

# 太陽型星のスーパーフレア

野津 湧太<sup>1</sup>，柴田 一成<sup>2</sup>

(要旨) 私たちの身近な太陽は、実は爆発(フレア)だらけの恐ろしい天体で、地球や社会へも影響が及ぶこともあります。太陽フレアとはどのような現象で、なぜ発生するのでしょうか？さらに最近、私たちの研究グループでは、系外惑星探査望遠鏡ケプラーのデータを用いて、太陽型星においてスーパーフレアという巨大フレア現象を多数発見しました。本稿では、その発見の過程と得られた統計的な性質について述べ、「私たちの太陽でもスーパーフレアは起きるのか？」という問いについて、どのような結果が得られてきたのかをご紹介します。さらに、フレアが惑星へ及ぼす影響など、その後の興味深い研究の一端についてもご紹介したいと思います。

## 1. 太陽フレア

太陽と聞いて何を連想するでしょうか？一見、ただ穏やかに燃え続けている星に見えます。数ある宇宙の星の中で、私達の最も身近にある星であり、その姿を私達は完全に理解していると思われるかもしれませんが、しかし実は、太陽の表面では様々なスケールの爆発現象が頻繁に起こっており、その最大のものが「太陽フレア」です[1]。フレアは、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 $\alpha$ 線やX線で明るく輝き、数分～数時間にわたって続きます(図1)。解放される全エネルギーは、 $10^{29}$ - $10^{32}$  erg。水素爆弾に例えると10万個～1億個に相当するような、非常に大きなエネルギーです。

太陽フレアの研究はこの100年で著しく進展してきました。さかのぼること約400年前、ガリレオ・ガリレイ達が望遠鏡で太陽を観測して以来、太陽黒点のスケッチ観測が行われるようになり、19世紀には、11年周期で黒点数が変動することがわかってきました。そして1859年、英国のキャリントンが眼視(白色光)による黒点スケッチ中に、黒点の一部が光輝いていると

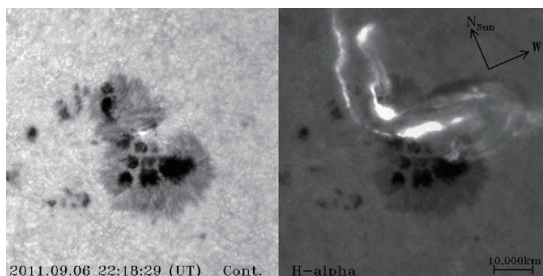


図1：太陽フレアの典型例(2011年9月7日JST)。京都大学飛騨天文台にて撮影。左図：可視連続光(白色光)、右図：H $\alpha$ 単色像。これはいわゆるXクラスフレアと分類される大フレア(エネルギー $10^{31}$ erg程度)。白色光で輝点が見えており、白色光フレアと呼ばれる。

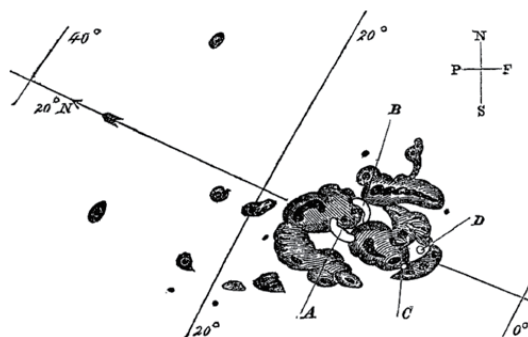


図2：キャリントンによるフレアのスケッチ (Carrington 1859 [2])。図中、A、B、C、Dと示されている所で、白く光っている部分がフレア。白色光観測。

1. 京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室  
2. 京都大学 大学院理学研究科 附属天文台  
ynotsu@kwasan.kyoto-u.ac.jp

の報告をしました(図2) [2]。これが太陽フレアの最初

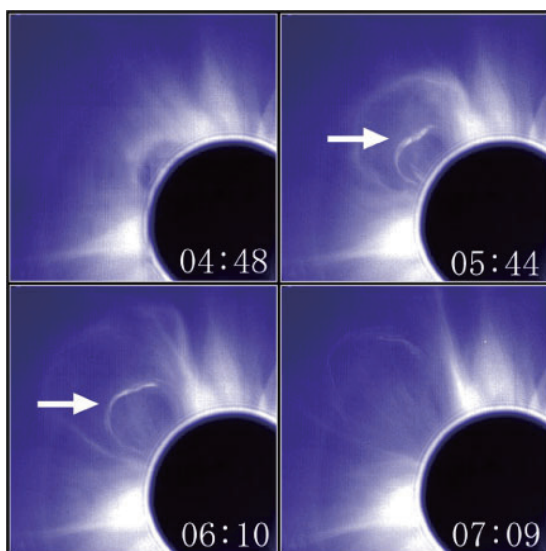


図3：SMM衛星が観測した1980年4月14日のコロナ質量放出(CME)。矢印の先がプロミネンス、その上方にCMEの先端が見える。07:09UTにはCMEの先端は視野の外まで飛んでいる。

の発見になります。翌日、世界各地でこの200年で最大とされる磁気嵐が発生し[3]、世界各地で巨大なオーロラが現れましたが、当時はフレアとの関係は不明でした。現在では、白色光で見えるフレア(白色光フレア)は大フレアの時のみ観測できることが知られており、キャリントンの見たこのフレアは史上最大のフレアだったと考えられています。しかし、このような巨大な白色光フレアの発生は稀なので、19世紀の間はフレア研究はあまり進展しませんでした。

