

さきがけによる惑星間空間磁場 (IMF) の観測的研究

斎藤 尚生*・湯元 清文*・平尾 邦雄
伊藤 富造・中川 朋子*

(1986 年 12 月 25 日受理)

Studies on the Interplanetary Magnetic Field (IMF) observed by Sakigake

By

T. SAITO, K. YUMOTO, K. HIRAO, T. ITOH,
and T. NAKAGAWA

Abstract: This paper is a review of 42 papers concerning the interplanetary magnetic field observed by Sakigake. The papers cover our works that were published only after the launching of Sakigake. (Another review on 46 papers published before the launching is cited in references of the present paper.)

A specification of our ring-core magnetometer is described in Chapter 2. Studies on the relation between the solar wind magnetic field observation and comet Halley are reviewed in Chapter 3, which is further divided mainly into two: Upstream region and ion tail region. Three models on the size of the comet, quasi-parallel, and dynamic pressure are reviewed as the new models proposed from our observation.

Chapter 4 covers other works from the Sakigake/IMF observation: the two-hemisphere model was substantiated, structure of the IMF discontinuities was analyzed, solar-interplanetary-terrestrial relationships were studied, and GBMR model was proposed.

The review is concluded emphasizing importance of further study of fresh comets and of further IMF observation by Sakigake.

* 東北大学理学部

概 要

さきがけに磁力計を搭載して惑星間磁場(IMF)を測定し、ハレー彗星および太陽圏を研究する計画は1977年から進められた。この計画でリングコア磁力計が初めて飛翔体用として開発され、本邦初の人工惑星であるさきがけに搭載された。地上試験を次々にクリアして1985年初頭に無事打ち上げられた。同年2月19日から観測が開始され、今日まで極めて順調に良質の記録がとられ続けている。これは支援して頂いた宇宙研全体の総力の賜であり、IMFチームとしても、より多くの成果でこれに応えようと努力してきた。磁場観測に関連して打ち上げ以後今日までに出版された42篇の研究論文を、本稿では総合報告の形で纏めた。

第2章では先づリングコア磁力計の構成が述べられ、第3章ではさきがけ磁場観測に関連してハレー彗星について得られた新しい知見が纏められている。第4章ではさきがけ磁場観測のもうひとつの重要研究課題である太陽圏と磁場不連続についての研究が述べられ、以上の纏めと将来の研究への展望が共に第5章で述べられる。

42篇の論文はそれぞれ主著者を異にするので、主著者ごとに分割した論文形式もあり得た。しかし読者側の立場からは、磁場観測全体としてどのような研究成果が得られたかを、総合的に容易に把握しうる形式のほうが望ましいと判断した。そこで本稿のような形式をとり、各節ごとに担当執筆者の名を付し、共著者全員で見を通すこととした。それぞれの研究の詳細については原論文に譲らざるを得ないので、巻末に成果論文をリストに纏めた。打ち上げ以前の磁力計開発・予備研究に関する46篇の研究成果については、その総合報告を1篇のみ巻末に掲げたので、孫引きして頂きたい。本特集号の性格か

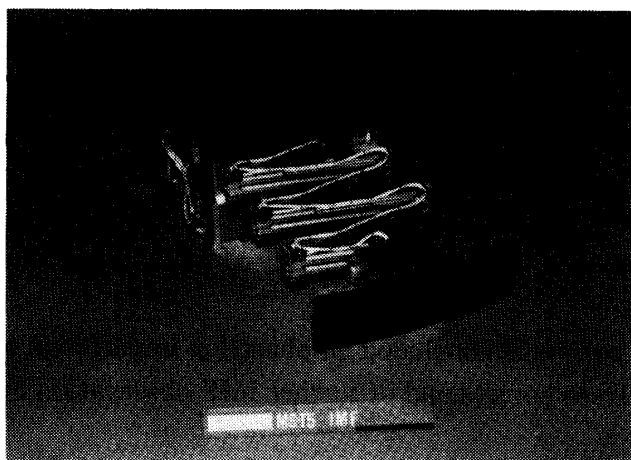


図 1

表 1. SAKIGAKE (MS-T 5)

SPECIFICATION OF IMF		
TYPE	:	FLUXGATE MAGNETOMETER
SENSOR	:	RING CORE 1 inch ϕ (THREE AXES)
DYNAMIC RANGE	:	± 64 nT
RESOLUTION	:	0.03215 nt/0.125 sec (or 4 sec)
NOISE ENVELOPE	:	0.05 nT
DRIVEN FREQUENCY	:	6.25 KHz
SIZE	:	ELECTRONICS 300 \times 245 \times 75 mm
	:	SENSOR 60 \times 60 \times 110
	:	2 m-BOOM 300 \times 245 \times 75
WEIGHT	:	ELECTRONICS 1.99 kg
	:	SENSOR & CABLE 0.39
	:	BOOM 2.65
PWER CONSUMPTION	:	2.0 W

ら、御支援頂いた多数の専門外の方達にも研究成果を報告する義務がありと考え、一般解説文も代表的な 3 篇を巻末に引用した。

1. さきがけ搭載リングコア磁力計 (湯元)

凡そ 8 nT 程度の微弱な IMF を高精度で計測する為に、飛翔体搭載用リングコア磁力計の研究開発が約 10 年前から開始された[43]。飛翔体搭載用磁力計としての性能は次の諸点によって評価される。即ち：(1)磁力計電気部の精確度、(2)検出部の機械精度という地上用磁力計が必要とする性能に加えて、飛翔体用としての新らたな 3 つの問題、即ち、(3)飛翔体本体の磁気バイアス、(4)飛翔体の姿勢精度(ブームも含む)、及び(5)飛翔体からのデータ伝送量によって評価される。これらの 5 項目を総合的に考慮し、無駄の少ないさきがけ搭載用磁力計の設計・製作がなされた。図 1 は搭載された IMF 計測用磁力計の概観を示す。又、表 1 にその性能と仕様をまとめた。

惑星間空間の極微小周囲磁場中の高精度高分解能観測なので、特に惑星間空間磁場の模擬実験や飛翔体本体の磁気バイアス評価の為に試験が、新しく建設された内径 6 m ϕ の磁気シールドルーム内でなされた[5]。又、飛翔体本体の磁気バイアスを少なくする為に、電子部品や材料の吟味もなされ、飛翔体本体の等価磁気双極子モーメントは 0.2 Am² 以下に押えられ、2 m ブーム先端における飛翔体の DC 的なオフセットは 2 nT 以下となった(図 2)。限られた地上試験では評価できなかった太陽電池の影響も、打ち上げ後の IMF データ解析から、太陽電池パネル上に 0.8~0.9 Am² の等価磁気双極子モーメントが存在することも見い出された。この様な DC 及び AC 的な磁気バイアスを、1 次データ処理で取除く為には少なくとも検出したい変動周波数の 10 倍以上のサンプリングが必要である。

太陽電池パネルによる磁気バイアスと、僅かなデータ伝送量は、磁場記録使用上の制約となった。そこで 1 次処理[3]に工夫をこらした結果、上質の絶対精度(スピン軸方向 ± 0.5

