

第14号科学衛星(SOLAR - A)

「ようこう」の成果について

(補足資料)

平成16年10月20日

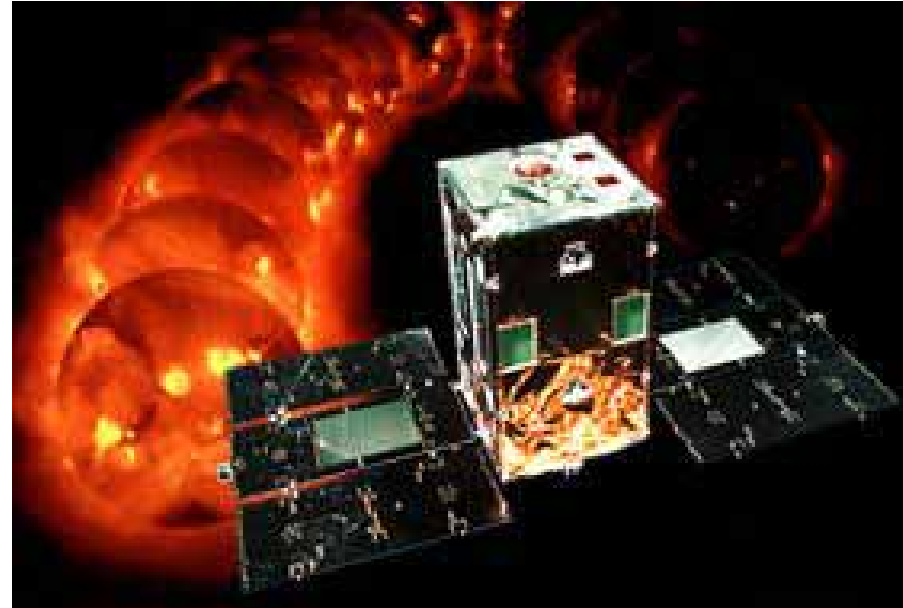
宇宙航空研究開発機構(JAXA)

「ようこう」プロジェクトマネージャ 小杉 健郎



X線太陽観測衛星「ようこう」

1991年8月30日 打上げ
" 9月初旬～ 各観測機器立上げ
" 9月下旬 全機器科学観測開始
2001年12月15日 科学観測中断
2004年4月23日 停波、運用終了



ミッション目的:

太陽活動極大期の太陽大気(コロナ)、及びそこで起こる太陽フレア爆発等の高エネルギー現象の高精度観測

諸元:

重量 390 kg; 高度約600キロの略円軌道(軌道傾斜角 31.7度)

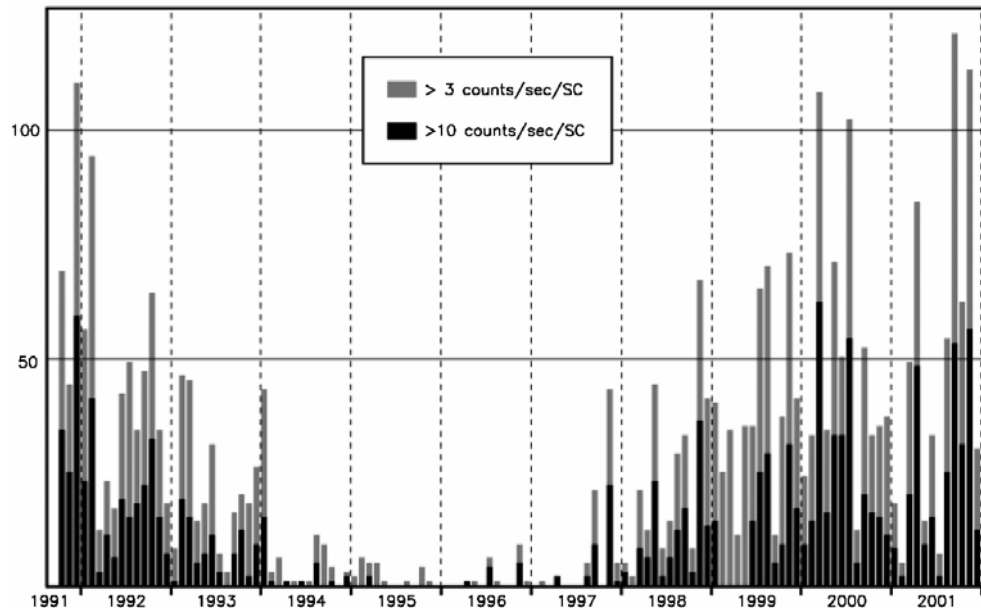
ミッション機器:

軟X線望遠鏡(SXT;日米協力) 硬X線望遠鏡(HXT)、
軟X線ブラッグ分光器(BCS;日英米協力) X線～ 線広帯域分光器(WBS)

「ようこう」太陽活動1周期の観測を達成

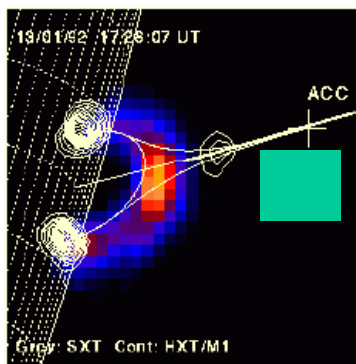
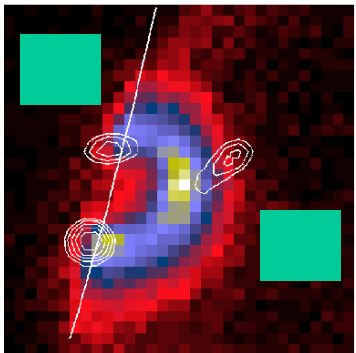
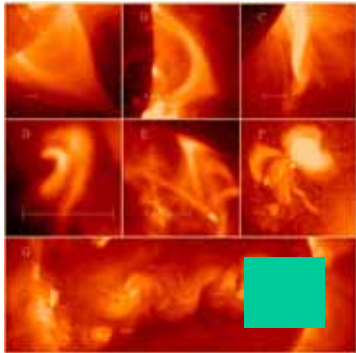
太陽活動周期(約11年)のほぼ1周期にわたるX線での太陽コロナ継続観測を実現し、黒点数の増減につれて3百万度以上のコロナ高温部からのX線放射量が2桁以上も変動すること、したがってコロナ加熱が黒点群に代表される太陽磁場に密接に関連するものであることを示した。

硬X線望遠鏡による太陽フレアの月別観測数

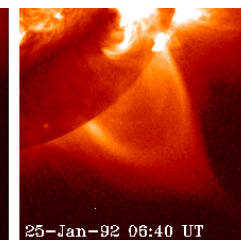
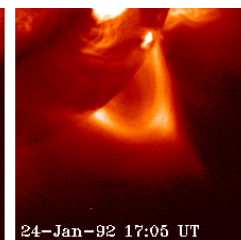
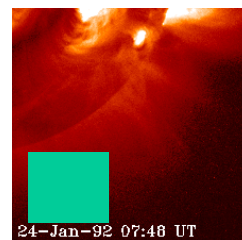
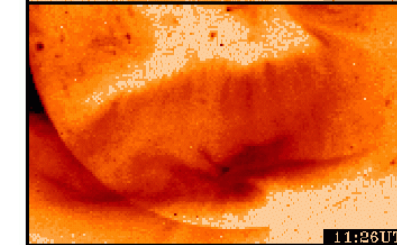
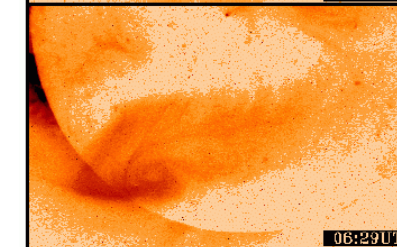
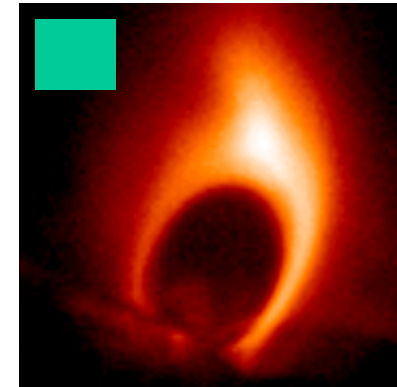


「ようこう」は、この間、軟X線望遠鏡でほぼ6百万枚に及ぶ画像を取得し、また硬X線望遠鏡で3千個以上の太陽フレアを撮像観測した。これらのデータから、さまざまな新しい活動現象が発見され、太陽フレア爆発を初めとするこれらの活動現象が磁気再結合(リコネクション)過程であることを確証した。

