

太陽面爆発（フレア）の謎に挑む

—「ようこう」はフレアをどこまで解明したか?—

柴田一成

〈国立天文台 〒181 東京都三鷹市大沢2-21-1〉
e-mail: shibata@spot.mtk.nao.ac.jp

太陽 X 線観測衛星「ようこう」は、1991年8月30日の打ち上げ以来、順調に観測を重ね、1000個以上のフレアを観測するのに成功した。これらの膨大なデータの解析から、フレアの謎の一端が解け出した。長年有力視されつつも、決定的な証拠がなく疑問をもたれることの多かった「磁気リコネクション」説の確かな証拠が、ついにわれわれの手にもたらされたのである。

1. はじめに

先日、天文学会（於新潟）の公開講演を頼まれ、表題のような講演をした。専門外の人向けにできるだけやさしく、ということであったが、「磁気リコネクション」（後で詳しく説明）のことを省いてフレアの原理を語るわけにはいかないので、できるだけ丁寧に説明することにした。ところが結果は惨たんたるもので、講演中に居眠りする人が続出するわ、終わってからもしばらく質問が出ず沈黙の時間がすぎるわ（このときほど時間が長く感じられたことはなかった）で、大失敗のできであった。あんまりのできでしょげていたら、新潟大学のある先生が「新潟の人はのりが悪いんですよ。関西人はすぐにのってくれますけどね。」と妙なフォローをしてくれた。（ちなみに私は関西出身である。）とにかく、内容がわかりにくかったことと、話し方がへただったことは事実であろう。（かの湯川博士もかつて「私の話はすぐ眠くなるよと人から言われるんですよ」とある講演のはじめに話していたことがあるが、その講演ではふと気づいたら私も眠っていた。だからと言ってへたな講演を正当化してはいけない！）

本解説は、学会でわかりにくい講演を聞いていただいた聴衆の方々に申し訳ないと思い、今度こ

そはもう少し「フレア」と「磁気リコネクション」のことをわかってもらいたいと思って、筆をとったものである。なお本格的な解説は別のところでしてあるので！、ここではエッセイ風にくだけた解説をしたい。

2. フレアとは何か

フレアとはひとことで言うとは何だろうか？ 昨年あるとき、「ようこう」チームの重鎮のハドソン（Hudson）さんに聞いたら、フレアとは「エネルギーが突然解放される現象」だ、という答えが返ってきた。「突然」とはいまいな表現である。どれくらい突然なのだろうか？ 実際のフレアは短いもので数分、長いものでは10時間以上続くものもある。両方とも突然なのだろうか？ またエネルギーが解放されると言っても、例えば光球面での対流の泡が「突然」浮き上がってきて、放射エネルギーを放出するという現象もあるが、これはフレアとは言わない。

私はフレアとは「コロナにおける超高温（数千百度）プラズマ生成をとともなう爆発現象」と、とりあえず現代の観測に基づいて定義してみたい。ここでわざわざ超高温を入れたのは、超高温プラズマ生成をとともなわない爆発（噴出）現象も多々あるからである。

表1 コロナにおける様々なフレア現象 (t_A はアルベーン波が現象のサイズを横切る時間, t_A で規格化すると様々なフレア現象の時間スケールは、すべて大略 $t/t_A \approx 10-100$ となっているのが興味深い.)

フレア現象	サイズ (10^4km)	時間スケール (sec)	t_A (sec)	t/t_A	エネルギー (erg)
マイクロフレア	0.5-4	60-600	5	12-120	$10^{26}-10^{29}$
インパルス・フレア	1-10	$60-3 \times 10^3$	10	6-300	$10^{29}-10^{32}$
長寿命 (LDE) フレア	10-40	$3 \times 10^3-10^5$	90	30-1000	$10^{30}-10^{32}$
巨大アーケード形成	30-100	$10^4-2 \times 10^5$	400	25-500	$10^{29}-10^{32}$

例えば、フレアとよく混同される現象にプロミネンスの爆発（噴出）がある。プロミネンスとは日食のときに太陽の縁に紅く見える現象（日本語で紅炎）のことで、太陽の解説には必ず出てくる太陽の華である。昔はよく、プロミネンスのことを「太陽の炎が見えている」と解説するような本に出くわしたことがあるが、さすがに最近あまり見ない。プロミネンスの正体は1万度程度の低温 (!) プラズマであり、フレア本体の数千万度の超高温プラズマとはまさに対極に位置するような現象である。ところがややこしいことに、プロミネンスが噴出したり運動するときにフレアがよく発生するのである。ここらあたりは、学生も専門の研究者でさえもよく混乱するところであり、実際かつて太陽の縁で発生したプロミネンス増光現象のことをリムフレアと呼んでいたことがあった。

