

ハレー彗星の Cometsheath 内のプラズマ

高橋 俊*・寺澤 敏夫*・向井 利典
北山 正信・三宅 亙**・平尾 邦雄***

(1987年12月25日受理)

Plasma in the cometsheath of comet Halley

By

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

Abstract: We estimate proton and alpha particle bulk parameters within the cometsheath. Temperature of protons seems to decrease from bow shock to about 2×10^5 km (not at closest approach), and increase thereafter slightly. This decrease is likely caused by the cooling effect accompanying with the charge exchange process as well as with the mass addition of cold pickup ions. On the contrary, the observed temperature of alpha particles stayed almost constant throughout the cometsheath. We attribute this to the absence of effective cooling process for alpha particles within the cometsheath.

概 要

我々は、cometsheath内のプロトンと α 粒子のバルクパラメータを算出した。温度は衝撃波から 210^5 km付近(最接近点とは一致しない。)まで低下し、その後幾分上昇する。この温度の低下は電荷交換と付け加わった冷たいpickupイオンによる冷却効果によると考えられる。これに対して、 α 粒子の温度はcometsheathを通してほとんど一定である。これは α 粒子の冷却に有効な電荷交換過程が存在しないためである。

1. 緒 言

ハレー彗星のcometsheath内のプラズマの流れを見るために、ハレー彗星探査機「すいせい」の観測データを、プロトンと α 粒子のバルクパラメータ(密度、温度、速度)をマックスウェル分布で最小二乗フィットして求めた。Cometsheathのプラズマは少なくとも次の6つの成分から構成される。(Mukai et al.: 1986a, b, c, 1987, Terasawa et al.:

* 京大理, **電波研, ***東海大工

1986a, 1987, Takahashi et al.: 1987)

1. 太陽風起源のプロトン (衝撃波の上流から流れてきた太陽風起源のプロトン.)
2. 太陽風起源の α 粒子.
3. 彗星起源のシェル分布したプロトン (ハレー彗星から放出された中性粒子が衝撃波の下流で太陽の放射あるいは太陽粒子との電荷交換によって電離したプロトンが磁力線に巻き付き, ピッチ角散乱によって速度空間上で球殻状に分布となったもの.)
4. 彗星起源のシェル分布した水族イオン.
5. 彗星起源のシェルがこわれ, マックスウェル分布したプロトン (衝撃波の上流まで中性粒子として拡散していった後, 電離されたプロトンが太陽風に流されて再び衝撃波を通過し, このとき加熱されてマックスウェル分布となったもの.)
6. 彗星起源のマックスウェル分布した水族イオン.

シェル分布したプロトン及び水族イオンについては Mukai et al. (1986 a, b, c. 1987), Terasawa et al. (1986 a, b. 1987) で既に議論されているので, この論文では, マックスウェル分布した太陽風起源のプロトンと α 粒子についての解析結果について述べる.

2. 観測結果

「すいせい」は 1986 年 3 月 8 日ハレー彗星に 151,000 km まで接近し, 12:45 から 14:45 にわたり cometosheath 内で静電型イオン計測器によりイオン 2 次元分布関数 (黄道面内) を観測した. 観測は高エネルギーモード (248 eV~15.8 keV) と低エネルギーモード (30 eV~1.92 keV) で, 512 秒ごとに, エネルギー方向を対数的に 64 分割, 黄道面内を 22 分割して行われた (Mukai et al.: 1986a, b). 観測されたデータは時刻順に 1 から 15 の通番で呼ぶことにする.

a. 観測されたデータ

図 1 はハレー中心核から約 15 万 km の場所で低エネルギーモードで観測されたイオンの速度空間分布 (4 番の分布関数) であり, 全てのイオンをプロトンと仮定してプロットしてある. この仮定のもとでは, 質量数 M , 電荷 Q のイオンは実際の速度より図では $(M/Q)^{1/2}$ 倍大きい速度を持つことに注意されたい. 左向きが太陽方向の速度 V_x であり, 黄道面内で V_x に垂直な方向が V_y である. 図の座標系は「すいせい」の観測の系である. ハレー彗星の系に移るには $(-18, 70)$ km/s を加える必要がある. 原点に近い方の \times 印はハレー彗星の「すいせい」に対するプロトン換算の相対速度である. 彗星からの中性粒子の放出速度は数 km/s 程度であるので, 電離された直後の彗星起源のプロトンは \times 印に出現すると考えてよい. 電離の後, プロトンは磁力線に巻き付き, ピッチ角散乱などで球殻状に分布するであろう. 破線で描いた円は期待される球殻 (シェル) の位置を示す. 破線のまわりに赤色のリング状の構造が読み取れ, 彗星起源のプロトン・シェルの証拠と考えられる. 破線の直線は観測されたシェルが一様でないことから推定される磁力線の方向である.

