

三瓶自然館の機器を使用した天体写真撮影

矢田 猛士*・竹内 幹蔵*・太田 哲朗*

Astronomical images taking with the telescopes and cameras of The Shimane Nature Museum of Mt. Sanbe.

Takeshi Yada, Mikimasa Takeuchi and Tetsuaki Ota

天体写真や天文現象の記録は貴重な博物館資料であり、継続して取得しなければならない。対象天体の視直径や明るさ、現象の種類によって望遠鏡とカメラの組み合わせを選択する必要がある。三瓶自然館の60cm反射望遠鏡 (F10) の直焦点で冷却 CCD カメラ SBIG ST-10XME を使用した場合、およそ 8.5' × 5.7' の画角で撮影が可能である。

Keyword : 天体写真, 望遠鏡, 冷却 CCD カメラ, デジタル一眼レフカメラ, 画像処理

はじめに

三瓶自然館では2002年のリニューアル時に、60 cm 反射望遠鏡 (西村製作所, F10), クーデ式20 cm 屈折望遠鏡 (五藤光学研究所, F9), それぞれの望遠鏡に同架する10cm 屈折望遠鏡 (PENTAX, F4) などが設置された。表1から表3にそれぞれの特徴をまとめる。撮像機器としては同時期に納入された冷却 CCD カメラ SBIG ST-10XME や2007年に納入さ

表1 三瓶自然館60cm反射望遠鏡 (西村製作所)

焦点形式	カセグレン式反射
鏡面	有効口径 600 mm 合成焦点距離 6040 mm 合成口径比 1:10
鏡筒	チューブ式
架台形式	フォーカス赤道儀

表2 三瓶自然館クーデ式20cm屈折望遠鏡 (五藤光学研究所)

光路形式	クーデ式屈折望遠鏡
対物レンズ	有効口径 200 mm 焦点距離 1800 mm 口径比 1:9
鏡筒	接眼部: 極軸固定, 本体固定機能付き
架台形式	ドイツ式赤道儀

れたデジタル一眼レフカメラ FUJIFILM FinePix S5 Pro を所有している (表4)。天体写真撮影や天文現象の観測を行う際には、対象天体の視直径や明るさ、現象の種類によって、望遠鏡とカメラの組み合わせを選択する必要がある。本稿では三瓶自然館の機器を使用した天体写真の撮影について紹介する。

望遠鏡とカメラの組み合わせ

天体望遠鏡とカメラを組み合わせると天体写真を撮影

表3 三瓶自然館10cm屈折望遠鏡 (PENTAX 100SDUF II)

対物レンズ	有効口径 100 mm 焦点距離 400 mm 口径比 1:4
-------	---------------------------------------

表4 冷却CCDカメラ SBIG ST-10XME とデジタル一眼レフカメラ FUJIFILM FinePix S5 Pro

	冷却CCDカメラ SBIG ST-10XME	デジタル一眼レフカメラ FUJIFILM FinePix S5 Pro
ノイズ	少ない (冷却時)	気温高いときは多い
画素数	2184×1472	4256×2848
1画素の大きさ	6.8 μm × 6.8 μm	5.4 μm × 5.4 μm
撮像面の広さ	14.9 mm × 10 mm	23.0 mm × 15.5 mm
階調 (A/D 変換)	16 bit	14 bit (RAW)
シャッター	1/10 - 3600 sec	1/8000 - 30 sec (バルブ撮影可能)

* 島根県立三瓶自然館, 〒694-0003 島根県大田市三瓶町多根 1121-8

The Shimane Nature Museum of Mt. Sanbe (Sahimel), 1121-8, Tane, Sanbe-cho, Ohda-shi, Shimane Prefecture

