

洛東高校の2013年の観測天文学実習: 激変星 EM Cyg の同時分光測光観測

西村昌能¹, 實本正樹¹, 野上大作², 松本桂³, 今田明⁴, 大島誠人², 中田智香子², 小林弘³,
増本和成³, 酒井大輔³, 古川寿実³, 福嶋大樹³, 松浦美波³, 新井彰⁵

- 1) 京都府立洛東高等学校
- 2) 京都大学
- 3) 大阪教育大学
- 4) 国立天文台岡山天体物理観測所
- 5) 兵庫県立大学 西はりま天文台

The Practical Observational Astronomy of Rakutou High School in 2013: Simultaneous Spectroscopic and Photometric Observations of a Cataclysmic Variable Star EM Cyg

Masayoshi NISHIMURA¹, Masaki JITSUMOTO¹, Daisaku NOGAMI²,
Katsura MATSUMOTO³, Akira IMADA⁴, Tomohito OHSHIMA², Chikako NAKATA²,
Hiroshi KOBAYASHI³, Kazunari MASUMOTO³, Daisuke SAKAI³, Hisami HURUKAWA³,
Daiki FUKUSHIMA³, Minami MATSUURA³, and Akira ARAI⁵

- 1) *Rakutou High School, Yamashina-Ku, Kyoto 607-8017, Japan*
- 2) *Kyoto University*
- 3) *Osaka kyoiku University*
- 4) *Okayama Astrophysical Observatory, National Astronomical Observatory Japan*
- 5) *Nishi-Harima Astronomical Observatory, University of Hyogo*

E-mail: aaagq805@kcat.zaq.ne.jp

(Received 2014 December 26)

概要

我々は2013年5月24日と25日の2夜、激変星 EM Cyg をターゲットにして京都府立洛東高等学校自然科学部の観測実習を行った。分光観測は西はりま天文台の2メートルなゆた望遠鏡に同架された可視分光器 MALLS によって行い、波長域 4500Å–7000Å、波長分解能 $R \sim 1000$ の低分散モードを利用した。測光観測は、60cm 望遠鏡 (R_c バンド)、および大阪教育大学 51cm 望遠鏡 (I_c バンド) を使用して行った。60cm 望遠鏡での観測は CCD カメラの不調のため、利用可能なデータを得ることはできなかった。大阪教育大学 51cm 望遠鏡の測光データから光度曲線を描き、京都大学のモデル計算コードを用いて EM Cyg の物理量を推定した。また、可視スペクトルの $H\alpha$ 輝線の半値幅からドップラー速度を 1400km s^{-1} と求めることができたほか、各軌道位相における $H\alpha$ 輝線の形状の比較を試みた。本稿では、本校で行っている生徒観測実習の流れを示す。

Abstract

We performed observations of EM Cyg for 2 night from 2013 May 24 to 25 as the practical trainings of observational astronomy for students of the Natural-Science Club of Rakutou High School. Our spectroscopic observations were carried out using the spectrograph MALLS mounted on the 2m Nayuta telescope at Nishi-Harima Astronomical Observatory. We use a low-resolution mode; the wavelength range and the resolution are $4500\text{\AA} - 7000\text{\AA}$ and $R \sim 1000$, respectively. For photometric observations, we planed two-band photometry using the 60cm telescope (R_c -band) at Nishi-Harima Astronomical Observatory and the 51cm telescope (I_c -band) at Osaka Kyoiku University. We were not able to obtain available data by the 60cm telescope, because the CCD camera of the telescope had troubles during our observations. We obtained light curves of EM Cyg from the data by the 51cm telescope, and we estimate some physical parameters of the object. Furthermore, we determined that the doppler velocity of $H\alpha$ is about 1400 km s^{-1} from the FWHM. We try to compare the difference of $H\alpha$ profiles for each orbital phase. In this paper, we show the procedure for our practical observations for students of our school.

