

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540278

研究課題名(和文) 太陽大気での磁気リコネクション現象におけるエネルギー輸送の観測的研究

研究課題名(英文) Observations of magnetic reconnection and its energy transfer in the solar atmosphere

研究代表者

清水 敏文 (Shimizu, Toshifumi)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：60311180

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：太陽観測衛星「ひので」の観測に基づき、フレアに代表される「磁気リコネクション」発生に関わるエネルギー輸送過程について調べ、(1)黒点の成長過程で半暗部形成の前駆現象を初めて発見し、(2)太陽表面に形成された水平磁場に高速ガス流が励起され、そのガス流が巨大フレアの発現に重要な磁場構造を徐々に造り上げる事、等を発見した。また、将来観測として可視域～紫外域の分光観測の高解像度化が決め手となるが、その実現に必要なCMOSカメラの高速制御回路と高感度紫外線分光望遠鏡の概念を確立した。この概念検討結果を反映させた次世代太陽観測衛星SOLAR-C計画をJAXA等に提案した。

研究成果の概要(英文)：We investigated “magnetic reconnection” phenomena and their related energy transfer process with Hinode observations and discovered a precursory structure of sunspot penumbra during the development of sunspots. We also identified high-speed gas flows at the photosphere excited in horizontal magnetic field and their key roles on the development of energy for leading to an energetic flare. In addition, we established concepts on high-speed CMOS camera and high-throughput UV spectroscopic telescope, both of which are essential in next-generation observations. The SOLAR-C mission proposal, which includes results from our conceptual studies, has been submitted to JAXA.

研究分野：太陽物理学

キーワード：太陽プラズマ 磁気リコネクション 太陽フレア CMOSセンサ 紫外線分光

1. 研究開始当初の背景

100 万度以上の「太陽コロナの成因」の謎は、未だ解き明かされていない天体物理学上重要な課題である。また、フレア、マイクロフレア、ジェットなどに代表される突発的な爆発は、「磁気リコネクション(再結合)」プロセスによる磁気エネルギー解放の現場と考えられ、天体プラズマの動的振る舞いを理解する上で重要な課題である。これら加熱や活動性において、エネルギーは光球から彩層・コロナに磁場が仲介する何らかの物理プロセスで輸送され最終的に熱化される。

「ひので」(2006 年～)衛星は、0.3 秒角という優れた解像度で太陽光球面磁場の測定を行い、ガス対流と磁場との相互作用の振る舞いを捉え、従来から知られていた直立した磁場以外に、ダイナミックに変化する短命水平磁場が太陽表面に満ち溢れていることを初めて明らかにした(Lites et al. 2007, Ishikawa et al. 2007, Centino et al. 2007)。また、Ca II H 線で見た彩層の微細構造やそのダイナミックな振る舞いを観測し、磁気的な波動が磁力線に沿って励起している姿が初めて捉えられるようになった(Okamoto et al. 2007, De Pontieu et al. 2007)。さらに、遷移層・コロナ起源の EUV 輝線のスペクトル診断によって、コロナループの足元付近に空間的に分解されていない 100km/s を超える高速上昇流や乱流が存在することが発見され(Hara et al. 2008, De Pontieu et al. 2009)、低層大気で非常に小さな「磁気リコネクション」現象が対流運動の結果たくさん励起されている可能性や彩層針状構造(スピキュール)に沿って「磁気的波動」がエネルギーを伝搬している可能性が観測的に現実味を帯びてきた。

次のステップとして、「磁気リコネクション」と「磁気的波動」励起との物理的なつながりを観測的に明確化することが重要である。「磁気的波動」の励起は、足元の対流運動の結果起こる可能性の他に、足元の小さな「磁気リコネクション」が「磁気的波動」を励起する可能性も考えられる。短命水平磁場が浮上してきて、垂直磁場との間で「磁気リコネクション」が引き起こされると、「磁気的波動」が励起され上空へ伝搬されることが、最近の数値シミュレーションによって予想されている(Isobe et al. 2008)。

また、これらの物理プロセスは、磁束管と呼ばれる小さな磁気的な要素構造(光球での太さ 100km 程度)を介して起きており、将来的に重点的に取り組むべき観測の一方向として、高解像度(0.1 秒角[70km]以下)での太陽「偏光」スペクトルと 0.3 秒角程度以上を狙った EUV 輝線スペクトルの同時観測を実現することが重要であり、このような観測の実現化への開発研究は極めて重要である。

