

太陽風内のハレー彗星起源イオンの空間分布：
「すいせい」による観測

寺 沢 敏 夫*・向 井 利 典
三 宅 亘**・北 山 正 信
平 尾 邦 雄***

(1986年12月25日受理)

Detection of Cometary Pickup Ions from Halley
in the Solar Wind: Suisei Observation

By

T. TERASAWA, T. MUKAI, W. MIYAKE
M. KITAYAMA and K. HIRAO

Abstract: Cometary pickup protons were observed as far as 10^7 km away from the cometary nucleus, while the pickup cometary water-group ions (O^+ , mainly) were observed as far as 4×10^6 km. Observation of these cometary ions is based on the identification of a specific feature in the phase space distribution of ions (ion-pickup shell). We found that the pickup shell is usually filled only partially ($\sim 50\%$). This observation suggests that the efficiency of the energy diffusion is comparable to that of the pitch angle diffusion. From the spatial asymmetry in the cometary ion density observed between inbound and outbound parts of the spacecraft orbit, it is suggested that there was a difference of a factor of 2-3 between the ion production rates around the inbound and outbound orbit.

概 要

「すいせい」の観測により、ハレー起源の水素イオン・水分子族イ

-
- * 京都大学理学部
 - ** 電波研究所
 - *** 東海大学工学部

オン(主に酸素イオンと推定)はそれぞれ彗星中心核から約1000万km, 400万kmのところまで広がっていることが見いだされた。これらのイオンの同定はイオンの位相空間における特徴的構造(シェル構造)の検出に基づいている。シェル構造の非一様性からピッチ角方向の拡散効率とエネルギー方向の拡散効率とは同程度であると結論される。また、ハレーとの遭遇の前後でイオン密度の空間的非対称性が見いだされ、彗星のガス放出率の変動との関連が示唆される。

1. はじめに

「すいせい」の観測によってハレーの comet シース内および彗星中心核から百万 km 程度の衝撃波上流域での彗星起源イオンの太陽風への同化過程が明らかにされた (Mukai et al., 1986a, 1986b)。これらの領域では彗星起源イオンによって太陽風自体の速度、密度、温度も大きく影響を受けていることが見い出されている。一方この領域の外では、彗星起源イオンの密度が低くなるためその太陽風のマクロな流れのパラメタに対する影響は顕著ではなくなるが、依然として強いプラズマ波動を励起していることが観測された (Oya et al., 1986; Yumoto et al., 1986)。この論文では彗星中心核から約1000万 km の距離までにおける「すいせい」のプラズマ観測の結果を示す。

2. 計測器について

この論文で報告する期間では、「すいせい」に搭載されたプラズマ計測器 ESP (Energy Spectrum of Particles) は2次元モードで作動し、248 eV/q-15.3 keV/q のエネルギーのイオンの位相空間分布を対数的に64分割、また経度方向(黄道面内)に22分割している。計測したイオンの分布のモーメントを求め、密度、速度、温度(圧力テンソル)を決定できる。太陽風プロトンの圧力テンソルの非等方性が強いとき、その主軸方向から黄道面に投影した磁場方向の推定が可能である。(この点については、例えば Feldman et al., 1973 参照) こうして決定した磁場方向はハレー起源イオンの位相空間分布の特性の解明に重要な意味を持つ。また「すいせい」とハレー彗星の遭遇の前後で ESP 計測器の較正を行い、感度に有意な変化のないことを確認した。

3. プラズマ観測の結果

図1に1986年3月4日から13日の間の「すいせい」の軌道をハレー彗星の核を中心とした座標系(CSE: Cometocentric Solar Ecliptic coordinate)で示した。中心部にある小さなパラボラはハレー彗星の周りに形成された定在衝撃波の大体の位置を示す。O⁺及びH⁺と記した枠は以下の解析の結果、彗星起源の水素及び酸素イオンの検出された軌道上の場所を示している。

図2に等高線図を示したのは中心核から約1千万 km 離れた場所(遭遇前、3月7日)で観測されたイオンの位相空間密度分布である。この図では全てのイオンをプロトン(水素イオン)と仮定し、速度の中心は「すいせい」の観測者系に取っている。等高線は半桁

