

# SUNRISE-3近赤外線偏光分光観測 SCIPによる高精度偏光観測の検討

久保雅仁<sup>1</sup>、勝川行雄<sup>1</sup>、  
石川真之介<sup>2</sup>、清水敏文<sup>2</sup>、  
一本潔<sup>1,3</sup>、阿南徹<sup>3</sup>、原弘久<sup>1</sup>  
1: NAOJ、2: ISAS/JAXA、3: 京都大学

## 1. SCIPによる偏光観測の概要

偏光観測の基本構成要素は、回転波長板、偏光板、カメラで構成される。SCIPの偏光観測の方式は、「ひので」衛星や観測ロケット実験CLASP(p-125)等でも採用しているオーソドックスなものである。太陽彩層の磁場を高解像・高精度で測定するためには、高速の偏光変調、つまり高速かつ一様に波長板を回転させる駆動機構と読み出しが高速なカメラがシステムと協調して動作することが必須である。この高速の偏光観測が、SCIPの特徴である。波長板(p-083)とその回転駆動機構はSOLAR-C用に開発されたものを使用する。得られるデータは

$$I_i^{obs} = I_i + a_i Q_i + b_i U_i + c_i V_i$$

のように、直線偏光や円偏光が混ざった明るさ情報である。係数の $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$ は図2で示すように、波長板の回転位相ごとに異なり、変調された偏光データが得られる。したがって、元のStokesパラメータを得るためには、偏光復調を行う必要がある。SCIPでは、SOLAR-Cでの観測を見据えて、機上で偏光復調を実施する。

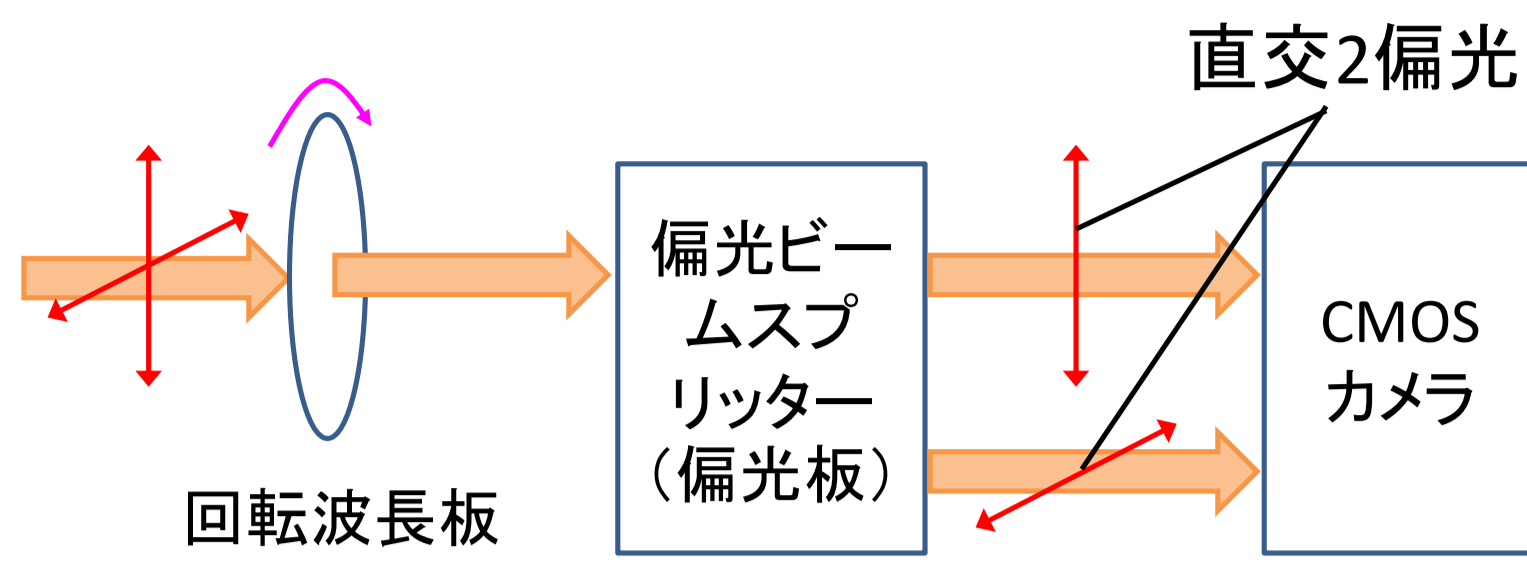


図1: SCIP偏光観測の基本構成要素

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	0.5秒/回転
撮像頻度	32枚/秒
露光時間	32ミリ秒
要求偏光精度	0.03% (10秒積算後)

