

「さきがけ」による 27 日回帰性太陽磁気圏構造に関わる諸現象

「さきがけ」観測研究グループ*

(1987 年 12 月 25 日受理)

27-Day Recurrence-Associated Phenomena Observed by Sakigake in the Heliosphere

By

Sakigake Research Group
for Plasma Wave and Structure in the Solar Wind

Abstract: 27-day recurrence-associated phenomena of the solar wind (SOW), the plasma wave (PWP), and the interplanetary magnetic field (IMF) were detected by the Sakigake spacecraft. The heliospheric structures, having a neutral (current) sheet of $\sim 2 \times 10^4$ km thickness and a “plasmashet” of $\geq 7 \times 10^5$ km thickness, during April, 1985-August, 1986 and September, 1986-July, 1987, were in the excursion and aligned phases, respectively. In the neutral sheet the IMF direction usually reverses in a minute. Using high time-resolution data, the average ion density and temperature in the heliospheric plasma sheet are also found to be $\geq 60/\text{cc}$ and $\sim 20 \times 10^4$ K, respectively.

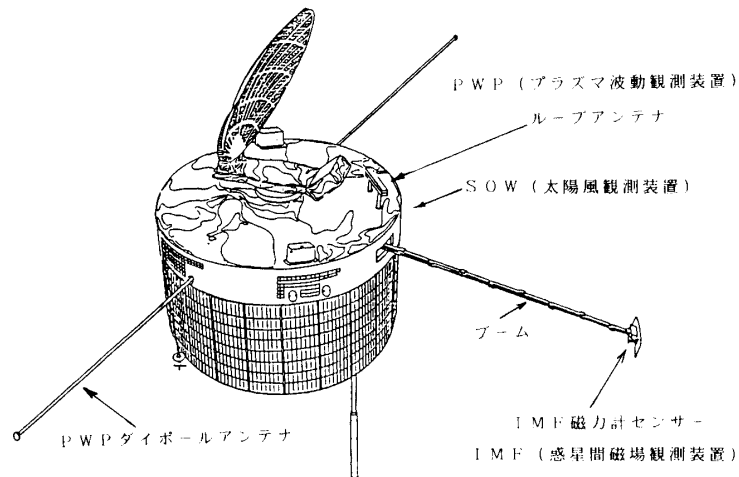
要 旨

「さきがけ」に搭載された太陽風(SOW), プラズマ波動(PWP), 及び惑星間空間磁場(IMF)観測装置で計測した 27 日回帰性諸現象の相関解析から, 1985 年 4 月から 1986 年 8 月までの太陽磁気圏は黄道面に対して傾いたイクスカーションの過渡状態であり, その後から 1987 年 7 月まではニュートラルシートが黄道面と平行になるアラインド状態であった事が明らか

PWP 班; 大家 寛・森岡 昭・小林敬生 (東北大理) 三宅 亘 (電波研)

SOW 班; 小山孝一郎・阿部琢美 (宇宙研) 平尾邦雄 (東海大工)

IMF 班; 斎藤尚生・湯元清文・鈴木裕見子 (東北大理)



第1図 人工惑星「さきがけ」の概観図。

かになった。又、高分解能データ解析から、数 R_E のニュートラル(カレント)シート近傍に $\geq 100R_E$ ($\sim 7 \times 10^5$ km) 程度の厚さを持つイオン密度・温度の高い“プラズマシート”が存在していることが発見された。

1. 緒言

1985年1月8日早朝、鹿児島県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日のハレー彗星の上流 ~ 700 万 km までの最接近時に太陽風-彗星相互作用に伴う様々な擾乱現象を観測し、数多くの研究成果をもたらした[大家他, 1987; 小山他, 1987; 斎藤他, 1987の参考文献参照]。その後も「さきがけ」は順調に太陽の回を飛行し、太陽活動極小期にしか観測できない“基本的”な太陽磁気圏構造に関わる回帰性擾乱や突発性の擾乱を精度良く計測し続けている。

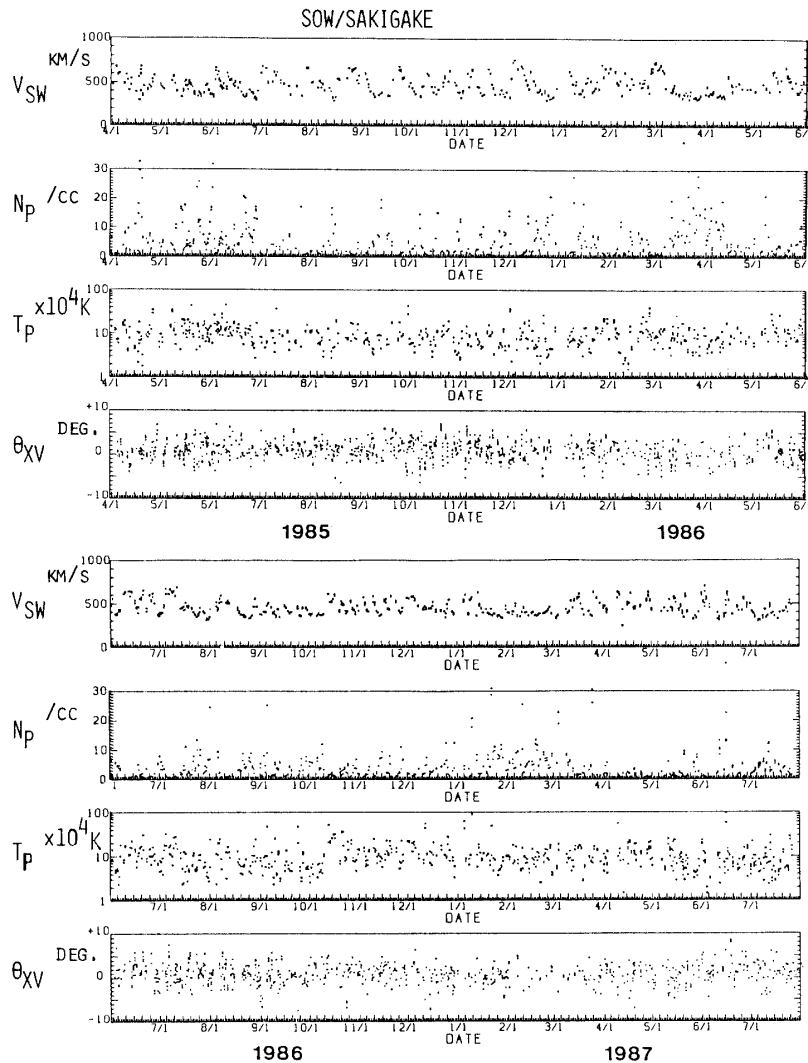
本論文では、「さきがけ」に搭載されたプラズマ波動観測装置[PWP; 大家他, 1987]、太陽風観測装置[SOW; 小山他, 1986]、惑星間空間磁場観測装置[IMF; 湯元他, 1986]の3PIがそれぞれ独立に見出した、太陽磁気圏構造に関わる27日回帰性の諸現象について比較検討を行った結果、太陽磁気圏の中に“プラズマシート”と云う構造が存在していることを裏付ける観測結果が新たに発見されたので、その詳細を報告する。

