

# 半分離型食連星 IU Per の光度曲線解析

佐々井 祐二\*, 坪井 元春\*\*, 赤澤 秀彦\*\*\*

## Light Curve Analysis of the Semi-Detached Binary System IU Per

SASAI Yuji, TSUBOI Motoharu and AKAZAWA Hidehiko

A new photoelectric light curve of the IU Per is presented. The IU Per is a short period eclipsing binary and was observed in 2018. The IU Per is a less-studied star. To obtain the absolute value rather than the ratio of physical quantities, radial velocity due to spectroscopic data is required. However, such data is difficult to obtain, even with a 1-meter diameter telescope. Therefore, we try to incorporate the scale from similar stars' data instead of radial velocity. Physical quantities of the IU Per were computed using the analysis software PHOEBE (physics of eclipsing binaries), which implements the Wilson-Devinney code. Results reveal that the IU Per is a semidetached system with the less-massive component filling its Roche lobe.

*Key Words* : Eclipsing Binary Star, Light Curve, PHOEBE

### 1. 緒 言

食連星<sup>1)</sup>は、共通重心の周りを回る2つの星が互いの光を覆い隠し合うことによって、両星の合成光度が変化する変光星である。そのため、食連星は必ず連星系を形成している。もちろん、成分星が3個以上の場合も多い。宇宙の恒星の約2/3が連星と見積もられており、特に食連星の観測データから温度、半径、質量などを導き出すことができるため、恒星を理解するための情報源として非常に重要である。

測光観測データを解析し、その結果として得られる光度曲線に対して、光度曲線合成法によるフィッティングを行うことで、周期、成分星の半径比及び温度比を導出できる。スケールを入れ連星間距離や成分星質量など物理量の絶対値を導出するには分光観測データが必要である。また、食連星の測光観測データ取得は比較的小口径望遠鏡で可能であるが、分光データ、特に成分星の視線速度を生成する1周期にわたるスペクトルのずれの取得は口径1mクラスの望遠鏡であっても難しい。

視線速度データ取得が無理で、測光観測データのみの場合でも、過去の蓄積された類似恒星のデータからスケールが入る可能性がある。

i. 光度曲線の副極小から主星の視等級を求める

ことで、絶対等級（地球からの距離が必要）、太陽との光度比を求め、質量光度関係から主星の質量を見積もることができる。

- ii. 詳細なスペクトル型から、天文学の理科年表であるCox他(2000)<sup>2)</sup>あるいは同スペクトル星の研究データから主星質量を推定する。
- iii. 成分星の質量比 $q$ について、 $q$ を変化させ光度曲線とフィッティング曲線との誤差の最小値を調べる $q$ -探索から $q$ を決定する。
- iv. 主星質量と質量比が分かれば、一般化されたケプラーの第3法則より、成分星間距離が分かり、スケールを入れることができる。

本研究では、この項目iiおよびivと先行論文も参考にしながら、食連星の測光観測データにスペクトル型などの情報、ロッジモデルの理論を組み合わせ、例として食連星ペルセウス座IU星(IU Per)の各種物理量を導出する。IU PerについてはZhang他(2009)<sup>3)</sup>の研究結果があるが、主星表面温度に疑問があることで、参考にしながら比較検討もする。

### 2. IU Per の測光

短周期食連星IU Perは公転周期が0.8570257日(ユリウス日, Kreiner(2004)<sup>4)</sup>)で、光度は最大11.50等、最小11.6等、スペクトル型がA4V、光度曲線の分類としてアルゴル型(EA型)、形状の分類(ロッジモデルでの分類)では半分離型

原稿受付 令和3年9月17日

\*総合理工学科 先進科学系, \*\*高知大学, \*\*\*船穂天文台

(SD型)であるので、EA/SD型に分類される。また、半分離型より、伴星から主星への質量移動による角運動量の減少から、長期的には周期の継続的な減少が予想される。

赤澤は2018年12月13日から31日に掛けて、船穂天文台にて口径20cm望遠鏡を用いた測光観測を行い、Johnson ICフィルタの測光観測データを得た。ライト画像総数は2178枚である。

