

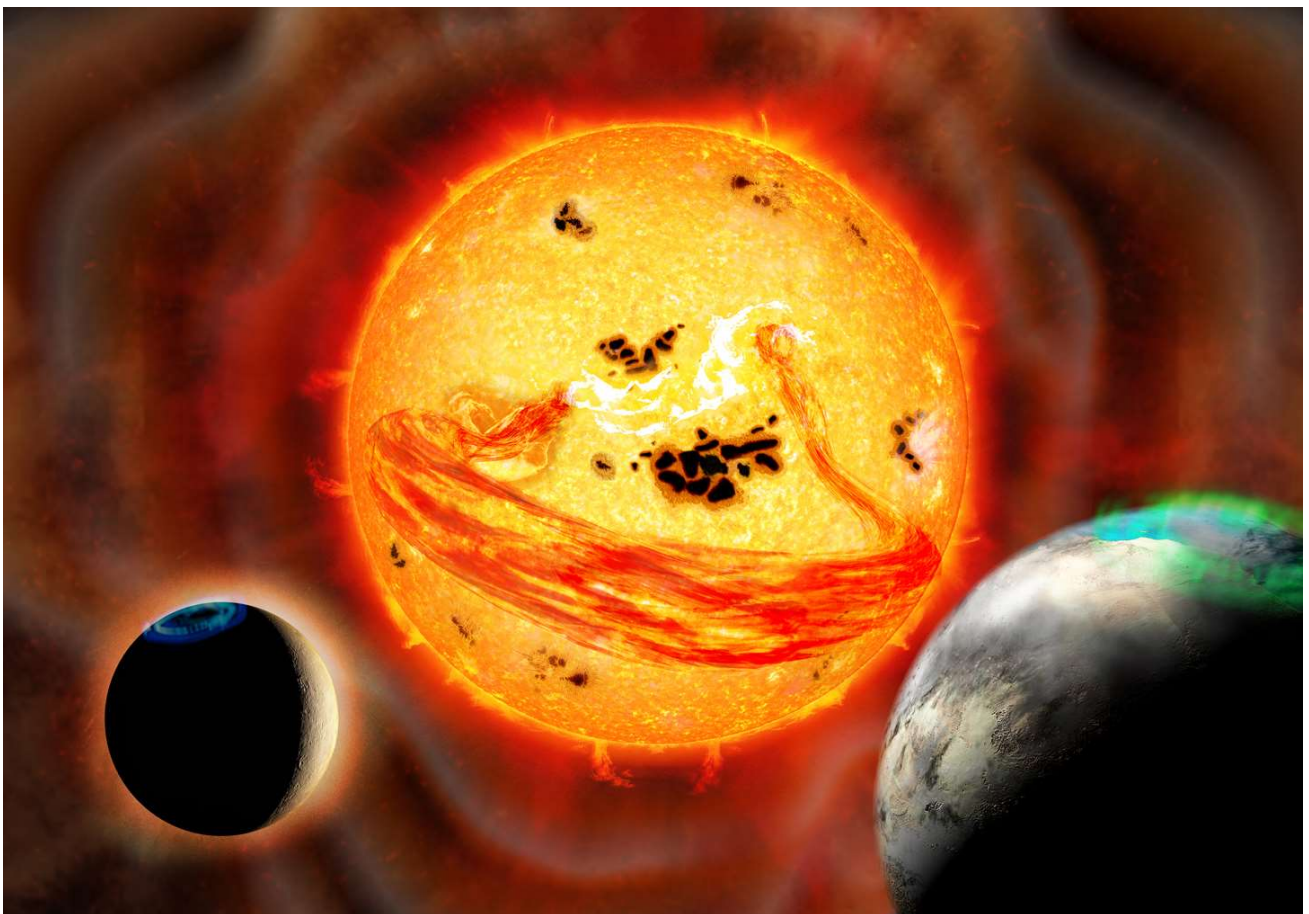
# 太陽型星スーパーフレアから巨大フィラメント噴出の初検出

—昔の、そして今の惑星環境や文明に与える脅威—

## 概要

巨大な太陽フレアは、しばしばフィラメント噴出(質量噴出)を伴って地球環境に影響を与えることが知られています。若い頃の太陽や、若い太陽型星(太陽に似た恒星)では、超巨大な「スーパーフレア」が若い惑星環境に影響した可能性が推測されていますが、フィラメント噴出の有無は全く知られていませんでした。国立天文台行方宏介特別研究員(旧京都大学博士課程学生)らの研究グループは、京都大学「せいめい」望遠鏡等を連携させ、若い太陽型星りゅう座EK星のモニタ観測を実施しました。その結果、太陽型星で初めてスーパーフレアの可視光分光観測に成功し、さらに超巨大なフィラメント噴出を伴っていることを発見しました。噴出した質量は太陽での史上最大級の質量噴出現象の10倍以上で、約500km/sもの速度で噴出していることが判明しました。この結果は、若い太陽や太陽型星は現在の太陽系に比べ惑星環境に非常に大きく影響していた可能性を示唆し、今後惑星での生命の誕生・維持の理解にもつながりえます。また、もし今の太陽でスーパーフレアが発生した場合の地球環境への影響を予測する手がかりともなり、我々人類文明にとっても重要です。

本成果は、2021年12月9日に、英国の国際学術誌「Nature Astronomy」にてオンライン掲載されました。



若い太陽型星「りゅう座EK星」の想像図。スーパーフレアの発生に伴い巨大なフィラメント噴出が起こるようす。(クレジット：国立天文台)

## 1. 背景

太陽フレアとは太陽表面の突発的な爆発現象のことであり、それに伴って質量噴出現象「フィラメント噴出」が発生することが知られています。太陽における大フレアの場合、地球に向かう質量噴出現象(フィラメント噴出や、より上層のコロナ質量放出)は地球環境に多大な影響を及ぼし、過去には実際に通信障害や大規模停電などの被害に繋がった事例が報告されています。これまでの我々の研究により、太陽型星(太陽によく似たパラメータを持つ恒星)<sup>注1</sup>では、超巨大な「スーパーフレア」(最大級の太陽フレアの10倍以上規模)<sup>注2</sup>が発生していることが発見されてきました。この発見は、今の太陽でもスーパーフレアが発生しうることを示唆しており、これまでの常識を覆すものでした。もし太陽でスーパーフレアが発生した場合、**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指摘されており、太陽型星及び太陽で発生するスーパーフレアが社会的にも学問的にも注目されています。**