2. 27日回帰性の諸現象

太陽活動極小期である1985年4月から1987年7月までの2年4ヶ月の期間に観測された太陽風(SOW)、プラズマ波動(PWP)や惑星間空間磁場(IMF)の諸現象の中で、太陽磁気圏構造の27日回帰性に関わる現象に注目し比較研究を行った結果以下のことが明らかにされた。

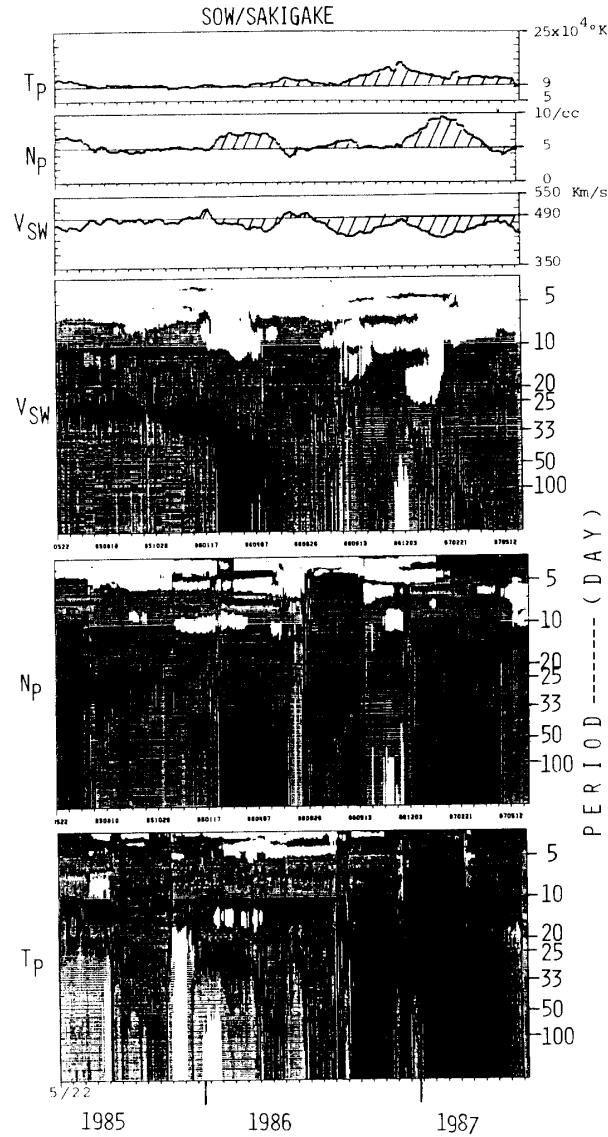
(1) 太陽風(SOW)観測

第2図は1985年4月から1987年7月まで観測された太陽風速度(V_{sw} km/s)、イオン



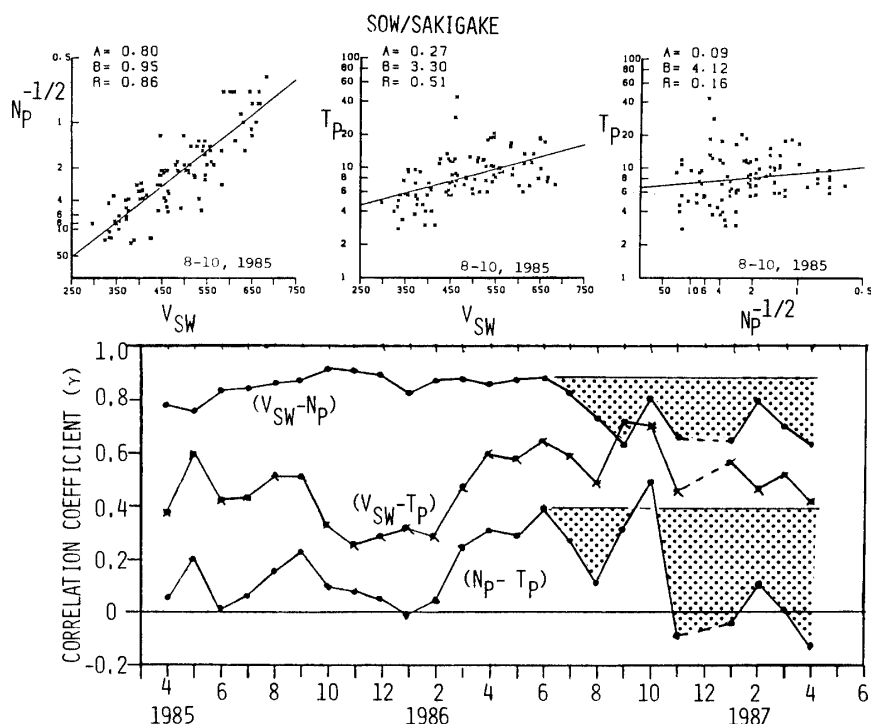
第2図 太陽風観測装置 (SOW) による太陽風速度 (V_{SW} km/s),
イオン密度 (N_P /cc), イオン温度 T_P ($\times 10^4$ K), 太陽風の向き
(θ_{XV} ; 太陽-「さきがけ」軸からの角度).

