

## SUNRISE-3 気球実験: 近赤外線偏光分光観測装置 SCIP

勝川行雄, 久保雅仁, 原弘久, 末松芳法, 石川遼子, 鹿野良平 (国立天文台)

C. Quintero Noda, 大場崇義, 石川真之介, 清水敏文 (ISAS/JAXA), 永田伸一, 阿南徹, 一本潔 (京大)

S. Solanki (ドイツ・マックス・プランク太陽系研究所, MPS)

J. C. del Toro Iniesta (スペイン・アンダルシア天体物理学研究所, IAA)

### 1. はじめに

太陽彩層は、温度 6000 度の光球と数 100 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場所である。「ひので」衛星をはじめとした高解像度撮像観測によって、彩層で発生する多彩で動的な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、太陽外層大気の加熱・加速に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・運動など物理量を定量化することで、光球における対流と磁場の相互作用による磁気流体的なエネルギー発生、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となっている。そこで、これまでドイツ・スペインを中心に進められてきた SUNRISE 気球実験に、近赤外線の偏光分光観測装置 SCIP (Sunrise Chromospheric Infrared spectroPolarimeter)を新規に搭載し、光球と彩層を同時に高解像度・高精度で偏光分光観測する計画を提案している。

### 2. 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いる国際共同太陽観測プロジェクトで、アメリカ NASA の Long Duration Balloon (LDB)プログラムで飛翔実験を行ってきた。口径 1m の光学太陽望遠鏡を搭載し(図 1)、太陽を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約 1 週間飛翔する。高度 35-37 km から地上ではできない波長 250-400nm の紫外線観測や大気ゆらぎの影響を受けない安定した可視光観測を 24 時間連続 5 日間以上できる。これまで 2009 年と 2013 年にフライト観測を行った。2 度のフライト観測では、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、光球表面の微細磁場構造の観測を行った。1 度目の観測で得られた代表的な成果として、光球表面の対流によって発生する渦状流を発見したこと、磁場構造に付随して超音速の上昇流が頻繁に発生していることが発見されたことなど、数多くの論文が出版された(参考文献[2]参照)。2 度目のフライトで得られた太陽活動領域のデータでも、10 編以上の論文が年内に出版予定である。



図 1: SUNRISE の外観  
(参考文献[1]より)

### 3. SUNRISE-3 提案にいたる背景

彩層で起こる動的現象の磁場を測定し、その起源となる磁気エネルギーの輸送・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域にある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 度目の飛翔実験 SUNRISE-3 に向けて、近赤外線の偏光分光装置を新たに搭載する計画をドイツ・スペインと共同で進めることとなった。観測対象となるのは「ひので」が明らかにした彩層で

頻発する小スケールの動的現象である。したがって、この観測に要求されるのは、(1)「ひので」の彩層観測と同じ0.2秒角の空間分解能、(2)0.2秒角を音速が通過する10秒の時間分解能、(3)弱い彩層磁場をとらえる偏光測定精度0.03%、である。SUNRISEに近赤外線偏光分光装置を搭載すればこれらの要求を達成できる。さらに、複数のスペクトル線を同時に観測することで光球と彩層を切れ目なく連続的にカバーし、3次元磁場・速度構造とその時間発展を得ることもできる。この観測により、磁気エネルギー輸送・散逸プロセスの鍵となる3次元磁場構造中の音波の発生源と衝撃波化、磁気流体波動の伝播に伴う磁場の時間変動、磁気リコネクションを示唆する彩層磁場の不連続構造とそれによる加熱・加速、を観測的に示すことを目指す(図2)。

