

## 広視野カメラ KWFC を搭載した木曾 105 cm シュミット望遠鏡の システム変換

吉田 悠人<sup>\*1</sup>・土橋 一仁<sup>\*1</sup>・上原 隼<sup>\*1,\*2</sup>・西浦 慎悟<sup>\*1</sup>  
遠藤 修弘<sup>\*1</sup>・平原 純一<sup>\*1</sup>・下井倉 ともみ<sup>\*1,\*3</sup>・直井 隆浩<sup>\*4</sup>

宇宙地球科学分野

(2019年5月23日受理)

YOSHIDA, Y., DOBASHI, K., UEHARA, H., NISHIURA, S., ENDO, M., HIRAHARA, J., SHIMOIKURA, T., and NAOI, T.: System Transformation of the Kiso Wide Field Camera (KWFC) installed on the 105 cm Schmidt Telescope at the KISO Observatory. *Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci.*, 71: 49-55. (2019) ISSN 2434-9380

### Abstract

We report on the system transformation from the Kiso 105 cm Schmidt Telescope system equipped with the Kiso Wide Field Camera (KWFC) to the standard Johnson-Cousins system. To formulate the transformation, we utilized the database of the Pan-STARRS1 1.8m telescope located on Haleakala (Hawaii). The resulting transformation formulae are expressed as a linear function of color (B-V) or (R-I), and they can be used to transform the magnitudes of the Kiso system to those of the Johnson-Cousins system in the BVRI bands. We also discuss the main sources of the errors in the derived formulae.

**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:** この論文では、木曾広視野カメラ (KWFC) を搭載した木曾観測所の 105 cm シュミット鏡の観測システム (木曾システム) について、標準測光システムであるジョンソン・カズンズシステムへの変換式を報告する。変換式の構築には、ハワイ州ハレアカラ山頂に設置された 1.8 m 鏡 (Pan-STARRS1) による公開データを比較対象として利用した。これにより、星の色指数 (B-V 及び R-I) の一次関数として、木曾システムでの等級からジョンソン・カズンズシステムでの等級を計算するための変換式を、BVRI バンドについて定式化した。また、変換係数の主な誤差とその原因について考察した。

---

\* 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 丁目 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)

## 1. はじめに

この論文では、木曾観測所の 105 cm シュミット望遠鏡（以後、木曾シュミット鏡）と広視野カメラ（Kiso Wide Field Camera, 以後、KWFC）から成る観測システム（以後、木曾システム）の標準測光システムへの変換式について報告する。KWFC は 2kCCD カメラの後継機として開発され、2012 年から 2017 年まで木曾シュミット鏡の主力検出器として使用された。KWFC は 8 枚の CCD から構成され、B バンドで約 22 等の限界等級をもち、一度に約  $2^\circ \times 2^\circ$  の領域を撮像できる視野を有する。

木曾シュミット鏡の広い視野は、広がった暗黒星雲の撮像観測に適している。我々は、2000 年から 2011 年の期間、KWFC の前身である 2kCCD カメラを用いて、おうし座やオリオン座などの暗黒星雲の広域多波長撮像観測 (BVRI) に取り組んだ（例えば、Kandori et al. 2003）。さらに、2016 年から 2017 年の期間も、検出器を KWFC に変更して観測を継続した。この研究の目的は、得られた星の測光データから E(B-V) や E(R-I) といった色超過マップを作成し、暗黒星雲内外におけるダストの光学的性質の変化を調査することである（例えば、吉田 2019）。研究を遂行するためには、木曾システムで得られた星の等級を標準システム（ジョンソン・カズンズシステム）での等級に変換する必要がある（例えば、市川 1997）。一般に、ある観測システムから標準システムへの変換式を確立するためには、各バンドでの等級が既にわかっている様々な色の測光標準星を多数観測する必要がある。測光標準星のカatalogとしては Landolt (1992, 2009) が作成したものが有名であるが、Landolt のカatalogに記載されている標準星は天球の赤道に沿って赤経約 1h 毎に数個から数十個程度分布しているにすぎない。システム変換式の確立のためには、測光夜にそれらを異なる天頂距離で次々と観測してエアマス・プロットを作成しなければならない。しかし、共同利用等の限られた観測時間内に、大気の状態（減光係数）が不安定になりがちな日本国内の観測所でそのような測光観測を実現することは、容易ではない。

