Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs. **22,** 17–26 (2012)

激変星 HT Cas を対象とした生徒測光観測実習

西村昌能[1]、岡和田健文[1]、實本正樹[1]、野上大作[2]、大島誠人[3]、蔵本哲也[3]、松本 桂[4]、藤井大地[4]、 青木朋哉[4]、中川辰一[5]、今田 明[6]、坂元 誠[7]、丹羽隆裕[8]、時政典孝[9]

1) 京都府立洛東高等学校 2) 京都大学大学院理学研究科附属天文台 3) 京都大学大学院理学研究科
4) 大阪教育大学 5) 大阪府寝屋川市 6) 国立天文台岡山天体物理観測所
7) 兵庫県立大学西はりま天文台 8) 八戸工業高等専門学校 9) 佐用町生涯学習課

Students' observational studies on the light curves of the cataclysmic variable star HT Cas.

Masayoshi Nishimura[1], Takebumi Okawada[1], Masaki Jitsumoto[1], Daisaku Nogami[2], Tomohito Ohshima[3], Tetsuya Kuramoto[3], Katsura Matsumoto[4], Daichi Fujii[4], Tomoya Aoki[4], Shinichi Nakagawa[5], Akira Imada[6], Makoto Sakamoto[7], Takahiro Niwa[8], Noritaka Tokimasa[9]

1) Rakutou High School, Yamashina-ku, Kyoto, 607-8017, Japan
2) Kwasan Observatory, Kyoto University, Yamashina-ku, Kyoto 607-8471,Japan
3) Department of Astronomy, Faculty of Science, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502,Japan
4) Osaka Kyoiku University, Kashiwara-shi, Osaka 582-8582, Japan
5) Neyagawa-shi, Osaka 572-0052, Japan
6) Okayama Astrophysical Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, Asakuchi-shi, Okayama 719-0232, Japan
7) Nishi-Harima Astronomical Observatory, Sayo-cho,Hyogo, 679-5313, Japan
8) Hachinohe National college of Technology, Hachinohe-shi, Aomori, 039-1192, Japan
9)Sayo Town office, Sayo-cho, Hyogo, 679-5301, Japan

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

(Received 2013 January 10)

概要

我々は、2010 年と 2011 年の秋に、西はりま天文台、京都大学理学部屋上望遠鏡を利用して高校生対象の天体観測実習を行った。対象の天体は激変星の HT Cas で測光観測をし、生徒が一次データを取得するようにした。その後、生徒が光度曲線を作成し、それを再現するモデルシミュレーションを行って、激変星の物理量を検討させた。

この論文では、実習の流れ、観測結果とモデル計算から得られた探究活動の結果、及び観測実習の教育効果を報告する。

Abstract

Using NAYUTA reflector and 60cm reflector at Nishiharima observatory, and 40cm reflector at Kyoto University, we had attempted the High School students' photometrical observations of the cataclysmic variable star HT Cas, in 2010 and 2011. After observations, students made the light curves by themselves. Comparing the model light curves with the observational ones, they could estimate the physical parameter of the accretion disk of HT Cas during observation terms. Furthermore, we discuss the educational effects of students' observational study.

Key words: astronomical education —High school students— light curve observations —the cataclysmic variable star— HT Cas

