

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05397

研究課題名(和文) 太陽フレアにおける粒子加速領域の特定

研究課題名(英文) The search for the acceleration site in a solar flare

研究代表者

下条 圭美 (SHIMOJO, Masumi)

国立天文台・アルマプロジェクト・准教授

研究者番号：00332164

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)：ミリ波をつかった太陽電波観測では、太陽大気の色層と呼ばれる大気層の物理状態を知ることができるだけでなく、太陽フレアにおける高エネルギー電子の様子も明らかにできる。しかし、秒角レベルの空間分解能を持ったミリ波観測は、その実現の困難によりこれまで行われていなかった。本研究では、天文観測用としては世界最大のミリ波・サブミリ波電波干渉計であるアタカマ大型ミリ波・サブミリ波干渉計(ALMA)を用いた太陽観測手法の開発を行った。さらにこの観測手法を用いて、高空間分解能ミリ波観測による小規模フレアにおける温度・密度診断、さらに色層におけるジェット現象であるスピキュールの物理量診断を世界で初めて成功させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミリ波による高空間分解能での太陽電波観測を実現しただけでなく、ミリ波データによる太陽研究手法を開拓したことが、本研究の学術的意義である。ミリ波による太陽研究を今後活発化することにより、太陽の活動現象の理解が深化するだけでなく、現代に生きる我々が多用している地球近辺の宇宙環境の理解も一層深まると思われる。

研究成果の概要(英文)：Solar radio observations with millimeter-wave can reveal not only the physical conditions of the chromosphere but also the behavior of high-energy electrons accelerated in a solar flare. However, solar millimeter-wave observations with a few arc-seconds spatial resolutions had not been done by the difficulties of realizing such observations. We developed the observing scheme of the Sun with Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) that is the largest interferometer for observing celestial objects. We succeeded in observing a small solar flare and a spicule, which is a small jet in the chromosphere, with about 2 arc-second resolution using our scheme and deriving the physical parameters of these phenomena from the millimeter data for the first in the world.

研究分野：太陽物理学

キーワード：電波観測 ミリ波 ALMA 太陽フレア 色層 スピキュール

1. 研究開始当初の背景

太陽物理学における重大未解決問題に、コロナ・彩層加熱と太陽フレアにおける粒子加速を含めることに異論を挟む研究者はいないだろう。これらの問題は観測・数値シミュレーションを含む理論の両面から長年研究がなされてきた。コロナ・彩層加熱問題では、2006年に打ち上げられた日本の太陽観測衛星「ひので」により、可視光によるサブ秒角の高空間分解能観測が実現され、プロミネンス中のMHD波動の検出など、彩層が予想よりダイナミックであることが示された。その結果、コロナ・彩層加熱問題を解くためには、彩層の物理状態、特にコロナに向かうエネルギーの流れを定量的に扱うことが鍵であるとの認識に至った。しかし、これまで行われていた可視・赤外・紫外線における吸収線・輝線による彩層の物理量導出は、これらの放射・吸収が局所的熱力学的平衡を満たさないプラズマで起きるため、大気モデルを介した推定に頼るしかなく、モデル依存性が問題視されていた。一方、太陽フレアにおける粒子加速では、数多くの粒子加速理論と共に数keV以上の硬X線や電波による観測的研究が盛んであった。ただし、これらの観測の空間分解能が他波長の観測データに比べて桁で悪く、高エネルギー粒子の空間分布と他の波長で調べることができる熱的な構造と比較することが難しかった。そのため、粒子加速のメカニズムの特定どころか、粒子加速が起きている領域を確定することさえできない状態であった。

