

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) カナリア天体物理学研究所 (スペイン)

(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2022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させる実験である。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。



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。そこで、2022年に計画する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)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(図2)。SCIPの基本仕様を表1に、光学・構造レイアウトを図3に示す。

2.1. 光学ユニット

SCIPを構成する光学素子や光学素子を保持するホルダ・マウント、CFRP サンドイッチパネルからなる光

学ベンチは 2019 年度中に完成しており、2019 年度後半から組立、調整試験を行っている。組立では、接触式 3 次元計測により、光学素子の位置を $10\ \mu\text{m}$ オーダーの精度で計測し、設置誤差をシム調整することで理想的な位置に追い込むことを行った (図 4 左)。その後、光学系に近赤外線波長可変レーザー光や白色ランプ光を導入し、結像性能を評価し、光学素子の位置・傾きを最適化する調整が完了している。十分良好な空間分解能と波長分解能になっていることを確認できている。さらに、太陽光を導入し、太陽のスペクトル線を実際に測定することで、観測波長範囲と波長分解能を確認している(図 5)。今後、偏光校正試験を実施する。

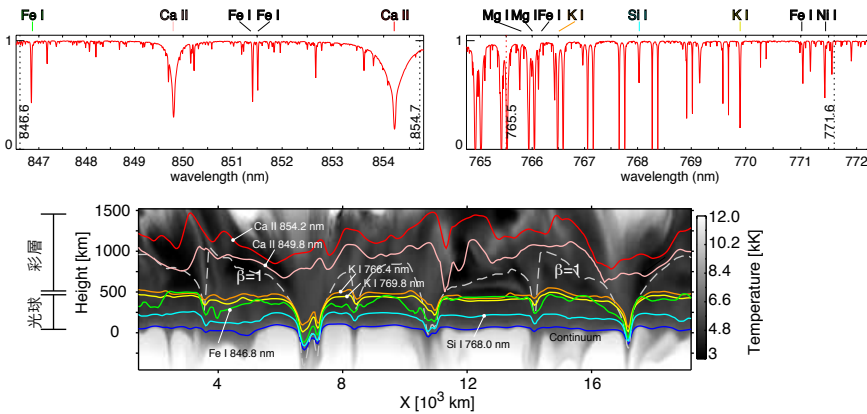


図 2: 近赤外線偏光分光装置 SCIP で観測する波長帯とその波長帯に含まれるスペクトル線(上图)。3次元 MHD 数値シミュレーションに基づき、代表的なスペクトル線が太陽大気中で形成する高さを下图に示す。ガス圧と磁気圧が釣り合う(プラズマ $\beta = 1$)高さを一点鎖線で示す。

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現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 | | $\lambda / \Delta \lambda = 2 \times 10^5$ |
| 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) x 58 秒角 (スキャン) (超粒状斑を十分にカバーできる視野) |

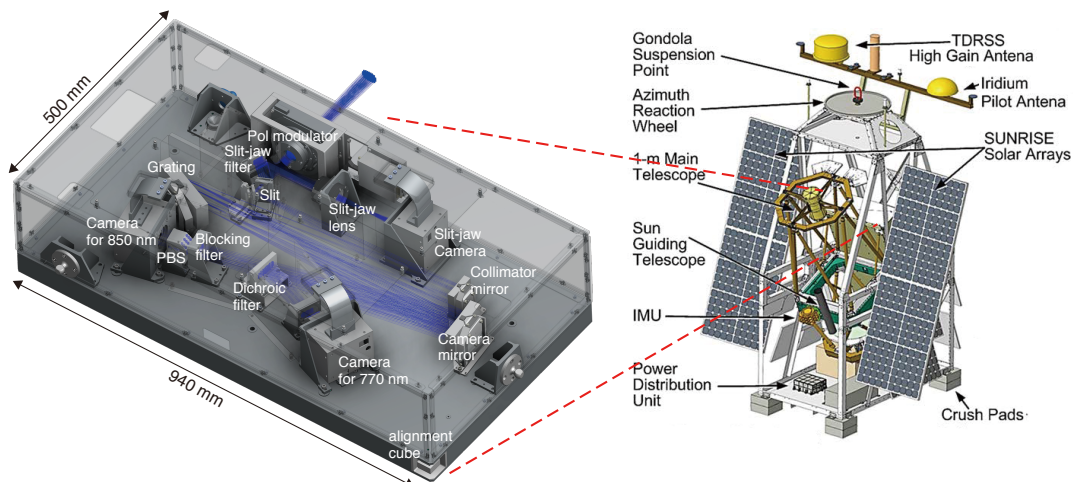


図 3: (左) SCIP の光学・構造レイアウト。940 mm x 500 mm x 340 mm の領域に収納される。(右) SUNRISE-3 ゴンドラの構成(米国担当)。

