

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05400

研究課題名(和文) 太陽型星の高精度測光データから探る巨大黒点の性質とスーパーフレアの関係

研究課題名(英文) On the correlation between starspot activity and superflares on solar-type stars

研究代表者

前原 裕之 (Maehara, Hiroyuki)

国立天文台・ハワイ観測所・助教

研究者番号：40456851

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、Kepler宇宙望遠鏡による超高精度の測光データと、地上観測による長期間の測光データから、太陽型星における巨大黒点の発生頻度や寿命、黒点の大きさとフレアの規模や頻度との相関を調べた。その結果、太陽型星における黒点のサイズ分布を明らかにすることができ、巨大黒点の面積・発生頻度の分布が、太陽黒点の面積・発生頻度の分布の延長上にのることを発見した。また、太陽型星において、スーパーフレアを起こしうる(=現在知られている最大級の太陽黒点の数倍から数十倍程度の面積をもつ)巨大黒点の面積と寿命の関係が、これまで太陽黒点で知られていた黒点寿命と黒点面積の関係の延長線上にのることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた研究結果から、スーパーフレアを起こしうる巨大黒点の発生頻度や寿命を初めて明らかにすることができ、それらが従来の太陽観測から知られていた黒点の発生頻度と面積の関係や、寿命と面積の関係の延長線上にのることが明らかとなった。このことは、スーパーフレアを起こすような巨大黒点と太陽で見られる黒点は、同じメカニズムで生成・発展・消滅することを示唆する。さらに、太陽でもスーパーフレアを起こすような巨大黒点が発生しうることを示唆しており、本研究の結果は太陽でのスーパーフレアに伴う巨大磁気嵐等の地球上の文明社会への影響やそのリスク評価にとっても重要である。

研究成果の概要(英文)：We studied the occurrence frequency and lifetime of large starspots which can produce "superflares" on solar-type stars by using photometric data by Kepler space telescope and ground-based long-term observations. We found that the size distribution of large starspots on solar-type stars as a function of the area of starspots shows the power-law distribution. Our results suggest that the size distribution of starspots on solar-type stars and that of sunspots lie on the same power-law line. We also analyzed the lifetime of starspots on solar-type stars from the rotational brightness modulations and found that larger starspots tend to have longer lifetime. The lifetime of large starspots on solar-type stars is consistent with that predicted from the lifetime-area relation for sunspots. Our findings imply that both sunspots and larger starspots on solar-type stars are caused by the same physical mechanisms.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：太陽型星 黒点 フレア

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

Kepler 宇宙望遠鏡による超高精度の測光観測から、太陽と同じような温度を持つ主系列星(太陽型星)の中には、最大級の太陽フレアで解放されるエネルギー(10^{32} erg)の 10-10,000 倍ものエネルギーを解放する「スーパーフレア」を起こす天体があることが明らかとなった(Maehara et al. 2012^[1], Shibayama et al. 2013^[2]など)。このような天体は、周期数日から数十日、振幅数パーセント程度の準周期的な変光を示すことが多く(図 1)、星表面に巨大な黒点(星の半球面積の 1 - 10% = 最大級の黒点の 10 倍以上)があることが示唆されていた。太陽フレアの研究から、フレアは黒点付近に蓄えられた磁気エネルギーが、磁気リコネクションによって熱や運動エネルギーとして解放される現象であると考えられているが、我々の研究から、観測された最大のスーパーフレアで解放されるエネルギーは黒点の大きさから推測される磁気エネルギーで十分説明可能であることが明らかとなった(Shibata et al. 2013^[3], Maehara et al. 2015^[4])ことから、巨大黒点はスーパーフレア発生の鍵を握っていると考えられる。

