



4. 太陽風プラズマ

小島正宜

名古屋大学太陽地球環境研究所

(原稿受付：2006年5月22日)

太陽風の宇宙天気予報とは、どのような物理的特徴（速度、密度、温度、磁場等）を持つ太陽風が、いつ地球磁気圏に吹き付けてくるか、それを予報することである。予報すべき太陽風を三つに大別し説明する。その一つは、定常的に吹いている太陽風で、地球に吹き付けてくる太陽風は太陽の自転に伴い27日周期で変化し、共回転太陽風と呼ばれる。もう一つの太陽風は、太陽面爆発現象に伴い短時間に惑星間空間に大量のプラズマが放出されたものでCME (Coronal Mass Ejection) と呼ばれている。これらの2種類の太陽風とは性格が異なる惑星間空間現象に、低速でありながら密度がきわめて低くなる太陽風消失現象と呼ばれるものがある。名古屋大学太陽地球環境研究所（以下、STE研）では、天体電波を用いたリモートセンシング技術を用いて、人工衛星等の飛翔体では観測不可能な太陽風三次元構造を短時間に求め、地球に吹き付けてくる太陽風の予報を試験的に行っている。

Keywords:

solar wind, coronal mass ejection, interplanetary scintillation, forecast

4.1 はじめに

太陽風は陽子と電子を主成分とする超音速磁化プラズマ流で、100万度を超える高温の太陽コロナプラズマが、その熱圧で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(表1)。この太陽風観測のために、多くの探測機が打ち上げられてきたが、広大な惑星間空間を吹く太陽風の全貌をとらえるには打ち上げられた軌道が限られている。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行く衝撃波の様子や、定常的に吹いている太陽風の構造を三次元的にとらえるには、広い緯度、経度に同時に多くの探測機を必要とする。また、太陽風の三次元構造は、太陽黒点活動とともに大きな変化をしており、その変化を観察するには太陽活動周期の11年以上にわたる安定した連続観測が必要である。このような観測を可能とするのが天体電波の惑星間空間シンチレーション現象 (IPS: interplanetary scintillation) を利用した地上からのリモートセンシングである。

太陽風の宇宙天気予報を行うのに、人工衛星などの宇宙空間探測機を利用する方法があるが、本章ではこの方法と

は異なり、太陽風の三次元構造を解析しその動きから予報を行う方法を紹介する。まず、STE研で行われているIPS観測から得られたデータなどを用いて予報すべき太陽風について概説し、次に三次元太陽風構造をとらえる方法を紹介する。IPS観測を用いた宇宙天気予報は、試験的であるが次のサイトで行っているのを見ていただきたい <http://stesun5.stelab.nagoya-u.ac.jp/forecast/>。また米国カリフォルニア大学サンディエゴ校へIPSデータを準実時間で送り、それを用いた宇宙天気予報を http://cassfos02.ucsd.edu/solar/forecast/index_v_n.html のサイトでも日米共同で行っている。

4.2 共回転太陽風

太陽極軌道探査機ユリシーズは、1994年から1995年の約10ヶ月をかけて太陽の南半球から北半球へと大きく緯度を変え、図1に示す太陽活動静穏期の太陽風速度の緯度構造を観測した。太陽活動静穏期には、高緯度に速度700-800 km/sの高速風、低緯度に300-400 km/sの低速風が吹いており、その両者は急峻な速度勾配で隔てられている。低緯度で繰り返し現れているスパイク状の高速は、低緯度まで伸び出した高速風が観測されたものである。このように太陽活動静穏期の太陽風は、低速風と高速風の2種類に大別でき、太陽風のbimodal構造と呼ばれている。

図2は、IPS観測から得られた太陽風速度の緯度経度分布の11年の周期変化である。1996年の太陽風構造は、太陽活動極小期にユリシーズが観測したものと同じで、太陽赤

表1 地球公転軌道付近を吹く太陽風の性格。

	速度 km/sec	陽子密度 1/cc	磁場 $\times 10^{-5}$ gauss	陽子温度 $\times 10^4$ °K
平均像	468 ± 116	5-7	6.2 ± 2.9	12.5 ± 9
高速太陽風	750~800	2.5	4	20
低速太陽風	300~400	9	5	4