フレア観測が急速に発展したのは、20世紀初頭、H $\alpha$ 線などの彩層から放射されるスペクトル線の分光観測が発展したことによります。フレアは彩層のような太陽の上空大気で起こる爆発現象であるため、H $\alpha$ 線などで彩層に着目すると、小さなフレアも検出できるようになり、フレアは黒点の発生と密接に関連していることが明らかになりました。また20世紀初頭に、黒点の正体は強い磁場であることが判明し、20世紀半ばにはフレアのエネルギー源は黒点近傍に蓄えられた磁気エネルギーであることが確立しました。

20世紀後半になると、急速に進歩した大気圏外での人工衛星による観測(特に、日本が打ち上げた「ようこう」衛星の軟X線観測の貢献が大きい)によって、フレアのエネルギー解放過程は、太陽の上空大気(特にコロナ)中での磁気リコネクションという機構によ

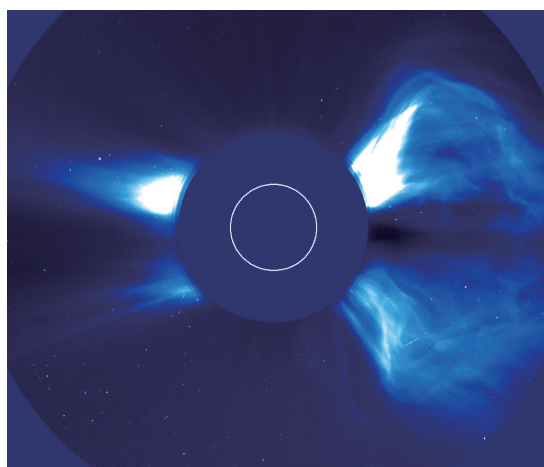


図4：SOHO衛星搭載のコロナグラフ装置LASCOによって観測された、1997年11月6日のX9.4クラスフレアに伴うコロナ質量放出(CME)。中央の白い円は太陽表面の大きさを表している。CMEは太陽直径の数倍(時として10倍以上)にも及ぶ大きさを持っていることが分かる。

って生じていることも確立しました[1]。そして現在は、磁気リコネクションを含む電磁流体機構に基づくフレアモデリングが太陽物理学の中心課題の一つとなっています。

太陽フレアが起きると、それに伴って、あらゆる電磁波が電波から紫外線、X線、ガンマ線に至るまで突発的に放出されます。さらに大量の高エネルギー電子や陽子が加速され、いわゆる放射線粒子となって、地球の方へと飛んでくる可能性があります。大気があるため、これらの放射線は、地上にはほとんど影響はありませんが、精密機器を積んだ人工衛星の故障や宇宙飛行士の被ばくなどの懸念があります。日本のX線天文衛星「あすか」は2000年に起きた太陽フレアの影響で膨張した地球大気によって、空気抵抗を受け軌道を維持できなくなり、最終的に大気圏に突入するという運命を辿りました。

また、フレアが起るとしばしば、惑星間空間に向けて、磁場を帯びたプラズマ噴出現象(コロナ質量放出：図3、図4)が発生します。巨大なコロナ質量放出が、地球に衝突すると、地球上部の磁気圏が激しく乱され、磁気嵐が発生、通信障害や送電網へダメージを与える懸念もあります。例えば1989年に、太陽フレアの影響によって、カナダのケベック州の変電所の変圧器に障害が起り、大停電が起きるといった事例もありまし

た。また最近でも、2017年9月前半に複数の巨大太陽フレアが発生し、磁気嵐の発生などが懸念され、報道等でも多数取り上げられたことは、記憶に新しいことかもしれません。この意味で、私達の社会(特に宇宙利用も始まった現代社会)は、太陽によって引き起こされる「災害」とは無縁ではないだろうということも言えるかもしれません。そのため、フレアの地球環境への影響の予報(宇宙天気予報)が緊急の課題となっています[4]。

## 2. スーパーフレア発見

さてここまで、太陽フレアによって、我々の社会も影響を受ける可能性があるということを見てきました。しかし広い宇宙に目を向けてみると、例えば生まれたばかりの星などでは、私達が今まで遭遇したこともないような巨大なフレア(スーパーフレア)が起きている事が知られています[5, 6]。その様なスーパーフレアが、我々の太陽で起きる可能性はあるのでしょうか? 長年の太陽研究により、フレアの発生頻度は、「フレアのエネルギーが10倍上がると、発生頻度は約10分の1になる」という経験則に従うことが分かってきました(図5)。これは興味深いことに、地震の発生頻度の統計と似ています。その関係を単純に延長すると、最大級の太陽フレア( $10^{32}$  erg)の100-1000倍の大きさのスーパーフレアは、1000年から10000万年に1回程度の頻度になります。頻度は非常に小さいですが、ひょっとしたら数千年前には、現代の我々がまだ知らないほど大きなフレアが起っていたのかもしれない。

もし本当だとしたら、大変重要で興味深い話です。しかし、いったいどのようにしたらこの頻度分布を調べることが出来るのでしょうか? 太陽の近代観測の歴史は数百年ほどにすぎないので、千年以上前はもちろん望遠鏡も人工衛星もなく、科学的記録から探るのは困難です。そこで私たち、京都大学附属天文台のグループでは、太陽を昔に遡って調べるのではなく、太陽とよく似た星(太陽型星)を沢山観測するという方法を考え始めました。太陽型星を1万個1年間観測すれば、太陽を1万年観測したデータと同様のデータが得られるのではないかと。そして、スーパーフレアが太陽で起きるかどうかの手掛かりを得る事が出来るかもしれない、と言う訳です。

