

〈2022年度日本天文学会天文功労賞〉



ベテルギウスの5色測光を続けて

大金 要次郎

〈〒185-0034 東京都国分寺市〉

e-mail: hqk00742@nifty.com

半世紀以上も前に聴講した鈴木敬信先生の天文学講座で「ベテルギウスの光電測光をすると良いのだが」という言葉が気がかりでした。しかし教職の合間には果たせず、定年間近になってようやく測光器の試作に取り組み観測してきました。その間多くの方々のご指導を得まして、この度観測結果をまとめることができました。すでに使われなくなった古典的な手法のままで継続してきた観測の結果ですが、ご指導下さった方々への感謝の気持ちを込めて、その経過をまとめてみました。

1. 明るく赤い星の観測

オリオン座のベテルギウスは冬の夜空で明るく目立つ星ですので、小学四年生の教科書で「冬の大三角」の一つとしても有名です。また、変光星としては平均光度が0.5等と明るいので眼視観測の対象ともなっております。ところが詳細な観測をしようとするとき近くに適当な比較星が見つからないことから結構難しい対象となっております。

明るさの面だけからいうと、ベテルギウスの周辺には冬の「大三角」のシリウス・プロキオンに加え冬の「ダイヤモンド」と呼ばれるベテルギウスを取り囲むリゲル・アルデバラン・カペラ・ポルクスを含めた六星も明るいので、これらを明るさの基準とした比較星とできればよいのですがこれらはすべて不都合と言えます。それは星の光は地球の大気を通して地上へ達することから、星の天頂距離によって大気の厚さが異なるため大気吸収による減光の量が異なります。したがって、観測対象とする天体と明るさを比較するための比較星とがほぼ同じ天頂距離であることが望まれます。プロキオンはベテルギウスが南中したすぐ後に天

頂距離がほぼ同じになりますが、星の色が異なるので問題ですし、その約1時間後にはアルデバランの天頂距離が同じになるのですが、アルデバランは変光星ですので比較星にはできません。

また、眼視観測の場合でも星の色の違いが人によって感度を狂わせます。一般的に肉眼では暗いときに赤色は他の色より感度が低い傾向があることがわかっています。測光器を用いた観測でもセンサーとフィルターおよび望遠鏡を含む光学系のシステムと測光の標準システムとの間に差異があれば補正をする必要があります。この補正は色指数補正と呼ばれています。冷却CCDによる観測では一般に変光星と同一画像内に写した比較星との等級差を求めて変光星の等級を決めますが、ベテルギウスでは同一画像内に明るい比較星を求めにくいのが普通ですし、暗い星に対してベテルギウスの明るさが飽和してしまい測定が難しくなります。

以上の理由でベテルギウスの明るさの変化を厳密に観測した報告がほとんどないのが実情でした。私は1991年より国立天文台の田中済助教授（当時）の指導のもとでベテルギウス専用ともい

える，フォトダイオードをセンサーとした測光器の作成を始めました．フォトダイオードは感度が低いのですが出力電流の大きさの直線性の範囲が大きく，明るい星の測定に向いています．さらに，当時の一般の冷却CCDでは測れない紫外域の感度も小さいながら存在しており，赤外部の感度はかなり大きいのが特徴です．

また，ベテルギウスの測光観測をしようとした当初の目的は，変光周期が諸説あって不確定であったことについてこれを確定してみたいということにありました．

2. フォトダイオード使用の測光器の作成

田中先生のご指導を受ける4年前に「現代天文学講座13“天体観測セミナー”」[\[1\]](#)で紹介されていたフォトダイオードを使用した測光器を試作してみました．ところがこれが全く作動しないことがわかり，当時東大におられた田中先生に点検をして頂きました．その結果は極めて大きなノイズが発生していて，拍手の音を感知するマイクロフォニックノイズもあるほどでした．原因はモールド型のオペアンプのサイズが2 cm角と大きく更に1 GΩのフィードバック抵抗が入手できなかったため，9500 kΩの抵抗を2個直列に並べるなど配線が長く引き回されていること等々でした．

その後勤務先の高等学校での仕事の事情で改造を中断していましたが，定年を前にして勤務先の校長と同僚のご理解が頂けて，1991年に研究生となって，それ以来継続して田中先生に師事することとなりました．

測光器のセンサーは浜松フォトニクス製のS1226-5BQというフォトダイオード，初段のオペアンプはBURR-BROWN社のキャンタイプの小型で高性能なOPA104CMを使用して，フィードバック抵抗を10 GΩとしたため，電流電圧増幅率が 10^{10} となりました．このとき，10 GΩの高抵抗は秋葉原電気街のどこの店を探しても見つか

