

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400231

研究課題名(和文) スーパーフレア星の化学組成から探る元素合成の研究

研究課題名(英文) Nucleosynthesis studies from the chemical abundances of superflare stars

研究代表者

本田 敏志 (Honda, Satoshi)

兵庫県立大学・自然・環境科学研究所・特任助教

研究者番号：20425408

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的はケプラー衛星のデータから発見されたスーパーフレア星の化学組成を調べ、フレアによる元素合成の可能性を観測から探ることである。すばる望遠鏡に搭載された高分散分光器(HDS)を使って比較的明るい34星のスーパーフレア星を観測し、リチウム組成を調査した。リチウム組成には大きなばらつきがあり、星の大気パラメータによる依存性は見られず、最大フレアのエネルギーやフレアの回数とリチウム組成にも相関は見られなかった。フレアによるリチウム合成の明確な証拠も見られなかった。スーパーフレア星と太陽に明確な違いを発見できなかったことは、現在の太陽がスーパーフレアを起こす可能性があることを支持します。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to investigate of the possibility of nucleosynthesis of elements by stellar flares from the chemical abundances of superflare stars. We performed the high-dispersion spectroscopy of 34 solar-type superflare stars with Subaru/HDS and derived the Li abundances of these objects. We confirm the large dispersion in the Li abundance, and the correlation with stellar parameters is not seen. The maximum energy and the number of the superflare also does not show any correlation with the Li abundance. In our observations, we could not find any evidence of Li production by superflares. We could not find a clear difference between superflare stars and our Sun. These results support the possibility that our Sun could generate superflares.

研究分野：恒星物理

キーワード：恒星フレア 元素合成 リチウム

## 1. 研究開始当初の背景

(1) フレアは太陽の表面で起こる巨大な爆発現象であり、黒点付近に溜めこまれた磁場エネルギーの開放によるものだと考えられているが、詳しいことはよく分かっていない。また、フレアは恒星でも起こることが知られているが、とりわけ M 型星などの比較的低温の星で自転が速いものや、RS CVn 型など連星系の一部、また、T タウリ型星などの若い星などでは、太陽で起こる最大フレアよりも  $10\sim 10^6$  倍ものエネルギーを示す“スーパーフレア”が観測されている。太陽のような単独でゆっくり自転している星ではスーパーフレアは起きないと考えられてきた。しかしながら、近年、Kepler 衛星の測光データから太陽で起こる最大級のフレアよりもエネルギーが 2 桁以上大きなフレアを起こしている連星ではない太陽型の星が多数発見された。このことは、現在の太陽でもスーパーフレアを起こす可能性があることを示しており、もし、そうであれば地球への影響も考えられる。よって、スーパーフレアが観測された星が、どのような星なのか、実際に年齢や自転速度などどこまで太陽に似ているか、と言ったことを観測的に確認することが急務となっている。

(2) 恒星大気の化学組成は、その星が誕生した時のガス組成を保持していると考えられている。そのため、恒星の化学組成が得られれば、銀河系の元素合成史や、その起源についての情報を得ることができる。しかしながら、軽元素であるリチウムについては反応性が高く、恒星大気層下部の温度の高い部分において容易に破壊されるため、必ずしも初期組成を保持しているとは限らない。実際、太陽のリチウム組成は、現在の太陽光球の値と太陽系初期組成を反映していると思われる隕石から得られた値とで大きく違っており、これは何らかの理由によって光球のリチウムは破壊されて減少したと考えられている。ただし、現在の太陽では、表面から大気の温度の高い層までリチウムを運ぶほど対流が起こっているとは考えにくく、未だに原因ははっきりしていない。また、リチウムの生成については、宇宙初期のビッグバン元素合成と、宇宙線の破碎によるものが主であると考えられているが、近年の研究では、新星爆発で多くのリチウムを生成することが示されるなど、他にも多数の起源が考えられており、その起源を明らかにすることは天文学上重要なテーマの一つである。