密度 (N_P /cc), イオン温度 ($T_P \times 10^4$ K), そして, 太陽風の流れる方向 (太陽-「さきがけ」軸からの角度 θ_{XV}) の1日2点の代表観測値をプロットしたものである。これらの代表点は1日平均値を代表していると思っても差し支えない。これらの太陽風パラメータの中で, 太陽風速, イオン密度及び温度の年変化と27日回帰性を詳しく見る為に, MEM (最大エントロピー)法による周波数解析を行った。第3図上部パネルに T_P , N_P , 及び V_{SW} の100点の移動平均値のプロットを, その下に濃淡表示のダイナミックスペクトルを描いた。上部パネル図は, 「さきがけ」が1986年頭初頃から太陽磁気圏の中の風速の遅い, イオン密度及び温度の高い領域に徐々に移行していった事を表わしている。これらの平均的な太陽風パラメータの変化に呼応しながら, 太陽風速度の回帰周期は1986年1月頃から徐々に長



第3図 SOW/SAKIGAKEにより観測されたイオン温度(T_p)、イオン密度(N_p)、太陽風速度(V_{sw})の平均値の年変化(上部パネル)。 V_{sw} 、 N_p 、 T_p のダイナミックスペクトル図(下部パネル)。

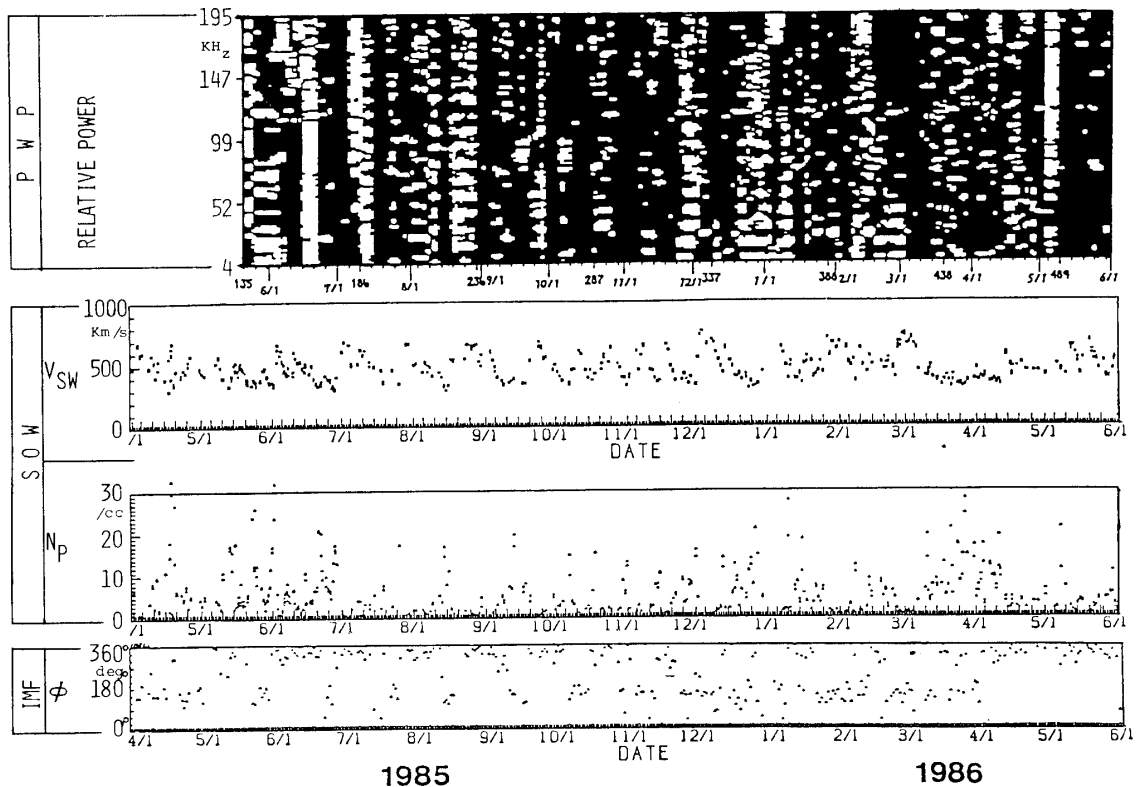
くなり1986年に一旦消失する。その後、6月に再び回帰性は出現するが9月には完全な消失状態になってしまった。イオン密度のスペクトル上にも1986年9月頃までは太陽風と同様な27日及び13.5日回帰性成分が見られるが、太陽風速の27日回帰性が無くなった1986年12月以降にも13-15日の回帰性成分が強く出現している所に特徴がある。一方、イオン温度のダイナミックスペクトルには、太陽風速の27日回帰性の弱くなる1986年1-3月に強い27日回帰性が見られるが、9月以降には特別な回帰周期成分の無い広帯域のスペクトルとなっている。



第4図 SOW/SAKIGAKEにより観測された太陽風速度 (V_{SW}), イオン密度 ($N_P^{-1/2}$), 温度 (T_P) 間の相関図 (上部パネル). V_{SW} , $N_P^{-1/2}$, T_P の組み合わせの各々について求めた相関係数の年変化 (下部パネル).