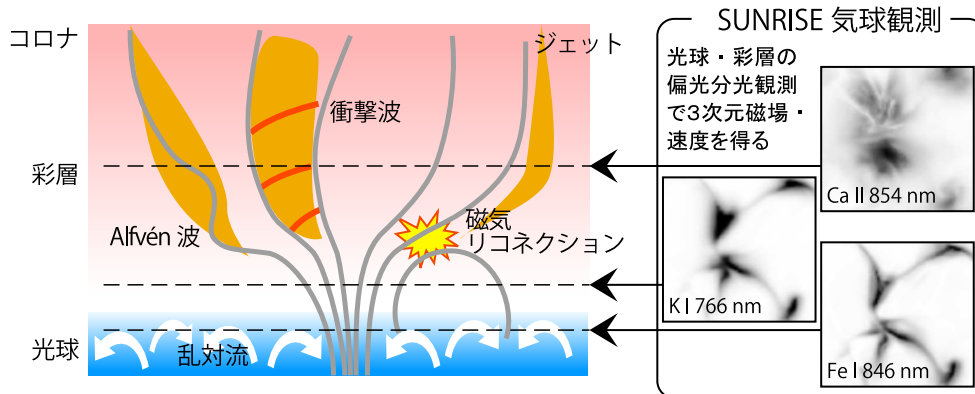


図 2: SUNRISE 搭載偏光分光装置 SCIP で目指す科学課題

SUNRISE-3 で目指す高解像度・高精度偏光観測は既存の装置では実現できていない。よって、SUNRISE-3をなるべく早く2020年に実現することを目指す。この頃にはハワイに建設中の口径4m地上大型太陽望遠鏡DKIST(Daniel K. Inouye Solar Telescope)がファーストライトを迎える。DKISTと相前後して高解像度・高精度な偏光観測を行うとともに、DKISTではできない数時間以上の安定した広視野観測を行う。彩層の偏光信号は特に微弱のため、太陽観測といえども10秒以上の積算が必要である。よって、シーイングの影響を受ける地上観測では積算中の太陽像のボケ・ゆがみにより高解像度、高感度、広波長域を両立する偏光観測が依然として困難である。高高度気球観測ではシーイング効果が無視できるため優位である。フライト実績のある大型のゴンドラと望遠鏡が存在するため、SUNRISE-3気球実験は次期太陽観測衛星SOLAR-Cに代表される次世代の偏光分光装置に必要な技術を日本が獲得する千載一遇のチャンスである。

#### 4. 近赤外線偏光分光装置 SCIP

##### 4.1. SCIP の概要

SUNRISE に新たに搭載する偏光分光装置 SCIP (Sunrise Chromospheric Infrared spectro-Polarimeter)の基本仕様を表1に、光学系レイアウトを図3(左)に示す。SCIP はリトロ式の分光器と偏光解析装置から構成され、SOLAR-C 光学望遠鏡(SUVIT)の偏光分光装置とできる限り共通の構成とすることで、SOLAR-C のために開発してきた高精度偏光測定技術の実証も兼ねる狙いである。光球から彩層中部を連続的にカバーできるCa II線850nmとK I線770nmの2波長帯を同時に観測する。Ca II線は彩層を、K I線は光球と彩層の境界にある磁場を測定することができる。これらの波長帯には、さらに、光球に感度のあるFe I線が複数含まれており、光球から彩層へのエネルギー輸送過程を連続的にとらえることができる。

表 1: SUNRISE 偏光分光装置 SCIP の基本仕様

観測波長	Ca II 850 nm 帯 (846.6 - 854.9 nm) K I D 線 770 nm 帯 (765.5 - 771.6 nm) の 2 波長域
空間分解能	0.2 秒角 (波長 854 nm の回折限界)、0.094" サンプルング
波長分解能	$\lambda / \Delta \lambda \sim 2 \times 10^5$
時間分解能	偏光分光 (Stokes IQUV) モード: 1-15 秒/step 分光 (Stokes I only) モード: 全視野を 45 秒以内でスキャン
視野	58" (スリット方向) x 58" (スキャン方向)
偏光測定感度	要求: $5 \times 10^{-4}$ (Ca II 854.2 nm で 10 G の視線磁場を測定) 目標: $3 \times 10^{-4}$ (Ca II 854.2 nm で 5 G の視線磁場を測定)

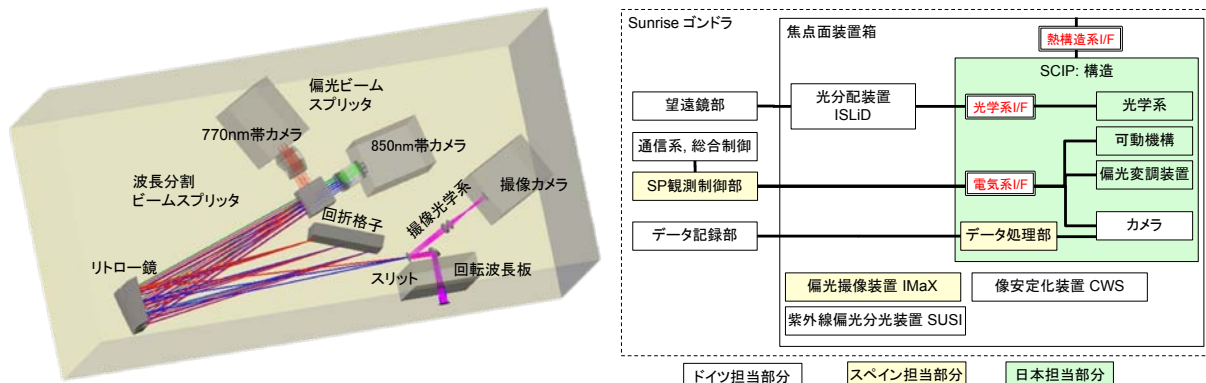


図 3: SUNRISE 搭載偏光分光装置 SCIP の光学系レイアウト(左)とブロックダイアグラム(右)

