

特集 太陽型星におけるスーパーフレア

(3) スーパーフレアを頻発する太陽型星

柴山 拓也

〈名古屋大学太陽地球環境研究所 〒464-8601 名古屋市千種区不老町〉

e-mail: shibayama@stelab.nagoya-u.ac.jp



人類はさまざまな形で太陽からもたらされるエネルギーの恩恵を受けてきました。しかし、太陽は時にフレアによって私たちに大きな被害をもたらします。京都大学理学研究科附属天文台の研究グループでは極端に大きなフレア爆発であるスーパーフレアが太陽で起こりうるのかどうかということについて研究を進めています。特集3回目の本記事ではNature論文後の研究の発展についてと学部1回生の頃から本研究に参加した学生という視点でこの研究について述べていきます。

1. 人類文明の脅威、太陽フレア

穏やかに燃えているように見える太陽もその表面でさまざまな活動を示しています。その一つに太陽フレアがあります。太陽フレアは太陽の表面で起こる爆発で、磁力線のつなぎ替えである磁気リコネクションにより黒点の周囲に蓄えられたエネルギーが短時間に解放されることで引き起こされると考えられています。その際に解放される全エネルギーは 10^{29} - 10^{32} ergで、水素爆弾に換算すると10万-1億個程度の莫大なエネルギーです¹⁾。太陽フレアが起こるとそれに伴ってX線や高エネルギー粒子などの放射線が地球に到達します。こうした放射線は地球大気や地磁気に遮られるため地上にはほとんど届きませんが、人工衛星や宇宙ステーションには直接到達します。精密な電子機器を搭載した人工衛星は故障する可能性がありますし、宇宙飛行士は被ばくの恐れがあります。また、大きな太陽フレアが起こると地球大気が加熱されて膨張します。日本のX線天文衛星「あすか」は2000年に起こった太陽フレアの影響で膨張した大気によって空気抵抗を受けて軌道を維持することができなくなり、最終的に大気圏に突入、燃

え尽きてしまいました²⁾。

さらに、太陽フレアはコロナ質量放出(CME)を伴うことが多く、大量の物質が宇宙空間に飛び出します。幸い地球は磁気圏に守られていますからCMEが直接地上に届くことはありません。しかし、場合によってはCMEのもつ磁場と地球磁気圏の磁場が磁気リコネクションを起こし、地磁気の擾乱である磁気嵐を引き起こします³⁾。磁気嵐が起こると地磁気が大きく時間変化するため地上の送電線などに大きな誘導電流が流れることがあり、これによって送電設備や変圧器が故障し、停電を引き起こす場合があります。

実際に1989年にはそれほど大規模でない太陽フレアに伴って噴出したCMEが地球を直撃し、大きな磁気嵐を引き起こしました。その結果カナダのケベック州で9時間にわたり大規模な停電が発生しました。アメリカでも変圧器が破損するなどの被害が発生し(図1)、被害総額は数百億円であったと報告されています^{4),5)}。

2. スーパーフレアとは

このように太陽フレアは災害を引き起こしますから対策を講じる必要があります。地震や大雨な

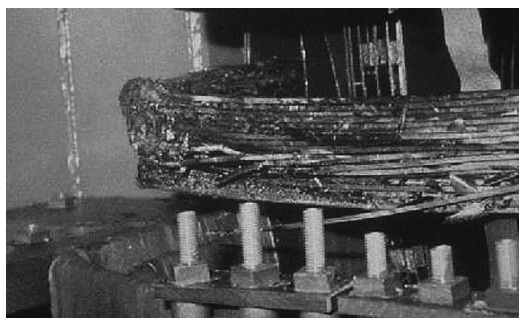


図1 1989年の太陽フレアによって引き起こされた磁気嵐で大破したアメリカ・ニュージャージー州の変圧器。

どの災害に対して備えるためには起こりうる最大の震度や降水量などを過去の経験や記録をもとに想定します。太陽フレアの場合も起こりうる最大の太陽フレアの規模というのを想定する必要があります。

いままで人類が観測した中で最も大きな太陽フレアは1859年イギリスの天文学者、リチャード・キャリントンによって観測された太陽フレアで「キャリントンフレア」と呼ばれています。解放されたエネルギーは 10^{32} erg程度であったと考えられています⁶⁾。キャリントンフレアが起こった当時は今のように電子機器は普及していませんでしたが、欧米の一部ではすでに通信システムが利用されており、磁気嵐によって発生した誘導電流によって火事が起きるなどの被害が出ました⁷⁾。

