

## トランジット時刻変動を用いた低密度惑星系の発見

増田 賢人 (東京大学大学院 理学系研究科)

### Abstract

本研究では、Kepler-51 (KOI-620) とよばれる複数トランジット惑星系におけるトランジット時刻変動の解析結果を論じる。この系は、2つのトランジット惑星 Kepler-51b (周期 45.2 日)、Kepler-51c (周期 85.3 日) およびトランジット惑星候補 KOI-620.02 (周期 130.2 日) の3つのトランジット天体を有しており、これらは 1:2:3 の平均軌道共鳴近くに存在している。本研究ではこれら3惑星のトランジット時刻変動を解析することで、各惑星の質量をそれぞれ  $2.1^{+1.5}_{-0.8} M_{\oplus}$  (Kepler-51b)、 $4.0 \pm 0.6 M_{\oplus}$  (Kepler-51c)、 $7.6 \pm 1.4 M_{\oplus}$  (KOI-620.02) と決定し、KOI-620.02 もまたこの系に属する惑星 (Kepler-51d) であることを立証した。さらに、トランジットから求めた惑星半径を上記の結果と組み合わせると、3つの惑星全てがこれまで発見された中で最も低い密度 ( $0.05 \text{ g/cm}^3$  以下) をもつことが明らかになった。この値は太陽系で最も密度が低い土星 ( $0.7 \text{ g/cm}^3$  程度) のさらに 1/10 以下であり、Kepler-51 系は現在の理論では形成が非常に難しい特異な惑星系であることが示された。上記の結果は、「短周期の複数トランジット惑星系に属する惑星は、それ以外の惑星と比べて密度が低くより多くのガスを含む」という近年指摘され始めた傾向を支持する新たな証拠となった。この違いは惑星系によって異なる形成・進化の経路が存在することを示唆するものである。

## 1 Introduction

2009 年の打ち上げ以来、ケプラー宇宙望遠鏡によって発見されたトランジット惑星の数は候補も含めると 3000 以上を数える。これらの惑星には、トランジットの深さから半径が推定可能であるという利点がある一方で、その質量の推定は容易ではなかった。これまで、惑星の質量は主に視線速度法 (惑星による主星の公転運動を、主星のスペクトル線のドップラーシフトを用いて検出する) を用いて決定されてきたが、ケプラーがターゲットとする星の多くは暗すぎて分光観測が困難なためである。

視線速度法にかわる質量推定法として、ケプラーによって発見された複数トランジット惑星系に対して近年よく用いられるのが、トランジット時刻変動 (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) の解析である。トランジット時刻変動は、視線速度とは異なり基本的に測光データのみを用いて解析可能である。そのため、ケプラーのターゲットに数多く含まれる暗い星の周りの惑星系において、トランジット時刻変動の解析は特に有用である。

このような複数トランジット惑星系のうち、本研

究では Kepler-51 (KOI-620) という系に着目した。この系は、力学的安定性から質量の上限値が与えられている2つのトランジット惑星 Kepler-51b (周期 45.2 日)、Kepler-51c (周期 85.3 日) およびトランジット惑星候補 KOI-620.02 (周期 130.2 日) の3つのトランジット天体を有しており、これらは 1:2:3 の平均軌道共鳴近くに存在している。本研究ではこれら3惑星のトランジット時刻変動から各惑星の質量を精密に推定し、KOI-620.02 が確かに惑星であることを示すとともに、この惑星系のより詳細な性質を論じる<sup>1</sup>。

## 2 Stellar and Planet Properties

主星の性質 (有効温度  $T_{\text{eff}}$ 、表面重力  $\log g$ 、質量  $M_{\star}$ ) としては、NASA Exoplanet Archive<sup>2</sup> に記載の値を用いた。これらの値と Claret & Bloemen (2011) の表から、主星の周辺減光パラメータの初期推定値として  $(u_1, u_2) = (0.36, 0.28)$  を得た。

<sup>1</sup>本研究の内容は、Masuda (2014) に準じる

<sup>2</sup><http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

各惑星の公転周期  $P$ 、惑星と主星の半径比  $R_p/R_*$ 、軌道長半径と主星半径の比  $a/R_*$ 、軌道傾斜角  $i$  の初期推定値としても、同様に NASA Exoplanet Archive の値を用いた。

