

# 天文分野を対象とした自主学習型解析体験教材の開発 I

伊藤 信成<sup>a)</sup>・山縣 朋彦<sup>b)</sup>・濱部 勝<sup>c)</sup>・西浦 慎悟<sup>d)</sup>・三戸 洋之<sup>e)</sup>

## Development of the self-direct learning programs for astronomical education. I

Nobunari ITOH, Tomohiko YAMAGATA, Masaru HAMABE,  
Shingo NISHIURA and Hiroyuki MITO

### 要 旨

天文学に興味・関心はあるものの高校地学の開講率低迷により高校での系統的な学習機会が得られない高校生を念頭に、自主学習型の天文解析体験プログラムの開発を行った。このプログラムは15のテーマから構成されており、太陽系から宇宙膨張まで様々な階層の天体を取り上げている。またテーマ毎に現代天文学の基本的な考え方が組み込まれており、テーマを一通り実習することにより天文学の系統的な学習ができるように配慮している。本プログラムの有効性検証のため、スーパーサイエンスハイスクールでの授業の一環として高校生に体験学習をしてもらったところ、実習内容を面白いと感じた割合は9割を超え、天体物理学的な考え方が伝えられたものとする。また前提となる天文学の知識がなくても、実習テーマの概容は十分に習得できることが確認できた。

### 1. はじめに

近年、天文・宇宙分野では、すばる望遠鏡や人工衛星等の大型機器を用いた研究が進められ、多くの成果を上げている。例えばハヤブサの成功は記憶に新しい。ハヤブサは惑星科学分野および宇宙工学分野で世界初の成果を上げ、地球への帰還の様子は世界中で報道された他、科学館等での衛星回収部品の公開では連日長蛇の列ができています。

この様に、学術分野では多数の成果を上げ、一般市民も高い関心を寄せる天文分野ではあるが、一方で高校における地学は、履修率の低下が続いている。科学技術振興機構の調査によれば、高校普通科での理科の開講率は物理Ⅱ、化学Ⅱ、生物Ⅱ\*がそれぞれ91%、96%、96%であるのに対し、地学Ⅱは8%である<sup>1)</sup>。また同調査では、理科を指導する教員の内、物理、化

学、生物の指導に苦手意識を持つ割合が約2割なのに対し、地学では5割近くが苦手意識を持っており、指導側にも課題があることがわかる。

高校地学の履修率低下には、大きく2つの問題がある。1つは急速に発展している宇宙科学に対し、その意義を正しく理解できる人材が減少することである。学習指導要領によれば、高校で地学を学習しなかった場合、太陽系より大きなスケールについて系統的に学ぶ機会がなくなるが、これは急速に発展している宇宙科学・宇宙開発の成果がブラックボックス化してしまうことを意味する。ブラックボックス化し、成果を正しく評価できる人材が減少することは、長期的観点から見れば当該分野の衰退を意味する。もう1つは、履修率の低下の原因でもあるが、高校における地学教員数の減少に伴い、地学を開講しない(できない)高校が増えていることである。これにより進学した先の高校で地学が開講されていなければ、たとえ興味を持った生徒がいたとしても、独学するか学習を諦めるしかなくなってしまう。結果として、次代を担う研究者、技術者の減少が懸念される。

この状況を少しでも改善するため、実習を通して現代天文学の基礎を体験し、その経験を学校現場で活かしてもらうことを目的に、教員養成系学部(に所属する学生に対する天体観測実習を、東京大学大学院理学系

