

アルゴル系における短周期振動の光電測光観測 —西はりま天文台 60 cm でのサイエンス—

鳴 沢 真 也

〈兵庫県立西はりま天文台 〒679-5313 兵庫県佐用町西河内 407-2〉

e-mail: narusawa@nhao.go.jp

アルゴル系の主星の中には、振動しているものが続々と発見されています。このような振動は、かつては δ Sct 型に分類されていました。しかし、筆者らが検出したアルゴル系 RZ Cas の主星などでは、 δ Sct 型としてはかなり短い二十数分周期で振動しています。最近、伴星から主星への質量移動が脈動に影響を及ぼしているという説が提唱されています。アルゴル系における短周期振動のメカニズム解明のために、西はりま天文台 60 cm 望遠鏡を用いて RZ Cas などの光電測光を行っているので報告します。小型望遠鏡を用いて食連星の測光をされているアマチュアの活躍についても紹介します。

1. 西はりま天文台と 60 cm 望遠鏡

兵庫県立西はりま天文台公園は、姫路市から車で1時間ほど北に位置する佐用町の標高約 440 m の大撫山（おおなでさん）頂にあります。1990 年 4 月にオープンしたこの施設は、その後全国各地に続々と建設された公開天文台のモデルケースとなってきました。現在の天文関係のスタッフは 10 名で、年間約 10 万人の来台者にさまざまな教育・普及活動をさせていただいております。昨年 11 月には、国内最大の、そして公開用としては世界最大の 2 m 「なゆた」望遠鏡が起動し、今後の活躍が内外から期待されています。

60 cm 望遠鏡（写真 1）は「なゆた」望遠鏡が完成するまでは、公開用としてまた研究用としても、西はりま天文台における活動の「主砲」となっておりました¹⁾。

この望遠鏡は西村製作所製で、カセグレン焦点を有しています ($F=12, f=7,200$ mm)。午後 7 時半から 9 時までは、一般の方を対象とした天体観

望用として活躍するのですが、それ以降はアイピースが外されて研究用の検出器が装着されます。主な検出器としては、冷却 CCD カメラ、分光器、近赤外線カメラ、光電測光器、I.I. カメラなどがあります。

これらを用いて、主に変光天体（BL Lac 天体、惑星状星雲中心天体、小惑星、半規則型変光星）の測光観測を行ってきました。公開天文台ですので TOO（突発天体）に対しても、いくつかの成果を出しています。探査機「のぞみ」支援の火星観測キャンペーンでは、中心的役割を担いました。また偶然ですが、高速度星の発見もしています。

なゆた望遠鏡が起動した後の 60 cm 望遠鏡の運用方針については、現在検討中ですが、なゆた望遠鏡と 60 cm 望遠鏡との「二刀流」観測も行われることでしょう（最近接近したマックホルツ彗星に対しては、すでに同時観測が実現しております）。

今回は、筆者が行っているアルゴル系における短周期振動の光電測光について紹介します。



写真1 西はりま天文台の 60 cm 望遠鏡。カセグレン焦点に装着されているのは、光電測光器 (ひごい)。

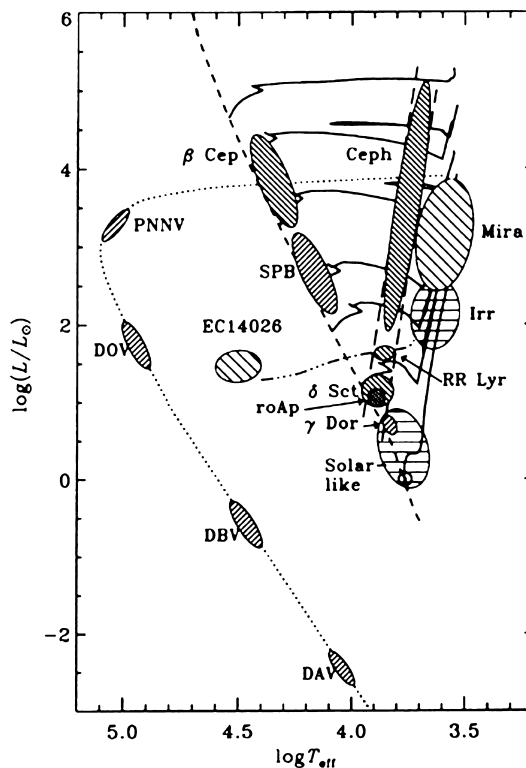


図1 HR (Hertzsprung-Russell) 図上における脈動変光星の位置. Alonso & Belmonte²⁾ による.