最近になり、赤緯  $-30^\circ$  以上の天空を網羅する Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System（通称 Pan-STARRS1, 例えば Hoddap et al. 2004）で取得された星の測光データが公開された。そのデータを標準システムでの等級に変換するための計算式も公開されている（Tonry et al. 2012）。エアマス・プロットさえ作成すれば、この星のデータベース

を利用して、天球の任意の領域で木曾システムのシステム変換式を確立することができるはずである。本論文では、このような発想のもと、上記の暗黒星雲の多波長観測のためのシステム変換式の構築を行った。本論文では、KWFC の標準システムへの変換式について報告する。2kCCD カメラの変換式も、同様の方法で構築した。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（上原ほか 2019）で述べる。

本論文の第 2 章では、木曾シュミット鏡での観測と使用した Pan-STARRS1 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. 使用データ

## 2.1 木曾シュミット鏡による観測

KWFC は、SITE 社製の 4 枚の CCD と、MIT 社製の 4 枚の CCD から構成されている。それらの天球上での配置を、図 1 の模式図に示す。各 CCD は  $4196 \times 2100$  個のピクセルをもち、ピクセルスケールは  $0.94''/\text{pix}$  である。1 枚の CCD で天球上の約  $1^\circ \times 0.5^\circ$  の範囲をカバーできる。赤経方向に  $60''$ 、赤緯方向に  $90''$  の隙間を設けて配置された合計 8 枚の CCD で、約  $2^\circ \times 2^\circ$  の範囲を一度にカバーできる。

KWFC のシステム変換式を構築するための観測は、

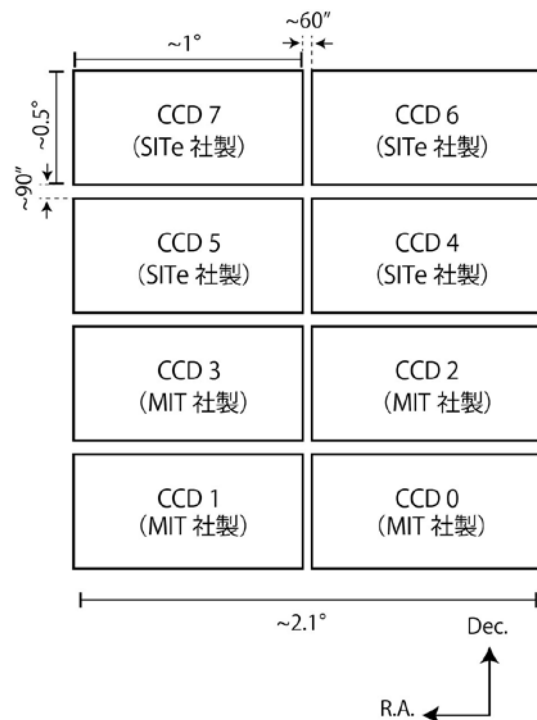


図 1 KWFC の模式図と天球上で各 CCD の配置。

表 1 観測日とスキャン番号

B	V	R	I
2017年2月14日	2017年2月15日	2016年12月28日	2016年12月28日
KWFC0163397	KWFC0163599	KWFC0157862	KWFC0157877
KWFC0163400	KWFC0163602	KWFC0157865	KWFC0157882
KWFC0163401	KWFC0163614	KWFC0157870	KWFC0157885
KWFC0163404	KWFC0163615	KWFC0157873	KWFC0157891
KWFC0163405	KWFC0163618	KWFC0157878	KWFC0157895
KWFC0163408	KWFC0163619	KWFC0157881	KWFC0157900
KWFC0163409	KWFC0163622	KWFC0157886	KWFC0157903
KWFC0163414	KWFC0163623	KWFC0157890	KWFC0157908
KWFC0163417	KWFC0163626	KWFC0157896	KWFC0157911
KWFC0163422	KWFC0163627	KWFC0157899	KWFC0157916
KWFC0163425	KWFC0163630	KWFC0157904	KWFC0157919
KWFC0163426	KWFC0163631	KWFC0157907	KWFC0157924
KWFC0163431	KWFC0163634	KWFC0157912	KWFC0157927
KWFC0163434	KWFC0163635	KWFC0157915	KWFC0157932
KWFC0163435	KWFC0163638	KWFC0157920	KWFC0157935
KWFC0163437	KWFC0163640	KWFC0157923	KWFC0157940
...	KWFC0163643	KWFC0157928	KWFC0157943
...	KWFC0163644	KWFC0157931	KWFC0157948
...	KWFC0163647	KWFC0157936	KWFC0157951
...	KWFC0163650	KWFC0157939	...
...	KWFC0163653	KWFC0157944	...
...	KWFC0163656	KWFC0157947	...
...	KWFC0163658	KWFC0157952	...
...	...	KWFC0157955	...