第4図上部パネルは各月の初めから100日のデータを組み合わせた ($N_P^{-1/2} - V_{SW}$), ($T_P - V_{SW}$), そして ($T_P - N_P^{-1/2}$) の相関関係の図を示し, 下部パネルはそれらの相関係数 (γ) の年変化を表わしている. 太陽風速度とイオン密度に高い相関性 ($\gamma \geq 0.8$) が見られることは, 一般に, 太陽風の動圧 ($\frac{1}{2} N_P V_{SW}^2$) が静圧 ($\approx B_{IMF}^2 / 2\mu + 2N_P k T_P$) より大きく, $N_P V_{SW}^2 \approx \text{一定}$ という関係式を満足する定常的な太陽風の流れを示唆している. ところが, 太陽風速のスペクトル上に27日回帰性成分が消失する1986年6-9月の頃から ($N_P^{-1/2} - V_{SW}$) の相関係数が低くなり1987年前半まで続いた事から, 「さきがけ」が定常流の乱された領域を飛翔していたものと考えられる.

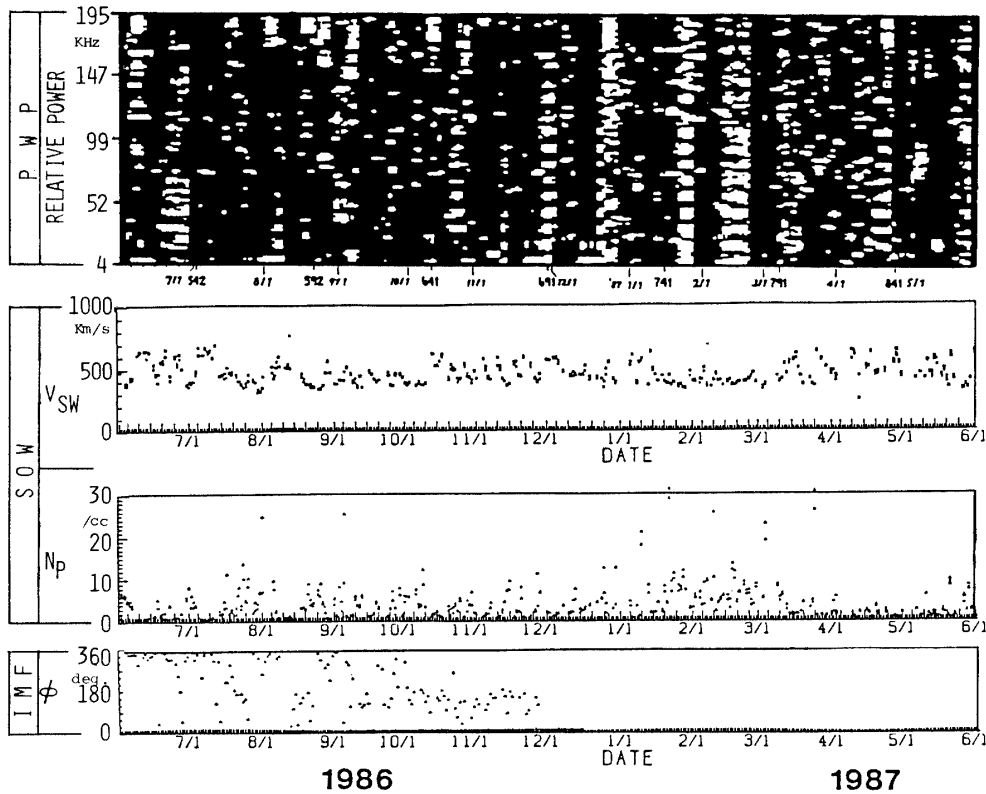
以上, 27日回帰性に関わる太陽風 (SOW) 観測データ解析から, 「さきがけ」は1985年4月から1986年頭初まで比較的平均速度の速い27日回帰性を示す領域 ($\bar{V}_{SW} \sim 490 \text{ km/s}$, $\bar{N}_P \sim 5/\text{cc}$, $\bar{T}_P \sim 9 \times 10^4 \text{ K}$) を飛翔していたが, 1986年9月以降平均速度の遅い, 且つ, イオン密度・温度の高い領域, 即ち, ヘリオスフィアプラズマシートに侵入もしくは接近していったものと思われる. このプラズマシート付近では, 回帰性の出ているイオン密度の緯度方向の勾配に比べて, 回帰性の消失した太陽風速度の緯度方向の勾配が小さいものと考えられる.



第5図 プラズマ波動 (PWP) 観測装置による LF 帯のスペクトル年変化 (上段). SOW による太陽風速度 (V_{sw}), イオン密度 (N_p) の年変化 (中段). 惑星間空間磁場 (IMF) の ϕ 成分 (太陽-「さきがけ」軸からの角度) の年変化 (下段).

