

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14771

研究課題名(和文) 紫外線散乱偏光スペクトルによる太陽磁場の精密測定

研究課題名(英文) Precise measurement of solar magnetic fields with UV scattering polarization

研究代表者

石川 遼子 (Ishikawa, Ryohko)

国立天文台・太陽観測科学プロジェクト・准教授

研究者番号：00709636

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：なぜ6千度の光球の上空に100万度のコロナが存在するのか？光球とコロナの間には、彩層と呼ばれる大気層が存在し、そこで起こる磁気流体現象が鍵を握ると考えられている。紫外線の偏光スペクトルは、地上観測では得られない彩層上部・遷移層の磁場が測定できると期待されており、その有用性の検証を目指して開発されたのが観測ロケット実験CLASP(2015年打ち上げ)、CLASP2(2019年打ち上げ)である。本研究は、CLASP2で得られた電離マグネシウム線波長域(波長280 nm)の偏光スペクトルを解析し、光球から彩層最上部へ繋がる磁力線の姿を明らかにし、紫外線偏光スペクトルの有用性を改めて実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果をもとに新たな観測ロケット実験CLASP2.1が立ち上がり、2021年秋に観測が実施された。また、次期太陽観測衛星Solar-C EUVSTの次の計画や海外の将来ミッションとして、紫外線の偏光分光観測を用いた宇宙から磁場を計測する太陽ミッションの検討が進められている。本研究成果は、これらの将来計画の検討を加速させることは明らかである。さらに、太陽フレアやコロナ質量放出など、太陽の活動現象は、我々の生活と密接な関わりを持っている。紫外線の偏光分光観測による磁場測定が定期的に実施されるようになれば、これらの活動現象の理解を大きく進展させることができる。

研究成果の概要(英文)：Why does a million-degree corona exist above a 6,000-degree photosphere? The key is thought to be the atmospheric layer called the chromosphere, which is located between the photosphere and the corona and where various magnetohydrodynamic phenomena occur. The polarization spectrum in ultraviolet (UV) light is expected to be able to measure the magnetic field of the upper chromosphere, which cannot be obtained by ground-based observations. The sounding rocket experiments CLASP (launched in 2015) and CLASP2 (launched in 2019) were developed to verify the usefulness of the UV polarization spectra. By analyzing data across the Mg II h & k lines around 280 nm obtained by CLASP2, our study clarifies the magnetic field lines leading from the photosphere to the top of the chromosphere, and demonstrates once again the usefulness of the UV polarization spectrum.

研究分野：数物系科学、太陽物理学

キーワード：太陽物理学 天文 紫外線 偏光 プラズマ・核融合

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

彩層・遷移層は、6千度の太陽表面(光球)と100万度のコロナに挟まれた薄い(～2000km)大気層である。ひので衛星(2006年打ち上げ)を始めとする近年の高解像度の撮像観測は、超音速にまで加速され上空へ噴出するジェットや磁気流体波動などの多様な活動現象が、非常に小さなスケールで、彩層・遷移層に満ち溢れていることを明らかにした(Shibata et al. 2007, Okamoto et al. 2015)。これらが、彩層・遷移層はもとより、コロナを加熱するエネルギー源ではないかと考えられるようになった。光球で出現した磁場のうちどれだけが、どのようにして外層大気に到達し(磁気エネルギーの輸送)活動現象を引き起こしているのか(散逸)?これら一連のプロセスを担う磁場の姿を明らかにし、そのメカニズム解明に定量的に迫る。ガス圧優勢から磁気圧優勢に切り替わる彩層・遷移層の磁場測定は、太陽物理のフロンティアである。

飛翔体による観測が必須の紫外線領域には、彩層上部・遷移層を構成する1万～10万度のプラズマ由来のスペクトル線が多数存在する。未だ手付かずの紫外域の偏光情報は、彩層上部・遷移層の磁場を可能にすると期待される。ひので衛星や地上観測で、光球の磁場測定に広く用いられてきたのが、ゼーマン効果で生じる偏光である。円偏光からは視線方向の、直線偏光からは視線方向と垂直面内の、磁場情報がそれぞれ得られる。一方彩層・遷移層は、光球よりも磁場が弱く、また激しい熱的運動(ドップラー広がり)によって偏光信号がかき消されやすく、特にその影響が顕著な直線偏光では、ゼーマン効果を用いて磁場を導出することは困難である。そこで注目したのが、熱的運動があっても偏光信号がかき消されず、弱い磁場に感度をもつハンレ効果である。これは、非等方にやってくる光を彩層(もしくは遷移層)の原子が散乱する際に生じるスペクトル線の偏光状態を磁場が変化させる効果である。近年の量子力学と輻射輸送によりその理解が進み、磁場の測定手法としての適用が検討されるようになった(Trujillo Bueno et al. 2009)。

