

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19340049

研究課題名（和文） 2次元同時分光偏光観測による太陽彩層ダイナミック現象の研究

研究課題名（英文） Study of Dynamical Phenomena in the Solar Chromosphere using Two-Dimensional Spectro-Polarimetric Observations

研究代表者

末松 芳法 (SUEMATSU YOSHINORI)

国立天文台・太陽天体プラズマ研究部・准教授

研究者番号：50171111

研究成果の概要（和文）：

太陽彩層で起こる未解明のジェットや加熱現象を的確に捉え、正確な物理量、特に磁場・速度場の導出のため、2次元同時分光偏光観測手法を開発した。他の地上装置、太陽観測衛星「ひので」からの高分解能共同観測を行い、ジェットの大きな視線速度と2重構造、根元の単極磁場構造の渦・接近運動があることを明らかにした。観測結果は新たな磁気リコネクション機構を示唆するものであり、これに伴う彩層電流が彩層加熱に寄与する可能性を示唆している。

研究成果の概要（英文）：

We developed a two-dimensional spectro-polarimetric observation method to detect unsolved chromospheric jets and heating phenomena effectively and to derive their physical parameters, particularly the magnetic and velocity fields, as accurately as possible. Using observational data coordinated with other ground-based instruments and the solar observing satellite Hinode, we newly revealed that the jets have a large line-of-sight velocity and often twin structure and uni-polar magnetic elements at their feet show vortex and encountering motion. Our results suggest a new type of magnetic reconnection mechanism in the chromospheres and its contribution to the chromospheric heating.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2008年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
年度			
総計	12,200,000	3,660,000	15,860,000

研究分野：太陽物理学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：太陽物理学、彩層、2次元分光、偏光、磁気流体現象

1. 研究開始当初の背景
太陽表面にはさまざまなエネルギー

解放現象が見られる。これらの大部分は磁場と密接な関係があることは自明と

思われているが、具体的なエネルギー蓄積・解放機構については理論的な示唆はあるものの、観測的な証拠はまだ得られていない。特に彩層のダイナミックな現象（ジェット現象など）については、その起源が不明である。観測的には、彩層現象が高い空間分解能を要するため、詳しい運動が見極められていないこと、特にエネルギー起源として有力な波動の伝播、磁気再結合の兆候が見られないことである。近年、口径 1m 太陽望遠鏡による H α 高空間分解能観測により、活動領域彩層ジェットの起源と光球 5 分振動との関係が有力視されるようになってきている。数値計算の結果でも、光球で観測される 5 分振動を擾乱源として与えると、H α で観測される彩層の 5 分振動が再現できるというものである。彩層ジェット現象と光球 5 分振動との関係は 1990 年に既に指摘されているが、強い磁場が彩層で大きく傾いていないとエネルギーが彩層を効率よく流れないため、磁場の弱い静穏領域のジェット現象には疑問で、ジェット現象の統一的な起源としては考えられない。マクロスピキュール、サージと呼ばれる大型のジェット現象は、根元に反対極性の磁場が見られることが多く、磁気再結合過程がエネルギー源となっている可能性が示唆されているが、磁場変化とジェットの出現との関係など、詳しい関係はよくわかっていない。このように、彩層現象は詳しい構造そのものも、そのダイナミクスの起源も未解明である。

2. 研究の目的

太陽彩層は天体プラズマの中でも特異な物理状態（部分電離、衝突優勢プラズマ）を持ち、背景で述べたように非常にダイナミックな現象が起こっているという点で、磁気プラズマ現象の物理過程研究で重要なテーマである。実際、彩層加熱に必要なエネルギーはコロナの 50 倍～100 倍にもなっており、コロナ加熱問題と同様、彩層加熱も未解明の重要問題となっている。今までの研究から彩層加熱は光球磁場の強い処に局在化しており、そこでは様々なダイナミック現象が起こっている。彩層は、エネルギー・質量の供給源である光球とそれらを消費するコロナ（コロナ加熱、フレア、太陽風などとして）のインタフェース層としての役割の観点からも重要である。本研究では、彩層現象の起源解明を目指して、(1)彩層観測装置・手法を確立し、将来の大型太陽望遠鏡、スペースからの観測への適用を研究すること、(2)得ら

れた彩層データから、彩層ダイナミック現象の詳しい構造、速度場を調べ、現象の物理過程を明らかにすること、(3)エネルギー源である光球磁場構造と彩層現象の関係を明らかにすることで提案されている発生物理機構のトレードオフを行うこと、などを目的とする。

