

令和 3 年 4 月 9 日

## 海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 31 年度

受付番号 201960072

氏名 野津 湧太

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

### 記

1. 用務地 (派遣先国名) 用務地: コロラド州ボルダー (国名: 米国)

2. 研究課題名 (和文) ※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。

分光観測で迫る太陽型星のスーパーフレアと巨大黒点

3. 派遣期間: 平成 31 年 4 月 1 日 ~ 令和 3 年 3 月 31 日

4. 受入機関名及び部局名

受入機関名: University of Colorado Boulder

部局名: Laboratory for Atmospheric and Space Physics

5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)**

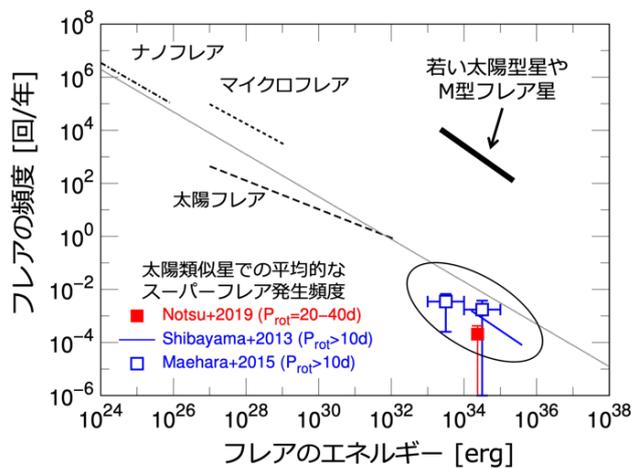
(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

次ページ以降に記載

## [研究・調査実施状況]

本研究員が博士課程時代から行ってきた研究(Notsu et al. 2019, Okamoto et al. 2020[**研究発表リスト(1)-(1), (1)-(11)**])でも明らかになった通り、若くて自転が速い太陽型(G 型主系列)星や低温の M 型星では、スーパーフレアと呼ばれる巨大爆発現象が非常に高い頻度で発生する(図 1)。そして、フレアに伴うプラズマ噴出が、惑星大気の散逸や生命関連物質の化学進化に影響する可能性が、近年広く議論されている。例えば、Airapetian et al. 2020 [**研究発表リスト(1)-(7)**]や、本研究員の参加した[**研究発表リスト(2)-(7)**]の会議でも詳細に議論された。若い太陽型星の議論は、そのまま過去の太陽でのフレア活動と太陽系惑星の進化の議論に繋がる。一方、TESS 衛星等で M 型星周囲の惑星発見が進んでおり、大気組成や生命関連物質について、将来の巨大望遠鏡(JWST, ARIEL, ELT, TMT 等)での探査が計画されている。しかし、これらの探査の結果は、中心星でのフレア活動によって、大きな変成を受ける可能性も指摘されている(Scheucher et al. 2018)。



(図 1) フレアのエネルギーと発生頻度(Notsu et al. 2019[**研究発表リスト(1)-(1)**より])。太陽の(ナノ・マイクロを含む)フレアはエネルギーのべき乗則で頻度が下がる。最大級の太陽フレアの 100 倍のエネルギー( $10^{34}$ erg)のフレアは、自転速度が遅く太陽とよく似た星(太陽類似星)では数千年に 1 度程度の頻度で起きる。一方、若い太陽型星(=自転速度が速い)や M 型フレア星(=星が低温なため、深い対流層を持ちダイナモ機構が効率的に働いて磁気活動が活発)では 1 年に 1000 回程度起きる(Güdel 2007; Hawley et al. 2014)。

