

# 国際大気球太陽観測実験 SUNRISE-3

## International Balloon-Borne Solar Observatory SUNRISE-3

勝川行雄<sup>(1)</sup>

久保雅仁<sup>(1)</sup>, 原弘久<sup>(1)</sup>, 末松芳法<sup>(1)</sup>, 石川遼子<sup>(1)</sup>, 鹿野良平<sup>(1)</sup>, 都築俊宏<sup>(1)</sup>, 浦口史寛<sup>(1)</sup>, 田村友範<sup>(1)</sup>  
 清水敏文<sup>(2)</sup>, C. Quintero Noda<sup>(2)</sup>, 石川真之介<sup>(2)</sup>, 大場崇義<sup>(2)</sup>, 川畑佑典<sup>(2)</sup>, 一本潔<sup>(3,1)</sup>, 永田伸一<sup>(3)</sup>, 阿南徹<sup>(3)</sup>  
 S. Solanki<sup>(4)</sup>, J. C. del Toro Iniesta<sup>(5)</sup>

(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) マックス・プランク太陽系研究所 (MPS, ドイツ) (5) アンダルシア天体物理学研究所 (IAA, 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。「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 次元的に定量化することで、光球における対流と磁場の相互作用による磁気流体のエネルギー発生、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 度目のフライトを平成 33 年に実施する計画を立てた。近赤外線の偏光分光観測装置 SCIP (スキップ, Sunrise Chromospheric Infrared spectro-Polarimeter)を新たに搭載することで、シーイングの影響を受ける地上観測では実現できない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)プログラムを使い、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に開発された(参考文献[1][2]参照)。キルナ ESRANGE から放球され大西洋を越えてカナダまで、高度 35–37km を約 1 週間飛行する。地上ではできない波長 250–400 nm の紫外線観測や大気ゆらぎの影響を受けない高解像度可視光観測を 24 時間連続 5 日間以上できることが特徴である(参考文献[1]-[4])。



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、3 度目の飛行実験 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)をドイツ・スペインと共同で開発することとなった。SUNRISE 気球に近赤外線の偏光分光装置を搭載すれば、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 $\sigma$ )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。

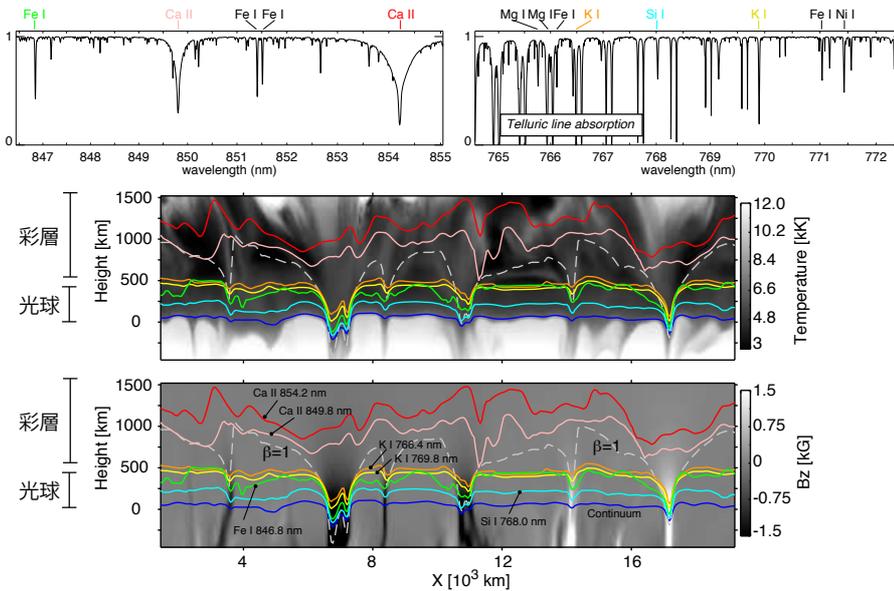


図 2: 近赤外線偏光分光装置 SCIP で観測する波長帯とその波長帯に含まれるスペクトル線(上図)。3次元 MHD 数値シミュレーションに基づき、代表的なスペクトル線が太陽大気中で形成する高さを下図に示す。ガス圧と磁気圧が釣り合う(プラズマ  $\beta=1$ )高さを一点鎖線で示す。

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リトロ式分光器と偏光解析装置から構成され、次期太陽観測衛星 SOLAR-C 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 と Ca II 線 850 nm の 2 波長帯を同時に観測することが特徴であり、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ができる。SCIP の装置構成ブロックダイアグラムを、ドイツ・スペインとの国際分担とともに図 3(右)に示す。鍵となる項目の開発状況を以下で説明する。

