J. Plasma Fusion Res. Vol.84, No.3 (2008) 147-154

解説

太陽観測の最前線 —「ひので」で迫る太陽活動—

渡邊鉄哉
国立天文台・ひので科学プロジェクト

（原稿受付：2007年12月3日）

太陽観測衛星「ひので」は平成18(2006)年9月23日の打ち上げ後，すべての観測装置が正常に動作し，現在では定常的に，光球からコロナまで，ほぼ全ての大気層の連続観測が行われている．「ひので」には可視，極端紫外，およびX線計測用の望遠鏡が搭載され，コロナの加熱問題や磁場リコネクションに関する太陽物理学の謎の解明を目指している．初期成果を踏まえた「ひので」の現状を報告する．

Keywords:
solar x-ray and euv radiation, solar corona, coronal heating, emission line spectroscopy, plasma diagnostics, *Hinode* mission

1．はじめに

平成18（2006）年9月23日午前6時36分，宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究本部（ISAS）内之浦宇宙空間観測所（USC）から発射されたMVロケットの最終（MV-7）号機は成功裡に衛星軌道に投入され，ここに科学衛星「ひので」が誕生した．10月3日までかかって太陽同期の極軌道に載った衛星は，10月下旬に搭載3望遠鏡のドア開けに成功し，順調に科学観測が開始されることになったのである．

「ひので」は，科学衛星「ひのとり」・「ようこう」に続くわが国3番目の太陽観測衛星である．昭和56（1981）年に飛翔した「ひのとり」は僅か183 kgの小型スピン衛星であったが，同時期にNASAにより打上げられた「Solar Maximum Mission（SMM）」に伍して，太陽フレア観測において画期的な成果を挙げることができた衛星であった．

平成3（1991）年に打上げられた「ようこう」は，太陽活動極大期の太陽大気（コロナ）およ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を行うことを目的とした科学衛星である．このミッション目的を達成するため，「ようこう」には，数百万度から数千万度に達する超高温のコロナを撮像観測する軟X線望遠鏡，フレア爆発に伴って生成される高エネルギー電子からの放射を捉える硬X線望遠鏡など，互いに相補的な4種類の観測装置が搭載された．「ようこう」に搭載された4種類の観測装置は，打上げ当時としては，いずれも画期的な性能を誇るものであり，旧来の「静かな太陽コロナ」のイメージを一新する大きな成果をもたらした[1]．

軟X線望遠鏡（SXT）は，衛星に載せたX線望遠鏡として世界で初めてCCDカメラを検出器として使用し，高分解能・高画質・連続観測を実現し，これを動画に編集し，超高温の太陽コロナがさまざまな空間・時間スケールでダイナミックに激しく変動する様子を鮮明に映し出した．「フーリエ合成型多素子すだれコリメータ」という新しい撮像方式を採用した硬X線望遠鏡（HXT）は，やはり世界で初めて30キロ電子ボルト以上の高エネルギー域でのX線撮像観測を画期的な高感度・高分解能で実現し，太陽フレアが生み出す高エネルギー電子の生成箇所と振舞いを明らかにした．この2種類の望遠鏡はいずれもかつてない高感度の望遠鏡であり，明るさを減じた太陽活動極小期のコロナを観測するのに十分な性能を有し，**図1**に示すように，極小期の太陽が，頻度は下がるもののなお突発的な変動や爆発現象を引き起こし続け，太陽のコロナを維持し続けていることを明らかにした．

硬・軟両X線の2つの望遠鏡の撮像結果を比較することで，さらには「ようこう」搭載の2つの分光器（軟X線ブ

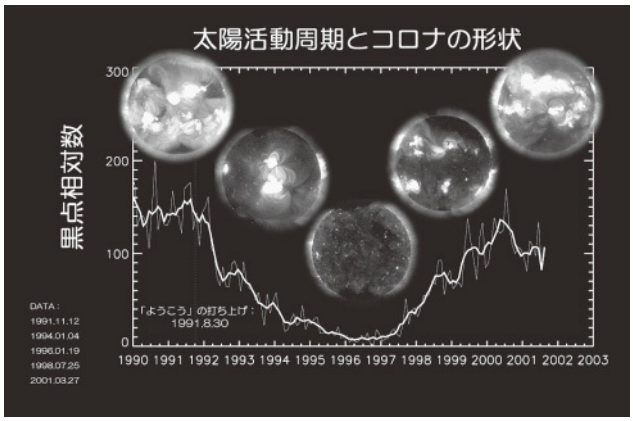


図1　第22-23活動周期に亘った「ようこう」軟X線望遠鏡（SXT）の観測．

Frontier of Solar Observation
WATANABE Tetsuya
author's e-mail: watanabe@uvlab.mtk.nao.ac.jp

©2008 The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

ラッグ分光器 BCS，広帯域 X 線・ガンマ線分光器 WBS）や時にはコンプトン・ガンマ線天文台衛星などの他の科学衛星や各種の地上望遠鏡による観測をも併せ用いることで，太陽フレアが太陽コロナ中の反平行の磁力線が結びつく磁気再結合（磁気リコネクション）過程であることを疑問の余地なく確証した．**図 2** は，HXT の観測で発見されたフレアループ上空の硬 X 線源と，磁気リコネクションモデルの予想するコロナの構造とが非常に整合していることを物語っている[2]．

大きな成功を収めた「ようこう」の国際協力の枠組みをさらに拡大して，第22号科学衛星「Solar-B」（飛翔成功後「ひので」と命名）が開発されてきた．ここで第 3 世代にあたる科学衛星「ひので」のサイエンスを，極々簡単に箇条書きにまとめてみると：

○高温コロナの形成：加熱エネルギーの源泉；対流のエネルギーをコロナへ運ぶ方法，エネルギーの熱化；電磁流体波，電流を熱にする方法，恒星・銀河・銀河団などの高温プラズマ（コロナ）；その成因との関係

