

恒星スペクトルの学習を目的とした天体画像データ集の作成

西浦 慎悟*¹・三戸 洋之*²・伊藤 信成*³・山縣 朋彦*⁴・濱部 勝*⁵・中田 好一*⁶

宇宙地球科学分野

(2016年5月25日受理)

NISHIURA, S., MITO, H., ITOH, N., YAMAGATA, T., HAMABE, M. and NAKADA, Y.: Making of the observational data set for learning of stellar spectra. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., **68**: 73-82. (2016) ISSN 1880-4330

Abstract

We developed the observational data set for learning the stellar spectra. The objective spectroscopic stellar images were obtained with the 2kCCD camera installed to the 105cm Schmidt telescope equipped with the four degrees objective prism at the Kiso Observatory, Institute of Astronomy (IoA), the University of Tokyo. Our data set are composed of raw stellar spectra images, bias and dome flat images, observation logs, finding-charts to identify stellar spectra and their positions, and the function to correct the fluxes. Our observational images include twenty-nine stellar spectra and a planetary nebula spectrum identified their spectral types in the four areas of HD159608, M57, HD182489, and HD192281. For the high school students and the beginners of the college students to easily obtain the stellar spectra from our image data set, it is necessary to develop the script codes and the macros for calibrating wavelength and correcting fluxes.

Keywords: astronomical education, teaching materials of astronomy, data reduction, stellar spectra

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

要旨: 我々は、恒星のスペクトル学習を目的とした天体画像データ集を作成した。恒星のスペクトル画像は、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の105cmシュミット望遠鏡に取り付けられた可視光広視野カメラ（通称、2kCCDカメラ）によって撮影された。分光器には、4度対物プリズムを使用した。データ集は、未処理状態の恒星スペクトル画像とバイアス画像、ドーム・フラット画像、簡易観測ログ、恒星を同定するためのファインディング・チャート、そして、フラックス補正用関数からなる。観測画像は、HD159608, M57, HD182489, とHD192281の4天域であり、これらには、スペクトル型が既知である29個の恒星と1個の惑星状星雲のスペクトルが捉えられている。高校生や大学生の初学者が、我々の画像データ集から恒星スペクトルを容易に得ることができるようにするために、今後、波長較正やフラックス補正を行うためのスクリプト・コードやマクロを開発する必要がある。

*1 東京学芸大学 広域自然科学講座 宇宙地球科学分野 (184-8501 小金井市貫井北町4-1-1)

*2 東京大学大学院 天文学教育研究センター木曾観測所 (397-0101 木曾郡木曾町三岳10762-30)

*3 三重大学 (514-8507 津市栗真町屋町1557)

*4 文教大学 (343-8511 越谷市南荻島3337)

*5 日本女子大学 (112-8681 文京区目白台2-8-1)

*6 東京大学 (113-8654 文京区本郷7-3-1)

1. はじめに

現行の高等学校学習指導要領 (文部科学省 2009a) 理科の地学基礎および地学では、太陽を初めとする恒星のスペクトル、そして、恒星の進化と元素合成を扱うことが謳われている。恒星のスペクトルは、その概形の特徴から様々なスペクトル型に分類され、恒星の諸性質と密接に関連していることが知られている。特に、恒星の表面温度の高い方から低い方へ向けて、スペクトル型がO, B, A, F, G, K, M型へと遷移していくという、恒星の表面温度とスペクトル型の関係は、天文学の最も重要な概念の一つであるヘルツシュプリング・ラッセル図 (Hertzsprung-Russell diagram = HR図) の成立にも大きく寄与している。それ故に、恒星のスペクトルは、宇宙・天文領域の基本事項と言っても過言では無い。現行の地学基礎の教科書においても、4社が太陽のスペクトル (磯崎ほか 2011, 森本ほか 2012, 西村ほか 2012, 小川ほか 2012) を扱い、さらに、このうちの3社が太陽以外の恒星スペクトルについて触れている (磯崎ほか 2011, 森本ほか 2012, 西村ほか 2012)。現行の地学の教科書においては、2社ともに太陽以外の恒星スペクトルについて言及しており、さらに、恒星からの電磁波放射の基本である黒体放射に関わる幾つかの法則や元素合成・金属量が取り上げられている (磯崎ほか 2013, 小川ほか 2014)。

これに対して、現行の高等学校学習指導要領解説 (文部科学省 2009b) では、スペクトルの吸収線や輝線から恒星表面に存在する元素について議論することや、CD分光器を用いて直接太陽のスペクトルを観察させること、そして、ネットワークを通して得た画像データやコンピュータを用いたデータ分析による学習が言及されている。このような状況に対して、世界中の天文台や観測所で取得された天体の観測データの多くはアーカイブ・データ化されており、ネットワークを介して誰でも入手できる。

このような状況を背景に、研究者が取得した天体観測データを教材や資料に加工し、中学校や高等学校の現場に投入する試みが、以前から行われてきた。公開天文台ネットワーク (PAONET) の有志からなるPAOFITS ワーキンググループ (PAOFITS WG) によって作成・公開されている「PAOFITS WG開発教材セット」 (<http://paofits.nao.ac.jp/Materials/index.html>) は、この流れの一つの集大成と言える (原ほか 2008; 原ほか 2009; 原ほか 2011)。しかしながら、天体の観測データを基にして開発された、恒星をテーマとした教

材の多くは、その多くがHR図に関連したものであり (田中ほか 2002; 西浦・柏木 2010; 原ほか 2011; 伊藤・高田 2015)、恒星スペクトルそのものが扱われることは稀である。最近の例では、伊藤ほか (2015) が、複数の広帯域撮像観測画像から恒星の分光的エネルギー分布 (spectral energy distribution = SED) を再現し、その表面温度の推定を行う教材を作成・報告しているが、波長分解能が著しく低いため、スペクトル中の吸収線や輝線を議論することは事実上不可能である。このような典型的な恒星スペクトルをテーマとした教材の欠如は、一般的な恒星のスペクトルを得るといった基本的な観測研究が、1980年代の観測天文学におけるCCDカメラの普及期以前 (即ち、デジタル化された観測データが得られ、それがアーカイブされ始める以前) にほぼ完了してしまい、恒星の分光観測の目的がより細分化・専門化されたことに原因があると考えられる。そこで本研究では、研究用観測機器によって得られた恒星の対物分光観測画像を元に、高校生や大学の初学者を対象とした恒星スペクトル学習のための天体画像データ集の作成を試みた。

