

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22244013

研究課題名(和文) 偏光分光スペクトルによる新しいプラズマ診断手法を用いた太陽活動現象の研究

研究課題名(英文) Research of solar active phenomena by mean of a new plasma diagnosis with spectro-polarimetry

研究代表者

一本 潔 (Ichimoto, Kiyoshi)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70193456

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,100,000円、(間接経費) 10,530,000円

研究成果の概要(和文)：活動する太陽プラズマの磁場や電場を計測することを目的に、京都大学飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡に、スペクトル線の偏光を高い精度で測定する装置を開発した。太陽の縁で発生した突発的質量放出(ジェット)について、中性水素が赤外域に発する一連の線スペクトル(パッシェン系列)の観測をおこない、ジェットが磁場にほぼ沿って運動し、中性水素といえども磁場にほぼ凍結して運動をしていることを世界で始めて観測的に示した。

研究成果の概要(英文)：A new spectro-polarimeter was developed on the Domeless Solar Telescope at Hida observatory of Kyoto University aiming for realise new diagnosis of physical quantities such as magnetic field and electric fields of dynamic solar plasma. Chromospheric mass ejection phenomena (jets) occurred on the solar limb were observed in spectral lines of Paschen series of neutral hydrogen and it was demonstrated that the magnetic field is aligned with the jets and neutral hydrogen is highly frozen to the magnetic field for the first time.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：太陽物理学 太陽活動 磁場 宇宙プラズマ 偏光 分光

1. 研究開始当初の背景

太陽観測衛星「ひので」は、解像度や偏光精度において嘗てない良質なデータを提供し、太陽プラズマ研究に画期的な進展をもたらした。太陽表面(光球)では、至る所に微細な磁束管が生まれては消え、それらはガスの対流運動によって揺すられ輸送されていく。また磁場の集中した黒点ではプラズマが磁場と複雑に絡み合いながら対流し、激しいガスの流れを生んでいる。これに応答して上空の彩層・コロナでは波動やジェット現象が至る所で励起され、磁気リコネクションが普遍的に存在すると考えられる。大規模な光球ガスの流動は、コロナを貫く磁場の歪みとなってエネルギーを蓄積し、やがて高エネルギー粒子の加速を伴う激しい爆発となって惑星空間に解放される。(まだみえない)非熱的粒子は太陽面に突入して彩層を加熱し、一連のフレア現象をひきおこす。また、コロナに浮かぶ低温ガス・プロミネンス・は、ガス塊の集合体として大規模な対流を伴い、突如崩壊する等、神秘的な姿を現した。

光球の磁場はゼーマン効果による精密な測定が可能になったことにより、そこで生起する電磁流体現象の定量的な研究が大きく進みつつある。これに対して彩層やプロミネンス、コロナは、ゼーマン効果による偏光シグナルが格段に小さく、磁場の直接測定が困難である。コロナや彩層の活動を駆動する磁場の構造、太陽大気を伝播する波動のモード、非熱的粒子の加速機構、等、太陽プラズマの重要課題に挑むためには、観測による彩層やコロナのより多面的なプラズマ診断、すなわち、磁場・電場の測定、加速粒子の直接検出が必要不可欠である。

スペクトルの偏光は、ゼーマン効果に留まらない太陽プラズマの診断ツールとしての大きな可能性を秘めている。例えば観測精度を高めていくと、あらゆるスペクトルはリム付近で偏光しており、各吸収線が強度スペクトルとは全く異なる個性を示すことから「太陽の第2スペクトル」とよばれている。光の散乱偏光に弱い磁場が作用したものとして注目されている¹⁾。プラズマが光を放出する際に生じる偏光については、理論・実験の両面から理解が深まっている²⁾。すなわち磁場(ゼーマン効果、ハンレ効果)、電場(シュタルク効果)、輻射場の非等方性(散乱偏光)、非熱的粒子(衝突偏光)によってつくられる線スペクトルの偏光が量子論的に記述され、それを考慮した太陽スペクトルの形成を計算するコードが開発されつつある³⁾。ハンレ効果は実際近年太陽観測に応用され、彩層の磁場導出に成果をあげ始めた^{1,4)}。ただしこういったマイクロ過程を太陽観測に応用した研究例はまだ非常に少なく、今後の開拓が急務となっている。

