

SX Phe型変光星BL Camの多色測光観測

大島 誠人¹, 穂積 正人²

¹兵庫県立大学 西はりま天文台

²兵庫県立舞子高等学校

Multi-color photometric observation of SX Phe-type variable BL Cam

Tomohito OHSHIMA¹, Masato HOZUMI²

¹Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo,
407-2 Nishigaichi, Sayo-cho, Hyogo 679-5313, Japan

²Hyogo Prefectural Maiko High School, 3-2 Manabigaoka, Tarumi-ku, Kobe-city, Hyogo 655-0004, Japan
ohshima@nhao.jp

(Received 2019 November 6; Accepted 2019 December 16)

概要

口径60cm反射望遠鏡と冷却CCDカメラを用いて、SX Phe型変光星BL Camの多色測光観測を行った。2016年11月と2018年1月に行われた観測で得たデータから作成した光度曲線を用いて、色指数 $B-V \sim 0.35$ を得た。この値から、天体の表面温度を6680Kと見積もった。また、脈動に応じて半径の変化が見られたが、一般的に脈動変光星で多く報告されているような極大付近で最小となり極大付近で最大となる半径の変化とはやや位相のずれがあり、極小・極大に対して0.3~0.4位相先行して半径の最大・最小を迎えるという結果となった。

Abstract

Optical multi-band photometric observations of SX Phe-type object BL Cam were carried out with 60-cm reflecting telescope equipped with CCD camera in 2016 November and 2018 January. The color index $B - V$ is estimated as 0.35 from the obtained B - and V -band data. The surface temperature is estimated 6680 K based on this color index. The variations of radius accompanying the variations of luminosity were detected, however, the variations do not correspond to that ever observed in similar objects. The maximum of stellar radius variation is delayed by 0.3 ~ 0.4 of phase to the maximum of light curve variation.

Key words: individual object: BL Cam — variable star

1. イントロダクション

セファイド不安定帯は、HR図上のスペクトルA – G型付近に位置する恒星が脈動を示しやすい領域である。これは、この付近の表面温度を持つ恒星においては、光球の表層よりやや下の層においてヘリウムの電離が生じることに起因する。中心核での燃焼によって放出されたエネルギーが光子として外側へ輸送される過程において、ヘリウムの電離に伴う光子の吸収が起こるため、一時的にエネルギーが蓄積される現象が起こる。このため κ -mechanismに基づく脈動変光を示しやすい(Cox 1958; Zhevakin 1963; Baker & Kippenhahn 1962)。

SX Phe型変光星は、このセファイド不安定帯に位置する脈動変光星の一つである。Frolov & Irkaev (1984)によって提唱された。セファイド不安定帯の主系列付近に位置するグループであるたて座 δ 型変光星のうち、金属量が少ない種族IIに属するものを分離したものである。変光周期は0.08日以下、変光の振幅は0.7等以下で、動径脈動と非動径脈動の両方を示す天体とされる (Fauvaud et al. 2006)。

このグループに属する天体は、Niss (1981)が ω Cen星団中に発見されて以来、球状星団・矮小銀河など、種族IIの星からなる集団の中で多く発見されている(Rodríguez & Lopez-Gonzalez 2000)。セファイド不安定帯に位置す

る主系列星は、通常なら1.2太陽質量程度の質量を持つため、球状星団などに位置するSX Phe型変光星の場合、質量から推定される年齢が星団の年齢と矛盾する (Nemec & Mateo 1990)。そのため、これらの星団に位置するSX Phe型変光星はblue stragglerであるとされる (Eggen 1989)。また、このような星団の外のフィールドにも15のSX Phe型変光星が知られている。

きりん座BL(BL Cam=GD428, $\alpha_{2000} = 3^{\text{h}}47^{\text{m}}19^{\text{s}}$, $\delta_{2000} = +63^{\circ}22'07''$) は、フィールドに位置するSX Phe型変光星の一つである。この天体ははじめ白色矮星の可能性の高い天体として発見され(Giclas et al. 1970)、のちにBerg & Duthie (1977)によって周期0.039日の脈動変光星であることが明らかにされた。のちに、多重周期の比から金属量が少なく、種族IIの天体である可能性が示唆された(McNamara & Budge 1985)。そのため、BL CamはSX Phe型の天体として分類されている。平均光度は13.1等で、0.33等の振幅の変動を示す(Rodríguez & Breger 2001)。金属量について、McNamara (1997)は $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.4$ という見積もりをしている。

