

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

名古屋大学太陽地球環境研究所（所長：町田 忍）の岡本 文典（おかもとじょうてん）研究員を中心とする研究チームは、日米の太陽観測衛星2機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ました。

6000度の太陽表面に対して、太陽大気コロナは100万度という高温であることは、今も太陽・天体研究における大きな謎の1つであります。これは「コロナ加熱問題」と呼ばれており、観測・理論両面から研究が進められていますが、いまだに解決には至っていません。

日本の太陽観測衛星「ひので」及び米国の太陽観測衛星「IRIS」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、数値シミュレーションを用いて調べたところ、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りました。

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す。

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ます。

<研究の背景>

太陽大気コロナは 100 万度の高温ガスから成っています。太陽表面は 6,000 度しかなく、どのようなメカニズムによってコロナの高温が維持されているのかわかっていません。この謎は「コロナ加熱問題」と呼ばれており、太陽のみならず、恒星や銀河間に存在する高温ガスの加熱過程にも当てはまる天体物理学共通の課題です。

この謎を解くべき鍵は磁場にあります。太陽の磁場マップと X 線強度マップ（100 万度のガスのマップ）を見比べると、磁場の強い箇所が特に X 線で明るく光っていることがわかります。

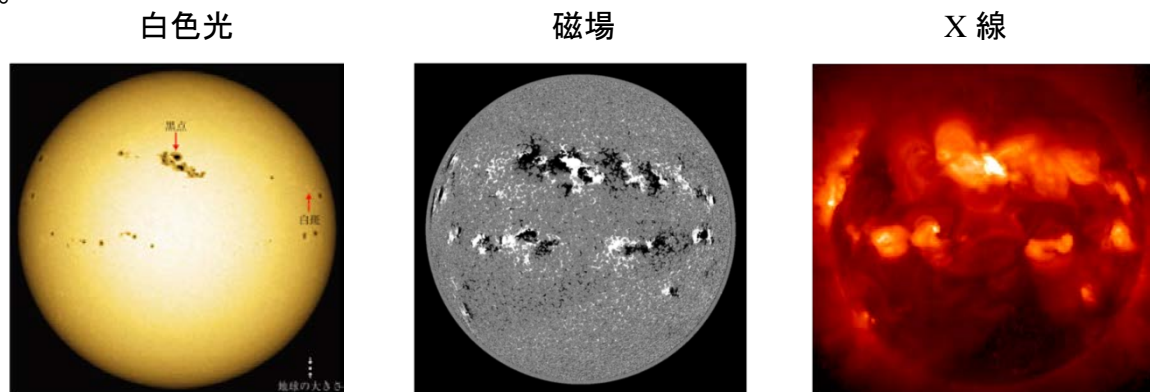
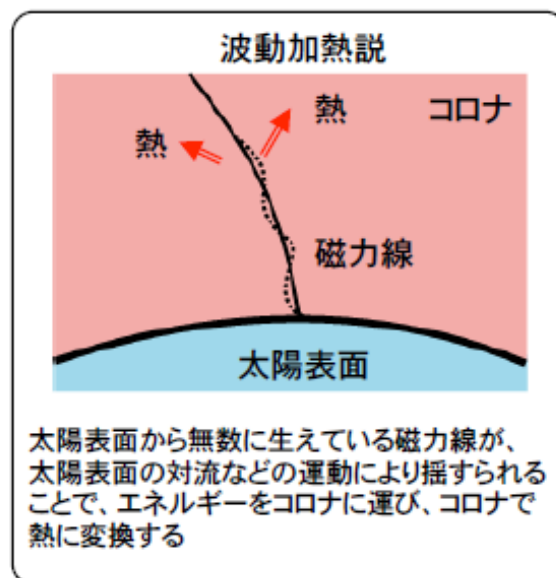
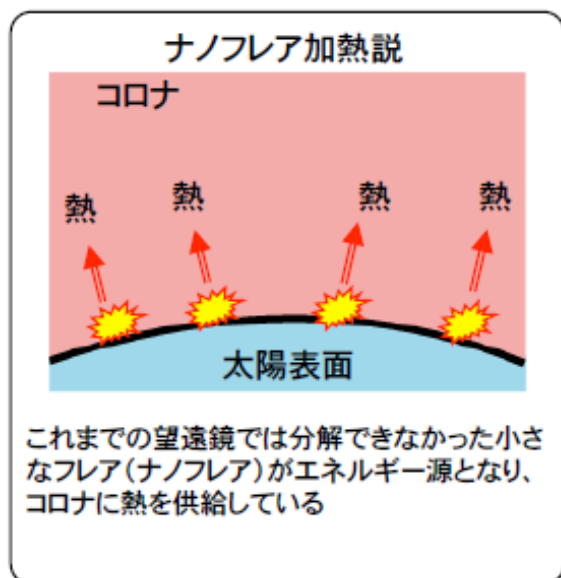


