

令和元年5月29日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17671

研究課題名(和文) 太陽から恒星へ：シミュレーションと観測に基づく普遍的な黒点・フレア理論の構築

研究課題名(英文) From the Sun to the Stars: Building of a Universal Theory of Spots and Flares Based on Numerical and Observational Studies

研究代表者

鳥海 森 (Toriumi, Shin)

国立天文台・太陽天体プラズマ研究部・特任助教

研究者番号：30738290

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：太陽・恒星における磁気エネルギー解放現象であるフレアは、黒点領域の周辺に生じやすい。本研究課題では、これらの発生機構を解明する目的で、以下の研究を実施した。(1)過去6年間にわたる大型太陽フレアの観測データから、フレアの継続時間と黒点磁場との相関関係や、フレアを生じやすい黒点の磁場構造を明らかにした。(2)フレア黒点の磁場構造を数値シミュレーションによって再現し、恒星内部における磁場のねじれや相互作用の重要性を明らかにした。(3)フレア継続時間と磁場構造との間に相関が生じる仕組みを、磁力線の熱力学シミュレーションによって解明し、恒星フレアへの応用を議論した。(4)その他関連する研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題によって、大型の太陽フレアを生じやすい黒点の磁場構造や、その形成過程が明らかになった。また、太陽フレアの継続時間と磁場構造との相関関係を明らかにしたことで、空間分解観測の不可能な恒星フレアについても、フレア継続時間を測定することで磁場構造を解明できる可能性が示された。恒星黒点・恒星フレアの研究者との議論を通じ、実際の観測データにこれらの理論を応用する道筋をつけることができた。また、これらの諸現象を観測的・理論的観点からまとめた総説論文を執筆し、成果を広くコミュニティに還元できた。

研究成果の概要(英文)：It is known that the flares on the Sun and stars, which are the releasing of magnetic energy, tend to appear in active regions (ARs) including sunspots. With the aim to reveal the mechanisms behind these phenomena, we performed the following research activities. (1) Analyzing the observational data of strong solar flares for six years, we revealed the relationship between the flare durations and AR magnetic fields, and the magnetic structures of flare-productive ARs. (2) We numerically reproduced the magnetic structures of flaring ARs and elucidated the importance of twist and interaction of magnetic fields within the stellar interior. (3) With thermo-dynamical simulations, we unraveled the statistical relation between the flare durations and AR magnetic fields and discussed the possible application to the stellar flare data. (4) Related studies were also performed.

研究分野：太陽物理学

キーワード：太陽物理学 プラズマ物理学 磁気流体力学 太陽黒点 太陽フレア

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太陽系における最大のエネルギー解放現象である「太陽フレア」は、「太陽黒点」を含む領域に蓄積された磁気エネルギーが、運動エネルギーや熱エネルギーに突発的に変換されることで生じる。近年の観測から、類似した現象は太陽以外の恒星にも広く存在することが知られており、これらは磁気活動性を示す恒星に普遍的な現象であるとして注目されていた。そこで、太陽・恒星における黒点形成からフレア発生までを一貫して説明する理論が望まれるが、恒星黒点やフレアの空間分解は困難であるため、太陽物理学の知見を恒星へ応用することでこれを打開する必要があった。

2. 研究の目的

本研究では、太陽・恒星に共通する黒点形成とフレア発生機構の解明を目的とした。

3. 研究の方法

太陽観測衛星による黒点やフレアの観測データを解析するとともに、3次元磁気流体シミュレーションを用いた黒点再現実験を実施することで、両者の比較をもとに研究を遂行した。

4. 研究成果

(1) フレア黒点の統計的観測研究

SDO衛星の取得した太陽全面の6年間にわたる観測データを解析することで、太陽フレアの継続時間と黒点領域内部の磁場構造との相関関係や、コロナ質量放出と呼ばれる現象に関して発生の可否を決定づけるパラメータの候補を明らかにした。また、フレアを生じやすい黒点領域の構造を4タイプに分類し、それぞれの磁気的特徴を明らかにした(図1左)。さらに、太陽における巨大フレア(スーパーフレア)発生の可能性について議論を行った。

