

令和元年6月4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：16K17663

研究課題名(和文)ALMA太陽観測で探るコロナ加熱：波動の生成を捉える

研究課題名(英文)Research on coronal heating using ALMA solar observations

研究代表者

岡本 丈典 (Okamoto, Takenori)

国立天文台・アルマプロジェクト・特任助教

研究者番号：70509679

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：太陽観測衛星「ひので」、「IRIS」、「SDO」及びアルマ望遠鏡など、現在利用可能な観測装置を駆使し、コロナ加熱問題に関わる太陽電磁流体现象の観測的研究を行った。成果として、(1)太陽縁のプロミネンスにおける特異な活動を調べ、磁場のつなぎ換えに起因する回転運動であることを見出した、(2)観測史上最強の黒点磁場を発見し、その生成メカニズムを明らかにした、ことが挙げられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽のみならず天体物理学全体の謎であるコロナ加熱問題を解くにあたり、太陽で見られる活動現象や磁気的性質を1つずつ明らかにすることが求められている。本研究では、プロミネンスの回転と強磁場生成機構に関する研究成果を得た。これらはフレアのような突発的エネルギー解放を伴わない静かな現象であるが、エネルギー解放や蓄積が準定常的に起こっていることを示しており、今後の太陽研究を行う上で重要である。

研究成果の概要(英文)：We performed several researches of solar magnetohydrodynamic activities associated with the coronal heating problem using available instruments such as the solar observing satellites "Hinode", "IRIS", and "SDO" and the ALMA telescope. Our main results are as follows. (1) We investigated peculiar motions of solar prominences observed in the off-limb region and found that they are caused by rotation related to magnetic reconnection between the magnetic fields of prominences and ambient coronal fields. (2) We discovered the strongest magnetic field of sunspots ever observed on the Sun and suggested a new hypothesis to generate the strong field by photospheric motions.

研究分野：太陽物理学

キーワード：ひので プロミネンス 回転 黒点 磁場 IRIS

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

1. 研究開始当初の背景

太陽観測衛星「ひので」「IRIS」「SDO」が打ち上がって数年が経過し、コロナ加熱問題における太陽電磁流体现象の研究が盛んに行われている。特に、研究代表者自身の成果でもある、コロナ中を伝播する波動の役割が注目を浴び、波動の生成・伝播・散逸の過程をより詳細に明らかにすることが求められている。また、2016年からはアルマ望遠鏡が太陽観測を開始することとなり、既存の観測装置と合わせれば、コロナ加熱研究に新たな視点や手法をもたらすものと期待された。

2. 研究の目的

コロナ加熱問題解明の鍵を握る太陽大気中の波動について、その「生成過程」を観測的に明らかにすることを目的とする。波動の「伝播」と「散逸」はここ10年の衛星観測で捉えられているが、生成の観測例は全くない。生成を捉える上で重要となるのは、太陽表面の対流とそのわずかに上空の大気の運動を同時に高空間分解能で観測することである。後者を捉えることができる観測装置がこれまでは存在しなかったが、現在太陽の観測準備が進められているアルマ望遠鏡を用いれば、太陽観測衛星「ひので」との共同観測を以てこの難点を克服できる。波動の「生成」「伝播」「散逸」が揃って初めて、波動によるコロナ加熱の具体的検討が可能になり、太陽物理学や天体物理学における大きな進展が期待される。

3. 研究の方法

(1) 太陽プロミネンスの回転運動

使用した観測データは、太陽観測衛星「ひので」及び「IRIS」による可視光撮像画像と紫外線撮像・分光画像である。「ひので」による太陽縁外観測において、比較的穏やかなプロミネンス中に突如明るい筋状構造が出現し、それらが連なって規則的に上昇する様子が捉えられた。このような現象はこれまで報告されておらず、「ひので」の高い空間分解能によって初めて捉えられたものである。また、同様の現象が「ひので」「IRIS」同時観測の際にも捉えられており、撮像による2次元面運動に加え、分光観測による視線方向速度及び非熱的速度などの情報も加味してこの現象について詳細な解析を行った。

