

M67 を使ったなゆた望遠鏡可視光撮像装置 MINT および 60cm 反射望遠鏡 ST-9 の測光較正観測

山中雅之¹、内藤博之²、定金晃三¹

1) 大阪教育大学教育学研究科

2) 兵庫県立西はりま天文台

Photometric Calibrations of NAYUTA imager MINT & 60cm reflector ST-9 CCD using M67

Masayuki YAMANAKA¹, Hiroyuki NAITO² and Kozo SADAKANE¹

1) *Astronomical Institute, Osaka Kyoiku University, Kashiwara-shi, Osaka, 582-8582, Japan*

2) *Nishi-Harima Astronomical Observatory, Sayo-cho, Hyogo, 679-5313, Japan*

E-mail: j069626@ex.osaka-kyoiku.ac.jp

(Received 2007 October 12)

概要

なゆた望遠鏡可視光撮像装置 MINT および 60cm 反射望遠鏡 ST-9 CCD の B、V、Rc、Ic フィルターを用いて測光標準星を含む散開星団 M67 の撮像観測を行った。各バンドの観測から求めた機械等級から両観測システムの色変換式を求めた。二つのシステムで得られた変換係数は、B バンドで機械等級と標準等級の間に大きな違いがあることが確認された。今回求めた色変換係数を用いて、機械等級を標準的な B、V、Rc、Ic システムの等級に変換することが可能となった。

Abstract

We observed secondary photometric standard stars in M67 through B, V, Rc, and Ic filters with the MINT imager of the NAYUTA telescope and a ST-9 CCD camera of the 60cm reflector. Using instrumental magnitudes in each band, we obtained the color transformation equations for the four bands for both observing systems. Among the coefficients of the color terms obtained for the two systems, significant differences between observed magnitudes and standard magnitudes were found only in B band. By using the obtained coefficients of the color terms, we can transform instrumental magnitudes into the standard B, V, Rc and Ic magnitudes.

Key words: photometric calibration – open cluster – M67

1. はじめに

サイエンスの有益な情報を得るための可視域での天体の撮像観測は、通常カラーフィルターを通して行われる。西はりま天文台ではST-9 CCDの取り付けられている60cm反射望遠鏡、可視光撮像装置(MINT)の取り付けられているなゆた望遠鏡により可視撮像観測を行うことができる(尾崎 2005)。これら二つの装置にはともにJohnson Kron-Cousin systemに従うB、V、Rc、Icフィルターが取り付けられている。しかし、各フィルターは必ずしも同じ透過率特性を示すわけではなく、各観測システムごとに実際的な透過効率は異なる。さらに、使われているCCDの波長感度特性はカメラによって異なる。仮に異なる観測システムで同じ天体を測光した場合、結果に系統的な誤差が生じてしまう。

とりわけ複数のシステムで一つの天体を対象として測光的研究を行う場合には、このような系統誤差を消去し、標準系への変換を行うため変換係数をあらかじめ求めておくことが必要となる。実際の天体の測光観測で等級を決定するときには、非常に空の安定した状態で標準星と目的天体の天頂距離が等しくなるよう観測を行う。その後、得られた標準星と天体の機械等級、標準星の既知の等級から得た変換係数を用いて天体や同じ視野の比較星の等級を決める。理屈としては異なる観測システムの系統誤差を解消できるようになるはずである。したがって、機械等級を標準等級に変換することが可能になるよう、それぞれの装置で変換係数を決めておく必要がある。最も理想的な変換係数の決定方法は、Landolt (1992) で挙げられている赤道帯標準星と呼ばれる天体の観測を行い、測光することである。しかし今回は以下のような理由で、赤道帯標準星に準じてStetson があげた第二次標準星リスト¹ からM67を観測対象に選んだ。

M67はかに座にある比較的古い星から構成される散開星団である(Fig. 1)。したがって球状星団に比べ星の配置がばらばらしている。“熊の爪”と呼ばれるこの領域には9等~14等の明るさの星が色指数が $B-V$ で $-0.2 \sim 1.4$ の範囲で分布している。数十センチメートルクラスからメートルクラスの望遠鏡で観測が可能であり、今回求めた60cm反射望遠鏡となゆた望遠鏡の変換係数を比較するのに適している。またLandolt (1992) による標準星は天の赤道にそって広く分布しているが、M67は一度に観測できる範囲に星が多数分布している。天気の変わりやすい日本においては、一度に観測できる天体が較正観測に適している。

なお60cm望遠鏡、なゆた望遠鏡の測光システムの変換係数を求める前に、すでに1995年に変換係数の決められている大阪教育大51cm反射望遠鏡でも予備的にM67の観測を行い、改めて係数を求め直した。

2. 観測とリダクション

M67は赤経08時50.5分、赤緯 $+11^{\circ}49'$ (2000年分点)に20分角以上に渡って広がっている。今回は特にFig. 1で示される領域を撮像観測した。なゆた望遠鏡のカセグレン焦点に据え付けられている可視光撮像装置(MINT)の観測は、世界時2007年2月11日に行われた。フィルターはJohnson Cousins システムによるB、V、Rc、Icバンドを用いた。Bバンドでは15秒、V、R、Iでは3秒の露出時間で10枚ずつの撮像データの取得に成功した。同じく、60cm反射望遠鏡でもB、V、Rc、Ic、4バンドで2月11日に観測を行った。それぞれBバンドで30秒、150秒、Vバンドで5秒、45秒、Rバンドで3秒、30秒、Iバンドで3秒、30秒の露出時間で撮像を行った。

リダクションはIRAF²により標準的な方法を用いてバイアス引き、フラット処理、トリミングを行った。さらにskyの分散を下げS/N比を稼ぐべく、それぞれのバンド、露出時間ごとの画像を位置あわせした後、合成した。合成は中央値を用いた。測光はIRAFを使ってaperture photometryを行った。M67はFig.1

¹ <http://www4.cadc-ccda.hia-ihp.nrc-cnrc.gc.ca/community/STETSON/standards/>

² IRAF is distributed by the National Optical Astronomy Observatories, which are operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under cooperative agreement with the National Science Foundation.