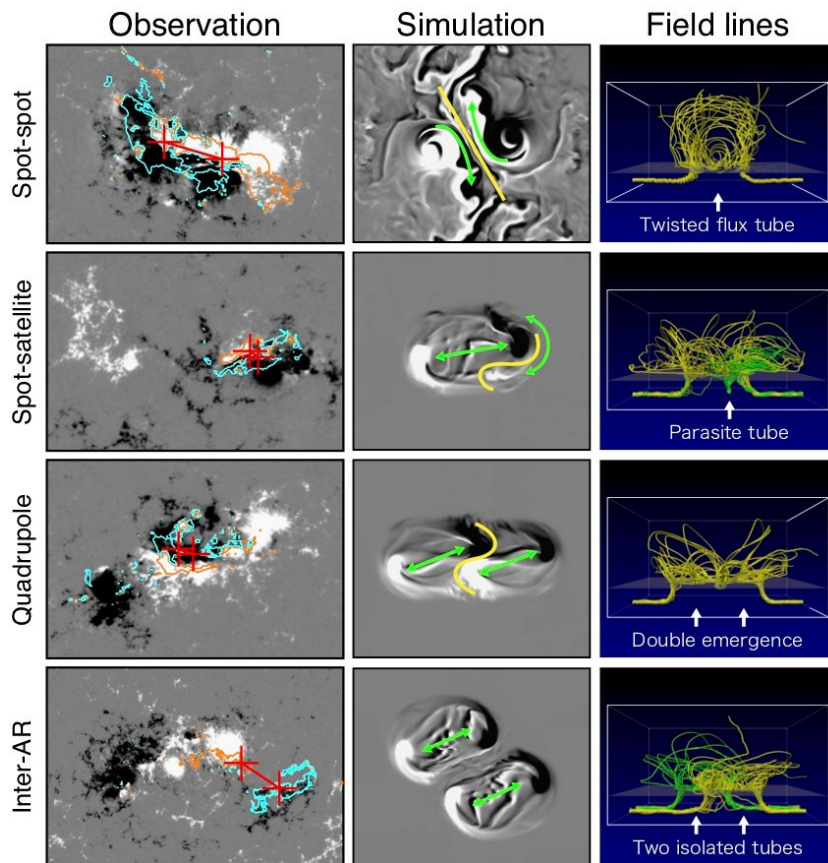


図1.太陽フレアを生じる4タイプの黒点群。(左)観測データ。背景の白黒は太陽表面磁場強度(白:正極、黒:負極) 水色・橙色は太陽フレアに伴う彩層増光、十字は彩層増光箇所の重心を示す。(中)3次元磁気流体シミュレーションによる再現結果。(右)磁力線の3次元プロット。

(2) フレア黒点の数値シミュレーション研究

上記(1)で明らかになった大型太陽フレアを生じやすい4タイプの太陽黒点を、3次元の磁気流体シミュレーションによって再現することで、フレア黒点の形成過程を理論面から研究した(図1中・右)。その結果、磁気エネルギーを蓄積するシアした磁場構造が太陽表面上に形成されるためには、太陽表面下において磁場が強くねじられたり、複数の磁場が相互作用を起こす必要があることなどが明らかになった。

- (3) フレア継続時間と磁場空間スケールに関する理論研究
上記(1)では、太陽フレアにともなうX線放射の継続時間(フレア継続時間)が、フレアに關与する磁場の空間スケールと高い相関を持つことを示した。そこで本研究では、フレアによって磁力線が加熱され、徐々に冷却される過程を、熱力学シミュレーションによって再現し、フレア継続時間と磁場スケールとの間に相関が生じる理由について理論的研究を行った。この相関関係を用いれば、空間分解観測の困難な恒星フレアについても、フレア継続時間を測定することで磁場構造を解明できる可能性が示された。
- (4) 黒点形成時に生じる爆発現象の観測研究
活動領域が太陽表面に出現する際の小規模エネルギー解放現象について、複数の衛星による共同観測データを用いた研究を実施した。日本の「ひので」衛星による高精度の光球磁場観測と、米国のIRIS衛星による彩層の紫外線スペクトル観測を組み合わせ、小規模エネルギー解放に關与する磁場構造や、その物理過程を解明した。
- (5) 太陽フレア黒点に関する総説論文
これまでの本研究課題の実績が評価されたことで、フレアを生じる太陽黒点に関する総説論文執筆の招待を受けた。本論文ではこれまでの重要な観測研究や理論研究をまとめ、平成30年度中に投稿を完了した。査読ののち令和元年5月に出版された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計16件)