とにかくここでは標語的に

プロミネンス=1万度程度の低温プラズマ

フレア(本体)=数千万度の超高温プラズマ

と書いておこう。

数千万度のプラズマからは大量のX線が放射されるので、フレア本体を解明するためにはX線による画像撮影が不可欠である。そのために打ち上げられたのが「ようこう」衛星²⁾であった。

1991年8月末打ち上げ以来、「ようこう」によって観測されたフレアの個数は1000個以上、撮影されたコロナのX線画像は数100万枚にもなっている。(すべてのデータを見た人はまだ誰もいない!) これらのデータの一部はムービーの形にさ

れていて、コロナやフレアの時間変化をつぶさに見ることができる¹⁸⁾。

なお、フレアの大きさとかエネルギーとか色々大事な数字があるが、それらは表1にまとめておくことにしよう。ただ注目すべきはエネルギーの大きさ(表2)である。最近「ようこう」でどんどん見つかってきた、フレアのミニチュア版であるマイクロフレアでさえも現在地球上に存在する(と思われている)全核兵器を一度に爆発させたときよりも大きなエネルギーを放出している。しかもフレアのエネルギーが小さいほど発生頻度が高いことがわかっており(これは興味深いことに地震の発生頻度と同じ傾向)、マイクロフレアにいたっては今この瞬間にも太陽コロナのどこかで常に発生しているのである。

表2 いろいろな現象のエネルギー

現象	エネルギー (erg)
雷	10^{17}
広島原爆 (15キロトン)	6×10^{20}
浅間山噴火 (1938年)	10^{22}
ビキニ水爆 (15メガトン)	6×10^{23}
マグニチュード8の地震	10^{24}
現在地球上に存在する全核兵器 (推定)	4×10^{26}
太陽のマイクロフレア	$10^{25}-10^{29}$
ハレー彗星の地球衝突	10^{31}
太陽フレア	$10^{29}-10^{32}$
恒星フレア	$10^{31}-10^{36}$
活動銀河核フレア (一秒当たり)	$10^{44}-10^{46}$
超新星爆発	10^{51}
活動銀河核 (全エネルギー)	$10^{60}-10^{62}$

3. 磁気リコネクション

さて以上のような大量のデータを元にフレアの謎はどこまで解明されたのだろうか？

ここでも標語的に次のように書くことにしよう。

「ようこう」は、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ことを、確かなものにした。

「磁気リコネクション」とは何だろうか？

その概念図を図1に示そう。

磁気リコネクションは文字どおり訳すと、「磁力線のつなぎかえ」である。「磁力線再結合」と呼ばれることもある。磁力線にはゴムひものような引っ張る力がはたらくので、つなぎかえの結果、パチンコのゴムひものような形ができると、ゴムひも（磁力線）にくっついたプラズマは猛烈な勢いで加速されてジェットになる。このジェットがどこかぶつかると衝撃波が発生し、ジェットの運動エネルギーは最終的には熱エネルギーになってしまう。エネルギーの元はもちろん磁気（電流）エネルギーである。実際には、つなぎかえのために異常電気抵抗が発生しなければならない、とか色々難しい話があるが、ここではそういう話は省略しよう。（興味ある方は、岩波科学の解説記事¹⁾

を見られたい.)とにかく大事なことは、次の3点である。

- (1) フレアのエネルギー源はコロナ中に蓄えられた磁気（電流）エネルギーである。
- (2) コロナでは磁気（電流）エネルギーを電熱器のようなジュール熱で解放するのは容易ではない。
- (3) この困難を克服するために「磁気力によるプラズマ加速でもってエネルギー解放をする」リコネクション説が提唱された。

リコネクション説はパーカー（Parker）博士らによってすでに30年以上も前から提唱されていたが、「ようこう」打ち上げに至るまでリコネクションの観測的証拠というのは非常に少なかった。そのためリコネクション説に反対する人が後をたななかったのである。（実はアメリカでは今でもまだそうらしい。）リコネクション理論の基礎になっている電磁流体力学の創設者であるノーベル賞学者アルベーン（Alfvén）博士までもが、強く反対していたほどであった²⁾。だから、「ようこう」がフレアのリコネクション説を確立したことは、天文学の歴史に残るほど重要なことと言って良いのである。（アルベーン博士は残念ながらつい最近亡くなられた。「ようこう」の活躍と時をほぼ同じくしているのは何かの因縁であろうか。）

