

# 彗星の軌道進化と起源

——ハレー彗星を中心として——

中 村 士\*

## 1. はじめに

ハレー彗星が一般天文愛好家の注目を集めるのは、各回帰ごとにほぼ決って見事な雄姿を見せてくれる上、生涯に一度しか観望できないこと、1705年にハレーによって再来を予言された最初の周期彗星であること、その歴史上の記録は遠く紀元前まで溯りうることなどによるのである。ハレー彗星の回帰であることが確実な B.C. 240年から、前回の回帰である1910年まで、B.C. 164年の1回だけを除いて(Kiangによれば、この時の回帰は観測条件が良かったにもかかわらずなぜか記載がない)、28回の回帰が主に中国の古記録中に同定できる。これらの記録を、現代の軌道計算法に従って適切に処理することは、天文学史的興味にとどまらず、この彗星の軌道は将来どうなるのか、この彗星はどこからやって来たのかなどを推定する上でも重要である。また、ヨーロッパ、ソ連、日本で計画中のハレー探測機を、過去の観測データを用いて目標に接近させるかどうかは、後述するジェット効果の大きさが精度よく推定できるか否かにかかっている。ジェット効果の物理的イメージを正しく把握するには長期間にわたる観測の解析が要求される。

本稿では、彗星の軌道進化や起源の問題を、ハレー彗星を中心にして述べてみたいと思う。

## 2. ハレー彗星の軌道

はじめにハレー彗星の1986年における軌道要素を、Yeomans(1977)から次に引用しておく。座標系は1950.0の平均黄道と春分点である。

軌道半長径 ( $a$ )	17.94 AU (周期 $P$ : 75.96 年)
離心率 ( $e$ )	0.967
近日点距離 ( $q$ )	0.587 AU
軌道傾斜角 ( $i$ )	162°24
近日点引数 ( $\omega$ )	111°85
昇交点経度 ( $Q$ )	58°15
近日点通過時刻 ( $T$ )	1986年2月9.66日 (ET)

ハレー彗星の軌道は、今まで発見された100個余りの短周期彗星(通常周期200年以下のもの)の内でもかなり特異な存在と言えよう。まず黄道に対し僅か18°傾いているだけの逆行軌道であること。逆行軌道の短周期彗星はこの他に、Tempel-Tuttle (162°), Pons-Gambart

(137°), Swift-Tuttle (114°)の3個があるにすぎない。ハレーのような逆行彗星では地球から打ち上げる探査機との相対速度が非常に大きくなるので、近寄って観測する時間が短く順行彗星に比べると色々な点で不利である。

ハレー彗星が他の彗星に比べて明るいのは、彗星核自体のサイズが平均的短周期彗星に比べて大きい(最近の推定では直径5km位)ことにもよるが、表で見るように近日点が地球軌道のかなり内側にある点も見逃せない。太陽に近づいてコマや尾が充分発達した時に、間近から観測できるチャンスが多いのである。周期が短い短周期彗星のうち、 $q$ がハレー彗星より明らかに小さいのは Encke 彗星(3.3年)と Helfenrieder 彗星(4.5年)だけであり、これに反して周期がハレー彗星の周期に近いがそれより長い彗星については、 $q$ の小さいものがほぼ連続的に存在する。単なる偶然とは思えない。軌道進化の研究から説明が見つかる問題かもしれない。

コンピュータのなかった時代は、ある回帰の観測を用いて次の回帰を予報するか、前回の回帰まで溯るのが精一杯だった。運動方程式を直接数値積分して、過去4回の出現観測に合わず試みを最初に行ったのは Brady らである。その結果近日点通過時刻に現われた長い周期的変動から、Brady(1972)は冥王星の外側にある新惑星が原因という説を出した。しかし翌年 Kiang が太陽、木星、彗星という簡単な3体問題でも同じような振舞いが見られると述べて、Bradyの説はその後顧みられなくなった。