2. 研究の目的

「ひので」衛星観測は太陽大気の加熱・活

動性についての理解を大きく押し進めているが、次のステップとして「磁気リコネクション」と「磁気的波動」の励起など、エネルギー輸送の様子を観測的に理解することが重要である。以下に挙げる 3 つの課題を設定して、太陽大気における「磁気リコネクション」「エネルギー輸送」の観測的研究を推進する。

(1): 「ひので」観測に基づいて「磁気リコネクション」発生におけるエネルギー輸送過程を観測的に明らかにする。

(2): 高解像度(0.1 秒角)の次世代スペース光学偏光観測の実現を目指した像安定化機構の開発研究、特に「コリレーショントラッカーの高速化」による像安定化機構の高帯域制御の実現への道筋をつける

(3): 高時間分解能・高解像度の EUV 輝線スペクトル観測の実現を目指した装置の実現に向けた技術検討やサイエンス要求検討を行う。

課題(1)は、現有の観測装置でエネルギー輸送過程を観測的に迫る研究であり、同時に現有装置の限界も明らかになる。その成果も踏まえ、課題(2)(3)はエネルギー輸送過程を解くのに極めて重要な将来実施すべき観測(Solar-C 衛星)の実現への布石となる。

3. 研究の方法

(1): コロナ加熱へ寄与する可能性がある「磁気リコネクション」は、ナノフレアと呼ばれるエネルギー規模が極めて小さな現象であり、直接的な観測は容易ではない。また、「磁気リコネクション」は、巨大なエネルギーを短時間に解放させる「太陽フレア」の中心ではたらく物理素過程であると考えられている。コロナ加熱や太陽フレアなどのダイナミクスを考える上で重要な「磁気リコネクション」について、磁気エネルギーの輸送という視点で、研究を行う。特に、「磁気リコネクション」は、その発生に至るまでのエネルギー蓄積や発生のトリガーが最も理解が乏しい。「磁気リコネクション」を起こす磁気構造がどのような過程によって形成され、またどのようにして発生が駆動されるか、そして局所的に解放された磁気エネルギーがどのような形態で、大気より広い領域に伝搬されるか、について、太陽観測衛星「ひので」が取得したデータを中心に解析を行う。観測対象は、巨大なエネルギーを解放させる「太陽フレア」、ナノフレアよりもひとまわりエネルギー規模が大きい「マイクロフレア」である。また、これらのダイナミクスが頻繁に発生する領域である「太陽黒点」「活動領域」の形成についても、磁気エネルギーの輸送による太陽大気中へのエネルギー蓄性の過程を理解するために、重要な対象である。

(2): 2020 年前後の次世代において、高解像度(0.1 秒角以下)で太陽「偏光」スペクトル観測を行うスペース光学望遠鏡は、エネル

ギー輸送の観測的研究のために極めて重要な武器となる。磁気要素を介して伝わる波動を捉えることが重要であるため、光球・彩層では磁気要素の内部をある程度解像できる0.1秒角以下が目標となる。また 10^{-4} の測光精度を持つ事で彩層の磁場診断が初めて可能となり、太陽大気内の立体的な磁場構造が見えてくると期待できる。このような先駆的な高解像度観測を実現するには、焦点面検出器上に投影された画像を安定化させるために必要な「コリレーション・トラッカー」の高帯域(200Hz程度)化が必須である。本研究では、高帯域化の実現性を検討するために、「コリレーション・トラッカー」用の高速カメラを試作開発する。「ひので」で世界で初めて実現された「コリレーション・トラッカー」では、CCDカメラが使用されたが、すでに撮像の高速化には限界にある(580フレーム/s)ため、さらに高速化が見込めるCMOSセンサーを使った高速カメラを試作開発する。

(3): 2020年前後の次世代に必要なEUV輝線スペクトル観測は、典型的な時間スケール(音波やアルヴェン波の伝搬時間)での変動を捉えることが可能な時間分解能を持ち、またエネルギー輸送の通路としての磁気要素と非磁気要素を空間的に分解できる能力(0.3秒角程度)を持つ、高スループットの撮像分光器による観測と考えられる。また、観測波長帯を17nmのEUV帯から120nmの遠紫外域まで広くカバーすることで、彩層～遷移層～コロナ、そして「磁気リコネクション」で短時間に発生しうる500万度以上の超高温プラズマ、を同時に診断できる能力を持たせる。このような分光器は世界初の分光望遠鏡であり、技術的な実現性を明確化して、将来ミッションの紫外線分光望遠鏡として提案を行えるレベルのサイエンスおよび装置設計検討を行う。この検討は、科学的かつ技術的経験が豊富な欧米の研究者らと共同で行う。

