

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⁾, 久保雅仁⁽¹⁾, 川畑佑典⁽¹⁾, 大場崇義⁽¹⁾, 松本琢磨^(1,3), 石川遼太郎⁽¹⁾, 原弘久⁽¹⁾, 清水敏文⁽²⁾, 浦口史寛⁽¹⁾, 都築俊宏⁽¹⁾, 納富良文⁽¹⁾, 篠田一也⁽¹⁾, 田村友範⁽¹⁾, 末松芳法⁽¹⁾, J. C. del Toro Iniesta⁽⁴⁾, D. Orozco Suárez⁽⁴⁾, M. Balaguer Jiménez⁽⁴⁾, C. Quintero Noda⁽⁶⁾, S. Solanki⁽⁵⁾, A. Korpi-Lagg⁽⁵⁾

(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) 名古屋大学

(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を目的とするのが国際気球実験SUNRISE-3である。SUNRISE-3は口径1mの光学望遠鏡で太陽を観測するもので、日本のグループは近赤外線偏光分光観測装置SCIP(スキップ, Sunrise Chromospheric Infrared spectroPolarimeter)の開発を主導した。これにより、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の実現を目指す。SUNRISE-3のフライトを2022年7月に実施したが、ゴンドラの不具合により観測データ取得することができなかった。装置は健全な状態で回収されたので、2023年度以降の再フライトを目指している。

1. SUNRISE 気球実験

SUNRISE 気球実験はドイツ・スペイン・アメリカ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行しながら太陽を観測する実験である。これまで2009年と2013年の2度飛行実験を行った。口径1m(「ひので」衛星は50cm)の光学望遠鏡を搭載し(図1)、高度35-37kmを約1週間かけて飛行することで、地上では不可能な紫外線(波長300-400nm)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。これまで2009年6月と2013年6月の2度の飛行実験を行い、それぞれ太陽活動が静穏な時期(2009年)と活発な時期(2013年)で観測を行い大きな成果を上げた。



図1: SUNRISE ゴンドラと口径1m望遠鏡
(2022年6月@ESRANGE)

2. 近赤外線偏光分光装置 SCIP

過去2度のSUNRISE飛行実験では、550nmより短波長の可視光・紫外線における光球の撮像観測のみであった。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。そこで3度目の飛行実験SUNRISE-3に向けて、近赤外線偏光分光装置SCIP(スキップ, Sunrise Chromospheric Infrared spectroPolarimeter, 図2)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が開発することになった。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770nm帯とCa II線850nm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 3)については、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、要求される光学性能(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(図 3 右)が観測できることを確認した。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較正試験も完了し、要求する偏光精度を達成していることを確認した。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、温度サイクル負荷と飛行時の運用温度環境における性能検証を行う熱真空試験を行った(図 4)。その後、SCIP 搭載の 3 台のカメラ(スペイン担当)にバイアスレベルが変動する不具合があったため、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 8 月に国内開発を完了し、ドイツのマックス・プランク太陽系研究所へ出荷した(図 4 右)。

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、さらに偏光較正試験を行った(図 5 左、中)。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。その後、他の観測装置、ゴンドラ、望遠鏡を結合して行う吊下試験を行い、その状態で太陽指向試験も行い、望遠鏡と結合した太陽光スルーポット、スペクトル線位置、他の観測機器とのアライメントを検証した(図 5 右)。さらに、観測装置間の協調動作試験、熱真空試験を行い、ドイツでの試験を 2022 年 3 月までに完了させた。

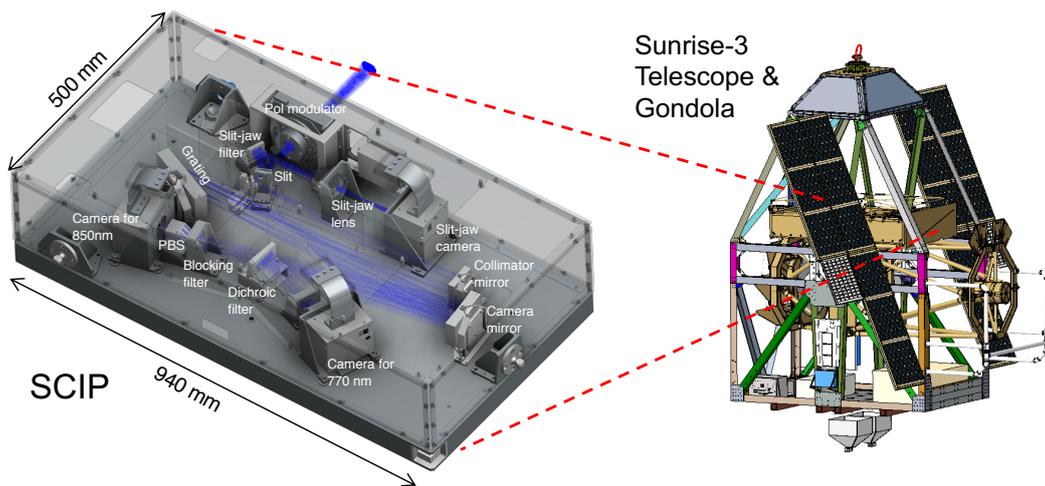


図 2: SCIP の光学・構造レイアウト(左)。940 mm x 500 mm x 340 mm の領域に収納できる大きさである。SCIP は焦点面装置箱内に搭載される(右)。

