

## 4.8 水メーザ電波源とクエーサの惑星間空間シンチレーションを用いた太陽風加速域の探査

徳丸 宗利<sup>\*1</sup> 山内 洋平<sup>\*2</sup> 近藤 哲朗<sup>\*3</sup>

### 4.8 Exploration of Solar Wind Acceleration Region Using Interplanetary Scintillation of Water Vaper Maser Source and Quasars

By

Munetoshi TOKUMARU, Yohei YAMAUCHI, and Tetsuro KONDO

Single-station observations of interplanetary scintillation (IPS) at three microwave frequencies 2, 8, and 22GHz, were carried out between 1989 and 1998 using a large (34-m $\phi$ ) radio telescope at the Kashima Space Research Center of the Communications Research Laboratory. The aim of these observations was to explore the near-sun solar wind, which is the key region for the study of the solar wind acceleration mechanism. Strong quasars, 3C279 and 3C273B, were used for the Kashima IPS observations at 2 and 8GHz, and a water-vapor maser source, IRC20431, was used for the IPS observations at 22GHz. Solar wind speeds derived from Kashima IPS data suggest that the solar wind acceleration takes place at radial distances between 10 and 30 solar radii ( $R_s$ ) from the sun. The properties of the turbulence spectrum (e.g. anisotropy, spectral index, inner scale) inferred from the Kashima data were found to change systematically in the solar wind acceleration region. While the solar wind in the maximum phase appears to be dominated by the slow wind, fast and rarefied winds associated with the coronal holes were found to develop significantly at high latitudes as the solar activity declined. Nevertheless, the Kashima data suggests that the location of the acceleration region is stable throughout the solar cycle.

[キーワード] 太陽風, 惑星間空間シンチレーション, 宇宙プラズマ物理

Solar wind, Interplanetary scintillation, Space plasma physics

#### 1. はじめに

太陽から超音速で吹き出すプラズマ流、太陽風が存在することは、Parkerによる理論的考察<sup>(1)</sup>によって予言され、その後、1960年代初頭に行われた飛翔体による直

接探査<sup>(2)</sup>で確認された。この太陽風の発見は、太陽と地球環境（特に電磁気的環境）をつなぐ新たな道筋を、我々に示したことで意義深い。すなわち、太陽と地球は太陽風という媒体を介して密接に結合した一つのシステムを成し、地球磁気圏で起こる擾乱の原因は太陽活動にあることが明らかとなったのである。太陽-地球結合系の研究は、当初、純粋な科学の観点からだったが、近年、我々の生活が宇宙からの情報サービス（放送、通信、測位な

\*1 名古屋大学 太陽地球環境研究所

\*2 NASA/Marshall Space Flight Center (MSFC)

\*3 鹿島宇宙通信センター 宇宙電波応用研究室

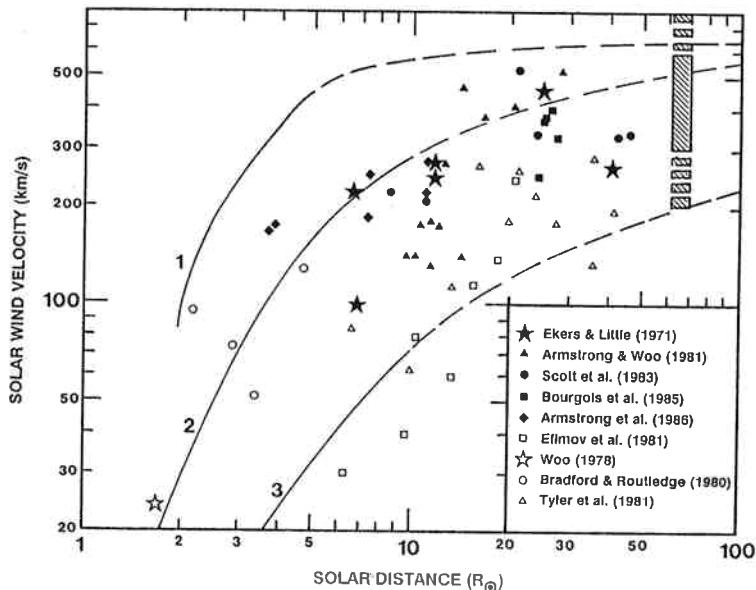
ど)に大きく依存するようになると、太陽活動がこれらに及ぼす影響が無視できなくなり、実用面からも太陽-地球系の研究は関心を集めようになった。ここで、太陽活動がもたらす影響は、宇宙機器の障害、宇宙飛行士の放射線被曝、無線通信への途絶、送電線・海底ケーブルへの異常電流など多岐にわたる。将来、さらなる高度情報化社会の到来を考えると、太陽活動の影響を事前に予報するサービス、「宇宙天気予報」は不可欠であると結論できる。この認識のもと、米国NASAをはじめ多くの機関で目下、宇宙天気予報に関する研究プロジェクトが進行中である。なかでも通信総合研究所が世界に先駆けて1988年から「宇宙天気予報」計画<sup>(3)</sup>を開始したことは特筆に値する。

太陽風の発見から今日まで、様々な研究によって太陽-地球系で起こる物理過程が明らかにされ、その内、いくつかの現象は計算機シミュレーションによって再現できるまでになった。しかしながら、太陽観測データから地球近傍の宇宙環境擾乱の発生を予測することは、現在知りうる最良の知識を用いても実現は難しい。その原因の一つは、我々が未だに太陽風がどこで、如何にして生成されるかについて正確に理解できていないことによる。太陽風が存在することはParkerのモデルによって示されたが、現実の太陽風の特性はそのモデルでは説明できないことが多い。改良された様々な太陽風モデル<sup>(4)</sup>が提唱されてはいるが、未だ決定版と言えるものはないのが現状である。太陽風生成（加速）に関する我々の理解の不完全さは、もっぱら太陽風が生成されている領域の観測

データが乏しいことに起因している。これまでの研究から、太陽風が生成されているのは太陽からの距離が数倍～数10倍の太陽半径( $R_S$ )の範囲にあると推定されている(第1図参照<sup>(5)</sup>)。この領域は未だ飛翔体による直接探査がされておらず、遠隔測定による探査に頼らなくてはならない。太陽表面近くでは広い周波数にわたって放射が観測されるので、この観測から太陽大気の特性や動態を詳細に遠隔探査できる。しかし、太陽風の生成域( $\sim R_S$ ～数 $10R_S$ )では密度が極めて希薄なので、プラズマ自体からの放射はほとんど観測することはできない。この点が、本領域の観測を困難にしている。

唯一、太陽風加速領域の探査に有効とされているのが、マイクロ波帯での惑星間空間シンチレーション(Interplanetary scintillation; 以下、IPS)を用いた観測である<sup>(6,7,8)</sup>。IPSとは、太陽風プラズマ中の密度ゆらぎによって電波が散乱され、それにより波面が互いに干渉して地上で電波強度の変動が見られる現象を指す<sup>(9,10)</sup>。IPSが観測されるには、電波源は見かけの大きさが小さくなければならず(コンパクトであること)、よってIPS観測にはクエーサ(準星)やメーザ電波源などが用いられる。IPSで探査される太陽風の範囲は観測周波数に依存しており、太陽の近傍を観測したければより高い周波数のIPSを観測する必要がある。マイクロ波帯( $\sim \text{GHz}$ )のIPSは数 $R_S$ ～数 $10R_S$ の範囲の太陽風に感度があり、加速域の観測に最適である。

マイクロ波帯IPSを用いた太陽風加速領域の観測は、これまでにいくつか試みられてきたが、得られたデー



第1図 これまでに実施されたマイクロ波帯IPS観測で得られた太陽風速度を重ね合わせて作られた太陽風速度の距離依存性(Birdら<sup>(5)</sup>から引用)。62 $R_S$ のところの縦棒は、最も太陽近くでHelios探査機によって測られた太陽風速度の範囲を示す。図中の実線は、1)コロナグラフ観測データから外挿された太陽風速度の距離変化、2)磁気波動の圧力がある場合の太陽風モデル、3)磁気波動のない場合の太陽風モデルを表す

タ数は少なく太陽風加速機構を決定するのには至っていなかった。マイクロ波帯 IPS データの少なさは、観測に用いることのできる電波源と設備（アンテナ）の少なさから来ている。高周波になるほど天体電波源のフラックスは減少するが、IPS は数秒から 0.1 秒の時間スケールの変動現象なので、長時間積分によって S/N を稼ぐことはできない。必然的に、できるだけ大きなアンテナを用い、観測対象は強い電波源に限られることになる。そして、IPS 観測に適した大きなアンテナは、大半が共同利用施設のため、その利用時間は非常に限られてくる。

我々は、1989 年から 1998 年にかけて、未だ謎となっている太陽風の生成（加速）機構を解明するため通信総合研究所鹿島センターの大型（口径 34m）電波望遠鏡を用いて 3 つのマイクロ波帯周波数（2GHz, 8GHz, 22GHz）での IPS 観測を行った<sup>(1)-(7)</sup>。本報告では、鹿島 IPS 観測の概要とそこから得られた主な成果について述べる。このような大型設備を使って、太陽活動周期（11 年）をカバーするほど長期にわたってマイクロ波帯 IPS 観測を実施した例は極めて稀である。さらに、22GHz は従来の研究で用いられた観測周波数の中で最も高く、 $5R_s$  といった太陽のごく近傍まで探査することができる。このように特色のある観測であったため、鹿島 IPS データは太陽風加速の研究の上で重要なものとなった。観測の実施された期間は丁度、太陽地球系エネルギー国際共同研究（STEP）の期間にあたり、様々なキャンペーン観測が世界各地で実施された。鹿島 IPS 観測は、その一翼をになうものになった<sup>(8)-(23)</sup>。また、本期間には太陽風加速機構の研究にとって重要な 2 つの出来事があった。それは、高緯度太陽風探査機 Ulysses の観測による太陽風 2 成分モデル（高速風と低速風）の確立<sup>(24)</sup>と、マイクロ波帯の長基線 IPS 観測による高速風の急な加速（Rapid acceleration）の発見<sup>(25)</sup>である。このような重要な時期に鹿島 IPS 観測が実施されたことは意義深いことである。

## 2. 観測の概要

第 1 表に鹿島 IPS 観測で用いた電波源のリストを示

す。ここで用いられた電波源（クエーサと水メーザ）は、コンパクトかつ比較的強い電波フラックスを持ち、見かけの位置が太陽に接近する ( $30R_s$  以内) ものである。表に示されたクエーサの中で、実際に有効なデータになったのは、専ら 3C273B と 3C279 の観測であり、他の星のデータは S/N が低く、本解析では用いられなかった。観測周波数は、クエーサの場合、2GHz と 8GHz (1990 年以降は 2 周波同時観測)，水メーザ電波源の場合は 22GHz である。

鹿島 IPS 観測は、1996 年を除く 1989 年～1998 年の間の毎年、クエーサの場合は 9 月下旬から 10 月中旬、水メーザの場合は 12 月下旬に実施された。第 2 表に、鹿島 IPS 観測の実施状況を示す。1992 年と 1993 年は鹿島センターの 34m アンテナが故障のため利用できなかったので、国土地理院所有の鹿島 26m アンテナを用いて観測を継続した。鹿島 26m アンテナは 22GHz を受信できないので、この期間は水メーザの IPS 観測はない。また、1995 年以降、観測に使用していた水メーザ源 IRC20431 が 34m アンテナで受からなくなつたので、22GHz IPS 観測は実施されていない。受からなくなつた原因は定かでないが、水メーザ源の減光または 34m アンテナの 22GHz 受信効率の低下などの可能性が考えられる。第 2 表に示された期間では、原則的に毎日 8 時 JST～16 時 JST 頃まで連続して IPS 観測が実施された。ただし、期間中 VLBI などの実験や保守・修繕作業を優先して実施しているので、その間、IPS 観測は中断している。

鹿島 IPS 観測では、既存のフロントエンド部を用い、IF 信号分配器からの出力を利用して IPS データの収集を行った（34m アンテナの受信システムについては、小山ほか<sup>(26)</sup>を参照）。観測の初年度（1989）年には、IF 出力をスペクトルアナライザに接続し、その検波出力を IPS 観測専用の PC でサンプリングした。1990 年からのクエーサの観測では、専用に開発されたバックエンド装置を用いてデータ収集を行った。IPS 専用バックエンド装置は 2GHz 用と 8GHz 用の合計 2 チャンネルがあり、各チャンネルは利得調整用のプログラマブルアッテ

第 1 表 鹿島 IPS 観測で用いられた電波源

名前	種類	赤経 (B1950)	赤緯 (B1950)	太陽最接近 日付	距離( $R_s$ )
1148-001	QSO	11h48'11"	-00d07'32"	Sep. 20	22
3C273B	QSO	12h26'33"	+02d19'43"	Sep. 28	18
3C279	QSO	12h53'36"	-05d31'08"	Oct. 08	<1
1306-09	QSO	13h06'01"	-09d34'28"	Oct. 13	9
IRC20431	WVM	18h05'03"	-22d13'56"	Dec. 23	5

QSO: Quasar, WVM: Water Vapor ( $H_2O$ ) Maser

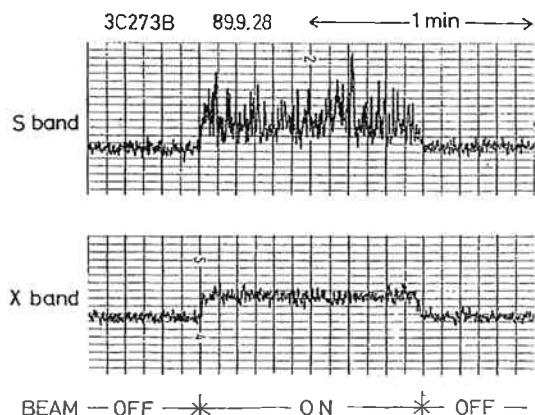
第2表 鹿島IPS観測の実施状況

観測年	期 間	電 波 源	備 考
1989	Sep. 22 - Oct. 16	3C273B, 3C279	
1989	Dec. 21 - Dec. 26	IRC20431	
1990	Sep. 20 - Oct. 19	3C273B, 3C279	専用バックエンド部使用開始
1990	Dec. 21 - Dec. 26	IRC20431	
1991	Sep. 20 - Oct. 20	3C273B, 3C279	受信バンド幅変更 受信機利得の自動制御
1991	Dec. 20 - Dec. 27	IRC20431	
1992	Sep. 22 - Oct. 12	3C273B, 3C279	国土地理院 26m アンテナ使用 サンプリング周期変更
1993	Sep. 21 - Oct. 20	3C273B, 3C279	国土地理院 26m アンテナ使用 連続サンプル数の増加
1994	Sep. 19 - Oct. 17	3C273B, 3C279 1148-001, 1306-09	
1994	Dec. 21 - Dec. 27	IRC20431	Dec. 23 以降, 受信機トラブル のため常温観測
1995	Oct. 3 - Oct. 20	3C273B, 3C279 1306-09	
1997	Oct. 8 - Oct. 19	3C273B, 3C279	
1997	Dec. 22 - Dec. 28	IRC20431	電波源受信不可
1998	Sep. 19 - Oct. 19	3C273B, 3C279 1148-001	

