

令和元年6月11日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03963

研究課題名(和文) 観測ロケット実験で目指す、紫外線領域での太陽大気磁場診断手法の確立

研究課題名(英文) Demonstration of UV Spectro-Polarimetry as a Solar Magnetic Field Diagnostics Tool by Sounding Rocket Experiment

研究代表者

石川 遼子 (Ishikawa, Ryohko)

国立天文台・SOLAR-C準備室・助教

研究者番号：00709636

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：光球(6千度)とコロナ(100万度)の連結領域である彩層・遷移層の磁場は、太陽の様々な活動現象を紐解く鍵を握る。そのため、彩層・遷移層の磁場計測は太陽物理のフロンティアであると考えられており、我々は、これに挑むべく、世界初の電離マグネシウム線(280 nm)の高精度偏光分光観測を行う観測ロケット実験CLASP2の開発を行い、観測に見事成功した。観測ロケット実験CLASP2の成功により、紫外線偏光分光観測による太陽大気磁場測定という太陽物理の新しい扉を開くことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

技術的難易度の高い紫外線偏光分光観測装置の開発に成功し、天文学における新しい観測技術を切り拓いた。この技術的知見に加え、紫外線の偏光情報から彩層・遷移層の磁場を導出する科学的手法の開拓は、日本のみならず世界中の飛翔体観測計画の立案に大きく貢献する。また、太陽フレアやコロナ質量放出など、太陽の活動現象は、我々人類の営みと密接な関わりを持っている。本研究で目指す彩層・遷移層の磁場測定が定期的に行われるようになれば、これらの活動現象の理解の基礎となることは必至であり、将来的な社会貢献も期待される。

研究成果の概要(英文)：The magnetic fields in the solar chromosphere and the transition region, which are interface layers between the photosphere and the corona, are considered to be key parameters to control the solar dynamical activities. Therefore, its measurement is one of new frontiers in solar observations. We developed the sounding rocket experiment CLASP2 (Chromospheric Layer Spectro-Polarimeter) to perform the spectro-polarimetric observations in Mg II lines at 280 nm and succeeded in the observations for the first time. The success of CLASP2 has opened up a new window of UV Spectro-Polarimetry to measure the magnetic fields in the upper solar atmosphere.

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 偏光分光 磁場 量子ハルレ効果 ゼーマン効果

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-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。太陽観測衛星ひので(2006年打ち上げ)によって、これらの大気層が、磁気流体波動や超音速にまで加速され噴出されるジェットで満ちあふれていることが発見された(Shibata et al. 2007)。これらの動的現象がコロナや宇宙空間へエネルギーを輸送していることは明らかで、太陽物理学の未解決問題「太陽風加速機構」や「彩層・コロナ加熱問題(なぜ、太陽表面に比べ高温の大気層が定在的に存在しているのか?)」を紐解く鍵を握っている。このような中、2013年に打ち上げられたIRIS衛星(米国)は、彩層・遷移層の観測を集中的に行い、磁気流体波動が散逸している様子を初めて捉えた(Okamoto et al. 2015)。残る課題は、磁気流体波動で運ばれるエネルギー量や散逸機構、ジェットの発生機構を定量的に論じることである。そのためには、彩層・遷移層の磁場情報が必須であるが、既存の観測装置でそれらを得る事はほとんどできていなかった。

紫外線領域には、彩層・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。未だ手付かずのその偏光情報は、彩層・遷移層の磁場情報をもたらすと期待される。ただし、その主たる偏光発生過程は、ひので衛星をはじめ光球の磁場測定で広く用いられてきたゼーマン効果ではなく、天文学の分野ではほとんど実用化されていないハンレ効果(非等方によってくる光を原子が散乱する際に生じる線スペクトルの偏光状態を磁場が変化させる効果)である。また、これまで、紫外線の高精度偏光分光観測は世界を見渡しても皆無であった。国立天文台を中心とする我々日米欧の国際共同研究チームは、2009年度より、観測ロケット実験CLASP(Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter)の開発を行ってきた(R. Ishikawa et al. 2013, R. Ishikawa et al. 2014, Narukage et al. 2015, S. Ishikawa et al. 2015)。2015年9月、NASAの観測ロケットで打ち上げ、5分間の観測を実施した。そして、世界初となるライマン α 輝線(波長122 nm)の偏光スペクトルを取得した(Giono et al. 2016, 2017)。理論的にしか予言されていなかった彩層・遷移層における散乱偏光、及び、磁場による散乱偏光の変化(ハンレ効果による変調)を検出するという快挙を成し遂げた(Kano et al. 2017, R. Ishikawa et al. 2017)。一方で、ライマン α 輝線の観測のみでは、磁場を精度よく決定するには至らなかった。

