

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

西浦 慎悟^{*1}・中西 裕之^{*2}・樽沢 賢一^{*3}・森 由貴^{*4}
宮田 隆志^{*5}・三戸 洋之^{*3}・原 正^{*6}・伊藤 信成^{*7}

宇宙地球科学分野

(2013年5月28日受理)

NISHIURA, S., NAKANISHI, H., TARUSAWA, K., MORI, Y., MIYATA, T., MITO, H., HARA, T. and ITOH, N.: Making of a teaching material to calculate the age of the universe with galaxy size distributions of galaxy clusters. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., **65**: 23–33. (2013)

ISSN 1880-4330

Abstract

We reported making a teaching material for high school students and for beginners in college students to calculate the age of the universe under simple assumptions with wide-field images of seven galaxy clusters of which radial velocities are known. In our teaching material, we suppose that all galaxies appearing in a galaxy cluster image are member of it. After identifying cluster galaxies with giant, normal size, and dwarf galaxy from a distribution of their apparent sizes, we calculate distances to them under the assumption that the true sizes of giant, normal size, and dwarf galaxy are 50, 30, and 10 kpc, respectively. The distance to the galaxy cluster is estimated with averaging those to the cluster member galaxies. Finally, we could obtain the Hubble constant and the age of universe with the distances to the galaxy clusters and known radial velocities.

Applying our teaching material to high school students and to beginners in college students, we found that it took from two to four hours for them to finish analysis of a galaxy cluster image. This fact indicates that our teaching material should not be used in a regular lesson, but in extracurricular activity, group learning, and self study. We also found that even beginners could obtain a valid Hubble constant and an age of the universe with our teaching material.

Key words: astronomical education, teaching material, galaxy, galaxy cluster, Hubble's law, Hubble constant, age of the universe

Department of Astronomy and Earth Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

要旨: 我々は、高校生や大学生初学者を対象に、平易な仮定の下で、後退速度が既知である7銀河団の広視野撮像データから宇宙年齢を算出する教材を作成した。本教材では、まず、銀河団画像に見られる全ての銀河が銀河団に属していると思見す。そして、それらの見かけサイズの分布から銀河団銀河を巨大銀河、通常銀河、矮小銀河に大別し、それぞれの真のサイズを50 kpc, 30 kpc, 10 kpcと仮定することで各銀河までの距離を算出、これを平均することで銀河団までの距離を求める。最終的には、銀河団までの距離と後退速度からハッブル定数および宇宙年齢を得ることができる。

この教材を、高校生と大学生の初学者に対して用いたところ、一つの銀河団画像の分析に2-4時間という時間が必要になることが分かった。これは、本教材を用いた実習が、正規の授業ではなく、課外活動やグループ学習、自主学習向きであることを示している。また、初学者ではあっても、本教材からは、妥当なハッブル定数や宇宙年齢を導き出せることが分かった。

*1 東京学芸大学 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)

*2 鹿児島大学大学院 (890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-35)

*3 東京大学大学院天文学教育研究センター木曽観測所 (397-0101 長野県木曽郡木曽町三岳10762-30)

*4 東京大学大学院 (113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)

*5 東京大学大学院天文学教育研究センター (181-0015 東京都三鷹市大沢2-21-1)

*6 埼玉県立豊岡高等学校 (358-0003 埼玉県入間市豊岡1-15-1)

*7 三重大学 (514-8507 三重県津市栗真町屋町1557)

1. はじめに

銀河団は数十から数千個もの銀河からなる巨大な銀河集団である。銀河団は、さらに巨大な宇宙の階層構造である超銀河団の構成要素ではあるが、超銀河団はその巨大さ故に、力学的な平衡状態には達していないと考えられているため、力学的平衡状態にある天体としては、銀河団が宇宙で最大のものとなる。銀河団とそれを構成する銀河の関係に目を向けると、銀河団銀河の形態—密度関係 (Dressler 1980) をはじめ、銀河団銀河とフィールド (孤立) 銀河の光度関数における, bright-end と faint-end を担う銀河の違い (Binggeli et al. 1988), 銀河団中心部に位置する渦巻銀河の中性水素ガスの欠乏 (van Gorkom and Kotanyi 1985; Bravo-Alfaro et al. 2000), そして、赤方偏移が大きい銀河団ほど青い銀河を含む割合が増加するといったブッチャー・イムラー効果 (Butcher and Oemler 1984) などが知られている。これらは、銀河団とこれに属する銀河の形成・進化の間に、密接な関係が存在することを示唆している。また、銀河団自身に注目すると、その巨大な重力ポテンシャル中に数千万 K にもなる高温プラズマを大量に有しており (例えば Schwarz et al. 1992), その質量はメンバー銀河を形作る恒星の質量を遥かに凌ぐほどになっている。この高温プラズマと銀河の相互作用は、銀河団銀河の形成・進化に大きな影響を与えていると考えられる。さらに、高温プラズマの観測からは、銀河団の全質量を見積もることが可能であり、銀河団中には、観測されるメンバー銀河の約 10 倍にも及ぶダークマターの存在が示唆されている (例えば White et al. 1993)。

このように、銀河団は、大規模構造の形成や、銀河の形成・進化、そして、ダークマターといった現代天文学が解明を急ぐ多くの研究テーマに深く関係している。現行の高等学校学習指導要領下の地学基礎では、「(1) 宇宙における地球」で「宇宙の誕生と銀河の分布について理解すること」(文部科学省 2009a) とあり、この「銀河の分布」について高等学校学習指導要領解説には「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」と記されている (文部科学省 2009b)。これを受けて、現行の地学基礎の教科書の全てで銀河団が取り上げられているが (磯崎ほか 2011; 木村ほか 2012; 森本ほか 2012; 西村ほか 2012; 小川ほか 2012), 銀河団を題材とした教材には、大学生初学者を対象とした横尾 (1993) があるものの、高校生を対象としたものは事実上皆無である。

さらに、文部科学省 (2009a) の地学では、地学基礎の内容を踏まえて、「(4) 宇宙の構造」で「様々な銀河の存在や銀河の後退運動を理解すること」そして「現代の宇宙像を理解すること」とされており、「『銀河の後退運動』については、ハッブルの法則も扱うこと」、そして膨張宇宙と宇宙の年齢の取り扱いが明記されている。これを受けて、文部科学省 (2009b) には、ハッブルの法則に関する探究活動として、銀河の後退速度と距離の関係図からハッブル定数を求める例が示されている。

後述するように、銀河団は、それ自体がハッブル定数を求める研究においても頻繁に取り上げられている。そこで、高校生を対象に、銀河団を用いてハッブルの法則を扱う教材を開発することができれば、銀河団という宇宙の巨大な構造を実感しながら、膨張宇宙の概念にアプローチできる可能性がある。

