

# 多重トランジット惑星系 KOI-94 における TTV の解析とその惑星食への示唆

増田 賢人 (東京大学大学院 理学系研究科)

## Abstract

本講演では、Kepler Object of Interest (KOI) 94 系における transit timing variation (TTV; 惑星どうしの重力相互作用によるトランジットの一定周期からのずれ) の解析結果を論じる。KOI-94 は、ケプラー宇宙望遠鏡によって発見された複数トランジット惑星系であり、中心星の近傍およそ 0.3AU 以内に b (周期 3.7 日)、c (10 日)、d (22 日)、e (54 日) という 4 つのトランジット惑星を有する。これらの惑星に対しては、視線速度法による質量・離心率の推定が行われており、いずれの質量も惑星と呼べる範囲にあることが分かっている。ところが、惑星 c、e に対する質量の制限はほぼ上限値のみであるうえ、得られた離心率の値には系の力学的安定性を鑑みると不自然に大きなものも含まれている。そこで我々は惑星 c、d、e の TTV を N 体計算を用いて解析することで、それらの質量・離心率に対して測光観測のみに基づく独立な制限を与えた。この結果、惑星 c、e の質量などのパラメータをより高い精度で決定した。得られた制限は視線速度法によるものと概ね整合的であったが、一方で先に述べたような大きな離心率は現れず、また惑星 d の質量は視線速度法で得られた値よりも有意に小さいという差異もみられた。加えて、惑星 e の TTV は、今回用いた 4 惑星によるモデルでは説明できなかった。本講演では、上記の内容に加え、その結果が KOI-94 で観測された planet-planet eclipse と呼ばれる興味深い現象に与える示唆についても議論する。

## 1 Introduction

KOI-94 は、ケプラー宇宙望遠鏡によって発見された複数トランジット惑星系であり、図 1 に示すような 4 つのトランジット惑星を有する。

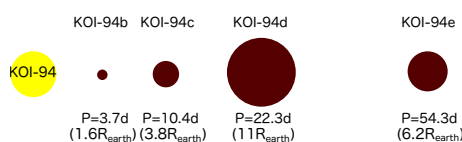


図 1: KOI-94 系の概念図

これらのうち KOI-94d については、Hirano et al. (2012) による Rossiter-McLaughlin 効果の測定の結果、その公転軸と中心星の自転軸が揃っていることが分かっている。さらに、KOI-94 は planet-planet eclipse (以下 PPE) と呼ばれるまれな現象 (2 つの惑星が同時にトランジットし、かつ恒星面上で重なり合う) が唯一観測された系でもある。KOI-94d と KOI-94e による PPE のライトカーブを解析することで、Hirano et al. (2012) は両者の公転面が 2 度以内で揃っ

ていることを結論づけた。以上の結果から、この系においては中心星自転軸と 2 惑星 (KOI-94d, KOI-94e) の公転軸すべてが高い精度で揃っていることが明らかとなった。このことは、KOI-94 の惑星の近接軌道が、円盤との相互作用による軌道移動の結果であることを示唆する。この点で、KOI-94 は複数惑星系の形成を理解する上での貴重なサンプルであり、詳細な特徴付けに値する系であるといえる。

近年、Weiss et al. (2013) は KOI-94 の視線速度を測定し、4 惑星の質量と離心率を見積もった。結果、KOI-94d の質量 ( $m_d = 106 \pm 11 M_{\oplus}$ ) についてはよい制限が得られたが、KOI-94c ( $m_c = 15.6^{+5.7}_{-15.6} M_{\oplus}$ ) と KOI-94e ( $m_e = 35^{+18}_{-28} M_{\oplus}$ ) の質量の制限はほぼ上限のみであることに加え、KOI-94c の離心率は系の力学的安定性を鑑みると不自然に大きな値 ( $e_c = 0.43 \pm 0.23$ ) となっている。これらの結果は視線速度の更なる長期観測の必要性を示すものであるが、一方で TTV (Transit Timing Variation; 惑星どうしの重力相互作用によるトランジットの一定周期からのずれ) を用いてこれらのパラメータに良い制限を与える