ネータ（1991年より追加）、バンドパスフィルター、増幅器、検波器、ローパスフィルター（カットオフ周波数25Hz）より成っている。バンドパスフィルターの帯域幅は、2GHz用では80MHz（1990年）または40MHz（1991年以降）、8GHz用では190MHz（1990年）または120MHz（1991年以降）である。一方、水メーザの観測は1989年同様、スペクトルアナライザとデータ収集PCを用いて行われた。

IPSデータ収集用のPCは、2チャネル同時サンプリングが可能で（但し、1989年は1チャネルのみ）、プログラムされた時間に自動的にデータ収集を行うことができる。このデータ収集PCは、バックエンド部のプログラマブルアッテネータも制御できる。サンプリングの分解能は12bit、周期は20ミリ秒（1991年まで）または12ミリ秒（1992年以降）である。また、連続サンプリング数は1チャネル当たり30000点（1993年まで）または41000点（1994年以降）である。取得したデータは光磁気ディスクにセーブされた後、ワークステーション上で解析された。

第2図に、鹿島34mアンテナで観測されたクエーサ3C273Bの受信強度データを示す。周波数は2GHz（S band）と8GHz（X band）である。この図では、約1分間隔でアンテナビームを電波源に向けたり（On-source）、外したり（Off-source）を繰り返している。



第2図 鹿島34mアンテナで受信された3C273Bの強度変動。上側が2GHz（S band）、下側が8GHz（X band）に対応する。アンテナビームを電波源に向けると（On-source）、受信レベルの上昇とともにIPSによる強度変動が見られる

On-sourceのところで激しく強度変動が見られるが、それがIPSである。実際の観測では、1つの電波源に対して15分間隔でOn-sourceとOff-sourceを繰り返し、それぞれのデータを取得した。Off-source観測でビームを外す方向は東西で、かつ電波源に対して太陽と反対方向にいたった。Off-sourceの大きさは、クエーサの場合、30'、水メーザの場合、5'とした。Off-sourceのデー

タは、バックグラウンド成分による強度変動を評価するのに使われた。

### 3. 解析方法

IPS観測で太陽風速度を推定する場合、多地点観測データから相互相関処理により時間差を求め、それを速度に換算する方法がとられる<sup>(27, 28)</sup>。ところが鹿島IPS実験では、観測局は1つなので、相互相関法は用いることはできない。そこで、鹿島IPS実験では、スペクトルフィッティング法<sup>(29)</sup>やコスペクトル法<sup>(30)</sup>を用いて太陽風速度の推定を行った。また、スペクトルフィッティング法からは太陽風速度のみならず、太陽風密度ゆらぎの空間スペクトルに関する情報が抽出された。さらに、取得したデータからシンチレーション指数<sup>(29)</sup>を求め、太陽風密度ゆらぎの分布に関する解析も行われた。ここでは、これらの解析方法の概要を述べる。

#### 3.1 スペクトルフィッティング法

太陽風プラズマの密度ゆらぎによる電波の散乱が弱く(weak scattering;  $\Delta\phi^2 < 1\text{rad.}$ )、多重散乱(Multiple scattering)の効果が無視できる場合(Born近似)、IPSのパワースペクトラム  $P(f)$  は次式で表される<sup>(31)</sup>。

$$P(f) = \int_0^\infty P'(f, z) dz \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\begin{aligned} P'(f, z) dz &= 2\pi\lambda r_e \int_0^\infty \frac{p(V_\perp)}{|V_\perp|} dV_\perp \int_{-\infty}^\infty \Phi_{ne}(k_x = \frac{2\pi f}{V_\perp}, k_y, z) \\ &\quad \times F_{diff}(k_x, k_y, k_z) F_{source}(\vec{k}) F_{receiver}(\vec{k}) dk_y dz, \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\vec{k} = (k_x, k_y, k_z = 0)$  は空間波数ベクトル、 $z$  は視線方向の距離、 $\lambda$  は観測波長、 $r_e$  は古典的電子半径( $= 2.8 \times 10^{-13}\text{cm}$ )、 $V_\perp$  は視線に垂直な面に投影した太陽風速度、 $p(v)$  は太陽風速度の分布関数(流れに平行な成分)である。IPSによる強度変化の周波数  $f$  は、 $f = V_\perp k_x / 2\pi$  で与えられる。モデル計算によるとパワースペクトルの形状は、 $p(v)$  に対して鈍感であることがわかる。よって、以下で述べるスペクトルフィッティング法による解析では、太陽風速度のばらつきを無視し、一様な流れを仮定した; $p(v) = \delta(v = V_\perp)$ 。

(2)式中、 $F_{diff}$  はフレネルフィルターの項であり、次式で与えられる。

$$F_{diff} = 4 \sin^2 \left( \frac{k^2 \lambda z}{4\pi} \right) \quad \dots \dots \dots (3)$$

この項は  $k_f = (4\pi/\lambda z)^{1/2}$  以下の空間波数をカットする特性を持っている。また、 $F_{source}$  と  $F_{receiver}$  は、それぞれ電波源の見かけの大きさによる効果と受信機のバンド幅による効果に対応し、次式で与えられる。

$$F_{source}(\vec{k}) = \exp(-k^2/k_s^2) \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$F_{receiver}(\vec{k}) = \exp(-k^2/k_r^2) \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで  $k_s = 1/z\theta_0$ 、 $k_r = k_f(\Delta\lambda/\lambda)^{1/2}$ 、 $\theta_0$ 、 $\Delta\lambda$  はそれぞれ電波源の視直径と受信機のバンド幅(波長)に対応する。これらの式からわかるように、 $F_{source}$ 、 $F_{receiver}$  は空間波数の大きな成分をカットする特性を持っている。

$\Phi_{ne}$  は太陽風(電子)密度ゆらぎの空間スペクトルであり、これまでの観測から次式でよく記述できることが知られている<sup>(32)</sup>。

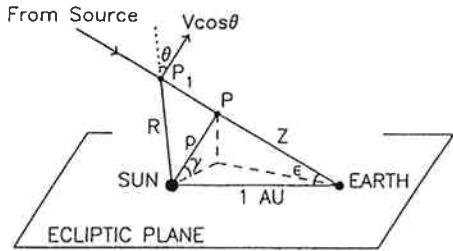
$$\Phi_{ne}(\vec{k}) = \Delta N_e^2 (k_x^2 + (k_y/AR)^2)^{-\alpha/2} \exp(-k^2/k_i^2) \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 $\Delta N_e$  は太陽風(電子)密度ゆらぎの大きさ、 $\alpha$  は空間スペクトルのパワー指数、 $AR$  は密度ゆらぎの異方性の軸比、 $k_i$  は密度ゆらぎスペクトルの Inner scale に対応した空間波数である。Inner scale の効果は、電波源の見かけの大きさの効果や受信機のバンド幅の効果と同じく、高周波の波数をカットするフィルターとして働くので、次式で与えられる等価カットオフ波数  $k_{eq}$  を用いて、これら3つの効果を表現することができる。

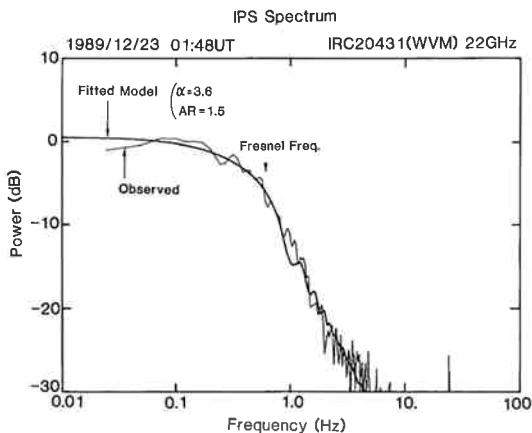
$$1/k_{eq}^2 = 1/k_s^2 + 1/k_r^2 + 1/k_i^2 \quad \dots \dots \dots (7)$$

以上のことからわかるように、IPSのパワースペクトル  $P(f)$  は太陽風速度や密度ゆらぎの空間スペクトルと密接に関係している。したがって、(1)、(2)式から計算される  $P(f)$  を観測されたスペクトルに最適化することで、太陽風速度や密度ゆらぎの空間スペクトルが推定できる。これが、スペクトルフィッティング法の原理である<sup>(29)</sup>。(1)、(2)式では太陽風による散乱が弱いことが仮定されていたが、太陽に近づくにつれ密度ゆらぎが増大し、電波の散乱も大きくなっている。ついにはこの弱い散乱の仮定が成り立たなくなる。そこが、スペクトルフィッティング法の適用限界を与える。適用限界の距離は、2GHzの場合、約  $10R_S$ 、8GHzの場合、約  $4R_S$ 、22GHzの場合、約  $1.7R_S$  に相当することが今までの研究から知られている。実際の観測では電波源はそこまで近づかないことが多いので、その場合は電波源の最接近距離がIPSで観測可能な最小距離を与える。

(1)式からわかるように、 $P(f)$  は視線に沿った積分であるので、モデル計算を実行するには、太陽風の3次元構造を予め知っておく必要がある。たくさんの電波源を用いた観測であれば、計算機トモグラフィー法の手法を応用してモデルを観測に最適化することで太陽風3次元構造も同時に推定可能である<sup>(33)</sup>。しかし、鹿島IPS実験では1日に数個の星しか観測しないので、計算機トモグラフィー法の応用はできない。そこで、鹿島IPS実験のデータ解析では、視線上で太陽に最も近い点(P点)の寄与が地上で観測されたIPSの大部分を占めると仮



第3図 IPS観測における視線の位置関係

第4図 鹿島34mアンテナで観測された22GHzのIPSパワースペクトルの例<sup>(10)</sup>。1989年の水メーヴ源IRC20431の観測から得られたもの。太い実線は、観測に最適化したモデル計算の結果を示す。

定して、解析を行っている（P点近似、第3図参照）。(6)式から  $\Phi_{ne}$  の大きさは太陽風密度ゆらぎ  $\Delta N_e^2$  に比例しており、等方的な太陽風構造を仮定した場合、 $\Delta N_e \propto R^{-2}$  ( $R$  は太陽からの距離) なので、結局、 $P'(f, z)$  の大きさは  $R^{-4}$  に比例することになる。このことから、IPSの視線積分において  $R$  が最小のP点の寄与が最も大きくなることがわかる。P点近似を使った場合、 $P(f)$  は次式で与えられる。

$$P(f) = P'(f, z = Z) \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 $Z$  は P 点から地球までの距離である。P 点において視線に垂直な面は、太陽風の動径方向と一致し、太陽風は流源面 ( $2.5R_s$ ) 以遠では概ね動径方向に沿って流れていると考えられるので、P 点近似の下では  $V_\perp$  は太陽風の真の速度  $V$  と一致するようになる。上式を使って計算した IPS のパワースペクトルを観測されたスペクトルに最適化した例（1989年、水メーヴ電波源 IRC203431 の観測）を、第4図に示す。この場合では、太陽風速度のみ自由パラメータにとり、その他のパラメータは固定にした。図からわかるように観測されたパワースペクトルはモデル計算とよく一致し、この解析からは太陽風速度  $33\text{km/s}$  (P 点の距離は  $5R_s$ ) が推定される。

### 3.2 コスペクトル法

スペクトルフィッティング法を使うと、原理的に1周1周波数のIPSデータから太陽風速度をはじめ様々な太陽風データが推定可能である。しかしながら、実際に取得されたIPSデータから推定できる太陽風パラメータはノイズの影響で限られており、精度よい推定値を得ようとすれば非常に優れたS/N（例えば30dB以上）が要求される。また、太陽風パラメータの内でいくつかは、パワースペクトル上で互いに分離が困難なものがあり、その例が太陽風速度と密度ゆらぎの軸比の効果である。特に密度ゆらぎの異方性が大きい場合、速度の推定結果の一意性は疑わしくなってくる。このスペクトルフィッティング法の欠点を補うため、我々は2GHzと8GHzでの2周波同時IPSデータから太陽風速度を推定する方法（コスペクトル法）を用いて解析を行った。コスペクトル法は最初、Scottら<sup>(30)</sup>によって提案され、UHF帯の3周波同時IPSデータの解析に応用され有効性が示された。しかしその後、コスペクトル法の応用例はなかった。コスペクトル法は比較的S/Nの低いIPSデータであっても、太陽風の異方性の影響を受けずに太陽風速度が求めることができる利点がある。

