

小特集 俯瞰と展望：磁気リコネクション研究の最前線

4. 新たなリコネクション研究の芽

4. New Trends of Reconnection Research

4.3 恒星におけるスーパーフレア現象

4.3 Superflare Phenomenon in Stars

柴田一成

SHIBATA Kazunari

京都大学大学院理学研究科附属天文台

(原稿受付：2013年11月7日)

最近、太陽で起きている最大級のフレアの100~1000倍ものエネルギーを放出するスーパーフレアという現象が、太陽とよく似た星で大量に発見された。現在の太陽の大フレアでも、人工衛星の故障や停電、通信障害など、現代文明に様々な被害を及ぼしているため、もしスーパーフレアが我々の太陽で起きれば、全地球規模の停電や通信障害など現代文明は大惨事になることが予想される。果たしてスーパーフレアは我々の太陽で起きるのか？ 起きるとすれば頻度はどれくらいか？ また、スーパーフレアの発生メカニズムは何か？ 太陽フレアの磁気リコネクション・モデルに基づき、これらの謎の解明にせまる。

Keywords:

flares, superflares, stars, sun, magnetic reconnection, dynamo

4.3.1 はじめに

太陽フレアのメカニズムに関する研究はこの20数年で著しく進展し、その中心エンジンは磁気リコネクションであることが、ほぼ確立した(例えば, Shibata and Magara 2011[1]のレビューを参照)。その際、我が国の「ようこう」衛星(1992-2001)が大きな役割を果たした。

一方、恒星フレアについても、わが国の「あすか」衛星をはじめとするX線天文学の発展により、自転速度の速い(>10 km/s)若い星あるいは連星系中の星では、太陽フレア(10^{29} - 10^{32} erg)よりずっとエネルギーの大きなスーパーフレア(10^{33} - 10^{38} erg)が多数発生していることが明らかになってきた(例えば[2])。また、星の自転速度が大きいほど、全磁束が多くX線が強い(図1)、ということもわかってきた(例えば[3,4])。さらに、磁気リコネクション理論に基づけば、太陽フレアから恒星フレア、さらには原始星のスーパーフレアまで、共通の物理で統一的に説明できることが判明した[6]。

我々の太陽は自転速度が2 km/s程度しかないので、全磁束は少なくX線も弱い(図1)。そのため、太陽ではスーパーフレアも起こらないと考えられていた。ところが、2000年に米国のSchaeferら[7]は、過去の天文観測の記録の中から、自転速度の遅い(<10 km/s)太陽型星(G型主系列星)で、9例のスーパーフレアを発見し、驚きと呼び起こした。ただし、Schaeferらは、これらのスーパーフ

レアは、ホットジュピター(中心星のすぐ近くを回る木星程度の巨大惑星)によって引き起こされていると主張した。したがって、我々の太陽にはホットジュピターがないのでスーパーフレアは起きない、と考えられていた。Schaeferらのデータは信頼性が低く観測条件も一様ではないので、どこまで信用してよいか？ 果たして、太陽でスーパーフレアは起きるのか？