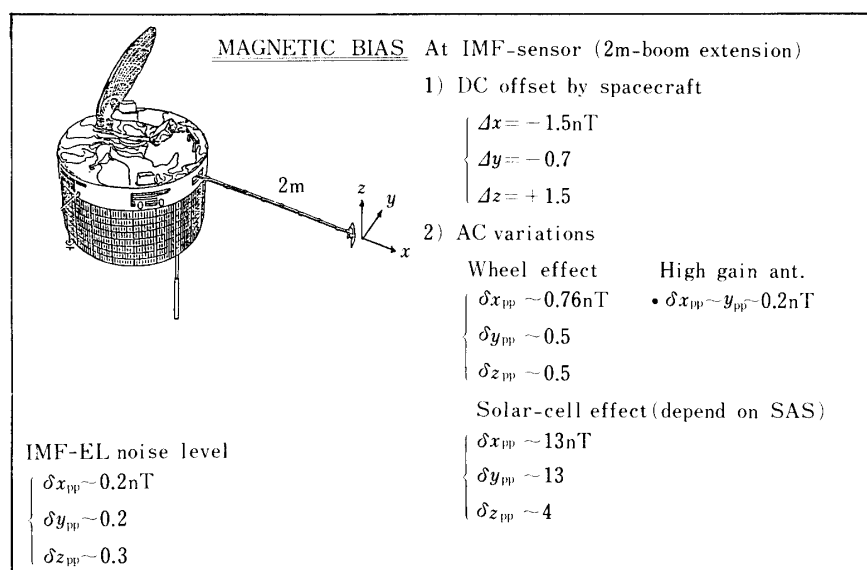


図 2

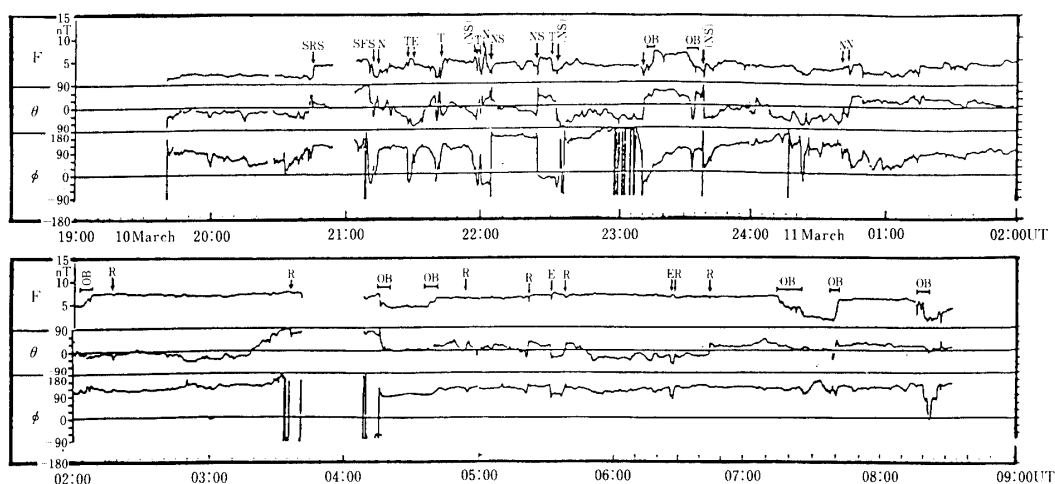


図 3

nT, 垂直方向 ± 0.1 nT), 相対精度(± 0.1 nT 以下)と時間分解能(10 秒)の IMF データが得られるようになった。この分解能 ± 0.03125 nT のリングコア磁力計(IMF)の電気・機械精度及び諸性能特性は、文献[20]に詳述されている。

2. ハレー彗星と惑星間磁場相互作用の観測的研究

この相互作用については先ずさがけ最接近時の観測から、彗星上流側および下流側(イオンテイル)について見出された結果を述べ、次に最接近時以外の相互作用について見出された結果について述べることにする。

2.1 彗星の 700 万 km 上流で検出された O^+ (若しくは H_2O^+) イオン (湯元)

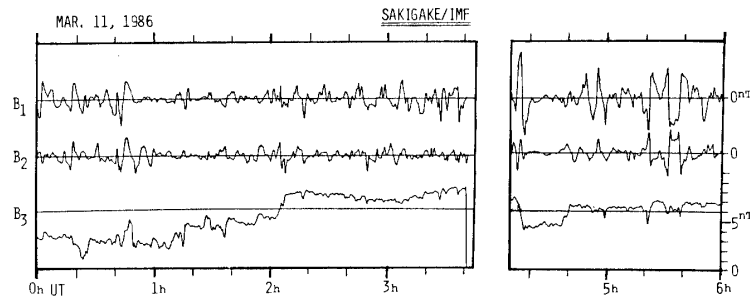


図 4

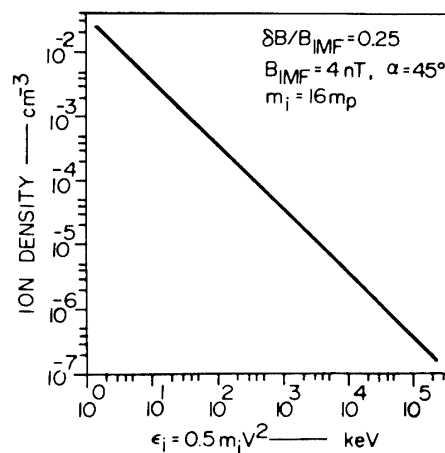


図 5

さがきがハレー彗星の上流側 700 万 km まで最接近した間 (1986 年 3 月 10 日 19 時から 11 日 09 時まで) に観測された惑星間磁場 3 成分の記録を図 3 に示す。この記録の解析から、ハレー彗星起源の O^+ (若しくは H_2O^+) イオンによるサイクロン共鳴で励起されたと思われる、周期 150-380 秒の長周期磁気流体波が見い出された [16, 18, 23, 27]。

先づ、この磁気流体波の卓越モードを調べる為に、周囲磁場方向を B_3 成分、黄道面内で B_3 軸に直交する B_2 軸、そして B_2, B_3 軸に垂直な B_1 軸を主軸とする局所的磁力線座標系 (B_1, B_2, B_3) への IMF データ変換がなされた。ハレー彗星最接近時の IMF 記録 (図 4) の B_1, B_2 成分に卓越している振幅 ~ 2 nT 程度の横波は、周囲磁場に垂直な B_1 - B_2 面内上で直線偏波に近い振舞をしている。又、ダイナミックスpektrum 上のこれらの長周期磁気流体波の卓越周期は、周囲磁場中の O^+ (若しくは H_2O^+) イオンサイクロトロン周期と一致しながら変化していることも見い出された。図 4 中の 1986 年 3 月 11 日 00-01 時 UT 間の周囲磁場 ~ 2.5 nT のときは卓越周期が ~ 380 秒であり、一方、02 時 UT 以降の $B_{IMF} \sim 6$ nT のときは ~ 150 秒の短周期成分が卓越している。

この特徴的な長周期磁気流体波が彗星起源の O^+ (若しくは H_2O^+) ピックアップイオンとのサイクロトロン共鳴により励起されたものとし、観測された波動の振巾から ~ 700 万 km 流域の水グループイオン密度を理論的に推定した (図 5)。太陽風にピックアップされ

る O^+ イオンの運動エネルギー範囲を 10-100 KeV とすると、少なくとも彗星から 700 万 km 上流域に 10^{-3} - 10^{-4} cm^{-3} 程度の水分子イオンが存在しているものと推察される。

