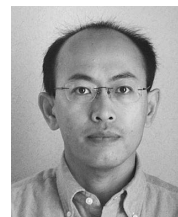


「ひので」で捉えたコロナ加熱の現場

原 弘 久

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: hirohisa.hara@nao.ac.jp



皆既日食時に太陽の周囲に見られるコロナは100万度の高温状態にある。エネルギーを生み出している中心核から表面まで単調に温度が減少した後に、僅か数千km上空から2桁も温度が上昇するコロナ域が広がっている。「ひので」衛星に搭載した望遠鏡の登場により、理解が進んだコロナ加熱の現場について紹介する。

1. はじめに

コロナが放射する輝線の同定から、太陽コロナは100万度もの高温であることが1940年代に理解された。このコロナがどのように作られるのか、というのがコロナ加熱問題で、これまで数多くの理論的研究・観測的研究が行われている。肉眼で捉えられる丸い太陽面は、コロナに比べて2桁以上も温度が低い直径1,000 km程度の乱流対流泡(粒状斑)で覆い尽くされており、その運動エネルギーが数千km上空から始まるコロナを加熱するエネルギー源であることに疑いはない。この乱流が発生させる音波が上空に伝播した後に、衝撃波となって大気を加熱するモデルが初期に提唱されたが、理論的にも観測的にも音波がコロナ域に

達することができないことが示されている。このため、このモデルは加熱機構の主候補から消え、別の加熱機構が必要となった。現在では、表面から上空へ延びた磁場を介して上空に加熱のためのエネルギーが輸送されていると考えられている。これを決定づけたのがX線太陽全面画像である(図1-右)。表面のどこでも同じように観測される対流構造とは異なり、表面磁場から推定される磁力線構造(図1-左の曲線)と同様の構造がコロナに観測され、また磁場の強い領域ほどコロナが明るくなっている(例えば図1-右の中央部)。ただし、コロナの生成には磁場の存在とその強さだけでは不十分で、磁力線を動かす対流も同時に必要となる。なぜなら、対流運動が抑制された強磁場領域として知られる大型の黒点上空では明るいコロナは観測されないからである。

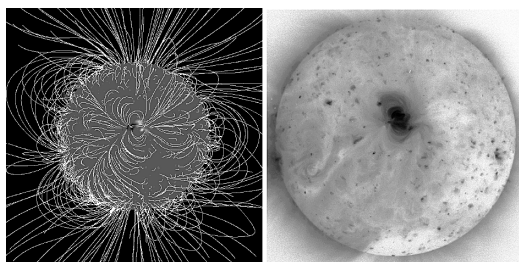


図1 (左) 光球磁場(白/黒: N/S極) (右) ひのでX線画像(対数スケールによるネガ表示: 黒いほど明るいコロナ)。

2. 「ひので」前の状況

コロナの観測において、米国が1960年代から1970年代にかけて実施した多数のロケット観測、複数のOSO衛星、そして宇宙実験室スカイラブで実施した観測を無視することはできない。これらにより、コロナが磁気的に加熱されていること、グローバルな単磁極領域では暗いコロナ(コロナホール: 図1-右の下側の暗い領域)が広が

り太陽風がそこから吹き出していること、コロナホール域以外は表面のN極とS極をアーチ状に結ぶコロナループでコロナが構成されることがわかった。当時は現在のCCDやCMOS検出器のような二次元電子素子が存在しなかったため、高解像観測には単位画素サイズが小さいフィルムを検出器として使用していた。感度の高い観測が必要などときには、二次元面上の観測点を一素子の高感度検出器に導くような観測が主流で、基本的に観測は低頻度であった。しかし、これらの観測からコロナの加熱に必要なとされるエネルギーフラックス(磁場の強い活動領域で $10^7 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, その外側の弱磁場の静穏領域で $10^5 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)が求められ¹⁾, その値は現在でも指標として使用されているほか、コロナループが定期的に加熱された場合に成立する温度, 圧力, ループ長間のスケリング則が見いだされている²⁾。