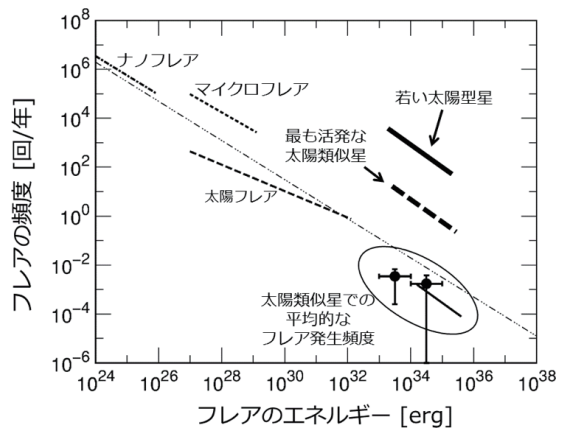


図5：フレアのエネルギーと発生頻度。太陽の(ナノ・マイクロを含む)フレアはエネルギーのべき乗則で頻度が下がる。最大級の太陽フレアの1000倍のエネルギー( $10^{35}$ erg)のフレアは、太陽とよく似た星では1万年に1度程度の頻度で起きる。一方、若い星では1年に100回程度起きる。

このようなスーパーフレア探索のアイデアが検討されていた2010年夏頃、2017年の現在に至るまで、系外惑星探査で革命的な業績を挙げ続けることになる、「ケプラー宇宙望遠鏡」が本格的に成果を発表し始めました(打ち上げは2009年3月)。はくちょう座近くの領域にある16万個の星(そのうち、太陽型星は約8万個)の明るさを、30分に1回の間隔で、4年の長期にわたり常時観測し続けるという観測を行います。星の明るさの僅かな変化も捉える事ができ、データはインターネットで世界中にすぐに公開されます。スーパーフレアによって星が僅かに明るくなる現象も捉えられると期待できる、ということが分かり、早速ケプラーのデータを使おう!ということになりました。

しかし、8万個の太陽型星のデータはあまりに膨大です。そこで当時学部1年生だった5名(柴山拓也・野津湧太(本稿著者)・野津翔太・長尾崇史・草場哲)も加わり、ある種の海軍戦術でフレア探索を開始したところ、メンバーの1人の柴山さんが早速、太陽型星の光度曲線から、フレアの候補となるデータを発見。それを受けて、当時京都大学附属天文台研究員だった前原裕之さんの指揮のもと、より体系だったフレアの検出手法の構築に着手し、本格的な研究が開始されました。

図6は検出された太陽型星のフレアの一例です。数日から数十日の準周期的な変動の上に、スパイク状



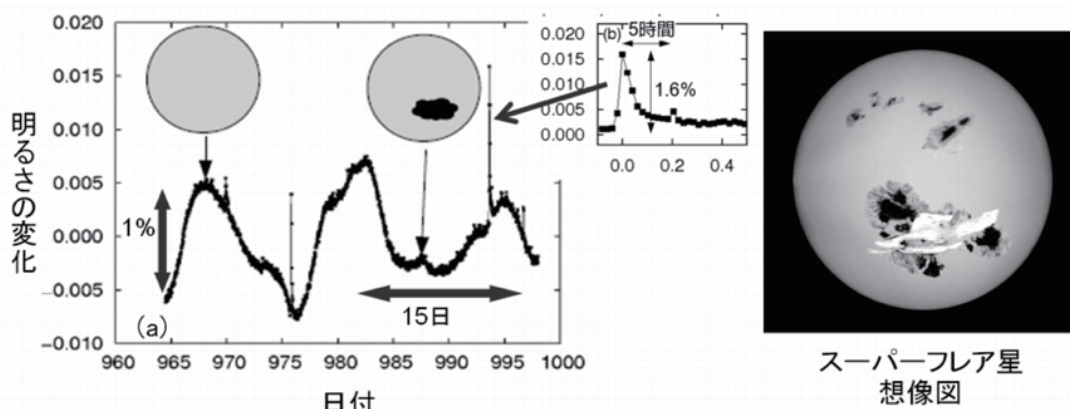


図6：左図：太陽型星のスーパーフレアの明るさの時間変化(ケプラー衛星の観測データ)。フレアでの突発的な増光の他に、周期15日程度のゆっくりとした明るさの変化が見られる。これから黒点のサイズと自転の周期が推定できる。  
右図：太陽型星のスーパーフレアの想像図。巨大な黒点群でスーパーフレア(白色)が起こっている。

の増光が何度も起きており、その部分を拡大すると、急速な増光とその後の緩やかな減光が見られることが分かります。近くに別の天体があるケースや、継続時間が短く増光点が1点しかないなど、疑わしいイベントについては最終的に個々の光度曲線を目で見て排除を徹底的に行い、148個の太陽型星で365個のフレアイベントを検出するに至りました(2012年にNature誌に発表[7])。フレアを起こした星自身の明るさとフレアの振幅、継続時間からエネルギーを推定すると、 $10^{33}$ - $10^{36}$  ergという値になることが分かりました。前章で述べたキャリントンフレアのエネルギーが $10^{32}$  erg程度だと推定されているので、まさにここで発見されたフレアは、最大級の太陽フレアの10~10,000倍に相当するような、「スーパーフレア」であることが判明しました。