ことも可能である。上述の通り KOI-94 は、Rossiter-McLaughlin 効果や PPE の観測によって軌道パラメータが他に類をみない精度で制限されている希少な惑星系である。このような系で TTV により視線速度法とは独立な制限を与え、両者の結果を比較しておくことは、TTV によるパラメータ推定の信頼性を評価するうえでも有益な作業である。

そこで本講演では、TTV の N 体計算を用いた解析により得られる KOI-94c, KOI-94d, KOI-94e の質量、離心率への制限について述べる。また、これらの結果が次回の PPE の発生時刻に与える示唆についても議論する。

## 2 Transit light curve の解析

まず我々は、KOI-94 の transit light curve を用いて各惑星の軌道パラメータを制限した。図 2 から 4 は、各惑星の phase-fold した transit light curve である。

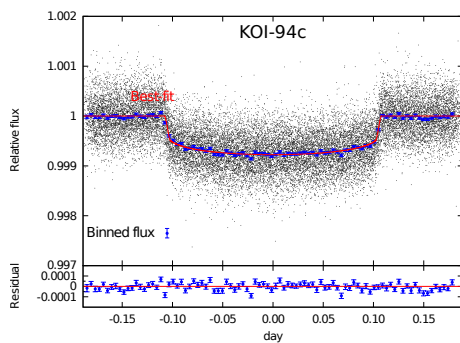


図 2: KOI-94c の phase-folded transit light curve

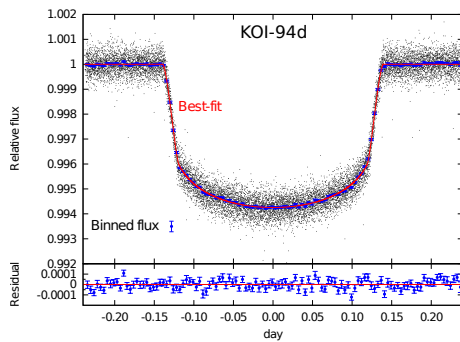


図 3: KOI-94d の phase-folded transit light curve

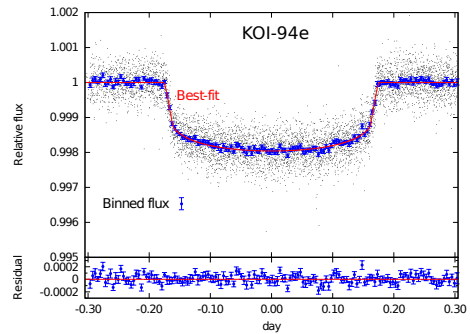


図 4: KOI-94e の phase-folded transit light curve

これらを Ohta et al. (2009) によるトランジットのモデルを用いてフィットした結果 (赤の実線)、KOI-94c, KOI-94d, KOI-94e の  $a/R_*$  (scaled semi-major axis),  $R_p/R_*$  (planet-to-star radius ratio),  $b$  (transit の impact parameter) および linear/quadratic limb-darkening coefficients  $u_1, u_2$  は表 1 のように決定された。

## 3 トランジット中心時刻の決定

表 1 のパラメータを用いて、次に各惑星のトランジット中心時刻を決定した。これらをトランジット回数の 1 次関数でフィットした残差をプロットしたのが図 5 である。いずれの惑星に対しても、トランジットの一定周期からの有意なずれ (=TTV) が見て取れる。

