

「さきがけ」で観測された磁気嵐性惑星間空間擾乱

湯元清文*・小山孝一郎・斎藤尚生*
平尾邦雄**・平野孝文**・中川朋子*

(1986年2月25日受理)

Geomagnetic Storm-Associated Interplanetary Disturbances Observed by SAKIGAKE (Planet-A Mission)

Kiyohumi YUMOTO, Kohichiro OYAMA, Takao SAITO, Kunio HIRAO,
Takafumi HIRANO and Tomoko NAKAGAWA

Abstract: Geomagnetic storm-associated interplanetary disturbances (IPD) were observed by Sakigake (Planet-A mission) during the interval from June to October, 1985. These IPD's can be classified into four groups related with (i) recurrent high-velocity stream, (ii) transient phenomena in the high solar-wind velocity, (iii) shock-like disturbance, and (iv) abnormally enhanced solar-wind density. The recurrent-stream type disturbances are found to appear predominantly in the minimum phase of the solar sunspot number.

要 旨

「さきがけ」により観測された太陽風及び惑星間磁場擾乱の中で、地球磁気嵐に関連すると思われる現象を形態学的に分類分けすると次の4つになることが明らかにされた。1985年6月から10月の9 events の磁気嵐のうち、4 events が(1)回帰性 high-velocity stream, 2 events が(2)高速太陽風中に発達した flare もしくは filament 消滅などの transient な現象であり、2 events が(3) shock-like 擾乱, そして最後の1 event が(4)異常密度増加と関連して発生した惑星間空間擾乱と関係しているものと推察された。

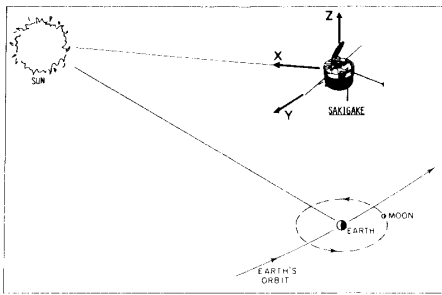
* 東北大学理学部

** 東海大学工学部

1. 緒 言

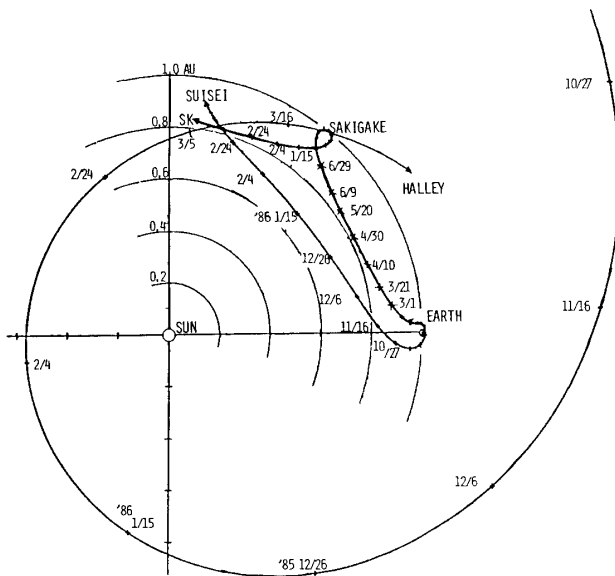
1985年1月8日早朝、内ノ浦の宇宙空間観測所から打ち上げられた「さきがけ」(第1図)は、1986年3月11日、700万 km までの Halley 彗星との接近を目指して順調な旅を続けている(第2図)。「さきがけ」に搭載された惑星間空間磁場観測装置(IMF)及び太陽風プラズマ観測装置(SOW)は、2月19日の boom 伸展、2月20日の高電圧印加、そして探査機 spin 軸姿勢の黄道面垂直調整を4月12日に完了して以来、太陽風中の様々な擾乱を精度良く検出し続けている。

本論文では、太陽活動極小期である1985年4月中旬から10月中旬の6ヶ月の間に地球上で観測された9 events の磁気嵐と太陽風擾乱(第3図)との関連性について調べた結果、極大期に頻発する solar flare などの transient な惑星間空間擾乱に起因するものが少なく、high-velocity stream-stream interaction によって形成されたと思われる回帰性の惑星間空間擾乱によって地磁気嵐が多く引き起こされた事が明らかになった。