4. Solar Wind Plasma

KOJIMA Masayoshi

author's e-mail: kojima@stelab.nagoya-u.ac.jp

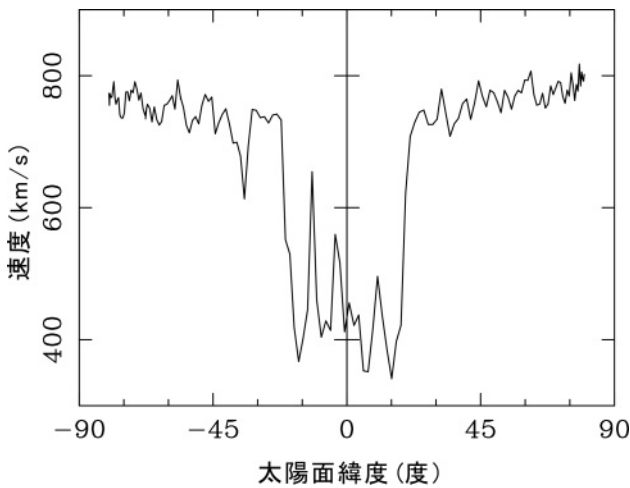


図1 太陽活動極小期に 太陽極軌道探査機ユリシーズが観測した太陽風速度の緯度分布。

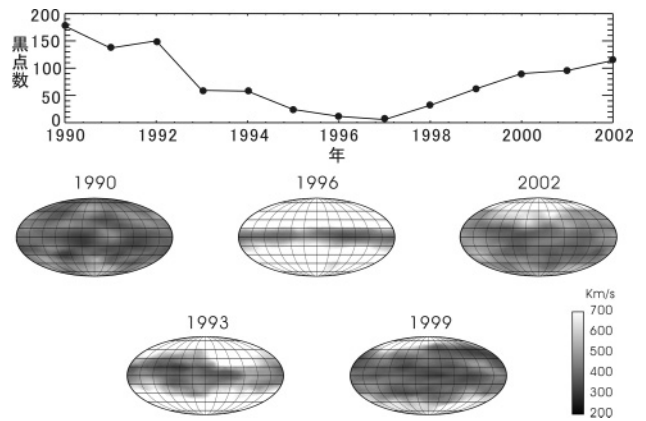


図2 太陽速度緯度経度分布の太陽黒点活動依存。速度分布はIPS トモグラフィ解析で得られた。

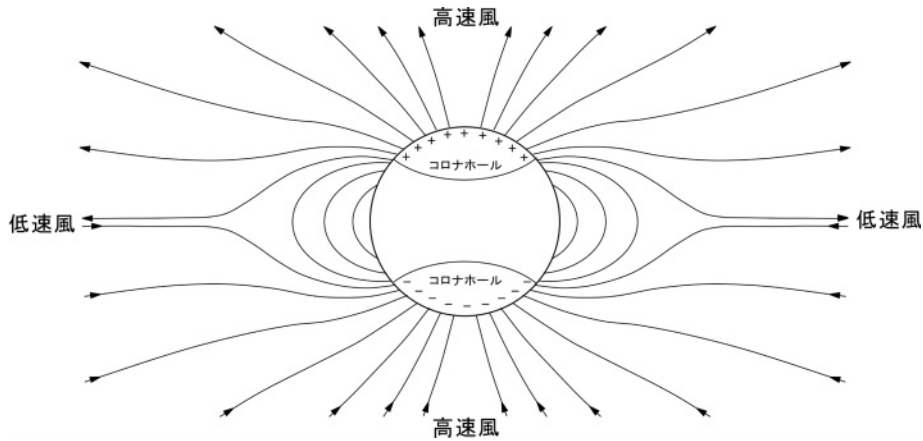


図3 太陽活動極小期の太陽磁場構造。この磁場構造が太陽風速度の緯度構造を表している。

道に添う細い帯状に低速風が分布し、中緯度から高緯度の広範囲に高速風が分布している。太陽活動が活発になると、低速風領域が緯度幅を広げ太陽全面へと広がり高速風領域が極域に小さくなっていき、太陽活動極大期にほとんど消滅してしまう。

