

特集：宇宙研究—多様な宇宙像を描く

## 太陽研究の現状と将来

柴 田 一 成

### 黄金時代を迎えた太陽観測

現代は太陽観測の黄金時代である。その先鞭をきったのは、1991年に打ち上げられた、わが国の太陽X線観測衛星「ようこう」であった。「ようこう」は日英米の国際共同プロジェクトとして、宇宙科学研究所より1991年8月に打ち上げられ、以来、10年以上の長期にわたって太陽コロナとフレア（太陽面爆発）をX線で観測し続けた。その結果、フレアの磁気リコネクション説をほぼ確立するとともに、コロナの予想外のダイナミックな姿を明らかにするなど（図1参照）、世界の太陽物理学を一新する成果をあげた。

「ようこう」の撮影したダイナミックな太陽コロナのX線ムービーはテレビ、ビデオ、インターネットを通じて、全世界に伝わり、専門の太陽物理学者だけでなく、他分野の研究者、さらには一般の市民にまで大きなインパクトを与えた。それまで研究対象としては成熟した地味な分野だと思われていた太陽が、実は謎に満ちた魅力的な新しい研究分野である、ということが、専門家だけでなく一般市民にもはっきりと示されたのである。

「ようこう」の成功に元気づけられ、1995年には欧米のSOHO衛星が打ち上げられた。SOHOは極紫外線によるコロナと遷移層の太陽全面観測や、コロナグラフ観測、日震学

観測などに成功し、「ようこう」よりさらに激しい太陽の素顔を暴き出した。

1998年になると、米国独自のTRACE衛星が打ち上げられた。この衛星は小規模ながら、「ようこう」やSOHOの観測をしのぐ高い空間・時間分解能でコロナを連続観測し、より一層激しい活動に満ちたコロナを明らかにすることで、世界を驚かせた。

「ようこう」は残念ながら2001年12月に観測を停止したが、2002年には、フレアからの硬X線やガンマ線をこれまでにない高空間分解能、高エネルギー分解能で観測するRHESSI衛星が打ち上げられ、「ようこう」を引き継ぐかのように、多数のフレアを現在も続々と観測しつつある。

これらの宇宙空間からの太陽観測の黄金時代に刺激されて、地上観測や理論分野での太陽研究の発展も目覚ましいものがある。わが国では、国立天文台野辺山電波ヘリオグラフ、同乗鞍コロナ観測所、京大飛騨天文台などが、スペース観測と共同観測を推進することによって、装いを新たにした太陽研究の第一線で活躍している。また、近年急速に発展したわが国得意のスーパーコンピュータを駆使することにより、フレアの電磁流体数値シミュレーションも可能になった。この分野での日本の貢献も、特筆すべきものである。

以下では、太陽物理学の主要課題の一つであると同時に、天体活動現象の雛形ともいう



図1 約1年ごとの太陽の「ようこう」軟X線画像。数100万度のコロナが見えている。左下が1992年の太陽。(宇宙科学研究所提供)

べき、フレアとコロナについて、現状と残された課題を詳しく解説し、今後の太陽研究の方向について述べる。

### フレアと磁気リコネクション

フレアとは太陽大気中で起こる爆発現象である。わずか数分-1時間程度の時間に、 $10^{29}$ - $10^{32}$  erg (水爆100万個-1億個)という膨大なエネルギーが、1万-10万 $\text{km}^2$ の空間で解放される。ただし、観測が発展するにつれ、マイクロフレアやナノフレアと呼ばれる、エネルギーや空間スケールの小さなフレアが続々と発見され、典型的なエネルギーや空間

スケールは存在しないことが判明した。(エネルギーの小さなフレアほど発生数が多い。興味深いことに、これは地震の発生数の統計分布と良く似ている。)フレアが起こるとあらゆる電磁波が急激に増光し、1 keV程度の軟X線の観測から、フレアの本体は1-2千万度の超高温プラズマであることがわかった。一方、30-100 keVの硬X線や電波(m波- $\mu$ 波)の観測からフレアにともなって大量の非熱的電子(30 keV-1 MeV)が加速されることや、ガンマ線観測から高エネルギー陽子(1-100 MeV)が加速されていることも判明した。また、フレアにともなって衝撃波やコロナ質量放出(図2)と呼ばれる