太陽スペクトルの高精度な偏光測定を妨げているのは、地球大気のゆらぎによる像の劣化や変動である。観測テクニックに関する

現状としては、これを抑制する技術 補償光学 が実用可能となってきたことが特筆できる。これを既存の観測設備に組み込むことで、これまで為し得なかった高精度の偏光分光測定を実現することが可能となる。

以上の現状を総合すると、偏光を用いた新しい診断手法による太陽プラズマの研究は、学術的要求と技術的な実現性の両面に於いて、今まさに着手すべく機が熟した状況にあるといえる。

2. 研究の目的

偏光した太陽スペクトルには、観測対象における何らかの非等方性(ベクトル物理量)の情報が忍んでいるはずであるが、偏光の起源についてまだすべてが理解されているわけではない。その意味で本研究は未知の領域に踏み込もうとする側面もある。本研究の1つの目的は、偏光情報を用いたプラズマ診断学の開拓そのものである。そのために様々な太陽現象について広い波長における偏光プロフィールを取得し、偏光メカニズムの同定、物理量の診断に適したスペクトル線(の組合わせ)の洗い出しをおこなう。

これとは並行して比較的理解が進んでいる偏光から現象の物理量を導出することもおこなう。とくに以下は本研究で解明に挑む最も重要なターゲットである。

- 1) ゼーマン効果とハンレ効果によるプロミネンス(ダークフィラメント)の磁場構造の解明、
- 2) シュタルク効果による $v \times B$ 電場の検出と中性水素の磁場横断の定量評価、
- 3) 彩層フレアの直線偏光(衝突偏光)による非熱的粒子の検出、
- 4) 活動領域の光球と彩層磁場の同時観測による磁場の三次元構造、コロナ磁場の導出。

本研究ではこうして得られた物理量を電磁流体数値シミュレーションとも比較して、現象のメカニズムの検証をおこなう。

3. 研究の方法

本研究がめざす新しい手法の太陽プラズマ診断には、観測中の安定した画像と広い波長域において 10^{-4} を超える高い精度の偏光スペクトル情報が必要である。これを実現するため、京都大学飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡に、地球大気の揺らぎによる像の劣化や変動を実時間で補正する「補償光学装置」、および「広帯域偏光解析装置」を整備する。このシステムにより太陽活動現象(プロミネンス、フレア、ダークフィラメント、活動領域彩層、等)の偏光分光観測をおこない、特徴ある偏光スペクトル輪郭を原子偏光モデルと比較し、偏光発生メカニズムの同定、および対応した物理量(磁場、電場、非熱的粒子速度場)の導出をおこなう。得られた結果は活動現象の数値シミュレーションと比較し、モデルの検証をおこなう。さらに今後のプラズマ偏光診断の発展に向け、各診断にと

って最適なスペクトル線(の組)や測定パラメータを明確にする。

4. 研究成果

飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡(DST)に、広い波長域で高い効率の偏光変調を生み出すことのできる偏光解析装置と、大容量の画像を高速に取得できるCCDカメラ及び赤外カメラを導入することにより、波長域400 nm - 1100 nmの任意のスペクトル線で、空間サンプリング0.4秒角、積算時間30 - 60秒で偏光精度 10^{-3} を達成する偏光分光観測システムを完成した。また、太陽からの偏光を正しく導出するために、DSTの入射窓に偏光板自動回転装置をとりつけ、人為的な偏光をDSTに入射させて焦点面における偏光状態を測定することで、全観測波長域におけるDSTの偏光校正モデルを構築した。(論文1)