原点から遠い方の \times 印は, 水族イオンが電離された直後の出現位置で, 破線で描いた円が水族イオンのシェル構造の期待される位置である. 図の右下の部分において, 黄緑色の

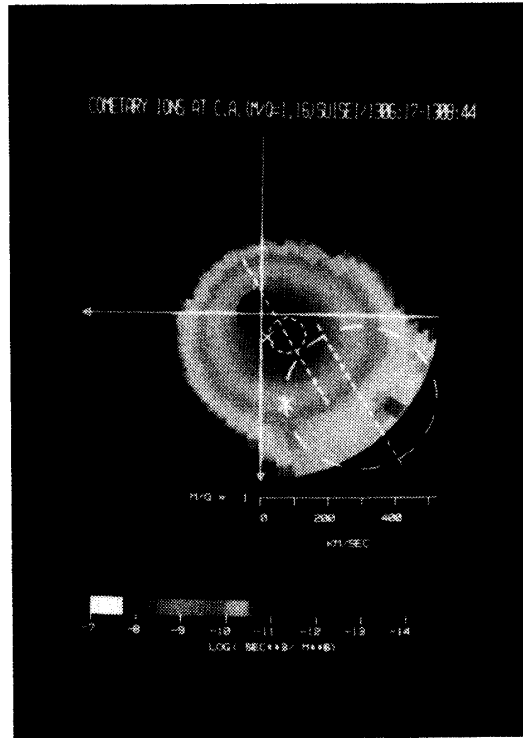


図1 ハレー中心核から約15万kmの場所で観測されたプロトンの速度空間分布(左向きが太陽方向 V_x) (4番の分布関数)。原点は「すいせい」の観測者の系であり、慣性座標系に移るには $(18, -70)$ km/sを加える必要がある。原点に近い方の×印はハレー彗星の「すいせい」に対するプロトン換算の相対速度で、ハレー彗星から放出された中性粒子のプロトン換算の相対速度とほぼ等しい。電離された直後のプロトンは×印に出現し、磁力線に巻き付き、ピッチ角散乱などで球殻状に分布する。破線で描いた円はその球殻(シェル)である。赤色でリング状の構造が形成されているのが読み取れる。破線の直線はこの球殻の形状から推定される磁力線の方向である。同様に、原点から遠い方の×印は先の値を4倍したもので、水族イオンが電離された直後の出現位置で、破線で描いた円が水族イオンのシェル構造である。図の右下の部分において、黄緑色の部分に2カ所「角」状の部分があり、その延長上に球殻の断片があるのが読み取れる。

部分に2カ所「角」状の部分があり、その延長上に球殻の断片があるのが読み取れ、水族イオンのつくるシェルの証拠と考えられる。ただし、この低エネルギーモードの観測例ではシェルの一部しか観測されていない。(完全な水族イオンのシェルの観測例は Mukai et al., 1986b を参照されたい。)

さて、プロトン・シェルのまわりには大きく広がったバックグラウンドの成分(橙～黄色～黄緑色の領域)が存在する。これは太陽風起源のプロトンであると考えられる(以下

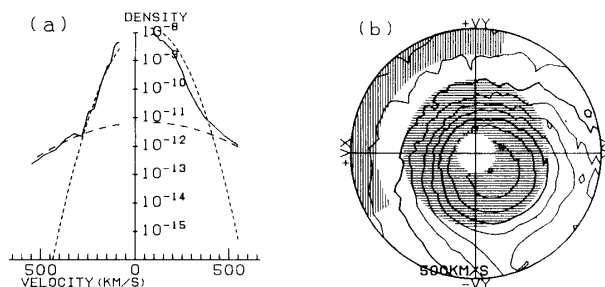


図2 4番(低エネルギーモード)の分布関数の速度空間上の(a)断面図と(b)等高線図。(a)は V_y 軸に沿っての断面である。速度は「すいせい」の系からみたものである。実線は観測値、短い破線はプロトンの算出モデル、長い破線は α 粒子の算出モデル、横軸は速度、縦軸は位相空間の密度である。この図から、少なくとも2つのマクスウェル分布が重ね合わされていることが読み取れる。(b)の座標軸は図1と同じである。水平方向のハッチをつけた部分はプロトン値の算出に用いた領域、垂直方向のハッチをつけた部分は α 粒子の値の算出に用いた領域である。 α 粒子の算出にあたっては、水族イオンのシェルを除去するために、かなりの数のセクターのデータを使用しなかった。