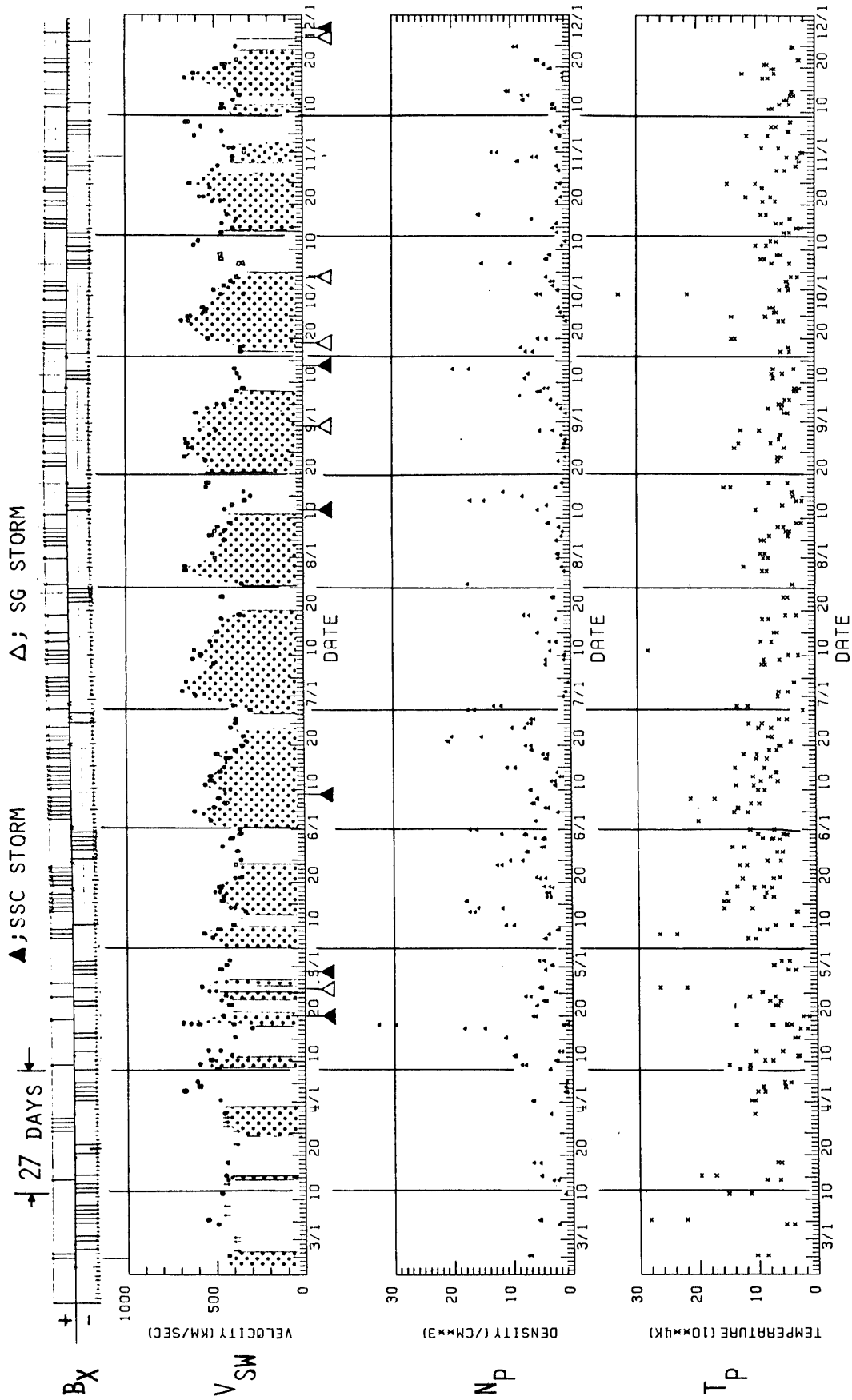


第1図

太陽磁気圏中を飛翔する「さきがけ」の概念図。X, Y, Z 軸は惑星間空間磁場3成分の方向を示す。



第2図 Halley 彗星, 「さきがけ」, 「すいせい」の黄道面軌道。



第3図 IMF によって観測された惑星間空間磁場の X 成分 (+; Toward, -; Away). SOW によって観測された太陽風速度 (V_{sw}), 密度 (N_p), 及び温度 (T_p). 黒白三角印は地球磁気嵐の発生を表す。

2. 観 測

地磁気嵐に繋る太陽風中の大きな擾乱は、太陽風圧 $P \equiv \epsilon N_p m_p V_{sw}^2 + \sum N_i k T_i + B_{IMF}^2 / 2\mu\pi$ の中で動圧が静圧を凌駕している事から、太陽風速度 (V_{sw}) 及び ion 密度 (N_p) の変動に起因するものと思われる。この V_{sw}, N_p の変動に伴う惑星間空間磁場擾乱の中で、特に IMF の南向き成分 ($B_z < 0$) が卓越した時、地磁気嵐に発達する事は周知の事である [Akasofu & Chapman, 1972]。地上で観測された地磁気嵐 9 events に関係すると思われる「さきがけ」での太陽風の擾乱は、惑星間空間擾乱の driven force と成り得る V_{sw} 及び N_p 変化の組み合わせから、次の様に分類されることが明らかになった。

(1) R-S 型 (回帰性 stream ; $\Delta V_{sw} \sim V_{sw}$)