4. 研究成果

太陽大気の加熱・活動性の観測的理解を目指し、「磁気リコネクション」を核に、光球～彩層～コロナのエネルギー輸送の観測的研究を主題に、3つの課題に多角的に取り組んだ。以下に、各課題についての成果を項目ごとにまとめる。

(1): 「磁気リコネクション」の発生に至るまでのエネルギー輸送を中心に以下の研究成果が得られた。

2009年12月30-31日に「ひので」可視光磁場望遠鏡が連続観測に成功した大規模な磁気浮上活動について解析研究を推進した。磁気浮上活動は、太陽表面に黒点群を形成する重要な物理プロセスである。半暗部の無い小黒点(ポア)から半暗部をもつ黒点に成長する過程は特によくわかっていなかったが、本解析の結果、小黒点の誕生直後に、小黒点をとりまく半暗部に相当する構造(前

駆構造)が、小黒点のある光球ではなくその上空の彩層で既に形成されていることを発見した。半暗部を伴う黒点の磁場構造を造る仕組みの理解に向けて、上空の彩層における磁場構造や物理診断が重要であることを示した。黒点は太陽面にはり付いた構造であり、密度の高い光球でまず構造が作られ、その結果として上空の彩層構造がつけられる、というのが従来の自然な考え方であった。今回の発見は、これを覆し、黒点の形成過程は彩層も含む立体的な磁場構造の成長過程として捉えなければならないことを明らかにした。また半暗部の前駆構造の発見は、フレア爆発(「磁気リコネクション」)などを引き起こす活動領域の発達を予測するのに役立つかもしれない。成果は、Shimizu, Ichimoto, & Suematsu (2012)として出版された。

「磁気リコネクション」の代表である「マイクロフレア」は、激しいコロナ加熱が起きる活動領域内で頻りに観測される。2009年12月30-31日に観測に成功した磁気浮上領域でも「マイクロフレア」が頻りに発生し、大量の高温プラズマの生成が、軟X線・極紫外線ととらえられている。異なる温度で見たプラズマの量について、「ひので」X線望遠鏡および極紫外線分光装置の連続的な時間履歴データから調べた。「マイクロフレア」の発生によって、ドップラー速度・擾乱がコロナ構造の足元で観測される場合、生成されたプラズマの温度は高く、軟X線(>300万度)が極紫外線(100-200万度)に比べ大きく卓越することを観測的に明らかにした。

「ひので」で得られる太陽表面(光球)での物質の流れ(エネルギー輸送)に注目し、磁気エネルギーの蓄積および巨大フレアの駆動を検討した。精密な磁場や速度場を知るのに最適な光球偏光分光マップを数時間置きに取得している時に発生した巨大フレアの観測は限定的であるが、そのような観測に成功した2012年3月7日に発生した巨大フレアに着目し、詳細な観測的検討を行った。このフレアは、 β 型と呼ばれる黒点で、大きくシアして磁気エネルギーが蓄積された磁気構造で発生したものであり、約1000km/sのガス噴出を伴う「典型的な」フレアである。

解析によって、フレア発生領域では、磁気中性線に沿って水平磁場が形成され、その水平磁場に沿って音速に匹敵する速いガス流が励起されていることを明らかにした。このガス流は、フレアのトリガーに向けた磁場構造の形成に重要な役割をして、最終的に爆発に至ることを初めて示した。この成果は、Shimizu, Lites & Bamba (2014)として出版した。

マイクロフレアについては、コロナで主に観測されるARTB(活動領域マイクロフレア)やX線ジェットに加え、「ひので」観測によって彩層で、彩層ジェット(Shibata et al. 2007)、黒点ライトブリッジでの噴出(Shimizu et al. 2009; Shimizu 2011)、黒

点半暗部マイクロジェット(Katsukawa et al. 2007)など、多種多様な現象が観測されている。それらの現象において「磁気リコネクション」を考えるためには、まず磁気構造を正しく理解することが第一に行うべきである。検討の結果、これらの現象が2種類の「磁気リコネクション」に大別できる可能性がある」と結論した(Shimizu 2015 PoP 論文投稿中)。

