

# 「ひので」衛星により見え始めた 熱的非平衡プラズマ

今田 晋亮

〈名古屋大学宇宙地球環境研究所 〒464-8601 名古屋市千種区不老町〉

e-mail: shinimada@stelab.nagoya-u.ac.jp



太陽コロナ中ではプラズマ同士が適度に衝突するため、地球磁気圏尾部のような無衝突プラズマ環境とは違い、プラズマは熱的に平衡状態に達していると考えられてきた。これまでの太陽コロナ観測（特に紫外線・X線分光観測）は時間分解能がそれほど高くなかったため、熱的平衡プラズマを仮定した考察で十分であった。「ひので」衛星の観測が始まり、これまでできなかった短い時間スケールで現象を議論できるようになった。さらに、これまで以上に高い波長分解能で、かつ多波長同時観測ができるようになった。その結果、粒子種間での温度非平衡や電離非平衡など、熱的非平衡プラズマの議論が可能となった。近年、太陽物理学分野だけでなく、X線天文学をはじめとしたさまざまな天文学の分野で熱的非平衡プラズマに関心が集まっており、今後の発展が期待される。

## 1. 熱的非平衡プラズマとは

一般に無衝突プラズマでは粒子間でのクーロン衝突による運動量交換のタイムスケールが非常に長いので、プラズマは熱的に非平衡状態になる。実際には無衝突プラズマでは、クーロン衝突によるプラズマ同士の相互作用より、電磁場を介した相互作用のほうが短い時間で行われ、非平衡状態を緩和していく。たとえば、地球磁気圏プラズマのように、現象の空間スケール ( $10^5$  km) がクーロン衝突のスケール (1天文単位) より非常に小さい完全無衝突プラズマでは、熱的に非平衡なプラズマ環境になる<sup>1)</sup>。実際に地球磁気圏では直接その場観測によってプラズマが計測されており、イオンと電子の温度が異なるなど熱的非平衡なプラズマが観測されている<sup>2)</sup>。一方、太陽コロナのような弱衝突プラズマ環境では、現象によっては、空間スケールと衝突のスケールが同程度になる。そのため、太陽コロナは熱的に平衡・非平衡性の両者を兼ね備えたプラズマ環境と言える。

熱的非平衡プラズマは大きく分けて (1) 非Maxwellianエネルギー分布関数、(2) 粒子種間での温度非平衡、(3) 電離非平衡、の三つが考えられる。(1) はプラズマの速度分布関数がMaxwell分布からずれた分布をしている状態であり、一般に同種プラズマの衝突によって緩和されるため最も短い時間で平衡に達する。(2) はイオン-電子間などの異種プラズマでの衝突によって緩和していくため (1) のような同種プラズマ間の衝突による緩和に比べて緩和時間は長くなる。(3) も異種プラズマ間での衝突により緩和するが、電離が数段階に及ぶことがしばしばあるため、さらに緩和時間は長くなる。

非Maxwellianエネルギー分布関数に関しては、「ようこう」時代から高エネルギー (10-100 keV程度) 粒子加速問題<sup>3)</sup> として議論されてきた。また近年、紫外線分光観測によるkappa分布を仮定した超熱的粒子加速に関する太陽物理学で議論されるようになってきた<sup>4)</sup>。しかし、熱速度程度 (100-1,000 eV程度) のエネルギーのプラズ

マに関しての考察はほとんどされていない。また粒子種間での温度非平衡は、いくつか議論はあるものの<sup>5)</sup>、観測の困難さから、こちらもこれまで十分な議論は行われてきていない。一方で、電離非平衡プラズマに関しては近年活発に議論されつつある。例えば、太陽コロナのプラズマを加熱する際、瞬間的に電離非平衡状態になることが示唆されており、太陽コロナ加熱問題を考えるうえで電離過程の考察は重要だと考えられている<sup>6)</sup>。また、彩層プラズマの電離状態は輻射輸送プロセスに多大な影響があることが知られており、彩層の観測を理解する上で電離非平衡の議論は重要である<sup>7)</sup>。

これまでほとんど議論されてこなかった熱的非平衡プラズマが「ひので」衛星打ち上げ以後、徐々に注目を集めている。ここでは、「ひので」衛星の観測によって明らかになった熱的非平衡プラズマ観測の例として、活動領域における粒子種間での温度非平衡、および太陽フレア時の電離非平衡に関する観測結果を紹介する。

