

京大せいめい望遠鏡による「スーパーフレア」観測 ～惑星への影響評価に向けて～

行方 宏介

Namekata Kosuke

1 はじめに

太陽 / 恒星フレアとは、星表面の突発的な爆発現象のことである¹⁾。太陽での大フレアの場合、放射線の照射やプラズマの衝突といった形で地球環境に影響を与えることがあり、過去には実際に通信障害や大規模停電等の被害に繋がった事例が報告されている。これまでの筆者らの研究により、太陽で「スーパーフレア」（観測史上最大級の太陽フレアの10倍以上規模）という超巨大フレアが発生する可能性が示唆されてきた^{2,3)}（図1）。その発生確率は数百年～数千年に一度と低く見積もられているが、電力インフラやITシステムに大きく依存する現代社会には甚大な影響を与える可能性があり、社会的にも注目されている。

一方、温度が低い星等ではスーパーフレアが頻発しており⁴⁾、周囲を周る系外惑星への影響が盛んに議論されている^{5,6)}。中心星での巨大フレアが惑星大気や惑星での生命誕生・維持にどのように影響するのか？こうした観点からも、恒星のスーパーフレアに対する関心が高まっている。

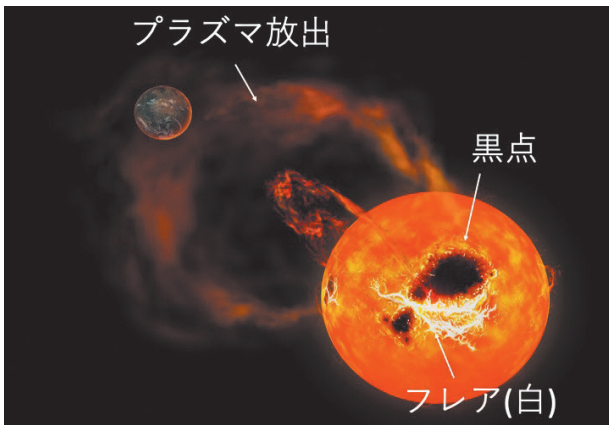


図1 恒星スーパーフレアの想像図⁹⁾

黒点の周りでスーパーフレアが発生すると考えられている (©国立天文台)

太陽フレアは、磁気リコネクション（反平行の磁力線のつなぎ変え）によって磁気エネルギーを解放する現象と考えられている¹⁾（図5も参照）。解放されたエネルギーは非熱的高エネルギー（放射線）粒子や熱エネルギーに変換され、恒星大気を加熱することで様々な放射を行う。ただし、このシナリオが、他の活動的な恒星で頻発するスーパーフレアという超巨大現象に適用できるかどうかは必ずしも明らかになっていない。

恒星スーパーフレアの理解における最大の問題点は、空間的に分解して観測できないことである。そこで重要となるのが「分光観測」である。電磁波を波長に分けて観測することで、恒星フレアに伴って発生しているプラズマの温度や密度、運動を推定することができる。ただし、これまで恒星スーパーフレアの分光観測例は多くない⁴⁾。これは、スーパーフレアの発生頻度が低く、分光観測データを取得すること自体が容易ではないからである。また、フレアが検出できたとしても、その時間変化は分スケールで起きるため、これを高精度で捉えることは更に困難となる。こうしたことから、恒星フレア研究において、3～4 m級の大口徑望遠鏡による、長時間の分光モニタ観測が大きく期待されているのである。

2 京大「せいめい」望遠鏡

2019年2月28日、京都大学3.8 mせいめい望遠鏡の観測が開始された。せいめい望遠鏡は、東アジア最大の口径の主鏡を誇る光赤外線望遠鏡であり、京都大学が中心となって開発を行った⁷⁾（図2）。この大口徑による高い集光能力により、短時間で変動する天体に対し高い時間分解能で観測できるようになる。もう1つの特徴として、大学専有の望遠鏡観測時間を確保できるため（年間100～120日程度）、その潤沢な観測時間を活かし、スーパーフレアのよ

