

連載

天文ソフトの活用【3】

ヘルツシュプリング・ラッセル図の描き方

～マカリィと Open Office Org を使って～

西浦慎悟、柏木雄太（東京学芸大学・教育）

1. はじめに

ヘルツシュプリング・ラッセル (Hertzsprung-Russell=HR) 図は恒星の絶対等級とスペクトル型の関係を示した図である。20 世紀初めに、ヘルツシュプリング (Hertzsprung, E.) とラッセル (Russell, H. N.) によってそれぞれ独立に提唱されて以来、HR 図は天文学の最も基本的かつ重要な概念の一つとして、天文学の研究だけではなく、高等学校地学の教科書でも取り上げられ続けている。

例えば、昭和 48 年 4 月施行の高等学校学習指導要領の地学では、恒星に関して、スペクトル型や分光視差と併せて HR 図を扱うことと明記されている[1]。また先の地学 IB では、恒星の放射と進化について HR 図を中心に平易に扱うこととされ[2]、また現行の地学 I では、定性的な扱いにとどめるものの、恒星の HR 図を中心に扱うことで恒星の性質・進化を学習することが謳われている[3]。さらに近年では、パソコンやインターネットの発達・普及・低価格化に伴い、前述した内容に加えてコンピュータやインターネットなどの積極的活用も推奨されるようになってきた。

これを受けて、HR 図に関する演習・教材開発も、表で与えられた等級・色をグラフ用紙に単純にプロットするタイプのものから[例えば 4、5、6、7 および 8 で取り上げられた各文献]、今では天体のデジタル画像をパソコン上で分析することで HR 図を描くタイプのものが主流となっているようだ[9、10、11]。特に観測天文学に特有の fits 形式画像を高い自由度で解析できるソフトウェア「マカリィ

(Makali'i)」[12]の開発・公開以降は、これを用いて天体画像の分析を行うケースが多くなってきた。特に PAOFITS WG は、アーカイブ・データから入手した散開星団と球状星団の fits 画像と前述したマカリィ、そしてマクロ機能を用いた Microsoft Office Excel (以下、Excel) 用ワークシートと教材解説書が一体となった極めて完成度の高い教材セットをインターネット上で公開している[13]。これは、表計算ソフトを用いることで、マカリィから得られた測定値から容易に HR 図を描くことができる仕様となっている。

2. フリーソフトに対応したHR図描画教材

我々は、このような fits 画像とパソコンを用いた星団の HR 図描画教材に、さらに、以下のような特徴を実装することで、より自由度の高い教材とする開発研究を試みている。すなわち、i) 簡易な使用方法、ii) 高価な Excel ではなく、フリーソフトである Open Office Org Calc (以下、Calc) に対応したワークシートの導入、iii) 様々な金属量に対応した等時曲線データの同時描画、iv) 多くの星団サンプル、の 4 点を重視した教材開発である。

本教材においても、天体の画像分析にはマカリィの使用を前提とする。マカリィは天文教育目的であれば、誰でも自由にダウンロードして使用できるフリーソフトとして公開されている[14]。また Open Office Org は、オープンソース方式で開発が進められているオフィスソフトで、インターネットを通して、無償で入手が可能である[15、16]。

上記 i) ii) について、まず fits 画像から得

られた光の強度から、見かけ等級や色、絶対等級を求めるために必要な計算式を、予め表計算ソフト用のワークシート内に埋め込んでおく。そして、このワークシートの特定のセルに、光の強度の情報を入力することで、必要な計算が一度にできるような仕様にした（PAOFITS WG の教材も同様の仕様である）。ただし、マクロなど異なる表計算ソフト間で、互換性が低下するような機能は使用しなかった。これによって Excel など他の表計算ソフトへの対応を狙った。

iii) については、PAOFITS WG の教材に倣って、Bertelli 他（1994）[17]が発表した等時曲線を、ワークシートに埋め込んでおき、これをグラフ化するように設定した。ただし本教材では、幾つかの異なる金属量に対応した等時曲線も用意しておき、マカリィによる測定値と同時に表示することで、星団の年齢と金属量についてもほぼ定量的な議論を行えるようにした。

