

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23501014

研究課題名(和文)天文分野を対象とした自主学習型解析体験教材の開発

研究課題名(英文)Development of self-directed astronomical materials for high school students

研究代表者

伊藤 信成 ( ITOH, NOBUNARI )

三重大学・教育学部・教授

研究者番号：60344272

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：天文学に興味を持つ高校生が多い一方で、高校で天文学を学ぶ教科である地学の履修率は低い水準で推移しています。このため天文学に興味を持っていても高校で系統的に学べない状況となっています。本研究では、天文学に興味を持つ高校生が自主的に学習・実習を進めることができる体験型教材を開発しました。この教材はWeb公開を行います。これにより、学校で地学が開講されていない高校生であっても天文学研究に触れる機会を増やすことができるものと考えています。

研究成果の概要(英文)：High school students who are interested in astronomy have little opportunity to study astronomy in depth because earth science courses of which astronomy is categorized as a part are little taken in high school. We have developed self-directed learning materials for modern astronomy to improve such conditions. Students could learn astronomical data analysis experimentally for various astronomical objects such as stars, star clusters, nebulae, and galaxies using our materials. These materials are opened on the web and anyone can access them anytime and anywhere. Our materials will provide high school students more opportunities for experiencing astronomical data analysis.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学教育・教育工学・科学教育

キーワード：自然科学教育 天文学 自主学習 画像処理

## 1. 研究開始当初の背景

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

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。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ふ。結果として、次代を担う研究者、技術者の減少が懸念され、状況の改善が求められている。

## 2. 研究の目的

上記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、教員養成系学部にも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。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 600 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、大きな成果を挙げている。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。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。

## 3. 研究の方法

本研究では、以下の 4 点を特長とした教材開発を行った。

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、その両課題の解決し系統的学習可能な教材作成を行った。

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、内容の異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可能とした。

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。そこで本教材で利用した天体画像データは、東京大学附属木曾観測所で取得され公開されている研究用データを用いた。公開データは 11 万枚を超えているため、本研究の目的に合った画像データを抽出することが可能である。また、同一観測装置による観測データのため、テーマは異なっても基本的な解析手法に共通部分が多い。このため 1 つのテーマで使用した解析方法が別のテーマでも利用できるなど、学習者が天文解析の関連性を理解するのに役立つ効果も期待できる。

4) **マクロを利用した可視化**。解析には様々な処理が必要となり、表計算ソフト等を用いた計算やグラフ描画が必要になる。この時、個々のソフトに慣れていない実習者は、ソフト使用にとまらなう困難さを天文解析の困難さと感じ、教材の利用で反って天文学習への障壁を感じてしまうことが危惧される。そこで、基本的な解析手法は維持しつつも、多量データに対する計算やグラフ描画など、解析部分の本質から外れる部分については表計算ソフトのマクロ機能を利用し、実習生の負担軽減を図っている。

## 4. 研究成果

本研究では 10 種類のテーマについて教材を開発した。各テーマは 4 章立てとなっており、第 1 章で各テーマ全体の概要を、2 章で解析で基盤となる測定原理について解説し、3 章で実際に画像データを用いて解析を行うようになっている。4 章は解析結果を受けてのまとめの章となっている。また教材は Web 上で公開する形式をとっており、これにより、いつでも・どこでも・誰でもアクセスすることが可能となっている(図 1)。