なお、「磁気リコネクション」の結果としてのエネルギー輸送に関しては、「磁気リコネクション」と「波動」励起などのエネルギー輸送との関係を定量的に把握する必要がある。実験室プラズマを用いた実験によって、「磁気リコネクション」によって励起された「波動」や加熱といったエネルギー輸送が観測され始めた(Nishizuka et al. 2012)。同様に「ひので」観測によっても、「磁気リコネクション」と「波動」等の関係の明確化を目指した。しかし、「磁気リコネクション」発生は予測が現状困難であり、最適化した高解像度観測が極めて乏しいことが分かった。そのため、さらに観測例を増やすために「ひので」観測の改良を行った。

(2)：像ずれをリアルタイムに検出する「コリレーション・トラッカー」用の高速 CMOS カメラを試作開発し、彩層で起きるエネルギー輸送について定量的診断を可能にする 0.1 秒角解像度の次世代スペース光学偏光望遠鏡の概念検討を進展させた。宇宙搭載品への応用を念頭において CMOS センサを選定し、そのカメラ制御回路を独自に開発した。試作した回路にて、約 1500 フレーム/s での高速撮像を実現した。さらに、机上検討で回路の高速化限界を見極め、さらなる改良によって、2000 弱フレーム/s までの高速化が可能であることを明らかにした。この検討成果は、次世代太陽観測衛星 SOLAR-C に搭載する大型光学磁場診断望遠鏡(SUVIT)に必要な「コリレーション・トラッカー」の性能要求を設定する際に、有効な成果となった。

(3)：彩層～コロナで起きる「磁気リコネクション」の発生や「波動」によるエネルギー輸送を観測的理解するためには、彩層～遷移層～コロナに存在する多温度プラズマを高時間分解能(0.5-10 秒)・高解像度(0.3 秒角)で紫外線分光することが次世代の望遠鏡として最有力である。この性能は、「ひので」の観測に比べ1桁以上向上し、非常に小さな振幅の「波動」を確実にとらえ、また小さな「磁気リコネクション」により熱化されたプラズマも検出することが可能になると期待できる。このような性能を持つ紫外線分光を行う次世代分光望遠鏡について、欧米共同研究者らと概念検討を行った。技術的な実現性を含めた総合的な検討によって、十分実現可能な望遠鏡の検討ができた。この分光望遠鏡は、次世代太陽観測衛星 SOLAR-C に搭載する際に、LEMUR および EUVST と名付けた。

(2)(3)の研究成果は、2020 年代前半に実現を目指す次世代太陽観測衛星 SOLAR-C の立案

にとって重要な成果である。SOLAR-C ミッション提案は、2015 年 1 月に ESA に、同 2 月に JAXA 宇宙科学研究所のミッション募集に対して提案した。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 21 件)