2. 研究の目的

果たして、紫外線スペクトルの偏光情報は彩層上部・遷移層の磁場測定を可能にするのか?日米欧の国際共同研究チームは、観測ロケット実験 CLASP (Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter) の開発を進め、2015年9月にNASAの観測ロケットを用いて5分間の観測を実施した。そして、紫外線領域では前人未到の高精度(0.1%)偏光分光観測に成功し、遷移層から放射される水素原子のライマン α 線(波長122nm)、電離シリコン線(波長121nm)の散乱偏光を観測した(Kano et al. 2017, Ishikawa et al. 2017)。さらに、CLASP観測装置を改造し(CLASP2: Chromospheric Layer Spectro-Polarimeter 2)、電離マグネシウム線(波長280nm)の偏光分光観測を2019年春に実施予定となった。困難だと思われていた紫外線高精度偏光分光観測の技術はCLASP, CLASP2実験により確立しつつある。残る課題は、紫外線偏光スペクトルから如何に磁場情報を引き出すか?である。

CLASPで得られたデータは、紫外域のスペクトル線で散乱偏光が発生することを世界で初めて示した。その一方で、観測された直線偏光は、その偏光度や向きが場所ごとに大きく異なり、予想を超えて複雑であった。これは、各場所で強度や向きが異なる磁場がハンレ効果を引き起こすことで直線偏光に空間変動を与えているだけでなく、散乱偏光そのものが場所ごとに異なる(局所的な非等方輻射場の影響)ためではないかと考えられる。実際、彩層上部・遷移層はスピキュール(針状の構造)や明るいジェット、フィラメント(暗い筋状の構造)などで埋め尽くされており、場所ごとに原子にやってくる輻射場が異なることが推察される。磁場ベクトル(磁場の強度・方位角・傾き角の)3つのパラメータに応じて、散乱偏光で生じた直線偏光が変化するハンレ効果では、磁場がない場合に生じる散乱偏光を抑えることが決定的に重要となる。本研究の目的は、3次元的な輻射場の影響までを考慮して散乱偏光を理解し、彩層上部・遷移層のベクトル磁場を明らかにすることである。

3. 研究の方法

2019年4月11日、日米欧共同で開発を行った太陽観測ロケットCLASP2が打ち上がり、世界初となる電離マグネシウム線域の詳細な偏光スペクトルの観測に成功した。電離マグネシウム線は、ライマン α 線よりも150kmほど形成高度が低く彩層上部を観測することになるが、依然としてコロナ直下の大気層にアクセスできる。さらに、ライマン α 線よりもドップラー広がり小さく波長も長いため、ハンレ効果に加えて、ゼーマン効果由来の円偏光も観測が可能となる。円偏光は散乱の影響を受けず、その有無によって磁場の存在を直接的に確認でき、また振幅が視線方向磁場強度に比例することから容易に視線方向磁場強度を導出できる。これにより、散乱偏光における局所的な非等方輻射場と磁場の影響を切り分け、ベクトル磁場の導出が可能となると期待される。

