

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24340040

研究課題名(和文)高精度偏光観測で初めてえられる、量子論的ハンレ効果を用いた太陽彩層磁場構造の研究

研究課題名(英文) Magnetic fields in the solar chromosphere revealed with the high-precision polarimetry via the Hanle effect

研究代表者

鹿野 良平 (Kano, Ryouhei)

国立天文台・SOLAR-C準備室・准教授

研究者番号：70321586

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,600,000円

研究成果の概要(和文)：日米欧観測ロケット実験CLASP(Chromospheric Lyman-Alpha SpectroPolarimeter)の真空紫外用偏光分光装置を開発し、望遠鏡と共にCLASP観測装置として、平成27年9月3日NASA観測ロケットにて打上げ、世界初の太陽ライマン線の偏光分光観測を成功させた。地上偏光較正試験と軌上偏光較正観測にて、目標の偏光精度0.1%の達成を確認した。

観測されたライマン線偏光は、理論モデルと概ね一致するが、太陽リム近傍ほど直線偏光が強い傾向が、ライマン線中心で見られない点は、モデル予想を超え、太陽大気構造が複雑さを示す。また、ハンレ効果を示唆する結果も得られた。

研究成果の概要(英文)：The high-precision UV spectropolarimeter for the sounding rocket experiment, Chromospheric Lyman-Alpha SpectroPolarimeter (CLASP), was developed. Then, CLASP was launched by the NASA sounding rocket on September 3, 2015, and succeeded to observe the solar Lyman-alpha polarization for the first time. The ground-based and on-flight polarization calibrations clearly show that the instrument achieved the required polarization precision, 0.1%.

CLASP discovered that the hydrogen Lyman-alpha line is indeed linearly polarized and its polarization has many properties predicted by the theoretical models. However, the polarization in the Lyman-alpha line-center does not show a clear center-to-limb variation, in marked contrast with the theoretical model calculations. This suggests that the plasma structures of the upper chromosphere and transition region are more complex than we expected. CLASP also discovered some indications for the operation of the Hanle effect in the solar transition region.

研究分野：太陽物理学

キーワード：太陽 国際協力 ロケット プラズマ・核融合 ハンレ効果

1. 研究開始当初の背景

2006年に打上げられた太陽観測衛星「ひので」は、かつてない高解像度にて光球面磁場観測と彩層撮像観測を行い、従来の太陽物理学の認識を覆す新たな知見をもたらした。なかでも大きな発見は、太陽の彩層で、ジェットや磁気流体波動などの動的現象が普遍的に発生していることである。彩層の動的現象は、さらに上空のコロナを加熱するエネルギー源になっている可能性もある。ただ、彩層の磁場構造が判っていないために、磁場に蓄積されたエネルギーが如何に解放されて活動現象を引き起しているのか、さらにそれが彩層(および上層のコロナ)の加熱にどれだけ寄与しているか、全く判っていない。そこで、光球はもちろんのこと彩層からコロナでの磁場を直接観測することが、今後の太陽物理の進展に極めて重要である。

これまで、彩層磁場は、活動領域周辺ではいくつかの先駆的な観測があるが、静穏領域の彩層やさらに上空の遷移層の磁場は、ほとんど計測されてこなかった。これは、彩層～コロナでは、光球よりも磁場が弱いのでゼーマン効果で生じる偏光信号がもともと小さいことに加え、激しい熱的・非熱的運動によるドップラーシフトが小さな偏光信号をさらに掻き消してしまうからである。一方、ハンレ効果による偏光はその特質上ドップラーシフトで掻き消され難いため、彩層～コロナの磁場測定のための重要な手段である。

彩層(および遷移層)を構成する1万～10万度のプラズマが放射する輝線は真空紫外線領域に多数存在するが、(1)ハンレ効果というなじみのない量子論的解析手法が必須であること、(2)真空紫外線は大気によって吸収されるので、宇宙からの観測が不可欠であること、(3)紫外線領域での偏光観測が技術的に難しい、という3つの理由でこれまで彩層磁場計測が行われてこなかった。しかし近年、太陽のスペクトル線形成モデルの量子論的取扱いが急速に進展しており、観測ロケットによりこれを実証する段階に入った。ライマンα線は、彩層～遷移層で生じる最も明るい真空紫外線領域の輝線であることと、ハンレ効果による磁場感度が適度で、静穏領域の彩層磁場(～数ガウス)から活動領域の彩層磁場(>100ガウス)まで汎用に適用できることから、最初の彩層～遷移層の磁場計測には最適の輝線である。

