

木曾観測所 2kCCD カメラのシステム変換

上原 隼^{*1,2}・土橋 一仁^{*1}・吉田 悠人^{*1}
西浦 慎悟^{*1}・下井倉 ともみ^{*1,*3}・直井 隆浩^{*4}

宇宙地球科学分野

(2019年5月23日受理)

UEHARA, H., DOBASHI, K., YOSHIDA, Y., NISHIURA, S., SHIMOIKURA, T., and NAOI, T.: The System Transformation of 2kCCD Camera at the KISO Observatory. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., 71: 57-64. (2019) ISSN 2434-9380

Abstract

In this paper, we report on the system transformation of the 105 cm Schmidt telescope equipped with the 2kCCD camera at Kiso Observatory to the standard Johnson-Cousins system. In order to investigate the transformation, we observed a certain region in Taurus in the BVRI bands, and obtained photometric data of about 300-500 stars for the four bands. Comparing the obtained data with Pan-STARRS1 data available on the internet, we established the transformation formulae for the BVRI bands as a linear function of the star color (B-V) or (R-I).

Keywords: astronomy, telescope, stars, system transformation

Department of Astronomy and Earth Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

要旨: 本論文では、2kCCD カメラを搭載した木曾観測所の 105 cm シュミット鏡の標準測光システム（ジョンソン・カズンズ）へのシステム変換について報告する。システム変換式を確立するために、我々は、おうし座のある領域を BVRI バンドで観測した。得られた 300~500 個の星の測光データを Pan-STARRS1 による公開データと比較し、BVRI バンドについてのシステム変換式を、色指数 (B-V) または (R-I) の 1 次関数として定式化した。

1. はじめに

本論文では、東京大学木曾観測所の 105 cm シュミット鏡と 2kCCD カメラおよび BVRI フィルターからなる測光システム（以後、Kiso システム）で得られた測光データを、標準測光システムでの等級（以後、標準等級）にするためのシステム変換式の導出について報告する。

我々は、2000 年 11 月から 2011 年 8 月まで、2kCCD カメラを用いて幾つかの暗黒星雲の測光観測を行った（例えば、Kandori et al. 2003）。この観測によって得られた測光データを解析し、他の研究と比較するためには、星の等級を標準等級へ変換する必要がある。近年、測光システムとしては、Sloan Digital Sky Survey システム (Fukugita et al. 1996) や Two Micron All Sky Survey システム (Cohen et al. 2003) がしばしば用い

* 1 東京学芸大学 自然科学系 宇宙地球科学分野 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)

* 2 桐朋中学校・高等学校 (186-0004 東京都国立市中 3-1-10)

* 3 大妻女子大学 社会情報学部 社会情報学科 (102-8357 東京都千代田区三番町 12 番地)

* 4 情報通信研究機構 電磁波研究所 宇宙環境研究室 (184-8795 小金井市貫井北町 4-2-1)

表 1 観測装置の諸元

東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター 木曾観測所 105 cm シュミット望遠鏡				
望 遠 鏡	主 鏡 口 径	1,500 mm		
	補正板口径	1,050 mm		
	主焦点距離	3,300 mm		
	口 径 比	F/3.1		
検 出 器	KISO-2kCCD (米国 SITe 社製 2048×2048 TK2048E)			
	画素サイズ	24 μm ×24 μm		
	受光面サイズ	48 mm×48 mm (主焦点で 50'×50')		
フ ェ ィ ル タ ー	B バンド	中心波長	440.2 nm	(波長幅 111.0 nm)
	V バンド	中心波長	597.8 nm	(波長幅 52.5 nm)
	R バンド	中心波長	647.5 nm	(波長幅 145.0 nm)
	I バンド	中心波長	803.5 nm	(波長幅 155.0 nm)
限界等級	B バンド	21.0 mag	V バンド	22.5 mag
	R バンド	21.1 mag	I バンド	21.0 mag

注：木曾観測所のホームページより (<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/>)。

られるが、可視光域の標準測光システムとしては、Johnson-Cousins システム (Johnson & Morgan 1953, Cousins 1976; 以後、ジョンソン・カズンズシステム) が伝統的に広く普及している。このシステムは、1953年にジョンソンがまとめたUBVバンドのシステムと、1976年にカズンズがまとめた R_cI_c バンド (本研究では R_c はR, I_c はIと表記する) のシステムを合わせたものである。