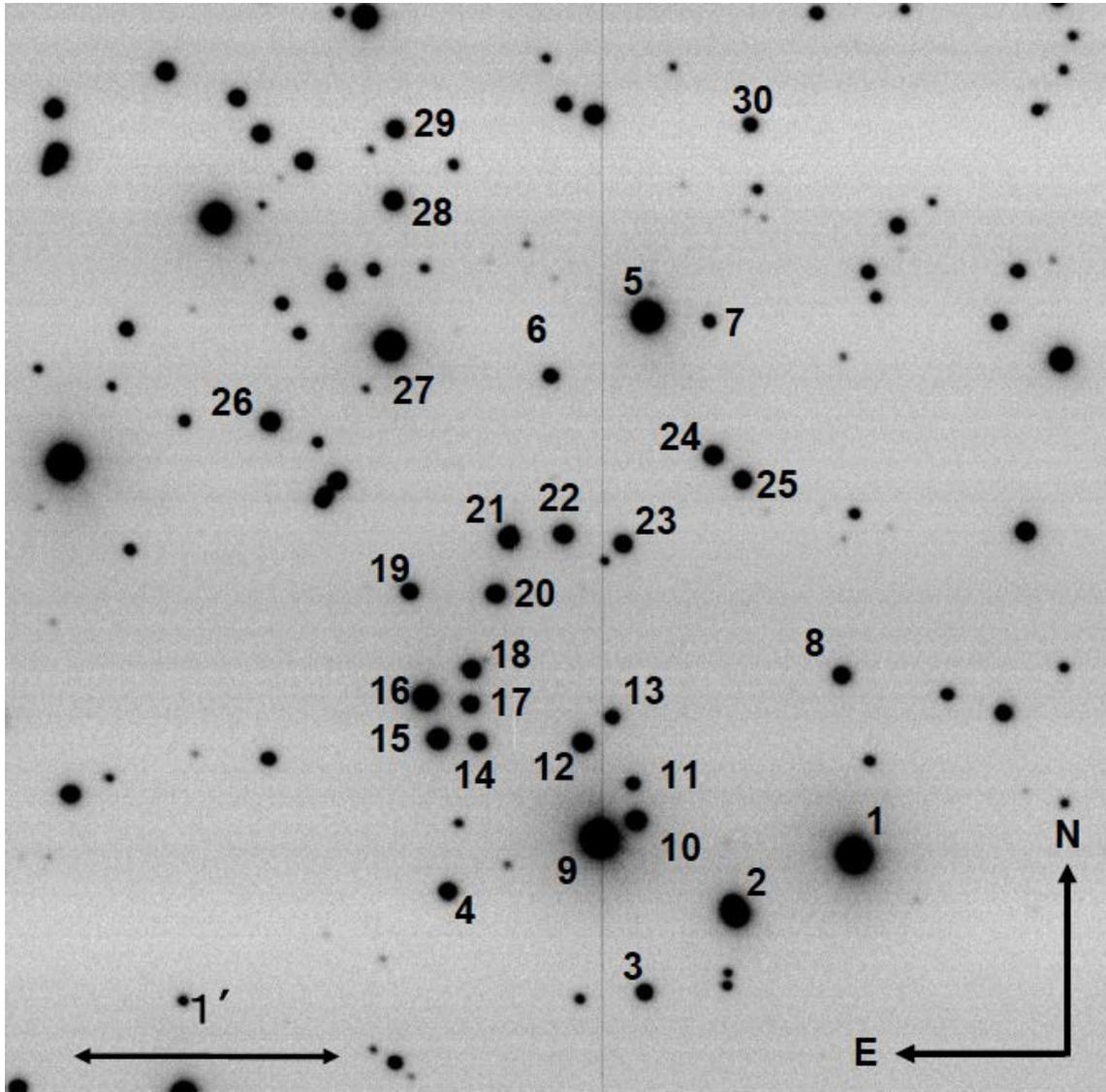


Fig. 1. なゆた望遠鏡 + 可視光撮像装置 MINT により撮られた M67 の V バンドのイメージである。番号は Chevalier & Ilovaisky (1991) の ID に従って付記した。

に示す通り星の込み入った散開星団である。Chevalier & Ilovaisky (1991) で用いられている 14 等台より明るい 30 個の星を測光の対象とした。Fig. 1 に測光した星の傍に ID を付記している。

60cm 反射望遠鏡では星像の半径がおよそ 3.0 になっている。このため測定する星の近くに設置する円環状の sky 領域の中に近くの星の像が重なってしまうものがいくつかあった。このような星は、60cm 反射望遠鏡システムの変換係数を求める上では除外した。一方、なゆた望遠鏡では FWHM がおよそ 2.0 と星の像が絞れている。したがって今回測光した星のうちで、sky 領域に他の星の像が入り込むような星はほとんど見られなかった。