### 3. スーパーフレアの発生頻度

このスーパーフレア発見で最も重要な意義は、非常に沢山の数のイベントを発見したことだと言えます。この発見以前は、過去の地上の写真乾板のデータや眼視観測から、太陽型星においては、わずか9個のフレアイベント「候補」が報告されているだけでした[8]。わずか9例という少数であったこと、またデータ自体の精度も眼視観測などである点を踏まえると、統計的な研究は困難です。しかしケプラーのデータの登場以後、私達のグループでは、2012年の最初の報告(ケプ

ラー宇宙望遠鏡の最初の90日間のデータを利用)に引き続き、さらに長期間(約500日)のデータを解析したところ、現在までに279個の太陽型星で1547個のスーパーフレアを発見するに至っています[9]。このように非常に沢山のイベントを発見したことにより、太陽型星のスーパーフレアについて、統計的な議論をすることが初めて可能となりました。

発生頻度について考えてみると、よりエネルギーの大きなスーパーフレアほど発生頻度は下がっていく関係(べき分布)が見られました。そして、図5に現れている通り、スーパーフレアの発生頻度分布は、太陽フレアの発生頻度分布を延長したものと非常によく合っています。太陽とよく似た性質を持つ星(太陽類似星)について、スーパーフレアの頻度を換算してみると、最大級の太陽フレアの100倍の大きさのスーパーフレアで約800年に1回、1000倍の大きさのフレアで約5,000年に1回という値になりました[10]。

### 4. スーパーフレア星の巨大黒点と、すばる望遠鏡での分光観測

スーパーフレアを起こした星を詳しく見てみると、フレアによる増光とは別に、数日から数十日の準周期的な変動が多く星で見られました。このような変動の原因は何なのでしょう？ 私たちは、表面に黒点を持つ星の自転によって引き起こされているのではないかと考えています(図6) [11]。もしこの仮定が正しい

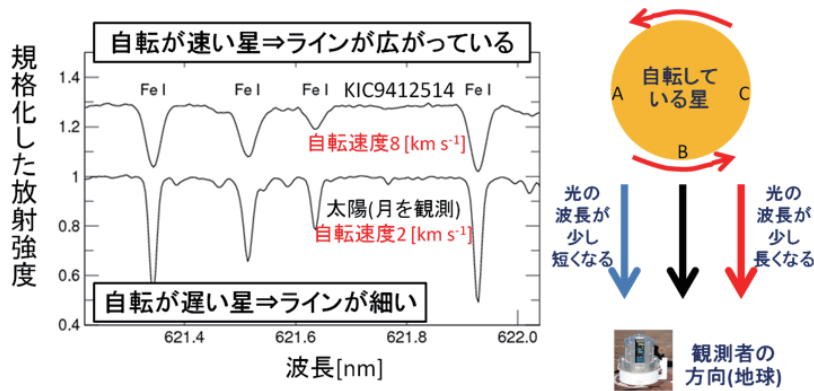


図7：(右) 自転している星の表面の各場所から放射される光は、光の「ドップラー効果」の影響で、波長に僅かな変化が生じます最終的に地球でスペクトル線を観測する場合、A、B、C点など星表面の各場所からの、波長が少しずつずれた光の足し合わせとなるので、スペクトル線が波長方向に広がって観測されます。(左) 星の自転速度とスペクトル線の広がり。ここでは、中性鉄(Fe I)の吸収線を4本示しています。上記の通り、自転している星表面から放射される光の「ドップラー効果」による波長ずれの影響で、吸収線には広がりが見られます。そして、太陽のように自転の遅い星は、ドップラー効果による波長ずれが小さいためにラインが比較的細い一方で、自転の速い星は波長のずれが大きくなり、ラインがより広がって観測されます。このラインの広がりを測定する事で、星の自転速度を求めることができます。

とすると、明るさの変動の周期は星の自転周期、変動の振幅は黒点の大きさに対応します。変動の振幅は典型的には0.1~数%なので、スーパーフレアを起こす星の多くは、図6のように太陽よりも大きな黒点を持つと考えられます。巨大な黒点があれば、磁場のエネルギーを沢山蓄えることができるので、スーパーフレアを起こすのに都合が良くなります。

しかし、この解釈はあくまで仮定であり、本当に巨大な黒点が星の表面に存在するのか？また、明るさ変動が自転で説明できるのか？そして、スーパーフレアを起こした星々は、本当に太陽とよく似た星なのか(連星である可能性などはないのか)？これらの点について、ケプラー宇宙望遠鏡の測光観測だけで答えを出すことは困難です。

そこで私たちは、ケプラー宇宙望遠鏡データで発見したスーパーフレア星のうち50星について、すばる望遠鏡HDSを用いて可視光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い、以下の結果を得ました[12, 13].