CLASPの開発が進み紫外線領域での偏光分光観測の実現が確実となったことで、ハンレ効果を紫外線領域の様々なスペクトル線へ適用する理論的研究が加速した。そして、電離マグネシウム線(波長280 nm)も磁場測定に適切なスペクトル線であることが明らかとなった(Belluzzi & Trujillo Bueno 2012)。また、CLASP観測装置は打ち上げ後回収され、2015年11月に行った光学性能確認試験等により、再飛翔での利用が可能な状態であることも確認できた。

2. 研究の目的

光球とコロナの連結層である彩層・遷移層の磁場情報が、太陽物理学上未解決の「彩層・コロナ加熱問題」を紐解く重要な鍵を握っている。本研究では、未だ手付かずで、その情報を持っていると期待される紫外線領域にあるスペクトル線、中でも、電離マグネシウム線(波長280 nm)の有用性に着目し、「紫外線偏光スペクトルから磁場診断を行う手法の確立」を目指す。

電離マグネシウム線は、ライマン α 輝線(2015年観測実施、波長122 nm、彩層上部~遷移層から放射)よりも数100 km低い大気層を観測することになるが、依然として遷移層直下の彩層上部までアクセスできる。また、その強度はライマン α 輝線の5倍で、高い精度を要求する偏光分光観測には有利である。そして、その最大の利点は、ライマン α 輝線に比べてドップラー広がり小さく波長も長いこと、活動領域など比較的磁場の強い領域では、ハンレ効果で生じる直線偏光に加えて、ゼーマン効果によって生じる円偏光も検出できることにある。ゼーマン効果は、ひので衛星を始め、これまで磁場の測定に広く用いられてきた。電離マグネシウム線(280 nm)のゼーマン効果の観測はこれまで行われていないが、円偏光スペクトルからの磁場導出は、他のスペクトル線の手法をそのまま適用することができるため、手法の構築は比較的簡単である。ハンレ効果とゼーマン効果をあわせることで、CLASPではできなかったベクトル磁場の導出が可能になると考えられる。

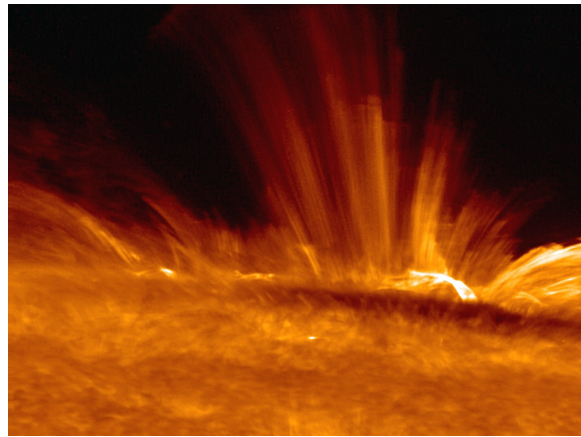


図1: 太陽観測衛星ひのでによって明らかになったダイナミックな彩層の姿。筋状に噴出するジェットが多数見られる。磁場によってこのような活動現象が引き起こされていると考えられているが、そのメカニズムを理解する上で必須となる磁場の強度や向きといった情報はこれまで得られていない。

3. 研究の方法

電離マグネシウム線 (280 nm) の有用性を確認し、紫外線偏光スペクトルを用いた磁場測定手法の確立を行うには、その観測を早急に実現することが必須となる。そのため、世界初の電離マグネシウム線の高精度偏光分光観測を行う、観測ロケット実験 CLASP2 (Chromospheric Layer Spectro-Polarimeter) の開発を進めた。開発は、CLASP 同様、我々日本の研究チームが主導する。CLASP 飛翔後に回収され、米国に保管されていた観測装置をできるだけ再利用することで、科学的要求は高い水準を維持しつつも、開発期間と費用を大幅に抑制する。

CLASP 観測装置は、カセグレン望遠鏡、スリットモニター撮像装置、偏光分光器の 3 つの部分からなる (図 2)。本研究では、CLASP (観測波長 122 nm) から CLASP2 (観測波長 280 nm) へ大規模な改造を要する偏光分光器部分の開発を中心に行った。また、観測装置の開発の傍ら、理論的な側面からの有用性検証とデータ解析手法の検討も進めた。