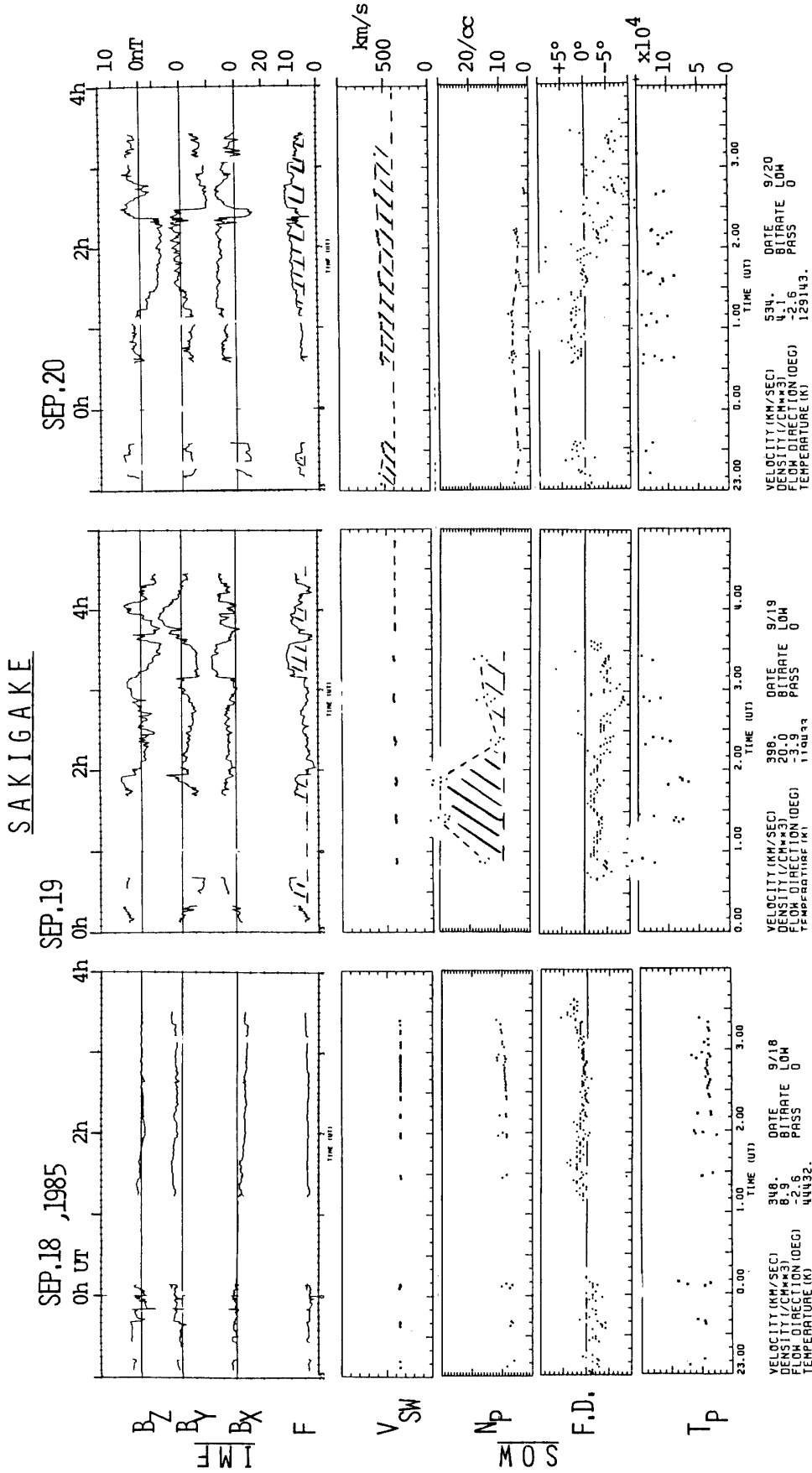
この惑星間空間擾乱は、回帰性地磁気嵐と関連するものと考えられる。1985年9月14日 06h00mUT に地上では SSC が観測された (第3図)。およそ 50° 経度西側に位置する「さきがけ」で (第2図参照) 観測された太陽風はこの9月18日まで静かで、CME (Coronal Mass Ejection) や flare 性の transient な擾乱は記録されていない (第4図)。地上の SSC からおよそ 4 (or 4.8) 日後に、まず、密度増加 ($\Delta N_p \geq 20$) と惑星間空間磁場強度の増加 ($\Delta F \geq 6nT$) が観測され、その後ほぼ1日後に太陽風速度の増加 ($\Delta V_{sw} = 534 - 398 \sim 140$ km/s) と密度の平常値までの減少が記録された。この状況は Chao et. al [1974] や Burlaga [1975, 1984] によって報告されている惑星間空間中の fast-stream と slow-stream との相互作用の結果発生する stream-stream interaction 性擾乱の様相と一致している。又、地球及び「さきがけ」間で、現象観測の時刻差がほぼ ~ 4 日であることから、回帰性現象と考えられる。小島 [1985] の報告によると、3C 147 の IPS 観測から9月17日 20.75 hUT に西側 15.6° 経度付近に SCIX (Scintillation Index $\propto (\delta Ne)^2$) の異常増加が存在したとのことである。この SCIX 増加の領域は共回転して19日頃「さきがけ」の所に到達したと思われる。観測時間分解能及び数10経度の擾乱領域の空間 scale を考慮すれば、この IPS 観測結果は、惑星間空間の stream-stream interaction による擾乱形成に伴う地磁気嵐の発生を支持するものである。

次に、第3図から、1985年6月から10月中旬頃までは太陽風の回帰性が非常に良かったことが観られる。それにも拘らず、特に6月-7月には、回帰性地磁気嵐が観測されていない。太陽風及び惑星間空間磁場擾乱は、連続的に且つ太陽磁気圏規模で観なければ結論は述べられないが、「さきがけ」によって1つの手懸らしきものが観測された。

第5図に示された、7月下旬に発生した太陽風速及び密度の変化は典型的な回帰性の太陽風擾乱である。地磁気嵐が発生した第4図の回帰性惑星間空間擾乱と、地磁気嵐が観測されなかった第5図の回帰性惑星間空間擾乱の唯一の差は、惑星間空間磁場強度の増加及び変動の増加の有無のみである。この差が惑星間空間擾乱構造の geometry に因るものなのか、それとも太陽表面に起因するのか、今後の人工惑星による多点同時観測が待たれるが、惑星間空間磁場の変動が地磁気嵐の発生に関与しているものと推察される。

(2) T-S 型 (Transient stream ; High- $V_{sw}, \Delta P > 0$)

この type の惑星間空間擾乱は、太陽風が high-velocity である期間に発生した filament 消失や flare などの transient な現象に伴う太陽風動圧増加に関連するものと思われる。



