



「ようこう」軟X線望遠鏡(SXT)がいかにくれているかという話はすでに書いたが、「ようこう」がのせている硬X線望遠鏡(HXT)も世界一のすぐれものである。

**64枚の「すだれ」  
利用して測る**

硬X線は、軟X線より波長が短く(1オングストローム以下)、高エネルギー(10キロ電子ボルト以上)で、透過力も強いから、軟X線のように反射鏡でCCDカメラに集光して目に見える映像にするといったことはできない。基本的にはシンチレーションカウンターのような検出器でX線の強度を計測することしかできない。しかし、検出器の前にすだれコリメーターと呼ばれる入射

# 立花隆

100億年の

# 旅

39

宇宙科学研究所「ようこう」観測チーム

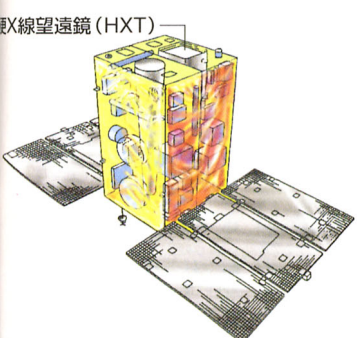
# 劇的な太陽の 素顔に迫る(下)

立花隆  
評論家

写真 戸澤裕司

X線の変調器を置いてやるとX線の位置情報が得られる。HXTは、それを64個も用いて、64の検出器に導き、その検出データをコンピュータでフリーエ合成すると

HXTの生データは、各コリメーターについて4つのエネルギーバンドごとに、38(右上の図)のようなカウント数の変動で与え



軟X線望遠鏡(HXT)

●硬X線望遠鏡(HXT)



●「ようこう」観測チームのメンバーたち。太陽の研究に国境はない

られる。これらのデータはそれぞれ、X線源の空間的な1次元フーリエ成分に相当している。こうして得られた64個のフーリエ成分を使って2次元像を再合成すると、<sup>38</sup>左下の図のように強度分布図ができる。これだけではよほどの専門家でないとなかなかわからないかもしれないが、これを<sup>39</sup>下の図のように、同じ場面の軟X線画像に重ね合わせると、さまざまなことがわかってくる。

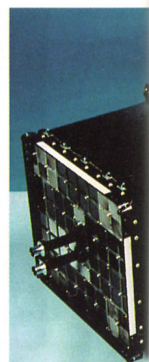
「これは太陽にフレア（爆発現象）が起きたときの画像です。『ようこう』の主な目的の1つが、フレア現象の解明ですから、フレアが起きると、搭載コンピュータが自動的にそれを識別し、システムがフレア・モードに切りかわり、フレアが起きた部分だけを切り出して（通常は太陽全面を観測）集中的に最高0.5秒間隔で観測データを送るようになっていきます」（小川原嘉明教授）

ふだんはこの自動プログラムで観測がすすむが、特にユニークな現象が起きているときには、1日5回、10分間ずつの衛星と直接通信できる時間帯を利用して、特別のコマンドを打ち、特別の観測態勢をしくことも可能である。このような柔軟なシステムによって、「ようこう」はいままで太陽観測衛星とは比較にならない、大変量の重要データを取得し、それによって、太陽物理学は飛躍的な

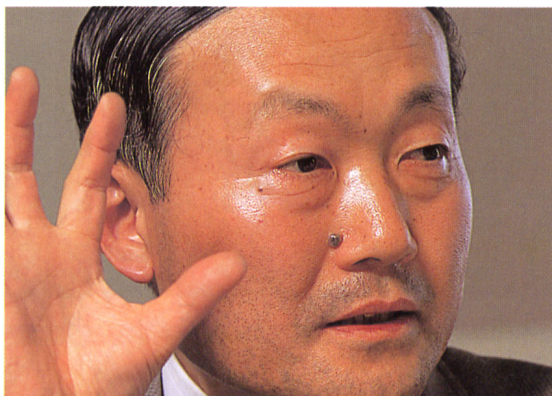
発展をとげつつある。

データの中でも、硬X線データの果たした役割には大きなものがある。硬X線データは、軟X線望遠鏡では決してみることができない高エネルギー領域で何が起こっているかを示してくれるからだ。