2. 対物分光観測画像

2. 1 観測機器

恒星の対物分光観測画像は、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 (以下、木曾シュミット鏡) と、その主焦点 (F3.1) に取り付けられた広視野可視光CCDカメラ (通称、2kCCDカメラ: Itoh et al. 2001) によって取得された。分光装置には、鏡筒先端部に取り付けた4度対物プリズムが用いられた。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からなる特殊な光学系によって、広い観測視野を持つ望遠鏡の総称である。木曾シュミット鏡は、直径150cmの球面鏡と直径105cmの補正板を持ち、これによって有効口径105cm、さらにこれに2kCCDカメラを搭載することによって、観測視野51.2分角四方 (ピクセル分解能1.5秒角 pixel^{-1})、という広視野撮像観測を実現している。さらに、この鏡筒先端部に4度対物プリズムを設置することで、H γ 帯、H α 帯とAバンド帯のそれぞれで、分散 170 \AA mm^{-1} 、 700 \AA mm^{-1} および 1000 \AA mm^{-1} の対物分光が可能となる (例えば Ogura and Hasegawa 1983)。この分散は、2kCCD上で、 $4.08 \text{ \AA pixel}^{-1}$ 、 $16.8 \text{ \AA pixel}^{-1}$ および $24.0 \text{ \AA pixel}^{-1}$ に相当する。なお、可視光のほぼ全波長域におけるスペクトルを得るため、観

測時にフィルターは使用されていない。

2. 2 恒星の対物分光観測画像の選出

前述したように、木曾シュミット鏡に搭載された2kCCDカメラの視野は51.2分角四方と広いため、1つの対物分光観測画像であっても、その中には多数の天体のスペクトルが写り込んでおり、そのほぼ全ては恒星である。本研究で作成する天体画像データ集は、恒星スペクトルの学習に供するものであるため、1つの画像の中に、可能な限り多くのスペクトル型が既知である恒星が存在することが望ましい。そこで、この条件を満たすものとして、2003年7月24日に取得された、HD159608領域、M57領域、HD182489領域、

HD192281領域の4領域の対物分光観測画像1枚ずつをサンプルとして選出した。表1に、各領域のkcd番号(本稿3.1参照)と露光時間、そして、各領域内に存在するスペクトル型が既知である29個の恒星と1個の惑星状星雲の名称と便宜上の番号、赤経(2000年分点)、赤緯(2000年分点)、スペクトル型を掲げた。また、図1から図4の左部に各領域の対物分光観測画像を示した。なお、対物分光観測画像のスペクトルの分散方向は南北方向と同じである。

さらに、同じ観測夜に取得されたバイアス画像10枚とドーム・フラット画像10枚を、天体画像解析用に出した。

表1 サンプル画像および恒星の基本データ

観測領域 kcd 番号 (露光時間)	番号	恒星名	赤経 (2000.0)	赤緯 (2000.0)	スペクトル型	
HD159608	1	BD + 30° 3015	17 ^h 32 ^m 47 ^s .6	+ 29° 55' 04"	A5	
	51303	BD + 29° 3047	17 ^h 33 ^m 29 ^s .2	+ 29° 42' 26"	K0	
	(30秒)	3	HD159608	17 ^h 34 ^m 21 ^s .5	+ 29° 45' 46"	M2III
	4	TYC2087-255-1	17 ^h 34 ^m 33 ^s .7	+ 29° 58' 06"	G0IV	
	5	BD + 29° 3061	17 ^h 36 ^m 19 ^s .4	+ 29° 42' 30"	G5	
M57	1	BD + 33° 3236	18 ^h 51 ^m 36 ^s .2	+ 33° 27' 29"	F0	
	51317	2	HD175082	18 ^h 52 ^m 17 ^s .3	+ 33° 21' 28"	A0
	(60秒)	3	BD + 33° 3243	18 ^h 52 ^m 36 ^s .4	+ 33° 20' 33"	K2
	4	HD175267	18 ^h 53 ^m 08 ^s .7	+ 33° 12' 36"	A0	
	5	HD175291	18 ^h 53 ^m 15 ^s .8	+ 33° 28' 28"	K	
	6	M57	18 ^h 53 ^m 35 ^s .1	+ 33° 01' 45"	DA	
	7	HD175577	18 ^h 54 ^m 37 ^s .0	+ 33° 05' 42"	M	
HD182489	1	HD182312	19 ^h 23 ^m 21 ^s .7	+ 18° 50' 56"	A2	
	51309	2	HD350016	19 ^h 23 ^m 30 ^s .7	+ 18° 46' 45"	G5
	(60秒)	3	HD350015	19 ^h 23 ^m 55 ^s .0	+ 18° 48' 14"	F0
	4	HD182489	19 ^h 24 ^m 12 ^s .7	+ 18° 44' 28"	B8V	
	5	HD350014	19 ^h 24 ^m 18 ^s .4	+ 18° 42' 50"	K5	
	6	HD350011	19 ^h 24 ^m 47 ^s .6	+ 18° 48' 33"	K2	
	7	HD231357	19 ^h 25 ^m 03 ^s .3	+ 18° 39' 00"	F0	
HD192281	1	HD191874	20 ^h 10 ^m 28 ^s .1	+ 40° 28' 43"	A0	
	51314	2	HD228134	20 ^h 10 ^m 42 ^s .7	+ 40° 17' 35"	B8
	(60秒)	3	HD228160	20 ^h 10 ^m 54 ^s .6	+ 40° 16' 55"	F0
	4	HD191964	20 ^h 10 ^m 55 ^s .3	+ 40° 42' 03"	M	
	5	HD228197	20 ^h 11 ^m 15 ^s .0	+ 40° 10' 01"	B8	
	6	HD228227	20 ^h 11 ^m 21 ^s .6	+ 40° 07' 06"	G5	
	7	HD192143	20 ^h 11 ^m 47 ^s .4	+ 40° 19' 48"	B9	
	8	HD228256	20 ^h 11 ^m 54 ^s .4	+ 40° 00' 30"	B	
	9	HD192281	20 ^h 12 ^m 33 ^s .1	+ 40° 16' 05"	O5V	
	10	HD192381	20 ^h 12 ^m 56 ^s .9	+ 40° 43' 16"	A0	
	11	HD228353	20 ^h 12 ^m 59 ^s .1	+ 40° 07' 44"	A7Iab	