これらの問題を解決する一つの方法は、秒角レベルの空間分解能を持ったミリ波による太陽観測である。彩層のプラズマはミリ波に対しては局所的熱力学的平衡が成り立っており、モデルを介さずに温度を導出することができる。一方、粒子加速問題に対しては、これまで主に使われてきたメートル波やセンチ波と比べてミリ波は高周波であるため高空間分解能が達成しやすく、またMeVを超える高エネルギー電子の振る舞いを示すことになる。このようにミリ波による太陽観測には大きな利点があったのだが、水蒸気による吸収が少ない高高度での観測（観測サイトの制限）、高周波化による装置開発の難易度およびコストの上昇などのため、太陽電波コミュニティー単体では太陽観測用の大規模ミリ波干渉計の開発・運用は不可能であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、太陽フレアにおける粒子加速メカニズムを明らかにすることである。宇宙プラズマにおける磁気リコネクション、それに伴う粒子加速メカニズムの探究は、太陽に留まらず、惑星磁気圏や高エネルギー天体など様々な領域において重要な未解決問題である。提案されている多くの粒子加速メカニズムから太陽フレアで実際に起きているメカニズムを確定するため、磁気リコネクションによって作られる熱的構造の中での高エネルギー電子の存在分布を明らかにし、その分布がどのような時間発展をするのか調べる。

3. 研究の方法

(1) アタカマ大型ミリ波・サブミリ波干渉計(ALMA)による太陽観測手法の確立

アタカマ大型ミリ波・サブミリ波干渉計(ALMA)は、世界最大の天体観測用ミリ波・サブミリ波干渉計である。ALMAは、分子雲や星形成領域、遠方銀河を主な観測ターゲットとしているが、設計当初から太陽観測を考慮に入れて作成された望遠鏡である。我々は2011年からALMAによる太陽観測手法の開発を行ってきた。2017年度はそのまとめの年であり、これまでの成果を基にALMAによる太陽観測を確立し、ミリ波による高空間分解能太陽観測を実現する。

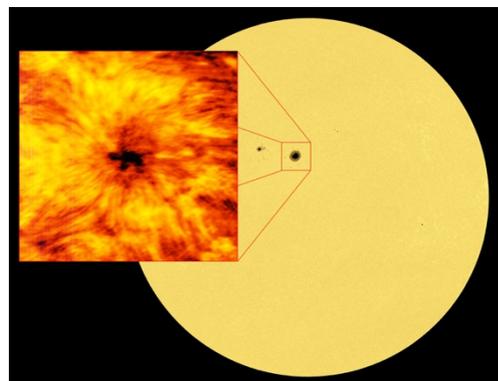
(2) ALMA データを使った太陽活動現象における物理量の導出と放射メカニズムの切り分け

前述したALMAによるミリ波太陽観測データを使い、まずはミリ波による物理量(温度・密度)導出方法を確立する。これにより、熱的プラズマによる放射と高エネルギー電子による放射との切り分けを行い、太陽フレア中に存在する高エネルギー電子の空間分布・並びに時間発展を明らかにする。得られた分布とX線・極端紫外線の観測データを比較し、太陽フレアの中で、どのような特徴がある領域に高エネルギー電子が存在するかを示し、粒子加速メカニズムに対する制限を示す。

4. 研究成果

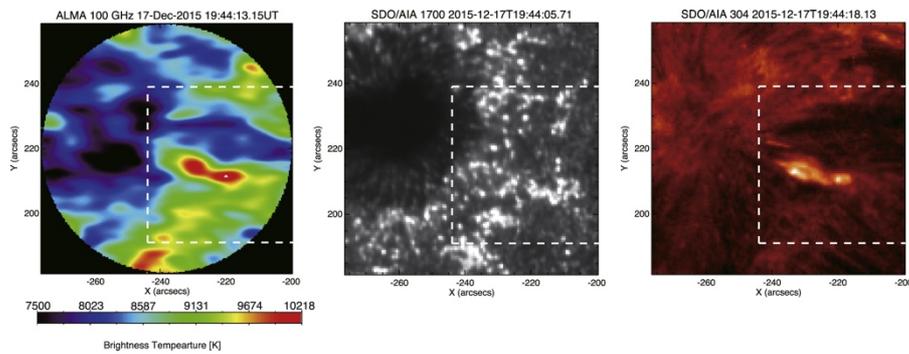
(1) Shimojo, et al. (2017) Solar Physics, 292, 87. “Observing the Sun with the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA): High-Resolution Interferometric Imaging”

