Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs. **8**, 1–17 (1998)

西はりま CCD システムの評価とフィルター系の校正 — 散開星団の測光観測を元に

川口美紀[1]、辻本寿太[1]、野田信之[1]、鳴沢真也[2]、山岡均[1]

1) 九州大学理学部
2) 兵庫県立西はりま天文台

Estimation of the Nishi-Harima CCD System and Proofreading Multi-color Filters — Through Observation of Two Open Clusters

Miki KAWAGUCHI[1], Juta TSUJIMOTO[1], Nobuyuki NODA[1], Shin-ya NARUSAWA[2], and Hitoshi YAMAOKA[1]

1) Faculity of Science, Kyushu Univercity, 4–2–1, Ropponmatsu, Chuo–ku, Fukuoka 810–8560, Japan
2) Nishi–Harima Astronomical Observatory, Sayo–cho, Hyogo, 679-5313, Japan

E-mail: yamaoka@rc.kyushu-u.ac.jp

(Received 1998, July 7)

Abstract

We have examined the Nishi-Harima CCD system by monitoring the change of temperature, checking the linearity, and observing two open clusters, NGC7790 and M67.

The CCD cooling with liquid N is fine, and linearity is good up to 30,000 counts. Multi-color photometry shows good convergences in V and R_c, but some divergences in B and I_c. After that, color–color diagrams and color–magnitude diagrams for two clusters are obtained.

Key words: CCD System – open clusters(indivisual): NGC7790, M67 – Photometry

1. はじめに

西はりま天文台の観測システムは、1997 年夏に冷却 CCD カメラの修理が完了し、同時にそれに用いる多波長測光用のフィルターも交換された。

これに伴い、システムの冷却時間や温度変化に対する安定性や多色測光システムの標準系への較正等について、再度調査する必要があった。

この論文では、 CCD カメラの性質についての評価と、2 つの星団の観測の結果を報告する。

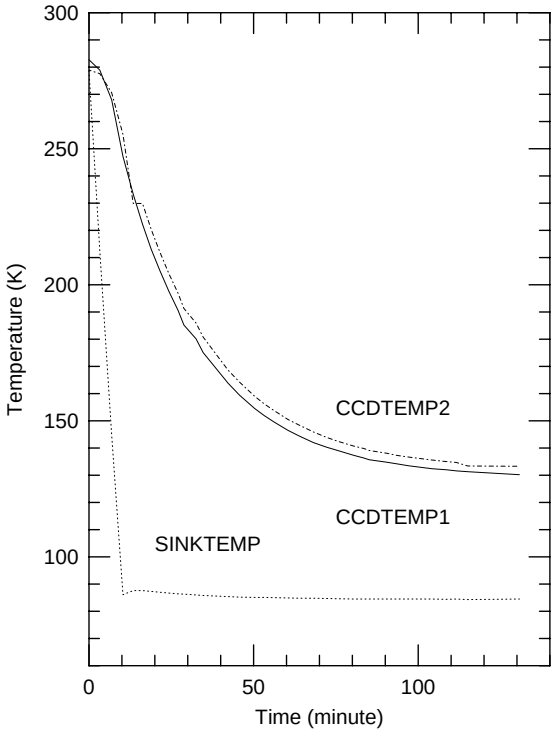

Fig. 1. Temperature change among cooling-down of CCD.

2. CCD カメラの冷却性能

2-1. データの収集

今回使用した冷却 CCD カメラは、AstroCam 3200 であり、UV コーティングがほどこされている。観測システムを構成する機器のうち、冷却 CCD カメラについては、使用の際のカメラ内部の温度や保冷時間が、取得データの解像度やカメラの使用限界時間に影響する。よって、CCD カメラの冷却性能を調べる事は、観測システムの能力の分析に対し大変重要である。

冷却中のデータの収集は、1997 年 12 月 2 日に次の方法で行った。

CCD カメラの冷却開始から約 3 分を 1 サイクルとして、この間にカメラの内部 2 ヶ所と液体窒素を入れる冷却シンクの温度測定 (CCDTEMP1/2、SINKTEMP と呼ぶ事にする) と、コンピューターの読み出しノイズを測るバイアス (露出 0 秒)、カメラの露出時のノイズを測るダーク (露出 10 秒) 両フレームの撮影を 1 枚ずつ行った。温度が安定してきた約 110 分後以降は、約 15 分ごとに測定と撮影を行うように切り変えた。総計で 178 分間に 37 サイクル行い、その内バイアスは 36 枚、ダークは 35 枚の画像データを得た。

2-2. 冷却中の CCD カメラ内の温度変化

温度変化の様子を図 1 に示す。

まず、SINKTEMP が冷却開始約 10 分後には室温 (約 280K) から 85K 前後に下がり、その後は測定終了時まで安定だった。

CCD 内部の方は、開始時の室温から 90 分ほどで CCDTEMP1 が約 135K、 CCDTEMP2 が約 140K になり、その頃から微減し続けて、 150 分後には CCDTEMP1 が 129K 程度、 CCDTEMP2 が 132K 程度になった。

カメラシステムの導入直後に測定された温度変化のグラフ (Okyudo *et al.*,1991) と比較すると、まず SINKTEMP の冷却安定までの時間が、導入直後は約 40 分であったが、約 10 分にまで短くなっている。 これは、導入直後の測定ではデュワーがデモ用であったので、入れた液体窒素の量が少なかった事が大きな要因であると思われる。

また、CCDTEMP1 の安定温度が導入直後の測定時 (144 ~ 145K) より 10K 以上低下している。今回の測定終了時には、温度は安定期にさしかかった所であり、安定温度はより低いと考えられる。これは、デュワーの真空度の向上など機器の性能の向上によるものとみられる。安定までの時間は、導入直後とほぼ同じである。

CCDTEMP2 については、導入直後のデータがなく比較はできなかったが、CCDTEMP1/2 間の温度差は小さく、カメラ内部の温度は部所によらずほぼ一定である事がわかった。

2-3. バイアスフレームとダークフレームの比較

温度測定と平行して集めたバイアスとダークのフレームの画像データは、各々のフレームに対して、全ピクセルでのカウントの平均 (算術平均) を計算して、その 2 つの平均値の時間変化、及び同サイクル内での 2 つの平均の差の経過を見た。

バイアスとダークの平均は、冷却開始直後にはカウントの値が非常に大きく不安定であったが、CCDTEMP1/2 がまだ低下中の約 10 分後からは $\pm$ 5 カウント程度の揺らぎしかなく非常に安定していた。また、 2 つの平均の差は、10 分後からは $\pm$ 2 カウント以内に収まっていた。

