

「さきがけ」による太陽風中の非熱的粒子の観測

阿部琢美*・小山孝一郎・寺沢敏夫**
奥沢隆志*

(1988年12月26日受理)

Non-Thermal Protons in the Solar Wind Observed by SAKIGAKE

By

Takumi ABE, Koh-Ichiro OYAMA, Toshio TERASAWA,
and Takashi OKUZAWA

Abstract: Low energy component of protons in the solar wind was found by means of an observation with the spacecraft "SAKIGAKE". This component is always accompanied by a sudden change in the solar wind parameters such as interplanetary shocks. The difference of bulk speed between the low energy component and normal one amounts to about 60-140 km/s, and is strongly affected by the configuration of the interplanetary magnetic field. It is shown that this low energy component was produced by the gyromotion of protons, through an acceleration mechanism, e. g., Fermi process. Furthermore, it seems that there are two types of accelerative process, though these mechanisms are unknown.

キーワード：非熱的粒子，衝撃波，不連続面，速度分布空間，旋回運動

あらまし

超音速の流れである太陽風が地球磁気圏のような障害物によって遮られると，その前面に定在衝撃波(バウショック)を生じる。境

* 電気通信大学

** 京都大学理学部

界域には粒子密度の上昇や磁場の乱れが生じ、さらに加速を受けた粒子が太陽風上流域に向かって進む逆流現象も観測される。いっぽう太陽風中には太陽面上のフレアや、回帰性をもつ低速流と高速流の2流体相互作用に起因する惑星間衝撃波が存在し、地球電離層や磁気圏に擾乱をひき起こす要因ともなる。

惑星間探査機「さきがけ」は打ち上げ以来約3年間にわたりこのような惑星間衝撃波を数例観測している。この現象は以前から注目を浴び、それ自身興味を引くものであるが、この論文では衝撃波などの太陽風パラメータの急激な変化の通過前後数時間内に観測された太陽風プロトンの低速度成分に注目し、その成因が衝撃波面等に生じた加速領域にあるとする一解釈を提示する。

また、加速を受けた粒子の速度成分は惑星間磁場に対して依存性をもち、この荷電粒子が非熱的なものであることを示唆している。

1. はじめに

惑星間探査機「さきがけ」はハレー彗星との遭遇を果たした後も順調に太陽風の定常観測を続けている。1988年1月から8月にかけては受信電波の太陽えんぺい現象を利用し、太陽近傍のプラズマ状態を調査したあと、9月からは定常観測を再開し現在に至っている。延べ約3年にわたる観測で、「さきがけ」は惑星間衝撃波、CME、2流体相互作用などの興味深い現象を捉えた。このうち衝撃波のような急激なパラメータの変動に伴って、太陽風体積速度よりも低速の成分が観測された。この成分は境界領域で加速を受けた粒子が惑星間磁場に捕捉され、旋回運動を行なった結果と考えられる。地球磁気圏のバウショックに関しては、その前面で太陽風プラズマ粒子が境界面にある加速機構により反射し、旋回運動を行なっていることの観測例が報告されている(たとえば[1], [2], [3])。これに対し惑星間衝撃波によるものについてはたとえばGosling[4], Kennel[5], Sanahuja[6]らによって1-1600 keVまでの広いエネルギー帯にわたる粒子の加速が報告されているが、エネルギーを得た粒子が旋回運動をしている現象はほとんど観測されていない。この論文では惑星間空間で見つけられた荷電粒子の体積速度よりも低いエネルギー成分について、その起源やプラズマのふるまいに関する観測事実を述べる。

2. 太陽風観測器

「さきがけ」に搭載された太陽風プラズマ測定器は図1のようなファラデーカップ型のもので探査機のスピンを利用して、体積速度、イオン密度、イオン温度およびプラズマ粒子流の到来方向を測定できる[7]。探査機がスピンする結果、開口正面が太陽方向から離れるにつれ、太陽風プラズマの見かけ上の速度は遅くなっていくが、第2グリッドへの印加電圧との釣り合いの角度により、速度を求めることができる。実際にはコレクタへの直流的な信号は太陽光線による二次電子電流はるかに大きく、太陽風イオンによる電流成

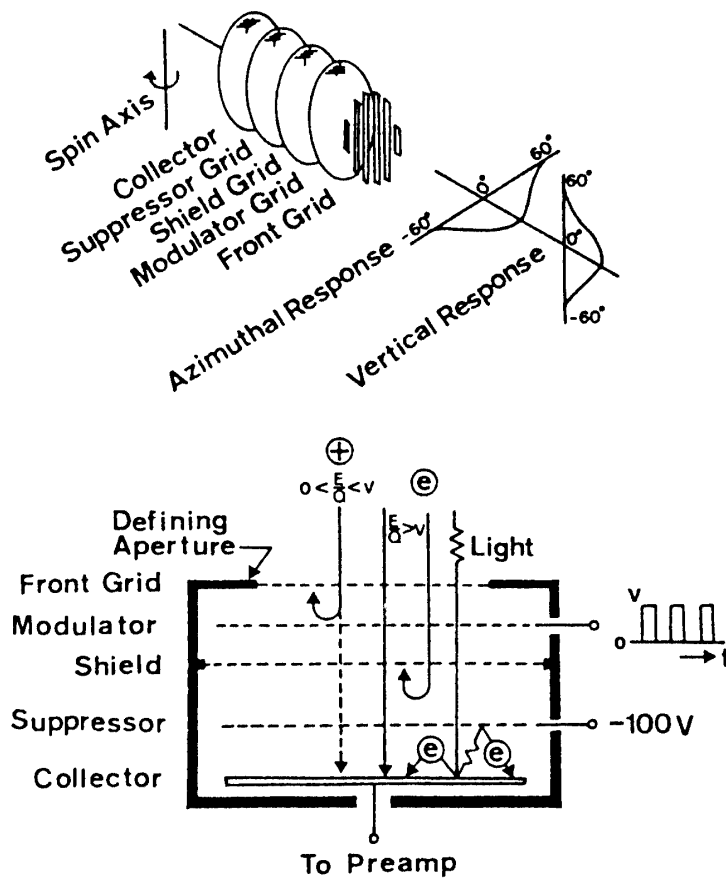


図1 ファラデーカップによる太陽風測定原理
 第2グリッド (Modulator Grid) に矩形波高電圧を印加しコレクタ電流の変調信号のみを取り出して電流/角度特性を得る。

分を見つけることは困難なので、第2グリッドに矩形波電圧を印加し、これによる変調信号のみを取り出し、電流値としている。

このようにして得られたコレクタ電流の太陽からの離角に対する角度特性は図2 (1988年8月7日の観測例) のような2つの山をもつことになる。さらにイオン密度はコレクタ電流の大きさから、プラズマ粒子流の方向は電流値最大の位置のずれから求められ、イオン温度は電流の理論式

$$I_{out} = \sqrt{\alpha/\pi} \cdot N_0 \cdot S_0(\theta) \cdot e \cdot [V_b \epsilon \int_{-V_b \epsilon}^{W - V_b \epsilon} \exp(-at^2) dt + 1/2\alpha \cdot \{\exp(-\alpha V_b^2 \epsilon^2) - \exp(-\alpha(W - V_b \epsilon)^2)\}] \quad (1)$$

(ここで $\alpha = m_i/2kT_i$, $W = \sqrt{2eV_{C2}/m_i}$, $\epsilon = \cos \theta$, N_0 はイオン密度, k はボルツマン定

