

東京学芸大学リポジトリ

Tokyo Gakugei University Repository

天体画像解析実習用データ集の作成

メタデータ	言語: Japanese
	出版者:
	公開日: 2012-10-25
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 西浦,慎悟, 濱部,勝, 伊藤,信成, 山縣,朋彦
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/2309/131818

# 天体画像解析実習用データ集の作成

# 西浦 慎悟\*·濱部 勝\*\*·伊藤 信成\*\*\*·山縣 朋彦\*\*\*\*

# 宇宙地球科学分野

(2012年5月25日受理)

NISHIURA, S., HAMABE, M., ITOH, N. and YAMAGATA, T.: Making of observational data set for practical training of astronomical data reduction. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., **64**: 45–53. (2012) ISSN 1880-4330

## Abstract

We report a making observational FITS image data set for practical training of astronomical data reduction, and examples of image analyses with them. Image data reduction is one of the most important constituent of astronomy. For extracting scientific information from observational data, it is essential to perform various data reduction. We selected images of the sixteen objects obtained with the 2 kCCD camera installed the 105cm Schmidt telescope at the Kiso observatory, Institute of Astronomy (IoA), the University of Tokyo, and made them into the FITS image data set for practical training of astronomical data reduction, we found that training with our data set effectively helped them to learn astronomical data analysis and bases of observational astronomy.

Key words: astronomical education, teaching materials of astronomy, data reduction, emission nebulae, planetary nebulae, supernova remnants, lenticular galaxies, spiral galaxies

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

要旨:本稿では,天体画像解析実習用に作成した画像データ集とその実用性の検証結果,そして実習例を報告する。 画像解析は天文学における重要な要素の一つである。観測で得られた画像データから,科学的な情報を抽出するため には,何段階にもおよぶ画像処理を施さねばならない。本研究では,東京大学木曽観測所の105 cmシュミット望遠 鏡と2kCCDカメラによって取得された観測データから,画像解析実習に適した16天体のデータを選び出し,簡易観 測ログなどを付すことで実習用データ集を作成した。天体画像処理や観測天文学の知識・経験が少ない大学生に対し て,本データ集を用いた天体画像解析実習を実施したところ,画像解析と観測天文学の基礎を理解する補助として有 効であることが確認できた。

<sup>\*</sup> 東京学芸大学(184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)

**<sup>\*\*</sup>** 日本女子大学(112-8681 東京都文京区目白台 2-8-1)

<sup>\*\*\*</sup> 三重大学 (514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577)

**<sup>\*\*\*\*</sup>** 文教大学(343-8511 埼玉県越谷市南荻島 3337)

## 1. はじめに

観測データの画像処理は、天文学における重要な要 素の一つである。天体観測によって得られた観測デー タには、天体起源の信号に加えて、観測機器由来の雑 音や画素ごとの感度むらなどが含まれている。そのた め, 観測データから天文学的な情報を抽出するには, これに先立って様々な画像処理を施す必要がある。特 に、観測データから観測機器由来の雑音を取り除き、 画素ごとの感度むら補正を行うことで, 天体起源の信 号を取り出す画像処理を、一次処理や整約、またはリ ダクション (reduction) と呼ぶ。CCDカメラによって 取得された観測データに対する基本的な一時処理の手 順はほぼ共通しているが、それを取得した観測装置に よっては固有の処理が必要となる場合もある。また, 観測データは、一般にFITS (=Flexible Image Transport System) と呼ばれるファイル形式で保存される。FITS ファイルは、ASCIIで記述されたヘッダー部と天体画 像が格納されたバイナリ・データ部からなり、天体画 像には非可逆圧縮などの加工は施されていない。ま た、ヘッダー部にはFITS規約に規定されたフォー マットに従って、その観測データに関わる様々な情報 が記述されている (Greisen and Harten 1981; Wells et al. 1981; Grosbal et al. 1988; Harten et al. 1988)。このよう な特殊性のため、一般の多くの画像処理ソフトウェア はFITSファイルに対応しておらず,一次処理をはじ めとする観測データの画像解析を行うためには、天体 画像解析に対応したソフトウェアを用いる必要があ る。

このような事情から,多くの天文関連の機関や研究 室では、学部生や大学院生に対して観測データの画像 解析実習が行われている(例えば、山縣・西浦2005 など)。特に、学部生を対象とした画像解析実習では 初学者が多いため、過度に特殊な画像処理が必要な観 測データは望ましくない。また、画像処理を施した天 体画像から何らかの天文学的情報を抽出し、科学的考 察を行わせるためには、高度過ぎる専門知識が必要と なる観測データは不適切である。そこで、本研究で は、初学者を対象とした天体画像解析実習に有用な観 測データを、実習現場で扱い易い形式にまとめ、さら に、実際にその実用性を確認することを目的とした。