### 3 Light Curve Analysis

#### 3.1 Transit Parameters and Transit Times

解析したデータは、NASA Exoplanet Archive で公開されている PDCSAP (Pre-search Data Conditioned Simple Aperture Photometry) flux である。Q12–16 については short-cadence のデータ、Q1–11 については long-cadence のデータを用いた。まず下処理として、ライトカーブからトランジット周辺のデータ点を抜き出し、これを 3 次多項式でフィットして割り算することで、トランジットのベースラインを 1 に規格化し、長周期のトレンドを取り除いた。

次に、これらのトランジットライトカーブから、各惑星のトランジット中心時刻  $t_c$  およびトランジットパラメータ (公転周期  $P$ 、惑星と主星の半径比  $R_p/R_*$ 、インパクトパラメータ  $b$ 、周辺減光パラメータ  $u_1$ 、 $u_2$ 、主星の平均密度  $\rho_*$ ) を決定するため、以下の操作を繰り返し行った：

1. トランジットパラメータの値を固定し、各惑星の各トランジットをフィットしてその中心時刻を決定する。得られた中心時刻をトランジット回数の一次関数でフィットし、公転周期  $P$  と切片の値  $t_0$  (0 回目のトランジット中心時刻に対応する) を求める。
2. 1. で得られたトランジット中心時刻を用いて、各惑星のすべてのトランジットの中心時刻を 0 に揃えたものを作る。これをフィットし、トランジットパラメータの値を決定する。この際、周期  $P$  は 1. で求めた値に固定する。

以上の操作を 5 回繰り返すことで、self-consistent なトランジットパラメータとトランジット中心時刻として、表 1–4 に示す値を得た。対応するトランジットライトカーブは図 1 に示してある。

表 2: Kepler-51b のトランジット中心時刻

Transit number	$t_c$ (BJD – 2454833)	$1\sigma_{\text{lower}}$	$1\sigma_{\text{upper}}$	$\chi^2/\text{d.o.f}$	$O - C$ (days)
0	159.10975	0.00072	0.00072	2.14	0.00323
1	204.26437	0.00078	0.00076	1.86	0.00253
2	249.41453	0.00120	0.00152	3.24	-0.00262
3	294.57446	0.00251	0.00159	2.12	0.00199
4	339.72399	0.00083	0.00088	2.32	-0.00379
5	384.87799	0.00078	0.00079	4.04	-0.00510
6	430.03405	0.00076	0.00076	1.78	-0.00436
8	520.34240	0.00151	0.00168	0.80	-0.00663
9	565.49926	0.00106	0.00148	3.29	-0.00509
10	610.65682	0.00087	0.00095	1.00	-0.00285
11	655.81302	0.00080	0.00084	1.38	-0.00196
12	700.97595	0.00204	0.00156	2.19	0.00566
13	746.12646	0.00082	0.00086	1.10	0.00085
14	791.28654	0.00102	0.00129	1.79	0.00562
15	836.43982	0.00074	0.00074	2.24	0.00358
16	881.59882	0.00072	0.00071	0.91	0.00727
17	926.75475	0.00083	0.00078	1.42	0.00789
18	971.90566	0.00181	0.00262	1.95	0.00348
19	1017.05878	0.00083	0.00088	1.62	0.00129
20	1062.21217	0.00075	0.00075	2.50	-0.00064
21	1107.36887	0.00095	0.00097	0.94	0.00075
22	1152.52090	0.00088	0.00088	0.96	-0.00253
23	1197.67687	0.00097	0.00097	0.87	-0.00188
24	1242.83059	0.00087	0.00087	0.99	-0.00347
25	1287.98482	0.00086	0.00088	0.92	-0.00456
26	1333.14289	0.00091	0.00090	0.95	-0.00179
27	1378.29779	0.00088	0.00088	0.86	-0.00220
28	1423.45442	0.00091	0.00090	1.00	-0.00089
29	1468.61324	0.00089	0.00089	0.97	0.00261

