

小特集

磁気リコネクション研究の到達点と課題

2. 太陽・天体プラズマにおける磁気リコネクション

柴田一成

(京都大学大学院理学研究科附属花山天文台)

Magnetic Reconnection in Solar and Astrophysical Plasmas

SHIBATA Kazunari

Kwasan Observatory, Kyoto University, Kyoto 607-8471, Japan

(Received 20 August 2001)

Abstract

Recently, observational studies of solar reconnection have been greatly advanced by the space observation made by Yohkoh. Numerical simulations of reconnection applicable to active solar phenomena have also been developed owing to the recent development of supercomputers. These studies of solar reconnection have led astrophysicists to apply reconnection to various astrophysical plasmas, such as stellar and protostellar flares. It is expected that the study of reconnection in solar and astrophysical plasmas will be more and more active than before. In this article, we briefly review the present status and future directions of solar and astrophysical reconnection studies.

Keywords:

magnetic reconnection, solar flare, stellar/protostellar flare, MHD

2.1 はじめに

1章でも述べられているように、磁気リコネクションという概念がこの世に現われたのは、太陽フレアを説明するためであったが、つい最近(1990年頃)まで、磁気リコネクション説に懐疑的な太陽物理学者は意外と多かった。その理由は、大きく分けると次の3点であろう。

1) フレア発生の舞台である太陽コロナプラズマの磁気レイノルズ数はきわめて大きい($\sim 10^{14}$)。そのため、Sweet-Parker modelだと時間スケールが観測と合わなくなるし、Petschek modelでは磁気拡散領域が0.01 cm以下というとんでもなく小さな空間スケールになる。1万kmのスケールのフレアの中心に0.01 cmの拡散領域がただ一つ存在して安定にリコネクションが進行する、というようなことが本当に起こりうるのだろうか？

2) 一方、異常電気抵抗などによって電気抵抗を大きくして実効的なレイノルズ数を小さくしようとすれば、電流シートをイオンのラーモア半径やイオンスキン長にまで小さくしないといけないが、これらの長さスケールは、10-100 cmのオーダーであり、やはり、実際のフレアのスケール($\sim 10^9$ cm)とのギャップが大きい。そもそも異常電気抵抗などのマイクロプラズマ過程はまだよくわかっていない。しかし、仮にマイクロプラズマ過程が解明されたとしても、基本的な謎(マイクロとマクロをいかにつなぐかという謎)は依然として残る。

3) 太陽フレアでは観測的に磁気リコネクションを強くサポートするデータがなかった。これは磁気リコネクションが起きている場所(コロナ中)のX線高分解能撮像観測がなかったためである。人によっては、これから磁気リコネクション説そのものに否定的になり、磁気リ

author's e-mail: shibata@kwasan.kyoto-u.ac.jp

コネクション以外の説を提唱する人も現れた（例えば Alfvén and Carlqvist の電流崩壊説[1], Akasofu のダイナモ説など[2]）。

果たして磁気リコネクションはフレアの際に起きているのであろうか？ これを検証するために打ち上げられたのが、太陽 X 線観測衛星「ようこう」[3]であった。

以下では、「ようこう」衛星によって太陽フレアで磁気リコネクションの証拠がどこまで観測され、磁気リコネクションの物理にどういった貢献をしたか概観しよう。さらに、宇宙プラズマ活動現象の一例として原始星フレアを取りあげ、最後に太陽・宇宙プラズマ現象における磁気リコネクション研究における今後の課題をまとめる。ただし、一般的な解説はいろんなところに書かれているので[4]、ここでは批判的なレビューを試みたい。

なお、上で述べた、フレアの長さスケールとマイクロプラズマの長さスケールのギャップが大きいという問題は重要である。これは実験室や磁気圏プラズマと最も異なる点であろう。時々、磁気リコネクションはマイクロプロセス (non-MHD 過程) こそが最も重要であり、MHD リコネクションの研究は意味がない、と主張する人がいるが、太陽・天体リコネクションではそれは正しくない。マイクロとマクロのカップリングこそが重要なのだ。マイクロとマクロの間には MHD が適用可能な広大な空間・時間スケールが存在し、そこでの MHD 過程がマイクロマクロカップリングの本質を握っている可能性すら残っている。以下では、このような太陽フレア特有の物理状況を念頭におきつつ、解説を進めたい。

2.2 太陽フレア

太陽 X 線観測衛星「ようこう」は、1991年 8 月30日にわが国の宇宙科学研究所より打ち上げられた。現在に至るまで10年の長きにわたりコロナとフレアを観測し続け、その結果、「ようこう」はフレアにおける磁気リコネクションの数々の観測的証拠を発見し、フレアの磁気リコネクション説をほぼ疑いないものとした[4]。ではその証拠はいかなるものだったのだろうか。本節では、「ようこう」で発見されたりコネクションの代表的な証拠をいくつか紹介しよう。

2.2.1 カスプ型ループとスローショック

「ようこう」が発見したりコネクションの証拠として最も有名なものは、このカスプ型ループであろう[5]。Fig. 1 を見ていただきたい。磁気リコネクション説の予言したのとまさにそっくりの先の尖ったカスプ型の高温度ループが現れ、時間とともに形が大きくなっていくのがわかる。この形の変化は、逆向きの磁力線がリコネクションすることによって、次々と外側の磁力線が加熱されて軟 X 線で見えるようになるための見かけの変化である。ループの高さは10万 km, 温度は1 - 2千万度, 電子密度は 10^{10} cm^{-3} 程度。温度はカスプの外側で最も高く、カスプループの内側になればなるほど温度が低くなる。これは、ループの外側ではリコネクションが起きたばかりなので温度も高く、内側では冷却の効果によって温度が次第に低くなる、というリコネクションモデルの予言とよく一致している。

