

## 2-1-3 モデルを用いた ICME 構造の推定

### 2-1-3 *Structure of Interplanetary Magnetic Cloud Estimated by Fitting Magnetic Flux Rope Models*

石橋弘光

ISHIBASHI Hiromitsu

#### 要旨

1999年4月16日の磁気フラックスロープイベントに対する磁気フラックスロープモデルによるフィッティング解析を通じて、円筒型磁気フラックスロープモデルおよびその発展形であるトーラス型磁気フラックスロープモデルを紹介する。

We examined the relationship between interplanetary magnetic cloud observed by the ACE satellite on April 16, 1999 and its solar origin. The solar and interplanetary background was relatively quiet for 10 clear days before April 16, enabling us to unambiguously assume the solar origin of the magnetic cloud. However, the results of fitting a constant-alpha force-free cylindrical flux rope model is inconsistent with findings from previous studies about magnetic clouds and their solar origins, although corresponding solar surface phenomena occurred near the central meridian. We therefore attempted to fit another model with the torus-shaped magnetic field structure, which is a simple extension of the conventional cylindrical model with more geometrical flexibility. Using the estimated planar structure of the flux rope, we were able to interpret reasonably the observed magnetic cloud as an expansion into interplanetary space of a filament eruption or halo CME (coronal mass ejection) on April 13, 1999.

#### [キーワード]

太陽風磁気フラックスロープ, 太陽風, 惑星間空間磁場, コロナ質量放出現象, フィラメント消失  
Interplanetary magnetic flux rope, Solar wind, Interplanetary magnetic field, Coronal mass ejection, Disappearing solar filament

## 1 はじめに

突発的な太陽面現象のひとつであるコロナ質量放出現象 (CME: Coronal Mass Ejection) は、SOHO、TRACE 等の人工衛星による高分解能観測から詳細に解明されつつあるが、惑星間空間 (太陽半径、 $R_s$  の 30 倍以上) における CME (ICME: Interplanetary CME) の研究については広大な惑星間空間に点在する探査機による in situ 観測に依存しているため、その空間構造や伝播特性は未だによくわかっていない。加えて、ICME は、その伝播過程で背景の太陽風との相互作用により構造や伝播速度も変化してゆくと考えられており、その解明をさらに困難なものにしている。

ICME 中のプラズマと磁場の特性を見いだす試みは、太陽風観測の黎明期から行われており、(1) 双方向性の高温電子流、(2) 異常に低いプロトン温度、(3) 磁気フラックスロープ (Magnetic Flux Rope) と呼ばれる磁力線を振ったような磁場構造の三つの特性がよく知られている [1]–[3]。このうち、磁気フラックスロープについては、軸対称な force-free 磁場における解析解 (Lundquist solution) を基にした円筒型磁気フラックスロープモデル (図 1) を用いて観測データ中に見られる磁気フラックスロープの特徴的な磁場変動の説明が試みられた後も、モデルおよび解析法の両面で多くの改良がなされ、次第に発展してきた。その研究成果は、コロナアーケード形成、プロミネンス放出、

