

太陽風速度構造の惑星間空間多点観測

三宅 亘*・小林 一英**・小山孝一郎・向井 利典
阿部 琢美***・寺沢 敏夫†・平尾 邦雄‡・A. J. Lazarus#

(1988年1月10日受理)

Multi-Spacecraft Observations of Heliographic Structure of Solar Wind Speed

By

W. MIYAKE, K. KOBAYASHI, K-I. OYAMA, T. MUKAI, T. ABE,
T. TERASAWA, K. HIRAO, and A. J. LAZARUS

Abstract: We investigate the heliographic latitude-longitude structure of solar wind speed between Sept. 1985 and Jan. 1987 through the analysis of the solar wind data obtained by Sakigake, Suisei, and IMP-8. Until Jan. 1986, both polar regions had a high-speed stream extended across the equatorial region. After Feb. 1986, high-speed streams were rarely seen on the equator and low-speed streams were ranged along the equator, although there remained a slight wavy pattern in the latitude-longitude structure. This wavy pattern has been stable till the end of 1986.

* 電波研究所平磯支所

** 千葉工業大学

*** 電気通信大学

† 京都大学理学部

‡ 東海大学工学部

MIT

概 要

「さきがけ」, 「すいせい」, IMP-8 の 3 探査機の太陽風データを用いて, 1985 年後半から 1986 年にかけての, 太陽風速度の太陽面緯度・経度構造を調べた。1986 年 1 月以前は, 南北から各々の高速流が赤道を越えるまでに張り出している状態であった。1986 年 2 月を境に, 赤道に達するような高速流の張り出しは消失し, わずかにうねりが存在するものの, 低速流が赤道に沿った構造へ変化した。1986 年末まで, このわずかに南北にうねる構造はほぼ安定であった。

1. 緒 言

太陽風の経度方向の構造は, 太陽の自転を利用して, 惑星間空間飛翔体によりほぼ 27 日で調べることができる。これに対し, 緯度方向の構造は簡単には知ることができない。地球の公転軌道面は太陽の赤道面と一致せず, およそ 7.2 度ほど傾いている。このため, 地球を周回する人工衛星で太陽風を観測すると, 半年で ± 7.2 度の緯度範囲を探索したことになる。しかし, 経度方向の走査が 1 ヶ月足らずの間でできるのに対し, これは長い期間を要する。それ故, 観測された太陽風の変動の原因が, 緯度方向に勾配を持つ構造中を移動したことにあるのか, 構造そのものが半年の間に变化したことにあるのか, その解釈には常に不確定性がつきまってくる。この点を克服するためには, 惑星間空間における同時多点観測を行い, 短期間で結果を出すことが必要となる。

76 年ぶりに回帰してきたハレー彗星に, 各国の探査機が 1986 年 3 月に接近し, 観測をしたことは記憶に新しい。日本の探査機「さきがけ」と「すいせい」には太陽風と彗星大気との相互作用を調べる目的で, 太陽風観測装置[1], [2]が搭載されていた。これらの太陽風観測はハレー彗星最接近時のみでなく, その後も継続して行われている。上記の期間は, 単に複数の探査機が惑星間空間で太陽風の観測を行った点だけでなく, ちょうど太陽活動極小期にあたり, 太陽フレア等による太陽風の変動成分が稀である点でも, 太陽風の構造を明確にし得るまたとない機会であった。本研究では「さきがけ」, 「すいせい」, 米国の人工衛星 IMP-8[3]の太陽風データを用い, 2 ヶ月を基本として太陽風速度の緯度・経度構造を求め, その時間変化を調べた。

2. 観 測

解析は 1985 年 9 月から, 「さきがけ」と「すいせい」については 1987 年 1 月まで, IMP-8 については 1986 年 11 月までの太陽風データを用いて行った。「さきがけ」, 「すいせい」, IMP-8 (すなわち地球) の惑星間空間における軌道は図 1 の通りである。太陽からの距離は探査機により各々変化していくが, 太陽風速度の太陽からの距離依存性は, この程度の太陽からの距離の差ではほとんど問題にならず[4], 以後の解析の障害とはならない。

一方, 各探査機の太陽面緯度・経度の変化を示したのが図 2 である。太陽の経度としては, 本論文ではすべてカリントン経度を使用している。打上げが早い分だけ 1985 年末です

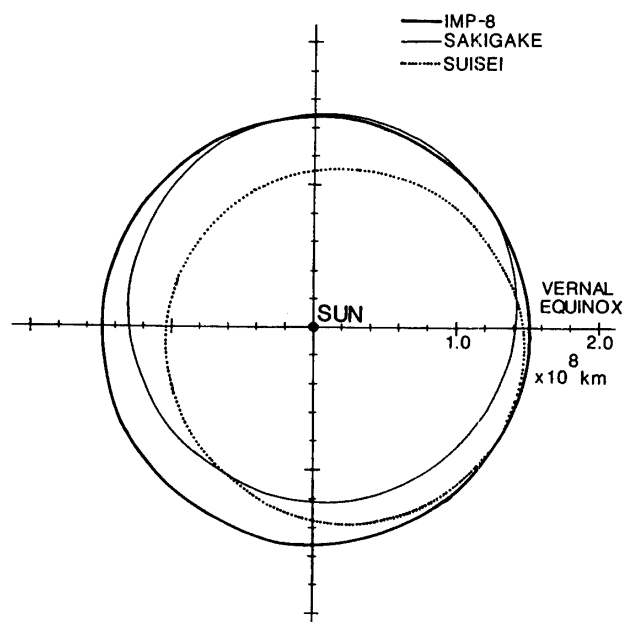


図 1 黄道面に投影した「さきがけ」,「すいせい」, IMP-8 (地球) の軌道.