また、若い太陽型星はスーパーフレアをより高頻度で起こすことが知られています(本誌で「若い」とは、惑星誕生後、恒星が太陽と同様の星内部構造に至っている段階を意味します)。同様に、我々の太陽も若い頃はスーパーフレアを発生させていたことが類推されます。このような若い太陽・太陽型星で発生していたスーパーフレアは、地球や系外惑星での生命生存環境の生成・維持にも大きく関わっていた可能性が指摘されており、近年注目されています。**太陽型星でのスーパーフレア現象を調べることで、「我々がどこから来たのか、何者か、どこへ行くのか」という重大な問いへの手がかりを得られるのではないかと期待されています。**

ところが、太陽型星のスーパーフレアに伴う噴出現象はこれまで未検出で、どのように惑星環境に影響を与えるのかは全くの未知でした。これを検出するには、視線方向の運動を知ることができる「分光」観測<sup>注3</sup>という手法での観測が必要です。しかし、検出感度の不足・観測時間の不足が理由で、これまで「分光」観測に成功した試しがなかったのです。そこで我々は、京都大学「せいめい」望遠鏡の3.8mの大口径とそれを中心とした膨大な観測時間により、太陽型星のスーパーフレアの「分光」観測データを初めて入手する計画を着想しました。**この計画を通して、フレア活動が高い太陽型星において、フィラメント噴出のような噴出現象が実際に発生しうるか?という問いに決着をつけ、惑星環境への影響の有無を観測的に制限したいと考えています。**

## 2. 研究手法・成果

### <研究手法>

1. 今回我々は、若い太陽型星りゅう座EK星(英名: EK Draconis)を連続的に「分光」する観測を、2020年2月~4月(約32日間)に実施しました。京都大学3.8m「せいめい」望遠鏡を中心に、西はりま天文台2.0m「なゆた」望遠鏡でも同時「分光」観測を実施しました(図1参照)。また、TESS衛星(NASA)による(星の明るさ変化を測定する)「測光」観測<sup>注3</sup>も同時に行いました。これら他望遠鏡を連携して観測を行ったのは、同時検出によりフレアの「分光」データを初検出したことを裏付けることが狙いです。
2. 「分光」観測によって得られたフレア中のH $\alpha$ 水素線<sup>注4</sup>が、「ドップラーシフト」という現象を起こしているかどうかを調べました。これにより、物質が視線方向に運動していたのかがわかります。
3. さらに、太陽で発生した(恒星での現象と比べると小規模な)フィラメント噴出のH $\alpha$ 水素線のデータ(京都大学飛騨天文台で観測)と比較し、太陽型星でも同じ現象が発生しているかどうかを検討しました。

