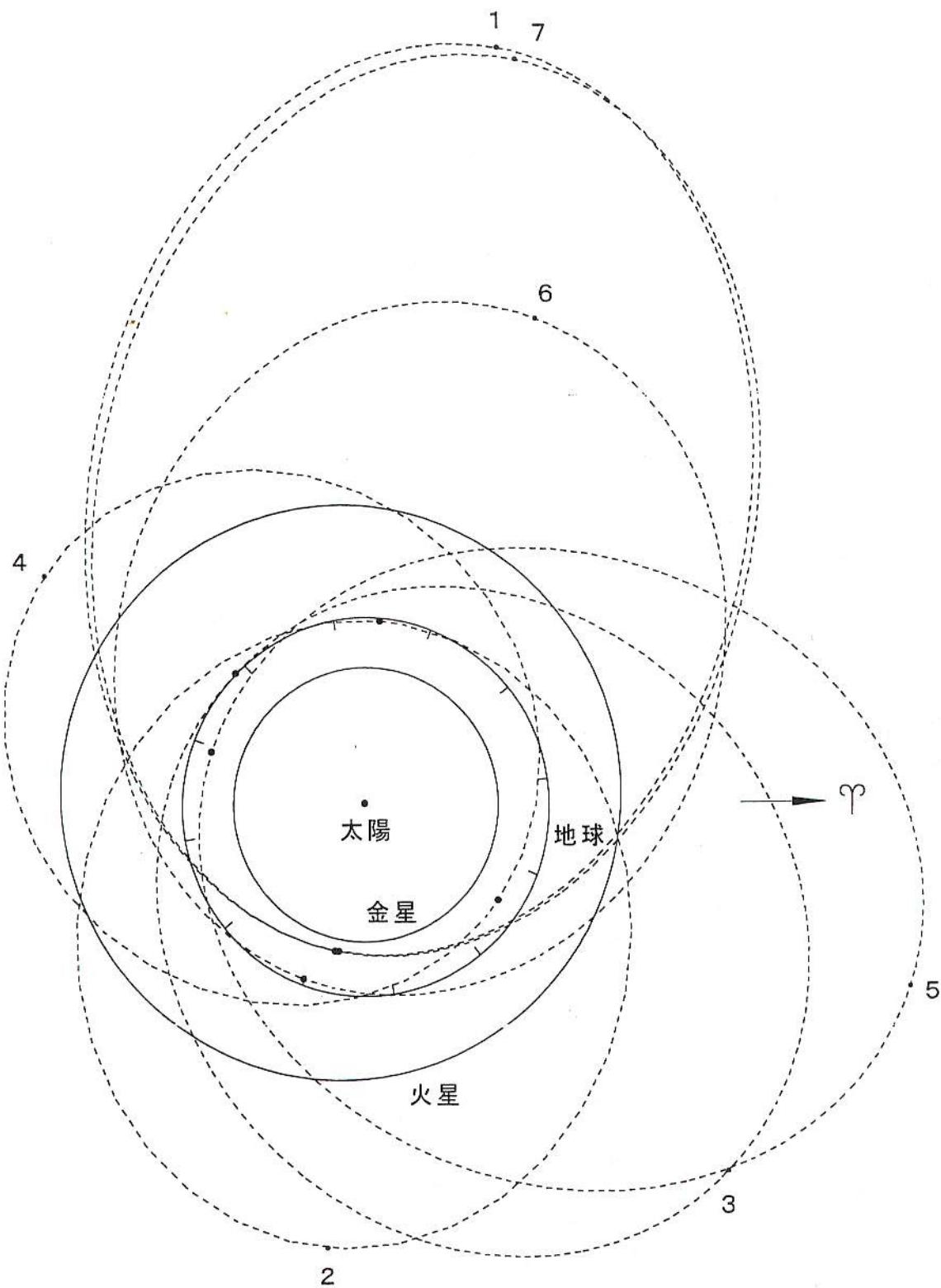
当日は日本を中心に本群の中規模な出現が観測された。薄明時から流星は流れはじめ、翌24日1時台まで活動は継続した。活動は21～22時台が活発であったが、明瞭な極大は得られなかった。これらの観測結果と本方法による予報を比較すると、時間帯については、およそ予報された範囲で流星活動があった。このことより本方法が本群、あるいは本群と似たタイプの流星群(ジャコビニ群など)の予報に有効であると判断された。

今後、3次元的な放出モデルの検討、より詳細な摂動計算(本方法では当日0hUT～出現時の摂動が含まれない)、光圧など重力以外の効果などの課題が克服されれば、より精度の良い予報計算が可能になると思われる。

2004年7月4日
No. 107回 流星物理セミナー
長崎川一郎

隕石、軌道

No.	1	7	2	3	4	6	5
名稱	Pribram	Neuschwanstein	Lost City	Innisfree	Peekskill	Moravka	Tagish Lake
落下時	1959年4月久82日	2002年4月6,85日	1970年1月4,09日	1977年2月5日	1992年10月9,99日	2000年5月6,49日	2000年1月18,20日(世界時)
落下地	4E	オーストリア・アルプス	アメリカ・カナダ・メキシコ	カナダ・アイルランド	ニューヨーク州	4E, 地下深12452m	カナダ・ブリティッシュ・コロンビア州・カナダ
軌道長軸	192°	192°	315°	7°	209°	250°	89.9°
速度 V	+17	+20	+39	+67	-29	+55	+29.8
軌道半長径 a	17.4	17.5 km/s	9.2	9.4	10.2	19.6	15.8 km/s
離心率 e	0.423	0.403	1.659	1.879	1.50	1.853	2.0 AU
近日点距離 q	0.674	0.670	0.417	0.473	0.41	0.470	0.56
遠日点距離 Q	0.789	0.793	0.968	0.990	0.886	0.982	0.885 AU
周期 P	4.05	4.01	2.35	2.77	2.12	2.724	3.14 AU
	3.76	3.73	2.14	2.57	1.84	2.52	2.85 年
近日角距 w	241.7	241.1	161.2	178.0	308°	203.5	223.9
昇交點黃經 Ζ	17.8	16.8	283.7	317.5	17.0	46.3	297.9
軌道傾斜角 i	10.5	11.4	12.0	12.3	4.9	32.2	2.0
近日点 姿勢 L	259.1	257.4	85.3	135.5	325.1	246.5	161.8
赤緯 B	-9.2	-10.0	+3.8	+0.4	-3.9	-12.3	-1.4
日心距離 r _{JL}	1.939	1.959	2.264	2.766	0.997	2.538	2.315 AU
r _{SP}	1.001	1.001	0.983	0.990	1.671	1.009	0.984 AU
備考	H5 普通球粒隕石 4個, 5.5kg	E6 球粒隕石 1.8kg 地表	普通球粒隕石 H5 9.8kg, 22x17x14 6.6, 18x14x10 0.6, 8x6x4 0.3, 6x6x2	普通球粒隕石 L5 4.6kg	H6 12.6kg	6個, 1.4kg H5-6 普通球粒隕石 地表, 七才隕石	~10 kg, 敷石層、 普通球粒隕石, CI2 東方, 人工隕石 (4183) Cuno 二周運行?
	Bull. Astr. Czech., 12, 21, (1961) Meteorite, Nov, 2002	Prairie Photographic Network JGR, 60復二排出 J. Geophys. Res. 76, 4050, (1971)	JRAS Canada, 72, 15 (1978)	Nature, 1994 Feb. 17, P-624		Meteoritics & Planet. Sci. Vol. 33, No. 7	(A.Terentjeva, S. Barabash WGN 32: 2 (2004), 60 Lat-Syn)



1 Pribram 1959 Apr. 7

2 Lost City 1970 Jan. 4

3 Innisfree 1977 Feb. 5

4 Peekskill 1992 Oct. 9

5 Tagish Lake 2000 Jan. 18

6 Moravka 2000 May 6

7 Neuschwanstein 2002 Apr. 6

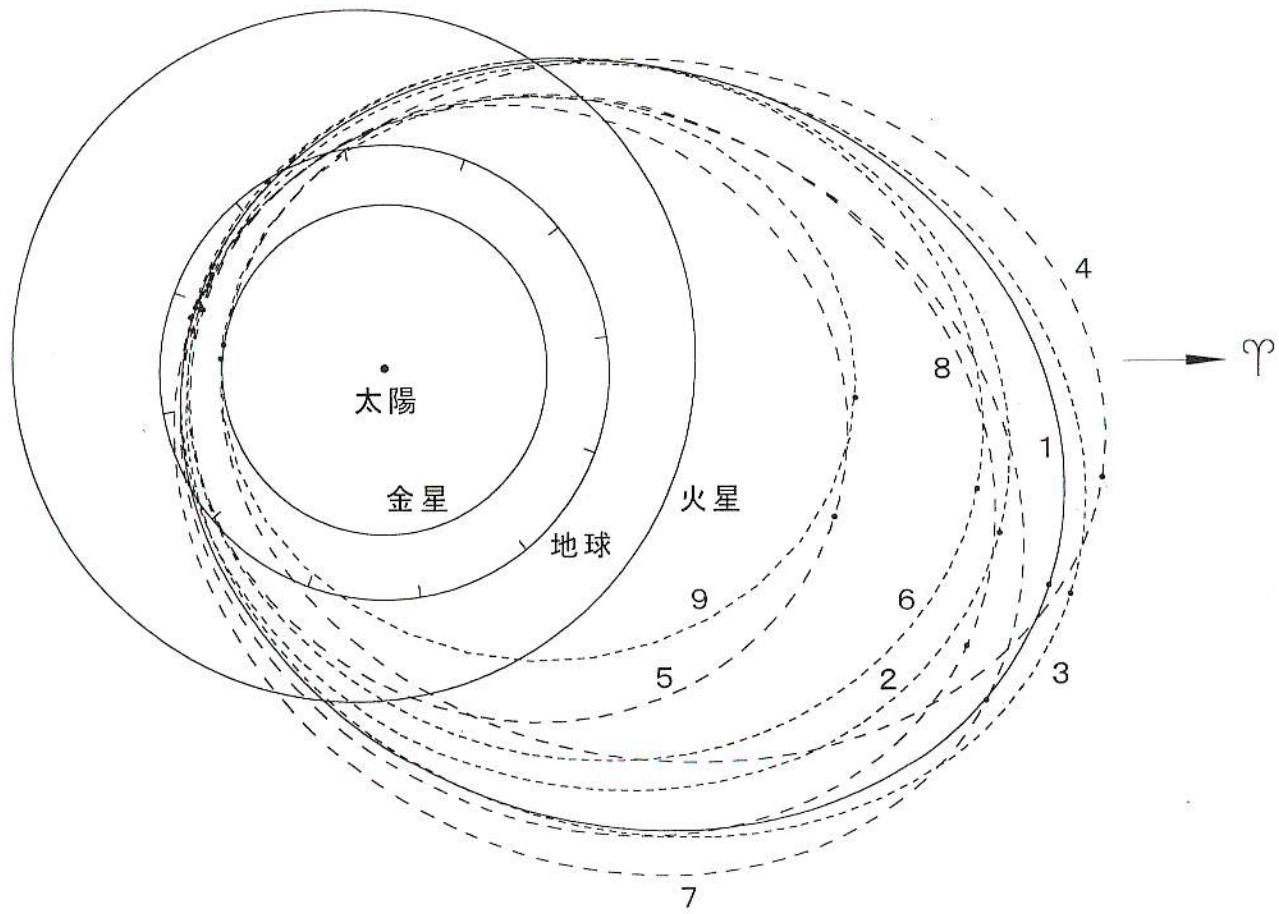
Pribram + Neuschwanstein (P. - N.)