コスペクトル法では、2周波同時IPSデータから次式によって規格化された相関スペクトル（Normalized co-spectrum） $NCS(f)$  を計算する。

$$NCS(f) = \frac{R_e(S_{12}(f))}{\sqrt{P_1(f) \cdot P_2(f)}} \quad \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 $R_e(S_{12}(f))$  は2周波の相関スペクトル  $S_{12}(f)$  の実数部、 $P_1(f)$  と  $P_2(f)$  はそれぞれ2つの周波数のパワースペクトルに相当する。前節で用いた弱散乱の仮定およびBorn近似（多重散乱を無視する）、P点近似（ $z = Z$  のみの寄与を考える）を用いると、 $S_{12}(f)$  は次式のように書ける。

$$S_{12}(f) = \pi r_e^2 \lambda_1 \lambda_2 \int_0^\infty \frac{2\pi}{V_\perp} p(v) dv \quad \dots \dots \dots (10)$$

$$\int_{-\infty}^\infty \Phi_{ne}(\vec{k}) \sin\left(\frac{k^2 \lambda_1 Z}{4\pi}\right) \sin\left(\frac{k^2 \lambda_2 Z}{4\pi}\right) \dots \dots \dots (10)$$

$$\times F_{source}(\vec{k}) F_{receiver}(\vec{k}) dk_y$$

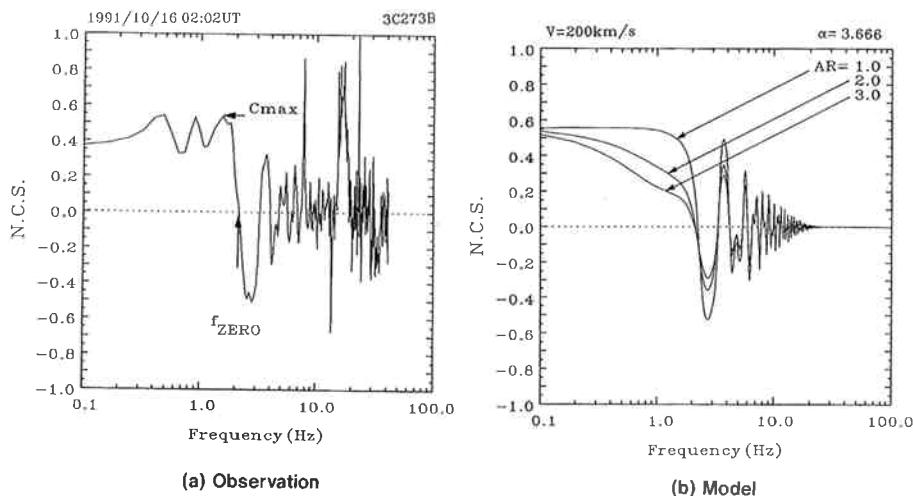
ここで、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  は、2つの周波数に対応する波長を表す。第5図に、(10)式で計算された  $NCS(f)$  と観測で得られた  $NCS(f)$  を示すが、両者の特徴はよく一致していることがわかる。 $NCS(f)$  は低周波で正の値を示し、高周波では正負の値をとって正弦的に変化する。ここで、最初にゼロを横切る周波数を  $f_{ZERO}$  とすると、 $f_{ZERO}$  は次式によって太陽風速度  $V$  と関連づけられる。

$$V = K f_{ZERO} \sqrt{\lambda_1 Z} \quad \dots \dots \dots (11)$$

ここで、 $\lambda_1$ は低い方の観測周波数（本研究では2GHz）に対応した波長、 $K$ は補正係数を示す。鹿島IPS観測において(11)式が適用可能な距離範囲は2GHzで弱い散乱の仮定が成り立つ領域に限られ、太陽からの距離が約 $10R_S$ までである。それ以内のデータは、コスペクトル法での解析には用いられなかった。

ここで注目すべきは、密度異方性や空間スペクトル指数などの太陽風パラメータが大きく変化した場合でも、補正係数 $K$ の値はほとんど変化がないことである。第3表に、様々な太陽風パラメータに対する補正係数 $K$ の依存性を示す。 $AR$ 、 $\alpha$ 、 $k_{eq}/k_F$ を変化させても、 $K$ は

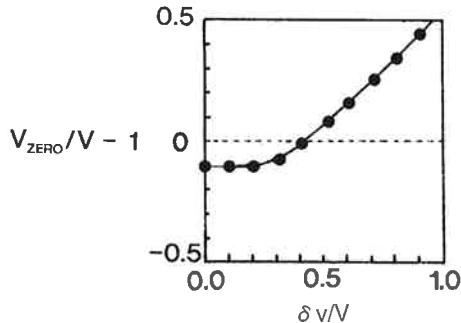
ほぼ1.1～1.2である。ただ例外なのは、ランダム速度 $\delta v$ （流れに平行な成分）が増大した場合であり、表から $\delta v$ が大きくなると、それに比例して $K$ は変化することがわかる。ここで、 $p(v)$ はガウス型の分布をしていると仮定した。逆に言うと、大きなランダム速度がある場合、 $K$ を一定値として(11)式を使って求めた速度 $V_{ZERO}$ は真の太陽風速度 $V$ と大きく食い違うことになる。この誤差のランダム速度依存性を示したのが、第6図である（図の場合 $K=1$ とした）。ランダム速度が太陽風速度の約30%以内ならば、 $V_{ZERO}$ は真の速度 $V$ に対し、10%程度低めになるが、ランダム速度が増加するにつれ、



第5図 (a). 鹿島IPS観測で得られた規格化されたコスペクトル $NCS(f)$ の例、(b). 軸比 $AR = 1.0, 2.0, 3.0$ の場合のモデル計算の結果。観測周波数は、2GHzと8GHz

第3表 様々な太陽風パラメータに対する $K$ の値。ここで、P点近似を用いた

軸比 $AR$	スペクトル指数 $\alpha$	等価カットオフ波数 $k_{eq}/k_F$	ランダム速度 $\delta v/V$	$K$
1.0	3.6	100	0.0	1.12
1.5	3.6	100	0.0	1.15
2.0	3.6	100	0.0	1.17
3.0	3.6	100	0.0	1.19
5.0	3.6	100	0.0	1.20
10.0	3.6	100	0.0	1.21
1.0	2.0	100	0.0	1.15
1.0	3.0	100	0.0	1.13
1.0	4.0	100	0.0	1.11
1.0	3.6	20	0.0	1.12
1.0	3.6	10	0.0	1.12
1.0	3.6	5	0.0	1.11
1.0	3.6	100	0.1	1.12
1.0	3.6	100	0.3	1.07
1.0	3.6	100	0.4	1.00
1.0	3.6	100	0.5	0.93
1.0	3.6	100	0.8	0.74



第6図 太陽風のランダム速度（流れに平行成分）が増加の割合  $\delta v/\Delta V$ （横軸）とコスペクトル法によって測定された太陽風速度と真の速度の違い（縦軸）。ここで、 $K = 1$  とし、縦軸は速度誤差を真の速度に対する割合で示す

$V_{ZERO}$  は真の速度より高くなり、90%程度のランダム速度がある場合、 $V_{ZERO}$  は真の速度の約1.5倍にもなる。

本研究では、ランダム速度の効果は小さいと仮定し、 $K = 1$  または  $K = 1.25$  として、(11)式から太陽風速度を求めた。例えば、 $K = 1$  の時、ランダム速度が太陽風速度の50%程度以内なら、(11)式から求めた速度  $V_{ZERO}$  は真の速度  $V$  の±10%以内に収まることが表からわかる。但し、これは視線積分の効果を無視し、P点での寄与ばかりを考えた場合（P点近似）である。実際には視線積分の効果によって  $K = 1$  を使った太陽風速度は真の値より低めになるので、その効果を考慮すると  $K = 1.25$  が適当であることがモデル計算から確かめられている（4.1節参照）。

### 3.3 シンチレーション指数

シンチレーション指数  $m$  はシンチレーション現象の大きさを表し、次式で定義される<sup>(34)</sup>。

$$m = \frac{\Delta I}{I} \quad \dots \dots \dots (12)$$

ここで、 $\Delta I$  は電波源の強度ゆらぎの大きさ、 $I$  は電波源の平均強度である。 $m$  は、次式によって 3.1 節で述べた IPS パワースペクトラムと結びつけることができる。

$$m^2 = \frac{\int_0^\infty P(f) df}{I^2} \quad \dots \dots \dots (13)$$

また、 $m$  は弱散乱の仮定の下で太陽風密度ゆらぎの大きさ  $\Delta N_e$  と次式によって関連付けられる<sup>(35)</sup>。

$$m^2 \propto \lambda^2 \int \Delta N_e^2 dz \sim \lambda^2 (\Delta N_e)^2 L \quad \dots \dots \dots (14)$$

ここで、 $L$  は電波散乱を生じる層の厚さである。等方的な太陽風構造を考えると  $L \sim R$ 、 $\Delta N_e \propto R^{-2}$  なので、(14)式から  $m \propto R^{-1.5}$  であることが予想される。

鹿島 IPS 観測では、取得した IPS データから(12)式

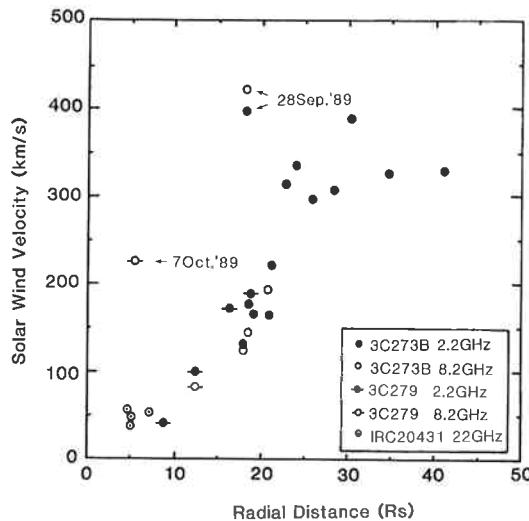
を用いて  $m$  を計算し、そのデータを用いて太陽風密度ゆらぎの分布について研究を行った。(14)式は弱い散乱を仮定しているので、スペクトルフィッティング法同様の適用限界がある。本研究では(14)式が適用可能な範囲、即ち 2GHz では  $> 10R_s$ 、8GHz では  $> 4R_s$ 、22GHz では  $> 1.7R_s$  の  $m$  データのみ解析に用いた。

## 4. 観測結果

### 4.1 スペクトルフィッティング法による速度測定－1989年の観測結果

1989年に取得した鹿島 IPS データを用いて、スペクトルフィッティング法を用い太陽風速度の推定を行った<sup>(36)</sup>。この解析では、太陽風速度のみを自由パラメータとしてモデルの最適化を行った。最適化にあたり、 $AR = 1.5$ 、 $\alpha = 11/3$  (Kolmogorov 値)、 $\Delta N_e$  は観測値に合うよう適宜調整し、 $k_{eq}$  の効果は無視した。その結果得られた太陽風速度の距離依存性を第7図に示す。ここで用いる距離は、太陽中心から P 点までの距離である（以下の解析でも同じ）。図には、太陽風が  $10R_s$  から  $30R_s$  の範囲で加速してゆく様子が明瞭に示されている。この観測がなされた時期は太陽極大期にあたり、太陽風は等方的な構造をしていたと考えられる<sup>(37), (46)</sup>。よって、これらの観測データが太陽面上の異なる緯度・経度で取得されたものであっても、それによる効果は無視できると考えらる。このことから図で見られる太陽風速度の変化は、真の太陽風加速を反映したものと結論できる。そして、最終速度が約 400km/s なので、このデータは低速風の加速に対応していると考えられる。図中、2つの日のデータ (28 Sep. と 7 Oct.) が、全体の加速プロファイルから大きく外れて高い速度を示しているが、これらは太陽面で生じた爆発現象に伴う過渡的な高速風<sup>(38)</sup>をとらえたものと推定される。この図を第1図と比べると、鹿島 IPS データの方がばらつきが小さく加速プロファイルをより鮮明に示していることがわかる。このことは、第1図が太陽活動の様々な時期に取得したデータを組み合わせたものであるのに対し、第7図は比較的短い期間の観測データから作られていることによる。

本解析で得られた太陽風速度データの信頼性を評価するため、名古屋大学太陽地球環境研究所（以下、STE 研）の多地点 IPS 観測結果<sup>(37)</sup>と比較を行った。STE 研の IPS 観測は、327MHz の周波数を用い相互相関法で太陽風速度の推定を行っている。STE 研が 1989 年に取得した 3C273B に対する IPS データのうち、5 つが鹿島 IPS 実験と同じ日に取得されていることがわかり、比較した結果、 $V_3/V_1 = 1.04 \pm 0.29$  という結果を得た ( $V_3$ 、 $V_1$  はそれぞれ STE 研と鹿島の太陽風速度データ)。このことから、本解析で得られた速度と STE 研の速度データはよく一致し、両者に有意な違いはないことがわかつ



第7図 1989年の観測データから得られた太陽風速度の距離依存性<sup>(11)</sup>。太陽風速度のみを自由パラメータとしたスペクトルフィッティング法による解析結果

た。さらに、同じ日、同じ電波源に対して 2GHz と 8GHz の鹿島 IPS データから得られた太陽風速度についても比較を行ったところ、両者はよく一致していることが確かめられた (5 例について  $V_2/V_8 = 0.94 \pm 0.16$  を得た。ここで、 $V_2$ 、 $V_8$  はそれぞれ 2GHz と 8GHz の IPS データから求めた太陽風速度)。

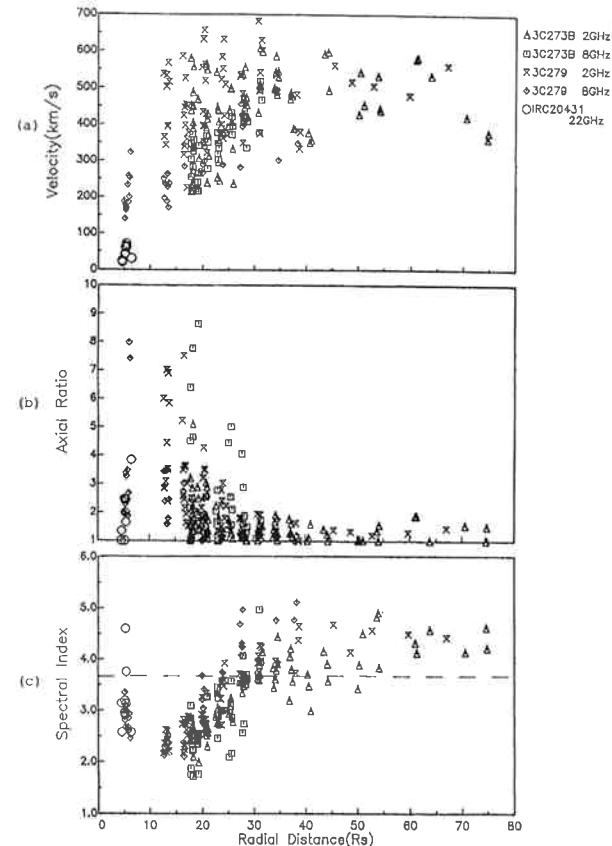
#### 4.2 スペクトルフィッティング法による太陽風パラメータの同時推定

##### 4.2.1 1990年の観測結果

1990年の観測からは、専用のバックエンド部を用いることで受信バンド幅が増加し、S/N が向上した。このため、複数の太陽風パラメータを非線形最小自乗法によって同時に推定することが可能になった。そこで、1990年のデータ解析では、太陽風速度  $V$  の他、密度ゆらぎの軸比  $AR$  (異方性)、密度ゆらぎスペクトルのパワー指数  $\alpha$ 、等価カットオフ波数  $k_{eq}$ 、密度ゆらぎの大きさ  $\Delta N_e$  を自由パラメータにとって推定を行った<sup>(12)</sup>。第8図に、1990年の観測データから求めた太陽風速度、軸比、スペクトル指数の距離変化を示す。

