

極端紫外線分光観測で探る 太陽フレアに伴う高温の高速流



今田 晋亮

〈名古屋大学太陽地球環境研究所 〒464-8601 名古屋市千種区不老町〉

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

太陽フレアは太陽系における最大の爆発現象である。1時間程度の時間で 10^{32} ergものエネルギーを解放し、電波からX線まであらゆる波長で増光する。この太陽フレアは、コロナと呼ばれる高温な太陽大気中に蓄えられた磁場のエネルギーを短い時間で磁気再結合（磁気リコネクション）によって解放していると考えられている。太陽フレアが磁気リコネクションによって引き起こされている場合、高温（数千万度）の高速流（～毎秒1,000 km）が発生することが理論的に予言されている。しかしながら、これまで観測的にこの高温高速流が捉えられた事例はほとんどない。今回、われわれは「ひので」衛星搭載の極端紫外線撮像分光装置（EIS）を用いてフレア領域の上空に高温の高速流の観測に成功し、初めてその2次元的な構造を分光観測によって明らかにした。

1. 太陽大気における磁気リコネクション

太陽大気における突発的な増光現象は1859年にイギリスの天文学者リチャード・キャリントンによって、世界で最初に可視光で観測された¹⁾。現在では、この突発的増光現象は太陽フレアと呼ばれており、太陽コロナと呼ばれる高温大気層で1時間程度の中に 10^{32} ergものエネルギーを解放し、電波からX線まであらゆる波長で増光する現象であることがわかっている。さらに、太陽フレアはしばしば太陽地球環境に多大な影響を及ぼし、磁気嵐やオーロラ発生など、地球環境にも影響を与えることが知られている。実際、キャリントンイベントでは磁気嵐、デリンジャー現象などが観測されたことが報告されている。

このような太陽系最大の爆発現象である太陽フレアがどのようにして起こるのか、長い間謎であった。その発見から約100年後、磁気リコネクションという物理メカニズムが提唱された²⁾ (図1)。

磁気リコネクションは図1aのような反平行磁場配位（電流層）において蓄えられた磁気エネルギーを非常に速い速度でプラズマのエネルギーに変換するメカニズムであり、太陽フレアのような突発的現象を説明しようとして脚光を浴びた。ピーター・スイートとユージーン・パーカーは、スイート・パーカーモデルと呼ばれる定常状態に落ち着いた磁気リコネクションの状態を記述するモデルを確立した^{3), 4)} (図1b)。しかし、このモデルでは磁気散逸領域へのプラズマ流入速度が磁気レイノルズ数の平方根に反比例し、太陽コロナのような磁気レイノルズ数が大きい環境では短時間のうちに太陽フレアに必要なエネルギーを散逸できないことが指摘されていた。しかし、後にハリ・ペチェックによってペチェックリコネクションモデルが提唱された⁵⁾。彼はスイート・パーカーのメカニズムに加え、衝撃波領域が形成されることを考えた (図1c)。その結果、プラズマ流入速度は磁気レイノルズ数に対して対数の逆数依存性になり、大きな磁気レイノルズ数におい

