

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⁽⁵⁾, S. Solanki⁽⁶⁾

久保雅仁⁽¹⁾, 原弘久⁽¹⁾, 清水敏文⁽²⁾, 大場崇義⁽²⁾, 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⁽³⁾, 永田伸一⁽⁴⁾, 一本潔⁽⁴⁾

(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) オスロ大学 (ノルウェー) (4) 京都大学
(5) アンダルシア天体物理学研究所 (スペイン) (6) マックス・プランク太陽系研究所 (ドイツ)

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2021年に実現する。近赤外線偏光分光観測装置 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・スペインの太陽研究グループが中心となり推進してきた国際共同太陽観測プロジェクトである。アメリカ 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する実験である。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)、太陽を高指向精度で追尾する大型ゴンドラも専用に開発された(参考文献[1][2])。高度35-37km 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光学観測を 24 時間連続 5 日間以上できることが特徴である。



図 1: SUNRISE ゴンドラと口径 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し、磁気エネルギーの輸送と散逸過程を調べるには、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、2021 年に計画する3度目の飛翔実験 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)を日本のグループを中心にドイツ・スペイン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(図 2)。SCIP の基本仕様を表 1 に、光学・構造レイアウトを図 3(左)に示す。

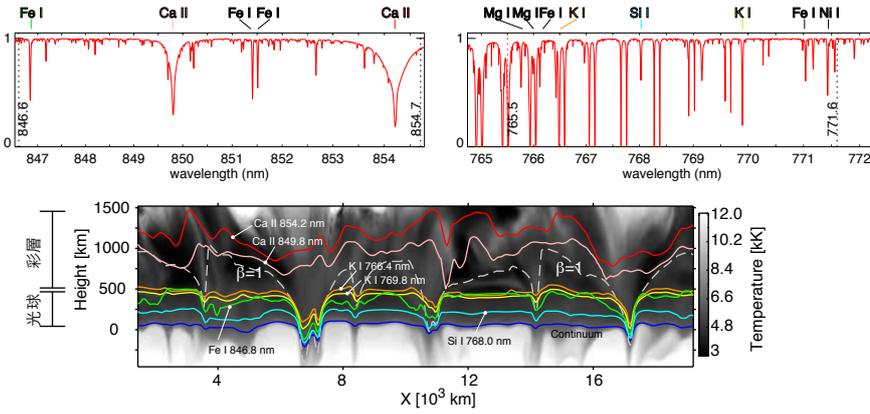


図 2: 近赤外線偏光分光装置 SCIP で観測する波長帯とその波長帯に含まれるスペクトル線(上図)。3次元 MHD 数値シミュレーションに基づき、代表的なスペクトル線が太陽大気中で形成する高さを下図に示す。ガス圧と磁気圧が釣り合う(プラズマ $\beta=1$)高さを一点鎖線で示す(参考文献[3])。

表 1: SCIP の基本仕様

	科学要求	SCIP 仕様
観測波長	光球・彩層を同時に切れ目なく観測できるスペクトル線の組み合わせ	① Ca II 線 850 nm 帯 (846.6 – 854.7 nm) ② K I 線 770 nm 帯 (765.5 – 771.6 nm) の 2 波長帯を同時観測
空間分解能	彩層の動的な磁気流体现象を分解できる空間・時間分解能	0.2 秒角 (波長 850 nm の回折限界分解能, ひので撮像観測と同等), 0.094 秒角/ピクセル
時間分解能		偏光分光(Stokes IQUV)モード: 1–10 秒/step 分光(Stokes I only)モード: 全視野 45 秒以内
波長分解能		$\lambda / \Delta \lambda = 2 \times 10^3$
偏光精度	彩層磁場観測に必要な波長分解能・偏光精度	要求: 0.05% (10 G 視線磁場 @ Ca II 854 nm) 目標: 0.03% (5 G 視線磁場 @ Ca II 854 nm)
視野	動的現象の環境条件を調べるのに必要な視野	58 秒角(スリット) × 58 秒角(スキャン) (超粒状斑を十分にカバーできる視野)