また、通常込み入った星団のような点源の測光には Point Spread Function (PSF) 測光を用いるのが良いとされている。PSF 測光とは測光対象の星と同じ視野内の星をいくつか用いて標準的な PSF を作り、それを測光対象の星にそれぞれにスケールングして行う測光方法である。この方法には測光対象の星の sky の値は反映されない。しかし、今回なゆた望遠鏡を用いて観測された M67 は比較的明るい星を飽和させないよう、フォーカスを甘くして観測を行った。なゆた可視撮像では理想的なシーイングサイズが 1.2 (4.0 pix) となるところをおよそ 2.1 (6.3 pix) として観測した。このため得られた星の像はピクセルに対してオーバーサンプリングとなり、測光対象の星に PSF スケールングが十分できなくて測光した後の星像の取りこぼしが大きくなった。そこで今回は 60cm 反射望遠鏡、なゆた望遠鏡ともにシーイングサイズに依らない aperture photometry を採用することにした。なお、予備測光に用いた大阪教育大 51cm で撮られた M67 に関しては PSF 測光を行っている。

3. 解析と結果

測光した星の機械等級はすべて 1 秒当たりのフラックスに換算した等級とした。60cm 反射望遠鏡のデータについては、長時間露光において CCD が飽和を起こしていない星と短時間露光で撮った星の平均等級を出した。長時間露光において飽和を起こした星は、飽和していない星の長時間露光と短時間露光の等級差の平均値の半分を短時間露光のデータに足しなおした。さらに、単一の露出時間でしか観測していないなゆたのデータでは Rc、Ic において飽和を起こしていると考えられる ID 5 の星を除外した。60cm 反射望遠鏡では、星の sky に他の星の像が入り込み正しい等級が与えられない星は除外した。また、このほかにも変光星の疑いのある ID 7 の星は除外した。こうして得られた機械等級を B、V、Rc、Ic に対応して b 、 v 、 r 、 i として以下の変換式を立てる。

$$B = b + k_1(B - V) + c_1 \quad (1)$$

$$V = v + k_2(B - V) + c_2 \quad (2)$$

$$V = v + k_3(V - R) + c_3 \quad (3)$$

$$R = r + k_4(V - R) + c_4 \quad (4)$$

$$R = r + k_5(R - I) + c_5 \quad (5)$$

$$I = i + k_6(R - I) + c_6 \quad (6)$$

上記 6 つの式において係数 $k_1 - k_6$ が本研究において最終的に求めたい標準等級への変換係数である。 $c_1 - c_6$ は露出時間により変えることのできる任意の定数である。いくつかの文献から、今回測光した星の標準等級を参照してこれらの係数を最小二乗法を使って求めた。用いた標準星の等級は Chevalier & Ilovaisky (1991)、Gilliland et al. (1991)、Anupama & Kembhavi (1994) から参照した。

予備的な作業として大阪教育大 51cm 反射望遠鏡で改めて M67 を観測し、変換係数を求め直し、1995 年の結果と比較した (有本、定金 1995)。すべての変換係数でほぼ 3σ 以内で一致している。このことから CCD、

フィルターなど感度効率に有意な経年変化は見られなかったことが示唆される。なゆた、60cm についても同じ参考文献を使って変換係数を求めた。Fig. 2 - Fig. 4 に 60cm 反射望遠鏡、Fig. 5 - Fig. 7 になゆた望遠鏡のデータを用いた最小二乗法による直線フィッティングの結果を示す。Table 1、2 に 60cm および、なゆたで得られた変換係数の結果をまとめて示している。

二つの望遠鏡の異なる観測システムではやはり、各々の変換係数に有意な違いが見られる。特に CCD の感度があまり良くない B バンドでは傾きが比較的大きく、60cm がおおよそ $k_1 = 0.26$ 、なゆたが $k_1 = 0.27$ である。これは、赤い星を B バンドで撮影するときに系統誤差が大きく見込まれることを意味する。例えば $B - V = 2.0$ もの非常に赤い天体をこれらの望遠鏡で測光観測し等級を求める場合、機械等級との違いが 0.5 等にも及ぶ。0.01 等より良い精度で撮像されていたとしたら、得られる値はなゆたと 60cm で有意に異なる結果となる。このような系統的な誤差は、変換係数の導出で解消されるべきであり、赤い星を B バンドで撮像する場合、このような注意が必要となってくる。V、R バンドに関してはこの色指数の範囲ではほとんどフラットである。I バンドでは 60cm が $k_6 = 0.13$ 、なゆたが $k_6 = 0.08$ と少し傾きが大きくなるが B バンドほどではない。

4. 標準等級の導出

得られた変換係数から M67 の星の標準等級を算出した (Table 3)。上記の通り 60cm では sky に他の星が入り込んでいる星は省略した。今回用いた参考文献とは独立に 30 個の星の等級が得られている Montgomery & Marschall (1993) の結果と比較した (Fig. 8、Fig. 9)。なゆた望遠鏡による結果で残差が 0.2 を越える星がいくつか見られるものの、平均すると 0.01 未満の残差に落ち着いている。また 60cm でも B、V、I の残差では平均が 0.15 とやや大きくなっているがこれはサンプル数が少ないためである。色指数の残差は $B - V$ 、 $V - I$ とともに 0.01 未満と落ち着いている。また、これらの残差に系統的な差は認められない。

5. まとめ

第二次標準星とされる M67 を撮像観測し、なゆた望遠鏡可視光撮像装置 MINT と 60cm 反射望遠鏡 ST-9 に取り付けられている B、V、Rc、Ic バンドの変換係数を求めた。二つの観測システムで得られた変換係数では、特に B バンドで大きな違いが見られたが、変換係数から求めた M67 の等級は標準等級との系統的な差が認められなかった。B バンドで非常に赤い星を可視撮像観測するときに、変換係数を用いることで得られた等級の系統誤差を解消できることが示された。これにより、今後の両観測システムでの可視撮像では本研究で得られた変換係数を用いることで、統一的な標準等級を得ることが可能となった。

