

スーパーフレアに伴うコロナ質量放出のシミュレーションにむけて

平石 平 (京都大学大学院 理学研究科 宇宙物理学教室)

Abstract

太陽と似た星 (自転の遅い G 型主系列星) から, 放出されるエネルギーが 10^{33} [erg] を超えるような巨大フレア (以下, スーパーフレア) が多く観測されている. これは太陽でもスーパーフレアが生じる可能性を示しているが, 太陽におけるスーパーフレアをシミュレーションで再現した例はまだない. 太陽でのスーパーフレアをシミュレーションすることによって, スーパーフレアが可能かどうか, スーパーフレアの形態に制限をかけられないか, 地球への影響はどの程度か, といった問いに答えられるだろう. ここでは, 太陽でのスーパーフレアのシミュレーションを研究するにあたって, その意味や動機, 今後の展望を過去の研究をふまえながら論じる.

1 イントロダクション

フレアやコロナ質量放出のような太陽面で生じる爆発については観測・理論ともに, 多くの研究が蓄積されてきた. フレアもコロナ質量放出も太陽表面で生じる磁気エネルギーの爆発的な解放現象である. 解放されたエネルギーが増光現象として観測されたものがフレアであり, ガスの運動エネルギーとなって惑星間空間まで噴出したものがコロナ質量放出である.

太陽面爆発の研究は, 1858 年に Carrington が白色光でフレアを観測したときにはじまる. 観測手段が白色光に限られていたため, しばらくのあいだ太陽フレアの研究は停滞していたが, H α 線や X 線での観測が可能になってから, 急激に進展していった. 解放されるエネルギーの大きさから, 太陽面爆発のエネルギーは黒点近傍に蓄えられた磁気エネルギーであると考えられるようになり, 様々なモデルが提唱されてきた.

フレアの観測は太陽だけではない. 太陽以外の恒星からも多くのフレアが観測されている. そのような中には, 総エネルギーが 10^{33} [erg] を超えるような巨大なフレアも含まれる. このような巨大フレアはスーパーフレアと呼ばれる. G 型主系列星からのスーパーフレアの観測は, 自転の周期が 10 日より短い自転の速い星からの観測が大多数を占めているが, 太陽のように自転の周期が 10 日より長い自転の遅い星からも観測されている. 現在まで太陽でスーパー

フレアが観測された例はないが, この観測は太陽でスーパーフレアが起きる可能性を示している.

フレアに伴うコロナ質量放出は, 地球磁場を変動させたり, 高エネルギーの粒子を発生させたりして, 地球に影響を及ぼす. スーパーフレアは巨大なコロナ質量放出を伴うと予想される. もしスーパーフレアが太陽で発生したら, 地球に非常に大きな影響を及ぼすだろう.

このように, スーパーフレアに伴うコロナ質量放出を考慮することは, 地球への影響を考える上で, 重要であるが, 太陽でのスーパーフレアに伴うコロナ質量放出をシミュレーションしたものはない. 太陽の観測と共に, それに関するモデルが発展していったように, 太陽型星におけるスーパーフレアの観測とともに, スーパーフレアのモデルを発展させていく必要があるだろう.

Shiota et al. 2010 では, 周囲の磁場の様子がコロナ質量放出に影響を与え, 規模や構造を変化させることを示している. このシミュレーションを発展させ, 太陽でのスーパーフレアに伴うコロナ質量放出をシミュレーションしたい.

2 節では, 太陽以外の恒星でのスーパーフレアの観測例を挙げる. 第 3 節では, コロナ質量放出の噴出過程について研究した論文を紹介する. そして, 第 4 節では, スーパーフレアに伴うコロナ質量放出のシミュレーションについて, 今後の方針を示す.

2 スーパーフレアの観測例

太陽フレアは黒点近傍に蓄えられた磁気エネルギーが突然解放されることにより生じる。その解放されるエネルギーの典型的な規模は 10^{29} から 10^{32} [erg] 程度である。

フレアは太陽に限らず、その他の恒星でも観測されている。その中には、解放されるエネルギーの規模が、 10^{33} から 10^{35} [erg] 程度にまで達する、巨大なフレアも含まれる。このように、典型的なフレアよりも 10^3 倍ほど大きい規模を持つフレアはスーパーフレアと呼ばれる。