2. アルゴル系における振動現象の光電測光観測

2.1 はじめに

2.1.1 アルゴル系

アルゴル型半分離連星系 (以下アルゴル系) とは、ロッシュ・ローブを満たしていない早期型星と、ロッシュ・ローブを満たしている晚期型星とがペアとなっている近接連星系です。伴星からあふれ出したガスは、ラグランジュ点 (L1) を通って主星の光球面に衝突してホットスポットを形成しています。ガスの一部は主星周辺を星周環帯として漂っていることが分光観測などから明らかにされています。厚い対流層をもつ伴星は、同期回転により自転が加速され、激しい磁場活動を起こしています。近赤外線の観測により伴星表面上の黒点の存在が、また X 線や電波の観測からはフ

レアやコロナが検出されています。

2.1.2 早期主系列の脈動星

次に、本稿に登場する早期主系列付近の脈動星について簡単に紹介しておきます。図 1²⁾ を見ながら読んで下さい。

- δ Sct 型: セファイド不安定帯が主系列と交差している付近に位置しています。スペクトル型は A-F で、典型的な周期は約 2 時間です。動径振動 (大きさが変化するタイプ)、非動径振動 (形が変化するタイプ) の両方が存在します。振動の励起には、電離ヘリウムが大きくかかわっています。
- roAp (rapidly oscillating Ap) 型: HR 図上では、ほとんど δ Sct 型と同じ位置です。ある特定の元素 (主に希土類元素) が異様に多い Ap 星³⁾の中で、周期 10 分程度で非動径振動してい

るものです。振動の原因を説明するモデルも提唱されていますが⁴⁾、詳細はまだ十分には解明されていません（かつては、Ap 星は脈動が起らないとさえ考えられていました）。

- **SPB (Slowly Pulsating B) 型**: 晩期 B 型星が周期約 6 時間-1 日でゆっくり振動するタイプです。非動径振動で、電離した鉄により励起されています。日本では増田盛治氏（国立天文台・岡山）による分光観測が知られています⁵⁾。
- **β Cep 型**: 早期 B 型星の非動径振動星で、周期は 2-7 時間程度です。やはり電離した鉄が原因で振動が励起されています。

2.1.3 脈動食連星

さて 1971 年に P. Tempesti (テンペスティ) は、アルゴル系 AB Cas の食外における光度曲線が周期的に変光していることに気がつき、主星が周期 84 分で振動する脈動変光星であることを発見しました⁶⁾。食連星の成分星がさらに脈動変光星となっているケース（以下、脈動食連星）の最初の発見でした。その後は、脈動食連星が数個発見されていましたが、1997 年に大島 修氏（岡山県立鴨方高校）と筆者が主宰した測光キャンペーンにより、RZ Cas の主星も振動していることを発見しました^{7), 8)}。RZ Cas は、明るく（6-7 等）公転周期も短い（1.19 日）ので、たいへんよく観測されていた食連星です^{9), 10)}。それにもかかわらずこの星が振動星でもあったことは衝撃的で、これに触発されてかその後はウクライナやスペインなどのグループも精力的に食連星における「振動ハンティング」を行っています。現在までに二十数個の食連星（ほとんどがアルゴル系）について振動が検出されています。

2.1.4 本研究の主な目的

よく知られているように、食連星の研究からは、星の質量や半径、表面温度などを算出することが可能です。一方で非動径振動星の場合は、その振動の様子（モード）から星の内部構造などの情報が得られます（星震学）。したがって脈動食連星は、このような情報を同時に得ることができるので、天体物理学上は重要な存在であると言えます^{8), 11), 12)}。

ところでアルゴル系の主星は、A-F 型の主系列星です。そのために、これらが振動している場合は、HR 図上の位置から δ Sct 型と分類されました（図 1）。しかしながら、筆者らはこれに疑問を感じています。 δ Sct 型の脈動周期は短くても 1 時間程度なのですが、脈動食連星である RZ Cas や AS Eri の振動周期は二十数分なのです。近接連星系としての何らかの効果が、振動に影響を及ぼしている可能性もあるのではないのでしょうか？