常田[5]はこのカスプ型フレアの温度分布と圧力分布の詳細な解析から、ペチェックモデルの証拠となるスローショックの存在を見つけたと主張している。ただ

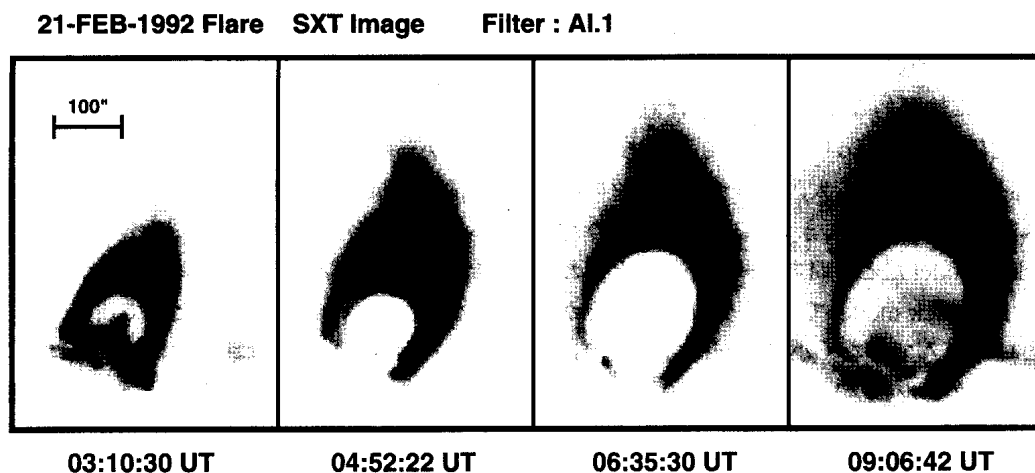


Fig. 1 Soft X-ray ($\sim 1 \text{ keV}$) images of a typical cusp-shaped flare [5]. These are negative images. Beautiful cusps are seen and grow with time as expected from reconnection theory. $100'' \approx 7 \times 10^4 \text{ km}$.

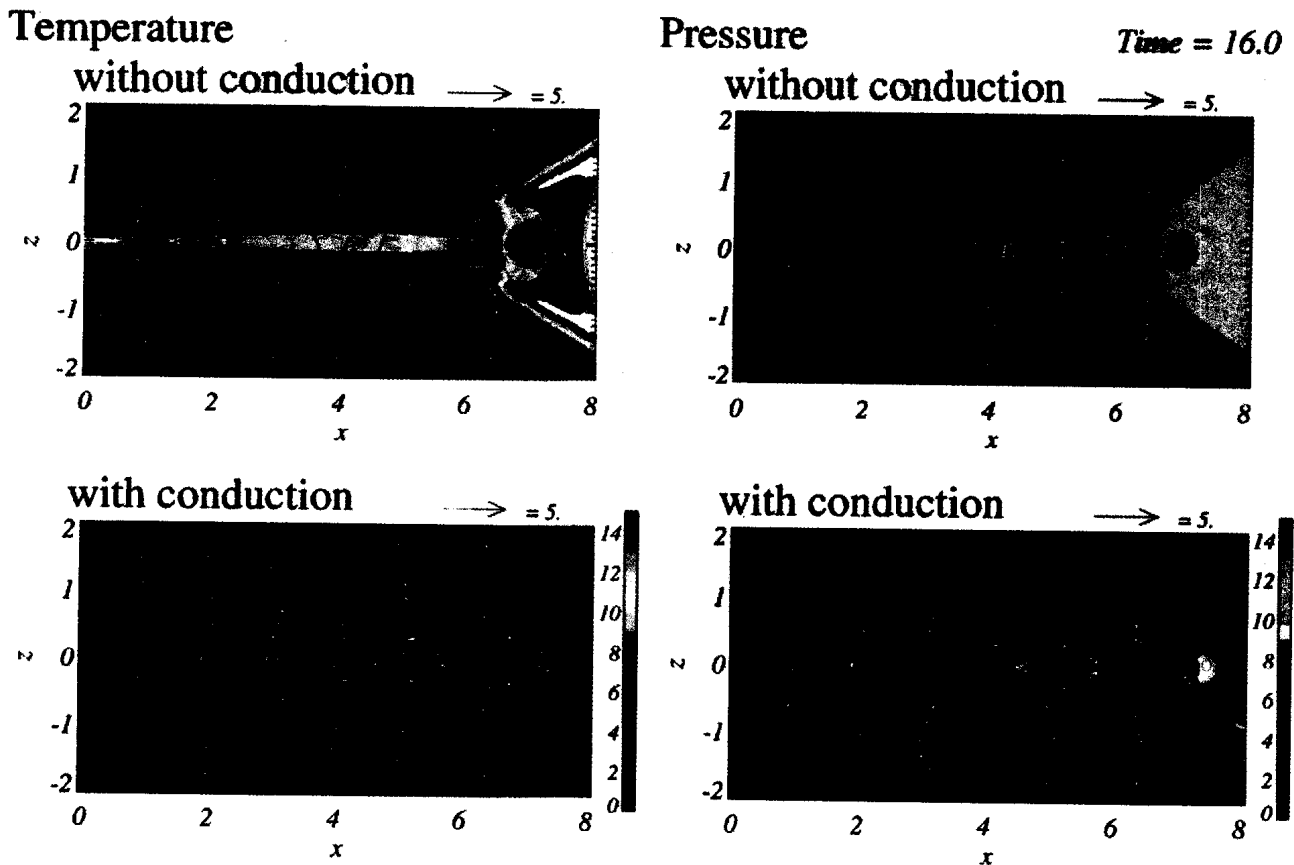


Fig. 2 MHD simulations of magnetic reconnection coupled with heat conduction [7]. Two dimensional distribution of temperature (color map), magnetic field lines (solid lines), and velocity vectors (arrows) are shown for the case without heat conduction (upper panel) and for the case with heat conduction (lower panel). The levels of the color map are shown to the right. The unit of velocity vectors is shown at the top right of the figure in unit of the initial sound speed ($\approx 0.15 \times$ Alfvén speed). Note that adiabatic slow shocks are dissociated into conduction fronts and isothermal shocks in the case with heat conduction.

