

WFGS2偏光モードの開発

川上碧¹, 伊藤洋一¹, 高橋隼¹, 戸塚都¹, 高山正輝¹

¹兵庫県立大学天文科学センター 西はりま天文台 〒679-4313 兵庫県佐用郡佐用町西川内 407-2

Development of Polarimetry Mode for WFGS2

Aoi KAWAKAMI¹, Yoichi ITOH¹, Jun TAKAHASHI¹, Miyako TOZUKA¹, and Masaki TAKAYAMA¹

¹Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo,
407-2 Nishigaichi, Sayo-cho, Hyogo 679-5313, Japan
kawakami@nhao.jp

(Received 2021 November 16; accepted 2021 December 25)

概要

我々は、兵庫県立大学西はりま天文台 広視野グリズム分光撮像装置 (WFGS2) の偏光撮像モードを開発した。半波長板ユニット、偏光分離素子、偏光観測用のアパーチャマスクを取り付け、試験観測を行った。無偏光標準星の観測により、器械偏光度は B バンドで $1.33 \pm 0.10\%$ 、 V バンドで $0.63 \pm 0.04\%$ 、 Rc バンドで $0.22 \pm 0.06\%$ と求められた。また、器械偏光の方位角は装置ローテータの回転角に依存して変化することが分かった。さらに、強偏光標準星を観測し、偏光度・偏光方位角の精度を検証した。 V バンドで16.8等の天体は、総積分時間3600秒で0.5%の精度で偏光度を求めることができる。

Abstract

We developed the imaging polarimetry mode for the Nishiharima Astronomical Observatory Wide Field Grism Spectrograph 2 (WFGS2). A polarizing beam splitter, a half-wave plate unit, and an aperture mask for polarimetry were equipped. By observing for unpolarized standard stars, the degrees of polarization of the instrument was determined to be $1.33 \pm 0.10\%$, $0.63 \pm 0.04\%$, and $0.22 \pm 0.06\%$ for the B -, V -, Rc -bands, respectively. The position angles of the instrumental polarization depends on the rotation angle of the instrumental rotator. We also observed strongly polarized standard stars and estimated the accuracy of polarization degrees and position angles. For an object with 16.8 mag in the V -band, the degree of polarization can be obtained with an accuracy of 0.5 % with a total integration time of 3600 seconds.

Key words: instrumentation: polarimeters — techniques: polarimetric — polarization

1. 導入

広視野グリズム分光撮像装置WFGS2は、西はりま天文台なゆた望遠鏡のカセグレン焦点で運用中の可視分光撮像装置である(図1)。WFGS2は名古屋大学が開発し(Uehara et al. 2004)、ハワイ大学2.2m望遠鏡(UH88)で運用されていたが、2017年に兵庫県立大学西はりま天文台に移管された。基本性能は表1の通りである。

WFGS2はUH88用に開発された装置であり、なゆた望遠鏡とは焦点面の位置が異なる。望遠鏡焦点面とWFGS2のスリット面を一致させるために、装置上部(スリット面上部)に前置ボックスが取り付けられた(伊藤 2018)。前置ボックス内部には分光観測用の波長校正ランプ、スリットビューア用カメラ等が設置された。こうした整備により、WFGS2で可視光の撮像観測と分光観測が行えるようになった。

なゆた望遠鏡のカセグレン焦点は同時に二つまでの観測装置を取り付けることができ、観測装置切り替え機構によって二つの装置を簡単に切り替えることができる。しかし以前は四つの装置を並行して運用しており、観測予定によって装置交換を頻繁に行うため負担が大きかった。そこで我々はWFGS2に偏光モードを導入することにした。これにより、一台で可視光域の撮像・分光・偏光観測を行

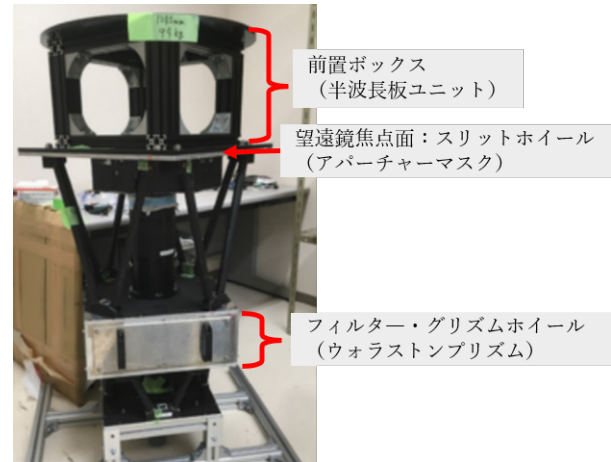
うことができるようになるため、カセグレン焦点の装置による観測を近赤外線撮像装置NICとWFGS2のみで行うことができ、装置交換作業を大幅に少なくすることができる。また、これまで可視光域での偏光撮像観測は、同時偏光撮像・分光装置POLが使用されていた。POLは同時に4方向の偏光成分を得ることができるが、装置内で光が別々の経路を通るため、偏光を導出する際に光学系の透過率に関する係数が残ってしまう。また、ビームスプリッターという光学素子を通る時に、光量が損なわれたり、器械偏光が大きくなる可能性が考えられる。実際にPOLの偏光撮像モードの器械偏光は1-2%と大きかった(西田 2008)。例えば、太陽の光を反射した惑星の偏光は数%程度であるため、望遠鏡や装置に起因する器械的な偏光を考慮することは重要である。

偏光観測は、太陽系惑星の大気粒子分布や表面の物性を調べるためには有効な観測方法である。また、空間分解できる太陽系惑星の偏光観測によって得られた情報は、生命探査を含めた系外惑星の研究に応用することができる(Takahashi et al. 2021)。

この論文では、WFGS2偏光撮像モードの開発を行い、試験観測を実施して、器械偏光を導出した。また、器械偏光の方位角がカセグレンローテータの回転角に依存していることを明らかにし、補正に必要なパラメータを求

Table 1. The basic parameters of WFGS2.

項目	内容
望遠鏡	口径2.0 m F/12 カセグレン焦点
観測モード	撮像、スリット分光
波長域	380–970 nm
コリメータレンズ焦点距離	285 mm
カメラレンズ焦点距離	185 mm
光学系拡大率	0.65倍
サイエンスカメラ	
種別	380–970 nm
製品	FLI PL23042-1-B
ピクセル数	2048 × 2064 pixels
ピクセルサイズ	15 μm × 15 μm
撮像視野	6.76 分角 × 6.81 分角
ピクセルスケール	0.198 秒角/pixel
フィルター	
広帯域	$g', r', i', z', B, V, Rc, Ic$
狭帯域	wide- $H\alpha$ (有効波長: 651.5 nm / 波長幅: 25 nm)
オーダーカット	LWP (透過波長 $\gtrsim$ 470 nm)
波長分解能	$R \sim 300$ (グリズム = g300)

**Fig. 1.** WFGS2 attached to the Cassegrain focus of Nayuta telescope.**Fig. 2.** WFGS2 without the shading plates. The front box is attached to the top of WFGS2. The aperture mask for polarimetry is attached to the slit wheel located on the focal plane. The Wollaston prism attached to the grism wheel in the filter box. This box contains 2 filter wheels and 1 grism wheel.