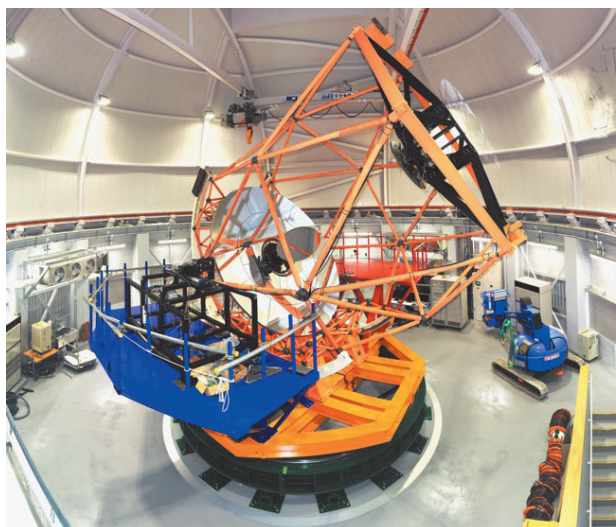


図2 京都大学せいめい望遠鏡⁷⁾ ©京都大学

うに発生頻度が低く、いつ起きるのか予測が難しい天体現象の観測に対しては非常に有効なのである。

せいめい望遠鏡に現在搭載されている装置は、可視光面分光観測装置 KOOLS-IFU である⁸⁾。これにより、恒星のように点源だけでなく、2次元的に広がった天体（銀河等）においても、分光観測を行うことが可能である。天体からの光で、よく注目されるのは、水素原子線のバルマー系列である。特に水素 H α 線（6562.8 Å）は、天体現象において非常によく用いられており、せいめい望遠鏡がカバーする波長域に含まれている。

H α 線は、太陽や恒星の表面（光球）から少し上の「彩層」という大気層から放出されている（図5参照）。太陽フレアでは歴史的に H α 線での増光現象がよく調べられており、H α 線を放射する彩層が加熱されることで増光する。太陽フレアの場合、その加熱は、磁気リコネクションにより生成された非熱的な高エネルギー粒子（主に電子）や熱伝導によって起こっていると考えられている（ただし、太陽でも未解明な点は多い⁹⁾）。

さて今回は、観測開始したばかりのせいめい望遠鏡で、活動的なフレア活動を示す M 型主系列星 AD Leo（獅子座 AD 星）のモニタ観測を実施した。本稿ではその最初の 8.5 夜間での成果を報告する（ただし、執筆時点では既に観測時間は約 80 夜にも至っている）。AD Leo は太陽（G 型主系列星）と同じ主系列星であるが、太陽より温度が低く（約 3,500 K）、半径も小さい（太陽の約 0.4 倍）。この星はフレア

の活動性が高いことが知られており、スーパーフレアが観測されたこともある。もしスーパーフレアのデータが得られ、太陽フレアとの共通点が明らかになれば、他の惑星を持つ M 型星だけでなく太陽で発生したスーパーフレアのプロキシとみなして研究を進展させることも期待される。

3 スーパーフレアの検出に成功

観測の結果、スーパーフレア（観測史上最大級の太陽フレアの 20 倍程度の規模）を、なんと観測初日に検出することに成功した^{9,10)}（図3）。スーパーフレアは、M 型星とはいえ発生頻度が低く、検出には少なくとも 10 日程度以上のモニタ観測が必要であった。ゆえに観測初日に検出できたのは、正に幸運であったと言える。本観測では、面分光装置 KOOLS-IFU を用い、速度分解能 150 km/s 程度で H α 線を連続分光観測することができた。時間分解能は 1 分程度であり、この速度分解能・時間分解能でスーパーフレアを分光観測した例はほとんどない。この観測期間で合計 12 件の小～大規模フレア現象を検出できたが⁹⁾、今回は中でも最大規模のスーパーフレア 1 件についての特徴を紹介する。

まず、図3は発見された最大のスーパーフレアの光度変化である。白色光（可視連続光）と H α 線の強度の時間変化は、両者共に突発的な増光を示した後、なだらかに減光を示した。これから電磁波のエネルギーを計算すると、おおよそ 2×10^{26} J（最大

