



# 東京学芸大学リポジトリ

Tokyo Gakugei University Repository

## Test Observations of the Open Cluster M29 Using the 40cm Telescope at Tokyo Gakugei University

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2022-12-27 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 下井倉, ともみ, 浜田, 麻比呂, 土橋, 一仁 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2309/00174483">http://hdl.handle.net/2309/00174483</a>

## 東京学芸大学40cm望遠鏡による散開星団M29の試験観測

下井倉ともみ\*<sup>1</sup>・浜田麻比呂\*<sup>1</sup>・土橋 一仁\*<sup>2</sup>

宇宙地球科学分野

(2022年6月27日受理)

SHIMOIKURA, T., HAMADA, M., and DOBASHI, K.: Test Observations of the Open Cluster M29 Using the 40cm Telescope at Tokyo Gakugei University. *Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci.*, **74** : 59-66. (2022) ISSN 2434-9380

### Abstract

We conducted test observations with the 40cm optical telescope at Tokyo Gakugei University to obtain data in the  $B$ ,  $V$ ,  $R_c$ , and  $I_c$  bands of the open cluster M29. We performed aperture photometry of 391 stars that are considered to belong to M29. The mechanical magnitudes of the stars were converted to the standard Johnson-Cousins system by comparing with their counterparts in the Pan-STARRS1 catalog. In order to see possible differences in the constituent stars, we attempted to divide the observed region into four regions according to the distance from the cluster center, and investigated the distributions of star color ( $B-V$ ) and the color-magnitude diagram for each region. However, we found no significant differences in these diagrams among the regions.

**Keywords:** astronomy, telescope, stars, open cluster

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

### 要 旨

東京学芸大学40cm光学望遠鏡を用いた試験観測により、散開星団M29の $B$ ,  $V$ ,  $R_c$ ,  $I_c$ バンドのデータを取得した。M29を構成すると考えられる391個の星の開口測光を行った。そのうち、等級の明るい15個の星についてPan-STARRS1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で、391個の星の標準等級を計算した。構成星のスペクトル型などの特徴が星団内での位置により異なるか否かを調べるために、観測した領域を星団の中心からの距離別に4つの領域にわけ、それぞれの領域で色指数 ( $B-V$ ) の分布と色-等級図を調査した。その結果、構成星の性質に領域による差は見られなかった。

**キーワード:** 天文学, 天体望遠鏡, 恒星, 散開星団

\* 1 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)

\* 2 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)

## 1. はじめに

星は分子雲から誕生する。分子雲は、水素を主成分としたガスと炭素やケイ素等からなる塵が周囲よりも高密度で分布する星間物質の塊である。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）。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。

M29は、はくちょう座の方向に位置する散開星団である。Cygnus OB1アソシエーションと呼ばれる星形成が活発な分子雲と若い星団の複合体に位置する。M29周囲のDSS2サーベイによる可視光画像とWISE衛星による遠赤外線画像を図1に示す。過去の研究では、可視光分光観測により*B*, *V*, *R*, *I*バンド等の等級が測定され、その年齢や距離、構成する星のスペクトル型の推定が行われてきた。それらの結果によれば、M29の年齢は $0.3\sim 5\times 10^6$ 年と推定されており、若い星団であることが示唆されている（Joshi et al. 1983, Straižys et al. 2014）。一方で、Kharchenkoら（2005）によれば約 $1.3\times 10^7$ 年と報告されている。Wang and Hu（2000）らは、M29を構成する100個程度の星の分光観測を行った。彼らによれば、M29を構成する恒星はO7型からK3型であることが報告されている。Wang and Hu（2000）は、M29を構成するメンバーは、O型星が2つ、B型星が全体の40%、A型星が全体の33%、残りがF, G, K型星であると報告した。このうち、HD194378はM29の手前に、またHD229238はM29の後ろに位置し、M29の構成メンバーではないとされている（Straižys et al. 2014）。Straižys（2014）の研究によると、M29の地球からの距離は1540pcと推定されており、本研究ではこの1540pcを採用する。

本研究では、東京学芸大学40cm光学望遠鏡（以後、40cm鏡）を用いてM29の観測を行った。この望遠鏡は2020年3月に東京学芸大学構内に設置され、2021年度より試験的な運用が開始されたばかりである（川崎 2022, 土橋ほか 2022, 富田ほか 2022, 鈴木ほか 2022）。先述のように、M29については分光観測例がいくつかあることから、同星団は40cm鏡のフィルターシステムの性能評価等を兼ねた試験観測に適している。

本論文の第2章では、観測について述べる。第3章では、取得した星の機械等級をJohnson-Cousinsシステムの標準等級に変換する方法について述べる。第4章では、標準等級に変換したデータを用いた結果を示し、M29の特徴を調査する。本論文のまとめを、第5章に示す。なお、本研究は、筆者の一人（浜田）が卒業研究として取り組んだものである（浜田 2022）。