めた。観測装置内での偏光を完全に失くすことはできないので、補正パラメータを適用して得られた値について精度の評価を行うことは一般的である。その後、強偏光標準星の偏光を文献値と比較し、その差を補正するパラメータを求め、補正パラメータを適用した値について、測

定精度の評価を行った。第二章では、偏光モードの開発について、第三章では、試験観測と解析方法について、最終章では、性能評価（器械偏光と補正パラメータの導出、偏光の測定精度の評価）について述べている。

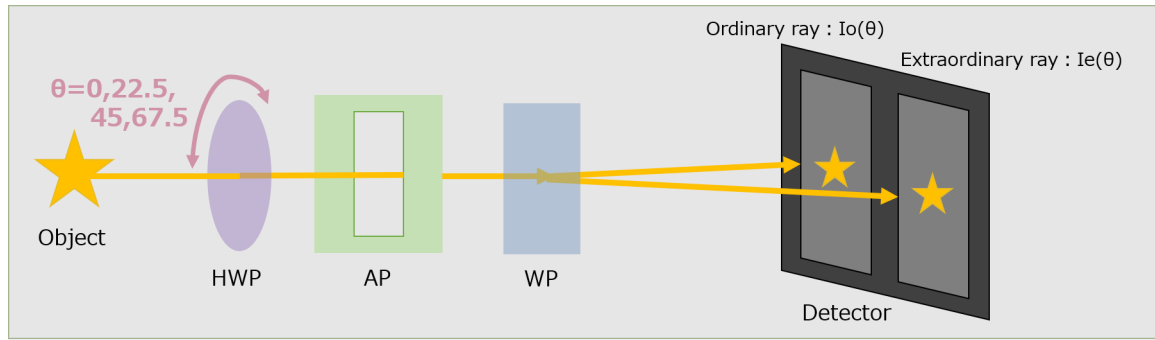


Fig. 3. Illustration of the WFGS2 polarimetry mode. Incident light from an object passes thorough half-wave plate (HWP), aperture mask (AP) and Wollaston prism (WP), then splits into two lights called ordinary ray and extraordinary ray. HWP rotates 4 angles (0° , 22.5° , 45° , 67.5°) during 1 set of polarimetry. AP prevents 2 images from overlapping on the detector.

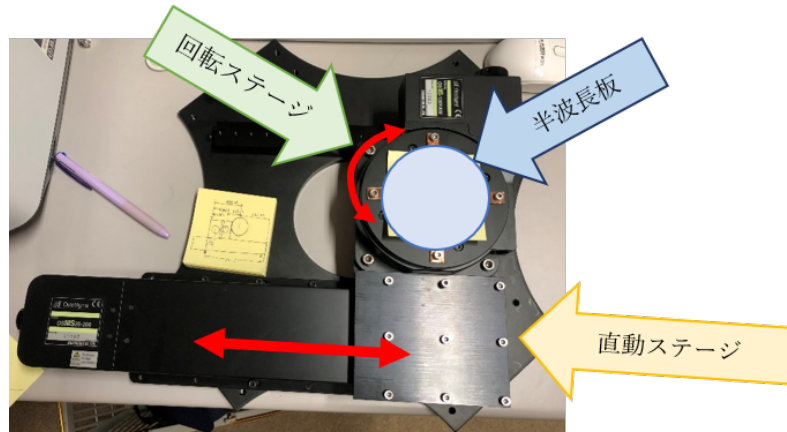


Fig. 4. The half-wave plate unit. In the polarimetry mode, the half-wave plate on the rotating stage moves on the optical path by the linear motion stage, and the half-wave plate rotates in four directions by the rotating stage.

2. 偏光撮像モードの開発

偏光撮像モードの開発にあたり、新たに部品の導入を行った箇所を図2に示す。開発では半波長板ユニットの取り付けと動作プログラムの作成、偏光観測用アパーチャマスクの設計と取り付け、偏光分離素子のホルダーの設計と取り付けを行った。

2.1. 半波長板ユニット

WFGS2による偏光観測では、現在標準的な方法である半波長板の回転と偏光分離素子による観測方法を採用した(図3)(家他 2007)。この観測方法では、大気の透過率と光学系の透過率による係数を除くことができ、測定精度は最高で0.01%である(Hough et al., 2006)。偏光観測では4方向の偏光成分の明るさが必要となる。半波長板の角度を 0° , 22.5° , 45° , 67.5° と回転させることで、 0° , 45° , 90° , 135° 方向の偏光成分を得ることができる。偏光分離素子は入射光を二つの光に分離する光学素子であるため、半波長板と偏光分離素子を組み合わせた観測により、8つの像を取得することができる。偏光分離素子の詳細な説明は2.3章に示す。

偏光モードと撮像・分光モードを切り替えるため、半波長板を移動させる直動ステージを望遠鏡焦点面手前の

前置ボックス内に取り付けた。また、半波長板を回転させるための回転ステージ上に半波長板を固定し、回転ステージを前置ボックス内の直動ステージ上に取り付けた(図4)。また、回転・直動ステージの動作プログラムを作成した。偏光モードの観測時は、半波長板が光路上に移動し、4つの角度に回転しながら観測する。半波長板にはBolder Vision Optik社製の有効波長425–750 nmのものを使用した。これはポリマーをガラス素材で挟んだ半波長板である。

2.2. 偏光観測用アパーチャマスク

偏光分離素子によって分けられた像を検出器上で重なることなく結像させるために、望遠鏡焦点面に位置するスリットホイールに偏光観測用のアパーチャマスクを取り付けた。アパーチャマスクは特に月や惑星などの拡がった天体が重ならないようにするために取り付ける。マスクの材質はアルミニウムである。マスクの形は22 mm×55 mmの長方形で、光学系の拡大率、検出器の大きさ、偏光分離素子の分離角によって、視野を一番広く取れる形でマスクの大きさを決定した。偏光モードの観測視野は6.81分角×2.90分角である(図5)。

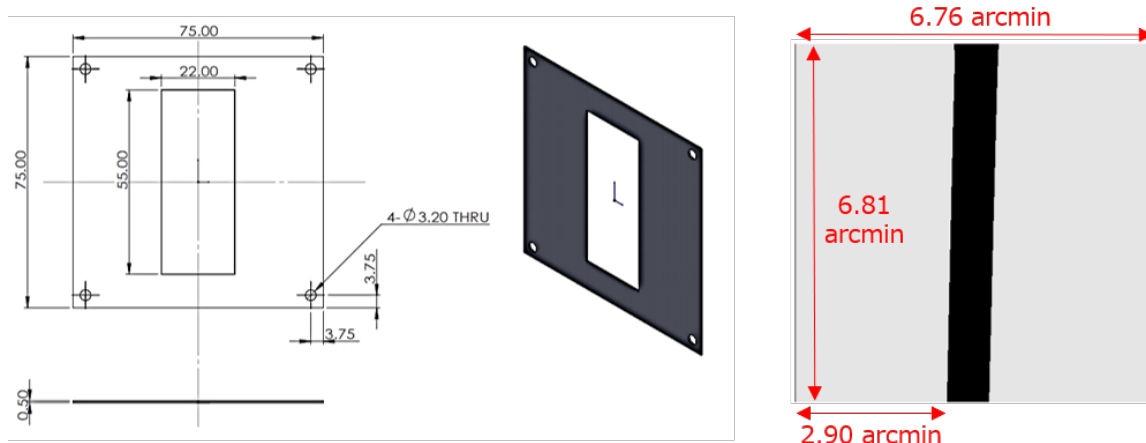


Fig. 5. The aperture mask (left) and observation field of view in the polarimetry mode (right).