Key words: practical observation – high school – cataclysmic variable star – EM Cyg

1. はじめに

洛東高校では、9年前から激変星の観測実習を実施している。これは12年前から始めた「花山天文台太陽物理観測実習」の経験を元にしたものである。観測実習は、生徒達が自分たちで観測を行い、そのデータを自らの手で処理・解析し、それを元に考察を行い、報告するなど、様々な体験をする中で、探求する態度を養い、科学への関心と興味を高めることを目的としている。

2. 2013年度の実習

2-1. 概要

我々は兵庫県立大学西はりま天文台の共同観測研究に応募し、2013年5月24日と25日の2夜に渡り、なゆた望遠鏡と60cm望遠鏡の観測時間を得た(天文台の共同研究者は新井)。分光観測においては、なゆた望遠鏡と可視分光器MALLSを使用し、指導を受けながら生徒ら自らが撮影し、観測ログの記録を行った。測光観測においては、西はりま天文台の60cm望遠鏡(R_c バンド)と大阪教育大学51cm望遠鏡(I_c バンド)による、2バンド同時観測を計画した。また、西はりま天文台60cm望遠鏡では生徒が実際に観測作業を行った。西はりま天文台での観測時には、観測指導補助員として大阪教育大学の学生2名を起用した。大阪教育大学51cm望遠鏡では、松本桂と大阪教育大学の学生に観測を依頼した。今年度の観測実習に参加した生徒は、3年生7名、2年生1名、1年生2名の合計10名である。

2-2. 研究課題の検討

今回は、撮像による測光観測と分光観測の両方を実施するにあたり、共著者らと議論を行い、次のように実習の目標を定めた。まず、測光観測を行い、光度曲線を得る。観測で得た光度曲線とモデル計算で計算したモデ

ル光度曲線の比較によって、激変星の物理量 (降着円盤、白色矮星、ホットスポット、伴星の位置関係) を調べる。合わせて分光観測を実施し、 $H\alpha$ 輝線のドップラー幅や視線速度の変化を調べることを目的とする。良質なデータを得ることができれば、共著者の研究論文に含められる可能性もあると考えた。研究指導にあたり、共著者の分担は次の通りである。西はりま天文台での観測は新井彰、モデル計算実習は野上大作、測光観測は松本桂、激変星の理解のための講義は国立天文台岡山天体物理観測所の今田明である。

2-3. 天体の選定

対象の天体は、この時期に明るく、かつ蝕のある激変星である EM Cyg を選んだ。天体が暗いと分光観測ができないため、明るさの検討は重要である。また、蝕を持つため天体は特徴的な極小を示す光度曲線を示すことが期待でき、モデル光度曲線との比較により天体の物理量の推定が比較的容易に行える。

3. EM Cyg の観測・解析作業

3-1. EM Cyg について

EM Cyg は Z Cam 型の激変星のひとつであり、伴星の公転運動による食 (周期は約 7 時間) が見られるのが特徴である。EM Cyg の物理量 (Godon et al., 2009) を Table 1 に示す。蝕が起こるものの傾斜角が少し小さいため、白色矮星本体が伴星に隠されることがない。

また 25 日程度という短い周期 (Brady and Herczeg, 1977) で矮新星アウトバーストを起こすことから、伴星からの質量輸送率が大きいと考えられている。分光観測によって、円盤起源の輝線、伴星起源の分子線、白色矮星起源の吸収線 (紫外) が見られると報告されている (Godon et al., 2009)。なお、EM Cyg には第三天体 (K2V – K5V) があることが分かっているが (North et al., 2000)、本研究では我々の観測実習の目的には影響はないと考え考慮していない。

Table 1. EM Cyg のパラメータ (Godon et al., 2009)

食の周期	約 7 時間 (= 0.29090912 day)
軌道傾斜角	$67 \pm 2^\circ$
白色矮星の質量	$1 M_\odot$
伴星の質量	$0.77 M_\odot$
伴星のスペクトル型	K3V
距離	200 – 500 pc
極小等級	$V = 14.4$
極大等級	$V = 12.5$

3-2. 測光観測

測光観測は 2 色測光を試み、西はりま天文台 60cm 望遠鏡で R_c バンド、大阪教育大学 51 cm 望遠鏡で I_c バンドによる観測を行う計画を立てた。しかし、60cm 望遠鏡の CCD カメラ が不調であったために R_c バンドについては十分なデータが得られなかった。一方、大阪教育大学では、二夜とも観測データが得られた。大阪教

