

天体分光データ解析体験教材の開発

— 太陽の吸収線同定および銀河の回転速度測定の例 —

伊藤 信成¹・山縣 朋彦²・浜部 勝³・西浦 慎悟⁴

**Development of Learning Materials for Experiencing Astronomical Spectral Analysis.
In cases of identifying solar absorption lines and measurements of galactic rotational velocities**

Nobunari ITOH, Tomohiko YAMAGATA, Masaru HAMABE and Shingo NISHIURA

Abstract

Astronomical learning materials in which spectral data are dealt with were developed to provide high school students opportunities to learn astronomy. Two kinds of astronomical topics, elemental identification of solar absorption lines and rotational velocity measurements of spiral galaxies, were selected as material subjects. Each material contains spectral data and spreadsheets and macro commands are built into spreadsheets to reduce analytical work burden. An astronomical image processing software, Makali'i, is adopted as a default image processor. To evaluate the efficiency of the learning materials, the trial practice of the materials were carried out. As a result, the materials got favorable response from over 80% of experimental participants. On the other hand, it is found that considerable fraction of participants felt difficulty to understand the material contents.

1. はじめに

天文学の分野では、すばる望遠鏡や ALMA、あるいは天文観測衛星といった大型装置を利用した研究が進められ、多くの成果を上げている。近年、これらの成果は研究機関から社会に向けて積極的に発信されるようになってきている。天文分野は、一般市民も高い関心を寄せる自然科学の分野ではあるが、一方で天文学の学習が含まれる高校地学の履修率は、理科の他分野（物理、化学、生物）に比べ圧倒的に低い状況が続いている¹⁾。H21 年の学習指導要領の改訂にともない、高校理科での 3 分野履修が必修となったことにより²⁾、地学を学習する高校生の数は微増したものの、他分野との履修率の差は埋まっていない³⁾。また、科学技術振興機構の調査では、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⁴⁾。

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

1 三重大大学教育学部理科教育講座

2 文教大学教育学部理科専修

3 日本女子大学理学部数物科学科

4 東京学芸大学自然科学系宇宙地球科学分野

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、SSH に代表される理数支援プログラムをはじめとして、実習を通して現代天文学の基礎を体験するプログラムが各地の施設で開催され、成果が報告されている⁵⁻⁸⁾。我々のグループでも、天文学における基礎的実習を体験し、その経験を学校現場で活かしてもらうことを目的に、教員養成系学部所属する大学生に対する天体観測実習を、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）の協力を得て 2005 年度より行っている⁹⁾。このような活動から、地学が未履修の生徒であっても、段階的に実習を積み重ねることによって実習テーマについての理解を得ることができ、知的好奇心を刺激する効果も高いことがわかっている^{10),11)}。

一方で、SSH 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、我々のグループ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行ってきた¹²⁻¹⁵⁾。本研究では分光データ（スペクトル）を用いた教材 2 種の開発について報告し、その有効性について議論する。

2. 教材のテーマと教材化の手順

スペクトルは天体からの光を波長ごとに分割することによって得られるデータであり、空気中の水滴等により太陽の光が分割されてできる虹は広義のスペクトルである。天体のスペクトルからは主として天体の元素組成、放射機構、運動情報を入手することができる。本論文では、この内の元素組成情報の入手の 1 例である太陽の吸収線同定と、運動情報の入手の 1 例である渦巻銀河の回転曲線測定の 2 つのテーマについて取り上げる。本研究では高校生～大学教養程度を対象とし、身近に指導者がいない環境でも独自のペースで自主学習できる教材を目指しているため、以下に示す 3 点を意識して開発を行った。

- 1) テーマの内容、解析の原理、結果についての注目点についてのドキュメントと解析に用いるデータをセットにして提供を行う。
- 2) 解析対象天体を複数用意すること。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ことが示されている¹⁶⁾。詳細は後述するが、本論文で取り上げたテーマについても、研究者が研究論文を作成するために取得したデータを用いている。