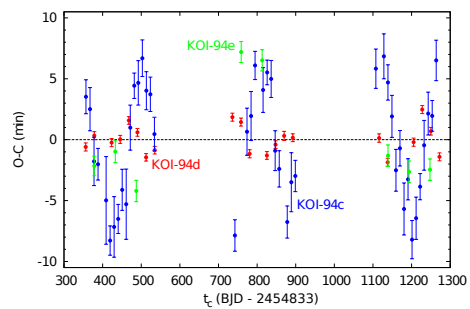


図 5: KOI-94c, KOI-94d, KOI-94e の TTV

表 1: Photometric parameters obtained from phase-folded light curves

Parameter	Value
KOI-94c	
$a/R_\star$	$15.779828^{+0.001560}_{-0.001561}$
$R_p/R_\star$	$0.025673^{+0.000074}_{-0.000075}$
$b$	$0.0212^{+0.020}_{-0.015}$
$u_1$	$0.40 \pm 0.06$
$u_2$	$0.10^{+0.08}_{-0.09}$
$\chi^2/\text{d.o.f}$	25, 843/23, 611
KOI-94d	
$a/R_\star$	$26.240616^{+0.196431}_{-0.186810}$
$R_p/R_\star$	$0.070288^{+0.00015}_{-0.00014}$
$b$	$0.2994^{+0.022}_{-0.025}$
$u_1$	$0.40 \pm 0.02$
$u_2$	$0.14 \pm 0.03$
$\chi^2/\text{d.o.f}$	15, 473/13, 766
KOI-94e	
$a/R_\star$	$47.43996^{+0.009385}_{-0.009306}$
$R_p/R_\star$	$0.041365^{+0.00012}_{-0.00013}$
$b$	$0.3840^{+0.005}_{-0.006}$
$u_1$	$0.36 \pm 0.07$
$u_2$	$0.19^{+0.11}_{-0.10}$
$\chi^2/\text{d.o.f}$	6, 822/5, 934

## 4 N 体計算を用いた TTV 解析

図 5 の TTV を、4 次のエルミート法 (Kokubo & Makino 2004) を用いた惑星の軌道計算によってフィットし (Fabrycky 2010)、各惑星の質量  $m$ 、離心率  $e$ 、近点黄経  $\varpi$  (transit light curve から求まらないパラメータ) を決定した。ここで KOI-94b については、

- 個々のトランジットが小さすぎて識別できない
- N 体計算による見積りの結果、他の惑星の TTV には寄与しないことが分かっている

ことから、以降の解析ではその存在を無視している。

### 4.1 KOI-94e

KOI-94e の TTV は、図 6 に示すように 4 惑星モデルでは説明できなかった。この事実と、KOI-94e についてはそもそもトランジットが 8 点しか観測されていないことを考慮し、今回の解析では KOI-94e の TTV はパラメータ推定には用いなかった。ベストフィットと観測との大きなずれは、KOI-94e の外側にトランジットしていない惑星が存在することを示唆しており、更なる探求に値するものである。

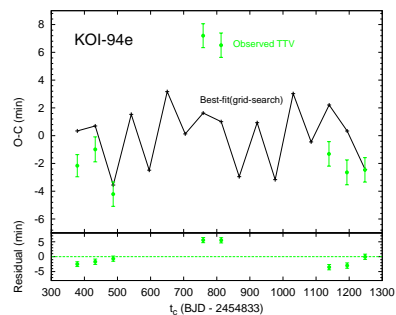


図 6: KOI-94e の TTV のフィット

### 4.2 KOI-94c と KOI-94d

次に、残りの KOI-94c と KOI-94d の TTV を MCMC を用いて同時にフィットした。結果、図 7 および 8 のようなベストフィットが得られ、パラメータへの制限は表 2 のようになった。

