明らかにされたハレー彗星の謎

——探査機による観測——

大 家 寛†

1986 年 2 月 9 日、ハレー彗星は予測どおりの軌道を通り 76 年ぶりに太陽に最接近した。

この機会に、ヨーロッパ、ソ連、日本、そして米国が、ハレー彗星の謎を解くべく、飛翔体を使って観測に参加した。地上観測の成果に加え、地上観測では想像もつかなかった新しい事実が明らかに出てきた。ここに、その観測の概様と成果を中心にお話をしたい。

1. 国際ハレー艦隊

今回のハレー探査には、ヨーロッパ宇宙開発機構 (European Space Agency)、ソ連宇宙科学研究所 (IKI) そして文部省宇宙科学研究所 (Institute for Space and Astronautical Science) および米国航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration) が、国家や政治組織というよりも、それぞれの宇宙開発機関として参加したことに大変大きな意義があった。これらの機関とその飛翔体は次表のとおりである。

機 関	飛翔体	最接近距離 (km)
ESA	Giotto ⁽³⁾	600
IKI	Vega 1 ⁽¹⁾	8,890
	Vega 2 ⁽¹⁾	8,030
ISAS	Suisei ⁽³⁾⁽⁴⁾	150,000
	Sakigake ⁽⁶⁾	7,000,000
NASA	ICE	28,000,000

各飛翔体は、それぞれハレー彗星の観測に当たりつつ、3 月 6 日～3 月 20 日の間に黄道面通過をするハレー彗星に近づいた。この様子を誰れがいうともなくハレー宇宙艦隊と呼ぶようになった。

2. PLANET-A 計画

宇宙科学研究所では、1980 年頃から PLANET-A

計画がスタートした。これは、当初は地球重力圏を脱出する飛翔体に 4 つの観測器を乗せハレー彗星に近づき、その様相を明らかにしようという目的のものであった。

しかし、この PLANET-A 計画を実施するには、従来地球周辺で実施してきた衛星観測用のロケットや地上施設では充分まかない切れるのではなく、計画の骨子には、2 つの大きな変更が含まれていた。すなわち、M-3 S ロケットを大型化し M-3 SII 型とすること、そして 2 天文単位 (1 天文単位は 1.5×10^8 km) 近くの長距離にわたるテレメータ通信を可能にするよう直径 64 m のパラボラアンテナのような地上施設を持つことであった。

76 年ぶりに到来するハレー彗星の謎を追うことの意義は科学行政側の充分な理解を得るところとなり、この PLANET 計画は、実施に移されることになった。

しかし、実施段階に入ると、すべては必ずしも当初の希望どおりともならなかった。まず計画された観測器は、

- (1) 紫外線撮像装置
- (2) 太陽風観測装置
- (3) 磁場観測装置
- (4) プラズマ波動観測装置

の 4 つであった。しかし、彗星の紫外線撮像のために飛翔体の自転を遅くする要求があり、そのための制御装置 (15 kg 以上の重量) を積むという、つまり観測器にして 2 個分の重量を費やすということになって、140 kg の飛翔体重量という制限の中でどうしても納

† 東北大学 理学部

"The Truth of Halley's Comet Revealed by Spacecraft Observations" by Hiroshi Oya (Geophysical Institute, Tohoku University, Sendai)

まり切らないものとなり、ついに PLANET-A の主探査機には2つの観測装置しか搭載されないという決定をみてしまったのである。つまり PLANET-A には紫外線撮像装置と太陽風観測装置のみが搭載され、残る磁場観測装置とプラズマ波動観測装置は、テスト機にまわった。このテスト機にはしかし、さらに工夫して太陽風観測装置も搭載させ、少しでも物理的に意義のある観測を実施するよう何とか最低限の要求は満たされるところまで修正された。そして重量 140 kg の範囲で Suisei と Sakigake の原案が成立した。

3. 彗星の基本構造

ハレー彗星だけでなく、多くの彗星が太陽近くに出現しそして消えていった。そうした機会をとらえて地上から観測される諸データをもとに、彗星の基本的構造は、徐々に明らかにされてきた。それらを概観してみると以下のとおりとなる (図1参照)。

3.1 核

彗星の物質は H_2O を主体とする氷核が太陽熱を受け H_2O 分子として蒸発することによって核の周辺に拡散していくことが基本となっている。彗星が充分太陽から隔った位置にある時、その核を直接見ることができる。もちろん微小天体であるので大型望遠鏡の助けをかりるわけであるが、それが氷からできているとする時、見かけの明るさから、直径 3 km~6 km 程度と推測されていた。