図1. ドームレス太陽望遠鏡の開口に取り付けられた機械偏光特性計測用の偏光板自動回転装置

電気伝導率の高い太陽プラズマにおいて電場の強度は極めて小さく、偏光信号も小さいと推定されるため、これまで電場はほとんど測定されてこなかった。しかし、電離度の低い彩層の中性粒子が磁場を横切る際に中性粒子が感じる電場は測定できると見積もられる(Gilbert et al. 2002)。そこでこれまで測定されていない活動領域上空のジェット磁場を測定すると共に、その電場を検出することを目的に、2012年5月5日DSTで開発した偏光分光観測システムを用いて、シュタルク効果に感度の高い中性水素パッシェン系列のスペクトル線を用いて活動領域ジェットの偏光分光観測を行った。電場測定の過去の研究では中性水素の主量子数が大きなエネルギー準位における原子偏向は無視されていたが、観測で得られた線スペクトルの偏光よりこの仮定が成立しないことが明らかとなった。そこでCasiniらが開発した原子偏向及び磁場と電場の効果を考慮した偏光プロファイル計算コードを用いて、活動領域ジェットの磁場と電場の導出をおこなった。その結果はジェットが磁場に沿っていること、さらに電場の上限値から中性水素

が磁場を横切る速度の上限値を求めることで、中性水素は磁場に凍結していることをはじめて観測的に示した。(論文2)

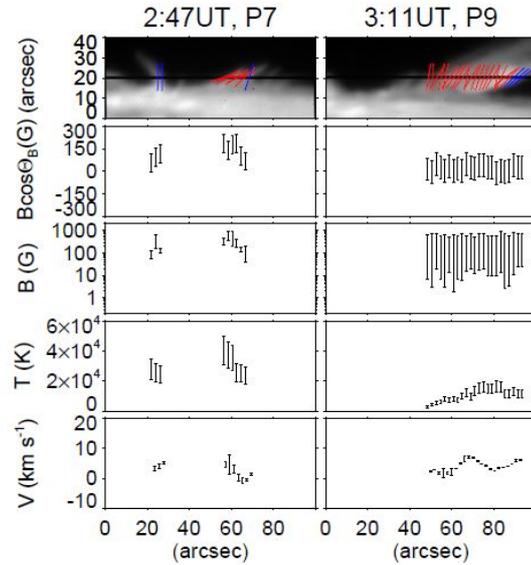


図2. 水素のパッシェン系列ラインの偏光分光観測より得られたジェット(左)とサージ(右)の視線方向磁場、磁場、温度、視線速度

尚、本研究で開発をおこなってきたDST補償光学装置は光学系の設置が完了し、現在制御システムの調整を進めている。今後より高精度をめざした偏光分光観測に資するものである。(論文3)

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3件)

1) "Developments of the wideband spectro-polarimeter of the Domeless Solar Telescope at Hida Observatory", T. Anan, K. Ichimoto, A. Oi, G. Kimura, Y. Nakatani, S. Ueno, 2012, SPIE, 8446, 84461C

2) "Solar adaptive optics at the Hida Observatory: latest achievements of current system and design of new system", N. Miura, J. Miyazaki, S. Kuwamura, N. Baba, Y. Hanaoka, M. Yamaguchi, S. Ueno, Y. Nakatani, S. Nagata, R. Kitai, K. Ichimoto, H. Takami, 2012, SPIE, 8447E..4DM

3) "Diagnosis of Magnetic and Electric Fields of Chromospheric Jets through Spectro-polarimetric Observations of H I Paschen Lines", T. Anan, R. Casini, K. Ichimoto, 2014, ApJ, in press

[学会発表](計15件)

"Developments of the Multi-Wavelength

Polarimeter of the Domeless Solar Telescope at the Hida Observatory”, T. Anan, K. Ichimoto, S. Ueno, G. Kimura, Y. Nakatani, N. Kaneda, M. Hagino, and I. Suzuki, 6th Solar Polarization Workshop, 2011

