

MALLSによる A, F, G, and K 型スーパーフレア星の分光観測

本田敏志¹、野津湧太²、野津翔太²、柴山拓也³、幾田佳²、行方宏介²、鄭祥子²、
猪口睦子²、前原裕之⁴、野上大作^{2,5}、柴田一成⁵

1) 兵庫県立大学 自然・環境科学研究所 天文科学センター 西はりま天文台

2) 京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室

3) 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

4) 国立天文台 岡山天体物理観測所

5) 京都大学 大学院理学研究科 附属天文台

Spectroscopy of A, F, G, and K type Superflare stars with MALLS

Satoshi HONDA¹, Yuta NOTSU², Shota NOTSU², Takuya SHIBAYAMA³, Kai IKUTA²,
Kosuke NAMEKATA², Akiko TEI², Mutsuko INOBUCHI², Hiroyuki MAEHARA⁴, Daisaku
NOGAMI^{2,5}, and Kazunari SHIBATA⁵

1) *Nishi-Harima Astronomical Observatory, Sayo-cho, Hyogo 679-53, Japan*

2) *Department of Astronomy, Kyoto University, Kitashirakawa-Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan*

3) *Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, Japan, 464-8601, Japan*

4) *Okayama Astrophysical Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, 3037-5 Honjo, Kamogata, Asakuchi, Okayama 719-0232, Japan*

5) *Kwasan and Hida Observatories, Kyoto University, Yamashina-ku, Kyoto 607-8471, Japan*

E-mail: honda@nhao.jp

(Received 2016 November 30)

概要

我々はスーパーフレアを起こしたと思われる A-K 型の星を MALLS で分光観測を行った。今回の観測では H α 線がやや浅くなっているものがいくつか確認されたが、輝線になっているようなものは見つからなかった。自転速度やリチウム組成の解析から、興味深い天体がいくつか発見されたが、スーパーフレア星の全般的な傾向としての特徴は見られなかった。

Abstract

We performed spectroscopic observations of A - K type stars which seem to have caused superflares by using MALLS. In this observation, we have confirmed some objects which show

shallow H α line. However, we could not find any emission line object. We found some interesting objects from our analysis of rotation speed and lithium abundance. However, we could not find any features in the general trend of superflare stars.

Key words: Superflare – Spectroscopy – Lithium – Stellar flare

1. はじめに

フレアは太陽の表面で起こる巨大な爆発現象である。これは、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 (e.g., Shibata & Magara 2011) だと考えられているが、詳しいことは未だに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おり、主に X 線などで急激な増光と緩やかな減光として観測されている。これらについても基本的には太陽フレアと同じ現象と考えられているが、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。このような星では、大きな自転速度によるダイナモ効果や、伴星との相互作用によって巨大な磁場のエネルギーが生成されることによってスーパーフレアが起きるものと考えられている。そのため、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太陽型の星が多数発見された (Maehara et al. 2012, Shibayama et al. 2013)。また、これらの星では、準周期的な変光も見られ、巨大黒点の存在が示唆されている (Notsu et al. 2013b)。巨大な黒点が存在するという事は、それだけ多くの磁場エネルギーを蓄えることができることを意味し、スーパーフレアを発生する星の条件の一つとも考えられる。Shibata et al. (2013) は、太陽ダイナモ理論に基づいた計算を行い、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いる。このようなことから、スーパーフレアを起こす星の性質や、太陽でも起こるかどうかが、といったことが近年注目されている。

2. スーパーフレア星の高分散分光観測

我々はこれまでに、Subaru/HDS (Noguchi et al. 2002) を使って、スーパーフレアを起こした太陽型の星について高分散分光観測を行ってきた (Notsu et al. 2013a, Nogami et al. 2014, Notsu et al. 2015a,b, Honda et al. 2015)。解析の結果、観測した星の半数以上は連星系に属している証拠は見られず、太陽と概ねよく似た星であることが確認された。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見られ、太陽のような自転速度の遅い星の存在も多数確認された。さらに彩層活動を反映する CaII や H α 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分かった。このことは巨大な黒点の存在を裏付ける結果である。