3.2 電離層

拡散していく中性大気の分布は、

$$\text{div}(N\vec{V}) = Q(\vec{r} - \vec{r}_0) \quad (1)$$

で表される。ここで $\vec{V}$ は中性大気の流速であり、 $Q(\vec{r} - \vec{r}_0)$ は核の表面 $\vec{r}_0$ に対する分子の生成率である。これは太陽に近づいた場合、特に地球軌道近傍では、毎秒 10^{30} 分子位と推定されていた。

図1 太陽側に向かった部分の彗星の状態

さて、この核からおおよそ 100 km 離れると、彗星をとりまく電離層がはじまる。つまりそこでは分子の数密度 $10^{10}/\text{cc}$ で紫外線を吸収する分子の断面積 10^{-15} cm^2 を考えると、紫外線の photon が $2 \times 10^9 / \text{sec} \cdot \text{cm}^2$ とする時、彗星大気のため紫外線が吸収しつくされる点に対応している。この限界点から外には紫外線が到来していて、ずっと電離層がひろがっていくことになる。

3.3 接触層

彗星の核から 4000 km 程はなれたところから太陽風の影響がはじまる。この境界面を接触層と呼んでいる。接触層では減速をうけた太陽風と彗星イオンの吹き流しの圧力に対し、彗星電離層の圧力がバランスする。したがって

$$\frac{N_s M_s}{2} V_s^2 + \frac{B^2}{2\mu_0} + P_1 = \frac{N_2 M}{2} V_c^2 + P_2 \quad (2)$$

となる。これは

N_s : 減速 (Shocked) された太陽風密度

N_2 : 彗星から噴出するガス密度

V_s : 減速された太陽風速度

V_c : 彗星から噴出するガス流速

B : 接触層に集積した磁場強度

P_1 : シース側のガス圧

P_2 : 電離層側のガス圧

M_s : 太陽風に混じった主として O^+ および OH^+ イオンの質量

M : 彗星物質 (主として水) の質量

といった諸量を使って表す圧力バランスの式が成立していることを示している。

この接触面から外側はシース領域と呼ばれるが、ここには衝撃波面を経て減速した太陽風とともに外側に向かう彗星の物質が太陽紫外線を受けつつ電離し、電離するつど太陽風に捕捉され、下流に流れていく。この流れは外側へ向かう中性ガス流の成分と混在している。

3.4 イオンピックアップ領域 (シース領域)

シース領域は別名、イオンピックアップ領域と呼ばれる。ここでは電離されたイオンが太陽風に運ばれて吹き流されていく基本的な過程が進行しているからであるが、イオンピックアップそのものは、まだ謎のプロセスで明確に解明されていない。彗星から噴出してくるガスがイオン化すると同時に太陽風の磁場に捕捉されるという見方もあるが、そうした単純な事柄ではなく、結局は太陽風プロトンの流れと、彗星イオンとの衝突が基本になるが、両者の衝突は単にイオン対イオンの衝突でなく、ここに発生するプラズマ波動

が介在して大きな衝突効果を生んでいる。

3.5 衝撃波面

さらに、およそ 30~60 万 km (太陽に向かって) 核から距ったところに、太陽風が彗星大気に突入するため不連続面(衝撃面)が形成される。ここを衝撃波面と呼んでいる。

条件の異なるガス体どうしが衝突する時、衝突速度が遅い間は、擾乱現象を起こしつつ2つのガスは混入していくが、その衝突速度が、加えられた変化を解消する間もないほど速い時、2つの流体は不連続面を作って接触する。この不連続面が衝撃波面であるが、流速、温度、密度の急激な変化が、この衝撃波面に出現する。しかし衝撃波面は、物質流量、エネルギーおよびエネルギー流が、連続的であるかぎり定常的に存在しつづける性質をもっている。すなわち、衝撃をはさんでIの領域の量を流速、密度、温度、磁場強度についてそれぞれ、 V_1 , N_1 , T_1 , B_1 とし、また領域IIの量を同じく V_2 , N_2 , T_2 および B_2 とすると、物質の連続から、

$$N_1 V_1^2 = N_2 V_2 \quad (3)$$

エネルギーの連続から、

$$\frac{1}{2} N_1 m V_1^2 + N_1 k T_1 + \frac{B_1^2}{2\mu_0} \\ = \frac{1}{2} N_2 m V_2 + N_2 k T_2 + \frac{B_2^2}{2\mu_0} \quad (4)$$

