

IPS長期間観測によって得られた太陽風速度分布の太陽活動11年周期変化。

惑星間空間シンチレーション観測

天体電波を利用したリモートセンシングの方法(惑星間空間シンチレーション:IPS)は、1962-1963年にケンブリッジ大学のヒューイッシュ(A. Hewish)達によって偶然に発見された。178 MHzの周波数で天体電波源の正確な位置決め観測を行っていたとき電離層の影響としては説明のできない、秒単位の速い電波強度変動(電波シンチレーション)が観測された。そして、このような速い変動をするのは、クェーサー(QSO)やパルサーのように視直径がきわめて小さな電波天体だけであることが分かった。視直径が小さいことと変動が速いこと、この二つの条件から、このような速い電波強度の変動の原因は、電離層よりもさらに地上から遠く離れた、惑星間空間を吹く太陽風による電波散乱であることを彼らは突き止めた。この発見により、地上から惑星間空間を吹く太陽風が観測できるようになったのである。

IPS発見後まもなく1965-1966年にはロシアのLebedev Physica InstituteのPushchino Radio Astronomy Observatory (PRAO)において汎用の電波天文用アンテナに加えて遠隔地に2アンテナを建設してIPSの3点観測が86 MHzで行われ、1968年にはオーストラリアCulgooraの太陽観測用の干渉計を用いたIPS観測が行われた。1970年代に入り常時太陽風を観測できるVHF帯のIPS観測施設が、名古屋大学空電研究所(現、太陽地球環境研究所)および米国カリフォルニア大学サン・ディエゴ校(UCSD)とPRAOにおいてほぼ同時期に建設された。空電研究所の施設は周波数69MHzの二次元ダイポールフェーズドアレーアンテナからなり、1971年に豊川、富士、菅平の3地

点で同時観測を開始した。この装置は太陽から 0.5-1 AU の距離領域で太陽風を観測することができ、1973 年から始まった惑星間空間現象国際共同研究プロジェクト (STIP) において活躍した。

空電研究所と UCSD の VHF 周波数での IPS 観測は、1980 年代はじめ頃まで続けられたが、人工天体による直接観測がまだ行われていない 0.3 AU 以内の太陽風観測を目的に両研究グループは、より高い周波数での IPS 観測へと移行していった。独自の観測施設を持つことが困難になった UCSD は、EISCAT

