



IPS観測データを用いた太陽圏大規模MHDシミュレーション

藤木 謙一（太陽圏環境部門）

はじめに

1977年9月に打ち上げられたアメリカの探査機ボイジャー1号機が、35年の歳月を経て太陽圏の境界（ヘリオポーズ）を超え星間空間（銀河系空間）に入ったというニュースが昨年話題になりました。まだ研究者間でコンセンサスが得られた訳ではありませんが、それを実証するような観測データが得られ始めています。このような遠方の研究が難しいのは、観測データが極めて限られていることにあります。この観測データの隙間を埋めるために用いられているのが計算機シミュレーションという手法ですが、これは境界条件次第で様々な解が出てきます。私たち太陽風グループでは惑星間空間シンチレーション（IPS）観測データから得られた太陽風の3次元的な立体構造を現実的な内側境界条件として、太陽圏全体を含むシミュレーションをアラバマ大学、スタンフォード大学と行ってきました。今回シミュレーションの結果から興味深い現象が見つかりましたので紹介します。

太陽圏の大規模シミュレーション

太陽圏の大規模シミュレーションを実施するに当たり、まず内側境界条件を作ります。これにはIPS観測と電磁流体力学的（MHD）シミュレーションを組み合わせたMHD トモグラフィという手法を用いています（詳しくはSTEL ニュースレター 2001年8月号巻頭記事を参照）。この手法はスタンフォード大学の林啓志氏により開発されたもので、日々のIPS観測データに矛盾しない太陽風の三次元構造が得られます。IPS観測では磁場の情報は得られない

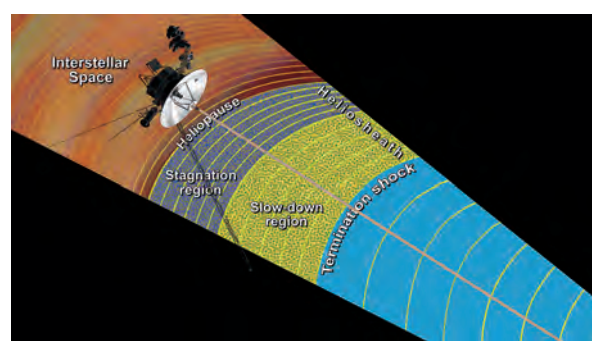


図1: ボイジャー1号のイメージ（画像提供：NASA/JPL-Caltech）。

ため、磁場はアメリカのウィルコックス太陽観測所（WSO）の光球面観測をポテンシャル磁場（PFSS）解析で外挿して計算に組み込んでいます。同氏により、近年の太陽風密度低下の影響を考慮して、2000年から2009年の50太陽半径（ R_s : 69万6000 km）－5天文単位（AU: 天文単位、1 AUは太陽と地球の間の距離で、約1億5000万 km）までの太陽風構造が計算されました。

次に、刻々と変化する5 AUの球面の太陽風の物理量を内側境界条件、これまでの研究で用いられている星間風の典型的な値を外側境界条件として、太陽から900 AU（ヘリオポーズの位置は120－130 AUあたり）まで計算しました。このシミュレーションコードはアラバマ大学の鷺見治一氏により開発されたものです。このコードには中性粒子流と太陽風の電荷交換の効果が組み込まれています。中性粒子流は太陽圏外を起源とする密度 0.17 cm^{-3} 、速度 26 km/s の中性原子（ほぼ水素）の定常的な流れですが、中性であるため太陽風磁場に押し戻されることなく太陽圏の深くまで侵入してきます。地球近傍では太