の議論を参照)。また、緒言で述べたように、衝撃波の上流で捕捉された後、加熱を受けた彗星起源のイオンが存在しているはずだが、この図では区別することができない。

b. 低エネルギーモードにおけるパラメータの算出

図2 aは図1と同じ分布関数の V_y 軸での断面である。縦軸は速度空間での密度、横軸は速度(左側が、 $+V_y$ 方向)である。観測されたデータを実線で示す。低速度(≤ 300 km/s)の部分と高速度の部分で勾配が異なっており、二種のイオンの分布が重ね合わさって観測されたものと考えられる。中心にある山の部分は図1で橙色から黄色・黄緑色として表現されていたバックグラウンドの成分であり、衝撃波により加熱された太陽風起源のプロトンであると考えられる。図2 aに短い破線で示したのは、このプロトンの部分に対して最小2乗法でマクスウェル分布をあてはめた結果である。 $(V_x = 71 \pm 33$ km/s, $V_y = -68 \pm 32$ km/s, $n = 178 \pm 55$ cm $^{-3}$, $T = 9.4 \pm 9.0 \times 10^5$ K)。図2 bは同じデータを等高線図で示したもので、最小2乗法に用いたのは水平方向のハッチを施した部分である。速度空間上でシェル構造を持つプロトンはマクスウェル分布したプロトンと重なっており、分離は困難である。しかし、シェル構造したプロトンの密度は 10 cm $^{-3}$ (Terasawa et al.: 1986b)であり、これは上で求めたマクスウェル分布したプロトンの密度 178 cm $^{-3}$ の6%程度であり、フィッティングの精度からみて無視できる。

次に、プロトンの山の外側に見られる第2のイオンについてパラメータを算出する。「すいせい」の計測器はイオンの種類を区別できないので、第2のイオンの種類は一義的には決定できないが、我々は以下の理由から、これを太陽風起源の α 粒子と判断した。図2 aの

長い破線で示したのは最小2乗法の結果であり、 α 粒子と仮定したときのプラズマのパラメータは、 $V_x=59\pm 15$ km/s, $V_y=-86\pm 20$ km/s, $n=6\pm 2$ cm⁻³, $T=1.7\pm 0.5\times 10^7$ Kとなる。ここで求めた速度は上で求めたプロトンの速度と誤差の範囲で一致している。また、求めた α 粒子の密度はプロトンの3.5%となり、衝撃波上流側の太陽風における値3~5%とほぼ一致している。もし、これらのイオンが α 粒子ではなく、水族イオンであるとする、速度は $V_x=21$ km/s, $V_y=-30$ km/s程度となって、プロトンの速度と大きくくい違う。従って、これらは水族イオンではない。

もし、この第2のイオンが高温のプロトンであるとする、結果は、 $V_x=83\pm 21$ km/s, $V_y=-120\pm 28$ km/s, $n=4\pm 1$ cm⁻³, $T=8.5\pm 2.5\times 10^6$ Kとなる。この速度は上流のプロトン（低温部）の速度との誤差の範囲にあり、速度の議論だけではプロトンである可能性を否定できない。この可能性を採るとき、まず考えねばならないのは、太陽風内で捕捉され、衝撃波で加熱された彗星起源のプロトンである。これらのプロトンは太陽風プロトンに対し、ずっと高いエネルギーを持つから、加熱された後 cometsheath 内でもずっと高い温度を持つと期待される。しかし、衝撃波直前の太陽風内での彗星起源のプロトンの密度は0.1 cm⁻³であり (Terasawa et al., 1986a, b), 衝撃波や cometsheath における圧縮を考慮しても、ここで得られる密度(~4 cm⁻³)を説明するには不足である。太陽風のプロトンの密度は上流で30 cm⁻³程度であり、5から6倍圧縮されたに過ぎない。以上から、第2のイオンは太陽風起源の α 粒子であると考えられるのがもっともらしい。

