

# 太陽観測最前線

西尾正則\*・一本 潔\*

## 1. はじめに

ふだん我々が目でみている太陽は半径約 70 万 km、温度約 6 千度のガスの塊である。しかし、これは太陽のほんの一面であり、ふだん目で見えている太陽面（光球面と呼ばれる）の下には太陽のエネルギーの源である核融合反応を起こしている中心核やそこで発生したエネルギーを外に伝える対流層がある。一方、光球面のすぐ上には 5 千度～1 万度の比較的低温で希薄な彩層と呼ばれる大気があり、さらにその上空には温度が 100 万度以上に達する高温で非常に希薄なコロナと呼ばれる大気が広がっている。光球面より上空の薄いガスの層は太陽上層大気と呼ばれる。現在、光球面より下の様子を調べる手段は太陽自身の振動の観測といった間接的な手段や核融合の現場から直接飛び出してくるニュートリノの観測などに限られているが、光球面から上の様子については電波、赤外線、紫外線、X線、 $\gamma$ 線といった様々な電磁波を観測手段として詳しく調べることが可能となってきた。

太陽光球面を観測すると、周囲より暗い部分が点在しているのが見える。これは、黒点と呼ばれるものである。太陽面上に出現する黒点の数は一定ではなく、約 11 年の周期で増減する。この 11 年周期には番号が付けられており、1755 年から始まる周期を第 1 周期とし、以後黒点数の極小期を区切りとして第 2 周期、第 3 周期と数えている。これに従うと、現在は 1986 年あたりから始まる第 22 周期のほぼ中央であり、黒点数が非常に多い時期にあたる。図 1 に最近 40 年間の太陽の黒点数の変化を示す。黒点の形状は複雑であり、数え方に個人差もあることから、統計で用いる黒点数には観測状態、

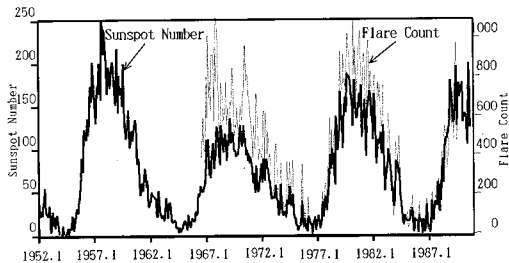


図 1 黒点数、フレア発生数の時間変動

黒点の形状で重み付けした黒点相対数という値が用いられている。

太陽外層大気中では、しばしばフレアと呼ばれる爆発現象が発生する。フレアの発生頻度は黒点数の増減と関連しており、おおまかに言うと太陽黒点数の多い時期にはフレアの発生頻度も高くなっている。フレアなどの現象が多く発生する時期は太陽活動の極大期と呼ばれ、これらの現象の少ない時期は太陽活動の極小期と呼ばれる。図 1 にはフレアの発生頻度も示してある。フレアは太陽自身が持つ磁気エネルギーを源とした活動現象である。白色光で見ることができるようなフレア現象はきわめて希であるが、 $H\alpha$  線と呼ばれる波長  $6563 \text{ \AA}$  近傍の光だけを通すようにして太陽を見ると、頻繁にフレア現象を捉えることができる。また、X線や電波などでもフレア現象は数多く捉えることができる。

現在の太陽研究の主要テーマの 1 つにフレアの発生機構の解明がある。前周期（第 21 周期）には、米国の NASA と日本の宇宙科学研究所からそれぞれ“SMM”、

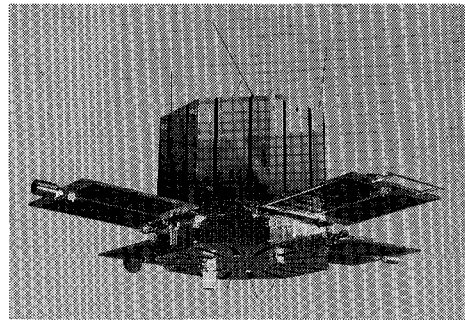


写真 1 前サイクルに活躍した太陽 X 線観測衛星“ひのと” (写真提供: 宇宙科学研究所)