- 1) Shimizu, T., Lites, B.W., Bamba, Y. “High speed photospheric material flow observed at the polarity inversion line of a delta-type sunspot producing an X5.4 flare on 7 March 2012,” 2014, PASJ 66 (SP1), S14. doi:10.1093/pasj/psu089
- 2) Shimizu, T. “Hinode observations of flares and active region emergence,” 2013, Journal of Physics: Conference Series, 440, 012002. doi:10.1088/1742-6596/440/1/012002
- 3) Shimizu, T., “Long-term Evolution of Magnetic and Dynamical Properties in a Sunspot Light Bridge,” 2011, Astrophys. J., 738, 83 (9pp)
- 4) Teriaca, T., Andretta, V., Auch`ere, F., Brown, C.M., Buchlin, E., Cauzzi, G., Culhane, L., Curdt, W., Davila, J.M., Del Zanna, G., Doschek, G.A., Fineschi, S., Fludra, A., Gallagher, P.T., Green, L., Harra, L.K., Imada, S., Innes, D., Kliem, B., Korendyke, C., Mariska, J.T., Martínez-Pillet, V., Parenti, S., Patsourakos, S., Peter, H., Poletto, L., Rutten, R., Sch`uhle, U., Siemer, M., Shimizu, T., Socas-Navarro, H., Solanki, S.K., Spadaro, D., Trujillo-Bueno, J., Tsuneta, S., Vargas Dominguez, S., Vial, J.-C., Walsh, R., Warren, H.P., Wiegmann, T., Winter, B., Young, P. ” LEMUR: Large European Module for solar Ultraviolet Research, European contribution to JAXA’s Solar-C mission,” 2012, Experimental Astronomy, Volume 34, Number 2, 273-309 doi: 10.1007/s10686-011-9274-x.
- 5) Shimizu, T., Ichimoto, K., and Suematsu, Y. “Precursor of Sunspot Penumbra Formation discovered with Hinode SOT Observations,” 2012, Astrophys. J., 747, L18 (5pp). doi:10.1088/2041-8205/747/2/L18
- 6) Nishizuka, N., Hayashi, Y., Tanabe, H., Kuwahata, A., Kaminou, Y., Ono, Y., Inomoto, M., and Shimizu, T. “A Laboratory Experiment of Magnetic Reconnection: Outflows, Heating, and Waves in Chromospheric Jets,” 2012, Astrophys. J., 756, 152 (11pp). doi:10.1088/0004-637X/756/2/152
- 7) Shimizu, T. and Imada, S. “Dynamical Behaviors of the Solar Chromosphere Observed with Hinode – Dynamics in Sunspot Light Bridges and Magnetic Reconnection Process,” Multi-scale Dynamical Processes in Space and Astrophysical Plasmas, eds., Manfred P. Leubner and Zoltán Vörös, ASTROPHYSICS AND SPACE SCIENCE PROCEEDINGS, Volume 33, 2012, pp. 23-28. doi:

[学会発表](計 85 件)