表面磁場から推定される磁気構造にほぼ沿った形でコロナループが観測されることから、磁気構造中に発生する電流の散逸や磁気構造に沿って伝播するアルヴェン波の散逸が加熱機構の有力な候補とされている。これらは上空のコロナに向かって延びていく磁力線が表面对流運動で並進運動したり、ひねられたり、ねじられたりしたときに発生するもので、その運動の時間スケールの違いで直流的な電流として現れるか、交流的な電流(アルヴェン波)として現れるかの違いがある。電流加熱の中で、ループを構成する多数の磁束がその足元の対流運動に長時間さらされた結果、磁気ループ内に局所的に逆方向を向いた磁気構造を粒状斑の表面对流運動で多数作り出し、磁力線のつながり(磁気リコネクション)によってループ内のプラズマをコロナの温度まで加熱する機構がパーカー博士の提唱した微小フレア仮説である^{3),4)}。

微小フレアによるコロナ加熱の可能性が真剣に考えられ始めたのは、大型気球に搭載した高感度硬X線スペクトル計の観測により1980年代に微小フレアが検出されてからである。観測された微

小フレア数は少数であったが、得られたべき型のエネルギー頻度分布が通常のフレアのものよりも急峻なことが示されたこと⁵⁾で、より微小なフレアの重要性が示唆され、エネルギーの小さいフレアの重ね合わせでコロナの加熱量が理解できるのではないかと考えられ始めた。この微小フレアを最初に撮像観測したのが、日本の太陽フレア観測衛星「ようこう」に搭載されたX線望遠鏡である。「ようこう」で捉えた微小フレアは、接近した複数の磁力線間の磁気リコネクションがかかわって発生する突発現象であり⁶⁾, 結果としてプラズマの熱化が起こる。磁場の配位によっては、この現象とともに「ようこう」で発見されたX線ジェットも同時に発生する。しかし、この微小フレアの寿命は長くても10分程度で、これと比べて長時間見え続けるほかの一般的なコロナループとは性質が明らかに異なっている。実際、べき型分布となる微小フレアのエネルギー E に関する頻度分布 $N(E)$ はフレアの頻度分布のおおよそ延長上にあり、その分布のべきの係数は1.7($N(E) \propto E^{-1.7}$)とサイズの大きいフレアと同等で、これを単に低エネルギー側へ延ばしたとしても、コロナに必要な加熱量を説明することはできない⁷⁾。

3. 「ようこう」から「ひので」へ

X線で観測されるコロナループの構造は、放射と熱伝導による冷却時間に比べて長時間にわたって維持されているように見える。また、1990年代半ば頃から極端紫外線(EUV)による衛星観測が開始され、これにより観測される温度の異なるコロナのループ構造は、長時間にわたってX線ループとは異なる空間を占めている(図2)。これは電離度の異なるイオンから放射される輝線観測で以前から知られていることで、その差の原因がどこにあるのかを理解することも重要である。一つには、それぞれのコロナループが根づいている表面の磁気構造の特徴の差にあるのかもしれない。

「ようこう」によるコロナの観測を実施してい

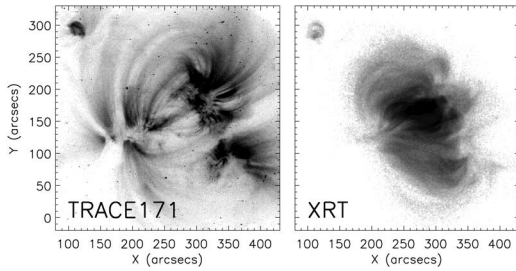


図2 活動領域コロナのループ構造。(左) TRACE衛星 171 Å EUV 画像 (~1 MK) (右) ひので X線画像 (>2 MK)。輝度は対数尺度のネガ表示で、黒いほど明るいことを示す。