そこで我々は、広視野撮像観測装置によって取得された銀河団の撮像データを、平易な仮定の下で分析することで、その銀河団までの距離を導出し、それを文献から得られた銀河団の後退速度と併せることで、ハッブル定数を算出する教材を作成した。本稿では、その原理と作成方法、そして、教材としての実用性の検証結果を報告する。

2. 基本原理

本教材では、後退速度が既知である銀河団までの距離を算出し、これにハッブルの法則 (Hubble's law) を用いることで、ハッブル定数 (Hubble constant), または、宇宙年齢を導出する。

1929年、ハッブル (E. Hubble) は、殆ど全ての銀河が我々から遠ざかる方向に運動しており、しかも、その後退速度はその銀河までの距離に比例するという関係を発表した (Hubble 1929)。この銀河までの距離 d と後退速度 v の比例関係,

$$v = H_0 d \quad (\text{式 1})$$

は、ハッブルの法則と呼ばれ、後に宇宙膨張の状況証拠の一つとして、現在の宇宙論の確立に非常に大きな影響を与えることになる。特に、比例定数 H_0 , ハッブル定数は宇宙膨張の速度を反映しており、この逆数 $1/H_0$ はハッブル時間 (Hubble time) と呼ばれる近似的な宇宙年齢を表す量になる。

通常、銀河の後退速度 v は、次のような手順で導出される。まず、分光観測によって得られた銀河のスペ

クトルから、輝線（もしくは吸収線）の波長 λ' を測定する。次に、この輝線（もしくは吸収線）の静止波長 λ_0 からのずれ $\Delta\lambda(=\lambda'-\lambda_0)$ から、赤方偏移 z を、

$$z = \Delta\lambda / \lambda_0 \quad (\text{式 2})$$

と求める。これにドップラー効果を適用することで、後退速度 v が近似的（ $z \ll 1$ の時）に、

$$v = cz \quad (\text{式 3})$$

と表される。なお、ここで c は光速を示す。

後退速度の導出方法がこの一つだけで、かつ、研究の早い時期から比較的高い精度で行われてきたことに対して、距離 d の導出方法については、これまでも多くの研究者から様々な方法が考案されている。しかしながら、誤差が大きいものが多く、結果としてハッブル定数の不定性を大きくする要因となっていた（Kennicutt et al. 1995）。特に、銀河団までの距離を導出する方法としてしばしば用いられるのは、渦巻銀河の回転速度と絶対等級の相関関係であるタリー・フィッシャー関係である（Tully and Fisher 1977）。この方法では、予め、高い精度で距離の分かった渦巻銀河（ローカル・キャリブレーターと呼ばれる）に対するタリー・フィッシャー関係を用意しておく必要があるが、この際には、渦巻銀河の中に存在するセフィイド型変光星が用いられる。また、観測例は決して多くないが、銀河団中の高温プラズマによる逆コンプトン散乱によって生じる、スニアエフ・ゼルドビッチ効果（例えばKomatsu et al. 1999など）や、銀河団による重力レンズ効果を用いて銀河団までの距離を求める方法なども試みられている（例えばKundic et al. 1997など）。

銀河や銀河団までの距離を決定する際に、頻繁に用いられる手法は、それらの見かけの明るさや見かけの大きさが、その真の明るさや真の大きさと比べてどれほど変わっているかを測定し、この変化量を距離に換算するという方法である。従って、如何に見かけの明るさや見かけの大きさを精度良く測定するかという問題よりも、如何にその真の明るさや真の大きさを設定するかが重要になる。本教材では、より平易な方法として、銀河の真の大きさ D が既知であると仮定することで、銀河までの距離 d が、銀河を見込む角度 θ (rad)を用いて、 θ が十分に小さい時、

$$d = D / \theta \quad (\text{式 4})$$

となることを利用する。銀河団中には多くの銀河が存在するが、銀河団そのものの大きさに比べて、我々から銀河団までの距離が非常に大きいため、我々から銀河団内における個々の銀河までの距離は全て同一と見なすことができる。そして、多くのメンバー銀河に対して、(式 4) からそれぞれの距離を求め、それらを平均することで銀河団までの距離を見積もる。図 1 に、本教材における銀河（銀河団）までの距離決定方法の概念図を掲げた。

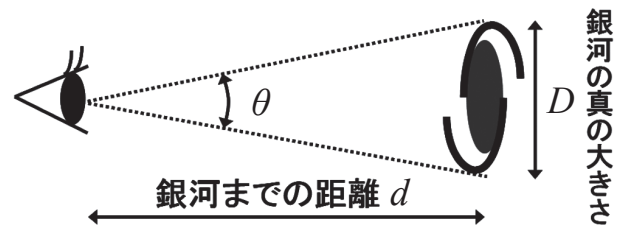


図 1 銀河（銀河団）までの距離を決定する方法の概念図。銀河の真の大きさを D 、それを見込む角度を θ (rad)とすると、銀河までの距離 d は、 $d = D / \theta$ と表される。

ハッブル図（Hubble diagram）を描いて、ハッブル定数や宇宙年齢を導出する高校生対象の演習や教材としては、西浦ほか（2007）、原ほか（2009）、そして、現行の地学基礎の教科書の森本ほか（2012）などがあり、大学生初学者を対象としたものとしては、福江（1993）や戎崎（1995）、Milner（2003）、などが挙げられる。

このような、銀河の見かけのサイズからその銀河までの距離を求める方法は、90年も前にランドマークが試みている。しかし、実際の銀河では巨大銀河から矮小銀河まで、その真の大きさには大きな幅があり、ランドマークが得た銀河までの距離と後退速度の関係は、非常に分散が大きなものであった（Lundmark 1924）。本教材で扱うような銀河団は、まさしく巨大銀河から矮小銀河までの多様かつ多数の銀河の集団である。そこでまず、本教材では、銀河団領域に観察される全ての銀河は、その銀河団のメンバー銀河であると仮定する。これは必ずしも自明ではないが、一つの銀河団から多くの銀河をサンプリングすることで、非メンバー銀河の混入による影響を軽減できる。また、銀河団銀河の真の大きさ D を、巨大銀河、通常銀河、矮小銀河でそれぞれ、50kpc、30kpc、10kpcと仮定する（例えば、岡村 1999）。一般的に、巨大銀河の数は、一つの銀河団においてせいぜい1個ないし2個程度である。そして、残った銀河の約半分のうち、見か

けのサイズが大きい方を通常銀河、最後に残った小さい方を矮小銀河と見做すことを目安とする。

3. 教材作成

本教材に必要なものは、1) 銀河団の広視野撮像データ、2) 観測天文学の画像データで、一般に用いられる FITS 形式データに対応した画像ビューアもしくは FITS 形式データの画像分析ソフトウェア、そして、3) 分析で得たデータを処理するための表計算ソフトウェアである。なお3) については、関数電卓などで代用することも可能であろう。