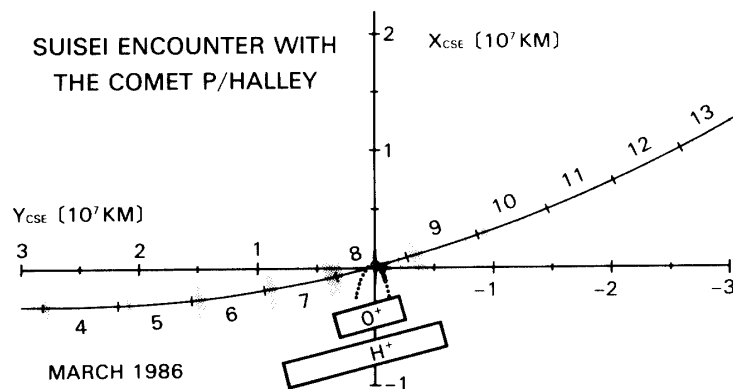


図1 「すいせい」のハレー彗星近傍での軌道を彗星中心座標系で示す。ハッチした部分はプラズマ計測が行われた場所である。彗星起源の水素イオン、酸素イオンは図で H^+ 、 O^+ と記した枠に沿った位置で検出された。

6 MARCH 2355-7 MARCH 0331

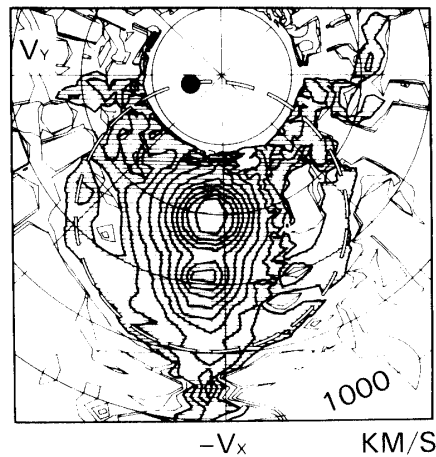


図2 ハレー中心核から約1000万kmの場所で観測されたプロトンの位相空間分布(上向きに $+V_x$ 、左向きに $+V_y$)。原点は「すいせい」の観測者の系であり、慣性座標系に移るには $(7, -33)$ km/sを加える必要がある。黒丸は「すいせい」に対するハレー彗星の速度であり彗星起源のイオンが電離直後に持つ速度と観測誤差の範囲で一致している。白抜きの破線で描いた円は彗星起源イオンの作る pickup shell の位相空間における位置を理論的に推定したもので、観測されたプロトンの分布にはそれに対応する密度の高まりが見られる(ハッチした領域)。

毎に描かれており、分布の構造を強調するため密度が $10^{-14} \text{ m}^{-6} \text{ s}^3$ より高い部分には斜線を施してある。 $(-400, 35)$ km/sの位置にある最も高いピークは太陽風プロトンを表す。 $(-570, 45)$ km/sには2番目のピークが見られるが、これは太陽風内のアルファ粒子を表して

いる。質量・電荷比が M/q のイオンに対して図の座標の速度の値は実際より $(M/q)^{1/2}$ 倍大きい。アルファ粒子の M/q は 2 なので実際の速度は $(-403, 32)$ km/s となり誤差の範囲 (± 5 km/s 程度) でプロトンの速度と一致していることがわかる。なおアルファ粒子に対しては位相空間密度のスケールも $(M/q)^2$ 倍する必要があることにも注意する。

さて、図に破線で描いた円は彗星起源のプロトンが太陽風磁場に捕捉された時形成する位相空間内の球殻 (ion-pickup shell) の理論的予想位置である。座標原点に近い黒丸は彗星起源の中性粒子が電離された直後に持つ速度である。(中性粒子が彗星中心核に対してもつ速度は 1 km/s 程度なので、以下の議論では電離直後のこの速度の「すいせい」座標系での値を「すいせい」ハレー彗星の相対速度 $(-18, 70)$ km/s と見なす。) 彗星起源のイオンは電離後磁場の回りにサイクロトロン運動を始め位相空間内でのトラスを作る。しかしこのようなトラスは不安定であって、すぐにピッチ角散乱を受けて球殻状に拡がる。これが pickup shell のできる原因である。図 2 では、破線に沿って位相空間分布の高まりが見られハレー起源のプロトンの存在を示すものと解釈される。彗星起源プロトンの同定はこの日が最初で、中心核から 1500 万 km 程離れた前日の観測では彗星起源イオンは検出限界以下であった。

図 3 にはハレー彗星起源の水分子族イオン (主に酸素イオンと期待されるので以下では単に O^+ と呼ぶ) の観測を示す。この観測は 3 月 7 日から 8 日にかけて中心核から約 300 万 km の所で行われたものである。座標原点に近い濃くハッチした部分 ($10^{-13.5} \text{ m}^{-6} \text{ s}^3$ 以上) には彗星起源プロトンが見られる (白い破線が理論的な場所を示す)。一方、黒い破線で示した円は彗星起源 O^+ に対し期待される場所を示す。図で薄くハッチした部分は O^+ に対する密度が $10^{-13.1} \text{ m}^{-6} \text{ s}^3$ 以上であることを示し破線に対応した高まりがあることが見られる。(但し、 O^+ の ion-pickup shell の高速度側の部分は ESP 計測器のエネルギー範囲を越えているため観測できない。) 解析の結果、彗星起源 O^+ は中心核から 400 万 km の場所まで検出されている。

