

「ひので」で探るマイクロフレア・ナノフレア



石川 真之介

〈宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所SOLAR-Bプロジェクト
〒252-5210 相模原市中央区由野台3-1-1〉
e-mail: s.ishikawa@solar.isas.jaxa.jp

爆発的エネルギー解放現象である太陽フレアはさまざまな大きさがあることがわかっており、小規模なフレアは解放エネルギーに応じてマイクロフレアやナノフレアと呼ばれる。それらのフレアはエネルギーは小さいが発生頻度は高いため、高温の太陽上層大気であるコロナの加熱に重要な役割を果たしている可能性がある。ひので衛星の3機器により、光球磁場からコロナのダイナミクスに至る同時観測で初めて小規模フレアの物理過程に迫ることができるようになった。また、多波長の温度解析により、増光現象としては検出されない、より小さなフレアの兆候をこれまでにない精度で評価できるようになりつつある。

1. 太陽の小規模フレア

太陽フレアと呼ばれる多波長の爆発的増光現象は19世紀から知られていたが、同様の現象がずっと小さなスケールでも起きていることが近年の観測でわかっている。フレアは解放されるエネルギーが小さいほど発生頻度も高く、コロナと呼ばれる数百万Kという高温の太陽上層大気の形成(コロナ加熱)に重要な役割を担っている可能性がある(コロナの微小フレア加熱説)。

小規模フレアは、エネルギーが巨大フレア(GOES衛星のX線観測による分類で最大規模であるXクラスのフレア)に比べてどの程度小さいかによって、マイクロフレア(3-6桁)、ナノフレア(6-9桁)といった名前と呼ばれる。コロナよりも下の層(光球、彩層、遷移層)でもナノフレア程度のさまざまなエネルギー解放現象がひので衛星で観測されているが¹⁾、本稿では特にコロナでのエネルギー解放について述べる。エネルギーが巨大フレアと比べて9桁以上小さいピコフレア²⁾の存在を示唆する研究も存在する³⁾⁻⁴⁾。マイ

クロフレアからピコフレアに至るまでの小規模フレアは放射強度が弱く継続時間が短いために観測が難しく、ひので衛星以前には物理過程の詳細は必ずしも明らかでなかった。

小規模フレアについてひので衛星で解決すべき課題は、(1) どのような現象であるか物理過程を明らかにすること、(2) 解放エネルギーの合計がコロナ加熱に足りうるかどうかを評価することである。(1)について、巨大フレアについては物理過程がある程度わかっている。そのため、小規模フレアでも巨大フレアと同じ物理過程の兆候が見られれば、巨大フレアと同じ現象として理解が進む。その検証には、可視光磁場望遠鏡(SOT)による詳細な磁場観測、極端紫外線撮像分光装置(EIS)によるプラズマの流れの観測、X線望遠鏡(XRT)によるコロナの観測の組み合わせが効力を発揮する。(2)については、これまでは個々のイベントのエネルギーと頻度の関係を調べることでエネルギーの総量が見積もられてきた(図1)⁵⁾。しかし、個々の検出可能なイベントだけではコロナ加熱にエネルギーが十分でないことがわかって

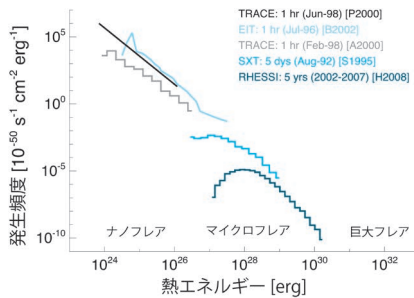


図1 巨大フレアからナノフレアまでのエネルギーと頻度の分布⁵⁾.