BVRI の 4 バンドについて行った。B バンドと V バンドのデータは 2017 年 2 月 14 日と 15 日にそれぞれ取得し、R バンドと I バンドのデータは両者とも 2016 年 12 月 28 日に取得した。露光時間は、BVRI バンドの順に、100 秒・60 秒・15 秒・45 秒である。オリオン座の赤経  $5^{\text{h}}45^{\text{m}}$ ・赤緯  $-5^{\circ}54'$  (2000 年分点) の観測点を KWFC の視野中心におき、天頂距離を変えながら撮像観測を行い、データを取得した。得られたデータのスキャン番号を、表 1 にまとめる。

データの整約と解析は、標準的な方法で行った。まず、取得した各 CCD の画像データからバイアスを引き、積分時間で規格化し、フラットフィールドで除して、画像データの整約を行った。次に、整約した画像データに写っている星を検出し、測光を行った。測光

は、まず周囲に他の星のない孤立した星に対して開口測光を行い、さらに開口測光が難しい星 (近傍に別の星があるもの) を含む全ての星に対してガウス関数型の Point Spread Function (PSF) を仮定した PSF フィット法による測光を行った。PSF 法により得られた星のフラックスを開口測光で得られたものと比較し、全ての星について開口測光相当のフラックスを得た。

検出した星の天球座標は、2 Micron All Sky Survey (2MASS) による点源カタログ (Skrutskie et al. 2006) とのマッチングをとることにより、 $1''$  以内の精度で測定した。

以上の一連の解析は、Interactive Data Language (IDL) を用いて行った。

## 2.2 Pan-STARRS1 の星のデータ

システム変換式を求めるための比較データとして、Pan-STARRS1 によるデータを使用した (例えば, Hoddap et al. 2004)。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ある。ハワイ州マウイ島のハレアカラ山頂に設置された口径 1.8m の初号機 Pan-STARRS1 は  $3^\circ \times 3^\circ$  以上の広い視野を有し, ハワイから観測可能な全天の 3/4 の恒星のデータを既に取得している。また, 標準システムであるジョンソン・カズンズシステムへの変換式も公開されている (Tonry et al. 2012)。我々は, そのデータベース (<https://catalogs.mast.stsci.edu/>) から木曾シュミット鏡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等級に変換して, KWFC のデータとの比較に用いた。

## 3. システム変換式の導出

### 3.1 大気圏外等級の測定

以下では, B バンドのデータを例にとり解析手順を説明する。まず, 木曾システムの B バンドで検出した星のカウントを  $D$  として, 全ての星について機械等級  $B_m$  を以下のように定義した。

$$B_m = -2.5 \log D + 25 \text{ mag} \quad (1)$$

観測時の天頂距離を  $Z$  とすると,  $B_m$  は木曾システムでの大気圏外等級  $B_k$  と, 次の式で表される関係にある。

$$B_m = B_k + k_B F(Z) \quad (2)$$

ここで,  $k_B$  は B バンドでの減光係数であり,  $F(Z)$  は空気量 (エアマス) である。  $F(Z)$  は, 以下のように近似できる (例えば, 安田 2007)。

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

測定結果の例として, 5 番目の CCD (以後, CCD5) で検出したある星について, 縦軸に  $B_m$ , 横軸に  $F(Z)$  をとったプロットを, 図 2 に示す。式 (2) で表した通り, データ点を直線でフィットした時の傾きが  $k_B$  であり, 切片が  $B_k$  である。

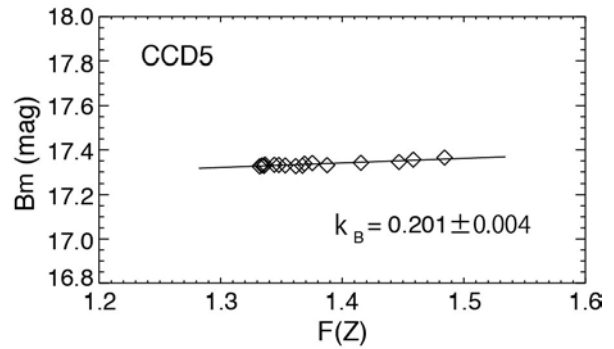


図2 エアマス・プロットの例。CCD5 で検出したある星の B バンドでのエアマス・プロット。縦軸は機械等級  $B_m$ , 横軸は天頂距離  $Z$  における空気量  $F(Z)$ 。直線はデータ点の直線フィットで, 直線の傾きが減光係数  $k_B$  である。