<sup>39</sup>下の図の3つの像からい



●小川原嘉明教授



ることは、硬X線も、低いエネルギー・レンジ（14〜23キロ電子ボルト）では軟X線で見えているループ構造（フレア・ループ）をそのまま反映しているが、よりエネルギーの高いX線で見ると、ループ構造の2つの足元と、ループの頂上から少し離れた上空のほうに硬X線源があるということだ。

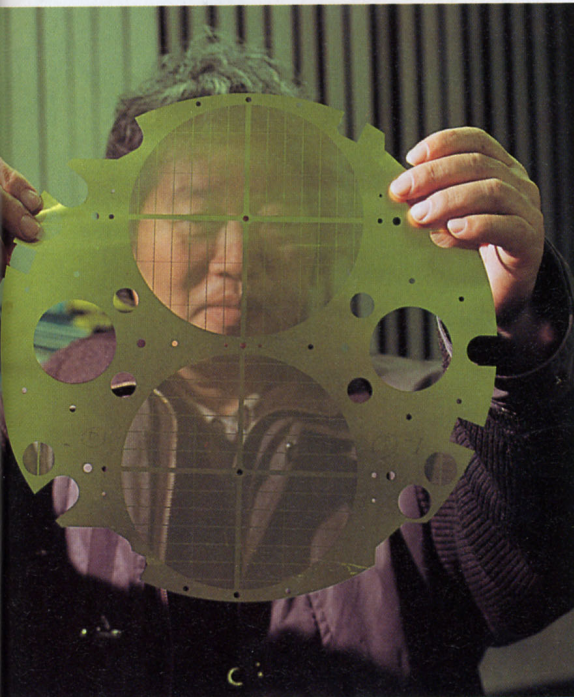
「こういう情報は、軟X線画像を

いくら見ても得られません。このように、硬X線のデータを他の情報とあわせて時間的・空間的に精密に分析していくことで、フレアが、磁気リコネクションによって起きているにちがいないということが、次第にわかってきたのです(同前)

## 核兵器を超える エネルギー

フレアには、左下の表に見るように、いろんなレベルのものがある。大きさをいえば、直径数千キロのマイクロフレアと呼ばれるものから、直径数十万キロの太陽半径をこえるような超巨大なものまである。持続時間もほんの数分で終わるものから、何十時間もつづくものまで、いろいろあるが、いずれにしても、驚くべきは、そのエネルギーの大きさである。右下の表を見て、他のエネルギー現象とくらべていただきたい。マイクロフレアですら、地球上の全核兵器を爆発させたときより大きなエネルギーを放出している。超巨大なフレアになったら、その100万倍も大きいのである。

そのような超巨大フレアは年に数回という規模でしか起きないが、インパルス・フレアのレベルになると、1日に何十回も起こることがあるし、マイクロフレアになると、もつともつと起きている。

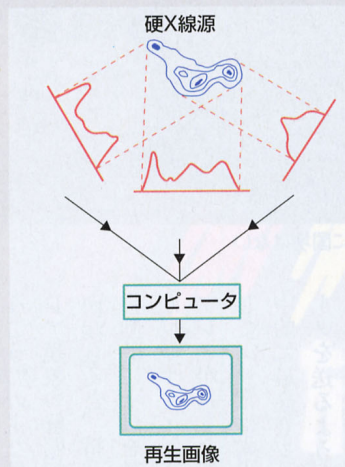
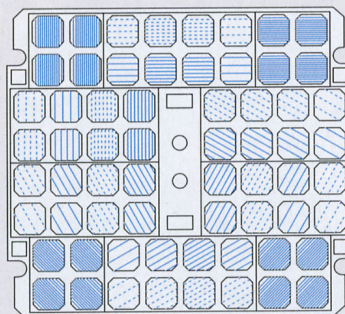


●すだれコリメーター(1981年に打ち上げられた宇宙研初の太陽観測衛星「ひのと」が使用)

太陽を可視光線だけで観測していた時代には、フレアはそれほど目立った現象ではなかった。それほどエネルギーが高い現象だとも、それほどしょっちゅう起こる現象だとも思われていなかった。