注) 座標およびスペクトル型は、Strasbourg astronomical Data Centre (CDS) のデータベース SIMBAD (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>) に依った。

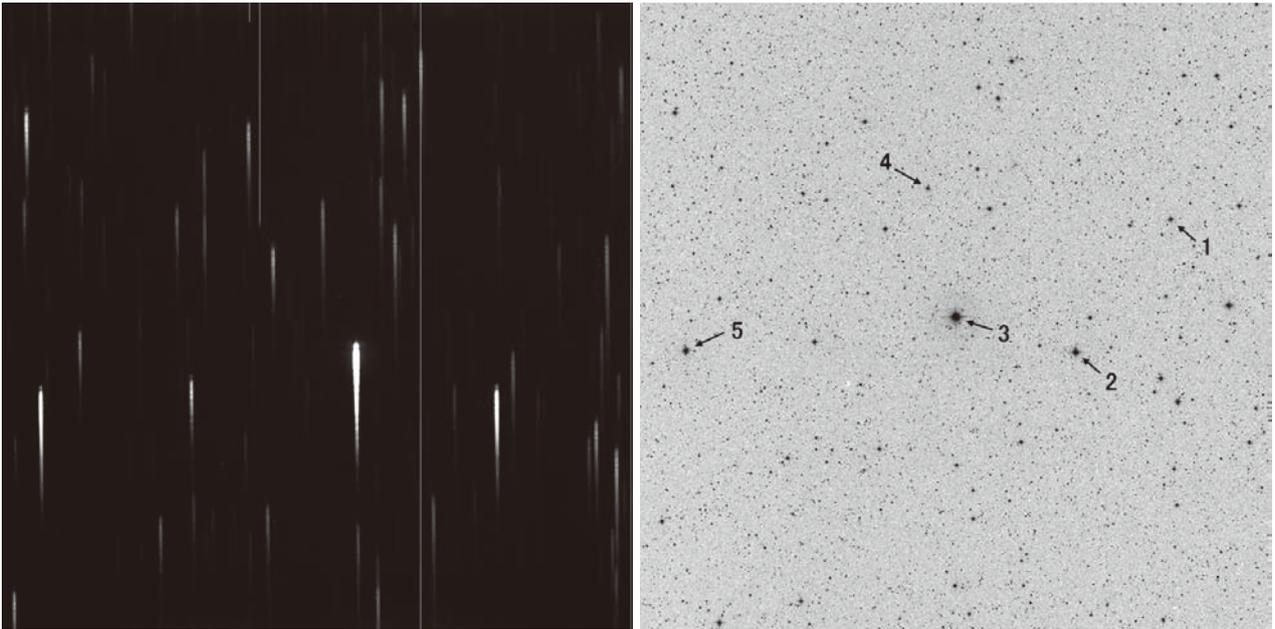


図1 HD159608領域の、左) 対物分光観測画像と、右) ファインディング・チャート。視野は51.2分角四方と1度角四方。両方の画像とも、北が上、東が左。対物分光画像の分散方向は南北方向と同じ。ファインディング・チャート中に、矢印で示した恒星は、表1中の番号で示した恒星に対応する。

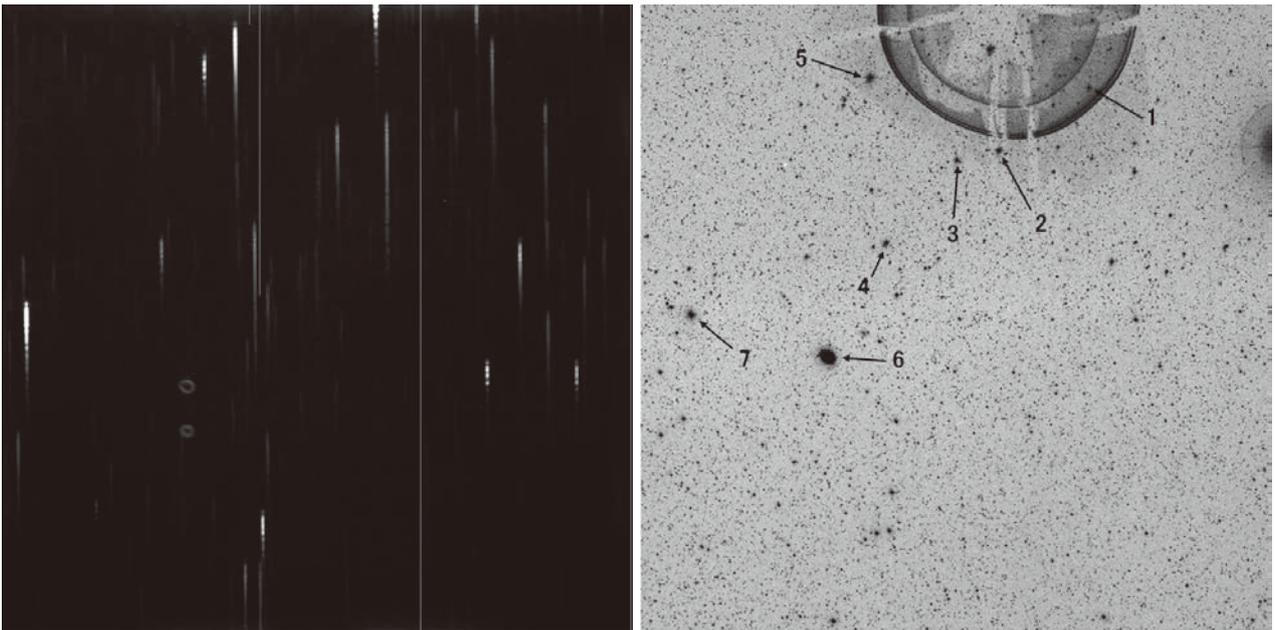


図2 M57領域の、左) 対物分光観測画像と、右) ファインディング・チャート。他は図1に同じ。

3. 天体画像データ集の作成

3. 1 簡易観測ログ

天体の観測データは、Flexible Image Transport System (= FITS) というファイル形式で記録され (Greisen and Harten 1981; Wells et al. 1981; Grosbol et al. 1988; Harten et al. 1988), 観測所や観測装置毎の通し番号で保存・管理されることが一般的である。木曾観測所の2kCCDカメラによって得られた観測データのFITS