近年の社会はますます電子機器や通信、人工衛星に頼るようになってきました。これは太陽フレアに対して脆弱な社会に変化しているとも言えます。NASAの試算によるとキャリントンフレアと同程度の太陽フレアが現代に起こったら衛星障害や通信障害、電力網の破損などによって数兆円相当の被害が発生する可能性があると言われています⁸⁾。

では、私たちが今まで遭遇したことのないような大規模なフレアは太陽では起こらないのでしょうか？ 太陽物理学ではキャリントンフレアは太陽で起こる最大級のフレアであって、その10倍

以上のエネルギーを解放する「スーパーフレア」は太陽では起こらないと考えられていました。これは400年程度の太陽観測の歴史上観測されていないことが主な理由です。しかし、太陽フレアは規模の大きいものほど頻度が低くなることが知られていて、1,000年に1回しか起こらないような大フレアがあるとすればそれを観測するためには400年という観測期間は十分ではありません。このことを考えると太陽でスーパーフレアが起こる可能性は否定できないのです。そこで、本当にスーパーフレアは太陽で起こらないのだろうかという疑問のもとに始まったのがこの研究です。私たちはNASAが系外惑星探査を目的として打ち上げたケプラー宇宙望遠鏡が観測した多数の太陽によく似た星（太陽型星：表面温度が5,100度以上6,000度未満，表面重力が4.2以上）のデータからスーパーフレアを検出することを目指しました。キャリントンフレア程度の太陽フレアでも大きな被害が起きることが予想されるのですからスーパーフレアがもし太陽で起こればその被害はかなり深刻なものになると思われます。この研究は宇宙への進出を加速させている現代文明は太陽フレアによる災害をどの程度想定すべきなのかということを検討するうえで基礎となる研究と言えます。

スーパーフレアについての詳細や私たちが用いた手法については連載2の前原さんの記事をお読みください⁹⁾。

3. 学部生がNature論文の第二著者に

私がこの研究にかかわったのはまだ1回生の頃で、3回生の春には英国の科学雑誌「Nature」に第二著者として論文を発表するに至りました。そのあたりの経緯について私の視点から少し述べたいと思います。連載1の柴田一成さんの記事にもこの研究の裏話的な内容が書かれていますのでそちらもお読みください¹⁰⁾。そもそもなぜ学部1回生が研究にかかわる機会があるのかと思われる方

も多いと思いますが、授業の中で柴田さんに勧誘されたことがきっかけでした。宇宙には漠然とした興味をもっていましたが実際の天体のことなど全く知らないままにこの研究を始めました。同じように研究に参加した1回生は私を含めて5人でした。その中にはこの特集の次とその次の記事を担当する野津湧太さんと野津翔太さん（双子！）もいました。

初回のゼミで前原さんからケプラー望遠鏡が取得したデータについて簡単に説明を受け、当時独学で勉強していたプログラミング言語を用いて自動検出を試みました。今思うと非常に単純な方法でしたがなんとかフレアを検出することができ、2カ月ほどすると太陽型星でのフレアの検出にも成功しました。このことをゼミで報告したところ、柴田さん、前原さん、野上さんの先生方が驚いていたことがたいへん印象に残っています。ついこの前まで高校生だった学部1回生が出した結果を見て大学で研究をしているプロの天文学者が驚い

ているというのはそれ自体私にとって驚きでしたし、非常に良い研究のモチベーションになりました。その後、前原さんがスーパーフレア研究を本格的に始め、Nature論文として発表するに至りました。発表する際には私も第二著者として著者に加わることになりました。これが私が学部3回生の頃でした。Nature論文が発表されると国内外のさまざまなメディアで報道されましたが、第二著者が愛知県出身の学部生であると知った中日新聞の記者から研究グループではなく個人の取材も受けたこともありました（図2）。

4. 長期間データの解析

Nature論文で解析の対象としたのは約120日分のデータでしたが、ケプラー宇宙望遠鏡はその後も順調に観測を進めていましたのでNature論文を発表した頃にはすでに約500日分のデータが公開されていました。観測期間を延ばせばより多くのスーパーフレアが検出でき、統計精度が向上することが期待できますのでこのデータの解析を進めることが次の課題となりました。自動検出はNature論文のときと同様の方法で行えますが、最終的な確認は目視で行っていたので多くのフレアを一つひとつ確認していく必要がありました。最終的にはNature論文のときの4倍を超える1,547イベントのスーパーフレアを279天体の太陽型星で検出することに成功しました^{11), 12)}。

