

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800120

研究課題名(和文) 太陽彩層を紐解く：スペース観測で迫る彩層プラズマ運動と磁場構造

研究課題名(英文) Solar chromosphere: plasma dynamics and magnetic field configuration revealed by spaceborne instruments

研究代表者

岡本 丈典 (Okamoto, Joten)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・研究員

研究者番号：70509679

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)：日米の太陽観測衛星ひので・IRISによる共同観測と数値シミュレーションを組み合わせた研究から、太陽コロナ加熱問題を解決する糸口となる、波動エネルギーが熱エネルギーへ変換される過程を捉えることに初めて成功した。両衛星によるプロミネンスの共同観測からこれまでに知られていない特異な運動を検出し、その成因を調べた結果、コロナ加熱を引き起こすとされる波動の熱化に伴う現象であることがわかった。この現象には共鳴吸収という物理過程が関わっており、これが観測されたのは初めてである。観測的研究が極めて難しいとされるこの過程を実証的に調べた意義は大きく、今後波動によるコロナ加熱問題解明へ弾みが付くと期待される。

研究成果の概要(英文)：We have joined efforts to directly detect for the first time a long hypothesised heating mechanism in action in the solar corona, the outer layer of the solar atmosphere. By combining high resolution observations from JAXA's Hinode mission and NASA's IRIS mission, together with state-of-the-art numerical simulations and modelling to guide interpretation, we have managed to detect and identify the observational signatures of resonant absorption, a wave-related mechanism of energy conversion, thought to play an important role in the so-called "coronal heating problem", one of the most important unsolved astrophysical problems for mankind.

研究分野：太陽物理学

キーワード：太陽観測衛星ひので 太陽観測衛星IRIS プロミネンス コロナ加熱 波動 振動 共鳴吸収 彩層

1. 研究開始当初の背景

2006年打ち上げの太陽観測衛星「ひので」により、それまでの観測機器では分解できなかった電磁流体现象やその構造が次々と明らかになった。スペースからの観測は地球大気の影響を受けないため、太陽大気中の微細な構造やそのダイナミクスの詳細を捉えることが可能である。この特性により、プロミネンスやスピキュールといった彩層構造(低温物質)を介して、その磁場の構造や性質を導き出せることが示された。彩層・コロナ中の磁場観測は偏光シグナルが非常に弱いため直接計測が難しく、ほとんどなされておらず、この手法は極めて有効である。

しかしながら、彩層/コロナ磁場の研究はまだ端緒に触れたに過ぎない。彩層プラズマの代表格であるプロミネンスの磁場構造は依然として謎であり、「ひので」の科学目標であるコロナ加熱問題も定性的理解にすら達していない。プラズマの運動により磁場構造は時々刻々変化しているため、それを正しく理解するにはプラズマの3次元的な動きを捉えることが必須だが、ひのでだけでは十分な情報が得られない。

そこで、米国の太陽観測衛星 IRIS (NASA Interface Region Imaging Spectrograph) の登場である。IRIS はひので開発の一翼を担ったロッキードマーティン太陽天体物理学研究所が開発を進め、2013年度中に打ち上げを控えていた。この衛星は彩層プラズマの紫外線分光観測を行う。これにより、ひのででは得られない視線方向速度や多温度構造の情報が得られる。そして、ひのでのデータと組み合わせることで多角的に彩層プラズマの物理量やその時間変化を調べることができる。

2. 研究の目的

ひのでと IRIS の共同観測による彩層プラズマの3次元運動から、プラズマの動きが彩層/コロナ磁場構造に与える影響を調べ、波動などの非熱的現象が彩層/コロナへの物質供給メカニズムで果たす役割について明らかにし、これらを基にコロナ加熱の定性的理解に迫る。

3. 研究の方法

ひので・IRIS の共同観測とデータ解析を実施し、彩層プラズマの3次元運動から彩層/コロナの磁場構造を明らかにする。求めた磁場構造を基に、波動の散逸、物質の流れを検出し、これらがどのようにコロナ加熱に貢献しているか調べる。観測対象として太陽面外(縁)のプロミネンスを提案、ひのでの観測プログラムを作成すると同時に、ロッキードマーティン太陽天体物理学研究所で行われる IRIS の科学運用に参加し、共同観測を成功