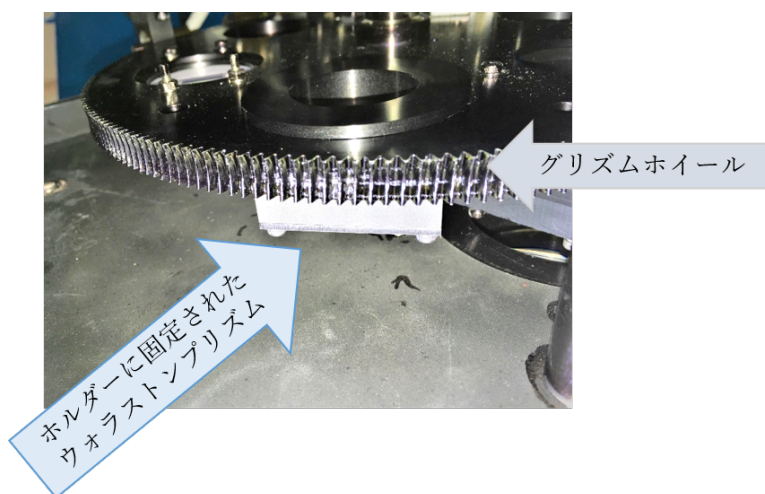


Fig. 6. Wollaston prism attached to the grism wheel. This wheel is the third wheel from the top in the filter wheel box.

2.3. 偏光分離素子

偏光分離素子であるウオラストンプリズムは、入射光を常光と異常光と呼ばれる互いに振動の向きが直交する二つの直線偏光成分に分離するプリズムである。今回は光学技研の方解石ウオラストンプリズムを使用した。使用したプリズムの大きさは35.06 mm × 35.09 mm × 14.20 mm、光線分離角は5°以上、透過波面精度は $\lambda/1.5$ 以下である。350–1000 nmの波長域が透明で、分離角5°を満たす条件から、光学技研により方解石が提案された。ホルダーを作成し、分光用グリズムと同じホイールに取り付けた。フィルターボックス内の3つのホイールのうち、上から3番目のグリズムホイールである(図6)。ホルダーの材質はアルミニウムである。

光標準星(SP)を観測した。2020年10月から2021年6月までの19夜、無偏光標準星11天体と強偏光標準星6天体を、*B*, *V*, *Rc*バンドで観測した。観測天体はSchmidt et al. (1992), Hsu and Breger (1982)の天体リストより選択した。観測天体のリストを表2に示す。

3.2. 画像処理

画像処理は以下の手順で行った。解析にはIRAF¹を用いた。

3.2.1. ダーク補正

ダーク画像を用いて暗電流によって発生するカウント値を除去する。

3. 観測と解析

3.1. 試験観測

器械偏光を評価するために、無偏光標準星(UP)を観測した。また、偏光度・偏光方位角を補正するために、強偏

¹ IRAF is distributed by the National Optical Astronomy Observatories, which are operated by the Associations of Universities for Research in Astronomy, Inc., under cooperative agreement with the National Science Foundation.

Table 2. List of observed polarization standard stars.

	Object	Mag. (V-band)	Nmb of sets	Single exp. (sec)			FWHM(arcsec)		
				<i>B</i>	<i>V</i>	<i>Rc</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>Rc</i>
UP star	β Cas	2.27	40	0.1 & 0.5	0.05	-	2.2 & 4.1	3.9	-
	HD 21447	5.10	55	3 & 5	0.1–1	1	2.3 & 4.7	3.1–3.5	4.4
	HD 14069	9.00	39	60 & 90	10 & 60	4 & 30	2.3 & 3.6	3.6 & 3.9	2.2 & 3.6
	ξ^2 Cet	4.29	9	3	2	-	5.5	5.3	-
	HD212311	8.10	35	15	15	1–10	4.1	3.0	1.7–2.8
	ζ Peg	3.40	35	0.7	0.1 & 0.2	0.05	4.7	4.2 & 4.4	4.3
	β Tau	1.62	14	0.1–0.3	-	-	2.8–3.5	-	-
	θ UMa	3.18	20	0.5 & 1	-	-	2.8 & 3.7	-	-
	β UMa	2.37	10	0.2	-	-	2.8	-	-
	γ Boo	3.02	25	-	-	0.3	-	-	6.5
	BD +32 3739	9.31	87	-	30	5–60	-	3.0 & 3.2	1.9–5.0
SP star	BD +59 389	9.07	31	10–60	1	2–5	2.0–2.1	3.4	2.2–4.5
	HD 19820	7.11	30	10	10	7	2.4	3.5	5.1
	BD +64 106	10.34	16	60 & 120	30	5	2.1 & 2.4	3.8	1.8
	HD 204827	7.93	25	60	30	1 & 10	3.3	5.2	1.6 & 3.2
	HD 25443	6.78	5	60	-	-	3.0	-	-
	HD 14433	6.39	4	30	-	-	2.2	-	-

3.2.2. フラット補正

CCDカメラで一樣な光を撮影しても画像の場所によってカウント値が異なるため、フラット画像を用いて補正する。ここではドームフラットを使用した。以下のように観測・画像処理をすることで、原理的に無偏光のフラット画像を作成できる。

1. カセグレン焦点の装置ローテータの角度を -135° から 180° まで 45° ずつ（8方向）回転させ、それぞれの角度でエンクロージャー内のフラットスクリーンに照射した光を偏光観測する。

2. ローテータの1角度につき、*B*, *V*バンドで10セット、*Rc*バンドで5セットずつ偏光観測を行った。1セットで半波長板の4回転の観測=4フレーム分のフラット画像が得られる。よって、*B*, *V*バンドでは4回転（半波長板） $\times$ 10セット $\times$ 8方向（ローテータ角度）=320枚、*Rc*バンドでは $4 \times 5 \times 8 = 160$ 枚のフラット画像を取得した。露出時間はそれぞれ、30秒(*B*), 5秒(*V*), 1.5秒(*Rc*)である。

3. ダーク処理を行った後、バンドごとにすべてのフラット画像を加算平均し、加算平均したフラット画像の平均値が1になるように規格化した。

ダーク処理後の天体画像を、以上のように作成し規格

化したフラット画像で除算し、フラット補正を行った。フラット補正後の天体画像を図7に示す。

3.2.3. 測光

IRAFのphotタスクを用いて標準星を測光した。使用したパラメータは、*aperture* = 55.7 pixel, *annulus*(sky内径) = 60 pixel, *dannulus*(sky幅) = 10 pixelである。

3.3. 偏光の導出

常光・異常光の測光値から以下の方法でストークスパラメーターを求めた。「半波長板回転と偏光分離」方式の偏光観測データに対しては標準的な方法である。

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

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

$$q = \frac{1 - R_q}{1 + R_q} \quad (3)$$

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

ここで $I_{x,\phi}$ は測光値であり、第1添字 x は常光(*o*)または

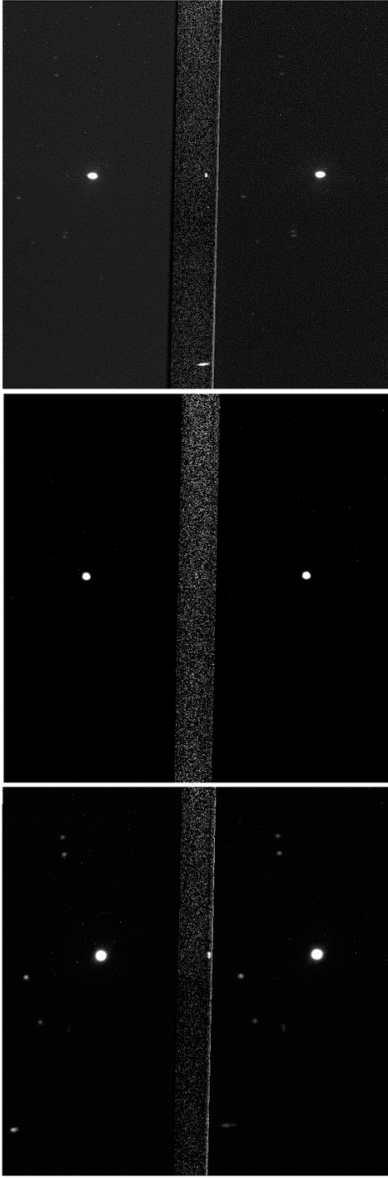


Fig. 7. The unpolarized star HD14069 images after flat correction.
(top: B-band, middle: V-band, bottom: Rc-band.)

