

実践報告

教員・社会人研究者たちによる共同研究

私たちはこうして RZ Cas の謎を解いた

大島 修 (岡山県立鴨方高等学校)

1. 私たちの手で解いた 50 年来の謎

本誌前号の2003年1月号において、鳴沢真也さんが書いた解説記事にあるように、時によって光度曲線が皆既食的だったり部分食的だったり不思議な変化を示す星として長年の間問題にされてきた食連星カシオペア座 RZ 星 (以下 RZ Cas と記す) の謎を、私たち日本の教員 (全員が本会会員) や社会人研究者の手で解くことができました。そして米国 *Astronomical Journal* 誌に掲載されました (Ohshima et al. 2001)。ただ鳴沢さんの解説記事では、解説全体の構成上からか、肝心の謎解きの部分がさらっと流してありますし、また鳴沢さんの視点から書かれています。実際には謎解きの部分は、もっともっと複雑で、多くの人間模様の絡み合ったものでした。そこで、編集部と相談した上で編集部のアドバイスにしたがい、謎解きの部分を中心に据えて、1950年代から謎とされてきた RZ Cas 問題をどうやってわれわれが解いていったかを紹介することにしました。真実に到達するために観測事実を曇りのない眼で見ることの意味、離れていながらオープンに議論しながら研究を進めることができたメーリングリストという手段、そして科学教育に携わる教員自らが参加したパラダイム転換、といったあたりに焦点を当てながら書いてみることにします。

2. 登場人物 一論文の共著者たち一

まず謎解きに参加したメンバーを紹介しましょう。共著者のうちでもっばら1シーズンを通して測光観測に取り組んだのは、あいうえお順に、赤沢秀彦さん (岡山県金光中学校教頭)、荒井菊一さん (埼玉県羽生実業高校教

諭)、大倉信雄 (岡山市、自営業・農業)、藤井貢さん (倉敷市、設計業自営)、森川孝一さん (岡山県井原市教育委員会社会教育主事、現井原市立出部小学校教諭) の5名です。使用した望遠鏡と観測装置は表1に示します。他の共著者で、鳴沢さん (西はりま天文台)、川端哲也さん (美星天文台)、助言者格の竹内峯先生 (東北大学) を除けば、筆者を含め教員4名、自営業2名の、いわば非職業的社会人研究グループと言ってよいでしょう。前記5名の観測者は、全員 JAPOA (日本アマチュア光電観測者協会) 会員でもあり、そこで光電測光・CCD観測を本格的に学びながら励ましあって観測を続けてきました。そのうち、赤沢・大倉・大島・藤井の4名は高校生時代に知り合い、それ以来「物理観測をしよう」を合言葉にして、測光・分光観測を志して、自分の観測所に機材を整備し、仕事の合間にゼミを開きながら観測を続けてきていました。荒井さんとは共に長年 JAPOA の主要メンバーとして北村正利先生の指導を受けながら共に研鑽してきた仲間です。また、最も若い森川さんが筆者と同じ指導教官を持った大学の後輩であったことは、筆者を美星天文台に尋ねてきて出会い知りました。それ以後、彼は観測環境を整備し自宅で CCD 測光を熱心に始めていました。

3. 1997 年以前

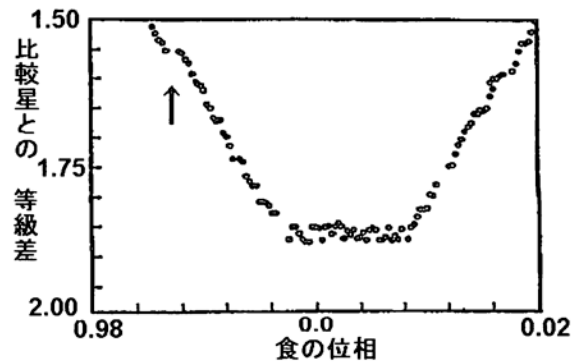
以前から鳴沢さんは、師匠である福島大学教育学部の中村泰久さんらと RZ Cas 問題に取り組み、光度曲線の解析からこの連星系の幾何学としては、部分食になることが本質であり時々何らかの理由で皆既食的な光度曲線である食の底が平たくなるという解釈が正しの

| | 観測所 | 望遠鏡 注1 | 観測装置 と測光帯域 |
|----------|-------------|----------------------------|--------------------------------|
| 赤沢 秀彦 | 自宅 | 28cmSC | 光電測光(AES 製、注2)、BV |
| 荒井 菊一 | 自宅 | 25cmSC | 光電測光SSP-5 (OPTEC製) - 、BV |
| 大倉 信雄 | 自宅 | 35cmSC | 光電測光 (AES製) 、BV |
| 藤井 貢 | 藤井美星 観測所 | 7.5cm屈折 (28cmSCに 同架) | ST-7 (SBIG製)、R |
| 森川 孝一 | 自宅 | 25cmSC | ST-7 (SBIG製)、I |