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	彩層磁場観測に必要な波長分解能・偏光精度	$\lambda / \Delta \lambda = 2 \times 10^5$
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)

### ○光学系・熱構造系

光学系の基本設計はほぼ完了しており(図 3 左)、波面誤差配分と公差解析を行うことで、フライト品製作に向けた仕様策定に取り掛かっている。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、SUNRISE-3 で新規導入された SCIP に対応するため、光分配光学系の再設計をドイツ MPS が行い、ほぼ完了している。

観測運用時に予想される温度範囲(10°C ~ 30°C)で光学性能を保証するため、光学素子は CFRP 光学ベンチに配置される。CFRP 光学ベンチは焦点面装置箱に3箇所のマウントポイントで設置され位置傾き調整を行う(図 3 左)。マウントポイントの配置と光学ベンチの位置傾き調整手法をドイツ MPS と協議しベースラインとなる方式を確定させた。フライト中の光学性能保証のため、熱変形の小さい光学系保持機構の設計も開始している。海外から供給されるカメラ等も含めて SCIP 内の機器発熱情報を取りまとめ、過去の SUNRSIE フライトの実績に基づいた周辺熱環境を導入した SCIP の熱数学モデルを平成29年度中に構築する。

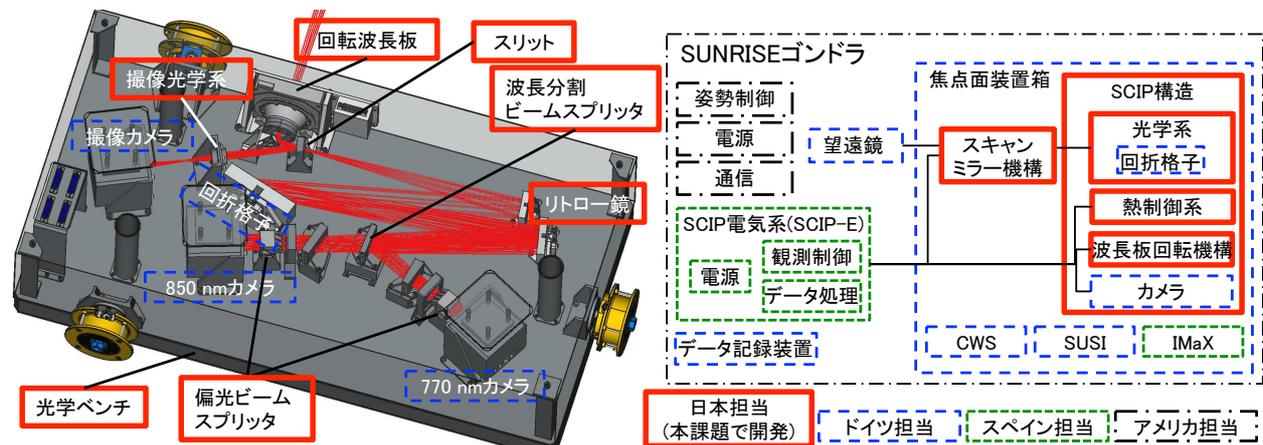


図 3: (左)SUNRISE 搭載偏光分光装置 SCIP の光学構造の概要。大きさは 1000 mm x 500 mm x 340 mm で、3箇所マウント I/F(黄色部分)でドイツ担当の焦点面装置箱に組み込まれる。(右) SCIP のコンポーネント概要と開発分担のブロックダイアグラム。

### ○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・ドイツ担当)と高精度( $<30 \mu \text{sec}$ )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。平成 28 年度戦略的開発研究により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)目途が立ったため、フライト用駆動エレキの製作に平成 29 年度から取りかかっている。スキャンミラー機構も、SOLAR-C のために平成 27 年度試作開発した静電容量センサーと電磁吸引を使った機構を基に、平成 29 年度から設計を開始した。

高速読出( $2k \times 2k$  を毎秒 32 フレーム)カメラの開発では、ドイツ MPS、スペイン 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た。高精度な偏光観測には、画像を高速に機上積算演算処理する必要がある。飛行中に取得されるデータは機上のデータレコーダーに保存され回収するが、膨大な生データを全て保存することはできない。微弱な偏光情報を損なわずにデータ量を 10% 以下に小さくする機上処理手法をスペイン IAA と検討し、模擬データで検証を行なった。

### ○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」の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かったが、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现象が、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る。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(図 2, SCIP で観測するスペクトル線の診断能力については文献[5][6]を参照)。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)手法の開発に今後取り組む。

