

平成21年 5月27日現在

研究種目：基盤研究(A)
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17204014
 研究課題名（和文） 赤外線検出器を用いた太陽フレアの磁気エネルギー蓄積機構の研究
 研究課題名（英文） Studies on the Process of Magnetic Energy Build-up in Solar Flares by Using an Infrared Detector
 研究代表者
 櫻井 隆 (SAKURAI TAKASHI)
 国立天文台・太陽天体プラズマ研究部・教授
 研究者番号：40114491

研究成果の概要：太陽のフレア爆発は、大気内に蓄積された磁気エネルギーが急激に解放される現象である。従ってフレアのエネルギー蓄積機構の研究には、太陽磁場の精密測定が不可欠である。可視光に比べて3倍程度の高感度を達成できる、赤外線領域で動作する太陽磁場観測装置を開発した。波長 $1.56 \mu\text{m}$ で太陽表面（光球）、波長 $1.083 \mu\text{m}$ で上層（彩層）の磁場を観測でき、黒点の磁場やプロミネンスの観測で性能を実証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	22,100,000	6,630,000	28,730,000
2006年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2007年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2008年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
年度			
総計	37,200,000	11,160,000	48,360,000

研究分野：天文学、太陽物理学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：太陽、周期活動、黒点、磁場、太陽フレア、磁気ヘリシティ、観測装置、赤外線

1. 研究開始当初の背景

太陽黒点の数が周期約11年で増減することはよく知られている。黒点が2000～4000ガウスの強い磁場を持っていることからわかるように、黒点数の増減はいいかえれば、太陽が約11年の周期で磁場を生成することによって引き起こされる。このような、太陽に見られる磁場の生成のメカニズムは、広く天体の磁気活動の起源に関わる重要な問題である。これは1960年代に、「天体電磁流体ダイナモ機構」として定式化され解明されたかに見えたが、新たな観測事実が積み重ねられるにつれ、この理論は根底から見直されね

ばならない事態となって現在に至っている。

黒点数の多い活動極大期には、太陽は磁場のエネルギーを駆動源として、フレアと呼ばれる激しい爆発現象を引き起こす。フレア爆発は、太陽黒点のまわりの強い磁場の中に蓄えられた歪みのエネルギーが、急激に解放されるために起こると考えられている。フレア爆発によって放出されたプラズマの雲(CME: Coronal Mass Ejection)は1～2日後には地球に到達し、地球磁気圏を乱してオーロラを輝かせるほか、誘導電流による送電線への被害や、人工衛星のメモリー、CPUへの障害を引き起こすことも知られている。

磁場の歪みは、フレア爆発の前に次第に増

加し、爆発が起こった後に減少するはずである。太陽表面の磁場を常に監視していれば、フレア爆発の時期や規模を予測することもできると考えられる。しかしこれまでの観測では、フレア爆発に伴って磁場の歪みはいつも減少するわけではなく、むしろ歪みが増えるような、一見矛盾した結果が得られた例もある。また、歪みの蓄積がどのレベルに達するとフレア爆発を起こすのかについても、「予報」と呼べるに足るほど信頼性のある判定はできていない。このような不確定性の主な原因は、太陽表面の磁場の測定の精度が十分でないためである。より高精度の磁場測定を可能にすれば、太陽の磁気活動の研究に画期的な前進をもたらすことができる。

太陽表面の磁場の測定はスペクトル線のゼーマン効果を用いてなされるが、ゼーマン効果は波長が長いほど大きいので、これまでの可視光による観測から、赤外線観測に進むのが理にかなった選択である。しかし赤外域で稼働する磁場観測装置は海外でもまだ実験段階であり、本格的な装置は存在しない。