頃、磁場に対して応答の異なる複数の吸収線を使った地上の偏光観測から、太陽表面に0.2秒角程度の直径をもった磁束管の存在が推定されていたが、理想的な条件下ではそれを解像可能な大口径望遠鏡でも大気揺らぎのためにその形状を磁場観測で捉えられない状態であった。コロナの生成の現場を理解するために、光球面上の磁場の形態を明らかにしてその運動を観測し、コロナでは微細な構造とその変動成分と速度構造を検出するような観測が強く望まれた。そうして誕生したのが、SOLAR-B(「ひので」)計画⁸⁾である。「ひので」衛星に搭載された観測装置については、本特集号の清水の記事を参照されたい。

「ひので」計画では、コロナ加熱問題について、観測・理論合わせて以下の三つの点の理解を大きく進めることを考えて提案された。

- ①アルヴェン波や電流は光球下でコロナの加熱に必要なだけ生成されるか?
- ②発生した波や電流は彩層・コロナに伝わっているか?
- ③輸送されたエネルギーはコロナ域でどのように熱化されるか?

「ひので」計画では、①を光球磁場と光球速度場によって、②を彩層の撮像観測から、そして③をコロナの撮像観測と撮像分光観測から明らかにしようとした。

4. ひので：コロナ加熱関連の成果

4.1 光球磁場の形態と上空へのエネルギー輸送

まず、可視光望遠鏡SOTによって光球面の対流泡である粒状斑が鮮明に捉えられ、磁場の観測から粒状斑の境界位置に直径約0.2秒角サイズで1 kGの磁場をもつ磁束管が存在して光球表面をはい回っていることが理解された。さらに、磁束管の形成されていく過程も明らかになった⁹⁾。磁気圧によってコロナ中に広がった磁気構造は、光球上の限られたエリアに磁束管の形態で集中していたわけである。しかし、「ひので」の解像度による磁場の撮像・偏光分光観測によって初めて、多くの磁束管は望遠鏡の解像度以上に広がっていないことや、一見一つの塊として観測される磁束管は十分に解像されていないことも同時に判明した¹⁰⁾。

コロナ加熱の観点では、この磁束管が光球面を運動することで上空にエネルギーが輸送されているという意味で光球面の観測は重要である。光球面の運動速度を求める従来のやり方は、連続画像中に観測される粒状斑などの形状変化から導き出すもので、取得される画像データの局所相関から面内の速度場が得られる。SOTの観測から得られた数多くの静穏領域(活動領域の外側)の観測から、光球面の速度場のパワースペクトルが得られている。この速度場の短時間変動分を取り込んだMHDシミュレーションから、静穏領域コロナやコロナホールといった磁場の弱い領域の加熱に必要なエネルギーがアルヴェン波成分で輸送可能であることが示されている¹¹⁾。また、磁束管の集合体の磁場と速度場の変動量の観測から、光球面から上空に向かうアルヴェン波成分のエネルギーフラックスが測定され¹²⁾、静穏領域の加熱には十分なエネルギーフラックスが光球とコロナの間にある彩層へ向かっていることがわかった。

1時間程度の時間スケールでゆっくりと光球面を移動していく磁束管群の動きは、上空に電流構造を作り出す。活動領域のコロナループが根づく

領域で、「ひので」の観測データを使って光球面から上空へ向かうエネルギーフラックスが評価され、コロナの加熱に必要な量が発生していることが示されている。同時に、この観測データの解析と磁気対流のMHDシミュレーションとの比較によると、「ひので」の観測データでは解像度が十分でないために、磁束管同士が絡み合う運動とそれによるエネルギー輸送量は過小評価されてしまっていると指摘されている¹³⁾。