一方、準周期的な変光からは巨大黒点が存在すると考えられるものの、スーパーフレアが Kepler の観測期間中には観測されなかった天体もあることが分かった。スーパーフレアの発生条件として、巨大黒点の存在以外にどのような物理的条件が必要なのか? このことを明らかにするためには、巨大黒点とスーパーフレアの発生との間にどのような関係があるのか、および、巨大黒点の発生頻度や寿命といった統計的性質はどのようになっているのかについて、太陽黒点と太陽フレアとの関係や、太陽黒点の統計的性質と比較研究する必要があると考えた。

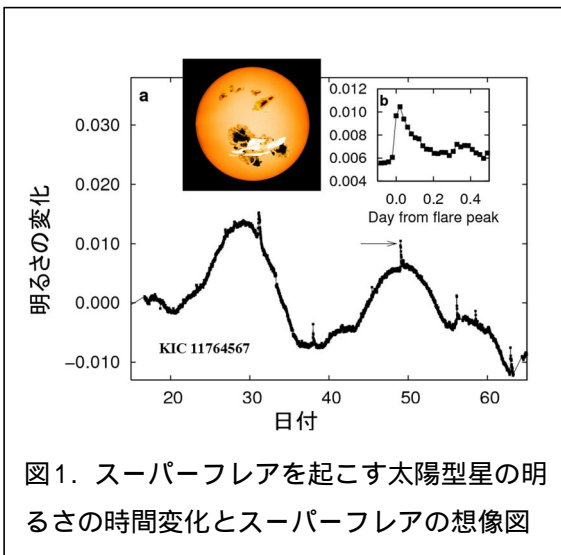


図 1. スーパーフレアを起こす太陽型星の明るさの時間変化とスーパーフレアの想像図

2. 研究の目的

1 で述べたような背景から、本研究ではケプラー宇宙望遠鏡のデータや地上からの長期間の太陽型星の測光データを用いて、以下のようなことを明らかにすることを研究目的とした。

- (1) 太陽型星におけるスーパーフレアを起こしうる巨大黒点とスーパーフレアの間関係を調べ、巨大黒点の発生頻度やサイズ分布が、スーパーフレアを起こす星と起こさない星でどのような違いがあるのかを調べる。
- (2) 自転による変光の測光データから、黒点の生成・発展・消滅のタイムスケールを観測的に明らかにする。
- (3) 太陽型星の巨大黒点の発生頻度やサイズ分布、寿命といった統計的性質やスーパーフレアとの関係について、太陽黒点の統計的性質や太陽黒点とフレアの間関係と比較研究し、両者の差異を調べる。

3. 研究の方法

上記のような研究目的を達成するため、本研究では、まず Kepler 宇宙望遠鏡で観測された全ての太陽型星のデータから、自転による変光の振幅および周期を調べ、そのデータベースを作成した。このデータから、光球表面の黒点のない部分の温度と黒点の暗部の温度の差を、太陽黒点や他の天体での黒点の研究で得られている経験則を仮定することで、自転による変光の振幅から黒点の面積を求めることが可能となる。Kepler の観測領域にある全ての太陽型星の黒点面積のデータから、黒点面積ごとの星の数と星の自転周期などを調べ、黒点のサイズ分布や巨大黒点の発生頻度を推定した。さらに、求めた巨大黒点の発生頻度分布と太陽黒点について同様の統計的研究とを比較した。

自転による明るさの変動では、黒点が星の中央を通るタイミングで曲線には局所的な極小ができる。この局所的な極小のタイミングおよび深さから、複数の巨大黒点があるケースにおいても、黒点を分離して、その面積の時間変化や寿命を調べることが可