「ようこう」が見つけた新しい現象 打上げから観測終了まで



- 1991年
 - ・コロナ中の様々な磁氣的構造(曲がりくねった磁気ループ、尖った磁気ループ等) ...
 - ・コロナの大規模再編成現象(巨大X線アーケード形成) ...
 - ・同期して変動するフレアの2つ目玉硬X線源
- 1992年
 - ・黒点群上空で頻発する軟X線マイクロ・フレア
 - ・膨張する軟X線フレア・ループの頂上に現れるカस्प(尖塔形状)構造 ...
 - ・X線ジェット
 - ・断続的に膨張する黒点群上空のコロナ
- 1993年
 - ・フレアに伴なうプラズマ雲の放出
 - ・フレアに伴なうX線コロナの急激な輝度低下
- 1994年
 - ・フレア・ループの上空に現れる硬X線源 ...
- 1996年
 - ・フレア・ループの上空にある高エネルギー粒子加速領域 ...
- 1999年
 - ・フレア・アーケード上空のスポーク構造と下降流
- 2000年
 - ・硬X線フレアの平行リボン形状
- 2001年
 - ・超高速(毎秒2千km)で上昇する硬X線源



「ようこう」が達成した『世界初』の成果

【科学成果】

太陽磁場に支配されるコロナの多様な構造・さまざまなダイナミックな変動現象を発見した

太陽フレアが磁気再結合(リコネクション)過程であることを確証した

太陽コロナが太陽磁場により加熱・生成されていることを確証した

地磁気嵐を引き起こす惑星間空間擾乱現象の源となるコロナ大規模ガス噴出現象(CME)に伴うX線現象【巨大アーケード形成、軟X線減光現象、等】を発見するとともに、その前兆をX線で捉え、地磁気嵐の予測可能性を大きく広げた

【連続観測】

太陽活動周期(約11年)をカバーする世界で初めてのX線による太陽連続観測

【観測装置】

(軟X線望遠鏡)

衛星に載せたX線望遠鏡として世界で初めてCCDカメラを使用

搭載コンピュータによる自動制御で太陽コロナとフレアの高速連続観測に成功

(硬X線望遠鏡)

新技術 = フーリエ合成型多素子「すだれ」コリメータ望遠鏡で太陽フレアの硬X線撮像を実現

30キロ電子ボルト以上の高エネルギーX線域で世界で初めての撮像に成功

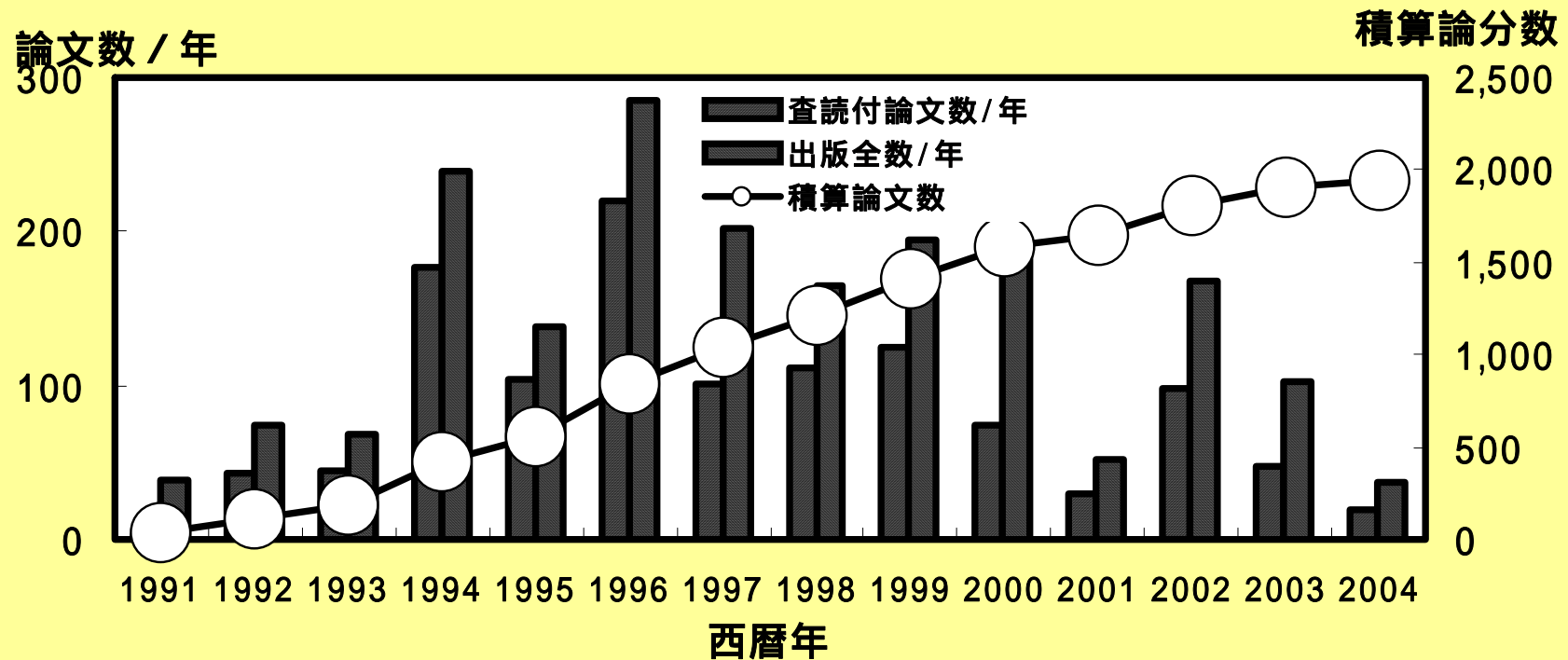
「ようこう」による主要な科学成果 (各論は後述)

- 太陽磁場に支配されるコロナの多様な構造・ダイナミックな変動現象を発見 (8頁)
- 太陽フレアは磁気再結合(リコネクション)過程であることを解明 (9~10頁)
 - 根拠事実
 - 軟X線フレアループ頂上のカスプ(尖塔形状)構造、その膨張
 - 2つ目玉の硬X線源と磁気ループ上空の硬X線源
 - 磁気ループ上空のフレア粒子加速領域、超高温領域
 - X線ジェット現象、X線プラズマ雲の放出現象、など
- コロナの生成・加熱が太陽磁場(黒点群の磁場)によることを確証 (11頁)
 - 根拠事実
 - 太陽活動周期に伴って劇的に変化するコロナの高温部
- コロナ大規模噴出と関連するX線現象を発見、地磁気嵐の予測可能性を拡大 (12~13頁)
 - 根拠事実
 - コロナの大規模再編成 = 巨大アーケードの出現
 - X線プラズマ雲の噴出
 - X線コロナの急激な輝度低下
 - ~ とCME(コロナ大規模噴出現象)の統計的関連
 - S字型X線ループの出現とコロナ大規模噴出現象の頻度の相関

「ようこう」の科学成果

博士学位取得者数	59名	(国内29名)	
修士学位取得者数	60名	(国内のみ)	(平成15年度末まで)

「ようこう」関連出版論文数の推移



日本の太陽観測衛星の継続的・漸進的発展

- ・独自の観測技術を駆使した小型衛星で世界最先端の研究（ひのとり）
- ・得意な技術を持ち寄る国際協力（共同設計、分担製作）で世界屈指の軌道太陽天文台を実現（ようこう、SOLAR-B）



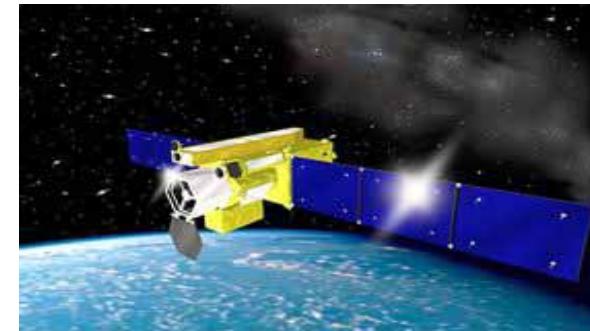
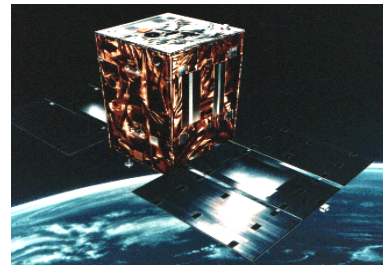
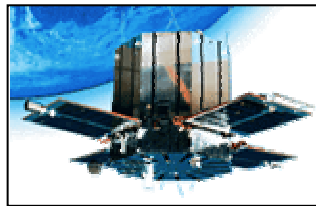
コロナ加熱 / 太陽磁気活動の包括的解明