する場合、大きくわけて次の3つの方法がある。

1. 直焦点：天体望遠鏡を望遠レンズとして使う。天体望遠鏡の対物レンズの焦点面にフィルムを置き、結ぶ像をそのまま撮影する。
2. 拡大撮影：望遠鏡を目でのぞくかわりに、レンズをはずしたカメラで撮影する。天体望遠鏡の焦点にできる像を、接眼レンズで拡大し、撮影することになる。
3. コリメート：望遠鏡を目でのぞくかわりに、レンズの付いたカメラで撮影する。コンパクトデジタルカメラなどで簡単に撮影が可能。

図1に眼視とカメラ取り付け位置を示す。

屈折望遠鏡の場合

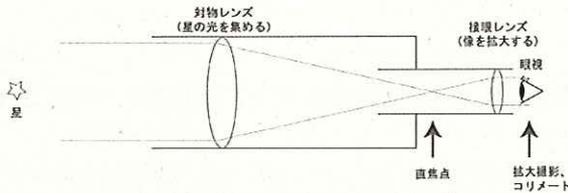


図1 天体望遠鏡とカメラの取り付け位置

直焦点で撮影したときの画角の広さ

天体望遠鏡の「焦点距離」と CCD の「撮像面の大きさ」によって直焦点で撮影したときの画角の広さは決まる。無限遠からの光は平行光線となり、結像面はレンズの焦点面と一致する。図2のように、平行光線がレンズの光軸と、光軸に対して角度 θ (rad) で入射し、焦点面上でそれぞれ結像したとする。それぞれの像の間の距離を y とする。

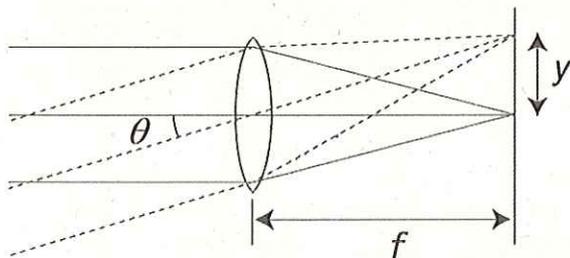


図2 平行光線とレンズの焦点面

このとき、 y はレンズの焦点距離 f と角度 θ を使って

$$y = f \tan \theta \approx f \theta \quad (\theta \ll 1) \quad (1)$$

と書くことができる。なお、角度の1秒は、ラジアンに直すと、

$$1'' = \frac{\pi}{180} \times \frac{1}{60} \times \frac{1}{60} \approx 4.85 \times 10^{-6} \text{ (rad)} \quad (2)$$

となる。以上の関係を使い、三瓶自然館の望遠鏡とカメラを組み合わせたときの、直焦点での画角の広さを計算する。例えば、60cm反射望遠鏡（焦点距離：6040 mm）の直焦点に冷却 CCD カメラ ST-10XME（撮像面の大きさ：14.9 mm × 10 mm）を取り付けた場合、画角の長い辺の幅を d とすると、式1より以下のようなになる。

$$14.9 = 6040 \times (d \times 4.85 \times 10^{-6}) \quad (3)$$

$$d \approx 509'' \approx 8.5' \quad (4)$$

同様に、短い辺は

$$10.0 = 6040 \times (d \times 4.85 \times 10^{-6}) \quad (5)$$

$$d \approx 341'' \approx 5.7' \quad (6)$$

となり、直焦点で60cm反射望遠鏡と ST-10XME を組み合わせるとおよそ (8.5' × 5.7') の画角で撮影できることが分かる。三瓶自然館の望遠鏡とカメラを直焦点で組み合わせた場合の画角の広さを表5にまとめる。

表5 三瓶自然館の望遠鏡とカメラの組み合わせによる視野角の広さ（直焦点の場合）

	SBIG ST-10XME 14.9 mm × 10 mm	FUJIFILM FinePix S5 Pro 23.0 mm × 15.5 mm
60 cm 反射 (F10) $f = 6040$ mm	8.5' × 5.7'	13.1' × 8.8'
60 cm 反射 + レデューサ (F3) $f = 1790$ mm	28.6' × 19.2'	44.2' × 29.8'
20 cm 屈折 (F9) $f = 1800$ mm	28.4' × 19.1'	44.0' × 29.6'
10 cm 屈折 (F4) $f = 400$ mm	2.1° × 1.4°	3.2° × 2.2°

