

Sunrise 気球実験による太陽彩層大気の高解像度・高感度偏光分光観測

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

一本潔, 永田伸一, 阿南徹 (京都大学)

清水敏文, Carlos Quintero Noda, 石川真之介, 大場崇義 (ISAS/JAXA)

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(すなわち、プラズマ $\beta \sim 1$) 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なダイナミクスが詳細に観測されるようになり、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・加熱や彩層中の磁気流体波動が、太陽外層大気加熱・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。彩層を偏光分光観測し磁場や運動を定量化することで、彩層ダイナミクスの起源を理解することが今後の太陽観測の中心課題となっている。次期太陽観測衛星 SOLAR-C では外層大気加熱機構を理解するために、可視光・近赤外線の高感度偏光分光観測から光球・彩層の 3 次元的な磁場構造を得ることを目指している。SOLAR-C に向けた科学課題・技術課題の実証のため、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、可視・近赤外の偏光分光観測装置を新規に搭載し、光球・彩層の高解像度・高感度偏光分光観測を行う検討を開始した。

2. Sunrise 気球実験の概要

2.1. 装置構成

Sunrise 気球実験は口径 1m の光学太陽望遠鏡と焦点面観測装置からなり、それらを搭載し太陽を追尾する大型ゴンドラも専用開発された。欧州(主にドイツ、スペイン)が中心となりアメリカ NASA の Long Duration Balloon (LDB) プログラムのもとで開発が行われた(参考文献[1]参照)。キルナの ESRANGE から放球され、高度 35km の高高度から、地上ではできない波長 200-300nm の紫外線観測や大気ゆらぎの影響の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 2 度のフライト観測を行った。



図 1: Sunrise の外観 (参考文献[1]より)

搭載装置の概要と国際分担を以下にまとめる。

- ゴンドラ: サンセンサーからの信号をもとに望遠鏡の高精度指向制御を行うとともに、観測装置への電源供給や地上局との通信機能も持つ。(担当: アメリカ、ヨーロッパ, 参考文献[1])
- 望遠鏡部: 口径 1m のグレゴリアン式望遠鏡。(担当: ドイツ, 参考文献[1])
- 焦点面装置 Image Stabilization and Light Distribution (ISLiD): 可動鏡による像安定と各焦点面装置への光の分配を行う。(担当: ドイツ, 参考文献[2])
- 焦点面装置 Sunrise Filter Imager (SuFI): 可視光(<400 nm)-UV 帯のフィルター撮像観測。(開発: ドイツ, 参考文献[2])
- 焦点面装置 Imaging Magnetograph Experiment (IMaX): 波長可変狭帯域フィルターによる撮

像磁場観測。(開発: スペイン, 参考文献[3])。

- 焦点面装置 Correlation tracking and Wavefront Sensing (CWS): 波面センサーによって望遠鏡アライメント(副鏡位置調整)と像安定(可動鏡駆動)のための誤差情報を検出。(開発: ドイツ, 参考文献[4])。

2.2. これまでの成果

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 度目の実験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が挙げられる。2 度目の飛翔実験で得られた太陽活動領域データは現在解析中であり、その成果が年内に論文としてまとめられる予定である。

3. Sunrise 気球実験 3 度目のフライトに向けて

これまでの 2 度の観測は波長 550nm より短い可視域・紫外域における光球の撮像観測が中心であった。彩層で起こるダイナミクスやその磁場を測定するには、ゼーマン効果に感度のよい可視・近赤外の偏光分光装置が必要である。3 度目のフライトではそれを搭載し、これまでではカバーできなかった彩層ダイナミクスも観測できるようにする。さらに、これまでのフライトで課題となっていたゴンドラの指向安定度を向上させ、より長時間太陽を追尾できることを目指すとともに、既存の焦点面撮像装置 IMaX、SUFU、CWS はカメラ・計算機・一部光学系をアップグレードして搭載する計画である。フライト時期として 2019 年-2020 年をターゲットとし、ドイツを中心として提案書の準備を開始した。日本は偏光分光装置の開発を新規に担当する。次期太陽観測衛星 SOLAR-C で彩層磁場観測を行う偏光分光装置を国内で開発するための科学的・技術的実証という位置づけでもある。

3.1. 目指す科学課題

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と高感度を両立する偏光観測が困難である。高高度気球観測ではシーイング効果がほぼ無視できるため圧倒的に有利となる。