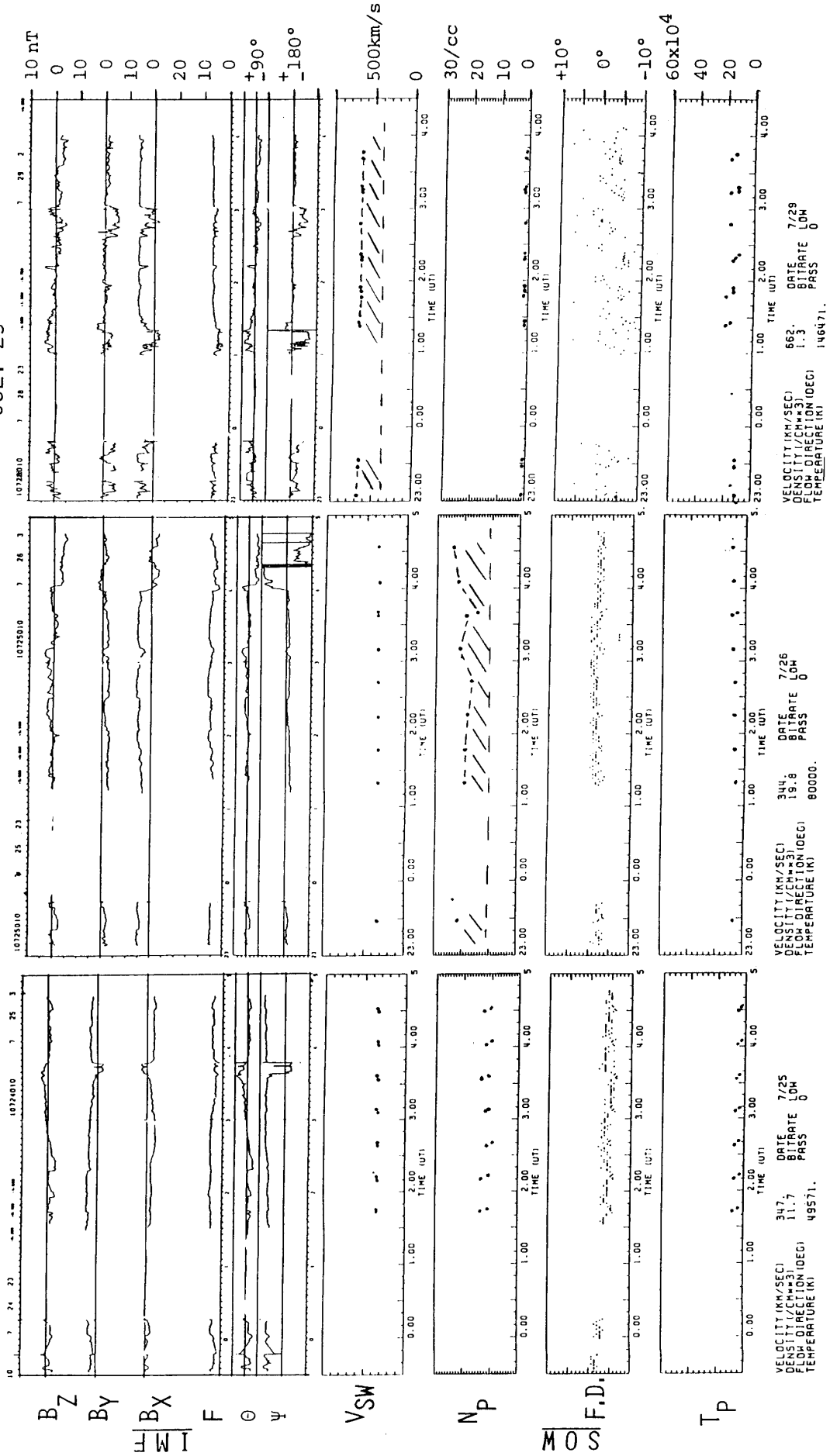
第4図 R-S型惑星間空間擾乱, IMFの B_x, B_y, B_z の3成分と絶対強度 F, SOW による太陽風速度 (V_{sw}), 密度 (N_p), flow direction (F.D.) と温度 (T_p).