画像処理・測光フリーソフト AstroImageJ (AIJ)<sup>5,6)</sup>を用い、このライト画像を処理する。AIJは以下のような特徴がある。

- ・ 画像処理・測光処理がしやすいGUIである
- ・ メモリ上に画像をスタックすれば連続測光が速い。最近のPCはメモリ容量が大きいので、スタックは容易い
- ・ 連続測光の際、画像間で星がずれていても、画像アライメントで星の位置を揃えることができる
- ・ 画像毎に測光誤差を算出する

AIJでダーク減算とフラット割をして、マスター画像を作成した。

食連星 V=IU Per に対し、視野内の比較星として C1=GSC 2858-2003 と C2=GSC 2858-2541 を選び、アパチャ測光した。測光結果はテキストデータとして出力されるので、Excelに取り込んで解析できる。

雲が横切るなどの不適画像を除いた利用データについて、横軸を撮影期間は2018年12月13日から31日に対応するユリウス日、縦軸を食連星 V と比較星 C1 による光度比としたグラフを図1に示す。ここで、光度比としては、アパチャ測光により得られたカウント値の比を使用している。

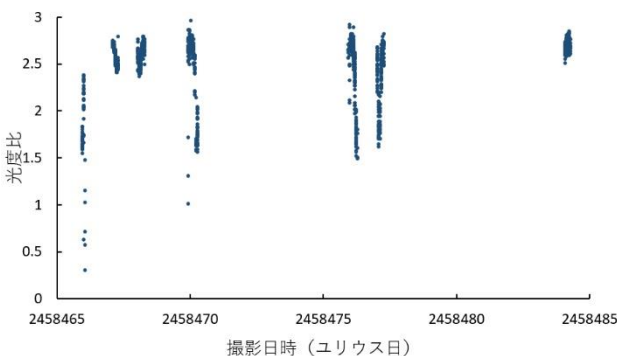


図1 撮影日時毎の光度比

次に、極小時刻 2458465.96629 日を元期 (EPOC) とし、周期 0.8570251 日で各画像の撮影時刻の位相を求め、食連星 V と比較星 C1 の位相図を描く。

この比較星 C1 が変光していないこと確認するため、比較星 C1 と別の恒星 C2 との比較も必要である。光度比 V/C1 と C2/C1 の位相図が図2である。等級差 V-C1 と C2-C1 の位相図が図3である。

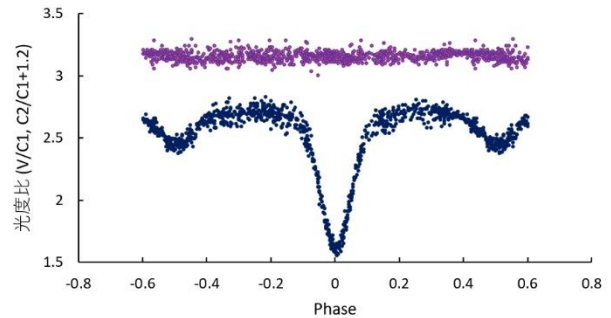


図2 光度曲線 (光度比, 下が V/C1, 上の C2/C1 は 1.2 だけずらしている)

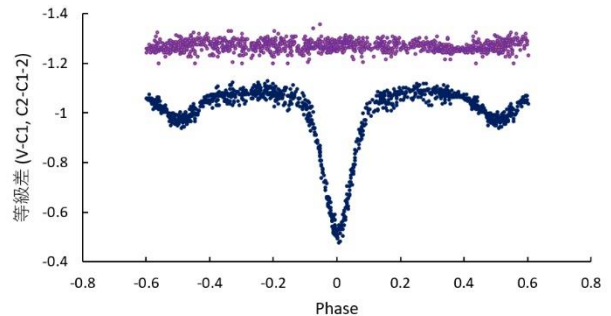


図3 光度曲線 (等級差, 下が V-C1, 上の C2-C1 は 2 だけずらしている)

ここで、等級差はポグソンの公式より光度比から

$$-2.5 \log \frac{V}{C1} \quad \text{および} \quad -2.5 \log \frac{C2}{C1}$$

で計算できる。なお、図3縦軸の記号 V-C1 等はカウント値の引き算の意味は持たない。C2/C1 および C2-C1 の位相図から、比較星 C1 は変光星でないと判断できる。V/C1 および V-C1 のグラフ形から、IU Per はアルゴル型 (EA型) であることが分かる。