3. 1 教材用銀河団サンプルと画像処理

銀河団は天球上で大きく広がっているため、その画像を得るためには、通常よりもはるかに広い視野を有する観測装置が必要である。これに対して、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（以下、木曾観測所）の105cmシュミット望遠鏡（以下、木曾シュミット望遠鏡）は、同観測所で開発された広視野 CCD カメラ（通称、2kCCD カメラ）を搭載することで、約1度角四方という広視野撮像観測を実現しており、銀河団の撮像観測には極めて有効である（Itoh et al. 2001）。そこで、木曾シュミット望遠鏡と2kCCDカメラによって撮像観測された銀河団の中から、表1に示した7つの銀河団を教材用サンプルとして選出した。選出の際には、銀河団の後退速度が既知であることと、その後退速度が幅広く分布していることを考慮した。後者の条件は、ハッブル図を描く際に、ハッブルの法則を視覚的に確認できることを念頭に置いたものである。これら銀河団サンプルの観測データの概要を表2に示した。

表1. 銀河団サンプル

銀河団名	赤経 (J2000.0)	赤緯 (J2000.0)	後退速度 (km/s)	BM分類
Abell 154	01h10m58s	+17d39m56s	19067	II
Abell 160	01h12m51s	+15d30m54s	13401	III
Abell 1656	12h59m49s	+27d58m50s	6925	II
Abell 2151	16h05m15s	+17d44m55s	10972	III
Abell 2199	16h28m39s	+39d33m06s	9039	I
Abell 2443	22h26m07s	+17d20m17s	32378	II
Abell 2666	23h50m56s	+27d08m41s	8042	I

注) 赤経, 赤緯, 後退速度はNASA/IPAC Extragalactic Database (<http://ned.ipac.caltech.edu/>) より, BM分類は, Abell et al. (1989) より引用した。

観測データの整約 (reduction, リダクション) には、アメリカの国立光学天文台が開発、管理、無償配布している IRAF (= Image Reduction and Analysis Facility, <http://iraf.noao.edu/>) を用いた。また、画像処理は、バイアス画像の合成と差し引き、フラット画像の合成と感度むら補正 (フラット・フィールドイング=flat fielding) という典型的な手法で行った。図2a-2gに、整約を施した7つの銀河団の*V*バンド画像を掲げた。画像としては、他にも*B*, *Rc*, そして一部の銀河団については*Ic*バンドも用意した。これは、点源である恒星に比べて、天球上で広がった構造を持つ銀河は、複数のバンド画像から作成される擬似カラー画像上で、恒星と区別しやすくなることを考慮したためである。

3. 2 データ分析用ソフトウェア

銀河団の広視野撮像データから、銀河の見かけサイズの度数分布を得るためには、少なくとも FITS 形式の画像ビューアが必要である。スミソニアン天体物理観測所 (SAO = Smithsonian Astrophysical Observatory) が開発・無償配布している SAOImage DS9 ([表2. 銀河団サンプルの観測データの概要](http://hea-</p>
</div>
<div data-bbox=)

銀河団名	観測日	観測バンド (露光時間×枚数)
Abell 154	2011年8月30日	<i>B</i> (300秒×2), <i>V</i> (300秒×2), <i>Rc</i> (210秒×2)
	2011年8月31日	<i>B</i> (300秒×1), <i>V</i> (300秒×1), <i>Rc</i> (210秒×1)
Abell 160	2004年8月12日	<i>B</i> (180秒×1), <i>V</i> (180秒×1), <i>Rc</i> (120秒×1), <i>Ic</i> (90秒×1)
Abell 1656	2003年3月09日	<i>B</i> (300秒×1), <i>V</i> (300秒×1), <i>Rc</i> (180秒×1), <i>Ic</i> (180秒×1)
Abell 2151	2003年2月11日	<i>B</i> (300秒×1), <i>V</i> (180秒×1), <i>Rc</i> (180秒×1)
Abell 2199	2003年2月11日	<i>B</i> (300秒×1), <i>V</i> (300秒×1), <i>Rc</i> (180秒×1)
Abell 2443	2004年8月12日	<i>B</i> (300秒×3), <i>V</i> (300秒×3), <i>Rc</i> (180秒×3), <i>Ic</i> (180秒×3)
Abell 2666	2011年8月01日	<i>B</i> (300秒×3), <i>V</i> (300秒×1), <i>Rc</i> (180秒×3)