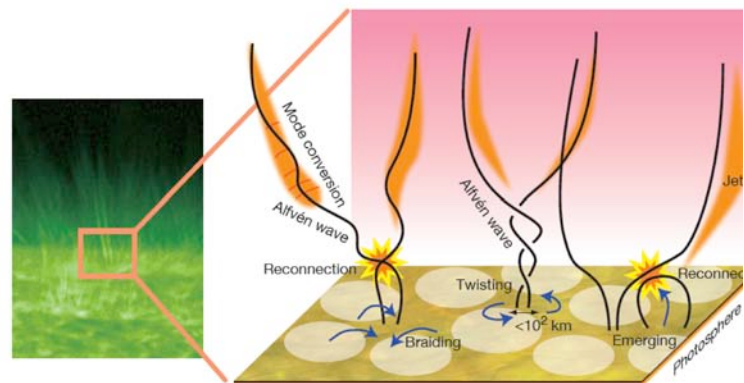


図 2: Sunrise で目指す科学課題: スピキュール

彩層の偏光分光観測を高解像度・高感度で実現することによって「彩層・コロナと太陽風の形成機構」の理解に進展が期待される。例として、彩層を構成するジェット現象スピキュールの起源が挙げられる。スピキュールの駆動メカニズムは未だによく理解されていないが、スピキュールの幅(0.3 秒角~200km 程度)を解像できる分解能で光球より上空の磁場構造とその時間発展を観測できれば、エネルギーを伝播している可能性のある電磁流体波の振る舞い、磁気リコネクションを示す逆極性の磁場が存在するかどうか、超音速の流れが発生しているか、等について観測的証拠が得られるはずである。彩層の加熱現象は太陽放射スペクトルに大きく影響し、特に波長 200-300 nm の紫外域の放射スペクトルは地球気候

変動へ影響を与える可能性が指摘されている。SuFI による紫外域の撮像観測と偏光分光装置による彩層磁場観測とを組み合わせることで、放射スペクトル変動を生み出すメカニズムに示唆が得られる。Sunrise の 5 日間のフライト期間中により黒点が太陽面上に出現すれば、太陽面爆発現象(フレア)のトリガ機構も観測対象となる。

3.2. 偏光分光装置の構成

偏光分光装置の構成は検討中であるが、表 1 に示す基本仕様案を出発点として、今後国内チーム内で科学的・技術的検討した後、ドイツ・スペインと協議してベースラインを決定する予定である。

表 1: Sunrise 偏光分光装置の基本仕様案

観測波長	Ca II 854.2 nm と Na I D 1 589.6nm/D2 589.0 nm の 2 波長域を観測
空間分解能	0.2 秒角程度 (波長 854.2nm の回折限界)、 <0.08" サンプリング
波長分解能	$\lambda / \Delta \lambda > 2.5 \times 10^5$
時間分解能	偏光分光 (Stokes IQUV) モード: ~15 秒/step, 分光 (Stokes I only) モード: 全視野を 1 分以内
視野	50" (スリット方向) x 50" (スキャン方向) (注) 上流光学系で制約
偏光測定感度	要求: 5×10^{-4} (Ca II 854.2 nm で 10 G の視線磁場を測定) 目標: 3×10^{-4} (Ca II 854.2 nm で 5 G の視線磁場を測定)

Sunrise 焦点面装置のレイアウトを図 3 に示す。各焦点面装置は CFRP 製の箱に設置されており、フライト中の温度変動でも光学系のひずみを小さくするようにしている。日本から提供する偏光分光装置は、専用のベース板を新規に製作しその上に光学系やカメラを配置し単体でのアライメントを行うことで開発する。その偏光分光装置ユニットを CFRP 箱に組み込み、上流の ISLiD 光学系とのアライメントをとる。