また、若い星で年齢の指標としても使われるリチウム組成を調べた結果、スーパーフレア星のリチウム組成には大きなばらつきが見られた。リチウム (${}^7\text{Li}$) は 250 万度で反応するため、恒星大気の深い層へ対流によって運ばれることで破壊され、表面組成は減少する。そのため、若い星などでは年齢の指標として使われることが多い (e.g., Skumanich 1972)。同じ温度の星でも大きなばらつきが見られるということは、年齢に幅があると考えることができ、これらのスーパーフレア星が必ずしも若い星では無いと言える。しかしながら、活動性の高くない太陽類似星の間でも、大きなばらつきが見られることや、活動性の高い星ではリチウムが過剰に見られることなど、未だにリチウムと活動性や年齢などとの関係についてははっきりしていない部分もあるのが現状である (e.g., Takeda et al. 2010)。また、フレアによるリチウム合成の可能性も指摘されている (e.g., Canal 1974, Tatischeff & Thibaud 2007)、今のところ明確な証拠は観測されていない。

3. MALLS によるスーパーフレア星の観測

今回、我々はスーパーフレアを起こす星の性質を探るために、これまでに HDS で観測した太陽型星よりも、広い温度範囲の星について何か特徴が見られないか分光観測を行った。観測は 2013 年の 5 月から 7 月の間に西はりま天文台 MALLS を使って行われた。MALLS は西はりま天文台なゆた望遠鏡のナスミス台に搭載されている可視中・低分散分光器 (Medium And Low-dispersion Long-slit Spectrograph) で 1800, 300, 150(本/mm) の 3 種類のグレーティングを持ち、それぞれ 1.2" スリットを用いた場合に波長分解能 ($R = \lambda/\Delta\lambda$) 7500, 1200, 600(5500 Å) のスペクトルを得ることができる。1800 本のグレーティングを用いた場合、一度に撮れる波長域は約 450 Å である。

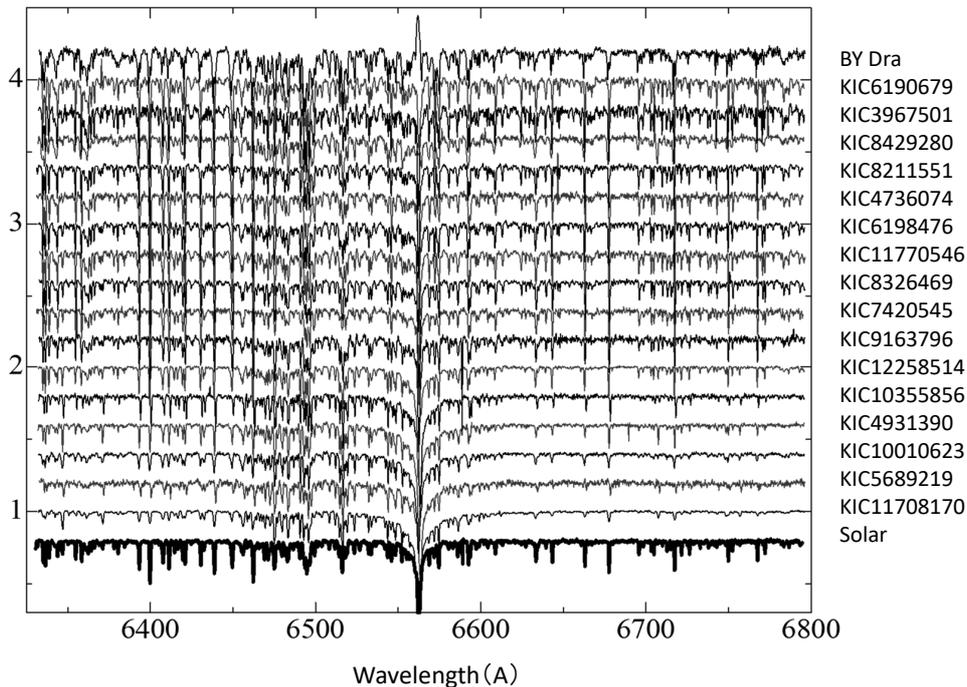


Fig. 1. 観測した G,K 型星のスペクトル。縦軸は連続光成分で規格化したものを各スペクトルごとにずらしたものの。比較のため取得した月 (太陽) と BY Dra のスペクトルも示してある。

