

平成 23 年 5 月 6 日現在

研究種目：学術創成研究費

研究期間：2005～2009

課題番号：17GS0208

研究課題名（和文） 宇宙天気予報の基礎研究

研究課題名（英文） Basic Study of Space Weather Prediction

研究代表者

柴田 一成 (SHIBATA KAZUNARI)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：70144178

研究成果の概要（和文）：宇宙天気予報は現代文明の緊急の課題である。最新観測に基づく太陽－地球間システム階層間結合数値モデルを構築することにより、宇宙天気予報の基礎研究を行った。この研究は、国際研究計画「太陽地球系の気候と天気」CAWSES 5 年計画の一環として行われたものであり、我が国および世界において太陽物理学者と地球物理学者を有機的に結びつけて有効な共同研究を推進・奨励するという国際的な責務の下に遂行した。

研究成果の概要（英文）：Space weather prediction is an urgent issue for modern civilization. Basic study of space weather prediction has been carried out, by developing the numerical multi-scale coupling model for the system from the Sun to the Earth on the basis of the new observations. This study was pushed as a part of CAWSES (Climate And Weather of the Sun-Earth system) program for 5 years, to encourage active communication and collaboration between solar physicists and geophysicists both in Japan and international communities.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-------------|-------------|-------------|
| 2005 年度 | 87,400,000 | 26,220,000 | 113,620,000 |
| 2006 年度 | 89,800,000 | 26,940,000 | 116,740,000 |
| 2007 年度 | 92,900,000 | 27,870,000 | 120,770,000 |
| 2008 年度 | 91,100,000 | 27,330,000 | 118,430,000 |
| 2009 年度 | 85,200,000 | 25,560,000 | 110,760,000 |
| 総計 | 446,400,000 | 133,920,000 | 580,320,000 |

研究分野：太陽・宇宙プラズマ物理学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：太陽、太陽風、地球磁気圏、電離圏、宇宙天気、プラズマ、スペース、天文

1. 研究開始当初の背景

(1) 我々の地球周辺の「宇宙」環境は、太陽に原因を持つ激しい嵐に襲われており、人類の活動を脅かしている。この宇宙の嵐の予報、すなわち「宇宙天気予報」の実現に向けた基礎研究が、現代の焦眉の課題となっている。

(2) このような重大な使命を達成するために、国際太陽地球系物理学科学委員会 (SCOSTEP) は 2004 年より 5 年計画で、国際研究計画「太陽地球系の気候と天気」CAWSES (Climate And Weather of the Sun-Earth System) を開始した。本研究の代表者 (柴田) は、CAWSES 第 2 班「宇宙天

気：基礎研究と応用」の座長を務めており、従来ばらばらに研究を続けていた太陽物理学者と地球物理学者を有機的に結び付け、真に有効な共同研究を推進・奨励するという国際的な責務を負っている。本学術創成研究は、そのような「国際的に対応を強く要請される研究」として、国際研究計画を日本がリーダーシップをとって進めるために不可欠な共同研究「宇宙天気予報の基礎研究」を推進することを目的として推薦され採択された。

2. 研究の目的

本研究では新しい観測データの解析とコンピュータ・シミュレーションを駆使することによって、太陽大気から惑星間空間、さらには地球磁気圏、オーロラや磁気嵐に至るまでの物理モデルの枠組みを完成させる。これに基づいて、太陽から地球に至るまでを1つのシステムとして扱う階層間結合モデルを構築し、実際の太陽-地球間現象の観測データの再現を試みる。これは数値宇宙天気予報コードの基礎となるものである。

3. 研究の方法

(1) 太陽エネルギー解放過程の研究：飛騨天文台における太陽地上観測と、2006年打ち上げられた「ひので」(Solar-B)太陽観測衛星によるスペース観測、さらには理論研究を組み合わせることにより、太陽面爆発(フレア)の発生機構を解明、モデル化する。

(2) 惑星間シンチレーション観測による太陽風モデルの構築：天体電波の太陽風による散乱(シンチレーション法)を用いて、フレアから発生した擾乱の3次元構造を観測し、太陽風モデルを構築する。

