

# IPS 観測とその宇宙環境予報への利用計画

小島 正宜\* 柿沼 隆清\*

## OBSERVATIONS OF INTERPLANETARY SCINTILLATION AND THEIR APPLICATION TO THE SPACE WEATHER FORECAST

By

Masayoshi KOJIMA and Takakiyo KAKINUMA

The interplanetary scintillation (IPS) method using natural radio sources can observe the solar wind near the sun and at high latitudes that have never been accessible to any spacecraft. Therefore, the IPS has been the most powerful method to observe the solar wind in three-dimensional space. Although the IPS method cannot predict when a flare will occur or when a filament will disappear, it can be used to forecast the propagation of interplanetary disturbances and to warn when they will attack the earth. Thus, the IPS method can be used to forecast recurrent interplanetary phenomena as well as transient phenomena.

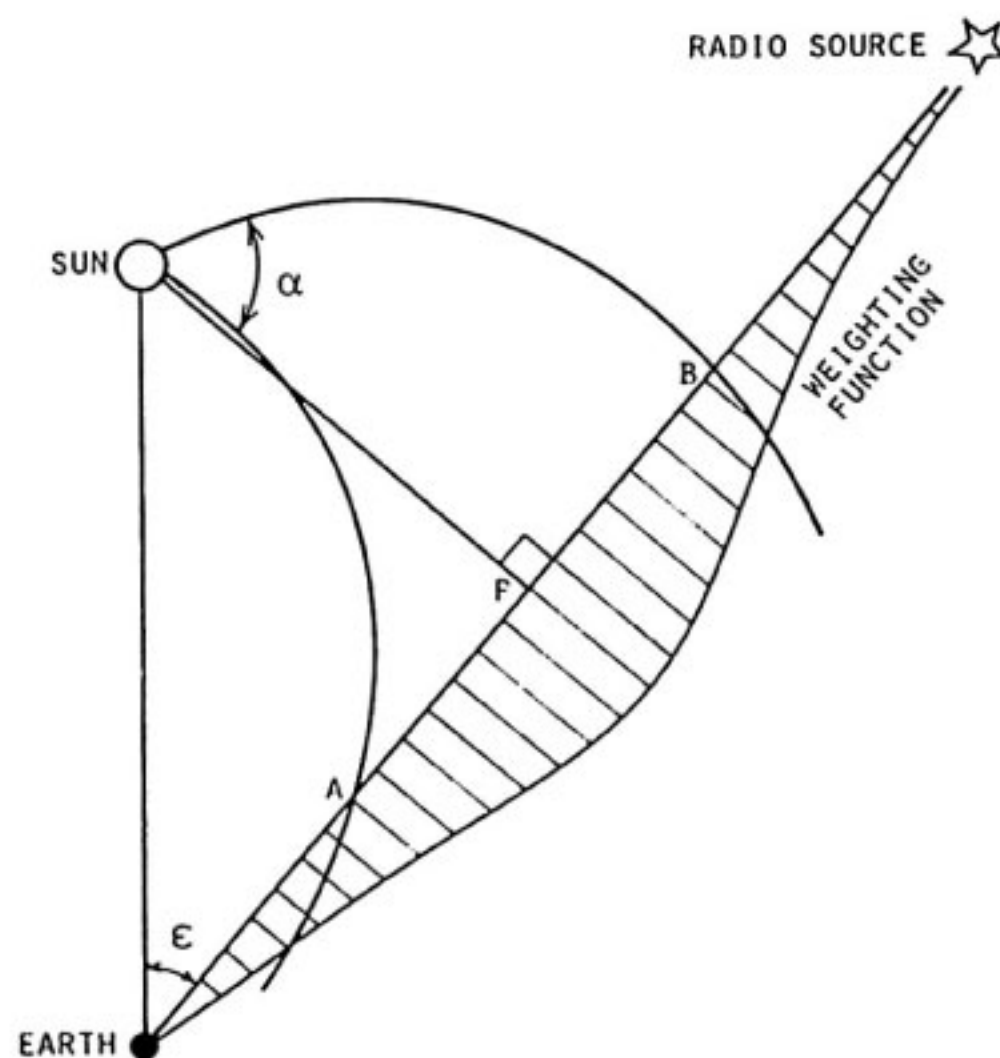
### 1. 序 論

惑星間空間シンチレーション (IPS) を用いた太陽風の観測は、飛翔体観測では不可能な太陽近傍や高緯度を吹く太陽風の観測が可能で、太陽風の3次元構造を捕らえることのできる有力な観測方法である。IPS観測は、いつフレアやフィラメント消失が発生するのか予報することはできないが、それらに伴う惑星間現象がどのように惑星間空間を伝播し、いつ地球に影響するのかを予報することに利用できる。本論文では、先ずIPS観測について説明し、宇宙天気予報への利用について議論する。宇宙天気予報は、太陽活動静穏時の回帰性現象の予報と、惑星間空間擾乱の予報とについて述べる。

### 2. IPS が観測するもの

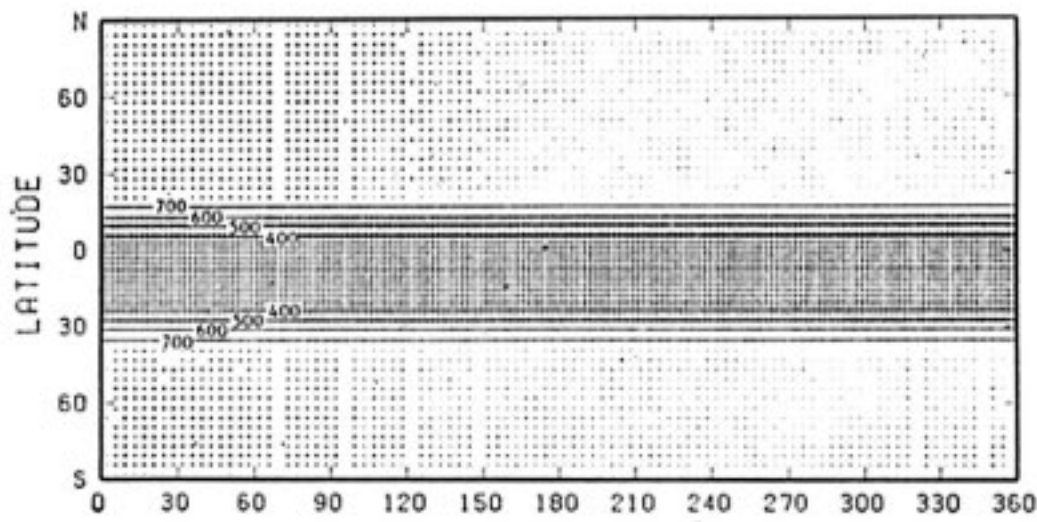
IPSによる太陽風の観測の様子を第1図に示してある。IPSにより観測されるものは、地球-電波源を結ぶ視線に沿って太陽風速度を荷重平均したものである(積分効果)。緯度・経度方向に一様分布する太陽風を仮定した場合には、図に示された荷重関数は、視線上の太陽に最も近い点(P)で最大となるが、荷重関数は長く尾を

引いたものである。このために、太陽風中の細かな構造や、シャープな構造はIPS観測では得られない。また、視線が低速太陽風と高速太陽風の両者の中を通るときは、荷重関数の最大点が高速太陽風中であっても、その速度は高速流の速度を正しく示さず低くバイアスされて観測される。これは、プラズマ密度が高速太陽風に比

