



惑星間空間シンチレーション観測の高精度化

小島正宜（太陽圏環境部門）

太陽風は陽子と電子を主成分とするプラズマ流で、百万度を超える高温の太陽コロナが太陽重力を振り切り惑星間空間へと吹き出したものである。この太陽風観測のために多くの探査機が打ち上げられてきたが、1990年に打ち上げられた太陽極軌道探査機ユリシーズの1機を除き、他の探査機の軌道は惑星公転面付近に限られ、また太陽からの距離で見ると、ヘリオス1, 2の2機が太陽半径の60倍の距離まで近づいたに過ぎない。このように、広大な惑星間空間を吹く太

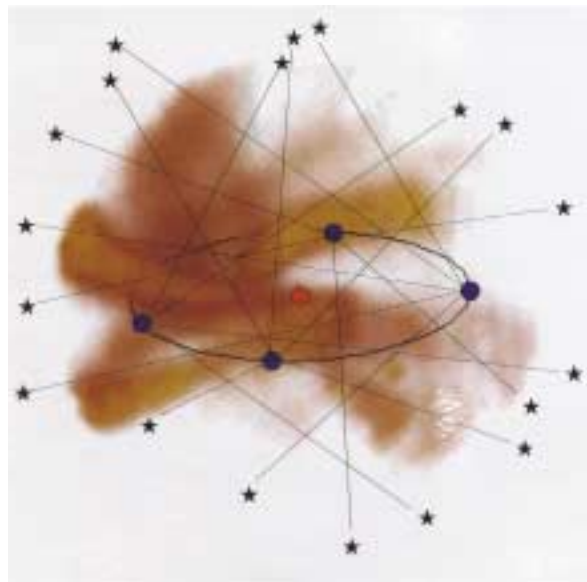


図1 トモグラフィー法の原理。太陽の自転を止め、相対的に地球が太陽の周りを27日で回転し、あらゆる方向からの電波を観測する。本図に利用した三次元の太陽風構造は、カリフォルニア大学サン・ディエゴ校のDr. B. Jacksonがトモグラフィー法を利用してケンブリッジ大学のIPSデータから作成した太陽風電子密度の揺らぎの構造である。
(<http://casswww.ucsd.edu/personal/bjackson/ipstomo.htm>)

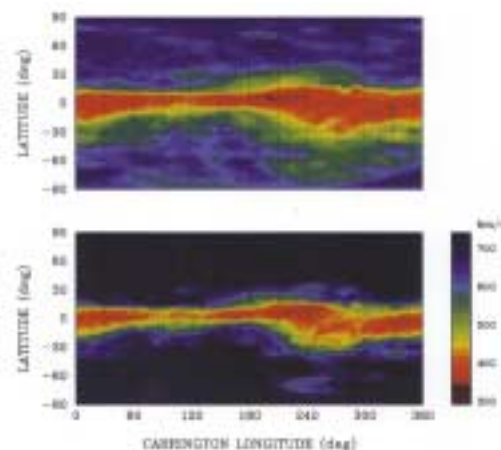


図2 1996年8月の頃の太陽風速度分布。上図は、従来の「P点近似」で求めたもので、下図はトモグラフィー解析を行った結果である。

陽風の全貌をとらえるには、打ち上げられた探査機の軌道があまりにも限られている。

太陽コロナが超音速流に加速され惑星間空間に吹き出ていく様子を調べるためには、探査機ヘリオスよりもさらに太陽に近づいた観測が必要である。フレアなどの太陽面爆発現象に伴い惑星間空間を吹き抜けていく衝撃波の様子を三次元的にとらえ、宇宙天気予報などに役立てるには、惑星公転軌道面内のみでなく、広い緯度、経度空間に、同時に多くの探査機を必要とする。多くの探査機を用いずにこのような観測を可能とするのが、天体電波を利用したリモートセンシング、すなわち惑星間空間シンチレーション（IPS）である。

惑星間空間を伝播する電波は、太陽風プラズマにより屈折・散乱され、電波強度が変動する。

この現象は、太陽風プラズマにより電波回折像が地上にできると考えてもよく、太陽風の動きと共にこの回折像も地上を動いていくので、複数のアンテナを配してこの現象を観測すれば、太陽風の速度やプラズマ擾乱の空間構造について知ることができる。このようなシンチレーション現象を起こす天体電波源は、天球のあらゆる方向に存在するので、太陽の近くを伝搬してくる電波を使えば、太陽近傍の太陽風が観測でき、また惑星公転面から高く離れた所を伝搬してくる電波を使えば、太陽の高緯度から吹き出した太陽風を観測できる。STE研が有しているIPS観測装置は、20太陽半径まで近づいて太陽風を観測でき、1日に数十個以上の電波源を惑星間空間の様々な方向で観測している。このため、広大な惑星間空間を吹く太陽風の三次元構造を、短時間で観測することができる。