2. 研究の目的

本研究課題では、現時点で達成しうるできる限り高速・高感度の赤外線検出器を選択し、波長 $1.56\mu\text{m}$ の赤外線領域 (Hバンド) で動作する高精度・高速の磁場観測装置を製作する。太陽のフレア爆発のエネルギー蓄積機構の研究や、太陽内部での磁場生成機構の情報を持っていると考えられる磁場のよじれ度 (ヘリシティ) の研究などが目的である。この装置を用いれば、今まで理論的には予測されながら決定的証拠が得られていなかった、磁場の歪みとフレア爆発の関係を世界に先駆けて明らかにする可能性が開けてくる。

3. 研究の方法

ゼーマン効果による太陽磁場の測定は、具体的には太陽スペクトルの偏光状態を測定することで行われる。偏光観測装置は、偏光変調を行う光学素子、スペクトル線の波長の光だけを取り出す分光装置、最終的にデータを取得する検出器、およびこれらに光を導く光学系とからなる。本研究では、望遠鏡そのものは、国立天文台三鷹キャンパスの太陽フレア望遠鏡 (1990年建設) の一部を改造して使い、これに導入光学系と偏光観測装置を搭載した。

分光装置としては、グレーティング分光器を採用し、太陽面をスリットによりスキャンして観測を行う。観測波長は太陽表面 (光球) の磁場観測用の波長 $1.56\mu\text{m}$ のほか、上層 (彩層) の磁場を観測するため、波長 $1.083\mu\text{m}$ での観測もできるように工夫した。

4. 研究成果

(1) 装置の概要

製作した装置の概観を図1に示した。装置は、国立天文台三鷹キャンパスの太陽フレア望遠鏡の上面光学ベンチに配置されている。

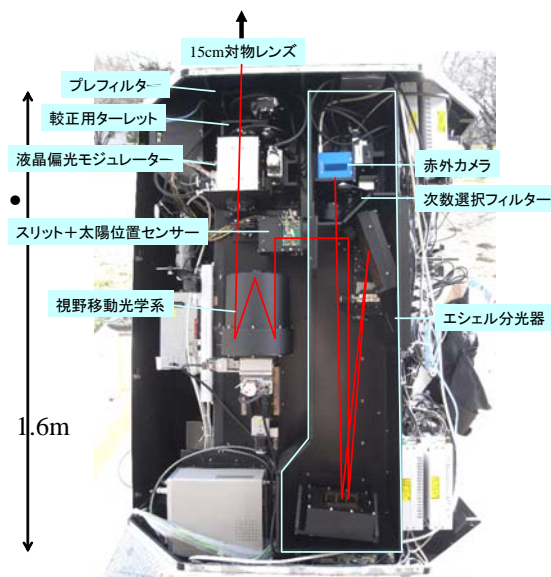


図1. 製作した赤外線偏光観測装置

ここで用いている赤外線検出器は、ベルギー-Xenics社のXEVA-FPA-640で、 512×640 素子のInGaAsカメラである (学会発表①)。 $0.9 \sim 1.7\mu\text{m}$ で量子効率80%以上を有し、また読み出し速度も60フレーム/秒と高速である。分光器の前には、口径15cmの対物レンズ、液晶を用いた偏光変調装置 (雑誌論文③)、視野移動のための光学・機械系、分光器用スリット部分に組み込まれた太陽位置検出装置などが配置されている。

フレア望遠鏡には他に既設の光学ベンチが2本あり、太陽像を拡大してその一部を観測している。従って今回製作した赤外線偏光観測装置はそれ自身、視野移動機構と太陽位置センサーを持っており、望遠鏡が太陽のどこを向いていても、太陽全面をラスタ観測できる。観測は実際には、太陽の北半分と南半分を別々に観測し、あとでデータを一つにまとめる。最終的には、1ピクセルが1.75秒角、約 1200×1200 ピクセルの太陽像になる。図2は観測状態での制御コンピュータの画面である。

分光器はアメリカのRichardson Gratings製で大きさ $11 \times 12\text{cm}$ 、刻線数87本/mmである。 $1.56\mu\text{m}$ 帯は13次のスペクトルで波長分解能は23万、 $1.083\mu\text{m}$ 帯は19次のスペクトルで波長分解能は34万となる。偏光観測装

