

物理科学雑誌

parity

第17巻第9号
2002年9月1日発行
毎月1回1日発行
1986年3月7日第三種郵便物認可

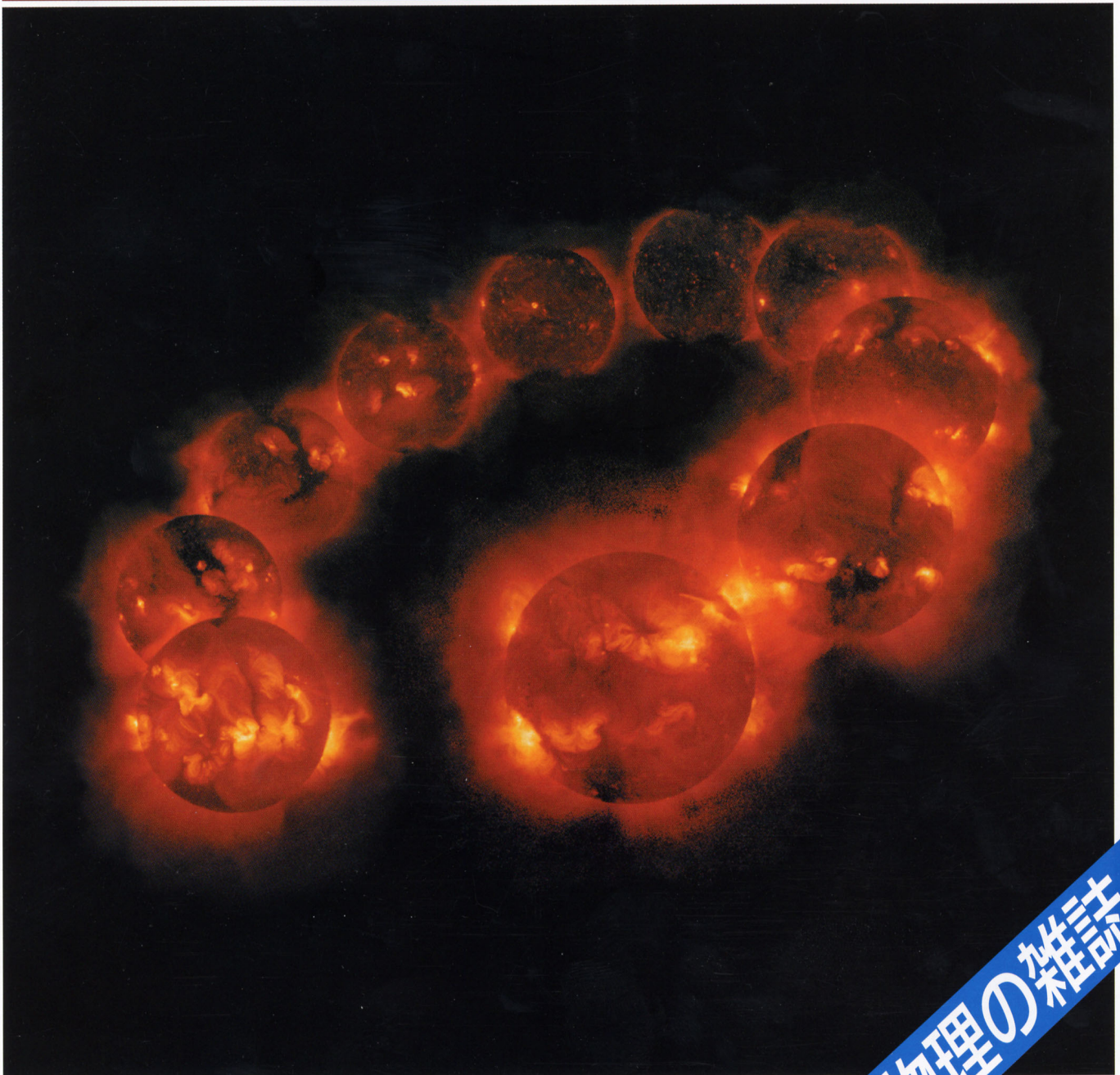
ISSN 0911-4815
PHYSICS TODAY 提携

パリティ

2002
09

粒界で決まる高温超伝導応用法 | 熱乱流: その構造とスケーリング
生体分子1個を操る | 太陽フレアとコロナはどこまで解明されたか?

磁気秩序と高温超伝導 | 超伝導量子ビットの実現が見えてきた



MARUZEN

物理の雑誌

太陽フレアとコロナはどこまで解明されたか？

太陽観測衛星「ようこう」10年の成果

柴田一成

太陽 X 線観測衛星「ようこう」は、1991年に打ち上げられて以来10年が経過した。太陽観測衛星としては希有の長期観測である。その間に観測されたフレアやコロナの膨大なデータから、フレアの磁気リコネクション説がほぼ確立され、コロナの予想外のダイナミックな姿が明らかになった。この10年の成果を概説する。

*1 本稿執筆中の12月15日、「ようこう」は日食観測のさいに起きたトラブルのためバッテリー電圧不足状態に陥り、たいへん残念なことに現在は観測中断の状態にある。

† 「今月のキーワード」(p.78)参照。

はじめに

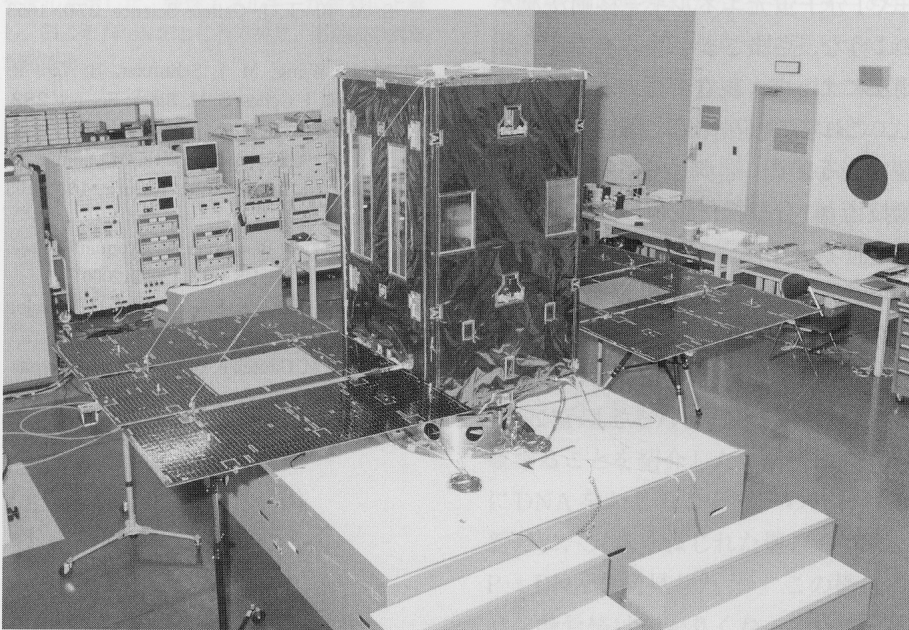
現代は太陽観測の黄金時代である。予想をはるかに超える太陽の激しい素顔が、太陽観測衛星「ようこう」(1991年打ち上げ)、SOHO(1995年打ち上げ)、TRACE(1998年打ち上げ)などによって次々と明らかにされ、太陽研究の大革新が進行中である。わが国では、太陽地上観測(京都大学飛騨天文台、国立天文台など)や理論シミュレーション研究の活躍も特筆してよいだろう。10年前に比べて、われわれの太陽認識は一新したといえる。その先べんを切り、現在もなお活躍中なのが、わが国の太陽 X 線観測衛星「ようこう」である<図1>^{*1}。

