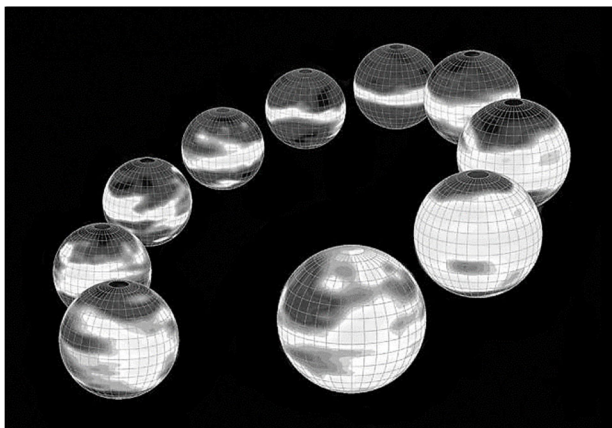


太陽圏研究部



研究テーマ・キーワード

- 太陽風と太陽圏 3 次元構造
- 惑星間空間シンチレーション (IPS) 観測
- コロナ質量放出 (CME)
- 太陽圏長期変動
- 宇宙天気予報
- 電波天文観測
- 電波望遠鏡・装置開発
- パルサー

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ある。地球はこの中で生まれ、進化してきた。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ない。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、太陽風の物理過程の解明に取り組んでいる。

地上観測の最大の特長は、長期にわたる安定運用であるが、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る。

近年、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ったり、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ったりすることが多くなった。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あろう。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がれるように、次世代装置の開発も行っている。

2021 年度の主な活動

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 327 MHz 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 観測は太陽風の全体的な分布に関する貴重な情報を提供する。現在我々が運用している IPS 多地点システムは、豊川、富士、木曾に設置された 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 つのアンテナ中で最も大型・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、木曾アンテナは 2013-2014 年に受信機が更新され、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。よって、多地点観測による太陽風速度データは冬期間得られない。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に利用されている。本年度は 4 月上旬から 12 月上旬まで豊川・富士・木曾の 3 つのアンテナによる IPS 観測を実施した。富士アンテナの観測は 6 月下旬から 8 月上旬および 11 月下旬から 12 月上旬に駆動系の不具合により度々中断している。また、菅平のアンテナは積雪による被害のため運用できなくなっていたが、本年度に同アンテナは撤去された。

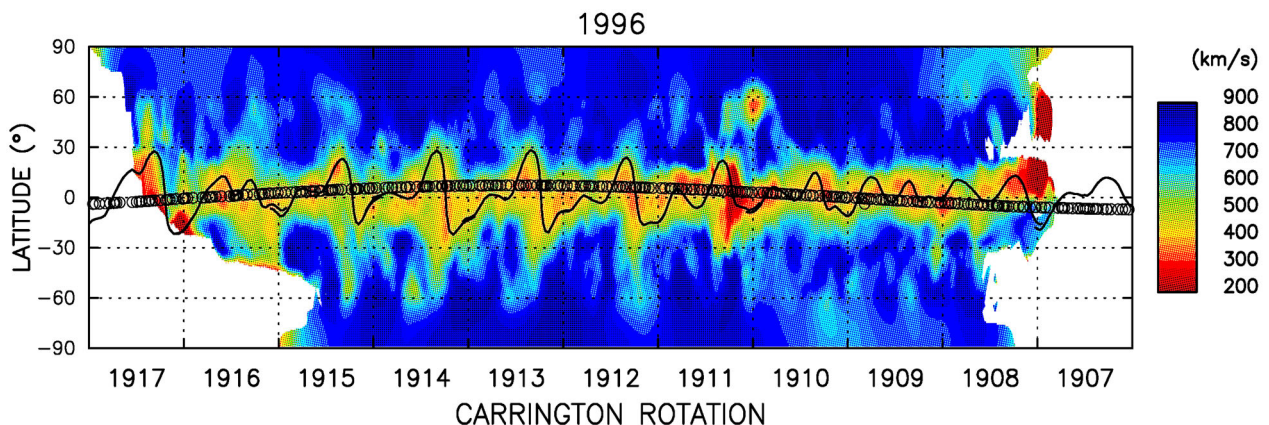
宇宙天気予報を目指した国際共同研究プロジェクト

我々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 解析から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。その共同研究を通じて開発されたのが Time-dependent tomography (TDT) プログラムである。宇宙天気予報の精度を一層向上するため、IPS 観測データと ENLIL 太陽風モデルを融合させた解析システムも開発されている。これらプログラムは、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）で地球に到来する太陽風を予報するためにリアルタイムで実行されている。