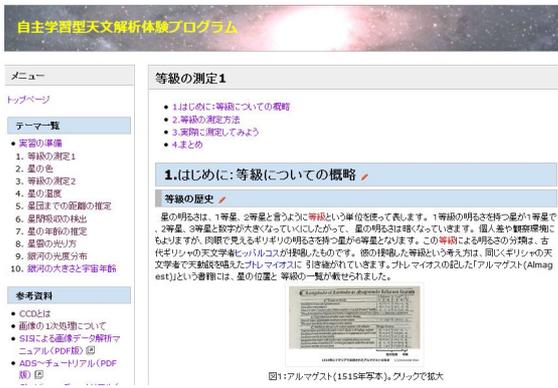


図1: Web 公開用のページ例

以下、各テーマについて簡単に紹介する。

**等級の測定:** 等級に関する歴史的背景について述べ、等級の基本であるポグソンの式を解説している。等級と明るさの関係は天文学の基本であり、ポグソンの式はほとんどの書籍で取り上げられているが、その関係を実習化したものは少ない。そこで、本テーマにおいては、等級測定の基礎となる開口測光の原理の説明と測光システムの説明を行った上で、ポグソンの式の検証実習を行うようにしている。実際の実習では異なるバンドでの測光を行うことで、同じ天体でも波長により明るさ (Flux) が異なることを示すことも合わせて行っている。さらに相対測光と絶対測光を取り上げ、相対測光では超新星のデータを用い、比較星との等級差の測定を行うことで光度変化を描画する実習となっている。超新星を扱うことで、実習者の興味を惹けるものと考え。

**星の色:** 等級推定の基礎を受けて、星の色の表し方を解説するとともに、星の絶対等級と色指数の関係を端的に表した図である HR 図を描画することで、恒星の種類についても解説を行っている。HR 図描画教材は既に多数作成されているが、ほとんどが星団に対する HR 図である。星団の HR 図は距離の補正をしなくても描画が可能であることや、星が密集する星団領域を観測すれば良いため、少ない画像枚数で HR 図を描けるメリットがあるが、一方で特定の年齢の星の分布を示すこととなり、星の分類という観点では必ずしも望ましいものではない。そこで、本教材では、木曾観測所の超広視野撮像装置 (KWFC) を用いて観測効率を高めることで、星団に属さない Field Star100 星を用いた HR 図描画教材を作成した。この教材では様々な距離・年齢にある星がデータ内に含まれることから、単に見かけの等級で等級・色の関係を描画しても明確な関係はわからないが、みかけ等級を絶対等級に変換することで、主系列星と巨星が明瞭に分離できる図を描くことができる (図 2)。見かけ等級での図と絶対等級での図の比較により、単に HR 図を描くというだけでなく、天体観測における距離補正の重要性を示すことができる教材となっている。

**等級の測定 2:** このテーマでは、等級について基本的な理解を促すため、大気吸収・散乱によ

る減光の効果を無視して説明を行っていたため、

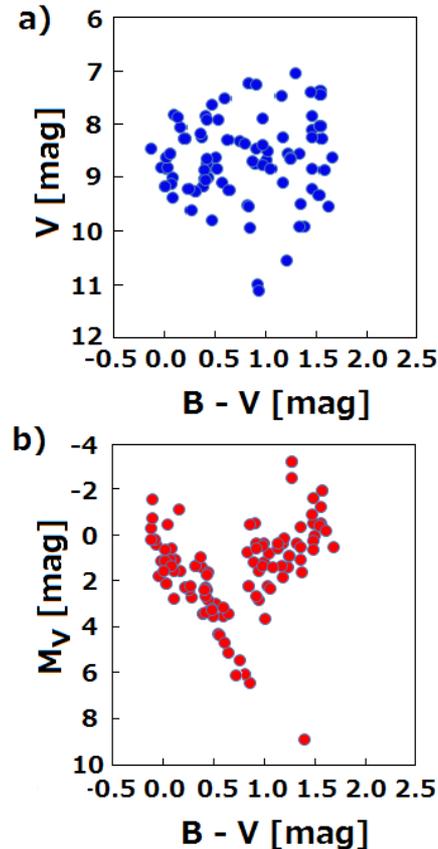


図2: 星の色のテーマ内で描く HR 図。a) 見かけの等級で描いた HR 図, b) 絶対等級で描いた HR 図

ここでは大気補正およびカラー補正について、そのような補正が必要となる背景を解説し、実際に異なる観測日、観測バンドのデータを用いて大気補正、カラー補正の実際の手順を実習する教材になっている。大気補正については波長が短くなるほど吸収・散乱の効果が大きくなることわかるようなグラフ描画マクロを作成している。