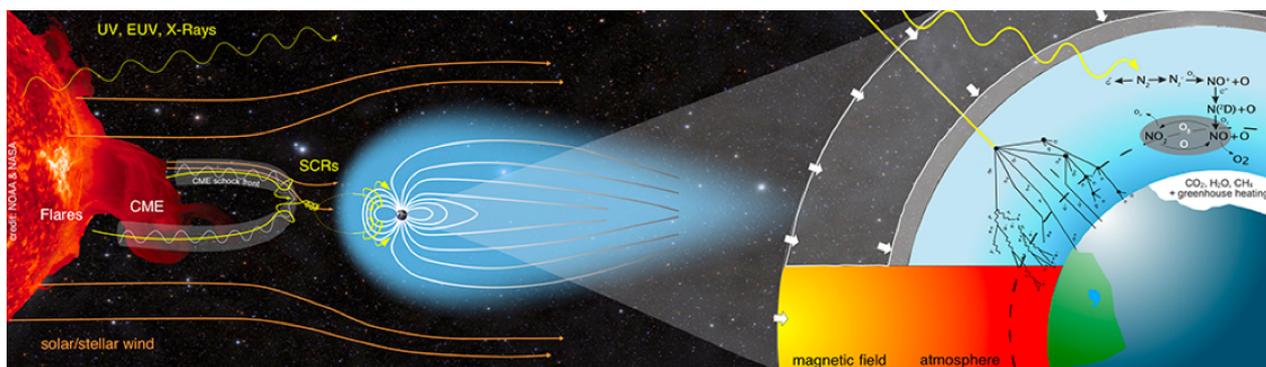


図 2: スーパーフレアとそれに伴うプラズマ噴出(CME)や高エネルギー粒子(SCR)が、地球型惑星の大気と化学組成に影響を与える様子を描いた模式図(申請者も Young Member として参加している、国際共同研究チームの Webpage <http://www.issibern.ch/teams/exoeternal/> より)

こうした状況を踏まえ、恒星フレアが生命を育む惑星の大気やその化学組成にどんな影響を与えるる

のか、統一的な理解が重要である(図 2)。特に、惑星大気に影響を与える高エネルギー粒子は、プラズマ噴出内の衝撃波で生成・加速されるため、スーパーフレアに伴うプラズマ噴出の定量的理解は非常に重要である。太陽フレアにおいては、フレアに伴うプラズマ噴出の規模を含め、詳細な観測が行われてきた(Emslie et al. 2012 他)。恒星においても、本研究者らの研究(e. g., **研究発表リスト(1)-(1), (1)-(11)**)を含め、スーパーフレアと星自体の特性の関係について、ある程度の統計的な性質は調べられてきた(年齢に伴う発生頻度の変化など)。しかし、「磁気エネルギーの解放から彩層放射やプラズマ噴出へ至る一連の過程について、**スーパーフレアが何桁も小さな太陽フレアと類似の物理過程で、全て説明可能なのか?**」、そして「**恒星スーパーフレアに伴って、どの程度の規模のプラズマ噴出が生じるのか?**」というような根本的な点が、未だほとんど明らかになっていない。

一方近年、M型星の彩層スペクトル線において、輝線輪郭が顕著な青方偏移(数百 km/s 程度)を示す場合があることが、視線速度法での惑星探査等の副産物として報告されている(Fuhrmeister et al. 2018; Vida et al. 2019)。これらの青方偏移は、スーパーフレアに伴うプラズマ噴出を表しているとも指摘されているが、現状では時間分解されていないスナップショット観測に基づく検出での報告なため、スーパーフレア中にどのように発生するのか、本当にプラズマ噴出を反映した現象なのか、その詳細な性質は分かっていない。

そこで本研究者は、海外学振の期間中の計画研究として、スーパーフレアを頻発している低温度星(AUMic, YZCMi, EVLac, Proxima Centauri などの M 型フレア星)や若い太陽型星について、可視光分光・可視光測光・X線の同時キャンペーン観測(多波長連携観測)を実施してきた。具体的には、表 1 にある通り、TESS 衛星による高精度測光観測や NICER などの X 線衛星の観測に合わせて、米国やチリの中口径望遠鏡や京都大学の 3.8m せいめい望遠鏡での分光観測と、地上小口径望遠鏡の測光観測を実施してきた(日本国内での観測は、共同研究者が実施)。その結果、現在までに、50 例以上のフレアを検出に成功している(**研究発表リスト(1)-(9), (1)-(12), (2)-(18), (2)-(20), (2)-(21)他**)。

表 1: フレア観測キャンペーンでの利用装置 (**研究発表リスト(2)-(18), (2)-(20), (2)-(21)他**)

| 観測   | 装置   |
|--|--|
| 高分散分光観測<br>(波長分解能 $\lambda/\Delta\lambda > 1$ 万)   | 米国 Apache Point Observatory 3.5m 望遠鏡<br>チリ Cerro Tololo Inter-American Observatory SMARTS1.5m 望遠鏡<br>西はりま天文台 2m 望遠鏡(大学間連携(OISTER)観測) |
| 低分散分光観測<br>(波長分解能 $\lambda/\Delta\lambda =$ 数百~数千) | 京都大学岡山 3.8m せいめい望遠鏡(大学間連携(OISTER)観測)<br>広島大学 1.5m 望遠鏡(大学間連携(OISTER)観測)<br>中央大学 36cm 望遠鏡  |
| 可視光測光(衛星)  | TESS 衛星(単波長)   |
| 可視光測光(地上: 多色観測)                                    | Las Cumbres Observatory 1m&0.4m 望遠鏡<br>米国 Apache Point Observatory 0.5m 望遠鏡  |