以上の観点から、筆者は RZ Cas の振動の様子を詳しく調査するために、この系のモニター測光を継続しています。また他のアルゴル系についても振動の検出を目的として観測を行っています。

2.2 観測

観測は、西はりま天文台の 60 cm 望遠鏡に光電測光器 (AES PCPA-2) を装着して、行っています。私たちが「ひごい」*1 という愛称で呼んでいるこの装置の立ち上げには、当時大阪教育大学の学部生だった五百蔵雅之氏（現在は南阿蘇ルナ天文台）の尽力があったことを特記します^{13), 14)}。フィルターは主にジョンソン系の B, V を用いています。RZ Cas の脈動の振幅は 0.02 等ほどですので、測光精度がミリマグニチュードより悪い夜は、

*1 全くの余談ですが、共同研究していたハンガリーのバヤ天文台長 T. Hegedus 博士が来日した時のことです。姫路城内の庭園の池に泳いでいる錦鯉の値段を教えたところ、博士は「日本にはそんなに高価な魚がいるのか！」と驚愕していました。その後、西はりま天文台に来られた博士が、今度は光電測光装置の値段を聞きました。そこで筆者が「さっき見て来た魚と同じ値段だよ」と答えたところ、笑って納得していました。それ以来、この装置をわれわれは「ひごい」と呼んでいます。

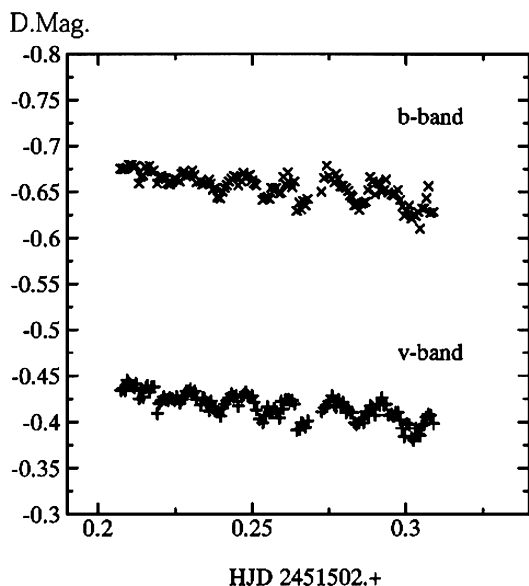


図2 60 cm 望遠鏡によるアルゴル系 RZ Cas の短周期振動の光度曲線の一部。

観測を行っていません。比較星との相対測光を行っているのですが、RZ Cas の振動周期が二十数分と短いために、サンプリング間隔は1分程度になるように努力しています。

時期によっては、ハンガリーのバヤ天文台や JAPOA (日本アマチュア光電測光観測者協会) メンバーなど、アマチュアの方々と共同観測を行ったこともありました。またパラグアイからの研修生の実習として行った年もありました。

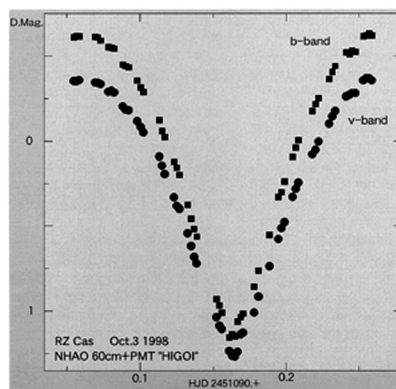
2.3 中間報告

60 cm 望遠鏡が検出した RZ Cas の振動の一例を図2に示します。観測は現在も継続中ですが、RZ Cas の振動の振幅がシーズンにより変化していることがわかりました。例えば、1997/98 年は振動が容易に検出できたのですが、1998/99 年では、振動がわかりにくくなりました。ところが、1999/2000 年は再び波が目立つようになりました。これは RZ Cas が複数の周期で振動していること(多重周期)に関係があります。振動が初めて検出されたシーズンのデータを大島氏が周波数解析したところ、ドミナント(最も強い振動)のほかに