表 3: Kepler-51c のトランジット中心時刻

Transit number	$t_c$ (BJD – 2454833)	$1\sigma_{\text{lower}}$	$1\sigma_{\text{upper}}$	$\chi^2/\text{d.o.f}$	$O - C$ (days)
0	295.31257	0.00378	0.00384	0.98	-0.00057
1	380.64295	0.00358	0.00354	0.97	0.01337
2	465.95289	0.00287	0.00283	1.41	0.00687
3	551.26161	0.00319	0.00304	0.99	-0.00086
4	636.56677	0.00324	0.00325	2.04	-0.01214
7	892.51469	0.00384	0.00393	1.90	-0.01355
8	977.84149	0.00360	0.00364	1.16	-0.00319
10	1148.45861	0.00327	0.00327	1.00	-0.01896
11	1233.80785	0.00322	0.00324	0.89	0.01385
12	1319.11072	0.00331	0.00342	0.95	0.00027
14	1489.75414	0.00337	0.00340	0.88	0.01080

#### 3.2 TTV Modeling

次に、上で得られたトランジット時刻を数値的にモデル化することで、各惑星の質量および軌道離心率を決定した。ここでは簡単のため、各惑星の公転軌道面はすべて同一平面内にあるものとした。

軌道の数値積分には、4 次のエルミート法 (Kokubo & Makino 2004) を用いた。各時刻ごとに計算された惑星の座標から、主星–惑星間の天球面における距

表 1: Kepler-51 の各惑星のトランジットパラメータ

Parameter	Kepler-51b	Kepler-51c	KOI-620.02
$t_0$ (BJD - 2454833)	159.10653 $\pm$ 0.00033	295.3131 $\pm$ 0.0018	212.03246 $\pm$ 0.00039
$P$ (days)	45.155314 $\pm$ 0.000019	85.31644 $\pm$ 0.00022	130.178058 $\pm$ 0.000071
$a/R_*$	61.5 $^{+1.5}_{-1.2}$	94.1 $^{+2.2}_{-1.9}$	124.7 $^{+3.0}_{-2.5}$
$R_p/R_*$	0.07414 $^{+0.00059}_{-0.00061}$	0.094 $^{+0.028}_{-0.017}$	0.10141 $^{+0.00084}_{-0.00085}$
$b$	0.251 $^{+0.073}_{-0.138}$	1.017 $^{+0.034}_{-0.023}$	0.250 $^{+0.075}_{-0.141}$
$u_1$		0.375 $^{+0.040}_{-0.036}$	
$u_2$		0.311 $^{+0.083}_{-0.087}$	
$\rho_*$ (g cm $^{-3}$ )		2.16 $^{+0.15}_{-0.13}$	
$\chi^2/d.o.f$		12681/12417	

表 4: KOI-620.02 のトランジット中心時刻

Transit number	$t_c$ (BJD - 2454833)	$1\sigma_{\text{lower}}$	$1\sigma_{\text{upper}}$	$\chi^2/d.o.f$	$O - C$ (days)
0	212.02417	0.00066	0.00066	2.67	-0.00829
1	342.20715	0.00063	0.00062	2.28	-0.00337
2	472.39116	0.00064	0.00064	2.08	0.00258
3	602.57341	0.00063	0.00063	2.17	0.00678
5	862.93196	0.00076	0.00070	3.88	0.00921
6	993.10424	0.00064	0.00065	2.35	0.00343
7	1123.28307	0.00065	0.00066	1.12	0.00420
8	1253.44963	0.00062	0.00063	0.89	-0.00730
9	1383.62994	0.00064	0.00064	0.99	-0.00505

離が最小となる時刻を Fabrycky (2010) に従って求め、これをシミュレーションにおけるトランジット時刻  $t_c^{\text{sim}}$  とした。すべての計算は、時刻  $T_0$ (BJD) = 2455720 から開始し、BJD = 2454980 と BJD = 2456345 の間で行った。

フィットしたパラメータは、各惑星の質量と主星質量の比  $M_p/M_*$ 、 $T_0$  に最も近いトランジット中心時刻  $T_c$ 、公転周期  $P$ 、離心率  $e$ 、および近点引数  $\omega$  である (ただし実際には  $e \cos \omega$  と  $e \sin \omega$  の組み合わせを用いた)。3 惑星の公転面が揃っていることを仮定したため、軌道傾斜角は  $i = 90^\circ$ 、昇交点経度は  $\Omega = 0^\circ$  に固定してある。まず、多次元シンプレックス法を用いて

$$\chi^2 = \sum_{j:\text{planets}} \sum_{i:\text{observed transits}} \left[ \frac{t_{c,j}(i) - t_{c,j}^{\text{sim}}(i)}{\sigma_j(i)} \right]^2 \quad (1)$$