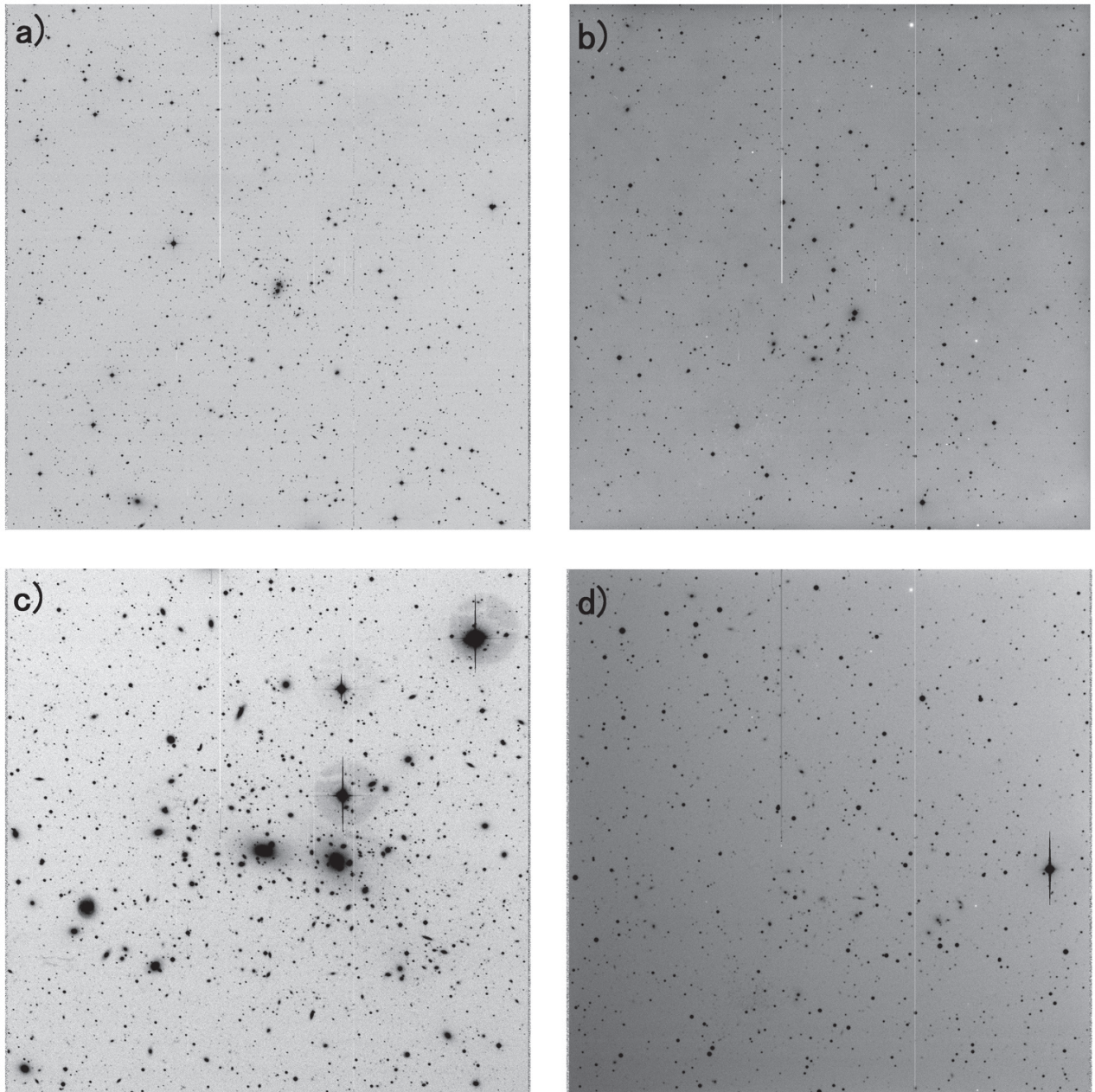


図2 a) Abell 154, b) Abell 160, c) Abell 1656, d) Abell 2151のIバンド画像。視野は51.2秒角×51.2秒角。方角は上が北で、左が東。縦（南北）方向に幾つかの筋が見えるが、これはバッド・ピクセル（元々感度の悪い画素）やホット・ピクセル（元々感度が良過ぎる画素）が集まった部分である。

www.harvard.edu/RD/ds9/site/Home.html) は、容易に入手でき、かつUNIX互換OS、MS-Windows、そしてMacOS X と様々なプラットフォームで動作するという利点がある。アストロアーツ社製のステライメージ（現在の最新バージョンは7、<http://www.astroarts.co.jp/products/stling7/>）は有償だが、FITS形式データの閲覧に加えて、画像分析のための様々な機能が備わっている。同社と国立天文台が共同開発したすばる画像解析ソフトMakali'i（マカリイ、<https://makalii.mtk.nao.ac.jp/index.html>）にも同様の機能が備わっており、無償の天文教育での利用を条件に、自由な利用が可能となっている（Horaguchi et al. 2006）。銀河団画像を

直接用いる作業は、銀河団銀河の見かけのサイズを測定するだけであるため、状況によっては、銀河団画像をプリントアウトした資料のみによる実習も可能であろう。

また、銀河団銀河の見かけのサイズの度数分布作成、銀河・銀河団までの距離の算出、ハッブル図の描画、最小二乗フィットによるハッブル定数の導出などには、表計算機能を備えたソフトウェア、MS-Office/ExcelやフリーソフトウェアのLibreOffice/Calcなどが便利である。