## 2. 実習用サンプル天体の選出

天体画像解析実習用の天体には、一次処理の行い易 さを考慮して、1)天球上で比較的広がっているもの、 2)複数の観測バンドで画像が取得されたもの、そし て実習内容を豊富にするため、3)多くの天体の種類 を網羅すること、という選出条件を設けた。また、観 測データの本格的な定量分析を行うためには、一次処 理に続いて、等級較正・フラックス較正と呼ばれる作 業が必要となるが、これにはより専門的な知識・技術 と、より精密な観測データが必要となる。そのため、 今回は4)ある程度の定性分析が可能な品質のデータ まで採用する、とした。なお、本稿での「ある程度の 定性分析」とは天体の相対的な色が議論できることを 意味する。

天球上で広がった天体を観測するためには、視野の 広い望遠鏡と観測装置が必要となる。そこで本研究で は,東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究 センター木曽観測所(以下,木曽観測所)の105cm シュミット望遠鏡と2kCCDカメラに注目した。シュ ミット望遠鏡とは、球面鏡の主鏡と鏡筒先端部の補正 板と呼ばれるレンズによって、著しく広い観測視野を 実現する望遠鏡の総称である。木曽観測所のシュミッ ト望遠鏡は、この形式の望遠鏡では世界第4位の有効 口径105cmを誇り、これに同観測所で開発された可 視光広視野CCDカメラ(通称,2kCCDカメラ)を搭 載することで、視野約1度角四方という世界トップク ラスの広視野撮像観測装置となる(Itoh et al. 2001)。 2kCCDカメラには観測天文学における測光標準シス テムであるジョンソン・カズンズ (Johnson-Cousins) システムに準拠したU(330nm波長帯), B(440nm 波長帯), V (550nm波長帯), Rc (660nm波長帯), Ic (800nm波長帯) フィルターが用意されており (Bessell 1990), 天体の色を定性的に議論する際に有 用である。

この観測装置によって取得された観測データから, 条件に合うものとして,散光星雲3個,惑星状星雲3 個,超新星残骸2個(ただし,網状星雲は天球上であ まりに大きく広がっているため,異なる3領域を観測 している),楕円銀河1個,レンズ状銀河2個,渦巻 銀河3個,連銀河1個,銀河群1個を選出した。これ ら実習用サンプル天体の詳細は表1に示した。

天体の種類	天体名	観測日	観測バンド(露光時間×枚数)
散光星雲	オメガ星雲 (M17)	2003年8月3日	$B(300 $ 秒×1), $V(300 $ 秒×1), $R_{c}$ (180 秒×1), $I_{c}$ (180 秒×1)
	三裂星雲 (M20)	2002年8月5日	$B$ (300 秒×4), $V$ (300 秒×4), $R_{ m c}$ (180 秒×4), $L$ (180 秒×4)
	繭星雲 (IC5146)	2003年8月2日	$B(300$ 秒×1), $V(300$ 秒×1), $R_{ m c}$ (180 秒×1), $I_{ m c}$ (180 秒×1)
惑星状星雲	唖鈴状星雲 (M27)	2001年12月7日	$B$ (180 秒×3), $V$ (180 秒×3), $R_{ m c}$ (180 秒×3), $I_{ m c}$ (180 秒×3)
	リング状星雲 (M57)	2004年9月12日	$B$ (150 秒×1), $V$ (150 秒×1), $R_{ m c}$ (90 秒×1), $L$ (90 秒×1)
	ふくろう星雲 (M97)	2002年12月30日	$B(300$ 秒×3), $V(300$ 秒×3), $R_{c}$ (180 秒×3), $L_{c}$ (180 秒×3)
超新星残骸	かに星雲 (M1)	2002年12月30日	$B$ (300 秒×1), $V$ (300 秒×1), $R_{ m c}$ (180 秒×1), $L$ (180 秒×1)
	網状星雲(NGC6960)	2003年7月7日	$B(300$ 秒×1), $V(300$ 秒×1), $R_{ m c}$ (180 秒×1), $I_{ m c}$ (180 秒×1)
	網状星雲(NGC6992)	2003年7月7日	$B$ (300 秒×1), V(300 秒×1), $R_{ m c}$ (180 秒×1), $L$ (180 秒×1)
	網状星雲(NGC6995)	2003年7月7日	$B$ (300 秒×1), V(300 秒×1), $R_{ m c}$ (180 秒×1), $L$ (180 秒×1)
楕円銀河	NGC524	2004年8月12日	$B$ (300 秒×3), $V$ (300 秒×3), $R_{ m c}$ (180 秒×3), $I_{ m c}$ (150 秒×3)
レンズ状銀河	NGC5866	2004年8月13日	$B$ (300 秒×3), $V$ (300 秒×3), $R_{ m c}$ (90 秒×5) , $L$ (90 秒×5)
	NGC7332	2004年8月13日	$B(150$ 秒×4), $V(150$ 秒×4), $R_{ m c}$ (90 秒×4) , $L$ (60 秒×4)
渦巻銀河	M63	2005年2月12日	$B(150$ 秒 $ imes$ 3), $V(150$ 秒 $ imes$ 3), $R_{ m c}$ (90 秒 $ imes$ 3) , $L$ (90 秒 $ imes$ 3)
	M83	2007年4月15日	$B(300$ 秒×1), $V(300$ 秒×1), $R_{\rm c}$ (180 秒×1)
	回転花火銀河(M101)	2004年8月12日	$B$ (240 秒×3), V(240 秒×3), $R_{\rm c}$ (120 秒×3) , $L$ (120 秒×3)
連銀河	子連れ銀河 (M51)	2006年8月15日	B(300  秒×1, 240 秒×2), $V(300 $ 秒×1, 240 秒×2),
			$R_{ m c}$ (150 秒×3) , $I_{ m c}$ (150 秒×3)
銀河群	HCG61	2004年12月9日	$B(150$ 秒×3), $V(150$ 秒×3), $R_{ m c}$ (90 秒×3), $I_{ m c}$ (90 秒×3)