しかし、2 つのフレームの平均の値は、 110 分以前では 2225 カウント前後であったが、130 分以降では 1100 カウント弱に変化していた。両方の時間帯のそれぞれで平均値は安定していたので、おそらくは CCD カメラ内部、またはその周辺機器のノイズが入っていたために、撮影前半では真のバイアスやダークのデータが得られておらず、途中での操作などによってノイズがなくなったために 130 分以降は両方のデータとも真の値が得られるようになったものと思われる。これらの値から、両者の差が非常に小さく、ダークフレームを観測時に取得する必要性はない事が分かるが、安定性などの議論を行うには再測定の必要があるだろう。

なお、Okyudo *et al.*(1991) の測定では、デュワー内の液体窒素の減少につれて、 CCDTEMP1 がある程度上昇すると、画像取得システムが暴走した事が報告されている。温度が高い状態でのデータの取得は不安定で信頼が置きにくいとも考えられる。

3. カウントの線形性 (有効限界)

CCD カメラのカウントと光量の線形性を調べるため、1997 年 11 月 19 日に白熱電灯で望遠鏡を覆うドームを照らし、さまざまな露光時間で撮影を行った。なお、フィルターは V バンドを用い、望遠鏡の追尾は停止した状態でデータの取得を行った。

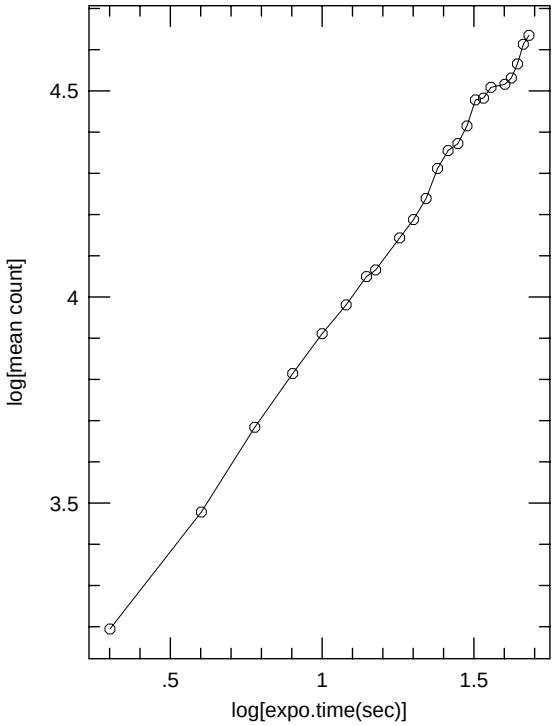

Fig. 2. The check of linearity.

結果を図 2 に示す。この図の縦軸は平均のカウント数 (バイアスは除去済み) の常用対数、横軸は露出時間 (秒) の常用対数である。図に示した露出時間は、最初の 2 秒間から 2 秒おきに増加させた、 46 秒間までの 23 通りのデータで、これ以上の露出時間では飽和したピクセルが出現した。

その結果、30000 カウント付近までは線形性を保っており、それよりもカウント数が大きい場合、やや efficiency が下がる傾向にある事が分かった。観測においては、ピークのカウント数が 20000 以下になる事を目標に露出時間を決めるのが適当であると考えられる。

4. 多色測光によるフィルター測光系の校正

4-1. 観測の方法

散開星団の多色測光を行い、過去の観測と比較する事で、われわれの測光系の評価及び標準系への校正を行う事ができる。これまで同様の観測をこの天文台でも行ってきた (Nakano *et al.*,1995、Tanabe *et al.*,1996) が、カメラの修理及びフィルター交換が行われたため、新たに観測を行う事が必要となっている。

そこで今回、1997 年 12 月 2 ~ 3 日に NGC7790 の、1997 年 12 月 4 ~ 5 日に M67 の多色撮像観測を行った。フィルターは、Bessell (1990) が青感度の良い CCD 用として推奨している以下のものを使用している。

B GG385(2mm)+BG12(1mm)+BG39(2mm)
V GG495(2mm)+BG39(3mm)
Rc OG570(2mm)+KG3(3mm)
Ic RG9(3mm)+WG305(2mm)

各々の観測に対して表 1 のような画像データを得た。

Table 1. Data frames obtained during our observation. (left:NGC7790, right:M67)

NGC7790				M67			
frame	filter	exposure time(s)	total	frame	filter	exposure time(s)	total
bias	(V)	0	5	bias	(I_c)	0	3
object	B	180	3	object	I_c	30	4
object	V	180	3	object	R_c	60	4
object	R_c	180	3	object	V	60	4
object	I_c	180	3	object	B	180	4
bias	(I_c)	0	3	bias	(B)	0	4
dome flat	B	10	3	dome flat	I_c	1	3
dome flat	V	1	3	dome flat	R_c	2	3
dome flat	R_c	1	3	dome flat	V	10	3
dome flat	I_c	1	3	dome flat	B	20	3
bias	(I_c)	0	3	bias	(B)	0	3
				object	B	180	4
				bias	(B)	0	3

4-2. 標準系システムへの変換 (1)

各星団の観測した視野内の星の内の数個を 「標準星」として選び、それらの標準等級を過去の観測で報告されたものから、拾い出したものを表 2、3 に示す。なお、NGC7790 は Christian *et al.*(1985) に、M67 は Anupama *et al.* (1994) に発表されたデータを用いる。

測光で求めた機械等級を標準等級に変換する式を算出する事で、現在の西はりま天文台の観測系の評価を行う。なお、文中では各々のフィルター別に、標準等級を大文字で、機械等級を小文字で表す。

機械等級を求める測光は IRAF を用いた。星像のあるオブジェクトフレームにバイアス、宇宙線などの除去、フラットの処理、複数画像の重ね合わせを行った後、DAOPHOT パッケージを用いて星像の形を示す関数 PSF を計算し、同フレーム上で適応した他の星像の機械等級を求める、という方法で行った。

変換式を求めるにあたり、機械等級と標準等級の間に、以下の一次式が成立すると仮定した。

Table 2. Magnitudes and color indices of NGC7790's standard stars (Christian *et al.*,1985).

