

RGBカラー合成による移動天体の検出について

山縣 朋彦* 伊藤 信成** 西浦 慎悟*** 濱部 勝****

On the Search for Moving Objects by RGB-color Method

Tomohiko YAMAGATA, Nobunari ITOH, Shingo NISHIURA, Masaru HAMABE

要旨 文教大学教育学部理科専修地学研究室では、長野県木曽郡木曽町にある東京大学大学院理学系研究科天文学教育研究センター木曽観測所の一角を借りて、三重大学教育学部、東京学芸大学教育学部、日本女子大学理学部の4大学合同の集中講義形式で、天体観測解析実習を行っている。その内容はアクティブラーニングを意識したもので、4大学混成で実習学生をグループ分けし、グループごとに異なる実習テーマ・対象天体を設定して行っている。また、観測によるデータ収集から、解析に至るまでを、実習学生に体験させるものとなっているのも特徴である。

実習の課題として取り上げているもののうち、RGBカラー合成による移動天体の検出の概要を述べる。移動天体として扱っているのは、小惑星及び、恒星の固有運動検出である。さらに、The STScI Digitized Sky Survey (DSS) を利用したRGBカラー合成による固有運動検出にも触れる。

キーワード：天文教育 理科教育 観測解析実習 教員養成 アクティブラーニング

1. はじめに

2004年以来、文教大学教育学部理科専修地学研究室では長野県木曽郡木曽町にある東京大学大学院理学系研究科天文学教育研究センター木曽観測所（以下、木曽観測所）¹⁾の一角を借りて、集中講義形式で天体観測解析実習を行っている。原則として、3泊4日の集中講義として、8月に実施している。なお、本実習は三重大学教育学部、東京学芸大学教育学部、日本女子大学理学部の4大学合同での実施というユニークな試みとなっている。初期の様子については山縣、西浦（2005）²⁾を参照されたい。最近の様子及び成果については

山縣他（2013）³⁾に報告がある。

本実習では、夜間の天体観望だけでなく、実際に、実習学生にシュミット望遠鏡（有効口径105cm, F3.1. 以下、木曽シュミット望遠鏡）と観測装置を操作させ、観測データを取得させている。本実習の最大の特徴は、自らが観測経験を経た上で、自分達で取得した観測データを解析、考察することにより、研究活動の一端を体験できるところにある。勿論、天候の具合によっては、データ取得できないこともあり、その場合には、木曽観測所のアーカイブ・データを使用して解析実習を行っている。また、活動は4大学混成で、1グループ3～4人のグループに分け、グループごとに異なる実習テーマ・対象天体を設定して行っている。実習の過程では、最低限の機器の使用法やデータ処理方法を除いて、教員は原則とし

* やまがた ともひこ 文教大学教育学部学校教育課程理科専修
** いとう のぶなり 三重大学教育学部理科教育講座
*** にしうら しんご 東京学芸大学自然科学系宇宙地球科学分野
**** はまべ まさる 日本女子大学理学部数物科学科

て、教えるという行為を行わず、方向を示すアドバイザーに徹している。その結果、学生間での討論や自主的な文献調査などによって、実習が進むのも特徴である。期間中の解析結果は、最終日の成果発表会でプレゼンテーションする。人里離れた木曽観測所の空間で、参加者は通常の大学生活では見られないような集中力を見せるのも特徴である。ある意味でアクティブラーニングの理想型であると自負している。

本実習で、我々が過去に行った実習課題の主なものは、山縣、西浦 (2005)²⁾、西浦他 (2012)⁴⁾、山縣他 (2013)³⁾、伊藤他 (2013)⁵⁾ に示したとおりである。その中で、我々が、最近着目している実習テーマとして、RGBカラー合成を使った解析テーマがある。

日常使用しているデジタルカメラのカラー写真は赤緑青 (RGB) のいわゆる光の3原色ごとの、光の強度を測定し合成することによって得られる。しかしながら、天体観測で得られた画像データから作成する天体カラー画像の場合は、やや状況が異なる。カラー画像自体はRGBの合成であるが、RGBに対応させる光の波長 (可視光では「色」) は元の波長とは異なるものを対応させることが多い。いわゆる赤外線やX線など、人間には見えないはずの波長の疑似カラー画像がこれに相当する。可視光の画像にしても、見た目を強調することもあり、合成する際の調整によって、色合いを初めとした、見栄えを意図的に変えることもある。しかしながら、天体のカラー画像によって、その天体を構成する成分や構造を定性的に理解することが出来るため、天文学の初学者が多い本実習において、天体のカラー画像の作成は、重要な意味を持つと言えよう。

