

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月25日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03955

研究課題名(和文) 太陽白色光フレアの解析に基づく、スーパーフレア星の磁気活動機構の解明

研究課題名(英文) Solving the Mechanism of Magnetic Activity of Superflare Stars based on the Analysis of White Light Solar Flares

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：飛騨天文台SMART望遠鏡やSDO衛星から得られた太陽白色光フレアと、ケプラー宇宙望遠鏡による太陽型星スーパーフレアのデータを比較解析した結果、太陽フレアのエネルギーと寿命の間に成り立つ関係式は太陽型星でも成り立つこと、その関係式から太陽型星の磁場強度が推定できることが発見された。また、光度曲線の局所的な極小を追跡する手法を用いた解析手法をケプラー宇宙望遠鏡の光度曲線に適用し、太陽型星の巨大黒点の時間発展を解析した結果、恒星黒点の面積の生成・消滅率は、太陽黒点の経験則と同じであることが判明した。西はりま天文台でM型星フレアの分光観測を行い、スペクトル線に青色非対称が存在することが発見された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、太陽型星のスーパーフレアはどのような黒点で発生するのか、太陽フレアとの違いはあるのか、について、基本的な知見が得られた。すなわち、太陽型星のスーパーフレアの発生メカニズムは太陽フレアのそれと共通であり、黒点のサイズの違いが主な違いであることが判明した。その結果、スーパーフレアが太陽で発生する可能性が、これまでより確からしくなったと言える。もし太陽でスーパーフレアが起きれば、地球環境や文明社会にとって壊滅的な大災害となることは間違いない。その意味で本研究の社会的意義は大きい。さらに本研究は、恒星の周辺の惑星の生命生存環境を解明するという観点からも、意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：Using the solar white light flare data taken with Hida Observatory SMART telescope and SDO satellite, it was found that the relationship (scaling law) between flare energy and duration for solar flares holds also for superflares on solar type stars. It was also found that magnetic field strength of solar type stars can be estimated from the scaling law between the Sun and solar type stars. We analyzed the time evolution of the large starspots of solar type superflare stars, by tracing the local minima of the light curves of the stars observed by Kepler space telescope. As a result, it was found that emergence and decay rates of star spots are mostly consistent with those expected from sunspots. We have performed spectroscopic observations of superflares of an M-type star, EV Lac, using the 2m Nayuta telescope at the Nishi-Harima Astronomical Observatory, and found the blue asymmetry of the H alpha line during superflares.

研究分野：太陽宇宙プラズマ物理学

キーワード：太陽物理学 恒星物理学 光学赤外線天文学 超高層物理学 宇宙天気 宇宙科学

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

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**年にキャリントンによるものである(キャリントン・フレア)。キャリントン・フレアは巨大で白色光でも増光を引き起こしたため、黒点スケッチ中に記録として残った。このようなフレアは、「白色光フレア」と呼ばれる。キャリントン・フレアは特に巨大で、**18**時間後に大磁気嵐が発生し、キューバ・ハワイといった低緯度地帯でもオーロラが観測された。現代では宇宙の利用拡大が急激に進んでいるため、同規模のフレアが発生すると、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、高速太陽風などの影響を受けることで、人工衛星故障や通信障害などが生じ、その被害は甚大である(被害総額が**2兆**ドルに達するとの試算もある)。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。

一方、太陽と類似の恒星は宇宙に無数にあり、そのような太陽そっくりの恒星を観測することで、スーパーフレアの発生頻度やその性質を知ることができる。太陽を長期間観測する代わりに、多くの「太陽型恒星」を観測することによって統計精度を高める。スーパーフレアの発生頻度は太陽フレアの発生頻度と共通のべき関数に従っており(図1)、太陽と同じくらいの自転速度の星でも、キャリントン・フレア(10^{32} エルグ程度)の**100倍~1000倍**ものエネルギーをもつ「スーパーフレア」が、**800年~5000年に1回**の頻度で起きていることが、我々のグループによるケプラー宇宙望遠鏡の観測結果から発見されている[1, 2]。