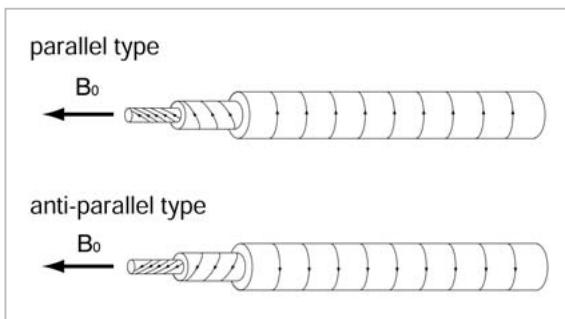


図1 磁気フラックスロープ内部磁場模式図

フィラメント消失 (DSF: disappearing solar filament) 等の ICME と密接な関連性のある太陽面現象と磁気フラックスロープ生成の因果関係を解明しようとする試みにも大きく貢献している[4]–[8]。すなわち、IMF の観測データに磁気フラックスロープモデルをフィッティングすることによって磁気フラックスロープの幾何学、物理パラメータを推定し、それらを基に太陽まで遡ってその起源を探り、関連する太陽面現象との物理的な整合性を検証しようとするものである。とりわけ、太陽、惑星間空間ともに数日間静穏な状態で推移した後、に突発的な太陽面現象が単独で発生した場合には、DSF 等の太陽面現象、CME、1AU 付近の ICME、地磁気擾乱と言った太陽面から地球近傍にいたる一連の現象を遡って追跡する事が可能になり、それらの因果関係の同定が比較的容易になることから磁気フラックスロープモデルの妥当性を検討する上でも格好なイベントとなる。本稿では、その典型と言える 1999 年 4 月 13 日に発生した DSF に伴い発生した一連の現象を対象に行った force-free 磁場フラックスロープモデルによる解析を紹介する。このイベントでは、地球に正対する太陽面中央部に位置するフィラメントが消失したにもかかわらず、円筒型磁気ロープによる推定では、過去の研究で見出されたフィラメント近傍の太陽面磁場と磁気雲中の磁気フラックスロープの間の法則に反する結果となった[4][5]。しかしながら、円筒型モデルは非常に単純化されたモデルであり、ICME と衛星の位置関係によっては磁気フラックスロープの曲率が重要な要素となり、円筒型モデルでは適切な近似とならない場合もあり得る。円筒を円形に曲げたトーラス型磁気フラックスロープモデルは、このような場合にも有効な手段のひとつである[3][5]。本稿では、最初に

1999 年 4 月 13 日に発生した DSF に伴う一連の現象の概要を簡単に紹介する。続いて、円筒型磁気ロープモデル、トーラス型磁気ロープモデルによるフィッティング結果から推定される磁気フラックスロープの構造と対応する太陽面現象との関係について述べていく。

## 2 観測

1999 年 4 月 16 日 10 時 30 分 (UT) 頃、ACE 衛星で衝撃波の通過が観測された。衝撃波通過直後から太陽風密度が上昇し、16 日 14 時 (UT) 頃に最大 68 個/cc に達した。続いて 16 日 21 時 (UT) 頃から磁場の南転が始まり、最大 -13 nT に達した。Bz < -10 nT の継続時間は約 6 時間。これに伴い、16 日 11 時 26 分 (UT) に SC 型地磁気嵐が発生、17 時 21 時 (UT) 頃に終了。柿岡における地磁気水平成分の減少値は最大約 160 nT であった。

太陽面現象との対応付けのため、SOHO/LASCO・EIT195 のデータから、衝撃波通過の数日前まで遡って太陽面の活動現象を拾い出した。この期間、太陽活動は低調であり惑星間空間も比較的静穏な状態で推移していたため、唯一候補として挙げられた現象は、4 月 13 日 3 時 30 分 (UT) 頃 LASCO/C2 で観測された halo CME であった (図 2)。

同日 10 時 (UT) 頃にも小さな X 線フレアに対応する CME が観測されているが、発生源は南東部であり CME は見かけ上、東側に飛んでおり、地球近傍の宇宙環境に影響を及ぼす可能性は低い。さらに、EIT195 による観測では、この halo CME に先行して、北半球中央部のフィラメント付近で 1 時 48 分 (UT) 頃コロナ輝度の減少 (dimming) が見られ、続いて 2 時 30 分 (UT) 頃にアーケード構造が形成されている (図 3)。

Meudon spectroheliogram の H $\alpha$  線観測でも、12 日 20 時 34 分 (UT) と 13 日 10 時 58 分 (UT) の観測からこのフィラメントの消失 (N16E00) が認められる (図 4)。

また、NICT 平磯太陽観測施設の太陽電波観測システム (HiRAS) でも同日 3 時 (UT) 頃に弱い type IV 電波バーストが観測されている。これらは、いずれも CME 発生と関係が深いと考えられている現象である[9][10]。以上のことより、16 日