表1. 実習用サンプル天体

#### 3. 実習用データ集の作成

前述したように、観測データには、目標天体からの 信号に加えて、観測機器由来の雑音や感度むらなどが 含まれている。一次処理によって、これらを取り除く ためには、天体を撮影した画像データ以外にも、多く の画像データが必要となる(例えば、宮崎 2002;高田 2007)。ここで、未処理の観測データ(一般に生デー タと呼ぶ)の信号を*I*obs、目標天体からの信号を*I*obj、 夜天光や市街光などの背景光成分(一般にスカイと呼 ぶ)を*I*sky、CCDの画素ごとの感度むらを*S*、暗電流 成分(一般にダークと呼ぶ)を*I*dark、CCDからの電荷 の読み出し時に、線形性と負の雑音成分の保持のため に付加される嵩上げ成分(一般にバイアスと呼ぶ)を *I*biasとすると、生データは、

$$I_{\text{obs}} = (I_{\text{obj}} + I_{\text{sky}}) \times S + I_{\text{dark}} + I_{\text{bias}}$$
(1)

と表される。従って、目標天体からの信号を得るため には、生データ画像からバイアス画像、ダーク画像を 差し引き、これを感度むら画像で除した後に、スカイ 成分を差し引けば良い。なお、感度むら画像をフラッ ト画像、感度むらの補正作業をフラット・フィール ディングと呼ぶ。バイアス画像やダーク画像、そして フラット画像は、普通、観測夜中に複数取得され、一 次処理の過程でそれらを合成することで精度の向上が 図られる。特に、画素ごとの感度むらは波長依存性を 持つため、フラット画像はフィルター・バンドごとに 取得する必要がある。ただし、木曽観測所の2kCCD カメラでは、ダーク成分がほぼゼロであるため(吉田 ほか1997)、観測中にダーク画像を取得するケースは ほとんどない。今回、選出したサンプル天体の観測に おいても、ダーク画像は取得されていない。

さらに,天体画像そのものも複数取得して合成する ことがあるが,この場合は,スカイ成分を取り除いた 後に,星像サイズとフラックス・レベルを一致させ, 位置合わせをして合成を行う。

このように、木曽観測所105 cmシュミット望遠鏡 と2kCCDカメラによる天体画像を用いた画像解析実 習に、最低限必要な観測データは、フィルター・バン ドごとの天体画像と複数のフラット画像、そして複数 のバイアス画像である。そこで、まず、表1に示した 天体を観測した晩のデータの中から、無関係な天体を 撮影した画像データや、飽和した画像データ、除去不 可能な雑音が混入した画像データなどを取り除いた。 そして、ASCIIのファイルに、FITSファイルの通し番 号(2kCCDカメラの画像データは、「kcd」の後に 5-6ケタの数字を付したFITSファイルとして保存さ れる)に対して、観測対象、使用したフィルター・バ ンド、露光時間、観測時の天体の天頂距離、などを簡 潔にまとめた簡易観測ログを作成した。図1に、渦巻 銀河M63の簡易観測ログの一部を例として掲げる。 これら1天体分の観測データと簡易観測ログを, CD1枚分としたISOファイルの形にまとめ上げた。 なお,超新星残骸網状星雲の三つの領域(NGC6960, NGC6992, NGC6995)については,一つの大きな同じ 天体の一部であることと,同じ観測夜に取得された データであることを配慮して,一つのISOファイルに まとめた。これによって作成した16個のISOファイ ルのサイズは,サンプル天体によって異なるが, 300MBから580MB程度である。