○太陽磁場・コロナ活動の起源：光球とコロナの磁気カップリング，磁束管の生成と運動；“微細”磁束管の高空間分解能観測

○天体プラズマの素過程の解明：フレア爆発と磁気リコネクション；フレア，ジェット，アーケード，磁気リコネクション過程；プラズマ流の検出，磁気エネルギーの蓄積と解放：エネルギー収支

を解明することが挙げられる．

「ひのとり」では太陽高エネルギー現象・フレアに限定した物理を，「ようこう」ではその高エネルギー現象・フレアの発生メカニズムを解明するため，その基盤となっている活動領域を，いずれも X 線を中心にした可視光より短い波長域の観測により挑戦してきた．これに対して，「ひので」では：

○可視光・磁場望遠鏡（SOT）：有効口径 50 cm（グレゴリアン），角分解能 0.25 秒角，測光精度 0.1%，焦点面パッケージ（FPIP）；フィルター撮像系＋分光系，波長域 4000－6600 Å（CaIIH，G-band，FeI，Hα など）

○X 線望遠鏡（XRT）：斜入射望遠鏡（開口環径 40 cm），有効波長域　2－400 Å，空間分解能　1－2.5 秒角，視野 34分角（太陽全面をカバー），X 線解析フィルターによる温度診断

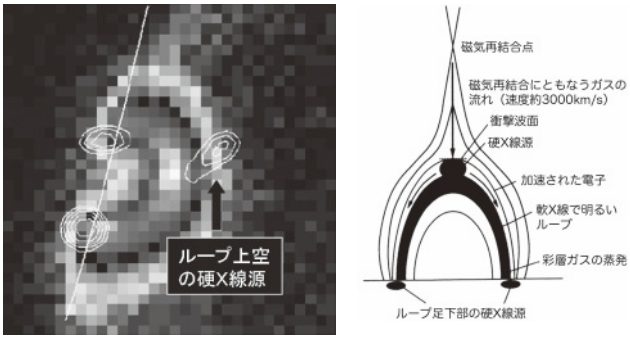


図 2　フレアループ上空に発見された硬 X 線源とフレアの磁気リコネクションモデル．

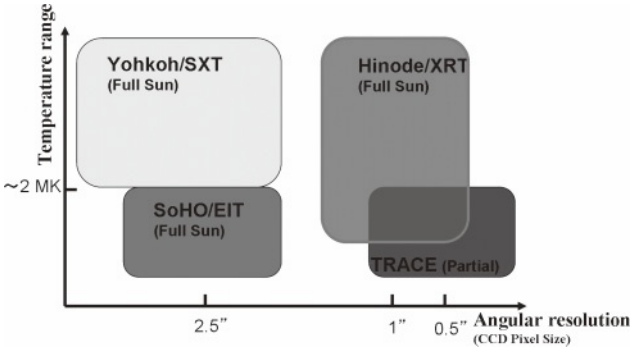


図 4　太陽観測軟 X 線・EUV 撮像望遠鏡の守備範囲．

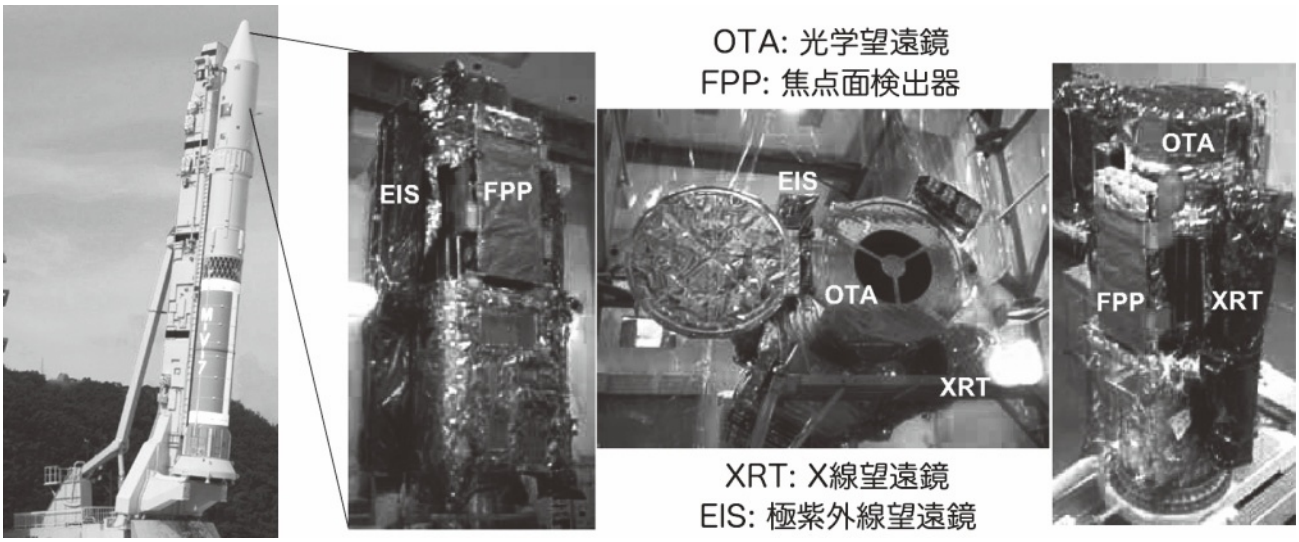


図 3　科学衛星「ひので」の誕生（平成18（2006）年 9 月23日午前 6 時36分）．衛星には 3 つの望遠鏡：光学磁場望遠鏡（SOT）とその焦点面パッケージ（FPP），X 線望遠鏡（XRT），極端紫外線望遠鏡（EIS）が搭載され，可視光から X 線による観測により，光球からコロナまで太陽大気の磁場・速度場を含む 3 次元構造を目指している．

○EUV 撮像分光装置（EIS）：極紫外域輝線輪郭分光，観測波長域 170－210 Å および 50－290 Å，視野500秒角，速度分解能 3 km/s 以下，温度診断範囲　10^5～2×10^7 K