らず製造元の進工業(株)へ問い合わせたところ，卸販売は100本単位と言われて驚きましたが2本程度であればと試作品として提供して頂けることになりひと安心致しました．

基盤や部品には取り付け時に指で触れることで塩分が付着して電流のリークが生じないように心がけて，取り付けの前後には洗浄液で十分に洗浄して，主要部分にはテフロンスタンドも取り付けで絶縁状態を良好に保つことを配慮しました．なお，2段目のオペアンプをアテネーターとして組み込み，最大 10^3 倍のゲインを得たため，測光器からの出力は電流電圧増幅率が 10^{13} となりました．

1992年に作成した感度テスト用の測光器では市販のアルミシャーシを二つ使用して，光学系とフォトダイオード以降の電気系とを別に作成してこれを結合させた形を取りましたが，1994年にはフリップミラーをロータリー式としてUBVRIの5色のフィルターを取り付けた試作器を作成しました．

1999年には新たに一体型の測光器を作成して，フリップミラーを取り付け，ロータリー式のフィルターもUBVRIの5色として観測に利用し始めました(図1)．

この間に田中先生が設計されたA/Dコンバーターを作成して測光器本体のフィルターとアテネーターのステータス情報が観測データと共に送



図1 自作の測光器．

信して記録できるように改造したため観測の効率が向上しました。

また測光器とA/Dコンバーター他の電気系統の部品は故障時に備えて同一のものをもう一組作成してバックアップとしました。このバックアップは後の故障時に直ちに交換ができて、さらに修理の際には比較しながら回路の点検が行えて大変便利なものとなっています。

3. ベテルギウスの5色測光

観測地は中央線国立駅の北約1.3 kmの地点で武蔵野台地南端の高台で国分寺崖線という崖の肩にあるため南が開けていて、時折カノープスも望むことができる立地です。移転してきた1960年代には天頂で4等星が見える程度でしたが、次第に市街光が明るくなり近年では北極星をどうにか探せるという程度の状況となりました。幸いフォトダイオードは感度が低いので明るい星の観測には大きな影響が出ていないと感じています(図2)。

ベテルギウスは赤くて明るい星の代表であるため近傍に適当な比較星がありません。そこで測光の方法としては一般的に行われている相対測光ではなく全天測光という方法で観測をします。この方法は天頂距離や色の異なる複数の星を測定して、大気による吸収量の補正と色指数による補正の双方を行います。

私は田中先生に倣って、大気補正と色補正を重回帰によって一つの補正式を求めることでベテル

ギウスの明るさを推定する方法を観測の都度行っています。この時明るさの基準とする10星以上でUVBRIの5色のバンドで測定しますが、フォトダイオードは紫外域の感度が非常に悪く、V等級で3等程度の星でもUバンドでは5分程度の積分時間をかけて観測しますので、それぞれの基準星で視野への導入やフィルターの切りかえ、基準星周辺の空の明るさを測定していくと少なくとも4時間程の観測時間を必要とします。その間に大気の透明度が変化すると変化後の測定のやり直しあるいは観測の中止を余儀なくされます。

2020年秋以降は後述するRed Leak(通称赤モレ)の補正の観測が加わり一晩での観測時間が4時間を超えてしまいます。星空が美しい夜でも、観測後に引き続き星空観望をする気力は残っていないのが残念ですし、厳冬期にはスキーウェアの上に更にキルティングを重ね着して衣服に貼る懐炉も使用して観測を続けていると、冷却CCDを温かい部屋からリモート観測の方々が羨ましく思われてくることもあります。

4. フィルターのRed Leakとその対策

岡山理科大学の大島修氏から、私の20年以上にわたるベテルギウスの測光観測のデータを世に残すべきだと論文として発表することを勧められました。そこで東京大学の高梨直紘・谷口大輔(現在は国立天文台)両氏にも加わって頂いてOpen European Journal on Variable Stars(OEJV)へ投稿することになりました。

ところが、私の5色測光のデータのうち、BとUのバンドがベテルギウスの標準的な値よりもかなり明るく求められていることが問題になりました。私自身はベテルギウス以外のスペクトル型がBからKまでの範囲の基準星では回帰直線からのそれぞれの観測値の偏倚に問題ないことから、回帰直線を外挿して得られたM型のベテルギウスの値が標準的なJohnsonシステムと異なる独特なシステムとなっていると思っており、標準システ