「ようこう」は、太陽面爆発(フレア)やコロナ[†]の成因を解明することを目的として、1991年8月30日に宇宙科学研究所鹿児島宇宙空間観測所(通称、内之浦基地)より打ち上げられた^{1), 2)}。

搭載された観測機器は、30 keV以上(～93 keV)の硬 X 線像を世界で初めて撮像した硬 X 線望遠鏡(HXT, Hard X-ray Telescope), CCDを用いることにより1～3 keVの軟 X 線像を高速連続撮影するのに成功した軟 X 線望遠鏡(SXT, Soft X-ray Telescope), 軟 X 線領域の特定の波長の輝線を分光測定するブラッグ分光器(BCS, Bragg Crystal Spectrometer), 数 keV～100MeV の X 線～ガンマ線スペクトルを測定する広帯域スペクトル計(WBS, Wide Band Spectrometer)の計4種である。

日本、米国、英国の3国による国際共同ミッションとして「ようこう」は打ち上げ以来10年間にわたり連続観測を続け、太陽活動サイクルのほぼ1周期(11年)分を世界で初めて観測した科学衛星となった<図2>。この間に撮影した軟 X 線画像は500万枚以上、観測した硬 X 線フレア<図3>は2800個以上と、ギネスブックものの記録をいくつもつづけている。特筆すべき成果は(1)太陽フレアが磁気リコネクション過程であることを確証したこと、(2)太陽コロナがこれまで誰が想像していたよりも激しくダイナミックに変動していることを発見したこと

の2点に集約できるだろう³⁾。これ以外にも、地磁気嵐を引き起こすコロナ質量放出(CME, coronal mass ejection)の前兆を X 線をとらえ、その予測可能性を実証(いわゆる宇宙天気予報の基礎づけ)するなどの成果もある。これらの成果の天文学、宇宙物理学、地球物理学、プラズマ物理学など隣接分野へのインパクトはきわめて大きく、「ようこう」の成果を軸にこの10



<図1>「ようこう」衛星
打ち上げ前の写真。

*2 H α 単色光というのは、電離した水素が出す波長656 nmの光のこと。

年、国内外での学際的な研究交流が著しく進んだ。とりわけ磁気リコネクション研究へのインパクトは大きい⁴⁾。

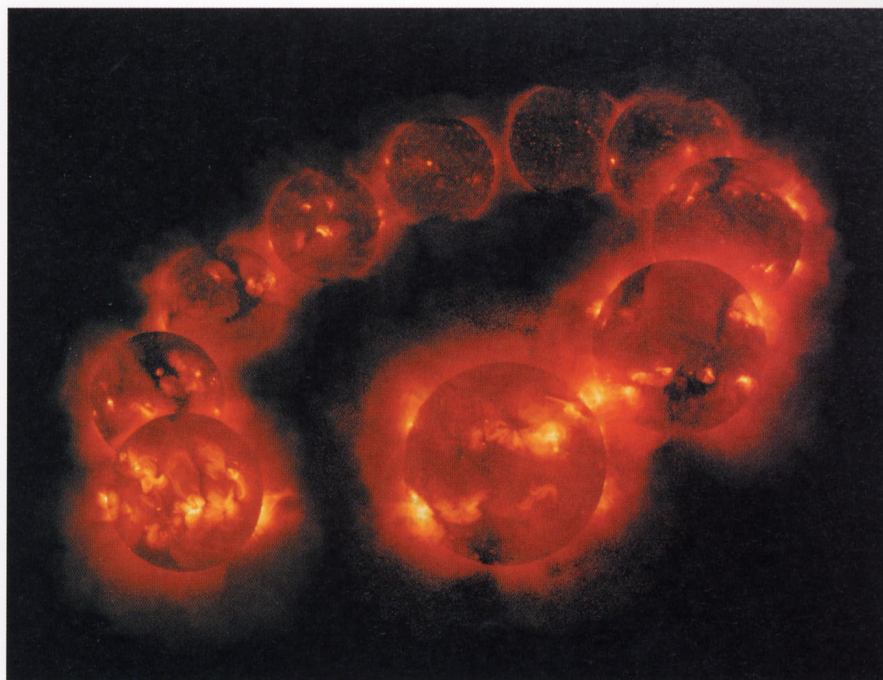
以下では、この磁気リコネクション研究へのインパクトを中心に、「ようこう」が成し遂げた10年の成果をくわしく解説しよう。

フレア

磁気リコネクションと軟X線カスプ構造

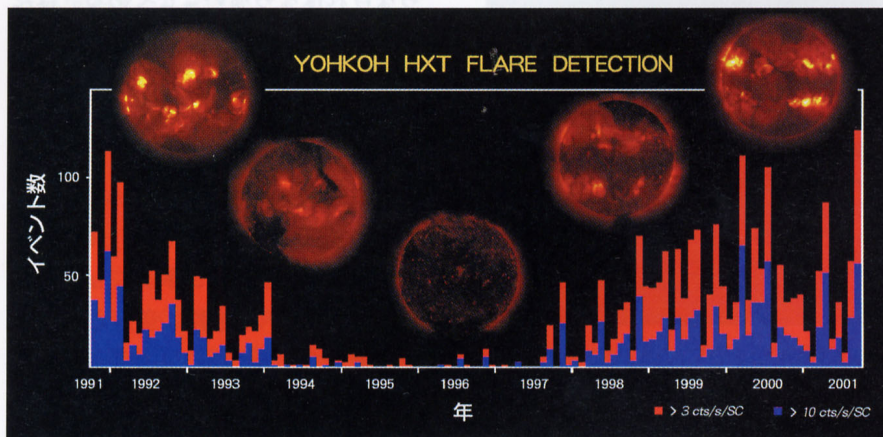
フレアとは太陽大気中で発生する爆発現象のことで、太陽面爆発ともいわれる。19世紀中ごろに可視光観測で発見され、20世紀中ごろには黒点磁場との関連が明らかになった。H α 単色光^{*2}でフレアを見ると、2か所が同時に光ることが多い。これは磁極のNとSに対応している。H α 単色光は太陽大気の色層とよばれる1万度くらいの領域を見ているので、フレアは当初、色層の現象かと思われた。ところが、20世紀後半に入るとフレアによる電波バーストやX線バーストが発見され、フレアの本体は色層上空のコロナ中で発生していることが判明した。フレアは1万度の爆発現象ではなく、強いX線放射や高速電子ビーム加速をとともう、1千万度の超高温プラズマ爆発現象であることがわかったのである。このような超高温プラズマや高速電子ビーム発生の有力なメカニズムとして、そのころ(1950~60年ごろ)提唱されたのが磁気リコネクション説であった。