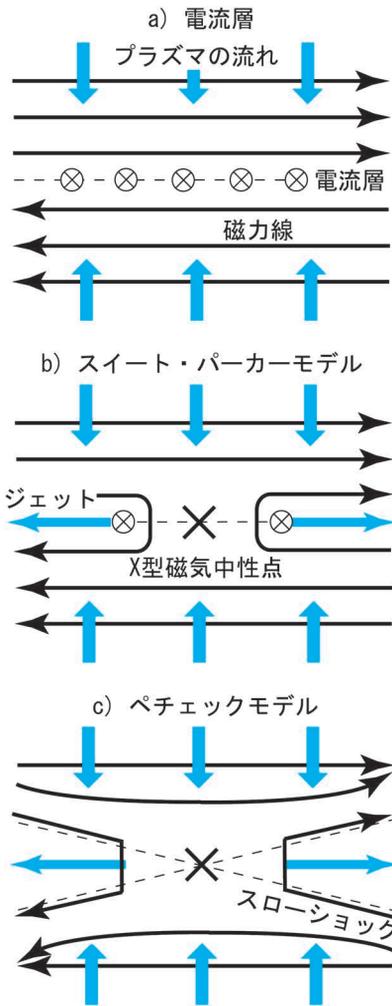


図1 磁気リコネクションの概念図。aは磁場のつなぎ変わりが起きる直前の電流層を表しており、上下に反平行磁場が存在しており、中央部に流れている電流で支えられていて、中心に向かってプラズマが流れ込んでいる。bはスイート・パーカーリコネクションを表しており、中央部にX型磁気中性点が存在しており上下からプラズマの流れがあり、左右に高速の流れが存在する。cはペテックリコネクションを表しており、衝撃波がX型磁気中性点より左右上下に伸びている様子が表されている²⁾。

でもエネルギー解放速度が遅くなることはなくなった。このような経緯を経て、現在では、磁気リコネクションは太陽フレアを説明する代表的なプロセスとして広く認められている。

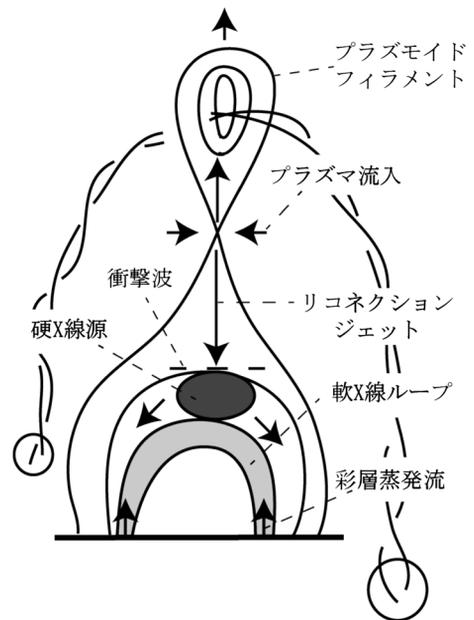


図2 太陽フレア標準モデルの概念図¹⁰⁾。軟X線ループ・硬X線源の上空で磁気リコネクションが起こっていると考えられている。(Reproduced by permission of AAS.)

太陽フレアの起源は磁気リコネクションであるとする、いったいどのような磁場構造が太陽コロナで磁気リコネクションを引き起こしているのであろうか。磁気リコネクションが提唱されて間もなくの1960-70年代に数多くの議論がなされた。最終的に、標準モデルの確立に貢献した5名の名前の頭文字をとってCSHKPモデル⁶⁾⁻⁹⁾という太陽フレアの標準モデルが提唱され、現在においても多くの太陽物理学者に支持されている。この標準モデルによると、図2のように太陽コロナ活動領域の磁場が変形され、太陽コロナ活動領域の上空に電流層と呼ばれる反平行磁場領域を形成し、そこで磁気リコネクションが生じる¹⁰⁾。この磁気リコネクションにより高速のアルペン速度程度（毎秒1,000 km）の双方向流（図2のリコネクションジェットに対応）が発生する。また、この高速流は磁気リコネクションによる激しい加熱を受けており、非常に高温（数千万度）であると

考えられる。この急速な加熱に伴って、大量の熱が熱伝導により彩層に注入され、彩層蒸発が起こり、大量の加熱された彩層起源のプラズマがフレアループの中を埋め尽くす。その結果として、特に軟X線領域でフレアループは激しく輝くと考えられている（図2の軟X線ループに対応）。これらの太陽フレア標準モデルから推定される性質の大部分は近代の衛星撮像観測によって検証された。例えば、図3は「ようこう」衛星によって観測された軟X線で捉えたフレアループ^{11), 12)}で、カスプのような先のとがった形状をしていることがはっきりとわかる。これは太陽フレア標準モデルで考えられてきたフレアの構造のうち、太陽側の下半分が軟X線で捉えられていると考えられており、標準モデルで説明できる太陽フレアが実際に起こっている証拠となった。そのほか、フレア領域へのプラズマ流入¹³⁾、フレアループ上空の高速流¹⁴⁾、プラズモイド放出¹⁵⁾、彩層蒸発流¹⁶⁾、フレアループ上空の硬X線源¹⁷⁾、など多くの太陽フレア標準モデルの証拠が観測的に示された。

