



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: jpn 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 2kCCD 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 with adding simple observation logs. Applying our data set to our college students who are beginners for 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、東京大学木曾観測所の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。

* 東京学芸大学 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)
** 日本女子大学 (112-8681 東京都文京区目白台 2-8-1)
*** 三重大学 (514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577)
**** 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曾観測所 (以下、木曾観測所) 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。木曾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)、 R_c (660nm波長帯)、 I_c (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。

表1. 実習用サンプル天体

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	$B(300 \text{ 秒} \times 1), V(300 \text{ 秒} \times 1), R_c(180 \text{ 秒} \times 1), I_c(180 \text{ 秒} \times 1)$
	三裂星雲 (M20)	2002年8月5日	$B(300 \text{ 秒} \times 4), V(300 \text{ 秒} \times 4), R_c(180 \text{ 秒} \times 4), I_c(180 \text{ 秒} \times 4)$
	繭星雲 (IC5146)	2003年8月2日	$B(300 \text{ 秒} \times 1), V(300 \text{ 秒} \times 1), R_c(180 \text{ 秒} \times 1), I_c(180 \text{ 秒} \times 1)$
惑星状星雲	唾鈴状星雲 (M27)	2001年12月7日	$B(180 \text{ 秒} \times 3), V(180 \text{ 秒} \times 3), R_c(180 \text{ 秒} \times 3), I_c(180 \text{ 秒} \times 3)$
	リング状星雲 (M57)	2004年9月12日	$B(150 \text{ 秒} \times 1), V(150 \text{ 秒} \times 1), R_c(90 \text{ 秒} \times 1), I_c(90 \text{ 秒} \times 1)$
	ふくろう星雲 (M97)	2002年12月30日	$B(300 \text{ 秒} \times 3), V(300 \text{ 秒} \times 3), R_c(180 \text{ 秒} \times 3), I_c(180 \text{ 秒} \times 3)$
超新星残骸	かに星雲 (M1)	2002年12月30日	$B(300 \text{ 秒} \times 1), V(300 \text{ 秒} \times 1), R_c(180 \text{ 秒} \times 1), I_c(180 \text{ 秒} \times 1)$
	網状星雲(NGC6960)	2003年7月7日	$B(300 \text{ 秒} \times 1), V(300 \text{ 秒} \times 1), R_c(180 \text{ 秒} \times 1), I_c(180 \text{ 秒} \times 1)$
	網状星雲(NGC6992)	2003年7月7日	$B(300 \text{ 秒} \times 1), V(300 \text{ 秒} \times 1), R_c(180 \text{ 秒} \times 1), I_c(180 \text{ 秒} \times 1)$
	網状星雲(NGC6995)	2003年7月7日	$B(300 \text{ 秒} \times 1), V(300 \text{ 秒} \times 1), R_c(180 \text{ 秒} \times 1), I_c(180 \text{ 秒} \times 1)$
楕円銀河	NGC524	2004年8月12日	$B(300 \text{ 秒} \times 3), V(300 \text{ 秒} \times 3), R_c(180 \text{ 秒} \times 3), I_c(150 \text{ 秒} \times 3)$
レンズ状銀河	NGC5866	2004年8月13日	$B(300 \text{ 秒} \times 3), V(300 \text{ 秒} \times 3), R_c(90 \text{ 秒} \times 5), I_c(90 \text{ 秒} \times 5)$
	NGC7332	2004年8月13日	$B(150 \text{ 秒} \times 4), V(150 \text{ 秒} \times 4), R_c(90 \text{ 秒} \times 4), I_c(60 \text{ 秒} \times 4)$
渦巻銀河	M63	2005年2月12日	$B(150 \text{ 秒} \times 3), V(150 \text{ 秒} \times 3), R_c(90 \text{ 秒} \times 3), I_c(90 \text{ 秒} \times 3)$
	M83	2007年4月15日	$B(300 \text{ 秒} \times 1), V(300 \text{ 秒} \times 1), R_c(180 \text{ 秒} \times 1)$
	回転火花銀河 (M101)	2004年8月12日	$B(240 \text{ 秒} \times 3), V(240 \text{ 秒} \times 3), R_c(120 \text{ 秒} \times 3), I_c(120 \text{ 秒} \times 3)$
連銀河	子連れ銀河 (M51)	2006年8月15日	$B(300 \text{ 秒} \times 1, 240 \text{ 秒} \times 2), V(300 \text{ 秒} \times 1, 240 \text{ 秒} \times 2),$ $R_c(150 \text{ 秒} \times 3), I_c(150 \text{ 秒} \times 3)$
銀河群	HCG61	2004年12月9日	$B(150 \text{ 秒} \times 3), V(150 \text{ 秒} \times 3), R_c(90 \text{ 秒} \times 3), I_c(90 \text{ 秒} \times 3)$