(3) リアルタイム観測と宇宙天気図モデリング：
地上磁場観測と磁気圏・電離圏人工衛星観測やレーダー観測、シミュレーションなどを総合し、電離圏電位・電流の宇宙天気図をリアルタイム(5分-10分毎)で作る。

(4) バーチャル観測所：(1)-(3)で得られた太陽-太陽風-地球観測を総合し、数値モデリングにより、太陽から地球に至るまでを一つのシステムとして扱う階層間結合モデルを構築し、太陽-地球間現象の観測データ

の再現を試みる。

4. 研究成果

(1) 太陽エネルギー解放過程の研究：太陽地上観測データチームは、データアーカイブシステムを整備完成し、H α 全面太陽活動画像データをインターネットで全データを公開している。これらのデータは、ひので衛星の定常観測や共同観測を推進するのにも有効に活用された。さらに全世界に広がる H α グローバルネットワーク(CHAIN プロジェクト)の実現化のため、南米ペルーにて調査研究を行い、飛騨天文台で活躍していたFMT(フレア監視望遠鏡)をペルー・イカ大学に移設した(2010年3月)。これより、日本の夜の時間帯でも、太陽全面 H α 像(H α センターおよび $\pm 0.8A$)データが得られるようになった。

ひので衛星プロジェクトは、本学術創成研究費によって整備された「ひのでサイエンスセンター」を中心に、太陽大気構造と磁気活動やコロナの成因の解明、宇宙天気の基礎研究初期観測データの解析を進めてきた。その結果、光球ジェット、黒点半暗部ジェット、極域X線ジェット等のダイナミックな現象の新発見、大気中にあまねく存在する Alfvén 波の発見などが続出し、その成果は国際科学雑誌サイエンス、および学術誌(PASJ,A&A)の特集号に公表した。

太陽理論チームは、2007年度に宇宙天気モデリング・サブグループを組織し、ひので衛星による精密太陽磁場観測データを用いて太陽フレアの発生からコロナ質量放出の形成過程までを数値シミュレーションすることに、世界で初めて成功した(図1、図2参照)。

また、コロナ質量放出モデル(図2、図3)と地球磁気圏モデル(図4)の連結実験、太陽フレア衝撃波におけるイオン加速過程を粒子・流体連結手法を駆使して効率的に計算する新アルゴリズムの開発を行った。

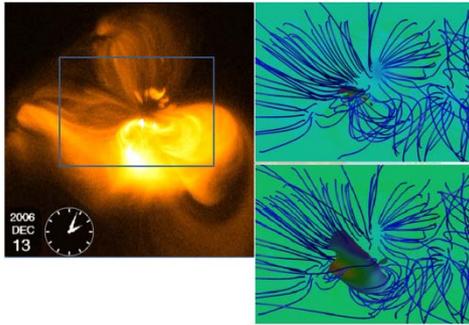


図1左図：活動領域 NOAA10930 において2006年12月13日に発生した大規模フレアの開始直後のX線画像(ひのでXRTによる)。X線ループ構造は磁力線を表わしていると考えられている。右図：同フレアのシミュレーションの結果。上図と下図は磁力線構造と密度分布の時間変動を表わす。(Kusano et al. 2009; 学会発表⑧)

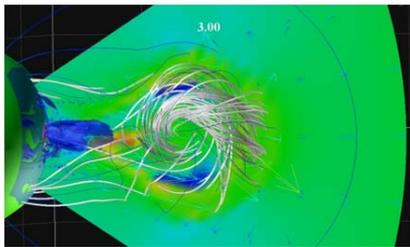


図2：太陽面からのプラズマ噴出が磁束を伴ってコロナ質量放出に成長する過程のシミュレーション結果。(Shiota et al. 2010; 雑誌論文②)

