

太陽コロナX線ジェットとその磁気リコネクションモデル

横山 央明

〈国立天文台・太陽物理学研究系 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉
e-mail: yokoyama@spot.mtk.nao.ac.jp

太陽X線衛星「ようこう」の観測により、さまざまな太陽コロナ活動現象の多くが磁気リコネクションで説明できることが明らかになりつつある。「ようこう」により新しく発見されたコロナX線ジェットもそのひとつである。数値シミュレーションによれば、磁気リコネクションモデルはX線ジェットのさまざまな様相をうまく説明することがわかった。

1. はじめに

観測衛星「ようこう」軟X線望遠鏡はいままでない高感度・高空間分解能・高時間分解能で太陽コロナをとらえた。その結果わかったのは、コロナが今まで思われてきたよりもずっと激しく変化するダイナミックな領域であったことである。そこではさまざまなスケールでの増光現象がひっきりなしに起こる。大きなものでは、 10^{29} — 10^{31} ergのエネルギーをもちサイズは数万～数十万 km に達するフレアがある。いっぽう小さなものでは、活動領域のループ増光現象 (10^{28} erg 以下) が数分間隔で明滅している。プラズマ放出も盛んにおこる。最大級のコロナ質量放出現象の運動エネルギーはフレアのエネルギーをも凌駕する。そしてX線ジェットが「ようこう」によってはじめて見つけた。これらコロナで起こるさまざまなスケールの増光・運動のメカニズムが実は共通でありそのプロセスを鍵にして全てが説明できるのではないだろうか、ということが近年の研究でわかってきた。そのプロセスこそが磁気リコネクションである。

大きなフレアについては別の場所ですでに詳しく紹介されている¹⁾のでここでは小さい方の現象に話を絞り、特に本稿では太陽コロナX線ジェ

ットに焦点をあてる。X線ジェットとはどのような現象なのか?、そのエネルギー源が何なのか?、またどのようなメカニズムで起こっているのか?そしてジェットの発見が太陽物理学研究に与えるインパクトは何なのか?、について述べたい。ひとこと付け加えると、ここで紹介するX線ジェットと、その物理プロセスである磁気リコネクションとは、太陽だけでなく星生成領域・降着円盤コロナ・銀河ハロー・銀河団にある高温プラズマ中で普遍的に起こりうる。したがって太陽コロナX線ジェットはこれから発見されるであろう“天体X線ジェット”のプロトタイプなのである。

2. 「ようこう」による コロナX線ジェットの発見

X線ジェットは「ようこう」によって初めて発見された¹⁾。図1は、その中でも最大級のX線ジェットの時間変化を示した連続画像である。イソギンチャク状の構造から真北に向かって細長い構造が現れそして消えているのがわかると思う。ビデオムービーで詳細に観察するとこの細長い構造がねもとから徐々にのびていくのがよくわかる。この伸びていく部分がジェット本体である。

ジェットの詳細な統計的研究は下条ら²⁾によってなされており、その結果をここで簡単にまとめ



図1 1992年1月11日に発生した太陽コロナX線ジェット、「ようこう」軟X線望遠鏡による連続画像。ジェットの足元はイソギンチャク型活動領域 NOAA 7001。図の領域のサイズは $1,200'' \times 1,040'' (\approx 8.6 \times 10^9 \text{km} \times 7.5 \times 10^9 \text{km})$ 。北が上で西が右。(柴田ら⁹⁾より)

る。まずサイズはいろいろなものがあり、長さ数千kmのものから数十万kmのものまで存在する。太陽半径が70万kmだから大きいものはそれに匹敵する。しかし一般に大きいものは数が少ない。平均は15万kmである。また速度は、画像の時間変化を観察した見かけの速度によると10km/secから1000km/secにわたる。数が多いのは数百km/sec前後である。運動エネルギーは 10^{26}erg から 10^{28}erg であり、典型的なフレアのエネルギー(10^{29} — 10^{31}erg)にくらべるとやや小さい。そして重要なことは、ほぼ全てのジェットがその足元でおこった小さなフレアにともなって放出されていることである。例えば図1のジェットでは、足元のイソギンチャク構造の中にひとときわかるく光っているフレアループが見える。これは