最後の iv) については、アーカイブ・データから収集した画像データや、我々が独自に取得した観測データを画像処理・等級較正することで対処する。現在我々は、NGC7788をはじめ幾つかの散開星団の *B* および *V* バンドの fits 画像を用意している。ここからはこの散開星団 NGC7788 の *B* および *V* バンドの fits 画像から HR 図を描くことを目標に話を続けよう。

なお、本教材はマカリィの version 1.4a、および Open Office Org 2.4.1 と 3.2.0、Excel 2002 SP3 での動作を確認している。

3. マカリィによる画像分析

ここでは、HR図を描くために必要な、マカリィの機能を簡単に紹介しつつ、恒星の測光方法を紹介する。

3.1 マカリィの起動と fits 画像の閲覧

マカリィは、インストール時にデスクトップに置かれるアイコンをダブル・左クリックすることで起動する。メニューから「ファイル」 「開く」、もしくはアイコンの「開く」でお好みの fits ファイルを指定することで、画像を閲覧することができる（図 1 の a）。図 1 は、マカリィで NGC7788 の *V* バンドの fits 画像を開いた状態である。

画像の拡大・縮小表示はメニュー中の「+」「-」のアイコンで行う（図 1 の b）。

画像の表示レベルは「自動調整」のボタン（図 1 の c）を左クリックすることで最適の表示をするはずだが、天体の画像によっては、表示レベルの最大値と最小値をスライドバーか数値で指定しなければならないこともあるだろう（図 1 の d）。また「対数」（図 1 の e）にチェックを入れて、このような表示レベルの調整を行うことで、明るい天体から暗い天体まで、適度なコントラストで表示させることも可能である。

HR 図を描く場合は、ある程度暗い恒星まで視認できる程度に調整すれば良いだろう。

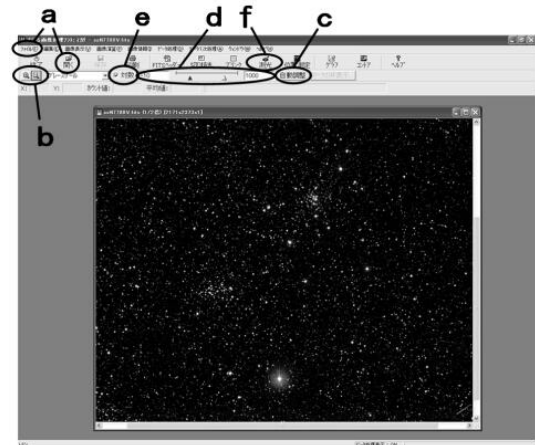


図 1 マカリィで fits 画像を開いた状態

3.2 測光の基本原理

今更ではあるが‘測光’とは天体の明るさを測定する作業である。こう言うと、fits 画像では明るさが数値で記録されているため、天体が写っている画素（ピクセルとも言う）の数値を足し合わせればいいのではないかとと思われるが、実はそうではない。画像の天体以外の場所には、一見何も存在しないようであるが、実際には様々な現象に起因する光が記録されている。つまり夜空は「真っ暗」ではないのだ！これらはまとめてスカイやスカイ成分、背景光成分などと呼ばれる（マカリィではSKYと表記されている）。従って、天体の明るさを測定するためには、天体が写っている画素の値を足し合わせるだけでなく、そこから一緒に写り込んでいるスカイの値を差し引く作業が必要となる。

図2を見て頂きたい。これは高さ方向に明るさを表現した天体画像の模式図である。平面全体がスカイ、中央の盛り上がり为天体を意味している。天体の明るさを測定することは、図中で濃いグレーで示した領域を測定することを意味する。しかし、実際には全体にスカイ（薄いグレー+白いドーナツ型部分）が混ざっているため、その明るさを天体周辺部に設けたドーナツ型領域を測定することで決め、これを差し引くことで天体の明るさを求めるのである。