置への入射口に取り付けられているプレフィルターは、この2波長の近傍のみを透過させる特殊な干渉フィルターとなっている。最終的な次数選択フィルターは、赤外線検出器の直前に置かれた通常バンドパス型干渉フィルターである。

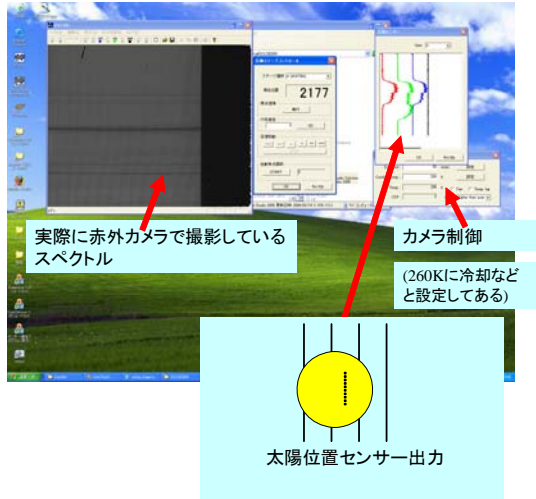


図2. 制御コンピュータの画面

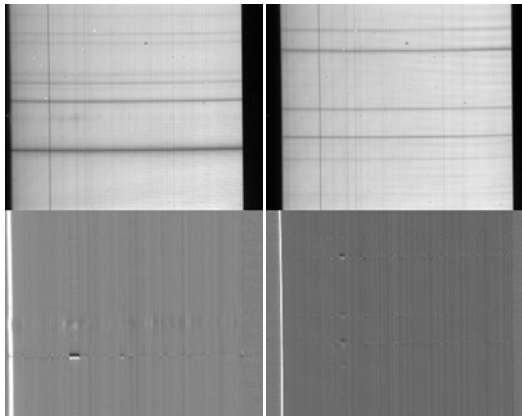


図3. 偏光スペクトルの観測例

(2) 観測結果

観測されたスペクトルと偏光状態の例を図3に示す。左半分が $1.083 \mu\text{m}$ 帯、右半分が $1.56 \mu\text{m}$ 帯で、下半分に偏光度を表示している。この例は黒点そのものではなく、その周辺領域（プラージュ領域）であるため、偏光は観測されるがスペクトル線のゼーマン分離は見えない。図4は黒点の観測例で、これでははっきりとしたゼーマン分離が見られる。