No.	V	I_c	$B-V$	$V-R_c$	R_c-I_c
9	15.414	14.440	1.658	0.974	0.953
10	16.027	15.156	0.718	0.410	0.461
16	15.330	14.559	0.617	0.359	0.412
17	16.017	15.312	0.553	0.323	0.382
20	15.773	14.647	0.997	0.563	0.563
21	15.977	15.029	0.711	0.440	0.503
25	15.444	14.540	0.681	0.436	0.460
100	14.391	13.824	0.443	0.252	0.314
K	13.212	11.607	1.500	0.826	0.778
S	14.252	13.507	0.544	0.342	0.398

$$v - V = \alpha_1(B-V) + \beta_1 \qquad (1)$$
$$v - V = \alpha_{1'}(V-R_c) + \beta_{1'} \qquad (1')$$
$$i - I_c = \alpha_2(R_c-I_c) + \beta_2 \qquad (2)$$
$$b - v = \alpha_3(B-V) + \beta_3 \qquad (3)$$
$$v - r = \alpha_4(V-R_c) + \beta_4 \qquad (4)$$
$$r - i = \alpha_5(R_c-I_c) + \beta_5 \qquad (5)$$

各式の β は、測光の基準の選び方によって決まるオフセットである。そのため、値自体はシステムの評価には関与しないが、確率誤差の大きさが小さいほど標準系と観測系の差が小さい事になる。

α については、観測システムが標準系と一致するならば、$\alpha_1, \alpha_{1'}, \alpha_2 = 0$、$\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5 = 1$ となる事が期待される。

論文に掲載されている等級と色指数の組み合わせに対応して、NGC7790 は (1)~(5)、$(1')$ の 6 つ、M67 は (2) を除く 5 つの式について、最小二乗法を用いて α と β の計算を行う。その結果を表 4 に示す。

4-3. 標準システムへの変換 (2)

これまでにまだ等級が知られていない星の標準等級を得るためには、観測で得た機械等級のみから標準等級を求める変換式を作成する必要がある。

4-2 節と同様に、標準等級と機械等級の関係について、以下のような一次式を仮定する。

Table 3. Magnitudes and color indices of M67's standard stars (Anupama *et al.*,1994).

No.	V	$B-V$	$V-R_c$	R_c-I_c
6	9.995	–0.145	–0.038	–0.030
9	15.118	0.771	0.431	0.421
10	15.267	0.778	0.387	0.430
11	15.716	0.862	0.506	0.404
12	11.039	0.380	0.231	0.259
14	12.803	0.568	0.330	0.300
15	13.446	0.572	0.334	0.338
17	12.415	0.732	0.421	0.388
18	14.167	0.760	0.396	0.386
19	15.341	0.816	0.519	0.554
22	13.941	0.591	0.353	0.327
23	13.066	0.580	0.324	0.318
24	12.743	0.557	0.344	0.324
25	15.774	1.086	0.575	0.561
26	16.620		0.708	0.680
27	12.636	0.810	0.466	0.440
28	13.155	0.575	0.333	0.334
29	13.106	0.587	0.361	0.342
30	15.837	0.969	0.591	0.587
31	12.123	0.457	0.280	0.272
32	12.759	0.565	0.327	0.315
33	13.191	0.579	0.344	0.324
34	12.892	0.457	0.278	0.265
35	12.250	0.573	0.341	0.329
36	11.424	1.058	0.557	0.508
37	13.194	0.591	0.432	0.323

Table 4. The coefficients of conversion equations with standard magnitudes (left:NGC7790, right:M67).

	NGC7790		M67	
	α	β	α	β
$v-V(B-V)(1)$	-0.061 ± 0.057	$+1.019\pm0.053$	-0.046 ± 0.033	$+1.206\pm0.023$
$v-V(V-R_{\rm c})(1')$	-0.101 ± 0.054	$+1.017\pm0.029$	-0.098 ± 0.063	$+1.214\pm0.025$
$i-I_{\rm c}(R_{\rm c}-I_{\rm c})(2)$	-0.051 ± 0.107	$+0.210\pm0.059$		
$b-v(B-V)(3)$	0.827 ± 0.061	$+1.251\pm0.057$	0.888 ± 0.092	-0.551 ± 0.063
$v-r(V-R_{\rm c})(4)$	0.854 ± 0.048	$+0.839\pm0.026$	0.927 ± 0.062	-0.259 ± 0.024
$r-i(R_{\rm c}-I_{\rm c})(5)$	1.103 ± 0.043	-0.032 ± 0.024	0.990 ± 0.031	-0.200 ± 0.012

$$v-V=\alpha_6(b-v)+\beta_6 \qquad (6)$$
$$v-V=\alpha_{6'}(v-r)+\beta_{6'} \qquad (6')$$
$$i-I_{\rm c}=\alpha_7(r-i)+\beta_7 \qquad (7)$$
$$B-V=\alpha_8(b-v)+\beta_8 \qquad (8)$$
$$V-R_{\rm c}=\alpha_9(v-r)+\beta_9 \qquad (9)$$
$$R_{\rm c}-I_{\rm c}=\alpha_{10}(r-i)+\beta_{10} \qquad (10)$$

4-2.節と同様、各式の β は、オフセットである。さらに、α については、観測システムが標準系と一致するならば、$\alpha_6,\alpha_{6'},\alpha_7=0$ 、$\alpha_8,\alpha_9,\alpha_{10}=1$ である事が期待される。

NGC7790 は (6)~(10)、$(6')$ の 6 つ、M67 は (7) を除く 5 つの式について、最小二乗法を用いて α と β の計算を行う。その結果を表 5 に示す。

Table 5. The coefficients of conversion equations with instrumental magnitudes (left:NGC7790, right:M67).

	NGC7790		M67	
	α	β	α	β
$V(b-v)(6)$	-0.082 ± 0.034	$+1.128\pm0.066$	-0.076 ± 0.032	$+1.180\pm0.008$
$V(v-r)(6')$	-0.114 ± 0.081	$+1.111\pm0.103$	-0.029 ± 0.068	$+1.179\pm0.010$
$I_{\rm c}(r-i)(7)$	-0.066 ± 0.095	$+0.219\pm0.055$		
$B-V(b-v)(8)$	1.165 ± 0.086	-1.427 ± 0.170	0.910 ± 0.095	$+0.624\pm0.023$
$V-R_{\rm c}(v-r)(9)$	1.142 ± 0.064	-0.946 ± 0.081	0.979 ± 0.065	$+0.289\pm0.010$
$R_{\rm c}-I_{\rm c}(r-i)(10)$	0.896 ± 0.035	$+0.035\pm0.020$	0.987 ± 0.031	$+0.206\pm0.006$