2.1. 太陽吸収線の同定

太陽のスペクトルには多数の暗線が存在し、発見者の名前を冠しフラウンフォーファー線と呼ばれている。この暗線は太陽表面に存在する原子により太陽内部からの連続光が吸収されることにより生成される。原子は原子核と電子から成るが、原子核の周囲を回る電子の軌道は不連続であり、電子がエネルギーの低い軌道からエネルギーが高い軌道へ遷移する際には、軌道間のエネルギー差に相当する波長の光を吸収する。このため、暗線は吸収線とも呼ばれる。電子の軌道のエネルギー準位は元素毎に決まっているので、吸収される光の波長も元素によって異なっている。このため、暗線の波長を調べることにより、太陽表面に存在する元素を同定することができる。

今回、教材として用いたデータはフランスの研究機関が提供する太陽データ・アーカイブ BASS 2000 (Base de donnees Solaire Sol) より取得した¹⁷⁾。当該のスペクトルデータは波長較正され、連続光レベルで規格化された状態で公開されている。このアーカイブデータから 370nm～670nm のスペクトルを取得した。この範囲はフラウンフォーファーの C 線 (656.3nm, H)、D 線 (589.6nm, 589.0nm, とともに Na)、E 線 (527.0nm, Fe)、F 線 (486.1nm, H)、G 線 (434.0nm, H)、H 線 (396.8nm, Ca⁺)、K 線 (393.4nm, Ca⁺) を含み、それ以外にも Mg や Cr、Sr 等の原子、CH や TiO の分子による暗線が存在している¹⁸⁾。ただし、オリジナルのスペクトルは波長分解能が $R=2,750,000$ (0.002 \AA/pixel) と非常に高分解能である。高分解能のスペクトルでは等価幅の狭い吸収線まで検出することができるため、検出可能な吸収線が膨大な数となる。本教材の目的は、太陽スペクトルに存在する顕著な吸収線を同定することでスペクトルから構成表面にある元素を推定できることを学ぶことであり、太陽スペクトルに存在する全ての吸収線を同定することではない。膨大な数の吸収線は学習者の混乱を招く可能性もあるため、オリジナルの分解能のままでは教材に用いることは適当ではないと判断した。そこで、オリジナルのスペクトルに対し、100 画素毎の移動平均をとり、波長分解能を $R=27,500$ (0.2 \AA/pixel) まで低くした。オリジナル分解能のスペクトルの一部を図 1a に、低分解能変換後の

スペクトルの一部を図 1b に示す。図 1a, b の波長 486nm に見える暗線は水素 (H β) によるものである。図 1a では 486~487nm の範囲に複数の暗線が確認できるが、図 1b では同じ波長範囲に明瞭な暗線を見出すことはできない。一方で 487nm より長い波長にある 2 本の暗線、これは Fe によるものであるが、これらは図 1a, b のいずれでも確認することができる。このように低分解能化により等価幅の比較的広い暗線が残るため、適度に暗線の数減らすことができ、無数ともいえる暗線を闇雲に測定するのではなく、太陽スペクトルの中で比較的強い暗線に注目して測定することができる。図 1c は教材として提供する低分解能化後の太陽スペクトルの全体像である。

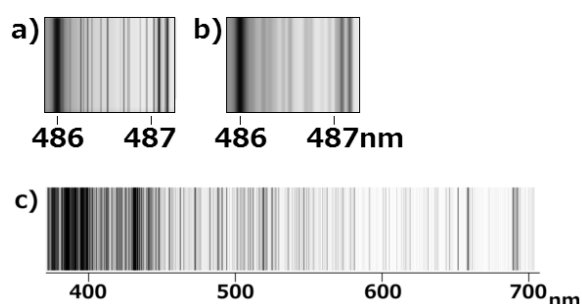


図 1: a) BASS2000 から取得した太陽スペクトルの一部、
b) 低分解能化後の太陽スペクトルの一部、
c) 教材として提供する太陽スペクトルの全体画像

スペクトルの解析は、

- (i) 吸収線の波長測定、
- (ii) 元素の同定

という 2 つの作業に大別できる。この解析には、国立天文台と (株) アストロアーツの共同開発による天体画像解析ソフト Makali'i¹⁹⁾ と MicroSoft 社の Excel を用いることとした。図 2a は Makali'i で太陽スペクトルを表示した例である。Makali'i での解析手順は次の 2 種である。