おり、増光現象として検出できないような小さなフレアの兆候を調べるといった方向の研究が進んでいる。

2. マイクロフレア、ナノフレアの物理過程

太陽フレアで現在受け入れられている標準的なモデルでは、フレアとはコロナにおける磁気リコネクション（磁力線のつながり変わり）による磁場のエネルギー解放現象と考えられている。リコネクションで解放されたエネルギーの一部により粒子が加速され、加速された粒子が太陽表面方向に突入し、彩層のプラズマを加熱してコロナ方向に蒸発していく（彩層蒸発）。これまで太陽活動領域で多数のマイクロフレアで硬X線が観測されており、巨大フレアの場合と同様に粒子加速が起きていることが示唆されている⁶⁾。ひので/EISの観測では、マイクロフレアにおいても彩層蒸発に対応すると考えられる上昇流が発見され⁷⁾、粒子加速と彩層蒸発という巨大フレアと同一の物理過程が示唆されることがわかった^{*1)}。

それではマイクロフレアと、エネルギー源と考えられる磁場の関係はどうだろうか。巨大フレアでは、浮上磁場により複雑な磁場構造が形作られることで磁気エネルギーが蓄えられ、フレアが発生する例が報告されている⁸⁾。ようこう衛星の成果によると、マイクロフレアの約半数でフレアと

関連した光球磁場の活動が発見されている⁹⁾。XRTで観測されたマイクロフレアでも、約半数で磁気要素同士の衝突が起きていることがSOTの観測により判明し、磁気要素衝突の原因も検証されている¹⁰⁾。Chifor et al.^{11), 12)}によると、SOTで確認された磁気フラックスの減少と同期して、XRTおよびEISでジェットが発生が観測された。マイクロフレアに伴うX線ジェットはようこう衛星で発見され、磁気リコネクションに伴うプラズマの放出現象であると考えられている¹³⁾。

以上の観測はすべて活動領域の観測結果であったが、静穏領域やコロナのプラズマの密度がより低いコロナホールと呼ばれる領域についても観測結果が報告されている。Kamio et al.の報告¹⁴⁾では、静穏領域やコロナホールでのナノフレアについて、EISとXRTの観測からフレアの経過に従って最初高温だったプラズマの温度が徐々に下がっていくこと、プラズマの温度が高い時間に密度の上昇が見られるという共通の特徴を発見した。これは彩層蒸発のシナリオと合致する結果であり、静穏領域やコロナホールでも活動領域のフレアと同様の物理過程によるフレアが発生していることを示唆している。XRTでは、極域のコロナホールや静穏領域でも多数のX線ジェットが観測され、理解が進んでいる^{15), 16)}。

一方、標準的フレアモデルでは説明できないほど上昇流が小さいマイクロフレアも複数見つかった^{17), 18)}。これらのフレアの過程は彩層蒸発では説明できないが、解放されたエネルギーが直接加熱に関与しているとすれば説明できる可能性が提示されている。巨大フレアにおいても、標準的なモデルで説明できない例は数多い。例外の存在が直ちに標準フレアモデルを棄却するわけではなく、より良い理解のために有用である。小規模フレアにおける報告例はまだまだ少なく、ひのでや将来のミッションによって、より多くの例が観

*1) ただし硬X線スペクトルがフレアのスケールで変化することが指摘されており、その物理的理解は今後の課題である⁶⁾。

測されることが期待される。

3. 見えないナノフレアの兆候を探る

最初に述べたとおり、これまで個々のイベントとして観測されたフレアだけではコロナ加熱にはエネルギーが十分でないが、微小フレア加熱の可能性が直ちに否定されているわけではない。もしも検出されないほど小さなエネルギー解放が無数に起こっていれば、ナノフレアによる加熱というシナリオは依然成り立つ可能性がある。そのようなイベントに迫るには、X線強度の細かな時間変化を追う方法^{19), 20)}、コロナの微細な空間構造を調べる方法²¹⁾、詳細な温度分布を調べる方法がある。ここでは特に温度分布解析について述べる。