## 2. 観測

観測は、2021年8月4日に行った。40cm鏡はカセグレン式であり、搭載されているCCDカメラの画角は22.7分角×17.0分角、ピクセル分解能は0.409秒角である。この望遠鏡にはJohnson-Cousinsシステムに準拠した*B*, *V*, *R<sub>c</sub>*, *I<sub>c</sub>*の4つのフィルターが装備されている。各フィルターは、観測可能な波長帯（バンド）を持つ。本研究では、望遠鏡の視野の中心座標をM29の赤経（J2000）20h23m50s, 赤緯（J2000）38°30'00"に設定し、M29の4バンドのデータを取得した。

観測では、*B*バンドは20秒露光を10枚、*V*バンドは10秒と20秒露光をあわせて15枚、*R<sub>c</sub>*バンドは10秒露光を5枚、*I<sub>c</sub>*バンドは20秒露光を5枚、それぞれ撮像した。取得した画像は、バンドごとに一枚の画像に合成した。

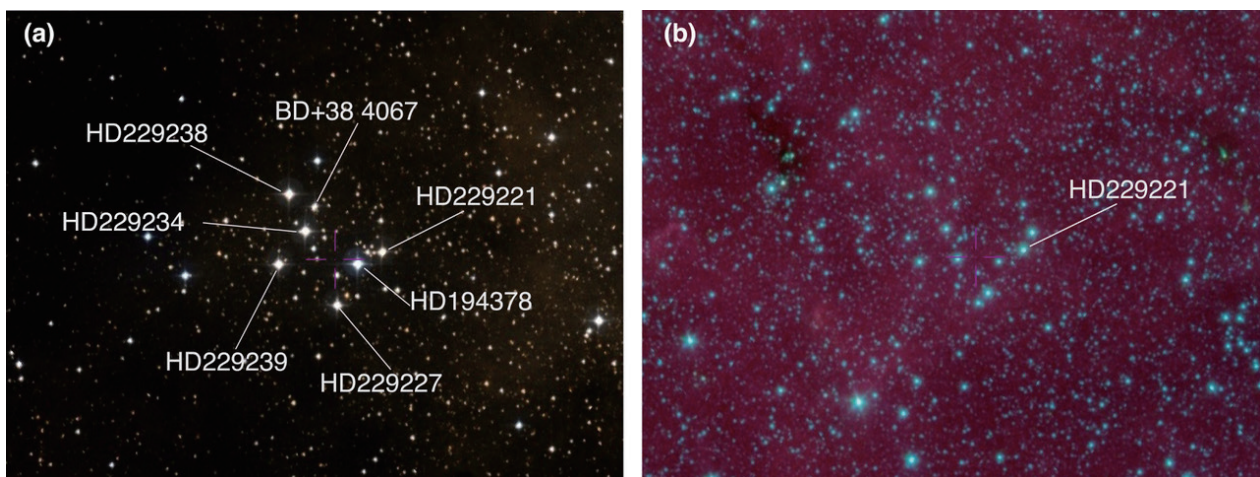


図1 M29周囲の (a) DSSによる可視光画像, (b) WISE衛星による遠赤外線画像



また, フラット画像とダーク画像は, M29の撮影の前後に取得した。CCDカメラの感度が低い*B*バンドについては, 240秒露光を20枚と1秒露光を10枚, *V*バンドは30秒露光を20枚, *Rc*バンドは10秒露光を20枚, *Ic*バンドは15秒露光を20枚撮像した。ダーク画像は, 1秒露光を120枚と5秒露光を40枚撮像した。M29の撮像データと同様に各バンドで合成することで, 4バンドごとのフラット画像とダーク画像を作成した。*Ic*バンドのフラット画像とダーク画像を図2に示す。

CCDカメラは素子ごとに感度にばらつきがあり, それらを補正する為にフラットフィールドを取得する必要がある。本研究では, ドーム内の壁に貼った白いスクリーンから放射される一様な光を観測することでフラットフィールドを取得した。このような方法で取得したフラットフィールドはドームフラットと呼ばれる。また, CCDカメラの撮像では, 熱的に発生する電流(暗電流)によって, 画素ごとにレベルが異なる電荷信号が出力され, 結果として出力画像にノイズが生じる。CCDを冷却することである程度暗電流を抑えることが出来るが, より正確に補正する為に, 暗電流

の画像(ダークフレーム)を取得した。ダークフレームとは, CCDカメラに外部の光が入らないようにした状態でノイズのみを撮影した画像である。通常の解析方法と同様に, M29を撮影した画像からダークフレームを差し引くことでノイズを除去し, さらにフラットフィールドで割ることにより, 画像データを較正した。例として, 得られたM29の*Ic*バンドの画像を, 図3に示す。

解析には, SAOImage DS9<sup>1</sup>とMakali<sup>2</sup>を用いた。いずれも, 研究観測で得られたFITS画像の解析を行うことができるソフトウェアであり, 無償で提供されている。