し、Forbesら[6]が指摘したように、コロナでは熱伝導冷却時間が短いので、スローショックは断熱衝撃波ではありえず、等温衝撃波と熱伝導フロントに分解する[7] (Fig.2 参照)。スローショックの場所では温度は一定だから、温度分布は衝撃波の検出には無力である。温度分布図で見えている外側の温度不連続面は熱伝導フロントに対応していると考えらるべきである。スローショックの証拠となるべき圧力(密度)不連続は残念ながら「ようこう」軟X線像では、はっきり見えていない。スローショックの確かな検出は、2005年打ち上げ予定の太陽観測衛星 Solar B に残されている。

さて見かけのループの上昇速度あるいはループの足の幅の運動速度は 10 km/s 程度である。この見かけの速度は磁力線がつなぎ替わるために起こるので、磁束の保存から、リコネクションインフロー速度が推定でき、これより、リコネクション率が導出できる。最近の磯部ら[8]の解析によれば、無次元リコネクション率は、 10^{-2} - 10^{-3} 程度である。

2.2.2 ループトップ硬X線源とファーストショック

「ようこう」最大の成果とも言われるのが、このループトップ硬X線源である。なぜか？ フレアの磁気リコネクション説は上述のように、カスプ型フレアの発見によってほぼ疑いのないものになったが、これはあくまで比較的サイズの大きな、寿命の長いフレア(LDEフレア)の場合に限る話であった。数としてはもっと多い、比較的小さな短寿命のフレア(インバルシブフレア)の軟X線像では、カスプ型構造がいっさい見えない(Fig.3)。そのために、「ようこう」打ち上げ直後の記者会見では、「フレアは2種類ある」と報告されたほどである[9]。フレアの磁気リコネクション説には根強い反論(Alfvén, Akasofu, Zirin, Melrose, Uchida, Hudson,...)が永らく存在したこともあって、インバルシブフレアにカスプが見えないことは、アンチリコネクション派には好都合の観測と見なされた。

ところがである。増田[10]による精密な硬X線像の解析と軟X線像との位置合わせによると、軟X線ループ上

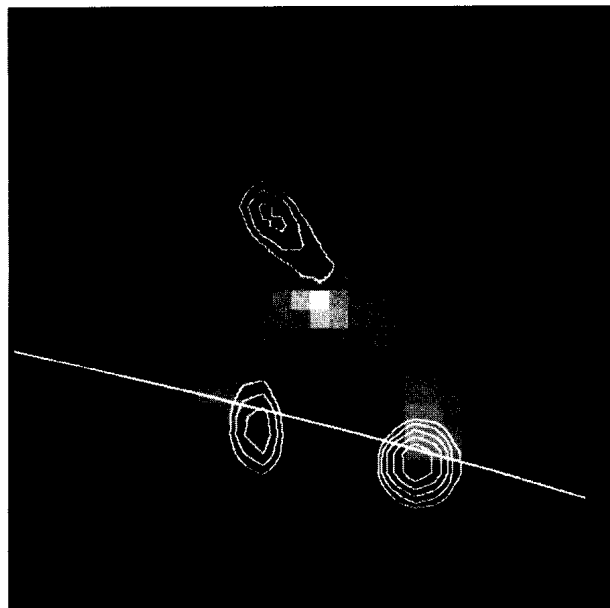


Fig. 3 Loop top hard X-ray source above the soft X-ray loop discovered with hard X-ray telescope (HXT) aboard Yohkoh [10]. The loop top source may correspond to fast shock. Contours show hard X-ray (20–30 keV) intensity distribution, and gray scale figures show soft X-ray (~ 1 keV) intensity distribution. Height of the loop is about 10^4 km.

空に明るい硬X線源が存在することがわかった (Fig. 3). 硬X線は10–100 keV 高エネルギー電子の制動放射で放出されるので、硬X線源がループ上空にあるということは、電子加速およびエネルギー解放場所がループ内ではなく、上空にあることを意味する。一方、もし、Alfvén and Carlqvist [1] の提唱したようなループに沿った電流の崩壊がフレアのエネルギー解放の原因であるならば、軟X線ループ内に硬X線源が存在すべきである。しかし、現実には違った。ここに至って、2種類のフレアという解釈に疑問が投げかけられるようになり、ひょっとしたら、LDEフレアと同様な磁気リコネクションがループの上空で起きているのかもしれない、と考えられるようになった。実際、インパルスフレアでも、ループは見かけ上次第に大きくなる。またリコネクションがフレアループ上空で起きるとアルヴェン速度 (1,000 km/s) の2方向高速リコネクションジェットが発生し、下向きのジェットはループ頂上に衝突しファーストショックが形成されるということが、理論的に予言されていた [11]。硬X線源を熱的であると仮定してその温度を測ってみると、およそ1億度となり、興味深いことに理論的に予想される温度 (ジェットの運動エネルギーを内部エネルギーに変換して得られる温度 $T \sim mv^2 / (6k) \sim 1$ 億度) とほぼ一致する。

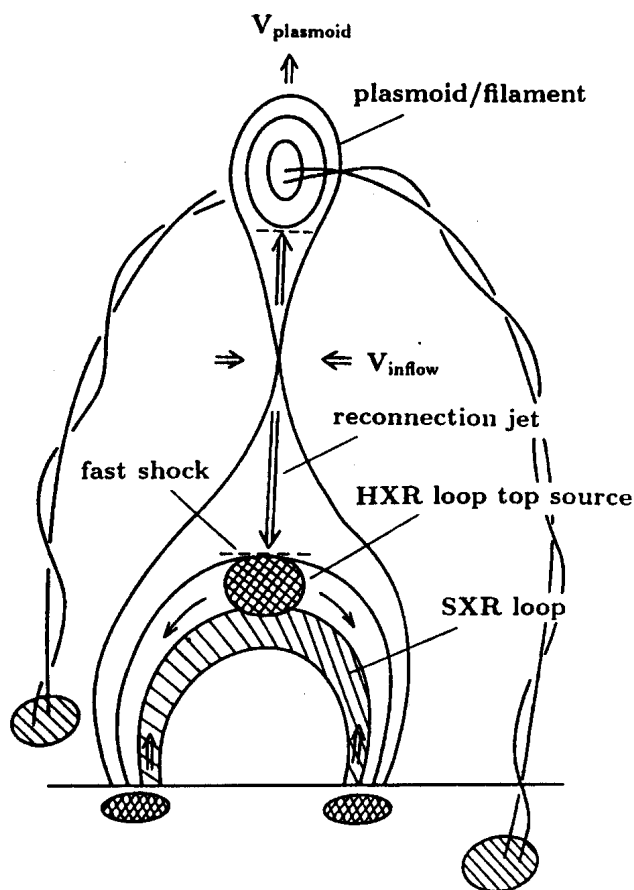


Fig. 4 A unified model of flares: plasmoid-induced-reconnection model [13, 17].