その後、2006年に打ち上げられた「ひので」衛星や2010年に打ち上げられたSolar Dynamics Observatory (SDO) 衛星により、フレアに伴う磁気リコネクション周辺領域の観測はさらに進ん

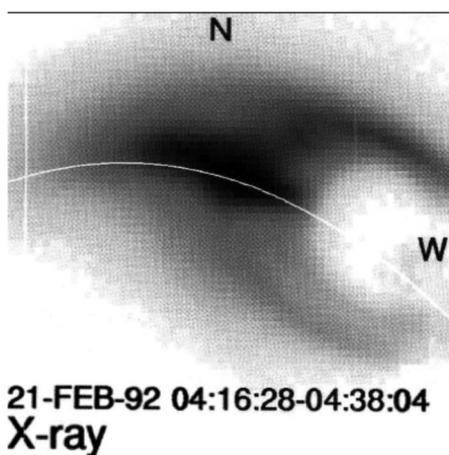


図3 「ようこう」衛星によるカスプフレアの軟X線撮像観測¹²⁾。(Reproduced by permission of AAS.)

だ。一方で、磁気リコネクション領域そのものの観測およびプラズマ環境の診断はあまり進んだとは言えないのが現状である。磁気リコネクション領域は小さく、そして密度が低く暗いと考えられており、いくつか例はあるものの¹⁸⁾、現代の衛星観測をもってしても希にしか観測することができないのが現状である。

2. 極端紫外線分光撮像装置 (EIS) による太陽フレア観測

2012年1月27日に西の縁で起こったXクラス(GOES軟X線強度によるクラス)フレアを「ひので」衛星および「SDO」衛星が観測することに成功した。このフレアは「ひので」衛星が初めて縁で観測したXクラスのフレアである¹⁹⁾。「ひので」衛星に搭載されているEISは極端紫外線領域において、分光観測を行い、太陽大気の診断を行う観測装置である。EISの観測波長(波長17~30 nm)は、太陽の大气層である遷移層(温度:数万~100万度)、コロナ(約100万度)、およびフレアプラズマ(約1,000万度)からの極端紫外線領域のさまざまな輝線を観測できるように設計されている。また分光観測することで、遷移層からコロナまでのプラズマの温度、速度、および密度などを診断することが可能である。今回のEIS観測により、フレアループ上空の高温高速流のプラズマパラメータおよびその2次元構造を初めて分光観測によって明らかにすることができた。

図4は「SDO」衛星に搭載されているAtmospheric Imaging Assembly (AIA)が193 Åのフィルターを用いて観測した結果である。193 Åのフィルターで観測した太陽コロナは、鉄が11階電離した鉄イオン(FeXII: およそ150万度のプラズマに対応)から出る光に対応しており、通常のコロナプラズマの運動を議論するために用いられるが、実は193 Åのフィルターを用いた観測には鉄イオンが23階電離したFeXXIVの輝線も含まれており、1千万度くらいのプラズマにも感度があ

