



東京学芸大学リポジトリ

Tokyo Gakugei University Repository

東京学芸大学40cm望遠鏡のシステム変換式の構築

メタデータ	言語: ja 出版者: 東京学芸大学教育実践研究推進本部 公開日: 2023-12-07 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 饗場, 智, 土橋, 一仁, 富田, 飛翔, 西浦, 慎悟, 下井倉, ともみ メールアドレス: 所属: 東京学芸大学, 東京学芸大学, 東京学芸大学, 東京学芸大学, 大妻女子大学
URL	http://hdl.handle.net/2309/0002000139

東京学芸大学 40 cm 望遠鏡のシステム変換式の構築

饗場 智^{*1}・土橋 一仁^{*1}・富田 飛翔^{*1}・西浦 慎悟^{*1}・下井倉 ともみ^{*2}

宇宙地球科学分野

(2023年5月31日受理)

AIBA, S., DOBASHI, K., TOMITA, T., NISHIURA, S. and SHIMOIKURA, T.: Transformation of the Magnitude System of the 40cm Optical Telescope at Tokyo Gakugei University to the Standard Johnson-Cousins System. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., 75 : 97-104. (2023) ISSN 2434-9380

Abstract

We report the system transformation formulae from the magnitude system of the 40cm optical telescope at Tokyo Gakugei University to the standard Johnson-Cousins photometric system. To construct the transformation formulae, we observed the open cluster M36 in the *BVRI* bands on October 20, 2022. We compared the data with the publicly available data, Pan-STARRS1, and established the system transformation formulae for the *BVRI* bands as a linear function of star colors.

Keywords: astronomy, telescope, photometric system

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、東京学芸大学の口径40 cmの光学望遠鏡の観測システムについて、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、40 cm鏡で2022年10月20日に観測した散開星団M36の*BVRI*バンドのデータを使用した。得られた星の測光データをPan-STARRS1の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星の色指数の1次関数として定式化した。

キーワード：天文学，天体望遠鏡，測光システム

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

*2 大妻女子大学 社会情報学部 環境情報学専攻 (102-0075 東京都千代田区三番町12)

1. はじめに

本論文では、東京学芸大学の口径40 cmの光学望遠鏡（以後、40 cm鏡）と光学フィルター、及び冷却 CCDカメラから成る観測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。

40 cm鏡は、2020年3月に東京学芸大学構内に設置された。2021年度より試験的な運用が開始され、様々な研究が進められている（例えば、土橋ほか 2022, 鈴木ほか 2022, 富田ほか 2022, 川崎ほか 2021, 浜田 2022）。GaiaやPan-STARRS 1といった恒星の巨大なデータベースには、標準測光システム（ジョンソン・カズンズシステム）への変換式が準備されており（例えば、Tonry et al. 2012）、それらを用いた研究活動を容易に行えるようになっている。しかし、最近設置されたばかりの40 cm鏡の標準測光システムへの変換式は、まだ確立されていない。

銀河系の多くの星は、分子雲から集団で星団として誕生することが知られている（例えば、Shimoikura et al. 2018, 下井倉ほか 2022）。数十個から数百個の若い恒星が不規則に散らばってできる星団を散開星団という。散開星団の星は様々な色をもつので、システム変換式を構築する上で有用である。以前、40 cm鏡を用いて、はくちょう座にある散開星団M29を観測して40 cm鏡のフィルターシステムの性能評価を兼ねた試験観測が行われた（下井倉ほか 2022）。その研究では、同星団の明るい星15個についてPan-STARRS 1カタログからカウンターパートを探し、それらと比較することにより、40 cm鏡のシステム変換係数が簡易的に求められた。しかし、そのときの観測では、不安定な天気による制約のため、システム変換式の色指数 ($B-V$) の1次の項の係数しか求めることができず、定数項は未知のままだった。また、($V-R$) や ($R-I$) といった異なる色指数に対する依存性も、測定することができなかった。

そこで、本研究では40 cm鏡のジョンソン・カズンズシステムへの変換式を構築することを目的として、ぎょしゃ座にある散開星団M36の測光観測を行った。M36の距離は4340光年 (1330 pc) で、年齢は2510万年である（例えば、Wu et al. 2009）。40 cm鏡で検出された全ての星に対してPan-STARRS 1カタログからカウンターパートを探し、これらを比較することで、40 cm鏡システムでの星の色指数 (B_0-V_0), (V_0-R_0), 及び (R_0-I_0) の1次関数としてシステム変換式を求めた。ここで、 B_0 , V_0 , R_0 , I_0 は40 cm鏡システムでの大気圏外等級である。得られたシステム変換式

