

## 光度の中間値比を用いた食連星のタイプ分類

三舂 慧人 (九州大学大学院 理学府物理学専攻)

### Abstract

公転軌道面が視線にきわめて近い連星系は、両星が互いに隠し合う食現象が起き、周期的な減光が観測されるため食連星と呼ばれる。ケプラー観測機は大量の恒星データを観測し、2000 個を超える食連星を発見した。それらの食連星は光度曲線の形を決めるパラメータによって 4 タイプ (detached, semi-detached, overcontact, ellipsoidal) に分けられ (Matijević et al. 2012)、Kepler Eclipsing Binaries に連星の一覧とパラメータの値が公開されている。

我々はケプラーで観測された食連星 2023 個の光度曲線について、光度の最大値  $L_{\max}$ 、最小値  $L_{\min}$ 、中間値  $L_{\text{med}}$  を算出し、中間値比  $((L_{\max} - L_{\text{med}})/(L_{\text{med}} - L_{\min}))$  と主極小の周期との関係調べた。その結果、周期が 0.5 日以下の食連星について、算出した中間値比の大きさによって overcontact と ellipsoidal の 2 タイプを分離できることが分かった。また分離できないものもあったが、元の光度曲線のエラーが原因であることが分かった。本研究の紹介と食連星が分離できる理由について議論を行い、さらに今後の展望について述べたい。

## 1 Introduction

公転軌道面が視線にきわめて近い連星系は、両星が互いに隠し合う食現象が起き、周期的な減光が観測されるため食連星と呼ばれる (参考: 恒星 シリーズ現代の天文学 第 7 巻)。NASA のケプラー観測機は大量の恒星を観測し、この中には 2000 個を超える食連星が含まれていた。観測された食連星は光度曲線の形状の目視によって 5 タイプ (detached, semi-detached, overcontact, ellipsoidal, uncertain) に分けられた (Prša et al. (2011))。図 1 に例を示す。

その後、食連星は光度曲線の形状を決める classification parameter  $c$  により、自動で 4 タイプ (detached, semi-detached, overcontact, ellipsoidal が優位な分布) に分けられ (Matijević et al. (2012))、Kepler Eclipsing Binaries に食連星の一覧と算出されたパラメータ、主極小の周期などが公開されている。

食連星のタイプ分類を自動で行うための指標を作ることは、大量の測光データに対して食連星の解析を行うのに非常に有用である。特に、簡単な演算で得られる指標を見出すことができれば、食連星の分類に要する時間は飛躍的に短くなる。そこで我々は中間値比という値を計算し、食連星のタイプ分類を自動で行う指標に用いることができないか調べた。

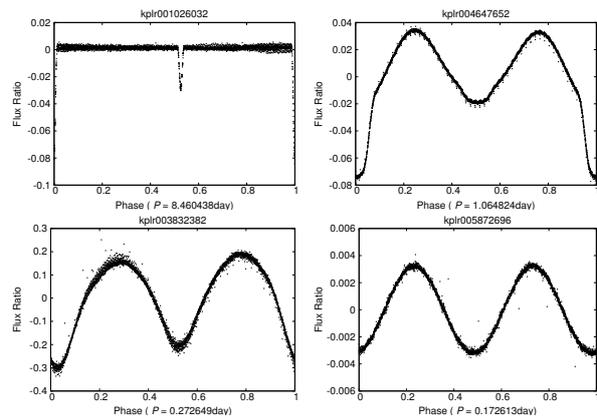


図 1: タイプ別の食連星の光度曲線 (主極小の周期で fold)。左上: detached、右上: semi-detached、左下: overcontact、右下: ellipsoidal

## 2 Instruments

NASA のケプラー観測機が測光したデータを用いた。ケプラーの性能は以下の通りである。

- 観測対象の恒星: 約 16 万個 (食連星は 2640 個 (2014 年 7 月時点))
- 観測期間: 2009 年 5 月 2 日~2013 年 5 月 11 日 (約 1471 日、safe mode 等を含む)

- 時間分解能: 約 29 分 (Long Cadence) と約 59 秒 (Short Cadence)

測光されたデータは MAST(Mikulski Archive for Space Telescopes) から取得できる。今回は観測期間のうち、Q10 シーズン (2011 年 6 月 27 日~9 月 28 日) に含まれる 2023 個の食連星のアーカイブデータを利用した。データは時間分解能が低いが、より多くの観測対象を持つ Long Cadence を選び、機器によって生じたエラー等を補正した PDCSAP(Pre-search Data Conditioning Simple Aperture Photometry) flux を用いた。