### 3. スケール導入のための考察

食連星 IU Per 主星のスペクトル型は A4V と分類される。これは A4 型の主系列星という意味であり、同型の恒星である HR2285 と HR4632 の表面温度は 8375 K である。A4 型主系列星の研究データ<sup>7,8)</sup>から、質量は太陽の 1.92 倍と推定される。これを  $1.92 M_{SUN}$  (太陽質量単位) と表す。以下、SUN の付いている量は太陽基準量を意味する。

佐々井他 (2017)<sup>9)</sup> からロッシュモデルを説明する。図4のような連星系を考える。遠心力および成分星からの引力のポテンシャルの和をその点のロッシュポテ

ンシャル<sup>9, 10</sup> という. このロッシュポテンシャルの極値 (力が釣り合う) となる点のことをラグランジュ点という. 図 4 は質量比  $q = 0.5$  の場合で計算している. ロッシュポテンシャル  $\xi$  が一定の等ポテンシャル面は,  $\xi$  値が大ききときには, 両星の重心の周りで球状形をしている (図 4 では  $\xi$ ).  $\xi$  値の減少と共にお互い相手の星の方に膨らんでいき, 特異点である内部ラグランジュ点  $L_1$  で合体し, 垂鈴状の曲面 (図 4 では 8 の字) となる. このときのロッシュポテンシャル  $\xi = \xi_{in}$  で表される等ポテンシャル面 (ロッシュローブ) が内部ロッシュローブである. さらに  $\xi$  値が減少すると, ロッシュローブが拡がり, 外部の特異点である外部ラグランジュ点  $L_2$  に達し, 外部ロッシュローブとなる. ロッシュポテンシャルは  $\xi = \xi_{out}$  である. なお, 両星のロッシュローブの内側は, その星の重力が主に効く領域で, 外側は遠心力が主に効く領域である.

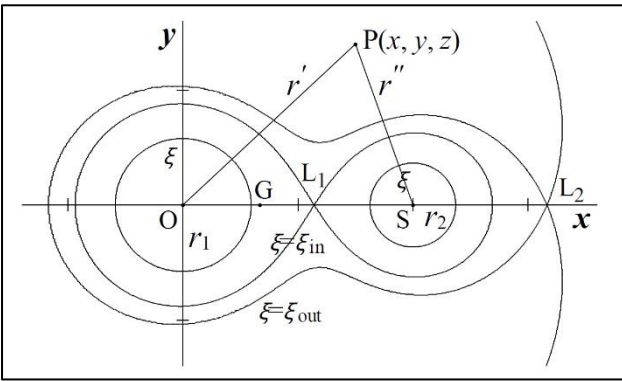


図4 ロッシュ等ポテンシャル曲線 ( $q = M_2/M_1 = 0.5$  の場合)  
 O: 主星の重心, S: 伴星の重心, G: 連星系の重心, L1: 内部ラグランジュ点, L2: 外部ラグランジュ点, 等ポテンシャル面は内側から順に,  $\xi (> \xi_{in})$  な等ポテンシャル面, 内部ロッシュローブ, 外部ロッシュローブ

主星の質量を  $M_1$ , 伴星を  $M_2$  とし, それぞれの軌道半径を  $a_1, a_2$ , その合計を連星間距離  $a$  とする. 成分星は共通重心の周りに円軌道を描く.

一般化されたケプラーの第3法則

$$M_1 + M_2 = \frac{a^3}{G} \left( \frac{2\pi}{P} \right)^2 \quad (1)$$

に成分星の質量比  $q = M_2/M_1$  を導入すると, 式(1)は

$$M_1(1+q) = \frac{a^3}{G} \left( \frac{2\pi}{P} \right)^2 \quad (2)$$

と書ける. 比較のため太陽の質量を計算する. 太陽と地球の場合,  $q = 0$  と近似すると, 通常のケプラーの法則となる. 太陽半径  $R_{SUN} = 6.9551 \times 10^8 m$ ,  $P = 365$  日, 軌道半径は 1 天文単位, 即ち  $1.495978707 \times 10^{11} m = 2.1509 \times 10^2 R_{SUN}$  より<sup>11)</sup>,

$$M_{SUN} = \frac{(2.15 \times 10^2 R_{SUN})^3}{G} \left( \frac{2\pi}{365.3} \right)^2 \quad (3)$$

式(2)と(3)より

$$a^3 = \frac{M_1(1+q)}{M_{SUN}} \left( 2.151 \times 10^2 R_{SUN} \right)^3 \left( \frac{P}{365.3} \right)^2 \quad (4)$$

を得る.