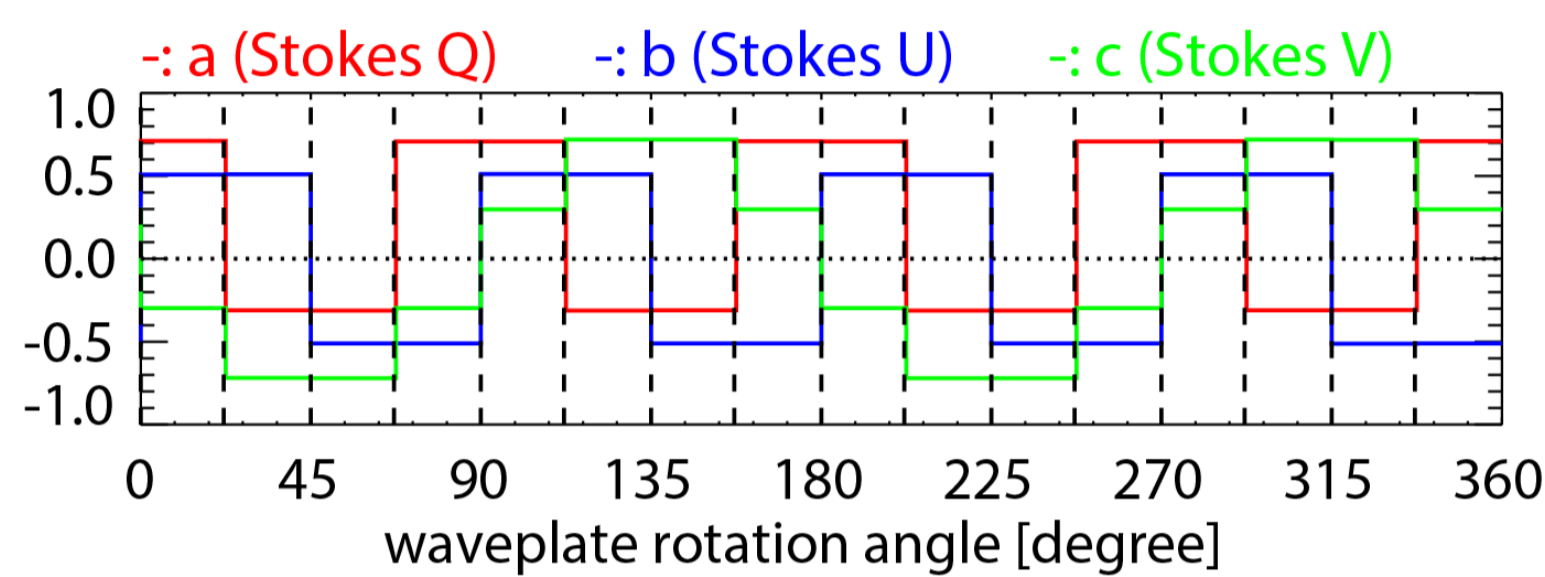


図2: 偏光変調の係数。横軸は波長板の回転角度。

## 3. カメラのローリングシャッターの影響

CMOSカメラのローリングシャッターの影響で、読み出しの開始点と終点では最大で一撮像分(~32ミリ秒)タイミングがずれる。一方、波長板は連続回転しているため、回転位相が最大で22.5度分ずれた偏光変調になる。その結果、表3に示したように、偏光復調後のアウトプットが正しい値からずれる。ただし、発生するのはStokes Q⇄U間及びV⇄R間のクロストークのみである(Rパラメータは、Stokes Vに対して波長板の回転位相が45度ずれた量。)トータルの直線偏光度や円偏光度は変わらないので、後処理で正しい値に戻すことができる。**ローリングシャッターの影響を最小限にするために、Stokesパラメータに加えてRパラメータの取得が必須である。また、各読み出し位置におけるクロストーク量を事前に知るうえで、精度の良い偏光較正試験が必須である。**

表3: カメラの読み出し位置の違いによる偏光復調後のアウトプット違い

Input	Output											
	Δt = 0s (位相ズレ 0)				Δt = 1/64s (位相ズレ π/16)				Δt = 1/32s (位相ズレ π/8)			
(Q, U, V)	Q	U	V	R	Q	U	V	R	Q	U	V	R
(1, 0, 0)	0.51	0.00	0.00	0.00	0.36	-0.36	0.00	0.00	0.00	-0.51	0.00	0.00
(0, 1, 0)	0.00	0.51	0.00	0.00	0.36	0.36	0.00	0.00	0.51	0.00	0.00	0.00
(0, 0, 1)	0.00	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.40	-0.17	0.00	0.00	0.31	-0.31

## 4. 波長板の回転一様性の検討

波長板の回転速度が一定でないと、偏光変調と復調で位相差が生じて、直線偏光と円偏光が混ざり合い、高精度の偏光観測が困難になる。SCIPで使用予定の回転駆動機構と同等品であるCLASPに搭載した回転駆動機構の回転一様性試験データ(Ishikawa et al. 2015)を基に必要な回転精度を検討した。

2Hzの一定回転に、CLASPで測定された回転誤差(図8)を加えてSCIPの駆動機構の回転を模擬し、偏光変調・復調を行った結果を図9に示す。ローリングシャッターの影響を考えて、回転波長板のずれが0-22.5度の範囲で計算した。この結果、いずれの場合でも、偏光誤差は0.03%以下となった。

回転誤差(図8)の周波数解析結果と各周期での許容最大誤差を図10に示す。測定結果で誤差の大きいn=11やn=1の周期では、許容誤差が大きく、要求が厳しいn=2やn=6の周期では、回転誤差が小さい。