1. はじめに

京都府立洛東高等学校では、この十年間、西はりま天文台などで、激変星をテーマにした測光観測実習を行っている。激変星は、白色矮星を主星、赤色星を伴星とする近接連星系で、公転周期は数時間程度である。そのため、両星の距離が大変近く、ロッシュローブからあふれたガスが赤色星から白色矮星に向かって落ち込んでいる。そのガスは白色矮星の周りで明るく輝く降着円盤を形成している。ガスが降着円盤に落ちていくところはホットスポットと呼ばれ、特に明るく輝いている。また、数年から数十年の間隔でアウトバーストやスーパーアウトバーストという増光現象が見られる。アウトバーストとは、伴星から降着円盤にガスが多量に落ち込み、降着円盤が明るくなり明るさが 100 倍ほどになる現象で、降着円盤の構造が変わり、さらに明るくなる現象をスーパーアウトバーストという (前原　2009)。降着円盤は原始太陽系星雲やブラックホール周辺にみられるが、詳しい観測的研究は激変星でのみ行えるといえるだろう。蝕の周期が短く、一夜で一周期が観測できるという点、降着円盤の構造研究が現在進んでいる状況であり、新たな知見を発見したり、研究に寄与する可能性のある点、準安定で周期的変化のある中で、突発現象を起こしたり、周期ごとに光度曲線の様子が異なるなど生徒実習のテーマとして面白い点がある一方、実視等級が十数等程度で暗く、中口径の望遠鏡を利用した観測が適しているという観測上の制約もある。

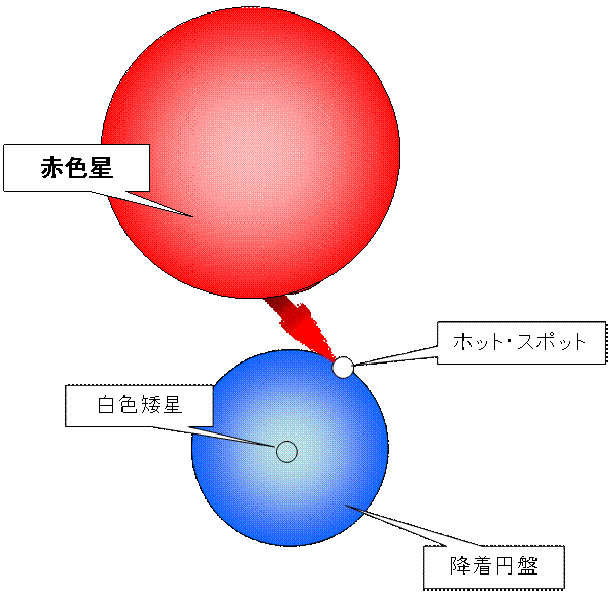

Fig. 1. 激変星の模式図（上部から見た図)。生徒作成

2. 生徒実習の流れ

我々が行っている生徒実習の流れ（実習課程）は、次のように定式化されている。

- 参加する生徒は全学年から公募する。

- 観測は、2 泊 3 日で行い、一次データを生徒が取得する。
- 観測期間中に、研究者により激変星と観測の概要を説明する。
- 学校に戻ってから、光度曲線を作成する。
- 光度曲線と、モデルによって作られた光度曲線を比較して激変星の物理量を推定する。
- 校内報告会や日本天文学会ジュニアセッションなど、外部の学会や研究会で報告する。
  このスタイルは、実習を始めた頃からほとんど変えていない。

3. 対象の激変星

本研究で生徒実習の観測対象にした HT Cas はカシオペア座にある激変星の一種で蝕の周期は 106 分である。等級は触中で 18.4 等と暗く、深い蝕を持つ。2010 年 11 月 2 日には、1 年 8ヶ月ぶりの増光をし、スーパーアウトバーストが見られた。