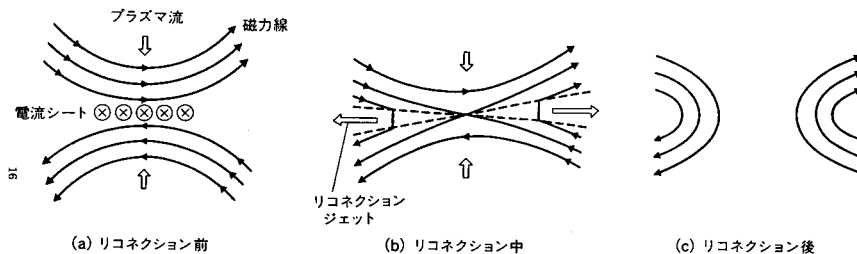


図1 磁気リコネクションの概念図（柴田・小杉¹⁾より）。

- (a) 磁力線がプラズマ流によって押しつけられ、磁気中性面に電流が流れる（電流シート）。
- (b) 電流のエネルギーが散逸し、リコネクションが起こる。左右に噴出する流れはリコネクション・ジェットと呼ばれ速度はアルベーン速度（コロナでは普通1000km/s以上）の程度である。磁力線の形状がカスプ型をなすことに注意。
- (c) 結果的に、磁力線のつながり方が(a)と入れ替わる。

ちょっと脱線するが、太陽分野以外の研究者とよく議論して出てくわすコメントに、『「ようこう」はリコネクション説を確立したと言うが、そんなのは昔から議論されていたことで、全然新しくないではないか』というのがある。わたしはあまのじゃくなので、これを聞くといつも『ブラックホールは昔から議論されていて全然新しくないが、まだ観測的に検出すらされていない（あるいは逆説的に言うと、毎年のようにブラックホール発見の報道がある）ではないか』と、思ってしまう。こういうとおそらく、ブラックホールとリコネクションではレベルが異なるという議論があるだろう。しかし、論理の構造は同じである。たぶん唯一の違いは、ブラックホールは小学生でも知っているが、リコネクションは大学生どころか物理学者でも普通は知らない、ということである。天文学者はどうだろうか？ 星形成領域の双極分子流の理論で有名なプドリッツ (Pudritz) 博士がかつて私にこう語ったことがある。

『天文学では、「磁場」は「ブラックホール」とほとんど同じレベルの扱いを受けている。なぜなら、みんな実体をよく理解していないのに、不思議な現象を見つけたらすぐそのせいにするからね。』

これを受けて私はこう言った。

『同じような言葉に「磁気リコネクション」があるね。みんなよく理解していないのにすぐ使う。しかし依然として観測的によくわかっていない。』

彼は笑って同意した。磁気リコネクションをよく理解していないのは、天文学者はおろか、専門の太陽物理学者でもしかりなのである。

4. 「ようこう」の見た太陽フレア

では「ようこう」が見つけた磁気リコネクションの証拠とはどんなものだったのであろうか？

表紙 (図2) を見ていただきたい。これは1992年2月21日に太陽の東のリムで発生したフレアの軟X線 (1 keV 程度) 像である。常田さん⁴⁾⁵⁾が

詳しく解析され、すでにいろんなところ出版されたりして有名になっているので見たことのある読者も多いと思う。この図がよくリコネクションの証拠として引き合いに出される。というのは非常にはっきりしたカスパ型形状 (先がとがった形) をしているからである。カスパのとがっているところはリコネクションがまさに起こりつつあるところ (またはその近く) に対応すると考えられる。しかもこのような軟X線像は連続してムービーの形で撮られているため時間変化もわかる。調べてみるとまさにリコネクション説が予想するように、カスパの形は時間とともに見かけ上大きくなっていくことがわかった (図3)。常田さんのさらに詳しい解析によれば、カスパの外側ほど温度が高い⁵⁾。これも磁気リコネクション理論の予想する通りであった。

ここで忘れてはならないのは、このようなフレアのモデルは今から20年以上前に、わが国の平山さん⁶⁾をはじめとする人々 (Carmichael, Sturrock, Hirayama, Kopp and Pneuman) によって発展させられてきたことである。そのためこのモデルは先駆者の頭文字をとってCSHKPモデルと呼ばれている (図4)。

このフレアは数時間以上続き、いわゆる Long Duration Event (LDE) フレアと呼ばれる種類のフレアである。(日本語にすると長寿命フレアか。) この種のフレアは大抵きれいなカスパ型形状を示し、温度分布も調べると上の例と同じような傾向を示す。したがって、少なくともこの種の長寿命フレアに関しては、リコネクション説はほぼ間違いないことが判明した。これは「ようこう」打ち上げ後半年余りの頃、1992年半ば頃のことであった。(この結果に、平山さんがいかに喜んだかは、皆さんご想像の通りである。)

ところが、である。フレアにはもっと短命のインパルス・フレアと呼ばれる種類があり、発生頻度はこちらの方が長寿命フレアよりも圧倒的に多い。そのインパルス・フレアではカスパが見