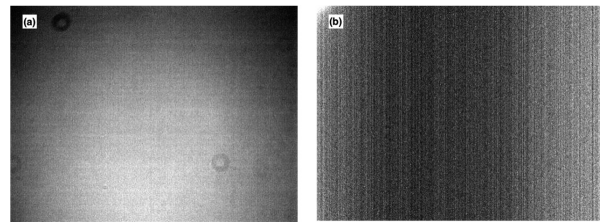


図2 (a) *Ic*バンドのフラット画像, (b) 暗電流画像

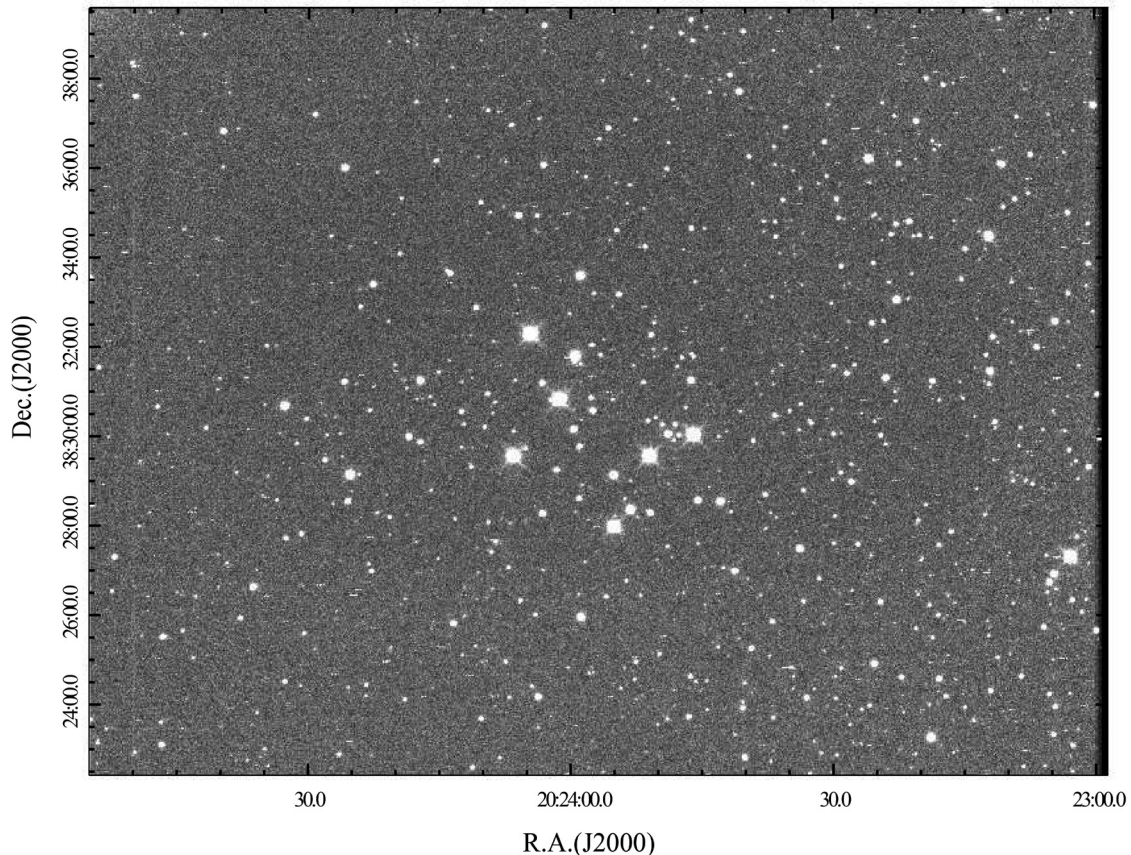


図3 M29の*Ic*バンド画像

<sup>1</sup> <https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimageds9>

<sup>2</sup> <https://makalii.mtk.nao.ac.jp/index.html.ja>

### 3. 取得データの標準等級への変換

この章では、取得した星のカウント値をJohnson-Cousinsシステムの標準等級に変換する作業について述べる。

#### 3. 1 開口測光と大気圏外等級

まず、4バンドそれぞれの画像から星を検出した。その結果、観測した領域で合計391個の星を見つけることができた。次に、これらの星に対して、Makali'iを用いて開口測光を行い、個々の星のカウント値を測定した。

星のカウント値を $D$ とすると、その星の機械等級 $m$ は、次のポグソン (Norman Pogson, 1829-1891) の式より求めることができる。

$$m = -2.5 \log_{10} D + C \quad (1)$$

この式より求めた各バンドでの機械等級を $B_m$ ,  $V_m$ ,  $R_m$ ,  $I_m$ とする。右辺の $C$ は定数で、本研究では $C = 25$ とした。