- ① 吸収線を選択
- ② 吸収線の X 座標を読み取る

次に Excel を用いた解析に移る。図 2b に Excel ファイル上での解析の様子を示す。Excel ファイルにはマクロが組み込まれており、実習者はボタン操作でマクロを起動することで解析を進めていく。マクロを組み込むことで、実習者は解析に関連する細かい作業を気にすることなく、テーマの本質的な部分に注目して解析を進めることができる。Excel ファイル上での解析手順は次の 5 種である。

- ③ Makali'i で測定した吸収線の X 座標の入力
- ④ X 座標を波長に変換

太陽スペクトルの X 座標と波長の対応は BASS2000 で公開されているので、実習者自身が

計算を行って X 座標値を波長に変換することもできるが、スペクトル上の座標値と波長の対応については別の教材で扱うこととし、今回はマクロにより自動化した。

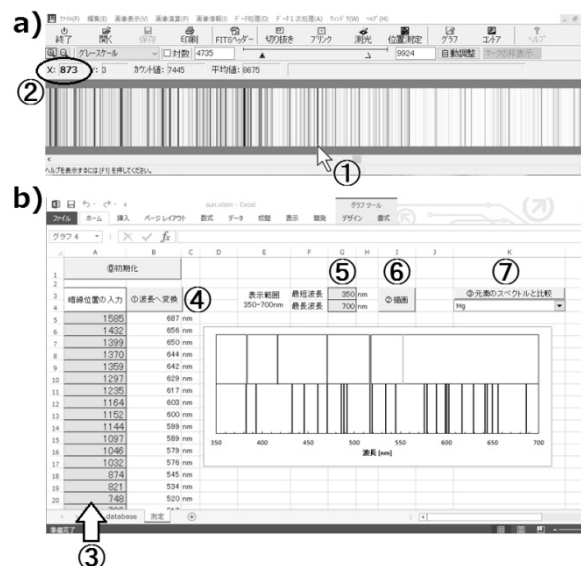


図 2: a) Makali'i での太陽スペクトル表示例、
b) 解析用エクセルファイルの表示例

- ⑤ 測定した吸収線を表示する範囲を入力
- ⑥ グラフの描画

ボタンを押すことで図 2b にある吸収線の位置を示したグラフの下部を表示できる。

ここまでの (i) 吸収線の波長測定に相当し、以下の解析が (ii) 元素の同定に相当する。

- ⑦ 元素の吸収線位置との比較

元素の種類を選択することで、選択した元素の吸収線の位置をグラフ上部に表示できる。実習者はグラフの上下を比較することで、測定で得られた各吸収線がどの元素に対応するか同定することができる。選択する元素の種類を変更すると、グラフ上部は自動的に再描画されるようになっている。

以上が太陽スペクトルの解析手順である。

2.2. 渦巻き銀河の回転速度の測定

渦巻銀河の円盤に属する星は、大局的には円盤内を回転運動している。図 3 は円盤内の星の運動を模式化したものであるが、円盤内を平均速度 V で公転している天体の運動を、銀河円盤に対する傾斜角 i の方向から観測した場合、観測される速度 V' は

$$V' = V \cdot \sin i \quad (1)$$

となる。式 (1) より、回転速度を測定する場合には i が大きい銀河が適していることがわかる。また、 V' の測定は、ドップラー効果によりスペクトル上の吸収線

または輝線の波長が移動することを利用する。話を簡単にするために、 $i=90^\circ$ のケースで考えると、視線方向に対して速度 V で近づいてくる天体からの吸収線または輝線の波長 λ は、もともとの吸収線または輝線の波長 λ_0 に対し、次式 (2) で示すように、 V の値に依存して変化する。

$$\lambda = \left(1 - \frac{V}{c}\right) \lambda_0 \quad (2)$$

ここで、 c は光速を表す。式 (2) より、視線上で近づいてくる場合 ($V > 0$) には波長は短い方に、遠ざかっていく場合 ($V < 0$) には波長は長い方にずれることがわかる。また、速度が大きいほど波長の変化も大きい。

