



解説

太陽観測衛星「ひので」・「IRIS」とロケット観測実験 FOXSI・CLASP との共同観測による太陽コロナ加熱問題への挑戦

Challenge to Coronal Heating Problem by Solar Observation Satellite Hinode Coordinated with IRIS, CLASP, and FOXSI

清水敏文, 岡本文典¹⁾, 石川真之介²⁾

SHIMIZU Toshifumi, OKAMOTO Joten¹⁾ and ISHIKAWA Shinnosuke²⁾

JAXA 宇宙科学研究所, ¹⁾国立天文台, ²⁾名古屋大学宇宙地球環境研究所

(原稿受付: 2018年08月26日)

太陽コロナは、6000度の太陽表面上空に形成された100万度以上の温度を持つ太陽外層大気である。この高温プラズマの形成はコロナ加熱問題と呼ばれ未解決な課題である。コロナ加熱では、磁氣的流体波や非常に小さな爆発(ナノフレア)が重要な役割を果たすと考えられている。太陽観測衛星「ひので」や「IRIS」、観測ロケット FOXSI や CLASP 等との共同観測によってそれらの直接的な観測が可能となり、コロナ加熱の理解が進展している。

Keywords:

corona, wave, nanoflare, energy transport, energy dissipation, magnetic field, EUV spectroscopy

1. はじめに

太陽コロナは、太陽磁場とプラズマがつくる多様なダイナミクスに満ち溢れている。太陽磁場は、太陽内部でダイナモ機構によって生成され、太陽表面に浮上する。そして、その磁場に蓄えられた磁気エネルギーが、コロナで熱や運動エネルギーに短時間に変換されることで、突発的な増光(加熱)やプラズマ噴出(ジェット)、大規模な爆発である太陽フレアなどが発生する。現在、この太陽は、地球周回する人工衛星から継続的に観測されている。さらには、観測ロケットに尖鋭的な観測装置を搭載して、約5分間の観測も行われる。このような多角的な観測をもとに、太陽研究者らは我が母なる太陽の理解に取り組んでいる。そのうち、未解明な重要課題の一つが、本解説の「コロナ加熱問題」である。

図1は太陽大気構造の模式図である。高温かつ高密度な太陽中心で、核融合反応によって莫大な太陽エネルギーが生み出される。そのエネルギーが、我々が球体として視覚できる太陽表面(光球)に伝わる。表面付近では、対流が主たるエネルギーの伝播機構である。エネルギーが外側に向かって流れているので、太陽内部から光球まで温度が下降し、光球は約6千度の温度となっている。しかしながら、さらに光球から上空に向かうと、逆に温度が上昇に転じる。彩層は約1万度の温度があり、コロナの温度は100万度を超える。

高温コロナの存在は、熱力学的な流れでは説明できない。コロナでは、熱放射(主に紫外線や軟X線波長域)や太陽表面への熱伝導、磁場構造が太陽圏に開いた領域では

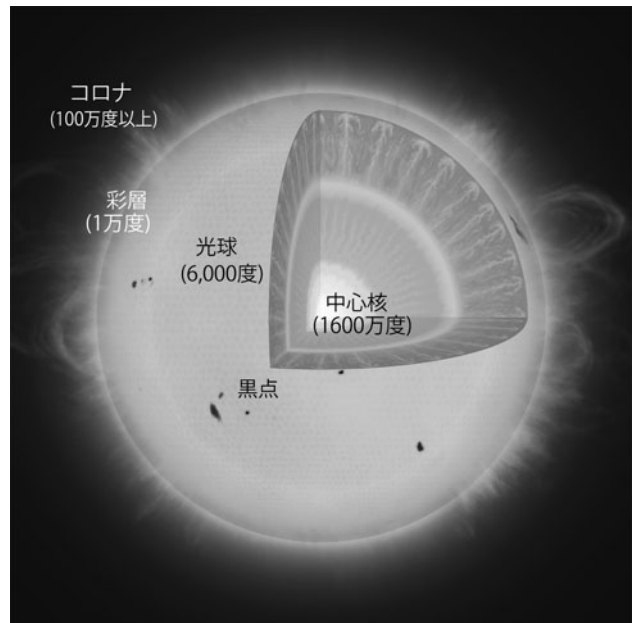


図1 太陽大気構造。

太陽風の加速によってエネルギーの損失が絶えずあり、遅かれ早かれ冷えてしまう。即ち、コロナが常に存在するには、これらの損失に見合うだけのエネルギーがコロナに注入され、プラズマの加熱が必要なのである。それは静かな領域で 10^2 J/m²/s、活動的な領域で 10^4 J/m²/s のエネルギー注入である[1]。その注入は、まだ見えていない何らかの非熱的な手段による。そしてこの物理的な機構が、「コロナ加熱問題」なのである。

注入されるエネルギーの源は太陽表面で見られる対流の乱流運動にあり、注入には太陽磁場が重要な役割を果たしていることは間違いない。乱流運動のエネルギーを何らかの手段で磁場を介して上空に持ち上げ、そのエネルギーを散逸させることができれば、コロナ加熱は説明できる[2]。これまでの理論的な研究によって多種多様なモデルが提唱されてきた。大別すると、波動がエネルギーを輸送し熱化する説と、非常に小さな爆発（ナノフレア）が多数発生して加熱する説である（図2）。いずれの説も、理論的にコロナ加熱を説明する有力な説であるのだが、波動やナノフレアの観測が乏しく、混沌としてきた。その一方で、このコロナ加熱の理解が近年格段に進みつつある。太陽観測衛星「ひので」[3]をはじめとした人工衛星や観測ロケットによる観測によって、目には見えなかった波動とナノフレアを徐々に捉えることが可能になってきたからである。次章以降、近年の観測的研究の進展を解説し、今後の観測研究の展望を論じる。太陽の観測研究は、宇宙のプラズマ実験室としてプラズマが宇宙で果たす役割について理解を深め、また観測から得られる磁力線のつなぎ換えとエネルギー輸送の物理的な知見も、プラズマ核融合に対して有益と思われる。