ファイル名にも、木曾観測所の2kCCDカメラを示す“kcd”の接頭辞のあとに、取得された順に5ケタから6ケタの通し番号が付けられている (本稿ではkcd番号と呼ぶ)。そのため、観測で得られた天体画像をファイル名から同定し、観測画像の内容や観測条件を確認するためには、観測記録 (観測ログ) が必要となる。そこで、本研究で作成した天体画像データ集にも、テキスト形式によるデジタル版の簡易観測ログを付した。簡易観測ログは、FITSファイルの通し番号

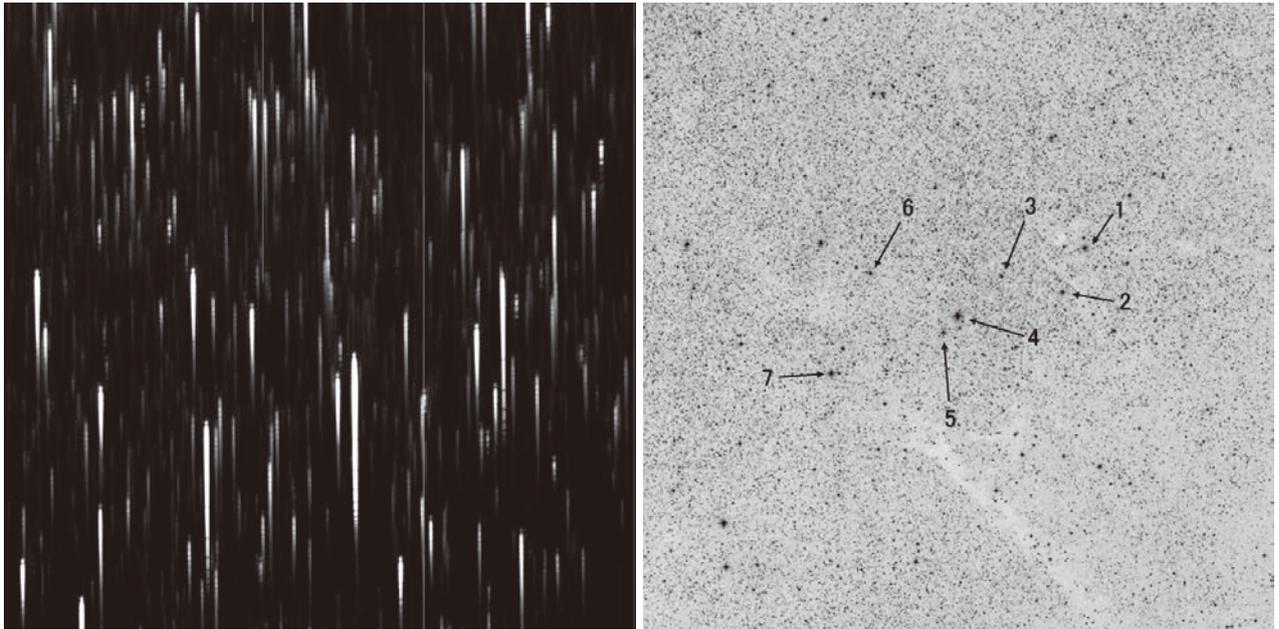


図3 HD182489領域の, 左) 対物分光観測画像と, 右) ファインディング・チャート。他は図1に同じ。

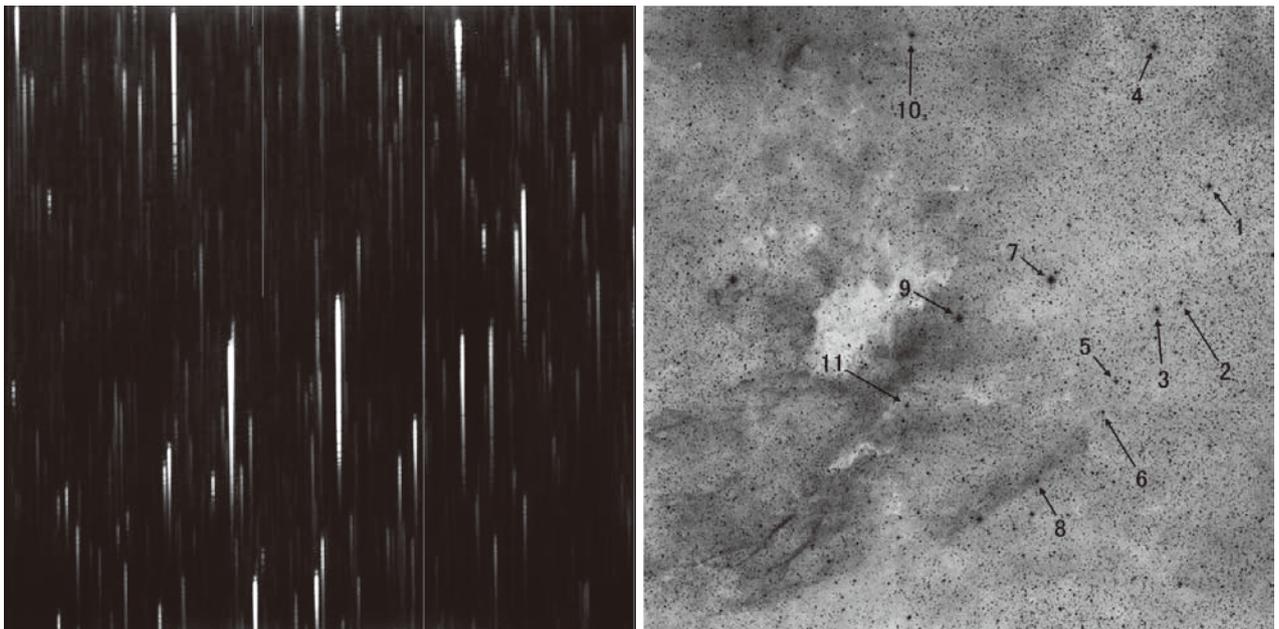


図4 HD192281領域の, 左) 対物分光観測画像と, 右) ファインディング・チャート。他は図1に同じ。

に対して, 画像データの種類 (天体画像, バイアス画像またはドーム・フラット画像), 観測した天体名・領域名, 露光時間, 観測時の天頂距離, 中心天体のスペクトル型やV等級のカタログ値などを記載した。図5に, 簡易観測ログの一部抜粋を掲げた。