以上により、カスプの見えないインパルスフレアにおいてもLDEフレアと同様な磁気リコネクションが起きている可能性が一気に高まった。いわば磁気リコネクションによるフレアの統一モデル [12] の可能性が見えだしたのである。つまり、ループトップ硬X線源の発見は、フレアの磁気リコネクション説のより一般的な意味での確立に大きく貢献したと言える。その意味で、ループトップ硬X線源の発見は、「ようこう」最大の成果と言われるのである。

ただし、ループトップ硬X線源がファーストショックに対応するかどうかについては、まだ観測的に確立していない。そもそも硬X線源が熱的 (温度が高い) なのか非熱的 (トラップされた非熱的電子) なのかさえ確立していない、ということに注意しておきたい。

2.2.3 X線プラズモイド

ループトップ硬X線源がもし本当にループ上空のリコネクションの結果であるならば、ループ上空にはプラズモイドと呼ばれる高温プラズマの噴出があるはずである [13] (Fig. 4)。そのような高温プラズモイドの噴出は実

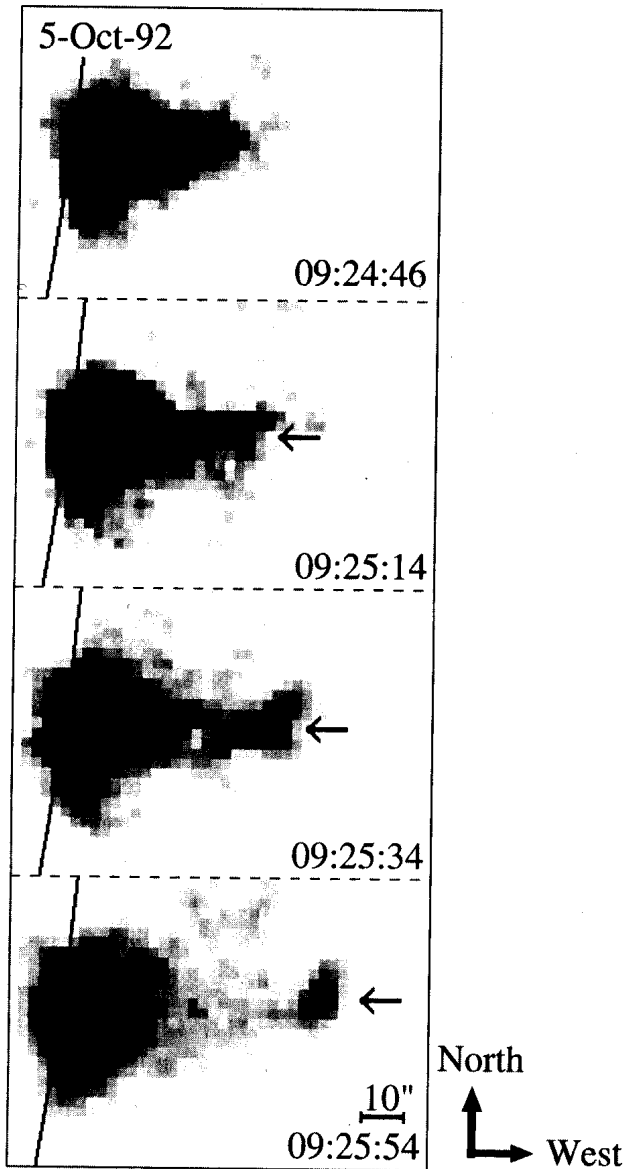


Fig. 5 X-ray plasmoid observed by the Soft X-ray Telescope (SXT) aboard Yohkoh [16]. These are negative. Apparent speed of ejecta is 250–500 km/s. $10'' \approx 7,000$ km.

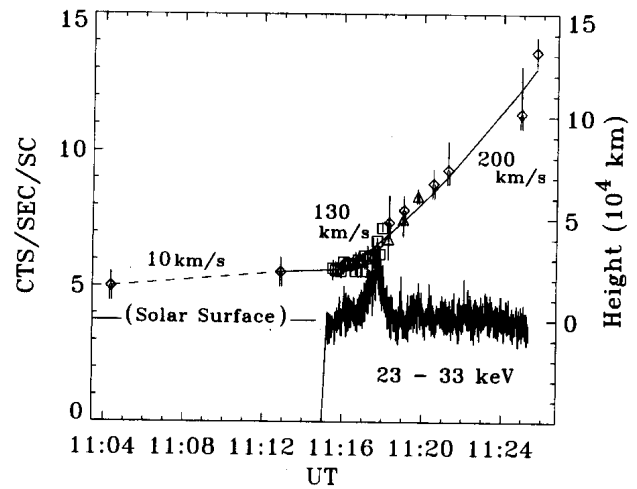


Fig. 6 Temporal variation of the height of an X-ray plasmoid (upper curve) and the hard X-ray intensity (lower curve) in an impulsive flare on 11 November 1993 observed by Yohkoh SXT and HXT [15].

ルヴェン速度の半分弱である。

上で見たように、大フレアも小フレアも、現象論的には、プラズモイド(3次元的にはヘリカルな磁気ロープ)の噴出にともなう磁気リコネクションということで統一的に説明できそうである。では、なぜプラズモイドなのか? その役割は何か?

この問いの答えに対するヒントが、やはり「ようこう」観測から得られている。Fig. 6をご覧ください。これはインパルスフレアにもなって発生したプラズモイドの高さの時間変化の図に、硬X線強度の時間変化を重ねた図である[15]。硬X線が急に増大しているのは、フレアのインパルス相である。このとき、エネルギーが最も激しく解放されている。おそらく、リコネクション率も大きいに違いない。さてプラズモイドは、このインパルス相よりもずっと前から上昇を開始している。つまりフレア(=リコネクション)が始まったから、プラズモイドが噴出を始めたのではない。しかし一方でプラズモイドの高さの時間変化をよく見ると、インパルス相で激しく加速されている。これはリコネクション(によって解放されたエネルギー)でプラズモイドが加速されていることを暗示する。このような観測事実は、よく調べてみるとほかにも続々と見つかり、さらには大フレアやコロナ質量放出現象にも見られることが判明した。これはプラズモイドの加速と磁気リコネクションが互いに助け合って発生していることを示唆しているのではなかろうか? よく、「プラズモイド噴出が大事なのか、リコネクションが大事なのか?」という問いがなされる

