

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⁾

清水敏文⁽²⁾, C. Quintero Noda⁽²⁾, 久保雅仁⁽¹⁾, 原弘久⁽¹⁾, 一本潔^(3,1), 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⁾, 大場崇義⁽²⁾, 川畑佑典⁽²⁾, 石川遼子⁽¹⁾, 鹿野良平⁽¹⁾, 石川真之介⁽⁴⁾, 永田伸一⁽³⁾

J. C. del Toro Iniesta⁽⁴⁾, S. Solanki⁽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) 京都大学 (4) 名古屋大学

(4) アンダルシア天体物理学研究所 (IAA, スペイン) (5) マックス・プランク太陽系研究所 (MPS, 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。「ひので」衛星をはじめとした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、コロナの加熱や太陽風の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。光球・彩層を偏光分光観測し磁場・運動などの物理量を3次元的に定量化し、光球における対流と磁場の相互作用による磁気エネルギー発生、彩層における伝播そして散逸を明らかにすることが、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」衛星可視光望遠鏡の2倍)の光学太陽望遠鏡を搭載し(図1)、太陽を高指向精度で追尾する大型ゴンドラも専用開発された(参考文献[1])。高度35–37kmを約1週間かけて飛翔することで、地上では不可能な波長250–400nmの紫外線観測や大気ゆらぎの影響を受けな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

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ドイツ・スペインとの国際協力で開発する。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(ひので可視光望遠鏡と同じ)・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。さらに、多数のスペクトル線を同時に観測することで、3次元的な磁場・速度構造を得ることもできる(図2)。これは既存の装置では実現できない観測である。

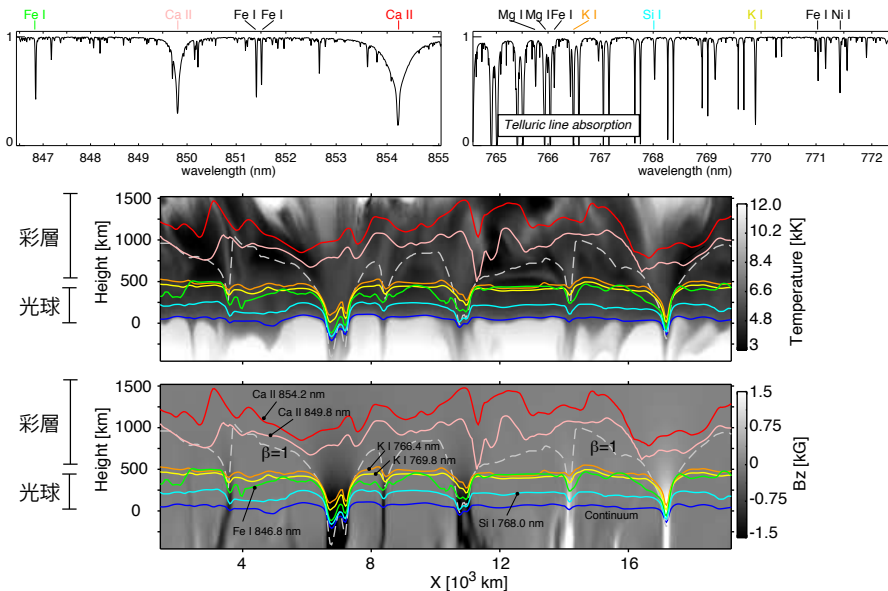


図 2: 近赤外線偏光分光装置 SCIP で観測する波長帯とその波長帯に含まれるスペクトル線(上図)。3 次元 MHD 数値シミュレーションに基づき、代表的なスペクトル線が太陽大気中で形成する高さを下図に示す。ガス圧と磁気圧が釣り合う(プラズマ $\beta=1$)高さを一点鎖線で示す。

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。SCIP はエシェル回折格子を使ったりトロ式分光器と回転波長板を使った偏光解析装置から構成され、次期太陽観測衛星 SOLAR-C やロケット実験 CLASP に向けて開発してきた高精度偏光測定技術を最大限に活用する。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(図 2)ことが特徴であり、これにより、光球から彩層へのエネルギー輸送と散逸過程に迫ることを狙う。

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) × 58 秒角 (スキャン) (超粒状斑を十分にカバーできる視野)

2.1. 光学系・熱構造系

SCIP の基本仕様を満たす光学系設計は完了しており(図 3)、波面誤差配分と公差解析に基づいて各素子の仕様を確定させフライト品製作を順次進めている。ドイツ担当の 1m 望遠鏡部は既存のグレゴリアン式望遠鏡をそのまま用いるが、望遠鏡で結像された光を複数の焦点面装置に分配する ISLiD(ドイツ担当)は、新規装置の導入に対応するため、光学系構造の再設計をドイツ MPS で行い完了している。