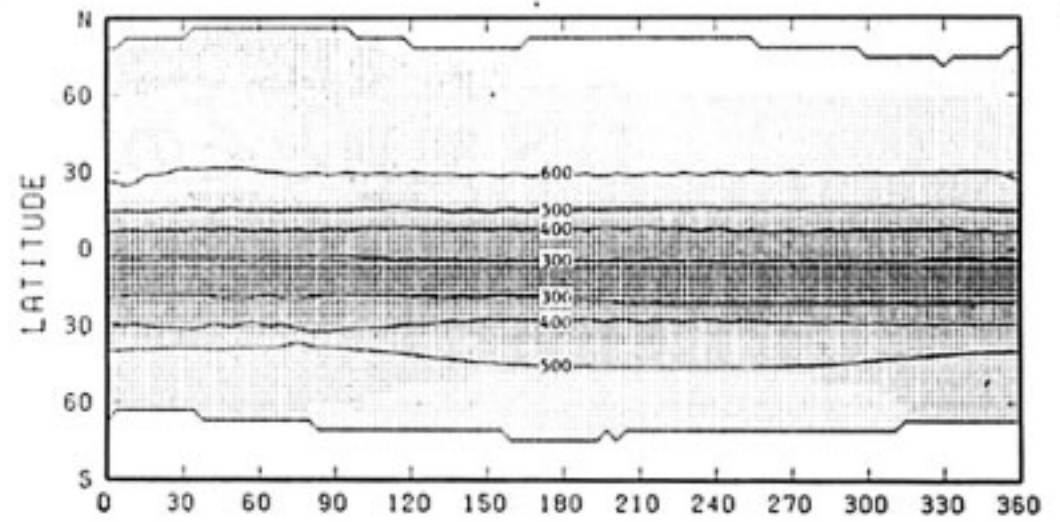


第1図 IPS観測は、視線に沿う太陽風情報を荷重平均する。

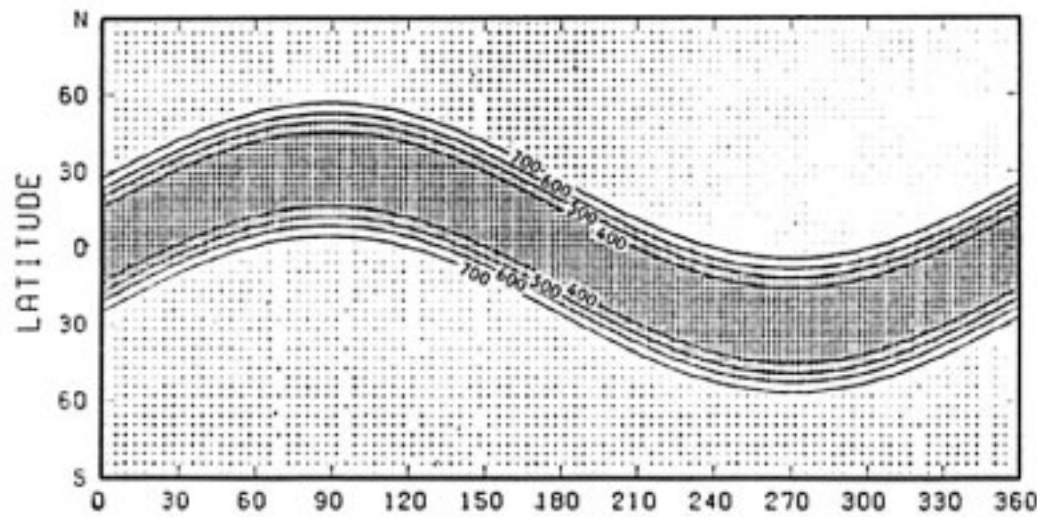
\* 名古屋大学空電研究所  
The Research Institute of Atmospherics,  
Nagoya University



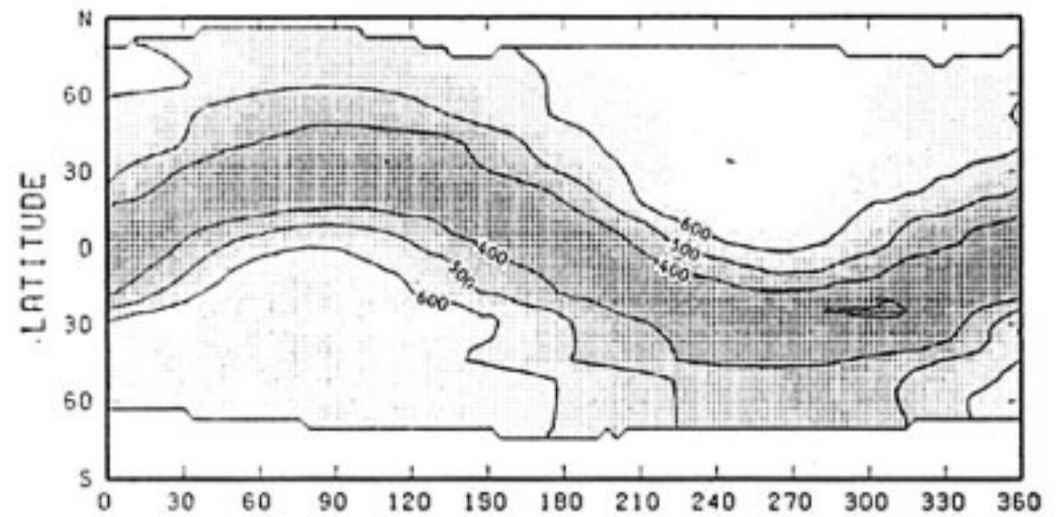
第2図 太陽風流源面における速度分布モデル。



第3図 第2図の太陽風をIPS観測した時に得られる太陽風速度分布。



第4図 太陽風流源面における速度分布モデル。



第5図 第4図の太陽風をIPS観測した時に得られる太陽風速度分布。

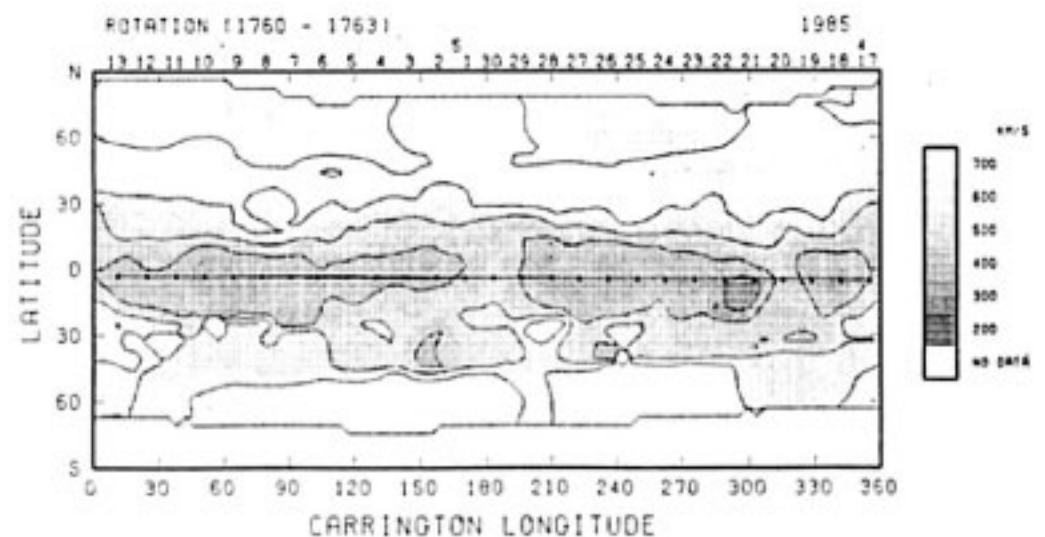
べ、低速太陽風中の方が大きいため、荷重関数が低速太陽風中でも大きな値をとるためである。これらの様子をシミュレーションにより示したのが第2図～第5図である (Kojima and Kakinuma<sup>(1)</sup> より)。第2図 (第4図) のような太陽風構造を仮定し、この太陽風中で実際に観測された電波源の配置でシンチレーションをシミュレートし、その結果を用いて第3図 (第5図) を作った。すなわち、第2図 (第4図) のような太陽風は、シンチレーション観測では第3図 (第5図) のように観測される。第2図と第3図、第4図と第5図の比較により以下のことが分かる。①高速流の速度は100-200 km/s程低く観測される。②低速流の帯 (磁気中性面に相当) の構造 (速度、分布) は大きな変化が無い。③低速流と高速流の境界にあるシャープな速度勾配は、IPSでは観測されない。