式(4)に, IU Per の諸量, 主星質量  $M_1 = 1.92 M_{SUN}$  および, 質量比  $q = 0.2738$  を代入して, 連星間距離

$$a = 5.12 R_{SUN}$$

を得る. これが次節で扱う伴星軌道の半長径 SMA の値である. ここで, 質量比については  $q$ -探索を試みたいが, 探索方法が不明のため, ここでは Zhang 他 (2009)<sup>3)</sup> の値を使用している. 伴星質量は

$$M_2 = q M_1 = 0.526 M_{SUN}$$

となる.

#### 4. PHOEBE 解析

PHOEBE (Physics Of Eclipsing BinariEs)<sup>9, 12, 13)</sup> は米国ピラノバ大の Andrej Prsa が中心となって開発しているオープンソースソフトであり, 光度曲線合成法 Wilson-Devinney (WD) コードを実装しており, 研究用途に活用されている. 以下, 丸括弧内の量記号は PHOEBE 記号である. また, PHOEBE で出力された桁数の数字をそのまま記載する.

PHOEBE に対する入力データとしては, ユリウス日としての撮影日時 (HJD\_UTC), 光度比 (V/C1), 誤差 (V\_Error/C1) の 3 要素である. 誤差の値は測光の時点で出力される V\_Error を C1 カウント値で割ったものである. これらを読み込むと, 内部処理によって横軸を位相とする光度曲線が PHOEBE 上へ出力される. Excel では式を与えて位相を計算していたが, PHOEBE では自動で計算される.

元期 (EPOC) 2458465.96629 日と周期 (PERIOD) 0.8570251 日を設定すると光度曲線が表示される. チューニング前に定数として設定した数値は, 主星の温度 (TAVH) 8375 K, 質量比 (RM) 0.2738, 連星間距離 (SMA) 5.116 である. 成分星の表面重力や周辺減光などのパラメータは PHOEBE のデフォルト値を使用する.

光度曲線を解析するためのフィッティング手法としては, Differential Corrections (差分補正) と最適化問題アルゴリズム Nelder & Mead' Simplex (ネルダー-ミード法) を使用する.

上記値を設定してフィッティングを行った結果, 伴星の温度 (TAVC) は 5042 K, 軌道傾斜角 (INCL) 77.76367°, 主星表面ポテンシャル (PHSV) 3.280, 伴星表面ポテンシャル (PCSV) 2.409 で収束した.

ポテンシャル計算画面から連星間距離に対する相対

半径が、主星では  $r1 = 0.3393$ 、伴星で  $r2 = 0.2649$  と分かるので、半径の絶対値として

$$R1 = r1 \cdot a = 1.74 R_{SUN}$$

$$R2 = r2 \cdot a = 1.36 R_{SUN}$$

を得る。図4のロッシュモデルの通り、連星系の恒星は球形とは異なる。これらの半径は平均値である。また、主星の質量は太陽の1.92倍、伴星は0.53倍である。

図5に光度曲線と赤線で描いたフィッティング曲線を示す。

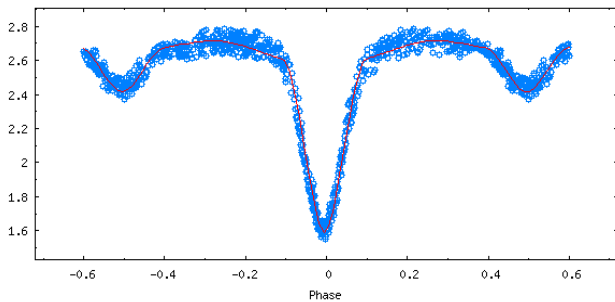


図5 光度曲線とフィッティング曲線 (縦軸 V/C1, Johnson Ic フィルタ)