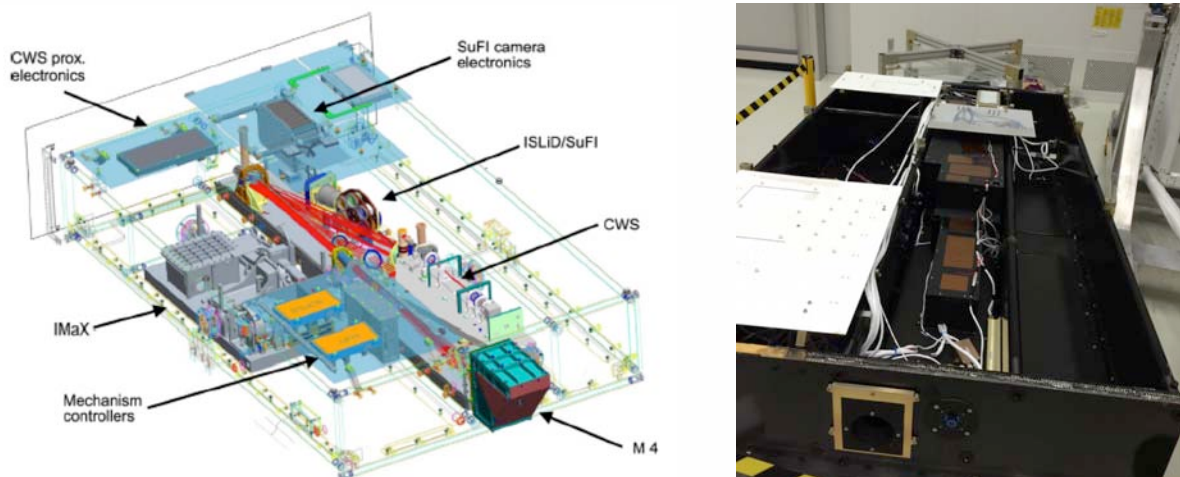


図 3: (左) Sunrise 焦点面装置の概観(参考文献[1]より)。(右)焦点面装置の CFRP 箱。右側の細かい(250 mm x 1800mm x 30mm ほど)領域が偏光分光装置の入るスペース。

偏光分光装置はリトロ式分光器と偏光回折装置からなるものを検討しており、SOLAR-C 光学磁場診断望遠鏡(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 や CLASP(Chromospheric Lyman-Alpha SpectroPolarimeter)ロケット実験のために開発してきた要

素技術の実証を行う方針である。鍵となる技術について以下にまとめる。

- 熱構造設計: 温度変動(提示されている運用温度範囲は $-20\sim+40^{\circ}\text{C}$)に対して性能保障できる構造とする必要がありCFRPベース板上に光学系を配置する構成とする予定である。光学系のトレランスや温度クリティカルなコンポーネントを維持するため、必要に応じてヒーター温度制御を行う可能性も検討する。地上熱真空試験も実施する。
- 偏光解析装置: SOLAR-C や CLASP ロケット実験での高精度偏光観測のために開発されてきた回転波長板による偏光変調をベースラインとする。CLASP では 1 回転 4.8 秒であったが Sunrise では 1 回転 1 秒程度に高速化するため回転一様性について検証が必要となる。太陽光入射時の温度環境や、波長板遅延量の温度依存性についても検証を行う。
- 可動機構: スリットスキャン機構やフォーカス調整機構など、SOLAR-C 焦点面装置に必要な可動機構についても出来る範囲で Sunrise に組み込み性能実証を行う。
- 高速カメラと偏光復調: 高精度偏光観測のためには太陽から来る光を逃さず検出し偏光変調器の位相と同期させて蓄積する必要がある。そのため、高速読出($2k\times 2k$ 素子を毎秒 50 フレーム以上)カメラと、その画像を高速に復調(demodulation)演算処理する装置が必要となる。
- 光学系: リトロ鏡 (軸外し非球面鏡)やリレーレンズ系など非球面光学素子の設計製作実証とともに分光器光学系全体の光学性能実証手法を構造設計とあわせて確立させる。

偏光分光装置の製作は日本が主担当となり行うが、コンポーネントの一部はスペイン・ドイツとの国際協力で開発していく予定であり、その分担を今後詰めていく。

3.3. 関連プロジェクトとの関係

彩層磁場測定を目指したもう一つのプロジェクトが CLASP ロケット実験である。紫外域にある $\text{Ly}\alpha$ 線(波長 121nm)の高精度偏光分光観測を NASA 観測ロケットで行うもので、国立天文台と宇宙研が中心となりアメリカ・ヨーロッパと共同で推進している。2015 年 9 月に 1 度目の実験を行い $\text{Ly}\alpha$ 線偏光データの取得に成功した。2 度目の実験を NASA に提案しており、 Mg II 線(波長 280 nm)に変更して高精度偏光分光観測を行う計画である。CLASP ロケット実験は、観測時間約 5 分、空間分解能約 1 秒角のため決して高解像度観測ではないが、紫外線域の高精度偏光観測、特にハンレ効果による磁場診断を新たに開拓することを目指したものである。Sunrise 気球実験 3 度目のフライトを提案している 2019-2020 年は、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時期でもある。DKIST と相前後して(あわよくば先んじて)高解像度・高感度観測を行うとともに、地上望遠鏡では実現できない数時間以上の安定した観測によって、彩層ダイナミクスの起源に迫ることのできるデータを取得することを目指す。

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)