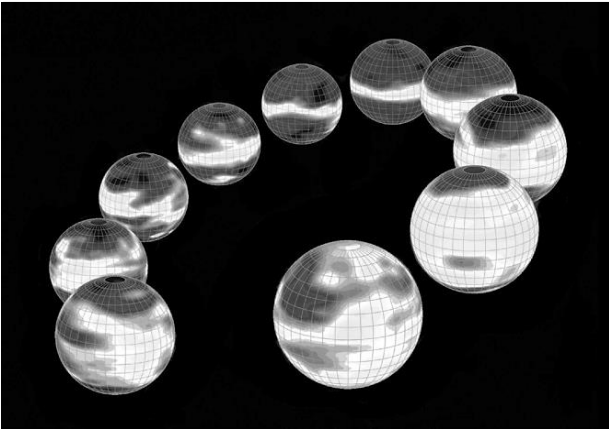


太陽圏研究部



研究テーマ・キーワード

- 太陽風
- コロナ質量放出(CME)
- 惑星間空間シンチレーション観測
- 太陽圏3次元構造
- 太陽圏長期変動
- 宇宙天気予報
- 電波天文観測
- 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伝搬機構はまだ十分に解明されていない。そのため、我々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る。

2018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観測は太陽風の全体的な分布に関する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）に利用されている。今年度は9月に到来した2つの大型台風によって富士アンテナが深刻な被害を被ったため、IPS観測が一時中断した。また、本IPS観測システムに対する電波天文業務受信施設の指定が12月に期限を迎えるため、総務省に対して更新申請を行い10年間（2028年12月まで）の延長が認められた。

宇宙天気予報を目指した国際共同研究プロジェクト

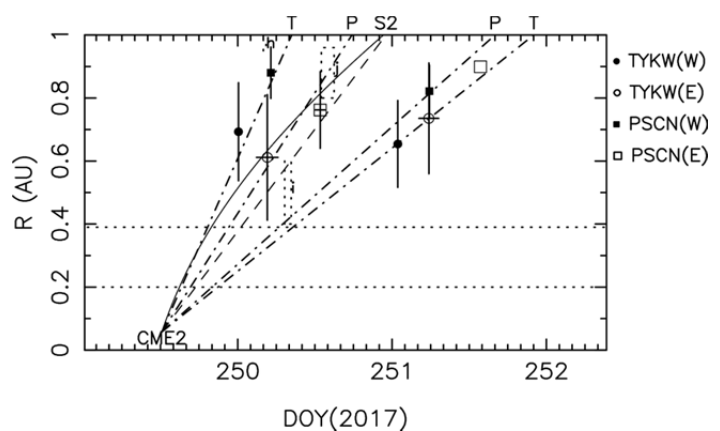
本研究部はカリフォルニア大学サンディエゴ校 (UCSD) ジャクソン博士のグループと協同で、IPS データの Tomography 解析によって時々刻々変化する太陽圏 3 次元構造を明らかにする研究に取り組んできた。その研究を通じて開発されたのが Time-dependent tomography (TDT) 解析プログラムである。本プログラムは、現在、NASA/Community Coordinated Modeling Center (CCMC) のサーバ上で利用可能になっているほか、韓国宇宙天気センター (KSWC) において地球に到来する太陽風を予報する実験のためリアルタイムで実行されている。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、7月に韓国・ソウルで開催された KSWC 主催の The 8th Space Weather Conference で本研究所の IPS 観測について招待講演を行った。また、12月には KSWC 関係者 3 名が本研究所を訪れて、IPS 観測データの解析方法などについて議論した。

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。中国では新たに IPS 観測専用の大型アンテナ建設計画が進行中である。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 10 月に中国・通遼で開催された IPS workshop に参加したほか、12月に名古屋大学で開催された MWA project meeting で本研究所の IPS 観測研究について招待講演を行った。また、同会議の後、MWA project の John Morgan 博士を交えて共同研究について議論した。さらに 1 月には中国の IPS アンテナ建設を計画しているグループ (Yihua Yan 博士他 4 名) が本研究所を来訪し、IPS 観測についての議論や豊川アンテナ施設の見学を行った。