1980

1990

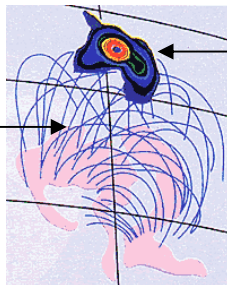
2000

2010

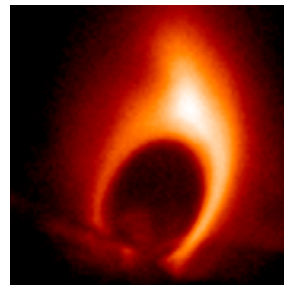


衛星名	ひのとり	ようこう	SOLAR-B
運用期間	1981 - 1982	1991 - 2001	2006年度打上げ(予定)
衛星重量	195 kg	390 kg	900 kg
主な搭載観測装置	硬X線撮像装置 X線分光装置	軟X線望遠鏡 硬X線望遠鏡	可視光・磁場望遠鏡 軟X線望遠鏡・極紫外線撮像装置
観測の概要	太陽フレアに伴う硬X線発生場所を初めて同定	太陽フレアに伴う軟X線像の変化を初めて動的に撮影	太陽フレアの立体構造と磁力線構造の時間変化を初めて同時に観測

地上観測による推定磁力線構造)



爆発初期のX線像がはじめて得られた。



太陽フレアの立体構造とその時間経過の理解が大きく深まった。

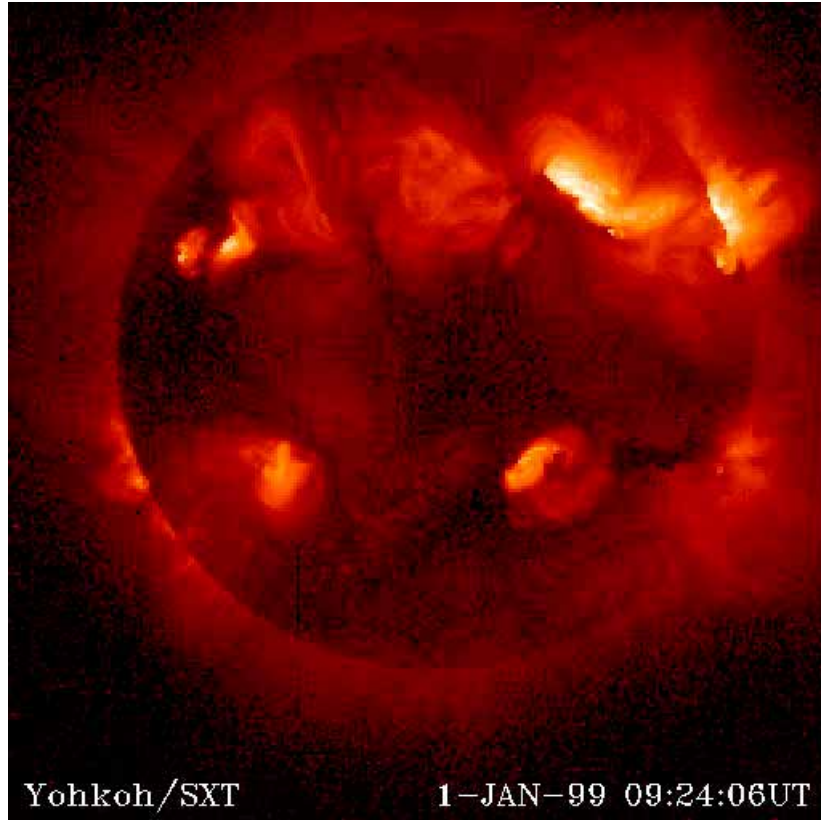


太陽表面

コロナ加熱太陽フレアの主役である磁力線ループの太陽表面での動きが初めて見える。

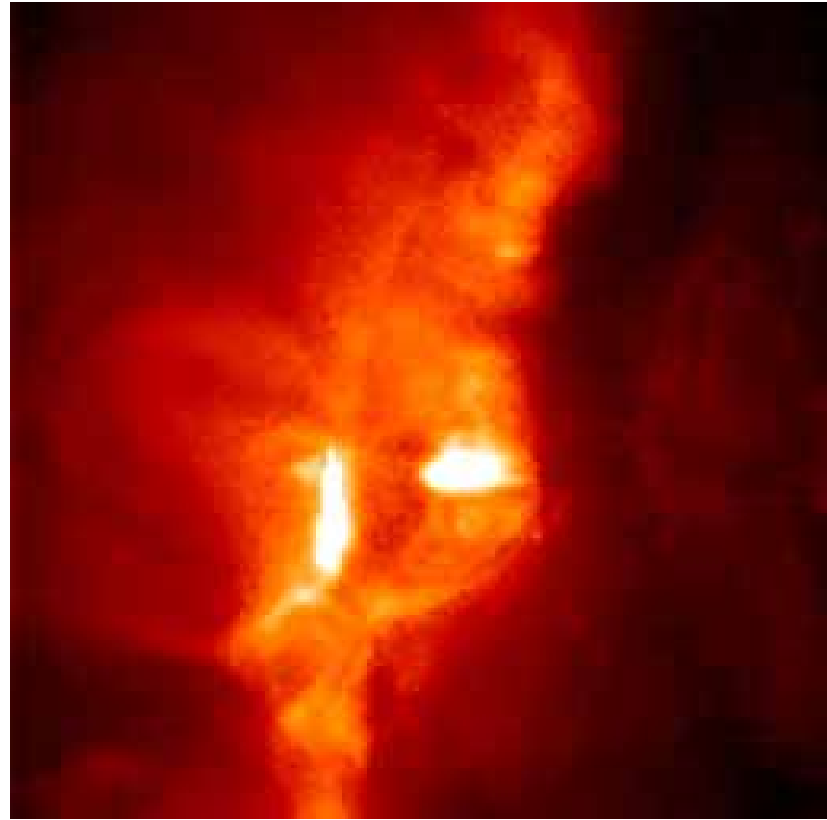
「ようこう」の発見： 1991～1994年

●コロナの多様な構造・さまざまなダイナミックな変動を見つけた



コロナを電流が流れている証拠となる曲がりくねったたくさんのループ構造、大きさと時間スケールの異なるさまざまな形状の変動現象が見つかった。コロナに突き出た太陽磁場が基本構造を決め、その突発的な変化がフレア爆発などの変動を引き起こしている。

