

# 「ひのとり」のみた太陽フレア

常 田 佐 久\*

## 1. はじめに

1980~81年を極大とする太陽活動期に太陽フレアをX線域で観測する目的で、1981年2月21日、宇宙科学研究所によって「ひのとり」衛星が打ち上げられた。「ひのとり」は多数の太陽フレアの硬X線(15 keV以上)2次元画像を高い空間・時間分解能で得ることに成功した。硬X線でみたフレアの姿は、我々の予想以上に多様性に富み、従来のフレアの撮像を一新しつつある。本稿では、「ひのとり」の硬X線望遠鏡で得られた硬X線画像とその解釈について述べてみたい。

## 2. 「ひのとり」のX線望遠鏡

太陽フレア時に放射される硬X線は、高エネルギー電子の衝突制動放射によって生じる。このX線は、またフレア現象を解明するための診断の道具としてたいへんすぐれている。これは次のような理由による。(i) X線源は光学的に十分薄く源の中心まで見通すことができエネルギー解放の核心にせまることができる。(ii) 太陽コロナの媒質や磁場に関連した伝播効果がない。10 keV以上のX線では、太陽大気中の吸収散乱過程としてはコンプトン散乱が主にきくが、これは光球付近まで無視でき、太陽大気はX線にたいしてはほとんど完全に透明である。したがって、硬X線域でのフレアの撮像によって、高エネルギー粒子や高温プラズマができる現場を直接目でみることが可能となりエネルギー解放のメカニズムについて決定的な情報を得ることができる。

「ひのとり」に搭載されている硬X線望遠鏡は、宇宙科学研究所の小田稔、小川原嘉明、村上敏夫、牧島一夫らによって開発・発展させられてきた「すだれコリメーター」の技術を用いて、硬X線フレアを高い空間的・時間的分解能で観測することができる。ここで「ひのとり」のX線望遠鏡の撮像の方法と性能について簡単にみてみよう。衛星がスピンするにつれて、「すだれコリメーター」が天球面につくりだす透過パターン(電波干渉計でいうフリンジ)もスピン軸を中心に回転し、フレアをいろいろなポジション角で1次元的にスキャンする。これらの1次元スキャンの集合はもとの2次元構造の情報を十分含んでおり、計算機処理により2次元像を再現できる。現在は、SN比の悪いかなり小さいフレアにた

いしても最大エントロピー法(MEM)等の手法を駆使することにより、実質の2次元画像を安定に再構成できている。「ひのとり」のX線望遠鏡の場合、角分解能は強度の大きいフレア(X-クラス)にたいしては、15秒角程度(太陽面上の距離にして約1万km)、それ以外の場合には30秒角ほどであるが、時間分解能を犠牲にすれば中程度のフレア(M-クラス)についても15秒の角分解能を得ることが可能である。望遠鏡の視野は太陽全面で、太陽面のどこでフレアが起きても2次元像を得られる。時間分解能は衛星のスピン周期によるが、3~6秒程度であり、太陽フレアのように早いタイムスケールの変動を十分追える。観測エネルギー域は5~50 keVで、15 keVの硬X線像と10 keV以下の軟X線像を同時に得ることも可能である。またX線フレアの絶対位置を $\pm 5 \sim 20$ 秒という高い精度で決定でき、光や電波フレアの発生位置との詳細な比較を行うことができる。「すだれコリメーター」はすでに「白鳥」衛星等にも搭載され、活躍中であるが、太陽X線フレアの撮像観測においてもこのような数々のすぐれた特徴によって、強力な武器となっている。

