

インパルシブな 太陽フレアに伴うX線プラズマ放出現象

大山 政光

〈宇宙科学研究所 〒229-8510 相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: ohyama@solar.mtk.nao.ac.jp

太陽観測衛星「ようこう」は、インパルシブな太陽フレアに伴ってX線プラズマ(プラズモイド)が放出される現象を発見した。この発見は、インパルシブ・フレアも長寿命フレア同様磁気リコネクションを通して発生している可能性を強く示唆する。X線噴出プラズマの物理状態は、リコネクション・モデルの予測と一致することがわかった。

1. はじめに

太陽観測衛星「ようこう」が1991年8月30日に打ち上がってから早いもので6年が過ぎ、今なお現役として活躍を続けています。その間に太陽フレア(太陽面で突発的にエネルギーが解放される現象)を千個以上も観測しています。フレアでは数千万度という高温のプラズマが生成され、解放されるエネルギーは 10^{29} - 10^{32} ergにも及びます。フレアで解放されるエネルギーがどれ程の大きさであるかは、柴田さんが書かれた天文月報¹⁾にいろいろな現象も含めた表がありますので、詳しくはそちらを参照して下さい。その内の幾つかを抜粋すると、95年に大災害をもたらした兵庫県南部大地震(マグニチュード7.2)をさらに上回るマグニチュード8の地震が 10^{24} erg、現在地球上に存在していると思われる全核兵器を一度に爆発させたとすると推定 4×10^{26} ergです。これらを比較すると1回のフレアで解放されるエネルギーがいかに大きいか分ると思います。

この莫大なエネルギーを解放する太陽フレアは、その寿命の長さでしばしば2つに分類されます。1時間以上も続く長寿命フレアと、もっと短命で発生頻度の高いインパルシブ・フレアです。これら両フレアに伴った高温プラズマの放出現象が、「よう

こう」の軟X線望遠鏡の観測によって発見されました。この放出プラズマはX線を放射しており、X線放出プラズマと呼ぶことにします。われわれは、中でも特にインパルシブ・フレアに伴うX線プラズマの放出現象に焦点をあて、研究を行ないました。次章以降で“新しく発見されたX線プラズマ放出現象が太陽物理学にどういったインパクトを与えるのか? ”、“なぜわれわれは特にインパルシブ・フレアを選んだのか?”を初めに述べ、その発生機構やX線プラズマの起源について、未知の世界へ駒を進めていきます。ここで一言だけ付け加えるなら、このプラズマ放出現象は太陽特有の現象ではなく、地球磁気圏でも観測されています。

2. 低温プラズマ(プロミネンス)放出現象と長寿命フレア

プラズマ放出現象は太陽では珍しい現象ではありません。「ようこう」以前から行なわれているH α 線を使った地上観測から、フレアに伴うプラズマの放出現象が知られています。「ようこう」によって新たに発見された放出プラズマはX線を放射していますので、少なくとも数百万度以上の高温であることが分ります。一方、H α 線で観測された放出プラズマは約1万度と低温です。この章ではこの低

温プラズマの放出現象について述べていきます。

太陽の外層大気は、光球、彩層、コロナと大きくわけて3つの層から形成されています。最も下層にあるのが太陽表面と言われる光球で、小学生の時に下敷を透かして太陽表面を眺めた人も多いのではないのでしょうか。光球の温度は6千度程度で、太陽で最も温度の低い領域です。光球の上層には、彩層、コロナと順に続いています。彩層の温度は約1万度で、 $H\alpha$ 線を通して観測する事ができます。コロナは約2百万度と高温で、「ようこう」の軟X線観測はまさにこのコロナを捉えています。

彩層を観測する $H\alpha$ 線を通して太陽像を見ると、黒い筋状の構造がよく見えます。これは、プロミネンス（あるいはダーク・フィラメント、日本語では紅炎）と呼ばれ、日食の時に太陽の縁に紅く見える構造です。このプロミネンスはコロナ中に存在しているにもかかわらず、1万度程度の低温プラズマから形成されています。プロミネンスは非常に安定した構造で、中には数ヵ月も存在し続けるものもあります。この安定なプロミネンスが時として、突然上昇、放出を始めます。この低温プラズマから成るプロミネンスの放出が起きるとそれに伴いフレアが発生します。但し、全てのフレアがプロミネンスの放出を伴っているわけではありません。では、プロミネンス放出を伴うフレアはどういった特徴があるのでしょうか？