表1 活躍した観測者と望遠鏡、観測装置
(注1) "SC" はシュミットカセグレン光学系を示す。
(注2) この光電測光装置は、筆者と藤井貢の2人が開発し、富田弘一郎さんの仲介によりAESにおいて製品化したもの。なお開発した両名は貧乏なので製品を購入できず、いまだに製品を所持していない。

であって、それまで知られていたケフェウス座U星のように皆既食が本質で時々部分的光度曲線を示す連星系とは逆であるということを示しました(鳴沢真也、1992年、Narusawa et al.1994)。

それ以来、鳴沢さんたちは、どのような理由で光度曲線が食の平底を示すのかを解明するために努力を重ねてきました。岡山天体物理観測所(以下OAOと記す)の188cm望遠鏡で分光観測を2度行いました。さらに当時測光観測で活躍していたJAPOAの会員を中心に再三共同観測を呼びかけました。筆者も参加して測光分光同時観測に成功しています。1995年秋にも測光分光同時観測を試みました。鳴沢さんからは、当時美星天文台に勤務していた筆者に対して、OAOでのH α 線のスペクトル観測時に、同時観測として、美星天



RZ Casの主極小での“平らな底”の観測例
福島大学45cm鏡による(1991年11月25日、V等級)

図1 見事な平らな底を示す食の光度曲線

福島大グループも観測していた一時停止現象(鳴沢、1992年、↑印は筆者記入)。Narusawa et al.(1994)では、この一時停止現象を示す部分は隠されて発表されている(「天文教育」2003年1月号P.32図5参照)。

文台でも星周物質の特徴が良く現れる7774Å付近にある中性酸素のスペクトルを撮って欲しいという共同観測の提案があり、受けることにしました。つまり、鳴沢さんたちは、食の光度曲線の平底を引き起こす原因として、何らかの星周物質(伴星からの降着物質など)が働いているのではないかという仮説を持っていたようでした。

なお、これらの呼びかけや議論はもっぱら連星研究のための日本語メーリングリスト“binj”上で行われていました。このMLは当時は美星天文台で運営していましたが、その後ML管理者の筆者が学校現場へ復帰したため、西はりま天文台へ移管されました。

4. 眼を曇らせた「平底(皆既食的)か、部分的食のか」へのこだわり

この1995年シーズンの同時観測の呼びかけに応じて、前出の荒井さん、藤井さんの他に、永井和男さん(神奈川県、会社員)と故・大森茂雄さん(東京都、中学校教諭)、安田岳志さん(姫路市星の子館職員)も測光観測に応じています。これらの観測は後に、鳴沢さん

がまとめて発表しました (Narusawa et al. 1997) が、後になって見返すと、「平底は観測されなかった」という皆既食のか部分食のかという判断基準に大きな注意が向けられている記述が見られます。

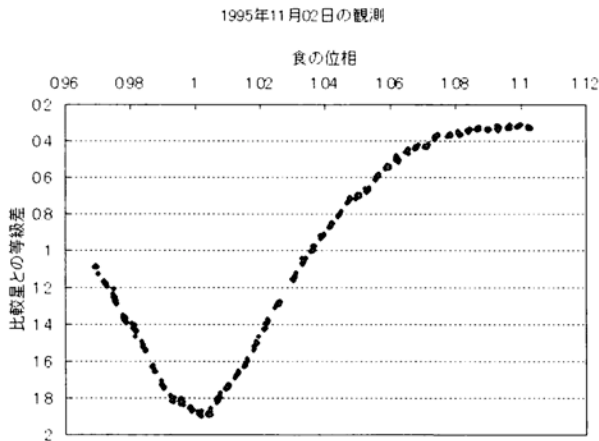


図2 凹凸があるために無視された光度曲線

この光度曲線は、凹凸があり観測精度に問題があるとしてNarusawa et al.(1997)では発表されなかったが、実はこの凹凸こそが δ Sct振動の存在そのものを示していたのだった。