1. まず、観測の結果、観測した50星のうち半数以上では、二つの星の吸収線が重なっていたり視線速度の大きな変動があるなどの連星の兆候は見られなかった。そして、温度等も太陽型星(G型主系列星)の範囲にあることを分光的に確認できた。
2. 上述の、「明るさ変動=自転」という解釈が正し

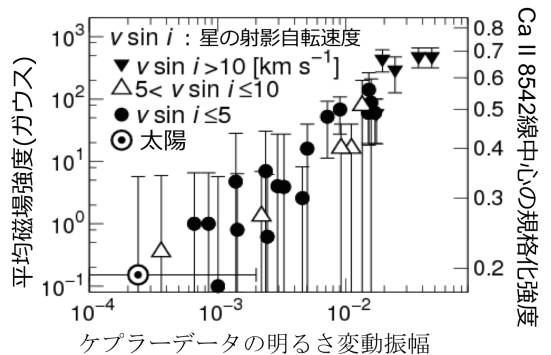


図8：ケプラーで観測された明るさの変動振幅(横軸)と、Ca II 8542線中心の規格化強度から推定された、星の平均磁場強度(縦軸)。Ca II 8542線強度と平均磁場強度の関係式は、太陽観測で得られた関係式を用いている。

この図から、黒点の大きさに関して、ケプラー宇宙望遠鏡の測光観測による指標(横軸)と、分光観測による指標(縦軸)の間に相関があり、よく対応しているということが分かる。

ければ、明るさの変化のタイムスケールは、星の自転の速さに対応することになる。「分光観測」を行うと、スペクトル線の広がり幅から、星の自転の速さを測定する事ができるが(図7)、今回の観測結果は、上記の明るさの変化から求めた値とよく対応しており、上記の予想が正しいことを提示している。

3. 大きな黒点が存在して星表面の平均磁場が強くなると、上空の彩層が加熱され彩層由来のスペクト

ル線の放射が強くなり、Ca II 8542 Å(電離カルシウム)の吸収線が浅くなるのが、太陽の観測から知られている。このことを応用し、スーパーフレア星のCa II 8542 Åの吸収線の深さを測定し、星の他の性質と比較した。その結果、ケプラーのデータでの明るさの変動振幅との間に相関が見られた(図8)。そして、スーパーフレア星は太陽と比較して、非常に大きな黒点を持つ事が確認された。

以上の結果から、スーパーフレアの示す準周期的な明るさ変動が、巨大黒点の自転で説明できると考えて矛盾ない、そしてスーパーフレア星は巨大な黒点を持つ、ということが分かりました。

## 5. スーパーフレアと星の性質

さて、上記で述べた分光観測によって、スーパーフレア星の明るさ変動が自転に説明可能だと考えて矛盾ないと言ってきました。これを踏まえ以下では、図6のような明るさ変動の周期がその星の自転周期であると仮定して、もう少し詳しく、スーパーフレアが星の性質、特に星の自転とどのような関係があるのか見ていきたいと思います([9-11])。

図9(b)は一定規模( $5 \times 10^{34}$ erg)以上のエネルギーを解放するスーパーフレアの発生頻度と自転周期の関係です。この図から、スーパーフレアの発生頻度は自転周期が長くなると低くなるのがわかります。星の自転周期は星の年齢と良い相関にあることが知られており、例えば若い年齢数億年の星は太陽と比べると1桁ほど速く自転しています。太陽と同じ自転周期(約25日)の太陽型星では、周期数日の若い太陽型星と比べると、スーパーフレアの発生頻度は1-2桁も低いと分かりました。1章で述べた通り、フレアは星の上空大気(コロナ)中での磁気エネルギーの解放現象であり、その磁気的な活動の源は、星の自転と対流によるダイナモ機構だと考えられています。若くて自転周期が短い星ほどフレアの発生頻度が高いのは、自転周期が短い星ほどダイナモによる磁場生成が活発であるためと考えることができます。

一方で、自転周期が2-3日より短くなるとスーパーフレアの発生頻度はほぼ一定の値になることも分かりました。太陽型星では、定常的なX線強度やCa II

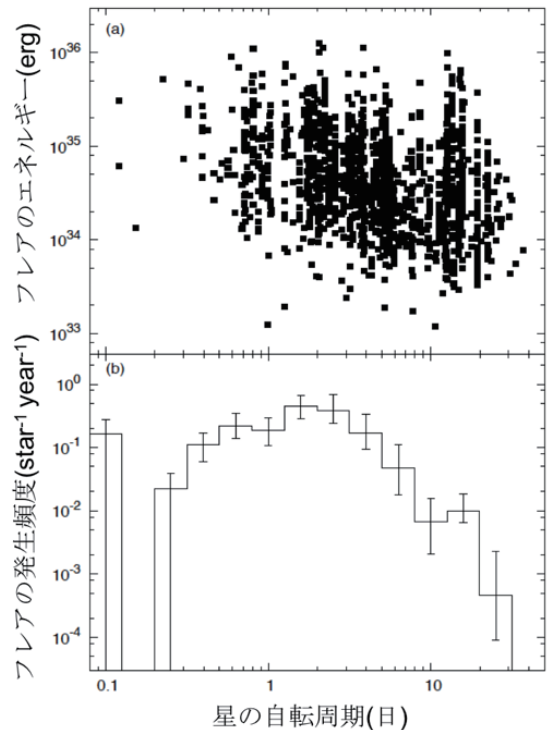


図9：(a) 個々のスーパーフレアのエネルギーとそのフレアを起こした星の自転周期の関係。  
(b) エネルギーが $5 \times 10^{34}$ erg以上のスーパーフレアの発生頻度と星の自転周期の関係。