BL Camの脈動には複数のモードがあることが古くから示唆されている(Hintz et al. 1997)。もっとも強くみられる周期である0.039日付近以外に含まれる変動周期の具体的な値は文献により異なった値が見積もられているが、Zong

Table 1. Observation Log

Date	Filter	Exposure (s)	N
2016/11/25	B,V	30	411
2018/1/13	B,V	30	664

Date is based on JST. N is the number of obtained frames.

et al. (2019)によるとBL Camはもっとも顕著な振動である25.5790/日の振動数とその倍振動のほか、非動径脈動に対応すると考えられる25.247/日の振動数の脈動が観測されている。

著者らは2016年から、兵庫県立舞子高等学校天文部の実習の一環として、毎年兵庫県立大学西はりま天文台の60cm望遠鏡を用いて変光星の測光観測実習を行っている(Hozumi 2017)。周期が短いために短い観測時間で複数の極大を追うことが容易なこと、振幅が大きいために変動をとらえることが容易なことなどから、BL Camをターゲットとして観測を行ってきた。本論文では、得られた観測から得られたBL Camの要素について記述する。

2. 観測

観測には、西はりま天文台60cm望遠鏡と、SBIG社の冷却CCDカメラSTL-1001を用いた。冷却CCDカメラには多色バンドフィルターが装着されており、 B バンドと V バンドでの撮像を交互に行った。観測日、露出時間などについての情報は、Table 1に示すとおりとなっている。

解析にはMakali'i¹を用いた。まず生データからダークフレームを引くことで熱によるノイズを除去し、その後規格化したフラットフレームで画像を割ることで画像全体の感度の補正を行った。その後、画像の視野内にある変光星と、光度が変化しない比較星の明るさを測定して開口測光を行い、2つの星の光度の比をとることによって相対測光を行った。

測定にはMakali'iの自動モードでの測光を行った。開口測光のパラメータのうち、測定半径はソフトウェアが自動に選んだものを用いて、半径設定は重心検索範囲を3ピクセルとした。星の中心をクリックして算出されるカウント値を元に、比較星のカウントとの比を取って等級へ換算した。

得られた相対測光の等級を元に、比較星光度の文献値を用いて光度を実等級に換算した。この際、比較星としてFig. 1に示したチャートのA星、チェック星としてB星を用いた。 V 等級は星Aが12.044等、B星が12.272等、 B 等級は星Aが12.675等、星Bが12.963等である。これらの光度はAAVSO星図で採用されているHendenによるCCD測光から採用した²。

3. 結果・考察

得られた光度曲線の、2016年のものをFig. 2の、2018年のものをFig. 3の、それぞれ(a), (b)に示す。いずれの図

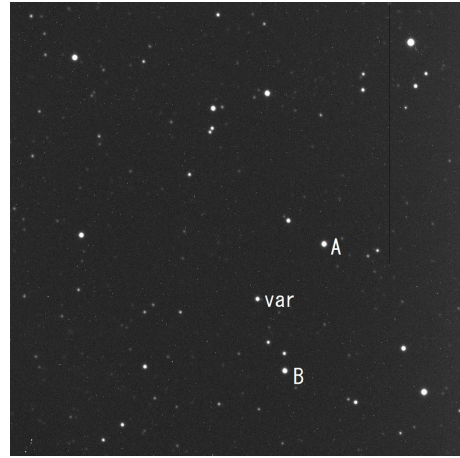


Fig. 1. The finding chart of BL Cam. The plotted "var" star corresponds to BL Cam. The star plotted A is a comparison star, and the star plotted B is a check star.