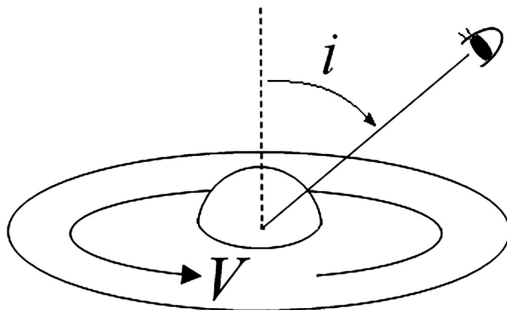


図3：渦巻銀河円盤での天体の公転の模式図

今回、教材として用いたデータは国立天文台が提供するデータ・アーカイブ SMOKA²⁰⁾ から抽出した。SMOKA には複数の観測機器のデータが提供されているが、今回はその中でもデータの取り扱いが比較的容易である Spectro-Nebular-Graph (SNG) のスペクトルデータを用いた²¹⁾。今回は銀河円盤の回転速度測定を目的としているので、傾斜角が大きい銀河を選択する必要がある。また、回転速度が銀河円盤外縁でも一定値を維持している (Flat Rotation) という一般的な傾向を見出すためには、銀河の中心付近のみでなく、銀河円盤の範囲までのスペクトルをとる必要がある。また、スリット長に比べ銀河が小さい場合には、測定の分解能が粗くなってしまう。SNG のスリット長が $5'$ であることから、アーカイブされているデータから傾斜角が 85° 以上、銀河径が $3'$ 以上 $15'$ 以下の銀河を抽出した。抽出した銀河のリストを表 1 に示す²²⁾。データの例として NGC5907 のケースを図 4 に示す。図 4a は NGC5907 の可視撮画像* である。図中の矩形枠はスリットの位置を示している。NGC5907 はバルジが目立たず、円盤が卓越している銀河である。スリットは

銀河面に沿って配置指されているが、銀河中心とスリット中心は若干ずれている。SNG で取得した NGC5907 のスペクトルを図 4b に示す。縦方向が波長方向、横方向が空間方向である。縦に明るい筋が見えるが、ここが銀河中心部に相当する。横方向に 2 本の屈曲した輝線が見えるが、上の輝線が $H\alpha$ (波長 656.3nm)、下の輝線が $[NII]$ (波長 658.3nm) である。2 本の輝線とも、銀河内の天体の回転運動によるドップラー効果により、波長がシフトしている様子がわかる。図中で銀河中心より左側の輝線は短波長側、右側は長波長側にずれているので、左側に相当する円盤部は観測者に近づき、右側は観測者から遠ざかる運動をしていることがわかる。

表 1：教材用に抽出した銀河の一覧

	傾斜角	銀河径	距離	Type
NGC3079	88°	$8'$	19Mpc	SBc
NGC3495	85°	$5'$	20Mpc	Scd
NGC5907	90°	$13'$	16Mpc	Sc

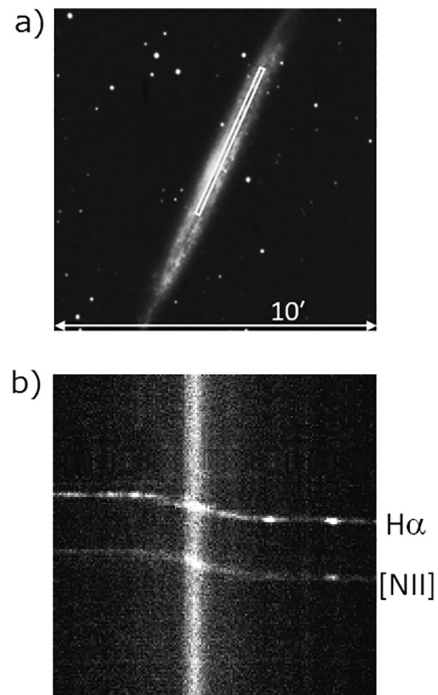


図4：a) NGC5907 の可視画像、
b) NGC5907 のスペクトル

スペクトルの解析は、

- 輝線位置の測定、
- 測定位置の波長への変換、
- 回転速度の算出、
- 結果のグラフ化

という 4 つの作業に大別できる。具体的な作業手順を以下に示す。この解析には、Makali'i と Excel を用いることとした。

* Digitized Sky Survey (POS2, B Band) を利用
<http://dss.nao.ac.jp/cgi-bin/search.cgi>

