

非熱的電波放射が異常に強い太陽フレア

増田 智

〈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: masuda@stelab.nagoya-u.ac.jp



太陽フレアによる増光は、主に高温プラズマからの熱的な放射と加速された高エネルギー粒子（特に電子）からの非熱的な放射の2種類があります。前者は、軟X線と呼ばれる比較的エネルギーの低いX線でよく観測され、後者はもっとエネルギーの高い硬X線や電波で観測されます。多数の太陽フレアで統計的に調べてみると、両者は正の相関をもっていることが知られています。が、今回、熱的な放射の代表である軟X線ではほとんど増光が検出されなかったにもかかわらず、強い非熱的な電波放射が観測された変わったタイプの太陽フレアが見つかりました。フレアループの磁場形状の異なる二つのモデルを比べながら、その特異性が生まれた原因について考察していきます。

1. はじめに

太陽フレア¹⁾は、太陽大気中で起きる爆発現象です。太陽フレアが起きると、電波から γ 線までほとんどすべての波長帯で増光現象が観測されます。しかし、その増光を引き起こす放射過程はさまざまです。ここでは、加速された高エネルギー電子から放射される電波と、高温プラズマ（電離した気体）から放射される軟X線（エネルギーの低いX線、本稿では光子1個あたりのエネルギーが10キロ電子ボルト以下のX線を指す）に注目します。

熱的な放射と非熱的な放射

太陽フレアが発生すると、例えば、フレア開始以前には太陽コロナ中に存在しなかった1,000万度を超えるような高温プラズマが生成されることにより、軟X線の放射強度は100倍から1,000倍にも上がります。このように、ある温度の物質から放射される放射を熱的な放射と呼びます。これに対して、温度を定義できないような粒子群、例えば、非常に高いエネルギーまで加速された粒子

（非熱的粒子）からの放射を非熱的放射と呼びます。太陽フレアでの代表的な非熱的放射は、加速電子により放射される硬X線（エネルギーの高いX線、本稿では光子1個あたりのエネルギーが10キロ電子ボルト以上のX線を指す）や電波（特にマイクロ波と呼ばれるGHz帯の電波）です。

熱的な放射と非熱的な放射には、個々のフレアにおける時間的な関係と多数のフレアを扱った際に見られる統計的な関係があります。前者は、ニューパート効果²⁾と一般的に呼ばれている関係です。すべてのフレアで成立するわけではありませんが、両者の関係を端的に示していますので、ここで簡単に紹介します。図1には、熱的な放射の代表として軟X線強度、非熱的放射の代表として硬X線強度の二つの波長での太陽フレアの典型的な時間変化を示しました。軟X線強度の時間変化は、なだらかで長時間続きます。これは、高温プラズマがフレア中にどんどん作られて、その量が増えるとともに増光し、供給が止まる（もしくは減少する）とだんだんプラズマが冷えて放射強度が下がる様子を示しています。これに対し

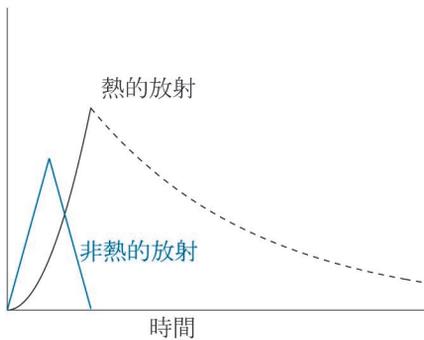


図1 ニューパート効果の概念図。硬X線などの非熱的放射（青色）は、フレア初期にスパイク状に現れます。それに対して、軟X線などの熱的な放射は、非熱的放射を時間積分したような形で現れ（黒の実線）、非熱的放射が終了したところにピークを迎え、その後は、高温プラズマがゆっくりと冷えていくとともに、徐々に弱くなっていきます（黒の点線）。

て硬X線は、太陽コロナ中で加速された電子が太陽大気中（主に彩層）でエネルギーを失う様子を示しています。特殊なフレアでない限り、生成から消失までは、それほど時間差は生じませんので、この時間変化は、加速電子の生成の様子を示していると言えます。ニューパート効果は、非熱的な放射の時間変化を積分すると熱的な放射の時間変化に似た時間変化になるという経験則です。その解釈は、加速電子が無視できない量のエネルギーをもって、その電子が彩層に突入して衝突し、エネルギーを失う際に彩層を加熱して高温プラズマを生成するという考え方になります。因果関係で言うと、加速電子が原因で、高温プラズマが結果という解釈です。

もう一つの関係は、両者の最大放射強度に関する統計的な相関関係です。図2は、縦軸に熱的な放射として Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES衛星) が計測した太陽フレア時の軟X線（波長1-8 Å）の最大フラックス、横軸に非熱的放射である野辺山太陽電波観測所の野辺山強度偏波計³⁾の17 GHz帯での最大電波フラックスを対数スケールでプロットしたものです。

