

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：82645

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07478

研究課題名(和文) 太陽面爆発・噴出現象の発生機構解明および発生予測を目指した統計的研究

研究課題名(英文) Statistical Study for Understanding and Prediction of Solar Explosive and Eruptive Phenomena

研究代表者

伴場 由美 (Bamba, Yumi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：30779541

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、「物理過程の科学的理解に基づいた太陽面爆発・噴出現象の発生予測パラメータの決定」を目的とし、理論モデルの観測的検証および統計的イベント解析を行った。ひので衛星およびSDO衛星による太陽フレア観測データを詳細に解析することで、我々の提案する太陽フレアモデルおよびフレア発生条件の定量的検証、その普遍性の検討、新たなフレア予測パラメータの提案を行った。

研究成果の概要(英文)：We aim to decide parameters for prediction of solar explosive and eruptive events based on understanding of physical processes. We performed observational verification of theoretical models and statistical data analysis for solar flares observed by the Hinode and SDO satellites. We quantitatively confirmed the physical processes and occurrence conditions of solar flare. Moreover, we proposed new candidates of parameters that would be useful for flare prediction, and discussed universality of our flare trigger model and its parameters.

研究分野：太陽物理学

キーワード：太陽フレア フレアトリガ 太陽黒点 フレア予測 宇宙天気 ひので衛星 SDO衛星 IRIS衛星

## 1. 研究開始当初の背景

太陽表面で発生する爆発・噴出現象である太陽フレアやコロナ質量放出は、付随して発生する高エネルギー粒子や衝撃波により、地球周辺の宇宙環境を擾乱することがある。しかし、その発生に関わる物理過程は完全には解明されていないため、太陽面爆発・噴出現象が「いつ・どこで・どの程度の規模で発生するのか」を正確に予測するのは困難な現状である。

太陽フレアやコロナ質量放出の発生過程に関する研究は、理論的・観測的側面から盛んに行われてきたが (e.g. Hagyard et al. 1984, Chen & Shibata 2000)、いずれも定性的議論にとどまり、観測的検証も十分とは言えない。それゆえ、現行の太陽面爆発・噴出現象の発生予測は、フレアやコロナ質量放出と相関があると経験的に知られている観測量を評価することで行われている。このため、観測技術が飛躍的に向上したにも関わらず、過去100年にわたり予測精度はほとんど向上していない。したがって、予測精度向上のためには、太陽面爆発・噴出現象発生時の物理過程の科学的理解に基づき、予測に有用なパラメータを定量的に決定することが必要である。

我々はこれまでに、数値シミュレーションに基づき太陽面爆発・噴出現象発生時の理論モデル (以後、便宜的にKB12モデルと呼ぶ) の提唱と観測的検証を行ってきた (e.g. Kusano et al. 2012, Bamba et al. 2013)。このモデルは、太陽表面の磁場の幾何学的構造を特徴づける単純な2つのパラメータの組み合わせによって、フレアの発生の有無を決定することができる画期的なものである。本研究代表者は特に、太陽観測衛星によるデータを用いた理論モデルの観測的検証研究により、前述の2つのパラメータの他に、フレア発生を決定づけるパラメータとして新たに考慮すべき物理量を発見した。一方で、これまで代表者が行ってきた観測的検証研究では、特にコロナ質量放出などの噴出現象の発生条件についての定量的検証は未だ十分ではない。これらのことから、我々のモデルを重要な仮説として位置づけつつ、他のモデルと併せてさらなる観測的検証を通して太陽面爆発・噴出現象を統一的に理解する必要がある。

