

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05034

研究課題名(和文)磁気ヘリシティに着目した太陽磁気活動の駆動機構の研究

研究課題名(英文) Study on the driving mechanism of solar magnetic activity with emphasis on magnetic helicity

研究代表者

櫻井 隆 (Sakurai, Takashi)

国立天文台・太陽観測科学プロジェクト・名誉教授

研究者番号：40114491

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：太陽の磁気活動の駆動機構の研究のため、スペクトル線の偏光観測のデータから太陽表面の磁場を導出する新しい手法を開発した。この手法では、1ピクセル内の磁場分布を、強い磁束管と、弱いゼロでない背景磁場(これは背景磁場をゼロとする従来理論の拡張)からなるとした。国立天文台の磁場観測データおよび「ひので」のデータを用い、黒点周辺(活動領域)の磁気ヘリシティを解析した。ダイナモ理論の枠組みでは、いわゆる  $\alpha$  効果(対流が磁場をよじる効果)が重要であるが、ヘリシティの統計分布からは、磁場が太陽の対流層の底で増幅され浮上する途中で、たかだか1個の対流渦と相互作用してよじれを得ている、という描像が得られた。

研究成果の概要(英文)：In order to study the driving mechanism of solar magnetic activity, we have developed a new method of deriving the magnetic field on the solar surface from the polarization observation data of spectral lines. In the new method, the magnetic field in a single pixel is assumed to consist of a strong flux-tube field and a weak but non-zero background field (this is an extension of the conventional theory that assumes non-magnetic background). We also considered the origin of helicity in solar active regions (sunspots and their surroundings) using the data from the National Astronomical Observatory and the magnetic field data from the Hinode satellite. In the dynamo theory, the so-called  $\alpha$  effect represents convection to twist the magnetic field lines. The statistical distribution of helicity implies that the magnetic flux tubes rising through the convection zone may encounter at most one convective cell from which they acquire helicity.

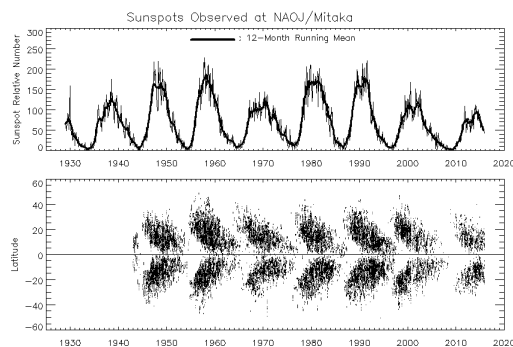
研究分野：太陽物理学

キーワード：太陽 磁場 黒点 磁気ヘリシティ 太陽活動サイクル ダイナモ機構

## 1. 研究開始当初の背景

太陽・恒星における磁場生成機構の解明は、太陽恒星物理学の最重要課題の一つで、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なければならない事態となっており、現在に至っている。生成された磁場が引き起こす現象として、フレアと呼ばれる激しい爆発現象と、常時存在する高温のコロナの生成、の二つが挙げられる。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、その基礎過程が磁気リコネクションであることは、1991年に打ち上げられた「ようこう」衛星の成果によりほぼ確実となった。コロナの加熱は、微小なフレアが多数起こることにより達成されているという説と、太陽表面で発生した波動がエネルギーを運んでいるとする説があり、2006年に打ち上げられた「ひので」衛星の最大の研究テーマである。「ひので」でいろいろな波動が検出され注目を集めている。

このように、生成された磁場が引き起こす結果としてのコロナ加熱やフレア爆発の研究は著しい進展を見ているが、その駆動源である磁場の生成機構についてはまだ混沌としており、現在及び近い将来において最も重要な研究課題と考えられる。1980年代以降、日震学的手法による太陽内部の診断や、自転・対流と磁場の相互作用に関する数値シミュレーションは大きな進歩を遂げてきたが、これと比較すべき観測データとしては、長い間、黒点の発生数変化(11年の周期性)と緯度分布(いわゆる蝶型図;下図)及び1950年代から測られるようになった太陽表面の磁場(磁束)の分布、に限られていた。

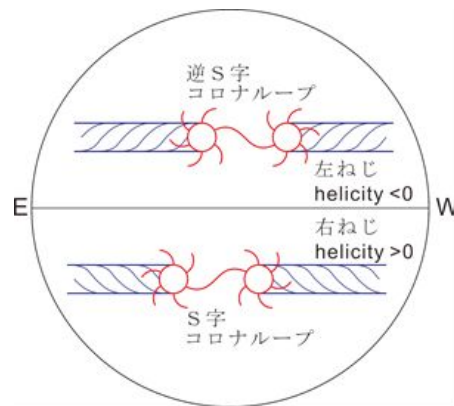


国立天文台で観測された黒点数の11年周期変動と緯度分布(蝶型図)