シンチレーション観測で得られるパラメータで重要なものは、密度揺らぎの程度 ( $\Delta N_e$ ) と速度  $V$  である。速度の観測には、最低2台のアンテナ系が必要であるが、前者の観測には1アンテナが良い。密度揺らぎ量の観測には、ケンブリッジ大学の3.6ヘクタールアレイアンテナ (81.5 MHz) とインド Physical Research Laboratory (PRL) の同規模のアンテナ (103 MHz) が働いている。速度の観測にはインド PRL の3アンテナ装置と空電研究所の3アンテナ装置 (327 MHz) がある。

### 3. 太陽活動極小期付近での回帰性現象の予報

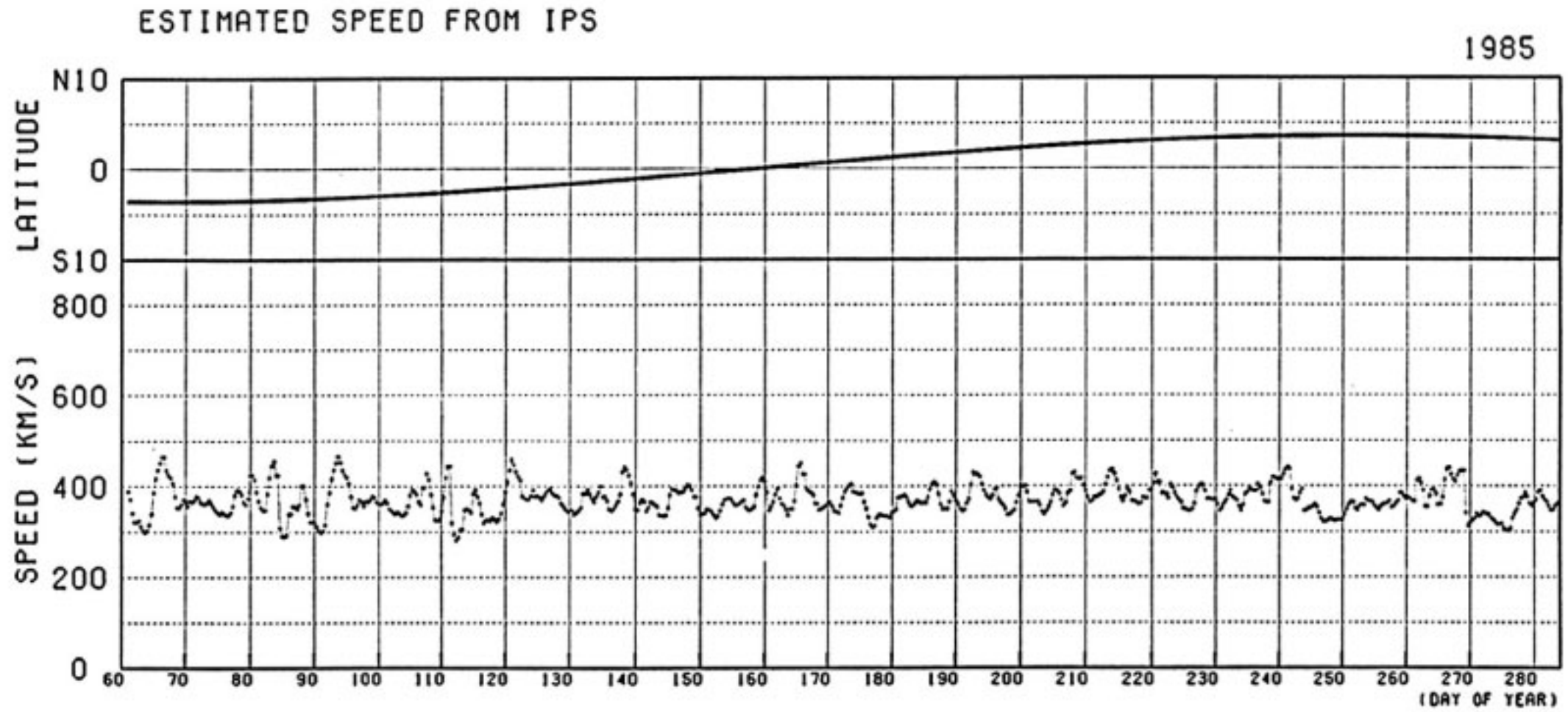
太陽風流源面における太陽風速の分布を第6図に heliographic 座標で表してある。この図は、図の左肩に示されたローテーションの期間に得られた IPS データを用いて作られている。太陽風構造が長期にわたり安定な時、あるいは、短期間に十分な観測が有って短期間の観測からこの図を求めることが出来る時は、この図を用いて予報を行うことができる。

この2次元的速度分布図中において、地球がどこに位置していたかを表したのが図中の黒丸とそれを結ぶ実線である。黒丸の位置は、400 km/s のストリームラインを地球から太陽風流源面へ戻して求めたものである。そして、400 km/s のストリームが地球で観測される日

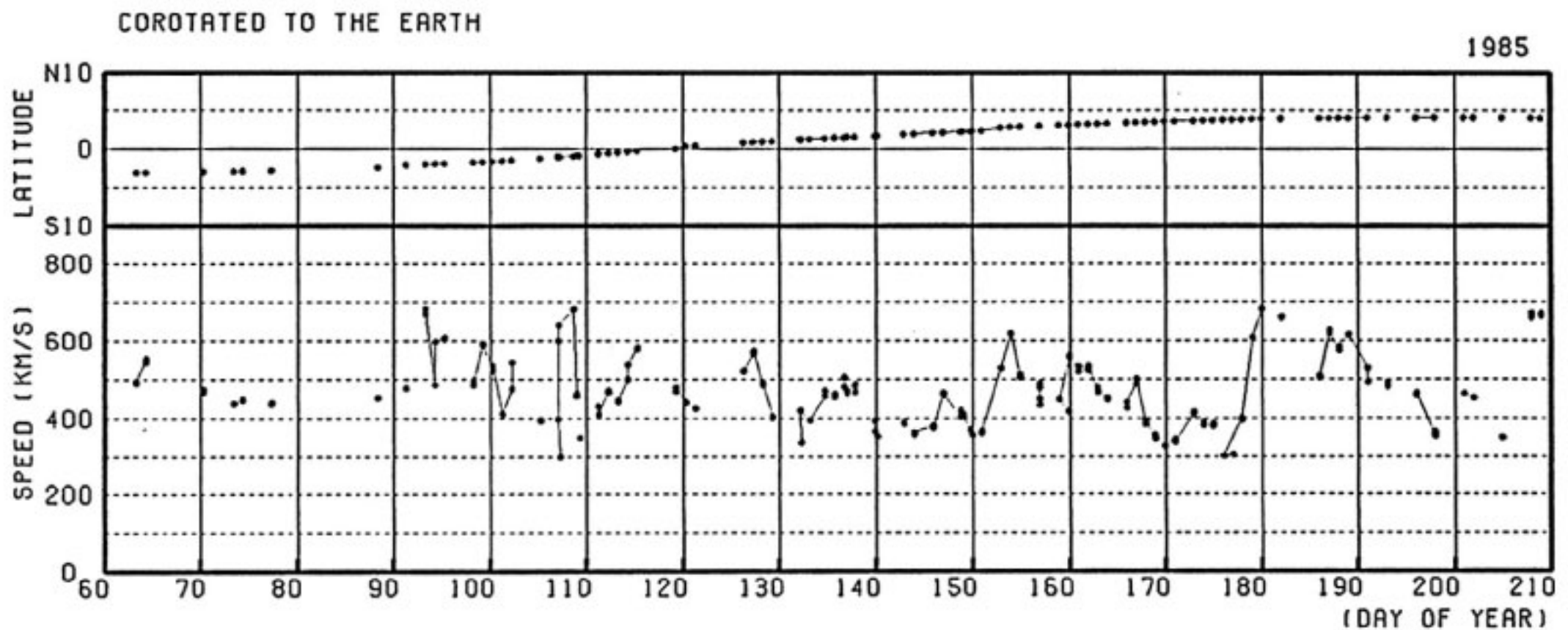


第6図 1985年の太陽風速度分布。





第7図 第6図より予想した地球で観測される太陽風速度.