(2) プラズマ波動 (PWP) 観測

プラズマ波動観測機は 5-190 kHz の LF 帯の観測と, 70 Hz- 3 kHz に至る ELF 帯を観測する二つの部分より成立している. ダイポールアンテナ (第1図参照) を用い 1 kHz 巾で周波数を掃引することによりプラズマ波動の LF 帯の電場成分が観測されている. 第5図上部パネルの PWP の LF 帯のスペクトルは周波数毎に1日の平均値を出し, 欠測データを補間する為に更に5日移動平均して得られたものである. 先づ, 広帯域の LF エミッションについて太陽風速度 (V_{sw}), イオン密度 (N_p), そして, 惑星間空間磁場の太陽-「さきがけ」軸からの角度 (ϕ) との相関性並びに 27 日回帰性について調べた. その結果, 例えば, 1985 年 5 月 20 日前後の低速流の太陽風, 高密度イオン, そして IMF 方向の逆転, 即ち, ニュートラルシートを横切る時期に発生する成分と, 7 月 10 日前後の太陽風速度最大, 低密度イオンで温度最大 (第2図参照), そして IMF の方向が変わらない時期に発生する 2 種類の広帯域 LF エミッションが検出され, これらは良い 27 日回帰性も示すことが明らかにされた. 低速流の太陽風, 高密度, IMF 方向の逆転時期に関連して発生する広帯域 LF エミッションは, プラズマシート内のプラズマ乱流に伴って引き起こされているものと考えられる. 又, 高温, 高速流に関係する広帯域 LF エミッションは, 太陽風中の速度上昇時に



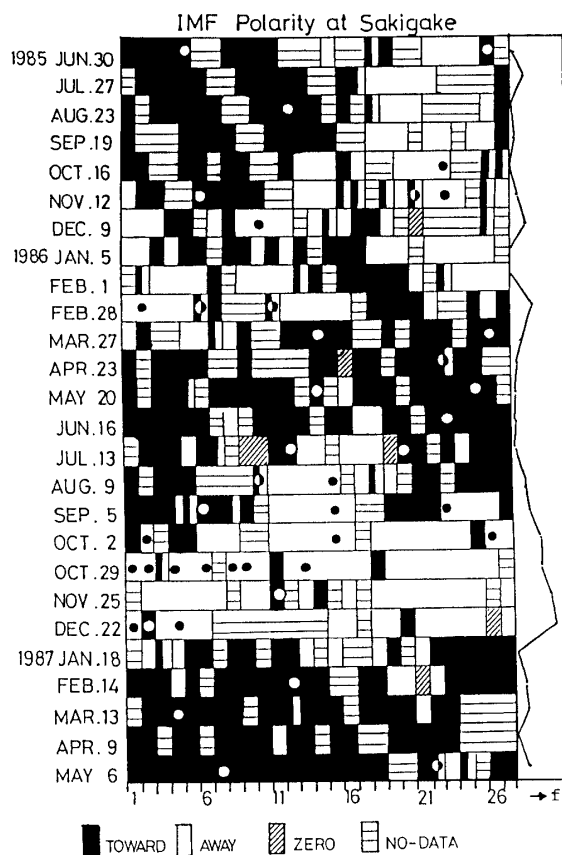
第6図 第5図と同じ。

発熱のある領域[Burlaga & Ogilvie, 1973]で発生している可能性がある。一方、太陽風高速流に同期した(例えば、1985年6月5日前後の)高周波側のLFエミッションや、イオン密度の異常増加に伴う(例えば、1985年9月15日前後の)プラズマ周波数帯のLFエミッションが散発的に発生しているが、これらは太陽フレア、CME(コロナルマスイジェクション)などの突発性の原因によるものと思われる。

次に、太陽風速度の27日回帰性が消失しイオン密度の13-15日回帰性が出現した(第3図参照)1986年9月以降のPWPの広帯域LFエミッションについて調べた(第6図)。その結果、特に、1986年12月以降の顕著な27日回帰性が出現したLFエミッションはイオン密度の比較的高い領域で発生していることが明らかになった。この広帯域エミッションがプラズマシート内部もしくは境界で発生しているものと仮定すれば、回帰性の無くなった太陽風の緯度方向の速度勾配に比べて、イオン密度の勾配は急であり、従って、プラズマシートの厚さも相対的に薄くなっているものと考えられる。