コロナがナノフレアで加熱されている場合、シミュレーションではコロナの代表的な温度である数MKよりも高温の成分の存在が予言されている²²⁾。それを検証するには、コロナの温度分布、すなわちどの温度のプラズマがどの程度の量存在しているかを示す分布である Differential Emission Measure (DEM) を推定する必要がある。DEMを調べるためにはEISの分光観測とXRTのフィルター観測が有効である。増光現象として観測されるフレアの影響を取り除くために、活動度が低めの活動領域や静穏領域が観測ターゲットとなる。

ひのでの観測を用いた活動領域のDEM推定では、 >10 MKの高温プラズマの存在を示唆する結果が複数報告されている^{23), 24)}。EISによる多数の輝線の観測を使うと、数MKまでのプラズマのDEMは精度よく推定できる^{25), 26)}。一方で、数MK以上の高温プラズマからの輝線は微弱であり、ひのでと他の機器との共同観測で数例の報告はあるものの^{27), 28)}、検出できなかった活動領域は数多い。そのため、高温成分は主にXRTの厚いフィルターにより評価されている。しかし、XRTの厚いフィルターの検出器応答には最新のキャリブレーションを適用してもなお不定性が残っており²⁹⁾、高温成分の定量評価には大きな

不定性が残っていることが指摘されている³⁰⁾。

コロナのプラズマに10 MKを超えるような高温成分が存在すれば、XRTの観測波長よりもよりエネルギーの高い硬X線でも放射が見られるはずである。しかし、硬X線観測衛星RHESSIでは、フレア発生時以外に場所が特定できる硬X線放射は検出されていない。この事実を考慮すると、ひのでのみで評価したDEMよりも高温成分が少なく見積もられる³¹⁾。RHESSIの結果は上限値を設定しているだけであるため、高温成分が実際にどの程度存在しているか、そもそも有意に検出されていると言えるかどうかは疑問が残る。

この疑問に答えるためには、RHESSIよりも高感度の観測装置が有効である。近年、集光型硬X線望遠鏡の技術により、RHESSIより数十倍感度の高い観測が実現している。ロケット実験FOXSIでは、活動度が低めの活動領域を硬X線で高感度観測したが、有意な硬X線放射は検出されず、RHESSIにより設定された上限値よりもさらに高温成分の量は少ないことがわかった³²⁾ (図2)。この結果から考えると、増光イベントとして捉えられないナノフレアを考慮してもなお、ナノフレアでコロナ加熱を説明することはできない。FOXSIロケットと同様に硬X線望遠鏡を搭載し高感度観測が可能なNuSTAR衛星でもこのような活動領域を観測しているが、高温成分が存在する兆候は得られていない³³⁾。

硬X線高感度観測の結果はまだ数例しかなく、活動領域の個性の影響が大きい可能性もある。そのため、今後のFOXSIロケットやNuStar衛星でのさらなる観測と、ひので衛星での共同観測により、コロナの静穏なプラズマにおける高温成分の統計的評価が期待される。FOXSIロケットの2回目の打ち上げでは高温成分が検出されており、その結果は近いうちに発表されるであろう。

4. まとめと今後の観測

小規模フレアは発生頻度は高いが物理過程はよ

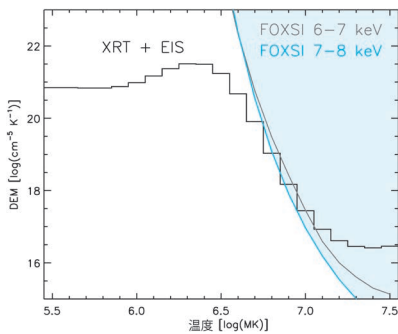


図2 ひのでにより推定されたDEM (黒線) と、FOXSIロケットによる上限値 (グレー、青)³²⁾。薄水色はFOXSIの結果から棄却される領域。

くわかっていなかったためにひのでの重要な観測ターゲットである。ひのでの観測により、マイクロフレアも巨大フレアと同じく磁気リコネクションによるエネルギー解放現象であり、彩層蒸発により増光すると考えられることがわかった。