2. 研究の目的

太陽観測衛星「ひので」が彩層で発見したジェットや磁気流体波動などの動的現象を理解し、彩層・コロナの加熱を解明するには、これまでほとんど観測のない彩層～遷移層での磁場測定が必須である。彩層～遷移層から来るライマンα輝線(1215.67nm)では、散乱により生じるわずかな直線偏光が、量子論的ハンレ効果による磁場の変調を受けていると予想されており、偏光の精密(0.1%)測定で

彩層～遷移層の磁場情報を得ることができると。そのためわれわれは、平成27年夏の飛翔観測を目指して、NASA科学観測ロケットによる日米欧共同観測ロケット実験“CLASP(Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter)”を実施する。特に本研究では、(1)CLASP観測装置の心臓部である真空紫外偏光分光装置の開発と、(2)偏光線輪郭からハンレ効果を用いて磁場を求める手法の確立を主目的とする。真空紫外線での精密偏光観測とハンレ効果を利用した天体の磁場測定は本研究が世界初である。

3. 研究の方法

本研究ではCLASP観測装置の要である「世界初の高精度(0.1%)真空紫外線偏光分光装置」の開発をまずはじめの3年で行う。並行して、ハンレ効果を用いた新たな磁場測定手法を確立するため、3次元磁気流体シミュレーションで計算された彩層～遷移層にある微細構造の影響も含めた、より現実的な太陽大気モデルを用いて、彩層～遷移層磁場に対する偏光線輪郭形成モデルを完成させる。そして、この偏光線輪郭モデルとCLASPの飛翔観測で得た偏光分光データとを照らしあわせ、彩層～遷移層の磁場構造を調べる。

4. 研究成果

CLASP観測装置の偏光分光観測装置の開発では、平成27年2～3月に国立天文台にて偏光較正試験を実施し、0.1%より充分高い精度で観測装置の偏光特性を取得することができた(雑誌論文)。その後、日本国内と米国NASAマーシャル宇宙飛行センター(MSFC)にて、CLASP観測装置全体としての耐機械環境試験や観測機能確認試験を続け、米国ホワイトサンズ実験場にてNASA観測ロケットに観測装置を搭載した。平成27年9月3日に実施した観測ロケット実験では、極めて安定したロケット飛翔と、完璧に動作運

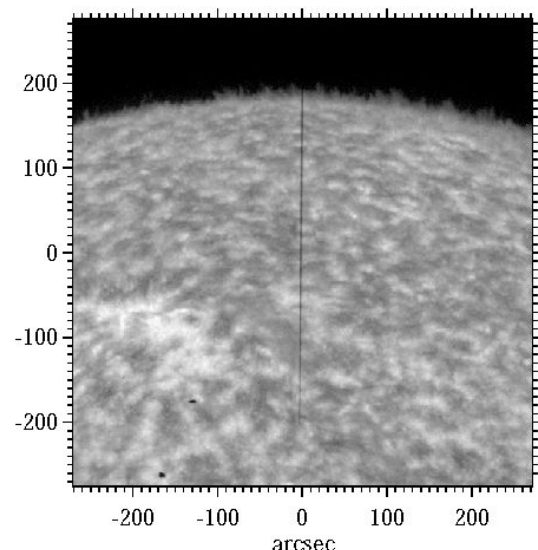


図1: CLASPによるライマンα線画像。画面中央の黒い筋が偏光分光装置のスリット。

用された CLASP 観測装置により、約 5 分間のライマン 線太陽観測を成功裡に行った。

観測では、まず太陽中心で軌上偏光校正データを取得し、上述の地上偏光校正試験と合わせることで、高精度偏光観測のための校正を完了させ、目標とした 0.1% の精度が得られることを検証した(雑誌論文)。また、観測後半には、太陽リム近傍の静穏領域にて科学研究用データ(図 1)を取得し、世界で初めて太陽から来るライマン α 線の偏光スペクトルを得た(図 2)。得られた偏光プロファイルは、原子偏光モデル計算と概ね一致し、真空紫外線での原子偏光を世界で初めて示した。一方で、(1)太陽の縁に近づくほど直線偏光が強いという散乱偏光の基本的性質が、ハンレ効果が効くライマン 線中心では見られない点や、(2)直線偏光が 10 秒角程度で変動する複雑な局所的空間構造を持つ点で、既存の偏光線輪郭形成モデルの予想を超える様相も示しており、太陽の彩層・遷移層が想像していた以上に複雑な構造をしていることを明らかにした(雑誌論文)。また、ライマン α 線の偏光のみならず、その近傍に CLASP で同時観測された Si III 輝線の偏光と組み合わせることで、一部の太陽構造ではあるが、実際にハンレ効果の影響を特定することができた(雑誌論文)。