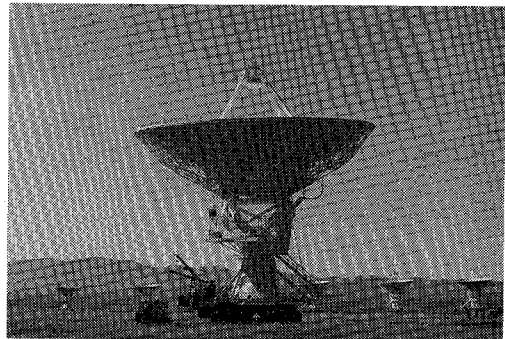


写真 2 米国 NRAO の大型電波望遠鏡 VLA

\* 国立天文台 Masanori Nishio, Kiyoshi Ichimoto: Advances in Solar Observations

“ひのと”という太陽フレア観測衛星が打ち上げられた。これらの衛星によって紫外線～ $\gamma$ 線での太陽フレア現象の研究において画期的な成果が得られた。しかしながら、フレア現象の理論的解釈に決着をつけるまでには至らず、このことは次の太陽周期、すなわち第22周期での観測に持ち越されることになった。一方、電波観測では米国 NRAO の大型電波望遠鏡 VLA がフレア現象の研究に重要な役割を果たした。VLA は数秒角の解像力で二次元電波写真を10秒に1枚撮影する高い性能を持っている。これにより、フレアが発生した領域の詳細な電波写真を連続撮影することができた。しかし、VLA は主に宇宙電波観測用の装置であり、電波強度が大きく変化する大規模な太陽フレア現象の観測には不向きな設計となっていた。このため、実際に VLA で観測できたフレア現象はほとんど小規模なものであった。また、太陽観測に割り当てられた時間が非常に短く、観測できたフレアの数も非常に少なかった。以上のことから、第21周期に VLA によって行われた観測は太陽フレア現象の全体的な姿を捉えきっているとは言い難い。新たな専用電波望遠鏡が期待されることである。

可視領域では、他の波長領域にて比べ解像力が高くとれるという特徴を生かした観測が精力的に行われてきた。こうした観測から、サイズが1秒(太陽表面上で約700 km)以下という小さな磁場の構造が活動領域の生成消滅過程において大変重要な役割を果たしていることが最近分かってきた。光球面や彩層における小さな構造のふるまいを知ることは、フレアを解明する上でも重要であろう。京都大学飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡は、高い解像力を得るためにさまざまな工夫が凝らされており、フレアや活動領域の良質な像を得て成果を上げてきている。

図1からわかるように、現在は第22周期の極大期近くであり、太陽フレアの研究にとって最適な時期である。これに合わせて新たなX線観測衛星の打ち上げ準備、フレア観測に重点を置いた電波望遠鏡や光学望遠鏡の建設などが進められている。本誌では、第22周期に焦点をあてて準備が進められている各種観測装置の中から、日本で進められている電波ヘリオグラフ、SOLAR-A 衛星、フレア望遠鏡、新コロナグラフの各装置の現状を報告する。

## 2. 太陽を観測する手段

### 2.1 光学観測

太陽から放射される光は白色光と呼ばれ赤から紫までの光が連続的に含まれた光である。しかし、プリズムや回折格子を用いて太陽の光を波長ごとの光の帯(スペク

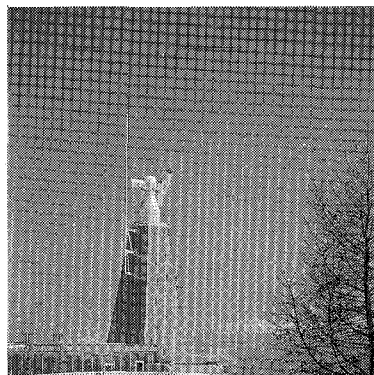


写真3 京都大学飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡

トル)に分けて詳しく調べると、多数の暗い線を見ることが出来る。これは、フラウンホーファー線と呼ばれるものである。吸収線は光球面で放射される連続光が上層の希薄な大気を通るときに選択的に吸収されることにより発生する。吸収に関与しているのは太陽上層大気を構成している様々な原子であり、代表的な吸収線として水素の  $H\alpha$  線、カルシウムイオンの H, K 線などがある。吸収線の幅、深さ、中心波長のずれなどを詳しく調べることで、太陽大気の温度、密度、運動などの情報を得ることが出来る。主な吸収線については理科年表を参照されたい。