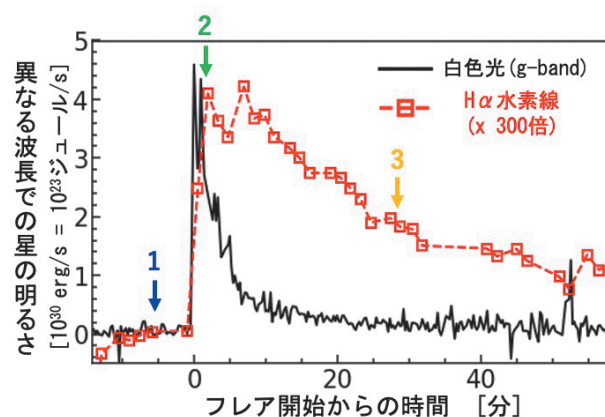


図3 AD Leo（獅子座 AD 星）で観測されたスーパーフレアの光度時間変化

矢印は、図4のスペクトルの時間に対応。白色光は、東京工業大学 MITSuME 望遠鏡により取得。引用⁹⁾より掲載

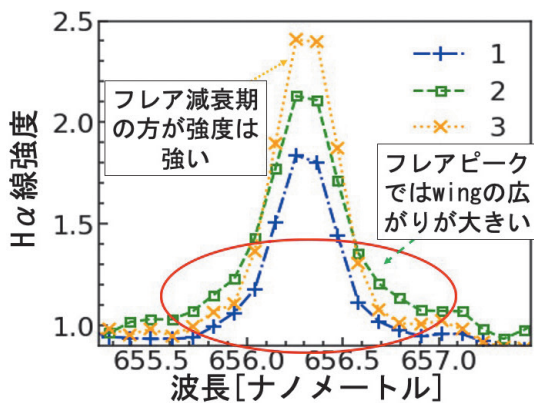


図4 AD Leoで観測されたスーパーフレアのH α スペクトル変化
 スペクトルの番号は、図3の数字の時刻に対応

級の太陽フレアの20倍程度)を放出していることが明らかになった。このスーパーフレアの観測的特徴を以下に2つ述べる。

H α 線の継続時間は、白色光よりも非常に長いことが分かった(図3)。この現象は、小規模な太陽フレアでも観測されていることである¹⁾。

H α 線のスペクトル線輪郭が、フレア初期(特に白色光で顕著な増光がある時間帯)に非常に大きく広がっていることが観測された(図4)。

性質1は、これまでも観測されることがある典型的な性質である。ところが、性質2がこれほど高精度に得られたことはない。特に、白色光の増光と同期したH α 線の広がりの変化が時間分解して観測された点(図4)は新しく、正にせいめい望遠鏡の大口径によってもたらされた新規性であると言える。

4 スーパーフレアにおける高エネルギー粒子発生

観測された性質1, 2は何を表しているのか? 定性的に言えば、これらの性質はどちらも「彩層」という大気層において、電子密度が大きくなっていることを表している。白色光の増光はH α 線よりも電子密度に非常に感度が高い⁴⁾。また、フレア現象においてH α 線の幅は、量子論的なStark効果に影響を受けていると考えられており、これも電子密度に対する依存性が大きい¹⁴⁾。このように、得られている性質1, 2は、どちらも「彩層」の電子密度の増加によって説明できそうである。

このような高密領域がどのようにして生成される

か? 太陽フレアをヒントに考えると、「彩層」の加熱機構は大きく熱的加熱と非熱的加熱に大別できる¹⁾。図5は、図1の星表面での「フレア」領域の模式図である。熱的加熱(図5右図)においては、磁気リコネクション(2章参照)によって作られた10⁷Kの上空からの熱伝導加熱によって「彩層」がじわじわと加熱される描像である。また、非熱的加熱(図5中図)においては、磁気リコネクション領域で加速された非熱的な高エネルギー電子(>10 keV)が「彩層」奥深くに突入し大気を加熱する。いずれも、大気中の水素を加熱・電離させ、電子密度を大幅に高める。

今回のスーパーフレアの観測においては、非熱的・高エネルギー電子による加熱が最も有力である⁹⁾。なぜなら、熱伝導による加熱は彩層表面の非常に薄い層の電子密度を高めるだけであり、白色光放射を放出するほど密度を高めるには至らないからである⁴⁾。非熱的・高エネルギー電子は、彩層の深いところまで突入してエネルギーを解放でき、白色光の増光を生み出すほどの厚い大気領域で電子密度を上げることができる(図5)。

筆者らは、これを確かめるために図5を模した輻射輸送流体数値計算を行い、特に強い高エネルギー電子によって、観測された白色光放射と、H α 線の幅の広がりを説明できることを証明した⁹⁾。更に、非熱的・高エネルギー電子の単位面積当たりの量が、典型的な太陽フレアに比べ10倍以上必要であることが推定され、スーパーフレアにおいて粒子加速が非常に効率良く行われていることが示唆された。また、フレア後期は、熱的加熱か弱い非熱的加熱に変化していることも推定され、スーパーフレア中に加熱機構が大幅に変化していることを示すことに初めて成功した。太陽/恒星フレアにおける粒子加速の物理機構は依然として未解明問題であるものの、このような形で加速電子の情報が得られたことは、粒子加速問題においても大きな貢献となる。

5 惑星における放射線の影響

近年、数千個もの系外惑星が発見され、恒星スーパーフレアが系外惑星の大気(及び生命居住可能性)に与える影響に関心が高まっている。今回の観測から、非常に強い高エネルギー電子が放出されている