先程、フレアはその寿命の長さで長寿命フレアとインパルス・フレアに分けられる事があると書きました。その長寿命フレアの多くはプロミネンスの放出現象やコロナ質量放出現象（CME）を伴うことが、「ようこう」以前の観測から分っています²⁾。プロミネンス放出に伴うフレアを $H\alpha$ 線で観測すると、彩層上に白く輝くりボン状の構造が平行に2本見えます（図1＝表紙）。このフレアは特にツーリボン・フレアと呼ばれ、2本のリボン間の距離は時間とともに広がっていきます。又、放出したプロミネンスのかなり下方に2本のリボンをまたぐ約1万度のループが現れ、そのループの高さが見

かけ上、時間と共に上昇していきます。さらにX線観測では、同様に放出プロミネンスのかなり下方に2本のリボンをまたぐ明るいX線アーケード構造（X線を放射する数百万～数千万度のプラズマで満たされた軟X線フレア・ループが、アーケード状に並んでいる構造）が見られます（図2）。このX線アーケードが冷えると、前述した $H\alpha$ 線で観測される1万度程度のループとして見えていると考えられています。これらの観測から長寿命フレアに対し、軟X線フレア・ループの上空で磁力線がつなぎ変わる（磁気リコネクション：図3）ことでエネルギー解放するというモデルが提案されました³⁾。そしてこのモデルからは、カスプ型（先が尖った形）の軟X線フレア・ループやフレア・ループの外側ほど高温であるという事が予測されていました。「ようこう」はその予測通りカスプ構造（図4 a）を初めて観測し、又構造の外側ほど高温であることも発

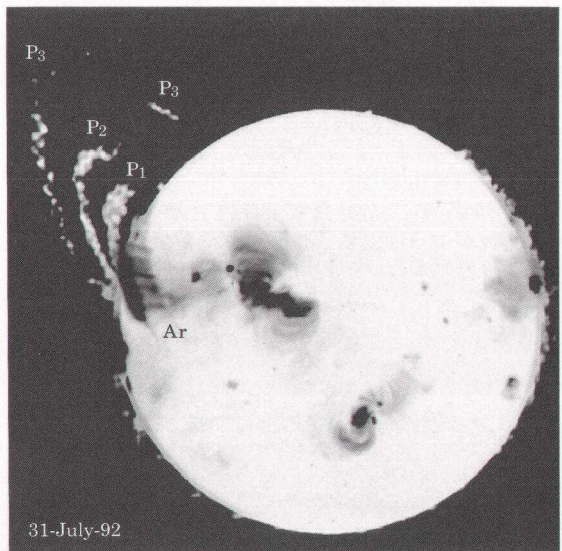


図2 1992年7月31日に発生したプロミネンス放出現象。「ようこう」の軟X線画像と国立天文台・野辺山電波ヘリオグラフ像の重ね合わせ。放出プロミネンス (P1-00:13 UT, P2-00:45 UT, P3-01:35 UT) は電波ヘリオグラフで、X線アーケード(Ar: 04:44 UT)は「ようこう」の軟X線望遠鏡によってそれぞれ観測された。放出プロミネンスのかなり下方でX線アーケードが形成されていることが分かる。

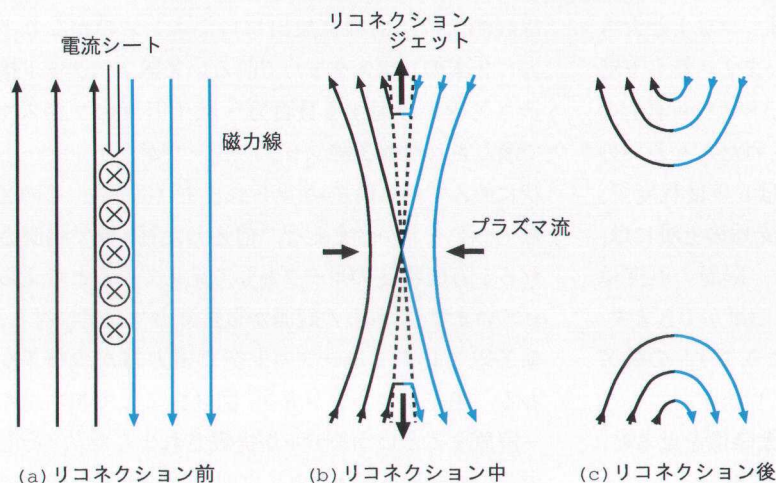


図3 磁気リコネクションの概念図。(a) 反平行の磁力線が接触している状態。磁気中性面に電流が流れ(電流シート), そこでは電気抵抗により磁力線が消失する(拡散領域)。(b) 拡散領域で磁力線のつなぎかえ(磁気リコネクション)が起こり, 磁気張力により磁力線が図の上下にはじけとんでいく。この上下の流れはリコネクション・ジェットと呼ばれ, アルファベン速度程度の速さである。(c) 磁気リコネクションにより, 磁力線のつながり方が(a)と変わる。

