

インターネット望遠鏡を使った食変光星 U Sge の多色測光

山本 裕樹

東北公益文科大学総合研究論集第37号 抜刷

2020年1月20日発行

研究ノート

インターネット望遠鏡を使った食変光星 U Sge の多色測光

山本 裕樹

1 はじめに

インターネット望遠鏡とは、遠隔地に設置した無人の天体望遠鏡をインターネットを通じて操作し天体観測を行うためのシステムである。筆者らは「慶應義塾大学インターネット望遠鏡プロジェクト」として2003年からインターネット望遠鏡の運用を行っている [1][2]。

筆者は2011年度から山形県立鶴岡南高等学校における2年生を対象にした探求活動「鶴南ゼミ」において、インターネット望遠鏡を使った研究指導を継続的に行っている [3]。同校は文部科学省のスーパーサイエンスハイスクールに指定され、2012年度から2016年度が1期目、2017年度から2期目に指定されている。

2018年度の鶴南ゼミでは「インターネット望遠鏡を用いた食変光星の多色測光」というテーマに取り組んだ。食変光星の観測は2013年度の鶴南ゼミで取り組んでいたが、このときはニューヨークのインターネット望遠鏡のサブスコープ(6cm屈折望遠鏡+モノクロ CCDカメラ)を使った観測によって光度曲線から変光周期を求めたのみであった。今回は、東海大学湘南キャンパスに設置されたインターネット望遠鏡のメインスコープ(20cm反射望遠鏡+冷却 CCDカメラ+RGBフィルタ)を使った観測により食変光星 U Sge の多色測光を行い、光度曲線の解析によって物理パラメータの推測を行った。

光度曲線の解析にはPHOEBE(PHysics Of Eclipsing BinariEs)¹を用いた。PHOEBEは食変光星の光度曲線や分光データから食変光星のモデルを解析するためのソフトウェアで、解析にはWilson-Devinney法 [4]が使われている。2018年時点でPHOEBEはバージョン2.0であったが、キャラクターベースで操作が難しいため、高校生でも使いやすいよう GUIが備わっている Windows

¹ <http://phoebe-project.org/>

版 0.32-snapshot(SVN Date: 2011-03-17)²を用いた。

本稿ではインターネット望遠鏡を用いて観測した食変光星 U Sge の光度曲線から PHOEBE を使って物理パラメータを推測するための具体的な観測手順と、鶴南ゼミの研究をベースに得られた解析結果について述べる。

2 食変光星について

食変光星は食連星ともいい、2つの恒星がお互いの周りを公転している連星系において、片方の恒星がもう片方の恒星に隠れる食現象が起こって周期的な減光が見られるものである。2つの恒星のうち、明るいほうを主星、暗いほうを伴星とよぶ。

食変光星を測光観測することで得られる光度(等級)を公転の位相ごとにプロットしたものを光度曲線という。光度曲線の形は食変光星がどのような連星系なのかによって大きく異なるため、光度曲線を解析することで連星系の様々なパラメータを推測することができる。

光度曲線の解析には、恒星形状と公転軌道のモデルを考えて理論的な光度曲線を計算し、それを観測で得られた光度曲線と比べて、違いが最も小さくなるような最適なパラメータを決定するという光度曲線合成法を用いるのが一般的である。光度曲線を定める物理パラメータとして、両星の質量比 $q(=M_2/M_1)$ 、主星と伴星の半径 R_1, R_2 、軌道傾角 i 、両星の有効表面温度比 $T_{\text{eff}2}/T_{\text{eff}1}$ 、近接効果(重力増光、反射能など)がある。

測光観測に加え、分光観測を行って得られる視線速度曲線からさらに多くのパラメータが推測できるが、インターネット望遠鏡では現在のところ測光観測しかできないため、光度曲線の解析のみを行った。