図 1. 3 種類の太陽全面像。磁場の図は、白が N 極、黒が S 極を表す。黒点のある場所は磁場が強く、さらに X 線強度も高い。

そして、磁場を介した加熱メカニズムが長年研究されてきており、特に 2 つの説が有力です。1 つは「ナノフレア加熱説」。フレアとは太陽面で起こる爆発現象で、磁場のエネルギーを熱エネルギーに変換します。大・中規模なフレアだけではコロナの維持に必要なエネルギーは足りないことがわかっていますが、現在の装置では検出できない微小なフレア（ナノフレア）を足し合わせれば達成できるというのがこの説の考え方です。もう 1 つは「波動加熱説」と呼ばれ、太陽表面から伸びる磁力線に沿って伝播する波により、エネルギーを波動の形で上空に運び、コロナ中にて熱エネルギーに変換することでコロナを加熱するものです。これらの説は 40 年以上に渡って観測・理論両面から検討されていますが、ナノフレアは見え、一方波動も観測されない状況が続くなど、手がかりが乏しい時代が続きました。



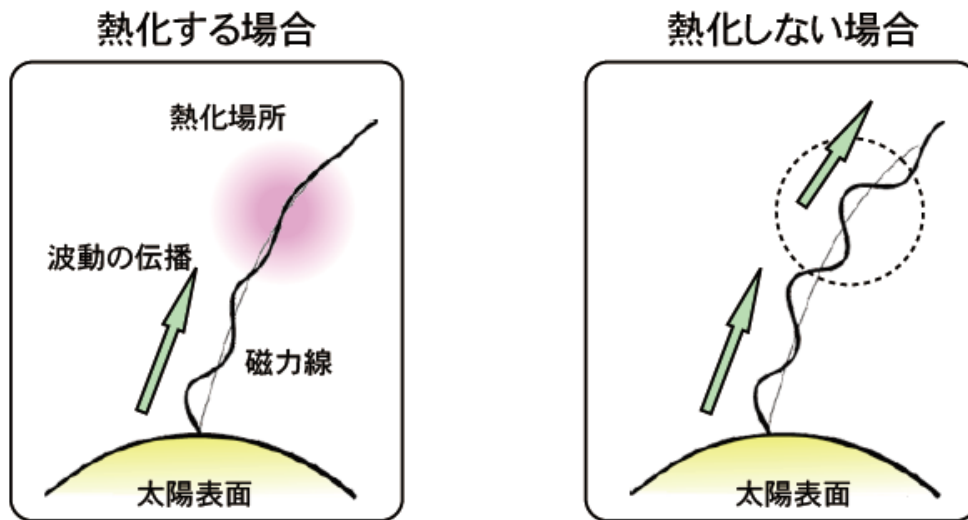
この膠着状態に変革をもたらしたのが、2006年に打ち上げられた太陽観測衛星「ひので」です。「ひので」の高空間分解能を活かした観測から、磁力線が振動している様子が捉えられました。これは「アルヴェン波」と呼ばれる、磁力線を伝播する波動によるもので、そのような波動が太陽大気中には満ち溢れていることが明らかとなりました。観測されたこれらの波動はコロナを高温に保つエネルギーを十分に持っており、世界の波動研究を活性化させています。しかし、波動はただ存在するだけではコロナを加熱できません。これらの波動がどのように熱化するのか、つまり波動から熱へのエネルギー変換過程を明らかにすることが求められます。アルヴェン波は横波という性質上、エネルギーの減衰が少なく、遠方のコロナまで効率的にエネルギーを運べる反面、熱化しにくく加熱に向かないという矛盾を抱えています。アルヴェン波の効果的な熱化過程の解明は重要な課題なのですが、観測的に捉えることは困難とされてきました。「ひので」は空間分解能力が高く、微細な構造の動きを世界最高レベルで捉えることができますが、観測できるのは上下方向の動きのみで、奥行き方向の動き（我々に近づいたり遠ざかったりする方向：ドップラー速度）はわからず、アルヴェン波の熱化に関連する決定的な物理情報を得ることができません。

