

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287039

研究課題名(和文) 太陽白色光フレアと太陽型星スーパーフレアの比較研究

研究課題名(英文) Solar White Light Flares and Superflares on Solar-type Stars

研究代表者

柴田 一成 (Shibata, Kazunari)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70144178

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：太陽面爆発(フレア)に代表される太陽活動は、地球環境「宇宙天気」に様々な影響や被害を及ぼすことが知られており、その宇宙天気の予報「宇宙天気予報」は、人類文明の緊急の課題である。

本研究では、宇宙天気現象の中でも特に巨大な太陽白色光フレアと、太陽型星での「スーパーフレア」、つまり最大太陽フレアの100～1万倍のエネルギーを解放する超巨大フレアについて、太陽フレア観測データと太陽型星の観測データの解析、および電磁流体シミュレーションを組み合わせることで、スーパーフレアの発生機構の解明に迫った。

研究成果の概要(英文)：It has now become clear that the solar flares (explosions in the solar atmosphere) and related solar activity affect an environment of the Earth and often cause various disasters in our civilization. Hence, the forecasting of the space weather is an urgent issue for modern civilizations.

In this study, we focus on extreme space weather events, such as solar white light flares (the most energetic solar flares) and superflares of solar type stars with energy of 100 - 10000 times more energetic than the largest solar flares, and studied the mechanism of the energy release in superflares, using observations of both solar white light flares and stellar superflares as well as magnetohydrodynamic numerical simulations.

研究分野：太陽・宇宙プラズマ物理学

キーワード：宇宙物理学 太陽物理学 超高層大気物理学

1. 研究開始当初の背景

人類が初めて観測した太陽面爆発（フレア）は、1859年にキャリントンが黒点スケッチ中に見たものである（キャリントン・フレア）。このフレアは巨大で、約18時間後に引き起こされた磁気嵐は最近200年間で最大級であったと推定されている（400年間で最大という説もある）。この磁気嵐に伴い、キューバやハワイといった世界の低緯度地帯でもオーロラが観測され、欧米では通信機に流れた誘導電流による火花放電で火事が多発したとの記録が残っている。

現代の宇宙時代にあっては、太陽フレアからの放射線（高エネルギー陽子、X線、紫外線）やコロナ質量放出、高速太陽風などから直接影響を受けることにより、人工衛星の故障や通信障害が頻繁に起きるなど、甚大な被害を生じ、その被害総額は2兆ドルに達するとの試算も出ている。また、宇宙飛行士や航空機乗務員は、大フレアの際に放射線被ばくの危険にさらされる。そのため、太陽地球間の宇宙環境の予報「宇宙天気予報」が人類全体の緊急の課題である。

2. 研究の目的

経験的には、フレアの発生頻度はべき関数に従うことが知られている（図1）。つまり、フレアのX線強度（あるいは解放された全エネルギー）が10倍大きくなれば、そのフレアの発生頻度は約10分の1になる。上述のキャリントン・フレアは、10~100年に1回程度の巨大フレア（ 10^{32} ~ 10^{33} エルグ程度）だったと考えられている。

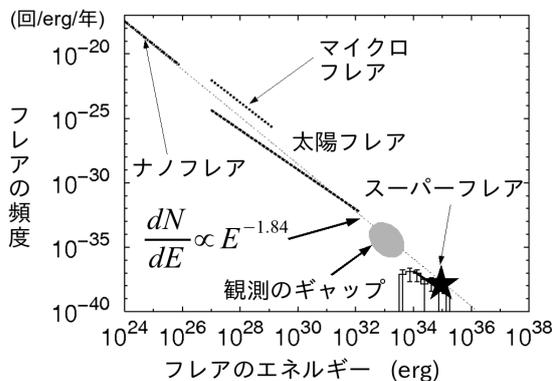


図1) 太陽フレアとスーパーフレアの、発生頻度のエネルギー分布。自転周期10日以上太陽型星で 10^{35} エルグ（太陽大フレアの1000倍のエネルギー）のフレア（★印）が起こる頻度は、約5000年に1回。（前原ら, 2012, Nature および、前原ら, 2015, EPS より）