ターゲットは Kepler の測光データの解析からスーパーフレアを起こした可能性のある明るい G,K 型と、Balona(2012) でスーパーフレアを起こしたと報告されている B,A,F 型星を選んだ。いずれも V 等級で 10 等より明るい天体を選び、スリットは最も狭い 0.8" スリットを用いることで、 $R \simeq 10,000$ のスペクトルを得ることができた。観測波長域は $H\alpha$ 付近 (6350 - 6800 Å) で、20 分から 90 分の露出で S/N は 100 から 300 程度であった。これらの分光データは IRAF¹ を用いた標準的な処理を行い、1 次元スペクトルを得た。Kepler の測光データのうち、非常に明るい天体についてはサチュレーションしたデータであり、得られた測光値は漏れ出た光を基に決めていることから注意が必要である。周辺の星の影響などによって、フレアを誤検出している可能性も否定できない。

¹ IRAF is distributed by the National Optical Astronomy Observatories, which is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc. under cooperative agreement with the National Science Foundation

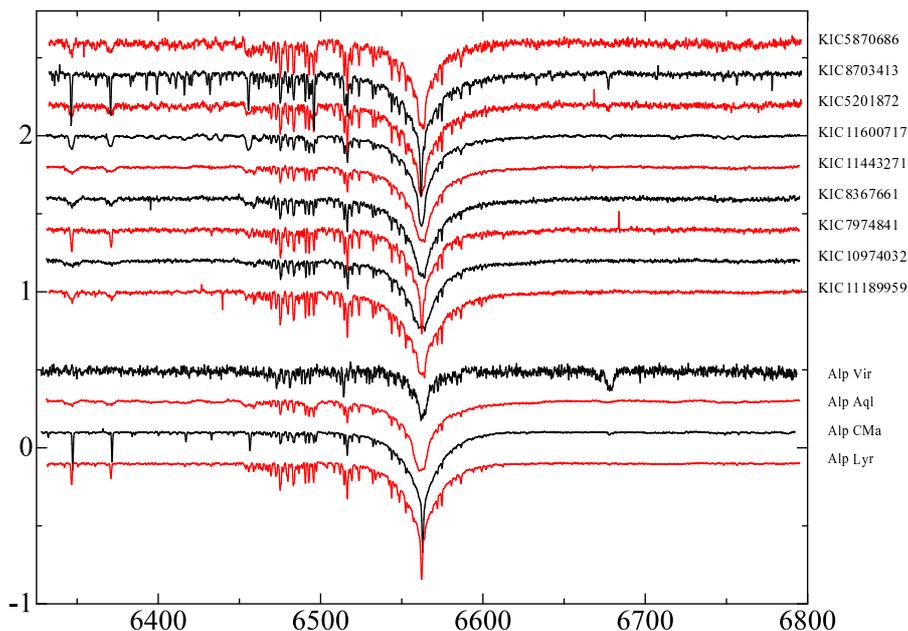


Fig. 2. 観測した星のうち B,A,F 型星スペクトルの一部。下の 4 つは比較のために取得した A 型星のスペクトルを示してある。

得られたスペクトルのうち、明確に複数の吸収線が見られるようなものは除外し、29 天体について解析を行った。観測した星は $H\alpha$ 線 (6563 \AA) がやや浅くなっているものがいくつか確認されたが、輝線になっているようなものは見つからなかった。観測した波長範囲にはリチウムのライン (6708 \AA) が含まれており、7000K 以下の星ではほぼすべての星でリチウムのラインが見られ、組成を得ることができた。また、(射影) 自転速度 ($v \sin i$) は、SPTOOL² を用いて吸収線の広がりから見積もった。 $v \sin i$ は波長分解能による制限から、 14 km s^{-1} 程度の下限值となるが、K 型と見られる星で 30 km s^{-1} を超えるものが存在した。このような星は連星 (RS CVn 型など) である可能性が高い。また、B,A 型の高温の星では、自転速度に大きなばらつきが見られるが、このような F 型より早期型星では 10 km s^{-1} 程度から数百 km s^{-1} まで広く分布することが知られている。