さて、複数のマックスウェル分布が重ね合わされた分布のパラメータを最小2乗法で同時に求めることは困難であることが経験的にわかっている。そこで、次のような技巧を用いる。図2 bを見れば、山の部分はほとんどプロトンのみであることがわかる。 α 粒子は1桁以上小さい。従って、この山の部分のデータがプロトンのみの分布関数であると考えてもよい。そこで、この範囲のデータから最小2乗フィットでプロトンの分布関数を算出する。一方裾野では、プロトンはほとんどなく、ほぼ α 粒子のみによって形成されている。そこで、この裾野の部分から α 粒子の分布関数を算出する。もちろん、山の部分で求めたプロトンの分布関数を裾野へ延長してデータから差し引いて α 粒子の分布関数を算出し、次にこの α 粒子の分布関数を山の部分へ延長して差し引いて、プロトンの分布関数を修正すればよりよい精度で分布関数が決定できると考えられる。このような緩和的な手法を試みたが、プロトンの分布関数の誤差が α 粒子の分布関数を大幅に狂わせ、プロトンの分布関数を修正するとさらに非現実的な値となり、誤差が誤差を生む結果となった。緩和的な手法が有効なのは、ある程度データがきれいなときである、我々の解析では有効ではない。従って、我々はプロトンと α 粒子の分布関数を独立に決定した。また、図1でみたような水族イオンが形成するシェル構造の存在はマックスウェル分布のパラメータを算出する際には雑音となるので、シェル構造が明瞭な部分及びその周辺のデータをフィッティングの対象から除去した。図2 bで垂直方向のハッチをつけた部分は α 粒子の算出に用いた領域である。プロトンのシェル構造の存在する速度空間上の領域は α 粒子の分布関数の算出には用いないので、シェル分布したプロトンの存在は無視できる。

各粒子の分布関数の算出に使用するデータの領域の決定（エネルギー及びセクターの範

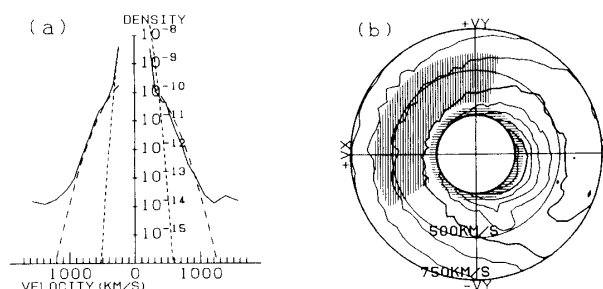


図3 7番(高エネルギーモード)の分布関数の速度空間上の(a)断面図と(b)等高線図。(a)は V_y 軸に沿っての断面である。実線は観測値、短い破線はプロトンの算出モデル、長い破線は α 粒子の算出モデル、横軸は速度、縦軸は位相空間の密度であるが、この図から、少なくとも2つのマックスウェル分布が重ね合わされていることが読み取れる。さらに裾野が読み取れる。この裾野は加熱された水族イオンであると考えられる。(b)の座標軸は図1と同じである。水平方向のハッチをつけた部分のプロトンの値の算出に用いた領域、垂直方向のハッチをつけた部分は α 粒子の値の算出に用いた領域である。 α 粒子の算出にあたっては、水族イオンのシェルを除去するために、かなりの数のセクターのデータを使用しなかった。

囲)を等高線図から一意的に決定するのは困難である。そこでこの範囲の決定を複数行つて、各決定ごとに分布関数を算出し、もっともよい結果を選択した。

c. 高エネルギーモードにおけるパラメータの算出

高エネルギーモードのデータについても同様な手順でパラメータの算出を行った。図3 aは7番(高エネルギーモード)の分布関数の断面である。座標などは図2と同じであるが、横軸はスケールが異なる。中央の切り立った山となだらかな山と裾野の3つの成分が存在していることが読み取れる。中央の山は図2 aの第1の山で、プロトンであり、なだらかな山は第2の山に相当し、 α 粒子である。裾野は加熱された水族イオンであると考えられるが、この論文では扱わない。図3 bは対応する等高線図である。水平方向のハッチをつけた部分はプロトンの、垂直方向のハッチをつけた部分は α 粒子の値の算出に用いた領域である。(図3 bでは、750 km/sまでを拡大して示した。)プロトンの算出に用いた領域は速度空間では狭く見えるが、観測のステップは低エネルギーで細かいので、実際には全データの1/8を使用している。プロトンの場合には分布関数のピークを中心として全ての方向のデータを用いているので、速度の算出にあたりかなりの精度が期待できるが、 α 粒子の分布関数のデータの算出では、水族イオンのシェル構造の除去のために速度空間上の $-V_x$ が負の領域のデータをほとんど使用していないために、速度算出の誤差が大きくなる。