3 測光観測

変光幅が大きく、主星と伴星の色が異なる方が解析しやすいと考え、食変光星 U Sge を観測対象とした。U Sge の V 等級は 6.45-9.28、スペクトル型は B8V+ G2IV-III である [5]。

² <http://phoebe-project.org/1.0/download>

観測には平塚の東海大学湘南キャンパスに設置されたインターネット望遠鏡のメインスコープを使用した。このメインスコープには20cm反射望遠鏡LX200-20ACF(Meade)を使用し、冷却CCDカメラSTF-402ME(SBIG)とカラーフィルタホイールCFW-402(SBIG)が取り付けられている。カラーフィルタホイールにはRed, Green, Blue, Clearの4枚のフィルタがあり、これらは測光用フィルタではないが、多色測光ができるのか試してみることにした。

観測は2018年5月24日から10月31日まで鶴南ゼミの生徒たちが分担して行い、観測画像はFITS形式で保存した。保存した画像はステライメージ(アストロアーツ)を用いてダーク補正³とフラット補正をしてから測光を行った。比較星としてTYC1607-726-1を用いてU Sgeの等級を計算し、Red, Green, Blueフィルタの光度曲線を得ることができた。

4 PHOEBE による光度曲線の解析

観測した光度曲線はPHOEBEで解析した。PHOEBEの使い方は付属のマニュアル[6][7]と佐々井らの先行研究[8]を参考にした。

PHOEBEでは光度曲線に最適なパラメータを自動的に決定してくれるが、パラメータが非常に多くあり、初期値をある程度しぼらないと計算が収束しない。そこでU Sgeの光度曲線をWilson-Devinney法で解析したManzooriら[9]によるパラメータ平均値を既知として入力し、我々が観測した光度曲線と理論的な光度曲線を比較した。合わなかった部分に対しては、既知のパラメータ値を初期値とし、いくつかのパラメータをフィッティングで動かして光度曲線に最適なパラメータ値を決定した。

4.1 LC dataのフォーマット

PHOEBEに読み込ませる光度曲線のデータ(LC data)は、フィルタごとにファイルにしたものである。ファイル形式はテキストファイルで、列がタブで区切られたもの⁴である。行頭に“#”をつけるとコメント行になる。

³ ダーク補正用の画像には、インターネット望遠鏡の屋根が夜間閉じた状態で撮影した画像を用いた。

⁴ Excelでは保存するときに「テキスト(タブ区切り)」を選ぶとタブ区切りのフォーマットで保存できる。

各列に入力するデータは以下の通りである。3列目はオプションなので無くてもよい。

| 列 | データ |
|---|---------------------|
| 1 | 位相もしくは日心ユリウス日 (HJD) |
| 2 | フラックスもしくは等級 |
| 3 | 重みもしくは標準偏差 |

実際に使用したU Sgeの観測データは、1列目を日心ユリウス日、2列目を等級とし、3列目は使用しなかった。

4.2 既知パラメータ値による光度曲線

Manzooriらのパラメータ値を使って理論的な光度曲線をプロットし、観測した光度曲線と比較した。手順は以下の通りである。

1. LC dataの読み込み

Dataタブで以下の操作を行った。

- (1) ModelではManzooriらと同じく“Detached binary”(分離型連星)を選択した。
- (2) LC dataの[Add]ボタンをクリックしてダイアログを開き、FilenameでRedフィルタのファイルを選択して読み込んだのち、Column1に“Time(HJD)”, Column2に“Magnitude”, Column3に“Unavailable”, Filterに“Johnson:R”を選択した。
- (3) Greenフィルタ、Blueフィルタのファイルも同様にして読み込んだ。FilterはBlueフィルタの場合は“Johnson:B”、Greenフィルタの場合は“Johnson:V”を選択した。

観測に用いたRed, Green, BlueフィルタはPHOEBEで選択できるものが無かったため、代わりにJohnsonのR, V, Bフィルタをそれぞれ選択した。