は、今後の40 cm鏡を利用した研究の基礎資料となることが期待される。

第2章では、40 cm鏡での観測方法や、比較のために使用したPan-STARRS 1のデータについて述べる。観測によって得られた散開星団の星の40 cm鏡での機械等級を大気圏外等級に変換し、さらにPan-STARRS 1のデータと比較して、システム変換式を導出した。第3章では、その解析方法と解析結果について述べる。本論文の結論を、第4章に示す。

2. 観測

2. 1 東京学芸大学の40 cm鏡での観測

本研究の観測に用いた40 cm鏡は、カセグレン式の望遠鏡である。この望遠鏡には、ジョンソン・カズンズシステムに準拠した*BVRI*バンドの4つのフィルターが装備されている。搭載されているCCDカメラの視野は22.7分角×17.0分角、ピクセル分解能は0.409秒角である。データ処理には、IDL (Interactive Data Language) 言語を使用した。観測した散開星団はM36であり、観測日時は2022年10月20日の24h-28h (JST) である。観測日の天候は無風・快晴だった。M36の中心座標を赤経05h36m18.0s, 赤緯34° 08′ 24″ (2000年分点) に設定し、*BVRI*バンドのデータを取得した。観測では、*B*バンドで15秒、*V*バンドで15秒、*R*バンドで13秒、*I*バンドで15秒の露光時間でそれぞれ9枚撮影し、それらをバンド毎に1枚の画像に合成した。また、天頂距離を3° ~ 47° の範囲で計8回撮影した。観測諸元等を、表1にまとめる。また、例として、合成した*B*バンドの画像を図1に示す。

フラット画像とダーク画像は、共にM36の観測を開始する数時間前に取得した。フラット画像は、*B*バンドで170秒、*V*バンドで21秒、*R*バンドで7秒、*I*バンドで9秒の露光時間で、それぞれ10枚ずつ撮影した。ダーク画像は、露光時間1秒で40枚撮影した。また、本研究では、ドーム内部の壁に貼った白いスクリーンを撮影することでフラット画像（ドームフラット）を取得した。撮影したM36の画像からダーク画像を差し引き、同様にダーク画像を差し引いて規格化したフラット画像でそれを割ることで、M36の画像処理を行った（例えば、下井倉ほか 2022）。

表1 M36と観測諸元

観測日時	2022年10月20日 24h-28 h(JST)			
赤道座標	赤経05 ^h 36 ^m 18.0 ^s , 赤緯+34° 08' 24" (2000年分点)			
観測領域	17' × 20'			
星団の距離	4340光年 (1330pc)			
星団の年齢	2510万年			
天頂距離 [°]	3.0,	4.2,	11.3,	19.0, 26.6, 30.4, 39.8, 46.2
天候	快晴・無風			
観測したバンド	B, V, R, I			
露光時間	Bバンド	Vバンド	Rバンド	Iバンド
	15秒	15秒	13秒	15秒 (×9枚)

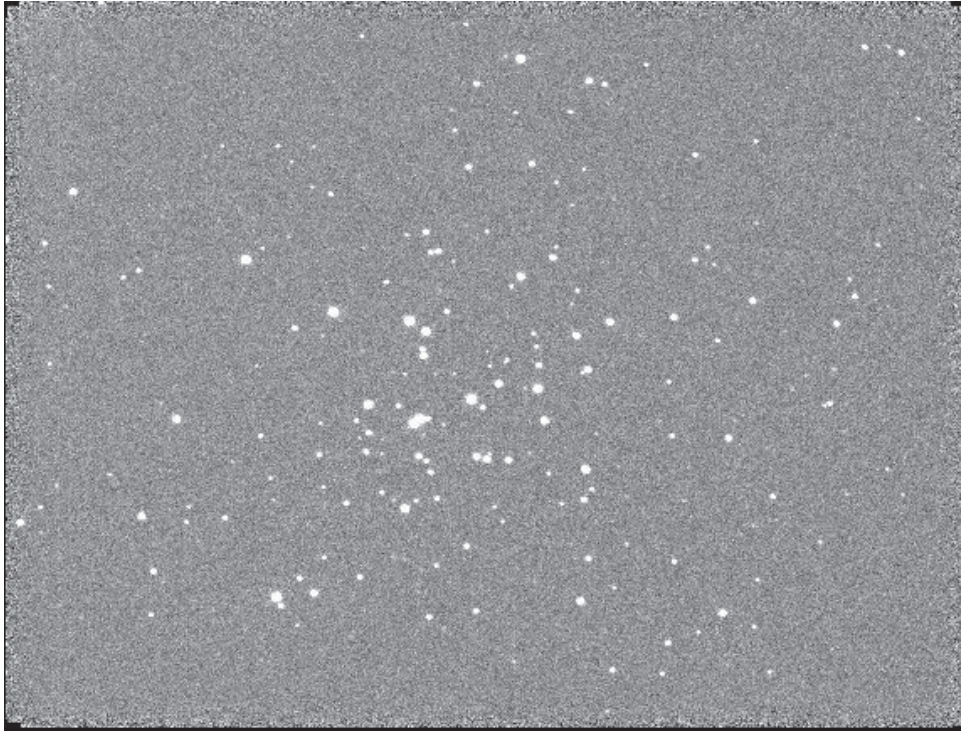


図1 2022年10月20日に40cm鏡で観測したM36 (Bバンド)