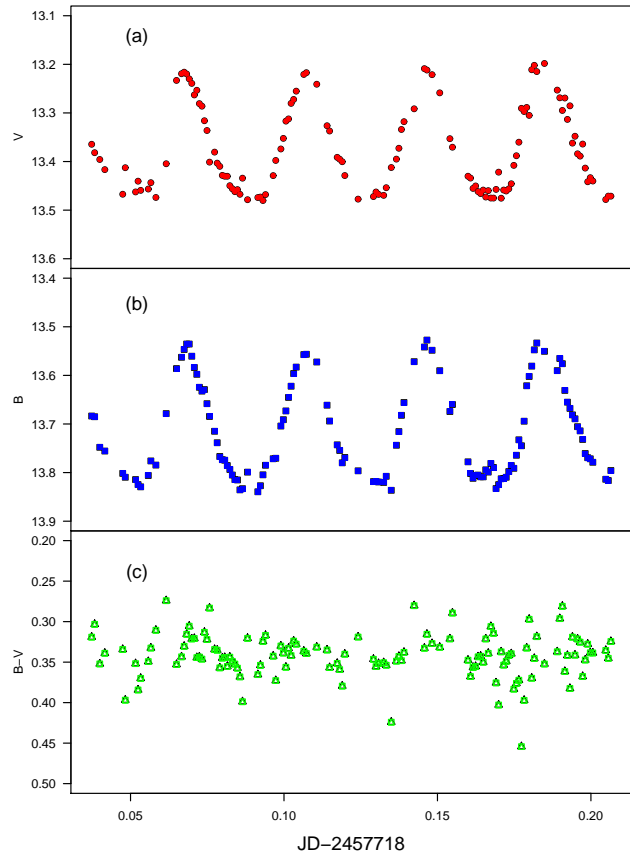


Fig. 2. The light curve of BL Cam in 2016 observations. The upper panel is obtained in V band, the middle panel is obtained in B band. The lower panel is color index $B - V$ curve.

¹ <https://makalii.mtk.nao.ac.jp>

² [https://www.aavso.org/apps/vsp/photometry/?fov=18.5&scale=F&star=](https://www.aavso.org/apps/vsp/photometry/?fov=18.5&scale=F&star=BL+Cam&orientation=ccd&maglimit=18.5&resolution=150&north=up&east=left&type=photometry)

[BL+Cam&orientation=ccd&maglimit=18.5&resolution=150&north=up&east=left&type=photometry](https://www.aavso.org/apps/vsp/photometry/?fov=18.5&scale=F&star=BL+Cam&orientation=ccd&maglimit=18.5&resolution=150&north=up&east=left&type=photometry)

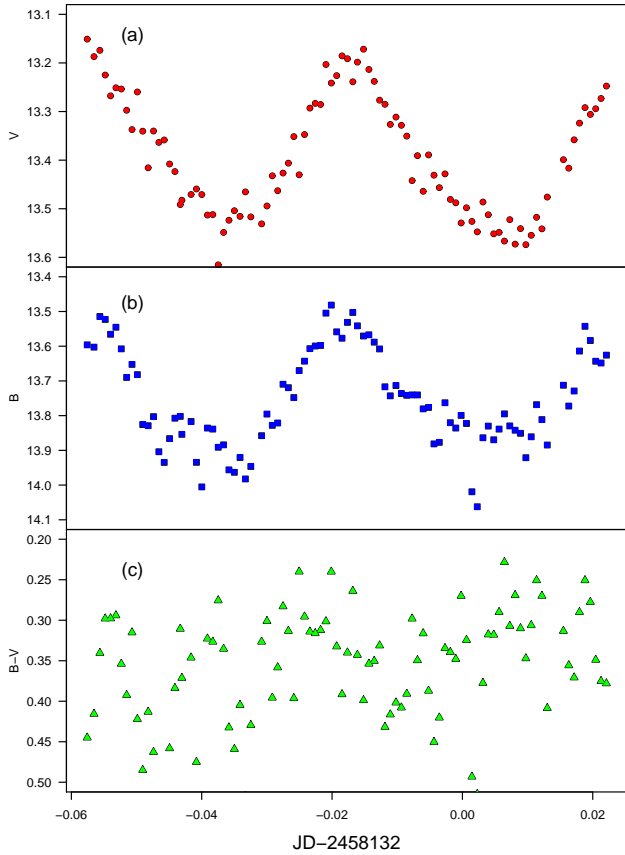


Fig. 3. The light curve of BL Cam in 2018 observations. The upper panel is obtained in V band, the middle panel is obtained in B band. The lower panel is color index $B - V$ curve.

