

光度の中間値比を用いた食連星のタイプ分類

三舛慧人、山岡均 (九州大学)

1. はじめに

ケプラーは系外惑星の起こすトランジットを観測するための、NASA の太陽系外惑星捜索プロジェクトの観測機である。約 16 万個の恒星を対象に、約 30 分と約 1 分の時間分解能で約 4 年間の測光観測を行った。これらに加え、ケプラーバンド (半値で 435~845nm) での平均の見かけの等級 Kp 、有効温度、半径、表面重力、色指数などの恒星の物理的性質が、アーカイブデータとして Mikulski Archive for Space Telescopes(MAST)に公開されている。

ケプラー観測機が測光した恒星には約 2600 個程度の食連星が含まれており、これら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^{[1][2]}。図 1 に uncertain 以外の 4 タイプの典型的な光度曲線を示す。

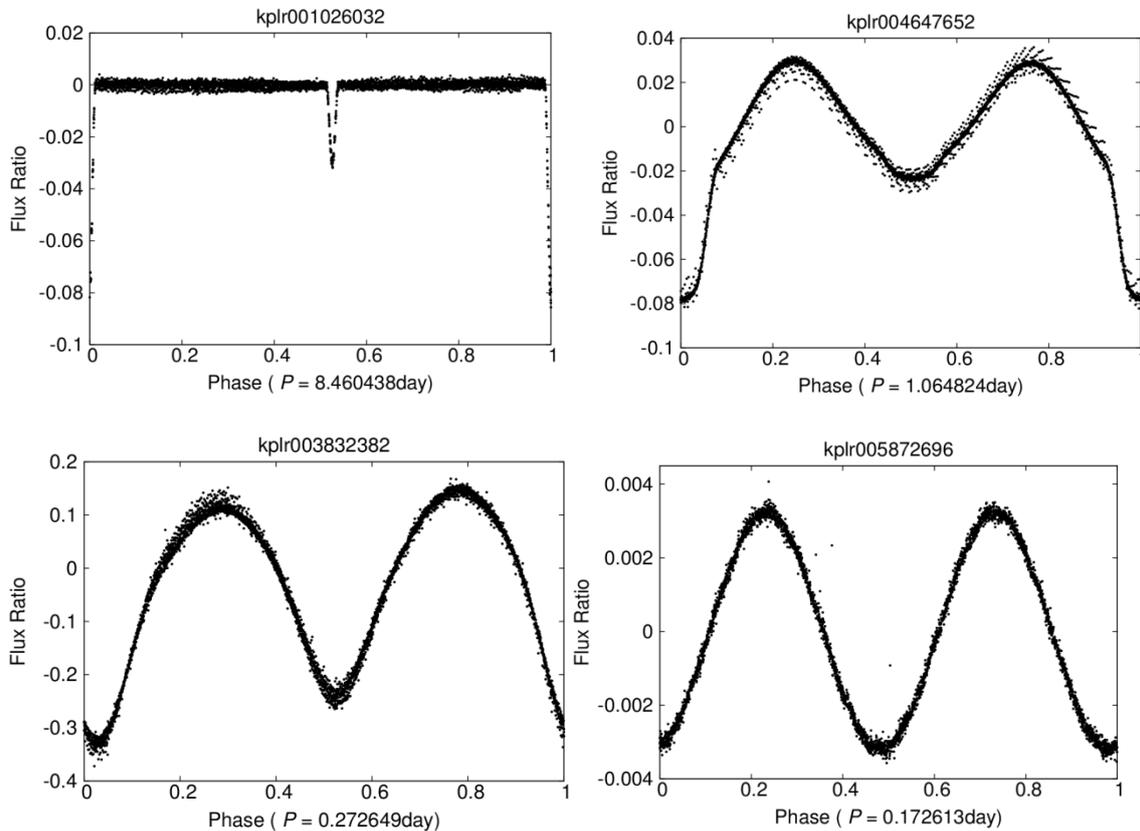


図 1 : タイプ別の食連星の光度曲線 (主極小の周期で fold)。横軸は主極小の周期を 1 で規格化した Phase、縦軸は振幅比。左上: detached、右上: semi-detached、左下: overcontact、右下: ellipsoidal。

その後 Locally Linear Embedding(LLE)によって定められる、光度曲線の形状に対応する classification parameter c が食連星ひとつひとつに自動で決められ、 c の大きさにタイプ分類 (detached, semi-detached, overcontact, ellipsoidal&uncertain が優位な分布) がされた^[3]。

Kepler Eclipsing Binaries (Revision 3)には食連星の一覧と算出された分類パラメータ c の大きさ、主極小の周期が公開されている。

LLE と分類パラメータ c を用いる方法では、LLE アルゴリズムの計算量が多く、また観測対象の食連星が増えると過去のサンプルも含めて再計算をしてパラメータを決め直す必要があった。そこで食連星タイプの自動分類のためにより簡単な演算で得られる指標を見出すことを考えた。簡単な指標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り（大量の測光データが得られる今後の観測としてガイア計画などがある）、分類に要する時間を飛躍的に短くできると期待される。