飛翔観測中は SCIP 光学系を温度範囲 10～30℃に保つよう熱設計を行う。SCIP 内の搭載電子機器(カメラ、回転波長板駆動機構)の内部発熱と SUNRSIE の周辺熱環境条件を取り込んだ SCIP 熱数学モデルを構築し(図 4 左)、カメラ受光面を冷却するための放熱面の面積を決定するとともに(図 4 中)、低温時に必要となるヒーター容量を導出した。

光学性能を上記温度範囲で保証するため、低熱膨張 CFRP 表皮アルミハニカムのサンドイッチパネルで構成する光学ベンチの上に光学素子を配置する設計とする。さらに、熱変形の小さい光学系保持機構の設計もほぼ完了している(図 4 右はその 1 例)。構造数学モデルを用いて、輸送や放球に対する耐衝撃性ととともに、運用中の熱変形に起因する光学性能劣化を検証し、波面誤差配分に反映させた。

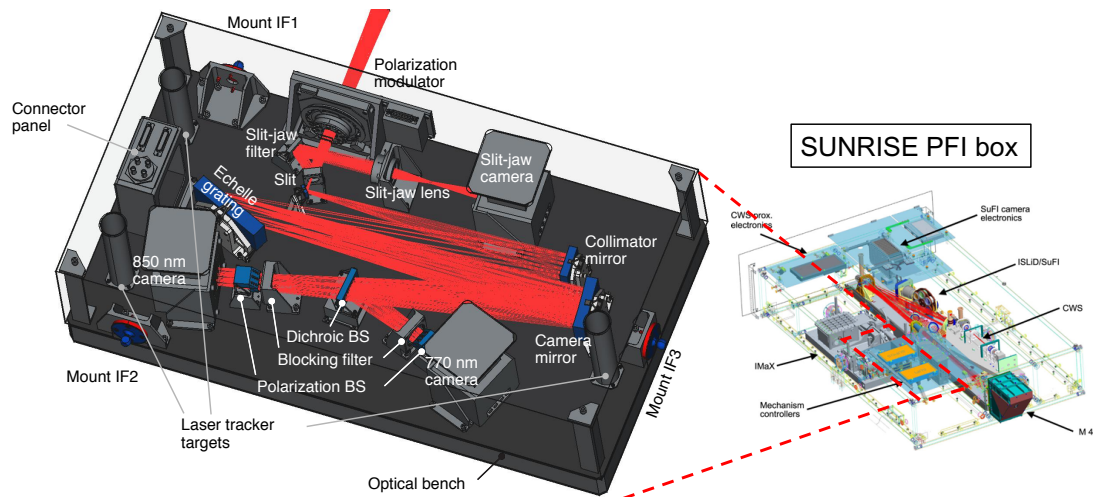


図 3: SCIP の光学・構造レイアウト(左)。1000 mm x 500 mm x 340 mm の領域に収納できる大きさである。SCIP は焦点面装置箱(Post-Focus Instrumentation)内に搭載される(右)。

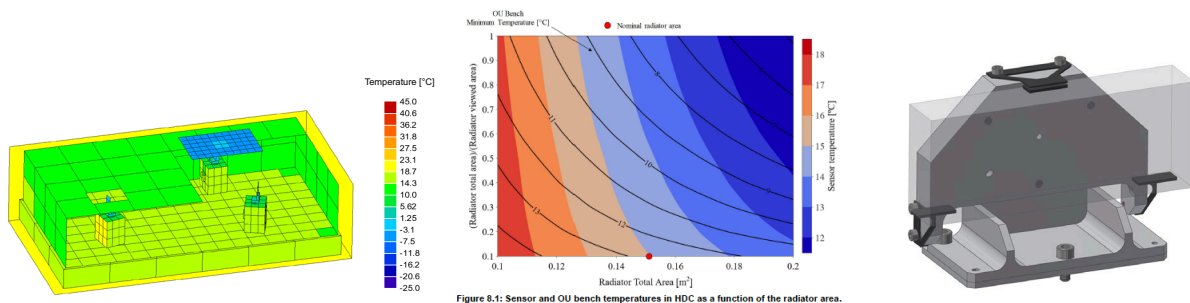


図 4: SCIP の熱数学モデル(左)と高温ケースの場合カメラ受光面温度予想(中)。ここから必要な放熱面の面積を決定した。SCIP 回折格子の保持機構設計(左)。

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 5 左)は SOLAR-C や CLASP ロケット実験用に日本で開発されたものを改良して搭載する。高い偏光精度を実現するには、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)必要があり、実機を用いた試験と回転制御パラメータのチューニングによって、その目途を立てた。高精度な回転波長板駆動機構は海外でも高く評価されており、ドイツ・MPS が開発する紫外線偏光分光装置 SUSI にも日本が駆動機構を開発し、供給することとなった。スキャンミラー機構(図 5 右)として、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採用した。SOLAR-C 偏光分光装置のために試作開発した方式を気球搭載装置として改良設計を行ったもので、現在フライト品の製作を行っている。2018-19 年度に熱真空環境下での動作性能試験を実施する計画である。