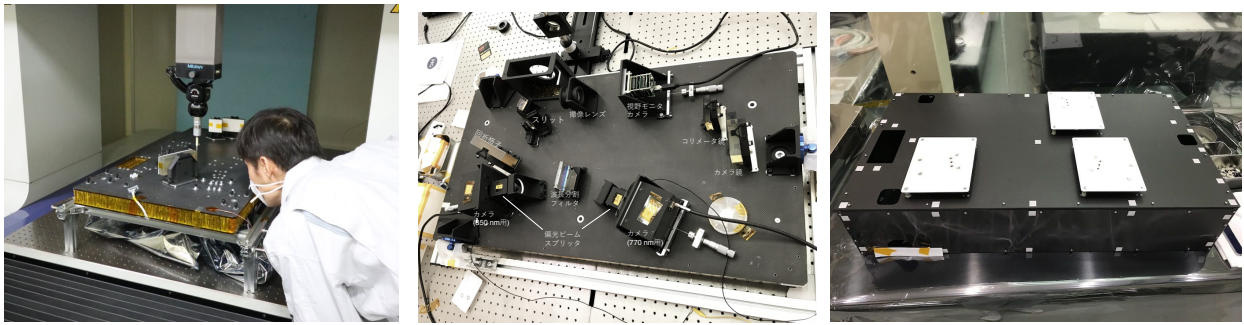


図 4: (左) 接触式 3 次元計測による光学素子の精密位置測定、(中)光学試験中の SCIP 光学ユニット、ただし、視野モニタカメラは試験用カメラ、(右) CFRP 薄板のカバー構造と3台のカメラ用のラジエータ。

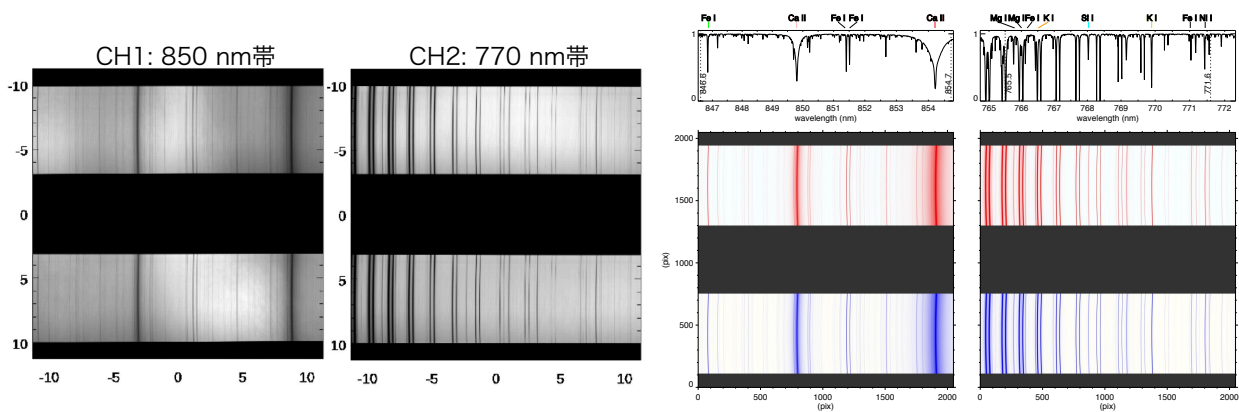


図 5: SCIP に太陽光を導入して測定した太陽のスペクトル(左)。吸収線の位置と形状は設計(右)と非常によくあっている。

SCIP のカバーも CFRP 薄板で製作しており、温度変形が光学性能に影響を及ぼさないよう設計されている(図 4 右)。SCIP 内には 3 台のカメラが設置されるが、カメラの発熱を逃がすため、カバー上面にラジエータを設置している。ラジエータとカメラの間を銅編線で接続する。CFRP カバーは SLI (single layer insulator) で覆う。光学ベンチ裏面に貼り付けられている運用ヒーターの制御で光学系を 20°C に維持するとき、CMOS センサーを 15-20°C に保つことができることを熱数学モデルで検証している。気球飛行時の熱真空環境における性能実証と、熱設計の検証のため、2020 年 12 月から SCIP の熱真空光学試験を行う計画である。