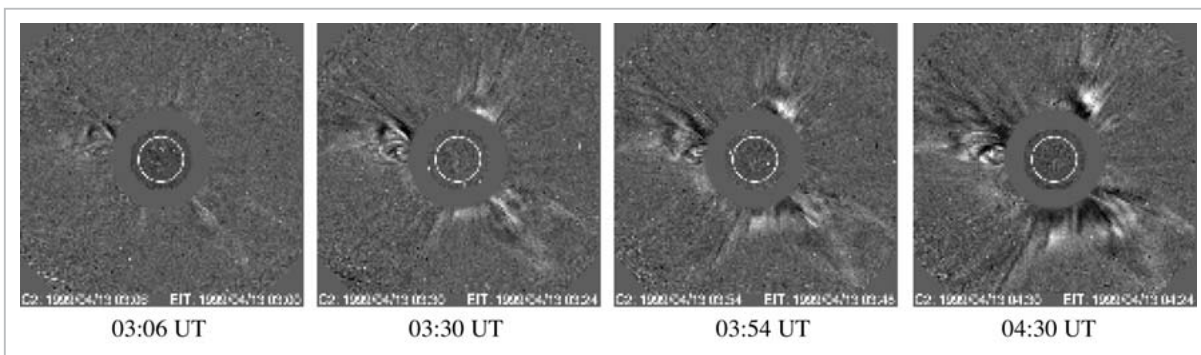


図2 1999年4月13日にLASCO C2 coronagraphによって観測された halo CME

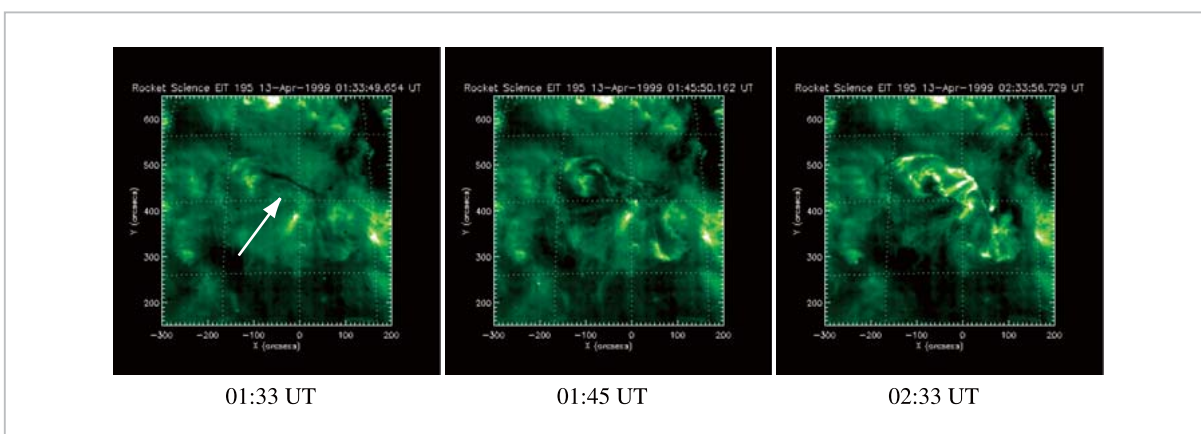


図3 1999年4月13日のSOHO/EIT 195 Å 観測

向かって左の図より、北半球子午線付近のフィラメント(白線矢印)、フィラメント近傍コロナ輝度の減少(dimming)、アーケード構造の形成。

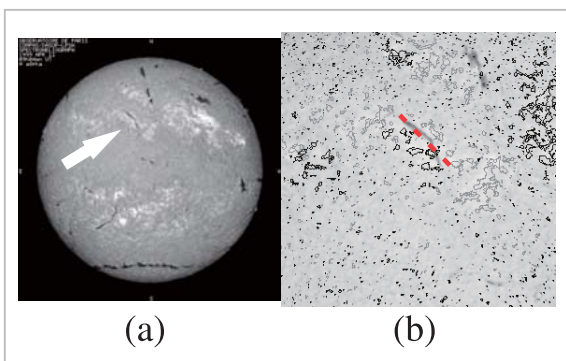


図4 (a) 1999年4月12日のMeudon heliographによるH-alpha像  
白い矢印で示したフィラメントが消失した。  
(b) (a)のH-alpha像にSOHO/MDI magnetoheliogramのcontourを重ね合わせて表示した図