4. 結果と考察

4-1. 観測した星の大気パラメータと自転速度

観測した星のパラメータを表 1 に示す。太陽、59Vir、61Vir は比較のため示した。有効温度 (T_{eff})、表面重力 ($\log g$)、金属量 ($[\text{Fe}/\text{H}]$) は KIC (Kepler Input Catalog : Brown et al. 2011) から得た値である。KIC の有効温度は分光的に決められた値より 200K ほど低い傾向にあることが指摘されており (e.g., Notsu et al. 2015a)、注意が必要である。リチウム組成は、KIC の値を基に Li I (6708 \AA) のラインについてブレンドしている成分も含めて、SPTOOL でプロファイルフィッティングを行い値を見積もった。用いたラインデータ等詳細については Honda et al. (2015) で示されているものと同じである。また、 $D_{H\alpha}$ は $H\alpha$ 線の底の相対 Flux 値で $Prot$ は光度曲線の周期解析から得られた自転周期の値 (日)、 N_f は Kepler の Quarter0 から 14 の観測データで検

² <http://optik2.mtk.nao.ac.jp/takeda/sptool>

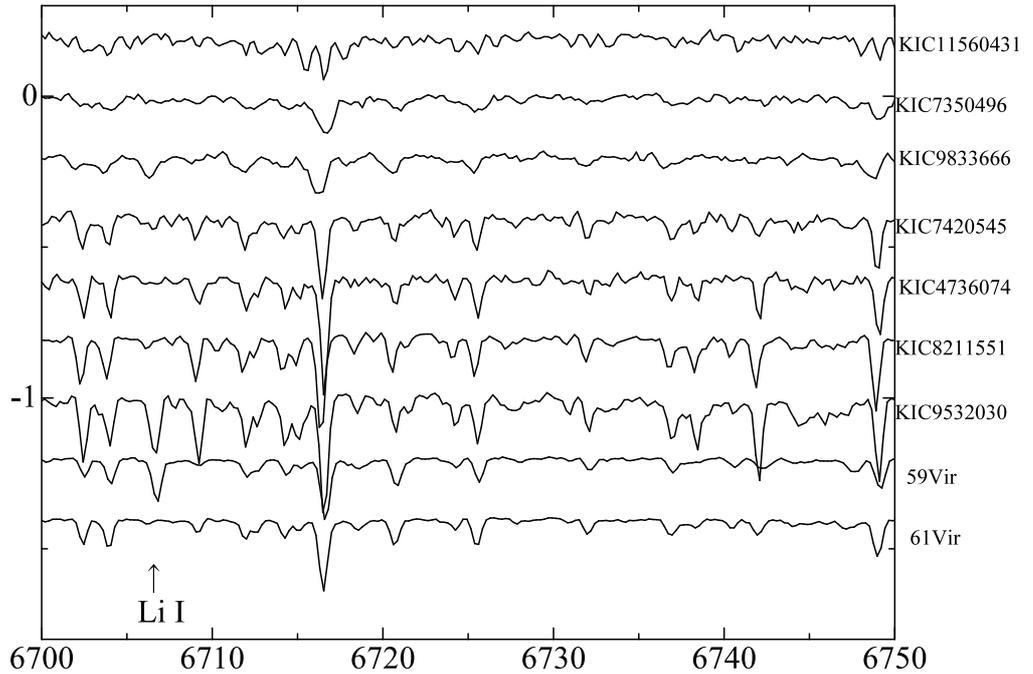


Fig. 3. G,K 型星のリチウム付近のスペクトル。KIC11560432 はラインに複数の成分が見られ、連星である可能性が高いため解析を行っていない。

出されたフレアの回数、 E_{\max} は検出されたフレアの最大エネルギー (erg)、Type は SIMBAD³ データベースより得たスペクトルタイプである。