d. cometosheath内のプラズマ・パラメータの変化

図4～図5は上記のように算出したプラズマパラメータをまとめたものである。図4で

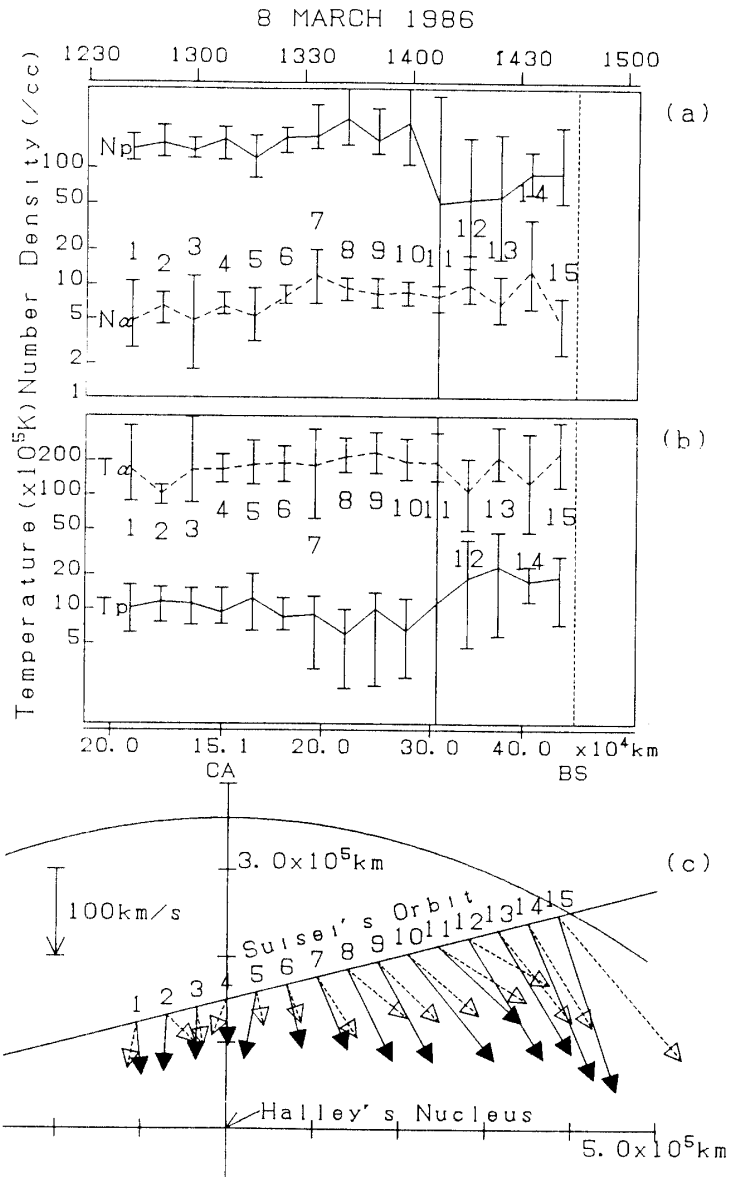


図4 プラズマのパラメータの変化。(a)密度、(b)温度
 実線はプロトンについての値、破線は α 粒子についての値。
 各々のパラメータは残差2倍の範囲である。上軸は観測時刻を、下軸は「すいせい」とハレー彗星の核との相対距離を示す。CAは最接近、BSは衝撃波通過である。縦軸は、(a)密度 (cm^{-3}) (b)温度 ($\times 10^5 \text{K}$) である。

(c) 衝撃波と流れのベクトル。
 2次曲線は、衝撃波に平行な速度の連続性と衝撃波通過の位置からフィットした衝撃波である。サブソーラポイントの距離は $8.6 \times 10^5 \text{km}$ である。速度はハレーを固定した座標系での値である。
 実線の矢印はプロトンの分布関数から算出した流れ、破線の矢印は α 粒子の分布関数から算出した流れ、座標原点はハレーの核、矢印の根元は「すいせい」の軌道である。