まず、太陽風速度のデータには  $10 \sim 30 R_s$  の範囲で速度が距離とともに増加する傾向が見られる。このことは、1989年の観測データに見られた (低速) 太陽風の加速と一致する。ただし、1990年の速度データは大きな分散を示し、1989年の場合と比べ加速プロファイルが不明瞭である。この原因としては、

1. 3C273B のデータに高速風の影響があり、異なった性質の風の加速プロファイルが重なったこと、
2. 次に述べる太陽近傍での軸比の増大により、パワースペクトル上で速度の効果を分離しづらくなかったこと、
3. 多くの変数を自由パラメータにとったので、1パラ



第8図 1990年の観測データから得られた(a)太陽風速度、(b)軸比、(c)スペクトル指数の距離依存性<sup>(12)</sup>。図中(c)の点線は、Kolmogorov 値 ( $\alpha = 11/3$ ) を示す

メータ当たりの推定誤差が大きくなつたこと、などが挙げられる。

軸比とスペクトル指数のデータからは、太陽風加速が起こっている領域で両者が系統的に変化していることがわかる。軸比のデータは、 $30 R_s$  以内の領域では太陽に近づくにつれて異方性が増加することを示している。即ち、遠方では軸比は 1~1.5 程度であるのに対し、 $5 \sim 20 R_s$  では、軸比は 2~8 にもなる。ただし、太陽近くでの軸比データの分散は大きい。一方、スペクトル指数は遠方では Kolmogorov 値 ( $\alpha = 11/3$ ) より若干高めの値 ( $\alpha \sim 4$ ) を示していたのが、 $30 R_s$  以内になると徐々にスペクトル指数は小さくなり (フラットなスペクトル)、 $10 R_s$  付近では  $\alpha \sim 2$  になる。さらに太陽に近づくとスペクトル指数は増加に転じ、 $5 R_s$  付近では  $\alpha \sim 3$  になっている。スペクトル指数のデータの分散は、速度や軸比のデータに比べ小さい。

軸比の変化については、従来の研究から太陽近傍で増加することが知られていたが<sup>(38)</sup>、同じシステムを用いた観測から、太陽風速度やスペクトル指数の変化と併せて、軸比の距離変化を示したのはこれが初めてであり、太陽風加速領域で起こっている物理過程を考える上で貴重なデータと言える。現在、軸比の距離変化については、

Coles と Esser<sup>(39)</sup> により太陽風中のアルベン波によって生じる見かけの効果であるというモデルが提唱されているが、最近、fast mode と slow mode の磁気波動によって生じる軸比の変化について、鹿島 IPS データを用いて研究が行われ<sup>(40)</sup>、軸比距離変化のメカニズムについて新たな議論が始まっている。スペクトル指数についても、従来の研究から太陽近傍でスペクトル指数がフラットになることが知られていたが<sup>(41)</sup>、未だにその原因はよくわからっていない。今回の観測でスペクトル指数の距離変化は速度変化と同期していることが判明し、太陽風加速メカニズムと関連した現象であることを示唆している。また、本観測から  $5R_s$ においては逆に急な傾きのスペクトル指数が見られたことは新しい発見であり、太陽風加速メカニズムとの関連から興味深い。

#### 4.2.2 1992~1994 年の観測結果

山内ら<sup>(41, 42)</sup>は、1992~1994 年に取得されたクエーサの IPS データを用いてスペクトルフィッティング法による解析を行い、速度・異方性・スペクトル指数・Inner scale ( $k_i$ ) の距離変化について詳細な解析を行っている。彼らの解析の特徴は、

1. 太陽風速度と P 点の位置からデータを高速風と低速風に分類し、それぞれの特性を議論したこと
2. パワースペクトルのモデル計算において球対称な構造を仮定して、視線積分の効果を考慮したこと
3. 理論的な太陽風加速モデルによる計算結果と IPS 観測結果の比較を行ったこと

などの特徴がある。

その結果、次のことが明らかとなっている。

1. 低速風では  $10 \sim 30R_s$  で加速傾向が見られ、これまでの解析と一致する。高速風は、太陽近傍のデータがないので加速については不明。
2. スペクトル指数や軸比のデータには、1990 年の観測結果と同様な距離変化が確認された。この距離変化について、高速風と低速風では違いは見られなかった。
3. Inner scale の解析では、低速風と高速風で有意な差異が見られた。低速風では太陽風加速が起こっている領域で、従来知られていた Inner scale の距離依存性から大きく外れることを発見した。このことは、Inner scale が磁気流体波の散逸に関係していると仮定した場合<sup>(43)</sup>、既存の太陽風加速モデルでよく説明できることがわかった。一方、高速風中の Inner scale の距離変化はこのモデルでは説明できないこともわかった。その原因としては、高速風中では密度ゆらぎと磁気ゆらぎとが互いに相関していないことが考えられる。

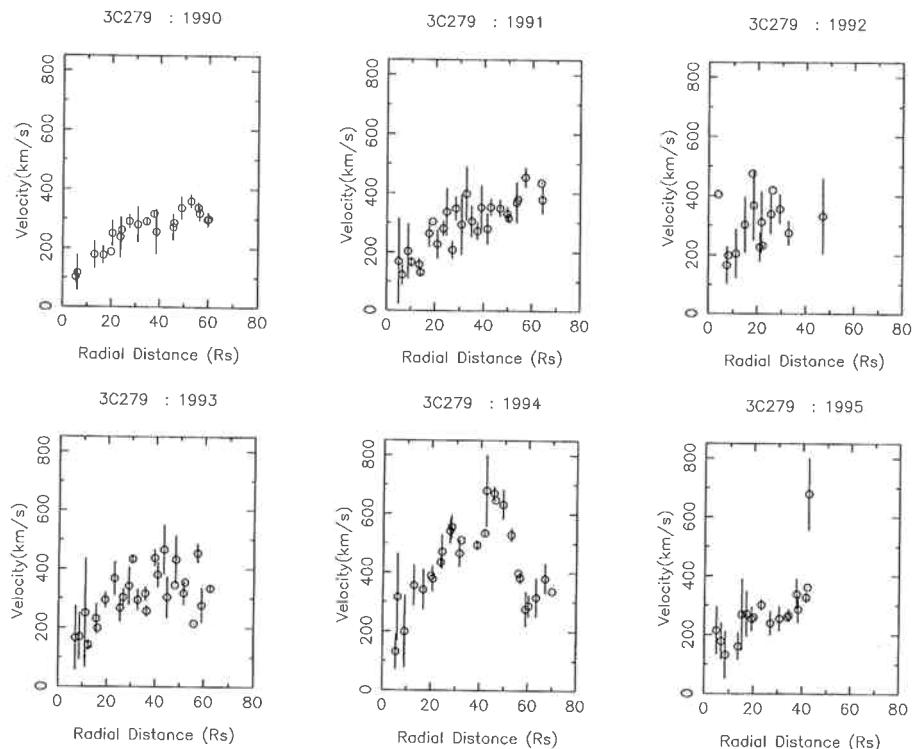
#### 4.3 コスペクトル法による速度測定 – 1990~1995 年の観測結果

1990 年から 2GHz と 8GHz の IPS 観測データは同時にサンプリングされるようになり、コスペクトル法による

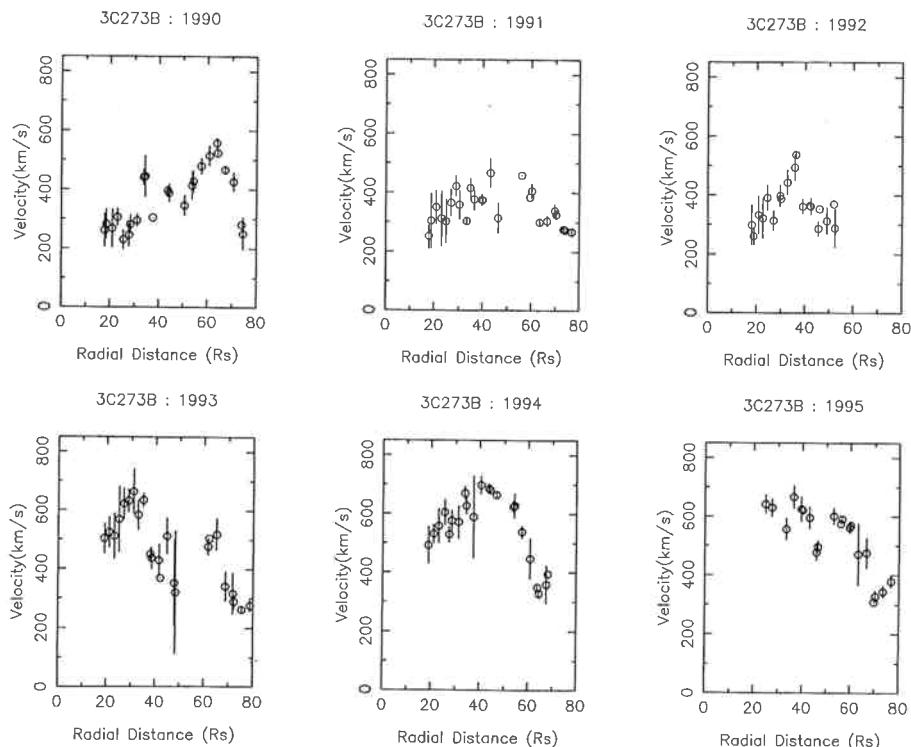
太陽風速度の推定が可能になった<sup>(13)</sup>。第 9 図および第 10 図には、それぞれ 3C279 と 3C273B に対する観測データから(11)式 ( $K = 1$ ) を用いて求めた太陽風速度を、距離に対してプロットしている。図中、1990 年~1995 年の速度データが毎年分けて表示されており、各プロットでは、 $2R_s$  毎に速度データの平均値をとっている。3C279 のデータ（第 9 図）から、太陽風速度が  $10 \sim 30 R_s$  の間で緩やかに増加していることがわかる。最終速度は約 400km/s 程度なので、このデータは低速風の加速に対応していると考えられる。3C273B のデータ（第 10 図）からも、 $10 \sim 30 R_s$  の範囲で太陽風の速度が増加する傾向が見られる。これらの事実は、スペクトルフィッティング法によって得られた結果（前節参照）と一致する。

ここで、スペクトルフィッティング法の場合と同様に、コスペクトル法で得られた太陽風速度と多地点 IPS 観測による速度データとの比較を行った。まず、1990~1992 年のデータを用いて、STE 研の速度データと比較した結果を、第 11 図に示す。1990 年と 1992 年の場合は、両者はよく一致し、 $V_1/V_3 = 1.04$  ( $\sigma_{rms} = 0.20$ ) を得た。しかし、1991 年の場合は両者の相関は悪く、相関係数は  $r = 0.7 \times 10^{-4}$  ( $N = 18$ ) であった。この原因は不明であるが、1991 年のデータでは鹿島と STE 研の速度の差異が距離とともに系統的に変化しているので、そこに謎を解く鍵があると考えられる。次に、1993 年の速度データについては、EISCAT による IPS 太陽風速度データ<sup>(45)</sup>と比較を行った。その結果、両者には非常によい相関 ( $r = 0.92$ ) があることが確かめられた。

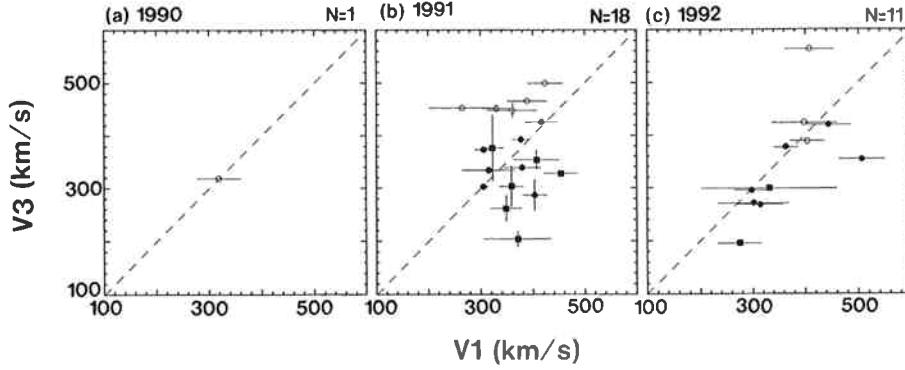
1990~1995 年は太陽活動の極大期から下降期に対応しているが、第 9 図および第 10 図から、この太陽活動の変動に伴って太陽風構造が変化してゆく様子を明瞭に見ることができる<sup>(14, 15, 16)</sup>。それは距離依存性のプロット中に現れる速度ピークが次第に顕著になってくることであり、高速風の成長に対応していると考えられる。太陽活動の低下に伴って高速風が高緯度に現れるることは、従来の IPS 観測から知られていたが<sup>(37, 46)</sup>、太陽近傍の観測から太陽風構造の長期変動を見た例はこれまでにあまりない。鹿島 IPS 観測において、高速風の影響は 3C279 より 3C273B のデータでより顕著である。即ち、3C273B のデータでは 1991 年を除くすべてで高速風の影響（速度ピーク）が見られるが、3C279 の場合、それが見られるのは 1994 年だけである。この違いは、これら電波源の視線の通過する領域の違いを反映している。第 12 図には、1993 年の観測について太陽面に投影された 3C273B と 3C279 の視線の P 点位置を示している。図中、シンボルの大きさは太陽風速度を表し、He1083nm で観測されたコロナホールの分布も重ねて示している。コ