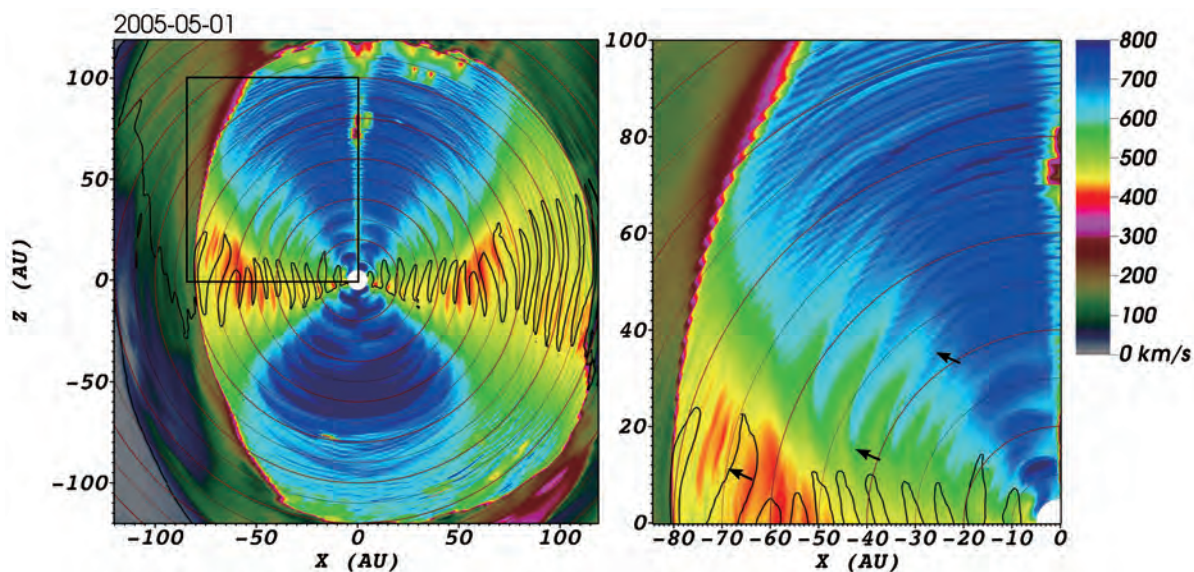


図2: 2005年5月1日の太陽圏シミュレーションのスナップショット。Z軸は太陽自転軸、x軸は星間風の流れに沿う(-x方向が上流)、同心円は太陽からの距離で10 AU 毎に実線と点線で示してある。黒線は惑星間空間の時期中性面を表す。右図は左図の四角で示した個所の拡大で矢印は速度振動を示す (Fujiki et al. GRL, 2014 より転載)。

陽風の構造を変えるような現象は起こりませんが、外部太陽圏では太陽風の密度が小さく、太陽風と電荷交換することで有意な量の太陽風高温成分となるため、太陽圏構造の決定に大きな役割をしていると考えられています。今回の計算では、太陽圏境界を十分に含む160 AUまで、これまでにない微細な動径方向のメッシュ(0.2 AU)を用いたことに特色があります。

さて結果の一例として、2005年5月1日の計算結果を図2に示します。太陽風の超音速領域は明るい色で示し、終端衝撃波を通過して亜音速に低下した太陽風領域(ヘリオシース)は暗い色で示されています。この図では星間風上流側(図の左側)は80 AUあたりに終端衝撃波が位置します。この時期は太陽活動下降期に相当し、高緯度の高速風と低緯度の低速風の速度の2層構造が見られます。また太陽活動下降期の特徴として極域から低緯度に向かってコロナホールが張り出しますが、その様子が高速風-低速風の境界付近の速度のギザギザ構造(緑色)や磁気中性面のうねり(黒線)から見てとれます。これらの構造は太陽が自転することによる影響で、太陽風速度と太陽自転周期で決まる共回転構造です。

太陽風速度振動

図2の右の拡大図を見ると、約50 AU以遠の太陽風の速度構造に奇妙な縞構造があることが分かりま

す。50 AU以内ではほとんど見られないため、惑星間空間で発生した構造であることは間違いありません。解析を進めるとこれは緯度、経度に関わらず全ての遠方領域に発生しており、波長は約2 AU、振幅は数十 km/sであることが判明しました。そこで類似の現象の観測例がないか調査したところ、ボイジャー2号機で似たような速度振動が報告されていました。

1990年代半ばにボイジャー2号機の太陽風速度がわずかながら振動しているという現象が発見されました。その波長は0.5~1 AU、振幅は数十 km/sであり、その時ボイジャー2号機は太陽から48 AUの位置にありました。太陽風速度振動と名付けられたこの現象は、後の研究でもさらに発見され、理論的な考察から太陽圏外起源である中性粒子流と太陽風の相互作用が起源であると指摘されています。私たちはボイジャー2号機で発見された太陽風速度振動が再現されたのだと考え、過去の理論的な考察に従って解析を進めていきました。その考察では波動の分散関係式が求められていましたが、残念なことに観測データには用いられていませんでした。太陽風速度が振動する場合、それに伴い密度や温度も振動するはずですが、搭載されている測定器の観測限界の問題で、それらの振動が検出できなかったためです。本研究ではこの分散関係式による解析をシミュレーションデータで行いました。その結果、速度と密度は逆位相で振動しており、そこから太陽風に乗

った系では波動の伝搬方向は太陽へ向かう向きであることが分かりました。ただし、実際には太陽風は超音速で太陽から遠ざかっているため、いったん発生した波動は太陽風によって外側へ運ばれていくことになります。