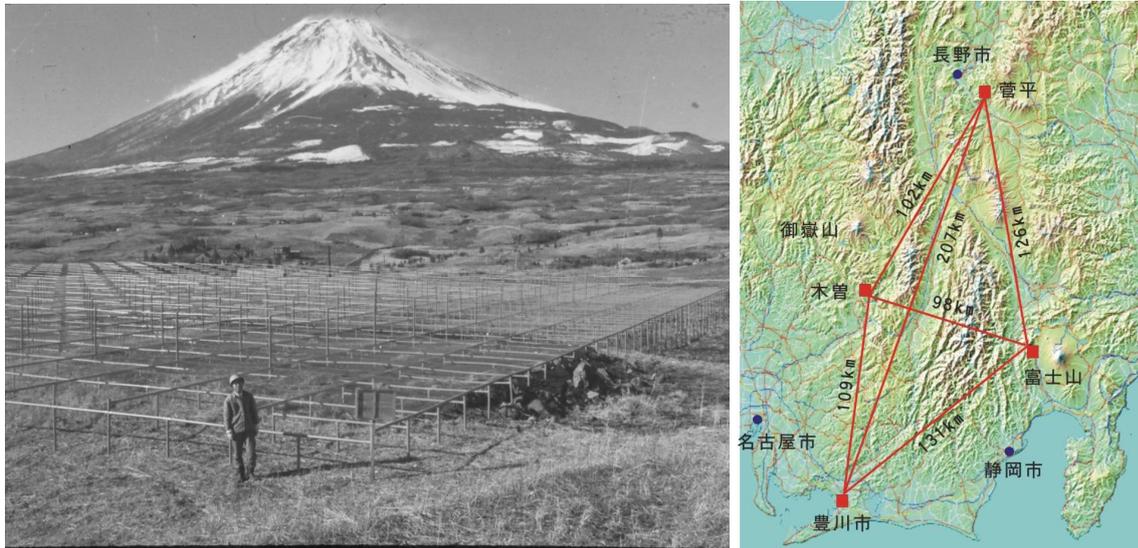


図 1. 1970 年に富士に完成した 16×16 素子の VHF ダイポールアレーアンテナと IPS 4 点観測システムの配置図。

のパラボラアンテナを用い 930MHz での IPS 観測を始めた。一方、空電研究所では 327 MHz のシリンドリカルパラボラアンテナが VHF アンテナの設置されていた 3 地点に 1977 年からの 3 年計画で建設された。しかし 327 MHz の IPS 現象を効率よく観測するためには豊川-菅平間の基線長が他のアンテナ間基線長に比べ長すぎるため最適の基線長を得るために豊川-菅平のほぼ中間に位置する木曾郡上松町内に 1992 年に第 4 アンテナが木曾観測施設として建設された。これにより、太陽風を太陽活動 2 周期以上にわたり今日まで長期に安定して観測できる世界唯一の太陽風観測専用装置が完成した。327 MHz で IPS を観測する装置としてはインドの Ootacamund (Ooty) に Tata Institute of Fundamental Research が 1970 年に完成させた長さ 530 m 幅 30 m の大シリンドリカルアンテナがある。このアンテナは当初は電波天文用に利用されたが後年 IPS 観測専用装置として使われるようになり今日まで観測を続けている。

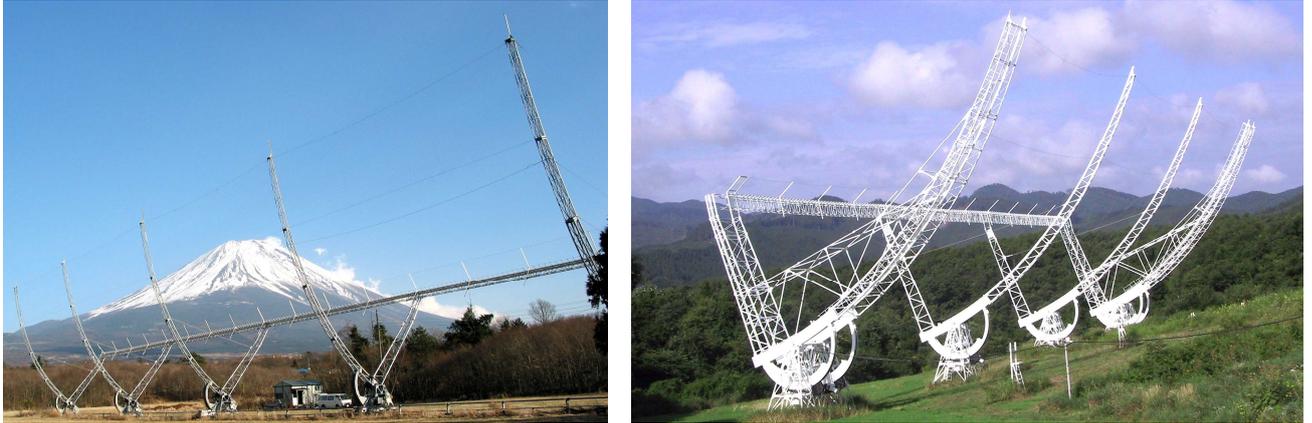


図2. 左は1978年に富士観測所に設置されたUHFシリンドリカルパラボラアンテナ. 東西長100 m 南北開口幅20 m あり, 3 cm おきに張られたステンレス線によりハラボラ反射面を作っている. 右は1992年に木曾観測施設に設置されたUHFシリンドリカルパラボラアンテナ. 東西長75 m 南北開口幅27 m あり開口面積は富士のものと同様である. これらの装置は修理, 改修, 改善を重ねながら今日も稼働を続けている.