(3) 惑星間空間磁場(IMF)観測

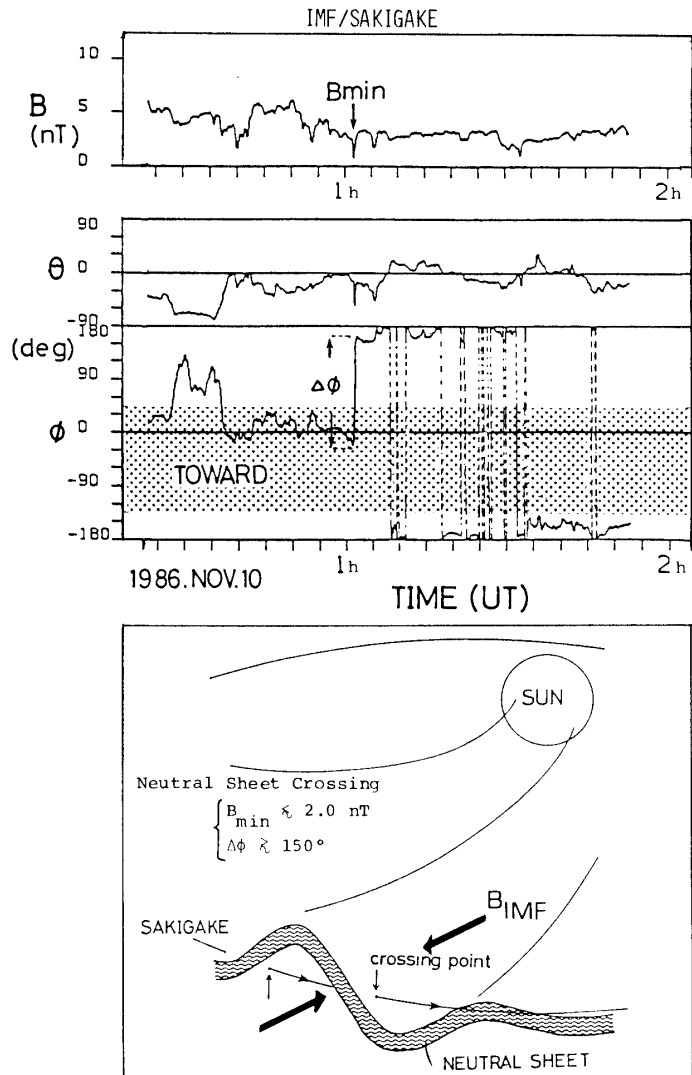
第7図は、1 AU 近傍でのアルキメデススパイラル線を中心に太陽方向を向いている時はツウワード(黒)、逆向の場合はアウェイ(白)と定義した時の、IMFポラリティ27日回帰図を示したものである。第2図の太陽風速度のダイナミックスペクトル上で27日回帰性のある1985年から1986年1月頃までは2-セクターであった事を示している。1986年2



第7図 IMF/SAKIGAKEにより観測されたIMFポラリティ。
 黒、白、斜線、二本線はトウオード、アウェイ、零、データ
 欠測を各々表わす。右側パネルは規格された“磁気中性面”
 の出現（左図中の○印）頻度を示す。

月から6月までの太陽風速度の回帰性的変動と共にIMFのセクター構造も乱れ、又、9月までの27日回帰性の再現と共に2-セクター構造に戻っている。1986年9月以降の太陽風速度の27日回帰性の消失時には、更に、IMFセクター構造も消えることから、太陽風速度の回帰性とIMFセクターには一対一の関係があるものと思われる。

一方、太陽磁気圏構造を調べる上で重要となるニュートラルシート横断時のIMF記録を第8図に示す。IMFの絶対値が2 nT以下の最小値を取り、黄道面内のIMF方向が150度以上回転する逆平行磁場構造の領域を「さきがけ」が横切ったと解釈される場合を“磁気中性面”と定義してある。これらの現象は第7図中の丸印で示された様にセクター境界だけでなく、途中でも多く観測されていることは注目し値する。この“磁気中性面”の厚さは、統計的に50秒以下の時定数をもつ磁場変化構造が平均400 km/sの太陽風により流されているものと仮定すれば、 $\sim 2 \times 10^4$ km、即ち、数 R_E （地球半径）以下の非常に薄いものであると云える。第7図の右端パネルに観測日で規格された“磁気中性面”の出現頻度を観ると、太陽風速度の27日回帰性及び2-セクタ構造の消失した直後の1986年12月に

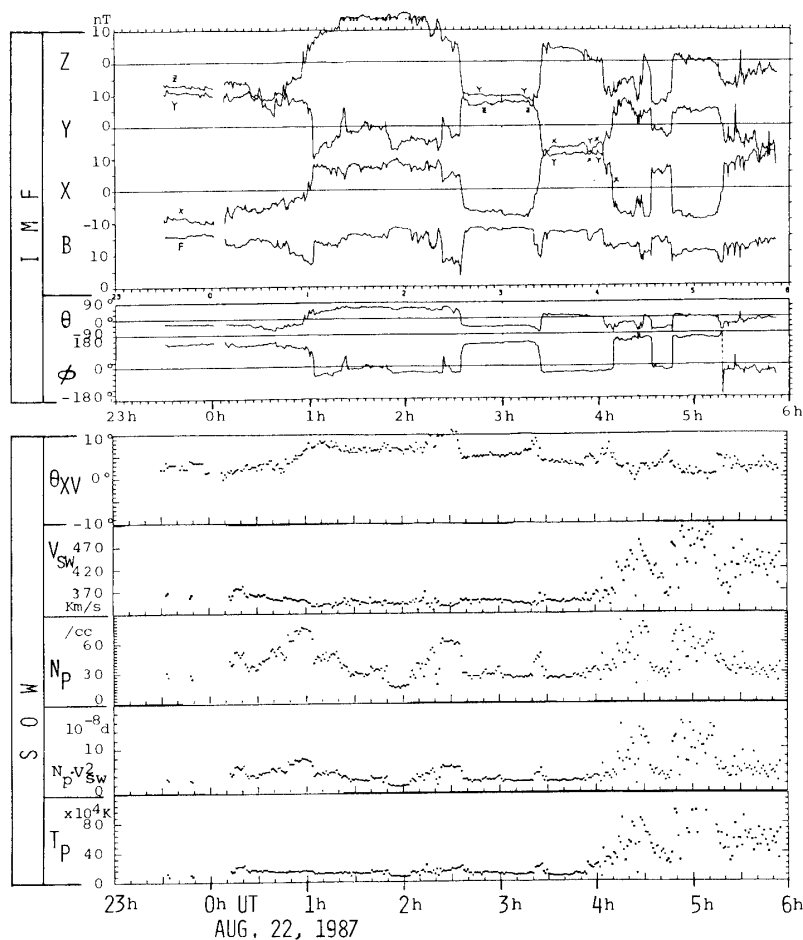


第8図 ニュートラルシート横断時のIMF磁場変化例(上部パネル). 太陽磁気圏中の波状構造をもつニュートラルシートの概念図(下部パネル).