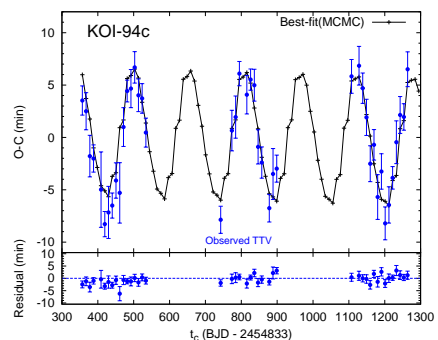


図 7: KOI-94c の TTV のフィット

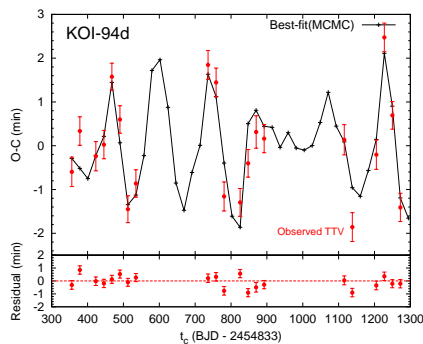


図 8: KOI-94d の TTV のフィット

表 2: Best-fit parameters obtained from TTV

Parameter	Value
KOI-94c	
$m_c$	$9.4^{+2.4}_{-2.1}$
$e_c \cos \varpi_c$	$0.0143^{+0.0080}_{-0.0059}$
$e_c \sin \varpi_c$	$0.0045^{+0.0091}_{-0.0079}$
$\chi_c^2$	56
KOI-94d	
$m_d$	$52.1^{+6.9}_{-7.1}$
$e_d \cos \varpi_d$	$-0.022^{+0.014}_{-0.011}$
$e_d \sin \varpi_d$	$0.0075^{+0.021}_{-0.018}$
$\chi_d^2$	43
KOI-94e	
$m_e$	$13.0^{+2.5}_{-2.1}$
$e_e \cos \varpi_e$	$-0.078^{+0.021}_{-0.014}$
$e_e \sin \varpi_e$	$-0.025^{+0.017}_{-0.014}$
$(\chi_c^2 + \chi_d^2)/\text{d.o.f}$	99/56

## 5 Discussion

### 5.1 視線速度法の結果との比較

TTV から得られた制限は、視線速度法によるもの (Weiss et al. 2013) と概ね整合的であった。特に、KOI-94c と KOI-94e の質量については、視線速度法による結果 (Weiss et al. 2013) よりも良い制限となっている。

KOI-94c の離心率については、視線速度法のベストフィットよりも  $1.8\sigma$  小さな値が得られた。KOI-94c

の視線速度の検出は有意性が低い (ゼロと consistent である) こと、視線速度法で求めたような大きな離心率では系が長期的に不安定になること (Weiss et al. (2013) 自身も指摘している) を考慮すると、このパラメータに関しては TTV による結果の方がより信頼性が高いと考えられる。

一方で、KOI-94d の質量については、視線速度が高い有意性で検出されているにも関わらず、TTV からは視線速度よりも  $4\sigma$  ほど小さな値が得られた (KOI-94d の質量が小さいことは、Lithwick et al. (2012) による TTV の近似公式を用いた解析によっても示唆される)。この差異の原因は現在のところ不明であり、視線速度/TTV を用いた更なる研究の必要がある。

### 5.2 PPE への示唆

KOI-94d と KOI-94e による次回の PPE を 2 体問題の範囲 (ケプラー軌道の単なる重ね合わせ) で計算すると、UT 2026 年 4 月 1 日-2 日にかけての double transit の最中に生じるという予測が得られる。この予測が多体問題の効果を含めても同様に成り立つかを検証するため、我々は TTV の解析から求めたパラメータ (表 2) を用いて、重力相互作用を含めた数値計算を行った。その結果、少なくともベストフィットの  $1\sigma$  の範囲内では、2 体問題の予測と同じ double transit で次回の PPE が生じるという結論を得た。

なお、視線速度による値を用いた場合でもほぼ同様な結果が得られたが、PPE によって生じる増光の形状には両者で有意な差があることが分かった。この差異により、もし次回の PPE が実際に観測されれば、どちらの結果がより妥当かを検証できる可能性がある。

## Reference

- Fabrycky, D. C. 2010, ArXiv e-prints
- Hirano, T., et al. 2012, ApJ, 759, L36
- Kokubo, E., & Makino, J. 2004, PASJ, 56, 861
- Lithwick, Y., Xie, J., & Wu, Y. 2012, ApJ, 761, 122
- Ohta, Y., Taruya, A., & Suto, Y. 2009, ApJ, 690, 1
- Weiss, L. M., et al. 2013, ApJ, 768, 14