2.2 Pan-STARRSとPan-STARRS1 カタログ
 システム変換式の導出は、40cm鏡で得られた星のデータをPan-STARRS (Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System)の公開データと比較して行った。Pan-STARRSは、ハワイ大学天文学研究所, Computing Center, マサチューセッツ工科大学リンカーン研究所, Science Applications International Corporationの共同計画である。口径1.8mの4台の望遠鏡で継続的に全天を観測し、移動天体や突発天体を検出する計画である。現在稼働している望遠鏡は、2008年12月6日にハワイ大学の管理の下で観測が開始された1台だけである。この望遠鏡は、ハワイ州マウイ島のハレアカラ山頂に設置されている。残りの3台の望遠鏡は、今後建設される予定である。また、望遠鏡の設置場所であるハワイから観測できる領域(全天の約3/4)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。現在はその最初のデータであるPan-STARRS1が

世界に公開されている (STScI 2022, 吉田ほか 2019, 富田 2020)。

Pan-STARRS1には *gri* バンドの測光データが収録されており、以下の変換式を用いてジョンソン・カズンズシステムの等級 *BVRI* へ変換することができる (Tonry et al. 2012)。

$$B = g + 0.213 + 0.587 \times (g - r) \quad (1)$$

$$V = r + 0.006 + 0.474 \times (g - r) \quad (2)$$

$$R = r - 0.138 - 0.131 \times (g - r) \quad (3)$$

$$I = i - 0.367 - 0.149 \times (g - r) \quad (4)$$

本研究では、観測した散開星団M36について、Pan-STARRS1の星の等級のデータをダウンロードし、式(1)~(4)を用いてジョンソン・カズンズシステムでの等級 *BVRI* を求めた。

3. 解析と結果

3. 1 40cm鏡の機械等級と大気圏外等級の測定

ある星を地上で観測する場合、図2のように、大気圏外での星の光の強さを A_0 、大気の光学的厚さを τ 、天頂距離を Z とする。また、天頂方向での光学的厚さを τ_0 とし、観測地点での星の光の強さを A_m とする。 A_m 、 A_0 及び τ の間には、以下の関係がある(例えば、安田 2007)。

$$A_m = A_0 e^{-\tau} \tag{5}$$

ここで、 τ 、 Z 及び τ_0 の間には、

$$\tau = \frac{\tau_0}{\cos Z} = \tau_0 \sec Z \tag{6}$$

という関係がある。式(5)、(6)より、次の関係が成り立つ。

$$A_m = A_0 e^{-\tau_0 \sec Z} \tag{7}$$

式(7)の両辺の常用対数をとると、次のようになる。

$$\log A_m = \log A_0 - \tau_0 \sec Z \log e \tag{8}$$

40cm鏡のBバンドで観測された星の機械等級 B_m 及び大気圏外等級 B_0 は、ポグソンの式より、 A_m 及び A_0 と次の関係にある。

$$B_m = -2.5 \log A_m + C \tag{9}$$

$$B_0 = -2.5 \log A_0 + C \tag{10}$$

ここで、 C は定数である。40cm鏡システムでは、 $C = 25$ としている。式(8)~(10)より、

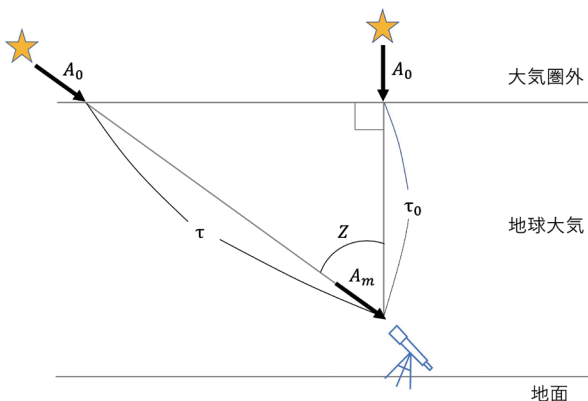


図2 観測される星の光の強さと大気の光学的厚さの関係

$$B_m = B_0 + 2.5 \tau_0 \sec Z \log e \tag{11}$$

となる。ここで、

$$k_B = 2.5 (\log e) \tau_0 = 1.086 \tau_0 \tag{12}$$

なる k_B を、減光係数という。

式(11)、(12)より、以下の関係式を得る。

$$B_m = B_0 + k_B \sec Z \tag{13}$$

様々な天頂距離 Z で星の機械等級 B_m を測定し、横軸を $\sec Z$ 、縦軸を B_m としたプロットを作成する。これをエアマスプロットという。式(13)より、エアマスプロットは切片 B_0 で傾き k_B の1次関数となる。プロットデータを1次関数でフィットすることにより、 k_B と B_0 を求めることができる。例として、M36のBバンドのエアマスプロットを、図3に示す。また、M36のBバンドの減光係数 k_B の頻度分布を、図4に示す。 k_B の平均値と標準偏差は、