実際に得られた機械等級 $m$ と、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)  $m_0$ には、次の関係がある。

$$m = m_0 + kF(Z) \quad (2)$$

$k$ は減光係数と呼ばれ、観測時の大気の状態やバンドごとに異なる。ここでは、バンド毎に $k_B$ ,  $k_V$ ,  $k_R$ ,  $k_I$ と表す。各バンドの機械等級と大気圏外等級 $B_0$ ,  $V_0$ ,  $R_0$ ,  $I_0$ の間には、以下のような関係がある。

$$B_0 = B_m - k_B F(Z) \quad (3)$$

$$V_0 = V_m - k_V F(Z) \quad (4)$$

$$R_0 = R_m - k_R F(Z) \quad (5)$$

$$I_0 = I_m - k_I F(Z) \quad (6)$$

ここで、 $Z$ は星の天頂距離であり、 $F(Z)$ は大気の大気量を表す (例えば、吉田ほか 2019)。

#### 3. 2 使用フィルターの波長依存性の確認と標準システムへの変換

次に、40cm鏡に付属されているフィルターとJohnson-Cousinsシステムによるフィルターとの波長依存性の違いを調べた。そのために、 $B_0$ と $V_0$ バンドのデ

ータを用いて、各バンドの標準等級との関係を調べた。

取得した $B$ ,  $V$ ,  $Rc$ バンドによる三色合成図を図4に示す。この図より、見かけの明るい星を15個選び、Pan-STARRS1カタログ<sup>3</sup>よりカウンターパートを探した。選んだ星については図中に赤丸で示した。Pan-STARRS1カタログには、ハワイのハレアカラ天文台に設置の口径1.8m望遠鏡に装備された5つの広帯域フィルター ( $g$ ,  $r$ ,  $i$ ,  $z$ ,  $y$ ) による観測データがまとめられている。図5に、 $g$ ,  $r$ ,  $i$ と本研究で取り扱うJohnson-Cousinsシステムの $B$ ,  $V$ ,  $R$ ,  $I$ バンドの関係を示す (Kostov and Bonev 2018)。

本研究では選んだ15個の星について、Pan-STARRS1カタログからそれぞれ1" 内に一致する星を探した。次に、Pan-STARRS1カタログにまとめられた各星の $g$ ,  $r$ ,  $i$ バンドの測光平均値を取得し、以下の式より、Johnson-Cousinsシステムの標準等級 $B_p$ ,  $V_p$ ,  $R_p$ ,  $I_p$ に変換した (Tonry et al. 2012, 上原ほか 2019)。

$$B_p = g + 0.213 + 0.587 (g - r) \quad (7)$$

$$V_p = r + 0.006 + 0.474 (g - r) \quad (8)$$

$$R_p = r - 0.138 - 0.131 (g - r) \quad (9)$$

$$I_p = i - 0.367 - 0.149 (g - r) \quad (10)$$

40cm鏡のシステムの大気圏外等級 ( $B_0$ ,  $V_0$ ,  $R_0$ ,  $I_0$ ) は、それぞれ以下のシステム変換式に従うものとする。

$$B_p = B_0 + \alpha_B (B_0 - V_0) + \beta_B \quad (11)$$

$$V_p = V_0 + \alpha_V (B_0 - V_0) + \beta_V \quad (12)$$

$$R_p = R_0 + \alpha_R (R_0 - I_0) + \beta_R \quad (13)$$

$$I_p = I_0 + \alpha_I (R_0 - I_0) + \beta_I \quad (14)$$

ここで、 $\alpha_B$ ,  $\alpha_V$ ,  $\alpha_R$ ,  $\alpha_I$ 及び $\beta_B$ ,  $\beta_V$ ,  $\beta_R$ ,  $\beta_I$ はシステム変換のための係数である。式(11)~(14)に式(3)~(6)を代入すると、以下の式を得る。

$$B_p - B_m = \alpha_B (B_m - V_m) + \alpha_B (k_B - k_V) F(Z) + \beta_B \quad (15)$$

$$V_p - V_m = \alpha_V (B_m - V_m) + \alpha_V (k_B - k_V) F(Z) + \beta_V \quad (16)$$

$$R_p - R_m = \alpha_R (R_m - I_m) + \alpha_R (k_R - k_I) F(Z) + \beta_R \quad (17)$$

$$I_p - I_m = \alpha_I (R_m - I_m) + \alpha_I (k_R - k_I) F(Z) + \beta_I \quad (18)$$

例として、式(15)の関係を、図6に示す。図からわかる通り、 $B_p - B_m$ 対 $B_m - V_m$ には、はっきりした相関関係は見取れない。 $V_p - V_m$ 対 $B_m - V_m$ 等の他のバンドにつ

<sup>3</sup> Pan-STARRS Catalog Search, <https://catalogs.mast.stsci.edu/panstarrs/>