太陽型星の中でもより太陽に似ている星は特に太陽類似星（表面温度が5,600度以上6,000度以上、表面重力が4.2以上、自転周期が10日以上）と呼ばれています。太陽類似星は比較的活動性が低いためスーパーフレア検出数も少なく、Nature論文の段階では太陽類似星でのスーパーフレアは14例しか検出されていませんでした。観測期間を120日から500日に延ばしたことで太陽類似星でのスーパーフレア検出数は44例に増加しました。これによりスーパーフレアを起こす太陽類似星と太陽とのより詳しい比較が可能となりました。

恒星の超巨大爆発の発見に貢献した京大生 柴田拓也さん

銀河系の恒星の表面で起きる超巨大な爆発現象「スーパーフレア」を三百例以上見つけ出す画期的な成果に貢献。太陽で起こる可能性も指摘した京大チームの報告は英科学誌に載り、大学三年生でありながら教員らと共に著者になった。

「単なる勉強でなく研究をしてみたい」と二年生の秋から京大花山天文台の柴田一成教授の自主ゼミに参加。十六万個もの星の明るさのデータを精査し、あるかどうか分からない爆発現象を

この人



探す難課題に挑んだ。別の授業で習得したプログラミングを試し、自作のソフトで解析したら、超巨大爆発を示すクラフがいきなりポンと出た。来日の日本の天文学を背負い「見つかったじゃん。本う人材」と大鼓判を押す。愛知県東郷町出身。パソコンを見つめ、一人二十一歳。（菅原千晶）

興奮した。この結果に教授らも驚き、本格的な研究が始まった。プログラムを改良したり、英語の論文を読み込んだり、学会発表をしたり。研究だけでなく冬は趣味のスキも。多忙な学生生活を送る。「遠くには見えない星の姿をコンピュータで再現できた」と夢見作のソフトで解析したら、未定だが柴田教授は「将来の日本の天文学を背負う人材」と大鼓判を押す。愛知県東郷町出身。パソコンを見つめ、一人二十一歳。（菅原千晶）

図2 中日新聞に掲載された新聞記事。

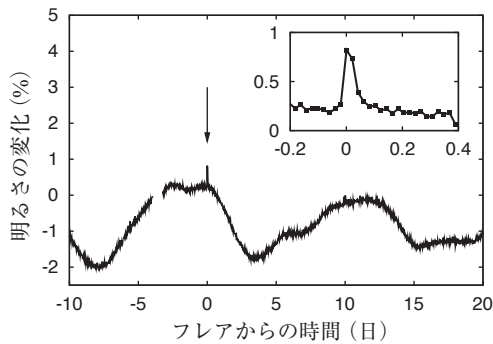


図3 フレアを起こした太陽類似星の光度曲線. 右上はフレア周辺の拡大図.

図3は今回私たちが検出した太陽類似星でのスーパーフレアの光度曲線(明るさの時間変化)の例です. 図3と図5のフレア以外の部分に見られる準周期的な光度変化の原因は表面に黒点をもった恒星が自転するために黒点が見え隠れすることだと考えられます. この点について詳しくは野津湧太さんの記事をお読みください¹³⁾.

Schaeferらによる先行研究では太陽型星のような通常活動性が低い星がスーパーフレアを起こす理由としてホットジュピターの存在により活動性が上昇するためであるという説が唱えられていました. ホットジュピターとは木星程度の質量の惑星が恒星のすぐ近くを公転しているものです. そのため, Schaeferらはホットジュピターをもたない太陽ではスーパーフレアは起こりえないと主張しました¹⁴⁾. しかし, 私たちがスーパーフレアを検出した279天体の太陽型星にはホットジュピターをもつものは一つも見つかりませんでした. このことからホットジュピターの存在とスーパーフレアを起こすほどの活動性とは必ずしも関係性はないということがわかりました. ところで, 英語版Wikipediaのケプラー望遠鏡のページにはケプラー望遠鏡による科学的成果としてスーパーフレアの観測が挙げられていますがそこには私たちの研究を引用してなんと「スーパーフレアは恒星の近くを回る木星サイズの天体によ

て引き起こされたのだろう」という趣旨のことが書かれています. 私たちの研究成果とは真逆の主張で間違いです. 読者の方でどなたか修正していただけませんか?