異常光(e)を、第2添字 ϕ は半波長板の回転角を表す。 q は 0° – 90° 方向の偏光、 u は 45° – 135° 方向の偏光を表す。 q 、 u より偏光度 P_0 と偏光方位角 Θ は以下のように表される。

$$P_0 = \sqrt{q^2 + u^2} \quad (5)$$

$$\tan 2\Theta = u/q \quad (6)$$

偏光度と偏光方位角の誤差(σ_P, σ_Θ)は、 q と u の誤差(σ_q, σ_u)から求める。

$$\sigma_P = \frac{\sqrt{q^2 \sigma_q^2 + u^2 \sigma_u^2}}{P_0} \quad (7)$$

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

式(5)で求めた偏光度 P_0 には、偏光度に対するその誤差

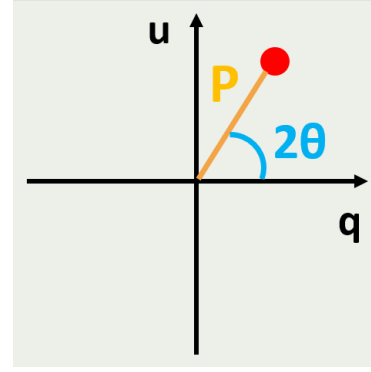


Fig. 8. q-u plane.

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、Plaszczyński et al. (2014) が提案した以下の補正式を用いた。

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

また、偏光は横軸を q 、縦軸を u とした q - u 平面で表すことができる(図8)。この時、偏光度 P は原点から観測点までの距離、偏光方位角 Θ は偏光度の直線と横軸のなす角の半分で表される。

4. 性能評価

4.1. 器械偏光

4.1.1. 器械偏光の導出

V等級1.6–9.3等の無偏光標準星11天体を観測し、器械偏光を導出した。無偏光標準星の常光・異常光をそれぞれ測光し、式(1)–(9)を用いて q 、 u 、偏光度 P 、偏光方位角 Θ を求めた。バンドごとに求めた無偏光標準星の q 、 u の値を q - u 平面上にプロットした(図9, 10, 11)。無偏光標準星の真の q 、 u は0であるはずなので、 q - u 平面上では原点からのズレが器械偏光を示す。図9, 10, 11の円の半径は無偏光標準星の偏光度 P の平均値を示す。

1天体ごとに偏光度 P を求め、それぞれのバンドで観測した無偏光標準星6–9天体の平均値を器械偏光の値とした。その結果、器械偏光の偏光度 P_{inst} はBバンドで $1.33 \pm 0.10\%$ 、Vバンドで $0.63 \pm 0.04\%$ 、Rcバンドで $0.22 \pm 0.06\%$ と求められた(表3)。

器械偏光の値は主鏡の洗浄によって小さくなる可能性がある。また、器械偏光は検出器上の結像位置や、望遠鏡の指向高度によっても変化する可能性があり、今後検討する必要がある。今回、RcバンドからBバンドにかけて器械偏光が大きくなるのは収差が大きくなるためだと考えられる。偏光方位角については、全バンドにおいて大きなばらつきが見られた。その理由として、「ローテータの回転角への依存性」と「望遠鏡と観測装置の回転軸のズレ」を以下で検討する。

4.1.2. ローテータ回転角への依存性

なやた望遠鏡の架台は経緯台式であるため、観測中に視野の向きが回転してしまう。常に視野がNorth upになるように観測するため、視野の回転に伴って観測装置自体を

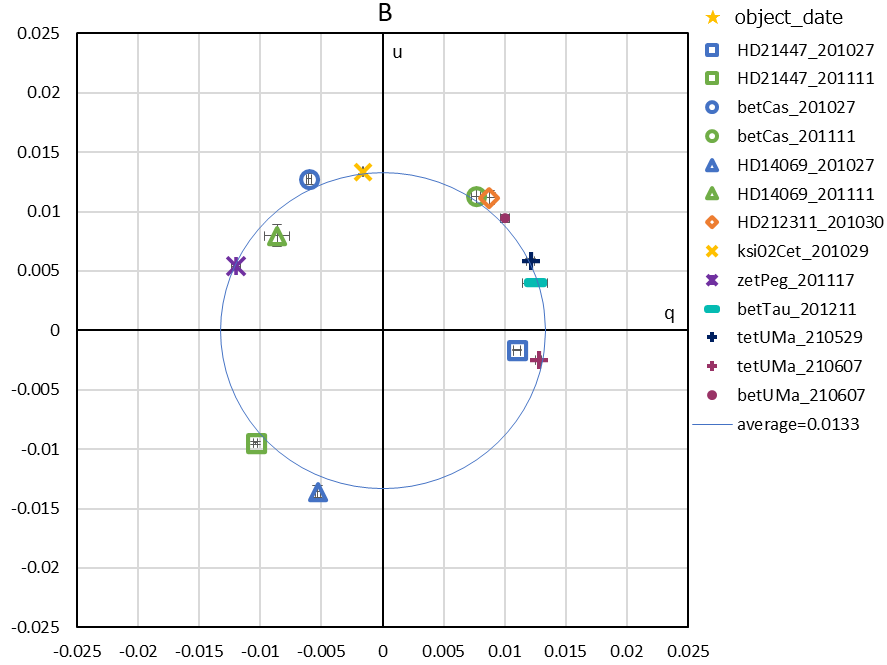


Fig. 9. q-u plane of unpolarized standard stars (*B*-band). Each mark indicates the observed polarization value. The circle is the average value of the polarization degree. Instrumental polarization degree in *B*-band is $1.33 \pm 0.10\%$, but the position angle of the instrumental polarization shows large variation.

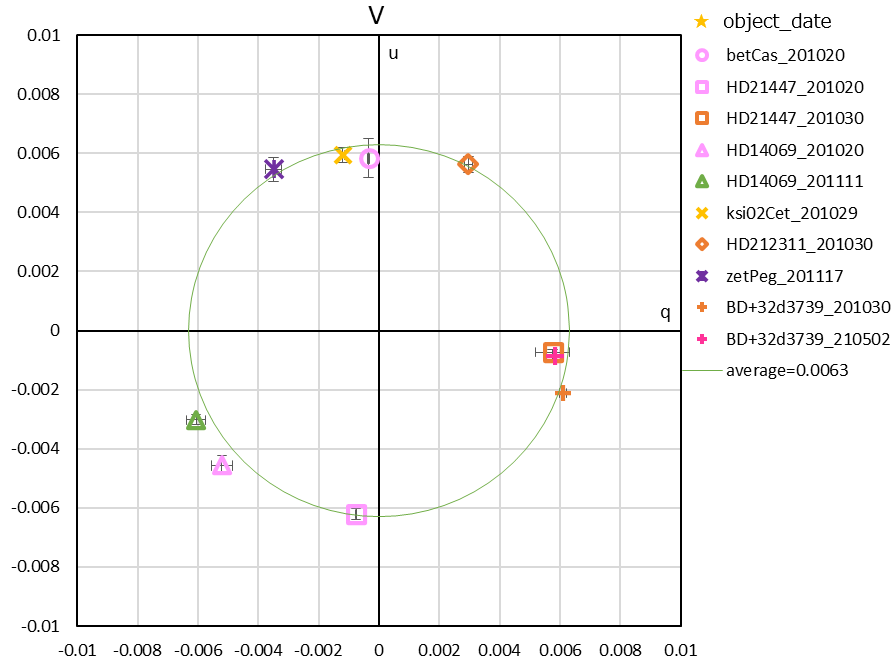


Fig. 10. q-u plane of unpolarized standard stars (*V*-band). Each mark indicates the observed polarization value. The circle is the average value of the polarization degree. Instrumental polarization degree in *V*-band is $0.63 \pm 0.04\%$, but the position angle of the instrumental polarization shows large variation.