図2 観測地であるひかり天体観測所。

フィルターの透過率

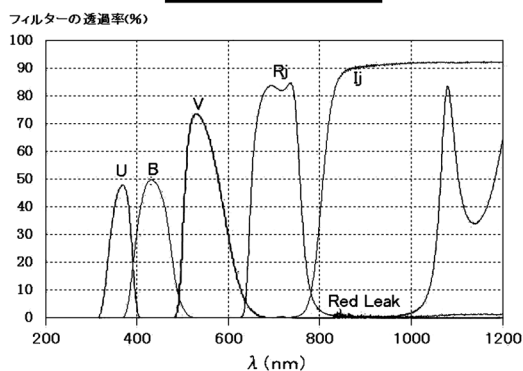


図3 フィルターの透過特性.

ムと異なる B_{og} バンド, U_{og} バンドと考えてそれぞれの絶対値ではなく変動の推移を問題にしたいと考えておりました. しかし, 高梨氏からそれでは納得できないと意見が出されて見直すこととなりましたが, ベテルギウスのスペクトルと大金の測光器のフィルターの特性 (図3), およびセンサーの感度特性 (ほぼ $700 \mu\text{m}$ 最大感度がある) を比較した大島氏から次の判断が寄せられました. この大金の観測結果と標準的な値との差は B と U バンドのフィルターの Red Leak の量 (図4) が, ベテルギウス本来の光量に加わり, 特に U バンドでは測定値の3分の2程度の Red Leak が含まれていると判断されました. 図3で Red Leak と示した部分は各フィルターの透過率と比べれば極めて小さく, スペクトル型が A 型から K 型の基準星では観測で目的としていた 1% の精度以下と見なせましたが, スペクトルが M 型のベテルギウスでは U バンドの光量が小さく, R や I の領域では光量が非常に大きいことから状況が全く異なっていて, Red leak が非常に大きな割合になっていたのです. なお, 図4は図3の中の Red Leak と示した部分の拡大図で, 点線は R フィルターの Red Leak 量でこれに対して U バンドの Red Leak 量を青の実線で示しています. B バンドの Red Leak は U バンドのそれより小さいので省略してあります.

Red Leak部分の拡大図

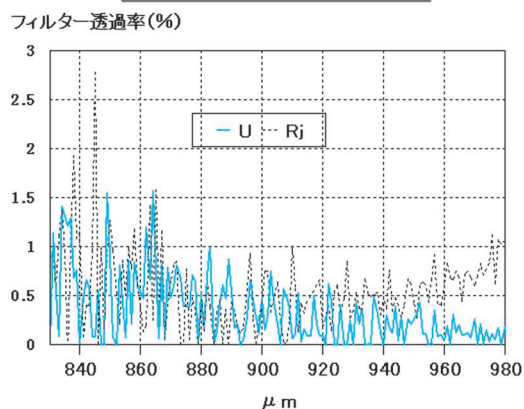


図4 フィルターの透過率の中の Red Leak 部分の拡大図.

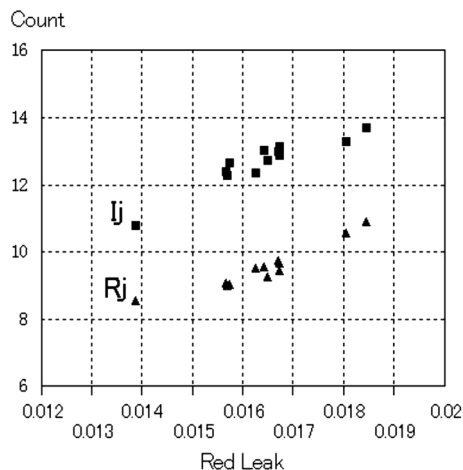


図5 I・Rバンドと Red Leak の相関.

さらに大島氏からは上記の Leak の量が観測時の I と R バンドと相関が強いことを見いだして, 過去の B と U バンドの観測値に含まれる Red Leak の量を統計的に推定する方法を提案して頂きました (図5).