《参考文献》

- Anupama, G. C. & Kembhavi, A. K. 1994, *A&AS*, **103**, 315
 Chevalier, C. & Ilovaisky, S. A. 1991, *A&AS*, **90**, 225
 Gilliland, R. L., Brown, T. M. & Duncan, D. K. 1991, *AJ*, **101**, 541
 Landolt, A. U. 1992, *AJ*, **104**, 340
 Montgomery, K. A. & Marschall, L. A. 1993, *AJ*, **106**, 181
 有本淳一, 定金晃三 1995, 大阪教育大学紀要 第 III 部門 自然科学・応用化学第 45 号, 第 1 号, 43 頁
 尾崎忍夫 2005, 西はりま天文台年報第 15 号, 6 頁

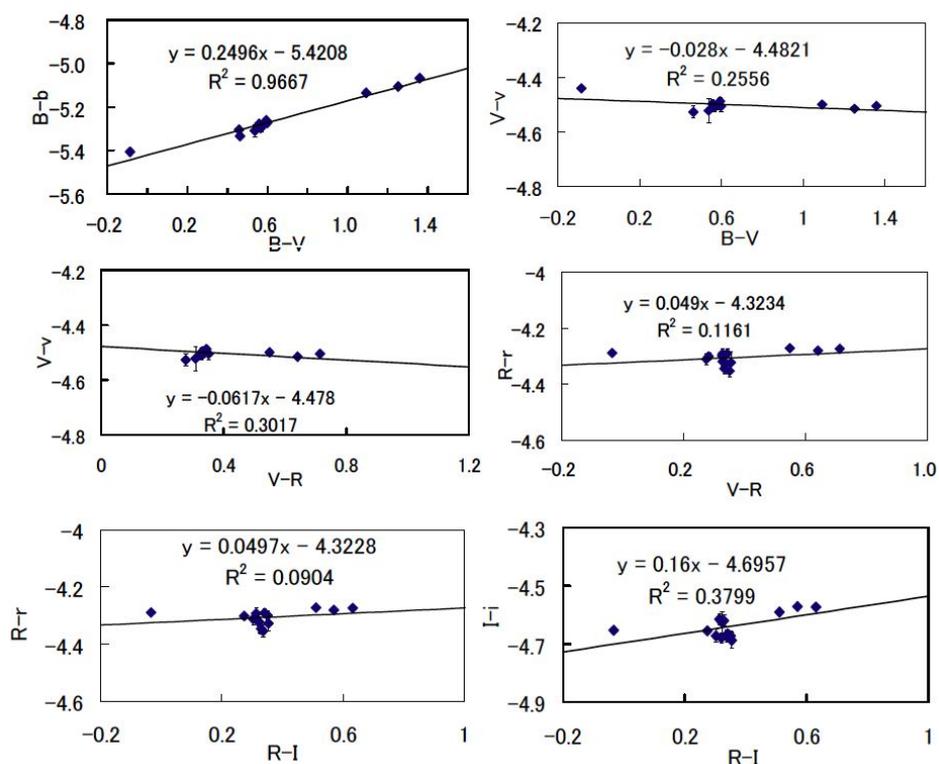


Fig. 2. Chevalier & Ilovaisky (1991) の色指数に対する 60cm 反射望遠鏡の機械等級と標準等級の差である。左上 k_1 、右上 k_2 、左中央 k_3 、右中央 k_4 、左下 k_5 、右下 k_6 である。以降の図においてはすべてこの順序で配列している。