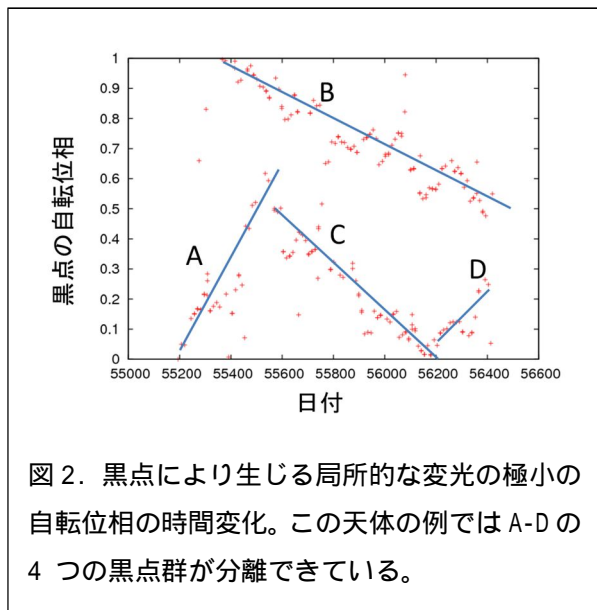


図 2. 黒点により生じる局所的な変光の極小の自転位相の時間変化。この天体の例では A-D の 4 つの黒点群が分離できている。

能である（図 2）。本研究では光度曲線から極小を検出してこの黒点を同定し、その時間発展を調べる手法を開発し、スーパーフレアを起こしうる巨大黒点の寿命を調べた。さらに、面積の異なる黒点を持つ太陽型星で黒点寿命を調べることで、黒点寿命と黒点面積の関係を明らかにし、それを太陽黒点の寿命と面積の関係と比較した。

4. 研究成果

(1) 太陽型星における巨大黒点の発生頻度分布とスーパーフレアとの関係

Kepler の観測領域にある全太陽型星の黒点面積と自転周期の関係は図 3 のようになった。太陽型星のうち、スーパーフレアを示す天体の割合は自転周期と黒点面積に依存し、自転周期の短い天体ほど、また、黒点面積の大きい天体ほど、スーパーフレアを示す天体の割合が高いことが分かった。この結果からは軌道周期ごとに黒点のサイズ分布を調べることが可能である。太陽型星の黒点面積のサイズ分布はべき関数分布を示し、自転周期によってべきの指数が異なり、自転周期の短い天体ほど、面積の大きな黒点を持つ天体の割合が多いことが分かった。

さらに、Kepler で観測された太陽型星のうち、太陽と同程度の自転周期を持つ天体（20-40 日）のサンプルについて、巨大黒点の発生頻度と黒点面積の関係を調べ、それを観測記録が十分そろっている過去 140 年間の太陽黒点の発生頻度分布と比較した（図 4）。その結果、太陽と同じくらいの自転周期を持つ星における巨大黒点の発生頻度分布は、太陽黒点の発生頻度分布のうち面積の大きい側の分布の延長線上にのることが分かった。このことは、太陽黒点と太陽型星の巨大黒点の発生には、共通する物理機構（ダイナモ機構）が働いていることを示唆する。また、太陽でも数百年オーダーのタイムスケールでは、スーパーフレアを起こすのに十分な大きさ（太陽表面積の 1% 以上）の巨大黒点が出現しうることを示唆しており、スーパーフレアによる極端宇宙天気現象の発生頻度などリスク評価をするうえでも重要な結果が得られたといえる（Maehara et al. 2017^[5]）。