5. 太陽でのスーパーフレアの可能性

Nature論文を発表した際には太陽でスーパーフレアが起こる可能性について言及した部分の削除をエディターに求められ, 太陽とスーパーフレア星の比較ができませんでした. その後の研究では太陽類似星でのスーパーフレアのサンプルが増えたこともあり, スーパーフレアの発生頻度分布から太陽フレアとスーパーフレアの類似性を調査し, 太陽でスーパーフレアが起こる可能性があるのかということについて検証を行いました¹¹⁾. それと合わせてスーパーフレアを起こしている星を分光的に調べることによりスーパーフレア星と太陽がどれほど似た性質をもっているのかを直接検証しました¹⁵⁾. 分光的手法を用いた研究については特集(5), (6)の野津翔太さん, 野上さんの記事で詳しく述べますのでここではスーパーフレアと太陽フレアの発生頻度分布から両者の類似性について見ていきます.

太陽フレアでは規模の大きいものほど発生頻度が低いことが知られています. 具体的にはフレアで放出されるエネルギーが10倍になると発生頻度は約10分の1になることが観測的に確認されています. 図4は各エネルギー範囲でのフレアの発生頻度分布で, 実線の直線は太陽で起こったナノフレア, マイクロフレア, フレアの発生頻度分布を示しています. 太陽で起こるフレアの発生頻度は 10^{24} – 10^{32} ergの8桁というたいへん広い範囲でおおむね同じ直線上に分布することがわかります. この直線分布は太陽で起こるフレアの特徴的の性質なのです. そして私たちの興味はこの直線がどれほど高いエネルギー範囲まで延びているかということになります. それに対して実線のヒストグラムは私たちが検出した太陽類似星での全スーパー

フレアから計算したスーパーフレアの発生頻度分布です。おおむね太陽フレアとスーパーフレアの発生頻度分布が同一の直線上に載っていて、共通の性質をもっていることがわかります。太陽フレアとスーパーフレアが共通の性質をもっているのなら太陽でもスーパーフレアが起こる可能性があります。ただし、 10^{34} ergのスーパーフレアは数百年から千年に1回程度の低い頻度でしか起こらないことが読み取れます。

太陽の活動性には周期性があり、約11年周期で活動的になったり（極大期）、あまり激しい活動を示さなくなったり（極小期）します。そのため、太陽フレアの発生頻度は観測をする時期に

よって異なります。図4中の青い直線で示したのは太陽フレアのX線での観測から極大期と極小期のフレア発生頻度を求め、それを外挿したものです。ケプラーの観測は活動周期の特定の時期などではなくランダムに観測したものであるので活動周期の平均を取ったものだと考えられます。図4を見るとスーパーフレアの発生頻度はちょうど極大期、極小期を表す二つの直線の間位置しています。つまり、太陽の活動性の平均と一致するのです。このことからスーパーフレアを起こすような星も長期間の平均的な活動度は太陽と同程度であると考えることができます。

点線のヒストグラムで表したのは特に活動的な太陽類似星のみを集めて計算した頻度分布です。太陽でのフレア分布を示した青い直線より上にきていることから活動性が高いことがわかります。この分布がどれほど上に位置しているかというのが星の活動性がどれほど高いかということを表していますが、図4を見てみるとこれらの星は太陽の極大期に予想されるよりも100倍程度頻繁にスーパーフレアを起こしていることがわかります。このような星は太陽類似星のうち2,000個に1個程度の割合で存在するので、太陽類似星がみな同様の性質をもっていると仮定し、仮に活動的な期間が1年程度とすれば、2,000年程度に1回の割合でそのような非常に活動的な周期に突入する

