

特集：太陽型星におけるスーパーフレア

(2) 太陽型星におけるスーパーフレアの探索



前原 裕之

〈東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター木曾観測所

〒397-0101 長野県木曾郡木曾町三岳 10762-30〉

e-mail: maehara@kiso.ioa.s.u-tokyo.ac.jp

太陽型星における「スーパーフレア」は、発生頻度が非常に低くまた星自身の明るさと比べてフレアによる明るさの変化が非常に小さいために観測が困難であり、これまで研究がほとんどされていませんでした。私たちは、ケプラーによって実現した宇宙からの超高精度かつ多数の天体の測光観測のデータを用いて、太陽型星におけるスーパーフレアを多数検出することに成功しました。本稿では、ケプラーのデータから検出された太陽型星におけるスーパーフレアとその統計的な性質について紹介します。

1. 太陽型星のスーパーフレア

太陽では大きなフレア発生時に「白色光フレア」と呼ばれる、可視光で黒点付近が光る現象が見られることがあります（柴田さんの記事の図1）。太陽は一番近くにある恒星なので表面を細かく分解して観測することができますが、遠方の恒星の表面を太陽のように細かく空間分解して捉えることは現在のところ困難なため、白色光フレアが起こったとしても、それを捉えるためには星表面をすべて積分した明るさの変化として観測する必要があります。しかしながら、スーパーフレアといっても太陽と同じG型主系列星では、星自身の明るさがフレアによる増光に比べてはるかに大きく、観測されるフレアによる増光は非常に小さいため、これを検出することは困難であるといえます。これまでに知られている10年に1回クラスの最大級の太陽フレアでさえ、可視光域での太陽全面の明るさの増加はわずかに1万分の1程度にしかならないため¹⁾、測光的にフレアを捉えるためには非常に高い測光精度が必要となります。

太陽フレアや恒星フレアでは、大きなフレアほど頻度が低いことが知られており、大雑把に言ってフレアのエネルギーが10倍大きくなると発生頻度は10分の1になってしまいます²⁾⁻⁴⁾。例えば、地上観測でも容易に検出できると思われる、可視光で10%の増光を示すような最大級の太陽フレアのさらに1,000倍の規模のフレアでは、大雑把に言って1万年に1回程度の極めてまれにしか発生しないことが予想されます。加えて、フレアのような突発現象はいつ起こるのか予想がつかないため、連続した観測が必要となります。このように、太陽型星のスーパーフレアは検出そのものが非常に難しいために、これまで観測例もほとんどなく、ほとんど研究されていませんでした。

太陽だけを観測した場合はスーパーフレアを検出するには1万年程度という非現実的な観測時間が必要になってしまいますが、1万個の太陽と似た星を1年間観測できれば、統計的には太陽を1万年観測したのと同程度のデータが得られることになり、多少は現実味を帯びてきます。われわれの研究以前にも、Schaeferらによって過去の眼視観

測の報告からX線の観測データまで、多数の天体のさまざまなデータから太陽型星（G-F型主系列星）におけるスーパーフレアを探す研究が行われたことがあります⁵⁾、わずかに9例が報告されたのみで、スーパーフレアの統計的な性質やフレアを起こす星の性質との関連などはわかっていませんでした。

2. ケプラー宇宙望遠鏡のデータ

太陽型星のフレアを捉えるためには、超高精度で、非常に多数の星を、なるべく長期間連続して測光観測をする必要があります。柴田さんの記事でも紹介しましたが、私たちは最初、地上から超広視野のサーベイを行って、多数の太陽型星（ $\sim 10^5$ 個）を観測し、スーパーフレアを捉えようと計画していました。しかし、この三つの条件をすべて満たす理想的な望遠鏡がすでに2009年に打ち上げられていました。その望遠鏡はケプラー宇宙望遠鏡です。ケプラーの主目的はトランジット法によって系外惑星、特に太陽と同じような天体の周りの地球型惑星を発見することです。太陽と地球の直径比は約100:1ですので、トランジットによる減光は単純に考えて1万分の1となり、当然ケプラーもこの減光を捉えることができる測光精度で多数の天体を連続して観測することができました（残念ながら2013年5月に姿勢制御に問題が発生してしまい、それまでのような観測は行えなくなっています）。この1万分の1という値は最大級の太陽フレアによる可視光域の増光と同程度です。微小な減光を観測できるなら、逆に微小な増光を捉えるためにも使えるはず、と考えました。