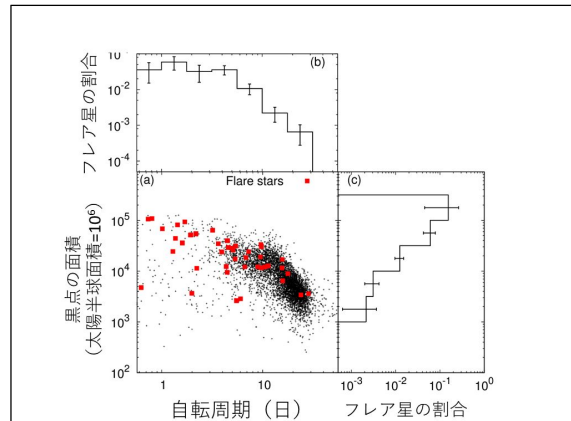


図3. 巨大黒点のサイズ（=星の明るさの変動の振幅）と星の自転周期の関係

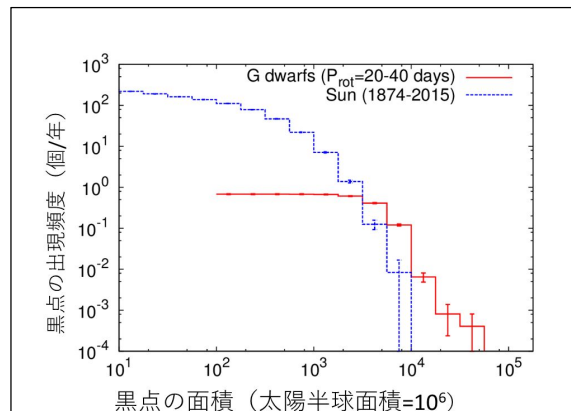


図 4. 太陽型星の巨大黒点のサイズ分布と太陽黒点のサイズ分布

(2) 太陽型星における巨大黒点の寿命と面積の関係

(1)の結果のうち太陽黒点の発生頻度との直接比較にあたっては、巨大黒点の寿命が自転周期に比べて十分長いことが必要であった。Maehara et al. (2017)^[5]では、実際にいくつかの天体について黒点の寿命が自転周期よりも十分長いことを示したが、この過程で光度曲線から黒点を同定して、その時間変化を追う手法を開発し、より多くの太陽型星の黒点について統計的な研究を行った。その結果として、巨大黒点の寿命は星の自転周期に対し弱い相関を示し、同じ黒点面積の場合、自転周期の

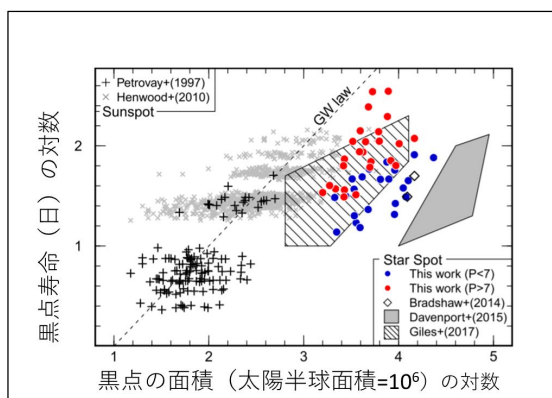


図 5. 太陽型星の巨大黒点の寿命と面積の関係と太陽黒点の寿命と面積の関係の比較

長い星の方が黒点の寿命が長い傾向がみられた。また、太陽型星の巨大黒点と太陽黒点のそれぞれについて、黒点の寿命や黒点の成長速度と黒点面積の関係を比較すると、太陽黒点で知られている関係の延長上に自転周期が太陽と同程度の太陽型星の巨大黒点が位置することが分かった(図5)。この結果は、巨大黒点とより小さな太陽黒点では、その生成や消滅などの時間発展の性質も共通していることを示している (Namekata et al. 2019^[6])。

(3) 太陽型星以外の晩期型星への応用

本研究ではもともと太陽型星におけるスーパーフレアと巨大黒点の関係を調べることが目的であったが、全く同じ手法をより幅広い温度を持つ晩期型星一般へ適用し、スーパーフレアと巨大黒点の関係が晩期型星一般に成り立つのかどうかを調べた。この結果、黒点面積が同じであれば、星の温度に依らずフレアの発生頻度分布や最大エネルギーといった統計的性質は同じになることが分かった(図6)。このことは、星の黒点面積が分かれば、その星でのフレア活動を推定することが可能であることを示唆している。

そこで、本研究で得られた知見を応用し、これまでにハビタブルゾーンを周回する惑星が発見されている恒星について、変光振幅から黒点面積を見積もり、その星で発生するフレアが、惑星に対してどのような影響を与えるか評価する研究へと発展させた。この研究では、惑星の持つ大気の組成や磁場の強さを変えた場合、スーパーフレアによって惑星表面でどの程度の放射線被ばく量となるかを調べた。その結果、現在の地球と同程度の大气や磁場が存在する場合、スーパーフレアによる惑星表面での放射線被ばく量は、地球型生命にとって致命的な量とはならないことが分かった(Yamashiki et al. 2019^[7])。