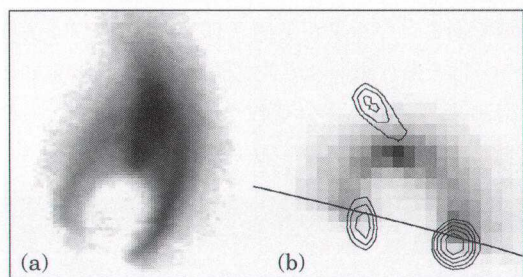


図4 「ようこう」が観測した長寿命フレアとインパルシブ・フレア。(a) 1992年2月21日の長寿命フレア(常田ら⁴⁾)。カスプ型のループ構造が観測されている。(b) 1992年1月13日のインパルシブ・フレア(増田ら⁵⁾)。カスプ構造は見られず, 見かけ1本のループ構造をしている。

見したのです。これらの多くの観測から長寿命フレアでは, フレア・ループの上空において磁気リコネクションが起きていることは, 確かであると考えられます。

3. インパルシブ・フレアにおける高温(X線)プラズマ放出現象の発見

前章では長寿命フレアについて述べましたが, もう一方のインパルシブ・フレアはどういったものなのでしょう。軟X線でインパルシブ・フレアを観測すると, 長寿命フレアのようなカスプやアーケード

構造は観測されず, ループが単に光っているように見えます(図4 b)。その結果, “インパルシブ・フレアでは長寿命フレアと同様なりコネクションは起きていないのではないか?”, “エネルギー解放はフレア・ループ内でしており, 長寿命フレアとは異なったメカニズムによって発生しているのではないか?”と考えられました。また過去にもインパルシブ・フレアに対しては, ループ内でエネルギー解放をするモデルが提案されています^{6,7)}。ところが, 「ようこう」の硬X線観測によって軟X線フレア・ループの上空に硬X線源が存在している事が発見されました⁵⁾。硬X線は高エネルギー電子がイオンと衝突するとき起こる制動放射によって放出されるため, 発見された硬X線源は軟X線フレア・ループ上空でのエネルギー解放を意味しています。これは, 今までインパルシブ・フレアに対して考えられたループ内のエネルギー解放説を否定(!)し, 長寿命フレアと同様にフレア・ループ上空で磁気リコネクションが発生していると考えられます(図5)。

もしこのような磁気リコネクションが起きているとすれば, 軟X線フレア・ループや硬X線源のかなり上空でプラズマの放出(いわゆる, プラズモイドの放出)が起こっている可能性が予測がさ

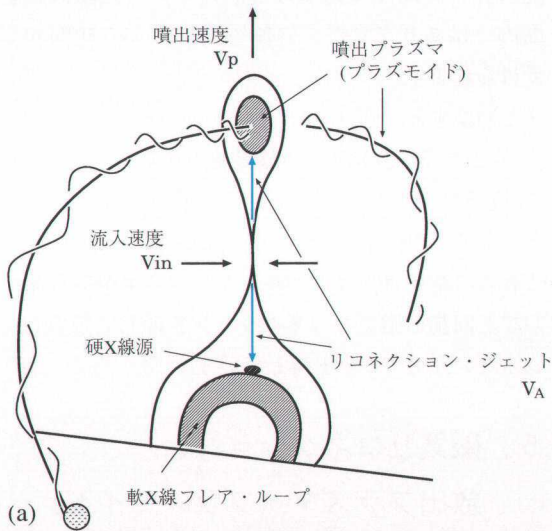


図5 インパルシブ・フレアのリコネクション・モデル。放出した低温プラズマ($H\alpha$ プロミネンス)または高温プラズマ(X線プラズマ)の下方で、磁気リコネクションが起きている。「ようこう」によって発見されたフレア・ループ上空の硬X線源は、リコネクション・ジェット(図3参照)がループに衝突し衝撃波が生じることで形成されると考えられている。このようなフレア・ループ上空でのリコネクション・モデルは、長寿命フレアにおいてもすでに考えられており、観測もそのモデルを支持している。