実習初日に、導入実習として、木曽シュミット望遠鏡のCCD画像を使い、アンドロメダ銀河 (M31) のカラー写真を作成することによって、実習学生に疑似カラー合成を体験させている。このカラー合成は、アンドロメダ銀河の画像を異なる波長の3つのバンド (R, V, および, Bバンド) で

取得したデータを、それぞれ、RGBに対応させて合成している。なお、R, V, Bバンドは、それぞれ中心波長が約660nm, 550nm, 440nmであり、肉眼では、赤, 緑, 青と認識される波長帯である。

2日目以降の実習課題には、主に天体の色に注目して、その性質や構造を議論するテーマが続くが、これらとは一線を画すものとして、RGBカラー合成を特定の天体の検出に利用するテーマも設定している。その一部として、我々は既に、RGBカラー合成を利用した球状星団中の変光星 (RR Lyr型変光星) の検出を行っている。これは、同一条件で、時間間隔を開けて撮影した3枚の写真をRGBカラー合成することにより、変光しない恒星がモノクロ画像となる一方で、輝度が時間変化している恒星は色付いて浮かび上がってくることにより、実習学生に変光星の検出をさせているものである。初日の導入実習と球状星団中の変光星検出については、山縣他 (2013)³⁾ に説明がある。

本稿では、今後の新たな課題として準備している、RGBカラー合成による移動天体の検出の概要を述べる。移動天体として、小惑星及び、恒星の固有運動検出を検討している。

2. カラー合成による小惑星の検出

太陽系の小惑星は、主に、火星と木星の間の黄道面周辺、いわゆる小惑星帯 (メインベルト) に分布する小天体である。その数は、数十万個にも上るが、大半は大きさ、数100km以下で、形状も岩石のかげらのような不規則な形のものが多い。これらの小惑星の探査・検出は、シュミット望遠鏡のような広視野の観測装置を使い、1時間以上の時間間隔を開けて得られた画像上の、移動天体として検出できる。太陽系内での小惑星は、黄道付近に集中しているので、小惑星探査と言うことであれば、黄道近くを撮影することになる。さらに、後述するように、その中でも衝付近の小惑星であれば、移動量の簡易な解析で、小惑星までの



図1 RGB カラー合成による小惑星の検出例

距離を求める事ができる。

そこで、我々の観測解析実習では、夜半を挟んで、真夜中の子午線近くの黄道付近を1時間以上間隔を開けて3回撮影することを目指してきた。そして、移動天体と言うことで、従来、その検出には、時間をおいて撮影した複数の画像をリンク、即ち、交互に見比べることによって、動いている天体と恒星を識別するのが一般的である。更には、より高度かつ複雑な画像処理を施すことによって、移動天体を識別する手段もあるが、我々は、変光星検出方法の応用として、RGBカラー合成を使う手法を考案し、これを用いている。

具体的には、時間をあけて撮影した同じ条件（フィルター、露出時間等）の3枚の画像をRGBカラー合成することで、カラー写真を作り、小惑星を浮かび上がらせるのである。カラー合成を使うことによって、学生に画像解析に興味を持ってもらうと言う目的もあるが、この方法では、画像を重ね合わせるので、移動天体以外の画像は、通常のコンボジットによってS/Nを向上させていることになる。従って、画像の画質も向上することになり、検出にも有利に働くと考えられる。リンク等による通常の検出と、RGBカラー合成に

よる検出の効率の違いなどの詳細は別稿（西浦他2018年投稿予定）を参照されたい。

図1は木曾観測所のアーカイブ・データから得た、2kCCD（1.5秒角/pix, FoV=51.2秒角四方, Itoh et al. 2001⁶⁾）で撮影した衝の方向の画像3枚（2001年4月27日撮影、それぞれ、Vバンド、900秒露出、時間間隔はおよそ1時間）をRGB合成したものである。小惑星が鮮やかにRGBの原色で浮かび上がっていることが分かる。また、露出時間900秒の間に小惑星が天球上を移動したために、画像が流れている（線上になっている）ことも分かる。