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、メキシコでも IPS 観測専用のアンテナが建設され、低周波帯の大型電波アレイシステム LoFAR（欧州）を用いた IPS 観測も実施されるようになった。本年度は、Parker Solar Probe (PSP) 探査機が太陽に接近した 3 つの期間（Orbit 1-3）について、TDT プログラムを使って本研究所、LoFAR、ロシアの IPS データを総合した解析が行われた。その結果を PSP のその場観測と比較したところ、密度と速度に食い違いが見られることが分かった。この食い違いの原因について目下検討中であり、今後 Orbit 3 以降の期間についても比較を行っていく予定である。

IPS Tomography の改良と太陽風乱流特性の長期変動

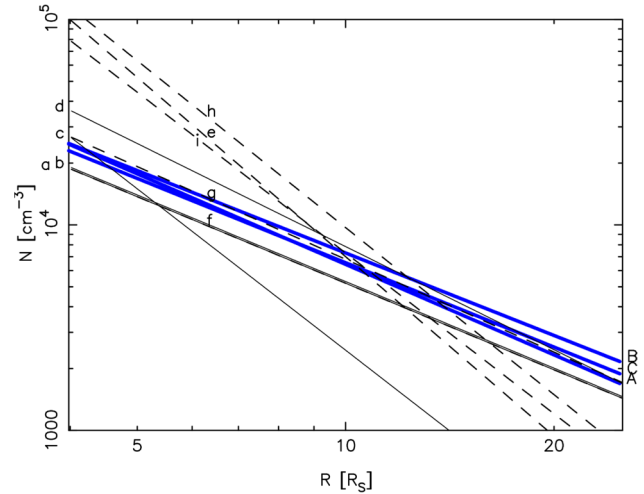
IPS 観測で得られた太陽風速度データを Tomography 解析する際、視線に沿った太陽風密度揺らぎ (ΔN_e) の空間分布の情報が必要となる。これまでの研究から太陽風速度 V と ΔN_e の間には $\Delta N_e \propto V^\alpha$ 、 $\alpha = -0.5$ の関係があることが分かっている。この関係式を使った Tomography 解析からは、第 23 太陽活動周期 (SC23) における飛翔体観測 (OMNI データベースや Ulysses 観測など) と良い一致を示す太陽風速度データが得られた。ところが、第 24 太陽活動周期 (SC24) において Tomography 解析と飛翔体観測を比較したところ、両者には系統的な食い違いがあることが分かった。即ち、Tomography 解析で得られる太陽風速度は飛翔体観測より 50–100 km/s 程度高くなっている。この原因について調査した結果、冪指数 α を変化させると、両者の食い違いが改善することが判明した。SC24 において Tomography 解析と飛翔体観測最が最もよく一致する冪指数は +0.5 であった。最近の理論研究によると ΔN_e は太陽風加速の効率を制御する重要なパラメータであり、本研究の結果は加速効率が太陽活動周期に伴って変化していることを示唆している。本研究で得られた太陽風速度データは Bzowski 博士（ポーランド）のグループとの共同研究に用いられ、長期間をカバーした太陽風密度の全体的モデルが開発された。



1996 年の IPS 観測の Tomography 解析から得られた太陽風速度の分布図。実線は Wilcox Solar Observatory の磁場観測から決定した磁気中性線、○は地球、即ち OMNI データベースが収集された場所を示す (Tokumaru et al., 2021)。