そして図2に示した荒井さんの11月2日の観測は、図示する光度曲線からはずされてきました。その理由は、皆既的とも部分食的とも言いがたく、がたがたした形は測光精度が良くないためであると鳴沢さんは判断したそうです。この夜は観測条件がとても良かったようで、400点も観測した荒井さんは、この判断が不満だったのでしょう。筆者に会った時にその光度曲線を見せて、どう思うかと見解を求められました。筆者は、個々のデータの散らばりは非常に小さく内部誤差が少ないこと、曲線は大きくうねってはいるものの、頻繁に比較星と比較しながら観測しているので外部誤差も少ない。また荒井さんの長年の観測データに接してきた経験から見て、冬場の関東地方がいかに透明度とその安定性が良く、高精度の測光観測に適しているかを知っていました。これらのことから判断して、リアルな現象を表しているのではないかと判断

しました。

きれいな光度曲線からはずれて、凸凹にうねったような変光は何かを表しているに違いないと思いました。しかし、その当時はそれが何であるのか全く見当が付きませんでした。

一方、美星天文台の近所に観測所を置く藤井さんもRZ Casを頻繁にCCD測光していました。OAOへ観測に来た鳴沢さんを筆者と一緒に訪ねた藤井さんは、「RZ Casは、食の途中で段を作るような変光を示すことがよくある。この現象は何度も起こっていて、天候のせいとは思えない。何なのか気になる」と言いました。私は頭をひねるだけでしたが印象に残っていました。なお、図1に矢印で示したように、実は福島大学でもすでにこの現象を観測していましたが、筆者が後で気付くまで、注意を引くことはなかったようです。

以上の荒井さんと藤井さんという2人の観測者とのやり取りは深く筆者の心に残り、それが、今回の謎解きのきっかけになったのでした。

5. パラダイム転換のきっかけになった論文コピーの依頼

1997年の11月、鳴沢さんからBAAS, Vol. 28, p.1375という論文を読みたいので、筆者にOAOの図書室でコピーして送って欲しいという依頼がありました。論文の現物を見ると、米国天文学会での発表要旨を印刷した冊子で、図もなくわずか10数行のものでした。縮刷された文字は小さく読みにくいので、コピーを送るよりもメールに手打ちして送った方が読みやすいと思い、binj MLへ投稿しようと思いました。その短い英文をメールにタイプしていく時に、途中から書いてある内容の重要性に気付き、胸がドキドキしてきたのを覚えています。このメールをきっかけにした謎解きの全てが始まったのでした。

その報告に曰く、「この (RZ Cas の) 食の

光度曲線は毎回わずかに形が異なるが、平均した光度曲線をテンプレートにして、個々の食の光度曲線から差し引いた残差は、約25分周期で ± 0.04 等の準周期的な振動を示す。その位相は連続した食ごとに約15分のズレがあるが、その構造は良く似ている。我々は、この光度曲線上の振動を、低温伴星からの質量移動の結果、主系列星である主星の表面にできた高温斑点と低温斑点の証拠として解釈する」と書いてあります。

その直後に付けた筆者の興奮の混ざったコメントをそのままコピーします。「藤井さんがRZ Casは食の光度曲線のスロープ部にいつも不整があると言っていました、何と、光度曲線に準周期的振動が乗ったものであったとは。この、平均光度曲線をテンプレートにして個々の食の光度曲線の残差を求めるという方法は、これまで国内で得られたデータに適用してみて、追試する価値がありそうですね。

皆既食的と思っていたのは、単にこの振動の山がちょうど食の中央に重なったためなのでしょうか。それなら、位相が少しずれるだけで、この前の赤沢さんの観測で、皆既食的な底が傾いていた現象も説明がつきそうですね。また、その振動の振幅が大きい時とそうでない時で「皆既」的だったり、「皆既」が見られなかったりということで説明がつくのでしょうか。その可否は、これまでの国内のデータが教えてくれればいいですね」とその重要性を強調し、過去のデータを持つ鳴沢さんに追試を勧めています。