X線観測が始まってまだ数10年しか経っていないため、極端に大きなフレアを人類はまだ知らないが、もしフレアの発生頻度の関係がこの大フレアより大きなエネルギーまで成り立つならば、我々の太陽で5000年に1回、大フレアの1000倍（ 10^{35} エルグ）の超巨大フレア（スーパーフレア）が起きる可能性がある。

もしスーパーフレアが起きれば、全地球にわたり大災害が起きるかもしれない。我々の太陽では数千年にわたるフレア統計を調べることはできないが、多数の太陽型星でのスーパーフレアの観測から、その統計的研究が可能である。本研究では、太陽白色光フレアと太陽型星におけるスーパーフレアを観測と理論研究に基づいて比較研究することにより、白色光フレアの白色光増光機構を解明する、またスーパーフレアが太陽で発生する確率を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、太陽フレア観測データと太陽型星の観測データの解析、および電磁流体シミュレーションを組み合わせることで、スーパーフレアの発生機構の解明を目指した。

(1) 太陽フレア観測

本研究課題の期間中、太陽は活動極大期を迎えており、大規模なフレア（Xクラスフレア）の発生が見込まれた。そこで、スペース観測（「ひので」、SDO、STEREO など）と、地上観測（京都大学飛騨天文台、ペルー・イカ大学における太陽全面連続観測）の観測データを用いて、フレアのX線、極紫外線、可視光（白色光・H α 線）変動を詳しく調べた。特に、京都大学飛騨天文台 SMART 望遠鏡に高速撮像装置が実装されたことで、1秒間に約30フレームという非常に高い時間分解能で白色光とH α 線での太陽フレア画像が取得できるようになった。これにより極めて短時間の変動について調べることが可能となった。また、スペース観測からは、地球大気による変動を受けない、安定した観測データを取得することが可能であるため、これらを活用することにより、太陽フレアの詳細な解析を行った。

(2) フレアの数値シミュレーション

太陽フレアについての電磁流体数値シミュレーションを行い、太陽観測データと総合的に理解することにより、巨大太陽フレアにおけるエネルギー解放機構や白色光フレアの発生機構の解明に迫った。

磁気リコネクションにより生成された高エネルギー粒子は磁力線に沿って伝わり、高密度な下層大気（彩層）に突入する。この際、彩層プラズマの圧力が一気に上昇し、磁力線にそった上昇流（彩層蒸発）が発生する。一方、彩層蒸発の反作用として彩層下向きの流れも生じる。この彩層下向きの衝撃波により圧縮されたプラズマが、放射冷却により熱不安定を引き起こすことで、光学的厚さ（ τ ）が1となる層が現れ、白色光が放射されると予想される。これが、白色光フレアでの白色光増光のモデルの1つとなっている。

本研究では、2次元の電磁流体数値シミュレーションを行い、フレアループ中の衝撃波構造やそれらの時間発展などについて詳細に調べた。

(3)太陽型星スーパーフレア観測

太陽型星におけるスーパーフレアをケプラー衛星のデータを用いて統計的に調べた。特に、我々が先行研究で用いたケプラー衛星のデータは、2009年に観測された公開データであり、30分の時間分解能データである。これで検出できるスーパーフレアは規模の大きいものに限られていた。一方、1分の時間分解能データも得られるようになったことを受け、これを用いることで、およそ30分の1の規模のフレアを検出できることになり、より小規模のスーパーフレアについて、統計的に調べた。

また、ケプラー衛星のデータ解析結果から、スーパーフレアを起こした星の多くは、周期数日～数十日で振幅の明るさの変動を示す。これらの多くは、星の表面に巨大な黒点(星の面積の数%)が存在し、星の自転によってその見かけの面積が変化することで説明できる。一般に自転の速い星ほど活動性が高いことが知られていたが、ケプラー衛星のデータから太陽と同程度の長い自転周期の星でも巨大黒点が出現することがわかった。これは、太陽でもスーパーフレアが発生する可能性を端的に示唆している。そこで、すばる望遠鏡のHDSや地上中口径望遠鏡を用いるなどして、スーパーフレアを起こす太陽型星の高分散分光観測を行い、自転速度や黒点の大きさと磁場強度などの関係を調べた。