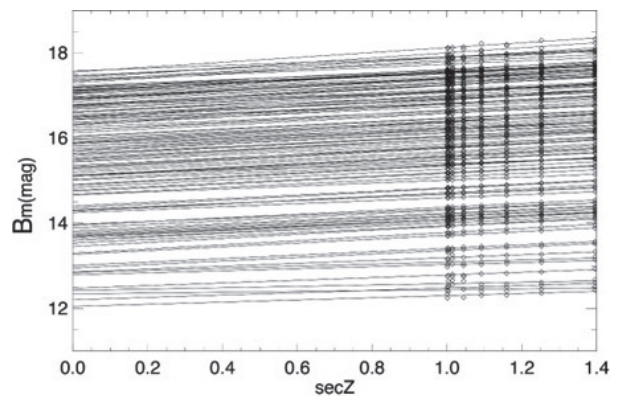


図3 Bバンドのエアマスプロット

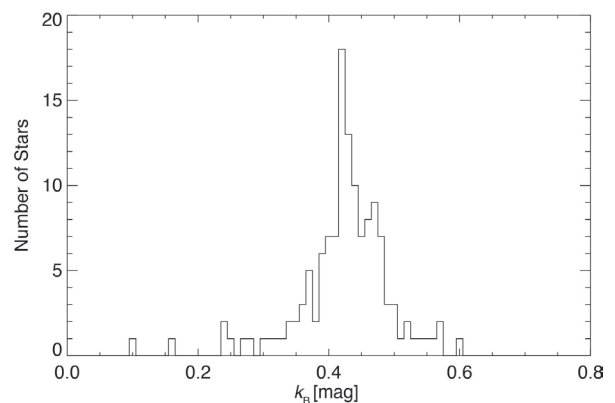


図4 減光係数 k_B の頻度分布

$$k_B = 0.428 \pm 0.071 \quad (14)$$

となった。他のバンドでも式 (13) と同様に、

$$V_m = V_0 + k_V \sec Z \quad (15)$$

$$R_m = R_0 + k_R \sec Z \quad (16)$$

$$I_m = I_0 + k_I \sec Z \quad (17)$$

という関係が成り立つので、各バンドでの減光係数 k_V , k_R , k_I と大気圏外等級 V_0 , R_0 , I_0 をエアマスプロットより求めることができる。得られた VRI バンドの減光係数 k_V , k_R , k_I の頻度分布を、それぞれ図5～図7に示す。各バンドでの減光係数の平均値と標準偏差は、それぞれ次のようになった。

$$k_V = 0.213 \pm 0.080 \quad (18)$$

$$k_R = 0.175 \pm 0.155 \quad (19)$$

$$k_I = 0.111 \pm 0.065 \quad (20)$$

これらの値を、表2にまとめる。

3. 2 システム変換係数の導出

2. 2節の方法でジョンソン・カズンズシステムでの等級 $BVRI$ に変換したPan-STARRS1のデータを、3. 1節で求めた40cm鏡の大気圏外等級 $B_0 V_0 R_0 I_0$ と比較して、40cm鏡システムからジョンソン・カズンズシステムへの変換式を構築する。この変換式は、以下の式 (21) のように色指数 $(B_0 - V_0)$, $(V_0 - R_0)$, 及び $(R_0 - I_0)$ の1次関数として求める。

$$y = \alpha x + \beta \quad (21)$$

ここで、 y はジョンソン・カズンズシステムと40cm鏡システムの等級差 $y = B - B_0, V - V_0, R - R_0$, または、 $I - I_0$ であり、 x は40cm鏡システムでの色指数 $x = B_0 - V_0, V_0 - R_0$ または、 $R_0 - I_0$ である。 α 及び β はシステム変換係数と呼ばれる定数である (上原ほか 2019, 吉田ほか 2019)。それぞれのバンドや色指数でのプロットを図8～図19に示す。また、それぞれの x, y について求めたシステム変換係数 α, β を、表3にまとめる。

