

## スーパーフレアを起こした太陽型星の高分散分光観測

野津 湧太<sup>1</sup>, 本田 敏志<sup>2</sup>, 前原 裕之<sup>3</sup>, 野津 翔太<sup>1</sup>, 柴山 拓也<sup>4</sup>, 野上 大作<sup>1</sup>, 柴田 一成<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 京都大学理学研究科宇宙物理学教室, <sup>2</sup> 兵庫県立大学西はりま天文台,

<sup>3</sup> 国立天文台岡山天体物理観測所, <sup>4</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所,

<sup>5</sup> 京都大学理学研究科附属天文台

### Abstract

我々は、ケプラー宇宙望遠鏡の測光データの解析により、太陽型星 (G 型主系列星) におけるスーパーフレア (最大級の太陽フレアの  $10 \sim 10^4$  倍、 $10^{33} \sim 10^{36}$  erg のエネルギーを放出) を多数発見した。太陽フレアは、黒点周辺の磁気エネルギーが突発的に解放される爆発現象である。スーパーフレアも同様の現象と仮定すると、そのエネルギーを説明するには、巨大な黒点の存在が必要である。一方、多くのスーパーフレア星では、準周期的な明るさの変動が観測されている。その振幅は、黒点の影響による太陽の明るさの変動の振幅と比べてはるかに大きい。このことも、巨大黒点を持つ星が自転しているとすれば、説明が可能である。しかし、本当に太陽のような星で巨大黒点は存在するのか、分光観測による詳細な探査が重要である。

そこで我々は、すばる望遠鏡 HDS を用いて、スーパーフレア星の高分散分光観測を行っている。本発表では、これまでに分光観測した 50 星について報告する。観測の結果、50 星中 34 星では、連星の証拠は見られなかった。これら 34 星について、詳細な解析を行った。まず、自転の効果による吸収線の広がりや強度を測定し、星の射影自転速度を求めた。求めた値は、星の自転軸の傾斜角の影響を考慮すれば、明るさの変動 (上述) の周期から推定した自転速度と矛盾しなかった。次に、Ca II の吸収線の強度 (星の彩層活動を反映する) を測定し、星の他の性質と比較した。その結果、明るさの変動振幅との間に相関が見られた。特に、大黒点の存在が予想される明るさの変動振幅の大きな星は、例外なく高い彩層の活動性を示した。これら 2 点から、上記の明るさの変動は、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る。

## 1 Introduction

太陽の表面では、太陽フレアと呼ばれる爆発現象が頻繁に発生しており、これは黒点付近に蓄えられた磁気エネルギーが、熱や運動、放射のエネルギーへ突発的に変換される過程だと考えられている (レビュー論文例: Shibata & Magara 2011)。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 程度だが、それを上回るフレア (スーパーフレア) が太陽で発生する可能性はあるのだろうか? そのような疑問に答えるため、我々のグループでは、主に系外惑星探査に用いられているケプラー宇宙望遠鏡の高精度測光データを用いて、太陽型星 (G 型主系列星) におけるスーパーフレアを探査する研究を行ってきた。その結果、現在までに 8 万個を超える太陽型星の 500 日分の測光データを解析し、279 個の太陽型星で 1547 個ものスーパーフレア ( $10^{33} \sim 10^{36}$  erg; 最大級の太陽フレアの  $10 \sim 10^4$  倍のエネルギーのフレア) を発見するに至っている (Maehara et al. 2012; Shibayama et al. 2013)。検出したスーパーフレアの光度曲線の例を図 1 に示す。

非常に沢山のイベントを発見した事で、スーパーフレアに関する統計的研究をする事が可能になった。発生頻度分布について調べてみると、スーパーフレアの発生頻度は、太陽フレアと同様のベキ分布をしており、太陽フレアとスーパーフレアの類似性が強く示唆された (Shibata et al. 2013; Shibayama et al. 2013)。

我々は、上記の結果を踏まえ、太陽フレアの理解をもとに、スーパーフレアを理解する事が可能かという観点で更なる検討を行ってきた。上述したように、太陽フレアは黒点付近の磁気エネルギーが突発的に解放される現象である。スーパーフレアも