2. 波動と散逸過程の観測

太陽大気を伝播する波動の発見は、衛星「ひので」最大の成果の一つである。磁力線を伝わる波動、特にアルヴェン波はコロナ加熱解明の有力候補として長年挙げられながら、観測的な証拠は見つかってこなかった。しかし、地球大気の影響を受けない「ひので」の観測により、これまで撮像が困難であった微細な構造や微小な運動が明らかとなり、ついに波動の検出に至った。本章では、太陽大気中の波動の姿とコロナ加熱への寄与について解説する。

2.1 太陽大気は常に揺れている

まずは、「ひので」で観測した太陽大気を見てほしい（図3：電離カルシウム線）。この画像の中の構造体は、プロミネンスと呼ばれる1万度のプラズマであり、100万度のコロナ中に浮かんでいる。磁場はプロミネンスの中も外もほぼ等しく、単純な圧力平衡を考えると、プロミネンスは周囲のプラズマよりも100倍重い。そのため、すぐに太陽表面に落ちてしまうはずであるが、コロナ中の磁場に支えられることで自由落下時間をはるかに超えて宙空に留まることができる。

次に、このプロミネンスの中の微細構造に着目する。個々の構造は太陽面に平行に伸びる細長い筋状構造をしている。この構造は、太陽大気中に存在する磁力線にプラズマが凍結したものであり、プラズマが太陽コロナの磁力線を可視化していると考えられる。どのような物理がこの幅を決定しているかはわかっていないが、いずれも500 km程度の太さを持っている。これら微細構造の運動を追跡してみると、磁力線に沿って激しく飛び交うのみならず、いたるところで鉛直方向に小さく揺れていることが明らかになった（図4）。その揺れの振幅は400 km程度であり、これほど微小な振動の検出に成功したのは、「ひので」

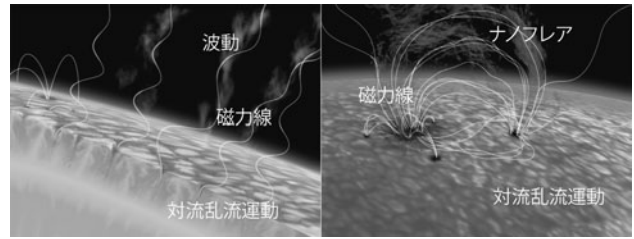


図2 コロナ加熱説。波動加熱(左)とナノフレア加熱(右)。

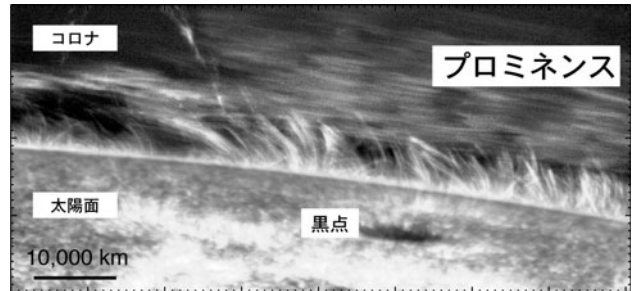


図3 「ひので」観測による太陽の縁。下半分が太陽面、上半分がコロナ。コロナ内で横にたなびく構造がプロミネンスで、微細構造の集合体であることがわかる（参考文献[4]の図1を改編）。

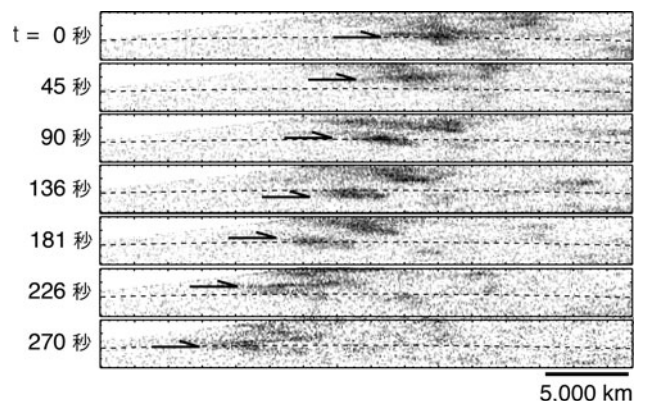


図4 振動する微細構造の例。コロナの一部分を切り出し、階調を反転させてある。破線は太陽面からの等高度を表す。右から左へ移動する微細構造が破線をまたいで振動しているのがわかる（参考文献[4]の図2を改編）。

の安定した撮像能力の賜である。このプラズマの揺れは磁力線が振動していることを意味する。つまり、これこそが太陽大気中を伝播する横波が存在する証拠であり、空間分解された姿が「ひので」によって初めて観測されたのである[4]。

検出された波動は磁力線を伝わる横波であり、アルヴェン波、またはそれに準ずるキंक波[5]と考えられる。その位相速度、及び振動の速度振幅や周期などから波動のエネルギーを見積もると、太陽コロナの加熱に十分な量を持つことが示された。この「ひので」による発見は、コロナ加熱問題解決の候補である波動の存在を確実なものとし、観測理論問わず波動加熱研究の活性化をもたらした[6-10]。

2.2 波動は加熱に寄与しているのか

ところが、コロナ加熱問題における波動研究はまだまだ道半ばである。なぜなら、波動の散逸過程に関する観測報

告がないためである。もし波動が散逸・熱化していなければ、コロナ加熱問題における波動の存在意義は薄れてしまう。「ひので」は波動に伴う磁力線の2次元的な揺れを捉えることには長けているが、奥行き方向の振動や、散逸時に期待される温度変化などを議論するには不十分である。

ここに新たな視点をもたらしたのが、2013年に打ち上げられた太陽観測衛星「IRIS」である[11]。「IRIS」は紫外線による分光、及び撮像ができる装置を搭載し、「ひので」に準ずる空間分解能でプロミネンスなどのプラズマの動きを観測することができる。特に、電離マグネシウム線のスリット分光観測データからは1万度のプラズマの視線方向速度が導出でき、また電離シリコン線の撮像観測データか

らは10万度のプラズマの空間分布が得られる。「ひので」と「IRIS」で同一の対象物を観測し、それらを比較することで、波動に伴うプラズマの温度変化や3次元運動に迫る。