Year	T	ΔT	g	Δg	a	Δa	L	ΔL	B	ΔB	r_{sp}	Δr_{sp}
21.36	P. May 4.1 N. May 15.7	+11.6	0.932 0.961	+0.029 2.418 2.414	-0.004 -0.006		238.1 237.8	-0.3 +2.9	+3.6 -0.7	-0.7	0.937 0.964	+0.027
28.87	P. Nov. 11.0 N. Nov. 13.7 (3.75)	+2.7	0.931 0.961	+0.030 2.419 2.413	-0.006 (P=3.75)		238.0 237.7	-0.3 +2.9	+3.6 -0.7	-0.7	0.936 0.964	+0.028
32.62	P. Aug. 14.0 N. Aug. 12.5 (3.73)	-1.5	0.919 0.949	+0.030 2.411 2.406	-0.005 (P=3.74)		238.2 232.8	-0.4 +2.8	+3.5 -0.7	-0.7	0.924 0.952	+0.028
36.35	P. May 11.3 N. May 5.6	-5.7	0.918 0.947	+0.029 2.410 2.406	-0.004 -0.004		238.1 237.8	-0.3 +2.8	+3.6 -0.8	-0.8	0.923 0.950	+0.027
895.79	P. Oct. 13.4 N. Oct. 16.6	+3.2	0.915 0.931	+0.016 2.424 2.412	-0.012 -0.012		248.4 247.4	-1.0 -4.8	-4.1 -4.8	-0.7	0.923 0.941	+0.018
1637.51	P. July 5.3 N. July 3.0	-2.3	0.798 0.820	+0.022 2.404 2.396	-0.008 -0.008		255.9 254.4	-1.5 -9.1	-8.4 -9.1	-0.7	0.871 0.894	+0.023
1959.38	P. May 18.0	—	0.789	+0.004	2.420	-0.017	259.1	-16	-9.2	-0.8	1.001	0.000
2002.38	N. May 16.8	—	0.793		2.403		257.5		-10.0		1.001	

(補助計算、中鉛主一尺二三ル)

Stream of Tagish Lake Meteorite (2000.0)

No.	Object	a(AU)	e	q(AU)	Q(AU)	ω	Ω	i	L	B	Branch
1	Tagish Lake	2.0	0.56	0.885	3.14	223°.9	297°.9	2°.0	162°	-1°	N
2	μ Orionids	1.866	0.524	0.888	2.84	51.8	113.1	4.1	165	+3	S
3	60 Orionids	2.04	0.58	0.86	3.22	49.0	112.7	9.0	161	+7	S
4	(4183) Cuno	1.981	0.636	0.721	3.24	235.4	295.7	6.7	171	-6	N
5	1998 VD35	1.482	0.429	0.847	2.12	294.5	227.2	6.0	162	-5	N
6	2002 AN129	1.784	0.515	0.866	2.70	74.2	94.1	0.3	168	0	S
7	2002 WQ4	1.966	0.557	0.870	3.06	243.4	267.8	4.0	151	-3	N
8	2003 WH166	1.869	0.539	0.861	2.88	328.9	185.6	0.7	154	0	N
9	* 2003 YH111	1.420	0.487	0.729	2.11	84.0	92.0	4.5	176	+4	S



7月のペルセウス座流星群

Perseid Radiant in July

Meteor Science Seminar Working Group (MSS-WG) 重野好彦

1. はじめに

1998年に橋本岳真氏が日流研の眼視輻射点観測結果をデータベース化し、それを紹介するため Visual Meteor Radiant Observations (Shigeno, WGN27:2, 1999) をまとめた。比較のためマクロスキー & ポゼン他の同時写真観測結果を使用したが、各月の輻射点分布図を見ている内に早期のペルセウス群に興味を持った。図1に7月の同時写真観測による輻射点分布を示す。ペルセウス群らしい輻射点を位置と速度を頼りにしてさかのぼっていくと、まずは(1)流星(7月23日出現)を探し出すことができる。ここから前も輻射点のつながりは続き、(2)流星(7月8日出現)にたどり着く。

2. 早期のペルセウス群

今年(2005年)7月は比較的天気が良かったため、眼視やビデオで観測が行われ、NMS同報で早期のペルセウス群に関する意見が出された。これを機会に改めて早期のペルセウス群を調べてみることにした。Early and Late Perseids (Kiraga & Olech, IMC, 2000)によると、活動期間は7月5日～8月31日と述べられている。しかし単点ビデオ観測のため輻射点位置の詳細は不明である。同時ビデオ観測では(岡本&上田, 天文回報759, Oct, 2005)で7月14日、15日の輻射点が紹介されている。

マクロスキー&ポゼン他とMSS-WGの同時観測結果を使用して早期のペルセウス群を追ってみた。表1にペルセウス群らしい輻射点、軌道を示す。8月4日～15日の間は流星数が多いため多数の流星の平均値とした。ID欄の数字は計算に使用した流星数。この期間以前または以降は単独流星の観測結果を示す。

Table 1 Meteor Radiant & Orbit seemed Perseids (Jul 08 - Aug 22). (2000.0).

[ID]-[i] : Observed Perseids. Right four items : Prediction by q-adjustment method.

Dst : Distance (AU) between the earth and parents comet orbit.

ID	DATE	UT	Co. Rad(2000)	VG	a	e	q	ω	Ω	i	Co. Rad(2000)	VG	Dst		
20531	19590708. 89865		356.4	49.0	56.9	-126	1.008	1.009	170.3	106.5	104.9	17.3	38.0	63.4 .253	
3601	19560712. 9891		2.7	50.2	58.0	-20.	1.051	1.005	167.8	111.2	107.0	20.6	41.6	62.6 .210	
44	19530714. 8326		4.0	49.4	57.6	25.0	.956	1.100	169.5	112.7	108.1	21.7	42.8	62.3 .196	
-08061	19530716. 35		7.7	51.3	58.5	-18	1.06	1.00	166.0	113.7	108.0	22.7	43.8	62.1 .184	
110	19650720. 9002		14.4	52.2	58.1	28.2	.965	.988	161.0	118.4	109.3	26.0	46.9	61.4 .149	
632141	19630723. 868		22.8	52.0	58.6	16.2	.941	.958	152.1	120.8	112.6	27.9	48.5	61.0 .130	
620384	19620725. 787		26.6	52.1	58.8	10.5	.910	.948	149.2	122.9	113.7	29.6	49.9	60.7 .114	
291	19620727. 968		27.4	54.8	58.4	25.2	.962	.956	151.7	125.0	110.6	31.4	51.2	60.4 .099	
57	19620728. 9063		27.7	53.7	58.6	11.9	.919	.963	153.2	125.9	112.4	32.2	51.7	60.3 .093	
3	19570729. 899		30.4	54.3	59.4	73.6	.987	.957	152.2	127.1	112.9	33.3	52.4	60.1 .084	
133	19590730. 858		30.1	54.8	59.9	-22.	1.044	.962	154.2	127.5	112.7	33.7	52.7	60.1 .081	
601443	19600731. 853		31.9	54.1	58.5	8.08	.881	.962	152.9	129.2	113.3	35.2	53.6	59.9 .069	
135	19590801. 84		32.5	55.8	59.0	56.5	.983	.960	152.9	129.4	111.6	35.5	53.7	59.9 .067	
620531	19620802. 829		34.9	55.0	59.5	34.2	.972	.957	151.9	130.6	113.6	36.6	54.3	59.8 .059	
7-met	0804		37.9	56.8	58.5	16.3	.942	.949	149.9	132.7	111.6	38.4	55.2	59.6 .047	
5-met	0805		38.3	56.6	58.5	13.2	.928	.948	150.6	133.5	111.9	39.4	55.6	59.5 .040	
9-met	0806		40.4	57.3	59.1	54.5	.983	.950	151.1	134.6	112.9	40.3	56.0	59.5 .034	
13-met	0807		40.7	57.3	58.9	34.1	.972	.957	151.1	134.9	112.3	41.3	56.4	59.5 .027	
13-met	0808		43.3	57.9	59.8	-19.	1.051	.948	150.5	136.2	112.3	42.4	56.7	59.4 .021	
19-met	0809		44.6	57.9	59.3	75.7	.987	.948	150.9	137.4	112.6	43.4	57.1	59.4 .014	
26-met	0810		45.3	58.1	59.0	31.7	.970	.949	150.8	138.1	112.4	44.4	57.4	59.4 .008	
23-met	20040811. 684		47.6	57.1	58.4	7.35	.872	.941	147.9	139.3	113.7	45.7	57.7	59.4 .001	
43-met	20040812. 678		48.4	57.7	58.8	10.0	.905	.947	149.6	140.2	113.5	46.8	57.9	59.4 .006	
49-met	0813		49.3	58.2	59.3	23.8	.960	.950	150.6	140.8	113.4	47.7	58.1	59.4 .011	
13-met	0814		50.3	58.1	59.3	20.4	.953	.949	150.6	141.6	113.7	48.8	58.3	59.5 .017	
5-met	0815		53.1	58.1	59.3	13.7	.931	.942	149.0	142.9	114.3	49.9	58.5	59.5 .024	
582804	19580816. 919		54.3	57.6	58.7	6.99	.860	.978	147.5	144.1	115.5	51.3	58.6	59.6 .031	
185	19600819. 799		58.4	58.4	59.8	14.4	.934	.951	151.0	147.3	115.3	55.3	58.9	59.9 .052	
271	19610822. 041		66.2	58.5	59.8	15.8	.942	.914	143.3	149.2	115.5	57.7	58.9	60.1 .065	
109P/Swift-Tuttle							26.6	.964	.958	153.0	139.4	113.4			

Table 2 Radiant's motion. (2000. 0).