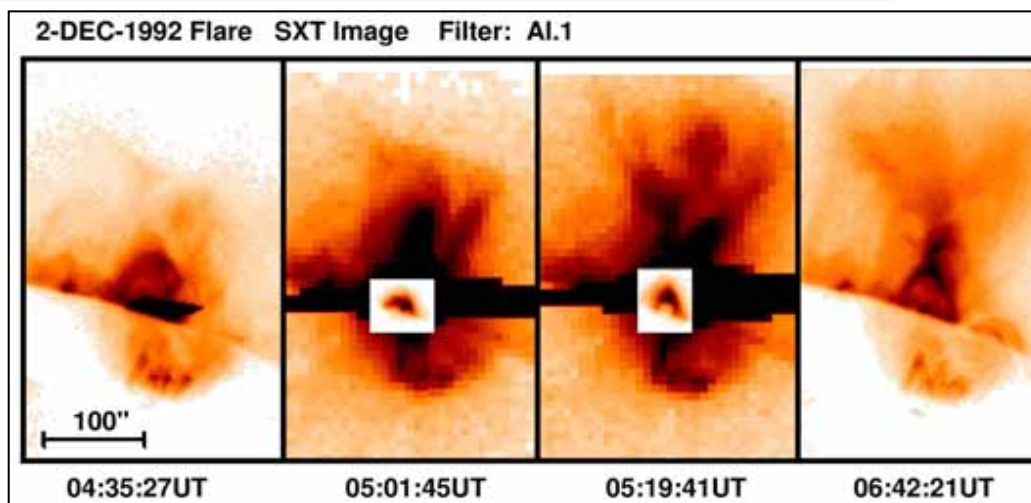
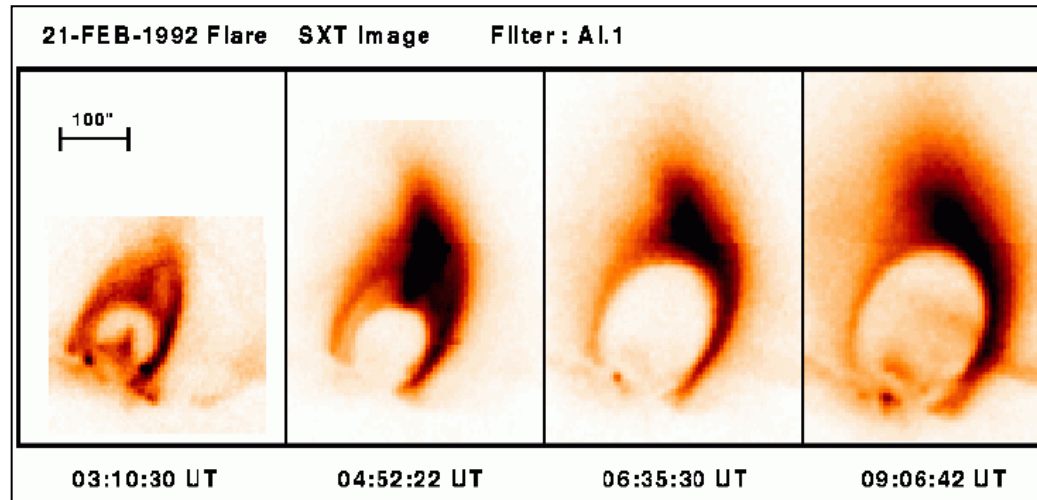
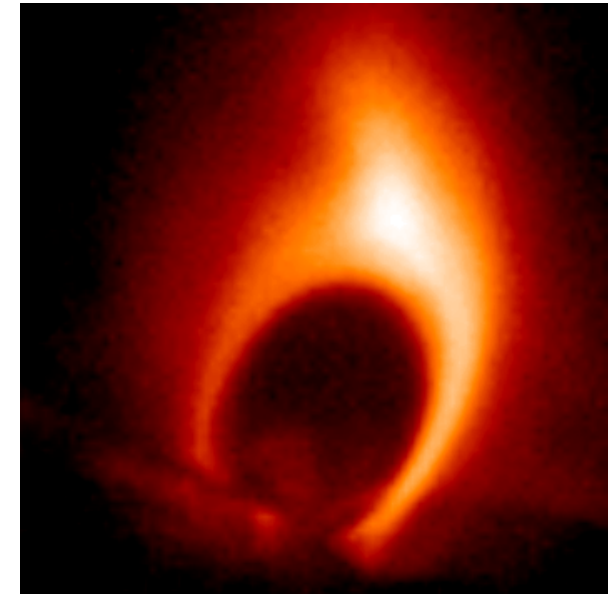
●太陽フレアの磁気再結合(リコネクション)説を裏付ける第一歩が得られた



フレア爆発に先立ち、黒点群上空のコロナが急激に膨張する。フレア爆発の本体(明るいループ部分)の頂上付近にカスプ(尖塔形状)構造が見つかり、爆発のメカニズム解明の糸口となった。

「ようこう」の発見： 1991～1994年

- 太陽フレア磁気再結合(リコネクション)説の確証
その強力な証拠として、軟X線フレアループのカスプ(尖塔形状)構造が見つかった(1992年)



軟X線望遠鏡が見つけた
磁気再結合の証拠

カスプを伴うループ
の時間発展(成長)

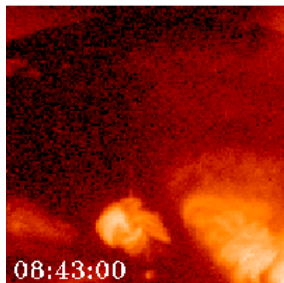
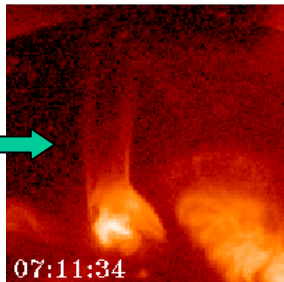
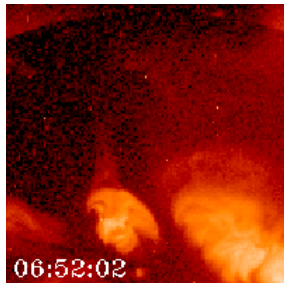
温度構造(カスプの
外側で最高温度を記録)

フレアに先行する周
辺部の膨張、上昇運動

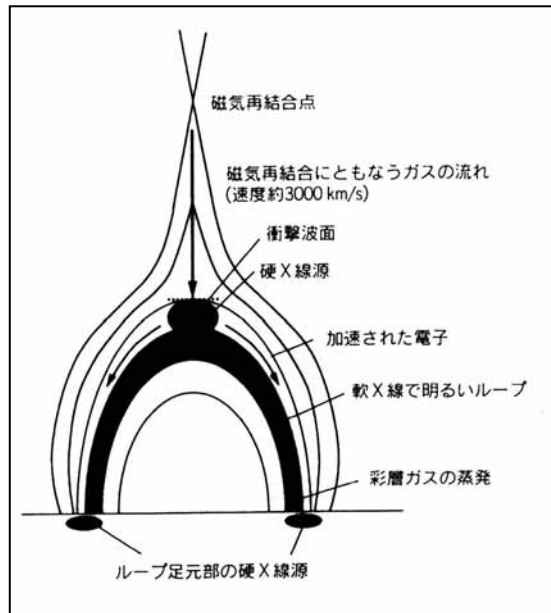
「ようこう」の発見： 1992～1995年

太陽フレア磁気再結合(リコネクション)説の確証

磁気ループ上空の硬X線源が見つかり、磁気再結合説をさらに確かなものとした(1994年)

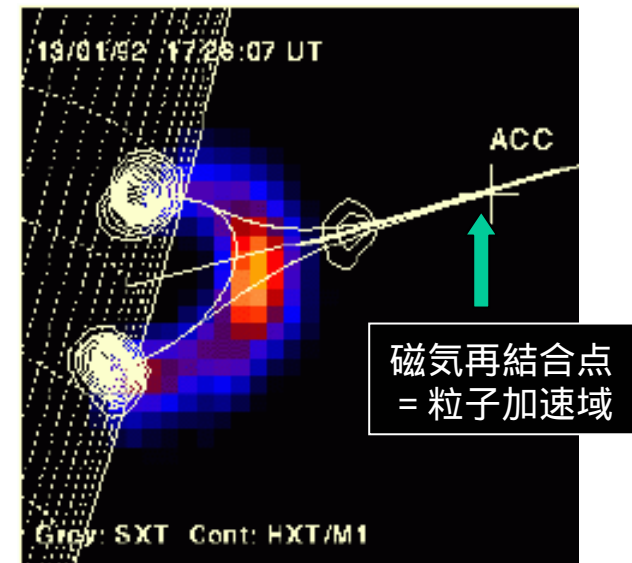
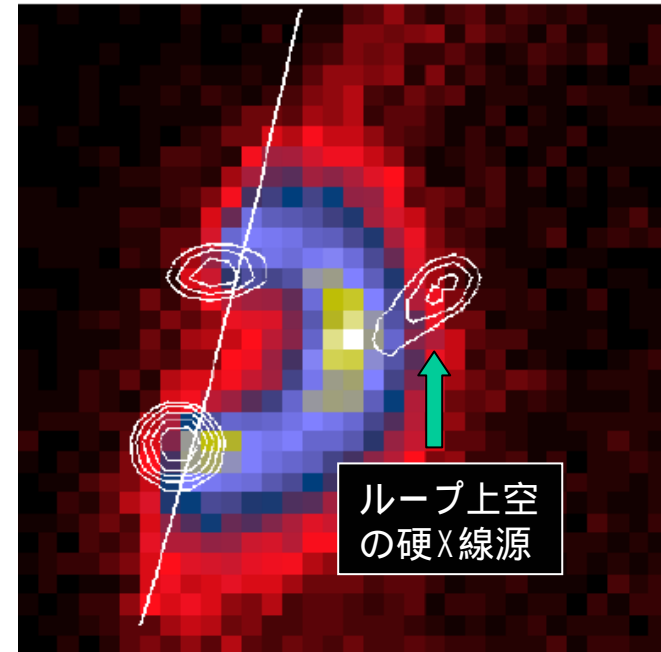