1990年代後半に開発された空間分解能の高い太陽風三次元構造を得る解析方法は, より多くのIPS電波天体が観測できればより高い空間時間分解能を得ることができるので当時の現有装置の2倍の受信能力を有する太陽圏イメージング装置を建設する計画を立て, 装置の開発と予算要求が進められた. またこの時期, 豊川キャンパスに代わるアンテナ建設適地の調査が数年にわたり行われたが, 必要とする面積を確保できる代替地が見つからず豊川キャンパスを引き続き利用することとなった. そこで設計上重視されたことは, 周辺工場からの電波雑音の干渉を受けにくい構造とすることであり, 加うるに今後予想される予算とマンパワーの削減にたいし維持管理が楽であることの2点であった. この条件を満たすためにF/D比を小さくして一次放射器を主反射面の奥に位置させたアンテナを設計した. そして維持管理の観点から機械的駆動部の無い固定型シリンドリカルパラボラアンテナを作ることとした. 装置は大学法人化後に認められた特別教育研究費の研究計画初年度2007年にジオスペース電波観測装置の名称で実現した.



図3. 2007年に完成した南北長10,600cm,東西有効開口幅1895cm×2を有する子午面トランシット型の固定シリンダリカルパラボラアンテナ.パラボラ反射面を支持する構造体にコンクリート柱を使用して経費を節約し限られた予算内でアンテナ開口面積を大きくする.

IPS 最大の問題を解決

IPS 観測の最大の欠点は、視線に沿って分布する異なる太陽風速度が重畳された荷重積分値しか得られないというものであった. このために観測値はバイアスを持つだけでなく、どこを吹いている太陽風の速度を測ったものなのか曖昧で空間分解能も劣っていた. この問題を解決する方法が1994年EISCATでIPSを観測していたUCSDグループにより偶然見つかった. IPS観測は、電波散乱で生じる回折像の大きさ程度の基線長を持つ複数アンテナで観測するのがそれまでの常識であったが、ある日彼らはEISCATのアンテナの事情で不適切に長い基線長で観測せざるを得なかった. その結果得られたIPS信号の相関関数は、双峰形に歪んだ異常なものであった. しかしこの異常な相関関数は視線上に分布する高速風と低速風が分解されたものであることが分かり、これにより視線積分の逆重畳を解く手法が発見されたのである. しかし残念ながらSTE研の4アンテナの持つ基線長は短いためにこの手法を利用することができなかった. 悔しい思いをする中で開発された方法が、計算機トモグラフィーを用いる方法である. 三次元情報が重畳されたものしか得られないという欠点が、逆に重畳されたものが得られるという短基線長IPSの利点となり、トモグラフィー解析により空間分解能の良い三次元構造が得られるようになった. この方法は、EISCATのように太陽風三次元モデルを何ら仮定する必要がないという利点も備えている. (Kojima, 1998).

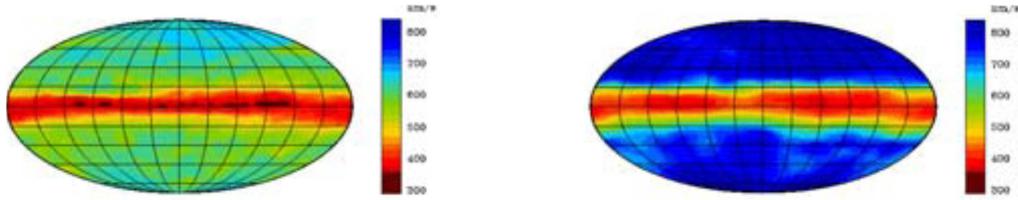


図4. 太陽活動極小期の太陽風速度の緯度経度分布. 左はトモグラフィー法を用いずに従来
の方法で得られたもの. 右図はトモグラフィー解析の結果で, 飛翔体 Ulysses により直接観
測された太陽風緯度構造によく一致している.