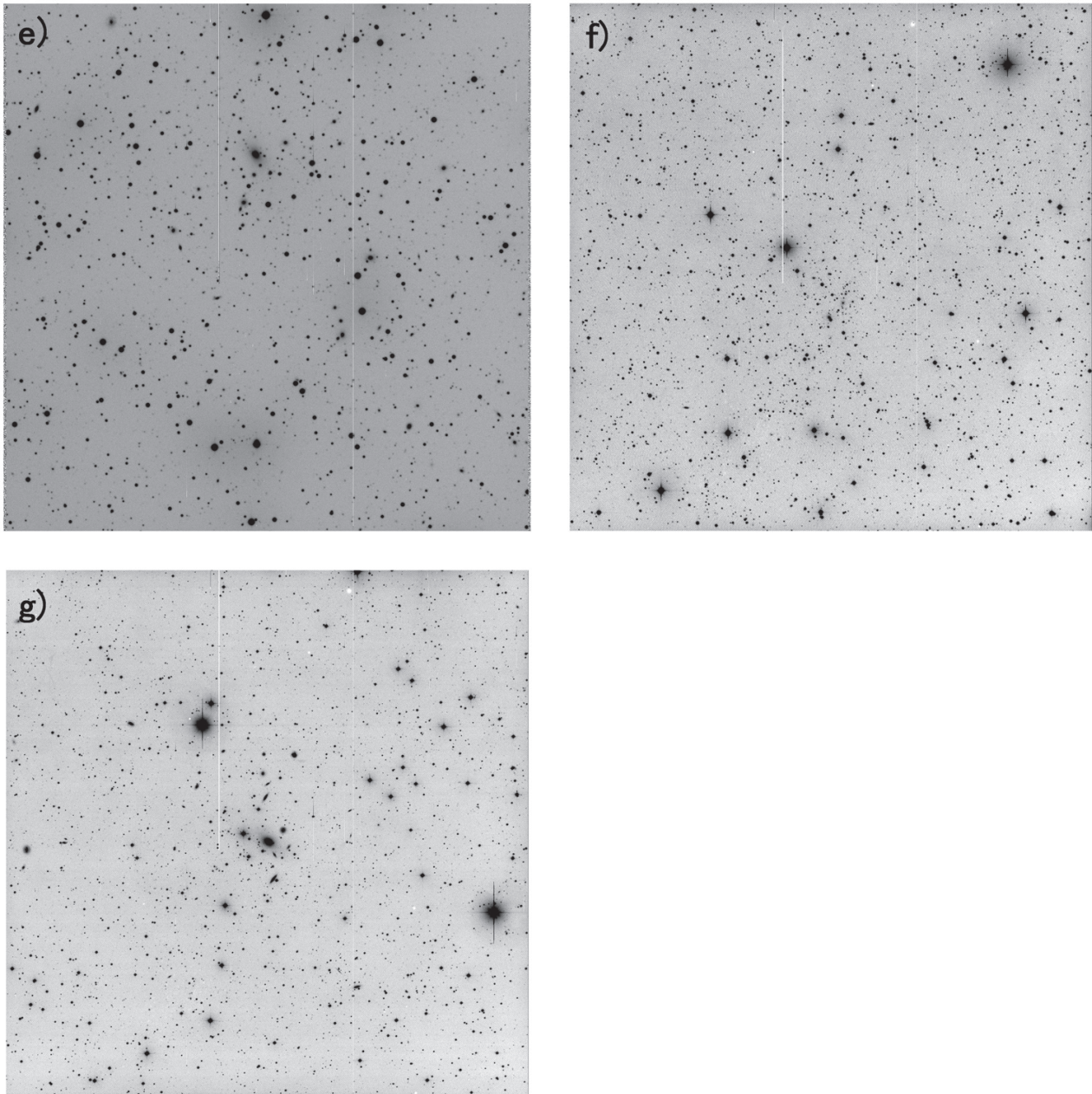


図2 (続き) e) Abell 2199, f) Abell 2443, g) Abell 2666の*I*バンド画像。他は図2a-dに同じ。

4. 教材としての実用性

本教材を用いるにあたって、確認すべき点が二つある。まず一つ目は、本教材を用いてハッブル定数や宇宙年齢を導くために必要な実習時間が適切なものであるか、そして二つ目は、本教材で得られるハッブル定数や宇宙年齢の値が、現在の観測的宇宙論の研究成果と比べて妥当なものであるか否か、である。これらは、高校生や大学生初学者のパーソナル・コンピュータの習熟度と観測データを扱う経験に大きく依存する。特に後者は、銀河と恒星の区別、そして、銀河の見かけサイズの測定、を精度良く行えるか否かに大きく

く影響される。本稿では、高校生と大学生に対する二つの事例から、これらの検証を行う。

4. 1 銀河学校2003

本教材のデータを取得した木曾観測所では、1998年以降、毎年3月末に、全国の高校生を対象とした観測天文学の滞在型体験教室「銀河学校」を開催している(田中 1998; 伊藤 2000; 西浦 2003)。銀河学校では、毎年20から30名の高校生が木曾観測所に2泊3日から3泊4日の日程で滞在し、木曾シュミット望遠鏡を用いて、自ら天体観測を行い、画像処理、データ分析、結果報告までを行っている。

2003年3月末に開催された銀河学校2003では、全参加者34名中12名（高校1年生7名、高校2年生5名）が、表1中の3つの銀河団、Abell 1656, 2151, 2199に属する銀河のサイズ分布を調査し、これに基づいて各銀河団までの距離を測定した。具体的には、高校生4名を1グループとし、1グループに対してパーソナル・コンピュータ1台と1銀河団のデータを割り当て、アストロアーツ製のステライメージ3を用いて画像解析、MS-OFFICE 2000 / Excelを用いて銀河団銀河の見かけサイズの度数分布の作製と距離計算を行った。図3a-3cに高校生が導出した各銀河団銀河の見かけのサイズ分布と、銀河の分類結果を示した。

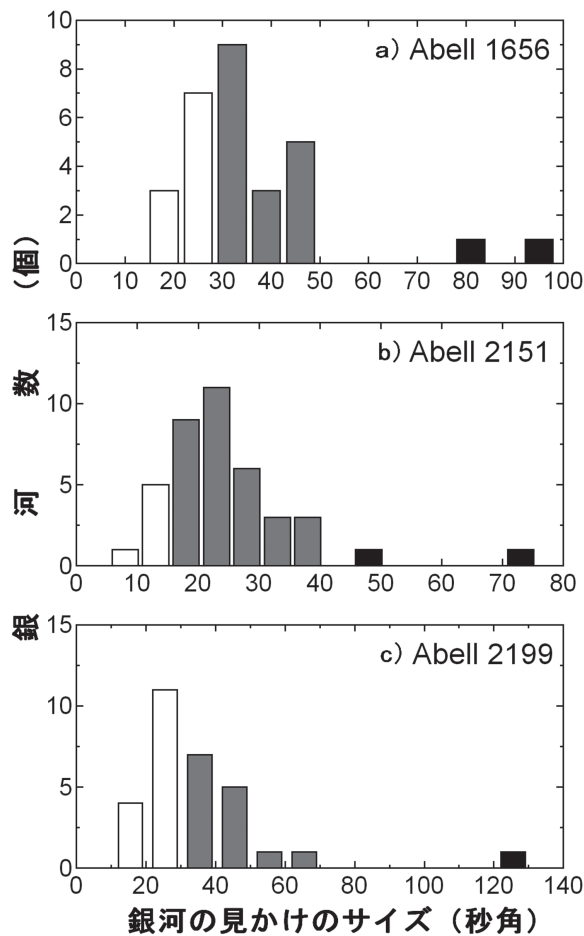


図3 a) Abell 1656, b) Abell 2151, c) Abell 2199の銀河の見かけのサイズの度数分布図。黒を巨大銀河、グレーを通常銀河、白を矮小銀河と見なした。銀河学校2003で高校生によって調べられたもの。

また、表3に高校生らが検出した銀河団銀河の数と、算出した各銀河団までの距離を示した。なお、銀河団銀河の検出には、単一バンドのグレー画像ではなく、*B*, *V*, *Rc*の3バンドから合成した擬似カラー画像を使用した。これは、前述したように、カラー画像の方が、グレー画像よりも銀河と恒星の区別が付き

やすいためである。高校生には、銀河団銀河の検出数は50個を目標にするように指示したが、実際に50個の銀河を検出したグループはなかった（表3参照）。これらに基づいて、高校生らは各銀河団までの距離と後退速度からそれぞれ宇宙年齢を求め、これらを平均することで 168 ± 31 億年を導き出した（山根ほか2004）。

銀河学校2003では、高校生が、1銀河団の擬似カラー画像から目視によって30-40個の銀河団銀河を見つけ出し、その見かけのサイズを測定して度数分布を得るまでに、平均3時間を要した。さらに、銀河の分類を経て、銀河団までの距離を導出するために約1時間を必要とした。

表3. 実習で得られた銀河団銀河の検出数と距離

銀河団名	検出数 (個)	距離 (Mpc)	実習対象
Abell 154	50	247 ± 79	教育学部3年生
Abell 160	50	172 ± 59	教育学部3年生
Abell 1656	29	$134 \pm 44^*$	高校1, 2年生
Abell 2151	40	$191 \pm 67^*$	高校1, 2年生
Abell 2199	30	$122 \pm 38^*$	高校1, 2年生
Abell 2443	50	240 ± 93	教育学部3年生
Abell 2666	50	155 ± 55	教育学部3年生

注) 銀河団までの距離に付した誤差は 1σ エラーを示す。ただし、*印を付けた誤差は、各銀河に対する具体的な測定データが残されていないため、度数分布から見積もった参考値であることを示す。