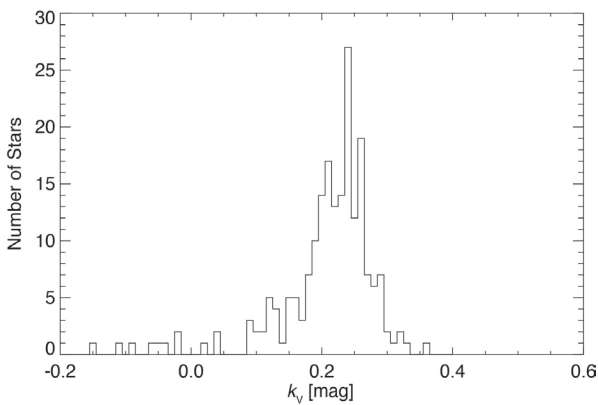


図5 減光係数 k_V の頻度分布

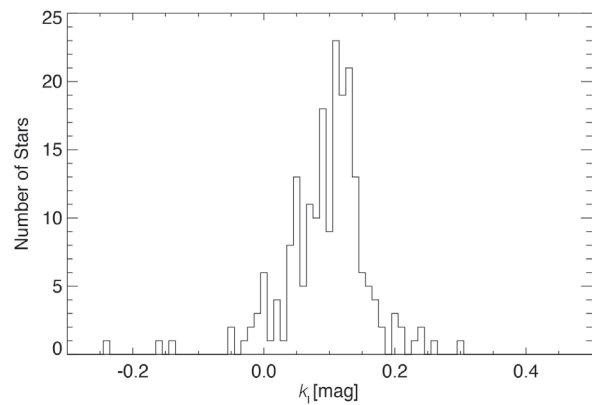


図7 減光係数 k_I の頻度分布

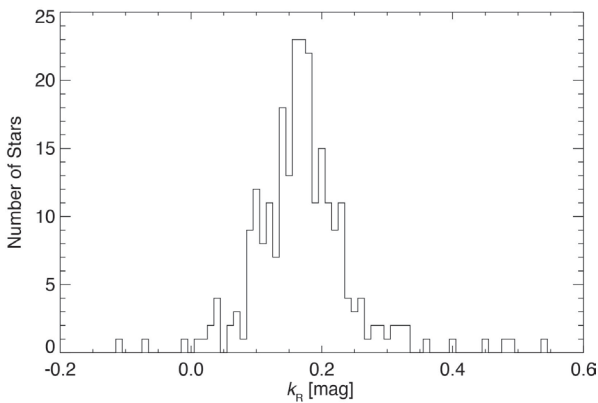


図6 減光係数 k_R の頻度分布

表2 M36の測定時の減光係数

k_B [mag]	0.428 ± 0.071
k_V [mag]	0.213 ± 0.080
k_R [mag]	0.175 ± 0.155
k_I [mag]	0.111 ± 0.065

表3 システム変換係数と色指数の範囲

等級差 y	色指数 x	α	β [mag]	色指数 x の範囲 [mag]
$B - B_0$	$B_0 - V_0$	0.193 ± 0.051	-3.138 ± 0.033	$+0.18 < x < +1.54$
$B - B_0$	$V_0 - R_0$	0.199 ± 0.077	-3.019 ± 0.016	$-0.60 < x < +0.51$
$B - B_0$	$R_0 - I_0$	0.122 ± 0.084	-2.850 ± 0.113	$-1.93 < x < -0.57$
$V - V_0$	$B_0 - V_0$	0.151 ± 0.036	-2.882 ± 0.024	$-0.15 < x < +1.53$
$V - V_0$	$V_0 - R_0$	0.005 ± 0.030	-2.794 ± 0.008	$-0.60 < x < +0.94$
$V - V_0$	$R_0 - I_0$	-0.005 ± 0.035	-2.798 ± 0.045	$-1.93 < x < -0.45$
$R - R_0$	$B_0 - V_0$	0.118 ± 0.058	-3.075 ± 0.038	$+0.15 < x < +1.54$
$R - R_0$	$V_0 - R_0$	0.271 ± 0.039	-3.034 ± 0.010	$-0.60 < x < +0.94$
$R - R_0$	$R_0 - I_0$	-0.119 ± 0.034	-3.147 ± 0.043	$-1.93 < x < +0.28$
$I - I_0$	$B_0 - V_0$	0.052 ± 0.030	-4.636 ± 0.020	$+0.15 < x < +1.54$
$I - I_0$	$V_0 - R_0$	0.002 ± 0.026	-4.609 ± 0.007	$-0.60 < x < +0.94$
$I - I_0$	$R_0 - I_0$	0.035 ± 0.022	-4.565 ± 0.027	$-1.93 < x < +0.28$

