

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13583

研究課題名（和文）画像認識アルゴリズムを利用した太陽ダイナモ理論モデルの観測実証

研究課題名（英文）Observational verification of the solar dynamo model based on image recognition

研究代表者

飯田 佑輔 (Iida, Yusuke)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：10706328

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究計画は、これまでの太陽観測衛星観測により蓄積された太陽表面磁場観測ビッグデータを用いて、現在の主流となっている太陽ダイナモ理論モデルの検証を行った。その鍵となっているのは、研究代表者が開発する磁気要素の自動追跡アルゴリズムであり、それをより効率化することで、衛星画素の1/100程度の太陽表面磁場の微小な運動を検出することが可能となった。それにより、子午面環流の直接検出が可能となり、太陽ダイナモモデルで仮定される子午面環流の扱いの妥当性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、これまでに間接的に示されてきた子午面環流について、より直接的な測定を可能としたものである。子午面環流は、太陽対流層の南北方向の流れのことを呼び、現在の太陽ダイナモ理論モデルでは、その周期を決める非常に重要な流れ場である。しかし、その大きさはとても小さく磁気要素の運動から直接検証することは難しかった。よって、本研究は太陽ダイナモ問題に対して新しい一歩を踏み出したものである。一方で、私たちが住む地球周辺宇宙は太陽活動周期性の影響を大きく受けている。そのため、これからの人類の宇宙進出にあたり、重要となるであろう礎を築くものである。

研究成果の概要（英文）：In this research, we try to verify the validation of the current solar dynamo theory model, flux transport dynamo, using big data accumulated by the solar satellite observations. The key point of this study is the automatic tracking algorithm of magnetic elements on the solar surface, which is developed by the principal investigator so far. We developed the code more efficient to make it possible to detect such small motions of the solar surface magnetic field that are about 1/100 of the image pixels. This technique enabled us to detect the meridional flow more directly, and we showed the validity of the treatment of the meridional flow in the current solar dynamo model.

研究分野：天文学

キーワード：太陽物理学 天文学 ビッグデータ 画像認識 磁場 対流

1. 研究開始当初の背景

(1)なぜ、宇宙空間に存在する星々の大気活動に周期性が存在するのか？この疑問を星ダイナモ問題という。太陽は私達が住む地球の最近傍に位置しており、太陽大気活動の周期性問題(太陽ダイナモ問題)は、最も詳細な観測実証が可能な星ダイナモ問題である。その起源である表面磁場には、11年の周期が存在することが知られ、磁気流体力学理論と数値シミュレーション研究によって、磁束輸送ダイナモモデル(Flux Transport Dynamo モデル; FTD モデル)が構築されてきた。FTD モデルでは、南北方向流れの子午面還流と等方流れの対流という2つの流れ場により磁場を輸送する。大雑把には、子午面還流の速さによって11年の周期を、対流の速さによって磁場総量(～太陽大気の活動度)が説明される。

(2)一方で、FTD モデル自体の観測実証はほとんど行われていなかった。それは、実際の太陽表面において、磁場は対流場中の微小磁気塊として無数に存在し、それらの複雑な運動を直接解析することが困難であるためである。特に、その周期性に重要とされる子午面還流の速さは小さく、その検出は困難であった。

2. 研究の目的

(1)上述の研究背景を受け、本研究計画ではこれまでに研究代表者が培ってきた表面磁気塊の自動追跡アルゴリズムと膨大な太陽定常観測データの組み合わせによって、FTD モデルの観測実証または改良を提案することを主な目的とする。

3. 研究の方法

(1)米国航空宇宙局が運用する Solar Dynamics Observatory 衛星(以下、SDO 衛星)の磁場観測ビッグデータに、磁気塊の自動追跡アルゴリズムを適用することで、微小な子午線還流の検出を行う。SDO 衛星は、2010年10月から太陽全面の磁場45秒間隔で観測しており、本計画に最適な観測データを提供している。

(2)図1は、実際に開発した磁気塊の自動追跡アルゴリズムをSDO 衛星の観測データに適用した結果を示し、数多くの磁気塊を検出できていることが分かる。このような膨大な数の磁気塊を追跡することで、画素サイズの1/100ほどとされる微小な南北依存性、つまり南北方向の流れ場である子午面還流を検出する。