4. 研究成果

(1)太陽フレア観測

太陽フレアについては、京都大学飛騨天文台SMART望遠鏡により、大フレア(Xクラスフレア)14例の観測に成功しており、白色光フレアに限っては、合計5例の観測データを蓄積するに至った。またSMART望遠鏡による高速撮像観測で白色光とH α 線での太陽フレア画像が取得され、極めて短時間の変動をとらえることに成功した(図2; 学会発表

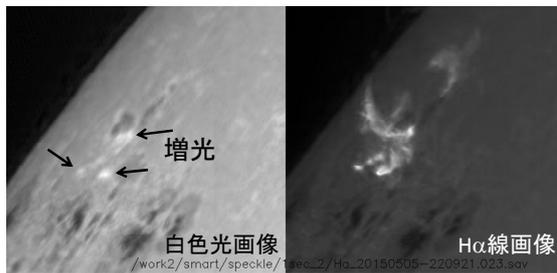


図2) 2015年5月5日に起きた白色光フレアの画像。飛騨天文台 SMART 望遠鏡で撮影。(石井ら, 2015, 日本天文学会より)

③)。

(2)フレアの数値シミュレーション

フレアの数値シミュレーションモデルの推進を行った。2次元の電磁流体計算を行い、フレア時にフレアループ内の至る所に衝撃波が生成され、それらによる高エネルギー電子の観測の可能性を明らかにした(図3; 雑

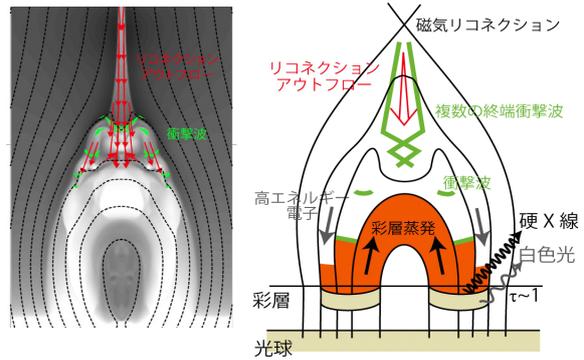


図3) 太陽フレアの電磁流体シミュレーション(左、高棹ら2015, ApJより)。破線は磁力線、背景の濃淡は密度の濃さを表す。黒色は衝撃波面の位置を表す。ループトップ付近は衝撃波だけであることがわかる。右は太陽フレア概念図(高棹ら2016, ApJより)。

誌論文①⑦)。

(3)太陽型星スーパーフレア観測

①ケプラー衛星・高時間分解能データの活用
ケプラー衛星のデータについては、これまで30分の時間分解能データを用いており、これで検出できるスーパーフレアは規模の大きいものに限られていたが、1分の時間分解能データを用いることで、およそ30分の1という小規模のスーパーフレアを検出することに成功し、これらの統計的な性質が明らかになった(図1; 雑誌論文⑨)。

②すばる望遠鏡・高分散分光観測

すばる望遠鏡を用いて、50個のスーパーフレア星の可視光高分散分光観測を行った。その結果、37個の星は連星の兆候がみられず、さらにその中で、太陽とよく似た自転周期、温度、表面重力、金属量、リチウム組成をもつ2個の星を発見した(雑誌論文⑫)。

また、これらの観測データの詳細解析により、スーパーフレアを引き起こす太陽型星の回転速度や黒点の大きさ(磁場強度)などの関係について明らかにした。この結果は明るさの変化から求めた値とよく対応しており、スーパーフレア星は太陽と比較して非常に大きな黒点を持つことが確認された(図4; 雑誌論文④⑤⑥)。

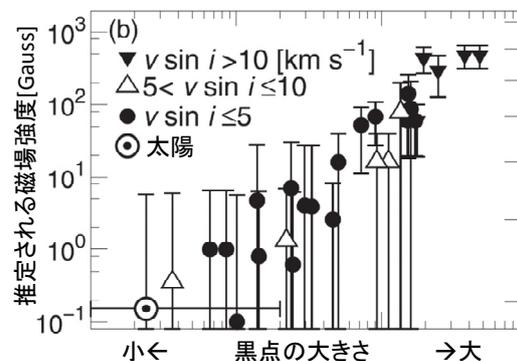


図4) 測光観測の強度変動から推定される黒点の大きさと恒星彩層分光観測から推定される磁場強度の関係。(野津ら, 2015, PASJより)