磁気リコネクションとは、逆向きの磁力線がつなぎ替わる過程のことで、プラズマ中の磁力線がゴムひものような性質をもっているために発生する。磁力線が突然つなぎ替わって尖った形状(カスプとよばれる)ができると、磁力線にトラップされたプラズマはパチ

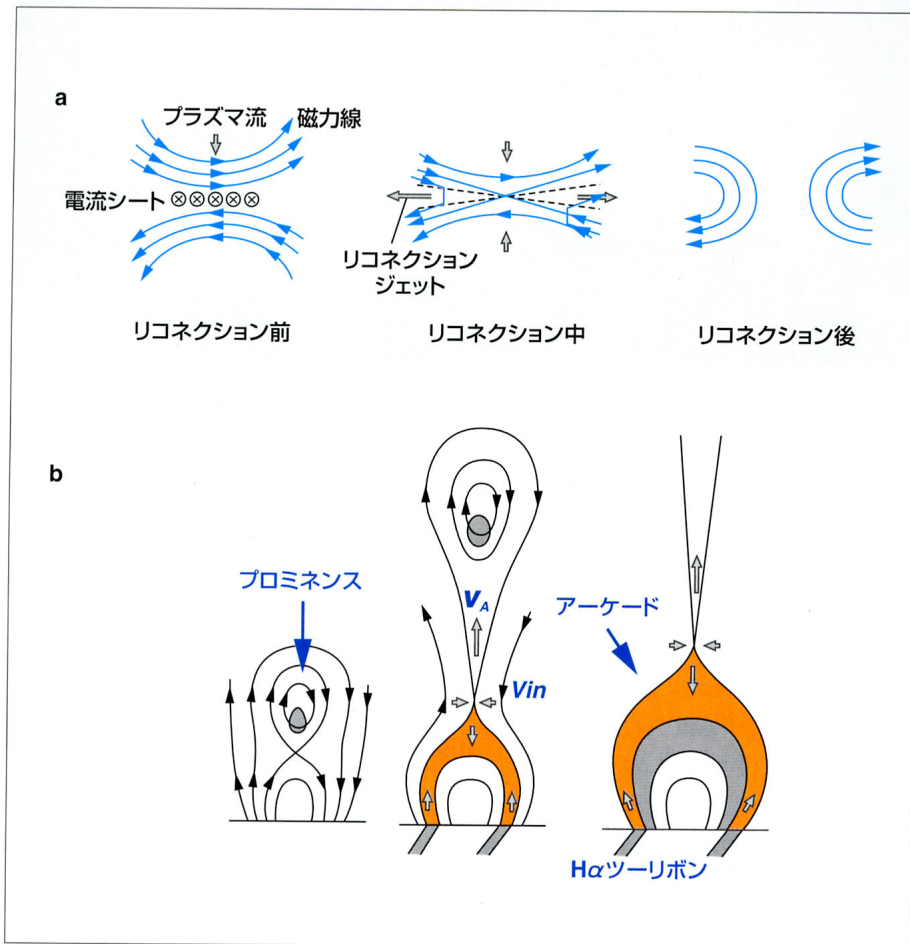


〈図2〉約1年ごとの太陽の軟X線画像
左下が1992年の太陽。明るく見えているのが黒点近傍の活動領域コロナ。

ンコ効果(磁気張力)によって急に加速され、加速されたプラズマがどこかに衝突すると衝撃波が発生して、超高温プラズマが発生する〈図4〉。しかし、リコネクション説には難点が多かった。たとえば、磁力線が突然つなぎ替わるためには電流の散逸が必要だが、それを実現する電気抵抗発生メカニズムが(いまもなお)謎である。これは核融合プラズマ磁気閉じ込め装置における閉じ込め失敗(ディスラプション)や、地球磁気圏サブストームのさいに起きている磁気リコネクションと共通の問題である⁴⁾。太陽フレアに特有のもっと根源的な謎は、フレアが1万kmスケールで起きているのに、リ



〈図3〉10年間の硬X線フレア数
太陽活動の11年周期に応じて、フレアの数が増減している。背景に約2年ごとの太陽の軟X線像も示す。



〈図4〉磁気リコネクション

(a) 磁気リコネクションの概念図。逆向きの磁力線がつなぎ替わり、エネルギーが解放される。(b) 太陽フレアのリコネクションモデル(Carmichael-Sturrock-Hirayama-Kopp-Pneuman model, あるいはしばしば5人の名前の頭文字をとってCSHKPモデルとよばれる)。上方へ噴出するプロミネンスの下で磁気リコネクションが起こり、その結果、カスプ形状の高温ループができる。またループの足元の彩層は、磁力線に沿って伝わったエネルギーによって加熱される。これがH α 線単色像で見えるH α ツーリボンである。ループは多数並んで発生するので、3次元的にはアーケードとして見える。

コネクション説では磁力線のつなぎ替えが1m以下の小さなスケールで起こらなければならないことである。はたして、そんな小さな空間スケールの物理が、1万km以上もある大きなフレアのエネルギー解放をコントロールしているというようなことが、本当に起きているのだろうか？ このような理由のため、「ようこう」打ち上げ(1991年)のころには、リコネクション説に反対する太陽研究者は意外と多かった。そして、何とんでも最大の難点は、リコネクションの直接の観測的証拠がほとんどなかったことである。フレアはコロナ中で起きており、そこから大量のX線が放出されているので、

フレアのリコネクション説を検証するにはフレアとコロナの高空間分解能X線撮像観測が不可欠だ。というわけで、太陽X線観測衛星「ようこう」が打ち上げられたのである。

さて、では「ようこう」が見たフレアはどのようなものだったのだろうか？ 〈図5〉は「ようこう」の軟X線遠鏡で撮影されたフレア軟X線像の時間変化を示す^{5), 6)}。これは「ようこう」の観測でもっとも有名な画像なので、読者の中にはすでにどこかでご覧になられた方も多いかもしれない。この図は、フレアの形がリコネクション説〈図4b〉の予言どおりのカスプ形状をしていることをはっきりと示している。また、時間とともにフレアのサイズ(高さおよびループの両足間の距離)が次第に大きくなるのもわかる。これは、リコネクションしてループになった磁力線が次々と降り積もっていることを表しており、これもリコネクションの証拠である。さらに、温度分布を調べると、カスプのすぐ外側がもっとも高温であり、内側ほど低温になっていることが判明した。これはリコネクションの位置(カスプのすぐ上空)と冷却の効果から自然に説明でき、これもリコネクションの証拠といえよう。

