

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17772

研究課題名(和文) 太陽衝撃波の観測的研究による、コロナ質量放出の発生源の解明

研究課題名(英文) On the Origin of Coronal Mass Ejection surveyed by Observations of Coronal Disturbances

研究代表者

浅井 歩 (Asai, Ayumi)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：50390620

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：太陽表面では、太陽フレア(太陽面爆発)に代表される磁気プラズマ現象が絶え間なく発生している。特に、コロナ中を伝播するさまざまな波動現象は、磁気流体衝撃波に関連する現象であり、コロナ質量放出の端緒として、また高エネルギー粒子生成機構の候補として、「宇宙天気」研究にとって極めて重要である。申請者は、コロナ中を伝播するコロナ衝撃波の3次元構造とコロナ質量放出との関係を、さまざまな観測データを通じて迫った。また、磁気流体衝撃波についての理論モデルに対し、観測的な立場から多角的な制限を与えた。

研究成果の概要(英文)：On the solar surface, various active phenomena, such as solar flares, are constantly occurring. In particular, various shocks propagating in the corona are phenomena related to MHD shock waves and are extremely important for research on "space weather" as an origin of corona mass emissions and as a generator of high energy particles. I surveyed the relationship between the 3-dimensional structure of the corona shock waves propagating through the corona and the corona mass emission through the various observational data.

研究分野：太陽物理学

キーワード：太陽物理学 超高層物理学 宇宙天気

1. 研究開始当初の背景

太陽表面では、太陽フレア(太陽面爆発)に代表される磁気プラズマ現象が絶え間なく発生している。これらフレアや関連して発生するプラズマ噴出現象・コロナ質量放出(CME)は、宇宙空間のプラズマ・磁場環境にとって擾乱源となる。そのため、太陽フレアや噴出現象の発生、およびその宇宙空間への影響は、「宇宙天気」として盛んに研究されている。太陽からの噴出現象はCMEを直接形成し、また噴出現象の前方に形成される衝撃波は、宇宙空間において高エネルギー粒子を加速するなど、宇宙天気研究の中でも特に重要な現象である。

噴出現象を伴うフレアでは、コロナ中を伝播する衝撃波などの波動現象がしばしば観測される。これらは、CME 衝撃波の太陽近傍での直接の姿とも見なせる。コロナ擾乱現象の一つ、「モートン波」(図1)はコロナ中を伝播する衝撃波面が下層大気である彩層に接する際に引き起こされる。その速度は1000km/s 近くにまで達し、プラズマ噴出の前方に現れる。また、X線観測でも波動現象(X線波)がモートン波に付随して観測されており、コロナ中を伝播する磁気流体衝撃波であることが確認されている。一方で、人工衛星により極端紫外線では、「EIT波」などと呼ばれる、異なる種類の波動現象が観測されるようになった(EITとはSOHO衛星搭載の極端紫外線撮像望遠鏡の名称)。EIT波は当初、モートン波のコロナ版ではないかと期待されたが、モートン波やX線波に比べ典型的な速度が約300km/sと遅く、フレア領域からほぼ等方に伝播するなど、物理的特徴が異なることが知られている。また最近は、2機のSTEREO衛星による立体的な構造も報告されている[2]。しかしながら、EIT波の発生原因はいまだ不明であり、モートン波・X線波との同時観測例も少なく、そもそも波動現象であるのかどうかという実態についてさえ明らかにはなっておらず、いまだに議論の対象である[3]。