一方、ハレー彗星の核から等方的に $\leq 1 \text{ km/秒}$ の速度で吹出された水分子が太陽光によってイオン化された後、太陽風磁場にピックアップされ彗星の上流の“さきがけ”の所まで吹き戻されているものと考えられている。理論的に予想される、700 万 km 上流の O^+ 若しくは H_2O^+ イオン密度は、ガス生成率を $\sim 10^{30}$ 分子秒とすれば、吹出し速度 $V_c \sim 1 \text{ km/秒}$ を仮定した場合 $n_i \sim 3 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$ となり、 $V_c \sim 500 \text{ m/秒}$ と仮定した場合は $n_i \sim 1.1 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$ となる。これらの予想値は、長周期磁気流体波振巾から求めた推定値(図5)とも良く一致する。又、ハレー彗星中心から 400 万 km 離れた地点において、すいせいに搭載されたプラズマ観測装置(ESP)により検出された水分子イオン密度値 $\sim 10^{-2}$ - 10^{-3} cm^{-3} とも大きく矛盾しない。

以上の観測的及び理論的考察から、ハレー彗星から 700 万 km 上流域で見い出された、 O^+ 若しくは H_2O^+ イオンサイクロトロン周期を持つ磁気流体波は、ハレー彗星起源の水分子イオンによって励起されたものと結論される。この長周期磁気流体波の波動解析及び理論的な詳細は文献[18]に議論されている。

3.2 最接近時の彗星上流での磁場不連続現象の異常(中川)

ハレー彗星最接近時に観測された磁場不連続現象は、通常とは明らかに異なる様相を見た。(磁場不連続の分類及び通常の発生状態については4.2節を参照されたい。)図6に最接近時の磁場不連続(磁場変化量が 1 nT を超えるもの)の発生状況を示す。通常なら rotational 及び either 不連続で全体の 9 割を占めるのに対し、3月10日20時から11日2時にかけて、tangential 及び neither 不連続の割合が異常に多くなっていた。特に10日21時~22時には現象数自体が目立って増加している。この状態は11日2時を境に一変し、tangential と neither 不連続は見られなくなった[29, 30]。

この日が太陽磁気圏の遷移領域に当たっていたこともあり、これらの異常が彗星起源のものであるとは現時点では断定することはできない。純粋に磁気圏構造に起因する異常分布の例との比較によって確認されるべきものである。現在、そのためのデータを蓄積中である。

3.3 最接近時の彗星磁気圏(準平行モデル)(斎藤)

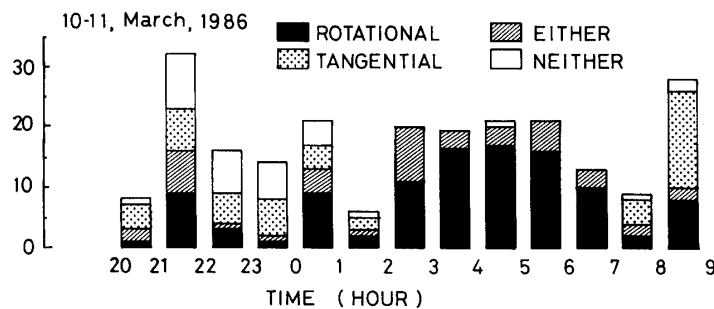


図 6

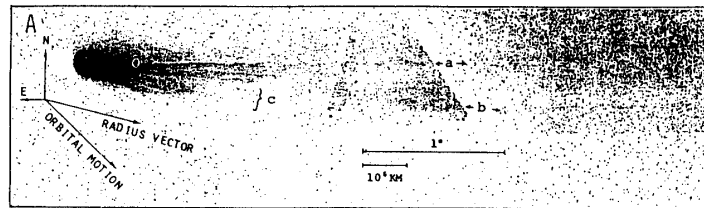


図 7

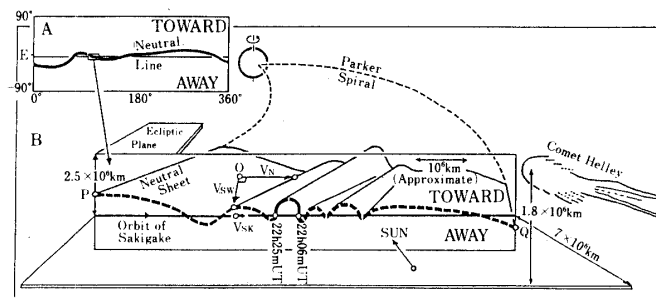


図 8

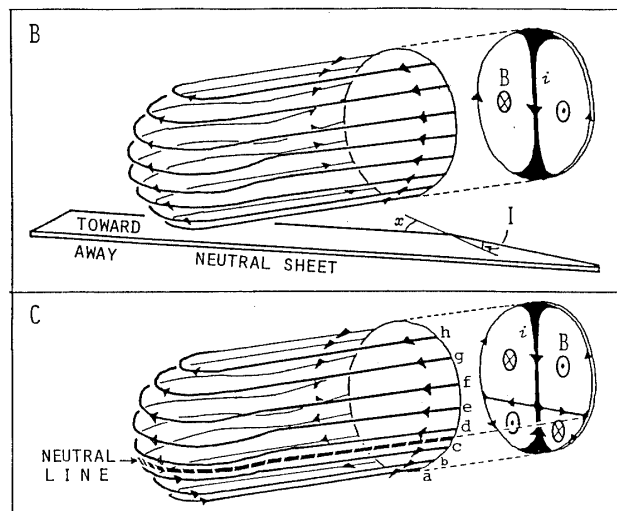


図 9

今回のハレー彗星出現に当たって、非常に多数の彗星研究者が待ち構えていたある擾乱現象があった。それはイオンテイルがちぎれる現象(略号 DE)である。ニードナーとブランドは「一般に彗星は太陽圏中性面をくぐり抜ける時、必ず DE をおこす」と主張していた。これを NB モデルと呼んでおこう。磁気再結合を考慮したこのモデルは、世界中の定説となっていた。

3月、各国の探査機は次々にハレー彗星に最接近した。幸運にもさきがけは最接近のそ

の日に、ハレー彗星の上流側で太陽圏の中性面を通過した(図3)。NBモデルの検証には絶好の機会が到来した。しかし、さきがけ通過後は明瞭なDEが観測されず(図7)、NBモデルとは異なる新しいモデルが必要となった。

そこで図3の記録を解析した結果、太陽圏中性面(いわゆるバレーナ・スカート)は図8のような構造をしていたと結論した。中性面はイオンテイル(彗星磁気圏)の軸にはほとんど平行である。このような場合は磁気再結合は部分的に緩慢に進行する筈(図9)なので、急激な大規模再結合(DE)が起らなかったという観測事実が説明できる。これは準平行モデルとしてネイチャー誌[16, 22, 24, 31]などに発表された。

3.4 最接近時以外の彗星磁気圏(擾乱総力カタログ)(斎藤)

日本天文学会府中総会において、約500枚のハレー彗星の写真が展示されたので、展示会場で精査して主なイオンテイル擾乱のカタログを作成した。そして今回のハレー彗星出現に当って、多数の方達の御好意で著者等に送られてきた写真や、その他公表された写真約150枚も含めて総て照合した上で、より完全な擾乱カタログが作成された。彗星磁気圏擾乱の特徴が、ストリーマー、顕著なレイ、ヘリクス、アーケード、DE、キンク等に分類された。イオンテイルが伸展していた11月から5月まで、毎日数枚ずつの写真が基礎資料となった。分類されたそれぞれの擾乱に対して、太陽風磁場の影響について、さきがけデータと比較しつつ可能なモデルが樹てられた[32, 34, 39]。