2. 方法

2.1 中間値比

食連星の光度曲線の形状から自動で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) を考えた。これは光度の最大値 L_{\max} 、最小値 L_{\min} 、中間値 L_{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。

2.2 光度曲線の補正

中間値比 MR を計算するにあたって、光度曲線は公開されている主極小の周期で折り重ねた。しかし中には食以外にタイムスケールの長い光度変動があつて上手く折り重ならないものが存在する。そこであらかじめ折り重ねる周期の 2 倍の長さでデータを分け、各区間での近似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 倍より十分に長いタイムスケールの光度変動の影響をカットできる）。補正後、主極小の周期で折り重ねた。

また食連星の中にはスパイク上の増光を示すものが複数見つかった。これらはリアルなスーパーフレアかもしれないし、雑音かもしれないが、いずれも食連星の解析とは無関係である。これらを除外するため、光度の最大値 L_{\max} は折り重ねた後の光度曲線の中で最も明るい 10 点の中間値に設定した。

3. 結果

ケプラー観測機の Q10（2011 年 6 月 27 日～9 月 28 日）に含まれる 2023 個の食連星の測光観測のアーカイブデータ（時間分解能約 30 分の LC、機器によるエラーなどを補正した PDCSAPflux）を利用し、中間値比を計算した。その後 classification parameter c ^[3] の大きさによって中間値比 MR の値と主極小の周期（公開データを利用）がどのような関係をもつのか調べた。ここで分類パラメータ c と優位な食連星タイプの対応を表 1 に示す。

ただし Q10 の観測期間（約 93 日）よりも主極小の周期が長い食連星は除外し、また周期が観測期間以下であっても 2 回以上折り重ねることのできない周期の長さをもつ食連星は折り重ね

ずに中間値比を計算した。さらに分類パラメータ c が付けられていない例が 3 例あった。これらを除外すると対象の食連星は 1902 個になった。結果が図 2 である。