# Object : M63 (=NGC5055)						
# ObsDate : 2005/02/12						
(中略)						
# kcd	Objects F	ilter	Exp.Time	Comments		
#						
75609	Bias					
75610	Bias					
75611	Bias					
75612	Bias					
75616	DomeFlat	В	90s			
(中略)						
75627	DomeFlat	V	30s			
75628	DomeFlat	Rc	10s			
(中略)						
75639	DomeFlat	Ic	30s			
75640	Bias					
(中略)						
75668	Bias					
75715	M63	В	150s	Z. D. =18.2		
75716	M63	V	150s			
75717	M63	Rc	90s			
75718	M63	Ic	90s			
75719	M63	В	150s	Z. D. =21.4		
75720	M63	V	150s			
75721	M63	Rc	90s			
75722	M63	Ic	90s			
75723	M63	В	150s	Z. D. =24.7		
75724	M63	V	150s			
75725	M63	Rc	90s			
75726	M63	Ic	90s			
75727	Bias					
(中略)						
75742	Bias					

図1 簡易観測ログの例。長いため同じ内容のファイ ルが連続する部分などは省略した。ヘッダー部 には観測年月日などの情報を記載した。左端か らFITSファイルの通し番号,撮影対象、フィ ルター・バンド,露光時間(秒)、コメント、 となっている。コメント欄のZ.D.とは天頂距 離を示し、度角単位で表している。

# 4. 天体画像解析実習

完成したデータ集を用いて,初学者を対象とした天 体画像解析実習を行った。これによって,本データ集 の実用性を検証し,また,各天体画像から初学者たち が得た実習結果の例を確認した。

#### 4. 1 東京学芸大学プロジェクト学習科目Ⅱ

2009年度および2010年度の東京学芸大学プロジェ クト学習科目II「教育施設や教材を用いた宇宙地球科 学」の中で、東京学芸大学教育学部2年生48名 (2009年度24名, 2010年度24名)に対して、本デー タ集を用いた天体画像解析実習を行った。表2に使用 した天体のデータを示した。

表2. 画像解析実習で用いた天体データ

プロジェク	ト学習科目Ⅱ	天体観測実習
2009年度	2010年度	2010年度
M1	M1	M1
M20	M17	M20
M51	M20	M27
M57	M27	M57
M97	M51	M101
M101	M57	IC5146
IC5146	M63	NGC5866
NGC6992	M97	NGC6992
	M101	
	IC5146	
	NGC6992	
	HCG61	

本実習の目標は、1つの天体に対して*B、V、R*c画 像を1つずつ作成し、最終的にこの3画像から天体の カラー画像を作成することである。また、画像処理の 難易度を下げるために、バイアス画像やフラット画像 の合成は行わず、バイアス画像は全てに共通の1枚の み、フラット画像は*B、V、R*cバンドに対して1枚ず つを使用することにした。作業は、学生2名(2009 年度)ないし3名(2010年度)を1グループとし、 この1グループに対してコンピュータ1台と1天体分 のデータを割り当て、グループで1つの天体の画像処 理を行わせた。実習に用いたコンピュータ環境は、 Microsoft Windows 2000上でCygwin (MS-Windows上 でUnix系OSに似た環境を提供するフリーウェア、 http://cygwin.com/)を起動し、この中でPC-IRAF (=Image Reduction and Analysis Facility、アメリカの国 立光学天文台が開発・無償配布している天体画像解析 用ソフトウェア)を用いて、スカイ成分除去までの画 像処理を行った。画像解析に用いるFITSファイルの 選出は、簡易観測ログをモニター上で開き、これを閲 覧することで行わせた。スカイ成分除去後の*B、V、 R*c画像からカラー画像を作成する際には、アストロ アーツ(http://www.astroarts.co.jp)製のステライメー ジ5を使用し、*B*バンド画像をB(青色)、*V*バンド画 像をG(緑色)、*R*cバンド画像をR(赤色)の各チャン ネルに割り当てた。

天体画像解析実習には90分授業2週分を配分し、 その最初の口頭質問によって、参加者の全てがUnix 系OSのコンピュータ環境に慣れていないこと、今回 のような天体画像解析を経験していないこと、を確認 した。そこで最初の30分は、今回使用するコン ピュータ環境と前節で述べたような天体画像処理の原 理を解説した。続いて, 天体のBバンド画像の一次処 理を行ったが、一次処理は端末への直接的なコマンド 入力で行うため、この時には、画像処理のために入力 すべきコマンドを逐一説明・指示し、それを実行させ た。参加者全員が、このようなコマンド入力の作業に 慣れていないこともあり, Bバンド画像のスカイ成分 除去までにほぼ45分を必要とした。ただし、この後 のVおよびRcバンド画像の一次処理については、両 方のスカイ成分除去まで60分程度で完了した。最後 のカラー画像作成も、作業手順を逐一指示して行わせ たが、これには20分程度を要した。図2に、2009年 度と2010年度の東京学芸大学プロジェクト学習科目 Ⅱ「教育施設や教材を用いた宇宙地球科学」で、学部 2年生等が実際に作成した、天体のカラー画像の例を 掲げる。