SAKIGAKE

JUL, 25, 1985

JUL, 26

JUL, 29



第5図 第4図と同じ。

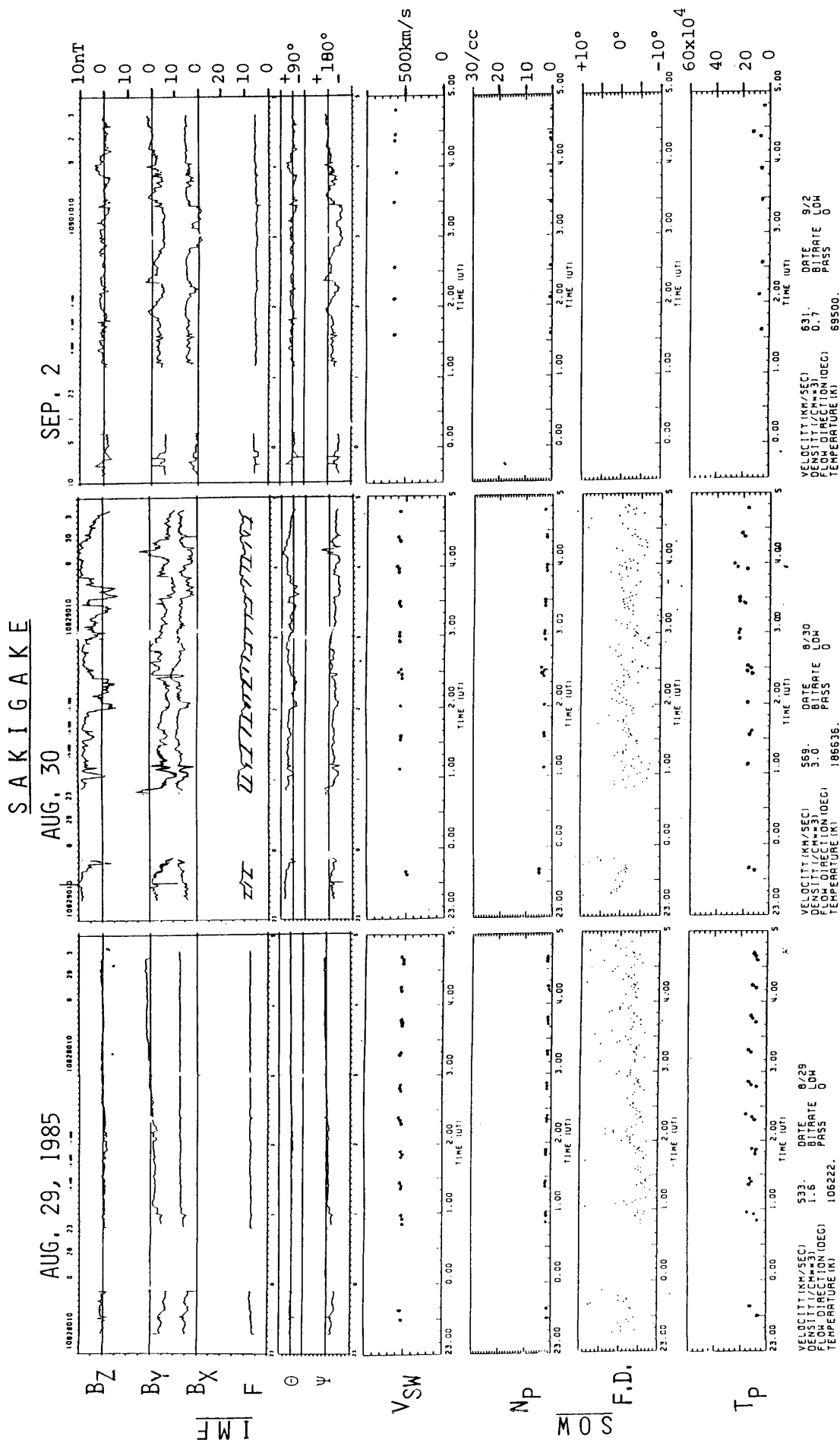
第6図に示される様に、太陽風が570 km-630 kmの高速流である期間に、NOAAのSolar Geophysical Dataによると、8月29日に filament 消失があったことが報告されている。「さきがけ」で観測された惑星間磁場強度及び変動の増加と僅かな密度増加 $\Delta N_p \sim 1.5$ の原因は不明であるが、この transient な惑星間空間擾乱が、地球で観測された8月31日のSG storm と関係する可能性が高いものと思われる。

(3) Shock 型 ($\Delta V_{sw}, \Delta P > 0$)

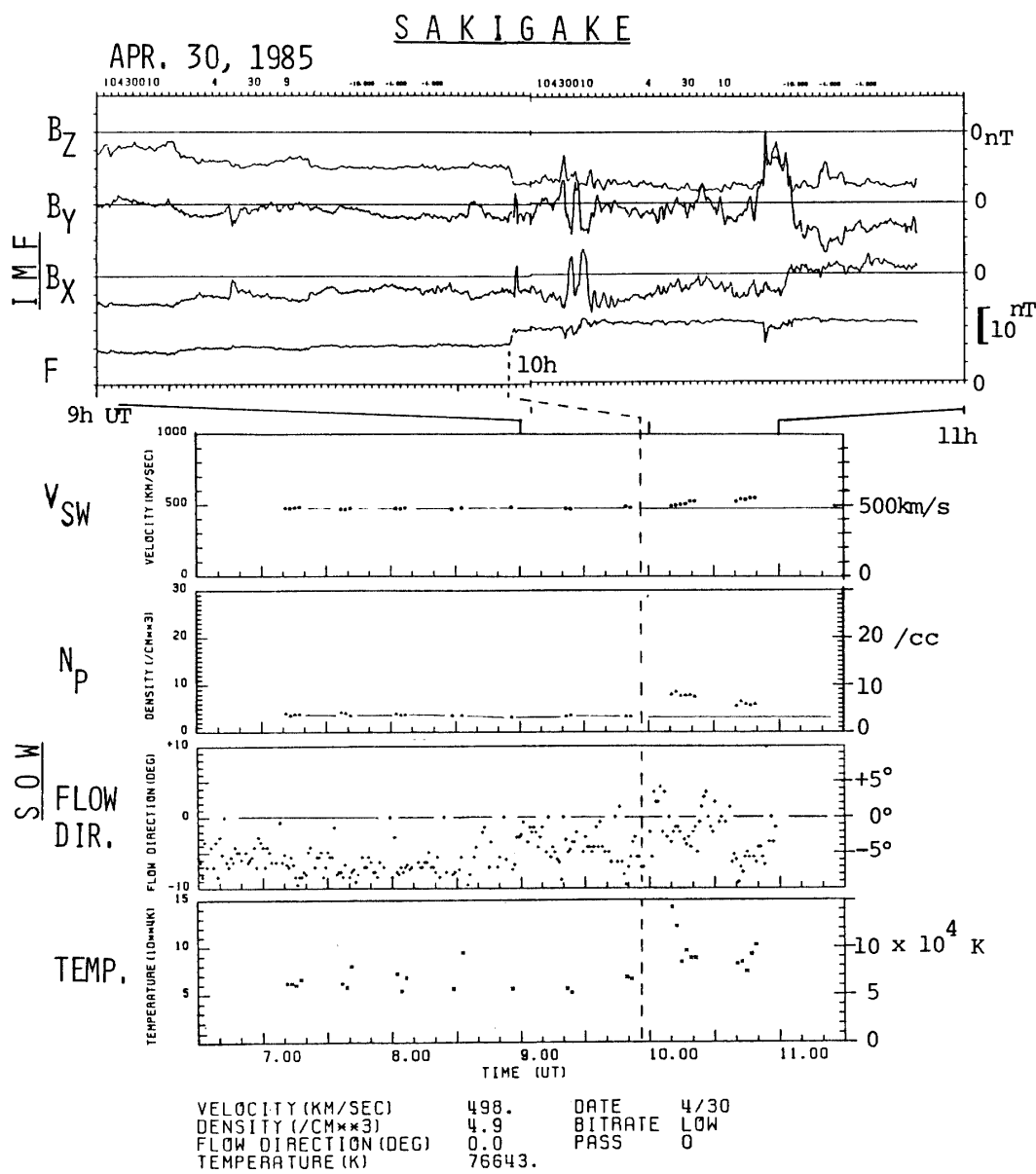
地上の4月30日09h24mUTのSSC性地磁気嵐(第2図)の33分後に「さきがけ」の場所において shock-like 構造が観測された(第7図)。IMF shock-like 構造; $\mathbf{B}_{\text{upst.}} = (-4.6, -3.1, -14.1)\text{nT}$, $\mathbf{B}_{\text{downst.}} = (-4.5, -2.5, -9.7)\text{nT}$ から求めた shock normal vector は $\mathbf{n} = (0.96, 0.27, -0.06)$ であり、quasi-perpendicular shock-like 構造であった事が理解される。又、この shock 面は地球の位置では「さきがけ」より早く擾乱を観測できることを示しており、観測結果と矛盾しない。この shock-like 構造に伴い、 $\Delta N_p = (8-3) = 5/\text{cc}$, $\Delta V_{sw} = (540-480) \sim 60\text{ km/s}$, $\Delta F = (15-19) \approx 6\text{ nT}$, $\Delta T \sim 10^5\text{ K}$ の変化が ~ 10 分の order でほぼ同時に起り、一見古典的な太陽 flare type の擾乱の様相であるが、NOAAのSGD速報によると、対応する大きな flare も無く原因不明との事である。この shock-like 構造の発生原因及び形成機構については、今後の観測的及び理論的研究が待たれる。