線などの彩層から放射される輝線と自転周期の間にも、同様の関係が知られています。

発生頻度については自転周期との相関が見られましたが、フレアのエネルギーについてはどうでしょうか？単純に考えると、自転周期の短い星の方が大きなフレアを起こせるのではないかと考えられます。しかし、図9(a) スーパーフレアのエネルギーと自転周期の散布図を見てみると、その予想とは異なることが分かります。スーパーフレアのエネルギーの上限値と自転周期との間には強い相関はなく、周期20日程度の自転の遅い星でも、 $10^{35}$ ergの巨大フレアが生じています。

以上の結果をまとめると、太陽のような自転の遅い星であっても、頻度は低いものの、巨大なスーパーフレアが起こりうることを意味していると言えます。

## 6. スーパーフレアと惑星の存在・スーパーフレアの痕跡

私たちの研究の以前に、太陽型星のスーパーフレアについて議論をしたSchaeferらは、太陽ではスーパーフレアが観測された形跡がないことから、スーパーフレアを起こす天体は、ホットジュピターをもち、それによって恒星の磁場活動が高められ、スーパーフレアを起こすのではないかと考えました[14]。私たちの太陽には、太陽のすぐ近くを公転する巨大惑星がないために、スーパーフレアを起こさない、というわけです。もしこの説が正しければ、ケプラーで発見されたスーパーフレアを起こす太陽型星の大部分はホットジュピターをもつはずで、ホットジュピターがトランジットを起こす確率を考えると、279個のスーパーフレアを起こす太陽型星の20個弱はケプラーによってトランジットが見つかっていてもよさそうです。しかし現在までに、この279個のスーパーフレア星の周りで見つかっている惑星は、Kepler-491bという0.1木星質量の星たった1つのみです(スーパーフレアを起こす星は大きな黒点による変光が見られることから、小さな惑星であれば自転による変光に隠されて見つからない可能性もありますが、ホットジュピターのような大きくかつ星の近くを公転する惑星であれば十分検出可能です)。この結果から、ホットジュピターをもつスーパーフレア星の数は、すべてのスーパーフレア星がホットジュピターをもつと仮定した場合に予想される数よりもずっと少なく、少なくともホットジュピターの存在が、太陽型星でスーパーフレアを引き起こすための必要条件だということではできなと分かりました。この結果は、従来の説では太陽ではスーパーフレアが起らないと考えられていましたが、「起らない」理由の一つである「太陽にはホットジュピターがない」という理由が成り立たないことを意味します。

では、太陽でスーパーフレアが起こった証拠は本当にないのでしょうか？私たちのスーパーフレア発見論文がNature誌に掲載された2週間後、驚くべき論文が同じくNature誌に掲載されました[15]。名古屋大学の三宅美沙さんらの研究結果で、屋久杉の年輪を使って炭素14( $^{14}\text{C}$ )の量の時間変化を調べたところ、西暦774-775年に急激な増加を示していたというものです。

$^{14}\text{C}$ は宇宙線が地球の上層大気中の原子に衝突してきた中性子が窒素14( $^{14}\text{N}$ )と衝突し、その後 $^{14}\text{N}$ が崩壊することで生成します。 $^{14}\text{C}$ の量が急激な増加を示したということは、宇宙からの放射線量が増えていたことを意味します。三宅さんらはさらに長期間の $^{14}\text{C}$ の量の時間変化を調べ、西暦993-994年にも同様のイベントがあることも発見しました[16]。これらの宇宙線量の原因としては、近傍の超新星爆発やガンマ線バースト、巨大な太陽フレアなどいくつかの可能性が挙げられます。2012年の発見以来、屋久杉以外の世界各地の樹木を用いた $^{14}\text{C}$ 濃度の測定や、氷床コアのベリリウム10( $^{10}\text{Be}$ )濃度( $^{10}\text{Be}$ は $^{14}\text{C}$ と同様に宇宙線由来)の測定が行われ、現在では太陽の爆発現象が最有力と考えられているようです[17]。

また、巨大なオーロラの報告が過去の文献に残っていないかを探る試みなども進んでいます([18, 19])。もしこれらのイベントが本当に太陽におけるスーパーフレアの痕跡であるとしたら、1000年オーダーの時間スケールでは、太陽でもスーパーフレアが起きることを示唆しているのかもしれない。

## 7. 惑星への影響

ここまで、スーパーフレアについて述べてきました。この章では、少し話題を転じて、スーパーフレアが惑星にどのような影響を与えるのか？少し掘り下げて、最近出てきた一つの興味深い新説[20]を紹介したいと思います。

### 7.1 faint young Sun paradox

私たちの住む地球は現在、温暖で液体の水が表面に安定に存在し、さらに私たち生命の体を形づくっている有機物が豊富に存在するという、生命の存在に非常に適した環境となっています。岩石など地質学的な証拠を紐解くと、地球に生命が誕生した約40億年前の昔から、地球上には海洋が存在し、現在のような温暖な環境がすでに形成されていたことが示唆されています。しかしその一方で、標準的な太陽の進化モデルでは、40億年前の太陽の明るさは、いまの約70%程度であったと考えられており、地球大気が現在と同じ組成であったと仮定すると、地球表面の温度は0℃を下回り、液体の海は存在できないことになってしまいま