## 2. 研究の目的

物理過程の科学的理解に基づいた太陽面爆発・噴出現象の発生予測パラメータの決定

## 3. 研究の方法

本研究では、以下の2項目を課題として研究を推進する。

### (i) 理論モデルの観測的検証

現在、KB12モデルを含め、複数の有力な太陽面爆発・噴出現象の理論モデルが存在する。これらは、爆発・噴出現象の発生に外的トリガが必要なモデルと、外的トリガを要しないモデルに大別できる。また、フレアやコロナ質量放出も、活動領域中心部など磁場構造の明確な領域で発生するイベントと、静穏領域と呼ばれる、小規模な弱い磁場が分布する領域で発生するものに大別される。本研究では、複数の太陽観測衛星によって観測された、あらゆる領域におけるフレア・コロナ質量放出・フィラメント噴出イベントを詳細に解析し、外的トリガあり・なしのそれぞれの理論モデルの数値シミュレーションと比較する。これにより、どのような場合に外的トリガあり・なしのそれぞれの理論モデルが適用可能なのか明らかにすることで、様々な条件のもとで発生する太陽面爆発・噴出現象の物理過程を理解する。同時に、外的トリガあり・なしの場合のそれぞれについて、爆発・噴出現象発生時の指標となり得る物理量の候補を決定する。

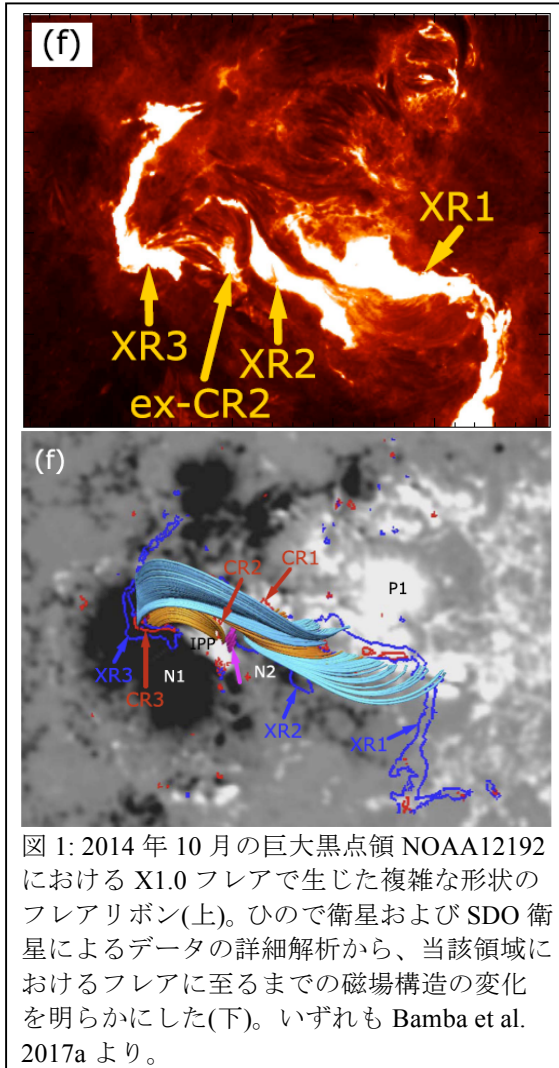
### (ii) 統計的イベント解析と予測実験

理論モデルの観測的検証によって、爆発・噴出現象発生時の指標の候補として挙げられた物理量に着目し、多くのフレア・コロナ質量放出・フィラメント噴出イベントを統計的に解析する。これにより、それぞれの物理量が予測にとって真に有効なパラメータとなり得るか評価を行う。