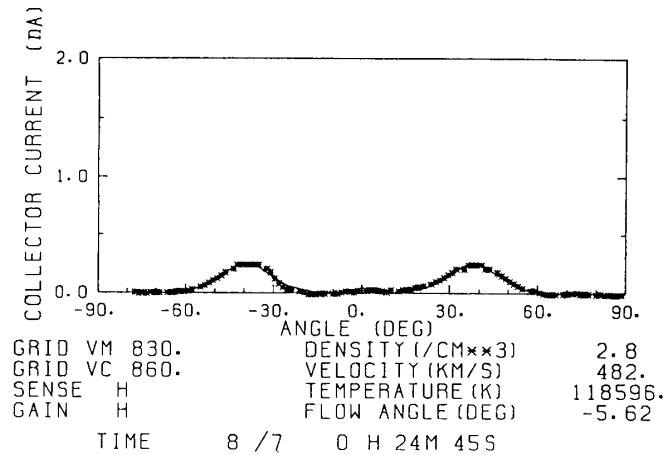


図2 1986年8月7日に得られたコレクタ電流/角度特性
右下の数値は得られた角度特性に曲線適合を行うことにより
求められた。

数, e は電子の電荷, そして $S_0(\theta)$ はイオン補集面積の角度特性関数, θ は補集面積の法線と太陽風プラズマ流のなす角) を測定データに曲線適合させることにより求めることができる。

3. 観測結果およびその解釈

3.1 Shock type (衝撃波型)

図3は1986年7月17日に「さきがけ」が惑星間衝撃波と思われる構造を通過したときの太陽風パラメータである。2時2分4秒(世界時)に474 km/sであった太陽風速度は2時3分8秒には519 km/sまで上昇し, それとともにイオン密度が $7.8/\text{cm}^3$ から $15.8/\text{cm}^3$ に, イオン温度は54 000 kから147 000 kにそれぞれ増加している。また惑星間磁場に関しても, 2時0分56秒に5.9 nTであった強度が2時3分8秒には10.5 nTにまで増加し, 衝撃波の様相を呈している。波面前後での磁場ベクトルの変化から, 衝撃波面の法線速度ベクトル(shock normal vector)を求めると(衝撃波面の直前・直後の2つの磁場ベクトルとの内積が0となるようなベクトル)太陽座標系(X : 探査機からみた太陽中心方向, Z : 黄道面に垂直な方向, Y : 経度方向)で表わした方向余弦として $(-0.871, -0.090, 0.483)$ となり, quasi-perpendicular shock と分類される。また, この時間帯の磁場は小刻みに変動し, 衝撃波付近で観測されるTsurutani[8]らの報告した低周波波動の存在を示唆している。

衝撃波通過直前のコレクタ電流/角度特性は図4aのように角度 ± 40 度前後の電流ピークのほかに ± 15 度付近に小さなサブピークが現れている。さらに衝撃波通過後も図4bのようにサブピークの出現は継続し(図3上部の陰影を施した部分は出現した時間帯を表わす), 時刻の経過にしたがいピークの位置が角度上で移動している。