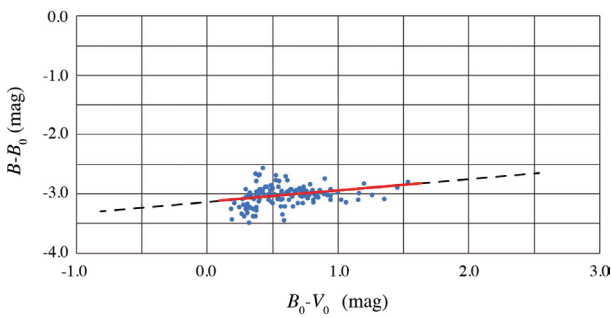


図8 $y = B - B_0$, $x = B_0 - V_0$ のときの
プロットとベストフィット

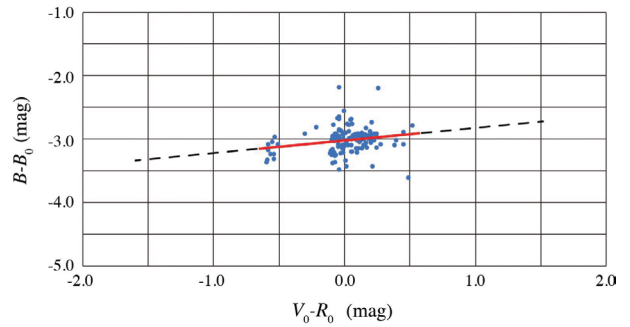


図9 $y = B - B_0$, $x = V_0 - R_0$ のときの
プロットとベストフィット

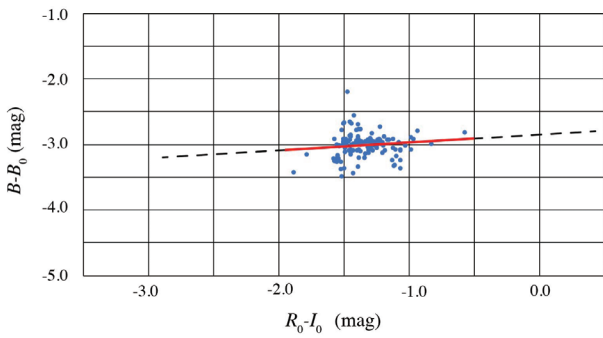


図10 $y = B - B_0$, $x = R_0 - I_0$ のときの
プロットとベストフィット

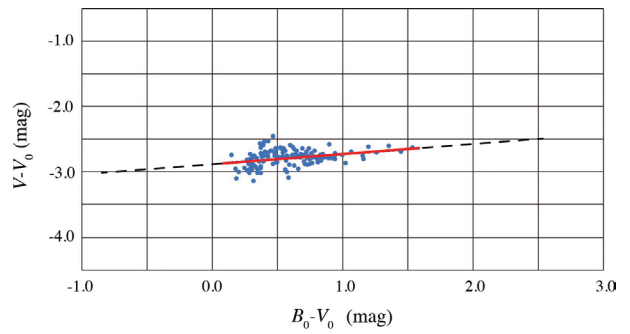


図11 $y = V - V_0$, $x = B_0 - V_0$ のときの
プロットとベストフィット

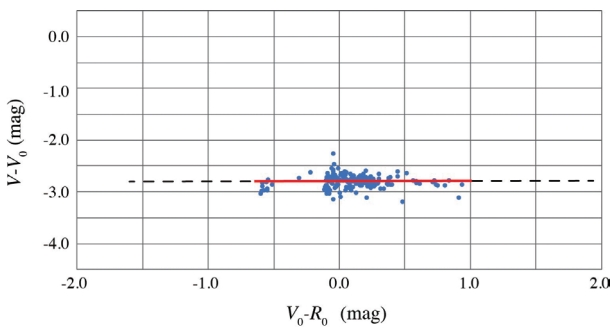


図12 $y = V - V_0$, $x = V_0 - R_0$ のときの
プロットとベストフィット

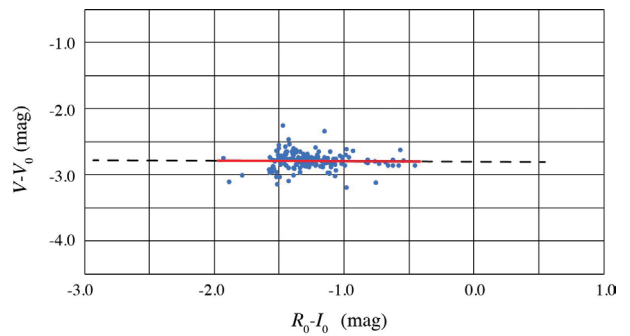


図13 $y = V - V_0$, $x = R_0 - I_0$ のときの
プロットとベストフィット

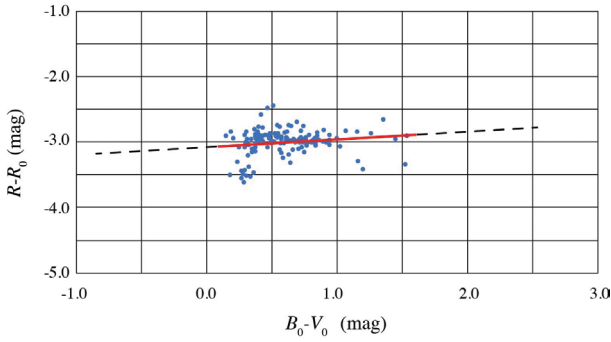


図14 $y = R - R_0$, $x = B_0 - V_0$ のときの