図5は両衛星が同時に撮影したプロミネンスの画像である。1万度と10万度の画像を比較すると、大局的構造は非常に類似しているが、両者の時間変化には顕著な違いが見られる。1例として、振動しながら磁力線に沿って移動する微細構造を追跡すると、1万度のプラズマが消失すると同時に10万度のプラズマが出現する様子が捉えられている(図6)。これは即ち、探し求めていた波動に伴う加熱にほかならない。同様の現象は数多く見られ、波動に伴う加熱は確実に存在することが示された[12]。

しかしながら、いかなる散逸過程が働き、波動エネルギーを熱エネルギーに換えているのだろうか。この疑問に答えるため、ここでは1つの微細構造に着目し、分光観測データを注意深く見てみることにする。まず、「ひので」の電離カルシウム線の撮像観測からプロミネンスが上下振動していることがわかる。一方、「IRIS」の分光観測から視線方向速度を導出したところ、奇妙なことがわかった。一般的に、磁力線を伝播する横波は、振動面が視線方向とずれていれば、振動重心から振幅が最も変位した箇所で速度がゼロになるはずである。しかし、図7に示した振動パターンはこの一般則に当てはまらない。この理由は、電離

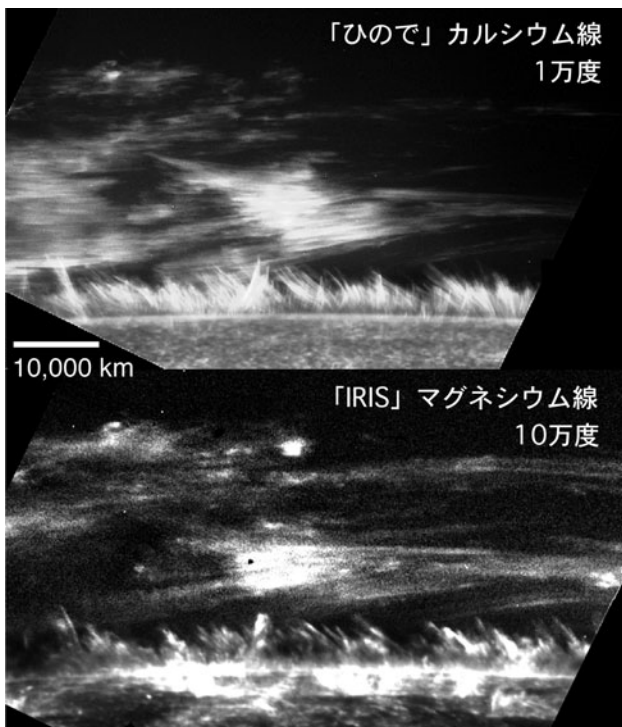


図5 「ひので」および「IRIS」が撮像したプロミネンス(それぞれ上図, 下図)。

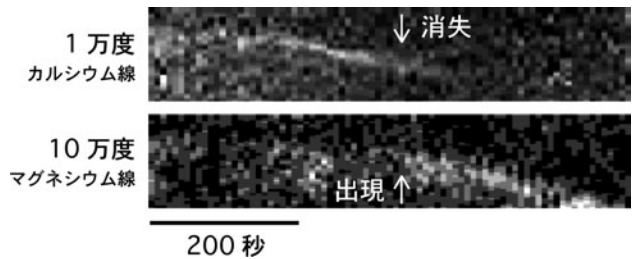


図6 上下振動しながら水平に移動する微細構造の軌跡。左から右に動く構造を追尾しながら切り出すことで1枚の絵にしている。よって、横軸方向は空間であり時間でもある。上が「ひので」、下が「IRIS」。

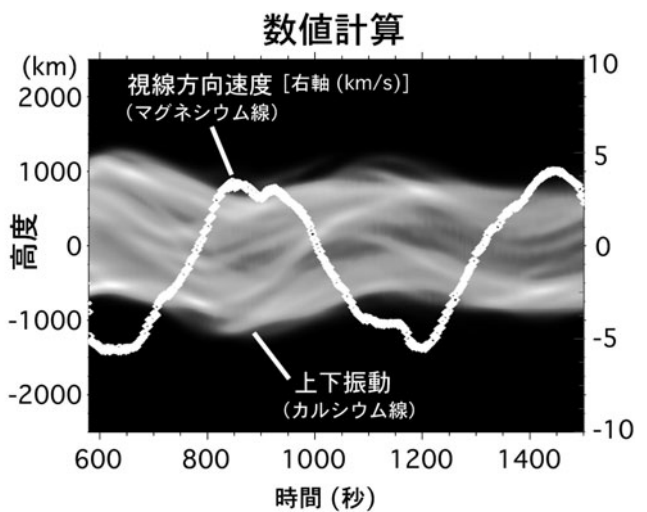
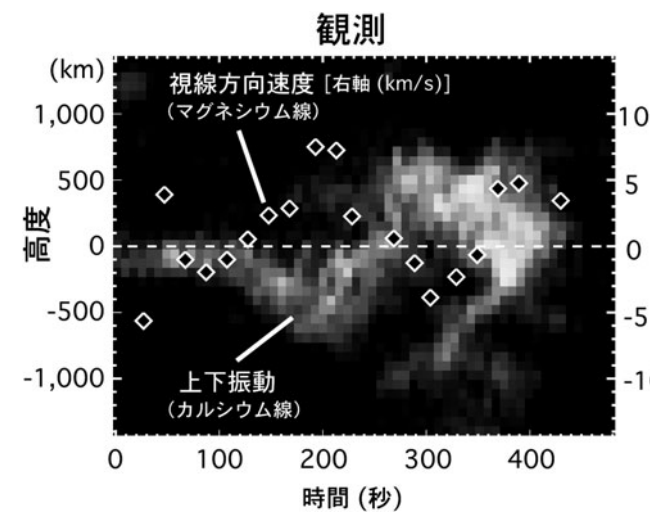


図7 微細構造の上下振動と視線方向速度の位相関係を示した空間-時間図。(左)観測、(右)数値計算(参考文献[12]の図4、図6を改編)。

カルシウム線では微細構造の重心の運動を捉えているのに対して、電離マグネシウム線では微細構造の表面のみの運動を捉えていることによる[13]。つまり、観測された振動パターンは、微細構造の重心と表面の運動が乖離していることを意味する。