ジョンソン・カズンズシステムの測光標準星のカタログとしては、Landolt (1992, 2009) が作成したものが有名である。しかし、Landoltの測光標準星カタログにある恒星は、天の赤道に沿って赤経約 1^{h} 毎に数個から数十個程度しか分布しておらず、共同利用等の限られた観測時間内にこれらを観測してシステム変換式を精度良く決めることは難しい。

一方、全天球の3/4にあたる広大な領域の星の測光データが2016年に公開された。Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (以後、Pan-STARRS, 例えばHodapp et al. 2004) と呼ばれるこの研究プロジェクトによって得られた測光データの一部分は、Pan-STARRS1 カタログ (以後、PS1 カタログ) として公開されている。また、そのデータをジョンソン・カズンズシステムに変換する変換式も公開されている (Tonry et al. 2012)。PS1 カタログを利用すれば、Kiso システムからジョンソン・カズンズシステムへの変換も比較的容易に定式化ができるはずである。

そこで我々は、大気が安定した測光夜に2kCCDを用いて撮像したデータをPS1 カタログと比較し、変換式を求めることにした。2kCCDカメラの運用は既に終了しているが、これまでに2kCCDで取得された

Kiso システムのデータは国立天文台によって保管・公開されている。本研究で求めたシステム変換係数を使えば、このデータアーカイブ (例えば、<https://smoka.nao.ac.jp/objectSearch.jsp>) にある膨大な測光データも有効に活用できる。なお、2kCCDカメラの後継であるKWFCのジョンソン・カズンズシステムへの変換式も、本論文と同じ方法で構築した。その結果については、この東京学芸大学紀要に掲載されている別の論文 (吉田ほか2019) で述べる。

本論文の第2章では、木曾観測所のシュミット鏡での観測とPS1 カタログのデータについて述べる。第3章では、解析方法と結果について述べる。本論文のまとめを、第4章に示す。

2. 観測とデータ

2.1 木曾2kCCDカメラの観測データ

本研究で用いたデータは、2002年11月6日に木曾観測所の105 cm シュミット鏡で観測したもので、検出器として2kCCDカメラを使用した。2kCCDカメラは天空のおおよそ $50' \times 50'$ の領域を撮像できる広視野のCCD (SITe社製) であった。その画素数は 2048×2048 ピクセルで、約 $1.5''$ の分解能をもつ。また、2kCCDカメラにはジョンソン・カズンズシステムに準拠したUBVRIの広帯域フィルターが実装され、限界等級はBバンドで約21等であった。観測装置の諸元を表1に示す。本研究では、BVRIバンドの4つのフィルターを用い、おうし座のある領域を異なる天頂距離で5回撮像した。典型的なシーイングサイズは $2.5''$ 、観測した領域の中心座標は赤経 $4^{\text{h}}29^{\text{m}}$ 、

表 2 観測データの諸元

観測日時	2002 年 11 月 6 日 11h - 18h (UT)			
観測領域	赤経 4 ^h 29 ^m , 赤緯 25°52′ (2000 年分点) を中心とした 50′×50′			
天頂距離 [°]	10.0, 22.1, 25.0, 44.7, 61.8			
	B バンド	V バンド	R バンド	I バンド
スキャン番号	KCD43524	KCD43525	KCD43526	KCD43527
	KCD43545	KCD43546	KCD43547	KCD43548
	KCD43570	KCD43571	KCD43572	KCD43573
	KCD43595	KCD43596	KCD43597	KCD43598
	KCD43621	KCD43622	KCD43623	KCD43624
積分時間 [秒]	200	100	100	50
シーイング [秒角]	2.53	2.58	2.72	2.24

注: 観測領域は中心座標を, 天頂距離とシーイングは平均値を表す。

赤緯 +25°52′ である。この領域の観測データの諸元を表 2 に示す。なお, 観測データの整約および解析には, Interactive Data Language (IDL) を用いた。