(2) 観測史上最強の黒点磁場

太陽観測衛星「ひので」による太陽表面の観測から、太陽観測史上最大となる6,250 Gaussの磁場強度を持つ黒点を発見した。これは一般的な黒点磁場の2倍の強さである。そして、黒点の磁場は通常最も暗い部分(暗部)が一番強いのだが、この黒点はそのルールに反し、暗くない部分に存在するという特異な性質を示している。このような、暗部以外の場所で暗部を上回る強い磁場を持つ黒点が過去にも複数報告されており、なぜそのような強い磁場が作られるのか長年疑問とされてきた。そこで、今回発見された6,250 Gaussの磁場強度を持つ黒点の5日間に渡る偏光分光観測データを解析し、いかなる物理によってこのような強磁場が作られているかについて詳細な解析を行った。また、これが普遍的なのか、あるいは特異なのかを明らかにするため、「ひので」が10年に渡り撮り貯めた全データを用いて、統計的視点からの解析も実施した。

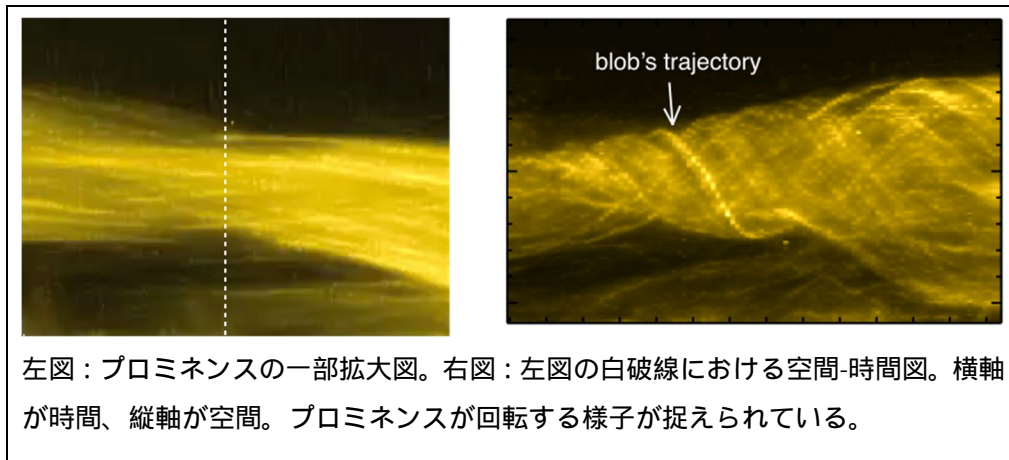
4. 研究成果

まず、本課題遂行にあたって発生した問題点について述べる。当初の研究目的では、「ひので」の撮像観測データとアルマ望遠鏡の撮像データを組み合わせ、波動の生成過程を調べるはずであった。しかし、当課題が開始されたばかりの2016年4月、アルマの観測が始まる前に「ひので」の撮像装置が使用不能に陥り、そのまま科学運用を断念した。「ひので」の撮像装置は世界最高の空間分解能を持つものであり、この損失は大きな痛手となった。また、アルマ観測自体も、観測提案が2016年度、2017年度の2度採択されたものの、観測所側のトラブルや悪天候、割り当てられた観測時間に適切な観測対象が存在しないこともあり、幾度にも及び再観測が実施されたものの、有意義なデータを取得することができなかった。しかし、本課題の大きな目的はコロナ加熱問題解明につながる知見を得ることであり、代替手段を用いて研究を遂行することとした。これは本課題の申請時にもバックアップ計画として記載している。代替案として、1つは過去の「ひので」「IRIS」観測から太陽彩層・コロナ中での磁場の振る舞いを調べること、もう1つは本来「ひので」で得るはずであった撮像観測を、「ひので」の分光データ、または「IRIS」の撮像データを用いて代用することである。それぞれが上記及び下記の(1)(2)に対応しており、本課題の目的に沿うよう、または今後使用するにあたっての可能性を検証できるよう、解析・研究を実施した。

(1)

「ひので」による撮像観測から、突如現れた明るい筋状構造が最大45 km/s程度で上昇する様子が捉えられた。また、「IRIS」による分光観測からも、構造の下部で手前向きに40 km/s程度、上部で向こう向きに同じく40 km/s程度で運動していることがわかり、総合的に考えてこれらの構造は回転していると結論付けることができた。また、その際にねじれが水平方向に90-270 km/sで伝播していることを見出し、これは螺旋状にねじれた磁場の束がその周囲の磁場

とのつなぎ換えによってねじれが解消することで引き起こされていると解釈した。ねじれの伝播はエネルギー輸送や加熱の点でも重要な示唆を含んでいる。この解析結果については査読論文が受理されたほか、回転運動が明白な好例としてプロミネンスに関する欧文の教科書にも掲載されるなど評価は高い。