$k_B$  は, ばらつきが大きいので, 多数の星について図 2 と同様のプロットを作成して測定を行い, 平均値を求めなければならない。 $k_B$  の頻度分布の例を, 図 3 に示す。この図の例では, 321 個の星について  $k_B$  の測定を行い, 平均値 0.201, 標準偏差 0.066 という結果を得た。

$k_B$  のばらつきは, 単に偶然誤差だけではなく, 星本来の色指数のばらつきによる有効波長のずれにも起因するものと考えられる。上記のようにして求めた  $k_B$  の平均値を使い, 各  $Z$  での  $B_m$  の測定値より式 (2) を使ってそれぞれ  $B_k$  を計算し,  $B_k$  の平均値をその星の大気圏外等級として採用した。

以上の測定を, CCD0~7 の全ての CCD で全てのバンドについて行い, 木曾システムでの機械等級  $B_m$ ,  $V_m$ ,  $R_m$ ,  $I_m$  のデータから大気圏外等級  $B_k$ ,  $V_k$ ,  $R_k$ ,  $I_k$  と観測時の減光係数  $k_B$ ,  $k_V$ ,  $k_R$ ,  $k_I$  を計算した。

得られた減光係数を, 表 2 にまとめる。

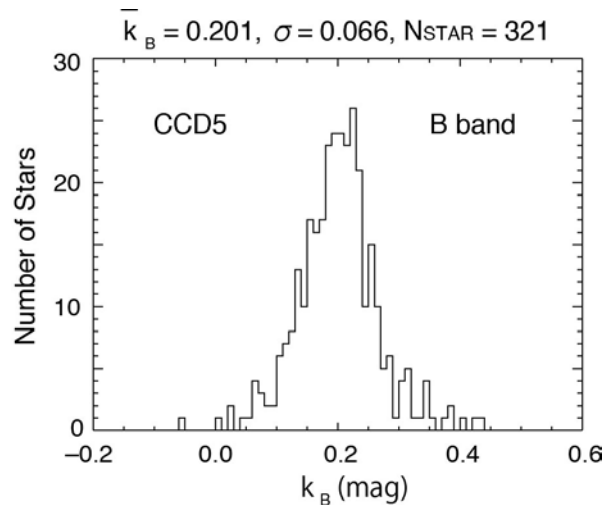


図3 減光係数の頻度分布の例。測定した全ての天頂距離  $Z$  で CCD5 の B バンドで検出できた星は 321 個である。それらの減光係数  $k_B$  の平均値は 0.201 であり, 標準偏差は 0.066 である。

表 2 測定時の減光係数

CCD	$k_B$ (mag)	$k_V$ (mag)	$k_R$ (mag)	$k_I$ (mag)
0	$0.190 \pm 0.005$	$0.180 \pm 0.002$	$0.040 \pm 0.004$	$0.047 \pm 0.003$
1	$0.234 \pm 0.008$	$0.172 \pm 0.003$	$0.042 \pm 0.002$	$0.044 \pm 0.003$
2	$0.167 \pm 0.004$	$0.190 \pm 0.002$	$0.053 \pm 0.002$	$0.039 \pm 0.002$
3	$0.243 \pm 0.006$	$0.166 \pm 0.002$	$0.047 \pm 0.002$	$0.027 \pm 0.004$
4	$0.183 \pm 0.005$	$0.148 \pm 0.002$	$0.042 \pm 0.002$	$0.034 \pm 0.006$
5	$0.201 \pm 0.004$	$0.198 \pm 0.003$	$0.038 \pm 0.002$	$0.018 \pm 0.003$
6	$0.284 \pm 0.005$	$0.222 \pm 0.002$	$0.025 \pm 0.002$	$0.041 \pm 0.004$
7	$0.094 \pm 0.005$	$0.323 \pm 0.004$	$0.048 \pm 0.002$	$0.028 \pm 0.003$

