

彗星の統計と力学

藪 下 信*

1. はじめに

現在、軌道要素が比較的正確に知られている彗星の数は約600に達する。周期200年以上のものは長周期、それ以下のものは短周期と分類される。最近、彗星の統計や力学に関する地道な研究が結実し、いくつかの確立されたと見做し得る結果が得られている。しかも、NASAが1986年に出現が予定されているハレー彗星に探測船の打ち上げを計画しており、その他に彗星の化学組成が生命の起源にとって、原始地球よりは都合が良いのではないかとするホイルの仮説が出されたりして、彗星に関する興味は高まっている。このような理由で、彗星についての最近の研究を紹介することは無意味ではなからう。

2. 観測データ

約600にも及ぶ彗星の軌道要素を正確に決定することは極めて重要であるが困難な仕事である。マースデンは'72年、'75年、'79年にカタログを出している。長谷川はこれらに含まれていない古代の彗星の要素を決定している。シタルスキーは中世ヨーロッパでの観測をもとにカタログの準備をしている。ここではマースデンと長谷川の仕事をもとに統計結果を紹介する。

図1は軌道傾斜角 i の分布を与える。近日点が地球上に一樣に分布しているとすれば、正弦曲線となる筈であるから、それからのずれの有無で一樣分布か否かが分かる。 $i=140^\circ$ 附近にピークがあること、 i が 0° 附近と 180° 附近のものが多くあることに注意して欲しい。とくに $i=140^\circ$ 附近のピークは著しい。しかし原初 $1/a$ (a は軌道の半長径)が 10^{-3} AU^{-1} より大きいものは、ほぼ一樣分布を示す。要するに一樣分布からのずれは $a > 10^8 \text{ AU}$ の彗星にあるのである。このピークが何に由来するかを見るために、近日点の黄経、黄緯(λ, β)を求め、その分布を調べると重心は $\lambda=259^\circ.7$, $\beta=66^\circ.0$ にあることが分かるが、これは太陽運動の近傍の恒星に関する運動方向 $\lambda=260^\circ.6$, $\beta=43^\circ.0$ からわずかにずれているだけである。さてクレサクは、近日点分布の一樣性からのずれは、地球上に観測者が一樣に分布していないことその他の観測選択の結果によると主張している。しかし筆者はある種の統計的手法を用いて、観測選択の効果を

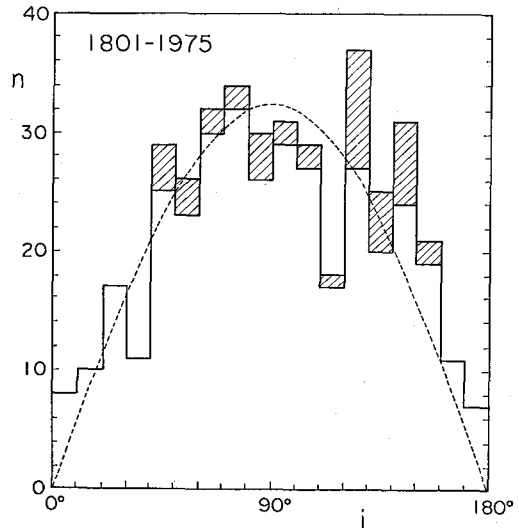


図1 長周期彗星の軌道傾斜角の分布。影を施しているのはSとGグループに属するもの。 $i=120^\circ$ 前後にピークがある。

調べてみたが、やはり特定の方向に近日点が集中しているという事実は否定し難いことが分かるのである。それで長谷川は太陽運動の方向の 30° 以内に近日点をもつ彗星をSグループと呼び、それを i の分布から除くと、ほぼ正弦曲線が得られることを示した(図1参照)。この他に、銀河面の近くにも近日点は多く存在する。以上を要約すると、太陽運動の背点の方向に遠日点をもつ彗星群が存在し、それを除けば、近日点の分布は、地球上でほぼ一樣と見做してよいのである。