CLASP が目指した高精度紫外線偏光分光観測とそれによる彩層・遷移層磁場の研究は、太陽物理分野での国際的な関心も高く、実験実施以前より複数の国際研究会で招待講演(学会発表 ~)を依頼されてきたが、実験実施後には、極めて質の高い観測データと予想を超えたライマン 線偏光の振舞もあり、国際会議"9th Hinode Science Meeting"での招待講演等、引き続き注目されている(学会発表 ~)。

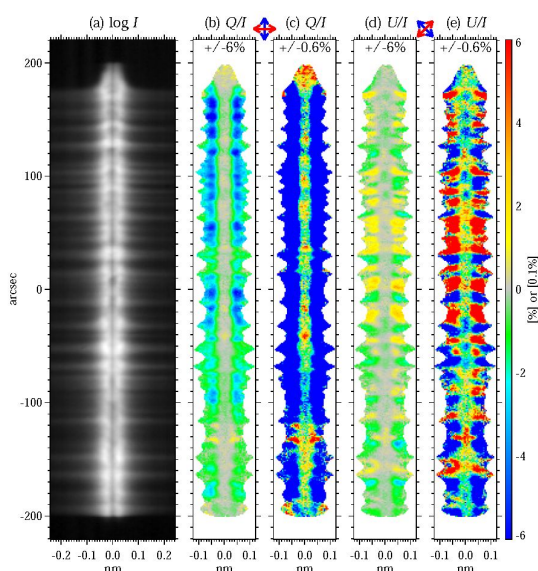


図 2: CLASP によるライマン α 線の偏光分光データ。(a)輝度分布、(b)-(e)直線偏光 Q/I 成分と U/I 成分。縦軸でスリットに沿った空間分布を、横軸で波長分布を示す。

5 . 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 15 件)

Ishikawa, R., Trujillo Bueno, J., Uitenbroek, H., 他 26 名 (Kano, R. 7 番目), "Indication of the Hanle Effect by Comparing the Scattering Polarization Observed by CLASP in the Lyman- α and Si III 120.65 nm Lines", ApJ, 841 巻, id.31, 2017, 査読有.

DOI: 10.3847/1538-4357/aa6ca9

Kano, R., Trujillo Bueno, J., Winebarger, A., Auchère, F., Narukage, N., 他 23 名, "Discovery of Scattering Polarization in the Hydrogen Ly α Line of the Solar Disk Radiation", ApJL, 839 巻, id.L10, 2017, 査読有.

DOI: 10.3847/2041-8213/aa697f

Narukage, N., Kubo, M., Ishikawa, R., Ishikawa, S., 他 12 名 (Kano, R. 8 番目), "High-reflectivity coatings for vacuum ultraviolet spectropolarimeter", Solar Physics, 292 巻, id.40, 2017, 査読有.

DOI: 10.1007/s11207-017-1061-z

Giono, G., Ishikawa, R., Narukage, N., Kano, R., Katsukawa, Y., Kubo, M., 他 23 名, "Polarization calibration of the Chromospheric Lyman-Alpha Spectropolarimeter for a 0.1% polarization sensitivity in the VUV range. Part II : In-flight calibration", Solar Physics, 292 巻, id.57, 2017, 査読有.

DOI: 10.1007/s11207-017-1062-y

Kubo, M., Katsukawa, Y., Suematsu, Y., Kano, R., Bando, T., Narukage, N., 他 22 名, "Discovery of Ubiquitous Fast-Propagating Intensity Disturbances by the Chromospheric Lyman Alpha Spectropolarimeter (CLASP)", ApJ, 832 巻, id.141, 2016, 査読有.

DOI: 10.3847/0004-637X/832/2/141

Giono, G., Ishikawa, R., Narukage, N., Kano, R., Katsukawa, Y., Kubo, M., 他 8 名, "Polarization Calibration of the Chromospheric Lyman-Alpha Spectropolarimeter for a 0.1% Polarization Sensitivity in the VUV Range. Part I: Pre-flight Calibration", Solar Physics, 291 巻, pp.3831-3867, 2016, 査読有.