像の明るさと F ナンバー

結像面での像の明るさはレンズの「有効径」と「焦点距離」で決まる。レンズの面積が大きくなると、取り込まれる光の量が増えて結像面での像が明るくなる。面積は有効径の2乗に比例するので、像の明るさはレンズの有効径の2乗に比例するといえる。また、天体写真のように被写体が無限遠にある場合、結像面での像の大きさはレンズの焦点距離によって決まる

(式1). 結像面での像が大きくなると、像の単位面積あたりの明るさは低下する。したがって、結像面での単位面積あたりの像の明るさは焦点距離の2乗に反比例することになる。

以上のことから、被写体が無限遠にあるとき、像の明るさはレンズの有効径の2乗に比例し、焦点距離の2乗に反比例することが分かる。一般に、レンズの有効径 (D) と焦点距離 (f) の比を口径比といい、以下のように定義したものをFナンバーと呼ぶ。

$$F \equiv \frac{f}{D} \quad (7)$$

このとき、像の明るさはFナンバーの2乗に反比例すると言える。つまり、Fナンバーが小さければ像が明るい、大きければ像が暗いということになる。

露出時間とFナンバー

同一焦点距離のレンズを使用した場合、写真に写る像の明るさは露出時間とFナンバーの組み合わせで決まる。例えば、露出時間を a 倍にすると写真に写る明るさは a 倍になるが、同時にレンズの有効面積を $\frac{1}{a}$ 倍にすれば、像の明るさは変化しないことになる。したがって、像の明るさを一定にしたい場合には、露出時間とレンズの有効面積を反比例の関係で変化させればよいことがわかる。この関係は相反則と呼ばれる。以下では露出時間とFナンバーの関係を考える。

レンズの有効面積 (S) は有効径 (D) の2乗に比例する。

$$S \propto D^2 \quad (8)$$

よって、式7より有効面積とFナンバーの関係は以下になる。

$$\sqrt{S} \propto D \propto \frac{1}{F} \quad (9)$$

像の明るさを一定としたい場合、露出時間 (t) と有効面積 (S) は反比例の関係にあるので、式9よりFナンバーと露出時間の関係は

$$F \propto \frac{1}{\sqrt{S}} \propto \sqrt{t} \quad (10)$$

となる。一般的に、カメラレンズの絞りが $\sqrt{2}$ 倍で刻んであるのは、カメラの露出時間を2倍で変化させることに対応している。表6にNikon NIKKOR 24 mm F2.8の絞りの刻みと $\sqrt{2}$ の累乗の値を示す。

表6 Nikon NIKKOR 24 mm F2.8の絞りの刻みと $\sqrt{2}$ の累乗

NIKKOR 24mm Fナンバー	$\sqrt{2}$ の n 乗
2.8	$(\sqrt{2})^3 = 2.8284$
4	$(\sqrt{2})^4 = 4$
5.6	$(\sqrt{2})^5 = 5.6568$
8	$(\sqrt{2})^6 = 8$
11	$(\sqrt{2})^7 = 11.3137$
16	$(\sqrt{2})^8 = 16$
22	$(\sqrt{2})^9 = 22.6274$

Fナンバーの小さいレンズを使用すると像が明るくなり、露出時間が短くても明るい写真を撮影することができる。カメラレンズで天体写真を撮影するとき、絞りをほぼ開放にするのは、Fナンバーを小さくするためである。ただし、Fナンバーの小さい光学系は収差などの影響が出やすくなる場合がある。また、露出時間を長くするとき、フィルムの場合は感度、CCDの場合はノイズの影響を無視できなくなるので注意が必要である。

天体写真撮影の特徴

普通に明るいところで撮影する写真と違い、天体写真では夜空に輝く天体が被写体となる。そのため、天体写真撮影は普通の写真とは異なる特徴がある(表7)。例えば、明るいところで写真を撮影する際、露出時間は概ね1秒以下であるが、天体写真の場合は数