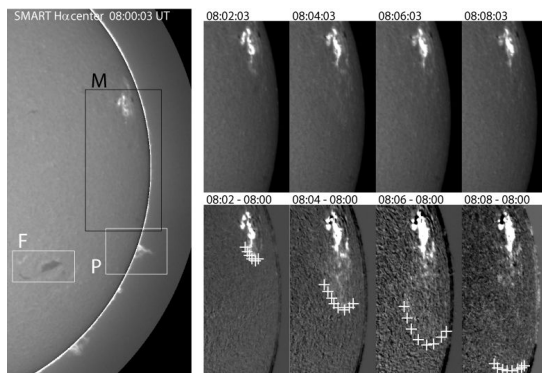


図1) (モートン波) (左)2011年8月9日のH α 線像。この日発生した大フレアに伴ってモートン波が発生した。(右)四角い領域(M)の時間変化(上)とその差分画像(下)。+サインは波面の位置を示す(文献[1])

2. 研究の目的

太陽コロナ衝撃波については、「衝撃波が発生する条件は何か」「EIT波とは一体何か」「CME とどのように結びついているか」などの未解決課題がある。本研究では、モートン波については京都大学飛騨天文台など地上観測によるH α 線観測のデータを、X線波・EIT波については「ひので」衛星など人工衛星というように、ありとあらゆるさまざまな観測データを解析することで、多角的にコロナ衝撃波をとらえ、その立体構造や時間発展を観測の立場から探った。

近年、人工衛星による太陽観測は格段に整備されている。「ひので」衛星は、搭載するX線望遠鏡(XRT)により高精度なX線観測を行っている。これにより、フレア本体に比べ格段に暗いX線波面をとらえることも可能となっている。加えて極端紫外線撮像分光装置(EIS)も搭載しており、分光観測によるコロナプラズマの詳細な診断が可能である。また、STEREO衛星は、2機の衛星をそれぞれ地球軌道の前方・後方に配置することで、極紫外線での前面・後面からの立体視観測を行っている。さらにSDO衛星は、極紫外線における太陽全面画像をこれまでにない高い時間分解能で取得しており、太陽全面にわたって伝播するコロナ波動現象を逃さず観測している(図2, [1])。一方、京都大学飛騨天文台では、太陽地場活動望遠鏡SMARTなどによりH α 線の多波長全面画像を定常的に観測しており、フレアに伴う衝撃波(H α 線モートン波)をこれまでに数十例観測している。太陽活動の極大期が2014年であったこともあり、本課題研究の遂行期間に、巨大フレアも多く発生した。このため、本研究期間は、フレア観測およびそれに付随するコロナ衝撃波の絶好の好機であった。

申請者は、これらの観測データを駆使することでコロナ衝撃波を詳細に調べた。コロナ衝撃波はまれな現象であるが、その発生原因の解明については、H α 線やX線のデータから波動現象(モートン波やX線波)の観測例を徹底的に探し、観測データから再現されるコロナのポテンシャル磁場と衝撃波の伝播の関係や、衝撃波ドライバであるプラズマ噴出との関係から調べた。また、EIT波の実態解明については、EIT波の3次元立体構造、特にH α 線やX線のデータから波動現象とEIT波と構造の比較から、両者の関係を探ることで調べた。また、極端紫外線・X線のそれぞれで複数の波長データを用いることで温度解析を行い、衝撃波面の物理状態を明らかにする。申請者は、これまでにモートン波とEIT波の同時観測[1]や「ひので」衛星EISおよびXRTを用いた世界初の衝撃波面分光観測[4]などの実績がある。これらの自然な発展として、STEREO衛星やSDO衛星による極端紫外線画像からEIT波の実態解明に迫る一方で、H α 線データやX線データからモ

ートン波・X線波の観測例を探し、それらとEIT波との関係を探り、コロナ衝撃波の発生原因を追究した。申請者は、候補となるX線波やモートン波、EIT波の観測例をすでに数例発見している[1]。これらを重点的に解析しEIT波と衝撃波との関係などを明らかにすることで、コロナ衝撃波の統一的理解を試みた。また、コロナ衝撃波の遠方への時間発展を追跡し、またCMEデータや電波データとの比較解析から、コロナ衝撃波がCMEに至る過程にも迫った。