<研究の内容>

そこで、岡本文典（宇宙科学研究所、現名古屋大学）とパトリックアントリン（国立天文台）率いる国際研究チームは「ひので」に加え、2013年に打ち上げられたNASAの太陽観測衛星「IRIS」を用いて、この変換過程の解明にチャレンジしました。「IRIS」は、「ひので」の観測を踏まえて提案・開発された衛星です。「ひので」と同等の空間分解能力で紫外線の分光観測を行い、太陽大気の奥行き方向の動きを捉えることができます。研究チームは、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ました。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ました。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ます。解析の結果、2つの重要な事実を発見しました。

まず、第一の発見はプロミネンスの加熱についてです。「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ました。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りました。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ます。

第二の発見は、奇妙な振動のパターンです。「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ました。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します。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ました。



アルヴェン波は熱化しにくく、エネルギー変換の仕組みがナゾ

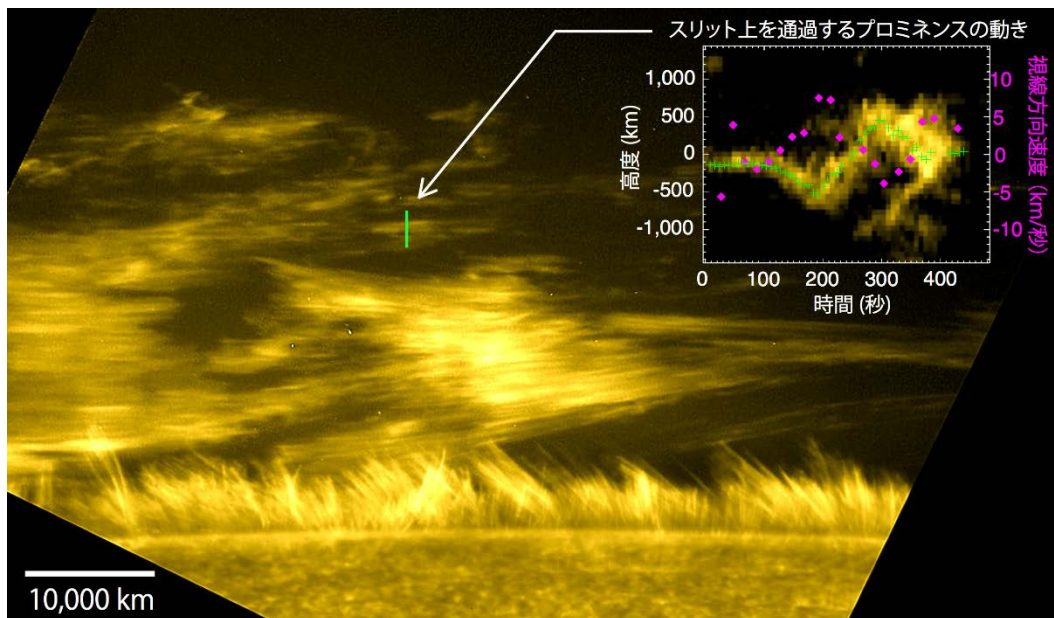
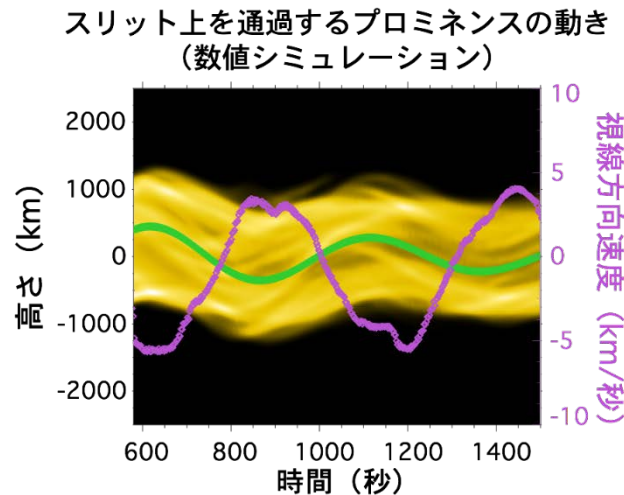