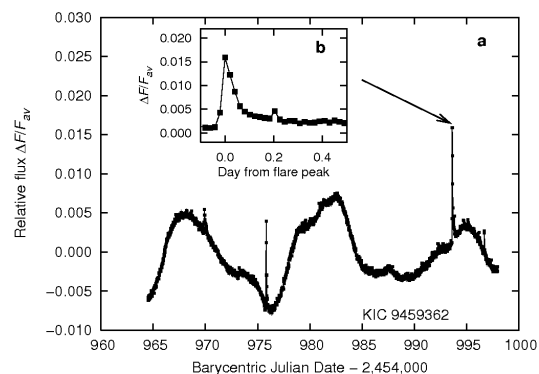


図 1: (a) スーパーフレア星 KIC9459362 の光度曲線。周期 15 日程度の準周期的変光に加えて、フレアによるスパイク状の明るさ変化が見られる。(b) 図中の矢印のフレアの拡大図。

同様の磁気エネルギー解放現象だと仮定すると、その巨大なエネルギーを説明するためには、太陽で見られるものよりもはるかに巨大な黒点の存在が必要だと考えられる。また、ケプラーの観測データを詳しく調べると、多くのスーパーフレア星では、数日から数十日程度の周期の準周期的な明るさの変動が見られた。その振幅は、典型的には数% 程度であり、黒点の影響による太陽の明るさの変動の振幅 (0.01 ~ 0.1% 程度) と比べてはるかに大きい。この変動は、星表面に大きな黒点が存在し、星の自転に伴って黒点の見え方が変化する事で生じているのだとすると、解釈が可能である (Notsu et al. 2013b)。すなわち、巨大黒点が星表面に存在する事が明るさの変動からも示唆されるといえる。しかし、上記の結果はあくまで、測光観測結果のみに

基づく結果である。

本当に巨大黒点が存在するのか、そして上述の明るさの変動が巨大黒点を持った星の自転で説明できるのか、明らかにするためには、分光観測によって、詳細な探査をする事が極めて重要である。以下の章で詳しく述べるように、星のスペクトルでは、自転速度の情報が吸収線の広がりとして反映される。また、太陽でも知られているように、黒点の存在が Ca II 線などの強度として反映される。本研究では、スーパーフレア星の分光観測を行い、これらの観点に着目して解析を行った。

## 2 観測の概要

我々は、すばる望遠鏡の高分散分光器 (HDS) を用いて、スーパーフレア星 50 星の分光観測を行った。これら 50 天体は、比較的明るいスーパーフレア星 ( $V < 14\text{mag}$ ) の中から、温度が太陽に近く、明るさ変動周期が比較的大きい (自転が遅く、太陽に似ていることが期待される) 天体を中心に選ばれた。観測期間は、2011 年 8 月、2012 年 8 月と 9 月、2013 年 6 月の 3 期間にわたっての、合計 5.5 日間である。吸収線の細かい成分を調べるため、波長分解能はそれぞれ 10 万、5 万、及び 8 万程度に設定した。波長域は、6100~8820Å であり、この波長域は、星の活動を反映する Ca II の 3 重線 (8498/8542/8662Å) や H $\alpha$  線が含まれている。また、S/N 比 (信号雑音比) については、Ca II 8542 線付近で 50~100 程度となった。なお、50 天体のうち 3 天体について、すでに Notsu et al. (2013a) 及び Nogami et al. (2014) で報告している。

50 天体の観測の結果、半数以上の天体 (34 天体) では、連星の証拠が見られず、温度や表面重力等の大気パラメータを確認した上で、単独の太陽型星だと判定された。残りの 16 天体のうち、12 天体については、スペクトル線が、2 つの星の成分が重なった形状になっていたり、複数の観測日のデータの間で視線速度の変化が見られるなどの連星としての徴候が見られた。また 4 天体については、望遠鏡を向けた時点で実視連星である事が分かった。以下では、単独星だと判定された 34 天体について、更に詳しい解析の結果を報告する。なお、観測や解析手法の詳細等については、投稿中の論文 (Notsu et al. 2014a & 2014b) で報告している。