最大になっている。この原因は、「さきがけ」がこの期間、巨視的には平な構造であるその上に微細波状構造[Behannon et al., 1981]が重なったニュートラルシートの回を飛翔した為に起ったものと考えられる。

3. 1987年10月22日のヘリオスフィアープラズマシート

一般的に、太陽磁気圏構造は1 AUを基本単位とする巨視的な数時間、数日($\sim 10^4 R_E$, $\sim 10^8$ km)の現象であると考えられていた為に、第8図下パネルに示されたニュートラルシート(若しくはカレントシート)の横断時間(≤ 50 秒)の短い数 R_E の微細構造に関する研究はそれ程注目されず、進んでいない現状である。Behannon et al. [1981]や Klein &



第9図 1987年10月22日に観測されたヘリオスフィリックプラズマシート横断時の IMF 磁場と太陽風パラメータ。X, Y, Z, B は太陽黄道面座標系の太陽方向, $e_z \times e_x$ 方向, 軸北方向の成分と絶対値を示す。下部パネルは風向 (θ_{XV}), 速度 (V_{SW}), イオン密度 (N_P), 動圧 ($\frac{1}{2} N_P V_{SW}^2$), イオン温度 (T_P) を示す。

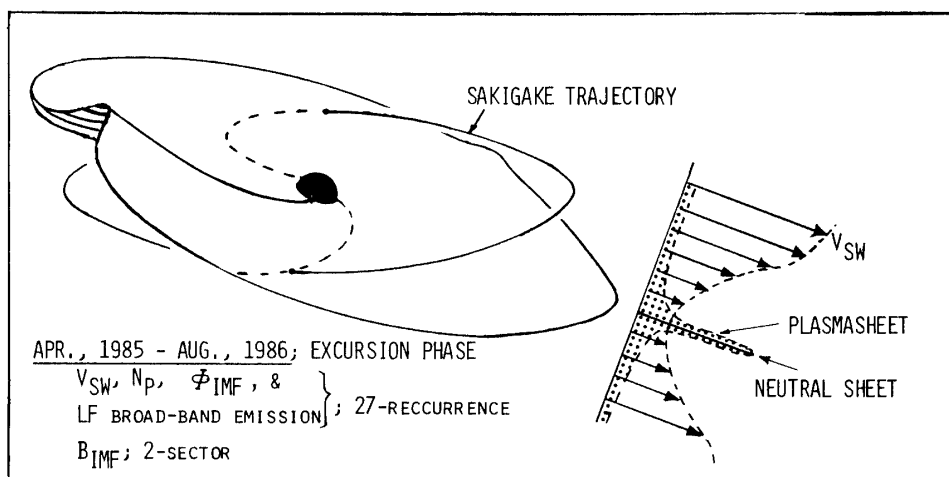
Burlage [1980]等は, 第8図のニュートラルシートをセクター境界の微細構造と解釈し統計的な研究を行っているが, それらは磁場データのみを用いて議論されており太陽磁気圏のプラズマ構造については今もって不明のままである。本節では, 高分解能のデータを用いた IMF の磁場構造と太陽風速度, イオン密度・温度の微細構造との比較から, 太陽磁気圏の基本構造と思われるヘリオスフィアープラズマシートの存在を以下に示したい。

第9図は, 1987年10月22日に観測された典型的な“プラズマシート”横断時の太陽風及び惑星間空間磁場パラメータの変化を表わす。プラズマシートを横切る10月22日の3日前に平均速度490 km/s, イオン密度 ~ 4 個/ccの高温($\sim 20 \times 10^4$ K)太陽風プラズマは, 徐々に遅くなり21日の前日には370 km/sでイオン温度は 2×10^4 Kまで下がっていた。

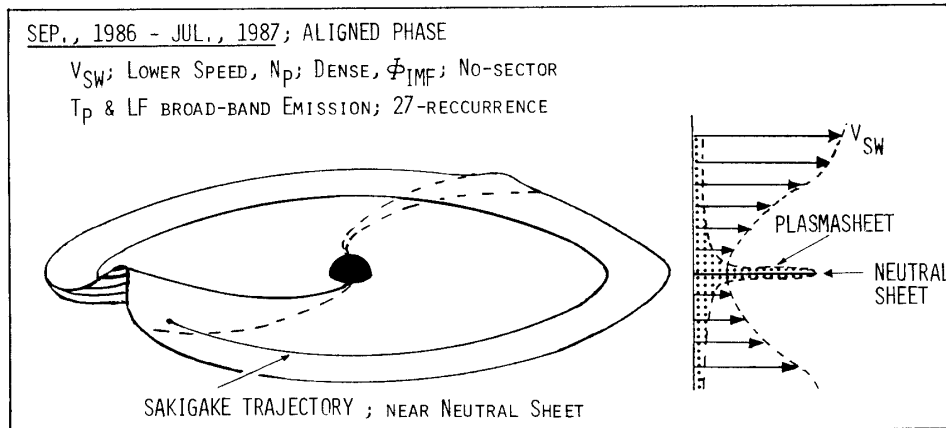
プラズマシート構造を観測した当日には、平均速度が更に下がり ~ 350 km/sの最小値となる一方、イオン密度の平均値は逆に 40 個/cc、平均温度も 15×10^4 Kまで高くなっている。翌日の23日には平均速度は 550 km/s以上、イオン密度 ~ 4 個/cc、温度 $\sim 30 \times 10^4$ Kの高速流が観測されている。この太陽風パラメータの変移は巨視的なセクター境界通過時の様子と一致している。今まで観測研究の進んでいないプラズマシートの微細構造の観点から調べてみると、IMFのニュートラルシート構造とプラズマシート構造に深い関連性が存在しているように思われる(第9図)。1987年10月22日の1時2分UT 2時35分、3時22分、4時8分、4時32分、4時46分、そして5時18分の7回のニュートラルシート横断、即ち、IMF ϕ 成分の 180 度変化に呼応したイオン密度の急激な増加(≥ 60 /cc)と太陽風の向きの変化($\theta_{xv} \sim 5$ 度)が見られる。ニュートラルシートを挟む太陽風の向きが南北半球で ~ 5 度もズレている事とニュートラルシートを境に非対称なイオン密度分布の状態とは深く関連しているものと思われ、「プラズマシート」の形成機構を解く鍵でもある。イオン密度異常増加の形状の半値巾時間が「プラズマシート」の平均的な厚さを表わすものと仮定すれば、その厚さは $\geq 100 R_E$ ($\geq 7 \times 10^5$ km)程度となり、太陽磁気圏構造(~ 100 AU = 1.5×10^{10} km)のスケールからすれば非常に薄い構造であると云える。又、 1 AUの「さきがけ」軌道での「プラズマシート」の厚さを $\sim 100 R_E$ とすると、その日面緯度巾は ± 0.15 度となり、 ± 8.5 度をほぼ1年かけて飛翔する「さきがけ」が「プラズマシート」を横切る確率も当然低くなる。この事はこれまで「プラズマシート」の概念と微細波状構造のニュートラルシートの観測研究が遅れた原因の1つでもあると思われる。

