

(海外の観測ロケットを用いた実験の報告や紹介)

太陽観測ロケット実験 CLASP2 & CLASP2.1

石川遼子 (国立天文台)、Song Donguk (韓国天文研究院)、
岡本文典 (国立天文台)、鹿野良平 (国立天文台) 吉田正樹 (総研大)、
浦口史寛 (国立天文台)、都築俊宏 (国立天文台)、久保雅仁 (国立天文台)、
篠田一也 (国立天文台)、末松芳法 (国立天文台)、納富良文 (国立天文台)、
原弘久 (国立天文台)、成影典之 (国立天文台) 坂尾太郎 (宇宙科学研究所)、
清水敏文 (宇宙科学研究所)、McKenzie David (NASA/MSFC)、
Trujillo Bueno Javier (カナリア天体物理学研究所)、
Auchere Frédéric (フランス宇宙天体物理学研究所)、
Kobayashi Ken (NASA/MSFC)、Rachmeler Laurel (アメリカ海洋大気庁)

概要

太陽物理学の最重要課題「彩層・コロナ加熱」「太陽風加速」の解明には、太陽表面とコロナの連結領域である彩層・遷移層の磁場観測が必要不可欠である。しかしながら、その観測は依然として不足しているのが現状である。これまで我々は、「紫外線偏光分光観測による彩層・遷移層の磁場診断手法の確立」を目指し、観測ロケット実験 CLASP シリーズを推進してきた。本講演では、電離マグネシウム線域 (波長 280 nm) の高精度偏光分光観測に成功した観測ロケット実験 CLASP2 (2019 年 4 月実施)、CLASP2.1 (2021 年 10 月実施) について報告する。

背景と科学目的

彩層は、6,000 度の太陽表面 (光球) と 100 万度のコロナに挟まれた薄い (~2,000 km) 大気層である。特にその彩層中～上部は、ガスの運動と磁場との相互作用が本質的なプラズマ現象にとって重要な、ガス圧優勢 (光球) から磁気圧優勢に切り替わる特徴的な領域であり、磁気流体波動やジェットなどさまざまな動的現象に満ち溢れている。これらの動的現象は、光球から彩層、コロナへとつながる磁場によって引き起こされていると考えられているが、光球より上空の磁場観測はこれまでほとんど行われておらず、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の本質的理解には至っていない。

そこで我々が注目したのが、彩層中～上部を構成する 1 万～数万度のプラズマ由来のスペクトル線が多数存在する紫外線領域である。近年、輻射輸送と量子力学を結合した理論研究の進展により、紫外線のスペクトル線のいくつかは、その偏光を高精度に観測することで磁場測定が可能となることが示された (Trujillo Bueno et al. 2011 ApJL など)。しかしながら、宇宙からの観測が必須となる紫外線の偏光スペクトルは未開の地であり、これを切り拓いたのが、日米欧観測ロケット実験 CLASP シリーズである。我々は、2015 年 9 月、観測ロケット実験 Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter (CLASP1, Kano et al. 2017 ApJL, Ishikawa et al. 2017 ApJ など) を実施した。しかしながら、複雑な大気構造ゆえに彩層上部磁場の定量計測には至らなかったことから、観測波長をライマン α 線 (122 nm) から電離マグネシウム線 (波長 280 nm) へ変更し、新たな観測ロケット実験 Chromospheric Layer Spectro-Polarimeter (CLASP2) を立ち上げた。電離マグネシウム線の最大の利点は、ライマン α 線同様に散乱及びハンレ効果 (磁場によって散乱偏光が変調を

受ける効果)で生じる直線偏光に加え、強い視線方向磁場があればゼーマン効果によって検出可能な円偏光が生じることにある (Alsina Ballester et al. 2016 ApJ など)。

CLASP2 の開発

CLASP2 は、電離マグネシウム線波長域 (280 nm) の強度 (I)、直線偏光 2 成分 (Q & U)、円偏光 (V) スペクトルの高精度 (0.1%) 観測を行う。科学的要求は高い水準を維持しつつも、開発期間短縮のため、打ち上げ後回収された CLASP1 観測装置の主構造や光学素子の大部分を再利用することで開発項目を最小限にした。CLASP2 観測装置は、直径 27 cm のカセグレン望遠鏡、偏光分光装置 (分光器 + 偏光解析装置)、スリット周辺の詳細層像を観測する二次元撮像光学系 (以下、スリットジョー光学系) の 3 つからなる (図 1)。0.1% という高い偏光精度要求を実現するため、少しでも多くの光量を確保するとともに、回折された ± 1 次光を使って直交する偏光 2 成分を同時に測定する新基軸の光学系を CLASP1 に続いて採用した (Narukage et al. 2015 Applied Optics, Tsuzuki et al. 2020 SPIE)。