### <成果>

1. 2020年4月5日、(「測光」観測による)白色光の増光と同時に、(「分光」観測による)H $\alpha$ 水素線でも星の光が増大する現象が検出されました(図2右の赤線)。そのエネルギーは最大級の太陽フレアの10倍以上であったことから、**太陽型星で初めてスーパーフレアの可視光「分光」観測に成功しました。**

2. スーパーフレアに伴って、H $\alpha$  水素線が「ドップラーシフト」を起こし、1万度程度の物質が視線方向にこちらに向かって運動している様子が捉えられました(図 2 右の青線)。この様子は、実は太陽でのフィラメント噴出と非常によく似ていることが判明しました(図 3)。こうしたことから、**太陽型星でスーパーフレアに伴って超巨大なフィラメント噴出を伴っていることを世界で初めて発見したとわかりました。**
3. 噴出したフィラメントの**質量は太陽での史上最大級の質量噴出現象の 10 倍以上であり、さらに約 500 キロメートル毎秒もの高速で噴出している**ことが判明しました。

#### <意義>

1. これまで可視光では「測光」観測しか行われていなかったが、初めての「分光」観測に成功し、太陽型星のスーパーフレアに伴う「物質の運動」という新たな扉を開きました。これにより、太陽型星スーパーフレアが、**質量噴出という形で周囲の惑星間空間に影響しているという、これまで想像でしかなかった 描像を明らかにし、我々の視野を飛躍的に広げた**という意義があります。
2. 本研究を一般化すると、若い太陽・若い太陽型星は、巨大な質量噴出という形で、その周囲を周る若い地球・若い系外惑星の大気の進化に深刻に影響する可能性がある、とすることができます。故に本研究は、**若い太陽型星での噴出現象が若い地球・惑星大気の進化(および生命誕生・維持)に影響する可能性を観測的に初めて示唆しただけでなく、その影響を議論する唯一の観測例を得た、**という意義があります。
3. 今回、太陽型星で発見されたこの現象は、太陽でスーパーフレアが発生した時に発生しうる巨大フィラメント噴出を予想するモデルとも捉えることができます。この意味で、**太陽が地球・惑星環境に「最大でどれくらい影響を与えるのか？」を評価する唯一の観測を得た**という意義があります。

### 3. 波及効果、今後の予定

近年、惑星における生命誕生・維持が天文学における大きなテーマになっています。先行研究では、質量噴出現象が、惑星大気の進化(例えば、温室効果ガスや有機物の生成、惑星大気の剥ぎ取り)に関与するというモデルが考案されていました。本発見での質量噴出の確かな検出、及びその性質の解明により、**若い太陽や太陽型星が、スーパーフレア・噴出現象といった形で若い地球・火星、及び若い系外惑星大気の維持・成長に影響する可能性が、より实际的に議論することができるようになる**と期待されます。

また、太陽ではスーパーフレアの発生頻度は数百年に一度と非常に低いとされていますが、数百年に一度の災害も決して現代社会と無縁でないことを我々は既に東日本大震災から学びました。今回の観測成果を太陽で発生しうるスーパーフレア・大質量噴出の代わりと捉え、それが地球環境に及ぼす影響を見積もることができれば、「**太陽でスーパーフレアが発生したら、地球環境はどうなるのか?**」という人類文明にとっても**重大な問いに答える手がかりになり、近代人類文明においては減災面での貢献**となります。

さらに、噴出現象の発生頻度次第では、太陽型星や太陽の質量・自転速度の進化理論にも大きく影響する可能性があり、これも太陽と地球の過去の進化を知るには重要な問題です。今後は、このフィラメント噴出の発生頻度を調べ、太陽型星・惑星の進化にどれほど影響を与えるのか、明らかにしたいと考えています。**今後とも地道に観測を継続し、人類の宇宙文明の継続、及び生命誕生・維持の秘話にまつわる課題を、一つ一つ解決していきたいと考えています。**