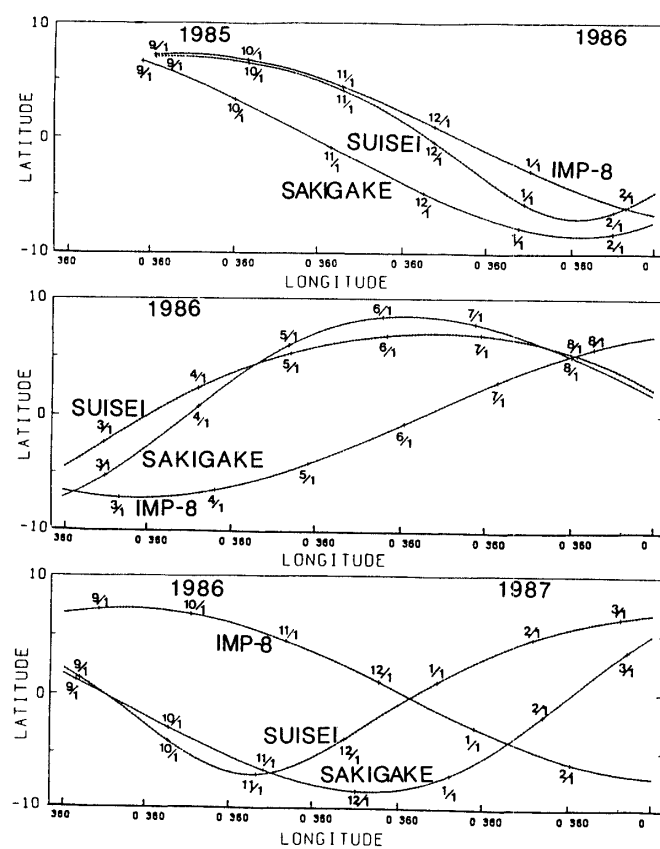


図 2 「さきがけ」,「すいせい」, IMP-8 (地球) の太陽面緯度・経度の時間変化.

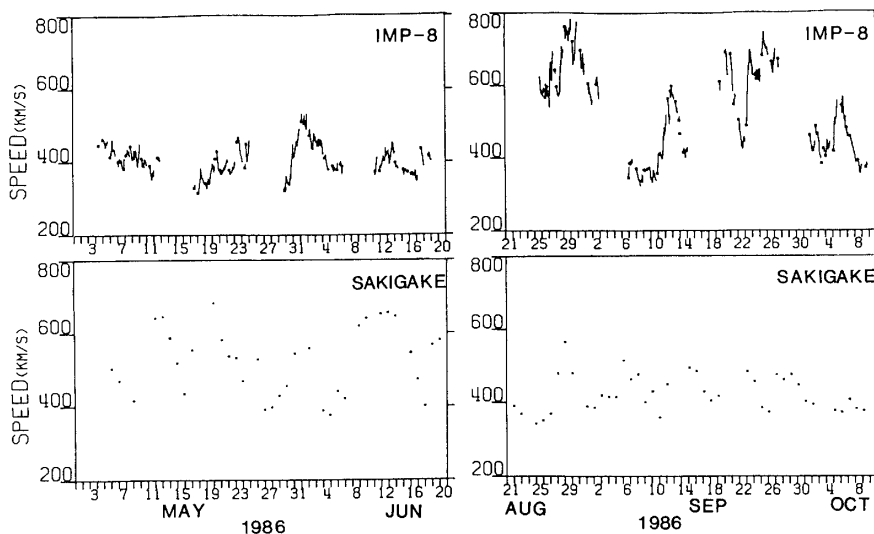


図3 IMP-8と「さきがけ」の観測した太陽風速度のデータ例

で、「さきがけ」の緯度はIMP-8（すなわち地球）と異なっているが、1986年に入ると「すいせい」もIMP-8とは異なってくる。このため、1985年では同時観測される緯度範囲は小さいが、1986年では大きな緯度幅で同時観測ができています。又、見方を変えれば、1986年では同じ緯度領域を異なる探査機が入れかわり観測をしており、単一の探査機に比べてより長期にわたり特定の緯度領域のデータが得られる状態となっている。

図3にIMP-8と「さきがけ」の観測した太陽風速度のデータ例を示す。1986年5月から6月にかけてのIMP-8のデータでは400 km/s前後の比較的遅い太陽風が観測されているが、「さきがけ」では600 km/s以上の高速の太陽風が何回か観測されている。一方、同年8月末から10月初めにかけてはIMP-8で600 km/sを越える太陽風速度が観測され、IMP-8（地球）から見た太陽の自転周期27日でほぼ回帰している。「さきがけ」ではこの時期600 km/s以上の速度は一度も計測されていない。単一の探査機のデータのみを見てみると、この数ヶ月間の太陽風速度の変動について、各々逆の傾向が結論されるであろう。図2からわかるように、「さきがけ」は6月に、IMP-8は9月に、各々緯度が最大となっており、その時もう一方の探査機は赤道近辺にあった。緯度に対する強い依存性をもった速度の構造を仮定すれば、統一された解釈が可能ながことが直観されよう。このように、構造と真の時間変化の分離が同時多点観測の意義であり、本論文の主目的である。

3. 速度の緯度・経度構造

3.1 太陽面への速度のマッピング

データをただ図3のように時系列として並べているだけでは、構造を明確に認識していくことは困難である。そこで、観測された太陽風速度をその源の太陽面上に戻して、マッピングをしてみた。実際に太陽風が加速され、惑星間空間へ吹き出していくのはコロナ領域であるが、マッピングされる経度の差は、コロナと太陽面とではわずかで、最大でも0.