の 3 つの望遠鏡を搭載し（**図 3**），太陽表面はもとより，光球下，太陽ダイナモ機構までを視野に入れた，太陽物理学のほぼ全分野を網羅するミッションに成長させている．このことは「ひので」が，科学面で「ひのとり」「ようこう」を受け継ぐだけでなく，組織的にも，JAXA/ISAS の衛星プロジェクトに，国立天文台の太陽グループが主体的に関与し，さらに国際協力としても大きく発展させたものとなっていることということをよく表している（**図 4**）．

2．コロナの微細構造を観測する X 線望遠鏡（XRT）

太陽コロナを観測する X 線撮像望遠鏡は1973/ 4 年のスカイラブに始まり，「ようこう」の軟 X 線望遠鏡（SXT）で画期をなし，その後，SoHO 衛星 EIT，TRACE 衛星，また最近ではさらに硬 X 線領域の撮像を狙った RHESSI 衛星の成功など，正にその黄金期を迎えている．そのような状況の中で，「ひので」に搭載されている X 線望遠鏡の特徴とは何であろうか？極端紫外から軟 X 線の波長域の光学系は斜入射系と直入射系とに大別される．直入射光学系は多層膜を塗布して，様々な電子温度のプラズマで形成される強い輝線にチューンして，その輝線の単色像を得ようというものである．空間分解の向上が容易なことが真骨頂であるが，その輝線の形成温度とは違う温度のプラズマには感度がないため，なかなかプラズマの温度変化，すなわち加熱や冷却の様子を調べることが難しい．一方，斜入射の望遠鏡が結像できる波長域は広いので，広帯域のフィルターを用いて連続光や輝線の強度比を測定することにより，プラズマの温度，エミッションメジャーの測定が可能である．「ひので」XRT は，斜入射光学系を採用して，これまでの最高性能に近い空間分解能（～1 秒角）をもち，同時にプラズマの温度診断が可能な X 線撮像望遠鏡であるということができよう[3]．「ようこう」SXT に比べ，極端紫外域（～300 Å）まで感度をもつフィルター群の採用により，温度診断可能な範囲が特に低温側に広がった（**図 5**）．診断可能温度広範囲化のおかげで，太陽コロナとしては低温構造，即ち小さな XBP やコロナホールの撮像能力が，格段に向上した．「ようこう」との比較を**図 6** に示す．

この空間分解能と感度温度範囲の向上により，「ひので」XRT は既にいくつかの新発見をしている．その第一は，まず「ようこう」SXT で真っ暗にしか写らなかったコロナホールの中にも双極的な磁場構造があり，往々，「ようこう」で発見された X 線ジェットと呼ばれる現象が観測された（**図 7**）．即ち，単極の磁場構造で，専ら高速（400－800 km/s）太陽風の源でしかないと思われていたコロナホールにも，細かな磁場構造が存在し，それに伴う活動性が見られたことは大変重要な観測的事実ということができる[4]．この双極磁場は「ひので」SOT の観測によっても確認されている．