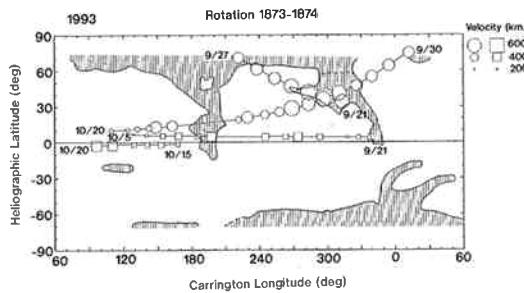
第9図 1990年～1995年の電波源3C279に対するIPS観測から得られた太陽風速度の距離依存性。コスペクトル法による速度測定結果。図中、毎年にデータをプロットしており、各プロットではデータを $2R_s$ 毎に平均化している。プロット中のエラーバーは、 $\pm 1\sigma$ に対応する



第10図 1990年～1995年の電波源3C273Bに対するIPS観測から得られた太陽風速度の距離依存性。図の書式は第9図と同じ



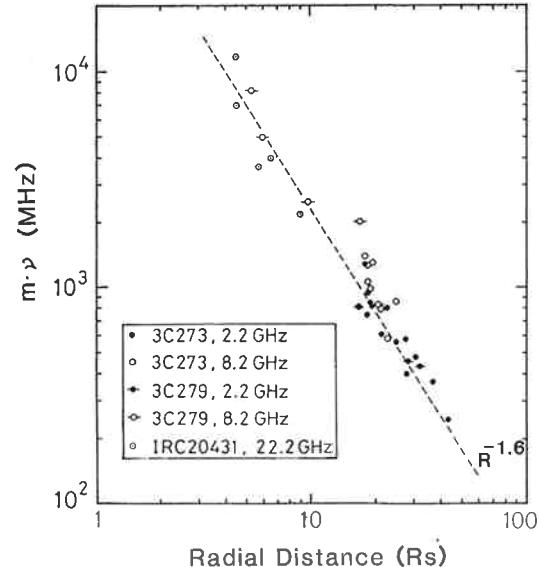
第11図 鹿島IPS観測データからコスペクトル法で求めた太陽風速度  $V_1$  とSTE研の多地点IPS観測から得られた太陽風速度  $V_3$  の比較<sup>(13)</sup>. (a), 1990年, (b), 1991年, (c), 1992年. ○, □印はそれぞれ, 3C273Bと3C279のデータを示し, 白抜きのシンボルは  $30R_S$  以内のデータであることを示す



第12図 電波源 3C273B (○) と 3C279 (□) に対する視線の P 点を太陽面上に投影したもの. シンボルの大きさは, 鹿島 IPS 観測で得られた太陽風速度を表す. 図中のハッチした領域は, HeI 1083nm で観測されたコロナホール (NOAA/SEC 提供) に対応している

コロナホールは高速風を吹き出す源と考えられているが<sup>(47)</sup>, この図からもコロナホールに P 点が近づいたところに太陽風速度の増加が対応していることがわかる. 以上のことから, 3C273B の視線が太陽に接近する際, 高緯度を通過し, 太陽極小期に極域で発達するコロナホール<sup>(48)</sup>からの高速風を観測しやすいのに対し, 3C279 の視線は専ら低緯度を通過し, コロナホールの影響を受けにくくことが結論される. このことによって, 2つの電波源のデータに対する高速風の影響の違いを説明できる.

このように太陽活動の低い時期には, 高速風の影響が鹿島 IPS データに見られるようになるので, 太陽風速度の距離依存性を議論するには注意が必要である. 特に, 比較的遠方で見られる距離とともに太陽風速度が減少する傾向は, 高速風から低速風へ視線が移動したことによる見かけの効果である. しかしながら, 3C279 と 3C273B のデータに共通して  $10 \sim 30R_S$  で太陽風速度の増加傾向が見られており, このことが太陽活動によってほとんど影響を受けていないことは, 注目に値する. 速度増加の傾きは年毎に異なっているが, それは高速風による影響が異なっているからである.  $10 \sim 30R_S$  における太陽風加速は, 異なる解析法 (スペクトルフィッティング法) を用いた場合でも確認されているので, この距離範囲が太陽風加速の現場であることは確実である.



第13図 1989年の鹿島IPS観測から得られたシンチレーション指数  $m$  の距離依存性<sup>(11)</sup>. 異なる周波数のデータを重ねるため, 観測周波数  $\nu$  との積  $m\nu$  を縦軸にとって表示している

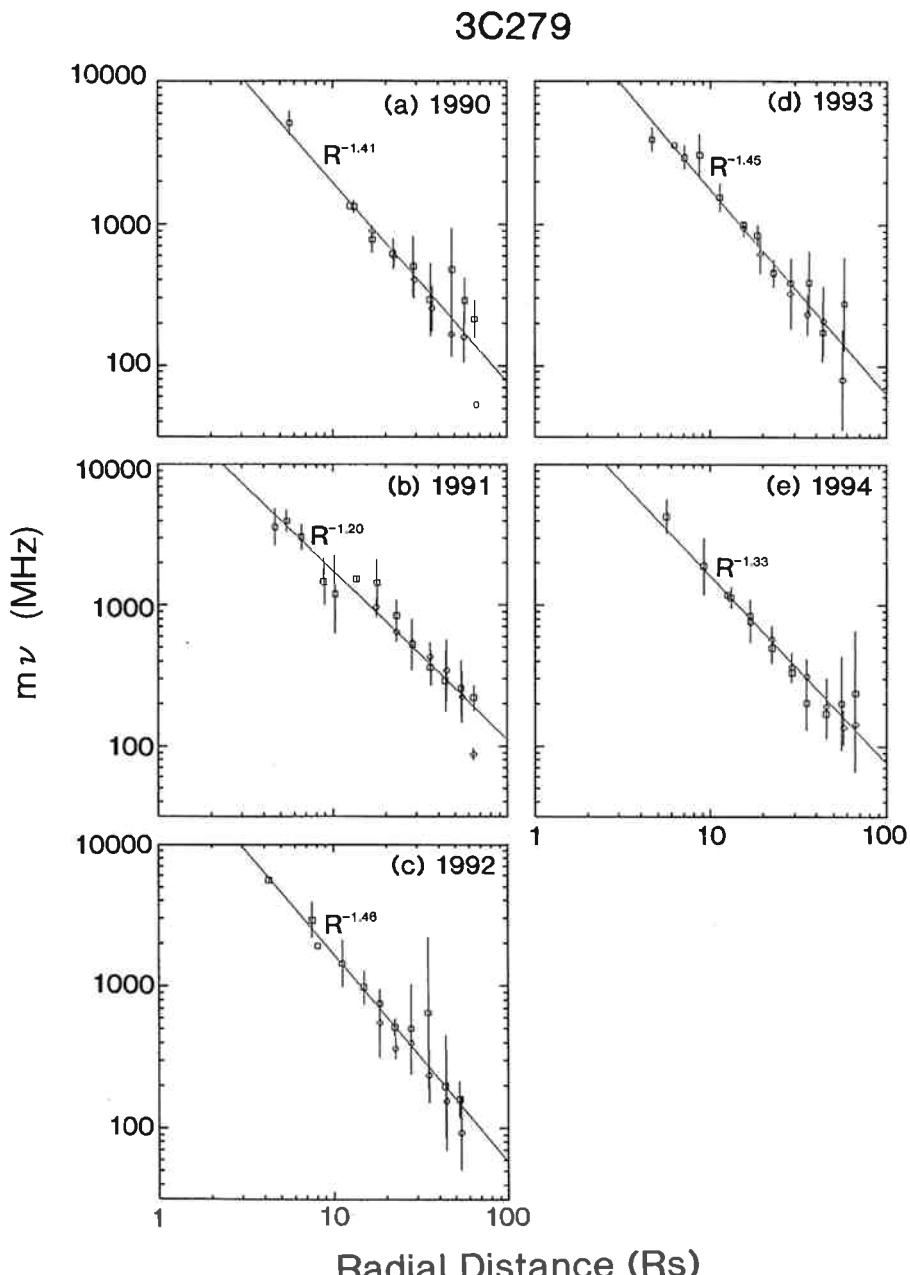
4.4 密度ゆらぎの分布 – 1989年～1994年の観測結果

1989年の鹿島IPS観測から求めたシンチレーション指数の距離依存性を, 第13図に示す<sup>(11)</sup>. 図には, 2GHz, 8GHz (クエーサ), および 22GHz (水メーザ) のデータを示してある. ただし, シンチレーション指数  $m$  観測周波数  $\nu$  に対して  $\nu^{-1}$  の依存性があるのを補正するため, 図の縦軸には積  $m\nu$  をとっている. 図中, 点線は Hewish と Symonds<sup>(49)</sup> によって報告された  $R^{-1.6}$  の距離依存性 (但し,  $R > 0.1\text{AU}$ ) であるが, 鹿島IPSデータはこの点線によく一致していることがわかる. よって,  $R^{-1.6}$  の距離依存性は  $5R_S$  ( $0.02\text{AU}$ ) の太陽近傍ま

で続いていることが結論できる。また、 $R^{-1.6}$  の距離依存性は、太陽風の密度ゆらぎの分布が等方的な場合に期待される  $R^{-1.5}$  に非常に近い。このことは、1989 年が太陽極大期にあたり、太陽風が等方的な構造をしていたこととも一致している<sup>(37, 46, 51)</sup>。図中、加速域と考えられる 10~30  $R_s$  の範囲で、シンチレーション指数が若干増加しているように見える。これは Lotova ら<sup>(50)</sup>が報告した Transonic Region と特性が一致するが、その後の鹿島

IPS 観測からは確認されていないので、これが有意なものであるかは現時点では判断できない。

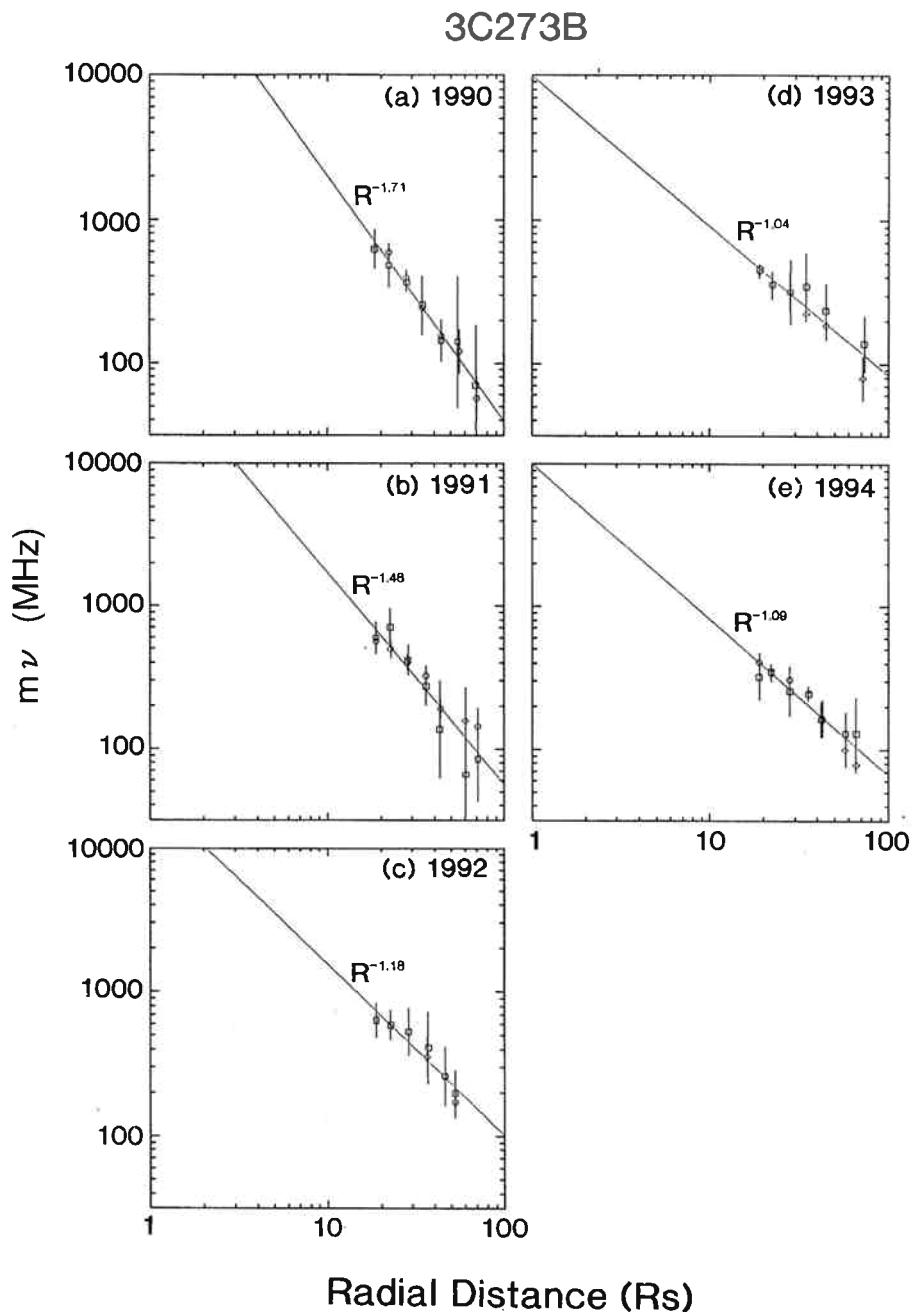
鹿島 IPS 観測から得られたシンチレーション指数データには、速度データに見られたような太陽活動変動に伴う太陽風の構造変化が明瞭に見て取れる<sup>(14, 15, 16)</sup>。第 14 図と第 15 図には、それぞれ 3C279 と 3C273B について 1990~1994 年の期間に得られたシンチレーション指数のデータを年毎に距離に対してプロットしている。図中、



第14図 1990~1994 年の 3C279 に対する鹿島 IPS 観測 (2GHz/8GHz) から得られたシンチレーション指数  $m$  の距離依存性<sup>(15)</sup>。第 13 図同様、 $m$  の周波数依存性を補正するため、周波数との積  $m\nu$  を縦軸にとっている。データは年毎にプロットしてあり、各プロットでは距離の Log スケールで一定区間毎に平均化している。エラーバーは平均をとったときの  $\pm 1\sigma$  に対応する。図中の点線は観測データに関数  $aR^{-x}$  をフィットさせたもの