ケプラーは口径95 cmのシュミット望遠鏡の焦点面にCCDを42枚並べた構成で、こと座とはくちょう座の間の約100平方度の範囲だけにある約16万天体を、データのダウンロードなどで望遠鏡の姿勢を変更するタイミングを除き、連続して観測していました。観測の時間分解能は約30分

で、特定の観測対象については時間分解能1分のデータもとられています。一般に太陽の白色光フレアは短時間（数分）の現象であり、30分という時間分解能はフレアの観測には明らかに向いていません。しかし、われわれがケプラーのデータを解析し始めた頃には、すでにケプラーの初期成果としてM型やK型主系列星のフレアを30分の時間分解能のデータから検出した論文が出版されており⁶⁾、時間分解能が悪くとも、継続時間の長いフレアであれば検出できることを示していました。

3. フレアの検出

ケプラーによって得られたデータは一部を除いてMASTのWebサイトで公開されており⁷⁾、その当時公開されていたすべてのデータをダウンロードして解析を始めました。2010年11月に、柴田さんの講義に出ていた当時1回生だった学生たち5名が参加するフレアゼミで、ケプラーのデータの扱い方や、フレアはどんな光度変化を示すのか、検出方法の方針などを解説して、彼らにフレアを探してもらうことになりました。実は当時私は太陽型星のスーパーフレアはないだろうと思っていました。ところが、この予想は良い意味で外れました。2010年12月に、当時1回生の柴山さんが、G型星の光度曲線からフレアを見つけました、とメールで報告してくれたのです。光度曲線を見ると、急激な増光とそのあとの緩やかな減光がはっきりと捉えられており、星の色もG型星と矛盾しない値になっていました。これはたいへん、ということで早速、膨大なケプラーのデータから、効率よくフレアだけを検出する方法の開発に着手することになりました。

フレアによる可視光の光度曲線は一般に急速な増光とその後の緩やかな減光を示します。増光時のタイムスケールはM型星のフレアの例では数分以下であることが多く、G型星におけるスーパーフレアでも同様であれば、ケプラーの時間分

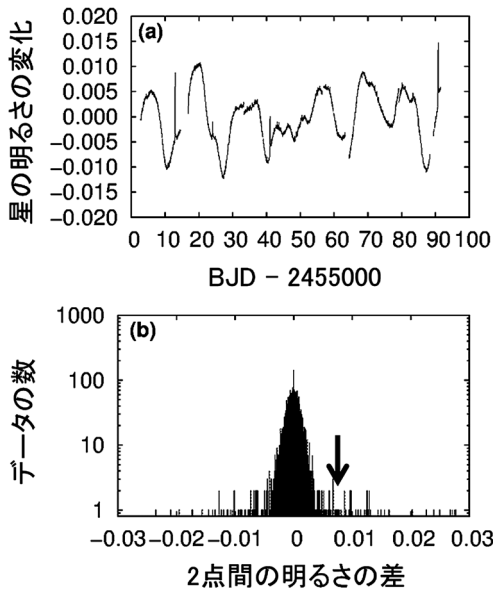


図1 (a) KIC 9459362の光度曲線. (b) (a)のデータの連続する2点間の明るさの差分のヒストグラム. このデータの場合、2点間の明るさの差分の上から1%は0.008になる(図中の下向きの矢印).