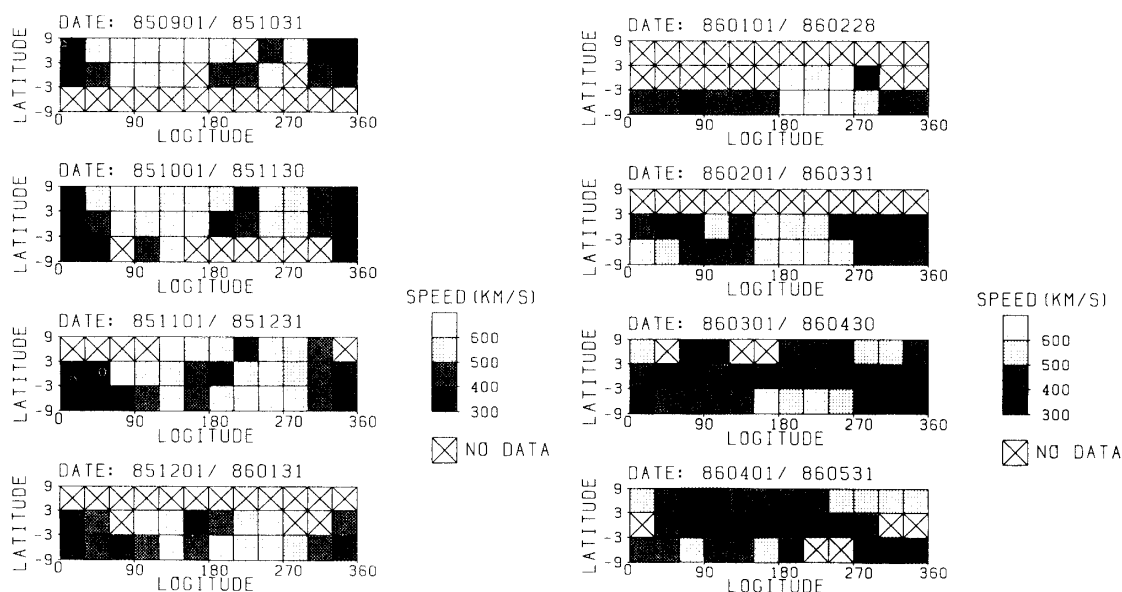


図 4 a 1985 年 9 月から 1986 年 1 月までの太陽 図 4 b 同じく 1986 年 1 月から 5 月までのもの。
風速度の太陽面上での分布。

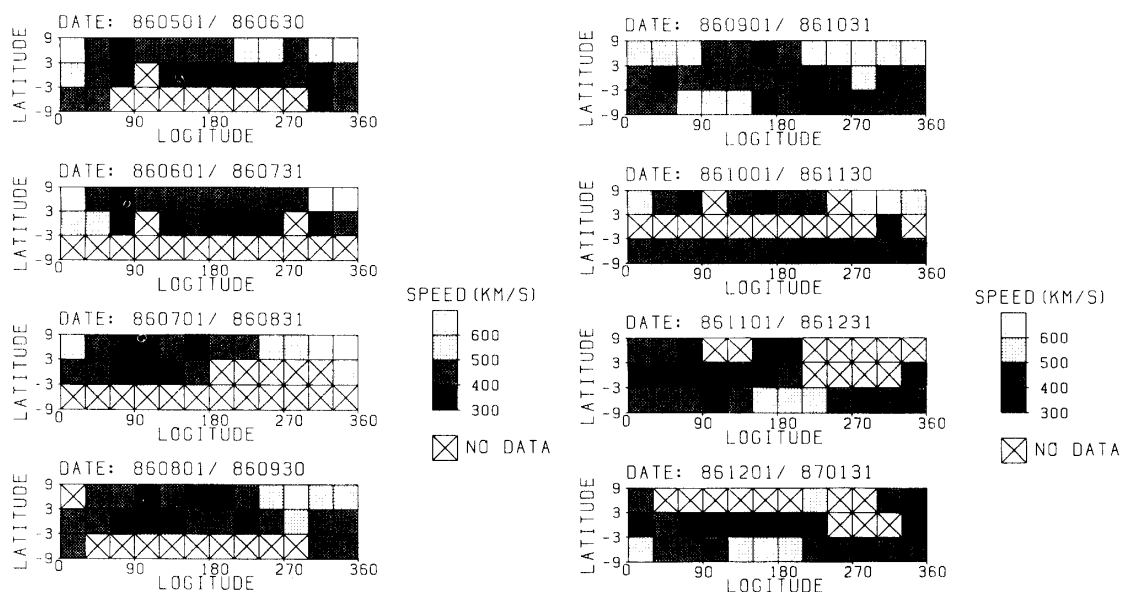


図 4 c 同じく 1986 年 5 月から 9 月までのもの。 図 4 d 同じく 1986 年 9 月から 1987 年 1 月ま
でのもの。

5 度程度である。太陽面上に戻すにあたり、個々の太陽風は途中で加減速されることなく、太陽を中心として動径方向の速度成分のみを持つものと仮定した。

図 4 a~d がその結果である。経度方向には 30° 、緯度方向には 6° の範囲を区切り、その中に入るデータの平均値を濃淡表示した。2 ヶ月に 1 枚を基準としてマップを構成したが、

3つの探査機の緯度が片寄った時期には、NO DATAの領域が多くなっている。

図4 aの4枚のマップはほぼ類似している。すなわちこの期間の特徴をまとめると、

- ・経度300度から60度付近にかけては広い範囲で低速の領域となっている。
- ・経度90度から180度付近に北（緯度正）にいくほど広がる高速領域がある。
- ・経度210度から300度付近には南（緯度負）にいくほど広がる高速領域がある。
- ・上記2つの高速領域を分離する狭い低速領域が経度150度から240度あたりにかけて斜めに存在する。