といった条件が満たされている。

この衝撃面からはしかし、厳密にいうと非常に激しいエネルギーの放射が起こっている。これに関しては、「さきがけ」が新しい現象を発見することになった。

3.6 水素コマ

彗星を大気圏外に出て観測すると、核の周辺をとりまいて非常に広く広がった領域から紫外線が放射されていることがわかる。この紫外線は、水素がイオン化し H^+ となった状態から再結合する際に放射されるもので、この放射域全体を水素コマと呼んでいる。ハレー彗星の場合、このコマは核から 1000 万 km まで拡大していることが観測されている。

この水素コマ領域では、中性水素が電離し、太陽風との相互作用を通じて吹き流されて行く過程、すなわちイオンピックアップの現象が依然として続いている。

4. 各探査機の成果

4.1 ジオット (Giotto) の観測⁸⁾⁹⁾

ヨーロッパ宇宙機構の打ち上げた Giotto は 1986 年

3月14日0時3分ハレー彗星の核 605 km の点まで近づいた。

観測内容は、核の放出する有機および無機物質プラズマ、エネルギー粒子、そして磁場と盛り沢山であったが、なかでもカメラによる核の撮影は世界中の注目を浴びた。

最接近時には、もうもうとたちこめる塵と衝突しカメラは破壊され、Giotto 自体の姿勢も傾き、電波通信が途絶したが、それ以前にとらえたカメラは、図2にスケッチした核の様相をとらえた。

核の形は「じゃがいも」に似ていて長軸は約 15 km 短軸は 7~10 km といびつになっている⁹⁾。そして表面は凹凸でクレータのようなくぼみもある。注目をひいたのはその表面の albedo が 2~4% ときわめて暗いことで、ハレー彗星核は塵の層をむき出していると考えられる。そして部分的に水を噴き出していることになる。

噴出する水は分子数にして毎秒 $7 \times 10^{29} \sim 10^{30}$ であった。噴出物は、ガスの他、多量の塵であるが、これらは Na, Mg, S, K, Ca といった金属性が無機性のものよりは有機化合物 H, C, N および O の占める割合が圧倒的に多量であることが判明した。dust は最初 290,000 km 付近から観測されはじめたが、大

図2 ジオットにより観測されたハレー彗星の核(上) 説明用のスケッチ(下)

図 3(a) 「すいせい」が横切った Bow Shock (衝撃波-弓状の形状をしている)

図 3(b) 「すいせい」が衝撃波を横切って観測したプラズマの流速、密度および温度

きは種々で $10^{-17} \sim 1.4 \times 10^{-4} \text{ g}$ まで分布している。

ここでは磁場が 57 nT まで急速に強まる。

コンタクト層は核から 4700 km の点で観測された。それから外側は秒速 260 km の減速された太陽風プラズマ流となっている。その外側に衝撃波はほぼ予定位置で観測されたが、それらが多重構造を示すような様子が随所で観測された。

4.2 ベガ (VEGA) の観測¹⁾²⁾

ベガ 1, 2 号は金星に立ち寄ってバルーンと着陸船をおろした後、3月6日に VEGA-1 が、そして3月9日には VEGA-2 がハレー彗星と会合した。当初 3000 および 4000 km の接近を予想した時期もあったが、最終的には VEGA-1 が 8890 km, VEGA-2 が 8030 km まで核に近づき、彗星の核の撮像に成功した。

その核の様相は全く Giotto が観測したものと同様で $53 \pm 3 \text{ h}$ で自転している。やはり albedo は 5% 程で、月の表面と同じ位の黒さであると結論される。

そして表面温度は 300~400 K つまり 80~100°C にもなっている部分がある。これは水を覆う塵の部分はかなり広いことを示していて、ここで加熱が起こり水が噴出していく様相を示している。

VEGA はやはり衝撃波を明瞭に横切っていったが、

その位置は、あとで述べるような重要なデータを提供してくれている。

4.3 「すいせい」の観測³⁾⁴⁾

「すいせい」は3月8日~9日にかけてハレー彗星に 15 万 km まで最接近した。

「すいせい」の成果のひとつは、非常に早い時期に、ハレー彗星の UV 活動が 52 時間前後で変化することを発見したことである³⁾。これは彗星の核が不均一で自転していることによるものであることを明らかにし、その後、Giotto, VEGA でも確認されるに至った点である。

「すいせい」はエネルギー粒子のエネルギースペクトルとその到来方向を精密に計測する装置を搭載しているが、すでに核から 700 万 km 距った点で、太陽風に捕捉された彗星イオンの存在を確認している。また図 3 に示すように、核から 45 万 km はなれた点で衝撃波を横切っている。(図 3(a), (b) 参照)⁴⁾