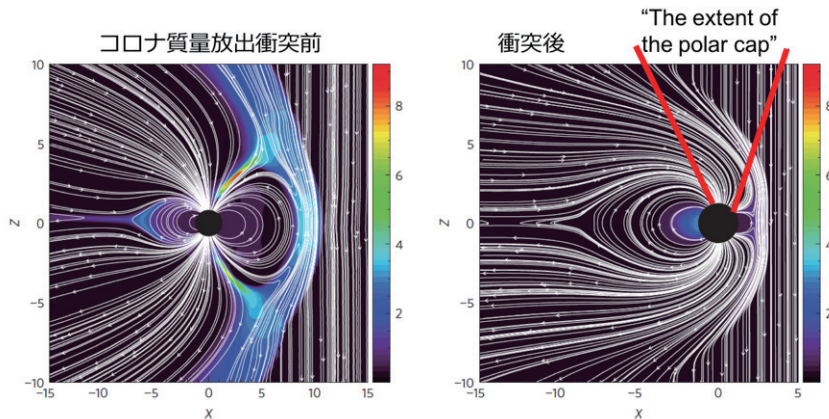


図10：スーパーフレアによって放出されたコロナ質量放出が、約40億年前の地球の磁気圏に衝突した際の想像図(Airapetian et al. 2016[20]の図を改変)。白線は磁力線、カラーバーはプラズマの圧力を表している。地球磁気圏が圧縮され、極地域から高エネルギー粒子が大気中に侵入する経路(図中の赤線で示された領域)が形成される。

す。この矛盾を、「若い太陽のパラドックス(faint young Sun paradox)」といい、1972年にCarl Saganらによって提唱されました[21]。

この矛盾を解決するために、さまざまな説が提唱されてきました(cf. [22])。これらの説では、昔の地球大気では温室効果ガスの量が、現在よりはるかに多かったことを仮定しています。たとえば、アンモニア( $\text{NH}_3$ )とメタン( $\text{CH}_4$ )の量が多くその温室効果が効いていたという説や、現在の1000~1万倍ほどの二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )が存在していたという説があります。しかしどの説も、たとえば地質学的に過去の $\text{CO}_2$ 濃度を調べた結果と一致しないなど、定量的な妥当性が確立されているとはいえ、現状このパラドックスについて、確定的な解決策は得られていないという状況です。

## 7.2 若い太陽のスーパーフレアの地球への影響

さて、約40億年前の若い太陽は、現在よりも30%も暗かったわけですが、前章までで述べてきた「太陽フレア」の視点でみてみると、太陽はどのような星であったのでしょうか？

ケプラーのデータを用いた統計的研究によると、太陽と比べると自転が10倍ほど速い若い星では、スーパーフレアの頻度ははるかに高く、1日に1回を超えるような頻度で起こっていることがわかります(図5)。この結果から、40億年前の若い太陽は、自転が速く、フレアに必要な大量の磁場のエネルギーを簡単に蓄えられる状況にあり、スーパーフレアが頻発し現在と比

べて非常に活発な状態であった、ということができません。

1章でご紹介したように、巨大なフレアが発生すると、巨大なコロナ質量放出も発生し、地球の方へ飛んでくる可能性が考えられますが、太陽でスーパーフレアが頻発している状況下で、約40億年前の昔の地球には、どんな影響があったのでしょうか？

2016年、Vladimir Airapetian氏らの研究チームは、上述の「ケプラー宇宙望遠鏡」での観測結果を基に、若い太陽でのコロナ質量放出のエネルギーと地球への衝突頻度を推定し、1日に1回以上地球に衝突するという結果を得ました[20]。そして、その高頻度のコロナ質量放出が地球へと衝突した際の地球磁場との相互作用について、数値シミュレーションを行ったところ、地球の磁気圏が圧縮され、極地域から高エネルギー粒子が大気中に侵入する経路が形成されることがわかりました(図10)。

高エネルギー粒子が大気中に侵入すると何が起こるのでしょうか？ Airapetian氏らは、初期地球の大気成分(窒素が豊富： $\text{N}_2$  80%， $\text{CO}_2$  20%)を仮定し、化学反応計算を行いました。その結果、これらの高エネルギー粒子は地球大気の中に豊富に含まれる窒素分子( $\text{N}_2$ )と化学反応を起こし、さまざまな中間生成物を経ながら、亜酸化窒素( $\text{N}_2\text{O}$ )とシアン化水素( $\text{HCN}$ )が大量に生成されることが強く示唆されました。



### 7.3 生命誕生に適した環境の形成

大量に生成される $N_2O$ とHCN.この2つの物質が、原始地球が生命誕生に適した環境であったかを考える上で、重要な役割を担う可能性があります。

実は $N_2O$ は強力な温室効果ガスであり、頻発するスーパーフレアの影響で大量の $N_2O$ が生成され、地球大気中へ拡散していくことを考えると、最初に述べた「若い太陽のパラドックス」は十分に解決できてしまう可能性が示唆されます。生命誕生に必要な液体の水を持つ温暖な地球環境が、初期地球においては、スーパーフレアのおかげで形成および維持されたのかもしれない。

一方HCNは、別の重要な役割を担います。より複雑な化合物の生成の起点となり、アミノ酸をはじめとする生物分子の供給源となる可能性があります。すなわち、私たち生物の体を形づくる物質の起源ともなった可能性があるわけです。

### 7.4 系外惑星系へのフレアの影響

「若い太陽での活発なスーパーフレアの影響により、原始地球の大気が温暖になり、さらに生命誕生に必要な環境と材料がつけられた」とする新説が提唱されました。今後より定量的な検討が必要ですが、太陽のフレアが単に地球に被害をもたらすだけでなく、初期地球での生命発生という、私たちの起源にもかかわっている可能性があるとは、非常に驚くべき結果といえます。