分光観測による磁場測定の基本理論は1956年に海野和三郎(現・東大名誉教授)が構築し、海野-ラチコフスキーの公式として知られている。スペクトル線の偏光(円偏光と直線偏光)を観測し、理論モデルを用いて磁場の強度と向き(磁場ベクトル)を求める

ことができる。この理論に基づく磁場観測装置も我が国では世界をリードして早くから建設され、ひので衛星の磁場観測装置や、国立天文台・三鷹で稼働中の装置(通称・太陽フレア望遠鏡)に引き継がれている。

磁場の量(磁束)だけでなく、磁場の向きも含めた磁場ベクトルの定常観測は1980年代に始まった。磁場ベクトルを微分すると電流密度( $J_z$ ,  $z$ は視線方向の座標)が得られ、磁場と電流の比  $=J_z/B_z$  から、磁力線のよじれの度合い(磁気ヘリシティ)が導かれる。その結果、太陽の磁場は系統的に北半球が左ねじ(負のヘリシティ)、南半球が右ねじ(正のヘリシティ)を持つことがわかってきた。これは、古くから知られていた黒点の周りの渦巻き模様や、ようこう衛星で注目されたS字型コロナループなどが定性的に示すよじれの向きと一致し、それを定量的に計測したものと見える。この性質はヘリシティの半球則と呼ばれている(下図)。



ところが、このヘリシティの半球則は、11年周期活動の極小期には逆転するということを Hagino and Sakurai (2005)は国立天文台の観測データを元に主張した。この結果には当初賛否両論があったが、中国・北京天文台の大量のデータを用いた解析(Zhang et al., 2010)の結果、現在では支持者のほうが多いと思われる。ヘリシティの起源は、従って時間的に一定な自転によるコリオリ力や差動自転のみによるのではなく、時間的に変化するメカニズムが深く関与していることになり、ダイナモ作用に迫る重要な第一歩となった。本研究ではさらにヘリシティを手がかりにダイナモ機構の根幹に迫る。

## 2. 研究の目的

太陽の磁気活動、すなわちフレア爆発や高温コロナの加熱と、それらのエネルギー源である磁場を作り出すメカニズムは、太陽のみならず広く恒星一般に共通する基本的かつ重要な研究課題であり、また磁気圏物理学、プラズマ物理学など多様な分野とも強い関連を持っている。その中で最も根源的なプロセス

スである磁場の生成は、直接見えない太陽内部で進行するため、とりわけ解明が困難であり、太陽表面での磁場の観測に加えて、日震学の手法による太陽内部の診断や、数値シミュレーションなど多面的なアプローチがなされてきた。今回の研究では、太陽表面で観測される磁場のよじれ(磁気ヘリシティ)を手がかりに、太陽内部で進行する磁場生成機構の解明に迫る。

### 3. 研究の方法

本計画では、手段として

(1) 偏光分光観測データから磁場を求める手法の精度を向上させる理論的研究と、その方法を用いて大量のデータを解析するためのハードウェア並びにソフトウェアの実装を行いつつ、

(2) 国立天文台の既存のデータおよび「ひので」のデータを用い、黒点周辺(活動領域)の磁気ヘリシティの時間変動や緯度分布の統計解析から、ヘリシティの起源を探る。ダイナモ理論の枠組みでは、いわゆる 効果(対流が磁場をよじる効果)に直接迫ることができる。

研究体制として、研究分担者は置かず、以下のような研究連携者及び海外の共同研究者からなる組織とした。

連携研究者：萩野正興(国立天文台専門研究職員)

研究協力者：篠田一也(国立天文台主任技術員) 森田諭(国立天文台特任専門員)

海外の共同研究者

北京天文台：H.Zhang, Y.Yan(教授), Y.Gao, H.Xu(研究員)

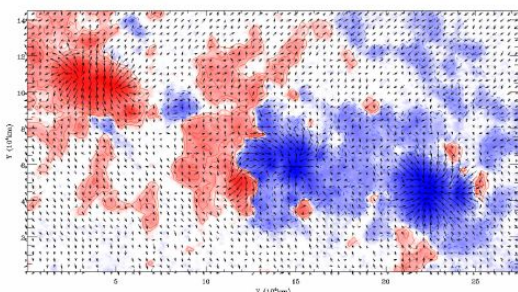
ロシア科学アカデミーIZMIR 研究所：

K.Kuzanyan(教授)

モスクワ国立大学：D.Sokoloff(教授)

### 4. 研究成果

(1) スペクトル線の偏光観測のデータから太陽表面の磁場を導出する手法の精度改良と高速化



本研究課題で開発した手法による太陽活動領域(2013年1月15日)の磁場構造(Sakurai et al.)