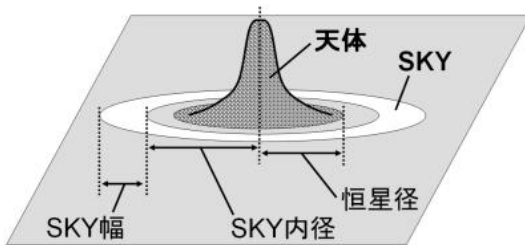


図2 天体画像の模式図

3.3 マカリィによる測光作業の基礎

かなり面倒に聞こえるが、勿論、マカリィにはこれを簡単に行うための機能が実装されている。測光したいfits画像を開いた状態で、メニューの「測光」アイコン（図1のf）を左クリック欲しい。すると、小さなウィンドウが開いて、開口測光か矩形測光か、と質問してくる。ここでは恒星の普通の測光なので「開口測光」を選択する。すると、図3のような測光用のウィンドウが開く。

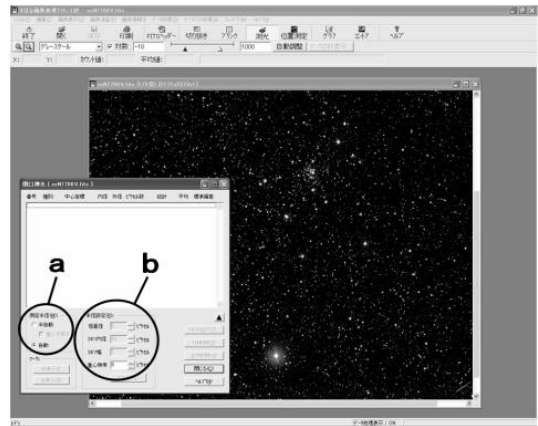


図3 測光用のウィンドウが開いた状態

続いて測光用のウィンドウの「測光半径」（図3のa）で「半自動」か「自動」を選ぶ。「自動」を選んだ場合は「重心検索」を設定する。ここは初期値のままでも良いだろう。

「半自動」を選んだ場合は「半径設定」（図3のb）の各設定値を入力する。半径設定で入力する恒星径、SKY内径、SKY幅は図2中に記したように、どこまで为天体と見なすか？どこにSKY領域を設定するか？に関わる値である。恒星径を小さくし過ぎると、天体からの光の信号を数え落とすため、天体の明るさは、本来よりも暗くなってしまふ。またドーナツ型領域に他の天体が混入すると、SKYを明るめに測定し、その結果天体の明るさは暗く出力されてしまふ。

少し専門的なことだが、測光対象が恒星で

あれば、恒星径にはシーイング・サイズ（星像の半値幅の値）の 2.5 から 3.5 倍程度の値を設定するのが適当と考えられている。

これらを設定し終わったら、後はマウス・カーソルを測光したい恒星の上に持って行って左クリックするだけである。先程の原理に従って測定された恒星からの光の強度をはじめ、様々な情報が、測光用ウィンドウ内に次々に表示される。同時に天体画像の上に、実際に恒星径、SKY 内径、SKY 幅に相当する円形のマークが表示され、どの天体の測光が行われたかを確認することができる。図 4 は測光作業中の様子である。

もしも測光すべき天体を間違えた場合は、測光用ウィンドウ中の「一件削除」(図 4 の a) で最新の一つの結果を削除し、測光をやり直すことができる。

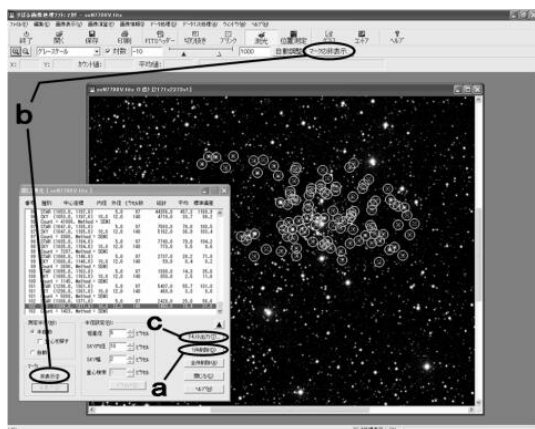


図 4 測光作業中の様子

また測光された天体の数が増えてくると、円形マークが邪魔になってくる。この時には「マーク」欄の「非表示」アイコン(図 4 の b)を左クリックすると、一時的にマークを非表示にしてくれるため、天体画像が見やすくなる。もう一度左クリックすれば、再度、円形のマークは表示される。