2. 既知パラメータ値の入力

Parameterタブを選択し、各タブでManzooriらのパラメータ値を入力した。入力したパラメータ値は以下の通りである。各パラメータについての

詳細は付録に記述した。

• Ephemeris タブ

| パラメータ | 値 |
|---------------------------|--------------|
| HJD0 HJD ₀ [日] | 2417130.4170 |
| PERIOD P ₀ [日] | 3.3806184 |

• System タブ

| パラメータ | 値 |
|----------------|--------|
| SMA a [太陽半径=1] | 18.7 |
| RM q | 0.3739 |
| INCL i [度] | 89.96 |

• Orbit タブ

| パラメータ | 値 |
|-------------------|------|
| F1 F ₁ | 1.44 |
| F2 F ₂ | 1.0 |

• Component タブ

| パラメータ | 値 |
|----------------------------|---------------|
| TAVH T _{eff1} [K] | 13300 |
| TAVC T _{eff2} [K] | 5455 |
| PHSV Ω ₁ | (計算値) 5.19977 |
| PCSV Ω ₂ | (計算値) 2.60802 |

• Surface タブ

| パラメータ | 値 |
|---------------------|------|
| ALB1 A ₁ | 1 |
| ALB2 A ₂ | 0.5 |
| GR1 g ₁ | 0.25 |
| GR2 g ₂ | 0.08 |

Componentタブでは以下の手順でPHSVとPCSVの計算を行った。

- (1) PHSV(PCSV)の[Calculate]をクリックしてダイアログを開く。
- (2) R1(R2)の値を入力しEnterキーを押してから[Calculate]ボタンをクリックしてPHSV(PCSV)を計算した。

| | パラメータ | 値 |
|----|-----------------|----------|
| R1 | R_1 [軌道長半径=1] | 0.209589 |
| R2 | R_2 [軌道長半径=1] | 0.292945 |

- (3) 計算した値は[Update]ボタンをクリックしてPHSV(PCSV)の値に反映させた。

LuminositiesタブではPassband luminositiesの[Calculate All]をクリックして各フィルタのLevelを調整した。これは理論的な光度曲線の光度を観測値に合わせるために必要である。

4.3 光度曲線のプロット

入力したパラメータに従って理論的な光度曲線と観測した光度曲線をプロットする。Plottingタブ(もしくは[LC Plot]ボタンをクリック)で以下の操作を行った。

- (1) Verticesに“300”を入力した。Verticesは理論光度曲線の制御点の数である。
- (2) Xで“Phase”(位相)、Yで“Magnitude”(等級)を選択した。Xが横軸、Yが縦軸である。
- (3) プロットしたいフィルタのObservedとSyntheticにチェックを入れて[Plot]ボタンをクリックして光度曲線をプロットした。

光度曲線をプロットすると理論光度曲線のResults summaryが更新される。Results summaryの各パラメータは以下のものがある。

| パラメータ | 説明 |
|------------------------|-----------------------------|
| $\Omega(L_1)$ | ラグランジュ点 L_1 のポテンシャル |
| $\Omega(L_2)$ | ラグランジュ点 L_2 のポテンシャル |
| M_1 [太陽質量=1] | 主星の質量 |
| M_2 [太陽質量=1] | 伴星の質量 |
| R_1 [太陽半径=1] | 主星の半径 |
| R_2 [太陽半径=1] | 伴星の半径 |
| $M_{bol,1}$ | 主星の放射絶対等級 |
| $M_{bol,2}$ | 伴星の放射絶対等級 |
| $\log(g_1)$ | 主星の表面重力(g_1 はcgs単位系) |
| $\log(g_2)$ | 伴星の表面重力(g_2 はcgs単位系) |
| Polar SBR ₁ | 主星のPolar surface brightness |
| Polar SBR ₂ | 伴星のPolar surface brightness |