ジェットがフレアと強い関係があり、実は共通の物理で発生していることを暗示している。さらに興味深いことは、X線で観測される高温プラズマ(数百万度)のジェットと同時にそのジェットと同じ方向にとぶ低温プラズマ(数万度)のジェット現象がH α 線の観測で何例か見つかっている。この現象はサージと呼ばれており地上観測により発見されてからすでに何十年もたつ。しかし実はその加速放出メカニズムはいまだに謎なのである。したがってこの同時観測の発見は、コロナX線ジェットとH α サージの加速メカニズムが共通であることを示唆する。

3. X線ジェットの磁気リコネクションモデル

では、X線ジェットのエネルギー源は何なのか？ またどのようなメカニズムで起こっているのだ

ろうか？ 図1のジェットを例にとって述べていく。ジェットの足元に見えるイソギンチャク状の構造は活動領域と呼ばれる。軟X線でみえるこの構造は太陽表面上1万から数万km上空の温度数百万度のプラズマの分布を示す。一方、この領域を可視光で観測すると太陽表面を見ることができる。するとこのイソギンチャク状の構造の真中に黒点があるのがわかる。つまりコロナ活動領域は黒点の上空にある。黒点が、強い磁場の局在する領域であることは良く知られているが、その磁場の磁力線が太陽の上空に現れたものが先ほどのイソギンチャク状構造なのである。さて図1の活動領域をムービーで注意深く見ていると、ジェットの放出とともにその構造が変化していることがわかる。活動領域の構造は磁場を表していると考え

て良いからこの変化は磁場の変化を示しジェットの出に磁場が関わっていることがわかる。

この磁場変化のエネルギーを見積もってジェットの運動・熱エネルギーと比較してみよう。このイソギンチャク活動領域のサイズは半径約 $L=3 \times 10^4 \text{ km}$ である。磁場強度を $B=30 \text{ G}$ 程度と仮定すると、総磁気エネルギーは $E = B^2 / (8\pi) L^3 \approx 10^{30} \text{ erg}$ になる。一方、柴田ら³⁾によると、軟 X 線望遠鏡の複数フィルタを用いた物理解析からもとめたジェットの密度は $n \approx 3 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 、温度は $T \approx 2-10 \times 10^6 \text{ K}$ 。ジェットの長さが $L_{\text{jet}} \approx 3 \times 10^5 \text{ km}$ 、幅が $W_{\text{jet}} \approx 7.5 \times 10^4 \text{ km}$ である。また見かけの速度が $v = 200 \text{ km/sec}$ でこれから運動エネルギー $E_{k,\text{jet}} \approx mnv^2 L_{\text{jet}} W_{\text{jet}}^2 \approx 2 \times 10^{29} \text{ erg}$ 、熱エネルギー $E_{t,\text{jet}} \approx nk_B T L_{\text{jet}} W_{\text{jet}}^2 \approx 1-6 \times 10^{29} \text{ erg}$ がもとまる。ここで k_B はボルツマン定数、 m は平均粒子質量である。したがってジェットのエネルギーが活動領域の磁場で充分まかなえることがわかった。

さて、ではどうやってこの磁気エネルギーをジェットの熱や運動のエネルギーに転換するのだろうか？ その答が本稿の主題、磁気リコネクションなのである。

まず磁気リコネクションとは何か？ プラズマ中で向き異なる磁束が接触している状態を考えよう(図2)。逆向き磁束の間には電流が流れ、そこでは電気抵抗のせいで電磁(磁場)エネルギーが熱

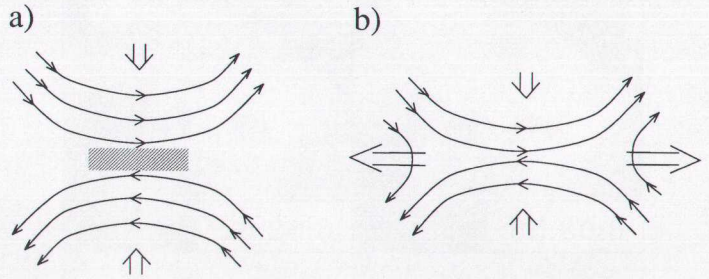


図2 磁気リコネクションの概念図。

a) 逆向き磁束が接触している状態。真中の斜線部分に電流がながれ(拡散領域)、そこでは電気抵抗により磁力線が消失する。b) 拡散領域でつなぎかわった磁力線は磁気張力により図の左右に弾きとんでいく。その際、周囲のプラズマも同時にとぶ。