DOI: 10.1007/s11207-016-0950-x

(学会発表)(計 7 1 件)

Kubo, M., et al., "Results & Future of CLASP Project - From CLASP1 to CLASP2 -", SOLARNET IV Meeting, 2017.1.20, Lanzarote (Spain), 招待.

Kano, R., et al., "Lyman-alpha scattering polarization observed with the Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter", 8th Solar

Polarization Workshop, 2016.9.15, Firenze (Italy).

Ishikawa, R., et al., "Comparison of the Scattering Polarization Observed by CLASP; Possible indication of the Hanle Effect", 8th Solar Polarization Workshop, 2016.9.15, Firenze (Italy).

Ishikawa, R., et al., "The chromosphere and transition region as seen with CLASP", IRIS-6: The Chromosphere, 2016.6.21, Stockholm (Sweden), 招待.

Ishikawa, R., et al., "Initial Results of Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter (CLASP)", ALMA-IRIS-DKIST Workshop, 2016.3.17, Boulder (USA), 招待.

Ishikawa, R., et al., "Initial Results of Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter (CLASP)", Asia-Pacific Solar Physics Meeting (APSPM) 2015, 2015.11.4, Seoul (South Korea), 招待.

Kano, R., et al., "Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter (CLASP)", 9th Hinode Science Meeting, 2015.9.17, Belfast (Northern Ireland), 招待.

Ishikawa, R., et al., "CLASP: a UV spectropolarimeter on a sounding rocket for probing the chromosphere-corona transition region", IAU General Assembly 29, 2015.8.10, Honolulu (USA), 招待.

Kano, R., et al., "Chromospheric Lyman-alpha spectro-polarimeter (CLASP)", 40th COSPAR Scientific Assembly, 2014.8.3, Moscow (Russia), 招待.

Narukage, N., et al., "UV spectropolarimeter design for precise polarization measurement and its application to the CLASP for exploration of magnetic fields in solar atmosphere", 40th COSPAR Scientific Assembly, 2014.8.9, Moscow (Russia), 招待.

Ishikawa, S., "The Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter (CLASP)", 13th RHESSI Workshop, 2014.4.2, Windisch (Switzerland), 招待.

〔その他〕

Web リリース

“ひらかれた太陽物理の新しい扉 ～真空紫外線による偏光分光観測～”, 2017.5.18

<http://hinode.nao.ac.jp/news/results/post-42/>

“太陽のあちらこちらに現れる謎の超

音速現象の発見 –太陽観測ロケット実験 CLASP による 5 分間の観測成果–”, 2016.11.21

<http://hinode.nao.ac.jp/news/results/clasp5/>

受賞歴

平成 28 年度国立天文台長賞 (研究教育部門), CLASP プロジェクトチーム, 2017.3.7

<http://hinode.nao.ac.jp/news/notice/clasp-1/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鹿野 良平 (KANO, Ryouhei)

国立天文台・SOLAR-C 準備室・准教授

研究者番号: 70321586

(2) 研究分担者

久保 雅仁 (KUBO, Masahito)

国立天文台・ひので科学プロジェクト・助教

研究者番号: 80425777

(平成 24-25 年度のみ。平成 26 年度からは連携研究者)

勝川 行雄 (KATSUKAWA, Yukio)

国立天文台・ひので科学プロジェクト・助教

研究者番号: 00399289

(平成 24-25 年度のみ。平成 26 年度からは連携研究者)

(3) 連携研究者

成影 典之 (NARUKAGE, Noriyuki)

国立天文台・SOLAR-C 準備室・助教

研究者番号: 50435806

後藤 基志 (GOTO, Motoshi)

核融合科学研究所・リ加研究部・准教授

研究者番号: 00290916

石川 遼子 (ISHIKAWA, Ryohko)

国立天文台・ひので科学プロジェクト・助教

研究者番号: 00709636

(平成 27 年度から。平成 24-26 年度は研究協力者)

(4) 研究協力者

坂東 貴政 (BANDO, Takamasa)

末松 芳法 (SUEMATSU, Yoshinori)

原 弘久 (HARA, Hirohisa)

一本 潔 (ICHIMOTO, Kiyoshi)

常田 佐久 (TSUNETTA, Saku)

小林 研 (KOBAYASHI, Ken)

J. Trujillo Bueno

M. Carlsson