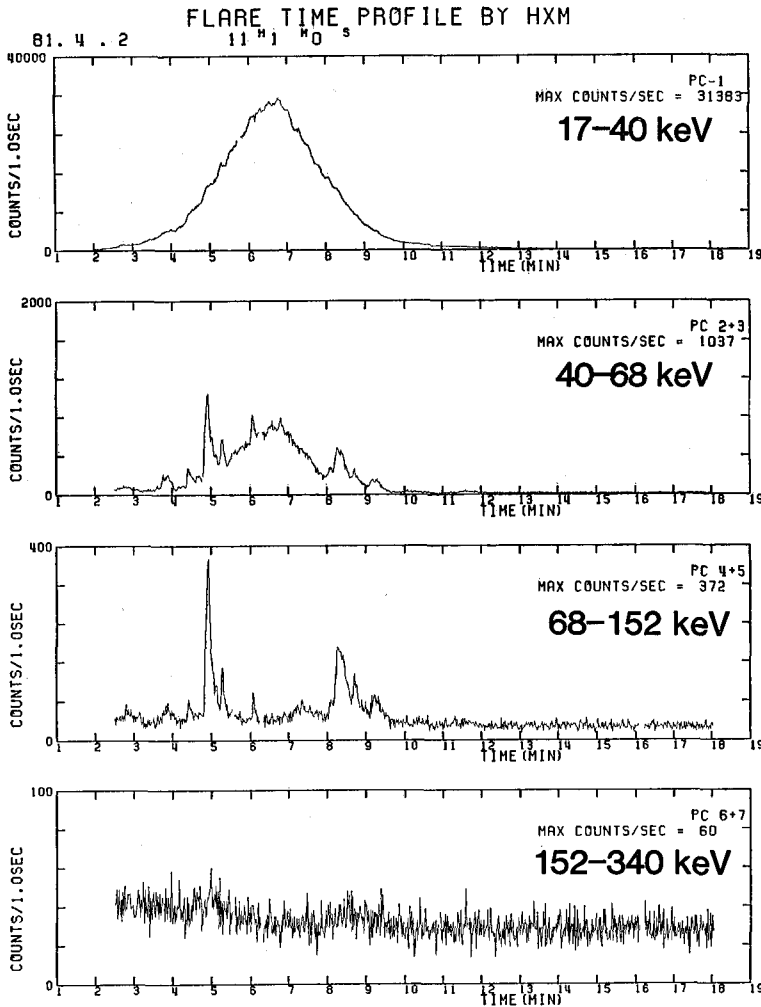
## 3. 「ひのとり」のみた太陽フレア

「ひのとり」は81年2月26日に最初のフレアを観測して以来、現在までに像合成可能な強度のフレアを100個以上観測している。硬X線でみた太陽フレアの姿は「ひのとり」以前には予想もつかなかったほど多様性に豊んでいるが、硬X線像、スペクトル及びX線強度の変動の様子から、かなりはっきり性質のことなる少なくとも3種類のフレアが存在することが分かってきた。今仮りにこれをA, B, C型と名づけそれぞれの観測的特徴をみてみよう。

### (i) A型フレア

A型フレアの硬X線強度は極めて大きく(X-クラス)数分程度のタイムスケールでゆっくり変動する。図1に81年4月2日に発生したA型フレアの硬X線(17~300 keV)タイムプロファイルを示す。早い時間変動は60 keV以上でわずかにみられるが、その強度は小さい。硬X線スペクトルは極めて軟らかく、べき指数で表わすと7~8程度にもなる。図2に81年7月17日に太陽のちょうど縁で発生したA型フレアの硬X線(14~28 keV)像を示す。硬X線源の大きさは、その極めて強いX線強度にもかかわらず、10秒角(地球1個分の大きさ)程度

\* 宇宙科学研究所 Saku Tsuneta: Hard X-ray Imaging of Solar Flares with the HINOTORI spacecraft



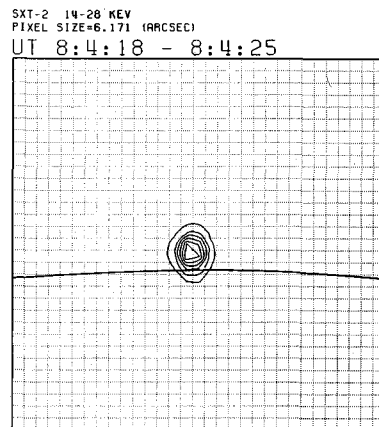
◀ 図 1 1981 年 9 月 2 日の X 線フレア。  
60keV 以下ではプロファイルは  
たいへんなめらかである。

▼ 図 2 1981 年 7 月 17 日のフレアの硬  
X 線像 (14~28keV)。1 ピクセルは  
6.2 秒角。画面の大きさは  
約 3.2 分角。コントラレベルは  
ピーク強度の 85, 70, 55, 49,  
25, 10%。X 線フレアはちょう  
ど、太陽の縁で発生した。(図  
中の曲線は光球の位置を示す。)

