



3. 太陽プラズマ

浅井 歩

国立天文台野辺山太陽電波観測所

(原稿受付：2006年7月10日)

太陽磁気プラズマの活動は、高エネルギー粒子や地磁気嵐の原因となる擾乱の発生源となり得るという点で、宇宙天気研究分野において大変重要である。特に宇宙天気の観点から注目されているプラズマ噴出現象やコロナ質量放出(CME)も、磁気リコネクションに伴う現象のある一側面を見ているといえる。本章では、太陽フレアでのエネルギー解放機構や、フレアとプラズマ噴出現象・CMEとの関係、またそれらに関する研究が宇宙天気研究に果たす役割を簡単にレビューする。

Keywords:

solar flare, corona, photosphere, magnetic reconnection, filament eruption, CME

3.1 はじめに

「神」として信仰されていた古代の頃から、またはそれ以前から、太陽は人類にとって最も注目されてきた天体であり、我々は感謝、畏怖、感動など特別な感情や影響を受け続けてきている。天文学における研究対象としての太陽も、常に最前線にあったといえよう。ガリレオ・ガリレイが手製の望遠鏡で太陽表面上に「黒いしみ-黒点-」を発見したことに始まる太陽物理学は、近年の太陽観測装置の急激な発達に伴い、ますますの発展を遂げている。そしてそれらにより、太陽表面が非常にダイナミックでさまざまな活動現象が絶えまなく起きていることを、我々は知ることとなった。一方「宇宙天気研究」においては、太陽は「擾乱の発生源」という絶対的な位置に君臨している。つまり太陽表面活動現象の解明が非常に重要であることは疑う余地がない。本章では、宇宙天気予報研究における太陽プラズマ現象の役割やそれらの研究の現状について述べてみたい。

3.2 発生源としての太陽表面活動現象

太陽表面で生じるさまざまな活動現象は、高エネルギー粒子や地磁気嵐など太陽地球環境での擾乱の源となる。太陽フレアはその中でもひととき目を引く現象である。「太陽フレアとは何ぞや」という問いに最も簡潔に答えるなら、恐らく「短時間のうちに磁場のエネルギーを解放することによって生じる、太陽系内最大の爆発現象」とでもするのが適当であろう。ここで短時間とは数分から数時間を指し、解放されるエネルギーはおおよそ 10^{22} – 10^{25} Jで、これは100メガトン級の水素爆弾の数百万発分のエネルギーにも

相当する。また答えに付け加えるなら、「電波から γ 線に至るさまざまな波長域において、増光現象が見られる」ことが不可欠であろう。そしてさらに詳しくは、そのそれぞれの波長域において観測される、多種多様の現象の各々を説明することになるだろう。例えば、軟X線ではカスプ型ループ構造[1](図1)、アーケード構造[2]、プラズマ塊の噴出現象[3]などが、 $H\alpha$ 線では、フレアリボンの形成(図1)、ポストフレアループ構造、フィラメント・プロミネンスの噴出現象などが、またこれ以外にも、フレアループ上空の硬X線放射源[4]、インフロー現象[5]、ダウンフロー現象[6]、そしてコロナ質量放出^{注1}(Coronal Mass Ejections: CMEs)などが観測される。また、太陽フレアの規模を表すためによく軟X線強度が用いられるが、この軟X線強度の増加はプラズマが数千万度にまで加熱されたことを示唆しており、やはりフレアに付随する現象の一つであるといえる。加えて、非常に高エネルギーにまで加速された粒子(電子、陽子、イオン)からの非熱的な放射もフレアに伴い観測される。これらの粒子加速の場所やメカニズムなどはよくわかっておらず、太陽フレアにおける大問題の一つとなっている。

ただしこれらの現象のすべてが、あらゆるフレアでいつも観測されるわけではない。例えば、きれいなカスプ型構造を示すフレアは、サイズが大きく(構造がはっきり見える)、リムに近い位置で発生する方が望ましい(真上から見るとわかりにくくなる)など、条件によりその現象が観測されるかどうかが変わってくる。噴出現象についても同様である。プロミネンス/フィラメントの噴出現象がいつも

注1 この日本語訳は、Massの訳として「質量」を当てており、これは日本の天文学会において通例となっているものである。一方でMassを「大量・多数」と解釈することに基づき、CMEを「コロナガス大規模噴出現象」と訳す場合もある。