→ 回転速度を高速化(CLASP: 4.8秒/回転)しつつ、回転一様性はCLASPの水準を維持する必要がある。

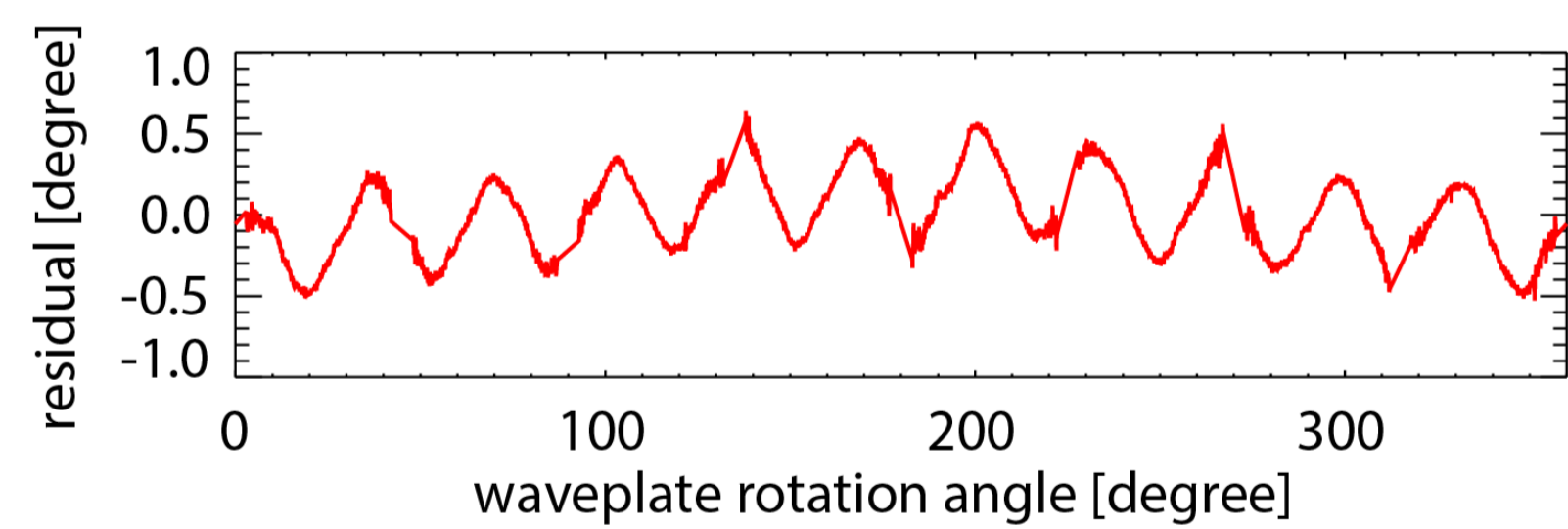


図8: CLASPの回転駆動機構で測定された回転誤差

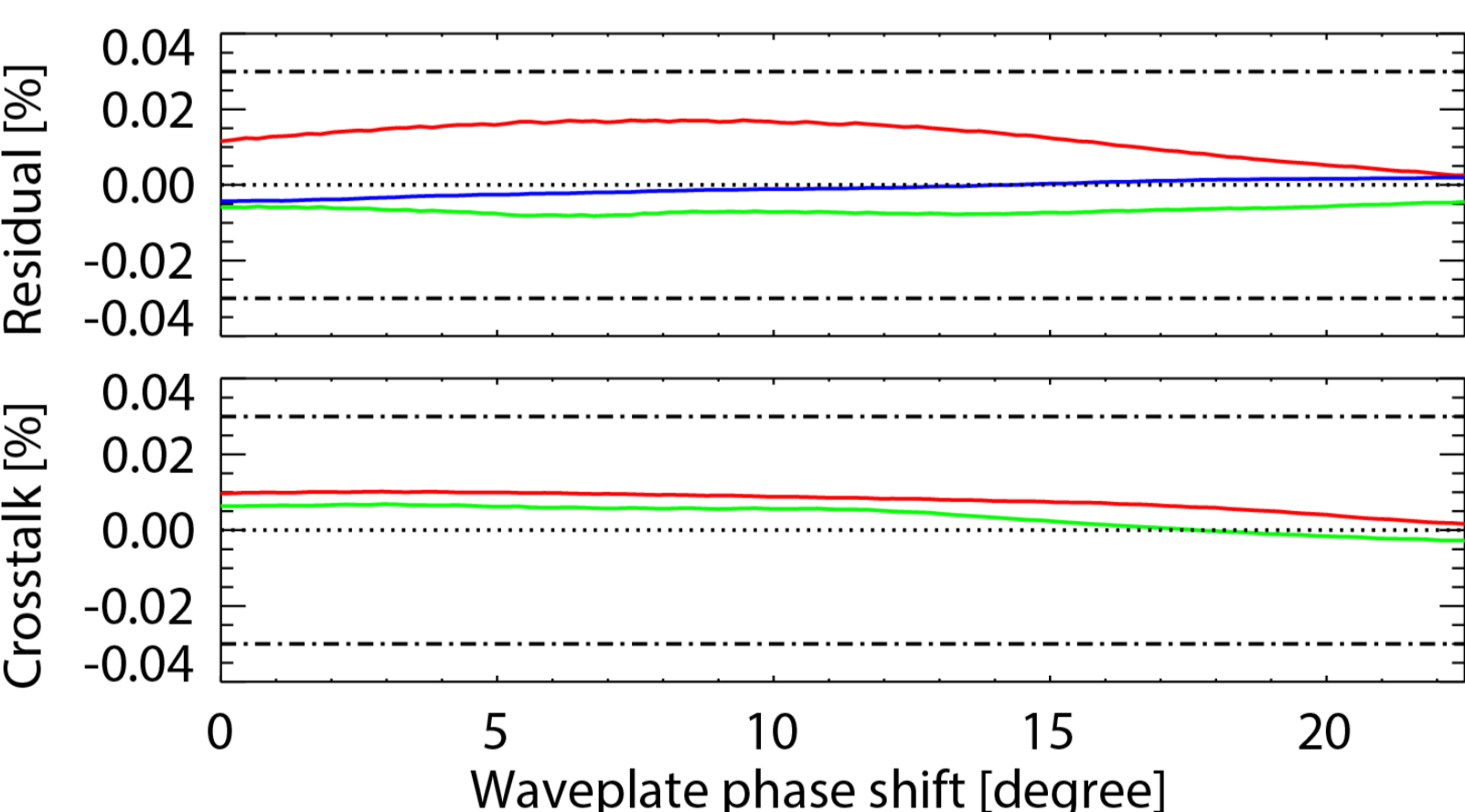


図9: Stokes Q, U, Vのいずれかを入力した場合の偏光復調後のQ, U, V誤差(上)。Stokes Vのみを入力した場合のQ, Uの誤差(下)。入力の偏光は全て20%を仮定。