高速読出(2k x 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 用のカメラを開発している。高精度な偏光観測には、加えて、画像を高速に演算処理するデータ処理部が必要となる。スペイン・IAA はこれまでの SUNRISE 気球実験と人工衛星 Solar Orbiter での偏光観測制御部開発の実績があり、それをもとに SCIP の観測制御部とデータ処理部を共同で開発している。

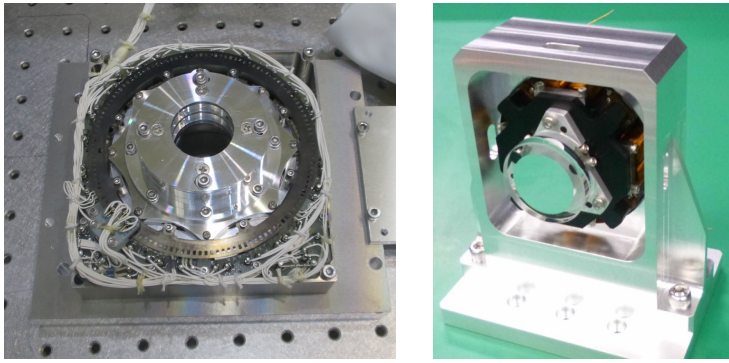


図 5: SCIP 用の波長板ホルダを組み込んだ回転波長板駆動機構 (左)。静電容量センサーと電磁アクチュエータを使ったスキャンミラー機構 (右)。

2.3. 偏光データ解析と光球・彩層モデリング

光球磁場の測定では「ひので」等が取得した偏光分光データの解析で多くの経験を積み上げてきた。一方、彩層は非局所熱平衡(non-LTE)のため、光球のように簡単に輻射輸送を解くことができない。しかし、non-LTE 輻射輸送計コードと3次元輻射電磁流体数値シミュレーションの発展により、磁気エネルギー輸送・散逸に寄与する磁気流体現象が、SCIP で観測する Fe I 線、Ca II 線、K I 線の円偏光・直線偏光データでどのように検出されるか、モデリングから予想することが可能になりつつあり、実際に SCIP で光球・彩層の磁気流体過程に伴う偏光信号を検出できる可能性を示した(SCIP で観測するスペクトル線の診断能力については文献[2]–[6]参照)。これらのモデリングをもとにして、逆に、偏光データから大気磁場・視線速度・温度構造を導出するインバージョン手法の開発にも取り組んでいる。

3. SUNRISE-3 の国際協力体制と予算獲得状況

SUNRISE-3 の実現には日本・ドイツ・スペイン・アメリカの各国で予算獲得が必要であったが、いずれの国でも計画が採択され、SUNRISE-3 の実現に向けて足並みがそろそろそろまでたどりついた。

国立天文台を中心とする日本のグループは、ロケット実験 CLASP2 とともに ISAS/JAXA の「小規模太陽観測プログラム」(2017–21)として SUNRISE-3 計画を推進している。さらに2018年度から科研費基盤(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」を獲得したことで、フライト品開発、ドイツ・スウェーデンでの結合試験やフライト運用への参加、さらに光球・彩層のモデリング研究まで広くカバーすることが可能となった。

SUNRISE 気球実験の主担当機関であるドイツ MPS は、1m 望遠鏡の改修、紫外線偏光分光装置 SUSI の開発、さらにフライト運用までカバーする予算を獲得済である。偏光撮像装置 IMaX(Imaging Magnetograph Experiment)と SCIP の電気系を担当するスペイン IAA も2017–18年の予算を確保し設計を詰めてきた。ゴンドラを担当するアメリカ・応用物理学研究所 (APL)も NASA で予算獲得に成功し、SUNRISE-3 用ゴンドラの開発に着手している。

参考文献

- [1] “The Sunrise Mission,” Barthol et al., Solar Physics, 268, 1 (2011).
- [2] “Spectropolarimetric capabilities of Ca II 8542 Å line”, Quintero Noda et al., MNRAS, 459, 3363 (2016).
- [3] “Chromospheric polarimetry through multiline observations of the 850-nm spectral region”, Quintero Noda et al., MNRAS, 464, 4534 (2017).
- [4] “Solar polarimetry through the K I lines at 770 nm”, Quintero Noda et al., MNRAS, 470, 1453 (2017).
- [5] “Chromospheric polarimetry through multiline observations of the 850-nm spectral region – II. A magnetic flux tube scenario”, Quintero Noda et al., 472, 727 (2017).
- [6] “Solar polarimetry in the K I D2 line : A novel possibility for a stratospheric balloon”, Quintero Noda et al., 610, 79 (2018).