平成27年度に導入した解析環境(Linux ワークステーションとグラフィック・プロセッ

サ・ユニット(GPU)、ソフトウェアとして画像解析用のIDLと、数値解析用にGPU対応のFORTRAN)を用いてデータ解析手法の開発を行った。データ源である国立天文台・三鷹の赤外スペクトロポラリメータについて、1ピクセル内の磁場分布を、強い磁束管と、弱いがゼロでない背景磁場(これは背景磁場をゼロとする従来理論の拡張)からなるとして、偏光度から磁場への変換手法を実装し、論文とした(Sakurai et al., 論文)。

(2) 得られた磁場データの解析(特に、磁場のよじれ「ヘリシティ」に注目する)から太陽内部における磁場生成機構の鍵を得る

ひので衛星の可視光望遠鏡を用いた磁気ヘリシティの解析結果はすでに2015年2月に出版していたが、そこで用いたデータは2006年から2012年のものであったので、さらに2014年までのデータを含めた改訂版を2015年9月のひので国際会議(北アイルランド、ベルファスト)で発表した(Otsuji et al., 発表)。その後、複数のスキャンを組み合わせる「モザイク観測」をひので衛星に提案し何度か実施されたので、その解析結果を2016年9月のひので国際会議(名古屋大学)と2018年3月の日本天文学会春季年会で発表した(大辻他、発表; Kuzanyan et al., 発表)。また、国立天文台と、中国科学院北京天文台が運用する類似の磁場観測装置とのデータの相互比較と差異の原因を考察した論文をSolar Physics誌に発表した(Xu et al., 論文)。

ひので衛星が観測した黒点磁場の膨大なデータから、観測史上最も強い磁場とその成因について考察した(Okamoto and Sakurai, 論文)また、太陽表面に見られるフィラメントのよじれの向きの半球則について、2017年9月の日本天文学会秋季年会で発表し(花岡他、発表)、論文出版(Hanaoka and Sakurai, 論文)を行った。

太陽の周期活動の長期変動を研究する上で重要なデータである黒点相対数が、その決定責任機関であるベルギー王立天文台によって2015年に大幅改訂されたことを受け、その正当性を確認する意味で、国立天文台(およびその前身である東京大学東京天文台)の1930年代からのデータとの比較を行い、2017年3月の日本天文学会春季年会において発表した(桜井・藤森、発表)。

### 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10件)

Infrared Spectro-Polarimeter on the Solar Flare Telescope at NAOJ/Mitaka Sakurai, T. 他18名、

Publ. Astron. Soc. Japan, 査読有、Vol.70 ,  
2018, in press  
DOI: 10.1093/pasj/psy050

Hinode's Contributions to Solar Physics  
Sakurai, T.,  
In 'First Ten Years of Hinode Solar  
On-Orbit Observatory', Astrophysics and  
Space Science Library, Vol. 449. Springer  
Nature Singapore Pte Ltd., 査読無、2018,  
p.19-26,  
DOI: 10.1007/978-981-10-7742-5\_2

Super-strong Magnetic Field in  
Sunspots  
Okamoto, T., Sakurai, T.,  
The Astrophysical Journal Letters, 査読有、  
Vol.852, Issue 1, article id. L16, 6 pp., 2018  
DOI: 10.3847/2041-8213/aaa3d8

Statistical Study of the Magnetic Field  
Orientation in Solar Filaments  
Hanaoka, Y., Sakurai, T.,  
The Astrophysical Journal, 査読有、Vol.851,  
Issue 2, article id. 130, 11 pp., 2017  
DOI: 10.3847/1538-4357/aa9cf1

Heating Mechanisms of the Solar  
Corona  
Sakurai, T.,  
Proceedings of the Japan Academy, Ser. B,  
査読有、Vol. 93, 87-97, 2017  
DOI: 10.2183/pjab.93.006

On the Origin of Differences in Helicity  
Parameters Derived from Data of Two  
Solar Magnetographs  
Xu, H., Zhang, H., Kuzanyan, K., Sakurai,  
T.,  
Solar Physics, 査読有、Volume 291,  
2253-2267, 2016  
DOI: 10.1007/s11207-016-0975-1