プロットとベストフィット

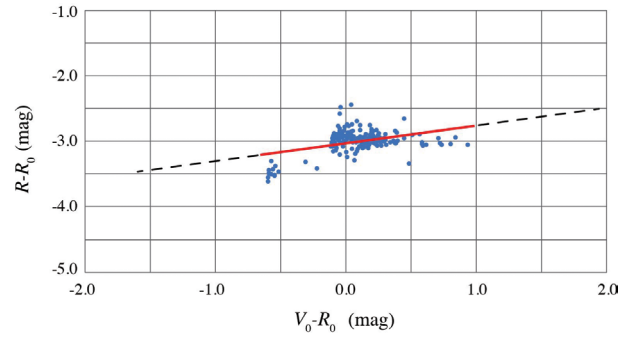


図15 $y = R - R_0$, $x = V_0 - R_0$ のときの
プロットとベストフィット

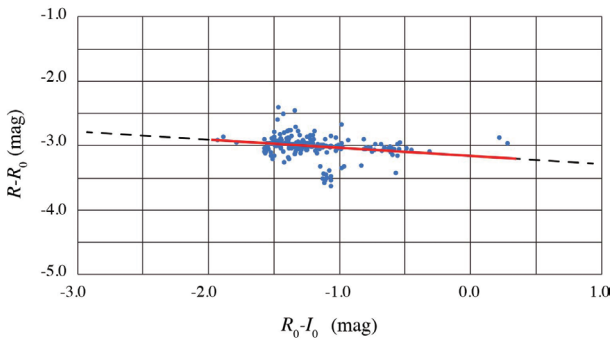


図16 $y = R - R_0$, $x = R_0 - I_0$ のときの
プロットとベストフィット

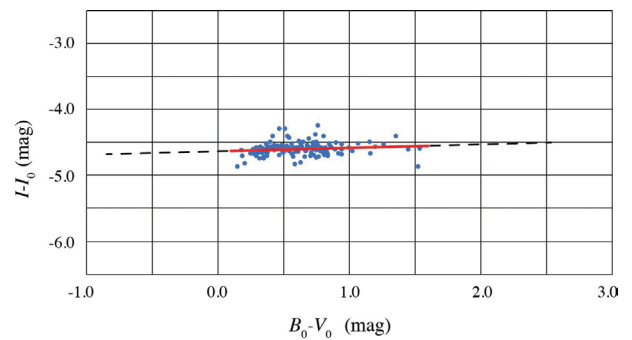


図17 $y = I - I_0$, $x = B_0 - V_0$ のときの
プロットとベストフィット

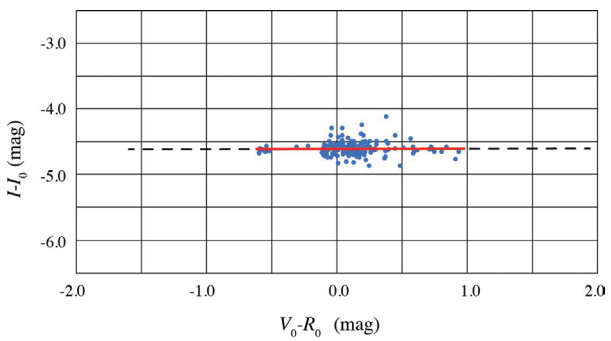


図18 $y = I - I_0$, $x = V_0 - R_0$ のときの
プロットとベストフィット

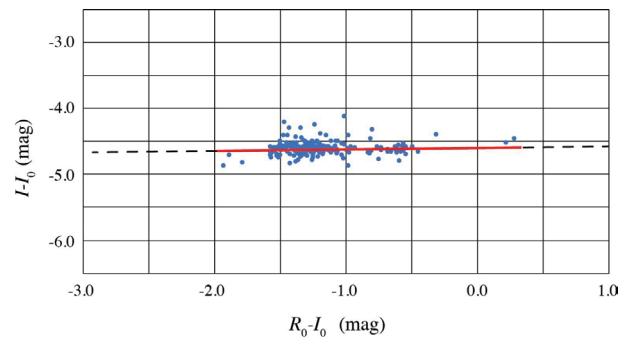


図19 $y = I - I_0$, $x = R_0 - I_0$ のときの
プロットとベストフィット

3. 3 先行研究との比較

本研究で求めたシステム変換係数 α がほぼ0なのは (表3), 40cm鏡のフィルターシステムがジョンソン・カズンズシステム ($BVRI$ バンド) のフィルターに準拠した Astrodon社製のものであるからだと考えられる (土橋ほか 2022)。本研究では, それを確認することができた。