2.2 Pan-STARRS1 カタログの測光データ

Pan-STARRS はハワイ大学によって開発・運用されている広視野の観測のシステムである。Pan-STARRS は 4 台の望遠鏡で継続的に全天サーベイを行い, 突発天体や移動天体を検出する計画で, そのために将来的には全天球にある 24 等級までの天体のデータベースが作成される予定である。現在はその第一段階のデータが公開されている。現在公開されている PS1 カタログのデータは, ハワイのハレアカラ天文台にある 1.8m 望遠鏡に実装された 1.4 ギガピクセルカメラ (視野角 3°×3°) によって, 5 つの広帯域フィルター (grizy) で撮像した天体のデータを整約したものがある。その観測範囲は赤緯 -30° より北側の天域で, これは全天球の 3/4 (3 万平方度) にあたる。また, Tonry et al. (2012) によって, PS1 カタログの gri バンドの等級からジョンソン・カズンズシステムの BVRI バンドの標準等級への変換式が示されている。我々は PS1 カタログのデータベース (<https://catalogs.mast.stsci.edu/>) から 2kCCD カメラで観測した領域の星のデータをダウンロードし, ジョンソン・カズンズシステムの標準等級へ変換したものを利用して, 2kCCD で観測した星の測光データをジョンソン・カズンズシステムの標準等級に変換した。

なお, 2019 年 5 月現在, PS1 カタログのデータの一部は, まだ未公開である。また, 一度にダウンロードできるのは指定した中心座標から半径 30′ 以内の星のデータに限られているので, 天球の広い範囲で PS1

カタログのデータを入手することは難しい。

3. システム変換の定式化

3.1 星の検出および星の天球座標の決定

観測によって得られた FITS 形式の画像データ (データフレーム) には, 天体からの信号の他に, CCD 素子を駆動するための印加電圧 (バイアス) や, ピクセル毎の感度むらが含まれている。これらの補正に必要なピクセル毎のバイアスのデータ (バイアスフレーム) はデータフレームの撮像前後に, 感度むらのデータ (フラットフレーム) は観測の開始時と終了時に取得した。

2kCCD の観測データの整約は, 一般的な方法で行った (例えば, 小寺&土橋 2005)。まず, データフレームからバイアスフレームを差し引き, CCD の中心付近を 1 に規格化したフラットフレームで除し, さらにフレーム毎の積分時間で除して, 星の測光が可能なデータ (オブジェクトフレーム) とした。このようにして得られたオブジェクトフレームで, 天体からの信号がないピクセルでのカウント値の平均 (スカイレベル) と標準偏差 σ を測定し, カウント値がスカイレベルより 5σ 以上となるピクセルを星像として検出した。

Two Micron All Sky Survey Point Source Catalog (Skrutskie et al. 2006, 以後 2MASS 点源カタログ) とのマッチングをとることにより, 検出した星のピクセル座標を赤道座標 (2000 年分点) に変換した。これにより, 検出した星の天球座標を 1″ 程度の精度で決定した。

3.2 星の機械等級の測定

検出した星に対して、点像分布関数測光 Point Spread Function Photometry (以後、PSF 測光) と開口測光 Aperture Photometry (以後、AP 測光) を行った。PSF 測光は、複数の星が隣接していても測光が可能であるが、精確な PSF を決めることは難しいため、カウント値に若干の系統誤差が発生しやすい。一方、AP 測光には、測光精度は高い反面、複数の星が隣接している場合には測光を行うことができないという問題がある。多くの星を精度良く測光するために、オブジェクトフレーム毎に PSF 測光と AP 測光を行い、両者の結果を比較することにより、PSF 測光によるカウント値を AP 測光相当のカウント値に変換し、機械等級を求めた。

それぞれの星の PSF としては、ピクセル座標 (x, y) の関数として、次の 2 次元のガウス関数

$$I(x, y) = A2^{-\left(\frac{r}{\phi/2}\right)^2} + S \quad (1)$$

$$r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \quad (2)$$

を仮定した。ここで A はガウス関数の最大値、 (x_0, y_0) は星の中心座標、 ϕ は星のシーイングサイズ、 S はスカイレベルである。これらをフリーパラメータとして星像をフィットし、得られたパラメータの値から星のカウント値 D_p を計算した。