IU Per の解析結果を表1にまとめる。本報告と Zhang 他 (2009)<sup>3)</sup> の結果を並記する。

表1 IU Per の解析結果 (1:主星, 2:伴星, T:表面温度, q:質量比, i:軌道傾斜角,  $\Omega$ :表面ポテンシャル, r:早退半径, R:成分星半径, a:連星間距離, M:成分星質量, 左列はPHOEBEの記号, \*は仮定, \*\*はsideの値)

	本報告	Zhang 他 (2009) <sup>3)</sup>
T1	8375 K*	6450 K*
T2	5042 K	4790 K
q=M2/M1	右を仮定	0.2738
i	77.8°	77.8°
$\Omega_1$	3.28	2.9845
$\Omega_2$	2.41	2.4076
r1	0.339	0.3792**
r2	0.265	0.2650**
R1	1.74 R <sub>sun</sub>	
R2	1.36 R <sub>sun</sub>	
a	5.12 R <sub>sun</sub>	
M1	1.92 M <sub>sun</sub>	
M2	0.526 M <sub>sun</sub>	

得られたパラメータにより PHOEBE 機能で描いた IU Per の形状 Star Shape を図6に示す。位相0.25の真横から見た状態を表す。また、縦横軸の原点が連星系の重心の位置であり、連星間距離を1とする相対値で描画されている。

シミュレーションでは、分離型 (D) の WD コード

によるシミュレーションでは、伴星が主星の方向に伸びて破れた形となり、恒星としてあり得ない形状となっていた。接触型 (K) の WD コードでは半径比の割には主星が大きすぎる結果となり、半分離型 (SD) の WD コードで現実的な結果となった。

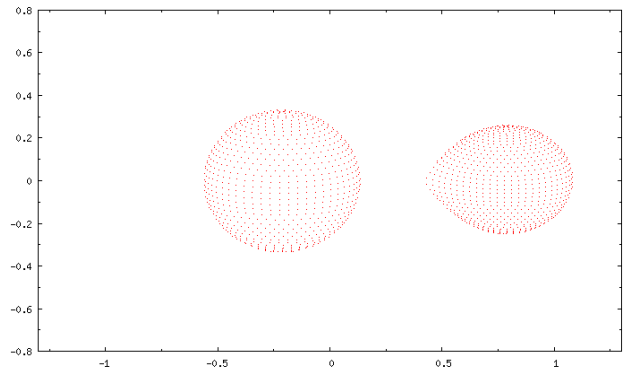


図6 IU Per の模式図 (位相0.25)

比較のため、グラフ作成ソフト gnuplot で IU Per の形状を描く。図4の点Pにおける無次元化されたロッシュポテンシャルは

$$\Omega = \xi(x, y, z)$$

$$= \left( \frac{1}{r'} + \frac{r'^2}{2} - \frac{z^2}{2} \right) + q \left( \frac{1}{r''} + \frac{r''^2}{2} - \frac{z^2}{2} \right) - \frac{q}{2}$$

で与えられ、等ポテンシャル面の様子は質量比  $q (= 0.2738)$  だけで決まる。主星表面ポテンシャル  $\Omega_1 = 3.280$ 、伴星表面ポテンシャル  $\Omega_2 = 2.409$  でポテンシャル面を描くと図7のようになる。主星表面ポテンシャル  $\Omega_1$  は内部ラグランジュ点 L1 のポテンシャル  $\Omega_{L1} = 2.408$  よりも大きいので、主星はロッシュローブよりも小さいサイズでラグランジュ点 L1 には届かない。  $\Omega_2$  の値は  $\Omega_{L1}$  とほぼ同じ値である。伴星大気はロッシュローブを満たしており、内部ラグランジュ点 L1 を通って、主星に流入し、質量移動が推定される。

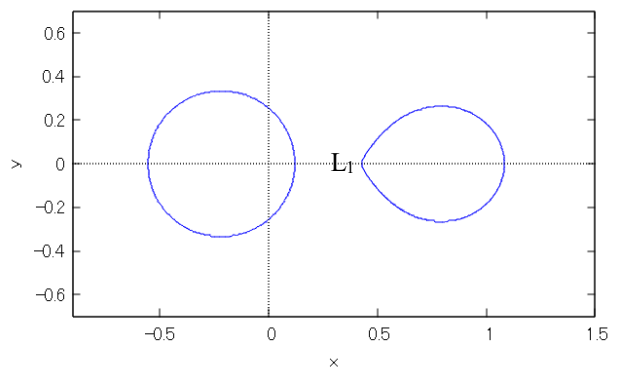


図7 表面ポテンシャル面 (質量比  $q = 0.2738$ , 左の主星のポテンシャル  $\Omega_1 = 3.280$ , 右の伴星のポテンシャル  $\Omega_2 = 2.409$ )