トモグラフィー法が適用できるのは準安定な太陽風構造であり, ICME のような一過性の現象への適用は困難である. しかし ICME の直接測定は極めて限られた数の探査機によるため情報が偏っており, ICME がいかなる姿をしているか, また太陽から地球軌道まで ICME がどのように伝搬しているかは, 多くの謎が残っている. IPS 観測は, 短時間で惑星間空間の広範囲を探查できるため ICME のような過渡的な現象の研究に適しているが, IPS 観測から ICME の立体構造を求めるには, 視線積分の効果を取り除く必要がある. この視線効果を取り除く方法として, モデルフィッティング法と時間依存トモグラフィー法と呼ばれる二つの手法が開発された. STE 研で開発したモデルフィッティング法は, 擾乱の三次元構造を複数のパラメータで記述するモデルを作り, そのモデルに対してシンチレーション観測をシミュレートして観測と比較し, よい一致が得られるようにモデルを改良してゆく. この方法の開発により, ICME の様々な立体構造を得ることが可能で, 太陽面におけるループ消失現象と比較研究することにより, 太陽面から惑星間空間へダイナミックな伝搬機構の解明が可能となってきた (Tokumaru, 2003). ICME は短時間に伝搬移動するので, ICME は観測者に対し相対的にさまざまな角度からその姿を見せることになる. これを利用したのが UCSD で開発された時間依存トモグラフィー法である. 図5の左は, STE 研の IPS 観測データを用いモデルフィッティング法で求めた ICME の構造である. 右は衛星搭載 SMEI 撮像装置のデータを時間依存トモグラフィー法で解析したものである. 二つの解析方法の結果がよく一致しているのが分かる. 立体構造が解析できると, ICME の総質量も知ることができ, 人工衛星などの飛翔体観測では得られない ICME の3次元情報を求めることができるようになってきた.

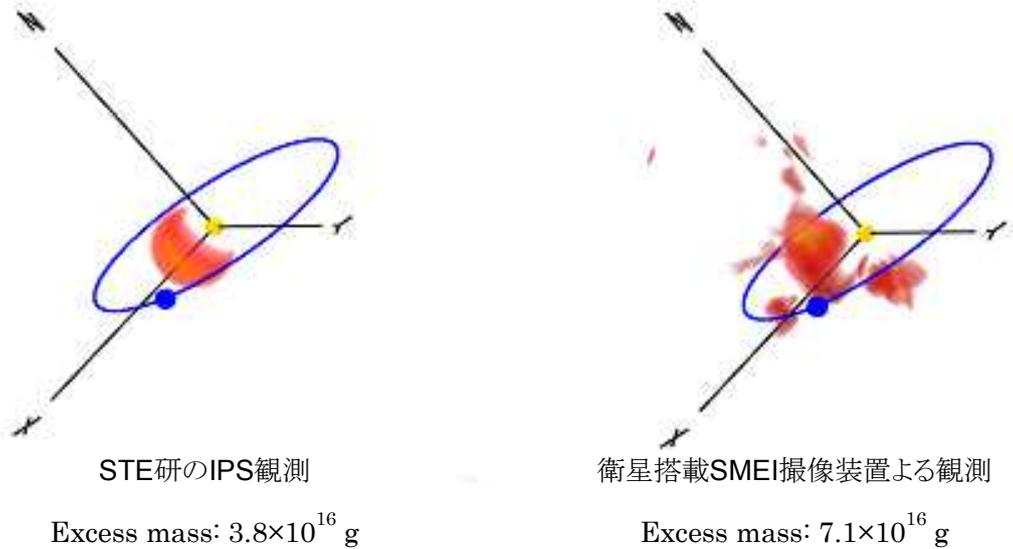


図5. 2003年10月28日のCMEイベントの3次元構造. 左はモデルフィッティング法, 右は時間依存トモグラフィー法による解析結果.