AP 測光は、PSF 測光で得られたフレーム毎の ϕ の平均値を用いて行った。すなわち、各星の中心座標 (x_0, y_0) から半径 $5\phi \sim 10\phi$ の円環内のピクセルのカウント値の平均をスカイレベルとして星像データから差し引き、半径 5ϕ の円内のピクセルの総カウント値を AP 測光による星のカウント値 D_A とした。フレーム毎に AP 測光できた星を抽出して D_p と D_A のプロットを作成し、1 次関数でフィットした。フィットにより得られた変換式から D_p を D_A 相当の値に変換し、星のカウント値 D とした。機械等級 m_i は、 D から以下の Pogson の式で求めた。

$$m_i = -2.5 \log_{10} D + 25 \quad (3)$$

ここで、右辺の定数 25 は、等級のゼロ点である。

3.3 大気による減光の補正と星の大気圏外等級の測定

機械等級は大気による減光を受けているため、その影響を取り除く必要がある。大気圏外で天体を観測した場合のフラックスを D_0 、地上で実際に観測する際の大気の光学的厚さを τ とすると、地上で観測される

フラックス D は、

$$D = D_0 \exp(-\tau) \quad (4)$$

と表される。 τ は大気中での光路の長さに比例する。天頂方向での光学的厚さを τ_0 、天頂距離を Z とすれば、

$$\tau = \tau_0 F(Z) \quad (5)$$

と表せる。ここで $F(Z)$ は空気量 (エアマス) 関数と呼ばれ、地球大気を平行平板と仮定すれば

$$F(Z) = \sec Z \quad (6)$$

と表される。実際には、地球が球形である効果や、大気密度の構造による効果などを考慮する必要があるため、 $F(Z)$ は次の近似式で計算される (例えば、安田 2007)。

$$F(Z) = \sec Z - 0.0018167(\sec Z - 1) - 0.002875(\sec Z)^2 - 0.0008083(\sec Z - 1)^3 \quad (7)$$

したがって、式(4)は、

$$D = D_0 \exp[-\tau_0 \cdot F(Z)] \quad (8)$$

と表される。両辺の対数を取り、式(3)に合わせて等級のゼロ点 25 を加えると、式(8)は次のようになる。

$$-2.5 \log_{10} D + 25 = (-2.5 \log_{10} D_0 + 25) + 2.5 \log_{10}(e) \cdot \tau_0 \cdot F(Z) \quad (9)$$

左辺を m_i 、右辺の最初の括弧内を m_0 とし、 $F(Z)$ の係数を k おくと、式(9)は、

$$m_i = m_0 + k \cdot F(Z) \quad (10)$$

となる。ここで、 m_i は観測される機械等級、 m_0 は大気による減光を受けていない場合の等級 (大気圏外等級) である。 k は減光係数と呼ばれ、バンド毎に異なる。

図 1 に、バンド毎の機械等級と $F(Z)$ のプロットの例を示す。この図はエアマス・プロットと呼ばれ、横軸はエアマス $F(Z)$ 、縦軸は上記の m_i に相当する各バンドでの機械等級 B_m, V_m, R_m, I_m である。+印は 5 回の観測で得られたデータで、直線は 1 次関数でフィットした結果である。この傾きが式(10)の減光係数、切片が Kiso システムにおけるこの星の大気圏外等級である。減光係数は星によってばらつきが大きいので、星ごとにエアマス・プロットを作成し、その平均