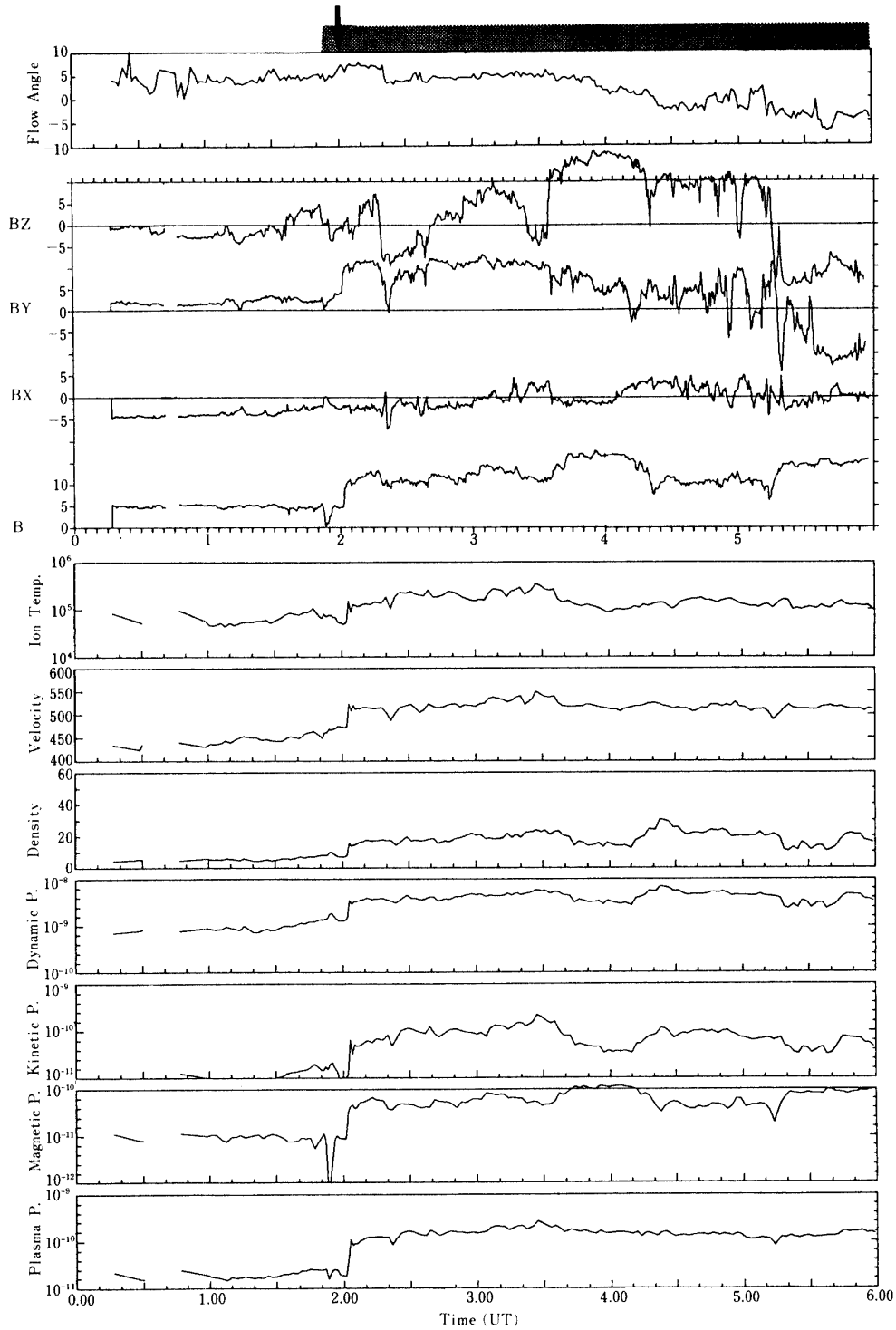


図 3 1986年7月17日の太陽風観測データ

上からプラズマ流の方向，磁場3成分，磁場強度，イオン温度，体積速度，イオン密度，プラズマの動圧，静圧，磁気圧，静圧と磁気圧の和を表わす。

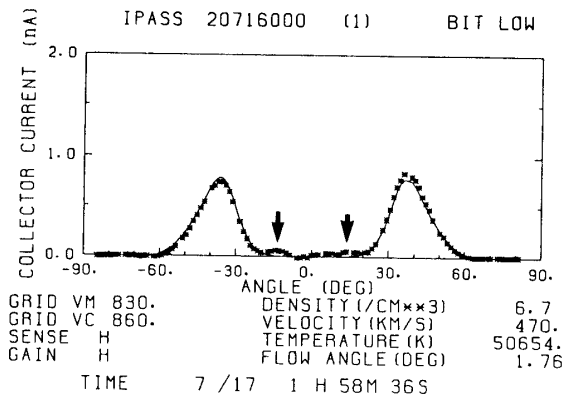


図 4 a 1986年7月17日1時58分に得られた
コレクタ電流/角度特性

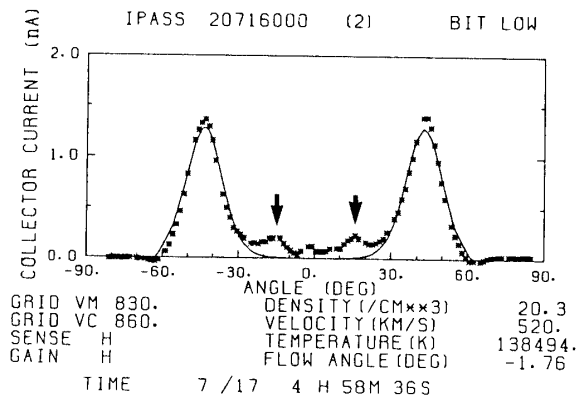


図 4 b 1986年7月17日4時58分に得られた
コレクタ電流/角度特性

衝撃波前面に、しかも周囲の体積速度よりも遅いプラズマが存在することは、物理的に不可能にさえ感じられる。なぜなら、衝撃波により低速のプラズマ流が作り出されたなら、衝撃波面よりも上流側（上流を波面よりも太陽に近い側と定義する）に観測されるべきだからである。ところで、Paschmann[1], [9]等が観測について、Edmiston[10], Terasawa[11]等が理論的解釈を与えているように地球磁気圏の太陽風上流域には体積速度程度のエネルギーをもつプラズマ粒子がバウショックで反射され得ることが知られている。そこで惑星間空間中の衝撃波によって加速（あるいは波面による反射）を受けた粒子が低速度成分をもつ可能性はないのだろうか。

いま、fast modeの平面衝撃波を考え、波面よりも下流側の粒子のうちの一部が、たとえば磁場の強度の増加に伴う鏡面反射などの過程により加速を受けたとする。鏡面反射(フェルミ加速)の過程で磁場の壁が V_m の速度で運動していて、これに荷電粒子が衝突してはね返されたとき、運動量の変化は

$$\Delta P = 2mV_m$$

となる。すなわち粒子は $2V_m$ 加速されることになり、いまの場合も下流域の粒子は衝撃波によりある大きさの加速を受けることになる。つぎに下流域の系から見た加速されたあとの荷電粒子のふるまいを考える。議論を容易にするため図5のように速度分布空間上で粒子の加速される方向を X 軸上にとり、惑星間磁場 (B_{IMF} , プラズマに凍結されているため原点を通る) が X 軸と適当な角度をなしていると仮定すると、加速された荷電粒子は磁場に捕捉され旋回運動を始める。旋回運動の方向は磁場の方向により異なるが、黄道面上 (XY 平面) に磁場ベクトルを制限すれば粒子は紙面に垂直な面内で運動し、黄道面と交わる点は B_{IMF} について点対称な位置になり、X 成分 $\Delta V (< 0)$ をもつことになる。また、この場合旋回中心は $V_x = V_c > 0$ となり、下流域の体積速度よりも速いことになる(逆に言えば $V_c < 0$ なら、衝撃波面よりも下流域を低速度成分が進むことはできない)。

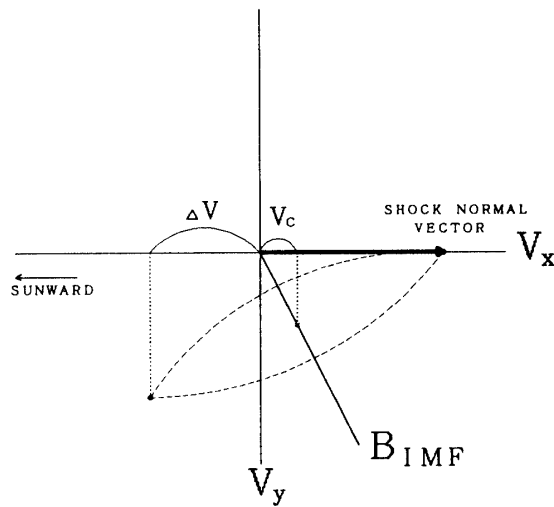
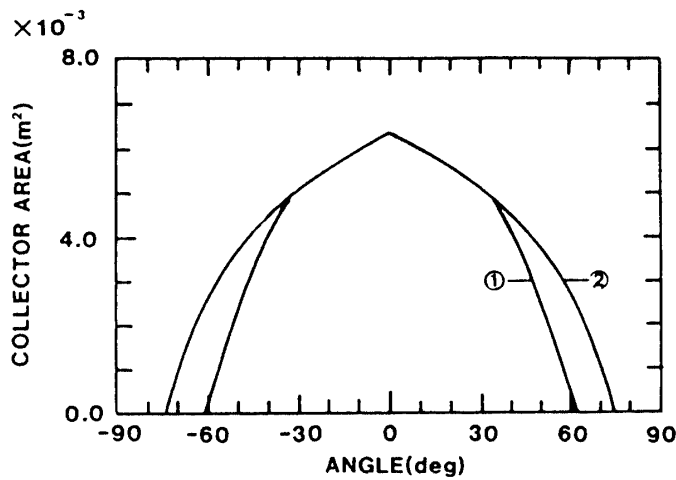


図5 速度分布空間上での荷電粒子の運動
 点線はXY平面に垂直方向の旋回運動により生じたトール
 スを示す。



フライトモデルに使われたコレクターの面積の角度特性。
 (1)探査機の壁の影響を考慮したもの、(2)は探査機の壁に
 とりつけない前。

図6 コレクターの有効面積の角度特性
 角度は探査機のスピン平面を北側から見て太陽方向を0度、
 左向きに正、右向きに負としている。

以上の議論はZ成分を無視した黄道面方向の断面図を考えた場合であるが、「さきがけ」
 に搭載されたファラデーカップのコレクターは図6のような面積/角度特性を示し[7]、
 面の法線方向に強い感度をもつので、実際に図5に近い分布を測定すると考えられる。さ

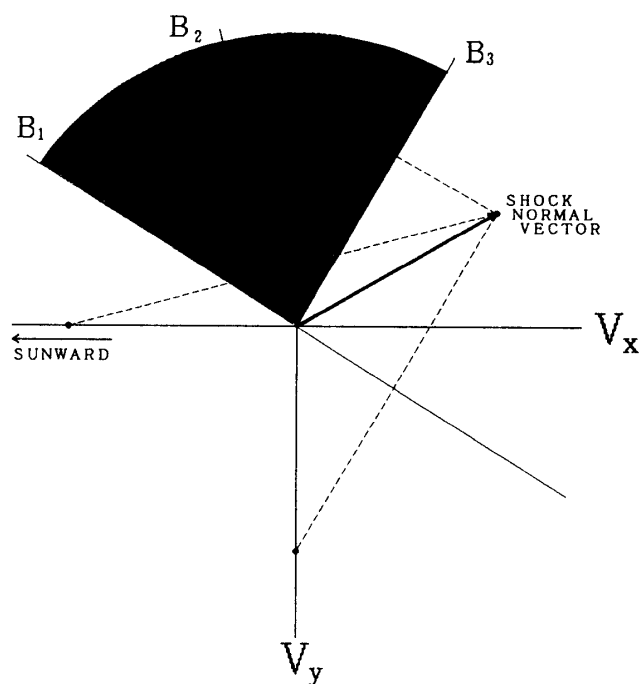


図 7 加速粒子と磁場ベクトルの関係

B_1, B_3 の方向を磁場が向いた時, 点線を通り XY 平面と垂直な平面内で粒子が運動し, Y 軸上でふたたび XY 平面と交わる. B_2 の時は X 軸上で交わる. 陰影を施した部分を磁場が向いた時のみ低速成分が観測される.