(a) 場所毎の輝線位置の測定

- ① Makali'i で銀河のスペクトルファイルを開く。
- ② 画像上での輝線の位置を記録する (図 5a)。教材として選定した 3 種の銀河のスペクトルには 2 本の輝線が写っており、各輝線は観測者に近づく成分と遠ざかる成分により短波長側、長波長側にシフトするので、それぞれについて測定を行う。
- ③ Excel ファイルを開き、②で測定した結果を入力する (図 5b)。

(b) 波長への変換

- ④ SNG の観測条件より、波長方向の 1 画素は 0.07nm に相当する。この関係を用いて画像上の輝線位置を波長に変換する。また、波長変換と合わせて、空間方向についても、SNG の観測仕様から得られる $1.75''/\text{pixel}$ という変換係数を用いて、画像上の位置から天球上での画角への変換を行う。これらの変換の計算自体は簡単なものであるが、測定点が多いため、マクロを組み込み、ボタン操作で一括返還できるようになっている。

(c) 回転速度の算出

- ⑤ 銀河の回転速度は、銀河中心における輝線波長を基準波長 λ_0 とし、④で求めた各場所での輝線波長 λ との比較から式 (2) を介して求めることができる。また、各銀河までの距離もわかっているので、画角を実距離に変換することができる。これらの変換もマクロを用いて一括変換できるようにしている。なお、傾斜角が 90° でない場合には、式 (1) を使って傾斜角の補正もあわせて行っている。

(d) グラフ化

- ⑥ 最後にグラフ化を行う。この作業もマクロを組み込み、自動化を図っている。結果の 1 例を図 5c に示す。銀河の外縁で回転速度がほぼ一定となる様子がわかる。

以上が銀河回転速度測定の実験手順である。多くの作業をマクロ化しており、作業負担を軽減している。一方で、マクロ化により解析原理がブラックボックス化することを避けるため、手計算による作業との併用も可能としている。すなわち、いくつかの観測点については、計算結果を Excel のセルに手入力し、計算手順を理解した後の残りのセルの計算についてはマクロでの一括計算が可能である。

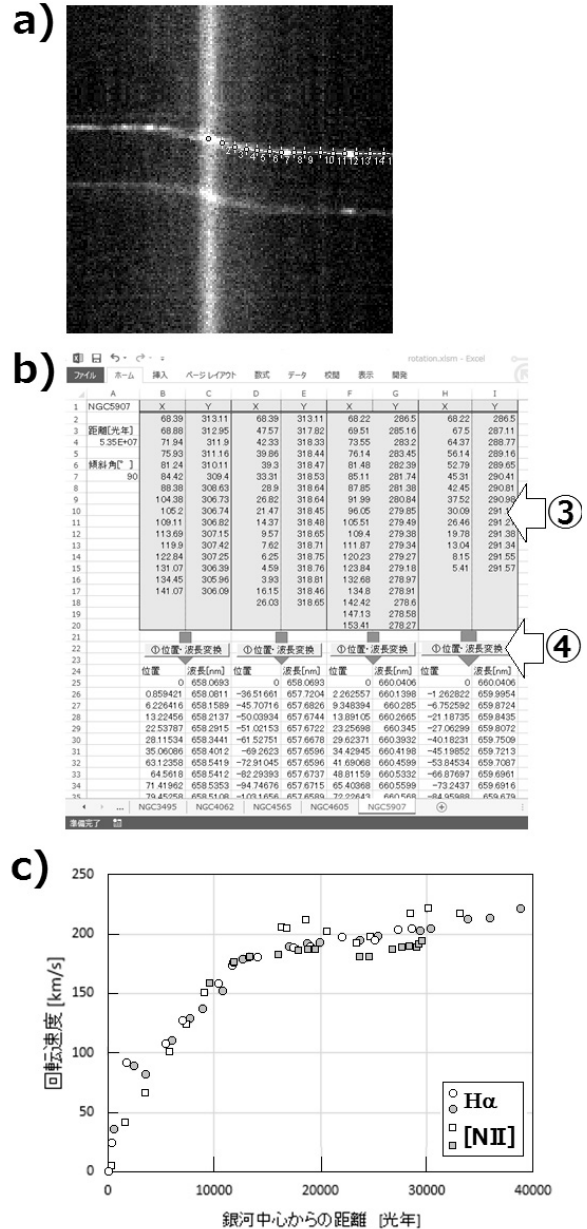


図 5 : a) 輝線位置の測定例、
b) Excel ファイルへの入力例、
c) 結果のグラフ化の例

3. 効果の検証

本教材の有効性を検証するため、高校生に対する実習を行った。上述のように、本教材は自主学習型であり、本来は高校生が指導者のいない状況下で独学的に実施することを念頭においているが、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を行った。