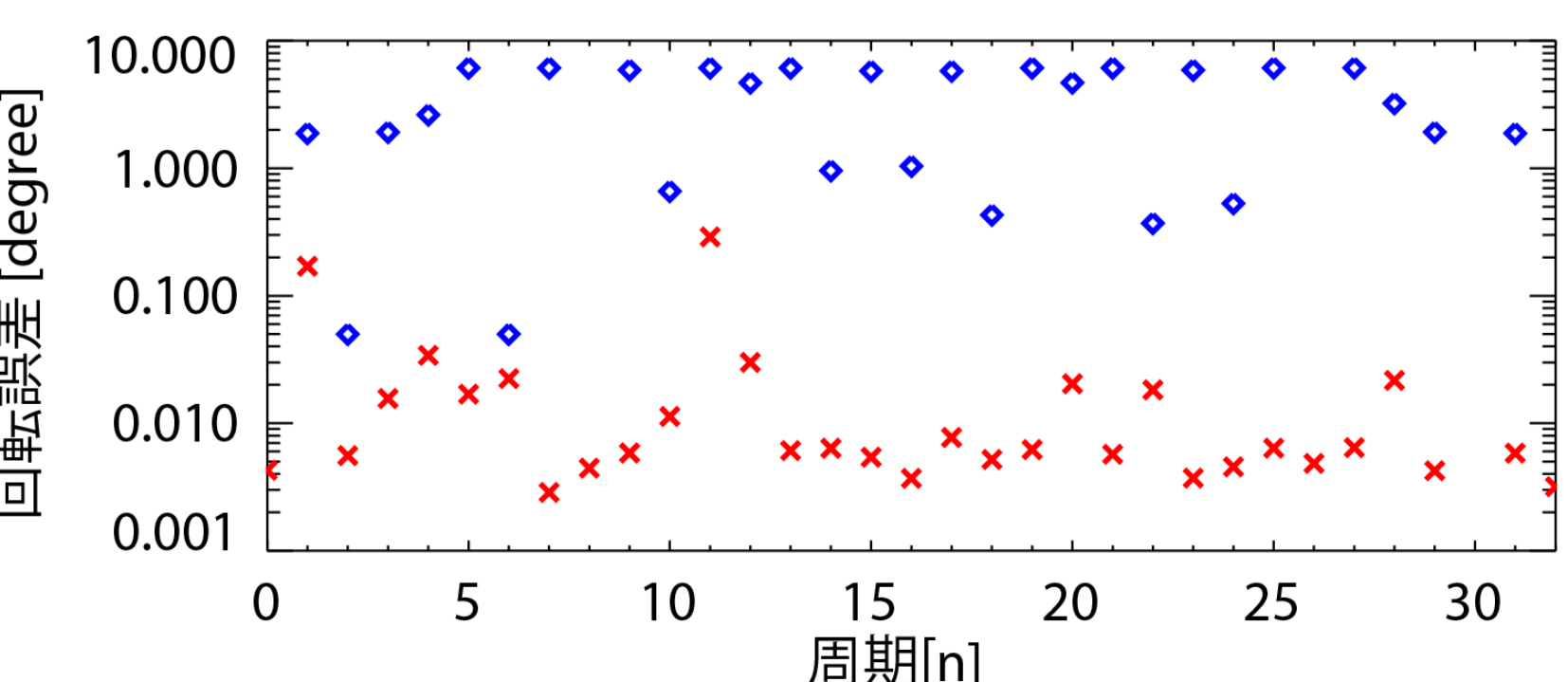


図10: 各周期での回転誤差の測定値(x)と許容値(◇)

## 2. 観測対象の変化による擬似偏光の検討

偏光変調中に、太陽起因の明るさの変動や気球望遠鏡の姿勢変動が発生すると擬似偏光が生じる。以下の様に単純なケースで擬似偏光の大きさを見積もった。

波長板の位相i番目の観測量

$$I_i^{obs} = \left( I_0 + \frac{dI}{dx} \Delta x_i \right) + a_i Q_0 + b_i U_0 + c_i \left( V_0 + \frac{dV}{dx} \Delta x_i \right)$$

$I_0, Q_0, U_0, V_0$ : 一定値  
 $a_i, b_i, c_i$ : 図2  
 $\Delta x_i$ : ジッター+ドリフト

偏光復調結果

$$\bar{I} = N I_0 + \frac{dI}{dx} \sum \Delta x_i, \quad \bar{Q} = Q_0 \sum |a_i| + \frac{dI}{dx} \sum \text{sign}(a_i) \Delta x_i + \frac{dV}{dx} \sum \text{sign}(a_i) c_i \Delta x_i$$

$$\frac{N}{A} \bar{Q} \sim \frac{Q_0}{I_0} + \frac{N}{A} \left( \frac{dI}{dx} / I_0 \right) (\bar{\Delta x} + \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}}) + \frac{N}{A} \left( \frac{dV}{dx} / I_0 \right) (\bar{\Delta x} + \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}})$$