a) 三重大学教育学部理科教育講座

b) 文教大学教育学部専修

c) 日本女子大学理学部数物科学科

d) 東京学芸大学自然科学系宇宙地球科学分野

e) 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

\* Ⅱは専門性の高い教科を示す。

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）の協力を得て2005年度より行っている。この実習では、単に天体観望に留まらず、解析や討論を通じ天体現象を解明する過程を重視しており、現在までに4大学の学生のべ180名が参加している<sup>2), 3)</sup>。また、木曾観測所では1997年度から、天文学に強い関心を持つ高校生に対する体験学習プログラム「銀河学校」を年1回開講しており、これまで約400名の高校生が参加している。参加した生徒の中から天文研究者になった者もあり、大きな成果を上げている。さらに、SSHやSPPといった理数支援プログラムでも天文分野での取り組みが行われ、天文学会のジュニアセッション等でも、その活動が報告されている<sup>4), 5)</sup>。このように体験型プログラムの参加者は、十分な事前知識がなくても、また教科書の範囲を超えた内容についても対応できており、知的好奇心を刺激する効果は極めて高いものと考えられる。

一方で、SSH、SPPなどに参加しているのは限られた高校であり、熱心な教員がいる高校以外では、依然として天文学に触れる機会は多くない。そこで、本研究では天文学に触れたいと思っている高校生を念頭に、身近に指導者がいない場合でも行える自主学習型の天文教材の開発を目指す。

## 2. 本教材の特長

本教材は高校生～大学教養程度を対象とする。教材の特長として次に示す3点を挙げるができる。

- 1) 系統的な実習が可能なこと。解析実習を行う教材は既に存在しているが、そこで取り上げられるテーマは単発のものが多く、また教員の指導があることを前提としているため、個人での遂行が難しい。本研究では、その両課題を解決し系統的学習可能な教材を目指す。
- 2) 解析対象が複数あること。同一テーマであっても、異なる天体について解析を行うことで、天体間の比較が可能になり、内容の更なる理解を図ることができる。本研究ではテーマ毎に、複数（3～5種）の天体データを提供することで、繰り返し実習による内容理解と天体間の相互比較化を目指す。
- 3) 研究者が利用したデータであること。実際に天文学者が利用したデータを用いることで、より研究に対する臨場感をもって学習することができる。例えば木曾観測所では、ハヤブサの目的地選定のために小惑星イトカワの観測も行われている。この様なデータを教材化できれば、学習者はより興味を持ってテーマに取り組めると考える。

## 3. 提供するデータ

本研究では、東京大学木曾観測所に保管されている可視 CCD カメラの撮像データから、教材に適したデータを抽出する。木曾観測所では1993年度からの観測データが公開されている。1999年度に可視観測装置が2KCCDカメラ<sup>6)</sup>に交換が行われたが、交換前後も含め現時点で公開されている画像枚数は11万枚を超える。この中から、各テーマに適した画像を抽出することになる。データの抽出はSMOKA<sup>7)</sup>を基本とするが、個々のメンバーが取得したデータも適宜利用する。同一の天体について複数回の観測されている例もあるため、データの品質の評価を行うことで教材として適した画像の選定を行う。

なお、木曾観測所のデータを用いるのは、基本的に同一の仕様・品質を持つ画像データを公開していること、以下に示すように様々な天体の観測データがあること、我々がデータ特性を熟知していること、等の理由による。

本研究では、テーマ毎にデータと学術背景および解析方法についてのドキュメントを1つのパッケージとして配布する。具体的テーマは次ページの表1に示す。大学での利用も考え、15テーマ（「画像処理の基本」を除く）を選定した。選定テーマの一覧を表1に示す。テーマ0～2は各テーマに共通する基礎的な解析手法を習得するためのもので、テーマ0は画像測定前に必要となる CCD データの下処理に相当する。

テーマ1は書籍等で目にする色彩豊かな天体画像の合成に関する考え方を理解する上で必要となる。テーマ2は天体観測の基本となる等級測定方法の習得が主目的である。テーマ3～15は天体毎の学術的要素を含んだ内容になっており、テーマ3～5が太陽系、6～10が銀河系天体、テーマ11～13が銀河系外天体、14～15が宇宙の構造に関するテーマとなっている。テーマ3～15には鍵となる観測原理や解析手法が設定されており、テーマを一通り実習することにより、現代天文学の基本的な観測・解析手法を習得できるようになっている。