慣れない画像解析作業のため「何をやっているか さっぱりわからなかった」という感想が1名からあっ たが、画像の合成を省略した画像解析実習では、初学 者が対象であっても90分2回の実習時間で、どのグ ループも天体のカラー画像を作成することができるこ とを確認できた。これは、大学における演習や実習の 授業に適度な内容・時間であろう。

#### 4.2 天体観測実習

2010年度8月に,東京学芸大学自然科学系宇宙地 球科学分野の学部3年生2名,日本女子大学理学部数 物科学科の学部4年生6名,文教大学教育学部の学部 3年生8名,三重大学教育学部の学部2年生16名の 計32名に対し,本データ集を用いた画像解析実習を 行った。表2に使用したデータを示した。



プロジェクト学習科目Ⅱで作成された天体の 図2 B+V+Rcカラー画像例。画像の上方が北,左方 が東。各画像の所々に見られる縦線はバッド・ カラムと呼ばれる欠陥画素によるもの。a) 散 光星雲IC5146、散光星雲のすぐ外側に暗黒星 雲が存在していることが分かる。図中右下の白 色棒は10秒角を示す。2009年度プロジェクト 学習科目Ⅱで作成されたもの。b) 惑星状星雲 M27, 図中右下の白色棒は5秒角を示す。 2010年度プロジェクト学習科目Ⅱで作成され たもの。c)超新星残骸網状星雲の一部 (NGC6992), 図中右下の白色棒は10秒角を 示す。2009年度プロジェクト学習科目Ⅱで作 成されたもの。d) 渦巻銀河M101, 図中右下 の白色棒は10秒角を示す。2009年度プロジェ クト学習科目Ⅱで作成されたもの。

本実習の本来の目的は、学部生自身による木曽観測 所105cmシュミット望遠鏡と2kCCDカメラを用いた 天体観測およびその画像解析実習であった。しかし、 実習期間中の天候が曇りまたは雨で観測データが取得 できなかったため、本データ集を予備データとして、 これを使った画像解析実習を実施した。本実習の目標 は二つある。一つ目は、前節同様にB, V, Rc画像の 一次処理とこれらを用いた天体のカラー画像作成であ る。そして、二つ目は、天体のカラー画像からその天 体の測光学的性質、特に天体の色の要因を考察するこ とである。

本実習においても、学部生のほぼ全員が天体画像解 析の初学者であったことから、画像処理の難易度を下 げるために、バイアス画像は全てに共通の1枚のみ、 フラット画像は各バンドに対して1枚ずつを使用させ た。作業は、4大学の学生を混在させた形で3名を1 グループとし、この1グループに対してコンピュータ 1台と1天体分のデータを割り当て、グループで1つ の天体の画像処理・考察を行わせた。実習に用いたコ ンピュータ環境は、Microsoft Windows XP(一部は MS-Windows 2000)上でCygwinを起動し、この中で PC-IRAFとSPIRAL (=Surface Photometry Interactive Reduction and Analysis Library: Hamabe and Ichikawa 1992; 濱部 2008)を用いて、スカイ成分除去までの画 像処理を行った。画像解析に用いるFITSファイルの 選出は、簡易観測ログをモニター上で開き、これを閲 覧することで行わせた。スカイ成分除去後の*B、V、*  $R_{c}$ 画像からカラー画像を作成する際には、アストロ アーツ製のステライメージ3またはIRAF/colorパッ ケージを使用し、*B*バンド画像をB、*V*バンド画像を G、 $R_{c}$ バンド画像をRの各チャンネルに割り当てた。 合成後のカラー画像の分析(例えば開口測光など)に は、ステライメージ3を用いた。

本実習においても、最初のBバンド画像の一次処理 については、入力すべきコマンドを逐一説明・指示 し、それを実行させ、Vバンド以降は自主的に画像解 析を行わせた。今回は、2つのグループに対して、同 じ種類の天体を割り当てたため(例えば散光星雲 M20とIC5146など)、最終的には2グループ6名に合 同で考察を行わせ、その結果をパワーポイントによっ て約15分程度で発表させた。なお、考察とパワーポ イントによるプレゼンテーション資料の作成には、約 6時間程度の時間を与えた。