## 4. 研究成果

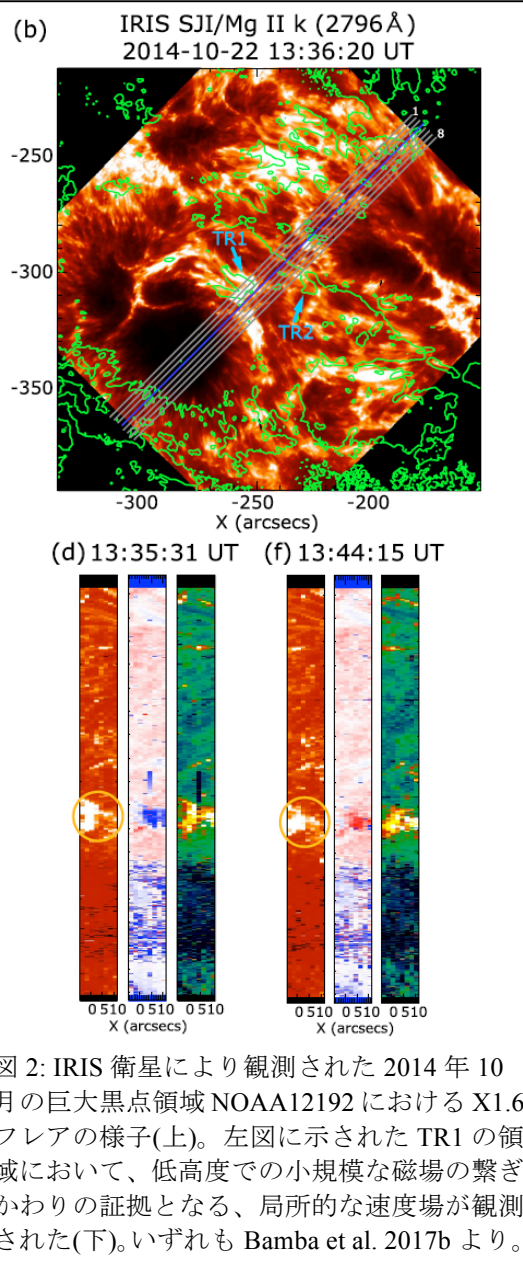
平成28年度には、主に(i)の理論モデルの観測的検証を行った。特に、2014年10月に太陽面上に現れた巨大黒点領域 NOAA12192 で連続的に発生した大規模フレアに着目した。まず、特徴的なフレアリボンが観測された X1.0 フレアについて、ひので衛星および SDO 衛星による磁場構造の詳細解析と数値シミュレーションを比較した。その結果、シミュレーションよりもはるかに複雑な磁場構造の下で発生したフレアイベントであっても、その発生過程は KB12 モデルで説明可能であり、フレア発生条件も定量的に一致すること

を明らかにした。これにより、シミュレーションで考えられているフレア発生のための幾何学的条件が、実際の太陽表面ではより柔軟であり、KB12 モデルの適用範囲を広げる可能性を示唆した (図 1, Bamba et al. 2017a)。



さらに、同じ黒点領域で発生した別の X1.6 クラスフレアに対し、ひので衛星および SDO 衛星による磁場構造と太陽大気中の発光現象の解析に加え、IRIS 衛星による分光観測データの解析を行った。これにより、KB12 モデルで提案しているような、光球面に現れる特徴的な小規模磁場構造の上空でフレア発生前に短時間の発光現象として観測される彩層のダイナミクスを解析した。結果として、フレア発生の原因となる、黒点領域の大局的磁場と、黒点領域中に現れる小規模な磁場との繋ぎかわりが、光球上部から彩層下部という低高度で起こっていることを明らかにした (図 2, Bamba et al. 2017b)。

平成 29 年度には、主に(ii)のイベント統計解析を行った。SDO 衛星によって観測された 32 例の大規模フレアイベントを解析し、KB12 モデルとの整合性を評価した。具体的



には、KB12 モデルから示唆される、①フレア発生領域に現れる特徴的な小規模磁場構造、②小規模磁場構造上でフレア発生前に見られる断続的な発光現象、③フレア発生直後に見られるフレアリボン、の 3 つの観測的特徴が見られるか調べた。これにより、32 例のフレアイベントを①から③の特徴に応じて 6 つのタイプに分類した。6 つのタイプには、KB12 モデルで提唱している 2 つのタイプ、KB12 モデルでフレアが発生しないとされる条件に一致するタイプ、②の前兆発光現象または③のフレアリボンのいずれかのみを示すタイプ、が含まれる。解析の結果、3 割のイベントが KB12 モデルと定量的に一致し、KB12 モデルのフレア発生条件と矛盾するイベントはなかった。一方で、残る 7 割については、KB12 モデルから示唆される重要な観測的特徴 (前兆発光現象またはフレアリボン) を示さないものもあり、したがって KB12 モデル以外の物理的解釈も可能であるもの