このように、宇宙空間探査機にはない特長を活かして、IPS観測は活用されている。しかし、このIPS観測には、空間分解能と観測の精度に深刻な問題がある。IPSで観測されるものは、地球と電波源を結ぶ視線に沿い分布する太陽風の速度を荷重積分したものであるために、観測値はバイアスを受けており、またどの辺りを吹いている太陽風を観測しているのかについての曖昧さがある。荷重関数は、一般には、視線上の太陽風密度のもっとも濃い辺りで最大となる傾向があるので、地球と電波源を結ぶ視線上の太陽に一番近い点（P点）の辺りをIPSは観測していると近似できる（P点近似）。IPSのデータ解析は、この「P点近似」で行われてきた。しかし、ユリシーズが、これまでIPSでのみ可能だった太陽の高緯度帯から吹き出す太陽風の直接観測を始めたり、太陽風加速機構の研究において、IPS観測と理論研究が共同し始めたりすると、視線積分によりバイアスを受けた観測値では役に立たなくなってきた。そこで、最近米国とSTE研の二つのIPSグループによって、視線積分の影響を除去する方法が、それぞれ独自に開発された。

米国カリフォルニア大学サン・ディエゴ校のIPSグループが開発した方法は、長基線シンチレーション観測法と呼ばれるもので、電波回折像の大きさ（約100 km 以下）よりも何倍も長い距離を離して設置された二つのアンテナを用いて観測する方法である。二つのアンテナで受信されたIPS信号の間の時間差を求めると、二つのア

ンテナの遙か上空の宇宙空間を吹いた太陽風の速度を測ることができる。視線上に、遅い太陽風と速い太陽風が同時に吹いていた場合を考える。それぞれの速さの太陽風が作り出すIPS信号は、二つのアンテナ間で異なる時間差で受信される。すなわち高速風は短い時間差で、低速風は大きな時間差で観測される。この時間差の違いは、2台のアンテナの間隔が長ければ長いほど大きくなり、高速風と低速風の速度の分離が可能となる。これが、長基線シンチレーション観測法の原理である。この方法は、米国のグループがEISCATのアンテナを用いてIPS観測中、いつも用いていた短い基線のアンテナ対が故障で使えなかったために、やむなく長基線のアンテナ対で観測せねばならなかった時に編み出された。

長基線シンチレーション観測法が利用できるのは、太陽風の吹く方向がアンテナ基線にほぼ平行な時に限られる。また、アンテナ対の距離にも制限があり、STE研で行っている観測に長基線シンチレーション観測法を用いることができない。そこで我々は、CTスキヤンの略称で、医学分野で人体の断面写真をとるために広く利用されている計算機トモグラフィー法を利用する方法を開発した。トモグラフィー解析法では、太陽風構造の初期モデルを作り、そのモデル太陽風で観測をシミュレートして、シミュレーション結果と観測値とを比較しながら、両者が一致するようにモデルを改良していく。曖昧性の少ない結果を得るためには、異なる方向からの複数の視線が、観測対象の中で交差することが必要である。この方法を太陽風のIPS観測に適用するには、三次元構造を持つ太陽風を、できるだけ多くの異なる方向から観測することが必要である。しかし、一日の観測データからだけでトモグラフィー解析を行うことはできない。それは、三次元空間を覆い尽くすほどの視線が得られないだけでなく、太陽風を一方から見たデータしか得られないためである。しかし、太陽が、地球から見て27日で自転することを利用すれば、様々な方向からの情報を得ることができる。それは、図1のように太陽の自転を止め、相対的に地球が太陽の周りを27日で一回りすると考えれば、太陽風をあらゆる方向から観測することができるからである。また、太陽風が太陽から惑星間空間に放射状に広がっていくこと

を利用すれば、限られた数の視線データで太陽からの異なる距離での情報も得ることができる。この解析のためには、太陽の自転に伴い太陽風の三次元構造は変化しないと仮定する必要があるが、太陽黒点活動が静かな時には太陽自転の数周期にわたって太陽風の大局的な構造は安定している。

