

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 10 月 21 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23340045

研究課題名(和文) 太陽フレア・トリガ機構の解明とその発生予測

研究課題名(英文) The study of solar flare triggering mechanism and its prediction

研究代表者

草野 完也 (Kusano, Kanya)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授

研究者番号：70183796

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：太陽フレアの発生機構について3次元電磁流体シミュレーションと太陽観測衛星「ひので」およびSDOによる観測データの解析を通して研究し、磁気中性線近傍に現れる2つの特徴的な構造を持つ比較的小型の磁場構造が太陽フレア発生のトリガとしての役割を果たすことを見出した。この小型の磁場は次期中性線上における平均場のポテンシャル成分と非ポテンシャル磁場成分に逆行する磁場成分を持つ。これらの結果は精密な磁場観測に基づいて太陽フレアの発生を決定論的に予測することが可能であることを示唆している。しかし、その予測時間は小スケールの磁場構造の変動によって数時間程度に制限されるであろう。

研究成果の概要(英文)：We studied the triggering mechanism of solar flares by systematically surveying the nonlinear dynamics caused by a wide variety of magnetic structures in terms of three-dimensional magnetohydrodynamic simulations and the analyses of data observed by solar physics satellites Hinode and SDO. As a result, we determined that two different types of small magnetic structures favor the onset of solar eruptions. These structures, which should appear near the magnetic polarity inversion line (PIL), include magnetic fluxes reversed to the potential component or the nonpotential component of major field on the PIL. These results suggest that forecasting of solar eruptions is possible with sophisticated observation of a solar magnetic field, although the lead time must be limited by the timescale of changes in the small magnetic structures.

研究分野：太陽物理学

キーワード：太陽フレア コロナ質量放出 宇宙天気 太陽 コロナ 予測 予報

### 1. 研究開始当初の背景

太陽フレアは太陽コロナ磁場に蓄積されたエネルギーが爆発的に解放される現象であると考えられる。しかし、その爆発がいつ、どこで、どのように、そしてなぜ発生するのかが十分理解されていなかった。太陽フレアは磁気嵐や電離層の擾乱、宇宙放射線の増加などをもたらす、地球環境と人間社会にも大きな影響を与えるため、その発生予測を行うことは科学的のみならず社会的にも重要な課題である。しかし、その基本的な発生機構の理解が十分ではなかったため、正確な発生予測ができない状況であった。

### 2. 研究の目的

代表者である草野らはフレア発生機構を探るため平衡遷移理論(Kusano et al. 1995 ApJ)をかつて提唱し、これを検証する為に独自の方法論を開発してフレア領域に入射される磁気ヘリシティ量を世界で初めて測定することに成功した(Kusano et al. 2002 ApJ)。しかし、その結果は意外なものであった。フレア領域に符号の異なる磁気ヘリシティが共に入射されていることが見出されたのだ。草野らはこの発見に基づき、正と負の磁気ヘリシティ(磁力線の鏡像ねじれ)が2つのリコネクションの相互駆動過程を通して対消滅することが、大規模なフレア発生のトリガとなるという「フィードバック・リコネクション・モデル」を新たに提唱した(Kusano et al. 2004 ApJ)。本研究ではこのフィードバック・リコネクション・モデルを重要な仮説として捉え、他のモデルと共にその検証を通してフレア発生機構の解明をすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では観測、数値シミュレーション、理論モデルの3つの方法を通して、フレア発生機構の解明を目指した。具体的方法は以下のとおりである。