そして何よりも嬉しいのが、「テキスト出力」アイコン(図 4 の c)を左クリックすることで、現在表示されている全ての測光結果を、テキスト・ファイルに出力してくれることだ(出力ファイルの拡張子は「CSV」となる、以下このテキスト・ファイルを CSV ファイルと呼ぶ)。この CSV ファイルは、テキストとはいえ、Excel で容易に開いて、表計算処理を施すことができる。

3.4 HR 図描画のための測光作業

さて、NGC7788 の HR 図の描画では、異なる *B* および *V* バンドの 2 枚の画像間で、同じ恒星を測光しなければならない。このような場合は、二つのバンドの fits 画像を同時に開き、さらにマカリイのメニューから「ウィンドウ」「左右に並べて表示」を選べば良い、図 5 のように二つの画像それぞれに対して測光用のウィンドウを開くことができるため、両方の画像を見比べながら、同じ星に対する測光作業が簡単にできる。勿論、測光結果は別々の CSV ファイルに保存できる。

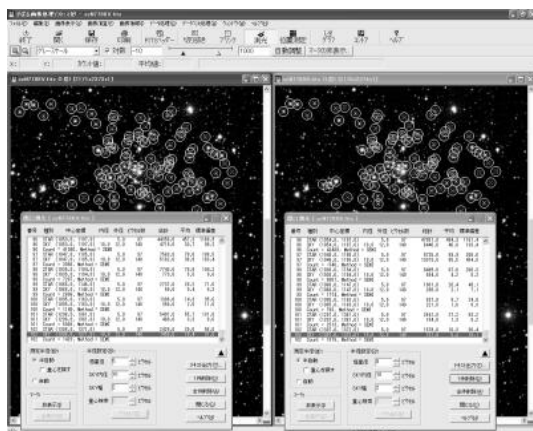


図 5 二つの画像の測光作業の様子

またこの時には、測光する恒星の順番を、二つの画像間で同じになるようにしておけば、次節で述べるように、ワークシート間での、単純なコピー&ペーストで簡単に HR 図を描くことができる。また、見やすい HR 図を描くためには、明るい恒星から暗い恒星までをまんべんなく測光しなければならないことに注意されたい。

4. Open Office Org CalcによるHR図の描画

本節では、表計算ソフトを用いて、CSV ファイルから HR 図を描く方法を紹介する。

4.1 HR 図を描くための天文基礎知識

ここで、少し専門的な話をしておこう。面倒に感じる方は、本節の最後のパラグラフまでスキップして頂いて構わない。

前節までで、我々はマカリィによって B および V バンドの散開星団 NGC7788 の恒星の明るさを測定した。ところが、その時に保存した CSV ファイルの中を覗くと、恒星の明るさは等級ではない単なる数値で記録されている。この数値は、恒星の明るさに比例しているため、この値が具体的に何等級に相当するかが分かれば、恒星の等級は容易に計算できる。波長帯 での CSV ファイル中の天体の明るさを C 、この天体の本来の等級を m (mag) とすると、定数 $m_{,0}(\text{mag})$ を用いて、

$$m = m_{,0} - 2.5 \log C \quad (1)$$

となる。対数は常用対数で、 $m_{,0}(\text{mag})$ は等級のゼロ点またはゼロ点等級と呼ばれる値であり、観測場所・装置、露光時間、観測日時、気象条件などで異なる値になる。第 2 節末で出てきた「等級較正」とは、この等級のゼロ点を求める（複雑で面倒な）作業に他ならない。そこで、まず NGC7788 の B および V バンド画像に対する等級のゼロ点を得る必要があるが、等級較正の方法については、ここでは省略する。なお、我々の NGC7788 の fits

画像に対しては 24.52mag (B)、24.00mag (V) という値が得られた。

続いて見かけ等級 m (mag) から絶対等級 M (mag) を得るためには、天体までの距離 d (pc) と星間吸収 $A_i(\text{mag})$ の値が必要となり、これらを用いて、

$$M = m + 5 - 5 \log d - A \quad (2)$$

と表される。

また色とは、異なる二つの波長帯（ここでは B 、 V ）での等級差なので、結局式 (2) より、色 $B - V$ は、

$$\begin{aligned} B - V &= M_B - M_V \\ &= (m_B - m_V) - (A_B - A_V) \end{aligned} \quad (3)$$