「ようこう」がもたらした磁気再結合(リコネクション)モデル



新発見のX線ジェットも磁気再結合モデルで説明できることが示された(1992年)

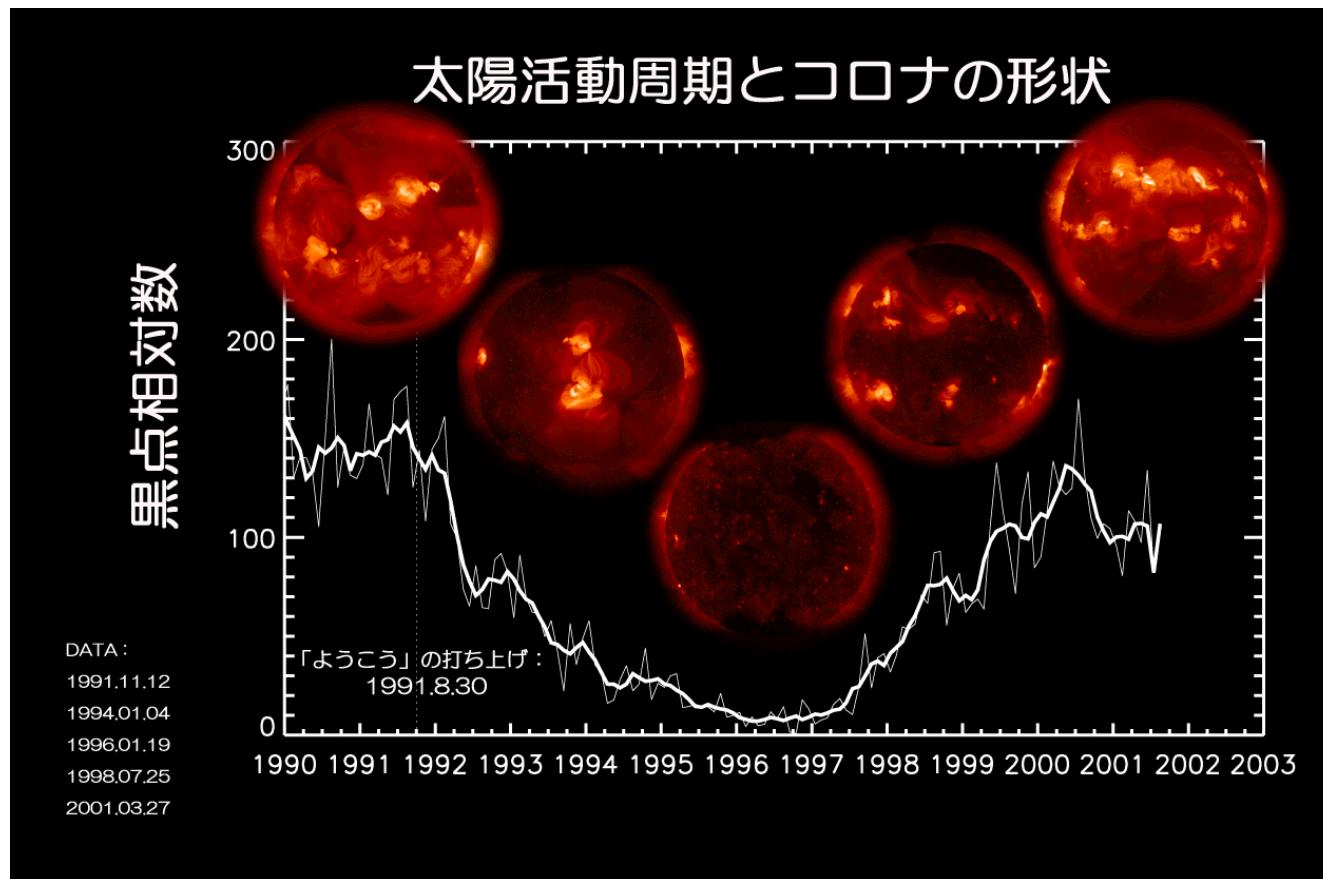
フレア粒子の加速領域が磁気再結合点であることが確認された(1996年)



「ようこう」の発見： 1991～2001年

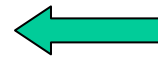
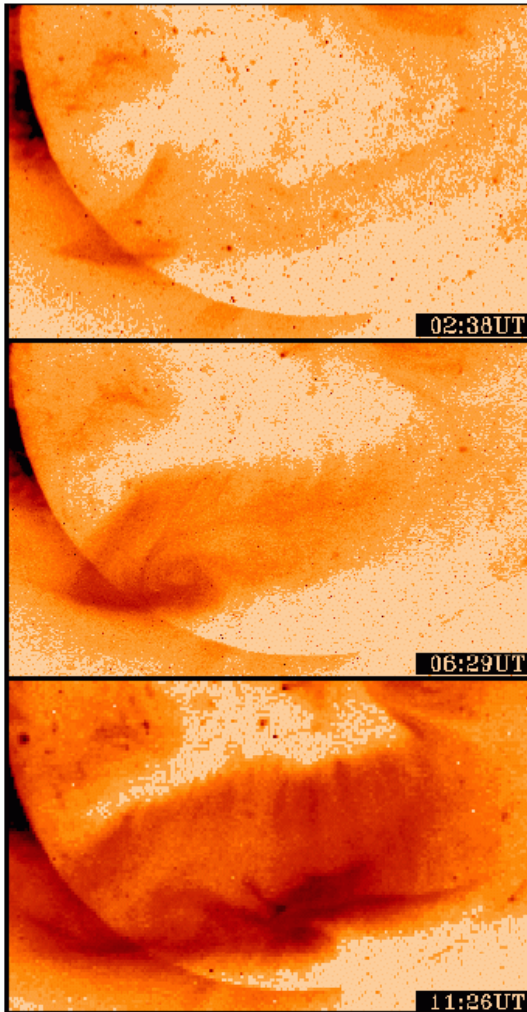
コロナの加熱は太陽黒点数に大きく依存することを発見

太陽活動極小期(1995年～96年)のコロナは、極大期(1991年、2001年)と比べて、3百万度以上のコロナ高温部からのX線の放射量が2桁以上も少なくなる。しかも、明るい黒点群から遠く離れた極域でさえ、極大期の明るさに遠く及ばない。極域には太陽周期により強さを変えない「一般磁場」が存在している。この部分のコロナの明るさまでもが、なぜ太陽活動周期を特徴づける黒点群の消長につれて変動するかは謎のままである。



「ようこう」の発見： 1991～1994年

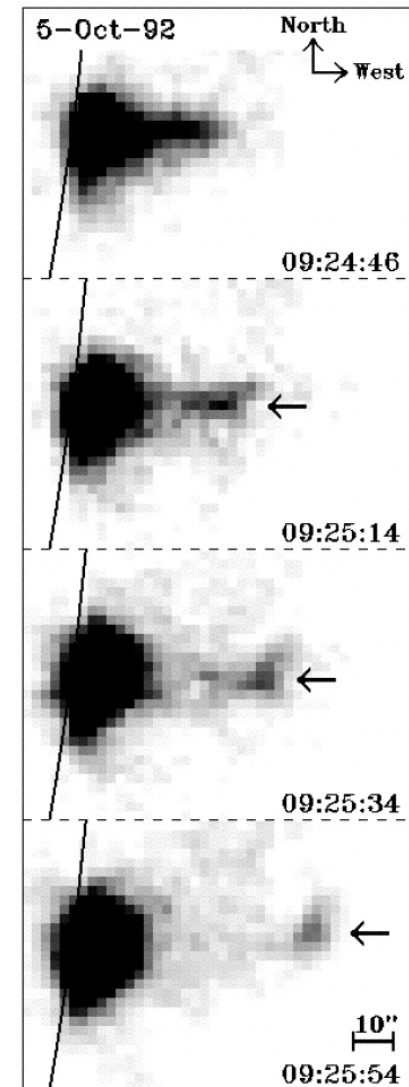
地磁気嵐を引き起こすコロナ大規模噴出現象に対応するX線現象を見つけた



その1： 太陽極域で見つかった巨大X線アーケードの形成現象(コロナの大規模再編成とも呼ばれる)。
激しい地磁気嵐を引き起こした(1994年)