より巨大なフレア(スーパーフレア)が、太陽で発生する可能性はあるのか?もし太陽でスーパーフレアが起きれば、地球環境や文明社会にとって壊滅的な大災害となることは間違いない。そのため、スーパーフレアを引き起こす太陽型星の物理的特性を解明し、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が急務である。

2. 研究の目的

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、ケプラー宇宙望遠鏡により最近次々と発見されている太陽型星でのスーパーフレアとの比較研究を行う。太陽型恒星で可視光により観測されるスーパーフレアは全て白色光フレアであるため、太陽白色光フレアと太陽型恒星におけるスーパーフレアの両者を観測と理論研究に基づいて比較研究することにより、白色光フレアの発生機構を解明する。さらにその研究成果に基づいて最終的には、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。

フレアのエネルギー規模と発生頻度は「べき関数」に従うことが知られている(図1)。また、多くのスーパーフレア星では、数日~数十日程度の準周期的な明るさの変動を示すことが知られており、これらは、巨大黒点を持った星の自転で説明できることが支持されている。本研究では、スーパーフレアを引き起こす太陽型星の磁場活動を観測から調べ、それによりスーパーフレア星の物理的特性やスーパーフレアの発生条件の解明を目指す。また、太陽白色光フレアや恒星スーパーフレアでの分光観測を行い、白色光増光機構の解明を目指す。

3. 研究の方法

スーパーフレアは、可視光ライトカーブの増光で判別するため、基本的には白色光フレアである。一方、太陽フレアにおける白色光増光の機構はいまだに解明されていない。本研究では、太陽活動極大期(**2014年4月**頃)付近に実施されたこともあり、太陽フレアを積極的に観測し詳細に調べることによって、白色光の増光の機構の解明を目指す。具体的には、京都大学飛騨天文台 **SMART** 望遠鏡やドームレス太陽望遠鏡(**DST**)を中心とした地上望遠鏡、「ひので」、**IRIS**、**SDO**などの人工衛星により得られた光球磁場・白色光観測などの解析を行う。特に、**SMART**望遠鏡に実装された高速撮像装置(**FISCH**; 1秒間に約**30**フレームの超高速時間分解能観測)により、極めて短時間の変動まで観測し、太陽**H**線および白色光の変動を調べる。

スーパーフレア星には太陽黒点より**1桁**以上大きい巨大黒点が存在すると推定されることから、スーパーフレア発生の解明のためには、どのようにして巨大黒点が生成・消滅するのか?を明らかにすることが重要であり、恒星黒点の面積の時間変化の調査が鍵であると考えられる。そこで、ケプラー宇宙望遠鏡などの観測から、巨大黒点を持つ太陽型星の自転によって生ずる光度変化を調べ、太陽型星の巨大黒点の時間発展を解析する。

数値モデリングにより、白色光増光のメカニズムを解明する。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が磁力線に沿って伝わり、高密度な下層大気(彩層)に突入する際、彩層プラズマの圧力が一気に上昇し、磁力線にそった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

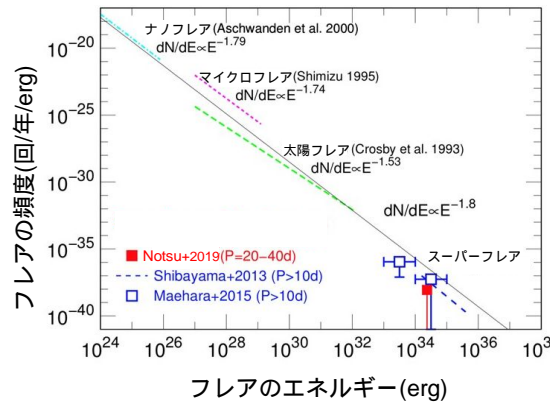


図1) 太陽フレアとスーパーフレアの、発生頻度のエネルギー分布[1]、 10^{35} エルグ(キャリントン・フレアの**1000倍**のエネルギー)のフレアが起こる頻度は約**5000年に1回**、(Notsu et al. 2019)