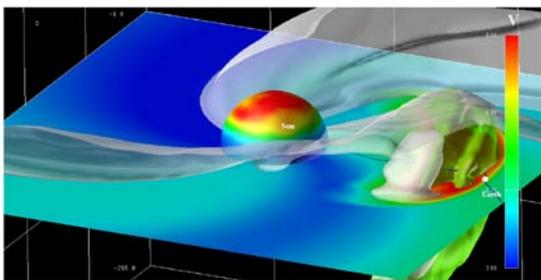


図3：惑星間空間を伝搬するコロナ質量放出のシミュレーション結果。(Kataoka et al. 2009; 雑誌論文⑦)

(2) 惑星間シンチレーション観測による太陽風モデルの構築：探索機 Ulysses データをもちいてコロナルホール太陽風の様でわずかに緯度依存性のある速度構造の成因を研究した。また、高感度 IPS アンテナ (太陽

圏イメージング装置) を完成し、総合調整を実施している。

(3) リアルタイム観測と宇宙天気図モデリング：二波長のオーロラ画像から、現実的な電気伝導度を算出する手法を開発し、激しく変動するサブストーム時における宇宙天気図(極域電離圏の電場・電流分布図)を作成することに成功した。

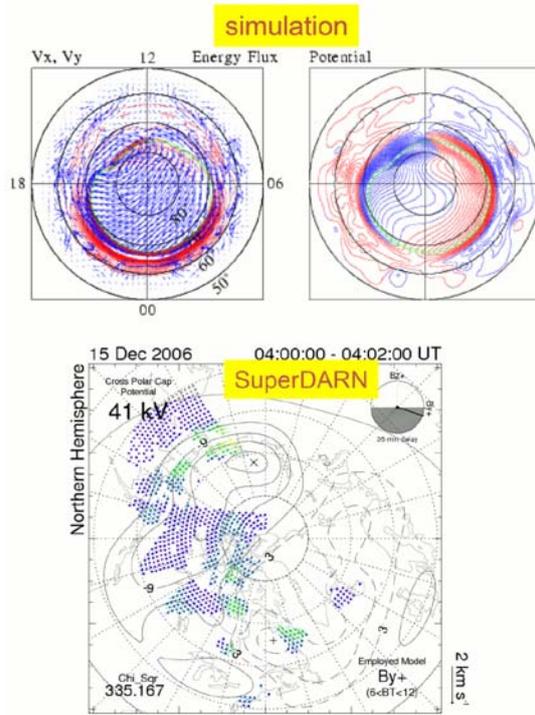


図4：2006年12月の磁気嵐に対するMHDシミュレーション結果(上図)とSuperDARN電離圏観測の極域図(下図)の比較(Ogino; 学会発表⑩)

(4) バーチャル観測所：バーチャル天文台タスクフォースグループを立ち上げ、データベースソフト「STARS」を基礎とするシステムを完成し、太陽圏・地球磁気圏データの整備を完了した。

(5) CAUSES 国際会議の開催：2007年10月22日-27日に、京都大でCAUSES国際会議を開催した。地球高層大気から太陽分野までのあらゆる分野を含むCAUSES研究会としては史上最大規模のもの(内外出席者376人、発表400編超)となった。モデリングに関する国際会議(2006年11月)の論文集を Journal of Geophysical Research

(2007年) に、フレアとオーロラの比較に関する国際会議(2007年3月)の論文集を *Earth, Planets and Space* (2008年) それぞれ特集号として出版した。

(6) 若手研究者の異分野融合共同研究を推進・支援するために、「若手支援研究」をプロジェクトチーム内で公募し、2007年度より2009年度まで、毎年2件(各100万円)の太陽地球分野融合の共同研究を支援した。

(7) 宇宙天気サマースクール(2008年8月)の講義を元に、宇宙天気に関するわが国初の教科書「総説宇宙天気」を京大学術出版会より出版した(2011年)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計119件)