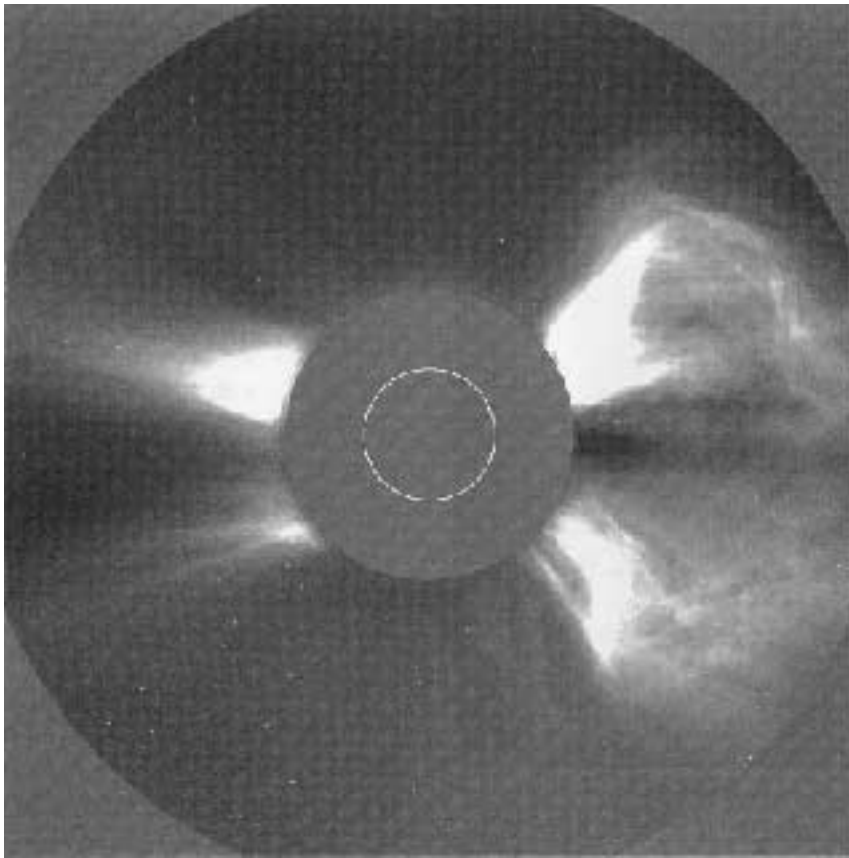


図2 SOHO 衛星搭載のコロナグラフ (LASCO) で観測されたコロナ質量放出。1997年11月6日の大フレアにともなって発生した。秒速1,560 kmのスピードで伝播。中心部の暗いところが遮蔽板で、真ん中の円が太陽の大きさを示す。

大規模質量噴出現象が惑星間空間に向けて頻繁に伝播していくことも発見された。

フレアが磁気エネルギーの爆発的解放によって起こることは、すでに20世紀半ばには判明していたが、いかにして磁気エネルギーをプラズマの熱エネルギーや運動エネルギーに変換するかが問題だった。フレアの発生母体である太陽コロナのような高温プラズマでは、電気伝導度はきわめて高く、一度流れ出した電流はなかなか消えない。フレア領域における平均電流がジュール熱として散逸する時間を計算すると、何と300万年にもなる。この電流散逸時間(300万年)と実際のフレアの時間スケール(数分-1時間)の

ギャップを解決するために提案されたメカニズムが、磁気リコネクション説である。

磁気リコネクションとは、逆向きの磁力線のつなぎかえによって、エネルギーを解放するメカニズムのことで、磁力線がゴムひものような性質をもっていることに由来する。つなぎかわった磁力線は、あたかもゴムひものパチンコのように効率良くプラズマを加速し、磁気エネルギーをプラズマの運動エネルギー、ひいては熱エネルギーに変換することができる。1950年代から60年代にかけて、Sweet, Parker, Petschekといったパイオニアたちによって理論が発展させられた。最終的にフレアの速い時間を説明するのに成功