回転させる装置ローテータ(Instrumental Rotator)がカセグレン焦点に取り付けられている。無偏光標準星の偏光方位角はカセグレン焦点の装置ローテータの角度(INSROT)に依存して変化した(図12, 13, 14)。これは望遠鏡によって発生する器械偏光が存在することを示す。

図12, 13, 14の横軸のINSROTの値はカセグレンローテータの角度であり、観測画像のヘッダーに記録されているものを使用した。図12, 13, 14に示されたローテータの角度と、観測から求めた無偏光標準星の偏光方位角の関係を *B*, *V*, *Rc*バンドに対してそれぞれ一次式でフィッティング

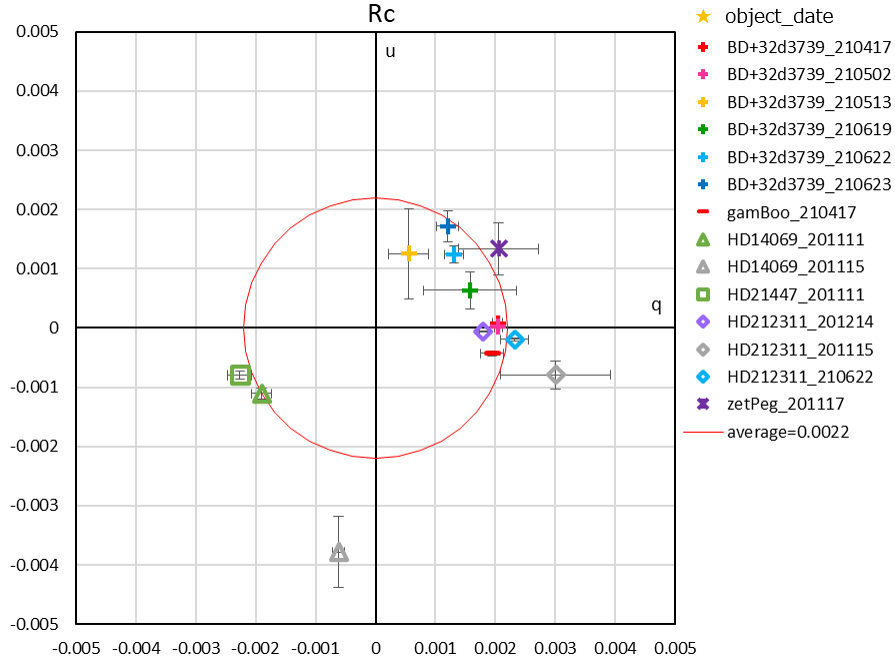


Fig. 11. q-u plane of unpolarized standard stars (R_c -band). Each mark indicates the observed polarization value. The circle is the average value of the polarization degree. Instrumental polarization degree in R_c -band is $0.22 \pm 0.06\%$, but the position angle of the instrumental polarization shows large variation.

Table 3. Instrumental polarization degree derived from observations of the unpolarized standard stars.

	B		V		R_c	
Object	P (%)	Number of sets	P (%)	Number of sets	P (%)	Number of sets
β Cas	1.387 ± 0.062	30	0.584 ± 0.066	10	—	—
HD 21447	1.259 ± 0.025	15	0.602 ± 0.038	30	0.240 ± 0.021	10
HD 14069	1.316 ± 0.098	10	0.685 ± 0.042	15	0.302 ± 0.040	14
ξ^2 Cet	1.346 ± 0.016	5	0.606 ± 0.027	4	—	—
HD 212311	1.420 ± 0.078	5	0.635 ± 0.030	10	0.241 ± 0.041	20
ζ Peg	1.314 ± 0.042	10	0.648 ± 0.049	15	0.245 ± 0.080	10
β Tau	1.309 ± 0.104	14	—	—	—	—
θ UMa	1.324 ± 0.031	20	—	—	—	—
β UMa	1.376 ± 0.050	10	—	—	—	—
γ Boo	—	—	—	—	0.200 ± 0.019	25
BD +32 3739	—	—	0.616 ± 0.010	27	0.196 ± 0.039	60
P_{inst} avg. $\pm$ stdev.	1.33 ± 0.10		0.63 ± 0.04		0.22 ± 0.06	

すると、式(10)–(12)が得られる。

$$B : 2\Theta_{inst} = 2.00 \times (INSROT) - 261.74 \quad (10)$$

$$V : 2\Theta_{inst} = 1.95 \times (INSROT) - 255.39 \quad (11)$$

$$Rc : 2\Theta_{inst} = 1.88 \times (INSROT) - 246.15 \quad (12)$$

4.1.1章で求めた P_{inst} と式(10)–(12)で求めた Θ_{inst} から、器械偏光の q と u 、すなわち q_{inst} と u_{inst} が求められる。

$$q_{inst} = P_{inst} \cos \Theta_{inst} \quad (13)$$

$$u_{inst} = P_{inst} \sin \Theta_{inst} \quad (14)$$

以上よりWFGS2の器械偏光は、観測した天体の q , u の

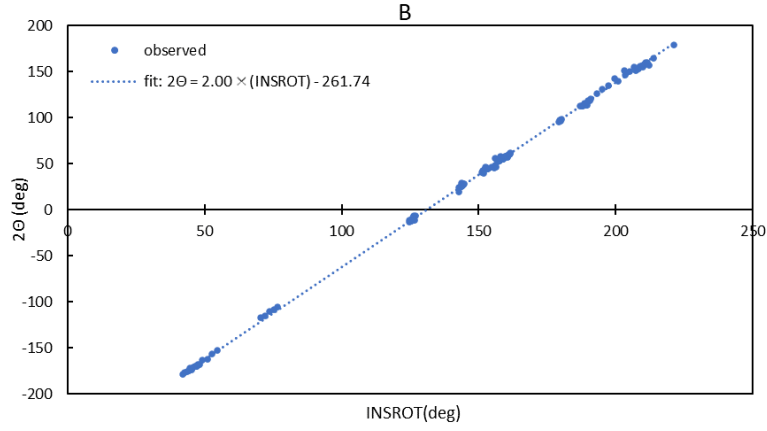


Fig. 12. The position angles of the instrumental polarization in the *B*-band measured by the unpolarized standard stars as a function of the angle of the Cassegrain instrumental rotator. Dotted line is the fitting line of the instrumental position angles for unpolarized standard stars.

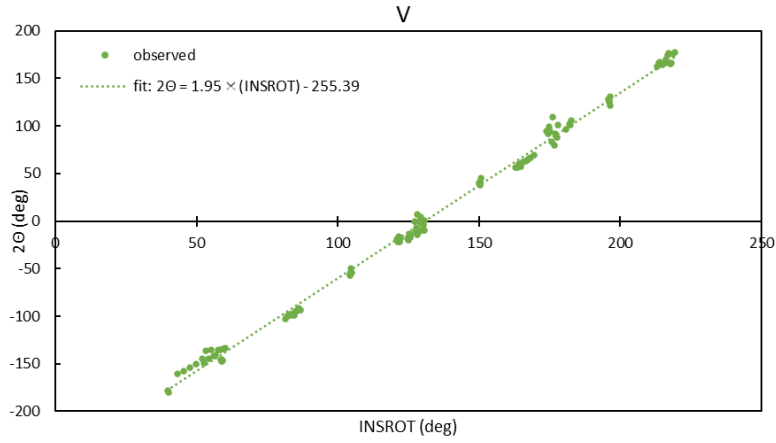


Fig. 13. The position angles of the instrumental polarization in the *V*-band measured by the unpolarized standard stars as a function of the angle of the Cassegrain instrumental rotator. Dotted line is the fitting line of the instrumental position angles for unpolarized standard stars.