藤井さんからは即座にレスポンスがありました。「短いがとてもエキサイティングな論文ですね。光度曲線を見ると短時間ですが多々スロープ部に光度一定の部分が出現し、心に引っかかっていました。その部分をエイヤッと食中央部に移動させると、なるほど怪奇になってもおかしくはないですねえ。追試の価値ありですね。」(私たちはその不思議な

特徴から、「皆既」のことを「怪奇」と呼んでいました。)

鳴沢さんの反応は、翌日のメールで「大島さん、OAOまで行ってコピーして下さり、ありがとうございます。期待以上に、興味をそそられる文献でした。(中略)それにしても、なぜか海外の方々は、“怪奇星斑説”ですね。(中略)いずれにせよ、国際的に怪奇ブームですね。」と少なくない興味は示してくれましたが、鳴沢さんがたくさん持っている過去の観測データをDavisたちと同様の方法で追試する様子はなかったので少しがっかりしました。

なお、鳴沢さんが本誌前号に書いたような「そして、『波』という文字が目に入った瞬間に、AB星をやっていた私は「脈動星ではないか?」と推論したのです」(「天文教育」2003年1月号P.33、右12行)という状況ではありませんでした。第一「波」という文字はそこにはありません。

荒井さんからは「今回の論文はかなりのインパクトを与えてくれましたね。」「それにしても、以前に迂人(荒井さんの自称)の観測したRZの光度曲線が歪んでいたのを、観測精度に自信がなかったとき、大島さんが『それはリアルだ。』と言ったのが今頃生きてきたようですね。」という反応がありました。

その数日後に、大倉さんと赤沢さん、藤井さんの独立した観測が行われました。大倉さんの観測を紹介する筆者のメールです。「最高の透明度=測光夜に大倉さんは観測し、時間分解能も高く申し分ありません。大倉さんの話を聞くと、確実に数ミリ等級の精度が出ているようです。(中略)周期25分程度の大きなうねりが食に重なっているのが良く分かります。測光精度からみてリアルであることは間違いのないと思いますが、さらに同じ夜の赤沢さんの独立した同時測光データがある

ようですので、現象のリアリティはさらに強固になるでしょう。]

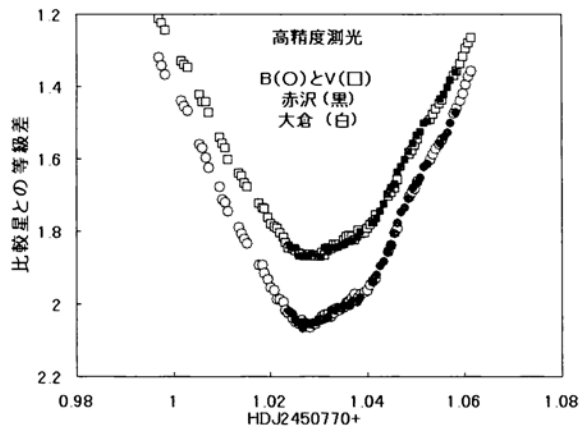


図3 好条件測光夜に同時独立観測でとらえたRZ Casの光度曲線の歪み

ゆがんでいる光度曲線は、一見誤差が多い観測のように見えるが、2地点での観測が見事に一致していることからリアルな現象であることがわかる。

さらに、その数日後、都合よく秋田大学で連星／変光星研究会が開かれ、この分野のプロとアマの研究者が集まります。その場を借りて、これまでRZ Cas研究の中心をになってきた鳴沢さんたち国内研究者を、星周物質説から転向してもらい、日本におけるRZ Cas研究のパラダイム転換を図りたいという気になりました。以下は binj ML へ投稿した筆者の発表の様子を報告したものです。「11月18日に大倉 (BV) 赤沢 (BV) 藤井 (V) さんたちが、それぞれ独立した測光を実施し、ミリ等級に達するすばらしい測光精度で食を捉えた。食の底は右上がりの「斜めボトム」。特に増光部に見られる光度曲線のうねりは、大倉・赤沢さんの光度曲線が見事に一致していてリアルな現象である。この光度曲線を裏返しにして重ねると、平均光度曲線はきれいな食の曲線となる。その平均からはみ出した部分に注目すると、約25分周期のうねりが載っている。Davisたちの準周期の発見を裏付けている。