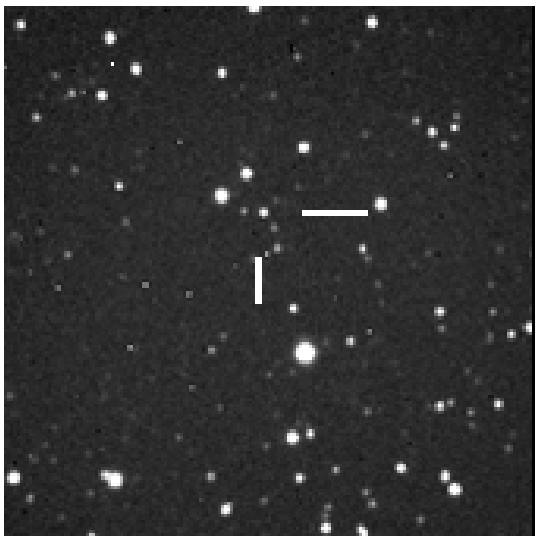

Fig. 2. 対象の激変星　HT Cas

4. 観測実習の生徒報告から

生徒の観測実習報告から実習結果を 以下に紹介する。

4–1. 観測

2010 年 10 月 16 日 22 時 56 分〜17 日 0 時 59 分（JST）に西はりま天文台のなゆた望遠鏡で観測した。なゆた望遠鏡は 2 mの口径を持つ。露出時間は 30 秒で、R フィルターを挿入し、33 秒間隔で自動観測した。CCD

カメラはST9で、なゆた望遠鏡の眼視観測用チューブに取り付けた（坂口ら 2011)。2011年10月16日2時41分〜17日5時25分（JST）に西はりま天文台の60cm望遠鏡で観測した。露出時間は120秒で、132秒間隔で観測した。Rフィルターを利用した。そして、2011年12月9日18時05分〜20時10分(JST)に京都大学理学部屋上の望遠鏡で、30秒露出、33秒間隔の自動観測をした。フィルターは利用していない（大仁田ら 2012a)，(大仁田ら 2012b)。

取得したデータは天体観測用画像のfitsデータ形式である。fitsデータの一次処理は京都大学で行われた。そのデータを学校で生徒が国立天文台提供の画像処理ソフト マカリ[1] を利用して、HT Casと比較星の明るさを測定した。

(a) 2010年の観測データから作成した光度曲線 (Fig. 3)

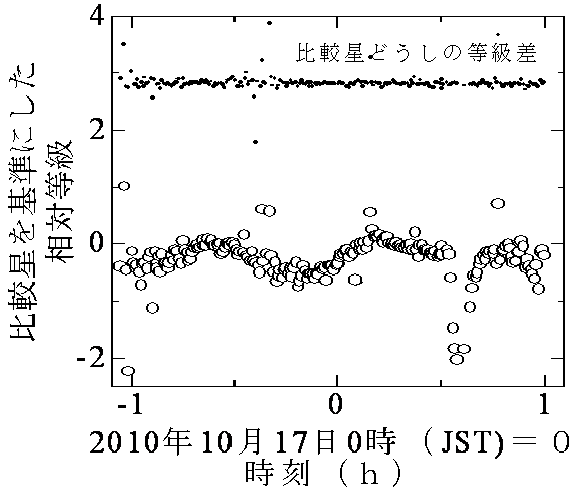

Fig. 3. 2010年10月17日の光度曲線。縦軸が等級差　横軸が時間を表す。比較星どうしの等級差に変動が見られないので、HT CaSの変動を捉えられたと判断できる (坂口ら 2011)。

(b) 2011年の観測データ（10月16日〜17日）から生徒が作成した光度曲線 (Fig. 4)

観測中、何度も雲が通過して、十分な結果が得られなかった。蝕付近の様子を2回捉えることができて蝕周期が107分と求めることができた。ただし、蝕の中心を判別出来ないのであくまでもおおよその値である。

(c) 2011年12月9日の追観測データから生徒が得た光度曲線 (Figs. 5 & 6)

4–2. 光度曲線解析

生徒達は光度曲線を作成後、京都大学宇宙物理学教室のIDLを利用して、Table 1に記載した物理量を光度曲線とモデル計算から得られたモデル光度曲線との比較で求めた。モデル計算コードは京都大学から提供を受けた。光度曲線の変化の様子を再現出来るような物理量を１モデルあたり百回程度の試行錯誤で探した。まず、2010年のモデルを以下の値を初期値として計算をスタートさせた。数字は比であるので単位はない。初期値は先行研究（Feline et.al. 2005) から考えたものである。