## 2. 太陽コロナにおけるイオン温度

太陽物理学の重要課題の一つにコロナ加熱の解明が挙げられる。6,000度の太陽表面(光球)の上空にどのようにして100万度のコロナを作るかという問題である(本特集号原記事<sup>8)</sup>参照)。加熱過程として波動加熱説やマイクロ・ナノフレア加熱などいくつかモデルは提唱されているもののいまだ明らかになっていない。このコロナ加熱問題に関しても、これまで熱的平衡プラズマを仮定し、いわゆる一流体の電磁流体力学の枠組みで議論されてきた。たとえば、イオンと電子はいつも同じ温度であり、イオンと電子のどちらが加熱されるかは区別しない。しかし、イオンを加熱する物理素過程と電子を加熱する物理素過程は通常異なり、物理素過程の理解という意味において、イオンが加熱されているのか、電子が加熱されているのか区別することは非常に有益である。

太陽コロナにおいて、イオンと電子どちらが加熱されているのかを理解するため、われわれは「ひので」衛星に搭載されている極端紫外線撮像分光装置(EIS)を用いて太陽の縁における活動領域近傍のイオン温度( $T_{ion}$ )と電子温度( $T_e$ )を別々の方法を用いて考察した<sup>9)</sup>。イオンの電離は電子との衝突によって進行するため、一般にイオンの電離階数から電子温度を決めることが可能である。図1はEISによる活動領域の観測で、左側は鉄イオン(a: Fe VIII 50万度, c: Fe XII 150

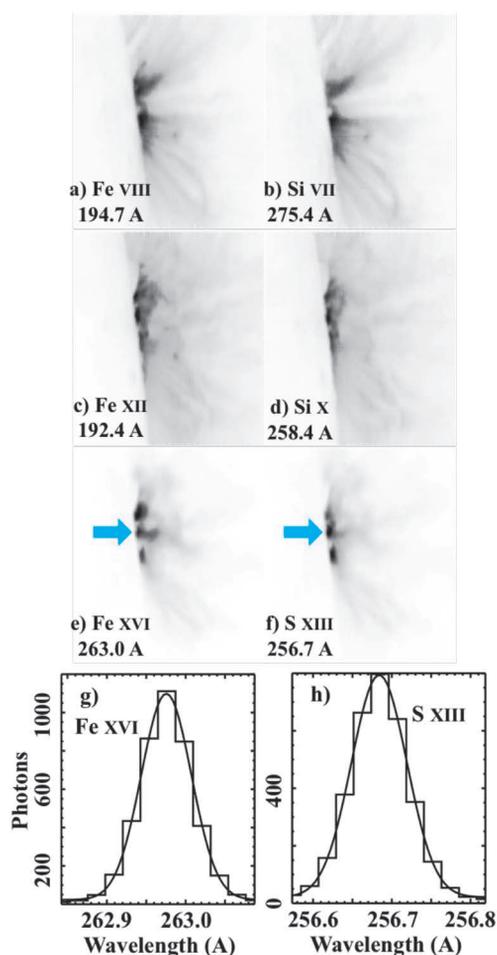


図1 a-f: 「ひので」衛星搭載EISによる太陽縁付近の活動領域の観測。g-h: 15階電離した鉄イオンおよび15階電離した硫黄イオンからの輝線スペクトルの例。

万度, e: Fe xvi 250万度) からの輝線強度を観測したもので, 右側はケイ素 (b: Si vii 50万度, d: Si x 150万度) および硫黄イオン (f: S xiii 250万度) からの輝線強度を観測したものである. 左右で画像が非常に似ているのは, どちらも同じ程度の電子温度を反映しているためである. 大抵は, この電子温度がイオン温度と同じだと考えてプラズマ温度とみなすのであるが, ここでは別の方法でイオンの温度を決めることを試みる. 図1 g-hはEISで観測した輝線 Fe xvi および S xiii のスペクトルの例である. 横軸は波長を表し, 縦軸は光子数を表している. 光子の分布はガウス分布に従うことがわかる. 波長方向のズレはいわゆるドップラーシフトを表し, プラズマの視線方向の速度を表す. 一方, 輝線の幅 ( $W_{\text{obs}}$ ) は, 観測装置起因による広がり ( $W_I$ ), イオンの熱速度による広がり (熱的幅), 熱的でない要因による広がり (乱流・波動など, 非熱的幅と呼ぶ), の三つの要素から構成されており, 式(1) のように記述できることが知られている ( $k_B$ : ボルツマン定数).

$$W_{\text{obs}} = \sqrt{W_I^2 + 4 \log 2 \left( \frac{2k_B T_{\text{ion}}}{M} + \xi^2 \right)} \quad (1)$$

