

# 食連星の質量移動率の見積もりとその統計的性質

高妻 真次郎

中京大学

e-mail: skouzuma@lets.chukyo-u.ac.jp

## 概要

$O-C$  図のデータアーカイブを利用し、公転の軌道周期変化が質量移動に起因すると考えられる食連星を選抜、質量移動率を定量的に求め、その統計的性質を調べた。その結果、ある値を境に連星間距離に近いほどあるいは遠いほど質量移動率が大きくなる傾向が見られた。さらに、両星の質量が同程度なほど質量損失よりも質量交換の影響が大きくなることが分かった。

## 1 はじめに

食連星とは、食により光度曲線に周期的な極小部が現れる連星系である。連星の軌道長半径が大きいと軌道傾斜角の影響により食連星としては観測されないため、発見される食連星の多くは近接連星となる。

近接連星では、ロッシュ・ローブ内での物理状態が星の形状などにも大きく影響する。コパールは、ロッシュ・ローブ内での両星の物理状態に着目し、両星ともにロッシュ・ローブを満たしていないものを分離型 (detached)、片方だけが満たすものを半分離型 (semi-detached)、両星ともに満たすものを接触型 (contact) と分類した。

ロッシュ・ローブが次第に満たされていくと、星の形状は球形から楕円体状へと変化をしていく。これに伴い、星の形状が球形のときには平坦であった光度曲線の極大部の形が、凸上の形へと変わる。さらに、少なくとも一方の星のロッシュ・ローブが満たされれば、ラグランジュ点を通して質量交換が生じたり、質量損失といった質量移動現象が発生する。連星系の進化を考える際には、この質量移動の影響を切り離して考えることはできず、質量移動がどの程度起きたのかによって連星系の進化の道筋が変わってくる。つまり、連星系における質量移動の性質を調べることは、連星系の進化などを解明するうえで重要な役割を果たすのである。

先行研究では、連星系の質量移動の性質について、個々の天体を調べたものはあるが、統計的な観点から調べたものはほとんどない。本研究では、多数の食連星の質量移動率を定量的に見積もることにより、質量移動の統計的な性質の調査を行った。

## 2 質量移動率の見積もり

質量移動は、質量交換と質量損失の2種類に大別することができる。両星間で質量のやりとりを行う質量交換では、連星系内で角運動量と質量が保存されると考えれば、以下の式が導かれる。

$$\frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = \frac{3(m_1 - m_2)}{m_1 m_2} \frac{dm_1}{dt} \quad (1)$$

ここで、 $P$  は軌道周期、 $m_1$  と  $m_2$  は連星を構成する星の質量である。式 (1) から分かるように、軌道周期が減少する ( $\dot{P} < 0$ ) 場合、相対的に質量の大きな星から小さな星へと質量が移動する一方、増加する ( $\dot{P} > 0$ ) 場合には相対的に質量の小さな星から大きな星へと質量が移動することになる。

質量損失では、系から質量が失われるため、系内では質量や角運動量は保存されず、質量損失によって生じる軌道周期の変化は以下ようになる。

$$\frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = -\frac{2}{m_1 + m_2} \frac{dm_1}{dt} \quad (2)$$

質量損失では、常に  $\dot{m}_1$  (あるいは  $\dot{m}_2$ )  $< 0$  となるはずなので、それによって生じる周期の変化は常に増加する ( $\dot{P} > 0$  となる) ことになる。

式 (1) および (2) から分かるように、質量交換や質量損失などの質量移動が起きることで軌道周期の変化が生じる。つまり、軌道周期変化を測定することができれば、質量移動率を定量的に求めることが可能となる。

軌道周期の変化は、 $O-C$  図を用いて調べることができる。 $O-C$  とは、光度曲線の極小部の観測時刻 (Observed) と計算予報時刻 (Calculated) との差を取った値である。通常、軌道周期にまったく変化がない場合には、 $O-C$  図上での分布は直線状になり、何らかの原因で周期変化が起きると  $O-C$  図上での分布は直線状で