- ① Matsumoto, T. and Shibata, K., “Nonlinear Propagation of Alfvén waves driven by Observed Phospheric Motions: Application to the Coronal Heating and Spicule Formation”, *ApJ*, 710, 1857-1867, (2010)
- ② Shiota, D., Kusano, K., Miyoshi, T., Shibata, K., “Magnetohydrodynamic Modeling for a Formation Process of Coronal Mass Ejections: Interaction Between an Ejecting Flux Rope and an Ambient Field”, *ApJ*, 718, Issue 2, 1305-1314 (2010)
- ③ Zhao, J., Kosovichev, A. G., Sekii, T., “High-Resolution Helioseismic Imaging of Subsurface Structures and Flows of a Solar Active Region Observed by Hinode”, *ApJ*, 708, 304-313, (2010)
- ④ Shimada, N., Hoshino, M., and Amano, T., “Structure of a Strong Supernova Shock Wave and Rapid Electron Acceleration Confined in its Transition Region”, *Phys. of Plasmas*, 17, 032902, (2010)
- ⑤ Nishida, K., Shimizu, S., Shiota, D., Takasaki, H., Magara, T., and Shibata, K., “Numerical Examination of Plasmoid-Induced Reconnection Model for Solar Flares: The Relation between Plasmoid Velocity and Reconnection Rate”, *ApJ*, 690, 748-757 (2009)
- ⑥ Asai, A., Shibata, K., Ishii, T.T., Oka, M., Kataoka, R., Fujiki, K., and Gropalswamy, N., “Evolution of the anemone AR NOAA 10798 and the related geo-effective flares and CMEs”, *JGR*, 114, A00A21, (2009)
- ⑦ Kataoka, R., Ebisuzaki, T., Kusano, K., et al., “Three-dimensional MHD modeling of the solar wind structures associated with 13 December 2006 coronal mass ejection”, *J. Geophys. Res.*, 114, A10102, (2009)
- ⑧ Tokumaru, M., Kojima, M., and Fujiki, K., “Non-dipolar Solar Wind Structure Observed in the Cycle 23/24 Minimum”, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L09101 120, (2009)
- ⑨ Amano, T., and Hoshino, M., “Electron Shock Surfing Acceleration in Multidimensions: Two-Dimensional Particle-In-Cell Simulation of Collisionless Perpendicular Shock”, *ApJ*, 690, 244-251, (2009)
- ⑩ Shinohara, I., et al., “Electron acceleration via magnetic island coalescence”, *AIP Conference Proceedings (Future Perspectives of Space Plasma and Particle Instrumentation and International Collaborations)*, Vol. 1144, pp.15-20, (2009)
- ⑪ Shimizu, T., Kondo, K., Ugai, M., and Shibata, K., “Magnetohydrodynamics Study of Three-dimensional Fast Magnetic Reconnection for Intermittent Snake-line Downflows in Solar Flares”, *ApJ*, 707, 420, (2009)
- ⑫ Tsuneta, S., et al., “The magnetic Landscape of the Sun’s Polar Region”, *ApJ*, 688, 1374-1381, (2008)
- ⑬ Omura, Y., Katoh, Y., and Summers, D., “Theory and simulation of the generation of whistler-mode chorus”, *J. Geophys. Res.*, 113, A04223, (2008)
- ⑭ Ugai, M., “Impulsive chromospheric heating of two-ribbon flares by the fast reconnection mechanism”, *Phys. of Plasma*, 15, 032902, (2008)
- ⑮ Ugai, M., “The evolution of fast reconnection in a three-dimensional current sheet system”, *Phys. Plasmas*, 15, 082306, (2008)
- ⑯ Shibata, K., et al., “Chromospheric Anemone Jets as Evidence of Ubiquitous Magnetic Reconnection”, *Science*, 318, 1591-1594 (2007)
- ⑰ Shibata, K., and Kamide, Y., “Basic Study of Space Weather Predictions: A New Project in Japan”, *Space Weather*, Volume 5, Issue 12, (2007)
- ⑱ Ueno, S., Shibata, K., et al., “CHAIN-project and installation of the flare monitoring telescopes

in developing countries”, Bull. Astr. Soc. India, 35, 697-704, (2007)

