

# 高精度測光データで探る トランジット系外惑星系の性質

増田 賢人

〈Department of Astrophysical Sciences, Princeton University, 4 Ivy Lane, Princeton, NJ 08544, USA〉  
e-mail: kmasuda@astro.princeton.edu



これまで発見された系外惑星（太陽とは別の恒星を公転する惑星）は現在3,000を優に超え、その3分の2以上が、公転する恒星の前面を周期的に通過する“トランジット惑星”である。これらの多くは、米国NASAのケプラー宇宙望遠鏡によって得られた長期間にわたる高精度の測光データから発見された。本稿では、特にトランジットによって生じる減光の“タイミング”に複数惑星どうしの重力相互作用が及ぼす影響をモデル化することで、トランジット惑星の物理的性質や、惑星系全体の構造とその形成史についてどのような知見が得られるかを紹介する。

## 1. トランジット惑星とケプラー衛星

太陽以外の恒星を公転する“太陽系外惑星（以下、系外惑星）”は、1990年代から2016年現在までに3,000個以上発見され、その存在はもはや当たり前なものとなった。筆者はこれらのうち、惑星の公転軌道面がわれわれの視線方向とちょうどそろっており、恒星の前面を周期的に通過する（食を起こす）“トランジット惑星”を研究している。食の最中は恒星の一部が惑星によって隠されるため、見かけ上恒星が暗くなる。食の繰り返す間隔からは惑星の公転周期が、食の深さからは惑星の半径（正確には、その恒星の半径に対する比）が得られる（図1）。

2008年以前に知られていたトランジット惑星の数は50に満たないほどであったが、近年その数は急速に増え、2016年現在では全惑星の3分の

2以上を占めるまでになっている<sup>\*1</sup>。このような大きなブレイクスルーの立役者が、米国NASAが2009年に打ち上げたケプラー宇宙望遠鏡（以下ケプラー）<sup>1), 2)</sup>である。ケプラーは、約20万の恒星の明るさを宇宙から（文字どおり）昼夜を問わず、かつてない高精度で観測し続けることにより多数のトランジット惑星を発見し、惑星系の性質の統計的な理解に大きく貢献した<sup>3)</sup>。

トランジットで発見された惑星の一番の利点は、追観測によって系のより詳細な情報が得られるという点である。たとえば、トランジット惑星系において分光観測を行って主星（惑星をもつ恒星のこと）の視線速度（惑星からの重力によって生じるふらつき）を測定すると、軌道面の向き（不定性を伴わずに<sup>\*2</sup>惑星質量を決定できる。一方、トランジットによって生じる減光の大きさからは惑星の半径がわかるので、その平均密度がわ

\*1 NASA Exoplanet Archive (<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>) による。

\*2 分光観測で測れるのは、主星の視線方向のふらつきのみである。これは惑星の質量（重力の大きさ）と、公転軌道面の視線方向に対する傾き（たとえば軌道面が視線方向と完全に直交していると、惑星がいくら重くても視線方向には動かない）の両方で決まり、ふつう両者は分離できない。ところが惑星がトランジットしていると、軌道面が視線とほぼそろっていることがわかるので、質量が一意に決定できる。

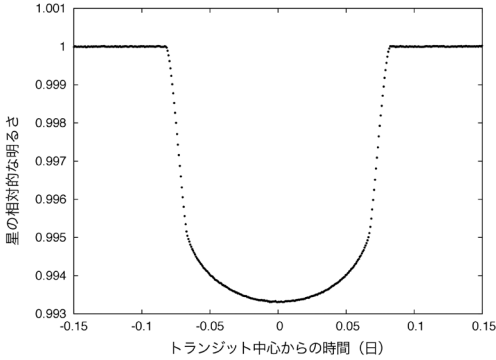


図1 ケプラー衛星によって得られた実際のトランジット光度曲線（星の明るさを時間の関数として描いたもの）の例。HAT-P-7bと呼ばれる公転周期2.2日の木星型惑星（いわゆるホットジュピター）のもの。ここではケプラーの観測期間中に得られたすべてのトランジットを平均し、ノイズを軽減したものを示している。

