

SUNRISE-3大気球太陽観測実験：高精度偏光分光装置 SCIPに搭載する回転波長板駆動機構の開発

久保雅仁¹、川畑佑典²、清水敏文³、勝川行雄¹、石川真之介⁴、一本潔^{1,5}、
中山聡⁶、山田琢也⁶、田島崇男⁶、中田森平⁶、中嶋義人⁷、奥谷耕生⁷

1: 国立天文台、2: 東京大学大学院、3: ISAS/JAXA、4: 名古屋大学、5: 京都大学、6: 三菱プレジジョン株式会社、7: テクノクラフト

1. SCIPによる偏光観測の概要

大気球実験SUNRISE-3に搭載される近赤外線偏光分光装置SCIP(Sunrise Chromospheric Infrared spectroPolarimeter)は、0.2秒角という高い空間解像度で太陽光球と彩層を切れ目なく磁場診断することで、3次元磁場構造の時間発展を定量的に捉えることを目指している。時間変化の激しい彩層の微細かつ微弱な磁場を観測するために、0.03% (1σ) という非常に高い偏光精度と高速の偏光変調が必要である。この高精度偏光観測を実現する鍵となるのは、波長板を一樣に高速回転させる偏光変調装置である。偏光変調装置から出力される撮像信号を用いてカメラを同期制御し、機上で偏光復調を行い偏光データを取得する。波長板が一樣に回転しないと、偏光変調と復調で回転位相差が生じ、疑似偏光が生じる。観測ロケット実験CLASP (P-069) の回転駆動機構ベースに、CLASPより約10倍速い回転速度(0.512秒/回転)を達成する制御ソフトウェアの開発を行った。

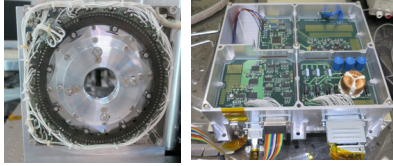


図1: 回転駆動機構(左)とドライバ回路(右)

表1: SCIP偏光観測の概要

項目	値
観測量	Stokes I, Q, U, V
波長板遅延量	127度
波長板回転速度	0.512秒/回転
撮像頻度	32枚/秒
要求偏光精度	0.03%(10秒積算後)

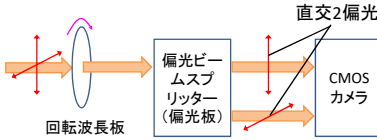


図2: SCIP偏光観測の基本構成要素

2. 試験セットアップ

- ・フライト実験に試験用の半波長板を載せて、図3に示した測定系で光学的に偏光変調を測定した(図4)。理想的な偏光変調からのズレから、波長板の回転誤差を導出した。
- ・同時に、モータードライバから出力される角度誤差のHouse keepingステータス(PMU_ANG_ERR)も記録した。サンプリングは1ms。

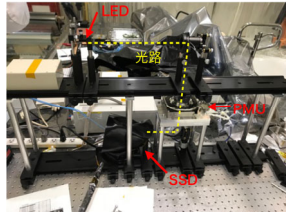


図3: 試験セットアップ (Ishikawa et al. 2015)

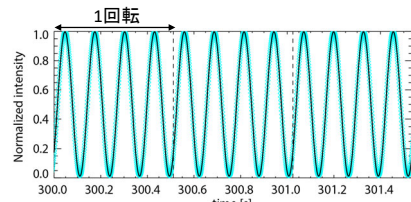


図4: 偏光変調の測定結果(水色)と理想値(黒)

3. 回転一様性

- ・回転誤差は±1度程度。
- ・光学測定から導出した回転角度誤差とHKステータス(PMU_ANG_ERR)が良く一致する。
- ・低周波(nが小)の回転角度誤差が支配的である。n=2が要求値より若干大きく、n=0が許容値より大きいが、それ以外は問題なし。
- ・回転駆動機構が水平配置(光学測定系)でも垂直配置(フライトでの配置)でも性能は変わらない。

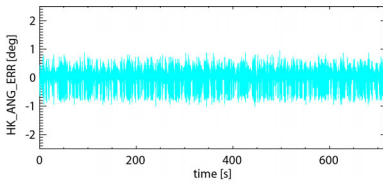


図5: 測定された回転角度誤差(HKステータス、1msサンプリング)

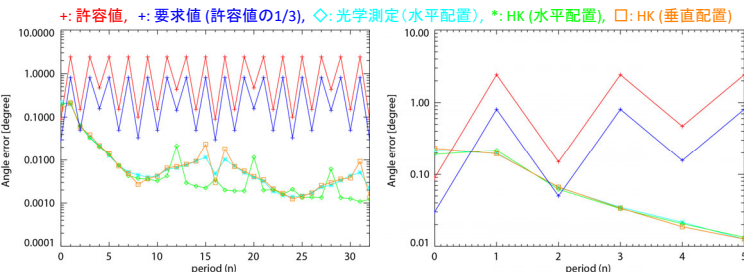


図6: 回転角度誤差の周期数特性。図5の様な時系列データのフーリエ変換を実施。例えば、n=1の場合は、1回転周期の回転誤差の大きさを示す。左図はn=0-32、右図はn=0-5を表示。