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、

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

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・フィールドングと呼ぶ。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、木曾観測所の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、木曾観測所105cm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  Filter  Exp.Time  Comments
#
75609 Bias
75610 Bias
75611 Bias
75612 Bias
75616 DomeFlat  B      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      B      150s  Z. D. =18.2
75716 M63      V      150s
75717 M63      Rc     90s
75718 M63      Ic     90s
75719 M63      B      150s  Z. D. =21.4
75720 M63      V      150s
75721 M63      Rc     90s
75722 M63      Ic     90s
75723 M63      B      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, Rc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, Rc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はほぼ45分を必要とした。ただし、この後の V および R_c 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。

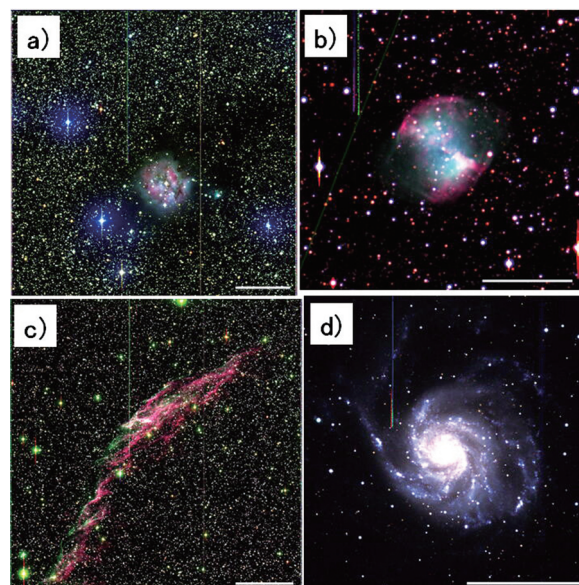


図2 プロジェクト学習科目Ⅱで作成された天体の $B+V+R_c$ カラー画像例。画像の上方が北、左方が東。各画像の所々に見られる縦線はバッド・カラムと呼ばれる欠陥画素によるもの。a) 散光星雲IC5146, 散光星雲のすぐ外側に暗黒星雲が存在していることが分かる。図中右下の白色棒は10秒角を示す。2009年度プロジェクト学習科目Ⅱで作成されたもの。b) 惑星状星雲M27, 図中右下の白色棒は5秒角を示す。2010年度プロジェクト学習科目Ⅱで作成されたもの。c) 超新星残骸網状星雲の一部(NGC6992), 図中右下の白色棒は10秒角を示す。2009年度プロジェクト学習科目Ⅱで作成されたもの。d) 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曾観測所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 、 R_c 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れた。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名に共同で考察を行わせ、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 $H\alpha$ 輝線の波長は656nmであり、これが R_c バンドの波長帯に入るため、散光星雲の $B+V+R_c$ 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 R_c 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・

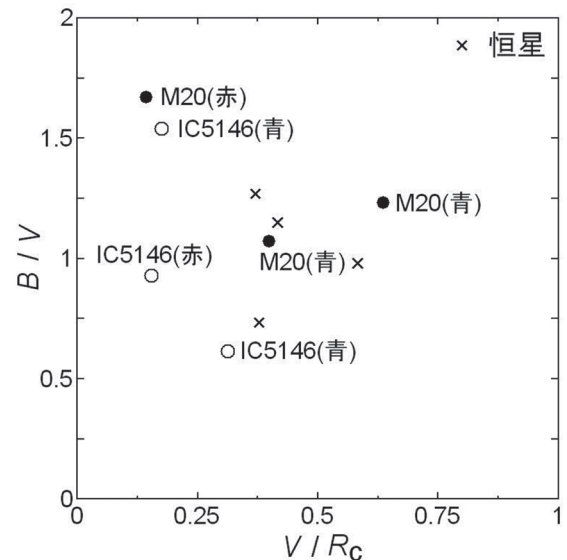


図3 天体観測実習で学部生が作成した散光星雲M20 (黒丸)とIC5146 (白丸)の各領域に対する2色図。縦軸が B バンドと V バンドの強度比 B/V 、横軸が V バンドと R_c バンドの強度比 V/R_c 。×印は同じ画像内の恒星である。括弧内の色は、領域の $B+V+R_c$ カラー画像上での色を示す。

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放射の紫外線による光電離、後者は高速で広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 $H\alpha$ 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、 $H\alpha$ 輝線よりも高温の $[OIII]$ 輝線が相対的に強く生