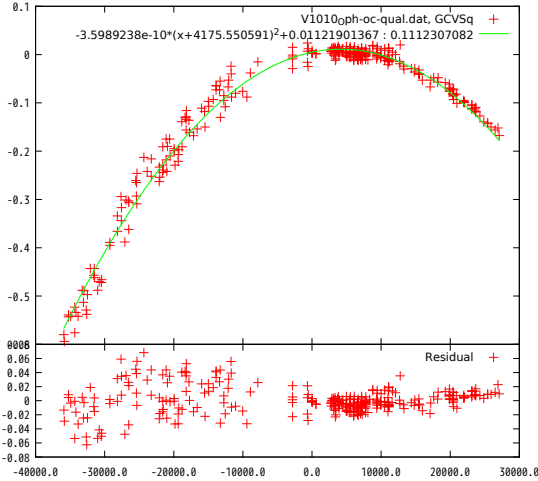


図 1: V1010 Oph の  $O-C$  図と最小二乗曲線（上部）。下部の縦軸は、観測値と最小二乗曲線との残差である。

はなく曲線（あるいは折れ線）状になる。もし、周期変化の割合が一定の場合には、その天体の  $O-C$  図は放物線状の分布を示す。したがって、定常的な質量移動を要因として軌道周期の変化が起きている場合、その食連星の  $O-C$  図上での分布は放物線状になると考えられる。今回の研究では、放物線状の分布を示す食連星を選抜し、質量移動率を定量的に見積もった。

### 3 質量移動候補天体の選抜

食連星の  $O-C$  値を得るためには、Lichtenkecker-Database of the BAV (LkDB)<sup>1</sup>、 $O-C$  gateway<sup>2</sup>のデータベースを利用した。これらには、過去数十年以上にわたり蓄積された観測データがまとめられ、数多くの食連星の  $O-C$  値が集約されている。

まず、これらのデータベースにある食連星のうち、 $O-C$  図上での分布が放物線状になる天体を目視により確認し、およそ 260 天体を質量移動が起きている可能性の高い天体として選抜した。

次に、二次関数

$$(O-C) = a \cdot E^2 + b \cdot E + c \quad (3)$$

により、 $O-C$  図の最小二乗フィッティングを行った。なお、 $E$  は極小時刻の位相を表し、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  はフィッティングにより得られる係数である。2 次の項の係数には  $2a = \frac{dP}{dE}$

<sup>1</sup><http://www.bav-astro.eu/index.php/veroeffentlichungen/service-for-scientists/lkdb-engl>

<sup>2</sup><http://var2.astro.cz/ocgate/>

という関係があるので、これを利用して  $\frac{dP}{dt} \equiv \dot{P}$  を算出した。一例として、図 1 に V1010 Oph のフィッティング結果を示す。

質量移動率を求めるうえで必要な各星の質量やその他の物理量に関しては、先行研究による文献値を利用した。

## 4 結果～質量移動率の統計的性質～

前節までに得た物理量と式 (1) および (2) を利用することで、質量が相対的に大きな星から小さな星への質量交換（ケース I）、質量が相対的に小さな星から大きな星への質量交換（ケース II）、連星系からの質量損失（ケース III）の 3 つのパターンでの質量移動率を算出し、周期・軌道長半径・質量比との相関関係を調べた。

本節では、食連星の質量移動率と各物理量との関係について紹介する。

### 4.1 軌道周期との相関

図 2 に軌道周期と質量移動率との関係を示す。ケース I～III までの共通の特徴として、軌道周期が概ね 0.6～1 日未満の食連星には負の相関が見られ、それ以上の軌道周期を持つ食連星には正の相関が見られた。つまり、0.6～1 日を境界として、軌道周期がより短いあるいはより長いほど質量移動率が大きくなる傾向がある。

### 4.2 軌道長半径との相関

軌道長半径は、ケプラーの第 3 法則

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G}{4\pi^2}(M_1 + M_2) \quad (4)$$

により算出した。

軌道長半径と質量移動率との関係を示した図 3 から分かるように、その傾向は軌道周期との関係に類似している。つまり、軌道長半径およそ  $6R_{\odot}$  を境界に、連星間距離が近いほどあるいは遠いほど質量移動率が大きくなる傾向が見られた。軌道長半径は周期に強く依存するため、その質量移動率との相関関係が周期とのものに類似していることは当然の結果ともいえる。