NHAO Astro Graph No.3

TITLE: 食連星「カシオペア座RZ星」の主極小光度変化
～国際観測キャンペーンの成果～



■ 青いフィルターを通して測定したもの
● 人間の目に最も感じやすい黄色のフィルターを通して測定したもの

Date: 1998年10月3日
Instruments: 60cm望遠鏡+光電測光装置(ひごい)
Reserchers: 鳴沢真也, 五百蔵雅之^{*1}
*1大阪教育大学



図3 60 cm 望遠鏡が観測した RZ Cas の主極小時の光度曲線。この図は、西はりま天文台友の会員に配布している天文教材シリーズ「Astro Graph」の一つです。

もいくつかの周波数が検出されました⁷⁾。また最近になってウクライナとスペインのグループも、RZ Cas は多重周期で振動していることを報告しています^{16), 17)}。いくつかの周期で振動しているので、それらが同位相で起きるようなシーズンでは波が顕著となりますが、位相がずれてきますと波が目立たなくなると解釈できます^{11), 15)}。このような現象は、「ビート(うなり)」と呼ばれています。今後の解析からさらに詳細な結果が得られるとっております。

RZ Cas はまた突発的に公転周期が変化する系としてもよく知られております。アルゴル系の公転周期が突然変化する原因については、晩期型伴星の磁場活動との関係が最近は有力ですが、詳細は不明です。脈動食連星の場合は、その振動と関

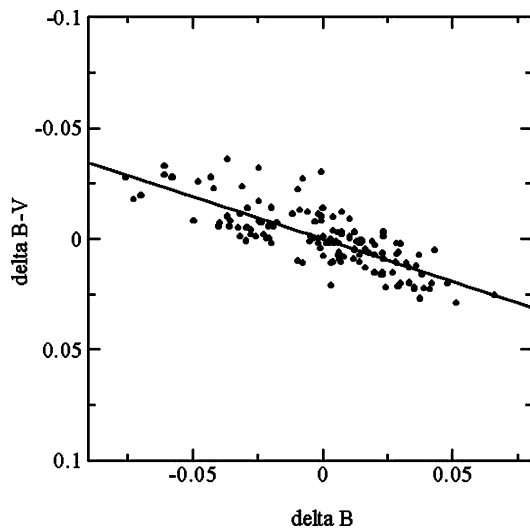


図4 60 cm 望遠鏡によるアルゴル系 AI Dra の色等級図。明るいときほど青くなりますので、この系における短周期変動も脈動が原因であると言えます。

係があるのでしょうか？岡崎 彰氏（群馬大学）は、AB Cas に対して研究を行った結果、公転周期の突発的な変化の前後で振動の周期は変化していないことを突き止めています¹⁸⁾。筆者らは、RZ Cas の場合について同様の議論を行うために、主極小のモニター観測も継続しています（図3）。観測を開始してから少なくとも2002年までは、公転周期の変化は起きていないようです。

筆者らは、またアルゴル系 AI Dra の主星の振動を発見しました¹⁹⁾（図4）。振動周期は約50分です。さらに、この振動もまた観測シーズンによっては、ほとんど見られなくなることも見いだしました²⁰⁾。したがって AI Dra に多重周期によるビートが起きていると考えられます。

2.4 今後の課題

2.4.1 「食」を利用したモードの同定

非動径振動のモードをパラメーターとして「食」における振動の光度曲線を描き、観測と比較することによって、どのモードで振動しているかを同定することができます²¹⁾。RZ Cas などにおける主極小を高時間分解能で観測し、このよう

な解析をしたいと思っております。予備的な結果としては、食外ではセクトラルモード（子午線方向のみに「節」がある振動）が卓越していますが、主極小ではテセラルモード（子午線と垂直方向の「節」もある振動）が卓越して観測されることがわかってきました²²⁾。ウクライナの A. Yu. Gamarova（ガマローバ）らも同様の研究を行っています^{17), 23)}。

2.4.2 B型連星系にも振動がある？

先に、アルゴル系のスペクトル型はA-F型であり、そのためにこれらが振動している場合は、 δ Sct型に分類されていることを述べました。ところが、私たちが約1時間周期の振動を示唆しているもう一つのアルゴル系 U CrB^{24), 25)} のスペクトル型はB6Vなのです。B型星の振動星としては、 β Cep型とSPBが知られております。ところが β Cep型は、B型早期に見られるタイプです。またSPBは、（その名前の由来のように）ゆっくりとした周期で脈動しています。したがって U CrBに見られる振動は、今までに知られていないメカニズムによる励起が原因なのかもしれません。