## 2. 研究の目的

スーパーフレア星の化学組成を調べること、上記 2 つそれぞれ両方の問題に対して手がかりが得られる可能性がある。

(1) スーパーフレアを起こした星で、現在

の太陽と完全に一致するような星が存在するかどうか調べることが、太陽でもスーパーフレアが起こるかどうかが検証する上で重要であるが、これまでの研究では、主に測光観測のデータを使って有効温度や表面重力加速度から推定された星の半径などの値をもとに、太陽と比較されてきた。しかしながら、さらに太陽と似た星であることを示すためには、その星がゆっくり自転している、若い星ではない、と言ったことを示す必要がある。これまでの研究によって、星の自転速度と年齢、活動性はリチウム組成と概ね相関があると考えられていることから、リチウム組成を含めて太陽と似たスーパーフレアを起こす星が存在するかどうか確認することを本研究の目的の一つとした。

(2) また、スーパーフレアを起こす太陽型の星で、その化学組成に異常がないか調べ、フレアによる元素合成の痕跡が存在しないか確認することも目的であった。リチウム組成が高い星が多く存在した場合、上述したように若い星である可能性が高いのだが、フレアによる粒子加速がリチウム合成を起こし、その結果を反映している可能性もある。過去にフレアによるリチウム合成を指摘した研究もある。よって、フレアによる元素合成が起こるようであれば、宇宙の化学進化モデルに影響を与えるかどうか検討する必要があり、そのようなことが確認できればビッグバン元素合成モデルの問題に一石を投じる可能性もある。また、鉄を含む重元素についても、スーパーフレアを起こす星で何らかの特徴が見られないか確認することを目的とした。

## 3. 研究の方法

主に、高分散分光観測によってスーパーフレア星のスペクトルを得て、その吸収線から元素組成を得る。ケプラー衛星によって発見された太陽型のスーパーフレア星のうち、比較的明るいものを抽出し、すばる望遠鏡高分散分光器 (HDS) を用いて観測を行った。約 50 天体の観測を行い、そのうち連星と確認できたものを除き、残り 34 天体について詳細な解析を行った。

## 4. 研究成果

得られた高分散スペクトルの組成解析などから、主に以下のような成果を得た。

(1) スペクトルの吸収線から見積もったスーパーフレア星の有効温度や表面重力などは、それまでに見積もられていた値と大きく変わらないことを確認し、太陽型の星であることを分光観測から確認した。また、測光データから見積もられた自転速度と、分光観測から見積もられた自転速度には良い相関がみられ、太陽のような自転速度の遅いスーパー

フレア星の存在が確認された。さらに、彩層活動を反映する CaII や H 線が太陽より浅くなっており、これらの星では彩層の活動性が高いことが明らかとなった (Notsu et al. 2015a, b)。

その上で、これらの星のリチウム組成を見積もり、有効温度や自転速度との関係を調べた。その結果、一部リチウムの非常に高い星が含まれるものの、低い値を示すものが多数存在し、同じ温度の星でも大きなばらつきを示した。これは、極端に活動性の高くない、いわゆる通常の太陽型星の観測で示された傾向と同じである。また、自転速度とリチウム組成の関係を調べたところ、リチウムの高い星は、自転速度も速い星であり、これらの星は若い星であることが示唆された。このサンプルから、若い星を切り分けるために、ヒアデス星団 (年齢約 6 億年) の星のリチウム組成と比較したところ、約半分がヒアデス星団の年齢より若い星である可能性が示された。

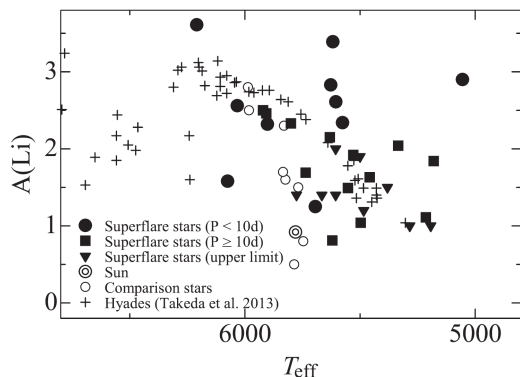


図 1 . リチウム組成と有効温度の関係。+ がヒアデス星団の星 (Honda et al. 2015)。

しかしながら、その一方で、自転が遅く、リチウム組成の低い星が存在することは、太陽のような年齢の星でもスーパーフレアを起こす可能性があることを意味する。

また、フレアの頻度や最大エネルギーとリチウム組成の関係を調べた。もし、フレアによるリチウム合成があれば、何らかの相関が見られることが期待されるが、むしろフレアを頻繁に起こしている星でリチウムが減少する傾向が見られ、今回の観測ではフレアによるリチウム合成の明確な証拠は見られなかった。ただし、フレアで合成されても、すぐに分解される可能性も考えられるので、今後はスーパーフレアが起こった直後の観測や、リチウムの同位体を調べる必要がある。今回は、このような観測を行うための観測時間は確保できなかった。