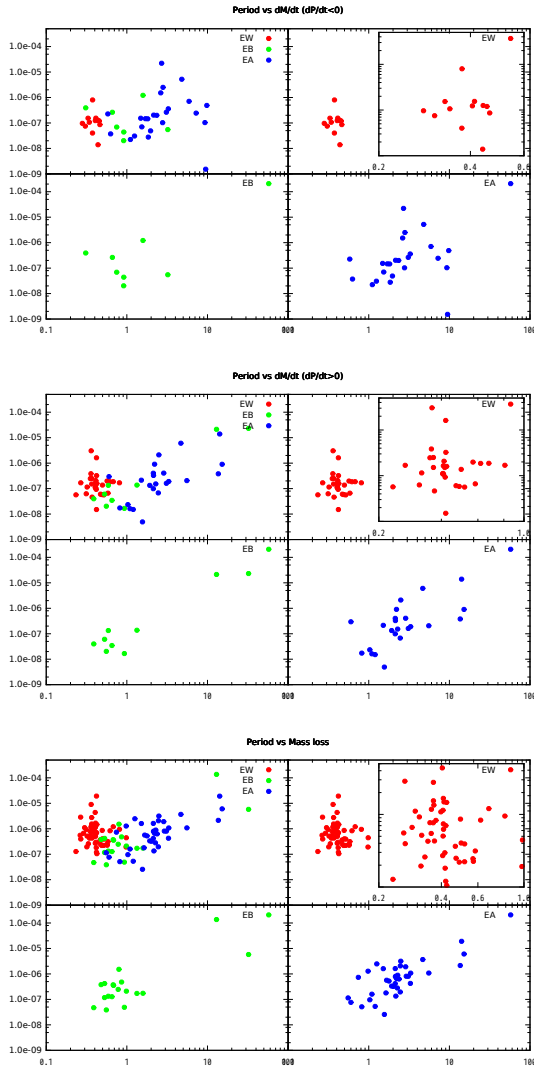


図 2: 横軸が周期 (日)、縦軸が質量移動率 ( $M_{\odot}/\text{yr}$ )。各図の左上が全対象天体のもので、他の3つは各タイプ (EW、EB、EA 型) ごとに分けた図。上段は相対的に質量が大きな天体から小さな天体への質量交換の場合、中段は相対的に質量が小さな天体から大きな天体への質量交換の場合、下段は連星系から質量損失する場合。

### 4.3 質量比との相関

図 4 が、質量比と質量移動率との関係である。ケース I においては、質量比 0.6 付近を境界に、質量移動率の性質に明確な違いが見られる。つまり、質量比がおよそ 0.6 未満の食連星の質量移動率は大きな変化が見られない一方で、質量比がおよそ 0.6 以上の天体については質量比が 1 に近づくほど質量移動率が急激に大きくなる。これは、質量が相対的に大きな星から小さな星へ

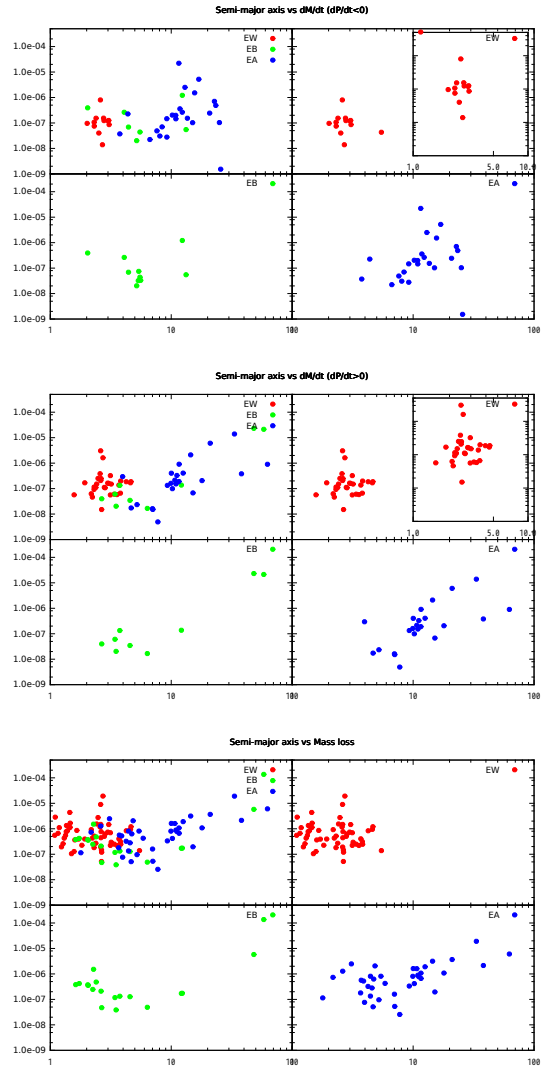


図 3: 横軸が軌道長半径 ( $R_{\odot}$ )、縦軸が質量移動率 ( $M_{\odot}/\text{yr}$ )。図の配置などに関しては、図 2 と同じ。

