

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：82645

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2020

課題番号：18H05878・19K21059

研究課題名（和文）画像回復手法で迫る太陽表面における磁気流体波駆動機構の同定

研究課題名（英文）Identification of magnetohydrodynamic waves drive mechanism on the solar surface by image reconstruction technique

研究代表者

大場 崇義（Oba, Takayoshi）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：10824443

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、太陽表面における磁気流体波を励起するメカニズムの同定を目指したものである。これまで捉えることが困難であった背景には、既存の観測機器では微細な磁束管を空間分解できなかつた点にあった。そこで、望遠鏡の結像性能を高精度に向上させる技術を開発した。本研究により、太陽表面における微細な磁場診断を可能にし、詳細な磁束管構造を捉えることに成功している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽において生じている動的現象の多くは、大気中に無数に存在している微細な磁束管が駆動していると考えられている。本研究において、これらの微細な磁束管を高空分解能・高精度で物理量診断する技術を開発した。今後、本手法を既存の観測データに適用することで、磁気流体波の励起に限らず、磁束管が駆動する様々なエネルギー解放現象について理解が進むことが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aims to reveal the mechanism that drives magnetohydrodynamic wave on the solar surface. The fact in the background of the difficulty of capturing the mechanism is that any observation instruments currently available cannot spatially resolve a magnetic flux tube. We developed a technique that improves the imaging performance of the telescope with high accuracy. Our study enables to diagnose a flux tube in a fine scale, providing a detail structure of magnetic field of the fluxtube.

研究分野：太陽物理学

キーワード：太陽 光球 磁場 偏光分光 対流

## 1. 研究開始当初の背景

太陽外層大気加熱問題とは、「太陽(恒星)の表面(光球)は数千度であるのに対し、上空大気(彩層・コロナ)はそれぞれ数万・数百万度となっている謎」のことであり、太陽物理学において未だに解明されていない。星の中心核で生成された核融合エネルギーが外層に伝搬する。そのため、通常の熱的エネルギー輸送では外層大気ほど低温になるため、何らかの非熱的エネルギー輸送過程が必要となる。

現在、その有力な解決策の1つとして、「波動加熱説:表面で生じている対流運動のエネルギーが磁場に注入され、磁気流体波によって上空まで非熱的に輸送」が提案されている。近年、太陽観測衛星「ひので」に代表される高空間分解能観測の実現により、彩層・コロナ中を磁気流体波が伝播している様子が観測されている(De Pontieu et al. 2007; Okamoto et al. 2007)。これらの磁気流体波が大気加熱に役割を果たしているかどうかを見極めることが重要視されている一方で、磁気流体波の起源が特定されていない。磁気流体波の駆動方法によって加熱機構が異なるため、「磁気流体波が、どこで・どのように生じたものであるか」を観測的に同定することが重要となる。

## 2. 研究の目的

本研究は、「磁気流体波が、太陽光球大気においてどこで・どのように生じたものであるか」を明らかにするため、「光球における対流運動が磁気流体波を駆動する機構を同定すること」を目指したものである。光球で生じる対流運動は、明るい粒状の構造である「粒状斑」と、その周りを囲う暗い間隙を形成する。間隙中において、磁束管(磁場の局所的な密集領域)が分布している。光球における磁束管は、太陽表面に対して鉛直に伸びているため、運動エネルギーを注入する役割を担うのは「対流による水平ガス運動」である。したがって、本研究課題に取り組むためには、「磁束管」と「磁束管周りの水平ガス運動」を診断する必要がある。磁束管の典型的な空間スケールは $0.''2-0.''3$ と報告されており、高精度な磁場診断ができる「ひので」の空間分解能( $0.''3$ )と同程度かそれ以上に小さいスケールである。先行研究の問題点は、この「磁束管と磁束管周りの水平ガス運動」を診断ができなかったことにある。水平ガス運動をドップラー解析するためには、視線方向と太陽表面が平行になる太陽縁の解析が必要となる。しかし、太陽縁観測においては遠近法によって光球の見た目の構造が視線方向に圧縮され、実質的な空間構造の分解能が著しく劣化してしまう。