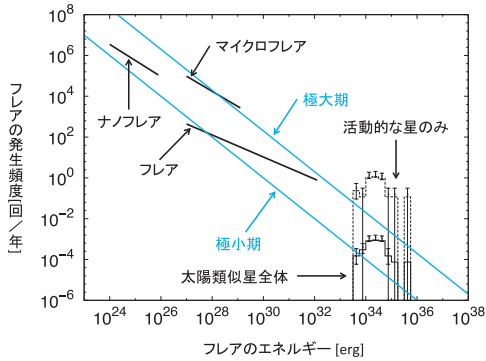


図4 各エネルギー範囲でのフレアの発生頻度分布。太陽の極大期と極小期の頻度分布（青直線）のちょうど真ん中にスーパーフレアの発生頻度が位置していることがわかる。

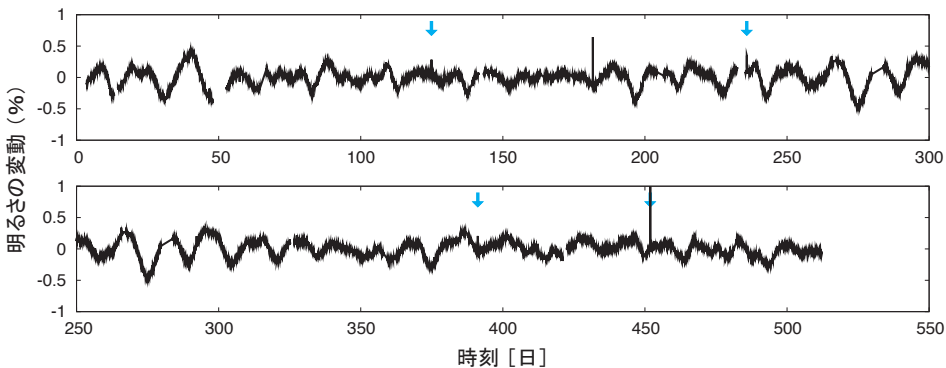


図5 多くのスーパーフレアを起こした太陽類似星 KIC10471412。約500日間に4回のフレアが検出された。図の上部にある青い矢印はスーパーフレアが検出されたタイミングを表しています。

と解釈することもできます。もしそうであれば地球上にスーパーフレアの記録が残っていてもよさそうなものです。実際、屋久杉の年輪中の放射線同位体の測定からスーパーフレアの痕跡らしきものが見つかっています¹⁶⁾。今後の研究でほかにもスーパーフレアの痕跡が見つかるかもしれません。

6. スーパーフレアを頻発する太陽型星

スーパーフレアを起こしたそれぞれの星について詳しく見ていくと特に激しい活動性を示す天体が存在することがわかりました。なかには自転周期が15日程度と割と長いにもかかわらず約500日の観測期間の間に4回のスーパーフレアを起こした太陽類似星や26日程度と非常に太陽と近い自転周期をもつにもかかわらず2回のスーパーフレアを起こした太陽類似星も発見されました。自転周期5日程度の太陽型星では観測期間の間に57回ものスーパーフレアを起こした極端な天体も存在しました。つまり、10日に1回以上の頻度でスーパーフレアを起こしていることとなります。図5は最もたくさんスーパーフレアが検出された太陽型星の光度曲線です。多くのフレアが検出されていることがわかります。宇宙生物学ではさまざまな星の周りを回る惑星で生命が誕生、生存できるかどうか（ハビタビリティ）という検討がされていますが、このような恒星の極端に高い活動性がハビタビリティにどのような影響を与えるのかということもたいへん興味深く、今後検討していきたい点です。

参考文献

- 1) Shibata K., Magara T., 2011, Living Review in Solar Physics 8, 6
- 2) Watari S., 2006, J. Plasma Fusion Res. 82(11), http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2006_11/jspf2006_11-739.pdf
- 3) 上出洋介, 2011, 「太陽と地球のふしぎな関係」, 講談社ブルーバックス
- 4) <http://sunearthday.gsfc.nasa.gov/2010/TTT/70.php>
- 5) http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/06may_carringtonflare/
- 6) Tsurutani B., 2003, JGR 108, 1268
- 7) Loomis E., et al., 1861, AmJS 32, 318
- 8) <http://news.nationalgeographic.com/news/2011/03/110302-solar-flares-sun-storms-earth-danger-carrington-event-science/>
- 9) 前原裕之, 2014, 天文月報 107, 260
- 10) 柴田一成, 2014, 天文月報 107, 253
- 11) Shibayama T., et al., 2013, ApJS 209, 5
- 12) Maehara H., et al., 2012, Nature 485, 478
- 13) 野津湧太, 2014, 天文月報 107, 367
- 14) Schaefer B. E., et al., 2000, ApJ 529, 1026
- 15) Notsu S., et al., 2013, PASJ 65, 112
- 16) Miyake F., et al., 2013, Nature 486, 240

Solar Type Stars with Many Superflares

Takuya SHIBAYAMA

Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

Abstract: Living things on the Earth including human being are getting a lot of benefit from the Sun. Solar flares, however, sometimes cause damage to our civilization. Our research group at Kyoto University is investigating whether the Sun can exhibit extremely large flares, or "superflares." In this third article of the special feature, I will discuss the progress of this study after our Nature paper.