もあった(図3, Bamba & Kusano 2018)。しかし、前年度に行った(i)の観測的検証の過程で、KB12 モデルにより提案されるフレア発生のための幾何学的条件が、実際にはより柔軟である可能性も示唆されており、今後はこれらの7割のイベントについて追加解析を行い、詳細な物理過程の検証が必要であるという指針が得られた。

No.	Date	Onset Time (UT)	GOES X-ray Class	AR (OOSAA)	Type	Angle(s)
1	2011 Feb 13	17:28	M6.6	11158	Reversed Shear	$\theta_1 \sim 88^\circ, \psi_1 \sim 341^\circ$
2	2011 Feb 15	01:44	X2.2	11158	Reversed Shear	$\theta_1 \sim 86^\circ, \psi_1 \sim 331^\circ$
3	2011 Mar 09	23:13	X1.5	11166	Complicated Ribbon	...
4	2011 Aug 05	13:17	M6.0	11261	Multiple Trigger Candidates	$\theta_1 \sim 51^\circ$
5	2011 Aug 04	03:41	M9.3	11261	Complicated Ribbon	...
6	2011 Sep 06	01:38	M5.3	11283	No-precursor Brightening	$\theta_1 \sim 80^\circ$
7	2011 Sep 06	22:12	X2.1	11283	No-precursor Brightening	$\theta_1 \sim 79^\circ$
8	2011 Sep 07	23:32	X1.8	11283	Complicated Ribbon	...
9	2011 Sep 08	18:32	M6.7	11283	Complicated Ribbon	...
10	2012 Jan 23	03:38	M8.7	11402	Multiple Trigger Candidates	$\theta_1 \sim 20^\circ$
11	2012 Mar 05	02:30	X1.1	11429	No-precursor Brightening	$\theta_1 \sim 60^\circ$
12	2012 Mar 07	00:02	X5.4	11429	Reversed Shear	$\theta_1 \sim 108^\circ, \psi_1 \sim 313^\circ$
13	2012 Mar 07	01:05	X1.3	11429	Reversed Shear	$\theta_1 \sim 68^\circ, \psi_1 \sim 295^\circ$
14	2012 Mar 09	03:22	M6.3	11429	Reversed Shear	$\theta_1 \sim 74^\circ, \psi_1 \sim 333^\circ$
15	2012 Mar 10	17:15	M8.4	11429	Reversed Shear	$\theta_1 \sim 98^\circ, \psi_1 \sim 312^\circ$
16	2012 May 10	04:11	M5.7	11476	Complicated Ribbon	...
17	2012 Jul 02	10:43	M5.6	11515	Complicated Ribbon	...
18	2012 Jul 04	09:47	M5.3	11515	Multiple Trigger Candidates	$\theta_1 \sim 56^\circ$
19	2012 Jul 05	11:39	M6.1	11515	Complicated Ribbon	...
20	2012 Jul 12	15:37	X1.4	11520	No-precursor Brightening	$\theta_1 \sim 77^\circ$
21	2012 Nov 13	01:58	M6.0	11613	Complicated Ribbon	$\theta_1 \sim 52^\circ$
22	2013 Apr 11	06:55	M6.5	11719	No-precursor Brightening	$\theta_1 \sim 82^\circ$
23	2013 Oct 24	00:21	M9.3	11877	Complicated Ribbon	$\theta_1 \sim 79^\circ$
24	2013 Nov 01	19:46	M6.3	11884	No-precursor Brightening	$\theta_1 \sim 82^\circ$
25	2013 Nov 03	05:16	M5.0	11884	No-precursor Brightening	$\theta_1 \sim 79^\circ$
26	2013 Nov 05	22:07	X3.3	11880	Complicated Ribbon	...
27	2013 Nov 08	04:20	X1.1	11880	No-precursor Brightening	$\theta_1 \sim 80^\circ$
28	2013 Dec 31	21:45	M6.4	11936	No-precursor Brightening	$\theta_1 \sim 47^\circ$
29	2014 Jan 01	18:40	M9.9	11936	Complicated Ribbon	...
30	2014 Jan 07	10:07	M7.2	11944	No-precursor Brightening	$\theta_1 \sim 95^\circ$
31	2014 Jan 07	18:04	X1.2	11944	No-precursor Brightening	$\theta_1 \sim 15^\circ$
32	2014 Feb 04	03:57	M5.2	11967	Multiple Trigger Candidates	$\theta_1 \sim 65^\circ$