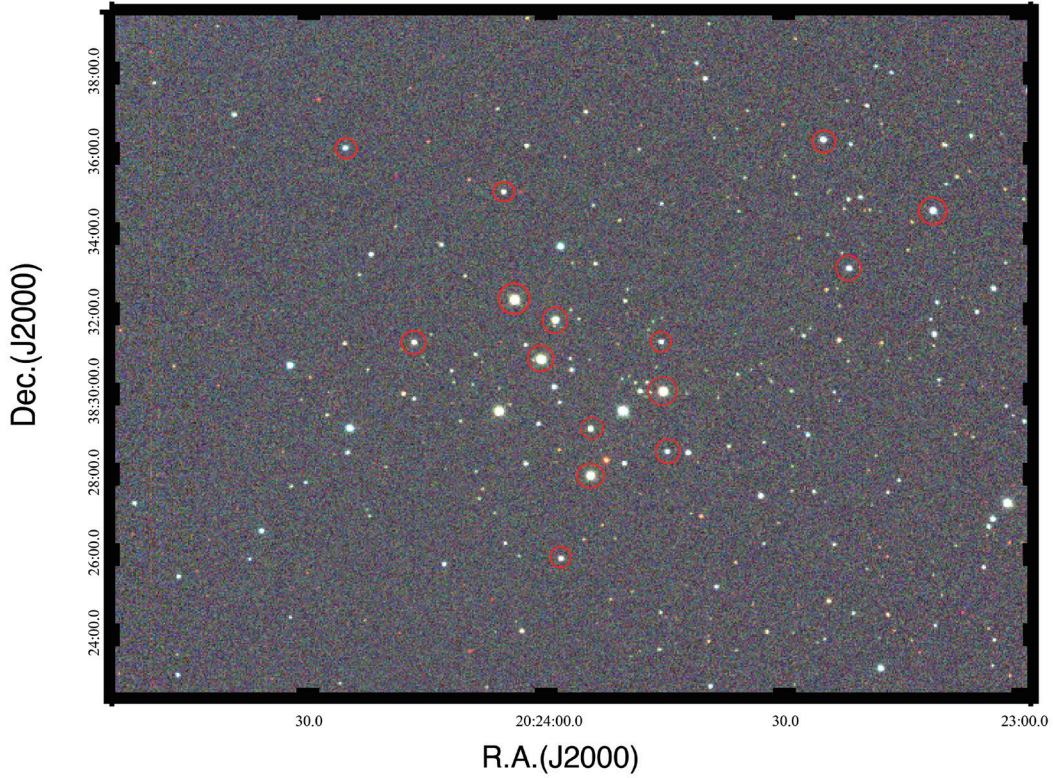


図4 M29のB, V, Rcバンドによる三色合成図。赤丸で囲んだ星はPan-STARRS1カタログでカウンターパートを探した15個の星

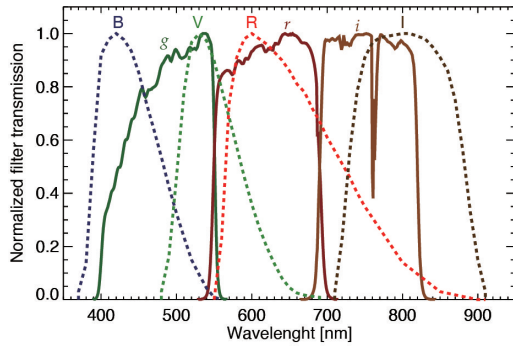


図5 Johnson-CousinsシステムBVRIとPan-STARRS1によるg, r, iフィルターの透過率。Kostov and Bonev (2018) のFig.1より

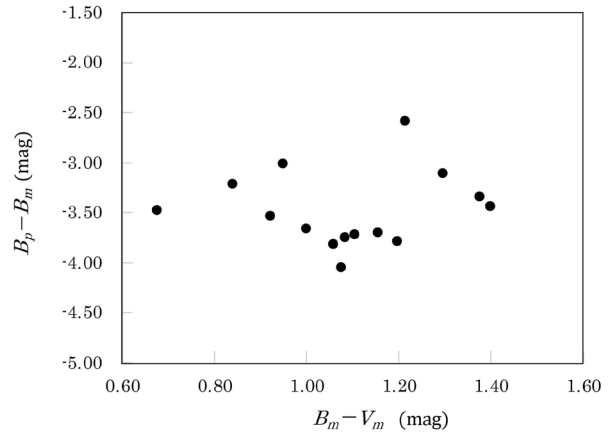


図6  $B_m - V_m$ と $B_p - B_m$ の関係

いても同様である。よって、ここでは機械等級での星の色に関する係数 ( $\alpha_B$ や $\alpha_I$ ) を0と仮定する。また、M29の各バンドでの撮像時間は合計で数分程度であったので、その間のZはほとんど変わらないものとして、式(15)~(18)の右辺の第2項と第3項を定数とみなすことにする。

以上のように仮定し、機械等級から標準等級への変換式を

$$B_p = B_m + C_B \quad (19)$$

$$V_p = V_m + C_V \quad (20)$$

$$R_p = R_m + C_R \quad (21)$$

$$I_p = I_m + C_I \quad (22)$$

とすることにした。ここで、 $C_B$ ,  $C_V$ ,  $C_R$ ,  $C_I$ は定数である。本研究では、開口測光を行った319個の星のデータをもとに、式(19)~(22)の $C_B$ ,  $C_V$ ,  $C_R$ ,  $C_I$ を求めた。

#### 4. 結果及び考察

標準等級に変換した $B_p$ ,  $V_p$ ,  $R_p$ ,  $I_p$ データを用いて、ヘルツシュプルング・ラッセル図(以後、HR図)を作成した。縦軸に $B_p$ ,  $V_p$ , 横軸に色指数 $B_p - V_p$ と $V_p - I_p$ を用いたHR図をそれぞれ図7に示す。色指数とは、異なるバンドで測定された等級の差である。図7(c)に