**星の表面温度:** 星の色は等級と並び最も基本的な観測量である。星の色に違いがあることは小学校 4 年生の理科単元「月と星」で学習するが、定量的な関係については、高校での学習まで待たねばならない。高校「地学」では、スペクトルの形状と恒星表面温度の詳細な解説が行われ、両者の関係を定量評価できることを学習する。したがって、表面温度推定の教材は地学履修者にとっては授業内外で利用可能なものとなり得る。等級への変換には対数関数を用いる必要があるが、対数関数は高校生にとっては新しい関数概念であり、その意味を理解し使いこなすには時間がかかる場合がある。表面温度推定の場合、等級を算出する必要がない点も利点として挙げることができる。観測装置から出力される天体からの信号は、輻射流束に相当する値であり、恒星の表面温度推定を行うおうとする場合、測定結果の数値をそのまま用いることが可能であり、数学および天文学の知識が十分でない生徒にとっても、実習を行いやすいテーマである。そこで本テーマでは BVRcic の 4 バンドの撮像データから求めた恒星の明るさ分布と黒体

放射スペクトルを比較することで、星の表面温度を推定する教材を開発した。この教材では異なる波長で観測された星の明るさを表計算ソフトに入力することで半自動的に星の表面温度を推定できる(図3)。

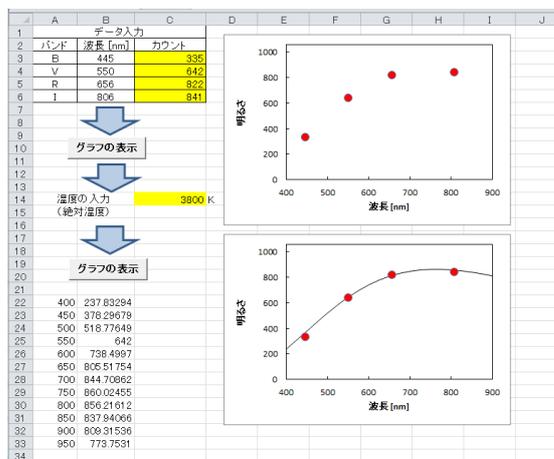


図3: 星の表面温度推定のグラフ描画例。図中の上のグラフは測定結果、下のグラフの実線は黒体放射のスペクトル(図では3800 Kの例)を示している。黄色い欄が入力部分。

星団までの距離推定: 天体までの距離推定は天文学でも最も重要なテーマの1つである。本テーマでは、距離測定の原理について1auの測定方法から超新星を用いた遠方銀河の距離推定方法までのいわゆる「距離はしご」について解説した後、変光星を用いた距離推定法に焦点をあてている。さらに変光星の種類について解説した後、こと座RR型変光星を用いた球状星団までの距離推定を実習として採用している。このテーマにおいては、同一バンドで異なる観測時刻に取得した画像に対して三色合成と同じ手法を適用することにより、変光しない星は白色となるが、変光した星は色がつくという手法を新たに考案した。この手法を用いることで、比較的容易に偏光星を検出できる(図4)。

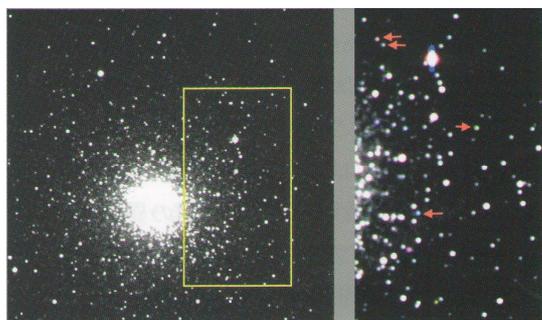


図4: 球状星団 M3 での三色合成法を用いた変光星の検出例。右図で矢印で示した星は先行研究により変光星と確認されているもの。

星間吸収の検出: 星間塵は恒星や星雲と異なり望遠鏡で直接観測することは難しいが、星間吸収の原因となるものであり、星間塵そのものも研究対象となっている。本教材のテーマは直接検出できないものをいかに検出するかであり、検出原理を理解してもらうことにある。本テーマでは、ま

ず星間吸収の存在を示す事例を紹介した後、赤化曲線を示し星間吸収の波長特性を説明した。その後、星間吸収の検出方法としてスターカウントと2色図の2種を提示した。さらに星間吸収検出のためのデータとして、銀河系中心付近の天の川(SA110領域)・anti-center方向(SA98領域)・銀経0°付近で天の川から離れた方向(SA107領域)・天の川から大きく外れた方向(SA104領域)の4領域を選択した(図5)。これらの4方向は星間吸収量が異なるため、測定結果を比較することで、領域による星間吸収量の違いを見出すことができるようになっている。