4.3.2 太陽型星におけるスーパーフレアの発見

我々は、太陽のような年老いた自転速度の小さな星ではスーパーフレアは起きない、あるいは、起きるとすれば

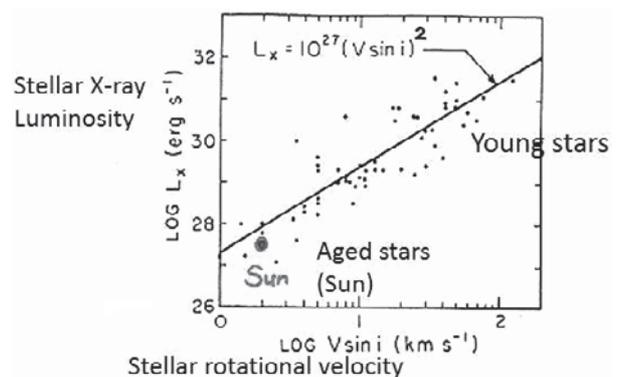


図1 恒星の回転速度とX線光度との関係([5], originalは[3])。

Kwasan Observatory, Kyoto University, KYOTO 607-8471, Japan

author's e-mail: shibata@kwasan.kyoto-u.ac.jp

ホットジュピターの存在が必要, という「天文学界の常識」を疑うところから始めた。

太陽フレアの統計的研究から, 大きなフレアも小さなフレアもメカニズム (電磁流体的リコネクション) は共通であり, エネルギーが大きくなるとフレアの発生頻度は少なくなる, ということが知られている (その関数形はべき型で, 地震の統計と似ている. 図4参照) 言い換えると, 頻度は小さくてもスーパーフレアは起きるかもしれない (!), というわけだ. もし, 通常フレアの発生頻度の経験則が, もっと大きなスーパーフレアでも成り立つならば, 最大級の太陽フレアの1000倍のスーパーフレアだと, 発生頻度は数千年に一回程度である. そのため, 数千年間, 太陽を観測し続ける必要があるが, それはもちろんできない. しかし, 星はそれぞれ星の数ほどあるので, 太陽型星を大量に観測したらよいのではないか. 1万個の太陽型星を1年間観測したら, 太陽を1万年間観測したのと同等のデータが得られよう.

さてでは, 具体的に, 大量の星をどう観測しようかと色々な人に相談していたある日, 国立天文台の関口教授から, 耳よりな話を教えてもらった. 太陽系外惑星探査衛星ケプラーは, 83000個の太陽型星を常時モニター観測しており, 30分に一回のデータが, すでに世界に公開されているという. ケプラーで観測された83000個の太陽型星を3ヶ月間観測すれば, 太陽を2万年間観測したのと同等のデータが得られる. これなら, 発生頻度の少ないスーパーフレアも見つかるかもしれない!

しかし, 83000個 \times 3ヶ月/30分のデータは膨大である. これら膨大なデータの中から, 稀なスーパーフレアを見つけ出すのは大変だ. 人手が必要である. それで, 私が学部1回生向けに開講している電磁気学入門の講義で, 「誰かスーパーフレア探査の研究を手伝ってくれる人いませんか? どうせ君たちはヒマでしょ……」と助っ人を募ったら, 意欲的な1回生が5人集まり, それで探査が始まった.

ケプラー衛星は, 星の前を惑星が横切るときの光度のわずかな減少を精度よくとらえることにより, 太陽系外惑星を検出しようというミッションであるが, 我々はその逆をやった. つまり, スーパーフレアが起これば星の明るさがわずかに増える. 最大の太陽フレアでは, 太陽全体の明るさの0.01%程度の増光にすぎないが, 100倍のスーパーフレアだと1%程度の増光があると期待される. そのわずかな増光を徹底的にサーベイしたのである.

そのような経緯でケプラー・データの解析を始めた結果, 当時1回生の柴山君の頑張りによって最初の数例が発見され (2010年12月), その後, 続々と148個の太陽型星に計365例のスーパーフレアが発見されるに至った (Maeharaら[8]). なお, その後にオープンされた500日間のケプラー・データの解析から, 279個の太陽型星で1547個のスーパーフレアが発見されている[9].

図2にスーパーフレアの典型例を示す. 縦軸が星の明るさ, 横軸が時間 (日単位) である. これを見ると, 星自身が周期数日~10日で明るさの1%程度の準周期変動を示している. 時折, スパイクのような短時間変動があるが, こ