- ⑱ Okamoto, T.J., Tsuneta, S., Berger, T.E., Ichimoto, K., Katsukawa, Y., Lites, B.W., Nagata, S., Shibata, K., et al., “Coronal Transverse Magnetohydrodynamic Waves in a Solar Prominence”, Science, 318, 1577-1580, (2007)
- ⑳ Kamide, Y., and Maltsev, Y.P., “Geomagnetic storms, in the Handbook of the Solar-Terrestrial Environment”, edited by Y. Kamide and A.C.-L. Chian, Springer Pub., Heidelberg, 356-374, (2007)
- ㉑ Kamide, Y., “From IGY to eGY: The importance of real-time data in space physics”, Adv. Geosciences 8, edited by M. Duldig et al., 1-24, World Sci. Pub., (2007)
- ㉒ Sekii, T., et al., “Initial Helioseismic Observations by Hinode/SOT”, PASJ, 59, S637-S641, (2007)
- ㉓ Kusano, K., “Simulation Study of Transition Process from Long-Lived Sigmoid to Flare Eruption”, New Solar Physics with Solar-B Mission ASP Conference Series, 369, 469, (2007)
- ㉔ Omura, Y., Furuya, N., and Summers, D., “Relativistic turning acceleration of resonant electrons by coherent whistler mode waves in a dipole magnetic field”, J. Geophys. Res., 112, A06236, (2007)

[学会発表] (計 458 件)

- ① Hoshino, M., “Lecture on Particle Acceleration in Shock Waves”, International School-Particle Acceleration in the Universe, GCOE Program/Nagoya University, 2009 年 11 月 14 日
- ② Shinohara, I., and Fujimoto, M., “An initial result of 3D full particle simulation of quasi-perpendicular shock”, 11th Scientific Assembly of IAGA, Sopron, Hungary., 2009 年 8 月 25 日
- ③ Tokumaru, M., Kojima, M., and Fujiki, K., “Propagation of coronal mass ejections in the interplanetary medium”, AOGS2009, Singapore., 2009 年 8 月 15 日
- ④ Omura, Y., “Nonlinear Wave-Particle Interactions in the Magnetosphere”, AOGS2009, Singapore, 2009 年 8 月 12 日
- ⑤ Fujiki, K., et al., “SOLAR WIND

FORECAST BY USING INTERPLANETARY SCINTILLATION OBSERVATIONS”, Solar Wind 12, Saint-Malo, France, 2009 年 6 月 21 日 ~26 日 (poster)

- ⑥ Ito, H., Tsuneta, S., Shiota, D., Tokumaru, M., and Fujiki, K., “IS THE POLAR REGION DIFFERENT FROM THE QUIET REGION OF THE SUN?”, Solar Wind 12, Saint-Malo, France, 2009 年 6 月 21 日 ~26 日 (poster)
- ⑦ Ugai, M., “Modeling of flare phenomena in space plasmas by fast reconnection”, 10th IPELS Workshop, Sweden, 2009 年 6 月 9 日
- ⑧ Kusano, K., Shibata, K., et al., “Space Weather Modeling of the Solar Terrestrial Connection Event in December 2006: From the Sun to the Interplanetary Space”, Space Weather Workshop, Boulder, Colorado, U.S.A., 2009 年 4 月 30 日
- ⑨ Kusano, K., Shiota, D., Inoue, S., Sugiyama, T., Shima, S., Kawamura, Y., Kataoka, R., Miyoshi, T., Asano, E., Matsumoto, T., Ogino, T., Shibata, K., “Multi-scale Simulation Study of Solar-Cosmic and Terrestrial Environment”, Space Climate symposium 3, Saariselka, Finnish Lapland, 2009 年 3 月 20 日
- ⑩ Sekii, T., “High-Resolution Helioseismic Observations”, Second Hinode Science Meeting, Boulder, Colorado, USA, 2008 年 10 月 2 日
- ⑪ Ogino, T., “MHD simulation of interaction of the solar wind with earth’s magnetosphere for the magnetospheric storm events”, AOGS2008, Busan, Korea, 2008 年 6 月 18 日
- ⑫ Shibata, K., “Initial Results of Hinode (Solar B) mission”, IPELS (Interrelationship between Plasma Experiments in Laboratory and Space), Palm Cove, Cairns, Australia, 2007 年 8 月 5 日
- ⑬ Kusano, K., et al., “Predictability of Solar Flare Onset and Multi-scale Modeling for Space Weather Dynamics”, CAWSES International Workshop on Space Weather Modeling (CSWM), Yokohama, Japan, 2006 年 11 月 17 日
- ⑭ Kato, S. X., “Integration between Solar Data and Space Science Data for Space Weather Forecast”, CODATA2006, Beijing, China, 2006 年 10 月 24 日
- ⑮ Shibata, K., “Solar Activity Affecting Space Weather”, SCOSTEP’s 11th Quadrennial STP Symposium, Rio de Janeiro, Brazil, 2006 年 3 月 7 日