2GHz と 8GHz のデータをプロットしており、第 13 図同様、周波数依存性の補正のため縦軸には  $m\nu$  をとっている。点線は、それぞれのデータに最小自乗法でフィットさせた関数  $m = aR^{-x}$  である。3C279 のデータ（第 14 図）では、シンチレーション指数の距離依存性は毎年あまり変化がないが、一方、3C273B のデータ（第 15 図）では、距離依存性が毎年に緩やかになっていることがわかる。第 16 図には、3C279 と 3C273B について最小自乗法で求めた距離依存性の傾き  $x$  を毎年に示している。図からわかるように、3C279 のデータでは

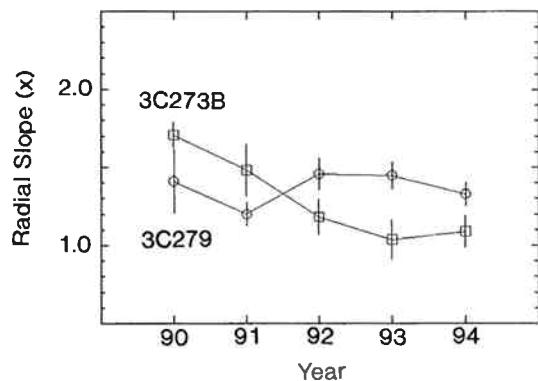
1990～1994 年の間に  $x$  には有意な変化はない、1.2 から 1.4 の範囲にあるが、3C273B の場合にはこの期間に徐々に緩やかな傾きに変化したことがわかる。3C279 の観測結果は、その視線が通過する低緯度帯においては密度ゆらぎの分布がほぼ等方的で、太陽活動度によってあまり変化しないことを物語っている。一方、3C273B のデータに見られた、緩やかな傾きへの系統的な変化は太陽活動下降期に極域でコロナホールが発達すること<sup>(4)</sup>に原因があると考えられる。即ち、コロナホール中の太陽風密度は希薄であり、3C273B の視線は太陽に近づくにつれ



第15図 1990～1994年の3C273Bに対する鹿島IPS観測(2GHz/8GHz)から得られたシンチレーション指数  $m$  の距離依存性<sup>(15)</sup>。図の書式は第14図と同じ

高緯度を通過するので、太陽近傍でのシンチレーション指数は極域コロナホールの影響を受けて低めになる。これによって、シンチレーション指数の距離依存性が緩やかになることが説明できる。太陽極小期に極域の密度ゆらぎが減少することは、Ooty (インド) における IPS 観測結果とも一致する<sup>(51)</sup>。

コロナホールは極域のみならず中・低緯度帯にも発生するので、コロナホールのシンチレーション指数への影響は太陽近傍だけでなく、より遠方の距離でも見られるはずである。このことを示したのが、第17図である。この図では、1991年の2GHzでの観測について、太陽面上に投影した3C273Bと3C279の視線のP点位置とシンチレーション指数の平均値からの増減 $\Delta m$ を示す。シンチレーション指数の平均値は、観測データに $m = aR^{-x}$ の関数を最小自乗法でフィットさせて求めた。図にはコロナホールの境界が示されているが、コロナホールにP点が近づいたとき、 $\Delta m$ はマイナスの値となり、



第16図 鹿島IPS観測データに最小二乗でフィットさせたべき関数の傾き $x$ の年変化

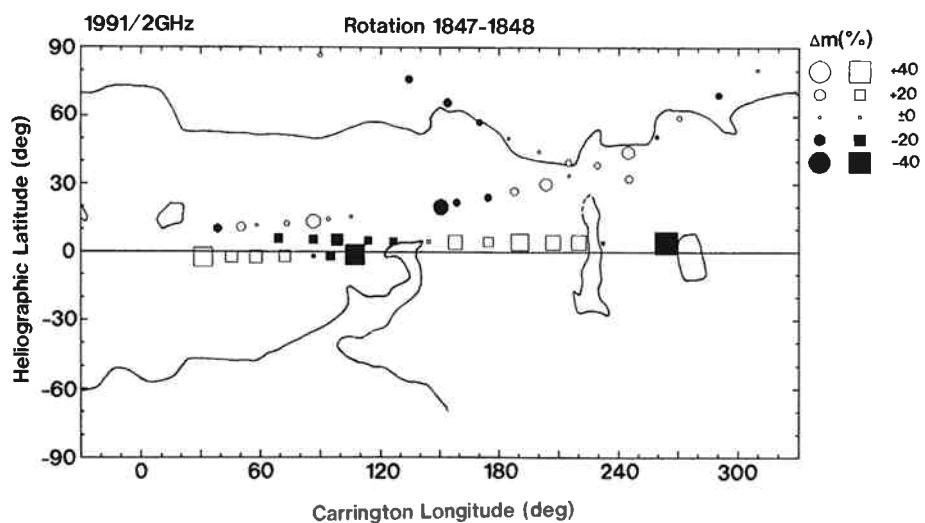
コロナホールとシンチレーション指数の減少は1対1に対応していることがわかる。

## 5. 議論

### 5.1 視線積分の効果

鹿島IPS観測では、高速風でも低速風と同様に太陽風加速が $10\sim30R_s$ で起こっていることを示した。このことは、最近の長基線IPS観測から高速風の加速が $10R_s$ 以内で完了していることが報告されたことと大きく食い違う<sup>(25)</sup>。この食い違いの原因として、まず考えられるのが視線積分の効果である。鹿島IPSデータの解析では、専らP点近似が用いられたが、これは等方的な太陽風構造を仮定した近似であることは先に述べた(3.1節参照)。しかし鹿島IPS観測からは、太陽活動度の低下に伴って極域に高速で低密度の領域；コロナホールに起源を持つ高速風が発達し、太陽風の構造は等方的でなくなることが示された。非等方な太陽風構造の場合、本解析で求めた結果にはバイアスが生じる可能性がある。そこで、その大きさはどの程度であるか確かめるため、単純な太陽風モデルを用いた視線積分効果の計算を行った<sup>(17)</sup>。ここでは高速風について鹿島データに見られた $10\sim30R_s$ での速度増加が真のものか、それとも視線積分の効果で現れる見かけのものであるかに焦点を絞ることにする。よって、モデル計算では視線のP点が高速風中を通過する場合のみを考えた。

第18図は、モデル計算に用いた太陽風モデルを示す。ここでは自転軸に対称な構造を仮定し、太陽風は高緯度帯( $\pm 90\sim\pm 30$ 度)の高速風、低緯度帯( $\pm 20\sim\pm 0$ 度)の低速風、その中間にある中速風の3つから構成されたとした。高速風と低速風の速度は、それぞれ700km/s

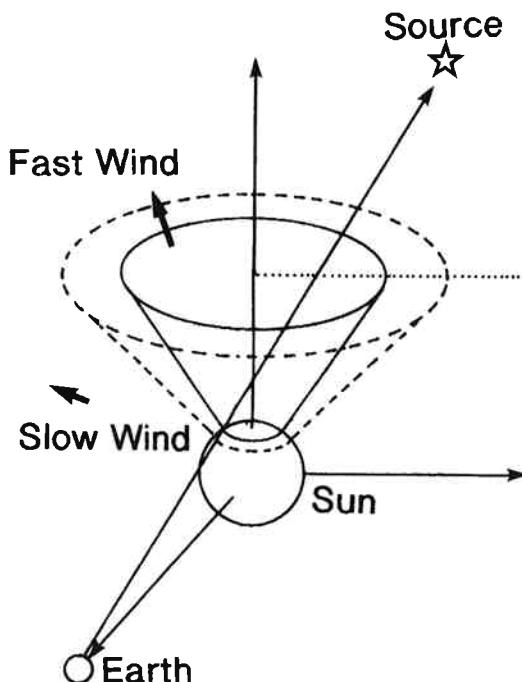


第17図 1991年の鹿島IPS観測について3C273Bと3C279に対する視線のP点を太陽面に投影したもの。シンボルの大きさと色は、2GHzで観測されたシンチレーション指数の平均値(観測にフィットさせた関数の値)からのずれ $\Delta m$ を表す。図中、He1038nm観測(NOAA/SEC)によって得られたコロナホールの境界を実線で示す

と  $400\text{km/s}$  (一定) とし, 高速風中の密度ゆらぎは低速風より一定の割合  $\delta N_e$  で低いとした。また, 高速風・低速風中では太陽風パラメータは一様で, 中速風では両者を直線的につなぐように太陽風パラメータを緯度とともに変化させた。

このモデルを用いて, 様々な太陽風パラメータについてコスペクトルの視線積分値を計算し, それから(11)式により太陽風速度を求めた。ただし,  $K$  は  $K = 1.25$  を用いた。こうして得られた太陽風速度は本来距離に対して一定になるはずであるが, 視線積分の効果によって距離変化が現れる。第19図には, その計算結果の例を示す。図中, a) 高速風と低速風の密度ゆらぎの比率を変えた場合, b) 密度ゆらぎの軸比を距離とともに変化させた場合, c) 密度ゆらぎのスペクトル指数を変化させた場合, に対応する。ここでランダム速度はないとしている。この図から, a)~c)のいずれの場合もコスペクトル法で求めた太陽風速度は, 視線積分によってほとんど影響を受けないことがわかる。その他にも太陽風パラメータを様々に変化させてモデル計算を行ってみたが, ランダム速度の影響を無視する限り, コスペクトル法によって得られる太陽風速度は真の速度に  $\pm 10\%$  程度の誤差で一致することが確かめられた。

第4表には, ランダム速度 (流れに平行な成分)  $\delta v$  を入れてモデル計算を行った結果を示すが,  $\delta v$  が増すにつれて, コスペクトル法で得られる速度は実際より大きくなることがわかる。このように, 視線積分を考慮し



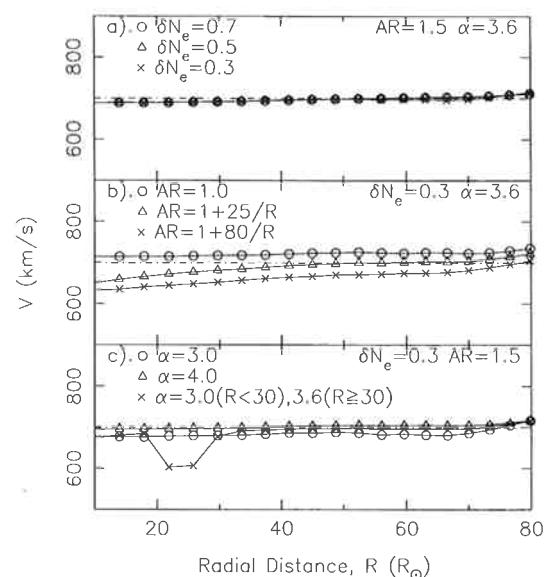
第18図 計算に用いた太陽風3次元モデル。高緯度の高速風 ( $700\text{km/s}$ ), 低緯度の低速風 ( $400\text{km/s}$ ), その間の遷移領域から成る

た場合でも, ランダム速度が唯一, コスペクトル法による太陽風速度測定に大きな影響を与えることが明らかとなった。ここで, もし鹿島IPSデータで見られた高速風の  $10\sim 30R_s$  での加速が, ランダム速度による見かけの効果であるなら, ランダム速度は太陽近傍で小さく, 距離とともに増大しなければならない。このことは太陽近傍でランダム速度が増加するという従来の観測事実<sup>(8)</sup>と矛盾し, よってランダム速度の影響では鹿島データの高速風加速を説明できないことがわかる。

目下, 高速風加速に関する鹿島観測と長基線観測の食い違いを説明できる可能性として考えられているのが, 太陽近傍における磁気波動の効果である。即ち, IPS観測では太陽風中の密度ゆらぎの運動速度を太陽風自体の流れの速度と見なしているが, 磁気波動が太陽風中を伝搬していた場合, 密度ゆらぎの運動速度には波動の伝搬速度が重畠し, 必ずしも太陽風速度と一致しなくなる。このようなランダム速度による影響は, 鹿島観測のような1局測定と長基線観測のような多局測定とでは異なってくることが考えられる。このような観点からの検討は始まったばかりであり, 詳細はあまり知られておらず, 今後の重要な研究課題の一つである。

## 5.2 太陽コロナデータを用いた太陽風加速プロファイルの決定

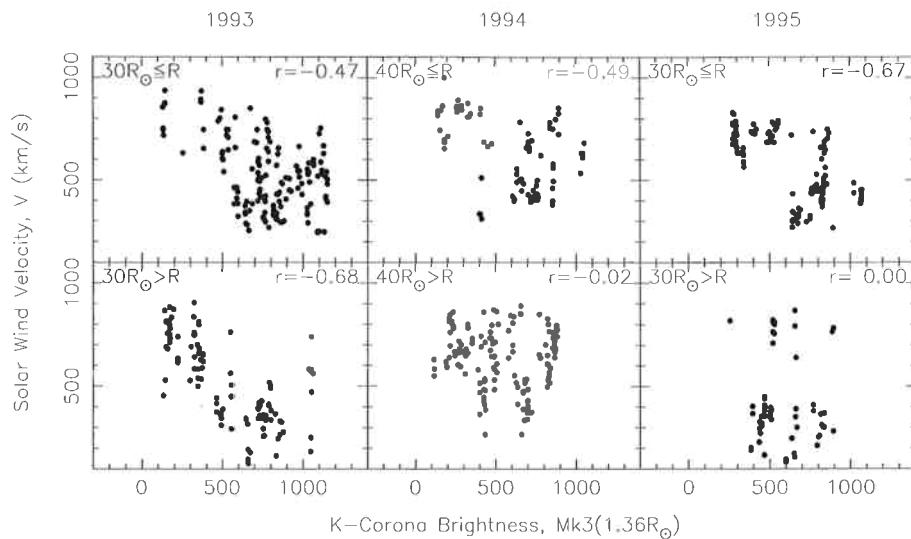
太陽活動が低下した時期では高速風と低速風が混在するので, 太陽風の加速プロファイルを正確に議論するには, 両者を分離して議論しなければならない (3.3節参照)。IPS観測からそれを行うには, 太陽面のほぼ同じ



第19図 コスペクトル法によって得られる太陽風速度の距離依存性のモデル計算結果<sup>(17)</sup>。(a) 低速風に対する高速風の密度ゆらぎの  $\delta N_e$  を変えたもの, (b) 軸比  $AR$  に距離依存性を持たせたもの, (c) 密度ゆらぎのスペクトル指数  $\alpha$  を変化させたもの