課題は惑星間空間から太陽風流源へ

IPS トモグラフィー法により詳細に太陽風の三次元構造を得ることができるようになり, 太陽風の流源を太陽コロナまで遡ることが可能となり太陽風の起源についての研究が可能となってきた. その一つは, 低速風の起源である. IPS トモグラフィーは低速風の中でも比較的速度の遅いコンパクトなストリームの流源は活動領域閉磁場の根元に存在する小さなコロナホールであることを解明した(Kojima, 1999). このIPS トモグラフィー法の見つけたプラズマ流の吹き出す様子に酷似したものが2007年に打ち上げられた太陽観測衛星「ひので」のX線望遠鏡により見つけられ, 低速風の起源の解明へと研究が進み始めた.



図6. 左図: IPS トモグラフィーで得られた低速太陽風(赤色領域)の源をコロナ磁場に沿い太陽光球面までたどると, 流源が閉磁場の端の小さなコロナホールであることがわかる. 右図: 太陽観測衛星「ひので」のX線望遠鏡の観測. 活動領域の左端にある赤丸印の領域からプラズマが絶えず噴出ししており, その様子は左の低速風流源の様子とよく似ている.

また太陽活動が極大期にさしかかり極域のコロナホールが消滅しようとする時には、高速風の流源であった極域コロナホールからは低速風が吹き出すようになることが見つかった(Ohmi, 2001)。極域の太陽風を観測できる手段は現在の所 IPS トモグラフィー以外にはなく、低緯度から高緯度までを長期にわたり連続して観測できる IPS の特長により短期間にしか現れないこのような現象を捉えることができるようになった。

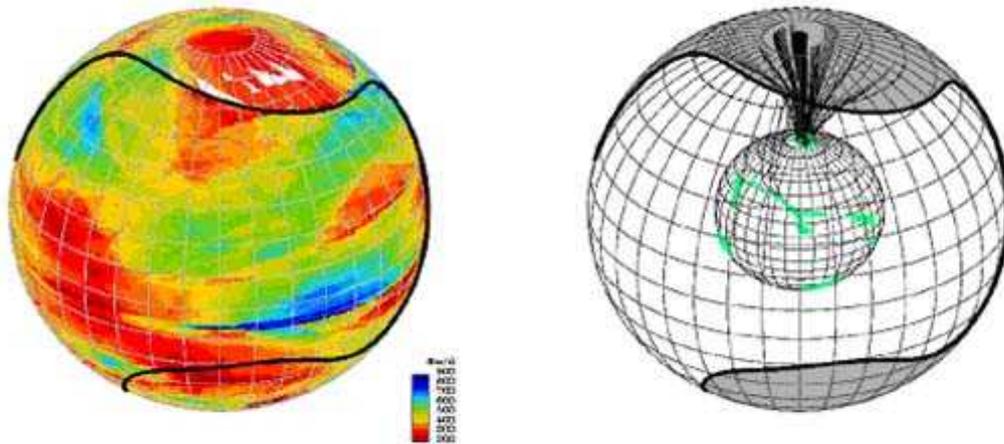


図7. 1990年の太陽活動極大期に極域コロナホールから低速太陽風が吹き出す様子. 左はIPS トモグラフィーにより2.5太陽半径の球面上に求められた速度分布. 右は、太陽光球面と2.5太陽半径の太陽風流源面をポテンシャル磁場で結んだもので図中の緑色領域はコロナホールを示している。