そこで本研究では、空間分解能を制限している「望遠鏡の結像性能による画像劣化」を、独自に開発した画像回復手法で補正し、「磁束管とその周りの水平ガス運動」を初めて導出することで、本研究課題への取り組みを可能にする。

## 3. 研究の方法

太陽観測衛星「ひので」/可視光磁場望遠鏡が観測する偏光分光データに適用可能な結像性能補正技術を開発する。アルゴリズムには、天文学において広く用いられているRichardson-Lucy法をベースとする。本研究では、ノイズ増幅を抑制する正則化項を新たに加えることで、結像性能を高精度に補正する手法を提案した。

本手法の妥当性の検証には、3次元輻射磁気流体数値シミュレーションによって再現された光球大気モデルを用いた。大気モデルに基づいて輻射輸送方程式を解き、観測量として得られる偏光分光スペクトルデータを生成する。さらに、太陽観測衛星「ひので」/可視光磁場

望遠鏡の結像性能に基づいた像劣化処理を施し、ノイズを加えることで、実際の観測を再現した検証データを生成する。本データに結像性能補正技術を適用することで、復元精度・有効性を検証する。

結像性能補正技術を観測データに適用することで、太陽光球大気中の高解像な偏光分光スペクトルデータが得られる。一方、偏光分光スペクトルは、大気の物理状態(温度・速度・磁場)に応じて変形しているため、輻射輸送方程式の逆問題を解くことで観測量に適合する大気モデル(物理量)を推定することが可能である。輻射輸送方程式の逆問題解法には、ドイツ/マックス・プランク研究所において開発された SPINOR コードを採用した。

#### 4. 研究成果

数値シミュレーションによって得られた模擬円偏光データを解析したところ、円偏光信号の強度は、結像性能に基づいた像劣化によって 1/3 程度まで低下していた(図 1)。また、局所的に集中していた円偏光発光領域が、観測模擬画像においては広がった構造として捉えられている。観測を模擬した円偏光データに結像性能補正を行ったところ、ノイズ増幅が見られるものの、優位に元の強度まで改善されていることを確認できた。