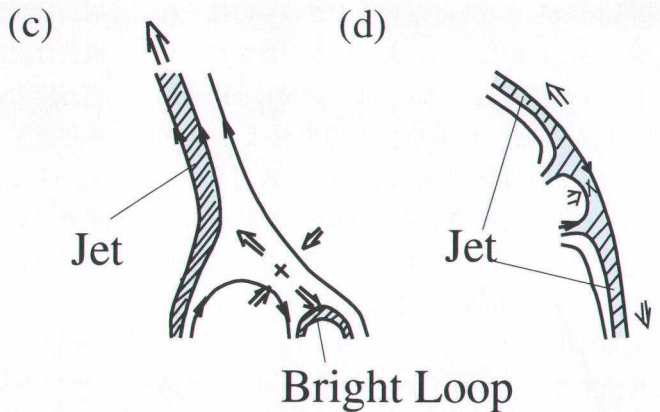
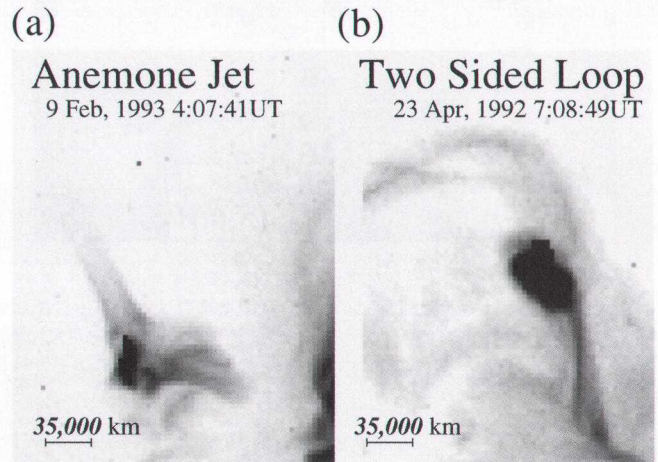


図3 a), b) 「ようこう」軟 X 線望遠鏡により観測された太陽コロナ X 線ジェットの例。c)・d) は各々 a)・b) に対応するリコネクションモデルの概念図。(横山と柴田⁷⁾より)

エネルギーに転換される(ジュール加熱)。つまり磁場が消失する。消失するのは接触点だけだから磁力線は切れてしまう。しかし実際は磁力線には端がないから ($\text{div } B=0$) すぐに相手を見つけてつながる。そのとき相手方の磁束の磁力線とつながる、つまりつながりかわる(リコネクションする)。

つながりかわると突然「く」の字型の磁力線ができる。磁力線はゴムひものような性質をもち、 「く」の字型の磁力線はまわりのプラズマを巻き込んではいけとんでいく(ローレンツ力による加速)。その結果加速された流れは接触点からプラズマを吸い出す役割をして先ほどの消失をますます