一般に小惑星は、ある程度時間をおいた3回以上の位置観測から、その軌道要素の個々を確定することができる（例えば、長沢 2003⁷⁾）。しかしながら、その計算過程は時間的な制約のある実習期間に行うには困難を伴う。そこで、本実習では、出来上がった小惑星画像の天球上の移動距離から、次に示すような簡易な方法で、太陽からの距離即ち、公転軌道半径を調べさせている。

まず、仮定として、地球と対象の小惑星は太陽の周りを同じ平面上で円運動していることとする。さらに、小惑星は衝付近にいて、観測時間間隔は十分に小さく、天球上の移動角距離（ θ ）も十分に小さいと仮定する。図2で、地球がその公

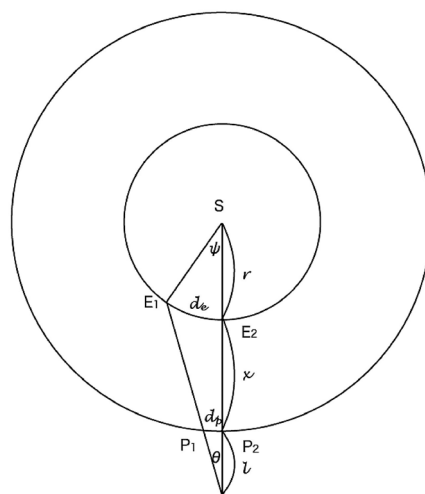


図2 衝付近での小惑星と地球の動き。内側の円が地球の公転軌道、外側の円が小惑星の公転軌道を表す。詳細は本文参照。

軌道上を時間 τ をかけて、 E_1 から E_2 に距離 d_e だけ進む間に、小惑星はその軌道上を P_1 から P_2 に距離 d_p 進むものとする。また、地球の公転軌道半径を r 、地球と小惑星の距離を x 、地球、小惑星の公転速度をそれぞれ、 v_e 、 v_p とする。すると、天球上での小惑星の移動角距離は図の θ となる。 ψ は時間 τ の間の地球の公転角である。 E_1 と P_1 を結んだ直線と、 E_2 と P_2 を結んだ直線の交点と P_2 (P_1) の間の距離を l とする。 ψ 、 θ は小さいことから、 $E_1 P_1 = E_2 P_2 = l$ となる。

以上の仮定から

$$d_e = r\psi = v_e \tau = (x + l) \theta \quad (1)$$

$$d_p = l\theta = v_p \tau \quad (2)$$

となる。(1)(2)から l を消去する。

$$r\psi = x\theta + v_p \tau = v_e \tau \quad (3)$$

また、ケプラーの第3法則から

$$rv_e^2 = (r + x) v_p^2 \quad (4)$$

が成り立つので、(3)(4)から v_e と v_p を消去して、 x に関する次の方程式が得られる。

$$\left(1 + \frac{x}{r}\right) \left(1 - \frac{x\theta}{r\psi}\right)^2 = 1 \quad (5)$$

ここで、 $\frac{x}{r} \equiv y$ 、 $\frac{\theta}{\psi} \equiv \omega$ とおいて、式を整理すると、

$$\omega^2 y^2 + \omega(\omega - 2)y + (1 - 2\omega) = 0 \quad (6)$$

となる。この方程式の解は、

$$y = \frac{1}{2\omega} \left(2 - \omega \pm \sqrt{\omega(\omega + 4)}\right) \quad (7)$$

となるが、このうち、意味のある解は

$$y = \frac{1}{2\omega} \left(2 - \omega - \sqrt{\omega(\omega + 4)}\right) \quad (8)$$