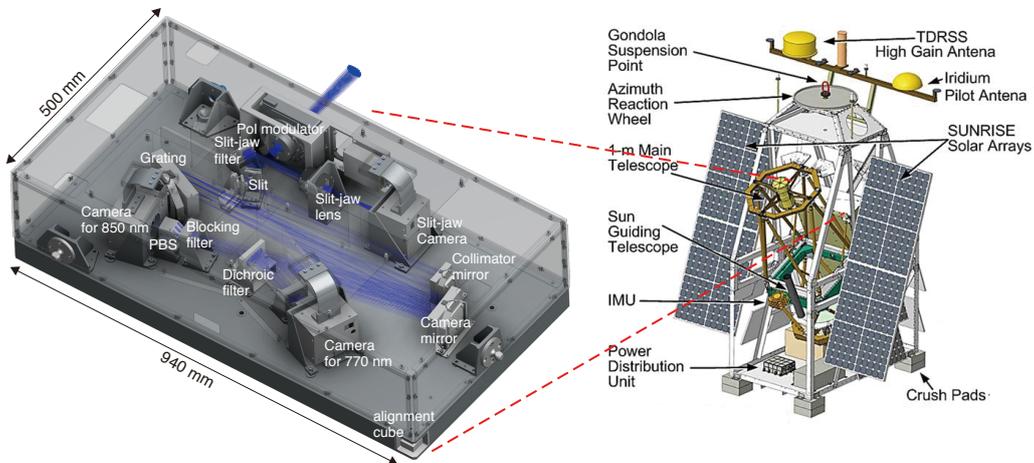


図 3: (左) SCIP の光学・構造レイアウト。940 mm x 500 mm x 340 mm の領域に収納される。(右) SUNRISE-3 ゴンドラの構成(米国担当)。

2.1. 光学系・熱構造系

SCIP を構成する光学素子は 2018 年度から順次製作を行っている。結像性能の鍵を握るのは、コリメータ鏡とカメラ鏡の 2 枚の軸外し高次非球面鏡であるが、国内メーカーと共同開発し高い鏡面精度を達成している。また、これらの鏡に耐候性がありかつ高反射率の銀コーティングを施した(図 4 左, 左中)。波長分割フィルターなど、誘電体多層膜コーティングを用いるフィルターでは、コーティングの応力による鏡面変形が懸念されたが、裏面の反射防止コーティングの厚みを最適化することで、多層膜コーティングによる鏡面変形をキャンセルすることに成功した(図 4 右中, 右)。2019 年 11 月の段階で、スリットモニター系のレンズユニットのみ製作中であり、他の光学素子はすでに完成している。

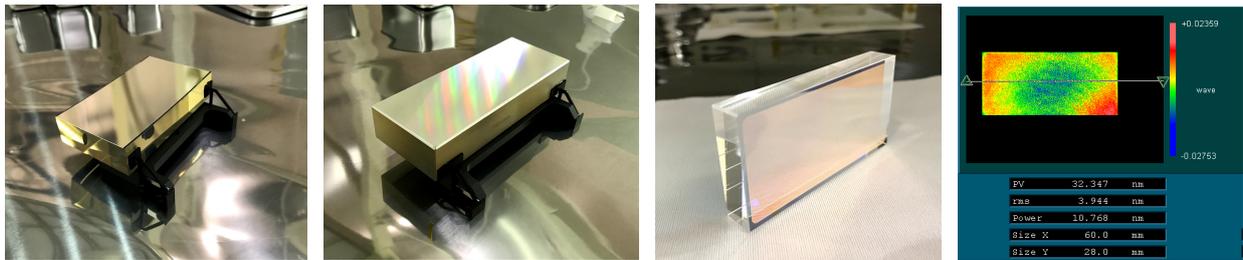


図 4: (左, 左中) 保護膜付き銀コーティングを施した高次非球面鏡と回折格子。鏡を保持するフレクシャ機構に接着された状態。(右中, 右) 波長分割フィルターとその波面誤差。850nm 帯と 770nm 帯を分割するフィルターで、表面の誘電体多層膜コーティングによる応力変形を補償するため裏面の AR コーティングを最適化することで、コーティング後面精度は 6nm RMS を下回っている。