そこで大島は、簡易的なシミュレーションとして、食の光度曲線を放物線で近似、それに振幅0.03等のSin波を重ねあわせると、フラットボトムを再現できることを示し、Sin波の位相をずらせて重ねあわせ、斜めボトムも再現した。さらにこの重ねあわせで、食の両側のスロープにおける光度曲線の歪みを説明できる。ただし、一時停止現象のような急激な変化を説明するには、単なるSin波では緩すぎるが、Sinの3乗のうねりを重ねると、うまく再現できる。これは実際のRZ CasにSinの3乗の変動があるという意味ではなく、その程度の複雑さを持った変動が存在するというを示している。こうして、RZ Cas光度曲線の謎は、食の光度曲線+周期約25分の変光の重なりで説明できることを示した。」

6. δ Sct 説の登場

さらに筆者の発表は、この発表当日の早朝に検討したことを述べている。「どのような原因でこのようなうねりが生じるかを検討。星斑が原因であるとすれば、斑点を円形の黒体で近似すると、うねりの周期から見て、斑点は主星の半径のわずか0.14%程度のサイズであり、それが±0.03等の変動を起こすには、黒点では説明できず、周囲に比べて有効温度が2.3倍程度の bright spot である必要がある。しかし、少なくとも食中央を挟んで3つうねりが必要であるが、これはどんな形の spot を主星上にどんなに配置するか、極めて困難であることに、発表当日の早朝に気づいた。そうなるに、周期的なうねりを与えるためには、主星の振動による変光 (δ Sct 変光) か、伴星の脈動により食時に見えている主星の面積を変えるか、のどちらかである。これらの判別は、食外と副極小に周期的変光が見つかるか否かで判断可能。」

実は、この部分の報告の元になる「早朝の検討」時に、筆者が考え込み、実際に声に出してうなっていたのでしょ。宿舎の同室で

寝ていた鳴沢さんが目を覚まして来て、発表用に筆者が描いた主星の振動を示した図、つまり食の全位相にわたって短周期変動の乗った光度曲線の絵を見て「 δ Sct だ！」と叫んだのでした。というわけで、「天文教育」の前月号に鳴沢さんが書いたように、論文を見るやいなや脈動だと叫んだのでもなければ、最初に見破ったのでもありませんでした。ここにいきさつを正確に記しておきます。

7. 副極小と食外における短周期変光の確認

では、この δ Sct 説はどのように確かめられたのでしょうか。

筆者の binj 投稿メール「RZ Cas の副極小付近での振動を藤井さんが12月4日に見事に捉えました。観測は何と7.5cm屈折望遠鏡にST-7、Rバンド 観測間隔は約30秒で、積分時間は20秒です。オリジナルデータのままだでは分散が大きかったので、5個ずつの移動平均を行い平滑化しました。そして、副極小の変光成分を取り除きました。この処理後、観測誤差はミリ等級のオーダーに達しているのが分かります。PDMで周期解析すると、0.0158day=22.8分周期が卓越しています。」

すると京都大学の加藤太一さんから、「25cm + ST-7 という比較的似た組み合わせで、off focus で測光すると、駆動系のピリオディックモーション（ギアのバックラッシュ）などの影響が顕著に現れた例を経験しているからです。（中略）一度、aperture size をずっと大きくしての測定と、比較星—チェック星での変化の有無なども調べていただけませんかでしょうか。」

筆者の返信「藤井さんのデータをチェックし直してみました。比較星の生カウントも、比較星—チェック星も、ともにグラフ上では有意な周期は見られませんでした。PDMにもかけてみましたがピリオドグラムはWhite Noise 的で、RZ Cas の周期性とは全く様相が異なっています。事前にチェックできて良

かったです。有益なアドバイスありがとうございました。というわけで、藤井さんの観測で副極小付近の22分振動はリアルとみてよいと思います。それにしても、ノコギリの刃のようなすどい波形です。もっとも、観測されたtemporary haltを再現するには鋭い波形の方がよいのですが」