際にあるのだろうか? Fig. 5を見ていただきたい。これはFig. 3と同様なインパルス・フレアの典型例であり、フレアはループ形状をしている(ただし、この図は露出過度のためきれいなループには見えていない)。このフレアループの上空(図では右側)に高温プラズマの塊が秒速300 kmくらいで噴出しているのが見て取れる。このようなプラズマ噴出現象(X線プラズモイド)は、多くのフレアにもなって普遍的に発生していることがX線観測により判明し、磁気リコネクションのさらなる証拠となった[13-16]。なお、アルヴェン速度は1,000 km/s程と推定されているから、X線プラズモイドの速度はア

が、答えは「片方だけが大事ということではなく、両方が大事」ということになる。

この物理的意味はこうである。プラズモイド（ねじれた磁気ロープ）が電流シートにはさまっていると、逆向きの磁力線は接触できないので、リコネクションは禁止される。その間周りから電流シートを圧縮してもプラズモイドが居座る限り、リコネクションは起こらず、圧縮に使われたエネルギーは磁気エネルギーとして蓄えられる。ところが、いったんプラズモイドが動き出すと、今まで接触が禁止されていた逆向きの磁力線が接触するようになり、リコネクションが始まる。すると解放されたエネルギー（または運動量）によってプラズモイドが加速される。プラズマが電流シートから排出されると質量保存より、シートを圧縮しようとする流れ（リコネクションインフロー）が発生する。するとリコネクション率が増大し、さらに激しいエネルギー解放が起こり、プラズモイドが加速され、またさらに速いインフローが誘起される、というふうに positive feedback が働いて、速いリコネクションに至る。このとき最大のリコネクション率をきめているのは、プラズモイドの噴出速度なので、plasmoid-induced-reconnection と呼ぶのがよいであろう [17]。大変興味深いことに、Fig. 6によく似た時間変化が、MHD 数値シミュレーション [18] や実験室プラズマでも観測されている（本小特集、小野氏の記事参照）。

以上のように、プラズモイド噴出は単にリコネクションの結果ではなくて、速いリコネクションの物理を決めるきわめて重要な役割を演じていると考えられる。また、この考えに立てば、プラズモイドのダイナミクスやサイズは MHD で決まりスケールによらないので、電流シートはフラクタル的になり、どんどん小さなスケールが出現し、ついにはマイクロプラズマのスケール（イオンのラーモア半径やイオンスキン長）の出現をもたらす。そのとき、異なるスケールのプラズモイドの噴出や融合を介して、マイクロとマクロをつなげることが可能になろう [17]。また、フラクタル電流シートでは、あらゆる長さスケールのプラズモイドが存在するため、それらの噴出や融合に対応して、あらゆる時間スケールの変動が付随するはずである。それが観測された硬 X 線や電波マイクロ波の時間変動におけるフラクタル的時間変動の原因かもしれない [19]。

2.2.4 X線ジェットとリコネクション・ジェット

磁気リコネクションの証拠としては、より直接的には、リコネクションした磁力線の張力によって加速されるアルヴェン速度（コロナ中では 1,000 km/s）程度の 2

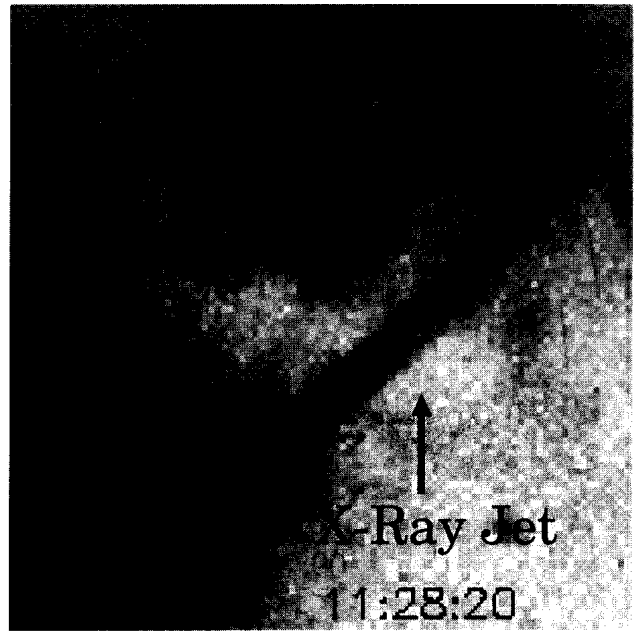


Fig. 7 An X-ray jet observed with Yohkoh SXT on 12 November 1991 [18].

方向リコネクションジェット (bidirectional reconnection jet) を発見すればよい。「ようこう」打ち上げ直後から、私自身も目をさらのようにして、このリコネクションジェットの探査を始めた。その結果、低速 (200–300 km/s) の 1 方向ジェット (X 線ジェット) が続々と見つかり [20] (Fig. 7), 一時はついにリコネクションジェットを発見したかと歓喜した。というのは、ほとんどの X 線ジェットは極小フレア (マイクロフレア) に付随しており、X 線ジェットやマイクロフレアのエネルギー源が磁気リコネクションによるらしいという状況証拠が次第に明らかになってきたからだ [20]。しかし冷静に考えると、それだけで X 線ジェットそのものがリコネクションジェットであるとは必ずしも言えない。その理由の一つは、1,000 km/s の 2 方向ジェットがまだ観測されていないからである。さらに、ジェットは別のメカニズムで形成されている可能性もある。磁気リコネクションによって解放されたエネルギーが太陽大気の下層の彩層に伝わり、その高密度プラズマを加熱すると、急激に増大した熱圧力によってプラズマは磁力線に沿って上方へ数百 km/s の速度で加速される (彩層蒸発流と呼ばれる)。これが X 線ジェットとして観測されている可能性があるのだ [20]。何と言っても「ようこう」はジェットのドップラー速度を測る装置を積んでいなかったため、速度に関して確かなことは言えない。上で述べた速度はすべて見かけの速度にすぎないのだ。フレアにおける高速 2 方向