[1] 国立天文台ホームページ、http://makalii.mtk.nao.ac.jp/

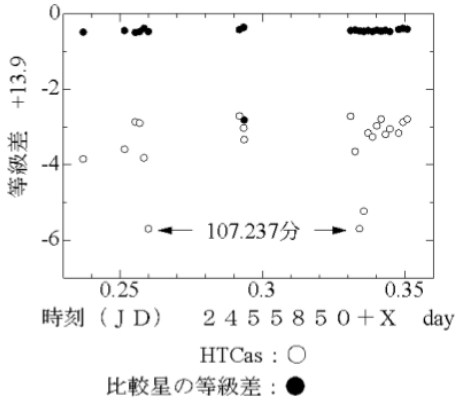

Fig. 4. 2011 年 10 月 16 日から 17 日の光度曲線（大仁田ら 2012a、b)。縦軸が等級差　横軸が時間を表す。

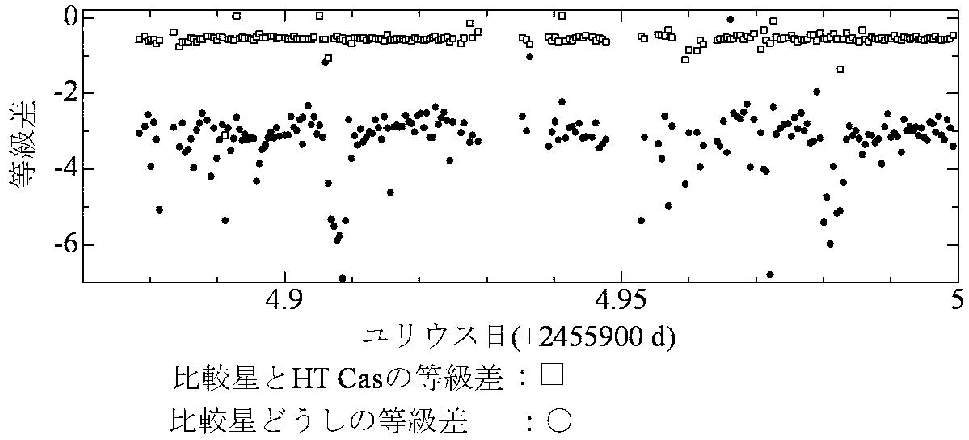

Fig. 5. 2011 年 12 月 9 日の光度曲線（大仁田ら 2012a、b)。縦軸が等級差　横軸が時間を表す。

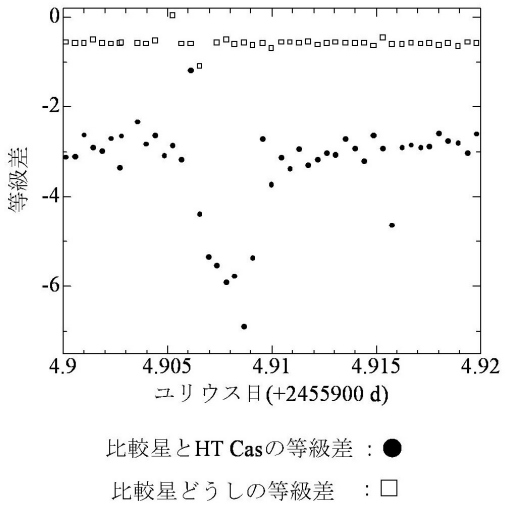

Fig. 6. FIg. 5 の 4.9 日付近の拡大図。この光度曲線を利用して解析を行った。

モデル主星の半径＝ 3
伴星の半径＝ 35
降着円盤の半径＝ 35
ホットスポットの半径＝ 5
主星と伴星の距離＝ 150
主星の明るさ＝ 200
伴星の明るさ＝ 3
降着円盤の明るさ＝ 100
ホットスポットの明るさ＝ 250
公転面の傾斜角＝ 81 °
降着円盤の傾き＝ 0.15 °
ホットスポットの 角度＝− 30 °