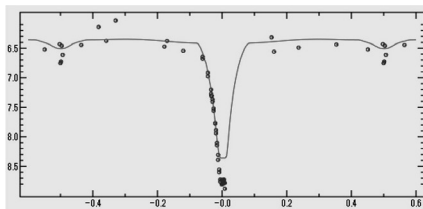
4.4 フィッティング

Fittingタブでは、パラメータを動かして観測した光度曲線にフィットする最適な理論光度曲線のパラメータ値を自動的に決めることができる。まず、Parametersタブで動かしたいパラメータのチェックボタンにチェックを入れる。そして、Fittingタブの[Calculate]ボタンをクリックすればパラメータ値が計算される。計算結果は[Update All]ボタンをクリックするまで反映されない。

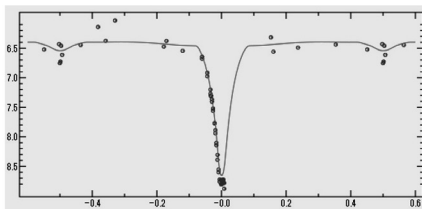
筆者らがフィッティングで動かしたパラメータは、光度曲線を決める物理パラメータのうち、質量比 q 、主星と伴星の表面ポテンシャル(主星と伴星の半径 R_1 , R_2 が関係)、軌道傾角 i 、伴星の有効表面温度 T_{eff2} の5つである。副極小付近の観測データが非常に少なかったため、近接効果のパラメータは固定することにした。Fitting methodには“Differential Corrections”を選択した。

4.5 解析結果

はじめに既知パラメータ値によりプロットした光度曲線は図1,2,3の左側(フィッティング前)の図で、縦軸は等級、横軸は位相である。観測値と理論曲線で大きくは違わないが、主極小の谷の深さが合わなかった。

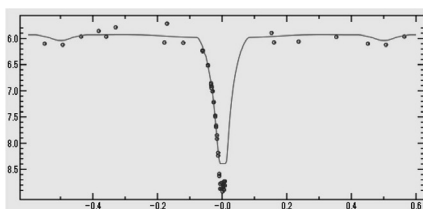


フィッティング前

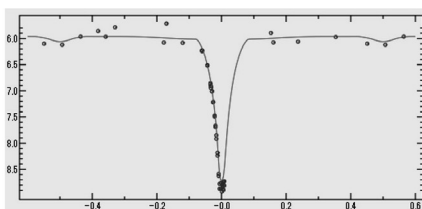


フィッティング後

図1 Redフィルタの光度曲線 (点が観測値、実線が理論曲線)

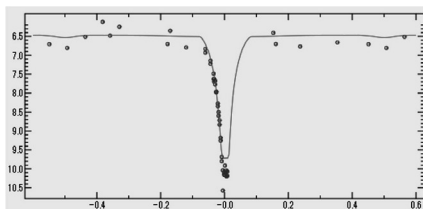


フィッティング前

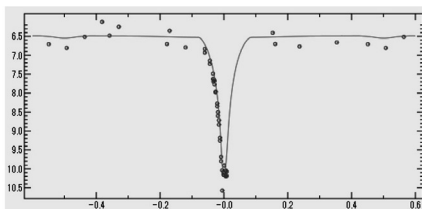


フィッティング後

図2 Greenフィルタの光度曲線 (点が観測値、実線が理論曲線)



フィッティング前



フィッティング後

図3 Blueフィルタの光度曲線 (点が観測値、実線が理論曲線)

その後、フィッティングで動かしたパラメータの結果は以下の通りである。

| パラメータ | パラメータ | フィッティング前 | フィッティング後 |
|-------|-----------------------|----------|------------|
| RM | q | 0.3739 | 0.348017 |
| PHSV | Ω_1 | 5.19977 | 4.949743 |
| PCSV | Ω_2 | 2.60802 | 2.556628 |
| INCL | i [度] | 89.96 | 93.176681 |
| TAVC | $T_{\text{eff}2}$ [K] | 5222 | 5278.30866 |