白色光で撮影した像は光球面の様子を示してくれる。光球面には黒点、白斑といった活動領域が見え、天候の良い日に口径の大きな望遠鏡で撮影すると静穏領域にも粒状斑と呼ばれる粒状の細かい構造が見えてくる。

水素の  $H\alpha$  線やカルシウムの H, K 線といった強い吸収線の中心の光だけで撮影した単色像は光球面の層にある彩層の様子を示してくれる。この像は白色光で撮影した像に比べて濃淡がはっきりしており、明るく輝くプラージュ、暗い紐状のフィラメントなどが良く見える。静かな太陽の領域ではこれらの吸収線の中心から離れるにしたがって彩層の低部を見ていることに相当し、いろいろな波長で撮影した単色像は彩層の高さ方向の情報を得るのに非常に有用である。一方、フレア現象のときなどには激しいガスの上昇、下降が発生するので、ドップラー効果により中心波長からずれた波長に興味ある構造が見えてくる。これらは、彩層内でのガスの上昇、下降運動を調べるために有用な情報である。可視光ではないが、波長  $10830 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA}$  は  $10^{-10} \text{ m}$ ) の赤外線にあるベリウムの吸収線は彩層より上空のコロナからやってくる X 線や極紫外線の影響を受けて形成される。このため、この光で観測することにより、コロナホールと呼ばれるコロナ中の大規模な構造やコロナ中の活動的な場所の分布を知ることが出来る。

吸収線の観測は光球面磁場の観測にも利用される。磁場があると太陽の吸収線はゼーマン効果により偏光するとともに、いくつかの吸収線に枝分かれする。その様子から磁場の強さや傾きを求めることができる。活動領域は磁場の強い領域である。もし、磁場の分布にねじれがあると、それは光球からコロナを貫いて電流が流れていることを意味しており、フレア現象のエネルギー源を解明する上で重要な手がかりとなる。磁場の測定には、鉄の  $6303 \text{ \AA}$  などの吸収線が多く使われる。

## 2.2 電波観測

電波とは波長が  $0.1 \text{ mm}$  程度より長い電磁波の総称であり、波長によって太陽の見え方は大きく異なる。太陽電波の観測の当初はメートル波での観測が精力的に行われ、コロナの温度の決定などに重要な役割をはたしたが、現在はそれより波長の短いマイクロ波(波長  $3 \text{ cm} \sim 30 \text{ cm}$ ) からミリ波にかけての電波が太陽観測の主流である。

コロナの組成は、主に電離した水素ガス(陽子と電子)である。彩層からコロナにかけての領域では、温度が急激に上昇し、ガスの密度が急激に低下する。彩層およびコロナは、可視光に対しては透過率が高く、ほとんど透明なガスである。しかし、電波に対しては透過率が低くなるとともに屈折率も高くなり、光球面から放射される電波は途中で吸収または反射されて太陽大気から外へ突き抜けることができない。逆にいうと、彩層やコロナからの放射だけが地球に到達することになる。太陽から放射される電波を観測すると、通常、可視光では観測できない太陽上層大気の構造および活動状態を知ることができる。大ざっぱにいうと、彩層やコロナの電波に対する透過率は波長が長くなるほど悪くなり、屈折率は波長が長くなるほど大きくなる。このため、メートル波などの長い波長の電波ではコロナ上層の大気が観測でき、マイクロ波やミリ波ではコロナの下層から彩層にかけての大気を観測できる。現在、フレア現象の発生機構の解明を主眼に置いた研究が数多く進められているが、これまでの研究からコロナ下層から彩層にかけての領域の観測がフレア現象の発生機構の解明に重要であることがわかってきた。