も、(a)はVバンド、(b)はBバンドでの光度変化に対応している。B、Vどちらのバンドにおいても0.3等程度の振幅をもつ変動が観測されている。これはRodríguez & Breger (2001)で報告されているBL Camの変光振幅にほぼ一致する。極小付近に小さな盛り上がり状の小ピークが見られる。この傾向はBバンドVバンド共に見られるが、Bバンドのほうがややはっきりと盛り上がりが見られる。これは、この変動と同時に色の変化が見られるためだと考えられる。

測光観測はB、Vの2バンドを使って行ったが、同時測光は行っておらず、そのためにそれぞれのバンドで観測時刻が異なっている。そこで変光に伴う色指数の変化を求めるため、観測間隔が十分に短いことを利用して、連続するBバンドでの観測時刻に相当する光度を求め、これから色指数を計算した。なお、悪条件により隣接するデータや対応するVバンドがない場合は除いた。このようにして2016年の観測から得られた色指数の時間変動がFig. 2の(c)である。同様に、2018年の観測から得られたものがFig. 3の(c)である。いずれも分散は大きいですが、脈動に対応した色の変化が見られる。

Fig. 4, 5の(c)は、それぞれ2016年、2018年の観測を用いて作成した脈動の位相に対する色指数の変動を示す。観

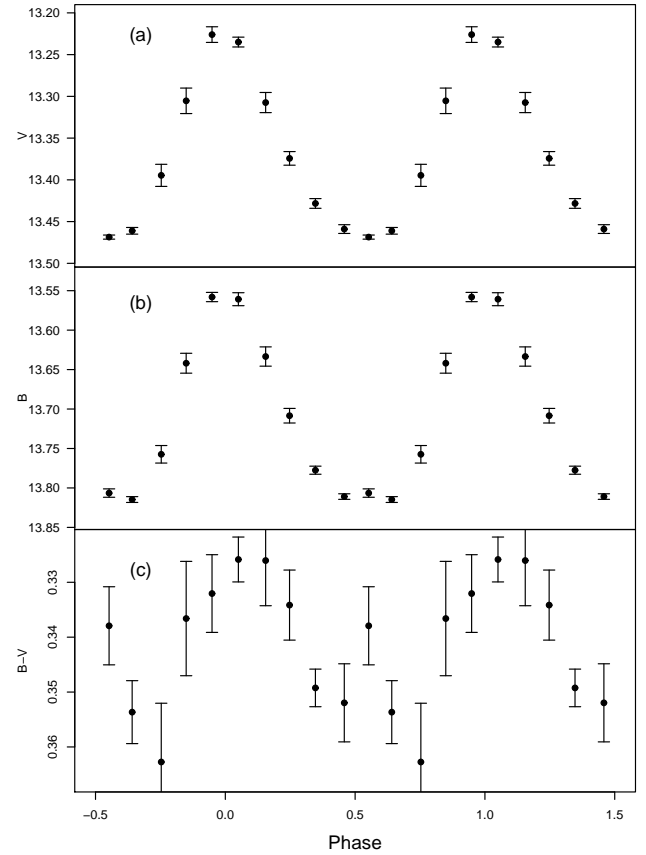


Fig. 4. 0.1 phase-binned light curve of 2016 observations folded by the period of 0.0390976 d.

測時刻を脈動の位相に変換するときの脈動周期はGCVSの0.0390976日を使用し、脈動の元期は2016年のデータについては $JD = 2457717.9835$ 、2018年のデータについては $JD = 2458131.943$ を用いた。これらの値を用いて観測時刻を位相に変換したのち、0.1位相ごとにデータをビンニングし、各ビンごとの平均光度から作成した位相に対する色指数の変動がFig. 4, 5の(c)である。なお、Fig. 4, 5の(a)は同じ元期・周期を使って作成したVバンドでの位相光度曲線、同様にFig. 4, 5の(b)はBバンドでの位相光度曲線である。

これらのグラフから分かるように、2016年、2018年共に脈動に伴った色変化が明白に見られる。これは脈動に伴う表面温度の変化に対応していると考えられる。ただし位相光度曲線と色変化の関係は2016年と2018年でやや差異がある。2016年の観測では光度の極大時のすぐ直後にあたる位相 $\phi 0 \sim 0.1$ でもっとも青くなり、極小時のすぐ直後の位相 $\phi 0.6 \sim 0.7$ でもっとも赤くなる傾向が観測されるのに対して、2018年の観測では最も青くなる位相が位相 $\phi 0.7 \sim 0.8$ 付近、最も赤くなる位相は $\phi 0.2 \sim 0.3$ 付近に対応している。