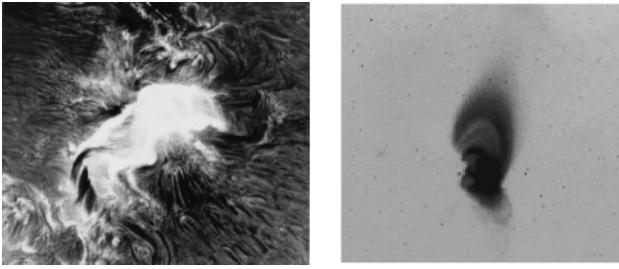


図1 H α 線(右)およびX線(左)で観測した太陽フレアの様子。H α 線では二すじの明るい領域(フレアリボン)が、X線ではカスプ型のフレアループ構造が見られる。

観測されるわけではないし、逆に噴出現象が起きて「フレアと認識される程度の軟X線強度の増加」を伴わない場合もある。これらについては、後でもう少し詳細に議論する。

3.2.1 磁気リコネクション

では、太陽フレアにおける磁気エネルギー解放機構とは何であろうか。ここ50年のパラダイムとして、「磁気リコネクション」がその答えとして挙げられる。長年にわたって論争が繰り返されたが、特に1991年にわが国の太陽観測衛星「ようこう」が打ち上げられて以降、太陽フレアの発生機構が磁気リコネクションによる磁気エネルギー解放によるものであることは、少なくとも定性的・形態学的には決定的なものとなった。そして、先に述べた様々な「フレア付随現象」は磁気リコネクションの枠組内で整合性良く説明付けられている。磁気リコネクション(magnetic reconnection: 日本語では「磁力線のつなぎ替え」や「磁力線の再結合」と呼ばれる)は、物理の素過程の一つである。原理的には、その名のとおりに、接近した反対方向の磁力線の間でつなぎ替えが生じることであるが、磁力線がゴムのように張力を持つため、つなぎ替え後に収縮しその過程で磁場のエネルギーを熱やプラズマの運動のエネルギーに変換するものである(本稿の読者である、プラズマ・核融合学会関係の方々にとってこのような記事を書くのは、まさに「釈迦に説法」であろう...)。図2に太陽フレアでの磁気リコネクションと、関連する観測現象の模式図を示す。この模式図は、現在最も標準的なフレアモデルとされている「CSHKPモデル[7-10]」に基づいている。ここでのこれ以上の説明は省略するが、[11]などをご参照願いたい。

また、太陽フレアを想定した磁気リコネクションの数値シミュレーション結果の例[13]を図3に示す。図中の白線は磁力線を示している。このシミュレーションでは熱伝導の効果も考慮しており、またフレアループ足元での彩層蒸発現象やカスプ型構造をよく再現している。図1(観測結果)、図2(観測の模式図)と図3(数値計算の結果)を見比べてみると、よく似た形状があることがわかる。

3.2.2 フィラメント/プラズマ塊噴出現象

ここからは、太陽フレアに付随して観測される現象の中で、宇宙天気研究と関わりが深いものを取り上げる。特に太陽表面からの噴出現象は、大量のプラズマを惑星間空間に放出する現象であり、関心が高い。太陽表面からの噴出現象と一言でいっても、観測波長に応じてさまざまな観測

注2 Solar Dyanmic Observatory

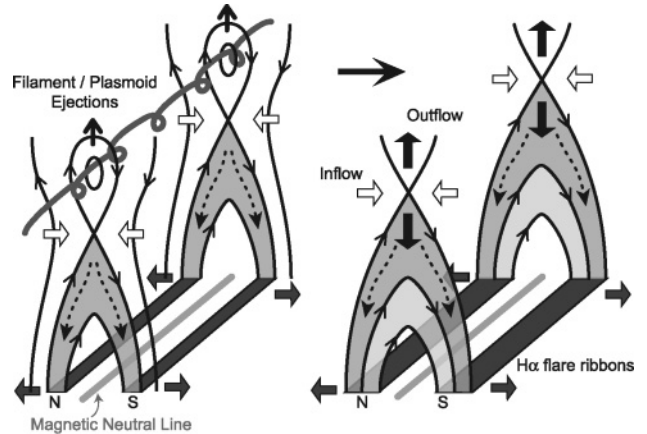


図2 磁気リコネクションの模式図[12]。黒い実線は磁力線を、NとSは磁場の極性を表す。つなぎ替った磁力線は、カスプ型構造などを伴うポストフレアループを形成する(灰色の領域)。また磁力線に沿って熱伝導や高エネルギー粒子が伝搬し(破線の矢印)、そのフレアループ足元で彩層に突入する際にH α フレアリボンなどとして観測される増光を引き起こす(暗い灰色の領域)。