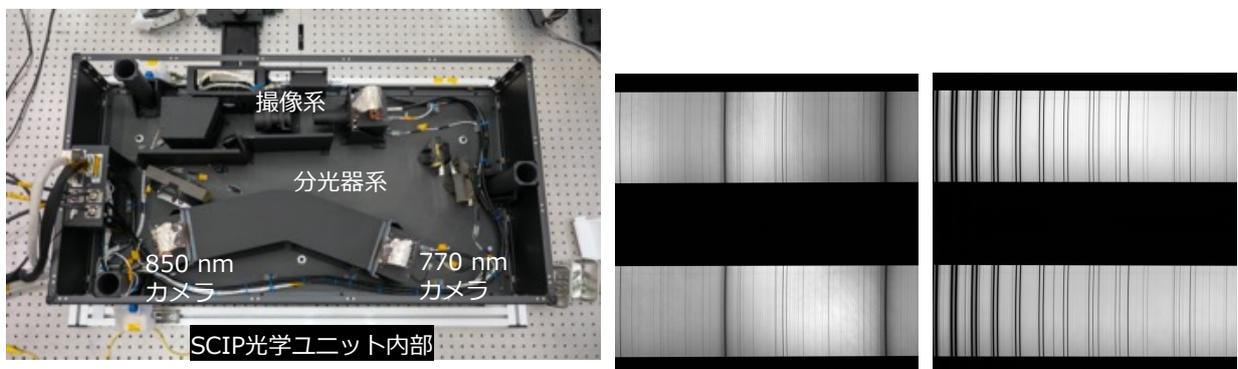


図 3: (左)光学素子やカメラを CFRP サンドイッチパネル上に配置した SCIP の光学構造。(右)SCIP に太陽光を導入して得た太陽スペクトル。

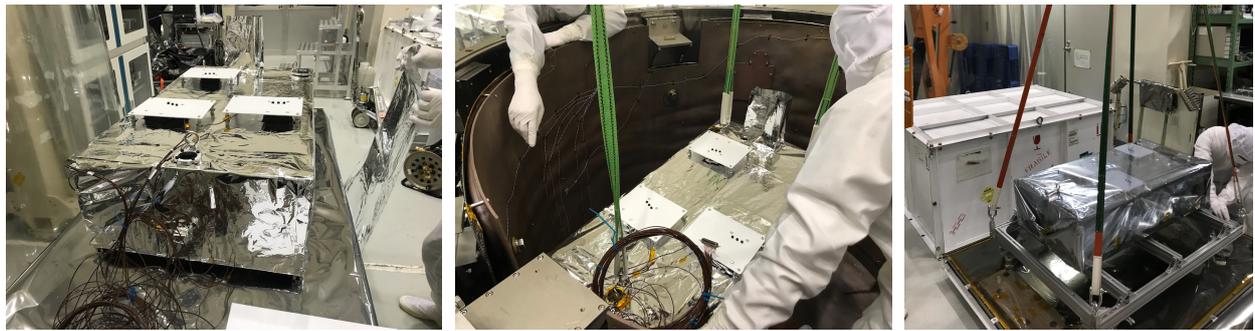


図 4: (左) 断熱シート(Single Layer Insulator)によって覆われた SCIP。上面の White Paint は 3 台のカメラの放熱板。(中) 熱真空試験のため大型チャンバに SCIP を入れる様子。(右) SCIP 光学ユニットを輸送コンテナに収容し国立天文台からドイツへ出荷した(2021 年 8 月)。



図 5: (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)望遠鏡とゴンドラを結合し行った太陽指向試験。

3. スウェーデン・キルナでの射場試験・飛翔観測

2022 年 4 月からキルナ ESRANGE において、ドイツから輸送された SUNRISE ゴンドラ、望遠鏡、観測装置を再度組立て、アライメント、結像性能、望遠鏡と装置の結合偏光較正試験、太陽指向試験を実施した(図 6 左、中)。また、飛翔中に観測と較正測定を効率よく行うため、観測機器を協調動作させるタイムラインの作成とその試験に多くの時間を費やした。タイムラインは、飛翔中に多様な観測モードを行うため、各観測モードにおいて装置をある時刻にどのように動作させるかを定義するもので、過去の SUNRISE -1, 2 では用意されたものの有効に使われなかった。これを地上試験で検証したことで、観測装置側としては、飛翔観測を実施する準備を整えた。