観測装置起因の幅はわかっているが, 一般に非熱的幅とイオン温度を区別することはできない. しかし, 式(1) からわかるように熱的幅は輝線を放出するイオンの質量 ( $M$ ) に依存するが, 一方で非熱的幅 ( $\xi$ ) は質量にはよらない. そこで, 質量の違う同じ程度の電子温度を反映するイオンからの輝線ペア (ここでは Fe xvi (質量:  $M_1$ ) と S xiii (質量:  $M_2$ ) を用いる) を用いればイオン温度を評価することができる (詳細は Imada et al.<sup>9)</sup> を参照). 簡単な算術の後, イオン温度は二つの輝線幅を用いて以下のように記述することができる ( $\hat{W}^2 \equiv W_{\text{obs}}^2 - W_I^2$ , 下付き数字の1および2はイオンの種類を表す).

$$T_{\text{ion}} = \frac{\hat{W}_1^2 - \hat{W}_2^2}{8k_B \log 2} \frac{M_1 M_2}{M_2 - M_1} \quad (2)$$

実際にこの方法を用いて活動領域のイオン温度を評価してみると, ほとんどの領域でイオン温度も電子温度と同じ250万度であることが確認された. しかし, 活動領域の中心部分 (図1矢印) のイオン温度を計測すると400万度近くになっていることがわかった. この観測により, 活動領域中心では激しいイオンの加熱が起きていることが明らかになった. 活動領域における熱的非平衡プラズマを初めて捉えた観測である. 「ひので」衛星により, 高い波長分解能で多波長同時観測ができるようになった賜物である.

### 3. 太陽フレアにおける電離非平衡プラズマ

次に, 太陽系最大の爆発現象である太陽フレアで観測された電離非平衡プラズマについての研究例を紹介する. 太陽フレアにおけるエネルギー解放の起源である磁気リコネクション領域の観測および電離非平衡プラズマの詳細な議論は天文月報の今田記事<sup>10)</sup> および Imada et al.<sup>11), 12)</sup> にあるのでそちらを参照されたい. 今回は, 特に太陽フレアの際に観測される彩層蒸発流に絞って紹介する.

図2a, bは2010年11月6日に起きたフレアを Solar Dynamics Observatory (SDO) が捉えたものである. 図2aはフレアの極めて初期の時間の

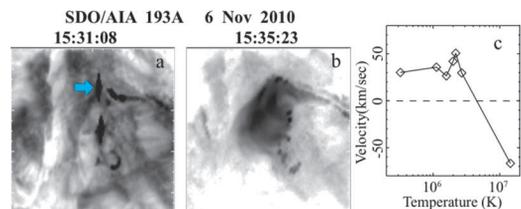


図2 a, b: SDO衛星193A (主に150万度程度のプラズマを表す) による太陽フレアの観測. c: 「ひので」EISによる彩層蒸発流の観測. 速度と温度の関係を示している.

観測であり、図2bはその少し後の様子を捉えたものである。図2aではまだポストフレアループと言われるループ状の高温のプラズマが見えておらず、足元だけが光っている状態である。コロナ上空でフレアによって解放されたエネルギーが、足元の彩層に注入された直後を捉えたものだと解釈できる。その後、数分かけて急速に加熱されたプラズマが足元から湧き上がってきて、ポストフレアループを埋め尽くす。この現象を彩層蒸発と呼ぶ。この彩層蒸発の様子を「ひので」衛星搭載のEISが捉えることに成功した。図2cはEISが捉えた彩層蒸発流の速度と温度の関係を示した図である(図2aの矢印の場所のもの)。彩層蒸発流の観測は「ひので」衛星以前からよく調べられており、温度との関係も「ひので」衛星が初めて観測したわけではない<sup>13)</sup>。しかし、「ひので」衛星の高い時間分解能により新たな発見があった。太陽大気は1万度程度の彩層の上に非常に薄い遷移層を挟んで100万度のコロナが形成されている。この大気構造のため、彩層蒸発流は通常100万度より低い温度では下降流、高い温度では上昇流が観測される。ところが、フレアのごく初期には図2cにあるように高温(300万度)のプラズマでも50 km/sの下降流を示すフレアが存在することが発見された。理論的にこの結果を再現しようと多くの研究者が取り組んだが、適切な条件でFe xvやFe xviの数百万度程度に対応する輝線で下降流を作ることは非常に難しかった。われわれはこの問題を、電離非平衡プラズマおよび熱伝導項の修正という新しい二つの視点を取り入れて考察することで解決した(詳細はImada et al.<sup>14)</sup>を参照)。図3はその彩層蒸発の数値シミュレーション結果で、フレアが起きてから僅か40秒後の結果である。上から順に、密度、速度、温度、規格化された輝線強度(Fe xv)、輝線強度に速度を掛けてフラックスにしたもの(マイナスが下降流を表す)を表す。横軸はフレアループの磁力線に沿った足元からの距離を表している。図3d,eの点線が電離平衡

