

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350193

研究課題名(和文) Webを用いた自主学習型天文分光解析体験プログラムの開発

研究課題名(英文) Development of self-directed astronomical learning materials dealing with spectral data

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) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：一般市民も高い関心を寄せ学術分野でも多数の成果が報告されている天文分野ではあるが、高校卒業時までには系統的に学習できる機会は少ない。このような状況を改善すべく、天文学に興味・関心を持った高校生・大学生が自主的・体験的に現代天文学の基礎的学習ができる教材の開発を行った。既に天体画像を主とした学習教材を作成しているため、本研究では分光データに焦点をあて、10種のテーマを取り上げた。分光データからは天体の温度や運動、発光機構についての情報を得ることができる。一連のテーマについて実習することで、天文学の基本的な考え方、観測原理を系統的に学習できる教材となっている。

研究成果の概要(英文)：Astronomy is one of the most popular science field and publicized new discoveries receive strong interest from a large number of people. However, there are not enough opportunities to learn astronomy until high school graduation in Japan. We have developed self-directed learning materials which can be used to learn basics of modern astronomy systematically through practices to give students who are interested in astronomy more chances to learn. In this study, 10 themes handling spectral data were selected because we already developed materials for analyzing imaging data. Spectral data give us information about temperature, movements and emission mechanism of astronomical objects. It is possible for students to acquire the basic concepts and analytical approaches about modern astronomy by exercising the series of our materials.

研究分野：天文学

キーワード：天文教育 分光 体験学習 高校生 解析

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。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、高校における地学の開講率は、物理・化学・生物に比べると極端に低い。国際天文連合は、天文学を学ぶ意義として、単に専門分野の知識習得にとどまらず、技術開発、歴史認識、国際協力など多方面で天文学的思考の重要性を指摘している。その観点から見ても、高校地学の履修者数の低レベルでの推移は、次代を担う研究者、技術者の減少だけではなく、宇宙科学を正しく理解し、その普及を支える市民の減少を招くことにもつながる。

ただ、H23年度の学習指導要領の改定により、基礎科目ではあるが多くの高校で理科3分野を履修することとなり、地学の履修者はこれまでよりも増加している。履修者が増加傾向にあるこの時期に、効果的な教材を提供することは、天文教育・普及の観点から重要である。また、高校理科の3分野必修化に伴い、地学を専門としない教員が指導を行う場合が増えることが予想される。特に天文分野では、美しい写真の背景にある科学的な情報の抽出には幾つかのプロセスが必要であるが、そのような経験を積んだ教員は少なく、知識伝達型の授業になり易い。このような教員を支援する面からも、効果的な教材の開発は不可避である。

このような状況の下、我々は H23～25 年度の3ヶ年において、天文・宇宙に興味・関心を持つ高校生～大学生が、指導者が身近にいない状況でも自主的に学習を進めることで、天文学の基礎的観測および解析手法や原理・法則を系統的に習得できるような自主学習型の解析体験プログラムの開発を行ってきた。この教材は、既に一部が Web 公開されており、現役高校生による試行では、地学の学習をしていない生徒であっても内容を十分に理解できることを確認している。

2. 研究の目的

これまでの取り組みから、撮像データを用いた解析体験教材については、一通り作成できたものと考えられるため、本研究ではこれまで開発してきた教材に足りなかった分光データを主とした教材開発を行うことを目的とした。分光を組み込むことにより、撮像データだけでは理解が難しかった天体の発光機構、運動についての理解を深めることができ、より系統的な天文学の理解が可能と

なる。分光データ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ため、テーマをこの3つのカテゴリーに分け、テーマ毎に分光解析の基本的な考え方・解析手法を習得できるようにする。具体的テーマを表1に示す。各テーマに対し、学術背景および解析方法についてのドキュメントと観測データを1つのまとめりとして配布する。また、一連のテーマは個別・独立に実習が行えるように整備するとともに、一連のテーマの実習を行うことで、分光データから得られる情報、解析原理、情報抽出の考え方を系統的に学習できるような教材のパッケージ化を試みた。

表1:教材として取り上げたテーマ

	テーマ	分類
0	画像処理の基礎	
1	太陽吸収線の同定	元素組成
2	星のスペクトル分類	
3	重元素量と吸収線強度	
4	超新星のスペクトル	
5	星の表面温度比較	放射機構
6	星雲のスペクトル	
7	銀河のスペクトル比較	
8	分光連星	天体の運動
9	銀河の回転曲線	
10	宇宙膨張	