この複雑な運動を理解するために、国立天文台のスーパーコンピュータ「アテルイ」を用いてプロミネンス内外の温度や密度構造を模した磁束管を用意し、振動がもたらす影響について数値実験を行った[14]。その結果、「共鳴吸収」[15]と呼ばれる物理過程を介して、磁力線振動のエネルギーが磁束管表面の運動（ねじれアルヴェン波）に変換されることがわかった。この表面運動の位相は、徐々に重心振動の位相からずれていき、振動開始から数周期後には、観測と同様のパターンになった。また、この表面運動はケルビン・ヘルムホルツ不安定性を励起する。これは、磁束管表面に乱流を形成し、磁場エネルギーの散逸が起こって周囲のプラズマを加熱することが確かめられた(図8)。これら一連の物理過程は観測結果をよく再現していることから、観測された波動と加熱には十分関連性があり、共鳴吸収がその鍵を握っていると結論づけるに至った。これがコロナにおける波動加熱の初の観測的証拠である。

ついに波動の散逸を捉えることに成功したが、これでコロナ加熱が説明できたと断言するのはまだ早い。1万度から10万度への加熱は示されたが、コロナの温度である100万度への加熱がまだ説明されていない。しかし、コロナの観測空間分解能は低く、光学的に薄い輝線ばかりである。そのため、多波長間の対比が難しく、問題解決への課題は多い。また、共鳴吸収以外の過程を排除したわけではなく、衝撃波加熱など他の可能性も今後検証することが重要である。

3. ナノフレアのX線観測

一方、1桁以上高い加熱率が必要とされる黒点周辺の活動領域では、多数のナノフレア発生がコロナ加熱において重要であるとの考えが依然として強い。フレアとは磁気エネルギーが短時間にコロナで解放される大爆発であり、フレアが発生するとコロナのプラズマが数千度以上にまで加熱される[16]。実際にコロナが加熱されているところが観測されているため、当初はフレアがコロナを加熱しているのではないかと考えられた。コロナが高温を保っている原因がフレアだとすると、コロナが放射や熱伝導でエネルギー

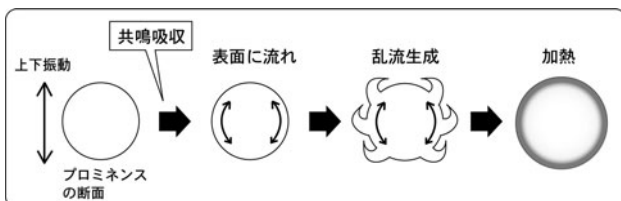


図8 波動散逸過程の模式図。共鳴吸収によってプロミネンス微細構造の表面に流れが生じ、乱流生成を経て加熱が起こる。

ギーを失うのと同じペースでフレアによりエネルギーが供給されている必要がある。しかし、大小様々なフレアを合計した場合でも、フレアにより供給されるエネルギーはコロナ温度を保つのに必要なエネルギーよりも何倍も小さいことが、「ようこう」衛星のX線観測によりわかっている[17]。

それでは、「ようこう」で観測されたよりもっと小さなフレアが多数起こっていればフレアでコロナ加熱を説明できるだろうか？そのような多数の微小なフレアにより、コロナが加熱されているとする説がナノフレア加熱説である[18]。ナノフレアは 10^{-9} を表す接頭語のナノをフレアにつけた造語で、巨大フレアと比較して解放されるエネルギーが 10^{-9} から 10^{-6} の間ぐらいのイベントをさす言葉である。エネルギーにより厳密に分類せずに、微小なフレアという意味で使われる場合もある[19]¹。ナノフレアは、コロナの磁場構造の中で不連続面ができれば磁気リコネクションが起きるので、至るところに存在すると考えられている(図2右)。太陽フレアでも、地震などと同じく解放されるエネルギーが小さいほど発生頻度が高いため[20]、より小さいフレアの方がエネルギー量全体に対する寄与が大きいのではないかと考えられてきた。

実際にフレアのエネルギーと発生頻度を比較してみると、フレアで解放されるエネルギー全体には大きなフレアの方が寄与が大きいことが、これまでのX線観測による統計的研究のほとんどで報告されている(図9, [21])。紫外線観測では、小さいイベントほど寄与が大きいとする結果も報告されている[22]。しかし、X線で観測されるフレアと同種のイベントを観測しているのか、イベント選択にバイアスがあるのではないかとといった指摘もなされており、ナノフレアがフレアのエネルギー解放において支配的であるという十分な証拠が得られているとは言い難い。そ

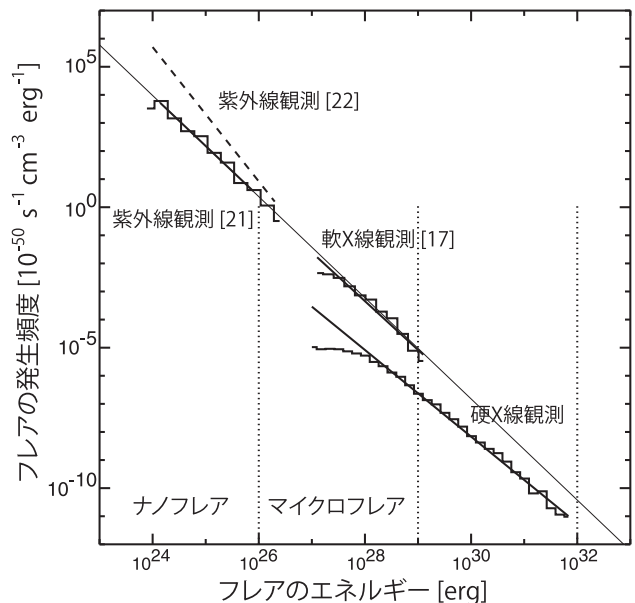


図9 様々なスケールのフレアの統計分布[21]。

1 Aschwanden *et al.* の定義では、最大の巨大フレアで解放されるエネルギーを 10^{26} J程度として、ナノフレアのエネルギーは 10^{17-19} J程度としている[19]。

のため多くの研究者は、これまで検出されたフレアの頻度分布が、ナノフレアのエネルギーに単に延びているだけではコロナ加熱に必要なエネルギーを説明できないと考えている。