マイクロ波で撮影した電波写真をみると光球面より少し広がった丸い太陽像を見ることができる。この放射は静かな太陽の放射と呼ばれ、太陽活動に関係なく常に見えている。静かな太陽の放射は電子とイオンの衝突によって生ずる熱制動放射である。

丸い太陽像の上には局所的に電波が強くなった領域が見られる。これは光学観測で見られる黒点やプラージュといった磁場の強い領域の構造に対応している。この局所的に強い電波の放射領域は、1) プラズマが周囲の磁場に

よって閉じ込められ密度が局所的に高くなる、2) 通常はマイクロ波に対して透明な上層コロナ中の電子が磁力線の影響で電波に対して磁気共鳴条件を満たし不透明になる、の2つの機構のどちらかによって生じている。いずれにしても黒点またはプラージュから上層大気につながる磁力線の影響によるものである。電波で観測されるフレア現象の温床はこういった磁場の影響で電波放射が強くなっている領域である。

電波観測の特徴の1つはコロナ中の磁場の強さと向きがわかることである。電波は太陽コロナ中の電離した気体(プラズマ)の中を通過して地球に到達する。この電離した気体の中に磁場があると電波の性質が変化させられる。電波の性質のひとつに偏光がある。偏光とは電波の波の振れる方向を表すもので、ある基準の方向に対して縦に振れるものや横に振れるもの、振れる方向がぐるぐると回るものなどがある。電離気体の中を電波が通り抜けるとき、磁場があると右回転をする電波と左回転をする電波のうち一方が通り難くなり、地球に到達する量がもう一方に比べて少なくなる。どちらがどれだけ減るか(場合によっては増える)ということは、磁場の強さ、向き、電離気体の密度などによって決まるので、右回りの電波と左回りの電波が通り抜ける前は等量であると仮定すると、電離気体中の物理状態が推定できる。また、電波の放射機構そのものが右回りの電波と左回りの電波を異なった量だけ放射する場合もある。放射の割合は放射機構の違いや磁場の強さ、向きなどによって決まり、このときは電波の放射機構も推定することができる。

## 2.3 紫外線観測

紫外線とは可視光より波長の短い電磁波であり、具体的には  $3970 \text{ \AA}$  あたりからX線までの間の波長範囲をいう。太陽からは多くの紫外線が放出されているが、その大部分は地球の大気で吸収されてしまうため地上までとどかない。このため、観測は衛星やロケット、気球を使って行われる。紫外線をスペクトルに分けて詳しく調べると、可視光の場合とは逆に局所的に放射が強くなっている部分(波長)が見つかる。これは高温の電離した原子(イオン)により放射されるもので輝線と呼ばれている。炭素や窒素、酸素といったさまざまな原子が電離状態によって特有の輝線を放射する。それぞれの輝線は特定の温度の大気から強く放射されるので、輝線の観測から特定の温度を持った太陽大気の分布や動きを知ることができる。紫外線で観測される輝線の多くは数万度Kから200万度の範囲で強く放射される。このことから、彩層上部からコロナにかけての温度が急激に上昇する領域の太陽大気の様子が分かる。

## 2.4 X線観測

X線とは  $100 \text{ \AA}$  から  $0.1 \text{ \AA}$  にわたる波長の電磁波の

総称である。この波長域になると電子ボルト (eV) という光子エネルギーの単位を波長の代わりに用いる。光子エネルギーは波長に反比例する。X線で太陽を観測すると、紫外線よりもさらに上空のコロナのようすが見えてくる。X線のうち光子エネルギーが比較的低い領域を軟X線、光子エネルギーが高い領域を硬X線といい、両者では太陽の見え方が大きく異なる。太陽の軟X線は高温に加熱されたプラズマから放射され、放射強度からガスの密度や温度を推定できる。一方、硬X線はなんらかの機構（この機構については未解決）によって加速されて高い運動エネルギーを持った電子が低エネルギーのイオンと衝突したときに放射されると考えられており、放射強度から加速された電子の持つ運動エネルギーやその電子の数などが推定できる。