図2の上段は、従来のP点近似で求めた太陽活動極小期の1996年8月の頃の太陽風の速度構造で、太陽面のどこからどのような速さの太陽風が吹き出しているかを示している。この速度分布図をもとに、トモグラフィ解析を行った結果を下段に示してある。この二つの図の比較から、トモグラフィ解析では、非常に鮮明な太陽風構造を求めることができるのが分かる。トモグラフィの結果では、太陽赤道帯に沿って400 km/s以下の低速風が細い帯状に分布し、中緯度辺りで大きな速度勾配を持って700 km/s以上の高速風と接している。このように、太陽風が高速風と低速風に明瞭に分離された構造を持つのは、太陽活動極小期の特徴で、次に示すようにユリシーズの観測とも極めてよく一致する。このような構造をbimodal構造といい、なぜ太陽活動静穏期の太陽風は高速風と低速風のみからなり、500 - 600 km/sの中間速度の太陽風が希なのかは大きな謎である。太陽活動が活発になると低速風領域が高緯度に拡大し、高速風領域が縮小することは分かっているが、静穏期以外でもbimodal構造を成しているのか、また、太陽活動極大期において高速太陽風領域は消滅するのか、消滅しないなら高速風領域はどこにあるのかななどの問題は今後の研究課題である。

経度240度辺りに低速風の微細構造が現れている。このような小さな構造については、これまでのP点近似解析では自信を持てなかったが、トモグラフィの結果に現れた速度構造とコロナ磁場の構造と比較すると非常によい一致が得られることが分かり、我々は低速風の新しいモデルを論文に発表することができた。この低速風モデルについては、別のニュースで紹介したい。

図3は、ユリシーズの観測した太陽風速度の緯度構造（実線）と、IPSトモグラフィ解析から得られた緯度構造（破線）の比較である。IPS観測が冬季には休止されるため、両者の観測時期は、半年ほど異なっている。ユリシーズは南極域から北極域までを、1994年9月から1995年7月

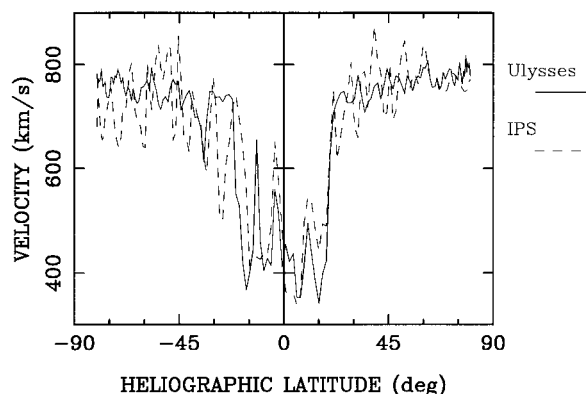


図3 太陽風速度の緯度構造。実線はユリシーズの観測データを、破線はIPSトモグラフィ解析で得られた速度図からユリシーズの軌道に沿って取り出してきた速度を示す。

まで、10ヶ月以上かけて観測しているが、IPSは、1995年4月から6月までの3ヶ月間のデータから緯度構造を求めている。図中の破線は、IPSトモグラフィ解析から求めた太陽風構造を、ユリシーズの軌道に沿って観測したと想定して求めたものである。観測時期が異なっているにもかかわらず、南半球の高緯度を除き、次のような微細構造までよく一致しているのが分かる。(1) 低速風と高速風の速度、(2) 低緯度の所々で見られるスパイク状の高速ストリームの現れ方、(3) 中緯度で、低速風から高速風へと移り変わる急激な速度勾配、(4) 北半球で、中緯度から高緯度にかけて速度がわずかに上昇する傾向、(5) 中緯度から高緯度における速度のわずかな南北半球非対称性。

このように、IPSトモグラフィ解析は、探査機と互角に勝負できる空間分解能と観測精度を持っているだけでなく、次のような利点がある。まず第一に、ユリシーズでは10ヶ月もかかった観測を、数ヶ月以内で行うことができることである。このため、ユリシーズが観測した中緯度から高緯度にかけての速度の南北非対称は、10ヶ月の間に太陽風構造が時間的に変化した結果ではないことが分かる。さらに、ユリシーズが到達した最高緯度は、80度までであり、太陽の極域から吹き出している太陽風速度については未知であるが、IPSトモグラフィ解析は、その観測を可能にする。

高速太陽風の加速がどの辺りで行われているのかを観測的に明らかにすることは、加速機構の解明に重要である。探査機ヘリオスの観測から、高速風は0.3 AUまでに加速は完了している