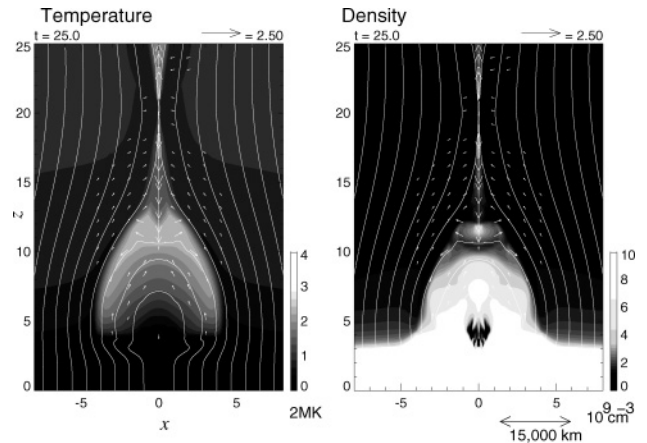


図3 磁気リコネクションに関する数値シミュレーションの結果[13]。左図は温度分布、右図は密度分布を示す。図中の白い実線は磁力線を、また矢印は速度ベクトルを表す。

現象があり、それぞれに名前がついている。

まず、H α 線で観測される、フィラメント(太陽円盤の外側にあれば、プロミネンスと呼ばれる)の噴出現象を取り上げる。H α 線での観測は歴史的に長く、またその噴出現象と地磁気嵐との相関が高いことも古くから知られている。このようなフィラメントは、磁気中性線の上空の磁場構造に低温プラズマが閉じ込められたものと考えられており、磁気リコネクションが起きると上方へと押し上げられる(図2参照)。しかし、これまでも様々な研究がなされてきたが(例えば[14])、その形成過程や噴出のタイミングなどはまだよくわかっておらず、2006年9月に打ち上げ予定のSOLAR-B衛星や2008年打ち上げ予定のSDO^{注2}衛星(どちらも2006年7月現在の予定に基づく)などの次世代観測装置に残された課題の一つとなっている。ただし、その噴出過程の定性的な特徴については、詳細に研究されるようになってきた([15,16])。図4にその結果の一例を示す。左

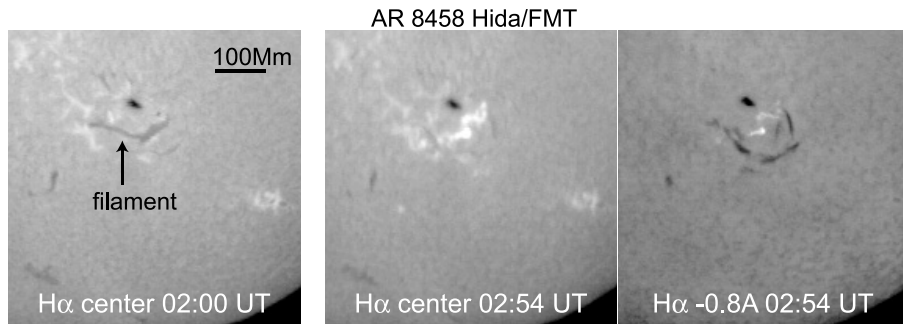


図4 1999年2月16日に活動領域 NOAA 8458 で観測されたフィラメント噴出の H α 線画像[16]. 図の上が太陽の北、左が太陽の東である. 観測時刻と波長域が図の下に示されている. フィラメントはまず H α 線中心で暗く見えるが(左図). 噴出する際には短波長側 0.8Å の画像でよりはっきりと見える(右図).

と中の図はどちらも H α 線中心の画像で時刻が異なる. 黒い筋状の構造がフィラメントで, 中図ではこれが飛び出しており代わりに明るい領域(フレアリボン)が現れた. 右図は噴出中の時刻での H α 線から短波長側に 0.8Å ずれた波長での画像である. 飛び出す動きは我々に近づく方向になるため, 短波長側でよりはっきり見える. このように H α 線付近の波長帯を複数で観測し線スペクトルを推定することで, 視線方向速度をそのドップラーシフトから導出し, またプラズマの量も見積もる. 一方, 画像内のフィラメントの動きから視線方向と直角の平面内の速度を求めることにより, 3次元速度場構造を詳細に調べることができる. このようにして, フィラメントの加速の度合と噴出されるプラズマ量との関係を知ることができるようになった.