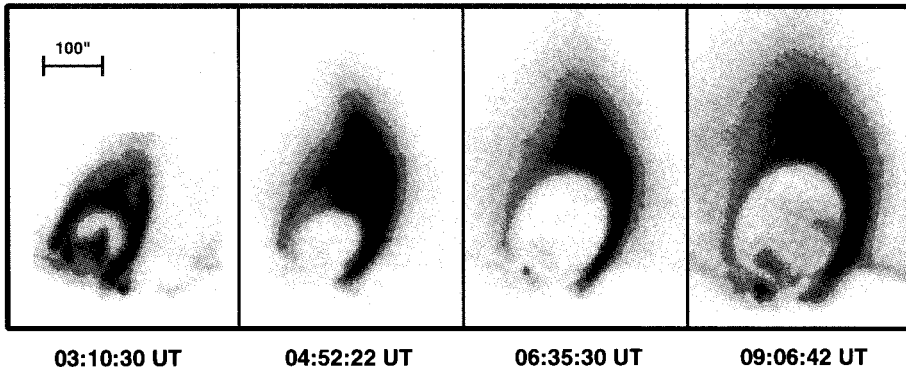


図3 軟X線 (1 keV 程度) で見た長寿命 (LDE) フレア (1992年2月21日のフレア; 常田ら⁴⁹⁵⁾) の時間変化。時間とともにカスパ型ループは次第に大きくなる。これは見かけ上の運動である。図はネガ。100''は約72000km に対応。

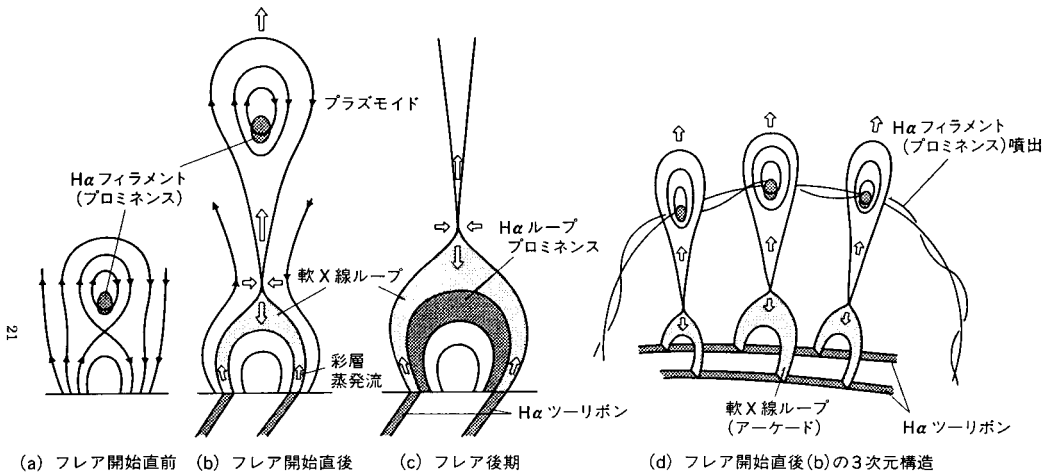


図4 フレアのCSHKP-リコネクションモデル (柴田・小杉¹⁾より)。大規模磁気ループの膨張にもなって低温プラズマ (H α プロミネンス) または高温プラズマ (しばしばプラズマモイドと呼ばれる) の噴出がある。このモデルは Carmichael, Sturrock, Hirayama⁶⁾, Kopp and Pneuman といった人々によって発展させられた。それゆえ CSHKP モデルと呼ばれる。

られないのだ！ インパルス・フレアを軟X線で見ると、単にループが光って見えるだけである。このようなフレアは実は20年前のスカイラブ時代から知られており、シンプル・ループフレアまたは単にループフレアと呼ばれていた。

スカイラブよりもはるかに良い感度をもつ「ようこう」軟X線望遠鏡をもってしてもカスパが見られないのは、この種のフレアでは磁気リコネクションが起きていないことの証拠ではないか？ 少なくとも長寿命フレアとは全く異なるメカニズ

ムでフレアが発生しているのではないか？

今度は平山さんにかわって内田さんが喜んだ。内田さんは15年以上も前から平山モデルとは異なる (リコネクションを含まない、または、少なくとも重要視しない) 独自のモデルを提唱されてきたからだ (内田と桜井: 1979年)。1988年に出版されたループフレアのモデルの論文は私との共著であり (内田と柴田⁷⁾)、私も責任の一端を負っている。