(FWHM) しかなく点状で、中心の高さは光球から 4 千 km 程度しかない。X 線源は境界層に近いコロナ下層にあると思われる。フレア中、X 線源の形状・場所はほとんど変化せず、ゆっくりと明るくなっていきゆっくりと暗くなっていく。いっぽう、同じく「ひのとり」に搭載されている軟 X 線輝線分光装置による観測から、A 型フレアは Fe XXVI (鉄の水素状イオン) の輝線をともなっており、34 万度以上の超高温プラズマが大量に (エミッションメジャ  $\geq 2 \cdot 10^{49}/\text{cm}^3$ ) 存在することが分かっている (田中捷雄らによる)。この超高温プラズマは、30 keV 以下で強い硬 X 線を放射するので、図 2 に示した硬 X 線像は、超高温プラズマの構造を示しており、大量の高温プラズマが、極めて小さい領域にとじこめられていると考えられる。

(ii) B 型フレア

B 型フレアの硬 X 線強度は数秒から数 10 秒の時定数ではげしく変動するが (インパルスフェーズ)、フレ



アの後半では、A 型フレアのようななめらかな時間変化を示し全体で数分ないし数 10 分継続する。図 3 に 81 年 7 月 20 日に起きた B 型フレアの硬 X 線タイムプロファイルを示す。X 線スペクトルは、べき指数に換算して 3

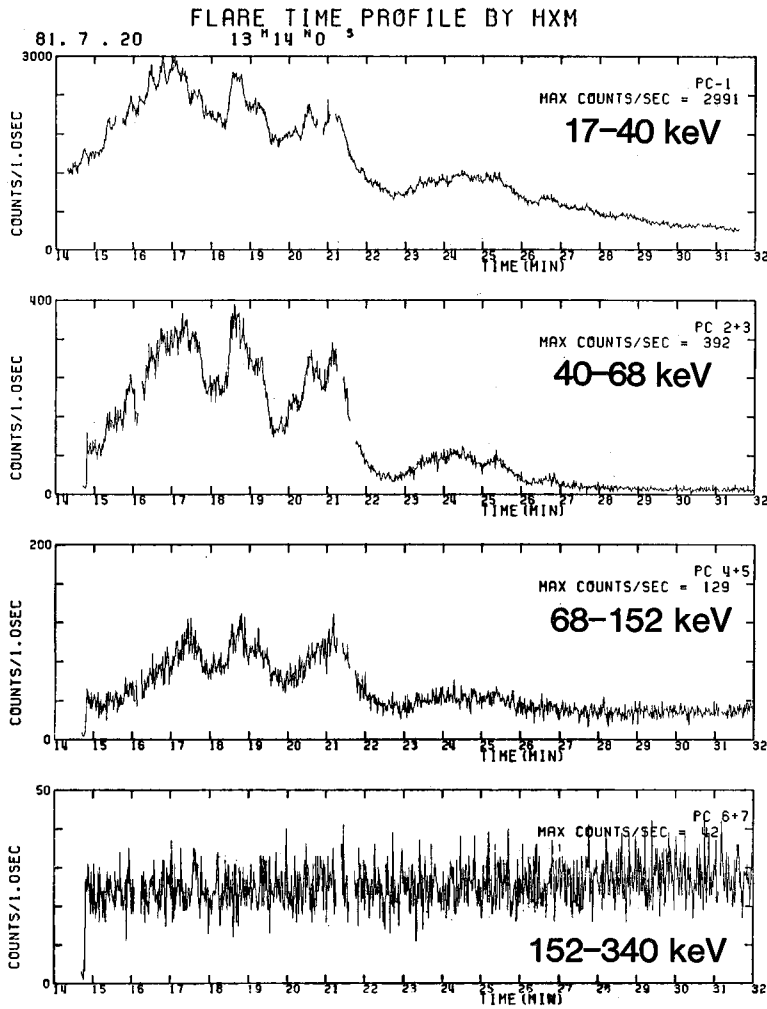
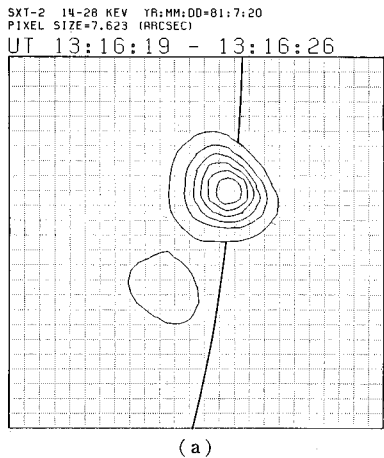
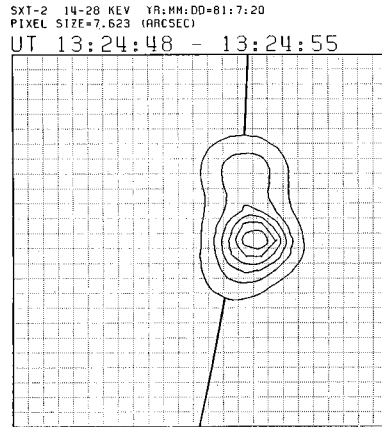