5. 変換式の評価と補正

5-1. 変換 (1) の変換式の評価

求めた変換式の評価を行う。4-2 節で求めた標準等級の方程式 (表 4) では、V 等級を求める 2 つの式を比較すると、変数として $B-V$ をとった場合 (1) よりも、$V-R_{\rm c}$ をとった場合 (1′) の方がより $|\alpha|$ が大きいが、これは色依存性の問題よりも $B-V$ と $V-R_{\rm c}$ の値の最大値と最小値の差の違いから生じた可能性が高い。すなわち、標準星の $B-V$ の値の範囲が $V-R_{\rm c}$ より大きいために、同じ V の変換式に対して小さい値を与えたのであろう。一方、色指数同士での変換では、波長の長い光の方が短波長の光に比べ α が 1 に近付く傾向にある事もわかった。

湿度が高い日本の気候では、大気中の水蒸気による光の吸収により、特に 短波長の B の観測が他のバンドに比べて難しい事が知られている。色指数同士の変換式においては、この影響が現れている事が認められる。

さらに変換式の信頼度を見るため、各々の変換式に対して各データの残差を求めて比較する。

各変換式の残差 ρ は、各々の標準星のデータに対して

$$\rho = (\text{変換式の左辺のデータの値}) - (\text{変換式の右辺の計算値})$$

となる。色指数を横軸に、残差を縦軸に図示したのが図 3 である。

等級の方では、$I_{\rm c}$ への変換における残差の大きさは、V へのものに比べて大きい。残差の大きい星は、撮影した星像が他の星像と重なっている場合であったり、暗い星である場合であったりと機械等級が計算しにくい条件になっている。色指数の方を見ると、両星団とも $B-V$ の変換式の残差が他の 2 倍程度になっている。これは、上記の大気の影響を大きく受けていると考えられる。特に顕著な色指数依存性は見られないため、標準系との差は充分小さいと見られる。

二星団間での係数を比較すると、(5) 以外は確率誤差を含む範囲内の値になった。(5) については、標準星の $R_{\rm c}-I_{\rm c}$ 分布が星団間で異なっているため、と推測される。$V-R_{\rm c}$ にはそれほどの影響はない事から、上記のものと同様に $I_{\rm c}$ の精度の問題が原因であると考えられる。

5-2. 変換 (2) の変換式の評価

4-3 節で求めた機械等級の方程式では、V 等級を求める 2 つの式の α は、両星団のデータで精度の傾向が異なるが、両星団の $v-r$ のばらつきに違いがあるためであると考えられる。確率誤差は $b-v$ をとった場合 (6) より $v-r$ をとった場合 (6′) の方が大きいという結果となった。色指数同士の変換は、4-2 節と同様に波長の長い光の方が良い結果が出た。

前節と同様に、4-3 節で求めた変換式に対して各データの残差を求めて比較する。その結果を図 4 に示す。

傾向は前節と変わらないが、色指数の $B-V$ の、他の 2 つに対する残差の大きさがより顕著である。

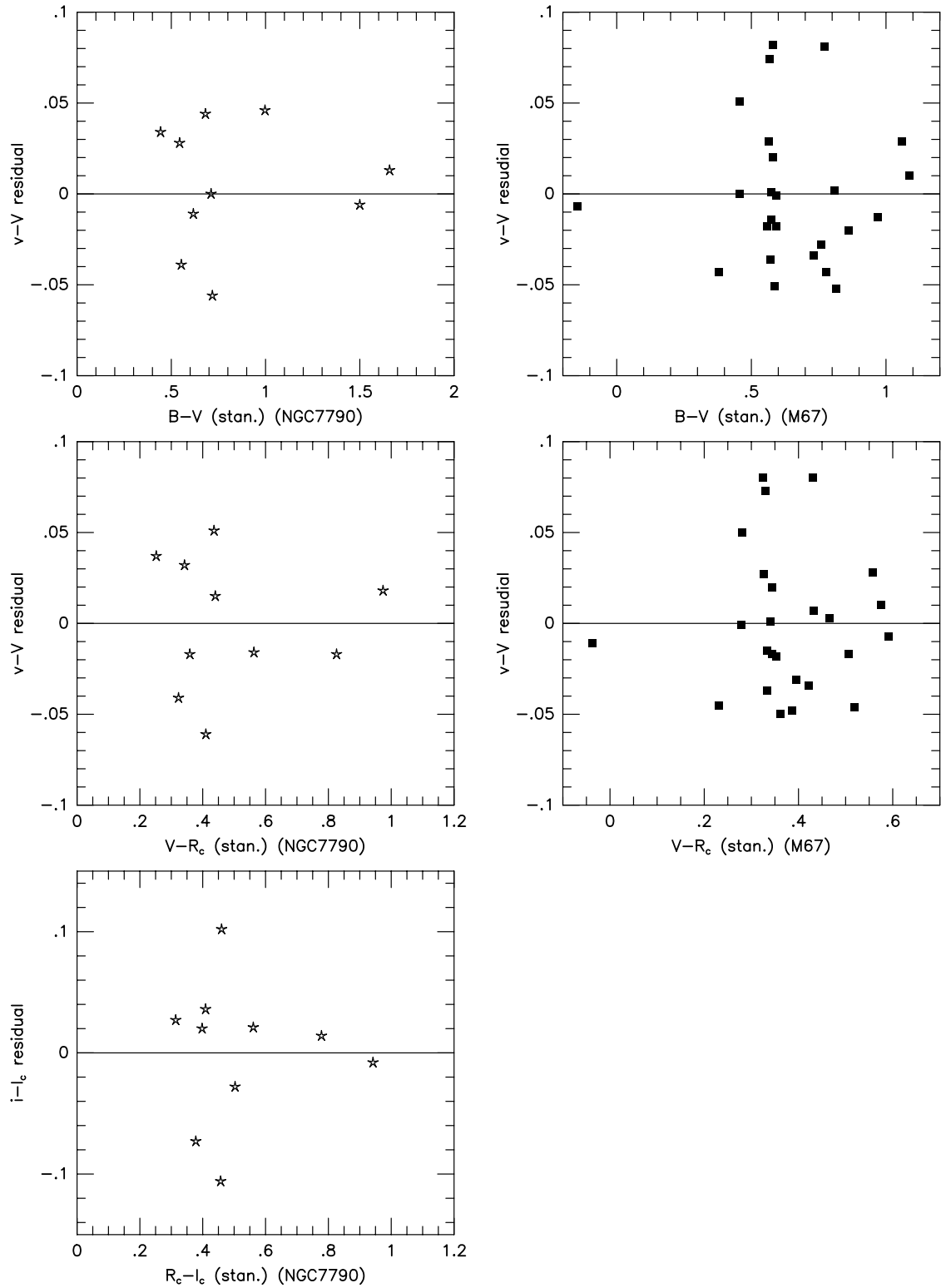

Fig. 3. Residuals of conversion equations using standard (stan.) colours [(1), (1') and (2)]. (left:NGC7790, right:M67)