本研究に先立ち, 下井倉ほか (2022) は, 式 (21) で $x = B_0 - V_0$ の色指数に対するシステム変換係数 α を測定した。本研究で求めた α の値は, 下井倉ほか

(2022) が求めた値と誤差の範囲で一致している。本研究では, さらに, β の値も求めることができた。また, $x = B_0 - V_0$ 以外の色指数 ($x = V_0 - R_0, R_0 - I_0$) についても, α と β の値を求めることができた。

4. まとめ

本研究では, Pan-STARRS1 の星の測光カタログを利用して, 40cm鏡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。晴天に恵まれた2022年10月20日の夜のM36のデータから減光係数と星の機械等級を求め、エアマスプロットを作成して、検出した星の大気圏外等級を求めた。これをPan-STARRS1に記載されている星のデータと比較し、*BVRI*バンドについて、40cm鏡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 ($B_0 - V_0$), ($V_0 - R_0$), 及び ($R_0 - I_0$) の1次関数として定式化した。

謝辞

本研究は、カシオ科学財団研究助成 (令和3年度)、放送大学教育振興会助成金 (2021・2022年度)、栢森情報科学振興財団研究助成 (令和3年度)、東京学芸大学連合大学院広域科学教育学研究経費 (令和3・4年度)、村田学術振興財団研究助成 (2022年度)、科学研究費補助金 (Nos.22K18618, 22K02966, 22K18583) の経済的な支援を受けました。ここに感謝致します。

引用文献

- Shimoikura, T., Dobashi, K., Nakamura, F., Matsumoto, T. and Hirota, T. (2018), "A Statistical Study of Massive Cluster-forming Clumps", *Astrophysical Journal*, Vol. 855, pp.59-66
- STScI (2022) <https://outerspace.stsci.edu/display/PANSTARRS/Pan-STARRS1+data+archive+home+page> (最終閲覧日2023年5月25日)
- 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", *Astrophysics Journal*, Vol. 750, id. 99 (14pp).
- Wu, Z.-Y., Zhou, X., Ma, J. and Du, C.-H. (2009), "The orbits of open clusters in the Galaxy", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vo. 399, pp.2146-2164
- 上原隼, 土橋一仁, 吉田悠人, 西浦慎悟, 下井倉ともみ, 直井隆浩 (2019), 「木曾観測所 2kCCD カメラのシステム変換」, 東京学芸大学紀要 自然科学系, Vol.71, pp.57-64
- 川崎優太 (2021), 「東京学芸大学新40cm鏡の制御システムの開発」, 東京学芸大学 修士論文, pp.1-27
- 下井倉ともみ, 浜田麻比呂, 土橋一仁 (2022), 「東京学芸大学40cm望遠鏡による散開星団M29の試験観測」, 東京学芸大学紀要 自然科学系, Vol.74, pp.59-66
- 鈴木海哉, 富田飛翔, 西浦慎悟, 土橋一仁 (2022), 「東京学芸大学新天体観測システムの性能評価—広帯域フィルターと冷却CCDカメラ—」, 東京学芸大学紀要 自然科学系, Vol.74, pp.67-75
- 土橋一仁, 西浦慎悟, 川崎優太, 富田飛翔 (2022), 「東京学芸大学審40cm望遠鏡の特徴と基本性能」, 東京学芸大学紀要 自然科学系, Vol.74, pp.77-84
- 富田飛翔 (2020), 「Pan-STARRSと2MASS PSCを用いた分子雲TGUH2178のダストサイズの研究」, 東京学芸大学教育学部, 卒業論文, pp.1-27
- 富田飛翔, 土橋一仁, 川崎優太, 西浦慎悟 (2022), 「東京学芸大学新40cm望遠鏡の観測システムの開発」, 東京学芸大学紀要 自然科学系, Vol.74, pp.85-93
- 浜田麻比呂 (2022), 「散開星団M29の可視光観測による研究」, 大妻女子大学社会情報学部, 卒業論文, pp.1-23
- 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, 土橋一仁, 上原隼, 西浦慎悟, 遠藤修弘, 平原淳一, 下井倉ともみ, 直井隆浩 (2019), 「広視野カメラKWFCを搭載した木曾105cmシュミット望遠鏡のシステム変換」, 東京学芸大学紀要 自然科学系, Vol.74, pp.49-55