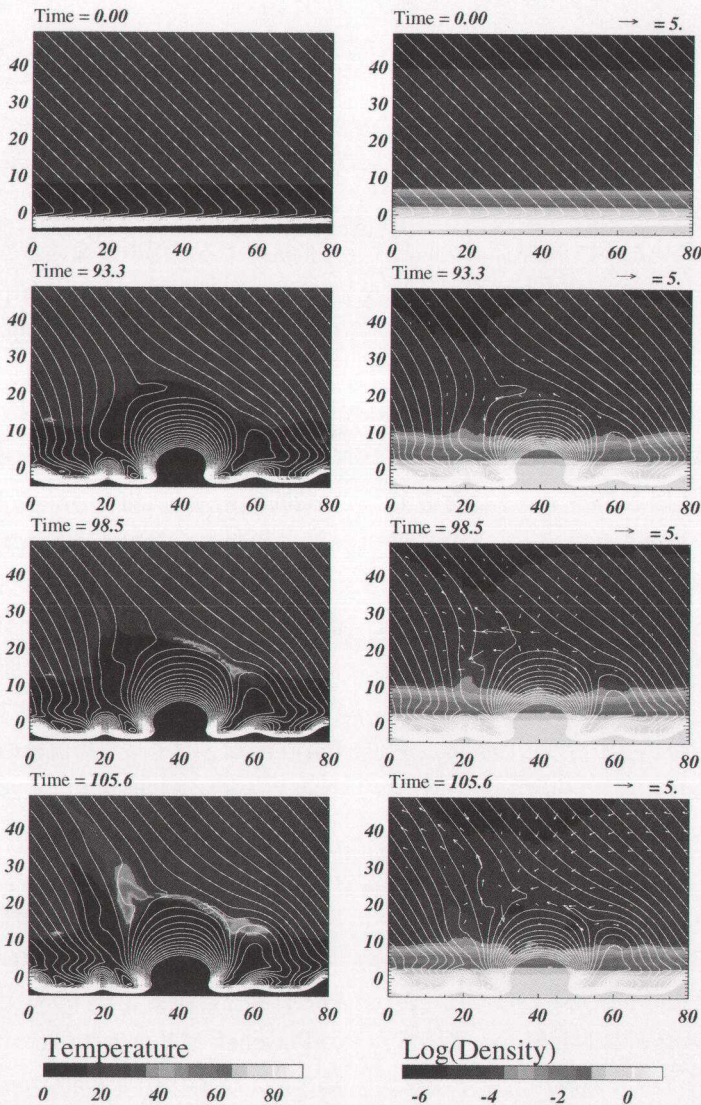


図4 リコネクションモデルに基づいたジェットの数値シミュレーション。左列は温度分布(グレースケール, 単位 10^4 K)と磁力線(線)。右列は対数尺度による密度分布(グレースケール, 単位 10^{-7}g cm^{-3})、磁力線(線)と速度場(矢印)。速度の単位は 10 km/sec. 時間の単位は 20 秒, 長さの単位は 200 km. (横山と柴田⁷⁾より)

助ける。このようにして磁場エネルギーはプラズマの加熱・加速に消費され熱・運動エネルギーに急速に転換されるのである。

フレアの磁気リコネクションモデルは古くから知られており今回「ようこう」による観測でそれが確かめられつつある^{4),5),6)}。そしてX線ジェットもこの磁気リコネクションで説明できるのではないかと考えられた¹⁾。図3がその具体的なモデルのスケッチである。ここではリコネクションを起こす磁束の一方は光球面から磁気浮力で浮上してきたループ(浮上磁場という)、もう一方はもとからコロナに存在したもの(つまり過去に浮上した磁束)としている。リコネクションにより加熱・加速されたプラズマは最終的にはコロナ磁場にそって流れ、その形が細長いためにX線ジェットとして観測されるだろうというのがこのモデルである。

図4はこのモデルにもとづいて2次元電磁流体数値シミュレーションをした結果である^{7),8),9)}。斜め上方に放出される高温プラズマの様子がわかるとおもう。この放出が太陽X線ジェットに対応する。シミュレーションで得られたジェットの温度はコロナ温度の数倍程度、速度はおおよそAlfvén速度の半分程度となった。さらに図4では右端の方に温度の高いループができていのがわかる。ジェットの足元で少しずれた位置で光るこのようなループは観測でもみつかっておりこのモデルを指示する重要な証拠のひとつになっている。リコネクションで発生するペアのプラズマ流(図2参照)のうち、一方が上にとんだジェットになり、もう一方が下に向かってとんだ結果、この高温のループを形作ったのである。図4でさらにおもしろいのは、高温プラズマのジェットだけでなく、同時に低温プラズマのジェットも起こっている(高温プラズマジェットのすぐ左隣)ことだ。浮上磁場によって持ち上げられた彩層の低温プラズマがリコネクションによってムチがしなうような動きで弾きとばされた結果このような低温ジェット

を形作った。この放出はH α 吸収線で観測される低温ジェットH α サージとして観測されるであろう。さきほどX線ジェットとH α サージの同時観測がみつかったと述べたが、この観測は図4のシミュレーションのようなりコネクションモデルでうまく説明できる。

4. 磁気リコネクションが“速く”起こる条件はなんだろうか?