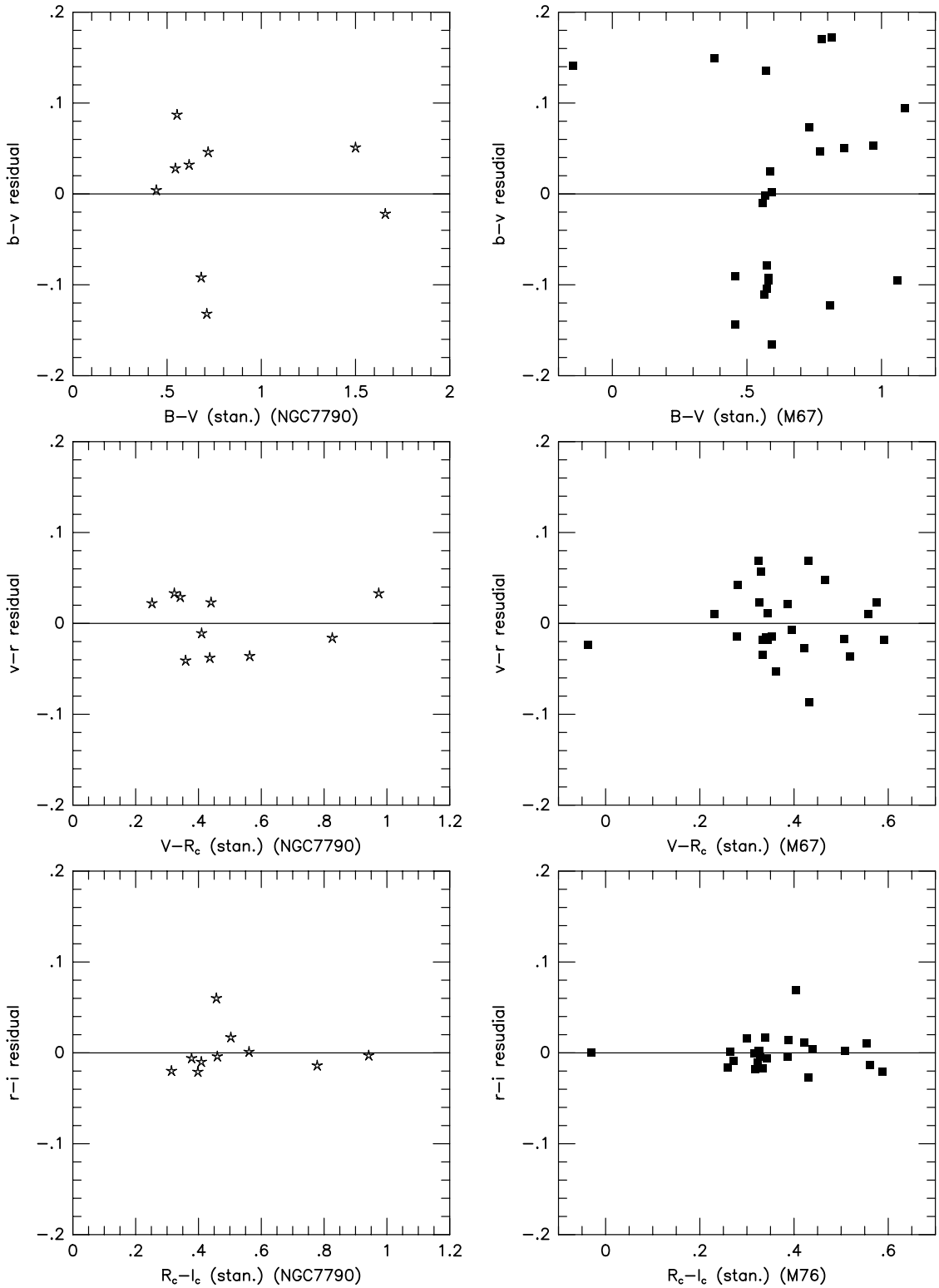

Fig. 3. (cont.) Residuals for conversion equations using standard (stan.) colours [(3) – (5)]. (left:NGC7790, right:M67)