### 3.2 システム変換係数の測定

Pan-STARRS1 から求めたジョンソン・カズンズシステムでの等級をそれぞれ  $B_p$ ,  $V_p$ ,  $R_p$ ,  $I_p$  とする。これらと木曾システムでの大気圏外等級は、それぞれ下記のシステム変換式に従うものとする。

$$B_p = B_k + \alpha_B(B_k - V_k) + \beta_B \quad (4)$$

$$V_p = V_k + \alpha_V(B_k - V_k) + \beta_V \quad (5)$$

$$R_p = R_k + \alpha_R(R_k - I_k) + \beta_R \quad (6)$$

$$I_p = I_k + \alpha_I(R_k - I_k) + \beta_I \quad (7)$$

ここで、 $\alpha_B \sim \alpha_I$  及び  $\beta_B \sim \beta_I$  は、システム変換のための係数である。

CCD5 の B バンドで検出された星についてのデータ例を、図 4 に示す。図では、縦軸に  $B_p - B_k$ 、横軸に  $B_k - V_k$  をとっている。これを式(4)に従う直線でフィットし、 $\alpha_B = 0.140 \pm 0.015$ 、 $\beta_B = -1.9755 \pm 0.012$  mag、という結果を得た。同様の解析を、CCD0~7

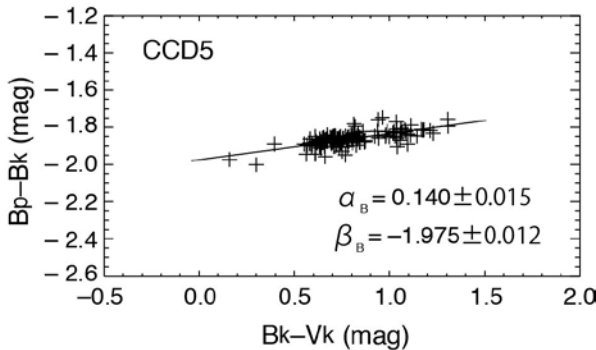


図 4 CCD5 の B バンドで検出された星についての等級差対色指数の例。縦軸は Pan-STARRS1 のデータから求めたジョンソン・カズンズシステムでの等級  $B_p$  と木曾システムでの大気圏外等級  $B_k$  の差、横軸は木曾システムでの色指数  $B_k - V_k$ 。直線はフィットの結果。直線の傾きは  $\alpha_B = 0.140$ 、切片は  $\beta_B = -1.975$  mag となった。

の全ての CCD で全てのバンドについて行い、係数  $\alpha_B \sim \alpha_I$  及び  $\beta_B \sim \beta_I$  を測定した。得られた結果を、表 3、表 4、表 5、及び表 6 に、バンド毎にまとめる。また、測定に使用した星の色指数の範囲を、これらの表の最後の列に示す。

### 3.3 測定結果の不確かさ

表 2 を見ると、CCD7 の B バンドの減光係数は他の CCD の値と比べて小さな値をとっている。CCD7 はリニアリティーに多少問題があり、入射光量に対してその応答 (カウント値) が比例していない可能性がある。

また、システム変換係数については、CCD1 の B バンド (表 3) 及び R バンド (表 5) の  $\alpha$  の値が、同じバンドの他の CCD の値と比べてやや異なっている。これは、CCD1 の特に B バンドのフィルターカーブが、他の CCD と多少異なることが原因である可能性が考えられる。また、KWFC の CCD は、全て、1 枚の CCD の上半分と下半分で異なる読み出し回路を使用しており、観測直後の生データではバイアスレベルが CCD の上半分と下半分で明らかに異なる場合がある。整約後のデータについては、全ての CCD で上下の感度が 0.1mag 程度以下の精度で一致していることを確かめているが、CCD1 については、僅かな差が残っている可能性がある。

## 4. まとめ

本研究では、Pan-STARR1 のデータを利用して、KWFC を搭載した木曾シュミット鏡の観測システム (木曾システム) の標準測光システム (ジョンソン・カズンズシステム) への BVRI バンドについての変換式の構築を行った。BV バンドについては色指数

表3 Bバンドの変換係数

CCD	$\alpha_B$	$\beta_B$ (mag)	$B_k - V_k$ の範囲 (mag)
0	$0.156 \pm 0.020$	$-1.987 \pm 0.018$	$0.5 < B_k - V_k < 1.5$
1	$0.298 \pm 0.030$	$-2.230 \pm 0.032$	$0.7 < B_k - V_k < 1.5$
2	$0.156 \pm 0.016$	$-2.003 \pm 0.016$	$0.5 < B_k - V_k < 1.6$
3	$0.208 \pm 0.027$	$-1.899 \pm 0.022$	$0.5 < B_k - V_k < 1.4$
4	$0.110 \pm 0.020$	$-1.813 \pm 0.017$	$0.5 < B_k - V_k < 1.4$
5	$0.140 \pm 0.015$	$-1.975 \pm 0.012$	$0.2 < B_k - V_k < 1.3$
6	$0.167 \pm 0.017$	$-1.656 \pm 0.014$	$0.4 < B_k - V_k < 1.6$
7	$0.156 \pm 0.028$	$-2.061 \pm 0.031$	$0.5 < B_k - V_k < 2.0$