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。この機構を数値シミュレーションモデルにより再現する。

4. 研究成果

(1) 太陽白色光フレアの観測

飛騨天文台 SMART 望遠鏡、DST 望遠鏡、IRIS 衛星などにより太陽フレアの観測に成功し、そのフレアに伴う増光の短時間変動や、分光スペクトルの挙動、フレアに伴う噴出現象の様子を詳細に追うことに成功した。また、歴史的文献から、過去に地球で観測された複数のオーロラの記録などから、太陽で発生した巨大フレアの痕跡を見出した。

(2) 太陽フレアと太陽型星スーパーフレアの比較研究

飛騨天文台 SMART 望遠鏡や SDO 衛星から得られた太陽白色光フレアと、ケプラー宇宙望遠鏡による太陽型星スーパーフレアのデータを比較解析した結果、太陽フレアのエネルギーと寿命の間に成り立つ関係性は太陽型星でも成り立つこと、その関係式から太陽型星の磁場強度が推定できることが発見された。

また、光度曲線の局所的な極小を追跡する手法を用いた解析手法をケプラー宇宙望遠鏡の光度曲線に適用し、太陽型星の巨大黒点の時間発展を解析した。その結果、恒星黒点の面積の生成・消滅率は、太陽黒点の経験則と同じであることが判明した(図2)。

さらに、西はりま天文台で観測されたM型星フレアの分光観測を行い、発見されたスペクトル線の謎の青色非対称に関する観測的特徴を学術論文としてまとめた。

(3) 白色光フレアの数値モデリング

国際共同研究などを推進することにより、太陽やM型星の白色光フレアの白色光の起源に関して新しいメカニズムを見出した。また、西はりま天文台で観測されたM型星フレアで発見されたスペクトル線の謎の青色非対称に関して、観測的特徴を学術論文としてまとめ、報告した。

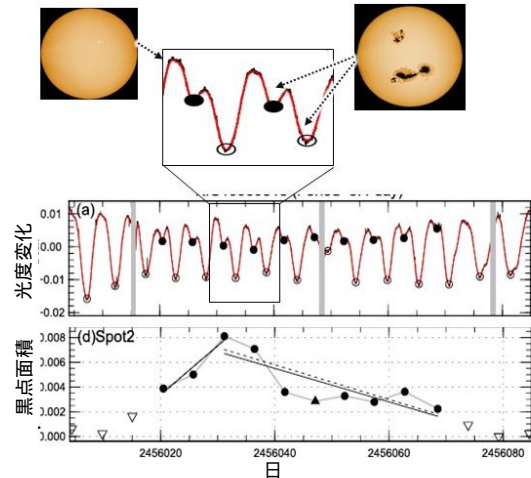


図2) 太陽型星の高度曲線の変動から推測される黒点面積の長期変動, (Namekata et al. 2019)

<引用文献>

[1] Maehara et al., *Nature*, **485**, 478-481 (2012)

[2] Shibayama et al., *ApJS*, **209**, 5 (2013)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 23件)

Ichimoto K., Ishii T. T., Otsuji K., Kimura G., Nakatani Y., Kaneda N., Nagata S., UeNo S., Hirose K., Cabezas D., Morita S., A New Solar Imaging System for Observing High-Speed Eruptions: Solar Dynamics Doppler Imager (SDDI), *Solar Physics*, 査読有, 292, 2017, id. 63, DOI:10.1007/s11207-017-1082-7

Tamazawa, H., Kawamura, A. D., Isobe, H., et al., Records of sunspot and aurora activity during 581-959 CE in Chinese official histories concerning the periods of Sui, Tang, and the Five Dynasties and Ten Kingdoms, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, 69, 2017, DOI:10.1093/pasj/psw132

Maehara, H., Notsu, Y., Honda, S., Nogami, D., Shibata, K., et al., Starspot activity and superflares on solar-type stars, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, 69, 2017, DOI:10.1093/pasj/psx013