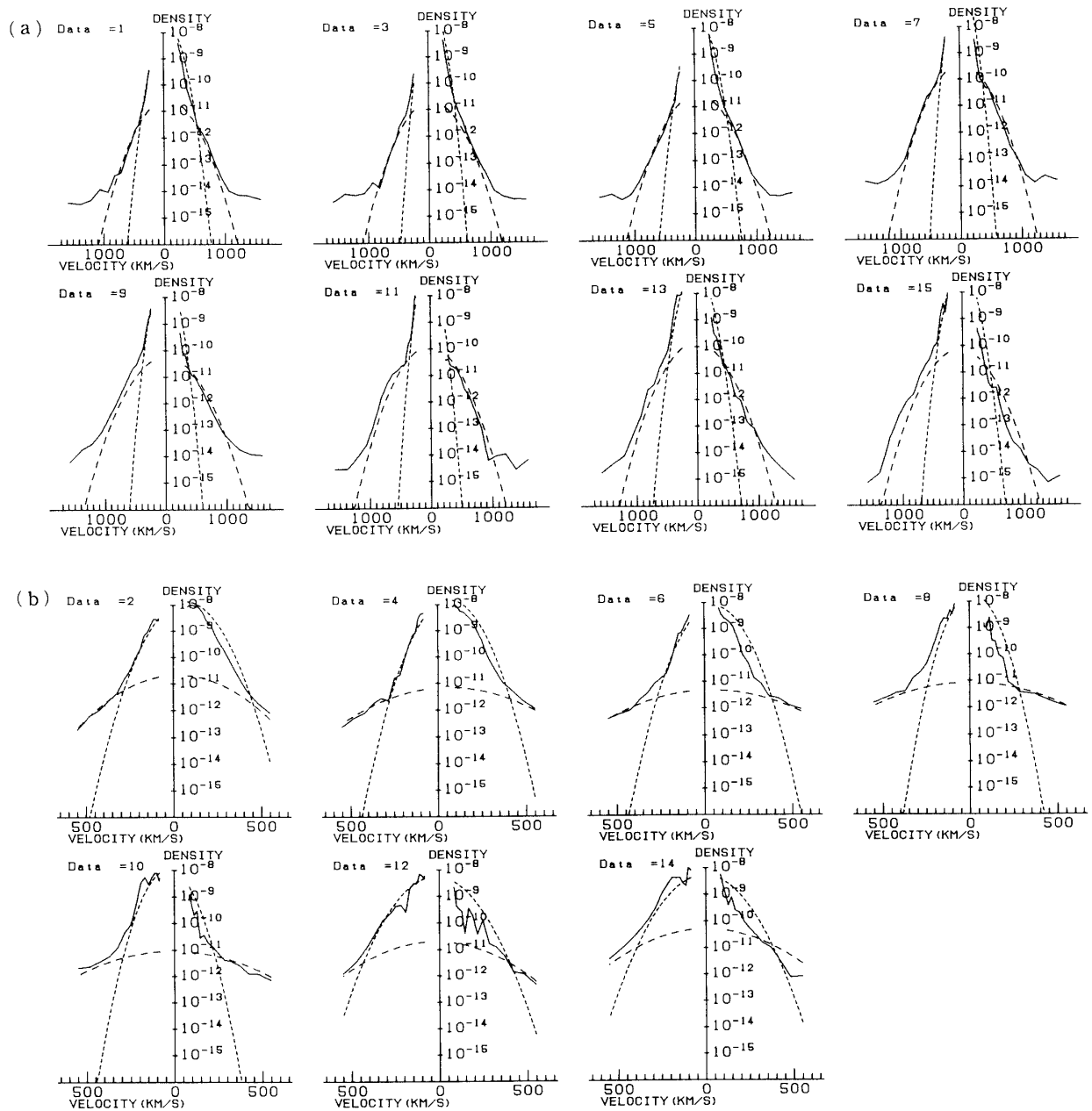


図5 観測とフィットした分布関数. 2次元分布関数の断面である。(太陽とハレー彗星の方向に垂直な断面, すなわち, V_v 軸) (a)は高エネルギーモード, (b)は低エネルギーモードである。観測はこの2つのモードが交互に行われた。データ番号は時刻順の通番で, (a)は奇数番号, (b)は偶数番号となっている。実線は観測値, 短い破線はプロトンの算出モデル, 長い破線は α 粒子の算出モデル, 横軸は速度, 縦軸は位相空間の密度である。横軸の速度は(a)と(b)ではスケールが異なっている。