図3: SDO 衛星によって観測されたフレアイベント32例と、そのタイプ分類結果一覧

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- [1] Y. Bamba, and K. Kusano, “Evaluation of Applicability of a Flare Trigger Model Based on a Comparison of Geometric Structures”, *The Astrophysical Journal*, 2018, 856, pp. 43-54, doi: 10.3847/1538-4357/aaacd1
- [2] S. Inoue, Y. Bamba, and K. Kusano, “Onset Mechanism of Solar Eruptions”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, in press, doi: 10.1016/j.jastp.2017.08.035
- [3] Y. Bamba, K. S. Lee, S. Imada, and K. Kusano, “Study on Precursor Activity of the X1.6 Flare in the Great AR 12192 with SDO, IRIS, and Hinode”, *The Astrophysical Journal*, 2017, 840, pp. 116-129, doi: 10.3847/1538-4357/aa6dfe
- [4] Y. Bamba, S. Inoue, K. Kusano, and D. Shiota, “Triggering Process of the X1.0 Flare in the Great Active Region NOAA 12192”, *The Astrophysical Journal*, 2017, 838, pp. 134-150, doi: 10.3847/1538-4357/aa6682
- [5] K. S. Lee, S. Imada, K. Watanabe, Y. Bamba, and D. H. Brooks, “IRIS, Hinode, SDO, and RHESSI Observations of a White Light Flare Produced Directly by Non-thermal Electrons”, *The Astrophysical Journal*, 2017, 836, pp. 150-164, doi: 10.3847/1538-4357/aa5b8b

[学会発表] (計 19 件)

- [1] 伴場由美, 今田晋亮, “2017年9月に発生したXクラスフレアのトリガに関する観測データ解析”, PSTEP・ISEE 研究集会「太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望」, 名古屋, 2018年2月, [招待講演]
- [2] 伴場由美, 井上諭, 林啓志, “St Patrick’s Storm の原因となったフィラメント噴出のトリガに関する研究”, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 京都, 2017年10月, [口頭]
- [3] Y. Bamba, S. Inoue, and K. Hayashi, “Triggering Scenario of Geo-effective Solar Eruption on 15 March 2015”, SPD Meeting, Portland, Oregon, USA, August, 2017, [Poster]
- [4] Y. Bamba, K. S. Lee, S. Imada, and K. Kusano, “Study on Precursor Activity of the X1.6 Flare in AR 12192”, Hinode-11/IRIS-8, Seattle, Washington, USA, May, 2017, [Talk]
- [5] Y. Bamba, and K. Kusano, “Current Status and Future Issues of the Observational Study for Solar Flare Trigger Process”, Hinode-10, Nagoya, Japan, September, 2016, [Talk]

その他、主著4件、共著10件

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

- SDO/HMI Science Nuggets  
<http://hmi.stanford.edu/hminuggets/?p=2436>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

伴場 由美 (BAMBA, Yumi)  
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・  
宇宙航空プロジェクト研究員  
研究者番号: 30779541

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし

### (4)研究協力者

草野 完也 (KUSANO, Kanya)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授  
研究者番号: 70183796

井上 諭 (INOUE, Satoshi)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・  
特任助教  
研究者番号：50432216

今田 晋亮 (IMADA, Shinsuke)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・助教  
研究者番号：40547965

塩田 大幸 (SHIOTA, Daikou)  
情報通信研究機構・電磁波研究所・研究員  
研究者番号：90462192

李 京宣 (Lee, Kyoung-Sun)  
国立天文台・太陽観測科学プロジェクト・  
研究員  
研究者番号：

K. D. Leka  
Northwest Research Associates・  
Senior Research Scientist  
研究者番号：

David H. Brooks  
George Mason 大学・駐在職員  
研究者番号：