Result summaryのパラメータは以下の通りである (PolarSBR₁ と PolarSBR₂ はフィルターごとに値が異なるので省略)。

| パラメータ | フィッティング前 | フィッティング後 |
|----------------|-----------|-----------|
| $\Omega(L_1)$ | 2.872785 | 2.819391 |
| $\Omega(L_2)$ | 2.395015 | 2.355375 |
| M_1 [太陽質量=1] | 5.595314 | 5.702748 |
| M_2 [太陽質量=1] | 2.092088 | 1.984653 |
| R_1 [太陽半径=1] | 3.909252 | 4.104553 |
| R_2 [太陽半径=1] | 5.649740 | 5.530913 |
| $M_{bol,1}$ | -1.839707 | -1.945567 |
| $M_{bol,2}$ | 1.231188 | 1.420600 |
| $\log(g_1)$ | 4.001243 | 3.967159 |
| $\log(g_2)$ | 3.254129 | 3.249697 |

フィッティング後にプロットした光度曲線は図1,2,3の右側(フィッティング後)の図である。フィッティング前とフィッティング後でパラメータの値はそれほど大きくは変わっていないが、フィッティング前に合っていなかった主極小の谷の深さがかなり合うようになった。

5 まとめ

インターネット望遠鏡を用いて観測した食変光星 U Sge の光度曲線から PHOEBE を使って物理パラメータを推測した。Manzoori らの既知のパラメータ平均値を使って少数のパラメータを動かすことで、観測した光度曲線に合うようなパラメータ値を推測できた。既知のパラメータ値からパラメータがあまり動かなかったということは、インターネット望遠鏡の観測でもある程度うまく多色測光ができたということだろう。

観測に用いた RGB フィルタは PHOEBE の Filter の選択肢には無かった。代わりに Johnson の RVB フィルタを選択したが、RGB フィルタとは透過率が異なるため、観測データには何らかの補正が必要になると思われる。

今回動かしたパラメータ以外にも近接効果のパラメータをフィッティングで動かしてみたが、既知のパラメータ値から大きく動いてありえない値になってしまったので、今回の観測データではデータ数や精度が足りない(特に副極小付近)と思われる。誤差については全く考慮しなかったのも、その辺は今後の課題である。

PHOEBEの使い方を解説した日本語の文献はあまり存在しないので、本稿の解説が役に立てば幸いである。

謝辞

山形県立鶴岡南高等学校の友野抗先生(2019年度から山形県立鶴岡中央高等学校)には鶴南ゼミにおける指導で大変お世話になった。鶴南ゼミで指導した生徒たちには「青少年のための科学の祭典」2018 全国大会で手伝ってもらい、観測や研究も積極的に行ってもらった。また、慶應義塾大学インターネット望遠鏡プロジェクトのメンバーにもご助力いただいた。以上の皆様には感謝申し上げます。本研究はJSPS 科研費JP18K02986の助成を受けたものである。

付録 Parameters タブの各種パラメータ

ここでは、Parameters タブにおける各タブのパラメータを列挙する。Luminosities, Limb Darkening, Spots タブについては割愛する。

• Ephemeris タブ

| パラメータ | | 説明 |
|--------|----------------------|-----------|
| HJD0 | HJD ₀ [日] | 元期(HJD) |
| PERIOD | P_0 [日] | 公転周期 |
| DPDT | dP/dt | 公転周期の微分係数 |
| PSHIFT | $\Delta\Phi$ | 位相のシフト |

• System タブ

| | パラメータ | 説明 |
|------|-------------------|-------------------|
| SMA | a [太陽半径=1] | 軌道長半径 |
| RM | q | 質量比(= M_2/M_1) |
| VGA | v_γ [km/s] | 重心の視線速度 |
| INCL | i [度] | 軌道傾角 |