第4表 コスペクトル法による太陽風速度測定において流れに平行なランダム速度  $\delta v$  によって発生する誤差。ここで、 $K=1.25$ とした。本来なら高速風速度 700km/s に一致するはずであるが、ランダム速度の効果によりコスペクトル法の速度は高めになる

$\delta v$	$V_{ZERO}$ at $10 R_S$	$V_{ZERO}$ at $70 R_S$
70km/s	717km/s	730km/s
210km/s	818km/s	832km/s
350km/s	1014km/s	1032km/s
560km/s	1368km/s	1395km/s



第20図 P点を太陽面に投影した場所でのKコロナの輝度と太陽風速度の関係<sup>(17)</sup>。データは年毎に分けて表示してあり、上段は  $30R_S$  以遠の速度データ、下段は  $30R_S$  以内の速度データに対応する

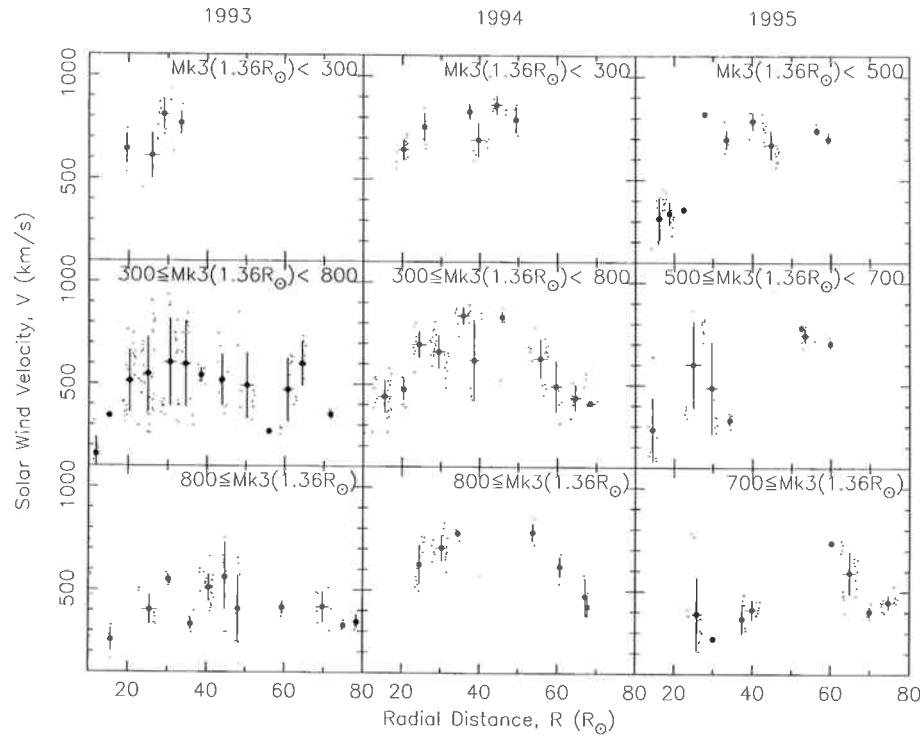
領域から吹き出す太陽風について異なる距離で視線が横切るいくつかの電波星を同時に観測する必要がある<sup>(52)</sup>。さらに厳密には、計算機トモグラフィー法<sup>(33)</sup>や長基線解析法<sup>(25, 53)</sup>を用いて、視線上の高速風・低速風の分布を求める必要があるだろう。しかし、ごく限られた電波源を用いて1局で行っている鹿島IPS観測には、いずれの方法も適用することはできない。

そこで、本研究では視線のP点を太陽面に投影した場所における太陽コロナ輝度のデータから鹿島データを高速風・中速風・低速風に分離して、それぞれ速度の距離変化を求め、加速プロファイルを議論することにした<sup>(17)</sup>。この解析方法は、太陽コロナ輝度の暗い領域と明るい領域がそれぞれ高速風（コロナホール）と低速風の吹き出す領域に対応しているという従来の観測事実に基づいている<sup>(46, 54)</sup>。前節のモデル計算で示されたように、コスペクトル法で得られる太陽風速度は視線積分の影響を受けにくく、P点での速度をよく反映しているので、P点を投影した点でのコロナ輝度で速度データを分類すれば、高速風と低速風は分類可能になると思われる。ここで太陽コロナ輝度データは、米国Muna Loa太陽観測所のMk IIIコロナグラフで取得したKコロナデータ

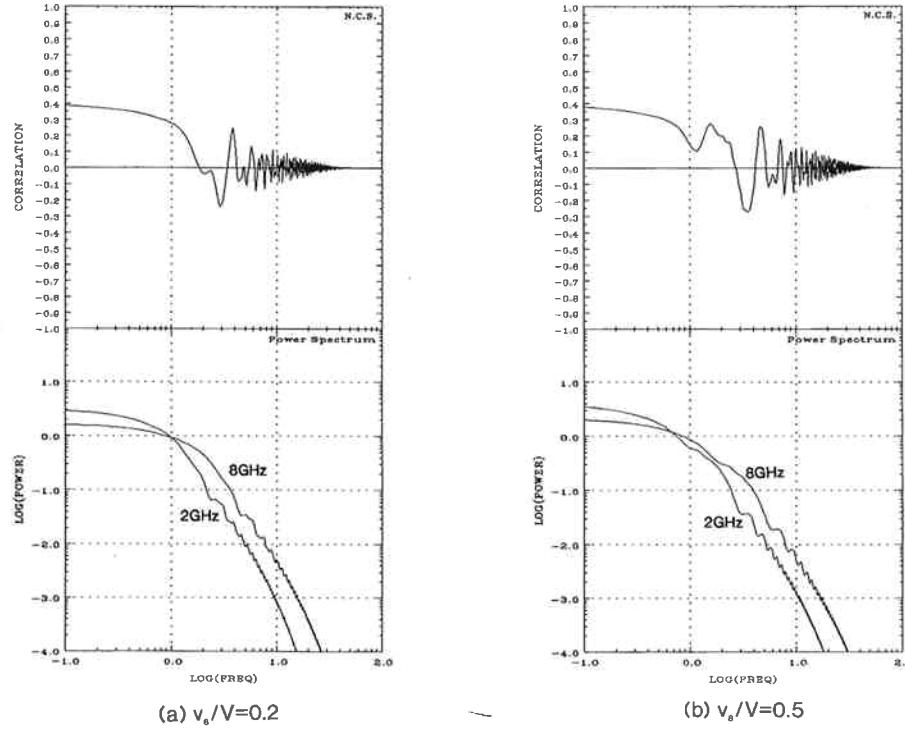
（太陽から $1.36R_S$ の高度）を用いた。一方、コスペクトル法で速度を求める場合、 $K=1.25$ を用い、P点を太陽面に投影する際には、動径方向へ一定速度で流れ太陽風を仮定した。

1993～1995年の鹿島IPSデータから求めた太陽風速度（コスペクトル法による）とP点を投影した場所におけるKコロナ輝度の関係を示したのが、第20図である。図では、加速が見られる距離の外側（ $>30$ または $>40R_S$ ）と、それより内側と2つにデータを分けて表示している。加速域の外側では太陽風速度とKコロナ輝度に逆相関が見られ、これは従来の観測事実<sup>(46, 54)</sup>と一致している。加速域の中では両者の相関は悪くなっているが、これは加速の効果によると思われる（ただし、1993年については加速域の中でも逆相関が見られる。）ここで見られた加速が終了した場所での太陽風速度とKコロナ輝度の逆相関は、Kコロナ輝度を用いて高速風と低速風が分離可能であることを示唆している。

第21図には、P点を太陽面（ $1.36R_S$ ）に投影した場所のKコロナ輝度が明るいもの、中間のもの、暗いものの3つのグループに鹿島IPSデータを分類し、太陽風速度の距離依存性を求めた結果を示す。Kコロナ輝



第21図 P点を太陽面に投影した場所でのKコロナ輝度データによって鹿島IPSデータを明るい領域（下段）、中間の領域（中段）、暗い領域（上段）に分類して得られた太陽風速度の距離依存性<sup>(17)</sup>。各プロット中、大きな黒丸は $5R_s$ 毎の平均値を示し、エラーバーは $\pm 1\sigma$ に対応する



第22図 Slow mode の磁気波動が存在するときに予想される、パワースペクトル（下段）とコスペクトル（上段）の計算結果<sup>(55)</sup>。太陽風速度に対する磁気波動の伝搬速度の比が、(a).  $v_s/V=0.2$ , (b).  $v_s/V=0.5$  のとき

度の明るい領域、中間の領域、暗い領域は、それぞれ低速風・中速風・高速風に対応していると予想される。図から、明るい領域と暗い領域に対応する速度データは加速後の最終速度がそれぞれ約400km/sと700~800km/sであることわかるが、これは低速風と高速風の速度によく一致する。中間のKコロナ輝度の領域についても、高速風と低速風の中間の最終速度をもつ太陽風に対応している。よって、Kコロナ輝度による高速風・低速風の分離は概ねうまくいっていると考えられる。

さて、最も重要な太陽風速度の距離変化に関しては、図からは低速風・中速風・高速風はすべて $20R_s$ まで加速が継続しているように見える。このことは、これまでの解析から得られた結論、即ち $10\sim30R_s$ での太陽風加速を裏付けるものである。ただ、中速風のデータで速度が遠方で距離とともに減少するのが見られるが、これは低速風と高速風の分離が十分でなく、両者の距離依存性が混ざった結果であろう。

### 5.3 磁気波動による効果

3.2.2節ではIPS観測から得られる太陽風密度ゆらぎの異方性が磁気波動によって影響を受けていると考えられることを述べた。また、4.1節ではIPS観測で得られる速度も磁気波動の影響を受ける可能性があることを述べた。磁気波動は太陽風加速やコロナ加熱に重要な役割を果たしていると考えられるので<sup>(4)</sup>、IPS観測から逆にその影響を抽出できれば、太陽風加速やコロナ加熱のメカニズムを研究する上で重要な手がかりが得られるであろう。IPS観測データを、磁気波動の研究観点から解析する試みは最近始まったばかりで、未だ解析手法は確立されていないが、ここではその解析方法の一つとして、鹿島IPS観測で用いられたコスペクトルを用いる方法を提案したい<sup>(55)</sup>。

第22図には、slow modeの磁気波動が存在した場合に予想されるコスペクトルの計算結果の例を示す。図からわかるように、コスペクトルの低周波側の正の相関成分に負の方向へふれる変動が現れてくるのが特徴である。この変動の形状および対応する周波数から、磁気波動のパラメータが推定可能となる。実際の鹿島IPSデータにも、図と似たようなコスペクトルが観測されており、それらの解析から今後、太陽近傍での磁気波動について情報が得られることが期待される。

## 6. まとめ

1989年から1998年にかけて、鹿島センターにおいてマイクロ波帯の3つの周波数(2GHz, 8GHz, 22GHz)を用いてIPS観測を行い、そのデータから未だ謎となっている太陽風の生成機構について研究を行った。その結果、次のようなことが明らかとなった。

1. スペクトルフィッティング法やコスペクトル法を用

いて太陽近傍における太陽風速度の推定を行った。得られた速度データから距離変化を求めたところ、太陽からの距離が $10\sim30R_s$ の範囲で太陽風加速が起こっていることが明らかとなった。ここで注目すべきは、高速風中でも同様な傾向が見られたことであり、これは高速風について $10R_s$ 以内で加速が完了しているとする最近の観測結果<sup>(25)</sup>と食い違う。この食い違いは、視線積分の効果や視線の緯度・経度変化による効果では説明できないことが示された。残された可能性としては、磁気波動によるIPS観測の影響が考えられ、今後の検討課題である。

2. スペクトルフィッティング法によって鹿島IPSデータから太陽近傍での密度ゆらぎの空間スペクトルの調査を行った。その結果、太陽近傍で異方性が増大し、かつスペクトルの傾きがKolmogorov値( $\alpha=11/3$ )よりも緩やかになることを見つけた。これらが起こっている領域は加速域と一致しており、加速メカニズムと関連した現象と推定される。詳細なメカニズムは不明である。また、密度ゆらぎスペクトルのInner scaleは、太陽風加速域で従来知られている距離依存性から有意に外れてることが鹿島IPSデータから初めて明らかになった。この原因がアルベン波の散逸に関連していると仮定すると、低速風の場合、従来の加速モデルでよく説明できることがわかった。一方、高速風では説明がつかず、今後、検討をする。
  3. シンチレーション指数の解析から、太陽極大期には密度ゆらぎの分布は太陽のごく近傍( $\sim 5R_s$ )まで $R^{-1.6}$ の距離依存性でよく記述できることがわかった。
  4. その後の長期にわたる鹿島IPS観測から、太陽活動の変動に伴って、太陽風構造が変化する様子が明瞭にとらえることができた。即ち、太陽極大期には密度ゆらぎの分布は等方的で専ら低速風が観測されるのに對し、太陽活動度が低下すると太陽極域に高速風の源であるコロナホールが発達し、極域の密度ゆらぎは赤道にくらべ低下する。太陽活動の変動に伴う低緯度の構造変化は小さく、太陽周期を通じて赤道付近では低速風が優勢であることが示された。太陽風加速域の場所も、太陽周期を通じてあまり影響を受けないこともわかった。
  5. 太陽風加速域で密度ゆらぎが増大していることを、鹿島のIPS観測から確認することはできなかった。
- これらの鹿島IPS観測の成果をふまえて、太陽風加速の謎をより詳細に研究するためマイクロ波帯の2地点IPS観測が近く実施予定である。これは、火星探査機「のぞみ」が2000年末から2001年初にかけて見かけ上、太陽に接近する時期をねらって、ビーコン電波(8GHz)のIPSを鹿島34mアンテナと臼田64mアンテナ(宇宙科学研究所)の2つで観測するものである<sup>(56)</sup>。「のぞみ」

電波観測のデータ解析には長基線解析法が適用される予定である。長基線解析法は、UCSD のグループによって開発され、高速風の急な加速 “Rapid Acceleration” を明らかにしたことで知られる<sup>(25)</sup>。ところが、この長基線解析法による観測結果について、他の独立な研究グループによる吟味が未だされておらず、高速風の加速についても追検証が必要である。今度の「のぞみ」電波観測では、その検証のための研究と位置づけられ、太陽風加速について鹿島 IPS 観測と長基線 IPS 観測が示した食い違いの謎を解く鍵を見つけることができると期待されている。