## 4. 実施例

本教材を用い、高校生に対する実習を行った。本教材は、上述のように自主学習型であるが、製作者の意図が正しく伝わっているかを確認する意味も込めて、大学教員立会いの下での実習とした。対象は三重県立伊勢高等学校の1年生12名、2012年11月4日に三重大学教育学部地学実験室で行った。伊勢高等学校は平成24年度から文部科学省のSSH（スーパーサイエ

表 1：教材テーマ一覧

0	画像処理の基本	天体画像解析の基本となる処理についての実習（一次処理）
1	三色合成	多波長観測画像から天体のカラー画像を作成（画像合成）
2	標準星の測光	天体観測の基本である測光について理解し、機械等級から標準システムへの等級変換方法を実習する（測光）
3	小惑星の自転周期	小惑星の光度曲線から自転周期を推定すると共に、小惑星形状の推定を行う（光度曲線、自転周期）
4	小惑星のタイプ分類	小惑星の色の比較からタイプ分類を行う（多色測光、タイプ分類）
5	小惑星の軌道	小惑星・彗星の位置変化から軌道を求める（軌道決定）
6	星団の年齢推定	星団の HR 図を作成し理論等年齢線との比較から、星団の年齢を推定する（HR 図、恒星進化モデル）
7	星団までの距離	球状星団内にある RR Lyr 型変光星を検出し、星団までの距離を推定する（変光星、距離推定）
8	星雲の発光機構	様々な種類の星雲を多波長での観測し、恒星の色と比較することで、星雲の発光機構を推定する（連続光、輝線放射）
9	星間吸収の検出	銀河系内に存在する星間塵を、星の計数を行うことにより間接的に検出する（スターカウント、星間吸収）
10	銀河系円盤の厚さ	銀河系円盤の鉛直方向の星の分布から円盤の構造を推定する（スターカウント、銀河系円盤）
11	銀河の構造	銀河の形態は様々だが、いくつかの共通した構造を持っている。銀河構造の規則性を見出し指標化する（表面測光、構造）
12	銀河の形態と色	様々な形態の銀河、また銀河の各領域（バルジ、渦状腕、等）での色の比較から、その成因を推定する（表面測光、Color 測定）
13	銀河形態と環境	銀河団内の銀河の形態分類を行い、銀河団内の位置と形態の関連を推定する（銀河形態分類、環境効果）
14	ハッブル定数の推定	後退速度既知の天体の大きさを測定することにより、宇宙膨張を特徴づけるハッブル定数を求める（角距離、ハッブルの法則）
15	銀河団の光度関数	銀河団の光度関数を求め、M* の銀河の見かけ等級から距離を推定し、ハッブル定数を推定する（光度関数、ハッブル定数）

ンスハイスクール）の指定を受けており、その活動の一環として本教材の実習を位置づけた。実習に用いたテーマは、表 1 中のテーマ 8（星雲の発光機構）で、“きれいな天体写真には意味がある”と題して行った。

#### 4. 1. 実習に用いたデータ

実習では、星雲の例として惑星状星雲 M 27 の B バンド（中心波長 440 nm）、V バンド（550 nm）、Rc バンド（647 nm）、Ic バンド（787 nm）の 4 波長帯で取得した画像を用いた。これらの画像は東京大学木曾観測所の 2 KCCD カメラで取得したものである。画像データの詳細を表 2 に示す。

CCD カメラで取得したデータから物理量を抽出す

表 2：実習に用いた画像データの詳細天体

天体名	M 27 (NGC 6853)	
天体位置 (J 2000.0)	赤経	19 <sup>h</sup> 59 <sup>m</sup> 36 <sup>s</sup>
	赤緯	+22° 43' 16"
観測日時	2002. 9. 8	
露出時間	B	180 sec × 2
	V	120 sec × 2
	Rc	120 sec × 2
	Ic	30 sec