本研究は、CLASP2で得られた画期的データに基づき以下のステップで行うこととした。

(1) 電離マグネシウム線で得られた円偏光スペクトルから、ゼーマン効果を用いて彩層最上部の視線方向磁場を導出する。

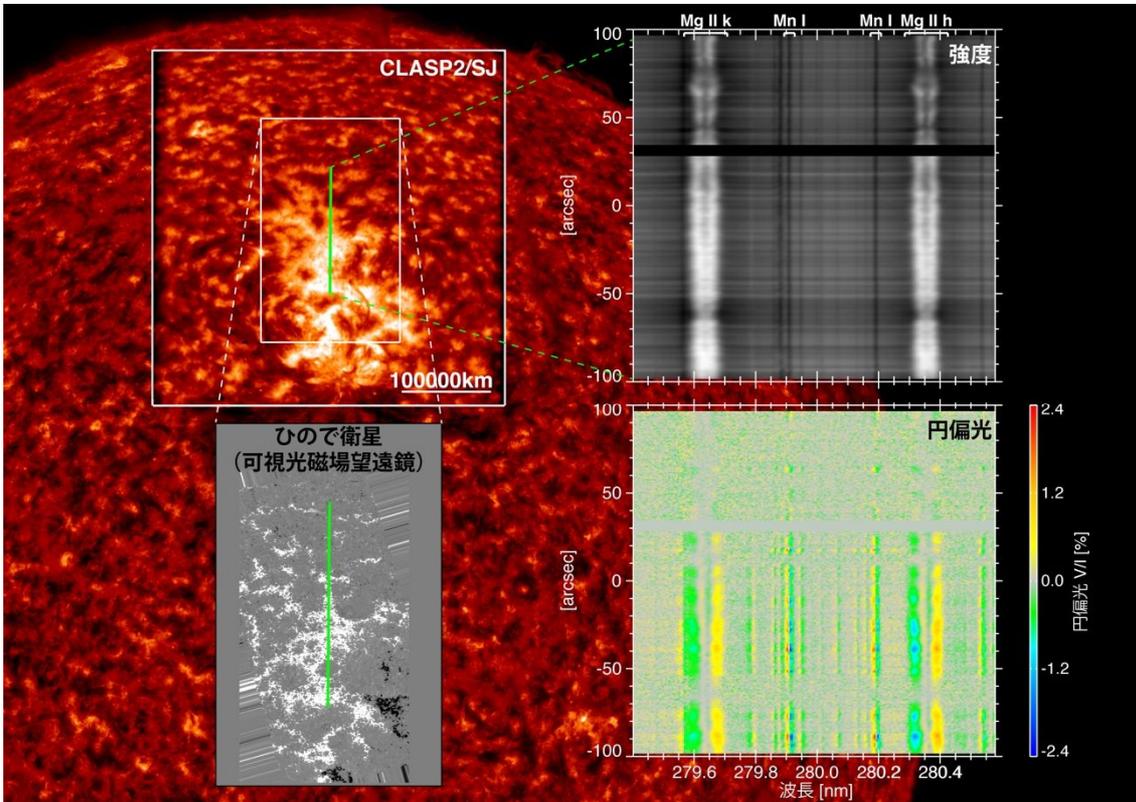


図 1: 本研究で用いた観測データ。CLASP2 は緑実線で示されたスリットの位置での偏光スペクトル(右側の上下のパネル)を得た。スリットを当てていた位置とその周辺の太陽彩層の様子は、CLASP2 に同じく搭載された撮像カメラ(SJ)で示されている(左上のパネル)。太陽表面磁場の詳細は、ひので衛星に搭載された可視光望遠鏡から得られた(左下のパネル)。白黒が N 極, S 極で磁場の強いところを表している。背景は、SDO 衛星で観測された太陽彩層の全面像。©国立天文台, IAC, NASA/MSFC, IAS

(2) 電離マグネシウム線の直線偏光スペクトルと (1) で導出した視線方向磁場を比較し、局所的な散乱偏光と磁場の影響(ハンレ効果)を分離する。

(3) 3 次元的な太陽大気構造(同時観測された彩層の撮像データを利用)も考慮し、局所的な散乱による散乱偏光を求め、ゼーマン効果(円偏光・視線方向磁場)とハンレ効果(直線偏光・鉛直方向から傾いた磁場)をあわせてベクトル磁場を導出する。

次章の研究成果で述べるように、CLASP2 で得られたデータの解析から、彩層最上のみならず、彩層底部からの連続した磁場構造が導出できることが明らかとなった。これにより、電離マグネシウム線波長域の有用性がさらに注目され、急速に、CLASP2 実験を拡張した CLASP2 再飛翔実験(CLASP2.1)を提案・実施することとなり、新たな科研費を提出することとなった。2021 年度より新しい科研費の採用が決定したため、本研究では、2019 年~2020 年度の 2 年間で (1)、(2) までを実施することとなり、(3) については、CLASP2.1 実験の観測データもあわせて今後進めていくこととなった。