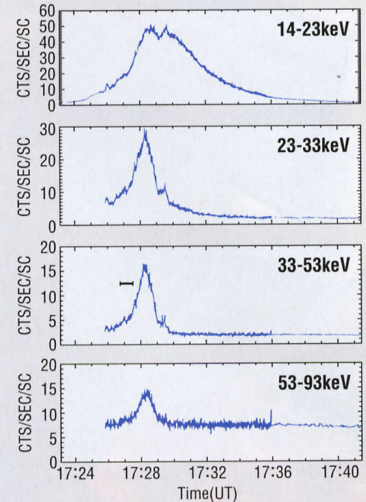
しかし、1970年代に入って、太陽をX線や電波で持続的に観測するようになってはじめて、フレアが規模においても、頻度においても、太陽活動で最も注目すべきものであるということがわかってきた。そして、フレアの解明

■「ようこう」のすだれコリメーターの構造。スリットの向きとピッチの異なる64枚の小型の「すだれ」が用いられている



■3方向のフーリエ成分から合成するようすを模式的に示した。実際「ようこう」では64個のフーリエ成分を使って2次元像を合成している

■HXTから得られる硬X線強度の時間変動のデータ



■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(15kt)	$6 \times 10^{20}$
浅間山噴火(1938年)	$10^{22}$
ビキニ水爆(15Mt)	$6 \times 10^{23}$
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)	$4 \times 10^{26}$
太陽のマイクロフレア	$10^{26} \sim 10^{29}$
ハレー彗星の地球衝突	$10^{31}$
太陽フレア	$10^{29} \sim 10^{32}$
恒星フレア	$10^{31} \sim 10^{36}$
活動銀河核フレア(1秒当たり)	$10^{44} \sim 10^{46}$
超新星爆発	$10^{51}$
活動銀河核(全エネルギー)	$10^{60} \sim 10^{62}$



●92年1月24日の巨大なコロナ質量放出(CME)

をめぐって打ち上げられた「ようこう」のもたらしたフレアに関するデータには、質量の両面で圧倒的なものがあり、太陽活動はフレアを中心に見ていくことで、その全体像がつかめてくるということがわかってきたのである。

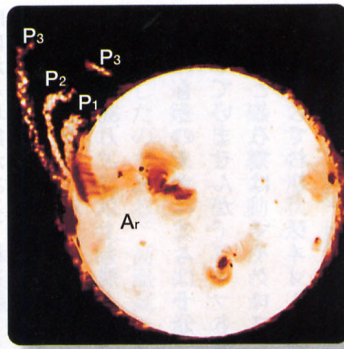
その中心的メカニズムが、前号でもちょっと説明した「磁気リコネクション」である。

「これまで異質な現象と考えられてきたさまざまな太陽活動が、磁気リコネクションがもたらす広義のフレア現象と考えられると、統一的に説明できるんじゃないかという



ことなんです」(「ようこう」研究グループ・柴田一成・国立天文台助教授)

たとえば、コロナ質量放出(CME)と呼ばれる右<sup>6</sup>下の写真に示したような現象である。CMEというのは、大きさにして太陽半径にも及び、質量にして10億ト(コロナは希薄なプラズマで、その質量は、1<sup>7</sup>立方方で10<sup>8</sup>程度だから、これがいかに恐るべき量かわかるだろう)にも及ぶというコロナの高温プラズマのかたまり



を秒速数十〜1000<sup>8</sup>キロメートルのスピードで宇宙空間に噴出する現象である。

「これがその発生も成長過程も、長寿命フレアとまるで同じなんです。そして、CMEのあとには、アーケードといわれる巨大構造が形成されます。形態だけでなく、時間変化、温度分布など、物理データからみてもほとんど同じです。発生メカニズムも磁気リコネクションで同じように説明でき