るには表 1 のテーマ 0 に相当する一次処理が必要である。しかしながら、一次処理の作業そのものが初めての実習者にとって複雑であるため、その作業を行うことで本来の目的である発光機構に関する作業への意識が薄れてしまう可能性がある。加えて本実習では時間の制約があったことから、本実習では画像間の天体位置合わせまでの一次処理済みのデータを生徒に提供した。また、天体の放射輝度 ( $f_{\lambda}$  [ $\text{Wm}^{-2} \text{nm}^{-1}$ ]) と等級 ( $m$ ) の間には次式 (1) に示すような関係がある。

$$f_{\lambda} = f_0 \cdot 10^{-0.4m} \quad \dots (1)$$

ここで、 $f_0$  は 0 等級天体の放射輝度である。

通常解析では、等級が既知の天体と観測対象の天体の出力値の比較から、観測天体の等級を求め、式 (1) を用いて放射輝度に変換するというプロセスが一般的である。しかし、比較星を用いた等級の算出と等級から放射輝度への変換をともに行うことは、高校 2 年程度の数学の知識が必要となり、本実習の対象であった 1 年生では難しい。また、等級 ( $m$ ) と  $f_0$  は波長によって違うため、波長毎に上述の作業が必要となる。そこで、事前に以下の作業を行い、画像データの値を直接比較することで、波長毎の違いも含めた放射輝度

の比較が行えるように配慮した。画像データ上で信号 (I) と放射輝度 (f) の間には次式 (2) の関係がある。

$$I = fA\tau t\Delta\lambda \quad \dots (2)$$

ここで  $A$  は望遠鏡の有効面積、 $\tau$  は透過効率、 $t$  は露出時間、 $\Delta\lambda$  は透過波長幅である。

さらに、式 (1) を式 (2) に代入すると、

$$I = f_0 10^{-0.4m} A\tau t\Delta\lambda \quad \dots (3)$$

となる。 $A$ 、 $\tau$ 、 $t$ 、 $\Delta\lambda$  は波長毎にわかるので、既知の値として左辺に移項する。

$$\frac{I}{A\tau t\Delta\lambda} = f_0 10^{-0.4m} \quad \dots (4)$$

本実習で天体ごと、波長毎に比較を行いたいのは式 (4) の右辺の値である。左辺の分子は画像から、分母は既知の値としてわかるので、あらかじめ左辺の値に画像データを変換しておくことで、解析の際には波長の違いを意識せず数値をもとめることができる。

#### 4. 2. 実習の流れ

実習の時間は全体で 90 分とした。これは高校側からの要請によるものである。この内、前半の 30 分を実習内容の概略説明にあて、天体の発光機構には熱的発光と輝線発光があること、前者の例としては白熱電球が、後者の例としてナトリウムランプがあること等を説明した。

後半の 60 分は計算機を用いた画像処理の時間とした。画像処理では、まず  $B$ 、 $V$ 、 $Rc$  バンドの 3 波長帯での画像を用いた三色合成を行い、天体により色が異なっていることを確認してもらった。三色合成には一般用に市販されている画像処理ソフト Steller Image<sup>†</sup> を用いた。異なる波長間での天体位置調整までの処理が終わっているため、三色合成そのものの作業は 10 分程度で終了した。三色合成作業の様子を図 1 に示す。



図 1：実習中の様子

作業は 3 名を 1 グループとして、グループごとに計算機 1 台を使用した。StellarImage は生徒にとって初めて使うソフトであるが、使う機能を限定したため、特に困難なく作業をすすめることができた。