4. 2 天文学特別演習

2012年12月、東京学芸大学の教育学部3年生対象の天文学特別演習で、F類自然環境科学の3年生3名に対して、本教材を用いた目視による銀河団銀河の検出と銀河の見かけのサイズの測定を行わせた。なお、この3名は、講義やゼミなどで銀河についての知識を学んではいるが、実際の銀河の撮像データを用いた実習経験は皆無である。その意味で、銀河画像を分析する上では、初学者と見做して良い。銀河団画像にはAbell 154, 160, 2443, 2666の*V*バンド画像を用い、学部3年生1人にパーソナル・コンピュータ1台と1銀河団（1名のみ2銀河団）を割り当てた。銀河の見かけのサイズ測定にはマカリイ、距離の算出にはLibre Office 3.6.4を用いた。また、銀河団銀河の検出数の目安として50個を指示した。図4a-4dに各銀河団銀河の見かけのサイズ分布と、銀河の分類結果を示した。また、表3に銀河団銀河の検出数と、銀河団銀河の見かけのサイズ分布から算出される銀河団までの距離を示した。

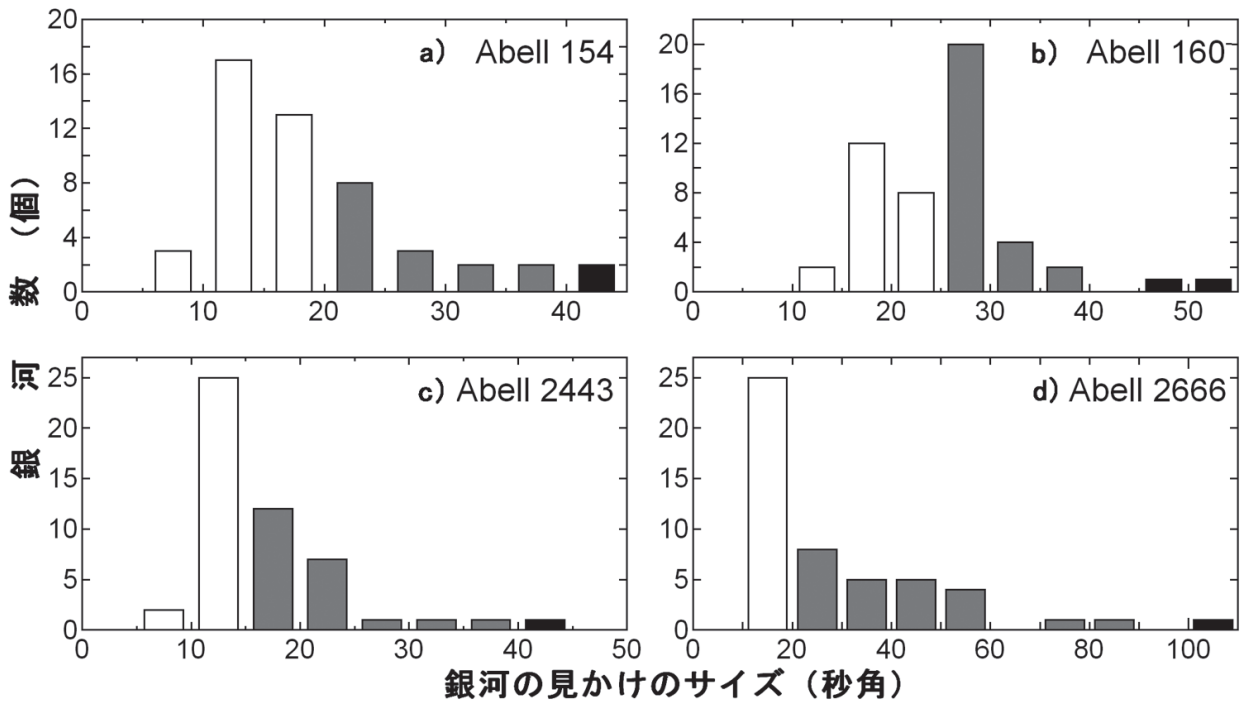


図4 a) Abell 154, b) Abell 160, c) Abell 2443, d) Abell 2666 の銀河の見かけのサイズの度数分布図。色は図3に同じ。東京学芸大学教育学部3年生が見かけのサイズ測定を行ったもの。

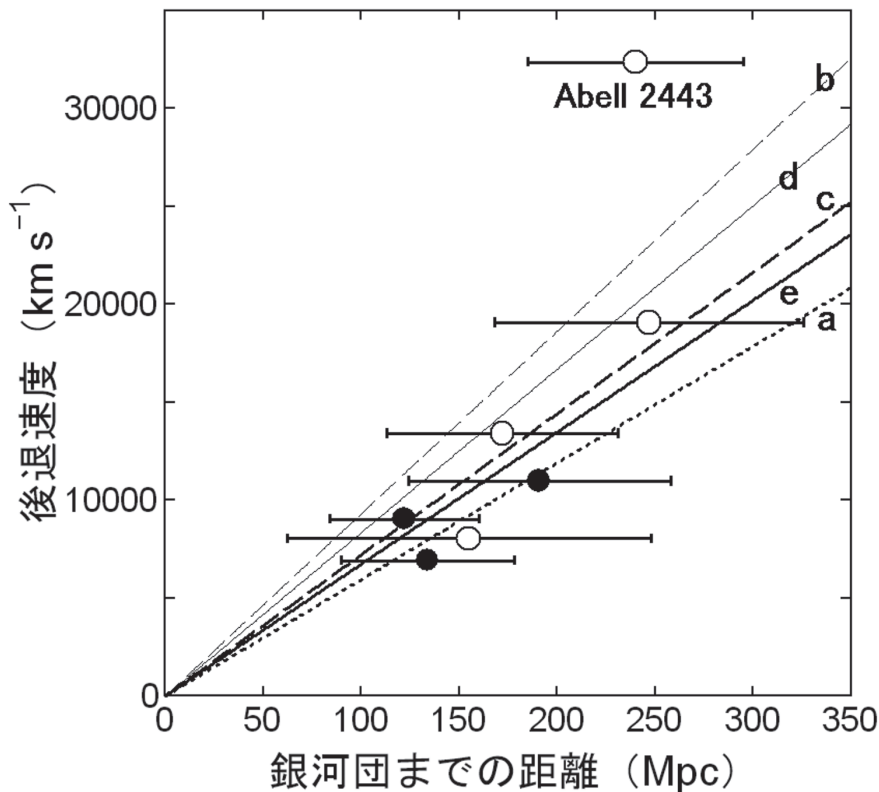


図5 本教材を用いた実習から得られたハッブル図。縦軸は銀河団の後退速度、横軸は銀河団までの距離である。黒丸は銀河学校2003で高校1, 2年生が、白丸は東京学芸大学教育学部3年生が天文学特別演習で測定したデータを示している。五つの直線は、原点を通る直線でデータ点を最小二乗フィットしたものである。点線aは高校1, 2年生による3つの測定点 (黒丸), 細い破線bは教育学部3年生による4つの測定点 (白丸), 太い破線cはそこから Abell 2443 を除いた3つの測定点に対してフィットしたもの。細い実線dは7つ全ての測定点 (黒丸と白丸), 太い実線eはそこから Abell 2443 を除いた6つの測定点に対してフィットしたもの。エラーバーについては表3を参照。なお、直線a-eは表4の実習対象a-eに対応している。