Namekata, K., Sakaue, T., Asai, A., Shibata, K., et al., Validation of a scaling law for the coronal magnetic field strength and loop length of solar and stellar flares, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, 69, 2017, id.7, DOI:10.1093/pasj/psw111

Cabezas, D., Martinez, L. M., Asai, A., Shibata, K., et al., "Dandelion" Filament Eruption and Coronal Waves Associated with a Solar Flare on 2011 February 16, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 836, 2017, id.33, DOI:10.3847/1538-4357/836/1/33

Notsu, Y., Honda, S., Maehara, H., Nogami, D., Shibata, K., et al., Spectroscopic observations of active solar-analog stars with high X-ray luminosity, as a proxy of superflare stars, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, 69, 2017, id.12, DOI:10.1093/pasj/psw116

Hayakawa, H., Iwahashi, K., Isobe, H., Shibata, K., et al., East Asian observations of

low-latitude aurora during the Carrington magnetic Storm、Publications of the Astronomical Society of Japan、査読有、68、2016、id.99、DOI:10.1093/pasj/psw097

Kawamura, A. D.; Hayakawa, H.; Tamazawa, H.; Miyahara, H.; Isobe, H. Aurora candidates from the chronicle of Qing dynasty in several degrees of Relevance、Publications of the Astronomical Society of Japan、査読有、68、2016、id.79、DOI:10.1093/pasj/psw074

Kawate, T.; Ishii, T. T.; Nakatani, Y.; Ichimoto, K.; Asai, A.; Morita, S.; Masuda, S. Temporal Evolution and Spatial Distribution of White-light Flare Kernels in a Solar Flare、The Astrophysical Journal、査読有、833、2016、id.50、DOI:10.3847/1538-4357/833/1/50

Takahashi, T.; Mizuno, Y.; Shibata, K. Scaling Relations in Coronal Mass Ejections and Energetic Proton Events Associated with Solar Superflares、The Astrophysical Journal Letters、査読有、833、2016、id.L8、DOI:10.3847/2041-8205/833/1/L8

Takasao, S., Asai, A., Isobe, H., Shibata, K. Observational Evidence of Particle Acceleration Associated with Plasmoid Motions、The Astrophysical Journal、査読有、823、2016、id.103、DOI:10.3847/0004-637X/828/2/103

Maehara H., Notsu Y., Notsu S., Namekata K., Honda S., Ishii T. T., Nogami D., Shibata K. Starspot activity and superflares on solar-type stars、Publications of the Astronomical Society of Japan、査読有、69、2017、id.41、DOI:10.1093/pasj/psx013

Takahashi T., Qiu J., Shibata K. Quasi-periodic Oscillations in Flares and Coronal Mass Ejections Associated with Magnetic Reconnection、The Astrophysical Journal、査読有、848、2017、id.102

DOI:10.3847/1538-4357/aa8f97

Sakaue T., Tei A., Asai A., Ueno S., Ichimoto K., Shibata K. Observational study on the fine structure and dynamics of a solar jet. I. Energy build-up process around a satellite spot、Publications of the Astronomical Society of Japan、査読有、69、2017、id.80、DOI:10.1093/pasj/psx071

Namekata K., Sakaue T., Watanabe K., Asai A., Maehara H., Notsu Y., Notsu S., Honda S., Ishii T. T., Ikuta K., Nogami D., Shibata K. Statistical Studies of Solar White-light Flares and Comparisons with Superflares on Solar-type Stars、The Astrophysical Journal、査読有、851、2017、id.91

DOI:10.3847/1538-4357/aa9b34

Heinzel P., Shibata K. Can Flare Loops Contribute to the White-light Emission of Stellar Superflares?、The Astrophysical Journal、査読有、859、2018年、id.143

DOI:10.3847/1538-4357/aabe78

Honda Satoshi, Notsu Yuta, Namekata Kosuke, Notsu Shota, Maehara Hiroyuki, Ikuta Kai, Nogami Daisaku, Shibata Kazunari Time-resolved spectroscopic observations of an M-dwarf flare star EV Lacertae during a flare、Publications of the Astronomical Society of Japan、査読有、70、2018、id.62、DOI:10.1093/pasj/psy055