### 3 Methods

#### 3.1 中間値比

我々は食連星の光度曲線の形状からタイプ分類を行うための新たな指標として、中間値比  $MR$ (Median Ratio) という量を考えた。これは光度の最大値  $L_{\max}$ 、最小値  $L_{\min}$ 、中間値  $L_{\text{med}}$  を用いて、

$$MR = \frac{L_{\max} - L_{\text{med}}}{L_{\text{med}} - L_{\min}}$$

と表される量である。

#### 3.2 光度曲線の fold

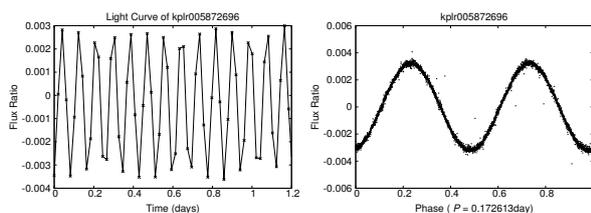


図 2: 食連星の fold の例。(左)fold 前 (右)fold 後。

fold は光度曲線を変光周期で折り重ねる操作である。図 2 の左図で、kplr005872696 は周期的な変光を起こしていることが分かる。この変光原因は食であり、主極小の周期が 0.172613 日と計算されているため、周期で光度曲線を折り重ねると図 2 の右図になる (横軸は 1 周期を 1 に規格化した)。ただし光度

曲線には食以外の変動が含まれることがあり、そのままでは上手く折り重ならない。そのため、あらかじめ fold する周期の 2 倍の長さでデータを分け、各区間で近似直線を引き、直線の傾きが水平になるようにデータを補正した (補正により主極小の周期の 2 倍より十分に長い周期の光度変動が消えることになる)。この補正データを用いて fold を行った。

今回我々は、fold の有無でそれぞれ中間値比を計算した。用いた Q10 シーズンのデータの長さは約 93 日であるため、fold なしについて主極小の周期が 93 日より長い食連星は対象外とした。また fold ありについて周期が 30 日より長い食連星は、データの長さ (約 93 日) に対して折り重ねる回数が少なくなるため対象外とした。結果食連星の数は、fold なしが 1904 個、fold ありが 1724 個となった。この中間値比の値を用いて、主極小の周期と算出した中間値比が、classification parameter  $c$  の違いによってどのような関係を持つのか調べた。

### 4 Results

#### 4.1 fold なし (食連星 1904 個)

結果が図 3 である。また表 1 は classification parameter  $c$  の値が食連星のどのタイプで優位かを示したものである。

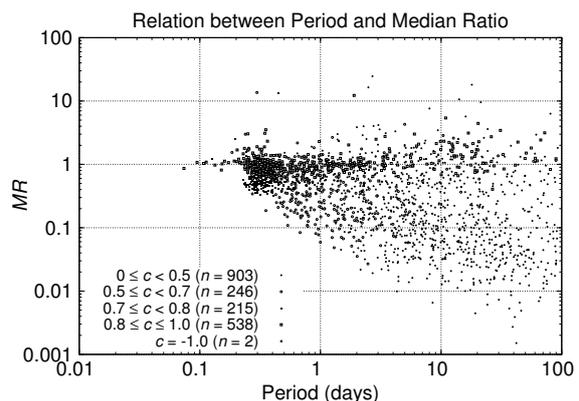


図 3: 主極小の周期と中間値比の関係 (fold なし、Q10 を利用)。点の種類は  $c$  の違い。 $n$  は各分布の個数。

	優位な食連星タイプ
$0 \leq c < 0.5$	detached
$0.5 \leq c < 0.7$	semi-detached
$0.7 \leq c < 0.8$	overcontact
$0.8 \leq c \leq 1.0$	ellipsoidal&uncertain
$c = -1.0$	$c$ が計算できなかったもの