これら解析を行った星について、全般に自転速度やリチウム組成、 $H\alpha$ 線の深さの値は広く分布しており、特に偏った傾向は見られなかった。自転速度は下限値が 14 km s^{-1} のため比較的ゆっくり自転する星について詳細な議論を行うことはできないが、KIC6190679 は $Prot$ が 37.63 日と長いにも関わらず、 $v \sin i$ の値は 15.4 km s^{-1} とやや大きな値となっている。また、G 型の星で KIC9833666, KIC7350496 は $v \sin i$ 約 25 km s^{-1} と速い速度を示した。これらの天体は連星系に属していないかなど、今後詳しく調査する必要がある。一方、KIC8703413 や KIC7974841 は $v \sin i$ が $17.4, 30.0 \text{ km s}^{-1}$ と早期型星としては小さいものが存在した。KIC8703413 については $H\alpha$ 線の深さも深くなっており、多数の吸収線が見られる。このような星は化学特異星である場合が多く、これらの星についても今後、磁場の測定など詳細な観測が期待される。一方、その他の A 型星は $v \sin i$ が 80 から 260 km s^{-1} に分布しており、典型的な値と考えられる。自転速度による影響が大きいため、 $H\alpha$ 線の深さについて直接得られた値で議論することはできないが、 $\alpha \text{ Aql}$ ($T_{\text{eff}}=7800\text{K}$, $v \sin i \simeq 200 \text{ km s}^{-1}$) の $D_{H\alpha}=0.57$ と比較してやや深い程度である。活動性が高い星であれば、吸収線がより浅くなっていることが期待されるが、特に目立った特徴は見られず、Balona(2012) で示された A 型星のスーパーフレアについて、活動性の兆候は見られなかった。B,A 型のように対流層が非常に薄い星で起こる巨大フレアは、通常モデルでは説明することができない。これらは伴星などによるフレアを検出した可能性もある。

³ <http://cdsweb.u-strasbg.fr/>

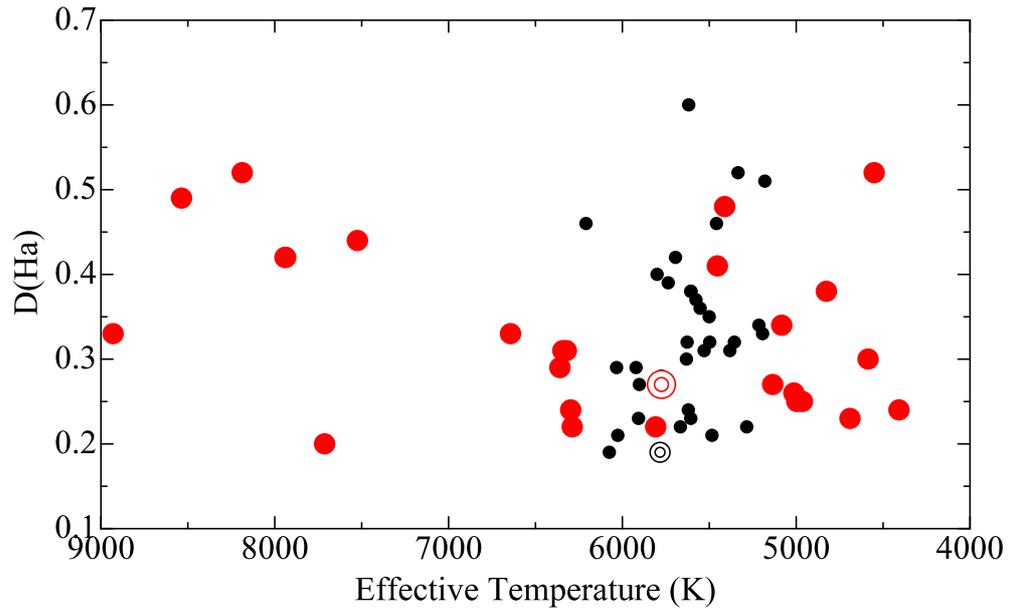


Fig. 4. 有効温度と H α 線の深さ ($D_{\text{H}\alpha}$)、 \odot は太陽の値を示す。小さい記号 ($\bullet\odot$)は HDS の観測。

4-2. 活動性とリチウム組成

Fig.5. に有効温度と今回の解析によって得られたリチウム組成を、HDSによる太陽型スーパーフレア星 (Honda et al. 2015) と太陽型星 (Takeda & Kawanomoto 2005) の観測と共に示した。リチウム組成は星の有効温度に依存することが知られており、5500K 付近で急激に減少する。これは対流層が深くなることによると考えられるため、温度の低い星でリチウム組成が高い値を示すものは若い星と考えられる。そのため、今回観測した星では、KIC8429280 を除いて極端に高い値を示すような星は無く、非常に若い星は含まれていないと考えられる。しかしながら、すでに述べたように KIC の温度の値は分光的に決めた値より 200K ほど低い傾向にあり、精度の高い観測で検証する必要がある。一方、6000K を超える星については全般に一定の高い値 ($\log A(\text{Li}) \approx 3$) を示した。また、F 型に若干見られるばらつきは Li-gap と呼ばれる現象であると見られるが、その原因はよくわかっていない (e.g., Boesgaard & Tripicco 1986, Takeda et al. 2013)。今回の観測天体全般の傾向として、これまでに観測された星のリチウム組成と比較して、極端に偏った傾向は見られなかった。