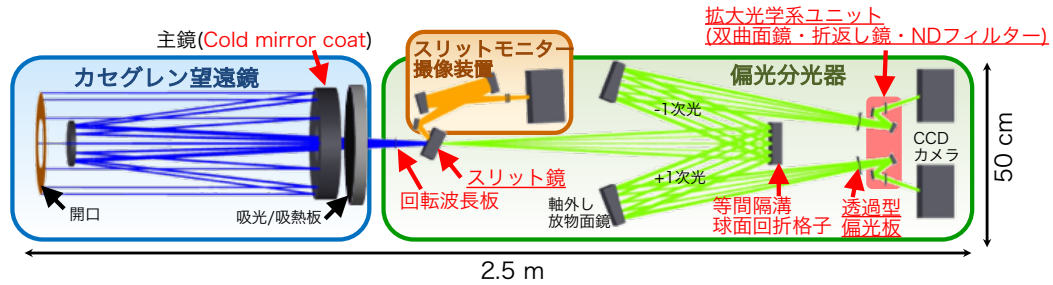


図 2: CLASP2 観測装置の光線図。赤字部分が CLASP から CLASP2 への改造箇所、そのうち下線で示した項目が本研究で開発を行った部分である。

4. 研究成果

(1) 観測ロケット実験 CLASP2 の開発

理論から予想される電離マグネシウム線のハンレ効果 (直線偏光の振幅 0.2-1.5%) 及びゼーマン効果 (円偏光の振幅 ~0.5%) を検出するためには、0.1%の偏光精度、0.01 nm の波長分解能が必要である。また、IRIS 衛星の分光観測からは、彩層上部に幅 2-3 秒角程の筋状構造が見つかっている。その磁場構造を調べるため、2 秒角の空間分解能を達成しなければならない。

本研究は、観測装置の光学・構造設計から開始した。CLASP 観測装置の主構造および光学素子を最大限に有効活用するため、望遠鏡開口から軸外し放物面鏡までの光学素子の配置は、CLASP のままとした。一方で、軸外し放物面鏡以降の光学配置も CLASP のものを踏襲すると、観測波長が長くなるのに比例して波長分解能が悪くなってしまふ。そこで、拡大光学系ユニットを導入し F 値を 2 倍にすることで 0.01nm の波長分解能を達成する (図 2)。これによって、2 秒角の空間分解能も十分に達成可能となる。この変更に対応するために既存のスリットよりも幅を狭めたスリット鏡、偏光計測の要となる 280nm 用ワイヤーグリッド偏光板も新規に開発した。回折格子は、CLASP と同様、フランス宇宙機関 (CNES) から提供を受け、回転波長板の改良 (ソフトウェアを書き換えて回転速度を速めた) については別予算で実施した。各フライト

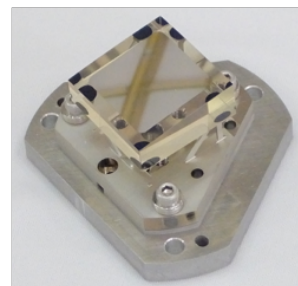
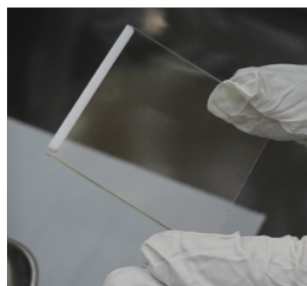
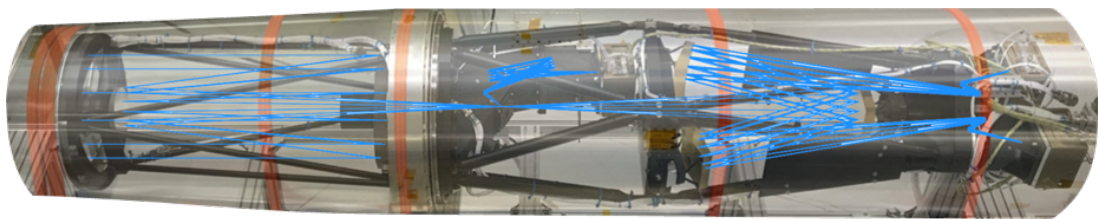