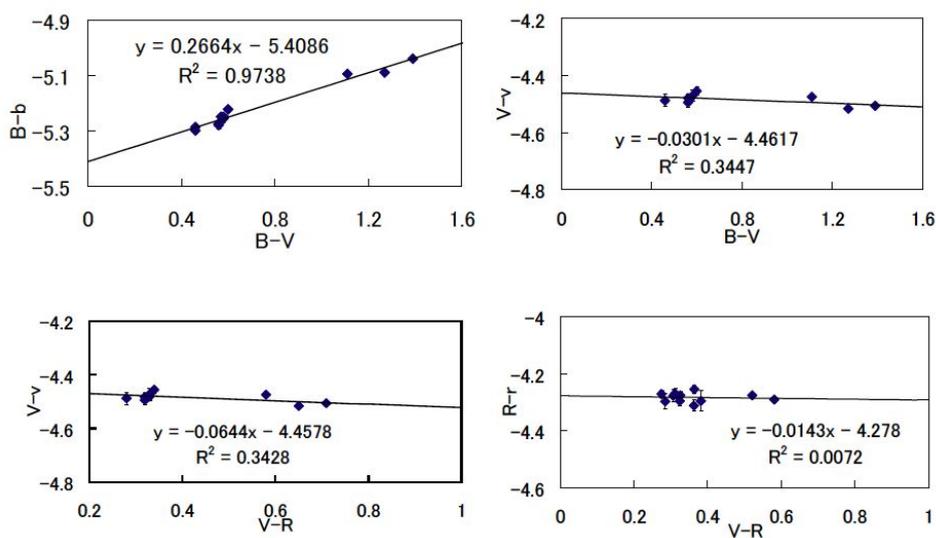


Fig. 3. Gilliland et al. (1991) の色指数に対する 60cm 反射望遠鏡の機械等級と標準等級の差。

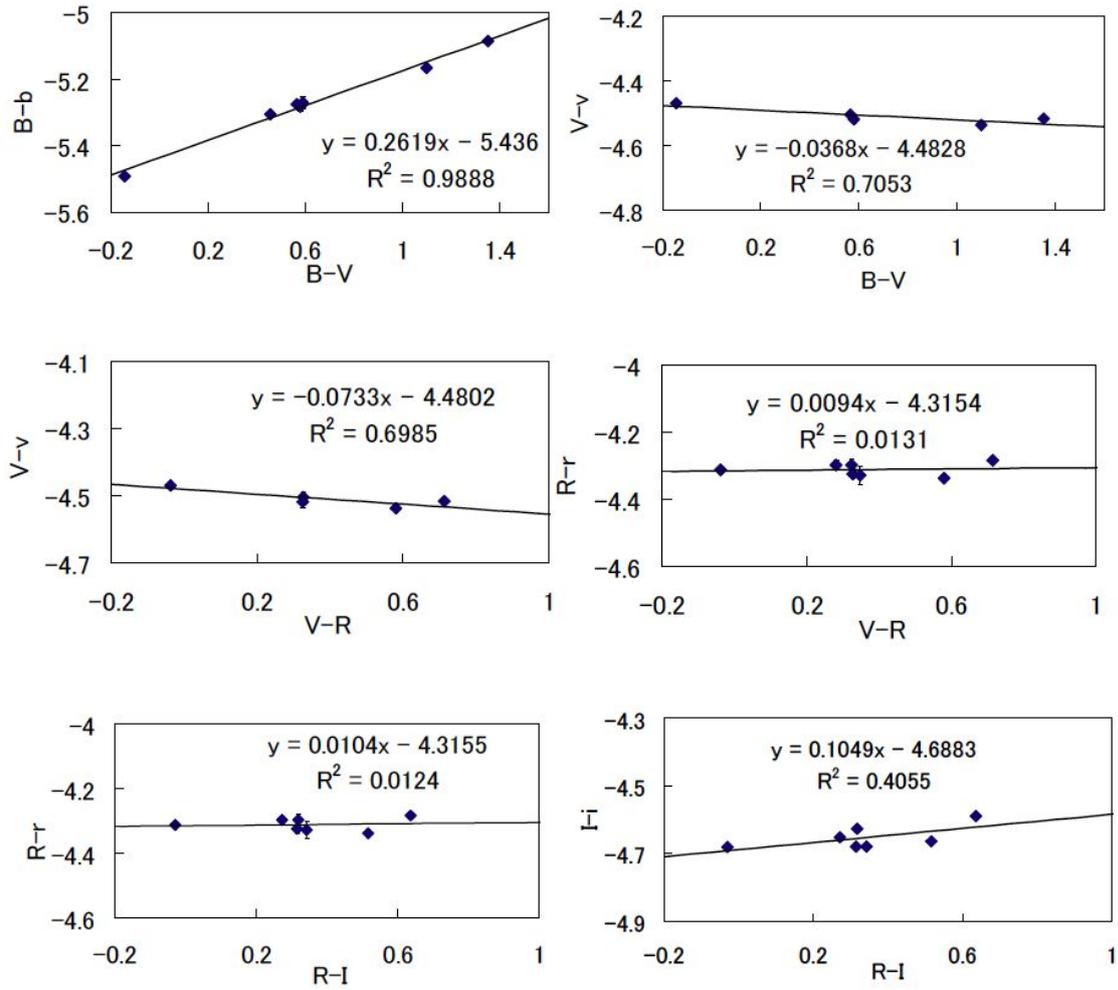


Fig. 4. Anupama & Kembhavi (1994) の色指数に対する 60cm 反射望遠鏡の機械等級と標準等級の差。

Table 1. Fig. 2 – Fig. 4 で得られた 60cm 反射望遠鏡の変換係数のまとめと平均。

	CI	GBD	AKP1992	average	σ
k_1	0.250	0.266	0.262	0.259	0.009
k_2	-0.028	-0.030	-0.037	-0.032	0.005
k_3	-0.062	-0.064	-0.073	-0.066	0.006
k_4	0.049	-0.014	0.009	0.015	0.032
k_5	0.050		0.010	0.030	0.028
k_6	0.160		0.105	0.132	0.039