また, 「ようこう」衛星搭載の軟 X 線望遠鏡により, 軟 X 線での類似の噴出現象が, 新たな驚きとともに発見され

た[3, 17]. それまで軟 X 線カスプ構造や H α 線リボン構造, フィラメント噴出といった現象は, 主に, いわゆる典型的な LDE フレア(長時間持続フレア: Long Duration Event flare)に付随する現象であると考えられており, 一方, インパルスフレア(LDE と対照的に短時間しか持続しないフレア: impulsive flare)ではほとんど観測されなかったため, これらのフレアで生じている物理過程は異なるのではないか, という議論がなされていた. ところがこの高温プラズマ塊の噴出現象は, そのインパルスフレアに付随して発見されたのだ. つまり, LDE フレアとインパルスフレアという分類に物理的な差異はなく, フレアの持続時間も先に述べたような太陽フレアを特徴づける一要因に過ぎないことが証明されたのだ. またこのプラズマ塊が, 太陽フレアで最もエネルギー解放が激しい時間帯で強く加速を受けていることがわかった. この時間帯は「インパルス

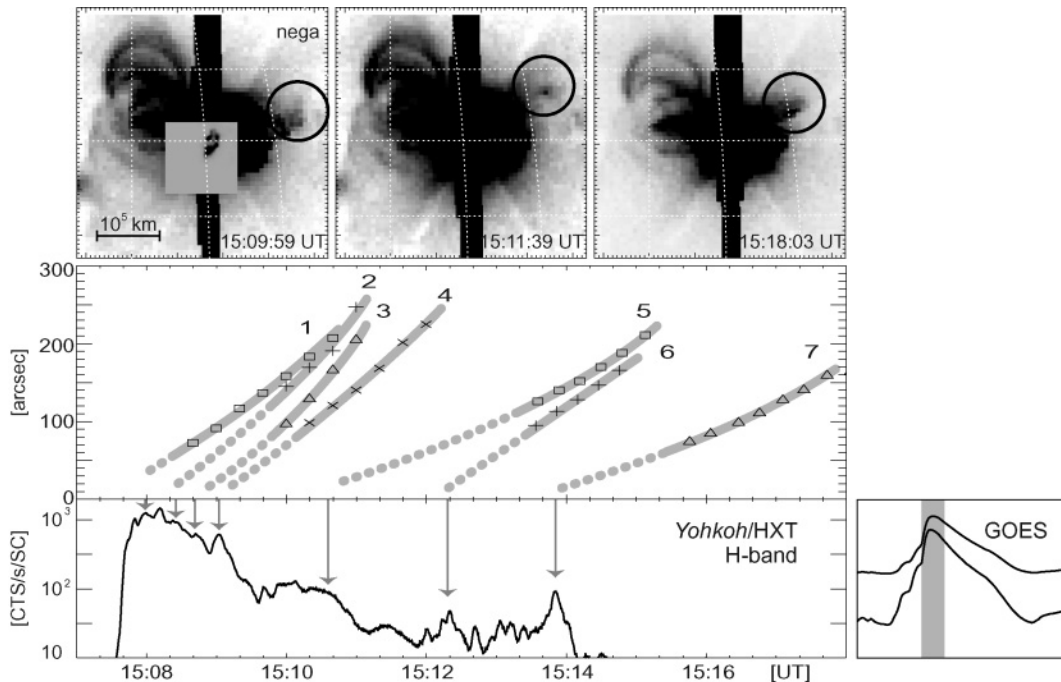


図5 上図: 2001年11月24日のフレアに伴い観測された, プラズマ塊噴出現象の軟 X 線画像. 黒○で囲まれた領域が噴出するプラズマ塊. プラズマ塊はフレアのコア領域と比べ格段に強度が弱い. 中図: 各プラズマ塊の高さ変化. 横軸は時刻, 縦軸はフレアコア領域から測ったプラズマ塊の距離. 下図: 硬 X 線強度曲線. 右下は GOES 衛星による軟 X 線強度曲線. ピーク付近の灰色で示した部分が注目している時間帯. (Courtesy of H. Takasaki)