4. 研究成果

(1) 円偏光スペクトルを用いた彩層の視線方向磁場導出

CLASP2 は、6 分半の全観測時間のうち、2 分半にわたって活動領域の観測を行い(図 1 左上)、世界初となる電離マグネシウム線(波長 280 nm)近辺の紫外線偏光スペクトルの取得に成功した(図 1 右)。スリットに沿ったほぼ全域にわたり、電離マグネシウム線(図中で Mg II k, Mg II h と表記)で顕著な円偏光が検出されている。さらに驚いたのは、CLASP2 打ち上げ前からの標的であった電離マグネシウム線に加え、その近傍にある 2 つのマンガン線(図中で Mn I と表記)にも、有意な円偏光が検出されたことである。この発見に触発されて輻射輸送計算を行っ

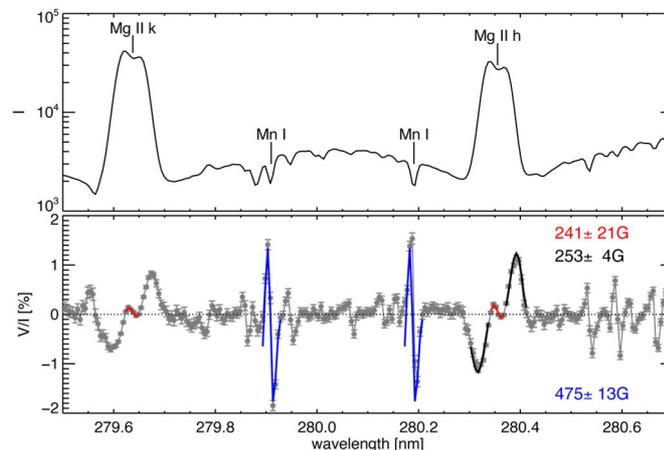


図 2: 強度(上)と円偏光スペクトル(下)の具体例。青(マンガン線、彩層底部の視線方向磁場)、黒(電離マグネシウム線ウイング、彩層中部の視線方向磁場)、赤線(電離マグネシウム線コア、彩層最上部の視線方向磁場)で示したのが弱磁場近似によるフィッティング。

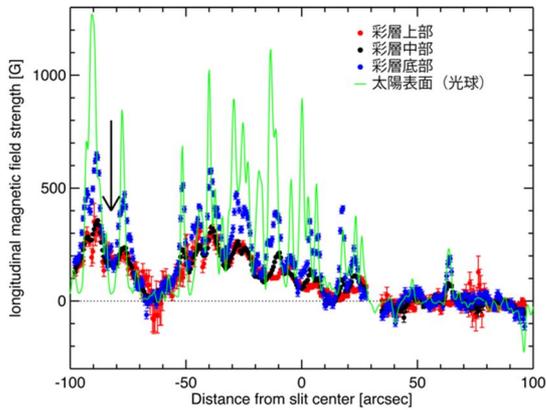


図 3: 太陽表面からコロナ直下に至る磁場分布。CLASP2 で観測したのが、彩層底部 (青)・中部 (黒)・上部 (赤) の 3 層。太陽表面の磁場 (緑) はひので衛星の観測により得た。

とすばまったチューブ状の「磁束管」が、互いに少しずつ離れて分布していることを示している。一方の彩層では (図 3 の青、黒、赤の丸) その振る舞いは大きく異なり、太陽表面に比べて急激に磁場強度が弱まること、彩層の中でも上空に行くに従って徐々に磁場が弱くなっていること、太陽表面で磁場が弱い場所でも彩層では比較的強い磁場が存在すること (例えば図 3 の黒矢印で示した場所) がわかった。これらのことから、磁束管が彩層で急激に膨張し互いにひしめき合うという、これまで太陽研究者が想像するも、その証拠が得られなかった彩層磁場の様子が初めて観測から明らかになった (図 4)。

さらに、電離マグネシウム線の強度スペクトルから彩層上部のエネルギー密度 (電子密度と温度の積) を求めたところ、彩層上部の磁場 (図 3 の赤丸) と非常に高い相関が得られた。これは、彩層加熱が磁場起因であること、さらにはその加熱機構に迫る上で太陽表面の磁場情報では不十分であり、彩層上部での磁場測定が必須であることを明瞭に示している。今後、CLASP2 で明らかになった太陽表面からコロナへ連なる磁束管の姿を元に、磁場がどのようにして太陽大気層を結合させているのか、異なる大気層間でどのようにエネルギーが伝達されていくのか、といった研究が進んでいくと期待される。この研究成果は、Ishikawa et al. (2021) として Science Advances 誌に発表された。