|        |  |
|--------|--|
|        | 岡山 MITSUME 50cm 望遠鏡(大学間連携(OISTER)観測)<br>他、大学間連携(OISTER)やアマチュア天文関係者の望遠鏡も用いた測光観測 |
| 軟 X 線  | NICER( Neutron Star Interior Composition Explorer), XMM-Newton                 |
| 近紫外線測光 | XMM-Newton   |

観測の結果、青方偏移が M 型星のスーパーフレアで広く見られる現象であることが判明した(太陽フレアでは、ほとんど見られない)。しかし、青方偏移を伴うフレアでも、青方偏移の大きさや継続時間、さらに可視連続光での増光の有無など、複数の要素が絡んだ多様性が見られた(研究発表リスト(2)-(18), (2)-(20), (2)-(21)他)。さらに、データ解析だけでなく、本海外学振制度における受入研究者(コロラド大学の Adam Kowalski 氏)と共同し、恒星フレアの輻射流体力学シミュレーションや太陽フレア観測との比較の議論も行なってきた。これらの研究結果に基づいて、恒星フレアを起こしている彩層中でのエネルギー解放過程や、青方偏移とプラズマ噴出の関係を探ることを目標として、主著論文および共著論文に取り組んできた(彩層スペクトル線の線幅と、フレア中の電子ビーム加熱の関係についての共著論文 1 編はすでに出版済み: 研究発表リスト(1)-(9))。

さらに、これらの恒星観測の成果を、惑星研究者へを提供するという形で、スーパーフレアの惑星大気中の放射線強度・大気化学組成の研究を行なっている。期間中に共著論文 Yamashiki et al. 2019[研究発表リスト(1)-(4)]が出版され、日本国内の共同研究者の所属機関からは記者発表も行われた([http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research\\_results/2019/190716\\_1.html](http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2019/190716_1.html))。

また、恒星磁気活動が惑星に与える影響については、従来本研究員が中心となって取り組んでいる、可視光での観測と同時に、紫外線(特に極端紫外線)での観測も重要であり、その観点からコロラド大学(本海外学振での滞在先)の研究者複数で主導する、極端紫外線観測を行う超小型衛星計画の提案に共同研究者として参画している(計画題目: BUFALO: Forging the missing link between superflares and their impacts on exoplanet atmospheres, NASA に 2020 年 12 月に Proposal 提出(PI: Allison Youngblood, NASA Proposal Number 20-APRA20-0048))。

また、本研究員の博士課程時代の研究(Notsu et al. 2019[研究発表リスト(1)-(1)])によって、スーパーフレアを起こすには、巨大黒点の存在が重要であることが分かったが、そのような巨大黒点がどのようにできるのか、理論にフィードバックするべく、観測的な制限が重要である。Kepler 宇宙望遠鏡の測光データを活用して巨大黒点の生成・消滅過程を調べた共同研究を推進し、共著論文 Namekata et al. 2020 の出版に至った[研究発表リスト(1)-(6)]。さらに、分光観測で長期的な探査をするべく、Apache Point 3.5m 望遠鏡の観測時間を活用して、近傍の活動的な太陽型星の探査も実施している。さらに、太陽でのスーパーフレアの発生可能性という観点に関連して、過去の地磁気強度記録や黒点の記録から太陽活動を再現する研究にも共同研究として関わった(Hayakawa et al. 2019 及び 2020 [研究発表リスト(1)-(2), (1)-(8)])。

## [成果の発表・関係学会への参加状況]

上記の研究活動に加えて、特にコロナ禍前の滞在1年目を中心に、学会等での発表も積極的に行った。まず、主として博士課程時代の研究(Notsu et al. 2019[[研究発表リスト\(1\)-\(1\)](#)])で行った、ケプラー宇宙望遠鏡での太陽型星スーパーフレア研究の結果について、アメリカ天文学会夏季総会・Astrobiology conference・COSPAR2021 等多くの国際会議で発表を行った [[研究発表リスト\(2\)-\(2\)](#), ([2\)-\(3\)](#), ([2\)-\(5\)](#), ([2\)-\(15\)](#), ([2\)-\(19\)](#)]。特にアメリカ天文学会総会での発表は、博士論文発表の枠で実施され、記者発表対象講演にも選ばれた。記者発表の結果、幸い米国をはじめ様々な国で報道が行われた(プレスリリースと URL <https://www.colorado.edu/today/2019/06/05/superflares>)。また、複数の研究機関のセミナーでも、招待等により発表を行った[[研究発表リスト\(2\)-\(1\)](#), ([2\)-\(6\)](#), ([2\)-\(8\)](#), ([2\)-\(13\)](#), ([2\)-\(14\)](#), ([2\)-\(17\)](#)]。