#### 5. 画像解析実習の例

#### 5.1 散光星雲

図3は散光星雲M20とIC5146(図2a参照)のカ ラー画像から、学部生達が得た散光星雲各領域の2色 図である。散光星雲は、豊富なガスとダストの中から 恒星が誕生している場であり、OB型星からの紫外線 によって周辺領域のガスが電離された輝線星雲と、恒 星からの光がダストによって反射されている反射星 雲,そして特にガス・ダストの密度が高い領域が背景 からの光を遮る暗黒星雲からなる。星雲中に最も豊富 に存在する元素は水素であるため、電離ガスの大部分 は電離水素である。これを起源とするバルマー系列の Ha輝線の波長は656nmであり、これがRcバンドの波 長帯に入るため、散光星雲のB+V+Rcカラー画像で電 離水素が多く存在する領域は赤くなる。散光星雲は, 紫外線による水素の電離、ダストによる可視光の吸 収・散乱という基本的な現象を、物理的素過程から考 察する良い対象となり得る。図3では、実際に散光星 雲の「赤い」領域は相対的にRcバンド強度が強い左 端に分布している。これに対して、恒星の光を反射・



図3 天体観測実習で学部生が作成した散光星雲 M20(黒丸)とIC5146(白丸)の各領域に 対する2色図。縦軸がBバンドとVバンドの 強度比B /V, 横軸がVバンドとR。バンドの 強度比V /Rc。×印は同じ画像内の恒星であ る。括弧内の色は、領域のB+V+R。カラー画 像上での色を示す。

散乱することで輝いている反射星雲の領域では, 短波 長側で散乱の効果が高いために青くなる。図3では, 散光星雲中の「青い」領域は,恒星に近い場所に分布 し,その色が恒星に近いものであることを示唆してい る。学部生のプレゼンテーションでは,散光星雲の赤 く見える領域には電離水素が多く存在していること, 青く見える領域の色は恒星に近いこと,が言及されて いた。

#### 5.2 惑星状星雲と超新星残骸

惑星状星雲と超新星残骸は、どちらも輝線のみで輝 く電離ガス星雲である。しかし、前者は中心星である 白色矮星からの黒体輻射の紫外線による光電離、後者 は高速で拡がるガス雲の衝撃波を電離源としている。 これらによって様々な輝線が励起されるが、特に強度 が強いものとしては、バルマー系列のHa輝線が $R_c$ バ ンド、電離酸素による[OIII]  $\lambda \lambda$  4959,5007 (以下, [OIII]と省略)輝線がVバンド、バルマー系列のH $\beta$ 輝線がBバンドの波長帯にそれぞれ含まれる。惑星状 星雲と超新星残骸は、原子の電離とその条件を考察す る上で良い対象となる。

図4は、学部生達が得た、惑星状星雲M27(図2b 参照)の中央を通る南北線に沿って測定された各フィ ルター・バンドでの強度(単位はADU=Analog to Digital Unit)分布である。特に中心星に近い領域で は、Ha輝線よりも高温の[OIII]輝線が相対的に強く生



図4 惑星状星雲M27の南北軸にそった各フィル ターでの強度分布。縦軸は各バンドでの強度 (ADU),横軸はM27を北から南に縦断する各 領域の便宜的な番号。5がほぼ中心,1と9が それぞれ北端と南端部分にあたる。黒菱形と実 線はBバンド,白丸と点線はVバンド,黒丸と 実線はR。バンドを示す。

じる。しかし、中心星から離れた領域では、温度が低 下して[OIII] 輝線を励起できないため、中心星から離 れた領域(図4の1や9)では、*R*cバンド強度に対し て、*V*バンド強度が急激に低下していることが分かる。 学部生のプレゼンテーションでは、Ha輝線から電離 水素の存在については言及されていたが、他のフィル ター・バンドで優勢な輝線成分を特定するには至らな かった。これは、[OIII]が禁制線であり、天文学や分 光学の専門書の中でも高度な内容として取り上げら れ、学部生達が、彼等にとって難解な専門書を避けた ためではないかと思われる。

図5は、学部生達による、超新星残骸網状星雲の一 部であるNGC6992(図2c参照)各領域と同じ画像中 の恒星に対する2色図である。図5では、NGC6992 各領域の色が、明らかに恒星の色と異なる分布を示し ている(図5で白色に見える領域のデータ点がある が、これは三つのフィルター・バンド全てで飽和して いることを意味する)。学部生のプレゼンテーション では、このことから、超新星残骸と恒星では、異なる 発光機構を持つであろうことが述べられていた。しか し、惑星状星雲と同様に、Ha輝線についての言及は あったが、他のフィルター・バンドにおける優勢な輝 線成分を特定するには至らなかった。

なお,学部生の惑星状星雲・超新星残骸の考察について,"輝線成分の特定には至らなかった"と報告したが,彼らが実際に行ったことは,各フィルター・バ



 図5 超新星残骸網状星雲の一部NGC6992の各領 域の2色図。縦軸がBバンドとVバンドの強度 比B/V,横軸がVバンドとRcバンドの強度比 V/Rcを示す。黒丸がNGC6992の各領域で, マークに添えた色はB+V+Rcカラー画像上での 色を示す。×印はNC6992と同じ画像内の恒 星を示す。