図 2.
 ひのでが観測したプロミネンス。緑色の部分を横切るプロミネンスの時間変化を示したものが右上の図で、一度下がった後、元の位置を越えて上昇し、再度下がる様子が捉えられている。その時々奥行き方向速度をピンク色で重ねている。速度は、奥に動くとき正の値、手前に動くとき負の値を取る。この図より、プロミネンスが最上点・最下点に達した時に奥行き速度は最大となり、中心位置にあるときは速度ゼロであることがわかる。

研究チームは、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いました。シミュレーションを開始しプロミネンス（※注1）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ちました。これは観測された特徴に良く合致します。この特異な

動きを生み出すメカニズムは共鳴吸収（※注2）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ます（図3下図）。

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りました。乱流は波のエネルギーを熱化させる上で非常に重要です（※注3）。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」で観測されうるサイズにまで拡大させていることも突き止めました。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と言えます。



振動に伴う加熱の仕組み

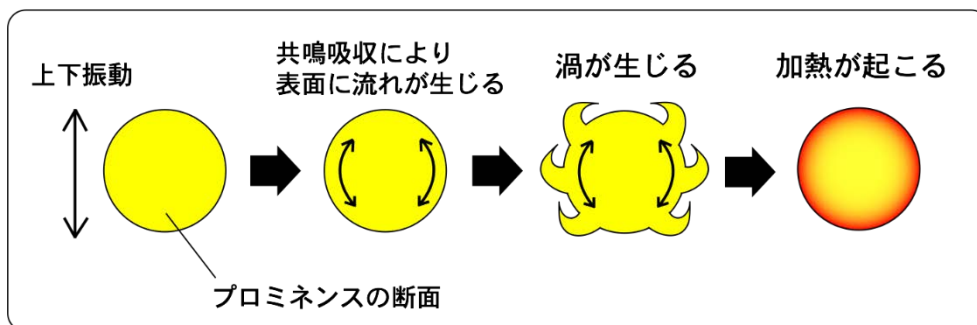


図3. (上図) 数値シミュレーションから再現したプロミネンスの動き。図2（右上）に対応する。緑色の線は各時刻でのプロミネンスの位置、ピンク色の線は奥行方向速度を表す。この速度パターンは観測結果と非常によく一致する。(下図) 数値シミュレーションからわかったプロミネンスの詳細な動き。プロミネンス振動に伴って起こる共鳴吸収と、それに付随する現象により、加熱が引き起こされることが数値シミュレーションにより明らかになった。

＜今後の展望＞

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ました。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

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ます。

※注 1

プロミネンスは太さのあるチューブ状構造の集合体であり、その構造の1つ1つを磁束管と呼びます。シミュレーションでは1つの磁束管の振る舞いについて取り扱っています。本文中では磁束管のことを「プロミネンス」と統一的に表現しています。

※注 2

共鳴とは、ある特定の速度や振動数を持つ物理現象が、同じ性質を持つものに影響を与えること。例えば、2つのおんさの一方を鳴らした時に、他方も鳴りはじめる現象などが挙げられます。これと同様に、今回の場合、プロミネンスを振動させている波動の位相速度が、プロミネンス内の特定の層における波動の固有速度と同じ時、これらの波動が相互作用することを共鳴吸収といいます。