$\bar{\Delta x}$ : 1偏光変調間の平均  
 $\sigma_x$ : 1偏光変調間の標準偏差

表2: dI/dx及びdV/dx起因の擬似偏光のまとめ

項目	dI/dx起因	dV/dx起因	コメント
dI/dx/I <sub>0</sub> , dV/dx/I <sub>0</sub>	24%/0.1秒角	5%/0.1秒角	
ドリフト項(Δx)	3.4 × 10 <sup>-3</sup> 秒角	-	10km/sの一方向の運動@太陽
ジッター項(σ <sub>x</sub> /√N)	4.8 × 10 <sup>-5</sup> 秒角	4.8 × 10 <sup>-5</sup> 秒角	気球の姿勢変動(10秒積算後)
擬似偏光	1.6%	0.005%	片偏光のみ使用した場合

ジッター項及びドリフト項の見積もり

ジッター項は、SUNRISEの2回目の飛翔のコリレーショントラックのデータ(図3黒線)から見積もった。露光時間分の移動平均をとった変動(図3赤線)に対して、1偏光変調間の標準偏差を計算した。姿勢変動のドリフトは非常に小さいので、ドリフト項は、太陽の構造が彩層の音速(~10km/s)で一方向に移動する場合を想定した。

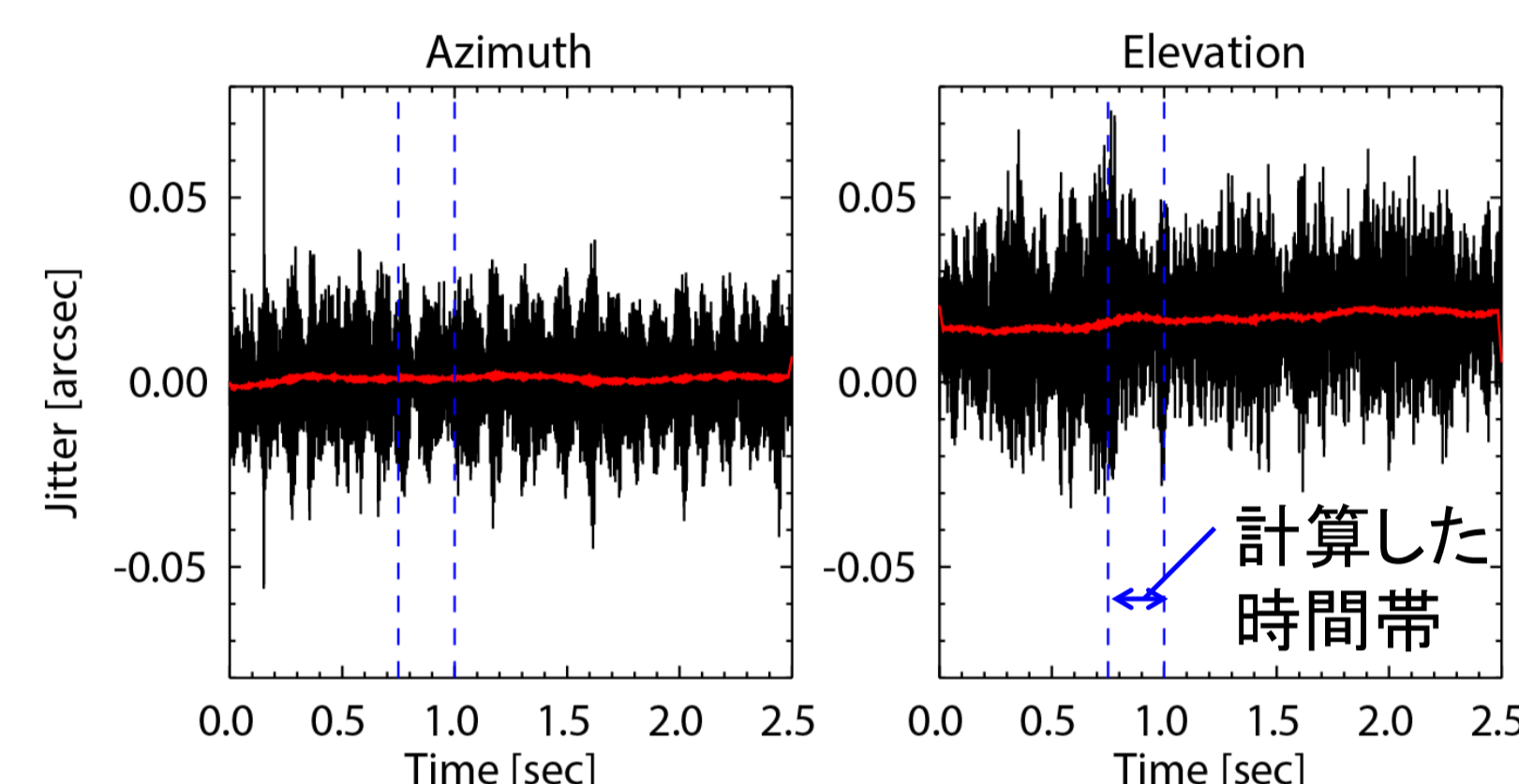


図3: SUNRISEの姿勢変動(2回目のフライト)

dI/dx, dV/dxの見積もり

SCIPで得られる高解像度・高精度な彩層の偏光観測データはこの世に存在しないため、非熱平衡輻射輸送の数値計算(図4)を用いてdI/dx, dV/dxを見積もった。