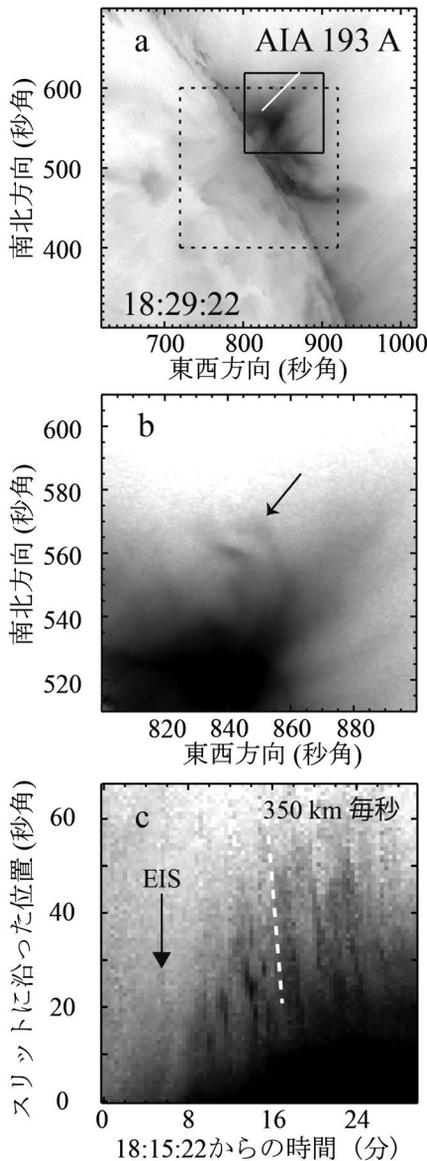


図4 (a)「SDO」衛星による193 Åフィルターを用いた太陽の縁で起こったフレアの全体像。点線はEISの観測視野を、実線の四角は拡大する領域(b)を、白線はcを作成するのに用いたスリットの位置を表している。(b) aの実線の領域の拡大図¹⁹⁾。矢印の先に太陽の表面に向かって高速で動くループが見える。(c) aのスリット上の明るさの時間変化。右下に向かって筋模様が見える。これはbで捉えられたループがスリットの下方向に高速で動いていることを表す。EISは図5dの輝線スペクトルが観測された時間を表す。(Reproduced by permission of AAS.)

る。したがって、フレアのような数千万度の高温プラズマを議論するのもも有用である。図4aおよび拡大図のbにおいて、カスプのような構造をしたフレアループが見えるが、その30秒角(1秒角はおよそ750 km)程度上空にU字型をひっくり返した構造が確認できる(図4bの矢印参照)。フレア標準モデルによれば、このU字型のループはフレアループの上空で磁気リコネクションによってつながり変わった後のループであると解釈できる。ここでは動画は紹介しないが、このU字型のループ構造は高速で太陽面に向かって飛んでいくことが確認されている。図4cはフレアループの上空(白い線で図4aに示されている領域)の時間発展を示している。図4cを見るとフレアループが下から徐々に上空に向かって発展し、15分程度(図4cの横軸で8-23分)の間に20秒角程度、高さを増していることがわかる。また、フレアループの成長とともに、上空からプラズマ(図4bのU字型ループに対応)が落ちてきている様子が見える。その落下速度は図4cの白い点線の傾きから見積もることができ、およそ毎秒350 km程度で落下していることがわかる。

このフレアは「ひので」衛星、なかでもEISによってフレアの立ち上がりから観測されており、分光観測によってプラズマを診断することが可能で、速度や温度などを見積もることが可能である。図5は「ひので」EISによるFeXXIV(23階電離した鉄イオンからの光)192.03 Åの観測結果である。FeXXIVは数千万度の非常に高温なプラズマを表している。図5bはFeXXIVの強度分布を表しており、先ほどのAIA 193 Åの画像と基本的には同じものである。図5bにあるフレアループ(図5bの○マーク箇所)の輝線スペクトルは192.03 Åを中心として対象なガウス分布をしていて、プラズマは視線方向にほぼ静止していることがわかる(図5e)。図5aはFeXXIVの輝線より0.2 Å短波長側の強度分布を表している。FeXXIVの短波長側を観測することで、どのくらいの量のプラズマが