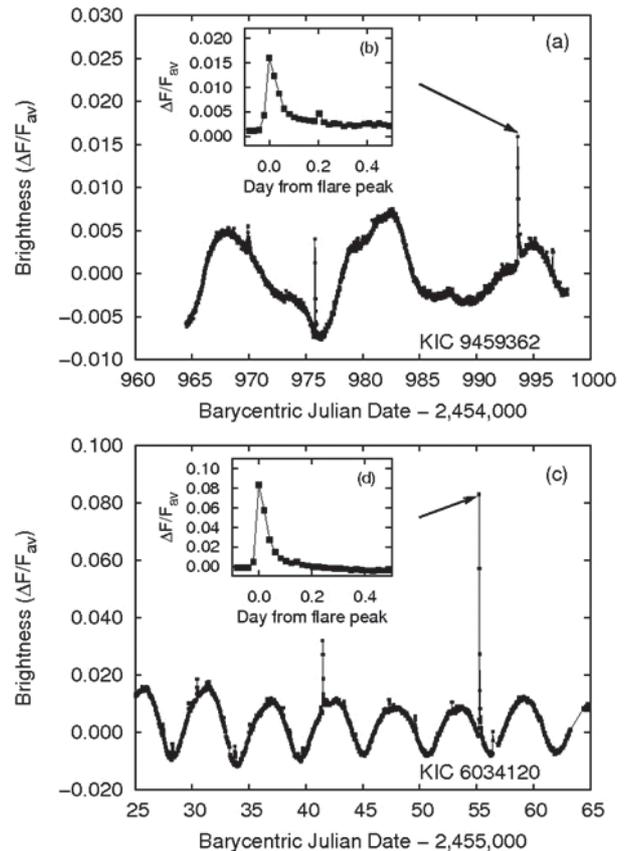


図2 太陽型星のスーパーフレアの典型例. 縦軸は星の明るさを平均の明るさで規格化したもの. 横軸は日単位の時間. 星の明るさ自身が1%程度の変動を示している. 挿入図のスーパーフレアのエネルギーを見積もると, 最大の太陽フレアのエネルギーの(a)1000倍, (b)10000倍となる[8].

れがスーパーフレアだ. 挿入図にスーパーフレアの拡大図を示す. (a)のスーパーフレアは星の明るさの1.5%もの増光を示している. また, 継続時間も0.1日, つまり2時間ほども続いている. ちなみに, これは可視光 (いわゆる白色光) 観測であり, 同じ方式で太陽フレアを観測すると, 最大級の太陽フレアでも, 太陽全体の明るさの0.01%程度の増光にしかならないし, 継続時間もせいぜい5分程度なのだ. このスーパーフレアで解放された全エネルギーを見積もるとおよそ 10^{35} ergすなわち最大級の太陽フレアの1000倍程度となる. (b)のスーパーフレアは10000倍の 10^{36} ergにもなる.

4.3.3 スーパーフレアの正体は何か?

多くのスーパーフレアを示す星の明るさの変化を調べると, ここで示したのと似たような明るさの準周期変動を示す星が多いことが判明した. これは何を意味するのだろうか?

我々は, これは星の表面に巨大な黒点があり, 星が自転をしているためではないかと考えている. 実際, そのような巨大黒点があるとして星の明るさの自転ともなう変化をモデル化してやると, 観測された星の明るさの変動が良く再現できる[10]. もちろん, これは一つの解釈であって, 自転や巨大黒点の証明になるわけではないが, 巨大黒点が

あるならば、巨大なフレアが起こることは、太陽フレアの磁気リコネクション・モデルをそのまま適用すれば、自然に理解できる。なぜなら、磁気リコネクションモデルはスケールフリーの電磁流体力学に基づいているからである。太陽フレアのエネルギーを蓄えている活動領域コロナのサイズを L とし、その空間 L^3 の平均磁場強度を B とすると、そこに蓄えられている磁気エネルギーは、 $L^3 B^2 / (8\pi)$ と書ける。 L を10万 km ($=10^{10}$ cm)、 B を100 Gとすると、磁気エネルギーは 4×10^{32} ergとなり、これが最大の太陽フレアのエネルギーに対応する。スーパーフレアのエネルギー 10^{35} ergを説明するためには、 L を10倍、つまり、100万 km ($=10^{11}$ cm) にすればよい。