表4 Vバンドの変換係数

CCD	$\alpha_V$	$\beta_V$ (mag)	$B_k - V_k$ の範囲 (mag)
0	$0.010 \pm 0.015$	$-2.107 \pm 0.013$	$0.5 < B_k - V_k < 1.5$
1	$-0.015 \pm 0.023$	$-1.929 \pm 0.024$	$0.7 < B_k - V_k < 1.5$
2	$-0.003 \pm 0.012$	$-2.069 \pm 0.012$	$0.5 < B_k - V_k < 1.6$
3	$0.012 \pm 0.020$	$-1.998 \pm 0.016$	$0.5 < B_k - V_k < 1.4$
4	$-0.029 \pm 0.015$	$-2.108 \pm 0.013$	$0.5 < B_k - V_k < 1.4$
5	$0.014 \pm 0.011$	$-2.155 \pm 0.009$	$0.3 < B_k - V_k < 1.6$
6	$-0.030 \pm 0.013$	$-1.991 \pm 0.010$	$0.4 < B_k - V_k < 1.6$
7	$0.007 \pm 0.023$	$-1.914 \pm 0.025$	$0.5 < B_k - V_k < 2.0$

表5 Rバンドの変換係数

CCD	$\alpha_R$	$\beta_R$ (mag)	$R_k - I_k$ の範囲 (mag)
0	$0.111 \pm 0.026$	$-2.149 \pm 0.007$	$0.0 < R_k - I_k < 0.6$
1	$0.001 \pm 0.005$	$-2.019 \pm 0.002$	$-0.2 < R_k - I_k < 0.5$
2	$0.114 \pm 0.009$	$-2.113 \pm 0.003$	$0.2 < R_k - I_k < 1.2$
3	$0.098 \pm 0.016$	$-2.014 \pm 0.002$	$-0.3 < R_k - I_k < 0.8$
4	$0.119 \pm 0.027$	$-2.198 \pm 0.004$	$-0.2 < R_k - I_k < 0.6$
5	$0.076 \pm 0.015$	$-2.242 \pm 0.002$	$-0.2 < R_k - I_k < 0.7$
6	$0.103 \pm 0.019$	$-2.186 \pm 0.003$	$-0.1 < R_k - I_k < 0.4$
7	$0.069 \pm 0.017$	$-2.178 \pm 0.002$	$-0.4 < R_k - I_k < 0.6$

表6 Iバンドの変換係数

CCD	$\alpha_I$	$\beta_I$ (mag)	$R_k - I_k$ の範囲 (mag)
0	$0.074 \pm 0.028$	$-2.633 \pm 0.007$	$0.0 < R_k - I_k < 0.6$
1	$-0.024 \pm 0.017$	$-2.708 \pm 0.002$	$-0.2 < R_k - I_k < 0.5$
2	$0.129 \pm 0.012$	$-2.619 \pm 0.004$	$0.0 < R_k - I_k < 1.2$
3	$0.078 \pm 0.019$	$-2.636 \pm 0.003$	$-0.3 < R_k - I_k < 0.8$
4	$0.104 \pm 0.037$	$-2.967 \pm 0.006$	$-0.2 < R_k - I_k < 0.6$
5	$-0.006 \pm 0.021$	$-2.959 \pm 0.003$	$-0.2 < R_k - I_k < 0.6$
6	$0.078 \pm 0.024$	$-2.908 \pm 0.004$	$-0.1 < R_k - I_k < 0.4$
7	$0.036 \pm 0.022$	$-2.883 \pm 0.003$	$-0.4 < R_k - I_k < 0.6$

(B-V) の, RI バンドについては色指数 (R-I) に関する 1 次関数として変換式を定義してその係数を測定し, 主な誤差等について考察した。

### 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

- 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
- 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)
- 市川 隆 (1997), 「標準測光システム」, 天文月報, 70 巻, 第 1 号, pp. 23–28
- 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