NIC偏光観測モードの再開発

高橋 隼¹、禅野 孝広²、斎藤 智樹¹、伊藤 洋一¹ 1)兵庫県立大学 天文科学センター 西はりま天文台 2)みやこ回路

Redevelopment of Polarimetry Mode for NIC

Jun TAKAHASHI¹, Takahiro ZENNO², Tomoki SAITO¹, and Yoichi ITOH¹

 Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo, Sayo-cho, Hyogo 679-5313, Japan
 Miyako Electronics, Kyoto City, Kyoto, Japan

 $E\text{-}mail:\ takahashi@nhao.jp$

(Received 2018 October 31; Accepted 2018 December 4)

概要

我々は、西はりま天文台3波長同時観測近赤外カメラ (NIC) の偏光観測モードを再開発した。方 解石の偏光分離素子を採用し、方解石の熱膨張率異方性に配慮した素子ホルダーを製作した。2018 年2月に新しい偏光分離素子を取り付け、試験観測を開始した。無偏光標準星の観測により、望 遠鏡を含む観測システムに起因する器械偏光度は 0.01±0.37% (J), 0.02±0.82% (H), 0.04±0.39% (K_s)と求められた。また、結像位置、装置ローテータ回転角、望遠鏡指向高度のいずれに対して も、器械偏光の依存性は見られなかった。少なくともJおよび K_s バンドについては、NIC は 1%の 偏光度を検出する潜在能力を持つことが分かった。

Abstract

We redeveloped the polarimetry mode for the Nishiharima Infrared Camera (NIC). A calcite polarizing beam displacer was adopted. The holder for the displacer was designed considering anisotropy in thermal expansion of calcite. We installed the new polarizing beam displacer into the cryostat in February, 2018. Observations for unpolarized standard stars yielded instrumental (including telescope) polarization degrees of $0.01\pm0.37\%$ (J), $0.02\pm0.82\%$ (H), and $0.04\pm0.39\%$ (K_s). We did not find any significant dependence of the instrumental polarization on either the image position, the rotator's angle, or the telescope altitude. Our evaluation shows that the NIC has a potential to detect a 1% polarization degree in at least J and K_s bands.

Key words: science instrument – near-infrared – polarimetry

1. はじめに

西はりま天文台 3 波長同時観測近赤外線カメラ (Nishiharima Infrared Camera: NIC) は、なゆた望遠鏡のカ セグレン焦点に装着されている撮像装置である。近赤外 *J*, *H*, *K_s* バンドを同時に観測できる。通常の強度撮 像観測 (以降「撮像観測」と呼ぶ) の性能は Ishiguro et al. (2011), Takahashi et al. (2013) に記述されている。

NICは、撮像観測の他に偏光撮像観測(「偏光観測」と呼ぶ)もできるように設計されている。偏光観測 には半波長板と偏光分離素子を用いる。真空冷却容器内の望遠鏡焦点面付近に偏光分離素子を置くことによ り、入射光線を常光・異常光の2光線(互いに振動の向きが直交する2光線)に分離する。半波長板は望遠鏡 と真空冷却容器の間(フランジ内部)に置かれ、偏光方位角を回転させる働きをする。

2012年5月より偏光観測の試験が開始された。しかし、その直後から視野を縦断する「く」の字の影が 現れた (Fig. 1)。「く」の字の影は使用可能な視野を大きく制限し、実質的に偏光観測ができない状態となっ た。その後、真空冷却容器を開腹し偏光分離素子を観察したところ、素子表面に亀裂が入ってることが分かっ た。復旧には偏光分離素子の新調が必要である。

NICは、コールドシャッターと偏光素子ホルダーを兼ねた部品(「ホルダー」と呼ぶ)を光路に出し入れす ることにより、撮像観測モード、ダーク観測モード、偏光観測モードの切り替えを行う。この駆動はホルダー を載せた直動装置が担う。直動装置はボールネジとステッピングモータで駆動する方式の物を用いていた。こ の直動機構は、常温常圧環境では問題なく動くものの、真空冷却環境 (~75–100 K, ~ 10^{-8...-6} Torr) では動 かなくなるトラブルが度々生じていた。そこで、偏光分離素子の新調に合わせ、別方式の直動装置も検討する ことにした。