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 4 日および 6 日に発生した Halo 型 CME イベントにおいて、本研究所およびロシア・プシナ観測所 (PRAO) の IPS 観測は、これらの CME に伴う擾乱が太陽風中を伝搬してゆく様子を明瞭に捉えた。IPS 観測が捉えた擾乱は、CME が励起した衝撃波に伴う高密度プラズマに対応すると考えられる。2つの観測局は異なる経度にあるため、両者のデータを組み合わせることで、衝撃波の伝搬をより細かな時間間隔で追跡することが可能になる。本研究では、本研究所の IPS 観測から得られる g 値と組み合わせるため、PRAO の IPS 観測から g 値を計算した。 g 値は視線方向の太陽風密度ゆらぎの相対的な大きさを表す量であり、視線を高密度プラズマが横切ると g は 1 より大きくなる。PRAO と本研究所の g 値データから $g > 1.5$ 以上のものを抽出し、時間に対して IPS 観測の視線の位置 (太陽からの距離) をプロットすることによって、2つの Halo CME イベントが励起した衝撃波が太陽から地球軌道まで伝搬する過程を明らかにした。得られた時間-距離プロットから推定された衝撃波の伝搬速度は地球軌道の衝撃波到来時刻から求めた速度に比べかなり速く、この

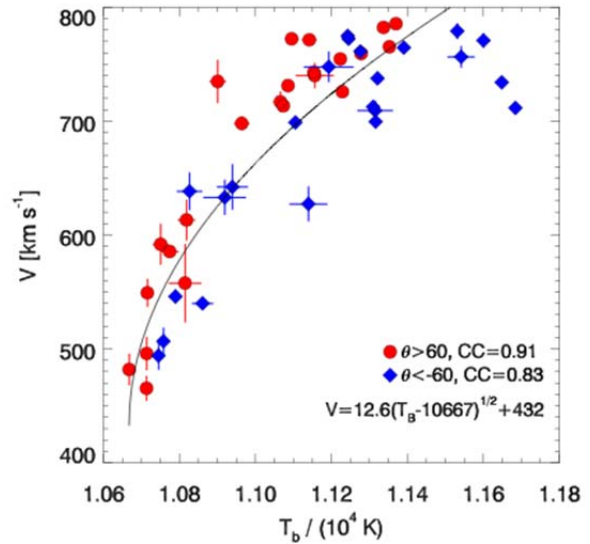


2017 年 9 月 6 日の Halo CME イベントに対して日本 (豊川、TYKW) とロシア (プシナ、PSCN) の IPS 観測データから作成した衝撃波の伝搬プロファイル。

ことはコロナから高速で打ち出された CME が惑星間空間中で急速に減速したことを示している。IPS データからは衝撃波の伝搬速度の経度依存性も明らかになった。さらに、9月6日の CME イベントでは、地球に到来した衝撃波の伝搬速度に比べ低い速度で伝搬した擾乱が観測されている。この「遅い擾乱」の伝搬速度は東西ではほぼ等しく、等方的に伝搬したことを示している。「遅い擾乱」の起源は未だ完全に解明されていないが、中心から離れた部分の衝撃波に対応している可能性がある。

マイクロ波極域増光と太陽風速度の関係

野辺山電波ヘリオグラフで観測されている極域増光は、彩層の大気構造を反映したマイクロ波、ミリ波でのみ観測される太陽外縁部の輝度温度の上昇である。過去の研究で、太陽活動周期との関係が知られており、極域の輝度温度は太陽活動極小期において最大となる。このことから、極域増光は、太陽活動極小期に大きく広がる極域コロナホールと、密接な関係があることが示唆される。一方で、極域を流れる太陽風も太陽活動周期に大きく依存しているため、その速度は極域増光と何らかの関係があることが予想される。そこで、本研究では、IPS 観測による極域太陽風とマイクロ波極域増光の関係を、1992–2018 年にわたり調査した。その結果、極域増光 (T_b) と極域太陽風速度 (V) の間には高い相関があることが判明し、関係式 $V = 12.6 (T_b - 10667)^{1/2} + 432$ を得た。また同時に、極域増光と極域コロナホールの面積 (A) には、極めて高い相関