太陽活動極小期の太陽磁場は、図3に示すようにダイポール構造となり、赤道上空のループ磁場は太陽風により惑星間空間へと引き出され磁気中性面を惑星間空間に形成する。そしてこの磁気中性面に沿い高密度の低速風が流れる。太陽活動が活発になるに連れ、磁気中性面(低速風帯)は太陽赤道に対し大きな傾きを成すようになる。このため太陽活動減衰期や上昇期の低緯度には高速風と低速風とが混在し、太陽の自転に伴い低速風の後ろから高速風が吹いてくるので、両者の境界には共回転相互作用領域と呼ばれる密度、磁場の増加領域が生じる。この太陽風三次元構造は太陽自転周期程度の時間では大きな変化をしないので、構造が求まれば、太陽の自転に伴い何時どのような速さの太陽風が地球に吹き付けてくるのか予報ができる。

4.3 惑星間空間擾乱 Coronal Mass Ejection

フレアやフィラメント消失現象に伴い大量のプラズマが惑星間空間に放出される現象をCMEといい、その放出エ

ネルギー総量の平均は $10^{23} - 10^{24}$ J、総質量は $10^{15} - 10^{16}$ gにも達する。高速のCMEは、惑星間空間を衝撃波を作りながら伝搬し、この衝撃波では高エネルギー粒子 (keV - 10 MeV) が連続して加速される。コロナで観測されるCMEは、core, frontal loopとその間に挟まれた低密度のcavityの3構造をしている(図4)。一方、惑星間空間で観測される高速のCME (ICME) は、衝撃波の内側に磁場が強く低温・低密度な磁気雲と呼ばれる領域があり、衝撃波面と磁気雲に挟まれた領域は圧縮され、高密度・高温になっている。太陽風中のCME前面にある密度の高いプラズマの相当量は伝搬過程で太陽風プラズマを集積してきたものと考えられ、CMEのFrontal Loopがこの密度増加にどれだけ寄与しているかは未だによくわかっていない。また、磁気雲は太陽近傍CMEのCavityに対応すると考えられるが、その内部にあるはずのCoreに対応する濃密なプラズマは、太陽風中の観測からは同定されていない。このためコロナ中のCMEと惑星間空間のICMEとの対応関係を確立することは、CMEの起源や伝搬機構を理解し、正確な宇宙天気予報を行うために重要である。

CMEがいかにして太陽から地球軌道まで伝搬するかについても、我々は非常に限られた知識しか持っていない。これまでの観測結果からは、ICMEは伝搬中に太陽風との

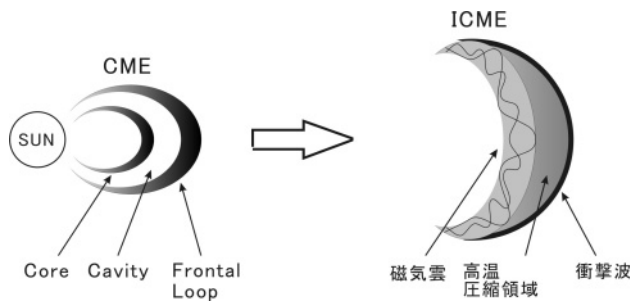


図4 コロナと惑星間空間における CME 構造の模式図。

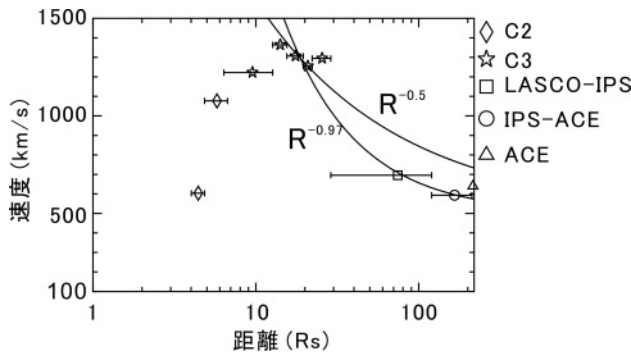


図5 2000年7月10日の CME イベントの伝搬速度の距離依存性。C2, C3 は SOHO 衛星搭載のコロナグラフ LASCO が観測したプラズマの動きから求めた速度。LASCO-IPS および IPS-ACE は、LASCO, IPS, ACE のそれぞれが CME を観測した場所の太陽からの距離と時間から推測した平均速度。