太陽型星については、自転速度が速い天体はリチウム組成が高い傾向にあり、自転速度とリチウム組成について相関がみられることが示されている (Takeda et al. 2010)。HDS で観測した太陽型のスーパーフレア星でも一部傾向から外れる星も存在したもののほぼ同じ傾向が見られた。今回の観測では太陽型よりも広い温度範囲の天体を対象としているため、 $v \sin i$ とリチウム組成にはっきりした相関は見られないが、 $v \sin i$ が大きなもの ($> 20 \text{ km s}^{-1}$) でリチウムの値が低いものは少なく、 $v \sin i$ の小さなものでは分散が大きい傾向であった。太陽型より低温の星も含まれることから単純に比較することはできないが、傾向としては同じである。

KIC7350496 の $v \sin i$ の値はやや高いものの (24.7 km s^{-1}) リチウムは低い値を示した。この天体は Balona (2015), Howell et al. (2016) らの解析では周期 10 日程度を示し、フレアが多数検出された G 型星である。この星は若い星ではない可能性が高く、視線速度の変化など今後詳細なモニタ観測が必要である。

また、活動性の高い星で見られるリチウムの過剰は、フレアによって合成された可能性も示唆されているが、今回の観測結果からは、そのような傾向は見られなかった。

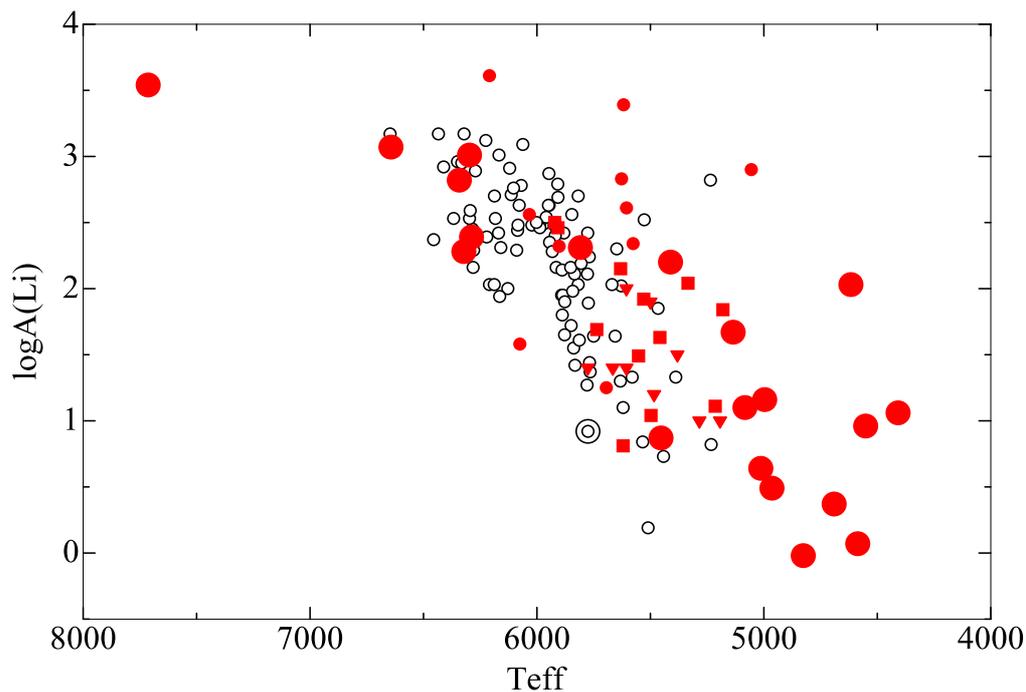


Fig. 5. 観測した星の温度とリチウム組成。小さい記号●■▼はHDSの観測 (●: $P \geq 10(\text{day})$, ■: $P < 10(\text{day})$, ▼:上限値)、○は活動性が極端に高くない太陽型星 (Takeda & Kawanomoto 2005)。◎は太陽の値を示す。