観測装置の開発は、CLASP1 同様国際協力で進められた。フランス、米国、それぞれから回折格子と CCD カメラの提供を受け、国立天文台・先端技術センターの強力なバックアップのもと、観測装置の設計、素子開発、米国から持ち帰った観測装置への改造・組み立て作業、性能確認試験を行った。2018 年 11 月、完成した観測装置を米国へ出荷し、フライトコンピュータや観測ロケットとの噛み合わせ試験を経て、2019 年 4 月 11 日 (現地時間)、米国ニューメキシコ州にあるホワイトサンズミサイル実験場 (WSMR) にて打ち上げを迎えた。

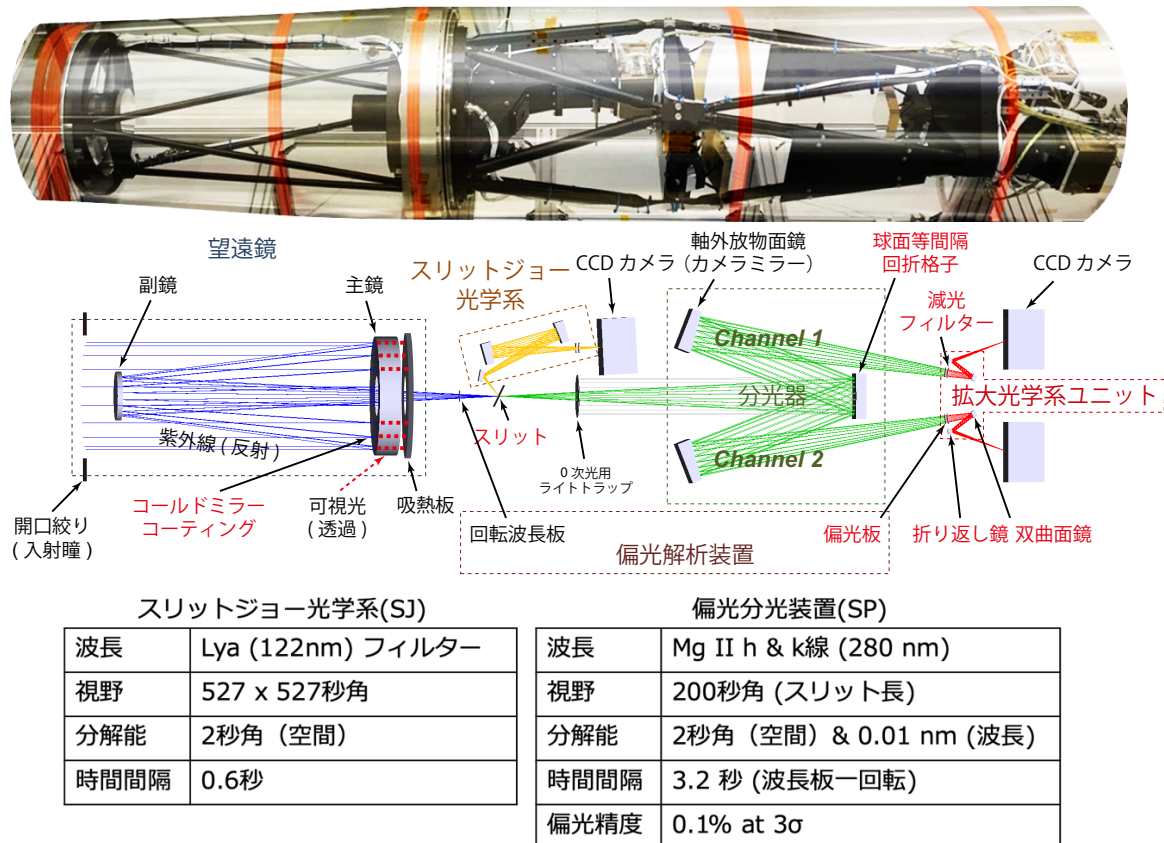


図 1: (上) CLASP2 観測装置。(中) CLASP2 光学系。赤字は CLASP2 での新規開発項目。(下) CLASP2 観測装置の様概略。光学試験の詳細については、Yoshida et al. 2018 SPIE, Song et al. 2018 SPIE を参照。