• dI/dxは、ヒストグラム(図5)をガウスフィットした際の3σ値である「24%/0.1秒角」を採用。

• dV/dxは、2次元マップの最大値である「5%/0.1秒角」を採用。図6のヒストグラムは偏光信号の弱い領域が支配的であるが、観測するのは偏光信号がある程度強い領域であるため。

口径1mの回折限界@854nm Stokes Vのピーク波長のPSFでconvolutionしている。

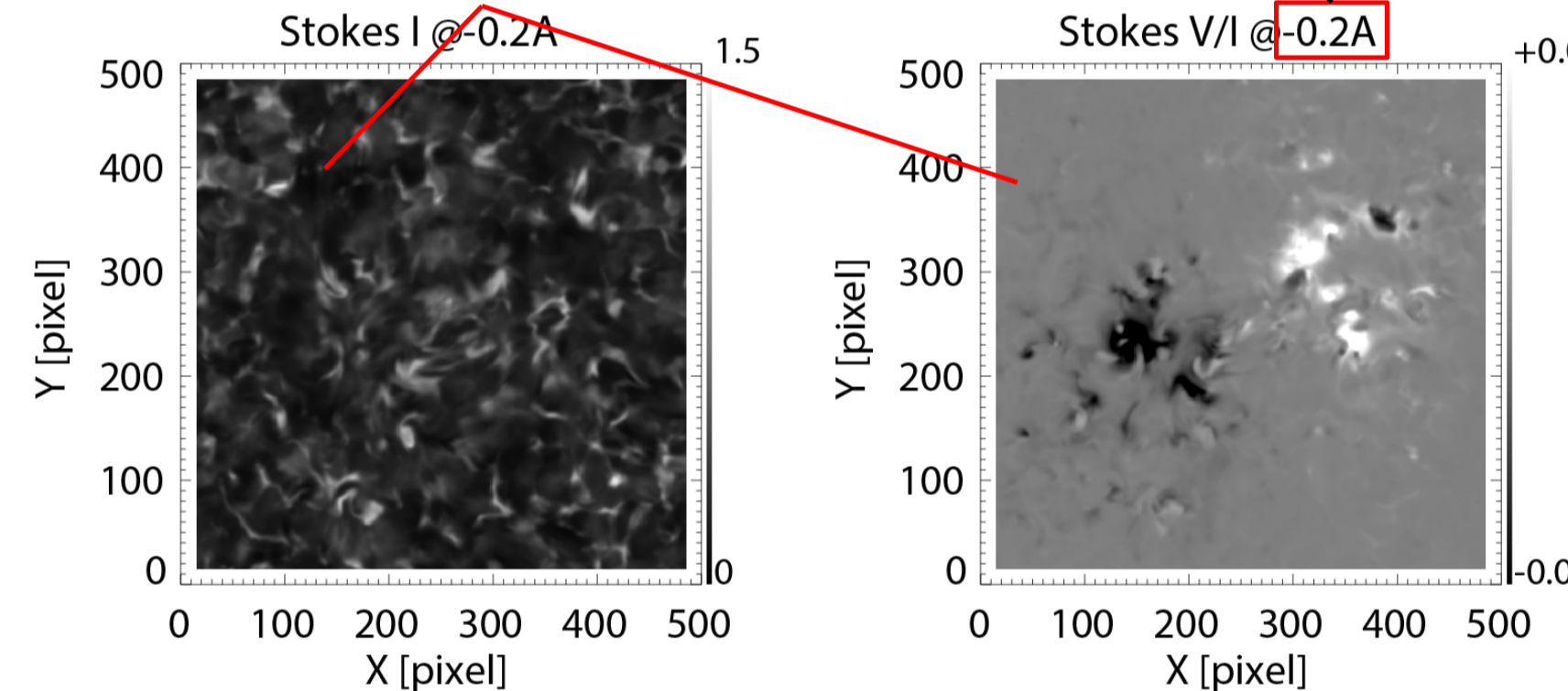


図4: 非熱平衡輻射輸送の数値計算結果(Ca II 854nm)