育大学の測光観測日時は、2013年5月24日22時51分～26時30分、25日22時53分～26時29分であり、いずれも露出時間は30秒の連続撮影を行った。

3-3. 分光観測

西はりま天文台の2mなゆた望遠鏡と分光器MALLS(Ozaki et al, 2005)を利用し、時間分解能40分間程度の分光観測を行った。グレーティングは300本/mmを使った低分散モード($R \sim 1000$; Arai et al., 2012)であり、観測波長域は $4500\text{\AA} - 7000\text{\AA}$ である。観測日時は、2013年5月24日21時45分～28時34分、25日21時43分～27時37分である。観測は300秒露出のデータを取得し、6枚重ね合わせたものを約40分おきを取得することができた。5月24日に11個、5月25日に9個のスペクトルデータを得ることができた。5月25日は、雲が多かったためS/N比が悪く利用できなかった。Figure 1の番号は、その軌道周期のときに分光観測がなされたことを示す。

3-4. 解析方法

国立天文台提供の「マカリ」(<http://makalii.mtk.nao.ac.jp/index.html.ja>)を利用して測光と分光両方のデータの一次処理を行った。測光観測では、マカリの測光機能を利用して4つの比較星とEM Cygの明るさを測定し等級に変換した。Figure 1は、2夜の観測から得られた1周期分の光度曲線である。軌道周期が約7時間であるため、連続2夜の観測によってほぼ1周期分の光度曲線が得られた。分光観測の解析では一次処理の後、美星天文台から提供されている「BeSpec 分光データ解析ソフト」(<http://www.bao.go.jp/soft/bespec/index.html>)を用いて一次元化処理と波長校正を行った。観測後のデータ処理は、すべて生徒による手作業で行った。土日を含めた部活時間を利用した腕力技によるものである。

3-5. モデル計算

我々は、大阪教育大学51cm望遠鏡の測光データから得た光度曲線の形状、特に蝕の形、蝕前後の増光部分、軌道位相0.5の減光部分に注目し、これらの頭頂をモデル光度曲線と比較した。モデル計算には、京都大学宇宙物理学教室のIDLで書かれた計算コード¹の提供を受けて利用した。具体的には、降着円盤とホットスポットの明るさなどのパラメータを、観測で得られた光度曲線とモデル計算コードで得られる光度曲線とを比較し、観測を再現するパラメータを求めた。Figure 2は、京都大学宇宙物理学教室で行ったモデル計算で得られた理論上の光度曲線である。観測した光度曲線(Figure 1)によく合うモデル光度曲線を、肉眼で比較してパラメータを変えながら探した。この作業は生徒4名が行い、合計200通りのモデルについてパラメータを変え最適なモデル光度曲線を搜索した。このモデルフィッティングにより得られた各パラメータはTable 2にまとめている。利用したプログラムの仕様により、軌道傾斜角以外の値は絶対値ではなく、主星の光度を200、主星と伴星間の距離を150とした場合の比率として得られる。

解析の結果、軌道傾斜角は文献値(Godon et al., 2009)と一致した。白色矮星の直径は地球と同程度かやや大きいぐらいの大きさであるため、推定されたパラメータの値からそれぞれの半径や距離を推定することができる。白色矮星の半径 = 3(Table 2)を地球半径(6.5×10^3 km)とほぼ同じと仮定すると、各半径や距離をkmで表すことができる(Table 2)。

¹ 京都大学大学院理学研究科花山天文台及び京都大学学部生によって開発されたもの。詳細については野上(nogami@kusastro.kyoto-u.ac.jp)までお問い合わせ下さい。