■2つ目玉硬X線源とループトップ硬X線源

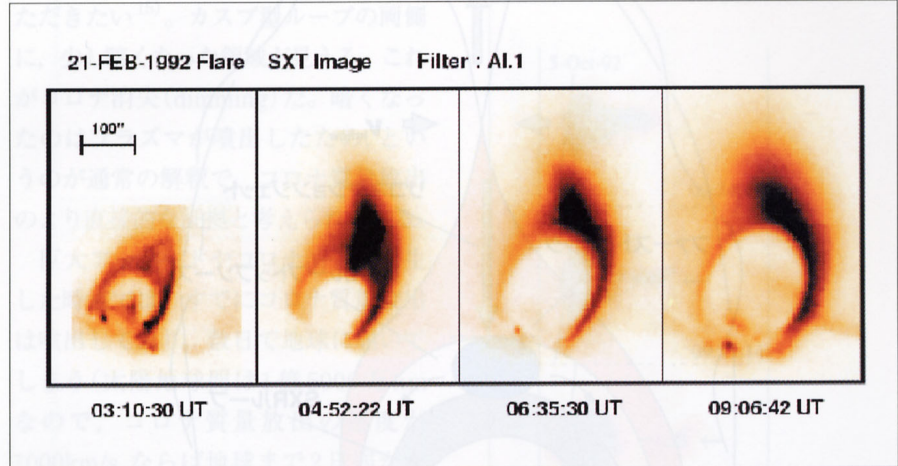
以上のようにして、長年有力視されつつも決定的な観測的証拠がなかったフレアのリコネクション説に対して、ついに決定的な証拠がもたらされた。ところが、これでフレア問題は一気に解決したかという、そうではなかった。〈図5〉のフレアはいわゆるLDE(Long Duration Event)フレアと

よばれる比較的長寿命(1時間以上)のフレアで(以下、長寿命フレアとよぶ)、サイズが大きくよく目立つが、その代わりに発生頻度は小さい。フレアにはもっと短寿命(1時間以下)のインパルスフレアとよばれる種類があり、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、カスプが見られないのだ！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。これは何を意味するのだろうか？大きな長寿命フレアでは磁気リコネクションが起きているが、小さなインパルスフレアではリコネクションが起きていないのだろうか？かつてアルヴェーン(Hannes O. G. Alfvén)が提唱したループ電流崩壊説のような、リコネクション以外のエネルギー解放メカニズムが働いているのだろうか？

このような議論が活発になされていた1993年暮れのある日、衝撃的な画像が発表された。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線像とを重ね合わせた画像だった。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6)⁸⁾。

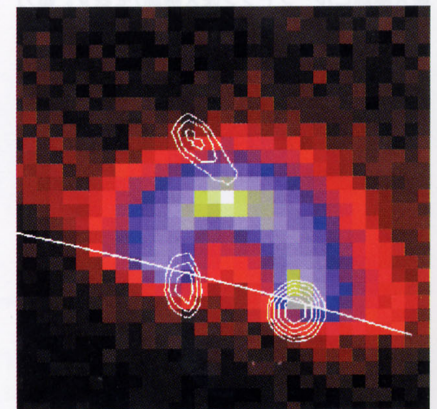
硬X線は高エネルギー電子がイオンに衝突するときに、制動放射によって放出される。したがって、硬X線を見れば高エネルギー電子が“見える”わけだ。この高エネルギー電子こそが、フレアのエネルギー解放のもっとも根源部分に近い情報を担っていると考えられる。

〈図6〉をよく見ていただきたい。等

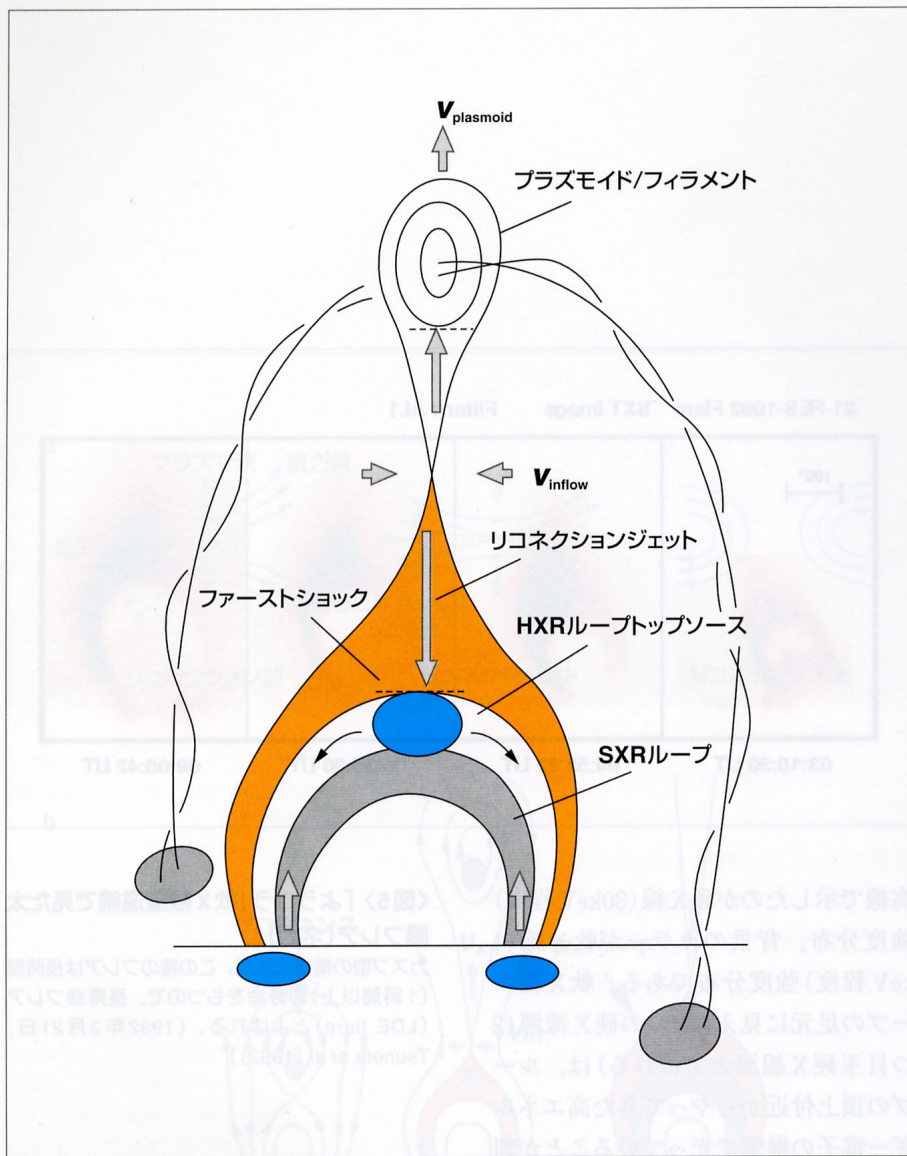


〈図5〉「ようこう」軟X線望遠鏡で見た太陽フレア(ネガ)
カスプ型の構造に注意。この種のフレアは長時間(1時間以上)の寿命をもつので、長寿命フレア(LDE flare)とよばれる。(1992年2月21日, Tsuneta *et al.*(1992))