“Magnetic and electric field diagnostics of chromospheric jets by spectropolarimetric observations of the H I Paschen lines, T. Anan, R. Casini, K. Ichimoto, 7th Solar Polarization Workshop, 2013

“Magnetic and electric field inference in a surge using spectro-polarimetric observations in H I Paschen lines”, T. Anan, R. Casini, K. Ichimoto, The 7th HINODE Science Meeting, 2013

“Analysis of Sunspot oscillations observed with DST/Hida”, A. Ohkawa, T. Anan, K. Ichimoto, S. Ueno, A. Oi, S. Nozawa, S. Sawada, The 7th HINODE Science Meeting, 2013

“Magnetic field of active region filaments observed with DST/Hida”, S. Sawada, T. Anan, K. Ichimoto, S. Ueno, A. Oi, S. Nozawa, A. Ohkawa, The 7th HINODE Science Meeting, 2013

“Attempts for high spatial resolution at Hida observatory and future coordination with Hinode”, K. Ichimoto, Y. Natakani, T. Kawate, S. Ueno, M. Yamaguchi, M. Hagino, G. Kimura, S. Nagata, N. Miura, The 7th HINODE Science Meeting, 2013

“飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡における広波長域偏光観測システムの開発”, 阿南徹、一本 潔、木村剛一、仲谷善一、上野 悟、柴田一成, 日本天文学会、2010 年度秋期年会

“京都大学飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡用赤外偏光フィルター自動回転装置の製作”, 仲谷善一、木村剛一、一本 潔、阿南徹、上野 悟、金田直樹、柴田一成, 日本天文学会、2010 年度秋期年会

“飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡における広波長域偏光観測システムの開発 3”, 発表者: 阿南徹、一本 潔、木村剛一、仲谷善一、上野 悟, 日本天文学会、2011 年度春期年会

“暗部フラッシュに伴う He 10830 スペクトル線形成層の変動”, 阿南徹、一本 潔、野澤恵、大井瑛仁、大川明宏、清水由季乃、尾岸真彩美、丸山ひかり、高棹真介、上野 悟, 日本天文学会、2011 年度春期年会

“飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡における広波長域高精度偏光観測システムの開発と観測”, 阿南徹、一本 潔、大井瑛仁、木村 剛一、仲谷 善一、上野 悟、日本天文学会、2012 年度秋期年会

“H I パッシェン系列のスペクトル線を用いた活動領域ジェットの偏光観測”, 阿南徹、一本 潔、Robert Casini, 日本天文学会、2013 年度春期年会

“飛騨天文台 DST 観測によるプロミネンスの磁場診断”, 澤田真平、阿南徹、大井瑛仁、一本 潔、上野 悟、野澤恵、大川明宏, 日本天文学会、2013 年度春期年会

“H I パッシェン系列のスペクトル線変更観測を用いた活動領域ジェットの磁場・電場診断”, 阿南徹、Robert Casini (HAO)、一本 潔, 日本天文学会、2014 年度春期年会

“飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡における彩層偏光分光観測”, 大井瑛仁、一本 潔、阿南徹、上野 悟, 日本天文学会、2014 年度春期年会

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等
http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/~ichimoto/projects/plasma_pol.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

一本 潔 (京都大学理附属天文台)
研究者番号: 70193456

(2) 研究分担者

北井礼三郎 (佛教大学)
研究者番号: 40169850
柴田一成 (京都大学理附属天文台)
研究者番号: 70144178
上野 悟 (京都大学理附属天文台)
研究者番号: 70303807

(3) 連携研究者

三浦則明 (北見工業大学)
研究者番号: 30209720
花岡庸一郎 (国立天文台)
研究者番号: 10238040
岩前敦 (東京大学理学系研究科)
研究者番号: 90322156