SOTの観測データからは、図2に示されるような温度の異なるコロナループが根づく光球面の磁束管の特徴とその運動も調べられた。それらは光球面で顕著な差がないと報告されている¹⁴⁾。温度の高いコロナループの長さは、温度の低いものに比べて一般的に短いことが知られ、これを考慮すると定性的にはコロナへ注入されるエネルギーフラックスは温度の高いループのほうが大きくなる。今後の研究により、光球でのエネルギー注入量とコロナでの必要量との対応関係が詳細に示されることになるだろう。

4.2 彩層構造中のエネルギー輸送

光球とコロナの間にある彩層のジェット状構造(太陽研究者間ではスピキュールと呼ばれる; 本特集号の岡本の記事を参照)の横揺れしている様子が「ひので」の可視光画像観測から初めて得られた。地上では国内・海外ともに「ひので」よりも大口径の望遠鏡が数多くあることを考えれば、これはひとえに大気揺らぎのないスペースからの観測で解像度が安定して0.2秒角まで大きく改善したからである。「ひので」衛星の初期運用時に取得直後のデータより作成された動画を見て、その様相に一同驚嘆したことを思い出す。これは磁気構造に対して横方向に振動するアルヴェン波が観測的に直接捉えられたものとして理解されている。

このジェット構造の横揺れの解析から、上空のコロナに向かうエネルギーフラックスが評価され、静穏領域コロナやコロナホールの加熱に十分

とされるエネルギーが彩層中を通過していることが判明している¹⁵⁾。アルヴェン波によるコロナ加熱説を支持する研究者に歓迎される結果ではあるが、彩層とコロナの間には急激に密度が変化する領域があるため、このエネルギーの大半がコロナに到達するのは難しいと考える研究者も少なくない。このジェット状構造の上空にあるコロナの微細構造やその波動エネルギーフラックスを同様に測定できれば、「ひので」で観測されたこの種の波動のコロナ加熱への寄与についてはさらに理解が進むだろう。そのためには、今後SOTと同等レベルの解像度(X線望遠鏡XRTや極端紫外線撮像分光装置EISの解像度の5-10倍)でコロナの構造を詳細に観測する必要がある。

4.3 コロナ中の微細構造と速度構造

観測されているコロナの構造は、空間的にどのくらい詰まっているのだろうか。EISによる観測では二つの輝線の強度比から電子密度を診断することが可能で、明るさから観測される個々のループ構造の幅を定義し、それと輝線強度比から得られる電子密度からプラズマの占めている割合を推定することができる。場所よって変化するが、おおよそ空間占有率は5-10%程度であることが理解されている¹⁶⁾。EISの空間分解能が3秒角程度であることを考えると、一つの細いフィラメント状の構造であれば、その幅はおおよそ0.6-0.8秒角くらいだろうか。これは現在飛翔中の太陽観測衛星では分解できない構造である。

個々の構造を分解できないのであれば、ある空間サイズ内にどのくらいの温度をもった構造がどれだけあるかを測定し、それをある加熱モデルが生み出せるかを比較できるようにしておくのが良いだろう。EISは個々の輝線の感度の差こそあれ、 $10^{5.6}-10^{6.7}$ Kの範囲のプラズマの量を多数の輝線により測定できており、またXRTは $10^{6.5}$ Kより温度の高いプラズマからの放射に感度の重みをもった観測を行っている。これらを組み合わせた結果、活動領域中央部のループや静穏領域の温度構造

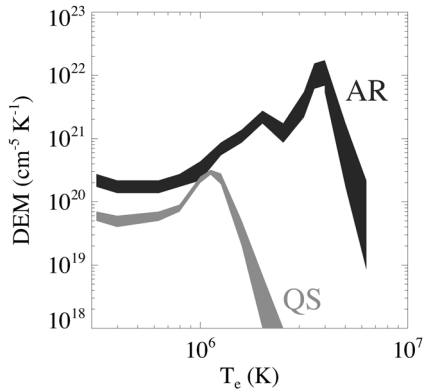


図3 活動領域コロナの中央部 (AR) と静穏領域コロナ (QS) の温度構造 (微分エミッションメジャー DEM) の模式図. 参考文献17-19より作成.