(2) その後、スーパーフレアと思われる現象が検出された B 型から K 型までの、太陽型星より広い温度範囲の星についても調査を行った。この観測には、西はりま天文台の 2m なゆた望遠鏡と分光器 MALLS を用いた。観測

で得られたスペクトルを解析した結果、多くの天体はダブルラインを示したり、極端に広がったラインを示すなど、連星系に属する天体であることが明らかとなった。また、リチウム組成についても、特に異常は見られなかった (本田、他、2016)。

(3) そこで、次のステップとして、フレアそのものの分光観測を目指し、西はりま天文台で、連続分光観測を行った。ターゲットはフレアを頻繁に起こしている、M 型星の EVLac とし、H 輝線を中心とした波長域の観測を行った。その結果、フレアによると考えられる、Ha 輝線の急激な増光とその後の減光を捉えることに成功した。

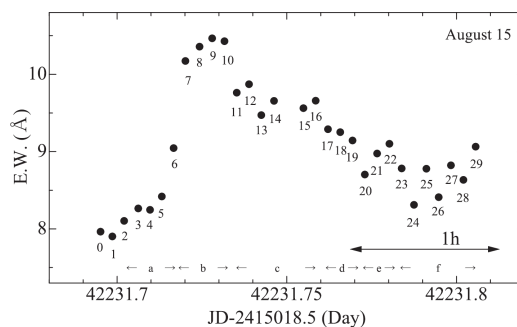


図 2 . EVLac の Ha 輝線の等価幅の時間変化。2015 年 8 月 15 日の観測 (Honda et al. 2018)。

この時の H 線プロファイルは非対称になっており、全体の増光と共に波長の短い方に広がった成分が見られた。その後、全体は弱くなりつつも、この日の観測では波長の短い成分はフレアが起こる前の状態まで戻ることは無かった。これは太陽フレアで見られる下向きガスによる赤い成分の増光とは逆である。より詳細に調べるため、各スペクトルについてフレアが起こる前のスペクトルとの差分を示した。

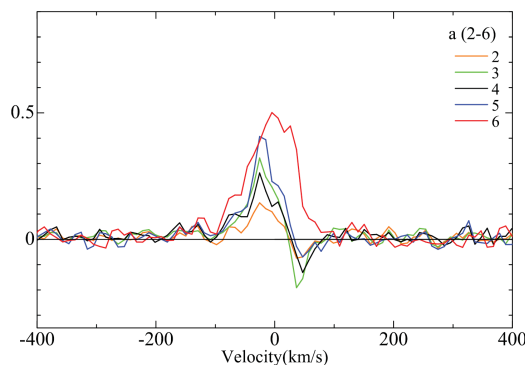


図 3 . フレア初期の差分スペクトル。

フレア初期に、青い増光成分と共に赤側に吸収成分が見られ、強度がピークに達する頃には吸収成分が一旦埋まり、減光時に再び吸収成分が現れた。この現象を太陽のフレアモデルを当てはめて説明することは難しいが、吸収成分はポストフレアループによるものと考えられる。このフレアが発生する

前のフレアによって発生したプロミネンスが吸収成分を生み出せば、このような現象を説明できる。あるいは、このフレアによる彩層蒸発がこの様な現象を生み出したとも考えられるが、詳しいことは分からない。今後、恒星フレアの連続分光観測によって、再度同様の現象が確認されることで、恒星フレアの詳細が明らかになることが期待される。

#### 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9件)

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、2018、印刷中

DOI: doi: 10.1093/pasj/psy055

Notsu Yuta、Honda Satoshi、Maehara Hiroyuki、Notsu Shota、Namekata Kosuke、Nogami Daisaku、Shibata Kazunari、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巻、2017、id 12

DOI: 10.1093/pasj/psw116

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、69巻、2017、1-13

DOI: 10.1093/pasj/psx013

Namekata Kosuke、Sakaue Takahito、Watanabe Kyoko、Asai Ayumi、Maehara Hiroyuki、Notsu Yuta、Notsu Shota、Honda Satoshi、Ishii Takako T.、Ikuta Kai、Nogami Daisaku、Shibata Kazunari、Statistical Studies of Solar White-light Flares and Comparisons with Superflares on Solar-type Stars、The Astrophysical Journal、査読有、851巻、2017、id 91