なかでも1985年12月31日に起こったDE状現象が、(特に近日点通過前における)今回のハレー・イオンテイル擾乱の最も顕著な例であることがわかった。

3.5 最接近時以外の彗星磁気圏(風の息モデル)(斎藤)

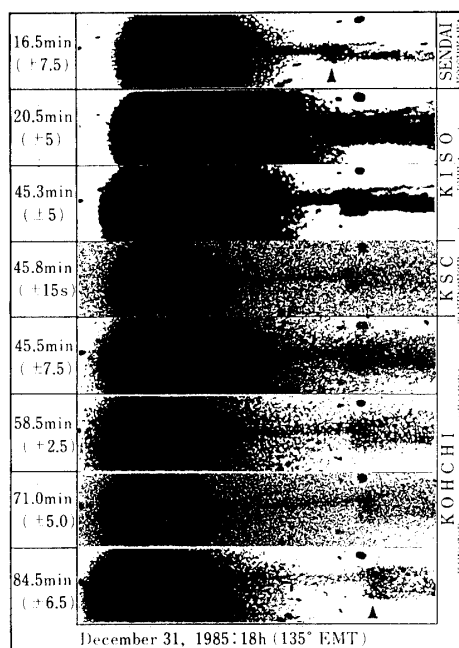


図 10

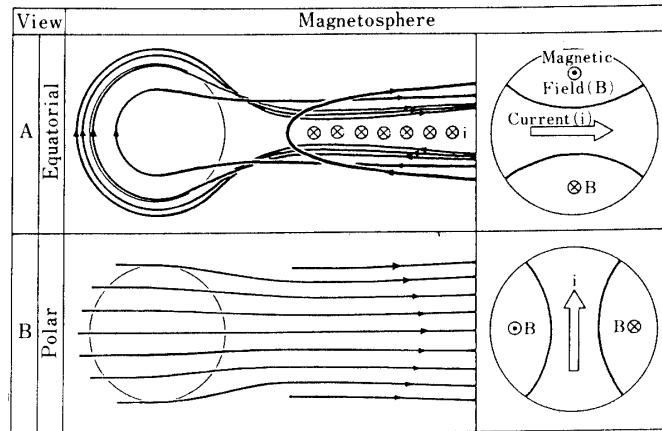


図 11

さきがけの IMF データを解析してみると、大晦日にこの DE 現象を起こしたハレー彗星 (図 10) は、この日磁気中性面を通過しなかったことが判明した。しかもこの時彗星は、太陽北半球のコロナルホールから吹き出して激しく息づいている高速太陽風流の中に突入していたことがわかった。再び NB モデルとは異なる新しいモデルが、この DE 現象に対して要求された。

そこで先づ金星磁場観測データ等を考慮しつつ、一般的な三次元彗星磁気圏モデルが樹てられた (図 11)。そして太陽圏の風の息 (つまり動圧変化) により、磁気圏尾で再結合をおこしてこの DE 状プラズモイドを発生させたという通称風の息モデルが 1 月のシンポジウム [12] など で発表された [17, 19, 22, 25, 34, 39]。これは比較磁気圏学の立場から、SC 型オーロラ嵐発生機構に比肩し得ることが指摘された。その後の荻野等によるシミュレーション等の結果からも、この風の息モデルは極めてよく裏付けられた。

3.6 前回と今回の彗星磁気圏擾乱の比較 (斎藤)

モデルには、時間を超えた普辺妥当性が必要である。そこで 1910 年出現時のハレー彗星

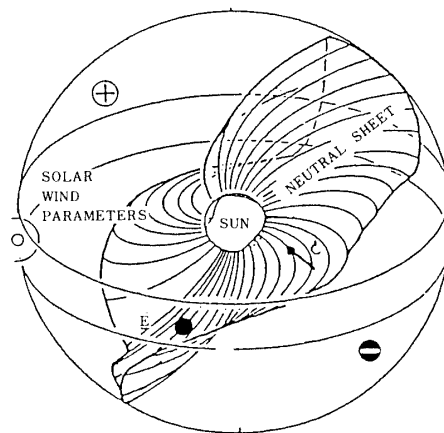


図 12

イオン尾擾乱と太陽風磁場の関連が予備的に研究され、今回の出現に備えられた。前回出現時の26枚の写真を精査した結果、最も特徴的なイオンテイルのキンク現象として、1910年5月13日現象が挙げられた。当時は太陽風磁場という概念すら無く、勿論直接磁場観測データも無い。しかし今日までの太陽圏研究のめざましい進歩は、当日の太陽圏の形と位置を論理的に推論することを可能としている。その結果、当日彗星は太陽圏中性面を通過したことが判明し[11]、このために磁気圏尾が折れ曲るモデル(図12)が樹てられた[29]。更に1910年のこの日に極めて類似した現象が、今回1986年3月17日に発生したことがわかった。太陽圏の擬^{エキスカ-ション}転^{アラインド}期に出現した前回に較べて、平行期に出現する今回の特徴(図13)が論じられ、準平行モデル(3.3節参照)を生む基礎となった。

4.1 太陽圏11年変化に関する二半球モデルの検証(斎藤)

さきがけ磁場観測の大きな目的のひとつは、我々が提唱していた二半球モデルの検証にあった。このモデルによれば、IMFの極性境界面である太陽圏中性面は、図14に示すよう