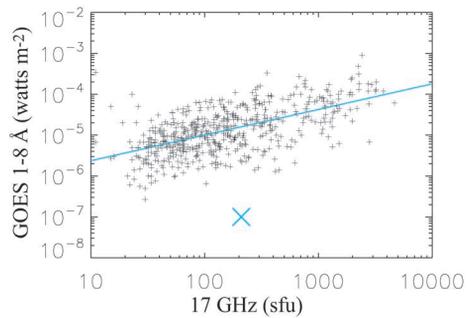


図2 非熱的放射である電波（17 GHz）のピーク放射強度（横軸）と熱的放射である軟X線のピーク放射強度（縦軸）の関係（縦軸、横軸とも対数スケール）。個々の点が、それぞれ一つの太陽フレアに対応しています。青い直線は両者の相関関係を示しています。本稿で紹介する太陽フレアは、青い×で示されており、その特異性がよくわかります。（sfuはsolar flux unitのことで、 $1 \text{ sfu} = 1 \times 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ に対応します。）

1992年から2011年までのすべてのフレアをプロットしています。これを見ると、散らばりはあるものの、両者がおおむね正の相関関係にあることが見て取れます^{4), 5)}。つまり、熱的エネルギーが大きいフレアでは、非熱的エネルギー、すなわち加速電子のもつエネルギーが大きいことを示しています。

2. 特異な太陽フレア

前章で述べたように、熱的エネルギーと非熱的エネルギーには、統計的に見ると相関があることがわかりました。しかし、ここでとんでもなく、その相関関係からずれる太陽フレアが見つかりました⁵⁾。2011年3月10日の2:56 UTに太陽の西の縁で発生したフレアです。野辺山太陽電波観測所の野辺山強度偏波計の17 GHz帯、35 GHz帯の電波フラックスの時間変化には、02:56:40 UT辺りから増光し、20秒ほどで弱くなるフレアの様子が見られます（図3下）。電波の増光としては、中規模のフレアに相当します。実際、前章で述べた統計的な相関関係から期待されるGOES衛星の軟X

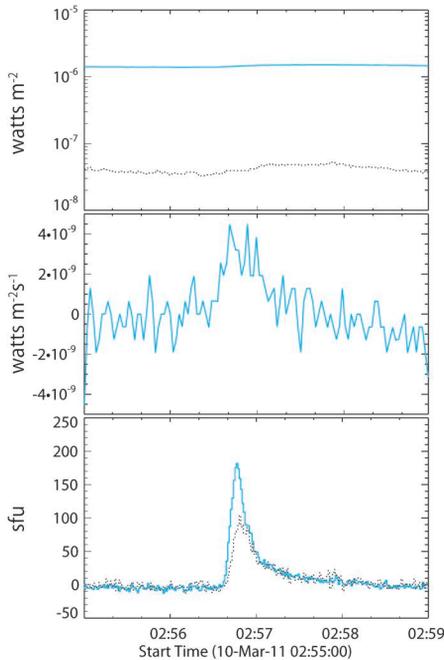


図3 2011年3月10日の太陽フレアの放射強度の時間変化。(上) GOES衛星の観測した波長1-8 Å (実線), 波長0.5-4 Å (点線) の軟X線強度変化(対数スケール)。(中) GOES衛星の波長1-8 Åの軟X線強度変化を時間微分したもの。(下) 野辺山強度偏波計が観測した17 GHz (実線) と35 GHz (点線) の電波強度。

線フラックスはM1 ($1 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$) クラスになります。が、同じ時刻のGOES衛星の軟X線フラックス変化は、ほとんどフラットで増光を確認できませんでした(図3上)。そこで、ニューパート効果を参考にして、軟X線強度の微分を調べてみると、小さいながらも電波と同じタイミングで同じような時間変化をしている成分を見つけることができました(図3中)。この増光成分からこのフレアの軟X線の最大フラックスを見積もると、B1クラス ($1 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$) 相当になり、このフレアの電波強度から期待されるフラックス(M1クラス = $1 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$) より2桁小さいことがわかりました。図2の上に、このフレアをプロットすると×の位置に相当することになり、統計的な相関関係からは極端に外れていることがわかります。