従来、短周期彗星の軌道計算と観測を何回帰にもわたって合せようとするとなかなかうまく行かなかった。その原因がジェット効果と呼ばれる力にあることが、色々な彗星について確立されたのは10年前からである。1950年に Whipple が提案した彗星の汚氷核モデルは、今やその正しさが広く認められている。Whippleがこのモデルに思い至ったのは、Encke 彗星の近日点通過時刻が重力作用で説明できない変動を示すのを、氷の核から昇華するガスの軌道に対する反作用で解釈しようとしたためだった。昇華したガスは、核表面で太陽の方向に主に力を及ぼすが、ガスの放出は時間遅れが伴うし、その間彗星核は一般に自転をしているので、動径に直角方向の反作用成分も現われる。前者に対する後者の比は2~数10位のものが多い。この値から遅れの自転角もある程度推定できる。核の自転軸が天王星のように軌道面に対して横倒しになっていれば、軌道面に垂直なジェット効果

\* 東京天文台 Tsuko Nakamura: Halley's Comet and Dynamical Evolution of Comets

が求まってもよい筈だが、そのような試みがなされないのは垂直成分が決りにくいからかあるいは実際に自転軸が軌道面に垂直な彗星は少ないためであろうか。ジェット効果が日心距離 ( $r$ ) にどう依存するかは、氷核のモデルと昇華のメカニズムを与えればかなり厳密に計算できる。しかし通常は経験的に  $1/r^3 \cdot \exp(-r^2/2)$  とか  $(r/r_0)^{-2.2} [1 + (r/r_0)^5]^{-4.6}$  とかの関数型を仮定してその係数を求めている。後者の方がいく分昇華の物理的議論を考慮している。

Yeomans と Kiang は、昨年新しく決定したハレー彗星の長期的軌道運動の結果を発表した。Kiang は、まず漢代以降の星食観測記録を用いて、後半夜に起った天文現象が当日の日付で記録されたか前日の日付で記録されたかを統計的に調査した。この結果を用いて、ハレー彗星の観測の日付を統一した。余談になるが、彼の星食の調査では後半夜に起った星食の内9割近くが前日の日付で記録されているのに対し、日本の星食では午前3時頃を境にしてかなりはっきり日付を変えている(斎藤国治氏の研究)。当時の日本の天文学は全面的に中国に依存していたにもかかわらず、なぜこのような差があるのかという新しい問題が提起されたという点で大変興味深い。古代のハレー彗星の観測記録は、近日点通過の時刻を決める上で最も重要である。ジェット効果のきき方が変化したか否かを知るには、近日点通過の時刻を通じてしか方法がない。Kiang が新たに決め直した1301年から141年までの9個の近日点通過の時刻に最もよく合うように、Yeomans は6個の初期値とジェット効果のパラメータ2個を数値積分による微分補正で求めた。これに従ってB.C. 1404年まで溯り、各回帰毎の接触軌道要素を計算している。その様子を図1に示す。近日点距離と軌道傾斜角が余り変らないのに対し、周期は1割以上変動し

ている。

彼らは、Yeomans が1977年に決定したジェット効果のパラメータ値と実質的に同じ一定値を用いて古代の観測に合うことができたことから、ハレー彗星核の自転軸の方向は過去2000年にわたってほぼ一定であったとしている。しかし実際には、837年に近日点通過時刻を0.88日ほどずらし、800年には離心率をわずかに減らさないと全体の観測に合うことはできなかった。近日点通過の時刻が0.1日違うと、ハレー彗星の場合近日点では49万km、1AUの日心距離では36万km軌道上を移動してしまうので、軌道修正のきかない探測機を接近させるには打上げの直前まで観測を行なって近日点通過時刻の誤差を小さくする必要がある。

ジェット効果などの非重力作用がない時でも、長期間の観測に数値積分を合わせようとしてうまくゆかない場合が起る。ハレー彗星に限らず一般の小天体の軌道計算は、惑星に異常接近すると計算精度が低下しその後の小天体の位置は余り信用できないものになる。Yeomans がB.C. 1404年で計算を止めたのもハレー彗星が地球に0.04AUまで近づいたためだった。しかし異常接近による計算精度の低下は、計算の桁数を充分取ってしかもregularizationなどの適切な計算法を採用すれば少くとも原理的には避けられる。問題は観測値の方である。観測値には必ず誤差が伴うから、決定された軌道要素にも誤差が入ってくる。計算しようとする軌道が軌道要素の少しの変化に対しても不安定である(Everhartはこの様な軌道をchaoticと呼んでいる)時には、その観測値を使っている限り充分な未来または過去の軌道は決して知ることができない。その様な一つの例は、1977年に発見され土星と天王星の軌道の間を運動する特異小惑星Chironである。Chironの軌道要素は、観測が1895年まで溯れるのでかなり正確に決定されている。ところがそれらの値を確率誤差の範囲内で僅かずつ変えて軌道追跡してみると、土星や天王星に接近した後の軌道の様子が互いにまったく違ってどれが本当の軌道なのかわからない。chaotic軌道を持つ天体が未来や過去に太陽系から放り出されてしまうのか、あるいは内側の惑星領域に捕獲されてしまうのかといった間には、最近Everhartを含めた何人かの研究者が行っているように、今の所確率の言葉で答える以外方法がない。ハレー彗星の場合も度々地球に異常接近するのでchaotic軌道である可能性があり、その場合にはジェット効果が働かないとしても数値積分によって充分未来・過去の振舞いを知ることは困難だろう。