相互作用を通じて減速されていることが知られている[1]。図5は、CME のコロナでの速度と惑星間空間での速度の関係で、CME が太陽風との相互作用を通じて減速している様子を示している[2]。この減速の強さは、相互作用する太陽風と CME との速度差に依存すると思われるので、太陽風との相互作用による CME の減速を予測するためには、CME の三次元構造と、それが伝搬していく惑星間空間を常時吹いている太陽風構造の両者を求める必要がある。

4.4 太陽風消失現象

1999年5月11-12日地球磁気圏に吹きつけていた太陽風は突然、低速(350 km/s 以下)でありながら密度がきわめて薄いものとなった(図6)。普段地球半径の約11倍の大きさの磁気圏は、太陽風動圧の大きな減少を受けて地球半径の60倍にも膨らんだ。この現象は disappearing solar wind と呼ばれ、その起源は謎であった。低緯度に現れる小さなコロナルホールからは、図8に示すように流管がコロナ中で大きく開き、それが原因で低速なストリーマーが吹き出すことが知られており[3]、Janardhan らは、異常低密度低速風をこの小さなコロナルホールで生じた過渡的な変化によると説明した[4]。

この現象が太陽に起源を持つ証拠の一つが、この太陽風のもう一つの特徴である速度方向が動径方向に対し太陽自転方向に大きくずれていることである。この速度の太陽自転方向成分 v_y は、図7に示すように密度が薄いほど大きい。これは、太陽近傍において太陽風プラズマは太陽と共

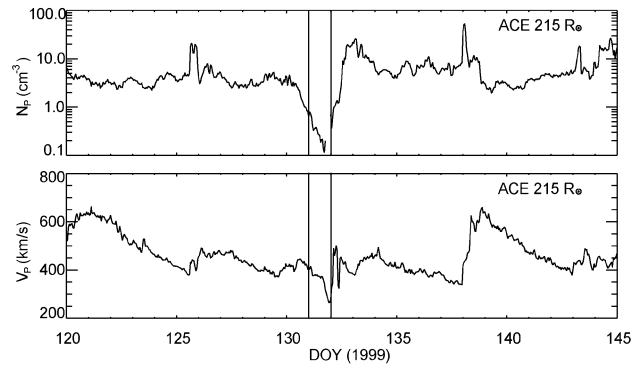


図6 人工衛星 ACE の観測した太陽風密度と速度。

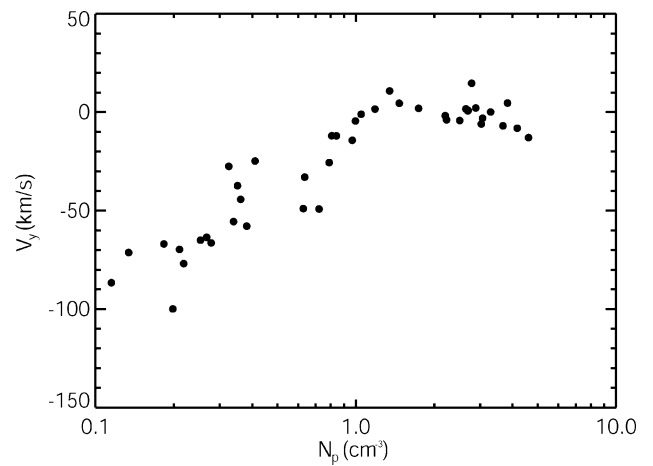


図7 太陽自転方向の太陽風速度と密度との相関図。([4] より転載)