惑星状星雲 M 27 は広がった構造を持つ天体であり、領域により色が異なっている。3 色合成作業によって作成した画像の中で、班毎に 1 領域ずつ測定する領域を選択してもらった後、それぞれの領域の信号量の測定を行った。各班 (A~D 班) が選択した領域を図 2 に示す。画像の測定は三色合成に用いた  $B$ 、 $V$ 、 $Rc$  の 3 波長に加えて  $Ic$  バンドの測定も加えた。また測定には天体画像測定ソフトであるマカリイ<sup>‡</sup>を用い、一定領域内にある信号の平均値を求めた。この測定はマカリイの開口測光モードで行うことができる。開口測光は星などの点光源に対して用いられる測光法で、星雲のような広がった天体には用いないのが一般的であるが、マカリイの開口測光モードでは、最終結果を導くまでに用いられる数種類の測定値が記録され、その中に一定領域内の信号の平均値も含まれるため、本実習ではその値を抜き出して用いた。また、星雲の発光機構との比較を行うために、図 2 中に示す星雲周囲の 2 つの星 (星 X、Y) についても、星雲と同じ方法で測定を行った。星 X は、GSCID 2: N 0312001124691、星 Y は GSCID 2: N 031200116 44 である<sup>\*)</sup>。星雲との比較が行いやすい星として事前に抽出しておき、生徒に位置を示した上で測定を行ってもらった。

なお、マカリイも生徒にとっては初めてのソフトであるが、使用したのは開口測光モードのみで、その操作もマウスのみでできることから、操作に関して大きな困難はなかった。

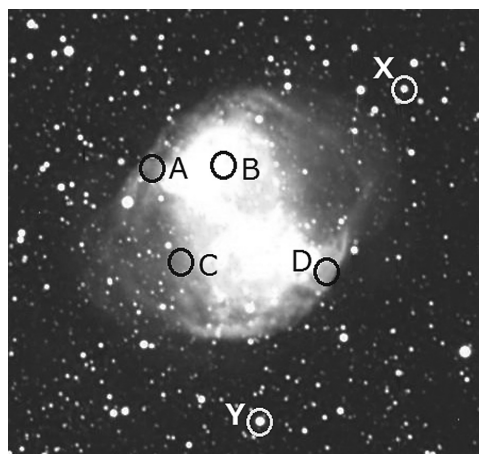


図 2：惑星状星雲 M 27 と測定領域

<sup>†</sup> AstroArts 社製の天体画像合成ソフト

<sup>‡</sup> 国立天文台と AstroArts 社により開発された画像処理ソフト。以下のサイトより誰でもダウンロードできる。  
<http://www.nao.ac.jp/others/Makalii/index.html>

4. 3. 測定結果および実習の効果

生徒の測定結果のグラフを図3に示す。図3aに示した星のグラフで、星XはK型の星で三色合成画像上ではオレンジ色に見え、星YはF型で白っぽく見える。星のタイプにより放射輝度が短波長側で強いのか、長波長側で強いのかの違いはあるが、いずれの星でも放射強度は波長に対して連続的に変化していることがわかる。星からの放射は熱的放射で連続光であり、図3aは星の放射輝度分布の理論モデルと定性的に一致している。一方、惑星状星雲からの放射は輝線放射である。星雲の領域A、Dは三色合成画像上では赤色に、領域B、Cは緑色に見える領域である。図3からは、程度の差はあるが、領域A、Dでは赤色に相当するRcバンドの放射輝度が強く、領域B、Cでは緑色に相当するVバンドの放射輝度が強くなっていることがわかる。惑星状星雲の赤色に見える領域では656.3 nmのH $\alpha$ および658.4 nmの[NII]の輝線が、緑色に見える領域では500.7 nmの[OIII]輝線が放射されていることが知られている<sup>9)</sup>。図3bで緑色領域のB、Cでは[OIII]を含むVバンドが強くなっている。赤色領域であるA、D領域ではH $\alpha$ 、[NII]を含むRcバンドでの放射強度が強くなっている。またA、D領域ではBバンドの放射輝度も若干高くなっているが、これはH $\alpha$ とともに放射されるH $\beta$ (486.1 nm)およびH $\gamma$ (430.1 nm)の輝線によるものと考えられる。また、4領域ともIcバンドでは有意な信号が検出されなかったが、これは当該波長域に放射輝度の高い輝線が存在しないことによる。