## 3 明るさ変動周期は自転に対応するのか？

一般に、星表面の各点から出る光は、自転に伴う運動でドップラーシフトして放射される。太陽以外の恒星を観測する場合、点源であるために、星全面の光を足し合わせた状態で観測する事になる。したがって、自転によってドップラーシフトした光を足し合わせる事になり、全体としてはラインの広がりとして観測される。このラインの広がりを調べることで、自転速度を見積もる事が出来る (図 2 も参照)。ただし、太陽以外の恒星を観測する場合、太陽のように赤道方向から観測しているとは限らず、ラインの広がりから得られる値は、自転速度の視線方向への射影成分 “ $v \sin i$ ” となることに注意する必要がある ( $i$  は星の自転

軸の方向と視線方向のなす角)。具体的な  $v \sin i$  の測定方法については、Notsu et al. (2013a) および Notsu et al. (2014a) で詳細に説明している。

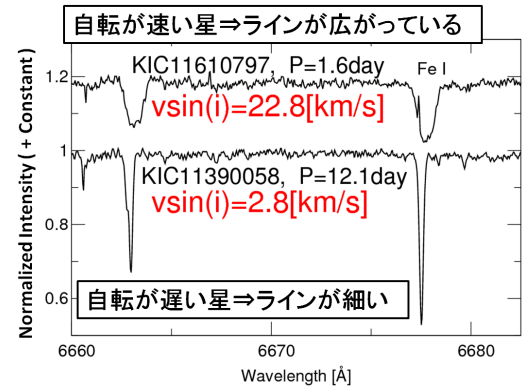


図 2: 自転速度の違いによる、吸収線の広がりの違いの例。2 星とも今回分光観測したスーパーフレア星である。

続いて、明るさの変動が自転に対応する事を確認するために、吸収線の広がりから測定した射影自転速度 “ $v \sin i$ ” と明るさの変動周期の比較を行った。まず、明るさの変動周期 ( $P$ ) から、

$$v_{lc} = \frac{2\pi R_s}{P} \quad (1)$$

( $R_s$  は星の半径) の関係式を用いて、周期  $P$  に対応する速度の値 ( $v_{lc}$ ) を導出し、それを  $v \sin i$  の値と比較した (図 3)。明るさの変動が自転と一致するならば、 $v \sim v_{lc}$  という関係が成立し、図 3 において、 $v = v_{lc}$  の近傍に全てのデータ点が位置することが期待される。しかし、太陽以外の恒星は赤道方向から観測しているとは限らないため、上述のように  $\sin i$  の効果が加わって、赤道方向から見てる場合 ( $\sin i = 1; i = 90^\circ$ ) と比べて、分光的に求めた速度  $v \sin i$  の値が小さくなる場合があると考えられる。すなわち、

$$v \sin i \lesssim v_{lc} \quad (2)$$

という関係式が予想される。

図 3 を見てみると、データ点のほとんどは、 $v \sin i = v_{lc}$  の線 ( $i = 90^\circ$ ) の下に分布しており、ここで述べた解釈 (式 (2)) と矛盾していない。また、 $i = 10^\circ$  と書かれた線の近傍に位置するような点 (赤い三角で示した点) は、特に極に近い方向から観測 (自転軸の方向と視線方向のなす角が小さい) ということになる。図 3 が式 (2) と矛盾しないということは、明るさの変動周期から求めた速度の値が、星の自転軸の傾斜角の影響を考慮すれば、分光観測で求めた自転速度と矛盾していないという事を意味している。すなわち、この結果は明るさの変動が自転で説明できると言う解釈を支持しているといえる。

図 3 について、右下に位置する点 (赤い三角で示した点) は、自転軸の方向と視線方向のなす角が小さいことが予想されると述べたが、このことは、以下に述べる議論からも確認される。まず、スーパーフレアが太陽フレアと同様の磁気エネルギー解放現象だと仮定すると、黒点付近に蓄えられる磁場のエネルギーによってスーパーフレアのエネルギーが説明可能だと予想できる。黒点に蓄えられる磁場のエネルギー  $E_{\text{mag}}$  は、黒点の磁場強