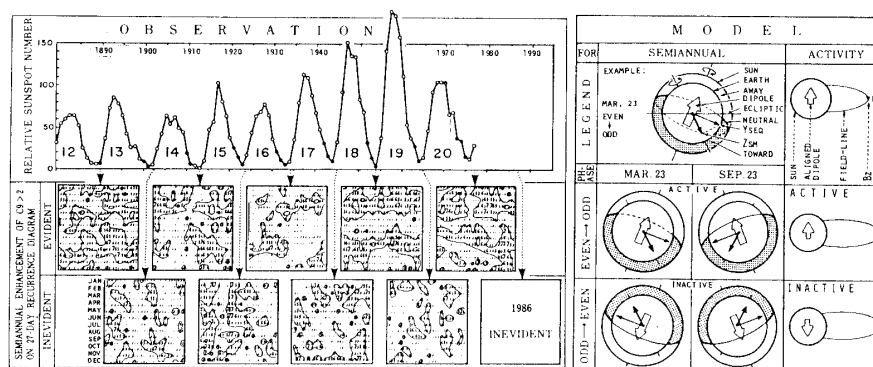


図 13

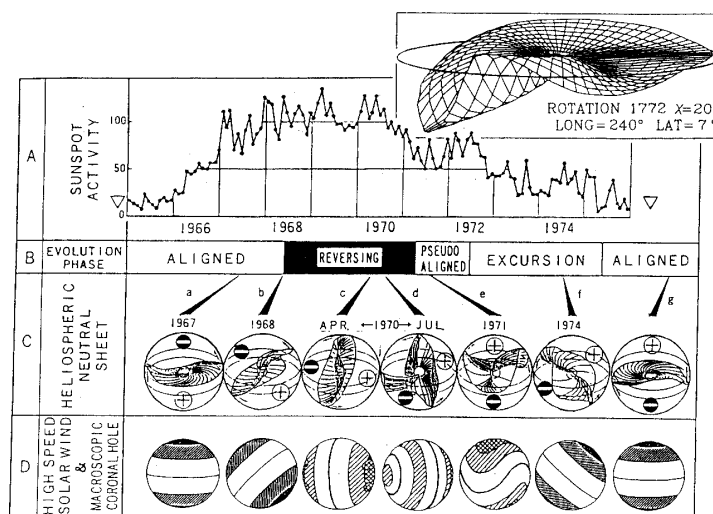


図 14

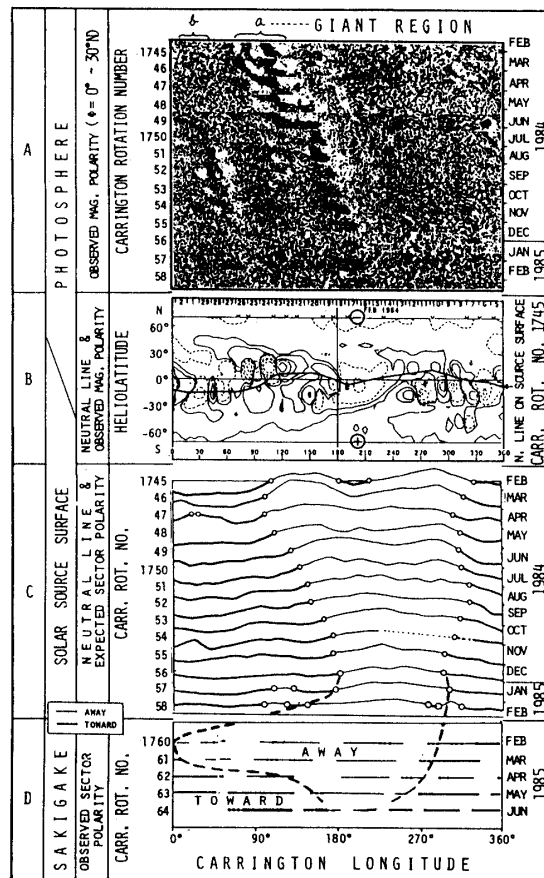


図 15

な11年変化をするはずであり、図13からも既にこのモデルが正しいことが予期されていた。そして観測当初からさきがけの磁場データは、擬 転 期から平行期と移り変って[4, 10]、二半球モデルが裏付けられていることが分った(図15)。このことはスイス[1]やチェッコ[6]やハンガリー[15]で発表され、ハレー探査機による外国での発表のさきがけとなった。現在までに中性面は、人類の探査機による観測が初まって以来、中性面の褶曲が最も少ない貴重な太陽圏を刻々と測定しつつある[26, 31]。

4.2 惑星間空間磁場不連続現象の特性 (中川)

0.8~1.0 AU で観測された惑星間空間磁場中には、図16のように、磁場ベクトルの方向や強度が、あたかもひとつの面で仕切られた異なる磁場領域に入ったように急激に変化する現象が数多く見られる。これらは磁場不連続現象と呼ばれており、さらにいくつかのタイプに分けることができる。本解析では、磁場変化が1 nT 以上の現象を、(1) 不連続面通過に際し磁場強度が保存され、方向だけが変化する rotational 不連続、(2) 不連続面がその両側の領域の磁力線に平行となる tangential 不連続、(3) (1)と(2)の性質を併せ持つ either 不連続、(4) (1)と(2)のどちらの性質も持たない neither 不連続、の4種に分類し、統計的性質、及び、発生の主因を探った。

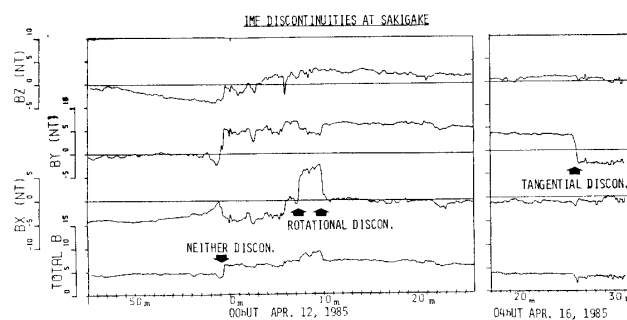


図 16

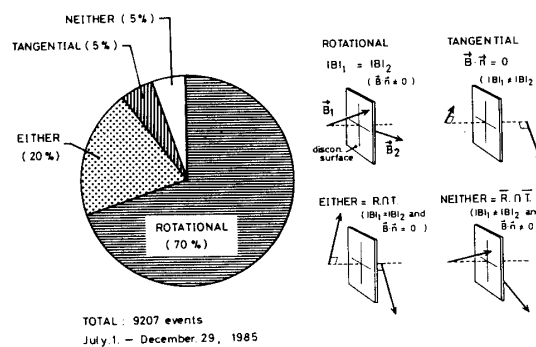


図 17

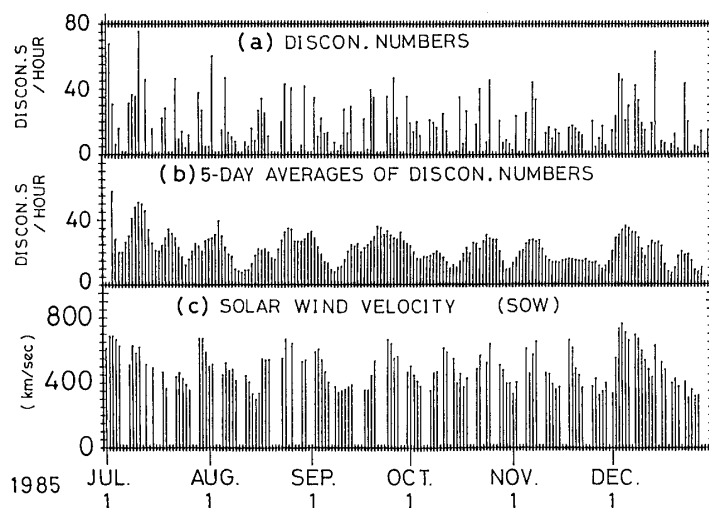


図 18

図 17 に 4 種の現象の構成比を示す。0.8~1.0 AU においては rotational 不連続が卓越している。これは、過去の飛翔体による観測結果を再確認する形となったが、さらに「さきがけ」データから、不連続現象によって変化した磁場が、後続の不連続現象で元の状態に復帰する「不連続ペア」が多数存在することが明らかにされた[7, 14]。ペアを構成する現象は全体の半数ないし 7 割にも達する。また、rotational 不連続は太陽系磁場の平均的スパイラル方向に垂直な不連続面、either 不連続はスパイラル構造に平行な不連続面を持つのに対し、tangential 及び neither 不連続にはそのような特性は全く見られないという事実も明らかとなった。

磁場不連続の成因究明のため、不連続現象の発生頻度と SOW による太陽風速度とを比べたのが図 18 である。磁場不連続現象の発生頻度は、約 1 日後の太陽風速度と高い相関があることが判明した[21, 28]。これを不連続のタイプごとに調べると、rotational 及び either 不連続は太陽風速と高い相関を持つが、tangential 及び neither 不連続と太陽風速との相関は見られない。