以上より、赤色・緑色の両領域からの分光放射輝度ともこれまでの研究報告と定性的に一致していることがわかる。

以上の実習を終えた後に生徒に対してアンケート調査を行った。アンケート項目および集計結果を表3に

示す。表3より、実習の内容については難しいと感じた生徒の割合が高く、その一方でテーマそのものに対する興味・関心については面白い・やや面白いと好意的にとらえている生徒の割合が9割を超える結果となった。この結果は、ほぼ我々の意図通りであり、多少難しく高校の学習範囲を超える内容であっても、実習のやり方次第で高校生に十分興味を持ってもらえることがわかった。パソコン操作も操作内容を限定したことにより、特に大きな困難はなかったことが確認できた。時間に関しては短いとの指摘が多かったが、実習前から懸念していた点でもあり、今後改善が必要である。また、一般市民の多くは天文学に対して、“天文学者は夜空を望遠鏡で覗いて新しい星を探している”というイメージを持っており、本実習前の話の中で参加した生徒の多くが同様の印象を持っていたが、実習後にはその印象が変わっており、理由の記述から、科学的手法を使って天体の特性を探るという現代天文学の主流となっている天体物理学のイメージへと変化していることがわかった。印象が変わらなかった生徒も、理由の記述内容から既に天体物理学的要素を知識として持っており、自然科学の一分野としての天文学の印象を与えることができたことが確認できた。この確認ができたことから、本実習は成功したものと言える。さらに、自由記述では、本実習のテーマとした天体の色をスペクトルの一種と捉えて天体の特性を把握するという考え方を理解したことを窺わせる内容の記述がみられた。ただし、その一方で“宇宙に電気が流れるのか”といった記述もあり、解説の際に譬えとして提示した現象と天体の発光現象を混同することによって考えが混乱してしまった生徒がいたこともわかった。天体現象は規模が大きくイメージしにくい身近な現象に譬える場合があるが、その場合には実際の現象と譬えの現象の違いを明確に示す必要性を再認識する必