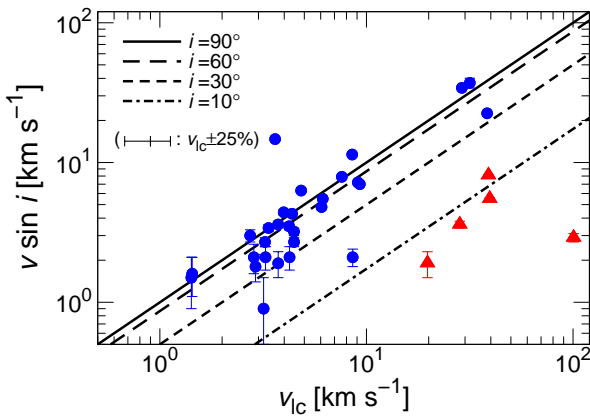


図 3: 明るさの変動周期から求めた速度 ( $v_{1c}$ ) と、分光的に求めた射影自転速度 ( $v \sin i$ ) の比較。4 本の線はそれぞれ、視線方向と自転軸のなす角度 ( $i$ ) を表す。 $i = 90^\circ$  の線が星を赤道方向から観測した場合に対応する。特に極方向から見てしまうと予想される星を赤の三角で表している。

度を  $B$ 、黒点領域のサイズを  $L$  とすると、

$$E_{\text{mag}} \approx \frac{B^2 L^3}{8\pi} \quad (3)$$

と概算できるので、黒点領域の面積を  $A_{\text{spot}}$ 、フレアのエネルギーを  $E_{\text{flare}}$  とし、 $A_{\text{spot}}^{3/2} \approx L^3$  を仮定すると、

$$E_{\text{mag}} \approx \frac{B^2 A_{\text{spot}}^{3/2}}{8\pi} \geq E_{\text{flare}} \quad (4)$$

という関係が出てくる (Notsu et al. 2013b)。不等号は、フレアのエネルギーが黒点の磁場エネルギーで説明可能という条件を表している。図 4 は、Notsu et al. (2013b) の図 10 と同様の方法で、縦軸にスーパーフレアと太陽フレアのエネルギー、横軸に黒点面積 (スーパーフレア星については、明るさの変動振幅から計算) をとった図である。太陽フレア (左下) については、黒点サイズとフレアのエネルギーの最大値の間に相関があり、基本的に、式 (4) に対応する 2 本の直線 ( $i = 90^\circ$ ) の下にきていることから、これらのフレアのエネルギーは黒点のエネルギーで説明されていることがわかる。しかし、スーパーフレアのデータ (右上) の一部については、式 (4) に対応する 2 本の直線 ( $i = 90^\circ$ ) よりも上に位置している。この理由として私達は、明るさの変動振幅から黒点サイズを見積もる際に、自転軸の視線方向からの傾き角や黒点の経度分布などの効果によって、黒点サイズの見積もりには誤差が含まれることを挙げている (Notsu et al. 2013b)。例えば、自転軸の傾き角が小さい、すなわち極に近い方向から星を観測している場合、黒点サイズを実際よりも小さく見積もってしまう。これを踏まえ、図 4 では、式 (4) に対応する線を、自転軸の傾き角 ( $i$ ) が大きい場合 ( $i = 90^\circ$ ) と小さい場合 ( $i = 2^\circ$ ) に分けて、それぞれ  $B = 1,000$  ガウスと  $B = 3,000$  ガウスの二つの場合について、引いている。するとスーパーフレアについても、すべてのデータ点が  $i = 2^\circ$  の線の下には位置する。この結果、自転軸の傾き角等の効果を仮定すれば、スーパーフレアのエネルギーが黒点のエネルギーで説明されていると、おおむね判断して良いだろうと判断される (Notsu et al. 2013b)。

上記の議論が正しいとすると、極に近い方向から観測されている星 (角度  $i$  の大きさが小さい星) は、図 4 では左上に分布する事が期待される。そこで、図 3 で特に極方向から見ていと判断された星 (図 3 では赤の三角形の点で表示) について、白三角の点で区別して図 4 の上に plot してみた。するとこれらの点は、図 4 でも左上 ( $i = 90^\circ$  かつ  $B = 3000$  の線の上) に分布している。このことから、図 3 と図 4 が consistent であると判断される。すなわち、この結果も明るさの変動が自転で説明できると言う解釈を支持しているといえる。