させる。そのため、IRIS 打ち上げ後の初年度は、初期データが自由に使用できる同研究所に3ヶ月滞在して運用に関わるほか、研究を円滑に遂行するための解析方法の習得(較正処理や温度ごとの分光データ解析の方法)及び同研究所の共同研究者との議論も合わせて行い、提案した観測のデータ解析を遂行する。

4. 研究成果

我々は2013年10月19日、「ひので」と「IRIS」両衛星による共同観測を実施した。コロナ中に浮かぶプロミネンスのデータを取得し、「ひので」で上下方向の動きを、「IRIS」による奥行き方向の動きを観測した。両衛星による観測結果を組み合わせることで太陽大気の運動を詳細に調べることができる。解析の結果、以下の2つの重要な事実を発見した。

まず、第一の発見はプロミネンスの加熱についてである。「ひので」が観測していた低温のプロミネンスが時間経過とともに消失する際、「IRIS」によって高温成分の出現が捉えられた。この観測からは、プロミネンスの温度が1万度から少なくとも10万度へ上がる様子が明らかになった。また、このプロミネンスの多くは波動を伴っており、この波動が加熱に寄与していることを示している。

第二の発見は奇妙な振動のパターンを検出したことである。「ひので」が観測したプロミネンスを構成する磁力線の上下振動と、その振動箇所での「IRIS」による奥行き方向の運動を比較すると、通常想定される振動パターンとは異なっていた。通常の振動パターンとは、上下振動の最上点と最下点で速度ゼロ、中心位置で速度最大となるものを指す。一方、今回観測されたものは最上点と最下点で最大速度、中心位置で速度ゼロとなっていた(図1参照)。

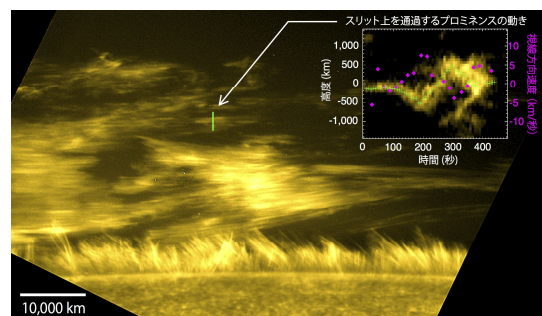


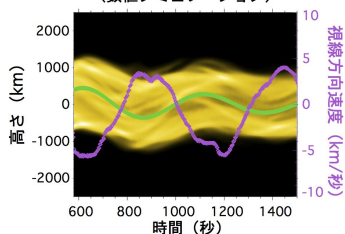
図1. ひのでが観測したプロミネンス。緑色の部分を横切るプロミネンスの時間変化を示したものが右上の図で、一度下がった後、元の位置を越えて上昇し、再度下がる様子が捉えられている。その時々奥行き方向速度をピンク色で重ねている。速度は、奥に動くとき正の値、手前に動くとき負の値を取る。この図より、プロミネンスが最上点・最下点に達した時に奥行き速度は最大となり、中心位置にあるときは速度ゼロであることがわかる。

我々は、この特異な動きの原因を明らかに

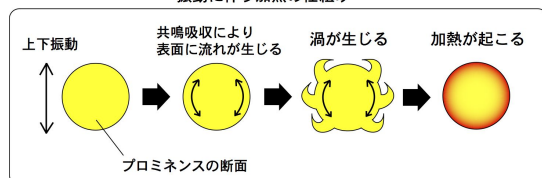
するため、国立天文台のスーパーコンピュータ「アテルイ」を用いて数値シミュレーションを行った。シミュレーションを開始しプロミネンスが振動すると、プロミネンスが最も振れた位置で、プロミネンス表面の動きが最大速度を持つことが明らかとなった。これは観測された特徴に良く合致する。この特異な動きを生み出すメカニズムは共鳴吸収と呼ばれ、これによりプロミネンスの振動エネルギーがプロミネンス表面の運動に変換される。