Sakaue Takahito, Tei Akiko, Asai Ayumi, Ueno Satoru, Ichimoto Kiyoshi, Shibata Kazunari Observational study on the fine structure and dynamics of a solar jet. II. Energy release process revealed by spectral analysis、Publications of the Astronomical Society of Japan、査読有、70、2018、id.99、DOI:10.1093/pasj/psx133

Tei Akiko, Sakaue Takahito, Okamoto Takenori J., Kawate Tomoko, Heinzel Petr, UeNo Satoru, Asai Ayumi, Ichimoto Kiyoshi, Shibata Kazunari Blue-wing enhancement of the chromospheric Mg ii h and k lines in a solar flare、Publications of the Astronomical Society of Japan、査読有、70、2018、id.100、DOI:10.1093/pasj/psy047

Namekata K., Maehara H., Notsu Y., Toriumi S., Hayakawa H., Ikuta K., Notsu S., Honda S., Nogami D., Shibata K. Lifetimes and Emergence/Decay Rates of Star Spots on Solar-type Stars Estimated by Kepler Data in Comparison with Those of Sunspots、The Astrophysical Journal、査読有、871、2019年、id.187、DOI:10.3847/1538-4357/aaf471

① Anan T., Yoneya T., Ichimoto K., UeNo S., Shiota D., Nozawa S., Takasao S., Kawate T. Measurement of vector magnetic field in a flare kernel with a spectropolarimetric observation in He ii 10830??、Publications of the Astronomical Society of Japan、査読有、70、2018年、id.101、DOI:10.1093/pasj/psy105

② Seki, D., Otsuji, K., Isobe, H., Ishii, T. T., Ichimoto, K., Shibata, K. Small-scale motions in solar filaments as the precursors of eruptions、Publications of the Astronomical Society of Japan、査読有、71、2019、印刷中、DOI:なし

⑳ **Isobe, H., Ebihara, Y., Kawamura, A. D., Tamazawa, H., Hayakawa, H., Intense geomagnetic storm during Maunder minimum possibly by a quiescent filament eruption, The Astrophysical Journal, 査読有, 2019, 印刷中, DOI:なし**

[学会発表](計 23 件)

Honda, S., Notsu, Y., Maehara, H., Notsu, S., Shibayama, T., Nogami, D., Shibata, K., Lithium Abundance of the Solar-Type Superflare Stars, The 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (国際学会), 2016 年

Honda, S., Notsu, Y., Maehara, H., Notsu, S., Shibayama, T., Nogami, D., Shibata, K., Time Resolved Spectroscopic Observations of an M-Dwarf Flare Star EV Lac During a Flare, The 19th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun (国際学会), 2016 年

Shibata, K., How Extreme Can Solar Events Be?, 1st Varsiti Meeting (招待講演) (国際学会), 2016 年

Shibata, K., Physics of Solar and Stellar Flares, ICPP (International Congress on Plasma Physics) 2016 (招待講演) (国際学会), 2016 年

Shibata, K., Magnetic Reconnection in Solar and Astrophysical Plasmas, 6th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical plasmas (招待講演) (国際学会), 2016 年

Shibata, K., Superflares on Solar Type Stars, IAU Symp. 327: Fine Structure and Dynamics of the Solar Atmosphere (招待講演) (国際学会), 2016 年

Maehara, H., Starspot activity and superflares on solar-type stars, IAU Symposium 328 "Living Around Active Stars" (招待講演) (国際学会), 2016 年

Maehara, H., Solar /Stellar Flares on K-M dwarfs, Impact of Exoplanetary Space Weather On Climate and Habitability (招待講演) (国際学会), 2016 年

前原裕之, G,K,M 型星におけるフレアと恒星黒点の関係, 日本天文学会 2017 年春季年会, 2017 年

Shibata, K., Superflares on Solar Type Stars, 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会), 2017 年

柴田一成, 天体電磁流体現象と太陽フレア, 数値流体力学シンポジウム(招待講演), 2017 年

Shibata, K., Extreme Solar Events, IAUS 340: Long-term datasets for the understanding of solar and stellar magnetic cycles (招待講演) (国際学会), 2018 年