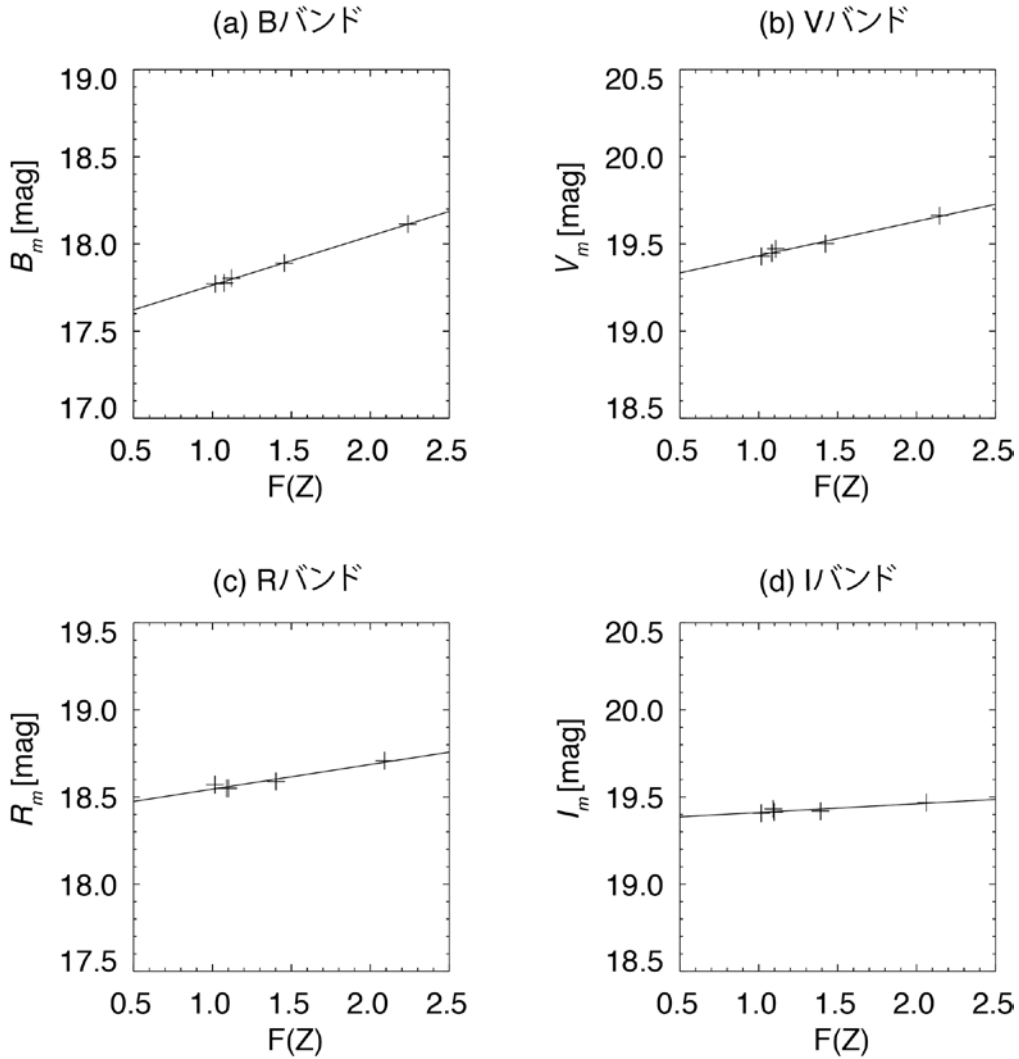


図1 2002年11月6日の観測により得られた4バンド (BVRI) のエアマス・プロットの例。横軸は空気量関数 $F(Z)$, 縦軸は各バンドの機械等級である。5回の観測データを+印で, 1次関数でフィットした結果を直線で表す。

値を求める必要がある。その頻度分布をバンド毎に図2に示す。減光係数のばらつきは, 偶然誤差だけでなく, 星本来の色指数のばらつきによる有効波長のずれを反映していると考えられる。また, 各バンドで求めた減光係数の平均値を表3に示す。ここで得られた減光係数の平均値を使い, それぞれの星の $F(Z)$ と m_i から, 式(10)の m_0 に相当する Kiso システムでの大気圏外等級 B_K, V_K, R_K, I_K を求めた。

3.4 標準測光システムへの変換式

検出した星と PS1 カタログの星のマッチングをとり, 個々の星の PS1 での等級をジョンソン・カズンズシステムでの標準等級に変換した。この標準等級を, B_p, V_p, R_p, I_p とする。Kiso システムでの大気圏外等級と標準等級との関係を, 以下のように色指数 ($B_K - V_K$) と ($R_K - I_K$) の1次関数で近似する。

$$B_p - B_K = \alpha_B (B_K - V_K) + \beta_B \quad (11)$$

$$V_p - V_K = \alpha_V (B_K - V_K) + \beta_V \quad (12)$$

$$R_p - R_K = \alpha_R (R_K - I_K) + \beta_R \quad (13)$$

$$I_p - I_K = \alpha_I (R_K - I_K) + \beta_I \quad (14)$$

ここで, $\alpha_B \sim \alpha_I$ および $\beta_B \sim \beta_I$ をシステム変換係数と呼ぶ。

それぞれのバンドでのプロットを, 図3に示す。バンド毎に, Kiso システムでの大気圏外等級の誤差が 0.05 mag 未満の星 300~500 個について, 式(11)~(14)の係数をフィットして求めた。その結果を, 図中の直線で示す。これらの直線の傾きと切片が, システム変換係数に相当する。得られたシステム変換係数と, フィットに用いた星の色指数の範囲を, 表4にまとめる。