リコネクションジェットの見出しは、Solar B 衛星の最大の課題の一つである。

ところで、「ようこう」の4年後に打ち上げられた米欧共同のSOHO衛星搭載のSUMERと呼ばれる観測装置は低温プラズマ(10万度程度)の速度検出が可能であり、これによってついにリコネクションジェットが観測されたという報告が、1997年 Nature 誌に掲載された[21]。のみならず、この論文は磁気リコネクションの観測的証拠としてたびたび引用され、特に、SOHO 衛星の代表的成果としてよく引き合いに出される。しかし私はこの論文の解釈には懐疑的である。その理由は2方向ジェットの間に見える点が存在し、これがリコネクション点に対応する、などと書いてあるからである。もし、本当に2方向ジェットがリコネクションジェットならば、両者の間のリコネクション点はあまりにも小さいのでそれが観測されるなどということは到底ありそうにない。なお、原理的には、この装置で10万度程度のプラズマ中の2方向リコネクションジェットを見つけることは可能である(フレアのリコネクションジェットは温度が数千万度-数億度なので、このジェットとは異なる)。だから、あまり揚げ足を取るのはいらないと思って、国際会議やその集録[22]などでは一言注意を促すくらいにしているのだが、リコネクション物理の観点から感心する新しい論文がなかなか出てこないの、やっぱり反論の論文を書いて喧嘩を仕掛けた方が良くかもしれない。

2.2.5 X線下降流

上向きのX線プラズモイドがあれば、下向きのX線プラズモイドはないのだろうか？

Fig. 8を見ていただきたい。これはカस्पがよく見えるLDEフレアの減衰期における軟X線画像の時間変化である。よく見ると、暗い矢印の部分が下向きに運動しているのがわかる[23]。速度は300 km/s程度で、おもしろいことに、上向きに噴出するX線プラズモイドの速度と同程度である。ただし、下降流の発生場所は大変局所的である。まるで、磁気圏で観測されているburstly bulk flow のようである[24]。

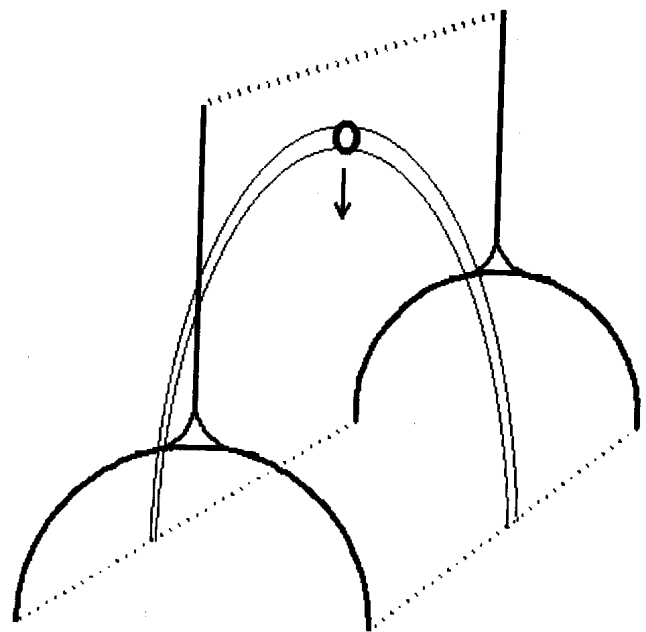
ただし、不思議なことに、この種のX線下降流は大部分LDEフレアの減衰期にしか見られない。なぜ、磁気リコネクションが最も激しく起きているはずの上昇期やインパルス相に出現しないのだろうか？(ちなみに、X線プラズモイドは上昇期やインパルス相に出現している。)

2.2.6 インフローの直接観測

リコネクションインフローの観測と速度測定はリコネ



(a)



(b)

Fig. 8 (a) Downflow above a flare arcade loop system in an LDE flare of 16 August 1998 observed with Yokohoh SXT [23]. The black arrow indicates the apex of an X-ray emitting looplike feature, observed to shrink into the top of the arcade; the white arrow is at a fixed position, for comparison. The field of view is 2.2×10^5 km square. (b) A schematic view of reconnection-induced downflow [23].

クション率の観測的導出という観点からきわめて重要であるが、「ようこう」ではインフローは全く見えない。これはリコネクションに反対する人々の、最も強い(リコネクション否定)観測的証拠であった。「ようこう」で見えないのは、ドップラー速度測定機器を積んでいないから、無理もなく、この論争の決着にはSolar Bを待たねばならない、と思われていた。ところが横山ら[25]はカस्पをきれいに示す典型的なLDEフレアのSOHO/EIT画像中に明らかなインフローの兆候を見つけ、Solar B

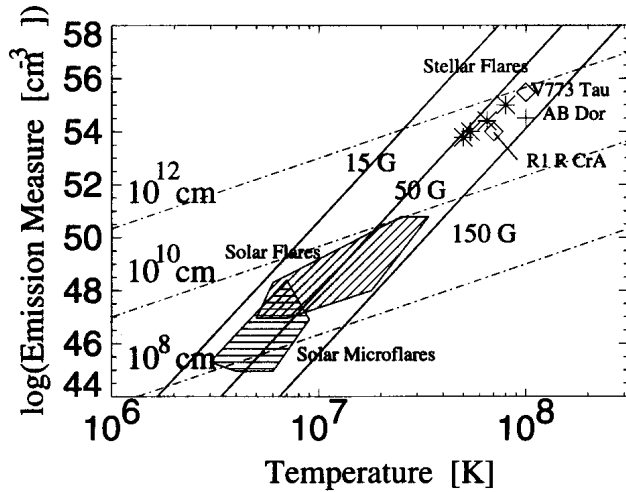


Fig. 9 The log-log plot of emission measure (EM) vs. electron temperature of solar flares, solar microflares, stellar flares, and protostellar flares [27]. The theoretical curve $EM \propto B^{-5} T^{17/2}$ based on the balance between reconnection heating and conduction cooling explains the empirical correlation if the magnetic field of these stars is roughly constant (15–150 G). The curves of constant flare loop length are also plotted, and reveal that the flare loop of stellar/protostellar flares is quite large, 10^{11} – 10^{12} cm.