3.1. 渦巻き銀河の回転速度について

三重大学では、毎年夏に県内高校生を対象としたサ

マーセミナーを開催している。このサマーセミナーで渦巻銀河の回転曲線の教材を用いた実習を実施し、教材の有効性を検証した。サマーセミナーの概要を表2に示す。実習に参加した高校生は全員、高校理科の科目である地学基礎は未履修であった。

表2：銀河の回転曲線測定実習の概要

実施日	2015年7月29, 30, 31日 (3日間とも同じ内容)
実習人数	32名 高1:22名, 高2:9名, 高3:1名
実習時間	2.5時間

実習では、2.5時間の実習時間の内、最初の1時間を分光およびスペクトルについての概要説明と銀河についての概要説明にあてた。その後、上述した解析作業を1時間かけて行い、最後の30分はまとめとして、太陽系の惑星の公転運動と渦巻銀河の回転曲線の比較を行い、暗黒物質の存在について言及を行った。実習後のアンケートでは、教材に関する項目として次の3点について聞いた。

- ・スペクトルから天体の情報がえられることについての理解度
- ・惑星の公転と銀河の回転曲線の違いについての理解度
- ・教材として取り上げたテーマの難易度

アンケート結果を図6に示す。図6aに示したように、スペクトルから天体についての情報が得られることについては、よく理解できた・だいたい理解できたで97%となっている。一方で、今回のテーマで具体的に得られる天体の情報である天体の運動についての理解では、図6bに示したように、81%の参加者が理解できたと回答している。一方で、15%の参加者がどちらともいえないと回答し、3%はよく理解できなかったと回答しており、両者で2割弱となっている。この割合は、図6cに示した難易度に対する回答結果において、非常に難しい・難しいと回答した割合とほぼ一致する。同種のセミナーで、スペクトルではなく撮像データをもとにした教材を使ったケースでは、理解度が95%を超えていたことから^{10),11)}、比較的直感的に理解が得られる天体の明るさや、色、形状等を測定する撮像データと比べ、測定値(波長)から結果(速度)を導くために数式を用いる必要がある分光データは、高校生にとって理解しにくいものと考えられる。

さらに、テーマについての理解度について、学年間の比較結果を図6dに示す。3年生は1名のみなので、比較から除外した。図からスペクトル全般に関しても回転運動に関しても、1年生より2年生の方が理解度

が低いことがわかる。特に回転運動については有意水準5%で有意な差となっている。惑星と銀河円盤での運動の様子が異なることを理解するには、力学の知識が必要となる。このため、理解度の違いは、学年によるものではなく、高校での物理科目の履修状況による可能性もある。しかしながら、アンケートでは高校での履修科目については調査を行っていないため、学年間で理解度に差が出た理由については、特定できなかった。

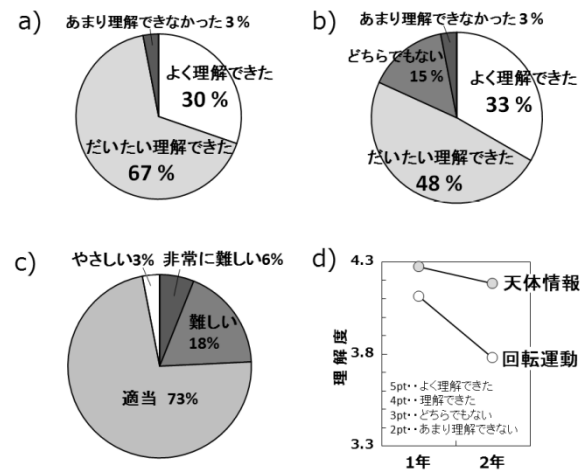


図6：実習後のアンケート結果

- スペクトルから天体の情報が得られることについての理解度,
- 惑星の回転運動と銀河の回転運動の違いについての理解度,
- テーマの難易度,
- 理解度の学年変化