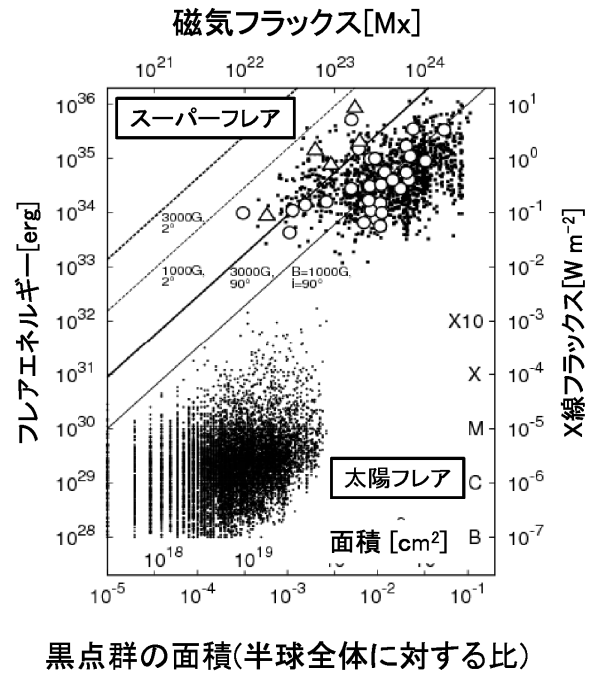


図 4: 太陽フレアのデータとスーパーフレアのデータの両方について、横軸に黒点サイズ、縦軸にフレアのエネルギーをとった図。用いたデータは、Notsu et al. (2013b) の図 10 と同じである。式 (4) に対応する直線を、視線速度からの自転軸の傾き角が 90 度または 2 度、及び磁場強度が 1,000 ガウスまたは 3,000 ガウスの計 4 つの場合に分けて書きこんでいる。白丸と白三角の点が、今回分光観測したそれぞれの星で観測された、最大のエネルギーのフレアに対応する。特に白三角の点は、図 3 で赤い三角で示された星を表している。

#### 4 Ca II 線を用いた巨大黒点の存在の検証

続いて、分光データから巨大黒点の存在の確認を試みた。Zeeman 効果等によって、黒点付近の強い磁場強度の値を直接検出することが出来れば、巨大黒点の存在を証明する事が出来ると期待される。しかし、太陽の場合と違って、星全面の観測であるために、G 型星では黒点以外の光球部分からの光が強すぎることで、そして今回の観測と比べてさらに高い S/N の観測が必要とされることをふまえると、現状では磁場の直接検出は困難である。したがってここでは、Ca II 線を用いて、磁場強度の強さを間接的に推定する事を試みた。黒点周辺の磁場が強い領域で

は、磁力線に沿ってエネルギーが輸送されて、上空の彩層が加熱され、彩層から放射される Ca II 線等の放射が増加する事が知られている (e.g., Schrijver et al. 1989)。したがって、星全体としての Ca II 線の放射強度を調べることで、間接的ではあるが、星の平均磁場強度を推定する事が出来るといえる。星の光球表面での圧力バランスをふまえると、黒点の磁場強度自体は、巨大黒点であっても太陽黒点と同オーダーだと推測されるので、星としての平均磁場強度の値は、黒点サイズの情報を反映すると考えられる。これらの事を踏まえ、以下では、Ca II 線の強度を調べ、検討を行った。

図 5 に、スーパーフレア星の Ca II 8542 及び 8498 線のスペクトルを例示した。Ca II 線のコア部分が浅くなっている星は、巨大黒点の磁場の影響によって彩層がより加熱されていると予想される。続いて、図 6 において、ケプラーで観測された明るさ変動の振幅と、Ca II 8542 線のライン中心の深さ  $r_0(8542)$  (ライン中心の強度を連続光部分の強度で規格化した値) を比較した。その結果、明るさの変動振幅と  $r_0(8542)$  の値の間に正の相関が見られた。すなわち、明るさの変動振幅の大きい星ほど、Ca II 線のコア部分が浅くなっている。1 章で触れたように、明るさ変動振幅の値は、明るさの変動が自転に対応するならば、黒点サイズの値に対応している。この事を踏まえると、明るさの変動振幅が大きく、大きな黒点の存在が予想される星は、 $r_0(8542)$  の値からも例外なく巨大黒点の存在が示唆される (Ca II 線のコア部分が浅い) という結論を得る事が出来る。