高線で示したのが硬X線(30keV程度)強度分布、背景のカラーが軟X線(1keV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(2つ目玉硬X線源とよばれる)は、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で光っていることが判明した⁷⁾。ところが硬X線源はもう1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て上空にあるのだ！このことは、エネルギー解放がループの中ではなくて、ループの外(上空)で起きていることを意味する。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、ひょっとしたらインパルスフレアでも、長寿命フレアと同様な磁気リコネクションがループ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、ループは見かけ次第に大きくなる。さらに、〈図6〉のフレアに関してコンプトンガンマ線衛星による高時間分解能硬X線データをくわしく解析することにより、硬X線を放射する高エネルギー電子の加速場所がたしかに軟X線ループの上空であることが、「よう



〈図6〉インパルスフレアの硬X線像(等高線)と軟X線像(カラー)
軟X線ループ上空の硬X線源に注意。斜めの白線は太陽の縁を示す。(1992年1月13日, Masuda *et al.*(1994))



〈図7〉 インパルスフレアと長寿命フレアを統一するリコネクションモデル

線は磁力線を表し、灰色の部分は軟X線で見える構造、青い部分は硬X線で見える構造(2つ目玉硬X線源とループトップ硬X線源)を表す。磁力線形状については、〈図3〉の太陽フレア・リコネクションモデルと基本的には同じであることに注意(この図のプラズモイド/フィラメントは、〈図3〉のプロミネンスと基本的には同じもの。ただし、この図は3次元的に描かれていることに注意)。(Shibata et al.(1995))

こう」の観測とは独立に確認された⁹⁾。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よばれる高温プラズマの噴出があるはずだ〈図7〉¹⁰⁾。そのような高温プラズモイド噴出は実際にあるのだろうか? 〈図8〉を見ていただきたい¹¹⁾。これは〈図6〉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に、高温プラズマのかたまりが秒速300 kmくらいで噴出しているのが見てとれる。このようなプラズマ噴出現象(X線プラズモイド)は、多くのフレアにとま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。

■ コロナ質量放出にともなう現象

■ 巨大アーケード

いまからおよそ30年ほど前、OSO7衛星に搭載されたコロナグラフ(人工日食装置)は、外部コロナから惑星間空間に向けて太陽半径程度の巨大な高温プラズマのかたまりが猛スピードで噴出してゆくのを見つけた。これは現在コロナ質量放出とよばれている現象で、典型的な速度は数10~1000km/s、全質量は50~500億トンにも達する。コロナ質量放出が地球に衝突すると、地磁気嵐を引き起こし、人工衛星や地上送電線、変電所などに甚大な被害を及ぼすことがある。そのため「宇宙天気予報」にとってコロナ質量放出の予報が重要である。コロナ質量放出のうちでフレアにともなうものは約4割しかないので、コロナ質量放出はフレアとは異なる物理現象であるとか、フレアは宇宙天気にとって重要ではないとか、しばしばいわれてきた。しかしこれは本当にそうなのだろうか? コロナ質量放出が起きたとき、コロナはどうなっているのだろうか?

〈図9〉を見ていただきたい¹³⁾。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(「ようこう」による軟X線像)を示している。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。さらにくわしく調べると、形にとどまらず、時間変化、温度分布などさまざまな点で、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。しかし、おもしろいことにこの巨大アーケードは、太陽全体からの軟X線をモニターしているGOES衛星の観測ではいっさい見えない。巨大ではあるがX線強度が弱すぎるのだ。したがって、これまでいわゆる“フレア”として気づかれることはなかった。フレアと無関係とされた多くのコロナ質量放出は、実はこのような巨大アーケードをともなっていたのである^{12), 13)}。また巨大アーケードが形成されるとき、しばしば同時に巨大なプロミネンス噴出が起きていることも、H α 観測や電波ヘリオグラフ観測からわかってきた¹⁴⁾。

ところで、この1994年4月14日の巨大アーケード発生後2日たってから地球で巨大地磁気嵐が発生したが、「ようこう」の観測に基づく予報のおかげで米国シカゴの電力会社の変圧器（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。太陽地球環境（すなわち宇宙天気）予報における太陽X線撮像観測の有用性が、このケースで実証されたといえよう。

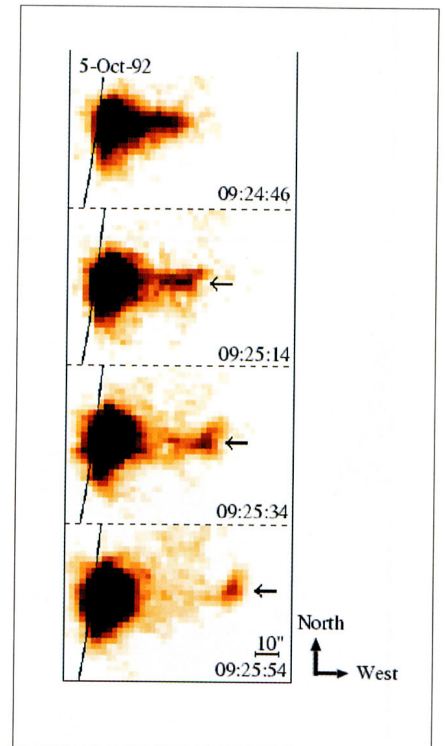
■ コロナ消失とシグモイド

前節では巨大アーケードがコロナ質量放出の証拠、したがって、地磁気嵐の前兆になるという事例を紹介した。巨大アーケード以外にコロナ質量放出の証拠はないのだろうか？ 1つは、実際にコロナプラズマの噴出の現場をとらえることである。その具体例が、前節で述べたX線プラズモイドである。しかし、これはフレアやアーケードが太陽の縁で発生しないとなかなか見えてこない。フレアやアーケードが太陽の真ん中で発生したときには、何か見えないだろうか？ 〈図10〉をご覧い

ただきたい¹⁵⁾。カスプ型ループの両側に、少し暗くなった領域が見える。これがコロナ消失(dimming)だ。暗くなったのはプラズマが噴出したため、というのが通常の解釈で、コロナ質量放出のより直接的な証拠と考えられている。