最近になってウクライナの D. E. Mkrtychian（ムクルチアン）は、「アルゴル型脈動変光星」とでも言うべき振動のタイプを提唱しています²⁶⁾。伴星からの質量移動により主星の物理量が変化するために、これが何らかの原因となって振動が励起されるというわけです。したがって、これは単独星では起こらない脈動ということになります。そうであるならば、この振動はA-F型に限定されたものではないでしょう。

筆者らは、U CrBにみられる振動の詳細を知るべく、この系のモニター観測も継続したいと考えています。

2.4.3 2 m 「なゆた」望遠鏡との同時観測

先にも述べていますが、RZ Cas や AS Eri の振動周期は、 δ Sct型としては短いものです。それよりは、むしろ振動周期が10分ほどの roAp型振動

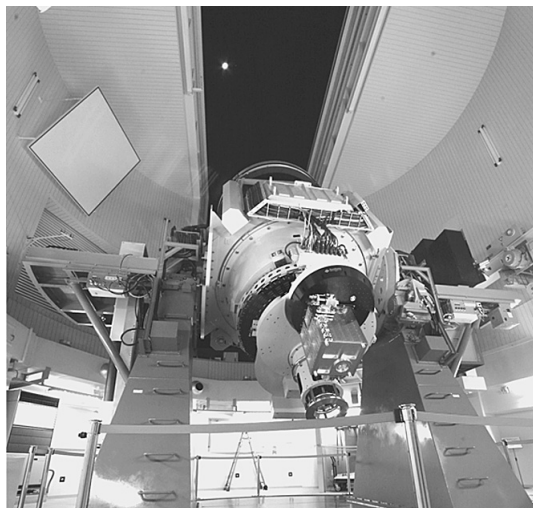


写真2 西はりま天文台 2 m 「なゆた」望遠鏡.

に近いかもしれません。そこで、RZ Cas や AS Eri について美星天文台にて分光観測を行いました。その結果、この二つは明らかな Ap 星ではありませんでした²²⁾。ところが岡山 188 cm で行った分光観測などでは、RZ Cas は同じスペクトル型の星と比較して、Fe や Si の等価幅が少ないことがわかりました²⁷⁾。金属量は振動に影響を与えていますので、他の脈動食連星を含めて金属量をさらに詳細に調査したいと考えています（金属が少ない原因としては、星周物資の存在もあるかもしれません）。

昨年 11 月、筆者らが待望していた 2 m なゆた望遠鏡²⁸⁾（写真 2）が稼働しました。検出器はまだ調整中ですが、今後はなゆた望遠鏡を用いて脈動食連星の分光観測を行いたいと考えています。同時に 60 cm を用いて測光観測を行えば、さらに情報量が増すので、このような試みも行いたいと思います。

3. 「7 cm でも研究ができる」

西はりま天文台 60 cm を用いた研究の話は終わりますが、今回はセンチメートルでのサイエンスについての特集だということですので、これ

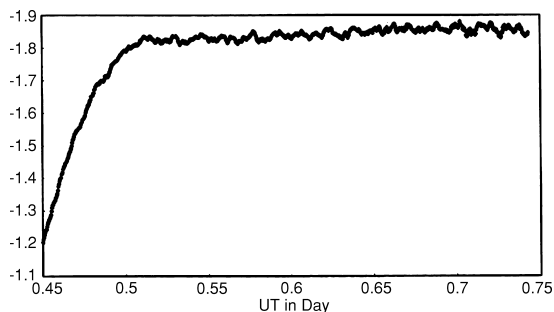


図5 藤井 貢氏 (JAPOA) が 7 cm 望遠鏡で (!) 検出された RZ Cas の短周期振動. CCD 測光による。左側は主極小の増光部です。

を機会にぜひ紹介したいことがあります。

アルゴル系 RZ Cas の測光キャンペーンにより、この系の振動が検出されたことを先に述べましたが、このキャンペーンに参加された方は、ほとんどがアマチュアの方で、用いられた望遠鏡は 20–30 cm クラスの望遠鏡でした^{29), 30)}。最も小さなものは、JAPOA の藤井 貢氏が使用された 7 cm の屈折望遠鏡でした。これに冷却 CCD カメラを装着して観測をされたのですが、RZ Cas の振動を見事に検出されています（図 5）。7 cm でも学術的な研究ができるのです。そして参加者による RZ Cas の振動検出から、海外でも脈動食連星の研究ブームが巻き起こったわけです。