活動領域とは黒点近傍の磁場の強い領域のことを指す。大きな活動領域があっても小さなフレアは無数に起きるが、ある活動領域での最大のフレアは、活動領域の体積でリミットされる。最大のフレアの体積は、母体の活動領域コロナの体積に比例するといつてよい。一方、活動領域コロナを作る元は、黒点である。黒点が小さければ、活動領域コロナは小さくなり、黒点が大きければ、活動領域コロナも大きくなる。観測された太陽フレアのエネルギーと黒点面積との関係を統計的に調べると、それぞれの黒点領域(活動領域)で起こるフレアの最大エネルギーは黒点面積の $3/2$ 乗に比例する(つまりフレアの最大エネルギーは黒点の直径の3乗に比例する)。すなわち、フレアの最大エネルギーは黒点のサイズで決まるのだ。このことから、スーパーフレアを起こしている星では、太陽の黒点(半径 ~ 1 万 km)の10倍程度のサイズ(半径 ~ 10 万 km)の巨大黒点があると予想される。実際、星の明るさの変動量は1%程度であり、これは、太陽半径(~ 70 万 km)を考えると、明るさの変動量は、(黒点半径/太陽半径) $^2 \sim 0.02$ つまり2%となり、大体合っている。

なお、読者の中には黒点の磁場の強さは色々変化しないのか?と疑問に思われる方もおられるかもしれない。黒点の磁場強度は、星の表面(光球)のガス圧で決まっている。黒点というのは、光球のガス圧で閉じ込められた磁束管(の断面)だからである。つまり黒点磁場強度は、 $B^2/8\pi = p$ で決まる。ガス圧 p は 10^5 dyn/cm 2 程度なので、磁場強度は、2000 G程度となる。(実際は、黒点サイズにより、ファクター2くらいは変わりうる。)太陽型星では年齢や自転速度によらず、光球のガス圧はほぼ一定なので、黒点磁場強度、したがって活動領域コロナの平均磁場強度も、星によらず一定であると思ってよい。

4.3.4 太陽でスーパーフレアは起きるのか?

さて、どうやら太陽型星でスーパーフレアが起きていることが確かになったが、太陽くらいの年老いた星、つまり、自転速度の遅い星では、起きているのか?

図3をご覧いただきたい。上図は、スーパーフレアのエネルギーを、その星の自転周期の関数としてプロットしたものである。星の自転周期は、前述の星の明るさの準周期変動から見積もった周期であり、あくまで、間接的な推定値であることに留意いただきたい。これを見ると、自転周

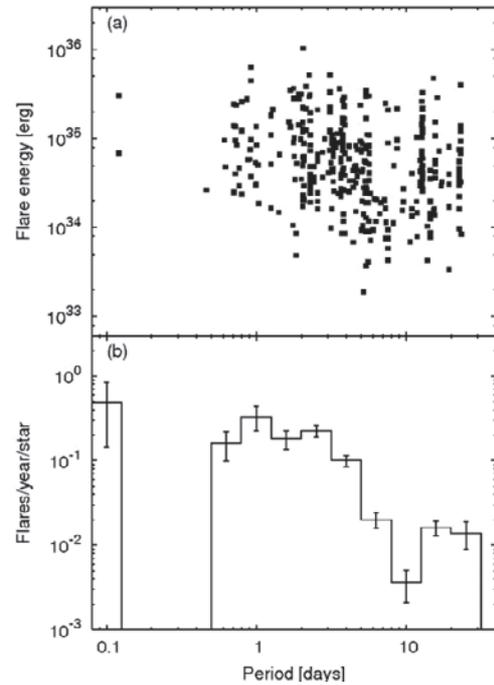


図3 太陽型星の自転周期の関数としての(上図)スーパーフレアのエネルギー、(下図)スーパーフレアの発生頻度。(Maehara et al. 2012) [8].