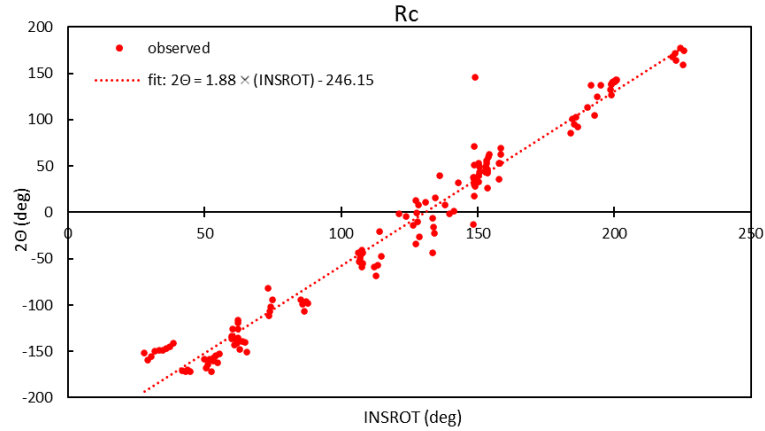


Fig. 14. The position angles of the instrumental polarization in the *Rc*-band measured by the unpolarized standard stars as a function of the angle of the Cassegrain instrumental rotator. Dotted line is the fitting line of the instrumental position angles for unpolarized standard stars.

値からそれぞれ q_{inst} , u_{inst} を減算することで補正できる。

4.1.3. カセグレンローテータの中心位置

望遠鏡と観測装置の回転軸が大きくずれている時、カセグレンローテータの回転角によって器械偏光が変化

Table 4. Differences of the polarization degree and the position angle of the strongly polarized standard stars between the measured values (P_{obs} , Θ_{obs}) and the values in the literature (P_{lt} , Θ_{lt}). The average value of P_{lt}/P_{obs} is substituted into α of equations (15) and (16), and the average value of $\Theta_{lt} - \Theta_{obs}$ is substituted into β of equations (17) and (18).

Object	<i>B</i>		<i>V</i>		<i>Rc</i>	
	P_{lt}/P_{obs}	$\Theta_{lt} - \Theta_{obs}$ (°)	P_{lt}/P_{obs}	$\Theta_{lt} - \Theta_{obs}$ (°)	P_{lt}/P_{obs}	$\Theta_{lt} - \Theta_{obs}$ (°)
BD +59 389	1.002	-6.46	0.994	-4.79	0.995	-5.60
HD 19820	0.993	-5.50	0.979	-4.81	0.970	-6.09
BD +64 106	0.987	-7.16	—	—	0.985	-5.82
HD 204827	0.999	-5.81	0.985	-5.66	0.969	-5.52
HD 25443	1.032	-6.72	—	—	—	—
HD 14433	1.012	-6.11	—	—	—	—
average (α , β)	1.004	-6.29	0.986	-5.09	0.982	-5.68

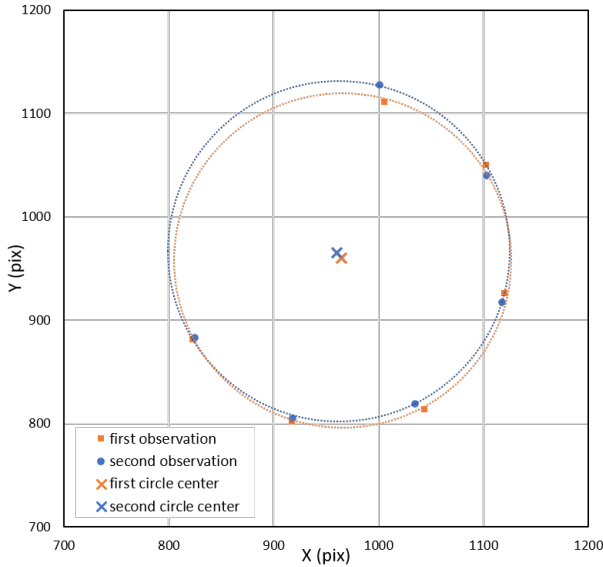


Fig. 15. Positions of stars observed with rotating the Cassegrain instrumental rotator. The X-axis and Y-axis in the figure are the horizontal and vertical axes of the detector. Cross marks indicate the center of the circles of the trajectory of the star images.

する場合がある。そこで、光軸のずれを調べるために、カセグレンローテータを回転しながら星を観測し、検出器上に映る星像の座標を測定し、円弧上に映った星像の軌跡の中心座標を求めた(図15)。

観測は2回行い、1回目の星の中心座標は $x=965$ pixel, $y=960$ pixel, 2回目は $x=960$ pixel, $y=965$ pixelであった。検出器の大きさは 2048×2064 pixelsのため、検出器の中心と星像の軌跡の中心座標は大きく異ならない。そのため、装置の光軸とカセグレンローテータの中心のずれはほとんどないものと考えられる。

4.2. 強偏光標準星の解析結果

V等級6.4–10.3等の強偏光標準星6天体を観測し、偏光度・偏光方位角の補正式を求めた。また、偏光度のランダム誤差と等級・積分時間の関係を調べた。

4.2.1. 補正パラメータの導出

補正パラメータ導出の手順を以下に示す。

1. まず、強偏光標準星を測光し $I_{o,\phi}$, $I_{e,\phi}$ を求め、3.3章の式(1)–(4)を用いて強偏光標準星の q , u を導出した。

2. 次に、4.1.2章の式(10)–(14)を用いて、強偏光標準星の器械偏光度とローテータ回転角に依存した偏光方位角を補正した。これは1.で求めた q , u から式(13), (14)で求めた q_{inst} , u_{inst} を減算することで補正をする。

3. その後、器械偏光を補正した q , u から、強偏光標準星の偏光度 P_{obs} ・偏光方位角 Θ_{obs} を計算し、文献値(P_{lt} , Θ_{lt})との違いを求めた(表4)。

全天体の P_{lt}/P_{obs} の平均値は、1.004 (*B*), 0.986 (*V*), 0.982 (*Rc*)、 $\Theta_{lt} - \Theta_{obs}$ の平均値は、 -6.29 (*B*), -5.09 (*V*), -5.68 (*Rc*)である。

4. 次に観測値 q_{obs} , u_{obs} を補正する。以下の形式の式を導出する。

$$q_1 = \alpha q_{obs} \quad (15)$$

$$u_1 = \alpha u_{obs} \quad (16)$$

$$q_2 = q_1 \cos 2\beta - u_1 \sin 2\beta \quad (17)$$

$$u_2 = q_1 \sin 2\beta + u_1 \cos 2\beta \quad (18)$$

α に P_{lt}/P_{obs} の平均値、 β に $\Theta_{lt} - \Theta_{obs}$ の平均値を代入することで、以下のように q , u の補正式を導出した。 q_{2*} , u_{2*} が補正後の q , u の値である。