直動装置を新調するとホルダーの取り付け穴位置も変わるため、ホルダーの再製作も必要となる。つま り、我々は偏光分離素子・ホルダー・直動装置で構成されるユニット(「モード切替ユニット」と呼ぶ)全体 を再開発することにした。

2. 開発

2-1. 偏光分離素子、ホルダー

破損した偏光分離素子の素材は方解石であった。方解石は熱膨張率の異方性が大きく¹、そのため温度変化に 弱い。破損の原因は明らかではないが、運用停止(昇温)時や運用再開(冷却)時には 200 K 程度の温度変 化があるため、温度変化が破損の原因になった可能性がある。



Fig. 1. Images obtained with the previous polarizing beam displacer before (left) and after (right) the breakage. Both of them are in J band. The left is a dome-flat image.

¹ 方解石の線膨張率は、光学軸に平行な方向では 26.3×10⁻⁶ K⁻¹、垂直な方向では 5.44×10⁻⁶ K⁻¹ (0-80 °C、理科年表 2015)。

そこで、方解石に代わる素材としてルチルを検討した。ルチルは方解石に比べて熱膨張率の異方性が小さい、透過率の波長依存性が小さいという利点がある。しかし表面反射が大きく、そのため反射防止コーティングが必須であるが、NICの真空冷却環境で問題なく機能する確証が得られなかった。そこで、ルチルの採用は見送り、従来と同様に方解石を偏光分離素子の素材として用いることにした。製作した偏光分離素子の主な 仕様を Table 1 にまとめる。

温度変化による変形という方解石の懸念点に対しては、ホルダーを工夫することで対応することにした。 すなわち、素子の側面4面のうち直交する2面をバネで支持することにより、素子が膨張しても過大な圧力が かからないようにした。このアイデアは、偏光分離素子およびホルダーの製作を依頼した光学技研から提案さ れたものである。

また、素子の(光軸に沿って見た時の)断面積は従来と変わらないが ($12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$)、入射窓の大き さを 2.7 mm × 4 mm から 2.7 mm × 8 mm に拡大することにより、偏光観測視野を拡大することにした。 さらに、従来、偏光素子表面(望遠鏡側)は望遠鏡焦点面より 2.2 mm 望遠鏡側として設計されたが、今回 は距離を若干広めにとり 4.2 mm 望遠鏡側とした。これは素子表面の粗さが撮像画像に現れにくくすることを 狙ったものである。

Substrate	Calcite
Size	$12~\mathrm{mm}$ \times $12~\mathrm{mm}$ \times $32.5~\mathrm{mm}$
Clear aperture	$10~\mathrm{mm}\times10~\mathrm{mm}$
Beam separation	$\geq 30 \text{ mm}$
Coating	None

Table 1. Specs of the new polarizing beam displacer

2-2. 直動装置

新しい直動装置には Janssen Precision Engineering (JPE) の Cryo Linear Drive (CLD) 1 を採用した。CLD1 は 0.02–375 K の温度環境で使用可能とされており、NIC での使用に十分対応できると判断した。

CLD1 を採用するにあたっての最大の不安点は、位置決め精度であった。CLD1 には移動距離を計測する エンコーダが付属していない²。CLD1 はピエゾ(圧電)素子により駆動するが、1 ステップあたりの移動距 離の不定性が大きい。JPE 技術者との private communication によると、すべての条件が一定だとしても移 動距離に対して 10%程度の不定性がある。open loop 制御では、数 10 mm の移動に対して数 mm の不定性が 予想され (1 mm はおよそ 5 pix に相当)、支障がある可能性がある。

そこで、CLD1 のキャリア可動域 (ストローク 51.5 mm) の機械的両端を、偏光観測モードおよび撮像観 測モードの位置とした。端点に達するのに十分と思われるステップ数の駆動を指令し、キャリアを端点にぶつ けることにより、位置決めを行う。ダーク観測モードについては、シャッターの大きさに余裕があるので位置 決め要求精度は 2–3 mm 程度と比較的緩く、open loop 制御でもぎりぎり運用可能であると見込まれた。