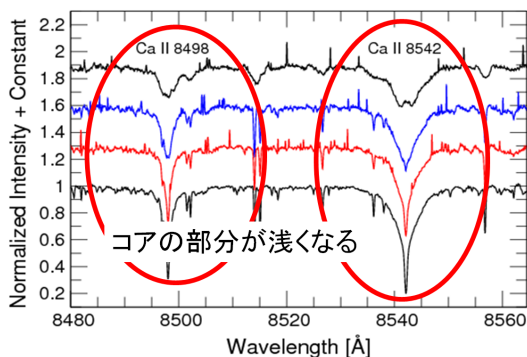


図 5: スーパーフレア星の Ca II 8542 及び 8498 線のスペクトル例。一番下は太陽類似星 18Sco(活動性低い)のスペクトル

## 5 Conclusion

すばる望遠鏡 HDS を用いて、スーパーフレア星の 50 星の高分散分光観測を行った。観測の結果、50 星中 34 星では、連星の証拠は見られなかった。これら 34 星について、詳細な解析を行った。まず、自転の効果による吸収線の広がりを測定し、星の射影自転速度を求めた。求めた値は、星の自転軸の傾斜角の影響を考慮すれば、ケプラーで観測された明るさの変動の周期から推定した自転速度と矛盾しなかった。次に、Ca II の吸収線の強度 (星の彩層活動を反映する) を測定し、星の他の性質と比較した。その結果、明るさの変動振幅との間に相関が見られた。特に、大

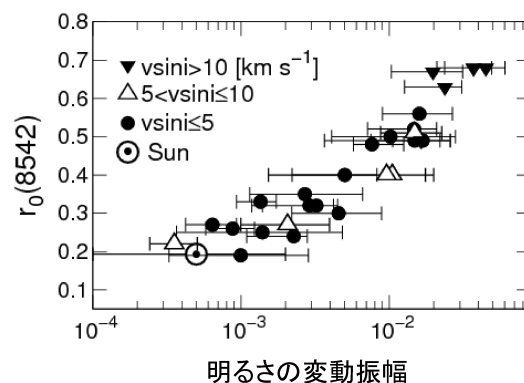


図 6: ケプラーで観測された明るさの変動振幅と、Ca II 8542 線中心の深さ  $r_0(8542)$  の比較。

黒点の存在が予想される明るさの変動振幅の大きな星では、Ca II 線の強度からも、大黒点の存在が例外なく示唆された。これら 2 点から、スーパーフレア星の示す準周期的な明るさの変動は、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る。

## Acknowledgement

本研究では、国立天文台すばる望遠鏡の共同利用観測で得られたデータを用いました。すばる望遠鏡での観測の際には、田実晃人氏をはじめとするハワイ観測所の職員の皆様に大変お世話になりました。また、分光観測データの解析の際には、国立天文台の竹田洋一氏から数多くの有益な助言を頂きました。なお、本集録原稿作成の際には、2014 年夏の学校集録用のスタイルファイルを一部改変し、使用させて頂きました。これらの方々をはじめとして、本研究に関わった全ての皆様に深く感謝します。

## Reference

- Maehara, H., Shibayama, T., Notsu, S., et al. 2012 Nature, 485, 478  
 Nogami, D., Notsu, Y., Honda, S., et al. 2014, PASJ, 2014, 66, L4  
 Notsu, S., Honda, S., Notsu, Y., et al. 2013a, PASJ, 65, 112  
 Notsu, Y., Shibayama, T., Maehara, H., et al. 2013b ApJ, 771, 127  
 Notsu, Y., Honda, S., Maehara, H., et al. 2014a PASJ, submitted  
 Notsu, Y., Honda, S., Maehara, H., et al. 2014b PASJ, submitted  
 Schrijver, C. J., Cote, J., Zwaan, C., et al. 1989, ApJ, 337, 964  
 Shibata, K., & Magara, T. 2011, Living Rev. Sol. Phys, 8, 6  
 Shibata, K., Isobe, H., Hillier, A., et al. 2013 PASJ, 65, 49  
 Shibayama, T., Maehara, H., Notsu, S., et al. 2013 ApJS, 209, 5