- S. Toriumi and H. Wang, “Flare-productive active regions”, *Living Reviews in Solar Physics*, 査読有, 16, 3, 1-128 (2019) DOI: 10.1007/s41116-019-0019-7
- H. Hayakawa, Y. Ebihara, E. Cliver, K. Hattori, S. Toriumi, J.J. Love, N. Umemura, K. Namekata, T. Sakaue, T. Takahashi, and K. Shibata, “The extreme space weather event in September 1909”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 484 (3), 4083-4099 (2019) DOI: 10.1093/mnras/sty3196
- M. Fujiyama, H. Hayakawa, T. Iju, T. Kawai, S. Toriumi, K. Otsuji, K. Kondo, Y. Watanabe, S. Nozawa, and S. Imada, “Revisiting Kunitomo’s Sunspot Drawings During 1835 – 1836 in Japan”, *Solar Physics*, 査読有, 294, 43 (2019) DOI: 10.1007/s11207-019-1429-3
- K. Namekata, H. Maehara, Y. Notsu, S. Toriumi, H. Hayakawa, K. Ikuta, S. Notsu, S. Honda, D. Nogami, and K. Shibata, “Lifetimes and Emergence/Decay Rates of Star Spots on Solar-type Stars Estimated by Kepler Data in Comparison with Those of Sunspots”, *Astrophysical Journal*, 査読有, 871, 187 (2019) DOI: 10.3847/1538-4357/aaf471
- P.R. Young, H. Tian, H. Peter, R.J. Rutten, C.J. Nelson, Z. Huang, B. Schmieder, G.J. Vissers, S. Toriumi, L.H.M.R. van der Voort, M.S. Madjarska, S. Danilovic, A. Berlicki, L.P. Chitta, M.C.M. Cheung, C. Madsen, K.P. Reardon, Y. Katsukawa, and P. Heinzel, “Solar Ultraviolet Bursts”, *Space Science Reviews*, 査読有, 214(8), 120 (2018) DOI: 10.1007/s11214-018-0551-0
- H. Hayakawa, K. Iwahashi, M. Fujiyama, T. Kawai, S. Toriumi, H. Hotta, H. Iijima, S. Imada, H. Tamazawa, and K. Shibata, “Sunspot drawings by Japanese official astronomers in 1749-1750”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, 70(4), 63 (2018) DOI: 10.1093/pasj/psy066
- H. Hayakawa, Y. Ebihara, D.M. Willis, K. Hattori, A.S. Giunta, M.N. Wild, S. Hayakawa, S. Toriumi, Y. Mitsuma, L.T. Macdonald, K. Shibata, and S.M. Silverman, “The Great Space Weather Event during 1872 February Recorded in East Asia”, *Astrophysical Journal*, 査読有, 862(1), 15 (2018) DOI: 10.3847/1538-4357/aaca40
- 西塚直人、堀田英之、鳥海森, “太陽ダイナモを起点とした黒点形成とフレア爆発への物理過程”, *プラズマ・核融合学会誌*, 査読無, 94(2), 51-57 (2018) URL: http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2018_02/jspf2018_02-51.pdf
- H. Hayakawa, K. Iwahashi, H. Tamazawa, S. Toriumi, and K. Shibata, “Iwahashi Zenbei’s Sunspot Drawings in 1793 in Japan”, *Solar Physics*, 査読有, 293(1), 8 (2018) DOI: 10.1007/s11207-017-1213-1
- H. Wang, V. Yurchyshyn, C. Liu, K. Ahn, S. Toriumi, and W. Cao, “Strong Transverse Photosphere Magnetic Fields and Twist in Light Bridge Dividing Delta Sunspot of Active Region 12673”, *Research Notes of the American Astronomical Society*, 査読無, 2(1), 8 (2018) DOI: 10.3847/2515-5172/aaa670
- J. Reep and S. Toriumi, “The Direct Relation between the Duration of Magnetic Reconnection and the Evolution of GOES Light Curves in Solar Flares”, *Astrophysical Journal*, 査読有, 851(1), 4 (2017) DOI: 10.3847/1538-4357/aa96fe
- S. Toriumi and S. Takasao, “Numerical Simulations of Flare-productive Active Regions:

δ -sunspots, Sheared Polarity Inversion Lines, Energy Storage, and Predictions”, *Astrophysical Journal*, 査読有, 850(1), 39 (2017) DOI: 10.3847/1538-4357/aa95c2
A. Khlystova and S. Toriumi, “Photospheric Velocity Structures during the Emergence of Small Active Regions on the Sun”, *Astrophysical Journal*, 査読有, 839(1), 63 (2017) DOI: 10.3847/1538-4357/aa688f
S. Toriumi, Y. Katsukawa, and M.C.M. Cheung, “Various Local Heating Events in the Earliest Phase of Flux Emergence”, *Astrophysical Journal*, 査読有, 836(1), 63 (2017) DOI: 10.3847/1538-4357/836/1/63
S. Toriumi, C.J. Schrijver, L.K. Harra, H. Hudson, and K. Nagashima, “Magnetic Properties of Solar Active Regions that Govern Large Solar Flares and Eruptions”, *Astrophysical Journal*, 査読有, 834(1), 56 (2017) DOI: 10.3847/1538-4357/834/1/56
L.K. Harra, C.J. Schrijver, M. Janvier, S. Toriumi, H. Hudson, S. Matthews, M.M. Woods, H. Hara, G. Guedel, A. Kowalski, R. Osten, K. Kusano, and T. Lueftinger, “The Characteristics of Solar X-Class Flares and CMEs: A Paradigm for Stellar Superflares and Eruptions?”, *Solar Physics*, 査読有, 291(6), 1761-1782 (2016) DOI: 10.1007/s11207-016-0923-0

〔学会発表〕(計 47 件)

以下、代表的なものとして招待講演のみを挙げる。

S. Toriumi, T. Shimizu, S. Imada, T. Kawate, C. Quitero Noda, K. Ichimoto, H. Hara, T. Watanabe, Y. Suematsu, Y. Katsukawa, and Solar-C WG, C. Korendyke, H. Warren, T. Tarbell, S. Solanki, L. Teriaca, L. Harra, A. Fludra, F. Auchere, A. Vincenzo, A. Zhukov, et al., “Solar-C_EUVST: Science Objectives and Collaborations”, 1st ASO-S International Workshop (2019)

S. Toriumi, “How Can We Create Flare-producing Sunspots?”, AAPPS-DPP 2018 (2018)

S. Toriumi, “Flare-productive Active Regions: Observations, Modeling, and their Applications”, COSPAR 2018 (2018)

S. Toriumi, “Dynamics of Flux Emergence: Combining IRIS with Other Observations, Modeling, and New Capabilities”, IRIS-9 (2018)

鳥海森, “黒点形成やフレア発生におけるプラズマ過程”, 日本物理学会第 73 回年次大会・領域 2・プラズマ宇宙物理 3 学会合同シンポジウム (2018)

S. Toriumi, “Physical Processes of Flux Emergence and Active Region Formation”, APSPM 2017 (2017)

S. Toriumi, “Flux Emergence Studies: Past, Present and Future”, Hinode-10 (2016)

S. Toriumi, Y. Katsukawa, M.C.M. Cheung, “Hinode-IRIS Analysis of Various Chromospheric Heatings in Emerging Flux Regions”, IRIS-6: The Chromosphere (2016)

S. Toriumi, Y. Katsukawa, M.C.M. Cheung, “Hinode-IRIS observation and MHD modeling of sunspot light bridges”, IRIS-7 Workshop (2016)

〔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〕

ホームページ等

https://researchmap.jp/shin_toriumi/

<https://hinode.nao.ac.jp/user/toriumi/index-j.html>

6 . 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。