入手した CLD1 を用いて、繰り返し位置決め精度を測定した。試験は常温 (~290 K) 常圧環境で行った。 CLD1 にホルダーを載せた状態で、水平、鉛直下向き、鉛直上向きの3種類の動作方向で試験した。キャリア を一端に置いた状態から 2500 ステップ動かした。CLD1 スペック表³ によると1 ステップあたりの移動距離

² 光学式エンコーダ付きの製品 (CLD1-COE) もあるが、真空冷却容器内外に光ファイバを配線する手間が大きく、採用しなかった。 ³ https://www.janssenprecisionengineering.com/page/cryo-linear-drive-cld/

は 8 µm (環境 293 K) であり⁴、この値に基づいて予想される移動距離は 20 mm である。この動作を 1 つ の動作方向あたり 10 回繰り返し、毎回、移動距離をデジタルノギスで測定した。

測定結果を Table 2 に示す。動作方向が同じであれば、繰り返し位置決め精度は 0.4 mm 未満であるが、 動作方向により移動距離に最大で 7 mm 程度の差が生じることが分かった。

ダーク観測モードに切り替えるための駆動ステップ数は、望遠鏡を垂直に立てた状態(CLD1の動作方向 は水平)の値を設定してある。上記の測定結果を踏まえると、ダーク観測モードへの切り替えは望遠鏡を垂 直に立てた状態で行うのが無難である。それ以外の状態でダーク観測を行う際は、シャッターが正しく挿入さ れ、光が完全に遮断されているか確認する必要がある。

2-3. 取り付けと簡易確認

再製作したモード切替ユニットを 2018 年 2 月に真空冷却容器内に取り付けた (Fig. 2)。

Fig. 3 は得られたフラット画像である(取得方法、画像処理方法は 3–2. 節参照)。ほぼ設計通りの位置 に、視野が結像されていることを確認した。検出器上の視野の大きさは、およそ 150 pix × 430 pix であっ た。ピクセルスケールが撮像観測と同じ 0.16"/pix (Ishiguro et al., 2011) と仮定すると、視野の大きさは約 24" × 69" に相当する。

ユニット取り付け後、本稿執筆時点までに4回の昇温·冷却⁵を行ったが、偏光分離素子の破損や直動装 置の故障は発生していない。

Move. orientation	Horizontal	Vertically downward	Vertically upward
Mean	19.54	24.06	17.30
Std. deviation	0.12	0.35	0.20

3. 器械偏光の評価

3-1. 試験観測

器械偏光(望遠鏡を含む観測システムで生じた人為的な偏光)を評価するために、無偏光標準星を観測した。 観測天体は "A List of Polarized and Unpolarized Standard Stars for UKIRT"⁶より選択した。観測の概要 を Table 3 に示す。

半波長板を基準方位から 0°, 45°, 22.5°, 67.5°回転させ、それぞれの回転角で行う連続 4回の撮像を 1 セットと呼んでいる。1 セットの観測データから、1 組の規格化されたストークスパラメータ (q = Q/I, u = U/I)が導出される。

3-2. 画像処理、ストークスパラメータの導出

画像処理は以下の手順で行った。

⁴ 温度により大きく異なる。

⁵ 不完全な昇温・冷却も含む。

⁶ https://www.ukirt.hawaii.edu/instruments/irpol/irpol_stds.html



Fig. 2. Mode switching unit. (a) Holder for the polarizing beam displacer. The positions to be inserted on the light path for imaging, dark, and polarimetry modes are designated by arrrows with "Open", "Close", and "Pol", respectively. (b) Mode switching unit as a whole. The holder is placed on the CLD1. A plate with a hole behind the holder is a light shield. (c) Installing the unit into the cryostat. The light path is shown by a bold yellow arrow.



Fig. 3. Combined flat frames in J, H, and K_s bands, from left to right. In each band, ordinay light is imaged on the left (smaller x) rectangular region, whereas extraordinary light reaches the right region.