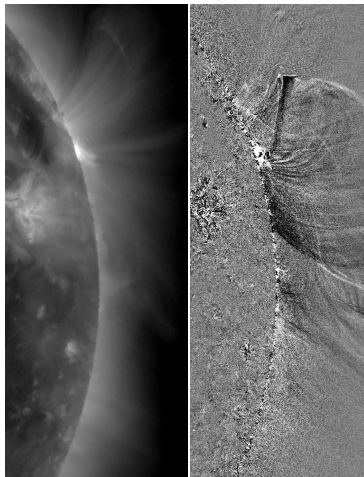


図2) (SDO/AIAによる画像) 太陽縁付近で2010年8月18日に発生したフレアの極端紫外線画像(左)と前の時刻の画像との差分画像(右)(波面を矢印で示す)。

3. 研究の方法

コロナ衝撃波現象は、比較的まれな現象である。そこで、まずは観測データの取得や解析に重点を置いた。SDO衛星のデータを有効利用するため、SDO打ち上げ後の2010年4月以降に起きた太陽フレアについて、波動現象が起きているイベントをサーベイした。申請者はSDO衛星AIAの副責任研究者(AI)を務めており、SDO衛星AIAの観測データの解析を国内で主導的に行う立場にある。SMART望遠鏡によるH α 線画像や他の人工衛星データについては、即時公開されており、申請者はそのデータ解析の経験も豊富であるため、データ入手・解析は問題なく行えた。規模の大きな太陽フレアは、太陽活動極大期(今回は2014年)を過ぎても数年間は多く発生するとされており、コロナ衝撃波を伴うフレアの発生が見込まれるため、本課題期間を通して観測データの収集を行った。得られた観測データの解析のために画像解析ソフトウェアを活用することで、観測データを詳細に解析し、コロナ衝撃波の解明を目指した。観測結果をこれまでに提唱された理論モデルと比較することで、理論モデルの検証を行った。また、計算機環境を整え、数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションでは、実データに基づく太陽コロナの真空

磁場(ポテンシャル磁場)構造と、プラズマ噴出現象と衝撃波面の形成・時間発展を調べた。

4. 研究成果

まずは、観測データの取得に重点を置いた。SDO衛星による太陽全面極端紫外線画像(AIA)やSTEREO衛星による極端紫外線画像(EUVI)に加えてSMART望遠鏡によるH α 線観測データなどから、コロナ衝撃波やその原因となるプラズマ噴出現象の観測データをサーベイした。この結果、複数の候補イベントを収集するに至った。

中でも、2011年2月16日に発生した太陽フレアおよびプラズマ噴出現象・コロナ衝撃波については、解析を進め噴出現象の3次元速度の時間変化とコロナ衝撃波との関連を明らかにした。これらを学術論文としてまとめるに至った([5]、5. 主な発表論文・雑誌論文の)。

次に、太陽フレアやコロナ衝撃波についてのデータ解析を行った。特に、太陽コロナに浮かぶ低温プラズマである「フィラメント」は、太陽フレア等に伴い宇宙空間に噴出されることがあるが、この際CMEの核を形成することから、宇宙天気研究の中でも注目されている。また、高速での噴出がコロナ衝撃波の駆動源であるとの指摘もある。そこで、フィラメントの噴出の過程に詳細に迫った。このために、フィラメント噴出の速度場とコロナ衝撃波の関係について調べた。これらについて、学術論文として投稿準備中である。

加えて、大きなフレアに伴う高エネルギー粒子の加速に関して、太陽フレアの観測データから迫った。これらについても、学術論文としてまとめるに至った([6, 7]、5. 主な発表論文・雑誌論文の)。

また、2011年3月8日に発生した太陽フレアに伴うフィラメント噴出について、フレア監視望遠鏡の観測データを用いて、視線方向の速度場を導出した。また、このフィラメント噴出と後に続くCMEとの関係を明らかにした。この成果は学術論文として投稿準備中である。この他、2010年2月10日のフレアに伴って観測された衝撃波については、フ