図3 1981年7月20日に起きたX線フレア。数秒から数10秒のタイムスケールで激しく変動するインパルスフェーズのあとに、なめらかなプロファイルを持つグラジュアルフェーズが続く。



(a)



(b)

図4 7月20日フレアの硬X線像(14~28keV)。(a)インパルスフェーズ、(b)グラジュアルフェーズ。1ピクセルは7.6秒角。画面の大きさは約3.2分角。コントラレベルはピーク強度の85, 70, 55, 40, 25, 10%。X線フレアは太陽の縁近くで発生した。インパルスフェーズとグラジュアルフェーズで硬X線源の形状と位置がことなっている様子がはっきり分かる。

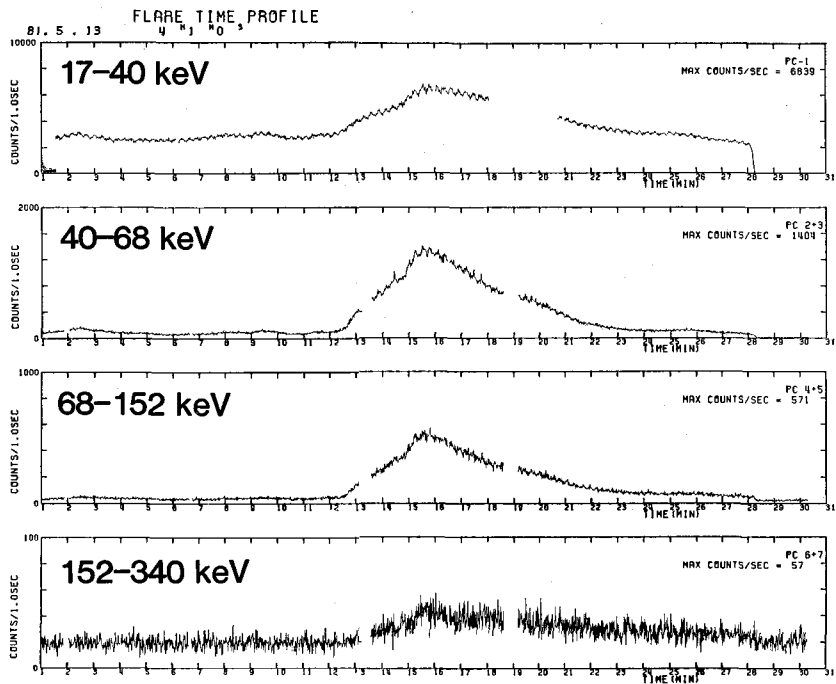


図 5 1981 年 5 月 13 日の X 線フレア。プロファイルはきわめてなだらかである。X 線フレアは 1 時間程度継続し、「ひのとり」はその後半のみを観測できた。(タイムプロファイル中にみえる周期 20 sec ほどのモジュレーションは衛星のスピンによるものである。)

から 6 程度までいろいろあるが、一般にグラジュアルフェーズになると軟化する。おどろくべきことに、硬 X 線像はインパルスフェーズとグラジュアルフェーズで全くことなっている。図 4 に 7 月 20 日フレアのインパルスフェーズ (a) とグラジュアルフェーズ (b) での硬 X 線像 (14~28 keV) を示す。このフレアは太陽の縁近くで発生した。インパルスフェーズでは、硬 X 線源は約 5 万 km はなれた 2 つ目構造をしている。H $\alpha$  像との比較から、2 つ目のおおのは H $\alpha$  フレアの明るい部分に対応しており、X 線源の高さは低く彩層付近に位置している。これらの 2 つ目は大きな磁気ループの根本に対応していると思われる。このフレアの場合、インパルスフェーズ中の数分間、2 つ目が輝き続ける。いっぽうグラジュアルフェーズになると、2 つ目構造は消えてしまい、2 つ目の位置より高い場所に硬 X 線源が出現する。