3. 研究の方法

本研究では自主学習型の教材開発を目的としており、またデータ解析を大きな柱としている。そのため、テーマ毎に、解析に用いるデータの提供、テーマについての解説、解析方法の原理の説明と具体的な手順の指示が必要となる。

まず、解析用に使用するデータは、国立天文台によって運営されている天文データアーカイブ SMOKA (Subaru-Mitaka-Okayama-Kiso Archive) から主として抽出した。教材に適したデータは、研究用に特化して取得されたデータとは必ずしも一致しない。特に、本研究で開発する教材は、次の4点を特長とするものを目指したため、データ抽出においては、アーカイブ・システムでデータの仕様を確認した上で、実際にダウンロードし、解析・較正を行ってみる必要がある。この作業に多くの時間が必要となった。

(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，既に開発済みの撮像データ教材と融合することで，天体観測の基本である撮像と分光の両手法をカバーするとともに，地球近傍天体から宇宙膨張まで，様々なスケールでの現象を扱う．これにより現代天文学の基本的な考え方を系統的に習得できる．

(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) **研究者が取得したデータを用いること**．研究者が自身の研究のために取得したデータを用いることで，教材のためのデータではなく，自分の行っていることが最先端科学に通じているという実感を得ることができる．教材開発においては，このようにモチベーションを向上させる仕掛けが重要である．

(4) **表計算シートの活用**．生の解析データから意味のある情報を抽出する際にはデータの変換・校正・加工が必要になる．この作業では装置の特性に起因する補正や複雑な関数を用いた計算等が必要となる場合があり，初学者が混乱する部分でもある．本研究では本質から外れるような煩雑な作業は半自動的に行えるようにすることで，実習者のPC作業に起因する負担を軽減させ，結果の考察などに注力できるよう，マクロ機能を組み込んだ表計算シートを活用する．

4. 研究成果

本研究では表1に示した(1)~(10)の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，1章で各テーマ全体の概要を，2章では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．以下10種のテーマについて作成した教材の概要を示す．10種のテーマの内，(1)，(4)，(6)，(9)，(10)については作成者の立ち合いの下で高校生(地学未履修)に試行してもらい，おおむね良好な結果が得られている．ただし，撮像データに比べると各テーマの内容についての理解度が低くなる傾向もあるため，今後改善策を検討する必要がある．また，残りのテーマについても試行を行っていく．

(1) 太陽吸収線の同定は，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 より取得した．当該のスペクトルデータは波長校正され，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(589.6, 589.0nm, Na), E 線(527.0nm, Fe), F 線(486.1nm, H), G 線(434.0nm, H), H 線(396.8nm, Ca⁺), K 線(393.4, 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．このスペクトルから任意の吸収線を選択し(図 1 a), その座標値から吸収線の波長を算出するとともに，原子毎の吸収線波長リストと比較することで吸収線の元になっている元素を同定する．図 1b は一連の作業を行う際に用いる表計算シートの例である．マウス操作で進められるように工夫がしてある．

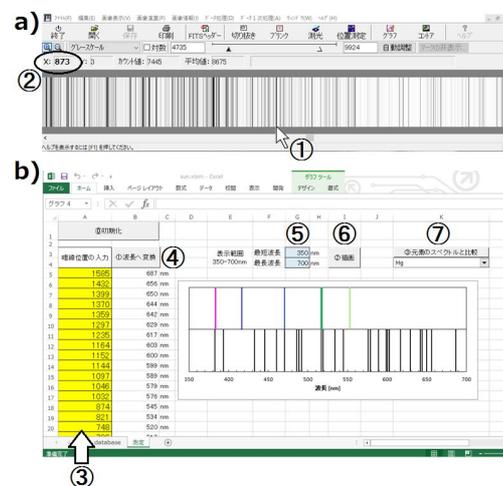


図 1 : a) 太陽スペクトル例, b) 表計算シート例

(2) 星のスペクトル分類は，木曾シュミット望遠鏡に 4° の対物プリズムを設置して撮影したデータを用いた．シュミット望遠鏡の特性である広視野を活かした対物分光データとなっているため，1枚の画像内に多数の恒星スペクトルが写っており，様々なスペクトル型の星についてスペクトルの比較を行うことができる．スペクトル型の比較の際には，flux 校正が重要となるが，本教材では文献で示されているスペクトルデータと観測から得られたスペクトルの比較を行うことで，波長毎の flux 校正関数を推定することで，比較的容易に視野内に写っている任意の天体の flux 校正を可能とした(図 2)．