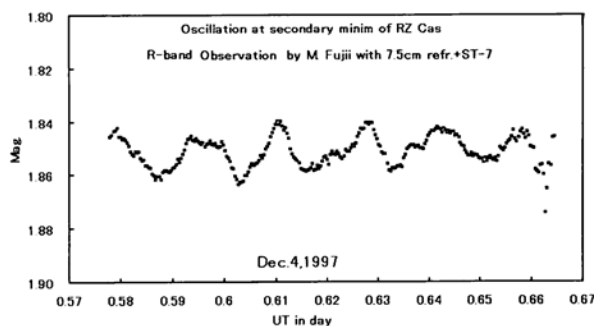


図4 副極小付近で観測された短周期変光
藤井さんによる δ Sct 振動を示す最初の観測。
データは5個ずつの移動平均をかけ平滑化してある。

竹内峯さん（東北大学）からの投稿「（前略）結論としては、たて座 δ 型である可能性が強いということです。もしそうであるとする、この型のもっとも高温の星を発見したということになりそうです。理論計算では、たて座 δ 型不安定帯の高温側極限は $\log T_{\text{eff}}$ が 3.9 あたりということですが、RZ Cas はこの極限にあるようです。

近年の研究結果では、たて座 δ 型の各モードは、それぞれの極限周期解（振動が落ち着く先）まで成長しておらず、さまざまなモードがそれぞれ一時的に励起されている例があるのでないかといわれています（例 Kurtz 1988）。わたしは、多くのモードが競合的に存在しており、振動のエネルギーがそれらの多くのモードに分配されつつ消費されるので、安定した変光曲線が得られないのではないかと解釈しています（定量的論証はこれからですが）。したがって、RZ Cas のたて座 δ 型変動は、時により著しくなり、時により弱まるというような振る舞いを見せるのではないか

とも思われます。今後の追試にあたって、注意して頂きたいと思います。

この星が、これまで知られていたなかで最も短周期高温の星であるとする、連星ですから物理量も詳しく調べることができ、精度も高い模型計算を行える希望があります。盾座デルタ型変光星の研究の貴重なサンプルとなるでしょう。藤井さん、大島さんらの大きな成果ですね。」

こうして藤井さんの観測から、RZ Casの短周期変動は、 δ Sct 振動によることが証明されたのでした。メーリングリストが実に有効に機能していることがわかります。

なお、前号の鳴沢さんの記事の冒頭の部分も、藤井さんの観測へと置き換える必要がありますね。もっともそこに書かれてある大倉さんの観測データ自体の価値を下げるものではありません。

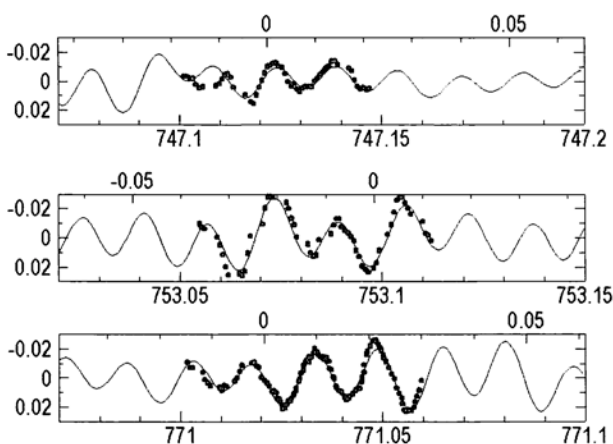


図5 食の中での δ Sct 変光

観測された光度曲線から食の変光を差し引いた残差を示す(黒点)。実線はフーリエ解析からの再現。

8. 論文化に向けて

こうして、1999年1月まで共同観測が続けられ、多くの貴重なデータが得られました。後はデータ解析と論文化です。

まずは速報として、国際天文学連合第27・42委員会(変光星と近接連星分野)の情報誌IBVSへ報告しました(Ohshima et al.1998)。

RZ Casの食の全位相において、周期22分の短周期変光が見られ、これはこれまでに見つかった最も短周期のたて座デルタ星型変光である。これまで問題になってきた食の光度曲線の変化は、この短周期変光と食の光度変化の重ね合わせとして説明できることを示唆しました。

速報の次は本論文です。予測ができて、それが実際の観測と一致することを示すことができなければ、説得力のある本格的な科学論文とは言えません。一般に δ Sct型変光は複数の周期成分を持ち、光度曲線はそれらの重ね合わせとして観測されています。そこで観測データをフーリエ解析し、複数の周期成分を検出し、それを再合成したものが、実際の観測を再現することを示すことにしました。フーリエ解析に使用した観測データを再現できるのは当然ですが、それだけでなく解析に使用していない別の夜の観測をうまく予測できるかが問題です。