4. 回転誤差で生じる疑似偏光

- ・下記の様に波長板の回転に誤差がある場合と無い場合(Δθ=0)で、SCIPで想定される偏光変調・偏光変調を用いてStokesパラメータを計算し、その差分から偏光誤差を導出した。

$$\text{波長板の回転角度: } \theta = \omega t + \Delta\theta$$

0.512秒/回転の理想回転
測定された回転誤差を入力

表2: 想定される偏光の大きさと許容値

	彩層	光球
Stokes I (入力)	1	1
Max Stokes Q (入力)	0.01	0.15
Max Stokes U (入力)	0.01	0.15
Max Stokes V (入力)	0.1	0.2
積算時間	> 10回転	2回転
許容誤差*	3×10^{-4}	1×10^{-3}

*実際にはフォトンノイズ等も含む

- ・偏光誤差は、観測で想定される偏光の大きさに依存する。今回は、太陽彩層・光球で観測される典型的な偏光の最大値(表1)を想定した。
- ・彩層の観測では、光子数の観点から10回転以上の積算が必要である。10回転分積算すれば標準偏差が許容値の1/5以下になり問題ない(図7)。
- ・光球の観測では、許容誤差と同程度の誤差が生じる。ただし、誤差の主要因はn=0成分で生じるStokes QU間のクロストークであるが、これはHKステータスを用いた後処理で補正できる(図8)。補正後は許容誤差の1/5以下程度になる見込みで問題無い。

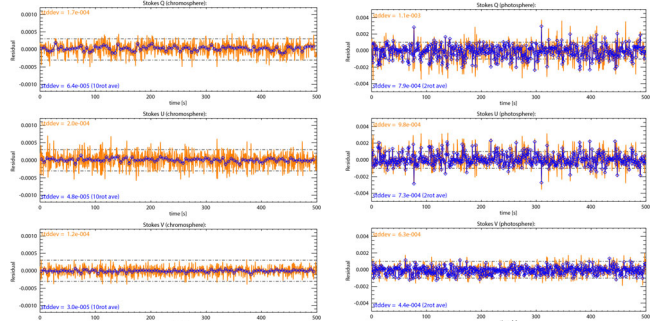


図7: 回転角度誤差から予想される彩層(左)と光球(右)の偏光誤差(橙色)。青線は、10回転分(彩層)/2回転分(光球)積算した場合。一点鎖線が許容値を示す。

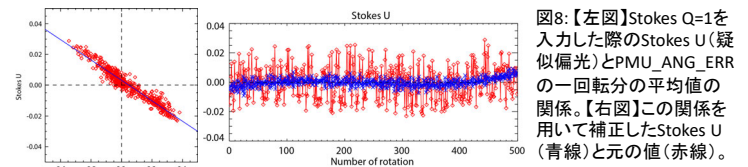


図8: [左図] Stokes Q=1を入力した際のStokes U(疑似偏光)とPMU_ANG_ERRの一回転分の平均値の関係。[右図]この関係を用いて補正したStokes U(青線)と元の値(赤線)。

5. 長期連続動作試験

- ・7日間連続で回転することを確認(図9、フライトは~5日間)。
- ・モータ電流の長期変動は許容範囲内。可能性の一つは縦置きの影響で今後確認する。
- ・モータ電流の30分以下の短期変動は周囲の温度変化起因。
- ・長期動作中に回転一様性が変わらないことを確認(図10)。

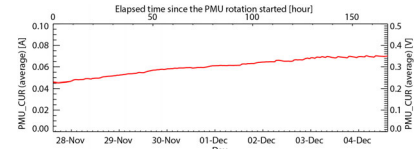
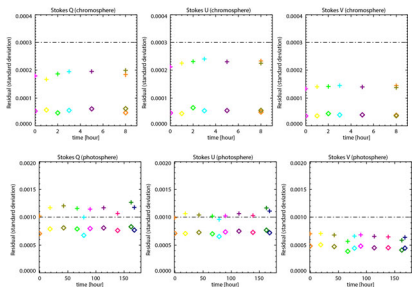


図9: モータードライバの電流値(30分平均)。

- ・図10: 彩層(上図)と光球(下図)観測で予想される偏光誤差の標準偏差の長時間変動。標準偏差は500秒間の1msサンプリングデータから計算。“+印”が1回転毎で、“◇印”が10回転分(彩層)/2回転分(光球)積算した場合。一点鎖線が許容値を示す。



6. 今後の予定

- ・回転性能が熱真空環境下でも変化しないことを確認。
- ・カメラ(スペインIAAが開発)やスキャンミラー駆動機構との同期制御の確認。
- ・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、ドイツマックスプランク太陽圏研究所がSUNRISE-3用に開発する紫外線偏光分光装置にも同じ駆動機構を供給する。

This document is provided by JAXA.