滞在後半では、上記の恒星フレアの観測キャンペーンで得られた初期成果について、発表を行った。アメリカ天文学会冬季総会[[研究発表リスト\(2\)-\(11\)](#), ([2\)-\(18\)](#)]で発表を行った他、小規模の議論重視の研究会でも発表・議論を積極的に行い[[研究発表リスト\(2\)-\(10\)](#)]、議論の成果を適宜観測計画へとフィードバックしてきた。

また、スイス・ベルンに所在の ISSI (International Space Science Institute) で開催される国際共同研究チーム “The Role Of Solar And Stellar Energetic Particles On (Exo)Planetary Habitability (ETERNAL)” に Young Scientist Member として招待され、2019年10月に開催された第一回会議に出席し、発表・議論を行った[[研究発表リスト\(2\)-\(7\)](#)]。この共同研究は、フレアをはじめとした磁気活動への惑星大気や化学組成への影響という観点について、恒星物理学、太陽物理学や惑星大気化学など幅広い分野の専門家15名弱が集まって、数年計画で議論・研究を行うというものである。今後第2回の会議(オンライン)が予定されており、この会議の枠組み等も活用して、本研究員らの恒星スーパーフレア研究と、惑星大気の研究の連携をさらに発展させていく計画である。

[研究発表リスト(上欄の説明のため、別紙1とは同内容だが、公開用として本欄にも記載)]

### (1) 学会誌等への発表

(1)

著者: **Notsu, Y.**, Maehara, H., Honda, S., Hawley, S.L., Davenport, J.R.A., Namekata, K., Notsu, S., Ikuta, K., Nogami, D., & Shibata, K.

題目: Do Kepler superflare stars really include slowly-rotating Sun-like stars? - Results using APO 3.5m telescope spectroscopic observations and Gaia-DR2 data -

誌名・巻号: The Astrophysical Journal, 876, 58 (2019年5月発行)

(2)

著者: Hayakawa, H., Willis, D.M., Hattori, K., **Notsu, Y.**, Wild, M.N., & Karoff, C.

題目: Unaided-eye Sunspot Observations in 1769 November: A Comparison of Graphical Records in the East and the West

誌名・巻号: Solar Physics, 294, 95 (2019年7月発行)

(3)

著者: Yamashiki, Y. A., Maehara, H., Airapetian, V. S., **Notsu, Y.**, Sato, T., Notsu, S., Kuroki, R., Murashima, K., Sato, H., Namekata, K., Sasaki, T., Scott, T.B., Bando, H., Nashimoto, S., Takagi, F., Ling, C., Nogami, D., Shibata, K.

題目: Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability

誌名・巻号: The Astrophysical Journal, 876, 58 (2019年8月発行)

(4)

著者: Broomhall, A. M., Davenport, J.R.A., Hayes, L. A., Inglis, A. R., Kolotkov, D. Y., McLaughlin, J. A., Mehta, T., Nakariakov, V. M., **Notsu, Y.**, Pascoe, D. J., Pugh, C. E., and Doorselaere, T. V.

題目: A Blueprint of State-of-the-art Techniques for Detecting Quasi-periodic Pulsations in Solar and Stellar Flares

誌名・巻号: The Astrophysical Journal Supplement Series, 244, 44 (2019年10月発行)

(5)

著者: Namekata, K., Davenport, J. R. A., Morris, B. M., Hawley, S. L., Maehara, H., **Notsu, Y.**, Toriumi, S., Ikuta, K., Notsu, S., Honda, S., Nogami, S., & Shibata, K.

題目: Temporal Evolution of Spatially-Resolved Individual Star Spots on a Planet-Hosting Solar-type Star: Kepler 17

誌名・巻号: The Astrophysical Journal, 891, 103 (2020年3月発行)

(6)

著者: Yamashiki, Y. A., Fujita, M., Sato, T., Maehara, H., **Notsu, Y.**, and Shibata, K.