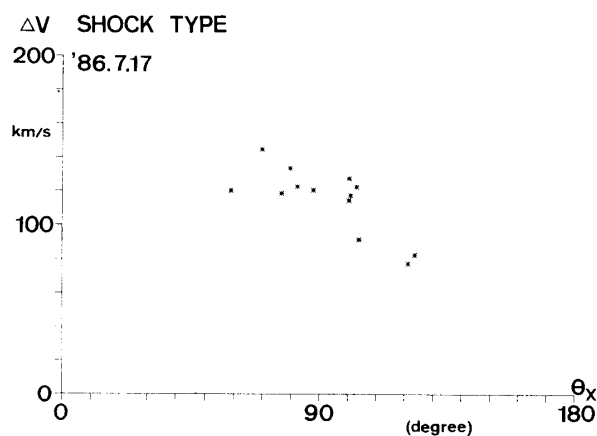


図 8 2成分の速度差と惑星間磁場の方向の関係 (衝撃波型)

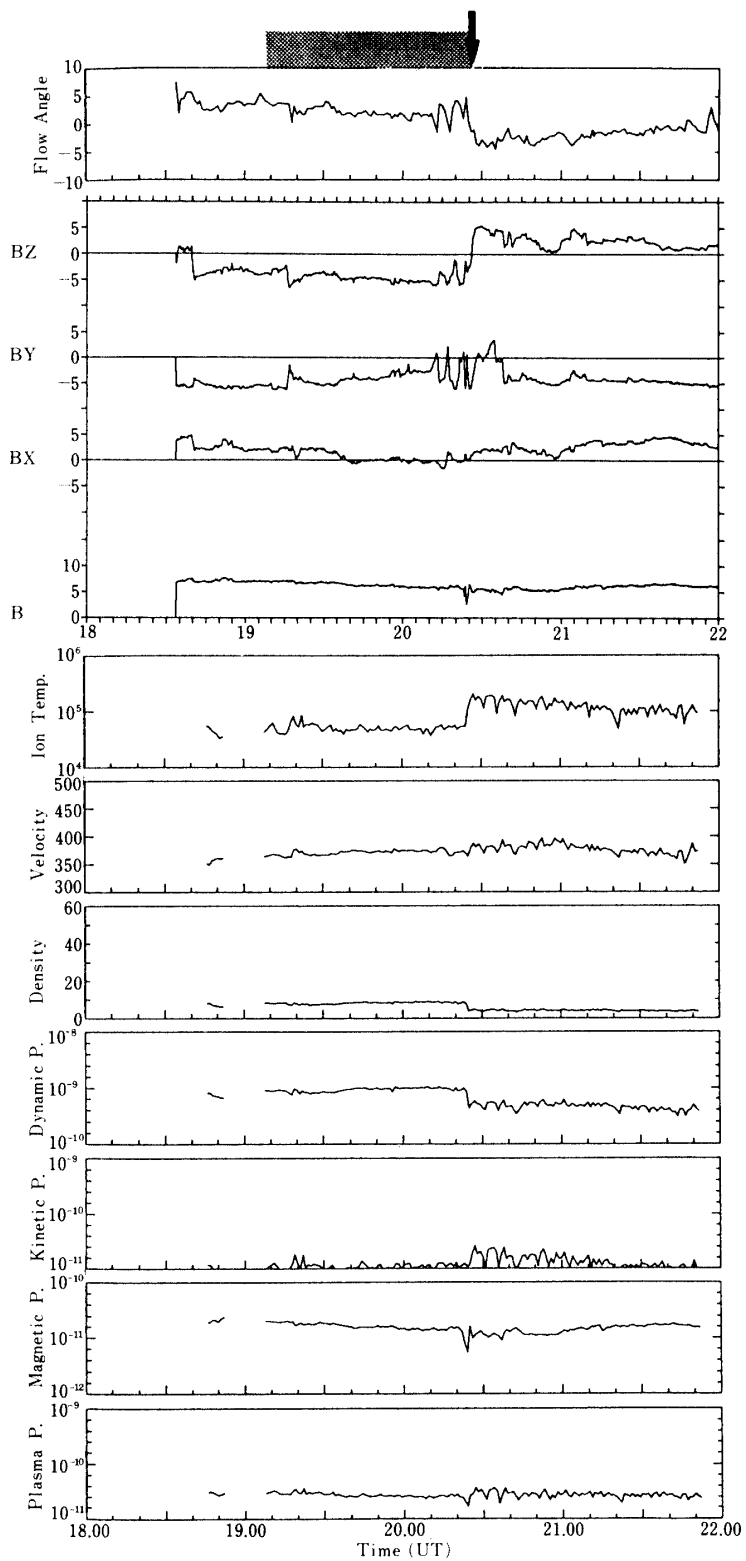


図 9 1985年11月13日の太陽風観測データ

らに図7のように粒子の加速される方向を定めると、下流域の体積速度より低い側に対称点が現れるのは、 B_{IMF} が陰影を施した領域内に存在するときに限られることが分かる。

このような観点から、「さきがけ」に搭載された磁力計[12]により求められた惑星間磁場のデータと、低速成分と体積速度の速度差との関係を調べたのが図8である。前述したように粒子のふるまいを2次元上で議論するため磁場の方向をXY平面に投影し、X軸とのなす角を求めて横軸にとった。図8が示すように低速成分が観測される磁場の方向は58~124度に集中し、この低速の粒子が磁場に補捉されている様子をうかがわせる。

このようにフェルミ過程の適用により衝撃波面の下流側で観測される低速成分の成因に対するひとつの解釈がなされた。ところがこの事象で特筆すべきことは衝撃波面上流側でも低速成分が観測されている点にある。前述したようなフェルミ加速の過程によれば低速成分は下流域にのみ観測されるはずであるから、上流側の低速粒子の成因を考えねばならない。

まず、この成因として次節で詳しく述べる温度勾配による加速機構が考えられる。しかし、この事例では衝撃波面上流側で加速を引き起こすような温度の上昇は認められておらず、また観測時間後に加速を生じるべく不連続面が通過したとしても、その前面の4時間にわたって低速成分が観測されることは考えにくいことから、可能性は否定される。このため、上流と下流の領域に低速成分が存在することを立証する機構が必要となるが、これは今後の課題である。

3.2 TEN Type (温度上昇型)

太陽風中の粒子に低速度成分が検出されるのは、衝撃波の観測される前後だけではない。図9は、1985年11月13日の観測データであるが、20時25分前後にイオン温度が53000kから203000kまで急激に上昇している。これに対し、イオン密度は $7.4/\text{cm}^3$ から $4.6/\text{cm}^3$ に減少し、体積速度は約370km/sでほとんど変化していない。このような構造は図3のような衝撃波とはあきらかに異なり、境界面を粒子の温度勾配が支配する不連続面といえる。不連続面通過直前の電流/角度特性は図10a, 10bに示すように図4と同様にサブピ