• Orbit タブ

| | パラメータ | 説明 |
|--------|--------------------|------------|
| PERRO | ω_0 [度] | 近星点引数 |
| DPERDT | $d\omega/dt$ [度/日] | 近星点引数の微分係数 |
| ECC | ε | 軌道離心率 |
| F1 | F_1 | 主星の回転パラメータ |
| F2 | F_2 | 伴星の回転パラメータ |

• Component タブ

| | パラメータ | 説明 |
|------|-----------------------|-------------|
| TAVH | T_{eff1} [K] | 主星の有効表面温度 |
| TAVC | T_{eff2} [K] | 伴星の有効表面温度 |
| PHSV | Ω_1 | 主星の表面ポテンシャル |
| PCSV | Ω_2 | 伴星の表面ポテンシャル |
| MET1 | [M/H] ₁ | 主星の金属量 |
| MET2 | [M/H] ₂ | 伴星の金属量 |

• Potential Calculator

| | パラメータ | 説明 |
|--------|-----------------|-------|
| D | D [軌道長半径=1] | 両星の距離 |
| R1 | R_1 [軌道長半径=1] | 主星の半径 |
| R2 | R_2 [軌道長半径=1] | 伴星の半径 |
| LAMBDA | λ | 方向余弦 |
| NU | ν | 方向余弦 |

Potential Calculator では PHSV と PCSV が計算できる。ここで用いられるポテンシャル

$$\Omega(r, \lambda, \nu) = \frac{1}{r} + q \left(\frac{1}{\sqrt{r^2 + D^2 - 2r\lambda D}} - \frac{r\lambda}{D^2} \right) + \frac{1}{2} F^2 (1+q)r^2(1-\nu^2)$$

は Roche ポテンシャルを無次元化して拡張したもので、一般化 Kopal ポテンシャルとよばれる [7]。ここで (r, λ, ν) は極座標で、 r は軌道長半径で無次元化したものである。

$$x = r \sin \theta \cos \phi = r\lambda$$

$$y = r \sin \theta \sin \phi = r\mu$$

$$z = r \cos \theta = r\nu$$

• Surface タブ

| | パラメータ | 説明 |
|------|-------|---------|
| ALB1 | A_1 | 主星の反射能 |
| ALB2 | A_2 | 伴星の反射能 |
| GR1 | g_1 | 主星の重力増光 |
| GR2 | g_2 | 伴星の重力増光 |

参考文献

- [1] 慶應義塾大学インターネット望遠鏡プロジェクト, “慶應義塾大学インターネット望遠鏡プロジェクト”, <http://www.kitp.org/>, (参照 2019-11-20).
- [2] 慶應義塾大学インターネット望遠鏡プロジェクト, “インターネット望遠鏡で観測! 現代天文学入門”, 森北出版 (2016) 160p.
- [3] 山本裕樹, 東北公益文科大学総合研究論集 **18**, 185 (2010).
- [4] R. E. Wilson and E. J. Devinney, *Astrophysical Journal* **166**, 605 (1971).
- [5] AAVSO, “The International Variable Star Index (VSX)”, <https://www.aavso.org/vsx/>, (参照 2018-10-17).
- [6] A. Prša and P. Harmanec, “PHOEBE manual adopted for PHOEBE 0.32”, http://phoebe-project.org/static/legacy/docs/phoebe_manual.pdf, (参照 2019-11-20).
- [7] A. Prša, “PHOEBE Scientific Reference, PHOEBE version 0.30”,

http://phoebe-project.org/static/legacy/docs/phoebe_science.pdf,
(参照 2019-11-20).

- [8] 佐々井祐二, 赤澤秀彦, 大島修, 片山敏彦, 津山工業高等専門学校紀要 **59**, 73(2017).
- [9] D. Manzoori, D. M. Jassur and M. H. Kermani, *Astrophys. Space. Sci.* **302**, 145(2006).