の4点となろう。

1986年1月から2月には、3つの探査機とも南半球に集中してしまい、観測される領域が南に片寄っている。同年4月以降、北側の観測も再び可能となったが、この時の構造は1985年末とは異なっている。すなわち、以前に北にいくほど幅の広がる高速流があった経度90度から180度付近は低速領域に変化している。又、1985年末には緯度±3度以内の赤道域でも500 km/s以上の領域があったが、1986年3月以降、この緯度範囲では高速流はほとんど現れない。むしろ、赤道に沿って低速流が経度方向に連なった構造が目につくようになる。

3.2 速度構造の変動

前節で指摘したような速度構造の変動をより明確にするため、緯度毎にまとめて、構造の時間変化を調べてみた。図4と同じく、±3度を境として3つの緯度領域に分けてまとめ

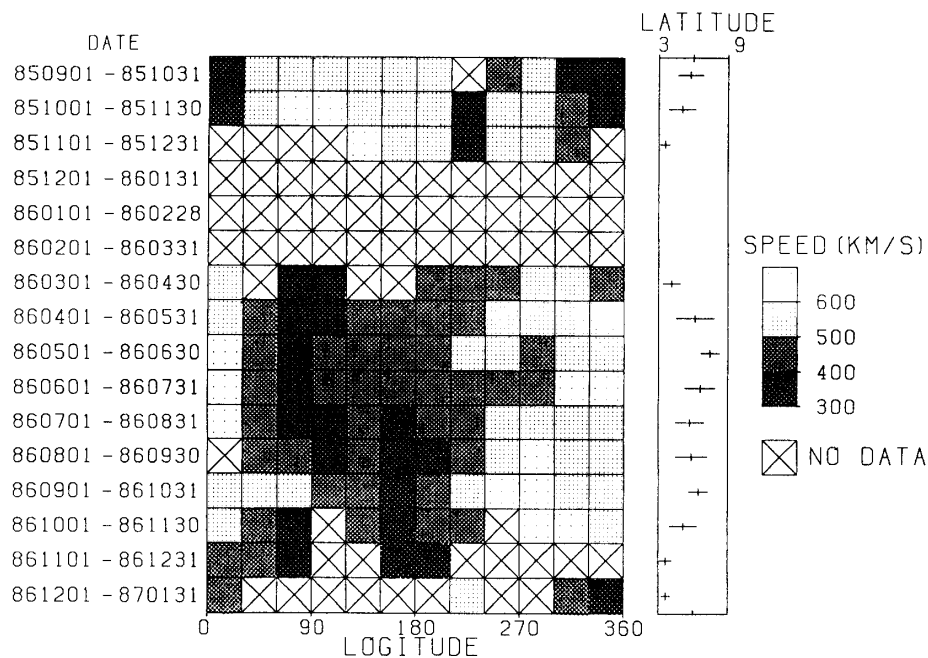
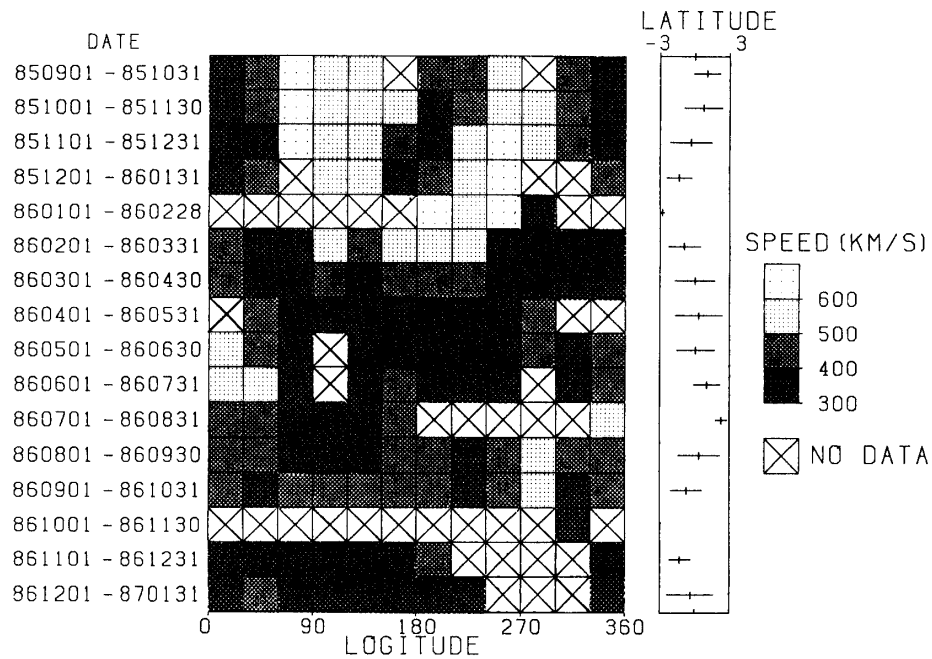
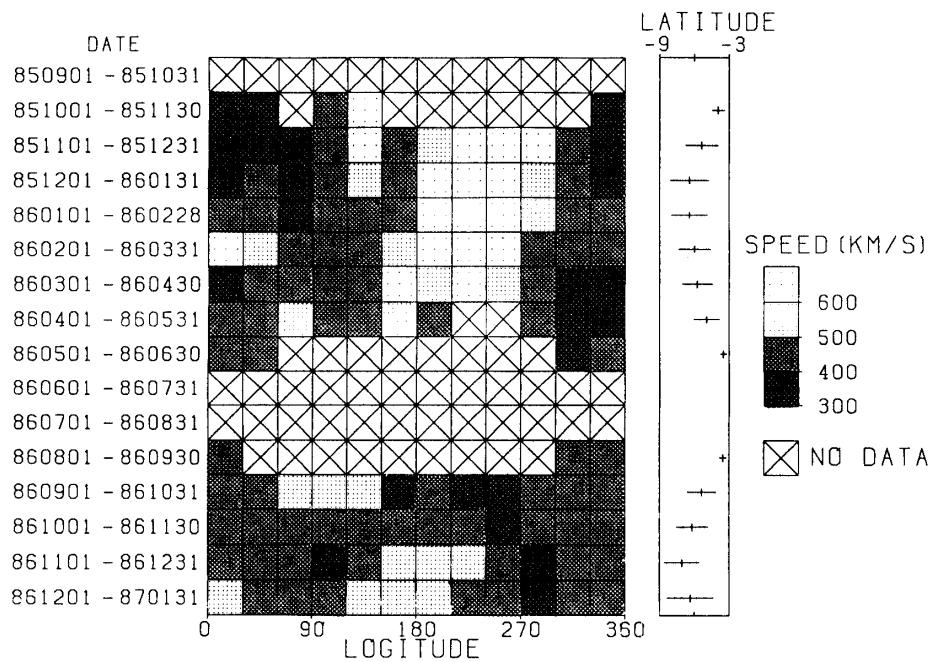