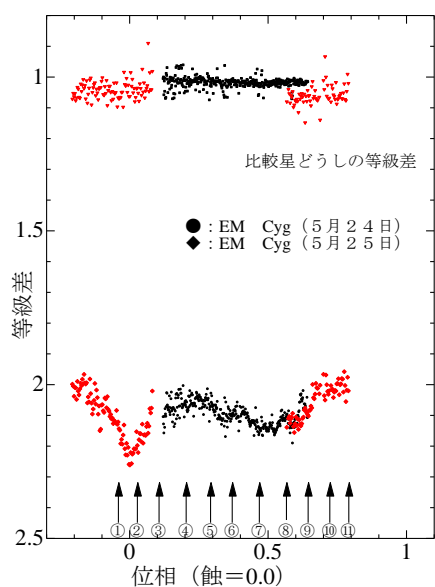


Fig. 1. EM Cyg の光度曲線 (5月24日と25日の観測から作成。図中、上部のデータは、比較星どうしの等級差である。降着円盤が伴星に隠されてできる蝕による極小を軌道位相の原点 (0) としている。軌道位相が0.5のとき伴星が円盤に隠されている。

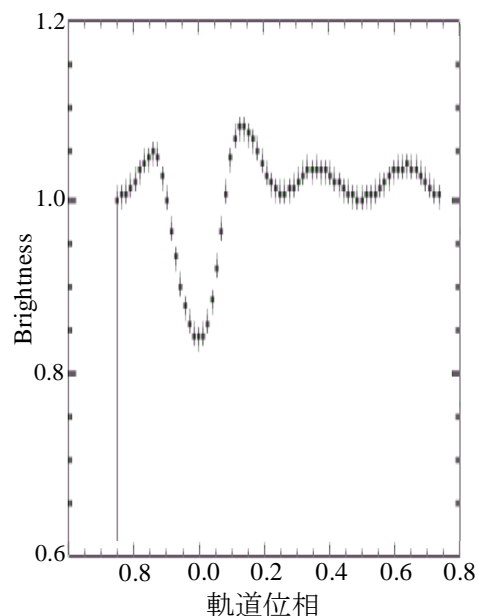


Fig. 2. 京都大学宇宙物理学教室で行ったモデル計算で得られた理論上の光度曲線。横軸は軌道位相、縦軸は相対的な明るさを示す。

Table 2. モデル計算の結果

パラメータ	初期値	推定値 (比)	推定値 (実スケール)
軌道傾斜角	75°	67°	67°
主星の明るさ	200	200	—
主星の半径	3	3	6.5×10^3 km
伴星の明るさ	5	45	—
伴星の半径	70	70	1.5×10^5 km
降着円盤の明るさ	100	100	—
降着円盤の半径	35	57	1.2×10^5 km
ホットスポットの明るさ	250	250	—
ホットスポットの半径	5	12	2.6×10^4 km
主星と伴星の距離	150	150	3.5×10^5 km

3-6. 分光観測の結果と考察、生徒の理解

得られたスペクトルのうち、 $H\alpha$ 線に注目して周期ごとに並べたものを Figure 3 に示す。分解能は低いものの、きれいなスペクトルが時系列で得られ、輝線形状の変化を検出できた。生徒達はプレゼンテーションでこの図を見せて「 $H\alpha$ 輝線のブルーシフト成分の位相変化を見るときれいな変化が見られた。降着円盤が隠されていくこと、ホットスポットが出現し赤方偏移すること、降着円盤全体が見えること、ホットスポットが現れ青方偏移したためと考える。」と述べた。しかし、「蝕のときに見える $H\alpha$ のダブルピークは、どうしてできるのか?」という校内報告会における柴田一成花山天文台台長の質問に対する生徒(1年生)の答えに、ドップラーシフトがわかっていないのではないかと不安になった。そこで、2年生、1年生の発表者を次の日に呼び出し確認したところ、やはり知識不足が露呈した。生徒の答えは、「 $H\alpha$ 輝線は、降着円盤から出ている。蝕のとき、降着円盤の正面部分は、伴星に隠されて光がこない。隠されていない左右(!)の部分の光が見えてダブルピークになる」というものだった。「あれ?ドップラーシフトは?」と、あれだけ説明したのに残念な思いがした。太陽の分光観測では、ドップラーシフトが理解できていたのに、恒星では無理なのだろうか。太陽と恒星の一番の違いは観測対象が面で見えているのか、点光源であるのかである。太陽面画像のこの部分の動きといえば理解できるが、点にしか見えない天体から光を分光し、その振る舞いを理解するのは難しいのだろう。