それでは、コロナ加熱の原因はフレアではないと結論づけることができるだろうか。依然それは明らかではない。これまで個々に検出できたフレアよりもずっと小さいフレア（ナノフレア）があるかもしれない。そしてそれらは、ずっと高頻度で発生しているかもしれない。そのようなことは原理的にはありうるが、検証できなければ単なる想像にすぎない。

これまで検出できなかったナノフレアが存在するかどうかのヒントを得る方法が一つある。それは、太陽コロナの温度成分に、100–200万度の主成分の他に、より温度の高い、1000万度以上の超高温成分が存在するかどうかを検証する方法である。フレアの物理過程は1000万度以上のプラズマを形成することができることは前述の通りであり、ナノフレアのスケールであっても500–1000万度のプラズマが形成されることはシミュレーションで示されている[23]。特に、コロナを1000万度以上に加熱できる他の方法は今のところ提案されていない。したがって、これまでの手法でフレアが検出されなかった領域において超高温成分を検出することができれば、これまで検出できなかったナノフレアの存在を示唆する結果となる。これまでフレアの検出は、主にX線の増光を調べることにより行われてきた。X線の増光がみられない時間帯に超高温成分が存在するかどうか、コロナ加熱のナノフレア説を検証する鍵となる。

超高温成分の存在を検証するのに有効な方法の一つが、X線の中でも数キロエレクトロンボルト以上のエネルギーを持つ硬X線である。コロナの主成分である100–200万度のプラズマは硬X線をほとんど放射せず、より温度の高い超高温成分からは多くの硬X線が放射されるため、硬X線は超高温プラズマの存在を検証する指標として用いるこ

とができる。これまでは、硬X線はフレアが検出された場合、すなわちX線の増光とともにのみ検出されていた。そのため、主に硬X線観測はフレア研究のために用いられてきた。

これまで、「ようこう」衛星搭載の硬X線望遠鏡や、現在まで観測を続けてきたRHESSI衛星といった観測機器が太陽の硬X線観測に活躍してきたが、これらの観測機器は検出手法による原理的な感度の限界があった。硬X線は可視光等のように光学系により集光することが難しく、従来の観測機器では集光に依らない撮像方法が用いられてきた。その場合、有効面積を確保するためには大きな検出器を用意する必要がある。硬X線は地球大気で吸収されるため、硬X線観測は観測衛星やロケット等の飛翔体を用いて行う必要がある。その一方で、大きな検出器を使うと荷電粒子によるバックグラウンドが多量に発生するため、どうしても高感度を実現することが難しくなる。この感度の限界は、フレア検出時以外の超高温成分の探査を大きく制限する要因となっていた。

近年、技術の進歩により、硬X線でも反射鏡により集光する技術が確立しつつある[24]。硬X線の撮像観測を集光光学系を用いて行うことができれば、検出する硬X線の光子数を犠牲にせずに検出器のサイズを小さくすることができ、かつバックグラウンドの比率を下げて感度を向上させることができる。硬X線集光撮像観測は、その高感度により超高温成分の探査を飛躍的に向上させる可能性を持っているのだ。

この技術を用い、いち早く太陽硬X線撮像分光観測を実現したのが、太陽観測ロケットFocusing Optics X-ray Solar Imager (FOXSI) である[25, 26]。FOXSIは硬X線ミラーと高分解能の硬X線撮像検出器により、RHESSI衛星と同等の有効面積を保ちながら2桁近い感度の向上を実現する。これまで2012年と2014年の2回打ち上げに成功し、太陽の様々な領域の観測を行った。

2014年の2回目のFOXSIの打ち上げでは、X線の増光現

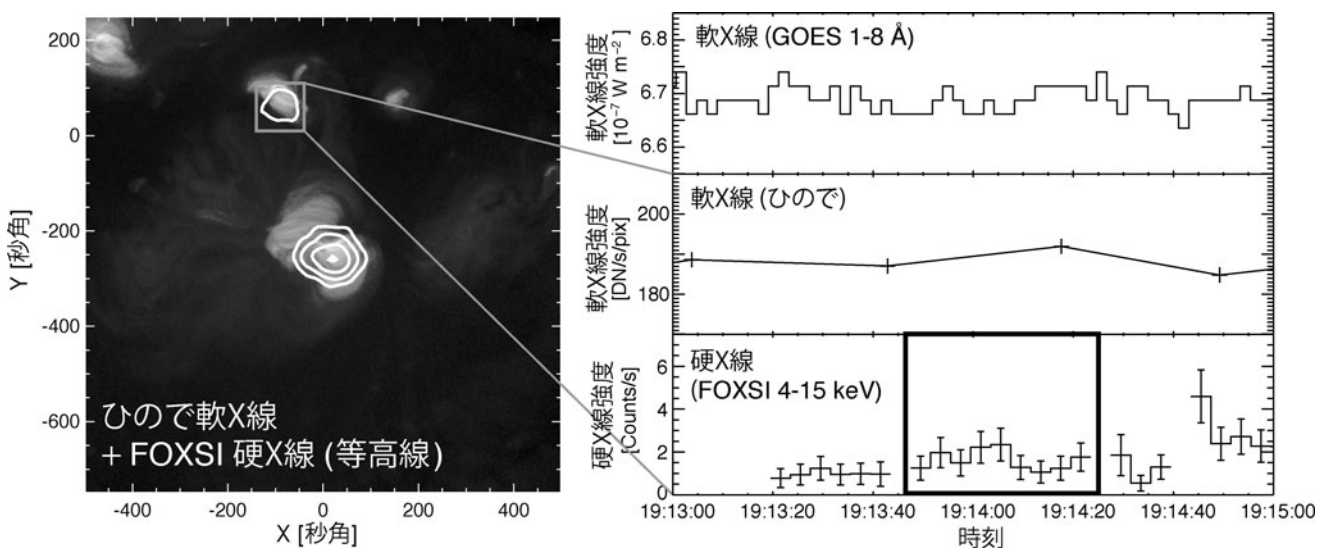


図10 FOXSI-2の硬X線観測結果(等高線)をひのでのX線画像に重ねたもの(左)。中央の領域では小規模なフレアが検出されていたが、左上の領域からは、右図の枠で囲った時間帯には増光現象は検出されなかった。