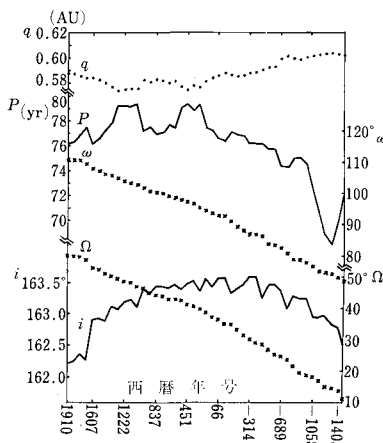


図1 ハレー彗星の軌道要素 (Yeomans-Kiang のデータによる)

### 3. ハレー彗星軌道の長年の振舞い

数値積分でハレー彗星の軌道を未来や過去に溯るのは

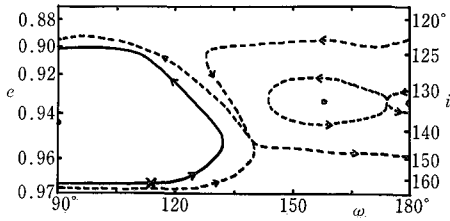


図2 ハレー彗星の永年摂動 (古在 1979 の図にもとづく)

不可能だとしても、モデルをもっと単純化した時の長年月の振舞いについてはある程度答が出せるはずである。こうした取扱いの一つに、永年摂動の理論と呼ばれるものがある。特に小惑星の永年摂動理論には長い研究の歴史がある。普通、小天体の平均運動と惑星の平均運動とは次数関係にないとか、小天体は惑星に異常接近して軌道半長径が大きく変えられることはないといった仮定をおく。要するに、小天体や惑星の公転周期程度の短い時間尺度をもつ色々な変動は、長年月の間には平均化されて軌道変化の大勢には影響しない場合だけを扱うのである。

永年摂動の一般公式は離心率や軌道傾斜角が小さい場合以外求めるのが困難だが、個々の小惑星についてはそれらを数値的に与えて計算できる。古在 (1979) は短周期項を調和解析で平均して、番号のついた小惑星と短周期彗星の永年摂動を求めている。彗星は皆同一平面上の円軌道としているので、小天体の角運動量の  $Z$  成分も一定であり、運動方程式は全角運動量 ( $G$ ) と近日点引数 ( $\omega$ ) に関する自由度 1 の力学系になる。ハミルトニアンも保存量だから結局、保存される諸量をパラメータとして与えれば、個々の小天体の永年の振舞いは  $(G, \omega)$  平面上の曲線として表わされる。図2はハレー彗星について、 $(G, \omega)$  平面的の代わりに  $(e, \omega)$  と  $(i, \omega)$  平面で示したものである。 $\omega$  が  $90^\circ$  と  $180^\circ$  の範囲外では、曲線は折かえし対称なので省略してある。×印がハレー彗星の現在の軌道要素の位置であり、×印の乗っている曲線が永年摂動で変化する有様を表わしている。点線の曲線は全エネルギーを少し変えた場合に相当する。この図によれば、ハレー彗星の近日点引数は  $90^\circ$  を中心として  $47^\circ$  と  $133^\circ$  の間を振動的に変化 (秤動という) していることがわかる。図1の  $\omega$  と比べると、 $\omega$  が一周する周期は約 18000 年となる。離心率は現在が最も大きい、将来もそんなには変動しない。これに対し軌道傾斜角は  $164^\circ$  と  $123^\circ$  の間を大幅に変動することもわかる。