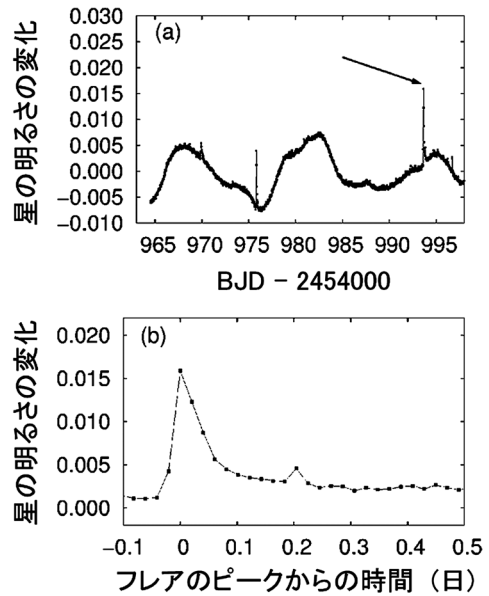


図2 (a) KIC 9459362の光度曲線. 周期15日程度の変光に加えてスパイク状の光度変化が見られる. (b) 図中の矢印のフレアの拡大図. 急激な増光の後、0.1日程度かけてゆっくりと減光する様子が観測された.

解能ではフレア直前のデータ点の次のデータ点はフレアのピークを含むと考えられます. もし、十分に大きなフレアが起これば、フレアの直前とフレアのピークを含むその次のデータ点の明るさの差分は、ほかのフレアが起きていない時間帯における連続する2点の明るさの差分よりも、大きくなるはずです. そこで、ケプラーによって得られた光度曲線の連続した二つの観測点の明るさの差分をとり、差分値の大きいほうから1%に相当する明るさの差から閾値を決め、ピークにおける明るさと増光前の明るさが閾値を超えたものをフレアの候補とすることにしました(図1).

しかしながら、これだけだと、たまたま宇宙線などによって生じた偽の増光も多数検出してしまいます. そこで、検出したフレアの候補のデータをもちいて、増光・減光にかかる時間や継続時間、フレアの振幅等を求め、(1) 継続時間が60分以上である(増光中のデータが2点以上ある)

こと、(2) 増光が速く減光が緩やかであることなどの条件をつけ、フレアの候補を絞り込みました. また、ケプラーの空間分解能は1画素4秒角なので、近くに別な星があるとどちらの星でフレアが起きたのかわからない可能性があります. そこで、(a) 12秒角以内に別な天体が存在するかどうか、(b) 24秒角以内で同時に別な天体のフレアが起きていないかどうかをチェックしたほか、フレアによって星の位置が変化していないか(近接星のフレアだと、観測される星の重心位置がずれる)どうかもチェックを行いました.

機械的に差分値だけで選ぶと2万以上のフレア候補のイベントが検出されましたが、継続時間や増光/減光の時間、近くに別な天体があるケースの排除を行うと数百程度にまで絞り込むことができました. 最後は数百個のフレア候補イベントについて、個々の光度曲線の一つひとつ目で見て、疑わしいイベントの排除を行い、148天体で365

個のフレアのデータが残りました。図2はそうしたG型星のフレアの一例で、数日から数十日の準周期的な変動のうえに、スパイク状の増光が何度も起きており、その部分を拡大すると、フレアに特徴的な急速な増光と緩やかな減光が見られることがわかります。

太陽の白色光フレアやM型星のフレアの研究によると、可視光で光る領域は、10,000 K程度の黒体放射に相当するスペクトルをしていることが報告されています^{8), 9)}。そこで、フレアを起こした領域の温度を10,000 Kと仮定し、フレアを起こした星自身の明るさとフレアの振幅、継続時間からフレアによって放射されるエネルギーを求めてみると、 10^{33} – 10^{36} ergになることがわかりました。これは最大級の太陽フレアで解放されるエネルギーの10から10,000倍のエネルギーに相当するもので、まさに探し求めていた「スーパーフレア」だったのです。

フレアを起こす天体の多くは数日から数十日の準周期的な変動が観測されました。このような変動の原因としては、表面に黒点をもつ星の自転が考えられます。また、フレアを起こす星が実は連星である可能性もあります（同程度の軌道周期を