Maehara, H., Starspot activity and superflares on solar type stars, Kepler & K2 Science Conference IV(国際学会), 2017 年

Maehara, H., Starspot activity and superflares on solar type stars, JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会), 2017 年

Maehara, H., Superflares on solar-type stars, Asteroseismology and its impact on other branches of astronomy(招待講演)(国際学会), 2017 年

前原裕之, G, K, M 型星におけるスーパーフレアのエネルギーと継続時間の関係, 日本天文学会 2018 年春季年会, 2018 年

H. Maehara; Y. Notsu; K. Namekata; K. Ikuta; S. Notsu; S. Honda; D. Nogami; K. Shibata, Starspots on late-type stars and their correlation with flare activity, 20th Cambridge Workshop: Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun(国際学会), 2018 年

K. Ikuta; H. Maehara; Y. Notsu; K. Namekata; S. Notsu; S. Honda; D. Nogami; K. Shibata, Bayesian spot modelling for Kepler light curves of superflare stars using adaptive parallel tempering, 20th Cambridge Workshop: Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun(国際学会), 2018 年

K. Namekata; H. Maehara; Y. Notsu; H. Hayakawa; K. Ikuta; S. Notsu; S. Honda; D. Nogami; K. Shibata, Lifetime, Emerging and Decay Rates of Starspots on Solar-type Stars Estimated by Kepler Data and Comparisons with Sunspots, 20th Cambridge Workshop: Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun(国際学会), 2018 年

Y. Notsu; H. Maehara; S. Honda; S. Hawley; S. Notsu; K. Namekata; K. Ikuta; D. Nogami; K. Shibata, Spectroscopic observations of Kepler/TESS solar-type superflare stars, 20th Cambridge Workshop: Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun(国際学会), 2018 年

㉑ **H. Maehara, Statistical properties of starspots on solar-type stars and their correlation with flare activity, IAU Focus Meeting FM9: Solar Irradiance: Physics-Based Advances(国**

際学会)、2018年

②H. Maehara、Superflares and starspot activity on solar-type stars、ISEE workshop on Extreme Solar Events(招待講演)(国際学会)、2018年

③前原裕之、G, K, M型星の恒星黒点の統計的性質とフレア活動性との関係、日本天文学会2019年春季年会、2019年

〔図書〕(計 1件)

Ichimoto, K.、Elsevier、The Sun as a Guide to Stellar Physics、ed. Oddbjørn Engvold, Jean-Claude Vial, Andrew Skumanich、2018年、522ページ、Chap. 5.3 Spectropolarimetry and Magnetic Structures を執筆

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp> (京都大学大学院理学研究科附属天文台)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 一本 潔

ローマ字氏名: **ICHIMOTO, Kiyoshi**

所属研究機関名: 京都大学

部局名: 理学研究科

職名: 教授

研究者番号(8桁): **70193456**

研究分担者氏名: 野上 大作

ローマ字氏名: **NOGAMI Daisaku**

所属研究機関名: 京都大学

部局名: 理学研究科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): **20332728**

研究分担者氏名: 浅井 歩

ローマ字氏名: **ASAI, Ayumi**

所属研究機関名: 京都大学

部局名: 理学研究科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): **50390620**

研究分担者氏名: 本田 敏志

ローマ字氏名: **HONDA Satoshi**

所属研究機関名: 兵庫県立大学

部局名: 自然・環境科学研究所

職名: 准教授

研究者番号(8桁): **20425408**

研究分担者氏名: 前原 裕之

ローマ字氏名: **MAEHARA Hiroyuki**

所属研究機関名: 国立天文台

部局名: ハワイ観測所

職名: 助教

研究者番号(8桁): **40456851**

研究分担者氏名: 磯部 洋明

ローマ字氏名: **ISOBE, Hiroaki**

所属研究機関名: 京都市立芸術大学

部局名: 美術学部 / 美術研究科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): **90511254**

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。