「かに」パルサーの巨大電波パルス観測による太陽コロナ密度の測定

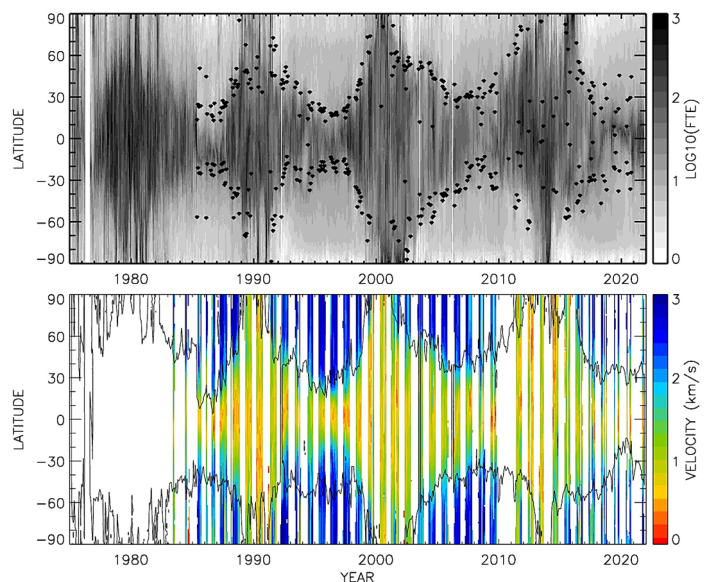
豊川アンテナを用いて「かに」パルサーの巨大電波パルスを受信し、太陽コロナの密度を遠隔測定する研究が2017年から実施されている。パルサーからの電波は伝搬経路上のプラズマによって到来時刻の遅延が発生するが、この遅延をとらえることでプラズマ密度の視線積分値（Dispersion Measure, DM）を決定することができる。「かに」パルサーは毎年6月に見かけ上太陽半径の5倍の距離まで太陽に接近するので、太陽接近時にDMを測定すれば、太陽と反対方向にあるときに対する増加量から太陽コロナ密度の推定が可能となる。また、「かに」パルサーは時々強力な電波（巨大電波パルス）を放射するので、これを検出すれば短時間かつ高精度でDMを決定することができる。本研究では、2018および2019年（SC24/25 極小期）に豊川で取得されたDMデータを解析し、太陽半径5–60倍の距離範囲における太陽風密度分布モデルを決定した。得られた密度モデルは過去の太陽活動下降期において「かに」パルサー観測から得られたものと誤差の範囲で一致していた。前回（SC23/24）の極小期では太陽風密度の顕著な低下が報告されていたが、本研究の結果は現極小期の太陽風密度が以前の極小期のレベルに回復したことを示している。



2018, 2019年の豊川における「かに」パルサー観測から決定したコロナ密度モデル（太線 A–C）。図中、a–d（細線）は過去のサイクルで太陽活動が低い時期、e–f（破線）は高い時期に決定された密度モデルを示す（Tokumaru et al., 2022）。

1975–1985年の太陽風大規模構造の再現

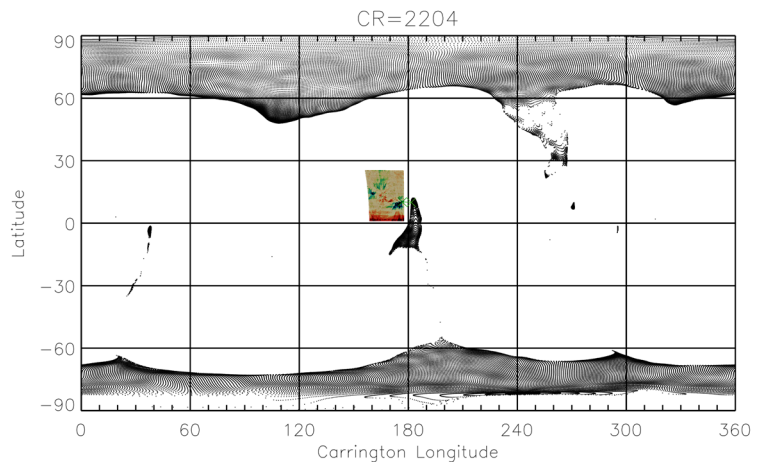
極大期を除き、太陽風は低緯度低速風（<450 km/s）と高緯度高速風（~800 km/s）で構成される緯度構造を持つことが知られている。低緯度低速風の緯度幅は太陽活動周期に大きく依存しているため、太陽風構造の長期変動を知るための足掛かりとして利用することができると期待できる。我々はこれまで、太陽風の起源であるコロナホールの分布を明らかにし、その分布が黒点蝶形図に類似していることを明らかにした。本年度はIPS観測とPotential Field Source Surface（PFSS）解析による磁束管拡大率（FTE）との比較を行った。両者ともに、各Carrington rotation（CR）数のデータを緯度平均して並べた蝶形図をベースとしており、各CR数の微細構造には注目していない。このようなデータセットで、太陽風速度の2成分性を考慮すると、低速風／高速風の境界ではそれぞれ同程度観測されるため、境界緯度は両者の平均値である600 km/sの緯度から決定できると仮定した。1985–2020年のIPS観測データから、太陽風速度が600 km/sになる境界緯度のFTEを抽出したところ、FTEは境界緯度で $\log_{10}(\text{FTE}) = 0.97 \pm 0.56$ であることが判明した（上図）。次に $\log_{10}(\text{FTE}) = 0.97$ を境界緯度として太陽風構造に重ねたところ、概ねIPS観測データと境界緯度が一致しており、これを過去に外挿して1975年以降の太陽風構造の概形の推定を行った（下図）。