次に、このフレアの撮像観測の結果を見てみま

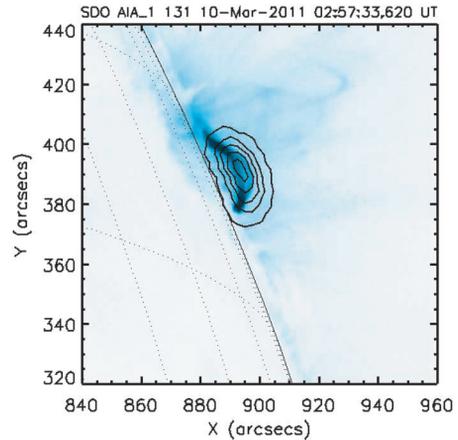


図4 2011年3月11日の太陽フレアのSDO衛星が観測した波長131 Åの紫外線画像(カラー)と野辺山電波ヘリオグラフが観測した34 GHzでの電波画像(等高線)を重ねたもの。カーブした曲線は、可視光での太陽の縁を示しています。

しょう。図4は、NASAのSolar Dynamics Observatory (SDO) 衛星によって観測された131 Åの紫外線画像(カラー)に野辺山電波ヘリオグラフ⁶⁾で観測された34 GHzの電波像(等高線)を重ねたものです。実線の曲線が太陽の西の縁で、このフレアは縁の少し裏側で発生しましたので、フレアループの足元は縁に少し隠されています。ループの両足元の距離は2万km程度、高さは1万km以下の比較的コンパクトなサイズのフレアです。電波源は紫外線のループを覆うように分布していますが、特にフレアループトップ付近で強い放射を示しています。

観測結果をまとめると、(1) 中規模フレアに相当する電波放射が観測されているが、対応する軟X線フラックスは、統計的な相関関係から期待される値に対して2桁程度小さく、(2) 電波放射の継続時間は約20秒間と非常に短く、(3) ループの足元の距離と高さが、それぞれ2万km程度、1万km以下のコンパクトなサイズのフレアということになります。結果(1)がこのフレアを特異なものにしている要因ですので、それについて、次章で考察していきます。

3. ループトップの磁場は弱い？ 強い？

どうしてこのように非常に弱い熱的な軟X線放射に対して、非熱的電波放射が異常に強いフレアが発生したのでしょうか。加速された電子のエネルギーは最終的に熱エネルギーになると考えると、このフレアで解放されたエネルギー総量は小さく、加速電子のもつエネルギー量も相応に小さいものであろうと推定されます。つまり、このフレアに見られる強い電波放射は、中型フレアと同じような量の電子が加速されたと考えるよりは、それよりは少量の加速電子が効率良く電波を放射した結果だと考えるのが自然です。つまり、このフレアは他の大部分のフレアと比べて、圧倒的に高い電波放射効率をもっていたという解釈です。ここで、この章の冒頭で提起された質問は、少ない加速電子で強い電波放射をどのように作り出せたのか、という問題に言い換えられます。太陽フレアにおいて、17 GHzや34 GHzの周波数帯の電波放射は、加速電子によるジャイロシンクロトロン放射だと考えられます。その電波放射強度は、加速電子の総数、電子のエネルギースペクトル、磁場強度、磁場と観測者のなす角に依存します⁷⁾。ここでは、電波放射領域、すなわちフレアループトップ付近の磁場強度が強い場合と弱い場合の二つの極端なモデルについて考察し、いかに少数の加速電子で強い電波放射を実現するかを検討したいと思います。

モデルAは、ループトップ領域の磁場が弱い場合です(図5左)。このモデルの場合、ループトップの磁場強度に対するループ足元の磁場強度の比が大きくなり、そのような状況では磁気ミラー効果が効果的に働き、加速電子はループ内に閉じ込められ、ループ内を行ったり来たりするバウンス運動をします。ループ内に滞在している間は、ずっと電波を放射し続けますので、総電子数に対する放射の効率は高くなります。しかし、このモデルには問題がいくつかあります。放射領域の磁

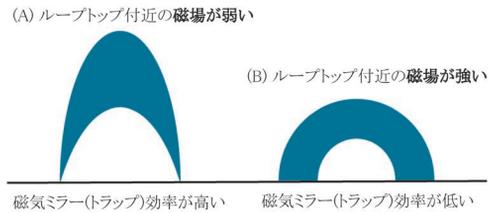


図5 (左) モデルAのフレアループ。ループトップ領域の磁場が足元の磁場に比べて弱く、ループ内に粒子が効率良く閉じ込められます。(右) モデルBのフレアループ。ループトップ領域の磁場が強く、ループ足元の磁場との差が小さい。粒子は、足元に落ちやすく、ループ内への閉じ込めの効率は悪くなります。