相」と呼ばれ、硬 X 線やマイクロ波での非熱的放射が観測されるなど、強いエネルギー解放が、つまり速いリコネクションが起きていると考えられる。

さらに最近では、一つのフレアに付随して複数のプラズマ塊噴出現象が観測される例が報告された[18]。そして、その各々の噴出のタイミングに合わせて硬 X 線放射が強くなっていたのだ。図 5 上段の黒○で囲った部分はそれぞれ異なるプラズマ塊である（一方図 5 から、フレアのコアの領域が、プラズマ塊に対し小さく非常に明るいこともわかる：左上図の中心に低露出の画像を埋め込んだ）。図 5 中段にフレアのコア領域から測った、各々のプラズマ塊の位置を、下段には硬 X 線強度を示した。このことから、エネルギー解放の強さとプラズマ塊噴出機構との間には密接な関係があることがわかる。現在では、典型的な $H\alpha$ 線フィラメントと軟 X 線プラズマ塊噴出現象が同じフレアに付随して同時に観測される例も報告されており、このようなプラズマ噴出現象が、太陽フレアに付随する現象の中でも普遍的なものと考えられるようになってきた。

3.2.3 コロナ質量放出 (CME)

CME は全質量が 50–500 億トンという莫大なプラズマが太陽コロナから 10–1,000 km/s ほどの速度で惑星間空間に放出される現象であり、このプラズマが惑星間空間の擾乱源として直接的に働くため、宇宙天気研究においても注目されている現象である。図 6 (b) に示す観測例のように典型的には、内側から、「明るいコア」「空洞」「ループ状のエッジ」の 3 つの構造からなることが知られている。CME に関する研究は、1995 年に米国の NASA と欧州宇宙機関 (ESA) が打ち上げた SOHO 衛星搭載の LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment) と呼ばれる観測装置により飛躍的に進んだ。そもそも太陽コロナは大変希薄であることから、日食の時を除いては構造を見ることができない。LASCO では、太陽円盤を掩蔽 (えんぺい) し、人工日食状態で太陽外層大気を観測しており、打ち上げから 2005 年末までに観測された CME の個数は 10,000 を超えた。これらはカタログ化^{注3}されており、またその統計研究の結果が [19, 20] などにとまめられている。

特に文献 [20] では、フレアの軟 X 線強度の規模にも依るが、約半数のフレアにしか CME が付随しないことが報告されている。このような事由から、よく、磁気嵐にとって重要なのは CME であり、フレアは実はそれほど重要でない、という類の発言を耳にすることがある。しかし、これは太陽物理学の立場から考えると、全く奇妙に聞こえる。例えばサイズが小さいフレアでは、大域的な磁場構造に閉じ込められていることも多々ある。この場合 X 線の強度も低いことが多く、たとえフレアとして認識されるほどの増光があっても、外側の磁場構造を取り除いてプラズマを惑星間空間に噴出するほどのエネルギーは解放されないかもしれない。太陽フレアでの発生頻度としては、このような「小さな」ものが圧倒的に多い (ちなみに、その分布は地震と同様にきれいな冪分布に従うことが知られている [21])。小さなフレアの場合、「X 線強度は上がったのに(これによ

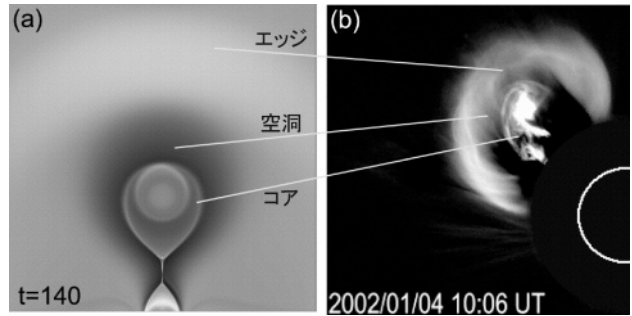


図 6 CME に関する数値シミュレーション結果と観測の比較。(a) 塩田ら [27] による数値シミュレーションによる密度分布。(b) 2002 年 1 月 4 日に発生した CME を SOHO 衛星搭載の観測装置 LASCO C 2 で観測したもの [28]。