図 3 上段: 完成した観測装置。観測ロケットの筒 (擬似的に半透明化) におさまられている。
 図 3 下段左: スリット鏡とスリットホルダー。光学面とは逆の面から写した写真。迷光対策のため、ホルダーには黒色化を施した。
 図 3 下段中: 280nm 用偏光板。インストールのためのテフロン枠をはめているところ。
 図 3 下段右: 拡大光学系内の軸外し双曲面鏡。スーパーインバー製のホルダに接着。

品の開発例は図3下段参照。

フライト品完成後は、それらの組み立て、望遠鏡・偏光分光器といった要素毎の光学調整、性能評価試験に移行した。電離マグネシウム線は、ライマン α 輝線同様不可視のため、その組み立て・光学調整は容易ではない。また、CLASPに比べて光学素子の数も増えている。我々は、可視光で確認できる項目と紫外線でしか確認できない項目を精査し、組み立て・光学調整手順の検討を事前に入念に行うことで、要求通りの光学性能を持つ偏光分光器を想定通りの時間とコストで開発した(図4)。偏光較正試験についても、その手順について検討を重ねた上で、新規に開発した較正用光源を用いて実施した。最終的に、2019年4月に実施した観測で得た机上偏光較正用データとあわせて、0.1%の精度を持つことを実証する。

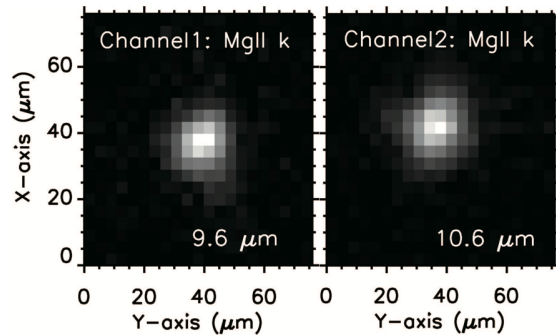


図4: 偏光分光器の光学調整試験の結果得られた、視野中心での電離マグネシウム線単色のスポット像 (Song et al. 2018 より引用)。右下の数字は Spot RMS 半径を示し、要求仕様 13 μ m を満たしていることがわかる。

偏光分光器単体での光学調整及び性能評価試験が完了した後、別途開発を進めてきた望遠鏡と結合し(図3上段)、全系での試験(太陽光を導入しての迷光確認試験、UV逆望遠鏡を使うでのスループット・全系での光学性能確認試験)を実施した。予定通り、国内での開発を2018年11月に完了させ、完成した観測装置を米国NASAマーシャル宇宙飛行センター(NASA/MSFC)へ出荷した。その後、NASA/MSFCでのフライトコンピュータとの噛み合わせ試験(～2019年1月)、打ち上げ場であるホワイトサンズミサイル実験場(WSMR)での観測ロケットとの噛み合わせ試験(2019年3月)を行い、打ち上げに向けた準備を全て整えた。

ホワイトサンズミサイル実験場で打ち上げが予定されている他のミッションとの調整などの結果、研究期間内(2018年度内)に観測ロケットの打ち上げまで完了させることはできなかった。打ち上げは、2019年4月11日(米国時間)に実施され、観測装置、ロケットいずれも完璧に動作し、世界初の電離マグネシウム線の偏光分光観測に成功した。予備的解析の結果、散乱偏光に加えて、活動領域においてゼーマン効果による円偏光を検出できていることが明らかになっている。詳細な解析はこれからであるが、本研究の最終目的である「紫外線偏光分光観測を用いた磁場診断手法の確立」の達成は確実である。

(2) 電離マグネシウム線の有用性確認とデータ解析の準備

観測装置開発と並行して、ハンレ効果の解析解(Goto et al. 印刷中)を用いて、円偏光を観測することで解の縮退及び不定性がどのように低減されるかを調べた(図5)。その結果、直線偏光のみの観測では、解の候補が弱磁場領域から強磁場領域まで広がっていたのに対し(図5左)、[1] 円偏光の観測を加えることで、解が弱磁場領域にあるかを判断できること、さらに、[2] 円偏光が検出できれば、ベクトル磁場を複数の縮退のみで決定し、解の候補を大幅に狭めることができること(図5右)、を明らかにした。これは、CLASP2による電離マグネシウム線の観測が実現できれば、より確実に磁場を導出できることを強くサポートする結果である。また、弱磁場近似を用いて、円偏光から視線方向の磁場強度を求めるプログラムも作成した。

さらに、将来に向けて、ライマン α 輝線と電離マグネシウム線を同時に偏光分光観測することで、解の縮退、不定性をさらに低減できるか、最適なスペクトル線の組み合わせは何か、についても検討を進めているところである。