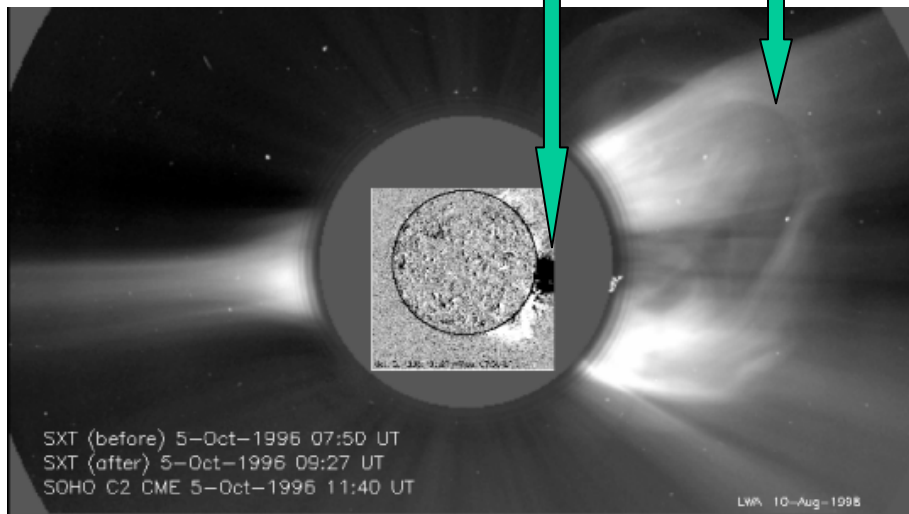


その2： フレアに伴なうX線プラズマ雲の噴出。やはり地磁気嵐を引き起こす

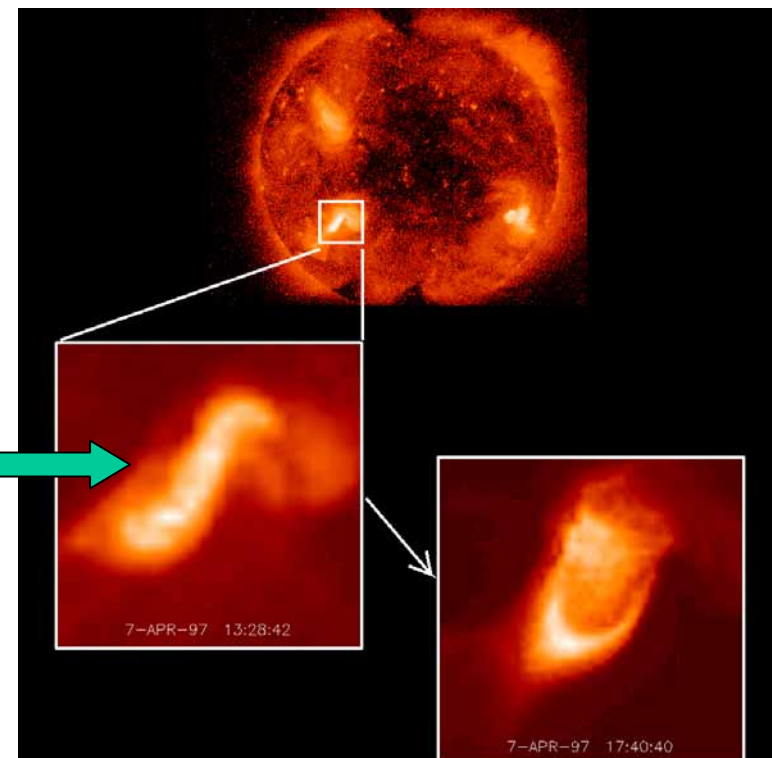


「ようこう」の発見： 1997～1998年

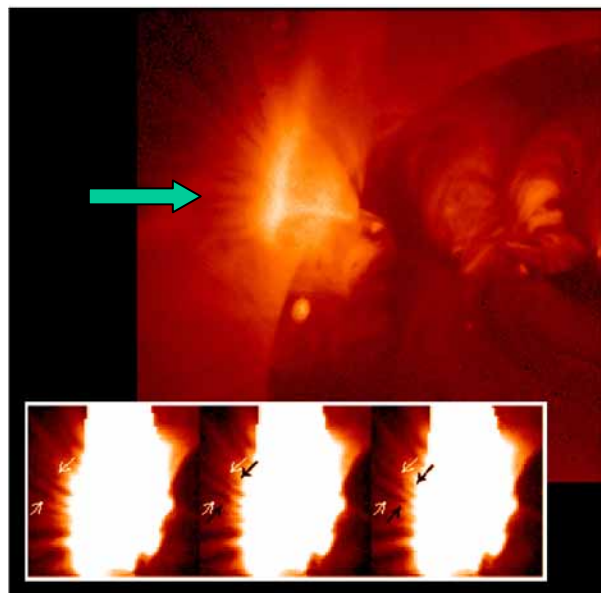
- 地磁気嵐を引き起こすコロナ大規模噴出現象の前兆をX線で見つけた
X線コロナの急激な輝度低下がCME(コロナ大規模噴出現象)を引き起こす
(SOHOとの共同観測; 1996年)



活動領域がS字型のX線ループ
を示すと、コロナ大規模噴出現象
が発生する

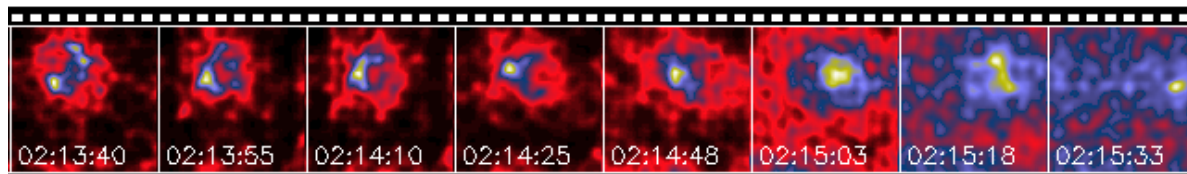
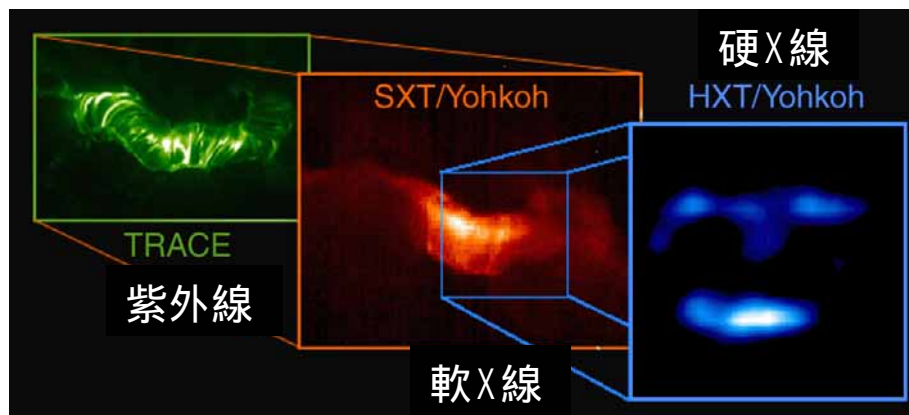


