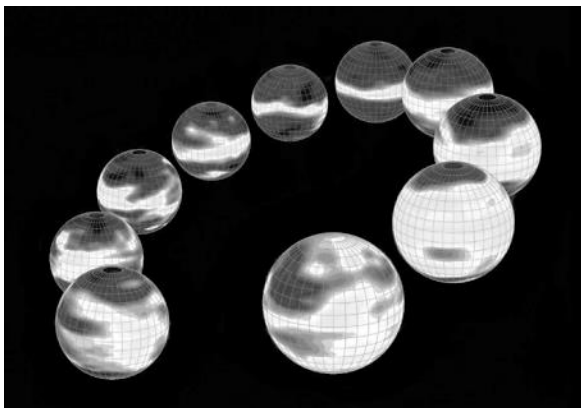


9-1. 基盤研究部門 | 太陽圏研究部



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

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伝搬機構はまだ十分に解明されていません。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、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がれるように、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。

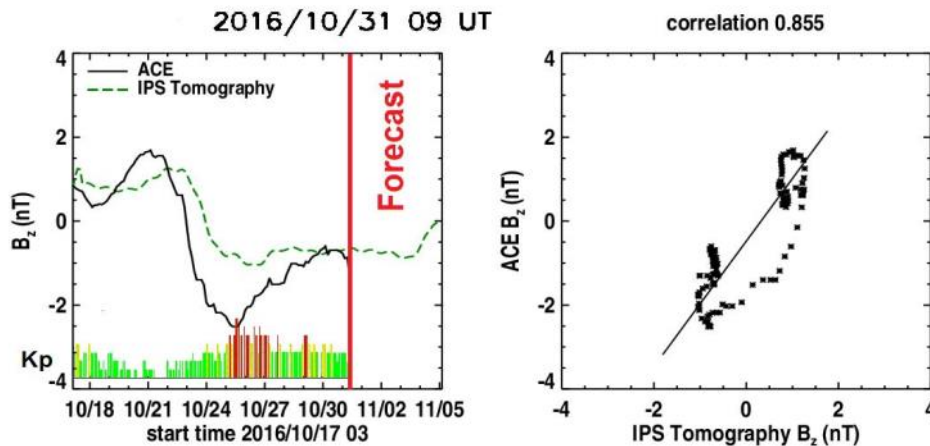
2016 年度 太陽圏研究部の主要な成果

1. 惑星間空間シンチレーションシステムを用いた太陽風観測

本研究所では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つの大型アンテナより成る。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

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、



IPS データの TDT 解析と CSSS モデル計算から得られた IMF Bz 予報値(点線)と ACE 探査機による観測値(実線)の比較。

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 (Korean Space Weather Center: 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。

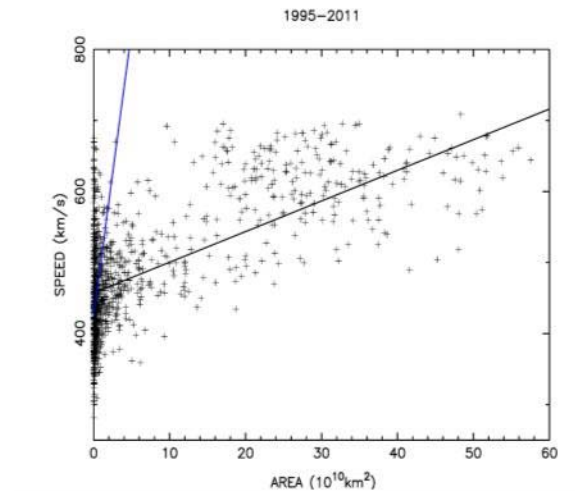
IMF Bz 成分は太陽風擾乱の地球磁気圏への影響を強くコントロールするため特に精度よい予報が求められる。そこで我々はジャクソン博士のグループと共同で太陽面磁場観測データと IPS データを組み合わせた解析から、地球における IMF を正確に予報する研究を実施している。これまでの研究からは、CSSS 磁場モデルで予測される IMF 動径および経度成分の変化が地球近傍における IMF の観測データとよく一致していることを明らかにした。また、IMF Bz 成分についても予測値は観測データとよく一致している場合があることから、今後更なる検証が必要とされる。

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、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。異なる観測局間での IPS データの比較は、WIPSS を推進する上で鍵となる。そこで今年度は、メキシコと本研究所の IPS データの比較を UCSD グループと協同で実施した。メキシコと本研究所の IPS データ (g 値) には食い違いが見られるが、調査の結果、メキシコの IPS データに大きなノイズが入っていることが判明し、これが食い違いの原因となっている可能性がある。今後メキシコの IPS 観測に見られるノイズに関する更なる調査が必要になっている。また、2016 年 12 月に UCSD で開催された IPS workshop において、IPS 観測データを交換するための共通のフォーマット IPSCDF 型式の改訂版 Version 1.1 (V1.1) が議論された。