This work	$R.A. = 10.2 + 1.90 * (S.L. - 115.0)$	$Decl. = 50.8 + 0.21 * (S.L. - 115.0)$	[Jul 08-Jul 25]
	$R.A. = 48.2 + 1.41 * (S.L. - 140.0)$	$Decl. = 57.9 + 0.18 * (S.L. - 140.0)$	[Jul 23-Aug 22]
	$R.A. = 48.2 + 1.40 * (S.L. - 140.0)$	$Decl. = 57.8 + 0.06 * (S.L. - 140.0)$	[Aug 06-Aug 16]
Cook	$R.A. = 47.6 + 1.35 * (S.L. - 140.0)$	$Decl. = 57.6 + 0.12 * (S.L. - 140.0)$	[Jul 23-Aug 23]
Kronk	$R.A. = 49.4 + 1.40 * (S.L. - 140.0)$	$Decl. = 57.3 + 0.25 * (S.L. - 140.0)$	[Jul 23-Aug 22]
IMO	$R.A. = 46.1 + 1.40 * (S.L. - 140.0)$	$Decl. = 57.4 + 0.18 * (S.L. - 140.0)$	[Jul 15-Aug 25]

表1の輻射点を星図上にプロットすると図2となる。たいへん興味深いことに輻射点移動の様子が7月23日前後でかなり異なっており、7月23日～25日ごろに約30度折れ曲がっている。比較のためqアジャストメント法(Hasegawa et al., Predictions of the Meteor Radiant-, PASJ, 44, 1992)を使用して表1の同日同時刻に於ける輻射点位置を予測してみた。表1の右側4列の数値はこの予測輻射点を表す。これを星図上にプロットした結果が図3である。7月23日以降は予測と観測結果が比較的一致しているが、7月20日以前は大きくずれていることが分かる。まとめとして、期間を分けた輻射点移動式を表2に示す。備考：図1の(a)(b)(c)はqアジャストメント法の予測位置に該当するが、出現日が7月28日～30日のためペルセウス群ではない。

3. 考察

表1の軌道傾斜角(i)を見ると7月23日～8月22日の1ヶ月間にわたり、 $113^{\circ} \pm 2^{\circ}$ と安定していることが分かる。一方、7月8日～20日は、 $107^{\circ} \pm 2^{\circ}$ であり、グループが別のように見える。

Simulation-Perseid-Stream(Brown & Jones, Icarus 133, 1998)には過去10万年間の軌道シミュレーションが紹介されている。それによると軌道傾斜角は 111° ～ 123° となっており、 110° を下回ることはない。よって、7月20日以前の流星の母彗星は109P/Swift-Tuttleではないかも知れない。しかし輻射点移動の継続性から考えるとSwift-Tuttle以外は考えにくい。

本報告をまとめるにあたり、長谷川一郎先生、大塚勝仁さんから大変貴重なご意見をいただきました。この場を借りてお礼を申し上げます。

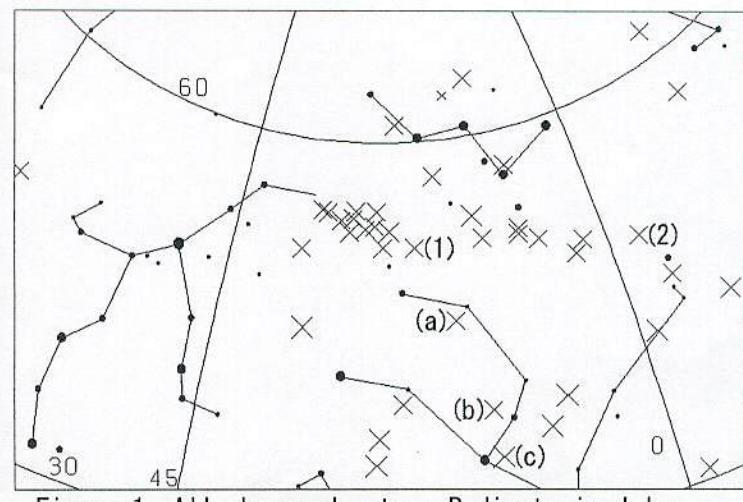


Figure 1 All observed meteor Radians in July.

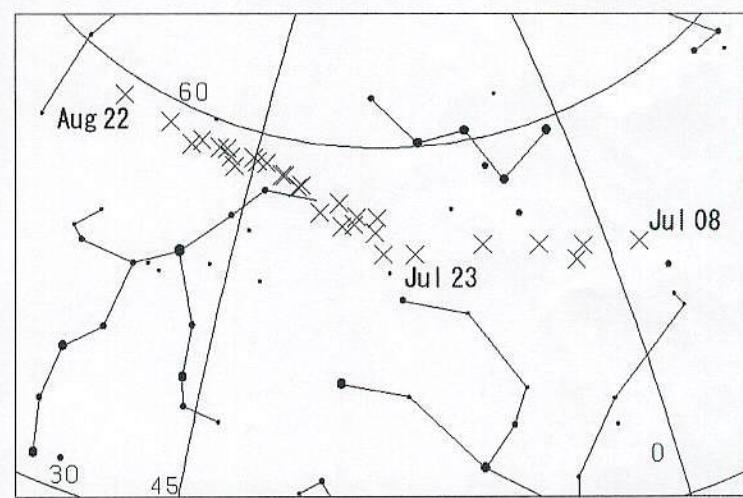


Figure 2 Observed meteor Radians seemed Perseids.

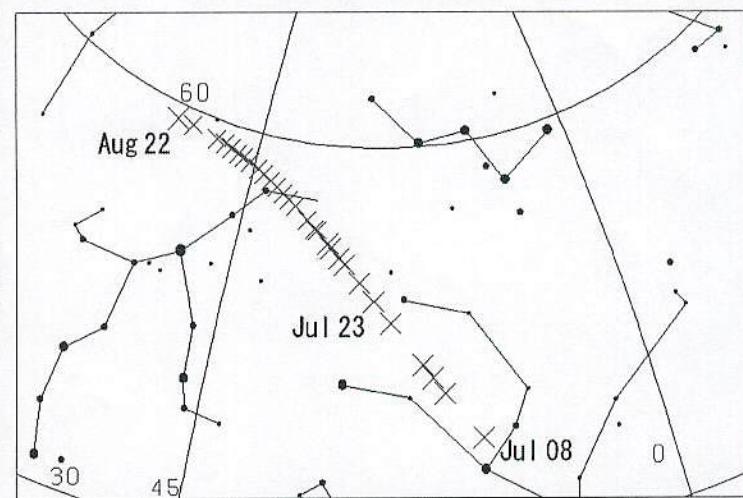


Figure 3 Prediction by q-adjustment method.

7月のペルセウス座流星群(第2報)

Perseid Radiant in July

Meteor Science Seminar Working Group (MSS-WG) 重野好彦

1. 早期のペルセウス群

1998年に橋本岳真氏が日流研の眼視輻射点観測結果をデータベース化し、それを紹介するため Visual Meteor Radiant Observations (Shigeno, WGN27:2, 1999) をまとめた。比較のため IAU Meteor Data Center (Lindblad, 1995) の同時写真観測結果を使用したが、各月の輻射点分布図を見ている内に早期のペルセウス群に興味を持った。図1に7月の同時観測による輻射点分布を示す。ペルセウス群らしい輻射点を位置と速度を頼りにしてさかのぼっていくと、まずは(1)流星(7月23日出現)を探し出すことができる。ここから前も輻射点のつながりは続き、(2)流星(7月8日出現)にたどり着く。

2005年7月は比較的天気が良かったため、眼視やビデオで観測が行われ、NMS同報で早期のペルセウス群に関する意見が出された。これを機会に改めて早期のペルセウス群を調べてみることにした。Early and Late Perseids (Kiraga & Olech, IMC, 2000)によると、活動期間は7月5日～8月31日と述べられている。しかし単点ビデオ観測のため輻射点位置の詳細は不明である。同時ビデオ観測では(岡本&上田, 天文回報759, Oct, 2005)で7月14日、15日の輻射点が紹介されている。

IAU Meteor Data CenterとMSS-WGの同時観測結果を使用して早期のペルセウス群を追ってみた。表1にペルセウス群らしい輻射点、軌道を示す。8月4日～15日の間は流星数が多いため多数の流星の平均値とした。ID欄の数字は計算に使用した流星数。この期間以前または以降は単独流星の観測結果を示す。

Table 1 Meteor Radiant & Orbit seemed Perseids (Jul 08 – Aug 22). (2000.0).
 [ID]-[i] : Observed Perseids. Right four items : Prediction by q-adjustment method.
 Dst : Distance(AU) between the earth and parents comet orbit.