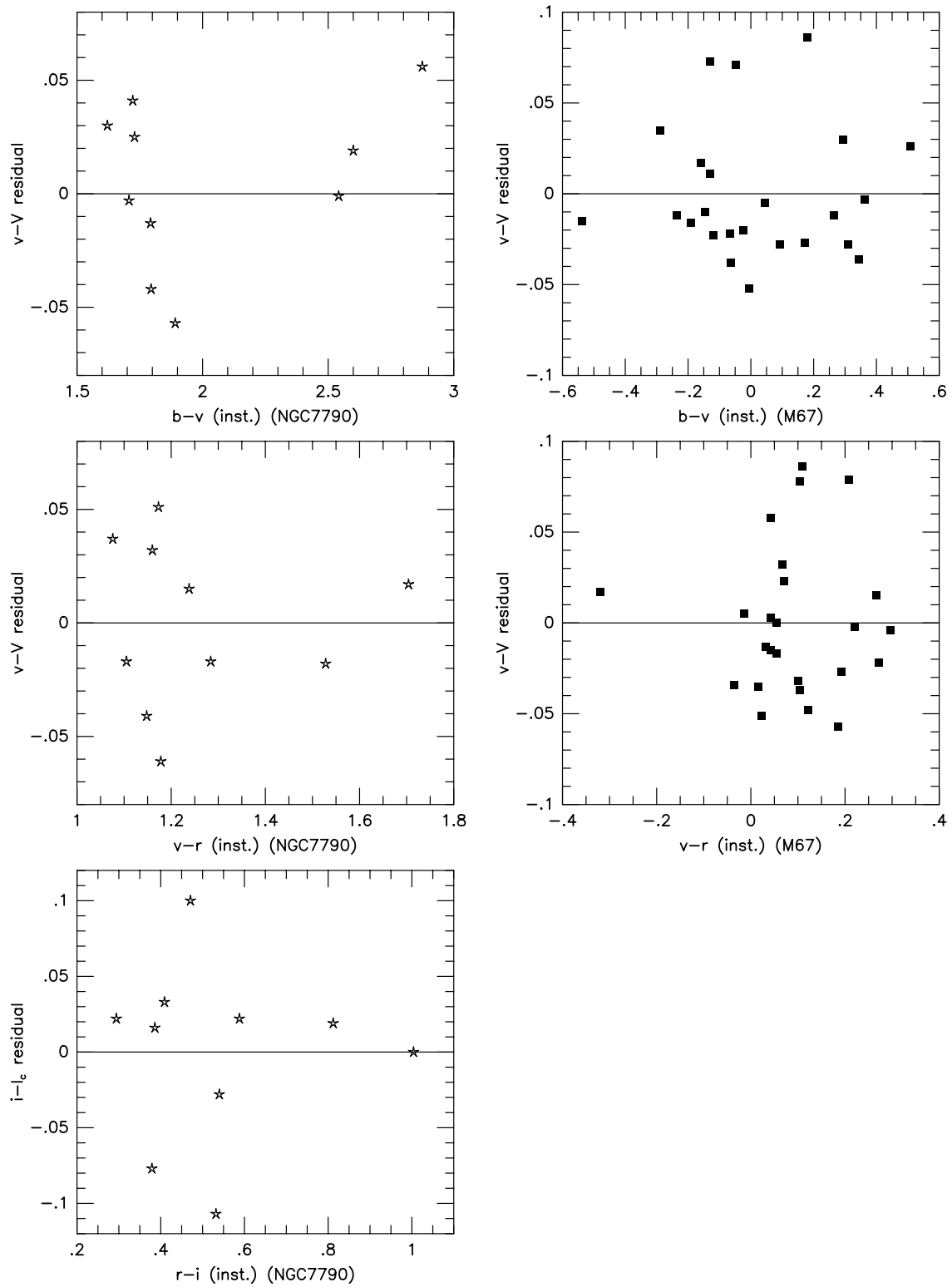

Fig. 4. Residuals for conversion equations using instrumental (inst.) colors [(6), (6') and (7)]. (left:NGC7790, right:M67).

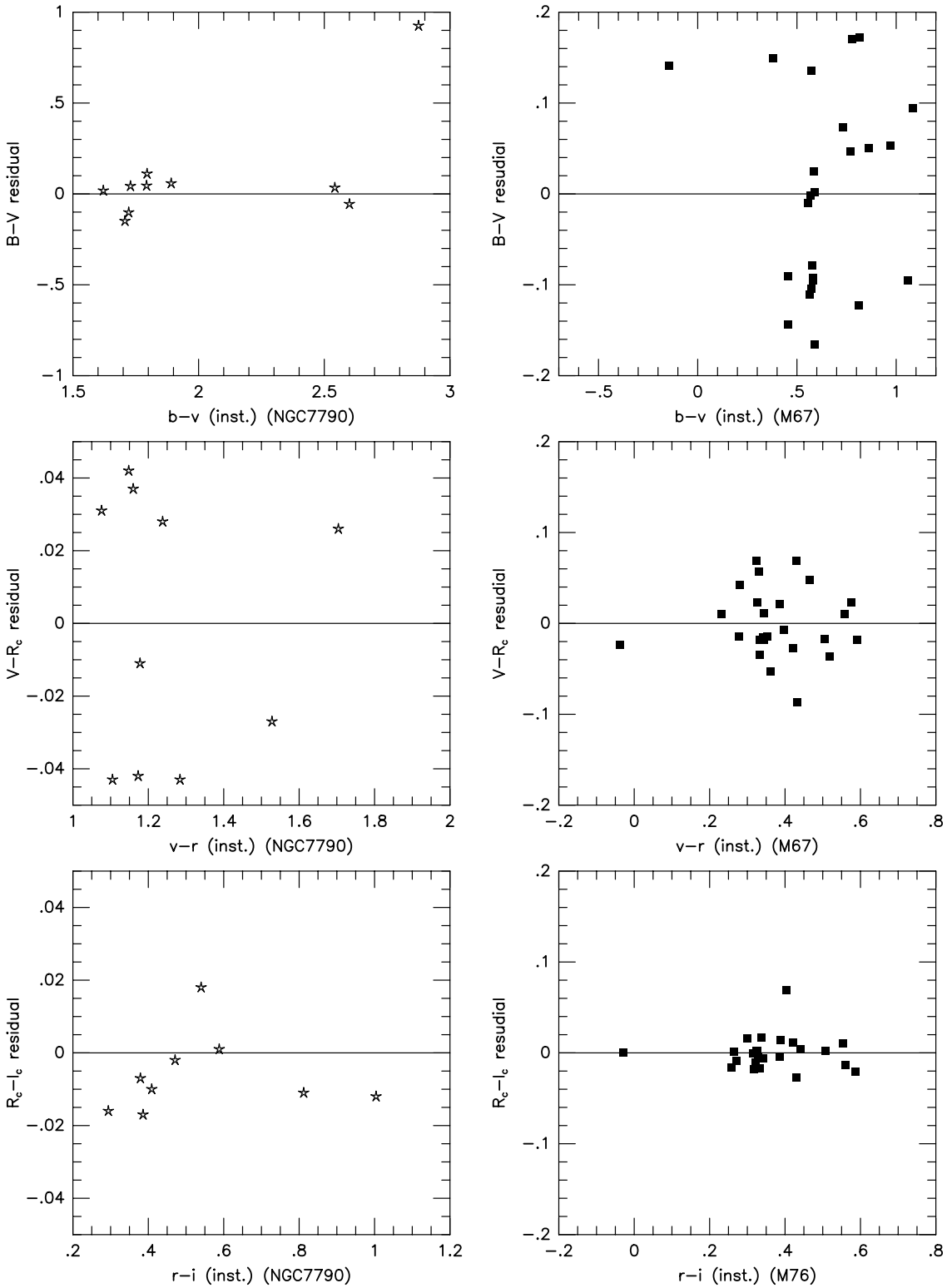

Fig. 4. (cont.) Residuals for conversion equations using instrumental (inst.) colors [(8) – (10)]. (left:NGC7790, right:M67).