Table 3. Summary of our observations for unpolarized standard stars. Hereby m_J represents magnitude in J band, retrieved from the SIMBAD database; Exp, PA and Alt stand for exposure time, NIC's position angle with respect to equatorial North, and telescope's pointing altitude, respectively.

Object	Date in 2018 (UT)	m_J	Exp(s)	Set $\#$	PA	Alt	Remarks
HD 65583	March 14	5.5	2	15	0°	80° - 73°	3 y-positions
HD 98281	March 14	5.9	5	15	0°	42° - 44°	3 y-positions
HD 103095	May 9	4.9	2	$\sim \! 150$	$90^{\circ}, 0^{\circ}$	72° - 32°	Self-guide (PA=0°)

1. 縦パターン・ダーク除去

2. フラット補正

NIC の画像には縦パターン(縦縞)が現れる。縦パターンの出方は、画像の象限ごとに異なり、また露 出ごとに変化する (Ishiguro et al., 2011)。通常の撮像観測の画像処理では、縦パターンの除去は、ダーク差し 引き、スカイ成分差し引きの後に行っていた。スカイ成分が強い場合は、それを差し引かないと、縦パターン を読み取れないためである。しかし、偏光観測の場合は、視野を小さく制限しているため、画像の各列に必ず 光がほとんど入らない領域が存在する。そこで、生画像の段階で、各象限について光がほとんど入らない領域 から縦パターンの強さ(カウント)を読み取り、それを差し引くことで縦パターンを除去した (Fig. 4)。この 過程で、ダーク成分など定数オフセットカウントも除去される。

次にフラット補正を行う。無偏光のフラット光源を用いてフラット画像を得るのが理想である。撮像観測 画像のフラット補正ではトワイライトフラットを用いることが推奨されている (Ishiguro et al., 2011)。しか し、薄明時の空(散乱された太陽光)は強く偏光し、強度も急激に時間変化するために⁷、偏光観測のフラッ ト光源としては適していない。そこで、ドームフラットを取得した(エンクロージャ内に設置してあるフラッ トスクリーンに照射した光を観測)。ドームフラットの強度は時間的にほぼ一定だが、斜め方向から光を照射 しているために完全に無偏光である保証はない。そこで、以下のような観測・画像処理を行い、無偏光光源に 対するフラット画像を合成した。

- カセグレン焦点の装置ローテータの回転角度を-135°から+180°まで45°刻みで回転させた(8角度)。
- 1 つのローテータ回転角度につき、20 セット(1 セットは半波長板 4 回転角の観測)の偏光観測を行った(1 回の露出時間は 2 秒)。つまり、合計 4 × 20 × 8 = 640 枚のフラット画像を取得した。
- 縦パターン除去処理を行った後、すべての画像を加算平均した(最終的にはカウント値が1付近になる ように規格化)。

以上の処理をして得られた最終フラット画像が、Fig. 3 である。旧偏光分離素子(破損前)のフラット画像 (Fig. 1 左)と比べると、一様な感度パターンが得られていることが分かる。この理由は

- 新素子の表面の粗さや結晶の非均一性が旧素子よりも小さい。
- 素子表面を望遠鏡焦点位置から離したことが奏功した。

⁷ 強度が変化すると以下で述べる方法では無偏光フラットを合成できない。



Fig. 4. Column pattern subtraction. Left: before subtraction. The regions enclosed by upper two lines and lower two lines are used for measurement of the column pattern. Right: after subtraction.



Fig. 5. Processed images of HD 65583 in J, H, and K_s bands, from left to right.

のいずれかまたは両方であると考えられる。

縦パターン除去済みの天体画像をフラット画像で割ることにより、フラット補正を行った。

天体が暗くスカイが相対的に明るく写る場合は、通常の撮像観測と同様に、スカイパターンの除去が必要 になるだろう。しかし、今回観測した無偏光標準星は非常に明るく、スカイ成分は相対的に非常に弱かったの で(Fig. 4 右でスカイ成分はほとんど写っていない)、スカイパターンの除去は行わなかった。