5. 「さきがけ」の観測と彗星と太陽風の相互作用の物理

「さきがけ」は3月11日から13日にかけてハレー彗星に会合し、ミッションのハイライトを迎えた。「さきがけ」のハレー彗星への最接近は 700 万 km までであったが、この探査体に搭載された PWP (プラズマ波動観測装置) では⁶⁾、①ハレー彗星より到来する電波および②核より 1000 万 km 以上にわたって広がる水素コマ内でのプラズマ波擾乱が観測された⁶⁾。特にハレー彗星より到来する電波は、その周波数をゆっくりと変動させる特徴をもった現象であることが発見された。その周波数帯域から CKR (Cometary Kilometric Radiation) と命名された⁶⁾。

図 4 3月10日 (3/10) から3月13日 (3/13) に至る「さきがけ」の軌道 (太線部および白ぬきの部分で観測が行われた)

5.1 CKR⁶⁾

図4に「さきがけ」がハレー彗星と encounter した際の軌道を示すが、この観測期間特に太い実線で描いた部分の時間帯に対して臼田局でデータを受信している。この観測データをダイナミックスペクトル表示したものが図5である。この図は S/N が良好でないのでも瞭度が落ちるが、それぞれ対応するダイナミックスペクトルを図の右側に表示されているように周波数が明瞭に時間変動をする特徴をもった電波放射が受信されている。(CKR(1)と命名)。

図5 「さきがけ」によって観測されたCKR (左が直接観測されたダイナミックスペクトル、右がそのスケッチ)

CKR がこのように周波数変動する理由を考えると

き、太陽電波、特にタイプII型バースト現象との類似点が見えに富んでいる。ただしCKRの場合、タイプIIバーストの場合のように基本周期とその2倍の高調波が同時に観測されるという現象は現れていない。でそうした点だけを見ると、むしろタイプIII型バーストに類似している。いずれにしてもこのCKRの発射には彗星のコマを取りまくように存在している衝撃波面にともなって、ここに存在する激しいプラズマ擾乱域が電波源として関与していると結論された。

5.2 衝撃波の位置⁶⁾

すでに述べたように、衝撃波の位置はハレー彗星に近づいた4つの探査体によって確認されている。すなわちGiotto, Vega I, IIおよびSuisaiのデータであるが、それらの観測をもとに衝撃波の太陽側の位置を表示したものが表1である。これらの結果は衝撃波の太陽方向の位置が20~70万kmにわたって大幅に移動していると理解するしかないが、観測されたCKRの周波数を $f = f_p$ (局所プラズマ周波数) の点で生じていると仮定し、また、衝撃波の位置での電離度を0.5と仮定すると、CKRの周波数は彗星の活動状況をそのまま映し出していることになり、電波スペクトルの変動は太陽風の活動や彗星の物質の放射の活動変動につれ、前後に移動する衝撃波面の様相を描き出してくれる(表2参照)。

5.2 水素コマ中のプラズマ擾乱

表1 直接観測された衝撃波の位置およびそれと対応する太陽側の衝撃波位置

探査機	衝撃波 (観測位置) (km)	太陽側の位置 (km)
VEGA-1	IN 10^6	3.46×10^5
	OUT 7.1×10^5	4.81×10^5
VEGA-2	IN 1.14×10^6	3.83×10^5
Giotto	IN(1) 1.13×10^6	4.19×10^5
	IN(2) 0.54×10^6	2.0×10^5
	OUT(1) 0.47×10^6	3.08×10^5
	OUT(2) 1.13×10^6	7.41×10^5
Suisai	OUT 4.1×10^5	3.5×10^5

「さきがけ」はハレー彗星の核より700万kmもへだたった位置を飛翔したが、CKRのような遠方から到来する電波だけでなく、水素コマの中で局所的なプラズマ活動も直接に観測している。観測されるプラズマ波動は70 Hz~400 Hz 至るELF帯から20 kHzから100 kHzに至るVLFおよびLF帯と非常に広い周波数帯をカバーしていて、特に電子音波や電子サイクロトロン波のようなレベルの高い静電的プラズマ波動の存在が顕著である。

この観測と時を同じくして、磁場⁵⁾および太陽風⁷⁾イオン観測が行われているが、これらの観測機が示した結果は、イオンピックアップ現象にともなうプラズマ擾乱であることを示している。イオンピックアップ現象は、太陽系のプラズマ現象としてきわめて重要で