題目: Cost estimation for alternative aviation plans against potential radiation exposure associated with solar proton events for the airline industry

誌名・巻号: Evolutionary and Institutional Economics Review, 17, 487 (2020年3月発行)

(7)

著者: Airapetian, V. S., Barnes, R., **Notsu, Y. (28 番目)**, 他 41 名

題目: Impact of Space Weather on Climate and Habitability of Terrestrial Type Exoplanets

誌名・巻号: International Journal of Astrobiology, 19, 136 (2020年4月発行)

(8)

著者: Hayakawa, H., Ribeiro, P., Vaquero, J.M., Cruz Gallego, M., Knipp, D.J., Mekhaldi, F., Bhaskar, A., Oliveira, D.M., **Notsu, Y.**, Carrasco, V.M.S., Caccavari, A., Veenadhari, B., Mukherjee, S., and Ebihara, Y.

題目: The Extreme Space Weather Event in 1903 October/November: An Outburst from the Quiet Sun

誌名・巻号: The Astrophysical Journal Letters, 897, 10 (2020年7月)

(9)

著者: Namekata K., Maehara H., Sasaki R., Kawai H., **Notsu Y.**, Kowalski A. F., Allred J. C., Iwakiri, W., Tsuboi, Y., Murata, K. L., Niwano, M., Shiraishi, K., Adachi, R., Iida, K., Oeda, M., Honda, S., Tozuka, M., Katoh, N., Onozato, H., Okamoto, S., Isogai, K., Kimura, M., Kojiguchi, N., Wakamatsu, Y., Tambo, Y., Nogami, D., Shibata, K.

題目: Optical and X-ray observations of stellar flares on an active M dwarf AD Leonis with Seimei Telescope, SCAT, NICER and OISTER

誌名・巻号: Publications of the Astronomical Society of Japan, 72, 68 (2020年8月発行)

(10)

著者: Ikuta, K., Maehara, H., Notsu, Y., Namekata, K., Kato, T., Notsu, S., Okamoto, S., Honda, S., Nogami, D., and Shibata, K.

題目: Starspot mapping with adaptive parallel tempering I: Implementation of computational code

誌名・巻号: The Astrophysical Journal, 902, 73 (2020年10月発行)

(11)

著者: Okamoto S., Notsu Y., Maehara H., Namekata K., Honda S., Ikuta K., Nogami D., and Shibata, K.

題目: Statistical Properties of Superflares on Solar-type Stars: Results Using All of the Kepler Primary Mission Data

誌名・巻号: The Astrophysical Journal, 906, 72 (2021年1月発行)

(12)

著者: Maehara, H., Notsu, Y., Namekata, K., Honda, S., Kowalski, A. F., Katoh, N., Ohshima, T., Iida, K., Oeda, M., Murata, K. L., Yamanaka, M., T

題目: Time-resolved spectroscopy and photometry of an M dwarf flare star YZ Canis Minoris with OISTER and TESS: Blue asymmetry in H $\alpha$  line during the non-white light flare

誌名・巻号: Publications of the Astronomical Society of Japan, 73, 44 (2021年2月発行)

## (2) 学会発表

(1)

題目: Do superflares really occur on slowly-rotating Sun-like stars? - Latest results using Kepler, Gaia-DR2, and spectroscopic data -

学会名等: NSO seminar, 2019 May 17th, at National Solar Observatory, Boulder, Colorado, USA (口頭発表)

(2)

題目: Do Kepler superflare stars really include slowly-rotating Sun-like stars? - Results using APO 3.5m telescope spectroscopic observations and Gaia-DR2 data - (Dissertation talk)

学会名等: 234th AAS Meeting 2019 (Session 122 — Stars & Stellar Topics I), June 9-13, St. Louis, Missouri, USA (口頭発表)

(3)

題目: Statistical properties of superflares on solar-type stars -- Latest results using Gaia-DR2 data --

学会名等: Astrobiology Conference 2019 (Session 111 - The Impact of Astrospheric Space Weather on Exoplanetary Habitability I), 2019 June 24 -28, Seattle, WA, USA (口頭発表)

(4)

題目: APO3.5m Spectroscopic Monitoring Observations of a M-dwarf Superflare Star YZCMi with TESS and ARCSAT0.5m Photometric and NICER Soft X-ray Observations

学会名等: TESS Science Conference I, July 29 - Aug 2 2019, MIT, Cambridge, MA, USA(ポスター発表)

(5)

題目: Do superflares really occur on slowly-rotating Sun-like stars in the long-term activity changes? - Latest statistical results using Kepler and Gaia-DR2 data

学会名等: SHINE2019, Aug 5 - Aug 9 2019, Boulder, CO, USA (ポスター発表)

(6)

題目: Do Superflares Occur on the Sun?