5. まとめ

MALLSを用いてスーパーフレアを起こしたと思われる天体の分光観測を行い、自転速度やリチウム組成などを調べた。今回の観測によって得られた自転速度やリチウム組成から興味深い天体が発見されたが、全体として主だった特徴は見られなかった。このことは、依然として太陽のような星でもスーパーフレアが起こる可能性を排除することはできない結果である。

本研究はJSPS 科研費 26400231、26800096、16H03955、16J00320、16J06887の助成を受けたものです。

《参考文献》

- Balona, L. A. 2012, MNRAS, 423, 3420
 Balona, L. A. 2015, MNRAS, 447, 2714
 Boesgaard, A. M. & Tripicco, M. J. 1986, ApJ, 302L, 49
 Brown, T.M., Latham, D. W., Everett, M. E., & Esquerdo, G. A. 2011, ApJ, 142, 112
 Canal R. 1974, ApJ, 189, 531
 Honda S. et al. 2015, PASJ, 67, 85
 Howell S.B., Mason E., Boyd P., Smith K.L., & Gelino D.M.. 2016, ApJ, 831, 27
 Maehara, H., et al. 2012, Nature, 485, 478

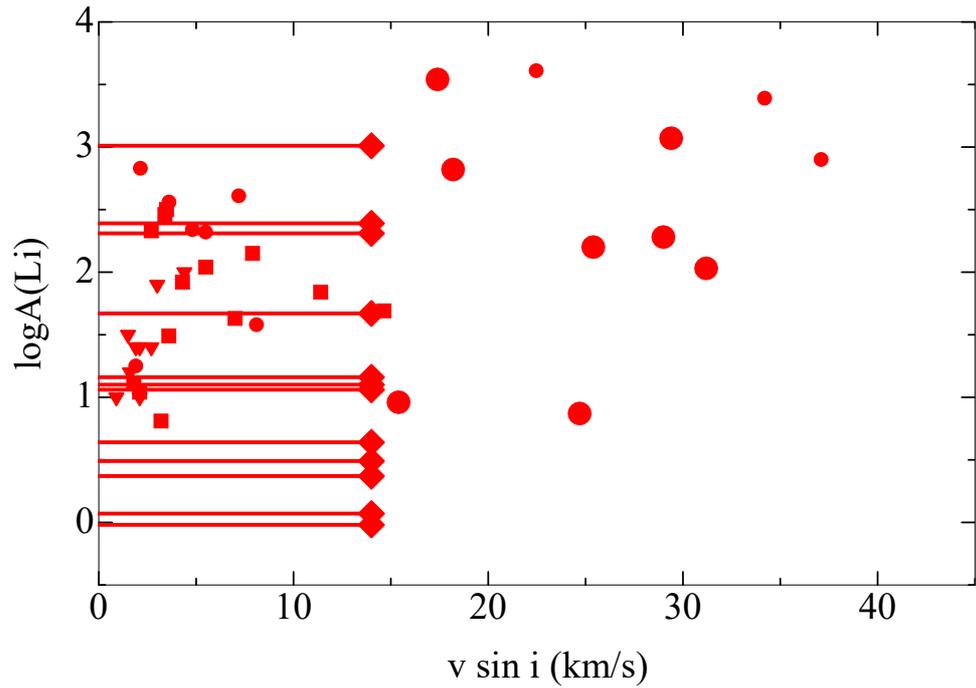


Fig. 6. 観測した星の $v \sin i$ とリチウム組成。◆は上限値。Fig.5と同じく小さい記号●■▼は HDS の観測。

Nogami, D., et al. 2014, PASJ, 2014, 66, L4

Noguchi, K., et al. 2002, PASJ, 54, 855

Notsu, S., et al. 2013a, PASJ, 65, 112

Notsu, Y., et al. 2013b, ApJ, 771, 127

Notsu, Y., et al. 2015a, PASJ, 67, 32

Notsu, Y., et al. 2015b, PASJ, 67, 33

Skumanich, A. 1972, ApJ, 171, 565

Shibata, K., & Magara, T. 2011, Living Rev. Sol. Phys, 8, 6

Shibata, K., et al. 2013, PASJ, 65, 49

Shibayama, T., et al. 2013, ApJS, 209, 5

Takeda, Y., & Kawanomoto, S. 2005, PASJ, 57, 45

Takeda, Y., Honda, S., Kawanomoto, S., Ando, H., & Sakurai, T. 2010, A & A, 515, A93