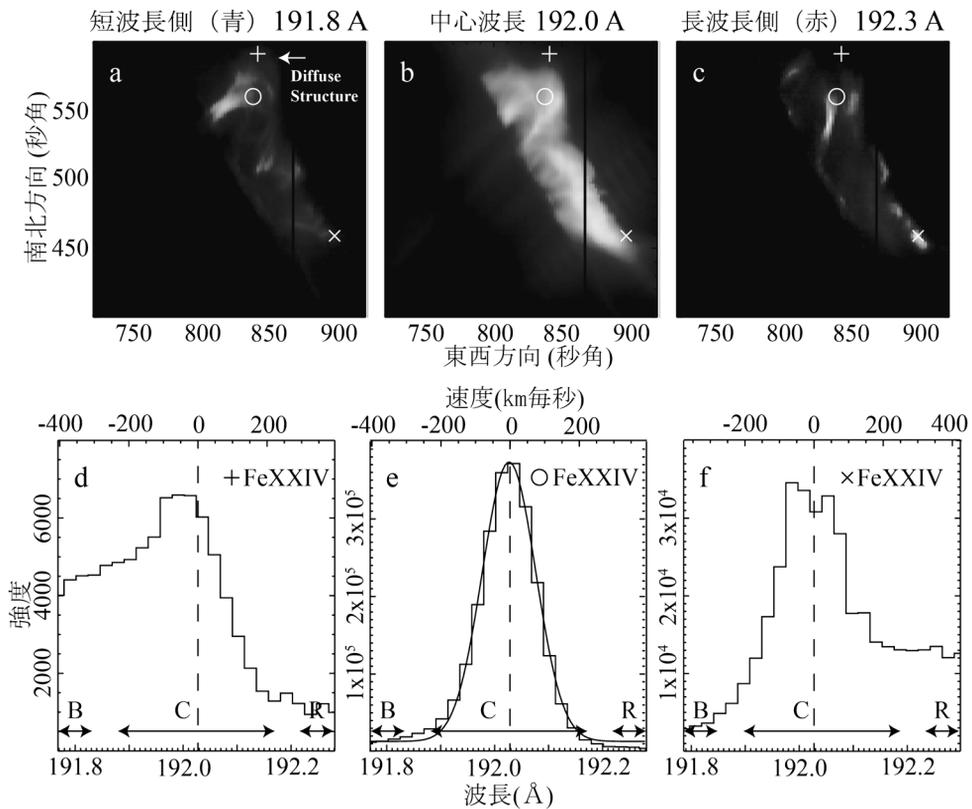


図5 「ひので」EISによるフレア観測。a) FeXXIVの短波長側, b) FeXXIVの波長中心, c) FeXXIVの長波長側の強度分布。d) +記号の場所, e) ○記号の場所, f) ×記号の場所のFeXXIVの輝線スペクトル¹⁹⁾。(Reproduced by permission of AAS.)

視線手前方向（紙面垂直手前方向）に飛んでいるかを理解することができる。0.2 Åのドップラーシフトはこの波長ではおよそ毎秒400 kmに対応している。EIS観測は分光観測であり波長方向の情報が取得可能で、AIAのようなイメージング観測と違い、このような特定の速度成分のみを抽出することが可能である。図5cはその反対で、毎秒400 kmで視線奥側方向に運動しているプラズマを表している。図5aとbを比較すると、形状が明らかに異なる箇所が多いことがわかる。なかでも、図5aにはフレアループ上空に図5bでは見えない構造が見える（図5aの+マーク箇所）。この領域はまさにAIAで高速の下降流が観測されていた領域であり、このブルーシフトしたプラズマはフレアに伴う高速流であると考えられる。その輝線ス

ペクトルは図5dで表されており、輝線スペクトルの形状は192.03 Å付近にピークをもち、そこから短波長側の強度が長波長側のそれより高い非対称なプロファイルを示していることが見て取れる。これは、確かに毎秒400 kmで視線手前方向に運動しているプラズマが卓越していることを表している。一方で長波長側が卓越している領域もることが図5bとcを比較することでわかる。図5cにあるフレアループの直上の領域（図5cの×マーク箇所）の輝線スペクトルは先ほどの例とは反対に視線奥方向に運動しているプラズマが卓越していることがわかる。フレア領域では短波長側が卓越している場所と長波長側が卓越している領域があり、これはフレアループの全体構造と衛星の視線方向の角度に起因している。これを理解するため

には視線方向とフレア構造を合わせて3次元的な磁場構造を議論する必要がある。「ひので」「SDO」さらに「STEREO」衛星を用いてImada¹⁹⁾ではフレア構造と併せてフレアダイナミクスの議論が展開されており、詳しくはそちらを参照されたい。

