

## Observational studies on solar-type superflare stars (博士論文)

太陽フレアは太陽表面での爆発現象であり、黒点近傍の磁場エネルギーの突発的解放現象だと考えられている。低温度星や近接連星、自転の速い若い星(自転周期:数日以下)では、「スーパーフレア」(最大級の太陽フレア(全エネルギー  $10^{32}$ erg)の10倍以上の巨大フレア)が多数発生している事が知られてきた。一方、太陽は年をとり自転も遅い(自転周期:25日)ので、磁気活動は穏やかで、スーパーフレアは起きないだろうと考えられてきた。

私達は、Kepler 宇宙望遠鏡の測光観測データから、太陽型(G型主系列)星においてスーパーフレア(最大級の太陽フレア(全エネルギー  $10^{32}$ erg)の $10\sim 10^4$ 倍の規模の巨大フレア)現象を多数発見し(Maehara et al. 2012; Shibayama et al. 2013)、その統計解析から自転の遅い太陽類似星でも巨大黒点を持ち、最大  $10^{35}$ erg 程度のスーパーフレアが発生する可能性を提起してきた(Notsu et al. 2013; Maehara et al. 2017)。これら一連の研究では、Kepler の測光データ中に見られる準周期的な明るさ変動が、巨大黒点を持った星の自転によって生じていると解釈して、自転周期や黒点面積の議論を行ってきた。しかし、これらの研究は測光観測のみに基づいた議論で、本当に明るさ変動が自転で説明できるのか、本当に自転の遅い単独の太陽型星がスーパーフレアを起こすのか、これらの問いを解明するには、より詳細な探査が重要であった。

そこで本研究では、Kepler で発見された太陽型スーパーフレア星のうち合計64星について、すばる望遠鏡および Apache Point 3.5m 望遠鏡を用いた「高分散分光観測」を行い、その波長スペクトルの詳細な分析を行った(Notsu et al. 2015a&2015b, 2019)。その結果、まず、観測した64星のうち半数以上の星は、連星系などの証拠もなく、温度等も太陽型星(G型主系列星)で概ね矛盾ないと分かった。次に、吸収線のドップラー効果による広がり幅から星の自転速度を測定し、Ca II 8542線やCa II H&K線などの彩層由来の吸収線の強度から黒点面積の情報を推定した(図)。その結果、自転速度及び黒点サイズに関して、Kepler の結果(明るさ変動)と分光観測の結果が矛盾ないことが確認された。これにより、スーパーフレア星の示す明るさ変動が、巨大黒点を持った星の自転で説明できることが確実に became。

続いて、以前の研究で発見したスーパーフレア星から、Gaia-DR2による修正星半径データで太陽型星でない(=準巨星の混入)と判定された40%超の星を除外し、より正確に太陽型星と言える星のみを用いて、Kepler データを用いたスーパーフレアの統計について再検討を行った(Notsu et al. 2019)。その結果、以前の結果と比べ、自転周期(~年齢)の増加とともに、フレアエネルギーの上限値が連続的に減少する傾向が見え始めた。太陽類似星(自転周期25日)では、その上限値は $5\times 10^{34}$ erg程度となり、太陽においても、数千年に1回の頻度で $10^{34}$ ergを超えるスーパーフレアが発生する可能性が示唆された。一方、自転の速い若い星ではフレアエネルギーの上限は $10^{36}$ ergに達し、発生頻度も $10^{34}$ ergを超えるフレアが少なくとも数十日以下に1回は発生する、という結果だった。さらに、黒点面積の上限値について、自転が速い場合は概ね一定だが、自転周期約12日を超えると自転周期の増加とともに明確に減少すると分かった。太陽類似星では、黒点面積の上限値は太陽半球の1%程度となり、この面積の黒点の磁場エネルギーは、上述のフレアエネルギーの上限値に不足ない値である。そして、上述のフレアエネルギーと黒点面積の自転周期に対する依存性の違いから、スーパーフレア発生過程で黒点面積以外の物理量(e.g.,

黒点の構造) が影響している可能性が示唆された。

また、ROSAT 衛星の全天軟 X 線サーベイで強い X 線放射を示した、近傍の太陽型星 50 星について、岡山 188cm 望遠鏡を用いて高分散分光観測を実施し、その性質を調べることも行なった (Notsu et al. 2017)。フレア活動が活発な天体は、強い X 線放射を示すと期待されるので、X 線源と同定されている星の性質 (例えば自転速度や彩層活動性) を本研究で詳しく調べることは、近傍のフレア星の詳細な探査につながると期待される。観測の結果、X 線強度の強い星は、上記の Ca II 線で見ても、Kepler のスーパーフレア星と同様に巨大黒点の存在が示唆された。また、自転速度や星の年齢を反映する Li 組成の観点から、太陽のように年をとって自転が遅い星も含まれ、太陽に似た近傍のスーパーフレア候補星が含まれると確認された。

以上の研究から、数千年に一回の頻度で自転の遅い太陽類似星でも、スーパーフレアが生じることが測光観測及び分光観測の両面から支持された。そして、巨大黒点の存在がスーパーフレア発生の必要条件だと明らかになった。しかし、巨大黒点がどのように形成されるのか、そもそも巨大なスーパーフレアで太陽フレアと類似のエネルギーの解放過程を本当に仮定して良いのか、未だ問いが残されている。今後は、(上記 Notsu et al. (2017) で観測した X 線天体を含む) 近傍の活動的な太陽型星について、京都大学岡山 3.8m せいめい望遠鏡等を用いて分光モニタ観測を推進し、巨大黒点の時間変化の探査や、フレアそのものの分光観測を推進していくことが重要である。

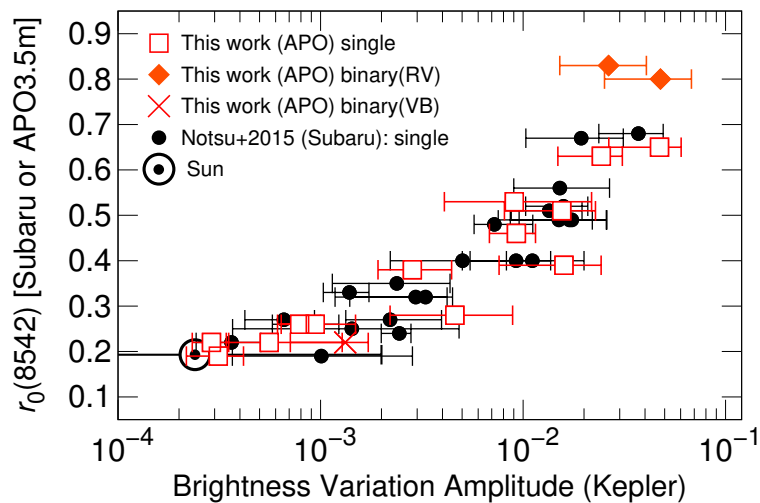


図: Ca II 8542 線中心規格化強度  $r_0(8542)$  vs. Kepler の明るさ変動の振幅 (黒点サイズに対応)

Reference:

Maehara, H. et al. 2012, Nature, 485, 478; Maehara, H. et al. 2017, PASJ, 69, 41  
 Notsu, Y. et al. 2013, ApJ, 771, 127 ; Notsu, Y. et al. 2015a, PASJ, 67, 32  
 Notsu, Y. et al. 2015b, PASJ, 67, 33 ; Notsu, Y. et al. 2017, PASJ, 69, 12  
 Notsu, Y. et al. 2019, ApJ, 876, 58 ; Shibayama, T. et al. 2013, ApJS, 209, 5

(野津湧太 記)