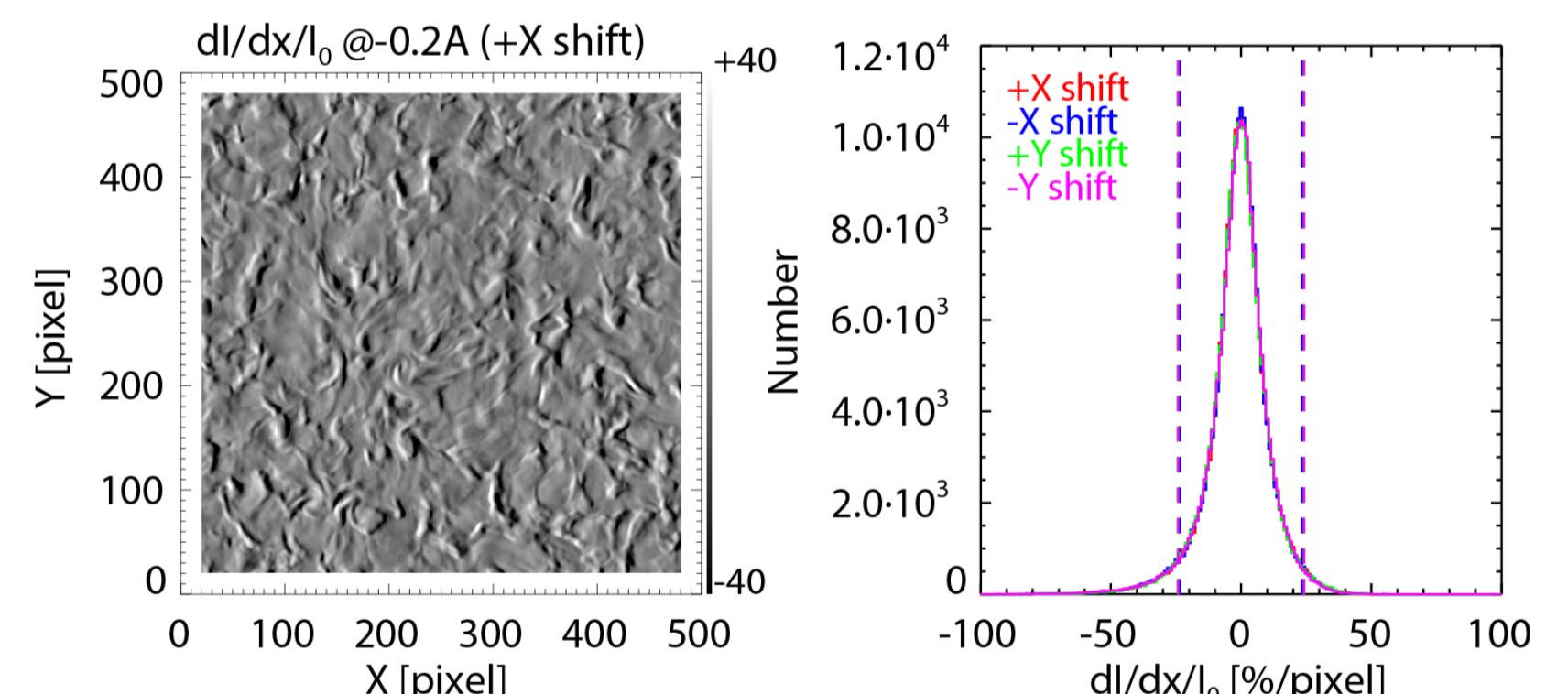


図5: 0.1"シフトした場合のdI/dxの2Dマップとヒストグラム

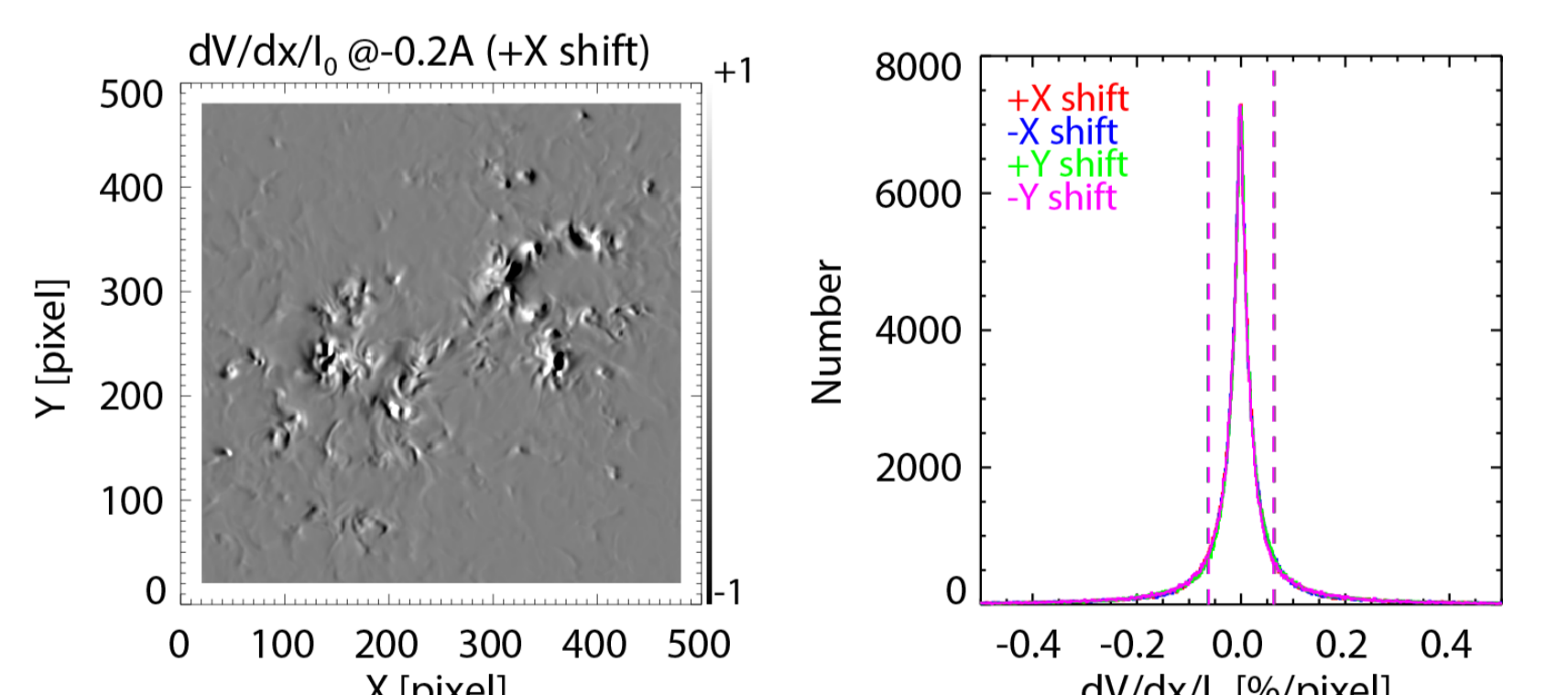


図6: 図5のdV/dx版

dI/dx起因の擬似偏光

主要項であるドリフト項を小さくするためには、高速の偏光変調(0.5秒/回転)が必須であるが、それでも、擬似偏光は要求される偏光精度の50倍である。したがって、**直交する2偏光の同時観測が必須である。観測された直交2偏光のStokesプロファイルを2%程度精度のアライメントして足し合わせることで、擬似偏光を低減し、要求精度を達成する。**