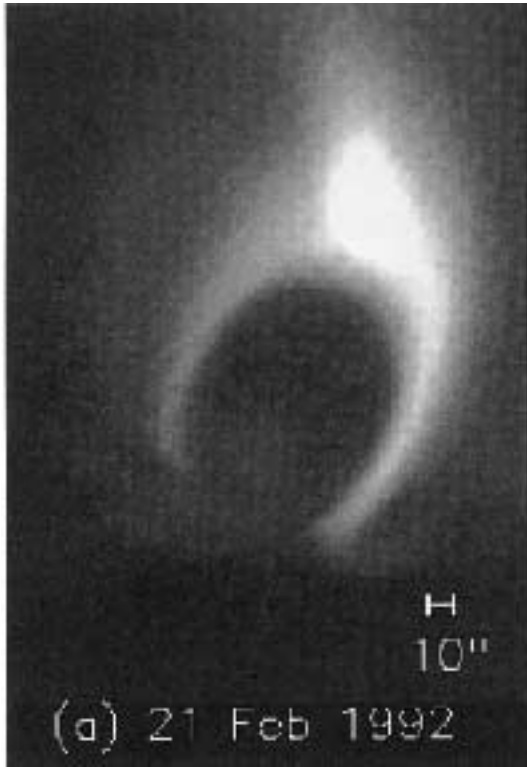


図3 「ようこう」軟X線望遠鏡で見た太陽フレア (1992年2月21日)。カスプ型の構造に注意。温度は約1千万度。この種のフレアは長時間 (1時間以上) の寿命をもつので、長寿命フレアと呼ばれる。

した Petschek の理論によれば、磁力線はきわめて小さな領域でつながりかわる。つながりかわった磁力線は、まるで引っぱったゴムひもからパチンと手を離れたときのゴムひものように、猛烈な勢いで縮もうとする。そのとき電磁流体衝撃波 (スロー・ショック) を形成することによって、波の伝播の時間スケールでエネルギー変換を実現する。しかしながら、理論が予想するつながりかわる領域のサイズが1 cm 以下と、フレアに比べてあまりにも小さすぎて、本当に実現するのか疑問視された。一方、観測的にリコネクションの確かな証拠はなかった。フレアがリコネクションによって起きているならば、フレアはカスプ型 (先がとがった形) をした数千万度プラズ

マ・ループとして見えるはずである (図5)。これを検証するには、フレアのX線撮像観測が不可欠である。

そこで打ち上げられたのが、わが国の太陽X線観測衛星「ようこう」であった。はたせるかな、「ようこう」は打ち上げ後しばらくして、理論モデルが予想するのとそっくりの、カスプ型をしたフレア・ループを発見した (図3)。似たようなカスプ型ループは、プロミネンス噴出やコロナ質量放出にともなって続々と見つかり、また、フレアの温度分布や見かけの大きさの変化も、リコネクション説の予言と良く一致した。

ここに至ってついに、磁気リコネクション説が確立した。ただし、カスプが見られるのはすべて、寿命が1時間以上の大型のフレア (長寿命フレア) に限られていた。フレアには小型のインパルス・フレアと呼ばれる短寿命フレアが多数あり、それらにはカスプが見えない単純なループ状の形をしているので、当初はフレアに2種類あるかと思われた。しかし、硬X線で見ると、ループの上空に硬X線源 (図4) が見つかり、これらの短寿命フレアもやはりループの上空でエネルギー解放、粒子加速をしていることが、ほぼ確かとなった。硬X線源の正体はまだ解明されていないが、リコネクションによって加速されたジェットがループに衝突してできた電磁流体衝撃波 (ファースト・ショック) ではないか、というのが有力な説である (図5)。

もしリコネクションがループの上空で起きているならば、プロミネンス噴出やコロナ質量放出と同様なプラズマの噴出 (プラズモイド、パチンコで発射される球のようなもの) が観測されるはずであり、実際、そのようなプラズマの噴出は続々と発見された。このような観測によって、フレアの磁気リコネクション説は、ほぼ確立された。