さて、今回の観測で捉えられた高温高速流は磁気リコネクションのアウトフローそのものなのであろうか。今回のフレアは太陽の縁で起きたフレアであったため分光観測によってフレアループ上空の高温高速流の2次元構造を議論できる。図5aの+で示した場所の近傍に着目すると、高温高速流の2次元構造はフレア標準モデルで予言されているような槍の先のような非常にとがった構造というより、むしろU字型をした丸い輪郭をした構造であることがわかる。また、本来は太陽から離れていく方向の高速流も見えるはずであるが、今回の観測では全く捉えられていない。以上の考察より、今回発見された高温高速流はリコネクションのアウトフローそのものというよりは明るいフレアループとすでに相互作用をして減速され始めたものである可能性が高い（図2の衝撃波および硬X線源と記されている領域）。磁気リコネクションアウトフロー領域のプラズマダイナミクスの理解はフレア研究における未解決の重要な課題である。

3. 太陽フレア領域からの輻射

前章で述べたように、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は実際には非常に難しい。なぜこうまで観測することが難しいのか。これまで、磁気リコネクション領域が小さいことや、密度が低いために暗いなどさまざまな議論がなされてきた。最近になり、これまでとは違い非平衡プラズマという視点からこの理由が議論されている²⁰⁾。ここでは、電離非平衡という視点から、磁気リコネクション領域観測の難しさに関して議論する。

コロナプラズマを極端紫外線領域における輻射

から診断する際、いくつかの仮定をおいて考察する。例えば、コロナプラズマの組成比、励起・脱励起平衡、などである。太陽コロナにおけるほとんどの現象の場合これらの仮定は正しいのだが、太陽フレアのような非常に時間スケールの短い速い現象の場合、電離平衡の仮定が脅かされる可能性がある。電離の時間変化は次式(1)で記述される。

$$\frac{\partial n_i^{\text{Fe}}}{\partial t} + \nabla \cdot n_i^{\text{Fe}} \mathbf{v} = n_e [n_{i+1}^{\text{Fe}} \alpha_{i+1}^{\text{Fe}} + n_{i-1}^{\text{Fe}} S_{i-1}^{\text{Fe}} - n_i^{\text{Fe}} (\alpha_i^{\text{Fe}} + S_i^{\text{Fe}})] \quad (1)$$

n_i^{Fe} は*i*階電離した鉄イオンの数を表しており、 α_i^{Fe} は再結合係数を表しており、 S_i^{Fe} は電離係数を表している。再結合係数および電離係数は温度で決まる。したがって、基本的には電離の平衡状態は温度で決まり、平衡までの時間スケールは密度で決まる。図6は150万度のプラズマが一気に約3千万度に加熱される際の電離過程を解いた結果（密度は1立方センチ当たり約 2.5×10^9 個：通常のコロナ密度程度）で、平衡に至るまでにおよそ1,000秒近くかかっていることがわかる。一方、フレアプラズマの典型的な時間スケールはフレアの典型的な大きさ（およそ 10^8 m）を典型的なアルベン速度（およそ毎秒1,000 km）で割った値であり、およそ100秒程度であることがわかる。つまり、フレアプラズマの運動の典型的な時間ス

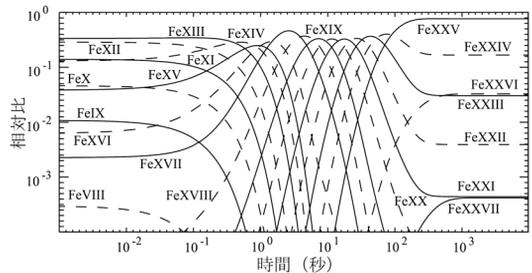


図6 150万度から瞬時に3千万度程度に加熱された際の鉄イオンの電離の時間変化²⁰⁾。FeXXIVまで電離されるのにおよそ10-100秒程度の時間がかかる。(Reproduced by permission of AAS.)