このような色の変化は、脈動に伴う恒星の表面温度の変化によるものと考えられる。そこで、得られた色指数の変化から、脈動に伴う恒星の表面温度の変化を求めた。

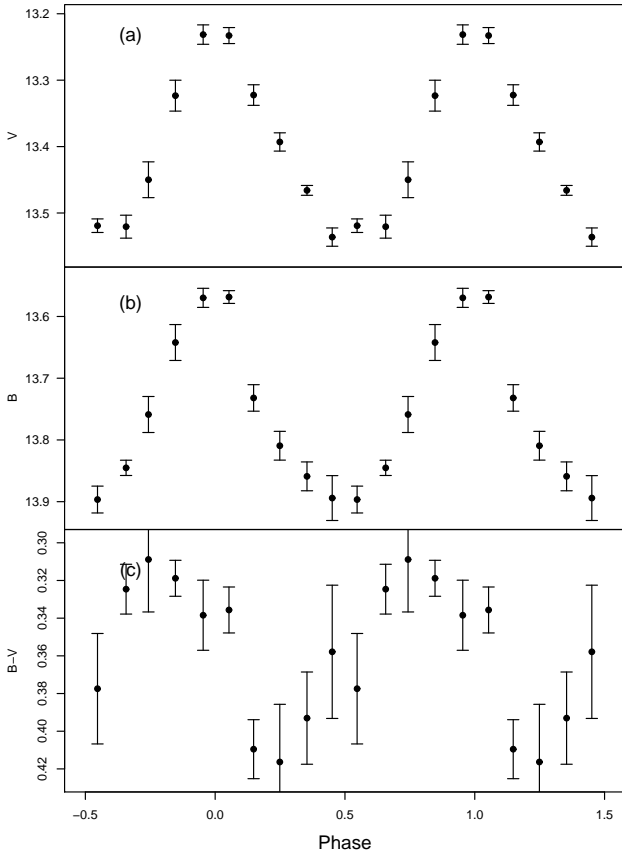


Fig. 5. 0.1 phase-binned light curve of 2018 observations folded by the period of 0.0390976 d.

恒星の表面温度に対応する輻射の分布は、ほぼ黒体輻射に一致すると仮定できる。そこで、プランクの熱放射の公式に基づいて、特定の温度に対して B 、 V それぞれのバンドパスに含まれる光の量を求め、理論的に想定される色指数との関係式を導いた。この関係式を用いて、ニュートン法により色指数から対応する表面温度を求め、位相に対してグラフ化したものが、Fig. 6, 7の(b)である。Fig. 6は2016年の観測、Fig. 7は2018年の観測から得られた変化を示す。

2018年に行われた観測では、色指数の変化から見積もられる脈動に伴う温度変化は700K程度となる。これは同じSX Phe型変光星に属するDY Pegの観測から示唆された1200Kに比べるとやや小さい (Wilson et al. 1998)。一方、2016年に行われた観測では、2018年に得られた変化と比べてもさらに温度変化が小さく、250K程度となっている。ピニングする前のデータであるFig. 2の(c)でも色の変化があまり大きくないことから、これはもともとあった変動がピニングする際に平均を取ったこと変化が不明瞭になったわけではなく、2016年の観測時には実際に表面温度の変化があまり大きくなかったことを示唆している。

2016年の平均 V 等級 $\langle V \rangle = 13.37$ 等、平均 B 等級 $\langle B \rangle = 13.71$ 等から得られた平均色指数 $\langle B - V \rangle = 0.34$ となり、平均表面温度は6744Kと見積もられる。一方、2018年では