一方、「ようこう」でカスパがはっきりと見えて



きた長寿命フレアは、太陽の真ん中付近で見るとアーケード状に見えるので、内田さんは「アーケードフレア」と呼んでおられる。「ようこう」打ち上げ後しばらくしてあった記者会見で、内田さんは『「ようこう」はフレアには2種類（アーケードフレアとループフレア）あることを明らかにしました。』と発表された。表面的な観測事実としてはこの時点ではこれは間違っていたわけではないが、ループフレアは何も新しい発見ではなく、アーケードフレアがカスプ形状を示すことこそが新しい発見だったのである。もっともこのような表現をされた内田さんの気持ちもわからないでもない。

5. 増田君の大発見

さてその後、「ようこう」チーム内では、依然として論争が絶えなかった。リコネクションは普遍的に起こっているのか、果たしてフレアには2種類あるのか、などなど。典型的な論争は、もちろん内田一平山論争であった。

そうこうしているうちに月日が流れ、1993年の暮れになった。ある日のセミナーで、「ようこう」チームの東大大学院生（当時）の増田君が、驚くべき画像を発表した。それは太陽の縁で発生したインパルス・フレアの軟X線像と同時に撮影された硬X線像を重ねあわせた画像だった。軟X線像は上で述べたように、どう見てもただのループにしか見えない。ところが硬X線像を見るとループの上空に明るい領域があるではないか（図5（表紙）参照）。

硬X線は高エネルギー電子がイオンに衝突するときに制動放射によって放出される。したがって、硬X線を見れば高エネルギー電子が“見える”わけだ。この高エネルギー電子こそが、フレアのエネルギー解放のもっとも根源部分に近い情報を担っていると考えられる。

図5（表紙）をよく見ていただきたい。等高線で示したのが硬X線（30 keV程度）強度分布、背

景の濃淡が軟X線（1 keV程度）強度分布である。軟X線ループの足元に見える2つの硬X線源は、坂尾さんの詳細な解析によって、ループの頂上付近からやってきた高エネルギー電子の爆撃によって光っていることが判明した。ところが硬X線源はもう一つあり、その3つ目の硬X線源が軟X線ループの中ではなく上空にあるのだ！ このことは、エネルギー解放がループの中ではなくて、ループの上空で起きていることを意味する。さらに、多くの人に支持されてきたアルベーンのループフレアモデルや、私も責任の一端を担っている内田一柴田のモデルをも否定するのである。かわってこの種のインパルス・フレアでも長寿命フレアと同種の磁気リコネクションが起きている可能性ががぜん有力になってきた（図6）。私は今でも増田君の画像をはじめて見たときの心臓の高なりをよく覚えている。増田君の大発見はしばらくしてNatureに出版され、世界中に衝撃波となって伝わった⁹⁾。

ところで、どうしてこの増田君の大発見が「ようこう」打ち上げ直後ではなくて、2年以上も遅れてなされたのだろうか？ これには軟X線像と硬X線像の位置あわせという難しい問題が絡んでいる。打ち上げ直後の位置あわせの精度では、硬X線像がループの上空にあるのか否かが判定出来なかったのである。それを判定できるように精度を高めたのが増田君の功績なのだ。この増田君の大発見は、1993-1994年度の日本天文学会最大の発見であり、また、1993-1994年度の世界の太陽物理学界最大の発見でもあった。にもかかわらずそのような評価がなされなかった（記者会見も新聞報道もなかった）のは、きわめて残念としか言いようがない。

さてここで賢明な読者は次のように思うかもしれない。増田君の大発見は確かにすごいが、これだけでただちにリコネクション説が確立されたというのは早計ではないか？ リコネクション説が確立されたと言うには、もう少し別の面からの独

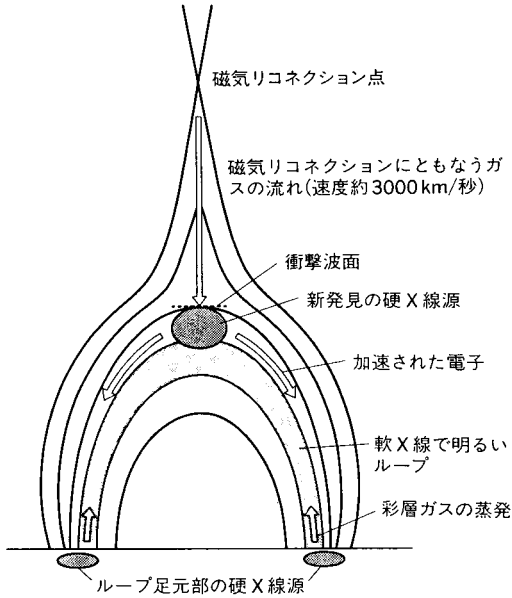


図6 インパルシブ・フレアのリコネクション・モデル (増田他⁹⁾)。

軟 X 線ループの上空に発見された硬 X 線源は、ループの上空で磁気リコネクションが起きていることを示唆する。すなわち、リコネクションにともなうガスの流れ(リコネクション・ジェット=速度約3000km/s)がループに衝突したところに衝撃波が発生して、新発見の硬 X 線源を形成すると考えられている。