れます(図5)。そして、見事その予測通りに軟X線観測でプラズマの放出が「ようこう」によって発見されました⁸⁾。このインパルシブ・フレアにおける「ようこう」の新たな発見(軟X線上空の硬X線源と、それらよりはるか上空でのX線プラズマの放出現象)は、長寿命フレアとインパルシブ・フレアとが、実はともに同じ物理過程(フレア・ループ上空での磁気リコネクション)によって発生している事を強く示唆する画期的なものなのです。

インパルシブ・フレアのメカニズムをより深く探っていくためには、X線プラズマの放出現象を詳しく調べる事が極めて重要です。そこで、今回は特にインパルシブ・フレアに伴うX線プラズマの放

出現象を扱うことにしました。次章以降では、今回の研究で実際に何が分ったのかを述べていくことにします。

4. 放出プラズマ(プラズモイド)の構造

「ようこう」の新発見により、インパルシブ・フレアも長寿命フレアと同様に、フレア・ループと放出プラズマとの間での磁気リコネクションによって起きているというモデルが示されました。ところで、X線放出プラズマの三次元構造や温度構造は、リコネクション・モデルの予想と一致しているのでしょうか? モデルの予想によると、初期の磁場が三次元的に配位し、かつN、S極の境界線である磁気中性線に平行な成分を持っていれば(決して特別な磁場形態ではない)、リコネクションによって形成される放出プラズマ(いわゆる、プラズモイド)は、フレア・ループ上空においてループ状(フラックス・ロープ)の構造をしていることが期待されます。また温度構造は、外側の磁場ほど新しくリコネクションを起こしていますので、外側ほど高温と予測されます。

そこで、まず三次元構造について見てみます。図6は、1992年10月5日に西の太陽縁で発生したインパルシブ・フレアに伴うX線プラズマ放出現象の時間変化です。これらの画像は短時間露出(2.9ミリ秒)で観測されています。上昇している丸い塊状の物がX線放出プラズマで、その構造はループではないようです。しかし、もう少し露出時間の長い画像(図7)では、先程の塊(P)と一緒に上昇しているループがあります。塊はループの頂上付近に位置しており、放出物の構造は予測された様にループ状であると考えられます。次は温度分布(図8)に関してです。フレア・ループは外側程高温になっており、これまでの「ようこう」の観測やリコネクション・モデルの予測と一致しています。さて、放出プラズマはどうでし

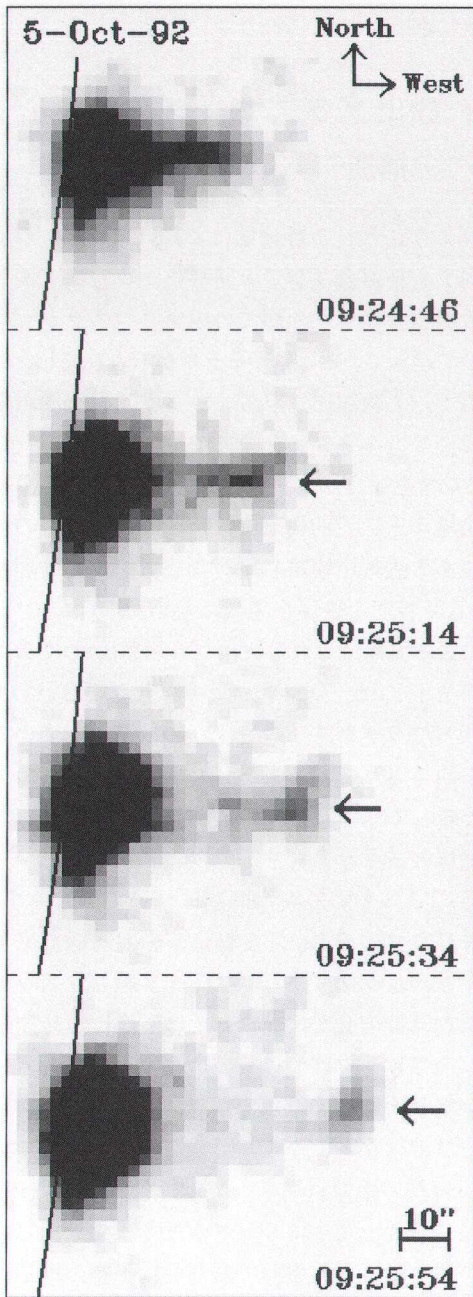


図6 軟X線で観測された1992年10月5日のフレアに伴うX線放出プラズマの時間変化。放出プラズマ(矢印で示す)がフレア・ループの上空を上昇しているのが分かる。黒い曲線は太陽縁を表している。露出時間は2.9ミリ秒、1秒角は約726km(大山と柴田⁹⁾より)