(4) DE 型 (Density enhancement; $\Delta N_p \gg N_p$)

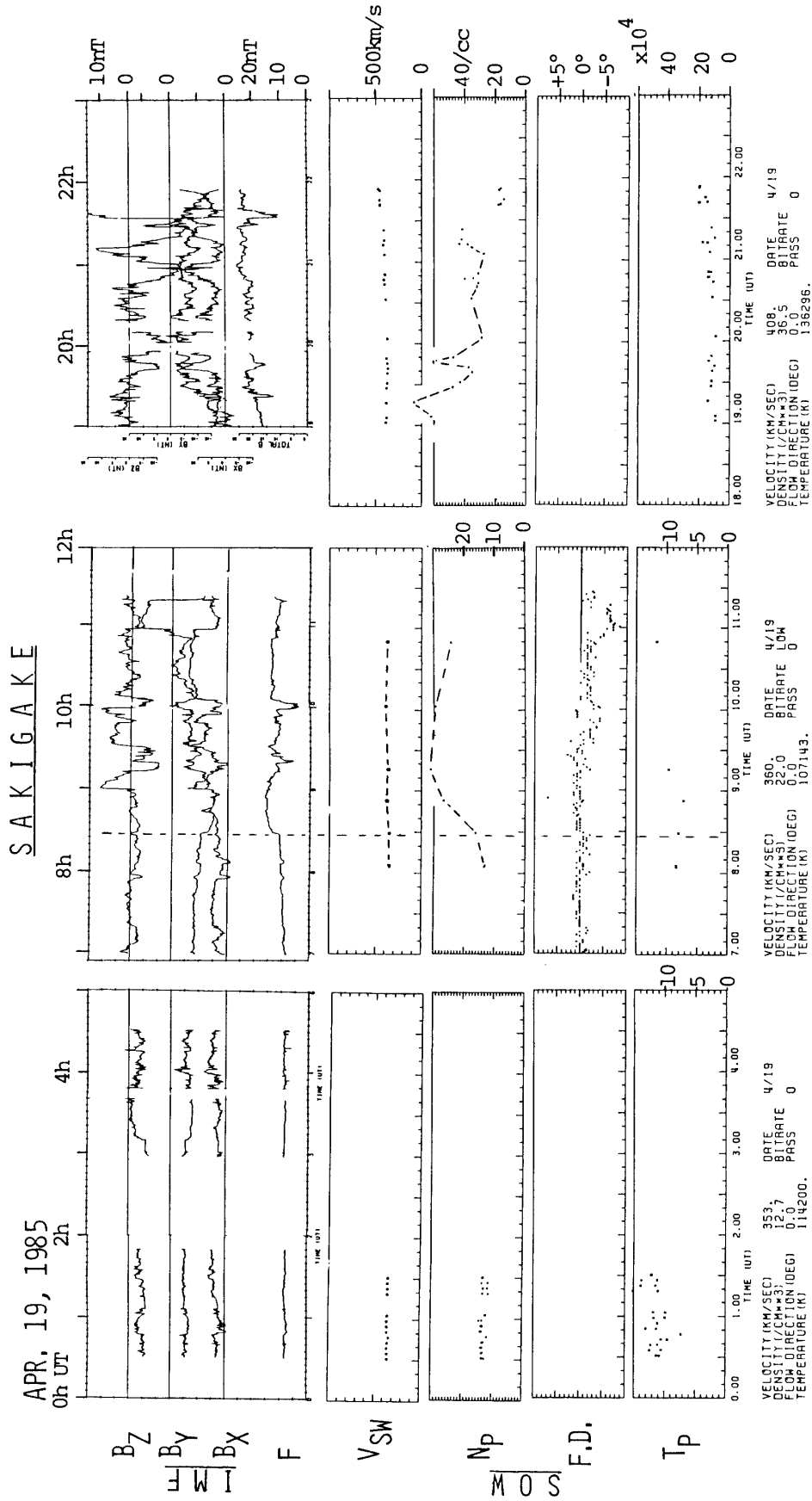
1985年4月20日03h11mUTから21日24hの間にSSC性地磁気嵐が発生したことが、東北大学女川地磁気観測所で記録された。この地磁気嵐の原因については、NOAAのSolar Geophysical Dataによると4月15~19日はno-flare、4月14日、16日、18日に filament 消失に関するCME及びsector boundary通過のいずれかに関係しているものと速報されている。この地磁気嵐に対応する擾乱は、「さきがけ」のIMF磁場記録の中に4月19日08h27mUTの不連続構造として、又、同時刻頃からSOWの N_p の記録に30/cc、さらに ~ 20 hUTには60/ccにも及ぶ異常増加として現われている(第8図)。ここで注目すべき事は、太陽風速度がほぼ一定($V_{sw} \sim \text{const.}$)であるにも拘らず、この太陽風中の擾乱が密度異常増加($\Delta N_p \geq 60$)のみによって発生した事にある。「さきがけ」の位置(西側 $\sim 25^\circ$ 経度、第2図)と、「さきがけ」で観測された擾乱が地磁気嵐の開始時刻(18h44m)より先行した事から、この異常密度増加の太陽表面における発生場所は西側と推定される。「さきがけ」の位置におけるIMF不連続構造; $\mathbf{B}_{\text{upst.}} = (3.6, -13.0, -2.5)\text{nT}$, $\mathbf{B}_{\text{downst.}} = (4.5, -10.0, -0.2)\text{nT}$ から求めた normal vector $\mathbf{n} = (-0.71, 0.55, -0.44)$ で quasi-parallel shock 構造に近い。このことは、不連続面が地球に数10時間後に到達することを示唆するものであり、太陽表面の西側に異常密度放出が発生したことを裏付けるものである。