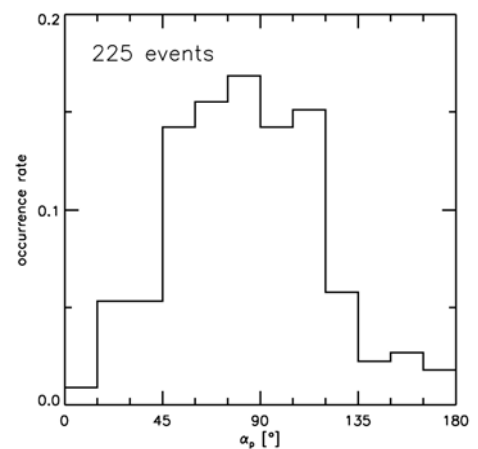


太陽風速度(V)と極域輝度温度(T_b)の関係。●、◆はそれぞれ北極域、南極域のデータを表す。

(>0.95) があることが確認された。このことから、 V - T_b の関係は、太陽風予報に用いられている V - A の関係を反映したものであるといえる。コロナホール面積とそこから伸びる磁束管の拡大率 (f) は概ね逆数の関係 ($A \propto 1/f$) にあることが知られており、 V - T_b の関係はよく知られた Wang and Sheeley の経験則 ($V \propto 1/f$) であるとも解釈できる。

表面ピッチ角の扱いが異なる2つのシリンダー型フラックスロープモデルフィッティング法の比較

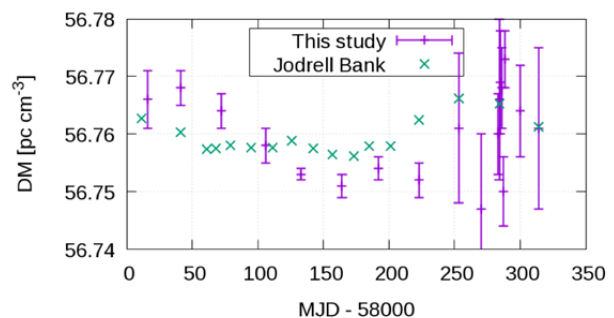
惑星間空間フラックスロープ (IFR) は太陽から惑星間空間へと噴出する磁場構造であり、軸となる磁力線が螺旋状の磁力線によって取り囲まれた磁場形状をしている。IFR の磁場構造を推定するのに最もよく使われる方法の一つが、Lundquist モデルを観測データにフィッティングする方法であり、IFR 表面磁場の軸磁場に対するピッチ角 α_p を 90 度に固定する方法と、フリーパラメタとする方法の2つがある。本研究では前者を従来法、後者を一般化法と呼び、これら2つの Lundquist モデルのフィッティング法を、Wind、STEREO で観測された magnetic obstacle (MO) イベントに適用し、方法による結果の違いを評価した。その結果、軸方向と磁束量に関して大きな違いが見られた。また、一般化法で得られた α_p の統計分布から、大部分のイベントで IFR 表面の磁力線のツイストは大きいことが分かった。これらの結果から、IFR の軸方向・磁束量・ピッチ角を推定する際は、従来法よりも一般化法を用いる方が良いことが示された。