りフレアと認識される)、CME が発生していない」ということになりうる。逆に大規模な構造がゆっくりとエネルギー解放する場合を考える。この場合、軟 X 線の強度は普通のフレアとは異なり非常にゆっくりと上昇するため、「フレア」とは認識されない可能性がある。しかしこのような場合でも、大規模な CME に伴う巨大アーケード形成が軟 X 線で観測されたり [22]、同時に巨大なフィラメント/プロミネンス噴出が観測されていることから [23]、磁場のエネルギー解放現象は起きているし、その機構が普通のフレアと大きく変わることはない。つまり CME もまた磁気リコネクションに付随して観測される現象の一つに過ぎず、CME をフレアから完全に切り離して議論することはできない。

ただし逆に、「CME を発生させやすいフレアや磁場構造」があるのも間違いがない。それらの特徴を知り発生を予測することが、太陽物理学者に求められている課題であろう。例えば CME の前兆現象として、シグモイド (sigmoid) が注目されている [24]。シグモイドとは S 字型 (または逆 S 字型) をしたコロナループのことで、ループに沿って電流が流れているためこのような構造に見える。このことは余分なエネルギーがこの構造に蓄えられていることを示している。そしてフレアもしくは CME の発生後に、よりエネルギーの低い形状へ移行することが知られている [25]。一方、数値シミュレーションを用いたの研究も盛んである (例えば [26, 27])。このため図 6 に示すように、数値シミュレーションの結果と観測結果を直接比較することも可能になってきている。CME については、2006 年秋に打ち上げ予定の STEREO 衛星により (2006 年 7 月現在の情報に基づく) 立体構造を観測することが計画されており、その研究分野は一層進むことであろう。

3.2.4 活動領域の特徴とフレア・CME

ここまで述べてきたことを簡単にまとめると、1) 太陽フレアでの磁気リコネクションにより解放されたエネルギーを駆動源とし、2) 太陽コロナから惑星間空間に放出される大量のプラズマが擾乱源となるが、3) 解放されるエネルギー量やフレアのサイズ、大域的な磁場構造など様々な要因によりプラズマの放出の可否やそのインパクトが決まる。つまり、「CME を発生しやすいフレア」がどの

注 3 http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

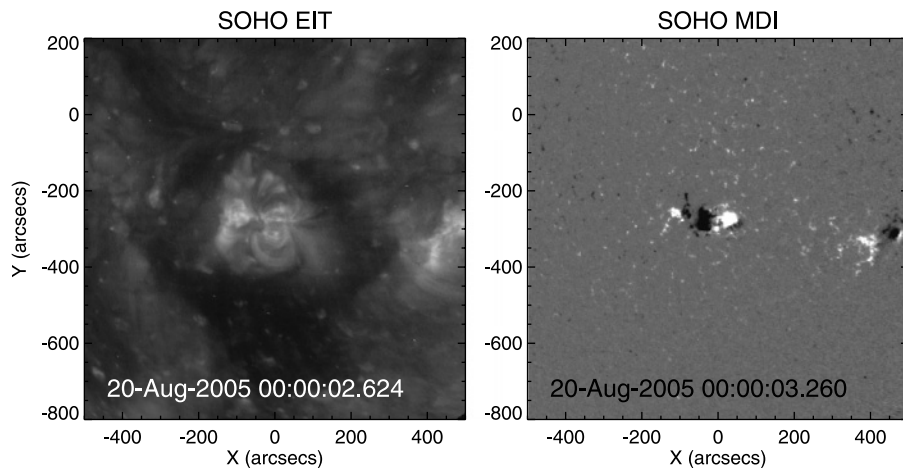


図7 2005年8月に現れた活動領域 NOAA 10798 の極紫外線 (195 Å) 画像 (左図) と光球磁場画像 (右図)。活動領域が小さなコロナホール (極紫外線画像で暗い領域) に囲まれていることがわかる。

ようなものであるかは、太陽表面の活動現象そのものだけでなく、活動領域全体や周りとの磁場構造上での関係も考慮に入れて議論する必要がある。また、本章は主に活動現象を中心として述べているため詳細には触れないが、「コロナホール」と呼ばれる領域もまた、宇宙天気研究においては重要である。コロナホールでは磁場が大域的に弱く、惑星間磁場と直接つながった磁場構造をしており、軟 X 線画像では「暗い領域」として観測される。太陽面での磁場活動という点では静穏であるが、磁力線が惑星間空間に開いていることで、高速太陽風の源となっている。