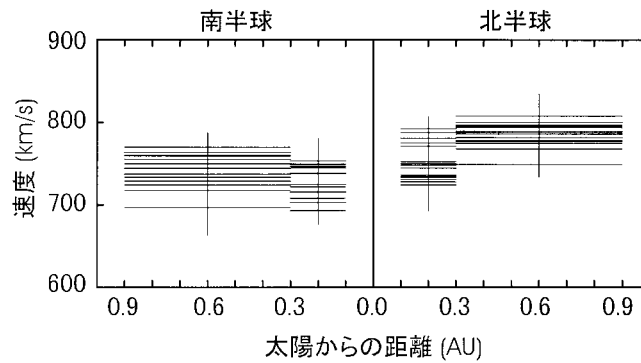


図4 太陽の南北両半球の高緯度から吹き出す高速太陽風の加速の様子。横線は、16のデータセットの各々から求めた高速風の平均速度を示し、各横線に付された縦棒は、誤差棒である。

ことが報告されている。また、米国のIPSグループは、最近の観測から、太陽風が10太陽半径以内で急激に加速されていることを報告し、これまでの太陽風加速理論に大きな衝撃を与えた。しかし、観測値のばらつきや誤差が大きく、詳細な加速の様子はまだ明確でない。そこで、我々は、IPSデータを0.3 AU以遠で観測されたものと、0.1 - 0.3 AUで観測されたものに二分し、トモグラフィ法を用いて解析を行った。1995 - 1996年の2年間のデータから、トモグラフィ解析で得た16枚の速度分布図の高速風領域の速度を平均し距離依存性を求め、図4に示した。この図は、高速風は0.1 AUまでに、700 km/s以上の高速に加速されているが、加速は完全には終了していないことを物語っている。また、解析を行った2年間にわたり、北半球の速度が南半球より高かったことも分かる。

トモグラフィ法を用いて、太陽風のダイナミクスや地球への影響の予報などを研究する日米科学協力事業共同研究が、本年より3年計画で、学术交流協定を結んでいる米国カリフォルニア大学サン・ディエゴ校、天体物理宇宙空間科学研究センターのDr. B. Jacksonのグループとの間で始まった (<http://casswww.ucsd.edu/personal/bjackson/forecast/index.html>)。本計画は、2001年末にDr. B. Jacksonらにより打ち上げ予定の人工衛星、SMEI (Solar Mass Ejection Imager: 太陽質量放出現象撮像衛星) との共同観測へと発展していく (<http://www-vsbs.plh.af.mil/projects/smei/smei.html>)。SMEIは、惑星間空間における密度分布の三次元構造を、太陽白色光の太陽風電子によるトムソン散乱を利用して観測し、我々はIPSで太陽風速度の三次元構造を観測する。また、NASAのSTEREO (Solar-TErrestrial

RElations Observatory) 計画に、Dr. B. Jacksonらは、ASHI (All-Sky Heliospheric Imager) を我々と共同提案しているが (<http://casswww.ucsd.edu/personal/bjackson/ashi.htm>)、この計画の決定は、NASAの厳しい予算事情で遅れている。

トモグラフィ解析の精度は、短期間にいかに多くの電波源が観測できるかに依存している。そこで我々は、電波受信能力が現有のアンテナの数倍を有する新しい装置、太陽圏イメージング装置の建設を計画している。本装置は、周波数327 MHzで観測できる二次元フェーズドアレイで、東西64素子、南北256素子の半波長ダイポールアレイで構成される。合計16,384本もの多数のダイポールアンテナからの信号をいかに安価な信号回路で合成するかが大問題で、我々は信号合成方法に工夫を凝らし、コネクタも安価なものを開発することから始めている。また、周辺からの電波干渉を防ぐために、アンテナ高を極力低くし、アンテナ周辺を電波シールドフェンスで囲う構造となっている。本装置が完成すれば、1ヶ月間の観測から、精度の高い太陽風構造が求められるようになる。そして、回帰性の太陽風の地球への影響を予測したり、惑星間空間を吹き抜ける衝撃波の様子を回帰性構造と分離してとらえやすくなる。

惑星間空間シンチレーションの現象が、1964年に英国ケンブリッジ大学のDr. Hewishらにより発見されてから今年で35年経つ。この間、惑星間空間シンチレーションは、探査機が観測できない領域を観測してきた。今、新たな解析法の開発により、IPSは、太陽風三次元構造を短時間に精度よく観測できるより強力な観測手段となったということである。