太陽は、アタカマ大型ミリ波・サブミリ波干渉計(ALMA)が通常観測する天体と比べ、数桁以上入力電波強度が強い。そのため、他の天体と同じように観測すると受信機出力が飽和を起こし、科学的に意味のあるデータを取得することはできない。この飽和を防ぐため、超電導ミキサへの印可電圧を通常観測に使われる感度を最大にする値からずらし、受信機のダイナミックレンジを上げることに成功した。一方、受信機システムを太陽からの電波に最適化すると、較正のために必要なクエーサー観測に支障をきたす。これらの問題を様々な工夫で解決し、ALMAによる太陽観測手法を確立した。上図は、SDO衛星にて可視光で観測された太陽全面と、ALMAで観測した太陽黒点ミリ波画像である。この成果は、国立天文台にてWebリリース¹⁾がなされ、ALMA合同天文台では記者会見²⁾が行われた。



(2) Shimojo, et al. (2017) The Astrophysical Journal, 841, L5. “The First ALMA Observation of a Solar Plasmoid Ejection from an X-Ray Bright Point”

2017年1月にALMA合同天文台から、太陽観測共同利用開始に先駆けてデモデータ(SVデータ)が公開された。このデータの中に非常に小さなフレア(マイクロフレア)を観測したデータ

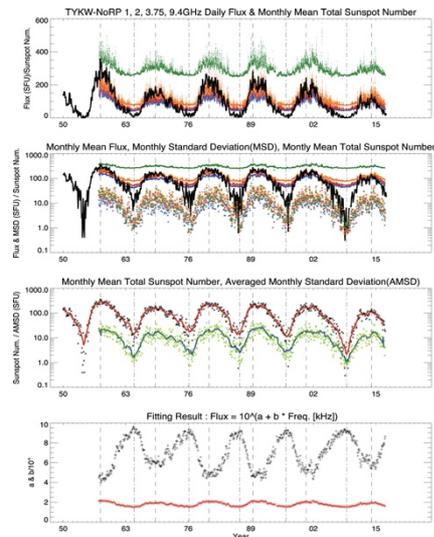


がある事を見出した。左図は、左からALMAにて観測した黒点付近のミリ波画像、紫外線連続光画像(彩層下部を示す)、

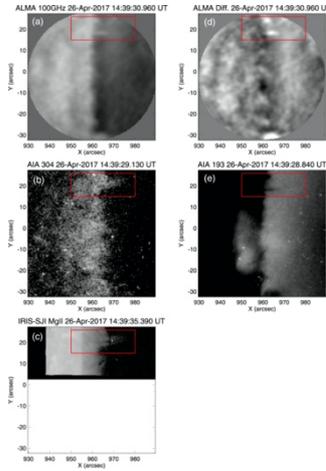
ヘリウムによる輝線(He II 304 Å : 遷移層を示す)画像であり、破線の四角はマイクロフレアが発生した領域を示している。これらのデータを使い、マイクロフレアから噴出するプラズモイドの温度・密度を推定した。ミリ波・極端紫外線の鉄輝線を利用し、空間分解した構造に対するプラズマ診断は、世界初の試みである。一方、残念ながらこの小さなフレアからは、高エネルギー電子からの放射の痕跡は見つからなかった。

(3) Shimojo, et al. (2017) The Astrophysical Journal, 848, 62. “Variation of the Solar Microwave Spectrum in the Last Half Century”