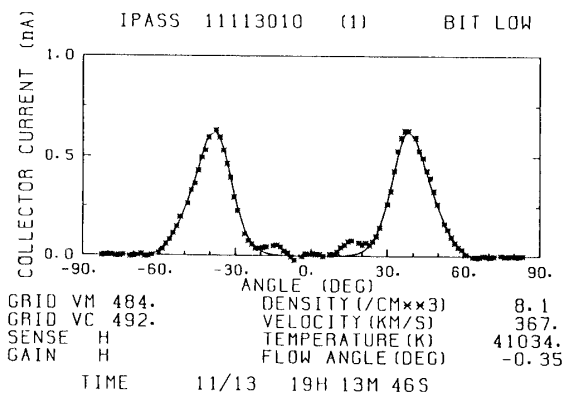


図10a 1985年11月13日19時13分に得られたコレクタ電流/角度特性

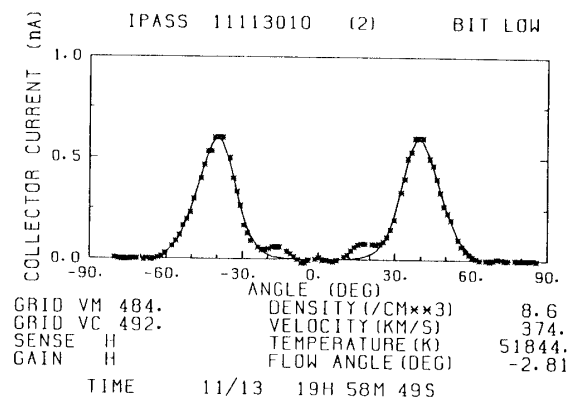


図10b 1985年11月13日19時58分に得られたコレクタ電流/角度特性

ークをもち、その速度を求めるとそれぞれ 301 km/s(10 a), 299 km/s(10 b)となる。しかし不連続面が通過し、温度が上昇した 20 時 25 分以降の電流特性ではサブピークは消え、通常の特徴に戻っている。すなわちサブピークの現れているのは図 9 で陰影をつけた部分にあたる温度上昇以前の約 20 分間に限られている。また図 9 の最上段の flow angle は不連続面の通過前に、イオン温度と体積速度は通過後の数分間に波動らしき周期的な変動を示し 1986 年 7 月 17 日の衝撃波の例と同様に不連続面の周辺に数分の周期の波動が存在することを示唆している。

さらに不連続面の前後では惑星間磁場の強度は約 3.8 nT 増加し、プラズマの静圧 ($2N_p k T_p$) と磁気圧 ($B^2/2\mu$) を加えたプラズマ圧力は、前後で均衡が保たれていない(ただしこの場合動圧 ($m_p V_{sw}^2$) は無視している)。したがって圧力の高い上流側のプラズマが下流域のプラズマを絶えず圧縮していることになる。

またこの時間帯の磁場に関してはプラズマのデータと同様に波動の存在が示唆される。よって上流側、下流側への波の伝搬についての詳しい議論を行なう必要がある。この点に関する報告は次回に譲り、ここでは衝撃波の場合と同様にして不連続面に温度勾配が生じている現象の場合について、図 11 のように 2 成分の速度差と磁場の方向の関係を調べてみた。また、この図は 1985 年 11 月の現象を含む温度上昇型と思われる 3 つの事例について描いたものである。前者以外の 1986 年 8 月 1 日、1987 年 10 月 22 日の 2 つの事例についても、それぞれ磁力計のデータを用いて表示した。図のように低速成分が観測される場合の磁場の方向は、それぞれ特定の角度に偏る傾向があり、荷電粒子が図 7 に示したようなふるまいをしていることが示唆される。図 11 に示した温度上昇型の事例に属するもうひとつの観測データを図 12 に示す。この 1987 年 10 月 22 日の現象[13]は「さきがけ」によって観測された特徴的なイベントのひとつで、太陽圏の磁気中性面近傍に $100 R_E$ ($\sim 7 \times 10^5$ km) 程度の厚さをもったプラズマシートが存在することを発見する基礎となったデータである。すなわち 1 時、2 時 30 分、3 時 25 分頃の計 3 回観測されたイオン密度の高い領域がその存在を示唆している。

この事例では、3 時 53 分に 86 000 k であったイオン温度が次第に上昇し続け、4 時 15

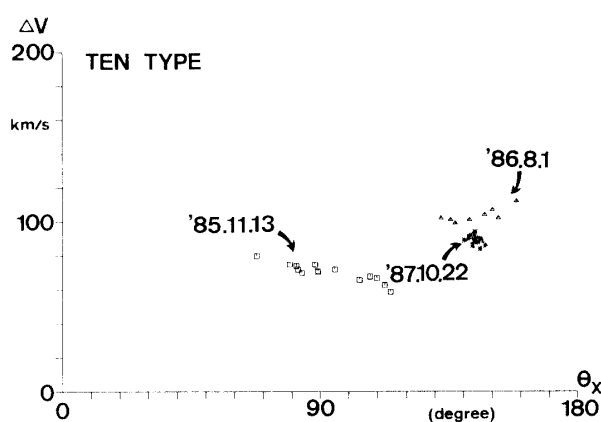


図 11 2 成分の速度差と惑星間磁場の方向の関係 (温度上昇型)