以上により、rotational 及び either 不連続が、惑星間空間の磁場構造及び太陽風速構造に関連して発生することが明らかとなった。この発生特性を説明するメカニズムとしては、太陽風速勾配による吹き寄せの効果と、異なる速度の太陽風速の相互作用領域での生成、が考えられる。

4.3 太陽風と地球磁気圏との電磁的相互作用（湯元）

太陽活動極小期である 1985 年 4 月中旬から 10 月中旬までの 6 ヶ月の間に地球上で観測された磁気嵐 9 例と、さきがけで観測された太陽風擾乱との関連性について調べた。その結果、極大期に頻発する太陽フレアなどの突発的な惑星間空間擾乱に起因するものは少なく、回帰性の太陽風高速流との相互作用により形成されたと思われる惑星間空間擾乱によって地磁気嵐が比較的多く発生していた事が明らかにされた[8, 13]。

地球磁気嵐に繋る太陽風中の大きな擾乱では、太陽風圧の中で動圧 $\left(\frac{1}{2} N_i m_i V_{sw}^2\right)$ が静圧 $(B_{IMF}^2/2\mu + \sum N_j k T_j)$ を凌駕している。このことから、太陽風速度変化 (ΔV_{sw}) 及び ion 密度変化 (ΔN_i) によって惑星間空間擾乱は起こされているものと考えられる。地上で観測された磁気嵐 9 例に関係すると思われるさきがけの位置での惑星間空間擾乱は、その起動力と成り得る (ΔV_{sw}) と (ΔN_i) の組み合わせから、図 19 の様な 4 つの形態に分類される。(i) R-S 型 (回帰性高速流: $\Delta V_{sw} \sim V_{sw}$) の惑星間空間擾乱は、太陽風 27 日回帰性の遅速流に高速流が後押しする事によって、高密度、高温、高磁気圧の領域として 2—3 日発生するものと考えられる。(ii) T-S 型 (高速流中の突発性圧力変化: $\Delta P > 0$) の惑星間空間擾乱は、太陽風が高速である時期に太陽表面のフィラメント消失やフレアなどの突発的な現象に伴う僅かな密度変化でも太陽風動圧が大きく変動することに因り発生したもので、9 例中 2 例であった。(iii) ショック型 ($\Delta V_{sw}, \Delta N_i > 0$) の惑星間空間擾乱の発生原因及び形成機構については、多くの研究者によって現在研究が進められている段階であるが、太陽風速度、密度の同期した増加の様相を示し、9 例中 2 例のものがこの型であった。(iv) DE 型 ($\Delta N_i \gg N_i$) の擾乱は、太陽風速度がほぼ一定であるにも拘らず太陽風プラズマ密度の異常増加

Interplanetary Disturbances Associated with Geomagnetic Storm

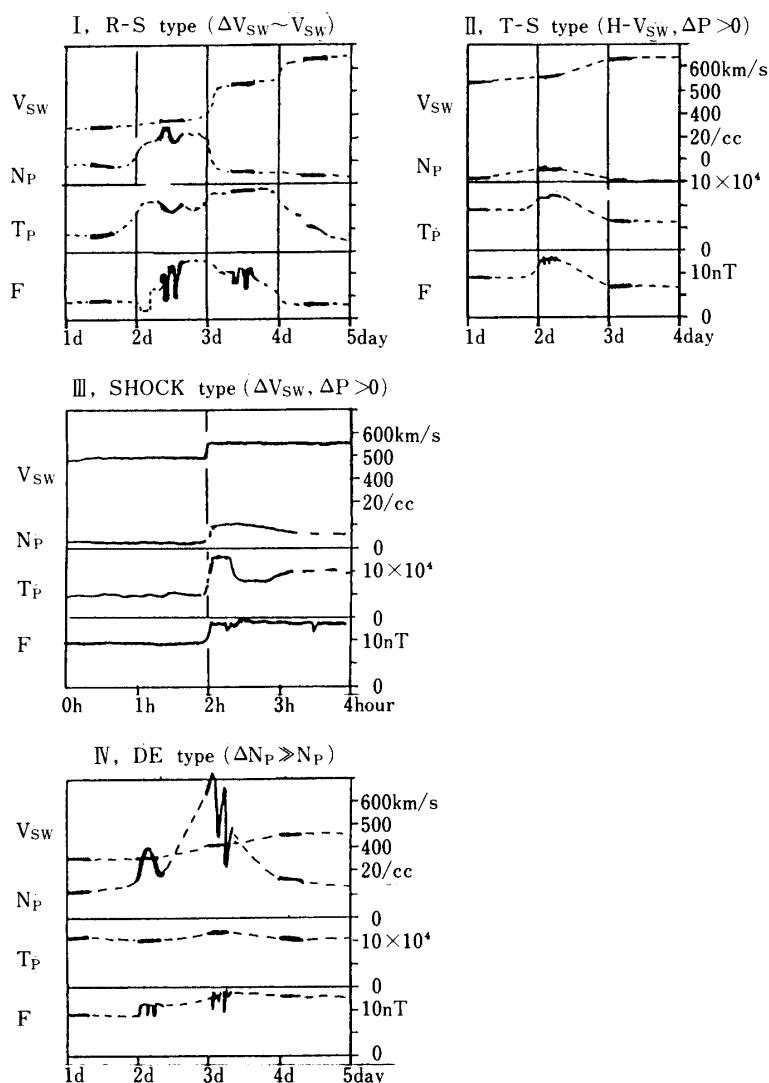


図 19

($\Delta N_i \geq 60 \text{ cm}^{-3}$) に起因するもので 9 例中 1 例のみであった。この異常密度増加の発生原因及び機構についても今後の観測的並びに理論的研究を必要とする新たに発見された特異な現象である。

これらの惑星間空間擾乱と地球磁気圏との相互作用についての研究は、1日4時間程のさきがけデータでは不十分で最終結論まで至らない。しかし、今後のデータ蓄積により太陽—惑星間空間—地球上の電磁気現象を総合的に詰め、その因果関係が解明されていくものと信じる。

4.4 その他の研究

さきがけが IMF を観測し始めた当初、太陽圏は二半球モデルからの予測どおり、傾いた

中性面を持つ擬^{エキスカッション}転期にあることを観測的に実証した。この観測の結果、中性面も傾けて回帰性磁気嵐をおこす原因が、太陽光球面に現われる巨大斑磁場によるものであるとのGBMRモデル[2, 4, 30]が発表された。このモデルによってさきがけ飛翔時のコロナ輝度、太陽風速、フレア領域などの分布や、^{アラインド}平行期への移行が説明された。更に天体一般の斜交双極子を生む成因論提示にまで発展した[30]。

5. 結 語

さきがけ打ち上げ後に発表された42篇の研究論文が纏められた。搭載した磁力計の構成が先づ第2章で述べられた。

次にIMF観測の結果、ハレー彗星の勢力範囲が予想以上に大きかったことが判明し(第3.1節。以下数字は節番号を表わす)。彗星上流の磁場解析(3.2)から、イオンテイル擾乱に関する新しい準平行モデル(3.3)が提唱された。ハレー彗星擾乱の総力カタログが作成解析され(3.4)、中でも大晦日の擾乱が風の息モデルで説明され(3.5)、かつ前回出現時の擾乱との特徴的相違(3.6)が調べられた。