よう。この図から放出プラズマの温度は約1000万度と非常に高温であることが分り、また誤差の範囲内ではありますが、外側程高温という傾向が見受けられます。

まとめますと、

(1) 放出プラズマはループ構造をしている。

(2) 放出プラズマは外側程高温の傾向がある。

という2つの結果が今回の研究から得られました⁹⁾。これらの結果は、インパルス・フレアが長寿命フレアと同種の磁気リコネクションを通して発生しているというモデルを支持しています¹⁰⁾。

5. 磁気リコネクションと 放出プラズマ(プラズモイド)

フレアの発生機構と考えられる磁気リコネクションのモデルに関し、リコネクションが先かプラズマ(プラズモイド)の放出が先かという議論がよくなされます。まさにニワトリが先か卵が先かの議論です。新たに発見されたX線プラズマ放出現象は、どのような見解を示すのでしょうか。ここではまず、放出プラズマ(プラズモイド)とリコネクションとの関係に関して3つの可能性を考え、整理してみます。

- (1) 放出プラズマが上部の磁場を引きちぎって上昇し、リコネクションが起きる。リコネクションは放出プラズマに影響を与えない。
- (2) リコネクションが発生した結果として放出プラズマが生成され、上昇する。放出プラズマはリコネクションに影響をあたえない。
- (3) 放出プラズマの上昇とリコネクションが相互に関係しあっている。

(1)の放出プラズマが上部の磁場を引きちぎって飛んでいくためには、放出プラズマの運動エネルギーがまわりで支えている磁場のエネルギーよりも大きいことが必要となります。フレアではそれまでに蓄えられていた磁場のエネルギーが解放され、熱エネルギーへと変換されます。それゆえ、放出プラズマの運動エネルギーがフレア・ループの熱エネル

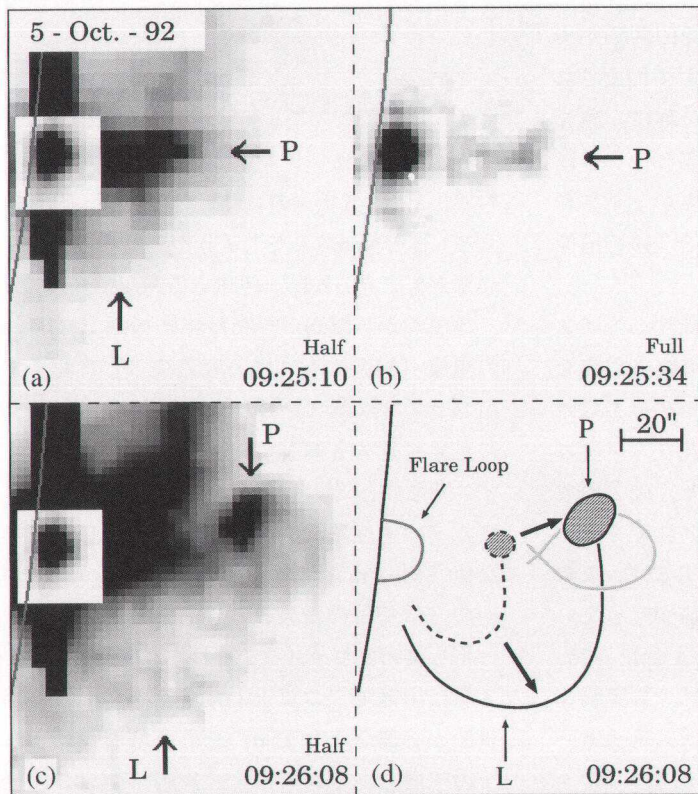


図7 軟X線で観測された1992年10月5日のフレアに伴うX線放出プラズマの時間変化. 図5と比べ広視野で露出時間が長い(a: 78 ミリ秒, c: 38 ミリ秒). (b) は図6の画像. (d)は(c)の概略図を表し, 点線は(a)での放出プラズマを示す. これらの図から, 放出プラズマは塊状のプラズマ(いわゆるプラズモイド)だけでなく, ループ構造も含まれていることが分かる. (大山と柴田⁹⁾より)