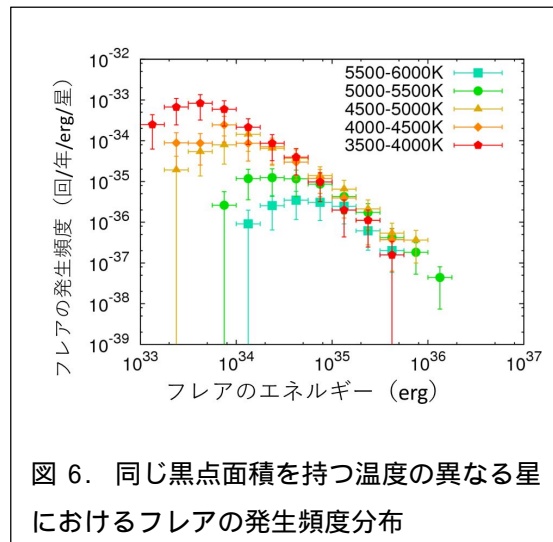


図6. 同じ黒点面積を持つ温度の異なる星におけるフレアの発生頻度分布

References

- [1] Maehara, H., et al. "Superflares on solar-type stars", *Nature*, 485, 478-481, (2012)
- [2] Shibayama, T., et al. "Superflares on Solar-type Stars Observed with Kepler. I. Statistical Properties of Superflares", *ApJS*, 209, 5, (2013)
- [3] Shibata, K., et al. "Can Superflares Occur on Our Sun?", *PASJ*, 65, 49, (2013)
- [4] Maehara, H., et al. "Statistical properties of superflares on solar-type stars based on 1-min cadence data", *Earth, Planets and Space* 67, 59, (2015)
- [5] Maehara, H., et al. "Starspot activity and superflares on solar-type stars", *PASJ*, 69, 41, (2017)
- [6] Namekata, K., et al. "Lifetimes and Emergence/Decay Rates of Star Spots on Solar-type Stars Estimated by Kepler Data in Comparison with Those of Sunspots", *ApJ*, 871, 187 (2019)
- [7] Yamashiki, Y. A., et al. "Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability", *ApJ*, 881, 114, (2019)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Namekata Kosuke, Davenport James R. A., Morris Brett M., Hawley Suzanne L., Maehara Hiroyuki, Notsu Yuta, Toriumi Shin, Ikuta Kai, Notsu Shota, Honda Satoshi, Nogami Daisaku, Shibata Kazunari	4. 巻 891
2. 論文標題 Temporal Evolution of Spatially Resolved Individual Star Spots on a Planet-hosting Solar-type Star: Kepler-17	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 103 ~ 103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab7384	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yamashiki Yosuke A., Maehara Hiroyuki, Airapetian Vladimir, Notsu Yuta, Sato Tatsuhiko, Notsu Shota, Kuroki Ryusuke, Murashima Keiya, Sato Hiroaki, Namekata Kosuke, Sasaki Takanori, Scott Thomas B., Bando Hina, Nashimoto Subaru, Takagi Fuka, Ling Cassandra, Nogami Daisaku, Shibata Kazunari	4. 巻 881
2. 論文標題 Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 114 ~ 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab2a71	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Notsu Yuta, Maehara Hiroyuki, Honda Satoshi, Hawley Suzanne L., Davenport James R. A., Namekata Kosuke, Notsu Shota, Ikuta Kai, Nogami Daisaku, Shibata Kazunari	4. 巻 876
2. 論文標題 Do Kepler Superflare Stars Really Include Slowly Rotating Sun-like Stars? --Results Using APO 3.5 m Telescope Spectroscopic Observations and Gaia-DR2 Data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 58 ~ 58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab14e6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Namekata Kosuke, Maehara Hiroyuki, Notsu Yuta, Toriumi Shin, Hayakawa Hisashi, Ikuta Kai, Notsu Shota, Honda Satoshi, Nogami Daisaku, Shibata Kazunari	4. 巻 871
2. 論文標題 Lifetimes and Emergence/Decay Rates of Star Spots on Solar-type Stars Estimated by Kepler Data in Comparison with Those of Sunspots	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 187 ~ 187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaf471	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Honda, Satoshi; Notsu, Yuta; Namekata, Kosuke; Notsu, Shota; Maehara, Hiroyuki; Ikuta, Kai; Nogami, Daisaku; Shibata, Kazunari	4. 巻 70