たところ、電離マグネシウム線はコロナ直下の彩層中～最上部から放射される一方、マンガン線は彩層底部から放射されることがわかった。これらの円偏光はゼーマン効果によって発生しており、弱磁場近似 (強度スペクトルの波長微分が視線方向磁場強度に比例する関係を使った磁場導出方法) を用いて、彩層底～中～最上部の連続した磁場を導出することができる (図 2)。

さらに CLASP2 は、ひので衛星との共同観測にも成功し、ひので搭載の可視光磁場望遠鏡 (Solar Optical Telescope: SOT) により光球 (太陽表面) の詳細な磁場測定を行った (図 1 左下)。CLASP2 とひのでの観測を組み合わせ得られたのが、光球から彩層底部、彩層中部、そしてコロナ直下の彩層上部に至る活動領域の磁場の様子である (図 3)。図 3 の緑線で示された、大きく変動した空間分布は、太陽表面ではキュー



図 4: CLASP2 とひので衛星の共同観測から明らかとなった磁束管の想像図 (クレジット: 国立天文台)。

(2) 直線偏光スペクトルと視線方向磁場の比較による局所的な散乱偏光とハンレ効果の分離

CLASP2 は、円偏光に加えて優位な直線偏光スペクトルの検出にも成功した。観測された直線偏光は散乱によって発生しているが (所謂、散乱偏光) 磁場が存在すると、その強度や方向に応じて変調 (偏光度の現象や直線偏光の向きの変化) を受ける。スペクトル線中心付近はハンレ効果が、スペクトル中心から離れた波長域 (ウィング部分) では、磁気光学効果が働くためである (Alsina Ballester et al. 2016, del Pino Aleman et al. 2016)。我々は、CLASP2 で観測された直線偏光の性質 (偏光度や直線偏光の方向) と、円偏光から導出した磁場強度を比較した。そして、視線方向磁場が強い領域では、偏光度の減少や偏光方向の回転といったハンレ効果や磁気光学効果の発生を示唆する観測的証拠が得られた。本研究をさらに拡張させることで、ベクトル磁場の情報を得ることができると期待される。現在、詳細を論文にまとめている。