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30件)

- ① Takasao, S., Shibata, K., “Above-the-loop-top Oscillation and Quasi-Periodic Coronal Wave Generation in Solar Flares”, *The Astrophysical Journal*, 2016, 823, 150
DOI: 10.3847/0004-637X/823/2/150
- ② Shibata, K., Takasao, S., “Fractal Reconnection in Solar and Stellar Environments”, *Magnetic Reconnection, Astrophysics and Space Science Library*, Vol427, (Gonzales and Parker (ed.), Springer), 2016, p.373
DOI: 10.1007/978-3-319-26432-5_10
- ③ Muranushi, T., Shibayama, T., Muranushi-Hada, Y., Isobe, H., Nemoto, S., Komazaki, K., Shibata, K., “UFCORIN: A fully automated predictor of solar flares in GOES X-ray flux”, *Space Weather*, 2015, 13, 778-796
DOI: 10.1002/2015SW001257
- ④ Honda, S., Notsu, Y., Maehara, H., Notsu, S., Shibayama, T., Nogami, D., Shibata, K., “High dispersion spectroscopy of solar-type superflare stars. III. Lithium abundances”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2015, 67, 85
DOI: 10.1093/pasj/psv054
- ⑤ Notsu, Y., Honda, S., Maehara, H., Notsu, S., Shibayama, T., Nogami, D., Shibata, K., “High dispersion spectroscopy of solar-type superflare stars. II. Stellar rotation, starspots, and chromospheric activities”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2015, 67, 33
DOI: 10.1093/pasj/psv002
- ⑥ Notsu, Y., Honda, S., Maehara, H., Notsu, S., Shibayama, T., Nogami, D., Shibata, K., “High dispersion spectroscopy of solar-type superflare stars. I. Temperature, surface gravity, metallicity, and $v \sin i$ ”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2015, 67, 32
DOI: 10.1093/pasj/psv001
- ⑦ Takasao, S., Matsumoto, T., Nakamura, N., Shibata, K., “Magnetohydrodynamic Shocks in and above Post-flare Loops: Two-dimensional Simulation and a Simplified Model”, *The Astrophysical Journal*, 2015, 805, 135
DOI: 10.1088/0004-637X/805/2/135

- ⑧ Hayakawa, H., Tamazawa, H., Kawamura, A. D., Isobe, H., “Records of sunspot and aurora during CE 960-1279 in the Chinese chronicle of the Sòng dynasty”, *Earth, Planets and Space*, 2015, 67, 82
DOI: 10.1186/s40623-015-0250-y
- ⑨ Maehara, H., Shibayama, T., Notsu, Y., Notsu, S., Honda, S., Nogami, D., Shibata, K., “Statistical properties of superflares on solar-type stars based on 1-min cadence data”, *Earth, Planets and Space*, 2015, 67, 59
DOI: 10.1186/s40623-015-0217-z
- ⑩ Candelaresi, S., Hillier, A., Maehara, H., Brandenburg, A., Shibata, K., “Superflare Occurrence and Energies on G-, K-, and M-type Dwarfs”, *The Astrophysical Journal*, 2014, 792, 67
DOI: 10.1088/0004-637X/792/1/67
- ⑪ Shen, Y., Ichimoto, K., Ishii, T. T., Tian, Z., Zhao, R., Shibata, K., “A Chain of Winking (Oscillating) Filaments Triggered by an Invisible Extreme-ultraviolet Wave”, *The Astrophysical Journal*, 2014, 786, 151
DOI: 10.1088/0004-637X/786/2/151
- ⑫ Nogami, D., Notsu, Y., Honda, S., Maehara, H., Notsu, S., Shibayama, T., Shibata, K., “Two sun-like superflare stars rotating as slow as the Sun*”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2014, 66, L4
DOI: 10.1093/pasj/psu012
- ⑬ Ueno, S., Shibata, K., Morita, S., Kimura, G., Asai, A., Kitai, R., Ichimoto, K., Nagata, S., Ishii, T., Nakatani, Y., Yamaguchi, M., et al., “International Collaboration and Academic Exchange of the CHAIN Project in this Three Years (ISWI Period)”, *Sun and Geosphere*, 2014, 9, 97-103
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2014SunGe...9...97U>
- ⑭ Tsurutani, B. T., Echer, E., Shibata, K., Verkhoglyadova, O. P., Mannucci, A. J., Gonzalez, W. D., Kozyra, J. U., Pätzold, M., “The interplanetary causes of geomagnetic activity during the 7-17 March 2012 interval: a CAUSES II overview”, *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2014, 4, A02
DOI: 10.1051/swsc/2013056
- ⑮ Shibayama, T., Maehara, H., Notsu, S., Notsu, Y., Nagao, T., Honda, S., Ishii, T. T.,