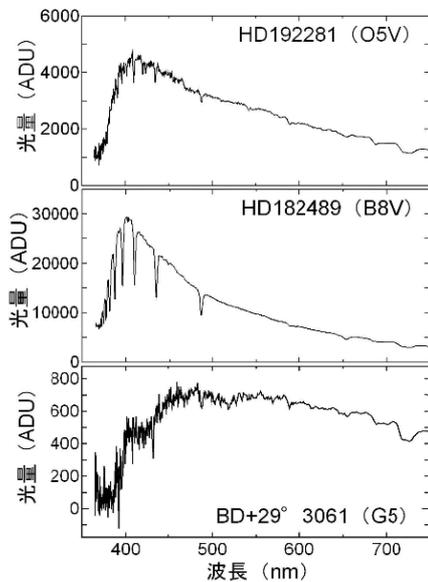


図 2 : flux 較正後のスペクトルの例

(3) 重元素量と吸収線強度については、スペクトル型・高度階級は同じ A0V 型であるが、金属量が異なる 4 個の恒星 (α Lyr, γ Aqr, HD109995, HD74721) のスペクトルの比較を行うことで、元素の存在量の違いによるスペクトルの変化を理解する教材となっている。元素の吸収線強度は元素存在量以外にも表面温度や表面重力等により見え方が異なってくる。また表面温度が低くなるにつれ吸収線の数が増加し、同定が難しくなるため、金属元素の吸収線が見え始める温度に相当する A 型星を対象とした。

(4) 超新星はスペクトルに見える特徴的な吸収線により幾つかの種類に分類される。また、爆発からの時間経過とともにスペクトルの形状が変化することも特徴である。このテーマでは水素の吸収線が特徴の II 型超新星の例として SN1993J, ヘリウムの吸収線が特徴の Ic 型として SN1994I, ケイ素の吸収線が特徴の Ia 型の例として SN1995D のデータを利用した。各超新星とも 2 週間以上間隔を開けて取得したスペクトルを比較することで、時間経過とともにスペクトルが変化する様子を把握できるようになっている (図 3)。

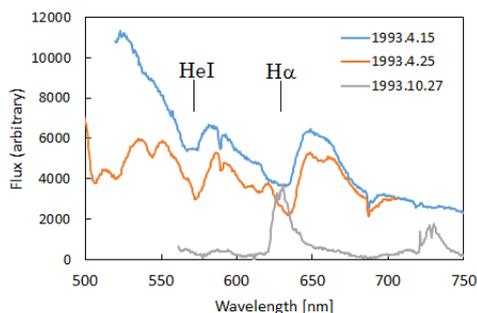


図 3 : SN1993J のスペクトルの時間変化

(5) 星の表面温度比較については、O7 から M1 までのスペクトル型を持つ 8 個の恒星について、450 ~ 700nm の波長範囲でのスペクトルと黒体放射スペクトルを比較することで表面温度の推定を行うこととした。

(6) 星雲のスペクトルについては、木曾観測所のシュミット望遠鏡に 4° プリズムを設置して取得した対物分光データを利用した。このデータは基本的に星のスペクトル分類に用いたものと同一のものである。スリットレスの対物分光であるので、視野内にある天体はすべて分光される。このため、惑星状星雲の典型例である M57 を含む領域を撮影することで、恒星のスペクトルと惑星状星雲のスペクトルを容易に比較することができる。

(7) 銀河のスペクトル比較では、代表的な楕円銀河、渦巻銀河、不規則銀河 (スターバースト銀河) を取り上げた。銀河は広がりを持っているため、各銀河の大局的なスペクトルの比較をすることで各銀河を構成する要素の違いに目を向けるとともに、銀河内の領域によってもスペクトルが異なる様子についても注目してもらう工夫を試みている。

(8) 分光連星は単一に見える星であるが、複数の星が共通重心の周りを周回している。時間経過とともに連星の視線速度成分が変化するため、ドップラー効果により各星に起因する吸収線の波長が変化するため、視線速度の変化を検出することにより連星の運動状態を推定できる。各星のスペクトルの吸収線あるいは輝線を分離する必要があるが、教材では表計算シートを用いて、各吸収線の中心波長を推定することで、視線速度を推定することができるようになっている (図 4)。なお、連星のスペクトルは Ritter Observatory の公開データを用いた。