ところで、西はりま天文台公園には「友の会」と呼ばれる活動があります。天文台でのさまざまなイベントなどに参加されて、会員同士や天文台スタッフと交流をしてもらおうサークル活動です。なかには天体写真のコンテストで上位に入られるような方もおられます。そのような方のお一人で会社員の脇 義文氏に「7 cm でも研究ができる」という先ほどの RZ Cas キャンペーンの話³¹⁾をしたところたいへんに興味をもたれ、早速冷却 CCD カメラを購入されました。所有されていた 7 cm の望遠鏡に装着して、食連星の測光観測を始められたのです。その成果は、天文学会などでも発表されています^{32)–34)}。その後、やはり友の会



写真3 小型望遠鏡で連星系の CCD 測光を行っている西はりま天文台公園友の会会員の脇 義文氏（手前）と塚田潤司氏（奥）。西はりま天文台公園にて。

会員で会社員の塚田潤司氏も 10 cm 望遠鏡を用いた CCD 測光を始められ、研究会の場で中間的な報告をされています³⁵⁾。現在、二人は異常小質量連星候補系^{36), 37)}というタイプの連星の測光観測をされています(写真3)。筆者は、今後もこのようなアマチュアの研究活動のサポートも行うつもりでいます。読者の中にも、小さな望遠鏡を所有されている方がいましたら、研究にも利用されてみてはいかがでしょうか。

謝 辞

アルゴル系における短周期振動についての研究は、多くの方の協力で行っていますが、ここでは特に中村泰久氏(福島大学)、竹内 峯氏(元東北大学)、神戸栄治氏(防衛大学校)、定金晃三氏(大阪教育大学)に感謝の意を記します。西はりま天文台の同僚の協力と妻由美の理解にも感謝しています。

参 考 文 献

- 1) 小野智子, 1998, 天文月報 91, 116
- 2) Alonso R., et al., 2003, in *Asteroseismology Across the HR Diagram*, eds. Thompson M. J., Cunha M. S., & Monteiro M. J. P. F. G., (Kluwer, Dordrecht), p. 295
- 3) 西村昌能, 加藤賢一, 定金晃三, 2003, 天文月報, 96, 383
- 4) 高田将郎, 1996, 天文月報 89, 216
- 5) 増田盛治, 神戸栄治, 2003, 天文月報 96, 321
- 6) Tempesti P., 1971, *IBVS* 596
- 7) Ohshima O., et al., 2001, *AJ* 122, 418
- 8) 鳴沢真也, 2003, 天文教育 15, 29
- 9) Narusawa S., Nakamura Y., Yamasaki A., 1994, *AJ* 107, 1141
- 10) Narusawa S., Ozaki S., Okyudo M., Takano R., Nakamura Y., 2005, *PASP*, submitted
- 11) 鳴沢真也, 1999, δ Sct 型星を含む食連星, 連星/変光星ワークショップ1999(県立ぐんま天文台)集録, p. 87
- 12) Lampens P., Boffin H. M. J., 2000, in *Delta Scuti and Related Stars, Reference Handbook and Proceedings of the 6th Vienna Workshop in Astrophysics*, ASP Conference Series, Vol. 210, eds. Breger M. & Montgomery M. H. (ASP, San Francisco), p. 309
- 13) 五百蔵雅之, 鳴沢真也, 大島 修, 1998, 西はりま光電測光装置“HIGOI”による観測, 第8回西はりま天文台ワークショップ「連星/変光星研究会」(西はりま天文台)集録, p. 50
- 14) <http://www22.ocn.ne.jp/~ioroi/kansoku.html>
- 15) 鳴沢真也, 大島 修, Hegedus T., 1999, 日本天文学会春季年会 N28b, δ Sct 型星を含む食連星 RZ Cas 国際測光キャンペーンの中間報告
- 16) Lehmann H., Mkrtichian D. E., 2004, *A&A* 413, 293
- 17) Rodriguez E., et al., 2004, *MNRAS* 347, 1317
- 18) 岡崎 彰, 1998, カシオペア座 AB 星の周期変化について, 第8回西はりま天文台ワークショップ「連星/