dV/dx起因の擬似偏光

この擬似偏光は、直交2偏光の足し合わせでは低減できない。しかし、Stokes VとQやUの変調の位相が異なるため(図2)、ドリフト項に起因する擬似偏光は、偏光復調でほぼキャンセルして、無視できるほど小さくなる(図7)。また、ジッター起因の擬似偏光も10秒積算後は、0.005%程度となり、**dV/dx起因の擬似偏光は問題にならない。**

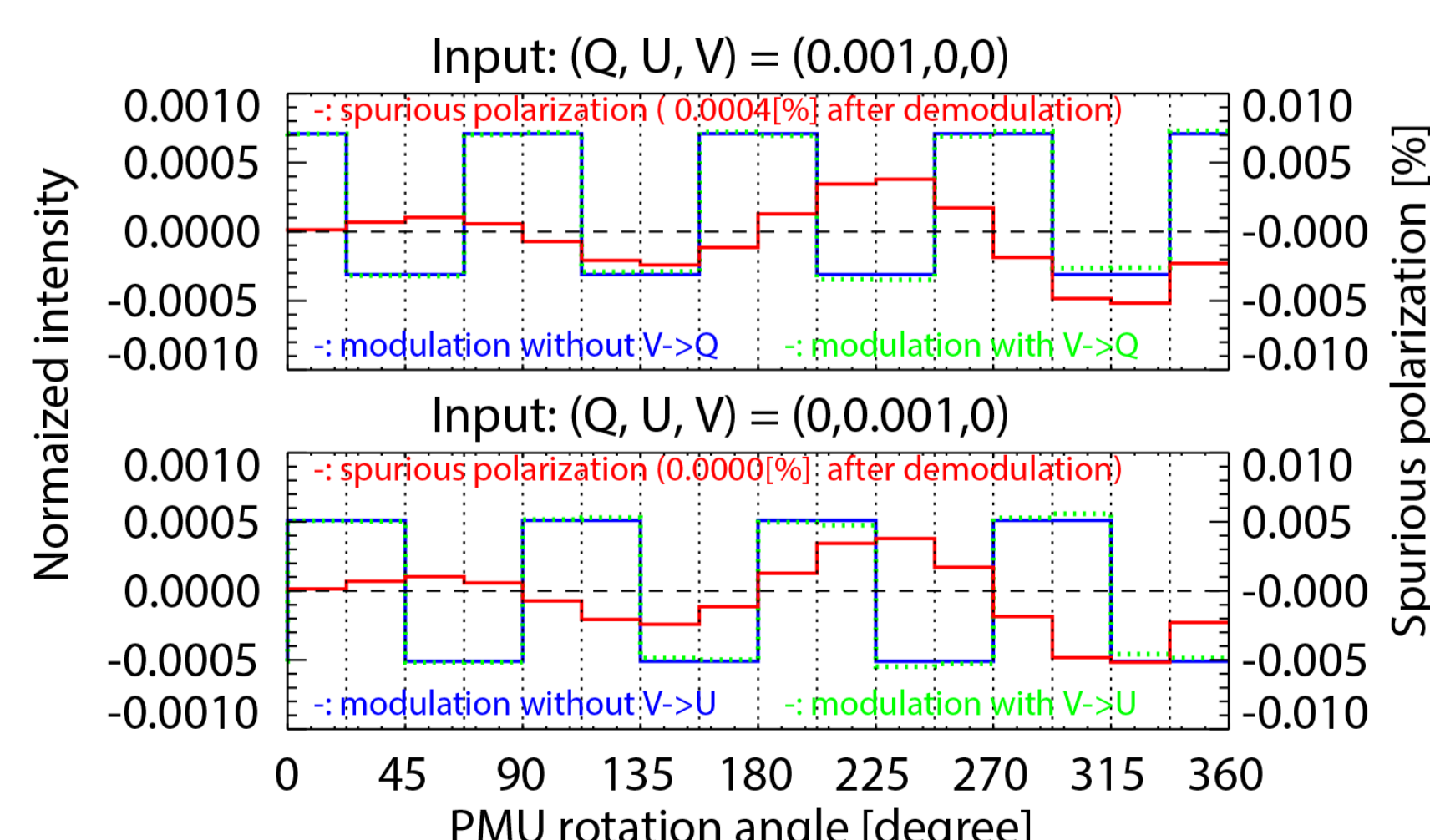


図7: dV/dx起因の擬似偏光(赤線)が無い場合(青線)とある場合(緑線)の偏光変調。ジッター無しで、10km/sのドリフトを仮定。

→ SUNRISEの2回目のフライトの姿勢安定度が実現されれば、SCIPで想定している偏光変調速度や偏光観測の方法(直交2偏光同時観測)で、擬似偏光を要求値(0.03%)以下に抑えることができる。