である。

この式を小惑星に適用した場合の妥当性を検証

するために、天体シミュレーションソフトウェアの StellaNavigator (アストロアーツ社製品) を使って、火星、及び木星の衝の時の天球移動角距離を再現した。小惑星の大半は火星軌道と木星軌道の間に存在するので、この計算式を使うことにより、火星、木星で、妥当な値が出れば、衝の位置の小惑星でも妥当な値が出てくるはずである。再現結果は、木星は衝付近の2016年3月9日1時30分から、2時30分の1時間に天球を $\theta = 20''$ 移動し、火星は同様に、2016年5月22日23時30分から翌日0時30分の1時間に $\theta = 56.6''$ 移動していた。また、公転軌道が完全な円軌道 (等速円運動) であると仮定すると、1時間あたりの地球の公転角度は、 $\psi = 147.8''$ となる。 $r = 1\text{au}$ として、(8)式から計算すると、木星、火星について、それぞれ x (木星) $= 4.1\text{au}$ 、 x (火星) $= 0.42\text{au}$ となった。実際の最接近距離は、木星、火星、それぞれで、およそ 4.2au 、 0.5au であるので、衝の時であれば、学生実習のための小惑星の距離を求める方法として、妥当な値になるものと考えている。

3. カラー合成による固有運動の検出

一般的に、恒星は、天球上に静止していて、彗星や小惑星などの太陽系内の天体は、恒星に対して移動する天体として検出される。しかしながら、恒星といえども銀河回転にのるなどして、宇宙空間上を移動している。この天球上の移動を固有運動と言うが、恒星は、我々からの距離が大きいことから固有運動の検出には、十分長い時間経過又は、精密な位置観測が必要となる。木曾観測所で、本格的なCCD観測が始まったのは、1993年に1kCCD (0.75秒角/pix, FoV=12.5分角四方) が共同利用に供されてからであるので、現在までに20年以上の年月が経過している。即ち、この期間で同一視野の観測があれば、ある程度大きい固有運動を持つ恒星は検出できる可能性が出てきたと言える。そこで、我々は5pc以内の近傍の恒星のリスト (P.van de Kamp)⁸⁾ に記載されている恒星の写っている画像の有無を、木曾観測所の



図3 木曽観測所画像によるRoss128の固有運動の検出。左下のピンクと緑の2点像がRoss128である。中央の緑の点是小惑星。

CCDデータ中から検索した。その結果、距離3.3pcにある近傍の恒星Ross128（赤経 $11^{\text{h}}47^{\text{m}}44.4^{\text{s}}$ ，赤緯 $+00^{\circ}48'16.4''$ ，固有運動 $1.37''/\text{年}$ ）が，1995年4月7日の1kCCDの画像データ（ファイル名：kcc030206），2002年2月13日の2kCCDの画像データ（ファイル名：kcd037564）中にあることを発見した。残念ながら，3つ目の画像は得られなかったので，RとBにkcd037564を対応させ，Gにkcc030206を対応させて作ったカラー画像が図3である。Ross128は左下にピンクと緑の2点像となって現れている。なお，中心近くに見える緑色の星は，1995年当時にこの視野にたまたま存在した小惑星と考えられる。

今回のデータ検索では，van de Kampeのリスト中のRoss128以外の恒星で，同一視野，且つ，十分年月をあけて撮った複数の画像が見つからなかった。しかしながら，1kCCDまたは，2kCCD初期の時期のデータにはリスト中の恒星が複数存在するので，今後は，実習期間中にこれらの天体の

撮影を試みることで，固有運動検出の実習ができるものと確信している。

時間間隔をあけて撮影したデータとしては，米国パロマ天文台のシュミット望遠鏡（オースチンシュミット，有効口径126cm，F2.4）による北半球の全天写真（パロマーチャート）が1950年代から2000年頃までである。また，南半球では，1970年代以降のオーストラリアのUKシュミット望遠鏡（有効口径124cm，F2.5）による全天サーベイがあり，ともにThe STScI Digitized Sky Survey (DSS) として，The Space Telescope Science Instituteのサイト⁹⁾ から取得できる。これを利用すれば，50年近くの時間経過で固有運動を調べることが可能である。このサイトから，Ross128周辺の画像を取得し，Ross128の固有運動の確認を行った。

取得した画像データは，1952年1月31日撮影のパロマーシュミットデータ（POSS1），1984年5月23日撮影のUKシュミットデータ（GSC1），1998年4月20日撮影のパロマーシュミットデータ（POSS2）である。これらをRGBそれぞれに対応させて，カラー合成したものが図4である。図の中央の画像がRoss128である。なお，その周辺に