第6図 T-S型惑星間空間擾乱. IMFの B_x, B_y, B_z 成分と絶対強度 F , それに磁場 vector の azimuth 角 (φ ; 太陽方向 0°) 及び elevation 角 (θ ; 黄道面 0°). SOW の表示は第4図と同じ.



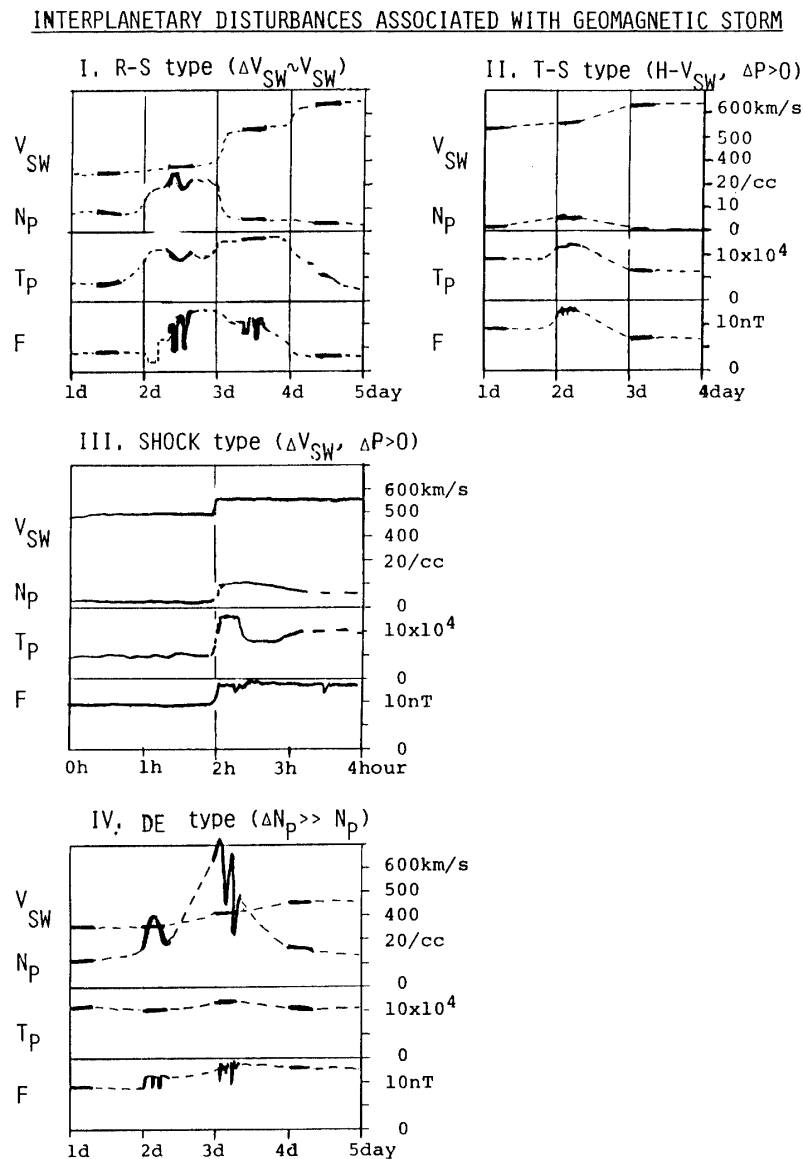
第7図 Shock-like 型惑星間空間擾乱。IMF と SOW の表示は第4図と同じ。