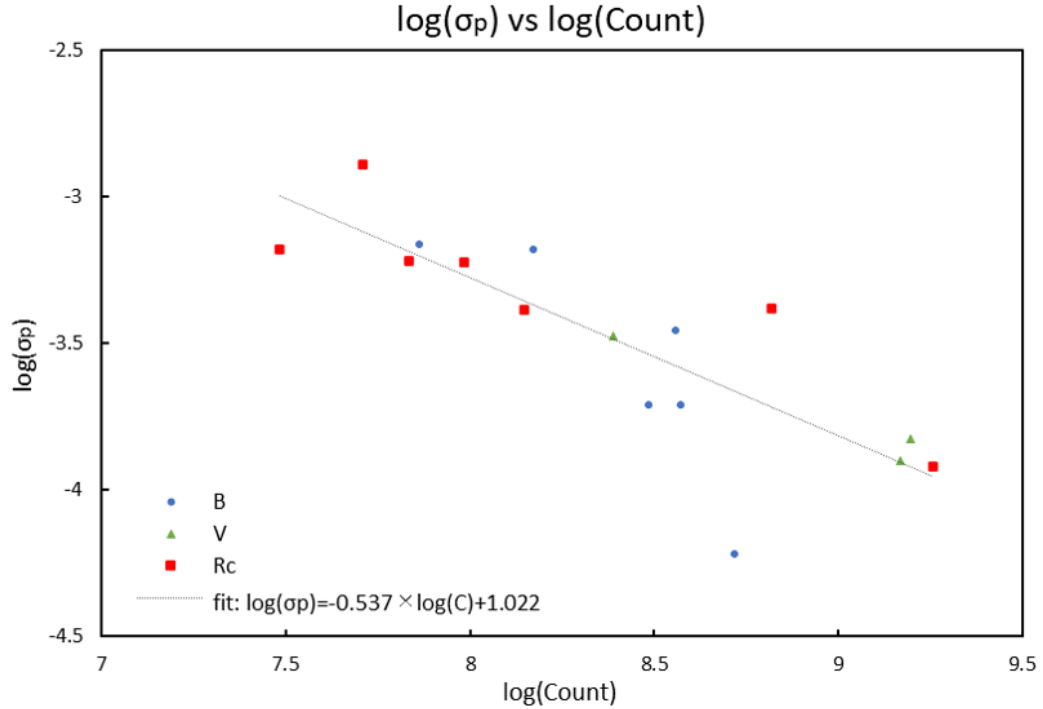
B:

$$q_{1B} = 1.004 \times q_{obs} \quad (19)$$

$$u_{1B} = 1.004 \times u_{obs} \quad (20)$$

Table 5. The polarization degree and the position angle of the strongly polarized standard stars.

Band	Object	Polarization degree (%)		Position angle (°)	
		Corrected value	Literature value	Corrected value	Literature value
<i>B</i>	BD +59 389	6.356 ± 0.065	6.345 ± 0.035	98.30 ± 0.30	98.14 ± 0.16
	HD 19820	4.754 ± 0.035	4.699 ± 0.036	114.91 ± 0.21	115.70 ± 0.22
	BD +64 106	5.600 ± 0.068	5.506 ± 0.090	98.01 ± 0.35	97.15 ± 0.47
	HD 204827	5.679 ± 0.019	5.648 ± 0.022	57.72 ± 0.10	58.20 ± 0.11
	HD 25443	5.091 ± 0.006	5.232 ± 0.092	134.71 ± 0.03	134.28 ± 0.51
	HD 14433	3.740 ± 0.020	3.77 ± 0.01	112.12 ± 0.15	112.8 ± 0.3
<i>V</i>	BD +59 389	6.648 ± 0.033	6.701 ± 0.015	97.79 ± 0.14	98.09 ± 0.07
	HD 19820	4.821 ± 0.013	4.787 ± 0.028	114.65 ± 0.07	114.93 ± 0.17
	HD 204827	5.328 ± 0.015	5.322 ± 0.014	59.31 ± 0.08	58.73 ± 0.08
<i>Rc</i>	BD +59 389	6.347 ± 0.077	6.430 ± 0.022	98.06 ± 0.35	98.14 ± 0.10
	HD 19820	5.218 ± 0.066	5.150 ± 0.098	97.15 ± 0.36	96.74 ± 0.54
	BD +64 106	4.516 ± 0.012	4.526 ± 0.025	114.60 ± 0.08	114.46 ± 0.16
	HD 204827	4.962 ± 0.051	4.893 ± 0.029	58.94 ± 0.29	59.10 ± 0.17

**Fig. 16.** Standard deviations in the polarization degree of the strongly polarized standard stars, σ_P vs. total stellar counts C . C is the sum of photometric counts of both ordinary and extra-ordinary images obtained during N sets ($4N$ frames) of the observations.

$$q_{2B} = 0.976 \times q_{1B} + 0.218 \times u_{1B} \quad (21) \quad V:$$

$$u_{2B} = -0.218 \times q_{1B} + 0.976 \times u_{1B} \quad (22)$$

$$q_{1V} = 0.986 \times q_{obs} \quad (23)$$

$$u_{1V} = 0.986 \times u_{obs} \quad (24)$$

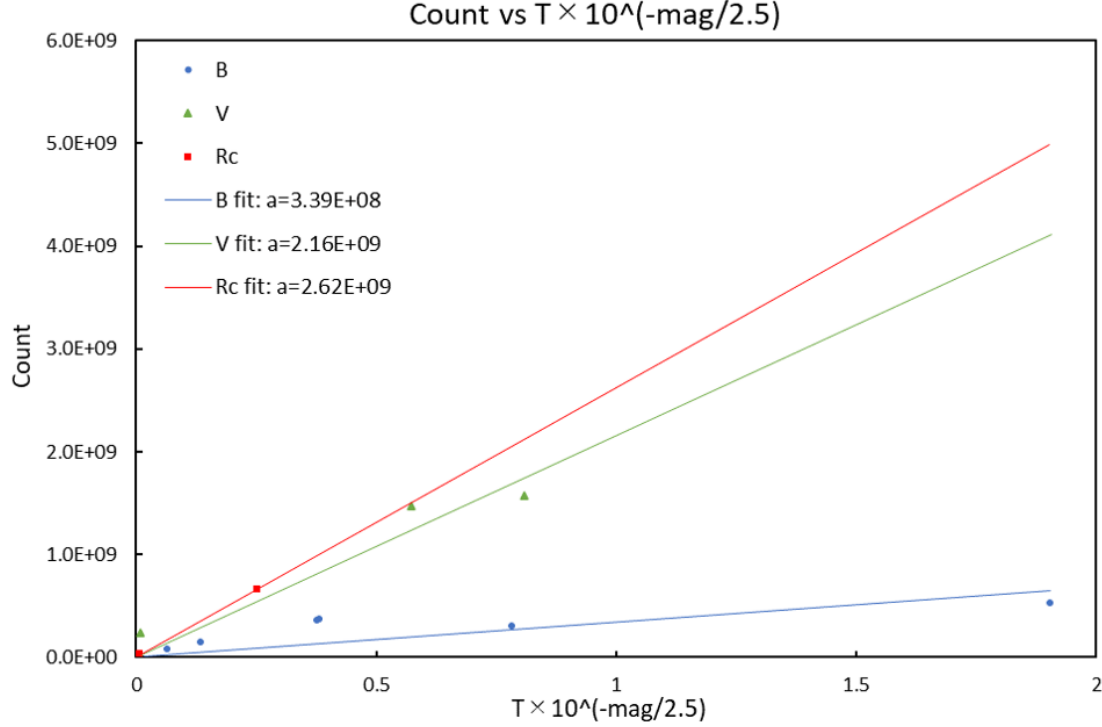


Fig. 17. The dependence of total counts on exposure time and magnitudes. Total exposure time T is $4N$ frames $\times$ (single exposure time).