期が長くなっても、最大のフレア・エネルギーが減らないのが驚きである。ちなみに太陽の自転周期は約25日なので、図の右端のデータに相当する。そこでも、 10^{35} erg(最大の太陽フレアの1000倍のスーパーフレア)が起きているのだ! 下図を見ると、発生頻度は自転周期が長くなるにつれ、減ってきているので、平均すれば、図1とは矛盾していないことがわかる。

先に、Schaeferら[7]は、太陽にはホットジュピターがないから、太陽ではスーパーフレアは起きない、と主張したと書いた。これらのスーパーフレアを起こしている太陽型星ではどうなのだろうか? ここで、我々が使用しているデータがケプラー衛星のデータであることが役立った。つまり、ケプラー衛星は、太陽系外惑星探査衛星なのだ。ホットジュピターの検出には最適のデータである。それで発見された系外惑星と我々のデータを詳しく比較してみたところ、何と、これらの星には一つもホットジュピターはみつからなかった。もし、すべてのスーパーフレアがホットジュピターによって引き起こされているならば、ホットジュピターの一般的な検出確率が10%程度であることから、十数個のホットジュピターがみつかるはずである。それが一つも見つからなかったことは、少なくともホットジュピターはスーパーフレア発生のための必要条件ではない、ということの意味する。これは、それまでの常識を覆す発見であり、我々の太陽でもスーパーフレアが起きる可能性があることを示唆する!

では、発生頻度はどれくらいなのか? 図3は、太陽型星(星の表面温度が5100度 \sim 6000度で、いわゆる主系列星)の場合のデータなので、太陽(表面温度5800度)にもっとよく似た星(表面温度が5600度 \sim 6000度で、自転周期が10日

以上)に限り,発生頻度を詳しく調べてみたら,最大級のフレアの100倍 (10^{34} erg) のスーパーフレアは800年に一度,1000倍 (10^{35} erg) のスーパーフレアは5000年に一度となることがわかった.その発生頻度を太陽フレアの発生頻度と比較したものを図4に示す.

図4を見ると,興味深いことに,フレア・エネルギーの関数としてのスーパーフレアの発生頻度は,べき関数となり,太陽フレアの発生頻度のべき関数と大体一致する.このことは,スーパーフレアの発生メカニズムが,太陽フレアのそれと共通(磁気リコネクション)であることを示唆する.

4.3.5 おわりに

前節の結果,我々は,Natureへの投稿論文に次のように書いた:「最大級の太陽フレアの100倍~1000倍のスーパーフレアが太陽で発生する可能性は否定できない.その頻度は,800年~5000年に一度である.発生頻度は小さいが,これは,2年前に日本で起きた東日本大震災を起こした大地震の発生頻度(1000年に一度)と同程度である」と.ところが,Natureのレフェリーもエディターも,そんな世界を恐怖のどん底に陥れるようなことを書いてはいけないと,その文章を削るように要求してきた.それどころか,「太陽ではスーパーフレアは起きない」と書け,さらに,「図4は太陽でスーパーフレアが起きる可能性があるかのように読者を惑わせるから削除せよ」と要求してきた.しかも,「これらのレフェリーとエディターの要求に従うのが嫌なら,他の雑誌に出したらどうか」とまで言ってきた.Natureには論文をぜひ出したいが,嘘を書くわけにはゆかない.我々は大いに困惑した.まるでガリレオ・ガリレイの心境であった.

結局のところ,Nature論文に関しては,恒星のスーパーフレアの観測結果の報告ということにとどめ,思案のあげく,「Schaeferら[7]は,『太陽ではスーパーフレアは起きない』と言っている.しかし,これらのスーパーフレア星の周りにはホットジュピターはみつかっていない」と書き,その判断は読者に委ねることにした.そのかわり,別