図5a 緯度3度以北における速度構造の変動。右のパネルは観測点の緯度の平均値を示す。

図 5b 同じく緯度 ± 3 度以内のもの。図 5c 同じく緯度 -3 度以南のもの。

たのが図 5 a~c である。表示の仕方と期間のとり方も図 4 と同じである。探査機の緯度が、ある程度は分けた範囲内で片寄る場合もあるので、データの得られた平均の緯度を標準偏差のバーをつけて右のパネルに示した。図 5 a が $+3$ 度以北のデータをまとめたもの

で、図5 bとcは同様に ± 3 度の間の赤道沿いのデータと -3 度以南のデータをまとめたものである。

図5 aでは1985年11月までのパターンと1986年4月以降のパターンが全く異なっている。1985年12月から1986年3月までは、この緯度領域のデータは無いが、この間に構造に変動を生じ、それ以後1986年中は構造がほぼ安定していたことがわかる。図5 bで、さらにこの変動が生じた時期がはっきりとしてくる。1985年中は、回帰性のよい高速流と低速流のパターンが繰り返えされているが、1976年2月を境に、高速流はこの緯度帯ではほとんど見られなくなる。図5 cの -3 度以南のデータでは、この2月を境にした変化は図5 bほどには劇的ではなく、ある程度連続的な印象を受ける。