実際にはハレー彗星の軌道半長径は惑星との遭遇の度に変化する。公転周期で平均した値もゆっくりと変化してゆくだろう。その時は近似的に図2の別の曲線に乗り移ると考えればよい。もしもう少し離心率の大きい曲線

に移れば、近日点引数はもはや秤動しなくなる可能性がある。

#### 4. 彗星の力学的進化とハレー彗星

永年摂動の理論によれば、軌道半長径が大幅に変動しない範囲での軌道変化を追うことができる。しかし、短周期彗星の場合、彗星が太陽系が誕生してからずっとその軌道附近にいた筈はない。なぜなら氷でできた彗星核の表面重力は極めて小さいので、木星軌道から内側では 45 億年もたつと氷は完全に昇華し尽してしまうだろうから。彗星は太陽から遠い低温の場所に元々あって、比較的最近何らかの原因で太陽附近に運ばれてきたと考えねばならない。もしそうなら、軌道半長径はほぼ  $\infty$  から惑星の値位まで変化するから、そのようなケースは永年摂動の理論では扱えない。

1950年に Oort は、軌道が放物線に近い彗星で、惑星の摂動を受ける前の軌道半長径の値が 5 万 AU 辺に集中している観測事実ヒントを得て、その附近に彗星の巨大集積帯があるという仮説を提案した。俗に Oort 彗星雲と呼ばれる。Oort 雲附近では時々恒星が通過する。この恒星の潮汐力によってこの彗星雲は太陽系からはぎ取られる程ではないが、一部の彗星は軌道を大きく乱されて太陽近傍にやって来る。これが私達の目に触れる長周期彗星という訳である。星間空間には恒星以外に巨大分子雲などが多数存在することがわかってきたので、最近では Oort 彗星雲というもの本当に存在しているかどうかを疑う研究者もいる。しかしいずれにせよ、初めて太陽附近にやって来た彗星は、ずっと遠方から飛来し放物線に近い軌道を持っていることは間違いない。

短周期彗星は、放物彗星や長周期彗星が主に木星と繰返し遭遇して徐々に軌道を変えられたものだという説は既に 19 世紀から称えられていた。しかしこの説を確かめることは、コンピュータが自由に使えるようになって初めて実現する。惑星や恒星の摂動を多数回受けて彗星の軌道がさまざまに変化してゆく様子を軌道進化と言う (天文月報 1979 年 9 月、藪下氏の記事参照)。Everhart (1972) は運動方程式の数値積分によって、実際に放物彗星が短周期彗星に捕獲されることを示した。木星の摂動だけを考慮しているが、周期 4 年という短い周期の彗星に捕獲できる例もいくつかあった。木星軌道附近に近日点を持ち、軌道傾斜角が小さい放物軌道が最も効率よく短周期彗星に軌道進化できる。

運動方程式の数値積分は一番直接的な方法だが、1 個の彗星を数 1000 周期も追跡しなければならず、計算時間とお金が非常にかかる。もっと安上りで早い方法は、予めいくつかの軌道要素の組について、1 周期に対する