(iii) C 型フレア

C 型フレアの硬 X 線強度はきわめて大きくその変動の様子は、図 5 に示したようになだらかであるが、時定数 ~ 数分のスパイク状構造をいくつかもつことがあり、30 分以上継続する。ここまでは A 型フレアの特徴と似ているが、X 線スペクトルをみると A 型とはっきり分離できる。硬 X 線スペクトルはパワー型に近く、べき指数も 3 ~ 5 と硬い。さらに特徴的なのは、スペクトルが平均として時間とともに硬くなっていく傾向のあることである。この傾向はフレアの終わりまで続き、B 型フレアと

逆のふるまいを示す。図 6 は、81 年 5 月 13 日に起きた C 型フレアの硬 X 線像を、東京天文台で撮影された H $\alpha$  写真に重ねて示したものである。B 型フレアとことな

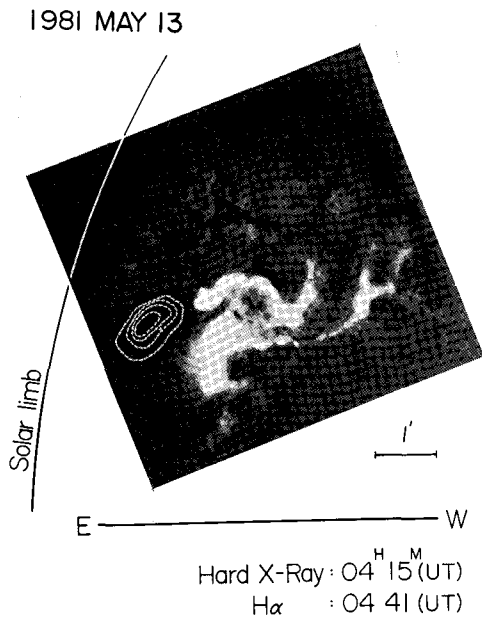


図 6 5 月 13 日フレアの硬 X 線像 (14~28 keV) を東京天文台で撮影された H $\alpha$  写真 (日江井栄二郎氏の御好意による) に重ね合わせた。硬 X 線フレアがコロナの高いところで起きたため、硬 X 線源が H $\alpha$  源に対して縁の方へずれてみえる。硬 X 線源のコントラストレベルはピーク強度の 80, 60, 40, 20%。

り、硬X線源がH $\alpha$ フレアにたいしてリム側へ1分角近くもずれていることがわかる。これは硬X線フレアがコロナの高いところで発生したため見かけ上ずれてみえていと考えられる。X線フレアがH $\alpha$ フレアの真上で起きているとするとその高さは約4万kmとなる。X線源はフレアの開始時からコロナ中に現われ、安定に存在し続ける。またA型フレアのようにFe XXVIの輝線を伴うこともある。

#### 4. 解 釈

3節で述べたようにフレアをその硬X線像のちがいにより少なくとも3種類に分類できることがわかった。さらに硬線像のちがいに対応して、スペクトル、X線強度の変化のし方にも特徴的な傾向があることは、これらの現象論的な相違の背後になにか本質的なエネルギー解放の状況のちがいが対応していることを暗示している。ここでは、各タイプのフレアのエネルギー解放のメカニズムについて考えてみよう。