2. 論文標題 Time-resolved spectroscopic observations of an M-dwarf flare star EV Lacertae during a flare	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id.62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy055	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Maehara, H., Notsu, Y., Notsu, S., Namekata, K., Honda, S., Ishii, T. T., Nogami, D., Shibata, K.	4. 巻 69
2. 論文標題 Starspot activity and superflares on solar-type stars	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 article id. 41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 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.	4. 巻 851
2. 論文標題 Statistical Studies of Solar White-light Flares and Comparisons with Superflares on Solar-type Stars	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 article id. 91
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa9b34	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Maehara, Hiroyuki
2. 発表標題 Simultaneous Photometry and Spectroscopy of an Active M dwarf YZ Canis Minoris with TESS and OISTER
3. 学会等名 TESS Science Conference I (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Maehara, Hiroyuki
2. 発表標題 Statistical properties of starspots on late-type main sequence stars and their correlation with flare activity
3. 学会等名 2019 Astrobiology Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前原裕之
2. 発表標題 光赤外線大学間連携とTESSによるフレア星YZ CMiの測光分光同時観測
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前原裕之
2. 発表標題 中小口径望遠鏡とTESSの連携によるフレア星 EV Lac の測光分光同時観測
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Maehara, Hiroyuki; Notsu, Yuta; Namekata, Kousuke; Ikuta, Kai; Notsu, Shota; Honda, Satoshi; Nogami, Daisaku; Shibata, Kazunari
2. 発表標題 Starspots on late-type stars and their correlation with flare activity
3. 学会等名 20th Cambridge Workshop: Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Maehara, Hiroyuki
2. 発表標題 Statistical properties of starspots on solar-type stars and their correlation with flare activity
3. 学会等名 IAU Focus Meeting FM9: Solar Irradiance: Physics-Based Advances (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Maehara, Hiroyuki
2. 発表標題 Superflares and starspot activity on solar-type stars
3. 学会等名 ISEE workshop on Extreme Solar Events (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前原裕之
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Maehara, H.
2. 発表標題 Starspot activity and superflares on solar-type stars
3. 学会等名 Kepler & K2 Science Conference IV (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Maehara, H.
2. 発表標題 Starspot activity and superflares on solar-type stars
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Maehara, H.
2. 発表標題 Superflares on solar-type stars
3. 学会等名 Asteroeismology and its impact on other branches of astronomy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前原裕之
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Miyake F., Usoskin I., Poluianov S., Baroni M., Cliver E., Dyer C., Ebihara Y., Feinberg A., Hayakawa H., Jull., Kovaltsov G., Kusano K., Maehara H., Mekhaldi F., Mitsuma Y., Muscheler R., Oinonen M., Sokoloff D., Rozanov E., Sukhodolov T., Wacker L., Wang F., Willis D.	4. 発行年 2019年
2. 出版社 IOP Publishing	5. 総ページ数 276
3. 書名 Extreme Solar Particle Storms The hostile Sun	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	柴田 一成 (Shibata Kazunari) (70144178)	京都大学・理学研究科・教授 (14301)	
連携研究者	野上 大作 (Nogami Daisaku) (20332728)	京都大学・理学研究科・准教授 (14301)	
連携研究者	本田 敏志 (Honda Satoshi) (20425408)	兵庫県立大学・自然・環境科学研究所・准教授 (24506)	