ンドがカバーする波長範囲と、理科年表(国立天文台 編 2009)などから得た様々な元素の輝線の波長の比 較である。また、どちらの天体についても、Ha輝線 については言及されていたため、惑星状星雲や超新星 残骸のスペクトルが掲載された文献を提示するなどの 誘導によって、具体的な輝線名やこれら星雲中で実現 している電離プロセス・電離源・電離条件などの一端 に辿り付けるものと考える。さらに、光電離や衝撃 波によって生じる各輝線の相対的な強度は、電離ガ スの温度や密度・金属量・衝撃波速度などの様々な 物理条件の違いによって生じることが明らかになっ ている(例えばStasinska 1984; Dopita and Sutherland 1996等)。ただし、これは極めて高度に専門的な内容 であるため、学部生対象の実習に持ち込む際には、詳 しい解説を行うなどの注意が必要である。

#### 5.3 銀河

銀河は系外銀河とも呼ばれ,宇宙を構成する単独の 天体としては最も巨大なものである。その形態から楕 円銀河・レンズ状銀河・渦巻銀河・不規則銀河に大別 されるが,一般に,前者二つでは既に星生成が終了し ているため,主に古い恒星から成り,恒星の材料とな るガスやダストもほとんど存在しないと考えられてい る。これに対して,後者二つでは豊富なガスやダスト を持つため,現在でも盛んな星生成が生じている。若 い(正確には寿命が短い大質量の)恒星の表面温度は 1万から数万K,これに対して古い(正確には寿命が 長い小質量の)恒星の表面温度は数1000K程度であ る。そのため,現在でも盛んな星生成が生じている銀 河では若い恒星の割合が高くなり,相対的にその色も 青くなる。反対に,星生成が停止すると,時間ととも に銀河の色は相対的に赤くなっていく。従って,銀河 は,恒星集団の形成と進化を学ぶ上で良い対象となる。



図6 上)レンズ状銀河NGC5866の中心部(黒丸 と実線),中間部(×印と点線),外縁部(+ 印と破線)のSED。下)渦巻銀河M101の中 心部(黒丸と実線),渦巻腕(×印と点線),渦 巻腕の間(+印と破線),星生成領域(白菱形 と一点破線)のSED。縦軸は相対的な輝度 (それぞれの領域のVバンドの輝度で規格化), 横軸は波長を示す。なお、フィルター・バンド 名を観測点に添えた。

図6に、学部生達が導出した、レンズ状銀河 NGC5866と渦巻銀河M101(図2d参照)の各領域に おけるスペクトル・エネルギー分布 (SED = spectral energy distribution) を示した。なお、輝度はそれぞれ の領域におけるVバンドの輝度で規格化されている。 これによると、NGC5866の各領域とM101の中心部と 渦巻腕の間の領域では、相対的にBバンドの輝度が低 く、若い恒星の割合が小さいことを示している。反対 に、M101の渦巻腕と星生成領域(渦巻腕中に分布す る斑状構造)では、Bバンドの輝度が高く、この領域 に若い恒星が多く分布していることが分かる。学部生 のプレゼンテーションからは、レンズ状銀河や渦巻銀 河のバルジ領域には古い恒星が多く分布しているこ と、渦巻銀河の渦巻腕の領域には若い恒星が多く分布 していることが述べられており,両銀河の構造や色に ついての相違点が考察されていた。

# 6. まとめ

東京大学木曽観測所の105cmシュミット望遠鏡と 2kCCDカメラによって取得された16天体の観測デー タを整理し,簡易観測ログを付すことで,天体画像解 析実習用のFITS画像データ集を作成した。

これを2009・2010年度の東京学芸大学プロジェク ト学習科目II「教育施設と教材を用いた宇宙地球科 学」で、48名の教育学部2年生(全員がUnix系OSと 天体画像解析の初学者)の画像解析実習に使用した。 画像処理をバイアス画像1つ、天体画像とフラット画 像はフィルター・バンドごとに1つ、という最小限で 行い、作業は入力コマンドを逐一指示するという方法 で実施したところ、全ての学部生(実際には2-3人 で1グループとした)が3時間程度で天体のカラー画 像を作成できることが分かった。これによって、本 データ集を用いた天体画像解析実習は、大学での2週 分の授業で実施可能であることを確認できた。