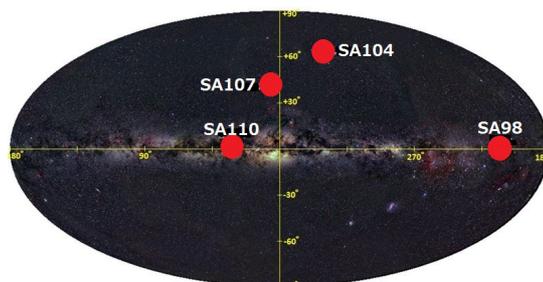


図5: 星間吸収検出のためのデータ提供領域。

星団の年齢推定: 星団の年齢推定は星団のHR図と理論的に求めた等年齢線の比較によって求めることができる。星団のHR図描画および年齢推定の教材はこれまでも多く公開されている。本教材で扱う内容は、基本的にこれまで公開されている教材と同じであるが、このテーマを実施するまでに、測光の原理、色指数、見かけ等級と絶対等級、星間吸収について解説を行っている。星団の年齢推定については、これらの各項目が関連してくるため、単発の実習でなく一連の実習を通じてより詳細な事柄について理解が深められるものとする。テーマでは、まず恒星の進化について解説をし、星団誕生からの時間とともにHR図上の星の分布が変化することを示している。また、本テーマでは星団を扱うため、散開星団と球状星団という異なるタイプの星団があり、その特徴が異なることについても解説している。

星雲の光り方: これまでのテーマは主として星(恒星)についての解析が主であったのに対し、本テーマでは星雲を扱っている。星雲は広がりをもち領域により輝度も異なるため、恒星とは異なる測定方法が必要となる。本テーマでは、まず星雲の種類について説明を行い、その後星雲の放射機構の解説を行っている。天体の光り方は熱放射によるものと、電離ガスからの輝線放射に大別される。熱放射についてはこのテーマで扱っており、本テーマでは輝線放射に注目して、原子構造に関連した輝線発生機構の解説を行っている。また、広がった天体に対する測光方法として表面測光についても、基本的な考えを解説している。提供するデータとしてはM27(惑星状星雲、輝線放射)、M20(水素電離領域+反射星雲、輝線放射、散乱光)、M1(超新星残骸)の3種を用意した。それぞれの星雲の場所ごとにスペクトル(SED)の違いを比較するとともに、周囲に写っている星のスペクトルと比較することで、星雲と恒星の光り方の違

いを比較できる。例として、図6にM27および周囲の星の測定例を示す。星のスペクトルが単調増加・単調減少のグラフになっているのに対し、星雲では領域ごとに振る舞いが違うのがわかる。図6で領域A,Dは水素輝線放射が主である領域であり、領域B,Cは酸素輝線放射が主である領域である。また今回選択した3種の天体は、天体毎に放射機構が異なっているため、個々の天体について解析を行うだけでなく、3種の天体のスペクトルを比較することで、天体の放射機構の違いが分かるようになっている。

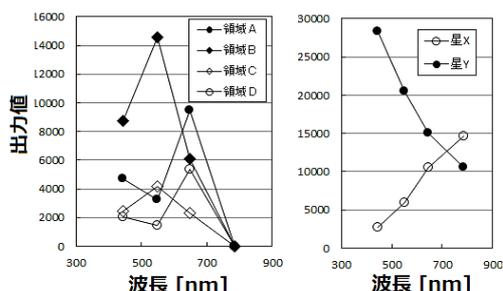


図6：M27領域のスペクトル(SED)と周囲の恒星のスペクトル(SED)の比較

銀河の光度分布：星雲の光り方に続き表面輝度を扱ったテーマ。銀河は大別して楕円銀河と渦巻銀河があり、光度分布が異なっている。本テーマでは銀河について説明した後、銀河の種類ごとに基本的な特徴を示し、形態分類について解説している。また、銀河の種類により光度分布がパラメータ化することができることを示し、代表的な銀河について表面測光を行い、そのパラメータを求める実習を行うとともに(図7)その結果を用いて形態分類を行う実習となっている。また渦巻銀河と楕円銀河の光度分布を比較することで、楕円銀河は基本的に1成分で構成されているのに対し、渦巻銀河は光度分布の特徴が異なる2成分で構成されていることを示す内容となっている。

