

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800096

研究課題名(和文) 広視野測光サーベイとアーカイブデータの活用による活動的な太陽型星の探査

研究課題名(英文) Survey of active solar-type stars with the wide-field photometric observations and archival data

研究代表者

前原 裕之 (Maehara, Hiroyuki)

国立天文台・岡山天体物理観測所・専門研究職員

研究者番号：40456851

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：これまでの研究により、太陽と同程度の自転速度の遅い天体でも、スーパーフレアなどの太陽よりもはるかに高い活動性を示す可能性が示唆された。本研究ではX線放射強度が強く高い時期活動が予想される明るい太陽型星について、測光および分光観測で自転速度の分布を調べた。その結果、これらの天体の中に太陽と同程度の自転速度の天体が含まれることが分かった。また、ケプラー宇宙望遠鏡のデータを用いて、活動的な太陽型星におけるフレアの統計的性質の研究を行った。その結果、フレアの継続時間と解放されるエネルギーの間には相関があること、この相関はフレアの発生機構が磁気リコネクションであるとすると説明できることを発見した。

研究成果の概要(英文)：Previous studies by using the data from Kepler suggest that a part of solar-type stars with the rotation period comparable to the Sun (~25 days) show much higher magnetic activity (e.g., superflares). We studied the rotation period distribution of the solar-type stars with high X-ray luminosity from ground-based photometric and spectroscopic observations. We found that some of active solar-type stars have the rotation velocity of < 5 km/s. We also studied the statistical properties of superflares on active solar-type stars by using the Kepler 1-min cadence data. We found a clear correlation between the duration of flares and the energy released by flares. This correlation can be explained if we assume that flares are caused by the magnetic reconnection.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：恒星フレア

1. 研究開始当初の背景

太陽フレアの発生頻度分布(dN/dE)はフレアで解放されるエネルギー(E)に対して、 10^{24} - 10^{32} erg の広いエネルギーの範囲において、べき関数分布をすることが知られており、エネルギーが 10 倍大きくなるとおおむね発生頻度は 10 分の 1 となる。これまでに観測された最大の太陽フレアのエネルギーは 10^{32} erg 程度で、頻度は 10 年に 1 回程度である。我々のグループでは、ケプラー宇宙望遠鏡による多数の太陽型星の超高精度(10^{-4} 程度)の測光データを解析することで、最大級の太陽フレアで解放されるエネルギーの 10-10,000 倍のエネルギーを解放する「スーパーフレア」を多数発見した(図 1; Maehara et al. 2012)。太陽型星におけるスーパーフレアの統計的研究から、スーパーフレアの発生頻度分布は太陽フレアの発生頻度分布の延長線上にのること、および、観測されたスーパーフレアのエネルギーの最大値が黒点サイズのみ依存し自転周期には依存しないことが明らかとなった。このことは、太陽のような自転周期の遅い天体であっても、巨大黒点が表面に現れれば、スーパーフレアを起こしうることを示している。

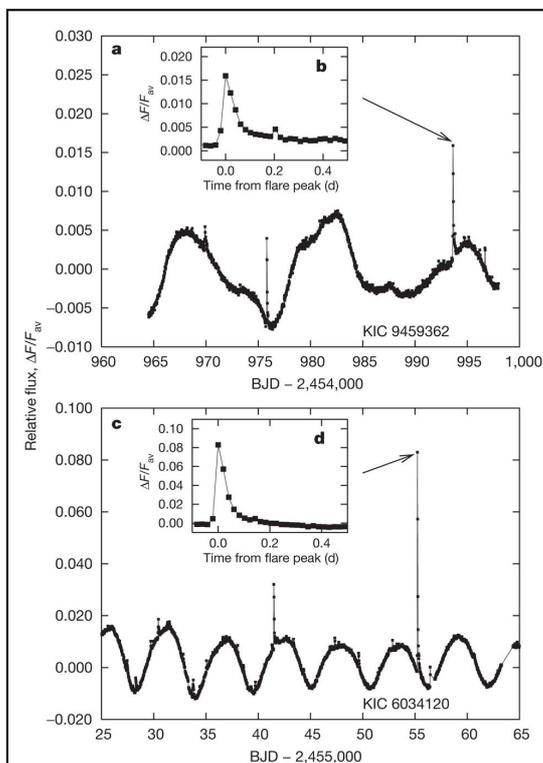


図 1. ケプラーで発見された太陽型星におけるスーパーフレアの光度曲線(Maehara et al. 2012)