象がみられない領域からの硬X線を初めて捉えることができた(図10, [27])。観測された中でも、特に7キロエレクトロンボルト以上の硬X線放射は1000万度以上のプラズマから放射されている。すなわち1000万度以上の超高温成分を硬X線により初めて捉えることに成功した。

先ほど述べたように、X線増光現象としてのフレアが検出されない領域から、1000万度以上の超高温成分の存在を示す硬X線が検出されたという事実は、個別には検出されなかったナノフレアが発生していることを示唆している。これは、これまで検出されていたフレアではコロナの加熱にエネルギーが不足しているとしても、検出されていなかったナノフレアのエネルギーによりコロナが加熱できる可能性がまだ残っていることを示す結果である。その一方で、これらの個別に検出されなかったナノフレアがどの程度のエネルギーを持つかはこの観測からのみではわからない。そのため、ナノフレアがコロナを加熱するのに十分なエネルギーを持っているかどうかは依然わかってはいない。

今後、この結果を踏まえてナノフレアのコロナ加熱への寄与を議論するためには、2つの方向性がある。1つ目は、観測装置の位置分解能、時間分解能、感度を向上させ、ナノフレアを個別のイベントとして検出することである。しかし、どの程度の分解能や感度が実現できればナノフレアが個別に検出できるかわからないため、その実現性は不透明である。もう1つの方向性は、FOXSIの結果を再現できるようなナノフレアの特徴を数値シミュレーションで調べることである。すでに一つの試みが報告されており、観測を再現するためにはナノフレアのタイムスケールに制限があることを示している[28]。

今後の研究の進展のためには、プラズマの温度分布探索も精度を上げる必要がある。米国のチームはFOXSIの観測装置による衛星観測を提案しており、実現すれば多数の領域を観測することで統計的性質を明らかにすることが期待される。一方、FOXSIの硬X線観測装置は超高温成分の検出には長けているが、コロナの主成分の温度域から連続して観測をすることができないという課題がある。これを解決するため、2018年9月に行われた3回目の打ち上げ(FOXSI-3)では、新たに開発した高速CMOSカメラにより太陽軟X線撮像分光観測を初めて実現した。この成果は近いうちに発表したいと考えている。また、コロナの高エネルギー現象の解明に向けて非常に強力なツールであるFOXSI-3の観測手法を用い、観測衛星を実現する計画もある(PhoENiX計画)。今後、FOXSI-3および衛星版FOXSIやPhoENiXにより、コロナ加熱のみならず太陽におけるエネルギー解放現象の理解(例えば、粒子加速)が大きく進むことを期待している。

4. 今後の観測展望～磁場計測や EUV 分光観測

第2章で述べたように、「ひので」や「IRIS」による高解像度の観測によって、コロナ加熱のエネルギーを担う波動の存在や散逸の例が見つかった。また、第3章で述べたように、ナノフレアによる超高温プラズマの生成の兆候が観

測ロケット実験で捉えられた。さらに、「ひので」や「IRIS」の高解像度観測は、これまでの想像を超える小スケールで動的な現象が、コロナのみならず彩層で頻発していることを発見した。例えば、超音速で彩層プラズマが上空に噴出するジェット現象[29, 30]や、それに付随した波動の励起や伝播[6, 7]など、多種多様な形で観測された。このような動的な現象は、彩層から上空のコロナに非熱的なエネルギーを注入する候補でもあり、現在の太陽物理学において最重要な課題となっている。彩層は、プラズマ圧が優勢な光球から磁気圧が優勢な大気に切り替わる場所である。そこで起きる動的現象の振る舞いこそが、コロナへの大規模なエネルギー輸送の鍵を握る。次に行うべき最も重要な観測は、光球の乱流と上空につながる磁場との相互作用によって磁気流体的エネルギーが発生し、彩層においてそのエネルギーがどのように伝播し、そしてさらに上空のコロナに必要な量が本当に散逸しているのか、観測によって定量的に決定することである。それを可能にする観測が、光球から彩層・コロナにおける磁場の精密な計測である。また、彩層からコロナをシームレスに、プラズマの動的な運動を計測する EUV 分光観測である。

4.1 彩層の磁場計測

精密な磁場観測は、現時点では光球に対してのみ実現している。それが、「ひので」が世界に先駆けて行った宇宙からの観測である。光球起源の吸収線は、光球の磁場(数10から数100ミリテスラ)によるゼーマン効果で偏光する。可視光域の吸収線を用いて、その偏光状態を精密に計測し、偏光の輻射輸送理論に基づいて偏光状態から磁場の強さやベクトルを導出する。例えば、その時間変化から、光球を通過する磁気流体波の振る舞いとらえ、その波が持つエネルギー量の評価を可能にした[10]。

次のステップとして、その磁気流体波、特にコロナまで伝播が容易な横波(アルヴェン波)が、磁力線に沿って光球から彩層・コロナにどのように伝播し、どれだけのエネルギーを持ち上げるかを観測的に明らかにすることである。そのためには、光球に加えて、彩層よりも上空で精密な磁場観測を行うことである。2015年9月に飛翔した観測ロケット実験 CLASP (Chromospheric Lyman-Alpha SpectroPolarimeter, 図11)[31]は、彩層上部・遷移層(約1~3万度)から放たれるライマン α 線(水素原子が出す紫外線波長 121.6 nm の輝線)の偏光を計測することで、彩層上部・遷移層の磁場の情報を得ようとする世界初の実験であ