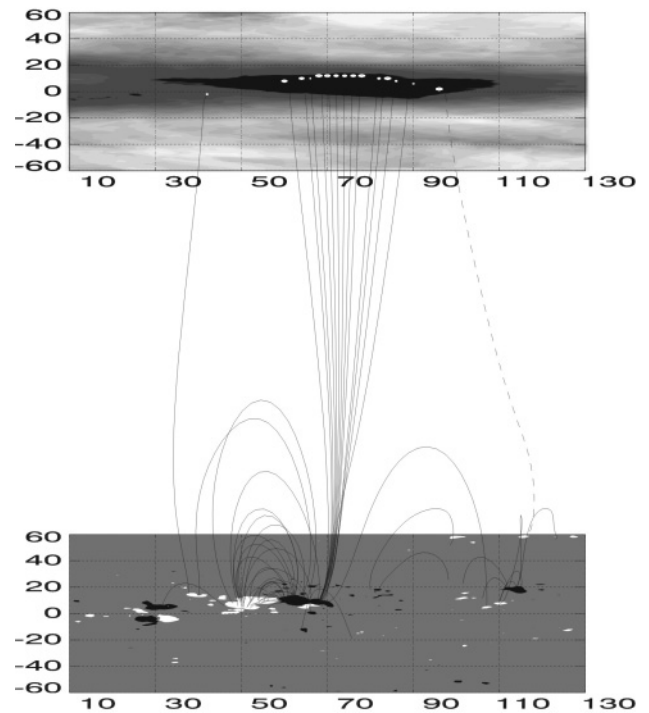


図8 太陽活動極小期に現れた低速ストリーム。上図は、2.5 太陽半径の距離にプロットした太陽風速度の緯度経度分布図。経度70度付近の黒色の領域は速度 370 km/s 以下を表す。下図は、米国キットピーク観測所で観測された太陽面上の磁場分布で、黒白で極性を表している。上図と下図を結ぶ黒線は、ポテンシャル磁場で、太陽風の流管を表す。([3] より転載)

回転するが、その共回転半径はプラズマベータ比に依存し、密度が薄くなり共回転半径 R が大きくなれば共回転から得られる速度成分 $v_y = R\omega$ もより大きくなるためである。

このような太陽風が何時発生するかを予測するためには、図8のように太陽風速度の緯度経度分布とコロナ中の磁場三次元構造を求め、低速風の起源となっている太陽面上の小さなコロナルホールを見つけて、その変化を監視することが必要である。

4.5 宇宙天気予報のための太陽風三次元構造の観測

4.5.1 惑星間空間シンチレーション

人工衛星等の飛翔体が観測できない広大な惑星間空間を吹く太陽風を観測する有力な手段が、電波を用いたりモートセンシング法で、惑星間空間シンチレーション (IPS) と呼ばれている。惑星間空間を伝播する電波は、太陽風プラズマの密度の揺らぎにより屈折・散乱され位相が乱される。散乱された電波は、地球まで伝播する過程で互いに干渉し電波強度が変動する。これがIPSと呼ばれる現象である。この現象を複数のアンテナを用いて観測すれば、太陽風の速度やプラズマ擾乱の構造について知ることができる。STE研では、世界で唯一の太陽風観測専用のアンテナシステムを有し、定常観測を実施している。この観測の優れた点は、多くの電波天体を観測して短時間で惑星間空間の広い範囲を観測することができることである。しかし、この観測で直接に得られるものは、視線積分によりバイアスを受けており、空間分解能も悪い。そこで、太陽風が、三次元空間に広がって行くことと、太陽が自転をすることを利用して、トモグラフィー解析をシンチレーション観測に利用する方法が開発された[5-7]。前節までの図に示した太陽風の緯度経度分布図はこの方法で求められたものである。

MHD シミュレーションとIPS トモグラフィー解析を組み合わせると、速度のほかに磁場や温度などの三次元的なデータを得ることができる[8]。この方法の特長は、シミュレーションの内部境界条件として太陽磁場データを用い、外部境界条件としてシンチレーションによる太陽風観測データを用いることである。これにより、実際の太陽風三次元構造に近い結果がシミュレーションにより得られ、シミュレーションを遠くまで展開すれば木星軌道あたりを吹く太陽風をも予測することができる。