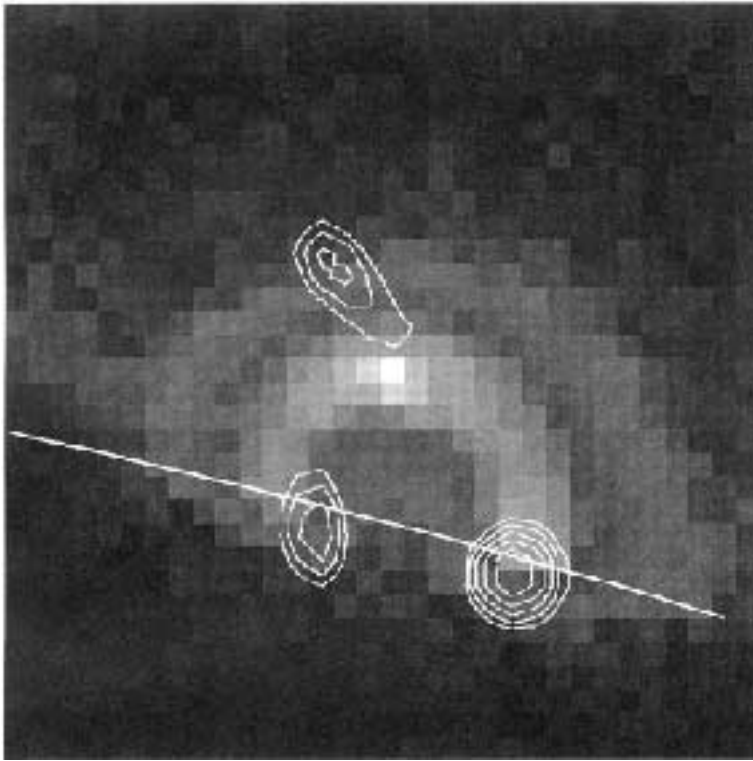
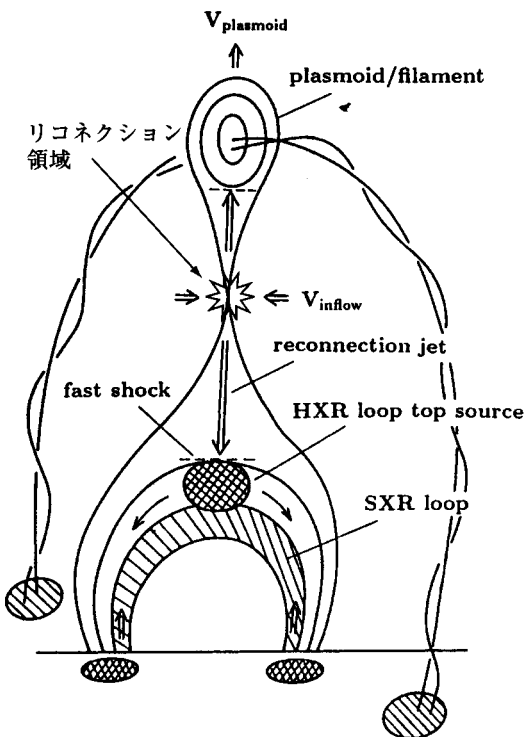


図4 インパルシブ・フレア (1992年1月13日)の硬X線像(等高線)と軟X線像(濃淡)。軟X線ループ上空の硬X線源(ループトップ硬X線源)に注意。斜めの白線は太陽の縁を示す。「ようこう」硬X線および軟X線望遠鏡による。



コロナ加熱の謎

日食の際に見えるコロナが実は100万度の高温プラズマであることは、20世紀半ばに判明した。これは一見きわめて不思議なことである。良く知られているように、太陽では中心部の核融合反応でエネルギーが発生し、それがゆっくりと外側に伝わっていく。

それに応じて温度も中心から外側に向けて次第に下がり、我々が可視光で見ることがで

図5 フレアの磁気リコネクション・モデル。線は磁力線を表し、斜線部分はインパルシブ・フレア(図4)の場合における軟X線で見える構造、網目部分は硬X線で見える構造(二つ目玉硬X線源とループトップ硬X線源)を表す。磁力線がつながりかわる点(星印)の近くでは、磁力線はカスプ型をしている。長寿命フレア(図3)の場合は、このカスプ構造が軟X線で明るく見える。