また、プロミネンスの上下振動と表面の運動は乱流（無数の小さな渦）を生じさせることがわかった。乱流は波のエネルギーを熱化させる上で非常に重要である。また、この乱流の存在が、磁束管表面に生じる運動領域を「IRIS」で観測されるサイズにまで拡大させていることも突き止めた。以上をまとめると、共鳴吸収とそれに関連する現象によって、プロミネンスの加熱や特異な振動パターンなどの観測された特徴を矛盾なく説明することができた（図2参照）。

図 2. (上図) 数値シミュレーションから再現したプロミネンスを通過するプロミネンスの動き (数値シミュレーション)



振動に伴う加熱の仕組み



ミネンスの動き。図 1 (右上) に対応する。緑色の線は各時刻でのプロミネンスの位置、ピンク色の線は奥行方向速度を表す。この速度パターンは観測結果と非常によく一致する。(下図) 数値シミュレーションからわかったプロミネンスの詳細な動き。プロミネンス振動に伴って起こる共鳴吸収と、それに付随する現象により、加熱が引き起こされることが数値シミュレーションにより明らかになった。

以上の通り、2 機の先進的な太陽観測衛星「ひので」「IRIS」による観測と数値シミュレーションの融合研究により、波動の熱化現場を太陽コロナ中で捉えることに世界で初めて成功した。この研究により、波動エネルギーから熱エネルギーへの変換過程を実証的に調べることが可能であると示した意義は大きく、今後、波動によるコロナ加熱問題解明への研究が進むと期待される。

本研究成果については、2015 年 8 月に宇宙航空研究開発機構にて記者会見、及び NASA

のウェブページにてプレスリリースを行い、国内外のメディア、一般向け科学雑誌等で広く紹介された。

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, K. Kusano, T. T. Yamamoto, T. J. Okamoto, “Study on the Triggering Process of Solar Flares Based on Hinode/SOT Observations”, *The Astrophysical Journal*, 2013 年, 778 巻, 48 (13pp), DOI: 10.1088/0004-637X/778/1/48

(2) B. De Pontieu, T. J. Okamoto (83 番目), 他 86 名, “Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS)”, *Solar Physics*, 2014 年, 289 巻, 2733-2779, DOI: 10.1007/s11207-014-0485-y

(3) Wei Liu, Bart De Pontieu, Jean-Claude Vial, Alan M. Title, Mats Carlsson, Han Uitenbroek, Takenori J. Okamoto, Thomas E. Berger, Patrick Antolin, “First High-resolution Spectroscopic Observations of an Erupting Prominence Within a Coronal Mass Ejection by the Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS)”, *The Astrophysical Journal*, 2015 年, 803 巻, 85 (12pp), DOI: 10.1088/0004-637X/803/2/85

(4) Takenori J. Okamoto, Patrick Antolin, Bart De Pontieu, Han Uitenbroek, Tom Van Doorselaere, Takaaki Yokoyama, “Resonant Absorption of Transverse Oscillations and Associated Heating in a Solar Prominence. I. Observational Aspects”, *The Astrophysical Journal*, 2015 年, 809 巻, 71 (12pp), DOI: 10.1088/0004-637X/809/1/71

(5) P. Antolin, T. J. Okamoto, B. De Pontieu, H. Uitenbroek, T. Van Doorselaere, T. Yokoyama, “Resonant Absorption of Transverse Oscillations and Associated Heating in a Solar Prominence. II. Numerical Aspects”, *The Astrophysical Journal*, 2015 年, 809 巻, 72 (18pp), DOI: 10.1088/0004-637X/809/1/72

[学会発表](計 17 件)
(主著のみ)

(1) Joten Okamoto, Bart De Pontieu, Ted

Tarbell, Alan Title, IRIS team, "Hinode-IRIS observations of prominences", 7th Hinode Science Meeting, 2013年11月12日, 日本・岐阜