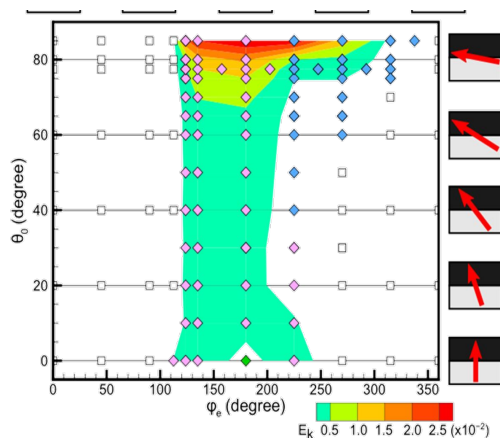


図 1: フレア発生に関するアンサンブル・シミュレーションの結果

#### (1) アンサンブル・シミュレーション

様々な磁場構造を少数の特徴的なパラメータで表現し、そのパラメータ空間の様々な磁場構造を初期条件とした3次元MHDシミュレーションを系統的に行うことにより、どのような磁場構造がフレア爆発を引き起こし得るかを調べる。本研究では線形フォースフリー磁場の磁気中性線上に小規模の双極磁束を導入することで、乱れたシア磁場を表現する。このため、フォースフリー磁場のシア角、小規模双極磁束の方位角、磁束量、半径R、磁気中性線からの距離dなどをパラメータとして採用した。

#### (2) データ駆動型シミュレーション

ひので衛星、SDO衛星によるベクトル・マグネトグラムを境界条件とした非線形フォースフリー磁場を数値的に形成し、フレア前の磁場構造の特徴を探る。さらに、その場に様々な乱れを太陽表面から入射し、どのような乱れがフレアのトリガとなるかを調べる。さらに、その結果を再び詳細な磁場観測と比較することで、実際にフレアが発生した活動領域の磁場においてトリガとなった構造は何かを突き止める。

#### (3) フレア前からフレア発生に至る過程の多波長詳細データ解析

実際にフレアが発生した領域をフレア発生の数時間前からの連続データを解析し、フレアに至る過程の発光現象及び構造変化を明らかにする。特に、ひのでSOTによるCa IIイメージや、SDO/AIA 1600Å イメージなどによる彩層発光と磁場データの比較を通して、フレア前の小規模なエネルギー解放過程の有無とその構造の解明を行う。

#### (4) 小規模リコネクションの効果を考慮したコロナ磁場の安定化理論モデルの開発

これまでの研究からフレア前には2つのシアした磁場を結ぶ小規模の内部リコネクション(テザー・カッピング・リコネクション)が発生することが示唆されている。この仮説によると、フレア爆発の直前に、フレア爆発を引き起こす磁力線は2つのループが繋がったダブルアーク構造を作ると考えられる。それ故、このダブルアーク構造の安定性を理論的に調べることにより、テザー・カッピング・リコネクションが爆発現象の原因に成り得るかどうかを明らかにする。

#### (5) 磁気リコネクションの精密シミュレーション

本研究ではこれまでにない精密な2次元MHDシミュレーションを実施することで、異常抵抗のない(すなわち、電気抵抗率が一樣である)状況で、リコネクションが高速化する可能性とそのメカニズムを探る。

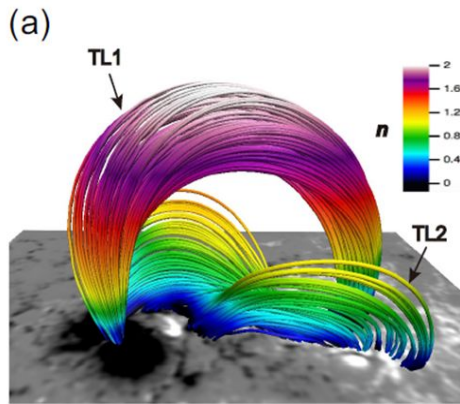


図 2：非線形フォースフリー磁場モデルによる活動領域の 3 次元磁場解析

#### 4. 研究成果

##### (1) アンサンプル・シミュレーション

上記したアンサンプル・シミュレーションを 100 通り以上の異なる初期条件について実施した。その結果をまとめたものが図 1 である (文献 19)。ここで縦軸は初期の線形フォースフリー磁場のシア角、横軸はそこに加えられた小規模擾乱磁場の方位角である。図中の はフレア爆発が起きなかった場合、 は何らかのエネルギー解放が起きた場合を示す。また、カラースケールはエネルギー解放の結果、増反した運動エネルギーの最大値を表している。

この図から、大規模な爆発はシア角が 80 度以上の場合にのみ発生することが分かる。一方、シア角が大きくても、擾乱磁場の方位角によって爆発現象が起きる場合と起きない場合があることが分かる。すなわち、爆発の規模は大きなスケールの磁場の捻じれで決まるが、爆発が起きるかどうかは小規模なスケールの磁場構造によって決められることが、この研究によって初めて示された。また、フィードバック・リコネクション・モデルを含む 2 つのフレア発生機構があることを発見した。(Kusano et al. 2012)