(ここで、 $t_{c,j}(i)$ 、 $t_{c,j}^{\text{sim}}(i)$  はそれぞれ観測またはシミュレーションから求めた惑星  $j$  の  $i$  番目のトランジット中心時刻、 $\sigma_j(i)$  は  $t_{c,j}(i)$  の誤差) を最小にする 15 個 (各惑星 5 個  $\times$  3 惑星) のパラメータの値の組を決定し、その周囲で Markov chain Monte Carlo (MCMC) を用いた探索を行った。この組に対応する

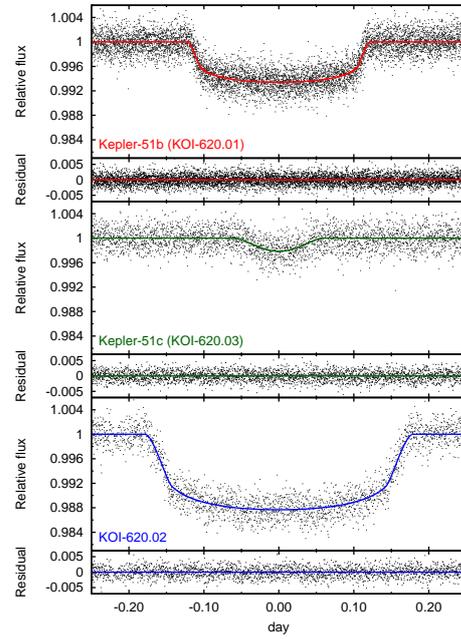


図 1: Kepler-51 の 3 惑星のトランジットライトカーブを公転周期で折り畳んだもの。上から順に Kepler-51b、Kepler-51c、KOI-620.02 に対応する。黒い点がデータ点、色のついた実線はデータ点へのベストフィットモデルを示す。

ベストフィットモデルを図 2 に黒い実線で示した。MCMC から求めた事後確率分布の中央値、 $1\sigma$  の誤差 (中央値の周囲で事後確率分布の 68% を含む範囲) は表 5 の上段にプロットしてある。

これらの値と表 1 で求めた値を組み合わせると、各惑星の質量、半径、平均密度、軌道長半径、平衡温度  $T_{\text{eq}}$  などが、それぞれ  $M_p = (M_p/M_*) \times M_*$ 、 $R_p = (R_p/R_*) \times R_*$ 、 $\rho_p = (\rho_p/\rho_*) \times \rho_*$ 、 $a = (a/R_*) \times R_*$ 、 $T_{\text{eq}} = (T_{\text{eq}}/T_{\text{eq},*}) \times T_{\text{eq},*}$  と表すことができる。

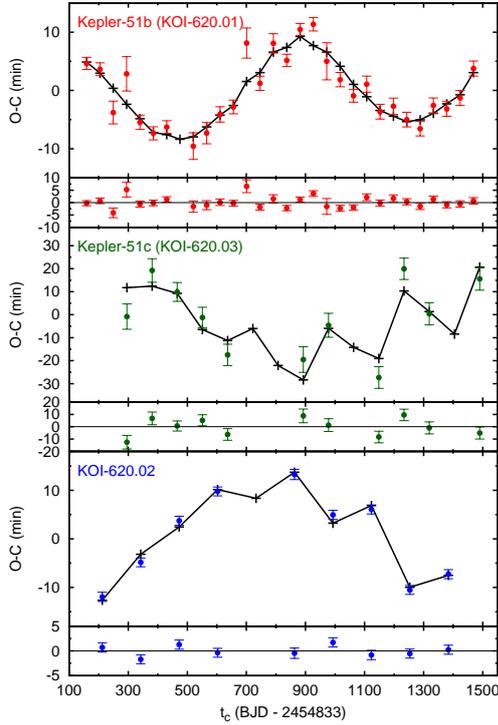


図 2: Kepler-51 の 3 惑星のトランジット時刻変動をフィットした図。上から順に Kepler-51b、Kepler-51c、KOI-620.02 に対応する。エラーバー付きのカラーの点は、観測されたトランジット時刻  $t_c$  をトランジット回数の一次関数でフィットしたときの残差を分の単位で示している。黒の折れ線はデータ点へのベストフィットモデルを示す。

