

国際大気球太陽観測実験 SUNRISE-3

International Balloon-Borne Solar Observatory SUNRISE-3

勝川行雄⁽¹⁾, J. C. del Toro Iniesta⁽⁴⁾, S. Solanki⁽⁵⁾

久保雅仁⁽¹⁾, 原弘久⁽¹⁾, 清水敏文⁽²⁾, 大場崇義⁽¹⁾, 川畑佑典⁽¹⁾, 末松芳法⁽¹⁾, 浦口史寛⁽¹⁾, 都築俊宏⁽¹⁾, 納富良文⁽¹⁾

田村友範⁽¹⁾, 篠田一也⁽¹⁾, 松本琢磨⁽¹⁾, 石川遼子⁽¹⁾, 鹿野良平⁽¹⁾, C. Quintero Noda⁽⁶⁾, 永田伸一⁽³⁾, 一本潔⁽³⁾

(1) 自然科学研究機構国立天文台 (2) 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (3) 京都大学

(4) アンダルシア天体物理学研究所 (スペイン) (5) マックス・プランク太陽系研究所 (ドイツ)

(6) カナリア天体物理学研究所(スペイン)

概要

太陽彩層は、温度6千度の光球と数百万度のコロナの中間に位置する大気層であるとともに、ガス圧優勢の光球から磁気圧優勢のコロナに切り替わる(すなわち、プラズマ $\beta \sim 1$ となる)場所でもある。近年の高解像度撮像観測によって、彩層で発生する動的現象が詳細に観測されるようになり、磁気流体波動の励起と伝播、磁気リコネクションが引き起こす急激なプラズマの加速・加熱が、コロナ加熱と太陽風加速にも重要な寄与をしていると考えられるようになった。その物理プロセスを理解するため、光球・彩層を偏光分光観測し磁場・運動などの物理量を3次元的に定量化することが、今後の太陽観測の中心課題である。そこで、SUNRISE 気球実験 3 度目のフライト観測を日本・ドイツ・スペイン・アメリカの国際協力で2022年に実施する。近赤外線の偏光分光観測装置 SCIP (スキップ, Sunrise Chromospheric Infrared spectroPolarimeter)を日本主導で開発し、地上観測では到達不可能な高解像度かつ高精度な偏光分光観測を目指す。

1. SUNRISE 気球実験

SUNRISE 気球実験はドイツ・スペインのグループが中心となり推進してきた国際共同プロジェクトで、NASA の Long Duration Balloon (LDB)を使い、スウェーデン ESRANGE から大西洋上空を飛翔させる実験である。これまで 2009 年と 2013 年の2度飛翔実験を行った。口径 1m(「ひので」衛星は 50cm)の光学望遠鏡を搭載し(図 1)、高度35–37 km を約1週間かけて飛翔することで、地上では不可能な紫外線(波長 300–400 nm)観測と大気ゆらぎの無い高解像度・高精度光学観測を 24 時間連続 5 日間以上できる。



図 1: SUNRISE ギンドラと口径 1m 望遠鏡
(2013 年の SUNRISE-2 フライトより)

2. 近赤外線偏光分光装置 SCIP

彩層で起こる動的現象の磁場を測定するには、ゼーマン効果に高い感度を持つ近赤外線域のスペクトル線を精密に偏光分光観測する必要がある。2022 年に計画する 3 度目の飛翔実験 SUNRISE-3 に向けて、近赤外線の偏光分光装置 SCIP (スキップ, Sunrise Chromospheric Infrared spectroPolarimeter)を日本のグループを中心にスペイン・ドイツとの国際協力で開発している。SUNRISE 搭載の 1m 望遠鏡と組み合わせることで、0.2 秒角の解像度(「ひので」と同じ)・10 秒の時間分解能で 0.03%(1 σ)の偏光測定感度を達成することができる。光球から彩層を連続的にカバーできる K I D 線 770 nm 帯と Ca II 線 850 nm 帯の 2 波長域を同時に観測することが特徴であり、これにより、3 次元的な磁場・速度構造を得ることができる。

SCIP 光学ユニット(図 2)は、光学構造の組み立てとアライメントを 2020 年度中に完了している。日本側で開発した回転波長板駆動機構やスペインから提供されたカメラを組み込み、必要な光学性能(空間・波長分解能)を達成していること、実太陽光を導入し想定されるスペクトルが観測できることを確認した(図 3)。さらに、既知の偏光状態を入力してその応答を測定する偏光校正試験も完了し、要求する偏光精度を達成していることを確認した。高精度偏光分光観測のためには、回転波長板の位相とスキャンミラー(両者は日本担