となる。星間吸収は短波長側でより大きくなるため、大抵のケースで天体は、本来の色よりも $A_B - A_V$ だけ赤く観測されることになる。この量は色超過と呼ばれ、 $E(B - V)$ で表され、

$$E(B - V) = A_B - A_V \quad (4)$$

となる。

ここまですべてを簡単にまとめると、散開星団 NGC7788 の B および V バンドの fits 画像からその HR 図を描くためには、それぞれの fits 画像に対する等級のゼロ点と星間吸収量、そして NGC7788 までの距離、が必要となる。ただし、それぞれの波長帯での星間吸収が分からなくても、色超過の値が分かれば、教材としては十分に機能する。なお本教材では、NGC7788 までの距離として 2374pc、色超過として 0.48mag を用いた[18]。

4.2 表計算ソフト用ワークシート

では早速、HR 図の描画を始めよう。図 6 は我々が作成した HR 図作成用のワークシートを Calc で開いた画面である。

このワークシートに対して、まず図 6 の a の部分に、前述した NGC7788 までの「距離」、「 B バンド画像の等級のゼロ点」、「 V バンド画像の等級のゼロ点」、そして「色超過 $E(B - V)$ 」の値を入力する

図6のb、cはそれぞれマカリィで測定したBバンドおよびVバンドの測光結果の入力部である。図6のd、e部には式(1)が埋め込んであり、測光結果が入力されると、それぞれにBおよびVバンドの見かけ等級が出力される。またf部には式(2)、g部には式(3)、(4)が埋め込んであり、それぞれVバンドでの絶対等級と色 $B-V$ が出力される。つまりここでやるべきことは、a部に数個のパラメータを入力することと、b、c部に測光結果をペーストするだけである。

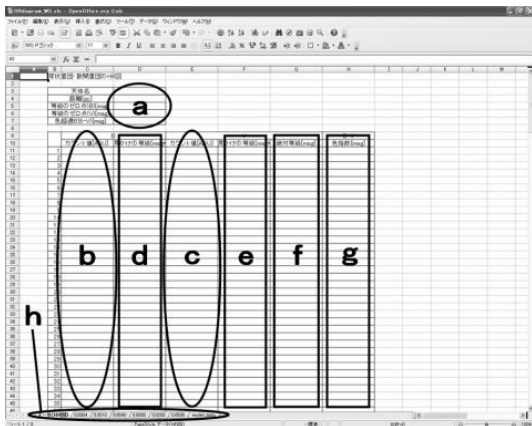


図6 HR図作成用ワークシートの測光データ入力部

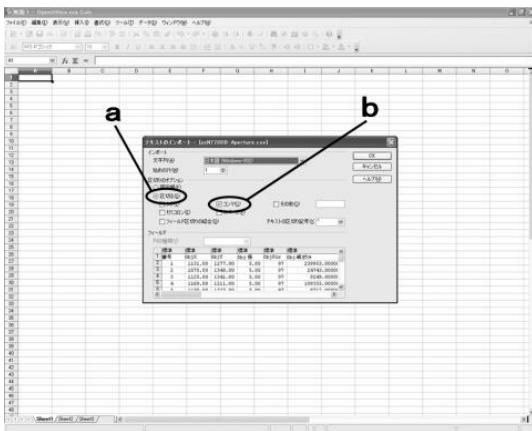


図7 CalcでCSVファイルを開こうとした時では次に、図6に入力すべき測光結果を

CSVファイルからコピーして来ることにしよう。まずCalcでCSVファイルを開く。ただし、Calcは初期状態ではCSVファイルに対応していないため、図7のような「テキストのインポート」というウィンドウが開かれる。この場合、「区切りのオプション」で「区切る」と「コンマ」にチェックを入れて「OK」を左クリックすればよい(図7のa、b)。すると図8のようにCSVファイルが開かれる。