さて前節まででX線ジェットが磁気リコネクションモデルでうまく説明できる、と述べたが話にはここでは終らない。実は磁気リコネクションには未解決の大問題が残っているのである。磁力線をつなぎかえるプロセスは先ほど述べたように電気抵抗による磁場の散逸でおこる。しかし、太陽コロナでは磁気レイノルズ数($R_m = t_D/t_A$, t_D は磁気散逸時間, t_A はAlfvén時間—Alfvén波が現象を横切る時間)が非常に大きい(例えば太陽フレアでは約 10^{11})。つまり、散逸時間スケールがAlfvén時間スケールより非常に長く、ジェットの短い時間スケール(約10分—数時間程度 $\approx 10-100 t_A$)を説明することが困難なのである。

“速い”磁気リコネクションすなわちAlfvén時間スケールで起こるリコネクションを実現するにはどうすればよいか? この問題を解決するべく現在まで多くの研究がなされてきた。Sweet¹⁰⁾とParker¹¹⁾は、プラズマの流れの効果を考えるとリコネクションの時間スケールが $(t_D t_A)^{1/2}$ になることを示した。これは散逸時間よりは短いはまだAlfvén時間よりはかなり長い。Petschek¹²⁾はさらに磁気流体波(磁気流体衝撃波)の効果を考えると時間スケールが約 $10 t_A$ になり磁気レイノルズ数とは独立に決まるというモデルを提案した。このPetschek型リコネクションが実現できれば太陽フレアなどの短い時間スケールを説明できる。そこで今度は、数値シミュレーションによって磁気リコネクションの実現が試みられた。鶴飼と津田¹³⁾はプラズマ電気抵抗が局所的に強い状況がで

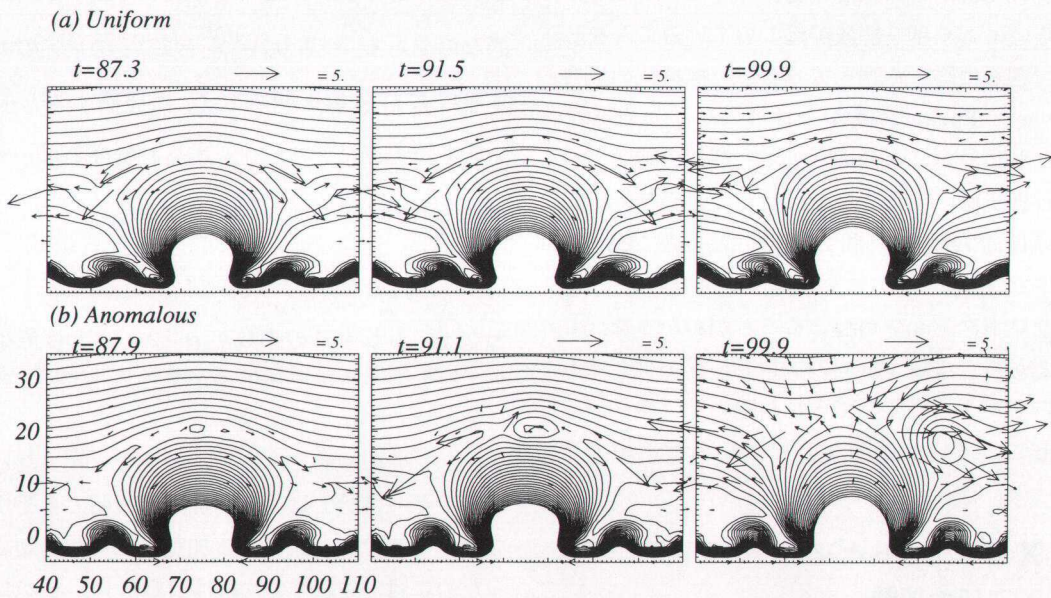


図5 磁気浮上不安定により駆動した磁気リコネクションの数値シミュレーション。磁力線(線)と速度場(矢印)が示してある。a)上段は抵抗が一樣抵抗の場合、b)下段は抵抗が異常抵抗である場合。(横山と柴田¹⁵⁾より)

できれば Petschek 型リコネクションが実現することを示した。このような抵抗は異常電気抵抗と呼ばれ、実際、電流が局所的に集中するとその抵抗値が急激に増加することが実験からわかっている。いっぽう佐藤と林¹⁴⁾は磁気中性点をプラズマの流れによって押しつける効果すなわち外部条件が速いリコネクションを実現するには重要であるとした。このように速いリコネクションの実現に影響を与える条件には磁場を外部から押しつける外的条件と、プラズマの電気抵抗という内的条件とのふたつがありどちらがより重要なのかはいまだに論争中の問題である。しかしこれまでの研究で見過ごされてきた点がある。それは、実際の現象たとえば太陽フレアなどでは外部からの押し付けは内部で起こっている磁気散逸の結果から影響を受けて変化しうる。外部条件と内部条件のどちらがより重要であるかを見るためには押し付けのプロセスにフィードバックがかかるような系でシミュレーションをしなければならないということである。