表7 普通の写真と天体写真の撮影方法の違い

	普通の写真	天体写真
露出時間	1秒以下	数分から数時間
バルブ	不要	必要
レリーズ	不要	必要
絞り	被写体により変わる	ほぼ開放
フィルム感度	被写体により変わる	一般的に高いものを使用
レンズの結露防止	不要	湿度の高い夜などは必要
架台	必要により三脚など	望遠の場合：赤道儀など 広角の場合：三脚
フォーカス	オートも可	マニュアル

分から数十分、長いときには数時間の露出を行う。また、地球の自転のため、天体の位置は東から西へと変化していく。したがって、天体写真を撮影するときには、日周運動に合わせて星を追尾するための架台（赤道儀など）を必要とする場合がある。図3に同一のカメラレンズとデジタル一眼レフカメラで撮影した、日中の三瓶山 (a) と星野写真 (b) を示す。

図3 同一のカメラで撮影した、日中の三瓶山(a)と星野写真(b)



図3a 日中の三瓶山
カメラ：FUJIFILM FinePix S5 Pro
撮影日時：2007年10月3日14時56分 露出時間：
1/1000秒 感度：ISO400相当 レンズ：Nikon
NIKKOR 24 mm F2.8 (絞り F16)



図3b 星野写真
カメラ：FUJIFILM FinePix S5 Pro
撮影日時：2007年7月18日22時30分-22時50分
露出時間：20分 感度：ISO100相当
レンズ：Nikon NIKKOR 24 mm F2.8 (絞り F4)
赤道儀を使用

CCD のノイズ対策

CCD カメラを使って天体を撮影する場合、長時間露出によって発生するノイズの対策を行う必要がある。

熱ノイズ：カメラ内部の熱源や外気温などからの影響を受けることで「ダークノイズ」や「熱カブリ」と呼ばれる熱ノイズが発生する。「ダークノイズ」は CCD 本体の温度によるもので、CCD の温度が高いほどノイズは増加する。「熱カブリ」はデジタル一眼レフカメラでよく見られる。ボディ内部の熱源によるもので、機種により発生状況が異なる。熱によるノイズは画像のほぼ同じ場所に見られるため、レンズにキャップをし、本撮影と同じ条件（感度、露出時間、温度）で撮影した「ダーク画像」を使って取り除くことができる。この対策はダーク処理と呼ばれる。

ランダムノイズ：CCD に宇宙線などが入射し、毎回、いろいろな場所に発生するのがランダムノイズである。同じ条件で撮影した画像を何枚か用意し、重ね合わせをすることで影響を小さくすることができる。画像の重ね合わせはコンポジットと呼ばれる。

デジタル一眼レフカメラでの撮影

天体望遠鏡と市販のデジタル一眼レフカメラを組み合わせ、手軽に天体写真を撮影することができる。図4に三瓶自然館の望遠鏡と FUJIFILM FinePix S5 Pro で撮影した天体写真を示す。

デジタルカメラでは JPEG や RAW などの画像記録形式が選べるようになっている。JPEG は汎用性の高い保存形式で、多くの画像表示ソフトウェアで使用することができる。ただし、撮影後の画像処理を前提とした形式ではなく、また、ファイルサイズを小さくするために画像をぼかして保存している場合がある。RAW は CCD の情報をそのまま保存した生データである。通常、データ構造が各カメラメーカーで異なるため、専用のソフトが必要になる。JPEG に比べて階調が多く、また、画質に関する処理が行われる前のデータであるため、ソフトウェア上での加工の自由度も大きい。RAW データは撮影後に PC などで画質調整を行うことができるが、感度については撮影時に適正になるように設定する必要がある。なお、デジタルカメラで JPEG 形式保存をする場合、カメラ内部では RAW から JPEG への変換が行われている。表8に JPEG と RAW 形式の特徴をまとめる。

図4 三瓶自然館の望遠鏡とFUJIFILM FinePix S5 Pro で撮影した天体写真
画像処理はすべて AstroArts StellaImage5 を使用.