もつRS CVn型連星は非常に活発な活動性を示し、巨大なフレアを起こすことが知られています。もし、自転によって生じているとすると星の変光周期は星の自転周期、変光の振幅は黒点の大きさを反映します。変光の振幅は典型的には0.1–数%程度なので、スーパーフレアを起こす星の多くは、図3のように太陽よりも大きな黒点を持つと考えられます（スーパーフレア星と黒点による変光については野津湧太さんの記事で詳しく解説します）。

4. スーパーフレアの発生頻度

ケプラー衛星のデータから365個ものスーパーフレアが検出されたことで、スーパーフレアの発生頻度とフレアのエネルギーの間にどのような関係があるのかを調べるのが可能になりました。そこで、太陽フレアの発生頻度分布と全く同じように、縦軸に発生頻度（検出したフレアの数／観測期間／観測天体数／エネルギー幅）、横軸にフレアのエネルギーをとり、スーパーフレアの発生頻度分布のグラフを作ってみました（図4）。フレアのエネルギーが 5×10^{34} ergよりも大きな範囲では、フレアの発生頻度（ dN/dE ）とフレアの

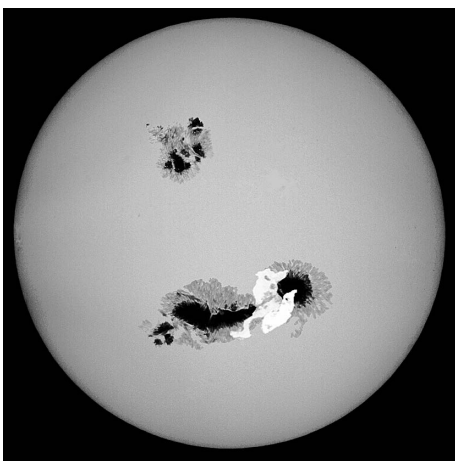


図3 スーパーフレアを起こした星の想像図。黒点近くの白い部分がスーパーフレアによって光っている。

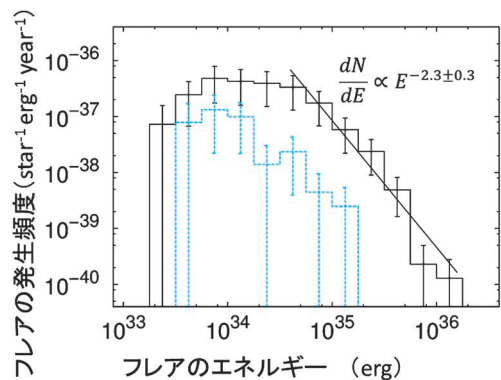


図4 スーパーフレアの発生頻度分布。実線はすべてのG型主系列星における発生頻度分布で、破線は表面温度5,600–6,000 K、自転周期10日以上太陽に近い性質をもつ星のみにおける発生頻度分布。

エネルギー (E) の間には

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-2.34 \pm 0.3}$$

のような関係が見られることがわかりました（エネルギーの小さい領域において、発生頻度が低くなっているのは、検出限界の影響で小さなフレアの検出率が低くなるためです）。同様のべき関数分布は太陽フレアの発生頻度分布においても知られていて、べき指数もスーパーフレアのものに近い値（ $-1.5 \sim -1.9$ ）になることが知られています²⁾⁻⁴⁾。

さらに、より太陽に近い性質の天体として、星の有効温度が5,600–6,000 Kでかつ変光から求めた自転周期が10日以上の比較的ゆっくりと自転している天体だけを選び、同様の発生頻度分布を調べると、やはり同様にエネルギーの大きい領域ではべき関数分布になることがわかりました。また、このような天体におけるスーパーフレアの発生頻度分布は、太陽フレアで知られている発生頻度分布のほぼ延長線上に乗ることもわかりました。太陽と似た温度、自転周期の星におけるスーパーフレアの発生頻度は、平均すると 10^{34} ergのエネルギーを解放するフレアで約800年に1回、 10^{35} ergのフレアでは約5,000年に1回になります。