示した $B_p - V_p$ と $V_p$ によるHR図をSchmidtke and Hunter (2020)の結果と比較し、図中に示したHD229221の等級が同程度であること、また、HR図の分布についても彼らと同様の結果が得られたことを確認した。

M29の特徴を調べるため、得られた色指数 $B_p - V_p$ を1.5 magごとに分け、それぞれが天球上でどのように分布しているのかを調べた。その結果を図8に示す。色指数の大きい赤色で示した星は、図の外側に分布しているように見えるが有意な数ではない。色指数が-1

から2mag (黄色・緑色)の星は、領域全体に散らばっている。色指数の小さい青色で示した星は、数が少ないため、傾向は明らかではない。以上の結果からは色指数の分布に明らかな偏りは見られない。

次に、以下の式により標準等級 $V_p$ を絶対等級 $M_v$ に変換した。

$$V_p - M_v = 5 \log_{10} d - 5 \quad (23)$$

ここで、 $d$ はM29の距離 (pc) である。本研究では1540pc (Straižys et al. 2014) を用いた。

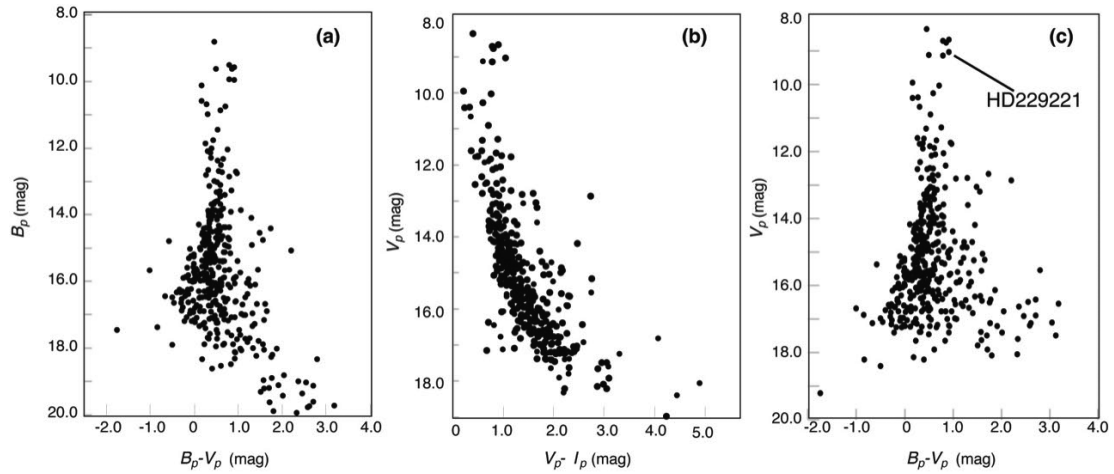


図7 HR図。(a)  $B_p$  対  $B_p - V_p$ , (b)  $V_p$  対  $V_p - I_p$ , (c)  $V_p$  対  $B_p - V_p$