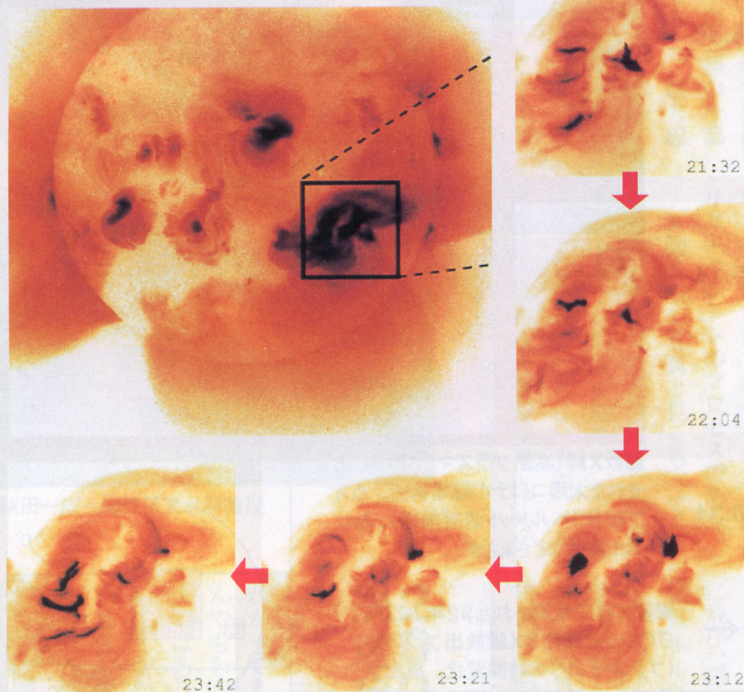
●92年7月31日に発生したプロミネンス放出現象(上)。軟X線画像(ようこう)と電波(国立天文台野辺山太陽電波観測所電波ヘリオグラフ)の画像を合成した。放出プロミネンス(P<sub>1</sub>-00:13 UT, P<sub>2</sub>-00:45 UT, P<sub>3</sub>-01:35 UT)は電波、X線アーケード(Ar-04:44 UT)は軟X線による



●91年11月12日に発生した巨大なX線ジェット



■マイクロフレア(短時間の増光現象)。連続写真に数多くみられる



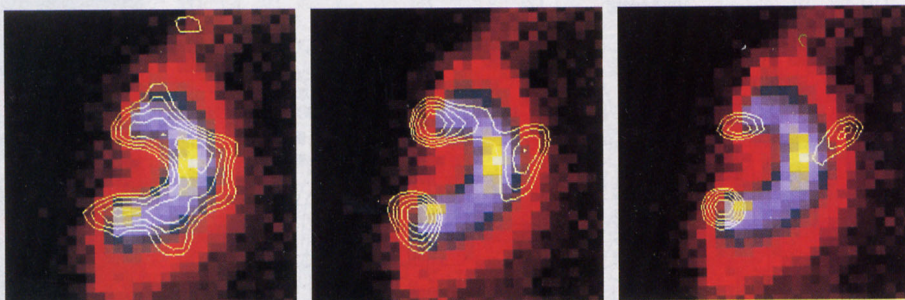
■HXTから得られる硬X線強度の時間変動のデータ

フレア現象	サイズ [10 <sup>4</sup> km]	時間スケール [sec]	t <sub>A</sub> [sec]	t/t <sub>A</sub>	エネルギー [erg]
マイクロフレア	0.5~4	60~600	5	12~120	10 <sup>26</sup> ~10 <sup>29</sup>
インパルス・フレア	1~10	60~3×10 <sup>3</sup>	10	6~300	10 <sup>29</sup> ~10 <sup>32</sup>
長寿命(LDE)フレア	10~40	3×10 <sup>3</sup> ~10 <sup>5</sup>	90	30~1000	10 <sup>30</sup> ~10 <sup>32</sup>
巨大アーケード形成	30~100	10 <sup>4</sup> ~2×10 <sup>5</sup>	400	25~500	10 <sup>29</sup> ~10 <sup>32</sup>

ると考えられます。左の表でフレアの超大型のところに、巨大アーケード形成としてあるのは、こういうものことなんです。写真の巨大CMEが起きたとき、ぼくはたまたま内之浦の宇宙空間観測所を『ようこう』追跡の運用当番をしていたので、これを最初に発見したんです。こういう超大型フレアが起きると、地球で巨大磁気嵐が起ることが確実なので、す

ぐに電子メールで、NASAはじめ世界中の関係機関に知らせたんです。電力会社、通信関係などがすぐに対策をとったので、巨額の被害がまぬがれ、NASAは米政府からずいぶん感謝されたそうです。あるいはプロミネンス放出と呼ばれる現象がある。プロミネンスというのは、彩層の部分にあらわれる紅炎のことだが、前に述べたように、これはコロナの中に浮いた低温部分で、H<sub>α</sub>線で見ると、紅炎どころか、黒い筋状構造とし