5. スーパーフレアと星の性質

スーパーフレアを起こす星はどのような性質の星が多いのか、またフレアのエネルギーは星の性質とどんな関係があるのか、それらを調べるために、まず自転周期とスーパーフレアの間関係を調べてみることにしました。測光観測だけでは正確な自転周期を測ることはできませんので、ここでは、変光周期をその星の自転周期であると仮定しました。

図5は 5×10^{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星の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

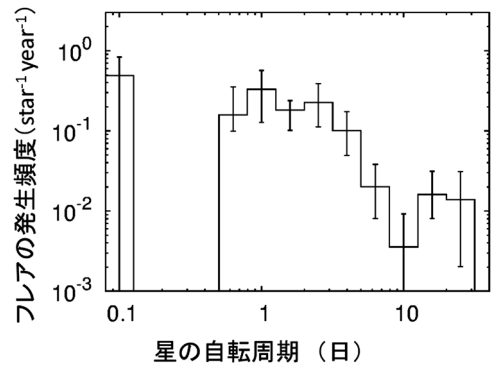


図5 エネルギーが 5×10^{34} erg以上のフレアの発生頻度と星の自転周期の関係。

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関係していると考えられており、若い星は速く自転していることが知られています¹⁰⁾。太陽の自転周期は約25日ですが、同様の自転周期の太陽型星では、周期数日の太陽型星と比べると、スーパーフレアの発生頻度は1–2桁も低いことがわかりました。フレアは星の大気（コロナ）中での磁気リコネクションによって、磁気エネルギーが熱や粒子の運動エネルギーなどに変換される過程であると考えられています¹¹⁾。そして、星の磁気的な活動の源は、星の自転と対流によるダイナモだと考えられています¹²⁾。自転周期が短い天体ほどフレアの発生頻度も高いのは、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られます。

ただ、周期が短ければフレアの発生頻度が高くなるのかというと、そうではなく、周期2–3日よりも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わかりました。太陽型星ではX線の強度（コロナからの定常的なX線だと考えられている）と自転周期の間にも、自転周期が短いほどX線が強くなり、2–3日よりも短い自転周期の星ではX線の明るさがほぼ一定になることが知られている¹³⁾ ほか、星の活動性を反映していると考えられている彩層からのCaHK線の強さ

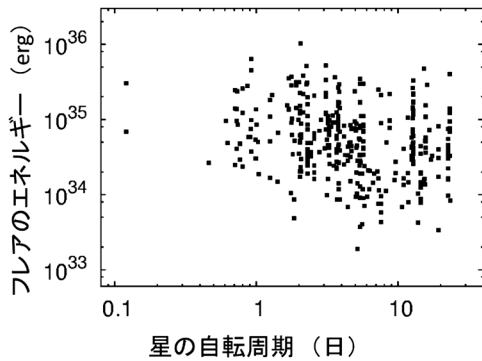


図6 個々のフレアのエネルギーとそのフレアを起こした星の自転周期の関係。

と自転周期にも同様の関係が知られています¹⁴⁾。

では、フレアのエネルギーはどうでしょうか？私たちは最初、自転周期の短い星のほうが大きなフレアを起こせるのではないかと考えていましたが、スーパーフレアのエネルギーと自転周期の散布図(図6)を作ってみたところ、その予想は全く違っていたことがわかりました。フレアのエネルギーと自転周期の間には特に相関はなかったのです。検出の下限近くのフレアを見ると、自転周期が短くなるほどエネルギーが大きくなっていますが、これは検出方法による効果(自転周期が短いほうが単位時間当たりの光度変化が大きく、フレア検出の閾値が大きくなるため)です。一方、検出されたスーパーフレアのエネルギーの最大値のほうを見ると、自転周期によらず 10^{35} – 10^{36} ergでほぼ一定であることがわかりました。このことは、太陽のような自転周期の遅い天体であっても、大きなスーパーフレアが起こりうることを意味します。

ここまでの議論では、観測された星の変光周期は、自転周期を反映したものだということを仮定していましたが、本当にそうでしょうか？世の中の恒星の半分は連星系だといいますが、近接連星なら自転と公転が同期するため自転速度が速められ、スーパーフレアを起こすのは別に不思議ではないとも考えられます。ところが、スーパーフ