(微分エミッションメジャー: $DEM \equiv d(n_e^2 L)/dT$; 電子密度 n_e , 視線方向の構造長 L , 温度 T) が図3のように得られている¹⁷⁾⁻¹⁹⁾. この図では, より高温領域は不定性が大きいので省略している. 活動領域では, $10^{6.5-6.6}$ K にピークをもち, 僅かにより高温のプラズマがあることがわかる. これらの温度のプラズマの量は, 独立に加熱・冷却過程にある微細構造の集合体である. $10^{6.6}$ K 程度の温度成分をもつコロナループは, 概してループ長が短いため, アルヴェン波加熱が難しくなること²⁰⁾ や, このような温度を作り出すには, ループの足元に観測されているものに比べて, かなり大きな速度擾乱を与える必要があること²¹⁾ が最近の計算機シミュレーションから理解されてきている. このように, 活動領域の高温プラズマの生成の点でアルヴェン波加熱は旗色が良くない. 一方で, 光球表面の磁束管の運動に伴って形成されるコロナの微細電流構造の数値計算から, コロナ中に生み出される温度構造とそのDEMが計算され, コロナの微細構造と高温成分を同時に説明する試みが進んでいる²²⁾.

「ひので」によるコロナの観測で最も新しかったところは, これまでにない感度と速度精度でコロナ中のプラズマの運動を任意の場所で二次元的

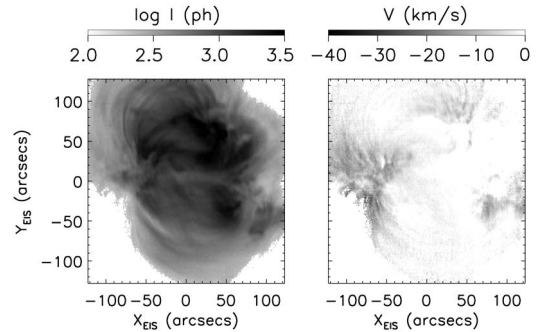


図4 EISによるFe XIV輝線観測. (左) 輝線強度 (光子数) (右) ドップラー速度 (青方偏移側のみ表示).

に捉えることができたことである (注: 太陽の縁より外では, 日食やコロナグラフによる分光観測で速度場は得られている). コロナが理想的に定常的に加熱されているとすると, コロナループ中のプラズマは静的で運動しない. 多くの研究者が考えているように, これが間欠的な加熱によるものだとすると, 磁気ループ内にプラズマの運動が発生する. 「ひので」以前のスペース観測では, 低感度のために広域の平均流速場だけが得られていた.

観測されたコロナの速度場 (図4) の特徴として, コロナループの足元などのコロナ下部で磁気構造に沿った 20 km/s の上昇流が観測されること, またこれと一緒に輝度は小さいがより高速の上昇流が観測され, なかにはコロナの音速に達する 100 km/s の速度成分をもつ上昇流があること, そしてそのような高速上昇流は観測装置の空間分解能以下の広がりしかもたない微細構造であることが挙げられる^{23), 24)}. 計算機シミュレーションの結果から, このような高速流が現れるには, コロナ下部に卓越した間欠的なエネルギー注入が必須である²⁵⁾. 高速の上昇流は加熱から間もないプラズマ流を, そして低速の上昇流は時間とともに緩和している途中の状態を観測しているのだろうか. いずれにしても, コロナの高いところへ向かってコロナ温度のプラズマが供給されている現

場が初めて捉えられたことになる。

この上昇流のもつ熱エネルギー量を見積もると、最大級フレアのエネルギーである 10^{32} erg の9桁下の 10^{23} erg (ナノフレアエネルギー) 程度となる²⁶⁾。この現象に伴う増光は、太陽面全体をモニターしている GOES 衛星の軟X線フラックスには検出されない微小なものである。