##### (2) データ駆動型シミュレーション

ベクトル磁場観測データを境界条件とした非線形フォースフリー磁場を数値的に求めることで、フレア発生前の磁場構造に関する安定性を解析した。その結果、図 2 にみられるように、フレア前に強くシアしたダブルアーク型の磁束管が存在することが見出された。一方、この磁束管のトーラスモードに対する不安定性について、磁場の減衰係数を調べて考察したところ、伝推計数は不安定化の臨界数 1.5 を大きく下回っており、トーラスモードは最初に不安定化できないことを示唆する結果となった。

さらに我々は、この非線形フォースフリー磁場に異なる小規模磁束を入射して、不安定

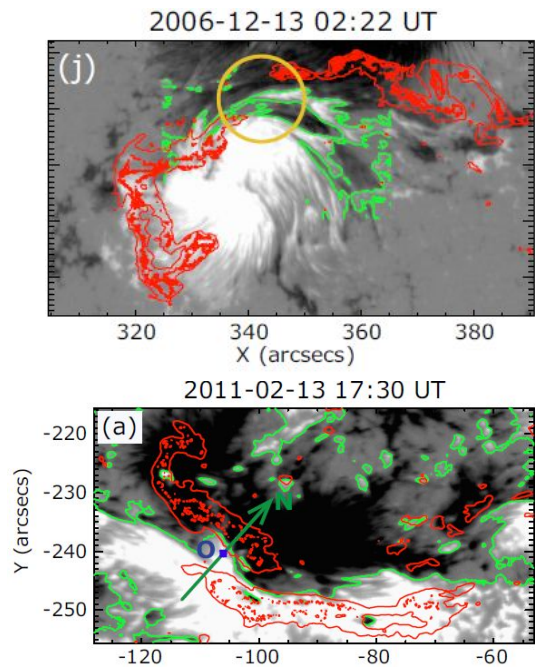


図 3：2 つのフレア領域における視線方向磁場 (グレースケール) 磁気中性線 (緑線)、フレアリボン (赤線)

化する可能性を探った。その結果、アンサンプル・シミュレーションで見出された反極性型と逆シア型の磁束を入射した場合にのみ不安定化することを確認した。(Inoue et al. 2016, 2014, 2011)

##### (3) フレア前からフレア発生に至る過程の多波長詳細データ解析

アンサンプル・シミュレーションの結果、フレアのトリガに重要な役割を果たすことが見出された 2 種類の小規模磁束について、実際の観測データよりその存在を確認するため、「ひので」衛星と SDO 衛星によるデータの解析を行った。その結果、図 3 のように、フレアが発生した複数の活動領域でこれらの小規模磁場構造がフレア発生領域にあることを確認した。また、それぞれのフレア領域の大小スケールの構造を調べたところ、図 1 に示すシミュレーションで見出されたフレア発生領域に実際の観測データも入っていることを確認した。(Bamba et al. 2014, 2013)

##### (4) 小規模リコネクションの効果を考慮したコロナ磁場の安定化理論モデルの開発

小規模なテザー・カッピング・リコネクションの結果として発生するダブルアークループの安定性を理論的に解析した。解析は、様々な磁場中でのダブルアーク電流回路の力学的安定性を調べたものである。その結果、ダブルアークループはトーラスモードのような磁場の減衰率に対する不安定化の臨界値が存在しない。それ故、トーラス不安定性に比べて、より容易に不安定化する「ダブル



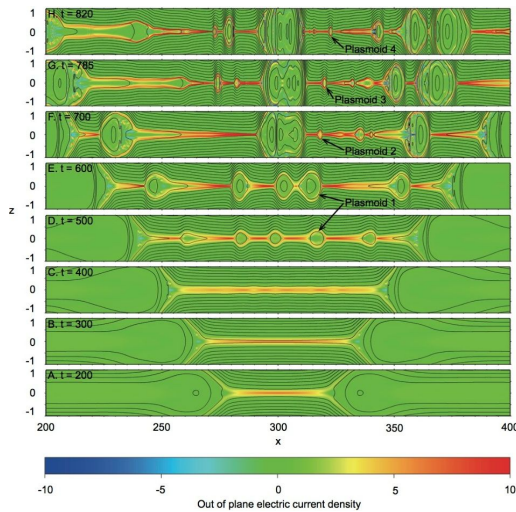


図 4: 磁気リコネクション領域の電流密度 (カラスケール) と磁束構造 (等高線)