Figure 4 は、輝線の半値幅をドップラー速度で示したものである。1000 km s⁻¹ 程度の速度が確認できた。Figure 5 に、 $H\alpha$ 輝線のダブルピークにみられた短波長側成分の視線速度の周期的変化を示す。この視線速度は、輝線ピークの波長と半値幅の測定時に得られた輝線の中心波長の差から求めた。

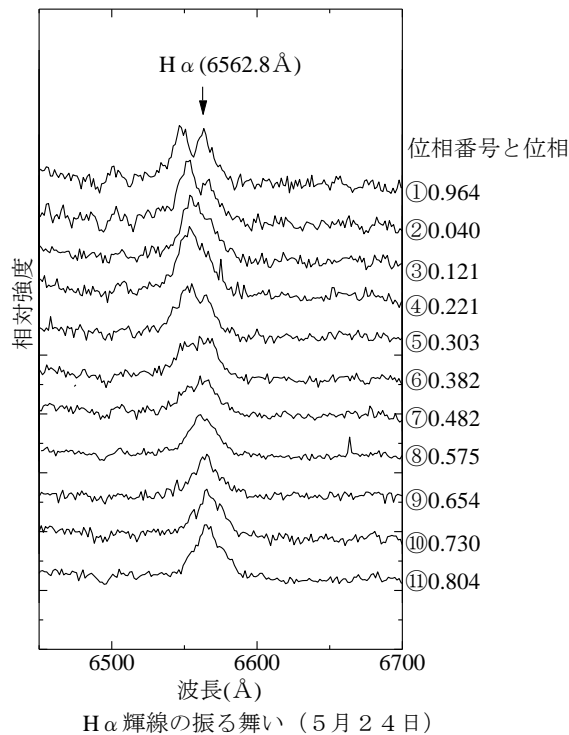


Fig. 3. 周期ごとに並べた $H\alpha$ 輝線スペクトルの様子。スペクトルの右側に付した番号と数字は Figure 1 に対応しており、位相番号とそのときの軌道位相を表している。

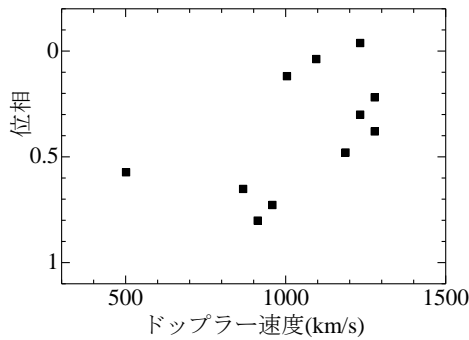


Fig. 4. H α 輝線のドップラー幅と軌道位相の関係

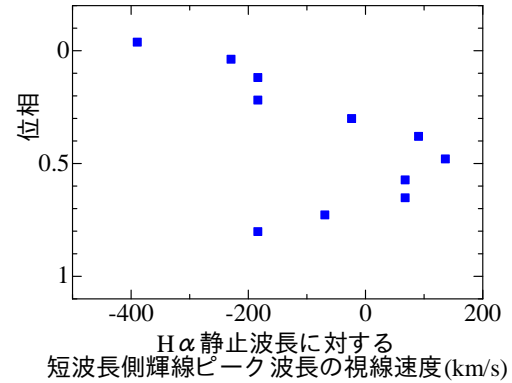


Fig. 5. H α 輝線のダブルピークの短波長成分が示す視線速度の周期的変化

4. 生徒の得た結果と感想

生徒たちが今回の観測実習により求めた結果をまとめると次のようになる。

- (i) 軌道傾斜角、伴星の明るさ、降着円盤の半径、ホットスポットの半径を見積もることができた (Table 2)。
- (ii) 降着円盤起源の H α 輝線の線幅から降着円盤のドップラー速度 (半値幅) がおよそ $900 \text{ km s}^{-1} - 1300 \text{ km s}^{-1}$ と得られた。軌道傾斜角が 67° なので、降着円盤の実際の回転速度はこの値を $\sin(67^\circ)$ で割り $1000 \text{ km s}^{-1} - 1400 \text{ km s}^{-1}$ となった。
- (iii) H α 輝線のピーク波長と H α 輝線静止波長の比較から、伴星とホットスポットの関係について言及した。