4. まとめ

「さきがけ」に搭載されたPWP, SOW, IMFの3PIにより観測された太陽風中のプ



第10図 SOW, PWP, IMFの観測データから推測された1985年4月から1986年8月の期間の「さきがけ」軌道に対する太陽磁気圏の概念図。イクスカーション状態のニュートラルシート、プラズマシート、太陽風の緯度分布(右側)。



第11図 1986年9月から1987年7月までのアンド状態にあった太陽磁気圏と「さきがけ」軌道の概念図。

プラズマ波動、太陽風、イオン密度・温度、及び惑星間空間磁場変動の27日回帰性に関わる巨視的な構造と時定数数10秒から数10分の微細構造との比較研究から、1985年4月から、1987年7月までの太陽磁気圏構造は第10及び11図の様に变化したものと推定される。1985年4月から1986年8月頃までは太陽磁気圏はイススカーション状態からアラインド状態への過渡期にあり、数 R_E 巾のニュートラルシートは「さきがけ」軌道から傾むいていたものと思われる。その為に、IMFのセクター構造や緯度方向に速度勾配(第10図右端パネル)のある太陽風速度にも27日回帰性が強く現われ、更に、イオン密度・温度の高いプラズマシート($\geq 100R_E$ 厚さ)を回帰的に横切る度に、プラズマシート内で発生したと考えられる広帯域のLFエミッションを観測したものと思われる。ところが、1986年9月以降になると太陽磁気圏は完全にアラインド状態にはいり、「さきがけ」の軌道面にほぼ平行になっていたものと考えられる(第11図)。その為に、低緯度側で緯度勾配の小さい太陽風速度の顕著な27日回帰性は消える一方、高イオン密度・温度の厚さ $\geq 100R_E$ の薄いプラズマシートの波状微細構造を回帰的に横切る度に広帯域のLFエミッションを観測したものと考えられる。

以上の様に、いままでの太陽磁気圏構造にプラズマシート概念を持ち込むことにより、「さきがけ」で観測された太陽風速度、イオン密度・温度、そして惑星間空間磁場の構造変化やLF帯のプラズマ波動の発生特性を統一的に説明する事が出来る。今後は、高分解能のデータ中心に解析を行い、プラズマシート及びその擾乱の発生機構に関する研究を更に進める必要がある。

最後に、この論文はSOW, PWP, IMFのそれぞれの研究グループの成果の中で27日回帰性に関わる諸現象についてまとめたものであるが、本文中の誤った表現、解釈等の文責は湯元清文(東北大理)にあることを付記する。

謝 辞

「さきがけ」は現在も順調に飛翔し続け、貴重な太陽風中の擾乱現象のデータを地上に送り続けている。これは宇宙科学研究所をはじめ関係大学、担当メーカーの方々の御尽力によるものであり、ここに深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- Behannon, K. W., F. M. Neubauer, and H. Barnstorf, Fine-scale characteristics of interplanetary sector boundaries, *J. Geophys. Res.*, 86, 3273-3287, 1981.
- Burlaga, L. F., and K. W. Ogilvie, Solar wind temperature and speed, *J. Geophys. Res.*, 78, 2028, 1973.
- Klein, L., and L. F. Burlaga, Interplanetary sector boundaries, 1971-1973, *J. Geophys. Res.*, 85, 2269-2276, 1980.
- 大家寛, 森岡昭, 三宅亘, ハレー彗星周辺のプラズマ波動及び衝撃波からの電波, 宇宙研報告, 特集19号, 73-84, 1987.
- 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15号, 3-43, 1986.
- 小山孝一郎, 阿部琢美, 平尾邦雄, 斎藤尚生, 湯元清文, ハレー彗星最接近時の太陽風パラメータと水イオンの検出, 宇宙研報告, 特集19号, 103-110, 1987.
- 斎藤尚生, 湯元清文, 平尾邦雄, 伊藤富造, 中川朋子, さきがけによる惑星間空間磁場(IMF)の観測研究, 宇宙研報告, 特集19号, 85-102, 1987.
- 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15号, 45-57, 1986.