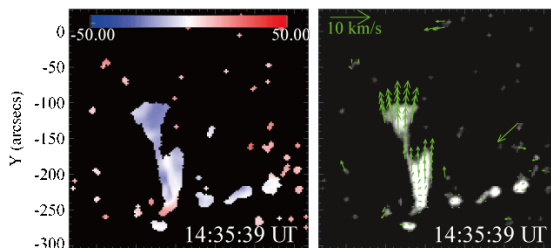


図3) (ペルー-FMTによるフィラメント噴出の速度場) 2011年2月16日に発生したフィラメント噴出の速度場マップ。視線方向速度(左)と視線に垂直な方向の速度画像(右)(速度の方向と大きさを矢印で示す)。

フィラメント噴出現象も観測されており、衝撃波とフィラメント噴出の関係について調べた。加えて、このフレアや活動領域についての観測データを元に磁気流体数値計算を実施し、フィラメント噴出に駆動される衝撃波を再現することに成功した。これらの成果は、投稿準備中である。

5. 主な発表論文等 (研究代表者には下線)

[雑誌論文](計 11 件)

- Ando, H., Shiota, D., Imamura, T., Tokumaru, M., Asai, A., Isobe, H., Pätzold, M., Häusler, B., Nakamura, M. “Internal structure of a coronal mass ejection revealed by Akatsuki radio occultation observations”, 2015, JGR, 120, 5318-5328, 査読有
DOI: 10.1002/2015JA021076
- Schrijver, C. J., Fletcher, L., van Driel-Gesztelyi, L., Asai, A., Cally, P. S., Charbonneau, P., Gibson, S. E., Gomez, D., Hasan, S. S., Veronig, A. M., Yan, Yihua, “Division E Commission 10: Solar Activity”, Transactions of the IAU, 2016, 245-277, 査読無
DOI: 10.1017/S174392131600079X
- Takasao, S., Asai, A., Isobe, H., Shibata, K., “Observational Evidence of Particle Acceleration Associated with Plasmoid Motions”, 2016, ApJ, 828, id.103, 査読有
DOI: 10.3847/0004-637X/828/2/103
- Kawate, T., Ishii, T. T., Nakatani, Y., Ichimoto, K., Asai, A., Morita, S., Masuda, S., “Temporal Evolution and Spatial Distribution of White-light Flare Kernels in a Solar Flare”, 2016, ApJ, 833, id.50, 査読有
DOI: 10.3847/1538-4357/833/1/50
- Cabezas, D. P., Martínez, L. M., Buleje, Y. J., Ishitsuka, M., Ishitsuka, J. K., Morita, S., Asai, A., UeNo, S., Ishii, T. T., Kitai, R., Takasao, S., Yoshinaga, Y., Otsuji, K., Shibata, K., ““Dandelion” Filament Eruption and Coronal Waves Associated with a Solar Flare on 2011 February 16”, 2017, ApJ, 836, id.33, 査読有
DOI: 10.3847/1538-4357/836/1/33
- Namekata, K., Sakaue, T., Watanabe, K., Asai, A., Shibata, K., “Validation of a scaling law for the coronal magnetic field strength and loop length of solar and stellar flares”, PASJ, 69, 7, 査読有
DOI: 10.1093/pasj/psw111
- Shimojo, M., Iwai, K., Asai, A., Nozawa, S., Minamidani, T., Saito, M.,