(灰色: positive polarity; 黒色: negative polarity)  
赤い点線は、フィラメントのおよその方向を示しており、フィラメントが太陽面磁場中性線上に北東-南西にのびているのがわかる。

にACE衛星を通過したICMEの起源を4月13日にhalo CMEを伴い発生したDSFに求めるのが妥当と考えられる。

### 3 磁気フラックスロープモデルによるフィッティング

#### 3.1 円筒型磁気フラックスロープモデル

前章で述べたイベントの太陽風磁場変化に対し磁気フラックスロープモデルを当てはめ、磁気フラックスロープの方向、サイズ、主磁場の大きさなどを決定する。自己相似的に膨張する constant- $\alpha$  Force Free 磁場で記述される円筒型磁気フラックスロープモデルは、ICME中のねじれた磁場構造を簡潔かつ合理的に説明するモデルとして認知され、広く普及している[5][11]。そこで、まず最初に円筒型磁気フラックスロープモデルを用いたフィッティングを行い、ICMEとDSFの関係を検証してみた。

フィッティングの結果、地心黄道座標系(Geocentric Solar Ecliptic coordinate)を基準に表した磁気ロープの主磁場の方向は、緯度角 $\theta$ 、経度角 $\phi$ がそれぞれ $-40.9^\circ$ 、 $120.2^\circ$ となる。

磁気ロープ内磁力線のねじれ方向(helicity)は、左手系(反平行)である。

他の推定されたパラメータは、以下の通り。

磁気フラックスロープの半径： $0.102 \text{ AU}$

主磁場強度： $25.2 \text{ nT}$

衝突パラメータ： $0.29$

ここで衝突パラメータは、衛星軌道と磁気ロープの軸との距離を磁気ロープ半径で規格化したものである。

太陽風中の磁気フラックスロープとトロイダル磁場の関係の研究[4]およびフィラメント磁場構造の解析[8]によって、北半球起源の磁気フラックスロープの helicity は左手系(反平行)、南半球起源は右手系(平行)の磁場構造を有する事が知られている。この説に従うと、この磁気フラックスロープの起源が北半球である事が導かれる。すなわち、この磁気フラックスロープイベントは13日発生のDSFを起源とする考えを支持する。SOHO/MDIの太陽表面磁場観測によれば、当該フィラメント付近の磁場は、フィラメントより北部で鉛直上向き、南部で鉛直下向きを示しており、既に左手系(反平行)の helicity を有していたフィラメントが惑星間空間に放出されたと仮定すれば、このSOHO/MDIによる表面磁場観測と円筒型磁気ロープモデルを用いたACE衛星観測データのフィッティングによって推定される磁気フラックスロープ内部磁場のねじれ構造は、無理なく説明できる[6][12]。

しかしながら、helicity に関しては磁気フラックスロープの起源を太陽面現象に求めた過去の研究に矛盾しない結果(左手系)を得た一方で、GSE座標系でY-Z平面に投影した磁気フラックスロープの主磁場ベクトルは、ほとんど北西-南東方向( $\sim -45.1^\circ$ )であり、当該フィラメントの方向とほとんど直角となっている(図4)。この解析結果を受け入れるには磁気フラックスロープの向きが惑星間空間を伝播中に大きく変化したと仮定しなければならない。以上のことから、地球に正対するほぼ正面で起こったDSFにもかかわらず、円筒型磁気フラックスロープモデルによるフィッ