Nogami, D., Shibata, K., “Superflares on Solar-type Stars Observed with Kepler. I. Statistical Properties of Superflares”, *The Astrophysical Journal Supplement*, 2013, 209, 5
DOI: 10.1088/0067-0049/209/1/5

⑬ Notsu, S., Honda, S., Notsu, Y., Nagao, T., Shibayama, T., Maehara, H., Nogami, D., Shibata, K., “High-Dispersion Spectroscopy of the Superflare Star KIC 6934317”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2013, 65, 112
DOI: 10.1093/pasj/65.5.112

⑭ Notsu, Y., Shibayama, T., Maehara, H., Notsu, S., Nagao, T., Honda, S., Ishii, T. T., Nogami, D., Shibata, K., “Superflares on Solar-type Stars Observed with Kepler II. Photometric Variability of Superflare-generating Stars: A Signature of Stellar Rotation and Starspots”, *The Astrophysical Journal*, 2013, 771, 127
DOI: 10.1088/0004-637X/771/2/127

⑮ Shibata, K., Isobe, H., Hillier, A., Choudhuri, A. R., Maehara, H., Ishii, T. T., Shibayama, T., Notsu, S., Notsu, Y., Nagao, T., Honda, S., Nogami, D., “Can Superflares Occur on Our Sun?”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2013, 65, 49
DOI: 10.1093/pasj/65.3.49

⑯ Ishii, T. T., Kawate, T., Nakatani, Y., Morita, S., Ichimoto, K., Masuda, S., “High-Speed Imaging System for Solar-Flare Research at Hida Observatory”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2013, 65, 39
DOI: 10.1093/pasj/65.2.39

〔学会発表〕(計45件)

① 前原裕之, 野津湧太, 野津翔太, 行方宏介, 石井貴子, 野上大作, 柴田一成, 「太陽型星における巨大黒点の発生頻度とスーパーフレアとの関係」, 日本天文学会 2016 年春季大会, 東京都八王子市, 2016 年 3 月 14 日～3 月 17 日

② Shibata, K., “Stellar Superflares”, Asia Pacific Solar Physics Meeting 2015, 韓国・ソウル, 2015 年 11 月 2 日 (招待講演)

③ 石井貴子, 一本潔, 仲谷善一, 浅井歩, 川手朋子, 増田智, 「京都大学飛騨天文台 SMART/FISCH による 2015 年 5 月 6 日(日本時間)の白色光フレアの観測」, 日本天文学会 2015 年秋季年会, 兵庫県神戸市, 2015 年 9 月 9 日～11 日

④ Shibata, K., “Solar and Stellar Flares and Their Impact on Planets”, 第 29 回 IAU (国際天文連盟) 総会/IAU シンポジウム 320 「Solar and Stellar Flares and Their Effects on Planets」, 米国・ホノルル, 2015 年 8 月 3 日～14 日 (招待講演)

⑤ Asai, A., “Energy Release Mechanisms of Solar Flares studied by Microwave Emission”, 第 26 回 IUGG (国際測地学・地球物理学連合) 総会, チェコ・プラハ, 2015 年 6 月 22 日～7 月 2 日 (招待講演)

⑥ Ichimoto, K., and International Solar-C Working Group, “SUVIT: The Large Aperture Solar Optical Telescope for Solar-C Mission”, スペイン・グラナダ, 2015 年 5 月 25 日～28 日 (招待講演)

⑦ 柴田一成, 石井貴子, 河村聡人, 飛騨 SMART チーム, 「巨大黒点 12192 はなぜコロナ質量放出を起こさなかったのか? I」, 日本天文学会 2015 年春季年会, 大阪府豊中市, 2015 年 3 月 18 日～21 日