図4a M42 (オリオン大星雲, オリオン座, 散光星雲)
五藤光学研究所クーデ式20cm 屈折望遠鏡
($D=200$ mm, $f=1800$ mm, F9)
撮影日時: 2007年11月9日25時35分
露出時間: 1分×2コマ (総露出2分)
感度: ISO1600相当



図4d 8P/Tuttle (タットル彗星, 彗星)
PENTAX 100SDUFII 屈折望遠鏡 ($D=100$ mm,
 $f=400$ mm, F4)
撮影日時: 2008年1月5日21時38分
露出時間: 1分×4コマ (総露出4分)
感度: ISO1600相当



図4b M42 (オリオン大星雲, オリオン座, 散光星雲)
PENTAX 100SDUFII 屈折望遠鏡 ($D=100$ mm,
 $f=400$ mm, F4)
撮影日時: 2007年11月7日25時14分-25時24分
露出時間: 10分 感度: ISO100相当



図4e IC434付近 (馬頭星雲, オリオン座, 暗黒星雲)
PENTAX 100SDUFII 屈折望遠鏡 ($D=100$ mm,
 $f=400$ mm, F4)
撮影日時: 2007年11月7日25時25分
露出時間: 10分 感度: ISO100相当



図4c M31 (アンドロメダ銀河, アンドロメダ座, 銀河)
PENTAX 100SDUFII 屈折望遠鏡 ($D=100$ mm,
 $f=400$ mm, F4)
撮影日時: 2007年10月10日21時50分-23時51分
露出時間: 5分×8コマ (総露出40分)
感度: ISO400相当



図4f NGC7000 (北アメリカ星雲, はくちょう座, 散光星雲)
PENTAX 100SDUFII 屈折望遠鏡 ($D=100$ mm,
 $f=400$ mm, F4)
撮影日時: 2007年9月20日21時12分
露出時間: 10分 感度: ISO400相当

表8 JPEG と RAW の特徴

	JPEG	RAW
データ形式	共通の規格	各メーカーで異なる
ソフト	多くの画像ソフトが対応	メーカー純正ほか
ファイルサイズ	圧縮により小さくすることが可能	どちらかというとき大きい
階調	8 bit	12 bit (S5 Pro は14 bit)
画質処理	カメラ内で処理済み	処理前 (PCなどで実施)

冷却 CCD カメラによる撮影とカラー合成

天体観測用の冷却 CCD カメラは通常モノクロで撮影を行う。そのため、カラー写真を得るには、赤 (R)、緑 (G)、青 (B) 三色のそれぞれの画像を撮影し、画像処理で合成する (図5)。これを RGB カラー合成と呼ぶ。モノクロ冷却 CCD カメラでカラー写真を撮るためには、最低3枚の画像が必要となる。一般に、RGB 合成の問題の1つは、総露出時間が長くなることである。