立な観測的証拠が必要ではないか？ 実は同じような疑問が筆者と増田君にもあった。そこで考えたのは次のような仮説である。

もし増田君の調べたインパルシブ・フレアが、図4に示されたようなリコネクションによって発生したのであれば、軟 X 線ループや硬 X 線源のはるか上空で高温プラズマ(プラズモイドと呼ばれる)の噴出が起こっているはずであろう。軟 X 線ループよりはるかに大きな領域の軟 X 線画像を調べれば、何か見つかるかもしれない。

こう考えてループの上空の長時間露光データを二人で丹念に調べていった。そうしたら見事予想通りに、この種の一連のインパルシブ・フレアで、続々と高温プラズマの噴出が見つかったのである⁹⁾。

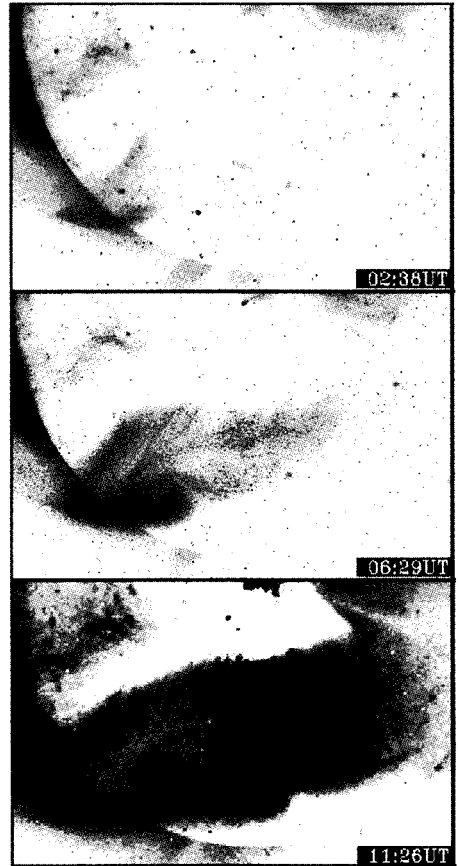


図7 「ようこう」軟 X 線望遠鏡で観測された1994年4月14日の巨大アーケード (McAllister 他11))。図はネガ。コロナ質量放出にともなって発生した。リコネクションを示唆するカスプ構造がはっきり見え、長寿命(LDE)フレアの形にそっくりである。2日後に巨大磁気嵐が地球で発生したが、「ようこう」観測に基づく予報のおかげでアメリカ・シカゴの電力会社が変圧器(これだけで5~10億円かかるという)などの破損の被害をまぬがれた。

ここに至って私は、リコネクション説の正しさを確信するにいたり、増田君の大発見の重要性をあらためて認識したのであった。

6. 巨大アーケードの発見：「ようこう」は電力会社を救った？

今からおよそ20数年前、スカイラブ衛星に搭載されたコロナグラフ(人工日食による観測装置)

は、外部コロナから惑星間空間に向けてしばしば太陽半径程度の巨大な高温プラズマのループが毎秒数 10–1000 km/s のスピードで噴出してゆくを見つけた。これは現在コロナ質量放出 (CME=Coronal Mass Ejection) と呼ばれている。そのコロナ質量放出にともなって、時に太陽半径のサイズにも達する巨大なアーケードが発生することが、「ようこう」観測によってわかってきた¹⁰⁾。図 7 を見ていただきたい。これは 1994 年 4 月 14 日に発生したコロナ質量放出にともなうコロナの変化の様子を示している¹¹⁾。最初に明るいカスプ構造が現れ、次第に巨大なアーケードに成長していく様子がよく見える。形の上からは前に述べた長寿命フレアと、瓜二つである。さらに詳しく調べると、形にとどまらず、時間変化、温度分布など様々な点で、長寿命フレアと類似の性質がどんどん見つかってきた。物理的には、この巨大アーケードはほとんど「フレア」と同じであると言える。このように異なったスケールで類似の現象が見られるというのは、たいへんおもしろい。(実は、後で述べるように、同じことが宇宙の現象にもあてはまる。)

余談であるが、図 7 の巨大アーケードが発生したとき、筆者は鹿児島内之浦の宇宙空間観測所で「ようこう」追跡の運用当番をしており、そのおかげで、この巨大アーケードの最初の発見者になる好運に恵まれた。当番の仕事の一つに、最新の「ようこう」観測データから太陽コロナで発生した異常現象を見つけ、電子メールで全世界の太陽観測所に報告するという仕事がある。その電子メールで、この巨大アーケードの発生を全世界に報告したのである。一週間ほどして東京に戻ると、「ようこう」チームのアメリカ側リーダーのアクトン (Acton) さんが、「4 月 14 日の巨大アーケードの発見で、NASA がアメリカ政府からたいそうほめられ、次に、「ようこう」チームが NASA からたいそうほめられた」と言うではないか。「ようこう」は NASA との国際共同プロジェクトでもあ