このような問題点を念頭に置いてわれわれはリコネクションのシミュレーションをおこなった¹⁵⁾。特に我々は太陽ジェット・コロナに興味があるのでそれに適当な状況、すなわちさきほどのジェットの条件を応用して調べた。具体的には、初期条件を固定し2種類の電気抵抗モデル、異常電気抵抗モデルと通常の一様抵抗について比較した。そうして「外部条件だけでリコネクションが速くなるのかどうか？」を検証した。シミュレーションの結果(図5)わかったことは、リコネクションの起こる速さが駆動プロセスによって一意に決まるのではなく、抵抗モデルに影響されることである。図5の上段一行が一様抵抗の場合で時間がたってもほとんど変化がなく定常的である。それに対して下段の異常抵抗の場合、電流シートが不安定でその中に磁気島ができる非定常な発展をする。一番右の $t=99.9$ の図で上段と下段を比べると下段の異常抵抗の場合磁気中性点に向かって強い流入が起こっているのがわかる。磁気エネルギーの解放率はこの流入速度に比例するので異

常抵抗の場合が一樣抵抗の場合にくらべてはるかに激しいエネルギー解放が起こっていることをしめす。さらに詳しく調べてみると一樣抵抗の場合は Sweet—Parker 型のリコネクションになっていることがわかりそのエネルギー解放の時間スケールが抵抗値に依存するのに対して、異常抵抗の場合はほぼ Alfvén 時間で起こり抵抗値に依存しないことがわかった。つまり異常抵抗の場合に“速い”リコネクションが起こることがわかった。このことから、太陽コロナのフレア・ジェットでも異常抵抗がおこっていてそれが速いリコネクションを起こしている原因なのではないか予想できる。

5. X線ジェットとマイクロフレア、そしてコロナ加熱

最後に、この X 線ジェットの発見が太陽物理の中でどういう意味を持つのかを論じて終りにしよう。ここでは太陽物理の最重要問題のひとつ、コロナ加熱の問題について特にのべる。太陽大気中で中心に近い光球・彩層よりもコロナの方が高温であるのはなぜなのかという謎はコロナ発見以来何十年も議論されているのにもかかわらずいまだに決着がつかない。今のところ有力なモデルは二つあって、ひとつは Alfvén 波による輸送・拡散 (Alfvén 波説)、もうひとつは小さなフレアによるエネルギー供給である (マイクロフレア・ナノフレア説¹⁰⁾)。前者は大気下層で発生した Alfvén 波がコロナまで伝播してそこで非線形モード相互作用あるいは相混合作用によりエネルギーを拡散、コロナに与えるというものである。一方、後者はフレアの際のリコネクションにより磁場のエネルギーをコロナ中で拡散するというモデルである。ここでは特に後者に注目する。フレア加熱モデルでは、コロナに供給されるエネルギーの総量は単一のフレアのエネルギーにフレアの数かけたものの合計になる。X 線でみたフレアの明るさ L_x と数 N のあいだにはおもしろい関係があつて、明

るもののほど数が少なくその減り方はべき乗関数的なのである。つまり、 $\frac{dN}{dL_x} \propto L_x^{-\alpha}$ 。フレアのエネルギー E が X 線の明るさ L_x に比例すると仮定すると $\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha}$ となり、これを積分するとエネルギー供給の総量は

$$P = \int \frac{dN}{dE} E dE \propto \frac{1}{-\alpha+2} E^{-\alpha+2} \Big|_{E_{\min}}^{E_{\max}}$$