2. 研究の目的

ケプラー宇宙望遠鏡のデータを用いた研究から、太陽のように自転周期の遅い天体であってもスーパーフレアのような極めて高

い磁気活動性を示す天体があることが明らかとなった。この結果から、高い磁気活動性を示す太陽型星の全てが自転周期の短い(=若い)星ではないことが予想される。そこで、本研究ではケプラー宇宙望遠鏡で発見されたスーパーフレア星や、ROSAT 衛星の全天 X 線サーベイのカatalogから G 型主系列星に同定できる天体を選択し、極めて高い磁気活動性を示す恒星の自転による変光を捉え、自転周期や黒点サイズ等を測光的に見積りデータベース化する。このことにより、高い磁気活動性を示す明るい天体の自転周期分布やスーパーフレアとの関係などの統計的な性質を調べることを目的とする。これにより、京大岡山 3.8m 望遠鏡などの中小口径の望遠鏡によって、高い S/N の高分散分光観測が可能なスーパーフレア星候補のうち、太陽と似た自転周期を持つ天体を探索する。

3. 研究の方法

(1) X 線で明るい太陽型星の測光サーベイ観測システムの構築

2011-2012 年度に、突発天体をターゲットとした焦点距離 105mm のレンズと CCD カメラを用いた広視野の測光サーベイシステムの構築を行った。本研究では、このシステムを用いて X 線放射の強い太陽型星の長期間にわたる測光サーベイ観測を行い、黒点を持つ星の自転による変光から恒星の自転周期を測定する。

(2) X 線で明るい太陽型星の高分散分光観測

X 線放射の強い太陽型星について、測光観測とは独立に岡山天体物理観測所の 188 cm 望遠鏡を用いて高分散分光観測を行い、自転速度を測定する。(1)で得られるデータと合わせて X 線で明るい高い磁気活動性を示す天体の自転速度分布を調べる。

(3) ケプラー宇宙望遠鏡のデータを用いたスーパーフレア及び黒点の統計的性質研究

ケプラー宇宙望遠鏡のデータのうち、時間分解能 1 分のデータを用いて、これまで観測されたものよりも小さなスーパーフレアの統計的な性質の研究を行う。この他に、太陽型星の巨大黒点の統計的な性質の解析を行い、スーパーフレアを起こす天体と巨大黒点との関連を調べる。

4. 研究成果

(1) X 線で明るい太陽型星の測光および分光観測

ROSAT 衛星による全天 X 線サーベイのカatalogから 15 個の天体を選び、岡山天体物理観測所の 188 cm 望遠鏡と高分散分光器 HIDES を用いた高分散分光観測を行った。さらに、2012 年度までに構築した広視野測光サーベイシステムに自転による変光をとらえやすい B-band のカメラを追加し、B,V,Ic の 3 色同時測光観測を行った。これらのデータを用いた研究から、強い X 線放射を示す太陽型星の中にも自転速度の遅い天体が含まれるこ

とが分かった(図 2; Notsu et al. 2017)。また、これらの星の自転速度は変光周期から推定した自転速度と矛盾しないことが分かった。さらに、変光振幅と彩層の吸収線の深さの相関はケプラー宇宙望遠鏡で発見されたスーパーフレア星における振幅と彩層吸収線の深さの相関と同等であることも分かった。