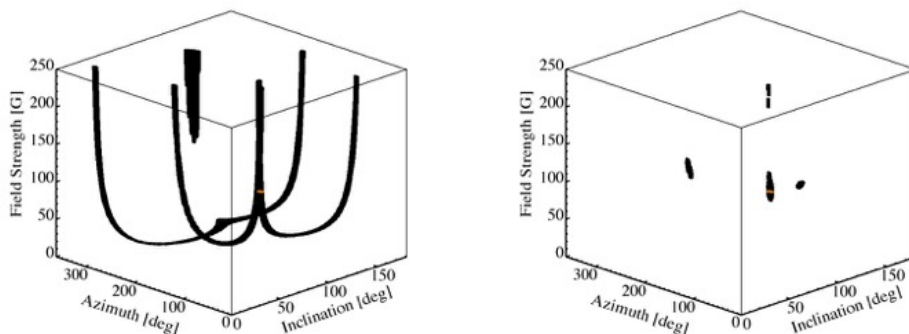


図5: データ解析を模擬した χ^2 マップ。オレンジ色で示したパラメータ(磁場強度・方位角・傾き角)で生じる偏光信号をCLASP2の観測で想定されるノイズを加えて観測量とした時に、解としてありえるパラメータを黒で示した。左側は直線偏光のみの観測(ライマン α 輝線)の場合で、右側は直線偏光に加えて円偏光の観測量がある場合(電離マグネシウム線)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① D. Song, R. Ishikawa, R. Kano, M. Yoshida, and K. Shinoda, Pre-flight Verification of CLASP2 Throughput, UVSOR ACTIVITY REPORT 2018, 印刷中, 査読無
- ② Yoshida, M., Song, D., Ishikawa, R. 他11名, Wavefront error measurements and alignment of CLASP2 telescope with a dual-band pass cold mirror coated primary mirror, Proceedings of the SPIE, vol.10699, p.1069930, 2018, 査読無
doi: 10.1117/12.2312463
- ③ Song, D., Ishikawa, R., Kano, R. 他10名, Optical alignment of the high-precision UV spectro-polarimeter (CLASP2), Proceedings of the SPIE, vol.10699, p.106992W, 2018, 査読無
doi: 10.1117/12.2313056
- ④ D. Song, R. Ishikawa, R. Kano, K. Shinoda and M. Yoshida, Performance Verification of the VUV Coating for the CLASP2 Flight Mirrors, UVSOR ACTIVITY REPORT 2017, p.36, 2018, 査読無
<https://www.uvsor.ims.ac.jp/eng/activity/2017/>
- ⑤ R. Ishikawa, K. Shinoda, H. Hara, R. Kano and N. Narukage, Axis Measurement of Polarizer and Waveplate for CLASP2 Light Source, UVSOR ACTIVITY REPORT 2016, p.43, 2017, 査読無
<https://www.uvsor.ims.ac.jp/eng/activity/2016/>
- ⑥ Narukage, N., McKenzie, D. E., Ishikawa, R. 他19名, Chromospheric LAYER Spectro Polarimeter (CLASP2), Proceedings of the SPIE, vol. 9905, p. 990508, 2016, 査読無
doi: 10.1117/12.2232245

[学会発表] (計 20 件)