7 MARCH 2351-8 MARCH 0251

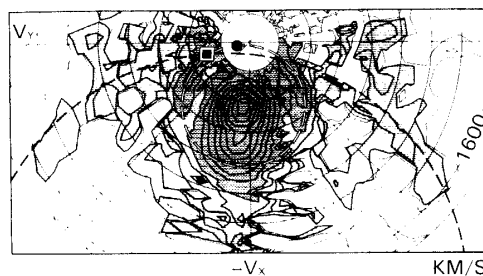


図 3 イオン (プロトンおよび酸素イオン) の位相空間分布。(ハレー中心核から約 300 万 km)。白抜きの破線はプロトンの pickup shell, 黒い破線は酸素イオンの pickup shell の理論的位置。黒丸, 白抜きの正方形はそれぞれ彗星起源のプロトン, 酸素イオンが電離直後に持つ速度である。

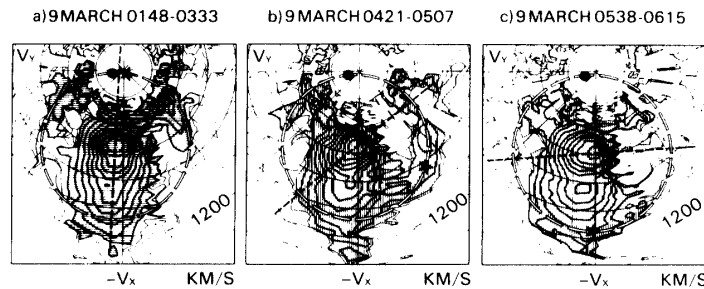


図4 ハレー中心核から340-440万kmにおけるプロトンの位相空間分布。破線で描いた直線はそれぞれの時間における磁場の推定方向。白抜きの破線で描いた円は期待される pickup shell の位置。黒丸は彗星起源プロトンが電離直後に持つ速度、星型のマークは磁場の回りに形成される位相空間のトラスと黄道面の交点。

ところで、内側のプロトンに対する pickup shell は一様ではなく、原点に近い部分のみに有意な密度の高まりがあることが図から明らかである。太陽風プロトンの非等方性から決めた磁場の方向はほぼ図の V_x 軸に平行で、図に見られる部分的な pickup shell の対称軸と一致している。pickup shell が部分的にしか満たされていない理由としては、

1) 電離された後十分時間が経過していないのでピッチ角散乱の結果が球殻を覆うまでに至っていない。

2) ピッチ角散乱と同時にエネルギーの散乱も起きるため、最初の電離位置(図の黒丸)から離れるにつれ球殻がはつきりしなくなる。

の2つが考えられるが、プロトンは観測にかかるまで数百回のサイクロトロン運動を経ており、ピッチ角散乱を受ける時間は十分あったと考えられ、理由2)がもっともらしい。しかし最終結論を得るためにはピッチ角散乱過程を定量的に取り扱う必要がある。

pickup shell が部分的にしか満たされておらず、その構造が磁場の方向に依存している例は遭遇後3月9日の観測でも得られている(図4)。この日は太陽風磁場がほぼ X 軸に平行な方向から垂直な方向へと変化し(図4 a から c にかけての磁場方向—黒い破線—の回転を見よ)それにつれて pickup shell の構造も回転している。

図5には同定された彗星起源プロトンの空間密度の変化を示した。ここで空間密度は観測された pickup shell について速度空間での積分を行って求めたものである。shell が3次元構造であるのに対し観測は2次元モードなので実際に積分を行うには速度空間での外挿が必要である。詳細については Mukai et al. [1986 a] を参照されたい。外挿にあたっては図3-4の観測に基づき pickup shell はその体積の50%が満たされていると仮定した。図の白丸は太陽風プロトンの非等方性から磁場方向の推定が可能であった場合に対応する。(この時、密度決定上の主な誤差要因は shell の厚みの推定にある。)黒丸は非等方性が小さく磁場方向を決定できない場合である。このとき、実は磁場は黄道面に垂直で shell と解釈した位相空間の構造は黄道面内に横たわるトラスかも知れない。この可能性を否定できないため黒丸の場合随分小さな密度推定の下限值が出てくる。下向きの矢印(inboundで