- “Variation of the Solar Microwave Spectrum in the Last Half Century”, 2017, ApJ, 848, id.62, 査読有
DOI: 10.3847/1538-4357/aa8c75
- Sakaue, T., Tei, A., Asai, A., Ueno, S., Ichimoto, K., Shibata, K., “Observational study on the fine structure and dynamics of a solar jet. I. Energy build-up process around a satellite spot”, 2017, PASJ, 69, id.80, 査読有
DOI: 10.1093/pasj/psx071
- Namekata, K., Sakaue, T., Watanabe, K., Asai, A., Maehara, H., Notsu, Y., Notsu, S., Honda, S., Ishii, T. T., Ikuta, K., Nogami, D., Shibata, K., “Statistical Studies of Solar White-light Flares and Comparisons with Superflares on Solar-type Stars”, 2017, ApJ, 851, id.91, 査読有
DOI: 10.3847/1538-4357/aa9b34
- Sakaue, T., Tei, A., Asai, A., Ueno, S., Ichimoto, K., Shibata, K., “Observational study on the fine structure and dynamics of a solar jet. II. Energy release process revealed by spectral analysis”, 2018, PASJ, 印刷中, 査読有
DOI: 10.1093/pasj/psx133
- Tei, A., Sakaue, T., Okamoto, T. J., Kawate, T., Heinzel, P., Ueno, S., Asai, A., Ichimoto, K., Shibata, K., “Blue-wing enhancement of the chromospheric Mg II h and k lines in a solar flare”, 2018, PASJ, 印刷中, 査読有
DOI: 10.1093/pasj/psy047

[学会発表](計 20 件)

- Asai, A., “Energy Release Mechanism of Solar Flares studied by Microwave Emission”, the 26th General Assembly of IUGG, チェコ・プラハ, 2015 年, 国際学会, 招待講演
- Asai, A., Ishii, T. T., Otsuji, K., Ichimoto, K., Shibata, K., “A Real Source of a Stealth CME: Energetics of an Eruption and Giant Arcade Formation”, XXIX IAU General Assembly, 米国・ハワイ, 2015 年, 国際学会
- 廣瀬公美, 一本潔, 浅井歩, 大辻賢一, 北井礼三郎, 京都大学 SMART チーム, 「飛騨天文台 SMART 望遠鏡を用いたフィラメント消失についての調査」, 日本天文学会 2015 年秋季年会, 兵庫県, 2015 年
- 西田圭佑, 浅井歩, 柴田一成, 「コロナ中の衝撃波に伴うプロミネンス振動の磁気流体シミュレーション II」, 日本天文学

会 2015 年秋季年会, 兵庫県, 2015 年
花岡庸一郎, **浅井步**, 「CME 時に観測され
た EUV 波によるプロミネンス振動」,
日本天文学会 2016 年春季年会, 東京都,
2016 年

石井貴子, 一本 潔, 仲谷善一, **浅井步**,
川手朋子, 増田智, 「京都大学飛騨天文台
SMART/FISCH による 2015 年 5 月 6
日(日本時間)の白色光フレアの観測 II」,
日本天文学会 2016 年春季年会, 東京都,
2016 年

Ayumi Asai, “Long-Term Solar
Ultraviolet Radiation Estimated from
Solar Images”, AOGS 13th Annual
Meeting, 中国・北京, 2016 年, 国際学会,
招待講演

廣瀬公美, 一本 潔, 石井貴子, **浅井步**,
大辻賢一, 北井礼三郎, 京都大学 SMART
チーム, 「飛騨天文台 SMART 望遠鏡を
用いた高速成分を伴うフィラメント活動
現象の発生頻度解析」, 日本天文学会
2016 年秋季年会, 愛媛県, 2016 年

鄭祥子, 坂上峻仁, **浅井步**, 上野悟, 一
本 潔, 柴田一成, 川手朋子, 岡本文典, 「彩
層分光観測で探る太陽フレアのエネルギ
ー解放過程とダイナミクス」, 日本天文
学会 2016 年秋季年会, 愛媛県, 2016 年
Takahashi, T., Shibata, K., **Asai, A.**,

“ The relationship between the
spatio-time structure of flare
two-ribbon and MHD
Kelvin-Helmholtz instabilities in the
flaring corona ”, 日本天文学会 2016 年
秋季年会, 愛媛県, 2016 年