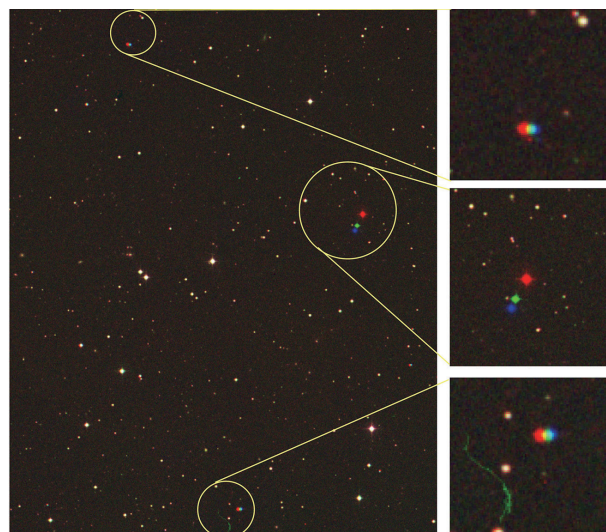


図4 DSS画像データによるRoss128の固有運動の検出。中央のRGBの3点像がRoss128である。上と下の3点像は，同一視野に偶然入っていた固有運動が見える恒星である。

明らかにRGB画像として、固有運動が検出される恒星が2つ見つかった。さすがに、40年以上のスパンなので、明確に固有運動が見えてくることが分かる。

Digitized Sky Surveyのデータによる固有運動の検出は、我々の観測解析実習用のデータとしては、やや目的から外れるものである。しかしながら、これによって、インターネット上から容易に取得可能な画像データを元にして、簡単なカラー合成操作で固有運動が検出できることがわかった。今後の観測解析実習以外の場面で使用できる実習テーマとして、その応用を考えていきたい。

4. まとめと今後

4.1 参加学生のアンケートから

2017年の実習では、RGBカラー合成による小惑星探査実習を試験的に行っている。実習終了後に、この解析実習を行った学生に書かせた感想の中から、主なものをあげる。

- 色の調整が人工的にできてしまうため、ちょっと編集をするだけでかなり違った画像になると言うことが面白かった。
- (小惑星探査の際に) ブリンクで小さな動く点を見つけることはとても疲れる作業で、なかなか見つけることができなかった。もう一つ教えてもらった方法がRGB合成を使った方法で、大きく動く星が色で分かれていて直ぐに見つけることができた。
- ブリンクは2つの写真を交互に見比べて、小惑星を見つけるため、どうしても目の良さに頼ることになってしまうのだが、RGB合成では、画像を1枚に合成し、さらに「赤、青、緑」の色で動いていることが判断できるため、画像を確認したとき、瞬間に小惑星があることを判断することができるから、RGB合成の方がブリンクよりも小惑星を見つけやすいことが分かった。
- 小惑星の画像からどうやって地球からの距離を算出できるかは、どの文献を調べてもお手上げ

で、先生に考えるための図と立てられる式を教えてください。この連立方程式を解くことにも時間がかかったが、なんとか小惑星の位置を推測することができた。

4.2 まとめと今後

天文学研究において、カラー写真はプレゼンテーションや広報活動としての利用目的を別にすれば、余り積極的な意味が無いとするのが一般的である。しかしながら、学生実習等における変光天体や、移動天体の検出手法としては、有用なものであると考えている。

2018年から木曽観測所では、木曽シュミット望遠鏡の全焦点面の9度角四方を一度で観測できるCMOSカメラ(通称、Tomo-e-Gozen¹⁰⁾)が運用開始となる予定である。Tomo-e-Gozenは、従来のどの観測装置よりも広視野且つ極めて短い時間間隔(最短で1秒間あたり2画像)で、大量の撮像データを取得することが出来るという特徴がある。しかし、Tomo-e-Gozenは、その余りの視野の広さのため、観測視野全面を覆う超大型フィルターの作成が極めて困難であり、現在のところ、フィルターを搭載しない状態で運用が始まることになっている。その一方で、Tomo-e-Gozenを用いた学生実習のテーマも熱望されている。そこで、我々は、撮像データを時間方向にRGBカラー合成することで、広い視野にわたって移動天体や変光天体を検出するテーマを検討している。また、この発展系として、Tomo-e-Gozenの高い時間分解能を活かすことで、RGBカラー合成した動画を作成することも考えたい。