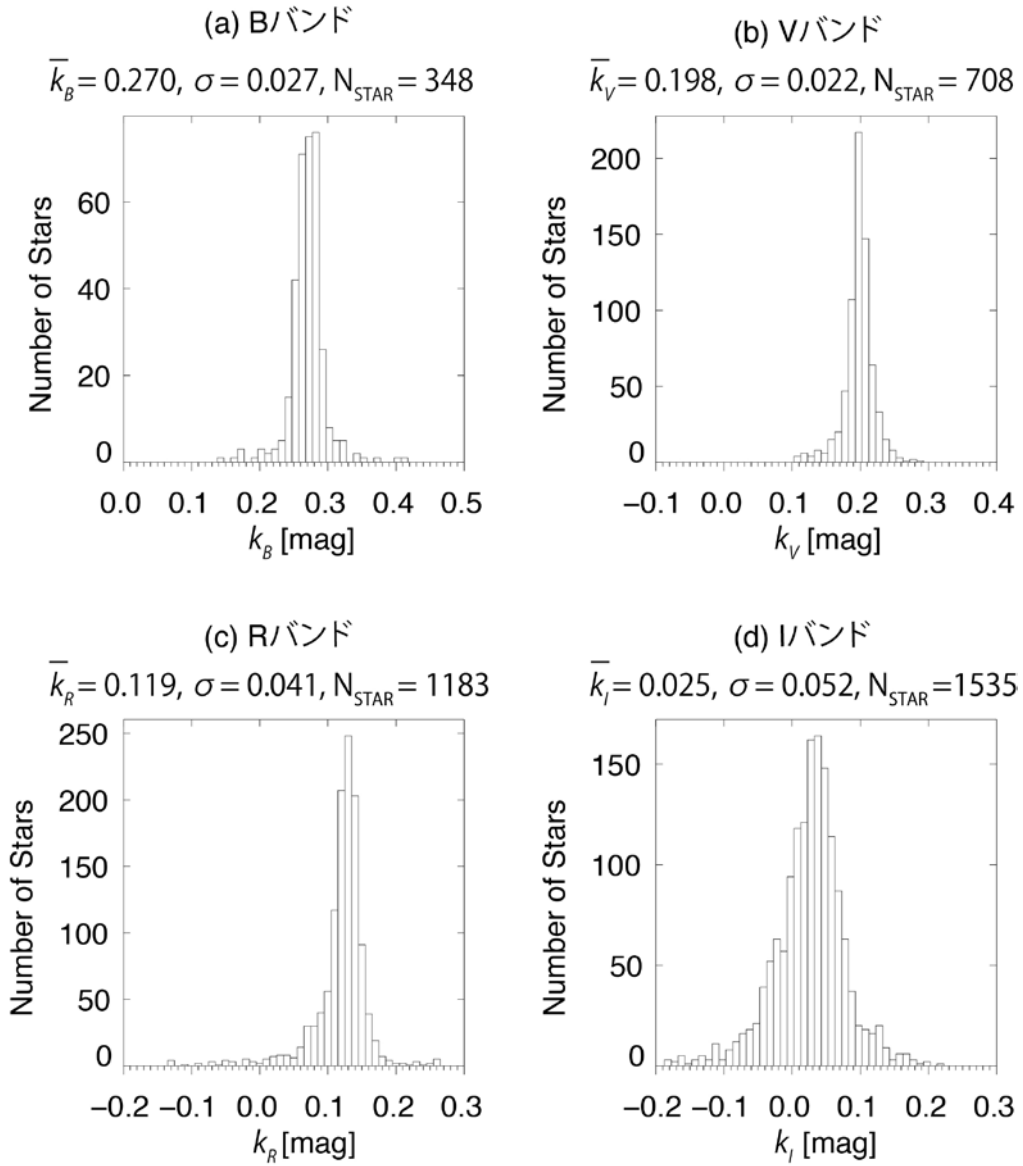


図2 4バンド (BVRI) の減光係数の頻度分布。各パネルの上の数値は、それぞれのバンドでの減光係数の平均値、標準偏差、および使用した星の数である。

表3 減光係数

k_B [mag]	k_V [mag]	k_R [mag]	k_I [mag]
0.270 ± 0.027	0.198 ± 0.022	0.119 ± 0.041	0.025 ± 0.052