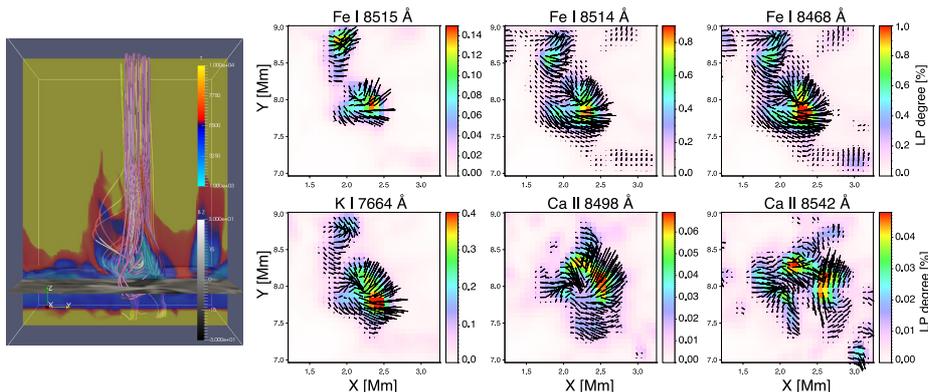


図 4: (左)光球の乱対流によって磁力線がねじられることで発生する彩層ジェットの数値シミュレーションと、(右) SCIP でジェットを上から観測したとき、各スペクトル線で測定される直線偏光度(背景)と直線偏光方位角(流線)。

### 3. SUNRISE-3 の国際協力体制と予算獲得状況

SCIP の鍵となる技術の検討と国際協力の調整のため、平成 28 年度から国立天文台及び ISAS/JAXA にて予算獲得し、ドイツ・スペインと共同で SCIP の設計を行なってきた。平成 29 年度 ISAS 小規模計画にロケット実験 CLASP2 (Chromospheric Lyman Alpha Spectro-Polarimeter) とともに「小規模太陽観測プログラム」として採択されたことで、SCIP の詳細設計とフライト搭載品の一部製作を開始した。

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(Sunrise Ultraviolet Spectropolarimeter and Imager)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 も平成 29-30 年の予算を確保し設計を進めている。ゴンドラを担当するアメリカ・応用物理学研究所 (APL)は平成 29 年 7 月に NASA へ提案を行い、平成 29 年 12 月までに採否が判明する予定である。望遠鏡及び焦点面装置の開発はゴンドラ開発と独立に進めることができるため、すでに予算を確保している日本・ドイツ・スペインとの国際協力の下、SCIP の設計・開発を進める体制ができている。

### 4. スケジュール

当初計画では、SUNRISE 気球実験 3 度目の飛翔観測を平成 32 年 6 月に実施する予定であった。確実な開発工程を検討した結果、ドイツで行うゴンドラ・望遠鏡・焦点面装置間の結合試験に十分な時間を割くこととなった。これに伴い、打ち上げを平成 33 年 6 月に変更した。SCIP を日本からドイツへ輸送する時期は、当初計画では平成 31 年 11 月であったが、平成 32 年 3 月へ変更となった。現在の工程を以下にまとめる。

平成 28 年度:	SCIP 概念設計 (光学系, 熱構造系, 観測制御・機上処理ロジック検討)
平成 29 年度:	SCIP 搭載機構部設計、一部コンポーネントはフライト品開発に着手
平成 30 年 4 月:	SCIP フライト部品製作開始、単体評価試験
平成 31 年 4 月:	SCIP フライト品組立・地上較正試験・熱真空試験
平成 32 年 3 月:	SCIP をドイツ・MPS へ輸送、Sunrise 望遠鏡への搭載・結合試験
平成 33 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
平成 33 年 6 月:	フライト観測

### 参考文献

- [1] “The Sunrise Mission,” Barthol et al., Solar Physics, 268, 1 (2011).
- [2] “The Filter Imager SuFI and the Image Stabilization and Light Distribution System ISLiD of the Sunrise Balloon-Borne Observatory: Instrument Description,” Gandofer et al., Solar Physics, 268, 35 (2011).
- [3] “The Imaging Magnetograph eXperiment (IMaX) for the Sunrise Balloon-Borne Solar Observatory,” Martinez Pillet et al., Solar Physics, 268, 57 (2011).
- [4] “The Wave-Front Correction System for the Sunrise Balloon-Borne Solar Observatory,” Berkefeld et al., Solar Physics, 268, 103 (2011).
- [5] “Chromospheric polarimetry through multiline observations of the 850-nm spectral region”, Quintero Noda et al., MNRAS, 464, 4534 (2017)
- [6] “Solar polarimetry through the K I lines at 770 nm,” Quintero Noda et al., MNRAS, 470, 1453 (2017)