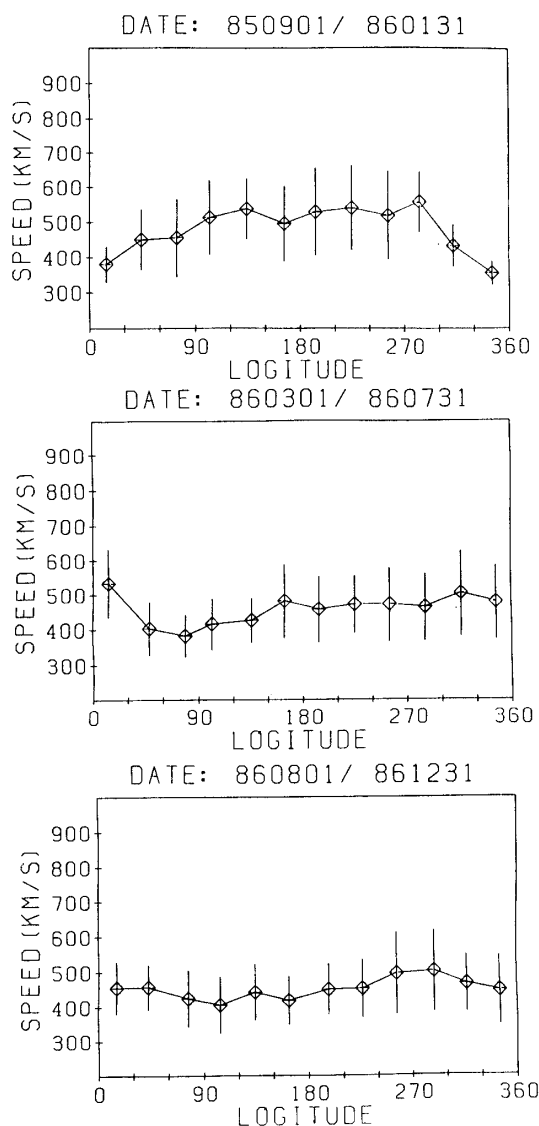


図6 a 速度の経度依存性。

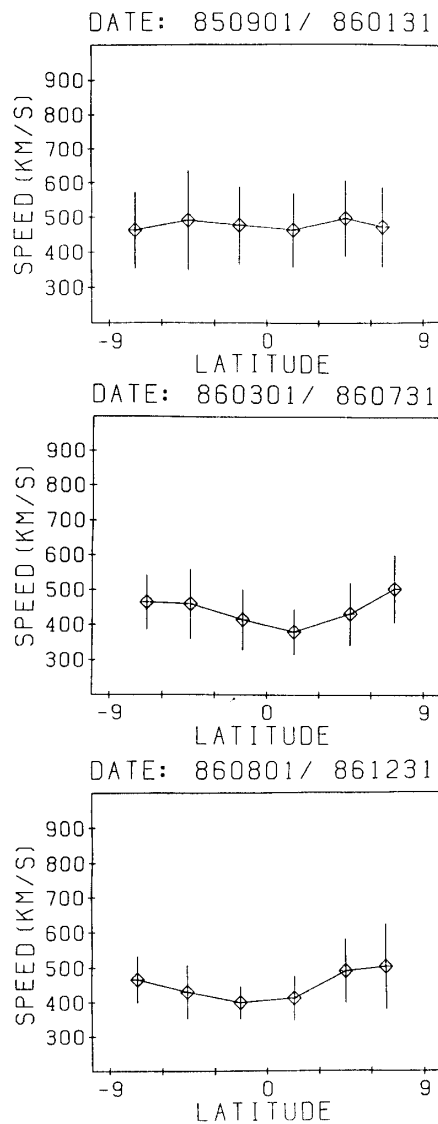


図6 b 速度の緯度依存性。

図 6 a, b は比較的安定していたと思われる期間でまとめて、緯度方向と経度方向に各々速度の値を平均してみたものである。1986 年 8 月でさらに分けているのは、5 ヶ月で区切ったため、ここで特に大きな変動があったからではない。1986 年 1 月以前は経度方向の変化が大きく、緯度方向にはほとんど変化がない。一方、1986 年 3 月以降は逆に経度方向には変化がなくなり、緯度方向には赤道付近で速度が最小となる依存性が現われている。

太陽コロナ中にはコロナホール[5]と呼ばれる低密度の領域があり、これが特に高速の太陽風の源であることはよく知られている。コロナホールは通常、太陽の北極域と南極域に分かれて、各々逆の磁場をもった領域として存在しており、これの一部が中・低緯度まで張り出してくると、張り出しの存在する領域に対応して、地球近辺でも太陽風速度の増大が観測される。コロナホールが高速太陽風の源であることは、一般に、高緯度では速度が大きく、低緯度では小さい、速度の緯度構造の存在を意味する。事実、電波星を用いた惑星空間シンチレーション (IPS) の観測からは、そのような大規模な速度の緯度方向の勾配が観測されている[6]。

1985 年後半は、南北に各々起源をもつ高速流が赤道を越えるまでに張り出していた状態といえるだろう。これが 1986 年 2 月を境にして、赤道域への高速流の張り出しは減少し、ほぼ赤道に沿って低速流が見られるようになった。図 7 はこの構造の変化をモデル化したものである。濃くハッチした領域ほど速度の小さいことを示す。図中、太線で囲った領域

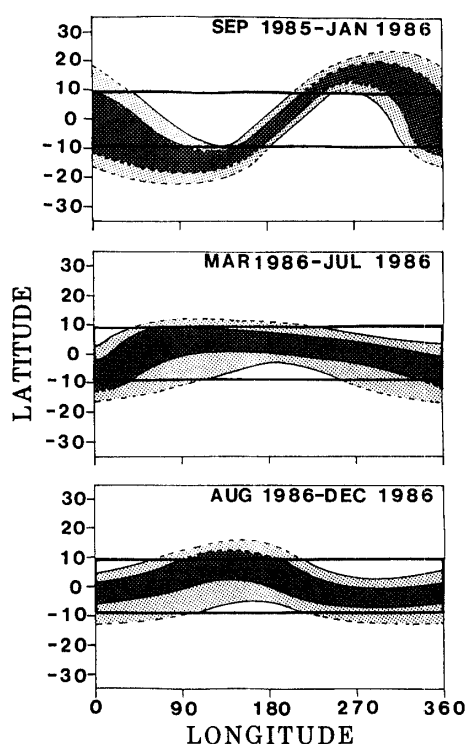


図 7 1985 年後半から 1986 年にかけての速度構造のモデル。
濃くハッチした領域ほど速度の小さいことを示す。

が我々の観測した範囲である。図6で示したように、1985年後半は観測した太線内では緯度方向の変化よりも経度方向の変化が目立つ構造であった。1986年に入り、赤道に沿っては高速流は見られなくなり、太線内の狭い緯度範囲でも、緯度方向の変化が目立つようになった。1986年に入ってもわずかなうねりが安定に存在しているため、赤道からずれてくると、図5aに示したような経度に依存した速度の増減が現われる。尚、図3に示した例はまさにこの場合に相当している。

1986年2月が、急激な構造の変化があった月と同定された。2月の前半はこの研究の解析期間の中で、随一の黒点群が現れ、大きなフレアが起こった時期であった。フレアを起こした黒点群はおおよそ経度60度付近にあったが、図4b(又は図5c)の860201/8603310の図で、経度0度から60度にかけて見られる小さな高速域がこのフレアの直接の影響である。太陽風の大規模な構造の変動と、黒点群の消長の関連について、今は他に検討する材料は持ちあわせていない。ここでは単に両者の時期的な一致を指摘するにとどめる。