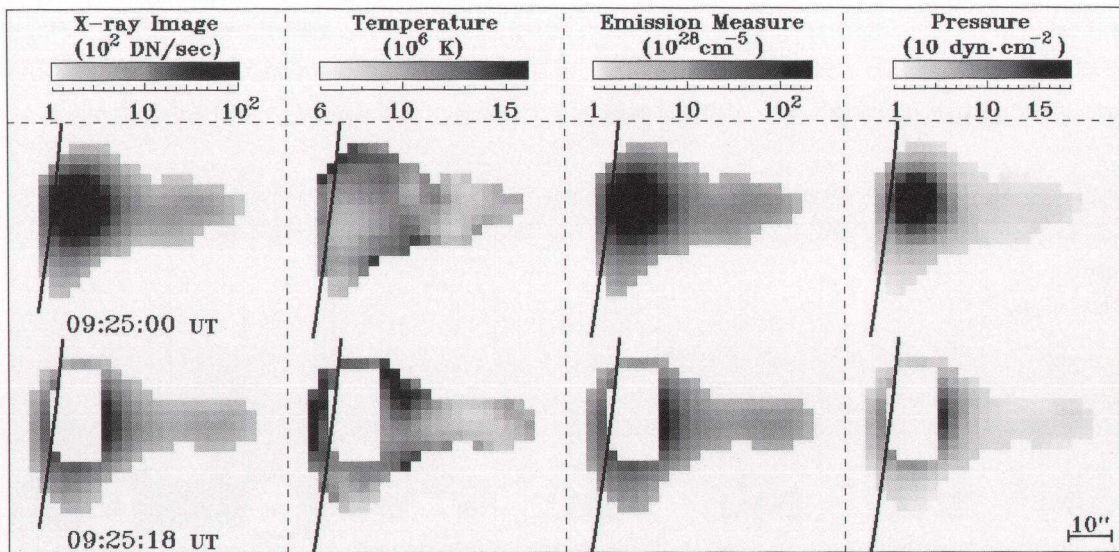


図8 1992年10月5日のフレアに伴うX線放出プラズマのX線強度, 温度, エミッション・メジャー, 圧力分布. 09:25:18 UTのフレア・ループ内の白い領域は, X線強度が非常に強かったために装置の観測限界を超えたことを表す. 黒い曲線は太陽縁を表す.

ギーよりも大きいと予測されます。描像(2)の場合は、放出プラズマと硬X線放射の時間的關係が決め手になります。リコネクションを通して加速された高エネルギー電子が彩層に衝突した時に、硬X線が放射されますので、硬X線放射のピークの後に放出プラズマの生成・加速される事が予測されます。そして(1)でも(2)でもない場合(3)の描像になります。

1993年11月11日に太陽の東縁で発生したインパルス・フレアに伴うX線プラズマ放出現象を見て下さい(図9)。この放出プラズマの高さの時間変化は図10に表してあります。放出プラズマは初めゆっくり(約10 km/s)と上昇し、硬X線放射の開始と時をほぼ同くして突然強い加速を受け上昇(約140 km/s)しているのが分ります。この硬X線放射のピーク以前にすでに加速が起きているという点で、描像(2)は否定されました。又、定量解析を行なった結果、放出プラズマの運動エネルギーは、フレア・ループの熱エネルギーより一桁小さい事が分りました(表1)。しかもフレア・ループの熱エネルギーはこの後さらに増大していきます。この結果は描像(1)の予測と矛盾しています。

今回の研究で得られたこれらの結果から、放出プラズマの上昇とリコネクションが相互に影響

を与えあっている(描像3)という事が判明しました^{10,11)}。

6. X線放出プラズマの起源

このX線放出プラズマはどこから供給されているのでしょうか。まわりのコロナからでしょうか？ それとも他の領域からでしょうか？ 放出プラズマの起源が何であるかは、興味ある問題の一つです。

放出前から観測が行なわれた1993年11月11日の現象(図9)をもう一度見ることにします。放出プラズマは、フレアの始まる前(プリフレア相)に足元付近のX線強度が増光した後に現れています。そして、その放出プラズマの温度は約1千万度、また密度が活動領域におけるコロナの典型的な値($10^9/cm^3$)より一桁大きいということが、今回の定量解析の結果より分りました(表1参照)。一桁も高密なプラズマをまわりのコロナから供給する事は困難で、コロナより密度の高い領域からの供給が必要となります。その高密な領域とはコロナの下層にある彩層です。彩層のプラズマは1万度程度と非常に温度が低く、1千万度まで加熱されなければなりません。この加熱は、コロナでのリコネクションによって解放されたエネルギーが加速イオンや熱伝導によって輸送されることで起こります。彩層プラズマが加熱を受けると圧力が上昇し、