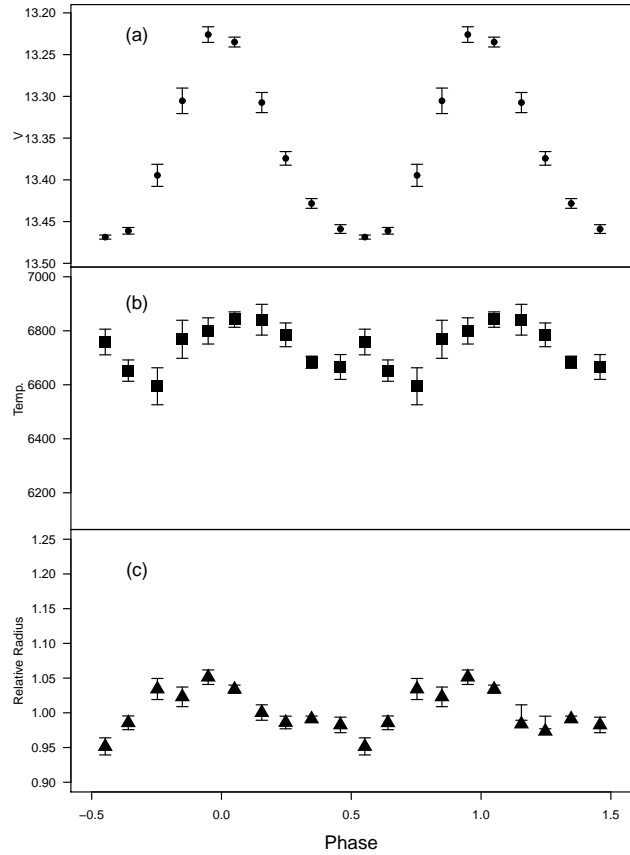


Fig. 6. The phase averaged V light curve (a), the estimated temperature with the blackbody radiation hypothesis (b), and the estimated stellar radius (c) from 2016 observations.

$\langle V \rangle = 13.39$ 等、 $\langle B \rangle = 13.74$ 等となり、ここから得た平均色指数は $\langle B - V \rangle = 0.36$ となった。このときの平均表面温度は6620Kと見積もられ、2回の観測を通じてほぼ一致している。両者の平均を求めると、平均色指数 $\langle B - V \rangle = 0.35$ 、平均表面温度6680Kとなる。これは、理論的に予想されるセファイド不安定帯の低温端よりやや低温側に位置するが、Rodríguez & Breger (2001)によると理論的なセファイド不安定帯の位置と実際に観測されているSX Phe型、 δ Sct型変光星のHR図上での位置は必ずしも一致せず、やや低温側まで伸びて分布しているため、この結果は大きく従来の観測には矛盾しないと思われる。

また、前述したように、位相に対する色指数の変化においては、色が赤くなり光度的にはもっとも暗くなる $\phi \sim 0.5$ 付近で一時的にやや青くなる傾向がみられる。これは、 $\phi \sim 0.5$ 前後に見られる光度曲線の小さな盛り上がりに対応していると考えられ、この光度変化に対応して表面温度がやや高くなっているものと考えられる。BL Camには複数の動径脈動が共存しているという報告がある(e.g. Zong et al. 2019)ことから、そのため、これは他のモードの振動の極大が現れているためと思われる。

見積もられた表面温度を元に、Stefan-Boltzmannの法則を用いて半径の変化に換算したものがFig. 6, 7の(c)である。2016年の観測に基づいたものがFig. 6、2018年の観測

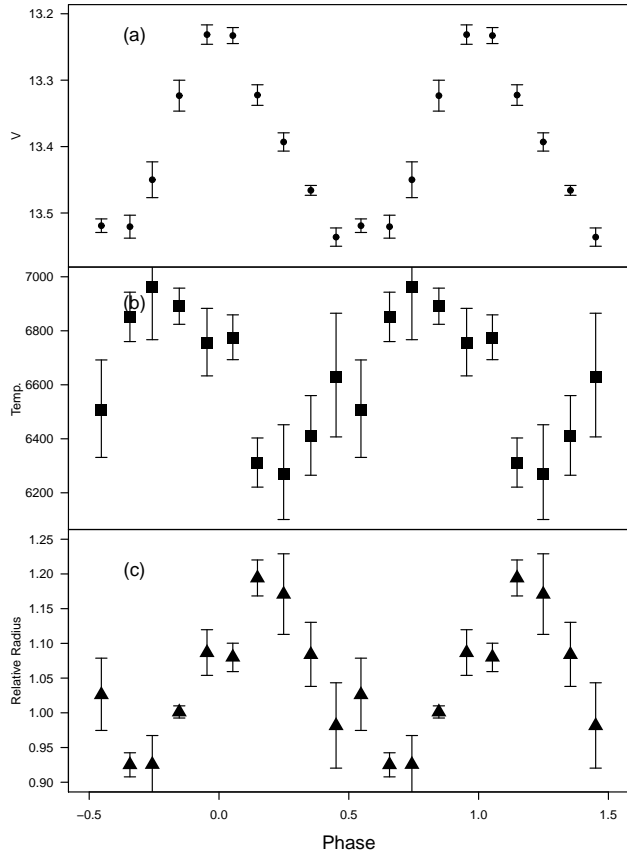


Fig. 7. The phase averaged V light curve (a), the estimated temperature with the blackbody radiation hypothesis (b), and the estimated stellar radius (c) from 2018 observations.