3. 太陽風速度とコロナホール面積の関係

コロナホールは太陽磁場が惑星間空間へと開いた領域であり、そこからは高速の太陽風が吹き出している。先行研究からは、コロナホールの面積と太陽風速度の間に正の相関関係が報告されている。しかし、これらの研究で用いられた太陽風速度データは黄道面内 (太陽赤道付近) における観測で得られたもので、そのデータと太陽面上のコロナホールと一対一の関係付けは行われてない。そこで我々は、本研究所の IPS 観測で得られた太陽風速度データを使ってコロナホール面積との関係を調査した。IPS 観測からは太陽風速度の全球的な分布が得られる。本研究では、ポテンシャル磁場モデルを使って太陽風の流源面 (Source surface) から光球面へ磁力線を追跡することによって、磁力線の開いた領域 (コロナホール) の面積と太陽風速度データの一対一の間連づけを行った。解析期間は

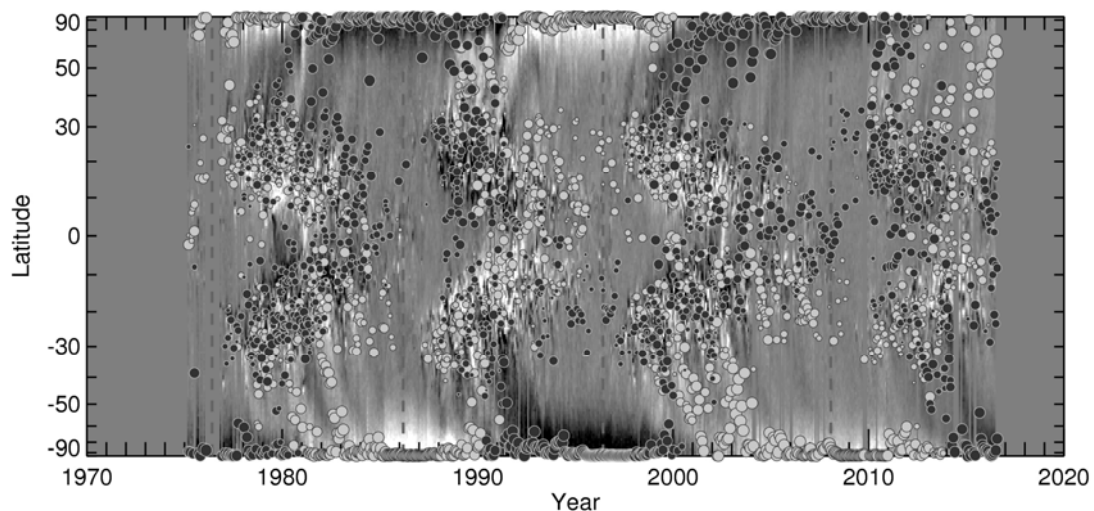
1995 年から 2011 年までである。解析の結果、コロナホール面積 A と太陽風速度 V との間には良好な正の相関関係があることが再確認されたが、その傾きは先行研究で得られたものは大きく異なっていた。また、 A と V の相関係数は太陽極大期に減少する傾向が見られたが、これは同時期における太陽磁場および太陽風の構造の時間変化が速いためと考えられる。極大期を除けば、 A と V の相関は高く、傾きは長期にわたって安定していた。また、太陽風速度を決定するパラメータとしてよく知られている磁力線拡大率の逆数 $1/f$ と比較したところ、 A と V の相関は $1/f$ と V の相関と同程度であることが分かった。さらに、 $A^{1/2}$ と V との間には A と V の関係に比べより高い相関があることが判明した。このことを使えば、コロナホールの観測からより正確に太陽風速度を求めることができるようになり、宇宙天気予報の精度向上が期待される。



