# 9-1. 基盤研究部門 | 太陽圏研究部



#### 太陽圏研究部の研究テーマ・キーワード

- 太陽風 · CME
- 電波観測
- 惑星空間シンチレーション観測
- 太陽圏 3 次元構造
- 宇宙天気予報
- 装置開発
- パルサー観測による太陽圏探査

# 太陽圏研究部の紹介

太陽圏は太陽から吹き出したプラズマ(太陽風)や磁場に満たされた銀河空間に浮かぶ巨大な泡のようなものです。地球はこの中で生まれ、進化してきました。太陽風は宇宙時代の幕開けとともにその存在が確認されましたが、その加速機構や宇宙空間での伝搬機構はまだ十分に解明されていません。そのため、太陽圏研究部では独自の観測装置を開発し国内3ヶ所に設置することで、地上から太陽風の3次元構造を捉え、太陽風の諸物理過程の解明に取り組んでいます。

地上観測の最大の特長は、長期にわたる安定運用です。これまでの観測の蓄積により太陽の活動周期と太陽風構造の関係を詳しく研究できるようになってきました。特に第 24 太陽活動周期の活動の落ち込みでは、これまでにない太陽風の構造やプラズマの特徴をいち早く捉えることに成功しています。

近年では、我々の実施している太陽風観測は太陽圏の大規模構造シミュレーションの初期値として用いられたり、惑星・彗星ミッションなどで探査機の太陽風環境予測の基礎データとして用いられたりすることが多くなりました。世界的に太陽風の3次元的な観測データの需要が増えてきたといえるでしょう。また、定常的に観測データを取得するとともに、より発展的な研究に繋げられるように、装置の改良や新規開発のための基礎実験も行っています。

# 2017 年度 太陽圏研究部の主要な成果

## 1.惑星間空間シンチレーション(IPS)システムを用いた太陽風観測

本研究グループでは 1980 年代より惑星間空間シンチレーション (IPS) の多地点システムを用いて太陽風の遠隔 測定を行ってきた。得られた IPS データを Tomography 法で解析することで、太陽風速度および密度ゆらぎの全球 的な分布を精度よく決定することができる。特に高緯度の太陽風は目下、飛翔体観測が行われていないため、IPS 観測は貴重な情報を提供している。現在運用している IPS 多地点システムは、豊川、富士、木曽に設置された 3 つの大型アンテナで構成される。豊川アンテナ (太陽圏イメージング装置 SWIFT) は 3 つのアンテナ中、最も大型・高感度であり、2008 年から観測を開始し、毎日稼働している。また、富士、木曽アンテナは 2013–2014 年に低雑音増幅器が更新され、感度が向上した。これら 2 つのアンテナは、山間部に設置されているため、冬期間は雪のため運用を中止する。一方、太陽風密度ゆらぎのデータは豊川アンテナの観測から求められるため、1 年を通じて利用可能である。取得した IPS データは本研究所の ftp サーバを介して即時的に公開し、様々な国際共同研究プロジェクト (以下参照) に利用された。

## 2.宇宙天気予報を目指した国際共同研究プロジェクト

本研究部はカリフォルニア大学サンディエゴ校(UCSD)ジャクソン博士のグループと協同で IPS データの Tomography 解析によって時々刻々変化する太陽圏 3 次元構造を明らかにする研究に取り組んできた。その研究を 通じて開発されたのが Time-dependent tomography (TDT) 解析プログラムである。本プログラムは、現在、 NASA/Community Coordinated Modeling Center (CCMC) のサーバ上で利用可能になっているほか、韓国宇宙天気セ ンター(KSWC)において地球に到来する太陽風を予報する実験のためリアルタイムで実行されている。さらに、 KSWC では IPS データの TDT 解析と ENLIL 太陽風モデル(GMU/NASA Ostrcil 博士が開発)を組み合わせて地球 近傍における太陽風と IMF を予測するシステムが開発されている。KSWC における IPS データを利用した宇宙天 気予報の研究のために、本研究所は KSWC と研究交流協定を締結している。本年度は、KSWC からセンター長ほ か数名が来訪し、豊川アンテナを見学後、今後の連携について議論した。

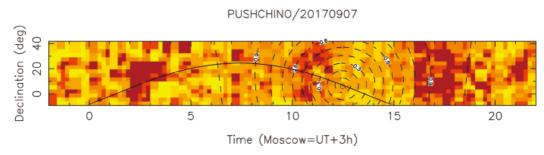
## 3.国際 IPS 観測ネットワーク (WIPSS) 計画

IPS 観測が宇宙天気予報に有用であるとの認識が高まるにつれて、世界各地で IPS 観測を実施する動きが活発に なっている。従来から IPS 観測を実施してきた日本、ロシア、インドに加えて、メキシコ、韓国で IPS 観測専用の アンテナが建設され、欧州や豪州に開発された低周波帯の大型電波アレイシステム LoFAR、MWA を用いた IPS 観 測も実施されるようになった。これらの世界各地の IPS 観測データを統合することで、太陽活動に伴って時々刻々 変化する太陽風の 3 次元構造をより詳細に明らかにできる。2015 年メキシコで開催された IPS Workshop において 国際的な IPS 観測網 WIPSS (World-wide IPS Stations) の構築が提案された。今年度は 12 月に英国カーディフにお いて IPS Workshop が開催され、各国の IPS に関する研究活動が報告された。また、2016 年 12 月に UCSD で開催さ れた IPS Workshop で IPS データ交換の標準形式の改訂版 V1.1 が決まったのに伴い、ISEE の ftp サーバでも V1.1 形式でのデータ提供を開始した。