表 4. 実習から得られたハッブル定数および宇宙年齢

実習対象	銀河団サンプル	ハッブル定数 ($\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$)	宇宙年齢 (億年)
a. 高校 1, 2 年生	Abell 1656, 2151, 2199	59.5	164
b. 教育学部 3 年生	Abell 154, 160, 2443, 2666	93.1	105
c. "	Abell 154, 160, 2666	72.1	135
d. 合同サンプル	Abell 154, 160, 1656, 2151, 2199, 2443, 2666	83.5	117
e. "	Abell 154, 160, 1656, 2151, 2199, 2666	67.3	145

学部 3 年生が、1 つの銀河団の V バンド画像から、目視で 50 個の銀河団銀河を見つけ出し、その見かけのサイズを測定するために平均 2 時間を要した。

5. 考察

本教材の目的は、銀河団のハッブル図からハッブル定数および宇宙年齢を導くことである。今回、2 つの事例から、一つの銀河団のデータ処理に対して、高校生で 3-4 時間、大学生で 2 時間を要することが分かった。この実習時間の違いの要因の一つは、パーソナル・コンピュータの習熟度の違いであると考えられる。銀河学校 2003 に参加した高校生の多くは、パーソナル・コンピュータに触れる程度の経験にさへ乏しいのに対し、教育学部 3 年生らは、レポート作製や情報検索などでパーソナル・コンピュータに触れる機会が多い。また、一人で作業を進める大学生の実習に対して、高校生の実習では、銀河と恒星の区別やサイズ測定・銀河の分類、などで互いに議論する場面がしばしば見られた。一つの銀河団に対して、高校生は 4 人 1 グループで、大学生は 1 人で実習を行ったことも実習時間の違いに影響していると考えられる。一つの銀河団のデータ処理に 2-4 時間という実習時間は、本教材を用いた実習が、高校の正規の授業では実施が難しいことを示している。原理が平易で作業内容も簡単なため、むしろ、時間の制約が少ない課外活動やグループ学習、もしくは自主学習に向いていると言える。

図 5 に、2 つの事例で得られた値から描いたハッブル図を示し、原点を通る直線フィットによるハッブル定数・宇宙年齢を表 4 に掲げた。なお、ハッブル宇宙望遠鏡や宇宙マイクロ波探査衛星 WMAP による観測成果から得られているハッブル定数は $71-72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ であり、これは宇宙年齢で 137 億年に相当する (Freedman et al. 2001; Spergel et al. 2003)。図 5

からは、明らかな後退速度と距離の間に直線的な相関関係、すなわちハッブルの法則が確認できる。ただし、サンプル中、最も遠くに位置すると思われる Abell 2443 のみがこの相関関係から外れている。

それぞれの事例に対して得られたハッブル定数および宇宙年齢は、最新の成果とは異なる値ではあるが、現在までのハッブル定数の不定性の大きさ (Kennicutt et al. 1995) を考慮すれば、むしろ妥当な結果であるといえる。特に、銀河に関する実習・研究経験に乏しい高校生や大学生初学者による測定であっても、ハッブル定数と宇宙年齢においては妥当な値が得られていることは興味深い。

6. まとめ

銀河団撮像観測データから、銀河の真の大きさを、巨大銀河、通常銀河、矮小銀河で 50, 30, 10 kpc とすることで、見かけのサイズから銀河団までの距離を求め、これを既知の後退速度と併せることで、ハッブル定数および宇宙年齢を求める教材を作成した。高校 1, 2 年生と教育学部 3 年生に対する実習から、本教材の実習時間は、一つの銀河団に対しても 2-4 時間を要し、この時間は、パーソナル・コンピュータの習熟度や実習形式に関係すること、本教材による実習は、正規の授業よりは課外活動やグループ学習、自主学習に向いていることが分かった。さらに、銀河に関する経験が乏しい初学者であっても、妥当なハッブル定数・宇宙年齢が得られることが見出された。

本教材を作成するにあたって、銀河団撮像観測に協力して頂いた青木勉氏、藤原英明氏、米田瑞生氏、土橋一仁氏、下井倉ともみ氏、中込圭佑氏、仲村賢一氏、澤村将太郎氏、山日彬史氏、水口健太氏、西浦研究室の 2004 年度天体観測実習の参加者のみなさん、そして、埼玉県立豊岡高校天文部の方々に感謝い

たします。また銀河学校2003でC班のメンバーとなった12人の高校生は、銀河団の撮像データを用いた教材を作るきっかけを与えてくれました、彼らに心から感謝申し上げます。最後に本稿の執筆・出版に関して、学術振興会による科学研究費補助金(22300269:代表者 長谷川正, 23501014:代表者 伊藤信成, 24654046:代表者 西浦慎悟)の援助を受けました、ここに御礼申し上げます。