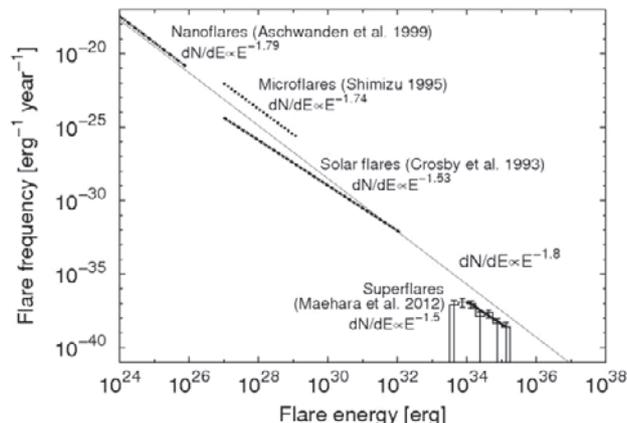


図4 スーパーフレアの発生頻度と太陽フレアの発生頻度の比較.縦軸はフレアの発生頻度,横軸はフレアのエネルギー (Shibata *et al.* 2013) [11].

の論文を書いて,そこに図4と共に我々の主張「太陽でスーパーフレアが起きる可能性は否定できない」とはっきりと書き,論文は日本天文学会のレフェリー付きジャーナル (Publ. Astron. Soc. Japan, 通称, PASJ) に投稿した.幸い論文は良識のあるレフェリーに送られ,エディターも偏見なく扱ってくれて,改訂ののち2013年6月に無事出版された (Shibata *et al.* [11]).この論文では,現代の太陽ダイナモ理論(未確立なので,現在流行っている理論)に基づき,スーパーフレアの基となる巨大黒点が太陽の差動回転によってどれくらいの時間スケールで生成されるかオーダー計算した.それによると,100倍のスーパーフレア (10^{34} erg) を発生させうる巨大黒点は8年で生成され,1000倍のスーパーフレア (10^{35} erg) だと40年かかる.ただし,このようにして生成された巨大磁束をいかにして太陽内部(対流層の底)に閉じ込めておくか,という大問題が未解決のまま残されている.この問題(巨大黒点生成のダイナモ理論)は,太陽物理学者,宇宙物理学者,そしてプラズマ物理学者へのチャレンジといえよう.

スーパーフレアの観測,特に,自転速度や黒点サイズ(あるいは平均磁場強度)の測定は,今のところ,あくまで間接的な測定であるので,今後,分光学的方法[12]により直接的に測定する必要がある.現在,京大グループで開発しつつある3.8 m新技術光学赤外線望遠鏡[13]は,太陽型星のスーパーフレアや星自身の分光観測のために世界でも適した望遠鏡であるので,その早期の完成が望まれる.

謝辞:本研究は,日本学術振興会先端研究拠点プログラム(日米欧 COE 共同研究プログラム)(小野靖・東大教授代表)より多大な支援を受けた.記して謝意を表したい.

参考文献

- [1] K. Shibata and T. Magara, Living Review in Solar Physics 8, 6 (2011).
- [2] K. Koyama *et al.*, PASJ 48, 87 (1996).
- [3] R. Pallavicini *et al.*, Astrophys. J. 248, 279 (1981).
- [4] A. Pevtsov *et al.*, Astrophys. J. 598, 1387 (2003).
- [5] T. Tajima and K. Shibata, *Plasma Astrophysics* (Addison-Wesley, 1997).
- [6] K. Shibata and T. Yokoyama, Astrophys. J. 526, L49 (1999); K. Shibata and T. Yokoyama, Astrophys. J. 577, 422 (2002).
- [7] B.E. Schaefer *et al.*, Astrophys. J. 529, 1026 (2000).
- [8] H. Maehara *et al.*, Nature 485, 478 (2012).
- [9] T. Shibayama *et al.*, Astrophys. J. Suppl. 209, 5 (2013).
- [10] Y. Notsu *et al.*, Astrophys. J. 771, 127 (2013).
- [11] K. Shibata *et al.*, PASJ 65, 49 (2013).
- [12] S. Notsu *et al.*, PASJ 65, 112 (2013).
- [13] 柴田一成:太陽大異変-スーパーフレアが地球を襲う日(朝日新書, 2013).