銀河の大きさや宇宙年齢：本テーマはハッブルの法則を用いてハッブル定数を求め、宇宙年齢の推定を行うものであり、現代宇宙論の基礎となっている宇宙膨張を学習することを目的としたものである。ハッブル定数を求めるためには銀河の後退速度と銀河までの距離が必要になる。本教材では、銀河団に属する銀河を扱い、後退速度は文献から引用し、銀河までの距離を観測画像上での銀河の見かけのサイズ(画角)と近傍銀河の実測値との比較から推定する方法を採用した。画角から距離を求める手法は、物理的・数学的背景が比較的少ない方法であり、高校の数I程度の知識があれば計算することができる。また新学習指導要領の実施で導入された地学基礎は、銀河系を含む銀河群、銀河団の存在を取り上げ、大規模構造にも触れることが示されており、銀河団と宇宙膨張を合わせて扱った本教材は、宇宙の広がりを経験的に学べるものとなっている。

なお、これら教材の有効性を確認するため、高校生および大学生に対して試行を行っている。その結果、

試行を行った全てのテーマにおいて、9割を超える実習生が満足と回答している。一方で、異なる学年が混在するケースでの試行例では、学年により満足度に差があり、学年が上がるにつれ満足度も上昇するという結果も出ている(図8)。本教材は、地学の事前知識がない高校生を念頭に作成しているが、実習を行うに当たって物理分野あるいは数学分野の知識が多少なりとも必要となる。学年ごとの満足度の差は、このような既習知識の差が影響しているものと考えられ、今後本プログラムを改訂していく際には、物理や数学といった周辺知識の取り扱いについても、意識を向ける必要がある。

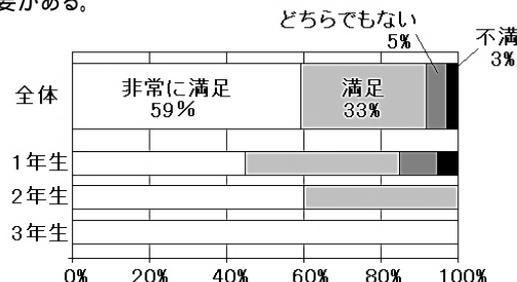


図8：高校生に対する教材試行時のアンケート結果例。学年が上がるにつれ満足度も上昇している。

また実習を行った高校生の約8割が実習前後で天文学に対するイメージが変化したと回答しており、自由記述からは現代天文学の基盤となる考え方を理解したことにより、これまで漠然と抱いていた天文学に対するイメージが変化したことが伺える。これらの結果から、今回開発した教材は、学習効果が十分に期待できるものと言える。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 6件)

山縣朋彦、伊藤信成、西浦慎悟、濱部勝、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、Vol.47, pp.171-178, (2014), 査読無

伊藤信成、アーカイブデータを用いた星の表面温度推定のための教材開発、三重大学教育学部紀要、vol.65, pp.27-33, (2014), 査読無

伊藤信成、蛭波敬、月の満ち欠けについての理解度調査～小学校教員採用試験受験者に対する調査～、天文教育、vol.25(No.1), pp.36-37, (2013), 査読無

伊藤信成、山縣朋彦、濱部勝、西浦慎悟、三戸洋之、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、vol.64, pp.34-40, (2013), 査読無

西浦慎悟、中西裕之、樽沢賢一、森由貴、宮田隆志、三戸洋之、原正、伊藤信成、銀河団銀河のサイズ分布を用いた宇宙年齢導出教材の作成、東京学芸大学紀要自然科学系、vol.65, pp.23-32, (2013), 査読無

西浦慎悟, 濱部勝, 伊藤信成, 山縣朋彦, 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, vol.64, pp.45-53, (2012), 査読無