より一足早くリコネクションインフローが発見されることになった。彼らの解析によれば無次元リコネクション率は0.001–0.03である。

2.3 恒星フレアと原始星フレア

太陽でさえ磁気リコネクションの証拠というのは、なかなか観測困難だが、恒星フレアに至っては、分解して観測できないので、直接的なりコネクションの観測は到底不可能である。したがって、現状は、太陽フレアとの比較を詳細に行うことによって恒星フレアや原始星フレアを理解する、というアプローチが取られている。

恒星フレアは古くは可視光観測で知られていたが、近年はX線観測の発展が著しく、太陽フレアと共通の性質が徐々に判明してきた。X線強度の時間変化、温度、スペクトル、全エネルギーなど太陽とそっくりの恒星フレアは少なくない。しかし、中には温度が一億度、全エネルギーは一百万倍以上などという大フレアもある。さらに、最近わが国の「あすか」衛星は生まれたばかりの原始星で1億度の大フレアを発見し、惑星や生命の起源にも影響を及ぼす可能性があるため、大きな驚きを呼び起こした[26]。これらの恒星フレアや原始星フレアは太陽フレアと共通の性質を多々示すとはいうものの温度や全エネルギーが桁違いに大きいものもある点が問題であ

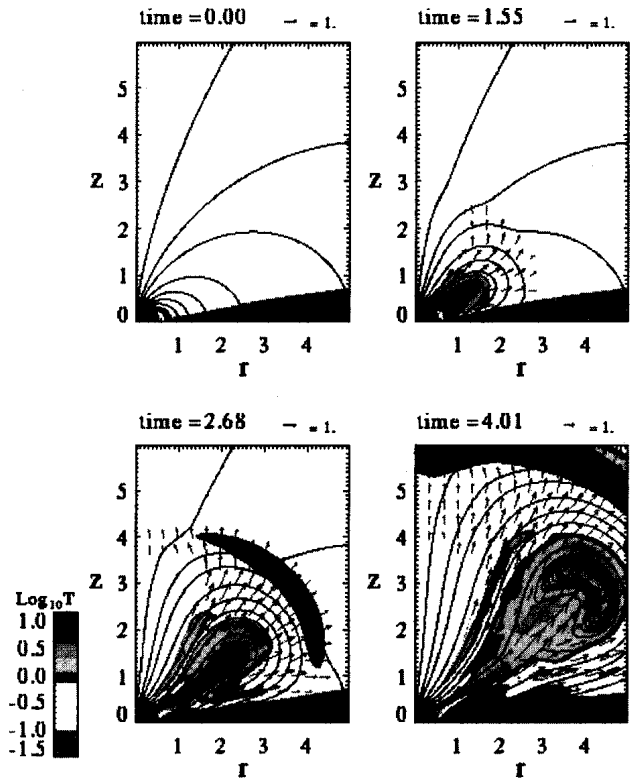


Fig. 10 A reconnection model of protostellar flare [28]. In this case, a dipole magnetic field is twisted by the rotation of the disk, becoming unstable or in non-equilibrium after one rotation, which eventually leads to the eruption of a plasmoid and associated reconnection.

る。果たして磁気リコネクション説は適用できるだろうか？

こういうときは統計的なアプローチを取るのが良い。X線観測の基本的観測量である Emission Measure ($EM = n^2 V$, n は電子密度, V は体積) を縦軸に温度を横軸にして、太陽フレア、マイクロフレアから恒星フレア、原始星フレアをプロットすると、興味深いことに一つの直線上にのる (Fig. 9)。このことは太陽フレアと同じメカニズム (磁気リコネクション) が恒星フレアや原始星フレアで働いていることを示唆すると考えられる [27]。このような研究から、原始星フレアが太陽フレアより高温でエネルギーが莫大である基本的な理由は、フレアのサイズが巨大 (太陽の半径程度またはそれ以上) であるため、ということが判明した。原始星は生まれたばかりなので回転が速くダイナモ作用が活発で、おそらく星全体が黒点に覆われていると考えられる。しかもその周りには惑星形成の元となるガス円盤が回っている。このような状況では、円盤と星の磁場の相互作用によって、巨大フレアが比較的容易に起こると考えられる [28]

(Fig. 10 参照).

2.4 おわりに

磁気リコネクションの観測的証拠というのは、今のところ太陽に限られるが、太陽フレアとそっくりのフレア現象が恒星や原始星で続々と見つかり、そのために磁気リコネクションの重要性が太陽以外でも次第に認識されるようになってきた。ブラックホールの周りの降着円盤で起きる活動性も磁気リコネクションに関係あると考えられている[29]。さらに、星間物質[30]や銀河団におけるプラズマ加熱[31]も磁気リコネクションによるかもしれないという議論が始まっている。要するに天体に磁場があれば、磁気リコネクションはさけて通れない基本的なプラズマ過程なのだ。そのことに対する認識がゆっくりとはあるが次第に天文学者や宇宙物理学者に広まりつつある。今こそ磁気リコネクションに詳しいプラズマ物理学者が天文学や宇宙物理学に参入する絶好のチャンスである。

最後に今後の課題をまとめておこう。

(1)「ようこう」は「コロナは誰が想像していたよりもはるかにダイナミックであり、マイクロフレアやジェットだらけである」ことを明らかにした。マイクロフレアもジェットも磁気リコネクションによって引き起こされるので、コロナが100万度に加熱されている原因は、ひょっとしたら、マイクロフレアやナノフレア(普通のフレアの10億分の1のエネルギーの超極小フレア)、つまり、磁気リコネクションかもしれない。その後打ち上げられた、SOHO衛星やTRACE衛星も同じ傾向の観測結果を見出している。果してコロナ加熱は微小スケールの磁気リコネクションによるのか、それとも古くから議論されてきたアルヴェン波によるものだろうか?この問題は2005年打ち上げ予定のSolar B衛星の最も重要な課題として残されている。

(2)ちょっときびしい見方をすると、フレアにともなうリコネクションは、Sweet-Parker typeなのか、Petschek typeなのか、あるいは、どちらでもないのか、まだ判明していない。これらの検証および速いリコネクションの発生条件の解明のためには、本文中でもふれたが、リコネクションにともなう流れ(インフロー、リコネクションジェット)を検出し、それらの速度をドップラー速度として正確に測ること、さらにスローショック、ファーストショックの確かな同定をし、MHD理論(ランキンユゴニオ関係式など)の検証を定量的に行うこと、などが必要であろう。これらはSolar B衛星の重要課題である。