活動領域においても重要な発見がなされている．**図 8** は，平成19（2007）年 2 月22日ころに観測された現象で活

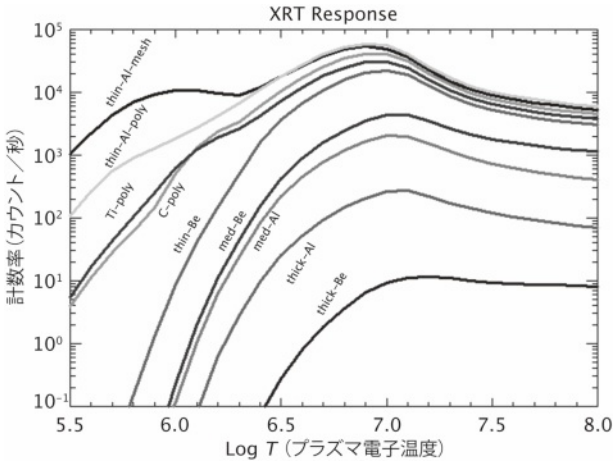


図 5　各フィルターの温度感度．太陽コロナ元素存在比のプラズマからの輻射に XRT の感度を畳みこんである．

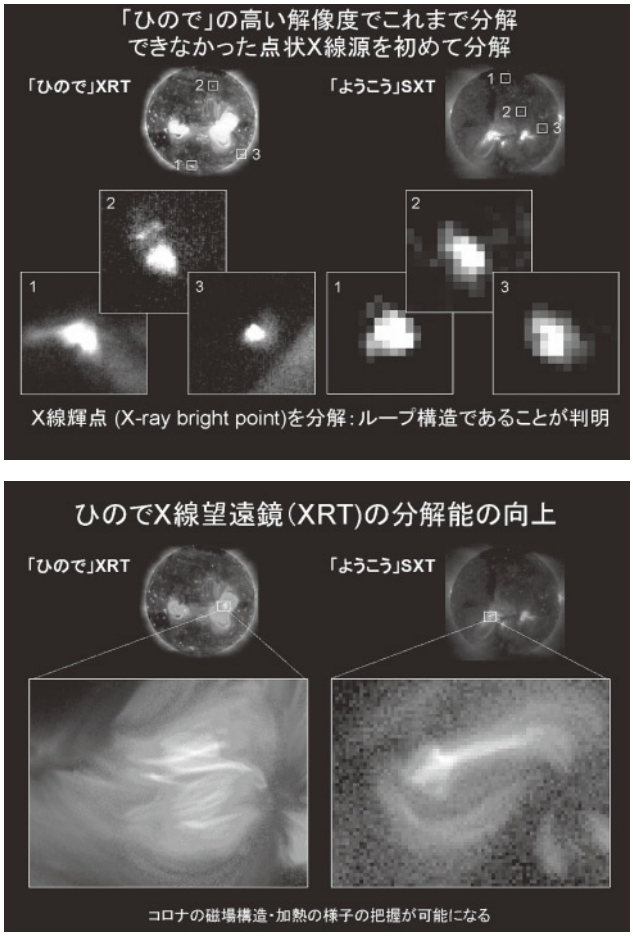


図 6　「ひので」XRT 画質の改善　ー「ようこう」SXT との比較によるー．

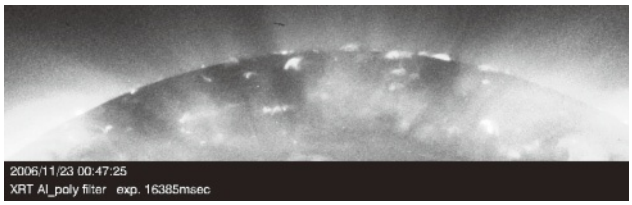


図 7　極域コロナホール中にも双極磁場構造が見られ，X 線ジェットの放出も観測される．

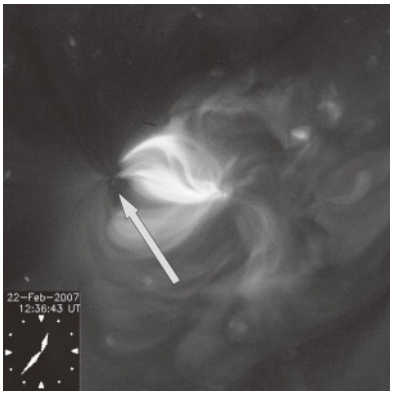


図８　活動領域からの定常的上昇プラズマ流（矢印部分）.

動領域の東側の縁から数時間以上に亘り定常的なプラズマの上昇流が観測された．活動領域にしては比較的低温（T ～1.3×10^6 K），低密度（2×10^9 cm^{-3}）のプラズマが，数時間以上にわたり，見かけの速度～140 km/s 程度で，磁力線にそって上昇流となっていることである．この１ヶ所からの質量放出レートとしては，2×10^{11} g/s 程度で，これは低速太陽風の相当の割合を賄えるのではないかとも推定されている[5]．

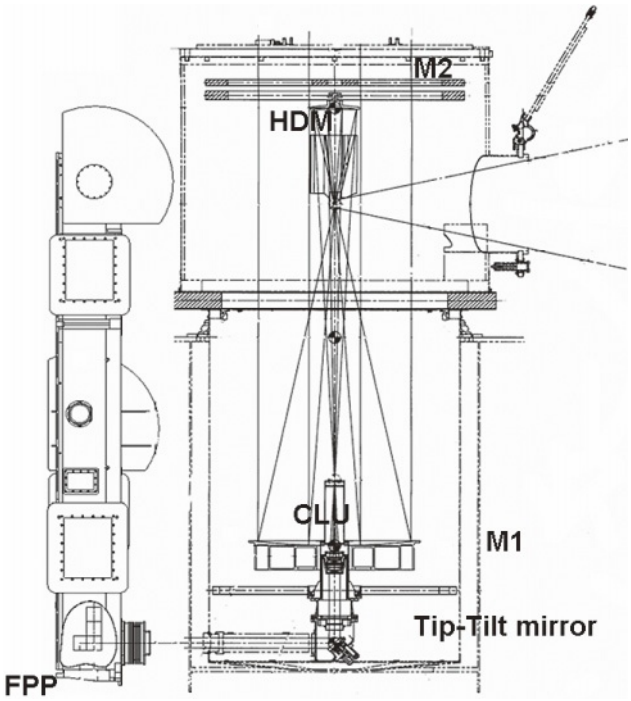
３．光球磁場の詳細観測　可視光磁場望遠鏡（SOT）

光学磁場望遠鏡（SOT）は有効口径 50 cm のグレゴリアン望遠鏡で，光束をコリメートした状態で焦点面パッケージ（FPP）と結合されている（**図９**）．グレゴリアン系のメリットは，主鏡が収集する視野範囲外の膨大な光熱量を排熱鏡により宇宙空間に捨てることが可能なことである．

FPP の中で光路は４つに分かれる．ひとつは相関追尾機構（CTM）により太陽面上の模様を認識して，可動鏡（TTM）にフィードバックする基本的には制御用のものである．残る３つの光路が科学観測に用いられるもので，それぞれ広帯域の干渉フィルター，複屈折偏光素子を用いる狭帯域フィルター，そしてリトロー型の分光器を用いる偏光分光装置に導入されることになる．それぞれの観測目的に応じた吸収線の選択等を含む観測パラメータの詳細は**図９**の表を参照されたい．狭帯域フィルターと分光器系は磁場に感度のある吸収線の偏光観測により，光球のベクトル（３次元）磁場構造を求めることが可能である．

地上観測が可能な可視光の望遠鏡を宇宙空間に打上げる最大の理由は，回折限界に達する高空間分解能：有効口径 50 cm 鏡の場合は波長5000 Åで0.2秒角，の画像を安定して取得できることに他ならない．実際，「ひので」SOT は，回折限界を達成していることが軌道上で確認されている（**図10**）．特に磁場観測では，複数の画像からそれぞれの偏光成分を取り出すことになるので，姿勢と空間分解能が時間的に安定していないと回折限界に達する３次元の磁場構造を求めることができない．そういう意味では，空間分解能のいい磁場観測にこそ，可視光の軌道望遠鏡の真価がある．

光球面の３次元磁場の観測は，Zeeman 効果を用いて行われる．ストークス偏光成分（I, Q, U, V）を偏光観測に



	BFI	NFI	SP	CT
CCD format	4096 x 2048		112 x 1024 x 2	50 x 50
pixel scale (arcsec/pix)	0.054	0.08	0.16	0.22
maximum FOV (arcsec^2) (EWxNS)	218x109	328x164	328 (scan range) x164 (slit length)	11x11
wavelength resolution (A)	3~10	~0.1	0.02	5
number of wavelength in a data set	1	1~4	244	1
time resolution (typical)	5~30s	10~60s	1min~3hr	580Hz
photometric aquracy (%)	0.5	0.1 ~ 0.5	~ 0.1	~0.5

図９　光学磁場望遠鏡（SOT・FPP）の基本仕様：M1：主鏡，M2：副鏡，HDM：排熱鏡，CLU：コリメータレンズ系，BFI：広帯域フィルター，NFI：狭帯域フィルター，SP：分光器，CT：相関追尾機構.