2011 年のモデル計算は 2010 年の結果を初期値として先に蝕の形と蝕後のへこみを再現するモデル 1 を構築し、さらに蝕前のハンプ（光度曲線の膨らみ）を再現するモデル 2 を探し出した。

(a) 2010 年のモデル (Fig. 7)
Fig. 3 の 0.5 時あたりの蝕の形に合うようなモデルを Fig. 7 のように見つけた。

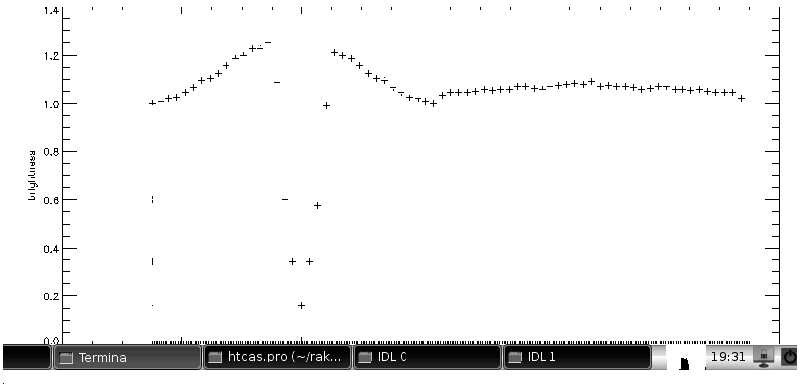

Fig. 7. モデルによって得られた光度曲線。縦軸が相対的な明るさ、横軸が蝕の周期を表している。この時に得られた物理量の値は Table 1 にまとめている。

(b) 2011 のモデル 1(Fig. 8)

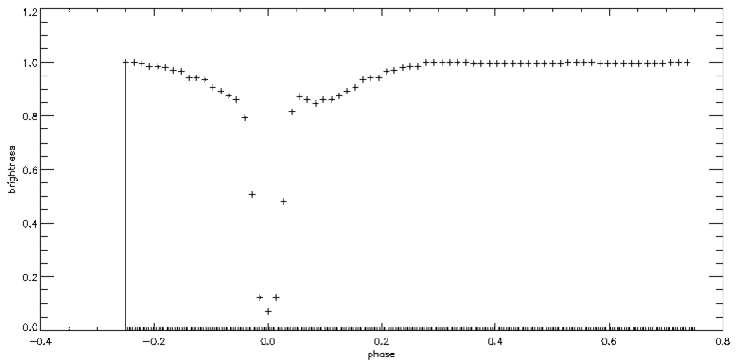

Fig. 8. FIg. 6 の時刻 4.9 日での蝕の形と蝕後の光度のへこみを再現するモデル縦軸が相対的な明るさ、横軸が触の周期を表す。得られた結果は Table 1 にまとめられている。

(c) 2011 年のモデル 2 (Fig. 9)

Fig. 6 の光度曲線で蝕前のハンプを再現するモデルを、パラメータを変えながら構築した。結果は Table 1 にまとめている。

4–3. 研究結果

生徒が光度曲線解析から得た HT Cas の物理量を Table 1 にまとめた。

2011 年のモデル 1 は、蝕の幅と深さ蝕後のくぼみの形が一致し、モデル 2 は、蝕の前に見られるハンプの形が再現できている、と思われる。なお、両方を同時に再現できるモデルは探しきれなかった。