に基づいたものがFig. 7である。いずれも脈動に伴って半径の変化が生じていることを示している。2016年の観測では10%、2018年の観測では20%程度の半径の変化が生じていることがわかる。これはBL Camにおける脈動が動径脈動であることを示す。

脈動理論によると、動径脈動を示す天体では極大付近が最も半径が小さく、極小付近でもっとも半径が大きくなるとされる。従来観測されたセファイド型変光星の多くも、これに概ね従った結果が得られている。しかし、今回得られたBL Camにおける脈動に伴う半径の変化には、やや異なった結果が見られる。2018年の観測では、半径の極大・極小は表面温度の極小・極大に対してそれぞれ $\phi \sim 0.1$ 程度先行している。また、光度の極小・極大に対しては $\phi \sim 0.3$ 先行している。一方、2016年の観測では、表面温度が最大になる位相は光度変化の極大にほぼ一致しており、一方で半径が最小になる位相はこれらに対して $\phi \sim 0.4$ 遅れている。

過去の研究における δ Sct型、SX Phe型の脈動変光星の半径変化に関する結果では、多くの場合半径の極大・極小は光度の極小・極大に対して $\phi \sim 0.1$ 程度先行している(e.g. Bessell 1969, Breger 1975, Fernley et al. 1987)。このような現象が引き起こされる理由としては膨張の際に引き起こされる衝撃波のために膨張が少し遅れるという可能性

が考えられる。BL Camでの位相差が他の星に比べて大きくみられるのは、BL CamがSX Phe型の天体の中では絶対等級の小さな天体であるため、半径が小さく密度が大きい天体であり、衝撃波が起きやすいことが関係があると思われる。

4. 謝辞

観測・解析に携わった舞子高等学校天文気象部の皆様に、心から感謝申し上げます。

References

- Baker, N. & Kippenhahn, R. 1962, *Zeitschrift für Astrophysik*, 54, 114
 Berg, R. A. & Duthie, J. G. 1977, *ApJ*, 215L, 25
 Bessell, M. S. 1969, *ApJS*, 18, 167
 Breger, M. 1975, *ApJ*, 201, 653
 Cox, J. P. & Whitney, C. 1958, *ApJ*, 127, 561
 Eggen, O. J. & Iben, I. Jr. 1989, *AJ*, 94, 431
 Fauvaud, S., Rodriguez, E., Zhou, A. Y. 2006, *A&A*, 451, 999
 Fernley, J. A., Jameson, R. F., Sherrington, M. R., Skillen, I. 1987, *MNRAS*, 225, 451
 Frolov, M. S. & Irkaev, B. N. 1984, *IBVS*, 2504, 1
 Giclas, H. L., Burnham, R., Thomas, N. G. 1970, *Lowell Observatory Bulletin*, 7, 183
 Hozumi, M. 2017, *Bull. Cent. Astron. Univ. Hyogo*, 5, 17
 Hintz, E., Joner, M. D., McNamara, D. H., Nelson, K. A., Moody, J. W., Kim, C. 1997, *PASP*, 109, 15
 McNamara, D. H. & Budge, K. G. 1985, *PASP*, 97, 322
 McNamara, D. H. 1997, *PASP*, 109, 1221
 Niss, B. 1981, *A&A*, 98, 415
 Nemeč, J. & Mateo, M. 1990, *Astronomical Society of the Pacific*, 11, 64
 Rodriguez, E. & Lopez-Gonzalez, M. J. 2000, *A&A*, 359, 597
 Rodriguez, E. & Breger, M. 2001, *A&A*, 366, 178
 Rodgers, A. W. 1957, *MNRAS*, 117, 85
 Wilson, W. J., Milone, E. F., Fry, D. J. I., van Leeuwen, J. 1998, *PASP*, 110, 433
 Zhevakin, S. A. 1963, *ARA&A*, 1, 367
 Zong, P., Esamdin, A., Fu, J. N., Niu, H. B., Feng, G. J., Yang, T. Z., Bai, C. H., Zhang, Y., Liu, J. Z. 2019, *PASP*, 131, 064202