かり組成が議論できる。基本的には、このように質量と半径の両方がきちんと測定できるのはトランジット惑星のみである。また、トランジットの間に分光観測を行うことで、大気の組成や軌道の幾何学に至るまで多様な情報が得られる点も重要である<sup>4)</sup>。この意味で、トランジット惑星は系外惑星系の成り立ちを理解するうえで欠かせない存在である。

一方で、ケプラーによって得られたデータ自体が非常に優れたものであるために、測光データ（すなわち図1に示したような減光曲線）のみからも多くのことがわかる。実際、ケプラーによって発見された惑星の多くは、主星が暗く分光観測によるフォローアップに適さないものが多い。そのため、分光に頼らない手法はケプラーのデータを最大限活用するうえで重要である。また、このような測光データに基づく方法論は、しばしば視

線速度から得られるものとは相補的な（そして系についてのより詳細な）情報を与えてくれる。本稿では、特にトランジットによって生じる減光の“タイミング”に着目することで明らかとなる惑星系の性質を、筆者の研究に沿って紹介する。

## 2. Transit Timing Variation (TTV)

トランジットを連続して観測すると、その間隔から惑星の公転周期を高精度で求めることができる。一つの惑星が一つの恒星<sup>\*3</sup>の周囲を公転している場合、この間隔は一定である<sup>\*4</sup>。ところが惑星が複数存在すると、惑星どうしの重力相互作用によって惑星の公転軌道が時々刻々と変化し、トランジットの間隔が一定ではなくなる。この現象はTransit Timing Variation (TTV)と呼ばれている。

トランジット時刻は、地上からであっても比較的精密な測定が可能である。加えて、二つの惑星の公転周期が簡単な整数比（1:2や2:3等）に近い場合、惑星どうしが軌道上のほぼ同じ場所で繰り返し最接近し、摂動の効果が累積されてより顕著になる。そのため、TTVは地球程度の低質量惑星を発見しうる手法として、トランジット惑星の発見当初から注目されていた<sup>5),6)</sup>。しかしながら、地上からの観測ではなかなか検出に至らなかった<sup>\*5</sup>。その理由としては、地上からのモニタリングだとどうしてもデータが断続的になってしまうこともあるが、そもそも当時の主な観測対象であった“ホットジュピター”（公転周期が数日程度の木星型惑星；その検出のしやすさから、初期に発見された系外惑星はほとんどがこのタイプであった）が、近傍に摂動源となる惑星をほとんどもたないことが決定的だったと考えられる<sup>\*6</sup>。

\*3 このようなまだるっこしい言い方をしているのは、二つの恒星の周囲を公転する惑星（周連星惑星と呼ばれる）も存在するためである。この場合は惑星が一つであっても公転周期の変動が生じる。

\*4 天体が有限の大きさをもつ効果や一般相対論を考えると、これも厳密には正しくない（特に非常に長い時間スケールで見た場合）。ただし本稿で議論する例も含め、数年分のデータを解析する場合は通常これらの効果は無視できる。

\*5 この時期の様子については、天文月報2012年3月号の特集に、福井暁彦氏による解説があるので参照されたい。

このような状況は、ケプラーによって一変した。ケプラーによる高精度・長期間の継続観測によって、複数トランジット惑星系（二つ以上の惑星が同じ恒星をトランジットする系）が数多く発見されるようになり、その中からTTVを示すものが続々と見つかったのである。本稿では、ケプラーデータにおけるTTV解析の“定番”ともいえる上記のような複数トランジット系における適用例に加え、それとは全くタイプの異なる単一トランジット系における研究について述べる。これらを通じて、高精度測光データのTTV解析が、トランジット惑星系のさまざまな側面の理解に結びつくことをお伝えできれば幸いである。