上図：FTEのソース面分布（画像）とIPS観測から求めた緯度境界（黒点）。
下図：IPS観測データ（画像）とPFSS解析から求めた境界緯度（黒線）。

Hinode/EIS 観測と IPS 観測の比較による plasma upflow と低速太陽風の関係

太陽活動領域で発生するプラズマ上昇流 (plasma upflow) に関する研究を行った。このプラズマ上昇流は人工衛星「ひので」に搭載された極端紫外線撮像分光装置 (EIS) によって検出され、その元素組成が低速太陽風と似ていることから、低速太陽風の発生源であることが示唆されている。我々は EIS 観測と Potential-Field-Source-Surface (PFSS) モデルによって計算された光球磁場を比較することによって、プラズマ上昇流と開いた磁場の関係について研究を行った。その結果、プラズマ上昇流は近くに開いた磁場が存在するパターンと、存在しないパターンの 2 つに分類できることが分かった。また、PFSS モデルと IPS データを比較することによって、upflow が存在する活動領域と低速太陽風の位置には相関があることが分かった。

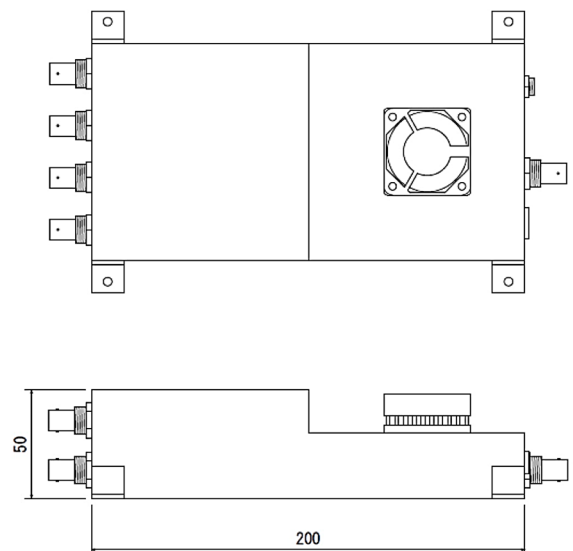


EIS データ(中央の長方形の領域)と PFSS で求めた開いた磁力線の光球面における足元を重ねて表示したもの。プラズマ上昇流のすぐ近くに開いた磁力線が存在していることが分かる。

次世代太陽風観測装置の開発

太陽圏研究部の IPS 観測を飛躍的に向上させるための次世代太陽風観測装置計画を推進した。本年度は、日本学術会議の「マスタープラン 2023」への提案を決め、天文・宇宙物理学分野に中型 B 計画として、地球惑星科学分野に中型計画として、それぞれ提案し、ヒアリングを受けた。マスタープラン自体は本計画よりも大規模な計画を対象とするが、今回の取りまとめでは両分野とも 10 億円規模の中型計画も分野の将来を見据えるために取りまとめることになったことで、本計画も提案が可能となった。「マスタープラン 2023」は結果的に取りまとめ自体が無くなったが、各コミュニティへの浸透が大きく進んだ。並行して、大型科研費の申請や研究所からの概算要求提案を行った。

2021 年度は科研費基盤研究 A が採択され、富士局用に全体の 5% の規模のコアアレイの建設に着手した。デジタルバックエンドの開発を行い、64 チャンネルの信号をフロントエンド直下に設置される 8 台の AD モジュールでデジタル化し、光ファイバーで接続された FPGA アレイで最大 8 ビームをリアルタイムに合成できる系の設計を完了した。本年は世界的な半導体不足に見舞われ、デジタル部品の調達は困難を極め、残念ながら納品は 2022 年度に持ち越されたが、システム設計から発注までを完了できたことは大きな進捗と言える。



次世代太陽風観測装置の AD モジュール。