太陽風源とされるコロナホールにはその物理的性質（大きさ、磁場強度、磁束管拡大率、温度など）の異なる様々なものが存在する。それらが太陽風速度を決める加速機構とどのような関係があるのかを調べるためには低緯度から高緯度までの様々な緯度に分布するコロナルホールとそれらを起源とする太陽風とを結びつける必要がある。これを可能としたのがIPS トモグラフィーである。速度を決める主流であったモデルの二つは、磁束管拡大率と磁場再結合で解放されるエネルギー量であったが、IPS トモグラフィーのデータを用いて様々なコロナルホールについて速度と相関のよい物理量を統計的に調べ、最良の相関は磁束管拡大率や磁場強度個々のパラメータではなく両者の比をとったものが最適であることが見つけた(Hirano, 2003)。このように惑星間空間での太陽風と太陽コロナ中における流源や加速領域の諸物理量とを関連づけて調べることができるようになり、ひので衛星が発見した太陽極域のパッチ状のキロガウス級の強磁場領域が果たして高速風源であるのかななどの新たな課題の解明にIPS トモグラフィーが重要な寄与ができるようになってきた。

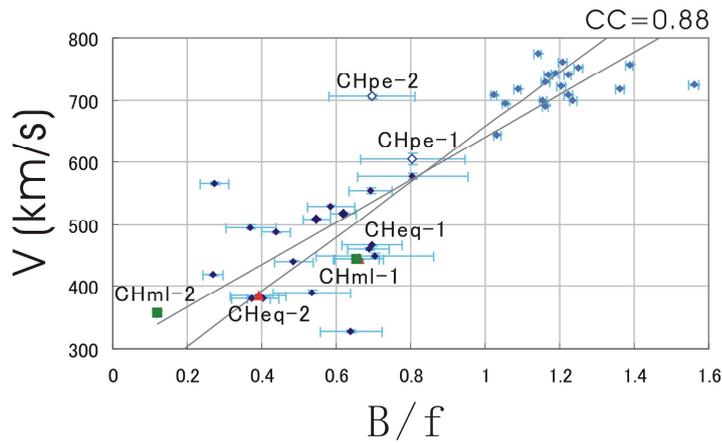


図8. IPS トモグラフィー解析から求めた太陽風速度と、コロナ磁場強度 B と流管の拡張率 f との比の相関. マークした CHEq, CHml, CHpe は、特に注目すべきもので、CHEq は低緯度コロナホールからの太陽風、CHml は中緯度コロナホールからの太陽風、CHpe は極域コロナホールが中緯度まで張り出してきた領域からの太陽風である. 異なる性格のコロナルホールから吹き出した太陽風が一本の回帰直線上に乗っている.

IPS トモグラフィーは更に改善が加えられ、ローテーション毎に太陽風速度分布がダイナミックに変化していく様子を見ることができるようになった. この手法と長期連続観測で蓄積されたデータを用いれば太陽風の緯度経度分布がどのように太陽活動に伴い変化するかその特長をとらえることができ (Tokumaru, 2010), サイクル 23/24 の太陽活動極小期の異常な太陽風構造を一目瞭然に見ることができる (Tokumaru, 2009).