ここで、太陽フレアや CME といった現象を大域的な磁場構造との関わりという点で調べた研究例として、2005年8月24日に活発な磁気嵐を生じた活動領域 NOAA10798 の多波長観測の結果を紹介する。光球磁場構造やコロナでの磁場構造からこの活動領域の成長過程を追うと、まずこの領域が小さなコロナホール中に浮上し、アネモネ (sea anemone: イソギンチャク) 構造と呼ばれる特殊な構造を形成していることがわかる。図7の左図は極紫外線で観測したこの活動領域の様子を示しており、活動領域は明るくコロナホールは暗く見える。右図は光球磁場画像であり、正 (白) 負 (黒) 極性の対が比較的静穏な領域に浮上してきている。この浮上磁場は一見すると、単純な磁場の対のようであるが、実は「ヘールの極性法則」で決まる磁場極性とは逆の磁場極性であり、光球下に非常に複雑な構造がある可能性を示唆している。ヘールの法則とは、太陽活動周期や南北半球によって先行/後行の黒点の極性が決まる、という経験則である。また、この活動領域で発生したフレアは中規模であったが、それに対して CME が極めて速いことがわかった。コロナホール内は通常は静穏な領域であるが、ひとたびフレアや CME が発生すると、その噴出されたプラズマは減速されることなく惑星間空間を伝搬することができ、結果として地球磁気圏に大きな影響を及ぼしたものと考えられる。このように惑星間空間へのインパクトは、浮上してくる活動領域の特徴と成長過程、および周りの磁場との関係が重要であることがわかる。

3.3 太陽フレア研究のこれからの課題

太陽物理学において、もしすべての太陽フレアの発生を事前に予報できるとすれば、これに優る宇宙天気研究への貢献はないであろう。逆にいえば、太陽活動現象を完全に理解できるという意味で、これが太陽物理学の究極的な目標となるのかもしれない。しかし太陽観測はリモートセンシングによる監視にのみ頼っている状況であり、フレアの発生の予知はたいへんな困難を伴うものである。現実的な貢献として太陽物理学分野に求められているのは、まず「特に太陽地球環境に影響を及ぼしやすい太陽フレアの特徴は何か？」を過去のフレアの統計などから明らかにすることであろう。これには大域的な磁場構造、つまり活動領域全体やさらにその周辺に注目する必要がある。また、活動領域の浮上から成長の過程を詳細に調べる研究も有効である。さらには、これまでの研究結果から「巨大フレアの発生を予測すること」は幾分簡単であろうと考えられている。というのは巨大フレアは、非常に複雑な活動領域で発生することが知られている。例えば、強く捻れられた磁力線はキンク不安定によりコブのような構造になることがあるが、このようなコブ状になった構造がそのまま浮上し、非常に複雑で活発な活動領域になることがある [29, 30]。先ほどの例で挙げた「ヘールの極性法則を破るような磁場極性の対の浮上」も、このような活動領域に分類されるであろう。それらの活動領域が太陽表面に現れたらいち早く注目することができ、2, 3日程度の誤差で大フレアの発生を予報することが現在でも可能になってきている。一方で、「明日フレアが発生するのか」よりも、「数ヶ月後の太陽は、あるいは3年後の太陽は活発であろうか」ということが宇宙開発においては重要になることもある。スペースシャトルの打ち上げや宇宙ステーションの進捗などに関係がある。このような要求に対し、太陽周期活動の研究から、統計的にどの時期が太陽活動が活発になりそうかの予報を立てることが必要とされている。