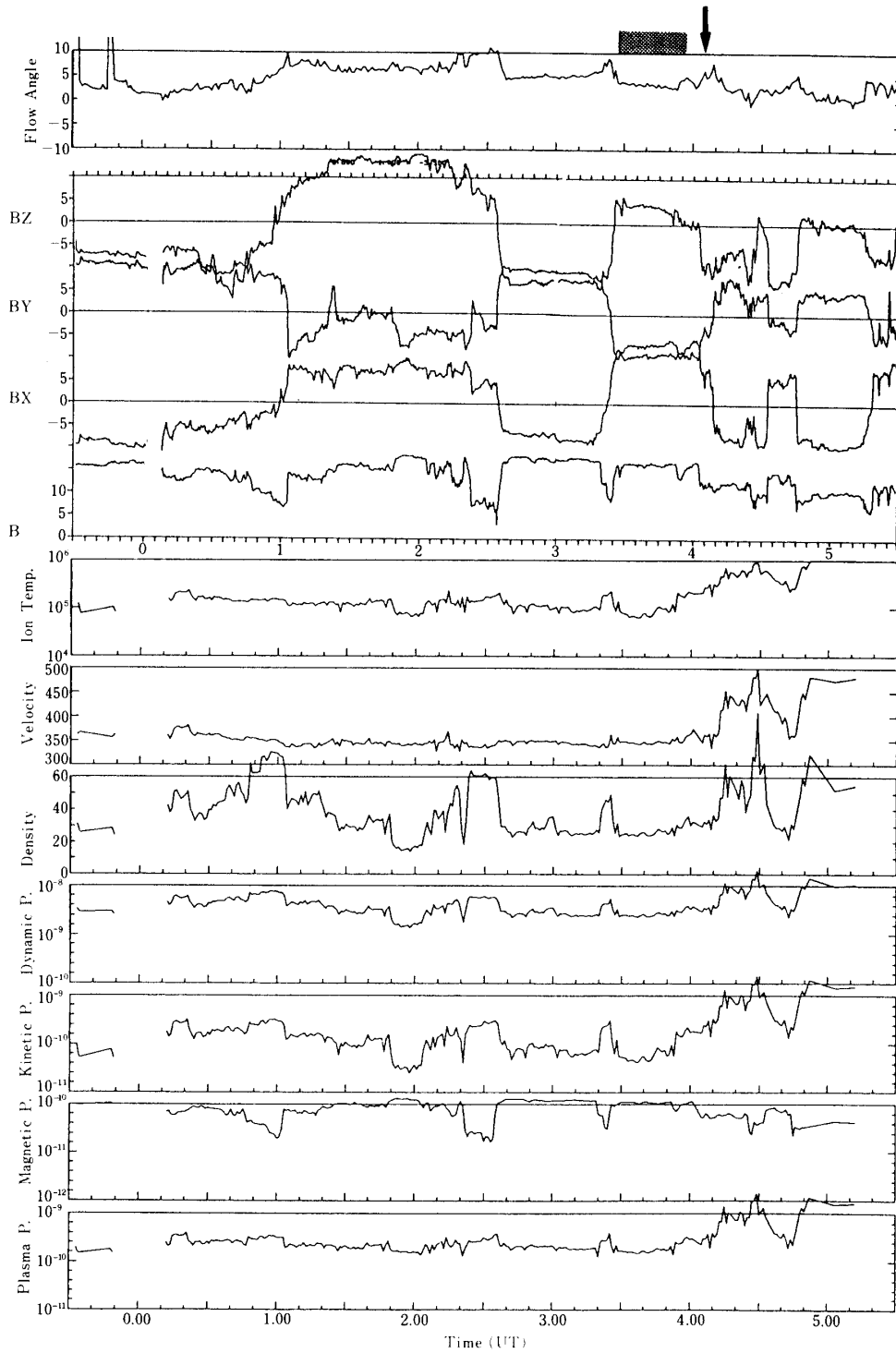


図12 1987年10月22日の太陽観測データ

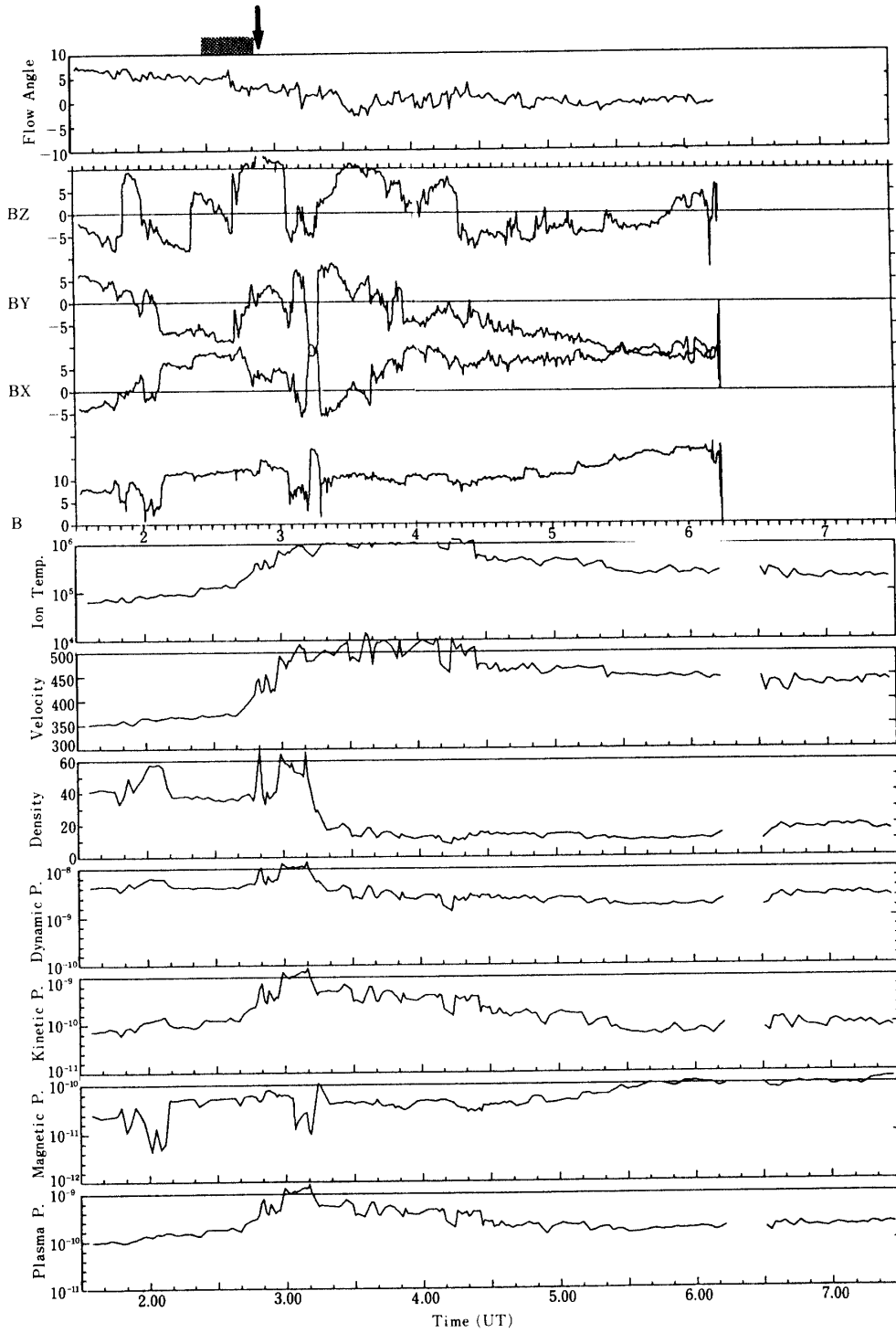


図 13 1986年8月1日の太陽風観測データ

分には 704 000 k にまで上昇している。いっぽう、体積速度は 4 時 12 分に急激に約 50 km/s の増加により 415 km/s にまで達している。それからこの時間にはイオン密度も約 25/cm³増加し、一見衝撃波性の構造を示しているが、惑星間磁場にはこれに対応する構造は見られず、この事例を温度上昇型の範疇に加えた。図中、陰影を施した時間帯は前例と同様、電流/角度特性上にサブピーク（すなわち低速度成分）が現れたことを示すが、温度上昇が始まった 3 時 53 分以前に限定されている。またサブピークの出現し始めた 3 時 27 分にはイオン密度、温度が減少し、したがってプラズマの静圧が減少し、磁場強度の増加により磁気圧は強くなっているが両者の和をとると絶対値は減少していることから、下流域のプラズマが上流側を押し戻すような感じになる。よってサブピークの出現している約 26 分間（約 54 万 km に相当）の領域のプラズマは上流側と下流側のプラズマによって押し込められていることになる。このようにサブピークの出現範囲が圧力平衡により支配されていることは、温度勾配による加速の機構、および旋回運動を開始した後のプラズマ粒子の運動の経緯を知る上で重要な意味をもつと思われる。

最後に温度上昇型の残る一つの例を図 13 に示す。この事例では不連続面を通過したと考えられる 2 時 51 分の直前約 20 分間に電流/角度特性上にサブピークが観測されている。サブピークの手前は体積速度よりも約 100 km/s 遅く、270 km/s 程度であった。太陽風パラメータの変化は 2 時 40 分に 366 km/s であった太陽風速がゆるやかながらも次第に増加し、3 時 4 分には 481 km/s まで達している。これに伴いイオン密度は 34.6 から 58.8/cm³ に、イオン温度も 117 000 k から 652 000 k にそれぞれ上昇しているほか、惑星間磁場に関しても 2 時 51 分から 52 分にかけて強度が 10.6 nT から 13.5 nT まで増加している。速度、温度の変動がゆるやかなこと、磁場強度の増加量が少ないことから、この現象も温度上昇型の分類に入れた。図 12、図 13 の事象はいずれも速度、温度がある程度上昇しているため、どちらの型に分類すべきか微妙なところではある。しかし、衝撃波型と分類した 1986 年 7 月 17 日の事象は速度、密度、温度、磁場の絶対量の増加がほとんど同時に生じているのに対し、温度上昇型の 3 つの事象では 4 つのパラメータの変化の様子が異なっている。まず 1985 年 11 月 13 日の現象では体積速度と磁場強度はほとんど一定で、イオン密度は逆に減少している。1986 年 8 月 1 日と 1987 年 10 月 22 日の現象では速度、密度、温度は衝撃波型に比べはるかにゆるやかに増加し、磁場強度の変化した時間とも一致していない。このような理由から 3 つの事象は温度上昇型と定義した。

4. 加速機構に対する検討

4.1 磁場ベクトルとの関連性

第 3 節で述べたように衝撃波型、温度上昇型の計 4 つの事例において、低速成分が観測された時の磁場ベクトルの方向はそれぞれ特定の方向に偏る傾向が見られた。これは図 7 に示したように、加速を受けた粒子が本来のマクスウエル分布している粒子に凍結された磁場に、補促されている様子を物語っているように見える。また衝撃波型の現象で求めた法線速度ベクトルはほぼ X 軸方向を向いていたことから、粒子の加速をこの方向にとり図 7 のようなベクトルの配置を考えると、磁場が Y 軸方向を向いた時（すなわち X 軸とのな