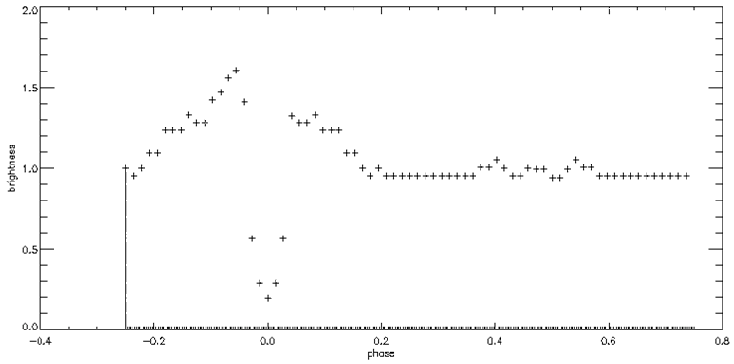

Fig. 9. 蝕前のハンプ（明るさの盛り上がり）を再現するモデル縦軸が相対的な明るさ、横軸が触の周期を表す。

Table 1. モデル計算から得られた HT Cas の物理量

物理量	2010 年 モデルの値	2011 年 モデルの値 1	2011 年 モデルの値 2
軌道傾斜角	81 °	81 °	81 °
主星の明るさ	50	50	50
主星の半径	3	3	3
伴星の明るさ	2	2	2
伴星の半径	35	35	35
降着円盤の明るさ	90	1500	300
降着円盤の半径	25	15	18
ホットスポットの角度	5 °	5 °	5 °
ホットスポットの明るさ	250	300	5000
ホットスポットの半径	5	2	2

4–4. 考察

Table 1 の結果を検討するとスーパーアウトバースト後はその前に比べて、主星、伴星、公転軌道面の角度、ホットスポットの位置に変化はなく、降着円盤とホットスポットの明るさおよび半径が変化していることがわかった。つまり、降着円盤はその明るさが明るくなり、一方、半径は小さくなっている傾向が見られた。また、ホットスポットの明るさは大変明るくなったが、その半径は小さくなった傾向が見られた。さらに、蝕まではモデル１で、蝕後はモデル２があっていたことから、蝕前はホットスポットの外側が明るいことと、蝕後は暗くなっている可能性がある。

スーパーアウトバーストという増光現象では、降着円盤の構造が変わるという。そのメカニズムはまだ不明な点が多い。今回も研究で、その様子が少し分かったと思われる。今後は、観測対象を変えながら、2 色測光や分光観測を交え、降着円盤の構造解明を行いたいと考えている。

5. 教育効果

観測実習の教育面での効果を調べるために、観測前と校内報告会後に参加者全員にアンケートを実施した。校内報告会までには、実習課程が全て終了している。アンケートにはネガティヴな質問とポジティブな質問を混ぜて配置し、1 点から 5 点までの点数でスコアを表し生徒の反応を見た。質問数は 26 である。FIg. 10 は 2011 年観測実習のアンケートのスコアの時間（トピックス）推移を表している。アンケートは観測前日（2011 年 10 月 14 日）と校内報告会直後（2012 年 2 月 17 日）に行った。FIg. 10 は経験者の影響を除くために、激変星の観測を初めて行った１年生 5 名のみで作成し、以下の項目でのスコアの平均値の推移を表している。各値の標準偏差は 0.5〜1.8 であった。対象の生徒たちのうち、3 名は同年 8 月に京都大学大学院理学研究科附属花山天文台で行われた太陽観測実習に参加している。なお、質問項目の次に図中の記号が書かれている。

天文は計算がややこしい　●
観測はおもしろい　△
自分でデータを取る（観測する）のが良い　□
研究施設で観測するのが良い　▽
研究がおもしろい ◇
研究成果の発表（プレゼン）はおもしろい　▲
激変星についてよく知っている　■
自分たちの観測データを誇りに思う　▼
自分たちの研究を誇りに思う　◎
測光観測について説明できる　二重□
激変星は面白い　二重◇