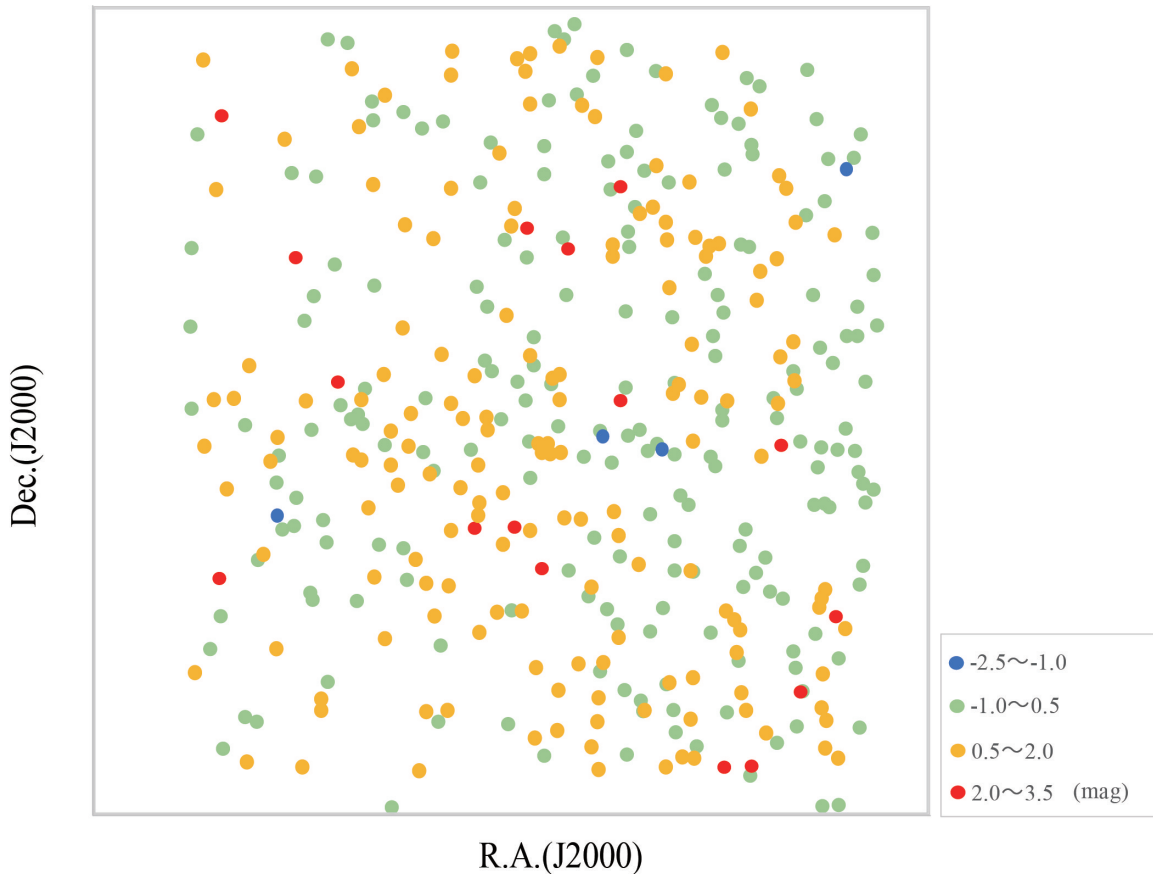


図8 色指数 $B_p - V_p$ を1.5 magごとに分けた391個の星の天球上での分布図



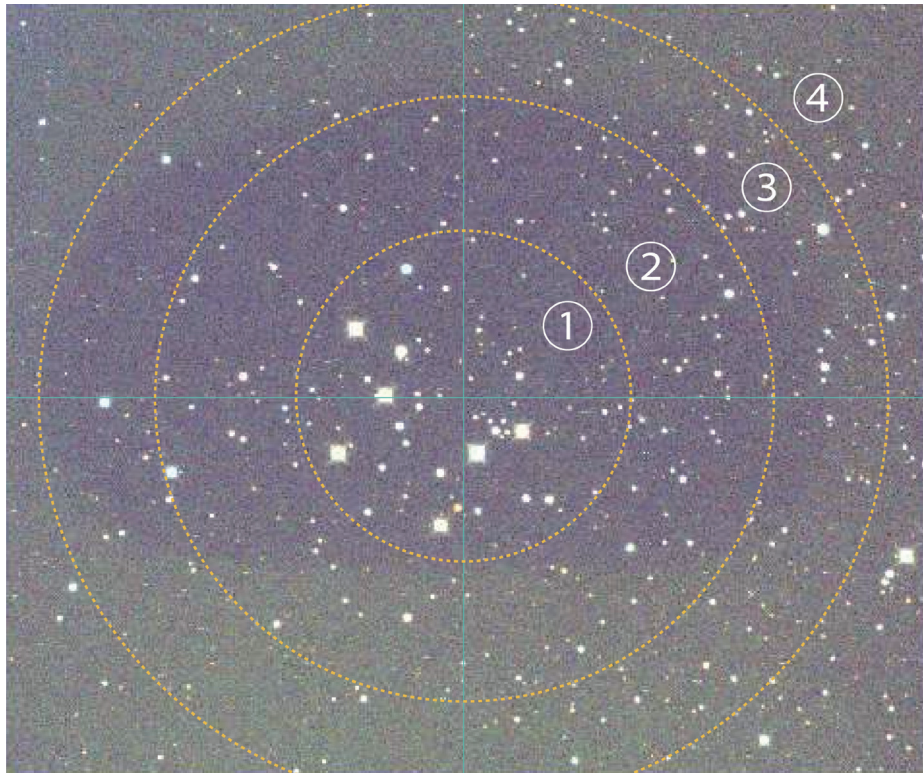


図9 解析のために分けた4つの領域①~④。各領域は、画像の中心（緑の線の交点）から異なる距離に円環状に設定した

絶対等級を用いたHR図を色-等級図（Color-Magnitude diagram, 以後, CM図）という。M29を構成する各恒星が領域によってCM図での分布に差があるか調査した。このために、図9に示すように、観測した領域の中心を中心からの距離ごとに4つの領域に分けた。Wang and Hu (2000) らによれば、M29を構成する恒星のスペクトル型は、O7型からK3型まで様々であり、図9の中心付近にはO・B型星が集中している。領域ごとに色を分けてCM図を作成した結果を、図10に示す。図からは、領域によるCM図の分布に大きな差は見られないことが分かった。また、この図に主系列（国立天文台 2021, 西浦・柏木 2007）をプロットしてM29の転向点を探した。転向点は主系列を離れる点であり、CM図上の主系列からの折れ曲がりとして見られる。図10からは、転向点をはっきり同定することはできなかった。

## 5. まとめ

- (1) 東京学芸大学の40cm鏡を用いて散開星団M29の試験観測を行った。M29の*B*, *V*, *Rc*, *Ic*バンドのデータを取得した。
- (2) 取得したデータより391個の星の開口測光を行った。見かけ上明るい星を15個選び、それらに対