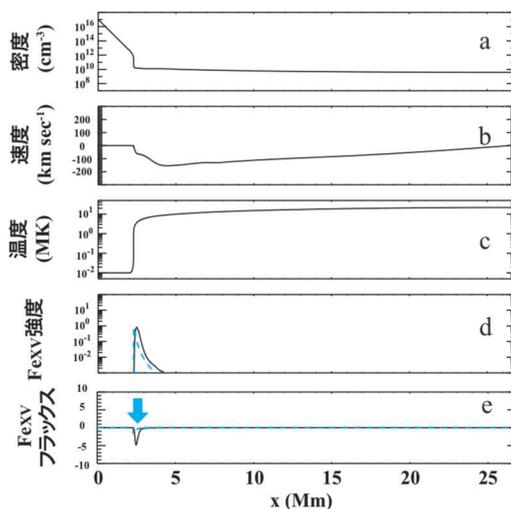


図3 電離非平衡を考慮した彩層蒸発の数値シミュレーション結果。矢印の位置でFe xvフラックスが負の値を示しており、下降流が形成されていることがわかる。

を仮定した計算結果であるのに対し、実線が電離非平衡まで考慮した計算結果である。結果、Fe xvの下降流は電離非平衡まで考慮することによって見事に再現できることを示している。さらに、この40秒後には数百万度の下降流は消失しており、これも観測事実をよく再現できている。「ひので」衛星により、これまでできなかった短い時間スケールのダイナミクスを議論できるようになり、プラズマの電離非平衡状態の考慮が観測を解釈するうえで必要となってきた。太陽物理学において熱的非平衡プラズマを議論できる時代が到来したのである。

#### 4. おわりに

「ひので」衛星により、コロナが発する多数の極端紫外線域の輝線を高時間分解能かつ高波長分解能の輝線スペクトルとして同時に観測できるようになった。その結果、熱的非平衡プラズマの議論が可能となり、これまで考えなかった新しい物理要素を議論するときがきた。しかし、「ひので」衛星をもってしても、時間分解能は熱的非平衡プラ

ズマの議論をするためには十分ではなく、熱的非平衡プラズマのごく初歩的な解析・考察をするにとどまっており、先に述べたコロナ加熱における物理過程を区別するなどの段階には、残念ながら及んでいない。現在、次世代太陽観測衛星Solar-Cの検討が進んでおり、「ひので」衛星より1桁程度時間分解能を向上させた紫外線の撮像分光装置を搭載することが検討されている。Solar-Cの時代には、この熱的非平衡プラズマの議論が格段に進むことが期待できる。また、近年さまざまな研究業界で非平衡プラズマの議論が活発にされ始めている。例えば「すざく」衛星による超新星残骸のX線観測を、電離非平衡の観点から考察し、親星の活動性や周辺環境の議論がされている<sup>15)</sup>。このように熱的非平衡プラズマの観測および理論的考察は、太陽物理学だけでなく、さまざまな天文学の分野に応用可能であり、今後分野間で連携してさらに発展させていくことが期待される。

### 参考文献

- 1) Terasawa T., et al., 2000, Adv. Space Res. 26, 573
- 2) Baumjohann W., et al., 1989, J. Geophys. Res. 94, 6597
- 3) Masuda S., et al., 1994, Nature 371, 495
- 4) Jeffrey N. L. S., et al., 2016, A&A 590, 13
- 5) Seely J. F., et al., 1997, ApJ 484, L87
- 6) Bradshaw S. J., Mason H. E., 2003, A&A 407, 1127
- 7) Martinez-Sykora J., et al., 2016, ApJ 817, 46
- 8) 原弘久, 2016, 天文月報109, 533
- 9) Imada S., et al., 2009, ApJ 705, 208 L
- 10) 今田晋亮, 2014, 天文月報107, 206
- 11) Imada S., et al., 2011, ApJ 742, 70
- 12) Imada S., et al., 2013, ApJ 776, L11
- 13) Miligan R., et al., 2006, ApJ 638, L117
- 14) Imada S., et al., 2006, Phys. Plasma 22, 101206
- 15) 山口弘悦, 2015, 天文月報108, 795

### Thermal Non-equilibrium Plasma Observed by Hinode

**Shinsuke IMADA**

*Institute for Space-Earth Environment Research (ISEE), Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan*

Abstract: I review Hinode EUV observations of the thermal non-equilibrium plasma and their interpretations. Thanks to its high temporal and spectral resolution, we can now discuss the characteristics of thermal non-equilibrium plasma in the corona.