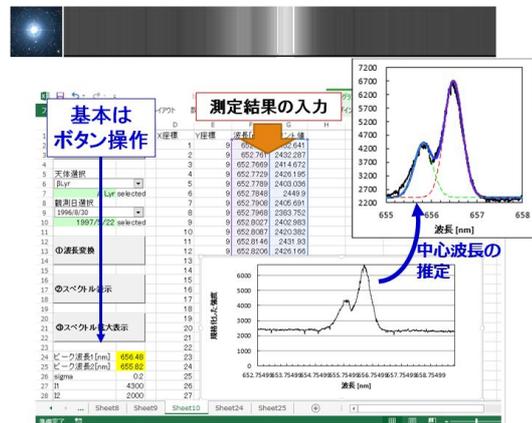


図 4 : 表計算シートを用いた視線速度推定例 (β Lyr)

(9) 銀河の回転曲線

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。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

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

となるので、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、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。そこで、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。図 5 は銀河円盤が卓越している NGC5907 のスペクトル例と回転速度の測定結果を示している。銀河外縁部で回転速度がほぼ一定となる Flat Rotation の特徴が現れている。

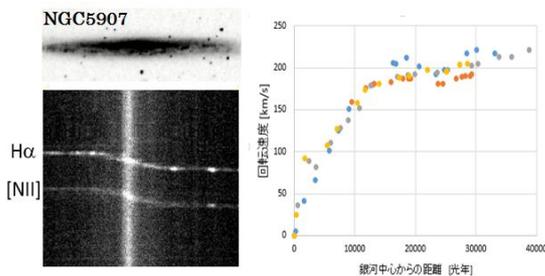


図 5：NGC5907 の回転速度測定例

(10) 宇宙膨張については、近傍 (NGC2903, $cz=560\text{km/s}$) から遠方 (3C273, $cz=52000\text{km/s}$) までの 6 個の銀河を選択し、ドップラー効果による波長のシフトから後退速度を推定できるようになっている。ただし、初学者にはスペクトル中に現れる吸収線・輝線が本来どの波長に対応するのかわからないので、複数の元素の吸収線・輝線の組合せによりシフト量が推定できるよう考慮している (図 6)。

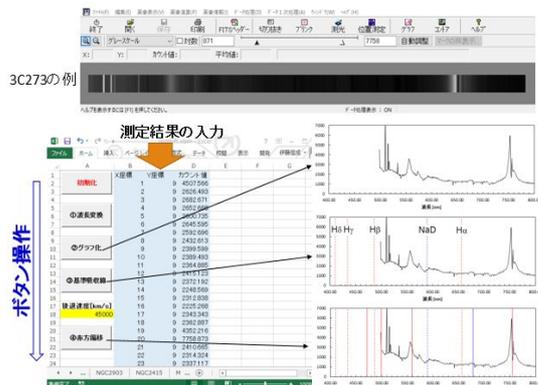


図 6：後退速度の測定例 (3C273)

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 7 件)

伊藤信成, 中川友博, デジタルカメラを用いた月の微小視差検出の試み, 地学教育, vol.69, pp.49-72, (2017), 査読有

伊藤信成, 山縣朋彦, 浜部 勝, 西浦慎悟, 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 - , 三重大学教育学部紀要, vol.67, pp.13-20, (2017), 査読無

西浦慎悟, 水戸洋之, 伊藤信成, 山縣朋彦, 浜部 勝, 中田好一, 較正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, vol.68, pp.73-81, (2016), 査読無

伊藤信成, 高田碧郎, 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, vol.68, pp.69-91, (2016), 査読有

伊藤信成, 山縣朋彦, 浜部 勝, 西浦慎悟, 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, vol.68, pp.1-16, (2016), 査読有

西浦慎悟, 根本明宗, 宮野 彩, 木曾 105cm シュミット望遠鏡と木曾広視野 CCD カメラ KWFC による講師や 659nm 撮像観測, 東京学芸大学紀要自然科学系, vol.66, pp.53-69, (2015), 査読無

山縣朋彦, 強制振動フーコー振り子について, 教育研究ジャーナル, vol.7, pp.1-7, (2015), 査読無

〔学会発表〕(計 21 件)

伊藤信成, 中川友博, 月食画像を用いた月の微小視差検出, 2017 年 1 月 4 日, 天体画像教育利用研究会, 国立天文台 (東京都三鷹市)

伊藤信成, 部分日食画像を用いた複数地点間の視差検出, 日本地学教育学会, 2016 年 10 月 8 日, 四国大学 (徳島県徳島市)