第8図 異常密度増加型惑星間空間擾乱, IMF と SOW の表示は第4図と同じ。

3. 結 論

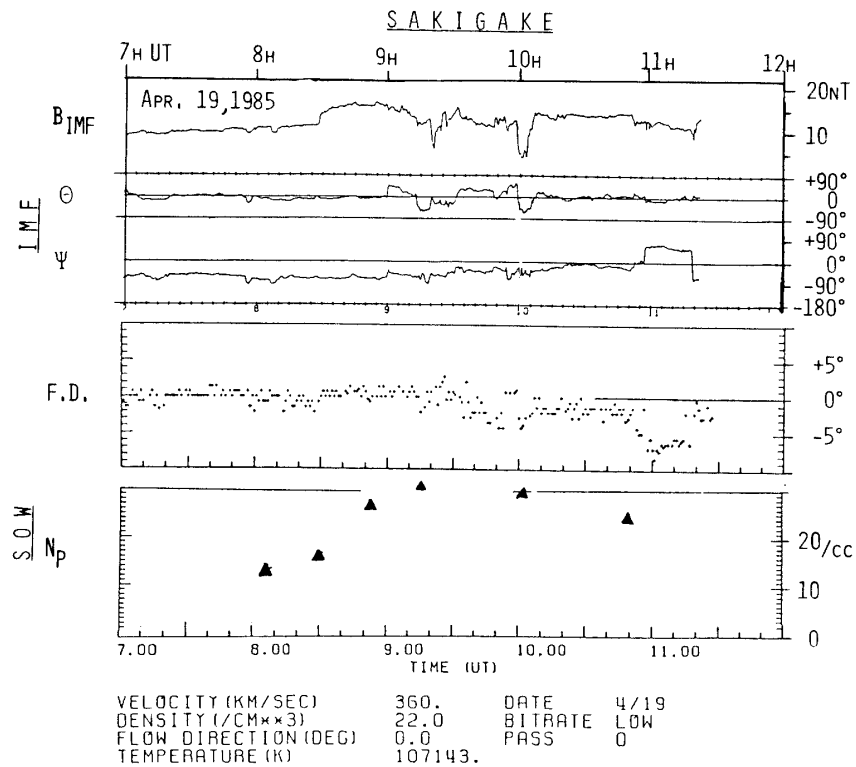
以上、地上で観測される磁気嵐と関連すると思われる惑星間空間（太陽風）擾乱が、太陽風変化速度 (ΔV_{sw}) 及び変化密度 (ΔN_p) の組合せから、4つの形態に分類できることが報告された。これら4型の惑星間空間擾乱を、「さきがけ」で観測された太陽風速度 (V_{sw})、密度 (N_p)、温度 (T_p) 及び惑星間空間磁場強度 (F) の変化として、概念的にまとめたのが第9図である。これらの形態は、観測時間が制限されていることから、最終結論までには



第9図 地球磁気嵐と関連すると思われる惑星間空間擾乱4分類の概念図。1985年6月から10月までの間(i) R-S型は4 event, (ii) T-S型は2 event, (iii) Shock-like型は2 event, そして(iv) DE-型は1 event 観測された。

至らないが、今後の data 蓄積と MHD 理論展開の研究発展に大きな手懸となるものである。今後の研究は、第 10 図に示される様に、太陽風 vector と IMF 磁場 vector が Alfvénic な不連続のとき (~10 h 50 mUT) 相関が良く [cf. Neugebauer. et. al, 1984] compressional な不連続のとき (~08 h 30 mUT) は相関が悪いことなどを手懸として行なう予定である。

Halley 探査機として打ち上げられた Vega-I&II, Giotto, Sakigake, Suisei に加え、米国の ICE の計 6 機の探査機の本来の目的は、Halley に接近して彗星本体の研究を行う事である。一方、惑星間空間 plasma 物理学上の観点からすれば、6 機もの探査機で以って惑星間空間及び太陽風擾乱を同時に観測できる事から、擾乱の空間及び時間 scale が同定され惑星間空間擾乱 (shock, discontinuity 等) の発生及び伝播機構を解明できる千歳一遇の時でもある。この様な観点からの研究は、今後の Solar-Interplanetary-Terrestrial Physics の進むべき一方向であるものと確信する。



第 10 図 IMF の変化 vector と太陽風 vector との関係を示した典型例。

謝 辞

Sakigake による太陽風及び惑星間空間磁場を精度良く観測できたのは、宇宙科学研究所の Planet-A 計画に関係する教職員、関係大学教職員、及び各担当メーカー関係者等の絶大なる御協力によるものであり、ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- Akasofu, S. I., and S. Chapman, *Solar-Terrestrial Physics*, Oxford Univ. Press, New York, 1972.
- Burlaga, L. F., *Space Sci. Rev.*, **17**, 327, 1975.
- Burlaga, L. F., *Space Sci. Rev.*, **39**, 255, 1984.
- Chao, J.-K., Lepping, R. L., and Binsak, J., *J. Geophys. Res.*, **79**, 2767, 1974.
- Neugebauer, M., D. R. clay, B. E. Goldstein, and B. T. Tsurutani, *J. Geophys. Res.*, **89**, 5395, 1984.
- 小島正宜, Private communication 1985.