当)を、高速読出カメラ(スペイン担当)と高速・高精度に同期し、太陽から来る光を逃さず検出し積算する必要がある。SCIP 光学ユニットへの組み込みの前に、スペイン担当の制御エレキ(E-unit)およびフライトカメラを結合させ、同期性能を実証した (図 4)。スキャンミラー機構はドイツ側担当部の光学系内部に組み込む必要があるため、ひと足早く 2020 年 11 月にドイツへ供給した。

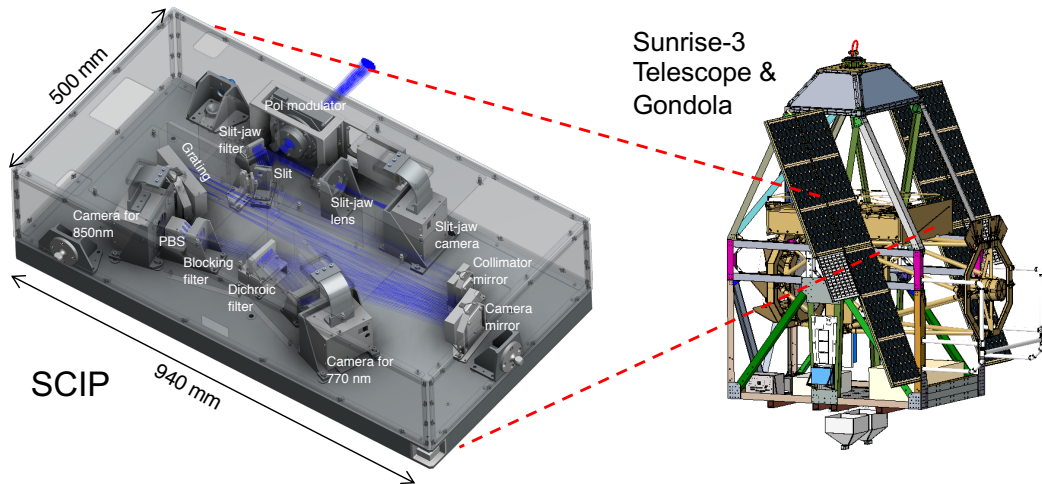


図 2: SCIP の光学・構造レイアウト(左)。940 mm x 500 mm x 340 mm の領域に収納できる大きさである。SCIP は焦点面装置箱内に搭載される(右)。