	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

表 1 : 分類パラメータ c ^[3] と優位な食連星タイプとの関係

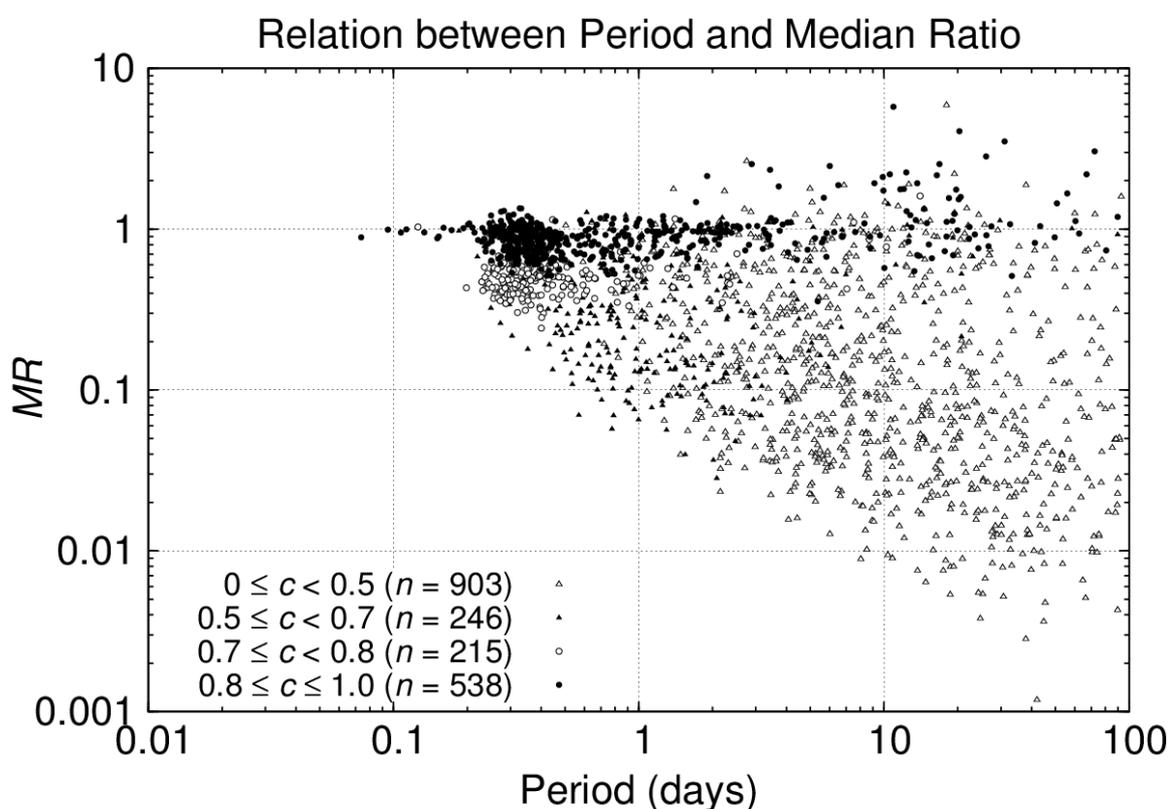


図 2 : 主極小の周期と中間値比 MR の関係。点の種類は分類パラメータ c ^[3] の大きさの違い。

4. 考察

ellipsoidal&uncertain と overcontact を $MR = 0.6 \sim 0.7$ を境に分離できた。これは ellipsoidal の光度曲線は sin 波形に近く $MR = 1$ 付近に分布するのに対し、overcontact は sin 波形から外れ $L_{\max} - L_{\text{med}} < L_{\text{med}} - L_{\min}$ となり $MR < 1$ に分布するのが理由だと考えられる。

また $MR = 0.1 \sim 0.3$ 、周期が 1 日以下の範囲に semi-detached の一部を分離できた。 $MR > 0.3$ と $MR < 0.3$ それぞれの範囲に分布する semi-detached の光度曲線を比較すると、傾向として $MR > 0.3$ にはベース変動（食以外の変動）や食の小さいものが多く含まれていた。 $MR < 0.3$ のものは 1Phase で副極小を軸に左右対称な光度曲線をもっていた。ベース変動が存在するもの

や食が小さなものは、semi-detached の MR の計算に大きく影響を与えることが分かった。

5. まとめ

ケプラーが観測した食連星について MR と主極小の周期との関係を調べ、 MR で食連星のタイプを分けられるか先行研究の分類パラメータ c を用いて判断した。結果 ellipsoidal&uncertain と overcontact の優位な分布、semi-detached が優位な分布の一部をそれぞれ分離することができた。一方でベース変動や小さな食をもつ食連星は semi-detached の MR の計算に大きく影響を与えた。今後食連星のカタログが増えたときには主極小の周期と MR を計算し、過去の食連星で描いた周期— MR グラフにプロットすることでタイプを自動分類できる可能性がある。

6. 今後の課題

主極小の周期は公開データを利用したため、食の周期解析を試みた。周期解析には PDM^[4] を用いた。PDM は飛びがあるデータ、正弦波形以外にも有効であるが、短周期の解析ほど計算時間が大きくなる。Q10 に含まれる 2023 個の食連星について周期解析を行い、既知の周期と比較したのが図 3 である (PDM 計算でエラーが出たものは除いている)。色の濃淡は MR を表す。

結果周期が算出できたものに加え、半分の周期を計算したものが多数あることが分かった。また図の左上は数日の周期に対して 100 日に近い周期と計算された食連星で、 MR が大きかった。これらはベース変動の影響が強く、PDM はベース変動の影響を大きく受けることが分かった。

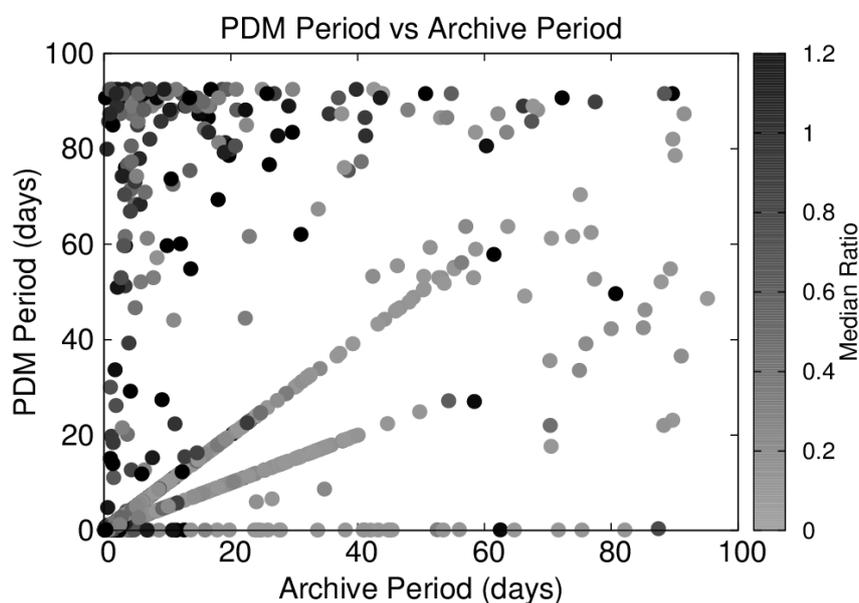


図 3 : 既知周期と PDM 計算周期の比較 (濃淡は MR の大きさ)

[参考文献]

- | | |
|---|--|
| [1] Prša, A., et al. 2011, AJ, 141, 83 | [3] Matijević, G., et al. 2012, AJ, 143, 123 |
| [2] Slawson, R. W., et al. 2011, AJ, 142, 160 | [4] Stellingwerf, R. F. 1978, ApJ, 224, 953 |