太陽の軟X線像にはループ状に放射が強くなっている領域が見られる。このループはコロナ大気が磁力線に沿って濃くなっているものであり、このことから逆にコロナ磁場のようすを知ることができる。フレアー現象の開

始前後でこのループの形、分布、放射強度などを調べることによりフレアー現象のもととなる磁場のエネルギーの蓄積や解放のようすを知ることが期待できる。

## 2.5 ガンマー線観測

X線よりもさらに波長が短い電磁波はガンマー線 ( $\gamma$ 線) と呼ばれる。 $\gamma$ 線には硬X線を放射する電子よりもさらに高い運動エネルギーを持った電子が太陽大気中のイオンや電子と衝突したときや  $\pi^0$  中間子の崩壊のときなどに放射される連続 $\gamma$ 線、高い運動エネルギーを持った陽子と太陽大気中の炭素、窒素等の原子との衝突（あるいは高い運動エネルギーを持った炭素、窒素等の原子と太陽大気中の陽子との衝突）により励起された炭素や酸素の原子核が元に戻るとき、中性子が陽子と融合したとき、電子と陽電子の対が消滅したときなどに放射される核 $\gamma$ 線ライン（特定のエネルギー域だけで放射される）などがある。いずれも大規模なフレアー現象が起こったときに観測される。硬X線との比較などから粒子の加速機構に関する情報を得ることができる。



# SPIE—The International Society for Optical Engineering



PROCEEDINGS

SPIE—The International Society for Optical Engineering は、現在米国における光産業の中核として、IEEE, AIP, OSA などの学会と連携を保ちながら、新技術の開発と、その応用領域の拡大に力を注ぎ、年間150~180テーマ別の Technical Conference を通じて技術者間の情報交換と、メーカーへの技術導入仲介に寄与しております。セミナー開催地も各国に移しながら、年を追うごとに急成長を遂げ、その Meeting 活動は光産業分野では不可欠なものとして評価されるほどで、その都度出版される Proceedings は、関連される研究開発に携っておられる方々には必須の研究資料として用いられております。

## Vol. 973 Cryogenic Optical Systems & Instruments III

Space Infrared Telescope Facility (SIRTF) & Superfluid Helium On-Orbit Transfer (SHOOT)/SIRTF Cryogenic Optics Technology/Cosmic Background Explorer Scientific Instruments & Advanced X-Ray Astrophysics Facility (AXAF) Cryogenic System/Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA)/High Volume IR Array Testing & Detector Collers/Development of IR Detectors & Associated Electronics/Cryogenic Limb Array Etalon Spectrometer (CLAES) 1988 ¥19,000

## Vol. 1070 Reconnaissance, Astronomy, Remote Sensing, & Photogrammetry

Remote Sensing/Photogrammetry & Cartography/Astronomical Imaging with IR Array Detectors 1989 ¥10,400

## Vol. 1159 EUV, X-Ray, & Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy & Atomic Physics

Hard X-Ray & Gamma-Ray Imaging Techniques/Hard X-Ray & Gamma-Ray Spectroscopic & Imaging Detectors I, II/X-Ray/EUV Solid-State Imagers I, II, III/Balloon & Spaceborne Experiments & Missions I, II, III/Laboratory Atomic Physics Instrumentation/Proportional Counter Detectors/Detector Calibration/High Resolution X-Ray Spectrometers/Position Readout Techniques I, II/Special Session on X-Ray/EUV Optics for Astronomy & Microscopy 1989 ¥17,800

★ご注文、お問合せ、新刊案内、入会ご希望の方は下記へご連絡下さい。



日本・極東・オーストラリア地域総代理店 (SPIE/Japan Chapter 事務局)

株式会社

オー・ティー・オー・リサーチコーポレーション

〒169 東京都新宿区高田馬場1-34-12-512 TEL. (03) 3208-7821(代) FAX. (03) 3200-2889