る。)事の真相はこうである。巨大アーケード発見の電子メールを受け取ったアメリカのある研究者が、これは巨大な磁気嵐に直結するとすぐ理解し、全世界に磁気嵐警報を発信した。予報通り 2 日後、非常に激しい磁気嵐が起こった。通常それくらい激しい磁気嵐が起こるとアメリカの電力会社の施設に少なからぬ被害が出る。ところがこの場合、事前に警報がでていたので被害は未然に防げ、電力会社はアメリカ政府に大層感謝した、というわけである。なんと、数億~数 10 億円の被害が防げたのだそうだ。アクトンさんから筆者がほめられたのは言うまでもない。(が、残念ながら、助かった被害額の 1 パーセントもこちらにはやってこなかった…。)

7. おわりに

フレアに関してはまだまだ書きたいことがいっぱいあるが、紙数もつきたので、今回はこれぐらいにしておいて、そのかわり書き残した重要な話題のいくつかを以下に箇条書きしておこう。

- (1) コロナはマイクロフレアに満ち満ちていることが発見された。(その物理状態や統計を調べると、普通のフレアと共通の性質を示すことが判明した。これについては、清水君の功績大。)¹²⁾
- (2) 宇宙ジェットによく似たジェット (見かけの速度数 100 km/s) がコロナのいたるところでマイクロフレアから噴出するのが発見された¹³⁾。(これらのジェットについてもリコネクションの証拠がどんどん見つかった。理論では横山君¹⁴⁾、観測では下条君¹⁵⁾の功績大。)
- (3) 以上を総合すると、小はマイクロフレアから、大はコロナ質量放出にともなう巨大アーケードに至るまで、太陽コロナの“フレア”現象は、リコネクション説で統一的に説明できそうな気配が見えてきたと言える (表 1 参照)¹⁾。
最後に残された謎について少し述べておこう。「ようこう」によってフレアのリコネクション説はほぼ確立されたが、リコネクションによるエネ

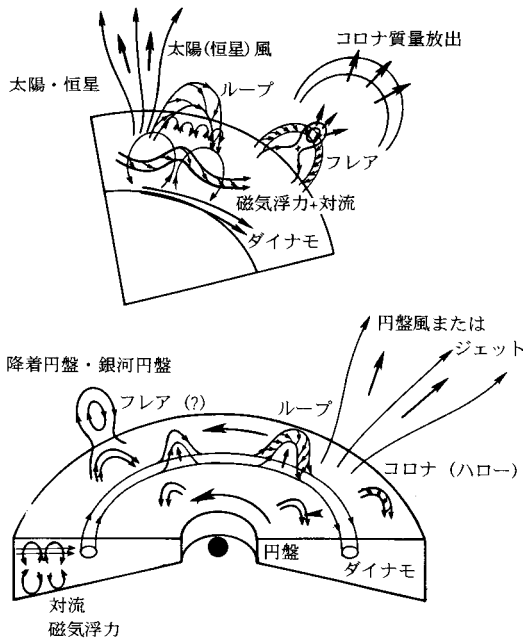


図8 星，降着円盤（および銀河円盤）におけるコロナ・フレア現象とそれに関連する電磁流体现象。

ルギー解放メカニズムの物理は100%解明されたと言えるだろうか？ 残念ながらまだ100%とは言えない。高エネルギー粒子の加速メカニズムという大問題がまだ残っている。さらに、リコネクション説に限っても、リコネクションにともなう1000 km/s以上の高速ジェットがまだ直接的に検出されていないという謎が残っている。これはしかし「ようこう」では空間を分解してのドップラー速度の観測が出来なかったのであるからある意味ではやむをえないと言えるだろう。コロナの空間高分解能撮像による速度場観測が強く望まれる。

リコネクションに至るまでの道筋，特にエネルギーの蓄積過程も，まだ，いぜんとして謎につつまれたままである。多くの観測家，理論家は，光球におけるプラズマの対流運動が磁場をひねることによって，エネルギーを蓄積するのではないか

と考えているが，もっと内部の奥深く，磁場がダイナモ過程によって生成されたときにすでにエネルギーが蓄積されていたという可能性もある。（私は実はそう考えている。もしそうなら，フレア問題はダイナモ問題に帰着する！）いずれが正しいか判定するには，コロナの観測だけではだめで，光球における磁場・速度場の，コロナとの同時精密観測が不可欠となる。