3.2. 太陽吸収線同定について

太陽吸収線教材を用いた実習も、上述した渦巻銀河の教材と同様、三重大学主催のサマーセミナーで取り上げた。実習実施の概要を表3に示す。この実習においても、参加した高校生全員が地学基礎は未履修であった。

表3：太陽吸収線同定実習の概要

実施日	2016年7月29日
実習人数	16名(高1:5名, 高2:11名)
実習時間	2.5時間

上述した2015年度の実習のアンケート結果から、高校生の多くが分光やスペクトルについて理解が十分でないにも関わらず、その点に考慮せずに実習が進められた可能性が高いことが読み取れた。そこで、2016年度の実習では、2.5時間の実習時間の内、最初の1時間をCD-Rを用いた簡易分光器作りにあてた。そして、自分が作成した分光器で様々な光源を観察することにより、光源によりスペクトルに違いが生じることを理

解してもらった上で、太陽吸収線の実習に入った。図7は参加高校生が自作の分光器で太陽を観察している様子である。太陽以外にも、白熱電球、蛍光灯、白色LEDライト、水銀灯の観察を行った。その後、上述した解析作業を1時間かけて行い、最後の30分はまとめとして、吸収線の見え方は、恒星表面に存在する元素の種類・存在量とともに恒星の表面温度に依存することを説明するとともに、恒星のスペクトル分類の紹介を行った。最後に、全員で太陽のスペクトル型の推定を行って実習を終了した。

実習後のアンケートでは、2015年度と同様、スペクトルから天体の情報を抽出できることについての理解度、吸収線から元素の同定ができることについての理解度、およびテーマの難易度についての3点について聞いた。結果を図8に示す。図8aはスペクトルから天体情報が得られることについての理解度を示しており、全ての参加者の理解がほぼ得られたことがわかる。また図8bで示した元素同定についての理解度についても、全ての参加者が理解できたと回答しており、銀河の回転曲線に比べ高い理解度が得られた。高い理解度が得られた理由としては、非常に身近な存在である太陽を扱ったテーマであったこと、自作分光器で実際に太陽スペクトルを観察した後に実習に入ったこと、元素同定と高校化学で扱う炎色反応を結び付けたことが挙げられる。特に太陽スペクトルを観察したことで、スペクトルに対する具体的なイメージを持ってから実習に入ったことが効果的だったと考える。一方で難易度については、参加者の1/4が非常に難しいと回答し、難しいと回答した参加者を含めると約4割が難易度が高いと認識していたことがわかる。

以上2種の教材の試行から、撮像データを用いた教材と比べ、難易度が高いと感じる高校生の割合が高いことがわかった。今後は、高校生が難しいと感じている点を把握し、理解を進めるための説明方法等の検討を行っていく必要がある。



図7：自作分光器を用いた太陽観察の様子

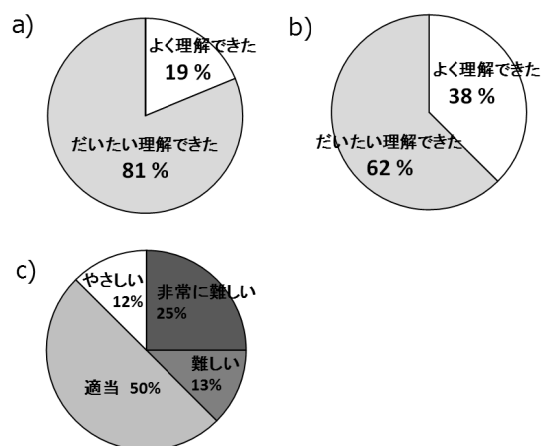


図8：実習後のアンケート結果

- a) スペクトルの概要についての理解度、
- b) 教材テーマについての理解度、
- c) テーマの難易度、

4. 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系統的な学習機会が得られない高校生を念頭に、分光データを用いた教材開発を行った。開発した教材は太陽スペクトルの吸収線の元素同定、および渦巻銀河の回転速度測定の種類である。各教材ともスペクトルデータとともに解析用のExcelファイルを配布する。Excelファイルにはマクロを組み込み、解析作業の負担軽減を図っている。また天体画像処理ソフトMakali'iの利用を念頭においている。