ID	DATE	UT	Co. Rad(2000)	VG	a	e	q	ω	Ω	i	Co. Rad(2000)	VG	Dst		
20531	19590708.89865		356.4	49.0	56.9	-126	1.008	1.009	170.3	106.5	104.9	17.3	38.0	63.4 .253	
3601	19560712.9891		2.7	50.2	58.0	-20.	1.051	1.005	167.8	111.2	107.0	20.6	41.6	62.6 .210	
44	19530714.8326		4.0	49.4	57.6	25.0	.956	1.100	169.5	112.7	108.1	21.7	42.8	62.3 .196	
-08061	19530716.35		7.7	51.3	58.5	-18	1.06	1.00	166.0	113.7	108.0	22.7	43.8	62.1 .184	
110	19650720.9002		14.4	52.2	58.1	28.2	.965	.988	161.0	118.4	109.3	26.0	46.9	61.4 .149	
632141	19630723.868		22.8	52.0	58.6	16.2	.941	.958	152.1	120.8	112.6	27.9	48.5	61.0 .130	
620384	19620725.787		26.6	52.1	58.8	10.5	.910	.948	149.2	122.9	113.7	29.6	49.9	60.7 .114	
291	19620727.968		27.4	54.8	58.4	25.2	.962	.956	151.7	125.0	110.6	31.4	51.2	60.4 .099	
57	19620728.9063		27.7	53.7	58.6	11.9	.919	.963	153.2	125.9	112.4	32.2	51.7	60.3 .093	
3	19570729.899		30.4	54.3	59.4	73.6	.987	.957	152.2	127.1	112.9	33.3	52.4	60.1 .084	
133	19590730.858		30.1	54.8	59.9	-22.	1.044	.962	154.2	127.5	112.7	33.7	52.7	60.1 .081	
601443	19600731.853		31.9	54.1	58.5	8.08	.881	.962	152.9	129.2	113.3	35.2	53.6	59.9 .069	
135	19590801.84		32.5	55.8	59.0	56.5	.983	.960	152.9	129.4	111.6	35.5	53.7	59.9 .067	
620531	19620802.829		34.9	55.0	59.5	34.2	.972	.957	151.9	130.6	113.6	36.6	54.3	59.8 .059	
7-met	0804		37.9	56.8	58.5	16.3	.942	.949	149.9	132.7	111.6	38.4	55.2	59.6 .047	
5-met	0805		38.3	56.6	58.5	13.2	.928	.948	150.6	133.5	111.9	39.4	55.6	59.5 .040	
9-met	0806		40.4	57.3	59.1	54.5	.983	.950	151.1	134.6	112.9	40.3	56.0	59.5 .034	
13-met	0807		40.7	57.3	58.9	34.1	.972	.957	151.1	134.9	112.3	41.3	56.4	59.5 .027	
13-met	0808		43.3	57.9	59.8	-19.	1.051	.948	150.5	136.2	112.3	42.4	56.7	59.4 .021	
19-met	0809		44.6	57.9	59.3	75.7	.987	.948	150.9	137.4	112.6	43.4	57.1	59.4 .014	
26-met	0810		45.3	58.1	59.0	31.7	.970	.949	150.8	138.1	112.4	44.4	57.4	59.4 .008	
23-met	20040811.684		47.6	57.1	58.4	7.35	.872	.941	147.9	139.3	113.7	45.7	57.7	59.4 .001	
43-met	20040812.678		48.4	57.7	58.8	10.0	.905	.947	149.6	140.2	113.5	46.8	57.9	59.4 .006	
49-met	0813		49.3	58.2	59.3	23.8	.960	.950	150.6	140.8	113.4	47.7	58.1	59.4 .011	
13-met	0814		50.3	58.1	59.3	20.4	.953	.949	150.6	141.6	113.7	48.8	58.3	59.5 .017	
5-met	0815		53.1	58.1	59.3	13.7	.931	.942	149.0	142.9	114.3	49.9	58.5	59.5 .024	
582804	19580816.919		54.3	57.6	58.7	6.99	.860	.978	147.5	144.1	115.5	51.3	58.6	59.6 .031	
185	19600819.799		58.4	58.4	59.8	14.4	.934	.951	151.0	147.3	115.3	55.3	58.9	59.9 .052	
271	19610822.041		66.2	58.5	59.8	15.8	.942	.914	143.3	149.2	115.5	57.7	58.9	60.1 .065	
109P/Swift-Tuttle							26.6	.964	.958	153.0	139.4	113.4			

Table 2 Radiant's motion. (2000.0).

This work	$R.A. = 10.2 + 1.90 * (S.L. - 115.0)$	$Decl. = 50.8 + 0.21 * (S.L. - 115.0)$	[Jul 08–Jul 25]
	$R.A. = 48.2 + 1.41 * (S.L. - 140.0)$	$Decl. = 57.9 + 0.18 * (S.L. - 140.0)$	[Jul 23–Aug 22]
	$R.A. = 48.2 + 1.40 * (S.L. - 140.0)$	$Decl. = 57.8 + 0.06 * (S.L. - 140.0)$	[Aug 06–Aug 16]
Cook	$R.A. = 47.6 + 1.35 * (S.L. - 140.0)$	$Decl. = 57.6 + 0.12 * (S.L. - 140.0)$	[Jul 23–Aug 23]
Kronk	$R.A. = 49.4 + 1.40 * (S.L. - 140.0)$	$Decl. = 57.3 + 0.25 * (S.L. - 140.0)$	[Jul 23–Aug 22]
IMO	$R.A. = 46.1 + 1.40 * (S.L. - 140.0)$	$Decl. = 57.4 + 0.18 * (S.L. - 140.0)$	[Jul 15–Aug 25]

表1の輻射点を星図上にプロットすると図2となる。たいへん興味深いことに輻射点移動の様子が7月23日前後でかなり異なっており、7月23日～25日ごろに約30度折れ曲がっている。比較のためqアジャストメント法(Hasegawa et al., Predictions of the Meteor Radiant, PASJ, 44, 1992)を使用して表1の同日同時刻に於ける輻射点位置を予測してみた。表1の右側4列の数値はこの予測輻射点を表す。これを星図上にプロットした結果が図3である。7月23日以降は予測と観測結果が比較的一致しているが、7月20日以前は大きくずれていることが分かる。まとめとして、期間を分けた輻射点移動式を表2に示す。

備考：図1の(a)(b)(c)はqアジャストメント法の予測位置に該当するが、出現日が7月28日～30日のためペルセウス群ではない。

2. 母彗星検索

表1の軌道傾斜角(i)を見ると7月23日～8月22日の1ヶ月間にわたり、 $113^{\circ} \pm 2^{\circ}$ と安定していることが分かる。一方、7月8日～20日は、 $107^{\circ} \pm 2^{\circ}$ であり、グループが別のように見える。

Simulation Perseid Stream(Brown & Jones, Icarus133, 1998)には過去10万年間の軌道シミュレーションが紹介されている。それによると軌道傾斜角は 111° ～ 123° となっており、 110° を下回ることはない。よって、7月20日以前の流星の母彗星はSwift-Tuttleではないかも知れない。

そこで新たな母彗星を探してみた。1971V/Toba彗星、C/2001W2/BATTeRS彗星を紹介いただいたので簡単に分析してみる。qアジャストメント法による予測を表3、4に示す。また星図上にプロットすると図4、5になる。

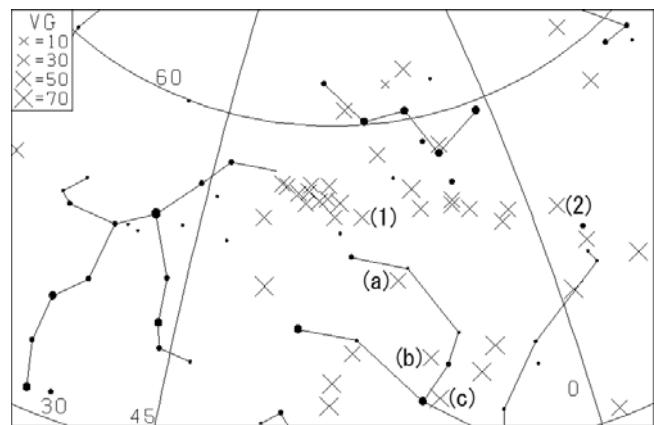


Figure 1 All observed meteor Radiants in July.

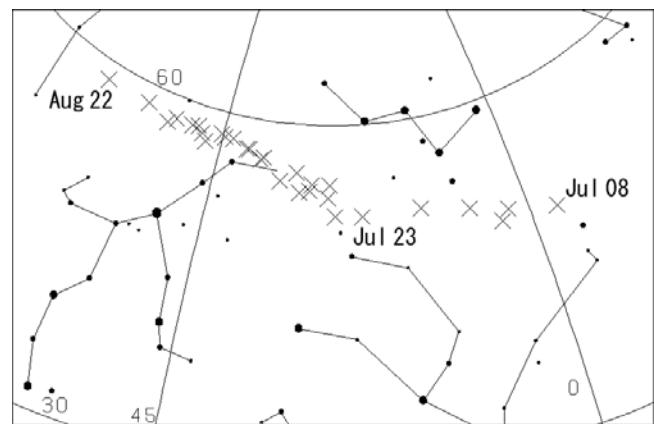


Figure 2 Observed meteor Radiants seemed Perseids.

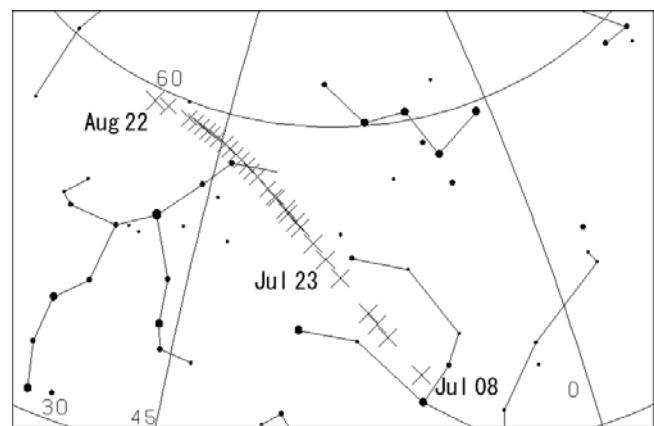


Figure 3 Prediction by q-adjustment method.

Table 3 Radiant prediction for 1971V/Toba in July (2000.0).

DATE	UT	Co. Rad(2000)	VG	a	e	q	ω	Ω	i	Dst
19590708.89865		6.8	48.4	58.4	-962	1.001	0.962	153.2	106.5	109.8 .287
19630723.868		20.7	50.0	60.4	-979	1.001	0.979	158.2	120.8	115.6 .284
19600731.853		30.3	49.3	62.3	-988	1.001	0.988	161.4	129.2	121.5 .301
1971V/Toba						-	1.001	1.233	152.4	104.1 109.7

Table 4 Radiant prediction for C/2001W2/BATTeRS in July (2000.0).

DATE	UT	Co. Rad(2000)	VG	a	e	q	ω	Ω	i	Dst
19590708.89865		14.8	45.1	59.7	15.2	0.941	0.896	139.1	106.5	116.7 .183
19630723.868		27.2	50.0	60.0	15.7	0.941	0.928	145.3	120.8	116.9 .145
19600731.853		35.8	50.8	61.0	16.0	0.941	0.945	149.1	129.2	120.0 .164
C/2001W2/BATTeRS						17.9	0.941	1.051	142.1	113.4 115.9

Table 5 Radiant prediction for Mean of Jul 08 – Jul 20 (2000.0).

1st, the mean of 08 – 20 in July is calculated. 2nd, Radiant and Orbit are predicted.