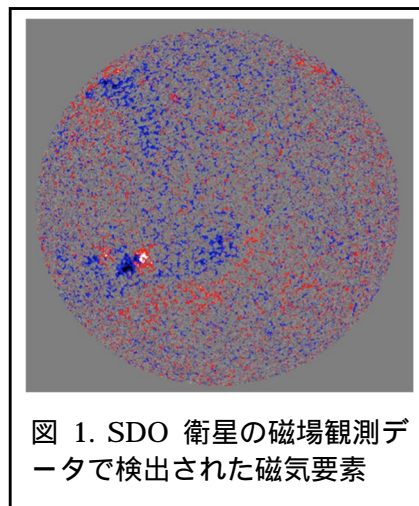


図 1. SDO 衛星の磁場観測データで検出された磁気要素

4. 研究成果

(1) 画像認識を用いた子午面環流の直接検出

1ヶ月分のSDO 衛星による磁場観測データを6分間の時間間隔(約6700枚)で用いることで、子午面還流の検出に挑戦した。各画像内において、約10,000個程度の磁気要素が検出され、データセット全体で 10^7 個以上の運動情報を得、緯度毎平均運動の南北異方性を調べた。

図2左は、その結果を示す。横軸は太陽緯度、縦軸は南北依存性つまり子午面還流の大きさ、さらにエラーバーはデータの分散から算出した1を示す。この図からは赤道を挟んで、それぞれの半球で極に向かう傾向が見えることが分かるが、そのばらつきも比較的大きいため有意であるとは言えない。Iida(2012)において、画像認識を利用した磁気要素運動においては、その分裂や合体によってみかけの運動が生じることが報告されており、その影響を取り除くことを考えた。特に、この場合は画素スケール以下の非常に微小な運動であり、数画素分のみかけの運動があるだけで影響が大きい。本研究で開発した磁気要素の追跡手法では、磁気要素の分裂や合体を含む相互作用を検出しており、そのような見かけの運動の大部分を同定することができる。

図2右は、そのようなみかけの運動を取り除いた結果である。横軸は太陽緯度、縦軸は南北依存性、エラーバーはデータの分散から算出した1を示す。これを見ると、緯度毎の運動の分散は小さくなっていることが分かる。さらに、赤道を挟んだそれぞれの極に向かう運動傾向は、エラーバーよりも十分に大きいことが分かる。