■フレア(1992年1月)の軟X線写真に、硬X線の強度分布(等高線)を重ねた図。左から、14~23keV、23~33keV、33~53keV

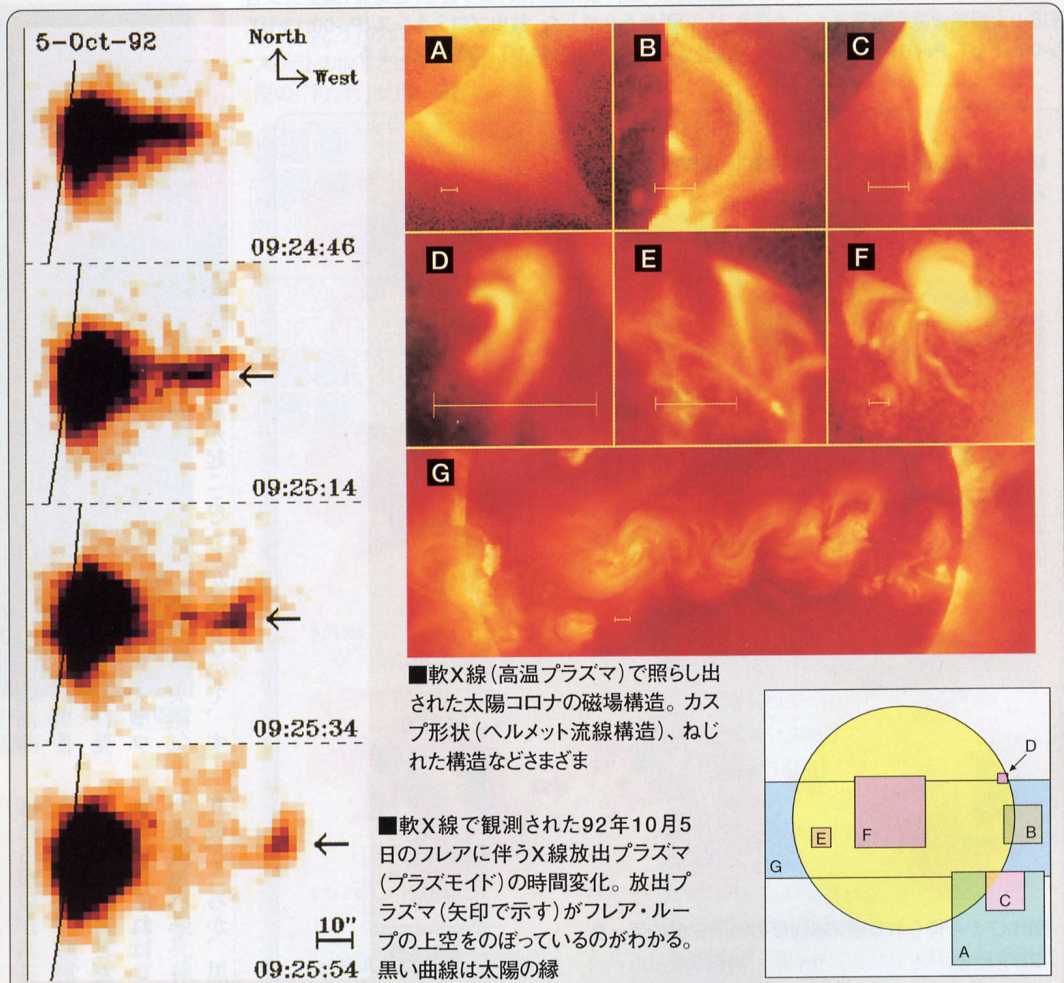


て見えるためにダーク・ファイラメントともいわれる。プロミネンスは、普通は安定した構造を保っているが、それが急に上昇して、宇宙空間に放出されることがある。

かつてこれは、プロミネンス爆発などと呼ばれ、それがフレアの正体などといわれたものだが、同じ場面をX線で見ると、足元のところにX線アーケードが形成されており、これも、磁気リコネクションが起こした、太陽フレアと同列にならぶ現象だということがわかる。