また、モデルを用いて観測データに最適化することにより過渡的現象であるCMEの三次元分布を決定することができる[9]。図9は、2000年7月14日に発生したCMEイベントのIPSデータを解析した結果得られたCMEのループ構造である。

4.5.2 コロナの物理量から太陽風速度を決める

コロナ下部からのエネルギーの供給と、それが何処でどのように太陽風加速に利用されるかにより、太陽風加速の様子は決まるので、太陽風速度がコロナ中のどのような物理量と良い相関を持つかがわかれば、太陽観測から太陽

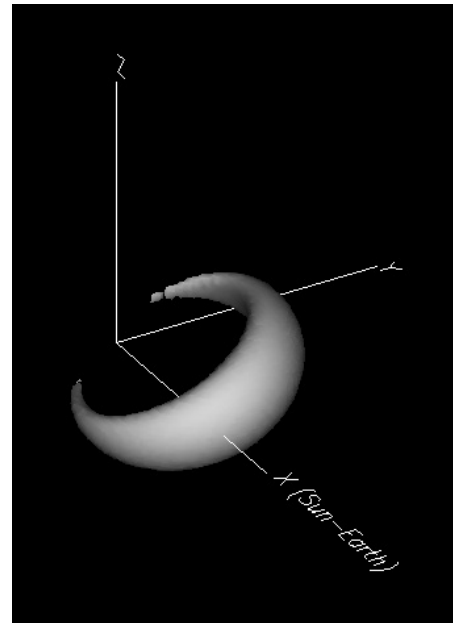


図9 シンチレーション観測から求められた2000年7月14日のCMEイベントの3次元構造。XY面は黄道面で、X軸は太陽-地球方向。原点は太陽の位置で、各軸の長さは1 AU。([9]より転載)

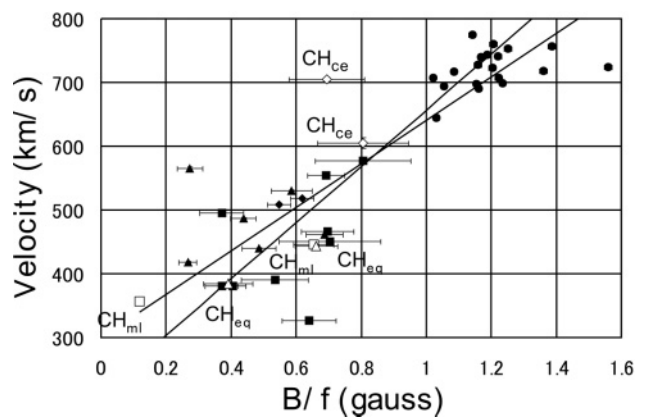


図10 IPS トモグラフィー解析から求めた太陽風速度と、コロナ磁場強度 B と流管の拡張率 f との比の相関。マークした CH_{eq} , CH_{ml} , CH_{ce} は、特に注目すべきもので、 CH_{eq} は低緯度コロナホールからの太陽風、 CH_{ml} は中緯度コロナホールからの太陽風、 CH_{ce} は極域コロナホールが中緯度まで張り出してきた領域からの太陽風である。異なる性格のコロナルホールから吹き出した太陽風が一本の回帰直線上に乗っている。

風を予測することができる。WangとSheeley[10,11]は、コロナ中の流管の拡張率 f と速度との間に良い反相関があることを見つけ、その理由を、単位質量当たりの太陽風に供給されるエネルギーが拡張率により異なるとして説明した。Fiskら[12]は、光球面から湧き出てきた磁場が再結合し、そのエネルギーが太陽風加速に利用されるとするモデルを提唱した。我々は、これら2つのモデルを組み合わせたパラメータ B/f が速度との間に他のモデルに比べ格段に良い相関を持つことを見つけた[13-15](図10)。Suzuki[16,17]は、この観測結果の理論的考察から太陽磁場から太陽風速度を求める関係式を導いている。この研究