3. 2 ファインディング・チャート

今回の対物分光観測で得られた天体画像は, 視野内の全ての天体のスペクトルが撮影されたものであり, 図1から図4に示したように, その分散方向は南北

#	kcd	Objects	Filter	Exp. Time	Comments
#	51303	HD159608	NONE	30s	Z. D. =??, ?d, M2111, V=7.5 mag
	51309	HD182489	NONE	60s	Z. D. =29.8d, B8V, V=7.92mag
	51311	Bias	-	-	-
	51314	HD192281	NONE	60s	Z. D. =24.1d, O5V, V=7.55mag
	51317	M57	NONE	60s	Z. D. =08.1d, Planetary Nebula
	51318	Bias	-	-	-
	51319	Bias	-	-	-
	51323	DomeFlat	NONE	5s	-
	51324	DomeFlat	NONE	5s	-
	51325	DomeFlat	NONE	5s	-
	51326	DomeFlat	NONE	5s	-
	51327	DomeFlat	NONE	5s	-
	51333	Bias	-	-	-
	51334	Bias	-	-	-
#					

図5 簡易観測ログ (一部抜粋)

方向に一致したものになっている。この画像の中から、目的の恒星のスペクトルを見つけ出すことは極めて難しく、恒星を同定した撮像観測データと比較する必要がある。このように、目標天体を示すことで、その天体の同定の補助に使用する天体画像をファインディング・チャート (finding chart) という。木曾観測所の2kCCDカメラは、観測視野が約1度角四方もあるため、1つの画像の中に撮影される恒星の数も極めて多くなる。そこで、サンプルとして選出した4つの天体領域に対して、パロマー天文台スカイ・サーベイ (Palomar Observatory Sky Survey = POSS) のコダック103a-E乾板による撮影画像中に、表1に掲げた全ての恒星を図示することで、本画像データ集用のファインディング・チャートを作成した。POSS画像は、NASAがインターネット上で運営している仮想天文台 (Virtual Observatory) システム SkyView (<http://skyview.gsfc.nasa.gov/>) を使用し、それぞれ、HD159608, M57, HD182489, HD192281を中心とした1度角四方の天域の画像を得た。作成したファインディング・チャートは、図1から図4の右部に、対物分光観測データに並べて掲げた。

3. 3 フラックス補正用関数

3. 3. 1 対物分光データの整約

恒星の対物分光観測画像から恒星のスペクトルを得るためには、まず、整約 (reduction, リダクション) と呼ばれる画像の1次処理を行う。観測によって得られた直後で未処理状態の画像データは、生データ (raw data) と呼ばれ、天体からの信号以外にも、夜天光 (星夜光・大気光・黄道光の総称) や大気によって反射された都市光からなる背景光成分、そして、検出器からのデータ読み出しの際に人為的に付与される嵩上げ (バイアス) 成分、検出器周辺の熱エネルギーによって励起された熱電子による暗電流 (ダーク) 成分などが含まれている。また、検出器を構成する個々の画素 (ピクセル) は、異なる感度特性を持っているため、同じ明るさの天体を撮影しても、異なるピクセルで受光した場合、異なる応答性を示すことになる。天体の生データ画像の信号を I_{raw} で表すことにすると、

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

となる。ここで、 I_{obj} は天体起源の信号、 I_{sky} 、 I_{bias} 、 I_{dark} は、それぞれ、背景光成分、バイアス成分、ダーク成分、 S はピクセル毎の感度特性を示している。従って、生データの天体観測画像から、天体の信号を

得るためには、バイアス成分とダーク成分を引き取り、ピクセル毎の感度補正を行った後、さらに背景光成分を取り除けばよい。整約とは、この一連の画像解析の手続きのことを指す (正しくは、ピクセル毎の感度補正の手続きまでを「整約」という)。

バイアス成分 I_{bias} の除去のためには、天体画像の取得の前後もしくは合間に、露光時間ゼロの画像データ (バイアス画像) を複数読み出し、これらを用いる。また、天文学の観測研究で通常使用される可視光 CCD では、ダーク成分 I_{dark} は極めて小さく、2kCCD カメラについても、動作温度である 170 K において 60 分あたり $1 \text{ e}^{-1} \text{ pixel}^{-1}$ と十分に無視できる値であることが示されている (木曾観測所 HP より、<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/>)。ピクセル毎の感度特性 S の補正には、天体画像取得の前後に、閉じた望遠鏡ドーム内において、ランプで照らした白色スクリーンを一樣光と見なして撮影し、この画像の応答性を用いる。この感度補正用の画像をドーム・フラット画像という。

3. 3. 2 フラックス補正用関数導出の原理

整約の後、背景光の除去、波長較正、分散の波長依存性の補正、そして、CCD 感度の波長依存性の補正を経て、本来の恒星のスペクトルが得られる。ここで、分散の波長依存性は、プリズムを用いた分光観測に特徴的なものであり、波長分解能は短波長域において高く、反対に、長波長域において低くなる。そのため、CCD の 1 ピクセルあたりに入射する光の波長範囲は、長波長側ほど大きくなる。また一般的に、可視光に対する CCD の感度は短波長側で低く、長波長側で高くなる傾向があり、2kCCD カメラについても例外ではない (樽沢ほか 1996)。そのため、画像解析の最後の段階では、これら二つの波長依存性の補正を行う必要がある。