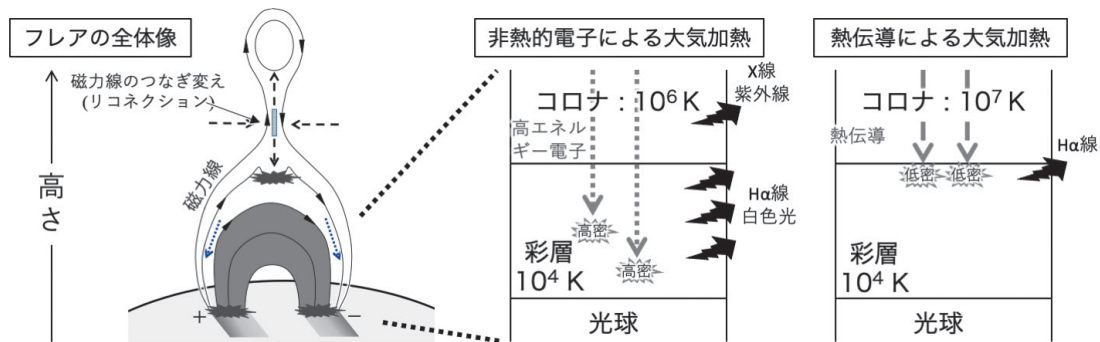


図5 スーパーフレア中の大気の加熱の様子の模式図 (図1の「フレア」と書かれている星表面の拡大図)

星表面は「光球」と呼ばれ、上に「彩層」「コロナ」がある。左) フレア中の星表面の磁力線の模式図。中) 非熱的電子による加熱の場合。右) 熱伝導加熱の場合。コロナ上空で磁気リコネクションが発生し、高エネルギー電子や熱伝導により、彩層にエネルギーが輸送される

ことが示唆された。この高エネルギー電子は、非常に強いX線・紫外線の放射を生み出す原因になり、更に高エネルギー陽子を伴って惑星間空間に放出されている可能性もある¹⁾。本研究で得られた加熱機構を仮定することで、惑星に照射されるX線・紫外線照射量の推定も可能となる。

この状況下で、惑星は様々な影響を受けることが示唆されている。強い紫外線は、上層大気の剥ぎ取りに関わっている可能性があり、X線・紫外線は惑星大気の加熱にも影響を及ぼす。また筆者らは、非常に強い高エネルギー陽子が、薄い大気しか持たない惑星に照射された場合は、地表での放射線量は致死量にもいたる可能性も提示してきた⁵⁾。一方で、近年はX線・紫外線放射や高エネルギー粒子が惑星大気と反応し、温室効果を持つ化合物や、有機物の元となる化合物が生成される可能性も提案されている⁶⁾。このように、様々な影響が考慮され始めている中、本研究のように観測的に物理量に制限を与えることは、惑星における生命誕生・維持の謎を解き明かす上で欠かせない。今後更に同観測データを蓄積し、地球・惑星分野の研究者と連携することで、スーパーフレアが系外惑星に与える影響評価の研究を行うことが重要である。

6 最後に

宇宙における生命誕生・維持の理解には、恒星の活動現象の性質の理解が不可欠である。また、本研究のように、他の恒星での大規模現象と太陽フレアとの共通点が明らかになれば、太陽で発生しうる

スーパーフレア^{2,3)}の予測にも繋がる。東アジア最大の口径を持つ京大せいめい望遠鏡の観測は始まったばかりで、本研究のような潤沢な観測期間・高時間分解能を活かしたサイエンスは、今後もデータを蓄積するほど成果が上がると期待される。本研究では可視光観測がメインではあったが、スーパーフレアの全体像を理解するには、X線から電波に至る多波長観測が必要である。多くの望遠鏡や衛星が立ち上がっている今世紀は、多波長同時観測を行う好機とも言える。今後共、せいめい望遠鏡を中心に研究を展開し、宇宙の神秘の理解に貢献できるようなプロジェクトを実現させていきたいと考えている。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金(18J20048, 代表:行方)によりサポートされている。

参考文献

- 1) Shibata, K., & Magara, T., *LRSP*, **8**, 6 (2011)
- 2) Maehara, H., *et al.*, *Nature*, **485**, 478 (2012)
- 3) Notsu, Y., *et al.*, *ApJ*, **876**, 58 (2019)
- 4) Kowalski, A. F., *et al.*, *ApJ*, **837**, 125 (2017)
- 5) Yamashiki, Y. A., *et al.*, *ApJ*, **881**, 114 (2019)
- 6) Airapetian, V. S., *et al.*, *Nat. Geo.*, **9**, 452 (2016)
- 7) Kurita, M., *et al.*, *PASJ*, **72**, 48 (2020)
- 8) Matsubayashi, K., *et al.*, *PASJ*, **71**, 102 (2019)
- 9) Namekata, K., *et al.*, *PASJ*, **72**, 68 (2020)
- 10) 行方 宏介, 他, 京都大学プレスリリース (2020) (https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2020/200710_1.html)

(京都大学 / 国立天文台)