さきがけ観測は更に二半球モデルの正しさを実証し(4.1)、IMF不連続構造を明らかにし(4.2)、太陽・惑星間・地球の電磁作用が調べられ(4.3)、中性面を傾けるGBMRモデルを生み出した(4.4)。

各国の探査機による総合的な、しかし一過性の観測は、彗星科学がいま緒についたばかりであることを知らしめ、これからの彗星と太陽圏研究の重要性を、一挙に認識させた。時あたかもハレーより新鮮で大型と思われるウィルソン彗星も来年4月に向けて刻々と近付きつつある。また現在、人類の飛翔体による観測史初まって以来の新しい原型太陽圏をさきがけは刻々と観測しつつあり、観測続行が学問的にいかに重要であるかを実際に示している。

謝 辞

日本のハレー探査機による観測の成功は、小田稔所長をはじめとする工学・理学のプロジェクトチーム、それを囲む宇宙研の総員、献身的に働いて頂いた多勢の会社関係者、理解と支援をして下さった文部省、さらにその周囲を囲む無数の方達の御声援の賜である。それを想う度に成果を少しでも多く挙げねばと絶えず勇気づけられ、励まされてきた。私達の研究は精神的に皆さん全員による共同研究というべきであろう。特に磁力計開発に苦勞を共にした青山巖・瀬戸正弘両氏、有益な御教示と討論をして下さった斉藤馨児, E. Smith, B. Tsurutani, M. Niednerの緒氏、貴重なデータを頂いたT. Hoeksema (SMF)、小島正宜 (IPS)の両氏、貴重な彗星の写真を御提供下さった竹内端夫、石田慧一, D. Tholen, M. Candy, 瀬尾基治、青木勉、小石川正弘、川添晃、西谷一、そのほか多数の諸氏に心からの感謝の意を表わしたい。

参 考 文 献

- [1] Saito, T., K. Yumoto, K. Hirao, I. Aoyama, and E. J. Smith, Three-dimensional struc-

- ture of the heliosphere as inferred from observations with a Japanese Halley spacecraft, in *The Sun and the Heliosphere in Three Dimensions*, edited by R. G. Marsden, pp. 281-286, D. Reidel Publ. Co., 1986.
- [2] 斎藤尚生, 湯元清文, 平尾邦雄, 青山巖, 瀬戸正弘, Sakigake による IMF 観測から推定した Solar Giant Region, 昭和 60 年度宇宙観測 Symp., 6 月 25-27 日, pp. 15-16, 1985.
- [3] 湯元清文, 斎藤尚生, 平尾邦雄, 青山巖, 瀬戸正弘, 中川朋子, Sakigake/IMF data の 1 次処理について, 昭和 60 年度宇宙観測 Symp., 6 月 25-27 日, pp. 17-18, 1985.
- [4] Saito, T., K. Yumoto, K. Hirao, and I. Aoyama, Solar wind magnetic fields observed by Sakigake and the solar giant regions, *Proc. of 18th ISAS Lunar & Planetary Symp.*, July 10-12, pp. 30-31, 1985.
- [5] Hirao, K., K. Tsuruda, I. Aoyama, and T. Saito, Large spherical magnetic shield room, *J. Geomag. Geoelectr.*, **37**, 581-588, 1985.
- [6] Saito, T., K. Yumoto, K. Hirao, I. Aoyama, and M. Seto, IMF observation with the Japanese Halley spacecraft "Sakigake" and the solar giant regions, *Abstracts of 5th General Assembly of IAGA/IAMAP*, held in Prague, Czechoslovakia on 5-17 August, p. 324, 1985.
- [7] 中川朋子, 斎藤尚生, 湯元清文, 「さきがけ」による惑星間空間不連続の変動特性, 昭和 60 年度総合研究 B「太陽磁気圏の構造とダイナミックス」, 12 月 4-6 日, pp. 68-73, 1985.
- [8] 湯元清文, 小山孝一郎, 斎藤尚生, 平尾邦雄, 平野孝文, Sakigake によって観測された惑星間空間擾乱と地球磁気嵐との関連性について, 昭和 60 年度総合研究 B「太陽磁気圏の構造とダイナミックス」, 12 月 4-6 日, pp. 74-80, 1985.
- [9] 斎藤尚生, 湯元清文, 平尾邦雄, 青山巖, 瀬戸正弘, 「さきがけ」の磁場観測から導かれた太陽圏構造の変化, 昭和 60 年度総合研究 B「太陽磁気圏の構造とダイナミックス」, 12 月 4-6 日, pp. 86-85, 1985.
- [10] Saito, T., K. Yumoto, K. Oyama, K. Hirao, I. Aoyama, and T. Nakagawa, Variation of the heliospheric structure as derived from the Sakigake-IMF observation, *Proc. 7th Symp. on Solar System Sci.*, held in ISAS on 16-17, January 1986 at ISAS., Publ. by ISAS, Tokyo, pp. 5-6, 1986.
- [11] Saito, T., and K. Saito, Interaction between comets and the heliospheric neutral sheet in the past, *Proc. 7th Symp. on Solar System Sci.*, held in ISAS on 16-17, January 1986 at ISAS., Publ. by ISAS, Tokyo, pp. 23-24, 1986.
- [12] Saito, T., T. Takenouchi, K. Saito, and K. Yumoto, Halley's plasma tail disturbances and solar wind observed by Sakigake, *Proc. 7th Symp. on Solar System Sci.*, held in ISAS on 16-17, January 1986 at ISAS., Publ. by ISAS, Tokyo, pp. 6-7, 1986.
- [13] Yumoto, K., K. Oyama, T. Saito, K. Hirao, T. Hirano, and T. Nakagawa, Geomagnetic storm-associated interplanetary disturbances observed by Sakigake (Planet-A mission), *Bulletin of ISAS*, Special issue No. 14, 33-45, 1986.
- [14] Nakagawa, T., T. Saito, and K. Yumoto, Characteristics of interplanetary magnetic discontinuities observed by Sakigake (Planet-A mission), *Bulletin of ISAS*, Special issue No. 14, pp. 47-57, 1986.
- [15] Saito, T., Napterékenység és művészet, *Természet Világa*, **5**, 117, 224-227, 1986.
- [16] Saito, T., K. Yumoto, K. Hirao, T. Nakagawa, and K. Saito, Interaction between comet Halley and the interplanetary magnetic field observed by Sakigake, *Nature*, Lond., **321**, 6067, 303-307, 1986.
- [17] Saito, T., K. Yumoto, K. Hirao, K. Saito, T. Nakagawa, and E. J. Smith, A disturbance