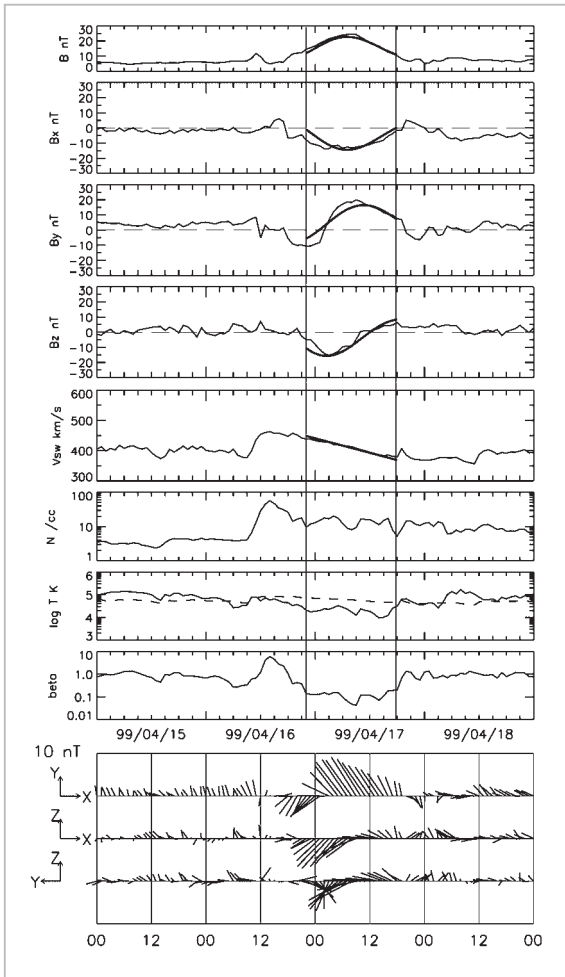
ティングは芳しくない結果となった。この手法による磁気ロープ構造の決定は本質的にモデルに依存しており、磁気フラックスロープとフィラメントの幾何学的関係の推定に大きく影響を与える[13]。モデル自体が招いた原因として、磁気フラックスロープの中央部からはずれた部分が衛星を通過したため、円筒型磁気フラックスロープモデルによる磁場構造の局所的記述が良い近似とならず、フィッティングの結果に影響を与えた可能性がある。こうした影響を排除するために磁気フラックスロープの曲率を考慮したトーラス型磁気フラックスロープモデル[5]を用いたフィッティングを試みた。

### 3.2 トーラス型磁気フラックスロープモデル

トーラス型磁気フラックスロープに対応したforce-free磁場の厳密解は、Romashets and Vandas[14]によって求められているが、本稿では、トーラスの大半径(major radius)が小半径(minor radius)に比べて十分に大きい条件の下での近似解[15]をもとに、さらに簡略化して磁気ロープの軸が円形をしているだけで内部磁場も主軸からの距離だけの関数となるトーラス型磁気ロープモデルを用いた[13]。トーラス型磁気フラックスロープモデルでは、トーラス小半径で表される磁気フラックスロープの太さに加え、磁気フラックスロープの有する曲率の指標となるトーラス大半径で表される大円の半径がパラメータに追加される。また、トーラス全体の黄道面に対する勾配は、トーラスの軸が張る平面の法線ベクトル、 $\theta_n$ 、 $\phi_n$ で与えられる。

このモデルによる1999年4月16-17日のICMEイベントに対するフィッティング結果を観測データに重ね合わせたものを図5に示す。上から磁場強度、GSE座標系における磁場X、Y、Z成分、太陽風速度、プロトン密度、温度、 $\beta$ 値、X-Y、X-Z、Y-Z平面に投影された磁場ベクトルを表している。プロトン温度の図中の点線は太陽風速度とプロトン温度の関係から期待される値を示し[16]、期待される値に比べて低いプロトン温度から磁気雲の通過を同定するために用いられる[2]。

トーラス平面は、 $\theta_n$ 、 $\phi_n$ がそれぞれ $-18^\circ$ 、 $33^\circ$ の法線ベクトルを有し、前述の円筒型モデル