6. 二色図と色–光度図

6-1. 二色図と星間吸収補正

天体観測の際には、各々の天体からの光の一部が、地球に到達する前に宇宙空間に漂うチリや他の小さく暗い天体によって散乱され、減光している。星の性質としての等級や色指数を知るためには、この星間吸収による減光の補正を行う必要がある。

星間吸収の値を求める方法として、値が既知の星団と未知の星団のそれぞれのデータから 2 色図を作り、プロットされた点の回帰曲線のシフト量から星間吸収の差を求める、という手法がある。この方法を用いるには、 2 色図から回帰曲線が容易に導出できる必要がある。しかし、式 (6) ~ (10) を用いて導いた標準等級を基にして描いた 2 色図 (図 6) を見ると、NGC7790 の方はプロットされた点の散逸が大きく、回帰曲線を得る事は難しい。

このため星間吸収の値は、過去に発表された論文のデータ、$E(B-V)_M = 0.050$ (Montgomery *et al.*,1993) と $E(B-V)_{NGC} = 0.110$ (Tanabe *et al.*,1996) を用いる事とした。

星間吸収の補正量を用いる際に必要な各フィルターの吸収量 $A(\lambda)$ は、 Candelli *et al.*(1989) の値

$$A(B)/A(V) = 1.337 \quad A(R)/A(V) = 0.751 \quad A(I)/A(V) = 0.479$$

を用いた。これらの値を用いて、両星団の星間吸収の補正を行った。

6-2. 色–光度図

4-3 節で求めた変換式を用いて得られた標準等級に前節で求めた星間吸収の補正を行って、今回の観測から得られたデータから各星像の等級と色指数を決定した。これらのデータを使って色–光度図を作成する。

色–光度図は横軸に色指数、縦軸に実視等級をとった。各等級のデータに対して作成し、図 7 (NGC7790) 及び図 8 (M67) で示す。

NGC7790 の図の作成の際に、V 等級で 17.2 等付近から、 $I_{\rm c}$ 等級で 18.2 等付近から暗い星像では、色指数が広い分布を示すようになった。このため、これらよりも暗い星は今回の観測においての限界等級以下と判断し、図 7 と図 8 はこれらの星は除いて作成した。 (なお、限界の等級の星間吸収補正前の値は、V 等級で 17.5 等付近、$I_{\rm c}$ 等級で 18.0 等付近に相当する。)

NGC7790 では、主系列と思われる星の並びが $(B-V)_0 \sim 0.2$ 付近まで続いており 、非常に若い星団である事がわかる。M67 の図に関しては、データ数は少ないが主系列は比較的はっきりと示されている。

7. まとめ

観測前の冷却時のデータの収集によって、CCD カメラの冷却に関しては良好である事、バイアスとダークの両フレームの違いがほとんどなく、 CCD カメラでの露出による信号のノイズが微小であ

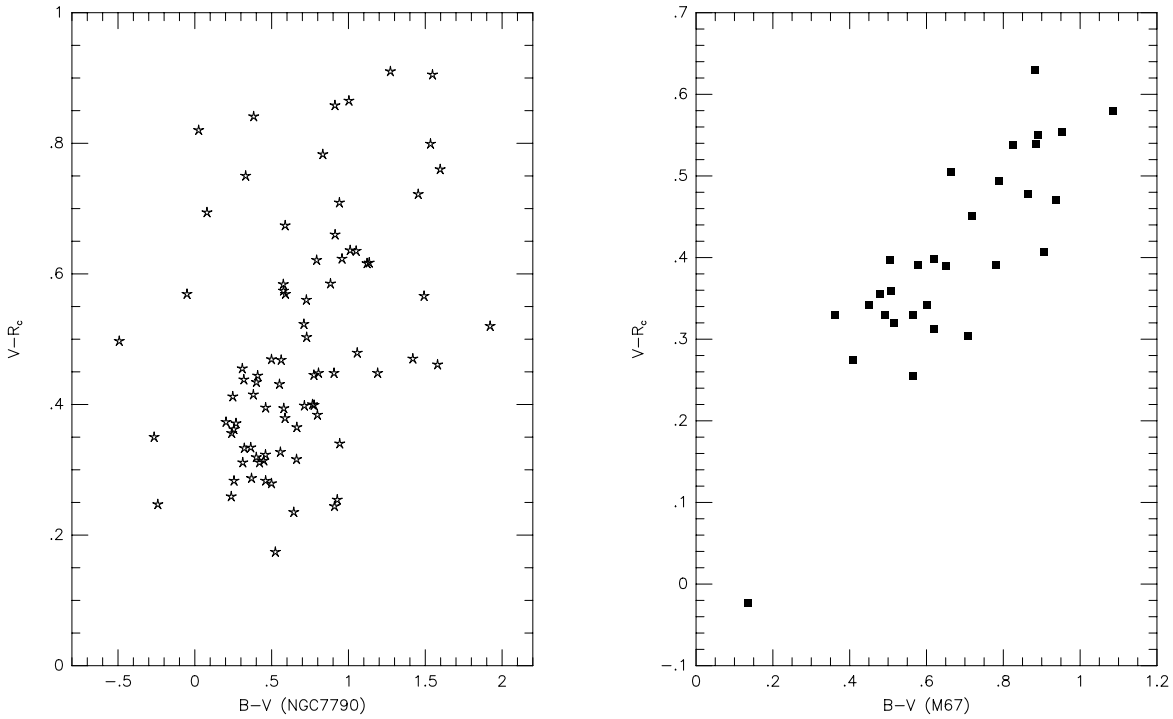

Fig. 5. Color-color diagrams (left:NGC7790,right:M67).

る事が分かったが、CCD カメラ自体か、フィルターフォルダや望遠鏡の駆動系など周辺部のノイズ発生源があった事が推定される。発生源の特定と再測定が必要である。

天体観測に関しては、変換式は概ね信頼度が高いと思われるが、気候の問題で B の変換が悪い。また、$B-V$ の変換で他に比べて残差がやや大きい。また、$I_{\rm c}$ について残差が比較的大きい星があり、再度調査する事が望ましい。測光観測の際には、これらの点に留意する必要がある。

《参考文献》

Anupama G.C. et al. 1994, A&AS 103, 315

Bessell M.S. 1990, PASP 102, 1181

Cardelli J. A. et al. 1989, AJ 345, 245

Christian C. A. et al. 1985, PASP 97, 363

Gilliland R. L. et al.1991, AJ 101, 541

Montgomery K.A. et al. 1993, AJ 106, 181

Nakano M. et al. 1995, Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs. 5, 1

Okyudo M. et al. 1991, Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs. 1, 17

Tanabe K. et al. 1996, Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs. 6, 1