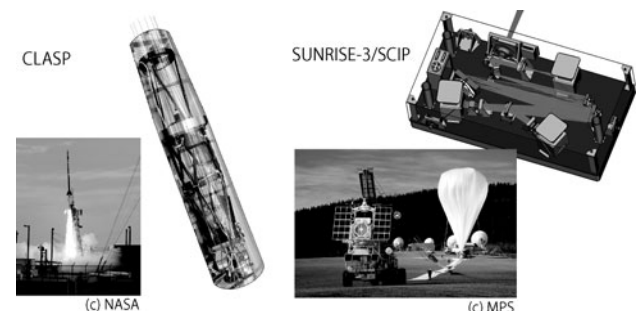


図11 彩層磁場を計測する CLASP(左)と SUNRISE-3/SCIP(右)。

る。太陽大気による散乱で生じる微弱な偏光（散乱偏光）が、彩層上部・遷移層磁場によって変化すること（ハンレ効果）を検出しようというものである。彩層上部・遷移層の磁場は10ミリテスラ程度以下と弱く、磁場が生む変化は弱い。望遠鏡の光路中に、波長板を一定に連続回転させる新規開発の駆動機構[32,33]を設置して、ライマン α 線中のお互いに直交する2つの直線偏光成分(Stokes Q, U)を0.1%精度で計測することに成功した[34]。この実験によって、彩層上部～遷移層に存在する磁場による偏光が初めて検出できた。一方、この偏光信号から彩層における磁場情報（磁場ベクトル）を直接導出するには、さらなる手法の確立が必要であることも明らかになり[35]、CLASPの再飛翔（CLASP 2, Chromospheric Layer SpectroPolarimeter 2）を2019年前半に予定している。CLASP2では、ライマン α 輝線と同様に有用と考えられる電離マグネシウム線（280 nm）の直線偏光および円偏光を観測し、磁場情報を導出することが期待されている。

また、地上天文台で培ってきた技術を発展させて、近赤外域にある彩層起源の吸収線を使って、高解像度で精度良い彩層磁場の観測を行う計画もある。米国ハワイ州で建設が進む大型太陽望遠鏡DKIST（Daniel K. Inouye Solar Telescope）と国際大気球実験SUNRISE-3である。このうち、日本が参加するSUNRISE-3は、大気球を用いて1 m口径望遠鏡を高度35 km以上に持ち上げ、地球大気揺らぎが小さな条件のもとで高精度かつ高解像度の太陽観測を行うプロジェクトである。その第3回目の飛翔は、2021年に計画されている（図11）。この飛翔には、可視偏光分光観測装置SCIP（Sunrise Chromospheric Infrared spectroPolarimeter）が、焦点面観測装置の一つとして日本より提供される。SCIPは近赤外線にある複数の吸収線を高精度（0.1%）で偏光計測する観測装置であり、1 m望遠鏡で実現される非常に高い空間分解能（0.2秒角）で観測が行われる。観測される吸収線は、電離カルシウム線（854 nm）や中性カリウム線（769 nm）などであり、光球上部から彩層中部の磁場を3次元的にとらえることができる[36]。そして、光球面の乱流運動によって励起された磁気流体波が彩層まで伝播する様子を定量的にとらえると期待される。

4.2 彩層からコロナのEUV分光観測

彩層を通過してコロナに伝播した磁気流体波は、コロナ加熱を担う可能性がある波動であり、とりわけ重要である。彩層・遷移層からコロナにわたって磁気流体波の伝播を追跡することで、波が伝えるエネルギー流量を定量的に測定し、またその波が熱に変わる現場をとらえることができる。そしてそれは、第2章に述べたように、コロナ加熱問題を直接的に解決する。これを可能にする観測は、1) 彩層からコロナにわたって温度のギャップなく（温度シームレスに）連続的にとらえることができ、2) 彩層で見られる微細磁場構造をその上空でも識別できる高い空間分解能をもち、そして3) 磁気流体波の伝播を追跡できる時間分解能を持つEUV分光観測である。極紫外線（EUV）～真空紫外線（VUV）の波長域には、彩層・遷移層・コロナに存在する様々な温度（1万～数100万度）のプラズマや、フレ

アで生成される超高温プラズマ（1000万度超）から発生する輝線が多数存在する。また、第3章で述べたように、ナノフレア発生で生成される500万度超のプラズマから発生する輝線もある。ナノフレアが低密度のコロナで発生すると、局所的に500万度を超える高温プラズマが短時間発生する。このような高温プラズマが、定常的に存在するコロナプラズマ（100～200万度）に対してどれだけ存在するのか、また時間的にどのように振る舞うのかを観測的に調べることは、ナノフレア説の理解において重要である。

このような性能を世界で初めて持つEUV分光望遠鏡の実現が2020年代中盤に期待できる。Solar-C_EUVST計画（図12）は、空間分解能0.4秒角（300 km程度）、最速0.5秒の時間分解能で17～120 nmの波長域を観測する高感度EUV/UV分光望遠鏡EUVST（EUV Spectroscopic Telescope）を搭載する500 kg級の科学衛星である。日本主導で米欧との国際協力によるミッションであり、「ひので」衛星に続く次世代太陽観測ミッションとなる。2018年7月に、公募型小型計画のミッション候補の一つとしてJAXA宇宙科学研究所の審査で選定され、2025年頃の実現をめざしてアイデア加速検討が始まっている。

5. まとめ

コロナは太陽に限らず、夜空に瞬く多くの恒星に存在する。さらに、銀河や銀河団にはコロナのような数100万度を超える高温プラズマが存在している。これら高温プラズマの存在の起源は未知である。即ち、詳しく分解して診断ができる太陽コロナの加熱を探ることは、宇宙物理学にとって課題解決につながるヒントが与えられる可能性がある。また、コロナは磁気リコネクションと呼ばれる磁力線のつなぎ変えに満ちたダイナミックな世界であり、プラズマ物理学の視点からも興味深い。地球上での核融合炉では高温プラズマの閉じ込めが必要である。高温プラズマの計測技術では、太陽研究者と核融合プラズマの研究者の連携で技術発展が進められている。また、その高温プラズマの生成