3. 研究の方法

太陽彩層現象の起源解明を目指して、彩層吸収線の高精度観測を行い、彩層の速度場と光球磁場変化の関係を導くことを考える。今までの観測研究の問題点は、フィルター或いは分光器による、準 2 次元的な分光撮像観測となっていること、また、シーイングの変化により十分な空間分解能が得られていないことである。彩層ダイナミック現象は 10 秒以下の時間で大きく変化するため、フィルターによる波長スキャン、或いは分光器による空間スキャンでは正確な現象変化を必ずしも追跡できない。この問題を克服するため、2 次元同時分光装置を開発した。但し、準 2 次元分光でも高速読み出しカメラ及びデータ点数を制限することで、データ量を増やすため、相補データとして用いた。また、シーイングによる像劣化については、地上観測では避けられない問題であるが、近年、太陽観測でもリアルタイムでの像補正が可能になっており、このような最新の像安定化装置が働いている観測所で観測を行うことで対応した。本研究では、光球の磁場・速度場の詳細観測も重要であり（特に光球・彩層での磁気再結合過程の観点から）、既存の観測装置、特に、太陽観測衛星「ひので」の可視光・磁場望遠鏡/偏光分光装置との共同観測を主体に行った。得られた光球偏光データは、ミルン・エディントン手法により磁場、速度を求め、電流分布の導出も行う。彩層データについては、線輪郭解析により速度を導出した。いずれも 2 次元データなので、位置合わせを行い、異なるデータ間の時間変化から、現象の物理機構を研究する。

4. 研究成果

(1) 2 次元同時分光偏光装置の開発

観測条件の良い太陽観測所で観測を随時実施行うため、装置は移動・再組み立てが可能であることが望ましい。このため、以前汎用性が確認されたマイクロレンズアレイを用いた 2 次元同時分光装置の発展を進めた。改良点は、①視野を広く取るため、より大きなフォーマットの CCD カメラを用いること、②狭い光球吸収線での偏光

観測が可能となるよう、レンズ開口の大きいマイクロレンズアレイを用いる、③偏光観測を行うため液晶遅延素子を2つ組み合わせ、直線偏光、円偏光観測を取得する方式を採用した。液晶の使用は偏光変調が早いと、それに伴う光線移動が生じないことである。彩層についても偏光観測は可能であるが、信号が弱く良いデータが得られないため、 $H\alpha$ 線での分光観測のみを行っている。光球偏光観測の一例を図1に示す。国内外の2つの観測所で観測を実施し、既存の望遠鏡と分光器に適合出来ることを確認した。

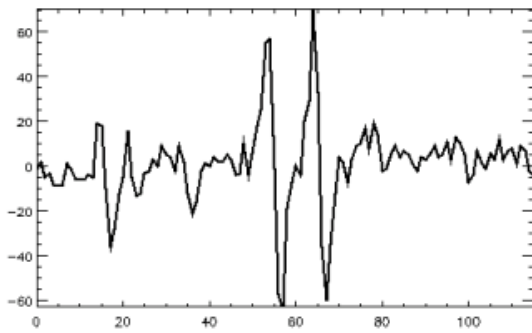
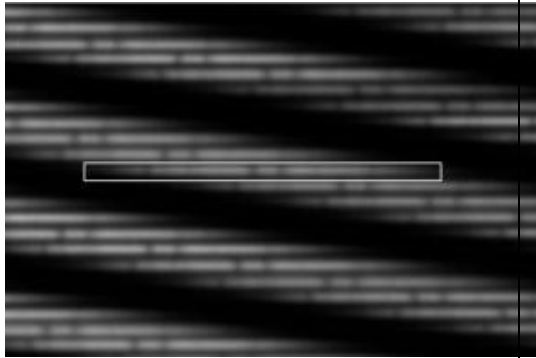


図1. マイクロレンズアレイを用いた光球吸収線 Fe I 630.15/630.25nm ペア-の2次元分光データ（一部、上図）と得られた円偏光プロファイル（下図）