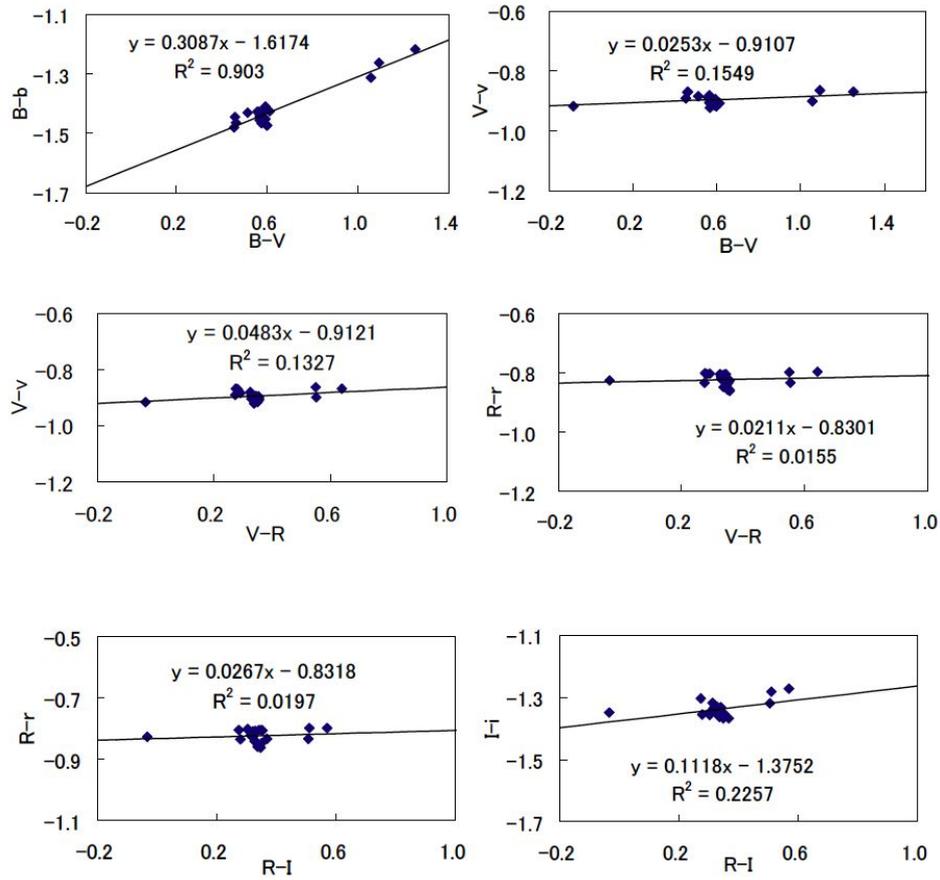


Fig. 5. Chevalier & Ilovaisky (1991) の色指数に対するなゆた望遠鏡の機械等級と標準等級の差。

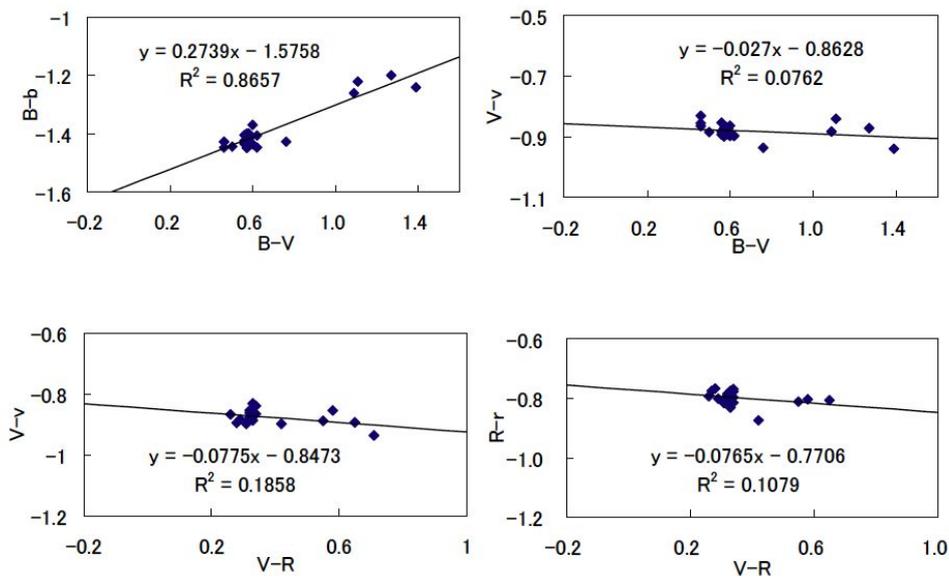


Fig. 6. Gilliland et al. (1991) の色指数に対するなゆた望遠鏡の機械等級と標準等級の差。

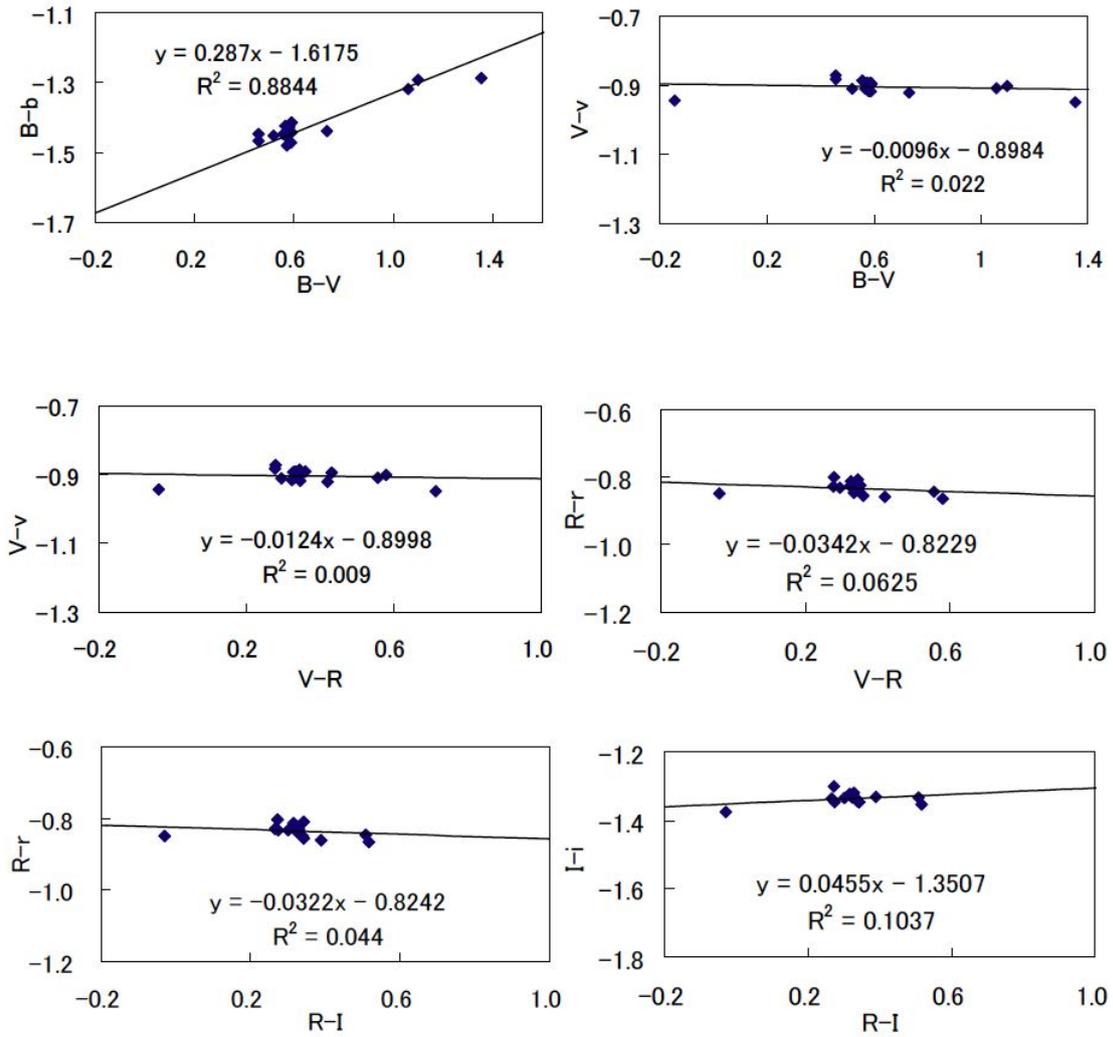


Fig. 7. Anupama & Kembhavi (1994) の色指数に対するなゆた望遠鏡の機械等級と標準等級の差。

Table 2. Fig. 5 - Fig. 7 で得られたなゆた望遠鏡の変換係数のまとめと平均。

