

特集：太陽型星におけるスーパーフレア

(1) スーパーフレア研究はいかに始まったか

柴田一成

〈京都大学理学研究科附属天文台 〒607-8471 京都市山科区北花山大峰町 京大花山天文台〉

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



一昨年（2012年5月）、京大理学研究科附属天文台の恒星研究グループによる「太陽型星のスーパーフレア」の研究結果がNature誌に出版され、新聞やTV、海外のメディアにまで取り上げられ、大きな話題となりました。本特集では、この研究について、経緯や裏話も交えながら、わかりやすく解説をしていきます。第1回は、研究はいかに始まったのか、という裏話をおもに紹介したいと思います。

1. フレアとは？

太陽の表面で起きている爆発（太陽面爆発）のことを、フレア¹⁾と言います。黒点の近くで発生し、典型的には1-10万km四方の面積が、突然H α 線やX線で明るく輝き、数分-数時間続きます（図1）。解放される全エネルギーは、 10^{29} - 10^{32} erg程度。これは水素爆弾にたとえると、10万個-1億個くらいのエネルギーに相当します。

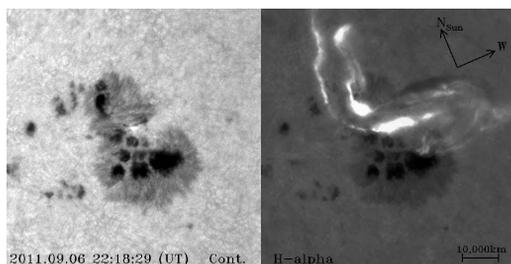


図1 太陽フレアの典型例（2011年9月7日JST）。飛騨天文台にて撮影。左図：可視連続光（白色光）、右図：H α 単色像。これはいわゆるXクラスフレアと分類される大フレア（エネルギー 10^{31} erg程度）。白色光で輝点が見えており、白色光フレアと呼ばれる。

太陽系最大の爆発現象です。1859年に英国のキャリントン²⁾が黒点スケッチ（図2）中に発見してから、150年あまり経ち、近年、ようやく、その全貌が明らかになってきました。エネルギーの源は黒点近傍の太陽大気中に蓄えられた磁気エネルギーであることが20世紀中頃にまず確立し、わが国の「ようこう」衛星の活躍などにより、磁気リコネクション（磁力線つなぎかえ）というメカニズムで磁気エネルギーが解放されていることが、20世紀最後の10年にほぼ確立しました¹⁾。ただし、磁気リコネクションはプラズマ物理学の最難問の一つであり、まだ、その基礎物理は確立

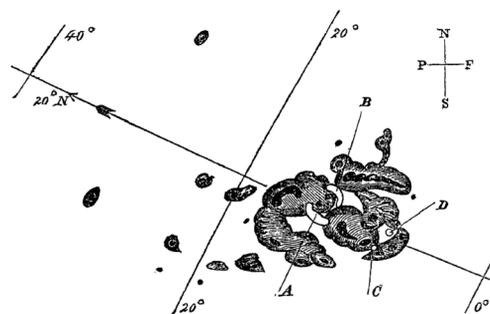


図2 キャリントン・フレアのスケッチ²⁾。白い部分（A-D）がフレア（白色光フレア）。

していません。また、いかにして磁気リコネクションが始まるか？ という、いわゆるトリガー（引き金）問題も全く未解決の状態です。

2. キャリントン・フレア

フレアが発見された19世紀中頃は、フレアが地球に影響を与える、などという考えは、馬鹿げた考えだと思われていたようです。しかし、キャリントンの観測したフレアから、わずか17時間後に地球の各地、しかも、ハワイとかキューバのような南方の島々で巨大なオーロラが観測されていました。実は、キャリントンのフレアはこの200年間で最大の磁気嵐³⁾を地球にもたらしたのです。