一方、NASA の気球関係の荷物がキルナに到着するのがおよそ 1 ヶ月遅れ、6 月中旬から、同時期に飛翔させる計画であった XL-Calibur と SUNRISE-3 の飛翔に向けた準備が始まった。SUNRISE-3 が大西洋を越えてカナダまで飛翔できるのは 7 月 10 日までとされたが、SUNRISE-3 が通信等の試験も終えて飛翔準備完了したのが 7 月 6 日であった。最終的には 7 月 10 日のギリギリのタイミングで放球することができた(図 6 右)。しかし放球時に発生した衝撃によって、望遠鏡高度軸を保持する機構(米国担当箇所)に故障が発生し、望遠鏡が天頂方向を向いた状態で固定されてしまい、太陽を指向できない状態となってしまった。装置を安全に回収することを優先し、放球からおよそ 5 時間後に運用を停止し、スウェーデン域内に降下させ、ESRANGE へと回収した。飛翔中は、望遠鏡指向以外、日本担当の SCIP を含む観測装置は問題なく動作していたことはテレメトリで確認できている。

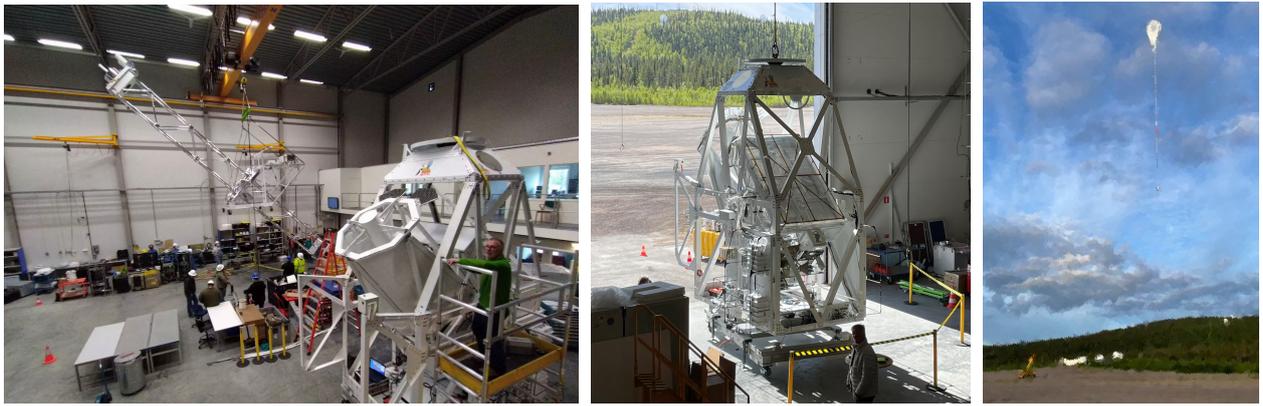


図6: (左)ESRANGEにおいて組み上げた SUNRISE-3(手前)と XL-Calibur(奥)、(中)SUNRISE-3 の太陽指向試験、(右)2022年7月10日の SUNRISE-3 放球。

4. 回収後の健全性確認

2022年8月から9月にかけて、回収後の装置の健全性確認を ESRANGE にて行った。望遠鏡の鏡にチリや水滴跡による汚れが見られる以外は装置は健全である。日本担当の SCIP も電源を投入し、駆動機構、カメラ、ヒーターが問題なく動作すること、SCIP 光学ユニットのアライメントがわずかに変化していたが、上流光学系の微調整で修正できる程度の量であることを確認した。そのため、SCIP を日本に持ち帰り修理する必要はないと判断した。他の観測装置も健全であることを確認できている。この結果をうけて、2023年に再飛行させることを目指して気球を提供する NASA との交渉を開始している。回収された SUNRISE-3 は、ゴンドラと望遠鏡は分離され、ゴンドラは担当の米国へ返送された。放球時の動画やテレメトリデータから不具合調査を行っており、放球時に故障した箇所を特定し改修する準備を進めている。望遠鏡と観測装置はキルナからドイツへ返送され、2023年のフライトに向けて、ミラーの清掃や光学系の再調整を実施する。

5. 今後のスケジュール

SUNRISE-3 気球実験の再フライトを 2023年6月に行う場合のスケジュールを以下に示す。

2022年11-2023年2月: SUNRISE 搭載焦点面装置試験 @ ドイツ
 2023年3月: スウェーデン・キルナ ESRANGE へ輸送
 2023年4月-5月: スウェーデン・キルナ ESRANGE での射場試験
 2023年6月: フライト観測

2023年6-7月に再フライトが可能かどうかは現在調整中で、2023年1月までには確定する見込みである。再フライトが 2023/2024年のどちらの場合でもドイツでの試験に際しては、日本から渡航をせずリモートで観測機器を操作して試験にあたる。

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」(研究代表者: 勝川)に基づき実施しています。