と質量交換が起きる場合、連星系を構成する両星の質量が同程度なほど、質量移動率が大きくなることを示す。

ケース II の場合には、質量比にともない質量移動率がやや増加しているような傾向が見られる。

ケース III に関しては負の相関が見られ、質量比とともに質量損失率が減少する傾向が見られた。

## 5 まとめ

今回、食連星の質量移動率の統計的性質について調べた。その結果、連星間距離が近い (軌道周期が短い) 天体ほど質量移動率が大きくなる一方で、ある境界値を境に、連星間距離 (軌道周期) の増加とともに質量移動率も増加するという統計的特徴が見られた。連星間距離が

点では、サンプル数も少なく、統計的精度も高いとはいえず、不確定性も大きい。したがって、今後はサンプル数やデータの質を向上させることで、今回の結果をさらに検証していく必要がある。

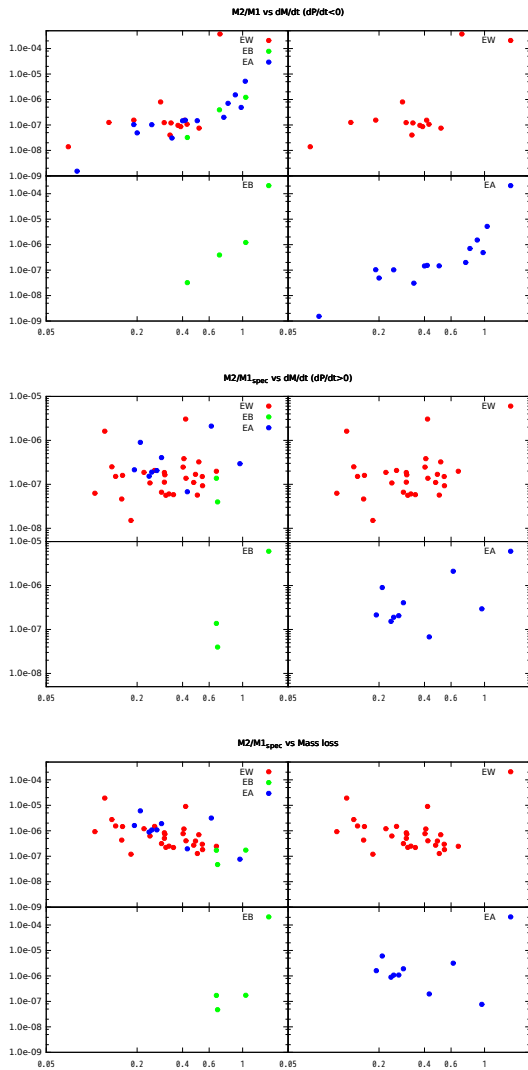


図 4: 横軸が質量比、縦軸が質量移動率 ( $M_{\odot}/\text{yr}$ )。図の配置などに関しては、図 2 と同じ。質量比は、分光的に得られたもののみを利用している。

近ければ、重力による相互作用が大きくなるために質量移動率も大きくなることが予想されるが、遠い場合に質量移動率が大きくなることは自明ではない。後者の点に関しては、今後さらなる調査を行うことによって、この性質の真偽を確認し、その物理的原因を探っていく必要がある。

また、質量比との相関関係については、両星の質量が同程度なほど質量交換率が大きくなる傾向が見られた。質量損失率に関しては逆に、質量が同程度なほど質量損失率が小さくなっている。これは、お互いの質量が近いほど質量損失より質量交換の効果の方が大きくなることを示す。

今回得られたような質量移動率の統計的性質は、連星系の進化を探究するうえでも重要な役割を果たす。現時