(2) Joten Okamoto, Bart De Pontieu, Ted Tarbell, Alan Title, IRIS team, "3D structure and dynamics of prominences in IRIS-Hinode collaborative observations", AGU Fall Meeting 2013, 2013年12月10日, アメリカ・カリフォルニア州サンフランシスコ

(3) 岡本文典, "IRISの最新状況", 太陽研連シンポジウム, 2014年2月19日, 京都大学(京都府京都市) [招待講演]

(4) 岡本文典, Bart De Pontieu, Ted Tarbell, Alan Title, IRIS team, "ひので-IRISの共同観測：プロミネンス", 日本天文学会春季年会, 2014年3月20日, 国際基督教大学(東京都三鷹市)

(5) 岡本文典, "太陽大気における波動の観測", 日本地球惑星科学連合2014年大会, 2014年5月2日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市) [招待講演]

(6) 岡本文典, "彩層の物理", GEMSIS ワークショップ, 2014年9月10日, 名古屋大学(愛知県名古屋市) [招待講演]

(7) 岡本文典, Patrick Antolin, Bart De Pontieu, IRIS team, "ひので-IRISの共同観測：波動散逸の現場に迫る", 日本天文学会秋季年会, 2014年9月12日, 山形大学(山形県山形市)

(8) Joten Okamoto, "IRIS-Hinode Collaborative Observations of Oscillating Prominences and Discovery of Resonant Absorption", 2014 LWS/Hinode/IRIS Workshop, 2014年11月5日, アメリカ・オレゴン州ポートランド [招待講演]

(9) Joten Okamoto, "Waves and Oscillations in Prominences", Coupling and Dynamics of the Solar Atmosphere, 2014年11月13日, インド・プネ [招待講演]

(10) Joten Okamoto, Patrick Antolin, Bart De Pontieu, Han Uitenbroek, Tom Van Doorselaere, Takaaki Yokoyama, "Observational evidence of resonant absorption in oscillating prominence", AGU Fall Meeting 2014, 2014年12月15日, アメリカ・カリフォルニア州サンフランシスコ [招待講演]

(11) 岡本文典, "IRIS観測1年", 太陽研

連シンポジウム, 2015年2月17日, 名古屋大学(愛知県名古屋市) [招待講演]

(12) 岡本文典, IRIS team, "ひので-IRISの共同観測：プロミネンスの回転運動", 2015年3月20日, 大阪大学(大阪府豊中市)

(13) Joten Okamoto, "Atmospheric dynamics/heating from coordinated IRIS/Hinode/SDO observations", IRIS-4 Workshop, 2015年5月20日, アメリカ・コロラド州ボルダー [招待講演]

(14) J. Okamoto and collaborators, "Hinode-IRIS observations of a solar prominence: Coronal heating by Alfvén waves", Founding Symposium for ISEE, 2015年11月4日, 日本・名古屋

(15) 岡本文典, "ALMAを使った研究計画", 太陽研連シンポジウム, 2016年2月17日, 国立天文台(東京都三鷹市) [招待講演]

(16) Joten Okamoto, "Resonant Absorption in the Solar Atmosphere", Dynamic Sun-I. MHD Waves and Confined Transients in the Magnetized Atmosphere, 2016年2月23日, インド・ワラナシ [招待講演]

(17) Joten Okamoto, "IRIS-Hinode observations of prominences", ALMA-IRIS-DKIST Workshop, 2016年3月15日, アメリカ・コロラド州ボルダー

〔その他〕
ホームページ等

プレスリリース・国立天文台
日米太陽観測衛星「ひので」「IRIS」の共演：太陽コロナ加熱メカニズムの観測的証拠を初めて捉えた
<http://hinode.nao.ac.jp/news/1508Hinode-IRIS/>

プレスリリース・NASA
IRIS and Hinode: A Stellar Research Team
<https://www.nasa.gov/feature/goddard/iris-and-hinode-stellar-research-team>

6. 研究組織

(1) 研究代表者
岡本 文典 (Okamoto, Joten/Takenori)
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・研究機関
研究員
研究者番号：70509679