図5は波長 $1.083 \mu\text{m}$ で太陽全面スキャン観測を行った例である。右下にプロミネンスが観測されている。同じ波長で観測を行って

いるアメリカ国立太陽天文台のデータと比べて、分解能、感度とも遜色はない。また、同じプロミネンスを SOHO 衛星の紫外線観測もとらえている。

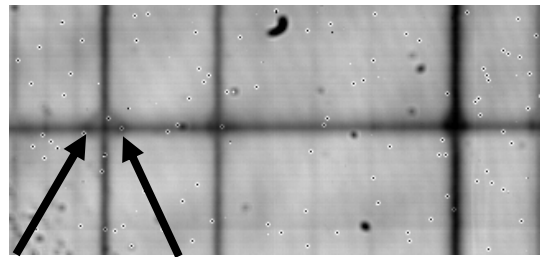


図4. 黒点でのゼーマン分離

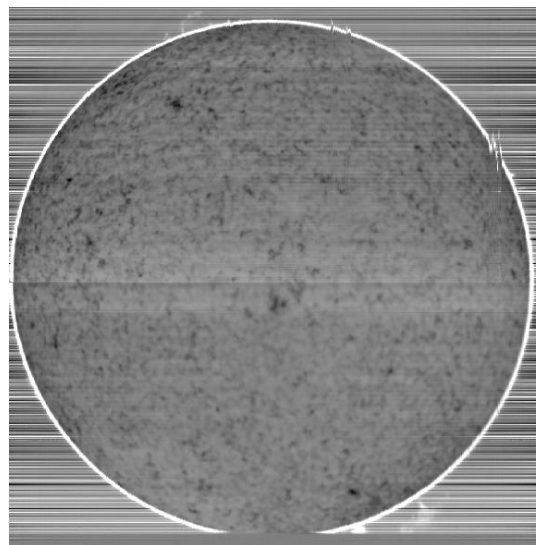


図5. 波長 $1.083 \mu\text{m}$ での太陽全面スキャン観測

(3) その他の成果

2008-2009 年は太陽活動極小期にあたり黒点がほとんど見られないため、現在は、2011-12 年と想定される次の活動極大期に向けて装置の改良を進めている。また、太陽フレア望遠鏡の旧装置による観測結果の解析研究を続行したほか、ひので衛星の X 線観測装置、磁場観測装置による観測研究も行い、本計画で導入した装置との連携を図っている。

雑誌論文⑥は、太陽表面での磁気ヘリシティが一般に北半球では負、南半球では正であるという、いわゆるヘリシティの符号則は、太陽活動の極大期ではよく成り立つが、極小期では逆転する傾向があることを、世界で始めて示した論文である (図6)。用いたデータは太陽フレア望遠鏡の旧・磁場観測装置によるものである。雑誌論文①では、この結果が世界の他の磁場観測装置でも得られるかどうかを検証しようとしたものであるが、誤差が大きく、結果の一致が得られなかった。

雑誌論文④は、3台の磁場観測装置（日本、中国、アメリカ）の測定結果の比較を徹底して行ったものであるが、似た装置である日本と中国の結果は大体一致し、全く違う方式をとるアメリカ（ハワイ大学）の結果とは一致しない、という結果になった。本研究課題で開発した装置を用いれば、より高精度の比較が可能となるはずである。

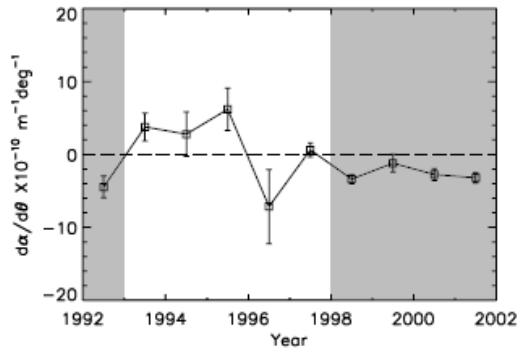


図6. 太陽フレア望遠鏡で観測された、磁気ヘリシティの符号則。負の値になるのが通常の符号則である（灰色の部分）が、活動極小期（白抜き部分）では正の値を取ることがある。雑誌論文⑥より。

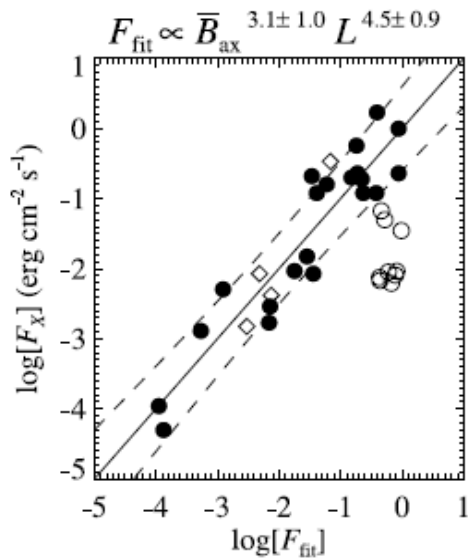


図7. フレアのX線等級の予想値（横軸）と観測値（縦軸）。雑誌論文②の結果をさらに改良したもの。

雑誌論文②および学会発表②、③は、磁場観測のデータをフレアの規模の予報に用いる試みについて述べたものである。太陽表面の活動領域の磁場観測データがあれば、その領域で起こる最大のフレアのX線等級を、2倍程度の不確定性で予報できることを示した。将来、磁場観測の精度が向上すれば、こ