参考文献

- Abell, G. O., Corwin, H. G. Jr., and Olowin, R. P. (1989), “A catalog of rich clusters of galaxies”, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 70, pp. 1-138.
- Binggeli, B., Sandage, A., and Tammann, G. A. (1988), “The luminosity function of galaxies”, *Annual review of astronomy and astrophysics*, 26, pp. 509-560.
- Bravo-Alfaro, H., Cayatte, V., van Gorkom, J. H., and Balkowski, C. (2000), “VLA HI Imaging of the Brightest Spiral Galaxies in Coma”, *Astronomical Journal*, 119, pp. 580-592.
- Butcher, H. and Oemler, A., Jr. (1984), “The evolution of galaxies in clusters. V. A study of populations since Z approximately equal to 0.5”, *Astrophysical Journal*, 285, pp. 426-438.
- Dressler, A. (1980), “Galaxy morphology in rich clusters—Implications for the formation and evolution of galaxies”, *Astrophysical Journal*, 236, pp. 351-365.
- 戎崎俊一 (1995), “9. 2 宇宙論と膨張宇宙”, ゼミナル宇宙科学, 東京大学出版会, 東京, pp. 128-138.
- 福江 純 (1993), “52 ハッブルの法則”. 横尾武夫編, 新・宇宙を解く—現代天文学演習, 恒星社厚生閣, pp. 189-191.
- Freedman, W. L., Madore, B. F., Gibson, B. K., Ferrarese, L., Kelson, D. D., Sakai, S., Mould, J. R., Kennicutt, R. C., Jr., Ford, H. C., Graham, J. A., Huchra, J. P., Hughes, S. M. G., Illingworth, G. D., Macri, L. M. and Stetson, P. B. (2001), “Final Results from the *Hubble Space Telescope* Key Project to Measure the Hubble Constant”, *Astrophysical Journal*, 553, pp. 47-52.
- 原 正・畠 浩二・五島正光・洞口俊博・金光 理・古荘玲子・矢治健太郎・PAOFITSワーキンググループ (2009), “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, pp. 151-165.
- Horaguchi, T., Furusho, R., Agata, H., and PAOFITS WG (2006) “FITS Image Analysis Software for Education: Makali'i”, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV, ASP Conference Series*, 351, p. 544.
- Hubble, E. (1929), “A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 15, pp. 168-173.
- 磯崎行雄・江里口良治・川勝 均・佐藤 薫・有山智雄・岡田昌訓・岡本 清・柴山元彦・寺戸 真・原 正・増田哲雄・株式会社新興出版啓林館編集部 (2011), *地学基礎*, 株式会社新興出版啓林館, 大阪.
- 伊藤信成 (2000), “銀河学校”, *天文教育*, 12, No. 3, pp. 5-9.
- Itoh, N., Soyano, T., Tarusawa, K., Aoki, T., Yoshida, S., Hasegawa, T., Yadomaru, Y., Nakada, Y., and Miyazaki, S. (2001), “A very wide-field CCD camera for Kiso Schmidt telescope”, *Publications of the National Astronomical Observatory of Japan*, 6, pp.41-48.
- Kennicutt, R. C., Jr., Freedman, W. L., and Mould, J. R. (1995), “Measuring the Hubble Constant with the Hubble Space Telescope”, *Astronomical Journal*, 110, pp. 1476-1491.
- 木村龍治・島崎邦彦・吉岡一男・縣 秀彦・大路樹生・加藤昌典・田中義洋・坪田幸政・饒村 曜・林 慶一・半田孝・半田利弘・前川寛和・宮嶋 敏・吉川 真・米澤正弘・東京書籍株式会社 (2012), *地学基礎*, 東京書籍株式会社, 東京.
- Komatsu, E., Kitayama, T., Suto, Y., Hattori, M., Kawabe, R., Matsuo, H., Schindler, S., and Yoshikawa, K. (1999), “Submillimeter Detection of the Sunyaev-Zeldovich Effect toward the Most Luminous X-Ray Cluster at $Z = 0.45$ ”, *Astrophysical Journal*, 516, pp. L1-L4.
- Kundic, T., Turner, E. L., Colley, W. N., Gott, J. R. III, Rhoads, J. E., Wang, Y., Bergeron, L. E., Gloria, K. A., Long, D. C., Malhotra, S., and Wambsganss, J. (1997), “A Robust Determination of the Time Delay in 0957+561A, B and a Measurement of the Global Value of Hubble's Constant”, *Astrophysical Journal*, 482, pp. 75-82.
- Lundmark, K. (1924), “The determination of the curvature of space-time in de Sitter's world”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 84, pp. 747-770.
- Milner, B. (2003), “ハッブルの法則”. 坪田幸政訳, ケンブリッジ物理学コース 宇宙の科学 天文学入門, 丸善株式会社, 東京, pp. 42-44.
- 文部科学省 (2009a), 高等学校学習指導要領, 東山書房, 京都.
- 文部科学省 (2009b), 高等学校学習指導要領解説 理科編 理数編, 実教出版株式会社, 東京.
- 森本雅樹・天野一男・黒田武彦・田中 博・坂本 泉・柴崎直明・足立久男・小幡喜一・斉藤尚人・直井雅文・森山義礼・実教出版株式会社 (2012), *地学基礎*, 実教出版株式会社, 東京.

- 西村祐二郎・奥村晃史・安成哲三・杉山 直・伊藤英樹・鈴木文二・遠藤正智・吉村壽哉 (2012), 高等学校 地学基礎, 株式会社 第一学習社, 東京.
- 西浦慎悟 (2003), “銀河学校2003～この5年間で得られたモノ～”, 天文月報, 96, pp. 7-13.
- 西浦慎悟・中田好一・三戸洋之・宮田隆志 (2007), “高校生のための天文学実習用教材『宇宙年齢を測る』の作成”, 地学教育, 60, pp. 53-66.
- 小川勇二郎・浅野俊雄・家 正則・磯村恭朗・高橋正樹・田中浩紀・中野孝教・中村 尚・林 美幸・平野弘道・丸山茂徳・八木勇治・吉田二美・数研出版株式会社編集部 (2012), 地学基礎, 数研出版株式会社, 東京.
- 岡村定矩 (1999), 銀河系と銀河宇宙, 東京大学出版会, 東京, p. 147.
- Schwarz, R. A., Edge, A. C., Voges, W., Böhringer, H., Ebeling, H. and Briel, U. G. (1992), “The structure of the intracluster medium of the Perseus cluster”, *Astronomy and Astrophysics*, 256, pp. L11-L14.
- Spiegel, D. N., Verde, L., Peiris, H. V., Komatsu, E., Nolte, M. R., Bennett, C. L., Halpern, M., Hinshaw, G., Jarosik, N., Kogut, A., Limon, M., Meyer, S. S., Page, L., Tucker, G. S., Weiland, J. L., Wollack, E., and Wright, E. L. (2003), “First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters”, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 148, pp. 175-194.
- 田中由美子 (1998), “観測所が銀河学校になった3日間”, 天文月報, 91, pp. 382-384.
- Tully, R. B., and Fisher, J. R. (1977), “A new method of determining distances to galaxies”, *Astronomy and Astrophysics*, 54, pp. 661-673.
- van Gorkom, J. H., and Kotanyi, C. G. (1985), “Neutral hydrogen observations at the VLA”, *ESO Workshop on the Virgo Cluster of Galaxies*, (eds. O.-G. Richter and B. Binggeli), (Garching:ESO), pp. 61-66.
- White, S. D. M., Navarro, J. F., Evrard, A. E., and Frenk, C. S. (1993), “The baryon content of galaxy clusters: a challenge to cosmological orthodoxy”, *Nature*, 366, pp. 429-433.
- 山根宏大・小森真里奈・佐々木飛鳥・鯨島朋義・寒川正敏・橋畑隆幸・福市有希子・久保田貴洋・佐藤優衣・堂園ゆかり・中島宏和・安原俊介 (2004), “講演24 銀河団を用いた宇宙年齢の測定”, 日本天文学会2004年春季年会ジュニアセッション講演予稿集, pp. 54-55.
- 横尾武夫 (1993), “57 銀河団”. 横尾武夫編 新・宇宙を解く一現代天文学演習, 恒星社厚生閣, pp. 205-207.