となる。もしもこの指数が $\alpha > 2$ であれば最小フレアからのエネルギー供給がまさり、 $\alpha < 2$ であれば最大フレアからの供給がまさる。現在までの大きなフレアの観測によると、大きなフレアだけのエネルギー供給ではコロナ加熱は説明できそうにない。そこでフレアによる加熱モデルが有効であるためには $\alpha > 2$ でなければならない。しかし現実の観測ではいまのところ 1.5—1.6 ぐらいで、否定的な答しかでていない¹⁷⁾。しかし今回の X 線ジェットの発見とそのシミュレーションは新たな可能性をこのモデルに付け加えた。まずいいたいのは X 線ジェットとフレアの共存の可能性である。さきほど X 線ジェットが小さなフレアにともなって発見されることは先ほど述べた。そしてジェットに伴うフレアの明るさとイベント数との関係もべき乗分布をしているのである。これは (ジェットを伴わない) フレアと共通の性質である。これから推測するに、フレアの源がリコネクションであるならば運動するプラズマがフレアには必ず存在しているはずである。一般にジェットの明るさはそれに伴うフレアに比べてずっと暗い。すると、先ほど考えたジェットを伴わないフレアにも、暗くて観測されてはいないけれども運動するプラズマ、すなわちジェットがあるのではなからうか。いままでのフレアのエネルギー勘定ではジェットの分を考えに入れていない。したがってジェットのエネルギーを加算することでフレア加熱の量が増えるにちがいない。さらにシミュレーションでは高温ジェットにともなって低温プラズマの運動

も発生するという話をしたがこの低温プラズマによるエネルギーも先ほどのフレア加熱モデルでは換算にはっていない。いかにして低温プラズマの運動エネルギーを高温プラズマの熱に転換するかという問題は残るもののこのエネルギーも考えに入れてもよいのではなからうか。ここで議論した内容は定量的なものではなくまた物理的にも埋めなければならない穴が多い。しかしひとつの可能性として議論する価値が充分あるのではないだろうか。

6. おわりに

このように X 線ジェットが磁気リコネクションモデルでうまく説明されることを述べた。しかしまだ課題はいくつも残されている。数値シミュレーションに関していえば太陽コロナの高い熱伝導性・輻射の効果などを考慮に入れてさらに正確なモデルを計算する必要がある。これには大量の計算機資源が必要であり新しく導入されるスーパーコンピュータを使ってさらに計算を進めたい。いっぽう観測については、X 線観測の空間分解能をあげ、同時に温度分布を測ってコロナ活動現象の構造を明確にする、また磁場エネルギーの蓄積のキープロセスである光球面上の活動をコロナと同時に観測する必要がある。これらは現在準備がすすめられている次期太陽衛星 (Solar-B) 計画の重要な課題であろう。

この研究は総合研究大学院大学・国立天文台でおこなった学位論文研究であり、指導教官であった天文台の柴田さんに感謝します。また議論してくださった総研大の下条さん、「ようこう」チーム、天文台のスタッフのみなさんに感謝します。

参 考 文 献

- 1) Shibata K., et al. 1992, PASJ, 44, L173
- 2) Shimojo M., et al., 1996, PASJ, 48 123
- 3) Shibata K., et al., 1994, ApJ, 431, L51
- 4) Tsuneta S., et al., 1992, PASJ, 44, L63
- 5) Masuda S., et al., 1994, Nat, 371, 495
- 6) Shibata K., et al., 1995, ApJ, 451, L83
- 7) Yokoyama T., Shibata K., 1995, Nat, 375, 42
- 8) Yokoyama T., Shibata K., 1996, PASJ, in press
- 9) Shibata K., Nozawa S., Matsumoto R., 1992, PASJ, 44, 265
- 10) Sweet P. A., 1958, in Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics, ed. Lehnert (Cambridge University Press, London), p. 123
- 11) Parker E. N., 1963, ApJS, 8, 177
- 12) Petschek H., E., 1964, in Proc. of AAS-NASA Symp. on the Physics of Solar Flares, ed. Hess W. N. (NASA Spec. Pub. 50), p. 425
- 13) Ugai M., Tsuda T., 1977, Journal of Plasma Physics, 17, 337
- 14) Sato T., Hayashi T., 1979, Plasma Physics, 22, 1189
- 15) Yokoyama T., Shibata K., 1994, ApJ, 436, L197
- 16) Parker E. N., 1988, ApJ, 330, 474
- 17) Shimizu T., 1995, PASJ, 47, 251
- 18) 柴田一成, 1996, 天文月報 vol. 89, 2月号, P. 60

Solar Coronal X-ray Jets and their Magnetic Reconnection Model

Takaaki YOKOYAMA

National Astronomical Observatory, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181

The solar X-ray data obtained by the Yohkoh satellite revealed us that magnetic reconnection is the basic mechanism for many of the solar coronal activity. The coronal X-ray jets which were newly discovered by Yohkoh, are one of such phenomena. By numerical simulations we found that magnetic reconnection model can explain many observed aspects of X-ray jets.