の不確定範囲は狭くできるはずである。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計37件）

- ① A. A. Pevtsov, R. C. Canfield, T. Sakurai, M. Hagino: “On the Solar Cycle Variation of the Hemispheric Helicity Rule”, *Astrophysical Journal*, 677 巻, 719-722, 2008, 査読有
- ② T. T. Yamamoto, T. Sakurai: “Correlations between Flare Parameters and Magnetic Parameters in Solar Flares”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 61 巻, 75-84, 2008, 査読有
- ③ Y. Hanaoka: “A New Magnetograph System for the Observation of the Multi-Height Vector Magnetic Field of the Sun”, *Advances in Space Research*, 39 巻, 1730-1733, 2007, 査読有
- ④ H. Xu, Y. Gao, H. Zhang, T. Sakurai, A. A. Pevtsov, D. Sokoloff: “Helicity Comparison among Three Magnetographs”, *Advances in Space Research*, 39 巻, 1715-1722, 2007, 査読有
- ⑤ T. T. Yamamoto, K. Kusano, T. Maeshiro, T. Yokoyama, T. Sakurai: “Magnetic Helicity Injection and Sigmoidal Coronal Loops”, *Astrophysical Journal*, 624 巻, 1072-1079, 2005, 査読有
- ⑥ M. Hagino, T. Sakurai: “Solar-Cycle Variation of Magnetic Helicity in Active Regions”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 57 巻, 481-485, 2005, 査読有

〔学会発表〕（計31件）

- ① 鈴木 勲、桜井 隆、花岡庸一郎、萩野正興：「太陽偏光分光観測用赤外線カメラの性能評価」、日本天文学会春季年会、2009年3月、大阪府立大学
- ② 山本哲也、桜井 隆、横山央明、草野完也：「光球面磁場から予測される太陽フレアの規模について」、地球惑星科学連

合合同大会、2007年5月、幕張メッセ

- ③ 山本哲也、桜井 隆、横山央明、草野完也：「光球面の磁場パラメータによる太陽フレアの規模の予測」、地球惑星科学連合合同大会、2006年5月、幕張メッセ

〔図書〕(計1件)

- ① 桜井 隆・他(編)、シリーズ現代の天文学第10巻「太陽」、日本評論社、2009年3月、346ページ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桜井 隆 (SAKURAI TAKASHI)

国立天文台・太陽天体プラズマ研究部・教授

研究者番号：40114491

(2) 研究分担者

(平成17年度～平成20年度)

篠田 一也 (SHINODA KAZUYA)

国立天文台・太陽天体プラズマ研究部・主任技術員

研究者番号：50413977

(平成18年度～平成20年度)

花岡 庸一郎 (HANAOKA YOUICHIROU)

国立天文台・太陽天体プラズマ研究部・准教授

研究者番号：10238040

福田 武夫 (FUKUDA TAKEO)

国立天文台・先端技術センター・技術員

研究者番号：10465924

(平成17年度～平成19年度)

西野 洋平 (NISHINO YOUHEI)

国立天文台・太陽天体プラズマ研究部・主任研究技師

研究者番号：40189296

宮下 正邦 (MIYASHITA MASAKUNI)

国立天文台・太陽天体プラズマ研究部・研究技師

研究者番号：50209904

田中 伸幸 (TANAKA NOBUYUKI)

国立天文台・太陽天体プラズマ研究部・主任技術員

研究者番号：60413978

(3) 連携研究者

(平成20年度)

西野 洋平 (NISHINO YOUHEI)

国立天文台・太陽天体プラズマ研究部・主任研究技師

研究者番号：40189296

宮下 正邦 (MIYASHITA MASAKUNI)

国立天文台・太陽天体プラズマ研究部・研究技師

研究者番号：50209904

田中 伸幸 (TANAKA NOBUYUKI)

国立天文台・太陽天体プラズマ研究部・主任技術員

研究者番号：60413978