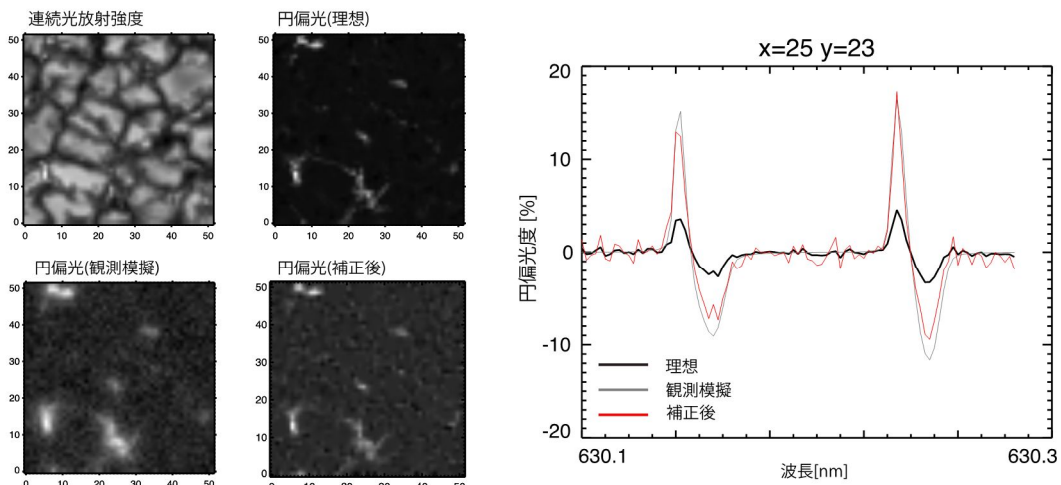


図 1. 数値シミュレーションデータを用いた結像性能補正の検証結果。

模擬観測画像を用いて実証した結像性能補正技術を、太陽観測衛星「ひので」/可視光磁場望遠鏡によって得られた実際の偏光分光データに適用した。さらに、輻射輸送方程式の逆問題解法に基づき、太陽光球大気の物理量を推定した。その結果、磁束管内で複雑な磁場強度構造を持っている構造が捉えられた(図 2)。また磁場強度の分布を解析したところ、数百ガウス程度だった磁場強度の大部分が、3-4 倍程度増幅している。磁場強度のヒストグラムを解析したところ、 $0 \cdot 1,400$ [G]の 2 つにピークが現れた。1kG を超える強磁場におけるピークの存在は、理論数値シミュレーションで再現されている磁場強度分布と類似している。強磁場構造を生成する機構である「対流崩壊」現象が、光球の至るところで活発に生じていることを示唆している。

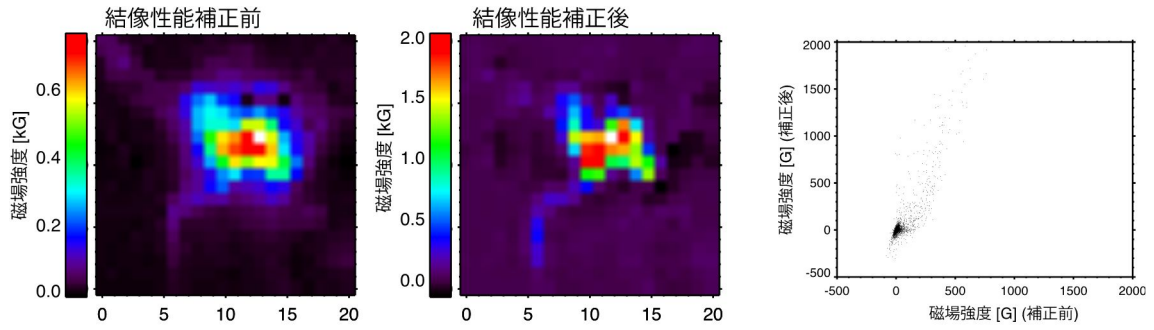


図 2. 結像性能補正処理を施す前後における偏光分光観測データに対し、輻射輸送方程式の逆問題解法によって得られた磁場強度分布.

本研究期間内においては、当初の目的であった磁気流体波駆動機構の同定には至れなかった。一方で、磁場構造を高空分解観測する技術を獲得できており、光球の磁束管構造に示唆を与える結果が得られている。今後、詳細に捉えられる「磁束管の振る舞い」に加え、「磁束管周りの水平ガス運動」のダイナミクスを解析し、当初のサイエンス成果の創出に注力する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Oba, Y. Iida, and T. Shimizu	4. 巻 890
2. 論文標題 Average Radial Structures of Gas Convection in the Solar Granulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab6a90	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takayoshi Oba
2. 発表標題 TBD（招待講演のオファーを承諾しているが、現段階で講演登録がまだ始まっておらずタイトルは未定）
3. 学会等名 Hinode-14/IRIS-11 Joint Science Meeting（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T.Oba, Y.Iida, T.Shimizu
2. 発表標題 How does the solar surface convection form the asymmetry in spectral profiles?
3. 学会等名 Hinode Science meeting 13（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大場崇義, 飯田佑輔, 清水敏文
2. 発表標題 太陽光球大気における平均対流速度場構造
3. 学会等名 プラズマ核融合学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大場崇義
2. 発表標題 将来観測機器で探る光球熱対流のサイエンス
3. 学会等名 太陽研連シンポジウム「太陽研究の将来展望」
4. 発表年 2019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		
ドイツ	マックス・プランク研究所		