分散の波長依存性 $D(\lambda)$ と CCD 感度の波長依存性 $A(\lambda)$ は、互いに独立な量であるため、両者の積を用いて、

$$1 / \alpha(\lambda) = D(\lambda) \times A(\lambda) \quad (2)$$

と表すことにすると、対物分光観測によって得られる天体のスペクトル $I_{\text{obs}}(\lambda)$ は、その本来のスペクトル $I_0(\lambda)$ に対して、

$$I_0(\lambda) = \alpha(\lambda) \times I_{\text{obs}}(\lambda) \quad (3)$$

となる。本稿では、以降、この $\alpha(\lambda)$ を「フラックス補正用関数」と呼ぶ。

フラックス補正関数 $\alpha(\lambda)$ は, スペクトルが既知である天体の観測スペクトルを取得し, 本来のスペクトル強度と観測で得られたスペクトル強度の比を求めることで得られる。

3. 3. 3 早期A型星のモデル・スペクトルの導出

本研究では, スペクトルが既知の天体として, バルマー吸収線が顕著で, 波長較正が容易な早期A型星を用いた。早期A型星のスペクトルは, Borisov et al. (1998, 以下B98) から, A0型星またはA2型星であるHD26141, HD197573, HD209665の3つを選出し(表2参照), これらのスペクトルをそれぞれ5500Åのフラックス密度の値で規格化して平均化することで, 早期A型星の平均的なスペクトルを作成した。図6に, 規格化した3つの恒星のスペクトルを示した。黒体放射起源の連続光成分は, 恒星の表面温度のみに依存していることに対し, 吸収線の深さは個々の恒星の性質に関連している。そのため, 吸収線については, その前後のスペクトル強度の値を用いて1次, または, 2次, 3次関数で内挿することで, 早期A型星の連続光のモデル・スペクトルを導出した。早期A型星の平均的なスペクトルと, 吸収線を内挿して得られた連続光のモデル・スペクトルを図7に掲げた。

3. 3. 4 早期A型星の観測スペクトルの導出

早期A型星の対物分光観測データについて, 表1中のHD182312, HD191874に加えて, 新たにHD23634, HD59889, HD182991の3つの恒星を選出した。表3にこれら3つの恒星の観測日, kcd番号, 露光時間, 赤経(2000.0), 赤緯(2000.0), スペクトル型を掲げた。これら5つの対物分光観測画像に対して, すばる画像解析ソフト・マカリィ(Horaguchi et al. 2006)

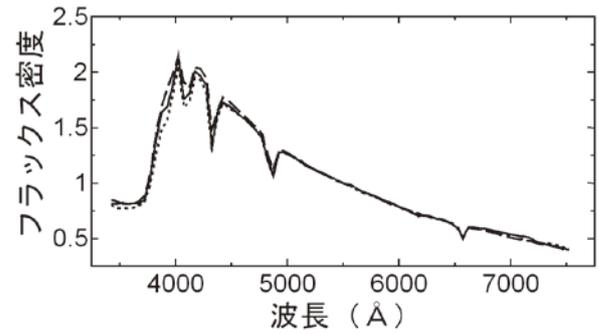


図6 早期A型星のスペクトル。実線はHD26141, 破線はHD197573, 点線はHD209665のスペクトル。縦軸は5500Åの値で規格化されたフラックス密度, 横軸は波長(Å)を示す。

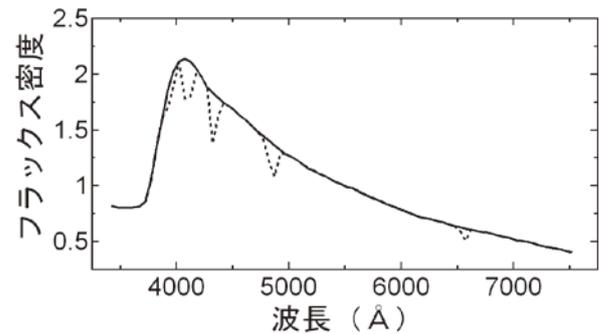


図7 早期A型星の平均的なスペクトル(点線)と連続光のモデル・スペクトル(実線)。縦軸・横軸は図6に同じ。

を用いて整約を行い, 恒星スペクトルの隣接領域を平均して背景光成分を作成して, これを差し引いた。

4度対物プリズムを取り付けた木曾シュミット鏡と2kCCDカメラによって得られた対物分光観測画像に対して, 分散方向のピクセル座標 z (pix)と波長 λ (Å)の間には, 経験的に,

$$z = a \times \lambda^{-n} + b \quad (4)$$

表2 スペクトルが既知である早期A型星の基本データ

恒星名	赤経 (2000.0)	赤緯 (2000.0)	スペクトル型
HD26141	04 ^h 08 ^m 49 ^s .5	+ 17° 17' 30"	A0V
HD197573	20 ^h 44 ^m 00 ^s .0	+ 21° 24' 02"	A2V
HD209665	22 ^h 04 ^m 32 ^s .8	+ 25° 39' 31"	A0V

注) 座標はCDS/SIMBAD, スペクトル型はB98に依った。

表3 追加した早期A型星の観測諸元

恒星名	観測日	kcd番号	露光時間	赤経 (2000.0)	赤緯 (2000.0)	スペクトル型
HD23634	2000/12/6	23358	10 s	03 ^h 46 ^m 56 ^s .1	+ 09° 31' 49"	A2
HD59889	2000/12/4	23233	30 s	07 ^h 31 ^m 11 ^s .2	- 21° 53' 12"	A0
HD182991	2000/7/4	20338	3 s	19 ^h 26 ^m 56 ^s .8	+ 12° 03' 43"	A0

注) 座標およびスペクトル型は, CDS/SIMBADに依った。

となる関係がある。ここで、 a , b , n は定数であり、 $n = 2 - 3$ である。そこで次に、恒星スペクトルからフラウンホーファー線のA線 (O_2 , 7593.7 \AA), B線 (O_2 , 6867.2 \AA), C線 ($H\alpha$, 6562.8 \AA), D線 (Na , 5893.0 \AA), F線 ($H\beta$, 4861.3 \AA), G'線 ($H\gamma$, 4340.5 \AA), h線 ($H\delta$, 4101.8 \AA) の7つの吸収線を同定し、これらのピクセル座標を読み取り、これらを式(4)にフィッティングすることで、各恒星スペクトルのピクセル座標を波長に変換する式を導き、これを用いて波長較正を行った。なお、吸収線のピクセル座標は、通常、吸収線をガウス関数などを用いてフィッティングすることで求めるが、本研究では、高校生や大学生の初学者を対象とするため、敢えて、強度が単純に極小となるピクセル座標を採用した。