第8図 「さきがけ」により観測された太陽風速度.

が図の上部に示してある. 従って, 400 km/s と異なる領域に黒丸が位置する場合は, その太陽風が地球で観測される日時は, 図上部に表示した日時と異なる. 回帰性の太陽風は, その構造が一定期間の間安定しているならば, 地球においてこの黒丸を結ぶ実線に沿って観測されて行くはずである. 第7図は, このようにして地球で観測される太陽風速度を予測してプロットしたものである. 太陽風流源面上の太陽風を地球軌道へ持って来る時は, ストリーム・ストリーム相互作用を考慮せねばならないが, ここではそれを無視した. 第8図は「さきがけ」により観測された太陽風速度である. IPSデータの縦軸は, 「さきがけ」データのものよりも拡大して示してある. これは前述した積分効果により高速流の速度が低めに観測され, 速度の日変化が圧縮されて見えるために

「さきがけ」データとの比較をしやすくするためである. 「さきがけ」は, 1985年3月頃は打ち上げ後間もなく, まだ地球近くにあった. 従って3~4月頃は, IPSによる予報速度と良い一致を見せている. しかし, 地球から離れるに従い, 両者の一致が悪くなって来る. これは, 地球と「さきがけ」の Heliographic Latitude の差が無視できなくなって来るためと思われる.

太陽活動が静かな時は, 等速度線は第2図の様に経度方向に平行な分布となる. また, 低速流帯の幅は狭く成り, 高速流との境界はシャープな速度勾配を持つ<sup>(1)~(4)</sup>. このように, 太陽活動が静かな時は, 低速流帯の幅が狭くなっているために, 太陽赤道に対し±7.5度動いたただけでも地球は高速流領域に入ったり出たりすることになる. しかも, この境界での速度勾配が 40-50 km/s/deg

にも成ることがあり、緯度による速度変化は大きい。このように、太陽活動静穏時には、小さな緯度変化が大きな速度差となって観測されるために、太陽風の構造は単純であるにも拘らず予報が難しい。

このような回帰性太陽風構造の予報は、擾乱の伝播するバックグラウンドとなる太陽風構造を知ることでありバックグラウンドを知っていれば、その中で生じる一過性の (transient) 現象を捕らえやすくなる。

4. 惑星間空間擾乱の予報

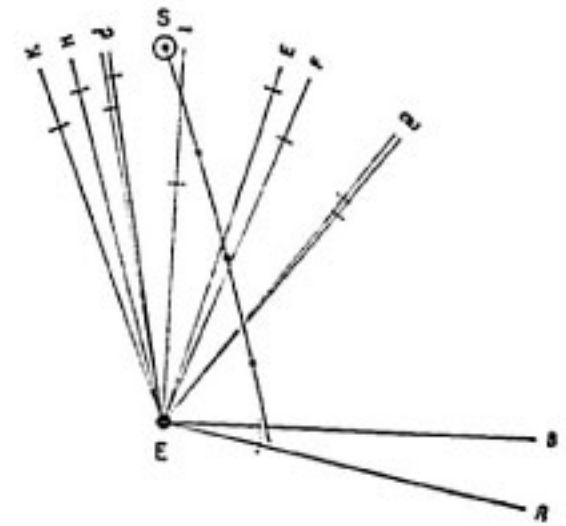
1988年10月3日に S27W16 の辺りでフレアーが発生した。第9図は、その時の IPS 観測の状況 (太陽、地球、そして電波源と地球を結ぶ視線の位置関係) を黄道面に投影したものである。各視線上のマーク線は、視線上の太陽に最も近い点の位置 (第10図中の P 点) を表す。太陽風の三次元分布が球対称な構造をしていると仮定すると、シンチレーション観測で得られる太陽風の情報は、この P 点の辺りのものと考えて良い。電波源リストの名前に続く括弧内の数字は、第10図中の角度  $\theta$  を表す。第11図は、地球から見た時の各電波源の配置である。横軸は黄道面中で計った角度  $\phi$ 、縦軸は  $\beta$  (第10図) である。図の中心は太陽であり、横軸の目盛りは、各電波源が観測された JST で表されている。図中の曲線は、フレアーによる惑星間空間擾乱が、600 km/s の速度で半径 (radial) 方向に伝播して行ったと仮定したときの軌跡であり、24 時間毎の位置が黒丸で示してある。これにより何時頃各電波源への視線を擾乱が横切ったかを推測できる。

第12図のグラフは、太陽風速とシンチレーションインデックス (SCIX) の日変化である。グラフ左肩に電波源の名が示してある。図の上部には、P 点の座標が示されている。緯度は heliographic の緯度である。第9、11図と合わせて見て頂きたい。電波源 3 C 147 は、記号 A で示されており、黄道面の北約30度で、3 C 161 は、黄道面南約30度辺りで観測されている。両電波源ともに、太陽-地球に対し観測された経度位置は、10度程の差しかない。フレア領域から半径方向へ引いた擾乱伝播経路は、両電波源の視線の下を通過している。この擾乱は、年通算日 281 日前後に、両電波源により観測されている。このことは、擾乱が緯度方向に大きく広がっていた事を示している。また、黄道面の北においても観測されていることは、黄道面内に位置する地球にもこの擾乱は影響を及ぼしていたことを示唆する。

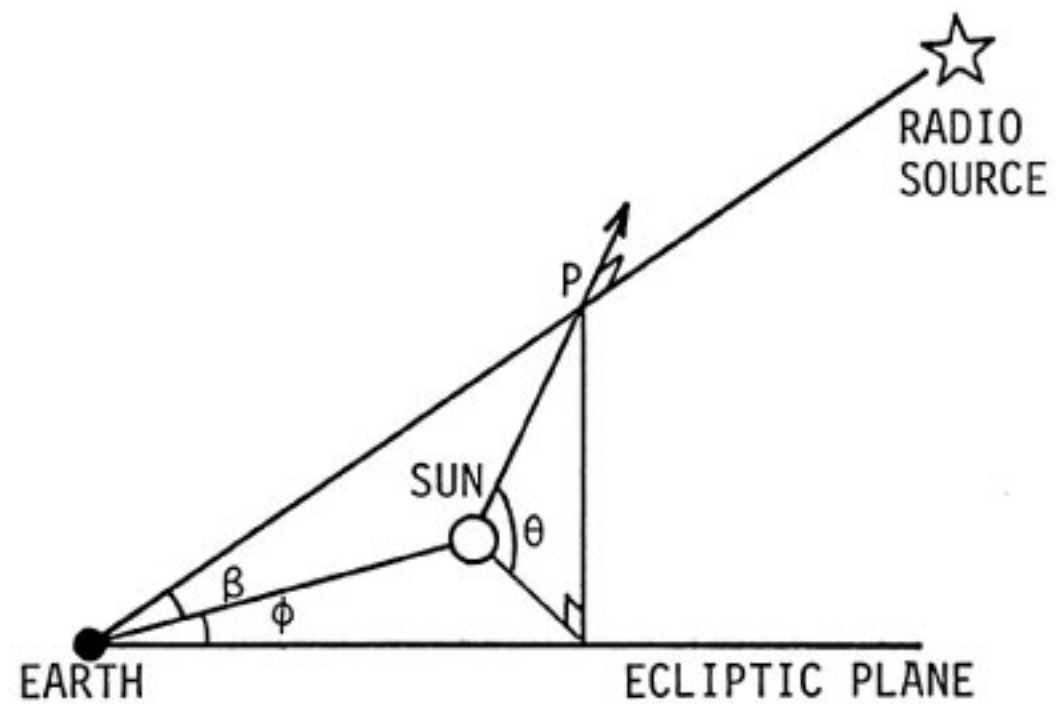
予報においては、擾乱自身の 3 次元的な拡がり方、伝播の方向を予測することは、いつ地球がその擾乱に襲われるのかを知るのに重要である。この予報をする際に、