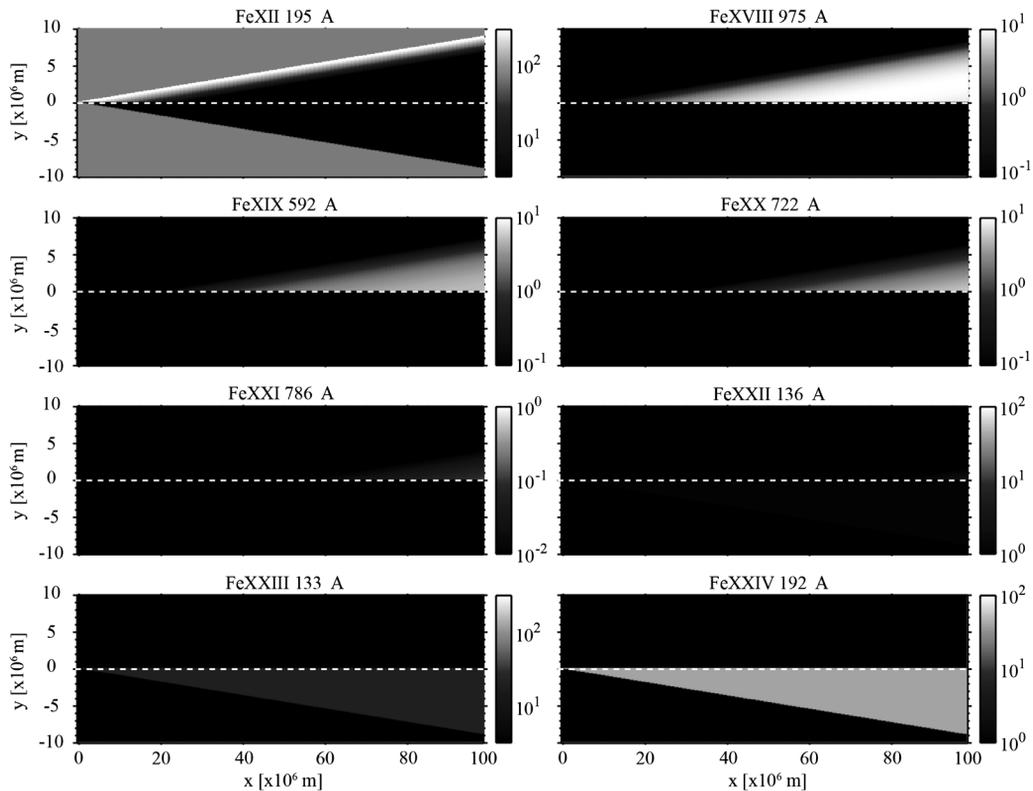


図7 磁気リコネクション領域（ペチェックモデル）における鉄イオンからの輻射量。上半分：電離過程を考慮，下半分：電離平衡を仮定²⁰⁾。リコネクションジェットは高速なため，図の左端から右端まで移動する時間が短く，FeXXIVまで電離できない。（Reproduced by permission of AAS.）

ケールは電離が平衡に落ち着くタイムスケールより短い，または同じ程度であることがわかる。したがって，電離過程まで考えてフレアプラズマからの輻射を考える必要がある。実際，ペチェックリコネクションモデルに関して電離過程を考慮して輻射を計算すると図7のようになる²⁰⁾。2次元モデルの計算であり，奥行き方向に同じ構造が 10^8 m 続くとして輻射を計算している。図7の原点 ($x=0, y=0$) が図1cのX型磁気中性点でありそこから上下左右に遅進衝撃波が伸びている。それぞれの図の上半分は式(1)に従って電離過程を考慮して輻射を計算した結果で，下半分は電離平衡を仮定して計算した結果である。この計算では通常のコロナの密度より若干低め（1立方センチメートル当たり 10^8 個）を想定している。この図

から，今想定している程度の密度の場合，磁気リコネクション領域では鉄の電離が追いつかず，X型磁気中性点より 10^8 m 下流にあってもFeXXIVの輝線が光ることはないことが示された。一方，ここでは示さないが，密度が高い状況（通常のコロナ密度の10倍程度）であると，ほぼ電離平衡を仮定した場合と同じ結果が得られることもわかっている。つまり，磁気リコネクション領域がFeXXIVなどの高温の輝線で観測可能かどうかは密度に強く依存している。通常，フレアはコロナのかなり上空で起きると考えられており，密度が低い可能性が高く，したがって電離が平衡に至っていないと考えられる。そのため，FeXXIVのような高階電離の鉄からの輻射は非常に小さく，捉えることが難しいと考えられる。