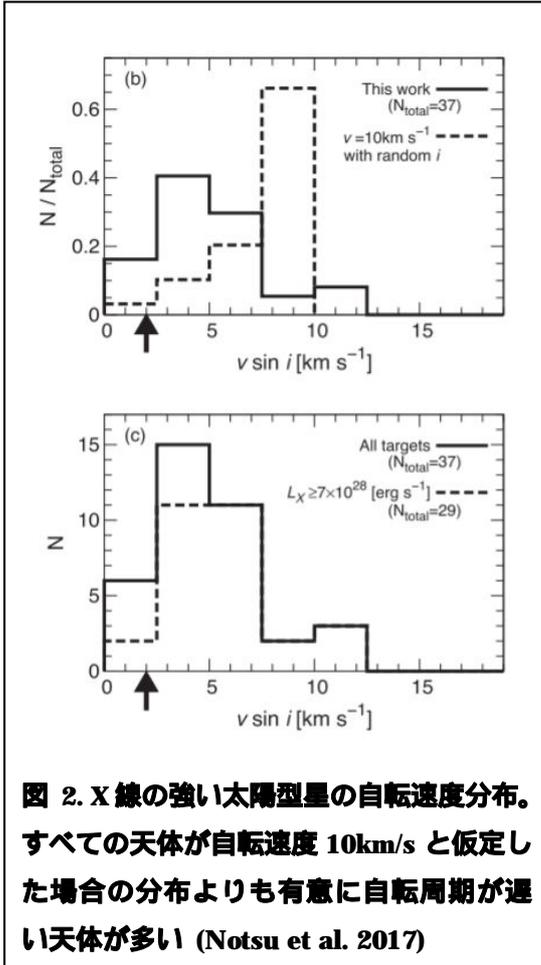


図 2. X 線の強い太陽型星の自転速度分布。すべての天体が自転速度 10km/s と仮定した場合の分布よりも有意に自転周期が遅い天体が多い (Notsu et al. 2017)

(2)ケプラー宇宙望遠鏡のデータを用いたスーパーフレアの統計的性質に関する研究
ケプラー宇宙望遠鏡の時間分解能 1 分のデータを用いて太陽型星におけるスーパーフレアの統計的性質の研究を行った。時間分解能 1 分のデータを用いて、これまでよりも継続時間の短いエネルギーの小さなフレアまで検出できる手法を開発し、最大級の太陽フレア(10^{32} erg 程度のエネルギーを解放)の数倍程度のフレアまで検出することに成功した。これらのフレアのデータから、スーパーフレアの発生頻度分布が 10^{33} - 10^{36} erg のエネルギー範囲にわたってべき関数分布となること、および太陽フレアの発生頻度分布とほぼ連続的につながることが分かった。さらに、時間分解能が高いデータを用いることで、フレアの継続時間とエネルギーの間の相関を詳細に調べることができるようになり、継続時間()とフレアのエネルギー(E)の間に $E^{0.39}$ となる関係があることを発見した(図 3)。Maehara et al. (2015)では、この相関はフレアの発生機構が磁気リコネクション

であるとすると説明できることを提唱した。

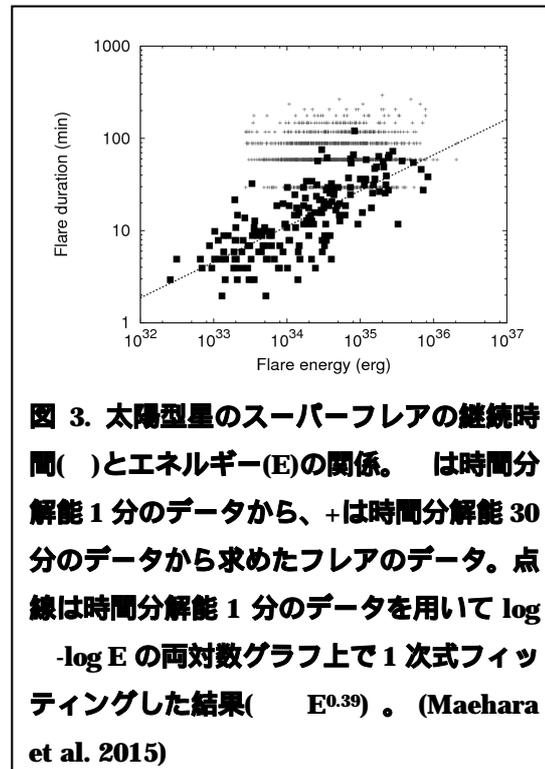


図 3. 太陽型星のスーパーフレアの継続時間()とエネルギー(E)の関係。 は時間分解能 1 分のデータから、+は時間分解能 30 分のデータから求めたフレアのデータ。点線は時間分解能 1 分のデータを用いて \log - $\log E$ の両対数グラフ上で 1 次式フィッティングした結果($E^{0.39}$)。(Maehara et al. 2015)

(3)ケプラー宇宙望遠鏡のデータを用いた恒星黒点とスーパーフレアの関係の研究
ケプラー宇宙望遠鏡で観測された約 10 万天体の太陽型星のうち、自転周期やそれに伴う変光の振幅が求められている約 6 万 4 千天体のデータを用いて、太陽型星における巨大黒点の発生頻度や黒点とスーパーフレアの関係の研究を行った。この研究により、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および変光の振幅から推定した黒点面積に依存し、自転周期が短く黒点面積の大きくなるほどフレア星の割合が高くなること、恒星黒点のサイズ分布は黒点面積(A_{spot})に対してべき分布となっており、自転周期が 20 日以上太陽型星では $A_{spot}^{-2.3}$ となり、太陽黒点のサイズ分布の延長線上にあること、あるエネルギーのフレアの発生頻度は黒点面積にほぼ比例し、太陽型星の恒星黒点-スーパーフレアの関係は太陽黒点-太陽フレアの間関係とほぼ同一であることが分かった(Maehara et al. 2017)。