表 2 「さきがけ」のダイナミックスペクトルより明らかにされた動く衝撃波の位置

No. of Case	Time Interval (min)	Ionization rate $\gamma=0.5$		Comments
		Starting Position (10 km)	Ending Position (10 km)	
1	113	0.71	0.35	Inward Motions
2	90	1.38	0.52	
3	51	0.43	0.32	
4	79	1.21	0.32	
5	47	0.50	0.38	
6	56	0.50	0.32	
7	101	0.71	0.39	
8	42	0.54	0.39	
9	42	0.34	0.79	Outward Motions
10	39	0.38	0.50	
11	18	0.34	0.50	
12	36	0.58	0.79	
13	16	0.58	0.79

図 6 「さきがけ」によって観測された ELF プラズマ波動のスペクトルの一例 (170 Hz 付近に小さなピークがあるのは電子サイクロトロン波動の存在を示す)

あるが、その基礎過程はあまり知られていない。いま、この「さきがけ」によって得られたデータをベースに、イオンピックアップ現象の解明が進められつつある (図 6 参照)。

6. 彗星とは何であったか

こうして幾つもの観測機は見事に所定の観測を終了した。ここに得られたものは、従来予測していたイメージと総じてかなり合っている。しかしなんといっても人類史上はじめて観測に成功したわけであり、推測

や理論ではなく、確かに、その状態を確認し物理像が明確になるような正確な数値が求められたのであり、太陽系の中で最も謎とされていた天体の正体を実証的に究明されるようになったのである。

彗星の正体が明確になった時、同時に 2 つの問題を解く鍵が得られることになる。それはまず彗星の核に関するもので、

(1) 太陽系の外域に存在する水そして有機物は太陽系の誕生にいかようにかかわっていたか。

という点であり、もうひとつは彗星のガスが太陽風と相互作用する様子に関連するもので、

(2) 原始太陽系星雲の中で、激しく吹いていたと考えられる原始太陽風がいかにしてプラズマ化したか、そして太陽系内の磁場に捕捉されたか。

という問題にかかわるものである。

特に (2) は惑星を作る源物質が原始太陽系の内部でいかに配分されていったかを知るうえで重要な点である。
(昭和 61 年 8 月 28 日講演)

【参 考 文 献】

- 1) R. Sagdeev, R. J. Blamont, A. A. Galeev, V. I. Moroz, V. D. Shapiro, V. I. Shevchenko and K. Szego: "Vega Spacecraft Encounters with Comet Halley", Nature, **321**, pp. 259-262 (1986)
- 2) K. I. Gringauz, T. I. Gombosi, A. P. Remizov, I. Apáthy, I. Szemerey, M. I. Verigin, L. I. Denchikova, A. V. Dyachkov, E. Keppler, T. N. Klimenko, A. K. Richter, A. J. Somogy, K. Szego, S. Szendro, M. Tárallyay, A. Varga, and G. A. Vladimirova: "First In-situ Plasma and Neutral Gas Measurements at Comet Halley", Nature, **321**, pp. 262-285 (1986)
- 3) E. Kaneda, O. Ashihara, M. Shimizu, M. Takagi and K. Hirao: "Observation of Comet Halley by the Ultraviolet Imager of Suisei", Nature, **321**, pp. 297-299 (1986)
- 4) T. Mukai, W. Miyake, T. Terasawa, M. Kitayama and K. Hirao: "Plasma Observation by Suisei of solar-wind Interaction with Comet Halley", Nature, **321**, pp. 299-303 (1986)
- 5) T. Saito, K. Yumoto, K. Hirao, T. Nakagawa and K. Saito: "Interaction between Comet Halley and the Interplanetary Magnetic Field Observed by Sakigake", Nature, **321**, pp. 303-307 (1986)
- 6) H. Oya, A. Morioka, W. Miyake, E. J. Smith and B. T. Tsurutani: "Discovery of Cometary Kilometric Ratations and Plasma Waves at comet Halley", Nature, **321**, pp. 307-310 (1986)
- 7) K. Oyama, K. Hirao, T. Hirano, K. Yumoto and T. Saito: "Was the Solar Wind Decelerated by Comet Halley", Nature, **321**, pp. 310-313 (1986)
- 8) R. Reinhard: "The Giotto Encounter with Comet Halley", Nature, **321**, pp. 313-318 (1986)
- 9) H. Keller, U. C. Arpigny, C. Barbieri, R. M. Bonnet, S. Cazes, M. Corodini, C. B. Comovici, W. A. Delamere, W. F. Huebner, D. W. Hughes, C. Jamar, D. Malaise, H. J. Reitsem, H. U. Schmitt, W. K. H. Schmidt, P. Seige, F. L. Whipple and K. Wilhelm: "First Halley Multicolour Camera Imaging Results from Giotto", Nature, **321**, pp. 320-329 (1986)