### 4. 研究プロジェクトについて

<予算の出資者> 京都大学、国立天文台、光赤外大学間連携 OISTER、日本学術振興会特別研究員補助金(18J20048 他)、同若手研究者海外挑戦プログラム(行方宏介)、同海外特別研究員プログラム(野津湧太)

<関連研究機関> 国立天文台、京都大学、東京工業大学、兵庫県立大学、コロラド大学、同志社大学

### <用語解説>

1. **太陽型星**：表面温度が 5000-6000 K 程度の星(太陽の表面温度は約 5800K)。今回観測したりゅう座 EK 星は、温度約 5750K であり、太陽と比較的よく似た構造をしていると考えられている。りゅう座 EK 星の年齢は 1 億年程度と推定されており(太陽の年齢 46 億年)、「若い太陽」の代表として知られる。この年齢においては、惑星は誕生した後の段階と考えられている。
2. **スーパーフレア**：最大級の太陽フレアの 10 倍( $10^{26}$  ジュール)以上のエネルギーを解放する大規模フレア。 $10^{26}$  ジュールは水素爆弾約 10 億個に相当する。
3. 「**分光**」と「**測光**」：「分光」観測とは、光を虹色のように色(=波長)に分けて、それぞれの色の強度を測る手法のこと。「測光」とは、光を色に分けず、全て積分した量として測る手法。
4. **H $\alpha$  水素線**：水素の異なるエネルギー間で遷移する際に放射される光。波長は 656.2nm で、赤く見える。

### <研究者のコメント>

せいめい望遠鏡としては初の Nature 姉妹誌での掲載を大変嬉しく思います。思い返せば、2020 年春先は新型コロナ感染拡大期であり観測にも制限がある困難な状況で、短期集中で 32 日間もの観測を実施し、このような唯一無二の現象を発見したときは感動もひとしおでした。今後も人々の興味関心に応えるべく研究をしていきたいと思えます。



上段左より、行方博士、本田准教授、野上准教授、前原助教、野津博士、柴田名誉教

### <論文タイトルと著者>

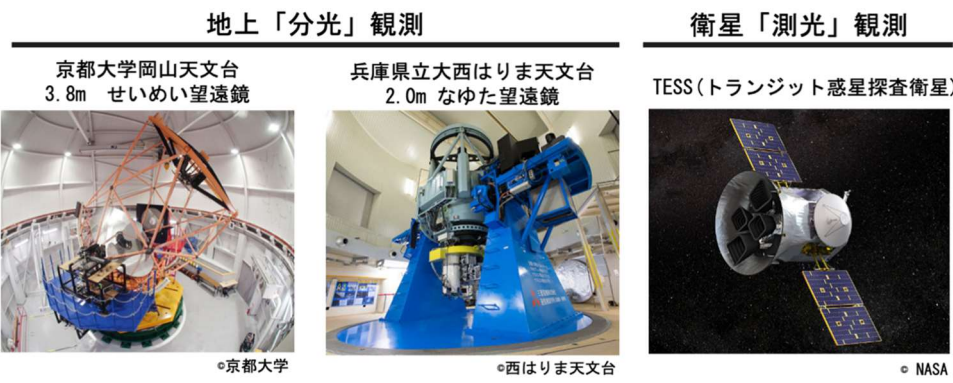
タイトル：Probable detection of an eruptive filament from a superflare on a solar-type star (太陽型星におけるスーパーフレアに伴うフィラメント噴出の検出)

著者：Kosuke Namekata, Hiroyuki Maehara, Satoshi Honda, Yuta Notsu, Soshi Okamoto, Jun Takahashi, Masaki Takayama, Tomohito Ohshima, Tomoki Saito, Noriyuki Katoh, Miyako Tozuka, Katsuhiro L. Murata, Futa Ogawa, Masafumi Niwano, Ryo Adachi, Motoki Oeda, Kazuki Shiraishi, Keisuke Isogai, Daikichi Seki, Takako T. Ishii, Kiyoshi Ichimoto, Daisaku Nogami & Kazunari Shibata