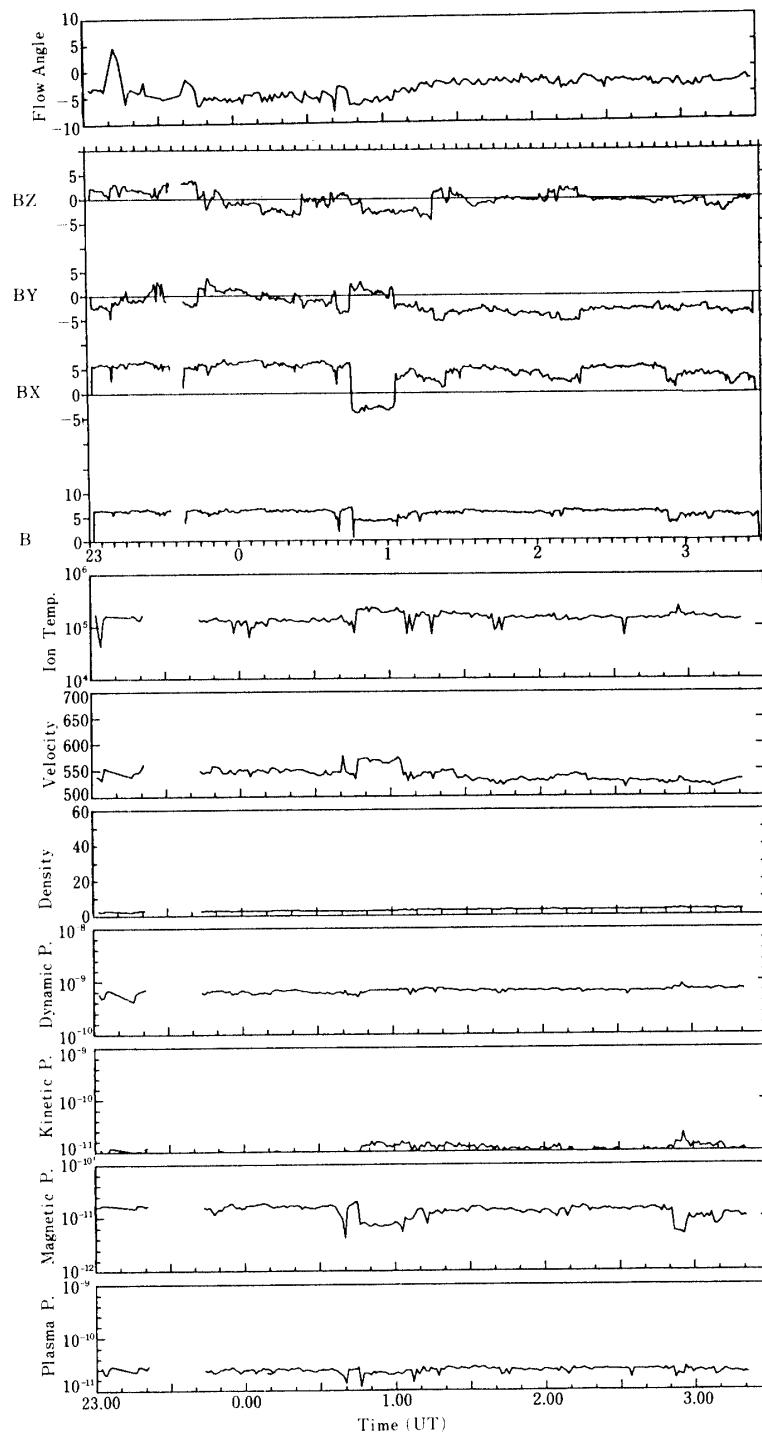


図 14 1987年5月12日の太陽風観測データ

す角が90度の時), 体積速度と低速成分の差が最大となる。また理想的な計算によれば磁場ベクトルとX軸とのなす角が (90 ± 45) 度で低速成分が観測されることになる。図8に示された点の角度範囲が58~124度であったことは, この様子を物語っているのであろう。さらに温度上昇型の場合についても図11のような低速成分の角度分布は粒子加速の行なわれている方向を表わしていると考えられる。

4.2 「さきがけ」による観測

「さきがけ」による3年間の観測で, 太陽風の体積速度に低エネルギー成分が見つかったのはわずか5例であった。出現が確認された時間を合計しても8時間弱で, 総観測時間に対する比率は1%にも満たない。加速現象が衝撃波または温度勾配により生じるならば, さらに頻繁に起きることは考えられないだろうか。

図14は1987年5月12日の観測データで0時47分前後にイオン温度が73000kから204000kに上昇するとともに, 体積速度が532km/sから570km/sまで増加している。この温度差を空間的なスケールに直すと3.7k/kmの勾配をもっていることになる。一方, 温度上昇型の加速現象と分類した1985年11月13日では温度勾配は2.1k/km, 1986年8月1日の場合4.0k/km, 1987年10月22日の場合7.3k/kmとなり, これらの値に比べてそれほど勾配が小さくない。ところがこの日の観測では図15a(不連続面通過前), 15b(通過後)のようにコレクタ電流特性上にサブピークは現れておらず, 加速現象が生じていないことを示している。どんな条件が加速を左右しているのだろうか。

そこで加速を引き起こす原因と考えられる不連続面前後での圧力勾配を調べるため, プラズマの静圧と磁気圧を求め図14下部のように表示した。一番下のパネルのプラズマ圧は静圧と磁気圧を加えた値としたが, この事例では不連続面の前後でほとんど変化が見られない。理由は, 温度の増加に対応して磁場の強度が減少したことにより, 両者の和で見た場合不連続面の前後で釣り合っているためである。これに対し温度上昇型と定義した1987年10月の事例ではイオン密度がひと桁大きいので, 静圧のオーダーが磁気圧を上回り, 総合的にみても圧力勾配が存在し, 加速を引き起こす条件を保っていたと考えられる。した

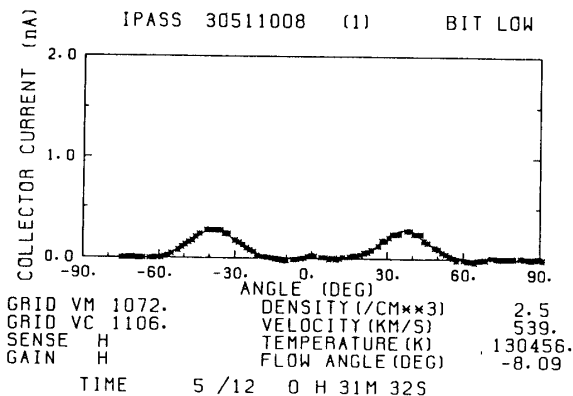


図15b 1987年5月12日1時1分に得られた電流/角度特性

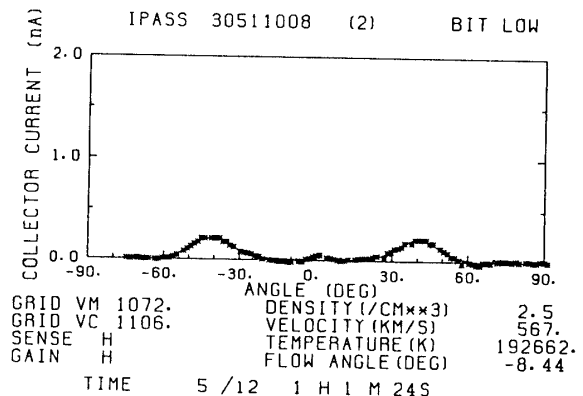


図15a 1987年5月12日0時31分に得られた電流/角度特性

がって加速現象が生起するためには背景のイオンの密度が十分に高い条件が必要である。

そのほか「さきがけ」が観測した多くのプラズマ不連続面を調べた結果、電流特性上にサブピークが現れるための背景パラメータ (N_p ; イオン密度, T_p ; イオン温度) としてつぎのような値が得られた。

$$N_p > 15/\text{cm}^3 \quad (1)$$

$$T_p < 10^5 \text{ k} \quad (2)$$

$$T_p/N_p < 5 \times 10^3 \quad (3)$$

条件(1)は上記したような理由により、(2)はコレクタ電流/角度特性上でサブピークの出現が認められる速度差の範囲が制限されており、イオン温度が上昇すると確認し難くなることから生じてくる。そして(3)は太陽風パラメータ(速度、密度、温度)間にある程度の相関関係があり、これらの変動量が背景のプラズマ状態により適度に制限されるためと考えられる。太陽風中に低速度成分が観測される可能性が小さいのは、このような条件がないと加速現象が起こらないためと思われる。