磁気嵐というのは、地球磁場の変動のことを言います。太陽フレアから飛び出した大量の磁気プラズマが地球磁気圏に衝突・侵入すると、地球磁気圏や電離層に大電流が励起されます。そのため地球磁場が激しく変動するのです。磁場が時間変化すると伝導体に電流が流れることはよく知られていますが、その誘導電流が地球のあちこちの伝導体で流れるのです。キャリントンの時代は150年も昔なのですが、当時すでに、電信機システムが北米とヨーロッパで使われていました。送電線に大量の電気が流れて火花放電が起き、そのせいで火事が発生したという記録が残っています。現代では、世界中に送電線がはりめぐらされているので、その被害はキャリントンの時代の比ではありません。キャリントンの見たフレア (10^{32} erg程度あるいはそれ以上) よりも小さなフレア (10^{31} – 10^{32} erg程度) でも、大磁気嵐が起きて、北極圏の都市で停電が起きたりしています。電離層が変動するので、短波通信が届かなくなる通信障害も頻繁に起きています。それどころか、今は宇宙時代です。大気圏外を飛んでいる人工衛星にとってはフレアから飛んでくる放射線は大敵です。しょっちゅう人工衛星は故障します。宇宙ステーション中の宇宙飛行士はフレア放射線による

被ばくの恐れもあるのです。地上のわれわれは幸い厚い地球大気に守られて太陽フレア放射線による被ばくの心配はありませんが、高度に発展した現代文明は太陽フレアの影響によって、いとも簡単に被害（停電、通信障害、人工衛星故障）を受けるような社会になってしまいました。そのため、地上の天気予報と同様に、「宇宙天気予報」⁴⁾の確立が緊急の課題となっています。

さて、キャリントン・フレアが再び発生したら、どんな恐ろしいことが起こるのでしょうか？ NASAなどによる推算によれば、大停電や人工衛星故障のため、最大で数兆ドルの被害が出るかもしれない⁵⁾、とのこと。いや、もしキャリントン・フレアよりも大きなフレア（これをスーパーフレアと呼びます）が起きたら、地球文明はもっとたいへんなことになるかもしれません。そんな可能性はないのでしょうか？ それが本稿および本特集の主題です。

3. フレアの発生頻度

長年のフレア研究により、フレアの発生頻度は、「フレアのエネルギーが10倍になると、発生頻度は大体10分の1になる」という経験法則に従うことがわかってきました。おもしろいことに、この法則は地震の発生頻度の法則とよく似ています。図3に観測から明らかにされたフレアの発生頻度とエネルギーの関係を示します。縦軸、横軸ともに常用対数スケールであることに注意ください。さきほど書いたように 10^{29} – 10^{32} ergの爆発現象がフレアです。それより小さな爆発現象はマイクロフレアとかナノフレアと呼ばれます。キャリントン・フレアの正確なエネルギーはよくわかりませんが、 10^{32} ergかそれ以上（最大 10^{33} erg）ではないかと推定されています。

10^{33} erg以上のフレア、すなわちスーパーフレアは、果たして太陽で起きるのでしょうか？ 起きるとすれば、どれくらいの頻度で起きるのか？ もしフレアの発生頻度の経験法則が、 10^{33} erg以上

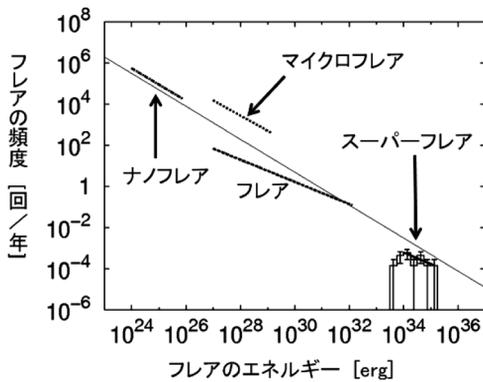


図3 フレアの発生頻度 vs. エネルギー. 縦軸はフレアの発生頻度 (発生数/年), 横軸はフレアのエネルギー (erg). ナノフレア (10^{23} - 10^{25} erg), マイクロフレア (10^{26} - 10^{28} erg), フレア (10^{29} - 10^{32} erg) は, ともに大雑把に類似のエネルギーのべき乗則 (灰色の直線) で頻度が下がる. 最大級の太陽フレアの1,000倍のエネルギー (10^{35} erg) のフレアは, スーパーフレア星では5,000年に1度程度の頻度であることを示している.