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(図 6)。波長板回転機構は CLASP ロケット実験で搭載したのものから、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。スキャンミラー機構は、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。2020 年度から、スペイン担当の制御エレキ(SCIP-E unit)およびスペインが開発したフライトカメラを国立天文台にて結合さ

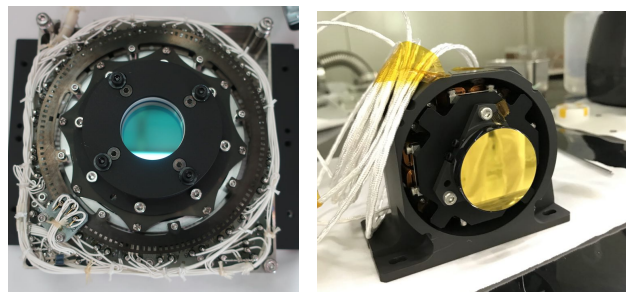


図 6: 回転波長板駆動機構(左)とスキャンミラー機構(右)

す。2020 年度から、スペイン担当の制御エレキ(SCIP-E unit)およびスペインが開発したフライトカメラを国立天文台にて結合さ

せ、同期性能を実証する機能試験を実施してきた(図7左)。E-unit Bread-Board Modelでの性能評価が完了し、所定の同期性能が実現されていることを確認できた(図7中、右)。すでにE-unitフライトモデルがスペインから供給されており、現在結合試験を実施中である。スキャンミラー機構はSCIPより上流の光学系に組み込む必要があるため、2020年11月に一足早くドイツへ輸送する。回転波長板駆動機構は、同期性能とE-unitによる機上画像処理機能を確認後、光学ユニットに組み込む。

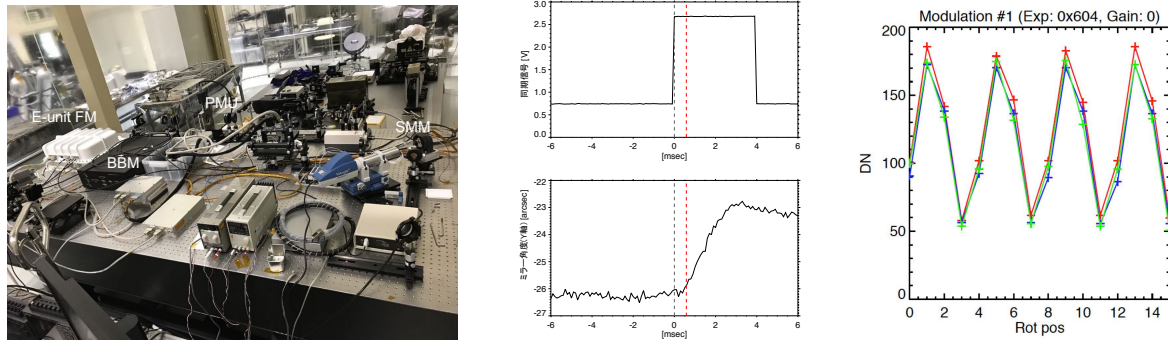


図7: (左)国立天文台にて実施中の電気試験の様子。(中)スキャンミラー機構は回転波長板からの同期信号の立ち上がりから遅延なく駆動していることを確認。(右)回転波長板とフライトカメラで偏光変調を確認。

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 Sunrise Ultraviolet Spectropolarimeter and Imager (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 Tunable Magnetograph (TuMag)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開発を進めている。

SUNRISE-3 気球実験の飛行観測を、当初、2021年6月としていたが、2022年6月に変更した。スペイン・ドイツで Solar Orbiter 衛星等のため開発に数ヶ月の遅延があったことが原因である。夏至付近のフライトが必須のためフライトを1年遅らせ2022年にする。1年遅らせたことで、ドイツでの地上試験に十分時間を割く(2021年夏以降)計画である。COVID-19の影響はあるが、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。今後のスケジュールを以下にまとめる。

| | |
|------------|--|
| 2020年12月 | SCIP 熱真空試験 |
| 2021年1月 | SCIP 最終光学、偏光試験 |
| 2021年2-3月 | SCIP をドイツ・MPS へ輸送、SUNRISE 望遠鏡への搭載・結合試験 |
| 2021年6-10月 | 焦点面装置機能試験、真空試験、ゴンドラ試験 |
| 2022年3月 | スウェーデン・キルナ ESRANGE へ輸送、射場での飛行前試験 |
| 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。