左図：プロミネンスの一部拡大図。右図：左図の白破線における空間-時間図。横軸が時間、縦軸が空間。プロミネンスが回転する様子が捉えられている。

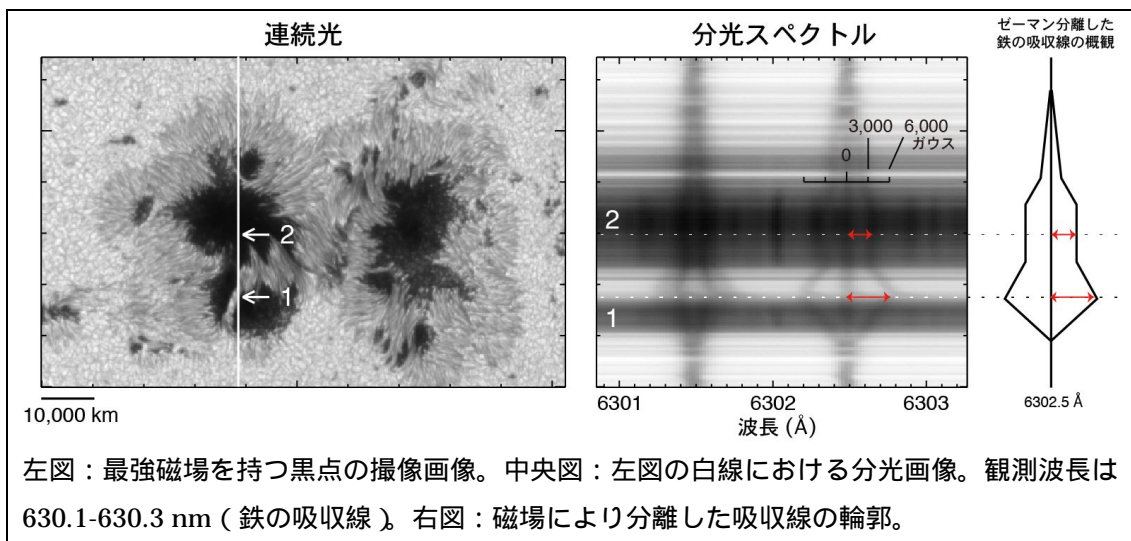
(2)

5日間に渡る「ひので」の観測データがこの強磁場形成に関する重要な情報をもたらした。まず、強磁場領域は逆極性を持つ2つの暗部に挟まれた明るい構造上に存在していた。そして、その中でも特に磁場が強い部分は明るい構造と暗部の境界付近に位置し続けており、同時にその場所で強い下降流が見られた。また、その構造全域に渡って磁場の向きに沿った水平流が存在し、その流れの先は常に強磁場領域に向いていた。これらのことから、強磁場領域を含む明るい構造は、一方(S極)の暗部に属する半暗部と見なすことができる。これは、地球のプレート境界で地震を引き起こす歪が溜まるのと同様に、この水平流が他方(N極)の暗部境界を強く圧縮し、暗部の最大値でも4,000ガウス程度しかない黒点の磁場を6,000ガウス以上に強めていたと考えられる。この成果は既に査読誌に出版済みである。

また、この現象の普遍性を検証するため「ひので」の全データを用いて統計的解析を行った。その結果、各黒点で最も大きな磁場強度を示す場所として、75%は従来どおりの暗部内であったが、それ以外の25%の黒点においては上述した同様の特徴全てを84%以上の割合で持っていた。観測的に不明確なものも含めるとその割合は9割以上に達する。この驚くべき高さの割合から、我々の解釈は統計的に正しく、そして普遍的な現象であると結論付けた。この成果については現在、査読誌への投稿を準備中である。

強磁場の起源やその振る舞いは、フレアや黒点形成、ガスの噴出、コロナ加熱などにも大きく関わっており、本研究の成果が今後の観測や数値シミュレーションを通じて、太陽活動現象の理解をさらに深めるものと期待される。

本研究成果は世界的反響が大きく、招待講演依頼のほか、海外の複数の研究者が観測・理論両面で我々の解釈の是非を検証している。概ね肯定的であるが、本課題終了後も研究が続けられている。また、2019年版理科年表に、昨年の代表的な天文学研究成果として掲載されている。