4. まとめ

本研究では、PS1 カタログの測光データを利用して、2kCCD で撮像した星の測光データをジョンソン・カズンズシステムの標準等級にするための変換式を構築した。大気の安定した測光夜のデータから減光

係数と機械等級を求め、エアマス・プロットから Kiso システムでの大気圏外等級を求めた。これを PS1 カタログに記載されている星のデータと比較し、BVRI の4バンドについて、Kiso システムでの大気圏外等級を標準等級にするための変換式を、色指数の1次関数として定式化した。

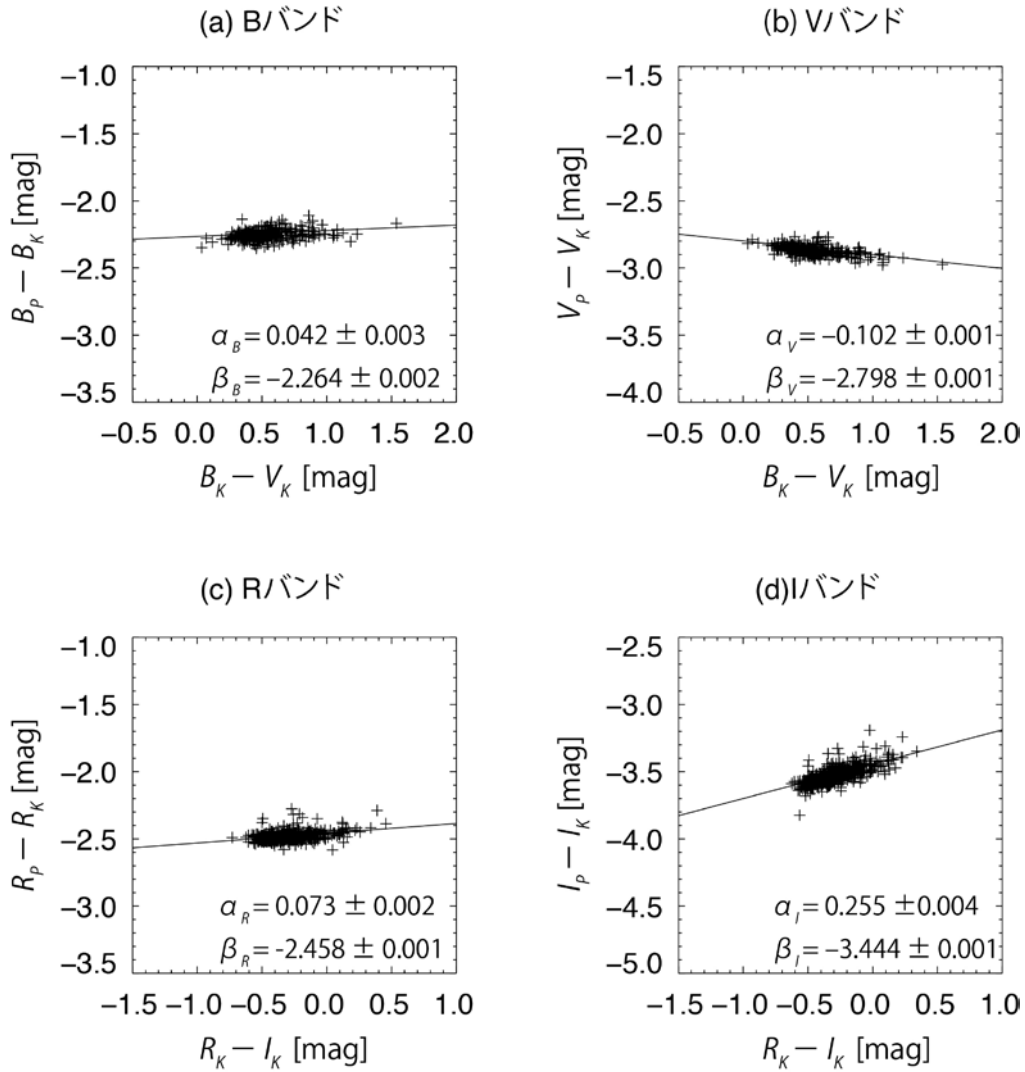


図3 4バンド (BVRI) の等級差対色指数の図。縦軸は Pan-STARRS1 の測光データを Johnson-Cousins システムに変換した標準等級と Kiso システムでの大気圏外等級の差, 横軸は Kiso システムにおける色指数。+印はデータを, 直線は式(11)~(14)によるフィットの結果を表す。