また、東京学芸大学教育学部・日本女子大学理学 部・文教大学教育学部・三重大学教育学部の学部 2-4年生32名に対する天体画像解析実習から、幾つ かの散光星雲、惑星状星雲、超新星残骸、系外銀河に 対する天体の色の分析例が得られた。学部生による実 習結果報告のプレゼンテーションから、本データ集に よって作成した天体のカラー画像を元に、天体の色と その要因について考察することで、観測天文学に必要 な基礎的知識を学習し得ることを確認できた。ただ し、禁制線に関わる原子の電離については、天体のス ペクトルの提示など、より具体的な誘導が必要である ことが明らかになった。今後は、この点に留意した天 体画像解析実習を試みる予定である。

本教材作成にあたって,観測データ取得に協力して 頂いた東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研 究センターの宮田隆志氏,同センター木曽観測所の三 戸洋之氏・征矢野隆夫氏,国学院大学の小倉勝男氏, 東京学芸大学天文学研究室の2004年度および2006年 度の大学院生・学部生のみなさんに深く感謝いたしま す。また,2009年度および2010年度の東京学芸大学 プロジェクト学習科目Ⅱ「教育施設や教材を用いた宇 宙地球科学」に出席した学部生48名と,2010年度の 天体観測実習に参加した日本女子大学・三重大学・文 教大学・東京学芸大学の学部生32名,そしてその時 にTAを務めた5名の各大学の大学院生・学部生の協 力によって,本教材をいろいろと試行することができ ました。みなさんに心から感謝しお礼申し上げます。 そして最後に,本稿の執筆・出版に関しては,学術 振興会による科学研究費補助金(22300269, 23501014,24654046),から援助を受けました。ここ に感謝申し上げます。

## 引用文献

- Bessell, M. S. (1990), "UBVRI pass bands", Publications of the Astronomical Society of Pacific, 102, pp. 1181-1199.
- Dopita, M. A., and Sutherland, R. S. (1996), "Spectral Signatures of Fast Shocks. I. Low-Density Model Grid", Astrophysical Journal Supplement, 102, pp. 161-188.
- Greisen, E. W., and Harten, R. H. (1981), "An Extension of FITS for Small Arrays of Data", Astronomy and Astrophysics Supplement, 44, pp. 371-374.
- Grosbal, P., Harten, R. H., Greisen, E. W., and Wells, D. C. (1988), "Generalized Extensions and Blocking Factors for FITS", Astronomy and Astrophysics Supplement, 73, pp. 359-364.
- Hamabe, M., and Ichikawa, S. (1992), "Development of Surface Photometry Package SPIRAL under IRAF Environment", in Proc. of Astronomical Data Analysis Software and Systems I, Astron. Soc. Pacific Conference Series, Vol. 25, eds. D. Worrall, Biemesderfer, and J. Barnes (ASP, San Francisco), pp. 325-327.
- 濱部 勝(2008), "SPIRALの改修について",木曽シュミットシンポジウム2008,東京大学大学院理学系研究科附属 天文学教育研究センター木曽観測所HP,http://www.ioa. s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/RESEARCH/symp2008/pdf/kiso2008\_ hamabe.pdf

- Harten, R. H., Grosbal, P., Greosen, E. W., and Wells, D. C. (1988), "The FITS Tables Extensions", Astronomy and Astrophysics Supplement, 73, pp. 365-372.
- Itoh, N., Soyano, T., Tarusawa, K., Aoki, T., Yoshida, S., Hasegawa, T., Yadomaru, Y., Nakada, Y., and Miyazaki, S. (2001), "A very wide-field CCD camera for Kiso Schmidt telescope", Publications of the National Astronomical Observatory of Japan, 6, pp.41-48.
- 国立天文台編 (2009), 理科年表 平成22年, 丸善株式会社, 東京, pp. 431-433.
- 宮崎 聡 (2002), "第3章 光検出器の発展「高感度CCD」",
   家 正則監修,「21世紀の宇宙観測」,誠文堂新光社,東京, pp. 55-75.
- Stasinska, G. (1984), "A grid of model nebulae photoionized by a power-law continuum", Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 55, pp. 15-32.
- 高田唯史(2007), "8.2 観測手法と一次処理",家 正則・ 岩室史英・舞原俊憲・水本好彦・吉田道利(編),シリー ズ現代の天文学 第15巻「宇宙の観測 I – 光・赤外天文 学」,日本評論社,東京, pp. 253-267.
- Wells, D. C., Greisen, E. W., and Harten, R. H. (1981), "FITS: A Flexible Image Transport System", Astronomy and Astrophysics Supplement, 44, pp. 363-370.
- 山縣朋彦・西浦慎悟 (2005), "研究施設を利用した天体観 測・解析実習について", 文教大学教育学部紀要, 39, pp. 111-120.
- 吉田重臣・征矢野隆夫, 樽沢賢一, 青木 勉, 長谷川隆 (1997), "2kCCDカメラの現況", 木曽シュミットシンポ ジウム集録, 東京大学理学部天文学教育研究センター木 曽観測所, pp. 3-10.