そこで2022年春までの全ての R と U の観測データについての補正を行い, それ以降の観測では R と U バンドの観測時に赤フィルター (R65) を重ねた観測も行って, Red Leak の量を観測の都度直接測定して補正するという方法をとることにし

Light Curves

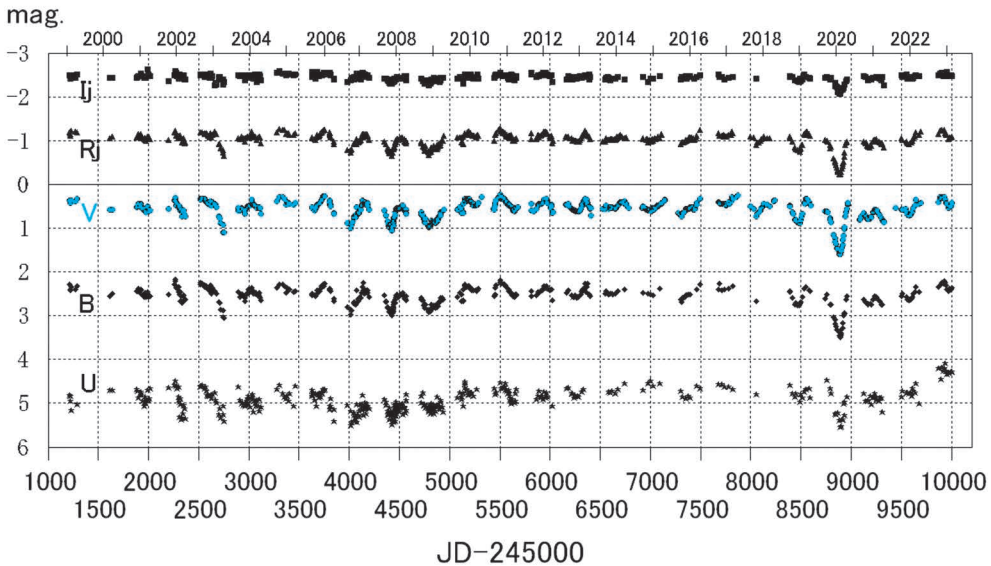


図6 ベテルギウスの5色の光度変化.

ました。そのために論文出版がまる1年遅れることになりましたが、念のためスペクトルがM型に近いK8型以降の測光標準星にも同様の補正の観測を行って、標準システムでのUバンドとBバンドの値に近い結果が得られております(図6)。

5. データの解析から

(1) ベテルギウスの変光周期

ベテルギウスは半規則変光星(SR型)の中では周期性が悪い仲間ですので、1990年代に知られていた変光周期は2335日[2]や2110日[3]のほか1070日[4]などと確定的ではありませんでした。これらの差異は観測年代の違いによるものであるのか知りませんが、その疑問を解き明かそうとしたのが今回の長期的な観測の目的でした。

予測される変光周期は6年ほどですので、その2倍の観測期間を経過した2012年に、東亜天文学会東京大会で観測の報告をする機会ができて、不等間隔のデータによる難解な周期解析を手がけておられた松永典之氏(当時木曾観測所)に

解析をお願いしました結果、2000日前後の周期があるとは判断できず420日前後と320日前後の周期性が考えられるという結論をいただきました。今回は不等間隔のフーリエ解析を行えるフリーソフトのPeriod04の運用方法を荒井菊一氏(リバーサイド天体観測所)と大島さんから手ほどきを受けて解析を行った結果、2160日・405日・202日の周期が得られました。Period04へパラメーターの入力の違いによっては有効数字の3桁め以降に差異が出ますし、今後観測日数の増加によってどのように変化するのが課題として残されます。

(2) Uバンドの長期変動

大金のベテルギウスの5色の光度変化を1960年代のJohnsonによる複数の観測も含めて調べてみた大島氏は、U-Bの値が2006年付近を中心とした3年ほどの間が0.2から0.4ほど大きくなっていて、この変動が20-30年の変光周期で生じている可能性もあると提言されています。図7は1960年代のJohnson等のU-Bのデータに大金のデー

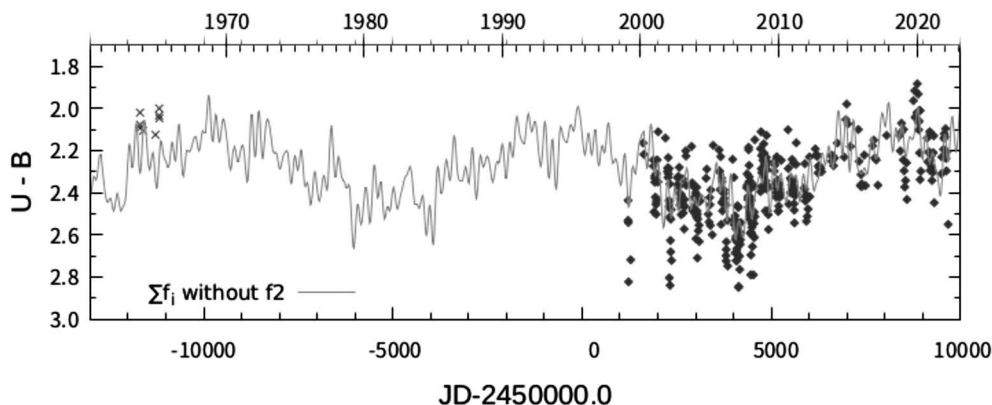


図7 ベテルギウスのU-Bの長期変動.