太陽風加速の解明に重要とされる領域は、この 10 年でさらに太陽近傍へと移った。これにより、 $5R_s$ まで探査できる水メーラ源の 22GHz IPS 観測データは一層重要視されるようになった。残念ながら、1995 年以降の鹿島 IPS 観測において水メーラ源のデータが取得できていないが、1997 年末～1998 年初には JNET を使って 22GHz VLBI 太陽風観測が実施されている。この実験は悪天候や危機の不良など種々のトラブルに見舞われながらも、貴重なデータを取得することに成功しており<sup>(57)</sup>、目下、その観測データから太陽近傍の擾乱スペクトルについて解析が進行中である。今後益々、高周波での IPS 観測や VLBI 太陽風観測が実施される機会が増えることを期待したい。

### 謝 辞

本研究を開始するにあたり森弘隆室長（当時・電波部電波媒質研究室）にご尽力いただきました。ここに深く感謝いたします。また、鹿島での IPS 観測を実施するにあたり宇宙電波応用研究室の皆様、さらにその前身である第 3 宇宙通信研究室の皆様には様々な面で多大なご支援いただきました。ここに、心から感謝の意を述べたいと思います。その他、本研究にかかわってくださった田中高史主任研究官（現宇宙科学部）はじめ通信総合研究所の皆様、名古屋大学太陽地球環境研究所の小島正宜教授はじめ太陽風グループの皆様に、感謝いたします。国土地理院の方々には、鹿島 34m アンテナが使用できない期間に 26m アンテナの使用を許可して頂きました。ここに深く感謝いたします。

### 参 考 文 献

- (1) Parker, E.N., “Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields”, *Astrophys. J.*, 128, pp. 664-676, 1958.
- (2) Neugebauer, M., and C.W. Snyder, “Mariner 2 observations of the solar wind, 1, Average properties”, *J. Geophys. Res.*, 71, pp.4496-4484, 1966.
- (3) Marubashi, K., “Space weather forecast program”, *Space Sci. Rev.*, 51, pp.197-214, 1989.
- (4) Barnes, A., “Acceleration of the solar wind”, *Rev. Geophys.*, 30, pp.43-55, 1992.
- (5) Bird, M.K. and P. Edenhofer, “Remote sensing observations of the solar corona”, in “Physics of the inner heliosphere, 1, Large-scale phenomena”, edited by R. Schwenn and E. Marsch, Springer-Verlag, pp.13-97, 1990.
- (6) Bourgois, G., Interplanetary scintillation of radio-sources at 2695MHz, *Astron. Astrophys.*, 2, pp.209-217, 1969.
- (7) Ekers, R.D., and L.T. Little, “The motion of the solar wind close to the sun”, *Astron. Astrophys.*, pp.310-316, 1971.
- (8) Armstrong, J.W., and R. Woo, “Solar wind motion within  $30 R_\odot$ : Spacecraft radio scintillation observations”, *Astron. Astrophys.*, 103, pp.415-421, 1981.
- (9) Hewish, A., P.F. Scott, and D. Wills, “Interplanetary scintillation of small diameter radio sources”, *Nature*, 203, pp.1214-1217, 1964.
- (10) Coles, W.A., “Interplanetary scintillation”, *Space Sci. Rev.*, 21, pp.411-425, 1978.
- (11) Tokumaru, M., H. Mori, T. Tanaka, T. Kondo, H. Takaba, and Y. Koyama, “Solar wind near the sun observed with interplanetary scintillation using three microwave frequencies”, *J. Geomag. Geoelectr.*, 43, pp.619-630, 1991.
- (12) Tokumaru, M., H. Mori, T. Tanaka, T. Kondo, H. Takaba, and Y. Koyama, “Observations of solar wind near the sun from microwave IPS phenomena”, *COSPAR Colloquia Series Vol.3, Solar Wind Seven*, pp.289-292, 1992.
- (13) Tokumaru, M., T. Kondo, H. Mori, and T. Tanaka, “Solar wind motion near the sun derived from simultaneous interplanetary scintillation observations at 2GHz and 8GHz”, *J. Geomag. Geoelectr.*, 46, pp.835-849, 1994.
- (14) Tokumaru, M., H. Mori, T. Tanaka, T. Kondo, “Evolution of the solar wind structure in the acceleration region during 1990-1993 (STEP Interval)”, *J. Geomag. Geoelectr.*, 47, pp.1113-1120, 1995.
- (15) Tokumaru, M., T. Kondo, H. Takaba, H. Mori, and T. Tanaka, “Evolution of the solar wind acceleration region during 1990-1994”, *Proc. International Solar Wind Eight Conference (AIP Conference Proc. No.382)*, pp.121-124, 1995.

- (16) Tokumaru, M., H. Mori, T. Tanaka, T. Kondo, and H. Takaba, "Observations of the solar wind close to the sun by interplanetary scintillation", Proc. STPW '96, pp.138-141, 1997.
- (17) Tokumaru, M., M. Kojima, T. Ohmi, T. Kondo, and K. Hakamada, "Radial variation of solar wind velocity near the sun", Proc. Solar Wind 9, pp.313-316, 1999.
- (18) 徳丸宗利, 森弘隆, 田中高史, 近藤哲朗, 高羽浩, 小山泰弘, "宇宙電波観測による太陽風及び太陽風・惑星相互作用の研究", 第1回STEPシンポジウム報告, pp.148-156, 1990.
- (19) 森弘隆, 田中高史, 近藤哲朗, 徳丸宗利, 高羽浩, 小山泰弘, "マイクロ波帯電波による太陽風加速域のIPS観測", 第2回STEPシンポジウム報告, pp.121-128, 1991.
- (20) 徳丸宗利, 森弘隆, 田中高史, 近藤哲朗, 高羽浩, 小山泰弘, "マイクロ波帯シントレーラー観測による太陽風加速域の研究", 第3回STEPシンポジウム報告, pp.97-105, 1992.
- (21) 徳丸宗利, 森弘隆, 田中高史, 近藤哲朗, 高羽浩, 小山泰弘, "マイクロ波帯惑星間空間シントレーラー観測による太陽風加速域の研究(II)", 第4回STEPシンポジウム報告, pp.212-220, 1993.
- (22) Tokumaru, M., H. Mori, T. Tanaka, and T. Kondo, "Distribution of turbulence and mass flux density in the acceleration region of the solar wind", Proceedings of the Eighth International Symposium on Solar Terrestrial Physics, pp.21, 1994.
- (23) 徳丸宗利, 森弘隆, 田中高史, 近藤哲朗, 高羽浩, "マイクロ波帯惑星間空間シントレーラー観測による太陽風加速域の研究(III)", 第6回STEPシンポジウム報告, pp.238-247, 1995.
- (24) Philips, J.L., A. balogh, S.J. Bame, B.E. Goldstein, J.T. Gosling, J.T. Hoeksema, D.J. McComas, M. Neugebauer, N.R. Sheeley, Jr., and Y.-M. Wang, "ULYSES at 50° south: Constant immersion in the high-speed solar wind", Geophys. Res. Lett., 21, pp.1105-1108, 1994.
- (25) Grall, R.A., W.A. Coles, M.T. Klinglesmith, A.R. Breen, P.J.S. Williams, J. Markkanen, and R. Esser, "Rapid acceleration of the polar solar wind", Nature, 379, pp.429-432, 1996.
- (26) 小山泰弘, 高羽浩, 栗原則幸, 川口則幸, "鹿島局34mアンテナシステム", 通信総合研究所季報, 36, pp.39-50, 1990.
- (27) Dennison, P.A., and A. Hewish, "The solar wind outside the plane of the ecliptic", Nature, 213, pp.343-346, 1967.
- (28) Coles, W.A., and J.K. Kaufman, "Solar wind velocity estimation from multi-station IPS", Radio Sci., 13, pp.591-597, 1978.
- (29) Manoharan, P.K., and S. Ananthakrishnan, "Determination of solar-wind velocities using single-station measurements of interplanetary scintillation", Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 244, pp.691-695, 1990.
- (30) Scott, S.L., B.J. Rickett, and J.W. Armstrong, "The velocity and density spectrum of the solar wind from simultaneous three-frequency IPS observations", Astron. Astrophys., 123, pp.191-206, 1983.
- (31) Scott, S.L., W.A. Coles, and G. Bourgois, "Solar wind observations near the sun using interplanetary scintillation", Astron. Astrophys., 123, pp.207-215, 1983.
- (32) Cronyn, W.M., "Density fluctuations in the interplanetary plasma: Agreement between space-probe and radio scattering observations", Astrophys. J., 171, pp.L101-L105, 1972.
- (33) Kojima, M., M. Tokumaru, H. Watanabe, A. Yokobe, K. Asai, B.V. Jackson, and P.L. Hick, "Heliospheric tomography using interplanetary scintillation observations, II. Latitude and heliocentric distance dependence of solar wind structure at 0.1-1 AU", J. Geophys. Res., 103, pp.1981-1989, 1998.
- (34) Cohen, M.H., E.J. Gundersmann, H.E. Hardebeck, and L.E. Sharp, "Interplanetary scintillations, II, Observations", Astrophys. J., 147, pp.449-466, 1967.
- (35) Salpeter, E.E., "Interplanetary scintillations, I, Theory", Astrophys. J., 147, pp.433-448, 1967.
- (36) Woo, R., and J.W. Armstrong, "Measurements of a solar flare-generated shock wave at 13.1  $R_S$ ", Nature, 292, pp.608-610, 1981.
- (37) Kojima, M., and T. Kakinuma, "Solar cycle dependence of global distribution of solar wind speed", Space Sci. Rev., 53, pp.173-222, 1990.
- (38) Armstrong, J.W., W.A. Coles, M. Kojima, and B.J. Rickett, "Observations of field-aligned density fluctuations in the inner solar wind", Astrophys. J., 358, pp.685-692, 1990.
- (39) Coles, W.A., and R. Esser, "An observational limit to the amplitude of Alfvén waves in the

- solar wind and comparison with an acceleration model", *J. Geophys. Res.*, 97, pp.19139-19148, 1992.
- (40) Chashei, I.V., M. Kojima, and M. Tokumaru, "Anisotropy of magnetosonic turbulence in the solar wind between 0.1 and 0.4 AU", *J. Geophys. Res.*, in press, 2000.
- (41) Woo, R., and J.W. Armstrong, "Spacecraft radio scattering observations of the power spectrum of electron density fluctuations in the solar wind", *J. Geophys. Res.*, 84, pp.7288-7296, 1979.
- (42) Yamauchi, Y., M. Kojima, M. Tokumaru, H. Misawa, H. Mori, T. Tanaka, H. Takaba, T. Kondo, and P.K. Manoharan, "Micro-turbulence in the solar wind at 5-76  $R_s$  observed with interplanetary scintillation", *J. Geomag. Geoelectr.*, Vol.48, pp.1201-1217, 1996.
- (43) Yamauchi, Y., M. Tokumaru, M. Kojima, P.K. Manoharan, R. Esser, "A study of density fluctuations in the solar wind acceleration region", *J. Geophys. Res.*, Vol.103, pp.6571-6583, 1998.
- (44) Coles, W.A., and J.K. Harmon, "Propagation observations of the solar wind near the sun", *Astrophys. J.*, 337, pp.1023-1034, 1989.
- (45) Bourgois, G., W.A. Coles, G. Daigne, J. Silen, T. Turunen, and P.J. Williams, "Measurements of the solar wind velocity with EISCAT", *Astron. Astrophys.*, 144, pp.452-462, 1985.
- (46) Rickett, B.J., and W.A. Coles, "Evolution of the solar wind structure over a solar cycle: Interplanetary scintillation measurements compared with coronal observations", *J. Geophys. Res.*, bf 96, pp.1717-1736, 1991.
- (47) Krieger, A.S., A.F. Timothy, and E.C. Roelof, "A coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream", *Sol. Phys.*, 29, pp.505-525, 1973.
- (48) Hundhausen, A.J., R.T. Hansen, and S.F. Hansen, "Coronal evolution during the sunspot cycle: Coronal hole observed with the Mauna Loa K-coronameters", *J. Geophys. Res.*, 86, pp.2076-2094, 1981.
- (49) Hewish, A., and M.D. Symonds, "Radio investigation of the solar plasma", *Planet. Space Sci.*, 17, pp.313-320, 1969.
- (50) Lotova, N.A., D.F. Blums, and K.V. Vladimirovskii, "Interplanetary scintillation and the structure of the solar wind transonic region", *Astron. Astrophys.*, 150, pp.266-272, 1985.
- (51) Manoharan, P.K., "Three-dimensional structure of the solar wind: Variation of density with the solar cycle", *Sol. Phys.*, 148, pp.153-167, 1993.
- (52) Coles, W.A., R. Esser, U.-P. Løvhaug, J. Markkanen, "Comparison of solar wind velocity measurements with a theoretical acceleration model", *J. Geophys. Res.*, 96, pp.13849-13859, 1991.
- (53) Breen, A.R., W.A. Coles, R.R. Grall, M.T. Klingsmith, J. Markkanen, P.J. Moran, B. Tegid, P.J.S. Williams, "EISCAT measurements of the solar wind", *Ann. Geophys.*, 14, pp.1235-1245, 1996.
- (54) Sime, D.G., and B.J. Rickett, "Coronal density and the solar wind speed at all latitudes", *J. Geophys. Res.*, 86, pp.8869-8876, 1981.
- (55) Shishov, V.I., and M. Tokumaru, "Temporal spectrum of interplanetary scintillation in the near-Sun region", *J. Geomag. Geoelectr.*, Vol.48, pp.1461-1480, 1996.
- (56) 徳丸宗利, 小島正宜, 藤木謙一, 橫辺篤史, 小山孝一郎, 近藤哲朗, "火星探査機ビーコン電波を用いた太陽風観測", 平成11年度磁気圏・電離圏シンポジウム, pp.58-61, 1999.
- (57) 清水義行, 徳丸宗利, 小島正宜, "VLBIによる太陽風プラズマの観測", 1998年度VLBIシンポジウム集録, pp.35-38, 1998.