- ① 石川遼子, 打ち上げ迫る! 太陽観測ロケット実験 CLASP2, 2018 年度太陽研連シンポジウム「太陽研究の将来展望」, 2019
- ② 勝川行雄, 石川遼子, 他22名, 太陽観測小規模プログラム: CLASP2 & SUNRISE-3, 第19回宇宙科学シンポジウム, 2019
- ③ 石川遼子, 他15名, 観測ロケット実験 CLASP2 -観測装置の開発状況報告-, 第19回宇宙科学シンポジウム, 2019
- ④ 宋東郁, 石川遼子, 鹿野良平 他11名, Optical Alignment and Pre-flight Polarization Calibration of the High-Precision UV Spectro-Polarimeter (CLASP2), 第19回宇宙科学シンポジウム, 2019
- ⑤ 吉田正樹, 宋東郁, 石川遼子 他11名, CLASP2 望遠鏡部のアライメント調整と迷光評価, 第19回宇宙科学シンポジウム, 2019
- ⑥ 石川遼子, CLASP/CLASP2 の文脈でみる EUVST/SUNRISE/DKIST, ワークショップ: EUVST-SUNRISE-DKIST への展望, 2018, 招待講演
- ⑦ J. Okamoto, R. Ishikawa, D. McKenzie, et al., The CLASP2 experiment and observing plans with IRIS and Hinode, HINODE-12 THE MANY SUNS, 2018, 招待講演
- ⑧ 石川遼子 他18名, 観測ロケット実験 CLASP2: 紫外線高精度偏光分光観測装置の開発, 日本天文学会, 2018
- ⑨ 鹿野良平, 石川遼子 他, CLASP/CLASP2 による太陽彩層・遷移層の紫外線偏光分光観測, 第1回観測ロケットシンポジウム, 2018, 招待講演
- ⑩ Ryohko Ishikawa, Ryouhei Kano, Amy Winebarger, et al., Current State of UV Spectro-Polarimetry and its Future Direction, COSPAR 2018 42nd Assembly, 2018, 招待講演
- ⑪ Yoshida, M., Song, D., Ishikawa, R., et al., Wave-front error measurements and alignment of CLASP2 telescope with a dual-band pass cold mirror coated primary mirror, SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2018
- ⑫ Song, D., Ishikawa, R., et al., Optical alignment of the high-precision UV spectro-polarimeter (CLASP2), SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2018
- ⑬ 鹿野良平, 石川遼子 他, 太陽彩層観測ロケット実験 CLASP2, 2017 年度太陽研連シンポジウム「太陽研究の将来展望」, 2018
- ⑭ 勝川行雄, 石川遼子, 原弘久, 他21名, 太陽観測小規模プログラム: CLASP2 & SUNRISE-3, 第18回宇宙科学シンポジウム, 2018
- ⑮ 宋東郁, 石川遼子, 鹿野良平 他14名, Current progress of Instrument development of Chromospheric LAYER Spectro-Polarimeter (CLASP2), 第18回宇宙科学シンポジウム, 2018
- ⑯ R. Ishikawa, R. Kano, A. Winebarger, et al., UV spectro-polarimetry with CLASP & CLASP2 sounding rocket experiments, Sac Peak Farewell workshop, 2017, 招待講演
- ⑰ 石川遼子, 後藤基志, 飯田佑輔, 常田佐久, Mg II k 線でのハンレ・ゼーマン効果を用いた磁場導出手法の検討, 日本天文学会, 2017

- ⑱ 石川遼子, CLASP1&2 team, CLASP1/2 と紫外線偏光分光観測の展望, 太陽研連シンポジウム「太陽系科学の中での太陽研究の将来展望」, 2017
- ⑲ 石川遼子, 久保雅仁, 成影典之, 他 8 名, 観測ロケット実験 CLASP2 ～紫外線偏光分光観測による磁場診断手法の確立を目指して～, 第 17 回 宇宙科学シンポジウム, 2017
- ⑳ 石川遼子, 久保雅仁, 成影典之, 他 4 名, 再飛翔計画 CLASP (CLASP2) の開発状況報告, 第 17 回 宇宙科学シンポジウム, 2017

[その他]

○受賞

石川遼子：平成 30 年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞
業績名「飛翔体観測装置を駆使した太陽磁場に関する観測的研究」

○報道関連

① 記者レクチャー

国立天文台 科学記者のための天文学レクチャー「磁場観測から太陽コロナの謎に迫る～太陽研究の現状と展望～」2017 年 7 月 25 日

② テレビ放映

NHK BS コズミックフロント☆NEXT 5min. 「チャンスは 5 分！太陽の謎に挑め」2017 年 9 月 9 日

③ Web リリース

[日本語] CLASP2 打ち上げ成功

<https://www.nao.ac.jp/news/topics/2019/20190423-clasp2.html>

<https://hinode.nao.ac.jp/news/topics/clasp2-launch-20190422/>

[英語] CLASP2 Rocket Experiment Launched

<https://www.nao.ac.jp/en/news/topics/2019/20190423-clasp2.html>

<https://hinode.nao.ac.jp/en/news/topics/clasp2-launch-en-20190422/>

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名：鹿野 良平、宋 東郁、吉田 正樹、石川 真之介、久保 雅仁、
成影 典之、後藤 基志、飯田 佑輔

ローマ字氏名：(KANO ryouhei), (SONG donguk), (YOSHIDA masaki),

(ISHIKAWA shin-nosuke), (KUBO, masahito), (NARUKAGE, noriyuki), (GOTO motoshi),

(IIDA yusuke)

※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、研究者個人に帰属されます。