(3)フレア(磁気リコネクション)そのものの様子はかなりわかってきたが、フレアに至るプロセス(エネルギー蓄積、トリガー機構)については、まだほとんどよくわかっていないと言ってよい。最近、草野ら[32]はこれに関連して大変興味深い理論をつくった。しかしまだ、実際の観測データと比較できるところまで理論は発展していない。一方観測データは浮上磁場(太陽内部から浮上してくる磁束管)が鍵を握っていることを示唆している。とくに、ねじれた磁束管の浮上が重要らしい[33]。これらの過程を明らかにし、観測と比較しうる(フレアの発生を予言できる)3次元MHD理論・シミュレーションの発展が望まれている。また、この課題(フレア発生条件の解明)は、現在の地上観測や衛星観測によってもある程度迫れる課題でもあるし、Solar B衛星の高空間分解能磁場観測の格好の重要課題でもある。

(4)アンチリコネクション派の中には、(現在の)リコネクションモデルはフレアの最も重要な観測事実を説明していないから、フレアのモデルとしては失格である、とまで言う人がいる。彼らにとっての「最も重要な」観測事実とは硬X線やガンマ線などの非熱的放射である。硬X線は高エネルギー電子(10 keV-1 MeV)、ガンマ線は高エネルギーイオン(1-100 MeV)が原因となって発生するので、要するにこれらの高エネルギー粒子の加速の解明が不可欠というわけだ。粒子加速機構を解明するにはマイクロプラズマ過程の解明が不可欠なので、ここにきてMHDリコネクション研究者は、マイクロプラズマ研究者との協力が必要であることを思い知らされる。最初に太陽・天体におけるリコネクションではMHDが重要であると書いたが、さすがにこの粒子加速に関しては太陽・天体物理学者といえどもnon-MHDに取り組まなければならない。しかし、かと言って、フレアの長さスケール(1万km)はnon-MHD(マイクロプラズマ)の長さスケール(10-100cm)よりあまりにも大きいので、観測データは無効だし、セルフコンシステントなシミュレーションも不可能である。フレアにおける粒子加速問題は超難問であると言ってよいだろう。多くの太陽・天体物理学者は、この粒子加速問題への解答なりヒントを得ることを最大の関心事として、non-MHD専門の実験室プラズマ物理学者や磁気圏物理学者と交流していると言っても過言ではない。

参考文献

- [1] H. Alfvén and P. Carlqvist, *Solar Phys.* 1, 220 (1967).
- [2] S. Akasofu, *Planet Space Sci.* 32, 1469 (1984).

- [3] Y. Ogawara *et al.*, *Solar Phys.* **136**, 1 (1991).
- [4] 柴田一成: *天文月報* **89**, 60 (1996); 柴田一成, 小杉健郎: *岩波科学* **65**, 524 (1995).
- [5] S. Tsuneta *et al.*, *Publ. Astr. Soc. Japan* **44**, L63 (1992); S. Tsuneta, *Astrophys. J.* **456**, 840 (1996).
- [6] T.G. Forbes, J.M. Malherbe and E.R. Priest, *Solar Phys.* **120**, 258 (1989).
- [7] T. Yokoyama and K. Shibata, *Astrophys. J.* **474**, L61 (1997).
- [8] H. Isobe *et al.*, *Astrophys. J. in press* (2001).
- [9] 内田 豊, *プラズマ・核融合学会誌* **71**, 732 (1995).
- [10] S. Masuda *et al.*, *Nature* **371**, 495 (1994).
- [11] M. Ugai, *Geophys. Res. Lett.* **14**, 103 (1987).
- [12] K. Shibata, *Adv. Space Res.* **17**, (4/5)9 (1996); K. Shibata, *Astrophys. Space Sci.* **264**, 129 (1999).
- [13] K. Shibata *et al.*, *Astrophys. J.* **451**, L83 (1995).
- [14] S. Tsuneta, *Astrophys. J.* **483**, 507 (1997).
- [15] M. Ohyama and K. Shibata, *Publ. Astron. Soc. Japan* **49**, 249 (1996).
- [16] M. Ohyama and K. Shibata, *Astrophys. J.* **499**, 934 (1998).
- [17] K. Shibata and S. Tanuma, *Earth, Planets and Space* **53**, 473 (2001); T. Tajima and K. Shibata, *Plasma Astrophysics* (Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1997) chap.3.
- [18] T. Magara, T. Yokoyama and K. Shibata, *Astrophys. J.* **487**, 437 (1997); P.F. Chen and K. Shibata, *Astrophys. J.* **545**, 524 (2000).
- [19] A.O. Benz and M.J. Aschwanden, in *Eruptive Solar Flares*, IAV Colloq, No.133, Z. Svestka *et al.*, (eds.), *Lecture Notes in Physics* **399** (Springer-Verlag, Berlin, 1992) p.106.
- [20] K. Shibata *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* **44**, L173 (1992); T. Yokoyama and K. Shibata, *Nature* **375**, 42 (1995); M. Shimojo *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* **48**, 19 (1996); M. Shimojo and K. Shibata, *Astrophys. J.* **541**, 1100 (2000).
- [21] D.E. Innes *et al.*, *Nature* **386**, 811 (1997).
- [22] K. Shibata, *Proc. 5th SOHO workshop*, ESA SP-404 (1997) p.103.
- [23] D. McKenzie and H.S. Hudson, *Astrophys. J.* **519**, L93 (1999); D. McKenzie and H.S. Hudson, *Earth, Planets and Space* **53**, 577 (2001).
- [24] T. Terasawa, K. Shibata and M. Scholer, *Adv. Space Res.* **26**, 573 (2000).
- [25] T. Yokoyama *et al.*, *Astrophys. J.* **546**, L69 (2001).
- [26] K. Koyama *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* **48**, L87 (1996).
- [27] K. Shibata and T. Yokoyama, *Astrophys. J.* **526**, L49 (1999).
- [28] M.R. Hayashi, K. Shibata and R. Matsumoto, *Astrophys. J.* **458**, 391 (1996).
- [29] T. Di Matteo, A. Celotti and A.C. Fabian, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **304**, 809 (1999); A.A. Galeev, R. Rosner and G.S. Vaiana, *Astrophys. J.* **229**, 318 (1979).
- [30] S. Tanuma *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* **51**, 161 (1999).
- [31] K. Makishima, *Earth, Planets and Space* **53**, 677 (2001).
- [32] K. Kusano *et al.*, *Astrophys. J.* **441**, 942 (1995).
- [33] H. Kurokawa, *Space Sci. Rev.* **51**, 49 (1989); T. Ishii and H. Kurokawa, *Publ. Astron. Soc. Japan* **52**, 337 (2000).