3.3 惑星間空間磁場との比較

高速流には、南極と北極いずれかのコロナホールの磁場の極性が対応している[5]。そ

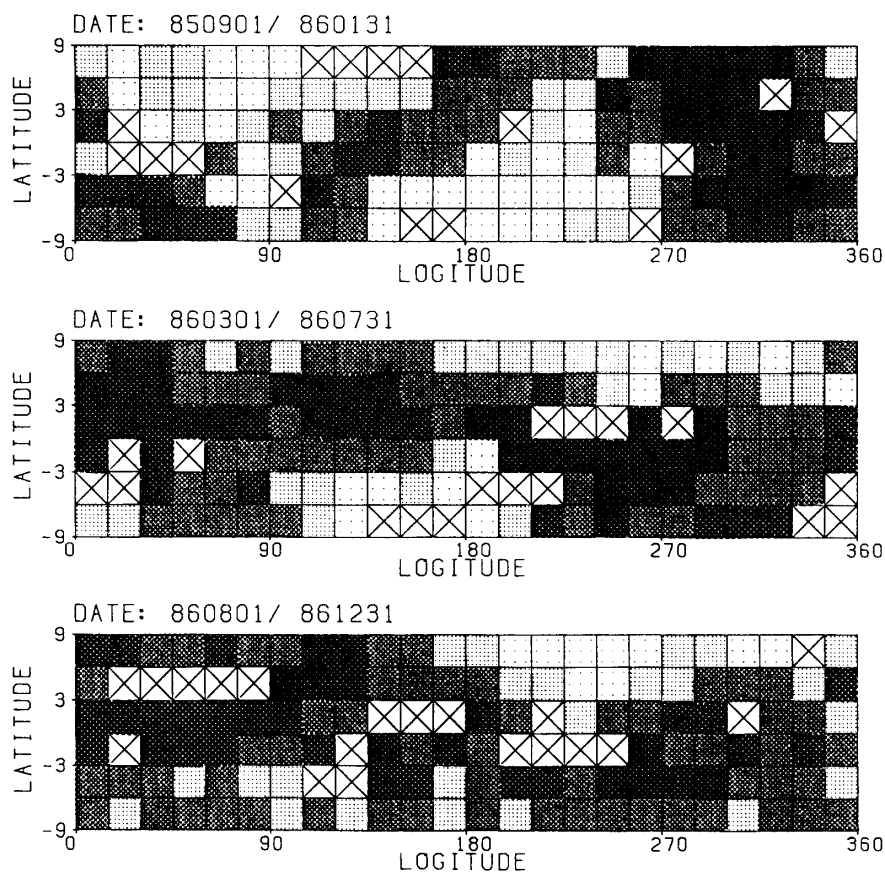


図8 1天文単位にマッピングした太陽風速度、濃淡の表示は図4, 5に同じ。

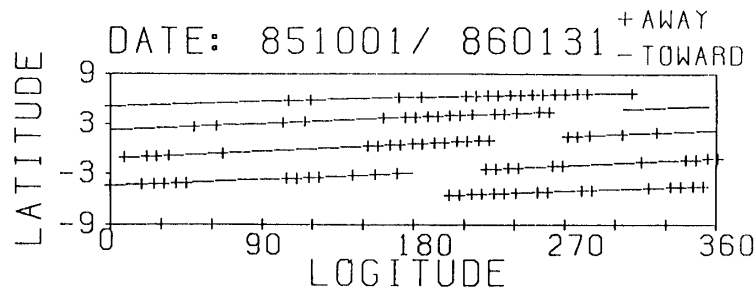


図9 地球周辺における惑星間空間磁場の極性。

ここで、地球近辺の惑星間空間磁場の極性と比較するため、太陽面上ではなく、太陽から1天文単位の球面上に速度をマッピングしなおしてみた。その結果が図8である。前述した比較的安定していたとみなせる3つの期間に分けてあり、5ヶ月にわたる多くのデータがあるため、緯度・経度ともに図4の倍の解像度で示した。濃淡と速度の対応は図4、5と同じである。

図9には1985年10月から1986年1月までの地球近辺における惑星間空間磁場の極性[7]を太陽の緯度・経度について示した。+が太陽から離れる方向に磁場ベクトルが向いている場合で、-が太陽にベクトルが向いている場合に対応する。図8の上図と比較すれば経度90度を中心として北へ行くほどひろがる高速流は-の磁場の領域であり、もう1つの南に下がるほどひろがる高速流は+の磁場の領域である。今回の太陽サイクル21から22の間の極小期における太陽の磁場の極性は南が正、北が負であり、前節での各々の高速流が南北いずれから張り出したものかの解釈が妥当であることを示している。

1986年4月以降は、この地球近辺の惑星間空間磁場の極性は入手不能となっている。「さきがけ」の観測によると[8]、1986年4月からは7月までは大部分が負の極性であり、逆に10月から12月までは大部分が正の極性であった。「さきがけ」は図2で示したように1986年6月に最も緯度が北に上がり、12月初めに最も南に下がっている。図8にみられるように、赤道にまで達するような高速流の張り出しがなくなったため、「さきがけ」の緯度の変化がそのまま磁場の極性の変化にでているものと思われる。

3.4 緯度方向の速度勾配

図6bにおいて、1986年3月以降は緯度方向の速度勾配があらわれているが、これは個々の場所における勾配よりもゆるやかになっている。図7のように1986年には高速流の目立った張り出しはなくなったものの、南北へのうねりがあり、これによって図6bの勾配はなまされている。

図10に局所的な緯度方向の速度勾配の例を示す。1985年の10月から12月のデータで、南北から各々高速流が張り出し、その境界に狭い低速領域がある部分である。図中の記号は探査機の違いを示し、数字はこの期間のうち1回目の太陽の自転中に計測されたものに1を付し、2回目のものに2を付した。つまり同一の数字のものは同時性が高いデータで、