- 変光星研究会」(西はりま天文台) 集録, p. 56
- 19) Narusawa S., et al., 2002, IBVS 5279
- 20) Narusawa S., Ioroi M., 2003, Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs. 13, 1
- 21) Unno W., et al., 1989, Nonradial Oscillations of Stars, Second Edition (University of Tokyo Press, Tokyo), p. 21
- 22) 鳴沢真也他, 2000, 短周期振動星を含むアルゴル系の分光観測とモードの推定, 連星・変光星ワークショップ(ダイニックアストロパーク天究館)集録, p. 58
- 23) Gamarova A. Y., et al., 2003, in Interplay of Periodic, Cyclic and Stochastic Variability in Selected Areas of the H-R Diagram, ASP Conference Series, Vol. 292, ed. Sterken C. (ASP, San Francisco), p. 369
- 24) Narusawa S., et al., 2002 Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs. 12, 3
- 25) 鳴沢真也, 脇 義文, 五百蔵雅之, 中村泰久, 竹内峯, 2002, 日本天文学会秋季年会 N47b, アルゴル型連星系 U CrB の短周期振動の検出
- 26) Mkrtichian D. E., et al., 2003, in Interplay of Periodic, Cyclic and Stochastic Variability in Selected Areas of the H-R Diagram ASP Conference Series, Vol. 292, ed. Sterken C. (PAS, San Francisco), p. 113
- 27) 鳴沢真也, 尾崎忍夫, 中村泰久, 2003, はたして RZ Cas には星周物質があったのか?—H α プロファイルの観測とモデル—, 連星/変光星ワークショップ(郡山市ふれあい科学館)集録, p. 44
- 28) 圓谷文明, 2003, 全体計画概要 2 m 望遠鏡と観測装置, 新天文台, 第 14 回西はりま天文台シンポジウム「2 m 望遠鏡を使う」集録, p. 5
- 29) Narusawa S., et al., 1997, IBVS 4502
- 30) Ohshima O., et al., 1998, IBVS 4581
- 31) 鳴沢真也, 1998, 「7 センチでも学問ができる!—食連星カシオペア座 RZ 星の国際測光キャンペーン—」, 第 9 回西はりま天文台シンポジウム「中小望遠鏡による天文学研究と教育」集録, p. 75
- 32) 脇 義文, 鳴沢真也, 2000, アマによる初めての CCD 測光観測, 連星・変光星ワークショップ(ダイニックアストロパーク天究館)集録, p. 76
- 33) Waki Y., Narusawa S., et al., 2002, Annu. Rep. Nishi-Harima Astron. Obs. 12, 1
- 34) 脇 義文, 鳴沢真也, 2003, 日本天文学会秋季年会 N10c, 異常小質量連星候補系 VV UMa の測光観測
- 35) 塚田潤司, 脇 義文, 鳴沢真也, 2004, 短周期連星系の CCD 測光の中間報告—AW UMa と DO Cas—, 連星・変光星ワークショップ(相模原市立博物館)集録, p. 112
- 36) Yamasaki A., et al., 1986, Ap&SS 118, 279
- 37) Narusawa S., et al., 2002, PASJ 54, 139

Photoelectric Observations of the Periodic Oscillation of Algol Type Systems

—Science with the 60 cm Telescope at the Nishi-Harima Astronomical Observatory—

Shin-ya NARUSAWA

Nishi-Harima Astronomical Observatory, Sayo-cho, Hyogo 679-5313, Japan

Abstract: Many primary stars in the Algol-type systems are recently recognized as pulsating stars. Although the traditional classification scheme indicates that such stars are the δ Sct stars, there are some doubts in this classification. It is proposed that in such a system the oscillation in the primary component is strongly affected by the mass transfer from the secondary to the primary.

We have been observing such variables, especially focusing on RZ Cas, with the 60 cm telescope in the Nishi-Harima Astronomical Observatory. In this article, we will report our recent results.

We will also present photometric studies of the eclipsing binaries by amateur observers using portable telescopes.