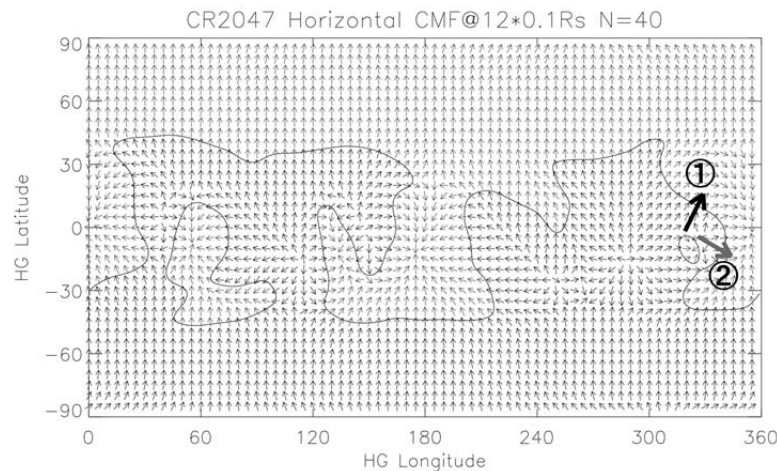
コロナホール面積太陽風速度の関係。

4. コロナホールの長期出現分布の傾向、および宇宙線モジュレーションとの関係

1975-2014 年の期間にわたり、ポテンシャル磁場モデルを用いて 3335 箇所のコロナホール領域を自動検出し、出現箇所、面積、平均磁場、磁束管拡大率、太陽風速度（IPS 観測のある場合のみ）のデータベースを作成した。まず最初にコロナホールの面積の頻度分布を調査したところ、1995-2011 年の HeI 1083 nm 観測データを用いて自動検出したコロナホール面積の頻度分布とほぼ一致した。これにより、ポテンシャル磁場近似によるコロナホール検出の有効性が確認できたため、全解析期間の出現状況の長期変動を調べた。その結果、低緯度において黒点蝶形図のパターンに一致した分布が得られた。これはコロナホールの出現が黒点のような強い磁場領域の崩壊過程で生成するというモデルを支持する結果である。また、極域コロナホールの面積と中性子モニターから得られた銀河宇宙線の変調パターンの相互相関関数が約 1 年の時間差で最大値をとることが分かった。1 年という時間差は、太陽風がコロナホールから吹き出して終端衝撃波まで到達する時間に相当することから、この結果は銀河宇宙線の太陽磁場の変動による直接的な変調によるものだと考えられる。



コロナホールの出現緯度の長期変動。白抜き、黒抜きの丸印はそれぞれコロナホールの極性（正/負）を示し、大きさはコロナホール面積の対数に比例する。背景は Kitt Peak National Solar Observatory, USA の観測で得られた光球面磁場の時間発展図。



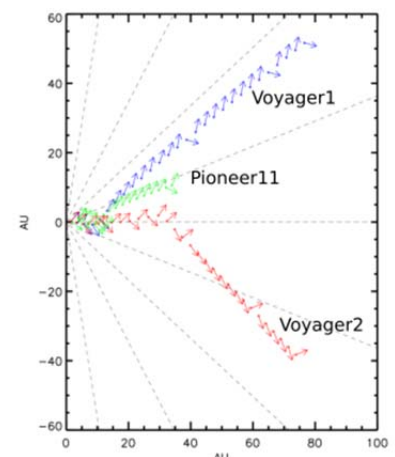
1.2 R_s の高さのコロナ磁場マップ。①の矢印はシース終了時刻における ACE データとの比較の対象となったコロナ磁場の方向、②の矢印は磁気嵐発生位置の上空のコロナ磁場の方向。

5. 磁気嵐前方シース領域の南北磁場成分とコロナ磁場の関係

磁気嵐の発生は、惑星間空間磁場 (IMF) の南北成分によってコントロールされており、磁気嵐の過半数は磁気嵐、あるいはその前方のシース領域によって引き起こされている。よって、磁気嵐の予報にとって、磁気嵐とシースにおける IMF の南北成分を理解することは重要である。磁気嵐はその磁場構造、起源が明らかになりつつあるが、シースの磁場の起源はあまり研究されておらず、シースの磁場とコロナ磁場との関係はまだ解明されていない。そこで我々は、PFSS モデルと、惑星間空間シンチレーション観測データから太陽風構造を求める UCSD time-dependent tomography (UTDT) 解析を組み合わせ、太陽風観測衛星 ACE で観測されたシースの南北磁場の極性とコロナの南北磁場の極性を比較し、両者の関係を探った。その結果、2006–2008 年の解析対象のどのシースに対しても、太陽中心から 1.1, 1.2 太陽半径の高さのコロナ磁場の南北成分の極性とシース終了時刻における南北磁場の極性が一致した。この結果はコロナの低高度の磁場が噴出し、それがシース終了時刻において見えていることを示唆する。さらに、2006 年 12 月のシースイベントに関しては、シースにおいてコロナ磁場の南北成分の高さ方向の変化が見えていることが示唆された。UTDT 解析の代わりに 1 次元流体力学モデルを用いた場合でも同様の結果が得られた。

6. 惑星間空間磁場の定常的南北成分の起源に関する研究

地磁気嵐を引き起こす要因となる惑星間空間磁場の南北成分を予測・解析することは、宇宙天気予報の分野で重要である。我々は、発生メカニズムが完全な理解には至っていない定常的な南北磁場に関する 2 つの解析を行った。一つめは様々な衛星の磁場データを用いた統計解析である。特に惑星間空間磁場の動径成分 (B_r) と南北成分 (B_n) の関係性について調べた。その結果、太陽の赤道面より北の領域では B_r と B_n が正の相関関係、太陽の赤道面より南の領域では B_r と B_n が負の相関関係を持つ傾向にあることが判明した。2 つめは、太陽コロナ領域の磁場と地球付近の磁場との比較解析である。コロナ磁場は PFSS モデル、惑星間空間を流れる太陽風は UTDT 解析を用いて計算したモデルを使用して解析を行った。その結果、太陽コロナ領域の B_r と地球付近の B_n の間に、統計的に有意な正の相関関係があることが判明した。この研究は UCSD の B. V. Jackson, H.-S. Yu と共同で行った。



太陽からの距離に対する Voyager1、oyager2、Pioneer11 の位置および年平均した B_n 成分の符号 (上向き: $B_n > 0$, 下向き $B_n < 0$)。