CLASP2 の成果

打ち上げられた CLASP2 は、160 km 以上の高度において約 6 分間、太陽観測を実施した。打ち上げ前から計画していた (1)太陽中心 (偏光較正データ取得のため)、(2)活動領域、(3)太陽縁近傍の静穏領域、の 3 つの領域を観測し、電離マグネシウム線域の偏光スペクトルの取得に世界で初めて成功した。中でも、活動領域の観測では、ゼーマン効果によって生じた優位な円偏光がほぼ全域にわたって観測され、さらに打ち上げ当初からのターゲットスペクトル線であった電離マグネシウム線 (彩層中～上部から放射) に加え、近傍のマンガン線 (彩層下部から放射) から視線方向磁場を得ることができた。これらと、ひので衛星で同時観測した光球磁場を合わせることで、光球からコロナ直下までの連続した磁場情報の取得に成功、彩層で急激に膨張する磁束管の姿が明らかとなった (図 2, Ishikawa et al. 2021 Science Advances)。今後、異なる大気層間で磁場を介して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。

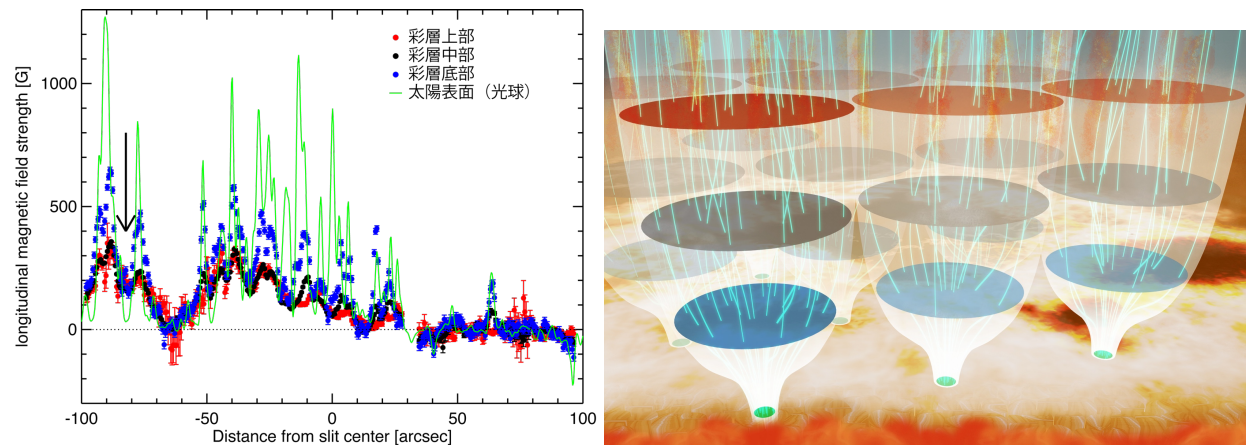


図 2: (左) 太陽表面からコロナ直下に至る磁場分布。CLASP2 で観測したのが、彩層底部 (青)・中部 (黒)・上部 (赤) の 3 層。太陽表面の磁場 (緑) はひので衛星の観測により得た。(右) CLASP2 とひので衛星の共同観測から明らかとなった磁束管の想像図 (クレジット: 国立天文台)。

CLASP2.1 立案

CLASP2 により、ゼーマン効果による電離マグネシウム線の円偏光が十分検出可能であること、さらにそこから彩層中・上部の視線方向磁場強度を導出できることが明らかになった。さらに彩層底部の視線方向磁場も同時に取得できるマンガン線の発見もあいまって、電離マグネシウム線波長域の有用性がさらに高まった。CLASP2 観測装置は、打ち上げ後パラシュートで砂漠に無傷で帰還した。そこで我々は、CLASP2 再飛行計画 (CLASP2.1) を立案することとなった。CLASP2.1 では、同一観測装置で、スリットスキャンを行う。これにより、視線方向磁場の 2 次元マップ化と、複数スペクトル線による高さ情報とにより、コロナへのエネルギー伝搬を担う磁場の 3 次元構造を明らかにする。

我々日米欧 CLASP2 チームが 2020 年 10 月に NASA へ提出した提案書は、5 段階評価で最高の Excellent を獲得し、2021 年 2 月に採択された。コロナ禍により見通しが立たない状況も懸念されたが、採択後間もなくして 2021 年秋の打ち上げが決まり、CLASP2.1 計画が本格始動した。提案書執筆中の計画立案時は、WSMR での射場試験前に、観測装置を保管している NASA/MSFC において、回転波長板の再インストール (長期保管の場合は回転面を水平にすることが望まれたので CLASP2 打ち上げ後一旦取り外して別に保管していた) 及び望遠鏡のアライメントを行うことを計画しており、2 回の米国への渡航を考えていた。しかし、当時はコロナワクチンがようやく普及し