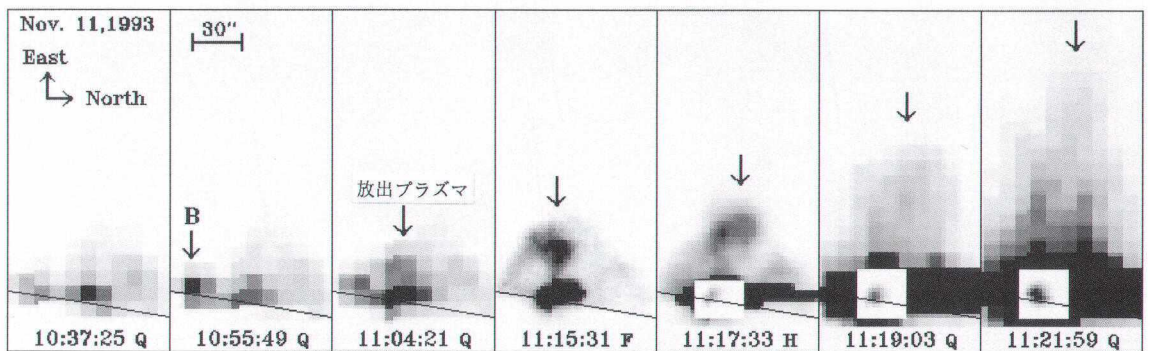


図9 軟X線で観測された1993年11月11日のフレアに伴うX線放出プラズマの時間変化..フレア開始(11:00 UT)前に足もと付近でX線強度が増光(10:55:49 UT: B)し、放出プラズマが現れている。(大山と柴田¹¹⁾より)

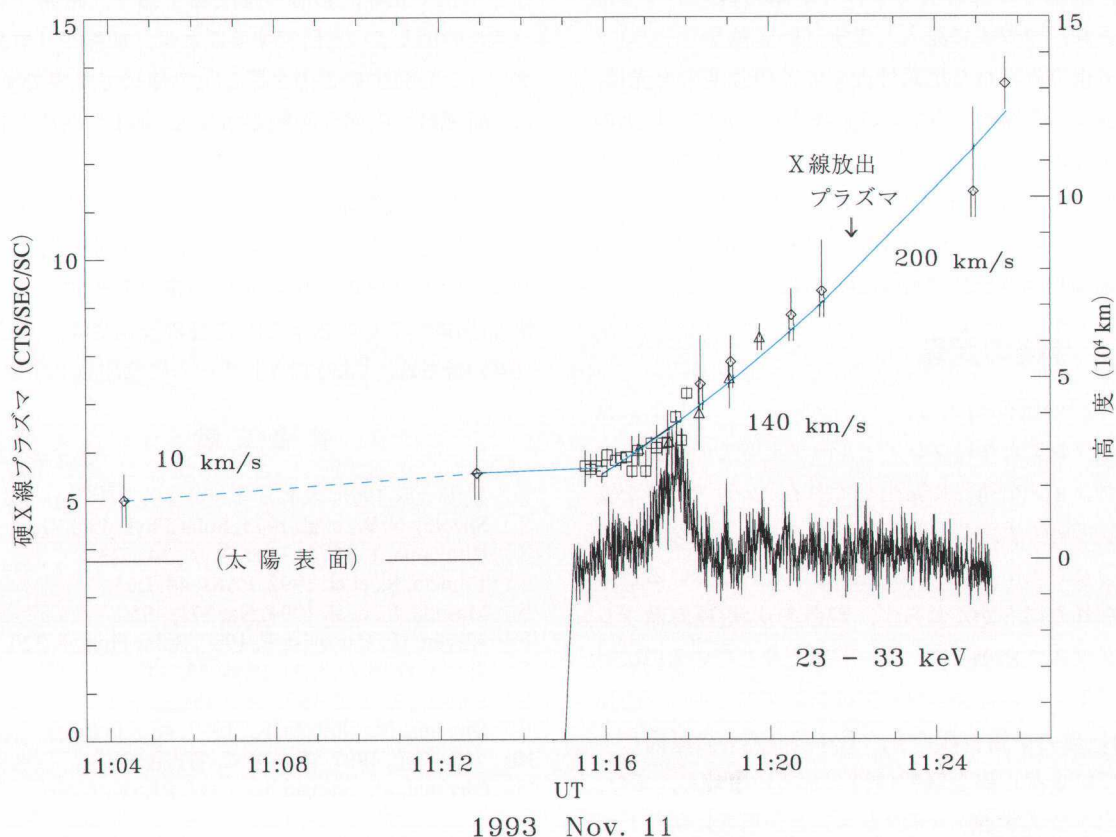


図10 1993年11月11日のフレアに伴うX線放出プラズマの高度と硬X線放射の時間変化。放出プラズマが硬X線放射の開始付近で突然強い加速を受けていることが分かる。