〔図書〕(計5件)

- ① 柴田一成、上出洋介、「総説 宇宙天気」
京大学術出版会 (2011) 654 ページ
- ② 柴田一成、「太陽の科学」、NHK出版
(2010), 213 ページ
- ③ Tsuda, T., Fujii, R., Shibata, K., and Gellar, M.
(eds.), “Climate and Weather of the Sun and
Earth System (CAWSES)”, Selected Papers from
the 2007 Kyoto Symposium, TERRAPUB,
Tokyo (2009). 360 ページ
- ④ Shibata, K., Nagata, S., Sakurai, T. (ed.),
“New Solar Physics with Solar-B Mission”, ASP
conference series, Volume: 369 (Astronomical
Society of the Pacific) (2007) 596 ページ
- ⑤ Kamide, Y., and A. C.-L. Chian, “Handbook of
the Solar-Terrestrial Environment”, Springer
Verlag, Heidelberg (2007), 540 ページ

〔その他〕本共同研究プロジェクトの成果の
詳細についてはホームページを参照：

<http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/spw/>

〔新聞報道〕4件

- 2007年12月7日 「ひので衛星によって発
見された彩層アネモネ・ジェット」
京都新聞ほか5紙で報道
- 2008年9月2日 「SMARTが捉えた太
陽フレアに伴う3連続衝撃波」
毎日新聞ほか4紙で報道
- 2009年2月21日 「宇宙の天気のをにぎ
るは太陽のアネモネ」
読売新聞ほか4紙で報道
- 2010年3月16日 「宇宙天気予報の基礎と
なる太陽嵐の最新モデリングに成功」
朝日新聞ほか5紙で報道

6. 研究組織

(1)研究代表者

柴田 一成 (SHIBATA KAZUNARI)
京都大学・理学研究科・教授
研究者番号：70144178

(2)研究分担者

関井 隆 (SEKII TAKASHI)
国立天文台・太陽天体プラズマ研究部
・准教授
研究者番号：20332158

草野 完也 (KUSANO KANYA)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授
研究者番号：70183796

藤木謙一 (FUJIKI KENICHI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教
研究者番号：20303597

荻野 竜樹 (OGINO TATUKI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授
研究者番号：00109274

星野 真弘 (HOSHINO MASAHIRO)

東京大学・理学研究科・教授
研究者番号：90241257

篠原 育 (SHINOHARA IKU)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・
准教授
研究者番号：20301723

鵜飼 正行 (UGAI MASAYUKI)

愛媛大学・宇宙進化研究センター・教授
研究者番号：10036444

加藤 精一 (KATOU SEIICHI)

兵庫医療大学・共通教育センター・講師
研究者番号：40346127

大村 善治 (OHMURA YOSHIHARU)

京都大学・生存圏研究所・教授
研究者番号：50171002

村田 健史 (MURATA TAKESHI)

情報通信研究機構・電磁波計測研究センター
宇宙環境計測グループ・グループリーダー
研究者番号：20274342

藤本 正樹 (FUJIMOTO MASAKI)

東京工業大学・理工学研究科・助教
研究者番号：30242811

常田 佐久 (TSUNETAKA SAKU)

国立天文台・太陽天体プラズマ研究部・教授
研究者番号：50188603

小原 隆博 (OBARA TAKAHIRO)

宇宙航空研究開発機構・研究開発本部・宇宙
環境グループリーダー
研究者番号：50194626