「アーク不安定性」の存在を発見することができた。(Ishiguro & Kusano, 投稿予定)

#### (5) 磁気リコネクションの精密シミュレーション

太陽フレアにおいて重要な役割を果たすと考えられている磁気リコネクションが、散逸の小さな太陽コロナでなぜ高速に進むのかを理解することは太陽フレアの発生機構の理解のために重要な課題である。我々は精密な磁気リコネクションの2次元MHDシミュレーションにより、リコネクション領域で生成される磁気島の成長と運動に伴って、電気抵抗が一樣であったもリコネクションは電磁流体方程式に従って高速化することを見出した。図4に見られるように、磁気島が電流層の幅に対して十分大きく成長し、かつ電流層に沿って運動するとき、磁気島の先端で電流層が分岐した構造が生まれることで、リコネクションの拡散領域の長さが短くなる。さらに、この電流層の分岐は、遅い磁気流体衝撃波の形成により発生することが見出された。このことから、ペチェック型リコネクションが動的に発生することで、リコネクションは自発的に高速化することを見出した。(Shibayama et al. 2015)

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計34件)

1. Inoue, S.; Hayashi, K.; Kusano, K., Structure and Stability of Magnetic Fields in Solar Active Region12192 Based on Nonlinear Force-Free Field Modeling, *The Astrophysical Journal*, Volume 818, Issue 2, article id. 168,

11, 02/2016 (査読あり)

DOI: 10.3847/0004-637X/818/2/168

2. Shibayama, Takuya; Kusano, Kanya; Miyoshi, Takahiro; Nakabou, Takashi; Vekstein, Grigory, Fast magnetic reconnection supported by sporadic small-scale Petschek-type shocks, *Physics of Plasmas*, Volume 22, Issue 10, id.100706, 10/2015 (査読あり)  
DOI: 10.1063/1.4934652
3. Vekstein, G.; Kusano, K., Nonlinear regimes of forced magnetic reconnection, *Physics of Plasmas*, Volume 22, Issue 9, id.090707, 09/2015 (査読あり)  
DOI: 10.1063/1.4932079
4. Bamba, Yumi; Kusano, Kanya; Imada, Shinsuke; Iida, Yusuke, Comparison between Hinode/SOT and SDO/HMI, AIA Data for the Study of the Solar Flare Trigger Process, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 66, Issue SP1, id. S1 11, 11/2014 (査読あり)  
DOI: 10.1093/pasj/psu092
5. Imada, Shinsuke, Bamba, Yumi, and Kusano, Kanya, Coronal behavior before the large flare onset, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 66, Issue SP1, id. S1711, 1-11, 11/2014 (査読あり)  
DOI: 10.1093/pasj/psu092
6. Toriumi, S.; Iida, Y.; Kusano, K.; Bamba, Y.; Imada, S., Formation of a Flare-Productive Active Region: Observation and Numerical Simulation of NOAA AR 11158, *Solar Physics*, Volume 289, Issue 9, pp.3351-3369, 09/2014 (査読あり)  
DOI: 10.1007/s11207-014-0502-1.
7. Inoue, S.; Magara, T.; Pandey, V. S.; Shiota, D.; Kusano, K.; Choe, G. S.; Kim, K. S., Nonlinear Force-free Extrapolation of the Coronal Magnetic Field Based on the Magnetohydrodynamic Relaxation Method, *The Astrophysical Journal*, Volume 780, Issue 1, article id. 101, 13 pp., 01/2014 (査読あり)  
DOI: 10.1088/0004-637X/780/1/101
8. 草野完也, 長谷川裕記, 小特集 宇宙気候学、*プラズマ・核融合学会誌*, 第90巻第2号(2014年2月)pp.105-146(査読あり)