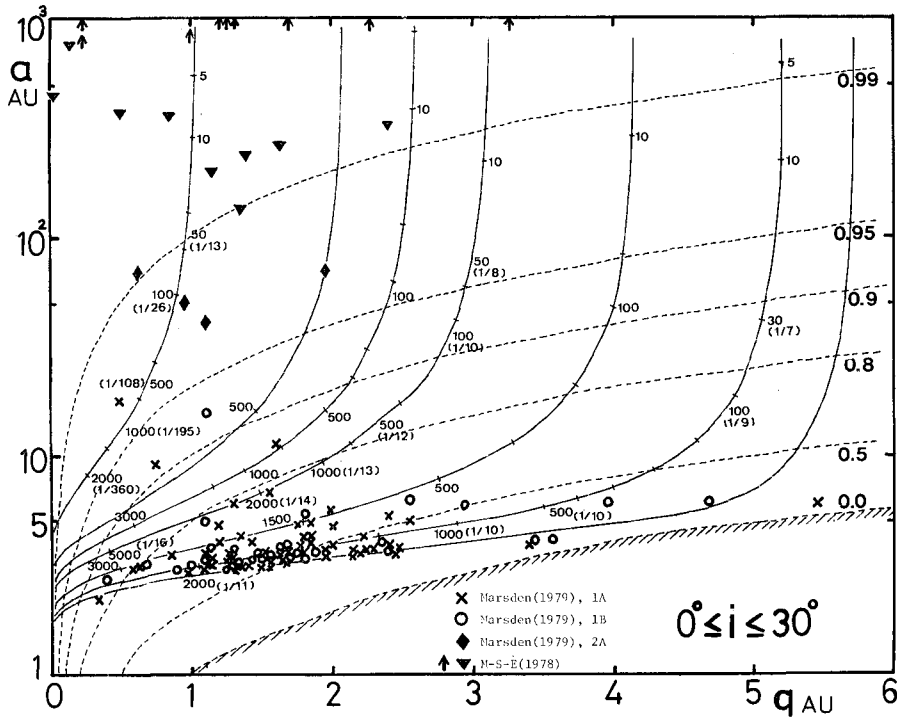


図3 低軌道傾斜角の彗星の軌道進化

軌道要素の摂動の分布を作っておき、この分布に従って摂動をランダムに発生させ軌道進化を追跡するやり方である。この方法は多くの研究者が用いているが、彗星の運動が惑星とレゾナンスになる様な場合は当然使えない。図3に一つの計算例を示す。×や○は観測された短周期彗星である。曲線は軌道進化の平均的経路を表わしている。横軸が近日点距離、縦軸は軌道半長径である。短周期彗星の多くが、木星の軌道半径(5.2 AU)附近に近日点をもつ放物彗星の進化経路の延長上にあることがわかるだろう。この計算では惑星は木星だけであり軌道傾斜角も小さいので、曲線の形は Tisserand の判定式と呼ばれるものにほぼ一致する。各曲線に記された数字は、放物彗星として出発してから太陽をめぐった平均の回数を示す。この間大部分の彗星は太陽系外に放出されてしまう。点線の曲線は離心率の等しい点を連ねたものである。放物彗星は短周期彗星に捕獲されてゆくにつれて近日点距離が減少してゆく。木星軌道附近に近日点をもつ放物彗星の場合、一旦離心率は減少して円軌道に近づき、周期の短い短周期彗星に近づくに従って離心率は再び増加する。Everhart は、Schwassmann-Wachmann I 彗星や Chiron が軌道進化の途中で円軌道に近くなった段階の彗星ではないかと示唆しているが、あるいはそうかもしれない。

木星軌道附近に近日点を持つ放物彗星が短周期彗星に軌道進化できることはわかったが、その様な放物彗星は速すぎて観測することができない。Joss (1973) は、放物新彗星の年間出現数と Everhart の求めた捕獲能率とから推定した短周期彗星数は、実際に発見されている短周期彗星の数に比べて  $10^4$  倍も足りない点を指摘している。これに対し Delsemme は、中間周期の彗星を相当数仮定すれば説明できるとしているが、これは見えない彗星を別な見えない軌道に置き換えただけで真の解決にはなっていない。こうした意味で、短周期彗星の起源は定性的には一応説明できたが定量的にはまだ不明な点が多いというのが実情であろう。

さてハレー彗星はどこから来たかという問題であるが、ハレー彗星もオ尔特雲などの充分遠方から飛来して徐々に捕獲された彗星だと言えるだろうか。ハレー彗星は逆行彗星だから、その軌道進化も図3の場合とは違った振舞いを示す。図3と同じ計算法で放物彗星からはじめて軌道を追跡してみると、軌道傾斜角はわずかに増加するだけだが、周期が短くなるに従って近日点距離は増加してゆく。始めの近日点距離が  $0.1 \sim 0.2$  AU の時、500 回ほど太陽の周囲をまわるとハレー彗星の軌道くらいまで持ってくる事ができる。しかもその捕獲の効率、木星の軌道附近に近日点がある低軌道傾斜角彗星の

捕獲効率の1/3ほどであり、他の色々な軌道の捕獲効率に比べて特に悪いことはない。もしこの計算結果が本当なら、ハレー彗星は1931IV ( $q=0.075$  AU,  $i=169^\circ$ ) といった近日点距離のかなり小さい長周期彗星から軌道進化したと考えざるを得ない。逆行軌道で黄道の近くを運動する長周期彗星は、低軌道傾斜角を持つ長周期彗星とほぼ同数知られているから数量的にも余り問題ない。