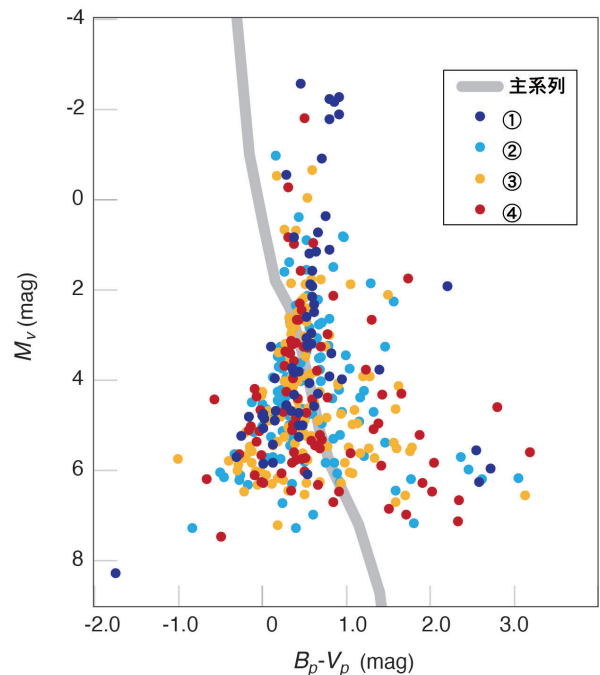


図10 CM図。図9で分けた領域ごとにプロットの色を変えてある。灰色の線は主系列星の並びを示す(国立天文台 2021, 西浦・柏木 2007)

応する星をPan-STARRS1カタログから探した。Pan-STARRS1の*g*, *r*, *i*バンドのデータを用いて15個の星の等級をJohnson-Cousinsシステムの標準等級に変換し、40cm鏡のデータと比較した。その結果、40cm鏡の*B*, *V*, *Rc*, *Ic*バンドのフィルターの波長



依存性が、Johnson-Cousinsシステムと等価であることを確認した。その後、開口測光した全ての星を標準等級に変換した。

(3) 標準等級に変換したデータを用いて、M29のHR図を作成した。M29の中心からの距離の違いによる構成星の違いを調べるために、星団の中心からの距離別に観測領域を4つに分け、領域ごとに色一等級図を作成した。その結果、星団の構成星の種類に領域間で大きな差は見られなかった。

### 謝辞

本研究は、JSPS科研費22K02966及び栢森財団研究助成金K33研X X VI第584・591号の助成を受けたものです。40cm鏡の開発・維持には、放送大学教育振興会助成金(2021年度)、カシオ科学振興財団研究助成金(助39-52)、東京学芸大学連合大学院広域科学教科教育学研究経費(令和3年度)の資金的な援助を受けました。ここに感謝致します。

### 引用文献

- Joshi, U. C., Sanwal, B. B., and Sagar, R. (1983), "Photometry of the open cluster NGC 6913", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 35, pp.405-412.
- Kharchenko, N. V., Piskunov, A. E., Röser, S., Schilbach, E., and Scholz, R.-D. (2005), "Astrophysical parameters of Galactic open clusters", *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 438, pp.1163-1173.
- Kostov, A., and Bonev, T. (2018), "Transformation of Pan-STARRS1 gri to Stetson BVRI magnitudes. Photometry of small bodies observations", *Bulgarian Astronomical Journal*, Vol. 28, p.3.
- Schmidtke, P., and Hunter, T. (2020), "A Photometric H  $\alpha$  Survey of the Open Cluster M29", *Research Notes of the AAS*, Vol.4, id.193.
- Shimoikura, T., Dobashi, K., Nakamura, F., Matsumoto, T., and Hirota, T. (2018), "A Statistical Study of Massive Cluster-forming Clumps", *Astrophysical Journal*, Vol.855, id.45 (28pp).
- Straizys, V., Milašius, K., Boyle, R. P., Vrba, F. J., Munari, U., Walborn, N. R., Černis, K., Kazlauskas, A., Zdanavičius, K., Janusz R. (2014), "THE ENIGMA OF THE OPEN CLUSTER M29 (NGC 6913) SOLVED.1.", *Astronomical Journal*, Vol.148, id.89 (9pp).
- 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).
- Wang, J.-J. and Hu, J.-Y. (2000), "Spectral classification and reddening in the young open cluster NGC 6913", *Astronomy & Astrophysics*, Vol.356, pp.118-126.
- 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.
- 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.
- 国立天文台 (2021), 理科年表, 丸善出版, p.124.
- 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.
- 土橋一仁, 西浦慎悟, 川崎優太, 富田飛翔 (2022), 「東京学芸大学新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.
- 西浦慎悟, 柏木雄太 (2007), 「天文ソフトの活用(3)ヘルツシュプリング・ラッセル図の描き方—マカリイとOpen Office Orgを使って」, *天文教育*, Vol.22, pp.35-42.
- 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.
- 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.71, pp.49-55.