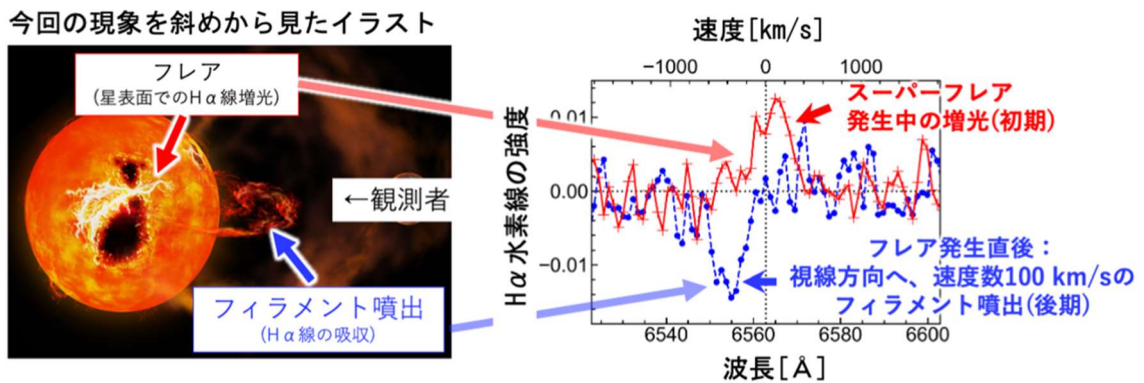
掲載誌：Nature Astronomy DOI：10.1038/s41550-021-01532-8



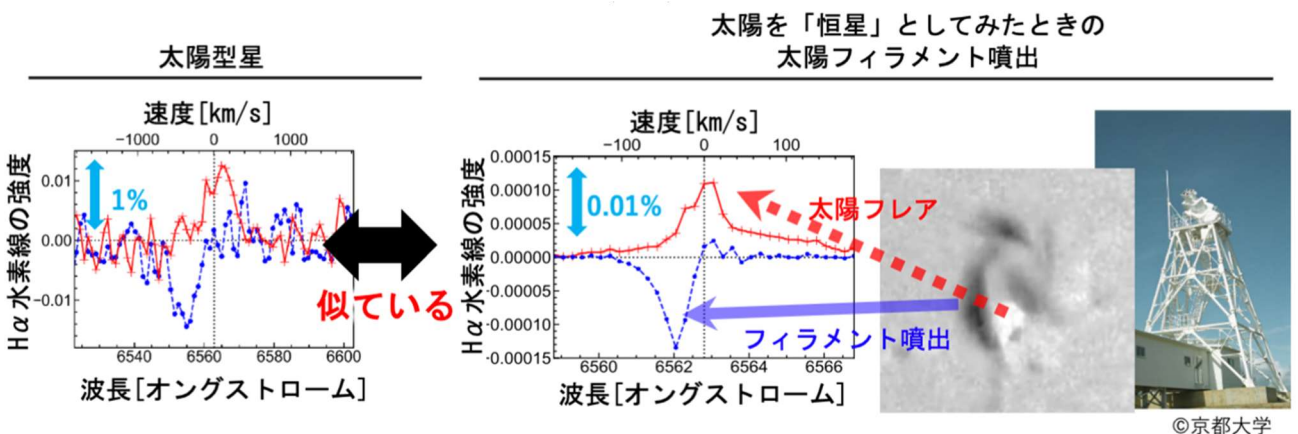
<参考図表>



<図 1> 今回の観測で利用された望遠鏡一覧。左から、京都大学岡山せいめい望遠鏡、兵庫県立大学西はりま天文台なゆた望遠鏡、アメリカ航空宇宙局(NASA)トランジット惑星探査衛星(TESS)。



<図 2> 2020年4月6日未明に観測された、太陽型星(太陽によく似た星)りゅう座EK星のスーパーフレア。(左)スーパーフレア時のイラスト。星表面でスーパーフレアが発生し、明るいところからHα線や白色光が放射される。一方、フィラメント噴出は、Hα線を吸収し、視線方向に対して運動している場合は、星からの光を吸収して暗く見える。(右)実際に得られたHα水素線の「分光」データ。スーパーフレア発生時は、Hα水素線中心で明るく光っている(赤線)。一方、約10分後には、視線方向に対して数100km/sで運



<図 3> (左)太陽型星(太陽によく似た星)りゅう座EK星のスーパーフレアと、(右)飛騨天文台 SMART 望遠鏡で観測された「太陽」でのフィラメント噴出を、Hα線で比較した図。両者のHα線の変化が非常によく似ていることが判明し、太陽型星でも同じような現象が起きていることが確定的になった。ただし、横軸・縦軸のスケールは大きく異なり、星での現象はかなり大規模であったことが推測される。