4. おわりに

今回、「ひので」および「SDO」衛星によるフレア観測およびフレアのエネルギー解放の鍵を握る領域である磁気リコネクション領域を観測することの難しさについて非平衡プラズマという視点から議論した。では、どのようにしたらフレアにおける磁気リコネクション領域を観測することができるのであろうか。現在、次世代太陽観測衛星の検討が進んでおり、科学的目的の一つに磁気リコネクション過程の理解が挙げられている。磁気リコネクション領域は暗く、そしてどの波長で光るかは密度などのプラズマパラメーターに敏感である。したがって、磁気リコネクション領域を逃さず観測するには、1. 暗い領域を観測可能にすること、2. 幅広い温度のプラズマを観測可能にすること、の両者が重要である。1を実現するには検出器の感度を上げ、鏡の反射率を上げることも重要であるが、それと同程度に、望遠鏡内で起こる散乱、迷光、および回折を減らし、明るい領域から暗い領域へ光が入り込まないようにすることが重要である。また、2を実現するためには観測波長範囲を広く取らなくてはならず、真空紫外域から極端紫外域までをカバーすること検討している。今後、「ひので」および「SDO」衛星でリコネクション領域観測に挑戦し、さらにその結果を踏まえ、どのようにしたら将来の衛星観測で磁気リコネクション過程がさらに理解できるかを十分検討することが重要である。

参考文献

- 1) Carrington R. C., 1859, MNRAS 20, 13
- 2) 寺沢敏夫, 2002, 岩波講座 物理の世界 地球と宇宙の物理2 太陽圏の物理 (岩波書店), 4章
- 3) Parker E. N., 1957, Phys. Rev. 107, 830
- 4) Sweet P.A., 1958, IAU Symposium No. 6, 123

- 5) Petschek H. E., 1964, in Proc. AAS-NASA Symp., the Physics of Solar Flares, ed. W. N. Hess (NASA Special Publication, Vol. 50; Washington, D.C.: NASA), 425
- 6) Carmichael H., 1964, in The Physics of Solar Flares, ed. W. N. Hess (NASA Special Publication, Vol. 50; Washington, D.C.: NASA), 451
- 7) Sturrock P. A., 1966, Nature 211, 695
- 8) Hirayama T., 1974, SoPh 34, 323
- 9) Kopp R. A. Pneuman G. W., 1976, SoPh 50, 85
- 10) Shibata K., et al., 1995, ApJ 451, L83
- 11) Tsuneta S., et al., 1992, PASJ 44, L63
- 12) Tsuneta S., et al., 1996, ApJ 456,840
- 13) Yokoyama T., et al., 2001, ApJL 546, L69
- 14) McKenzie D. E., Hudson H. S., 1999, ApJL 519, L93
- 15) Ohyama M., Shibata K., 1998, ApJ 499, 934
- 16) Teriaca L., et al., 2003, ApJ 588, 596
- 17) Masuda S., et al., 1994, Nature 371, 495
- 18) Hara H., et al., 2011, ApJ 741, 107
- 19) Imada S., et al., 2013, ApJL 776, L11
- 20) Imada S., et al., 2011, ApJ 742, 70

Hot Fast Flow above a Solar Flare Arcade Observed by Imaging Spectroscopy

Shinsuke IMADA

Solar-Terrestrial Environment Laboratory (STEL), Nagoya University, Furocho, Chigusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

Abstract: We have analyzed the X-class limb flare with the high cadence EIS study on 27th January 2012. This is the first EIS observation of a limb X-class flare. We have found a very fast component in FeXXIV (a few 10 MK) just above the flare loops where the emissions are very weak. Hinode/EIS has observed several flare events, and reveals the dynamical features associated with flows during the flares. However, there is not much spectroscopic evidence for hot (~ 10 MK) Alfvénic flows ($\sim 1,000$ km/s) produced by magnetic reconnection. This is the first imaging spectroscopic evidence that the magnetic reconnection takes place above the flare loops.