表 1: classification parameter  $c$  とそのパラメータの大きさを優位な食連星のタイプ

## 4.2 fold あり (食連星 1724 個)

結果が図 4 である。

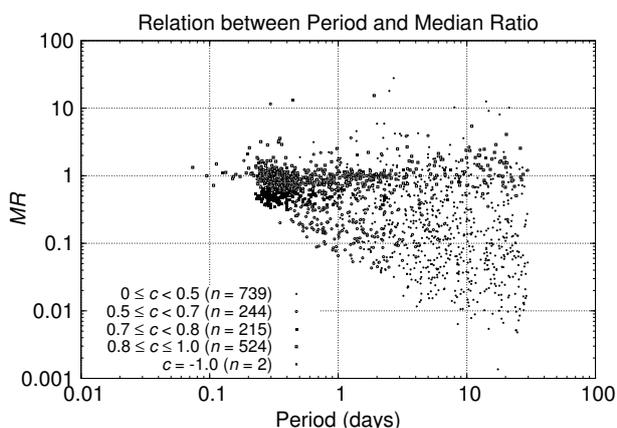


図 4: 主極小の周期と中間値比の関係 (fold あり、Q10 を利用)。点の種類は  $c$  の違い。  $n$  は各分布の個数。

fold の有無にかかわらず、主極小の周期が 0.5 日以下において、 $0.7 \leq c < 0.8$  の分布 (overcontact が優位) と  $0.8 \leq c \leq 1.0$  の分布 (ellipsoidal と uncertain が優位) が分離された。一方、主極小の周期が 0.5 日以上 1 日未満で、 $0.5 \leq c < 0.7$  の分布 (semi-detached が優位) が、 $0.1 < MR < 0.3$  で分離され、 $MR > 0.3$  では他の分布と混ざった。

## 5 Discussion

### 5.1 中間値比によるタイプ分類

主極小の周期が 0.5 日以下では、 $0.7 \leq c < 0.8$  と  $0.8 \leq c \leq 1.0$  の分布を分離できた。それらの分布

を優位に占める overcontact と ellipsoidal の光度曲線を図 1 で見比べると、ellipsoidal の方がより sin 波形に近いことが分かる。ここで理想的な sin 波形は  $MR = 1$  なので、ellipsoidal を多く含む分布が  $MR$  で 1 に近づき、overcontact を多く含む分布は sin 波形から外れ、 $L_{\max} - L_{\text{med}} < L_{\text{med}} - L_{\min}$  の光度曲線を持つため  $MR$  の値が 1 より小さくなり、ellipsoidal よりも下方に分布したと考えることができる。

一方で主極小の周期が 0.5 日以上 1 日未満では、 $0.5 \leq c < 0.7$  の分布が  $0.1 < MR < 0.3$  で分離され、 $MR > 0.3$  では他の分布と混ざった。そこで光度曲線を見てみると、 $0.1 < MR < 0.3$  は fold した光度曲線が副極小を軸に左右対称のものであり、 $MR > 0.3$  は急な増光を起こしているものや、食以外の光度変動によって副極小を軸に左右非対称なものであった。食以外の変動は fold ありの場合、主極小の周期の 2 倍より十分長い周期の光度変動が補正される。しかし 2 倍程度の長さの光度変動の影響は補正されず含まれたままである。従ってこのような食以外の光度変動が、分離できなかった原因の 1 つに挙げられる。

fold の有無で、各 classification parameter  $c$  ごとの分布に大きな変化は見られなかった。

### 5.2 急な増減光の影響

$0.7 \leq c < 0.8$  の食連星には  $MR \approx 1$  のものや、 $0.8 \leq c \leq 1.0$  には  $MR < 0.6$  のものがあり、互いの分布に混ざるものが見つかった。また、 $0.5 \leq c < 0.7$  には  $MR > 0.3$  のものがあり、他の分布に混ざった。さらにパラメータを問わず  $MR > 1$  のものが存在し、 $MR > 10$  のものもあった。これらの原因の 1 つに、光度曲線に含まれる急な増減光が挙げられる。

そこで急な増減光の影響を小さくするために、公開されているケプラーの Q0~Q17 シーズン (計 18 シーズン) 全ての観測データを利用することを考えた。なぜなら各シーズンで中間値比を計算し、全シーズンで平均すれば、1 シーズンに生じる急な増減光が中間値比に与える影響が小さくなるからである。

全シーズンの食連星について、光度曲線を fold して中間値比を計算し、主極小の周期と中間値比の関係を調べたのが図 5 である。ただし対象とした食連星の数は 2063 個に増えたが、これは始めに利用した