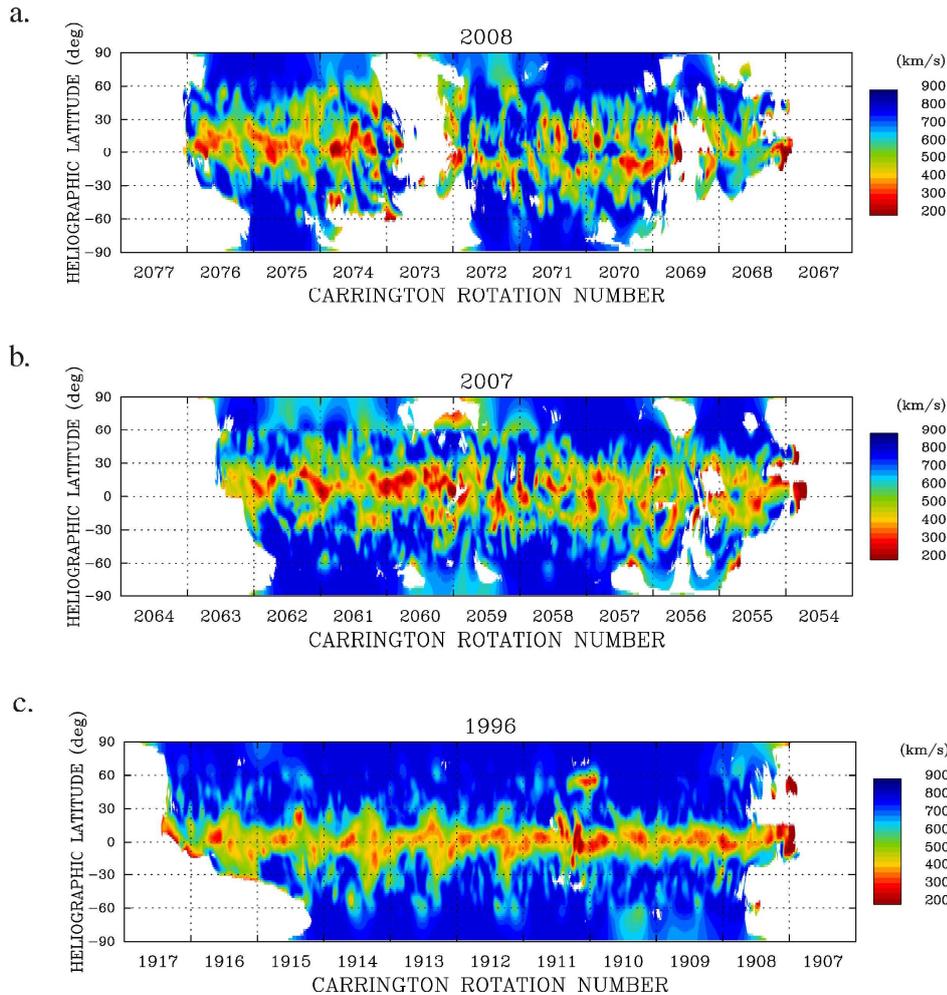


図9. 1年間のデータ全体を1セットとしてトモグラフィー解析を行い、ローテーション毎に太陽風速度分布がダイナミックに変化していく様子を示した. 前太陽活動極小期 1996年の速度分布と比べると今期の極小期の太陽風構造の異常さがよく分かる.

国際共同研究と宇宙天気予報への応用

革新的な観測方法の開発により IPSは惑星間空間を三次元的に常時高い空間分解能で観測できるようになり、飛翔体観測や理論研究また太陽物理学との共同研究が進みつつある. また, IPS 観測の特長を活かした宇宙天気予報も始まっている. IPS トモグラフィーで観測する太陽風が太陽との共回転と地球公転運動により日々少しずつ変化していくのを利用して太陽風立体構造の日変化を求めることができる. 地球と太陽を結ぶ面から東に存在する太陽風は共回転によりこれから地球に到達するので太陽風立体構造が分かれば, 太陽風の短期予報ができる. この予報は STEL Standard Version および UCSD Version としてインターネットですでに公開されている. UCSD Version は時間依存トモグラフィー法を用いているので CME の予報も可能である. IPS トモグラフィー法を MHD シミュレーションと融合させることにより, 太陽風速度のみでなく密度, 磁場, 温度の物理量まで地球公転軌道以遠はるか木星軌道までも含む空間で三次元構造を求めることができる. この方法による解析結果も STEL MHD Tomography としてインターネットで公開されている. 太陽コロナ中の磁束管拡大率と磁場強度比が太陽風速度とよい相関があることを利用すれば, 太陽面磁場観測から太陽風速度の三次元構造を予報することも可能になる.