その後、前節同様に5つの恒星のスペクトル強度を 5500 \AA の値で規格化し、これらを平均して早期A型星の平均的な観測スペクトルを作成した。そして、吸収線部分を、前後のスペクトル強度を用いて1次、または、2次関数で内挿することで、早期A型星連続光の観測スペクトルを作成した。図8に規格化した5つの早期A型星の観測スペクトル、図9に早期A型星の平均的な観測スペクトルと、この吸収線を内挿して得られた連続光の観測スペクトルを掲げた。

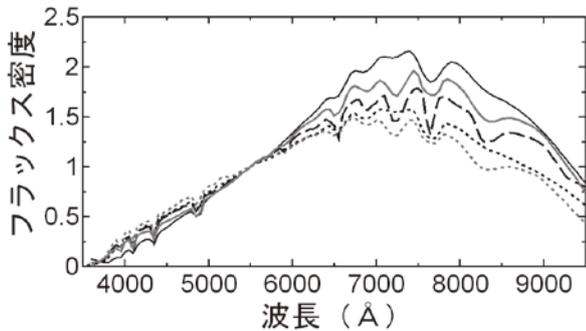


図8 早期A型星の観測スペクトル。黒実線はHD23634, 黒点線はHD59889, 黒破線はHD182312, グレー実線はHD182991, グレー点線はHD191874を示す。縦軸・横軸は図6に同じ

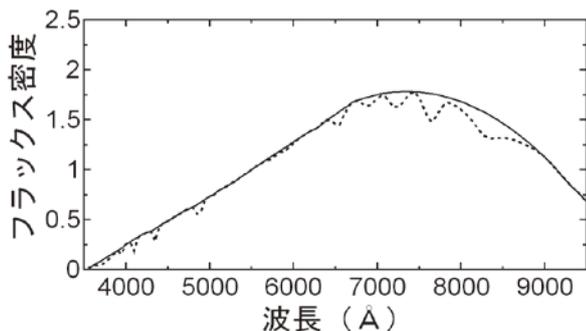


図9 早期A型星の平均的な観測スペクトル(点線)と連続光の観測スペクトル(実線)。縦軸・横軸は図6に同じ。

3. 3. 5 フラックス補正用関数の導出

前節までで得られた早期A型星の連続光のモデル・スペクトルを式(3)の $I_0(\lambda)$, 連続光の平均的な観測スペクトルを $I_{obs}(\lambda)$ として、フラックス補正用関数 $\alpha(\lambda)$ を導いた。表4および図10に $\alpha(\lambda)$ を示した。

これによって、波長較正を施した観測スペクトルに、 $\alpha(\lambda)$ を乗じることで、分散の波長依存性と CCD 感度の波長依存性を同時に補正することができる。ただし、図8における早期A型星の観測スペクトル強度の分散の大きさは、図6における分散よりも大きく、今後、大気量補正を考慮する可能性があることに留意しておきたい。

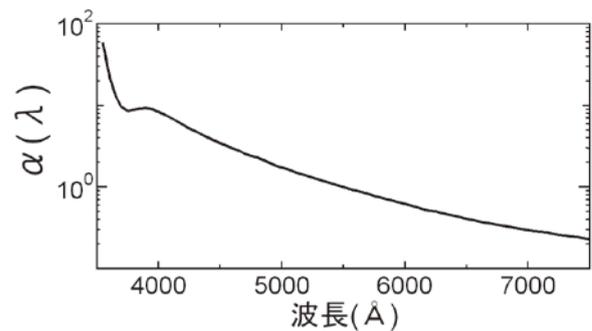


図10 フラックス補正用関数 $\alpha(\lambda)$ 。縦軸は $\alpha(\lambda)$ ・横軸は波長 $\lambda(\text{\AA})$ を示す。

4. 天体画像データ集を用いた画像解析実践

本研究で作成した天体画像データ集を用いて、2014・2015年度の東京学芸大学教育学部の天文学実験において、A類理科3年生4名、F類自然環境科学3年生3名に対して、恒星スペクトルの画像解析実習を行った。この時の受講生に対しては、恒星の対物分光観測画像(生データ)とバイアス画像、ドーム・フラット画像、簡易観測ログ、ファインディング・チャート、平均的な早期A型星のスペクトル(本稿の図7中の点線に相当)とマカリイを提供し、フラックス補正用関数 $\alpha(\lambda)$ を導出することも実習の一部とした。

その結果、マカリイを用いた整約や背景光除去が比較的容易に行われるのに対して、波長較正とフラックス補正に大きな作業時間を要していることが確認された。波長較正については、3つのパラメータによるフィッティングに10~15分以上、そして、フラックス補正については、多くの離散的なデータを内挿、計算する作業が必要となり、1時間からそれ以上の時間を要している。この授業の受講生等が、多少なりともコンピュータを用いた作業に慣れていることを考慮

表4 フラックス補正用関数 $\alpha(\lambda)$

$\lambda(\text{\AA})$	$\alpha(\lambda)$	$\lambda(\text{\AA})$	$\alpha(\lambda)$	$\lambda(\text{\AA})$	$\alpha(\lambda)$	$\lambda(\text{\AA})$	$\alpha(\lambda)$
3550	58.93	4550	3.211	5550	0.9529	6550	0.3920
3600	22.88	4600	2.984	5600	0.9085	6600	0.3777
3650	13.42	4650	2.785	5650	0.8606	6650	0.3646
3700	9.739	4700	2.564	5700	0.8195	6700	0.3519
3750	8.522	4750	2.414	5750	0.7822	6750	0.3425
3800	8.786	4800	2.287	5800	0.7464	6800	0.3341
3850	9.149	4850	2.129	5850	0.7106	6850	0.3238
3900	9.247	4900	1.983	5900	0.6769	6900	0.3146
3950	8.941	4950	1.849	5950	0.6461	6950	0.3067
4000	8.372	5000	1.734	6000	0.6158	7000	0.2970
4050	7.673	5050	1.655	6050	0.5880	7050	0.2890
4100	7.056	5100	1.537	6100	0.5616	7100	0.2840
4150	6.400	5150	1.446	6150	0.5342	7150	0.2769
4200	5.753	5200	1.374	6200	0.5132	7200	0.2675
4250	5.188	5250	1.303	6250	0.5004	7250	0.2588
4300	4.865	5300	1.241	6300	0.4821	7300	0.2531
4350	4.430	5350	1.172	6350	0.4614	7350	0.2482
4400	4.049	5400	1.109	6400	0.4427	7400	0.2424
4450	3.729	5450	1.053	6450	0.4233	7450	0.2352
4500	3.477	5500	1.000	6500	0.4069	7500	0.2281