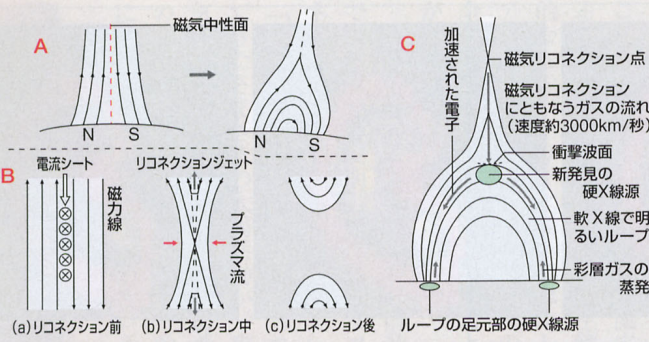
あるいは、これも「ようこう」のSXTが発見したものが、右の写真的ような、X線ジェットと呼ばれる現象がある。秒速約200<sup>キロメートル</sup>の細かい激しいプラズマ流が突然噴き上がり、30分以上にわたって長さ30万<sup>キロメートル</sup>以上も飛ぶのである。

「これもそのメカニズムは十分にわかっていませんが、ジェットの根本のところでは、マイクロフレアが発生しており、ジェットの発生の前と後の磁気ループの形から、これも、磁気リコネクションによってもたらされたものだろうと考えられています。実はよくわからないジェット噴出が、宇宙のさまざまな局面で観察されています。われわれの銀河系を含む、銀河からも噴き出しているし、原始星が生まれるものになる星間物質の回転円盤の中心からも噴き出しています。活動銀河中心にあるブラックホールのまわりの降着円盤からも噴出しています。実はフレア現象も宇宙のあちこちで観察されており、太陽で起きているさまざま



■磁気リコネクションの起こり方

A 磁気中性面をはさんで反対向きの磁力線につなぎかえが起こる/B 磁気中性面に電流が流れ、そこでは電気抵抗で磁力線が消失する(a)。この領域でつなぎかえが起こり磁気張力で磁力線が上下にはじきとんでいく(b)。この上下の流れはリコネクションジェットと呼ばれる/C 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こっていることを示す。リコネクションジェットがループにぶつかったところに衝撃波が発生して硬X線源を形成すると考えられる



な現象は、宇宙スケールで起きている類似の現象のプロトタイプなわけではないかと考えられます。つまり、太陽を研究することで、宇宙のさまざまな謎とされていた現象がわかってくるのではないかと、そして、その謎をとくカギは、結

局、磁気リコネクションにあるのではないかと考えられるのです」(柴田助教)

磁気リコネクションがそれほど大きな意味を持っているのかもしれないということがわかってきたのも「ようこう」の成果である。

磁気リコネクションという現象があり、それによって、磁力線の中に蓄えられていたエネルギーが一挙に放出されるといえることが起こり得ることはパーカーらによって30年も前から明らかにされていた。コロナ加熱の問題なども、それで

解けるのではないかとという説も、となえられていたのである。しかし、「ようこう」以前には、明確に磁気リコネクションが起こっていることを示す観測事実が見つからなかったのである。磁力線そのものが目に見えるわけではないの

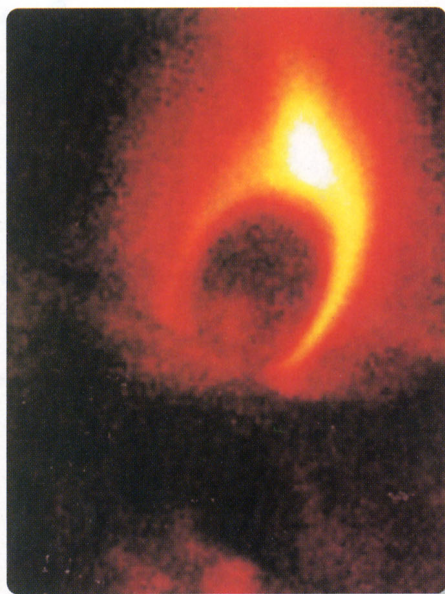


だから、それも無理はなかった。「しかし、『ようこう』が登場してくると、磁気リコネクションの証拠となる現象が次々に発見されて、今では、磁気リコネクションが、フレアのエネルギー解放機構を説明する標準理論となっていて、コロナ仮説の問題でも有力な仮説となつていきます」(小川原教授)