きる表面（光球）では、約6,000度である。ところが、コロナは光球よりさらに外側にあるのだ。

単純に考えれば温度はさらに低くなるはずなのに、実際は温度が逆に高くなっている。しかも100万度という高温に、コロナはいかにして加熱されているのか？これがコロナ加熱問題である。

コロナが100万度であることが発見されてしばらくして、コロナは音波衝撃波で加熱されているのではないかという説が提案された。計算してみると見事に100万度のコロナが再現できたので、一時はコロナ加熱問題は解決されたかに思われた。ところが、スペース観測の時代が始まり、米国のスカイラブ衛星などによってコロナの構造が調べられると、コロナは決して一様ではなく、磁場によって強く支配された非一様構造をしていることが判明した。コロナは磁気ループに閉じ込められた高温プラズマの集合体だったのである。ここに至って磁場を一切考慮していなかった音波衝撃波説は否定され、コロナ加熱問題は振り出しに戻った。

「ようこう」は、このコロナ加熱問題にも貴重な知見を与えた。図1でも見たように、「ようこう」は「コロナは誰が想像していたよりも、激しくダイナミックに活動している」ことを明らかにした。

つまり、コロナはきわめて非定常なのである。良く観察すると、いたるところで、マイクロフレア、ナノフレアが発生し、さらには、そこから無数のジェットが発生している。

SOHO, TRACEの高空間分解能観測は、さらに、この傾向を押し進め、「静穏領域は決して静かではない」こと、「太陽大気は小爆発現象に満ちている」ことを見出した。

ちなみにこれらの小爆発現象においても、磁気リコネクションの証拠がいくつか見つ

かっている。コロナは、ひょっとしたら微小リコネクション現象によって加熱されているのかもしれない。もし、そうならコロナの物理もフレアの物理と基本は同じ、ということになる。

しかし別の可能性もある。光球の下には乱流状態にある対流層があり、コロナ磁場はこのような乱流状態にある対流層につながっている。すると磁力線が乱対流によってねじられ、アルフベン波が発生する。

アルフベン波とは、ゴムひもの振動のように磁力線が振動することによって伝わる電磁流体波の一種である。対流層から効率良くエネルギーをコロナに運ぶことができるので、アルフベン波もコロナ加熱の有力候補となる。

はたして、コロナは微小リコネクション（ナノフレア）により加熱されているのか、それとも、アルフベン波によって加熱されているのか？

### 「ようこう」から Solar B へ

2005年に打ち上げを予定されている Solar B の最も重要な課題が、前節で述べたコロナ加熱の謎の解明である。標語風に言えば、コロナ加熱の2大仮説、「ナノフレア説」対「アルフベン波説」論争に決着をつけることである。そのためには、

- ・アルフベン波や電流のエネルギーの発生場所（光球）における磁場・速度場を高空間分解能で測ること、
- ・光球から上層大気（彩層、遷移層、コロナ）への波の伝播を正確に測ること、
- ・コロナでのエネルギー散逸の証拠をつかむこと、

が必要である。光球磁場・速度場の測定のためには可視光望遠鏡が不可欠なので、Solar B は史上初めて口径50cmの可視光磁場観

測望遠鏡 (SOT=Solar Optical Telescope) を宇宙空間にもっていく。また、遷移層やコロナの速度場をかつてない精度で測る極紫外線撮像分光器 (EIS=EUV Imaging Spectrometer), 様々な温度のコロナ・プラズマ分布を史上最高の空間分解能で撮像する軟X線望遠鏡 (XRT=X-Ray Telescope) も搭載する。

「ようこう」は、フレアの磁気リコネクション説をほぼ確立した。しかしながら、リコネクション理論が予言するすべての特徴を検証したわけではない。例えば、リコネクション領域から噴出する高速 (およそ 1,000 km/s) のリコネクション・ジェットや、リコネクション領域に向かうインフロー (図5でリコネクション点に向いている矢印) は、「ようこう」では一切見えず大きな謎として残されていた。