図 10. 2007 年豊川で開催された IPS 国際会議には 7 カ国 10 研究機関からの研究者が集まった。

2007 年 STE 研豊川分室で IPS 国際研究集会が開催され国際共同観測・研究について討議された。英国のグループは、EISCAT アンテナと自国内にある電波天文用の干渉計 MERLIN を用いて 930 MHz と 1400 MHz の周波で太陽近傍の太陽風観測を行っている。インドの Ooty 観測所の 327 MHz 大シリンドリカルパラボラは、近年南北方向にマルチビーム化されより多くの IPS 天体の観測が可能となった。メキシコ UNAM の Institute of Geophysics では IPS 観測専用の 140 MHz の 10,000m² の面積を持つアレーが完成し運用を始めようとしている。110 MHz で稼働する 72,000m² の大受信面積を持つロシアの PRAO は現在観測を休止しているが、装置のマルチビーム化などの改良が進んでいる。現在オーストラリア西部に 80-300 MHz の広帯域で稼働する大アレーアンテナ (Murchison Widefield Array: MWA) の建設が米国 MIT が中心となり国際プロジェクトで進められている。この装置は、極めて多くの IPS 天体の観測から太陽風密度分布の詳細を求めることができるだけでなく偏波面のファラデー回転を利用して惑星間空間磁場計測も可能になると期待されており、磁場計測方法のシミュレーションが進んでいる。また南半球に存在する MWA は、北半球から観測しにくい惑星間空間領域をカバーする貴重な IPS ステーションとなる。UCSD は時間依存トモグラフィ法を用いて、STE 研と Ooty のデータを解析し CME 三次元構造の解析を行っている。そして STE 研から UCSD へは準リアルタイムで IPS データが日々送られ、双方で宇宙天気予報が行われている。近年、韓国 (Seoul National University, Radio Research Agency, Electronics and Telecommunications Research Institute) では宇宙天気予報のための IPS 観測施設を済州島に建設する計画が始まっている。

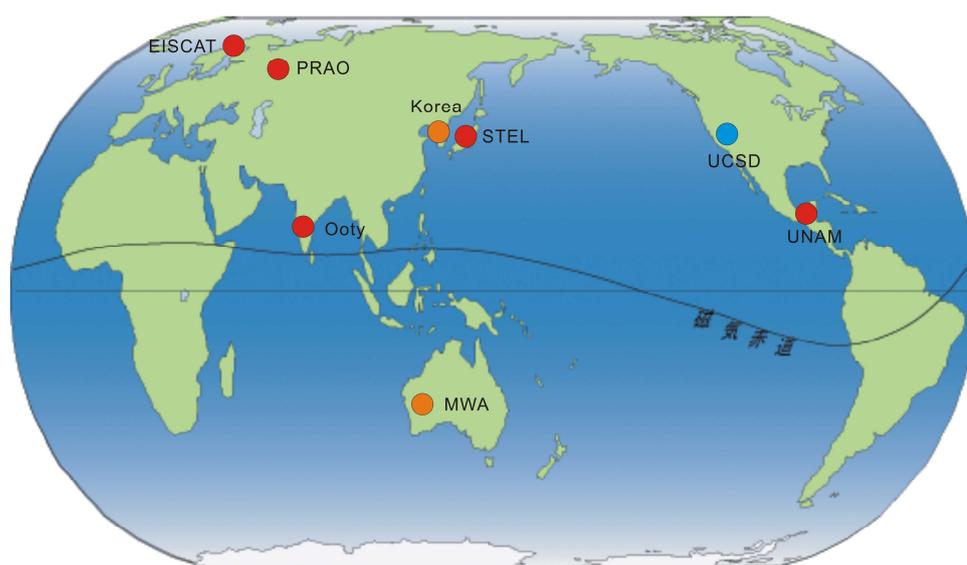


図 11. IPS 国際共同観測点. Ooty は 327 MHz 大シリンドリカルパラボラの南北方向マルチビーム化が完成し観測続行中. UNAM では 140 MHz の 10,000m² の面積を持つアレーが完成し運用を開始. PRAO は現在観測を休止しているが, 装置のマルチビーム化などの改良中. MWA は現在建設中の広帯域高感度高分解能アレーアンテナ. UCSD は, IPS データや衛星搭載 SMEI 撮像データの解析を通じて共同. Korea は IPS 観測施設の建設を計画中.