増光イベントとして検出されないナノフレアの兆候を探す試みは、ひので衛星のEUV、軟X線の観測と硬X線の観測を組み合わせた温度解析により進められている。これまでのところ、FOXSIロケット等の高感度観測により、微小フレア加熱を示唆する高温成分は検出されなかったが、今後の統計的研究が必要である。活動領域のよりよいモデル構築のためにも、高温成分の検出と定量評価が望まれる。

マイクロフレアの物理過程のさらなる理解にも、より精度の良いDEMとその詳細な空間構造を調べるにも、より高感度、高分解能の観測が必要である。そのためには、高い時間・空間分解能でコロナの物理量を得ることができる、光子計測型の軟X線望遠鏡による撮像分光観測が極めて有効である³⁴⁾。今後、新しい観測機器による観測で理解が大きく進むことを期待したい。

参考文献

- 1) Shimizu T., 2015, *Physics of Plasmas* 22, 101207
- 2) Katsukawa Y., Tsuneta, S., 2001, *ApJ* 557, 343

- 3) Katsukawa Y., 2003, *PASJ* 55, 1025
- 4) Ramesh R., et al., 2013, *ApJ* 762, 89
- 5) Hannah I. G., et al., 2011, *SSRv* 159, 263
- 6) Christe S., et al., 2008, *ApJ* 677, 1385
- 7) Chen F., Ding, M. D., 2010, *ApJ* 724, 640
- 8) Kubo M., et al., 2007, *PASJ* 59, S779
- 9) Shimizu T., et al., 2002, *ApJ* 574, 1074
- 10) Kano R., et al., 2010, *ApJ* 720, 1136
- 11) Chifor C., et al., 2008, *A&A* 481, L57
- 12) Chifor C., et al., 2008, *A&A* 491, 279
- 13) Shimojo M., et al., 1996, *PASJ* 48, 123
- 14) Kamio S., et al., 2011, *A&A* 529, A21
- 15) Cirtain J. W., et al., 2007, *Science* 318, 1580
- 16) Sako N., et al., 2013, *ApJ* 775, 22
- 17) Milligan R. O., 2008, *ApJ* 680, L157
- 18) Brosius J. W., 2013, *ApJ* 777, 135
- 19) Terzo S., et al., 2011, *ApJ* 736, 111
- 20) Antolin P., et al., 2008, *ApJ* 688, 669
- 21) Cirtain J. W., et al., 2013, *Nature* 493, 501
- 22) Klimchuk J. A., et al., 2008, *ApJ* 682, 1351
- 23) Schmelz J. T., et al., 2009, *ApJ* 693, L131
- 24) Reale F., et al., 2009, *ApJ* 698, 756
- 25) Winebarger A., et al., 2011, *ApJ* 740, 2
- 26) Warren H. P., et al., 2012, *ApJ* 759, 141
- 27) Teriaca L., et al., 2012, *ApJ* 754, L40
- 28) Brosius J. W., et al., 2014, *ApJ* 790, 112
- 29) Narukage N., et al., 2014, *Sol. Phys.* 289, 1029
- 30) Winebarger A., et al., 2012, *ApJ* 746, L17
- 31) Schmelz J. T., et al., 2009, *ApJ* 704, 863
- 32) Ishikawa S., et al., 2014, *PASJ* 66, S15
- 33) Hannah I. G., et al., 2016, *ApJ* 820, L14
- 34) Sakao T., et al., 2014, *Proc. SPIE* 9144, 91443D

Hinode Investigations of Microflares and Nanoflares

Shin-nosuke ISHIKAWA

SOLAR-B Project, Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara 252-5210, Japan

Abstract: Microflares and nanoflares are small energy release phenomena in the Sun. Since occurrence rate is high, those may contribute to the heating of the solar corona. The 3 instruments onboard the Hinode satellite enable us to investigate the physical process and energetics of microflares and nanoflares. By Hinode observations, it is revealed that some of the events are explained by the standard model. Differential emission measure estimations show no evidence for the nanoflare heating so far.