FIg. 10 を見ると「天文は計算がややこしい（●）」という項目以外はスコアがあきらかに上昇している。この項目は、ネガティブな質問項目で、スコアが下がると好感度（効果）が上がるというものであるので、全ての項目で教育効果が上昇していることが示された。また、実習課程を経て項目間のスコアの分散が小さくなったともいえる。生徒になじみのない激変星や測光観測について調べてみると、観測前はかなり低いスコア（2 以下）であったが、実習課程を経て、他の項目より高いスコアを示すようになっている。一方、研究成果の報告は生徒にとってはプレッシャーであったようで、スコアの上昇は微増にとどまった。なお、この年は、東日本大震災の直後で、日本天文学会のジュニアセッションが中止された。このため、他校生徒との研究交流ができず、発表のおもしろさを理解できる機会を逃したと考えている。観測に対する期待は観測前から高かったが、生徒が自分たち自身でデータを取得することと同じように観測後スコアがさらに上昇した。このように、観測実習、特に、生徒がデータを取得し、そのデータを扱い、研究成果を報告することが生徒の観測に対する興味関心を高めることが示唆された。同様の傾向は花山天文台で実施されている太陽の物理観測実習でも観察されている（西村 2009）。このことから生徒が実習を行うにあたっては、生徒自身が観測しデータを取得し、それを解析し、しかるべきところで発表するという今回の方法の教育上の有効性が示されたと考える。また、今回のような観測実習において、公開天文台であり、研究施設が整っている西はりま天文台の教育上の重要性も示されたといえる。

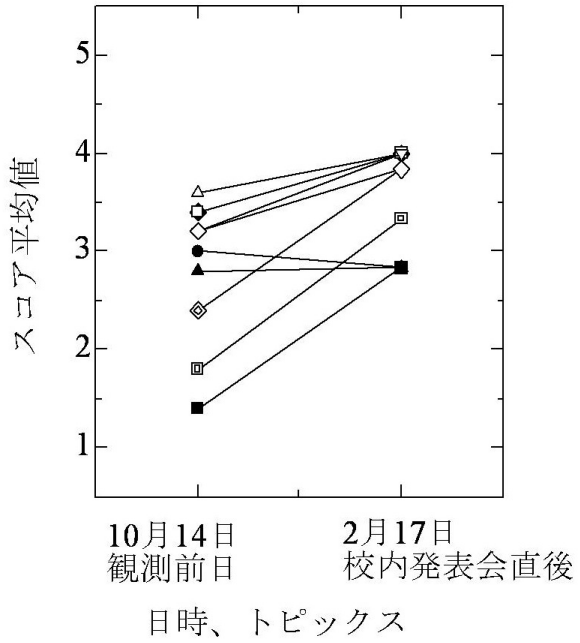

Fig. 10. 2011 年度天文台実習観測アンケート結果

6. 謝辞

生徒の観測実習は洛東高校で実施した平成 22 年度 SPP 講座および平成 23 年度科学技術振興機構サイエンスパートナーシッププログラムの支援を受けて行われた。

観測及び天文台滞在に際しては、西はりま天文台のスタッフにかなりの部分を助けられた。ここに記して感謝の意を表したい。

《参考文献》

Feline, W.J., Dhillon,V.S., Marsh,T.R., C.A.Watson,C.R., & Littlefair,S.P. 2005 M.N.R.A.S. **364** p1158

前原裕之 2009 天体観測の教科書 変光星観測 p50 3-3 激変星 日本変光星研究会編 誠文堂新光社

西村昌能 2009「花山天文台観測実習とその教育効果」 第 23 回天文教育研究会集録 p192

大仁田 萌、各務 正浩、小林 亮介、西村 友佳、野村 みのり、林 由樹、瓶子 実紗央、木戸 理沙、松本 遵、池田 誓太、中尾 拓海2012a 2011 年度連星・変光星・低温度星研究会 集録 p38

大仁田 萌、各務 正浩、小林 亮介、西村 友佳、野村 みのり、林 由樹、瓶子 実紗央、木戸 理沙、松本 遵、池田 誓太、中尾 拓海2012b 日本天文学会 第 14 回ジュニアセッション講演予稿集 p94

坂口雄馬、永戸一史、原 奈於、松本 遵、安田春花、吉田明弘、大西竜司、織田希美、中嶋まみ子、西岡 翼、西埜美帆、松本結香理 2011 日本天文学会 第 13 回ジュニアセッション講演予稿集 p24（震災のため開催されず）