Takeda, Y., et al. 2013, PASJ, 65, 53

Tatischeff, V., & Thibaud, J.-P. 2007, A & A, 469, 265

Table 1. 観測した星のパラメータとリチウム組成

KIC ID	Star Name	T_{eff}	$\log g$	Fe/H	$v \sin i$	A(Li)	D_Ha	Prot	N_f	E_max	Type
9532030	BD+45 2930	4408	4.6	0.33	<14	1.06	0.24	-	1	-	K2III
6190679	BD+41 3238	4551	1.9	-0.30	15.4	0.96	0.52	37.63	4	1.7×10^{36}	K0
3967501	TYC3135-233-1	4586	2.9	-0.06	<14	0.07	0.30	0.11	4	6.4×10^{35}	-
8429280	TYC3146-35-1	4616	4.4	-1.35	31.2	2.03	0.88	0.58	13	1.3×10^{35}	K2V
8211551	HD173999	4690	4.6	0.52	<14	0.37	0.23	-	1	-	K0.5IIIb
4736074	BD+39 3689	4826	4.6	-0.60	<14	-0.02	0.38	-	1	-	K3V
6198476	BD+41 3307	4964	2.8	-0.47	<14	0.49	0.25	1.54	2	6.7×10^{35}	K0
11770546	HD186409	4996	2.7	-0.02	<14	1.16	0.25	0.72	1	5.3×10^{35}	K0
8326469	HD189670	5013	2.5	-0.43	<14	0.64	0.26	1.23	1	4.2×10^{35}	K0
7420545	TYC3127-104-1	5083	3.8	-0.24	<14	1.10	0.34	36.16	88	6.8×10^{35}	-
9163796	TYC3557-2118-1	5135	2.9	-0.45	<14	1.67	0.27	0.27	1	-	-
9833666	TYC3556-926-1	5411	3.7	-0.01	25.4	2.20	0.48	-	79	-	-
7350496	BD+42 3262	5453	3.7	-0.60	24.7	0.87	0.41	-	61	-	G0
12258514	HD183298	5808	4.3	0.09	<14	2.31	0.22	7.36	1	-	G0
10355856	BD+47 2934	6288	4.1	-0.53	<14	2.39	0.22	4.47	9	4.2×10^{34}	F5
4931390	BD+39 3832	6297	4.2	-0.31	<14	3.01	0.24	7.58	9	4.5×10^{34}	F8
10010623	HD183031	6322	4.1	-0.14	29.0	2.28	0.31	2.02	2	-	F8
5689219	TYC3124-797-1	6342	4.1	-0.22	18.2	2.82	0.31	1.02	3	5.5×10^{34}	-
1108172	BD+48 2887	6359	4.0	-0.10	19.5	-	0.29	1.34	2	-	F5
11708170	HD181252	6643	4.2	-0.36	29.4	3.07	0.33	0.81	2	6.8×10^{34}	F2
5870686	TYC3125-99-1	7524	3.8	-0.08	101.0	-	0.44	0.72	26	1.7×10^{35}	-
8703413	HD187254	7713	3.8	0.25	17.4	3.54	0.20	6.53	8	-	Am
5201872	HD225493	7937	3.9	-0.12	85.5	-	0.42	16.64	4	1.3×10^{35}	A2
11600717	HD177828	7941	3.6	-0.22	90	-	0.42	2.21	3	-	A3
11443271	HD176708	8187	3.9	-0.19	180	-	0.52	0.81	6	-	A2
8367661	HD184023	8536	3.9	-0.12	140	-	0.49	0.62	23	-	A0
7974841	HD187139	8930	3.8	-0.14	30.0	-	0.33	3.78	22	2.4×10^{35}	B8
1097403	HD182828	9038	3.7	-0.33	260	-	0.55	0.56	7	-	A0
1118995	HD183257	9258	4.1	-0.17	83.3	-	0.45	0.82	38	-	A0
Sun(Moon)	Sun(Moon)	5780	4.4	0.00	<14	(0.92)	0.27				
59 Vir	HD115383	6009	4.2	0.09	<14	2.82	0.29				
61 Vir	HD115617	5558	4.5	-0.04	<14	-	0.22				