〔学会発表〕(計 14 件)

伊藤信成, 山縣朋彦, 濱部勝, 西浦慎悟, 三戸洋之, 天文分野を対象とした自主学習型解析体験教材の開発 IV, 日本天文学会, 2014年3月19日, 国際基督教大学(東京都三鷹市)

西浦慎悟, 柏木雄太, 土橋一仁, 伊藤信成, 三戸洋之, 樽沢賢一, 中西裕之, 森由貴, 宮田隆志, 原正, 山縣朋彦, 濱部勝, 天文分野を対象とした自主学習型解析体験教材の開発 III, 日本天文学会, 2014年3月19日, 国際基督教大学(東京都三鷹市)

伊藤信成, 山縣朋彦, 濱部勝, 西浦慎悟, 三戸洋之, 天文分野を対象とした自主学習型解析体験教材の開発 II, 日本天文学会, 2013年9月10日, 東北大学(仙台市青葉区)

伊藤信成, 移動プラネタリウムを通じた博物館と教員養成学部の連携, 天文教育普及研究会年会, 2013年8月18日, 山口県教育会館(山口県山口市)

早川 賢, 前田昌志, 伊藤信成, 大学生を対象とした定期星空観望会の試み, 天文教育普及研究会年会, 2013年8月18日, 山口県教育会館(山口県山口市)

西浦慎悟, 中西裕之, 樽沢賢一, 森由貴, 宮田隆志, 三戸洋之, 原正, 伊藤信成, 銀河団銀河のサイズ分布を用いた宇宙年齢導出教材の作成, 木曾シュミットシンポジウム, 2013年7月9日, 木曾郡民会館(長野県木曾郡木曾町)

伊藤信成, 早川賢, 前田昌志, 上野寛人, 湯浅祥司, 三重大学と尾鷲市天文科学館との連携, 日本天文学会, 2013年3月20日, 埼玉大学(埼玉県さいたま市)

早川賢, 前田昌志, 伊藤信成, 上野寛人, 湯浅祥司, 尾鷲市天文科学館 81cm 反射望遠鏡の性能評価, 日本天文学会, 2013年3月20日, 埼玉大学(埼玉県さいたま市)

伊藤信成, 蛭波敬, 月の満ち欠けについての理解度調査 ~ 小学校教員採用試験受験者に対する調査 ~, 天文教育普及研究会中部支部会, 2012年12月, 長野工業高等専門学校(長野県長野市)

伊藤信成, 山縣朋彦, 濱部勝, 西浦慎悟, 三戸洋之, 自主学習型を基本とした天文解析体験プログラムの開発, 日本天文学会, 2012年9月19日, 大分大学(大分県大分市)

伊藤信成, 山縣朋彦, 濱部勝, 西浦慎悟, 三戸洋之, 木曾アーカイブデータを用いた天文教材開発 II, 木曾シュミットシンポジウム, 2012年7月10日, 木曾勤労者福祉センター(長野県木曾郡上松町)

西浦慎悟, 濱部勝, 伊藤信成, 山縣朋彦, Kiso 105+2KCCD 広帯域撮像データによる学生実習, 木曾シュミットシンポジウム,

2012年7月10日, 木曾勤労者福祉センター(長野県木曾郡上松町)

伊藤信成, 三重大学と尾鷲市天文科学館との連携活動, 天文教育普及研究会中部支部会, 2012年6月9日, ディスカバリーパーク焼津(静岡県焼津市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
教材公開用ホームページ:  
<http://astroexercise.wiki.fc2.com/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊藤信成 ( ITOH Nobunari )  
三重大学・教育学部・教授  
研究者番号: 60344272

### (2) 研究分担者

山縣朋彦 ( YAMAGATA Tomohiko )  
文教大学・教育学部・教授  
研究者番号: 70383213

浜部 勝 ( HAMABE Masaru )  
日本女子大学・理学部・教授  
研究者番号: 00156415

西浦慎悟 ( NISHIURA Shingo )  
東京学芸大学・教育学部・助教  
研究者番号: 50372454

三戸洋之 ( MITO Hiroyuki )  
東京大学・理学系研究科・研究員  
研究者番号: 00396805