伊藤信成, 山縣朋彦, 浜部 勝, 西浦慎悟, 分光データを用いた自主学習型解析体験教材の開発, 日本天文学会, 2016 年 9 月 14 日, 愛媛大学 (愛媛県松山市)

萩原拓也, 越村真帆, 伊藤信成, 三重大学教育学部天文学教室での観望会を通じた天文普及活動, 2016 年 7 月 9 日, コニカミノルタ豊川サイト (愛知県豊川市)

伊藤信成, 月食画像を用いた地図作成の試み, 天文教育普及研究会中部支部会, 2016 年 7 月 9 日, コニカミノルタ豊川サイト (愛知県豊川市)

西浦慎悟, 佐藤唯香, 長谷川優子, 根本明宗, 宮野 彩, 柏木雄太, 近傍銀河の狭帯域撮像観測と H β フィルター, 木曾シュミットシンポジウム, 2016 年 7 月 5 日, 東京大学木曾観測所 (長野県木曾郡)

西浦慎悟, 三戸洋之, 伊藤信成, 山縣朋彦, 浜部 勝, 中田好一, Kiso105 + 4 $^\circ$ プリズム

による対物分光データの教材化 II, 木曾シュミットシンポジウム, 2016年7月5日, 東京大学木曾観測所(長野県木曾郡)

西浦慎悟, 三戸洋之, 伊藤信成, 山縣朋彦, 浜部 勝, iso105+4°プリズムによる恒星の分光データの教材化, 日本天文学会, 2016年3月14日, 首都大学東京(東京都八王子市)

西浦慎悟, 三戸洋之, 伊藤信成, 山縣朋彦, 浜部 勝, 木曾 105cm シュミット+KWFC による 501nm および 659nm 狭帯域撮像, 日本天文学会, 2016年3月14日, 首都大学東京(東京都八王子市)

伊藤信成, 観望会における大学学部内コラボレーション, 天文教育普及研究会近畿支部会, 2015年12月19日, 尼崎市女性センター(兵庫県尼崎市)

伊藤信成, 中川友博, デジタルカメラによる皆既月食画像を用いた微小視差検出による地図作成の試み, 日本地学教育学会, 2015年8月21日, 福岡教育大学(福岡県宗像市)

西浦慎悟, 宮野 彩, 根本明宗, 長谷川優子, 柏木雄太, 近傍銀河領域の狭帯域撮像観測, 木曾シュミットシンポジウム, 2015年7月13日, 上松町総合文化センター(長野県上松町)

西浦慎悟, 三戸洋之, 伊藤信成, 山縣朋彦, 浜部 勝, 中田好一, Kiso105+4°プリズムによる対物分光データの教材化, 木曾シュミットシンポジウム, 2015年7月13日, 上松町総合文化センター(長野県上松町)

伊藤信成, 月食画像を用いた微小視差検出, 天文教育普及研究会, 2015年6月13日, 雁宿ホール(愛知県半田市)

伊藤信成, 日食画像を用いた視差検出の試み, 天文教育普及研究会, 2015年6月13日, 雁宿ホール(愛知県半田市)

中川友博, 伊藤信成, 市民提供の皆既月食画像を用いた三重県地図作成の試み, 日本理科教育学会東海支部会, 2014年11月29日, 静岡大学(静岡県静岡市)

伊藤信成, 月の満ち欠けの理解度は分数の理解度より低いか, 日本理科教育学会, 2014年8月23日, 愛媛大学(愛媛県松山市)

伊藤信成, 高田碧郎, Field Star を用いた HR 図描画教材の開発, 地学教育学会, 2014年8月9日, 酪農学園大学(北海道札幌市)

伊藤信成, 木曾観測所での学生実習をベースにした天文解析体験教材の開発, 木曾シュミットシンポジウム, 2014年7月9日, 東京大学天文センター(東京都三鷹市)

西浦慎悟, KWFC 用狭帯域フィルター, 木曾シュミットシンポジウム, 2014年7月9日, 東京大学天文センター(東京都三鷹市)

④西浦慎悟, 山縣朋彦, 浜部 勝, 伊藤信成, Kiso105+2KCCD 狭帯域撮像観測データによる学生実習例, 木曾シュミットシンポジウム, 2014年7月9日, 東京大学天文センター(東京都三鷹市)

〔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 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〕
ホームページ等

6. 研究組織

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・講師
研究者番号: 50372454