つぎに問題にしなければならないのが $1/a$ の分布である。これは彗星の力学エネルギーを与えるのみでなく、その原初の値は、少くとも観測された彗星が直接どこから来たかを示すのである。原初 $1/a$ の値は個々の彗星について、観測された軌道要素から惑星摂動を差し引いて計算されるが、マースデン・セカニナ・エバーハートは200個の軌道要素がとくに正確に知られているものについて計算した。その分布を図2に示す。以後原初軌道要素は $(1/a)_{or}$ のように示す。

このヒストグラムから、 $a \sim 10^8 \text{ AU}$ あたりに多数の彗星のあることが見てとれる。これがいわゆるオールトの彗星雲の半径であって、ここに現実に多数の彗星が存在することは否定できないのである。オールトによれば、この多数の彗星のいくつかは、太陽近傍を通過する

* 京都大学・工 S. Yabushita: Statistics and Dynamics of Comets

恒星の摂動により、近日点距離 q が小さくなり可視領域 (4~5 AU 以下) にもって来られるのである。恒星摂動は彗星の角運動量 h は変えるが、エネルギーは殆んど変えない。よって原初 $1/a$ の値が、オールト雲の半径を与えると考えるとよいのである。ただ筆者が注意したいのは負の $1/a$ が多数存在することである。マースデン等は、これは見かけ上のもので、次節でのべるジェット効果を考慮すれば全て正 (楕円軌道) となると主張する。しかし、10% にも達する負の値をすべてそれで説明するのは難しいと考える。素直に受けとれば、負の $1/a$ は彗星の星間空間での起源を示すものである。

3. 彗星のモデル

彗星が何でできているかは、はっきりとは分からない。推定されている質量 10^{18-23} グラムが一つの固体でできているとしても半径数 km であり、望遠鏡の分解能以下である。しかし最近ではホイップルの氷核モデルが広く支持され、他のモデルは無視されるようになった。

ホイップルによれば、彗星のコマの中心には半径数 km の核があり、それは H_2O (水)、 CH_3CN (シアン化メタノール)、 HCN (シアン)、 CO_2 のような分子が氷の状態にあるものから成る。それにダスト (Si を主成分とする) が混入しているのである。太陽輻射により揮発性の成分は表面から蒸発して、彗星のコマを作る。太陽風によりそれが後方に吹きとばされてテイルを作る。テイルは主としてガス成分からなるか、ダストによるかでタイプ I, II に分類される。

さてガス分子が核の表面から蒸発するとき、核に反跳力を及ぼす。即ち、太陽とは逆方向に力を及ぼす、もし核が自転していれば、この力の方向は、必ずしも軌道接線とは一致しない。これをマースデン等は非重力効果とよんでいる。そして純粹の重力理論と観測とのずれから、その大きさを推定しようと試みている。事実、ハレー彗星の過去の出現に際しては 3 日間にも及ぶ残差があり、

これはジェット効果によるものと考えられている。ウェイスマンは $q \sim 0.1$ AU のものでは、この効果の $1/a$ への影響は惑星摂動とほぼ同一のオーダーと主張する。

このモデルはしかし単純化しすぎであると考えられる。コマは分子の自由距離よりもはるかに大きく、むしろ空気力学的に扱う必要がある。核からの稀薄ガスと太陽風が相互作用すると前面に衝げき波ができる。非圧縮性流体の場合、流体を噴出する物体には推力が働くが、ガスの場合、推力になるか、抵抗になるかはおそらく流れのマッハ数に依存するものと予想される。ピアーマン一派は衝げき波の模様や、コマの中での流れの様子がどうなるかを調べたが、計算の精度が悪く、抵抗か推力かは分かっていない。彗星の中にはエンケ彗星の如く、加速を受けたり減速を受けたりするものがあるが、おそらく太陽風との空気力学的な相互作用が原因となっているのであろう。流体力学の専門家がこの方面の研究に興味を持つことに期待したい。