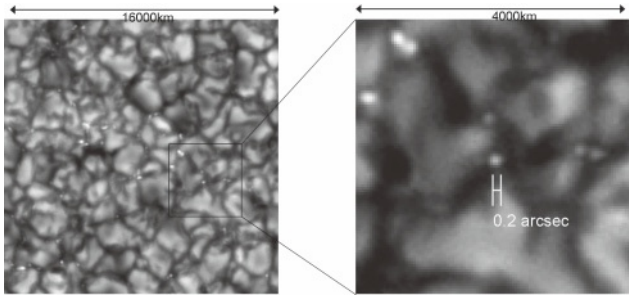


図10　粒状斑間に出現する輝点のサイズから推定して，観測波長（4300 Å）での回折限界が達成されていることが確認された.

より分離し，磁場を含む太陽大気モデルの輻射輸送問題を解いて，これらの吸収線の線輪郭から光球面磁場に関する情報を得るものである（**図11**参照）．

XRTとの共同観測中，極域コロナホール近傍の磁場観測が実施された．その結果は**図12**に示されるように，極域のコロナホール中にも１kG を超えるような双極の強磁場が存在し，コロナホールといえども決して単極の磁場構造ではないことが判明した[6]．

また，彩層にて形成される電離カルシウムの共鳴線

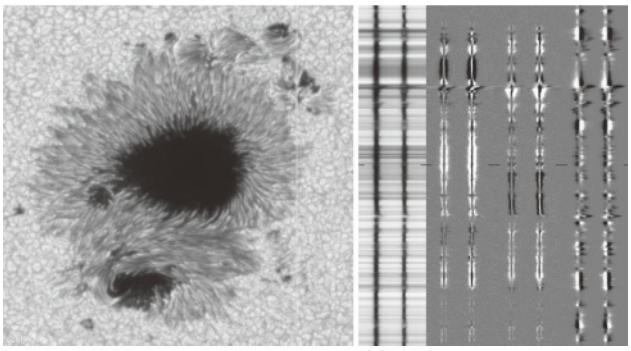


図11　黒点と磁場に感度のある FeI 6302Å の吸収線（２本）を用いる光球３次元磁場観測．連続光の画像中の細線が分光器のスリット位置を示している．右図は左からストークス成分：I，Q，U，V の線輪郭を示している．

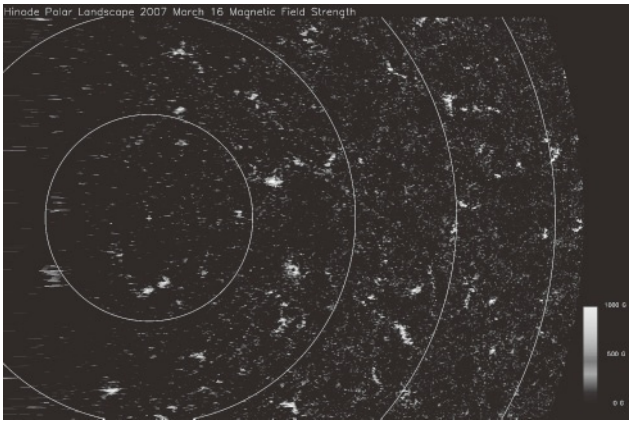


図12　極域の磁場分布（南極方向からの鳥瞰図）．右手が視線方向．

（CaIIH3969.4Å）を用いた彩層微細構造の観測では，「ようこう」や「ひので」XRT でも発見されたコロナ中の X 線ジェット同様の形状をした彩層ジェットが観測されている（**図13**）．このことは，彩層中においても，磁気リコネクション過程が発生していることを物語っている[7]．

コロナホール中のX線ジェット，彩層中のH線ジェット，いずれもコロナ加熱や彩層加熱，また太陽風加速とどのような関係になるのか，今後研究の進展が待たれるところである．

４．遷移層・コロナの速度場観測　極端紫外線撮像分光装置（EIS）

光球とコロナを高い空間分解能で撮像する望遠鏡と共に，「ひので」には極端紫外域で撮像分光が可能な望遠鏡（EIS；**図14**）が搭載されていて，光球とコロナをつなぐ遷移層～コロナ，またフレアまでのプラズマの分光診断を行い，その視線方向の速度場を得ることができる．光学系は直入射系を採用して空間分解能２秒角を達成し，Mo/Si の多層膜を塗布し分けて，限られた２波長域（170－210Å，250－290Å）の感度を向上させている．スリット部には４つの幅の違うスリット（幅＝1，２秒角）／スロット（幅＝40，266秒角）があり，これにより輝線輪郭もしくは輝線準単色像を得ることができる[8]．

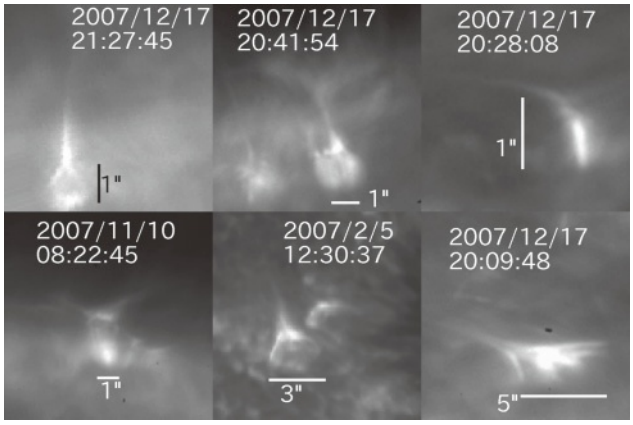


図13　CaIIH 線のジェット（観測例）．

２つの極端紫外域には，種々の高階電離（多価）イオンの輝線が数多く観測されるが，特にその中でも，太陽大気の中に豊富に存在する鉄イオンは，**図15**に見られるように，FeVIII（形成温度 $\log T_e$～5.6）から FeXXIV（$\log T_e$～7.2）までの電離状態の輝線が存在し，元素存在比の不確定性を気にすることなく，遷移層～コロナのプラズマの電離・再結合の様子を時間分解能を上げて観測できる（**図16**参照）．光球の磁場観測とコロナループとの速度と形状の変化の様子を調べることにより，太陽大気の空間・速度の（３＋１）次元構造が理解できるようになると期待される．