このようなさまざまな課題に対する取り組みとして、現在、学術創成研究「宇宙天気予報の基礎研究」^{注4}(代表: 柴

注4 <http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/spw/>

田一成氏)が進められている。この研究は、2005年から5ヶ年の計画で、「現代社会の基盤をゆるがす宇宙の嵐を解明し、『宇宙天気』の予報の基礎を築く」ことを目的としている。そのために、太陽や太陽風から地球磁気圏・電離圏に至る観測データの解析とコンピュータシミュレーションを駆使し、太陽から地球に至るまでを一つのシステムとして扱う階層間結合モデルの構築が推進されている。太陽はこれまで、宇宙天気分野においてエネルギー源としての役割しか担っていないとの認識が強かったが、この研究では、本稿で述べたさまざまな太陽活動現象の諸問題の解明が大きな課題として取り上げられている。また、2006年9月に打ち上げ予定のSOLAR-B衛星も、宇宙天気研究に大きな躍進をもたらすと期待されている。SOLAR-B衛星を始めとするスペース太陽観測の発展が、現在の宇宙天気研究で太陽研究が重視されている理由であり、また結果とも成りうるためである。また、国際的にも国際太陽地球物理学・科学委員会(SCOSTEP^{注5})により、2004年から5年間の国際共同研究計画CAWSES (Climate And Weather of the Sun-Earth System; 太陽地球系の気候と天気)^{注6}が実行されており、そのテーマ2として「宇宙天気の研究と応用(Space Weather: Science and Applications)」が掲げられている。その遂行のためには、太陽地球環境に関わるあらゆる研究分野とより一層関係を図ることとともに、そのそれぞれでの分野で研究発展が必要であることはいうまでもない。また、磁気リコネクションや粒子加速機構など、太陽フレアでのエネルギー解放機構の研究も、同時に進められる必要があるだろう。

参考文献

- [1] S. Tsuneta *et al.*, Publ. Astr. Soc. Japan **44**, L63 (1992).
- [2] M.J. Aschwanden and D. Alexander, Sol. Phys. **204**, 91 (2001).
- [3] K. Shibata *et al.*, Astrophys. J. **451**, 83 (1995).
- [4] S. Masuda *et al.*, Nature **371**, 495 (1994).

- [5] T. Yokoyama, K. Akita, T. Morimoto and K. Inoue, J. Newmark, Astrophys. J. **546**, L69 (2001).
- [6] A. Asai *et al.*, Astrophys. J. **605**, L77 (2004).
- [7] H. Carmichael, in *The Physics of Solar Flares*, ed. W.N. Hess (NASA SP-50) (1964) p.450.
- [8] P.A. Sturrock, Nature **211**, 695 (1966).
- [9] T. Hirayama, Sol. Phys. **34**, 323 (1974).
- [10] R.A. Kopp and G.W. Pnevman, Sol. Phys. **50**, 85 (1976).
- [11] K. Shibata, J. Plasma Fusion Res. **77**, 955 (2001) [*in Japanese*].
- [12] A. Asai *et al.*, Astrophys. J. **611**, 557 (2004).
- [13] T. Yokoyama, and K. Shibata, Astrophys. J. **549**, 1160 (2001).
- [14] E. Tandberg-Hanssen, *The Nature of Solar Prominences* (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995).
- [15] T. Morimoto and H. Kurokawa, Publ. Astr. Soc. Japan **55**, 505 (2003).
- [17] M. Ohyama and K. Shibata, Publ. Astr. Soc. Japan **49**, 249 (1997).
- [16] T. Morimoto and H. Kurokawa, Publ. Astr. Soc. Japan **55**, 1141 (2003).
- [18] H. Takasaki, *in private communication*.
- [19] S. Yashiro *et al.*, J. Geophys. Res. **109**, A07105 (2004).
- [20] S. Yashiro, N. Gopalswamy, S. Akiyama, G. Michalek and R.A. Howard, J. Geophys. Res. **110**, A12S05 (2005).
- [21] T. Shimizu, Publ. Astr. Soc. Japan **47**, 251 (1995).
- [22] A.H. McAllister *et al.*, J. Geophys. Res. **101**, 13497 (1996).
- [23] Y. Hanaoka *et al.* Publ. Astr. Soc. Japan **46**, 205 (1994).
- [24] R.C. Canfield, H.S. Hudson and D.E. McKenzie, Geophys. Res. Lett. **26**, 627 (1999).
- [25] T. Sakurai *et al.*, Publ. Astr. Soc. Japan **44**, L123 (1992).
- [26] P.F. Chen and K. Shibata, Astrophys. J. **545**, 524 (2000).
- [27] D. Shiota *et al.*, Astrophys. J. **634**, 663 (2005).
- [28] H. Cremades and V. Bothmer, Astron. Astrophys. **422**, 307 (2004).
- [29] T.T. Ishii, H. Kurokawa and T.T. Takeuchi, Publ. Astr. Soc. Japan **52**, 337 (2000).
- [30] H. Kurokawa, T.J. Wang and T.T. Ishii, Astrophys. J. **572**, 598 (2002).

注5 <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SCOSTEP/scostep.html>

注6 <http://www.bu.edu/cawses/>