WIPSS を推進する上で、異なる観測局間での IPS データの比較が鍵となる。 今年度 9 月 10 日から 12 月 9 日の期 間に、ロシア・Pushchino 電波天文観測所(PRAO)の Sergey Tyul'bashev 博士を招聘し、同観測所の大型電波アレ イによる IPS 観測結果と本研究所の IPS データの比較を行った。また、3 月 11-30 日にインド・Ooty 電波天文セン ターの P. K. Manaharan 博士が来訪し、Ooty における IPS 観測結果と ISEE の IPS データとの比較を行った。

#### 4.日本・ロシアにおける惑星間空間擾乱の協同観測

2017年9月上旬に太陽面上で活発なフレア活動があり、いくつかのフレアの発生に伴って Halo 型 CME が観 測された。2017 年 9 月 4 日および 6 日に発生した Halo 型 CME イベントでは、この CME に伴う擾乱が太陽風中 を伝搬してゆく様子が ISEE とロシア・PRAO の IPS 観測から明瞭に捉えられている。2 つの観測局の経度差を 考慮してデータを比較したところ、ISEE と PRAO のデータは擾乱が高速で地球方向に伝搬したことでよく説明 できることが判った。9月4日および6日の CME イベントに対する IPS データは、擾乱の平均伝搬速度が約1000 km/s 以上にも達することを示している。この速度は、地球に到来した衝撃波の平均伝搬速度より高く、擾乱が 伝搬中に減速したことを物語っている。また、9月6日の CME イベントでは、高速に伝搬する擾乱の後から比



2017年9月7日のロシア・Pushchino電波天文観測所におけるIPS観測で得られた太陽密度擾乱指数の全天マップ。

較的低速(約 700 km/s)で伝搬する擾乱が観測された。この低速な擾乱の起源について、経度方向に広がった擾乱 の両脇部分が中央部よりやや遅れて伝搬しているのを捉えた可能性が指摘されている。以上の成果は、宇宙天気予 報における国際的な IPS 観測網の有用性を示したものである。

## 5. 低密度・超低速風の長期変動

速度が 350 km/s 以下の太陽風は超低速風と呼ばれ、過去に実施された我々の研究からその起源は太陽黒点付 近にあって磁力線が惑星間空間につながった領域(Open 磁場領域)に対応していることが判明している。この 太陽黒点付近の Open 磁場領域は磁力線の拡大率が極めて大きいため、通常の低速風より加速効率が悪くなって いると考えられている。長年にわたって実施されている本研究所の IPS 観測を使って超低速風に対応する太陽風 密度ゆらぎの大きさ( $=\Delta$  Ne)を調べたところ、サイクル 23 から 24 にかけて小さな  $\Delta$  Ne を持つ超低速風の出 現が顕著に増加していることが判明した。ΔNe の大きさは太陽風密度に対応していることから、この観測結果 はサイクル 24 の超低速風が低密度化していること示している。ACE 探査機による太陽風データを調べたところ、 IPS 観測結果と同様に低密度な超低速風の出現頻度が増加していることが判明した。我々はポテンシャル磁場モ デルを使って、低い Δ Ne を伴う超低速風の流源における磁場特性を調査した。その結果、低 Δ Ne の超低速風の 流源は、通常の高い A Ne を伴った領域に比べより小さい磁力線拡大率と弱い磁場強度を示すことが判明した。 これらの事実からサイクル 24 に増加した低密度の超低速風は太陽の静穏領域に形成された pseudo-streamer と対 応していると推測される。

## 6. 太陽風非動径成分の起源の研究

通常、太陽風の流れはほぼ動径方向に沿っており、非動径方向の速度成分は典型的な値として 10-30 km/s 程 度である。この非動径成分は ICME や共回転相互作用領域(CIR)の探査機通過に伴って増加することが知られ ている。しかしながら、1995-2017 年の OMNI データベースを用いて調査したところ、上記の原因で説明できな いイベントを20例発見した。これらのイベントに共通する特徴として、動径方向からのずれが方位角にして6 度以上あり、その継続時間は1日以上であり、また、多くの場合で1AUでの太陽風密度は低密度(5 cm-3)であ った。我々はこれら20例の太陽風起源を探るため、太陽風を等速度でソース面(2.5太陽半径)に投影し、コロ ナ磁場をポテンシャル磁場近似(PFSS 近似)することで光球面上の起源領域を特定した。特定された起源領域 の紫外線画像を SOHO/EIT の時系列データで調査した結果、ほぼすべての起源領域は活動領域とそれに隣接する 小さなコロナホールが一対として観測されており、その多くが太陽中央経度を通過する際は活動度の高い領域で あった。我々は活動領域-コロナホールの相互作用が、今回発見された非動径成分増大イベントに深いかかわり があると推察している。本研究は ISEE 国際共同研究事業のもと Physical Research Laboratory (インド) との共同 研究として実施された。