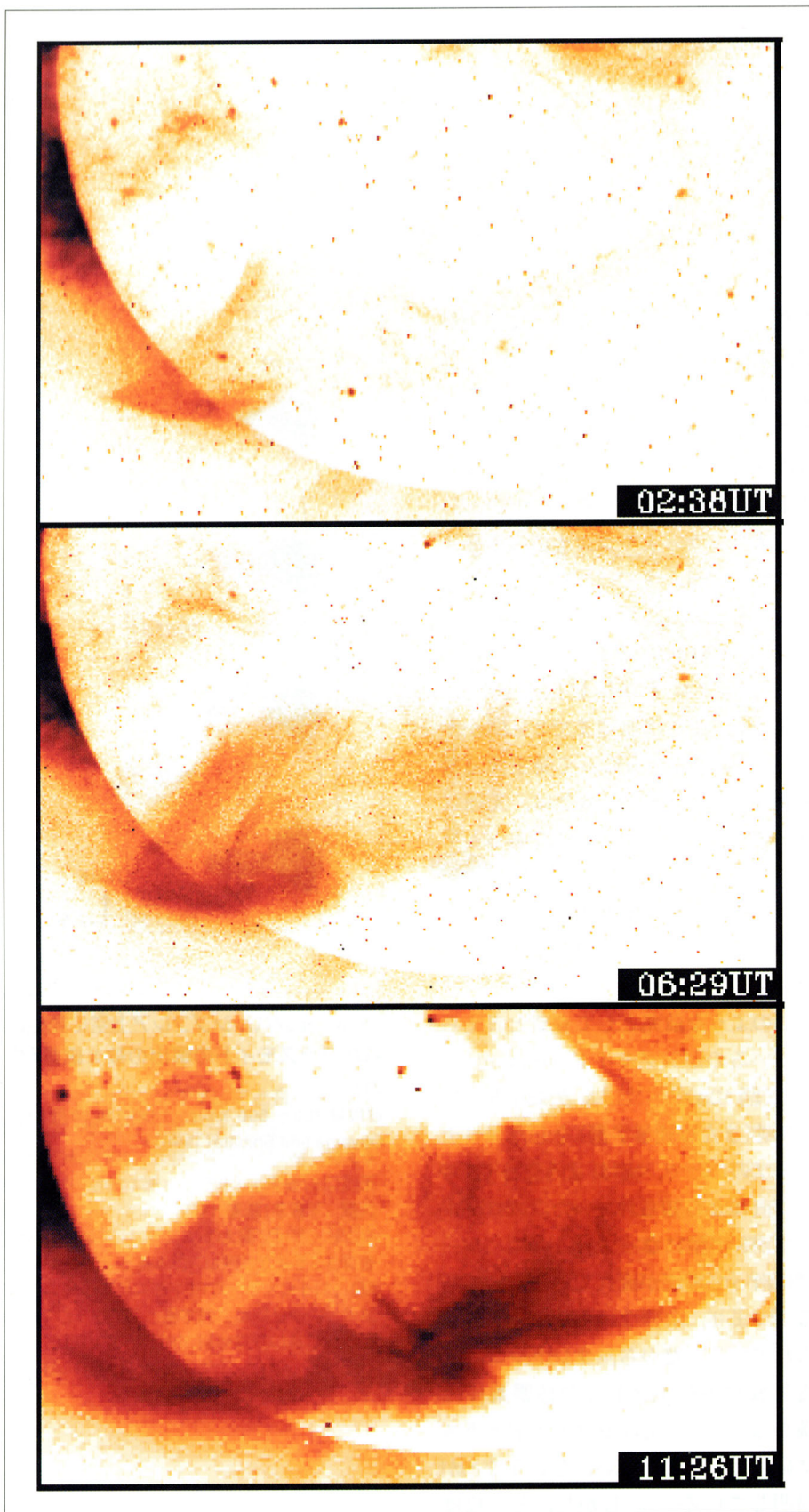
巨大アーケードやコロナ消失が発生した時点では、すでにコロナ質量放出は噴出しており、数日で地球に届いてしまう(太陽地球間は1億5000万kmなので、コロナ質量放出の速度が1000km/sならば地球まで2日弱かかる)。フレアともなって発生する放射線(太陽宇宙線)の場合は、光速に近いスピードで伝播するのでもっと早く、わずか8分で太陽から地球に到達してしまう。宇宙飛行士への影響を考えると、もっと前から前兆を予測できないものだろうか？

このような前兆として有望と考えられているのがシグモイド(sigmoid)である〈図10a〉^{15), 16)}。シグモイドとはS字型(または逆S字型)をしたコロナループのことで、実は「ようこう」打ち上げ直後から知られていた。コロナループがS字型になっているのは、ループに沿って電流が流れているためである。つまり、余分なエネルギーが蓄えられている。だから、フレアやコロナ質量放出の前兆としての必要条件は満たしている。実際シグモイドとカスプ発生との相関がよい、ということが判明している¹⁶⁾。しかし、どの程度までフレアやコロナ質量放出の予報に役立つかについては、まだよくわかっていない。今後の課題である。



〈図8〉インパルスフレア上空に発見されたプラズモイドの噴出の軟X線像(ネガ)

速度は250～500 km/s。(1992年10月5日, Ohyama and Shibata(1998))



〈図9〉「ようこう」軟X線望遠鏡で発見された巨大アーケード

2日後地球で巨大な磁気嵐が発生した。図はネガで、太陽の南半球を示す。太陽の縁が図の東側ではっきり見える。(上図)カスプ発生、(中図)カスプループの成長とともに、アーケードが西側(右側)に向けて発達、(下図)アーケードが南半球を覆いつくすほどに発達。(1994年4月14日; McAllister *et al.*(1996))

コロナのダイナミクス

■ マイクロフレアとX線ジェット

日食のときに真珠色に輝くコロナは、実は100万度もの高温状態にある。この重要な事実が発見されてから半世紀以上たつが、いまなお、なぜコロナが100万度もの高温状態にあるのかよくわかっていない。これをコロナ加熱の謎という。太陽だけでなく、多くの星や銀河にもコロナがあることがわかっているので、天文学上の大難問だといってよい。「ようこう」はこのフレア加熱の謎に対しても果敢にチャレンジした。コロナはいかにして100万度に加熱されているか？ コロナの正体は何か？

最初の節でも述べたように、「ようこう」による軟X線の動画は、コロナの驚くべき姿を明らかにした。軟X線の動画を見ると、活動領域コロナループがたえず断続的に惑星間空間に膨張していくのがわかる¹⁷⁾。また、コロナのあらゆるところでチカチカと微かな爆発やプラズマの噴出が起きているのに気づく。すなわち、「コロナはこれまで予想されていたより、はるかにダイナミック」だったのである。これはそれまで信じられてきた“静的なコロナ”の描像を根底から覆す画期的発見ということができ、未解決の難問であるコロナ加熱機構は“ダイナミックコロナ”と深く関係している可能性が出てきた。

その“ダイナミックコロナ”の典型的現象が、マイクロフレアとX線ジェットである。マイクロフレアとは通常フレアより規模が小さい爆発現象のことをいい、もともと空間分解能のないX線観測から存在が知られていた。こ