スーパーフレアの観測例は非常に少なかったため、スーパーフレアの研究は停滞していた。最近になって、太陽以外の恒星でのフレアの観測の中から、多くのスーパーフレアが観測されるようになった。NASA の Kepler ミッションを利用したスーパーフレアの観測 (Maehara et al. 2012) は太陽でスーパーフレアが生じる可能性を示した。

観測は 2009 年の 4 月から 12 月にわたって行われた。この間に観測された恒星の総数は 83000 であり、観測されたスーパーフレアの総数は 365 である。観測された恒星のうち、太陽型星の数は 9751 で、太陽型星から観測されたスーパーフレアは 148 である。太陽型星であると判断するために、Kepler Input Catalog を用いた。判断の基準は、有効温度と表面重力 ($5100 \leq T_{\text{eff}} \leq 6000$, $\log(g) \geq 4$) である。

スーパーフレアの持続時間は数時間であり、その間に、星全体の光度が 0.1% から 1% ほど大きくなる。G 型の主系列星で観測されたスーパーフレアの光度は、 9×10^{29} から 4×10^{32} [erg/s] であり、放出される総エネルギーは、 10^{33} から 10^{36} [erg] である。

典型的なスーパーフレアのライトカーブを図 1 に示す。図 (1) の (a), (b) は、G 型の主系列星、KIC 9459362 で発生したスーパーフレアのライトカーブである。(a) の各観測点は、観測にわたっての平均輝度とその瞬間の輝度との差を平均輝度で規格化したものを示す。(b) はスーパーフレアの発生した箇所を拡大したものである。1.4% の増光があり、持続時間は 3.9 時間であった。ピーク時の輝度は 1.3×10^{31} [erg/s] であり、放出されたエネルギーは 5.6×10^{34} [erg] であった。

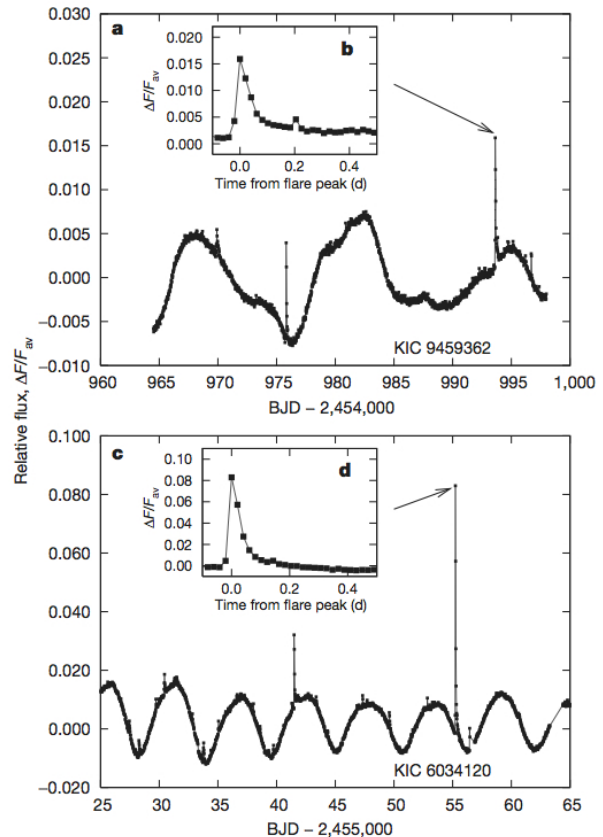


図 1: 典型的なフレアのライトカーブ (Maehara et al. 2012)

(c), (d) は (a), (b) と同様であるが、G 型の主系列星、KIC 6034120 を観測したものである。8.4% の増光があり、持続時間は 5.4 時間であった。ピーク時の輝度は 6.8×10^{31} [erg/s] であり、放出されたエネルギーは 3.0×10^{35} [erg] であった。

次に、ライトカーブの準周期的な輝度の変動に注目する。その周期は、KIC 9459362 では、12.5 時間である。この変動の原因として考えられるのは、黒点が自転によって見え隠れすること、連星系の運動、伴星による蝕、星自体の脈動、などが挙げられる。星自体の脈動の可能性は、G 型主系列星の脈動の周期が、分のオーダーであることから除外される。輝度の変動が、公転によるものか、自転によるものかについては、慎重に検討しなくてはならないが、図 1 のライトカーブにおける変動は、自転によるものである (cf Debosscher.J et al. 2011)。スーパーフレア