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 7 件)
Maehara, H., Notsu, Y., Notsu, S., Namekata, K., Honda, S., Ishii, T. T., Nogami, D., and Shibata, K., Starspot activity and superflares on solar-type stars, Publications of the Astronomical Society of Japan (査読有), 掲載確定, (2017),

<https://doi.org/10.1093/pasj/psx013>
Notsu, Y., Honda, S., Maehara, H.,
Notsu, S., Namekata, K., Nogami, D.,
and Shibata, K., 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, id.12,
31 pp. (2017),
<http://dx.doi.org/10.1093/pasj/psw116>
Notsu, Y., Honda, S., Maehara, H.,
Notsu, S., Shibayama, T., Nogami, D.,
and Shibata, K., High dispersion
spectroscopy of solar-type superflare
stars. II. Stellar rotation, starspots,
and chromospheric activities,
Publications of the Astronomical
Society of Japan (査読有), 67, id.33,
14 pp. (2015),
<http://dx.doi.org/10.1093/pasj/psv002>
Notsu, Y., Honda, S., Maehara, H.,
Notsu, S., Shibayama, T., Nogami, D.,
and 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
(査読有), 67, id.32, 24 pp. (2015),
<http://dx.doi.org/10.1093/pasj/psv001>
Maehara, H., Shibayama, T., Notsu, Y.,
Notsu, S., Honda, S., Nogami, D., and
Shibata, K., Statistical properties of
superflares on solar-type stars based
on 1-min cadence data, Earth, Planets
and Space (査読有), 67, article id.59,
10 pp. (2015),
<http://dx.doi.org/10.1186/s40623-015-0217-z>
Candelaresi, S., Hillier, A., Maehara, H.,
Brandenburg, A., and Shibata, K.,
Superflare Occurrence and Energies on
G-, K-, and M-type Dwarfs, The
Astrophysical Journal (査読有), 792,
article id. 67, 9 pp. (2014),
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/792/1/67>
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 (査読有), 66, id.L4,
(2014),
<http://dx.doi.org/10.1093/pasj/psu012>

[学会発表](計12件)

Maehara, H., Starspot activity and
superflares on solar-type stars, 2nd
PSTEP International Symposium,
2017年3月23日, 京都大学(京都府・
京都市)

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3月17日, 九州大学
(福岡県・福岡市)

Maehara, H., Solar/Stellar Flares on
K-M dwarfs, Impact of Exoplanetary
Space Weather on Climate and
Habitability, 2016年11月29日, New
Orleans (USA)

Maehara, H., Starspot activity and
superflares on solar-type stars, IAU
Symposium 328 "Living Around Active
Stars", 2016年10月18日, Maresias
(Brazil)

前原裕之, 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 年春季年会, 2016年3
月14日, 首都大学東京(東京都・八王子
市)

Maehara, H., Statistical properties of
superflares on solar-type stars, The
first K2 Science Conference, 2015年11
月2日, Santa Barbara (USA)

前原裕之, 活動的な太陽型星の測光モニ
ター観測, 日本天文学会 2015 年秋季年
会, 2015年9月9日, 甲南大学(兵庫県・
神戸市)

Maehara, H., Statistical properties of
superflares on solar-type stars based
on the Kepler 1-min cadence data, IAU
Symposium 320 "Solar and Stellar
Flares and their Effects on Planets",
2015年8月14日, Honolulu (USA)

Maehara, H., Superflares on G-stars
discovered with Kepler mission,
VarSITI-SCOSTEP conference
"Superflares and Activity of the Sun in
the Cycle Formation Epoch", 2015年4
月29日, Tel Aviv (Israel)

Maehara, H., Statistical properties of
superflares on solar-type stars, AOGS
11th annual meeting, 2014年8月1日,
Royton Sapporo Hotel(北海道・札幌市)

Maehara, H., Statistical properties of
superflares on solar-type stars, SOLAR
AND STELLAR FLARES, 2014年6月
26日, Prague (Czech Republic)

前原裕之, 太陽型星におけるスーパーフ
レアの統計的性質, 地球惑星科学連合連
合大会 2014, 2014年5月1日, パシフィ
コ横浜(神奈川県・横浜市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

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
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・天文科学センター・
特任助教
研究者番号：20425408