のエネルギーのスーパーフレアでも成り立っているなら, 図3からわかるように, 最大級のフレア (10^{32} erg) より, 100-1,000倍エネルギーの大きなスーパーフレア (10^{34} - 10^{35} erg) は1千年-1万年に1回程度の頻度になります. さらに, 1-10万倍 (10^{36} - 10^{37} erg) という極端なスーパーフレアだって, 頻度は10-100万年に一度とまれですが, 起こるかもしれません! すると, 大気の底の地上にも大量のフレア放射線が降り注ぎ, 地上の生命は大絶滅を起こすかも…? 10-100万年などという長い時間は考えるだけ時間の無駄と思われるかもしれませんが, 現世人類がアフリカで生まれたのが20万年前, オーストラロピテクスで数百万年前ですから, われわれの先祖たちはそんなスーパーフレアの放射線を浴びたことがあったかもしれないのです. 実は生まれたばかりの星 (原始星) では, この程度のスーパーフレアは実際に観測されているのです⁶⁾. 太陽は生まれてから46億年経っており, 生命は40億年ほど前に生まれたと考えられています. 40億年の長い時間があ

れば, その間, 上記のような極端なスーパーフレアが起きて生命の進化に影響を与えた可能性だってあるかもしれません.

この問題 (恒星活動による惑星環境への影響の問題) は, 最近続々と見つかりつつある太陽系外惑星のハビタブルな環境を考えるうえで重要です. 宇宙生物学を研究するための基礎ともいえます. 実は本研究のそもそものきっかけは2009年に海部宣男先生のリーダーシップで始まった「宇宙における生命」研究会でした. そこでは, 天文宇宙, 惑星, 地質, 生命, 化学, など, さまざまな分野のトップクラスの研究者が集まり, 宇宙における生命の起源や進化, さらには地球外文明探査の問題に至るまで, 自由奔放な議論がなされていました. その研究会における知的興奮に満ちた議論に刺激され, スーパーフレアが太陽や恒星でどれくらいの頻度で起こるのか, それは惑星環境や生命進化にどういう影響を及ぼすのか, という問題を解明したいと思うようになったのです.

ちなみに100倍のスーパーフレアが起きたとしても, 太陽の明るさはせいぜい数%明るくなるにすぎないので, 昔の人は気づくことはないでしょう. 太陽の望遠鏡観測が始まったたかだか400年でしかないので, スーパーフレアの頻度を探るのは困難です. 1,000倍だと数割の明るさ増加なので, 人類は気づくかもしれませんが, 1万年に1回程度と頻度が小さすぎて, 歴史記録には残りそうにありません.

どうすればスーパーフレアの発生頻度を調べることができるのか? そこで私たちは考えました. 太陽とよく似た太陽型星 (スペクトル型G型の主系列星) は銀河系の中に, それこそ星の数ほど大量にあるので, 太陽型星を1万個1年間観測したら, 太陽を1万年観測したのと同等のデータが得られるのではないかと. そうすれば太陽でスーパーフレアが起きるかどうかが, その頻度はどれくらいか, 答えが得られるかもしれない.

4. 研究のはじまり—「どうせ、君たちはヒマでしょ…」

というわけで、太陽型星を1万個、実際にずっとモニター観測しようと、2010年の夏ころから、当時花山天文台で研究員をやっていた前原裕之君や助教の野上大作君と相談していました。小望遠鏡を20本くらい用意して、全天の明るい太陽型星を常時観測しよう、というプランです。しかし、この計画は予算もかかり、なかなかたいへんなので、すでに別目的のために観測された太陽型星のデータはないだろうか？ という人々に相談していました。