ストークスパラメータを導出するために、常光と異常光ぞれぞれの星像を測光した。測光には IRAF の apphot.phot タスクを用いた。以下の方法で測光値からストークスパラメータを求めた。「半波長板回転+偏 光分離」方式の偏光観測データに対しては標準的な方法である。

$$R_q = \sqrt{\frac{I_{e,0^{\circ}}}{I_{0,0^{\circ}}} \frac{I_{0,45^{\circ}}}{I_{e,45^{\circ}}}},$$
(1)

$$R_u = \sqrt{\frac{I_{e,22.5^{\circ}}}{I_{0,22.5^{\circ}}}} \frac{I_{0,67.5^{\circ}}}{I_{e,67.5^{\circ}}},$$
(2)

$$q = \frac{1 - R_q}{1 + R_q},\tag{3}$$

$$u = \frac{1 - R_u}{1 + R_u}.$$
(4)

ここで $I_{\mathbf{X},\phi}$ は測光値であり、第1添字 x は常光 (o) または異常光 (e) を、第2添字 ϕ は半波長板の回転角を表す。なお、ここで求めた q, u は偏光分離素子にとっての常光の偏光方位を基準として求められたもので、必ずしも赤道座標の南北を基準とする q, u とは一致しない。

今回は無偏光標準星(真の q, u は 0)を観測したので、ここで導出された q, u が器械偏光であると言える。なお、器械偏光の他に地球大気透過中に生じる偏光が寄与する可能性もあるが、地球大気による偏光は最大で 0.005%程度と報告されており (Bailey et al., 2008)、NIC で検出できるレベルではないので (Table 4) ここでは考えない。

q, u は以下により、偏光度 P_0 と偏光方位角 Θ に変換できる。

$$P_0 = \sqrt{q^2 + u^2},\tag{5}$$

$$\tan(2\Theta) = u/q,\tag{6}$$

偏光度と偏光方位角の誤差 $(\sigma_P, \sigma_\Theta)$ は、 $q \ge u$ の誤差 (σ_q, σ_u) から求める。

$$\sigma_P = \frac{\sqrt{q^2 \sigma_q^2 + u^2 \sigma_u^2}}{P_0},\tag{7}$$

$$\sigma_{\Theta} = 28.65^{\circ} \frac{\sigma_P}{P_0}.$$
(8)

式 (5) で求めた偏光度 P_0 には、偏光度に対するその誤差の比 (σ_P/P_0) が大きいとき、正のバイアスがか かる。このバイアスを補正するために、Plaszczynski et al. (2014) が提案した以下の補正式を用いた。

$$P = P_0 - \sigma_P^2 \frac{1 - e^{-P_0^2/\sigma_P^2}}{2P_0}.$$
(9)

3-3. 結果

(a) 全般

得られた器械偏光 q, u を Table 4 にまとめる。3 天体の平均 q, u から偏光度 P を求めると、0.01±0.37% (J), 0.02±0.82% (H), 0.04±0.39% (K_s)⁸ となる。 J, H, K_s バンドとも、有意な器械偏光は検出されなかった。有意な偏光が検出されなかったので、偏光方位角 Θ は求めていない。

HD 65583 と HD 98281 に対する H バンドの測定値がないのは、検出器上で信号カウントが飽和してし まったからである。HD 103095 についても、H バンドのカウントは J, K_s バンドよりも大きかったにもかか わらず、H バンドの誤差は他バンドよりも大きくなっている。この原因も、H バンドの一部のピクセルでカ ウントが飽和したかリニアリティが保たれる限界を超えてしまったためである可能性がある。

⁸ 負の値は無効。

	J band		H l	band	K_s band		
Object	q~(%)	u~(%)	q~(%)	u~(%)	q~(%)	u~(%)	
HD 65583	0.03 ± 0.32	-0.06 ± 0.33	_	_	-0.05 ± 0.26	-0.13 ± 0.24	
HD 98281	-0.05 ± 0.25	0.01 ± 0.14	_	_	-0.04 ± 0.17	-0.05 ± 0.20	
HD 103095	0.01 ± 0.30	0.02 ± 0.36	0.03 ± 0.52	-0.03 ± 0.55	0.02 ± 0.42	-0.02 ± 0.43	
Mean	-0.00 ± 0.29	-0.01 \pm 0.29	0.03 ± 0.52	-0.03 ± 0.55	-0.02 ± 0.30	-0.07 ± 0.31	

Table 4. Derived instrumental polarization. Errors in q, u for each object are in terms of standard deviation (one sigma). Errors in the mean q, u are calculated as root-mean-square of errors for the objects.