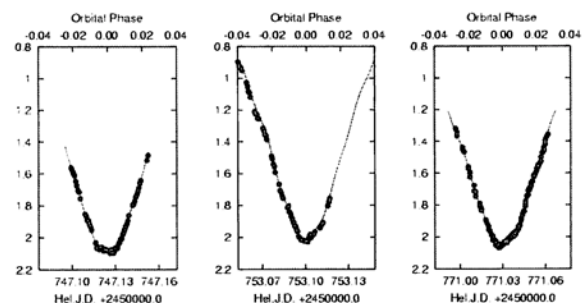


図6 データ解析に使った食の光度曲線(黒点)と合成により再現した δ Sct 変光(実線)

そのためには、観測された光度曲線から食の変光成分を差し引き、短周期成分だけを抽出しなければなりません。この星の場合、明るさを等級から真数で表現した光度へ変換すると、食変光をうまくフィッティングできるのは奇数項をゼロと置いた6次の多項式であることがわかりました。図5に、こうして抽出した主極小における短周期変光成分を示します。この解析にはPeriod98というフリーソフトを見つけてきて利用し、確からしい周期

成分5個を検出しました。周期だけでなく、振幅と元期も明示して後日の検証に耐えうるものにしました。

まずは、解析に利用した観測を再現しました。それを図6に示します。次は、いよいよ解析に利用していない観測の予測です。図7にその予測再現と実際の観測を示します。荒井さんによる精度の良い長時間の観測と微妙な凸凹まで見事な一致を見せています。この成功は、飛び上がるほどうれしかったです。

こうしてAJへ投稿した私達の論文は、「長年にわたり異なる観測者達によって観測されてきた主極小の形の変化を、この著者達は主星の δ Sct型変光と食のカップリングで説明できることを示した。英語表現の若干の手直しをするだけで、出版に値する。」というレフリーの好意的評価をもらい、無事受理され出版されたのでした。

終わりに

今回の成果は、RZ Casの謎の解明に執念を持って挑みつづけた鳴沢さんという存在と社会人研究者との共同研究の結果と言えるでしょう。思えば、1982年にJAPOAが結成され、皆で合宿を繰り返しながら光電観測のノ

ウハウを身に付け、測光器を開発し製品化し、全国の教員やアマチュアに光電観測を広めた、その活動の集大成の結果とも言えるでしょう。筆者自身にとっては、教育学部を卒業して25年めにして初めての本論文の筆頭筆者となったのでした。

JAPOA結成当初から顧問として、私たちに励まし導いてくださった北村正利先生に感謝申し上げます。

メーリングリストbinjで議論に参加して下さった方々、秋田大学での連星系/変光星研究会で有益な議論や示唆を下された参加者のみなさんにも感謝いたします。

参考文献

- Davis, S. M. and Balonek, T. J., 1996, BAAS, 28, 1375
 鳴沢真也, 1992, 「天体光電観測ガイドブック」JAPOA編, p.133
 Narusawa, S., Nakamura, Y. and Yamasaki, A., 1994, A.J., 107, 1141
 Narusawa, S., Arai, K., Nagai, K., Ohmori, S., Fujii, M. and Yasuda, T., 1997, I.B.V.S., No.4502
 Ohshima, O., Narusawa, S., Akazawa, H., Arai, K., Fujii, M., Kawabata, T., Morikawa, K., Ohkura, N. and Takeuti, M., 2001, A.J. 122, 4180
 Ohshima, O., Narusawa, S., Akazawa, H., Fujii, M., Kawabata, and Ohkura, N., 1998, I.B.V.S., No.4581

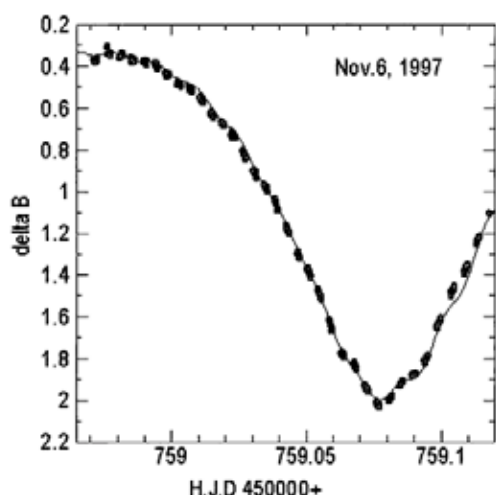


図7 解析に使っていない食の光度曲線（黒点）に対する予測（実線）
 微妙な光度曲線の歪みまで正確に予測再現できた。