$(3M_\star/4\pi\rho_\star)^{1/3}$ 、 $\rho_p = \rho_\star \times (M_p/M_\star) \times (R_p/R_\star)^{-3}$ 、 $a = [GM_\star(1 + M_p/M_\star)P^2/4\pi^2]^{1/3}$  のように求まる。これらの値は表 5 下段に示してある。

以上の結果から、まず KOI-620.02 がこの惑星系の惑星 (Kepler-51d) であることが確かめられた。また、Kepler-51 の 3 つの惑星が、これまで発見された惑星の中で最も低い密度をもつことも明らかとなった。上で示したように、惑星密度は  $M_p/M_\star$ 、 $R_p/R_\star$ 、 $\rho_\star$  のみから計算でき、これらはライトカーブのみから得られるため、この結論は主星パラメータの不定性には依存しないことに注意する (ただし、質量と半径はそれぞれ主星パラメータに依存するため、惑星密度の解釈は変わりうる)。

表 5: トランジット時刻変動とライトカーブから得られた惑星の性質

Parameter	Kepler-51b	Kepler-51c	KOI-620.02
トランジット時刻変動でフィットしたパラメータ			
$M_p/M_\star$	$6_{-2}^{+4} \times 10^{-6}$	$(1.2 \pm 0.1) \times 10^{-6}$	$(2.2 \pm 0.3) \times 10^{-6}$
(BJD - 2454833) $T_c$	$881.5977 \pm 0.0004$	$892.509 \pm 0.003$	$862.9323 \pm 0.0004$
$P$ (days)	$45.1540 \pm 0.0002$	$85.312_{-0.002}^{+0.003}$	$130.194_{-0.002}^{+0.005}$
$e \cos \omega$	$-0.016 \pm 0.006$	$0.010_{-0.008}^{+0.0013}$	$0.005_{-0.006}^{+0.011}$
$e \sin \omega$	$-0.04 \pm 0.01$	$-0.009_{-0.013}^{+0.009}$	$-0.006_{-0.010}^{+0.008}$
上記のものから導かれるパラメータ			
$M_p$ ( $M_\oplus$ )	$2.1_{-0.8}^{+1.5}$	$4.0 \pm 0.6$	$7.6 \pm 1.4$
$R_p$ ( $R_\oplus$ )	$7.1 \pm 0.3$	$9.0_{-1.7}^{+2.8}$	$9.7 \pm 0.5$
$\rho_p$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$0.03_{-0.01}^{+0.02}$	$0.03 \pm 0.03$	$0.05 \pm 0.01$
$a$ (AU)	$0.251 \pm 0.01$	$0.38 \pm 0.02$	$0.51 \pm 0.02$
$e$	$0.04 \pm 0.01$	$0.014_{-0.009}^{+0.013}$	$0.008_{-0.008}^{+0.011}$

## 4 Discussion

得られた惑星質量・半径と理論モデルの比較によると (e.g. Lopez & Fortney 2013)、Kepler-51 の惑星は質量比で 10–40% 程度の H/He の外層を含むことが予想される。しかし、観測された程度の質量でこれほど多くのガスを含む惑星を形成するのは困難 (e.g. Ikoma & Hori 2012) であるとされており、Kepler-51 系がどのように形成されたかは理論的に興味深い問題である。また今回の発見は、近年指摘されつつある「トランジット時刻変動によって質量が決定されたコンパクトな複数惑星系は、その他の系の惑星と比べ低い密度をもつ」という傾向 (e.g. Jontof-Hutter et al. 2014) を指示するものでもある。以上の事実は、これら一群の低密度惑星が、現在知られているのとは異なる経路を辿って形成または進化した可能性を示唆するものである。

## Reference

- Masuda, K. 2014, ApJ, 783, 53  
 Claret, A., & Bloemen, S. 2011, A&A, 529, A75  
 Kokubo, E., & Makino, J. 2004, PASJ, 56, 861  
 Fabrycky, D. C. 2010, ArXiv e-prints  
 Lopex, E. D., & Fortney, J. J. 2013, arXiv e-prints  
 Ikoma, M., & Hori, Y. 2012, ApJ, 753, 66  
 Jontof-Hutter, D., et al. 2014, ApJ, 785, 15