「ようこう」のその他の発見： 1999～2001年



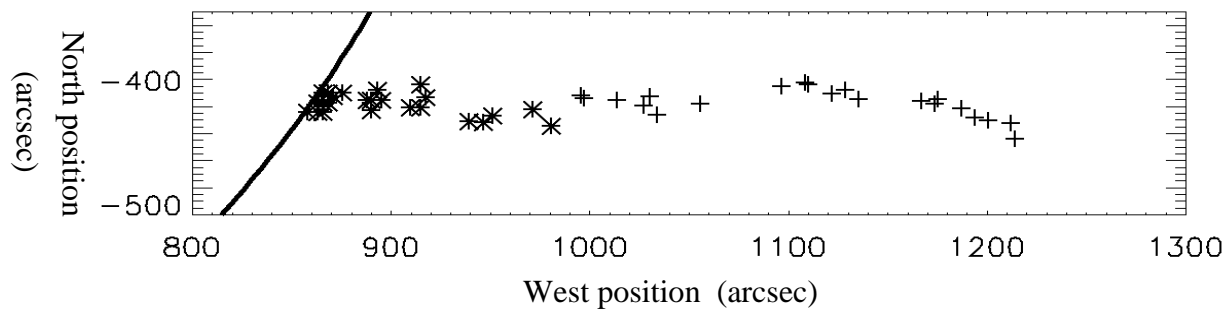
1999 フレア・アーケード上空の
スポーク構造と下降流

2000 硬X線フレアの平行リボン形状



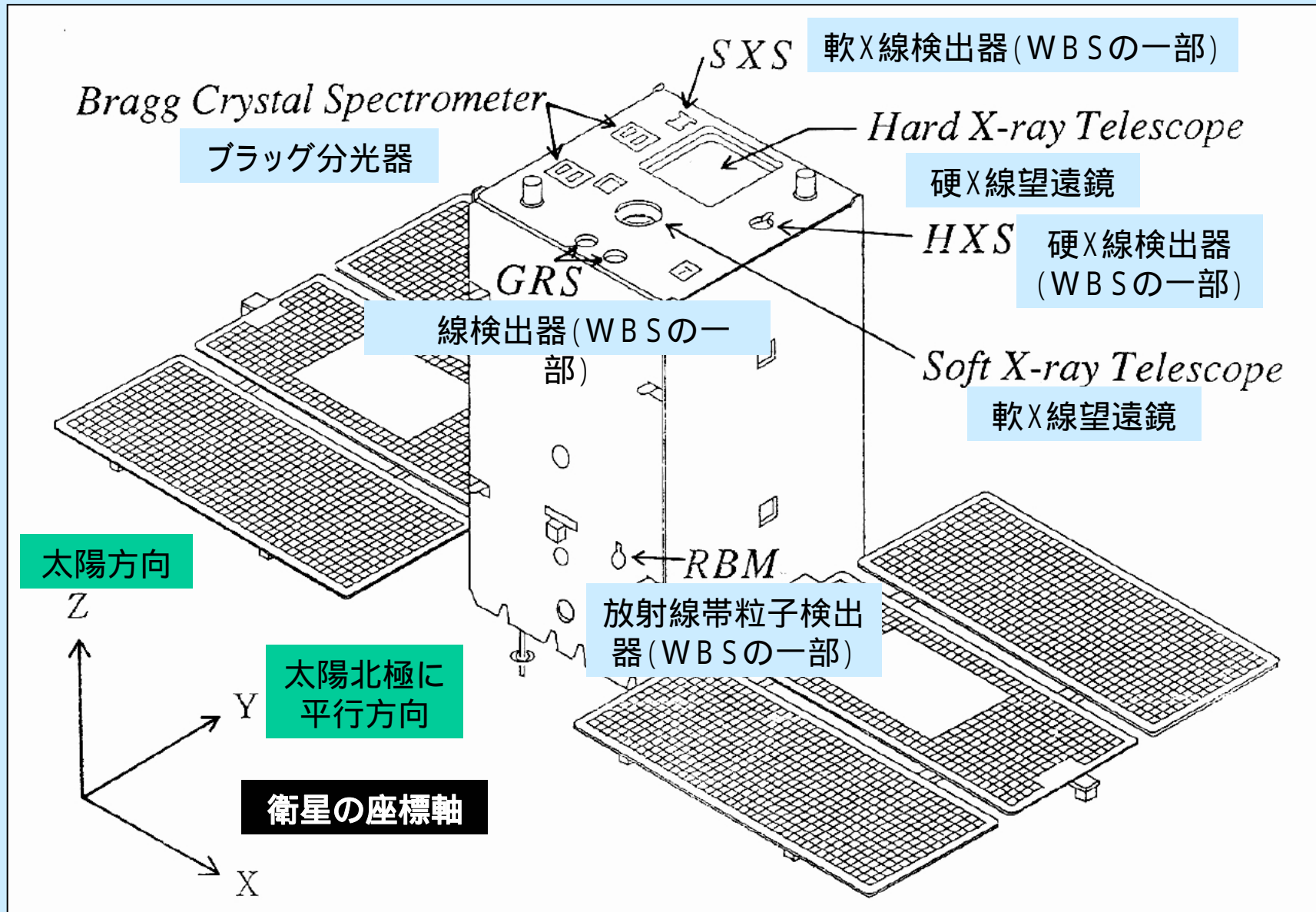
2001

超高速で移動する太
陽フレアの硬X線源



いずれも磁気再結合を裏づ
ける観測事実と考えられる

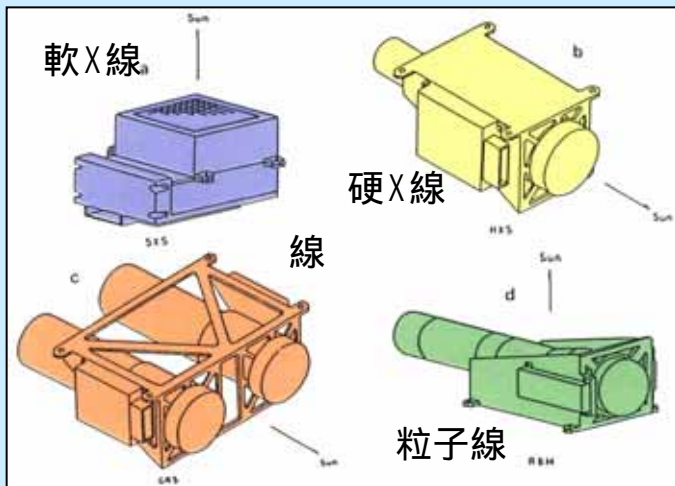
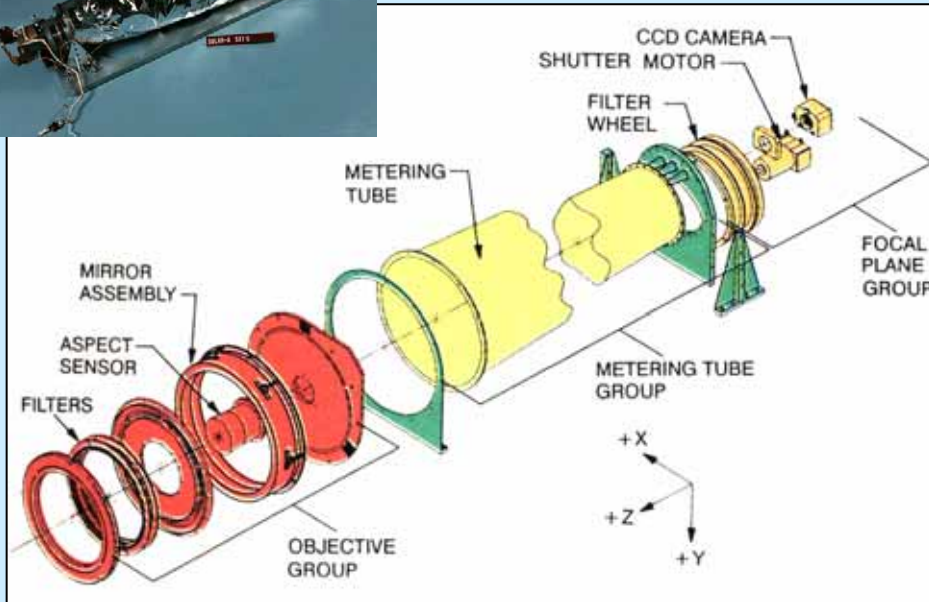
「ようこう」衛星：構造と座標系



「ようこう」観測機器

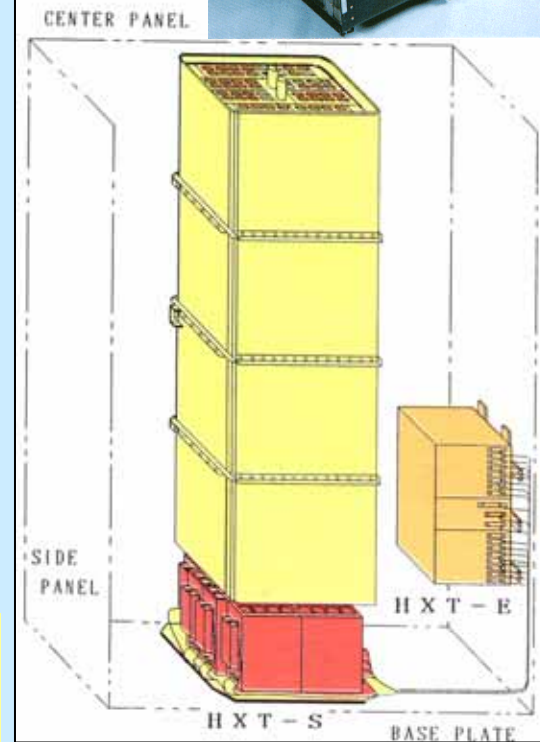
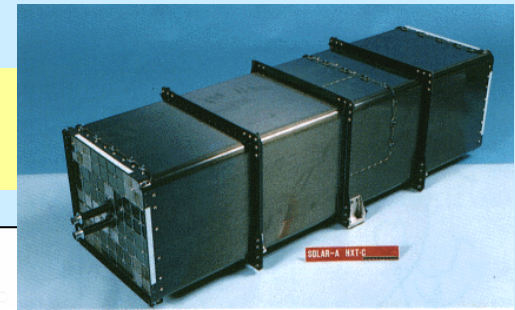