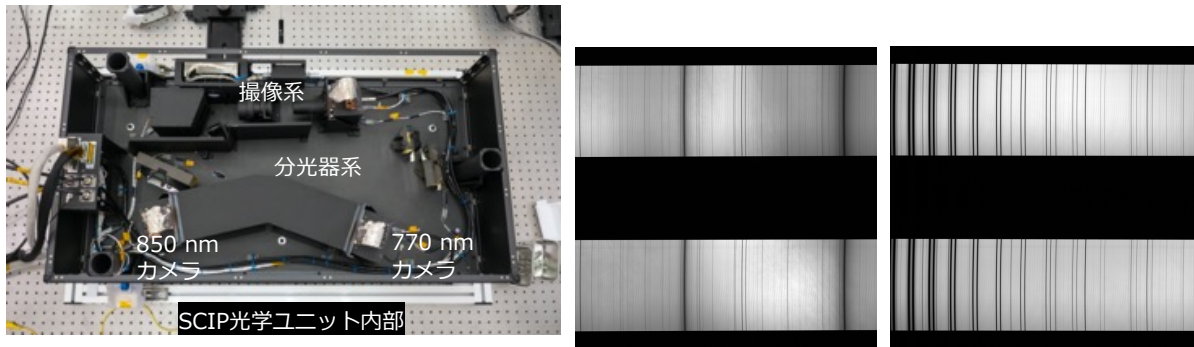


図 3: (左)光学素子やカメラを CFRP サンドイッチパネル上に配置した SCIP の光学構造。(右)SCIP に太陽光を導入して得た太陽スペクトル。

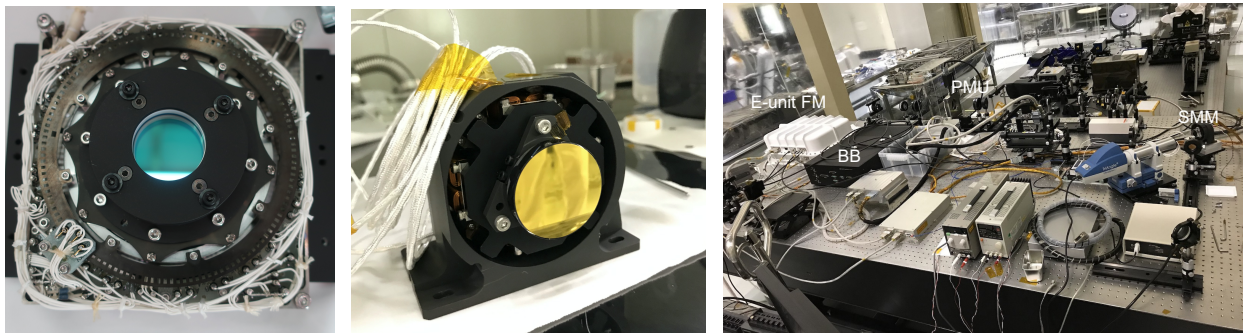


図 4: SCIP 用の回転波長板駆動機構(PMU, 左)とスキャンミラー機構(SMM, 中)。国立天文台先端技術センターで実施した SCIP 制御エレキ(SCIP-E unit, FM)との結合試験。

飛行環境時における SCIP の熱制御性能と光学性能を確認するため、完成した SCIP 光学ユニットを大型真空チャンバーにいれ、温度サイクルを負荷するとともに、飛行時の運用温度環境を模擬する熱真空試験を行った(図 5, 図 6)。その結果、温度サイクル試験前後で性能に変化がないことを確認した。運用温度範囲で空間分解能、波長分解能が所定の性能を達成していることを確認した。検出器上の画像位置が温度

依存することがわかったが問題ない範囲である。熱真空試験では、フライト時の温度環境を完全に模擬できているわけではないので、フライト時の温度分布を予測するには熱数学モデルが必要になる。SCIP 内の温度分布を熱数学モデルと比較検証し、熱数学モデルを更新する作業を行っている。

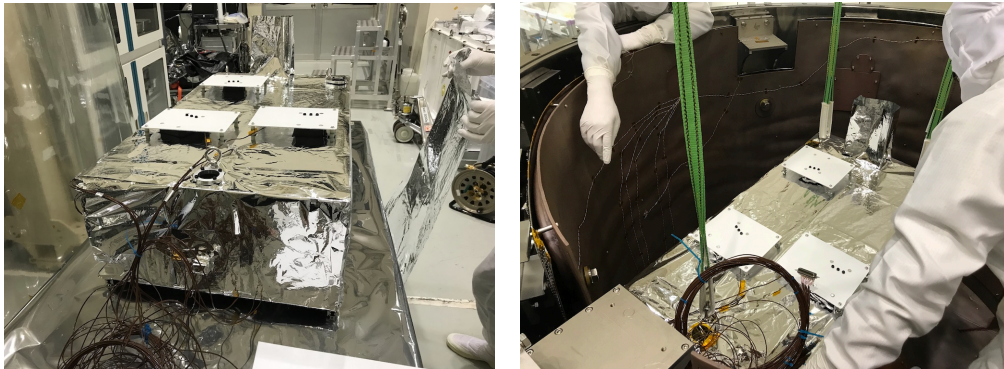


図 5: (左) 断熱シート(Single Layer Insulator)によって覆われた SCIP。上面の White Paint は 3 台のカメラの放熱板。(右) 熱真空試験のため大型チャンバに SCIP を入れる様子。