一般化法によって推定された α_p のヒストグラム。

かにパルサーを用いた太陽コロナの密度推定

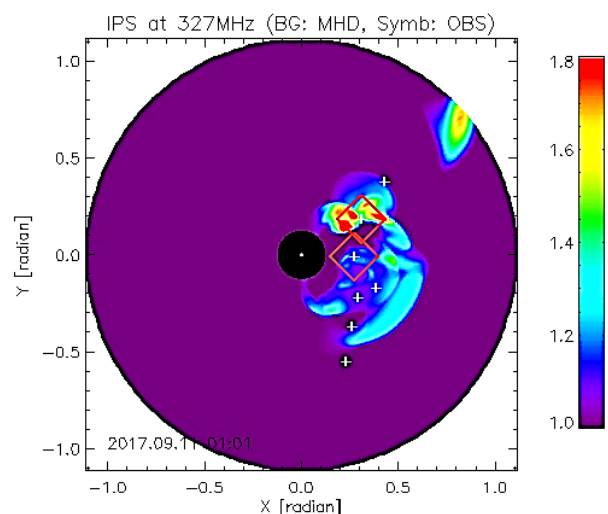
近年の太陽活動の衰退に伴う太陽風密度の顕著な低下が IPS や探査機による観測から報告されており、その流源であるコロナの密度を得ることは太陽活動の状態を調査する上で重要である。コロナの密度を推定する手法の一つに、パルサーが放射する電波パルスの周波数分散度（Dispersion Measure：DM）を測定するものがある。DM はパルス伝搬経路上の電子密度の積分値を表すため、パルサーが見かけ上太陽に近づいたときと離れたときの DM の僅かな差を測ることでコロナ密度の視線積分値が得られる。パルサーDM 測定はコロナ密度を推定するための有用な手法であるが、こうした研究は近年行われていない。本研究部では、豊川アンテナによる“かにパルサー”の観測からその DM を測定しコロナ密度を推定した。ここで、かにパルサーは毎年 6 月中旬に見かけ上太陽南極上空に約 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電波パルスの強度を数桁上回る巨大電波パルスを放射しており、これを利用することで短時間の観測から DM を測定できる。本研究部における観測の結果、得られたコロナ密度は現在の太陽活動度である極小期で過去に見られた値と概ね一致した。しかし、その誤差は大きく、過去の太陽活動周期で得られた値に対する有意な変化は確認できなかったため、コロナ密度推定の高精度化に向けて今後も観測を継続してゆくつもりである。



本研究部の観測から得られたかにパルサーの DM(—)と Jodrell Bank 天文台により測定された DM(X)の比較。

宇宙天気予報の実用化に向けたデータ同化太陽圏モデルの開発研究

太陽から放出されるコロナ質量放出（CME）現象は地球に到来すると地球周辺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ため、到来前に予報することが重要である。本研究部で行っている IPS 観測は、遠方天体の地上電波観測から CME の通過に伴う電波の散乱現象を捉えることで地球方向に飛来する CME を検出できる。一方、本観測は内部太陽圏を 1 日かけてスキャンするため、比較的時変動の早い CME を追跡することは難しかった。本研究では日本の宇宙天気予報業務を担う情報通信研究機構（NICT）と共同で、磁気流体（MHD）シミュレーションを用いた IPS 観測データの可視化システムを開発した。本システムでは、まず可視光のコロナグラフ観測から CME の初期速度を求め、MHD シミュレーション SUSANOO-CME を用いて伝搬のシミュレーションを行う。そこで得られる内部太陽圏の 3 次元密度分布を元に、地球から各電波天体への視線に沿った電波の散乱を解くことで擬似的な IPS データを再現する。この計算を複数の CME 初期速度で行い、それぞれから得られる擬似 IPS データの中から、最も実際の IPS 観測を再現する結果を自動的に選択する。2017 年に発生した代表的な CME に対して本シミュレーションを行った結果、実際の IPS 観測に最も近い擬似 IPS データが CME の地球への到来を最もよく予報できることが示唆された。現在、本システムを NICT の予報業務に実装する作業が進められている。



MHD シミュレーションで再現された IPS データ(背景)と本研究部で実際に観測された IPS データ(シンボル)の比較。