	CI	GBD	AKP1992	average	σ
k_1	0.309	0.272	0.229	0.270	0.040
k_2	0.025	-0.029	-0.011	-0.005	0.028
k_3	0.048	-0.085	-0.014	-0.017	0.067
k_4	0.021	-0.101	-0.036	-0.039	0.061
k_5	0.027		-0.035	-0.004	0.044
k_6	0.112		0.046	0.079	0.047

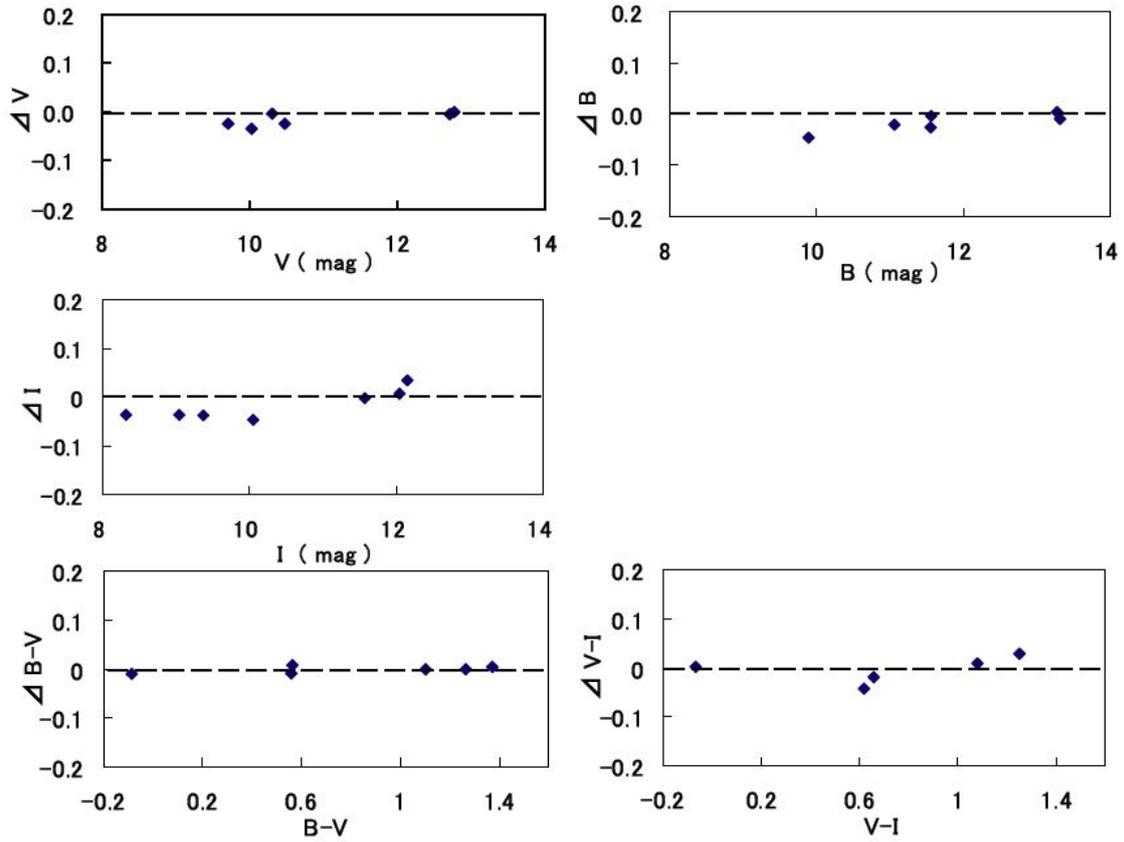


Fig. 8. 今回得られた M67 の等級、色指数に対して、Montgomery & Marschall (1993) で得られている等級、色指数と 60cm 反射望遠鏡で得られている等級、色指数の残差をプロットした。