Q10 シーズンで観測されなかった食連星が他シーズンに含まれるからである。またこのようにシーズンで観測される食連星の数が異なるため、中間値比は観測されたシーズン数で平均した。なお各シーズンの日数が異なるため、fold する周期の長さの上限を (シーズンの日数)  $\times 0.3$  とした (図 5 の右端に対応)。

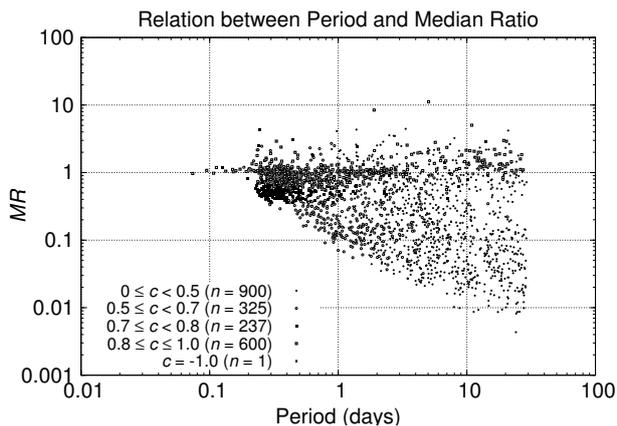


図 5: 主極小の周期と中間値比の関係 (fold あり、Q0 ~ Q17 の 18 シーズンを利用)。点の種類は  $c$  の違い。  $n$  は各分布の個数。

図 4 と図 5 を比較すると、 $MR > 10$  のものは少なくなることが分かる。また各パラメータの分布は、それぞれ中間値比 (縦軸) 方向の広がりが狭くなった。これらから全シーズンで中間値比を平均すると、急な増減光の影響を小さくできることが言える。

## 6 Conclusion

食連星のタイプ分類を自動で行う指標として中間値比を計算し、classification parameter  $c$  ごとの主極小の周期と中間値比の関係を調べた。その結果、周期が 0.5 日以下では  $0.7 \leq c < 0.8$  の分布 (overcontact が優位) と、 $0.8 \leq c \leq 1.0$  の分布 (ellipsoidal と uncertain が優位) を分離できた。これは ellipsoidal の光度曲線が overcontact のものより sin 波形に近く、中間値比の値として 1 に近づいたためだと考えられる。周期が 0.5 日以上 1 日未満では  $0.5 \leq c < 0.7$  の分布 (semi-detached が優位) が  $0.1 < MR < 0.3$  で分離され、 $MR > 0.3$  では他の分布と混ざった。理由の 1 つに食以外の光度変動の影響が考えられる。ま

た fold の有無ではパラメータごとの分布に大きな変化は見られなかった。さらに、急な増減光の影響により中間値比が上手く算出されない例があることが分かり、全シーズンで中間値比を平均し、主極小の周期と中間値比の関係を調べたところ、急な増減光の影響を小さくすることができた。

今後は主極小の周期が 0.5 日以上 of 食連星についても中間値比を用いてタイプ分類を進めることを考えていき、特に  $0.5 \leq c < 0.7$  で  $MR > 0.3$  を持つ分布が中間値比を用いて分離可能か検討したい。

## Acknowledgement

Some of the data presented in this paper were obtained from the Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST). STScI is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under NASA contract NAS5-26555. Support for MAST for non-HST data is provided by the NASA Office of Space Science via grant NNX13AC07G and by other grants and contracts. This paper includes data collected by the Kepler mission. Funding for the Kepler mission is provided by the NASA Science Mission directorate.

## Reference

- Matijević, G., et al. 2012, AJ, 143, 123
- Prša, A., et al. 2011, AJ, 141, 83
- Slawson, R. W., et al. 2011, AJ, 142, 160
- Coughlin, J. L., et al. 2011, AJ, 141, 78
- 恒星 シリーズ現代の天文学 第 7 巻  
(野本憲一・定金晃三・佐藤勝彦 [編], 2009, 日本評論社)
- FTOOLS (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/ftools/>)
- Blackburn, J. K. 1995, in ASP Conf. Ser., Vol. 77, Astronomical Data Analysis Software and Systems IV, ed. R. A. Shaw, H. E. Payne, and J. J. E. Hayes (San Francisco: ASP), 367
- Barclay, T., et al. 2012, Kepler Data Release 13 Notes (KSCI-19053-001)
- Thompson, S. E., et al. 2013, Kepler Data Release 23 Notes (KSCI-19063-001)