ID	DATE	UT	Co. Rad(2000)	VG	Observed Prediction						
					Co. Rad(2000)	VG	Dst	a	e	q	ω
20531	19590708.89865		356.4	49.0	56.9	.4	47.7	58.1	.037	-125	1.008
44	19530714.8326		4.0	49.4	57.6	4.9	50.4	57.8	.017	-125	1.008
110	19650720.9002		14.4	52.2	58.1	10.1	51.9	58.1	.033	-126	1.008
Mean of Jul08 – Jul20			5.0	50.4	57.8					-128	1.008
										1.020	166.9
											112.5
											107.5

Table 6 Radiant's motion for prediction for Mean of Jul 08 – Jul 20. (2000.0).

$$\text{R. A.} = 6.9 + 0.82 * (\text{S. L.} - 115.0) \quad \text{Decl.} = 51.1 + 0.35 * (\text{S. L.} - 115.0) \quad [\text{Jul}08-\text{Jul}20]$$

1971V/Toba彗星からの予測が比較的
7月のペルセウス群に近いように思われるが、地球と彗星軌道までの距離
(Dst)が約0.3天文単位離れているため可能性は低い。しかし7月23日の
観測値($\alpha 23, \delta 52, VG 59$)に着目すると、
広い全天で、「この日」「この位置」
「この速度」を予測できる母彗星候補
を探し出せる確率は非常に低いと考え
ていたが、図4、5に示すように容易に
探し出すことができて驚いている。

視点を変えて次のようなシミュレー
ションを行ってみた。まず7月8日～
20日の平均値を求める。これを表5
のMean of Jul08 – Jul20に示す。この
平均値を使用してqアジャストメント
法による予測を表5の0708～0720に
示す。また星図上にプロットすると図
6となる。さらに輻射点移動を計算す
ると表6となる。このシミュレーション
の場合、輻射点移動が0.82度/日と
非常に遅い。観測結果は1.90度/日と
非常に速く、理論値と大きく異なっ
ている。7月のペルセウス群の分類に問
題があるのかも知れない。

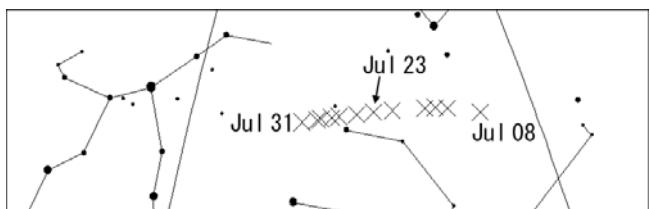


Figure 4 Prediction for 1971V/Toba in July.

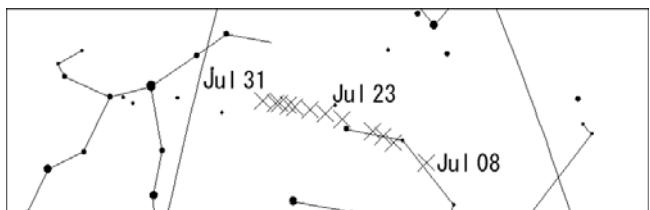


Figure 5 Prediction for C/2001W2/BATTeRS in July.

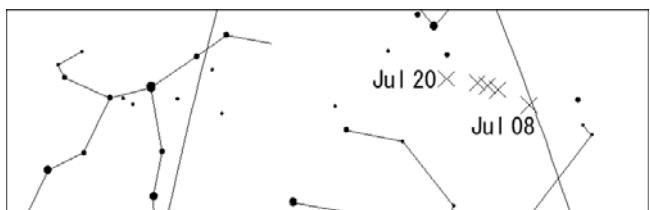


Figure 6 Prediction for Mean of Jul 08 – Jul 20.

輻射点移動の継続性から考えると、あくまでも Swift-Tuttle を母彗星とする案も残っている。ど
ちらにしても証明は困難なようだ。本報告をまとめるにあたり、長谷川一郎先生、小関正広さん、
大塚勝仁さんから大変貴重なご意見をいただきました。お礼を申し上げます。

放射点位置の数値計算 1

長沢 工

2017年7月2日

1 流星経路が平面上に得られている場合

ここでは、平面上に流星経路が得られ、それぞれの流星が直線で表わされている場合を考える。適当な直交座標系 (x, y) において、ある流星の発光点 P の座標が (x_p, y_p) 、消滅点 Q の座標が (x_q, y_q) であるとき、流星直線の傾きを m 、 y 軸上の切片を n とすると、 m, n は、

$$\begin{aligned} m &= \frac{y_q - y_p}{x_q - x_p}, \\ n &= \frac{x_q y_p - x_p y_q}{x_q - x_p}, \end{aligned} \quad (1)$$

で計算され、流星直線の方程式は、

$$y = mx + n, \quad (2)$$

で表わされる。また、この流星の経路長 γ は、

$$\gamma = \sqrt{(x_q - x_p)^2 + (y_q - y_p)^2}, \quad (3)$$

で計算できる。

いま流星経路が k 個あり、それらの方程式が、

$$y = m_i x + n_i, (i = 1, 2, \dots, k) \quad (4)$$

で与えられているとき、もっとも確からしい放射点の位置はどのように計算すればよいか。

単純に考えるなら、最小二乗法を使い、それぞれの直線からの距離の二乗和が最小になる点を求めればよい。任意の点 (x_0, y_0) と直線 (4) との距離 r_i の二乗は、

$$\begin{aligned} r_i^2 &= \frac{(m_i x_0 - y_0 + n_i)^2}{m_i^2 + 1} \\ &= \frac{m_i^2 x_0^2 - 2m_i x_0 y_0 + y_0^2 + 2m_i n_i x_0 - 2n_i y_0 + n_i^2}{m_i^2 + 1}, \end{aligned} \quad (5)$$

である。したがって k 個のこの和 R は、

$$\begin{aligned} R &= \sum_{i=1}^k \frac{(m_i x_0 - y_0 + n_i)^2}{m_i^2 + 1} \\ &= x_0^2 \Sigma \frac{m_i^2}{m_i^2 + 1} - 2x_0 y_0 \Sigma \frac{m_i}{m_i^2 + 1} + y_0^2 \Sigma \frac{1}{m_i^2 + 1} \\ &\quad + 2x_0 \Sigma \frac{m_i n_i}{m_i^2 + 1} - 2y_0 \Sigma \frac{n_i}{m_i^2 + 1} + \Sigma \frac{n_i^2}{m_i^2 + 1}, \end{aligned} \quad (6)$$

である。わかりやすいように、

$$\begin{aligned} a &= \Sigma \frac{m_i^2}{m_i^2 + 1}, & d &= \Sigma \frac{m_i n_i}{m_i^2 + 1}, \\ b &= \Sigma \frac{m_i}{m_i^2 + 1}, & e &= \Sigma \frac{n_i}{m_i^2 + 1}, \\ c &= \Sigma \frac{1}{m_i^2 + 1}, & f &= \Sigma \frac{n_i^2}{m_i^2 + 1}, \end{aligned} \quad (7)$$

と書くことになると、

$$R = ax_0^2 - 2bx_0 y_0 + cy_0^2 + 2dx_0 - 2ey_0 + f, \quad (8)$$

である。この R が最小値をとる必要条件は、

$$\frac{\partial R}{\partial x_0} = 0, \quad \frac{\partial R}{\partial y_0} = 0, \quad (9)$$

である。この計算を実行すると、

$$ax_0 - by_0 + d = 0, \quad -bx_0 + cy_0 - e = 0, \quad (10)$$

の関係が得られる。これは簡単に解くことができて、

$$x_0 = \frac{dc - be}{b^2 - ac}, \quad y_0 = \frac{bd - ae}{b^2 - ac}, \quad (11)$$

が得られる。 f の計算は不要である。こうして、それぞれの流星直線からの距離の二乗和が最小になる点 (x_0, y_0) が決定できる。

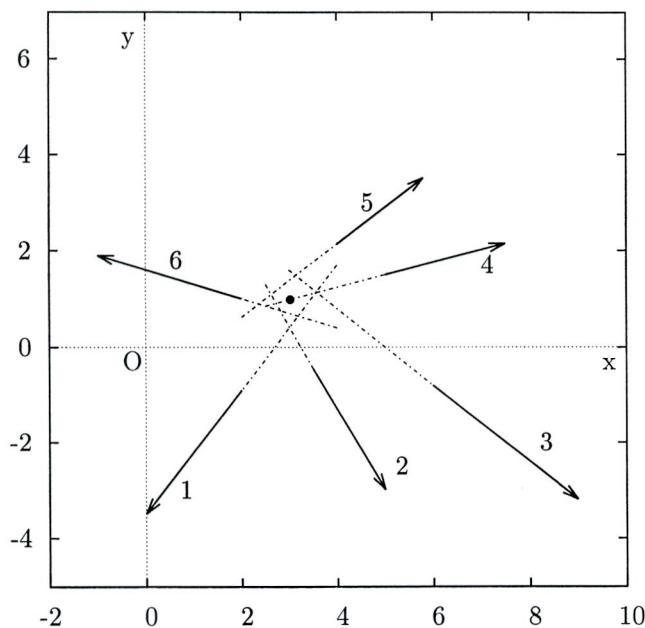


図 1: 流星を模した直線群

ここで述べたのは、それぞれの流星経路の重みをすべて等しいとした場合の計算である。経路長の長い流星の方が放射点を決めるのに貢献度が高いとか、放射点に近い方が影響が大きいなどと考える人もあるかもしれない。その考えに対しては、それに応じた重みを与えて上記の計算を行なえばよい。

計算例

ここでは、図 1 に示した 6 個の流星の放射点を計算してみよう。これらは実際の流星の位置を測ったものではなく、単なるモデルであり、それぞれの流星には番号が振ってある。測定位置からの計算手順は表 1 に示してある。