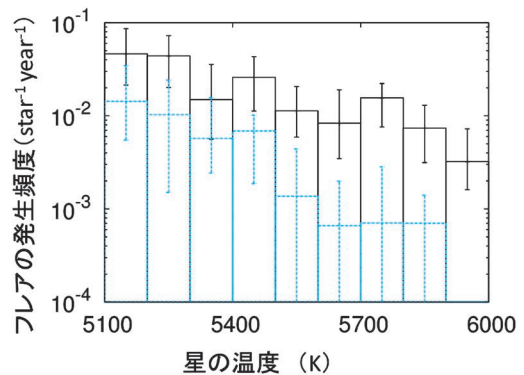


図7 エネルギーが 5×10^{34} erg以上のフレアの発生頻度と星の温度の関係。実線はすべてのG型主系列星における発生頻度、破線は自転周期10日以上星の発生頻度を表す。

レアの発生頻度と星の性質の関係を調べてみると、すべてのスーパーフレアを起こす星が近接連星だとすると説明できない観測事実があることがわかりました。スーパーフレアの発生頻度は星の温度にも関係があり、星の温度が高くなるほどフレアの頻度が低くなっていたのです(図7)。星の温度が高いほど同じエネルギーのフレアであっても、星自体の明るさに対するフレアの影響が小さくなるため、フレアの検出数をそのまま使うと、当然ながら、温度が低い星ほどたくさんのフレアが検出されます。しかし、温度の高い星でも確実に検出できる、エネルギーが 5×10^{34} ergよりも大きなスーパーフレアだけを選んで発生頻度を求めても、温度が高くなるほどフレアの発生頻度が低いことがわかりました。もし、すべてのスーパーフレアが連星で起きていたとすると、フレアを起こす頻度の違いは連星である確率の違いに対応します。スーパーフレアを起こす星の大部分が連星だと仮定すると、温度5,100 Kの星が連星である確率は、温度6,000 Kの星よりもはるかに高いことにはなりますが、5,100 Kの星と6,000 Kの星で連星である確率が大きく異なるという観測的な証拠はありません。

星の質量すなわち星の温度と対流層の深さには関係があり¹⁵⁾、低質量の温度の低い星ほど対流

層が発達するため、ダイナモによる磁場生成が活発になると考えられます。これはスーパーフレアの発生頻度の温度依存性の傾向と一致するため、少なくとも定性的には観測事実を説明できます。このことから、スーパーフレアを起こす星の（一部はもちろん連星が混ざっていることが予想されますが）少なくない数の天体は連星ではないと考えられます。実際に高分散分光による確認観測を行って見たところ、観測天体の半数以上で連星の証拠が見つからないことがわかりました。

6. スーパーフレアと系外惑星、そして太陽でのスーパーフレアの可能性

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^{5), 16)}。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、148個のスーパーフレアを起こす太陽型星の10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。ちょうどよいことに、ケプラーによって発見された系外惑星候補のリストが発表されていたため¹⁷⁾、私たちはこの惑星候補のリストとスーパーフレアを起こす星のリストを比べてみることにしました。両者を比較したところ、スーパーフレアを起こす星の中には、系外惑星候補が発見されている天体は一つもないことがわかりました（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ってい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、ホットジュピターがあることで起こる太陽型星でのスーパーフレアはまれであることがわかりました。この結果は、従来の説では太陽ではスーパーフレアが起こらないと考えられていましたが、「起こらない」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はないのでしょうか？ 私たちの論文¹⁸⁾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。名古屋大学の三宅美沙さんたちの研究結果で、屋久杉の年輪を使って炭素14 (^{14}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¹⁹⁾。 ^{14}C は宇宙線が地球の上層大気中の原子に衝突してできた中性子が窒素14 (^{14}N) と衝突し、その後 ^{14}N が崩壊することで生成します。 ^{14}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。この原因として考えられているのは、近傍の超新星爆発や巨大な太陽フレアです。巨大な太陽フレアであれば、大規模なオーロラが見られるはずで、実際にそのような記録に対応するのではないかとと思われる文献があるとの指摘もあります^{20), 21)}。三宅さんらはさらに長期間の ^{14}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を発見しました²²⁾。これらが本当に太陽におけるスーパーフレアの痕跡なのかはまだよくわかりませんが、もしそうだとしたら1,000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、ケプラーの観測データから求めた発生頻度と同程度になるのはたいへん興味深いと思います。