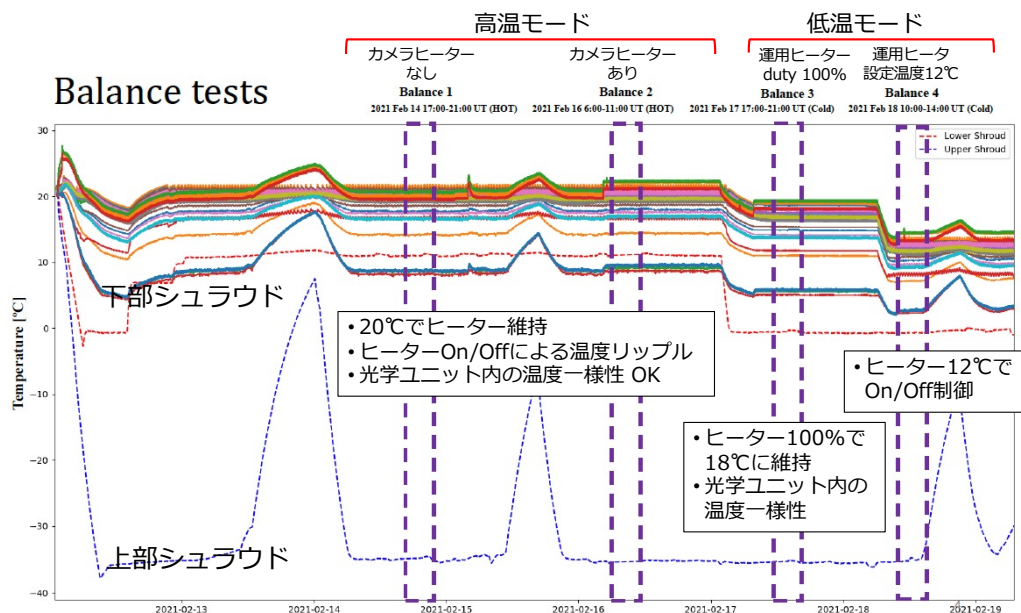


図 6: 熱真空試験における温度履歴。チャンバー内の上部シュラウドと下部シュラウドを異なる温度に制御することで、放熱板を冷却できるような温度分布を作った。各モードにおいて光学性能評価を行っている。



図 7: SCIP 光学ユニットを輸送コンテナに収容し国立天文台からドイツへ出荷した(2021 年 8 月)。



図 8: ドイツのマックス・プランク太陽系研究所で輸送コンテナを開ける様子(左)、光学ユニットを焦点面装置箱への組み込み作業(中)、組み込まれた SCIP 光学ユニット(右)。

当初は 2021 年 3-4 月に国内試験を完了しドイツへ出荷する予定であったが、SCIP に搭載している 3 台のカメラでバイアス画像が変動する現象が 2021 年 3 月に発覚した。これらのカメラはスペインで SUNRISE-3 用に新規に開発されたもので、裏面照射 CMOS センサー(GSENSE 400BSI, 市販品)を使用したものである。カメラ内の不具合箇所を特定した上で、ドイツ、スペイン、日本で協議した結果、2022 年のフライトを維持しつつカメラを修理する工程を組めることを確認し、SCIP 搭載カメラを修理することとした。一端カメラを取り外し、スペインで修理したカメラを再度光学ユニットに組み込み、アライメント、光学性能評価、熱真空試験を実施した上で、2021 年 6 月にドイツのマックス・プランク太陽系研究所へ出荷した(図 7)。

SCIP 光学ユニットがドイツのマックス・プランク太陽系研究所に到着後、装置が問題なく動作することを確認したのち、焦点面装置箱へ搭載し位置調整を行うとともに、さらに偏光校正試験を行った(図 8)。これらの試験は、前半は手順書に基づいてドイツ側で作業してもらいつつ日本からもネット接続でサポートする体制で実施した。後半は日本から 2 名が渡航し、現地にてドイツ側と共同で作業を行い、問題なく完了させることができた。今後、同研究所にて、他の観測装置、ゴンドラ、望遠鏡を結合して行う吊下試験、観測装置間の協調動作試験、熱真空試験を行う計画であり、日本からも必要に応じて渡航する計画である。2022 年 3 月からキルナへ輸送し射場試験を開始する。

3. 今後のスケジュール

SUNRISE-3 気球実験の飛翔観測を 2022 年 6 月に計画している。各国で開発された観測機器は、ドイツにて望遠鏡・ゴンドラと結合させ、試験を実施する時間を十分確保し進めている。COVID-19 の影響は多少あるが、2022 年のフライトを死守することを参加機関で合意し、遅延を発生させないように努めている。

2021 年 11 月: 望遠鏡・ゴンドラ吊下試験

2021 年 11-1 月: SUNRISE 運用試験

2021 年 2 月: 焦点面装置全体の熱真空試験

2022 年 3 月: スウェーデン・キルナ ESRANGE へ輸送、射場での飛翔前試験

2022 年 6 月: フライト観測

謝辞

SUNRISE-3 機器の開発は、国立天文台先端技術センターにて行っています。日本の SUNRISE-3 への参加は、ロケット実験 CLASP2 とともに「小規模太陽観測プログラム」(FY2017-2022)として、ISAS 小規模計画の支援を受けています。搭載装置の開発、及び、SUNRISE-3 に向けた偏光データ解析手法の開発と数値モデリング研究を、科研費基盤(S)「気球太陽望遠鏡による精密偏光観測: 恒星大気における磁気エネルギー変換の現場に迫る」に基づき実施しています。