⑧ Shibata, K., “Superflares of Solar type Stars”, APRIM (Asia Pacific Regional IAU Meeting) 2014, 韓国・太田, 2014 年 8 月 18 日～22 日 (招待講演)

⑨ Maehara, H., “Statistical Properties of Superflares on Solar-type Stars”, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2014, 北海道札幌市, 2014 年 7 月 28 日～8 月 1 日 (招待講演)

⑩ Shibata, K., “Physics of Solar and Stellar Flares”, NAM (National Astronomy Meeting: 英国天文学会) 2014, 英国・ポーツマス, 2014 年 6 月 23 日～26 日 (招待講演)

⑪ 石井貴子, 川手朋子, 仲谷善一, 一本潔, 浅井歩, 増田智, 「京都大学飛騨天文台 SMART 望遠鏡/高速フレア撮像装置 (FISCH) による白色光フレアの観測」, 日本天文学会 2014 年春季年会, 東京都三鷹市, 2014 年 3 月 19 日～22 日

⑫ Nogami, D., “Solar and Stellar Superflares”, The 2nd Asian-Pacific Solar Physics Meeting, 中国・杭州, 2013 年 10 月 14 日～18 日 (招待講演)

⑬ 本田敏志, 野津湧太, 野津翔太, 柴山拓也, 鄭祥子, 猪口睦子, 前原裕之, 野上大作, 柴田一成, 「西はりま天文台 MALLS によるスーパーフレア星の分光観測」, 日本天文学会 2013 年秋季年会, 宮城県仙台市, 2013 年 9 月 10 日～12 日

⑭ Shibata, K., “Key Physics of Prominence Eruption: Models and Observations”, IAU シンポジウム 300 「Nature of Prominences and their Role in Pace Weather」, フランス・パリ, 2013 年 6 月 10 日～16 日 (招待講演)

⑮ Shibata, K., “Superflares and Their Possible Impact on the Terrestrial Environment”, 日本地球惑星科学連合 2013 年度連合大会, 千葉県千葉市, 2013 年 5 月 19 日～24 日 (招待講演)

[図書] (計 4 件)

① 柴田一成, 角川書店, 「とんでもなくおもしろい宇宙」, 2016, 207

② クリストファー・クーパー(著), 柴田一成 (監修), 緑書房, 「太陽大図鑑」, 2015, 224

③ 小久保英一郎, 嶺重慎(編), 浅井歩 他著, 岩波書店, 「宇宙と生命の起源 2 - ヒッグス粒子から iPS 細胞まで」, 2014, 256

④ 柴田一成, 朝日新書, 「太陽大異変-スーパーフレアが地球を襲う日」, 2013, 211

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 機械学習によるアルゴリズムを用いた太陽フレア予報システム

発明者: 村主崇行, 磯部洋明, 柴山拓也, 柴田一成, 浅井歩, 他

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2014-153706

出願年月日: 2014 年 7 月 29 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

① 研究トピックス (スーパーフレアを起こす太陽にそっくりな星)

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴田 一成 (SHIBATA, Kazunari)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 70144178

(2) 研究分担者

一本 潔 (ICHIMOTO, Kiyoshi)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 70193456

野上 大作 (NOGAMI, Daisaku)

京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 20332728

本田 敏志 (HONDA, Satoshi)
兵庫県立大学・西はりま天文台・研究員
研究者番号: 20425408

前原 裕之 (MAEHARA, Hiroyuki)
国立天文台・岡山天体観測所・専門研究職員
研究者番号: 40456851

上野 悟 (UENO, Satoru)
京都大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 70303807

永田 伸一 (NAGATA, Shinichi)
京都大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 30362437

磯部 洋明 (ISOBE, Hiroaki)
京都大学・大学院総合生存学館・准教授
研究者番号: 90511254

浅井 歩 (ASAI, Ayumi)
京都大学・宇宙総合学研究ユニット・准教授
研究者番号: 50390620

石井 貴子 (ISHII, Takako)
京都大学・大学院理学研究科・研究員
研究者番号: 10437197

(3) 連携研究者
なし