(2) 彩層ダイナミック構造とその起源

高分解能観測により、静穏領域彩層で良く見られる太陽縁ジェットは2重構造を示すものが30%ほどを占めることが分かった。以前、太陽面のジェットに対して同様の結果が得られていたが、太陽縁の観測は難しく今回2次元同時分光観測により初めて明らかになったものである。このことから太陽面のジェットと太陽縁のジェットは同じ起源であることが示唆される。一方、ジェットは根元までまっすぐな構造をしており（アーチ構造は見えない）、太陽面のジェットの根元の磁場構造は単極構造であることが明らかになった。見掛け上より大きなジェット（サージ、マクロスピキュールと呼ばれる）は根元がアーチ状構造で、その起源で通常想定される浮上双曲磁場

に伴う磁気リコネクション過程は適用できないことがわかった。但し、根元の単極磁場は小さな空間構造を持ち、時間変化が激しく全体的に渦運動や接近運動を示しており、これらの運動が結果として磁力線のねじれを引き起こし、部分的な磁気リコネクションを起こし、このエネルギーがジェットの誕生、加速に寄与している可能性が大きい。ジェットの見かけの構造及び光球磁場観測から、根元の電流分布には3つのタイプがあることが予想される。また、太陽縁彩層ジェットでは横揺れが顕著で、その $H\alpha$ スペクトル線にはアルフベン速度50km/sを超える大きな視線速度が見られた。これらのことは彩層ダイナミック現象には磁力線構造を変化させる現象が伴っており、結果彩層加熱に寄与する可能性を示唆している。

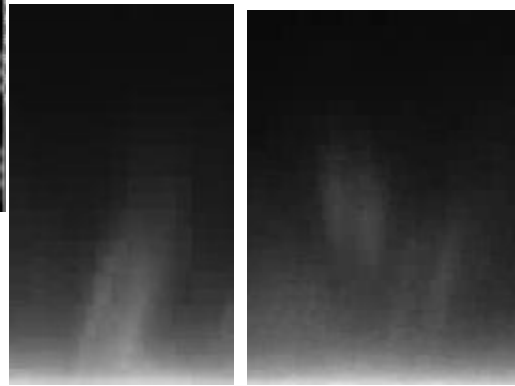


図2. $H\alpha$ 2次元同時分光により得られた太陽縁ジェットの2重構造例。

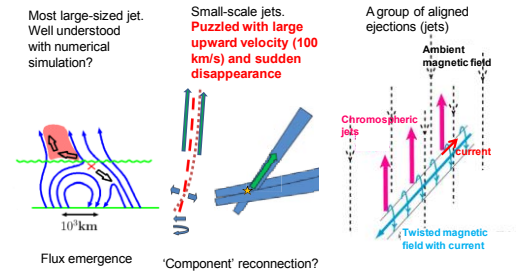


図3. 彩層ダイナミック現象を説明する提案する3つの電流分布。左は従来からある大きいジェットを説明するもの、真ん中の2つは磁場のねじれ、交差に伴うもの、右は電流ループによりグループジェットを説明する。

(3) 国内外における位置づけ、今後の展望

2次元同時分光手法は、太陽観測ではまだ一般的ではないが、本研究の結果により、国内外で普及していくものと考えられる。特に彩層観測では必須の手法であり、今後望遠鏡の口径が大きくなり、空間分解能が上がるとより小さな彩層構造が見えてくると考えられるので、時間分解能要求も必然的に厳しいものとなる。一方、2次元分光手法では分光器の大きさやCCDカメラのフォ

ーマットの大きさから、視野が狭くなるのが難点であり、今後の発展のためにはこの克服が重要である。

本研究で得られた太陽彩層ダイナミック現象の知見はまだまだ仮定の多いものに留まっている。主な原因は、空間分解能が彩層現象理解のためにはまだ足りないこと、彩層自身の磁場分布が得られていないこと、理論面ではMHD数値シミュレーションの発展も著しいが彩層現象の複雑な磁場構造変化を必ずしも再現出来ていないこと、など考えられる。それぞれの問題克服は容易ではないが、彩層研究のためには必然であり、観測面からは、分解能、彩層偏光観測を実現する地上或いはスペース大口径太陽望遠鏡の実現が必須であると考え、同時にこれらに搭載する2次元同時分光装置についても更なる開発が必要である。

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 20 件)