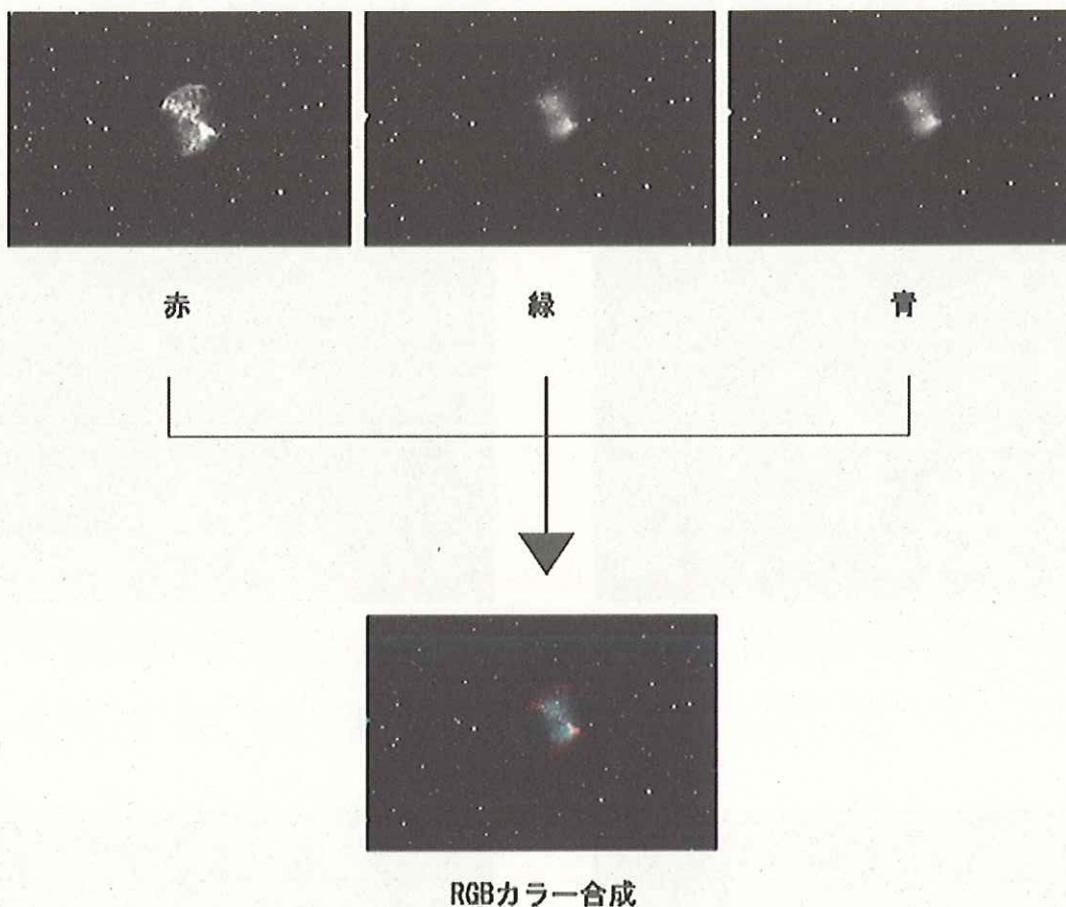


図5 冷却 CCD による RGB カラー合成
 M27 (あらい星雲, こぎつね座, 惑星状星雲, 視直径: 8' × 5')
 撮影日時: 平成19年7月18日 23:30~26:00
 西村製作所 60cm反射望遠鏡 (D=600 mm, f=6000 mm, F10)
 レデューサ使用 (合成 F3)
 SBIG ST10-XME 冷却 CCD カメラ (-10℃)
 SBIG CFW-8A カラーフィルターホイール
 露出時間 R:G:B=150:240:360秒
 AstroArts StellaImage5で画像処理

冷却 CCD カメラを使ったカラー合成での総露出時間を短くする工夫の1つに、LRGB 合成がある(図6)。この方法では、カラー画像を輝度信号(L)と色信号(RGB)に分けて考える。L画像は高解像度、RGB画像は低解像度のものをそれぞれ使用する。これは、解像度など画質のほとんどは輝度信号で決まるという性質を利用している。合計4種類の画像を使用するが、色信号のRGB画像は低解像度でもよいのでピンニングなどを行うことで、総露出時間を短くすることが可能になる。L画像はノーフィルタ、または、色がついていないクリアフィルタで撮像する。

ピンニングとは、いくつかのピクセルをまとめて1ピクセルとし読み出すことをいう。例えば、「1024×1024」ピクセルのCCDを「2×2」でピンニングした場合「512×512」の画像として扱うことになる。解像度は低くなるが、1ピクセルの受光面積を増やすことになる。その結果、星雲など広がった天体を撮影する場合などのS/N向上につながる。