のエネルギーは、黒点近傍に蓄えられた磁気エネルギーであるから、図1における準周期的な変動は、黒点が生じて見え隠れすることによって生じると考えられる。このように考えると、スーパーフレアを起こす黒点は、通常太陽で見られるものよりも、遙かに大きな巨大黒点でなくてはならない。

また、観測された星の数、観測期間、観測されたスーパーフレアの数から、スーパーフレアの平均発生頻度を見積もることができる。スーパーフレアの発生頻度は、星の自転速度と関係があり、早く自転している星ほどスーパーフレアの発生頻度は高い。太陽のような自転の遅い G 型主系列星の場合の例を挙げる。自転の遅い G 型主系列星で表面温度が $5600 \leq T_{\text{eff}} < 6000$ [K] の範囲にある星 14000 個を 120 日間にわたって観測したところ、14 のスーパーフレアが観測された。これから、計算されるスーパーフレアの頻度は 2.9×10^{-3} [times/yr/stars] (350 年に一回程度) である。さらに詳しく、スーパーフレアの発生頻度を調べると、太陽と性質の近い星 (自転が遅い G 型主系列星) では、 10^{34} [erg] 程度のフレアが 800 年に 1 回、 10^{35} [erg] なら、5000 年に 1 回程度発生していると結論できる。

3 コロナ質量放出と周囲の磁場との関係

続いて、コロナ質量放出と周囲の磁場との関係を扱った論文 (Shiota et al. 2010) を紹介する。

太陽面爆発が発生したとき、常にフレアやコロナ質量放出が生じるわけではない。フレアやコロナ質量放出は、コロナ中の磁気エネルギーの突発的な解放によって生じる 2 次的な現象である。解放されたエネルギーが熱エネルギーとなれば、増光現象 (フレア) として観測されるし、運動エネルギーとなり、それが太陽の重力を振り切れば、コロナ質量放出となる。

フレアの規模と発生頻度はベキ法則に従う (Drake 1971)。一方、コロナ質量放出のサイズと発生頻度は対数正規分布に従う (Aoki et al. 2004)。起源を同じにする現象が、異なる統計法則を示すということは、何かしらのフィルター効果が働いて、小さなコ

ロナ質量放出の発生頻度を低くしていると考えられる。そのフィルター効果の候補として爆発と周囲の磁場の相互作用が挙げられる。特に、コロナ質量放出が生じるかどうかは、プラズマの塊が運動エネルギーを得て飛んでいくだけでなく、周囲の磁場の障害を振り切って、惑星間空間まで飛び出していかどうか重要な問題となる。

爆発の初期条件として、フォースフリー磁場の解析解のひとつであるスフェロマック解の一部を周囲の磁場に埋め込んだものを用いる (図 2)。爆発が生じる前は、磁場構造は力学的に安定でなければならぬため、ローレンツ力の働かない、フォースフリー磁場に近い構造としていられる。これが、初期条件としてフォースフリー磁場を仮定する理由である。フォースフリー磁場の一部のみを用いているため、この初期条件自体は平衡状態ではない。

周囲の磁場として以下の 3 通りの場合を考えた (図 2)。1 つめは、周囲の磁場がない場合。2 つめは、スフェロマック磁場の表面と平行な磁場がある場合。3 つめは、反平行な磁場がある場合である。

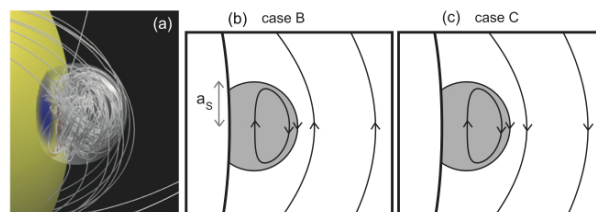


図 2: 3 種の初期条件: (a) スフェロマック磁場の 3D 描像, (b)(c) 平行磁場と反平行磁場の模式図 (Shiota et al. 2010)