大規模な太陽フレアやそれによる磁気嵐は、人工衛星の故障や送電システム・情報通信網の障害という形で、今日の文明社会に悪影響を及ぼすことがあります。太陽フレアよりも桁違いに大きなスーパーフレアでは、その影響もより大きくなると予想され、太陽でスーパーフレアが起こりうるのかどうかは極めて重要な問題だと言えます。私たちの今後の研究でも、スーパーフレアを起こす星が本当に太陽と同じような星なのか、それとももっと別なスーパーフレアを起こす特別な要因があるのかを明らかにできれば、と考えています。

参考文献

- 1) Kopp G., Lawrence G., Rottman G., 2005, *Solar Physics* 230, 129
- 2) Crosby N. B., Aschwanden M. J., Dennis B. R., 1993, *Solar Physics* 143, 275
- 3) Shimizu T., 1995, *PASJ* 47, 251
- 4) Aschwanden M. J., Tarbell T. D., Nightingale R. W., et al., 2000, *ApJ* 535, 1047
- 5) Schaefer B. E., King J. R., Deliyannis C. P., 2000, *ApJ* 529, 1026
- 6) Walkowicz L. M., Basri G., Batalha N., et al., 2011, *AJ* 141, 50
- 7) <http://archive.stsci.edu/kepler/>
- 8) Hawley S. L., Allred J. C., Johns-Krull C. M., et al., 2003, *ApJ* 597, 535
- 9) Kretzschmar M., 2011, *A&A* 530, A84
- 10) Ayres T. R., 1997, *JGR* 102, 1641
- 11) Shibata K., Magara, T., 2011, *Living Reviews in Solar Physics* 8, 6
- 12) Parker, E. N., *Cosmical Magnetic Fields: Their Origin and Their Activity*. Oxford University Press, New York, 1979
- 13) Pallavicini R., Golub L., Rosner R., et al., 1981, *ApJ* 248, 279
- 14) Noyes R. W., Hartmann L. W., Baliunas S. L., et al., 1984, *ApJ* 279, 763
- 15) Kippenhahn, R., Weigert, A., *Stellar Structure and Evolution*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1990
- 16) Rubenstein E. P., Schaefer B. E., 2000, *ApJ* 529, 1031
- 17) Borucki W. J., Koch D. G., Basri G., et al., 2011, *ApJ* 736, 19
- 18) Maehara H., Shibayama T., Notsu S., et al., 2012, *Nature* 485, 478
- 19) Miyake F., Nagaya K., Masuda K., et al., 2012, *Nature* 486, 240
- 20) <http://www.nature.com/news/mysterious-radiation-burst-recorded-in-tree-rings-1.10768>
- 21) McClintock J., Strong J., *Cyclopaedia of Biblical, Theological, and Ecclesiastical Literature*. Harper, 1894
- 22) Miyake F., Masuda K., Nakamura T., 2013, *Nature Communications* 4, 1748

Search for Superflares on Solar-Type Stars

Hiroyuki MAEHARA

*Kiso Observatory, Institute of Astronomy,
Graduate School of Science, The University
of Tokyo, 10762-30 Mitake, Kisomachi,
Kiso-gun, Nagano 397-0101, Japan*

Abstract: Stellar flares on solar-type stars have not been well studied because of difficulties in detection (extremely low occurrence frequency and very tiny changes in brightness of the star). We searched for superflares on solar-type stars using the data obtained by the Kepler space telescope and found many superflares. In this article, I would like to introduce the superflares on solar-type stars discovered from the Kepler data and their statistical properties.