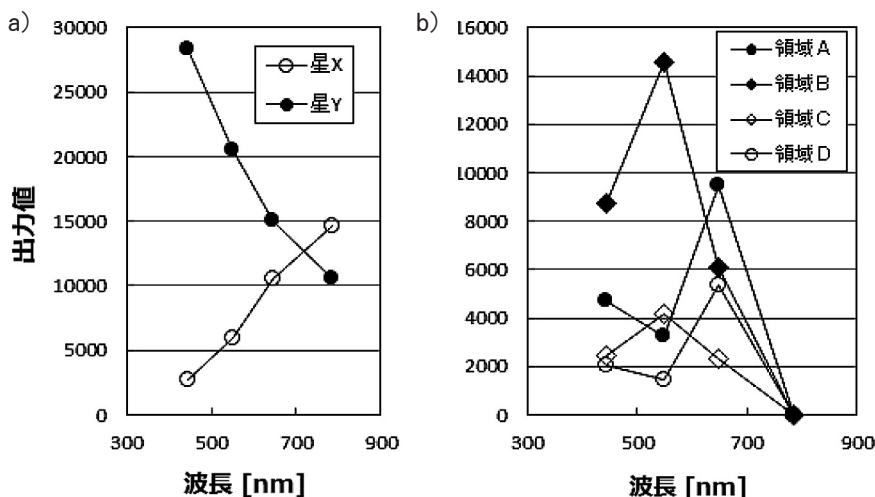


図3：放射輝度の測定結果。a) 比較星 X、Y の分光放射輝度、b) M27 の領域毎の放射輝度

表3：実習後のアンケート結果

実習の難易度	難しい	やや難しい	適当	やや易しい	易しい
	2	8	2	0	0
実習時間	長い	やや長い	ちょうど良い	やや短い	短い
	0	0	4	4	4
実習は面白かったか	面白い	やや面白い	どちらでもない	ややつまらない	つまらない
	7	4	1	0	0
パソコンの操作	難しい	やや難しい	適当	やや易しい	易しい
	1	5	5	1	0
天文に対する印象は変わったか	YES 9		NO 3		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>星を見るだけでないことが分かった</li> <li>写真から様々なことがわかる</li> <li>物理や化学の話ができた</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>TVで天文の番組を見たことがあった</li> <li>計算機を使う印象があり、実習と同じだった</li> </ul>		
自由記述	<ul style="list-style-type: none"> <li>綺麗な写真は綺麗だけではなかった。</li> <li>星の光り方にはいろいろな種類があることがわかった。</li> <li>天体観測をしてみたい。</li> <li>ソフトで天体の色が変わることがわかったが、実際の色がどうなっているのかはどうすればわかるのか疑問に思った。</li> <li>電球やネオン灯と同じ光り方ということだが、宇宙には電気が流れているのか？</li> </ul>				

要がある。以上を踏まえた上で、総合的に判断すれば、本実習の目的は十分達成されたものとする。

## 5. まとめ

本研究では、高校での地学の開講率が低迷する中、天文学に興味・関心はあるものの高校での体系的な学習機会が得られない高校生を念頭に、自主学習型の天文解析体験プログラムの開発を行った。このプログラムは15のテーマから構成されており、太陽系から宇宙膨張まで様々な階層の天体を取り上げている。またテーマ毎に現代天文学の基本的な考え方が組み込まれており、テーマを一通り実習することにより天文学の体系的な学習ができるように配慮している。

本プログラムの有効性検証のため、スーパーサイエンスハイスクールでの授業の一環として高校生に体験学習をしてもらった。対象は1年生で実習そのものの時間は約60分であった。限られた時間ではあったが、画像データを予め事前処理しておくことで、初めての解析作業に対しても過度の困難を伴うことなく解析を進めることができた。実習後のアンケート結果から、実習内容を面白いと感じた割合は9割を超え、自然科学の一分野としての天文学の考え方も伝えることができた。また前提となる知識がなくても、実習テーマの概容は十分に習得できることが確認できた。

## 参考文献

- 1) 平成20年度高等学校理科教員実態調査集計結果，科学技術振興機構，(2009)。
- 2) 山縣，西浦：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，(2005)。
- 3) 西浦，濱部，伊藤，山縣：天体画像解析実習用データ集の作成，東京学芸大学紀要 自然科学系，64，pp.45-53，(2012)。
- 4) 伊藤：銀河学校，天文教育，12 (3)，pp.5-9，(2000)。
- 5) 西浦：銀河学校2003—この5年間で得られたモノ，天文月報，96 (1)，pp.7-13，(2003)。
- 6) Itoh, et al.: A very wide-field CCD camera for Kiso Schmidt Telescope, Publications of the National Astronomical Observatory of Japan, Vol.6 (No.2), pp. 41-48, (2001)。
- 7) Baba, H., et al.: Development of the Subaru-Mitaka-Okayama-Kiso Archive System, ADASS XI, eds. D. A. Bohlender, D. Durand, & T. H. Handley, ASP Conference Series, Vol. 281, 298, (2002)。
- 8) Lasker et al.: The Second-Generation Guide Star Catalog: Description and Properties, *Astrophysical Journal*, 136 (2), pp.735-766, (2008)。
- 9) Sabbadin, F: Spectroscopic Observation of the Planetary Nebula NGC 6853, *Astronomy & Astrophysics*, 57, pp.307-308, (1977)。