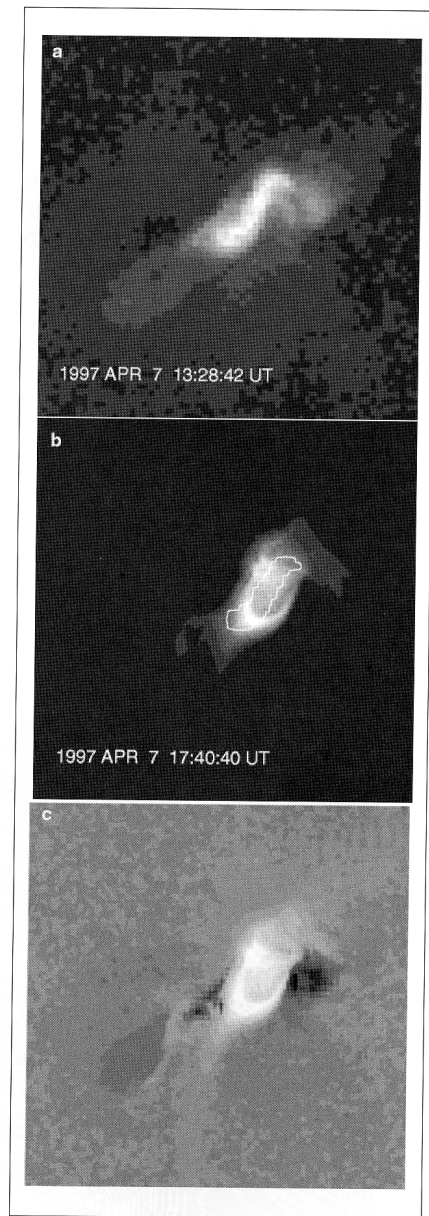
れが「ようこう」の軟X線望遠鏡によって、1万km程度の小さなループ(複数)が突然明るくなる現象として発見されたのである^{18), 19)}。活動領域はマイクロフレアに満ち満ちており、エネルギーの小さいマイクロフレアほど発生頻度が高い。興味深いことに、この傾向は通常のフレアと同じである(さらに地震の発生頻度の統計とも似ている)。くわしく調べると、マイクロフレアも磁気リコネクションによって発生している証拠が見つかった。ひょっとしたら、コロナは無数のマイクロフレア(微小スケールのリコネクション)で加熱されているという可能性はないだろうか? 統計データを使ってマイクロフレアによるコロナ加熱率を見積もると、残念ながらマイクロフレアだけではコロナを加熱するのにエネルギーが足りないことがわかった。では、「ようこう」で分解できないくらい小さなフレアであるナノフレアやピコフレアが大量に発生して、コロナを加熱しているのだろうか? それとも、古くから議論されているアルヴェーン波による加熱なのだろうか?

また、「ようこう」で新たに発見されたもう1つの現象に、X線ジェットがある²⁰⁾。ジェットとは細長く絞られたプラズマ流のことであり、この20年間ほどの間に、活動銀河中心核、恒星形成領域、連星系など、宇宙のあらゆるところでジェットが続々と見つかったことは記憶に新しい。「ようこう」は、太陽コロナにおいても宇宙ジェットとよく似たジェットがひんばんに発生していることを発見したのである。ジェットの長さは1万~40万km、見かけの速度は10~1000 km/sであり、ほとんどの場合、ジェットの足元

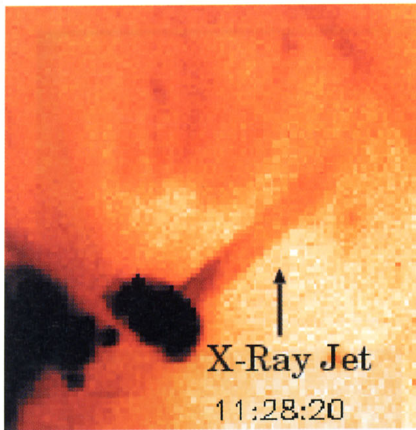
近くで同時にマイクロフレアが発生している<図11>²¹⁾。ジェットの足元付近のコロナの構造をくわしく調べると、ジェットの発生の前と後で磁気ループの形、特にループのつながり方が変化していることが多い。これは磁気リコネクションを思い起こさせる。実際、コンピューター数値シミュレーション²²⁾によれば、X線ジェットとマイクロフレアは、太陽内部から浮かび上がってきた磁気ループとコロナ磁場の間で起こるリコネクションによって非常によく説明される<図12>。おもしろいことに、観測がよりくわしくなるにつれて、より微小なジェットがどんどん見つかった。ひょっとしたらジェットも、コロナ加熱に何らかの役割を果たしているかもしれない。

■ “フレア”の統一的描像

以上の新しい「ようこう」観測をもとにすると、マイクロフレアやX線ジェットまで含めて、“フレア”現象の統一的描像が見えてくる²³⁾。<表1>に、マイクロフレアから巨大アーケードにいたるまで、さまざまな“フレア”現象の典型的物理量をまとめておこう。これを見ると、4つの異なる“フレア”現象は、そのサイズが2~3桁異なるにもかかわらず、時間スケールはアルヴェーン時間(t_A)[†]で規格化すると同じ程度(10~100 t_A)になることがわかる。興味深いことに、この時間スケールは、磁気圏や実験室で知られている磁気リコネクションが起こる時間スケールとだいたい一致している。また、解放エネルギーは、その空間体積内の全磁気エネルギーの程度である。これも磁気リコネクション説と矛盾しない(何桁にもわたるエネルギーの差は、主としてサイズの差で決まっている)。



<図10> コロナ消失の軟X線像 (b)から(a)を差し引いた軟X線強度分布が(c)に示されている。黒い部分が軟X線強度が低下したところで、コロナ消失領域に対応する。(a)のS字型コロナループはシグモイドとよばれる。(Sterling and Hudson(1997))



〈図11〉X線ジェットの軟X線像(ネガ)
 ジェットの長さはおよそ20万km。ジェットの左下に見える明るい領域がマイクロフレアで、ジェットはそこから右上の方向に秒速100km以上の速度で噴出している。(Shibata *et al.*(1992))

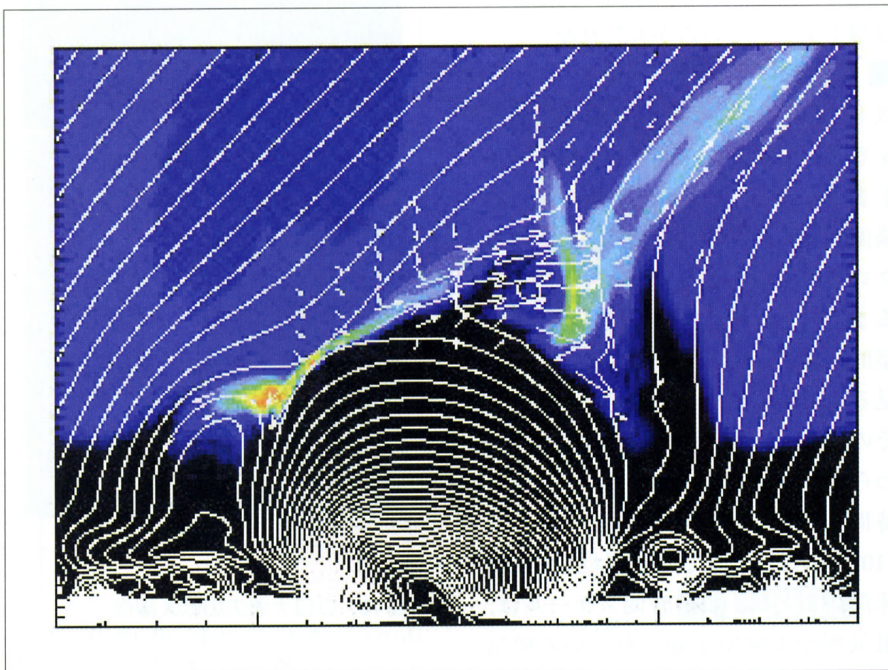
さらに興味深いのは、4種の“フレア”はどれも、従来考えられていた以上にプラズマ噴出をともなうことが多いことである。たとえば長寿命フレアやインパルスフレアからは、高温プラズマモードが予想以上に数多く噴出しているし、マイクロフレアからはしばしばX線ジェットが噴出している。逆に、従来フレアとは無関係と思われていたコロナ質量放出の足元には、フレアそっくりの巨大アーケードが見つかった。プラズマ噴出はリコネクションの原因と結果の両方に深く関わっているから、この新事実はリコネクション説を強く支持する証拠といえよう。