表 1 放射点の計算手順

	1	2	3	4	5	6	合計
x_p	2.00	3.60	6.00	5.00	4.00	2.00	
y_p	-0.90	-0.62	-0.80	1.50	2.14	1.00	
x_q	0.00	5.00	8.75	7.50	6.00	-1.00	
y_q	-3.50	-3.00	-3.00	2.15	3.66	1.90	
m	1.30	-1.70	-0.80	0.26	0.76	-0.30	-0.48
n	-3.50	5.50	4.00	0.20	-0.90	1.60	6.90
m^2	1.6900	2.8900	0.6400	0.0676	0.5776	0.0900	5.9552
mn	-4.550	-9.350	-3.200	0.052	-0.648	-0.480	-18.212
n^2	12.25	30.25	16.00	0.04	0.81	2.56	61.91
$\frac{m^2}{m^2+1}$	0.6283	0.7429	0.3902	0.0633	0.3661	0.0826	$a = 2.2734$
$\frac{m}{m^2+1}$	0.4833	-0.4370	-0.4878	0.2435	0.4817	-0.2752	$b = -0.085$
$\frac{1}{m^2+1}$	0.3717	0.2571	0.6098	0.9367	0.6339	0.9174	$c = 3.7266$
$\frac{mn}{m^2+1}$	-0.6915	-2.4036	-1.9512	0.0487	-0.4336	-0.4474	$d = -6.8715$
$\frac{n}{m^2+1}$	-1.3011	1.4139	2.4390	0.1873	-0.5705	1.4679	$e = 3.6365$

a, b, c, d, e がわかったから、(11) 式を使って、ただちに、

$$\begin{aligned} x_0 &= 3.026, \\ y_0 &= 0.983, \end{aligned} \tag{12}$$

を計算できる。この点はすでに図 1 に示してある。

2 直線と点の置き換え

これから述べることは、通常の思考方法と大きく異なっているので、ちょっと解りにくいかもしない。それは直線と点とを置き換える方法である。

ある平面上に直線があったとする。その直線を決めるには、二つの数値が必要である。たとえば、その直線が、

$$y = mx + n,$$

であったとすれば、 m, n の二つの数値がこの直線を決定する。このとき、この直線を点 (m, n) に置き換えるのである。

直線を点に置き換えると同時に、点 (a, b) は直線、

$$y = ax + b,$$

に置き換える。すると、どんなことが起こるか。

二つの直線をそれぞれ点に置き換えたとする。すると、初めに二つの直線の交点だった点が、こんどは置き換わった二つの点を結ぶ直線になる。たとえば、

$$y = x + 1, \quad y = -x + 3,$$

の二つの直線を考える。すぐわかるように、この交点は $(1, 2)$ である。ここで置き換えをすると、

$$y = x + 1, \quad \text{は点 } (1, 1) \text{ になる。}$$

$$y = -x + 3, \quad \text{は点 } (-1, 3) \text{ になる。}$$

この二つの点を結ぶ直線は $y = -x + 2$ である。つまり、 $(1, 2)$ の交点がこの直線に置き換わったと考えることができる。このとき、 x の係数の符号の正負が代わるから、注意が必要である。

この考えを進めよう。仮に三本の直線が一点に交わっていたとしたら、それらの直線を点に置き換えると、交点はその三点を通る直線に置き換わる。群流星の経路のように、ほぼ一点に交わる何本もの直線を点に置き換えたなら、それらの点はほぼ一直線上に並ぶ。その直線は、放射点を置き換えた直線に相当する。

何本もの流星直線がたくさんの交点を作っているところで、ただ一点の放射点を決めるよりも、おおむね直線上に並んでいるたくさんの点に接近して

通る一本の直線を決める方がずっと決めやすい。その直線を元の点に戻せば、それが放射点になる。こうした方法で放射点を決めることもできる。

このときは、それぞれの点から直線に下ろした垂線の長さの二乗和が最小になる直線を求めればよい。見通しが良さそうな方法だけれど。計算がそう簡単になるわけではない。ここでは、単に計算の手順だけを示しておく。求める直線の方程式を

$$y = ax + b, \quad (13)$$

とする。ただし、この a, b は、1 節で扱った a, b とはまったく無関係のものである。そしてまず、

$$\begin{aligned} u &= k\Sigma m_i n_i - \Sigma m_i \Sigma n_i, \\ v &= k(\Sigma m_i^2 - \Sigma n_i^2) - (\Sigma m_i)^2 + (\Sigma n_i)^2, \end{aligned} \quad (14)$$

で u, v を計算する。 k は流星の数である。このとき放射点 (x_0, y_0) は、

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{v \pm \sqrt{v^2 + u^2}}{2u}, \\ y_0 &= \frac{1}{k}(\Sigma n_i + x_0 \Sigma m_i), \end{aligned} \quad (15)$$

で計算できる。複号があるので x_0 に二つの値が出るが、正しいのは一方だけである。垂線の長さの二乗和を直接に計算しても、図を描いても、どちらが正しいかは容易に判別できる。なお、こうして求めた放射点位置は前の節で計算した放射点位置と近いものにはなるが、厳密に同じにはならない。

計算例

$\Sigma m_i, \Sigma n_i, \Sigma m_i^2, \Sigma m_i n_i, \Sigma n_i^2$ は、すでに表 1 に計算してある。 $k = 6$ であり、

$$\begin{aligned} \Sigma m_i &= -0.48, \quad \Sigma m_i^2 = 5.9552, \\ \Sigma n_i &= 6.90, \quad \Sigma n_i^2 = 61.91, \\ \Sigma m_i n_i &= -18.212, \end{aligned}$$

である。これらを使って (14) 式から、

$$\begin{aligned} u &= 105.96, \\ v &= -288.3492, \end{aligned} \quad (16)$$

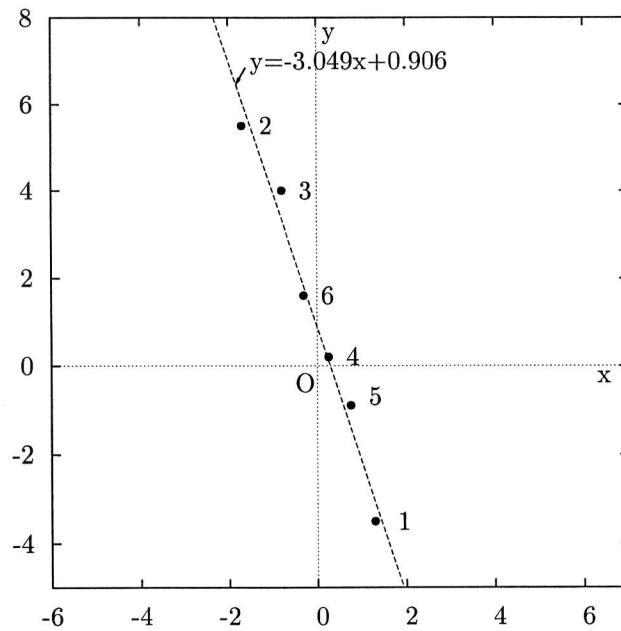


図 2: 流星を表わす点群に接近する直線

が計算できる。そして (15) 式により、

$$(1) \quad a = -3.049, \quad b = 0.906,$$

$$(2) \quad a = 0.328, \quad b = 1.176,$$

の二組の解が計算できる。垂線の長さの二乗和は、(1) に対しては 0.125、(2) に対しては 59.767 となるので、(1) が真の解であることは明らかである。その状況は図 2 からもすぐにわかる。したがって放射点の位置は、

$$\begin{aligned} x_0 &= 3.049, \\ y_0 &= 0.906, \end{aligned} \tag{17}$$

になる

放射点位置の数値計算 2

長沢 工

2017年10月1日

1 測定座標から天球座標への換算

前回に述べたのは、流星経路が平面上に得られている場合であった。しかし、現実には流星は天球上に出現する。放射点の位置は測定した (x, y) ではなく、赤経、赤緯で表わしたい。それにはどうすればよいか。

天文学では、天球上の点は一般に赤経、赤緯 (α, δ) で示されることが多い。しかし、さまざまな計算をするのには、赤経、赤緯よりも、方向余弦 (l, m, n) を使う方が便利なことが多い。方向余弦 (l, m, n) と赤経、赤緯 (α, δ) との関係は、

$$\begin{aligned} l &= \cos \delta \cos \alpha, \\ m &= \cos \delta \sin \alpha, \\ n &= \sin \delta, \end{aligned} \tag{1}$$

であり、また、

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= \frac{m}{l}, (l > 0 \text{ で } \alpha \text{ は第1または第4象限}), \\ \sin \delta &= n, \end{aligned} \tag{2}$$

であるから、容易に換算できる。赤経、赤緯は二量であるが、方向余弦は三量である。それは、

$$l^2 + m^2 + n^2 = 1, \tag{3}$$

の関係が常に成り立っているからである。ここでは、方向余弦による計算を示すことにする。

まず、写真などで流星経路などが得られているとき、その測定点 (x, y) と、天球座標の (l, m, n) との関係を定める必要がある。これにはすでに確立した手順があり、たとえば、アストラルシリーズの「流星 II(恒星社厚生閣,1984)」に、大西洋氏の記述がある。ただし、この本は現在は簡単には手に入らないかもしれないが、ごく簡単にその手順を述べておく。多少煩雑な関係はあるが、プログラムを作ってパソコンで計算すれば、簡単に処理できる。

流星経路が写真撮影されたものであるとし、そこには恒星像も同時に写っているものとする。そのとき、流星像の位置を測定すると同時に何個かの恒星の位置も測っておく。なるべく光軸に近いところにひとつ(中心星)、そのほかにいくつかの比較星を選んで測定する。比較星は 3 個以上必要である。ここでは中心星の位置を (x_0, y_0) とし、比較星の位置を (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, k$) とする。また、中心星の赤経、赤緯を (A, D) 、方向余弦を (L, M, N) とし、 k 個の比較星の方向余弦をそれぞれ (l_i, m_i, n_i) ($i = 1, 2, \dots, k$) とする。

ここで。比較星 ($i = 1, 2, \dots, k$) に対し、つぎの式で (ξ_i, η_i) を計算する。

$$\begin{pmatrix} 1 \\ \xi_i \\ \eta_i \end{pmatrix} = \frac{1}{Ll_i + Mm_i + Nn_i} \begin{pmatrix} \cos D & 0 & \sin D \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin D & 0 & \cos D \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos A & \sin A & 0 \\ -\sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_i \\ m_i \\ n_i \end{pmatrix} \quad (4)$$

この (ξ_i, η_i) を、比較星 I の標準座標という。

つぎに、カメラの焦点距離を s として、比較星に対し

$$\begin{aligned} X_i &= \frac{x_i - x_0}{s}, \\ Y_i &= \frac{y_i - y_0}{s}, \end{aligned} \quad (5)$$

を計算する。この (X_i, Y_i) を比較星の測定座標という。 s にそれほどの精度は必要ないが、一度決めたら、その値を使い続けなければならない。標準座標は天球座標に関する量であり、測定座標は (x, y) の測定値に関する量