## 4.2. SCIP の検討状況

SCIP は日本を中心として、ドイツ・スペインと共同開発する。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。鍵となる項目の検討状況を以下で説明する。

### ○光学系

日本側で SCIP の光学設計を行っており、必要な空間・波長分解能を実現する目途がたちつつある(図 3 左)。偏光ビームスプリッタとフィルターを 2016 年度中に試作する。SUNRISE-3 では SCIP 以外の可視光・紫外線観測装置もアップグレードする予定であり、それに対応するため、ドイツで各装置に光を分配する上流光学系の再設計を進めている。光学設計と開発試験計画を 2016 年度中に策定する。

### ○熱構造系

観測運用時に予想される温度変動範囲(0°C~20°C)で光学性能を保証するため、光学素子を CFRP 光学ベンチに配置する。CFRP 光学ベンチは望遠鏡横の焦点面装置箱に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。マウントポイントの配置とともに、光学ベンチの位置傾き調整手法について、ドイツと協議を行っている。ドイツ側と熱インターフェイス条件を決めた後、構熱構造設計を 2017 年度中旬にかけて実施する。

### ○電気系

高精度偏光観測のためには、偏光変調装置(回転波長板)の位相とカメラ、スキャンミラーの 3 者を高速・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。波長板回転機構は SOLAR-C や CLASP ロケット実験用に日本で開発されたものをベースに、必要な偏光精度を達成するための検討を実施している。高速読出(2k x 2k 素子を毎秒 32 フレーム以上)できるカメラ開発では、ドイツ、スペインと協力して CMOS カメラの候補選定と性能評価試験を開始している。偏光観測には、加えて、画

像を高速に復調(demodulation)演算処理するデータ処理部が必要となる。スペインはこれまでの SUNRISE 気球実験と人工衛星 Solar Orbiter での偏光観測装置で実績があり、それをもとに SCIP の観測制御部とデータ処理部を開発する。波長板回転機構・カメラ・スキャンミラーの同期と機上データ処理のロジックは SOLAR-C 用に検討されたものを活用した設計とし、SOLAR-C 用制御部の実証も兼ねる狙いである。

## 5. スケジュール

SUNRISE-3 を 2020 年に実現することを目指し、以下の工程案をドイツ・スペインと協議中である。

2016 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)
2017 年 4 月:	SCIP 詳細設計
2017 年 10 月:	SCIP フライト部品製作開始、単体評価試験
2018 年 9 月:	SCIP フライト品組立・地上較正試験
2019 年 8 月:	SCIP をドイツ・MPS へ輸送、Sunrise 望遠鏡への搭載・結合試験
2020 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
2020 年 6 月:	フライト観測

## 6. SUNRISE-3 の国際協力体制と提案状況

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。望遠鏡部と観測装置に光を分配する Image Stabilization and Light Distribution (ISLiD)[3]、及び紫外線偏光観測装置 Sunrise Ultraviolet Spectropolarimeter and Imager (SUSI)を担当する。スペイン・アンダルシア天体物理学研究所は偏光撮像装置 Imaging Magnetograph Experiment (IMaX)[4]を担当する。上記 2 機関と日本に加え、像安定化装置 Correlation tracking and Wavefront Sensing (CWS)[5]を担当するドイツ・キーペンハ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)との間で SUNRISE-3 実現に向けた検討を協力して行っていくことに同意した。主担当機関であるドイツ MPS は SUNRISE-3(望遠鏡部と焦点面装置改修, フライト運用含む)実施の提案書をマックス・プランク研究所へ 2016 年 8 月に提出した。スペインは 4 月に、アメリカは 7 月にそれぞれの担当部開発のための提案を各国で行った。これらの採否結果は 2016 年度中に判明する見込みである。日本側は 2017 年度からの SCIP 詳細設計、フライト品製作、及び飛翔観測のため、科研費と ISAS/JAXA の小規模計画に提案する。

## 参考文献

- [1] “The Sunrise Mission,” Barthol et al., Solar Physics, 268, 1 (2011)
- [2] “SUNRISE: Instrument, Mission, Data, and First Results,” Solanki et al., ApJ, 723, 127 (2010)
- [3] “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)
- [4] “The Imaging Magnetograph eXperiment (IMaX) for the Sunrise Balloon-Borne Solar Observatory,” Martinez Pillet et al., Solar Physics, 268, 57 (2011)
- [5] “The Wave-Front Correction System for the Sunrise Balloon-Borne Solar Observatory,” Berkefeld et al., Solar Physics, 268, 103 (2011)
- [6] “High-Precision Spectro-Polarimetry in the Visible and Infrared on the SUNRISE Balloon-Borne Solar Observatory,” Katsukawa et al., HINODE-10 Science Meeting (Sep 5-8, 2016, Nagoya Univ.)