この結果は、太陽表面磁気要素の運動から直接子午面還流が検出されたことを示し、現在の太陽ダイナモで必要とされている速度の大きさを持つことを示した。

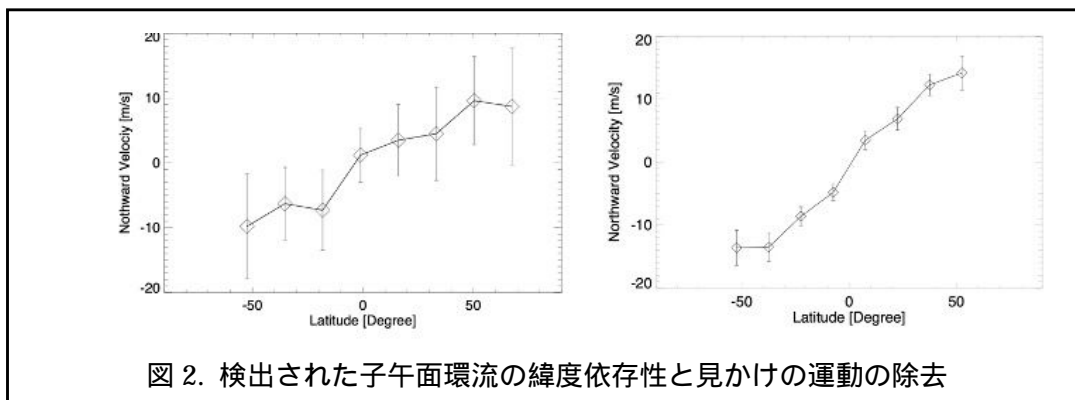


図 2. 検出された子午面環流の緯度依存性と見かけの運動の除去

(2) 子午面環流環流のパラメータ依存性

(1)にて開発した高精度の直接子午面還流検出手法を用いて、その磁気塊パラメータと緯度への依存性を調べた。

図3は、左からそれぞれ検出された子午面還流の磁束量、面積、磁場強度への依存性を示す。赤色はN極、青色はS極を示し、エラーバーは各 bin に対してばらつきから推定した1標準偏差を示す。どの物理量に対しても比較的ばらつきが多いが、磁束量と面積に対しては右上がりであること、つまり磁束量が大きく、面積が大きいものの方が大きい子午面還流を持っていることが見てとれる。一方で、磁場強度に対しては子午面還流の依存性が見えないことが分かる。これらから、磁気塊の空間サイズが大きいほど早い子午面還流は大きく、一方で磁場強度にはその大きさはあまり関係がないことが分かる。これは、空間スケールが大きい磁気要素はより太陽内部の流れ場を反映していることと解釈され、また磁気要素の磁場強度は太陽表面で起こる対流崩壊現象に起こるといふ現在の描像とコンシステントである。

ここで得た結果は子午面還流の検出結果としても重要であるが、太陽表面の磁気塊運動を見て太陽内部のガス運動に迫りうる新しい可能性を示している。

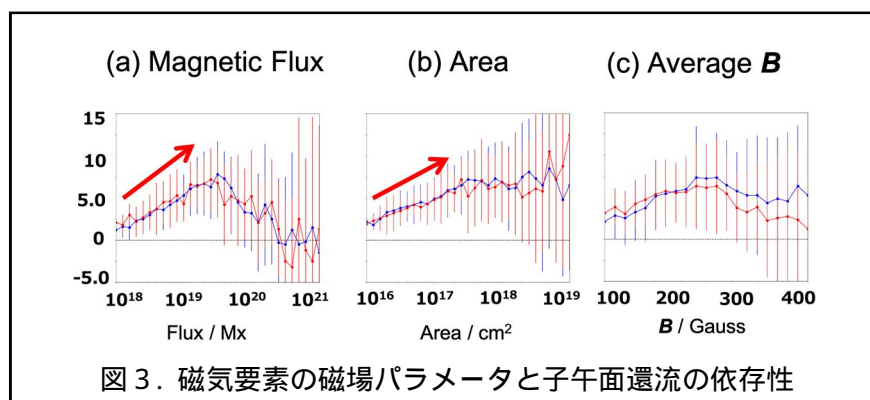


図 3. 磁気要素の磁場パラメータと子午面還流の依存性

(3) 深層学習を用いた太陽黒点成長の予測

本研究計画提案時に比べ、情報科学技術は非常に発展してきた。特に、深層学習技術の発展は目覚ましく、数多くの周辺分野に大きな影響を与えており、本研究においてもその技術を取り入れることに挑戦した。深層学習は典型的には、予測や分類といったタスクを得意としており、現在の太陽ダイナモモデルでは考慮されていない太陽黒点成長についての予測モデル作成に挑戦した。その結果、黒点の初期10時間分の総磁束量とその変化から、その最大磁束量と最大成長時間を、それぞれ48%と23時間の1誤差で予測するモデルを構築した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Y. Iida
2. 発表標題 Investigation of flow structures in the solar interior through the surface magnetic elements' tracking
3. 学会等名 Japan Geoscience Union 2019 meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯田佑輔
2. 発表標題 衛星観測ビッグデータで迫る太陽ダイナモ問題
3. 学会等名 量子コンピュータ開発の現在とこれから
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Iida
2. 発表標題 Exploration of the solar surface meridional flow and open new window for the solar interior exploration
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯田佑輔、堀田英之
2. 発表標題 太陽表面对流の磁場水平輸送における3次元性と磁場の影響評価
3. 学会等名 日本流体力学会 年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯田佑輔
2. 発表標題 太陽表面对流による磁場水平輸送の拡散性
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀川大地、飯田佑輔
2. 発表標題 太陽全球可視光画像における黒点自動検出による重心判別
3. 学会等名 日本天文学会 春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯田佑輔
2. 発表標題 太陽表面における子午面還流の磁気要素パラメータ依存性と内部探査の可能性
3. 学会等名 日本天文学会 春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大沼伊織, 飯田佑輔
2. 発表標題 深層学習を用いた黒点の成長予測モデル構築
3. 学会等名 日本天文学会 春期年会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小松耀人, 飯田佑輔
2. 発表標題 Mask-RCNNを用いた活動領域の検出
3. 学会等名 日本天文学会春期年会 2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------