また、我々は、主に本実習で得られた、観測データやアーカイブ・データを用いた、天体画像解析の教材作成プロジェクトを進めており、その幾つかについては、既に報告を行っている(西浦他2012⁴⁾、伊藤他2013⁵⁾、伊藤他2015¹¹⁾など)。本稿で紹介した小惑星の距離測定や恒星の固有運動は、天文学の中でも古典的かつ基本的な内容であり、現行の高等学校学習指導要領¹²⁾や同解説¹³⁾

の理科で謳われている、年周視差や年周光行差、恒星までの距離などとも密接に関連している。ところがその反面、これらを教育現場の観測や実験で、再現・体験することは事実上不可能であり、本教材がこのような局面に一石を投じることが期待される。

5. 謝辞

観測解析実習の実施にあたっては、東京大学大学院理学系研究科天文学教育研究センター木曾観測所の皆さんの全面的な協力をいただいております。感謝の意を表します。本稿の執筆に際しては、学術振興会による科学研究費補助金（26350193, 16K12750, 17K00971）から一部の援助を受けました。

なお、以下はDigitized Sky Survey利用に対するacknowledgementsです。

The Digitized Sky Surveys were produced at the Space Telescope Science Institute under U.S. Government grant NAG W-2166. The images of these surveys are based on photographic data obtained using the Oschin Schmidt Telescope on Palomar Mountain and the UK Schmidt Telescope. The plates were processed into the present compressed digital form with the permission of these institutions.

The National Geographic Society - Palomar Observatory Sky Atlas (POSS-I) was made by the California Institute of Technology with grants from the National Geographic Society.

The Second Palomar Observatory Sky Survey (POSS-II) was made by the California Institute of Technology with funds from the National Science Foundation, the National Geographic Society, the Sloan Foundation, the Samuel Oschin Foundation, and the Eastman Kodak Corporation.

The Oschin Schmidt Telescope is operated by the California Institute of Technology and

Palomar Observatory.

The UK Schmidt Telescope was operated by the Royal Observatory Edinburgh, with funding from the UK Science and Engineering Research Council (later the UK Particle Physics and Astronomy Research Council), until 1988 June, and thereafter by the Anglo-Australian Observatory. The blue plates of the southern Sky Atlas and its Equatorial Extension (together known as the SERC-J), as well as the Equatorial Red (ER), and the Second Epoch [red] Survey (SES) were all taken with the UK Schmidt.

All data are subject to the copyright given in the copyright summary. Copyright information specific to individual plates is provided in the downloaded FITS headers.

Supplemental funding for sky-survey work at the ST ScI is provided by the European Southern Observatory.

参考文献

- 1) 東京大学木曾観測所ホームページ
<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/>
- 2) 山縣朋彦, 西浦慎悟, 「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, 2005年, pp111-120
- 3) 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, 47, 2013年, pp171-177
- 4) 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, 64, 2012年, pp45-53
- 5) 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型解析体験教材の開発Ⅰ」三重大学教育学部紀要, 64, 2013年, pp35-40
- 6) Itoh, N., Soyano, T., Tarusawa, K., Aoki,

- T., Yoshida, S., Hasegawa, T., Yadomaru, Y., Nakada, Y., and Miyazaki, S., “A Very Wide-Field CCD Camera for Kiso Schmidt Telescope”, Pub. Nat. Astron. Obs. Japan, 2001, vol.6, pp.41-48
- 7) 長沢工, 「軌道決定の原理 彗星・小惑星の観測方向から距離を決めるには」, 2003年, 地人書館, p241
- 8) Peter van de Kamp “The Nearby Stars” Annual Review A&Ap, 9, 1971, pp103-126
- 9) The STScI Digitized Sky Survey ホームページ
http://stdatu.stsci.edu/cgi-bin/dss_form
- 10) 東京大学天文学教育研究センターTomo-e-Gozen
ホームページ
<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/tomoe/>
- 11) 伊藤信成, 山縣朋彦, 濱部勝, 西浦慎悟, 三戸洋之「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, 2015年, pp13-28
- 12) 文部科学省, 高等学校学習指導要領 平成21年3月, 2015年, 東山書房, p296
- 13) 文部科学省, 高等学校学習指導要領解説 理科編理数編, 2015年, 実教出版, p232