ALMAによるミリ波彩層観測が現実味を帯びている状況で、その較正において太陽静穏領域の安定性が問題となった。名古屋大学空電研究所および国立天文台野辺山にて、60年を超える長期間にわたりGHz帯で太陽強度を観測している。このデータ(右図)を使って、半世紀を超える太陽強度およびGHz帯のスペクトルの長期変動を調査した。その結果、60年間に5回あった太陽活動極小期の電波強度およびスペクトルが、測定誤差の範囲で全く同じであったことが示された。この成果は、国立天文台にてWebリリース³⁾がなされた。



- (4) Shimojo, et al. (2020) The Astrophysical Journal, 888, L28. “Estimating the Temperature and Density of a Spicule from 100 GHz Data Obtained with ALMA”



我々は太陽フレア観測のために ALMA-Cycle4 (Oct. 2016 - Sep. 2017) に観測提案を提出し、6 時間の観測時間を得た。しかし、望遠鏡運用の問題のため実際に観測されたのは2時間のみとなり、観測時間中に太陽フレアは発生しなかった。一方、太陽の淵を観測したため、ミリ波によるスピキュール（彩層におけるジェット現象）の観測に成功した。カルシウムの紫外輝線・鉄の極端紫外線の輝線とミリ波のデータを使って、スピキュールの温度・密度の推定に成功した。