次に本シミュレーションで得られた結果とボイジャー2号機で観測された速度振動の相違点について考えてみます。ひとつ目は、速度振動の波長です。シミュレーションの結果は、ボイジャーの観測データの2〜4倍長い波長になっています。ボイジャー2号機の観測は1990年代、本シミュレーションは2000年代のデータを元に計算しています。新聞報道でも取り上げられていますので近年の太陽活動の低下は多くの人の知るところとなっていますが、これら2つの時期は太陽活動が低下する前後に相当します。この違いが波長に影響を及ぼすかどうかを見るために、2000年〜終端衝撃波通過までのボイジャー2号機のデータに周期解析(ウェーブレット解析)をかけて速度振動を探しました。結果を図3に示します。非常に弱いのですが周期8日の付近にシグナルが見られます。これは太陽風速度で換算するとちょうど2 AU となり、シミュレーションの結果と一致しています。また解析した期間で2 AU よりも短い波長のシグナルは見つかりませんでした。これらの結果から太陽活動の低下にともなう太陽風動圧の低下が、速度振動の波長に何らかの影響を及ぼしている可能性が示唆されます。

2つ目として速度振動の発生率があります。1990年代に発見されたボイジャー2号機のデータでは限られた期間のみで観測されており、これまでに見つかった速度振動は10例もありません。一方で、シミュレーションでは50 AU 以遠であれば常時発生しているように見えます。これはおそらく本シミュレーションでは再現されない減衰機構(例えばランダウ減衰)が働いているためだろうと考えています。ただし、これを検証するには次世代の探査機を待たねばなりません。

最後に

本シミュレーションで見つかった外部太陽圏の太陽風速度の奇妙な構造は、ボイジャー2号機により発見

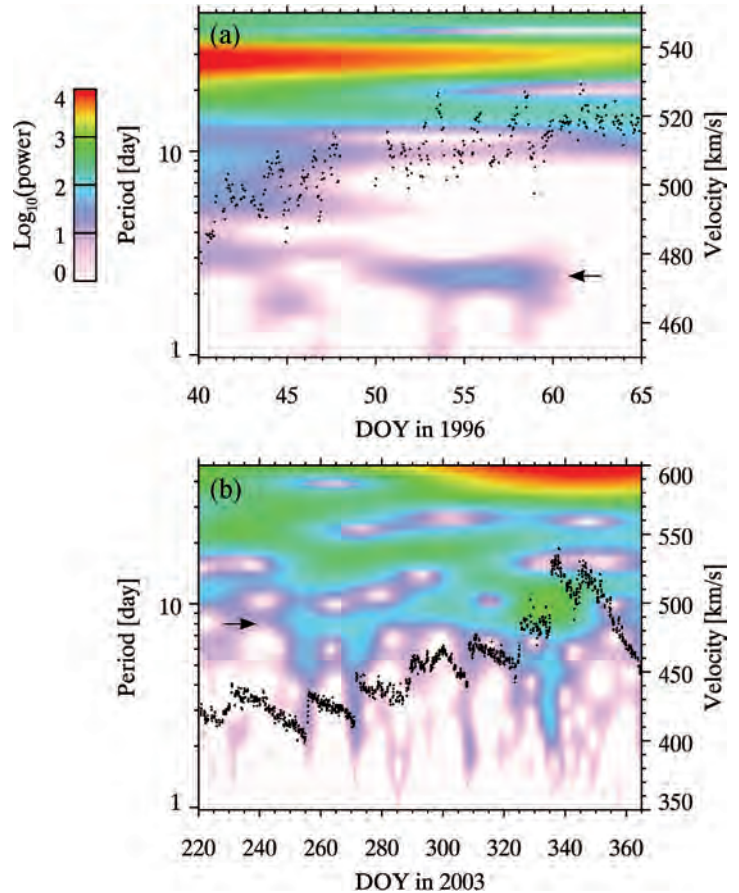


図3: ボイジャー2号機の観測データのウェーブレット解析結果。上図は過去の研究で発見されている期間、下図は今回見つかった周期性。黒点はボイジャーの速度を表す(Fujiki et al. GRL, 2014 より転載)。

された太陽風速度振動の3次元的構造の再現であると結論しました。ただし、中性粒子の振る舞いはまだまだ研究の途上であり、前述した速度振動の理論的な考察もかなり単純化されたモデルで行われています。より詳細な解析を進めこの波動の正体を明らかにしていくことで、中性粒子研究や、太陽圏のダイナミクス研究を進める上で何がしかの重要なヒントが得られるのではないかと考えています。

太陽風の高緯度観測を行っていた探査機ユリシーズが2008年に観測を終了してしまった今では、IPS観測は太陽風の大規模構造を観測する唯一の手段となっています。IPS観測単体では速度と密度の揺らぎしか導出することはできませんが、太陽観測グループ、シミュレーショングループとの共同研究により太陽-太陽圏境界までの大規模構造の研究を推進していくことができます。特に今サイクルの太陽活動の低下で、太陽圏構造が今後どのように変化していくのかは大変興味のある問題ですが、そのためにはこれからも質の高い観測を継続する必要性があり、現在太陽風グループ一丸となって観測装置の改良に尽力しています。