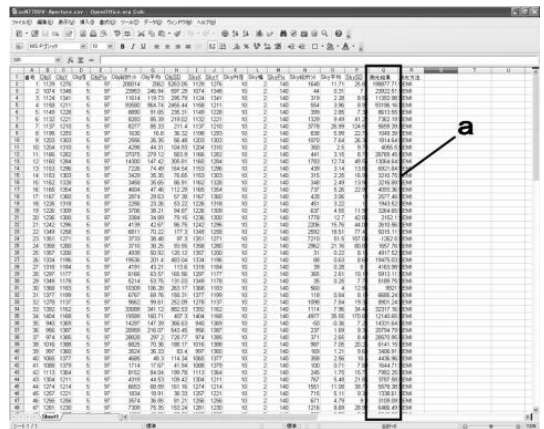


図8 CalcでCSVファイルを開いた状態

ここには、マカリィで行った恒星の測光作業の全ての情報が表示されている。その中で、我々のHR図作成に必要なデータは、右端の方のたった一列「測光結果」の部分(図8のa)だけである(前節のCに相当する値である)。この一列を丸ごとコピーして、Bバンドの測光結果であれば図6のb部、Vバンドであればc部にペーストする。これで全ての作業は完了であり、即座に図6のd、e、f、g部に計算結果が表示される。

図6に示したHR図作成用のワークシートには、複数のシートを用意した(図6のh)。最初のシートは前述したようにデータを入力するためのものであり、最後のシートには等時曲線のデータを入力してある。そして他の

シートには、図 9、10 のように、これらのシートからデータを読み込んで描かれた HR 図と、異なる金属量 ($z=0.0004, 0.0010, 0.0040, 0.0080, 0.0200, 0.0500$) に対する等時曲線が表示されている。つまり予め HR 図と等時曲線そのものを埋め込んであるのだ。

なお、ここで述べたようなワークシートの作成は、表計算ソフトウェアに多少でも慣れていれば、誰にでも比較的簡単に作成できるだろう。

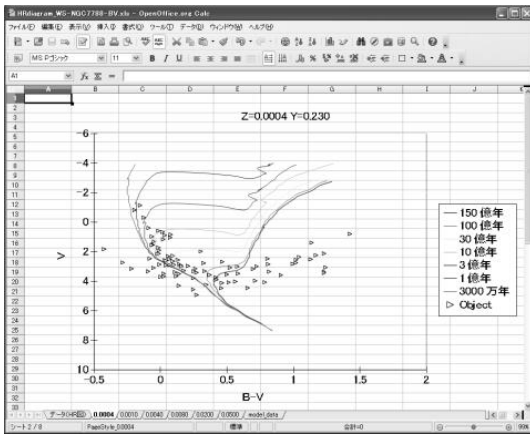


図 9 NGC7788 の HR 図と金属量 $z=0.0004$ の等時曲線。星団年齢は、0.3、1、3、10、30、100、150 億年

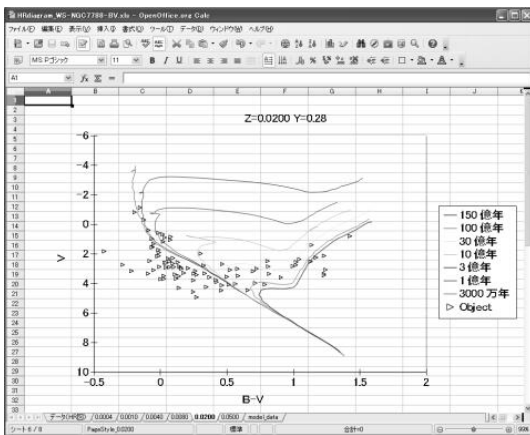


図 10 金属量 $z=0.02$ の場合の等時曲線

5. 教育実践の結果から

2008 年 12 月に本教材を用いた教育実践を行った。対象は東京学芸大学教育学部自然環境科学専攻 17 名(1 年生 11 名、2 年生以上 6 名)である。大学生 2 名 1 組に対してパソコン 1 台を配し、各組に一つの星団の B および V バンド画像を与えた。事前アンケートでは、17 名中 15 名が天文に対する興味を「普通」以下(5 段階で 3 以下)と回答しており、また 17 名中 10 名がパーソナル・コンピュータを用いた作業を「苦手」「やや苦手」(5 段階で 1 および 2)と回答していた。これらからは、今回の大学生達がパソコンを用いた天文学の実験や演習に対して、予備知識が皆無であることが窺える。なお実際の測光作業に入る前に 30 分ほど基礎事項(星団と HR 図、等級、色指数について)の説明を行った。また、この時には 3.4 で解説したような、二つの画像を同時に開いて見比べながら測光するという方法を提示しなかったため、大学生達は星団の画像をプリントアウトしたものを片手に、測光が済んだ恒星にペンでマークを書き込む、という効率の悪い方法で作業を進めることになった。