<引用文献>

- 1) https://alma-telescope.jp/news/mt-post_679
- 2) <https://www.almaobservatory.org/en/announcement/alma-starts-observing-the-sun/>
- 3) <https://www.nro.nao.ac.jp/news/2017/1117-shimojo.html#norp>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Brajša R., Sudar D., Benz A. O., Skokic I., Barta M., De Pontieu B., Kim S., Kobelski A., Kuhar M., Shimojo M., Wedemeyer S., White S., Yagoubov P., Yan Y.	4. 巻 613
2. 論文標題 First analysis of solar structures in 1.21 mm full-disc ALMA image of the Sun	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A17 ~ A17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201730656	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yokoyama Takaaki, Shimojo Masumi, Okamoto Takenori J., Iijima Haruhisa	4. 巻 863
2. 論文標題 ALMA Observations of the Solar Chromosphere on the Polar Limb	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 96 ~ 96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aad27e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Bastian, T. S., Barta, M., Braja, R., Chen, B., Pontieu, B. D., Gary, D. E., Fleishman, G. D., Hales, A. S., Iwai, K., Hudson, H., Kim, S., Kobelski, A., Loukitcheva, M., Shimojo, M., Skokia, I., Wedemeyer, S., White, S. M., Yan, Y.	4. 巻 171
2. 論文標題 Exploring the Sun with ALMA	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Messenger	6. 最初と最後の頁 25-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Shimojo Masumi, Hudson Hugh S., White Stephen M., Bastian Timothy S., Iwai Kazumasa	4. 巻 841
2. 論文標題 The First ALMA Observation of a Solar Plasmoid Ejection from an X-Ray Bright Point	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal Letter	6. 最初と最後の頁 L5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aa70e3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Iwai Kazumasa, Loukitcheva Maria, Shimojo Masumi, Solanki Sami K., White Stephen M.	4. 巻 841
2. 論文標題 ALMA Discovery of Solar Umbral Brightness Enhancement at $\lambda = 3$ mm	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal Letter	6. 最初と最後の頁 L20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aa71b5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shimojo M., Bastian T. S., Hales A. S., White S. M., Iwai K., Hills R. E., Hirota A., Phillips N. M., Sawada T., Yagoubov P., Siringo G., Asayama S., Sugimoto M., Brajsa R., Skokic I., Barta M., Kim S., de Gregorio-Monsalvo I., Corder S. A., et al.	4. 巻 292
2. 論文標題 Observing the Sun with the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA): High-Resolution Interferometric Imaging	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Solar Physics	6. 最初と最後の頁 87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11207-017-1095-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 White S. M., Iwai K., Phillips N. M., Hills R. E., Hirota A., Yagoubov P., Siringo G., Shimojo M., Bastian T. S., Hales A. S., Sawada T., Asayama S., Sugimoto M., Marson R. G., Kawasaki W., Muller E., Nakazato T., Sugimoto K., et al.	4. 巻 292
2. 論文標題 Observing the Sun with the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA): Fast-Scan Single-Dish Mapping	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Solar Physics	6. 最初と最後の頁 88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11207-017-1123-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Bastian T. S., Chintzoglou G., De Pontieu B., Shimojo M., Schmit D., Leenaarts J., Loukitcheva M.	4. 巻 845
2. 論文標題 A First Comparison of Millimeter Continuum and Mg ii Ultraviolet Line Emission from the Solar Chromosphere	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal Letter	6. 最初と最後の頁 L19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aa844c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shimojo Masumi, Iwai Kazumasa, Asai Ayumi, Nozawa Satoshi, Minamidani Tetsuhiro, Saito Masao	4. 巻 848
2. 論文標題 Variation of the Solar Microwave Spectrum in the Last Half Century	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa8c75	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Loukitcheva Maria A., Iwai Kazumasa, Solanki Sami K., White Stephen M., Shimojo Masumi	4. 巻 850
2. 論文標題 Solar ALMA Observations: Constraining the Chromosphere above Sunspots	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa91cc	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shimojo Masumi, Hudson Hugh S., White Stephen M., Bastian Timothy S., Iwai Kazumasa	4. 巻 841
2. 論文標題 The First ALMA Observation of a Solar Plasmoid Ejection from an X-Ray Bright Point	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L5 ~ L5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aa70e3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Shimojo, M.
2. 発表標題 Solar Science with ALMA
3. 学会等名 XXXth General Assembly of the International Astronomical Union (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shimojo, M. and ALMA Solar development team
2. 発表標題 Initial Results from ALMA solar observations
3. 学会等名 Hinode-12: The Many Suns (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下条圭美
2. 発表標題 太陽大気におけるミリ波帯水素再結合線の探索
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shimojo Masumi and ALMA Solar development team
2. 発表標題 New Window of Solar Physics: Solar Observations with ALMA
3. 学会等名 JOINT HINODE-11/IRIS-8 SCIENCE MEETING (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shimojo Masumi, Hudson Hugh S., White Stephen M., Bastian Timothy S., Iwai Kazumasa
2. 発表標題 The first ALMA observation of a plasmoid ejection from an X-ray bright point
3. 学会等名 32nd URSI General Assembly & Science Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shimojo Masumi, Hudson Hugh S., White Stephen M., Bastian Timothy S., Iwai Kazumasa
2. 発表標題 The first ALMA observation of a plasmoid ejection from an X-ray bright point
3. 学会等名 4th Asia-Pacific Solar Physics Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shimojo Masumi, Hudson Hugh S., White Stephen M., Bastian Timothy S., Iwai Kazumasa
2. 発表標題 The first ALMA observation of a plasmoid ejection from an X-ray bright point
3. 学会等名 American Geophysical Union, Fall Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 下奈圭美, Hudson Hugh S., White Stephen M., Bastian Timothy S., 岩井一正
2. 発表標題 ALMAによるプラズモイド放出現象の観測
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ALMA-SoI-CDAW19 https://hinode.nao.ac.jp/user/shimojo/ALMA_WS_Solar_HP/Tokyo_2019.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	岩井 一正 (Iwai Kazumasa)		
研究協力者	バスティアン (Bastian Tim)		
研究協力者	ホワイト (White Stephen)		
研究協力者	アレス (Hales Antonio)		
研究協力者	横山 央明 (Yokoyama Takaaki)		
研究協力者	岡本 丈典 (Okamoto Takenori)		
研究協力者	川手 智子 (Kawate Tomoko)		
研究協力者	柴田 一成 (Shibata Kazunari)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力 者	フライシュマン (Fleishman Gregory)		