「ようこう」でその描像が一新されたように太陽コロナはいつでもダイナミックである．**図17**に示すのは，2006年12月13日に発生したフレアの観測中に見つかった高速のプラズマ上昇流の様子である．この領域はフレアとは直接関係ない活動領域東縁に近い場所で，ディミング（減光）といわれるコロナ輝線の強度が，前日より減少をしてきた場所との境界領域に相当する．スペクトルの様子からわかるよ

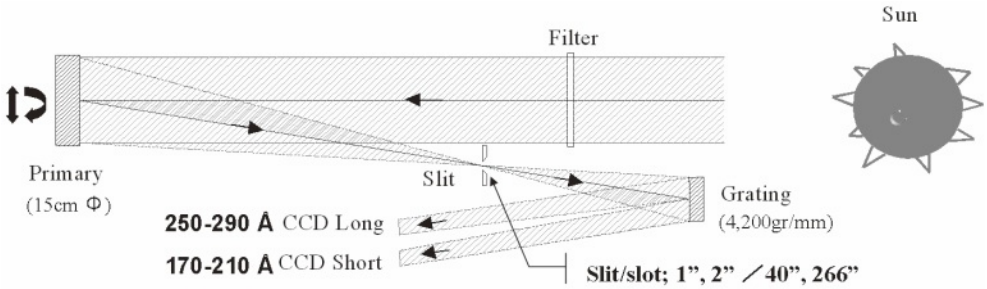


図14　EIS 光路図．

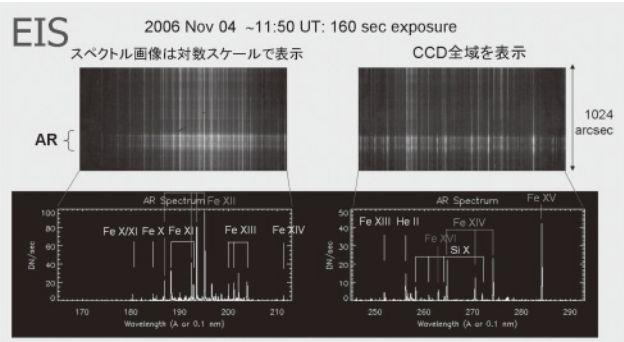


図15　EIS スリット観測で取得されるスペクトル．

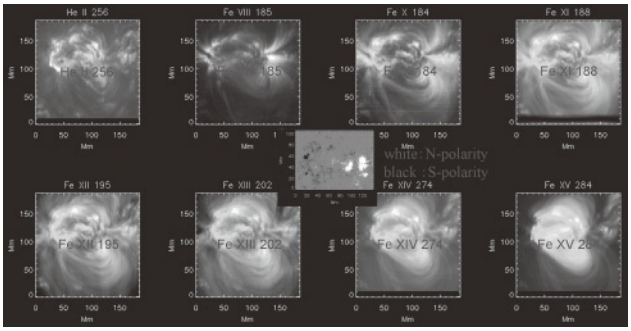


図16　光球磁場（中央図）とコロナループの多温度構造．

うに，彩層上空（HeII）での速度は小さく，コロナの高温の輝線で青方偏移が著しくなっていて，即ち上昇プラズマ流は顕著な温度依存性を示しているのである．この領域の磁場構造の変化を原因とするプラズマの運動ではないかと推察される[9]．

遷移層より上空の太陽大気では，すべての輝線や連続光は光学的に薄いプラズマからの発光となると考えられる．したがって，光球や彩層の解析に用いた輻射輸送方程式は必要ではなく，その代わりに種々原子・イオンの各エネルギー準位の数密度からその準位間の遷移を考慮した，いわゆる「衝突輻射」モデルを考えることになる．太陽大気のように高温希薄なプラズマでは，自由電子との衝突による励起や電離過程が卓越し，輻射による脱励起・再結合が行われる．このうち電離・再結合過程は，励起・脱励起過程に比べて，平衡に達するまでの緩和時間が長い．電子温度 10^6 K 以上のプラズマの緩和時間（τ_{equil}）は通常，$N_e\tau_{\mathrm{equil}}$ ～10^{12} cm^{-3} sec と評価できるので，典型的な静穏コロナ（5×10^8 cm^{-3}）や活動領域（5×10^9 cm^{-3}）に適用すると，それぞれ τ_{equil}～1時間，5分となる[10]．したがってこれより短い時間間隔で，コロナプラズマの極端紫外分光観測が行われれば，電離非平衡状態にあるプラズマを観測により見出せる可能性がある．このため，**図18**に示すような時間発展型の衝突輻射モデルを開発して，解析に用いることにしている．

5．まとめ

太陽の外層大気は光球よりも高温である．これが彩層やコロナの加熱問題と呼ばれるもので，1940年になり，日食のスペクトルに見られる5303Åの緑色の輝線が鉄の13階電離イオン（FeXIV）からの輝線であることが判明した時