### 3. コンパクトな複数惑星系のTTVと低質量惑星の内部構造

ケプラー宇宙望遠鏡による最も重要な成果のひとつとして、地球（岩石型惑星）と海王星・天王星（巨大氷惑星）の中間程度の質量・半径をもつ惑星が、系外惑星系においては非常にありふれた存在であることの発見が挙げられる<sup>3), \*7</sup>。このようなサイズの惑星は太陽系には存在しないため、それらの惑星がどのような物理的性質（内部構造）をもつかは興味深い問題である。

これらの惑星はしばしば、公転周期が100日程度を下回る、これまた太陽系ではほぼ何もない内側の領域（水星の公転周期は88日である）に複数存在し、“コンパクトな複数トランジット惑星

系”を成す<sup>\*8</sup>。このようなコンパクトな系は、惑星どうしが近く、重力相互作用が強いいため、TTVを用いた質量（ひいては平均密度やその組成）の推定に適したものが多い。実際に数多くの重要な科学成果がTTV解析によってもたらされている。本節では、こうした低質量惑星の内部構造の多様性の一端を明らかにした研究<sup>9), 10)</sup>を紹介する。

#### 3.1 当時の経緯

筆者は、ケプラー宇宙望遠鏡によるTTVの解析が行われ始めた比較的初期に、Kepler-51系という三重トランジット惑星系の解析に着手した。三つの惑星の公転周期は45日、85日、130日と1:2:3の整数比に近くっており、顕著なTTVを示すことが期待される系である。

当時“整数比に近い周期比をもち、TTVを示すことが知られている複数トランジット系”はケプラーデータ中に数十個ほど知られており<sup>11)-13), \*9</sup>、Kepler-51系はある意味そのような“平凡な”複数トランジット系の一つだった。筆者がその中から特にこの惑星系に注目することになったのは、ケプラーのデータから“惑星食”（2惑星がたまたま同時にトランジットを起こし、さらに運良くその途中で惑星どうしが重なりあうことで、主星が見かけ上一瞬明るくなる）と呼ばれる現象の探索を行っていたことがきっかけであった。

これは、筆者が所属していたグループの大学院生であった平野照幸氏がKepler-89（別名KOI-94）系

\*6 実際、より小さな惑星に感度のあるケプラーによる観測データでも、ホットジュピター近傍のトランジット惑星や、その存在を示唆するようなTTVはほぼ検出されていない<sup>7)</sup>。しかし例外<sup>8)</sup>も存在しないわけではなく、“ホットジュピター付近に惑星がない”というのがどこまで本当かは明らかではない（と筆者は考えている）。

\*7 太陽型の恒星の約半数がこうした惑星を有する。ホットジュピターの存在頻度（約1%）と比較しても圧倒的に高い。

\*8 たとえケプラーであっても、トランジット観測では短周期の惑星が圧倒的に検出しやすく、長周期のものの割合は必然的に少なくなる。したがって、もしこのような短周期の小さな惑星が全く存在しなかったとしたら（たとえば他の惑星系がみな太陽系と類似の構造だったとしたら）、ケプラーの成果は今よりずっと限られたものになっていただろう。

\*9 これはTTVが“ある”惑星のリストであり、TTVがモデル化されて惑星質量が決定されたものとは異なる。当然、TTVのモデル化はその存在の確認と比べてはるかに困難であり、そもそもデータが十分でない、トランジットしていない惑星が存在するなどの理由によってうまくいかないケースもある。この辺りは最終的には試してみないとわからない。

という複数トランジット系において発見した現象であり<sup>14)</sup>, \*10, 筆者は修士課程の最初の研究としてその現象の一般的モデル化と次回のイベントの予想というテーマを与えられていた. その課題自体は無事完成させたものの<sup>10)</sup>, <sup>15)</sup>, \*11, ほかに惑星食が見つからないと折角のモデルも使い途がないことに思い至った筆者は, ケプラーデータ中で同様の現象を探す過程で今回の系にたどりついたわけである.