※注 3

乱流が生じると、磁力線がねじ曲げられることで微小な電流層が生成されます。この電流層で磁場が散逸し、熱エネルギーが生み出されます。

<補足説明>

プロミネンス：

100万度の太陽コロナ中に浮かぶ、1万度の低温ガスのこと。細かい構造(=磁束管)の集合体として観測されます。プロミネンスは周囲のコロナよりも100倍重いのですが、コロナ中の磁場がハンモックの役割を果たし、このガスを浮かせています。コロナ中の磁場の直接観測は困難ですが、磁場に束縛されたプロミネンスを観測することで、コロナ磁場の性質や振る舞いを調べるのが可能です。また、プロミネンスはしばしば太陽から放出され、磁気嵐などの原因として地球にも影響を与えることがあることから、宇宙天気観測の観点からも重要です。

太陽観測衛星「ひので」：

日本主導で開発、2006年に打ち上げられた太陽観測専門の人工衛星。日米欧の国際共同ミッション。3つの望遠鏡を搭載し、太陽表面からその上空の彩層、コロナにおけるガスの運動や磁場測定などを世界最高レベルの解像度と精度で行います。

太陽観測衛星「IRIS」：

米国が 2013 年に打ち上げた太陽観測専門の人工衛星。Interface Region Imaging Spectrograph の略。「ひので」の成功を受けて開発されました。「ひので」と同程度の空間分解能による紫外線の分光観測から、主に彩層の物理量（視線方向速度、輝線幅など）を測定します。

ナノフレア：

「IRIS」による別の観測とシミュレーションの融合研究から、ナノフレアと考えられる微小なエネルギー解放現象が最近見つかりはじめています。「波動研究」「ナノフレア研究」がそれぞれ進展すれば、コロナ加熱におけるそれぞれの貢献割合や、お互いの因果関係などの研究が進むものと期待されます。

磁場：

身近な例では、磁石の N 極から S 極に向かう場のこと。場をたどった線のことを磁力線と言います。太陽は磁場に満ちあふれており、黒点はその代表的構造です。黒点も含め、太陽表面から出てきた磁場（N 極）は必ずどこかで再び太陽表面（S 極）に戻ります。プロミネンスはコロナ中を通る磁力線にくっついたプラズマの集合体のことで、その微細構造は磁力線をなぞったものと考えられています。

分光観測：

プリズムのように光を色（波長）ごとに分解すること。「IRIS」は紫外線を分光し、マグネシウムの吸収線やシリコンの輝線を観測します。これらの光は特定の温度域のプラズマから発せられているため、ある温度のプラズマの物理的性質、特に輝線や吸収線の波長遷移（ドップラーシフト）を調べることで奥行き方向の速度を調べることができます。

アルヴェン速度：

アルヴェン波が磁力線を伝播する時の速さ。磁場が強ければ速く、密度が濃ければ遅くなります。

<論文>

“Resonant Absorption of Transverse Oscillations and Associated Heating in a Solar Prominence. I. Observational Aspects”

T. J. Okamoto, P. Antolin, B. De Pontieu, H. Uitenbroek, T. Van Doorsselaere, T. Yokoyama 2015, The Astrophysical Journal, 809, 71

“Resonant Absorption of Transverse Oscillations and Associated Heating in a Solar Prominence. II. Numerical Aspects”

P. Antolin, T. J. Okamoto, B. De Pontieu, H. Uitenbroek, T. Van Doorsselaere, T. Yokoyama 2015, The Astrophysical Journal, 809, 72

<著者>

岡本文典（おかもとじょうてん）・・・ JAXA 宇宙科学研究所 研究員、現 名古屋大学 研究員
Patrick Antolin（パトリック・アントリン）・・・ 国立天文台 研究員
Bart De Pontieu・・・ アメリカ・ロッキードマーティン太陽天体物理学研究所
Han Uitenbroek・・・ アメリカ・国立太陽天文台
Tom Van Doorselaere・・・ ベルギー・ルーベン大学
横山央明・・・ 東京大学

<科研費>

25800120 ・ 若手研究 B ・ 岡本文典
“太陽彩層を紐解く：スペース観測で迫るプラズマ運動と磁場構造”

25220703 ・ 基盤研究 S ・ 常田佐久
“太陽コロナ・彩層加熱現象に迫る - ひので・IRIS・CLASP から SOLAR-C へ”

本研究には以下の研究機関が関わっています。