A型フレアは、硬X線像から高さの低い小さい磁気ループ中で生じているとき考えられる。ループはFe XXVIの輝線を強く放射する34万度以上の高温プラズマで満たされ、密度は $10^{11}$ 個/cm $^3$ 以上もある。このプラズマの温度は、フレアに普遍的に存在するプラズマの温度(24万度以下)よりもずっと高い。さらに温度の高い1億度近いプラズマが生成されている兆候もある。高温プラズマは主に熱伝導によって急速に(数秒程度)冷却する。熱電導損失 $q$ は $q=K(dT/dX)\propto T^{7/2}/L$ ( $K$ は熱伝導係数、 $L$ はソースサイズ)で表わされ、温度の上昇にともなって急速に増大するので、3千万度以上の熱プラズマを熱損失にさからって数分から数十分間安定に維持するには、大きな熱入力が必要とする。図1のフレアの場合、高温プラズマを維持するのに必要なエネルギーは $10^{32}$ ergにも達する。さらにループ内の高温プラズマを磁場に垂直な方向にささえるには( $\beta < 1$ )、300 Gauss以上の磁場を必要とする。このようなことからA型X線フレアでは、強い磁場をもった高さの低い小ループ内に連続的な熱入力が生じ(硬X線フレアの準定常熱的モデル)高温プラズマが長時間保持されていると考えられる。

これにたいしてB型フレアのインパルスフェーズは全くことなつた様相を示す。硬X線像は数万km離れた2ツ目構造を示し、2ツ目のそれぞれの強度は望遠鏡の時間分解能( $\sim 5$ sec)の範囲内でほぼ一致して増減する。さらにコロナ中では、タイムプロファイルにみられるスパイク成分に対応して硬X線フレアの熱的モデルから予想される熱電導フロントがみられないことから、コロナ中で加速された電子が、磁気ループの双方の根本を爆撃

して、ターゲット密度の急激に高くなる彩層で硬X線を放射していると考えられる(硬X線フレアの非熱的モデル)。さらに磁気ループ中を流れる電子ビームによって加速域とループの根本付近で電荷の不均衡が生じるため、ループにそつた電場がつくられ、ループの根本から加速域に向かう逆電流を誘起する。電子ビームによる電流と逆電流がつりあって正味の電流は0に近くなる。20 keV以上に加速された電子の総数は $10^{36}$ 個にも達し、磁気ループ中の冷たいプラズマの総量に匹敵するが、この大量の電子は、ビーム自身のつくる逆電流によって連続的に供給される。このように供給された冷たい電子を数10 keV以上に連続的に加速するメカニズムについては、ほとんどわかっていない。いっぽう逆電流電子の速さが、バックグラウンドプラズマの電子・陽子温度で決まる一定値をこえると、プラズマ不安定が誘起され電子ビームを散乱によって止めてしまうと考えられている。電子ビームが安定に流れるという条件から、図3, 4に示した7月20日フレアの例ではビーム電子の最低エネルギーは10 keV以上でなければならず、解放されるエネルギーの総量に上限をつける。このようにB型フレアのインパルスフェーズの観測は、従来から推測されてきた硬X線フレアの非熱的モデル(厚い標的モデル)のシナリオを確認しつつあるといえる。これにたいして、グラジュアルフェーズにみられる高さの高い硬X線源の成因についてはまだよくわかっていないが次のような2つの可能性が考えられる。(i)フレアのエネルギー解放のモードが何らかの理由で変わり、インパルスフェーズでは加速が主であったが、グラジュアルフェーズでは加熱が主になった。このためループ中に34万度を越えるプラズマが準定常的に維持され硬X線を放射する。(ii)電子ビーム元論ともいべきモデルでグラジュアルフェーズでもビームは続いている。いっぽう彩層を爆撃した電子によってあたためられた2千万度程度のプラズマが、膨張してループ中の密度を上げるためエネルギーの低い電子はループの根本に達する前にエネルギーを失ってしまい、コロナの高い部分にX線源が見える。UCBのロバート・リンらによる気球に搭載された半導体検出器による高分解能スペクトル観測、SMM(Solar Maximum Mission)衛星に搭載された比例計数管によるスペクトル観測から、いくつかのフレアのグラジュアルフェーズの始めに3~4千万度の高温プラズマの存在が明らかになっており、(i)説の方が有力である。もし(i)説の方が正しいとすると、B型のグラジュアルフェーズとA型フレアの性質がいくつかの点で似ていることに気がつく。この場合、A型フレアは何らかの理由でインパルスフェーズができずフレアの開始から、解放されたエネルギーが加熱にいつてしまったとも考えるこ

とができる。いっぽう(ii)説にもとづくと、高いエネルギーのX線で観測できればグラジュアルフェーズでも依然として2ツ目構造がみえると考えられる。この二つのモデルのうちどちらが支配的であるかは、たいへん重要な問題であり、50 keV以上のX線で撮像が可能となれば答が得られだろう。