また、感想については、「今回初めて同時観測をしましたが、解析をすればこんなにも結果が得られるのだと感動しました。」と書いている。実際のところ、長丁場の実習だったので、辛いときもあったと思う。

5. 実習の流れ

まとめに代えて私たちが数年以上にわたって行っている実習の流れを紹介しておく。今後、西はりま天文台を利用した高校生の共同観測実習が実施される時に参考にさせていただきたい。

- (i) 対象星の選定は顧問、指導者が決定した。しかし生徒は自分の星 (つまり、自らが率先して選んだ研究対象) として認識している。それは、研究用の大きな望遠鏡を利用する機会を得て、できるだけ自分達で観測・解析作業を行わせたことが観測実習への強い動機付けになったためだろう。このような自前のデータをオーセンティックデータという。オーセンティックデータの取得は、やる気が起こり、データに愛情を感じるようである。熱心な生徒がいる場合、3年間同じ星を追うことができる。そのため、長期的な研究内容を選択できたり、データの蓄積によってより踏み込んだ解析と考察を行える可能性もある。
- (ii) 一次処理は生徒自らが行う。ここでもデータに深く触れる必要があるため、観測データに愛着を持つ良い機会であると思われる。
- (iii) 処理をした測光観測データから光度曲線作成には「Microsoft Excel」、「Sma4」という Windows 用の市販のソフトウェアを利用した。

(iv) 観測で得た光度曲線に合うようなモデル光度曲線を、京都大学のモデルコードを用いて行った。生徒達が何人も大学に押し掛け、かなりの数(今回は 200 個)のモデル光度曲線を作り、「肉眼作業」によってベストフィットモデルを探し出した。

上記の (i) から (iv) は、観測データの処理が生徒らの手作業であることを示している。このような手作業から、作業手順やデータ解析の原理を修得していけると考えている。

(v) 分光データ解析は、視線速度のみを取り扱うことにした。ドップラーシフトについては花山天文台で行っている太陽の観測の際には理解できていたが、点光源である激変星については理解できておらず、これからの課題である。

(vi) これらの実習成果は、校内発表会、日本天文学会のジュニアセッションはじめ、いろいろな発表会で報告していくことを義務化している(上籠 他, 2014)。レポート、ポスター発表、口頭発表などの資料作成を生徒達が行い、成果発表をしている。

(vii) このような作業を観測から 1 年かけて行う。息の長い探求活動として、性急に答えを求めない。また、上級生が下級生の世話をしながらの共同研究としている。

これらの手順と方法は、京都大学大学院理学研究科附属花山天文台で洛東高校がお世話になっている太陽の高分散分光観測実習でも同様に実施している(例 西村 他, 2011)。

今回実施した生徒実習は独立行政法人科学技術振興機構中高生の科学部活動振興事業「多波長測光・分光観測を用いた激変星降着円盤の解明」から援助をいただいて実施した。記して感謝したい。

参考文献

Arai, A., Takagi, Y., Honda S., Sakamoto, M., Narusawa, S. & Itoh, Y., 2012, Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs. 22, 34

Brady, R.A. and Herczeg, T.J., 1977 PASP, 89, 71

Godon, P., Sion, E.M., Barrett, P. E., & Linnell, A.P., 2009, ApJ,699,1229

North, R.C., Marsh, T.R., Moran, C.K., Kolb, U., Smith, R.C. & Stehle, R., 2000, MNRAS, 313, 383

Ozaki, S. & Tokimasa, N., 2005, Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs., 15, 15

上籠俊輝、木谷有沙、板谷由菜、林由樹、大仁田萌、各務正浩、小林亮介、西村友佳、野村みのり、瓶子実紗央 2014, 日本天文学会 2014 年春季年会 第 16 回ジュニアセッション講演予稿集, p.160

西村昌能、岡和田健文、黒河宏企、石井貴子, 2011, 天文教育, 第 23 巻, 5 号 2011 年 9 月号, p.51-54