軟X線望遠鏡
(高温コロナ撮像)

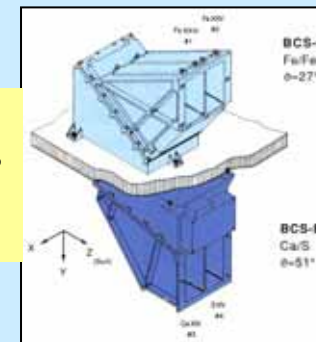


広帯域分光器 (WBS)
(フレアX線・ガンマ線
放射の大局的診断)

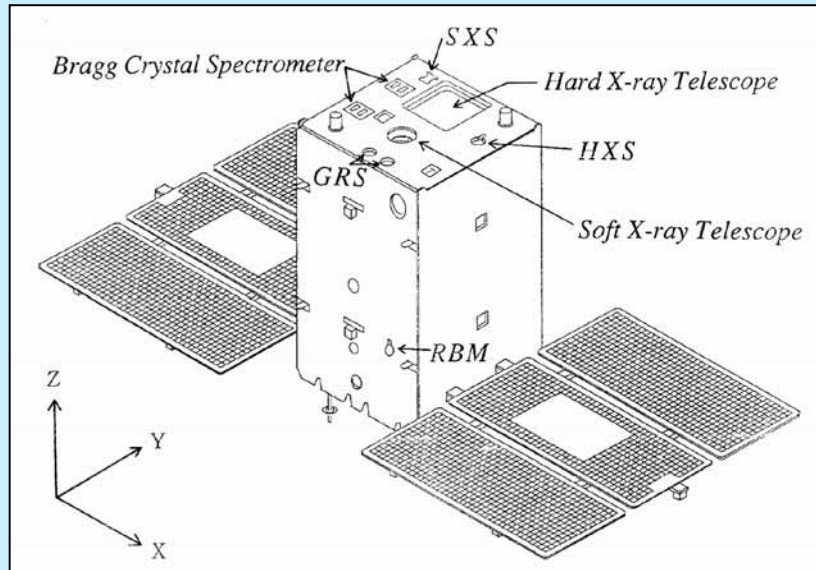
硬X線望遠鏡
(フレア硬X線観
測)



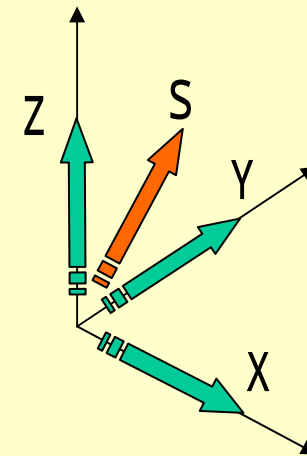
ブリッグ分光器
(フレア超高温プ
ラズマ診断)



「ようこう」衛星： 姿勢制御系の基本構成

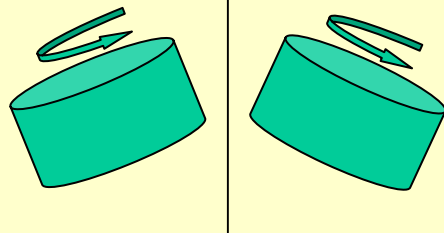


センサ (IRUジャイロ) の冗長構成



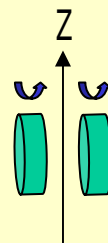
アクチュエータ (MW、CMG) の役割分担

X・Y軸周り



Y軸方向から少し傾けた2台のホイールでX軸、Y軸周りの回転を制御。大きな劣化なし。

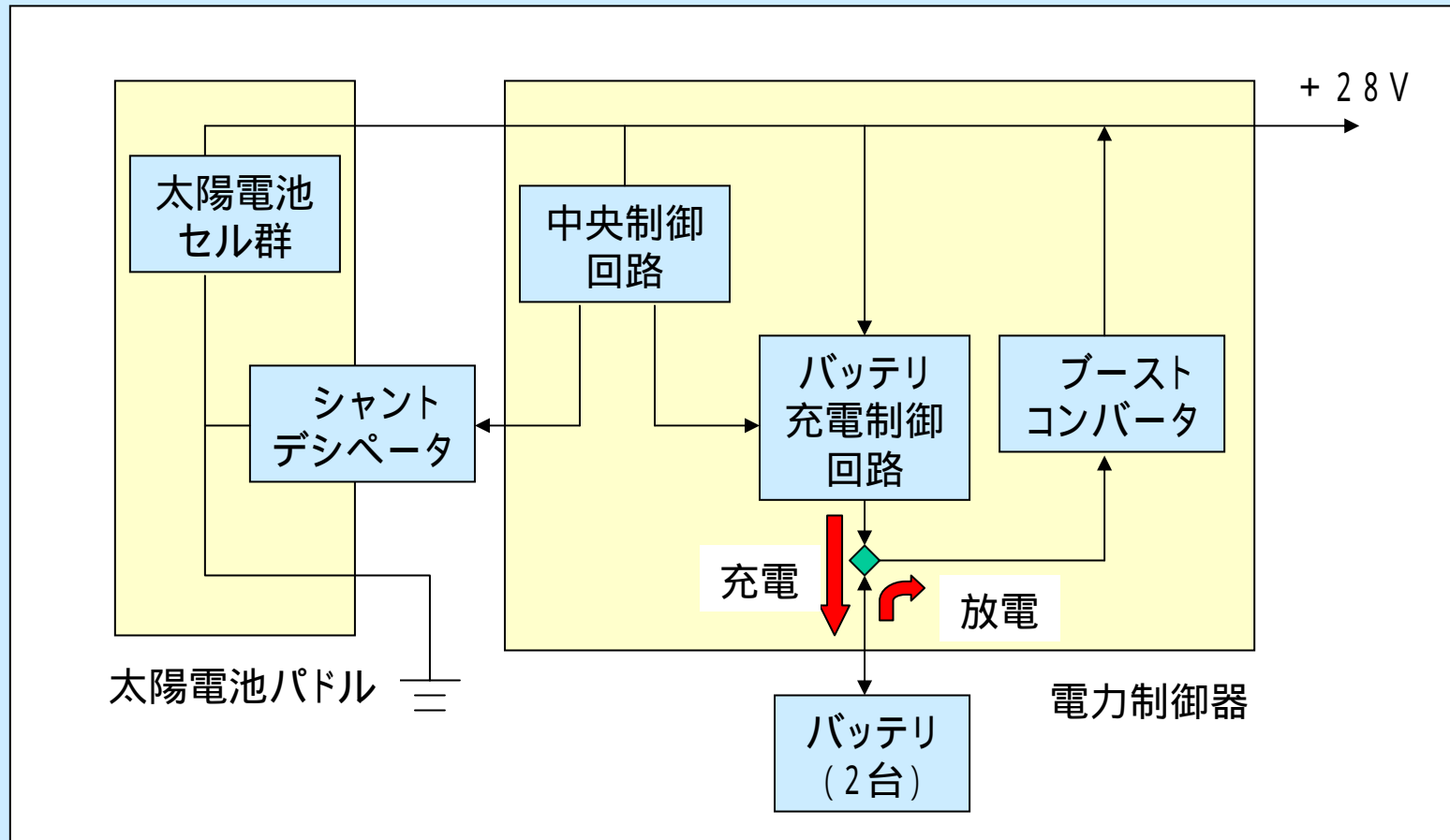
Z軸周り



2台のCMG。1台で最低限の役割を果たす。2001年9月より1台で運用。

Yジャイロの劣化が始まった1993年3月以降、[X - S - Z]の組み合わせで運用。2000年10月からはZジャイロ、2001年1月からはSジャイロでも劣化が激しくなった。この時点でYジャイロの再使用の可能性を考えて性能評価を行ったが、劣化の進み具合が激しく、そのまま[X - S - Z]での運用を継続することとした。

「ようこう」衛星：電源制御系の基本構成



バッテリー充電制御回路内の充電スイッチを充電側に切り替えるための電源がバッテリー側から供給されるようになっていたため、全放電状態からの回復措置を能動的には採ることができなかった。