9. Savani, N. P., Vourlidas, A., Shiota, D., Linton, M. G., Kusano, K., Lugaz, N., Rouillard, A. P., A Plasma Transition within a Propagating Flux Rope, *The Astrophysical Journal*, 779, 142, 12/2013 ( 査読あり )  
DOI: 10.1088/0004-637X/779/2/142
10. Park, S., Kusano, K., Cho, K, Chae, J., Bong, S., Kumar, P., Park, S., Kim, Y., Park, Y., Study of Magnetic Helicity Injection in the Active Regions NOAA 9236 Producing Multiple Flare-associated CME Events, *The Astrophysical Journal*, 778, 13, 11/2013 ( 査読あり )  
DOI: 10.1088/0004-637X/778/1/13
11. Bamba, Y., Kusano, K., Yamamoto, T. T., Okamoto, T. J., Study on Triggering Process of Solar Flares Based on Hinode/SOT Observations, *The Astrophysical Journal*, 778, 48, 11/2013 ( 査読あり )  
DOI: 10.1088/0004-637X/778/1/48
12. Toriumi, S., Iida, Y., Bamba, Y., Kusano, K., Imada, S., Satoshi Inoue, Magnetic Systems Triggering the M6.6-class Solar Flare in NOAA Active Region 11158, *The Astrophysical Journal*, 773, 128, 08/2013 ( 査読あり )  
DOI: 10.1088/0004-637X/773/2/128
13. Vekstein, G. and Kusano, K., Onset of Hall-mediated magnetic reconnection in weakly ionized astrophysical plasmas, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 434, 1789-1791, 09/2013 ( 査読あり )  
DOI: 10.1093/mnras/stt1155
14. Kamide, Y. & Kusano, K., Is something wrong with the present solar maximum? *Space Weather*, 11, 4, pp. 140-141, 04/2013 ( 査読あり )  
DOI: 10.1002/swe.20045
15. Vekstein, G. and Kusano, K., Comment on ``Supersonic regime of the Hall-magnetohydrodynamics resistive tearing instability'' [*Phys. Plasmas* 19, 072519 (2012)], *Physics of Plasmas*, Volume 20, Issue 1, pp. 014703-014703-2, 01/2013 ( 査読あり )  
DOI: 10.1063/1.4789449
16. Kusano, K., Bamba, Y., Yamamoto, T., Iida, Y., Toriumi, S., Asai, A., Magnetic field structures triggering solar flares and coronal mass ejections, *The Astrophysical Journal*, Volume 760, Issue 1, article id 31. 9 pp., 11/2012 ( 査読あり )  
DOI: 10.1088/0004-637X/760/1/31
17. Savani, N. P., Shiota, D., Kusano, K., Lugaz, N., Vourlidas, A., A study of the Heliocentric dependence of Shock Standoff Distance and Geometry using 2.5D MHD Simulations of CME-driven shocks, *The Astrophysical Journal*, Volume 759, Issue 2, article id. 103. 11pp., 11/2012 ( 査読あり )  
DOI: 10.1088/0004-637X/759/2/103
18. Savani, N. P., Davies, J. A., Shiota, D., Davis, C. J., Rouillard, A. P., Owens, M. J., Kusano, K., Bothmer, V., Observational Tracking of the 2D Structure of Coronal Mass Ejections between the Sun and 1 AU, *Solar Physics*, Volume 279, Issue 2, pp.517-535, 08/2012 ( 査読あり )  
DOI: 10.1007/s11207-012-0041-6
19. Yamamoto, T. T. and Kusano, K., Preprocessing magnetic fields with chromospheric longitudinal fields, *The Astrophysical Journal*, Volume 752, Issue 2, article id. 126, 06/2012 ( 査読あり )  
DOI: 10.1088/0004-637X/752/2/126
20. Welsch, B. T., Kusano, K., Yamamoto, T. T., Muglach, K., Decorrelation Times of Photospheric Fields and Flows, *The Astrophysical Journal* 747, 130, 03/2012 ( 査読あり )  
DOI: 10.1088/0004-637X/747/2/130
21. Asai, Ayumi; Ishii, Takako T.; Isobe, Hiroaki; Kitai, Reizaburo; Ichimoto, Kiyoshi; UeNo, Satoru; Nagata, Shin'ichi; Morita, Satoshi; Nishida, Keisuke; Shiota, Daikou; Oi, Akihito; Akioka, Maki; Shibata, Kazunari, First Simultaneous Observation of an H Moreton Wave, EUV Wave, and Filament/Prominence Oscillations, *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 745, Issue 2, article id. L18, 6 pp., 2012 ( 査読あり )  
DOI: 10.1088/2041-8205/745/2/L18
22. Inoue, S., Kusano, K., Magara, T., Shiota, D., Yamamoto, T. T., Twist and connectivity of magnetic field lines in the solar active region NOAA 10930, *The Astrophysical Journal*, Volume 738,