4. 太陽系内起源と星間空間起源

彗星が前節で紹介したようなものとして、その起源には 2 通り、即ち太陽系内か星間空間かのいずれかしきあり得ない。オールト雲のあたりに、ガスが多量に存在したとは考えられないから、太陽系内としては惑星軌道の外側のあたりで彗星ができ、主惑星の摂動で現在のオールト雲のあたりに持って行かれたか、或いは星間ガスの中で形成され、太陽系に捕獲されたかである。太陽系内起源説が強く支持されて来た理由として、オールト雲の半径が非常に大きいとは云え、ほぼ 10^5 AU とははっきりしていること、確実に双曲軌道と見做される彗星が殆どなかったことによる。さて、もしマースデン等の主張する非重力効果があるとすれば q の小さなもの程大きい筈である。そしてマースデン・セカニナ・エバーハートの原初 $1/a$ のうち負のものが、この非重力によって説明されるのであれば、 q と $(1/a)_r$ をプロットした場合、強い相関が見られる筈である。実際には、全く相関のない図が得られ、マースデンの説明は根拠に乏しいと云える。それでは星間空間起源説に立った場合、どのような問題があるであろうか。第一に、果して氷核ができる位に密度の高い星間ガスがあるか否かということ、第二に、その場合 $1/a$ の分布が図 2 に示したようなものになるかということである。

マックリーは濃いガス雲の中に $10^5 H_2 cm^{-3}$ 程度の、特に密度の高い部分があり、そのような部分が重力によって 10^3 年程度で収縮して $10^{18} g$ 程度の氷核ができると考える。ガス雲は決して一様ではなく濃淡はあると考えられるから、マックリーの仮説は極めて妥当なものである。その中に星間ダストが混入していれば、ちょうどホ

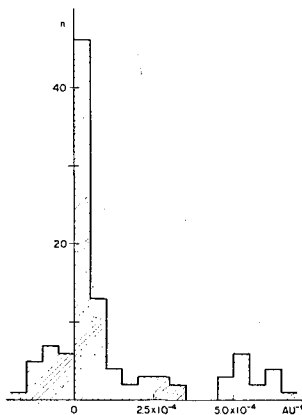


図 2 惑星領域に入る前の $1/a$ の分布。
 $1/a$ の値はマースデン・セカニナ・エバーハートによるものを用いた。

イップルの氷核に似たものができるとするのである。原始太陽系そのものが星間ガスが収縮してできたものであり、その過程の中で彗星ができたとすれば、星間ガス内の密度の高いところと物理・化学的条件はほぼ似ていると考えられるから、いずれを採るかはそれ程重要ではないかも知れない。残る問題は果して $1/a$ の分布がどうかである。

5. 惑星摂動

彗星の軌道は a, q, i, ω, Ω と近日点通過の時刻によって定まる。さて長周期から木星との近接遭遇によって短周期になるというようなドラスチックな変化を除いては、 $1/a$ そのものはそれ自身と同じ位変化を受けるが、他の軌道要素は殆んど変化しない。たとえばハレー彗星の場合、 Ω の木星による永年変化は一周期あたり $0^{\circ}3$ 位であり、土星もこの程度の変化しか与えない。しかも後にのべるように何回も周回できないので、 (q, i, ω, Ω) は一定にとどまると見なして良い。さて軌道を放物線で近似した場合、 $1/a$ の摂動 $\delta(1/a)$ は、近日点通過時の木星の位置について、平均をとると零になる。しかも、小さく見積っても数百万個にも及ぶ彗星の周期は数万年から数百万年或いはそれよりも大きいから、彗星が惑星領域に来るときの木星や土星の位置はランダムと見做してよい。よって問題とすべきは、 $\delta(1/a)$ の統計的分布である。その平均値は零であるから、求めるべきはその分布形と偏差である。さて、彗星はその軌道が進化するには、何回も惑星による摂動を受けなければならないので、 $\delta(1/a)$ の分布の形はそれ程重要でない。惑星の位置の他に (i, ω, Ω) も近日点が一樣分布によるものとして計算すれば $\sigma(\delta(1/a)) = 45.5 \times 10^{-5} \text{ AU}^{-1}$ (エパーハート)、 $\sigma = 74 \times 10^{-5} \text{ AU}^{-1}$ ($q = 1.16 \text{ AU}$)、 $\sigma = 52 \times 10^{-5} \text{ AU}^{-1}$ ($q = 2.94 \text{ AU}$) (藪下) という様な数値となる。近日点が木星軌道の内側にあれば、ほぼ一定であるが、 q が 5.2 AU より大となれば、 σ は急激に減少する。