輝線のブルーシフトを示す上昇流には、波動成分が乗っているが、そのエネルギーのほとんどが上向きのスローモード波で、それがもつエネルギーフラックスは 10^3 - 10^5 erg cm⁻² s⁻¹ と活動領域コロナを加熱するには2桁以上足りない^{24), 27), 28)}。この波は加熱過程に伴った二次的な産物であろうと考えられている。いまのところ EIS による活動領域の観測に見られる波動の中に、アルヴェン波の兆候は捉えられていないが、これは構造に対して解像度が足りていないからなのかもしれない。というのは EIS よりも1桁解像度の高い SOT や IRIS 衛星の観測から、活動領域のコロナ中に浮かんでいるプロミネンスという彩層温度 (10^4 K) の構造が 10^6 erg cm⁻² s⁻¹ というエネルギーフラックスをもって横揺れしている^{29), 30)} ことが判明しているからである。ただし、この微細スケールの波動が活動領域コロナの加熱の一部は担うかもしれないが、見積もられたエネルギーフラックス量を見ると、この領域の主要な加熱源としての役割は果たさないように見える。

活動領域とは異なり、極領域に見られるコロナホール中ではアルヴェン波による加熱がコロナ加熱の主要素と考えられている。EIS によるこの極領域の観測から、アルヴェン波の減衰が表面から0.2太陽半径より外側で検出されたと報告されている³¹⁾。輝線幅に含まれる非熱的幅を磁力線に垂直に振動する波動の振幅と解釈すると、表面から0.2太陽半径以内ではアルヴェン波が減衰することなく惑星間空間方向へ伝わっていき、それ以外では波動の振幅が減少していくのである。輝線幅から推定される波の振幅やそれから評価された

エネルギーフラックスは、極域コロナの加熱とそこから吹き出す太陽風の加速に十分である。

5. おわりに

この稿では、コロナ加熱問題に対して「ひので」の観測から理解されてきたことについて概説した。それまでの観測との違いは、上空へのエネルギー注入現場の磁場と速度場を取得できたこと、波動加熱の主要素を担うアルヴェン波が解像度の向上により検出されたこと、同時に加熱されるコロナの微細構造サイズが推定できたこと、活動領域に特徴的なコロナの高温成分量がコロナループサイズで測定できたこと、コロナの速度場が得られて加熱の結果としてのプラズマの運動や波動を測定できたこと、にある。研究者によってこれらの捉え方は幾分違うだろうが、筆者の現時点の見立てを示すと、活動領域コロナでは主として電流加熱、そしてコロナホールでは主としてアルヴェン波加熱が効き、静穏領域ではどちらも同程度に寄与している可能性がある、となる。これらは、今後の検証の積み重ねを通してより明確になっていくだろう。

「ひので」で観測された微小フレアの詳細については、本特集中の石川の記事を参照されたい。磁場観測のない「ようこう」と異なり、同一衛星で取得される光球磁場とX線コロナの同時観測データから、表面への浮上や黒点周囲のフローにより移動する微小磁気ループの一方の磁極が異極と衝突する場所で、半数の微小フレアが発生していることが判明している³²⁾。この異極磁場が混在する状況は静穏領域ではありふれた状況であるが、図2のような活動領域コロナループの着地点では、同極の磁束群が粒状斑の対流運動によって運動している磁気配位とは異なっていて、別物と考えるべきであろう。ちなみに EIS で新たに観測された高速上昇流などは、図2の単極の磁束群中に観測されている。磁場配位は違っても、どちらも磁気リコネクションによるプラズマ加熱と考え

られるので、エネルギー頻度分布 $N(E)$ の係数が 1.7 程度のべき型分布となることが予想されるが、現象を引き起こす磁場配位の形成過程が異なるため、頻度の絶対値が両者で異なっているかもしれない。これも今後のデータ解析から明らかになるだろう。