これらの教材は、身近に指導者がいない環境でも生徒自身の力で実習を進める自主学習型教材を目指しているが、開発段階での有効性を確認するため、大学教員立会いの下で高校生に対する実習を行った。実習後のアンケート結果から、太陽吸収線の同定については、参加者全員がテーマについて理解できたと回答した一方で、銀河の回転速度については、約2割が理解不足であることがわかった。またテーマの難易度については、2つのテーマとも1/4～1/3の参加者が難しいと感じていることがわかった。自主学習型教材を目指すという観点から、今後は、高校生が難しいと感じている点を整理し、理解を促進する説明等の検討を行っていく必要がある。

引用文献

- 1) 文部科学省, 平成 27 年度公立高等学校における教育課程の編成・実施状況調査の結果について, (2016).
- 2) 文部科学省, 高等学校学習指導要領解説理科編理数編, 実教出版, 東京, 232p.
- 3) 縣, 次期学習指導要領で地学を含む高校必修理科学科目の設置は可能か? 第 27 回天文教育普及研究会集録, 25-28, (2013).
- 4) 科学技術振興機構, 平成 20 年度高等学校理科教員実態調査集計結果, (2009).
- 5) 室井, 志岐, 五島, 縣, 渡部, 理想のセミナーを求めてー君が天文学者になる 4 日間 4 年間の実践のまとめー, 天文月報, **96** (1), 14-20, (2003).
- 6) 伊藤, 銀河学校, 天文教育, **12** (3), 5-9, (2000).
- 7) 西浦, 銀河学校 2003ーこの 5 年間で得られたモノ, 天文月報, **96** (1), 7-13, (2003).
- 8) 前原, 木星の衛星イオと光速度〜ジュニアセッションと SSH〜, 天文月報, **107** (9), 493-501, (2014).
- 9) 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**, 111-120, (2005).
- 10) 伊藤, 山縣, 浜部, 西浦, 三戸, 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** (1), 13-28, (2014).
- 11) 伊藤, 高田, 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** (2), 69-91, (2015).
- 12) 西浦, 濱部, 山縣, 伊藤, 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**, 45-53, (2012).
- 13) 伊藤, 山縣, 濱部, 西浦, 三戸, 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, 三重大学教育学部紀要, **64**, 35-40, (2012).
- 14) 山縣, 伊藤, 西浦, 濱部, 研究施設を利用した天体観測・解析実習について II, 文教大学 教育学部紀要, **47**, 171-178, (2013).
- 15) 西浦, 三戸, 伊藤, 山縣, 浜部, 中田, 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, 東京学芸大学紀要 自然科学系, **68**, 73-81, (2016).
- 16) 原, 五島, 洞口, 金光, 古荘, 矢治, PAOFITS ワーキンググループ, 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** (5), 151-165, (2009).
- 17) Meunier, N., Lafon, M., Maeght, P., Grimaud, F., Roudier, Th., *BASS2000: on-going projects and results*, Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics Eds.: D. Barret, F. Casoli, G. Lagache, A. Lecavelier, L. Pagani, 553, (2006).
- 18) 国立天文台, 理科年表, 丸善, 東京, 1098p, (2016).
- 19) Horaguchi, et. al., *FITS image analysis software for education: Makali`i*. In Gabriel, C., Arviset, C., Ponz, D. and Solano, E. (eds.), ASP Conference Series, **351**, 544-547, (2006).
- 20) 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, **281**, 298, (2002).
- 21) Kosugi, G., Ohtani, H., Sasaki, T., Koyano, H., Shimizu, Y., Yoshida, M., Sasaki, M., Aoki, K., Baba, A., *Spectro-nebula graph: A Tridimensional Spectroscopic System Based on a Local Area Network of Personal Computers*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, **107**, 474, (1995).
- 22) Tully, R., B., *Nearby Galaxy Catalog*, Cambridge University Press, Cambridge, (1988).