一方，「ようこう」により，コロナは「誰が想像していたよりもダイナミック」であることが判明したが，未解決の難問であるコロナ加熱は，このようなコロナのダイナミクス（特にマイクロフレア）と関連している可能性が強くなってきた。果たしてコロナはマイクロフレア（リコネクション）のような激しい機構で加熱されているのか（もしそうなら，コロナ問題はフレア問題に帰着する！），それとも以前から有力視されていたアルフベーン波によるものなのか？

これらの残された謎は2003年頃打ち上げを目指して計画の立案がされつつあるSolar B衛星¹⁷⁾による観測で解明されることを強く期待したい。

本解説では詳しく述べる余裕が全くなかったが，太陽フレアや太陽コロナによく似た現象は宇宙のいたるところで観測されている（図8）。その最大のもは活動銀河核であろう。1秒当たり放出されるエネルギーは太陽フレアのなんと1兆倍以上にもなる。活動銀河核の中心には，おそらく超巨大ブラックホールの周りを回る巨大な降着円盤があり，そこでは太陽フレアの何億—何千億倍のエネルギーの超巨大フレアがひっきりなしに起きているにちがいない¹⁸⁾。おもしろいことに，活動銀河核のミニチュア版とも言えるような現象が，近年，銀河系内の近接連星系や原始星で続々と見つかり出した。ただしミニチュアとは言っても太陽フレアに比べるとエネルギーは格段に大きい。小山さん，坪井さんによると，X線天文衛星「あすか」は非常に若い原始星で太陽フレアを何万倍も大きくしたような巨大フレアを発見したとい

う。一方、牧島さんによれば、最新の「あすか」の銀河・銀河団のX線観測データを説明するには、太陽フレアやコロナに似た現象が銀河団スケールや宇宙論的スケールでも起こっている可能性を考える必要があるかもしれない、という。

「ようこう」(Solar A)に続くSolar B衛星は、太陽フレア・コロナをロゼッタ・ストーンとして、上で述べたような天体フレア・コロナ現象を解明するための基礎を築くミッションであるという位置づけがなされるべきであろう。そのためにも計画の立案には太陽物理学者のみならず幅広い分野の天文学者・天体物理学者の参加が強く望まれる。

参 考 文 献

- 1) 柴田一成, 小杉健郎, 1995, 科学(岩波書店), vol. 65, 8月号, p. 524.
- 2) Ogawara, Y. et al. 1992, PASJ, 44, L41.
- 3) Alfvén, H. and Carlqvist, P. 1967, Solar Phys., 1, 220.
- 4) 常田佐久 1992, 科学(岩波書店), Vol. 62, No. 8, p. 480
- 5) Tsuneta, S. et al. 1992, PASJ, 44, L63; Tsuneta, S. 1995, Ap. J., in press.
- 6) Hirayama, T. 1974, Solar Phys., 34, 323.
- 7) Uchida, Y. and Shibata, K. 1988, Solar Phys. 116, 291.
- 8) Masuda, S. et al. 1994, Nature, 371, 495.
- 9) Shibata, K. et al. 1995, Ap. J. Lett., 451, L83.
- 10) Tsuneta, S. et al. 1992, PASJ, 44, L211; Hudson, H. S. et al. 1995, J. Geophys. Res., 100, 347.
- 11) McAllister, A. et al. 1995, ESA SP-373, p. 315.
- 12) Shimizu, T. et al., 1992, PASJ, 44, L147; 1995, PASJ, 47, 251.
- 13) Shibata, K. et al. 1992, PASJ, 44, L173; Shibata, K. et al. 1994, Ap. J. Lett., 431, L51.
- 14) Yokoyama, T. and Shibata, K., 1995, Nature, 375, 42.
- 15) Shimojo, M. et al. 1996, PASJ, 48, in press.
- 16) 嶺重慎, 竹内充, 根来均, 1995, 天文月報 vol. 88, 9月号, p. 408.
- 17) 桜井隆, 1995, 天文月報 vol. 88, 2月号, p. 61.
- 18) 清水敏文, 1995, 天文月報 vol. 88, 7月号, p. 316(軟X線望遠鏡の解説)

Challenge to the Riddle of Solar Flares —To what extent did Yohkoh resolve solar flares?—

Kazunari SHIBATA (*National Astronomical Observatory*)

Abstract: Since its launch on August 30, 1991, the solar X-ray observing satellite Yohkoh has been successfully observing the Sun and obtained data of more than 1000 flares.

From extensive analysis of these vast amount of data, the riddle of flares has begun to be solved. Yohkoh data has finally given us various evidence supporting the magnetic reconnection hypothesis, which has been considered to be a promising model for flares but has often been questioned due to the lack of clear observational evidence.



星のゆりかご
小北純子(和歌山県)