ただしこの計算では、木星以外の惑星は考慮されていないし、ジェット効果の影響も入っていない。近日点距離の小さい彗星ではこの効果は核の自転軸の方向によ

てはかなりきいてくる場合がある。その時には今の結論が変わってくるかもしれない。

今後は、ジェット効果による軌道の変化と、核の慣性モーメントの変化による自転の変動を同時に解くようなアプローチが必要になるだろう。またガス放出のメカニズムと自転の方向を知るために、ハレー彗星の接近時に、核附近のガスの流れを詳しく観測することは極めて重要である。高倍率による眼視観測の出る幕はまだであると思われる。

## ハレー彗星でなにを観測するか

齊藤 兎\*

### 1. ハレー彗星の意義

彗星の科学的な研究はハレー彗星とともに進んだというのはいいすぎだろうか。

18世紀初頭ハレーは彗星の回帰軌道をはじめて予言した。天王星や海王星の発見に百年も先だち太陽引力のおよぶひろい空間の存在をしめした。1758年のハレー彗星の回帰はフランスのクレイローが木星・土星の摂動をしらべてその時期を正確にいいあてた。

1835年の回帰は彗星の物理的な観測というあたらしい方面の研究のはじまりになった。ハレー彗星は、近日点の前で頭部の形や様相がいろいろに変わる。中心核から突出する光りもの・円形の光暈・中心から弧をえがいてでる流線などがあらわれる。彗星本体からふきだすちいさな固体粒が太陽に起因する斥力で押しながされるのだとみて、ドイツのベッセルはそういういろいろな活動や頭部の形状を説明しようと試みた。この斥力は彗星の尾をもつくる。19世紀後半ロシアのブレディヒンは、ベッセルの考えを応用して尾の形の分析をおこなって成功した。ベッセル・ブレディヒンの尾の理論といいその大筋はいまも通用する。

19世紀は彗星の本質を推定する観測事実のでた時代でもあった。特定の彗星と流星群との軌道が一致するという発見がそれだ。すると彗星の本体は密にむらかった流星物質の集団であろう。この考えは一世紀にわたってひろく信用され、いまでもイギリスのリットルトンなどが主張しつづけている。

1910年の回帰は、尾が地球をつつむほど彗星と地球とがちかづくというので早くから一般の関心をあつめた。専門的にも多くの人びとが観測し大量の記録がえられ

た。だがそれらはおおく個別におこなわれたから、記録の蒐集は不完全でいまなお埋もれている観測もあるらしい。このハレー彗星の研究から彗星分子の発光が太陽光の共鳴散乱にもとづくことがわかった。リック天文台のポプロフニコフはスペクトルならびに頭部や尾の形とその変化の広範な研究をおこなった。また隕石がガス物質を収着していることから類推をすすめて、彗星の発光分子の起原になる安定な母物質の存在を予想した。分子収着の考えをうけてソビエトのレーヴインは彗星光度と太陽距離との関係を説明し、その説明は1950年代まで、正しいとみられていた。

このように近代のハレー彗星はどの回帰も彗星研究の中心に位置をしめている。これはハレー彗星が計画的に観測のできる大型の周期彗星だというばかりでなく、76年の周期が人の一生にちかくて科学研究のサイクルと同期したことも見のがせないとおもう。

さて1986年の回帰は、いままでをこえて重要な彗星研究上の節目にあたっている。それは、まだ直接知ることができないでいる彗星の本体をなんとか解明したい機運とじっさい解明できそうな状況が、彗星とそれをめぐるいろいろな方面の研究の結果熟し開けてきているからである。

### 2. 彗星の本体

20世紀前半に到達した彗星の本質に関する結論によると、定性的には、彗星現象はうまく説明できる。すなわち彗星の本体は直径数百キロメートルに広がる流星物質の集団であること。その流星物質は揮発性の安定分子、たとえば水・アンモニア・二酸化タンソなどを粒の内部に収着していること。揮発性分子は太陽のちかんで固体粒からでてきて、太陽光の作用やたがいの化学反応で、発光する分子基を生じ目にみえる彗星の形をつくること。

\* 東京天文台 Keiji Saito: Ground-based study of Halley's comet at the next return