そうした折、上海で開催された東アジア天文学会議 (EAMA8) の会議場で、国立天文台の関口和寛さんに上のような話をしましたら、「太陽系外惑星探査衛星ケプラー」がすでに大量の太陽型星を観測している、という耳よりな話を教えてくださいました。ケプラーは白鳥座近くの領域にある16万個の星(うち83,000個が太陽型星)を常時モニター観測しており、30分に1回の明るさのデータがインターネットで公開されている、とのことでした。「それは素晴らしい！」と、すぐに前原君らと相談し、データ解析のプランを立てました。しかし、83,000個の太陽型星のデータはあまりに大量です。サーベイはある程度自動化するにしても人手が必要です。どうしようか思案していましたら、ふと「そうだ、ヒマをもてあましている京大の1回生を動員しよう」と思いつきました。早速、1回生向けの物理学の講義で、「だれか一緒にスーパーフレアを探しませんか？ どうせ君たちはヒマでしょ…」とボランティアを募集しましたら、5名の学生が集まりました。柴山拓也、野津湧太、野津翔太、長尾崇史、草場 哲の5名です。2010年10月後半のことでした。当時のメールを読み返すと、第1回のゼミが11月16日。その日に前原君が1回生諸君にデータ解析の方法をレクチャーしてくれました。(実はそのときの



図4 京都新聞(2012年5月17日)の記事。京大の3回生(柴山拓也、野津湧太、野津翔太、長尾崇史、草場 哲)がスーパーフレアのNature論文の共著者になったことを報じている。

ゼミの様子の録画が残っています。京大理学部のホームページで公開されている京大理学部の紹介記事「わくわく理学2」⁷⁾をご覧ください。)。

最初にスーパーフレア数例を発見したのは、柴山拓也君で2010年12月14日のことでした。それ以後、前原君、野上君、本田敏志君(当時、花山天文台研究員)の指導の下に、1回生の学生諸君たちは熱心に解析を進め、最終的に、148の太陽型星で365回のスーパーフレアが見つかりました。その結果、2012年の5月に前原君を筆頭著者とする論文がNature誌に出版されることになったのです⁸⁾。(その詳しい内容については、本解説の直後に来る前原君の解説を参照ください。なお、本発見は、日本のあらゆる新聞やテレビ、世界の多くのインターネット・メディアでニュースとなりました。地元の京都新聞では、学部生が共同著者のNature論文は珍しいと、それだけで記事になったほどです(図4)。また、筆頭著者の前原君の顔写真がフィンランドの天文雑誌にデカデカと載りました(図5)。)



Siinä kertaan nopeammin kuin nykyään. Sillä oli todennäköisesti paljon nykyistä voimakkaampi ja suurempia aurinkopilkkuja. Tähtien lähettämien röntgen- ja nykyistä voimakkaampia. Taiteilijan näkemys.

Pieni-
saavat
tiedon
ra-
neetti-
tuville
kkuja,
nteja
igneet-
toksil-
mutta
ismää-
sattori
vuoro-
sitten
ymme-
infred
ttä voi-
kaltai-
irkauk-
aurin-
paltui
irvelee.



mista ja ultraviolettisäteilyä tulviva ympäristö saattoi hyvinkin 'valikoitua', minkälaisista elämästä sen ympärille saattoi kehittyä", Cuntz pohtii.
Kun elämää alkoi kehittyä maapallolle noin 3,5 miljardia vuotta sitten, suojaava otsonikerros ei vielä ollut. Se kehittyi vasta, kun yhteyttävät eliöt olivat ilmaantuneet. Kaikkien eliöiden perimässä onkin jonkinlai-

"Tarvitaan yksityiskohtaisia havaintoja voimakkaasti purkautuvista tähdistä, jotta tiedämme, ovatko nämä tähdet todella samanlaisia kuin oma Aurinkomme", Hiroyuki Maehara sanoo.