- ① Suematsu, Y.: 2010, "Review of Hinode results", *Astron. Nachr.* 331, 605-608. 査読有
- ② Su, J. T., Sakurai, T., Suematsu, Y., Hagino, M., Liu, Yu. 2009, "Local Twist and Current Helicity Distributions of Active Region NOAA 10930", *Ap.J.* 697, L103-L107 査読有
- ③ Shimizu, T., Katsukawa, Y., Kubo, M., Lites, B.W., Ichimoto, K., Suematsu, Y., et al.: 2009, "Hinode Observation of the Magnetic Fields in a Sunspot Light Bridge Accompanied by Long-Lasting Chromospheric Plasma Ejections", *Ap. J.* 696, L66-L69. 査読有
- ④ Ichimoto, K., Suematsu, Y., Katsukawa, et al.: 2009, "A New View of Fine Scale Dynamics and Magnetism of Sunspots Revealed by Hinode/SOT", *ASP Conf. Ser.* 405, 167-172. 査読無
- ⑤ Kim, Y.-H., Bong, S.-C., Park, Y.-D., Cho, K.-S., Moon, Y.-J., and Suematsu, Y.: 2008, "Estimation of Spicule Magnetic Field Using Observed MHD Waves by the Hinode SOT", *J. of Korean Astro. Soc.* 41, 173-180. 査読有
- ⑥ Suematsu, Y., Ichimoto, K., Katsukawa, et al.: 2008, "High Resolution Observations of Spicules with Hinode/SOT", *First Results From Hinode, ASP Conf. Ser.* 397, 27-30. 査読無
- ⑦ Jing, Ju, Wiegelmann, T., Suematsu, Y.,

Kubo, M., Wang, H.: 2008 Changes of Magnetic Structure in Three Dimensions Associated with the X3.4 Flare of 2006 December 13, *Ap.J.* 676, L81-L84. 査読有

- ⑧ Suematsu, Y., Tsuneta, S., Ichimoto, K., et al.: 2008, "The Solar Optical Telescope of Solar-B (Hinode): The Optical Telescope Assembly", *Solar Phys.* 249, 197. 査読有

[学会発表] (計 14 件)

- ① 末松芳法, 田中伸幸, 斉藤守也, 木挽俊彦: "2009年7月22日皆既日食時の太陽コロナ", 日本天文学会、広島大学、2010年3月26日
- ② 末松芳法, 勝川行雄, 一本潔, 清水敏文, 堀内俊英, 松本吉昭: "Solar-C B案 紫外可視光近赤外望遠鏡の光学設計・熱設計検討", 宇宙科学シンポジウム、JAXA 宇宙科学研究本部、2010年1月8日
- ③ Suematsu, Y.: "On the Evaluation of Image Quality of Hinode Solar Optical Telescope", American Geophysical Union, Moscone Convention Center, San Francisco, USA, 2009年12月18日
- ④ Suematsu, Y.: "On Magnetic Origin and Evolution of Small-Scale Jets in the Solar Chromosphere", 3rd Hinode Science Meeting, 一橋記念会館, 東京, 2009年12月2日
- ⑤ Suematsu, Y.: "Small-Scale Jets in the Solar Chromosphere: Their Dynamics and Evolution", NSO Workshop#25, 米国立サクラメントピーク天文台, Sunspot/NM, USA, 2009年9月4日
- ⑥ Suematsu, Y.: "Nature of Small-Scale Jets On the Solar Chromosphere Revealed with Hinode", American Geophysical Union, Moscone Convention Center, San Francisco, USA, 2008年12月18日
- ⑦ 末松芳法, 勝川行雄, 常田佐久, 他: "太陽彩層スピキュールの運動と起源について", 日本天文学会、岡山理科大学、2008年9月13日
- ⑧ 清水敏文, 勝川行雄, 一本潔, 末松芳法, 他: "黒点ライトブリッジ内磁場構造とループ状マイクロフレアの発生", 日本天文学会、岡山理科大学、2008年9月13日
- ⑨ 一本潔, 常田佐久, 末松芳法: "ネット円偏光の黒点内空間分布", 日本天文学会、国立オリンピック記念青少年総合センター、2008年3月25日

〔図書〕(計1件)

末松芳法 (天文ガイド編) : 2009 年、“天体観測の教科書「太陽観測」、第 7 章 太陽観測の変遷”、誠文堂新光社、頁 118-135

〔その他〕

ホームページ等

<http://solarwww.mtk.nao.ac.jp/suematsu/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

末松 芳法 (SUEMATSU YOSHINORI)
国立天文台・太陽天体プラズマ研究部
准教授
研究者番号 : 50171111

(2) 研究分担者

一本 潔 (ICHMOTO KIYOSHI)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号 : 70193456
(H20→H21 連携研究者)
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
(H20→H21 連携研究者)

(3) 連携研究者

該当なし