(b) 結像位置への依存性

器械偏光の結像位置に対する依存性を調べた。HD 65583 と HD 98281 について、視野の上(座標 y が大きい方)、中央、下の 3 箇所に分けて天体を結像させ、結像位置別に q, u を求めた。その結果を Table 5 に示す。 結像位置に対する器械偏光の依存性は見られなかった。

Table 5. Positional dependence of instrumental polarization.

	J b	and	K_s band		
y-position	q~(%)	u~(%)	q~(%)	u~(%)	
Upper	-0.02 ± 0.26	-0.11 ± 0.21	-0.01 ± 0.24	-0.09 ± 0.26	
Center	0.12 ± 0.30	-0.03 ± 0.31	0.01 ± 0.22	-0.13 ± 0.22	
Lower	-0.12 ± 0.26	0.05 ± 0.22	-0.13 ± 0.18	-0.04 ± 0.19	

(c) ローテータ回転角・指向高度への依存性

装置ローテータの回転角が変化すると、装置側から見ると望遠鏡が回転することになる。もし、望遠鏡に起因する器械偏光があるのならば、ローテータの回転に伴って器械偏光の方位 Θ が回転する (q, u も変化する)はずである。HD 103095の観測データを用いて、器械偏光のローテータ回転角への依存性を調べた。始めの 30 セットは装置方位角 (PA) が 90°、その後は PA が 0°の設定で観測をしたので、PA を切り替えたタイミングでローテータの回転角 (insrot)が大きく変化した。また、PA を固定している間、視野の回転を打ち消すために insrot は徐々に変化していく。Figs. 6-8 で、insrot の変化に伴った q, u の変化は確認できない。

また、HD 103095の観測中、望遠鏡指向高度は 72° から 32° まで変化したが、高度に対する q, u の依存 性も見えない (Figs. 6-8)。これは、少なくともこの高度範囲では地球大気透過による偏光が無視できることを 確認する結果であると言える。しかし、高度が約 22° を下回ると、なゆた望遠鏡の視界の一部がエンクロー ジャの壁に遮蔽されるので、対称性が崩れ器械偏光が大きくなる可能性がある。高度 30° 以下での無偏光標準 星観測も望まれる。



Fig. 6. J-band instrumental polarization derived from observations for HD 103095.



Fig. 7. H-band instrumental polarization derived from observations for HD 103095.



Fig. 8. K_s -band instrumental polarization derived from observations for HD 103095.

4. まとめ

我々は NIC の偏光観測モードを再開発した。無偏光標準星の観測により、器械偏光度は 0.01±0.37% (J), 0.02±0.82% (H), 0.04±0.39% (K_s) と求められた。 J, H, K_s バンドとも、有意な器械偏光は検出されなかった。また、結像位置、装置ローテータ回転角、望遠鏡指向高度のいずれに対しても、器械偏光の依存性は見られなかった。少なくとも J, K_s バンドについては、NIC は 1%の偏光度を検出する潜在能力を持つことが分かった。今後、強偏光標準星の観測・解析を行い、偏光度測定の正確性等を評価する予定である。

本開発は、部分的に「特色のある共同利用·共同研究拠点の形成事業」、および日本学術振興会科研費 (15K21296)の支援を受けました。

参考文献

Bailey, J., Ulanowski, Z., Lucas, P. W., et al. 2008, MNRAS, 386, 1016

Ishiguro M., Takahashi J., Zenno T., Tokimasa N., & Kuroda T. 2011, Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs., 21, 13-42

Plaszczynski, S., Montier, L., Levrier, F., & Tristram, M. 2014, MNRAS, 439, 4048

Takahashi, J., Zenno, T., & Ishiguro, M.. 2013, Bull. Cent. Astron. Univ. Hyogo 1, 17-22