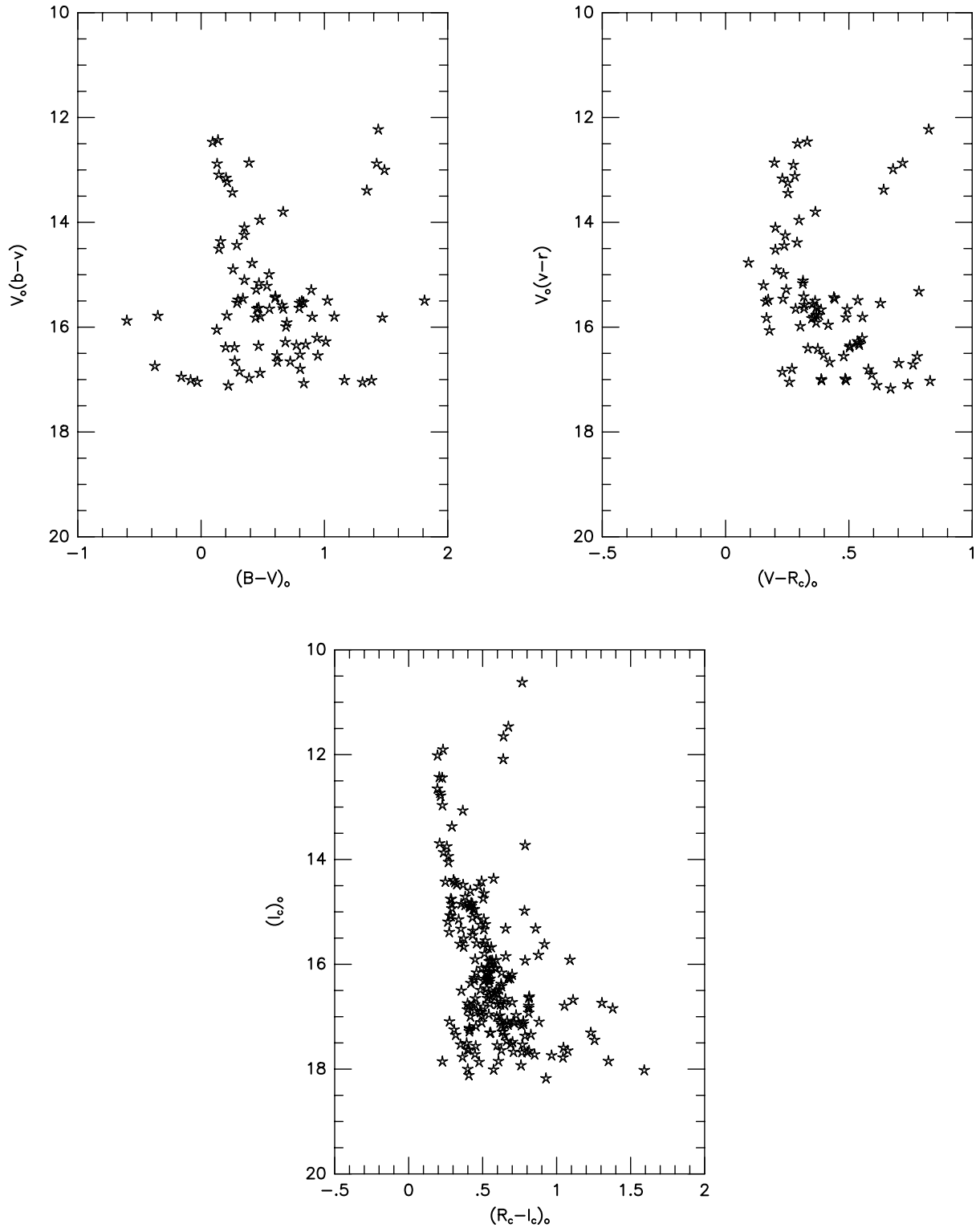

Fig. 6. Color-Magnitude diagrams of NGC7790.

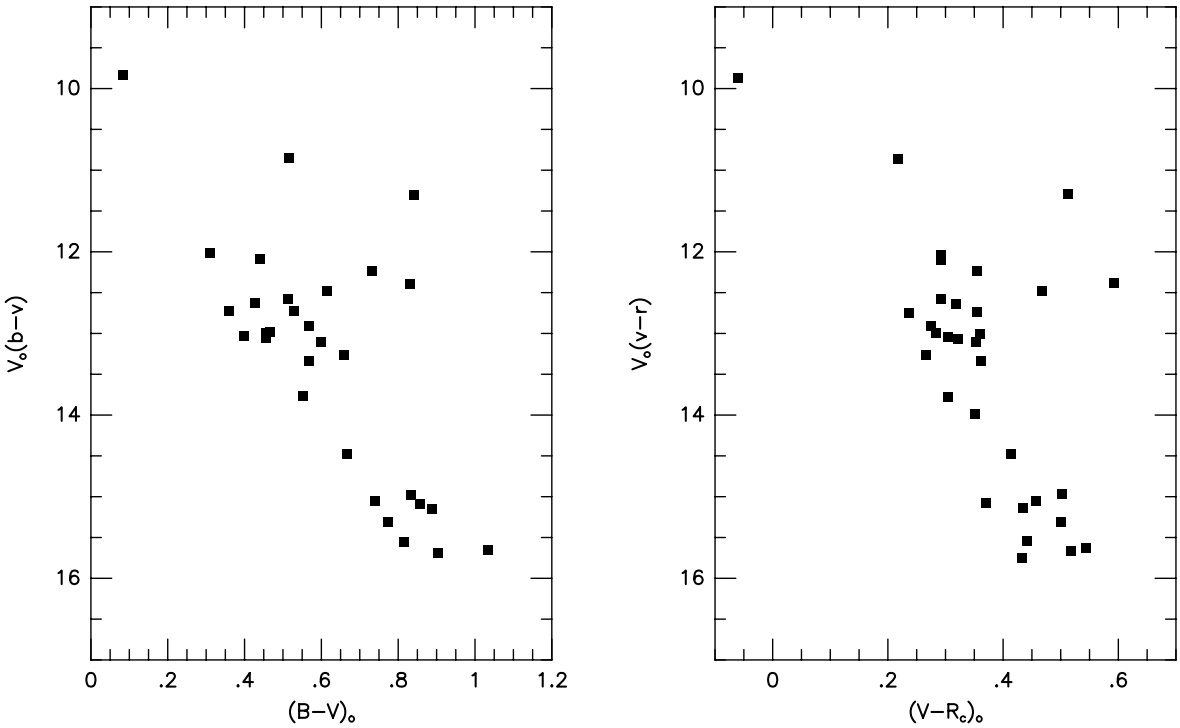

Fig. 7. Color-Magnitude diagrams of M67.