タを接続させて、さらに大金のデータをPeriod04で数値解析して得られた周波数のうちの主なものから得られたU-Bの変動の波形が細線で参考のために表記されています。これまでの20年を超える観測の中での変動が一時的な変動であったのか、ベテルギウスの自転周期の30-40年と関連しているものかどうかはさらに長期間の観測結果を待つしかないと思っております。

(3) 2020年ベテルギウスの大減光

2020年初めにベテルギウスが2等星といわれるほど暗くなった異常な大減光期に谷口大輔氏（当時東京大学）はひまわり8号の画像に写ったベテルギウスの画像を利用して16バンドもの詳細な測光値の解析によって、減光の原因は通常の光度低下に星周ダストによる減光が加わったのであろうとする考えを発表しておられます [5]。このことに関連して大金の観測で得られたU-Bについて、温度低下のみであればV等級が暗い時にはU-Bが青い方へ変化していくはずなのに、V等級が1.2等より暗くなる時期には変化しない、あるいは赤くなる傾向を示していました。このことは色等級図（図8）でみるとわかりますが、星周ダストによる減光が加わったとする考えを支持するものと判断できます。

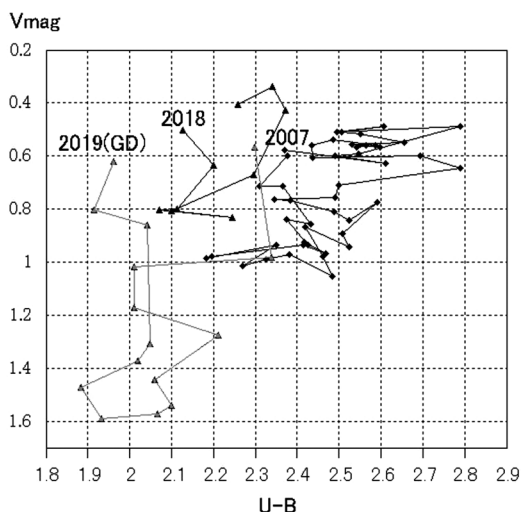


図8 ベテルギウスのU-Bの色等級図.

6. まとめとして

前記のように三人の方々との共同研究として、1999年以降のベテルギウスの観測結果を2022年秋にOEJVへ投稿しました。論文は査読後の11月に出版されました [6] が、早速日本天文学会の天文学辞典と Saio et al. (2023) [7] で引用され、Wheeler and Chatzopoulos (2023) の Betelgeuse: A review [8] ではUバンドの観測が比較的希少として Ogane et al. (2022) [6] も挙げています。

実は、フォトダイオードによる測光器の開発初期にはUバンドの観測が可能と判断はしたもの

の、実際にはベテルギウスよりかなり暗い基準星については測定限界となっていました。しかし、測れるものは測っておこうという程度の気持ちでUバンドの観測を継続しておりましたところ。これが希少な観測だと評価されることがわかりましたので、古めかしい測光システムのままではありながら今後も継続していかなければなりません。

なお、今回の測光器の開発については旧文部省の科学研究費補助金（奨励研究（B））の助成を受け、さらにその改良と観測につきましては日本天文学会国内研修支援金の補助によって行われております。これらの助成に大いに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 森本雅樹編, 1980, 現代天文学講座13天文観測セミナー (恒星社厚生閣)
- [2] Stothers, R., & Leung, K. C., 1971, A&A, 10, 290
- [3] Tirion, W., 1991, The Cambridge Star Atlas, 1st ed., (Cambridge University Press, Cambridge)
- [4] 下保 茂, 1970, 変光星の観測天体観測シリーズ (恒星社厚生閣)
- [5] Taniguchi, D., et al., 2022, Nat. Astron. 6, 930
- [6] Ogane, Y., et al., 2022, OEJV, 233, 1
- [7] Saio, H., et al., 2023, MNRAS, submitted (arXiv: 2306.00287)
- [8] Wheeler, J. C., & Chatzopoulos, E., 2023, Astron. Geophys., 64, 3.11