表4 システム変換係数

	α	β [mag]	色指数の範囲 [mag]
<i>B</i>	0.042 ± 0.003	-2.264 ± 0.002	$0.03 < (B_K - V_K) < 1.5$
<i>V</i>	-0.102 ± 0.001	-2.798 ± 0.001	$0.03 < (B_K - V_K) < 1.5$
<i>R</i>	0.073 ± 0.002	-2.458 ± 0.001	$-0.7 < (R_K - I_K) < 0.5$
<i>I</i>	0.255 ± 0.004	-3.444 ± 0.001	$-0.6 < (R_K - I_K) < 0.3$

謝 辞

本研究の一部は, 科学研究費補助金 (Nos.16K12749, 16K12750, 17K00963, 17H02863, 19H05070) の援助を受けて行いました。ここに感謝致します。

引用文献

Cohen, M., Wheaton, W. A., Megeath, S. T. (2003), "Spectral Irradiance Calibration in the Infrared. XIV. The Absolute Calibration of 2MASS", *Astronomical Journal*, vol.126, pp.1090-1096

- Cousins, A. W. J. (1976), "VRI standards in the E regions", *Memoirs of the Royal Astronomical Society*, vol.81, p.25
- Fukugita, M., Ichikawa, T., Gunn, J. E., Doi, M., Shimasaku, K., Schneider, D. P. (1996), "The Sloan Digital Sky Survey Photometric System", *Astronomical Journal*, vol.111, pp.1748-1756
- Hodapp, K. W., Kaiser, N., Aussel, H., Burgett, W., Chambers, K. C., Chun, M., Dombeck, T., Douglas, A., Hafner, D. et al. (2004), "Design of the Pan-STARRS Telescopes", *Astronomische Nachrichten*, vol. 325, pp.636-642
- Johnson, H. L., Morgan, W. W. (1953), "Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the Yerkes spectral atlas", *Astrophysical Journal*, vol.117, pp.313-352
- Kandori, R., Dobashi, K., Uehara, H., Sato, F., Yanagisawa, K. (2003), "Grain Growth in the Dark Cloud L1251", *Astronomical Journal*, vol.126, pp.1888-1895
- Landolt, A. U. (2009), "UBVRI Photometric Standard Stars around the Celestial Equator: Updates and Additions", *Astronomical Journal*, vol.137, pp.4186-4269
- Landolt, A. U. (1992), "UBVRI Photometric Standard Stars in the Magnitude Range 11.5-16.0 around the Celestial Equator", *Astronomical Journal*, vol.104, pp.340-371 and 436-491
- Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., Weinberg, M. D., Schneider, S., Carpenter, J.M., Beichman, C., Capps, R., Chester, T. et al. (2006), "Two Micron All Sky Survey (2MASS)", *Astronomical Journal*, vol.131, pp.1163-1183
- Tonry, J. L., Stubbs, C. W., Lykke, K. R., Doherty, P., Shivvers, I. S., Burgett, W. S., Chambers, K. C., Hodapp, K. W., Kaiser, N. et al. (2012), "The Pan-STARRS1 Photometric System", *Astrophysical Journal*, vol.750, id.99 (14pp)
- 小寺綾乃, 土橋一仁 (2005), 「木曾観測所 2kCCD カメラのための星の自動検出プログラムの開発」, *東京学芸大学紀要 自然科学系*, Vol.57, pp. 109-117
- 安田直樹 (2007), 「シリーズ現代の天文学第 15 巻 宇宙の観測光・赤外天文学」, 家 正則, 岩室史英, 舞原俊憲, 水本好彦, 吉田道利編, 日本評論社, p. 271
- 吉田悠人 (2019), 「可視光多波長観測によるおうし座分子雲周辺のダストの光学的性質に関する研究」, *東京学芸大学修士論文*, pp. 1-25