The Vignetting Effect of the Soft X-Ray  
Telescope Onboard Yohkoh: II. Pre-Launch  
Data Analysis  
Shin, J., Sakurai, T.,  
Solar Physics, 査読有、Volume 291,  
705-725, 2016  
DOI: 10.1007/s11207-016-0845-x

Solar Full-Disk Polarization  
Measurement with the Fe I 15648  
Angstrom Line  
Hanaoka, Y., Sakurai, T., IRMag Group  
Proceedings of the International  
Astronomical Union, 査読無、Volume 305,  
92-96, 2015  
DOI: 10.1017/S1743921315004573

桜井 隆  
太陽物理学  
パリテイ、査読無、30, 14-15, 2015

Vignetting Effect in the Soft X-Ray  
Telescope Onboard Yohkoh: I. Numerical  
Simulation  
Shin, J., Sakurai, T.,  
Solar Physics, 査読有、Volume 290,  
1531-1546, 2015  
DOI: 10.1007/s11207-013-0292-x

〔学会発表〕(計 10 件)

「ひので」観測 10 年：黒点磁場強度ラン  
キング  
岡本文典、桜井 隆  
2018 年 3 月 14～17 日、千葉大学

ひので SOT/SP モザイク観測による広視野  
高空間分解能ベクトル磁場観測および電流  
ヘリシティ測定  
大辻賢一、桜井 隆、Kirill Kuzanyan  
2018 年 3 月 14～17 日、千葉大学

プロミネンスの緯度分布と太陽の周期活  
動  
萩野正興、桜井 隆、篠田一也、入江 誠、浜  
屋ひかり、石塚千彰、藤森賢一  
日本天文学会秋季年会  
2017 年 9 月 11～13 日、北海道大学

桜井 隆、藤森賢一  
International Sunspot Number の改訂と東  
京天文台・国立天文台の黒点相対数  
日本天文学会春季年会  
2017 年 3 月 17 日、九州大学伊都キャンパス  
(福岡県福岡市)

「ひので」観測 10 年：最強の黒点磁場  
岡本文典、桜井 隆  
日本天文学会春季年会  
2017 年 3 月 17 日、九州大学伊都キャンパス  
(福岡県福岡市)

He I 10830 吸収線で見たフィラメント  
の磁場の方向の統計的性質  
花岡庸一郎、桜井 隆、赤外マグネトグラフ  
グループ  
日本天文学会春季年会  
2017 年 3 月 16 日、九州大学伊都キャンパス  
(福岡県福岡市)

太陽フレア望遠鏡赤外ポラリメーターで  
観測したコロナホール  
萩野正興、花岡庸一郎、末松芳法、桜井 隆、  
大井瑛仁、一本潔、大辻賢一、野澤 恵、坂  
江隆志  
日本天文学会秋季年会  
2016 年 9 月 13～16 日、愛媛大学城北キャン

パス（愛媛県松山市）

Current Helicity in the Solar Cycle, the Properties of Turbulent Magnetic Field from Mosaic SOT/SP Raster Scans and Messages for Dynamo Theory  
Kuzanyan, K., Otsuji, K., Sakurai, T., Hagino, M., Yokoi, N.  
10th Hinode Science Meeting, Nagoya University, 2016 Sept.5-6

Current Helicity and Twist of Solar Magnetic Fields from Hinode/SOT SP and Ground Based Telescopes Data  
Otsuji, K., Sakurai, T., Kuzanyan, K., Hagino, M.  
9th Hinode Science Meeting, Belfast, Northern Ireland, 2015 Sept.14-18  
ベルファスト市（英国、北アイルランド）

太陽の周期活動およびその長期変動と地球環境  
桜井 隆  
地球惑星科学連合同大会  
2015年5月24日、幕張メッセ（千葉県千葉市）

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

出願状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

桜井 隆（SAKURAI, Takashi）  
国立天文台・太陽観測科学プロジェクト・  
名誉教授

研究者番号：40114491

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

萩野正興（HAGINO, Masaoki）  
国立天文台・太陽観測科学プロジェクト・  
専門研究職員  
研究者番号：90437195

### (4) 研究協力者

篠田一也（SHINODA, Kazuya）  
国立天文台・太陽観測科学プロジェクト・  
技師

森田 諭（MORITA, Satoshi）  
国立天文台・太陽観測科学プロジェクト・  
特任専門員