C型フレアのマニズムについては、まだはっきりわかっていないことが多い。電子分布がパワー型をしているときエネルギー  $E$  のX線の放出には主にエネルギー  $\sim 1.2E$  程度の電子が寄与する。15~30 keVでのX線源が、図6のようにコロナ中に見えることから、20 keV以上の電子がコロナのループ中に滞在していると考えられる。いっぽう、河鱈公昭・小川英夫らによって行なわれた、図6のフレアの35 GHz電波干渉計による同時観測によると、マイクロ波の主ソースの位置が、硬X線源の位置とよく一致する。コロナ中では磁場が弱いいため、35 GHzのマイクロ波放射に寄与するのは、数100 keV以上のエネルギーの電子である。このようなことから、非熱的粒子が大きな磁気ボルト中にたくわえられている可能性が考えられるが、ループ内のプラズマ密度が  $3 \times 10^{10}/\text{cm}^3$  と高く、低いエネルギーの電子の閉じこめに難点がある。またVLAによる10 GHz以上での2次元観測から、いくつかの小さいフレアについて、ループの頂上付近の狭い領域に高エネルギー電子が局在している例が報告されており、C型フレアとの関連が興味深い。C型フレアのマニズムについても、50 keV以上の硬X線域での撮像が可能となり、X/マイクロ波の同時観測が行なわれれば決定的な情報が得られるだろう。

## 5. おわりに

「ひのとり」のX線望遠鏡は、X線フレアの多様な姿を始めて明らかにしたといえる。ここで述べた解釈については、これからさらに綿密な検討が必要なことはいうまでもないが、3種類のフレアがそれぞれことなったエネルギー解放の状況あるいはメカニズムに関連していることは確かといえよう。今太陽極大期には、SMM衛星に搭載されたX線望遠鏡によってもX線フレアの撮像観測が行なわれた。1982年10月に東京で「ひのとり」とSMMの両衛星で得られた結果を議論するために日米セミナーが開かれたが(月報83年4月号の内田・田中の記事参照)、そのなかで「ひのとり」とSMMで得られた硬X線像の様子が異なっているのではないかという感じを多くの人がもった。これはひとつには、SMMの撮像装置は「ひのとり」のそれとはことなった方式を採用しており視野が非常に狭い(太陽面の1/20~1/150しかカバーできない)ため十分な数のフレアが観測できなかったことによると思われる。実際SMMグループによって今までに詳しく報告された3例のフレアは「ひのとり」の分類のB型に属し、双方の観測結果はよく一致している。いっぽうSMMグループからA、C型フレアの報告はない。

「ひのとり」の観測結果は、フレアのエネルギー解放にともなう問題の一部に決着をつけつつあるが、より深いレベルで新しい問題をよりすどく我々に提起しつつあるようにみえる。「ひのとり」の観測データは、現在関連分野の多くの研究者によって詳細な解析が進行中であり、これからも数多くの新しい知見が得られることと信じている。

## 雑報

### 天文・天体物理若手夏の学校

第13回、天文・天体物理若手夏の学校は、1983年7月25-29日に、神戸市の関西地区大学セミナーハウスにおいて開催された。参加者は、講師6名を含めて100名で、全体企画、分科会、更に夜の部にわたって、若手の活発な議論がなされ盛況であった。プログラムの大要は以下の通りである。

#### \*分科会(午前)

- 26日 銀河、太陽、星間物質
- 27日 天文学と社会、宇宙論・相対論
- 28日 銀河、太陽、観測機器

#### \*全体企画(午後)

——理論と観測との接点を探る——

#### テーマ 講師

- 26日 分子雲と星生成 中野武宣、海部宣男
- 27日 X線天文学 高原文郎、常深博
- 28日 宇宙論 佐藤文隆、田原博人

なお、今年度は、京都大学理学部物理第二教室と大阪大学理学部物理教室とが共同で夏の学校事務局を担当した。来年度は、東北大学理学部教室の担当である。

(田中培生・伊沢瑞夫)

#### 訂正

10月号 関口直甫氏記事で、「佐藤亮君」を「佐藤勲君」に、太陽黒点相対数表中、7月1日の「55」を「50」に、それぞれ訂正し、お詫び致します。