場強度が弱いと、同じ周波数(ここでは、17 GHzや34 GHz)の電波を出す電子の平均的なエネルギーが高くなります。加速電子のエネルギースペクトルは、通常、べき乗型で近似されるようなスペクトルをしていて、典型的なべき指数は-4くらいですので、電子のエネルギーが高くなると急激に電子数が減ることになります。高いエネルギーの電子で強い電波を放射しようとするとき、必要な総電子数が非常に多くなってしまいます。少ない加速電子で強い電波放射を作り出す解答にはなりません。また、別の観点からも、このモデルでは説明が苦しいことがわかります。いったん、ループ中に捕捉された電子は、衝突・散乱されて、運動する方向が変わらない限り、ずっと捕捉されたままです。別の観測から求めたループ内のプラズマ密度を使い、クーロン衝突のタイムスケールを計算すると、60秒から160秒程度になり、約20秒というこのフレアの電波放射のタイムスケールを説明することができません。もちろん、他の機構が働き、もっと早く散乱・消失させることは可能かもしれませんが、そうになると、このモデルの利点であるループ内への効果的な閉じ込めが働いていないことになり、自己矛盾を引き起こします。そもそも、撮像観測で見られるループの高さは低く、磁気ミラーが効果的に働く磁場形状(=背の高いループ)^{8), 9)}をしている

ように見えないという問題もあります。

では、ループトップの磁場が強い場合（モデルB、図5右）はどうでしょうか。ループトップの磁場が強いと磁気ミラーによる加速電子のループ内への閉じ込め機構が働かず、放射効率は悪いように思えます。が、モデルAとは逆に、磁場が強いために同じ周波数の電波を放射する電子の平均エネルギーは低くなり、加速電子のエネルギースペクトルの形を考えると、圧倒的に数の多い低エネルギーの電子が電波放射に寄与することになります。また、モデルAの検討の際、問題になった短いタイムスケールや背の低いループ形状といった問題点も解決されます。したがって、モデルAとBというループトップの磁場を変えて比べてみたモデルでは、モデルBのほうが現実に近いのではないかという結論になりました。

4. まとめと課題

前章では、ループトップ磁場が弱いモデルと強いモデルを想定して、どちらがより観測結果をうまく説明するかを考察しました。その結果、ループトップの磁場が強いモデルBのほうが、観測によく一致していることがわかりました。

ただし、前章の初めに述べましたように、電波放射強度を決める物理量は、磁場強度だけではありません。このフレアでは、同時観測データが取得されていませんでしたが、The Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI 衛星)¹⁰⁾の硬X線の撮像観測と電波放射分布を比較することができれば、加速電子が磁場に対して、どういう方向に運動しているか、という情報を引き出せる可能性もあります。また、コロナ中の磁場強度を直接測定するのは難しいのですが、最近、電波を用いた新しい手法も提案されていますし¹¹⁾、光球面磁場からコロナ磁場を推定する手法も確立されてきています¹²⁾。今回、紹介したフレアは、統計的には平均的な描像から大きく外れるフレアでしたが、このような非熱的放射が

熱的放射に比べて卓越したフレアを詳細に解析することにより、粒子加速機構そのものに迫れる可能性を感じさせられました。逆に、熱的放射が卓越しているフレアを集中的に研究することにより、高温プラズマの生成過程の研究も進むのではないかと、とも思っています。

謝辞

本稿は、下条圭美氏、川手朋子氏、石川真之介氏、大野雅功氏との共同研究⁵⁾を基にまとめたものです。

参考文献

- 1) シリーズ現代の天文学10太陽, 第7章, 2009, 日本評論社, 東京
- 2) Neupert W. M., 1968, ApJ 153, L59
- 3) Nakajima H., et al., 1985, PASJ 37, 163
- 4) Kawate T., Asai A., Ichimoto K., 2011, PASJ 63, 1251
- 5) Masuda S., Shimojo M., Kawate T., Ishikawa S., Ohno M., 2013, PASJ 65(SP1), 1
- 6) Nakajima H., et al., 1994, Proc. IEEE 82, 705
- 7) Dulk G. A., 1985, ARA&A 23, 169
- 8) Tanaka K., 1987, PASJ 39, 1
- 9) Tsuneta S., et al., 1984, ApJ 280, 887
- 10) Lin R. P., et al., 2002, Solar Phys. 210, 3
- 11) Iwai K., Shibasaki K., 2013, PASJ 65(SP1), 14
- 12) Inoue S., Kusano K., Masuda S., et al., 2008, ASP Conf. Ser. 397, 110

Solar Flare with Extremely Intense Nonthermal Microwave Emissions

Satoshi MASUDA

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

Abstract: There are two kinds of radiations detected in a solar flare. One is thermal emission emitted from a high-temperature plasma such as soft X-rays, and the other is nonthermal emissions mainly emitted by accelerated particles such as hard X-rays and microwaves. It is known that there is a correlation between these two emissions. However, observed was a unique solar flare which had intense nonthermal microwave emissions and almost no significant enhancement in thermal soft X-rays. We try to understand why this kind of flare was generated, considering two types of models.