それでも早い組は、作業開始 20 分程度で 100 個の恒星を測光し終え、HR 図の描画に 15 分、等時曲線との比較・考察に 20 分と、ほぼ 1 時間で全工程を完了している。最終的に全ての組が、何らかの考察を得るまでに約 2 時間を要した。これから、本教材は 2 限連続で行う内容として丁度良いことが伺える。また本実践への出席者には、恒星の進化などに関するレポート提出を課した。

事後アンケートは 17 名中 12 名からしか回収できなかったが、半分の 6 名が「天文学への興味が増した」「やや増した」(5 段階で 5、4)と回答しており、大学生の自己評価ではあるが、12 名全員が恒星の進化についての理解が「普通」以上にできた(5 段階で 3 以上)と回答している。本教材は、興味の喚起に加

えて、少なくとも短期的には天文学の学習に関しても有効であると言えよう。ただし、長期的な学習内容定着の効果については、授業の構成上未確認である。また、詳細な事前授業を望む回答も数件見られ、授業プログラムとしてはまだまだ改善の余地がある。

最後に本教材作成に関して、度々インスピレーションを与えてくれた PAOFITS WG と、観測を支えてくれた東京大学木曾観測所の皆様、そして本教材作成のきっかけを頂いた東京学芸大学の土橋一仁氏に心から感謝したい。

文 献

- [1] 文部省(1970)『高等学校学習指導要領(昭和45年10月)』。
- [2] 文部省(1989)『高等学校学習指導要領(平成元年3月)』。
- [3] 文部省(1999)『高等学校学習指導要領(平成11年3月)』。
- [4] 横尾武夫編(1988)『宇宙を解く-現代天文学演習』, 恒星社, pp.94-103.
- [5] 横尾武夫編(1993)『新・宇宙を解く-現代天文学演習』, 恒星社, pp.103-118.
- [6] 宇留野勝敏(1993)「高校での天文観察・実習の簡略化」, 第7回 天文教育研究会, pp.61-64.
- [7] 戒崎俊一(1995)『ゼミナール宇宙科学』, 東京大学出版会, pp.29-52.
- [8] 吉岡一男, 岡崎彰(1989)「HR図による指導について」, 第3回 天文教育研究会, pp.184-188.
- [9] 田中義洋, 縣秀彦, 小池邦昭(2002)「中学校における恒星の多様性に関する学習の提案-ハッブル宇宙望遠鏡撮影画像を用いたHR図作成実習の評価-」, 地学教育, **55**: 135.
- [10] 富田晃彦他(2002)「天体までの距離と年齢の推定」, 平成14年度サイエンス・パートナーシップ・プログラム集録. 40p.
- [11] 山田隆文(2003)「高校地学における観測実習を軸とした授業展開」, 第17回 天文教育研究会, pp.46-49.
- [12] Horaguchi, T., Furusho, R., and Agata, H. (2006) 'FITS Image Analysis Software for Education: Makali'i', *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV, ASP Conf. Ser.*, **351**: 544.
- [13] PAOFITS WG 開発教材セット, <http://paofits.nao.ac.jp/Materials/>
- [14] マカリィ配布サイト, <http://makalii.mtk.nao.ac.jp/>
- [15] Open Office Org 公式サイト(英語), <http://www.openoffice.org/>
- [16] Open Office Org 日本語プロジェクト, <http://ja.openoffice.org/>
- [17] Bertelli, G., Bressan, A. Chiosi, C., Fagotto, F. & Nasi, E. (1994) 'Theoretical isochrones from models with new radiative opacities', *A&AS*, **106**: 275.
- [18] Kharchenko. N. V., Piskunov. A. E., Roeser. S., Schilbach. E., Scholz. R. -D. (2005) 'Astrophysical parameters of Galactic open clusters', *A&A*, **438**: 1163.