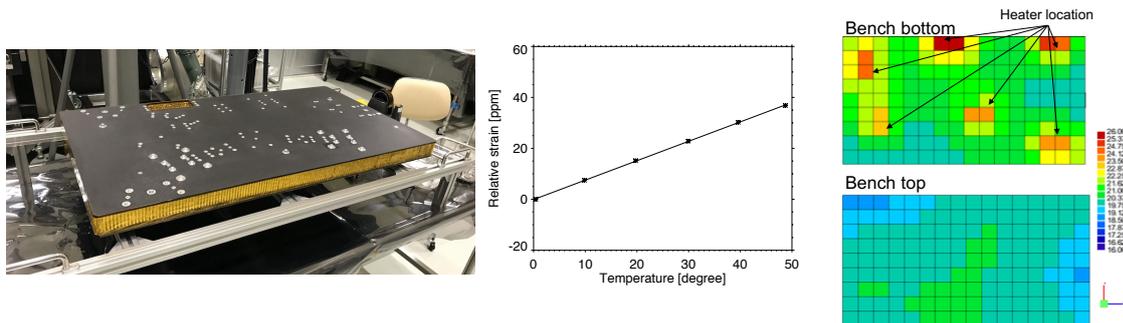


図 5: (左) SCIP 用に製作した CFRP 表皮アルミニウムハニカムコアの光学ベンチ。(中)サンプルを用いた熱膨張率測定。<math>< 1\text{ppm/K}</math>であることを実証した。(右)熱数学モデルで運用ヒーター動作時の光学ベンチ内の温度分布を計算(低温ケースのとき)。

運用時に観測装置を 10~30°C 温度範囲に維持する。この温度範囲で光学性能を保証するため、CFRP スキンとアルミニウムハニカムコアからなるサンドイッチパネルを開発し、光学素子を光学ベンチ上に配置する(図 5 左)。サンドイッチパネルのサンプルを測定することで、熱膨張係数が 1ppm/K より小さく、また脱水変形も 1 週間のフライトで小さいことを確認した(図 5 中)。さらに熱変形の小さい光学系保持機構を設計・製作し、光学素子の接着を順次進めている(図 4 左, 左中)。熱設計のため、熱数学モデルをスペイン・マドリド工科大と共同で構築し、電気機器(カメラ、回転波長板駆動機構、ヒーター)の発熱を取り込んだ熱解析を実施した(図 5 右)。さらに SUNRSIE-3 の全体モデルに組み込んだ熱解析を実施している。これにより、カメラ受光面を冷却するための放熱面とヒーターの設計を完了し、実装の段階である。

2.2. 駆動機構・電気系

高精度偏光分光観測のためには、偏光変調装置(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。波長板回転機構(図 6)は CLASP ロケット実験で搭載したのから、回転一様性を維持したまま回転速度を上げる(4.8 秒/回転から 0.5 秒/回転へ)ことで偏光測定精度をあげたものである。先行して開発した SCIP の波長板回転機構の性能が評価され、SUNRISE-3 に搭載するドイツ担当の紫外線偏光観測装置 Sunrise Ultraviolet Imager and Spectropolarimeter (SUSI)にも同じ回転駆動機構を提供することになり、その開発も 2019 年度中に完