図7に三瓶自然館の望遠鏡と冷却 CCD カメラ SBIG ST-10XME で撮影した天体写真を示す。

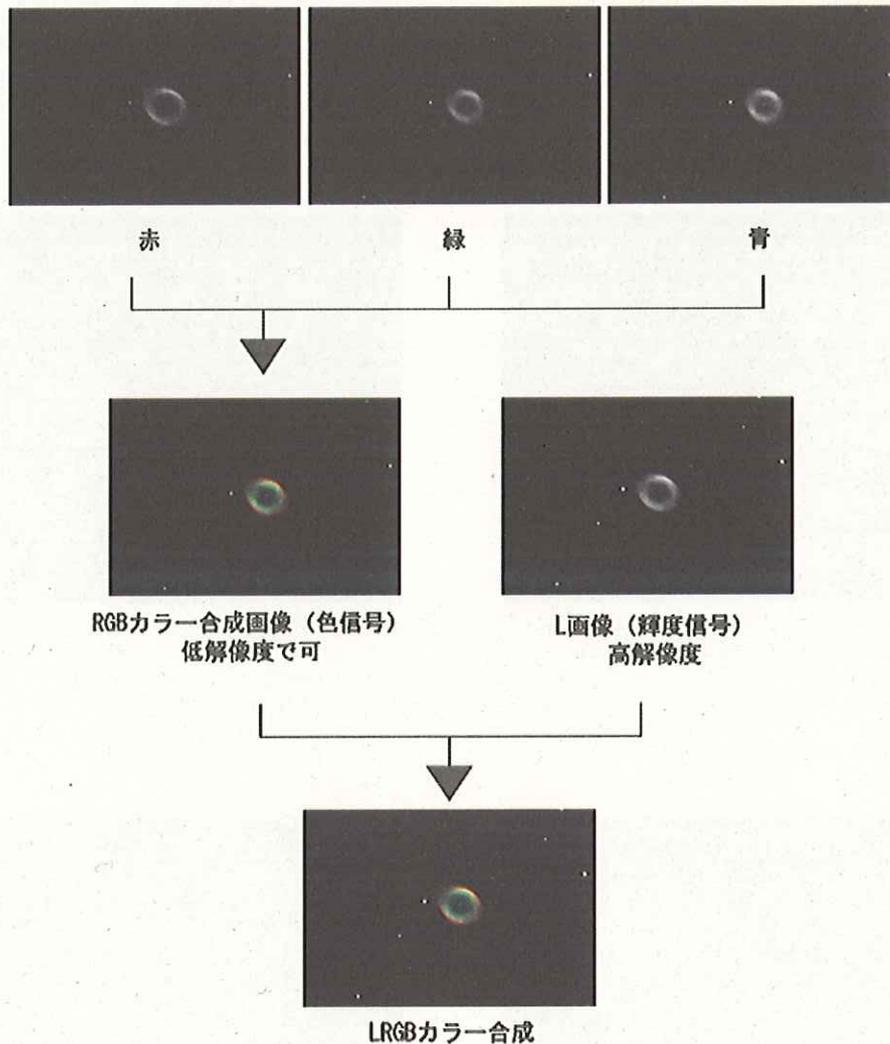


図6 冷却 CCD による LRGB カラー合成
 M57 (リング星雲, こと座, 惑星状星雲, 視直径1.3' × 1')
 撮影日時: 平成19年9月20日 20:20~21:00
 西村製作所 60cm反射望遠鏡 (D=600 mm, f=6000 mm, F10)
 SBIG ST10-XME 冷却 CCD カメラ (-8°C)
 SBIG CFW-8A カラーフィルターホイール
 露出時間 L:R:G:B=600:120:120:120秒
 AstroArts StellaImage5で画像処理

図7 三瓶自然館の望遠鏡とSBIG ST-10XMEで撮影した天体写真
 カラー画像を取得するためにカラーフィルタホイールSBIG CFW-8を、画像処理にはすべてAstroArts StellaImage5をそれぞれ使用。