## 7. シリンダー・トーラスモデルを用いた 1AU における磁気ロープの軸方向の推定

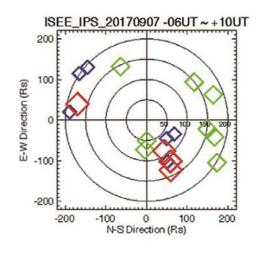
太陽からは時折、コロナ質量放出(CME)と呼ばれる磁化プラズマの塊が噴出する。CME 内部の磁場構造は、 ある軸を中心としてその周りを螺旋状の磁力線が取り巻いた構造をしており、この構造は磁気ロープと呼ばれてい る。磁気ロープの軸方向は地球で観測される磁場を予測する上で重要な要素の一つである。個々の磁気ロープの具 体的な磁場構造を推定する方法として、まっすぐな軸の周りを螺旋状の磁力線が取り囲むような磁場モデルである シリンダーモデルと、磁気ロープの軸の曲がりを考慮したトーラス型の軸を螺旋状の磁力線が取り囲む磁場構造の トーラスモデルがある。我々は磁気ロープの軸が曲がっている可能性も考慮するために、シリンダーモデルとトー ラスモデルの両方を用いて、2006-2007 年に太陽風観測衛星 ACE で観測された 5 つの磁気ロープイベントを解析 した。その結果、2つのイベントについてはシリンダーモデルとトーラスモデルによって推定された軸方向はほぼ 同じ(11 度以内)であり、一つのイベントは少し異なる角度(30 度近く)であり、別の一つは大きな違い(90 度 以上)、残りの一つのイベントはトーラスモデルでのみ観測を再現可能であった。

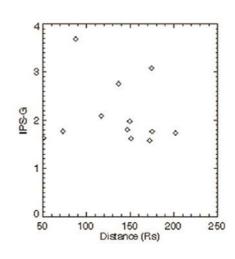
#### 8.かにパルサーを用いた太陽南極域のコロナ密度推定

近年の太陽活動の低下に伴う太陽風密度の減少が IPS やその場観測から指摘されており、その流源であるコロナの状態を知ることは太陽活動を探る上で重要である。太陽コロナの密度を推定する方法の一つに、パルサーが放射する電波パルスの周波数分散値(Dispersion Measure: DM)を測定するものがある。 DM はパルサー視線上の電子密度の積分値を表すため、視線が太陽に近づいたときと離れたときの DM 測定値の差を取ることでコロナ密度の積分値を得ることができると考えられる。 我々は 2016 年 11 月より豊川アンテナを用いた"かにパルサー"の観測を開始した。かにパルサーは 6 月中旬に見かけ上、太陽南極上空に 5 倍の太陽半径まで接近する。また、かにパルサーは時折通常のパルス強度を数析上回る巨大パルスを放射することで知られ、その巨大パルスを利用することで短時間の観測から DM を決定することができる。豊川の大型アンテナを用いた一日当たり約6分間の観測で数十から数百の巨大パルスを検出した。この値は先行研究と比較しても非常に高く、豊川アンテナが高感度であることを示している。現在、太陽コロナの密度推定を含めたパルサー観測の発展に取り組んでいる。

## 9. リアルタイム宇宙天気予報に向けた IPS データ同化シミュレーションの開発

太陽から放出される太陽風や CME は地球に到来すると地磁気を始めとした地球環境に擾乱をもたらし、電波通信や人工衛星・航空機の航行、GPS 測位など、社会生活に様々な影響を与える。これらの擾乱現象やそれらに起因する社会的影響を擾乱の到来前に予報する宇宙天気予報が近年ますます重要になってきている。本研究部で推進している IPS 観測は、安定した地上観測から地球方向に飛来する太陽風や CME を到来前に検出できる利点がある。本研究部では、日本における宇宙天気予報業務を担う情報通信研究機構(NICT)と共同で IPS 観測データを NICT の太陽風・CME 予報シミュレーションに取り込み予報精度を向上させる開発研究に着手した。従来の CME 予報モデルでは、太陽近傍の可視光撮像観測などから CME の初期速度を導出し、電磁流体シミュレーション上で、その伝搬を解くことで地球への到来を予報していた。しかし観測から求まる初期速度に誤差があることや、惑星間空間中を伝搬する過程で CME が加速・減速を受ける効果の影響で予報精度は低かった。一方、IPS 観測では惑星間空間を伝搬中の CME の位置や速度を導出できる。そこで、あらかじめ様々な CME の初期速度で伝播をシミュレーションしておき、IPS 観測結果に最も近いシミュレーション結果を抽出することで、より高精度にかつ迅速に地球への到来を予報できるよう、システムの開発を進めている。





左: ISEE の観測から得られた CME に起因する IPS 擾乱。 右: CME に起因する擾乱が得られた天体の位置。