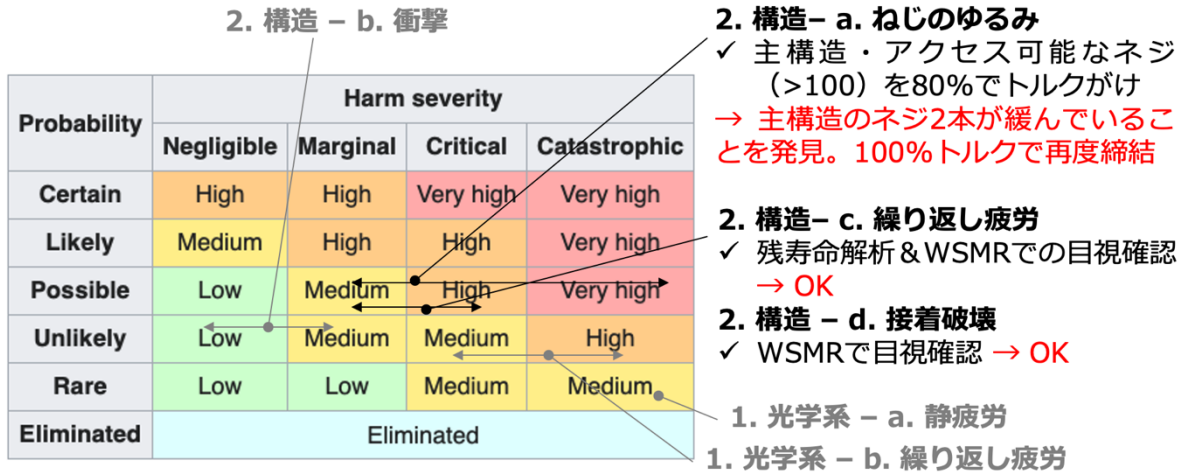


図3: 再飛行にあたってのリスク分析とその対応策。黒字で示した項目について対応することとした。

始めたところで、米国、日本それぞれで隔離が要請されること、また移動中の感染リスクも懸念されたことから、渡航回数を減らすために全ての作業を WSMR で実施することとし、また渡航者も、石川（日本側 Principal Investigator）と Song（日本側 Instrument Scientist）の2名に絞ることとなった。

CLASP2 観測装置を再飛行させる上で一番の懸念となったのが、限られた時間の中で構造の健全性をどう担保するか? である。そのために、あらゆるリスク要因を洗い出しその発生可能性とインパクトを評価した(図3)。そして、発生の可能性が否定できない、[1]ネジの緩み、[2]繰り返し疲労(特にヒンジ部分)、[3]光学素子の接着破壊、の3点について対策を講じることとした。なお、CLASP2 開発時にも、再利用する CLASP1 構造や光学素子について、トルクがけをしてネジの締結確認、接着の目視確認を国立天文台において実施し、問題は確認されなかった。今回、CLASP2.1 打ち上げに向けて、WSMR で[1], [3]への対応を行ったところ、接着は問題なかったが、主構造をささえるネジが2本緩んでいることが確認され、振動試験前に問題箇所を発見することができた。緩んだネジは、フライトトルクで再締結し、ロケットに結合しての振動試験、打ち上げに臨みいづれにおいても不具合は発見されなかった。なお、振動試験前後、打ち上げ後、その都度光学試験を行うことで、観測装置のアライメント及びスルーポットが保たれていることを確認している。