「ひので」打ち上げ後には、より解像度の高いコロナ撮像望遠鏡を搭載した SDO 衛星の観測や HiC ロケット観測実験が米国で実施されている。特に 2012 年に実施された 0.3 秒角解像度の HiC の EUV 画像観測では、短時間ではあるが EIS で推定された微細スケールのコロナの構造が観測された^{33), 34)}。これは光球で生成される電流の空間スケールと同サイズの構造であり、同様のスケールの構造はコロナループが冷却して磁力線に沿って流れ落ちるプラズマとしても観測されるようになってきた³⁵⁾。これらの微細構造がどのように生成されているか、そしてその微細構造中に潜んでいるかもしれないアルヴェン波の波動エネルギー量を知るために、HiC で実現された解像度でコロナを衛星から撮像観測・分光観測することが重要になってきている。このとき、コロナ中の電流構造を直下の光球・彩層磁場の情報から同時に得られるようになれば、この問題を終結させる観測となるのではないだろうか。

参考文献

- 1) Withbroe G. L., Noyes R. W., 1977, ARA&A 15, 363
- 2) Rosner R., et al., 1978, ApJ 220, 643
- 3) Parker E. N., 1972, ApJ 174, 999
- 4) Parker E. N., 1988, ApJ 330, 474
- 5) Lin R. P., 1984, ApJ 283, 421
- 6) Shimizu T., et al., 1992, ApJ 44, L147
- 7) Shimizu T., et al., 1995, PASJ 47, 251
- 8) Kosugi T., et al., 2007, Solar Phys. 243, 3
- 9) Nagata S., et al., 2008, ApJ 677, L145
- 10) Stenflo J. O., 2011, A&A 529, A42
- 11) Matsumoto T., Shibata K., 2010, ApJ 710, 1857
- 12) Fujimura D., Tsuneta S., 2009, ApJ 702, 1443
- 13) Yeates A. R., et al., 2014, A&A 564, A131
- 14) Kano R., et al., 2014, ApJ 782, L32
- 15) Okamoto T., De Pontieu B., 2011, ApJ 736, L24
- 16) Warren H. P., et al., 2008, ApJ 686, L131
- 17) Warren H. P., et al., 2012, ApJ 759, 141
- 18) Winebarger A. R., et al., 2012, ApJ 746, L17
- 19) Brooks D. H., et al., 2009, ApJ 705, 1522
- 20) Antolin P., Shibata K., 2010, ApJ 712, 494
- 21) Asgari-Targhi M., et al., 2014, ApJ 786, 28
- 22) Dahlburg R. B., et al., 2016, ApJ 817, 47
- 23) Hara H., et al., 2008, ApJ 678, L67
- 24) Nishizuka N., Hara H., 2011, ApJ 737, L43
- 25) Antolin P., et al., 2008, ApJ 688, 669
- 26) Hara H., 2009, ASPC 415, 252
- 27) Wang T. J., et al., 2009, ApJ 696, 1448
- 28) Kitagawa N., et al., 2010, ApJ 721, 744
- 29) Okamoto T., et al., 2007, Science 318, 1577
- 30) Okamoto T., et al., 2015, ApJ 809, 71
- 31) Hahn M., Savin D. W., 2013, ApJ 776, 78
- 32) Kano R., et al., 2010, ApJ 720, 1136
- 33) Cirtain J. W., et al., 2013, Nature 493, 501
- 34) Brooks D. H., et al., 2013, ApJ 772, L18
- 35) Scullion E., et al., 2014, ApJ 797, 36

Coronal Heating: Issues Revealed from Hinode Observations

Hirohisa HARA

SOLAR-C Project Office, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: The solar corona, which is visible in the total eclipse of the Sun, is a tenuous hot atmosphere of a million degree. We review the remarkable observations on coronal heating that Hinode has achieved.