学会名等: Colloquium of Department of Physics and Astronomy, University of Denver, 2019 Sep 18th 16:00-17:00 at University of Denver, Denver, Colorado, USA (口頭発表)

(7)

題目: Superflares of G-, K- and M-Stars

学会名等: 1st workshop of ISSI team "The Role Of Solar And Stellar Energetic Particles On (Exo)Planetary Habitability (ETERNAL)" led by K. Herbst (DE) & J.L. Grenfell (DE), 2019 Oct 7 - 11 at International Space Science Institute, Bern, Switzerland (口頭発表)

(8)

題目: Do Superflares Occur on the Sun?

学会名等: NOAA/SWPC seminar, 2019 Oct 17th 10:30-11:30, at NOAA/Space Weather Prediction Center (SWPC), Boulder, Colorado, USA (口頭発表)

(9)

題目: Recent superflare studies and impacts on planets

学会名等: Exoplanet Transit Spectroscopy e-Workshop 2019 2019 Oct 23 - 24 at National Solar Observatory, Boulder, CO, USA (口頭発表)

(10)

題目: Recent stellar flare observations with Kepler/TESS photometry and ground-based optical spectroscopy

学会名等: NSO Solar Focus Meeting "Solar and Stellar Flares", 2019 Dec 6 at National Solar Observatory, Boulder, CO, USA (口頭発表)

(11)

題目: Blue asymmetries of Balmer lines during M-dwarf flares investigated with multi-wavelength observations

学会名等: 235th AAS Meeting (Session 288. iPoster-Plus - Exoplanets, Dwarf Star, & Tabby's Star), 2020 Jan 4-8, Honolulu, Hawaii, USA (ポスター発表)

(12)

題目: 多波長モニタ観測で探る M 型星フレアのバルマー線の輝線輪郭非対称性

学会名等: 日本天文学会 2020 年春季年会 N01a, 2020 年 3 月 16-19 日, コロナウイルス感染対策で中止の為、学会ウェブサイト上での講演スライド発表のみ

(13)

題目: 太陽型星でのスーパーフレア研究の最新状況

学会名等: SSE (Space-Sun-Earth) ランチセミナー , 2020 年 7 月 8 日 12:00-13:00(JST), オンライン開催  
(口頭発表)

(14)

題目: Do superflares occur on the Sun ?

学会名等: NYUAD Space Science Webinar, 2020 July 28, 3:00-4:00(GST), オンライン開催 (口頭発表)

(15)

題目: Do superflares occur on the Sun? - Latest results using all the Kepler 4-year data and Gaia-DR2 data

学会名等: 51th SPD Virtual Meeting, 2020 Aug 18 – 19, オンライン開催 (ポスター発表)

(16)

題目: 多波長モニタ観測で探る M 型星フレアのバルマー線の輝線輪郭非対称性 II

学会名等: 日本天文学会 2020 年秋季年会 N15a, 2020 年 9 月 8-10 日, オンライン開催 (口頭発表)

(17)

題目: Recent observational studies of stellar superflares and their impacts on planets

学会名等: Monthly Colloquium of Tamgawa & Enoto Labs, RIKEN, 2020 Dec 16, 11:00-12:00 (JST), オンライン開催 (口頭発表)

(18)

題目: Blue asymmetries in Balmer lines during mid M dwarf flares

学会名等: 237th AAS meeting (Session 515. Stellar Rotation, Variability, and Flares 2), 2021 Jan 11-15, オンライン開催 (口頭発表)

(19)

題目: Do superflares occur on the Sun?

学会名等: COSPAR2021 Session E2.1: Magnetic flux ropes in solar and stellar environments, 2021 Jan 28 – Feb 4, オンライン開催 (招待講演)

(20)

題目: Blue asymmetries in Balmer lines during mid M dwarf flares

学会名等: The 20.5th Cambridge Workshops of Cool Stars, Stellar Systems and the Sun" (CS20.5), virtually anywhere, March 2-4 2021, オンライン開催 (ポスター発表)

(21)

題目: 多波長モニタ観測で探る M 型星フレアのバルマー線の輝線輪郭非対称性 III

学会名等: 日本天文学会 2021 年春季年会 N02a, 2021 年 3 月 16-19 日, オンライン開催(口頭発表)