図7a M27 (あれい星雲, こぎつね座, 惑星状星雲)
 西村製作所60cm反射望遠鏡 ($D=600$ mm, $f=6000$ mm, F10), レデューサ使用 (合成 F3)
 撮影日時: 2007年7月18日23時33分-24時47分
 CCD冷却温度: -10°C LRGB カラー合成
 露出 L:R:G:B = 50:150:240:360秒

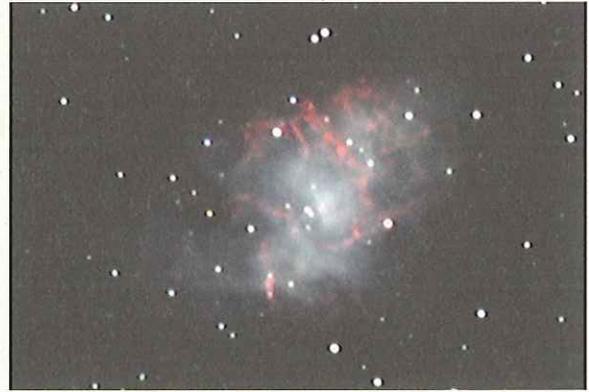


図7d M1 (かに星雲, おうし座, 超新星残骸)
 西村製作所60cm反射望遠鏡 ($D=600$ mm, $f=6000$ mm, F10) 撮影日時: 2007年11月7日
 23時42分-24時12分 CCD冷却温度: -13°C
 LRGB カラー合成 露出 L:R:G:B = 600:300:300:300
 秒 RBG はピニング2×2



図7b M27 (あれい星雲, こぎつね座, 惑星状星雲)
 西村製作所60cm反射望遠鏡 ($D=600$ mm, $f=6000$ mm, F10)
 撮影日時: 2007年9月20日21時27分-21時43分
 CCD冷却温度: -8°C LRGB カラー合成
 露出 L:R:G:B = 300:120:120:120秒



図7e M15 (ペガサス座, 球状星団)
 西村製作所60cm反射望遠鏡 ($D=600$ mm, $f=6000$ mm, F10) 撮影日時: 2007年10月11日
 21時59分-22時32分 CCD冷却温度: -15°C
 LRGB カラー合成 露出 L:R:G:B = 300:300:300:300
 秒 RBG はピニング2×2



図7c M57 (リング星雲, こと座, 惑星状星雲)
 西村製作所60cm反射望遠鏡 ($D=600$ mm, $f=6000$ mm, F10)
 撮影日時: 2007年9月20日20時22分-20時45分
 CCD冷却温度: -8°C LRGB カラー合成
 露出 L:R:G:B = 600:120:120:120秒



図7f NGC7814 (ペガサス座, 銀河)
 西村製作所60cm反射望遠鏡 ($D=600$ mm, $f=6000$ mm, F10) 撮影日時: 2007年11月7日
 22時50分-23時20分 CCD冷却温度: -13°C
 LRGB カラー合成 露出 L:R:G:B = 600:300:300:300
 秒 RBG はピニング2×2

まとめと展望

本稿では三瓶自然館の機材を使用した天体写真撮影についてまとめた。天体写真や天文現象の記録は、貴重な博物館資料であり、今後も継続して取得を行なう予定である。また、天体写真撮影についての講座などを開催することで、三瓶自然館の来館者に天体写真や天文学へ親しんでいただきたいと考えている。

参考図書

- 岡野邦彦 (2002), 冷却 CCD カメラによる天体撮影テクニック, 誠文堂新光社
- 永田信一 (2002), 図解 レンズがわかる本, 日本実業出版社
- 古庄歩 (2006), ステライメージ Ver.5 公式ガイドブック ～デジタル一眼レフカメラ 星雲星団基本編～, アstroアーツ
- Richard Berry and James Burnell (2005), The Handbook of Astronomical IMAGE PROCESSING, Willmann-Bell, Inc.