Takahashi, T., Shibata, K., **Asai, A.**,
“ Coronal MHD shock-prominence
interaction ”, 日本天文学会 2016 年秋季
年会, 愛媛県, 2016 年

行方宏介, 坂上峻仁, 野津湧太, 渡邊恭
子, 前原裕之, **浅井步**, 柴田一成, 「太陽
の白色光フレアの統計的研究と太陽型星
スーパーフレアとの比較」, 日本天文
学会 2016 年秋季年会, 愛媛県, 2016 年

廣瀬公美, 一本 潔, 大辻賢一, 石井貴子,
浅井步, 京都大学 SMART チーム, 「飛
騨天文台 SMART 望遠鏡を用いた高速成
分を持つ点状プラズマ塊の統計解析」,
日本天文学会 2017 年春季年会, 福岡県,
2017 年

行方宏介, 坂上峻仁, 渡邊恭子, **浅井步**,
柴田一成, 「太陽、恒星フレアの EM-T
スケーリング則の検証」, 日本天文学会
2017 年春季年会, 福岡県, 2017 年

鄭祥子, 坂上峻仁, **浅井步**, 上野悟, 一本
潔, 柴田一成, 川手朋子, 岡本文典,
「IRIS - 飛騨 共同観測: 多波長分光観
測で探る太陽フレアのダイナミクス」,
日本天文学会 2017 年春季年会, 福岡県,
2017 年

廣瀬公美, 一本 潔, 大辻賢一, 石井貴子,

浅井步, 京都大学 SMART チーム, 「高
速成分を持つ小プラズマ塊の太陽面での
発生分布解析」, 日本天文学会 2017 年秋
季年会, 2017 年, 北海道

町田亜希, 岡田翔陽, 徳田怜実, 一本 潔,
浅井步, 上野悟, 柴田一成, 「温度と視線
速度の位相差から探る、プロミネンスの
中の波動の性質」, 日本天文学会 2017 年
秋季年会, 2017 年, 北海道

花岡庸一郎, **浅井步**, 「噴出するプロミネ
ンスに見られた波動現象」, 日本天文学
会 2017 年秋季年会, 2017 年, 北海道

町田亜希, **浅井步**, 大辻賢一, 「飛騨天文
台 SMART/SDDI で観測された浮上磁
場領域とアーチフィラメントシステム」,
日本天文学会 2018 年春季年会, 2018 年,
千葉県

D. P. Cabezas, **A. Asai**, K. Ichimoto, S.
UeNo, M. Ishitsuka, K. Shibata,
“Dynamics Processes of the Moreton
Wave on 2014 March 29” , 日本天文学会
2018 年春季年会, 2018 年, 千葉県

〔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〕

・「一目でわかる! 『研究力が高い大学』」(株
式会社アネスタ発行、2016 年)に申請者およ
び本研究課題が紹介された。読者アンケート
の集計結果では、掲載された課題の中で本研
究課題が最も関心を集め、また好評であった。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅井 步 (ASAI, Ayumi)

京都大学・大学院理学研究科附・准教授

研究者番号: 50390620

【参考文献】

- [1] Asai, A., Ishii, T.T., Isobe, H., et al. ApJL, 745, L6 (2012)
- [2] Kienreich, I. W., Temmer, M., Veronig, A. M., ApJ, 703, L118-L122 (2009)
- [3] Chen, P. F., Fang, C., Shibata, K., ApJ, 622, 1202-1210 (2005)
- [4] Asai, A., Hara, H., Watanabe, T., et al., ApJ, 685, 622-628 (2008)
- [5] Cabezas, D. P., Martínez, L. M., Buleje, Y. J., et al., ApJ, 836, id.33, (2017)
- [6] Takasao, S., Asai, A., Isobe, H., Shibata, K., ApJ, 828, id.103 (2016)
- [7] Kawate, T., Ishii, T. T., Nakatani, Y., et al., ApJ, 833, id.50 (2016)