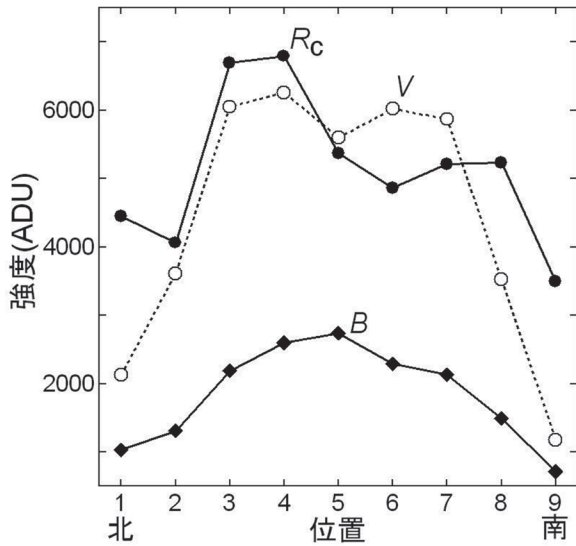


図4 惑星状星雲M27の南北軸にそった各フィルターでの強度分布。縦軸は各バンドでの強度(ADU), 横軸はM27を北から南に縦断する各領域の便宜的な番号。5がほぼ中心, 1と9がそれぞれ北端と南端部分にあたる。黒菱形と実線はBバンド, 白丸と点線はVバンド, 黒丸と実線はRcバンドを示す。

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, Rc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, H α 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, H α 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

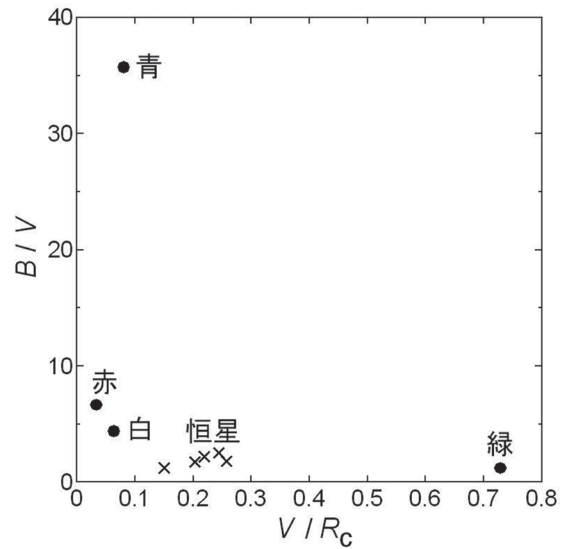


図5 超新星残骸網状星雲の一部NGC6992の各領域の2色図。縦軸がBバンドとVバンドの強度比B/V, 横軸がVバンドとRcバンドの強度比V/Rcを示す。黒丸がNGC6992の各領域で, マークに添えた色はB+V+Rcカラー画像上での色を示す。×印はNC6992と同じ画像内の恒星を示す。

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, H α 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られる。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

6. まとめ

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。

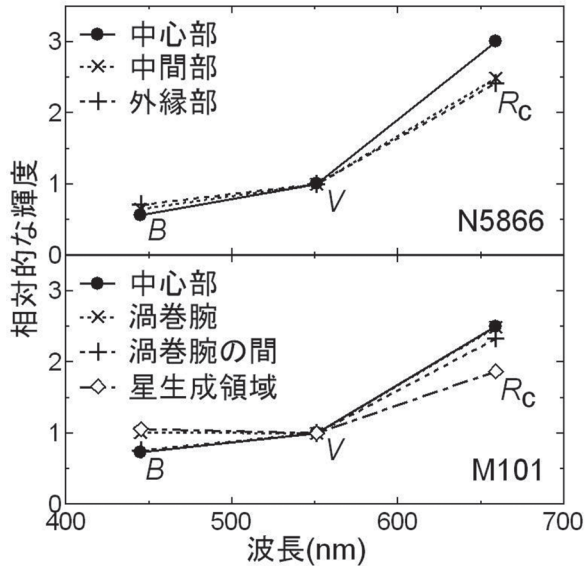


図6 上) レンズ状銀河NGC5866の中心部(黒丸と実線), 中間部(×印と点線), 外縁部(+印と破線)のSED。下) 渦巻銀河M101の中心部(黒丸と実線), 渦巻腕(×印と点線), 渦巻腕の間(+印と破線), 星生成領域(白菱形と一点破線)のSED。縦軸は相対的な輝度(それぞれの領域のVバンドの輝度で規格化), 横軸は波長を示す。なお, フィルター・バンド名を観測点に添えた。

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。

東京大学木曾観測所の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, 同センター木曾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”, 木曾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曾観測所HP, http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kiso/RESEARCH/symp2008/pdf/kiso2008_hamabe.pdf
- Harten, R. H., Grosbal, P., Greisen, 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”, 木曾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曾観測所, pp. 3-10.