- 1) 清水敏文、渡邊恭子、伴場由美、ほかひので観測チーム「ひので」のフレア観測：2014年の状況、M13a、日本天文学会 2015 年春季年会、2015 年 3 月 18-21 日、大阪大学、大阪。
- 2) 清水敏文「太陽観測衛星「ひので」観測研究の推進」(招待講演)、太陽研連シンポジウム「サイクル 24 極大期の太陽活動と太陽研究の将来展望」、2015 年 2 月 16-18 日、名古屋大学、名古屋。
- 3) 清水敏文「ひので衛星観測によるフレア予測」、シンポジウム「太陽地球圏環境予測」~我々が生きる宇宙の理解とその変動に備える社会のために~、2015 年 1 月 13 日、名古屋大学、名古屋。
- 4) 清水 敏文「太陽フレアのエネルギー蓄積・トリガー機構：「ひので」光球磁場・速度場観測からの知見」(招待講演)、研究会「GEMSIS ワークショップ：第 3 期に向けての研究戦略」、2014 年 9 月 9 日-10 日、名古屋大学、名古屋。
- 5) Shimizu, T., “3D magnetic field configuration of small-scale reconnection events in the solar atmosphere” (Invited), US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection (MR2014), 20-23 May 2014, The University of Tokyo, Tokyo, Japan.
- 6) Shimizu, T., Lites, B.W., and Bamba, Y. “X5.4 flare on 7 March 2012: magnetic and velocity properties at the solar surface,” Session P-EM08 Space Weather and Space Climate, Japan Geoscience Union Meeting 2014, 28 April-2 May 2014, Yokohama, Japan.
- 7) 清水敏文、飯田 佑輔、岡本 文典、渡邊恭子、小出来 一秀「コリレーショントラッカー用高速 CMOS カメラの試作開発」、W230a、日本天文学会 2014 年春季年会、2014 年 3 月 20-22 日、国際キリスト教大学、東京。
- 8) 清水 敏文「光球磁場・速度場観測から探る太陽フレアのエネルギー蓄積・解放」、磁気リコネクションと太陽プラズマ研究会、2014 年 3 月 3-5 日、京都大学東京オフィス会議室(品川インターシティ)、東京。
- 9) 清水敏文、他ひので運用チーム「ひのでによる観測研究状況：2013 年の観測と 2014 年への期待」(招待講演)、太陽研連シンポジウム「活動極大期を迎えた太陽研究の新たな展開、彩層プラズマ診断、宇宙天気、Solar-C」、2014 年 2 月 17-19 日、京都大学、京都。
- 10) 清水 敏文「紫外線高感度分光望遠鏡 EUVST」(招待講演)、太陽研連シンポジウム「活動極大期を迎えた太陽研究の新たな展開、彩層プラズマ診断、宇宙天気、Solar-C」、2014 年 2 月 17-19 日、京都大学、京都。
- 11) 清水敏文、岡本文典、飯田佑輔、渡邊恭子、小出来一秀「SOLAR-C 光学磁場診断望遠鏡：像安定化装置(コリレーショントラッカー)に向けた高速 CMOS カメラ検討開発」、宇宙科学シンポジウム P2-87、2014 年 1 月 9-10 日、宇宙科学研究所、相模原。
- 12) Shimizu, T.: “EUV/FUV High-Throughput Spectroscopic Telescope (EUVST),” 4th Solar-C Science Meeting, 11 November 2013, Takayama, Japan.
- 13) Shimizu, T.: “High speed photospheric flows observed around polarity inversion lines of a delta-type sunspot,” Hinode-7, 12-15 November 2013, Takayama, Japan.
- 14) Shimizu, T.: “X-class flares and photospheric flows observed around polarity inversion lines in delta-type sunspots,” International CAUSES-II symposium, 18-22 November 2013, Nagoya, Japan.
- 15) 清水 敏文「X クラスフレアを発生させた型黒点で観測される顕著な光球高速流」、日本天文学会 2013 年秋季年会 M37a、2013 年 9 月 10-12 日、東北大学、仙台。
- 16) Shimizu, T.: “Hinode and SDO/AIA Observations of X-class Flares: Magnetic and Velocity Fields at the Photosphere,” (invited oral), 12th International workshop on the interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space (IPELS2013), 1-5 July 2013, Hakuba, Nagano, Japan.
- 17) Teriaca, L., Doschek, G.A., Harra, L.K., Korendyke, C., Schuhle, U., Shimizu, T. and the LEMUR/EUVST team: “LEMUR/EUVST: the high spatial and temporal resolution spectrograph for the Solar C mission,” 6th coronal loops workshop, 25-27 June 2013, La Roche-en-Ardenne, Belgium.
- 18) Shimizu, T.: “Hinode for exploring magnetic activities on the Sun,” (invited oral) in union session U-01 “NASA and JAXA, the latest corporative status of Earth observation and Planetary physics,” Japan Geoscience Union meeting 2013, 23 May 2013, Makuhari, Japan.
- 19) 清水敏文、今田晋亮、西塚直人「活動領域における高温コロナプラズマの形成：マイクロフレアの役割」、日本天文学会 2013 年春季年会 M33a、2013 年 3 月 20-23 日、埼玉大学、さいたま。
- 20) 清水敏文「高解像度で太陽大気を分光診断する紫外線高感度分光望遠鏡 EUVST」、太陽研究シンポジウム「活動極大期の太陽研究、そして新たな太陽研究への布石」、2013 年 2 月 22 日、立教大学。
- 21) 清水 敏文、L. Teriaca, C. Korendyke 他 LEMUR コンソーシアム、および SOLAR-C WG 「SOLAR-C 搭載 UV/EUV 撮像分光望遠鏡 (EUVST) の最新設計」、第 13 回宇宙科学シンポジウム、P2-148、2013 年 1 月 8-9 日、ISAS/JAXA。
- 22) Shimizu, T., “Hinode observations of flares and active regions during the ascending phase of solar cycle 24,” (invited lecture), GONG

2012 /LWS/SDO-5 /SOHO 27“Eclipse on the Coral Sea: Cycle 24 Ascending”, 12-16 November 2012, Palm Cove, Australia.