この結果は、近日点が一樣に分布したとしての計算であるが、 $\sigma(\delta(1/a))$ は i や近日点の黄緯 (β) にも依存するはずである。実際の計算によれば、 i について云えば $i=0^{\circ}$ で大きく $i=120^{\circ}$ 前後で小さくなり、 $i=180^{\circ}$ 附近で再び大きくなる。また β について云えば、黄道面近傍で大きく、極に近いと小さい。要するに、彗星の受ける摂動は決して一樣ではなく、軌道傾角や黄緯に強く依存する。

6. 回帰数の分布

あるとき、多くの彗星が太陽系に注入されたとしよう。惑星摂動によりこのうちいくつかは正のエネルギーを得て太陽系から脱出し、あるものは短周期軌道へと進化する

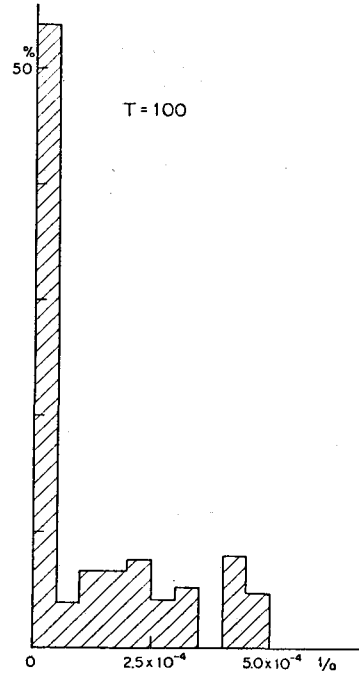


図3 $1/a$ の分布の時間変化。約600万年で、初期分布と関係なく、このようになる。

るのであろう。このとき、 N 回近日点を通じたのちに、太陽系に残っている割合を求めることを、中村の命名によって回帰数分布の問題と呼ぼう。エパーハートは約6000個の仮想的な放物彗星を発生させ、その軌道を追跡して、この割合が $N^{-1/2}$ に比例することを見出した。以前ハマズリーは、これを酔歩の問題として数値計算で求めたことがあるが、実はこの結果は解析的に得られるのである。その基礎になるのが、経済学者サムエルソンの導いた方程式であって、この方程式を今の問題に適用すると、この割合は正確に $(\pi N)^{-1/2}$ ($N \gg 1$) となることが示される。もしガスの放出や流星群を作ることにより、一回に κ^2 の割合で彗星が失われるとすればこれは $(\pi N)^{-1/2} \exp(-\kappa^2 N)$ となる。またエパーハートは $1/a$ の平均値が $N^{1/2}$ で増加することを数値実験の結果として得たが、これも解析的に求めると $(\pi N)^{1/2} \times \sigma(\delta(1/a))$ となることが示される。要するに回帰数 N の増加とともに a の平均値は減少し、短周期へと移行するのである。他方、中村は $1/a$ と角運動量の摂動を同時に取り入れた軌道進化を酔歩の問題としてとらえ、類似の結果を得ている。黄道面に近い彗星は小さな N のうちに短周期に変化し、逆に i が大きい軌道の進化には、大きな回帰数を必要とする。したがって、もし物理崩壊をも考慮すれば、 i の大きなものは軌道進化の途中で観測不能なものとなってしまい、黄道面附近のもののみが可視彗星として残るのであろう。この中村の考えは、短周期彗星が主と