すれば、高校生では、これらの作業により多くの時間が必要となることが予想される。そのため、今後、大学生の初学者以下を想定し、波長較正とフラックス補正を容易に行うためのスクリプトコードやマクロの開発が必要である。

謝辞

本教材の作成にあたり、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の青木勉氏、征矢野隆夫氏、樽沢賢一氏には恒星の対物分光観測データの取得に協力して頂きました、心より感謝申し上げます。また、本教材で使用したデータの多くは、木曾観測所における2003年度の天体観測実習において東京大学理学部天文学教室の学部3年生が主体となって取得したものです。参加者の皆さんに深く御礼申し上げます。最後に、本稿の執筆と出版に関して、学術振興会による科学研究費補助金(26350193: 代表者 伊藤信成, 16K12750: 代表者 西浦慎悟)から支援を受けました、ここに感謝申し上げます。

引用文献

Borisov, G. V., Glushneva, I. N., and Shenavrin, V. I. (1998), "Spectrophotometric Standards of 7m-8m: Supplement 1", *Astronomical and Astrophysical Transactions*, 17, pp. 309-320.

(B98)

Greisen, E. W., and Harten, R. H. (1981), "An Extension of FITS for Groups of Small Arrays of Data", *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 44, pp. 371-374.

Grosbol, 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.

原正・五島正光・洞口俊博・縣秀彦・矢治健太郎・古荘玲子・金光理 (2008), "Ia型超新星を使った銀河の距離測定の指導", *地学教育*, 61, pp. 113-122.

原正・畠浩二・五島正光・洞口俊博・金光理・古荘玲子・矢治健太郎・PAOFITSワーキンググループ (2009), "研究用銀河スペクトル画像を用いたハッブル則の高校向け教材の開発と試行", *地学教育*, 62, pp. 151-165.

原正・五島正光・洞口俊博・古荘玲子・大島修・矢動丸泰・金光理 (2011), "星団の色等級図作成と年齢を推定する高校生向け教材の開発と授業実践: 研究用資源を利用した天文教材の開発", *地学教育*, 64, pp. 131-150.

Harten, R. H., Grosbol, P., Greisen, E. W., and Wells, D. C. (1988), "The FITS Tables Extension", *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 73, pp. 365-372.

Horaguchi, T., Furusho, R., Agata, H., and PAOFITS WG (2006), "FITS Image Analysis Software for Education: Makali'i", *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV, ASP Conference Series*, 351, p. 544.

磯崎行雄・江里口良治・川勝均・佐藤薫・有山智雄・岡田昌

- 訓・岡本清・柴山元彦・寺戸真・原正・増田哲雄・新興出版啓林館編集部 (2011), 地学基礎, 新興出版啓林館, 大阪.
- 磯崎行雄・江里口良治・川勝均・佐藤薫・有山智雄・岡田昌訓・岡本清・柴山元彦・寺戸真・原正・増田哲雄・新興出版啓林館編集部 (2013), 地学, 新興出版啓林館, 大阪.
- 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.
- 伊藤信成・高田碧郎 (2015), "星団に属さない恒星を用いたHR図描画教材の開発", *地学教育*, 68, pp. 69-91.
- 伊藤信成・山縣朋彦・浜部勝・西浦慎悟・三戸洋之 (2015), "撮像データを用いた恒星の表面温度推定のための自主学習型教材の開発", *地学教育*, 68, pp. 13-28.
- 文部科学省 (2009a), 高等学校学習指導要領, 東山書房, 京都.
- 文部科学省 (2009b), 高等学校学習指導要領, 実教出版株式会社, 東京.
- 森本雅樹・天野一男・黒田武彦・田中博・坂本泉・柴崎直明・足立久男・小幡喜一・齊藤尚人・直井雅文・森山義礼・実教出版株式会社 (2012), 地学基礎, 実教出版株式会社, 東京.
- 西村祐二郎・奥村晃史・安成哲三・伊藤英樹・鈴木文二・杉山直・遠藤正智・吉村壽哉 (2012), 高等学校 地学基礎, 第一学習社, 広島.
- 西浦慎悟・柏木雄太 (2010), "ヘルツシュプルング・ラッセル図の描き方〜マカリイとOpen Office Org.を使って〜", *天文教育*, 22, pp. 35-42.
- 小川勇二郎・浅野俊雄・家正則・磯村恭朗・高橋正樹・田中浩紀・中野孝教・中村尚・林美幸・平野弘道・丸山茂徳・八木勇治・吉田二美・数研出版株式会社編集部 (2012), 地学基礎, 数研出版株式会社, 東京.
- 小川勇二郎・浅野俊雄・家正則・磯村恭朗・高橋正樹・武田康男・田中浩紀・中野孝教・中村尚・林美幸・平野弘道・丸山茂徳・八木勇治・吉田二美・数研出版株式会社編集部 (2014), 地学, 数研出版株式会社, 東京.
- Ogura, K., and Hasegawa, T. (1983), "A Survey of Northern Bok Globules for H-Alpha Emission Stars", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 35, pp. 299-315.
- 田中義洋・縣秀彦・小池邦昭 (2002), "中学校における恒星の多様性に関する学習の提案ーハッブル宇宙望遠鏡撮影画像を用いたHR図作成実習の評価ー", *地学教育*, 55, pp. 135-139.
- 樽沢賢一, 征矢野隆夫, 青木勉, 吉田重臣, 長谷川隆 (1996), "2KCCDカメラの開発II: デュワー関係", 木曾シュミット観測の新展開: 2KCCDとKONICによる新しい天文学, pp. 7-16.
- Wells, D. C., Geisen, E. W., and Harten, R. H. (1981), "FITS: A Flexible Image Transport System", *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 44, p.363-370.