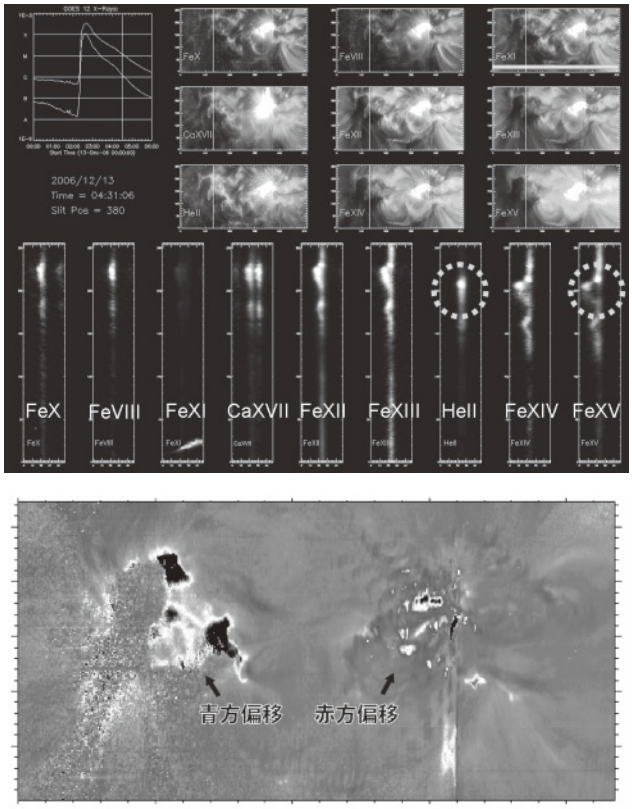


図17　プラズマ高速上昇流ー上図：観測時刻のスリット位置と輝線のスペクトル．輝線形成温度による速度の違いがわかる．下図：観測領域の視線速度図（青：青方偏移，赤：赤方偏移〔表紙図参照〕）．西側の速度構造はフレアに伴うもので，彩層蒸発や衝撃波伝播に伴う急激なプラズマの運動を示している．

から，太陽物理の大きな謎として君臨している．当初，対流層起源の音波が希薄なコロナ中に導入され，衝撃波となり最終的に熱に変わるというシナリオは，コロナ構造が，磁場の構造と密接に関連していることが判明した時点で消え去った．現在では大きくわけて2つの説が有力である．ひとつは，音波ではダメなことがわかったが，例えばアルヴェン波のような磁気流体波がコロナ中で熱化するとするもの（波動説）であり，もう一方は，フレアのような（磁気リコネクションを起源とする）エネルギー解放機構が働き，そのうちの小さいものは数多く発生しているので，結果としてコロナの高温を維持できるとするもの（ナノフレア説）である．

科学衛星「ひので」のデータは，この問題に対して現時点で，どこまで答えられたのであろうか．「ひので」の初期成果を表1に示す．(1)から(5)までには「発見」という言葉がついている．最初の3つは直接磁場に関係するもので，光球とコロナは微細な磁束管を通して繋がっており，光球（下）で作られた強い磁場が，時間的にも激しい変化をしていることが明らかになった．

強烈な可視光の輻射が影響を及ぼしている太陽大気の低層（光球・彩層）においても，微細構造のダイナミックな振舞いが初めて暴かれた．ひとつは「アルヴェン波」の伝播を初めて観測的にクリアーにしたことであるが，しかし同時に，この低層大気においても磁気リコネクションとい

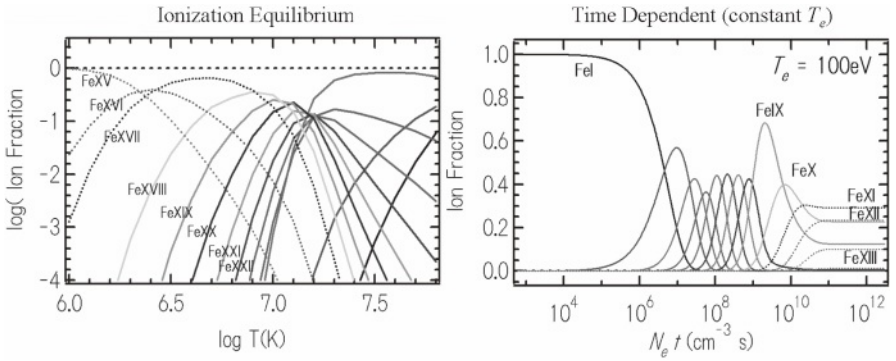


図18　電離平衡にある鉄イオンの分布の温度依存性（左図）と中性状態から電離が進行する場合の時間変化（右図）.

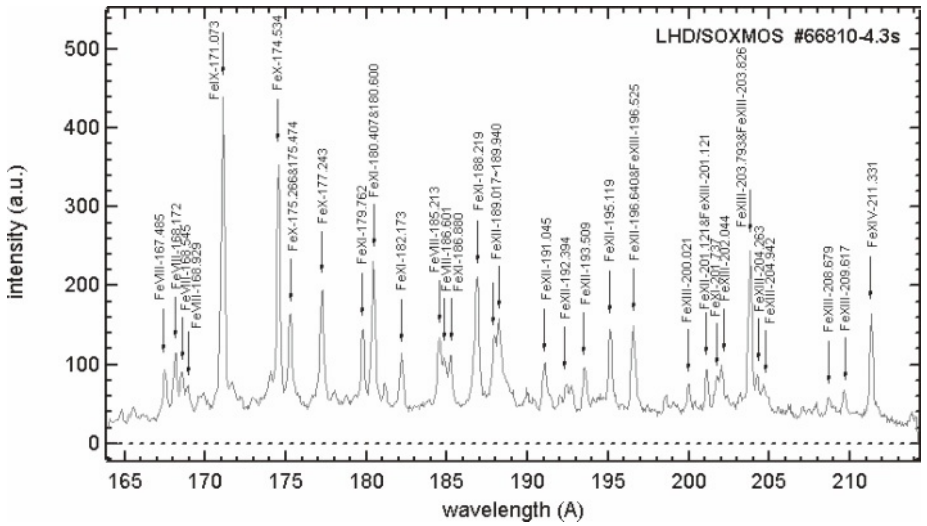


図19　LHDにおける鉄ペレット入射実験で撮られた極端紫外域スペクトル.「ひので」EISの観測波長域と重なる部分では鉄多価イオンからの輝線が共通に計測されている.

表１　科学衛星「ひので」の初期成果.