- of the ion tail of comet Halley and the heliospheric structure as observed by Sakigake, *Geophys. Res. Lett.*, **13**, No. 8 821-824, 1986.
- [18] 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. Lett.*, **13**, No. 8, 825-828, 1986.
- [19] Saito, T., K. Yumoto, K. Hirao, K. Saito, and E. J. Smith, Ion tail disturbances of comet Halley and the solar wind structure as observed by Sakigake (with detailed data), *Bulletin of ISAS*, Special issue No. 15, in press, 1985.
- [20] Yumoto, K., T. Saito, T. Nakagawa, K. Hirao, I. Aoyama, and M. Seto, Ring-core fluxgate magnetometer installed on Sakigake, *Bulletin of ISAS*, Special issue No. 15, 45-57, 1985.
- [21] 中川朋子, 斎藤尚生, 小山孝一郎; 湯元清文, 平尾邦雄, 平野孝文, 太陽風中磁気不連続現象の発生特性について, 昭和 61 年度宇宙観測 Symp., 6 月 5-7 日, 37-38, 1986.
- [22] 斎藤尚生, 斎藤馨児, 湯元清文, 中川朋子, 平尾邦雄, E. J. Smith, 「さきがけ」磁場観測から提出されたハレー彗星イオン尾構造のふたつのモデル, 昭和 61 年度宇宙観測 Symp., 6 月 5-7 日, 39-40, 1986.
- [23] 湯元清文, 斎藤尚生, 中川朋子, 「さきがけ」によってハレー彗星の上流で観測された長周期磁気流体波と O^+ (もしくは H_2O^+) イオンとの関連性, 昭和 61 年度宇宙観測 Symp., 6 月 5-7 日, 52-53, 1986.
- [24] Saito, T., K. Yumoto, K. Hirao, and T. Nakagawa, Comet Halley and the IMF observed by Sakigake, (1) Quasiparallel model on the ion tail during encounter, *Proc. of 19th ISAS Lunar & Planetary Symp.*, Aug. 28-30, 36-38, 1986.
- [25] Saito, T., K. Saito, K. Hirao, and K. Yumoto, Comet Halley and the IMF observed by Sakigake, (2) Dynamic pressure model on the ion tail on December 31, 1985, *Proc. of 19th ISAS Lunar & Planetary Symp.*, Aug. 28-30, 39-41, 1986.
- [26] Saito, T., K. Yumoto, and K.-I. Oyama, Comet Halley and the IMF observed by Sakigake, (3) First spacecraft observation of the aligned heliosphere with the most flattened neutral sheet, *Proc. of 19th ISAS Lunar & Planetary Symp.*, Aug. 28-30, 42-45, 1986.
- [27] Yumoto, K., T. Saito, and T. Nakagawa, Comet Halley and the IMF observed by Sakigake, (4) O^+ ions detected in the upstream region about 7×10^6 km, *Proc. of 19th ISAS Lunar & Planetary Symp.*, Aug. 28-30, 46-48, 1986.
- [28] Nakagawa, T., T. Saito, K. Yumoto, K.-I. Oyama, K. Hirao, and T. Hirano, Comet Halley and the IMF observed by Sakigake, (5) Correlation between magnetic discontinuity occurrence and the solar wind speed, *Proc. of 19th ISAS Lunar & Planetary Symp.*, Aug. 28-30, 49-50, 1986.
- [29] 斎藤尚生, 斎藤馨児, 彗星が太陽磁気圏中性面を通過する際の尾の変化——1910 年出現時のハレー彗星その他, 宇宙科学研究所報告 (太陽風と彗星の相互研究特集号) 89-101 頁 (1986 年).
- [30] 斎藤尚生, 太陽に関する巨大斑磁場 MODEL とその惑星磁場成因論への応用, 宇宙科学研究所報告 (太陽風と彗星の相互研究特集号) 69-87 頁 (1986 年).
- [31] Saito, T., K. Yumoto, K. Hirao, T. Nakagawa, and K. Saito, Quasi-parallel model for comet Halley near the encounter of Sakigake, *Proc. 20th ESLAB Symp. on the Exploration of Halley's Comet*, Heidelberg, 27-31 October 1986, ESA SP-250, 129-133, 1986.

- [32] Saito, T. and K. Saito, Effect of the heliospheric neutral sheet to the kinked ion tail of comet Halley on 13 May 1910, *Proc. 20th ESLAB Symp. on the Exploration of Halley's Comet*, Heidelberg, 27-31 October 1986, ESA SP-250, 135-130, 1986.
 - [33] Yumoto, K., T. Saito, and T. Nakagawa, Long-period HM waves associated with cometary O^+ (or H_2O^+) ions: Sakigake observation, *Proc. 20th ESLAB Symp. on the Exploration of Halley's Comet*, Heidelberg, 27-31 October 1986, ESA SP-250, 249-253, 1986.
 - [34] Saito, K., T. Saito, T. Aoki, and K. Yumoto, Possible models on disturbances of the ion tail of comet Halley during the 1985-1986 apparition, *Proc. 20th ESLAB Symp. on the Exploration of Halley's Comet*, Heidelberg, 27-31 October 1986, ESA SP-250, Vol. 3, 1986.
 - [35] Saito, T., K. Yumoto, K. Hirao, K. Saito, T. Nakagawa, and E. Smith, Dynamic pressure model derived from an observation by Sakigake for comet Halley on 31 December, 1985, *Proc. ESLAB Symp. on the Exploration of Halley's Comet*, Heidelberg, 27-31 October 1986, ESA SP-250, Vol. 3, 1986.
 - [36] Nakagawa, T., T. Saito, K. Yumoto, and K. Hirao, Interplanetary magnetic microstructure observed by Sakigake near its closest approach to comet Halley, *ISAS Research Note*, No.149, 1986.
 - [37] 鈴木裕見子, 斎藤尚生, 湯元清文, 「さきがけ」で観測された太陽圏磁気中性面の特徴, 昭和61年度太陽系科学 Symp., 1月8-9日, 1-2, 1987.
 - [38] 湯元清文, 斎藤尚生, 中川朋子, 「さきがけ」磁場観測によるハレー彗星起源水分子イオンの検出, 昭和61年度太陽系科学 Symp., 1月8-9日, 7-8, 1987.
 - [39] Saito, T., K. Saito, and T. Aoki, Possible models for ion tail structure of comet Halley pictured from the ground, *Proc. 8th Solar System Sci. Symp.*, 8-9 Jan. 38-39, 1987.
 - [40] Saito, T., K. Yumoto, K. Hirao, K.-I. Oyama, T. Itoh, and T. Nakagawa, Ion tail disturbance of comet Halley and the solar wind structure as observed by Sakigake, (I) Sakigake/IMF observation and heliospheric structure, *Bulletin of ISAS*, (in press), 1986.
 - [41] Saito, T., T. Aoki, M. Seo, and K. Saito, Ion tail disturbances of comet Halley and the solar wind structure as observed by Sakigake, (II) Ion tail disturbance on 31 December 1985, *Bulletin of ISAS*, (in press), 1986.
 - [42] Saito, T., K. Saito, T. Ogino, T. Aoki, K. Hirao, and K. Yumoto, Ion tail disturbances of comet Halley and the solar wind structure as observed by Sakigake, (III) Dynamic pressure model and its application to the DE-like knot event, *Bulletin of ISAS*, (in press), 1986.
- 尚, Halley 彗星関係の論文6篇を現在 *Astronomy and Astrophysics* 誌に投稿中なので, その詳細は同誌で見られたい. またさきがけ打ち上げ以前の機器開発や理論的予測などの約46篇の論文については, 下記総合報告の巻末論文リストを参照されたい.
- [43] Saito, T., A review on 70 recent papers on development of various kinds of magnetometers for geophysical uses. 昭和58年度科学研究費補助金(総合A)研究成果報告書, 132-149頁(1983).

また本特集号の性格から, 御支援頂いた沢山の専門外の方達へも研究内容を報告する義務があると考え, 次の天文学会特別講演解説文等も参考として掲げておく.

斎藤尚生, 天文ガイド 1986年8月号62-63頁, 1987年1月号および2月号.