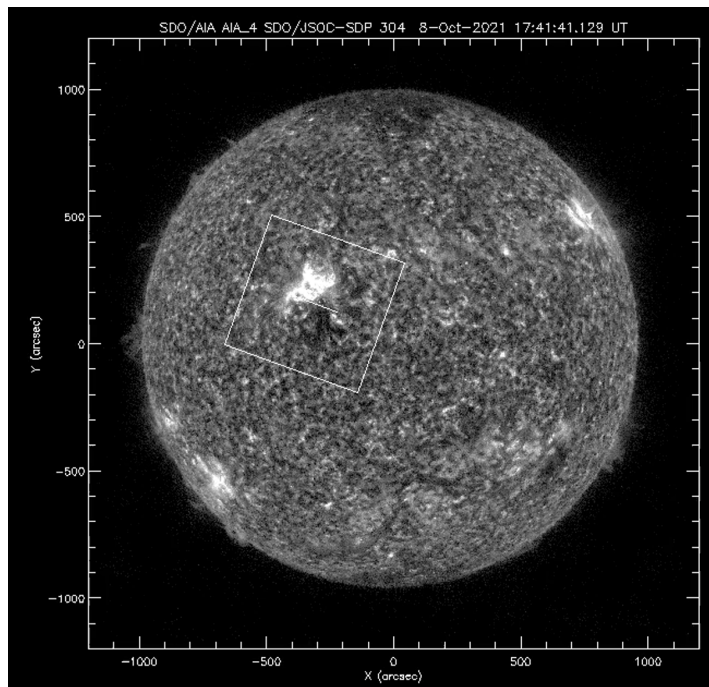


図4: CLASP2.1 で観測した活動領域。四角がスリットジョー光学系の視野を、直線が最初のスキンのスリット位置を示す。

CLASP2.1 打ち上げ

1ヶ月半に及ぶWSMRでの試験はおおむね順調に進み、2021年10月8日(現地時間)CLASP2.1を打ち上げた。ロケット、観測装置いずれも完璧に動作し、約6分間にわたって観測データの取得に成功した。まず実施したのが、偏光校正用データを取得するための太陽中心での観測である。この観測で得られたデータを打ち上げ後解析し、観測装置の偏光特性はCLASP2から変化していないであろうことを確認した。次に行った活動領域での観測では(図4)、ロケットのポインティングを1.7"ステップで動かすことで(nudge capability)、計16ヶ所、200"×26"の領域でのスキャン観測に成功した(図5)。各スリット位置では、17.6秒以上の積算を行い、様々な形状を持つゼーマン効果由来の電離マグネシウム線、マンガンの円偏光スペクトルが検出された。

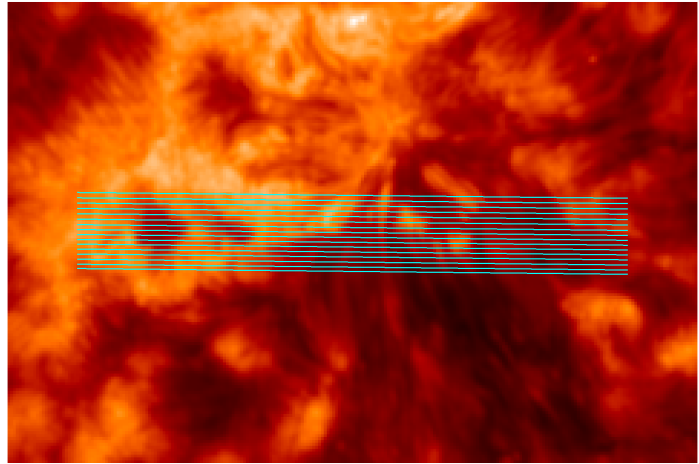


図5: CLASP2.1 スリットジョー光学系で観測した彩層の様子。水色線で示された16ヶ所で偏光スペクトルを得た。

今後

現在、チーム一丸となってデータ校正を進めている。CLASP2.1は、ひので衛星との共同観測にも成功しており、光球～コロナ直下の3次元磁場の導出など、科学成果創出に取り組んでいく。また、欧米と協力して開発を進めている次期太陽観測衛星Solar-C EUVSTの次の計画として(太陽研究者連絡会「30年代の科学研究戦略」White Paper 石川ら、川畑ら、大場ら)、海外の将来ミッションとして(Peter et al. 2021 *Experimental Astronomy*, Orozco Suarez et al. 2022 *Experimental Astronomy*)、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。これらの将来計画において、電離マグネシウム線やライマン α 線は、有力なスペクトル線と期待されており、我々の観測ロケット実験で得られた測定技術や観測データ、科学成果は、これらの検討を大きく進展させると期待される。また、これらの観測ロケット実験には、若い研究者やエンジニア、学生が携わっており、人材育成の観点からも大きな貢献を成したといえる。

謝辞

日本側CLASP2及びCLASP2.1の開発は、以下の助成を受けて進めた。

- 2021～2023年度JSPS科研費21H01138 基盤研究(B)
- 2020～2021年度JAXA小規模計画(科研費獲得により予算の配算なし)
- 2019～2021年度JSPS科研費19K03935 基盤研究(C)
- 2017～2019年度JAXA小規模計画「小規模太陽観測プロジェクト(CLASP2+SUNRISE-3)」
- 2016～2018年度JSPS科研費16H03963 基盤研究(B)
- 2016年度国立天文台共同開発研究
- 2015年度宇宙科学研究所国際共同ミッション推進経費
- 2013～2017年度JSPS科研費JP25220703 基盤研究(S)