(a)は密度、(b)は温度、(c)は速度である。実線はプロトン、破線は α 粒子の値である。上軸は時刻、下軸はハレー彗星の核と「すいせい」の距離であり、CAは最接近をBSは衝撃波通過を示す。一方、図5 aは高エネルギーモードの、図5 bは低エネルギーモードの分布関数の V_y 軸での断面である。図5 aと図5 bは交互に観測されたものである。(左側が、 $+V_y$ 方向)縦軸は速度空間での密度、横軸は速度である。図5 aと図5 bでは横軸のスケールが違えてある。実線は観測されたデータを、短い破線はフィットされたプロトンの、長い破線は α 粒子の分布関数を示す。図4を右から左へみて行くと、衝撃波から次第にcometosheathの内部へと入っていくことになる。図4でデータにつけられた数字は、図5のデータ番号と対応している。プロトンの誤差範囲が振り切っている11番の観測された分布関数はかなり乱れた形状をしていた。プロトンの密度と温度を比べると1番から11番において逆相関となっている。これに対して α 粒子の密度と温度ではわずかに正の相関であるように見える。また、プロトンの温度は最接近点へ向かって減少しているが、温度最小点(8番)と最接近点(4番)は一致していない。このずれは解析手法上の問題ではない。これは図5 bで確認できる。温度は分布関数の断面図においてはその広がりにも現れる。この図で8番のプロトンの分布の広がりが最も狭く、温度が最小となっている。

3. 観測結果の検討

プロトンの密度はcometosheathの外側では 30 cm^{-3} 程度であったが、ハレー彗星から 10^6 km 以上離れたところでは密度が 15 cm^{-3} 程度に低下した。この密度の変化は衝撃波上流側のmassloading過程に伴うものと解釈されている(Mukai et al.: 1986a)。衝撃波を通過したところで、 60 cm^{-3} 程度、さらに内側では 160 cm^{-3} 程度となっている。内側へ入るに従い速度が減少しており、密度の増大と対応している。衝撃波の内側での α 粒子の密度は 6 cm^{-3} 程度であり、プロトンに対する α 粒子の比率は4%程度である。一方、上流の太陽風中ではこの比率は3~5%程度である。従ってcometosheath内でpickupされた後、暖められてマックスウェル分布になった彗星起源のプロトンの比率は太陽風起源のプロトンの比率に比べて少ないと結論できる。(もしそうでなければ、 α 粒子の比率はもっと小さいはずである。)

プロトンの温度はcometosheathの内側に向かって低下している。この低下はプロトンと彗星起源の中性粒子との電荷交換に伴う冷却効果によると考えられる。一方、 α 粒子の温度はそれほど低下していない。 α 粒子の冷却に有効な電荷交換過程がないからである。(プロトンと中性の水素が電荷交換したとき、中性の水素がプロトンとなって、冷却されることとなる。しかし、 α 粒子は電荷交換によって He^+ となるので、冷却効果はない。Shelley et al.: 1986)

図4でみられるようにプロトンの温度の最小点は最接近点と一致していない。これについてはいくつかの解釈が考えられる。

1. 温度最小点の上流で中性粒子が局所的に増加していた可能性。中性粒子が多ければ、電離されて付け加わる粒子が多いだろう。このことは密度と温度に逆相関があることと一致する。ただし、その様な中性粒子の密度の大きい領域の存在が考えられるのだろうか。

2. 中性粒子の密度はハレー彗星の核との距離が近いほど大きくなる。このため最接近点ではもっとも冷却の効果があると考えられる。一方、減速されて密度が上昇することで、温度が上昇する効果が働く。従って、この2つの効果の釣合如何では、温度最小点が最接近点とずれるかも知れない。

3. 単に上流の太陽風の変化の反映に過ぎないとも考えられる。ただし、上流での同時観測がないので、結論は下せない。

以上の3つの説明が考えられるが、どれについても積極的に支持するだけの情報がない。従って、GIOTTOの観測 (e. g. Goldstein et al.: 1986) との比較、あるいはシミュレーションによって決め手を求める必要がある。

図4cで流れの速度がプロトンと α 粒子では系統的に異なっている。 α 粒子の方がより外向きに流れているように見える。プロトンの方が高速である。図3(b)をよくみると、流れが中心近くと周辺で捻れているように見える。(各等高線ごとに流れの方向をみていくと、それぞれ図の内側と外側とで流れの方向が違うように見える。) また、流れの方向はシェルの形状から算出した方向と異なっていることがある。Mukai et al. (1986b) が水族イオンのシェルの形状などから求めた速度と、我々がフィッティングによって求めた速度は一致しない。この原因として、ひとつの観測を行う時間の中で流れが変化していることが考えられる。外部 cometosheath の乱流域 (e. g. Mukai et al.: 1986b) における変化の特性時間は VEGA の観測によれば 30 秒程度であり (Verigin et al.: 1986), 一方我々の観測は 147 秒で一つのデータを手にいれている。このために流れが捻れて観測されることがありうる。しかし、乱流的な振舞いによるものならば、プロトンと α 粒子の速度の差が観測されても常にプロトンが外向きにより流れるといった系統性ではないはずである。