図5 フィンランドの天文雑誌に掲載されたスーパーフレアの解説記事と、前原裕之君の顔写真 (2012年7月号)

ところで、読者の皆さんは、どうして他の天文学者は同じことをやらなかったのだろうか？ と疑問に思うかもしれません。私たちが誰かに先にやられてしまうのではないかと、このことをいつも心配していました。しかし、大量の太陽型星の中からシステマティックにスーパーフレアを真剣に探そうという天文学者は、世界にいませんでした。それには理由がありました。これまでは、スーパーフレアは若い星や近接連星系、ホットジュピター（星近くの木星くらいの巨大惑星）をもつ星、などでしか起こらない、つまりわれわれの太陽（あるいは太陽によく似た太陽型星）では起こらない、と信じられていたからです。実際、米国のシェイファーら⁹⁾は2000年に過去のさまざまな観測データをサーベイして、その中から太陽のように比較的遅い自転速度をもつ太陽型星で9例スーパーフレアを見つけていましたが、彼らはスーパーフレアの原因をホットジュピターの存

在であるとし、したがって、われわれの太陽ではスーパーフレアは起きない、と結論づけていたのです。

しかし、スーパーフレア探査に参加してくれた京大の1回生諸君は、このような「天文学者の常識」にとらわれることなく、真剣に探してくれました。そのおかげで、(ホットジュピターをもたない)太陽型星で大量のスーパーフレアが発見できました。

京大グループが発見したスーパーフレアを起こす星々にはホットジュピターをもつ星が一つもなかったのですが、そのことは、スーパーフレアはホットジュピターがなくても起きる、つまり、われわれの太陽でも起こる可能性がある、ということを示しています。ただし、発生頻度は、最大級の太陽フレアの100-1,000倍のスーパーフレアの場合800-5,000年に一度という程度ですので、すぐに心配することはありませんが、一昨年の東日本大震災の大地震が1,000年に一度くらいでしたから、これは遠い未来の話ではなくて、現在の問題として捉えるべきだと思っています。

5. Nature論文とPASJ論文—「それでも太陽でスーパーフレアが起きる可能性は否定できない!？」

「もしスーパーフレアが太陽で起きたら、地球規模の大災害となる可能性がある」という文章を書いた論文を世界的な科学専門誌Natureに投稿したところ、「素晴らしい発見だが、『太陽で起こる可能性がある』というような世界を恐怖のどん底に陥れる文章を書いてはいけない。これはあくまで天文学として(太陽系外惑星や地球外生命の環境にとって)重要な話であって、われわれの太陽に関する話ではない。」という理由で「太陽で起こる可能性」は削除されてしまいました。「どうしても太陽で起こる可能性の文章を書きたいなら、Nature誌以外のほかのジャーナルに出しなさい」という最後通告まで受けました。それで共

著者（前原ほか）一同、泣く泣く、ガリレオの心境で、その文章を削除した次第です。

しかし、われわれ自身が「スーパーフレアは太陽で起きない」と信じているわけではありません。事実、その後、現在のダイナモ理論に基づいたオーダー計算をしてみると、最大級の太陽フレアの100倍のエネルギー（ 10^{34} erg）のスーパーフレアを起こすのに必要な巨大黒点は8年ほどで作ることがわかりました。1,000倍のスーパーフレア（ 10^{35} erg）だと40年かかります。40年は、黒点の11年サイクルより長いので、ありそうにない、と解釈するか、あるいは、800–5,000年（観測されたスーパーフレアの発生時間間隔）よりは短いので、ありうらと思うか。皆さんはどう思われますか？

この理論の論文（柴田ほか）は、Nature誌に掲載できなかった「(少なくとも100倍の)スーパーフレアは、われわれの太陽で起きる可能性がある」との文章付きで、日本天文学会のPASJ誌に投稿され、さいわい2012年12月に受理されて、2013年6月号に掲載されました⁹⁾。（私が第一著者のPASJ論文としては、何と20年ぶり(!)の論文です。）

6. 今後の観測～3.8 m望遠鏡へ

もし太陽でスーパーフレアが本当に起こるとたいへんなことになるので、少しでも可能性が否定できないならその対策・準備が必要です。そのためには、やはり、太陽によく似た星をもっと時間をかけて観測し、スーパーフレアを起こした太陽型星はどれくらい太陽と似ているのか、スーパーフレアの発生条件は何か、前兆現象は何か、など、明らかにする必要があります。太陽型星の詳しい長期観測が必要です。