ただしリコネクションに関しては、

まだわからないことが山積みだ。たとえば最初の章に述べたことにも関連するが、リコネクションの進行速度が何で決まっているのか不明である。ミクロな物理なのか、境界条件なのか、はたまたマクロな非定常ダイナミックスなのか? 「ようこう」による観測は、マクロなダイナミクスの役割に関して多くのヒントを提供した。一方、リコネクションにともなって発生すると考えられる高速ジェットや衝撃波がまだはっきりと見えていない。高エネルギー電子やイオンがリコネクション領域のどこでどのようにして加速されているのか、という粒子加速問題は、残された課題の中でも難問中の難問である。

おわりに： 「ようこう」から Solar B へ

本稿では紙数の関係で紹介できなかったが、「ようこう」はコロナの温度分布や磁場強度との関連で新しい発見をいくつかなすとげ^{24)~26)}、コロナにとって“磁場”が重要な役割を果たしていることがますます明らかになってきた。さらに前章で述べたように、「ようこう」はコロナが常にダイナミックに変動していること、すなわち、コロナの本質を理解するには“時間変化”という新しいキーワードが重要であることを発見した。“磁場”と“時間変化”，これがコロナが100万度に加熱されているメカニズムを解く鍵である。この「ようこう」の発見は、後続の太陽観測衛星 SOHO や TRACE でも受け継がれ、「静かな太陽はけっして静かではない」、「コロナだけでなく彩層もナノフレアやジェットだらけ」、「太陽大気のいたると



〈図12〉X線ジェットのリコネクションモデル

電磁流体数値シミュレーションによる。色は温度分布、線は磁力線、矢印は速度ベクトル。太陽表面下から浮き上がった磁力線(中央の丸い部分)が、もともと存在した逆向きのコロナの磁力線に衝突し、磁気リコネクションを起こしている様子を示す。磁気リコネクションによって発生した右向き的高速ジェット流は、まわりの磁場にぶつかって衝撃波を形成した後、向きを変えて傾いた磁場に沿って流れるようになり、細長いジェットを形成する。この後者のジェットが、X線ジェットとして観測されると考えられる。一方、左向き的高速ジェット流は小規模ループに衝突して衝撃波をつくり、高温プラズマループを生成する。この小ループがマイクロフレアとして観測されると考えられる。(Yokoyama and Shibata(1995))

〈表1〉 コロナにおけるさまざまなフレア現象

フレア現象	サイズ (10^4 km)	時間スケール t (sec)	アルヴェーン時間 t_A (sec)	t/t_A	エネルギー (J)
マイクロフレア	0.5~4	60~600	5	12~120	$10^{19} \sim 10^{22}$
インパシブルフレア	1~10	$60 \sim 3 \times 10^3$	10	6~300	$10^{22} \sim 10^{25}$
長寿命フレア	10~40	$3 \times 10^3 \sim 10^5$	90	30~1000	$10^{23} \sim 10^{25}$
巨大アーケード	30~100	$10^4 \sim 2 \times 10^5$	400	25~500	$10^{23} \sim 10^{25}$

ころでリコネクションが発生している」といったことなどがわかってきた。コロナ加熱の謎を解くまで、もうあと一歩である。

上でも少し述べたが、宇宙には太陽コロナとよく似た天体コロナ(恒星コロナ、銀河コロナ、降着円盤コロナなど)がいたるところに存在する。フレアやジェットもしかりである。恒星フレア、原始星フレア、宇宙ジェット、ガンマ線バースト、……。これらの天体活動現象の解明のためにも、コロナをはじめとする太陽電磁プラズマ現象の早期の解明が望まれている。

2005年には、「ようこう」(Solar-A)の後継機であるSolar-B衛星が打ち上げられる予定だ。はたしてこの天文学上の大難問であるコロナ加熱の謎が解明できるか、リコネクションに関して残された謎がどこまで解明できるか、さらにまた、どんな新たな謎が発見されるのか、たいへん楽しみである。

参考文献

- 1) Y. Ogawara *et al.*: PASJ **44**, L41 (1992).
- 2) 小杉健郎: パリティ **7**, 48 (1992).
- 3) 柴田一成: 天文月報 **89**, 60 (1996).
- 4) 小野靖ほか: プラズマ核融合学会誌 Vol. **77**, No. 10, 小特集「磁気リコネクション研究の現状と問題点」(2001).
- 5) S. Tsuneta *et al.*: PASJ **44**, L63 (1992).
- 6) S. Tsuneta: ApJ, **456**, 840 (1996).
- 7) T. Sakao *et al.*: Ph. D. Thesis, Univ. of Tokyo (1994).
- 8) S. Masuda *et al.*: Nature **371**, 495 (1994).
- 9) M. J. Aschwanden *et al.*: ApJ **464**, 985 (1996).
- 10) K. Shibata, S. Masuda, M. Shimojo *et al.*: ApJ **451**, L83 (1995).
- 11) M. Ohyama and K. Shibata: ApJ **499**, 934 (1998).
- 12) S. Tsuneta *et al.*: PASJ **44**, L211 (1992).
- 13) A. McAllister *et al.*: JGR **101**, 13497 (1996).
- 14) Y. Hanaoka *et al.*: PASJ **46**, 205 (1994).
- 15) A. C. Sterling and H. S. Hudson: ApJ **491**, L55 (1997).
- 16) R. C. Canfield, H. S. Hudson and D. E. McKenzie: Geophys. Res. Lett. **26**, 627 (1999).
- 17) Y. Uchida *et al.*: PASJ **44**, L155 (1992).
- 18) T. Shimizu *et al.*: PASJ **44**, L147 (1992).
- 19) T. Shimizu: PASJ **47**, 251 (1995).
- 20) K. Shibata, Y. Ishido, L. Acton *et al.*: PASJ **44**, L173 (1992).
- 21) M. Shimojo, S. Hashimoto, K. Shibata *et al.*: PASJ **48**, 123 (1996).
- 22) T. Yokoyama and K. Shibata: Nature **375**, 42 (1995).
- 23) K. Shibata: Ap. Sp. Sci. **264**, 129 (1999).
- 24) H. Hara: Ph. D. Thesis, Univ. of Tokyo (1996).
- 25) R. Kano and S. Tsuneta: PASJ **48**, 535 (1996).
- 26) S. Yashiro and K. Shibata: ApJ **550**, L113 (2001).