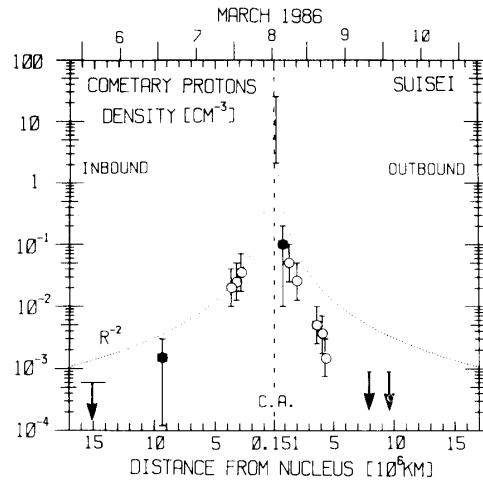


図5 ハレー彗星起源のプロトンの密度の空間分布。

1500万 km, outboundで800–950万 kmの場所)は彗星起源プロトンが検出限界以下で密度の上限のみ求められた場合を示している。スケールとして距離の逆2乗曲線を点線で示してある。

プロトンと同様に彗星起源の酸素イオンについてもその空間密度の計算を行った。図3の例では密度は $0.015\text{--}0.035\text{ cm}^{-3}$ となっている。しかし酸素イオンについては pickup shellの約半分ほどがESP計測器のエネルギー範囲にあるにすぎないため、結果の解釈には注意が必要である。酸素イオン密度の観測はハレー彗星のコメトシース内での観測とあわせこの報告集の向井ほかの論文にまとめた。

4. 結果の考察

この論文では太陽風内での彗星起源イオンの位相空間分布についての詳細な観測結果を報告した。最も重要なのは理論的に予測されていた ion-pickup shellを同定したことである。pickup shellの充填率が100%でなくほぼ50%程度であることが見いだされたが、この発見は彗星起源イオンの太陽風プラズマへの同化 (assimilation) の微視的物理過程の研究にとって重要である。

図5で彗星起源プロトンの空間密度分布は彗星中心核に対し対称ではないように見える。理論的に「すいせい」の観測場所 (R_{obs} とする)での空間密度を求めるには、その上流側で彗星起源の中性粒子から生成されたプロトンを太陽風の流線に沿って集めればよい [Ipavich et al., 1986; Mukai et al., 1986a] ;

$$n = \frac{1}{V_c} \int_{R_{\text{obs}}}^{R_{\text{limit}}} P ds \quad (1)$$

ここで P はプロトンの生成率、 R_{limit} は上流側への積分限界である。 V_c は生成されたあと太陽風によって流される速度である。彗星起源プロトンは太陽風の固有座標系で等方的で

ないので一般に V_c は太陽風流速とは等しくない。さて inbound 側での観測場所は outbound 側に比べより下流側である(図1参照)。このため(1)での積分路が長くなり生成率 P 、速度 V_c が一定としても n は40%程大きくなりうる。また観測された太陽風速度は inbound の時期には400–450 km/sであり outbound の時期には570–600 km/sであった。 V_c の変化も太陽風速度と同期しているであろうから、このことによる n の違いは30%程と見込まれる。これら2つの効果を合わせると inbound の空間密度は outbound に比べ2倍程度大きくなり得るが、図5では5倍程度異なっているのもまだ足りない。観測された非対称性の説明には生成率自体が2–3倍程度 inbound で高かったとする必要がある。このイオン生成率の変化は金田ら〔1986〕の見い出した中性ガス密度の時間変化と関連するかも知れないが詳しいことは今後の研究に待たねばならない。

参 考 文 献

- [1] Feldman, W. C., J. R. Asbridge, S. J. Bame, and M. D. Montgomery, On the origin of solar wind proton thermal anisotropy, *J. Geophys. Res.*, **78**, 6451–6468, 1973.
- [2] Ipavich, F. M., A. B. Galvin, G. Gloeckler, D. Hovestadt, B. Klecker, and M. Scholer, Comet P/Giacobini-Zinner: In situ observations of energetic heavy ions, *Science*, **232**, 366–369, 1986.
- [3] Kanada, E., K. Hirao, M. Takagi, O. Ashihara, T. Itoh, and M. Shimizu, Strong breathing of the hydrogen coma of comet Halley, *Nature*, **320**, 140–141, 1986.
- [4] Mukai, T., W. Miyake, T. Terasawa, M. Kitayama, and K. Hirao, Plasma observation by Suisei of solar wind interaction with comet Halley, *Nature*, **321**, 299–303, 1986a.
- [5] Mukai, T., W. Miyake, T. Terasawa, M. Kitayama, and K. Hirao, Ion dynamics and distribution around comet Halley: Suisei observation, *Geophys. Res. Letters*, **13**, 836–840, 1986b.
- [6] Oya, H., A. Morioka, W. Miyake, E. J. Smith, and B. T. Tsurutani, Discovery of cometary kilometric radiations and plasma waves at comet Halley, *Nature*, **321**, 307–310, 1986.
- [7] Yumoto, K., T. Saito, and T. Nakagawa, Hydromagnetic waves near O^+ (or H_2O^+) ion cyclotron frequency observed by Sakigake at the closest approach to comet Halley, *Geophys. Res. Letters*, **13**, 825–828, 1986.