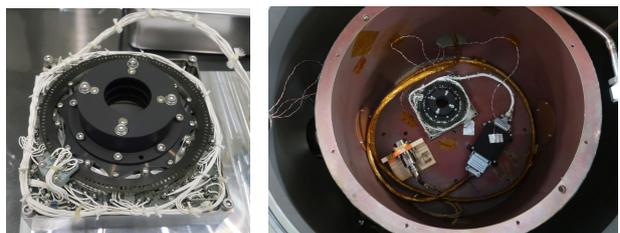


図 6: SCIP 用の回転波長板駆動機構(左)と国立天文台で実施した熱真空試験の様子(右)。

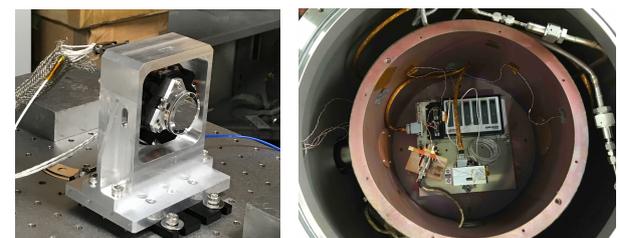


図 7: SCIP 用のスキャンミラー機構 (左)と国立天文台で実施した熱真空試験の様子(右)。

了させた。スキャンミラー機構(図 7)は、高い安定度と高速動作を達成するため、静電容量センサーと電磁アクチュエータを用いたミラーの傾き制御機構を開発し、その性能を実験室で実証した。両駆動機構に対して、気球搭載時の動作を実証するため、国立天文台にて熱真空環境試験を実施した。運用温度範囲における動作性能とともに、非運用温度サイクルを负荷した後の動作を確認した(図 6, 図 7)。高速読出(2k×2k 素子を毎秒 32 フレーム以上)カメラの開発では、ドイツ MPS、スペイン・アンダルシア天体物理学研究所(IAA)と協力して近赤外線の高い感度を持つ裏面照射 CMOS センサーの性能を評価し、スペイン IAA が SCIP 用のカメラを設計し現在製作中である(図 8)。

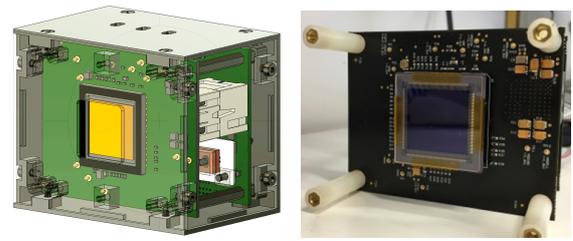


図 8: SCIP に搭載する裏面照射 CMOS センサーを使ったカメラの設計(左)とそのプロトモデル (右)。

3. SUNRISE-3 の国際協力体制とスケジュール

SUNRISE 気球実験の主担当機関はドイツ・マックスプランク太陽系研究所(MPS)である。望遠鏡部とともに、観測装置に光を分配する Image Stabilization and Light Distribution(ISLiD)、及び紫外線偏光観測装置 SUSI を担当している。スペイン・アンダルシア天体物理学研究所(IAA)は偏光撮像装置 Imaging Magnetograph Experiment(IMaX+)を担当している。上記 2 機関と日本に加え、像安定化装置 Correlation tracking and Wavefront Sensing (CWS)を担当するドイツ・キーペンホイヤー太陽物理学研究所(KIS)、ゴンドラを担当するアメリカ・応用物理学研究所 (APL)が、取り決めたインターフェイスをもとに各自開発を進めている。

日本が開発主担当の SCIP で は、日本で光学・構造系と駆動機構を担当し、スペインがその制御エレキを担当する。制御エレキの BBM を先出して日本に提供してもらうことで、日本側装置との電気噛み合わせ試験を実施するとともに、光学・構造の性能評価試験を行う。これにより、双方で並行して開発できる体制とし、さらに、制御エレキ FM との電気結合試験で発生し得るリスクの低減を図る。SUNRISE-3 気球実験の飛翔観測を 2021 年 6 月に実施するための開発スケジュールを以下にまとめる。

2020 年 2 月	SCIP 制御エレキ BBM(スペイン担当)との電気噛み合わせ試験 並行して光学構造組立、光学偏光性能試験
2020 年 5 月	SCIP 熱真空試験
2020 年 6 月	SCIP 制御エレキ FM(スペイン担当)との結合試験
2020 年 8 月	SCIP をドイツ・MPS へ輸送、Sunrise 望遠鏡への搭載・結合試験
2021 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
2021 年 6 月	フライト観測

謝辞

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」(FY2017-2021)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。

参考文献

- [1] “The Sunrise Mission,” Barthol et al., Solar Physics, 268, 1 (2011).
- [2] “The Second Flight of the Sunrise Balloon-borne Solar Observatory: Overview of Instrument Updates, the Flight, the Data, and First Results”, Solanki et al., ApJS, 229, 2 (2017).
- [3] “Chromospheric polarimetry through multiline observations of the 850-nm spectral region”, Quintero Noda et al., MNRAS, 464, 4534 (2017).