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 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 R. Ishikawa, J. Trujillo Bueno, T. del Pino Aleman, T. J. Okamoto, D. E. McKenzie, F. Auchere, R. Kano, D. Song, M. Yoshida, L. A. Rachmeler, K. Kobayashi, H. Hara, M. Kubo, N. Narukage, T. Sakao, T. Shimizu, Y. Suematsu, C. Bethge, B. De Pontieu, A. Sainz Dalda, G. D. Vigil, A. Winebarger, E. Alsina Ballester, 以下5名	4. 巻 7
2. 論文標題 Mapping Solar Magnetic Fields from the Photosphere to the Base of the Corona	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/sciadv.abe8406	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 5件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Joten Okamoto, R. Ishikawa, D. E. McKenzie, J. Trujillo Bueno, R. Kano, A. R. Winebarger, F. Auchere, L. A. Rachmeler, D. Song, N. Narukage, C. Bethge, K. Kobayashi, M. Yoshida, M. Kubo, S. Ishikawa, Y. Katsukawa, T. Bando, G. Giono, T. del Pino Aleman
2. 発表標題 UV Spectro-Polarimetry in the Solar Atmosphere -- Results from Two Sounding Rocket Experiments CLASP1 and CLASP2
3. 学会等名 IAU Symposium 360 Astronomical Polarimetry 2020 New Era of Multi-Wavelength Polarimetry（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryohko Ishikawa
2. 発表標題 CLASP2 first results: mapping of solar magnetic fields from the photosphere to the top of the chromosphere
3. 学会等名 SDO 2021 Science Workshop（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川遼子, 岡本文典, D. McKenzie, J. Trujillo Bueno, 鹿野良平, D. Song, 吉田正樹, L. Rachmeler, F. Auchere, 浦口史寛, 久保雅仁, 坂尾太郎, 篠田一也, 清水敏文, 末松芳法, 都築俊宏, 成影典之, 納富良文, 原弘久, A. Winebarger, K. Kobayashi, 以下10名
2. 発表標題 観測ロケット実験CLASP2・ひので衛星による太陽磁場の断層診断
3. 学会等名 宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Donguk Song, Ryohko Ishikawa, Takenori Joten Okamoto, Ryouhei Kano, David E. McKenzie, Javier Trujillo Bueno, Frederic Auchere, Laurel Rachmeler, Ken Kobayashi, Christian Bethge, and CLASP2 and CLASP2.1 teams
2. 発表標題 Chromospheric Studies Based on CLASP Series: A New Challenge for CLASP2.1
3. 学会等名 2020年度太陽研連・太陽スペース研究シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Ishikawa, J. Trujillo Bueno, T. del Pino Aleman, T. J. Okamoto, R. Kano, D. Song, M. Yoshida, D. E. McKenzie, K. Kobayashi, F. Auchere, L. Rachmeler, C. Bethge, CLASP2 team
2. 発表標題 Tomography of plage and network magnetic fields from Hinode and CLASP2 observations
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Joten Okamoto, Ryoko Ishikawa, David McKenzie, Javier Trujillo Bueno, Frederic Auchere, Laurel Rachmeler, Ryohei Kano, Donguk Song, Christian Bethge, Ken Kobayashi, Masaki Yoshida, Tanausu del Pino Aleman, CLASP2 team
2. 発表標題 Initial results from CLASP2 rocket experiment to measure magnetic fields in the solar chromosphere
3. 学会等名 JpGU - AGU Joint Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 David E. McKenzie, Ryohko Ishikawa, Ryouhei Kano, Joten Okamoto, Laurel Rachmeler, Javier Trujillo Bueno, Frederic Auchere, Ken Kobayashi, Donguk Song, Masaki Yoshida
2. 発表標題 The Chromospheric Layer SpectroPolarimeter (CLASP2) Mission: Introduction
3. 学会等名 JpGU - AGU Joint Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名	Ryohko Ishikawa, Ryouhei Kano, Amy Winebarger, David McKenzie, Javier Trujillo Bueno, Frederic Auchere, Noriyuki Narukage, Takamasa Bando, Ken Kobayashi, Laurel Rachmeler, Donguk Song, Masaki Yoshida, Takenori J. Okamoto, and the CLASP and CLASP2 team
2. 発表標題	The CLASP and CLASP2 missions
3. 学会等名	Solar Polarization Workshop 9 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Ryohko Ishikawa, David E. McKenzie, Javier Trujillo Bueno, Frederic Auchere, Ryouhei Kano, Donguk Song, Masaki Yoshida, Toshihiro Tsuzuki, Fumihiro Uraguchi, Takenori Okamoto, Laurel Rachmeler, Ken Kobayashi, CLASP2 Team
2. 発表標題	First results of the Chromospheric LAyer Spectro-Polarimeter (CLASP2)
3. 学会等名	Hinode-13/IPELS 2019 (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	石川遼子
2. 発表標題	紫外線偏光分光観測実験CLASPシリーズから得る将来計画への示唆
3. 学会等名	日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Ryohko Ishikawa
2. 発表標題	Observational results for the plage target
3. 学会等名	CLASP2 Science Meeting (国際学会)
4. 発表年	2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

太陽観測ロケットCLASP2.1 打ち上げ成功
<https://hinode.nao.ac.jp/news/topics/clasp21-launch2021-j/>
Successful launch of the solar sounding rocket CLASP2.1
<https://hinode.nao.ac.jp/en/news/topics/clasp21-launch2021-e/>
太陽表面からコロナ直下に迫る 太陽観測ロケット実験CLASP2が測定した太陽大気の磁場
<https://www.nao.ac.jp/news/science/2021/20210220-clasp2.html>
太陽表面からコロナ直下に迫る 太陽観測ロケット実験CLASP2が測定した太陽大気の磁場
<https://hinode.nao.ac.jp/news/results/clasp2-publication-202102/>
CLASP2 Elucidates Solar Magnetic Field
<https://www.nao.ac.jp/en/news/science/2021/20210220-clasp2.html>
CLASP2 Elucidates Solar Magnetic Field
<https://hinode.nao.ac.jp/en/news/results/clasp2-publication-en-202102/>
CLASP2Webページ
https://solarwww.mtk.nao.ac.jp/Rocket_balloon_experiments/CLASP2/index_j.html

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		
スペイン	Instituto de Astrofisica de Canarias		
米国	NASA/MSFC		