インフローについては数年前に、SOHO 極紫外線像ムービー中に発見されたが、観測例はまだ一例だけだし、この観測も見かけの運動を見ているにすぎないので、ドップラー速度として確かに検出することが残されている。このようなリコネクションにともなうプラズマ運動の速度の測定とそれによる電磁流体衝撃波の同定も、Solar B 衛星に残された大きな課題である。

リコネクションについては、さらに根源的な問題も残されている。最大の未解決の問題は、「リコネクションの進行速度を決める物理は何か?」という問題である。境界条件 (駆動型) か、異常抵抗などの内在する物理 (自発型) か、それとも、全く別の概念の導入が必要なのか?

リコネクション問題も、コロナ加熱問題とやや良く似た側面があって、一時、境界条件ですべて解決できると思われたが、現在は振り出しに戻っている。古くて新しい問題なのだ。ただし、昔と異なるのは、室内実験、ス

ペース観測に格段の進歩が見られることである。新しい実験・観測データを元に、新しいアイデアで問題の核心にせまることが、求められている。

リコネクションは、太陽フレアに限らず、地球磁気圏 (寺沢氏の稿参照)、核融合磁気閉じ込めプラズマなど磁場とプラズマがあればあらゆる場所で発生する普遍的過程である。おそらく、活動銀河核、ブラックホール降着円盤、原始星、恒星コロナなど、多くの天体活動現象で、普遍的に発生しているに違いない。リコネクションにともなう起こる粒子加速も、普遍的な未解決の大問題である。天体プラズマの実験室としての太陽と地球磁気圏を軸に、「比較リコネクション学」が始まろうとしている。

本稿では、近年のスペース太陽観測の発展がもっとも大きかった分野として太陽フレアとコロナの問題を主に解説した。本稿で述べられなかった重要分野に、日震学とダイナモ (磁場の起源) がある。(太陽ニュートリノに関しては梶田氏の稿を参照のこと。) 日震学は太陽震動を利用して、太陽内部の温度分布、対流、自転、磁場などを測定する分野のことで、近年の発展は著しい。表面直下の様子を明らかにする局所の日震学という分野も生まれている。おそらく、Solar B 時代に地球の磁場・速度場分布の詳細な観測データを境界条件として、スーパーコンピュータで数値シミュレーションすることにより内部速度場、磁場分布を推定するという新分野が誕生すると考えられる。その新分野が局所日震学と融合する時代が今後10年のうちに到来するであろう。その時代の太陽研究の主要課題はダイナモ問題となるかもしれない。

一方、太陽の外側へ向けてのアプローチもある。近年の人工衛星による観測の発展によって、フレア、コロナの影響は太陽系空間に広く伝わっていることが明らかになった。

我々の地球は、言ってみれば、太陽大気の延長上の中にあるようなものである。太陽がくしゃみをすれば地球は甚大な影響を受ける。実際、すでに太陽フレアやコロナ質量放出の影響で、人工衛星が故障したり、地上電力会社の変圧器が破損したり、また、航空機の通信が途絶したりする被害が発生している。

人類や飛翔体が宇宙空間に進出するにつれ、その被害の度合いは深刻になってきた。このような被害を最小限に食い止めるために、地上の天気予報になぞらえて、宇宙天気予報が必要であるという認識が生まれ、宇宙天気研究という分野が誕生した。未来の宇宙天気予報実現のためには、この先長い基礎的研究の積み重ねが必要であり、その中心課題が太陽研究である。

とりわけ、フレアやコロナ質量放出の引き

金は何か、これらをもたらず磁場構造はいかにして形成されたか（これはつきつめるとダイナモ問題に帰着する）、フレアやコロナ質量放出の影響は惑星間空間にどのようにして伝わっていくか、という問題は、残された重要課題である。

また、太陽の近くまで探査機を送り込んで地球磁気圏プラズマ探査と同じ手法でフレアやコロナを探る、といったような、挑戦的な新しい研究手法の開発も必要であろう。そのためにも、今後、太陽物理学者と地球物理学者のより一層の密接な交流と協力が望まれる。

柴田 一成 (しばた・かずなり)  
京都大学大学院理学研究科附属花山天文台  
教授