4.3 ファラデーカップによる観測

惑星間空間の衝撃波あるいは不連続面による加速によって、粒子の一部が旋回運動していることが「さきがけ」により確かめられた。このような現象が他の探査機でほとんど観測されなかったのは何故だろうか。

まず理由として考えられるのは、太陽風の測定にファラデーカップを用いたことである。私どもの観測では探査機のスピンを利用してパラメータを求めているので、X軸方向の速度を走査していることに等しいことは前述したとおりである。角度方向の標本頻度が1.4度に1回のためファラデーカップの第2グリッドに830[V]を印加した場合(図4のデータに相当)、サブピークの出現する角度15度付近ではこの掃引のステップは $\Delta E = 10.1[\text{eV}]$ に相当する。

これに対してたとえば探査機「すいせい」[14]に搭載された太陽風観測装置の場合、エネルギー掃引はE3モードの場合

$$E_n = 30 \cdot \exp(0.066 \cdot n)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, 95$$

で表わされ、800 eV付近では $\Delta E = 52[\text{eV}]$ になる。またISEE 1に搭載された測定器[15]でも $\Delta E = 60[\text{eV}]$ であっても私どものファラデーカップ型のものに比べ5倍以上大きい。これらのエネルギー掃引がある程度の幅をもつことや、探査機のスピンの影響でバイアスを固定していても掃引がずれにくいことなどから単純には比較できないが、一般にファラデーカップのエネルギー掃引は静電型の分析器に比べきめ細かいということが出来る。

いっぽう、コレクタ電流/角度特性上に現れたサブピークは図4aの場合、計算により約76[eV]の幅をもっていることになるが、ファラデーカップで観測すると図のようにサブピ

ークに関する数個の標本点数を得ることになる。ところが静電型の分析器の場合 $\Delta E = 50[\text{eV}]$ 程度なのでサブピークを捉えるのは多くてもそれが2点であって、その存在を確信するだけの情報に満たないかもしれない。今まで多数の探査機に搭載された2次元あるいは3次元の速度分布を測定できる静電型のエネルギー分析器が、低エネルギー成分すなわち旋回運動を行なっている粒子をほとんど確認できなかったのは、この点に原因があるのかもしれない。

5. 結論

太陽風中にマクスウエル分布から外れた、すなわち非熱的な粒子が観測された。この速度成分は太陽風の体積速度よりも60-140 km/s遅く、いつもパラメータの急激な変化を伴って現れる。この低速成分の成因は惑星間空間に存在するある種の加速機構によりエネルギーを受け取った粒子が、本来のマクスウエル分布している側のプラズマに凍結している惑星間磁場に捕捉され、旋回運動を始めた結果生じたと推測される。

加速機構としては2つのタイプが考えられ、惑星間衝撃波によるフェルミ加速と、プラズマの温度勾配、言い換えれば圧力勾配に伴う加速と考えられる。

衝撃波面、あるいは不連続面の前後には衝撃波の構造に関わる波動が存在しているらしい形跡が見つかっている。これらの波動は上流側、下流側に向かう粒子と密接に関連していると思われ、さらに詳しく解析する必要がある。

7. 謝辞

「さきがけ」の観測は宇宙科学研究所内外の多くの方々のご協力により達成された。心から感謝の意を表す。またデータの解釈について有益な議論を下された渡部重十、湯元清文の両氏に深く感謝する。惑星間磁場に関するデータは斎藤尚生教授を主任研究者とするグループにより提供していただいた。

参考文献

- [1] Paschmann, G., N. Sckopke, I. Papamastorakis, J. R. Asbridge, S. J. Bame, and J. T. Gosling, Characteristics of reflected and diffuse ions upstream from the earth's bow shock, *J. Geophys. Res.*, **86**, 4355-4364, 1981.
- [2] Gosling, J. T., M. F. Thomsen, S. J. Bame, W. C. Feldman, G. Paschmann, and N. Sckopke, Evidence for specularly reflected ions upstream from the quasi-parallel bow shock, *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 1333-1336, 1982.
- [3] Sckopke, N., G. Paschmann, S. J. Bame, J. T. Gosling, and C. T. Russell, Evolution of ion distributions across the nearly perpendicular bow shock: specularly and non-specularly reflected-gyrating ions, *J. Geophys. Res.*, **88**, 6121-6136, 1983.
- [4] Gosling, J. T., J. R. Asbridge, S. J. Bame, W. C. Feldmann, R. D. Zwickl, G. Paschmann, N. Sckopke, and R. J. Hynds, Interplanetary ions during an energetic storm particle event: The distribution function from solar wind thermal energies to 1.6 MeV, *J. Geophys. Res.*, **86**, 547-554, 1981.
- [5] Kennel, C. F., F. J. Scarf, F. V. Coroniti, C. T. Russell, K. P. Wenzel, T. R. Sanderson,

- P. Van Nes, W. C. Feldman, G. K. Parks, E. J. Smith, B. T. Tsurutani, F. S. Mozer, M. Temerin, R. R. Anderson, J. D. Scudder, and M. Scholer, Plasma and energetic particle structure upstream of a quasi-parallel interplanetary shock, *J. Geophys. Res.*, **89**, 5419-5435, 1984.
- [6] Sanahuja, B. and V. Domingo, Low-energy protons associated with interplanetary shocks as a coherent population, *J. Geophys. Res.*, **92**, 7280-7288, 1987.
- [7] 小山孝一郎, 平野孝文, 平尾邦雄, 「さきがけ」に搭載された太陽風観測器, 宇宙研報告特集第15号, 3-43, 1986.
- [8] Tsurutani, B. T., E. J. Smith, and D. E. Jones, Waves observed upstream of interplanetary shocks, *J. Geophys. Res.*, **88**, 5645-5656, 1983.
- [9] Paschmann, G., N. Sckopke, J. R. Asbridge, S. J. Bame, and J. T. Gosling, Energization of solar wind ions by reflection from the earth's bow shock, *J. Geophys. Res.*, **85**, 4689-4693, 1980.
- [10] Edmiston, J. P., C. F. Kennel, and D. Eichler, Escape of heated ions upstream of quasi-parallel shocks, *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 531-534, 1982.
- [11] Terasawa, T., Energy spectrum and pitch angle distribution of particles reflected by MHD shock waves of fast mode, *Planet. Space Sci.*, **27**, 193-201, 1979.
- [12] 湯元清文, 斎藤尚生, 中川朋子, 平尾邦雄, 青山巖, 瀬戸正弘, 「さきがけ」搭載リングコア磁力計について, 宇宙研報告特集第15号, 45-57, 1986.
- [13] 「さきがけ」観測研究グループ, 「さきがけ」による27日回帰性太陽磁気圏構造に関する諸現象, 宇宙研報告特集第21号, 61-73, 1988.
- [14] 向井利典, 三宅亘, 寺沢敏夫, 平尾邦雄, 「すいせい」による太陽風イオン観測, 宇宙研報告特集第14号, 59-74, 1986.
- [15] Sentman, D. D., C. F. Kennel, and L. A. Frank, Plasma rest frame distributions of suprathermal ions in the earth's foreshock region, *J. Geophys. Res.*, **86**, 4365-4373, 1981.