が進展すれば、コロナ磁場の観測から、太陽風の三次元構造を予測することが可能となる。

4.6 まとめ

宇宙天気予報を気象予報に例えるならば、太陽観測で何時フレアやCME現象が発生するかを監視し予報することは、台風発生の予報といえる。一方太陽風の観測は、惑星間空間擾乱がいつ地球に到達するのか、あるいは影響しないのかを予報することであり、それは台風の規模とその進路予報をすることに似ている。台風の進路予報には、日本周辺の気圧配置が必要であると同様に、惑星間空間においても、衝撃波が伝搬していくバックグラウンドである常時吹いている太陽風の様子を知ることが必要である。

太陽活動とともに大きく様子を変える太陽風を広大な三次元惑星間空間の構造として常時監視することが宇宙天気予報には必要であるが、現在のところそれが可能なのは惑星間空間シンチレーションが唯一有効な手段である。この惑星間空間シンチレーション観測専用の電波望遠鏡を有し、定常観測を継続しているのは名古屋大学太陽地球環境研究所とインドのターター研究所である。近々メキシコUNAMの新しい装置が観測を始めるので、異なる経度の観測所の国際共同で太陽風の長時間連続観測も可能となる。

参考文献

- [1] N.Gopalswamy, A.Lara, R.P.Leping, M.L.Kaiser, D.Berdichevsky and O.C. St Cyr, *Geophys. Res. L.* **27**, 145 (2000).
- [2] M. Yamashita, M. Tokumaru and M. Kojima, *Solar Wind Ten*, AIP Conference Proceedings **679**, Editors: by M. Velli, R. Bruno and F. Malara (AIP, New York, 2003) p.754.
- [3] M. Kojima, K. Fujiki, T. Ohmi, M. Tokumaru, A. Yokobe and K. Hakamada, *J. Geophys. Res.* **104**, 16993 (1999).
- [4] P. Janardhan, K. Fujiki, M. Kojima, M. Tokumaru and K. Hakamada, *J. Geophys. Res.* **110**, doi:10.1029/2004JA010535 (2005).
- [5] K. Asai, M. Kojima, M. Tokumaru, A. Yokobe, B.V. Jackson, P.L. Hick and P.K. Manoharan, *J. Geophys. Res.* **103**, 1991 (1998).
- [6] B.V. Jackson, P.L. Hick, M. Kojima and A. Yokobe, *J. Geophys. Res.* **103**, 12049 (1998).
- [7] M. Kojima, M. Tokumaru, H. Watanabe, A. Yokobe, K. Asai, B.V. Jackson and P.L. Hick, *J. Geophys. Res.* **103**, 1981 (1998).
- [8] K. Hayashi, M. Kojima, M. Tokumaru and K. Fujiki, *J. Geophys. Res.* **108**, doi:10.1029/2002JA009567 (2003).
- [9] M. Tokumaru, M. Kojima, K. Fujiki, M. Yamashita and A. Yokobe, *J. Geophys. Res.* **108**, doi:10.1029/2002JA009574 (2003).
- [10] Y.M. Wang and N.R. Sheeley Jr., *Astrophys. J.* **355** 726 (1990).
- [11] Y.M. Wang and N.R. Sheeley, Jr., *Astrophys. J.* **372**, L45 (1991).
- [12] L.A. Fisk, N.A. Schwadron and T.H. Zurbuchen, *J. Geophys. Res.* **104**, 19765 (1999).
- [13] M. Hirano, M. Kojima, M. Tokumaru, K. Fujiki, T. Ohmi, M. Yamashita, K. Hakamada and K. Hayashi, *Eos Trans. AGU*, **f84(46)**, Fall Meet. Suppl., Abstract SH21B-0164 (2003).
- [14] D. Baba, M. thesis, Nagoya Univ. (2004) [*in Japanese*].
- [15] M. Kojima, K. Fujiki, M. Hirano, M. Tokumaru, T. Ohmi and K. Hakamada, *The Sun and the heliosphere as an Integrated System*, Editors: Giannina Poletto and Steven T. Suess (Kluwer Academic Publishers, 2004) p.147.
- [16] T.K. Suzuki, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **349**, 1227 (2004).
- [17] T. Suzuki, *Astrophys. J.* **640**, L75 (2006).