表1 1993年11月11日のインパルス・フレアに伴うX線放出プラズマの物理量

物理量	フレア・ループ	X線放出プラズマ
温度 (10^6K)	6-16.5	4.6-15.8 (11.3 ± 4)
エミッション・メジャー (10^{28}cm^{-5})	5.4-276	2-18
電子密度 (10^9cm^{-3})	6.4-53	4.5-14
ガス圧 (dyn cm^{-2})	14-136	10-45
質量 (10^{13}g)	~ 10	9.2 ± 0.7
熱エネルギー (10^{29}erg)	2.6 ± 0.2	2.3 ± 0.3
運動エネルギー (10^{27}erg)	—	4.2-20

※括弧内の温度は放出プラズマの(見かけの)中心付近の温度。

圧力勾配が生じます。そしてその圧力勾配によって、加熱された彩層プラズマが磁力線に沿って加速され、コロナに流入します(彩層蒸発)。プリフレア相でみられた足元付近でのX線強度の増光は、まさにこの加熱をみていると考えられます。以上の点を整理しますと、プリフレア相における加熱によって彩層蒸発が発生し、放出物のプラズマが供給されていることが分ります^{10), 11)}。X線プラズマの起源は彩層プラズマだったのです。

7. 今後の課題

今回の研究結果は、インパルス・フレア、長寿命フレアともにフレア・ループ上空での磁気リコネクションを通して発生しているというモデルを支持しています。しかし、両フレアとも上記のリコネクションという同じ物理過程で発生していると考えられるにもかかわらず、寿命や形状(長寿命フレアがカスプを伴うアーケード構造をしているのに対し、インパルス・フレアはシングル・ループの構造)に違いが見られます。それらの違いの原因についてはまだ正確な解釈は得られていません。また、放出プラズマとリコネクションとが相互に関係している点を考慮すると、この両方はグローバルな不安定性によって引き起こされているのではないかと考えられます。しかし、この不安定性がどのようにして起きているかはまだ未解決な問題です。さらに、放出物のプラズマがプリフレア相での加熱による彩層蒸発によって供給されている事がつきとめられましたが、そのプリフレア相での加熱がどのようにして発生しているかもまだ分っていません。これらリコネクションとプリフレア加熱は関係しているとも考えられ、プリフレアの研究がこれから非常に重要になってきます。このため、プリフレアにおける高

空間、高時間分解能での磁場構造、コロナ・ループの変化や光球、彩層の速度場を知り、磁場・プラズマの振るまいを研究することが、加熱やリコネクションの発生の要因を探る上で極めて重要です。この研究は、次期太陽観測衛星 Solar-B に期待されます。

最後に、この研究は名古屋大学・博士論文研究として国立天文台で行ないました。指導教官でありました天文台の柴田さんに感謝致します。また快く議論して下さった天文台の横山さん、スタッフの皆さん、「ようこう」チームに感謝致します。

参考文献

- 1) 柴田一成 1996, 天文月報 Vol. 89, 2月号, p. 60.
- 2) Sheeley N. R., et al. 1975, *Solar Phys.* 45, 377.
- 3) Hirayama, T. 1974, *Solar Phys.*, 34, 323.
- 4) Tsuneta, S., et al. 1992, *PASJ*, 44, L63.
- 5) Masuda, S., et al. 1994, *Nat* 371, 495.
- 6) Alfvén, H., Carlqvist, P. 1967, *Solar Phys.* 1, 220.
- 7) Spicer, D. 1977, *Solar Phys.* 53, 305.
- 8) Shibata, K. et al. 1995, *ApJ* 451, L83.
- 9) Ohya, M., Shibata, K., 1997, *ApJ*, in Press
- 10) 大山政光, 1997, 博士論文, 名古屋大学
- 11) Ohya, M., Shibata, K., 1997, *PASJ* 49, 249.

X-ray Plasma Ejections Associated with Impulsive Solar Flare

Masamitsu OHYAMA

*The Institute of Space and Astronomical Science
3-1-1 Yunodai, Sagami-hara Kanagawa 229-8510,
Japan*

Abstract: The soft X-ray data taken with the Yohkoh satellite revealed X-ray plasma ejections associated with impulsive solar flares. This discovery suggests that the impulsive flares occur through a magnetic reconnection process similar to that proposed for LDE (long duration event) flares. We found that the physical conditions of X-ray plasma ejections are consistent with predictions of reconnection models.