である。この両者を関連付けることで、測定座標を標準座標に換算することができる。それには、以下の手順が必要になる。

それぞれの比較星に対する測定座標と標準座標を求めたら、まず、つぎの11個の数値を計算する。

$$\begin{aligned}
 h_{11} &= \sum_{i=1}^k X_i^2 = X_1^2 + X_2^2 + \cdots + X_k^2, \\
 h_{12} &= h_{21} = \sum_{i=1}^k X_i Y_i = X_1 Y_1 + X_2 Y_2 + \cdots + X_k Y_k, \\
 h_{22} &= \sum_{i=1}^k Y_i^2 = Y_1^2 + Y_2^2 + \cdots + Y_k^2, \\
 h_{13} &= h_{31} = \sum_{i=1}^k X_i = X_1 + X_2 + \cdots + X_k, \\
 h_{23} &= h_{32} = \sum_{i=1}^k Y_i = Y_1 + Y_2 + \cdots + Y_k, \\
 h_{14} &= \sum_{i=1}^k \xi_i X_i = \xi_1 X_1 + \xi_2 X_2 + \cdots + \xi_k X_k, \\
 h_{24} &= \sum_{i=1}^k \xi_i Y_i = \xi_1 Y_1 + \xi_2 Y_2 + \cdots + \xi_k Y_k, \\
 h_{34} &= \sum_{i=1}^k \xi_i = \xi_1 + \xi_2 + \cdots + \xi_k, \\
 h_{15} &= \sum_{i=1}^k \eta_i X_i = \eta_1 X_1 + \eta_2 X_2 + \cdots + \eta_k X_k, \\
 h_{25} &= \sum_{i=1}^k \eta_i Y_i = \eta_1 Y_1 + \eta_2 Y_2 + \cdots + \eta_k Y_k, \\
 h_{35} &= \sum_{i=1}^k k = \eta_1 + \eta_2 + \cdots + \eta_k,
 \end{aligned} \tag{6}$$

これらの値を使って、 a, b, c, d, e, f を未知数とする、つぎの二組の三元連立

方程式を作る、それらは、

$$\begin{aligned} h_{11}a + h_{12}b + h_{13}c &= h_{14}, \\ h_{21}a + h_{22}b + h_{23}c &= h_{24}, \\ h_{31}a + h_{32}b + kc &= h_{34}, \end{aligned} \quad (7)$$

および、

$$\begin{aligned} h_{11}d + h_{12}e + h_{13}f &= h_{15}, \\ h_{21}d + h_{22}e + h_{23}f &= h_{25}, \\ h_{31}d + h_{32}e + kf &= h_{35}, \end{aligned} \quad (8)$$

である。この二組の方程式を解くことで、 a, b, c, d, e, f の六つの数値が得られる。これらから、標準座標と測定座標との間に、一般的に、

$$\begin{aligned} \xi &= aX + bY + c, \\ \eta &= dX + eY + f, \end{aligned} \quad (9)$$

の関係が成立する。つまり、この式で測定座標を標準座標に換算できる。そして、

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} l_i \\ m_i \\ n_i \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos A & -\sin A & 0 \\ \sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} \cos D & 0 & -\sin D \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin D & 0 & \cos D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/\sqrt{\xi_i^2 + \eta_i^2 + 1} \\ \xi_i/\sqrt{\xi_i^2 + \eta_i^2 + 1} \\ \eta_i/\sqrt{\xi_i^2 + \eta_i^2 + 1} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (10)$$

の関係が成立している。(4) 式で測定点 (x, y) に対する標準座標 (ξ, η) が計算できるから、(10) 式で、その測定点の天球座標 (l, m, n) を計算できる。

計算例

ここでは、「ふたご座」と「おうし座」にまたがる 7 個の星から、 (x, y) 座標と天球座標との関係を求めてみる。中心星を δ Gem ($A = 110^\circ.0304, D = 21^\circ.9822$) にとり、残る 6 個の比較星の中心星に対する測定位置 $(x_i - x_0, y_i -$

y_0) から計算をする。測定の単位は cm であり、焦点距離は $s = 20\text{cm}$ としている。このとき、それぞれの比較星に対する計算の途中経過は、表 1 のようになる。都合上、表を二つに分けて示しているのでちょっと見にくいか、お許しを請う。

表 1 整約の途中経過

	β Gem	θ Gem	γ Gem	μ Gem
α_i	116°.32875	103°.19708	99°.42792	95°.74000
δ_i	28°.02611	33°.96111	16°.39917	22°.51361
l_i	-0.39151	-0.18936	-0.15714	-0.09239
m_i	0.79116	0.80751	0.94636	0.91916
n_i	0.46987	0.55863	0.28233	0.38290
ξ_i	0.09787	-0.10415	-0.18010	-0.23424
η_i	0.10842	0.21563	-0.09301	0.02052
$x_i - x_0$	-0.05	3.90	1.34	3.37
$y_i - y_0$	2.60	1.72	-3.41	-2.45
X_i	-0.0025	0.195	0.0670	0.1685
Y_i	0.1300	0.086	-0.1705	-0.1255
X_i^2	0.000006	0.038025	0.004489	0.028392
$X_i Y_i$	-0.000325	0.016770	-0.011424	-0.020641
Y_i^2	0.016900	0.007396	0.029070	0.015006
$X_i \xi_i$	-0.000245	-0.019783	-0.012067	-0.039469
$Y_i \xi_i$	0.012723	-0.008725	0.030707	0.028694
$X_i \eta_i$	-0.000271	0.042048	-0.006232	0.003458
$Y_i \eta_i$	0.014095	0.018544	0.015858	-0.002514

ここから、(7),(8) の方程式は、

$$\begin{aligned}
 0.344874a - 0.160164b + 1.160c &= -0.405451, \\
 -0.160164a + 0.155388b - 0.485c &= 0.247526, \\
 1.160a - 0.485b + 6c &= -1.32618,
 \end{aligned} \tag{11}$$

および、

$$\begin{aligned}
 0.344874d - 0.160164e + 1.160f &= 0.118641, \\
 -0.160164d + 0.155388e - 0.485f &= 0.012851, \\
 1.160d - 0.485e + 6f &= 0.44634,
 \end{aligned} \tag{12}$$

となる。

	表 1 (つづき)		合計
	ζ Aur	β Aur	
α_i	84°.41083	81°.57292	
δ_i	21°.14250	28°.60750	
l_i	0.09084	0.12866	
m_i	0.92825	0.86844	
n_i	0.36069	0.47881	
ξ_i	-0.44082	-0.46744	-1.32618
η_i	0.02141	0.17329	0.44634
$x_i - x_0$	6.22	8.42	
$y_i - y_0$	-4.95	-3.21	
X_i	0.3110	0.4210	1.160
Y_i	-0.2475	-0.1605	-0.485
X_i^2	0.096721	0.117241	0.344874
$X_i Y_i$	-0.076973	-0.067571	-0.160164
Y_i^2	0.061256	0.025460	0.155388
$X_i \xi_i$	-0.137095	-0.196792	-0.405451
$Y_i \xi_i$	0.109103	0.075024	0.247526
$X_i \eta_i$	0.006683	0.072955	0.118641
$Y_i \eta_i$	-0.005319	-0.027813	0.012851

上記の方程式を解いて、

$$\begin{aligned} a &= -0.833049, \quad d = 0.729613, \\ b &= 0.731721, \quad e = 0.838107, \\ c &= -0.000826, \quad f = 0.001078, \end{aligned} \quad (13)$$

が得られる。つまり、 (ξ, η) と (X, Y) の間には、

$$\begin{aligned} \xi &= -0.833049X + 0.731721Y - 0.000826, \\ \eta &= 0.729613X + 0.838107Y + 0.001078, \end{aligned} \quad (14)$$

の関係が成り立っている。これにより測定座標 (X, Y) から計算された標準座標 (ξ, η) は、さらに (10) 式によって天球座標 (l, m, n) に換算できる。

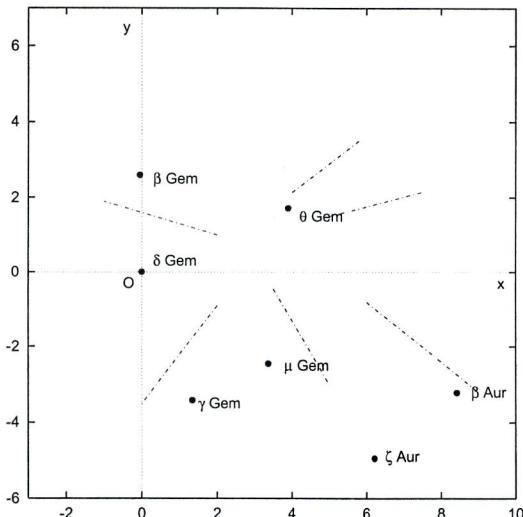


図 1: 流星に対する比較星の位置

いま、前回計算したモデル流星の位置が、測定したこれらの中心星、比較星の位置と重なっていることにする。これは図 1 のような関係になる。この

とき、最初に計算した放射点の位置 ($x=3.026, y=0.983$) を、天球座標に換算してみよう。

焦点距離 $s = 20\text{cm}$ であるから、まず測定座標 (X, Y) は、

$$\begin{aligned} X &= x/20 = 0.15130, \\ Y &= y/20 = 0.04915, \end{aligned} \quad (15)$$

である。したがって (14) 式により、

$$\begin{aligned} \xi &= -0.833049X + 0.731721Y - 0.000826 = -0.090902, \\ \eta &= 0.729613X + 0.838107Y + 0.001078 = 0.152661, \end{aligned} \quad (16)$$

である。ここから、

$$\begin{aligned} 1/\sqrt{(\xi^2 + \eta^2 + 1)} &= 0.984580, \\ \xi/\sqrt{(\xi^2 + \eta^2 + 1)} &= -0.089500, \\ \eta/\sqrt{(\xi^2 + \eta^2 + 1)} &= 0.150307, \end{aligned} \quad (17)$$

となる。中心星の位置は ($A = 110^\circ.0304, D = 21^\circ.9822$) であるから、(10) 式によって、

$$\begin{aligned} l &= -0.209362, \\ m &= 0.835570, \\ n &= 0.507927, \end{aligned} \quad (18)$$

が計算できる。これで天球座標が得られた。もしこれを赤経、赤緯にするなら、(2) 式によって、

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= \frac{m}{l} = \frac{0.835570}{-0.209362} = -3.99103, \\ \sin \delta &= 0.507927, \end{aligned} \quad (19)$$

であり、放射点の位置として、

$$\begin{aligned} \alpha &= 104^\circ.067, \\ \delta &= 30^\circ.526, \end{aligned} \quad (20)$$