ここで述べたのは、約40億年前の地球・太陽間で起こりうる現象でしたが、この新説は、近年多数発見されている太陽系外の地球型惑星でも適用できるかもしれません。さらに、物質が生成されるだけでなく、巨大フレアに伴う高エネルギーに陽子によって、オゾンが破壊されるというような計算結果も報告されるなど[23]、この分野の研究は、少しずつ増えてきています。

現在、「第2の地球」を探そうという試みが、多数の宇宙・地上の望遠鏡を用いて、盛んに行われています。たとえばその際に、「活発なフレアによって惑星の大気にどんな影響が出ているのか？」をもっと詳しく調べていく必要があります。

## 8. 今後の展開 ～太陽でスーパーフレアは起こるのか？

本記事の2～4章では、ケプラーのデータに基づいて、スーパーフレアを起こす星の性質について見てきました。自転周期の遅い太陽のような星でも、巨大な黒点が生じれば、頻度は低いものの巨大なスーパーフレアが発生するという描像が見えてきました。しかし、「太陽でスーパーフレアが起こるのか？」という問いに迫るには、まだまだ明らかにすべき点がたくさん残されています。例えば、太陽のような星で巨大な黒点はどのようにできるのか？そのような黒点の寿命はどれくらいか？例えば、私たちのグループでは、理論的な考察によって、太陽で巨大な黒点は作れる可能性を示した研究も行いましたが[24]、観測的な理解もまだまだ不十分です。

京都大学大学院理学研究科の宇宙物理学教室と附属天文台は、天体爆発現象の観測や系外惑星探査を目的とした東アジア最大の3.8 m望遠鏡(図11) [25]を、岡山県浅口市(現・国立天文台岡山天体物理観測所構内)に開発・建設し、2018年から共同利用観測も開始の予定です。この望遠鏡は、まさに太陽型星のスーパーフレアを解明するのに世界で最も適した望遠鏡です。「占有望遠鏡」の強みを最大限に生かし、多数の観測時間を集中的に投下することによって、スーパーフレア星は巨大な黒点をもっているのか？スーパーフレアの発生機構は太陽フレアと同じなのか？太陽フレアと同様にプロミネンス噴出やコロナ質量放出を起こして

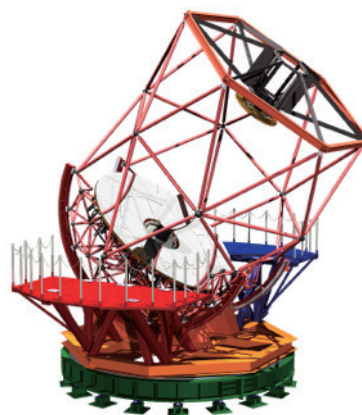


図11：3.8 m望遠鏡完成予想図。18枚の鏡を組み合わせる分割鏡方式で、独特な構造の軽量架台となっている。

いるのか? などの重要問題の解決に挑むことを目指しています。そして太陽型星を詳しく解明することにより、私たちの太陽の活動の未来と過去を解明したいと考えています。

3.8 m望遠鏡は京都大学の望遠鏡開発チームの頑張りで、10年がかりでいよいよ完成し、いよいよ稼働しようとしています。多くの皆さまのご支援をいただけたら幸いです[26].

## 参考文献

- [1] Shibata, K. and Magara, T., 2011, *Living Review Solar Physics* 8, 6.
- [2] Carrington, R. C., 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] Koyama, K. et al., 1996, *PASJ* 48, 87.
- [6] Gershberg, R. E., 2005, *Solar-Type Activity in Main-Sequence Stars* (Berlin: Springer).
- [7] Maehara, H. et al., 2012, *Nature* 485, 478.
- [8] Schaefer, B. E. et al., 2000, *ApJ* 529, 1026.
- [9] Shibayama, T. et al., 2013, *ApJS* 209, 5.
- [10] Maehara, H. et al., 2015, *Earth, Planets and Space* 67, 59.
- [11] Notsu, Y. et al., 2013, *ApJ* 771, 127.
- [12] Notsu, Y. et al., 2015, *PASJ* 67, 32.
- [13] Notsu, Y. et al., 2015, *PASJ* 67, 33.
- [14] Rubenstein, E. P. and Schaefer, B. E., 2000, *ApJ* 529, 1031.
- [15] Miyake, F. et al., 2012, *Nature* 486, 240.
- [16] Miyake, F. et al., 2013, *Nature Communications* 4, 1748.
- [17] Miyake, F. et al., 2015, *Geophys. Res. Lett.* 42, 84.
- [18] Hayakawa, H. et al., 2017, *Solar Physics* 292, 12.
- [19] 磯部洋明, 早川尚志, ほか, 2017, *天文月報* 110, 「特集: 歴史書から探る太陽活動」.
- [20] Airapetian, V. S. et al., 2016, *Nature Geophysics* 9, 452.
- [21] Sagan, C. and Mullen, G., 1972, *Science* 177, 52.
- [22] Kasting, J. F., 2010, *Nature* 464, 687.
- [23] Segura, A. et al., 2010, *Astrobiology* 10, 751.
- [24] Shibata, K. et al., 2013, *PASJ* 65, 49.
- [25] 京大岡山3.8m望遠鏡 <http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/psmt/>
- [26] 京大天文台基金 <http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/kikin/>