それぞれの場合についての結果は以下のようであった。

まず、周囲の磁場がない場合には、噴出したプラズマの塊は、急激に加速した後、減速して一定速度となり、計算ボックスの境界まで達することができた。

反平行の磁場の場合は、噴出した後で、磁場は周囲の磁場と相互作用して開いた構造に変化してしまい、形をとどめたまま、境界まで達することができなかった。

平行な磁場の場合は、磁場がない場合と同様に、プラズマの塊が計算ボックスの境界まで達することが

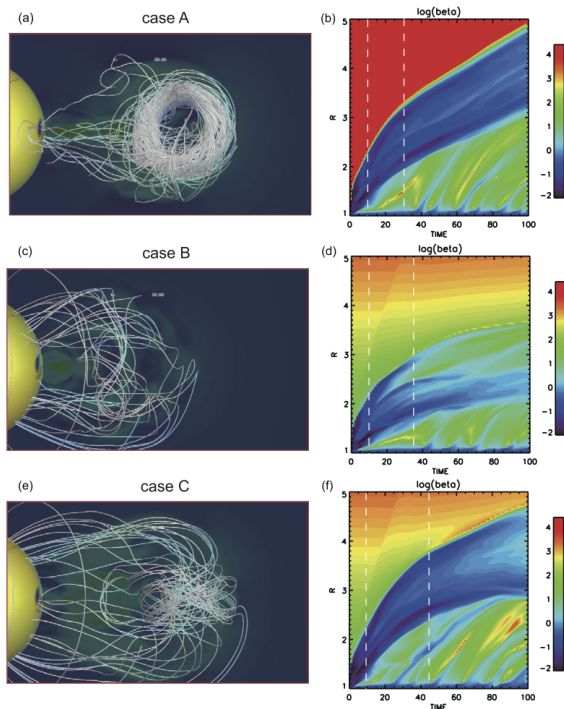


図 3: 3 種の初期条件による結果のちがいは: (a,b) 周囲の磁場なし (c,d) 反平行磁場の場合 (e,f) 平行磁場の場合: (a), (c), (e) はそれぞれ, $t = 50$ における磁場の様子を 3 次元的に描写した物である. (b), (d), (f) における色は, プラズマ β を表す. 横軸は時間, 縦軸は x 軸 (光球面でのスフェロマック磁場の中心を 0 とし, 鉛直上向き方向に軸をとったもの) 色の青い部分は磁場が強い領域, つまりプラズマの塊を表している. この図から, プラズマがどの程度の速度で噴出しているがわかる. (Shiota et al. 2010)

できた. さらに加えて, プラズマの塊が噴出の過程で回転するという現象が示された. 惑星固有磁場に半平行な成分の量は磁気嵐の規模と密接に関係しているため, このような成分の磁場の量を予測できることは重要である.

4 今後の展望

最初にするべきことは, Shiota et al. 2010 に従って, 太陽でのスーパーフレアに伴う巨大 CME をシミュレーションで再現することである. このシミュ

レーションでは, 初期条件として, 莫大な磁気エネルギーをもった黒点周囲の磁場を模倣したスフェロマック磁場を用意する. そのためには, 磁場を強くする, 黒点を大きくする, 磁力線のねじれを強くするなどのいくつかの方法があるが, それが CME の速度や噴出範囲にどのように関係しているのかを調べたい. とくに, スーパーフレア発生時には巨大黒点が存在していることが予想されているため, 黒点のサイズを大きくすることは重要である.

このシミュレーションで, 巨大コロナ質量放出を伴うようなフレアを発生させるために必要な黒点のサイズが絞り込めれば, スーパーフレアの前触れとなる磁場構造についての知見が得られる. そして, そのような磁場構造のモデルを模索するような研究に発展させることもできる.

Shiota et al. 2010 では太陽の自転を考慮していないが, 爆発の時間スケールは自転の時間スケールを無視できるほど速いので, 太陽の自転は考慮しなくても問題ないであろう. ただし, 自転の速い星ほど, スーパーフレアの発生頻度が大きい傾向があるので, スーパーフレアの前触れとなる磁場構造の出現に関しては太陽の自転が無視できないかもしれない.

次に, 上記のシミュレーションを発展させて, CME が惑星間空間に伝わっていく様子を調べたい. 衝撃波の生じる様子がわかれば, 太陽以外の恒星でスーパーフレアが起きたとき, それに伴う CME の伝播を観測できるかもしれない.

Reference

- [1] Maehara et al. 2012. Superflares on solar-type stars. Nature Vol.485 pp478
- [2] Shiota et al. 2010 Magneto-hydrodynamic modeling for a formation process of coronal mass ejection: Interaction between an ejecting flux rope and an ambient field. The Astrophysical Journal
- [3] Debosscher. J et al. 2011 Global stellar variability study in the field-of-view of the Kepler satellite. Astron. Astrophys. 529, A89
- [4] Drake, J.F. 1971, Sol. Phys., 16 152
- [5] Aoki S. I, Yashiro S, and Shibata K. 2004. arXiv:astro-ph/0401352