3 OCT 1988

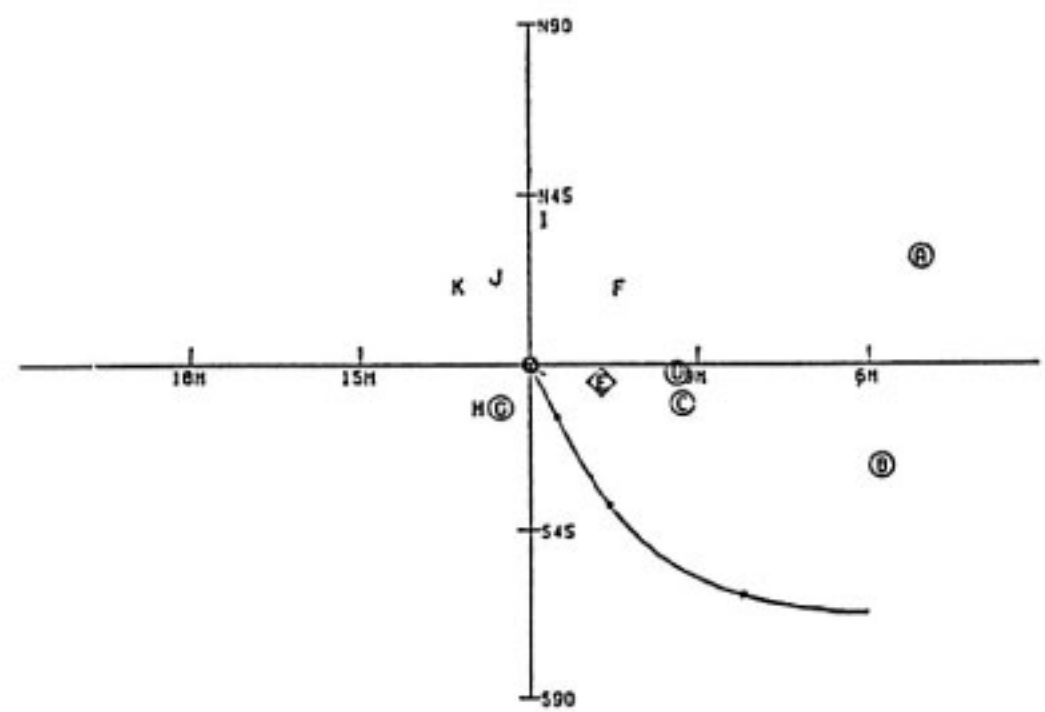
|    |          |       |
|----|----------|-------|
| A: | 3C147    | (+ 6) |
| B: | 3C161    | (- 7) |
| C: | 3C230    | (-13) |
| D: | 3C237    | (- 4) |
| E: | 3C255    | (-18) |
| F: | 3C263.1  | (-34) |
| G: | 3C263.19 | (-54) |
| H: | 1245-19  | (-40) |
| I: | 3C282    | (+52) |
| J: | 3C286    | (+57) |
| K: | 1345-12  | (+57) |
| L: | 3C298    | (+39) |