$$q_{2V} = 0.984 \times q_{1V} + 0.177 \times u_{1V} \quad (25)$$

$$u_{2V} = -0.177 \times q_{1V} + 0.984 \times u_{1V} \quad (26)$$

Rc :

$$q_{1Rc} = 0.982 \times q_{obs} \quad (27)$$

$$u_{1Rc} = 0.982 \times u_{obs} \quad (28)$$

$$q_{2Rc} = 0.980 \times q_{1Rc} + 0.197 \times u_{1Rc} \quad (29)$$

$$u_{2Rc} = -0.197 \times q_{1Rc} + 0.980 \times u_{1Rc} \quad (30)$$

4.2.2. 偏光度・偏光方位角の精度

q_{2*} , u_{2*} を式(5)–(9)に代入し、文献値補正後の強偏光標準星の偏光度と偏光方位角を導出した(表5)。文献値補正後の偏光度・偏光方位角の値と、文献値を比較した(表6–8)。偏光度については、 $P - P_{lt}$ の平均値は $0.003 \pm 0.082\%$ (B), $-0.005 \pm 0.044\%$ (V), $0.011 \pm 0.073\%$ (Rc)、 P / P_{lt} の平均値は 1.000 ± 0.016 (B), 1.000 ± 0.008 (V), 1.003 ± 0.013 (Rc)である。また、偏光方位角については、 $\Theta - \Theta_{lt}$ の平均値は $0^\circ 00' \pm 0^\circ 61'$ (B), $0^\circ 00' \pm 0^\circ 50'$ (V), $0^\circ 08' \pm 0^\circ 25'$ (Rc)である。

偏光度・偏光方位角のランダム誤差と、測定値と文献値の差を比較したが、偏光度・偏光方位角ともに有意な系統誤差は見られなかった。

4.2.3. 偏光度のランダム誤差と等級・積分時間の関係

偏光度の誤差 σ_P と等級 m ・総積分時間 T の関係を調べた。図16は総カウント C に対して偏光度の誤差 σ_P をプロットしたものである。バンドに関わらず単一のべき乗則で

フィッティングした時、式(31)の関係式が得られる。

$$\log \sigma_P = -0.54 \times \log C + 1.022 \quad (31)$$

σ_P : 偏光度の誤差

C : 総カウント数 (偏光成分4方向 $\times N$ セット分の常光・異常光測光値の合計カウント数)

また、図17は $10^{-m/2.5}T$ に対して総カウント数 C をプロットしたものである。

$$C = 10^{-m/2.5}aT \quad (32)$$

C : 総カウント数

T : 総積分時間 ($4N \times 1$ フレーム分の積分時間)

m : 等級

各バンドでそれぞれ式(32)の関数でフィットしたところ、比例定数 a はそれぞれ 3.39×10^8 (B), 2.16×10^9 (V), 2.62×10^9 (Rc)と求められた。式(31), (32)を組み合わせることで以下の式が得られる。

$$B: \log \sigma_P = -0.54 \times \log T + 0.216 \times m - 3.584 \quad (33)$$

$$V: \log \sigma_P = -0.54 \times \log T + 0.216 \times m - 4.019 \quad (34)$$

$$Rc: \log \sigma_P = -0.54 \times \log T + 0.216 \times m - 4.064 \quad (35)$$

式(33)–(35)を用いることで、等級・総積分時間と偏光度の誤差の見積もりをすることができる。総積分時間3600秒で、偏光度の誤差が0.5%になるように観測したときの限界等級は、 B バンドで14.8等、 V バンドで16.8等、 Rc バンドで17.1等である。

Table 6. The measured polarization degrees and position angles of the strongly polarized standard stars (P, Θ) and those in the literature (P_{lt}, Θ_{lt}) (B -band).

Object	$P(\%)$	$P - P_{lt}(\%)$	P / P_{lt}	$\Theta (^{\circ})$	$\Theta - \Theta_{lt} (^{\circ})$
BD +59 389	6.356 ± 0.065	0.011	1.002	98.30 ± 0.30	0.16
HD 19820	4.754 ± 0.035	0.055	1.012	114.91 ± 0.21	-0.79
BD +64 106	5.600 ± 0.068	0.094	1.017	98.01 ± 0.35	0.86
HD 204827	5.679 ± 0.019	0.031	1.006	57.72 ± 0.10	-0.48
HD 25443	5.091 ± 0.006	-0.141	0.973	134.71 ± 0.03	0.43
HD 14433	3.740 ± 0.020	-0.030	0.992	112.12 ± 0.15	-0.18
avg. $\pm$ stdev.	—	0.003 ± 0.082	1.000 ± 0.016	—	0.00 ± 0.61

Table 7. The measured polarization degrees and position angles of the strongly polarized standard stars (P, Θ) and those in the literature (P_{lt}, Θ_{lt}) (V -band).

Object	$P(\%)$	$P - P_{lt}(\%)$	P / P_{lt}	$\Theta (^{\circ})$	$\Theta - \Theta_{lt} (^{\circ})$
BD +59 389	6.648 ± 0.033	-0.053	0.992	97.79 ± 0.14	-0.30
HD 19820	4.821 ± 0.013	0.034	1.007	114.65 ± 0.07	-0.28
HD 204827	5.328 ± 0.015	0.006	1.001	59.31 ± 0.08	0.58
avg. $\pm$ stdev.	—	-0.005 ± 0.044	1.000 ± 0.008	—	0.00 ± 0.50

Table 8. The measured polarization degrees and position angles of the strongly polarized standard stars (P, Θ) and those in the literature (P_{lt}, Θ_{lt}) (Rc -band).

Object	$P(\%)$	$P - P_{lt}(\%)$	P / P_{lt}	$\Theta (^{\circ})$	$\Theta - \Theta_{lt} (^{\circ})$
BD +59 389	6.347 ± 0.077	-0.083	0.987	98.06 ± 0.35	-0.08
HD 19820	5.218 ± 0.066	0.068	1.013	97.15 ± 0.36	0.41
BD +64 106	4.516 ± 0.012	-0.010	0.998	114.60 ± 0.08	0.14
HD 204827	4.962 ± 0.051	0.069	1.014	58.94 ± 0.29	-0.16
avg. $\pm$ stdev.	—	0.011 ± 0.073	1.003 ± 0.013	—	0.08 ± 0.25

5. まとめ

我々は、西はりま天文台WFGS2の偏光撮像モードの開発を行った。無偏光標準星の観測・解析により、器械偏光度は B バンドで $1.33 \pm 0.10\%$ 、 V バンドで $0.63 \pm 0.04\%$ 、 Rc バンドで $0.22 \pm 0.06\%$ と求められた。また、器械偏光の方位角と装置ローテータの回転角は依存して変化した。そのため、ローテータ回転角に依存した器械偏光の方位角を補正する式を求めた。さらに、強偏光標準星を観測し、文献値との差を補正する式を求め、補正を適用した時の偏光度・偏光方位角の精度を検証した。器械偏光の補正、強偏光標準星による補正を適用した時、 V バンドで16.8等の天体は、総積分時間3600秒で0.5%の精度で偏光度を求めることができる。

References

- Hough, J. H., Lucas, P. W., Bailey, J. A., Tamura, M., Hirst, E., Harrison, D., & Bartholomew-Biggs, M. 2006, *PASP*, 118, 1302
Hsu, J. -C., & Breger, M. 1982, *ApJ*, 262, 732
Plaszczynski, S., Montier, L., Levrier, F., & Tristram, M. 2014, *MNRAS*, 439, 4048
Schmidt, G. D., Elston, R., & Lupie, O. L. 1992, *AJ*, 104, 1563
Takahashi, J., Itoh, Y., Matsuo, T., Oasa, Y., Bach, Y. P., & Ishiguro, M. 2021, *A&A*, 653, A99
Uehara, M., et al. 2004, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 5492, 661
家正則, 岩室史英, 舞原俊憲, 水本好彦, 吉田道利 (編). 2007, 宇宙の観測I - 光・赤外天文学 シリーズ現代の天文学第15巻, 日本評論社
伊藤良太. 2018, 兵庫県立大学 卒業論文
高橋 隼, 禅野 孝広, 斎藤 智樹, 伊藤 洋一. 2018, *Stars and Galaxies*,

1, 17

高橋 隼. 2019, Stars and Galaxies, 2, 3

西田麻衣子. 2008, 神戸大学 修士論文