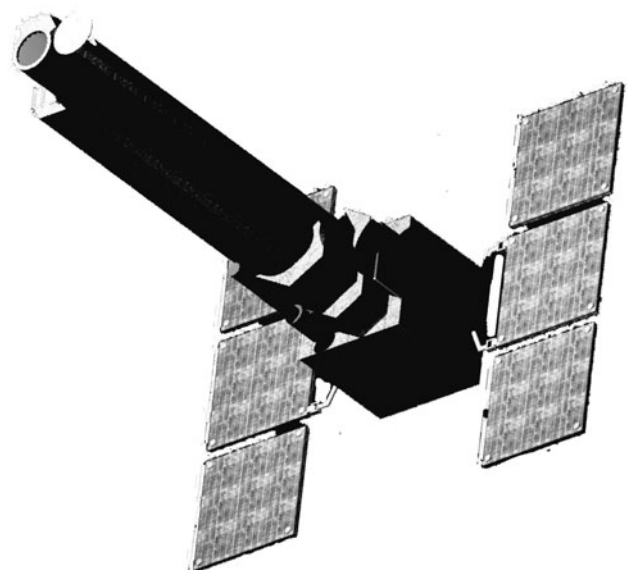


図12 2025年頃に飛翔をめざすSolar-C_EUVST衛星。

や閉じ込めを考える上で、太陽コロナで常に起きているプラズマ現象からの知見は何らかのアイデアを与えるかもしれない。

これから展開されるコロナ加熱研究は、「ひので」や「IRIS」、そして観測ロケット実験で得られた知見をもとに、彩層やその上空の磁場計測や彩層からコロナをシームレスにカバーする分光観測を中心に展開される。高感度EUV/UV分光観測を行うSolar-C_EUVST計画を日本が主導し実現させ、彩層～コロナの分光診断能力を飛躍的に増強させることで、コロナ加熱に迫る。それとともに、CLASP2やSUNRISE-3/SCIPによって彩層磁場の計測手法を磨き、Solar-C_EUVSTとDKISTによる彩層磁場計測を協働して、エネルギー注入・伝播・散逸の観測からコロナ加熱問題への答えを出そうとしている。今後の研究に期待したい。

参考文献

- [1] G.L. Withbroe and R.W. Noyes, Annual Review of Astronomy and Astrophysics **15**, 363 (1977).
- [2] 桜井 隆 他編：「太陽」第8章コロナ加熱，現代の天文学10（日本評論社，2009）。
- [3] T. Kosugi *et al.*, Solar Phys. **243**, 3 (2007).
- [4] T.J. Okamoto *et al.*, Science **318**, 1577 (2007).
- [5] T. Van Doorselaere *et al.*, Astrophys. J. **676**, L73 (2008).
- [6] B. De Pontieu *et al.*, Science **318**, 1574 (2007).
- [7] T.J. Okamoto and B. De Pontieu, Astrophys. J. **736**, L24 (2011).
- [8] I. Arregui *et al.*, Living Rev. Sol. Phys. **15**, 3 (2018).
- [9] S.W. McIntosh *et al.*, Nature **475**, 477 (2011).
- [10] R. Kanoh *et al.*, Astrophys. J. **831**, 24 (2016).
- [11] B. De Pontieu *et al.*, Sol. Phys. **289**, 2733 (2014).
- [12] T.J. Okamoto *et al.*, Astrophys. J. **809**, 71 (2015).
- [13] H. Uitenbroek, Astrophys. J. **557**, 389 (2001).
- [14] P. Antolin *et al.*, Astrophys. J. **809**, 72 (2015).
- [15] J.A. Ionson, Astrophys. J. **226**, 650 (1978).
- [16] A.O. Benz, Living Rev. Sol. Phys. **5**, 1 (2008).
- [17] T. Shimizu, Publ. Astron. Soc. Jpn. **47**, 251 (1995).
- [18] E.N. Parker, Astrophys. J. **330**, 474 (1988).
- [19] M.J. Aschwanden, *Physics of the Solar Corona* (Springer, 2005).
- [20] H.S. Hudson, Sol. Phys. **133**, 357 (1991).
- [21] M.J. Aschwanden *et al.*, Astrophys. J. **535**, 1047 (2000).
- [22] C.E. Parnell and P. E. Jupp, Astrophys. J. **529**, 554 (2000).
- [23] J.A. Klimchuk, ASP Conference Series **415**, 221 (2009).
- [24] B.D. Ramsey *et al.*, Astrophys. J. **568**, 432 (2002).
- [25] S. Krucker *et al.*, Astrophys. J. **793**, L32 (2014).
- [26] S. Ishikawa *et al.*, Publ. Astron. Soc. Jpn. **66**, S157 (2014).
- [27] S. Ishikawa *et al.*, Nature Astronomy **1**, 771 (2017).
- [28] A. Marsh *et al.*, Astrophys. J., **864**, 5 (2018).
- [29] Y. Katsukawa *et al.*, Science **318**, 1594 (2007).
- [30] K. Shibata *et al.*, Science **318**, 1591 (2007).
- [31] M. Kubo *et al.*, ASP Conf. **489**, 307 (2014).
- [32] T. Shimizu *et al.*, Proc. SPIE **9151**, 915138 (2014).
- [33] S. Ishikawa *et al.*, Solar Physics **290**, 3081 (2015).
- [34] R. Kano *et al.*, Astrophys. J. **839**, L10 (2017).
- [35] R. Ishikawa *et al.*, Astrophys. J. **841**, 311 (2017).
- [36] C. Quintero Noda *et al.*, MNRAS **464**, 4534 (2017).



しみず とし のぶ
清水 敏文

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 准教授。1995年東京大学大学院・博士（理学）。2005年より現職。専門は太陽物理学、衛星・搭載望遠鏡の開発し、コロナ加熱、磁気リコネクション現象としてのマイクロフレア、太陽磁場のダイナミクスなど観測的研究に取り組む。趣味は美味しいもの探訪とジムでのストレス発散。



おか もと じょう てん
岡本 丈典

1980年大阪府高槻市生まれ。京都大学博士（理学）。現職は国立天文台フェロー。観峰流書道宗家六段免許。太陽観測衛星「ひので」「IRIS」の科学運用を行いつつ、太陽の細かいところまでよく見て何か変なことがないか調べる研究をしている。神社、ダム、ボルダリング、高いところから飛び降りる、岡本太郎、が最近のお気に入り。



いし かわ しん の すけ
石川 真之介

名古屋大学宇宙地球環境研究所・研究機関研究員。2011年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻修了。カリフォルニア大学バークレー校研究員、国立天文台研究員、JAXA 宇宙科学研究所研究員を経て現職。X線観測機器を中心に、宇宙観測に向けた様々な計測システムの開発を行ってきた。本記事に参加させていただき、大変良い思い出になりました。