第9図 1988年10月3日頃の IPS 観測状況 (黄道面への投影)。



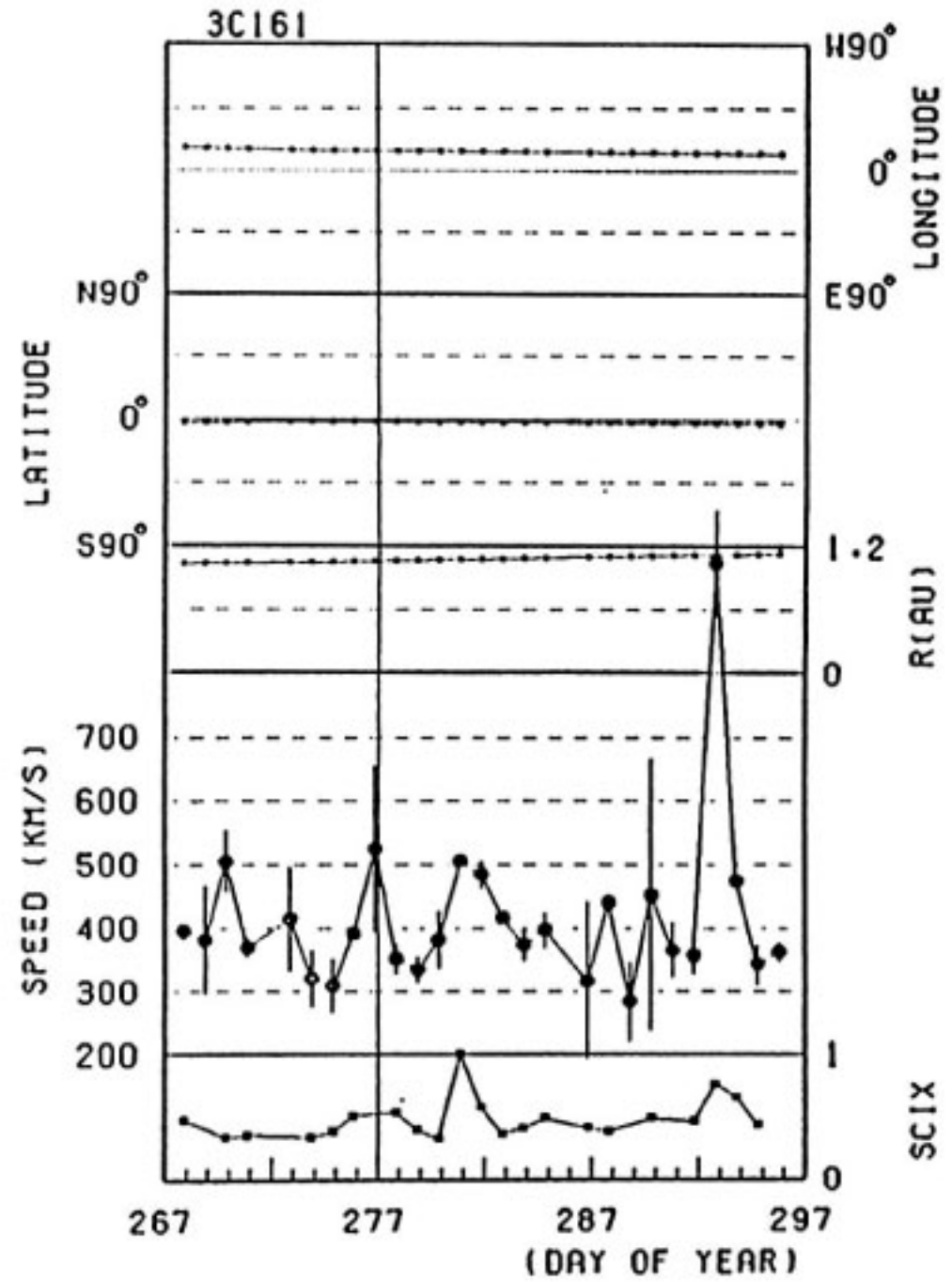
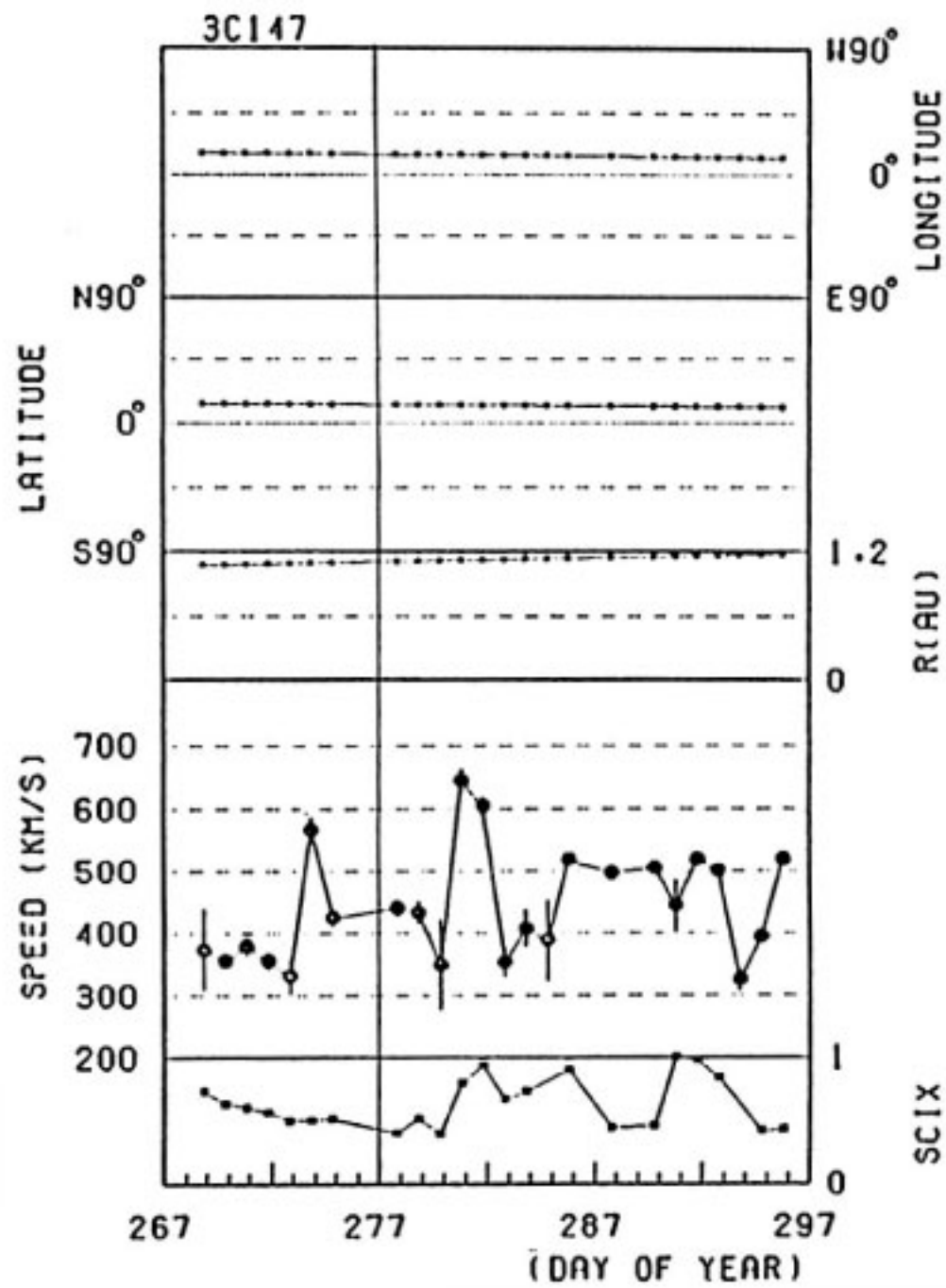
第10図 IPS 観測の幾何学的関係。



第11図 1988年10月3日頃の IPS 観測状況 (地球より見て)。

背景となる太陽風の 3 次元構造を知っておくことも重要である。Watanabe et al.<sup>(5)</sup> は、擾乱の広がり方が、磁気中性面により大きな影響を受ける可能性があることを示した。フレア領域と地球が磁気中性面により隔てられていれば、擾乱の地球への影響は少なくなる可能性が





第12図 太陽風速度とシンチレーションインデックスの日変化.

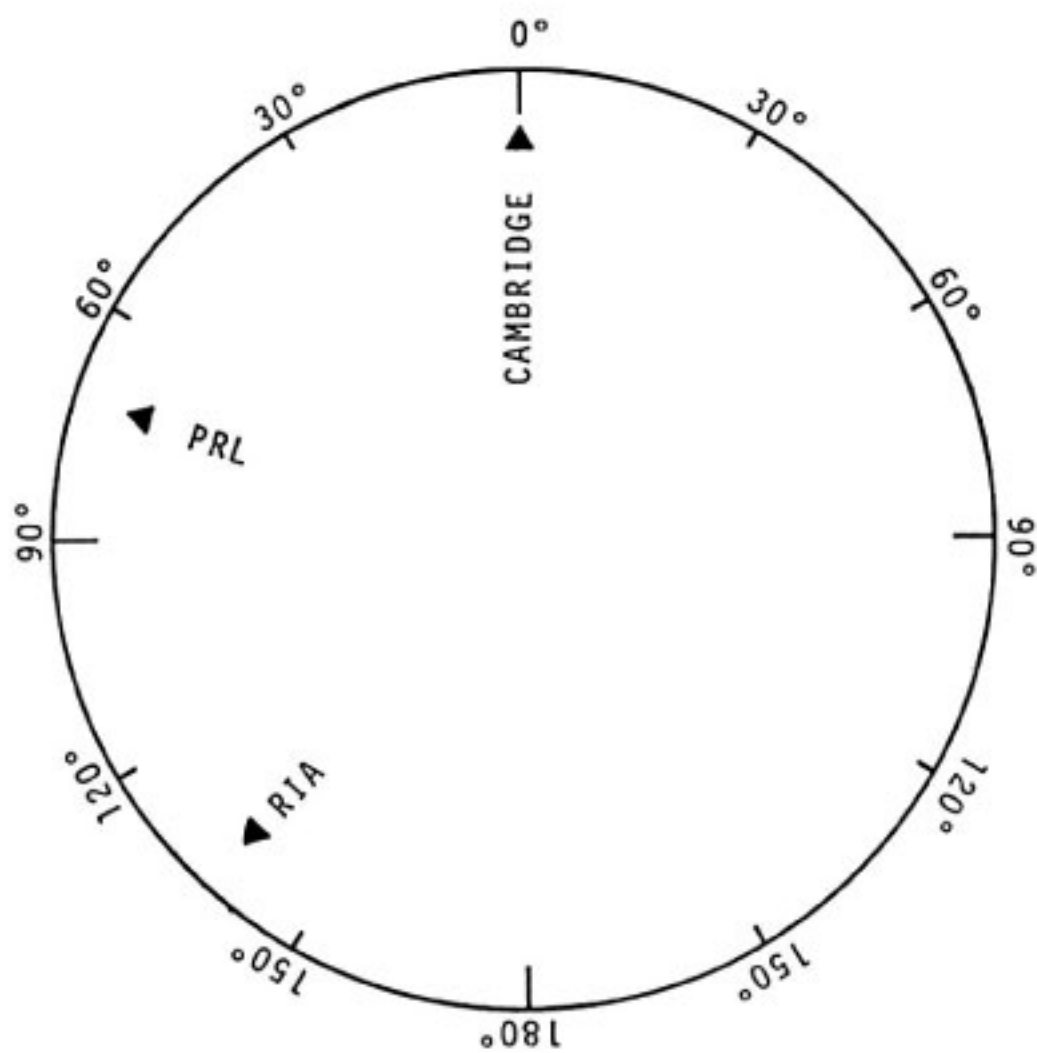
ある.