- 23) Shimizu, T., “Emerging flux region - dynamical heating behaviors in the corona and chromosphere in response to the development of photospheric magnetic structure,” Hinode-6, University of St. Andrews, UK, 14-17 August 2012.
- 24) Shimizu, T., “Hinode observations of microflares and plasma ejections in the solar corona,” 2012 MR2012, Princeton University, NJ, U.S.A., 23-25 May 2012.
- 25) 清水 敏文、坂尾太郎、今田晋亮、渡邊恭子 (招待講演)「太陽フレアに関する最近の「ひので」観測 Recent Hinode Observations of Solar Flares」, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, PEM29-1, 2012 年 5 月 21 日、幕張メッセ.
- 26) Shimizu, T., Imada, S., and N. Nishizuka, “Development of coronal plasma in an emerging flux region,” Spectroscopy of the Dynamic Sun, University College London, London, U.K., 18-19 April, 2012.
- 27) 清水 敏文「太陽マイクロフレア・彩層ジェットを起こす磁場形状」, 日本天文学会 2012 年春季年会、物理学会・天文学会・SGEPSS 合同プラズマ共催セッション「プラズマ宇宙物理」, 2012 年 3 月 19-22 日、龍谷大学、京都.
- 28) 清水敏文、一本潔、末松芳法「「ひので」による黒点半暗部形成の前駆体の発見」, 日本天文学会 2011 年秋季年会、M27a 2011 年 9 月 21 日、鹿児島大学.
- 29) Shimizu, T.: “Hinode observations of small-scale energy releases in the solar atmosphere,” (Invited talk), International Space Plasma Sympo. 2011, 14-19 August 2011, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan.
- 30) Shimizu, T.: “Hinode observations of dynamics in the solar chromosphere,” (Invited talk), 11th Interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space (IPELS2011), 10-15 July 2011, Whistler, British Columbia, Canada.

〔図書〕(計 1 件)

- 1) Golub, L., De Moortel, I, and Shimizu, T. “FIFTH HINODE SCIENCE MEETING: EXPLORING THE ACTIVE SUN”, Astronomical Society of the Pacific Conference Series Volume Number 456, 2012 (ISBN: 978-1-58381-794 -0) (Astronomical Society of Pacific: San Francisco). Total page: 246 pages.

〔その他〕

本研究成果を一般に広める普及活動:

- 1) 清水 敏文「太陽フレアの発現メカニズム

解明を目指して: 太陽観測衛星「ひので」の取り組み」, 記者向け勉強会「宇宙科学勉強会」, JAXA 東京事務所プレスルーム、2015 年 1 月 20 日.

- 2) 清水 敏文「太陽活動のなぞにせまる～「ひので」が見た太陽～」, 相模原市「あじさい大学」講義、相模原市環境情報センター2 階学習室、2014 年 11 月 14 日.
- 3) 清水敏文、原弘久:「5. リコネクション研究の課題と将来 5.3 太陽観測の課題と将来」, 小特集「俯瞰と展望: 磁気リコネクション研究の最前線」, J. Plasma Fusion Res. Vol.89, No.12, 868-871, 2013.
- 4) 清水 敏文「衛星観測による太陽研究最前線: ひので、そして SOLAR-C へ」, さがみはら宇宙の日講演会、相模原市立博物館、2013 年 11 月 3 日.
- 5) 清水 敏文「太陽活動のなぞに迫る～「ひので」が見た太陽～」, 相模原市「あじさい大学」講義、相模原市環境情報センター2 階学習室、2013 年 9 月 20 日.
- 6) 清水 敏文「元気がない? 「ひので」が見た太陽」, 神奈川県立総合教育センター 授業力向上のための研修、JAXA 相模原キャンパス、2013 年 8 月 19 日.
- 7) 清水 敏文「激しく活動する太陽～地球の気候への関わり」, 明石市立天文科学館特別展「自然エネルギー展」関連企画 JAXA 講演会、主催: 環境プランナー協議会大阪研究会 / 共催: 明石市立天文科学館、明石市立勤労福祉会館、2012 年 11 月 4 日.
- 8) 西塚直人、清水敏文他「太陽表面での活動現象を世界で初めて地上で再現」, JAXA プレスリリース、2012.9.7 (毎日新聞 9 月 8 日夕刊、共同通信 9 月 7 日、他掲載).
- 9) 清水 敏文「太陽観測衛星「ひので」がとらえた太陽」, milsil(自然と科学の情報誌 [ミルシル]), 第 5 巻第 3 号、p12-15, 2012 年 5 月発行. (独)国立科学博物館.
- 10) 清水 敏文「太陽研究の最前線 ～ ひのでがとらえた激しく活動する太陽」, 朝日カルチャーセンター新宿、一般向け講義、2012 年 4 月 14 日.
- 11) 清水敏文、一本潔、末松芳法「「ひので」太陽黒点半暗部形成に前駆構造を初めてとらえた」, WEB リリース、JAXA/国立天文台/京都大学他、2012 年 3 月 8 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清水 敏文

(独立行政法人宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究所・准教授)

研究者番号: 60311180

(3) 連携研究者

勝川 行雄

(大学共同利用法人自然科学研究機構
国立天文台・助教)

研究者番号: 00399289