## 5. 結 言

研究例の少ない IU Per について、測光観測データに視線速度データ以外の蓄積された類似恒星のデータからスケールを入れ、光度曲線合成法から物理量の絶対値を導出した。

IU Per の主星は太陽よりも巨大で温度も高い。伴星は半径が少し大きく、温度は太陽よりも少し低いことが分かった。また、主星は太陽の 2 倍に迫る質量でありながら、伴星は太陽の 1/2 程度ということも判明した。また、半分離型で伴星がロッシュローブを満たしているため、内部ラグランジュ点を通して伴星から主星への質量移動が起こり、角運動量の減少から長期的には周期の継続的な減少が起ることが予想される。

本研究で参考にした研究論文 Zhang 他 (2009)<sup>3)</sup> では、主星の温度が 6450 K とされていた。これはスペクトル型が A 型ではなく F 型となるほど低い温度である。IU Per は A4 型であり、他の同型の恒星は 8375 K<sup>7)</sup> であるため、8375 K を主星温度と仮定し解析した。しかし、IU Per の質量比については光度曲線へのフィッティング曲線の誤差を少なくするように  $q$ -探索されたものであるため、今回はこの質量比を利用した。

今後は、 $q$ -探索の方法および、詳細なスペクトル型から質量光度関係を通して主星質量の理論的予測を組み込むことで、測光観測データにスケールを入れる自己完結する方法で食連星の各種物理量導出を目指したい。

## 謝 辞

本取組は科学研究費補助金 (17K01002) を受けて行ったものであり、ここに謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 佐々井祐二：食連星の物理量についての考察，津山工業高等専門学校紀要，第 57 号 (2015) 145-149.
- 2) Cox, N. : Allen's Astrophysical Quantities (4th ed., New York: Springer) (2000) 388.
- 3) Xiao-Bin Zhang, Rong-Xian Zhang and Qi-Sheng Li : The semi-detached binary system IU Per and its intrinsic oscillation, Research in Astronomy and Astrophysics, Vol. 9 No. 4 (2009) 422-430.
- 4) Kreiner, J. M.: Up-to-Date Linear Elements of Eclipsing Binaries, Acta Astron., 54 (2004) 207.
- 5) AstroImageJ (ImageJ for Astronomy) Web site:<https://www.astro.louisville.edu/software/astroimagej/> (参照 2021-09-15).
- 6) 鈴木仁：「画像処理ソフト”AstroImageJ”(AIJ)の使い方について」～我流入門，変光星観測者会議(2017)，<http://vsolj.cetus-net.org/VSCong2017.pdf> (参照 2021-09-15).
- 7) M.A.Malkan, et al. : Micron Spectral Atlas of Stars, Astrophys. J. Suppl. 142 (2002) 79-94.
- 8) Saul J. Adelman : The physical properties of normal A stars, IAU Symposium, No. 224 (2004) 1-11.
- 9) 佐々井祐二，赤澤秀彦，大島修，片山敏彦：PHOEBE を用いる食連星の光度曲線解析，津山工業高等専門学校紀要，第 59 号 (2017)7 3-78.
- 10) 福江純・沢武文 編：超・宇宙を解く—現代天文学演習，恒星社厚生閣 (2019) 130-134.
- 11) 天文年鑑編集委員会 編：天文年鑑 2020 年版，誠文堂新光社(2019).
- 12) 赤澤，片山，佐々井，大島：退職後から始めた食連星合宿ゼミ (Phoebe を使った光度曲線解析を目指して)，連星系・変光星・低温度星研究会 2016 集録 (慶応大学日吉) pp.5-8.
- 13) PHOEBE (PHysics Of Eclipsing BinariEs) Web site:<http://phoebe-project.org/> (参照 2021-09-15).