5. IPS 世界観測網と理論シミュレーションによる太陽風擾乱のモデリング

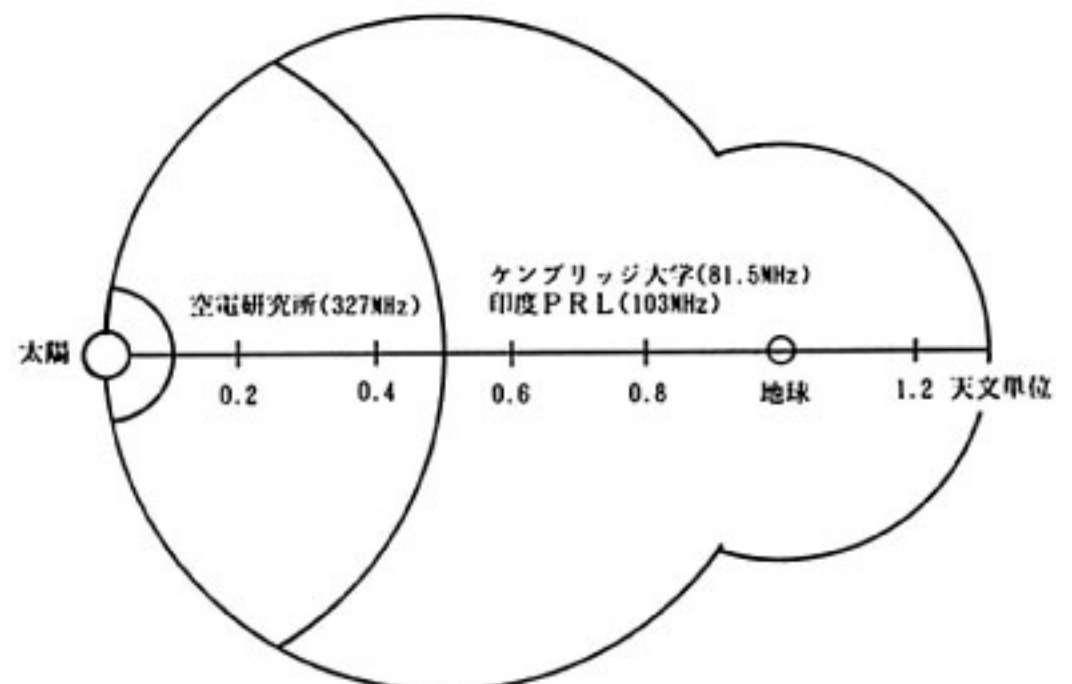
IPS 観測は、太陽風 3 次元構造を捕らえることができるが、それは単一周波数の観測では不可能で、異なる周

波数での観測の協力が必要である。また、24時間連続観測を行うためには、異なる地理経度での観測の国際協力が必要である。現在、この IPS 観測協力体制の建設が進行中である。

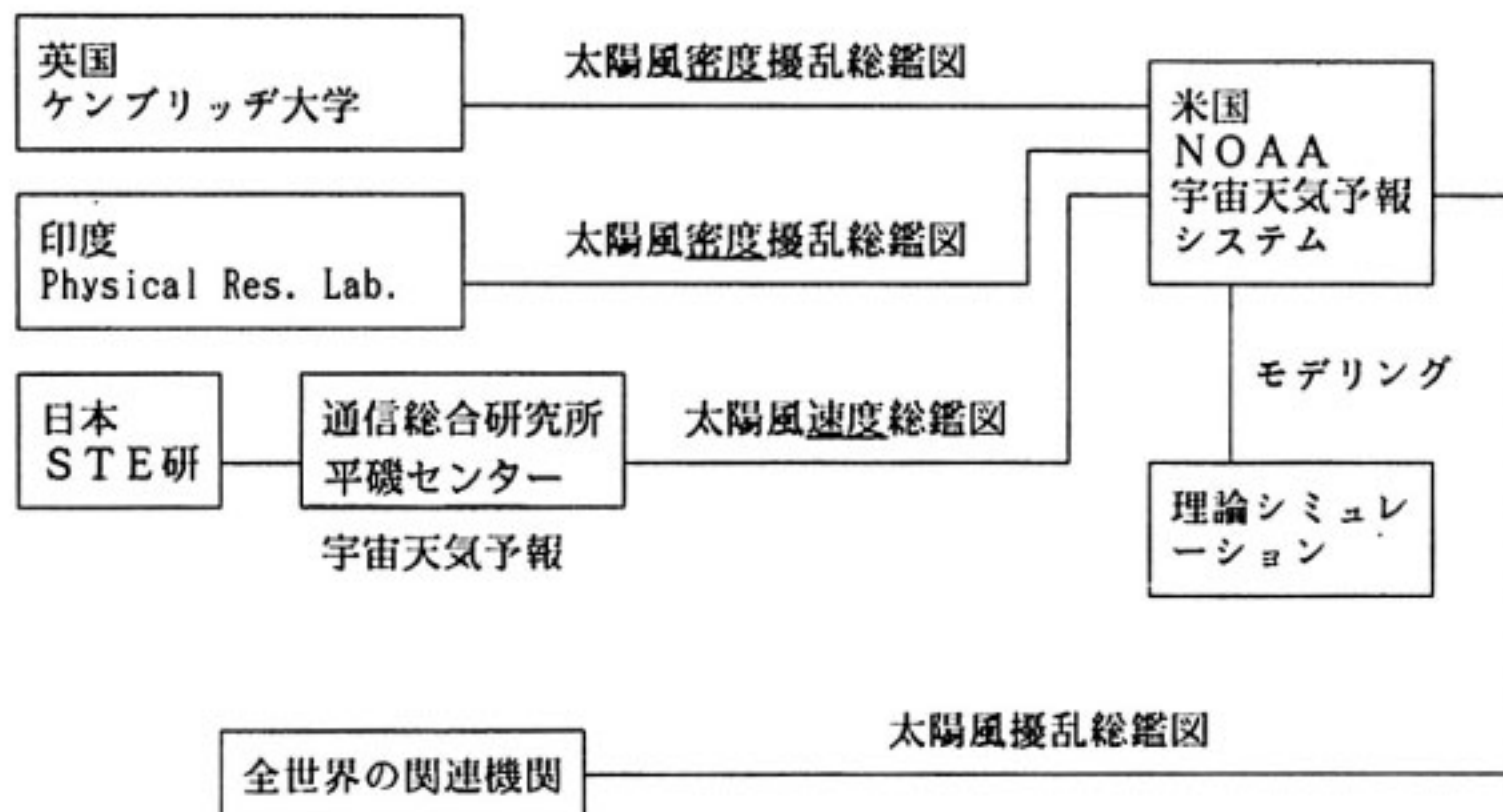
第13図は、STP (太陽地球間物理) 研究を目的とし、ルーチンベースで IPS 観測を行うことができるケンブリッジ大学、インド PRL、空電研究所の経度的な配置である。第14図は、これらの観測機関がカバー出来る惑星間空間の領域を示している。観測機関の配置は東半球に偏っているが、これらの機関の協力で太陽風擾乱を12時間/日ほぼ連続監視でき、そして、0.1 AU から 1 AU



第13図 IPS 観測機関の地理的経度分布.