DOI: 10.3847/1538-4357/aa9b34

Hinkel, N. R.; Korn, A. J.; Asplund, M.; Beck, P. G.; Deal, M.; Gustafsson, B.; Honda, S.; Lind, K.; Nissen, P. E.;

Spina, L., Sun-like stars unlike the Sun: Clues for chemical anomalies of cool stars、Astronomische Nachrichten、査読有、338巻、2017、442-452

DOI: 10.1002/asna.201713315

本田敏志、野津湧太、野津翔太、柴山拓也、幾田佳、行方宏介、鄭祥子、猪口陸子、前原裕之、野上大作、柴田一成、MALLSによるA,F,G,and K型スーパーフレア星の分光観測、兵庫県立大学天文科学センター紀要2016年、4巻、2016、1-9

<http://www.nhao.jp/research/bulletin/docs/bl2016-1.pdf>

Honda, Satoshi; Notsu, Yuta; Maehara, Hiroyuki; Notsu, Shota; Shibayama, Takuya; Nogami, Daisaku; Shibata, Kazunari、High dispersion spectroscopy of solar-type superflare stars. III. Lithium abundances、Publications of the Astronomical Society of Japan、査読有、67巻、2015、id 85

DOI: 10.1093/pasj/psv054

Notsu, Yuta; Honda, Satoshi; Maehara, Hiroyuki; Notsu, Shota; Shibayama, Takuya; Nogami, Daisaku; Shibata, Kazunari、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巻、2015、id 33

DOI: 10.1093/pasj/psv002

Notsu, Yuta; Honda, Satoshi; Maehara, Hiroyuki; Notsu, Shota; Shibayama, Takuya; Nogami, Daisaku; Shibata, Kazunari、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巻、2015、id 32

DOI: 10.1093/pasj/psv001

[学会発表](計9件)

野津湧太、前原裕之、行方宏介、野津翔太、幾田佳、本田敏志、野上大作、柴田一成、G, K, M型星でのスーパーフレア、日本地球惑星科学連合2017年大会(国際学会)2017年

野津湧太、Suzanne Hawley、前原裕之、本田敏志、野津翔太、行方宏介、幾田佳、野上大作、柴田一成、Spectroscopic observations of solar-type superflare

stars found from Kepler short (1-min) time cadence data、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年

Honda, Satoshi; Notsu, Yuta; Maehara, Hiroyuki; Notsu, Shota; Shibayama, Takuya; Nogami, Daisaku; Shibata, Kazunari、Lithium Abundance Of The Solar-Type Superflare Stars、The 19th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun、2016

Honda, Satoshi; Notsu, Yuta; Notsu, Shota; Maehara, Hiroyuki; Namekata, Kosuke; Nogami, Daisaku; Shibata, Kazunari、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、2016

Notsu, Yuta; Honda, Satoshi; Maehara, Hiroyuki; Notsu, Shota; Shibayama, Takuya; Namekata, Kosuke; Nogami, Daisaku; Shibata, Kazunari、Statistical Properties Of Superflares On Solar-Type Stars With Kepler Data、The 19th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun、2016

Notsu, Yuta; Honda, Satoshi; Maehara, Hiroyuki; Notsu, Shota; Shibayama, Takuya; Namekata, Kosuke; Nogami, Daisaku; Shibata, Kazunari、High Dispersion Spectroscopy of Solar-Type Superflare Stars With Subaru/HDS、The 19th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun、2016

本田敏志、野津湧太、野津翔太、前原裕之、行方宏介、野上大作、柴田一成、フレア星 EV Lac の Ha 線連続分光観測、日本天文学会 2016 年春季年会、2016 年

Notsu, Y., Honda, S., Maehara, H., Notsu, S., Shibayama, T., Nogami, D., Shibata, K.、High dispersion spectroscopy of solar-type superflare stars with Subaru/HDS、XXIX IAU General Assembly、2015

本田敏志、野津湧太、前原裕之、野津翔太、柴山拓也、野上大作、柴田一成、スーパーフレア星のリチウム組成 II、日本天文学会 2015 年秋季年会、2015 年

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

本田 敏志 (HONDA Satoshi)

兵庫県立大学・自然・環境科学研究所 天文科学センター・特任助教

研究者番号：20425408