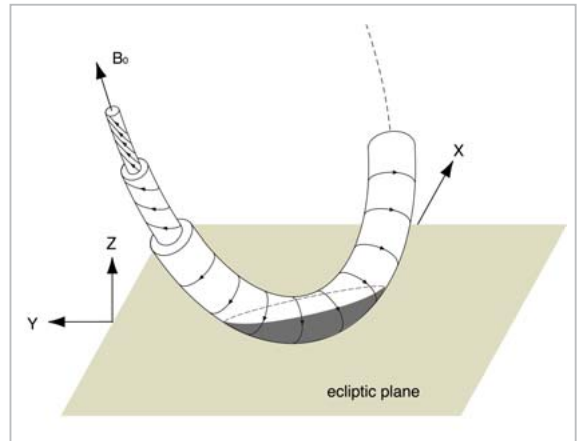
**図5** トーラス型モデルでフィッティングされた1999年4月16-17日の磁気フラックスロープイベント

上から磁場強度、GSE座標系における磁場X、Y、Z成分、太陽風速度、プロトン密度、温度、 $\beta$ 値、X-Y、X-Z、Y-Z平面に投影された磁場ベクトル。

によるフィッティング結果と同様に、磁気フラックスロープ内の磁場構造は左手系(反平行)であった。フィッティングによって得られた他のパラメータは、以下の通り。

- トーラス大半径：0.3 AU
- トーラス小半径：0.07 AU
- 主磁場強度：23 nT
- 衝突パラメータ、 $P_y$  (GSE座標系、Y成分)：-0.24
- 衝突パラメータ、 $P_z$  (GSE座標系、Z成分)：-0.21

ここで衝突パラメータは、衛星軌道と磁気ロープの軸との距離を磁気ロープ半径(トーラス小半径)で規格化したものである。



**図6** 図5のフィッティング結果に対応するトーラス型磁気フラックスロープの配位模式図

図中、陰の部分は黄道面より下側になる。

衝突パラメータ、 $P_y$ ,  $P_z$  からトーラス中心は黄道面より南側を通過したと推定される。

トーラス型磁気フラックスロープモデルによる解析では、磁気フラックスロープは、 $\theta_n$ ,  $\phi_n$  がそれぞれ $-18^\circ$ ,  $33^\circ$ の法線ベクトルを有するトーラスの一部としてフィッティングされ、トーラス南端部分がACE衛星を通過したとする描像で説明される。このフィッティングで得られた磁気フラックスロープの幾何学的な概略図を図6に示す。

トーラスモデルで推定されたトーラスの軸が張る平面は、ほぼアルキメデススパイラルに沿っている。さらに前述の円筒型磁気フラックスロープモデルによって推定された主磁場ベクトルが、このトーラス平面内に包含されている点も非常に重要である。DSFに伴い北東-南西方向に伸びる磁気中性面に沿って放出されたフィラメントが惑星間空間を伝播し、1AUでアルキメデススパイラルに沿ったトーラス型の幾何学的特徴を有する磁気フラックスロープとして観測されたと考えれば、DSFからACEで観測された磁気フラックスロープにいたる一連のイベントは、矛盾なく説明される。

## 4 むすび

本稿では、1999年4月16日の磁気フラックスロープイベントに対する磁気フラックスロープモデルによるフィッティング解析を通じて、円筒型

磁気フラックスロープモデルおよびその発展形であるトーラス型磁気フラックスロープモデルを紹介した。DSF、アーケード構造、CME等の太陽面現象とICMEとの物理的な対応付けを行おうとする試みは、磁気雲の惑星間空間における時間的・空間的な発達過程を知る上で重要な手がかりを与えるものであり、磁気フラックスロープモデルはその重要な解析ツールとして改良が続けられ発展している。円筒型磁気フラックスロープモデルによる解析は過去にも多くの事例で太陽面現象との関連づけに成功しているが、ここで報告したイベントに関しては、対応する太陽面現象が地球に正対するほぼ子午面上で発生したにも関わらず、合理的な解析結果は得られなかった。しかし、磁気ロープの曲率を考慮したトーラス型磁気フ