一方、速度差の原因が解析手法上の問題である可能性も残されている。亜音速の cometosheath 内のプラズマでの最小二乗フィッティングによる速度の決定は密度・温度に比べ、誤差範囲が大きい。更にフィッティングに用いたデータの偏りに問題がある。得られた速度の大きさは、プロトンの方が α 粒子より大きい。プロトンは分布関数の中心が抜けている分、外側へ引かれて大きめに評価され、一方、 α 粒子は、逆に除去しきれなかったプロトンに引きずられて、小さめに評価されたものと考えられる。また、 α 粒子は反太陽方向のデータを水族イオンの除去のために失っているため、速度が決定しにくくなっている。(分布関数の山の片側の斜面の情報だけで、反対側の斜面を推定することになるので、これはやむを得ない。) このように、解析に使用するデータの選択がプロトンと α 粒子で系統的に異なっているために、系統的に異なった速度を算出した可能性がある。

しかしながら、この速度差を物理的なものであるとした場合、どのような機構が考えられるのであろうか。例えば、衝撃波による減速過程でプロトンと α 粒子が異なる減速を受けたとしよう。観測された速度ベクトルの差は既に推定された磁場の方向 (Mukai et al.: 1986b) と似ており、衝撃波で作られた速度差を保持したものと考えれば、図4の観測を説明できるかも知れない。

謝 辞

「すいせい」の観測を成功に導いた宇宙科学研究所のプロジェクトチームの方々ならびに多くの関係者の方々に感謝致します。また、1987年春の地球電磁気・地球惑星圏学会において有益な議論をしていただいた方々に感謝します。なお、ここで使用したデータはNASA/DSN ゴールトストーン局で取得されたもので、受信に協力されたNASAの関係者の方々にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- d'Uston, C., H. Reme, J. A. Squvaud, A. Cros, K. A. Anderson, C. W. Carlson, D. Curtis, R. P. Lin, A. Korth, A. K. Richter, and A. Mendis, ESA SP-250, 77, 1986
- Ip, W. -H. and W. I. Axford, Theories of physical processes in the cometary comae and ion tails, in Comets, L. L. Wilkening, ed., The Univ. Arizona Press, Tucson, pp. 588-634, 1982
- Goldstein, B. E., M., Neugebauer, H. Balsiger, J. F. Drake, S. A. Fuselier, R. Goldstein, W. -H. Ip, U. Rettenmund, H. Rosenbauer, R. Schwenn, and E. G. Shelley., ESA SP-250, 285, 1986
- Mukai, T., W. Miyake, T. Terasawa, M. Kitayama, and K. Hirao, Nature 321, 299, 1986a.
- Mukai, T., W. Miyake, T. Terasawa, M. Kitayama, and K. Hirao, Geophys. Res. Letters 13, 829, 1986b.
- Mukai, T., M. Kitayama, T. Terasawa, W. Miyake, and K. Hirao, ESA SP-250, 71, 1986c
- Mukai, T., W. Miyake, T. Terasawa, M. Kitayama, and K. Hirao, (in Japanese) 宇宙研報告 特集第19号, 125, 1987
- Shelley, E. G., S. A. Fuselier, J. F. Drake, H. Balsiger, W. -H. Ip, B. E. Goldstein, R. Goldstein, and M. Neugebauer, ESA SP-250, 285, 1986
- Takahashi, S., T. Terasawa, T. Mukai, W. Miyake, M. Kitayama, and K. Hirao, Astron. Astrophys., 187, 94, 1987
- Terasawa, T., T. Mukai, W. Miyake, M. Kitayama, and K. Hirao, Geophys. Res. Letters, 13, 837, 1986a
- Terasawa, T., S. Takahashi, T. Mukai, W. Miyake, M. Kitayama, and K. Hirao, ESA SP-250, 281, 1987 b
- Terasawa, T., T. Mukai, W. Miyake, M. Kitayama, and K. Hirao, (in Japanese) 宇宙研報告, 特集第19号, 189, 1987
- Verigin, M. I., K. I. Gringauz, A. K. Richter, T. I. Gombosi, A. P. Remizov, K. Szego, I. Apathy, I. Szemerey, K. Tatrallyay, and L. A. Lezhen, ESZ SP-250, 169, 1986