して $i=0$ 附近のものが多いという観測データと一致する。この短周期軌道への進化と関連して重要なのが、物理崩壊の確率 κ^2 の値である。 a の平均値が 50 AU になるための必要回帰数 N は $\sigma(\delta(1/a))=(1500 \text{ AU})^{-1}$ とすれば 570 にもなり、もしオールの主張する $\kappa^2=0.01 \sim 0.02$ が正しければ、初期の放物彗星の数は膨大なものとなる。最近の研究結果では、しかし、700 回位は可視彗星として残るといふ考えが支配的である。もしそうであれば、観測されている約 100 個の短周期彗星は放物彗星の最後の姿とする考えは、それ程多くの困難をかかえていない。

7. $1/a$ の分布

原初 $1/a$ の値の分布は図 2 に示した通りであり、これから $a=10^5 \text{ AU}$ のあたりから現在観測される彗星が来るとは間違いない。しかし $1/a$ が負の部分にもあり、それらはそのまま受けとれば星間ガス内起源を示している。他方、太陽系内起源をとっても、おそらく濃いガスがあったのは 100 AU 位迄であったろうから、何らかの機構で現在あるところに追いやられたに違いない。もし現在の $1/a$ の分布が惑星摂動によるものであれば、現在の分布は彗星の起源そのものとは無関係な筈である。 $1/a$ は彗星の力学的エネルギーそのものであるから、その分布が惑星摂動によってどのように変化するかを時間(回帰数ではない)の関数として追跡すれば良い。ある初期エネルギー(星間空間起源では $1/a$ は負、太陽系内起源であれば正)の彗星を仮想的に発生させ時間とともに変化をみれば、図 3 に示すように $1/a=0$ の近くにピークがでてくる。ここで、時間単位は $\sigma(\delta(1/a))^{-3/2}=58000$ 年である。 $T=50 \sim 60$ 単位ののちにはこの分布は初期エネルギーとは殆んど無関係(たとえ星間空間起源でも!)であることが示される。このことは現在の $1/a$ 分布は主として惑星摂動の結果作り出されたもので、究極的な彗

星起源とは無関係であることを示している。勿論 $a=10^5 \text{ AU}$ 位の大きさとなれば、恒星摂動が作用し始め、 q の小さなものはより大きく、逆に大きなものはより小さくするよう作用する。よって太陽系内起源にせよ、星間空間起源にせよ、いずれはオールの彗星雲のメンバーとなってしまうのである。よって直接に原初 $1/a$ が負のものを確立しない限り星間空間起源説を立証することはできない。この点に関して興味あるのは紫金山天文台で見出された彗星である。これの原初軌道は双曲線、未来軌道も双曲線で、そのまま受けとれば太陽系を単に通過する宇宙の放浪者である。

8. 今後の問題点

以上を要約すると、まず観測データの面からは (i) ある特定方向(太陽背点)からくる一群の彗星の存在 (ii) 原初軌道のなかに 10% にも及ぶ双曲軌道があり、特に紫金山彗星のようなものもあることはほぼ間違いないと考えられる。他方力学的な面からは (i) 回帰数の分布の問題 (ii) 惑星摂動の $1/a$ の分布に及ぼす影響 (iii) 形成後太陽系に残っている割合(ハマズリー理論) (iv) 惑星摂動の大きさは、ほぼ解明されたと考えられる。それ程明確に理解されないのが、短周期彗星起源の問題で、この点で重要なのは、新彗星が観測不能になるまで何回太陽系を周回できるということであらう。もしこれが 10^8 のオーダーであれば、軌道進化の結果として理解できる。

残る問題はジェット効果(3 節)の流体力学的研究と、果して星間ガス中にマックリーの主張するような高密度部分が存在するかどうかということ、彗星分子と星間ガスの間の類似点と相違点の明確化、それに上にも触れた彗星の物理的崩壊の割合の 4 点であらう。これらはいずれも物理的問題であって、天体物理学者の活躍に期待するところである。