実はこういう観測をするのに、京大で現在開発を進めつつある3.8 m望遠鏡¹¹⁾は世界で最も適しています。長期にわたり観測日数を多くとって分光観測ができるし、また、突然発生したスーパー

フレアをいち早く詳細に分光観測することも可能です。ぜひ、早く3.8 m望遠鏡を完成させて観測を開始し、太陽型星のスーパーフレアを解明して、未来の人類社会の安全に貢献したいと思います。

一方、太陽型星の活動の観測は過去の太陽活動を解明するうえでも重要です。太陽型スーパーフレア星の観測から、「太陽（恒星）活動は地球（惑星）環境にいかなる変動を与えたのか?」、「太陽（恒星）は生命の進化にどんな影響を与えたのか?」、「なぜわれわれは生まれたのか?」という疑問を解明するためのヒントすら得られる可能性があるのです¹²⁾。

思い起こせば、50年以上前、私が小学校に入ったころ、毎日「自分はなぜここにいるのか」という疑問ばかり考えていました。結局、この子どものときの疑問の答えが知りたくて、宇宙の研究者になったのですが、ついにその疑問に私なりのアプローチで迫れるようになって、ワクワクしています。しかも、単に過去の謎が解明できるだけでなく、「人類の未来」の災害を軽減することにも貢献できる、ということで、恐ろしい話の割にはワクワクしています。このワクワク感を皆さんと共有できれば幸いです。

7. 本特集の予定

本特集は、以上のスーパーフレアの研究チームが最近発表した論文に基づき、次のような予定で、解説を進めていきます：

- (1) 柴田一成 「スーパーフレア研究はいかに始まったか」（本記事）
- (2) 前原裕之 「太陽型星におけるスーパーフレアの探索」
- (3) 柴山拓也 「スーパーフレアを頻発する太陽型星」
- (4) 野津湧太 「スーパーフレア星と巨大黒点」
- (5) 野津翔太 「スーパーフレア星のすばる高分散分光観測」
- (6) 野上大作 「太陽ときわめてよく似た星にお

けるスーパーフレアの発見と3.8 m望遠鏡計画」

(7) 本田敏志「スーパーフレア星のリチウム」
ご期待ください。

参考文献

- 1) Shibata K., Magara T., 2011, Living Review in Solar Physics 8, 6
- 2) Carrington R., 1859, MNRAS 20, 13
- 3) Tsurutani B., 2003, JGR 108, 1268
- 4) 柴田一成, 上出洋介 (編), 2011, 「総説宇宙天気」, 京大学術出版会
- 5) <http://news.nationalgeographic.com/news/2011/03/110302-solar-flares-sun-storms-earth-danger-carrington-event-science/>
- 6) Koyama K., et al., 1996, PASJ 48, 87
- 7) <http://www.sci.kyoto-u.ac.jp/wakuwaku/>の巻頭特集
- 8) Maehara H., et al., 2012, Nature 485, 478
- 9) Schaefer B. E., et al., 2000, ApJ 529, 1026
- 10) Shibata K., et al., 2013, PASJ 65, 49
- 11) <http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/psmt/index.html>
- 12) 柴田一成「太陽大異変ースーパーフレアが地球を襲う日」朝日新書 (2013)

How Our Superflare Studies Began?

Kazunari SHIBATA

*Kwasan and Hida Observatories, Kyoto University,
Kitahanayama Oominecho, Yamashina-ku, Kyoto
607-8471, Japan*

Abstract: In May of 2012, the paper on “Superflares on Solar Type Stars” by our stellar research group (Maehara et al.) at Kyoto University was published in Nature. News of these results has been widely reported in many newspapers and even TV shows in Japan, and also in various internet media from all over the world. In this series of our articles in the Astronomical Herald, we will introduce in detail our studies on superflares on solar type stars. In this 1st article, I will discuss how and why our research on superflares began and how it has developed, also introducing some inside stories and anecdotal episodes from our research journey.