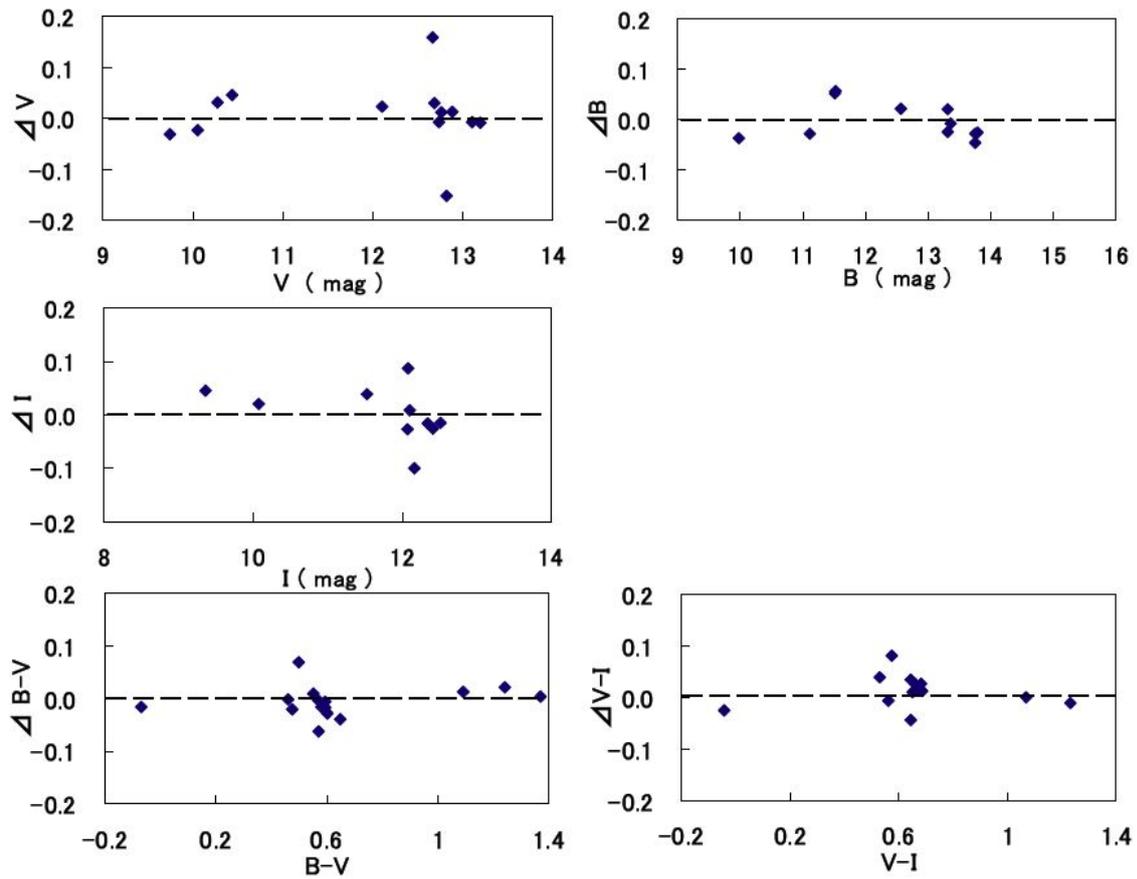


Fig. 9. 今回得られた M67 の等級、色指数に対して、Montgomery & Marschall (1993) で得られている等級、色指数となゆた望遠鏡で得られている等級、色指数の残差をプロットした。

Table 3. 60cm 反射望遠鏡となゆた望遠鏡で得られた変換係数から求めた標準等級。

	60cm				MINT			
	V	$B - V$	$V - R$	$R - I$	V	$B - V$	$V - R$	$R - I$
1	9.992	-0.096	-0.043	-0.023	10.049	-0.070	-0.022	-0.020
3					13.460	0.617	0.323	0.348
4					13.104	0.648	0.326	0.357
5	10.301	1.264	0.658	0.592	10.274	1.243	0.650	0.582
6				0.331	13.700	0.537	0.386	0.313
8	13.211	0.591	0.312	0.354	13.222	0.629	0.339	0.338
9	9.687	1.377	0.722	0.639	9.743	1.369		
10					12.442	0.763	0.413	0.417
11					14.191	0.710	0.397	0.403
12					12.735	0.581	0.322	0.337
13					13.944	0.606	0.353	0.340
14					13.153	0.603		
15					12.251	0.589	0.333	0.336
16					11.437	1.062	0.555	0.512
17					13.194	0.595	0.343	0.326
18					12.882	0.475	0.259	0.270
19	13.199	0.579	0.301	0.387	13.194	0.570	0.352	0.315
20	12.769	0.550	0.316	0.302	12.759	0.551	0.336	0.315
21				0.263	12.102	0.461	0.278	0.285
22	12.567	0.784	0.446	0.439	12.547	0.778	0.460	0.439
23	13.090	0.560	0.351	0.329	13.090	0.542	0.343	0.324
24					12.662	0.498	0.302	0.272
25					12.819	0.570	0.337	0.307
26	12.530	0.593	0.348	0.307	12.540	0.563	0.365	0.321
27	10.454	1.103	0.568	0.511	10.434	1.092	0.551	0.519
28	12.706	0.573	0.342	0.317	12.680	0.568	0.332	0.312
29	13.297	0.456	0.302	0.286	13.238	0.494	0.271	0.261
30				0.356	14.142	0.595	0.369	0.318