何が磁気リコネクションの存在を証明するかというと、何よりわかりやすいのは磁力線の形である。磁力線は目に見えないが、前号で述べたように、プラズマが磁力線に凍結されるといふ現象があるから、プラズマの形状がトレースできれば、磁力線の動きがわかるのである。そして「ようこう」の軟X線望遠鏡の映像がまさにそれを可能にしたのである。高温高エネルギー状態のプラズマはX線を発し、そのプラズマの形状は磁力線に凍結されているのだから、右の写真的ようなさまざまなプラズマ像は、磁力線の形状そのものを表現しているのである。

## 分断を避けてつなぎかえる

磁気リコネクションの簡単な概念図を描いてみると、右の下の図のようになる。磁力線は、しばしば磁気中性面をはさんで、反対方向を向いている。それが何らかの原因で(プラズマの圧力に押され



●92年2月21日、太陽の東の縁で発生した太陽フレアの軟X線画像。巨大な磁気ループの頂上付近の明るく輝いているところで磁場のエネルギーが解放されたと考えられる

て。よじれ、ねじれなどのストレスに耐えきれなくなつて。中性面に強い電流が流れ、それに異常抵抗が発生して、など、磁力線の一部が分断されようとすると、磁力線は分断されたくないの、あわてて手近にある同じ方向の磁力線をつなぎかえる。つなぎかえるときに、磁力線がより整理され、それまで

磁力線にストレスなどの形で蓄積されていたエネルギーが吐き出される。簡単にいえば、これが磁気リコネクションのプロセスである。A図を右の写真と見くらべてほしいが、形を見ただけで、これはA図のような現象が起きているところと思われるだろう。実際、さまざまな物理データを整理してみると、その通りなのである。



●柴田一成・国立天文台助教授

B図に特徴的なのは、リコネクションジェットと呼ばれる現象が起きることだが、まさにそのような現象が、現実には起きているというところが、右の左の図に示した、放出プラズマモード現象を調べることでわかるだろう。先に述べたX線ジェット現象とか、プロミネンスの放出現象の基本メカニズムもこれだろうと考えられている。

あるいは39の下の図に示した硬X線望遠鏡がとらえたフレアを概念的に示すとC図のようになる。磁気リコネクション点から発する高速(秒速30000km)のリコネクションジェット(B図)が下方に飛び、磁気ループ面と衝突して、磁気ループ上空で硬X線を発する。リコネクションジェットの高速電子は、磁力線ループを伝って、ループの足元まで飛び、そこで彩層ガスと衝突して、2つ目玉の硬X線源になるというわけである。

## 2004年に次世代機を

「磁気リコネクションでいろいろわかってきたわけですが、残念ながらもわかったのかというと、そうではありません。まだわからないことがたくさんあります。コロナ加熱の問題だって、まだきちんと解明されたわけじゃありません。磁気リコネクションのプロセスについても異論異説がたくさんあり

ます。もっと根底的な問題、たとえば、太陽磁場のものになつている太陽中心の電磁流体のダイナモの問題もよくわかっていない。それがわからないと、黒点の11年周期の問題もわからない。太陽の活動性がなぜ低下し、それがなぜ復活してくるのか。それをつかむためには、太陽磁場をもっと精密に計測できるようにしなければなりません。また、フレアの問題にしても、一番大事なことは、フレアのはじまる直前の、リコネクション・ポイントの近傍のプラズマのふるまいにあるはずなんですが、そのところがよく見えてない。もっと空間分解能も時間分解能もいい装置を作つて、そのところをじっくり見たい。ジェットの問題も、ジェット噴出の正確なスピード(エネルギー)を知るために、そのドップラー効果を測定したいなどなど、まだまだやりたいことがたくさんあります。『ようこう』は驚くほど長寿命な衛星で、まだあと数年はこのままだけそうですが、われわれとしては、太陽が次の活動期に入った2004年ころに次世代機、『ソーラーB』衛星をあげようと思つて、すでにその開発に入っています。『ソーラーB』に新しい観測装置をたくさんつんで、太陽物理をより深いレベルで解明したいというのが、われわれのグループの共通の願いです」と小川原教授は話を結んだ。