Issue 2, article id. 161, 09/2011 ( 査読あり )  
DOI: 10.1088/0004-637X/738/2/161

[学会発表](計 106 件)

1. Kusano, K., Project Overview of PSTEP, International Symposium PSTEP-1, Toward the Solar-Terrestrial Environment Prediction as Science and Social Infrastructure. 名古屋大学 2016 年 1 月 13 - 14 日 (招待講演)
2. Kanya Kusano, Magnetic Reconnection in Solar and Space Plasmas, 5th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas, POSTEC, Korea, August 17 (Mon), 2015 (招待講演)
3. 草野完也, 太陽地球圏環境の理解と予測、宇宙科学技術連合講演会、鹿児島、2015 年 10 月 8 日 (招待講演)
4. Kanya Kusano, Project for Solar-Terrestrial Environment Prediction (PSTEP) in Japan KASI-ISEE 2015 Korea/Japan Space Weather Workshop KASI, Daejeon, Korea、2015 年 10 月 13 ~ 14 日 (招待講演)
5. Kanya Kusano, Project for Solar-Terrestrial Environment Prediction (PSTEP) in Japan, The 3rd Asia-Pacific Solar Physics Meeting APSPM 2015, Seoul, Korea 2015 年 11 月 3 ~ 6 日 (招待講演)
6. Kanya Kusano, Simulation Study of Solar-Terrestrial Environment, Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015) 奈良市、2015 年 11 月 4 ~ 8 日 (招待講演)
7. Bamba, Y., Kusano, K., Observational Study of the Flare Trigger Process, Japan Geoscience Union Meeting, Chiba, Japan, 2015/05 (招待講演)
8. Kanya Kusano, Magnetic Field Structures Triggering Solar Flares and Coronal Mass Ejections & Introduction to Simple MHD Model of Flares, ISSI team meeting Solar and Stellar Flares, スイス、ベルン 2014 年 2 月 24 日 ~ 28 日 (招待講演)
9. Kanya Kusano, Nonlinear Magneto-hydrodynamics in Solar-Terrestrial Environment System, Fundamental

Aspects of Geophysical Turbulence, 名古屋、2014 年 3 月 10 日 ~ 12 日 (招待講演)

10. 草野完也, Spontaneous Occurrence of Dynamical Petschek Reconnection、Magnetic Reconnection 2014、東京、2014 年 5 月 20 日 ~ 24 日 (招待講演)
11. 草野完也, Hemispheric Asymmetry of Solar Cycle Activities, AOGS2014, 札幌、2014 年 8 月 1 日 (招待講演)

[図書](計 1 件)

1. 総説「宇宙天気」(京都大学出版会、編者: 柴田一成、上出洋介、) 草野完也、第 16 章 宇宙天気のモデリング、pp.549-570、2011 年 5 月 31 日

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://st4a.stelab.nagoya-u.ac.jp/kusano/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

草野 完也 (KUSANO, Kanya)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授  
研究者番号: 70183796

(2) 研究分担者

浅井 歩 (ASAI, Ayumi)  
京都大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 50390620

今田晋亮 (IMADA, Shinsuke)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・助教  
研究者番号: 40547965

塩田大幸 (SHIOTA, Daiko)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・助教  
研究者番号: 90462192

(3) 連携研究者

三好隆博 (MIYOSHI, Takahiro)  
広島大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号: 60335700

簗島 敬 (MINOSHIMA, Takashi)  
国立研究開発法人海洋研究開発機構・数理科学先端技術分野・研究員  
研究者番号: 00514811