(1) 太陽の極地域に１kG 以上の強磁場を発見
(2) 光球にトランジエント的に発生する無数の水平方向強磁場を発見
(3) パーカーの予言した対流崩壊現象を発見
(4) コロナや彩層でアルベン波を発見
(5) 彩層や光球でジェットや超高速流れの発見
(6) 黒点の崩壊過程の詳細観測
(7) 磁気ループの足元で乱流ないし微細な流れを示唆する乱流を検出
(8) 散乱の影響を完全に補正したコロナの高さ方向精密温度分布を測定
(9) 極域コロナルホール内ジェット現象の発見
(10) 光球・彩層振動の検出
(11) 太陽風の足元の流れの検出
(12) コロナルホールの形成現場，白色光フレアなど

う，「ようこう」で高温コロナやフレアに伴って発生する物理過程も観測されたことである．即ち，波動説，ナノフレア説，いずれにしても，そのエネルギー供給源，供給の過程というのが，コロナだけではなく，あらゆる太陽大気層にわたり，ユビキタスに見られたことになり，現在，どちらかに軍配を上げることはできない．しかし今後，詳細なエネルギー収支を観測的に調べることにより，決着することができるのではないかと期待している．

光球における磁場ベクトルの精密観測による偏光スペクトル観測により，太陽表面磁場について新たな発見・知見が得られ始め，太陽面に偏在する磁場構造の理解が大きく進展することが期待される．また軟 X 線コロナ観測は，世界で初めての高解像度（１秒角）の斜入射望遠鏡で，コロナに存在する高温プラズマの振る舞いを広い温度域で行い，「ようこう」では見えていなかったコロナとしては低温部に頻発する微小な現象に新たな知見を得つつある．極端紫外域分光でのコロナ輝線の線輪郭を精密に測定できていることは画期的で，ダイナミックなコロナの振る舞いを初めて定量化できるようになった．コロナプラズマの加熱と運動について新たな観測が得られ始めている．

これらのコロナプラズマの加熱と運動の精密観測を支えるものは，それに見合う分光診断ツールの開発である．コロナ輝線を放っているイオンの原子パラメータを知らなくては解析を進めることができないので，それらのデータベースを整備し，かつコロナ大気のダイナミズムを模擬する，時間発展型のモデル原子・イオンが作られて，観測と比較されなくてはならない．このため実験室プラズマとの共同研究は大変重要であり，双方にとってメリットがあるものと確信をしている．特に，「ひので」EISの観測波長域には鉄多価イオンからの数多くの輝線が存在し，温度・密度診断に頻出することになるので，鉄イオンのモデルを整備することは最重要課題と思っている．

図19に見るように，LHD中に鉄のペレットを入射して鉄のスペクトルを取得し，理論的なモデル計算との比較を試みている．この共同研究を進めるうちに明らかになってきたことは，現状では鉄イオンのM核，L核の遷移に関する実験データは皆無に等しいことであり，理論的な計算も不確定性を伴っていることである．このため，低エネルギー仕様のEBIT (electron beam ion trap) 装置を製作し，実験データを取得することもスタートさせている．これらの実験室プラズマとの共同研究を通じて，鉄多価イオンに関しては最良のイオンモデルを構築して，来るべき第24太陽活動極大期の観測に期待をしているところである．

科学衛星「ひので」は，宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部(ISAS/JAXA)が，国内においては国立天文台を，海外においては米国航空宇宙局(NASA)，英国科学技術施設評議会（STFC）を研究協力機関として打ち上げた衛星で，その運用には，欧州宇宙局(ESA)，ノルウェイ宇宙センター（NSC）との研究協力も加えて行われている．また，国立天文台は，自然科学研究機構おける分野間連携事業を通じて，核融合科学研究所や電気通信大学等の研究協力を仰いでいる．この場を借りて，これらの研究機関の太陽天体プラズマ関連の研究者の方々の貢献に感謝の意を表したい．

参考文献

［1］渡邊鉄哉：日本物理学会誌 BUTSURI **57**, 738 (2002).
［2］S. Masuda *et al.,* Nature **371**, 495 (1994).
［3］L. Golub *et al.,* Solar Phys. **243**, 63 (2007).
［4］J. Cirtain *et al.,* Science **318**, 1580 (2007).
［5］T. Sakao *et al.,* Science **318**, 1585 (2007).
［6］S. Tsuneta *et al., submitted to* Astrophys. J. Lett.
［7］K. Shibata *et al.,* Science **318**, 1591 (2007).
［8］J.L. Culhane *et al.,* Solar Phys. **243**, 19 (2007).
［9］S. Imada *et al.,* Publ. Astron. Soc. Jpn. **59**, 793 (2007).
［10］D.H. Brooks, H.P. Summers, R.A. Harrison, J. Lang, A.C. Lanzafame, Astrophys. Space Sci. **261**, 91 (1999).

用語解説

彩層

日食の際，H_α 線（6563 Å）で色づいて見えた太陽の外層大気層．注入された非熱的なエネルギーを輝線の輻射として散逸している．水素の電離が電子衝突励起による輻射損失を促進している弱電離プラズマ層である．

粒状斑

太陽表面上大きさ1秒角（～700 km）程度の主に可視連続光で見られる放射強度の模様で，光球面下までエネルギー輸送を担っている対流胞と考えている．粒状斑境界（連続光で暗く見える縁）はプラズマ流が沈み込む場所で，微細磁束管を履き集め，さらにガス圧と磁気圧の不安定から引き起こされる対流崩壊により，強磁場が形成される場所で，しばしばその磁束管が微小な輝点として観測されることもある．

渡邊鉄哉（わたなべてつや）

1952年東京都出身．1980年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了，理学博士，東京大学助手(東京天文台)，国立天文台太陽物理学研究系助教授，電波天文学研究系教授を経て，現在，自然科学研究機構国立天文台ひので科学プロジェクト教授・太陽天体プラズマ研究部主任．太陽衛星観測（たんせい4号・ひのとり・ようこう・ひので）に参加し，主にX線・紫外線のスペクトル計・分光器を用いたプラズマ分光観測を中心となって行ってきた．