第14図 IPS 観測のカバーする惑星間空間の領域.



第15図 IPS 世界観測網.

までの広大な領域をカバーできる。

STEP 期間には、これらの IPS グループの協同で惑星間空間衝撃波の伝播を捕らえ、観測データをアメリカの NOAA に集め、そこで宇宙天気図を作る計画が進んでいる (第 15 図)。イギリス、インドによる千個近くの電波源観測から作られる太陽風密度擾乱の分布図に、空電研で得られる速度データが重ねられ、ダイナミックな宇宙天気図が作られる。空電研のデータは、通信総合研究所平磯宇宙環境センターを通して NOAA に送られ、NOAA で完成した天気図は平磯宇宙環境センターを通して国内に配布される計画である。

### 5.1 太陽風密度擾乱総鑑図 (g-map)

g-map は、Gapper et al.<sup>(6)</sup>により考案された太陽風密度擾乱  $\Delta N_e$  の 3 次元分布構造を表す総鑑図である。ケンブリッジ大のアンテナは、その巨大な受信面積で 1 日の内に 900 個以上の電波源を観測することができる。各電波源は、地球とそれら電波源を結ぶ視線をいつ、どの程度の擾乱が通過して行ったかを教えてくれる。すなわち、第 11 図で電波源の総数が 900 個になった場合である。g-map を求めるには、まず、1 年間にわたる観測から各電波源のシンチレーションインデックス ( $\Delta S(\epsilon)$ ) の太陽からの距離依存性を求める (文献(6)の第 1 図)。インデックスは、太陽に近づくと伴い増加するが、やがては飽和し最大値をとる。このシンチレーションインデックスは、電波源の視直径に依存する。このために、全電波源のインデックスが太陽風密度擾乱のみを反映するように、このインデックス最大値を等しくする様に校正係数が求められる。この準備の後に、日々の観測値をこの係数で校正し次式で定義される g 値を求める。

$$g = \Delta S(\epsilon) / \langle \Delta S(\epsilon) \rangle$$

$\epsilon$  は、太陽-地球と地球-電波源のなす elongation 角度である。 $\langle \Delta S(\epsilon) \rangle$  は、同図中に実線で示されたパッ

クグラウンドとなる太陽風によるインデックスである。従って、g 値は、静かな太陽風に対する擾乱の比率である。

1978年12月の観測例が、文献(6)の第 2 図左に示されている。各パネル下中央の黒丸が太陽で、擾乱が太陽から惑星間空間に拡がっていく様子がうかがえる。しかし、この g-map 図からは、前述のように地球-電波源を結ぶ視線上の何処を擾乱が通ったのかは分からない。擾乱の 3 次元構造を求めるには、そのモデル (文献(6)の第 2 図右) を作り、それに対して IPS 観測をシミュレートして (Gapper et al. の第 2 図中央)、観測と比較し、良い一致が得られるようにモデルを改良するイタレーション (逐次近似) を行う。

### 5.2 太陽風速度総鑑図 (V-map)

V-map は、擾乱の伝播速度の空間分布を求めたものである。速度を求めるには複数のアンテナが必要であり、尚且つデータの相関処理が必要であるために、多くの電波源の観測は不可能である。空電研究所の装置で観測出来る電波源は、現在一日当たり 10~20 個程である。観測できる電波源の数は少ないが、g-map に速度情報を加えることによりダイナミックな惑星間空間擾乱の総鑑図を作り上げることができる。

## 6. IPS 観測将来計画

### 6.1 時間・空間分解能の向上

惑星間空間擾乱の伝播のような短時間の現象を捕らえるには、天球上に広く分布する多くの電波源を観測し、時間・空間分解能を上げねばならない。現在空電研究所で稼働している UHF 太陽風観測装置は、太陽活動の減少期に完成し、長期間安定した太陽風の大規模構造の研究に成果を上げて来た。現在太陽活動は、活発になりつつある、1990年には極大期を迎えようとしており、多く



の惑星間空間擾乱の発生が期待される。そこで、現有の UHF 太陽風観測装置の受信能力を上げ、時間・空間分解能の良い惑星間空間擾乱の観測を可能にする計画である。受信能力の向上は、受信機の低雑音化、アンテナ面積の拡張そして電波環境の悪い豊川からのアンテナの移転により行う。

$g$ -map を作成するための観測には、面積が十分に大きくて、同時に複数の電波源が観測でき、そしてビームを瞬時に目的の電波源に向け得るアンテナが必要である。空電研究所の現有する装置は、主に太陽風の速度を求めるように設計されているために、密度擾乱分布の観測には適さない。このために受信面積の大きなアンテナを建造することを計画している。その建設場所としては、シンチレーション観測点の配置が、現在北半球且つ東半球に限られているために完全な太陽風の立体構造の観測と24時間連続監視が出来ないことを考え、西半球の南米に大型のアンテナを作る計画を進めている。

#### 6.2 0.3 AU 以内の観測強化

飛翔体による太陽風の直接観測は、HELIOSにより太陽に0.3 AUまで近づいて行われたが、0.3 AU以内の領域は、未だ直接観測の行われていない未知の領域である。太陽風加速領域を含め、0.3 AU以内の未知の領域における太陽風が当面の重要課題の一つである。太陽風がどのように加速され、太陽風の惑星間空間における速度や密度分布の三次元構造がどのように形成されて行くのか、惑星間空間擾乱が、太陽から地球まで到達する過程で、どのような振る舞い（加速や減速）をするのか、これらの課題はいずれもまだ解明されていない。また、惑星間空間擾乱の三次元構造を捕らえることは、地球嵐の発生機構を明確にするのに重要であるのみでなく、擾乱が伝播過程で、背景の太陽風とどのような相互作用をするのかを研究する上でも重要である。これらの問題は、観測の空白領域である、0.3 AU以内での観測が進めば、かなり解明できるようになると思われる。更に、最近見つかったスローモード・ショック (slow

mode shock) は、アルフヴェーン (Alfven) 速度と熱速度に差のある条件下で成長するので、0.3 AU 以内で観測される機会が多いと期待される。

#### 参 考 文 献

- (1) Kojima, M., and T. Kakinuma, Solar cycle dependence of global distribution of the solar wind speed, *Space Science Rev.*, to be published, 1990.
- (2) Kojima, M., and T. Kakinuma, Solar cycle evolution of solar wind speed structure between 1973 and 1985 observed with the interplanetary scintillation method, *J. Geophys. Res.*, **92**, pp. 7269-7279, 1987.
- (3) Rickett, B. J., and W. A. Coles, Solar cycle evolution of the solar wind in the three dimension, in "Solar Wind Five", NASA Conference Publication 2280, edited by M. Neugebauer, JPL, Pasadena, California, U. S. A., pp. 315-321, 1982.
- (4) Newkirk, Jr. G., and L. A. Fisk, Variation of cosmic rays and solar wind properties with respect to the heliospheric current sheet: 1. Five-Gev protons and solar wind speed, *J. Geophys. Res.*, **90**, pp. 3391-3414, 1985.
- (5) Watanabe, T., T. Kakinuma, and M. Kojima, Radio scintillation observations of interplanetary disturbances in association with solar filament activity, *Proc. International Plasma Workshop, Tokyo*, edited by H. Kikuchi, Springer-Verlag, Berlin, in press, 1989.
- (6) Gapper, G. R., A. Hewish, A. Purvis and P. J. Duffett-Smith, Observing interplanetary disturbances from the ground, *Nature*, **296**, pp. 633-636, 1982.