が求められる。

2 天球座標から放射点を定める

ここでは、天球座標から放射点を決める手順を考える。流星は、一般に天球上の大円に沿って出現すると考えられる。発光点 P の方向余弦が (l_p, m_p, n_p) , 消滅点 Q の方向余弦が (l_q, m_q, n_q) であるとき、この流星の経路長 γ は、

$$\begin{aligned}\sin \gamma &= \sqrt{(m_p n_q - n_q m_p)^2 + (n_p l_q - l_p n_q)^2 + (l_p m_q - m_p l_q)^2}, \\ \cos \gamma &= l_p l_q + m_p m_q + n_p n_q,\end{aligned}\quad (21)$$

で表わされる。

球面上の大円に対しては、その極が存在する。極とは、大円上のどの点からも中心角が 90° である点のことである。たとえば、地球を球と考えたとき、赤道大円に対する極は北極と南極になる。大円に対する極はいつも二つ存在する。

流星経路大円 PQ に対する極の方向余弦 (l, m, n) は、

$$\begin{aligned}l &= \pm \frac{1}{\sin \gamma} (m_p n_q - n_p m_q), \\ m &= \pm \frac{1}{\sin \gamma} (n_p l_q - l_p n_q), \\ n &= \pm \frac{1}{\sin \gamma} (l_p m_q - m_p l_q), \text{ (複号同順)}\end{aligned}\quad (22)$$

で計算できる。

いくつかの流星経路を表わす大円があるとき、放射点としては、それらの大円に対する天球上の距離 θ の二乗和が最小になる点を求めればよい。この場合の距離は、天球中心から見た中心角 θ のことである。現実の計算では、 θ の二乗和ではなく、 $\sin \theta$ の二乗和を考えるほうが計算しやすい。

ここで、以前のように、大円と点とを置き換えることを考える。このときは、経路を表わす大円をその極に置き換えればよい。とにかく、いくつかの流星経路大円をそれぞれその極に置き換えてみる。流星の経路大円がほぼ一点に交わるのならば、それらの極はおおむねひとつの大円上に並ぶ。そのとき、それらの極からの距離 θ に対し、 $\sin \theta$ の二乗和が最小になる大円を決める。そうすれば、その大円の極のひとつが放射点になる。

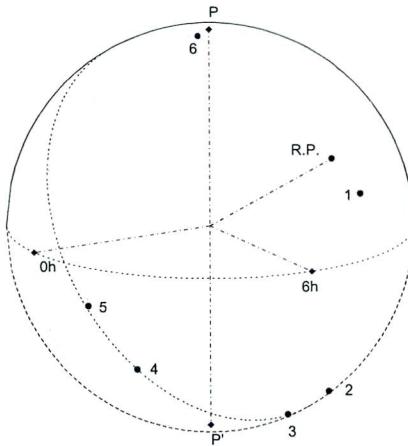


図 2: 流星経路の極とそれを通る大円

何かだまされた感じがするかもしれないが、この関係はうまく成立する。その大略の状況は図 2 に示したようになる。そして、考え方は違っても、経路大円から直接放射点を求める場合と、経路大円の極に接近して通る大円から放射点を求める場合でも、計算式はまったく同じになる。でも、残念ながら、その関係式から直接に放射点の位置を計算するのはちょっと困難である。ここでは、近似位置から逐次近似でより精度の高い位置を計算する方法の概略手順を示しておく。

それぞれの流星経路を表わす k 個の大円の極位置を $(l_i, m_i, n_i) i = 1, 2, \dots, k$

とする。そこからつぎの値を計算する。

$$\begin{aligned}
 s_{11} &= \sum_{i=1}^k l_i^2 = l_1^2 + l_2^2 + \cdots + l_k^2, \\
 s_{22} &= \sum_{i=1}^k m_i^2 = m_1^2 + m_2^2 + \cdots + m_k^2, \\
 s_{33} &= \sum_{i=1}^k n_i^2 = n_1^2 + n_2^2 + \cdots + n_k^2, \\
 s_{12} &= \sum_{i=1}^k l_i m_i = l_1 m_1 + l_2 m_2 + \cdots + l_k m_k, \\
 s_{23} &= \sum_{i=1}^k m_i n_i = m_1 n_1 + m_2 n_2 + \cdots + m_k n_k, \\
 s_{31} &= \sum_{i=1}^k n_i l_i = n_1 l_1 + n_2 l_2 + \cdots + n_k l_k,
 \end{aligned} \tag{23}$$

このとき、 $\sin^2 \theta$ の和を最小にする放射点の方向余弦 (l_0, m_0, n_0) は、

$$\begin{aligned}
 f(l_0, m_0) &= (s_{11} - s_{33})l_0 + s_{12}m_0 - s_{23} \frac{l_0 m_0}{n_0} + s_{31} \left(n_0 - \frac{l_0^2}{n_0} \right) = 0, \\
 g(l_0, m_0) &= s_{12}l_0 + (s_{22} - s_{33})m_0 + s_{23} \left(n_0 - \frac{m_0^2}{n_0} \right) - s_{31} \frac{l_0 m_0}{n_0} = 0,
 \end{aligned} \tag{24}$$

の関係を満たす。 f, g を l_0, m_0 だけの関数としているのは、

$$l_0^2 + m_0^2 + n_0^2 = 1, \tag{25}$$

の関係があるからである。(24) 式を l_0, m_0 について解けばいいのであるが、これを直接に解くのは難しい。そこで、近似値を出発点として逐次近似で解くことにする。

l_0, m_0 の近似値を l', m' とする。そのとき n' を、

$$(n')^2 = 1 - (l')^2 - (m')^2, \tag{26}$$

から計算しておく。そして、

$$\begin{aligned} f(l', m') &= f_0, \\ g(l', m') &= g_0, \end{aligned} \quad (27)$$

とする。

ここで、 l', m' に $\Delta l, \Delta m$ を加えて、 $l' + \Delta l, m' + \Delta m$ をより真の解に近付けることを考える。それにはまず、

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial l_0} &= f_l, & \frac{\partial f}{\partial m_0} &= f_m, \\ \frac{\partial g}{\partial l_0} &= g_l, & \frac{\partial g}{\partial m_0} &= g_m, \end{aligned} \quad (28)$$

を計算する。 f_l, f_m, g_l, g_m は、偏微分を行なったそれぞれの式の l_0, m_0, n_0 に l', m', n' を代入した数値を表わすものとする。すると、

$$\begin{aligned} f_l \Delta l + f_m \Delta m + f_0 &= 0, \\ g_l \Delta l + g_m \Delta m + g_0 &= 0, \end{aligned} \quad (29)$$

の連立方程式から、

$$\begin{aligned} \Delta l &= \frac{g_0 f_m - f_0 g_m}{f_l g_m - f_m g_l}, \\ \Delta m &= \frac{f_0 g_l - g_0 f_l}{f_l g_m - f_m g_l}, \end{aligned} \quad (30)$$

で $\Delta l, \Delta m$ を計算できる。ただし、

$$\begin{aligned} f_l &= s_{11} - s_{33} - s_{23} \frac{m_0(1 - m_0^2)}{n_0^3} - s_{31} \frac{l_0(3n_0^2 + l_0^2)}{n_0^3}, \\ f_m &= s_{12} - s_{23} \frac{l_0(1 - l_0^2)}{n_0^3} - s_{31} \frac{m_0(1 - m_0^2)}{n_0^3}, \\ g_l &= f_m, \\ g_m &= s_{22} - s_{33} - s_{23} \frac{m_0(3n_0^2 + m_0^2)}{n_0^3} - s_{31} \frac{l_0(1 - l_0^2)}{n_0^3}, \end{aligned} \quad (31)$$

である。

こうして得られたより高精度の近似値を新たな近似値と考え直し、同様の手順を繰り返せば、解はしだいに真の値に近付く。そして、どのような精度に対しても必要な解を求めることができる。

計算例

この計算には、各流星の発光点、消滅点の方向余弦、経路大円の極などの計算が必要である。でも、ここではそれらを省略し、まず表 2 に、それぞれの経路大円の極位置に基づく計算を示す。

表 2 経路大円の極の方向余弦に関する計算

i	1	2	3	4	5	6
l_i	-0.976785	-0.463714	-0.142278	0.702072	0.907408	-0.243689
m_i	-0.213667	0.356359	0.510045	0.490160	0.370082	-0.534712
n_i	-0.015403	-0.811158	-0.848299	-0.516564	-0.199121	0.809129
l_i^2	0.954109	0.215031	0.020243	0.492905	0.823389	0.059384
m_i^2	0.045654	0.126992	0.260146	0.240257	0.136961	0.285927
n_i^2	0.000237	0.657977	0.719611	0.266838	0.039649	0.654690
$l_i m_i$	0.208707	-0.165249	-0.072568	0.344128	0.335815	0.130306
$m_i n_i$	0.03291	-0.289063	-0.432671	-0.253199	-0.073691	-0.432658
$n_i l_i$	0.015045	0.376145	0.120694	-0.362665	-0.180684	-0.197176

この表 2 から、

$$\begin{aligned} s_{11} &= 2.565061, \quad s_{12} = 0.781138, \\ s_{22} &= 1.095935, \quad s_{23} = -1.477991, \\ s_{33} &= 2.339003, \quad s_{31} = -0.228640, \end{aligned} \tag{32}$$

が計算できる。つぎに、放射点の近似位置 (l', m', n') として、流星 1 と 4 の経路の交点をとることにする。これは、

$$\begin{aligned} l' &= -0.189406, \\ m' &= 0.827809, \\ n' &= 0.528070, \end{aligned} \tag{33}$$

である。これを基にしての逐次近似は表 3 のようになる。

表 3 放射点位置の逐次近似

	1	2	3	4
l'	-0.189406	-0.210422	-0.209337	-0.209332
m'	0.827809	0.836244	0.835583	0.835579
n'	0.528070	0.506378	0.507917	0.507925
f_0	0.059773	-0.003726	-0.000018	0.000000
g_0	-0.107379	0.009345	0.000048	0.000000
f_l	2.584468	2.786877	2.771844	2.771769
f_m	-0.647174	-1.065209	-1.036598	-1.036457
g_m	11.117762	12.381689	12.282616	12.282108
Δl	-0.021016	0.001084	0.000005	0.000000
Δm	0.008435	-0.000661	-0.000004	0.000000

4回の繰り返しで計算は収束し、そこから放射点の位置は、

$$\begin{aligned} l &= -0.209332, \\ m &= 0.835579, \\ n &= 0.507925, \end{aligned} \tag{34}$$

となる。これを赤経、赤緯に直せば、

$$\begin{aligned} \alpha &= 104^\circ.065, \\ \delta &= 30^\circ.526, \end{aligned} \tag{35}$$

になる。