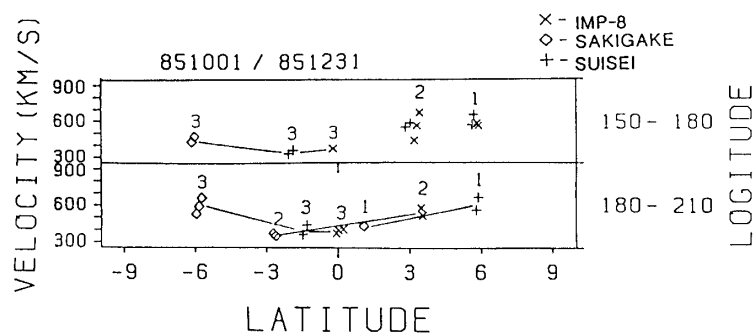


図10 局所における速度の緯度に対するプロット。付した数字が同じものは同時性の高いデータであることを示す。

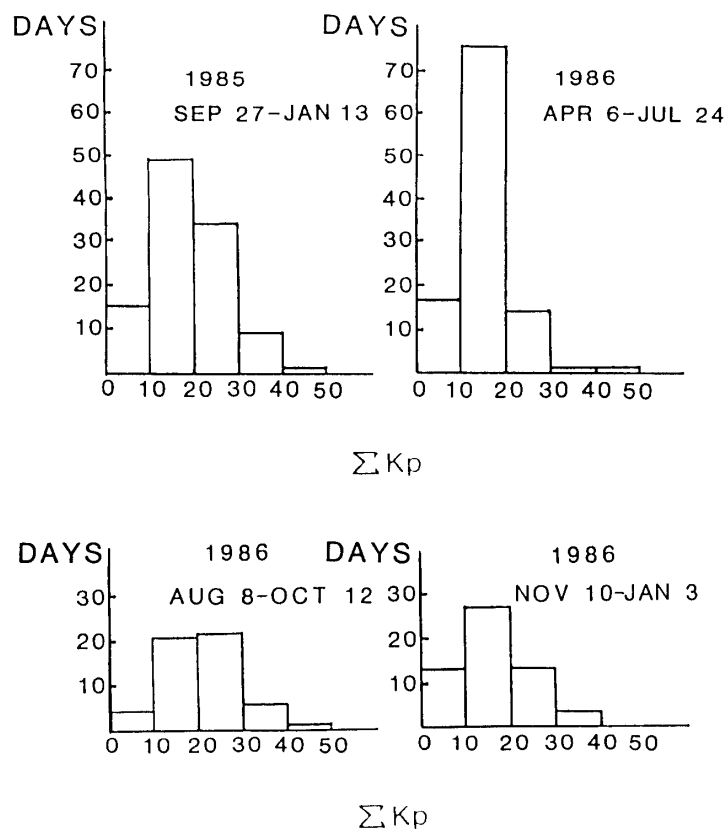


図11 1985年後半から1986年にかけての地磁気活動度の頻度分布を4つの期間に分けて示したもの。

直線で結んである。局所における緯度方向の勾配は、1度につき最大30～40 km/s になっていることがわかる。

今回我々が探査機のデータを用いて調べたのは、惑星間空間全体からみれば、ごく限られた緯度の範囲といえよう。しかし、ごくわずかな緯度の差でありながら、図3の例にみ

られるように全く異なった太陽風速度が観測された。これは、高速流と低速流の境界が明瞭で、そこにはこの節で示したような、きつい速度の勾配が存在しているためである[4]。

3.5 地磁気活動へのコメント

我々は本論文において、1985 年 9 月から 1986 年末までの太陽風の速度構造とその変動を明確にしてきた。地磁気活動が地球に吹きつける太陽風速度に依存していることはよく知られている[9]。そこで、この節ではこの期間における地磁気活動度(ΣK_p)を速度構造の変動を考慮して、概説しておく。

図 11 には 4 つの期間について、1 日分の K_p 指数の和(ΣK_p)の値の頻度分布を示した。 ΣK_p が 20 以上のものと 10 以下のものとを比較しながら見てゆきたい。

- 1985 年 9 月～1986 年 1 月は南北から各々高速流が張り出していた。この期間の ΣK_p は 20 以上のものがかなりある。
- 1986 年 4 月～7 月は速度構造の変化に伴い、赤道付近に低速域がならんだ。この間、 ΣK_p が 20 以上のものは、10 以下のものと同程度となった。
- 1986 年 8 月～10 月は、速度構造はほとんど変化してないが、地球の緯度が北へ上がり、わずかな構造のうねりに対応して、北の高速流に遭遇するようになった。このため、 ΣK_p が 20 以上のものが多くなった。
- 1986 年 11 月以降は再び地球の緯度が赤道付近に下がり、高速流に遭遇することがなくなった。 ΣK_p が 20 以上のものは 10 以下のものと同程度となった。

4. まとめ

「さきがけ」、「すいせい」、IMP-8 の太陽風速度データを解析し、1985 年後半から 1986 年にかけての速度の緯度・経度構造を調べた。その結果、1986 年 1 月までは、南北から高速流が、各々、赤道を越えるまでに張り出している状態であった。1986 年 3 月以降は、赤道に達するような高速流の張り出しは消失し、わずかなうねりが存在する程度で、基本的には低速域が赤道に沿って展開する構造へ変化した。構造とその時間変化を分離したことから、1986 年初めのこの構造の変動が、徐々にではなく、1～2 ヶ月以内の短い間に生じたことが明確にされた。さらに赤道近辺 ± 3 度以内とそれ以北のデータを見る限り、この変動後のわずかにうねる構造は、1986 年末までほぼ安定していたことが明らかとなった。

謝 辞

「さきがけ」と「すいせい」は現在も太陽風観測を続け、データは順調に蓄積されている。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、ここに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] 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, 1986.
- [2] 向井利典, 三宅 亘, 寺沢敏夫, 平尾邦雄, 「すいせい」(PLANET-A) による太陽風イオン観測, 宇宙研報告, 特集 14 号, 60, 1986.
- [3] Solar Geophysical Data, No. 503-Part II, 1986 and No. 511-Part II, 1987.
- [4] Schwenn, R., M. D. Montgomery, H. Rosenbauer, H. Miggenrieder, and K. Muhlhauser, Direct Observation of the latitudinal extent of a high-speed stream in the solar wind, J. Geophys. Res., 83, 1011, 1978.
- [5] Hundhausen, J. A., An interplanetary view of coronal holes, in Coronal Holes and High-speed Solar Wind Streams, 225, Colorado associated University Press.
- [6] 例えば, Zhao, X-P., and A. J. Hundhausen, Spatial structure of solar wind in 1976, J. Geophys. Res., 88, 451, 1983.
- [7] Solar Geophysical Data, No. 500-Part I, 1986.
- [8] 「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わる諸現象, 宇宙研報告, 1988, 印刷中.
- [9] Akasofu, S-I., and S. Chapman, Solar Terrestrial Physics, Oxford University Press, 1972.