ラックスロープモデルでは、円筒型モデルの問題点が解消されて一連の観測事実を無理なく説明できた。過去の研究において円筒型モデルによるフィッティングで芳しい結果を得られなかったICMEイベントは数多く、それらを対象にトーラス型磁気ロープモデルを用いて再検証を行うのは有意義であろう。その一方で、トーラス型磁気フラックスロープモデル自体も、本稿で用いたトーラス大半径がトーラス小半径に対して十分に大きいという仮定のもとで適用可能なforce-free磁場の近似解からトーラス大半径とトーラス小半径の比に依存しない厳密解を基にしたものへと改良を進めて、フィッティングプログラムの適用範囲を広げていく必要がある。

## 参考文献

- 1 Gosling J. T., Baker D. N., Bame S. J., Feldman W. C., Zwickl R. D., and E. J. Smith, "Bidirectional solar wind electron heat flux events", *J. Geophys. Res.*, 92, 8519-8535, 1987.
- 2 Richardson, I. G. and H. V. Cane, "Regions of abnormally low proton temperature in the solar wind (1965-1991) and their association with ejecta", *J. Geophys. Res.*, 100, 23397, 1995.
- 3 Marubashi, K., "Physics of interplanetary magnetic flux ropes: toward prediction of geomagnetic storm", *Adv. Space Res.*, 26(1), 55-66, 2000.
- 4 Marubashi, K., "Structure of the interplanetary magnetic clouds and their origins", *Adv. Space Res.*, v6(6), 335-338, 1986.
- 5 Marubashi, K., "Interplanetary magnetic flux ropes and solar filaments, in *Coronal Mass Ejections*", *Geophys. Monogr. Ser.*, Vol.99, edited by N. Crooker, J. Joselyn, and J. Feynman, p.147, AGU, Washington, D.C., 1997.
- 6 Bothmer, V. and R. Schwenn, "Eruptive prominences as sources of magnetic clouds in the solar wind", *Space Sci. Rev.*, 70, 215-220, 1994.
- 7 Bothmer, V. and D. M. Rust, "The field configuration of magnetic clouds and solar cycle, in *Coronal Mass Ejections*", *Geophys. Monogr. Ser.*, Vol.99, edited by N. Crooker, J. Joselyn, and J. Feynman, p.139, AGU, Washington, D.C., 1997.
- 8 Rust, D. M., "Spawning and shedding helical magnetic fields in the solar atmosphere", *Geophys. Res. Lett.*, 21, 241-244, 1994.
- 9 Munro, R. H., J. T. Gosling, E. Hildner, R. M. MacQueen, A. Poland, and C. L. Ross, "The association of coronal mass ejection transients with others forms of solar activity", *Sol. Phys.*, 61, 201-215, 1979.
- 10 Webb, D. F. and A. J. Hundhausen, "Activity associated with the solar origin of coronal mass ejections", *Sol. Phys.*, 108, 383-401, 1987.
- 11 Farrugia, C. J., L. F. Burlaga, V. A. Oshrovič, I. G. Richardson, M. P. Freeman, R. P. Lepping, and A. J. Lezarus, "A study of an expanding interplanetary magnetic cloud and its interaction with the Earth's magnetosphere", *J. Geophys. Res.*, 98, 7621-7632, 1993

- 12 Rust, D. M. and A. Kumar, "Helical magnetic fields in filaments", Sol. Phys., 155, 69, 1994.
- 13 Marubashi, K., "Interplanetary magnetic flux ropes", J. Comm. Res. Lab., 49(3), 41-59, 2002.
- 14 Romashets, E., and M. Vandas, "Force-free field inside a toroidal magnetic cloud", Geophys. Res. Lett., 30(20), 2065-2068, 2003.
- 15 Miller, G. and L. Turner, "Force free equilibria in toroidal geometry", Phys. Fluids, 24, 363-365, 1981.
- 16 Lopez, R., "Solar cycle invariance in solar wind proton temperature relationships", J. Geophys. Res., 92, 11189, 1987.



いしはらひろあき  
石橋弘光

電磁波計測研究センター宇宙環境計測  
グループ主任研究員  
太陽風、宇宙天気