左図：最強磁場を持つ黒点の撮像画像。中央図：左図の白線における分光画像。観測波長は630.1-630.3 nm (鉄の吸収線)。右図：磁場により分離した吸収線の輪郭。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- (1) “Blue-wing enhancement of the chromospheric Mg II h and k lines in a solar flare”
鄭祥子, 坂上峻仁, 岡本文典, 川手朋子, Petr Heinzel, 上野悟, 浅井歩, 一本潔, 柴田一成
Publications of the Astronomical Society of Japan, vol. 70, 6 (15pp), 2018
(査読付き)
DOI : 10.1093/pasj/psy047
- (2) “ALMA Observations of the Solar Chromosphere on the Polar Limb”
横山央明, 下条圭美, 岡本文典, 飯島陽久
The Astrophysical Journal, vol. 863, 96 (5pp), 2018 (査読付き)
DOI : 10.3847/1538-4357/aad27e
- (3) “Super-strong Magnetic Field in Sunspots”
岡本文典, 桜井隆
The Astrophysical Journal Letters, vol. 852, L16 (6pp), 2018 (査読付き)
DOI : 10.3847/2041-8213/aaa3d8
- (4) “Helical Motions of Fine-structure Prominence Threads Observed by Hinode and IRIS”
岡本文典, Wei Liu, 常田佐久
The Astrophysical Journal, vol. 831, 126 (11pp), 2016 (査読付き)
DOI : 10.3847/0004-637X/831/2/126

〔学会発表〕(計 14 件)

- (1) 岡本文典, 桜井隆
“Where is the strongest field located in sunspots ? - A statistical analysis using Hinode/Spectro-Polarimeter - ”
American Geophysical Union Meeting, 2018年12月13日, ワシントン DC (米国)
- (2) 岡本文典, CLASP2 team
“The CLASP2 experiment and the observing plans with IRIS and Hinode”
12th Hinode Science Meeting, 2018年9月13日, グラナダ (スペイン)(招待講演)
- (3) 岡本文典, Wei Liu
“High resolution observations of prominence rotation by Hinode and IRIS”
COSPAR 2018 42nd Assembly, 2018年7月20日, パサデナ (米国)
- (4) 岡本文典, 桜井隆
“「ひので」観測 10年: 黒点磁場強度ランキング”
日本天文学会春季年会, 2018年3月16日, 千葉大学 (千葉県千葉市)
- (5) 岡本文典, 桜井隆
“The Strongest Magnetic Field in Sunspots”
American Geophysical Union Meeting, 2017年12月15日, ニューオーリンズ (米国)
- (6) 岡本文典
“Solar MHD phenomena observed by Hinode”
The 1st Asia-pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP 2017),
2017年9月20日, 成都 (中国)(招待講演)
- (7) 岡本文典, 桜井隆
“The Strongest Magnetic Field in Sunspots”
IRIS-8/Hinode-11 Science Meeting, 2017年6月2日, シアトル (米国)
- (8) 岡本文典, 桜井隆
“「ひので」観測 10年: 最強の黒点磁場”
日本天文学会春季年会, 2017年3月17日, 九州大学 (福岡県福岡市)
- (9) 岡本文典, Wei Liu, 常田佐久
“High resolution observations of prominence rotation by Hinode and IRIS”
American Geophysical Union Meeting, 2016年12月15日, サンフランシスコ (米国)
- (10) 岡本文典, Wei Liu, 常田佐久
“3D motion of active-region prominences: Rotation”
International Astronomical Union Symposium 327, 2016年10月10日, カルタヘナ (コロンビア)
- (11) 岡本文典, Wei Liu, 常田佐久
“Rotations of helical prominence threads observed by Hinode and IRIS”
Hinode-10 Science Meeting, 2016年9月5日, 名古屋大学 (愛知県名古屋市)
- (12) 岡本文典
“Waves in prominences and approach to the coronal heating”
AOGS 2016, 2016年8月2日, 北京 (中国)(招待講演)

- (13) 岡本文典, Wei Liu, 常田佐久
“ Helical Motions of Fine-structure Prominence Threads Observed by Hinode and IRIS ”
IRIS-6 Workshop, 2016 年 6 月 20 日, ストックホルム (スウェーデン)
- (14) 岡本文典
“ Introduction to the operation of HINODE ”
IRIS-7 Workshop, 2016 年 4 月 13 日, 威海 (中国) (招待講演)

〔その他〕

ホームページ等

観測史上最強の黒点磁場

<https://www.nao.ac.jp/news/science/2018/20180206-hinode.html>

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。