ケプラーは当時, 取得したデータを3カ月分ずつ段階的に公開しており, ちょうど公開されたばかりのKepler-51の最新データで候補となるイベントを発見した. 紆余曲折の末, 結果的にこのイベントは残念ながら惑星食である可能性は低いという結論に至ったが<sup>9)</sup>, その過程でKepler-51の内側2惑星にはTTVの兆候があるが, 一番外側の130日周期の天体のTTVは検出されておらず, また三つの惑星の質量はいずれも求められていないことを知った. そこで, Kepler-89系の惑星食を予言した際にTTVの解析をやっていたこともあり, 試しに最新のデータも含めて解析してみると, 三つの惑星すべてで確かにTTVが生じており, しかもその振幅が惑星の半径から期待される値よりも異様に小さいことがわかった. かくして, 本腰を入れてKepler-51系のTTVのモデル化に取り組むことになった\*12.

### 3.2 超低密度惑星の発見

筆者が解析したKepler-51系のTTVを図2に示す. 誤差棒のついた黒点が, 各惑星のトランジット周期の一定値からのずれの測定値を時間の関数

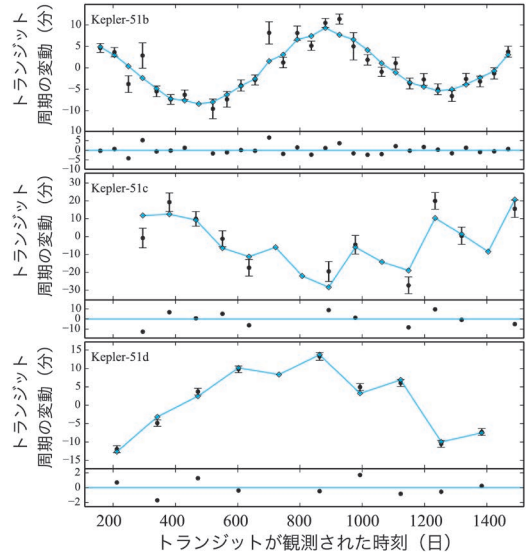


図2 Kepler-51系で観測されたTTVとその力学的モデル. 上から順に惑星b(公転周期45日), 惑星c(85日), 惑星d(130日)のもの. 誤差棒つきの点が, ケプラーのトランジット光度曲線から得られたTTVの測定値を表し, ダイヤモンドを結んだものが, 観測されたTTVを最もよく再現する数値モデルを示す. 各惑星の下パネルは観測データとモデルのずれを示す.

として示している. すなわち, 値がプラスであれば, そのトランジットは周期が一定と仮定した場合に予想されるよりも遅く生じ, マイナスであれば早く生じていることを意味する. したがって, もし周期の変動がなければ, 測定点は誤差の範囲ですべて0になるはずである. ところが, 各惑星の測定値は明らかな変動のパターンを示している. これは三つの惑星が重力的に相互作用し, 軌道を

\*10 日本惑星科学会誌「遊・星・人」2014年第23巻2号の平野氏の解説記事を参照. この現象は単に珍しいだけでなく, 惑星どうしの軌道面のずれを高精度で測定できる数少ない手法の一つとして, 実用性もある.

\*11 ちなみに答えは2026年の「4月1日」であるというオチまでついている.

\*12 ちなみに惑星食の探索はKepler-51系のTTV解析を始めた時点でやめてしまったので, ひょっとするとまだ埋もれているものがあるかもしれない.

\*13 注意深く眺めると, 各惑星のTTVは, 長周期の正弦波状の変動と短周期のノコギリ波状のギザギザ(特にKepler-51dで顕著であり, Kepler-51cでも確認できる)からなることがわかる. 前者は, 各惑星の周期が整数比に近い(か少しずれている)ことに由来するもので, 惑星どうしが最接近する「合」の軌道上での位置が少しずつ移動していく周期に対応する<sup>16)</sup>. 一方, 後者の短周期の変動は, 惑星が合で接近する際の瞬間的な軌道の変化に対応している. たとえばKepler-51cとdの場合, 周期比が2:3に近いので, 惑星cは3公転ごと, 惑星dは2公転ごとに互いに接近する. これが原因で, cとdのTTVにはそれぞれ3回ごとに繰り返すパターンが現れている. この成分は「chopping」と呼ばれており, その検出の可否が質量推定の精度を左右する<sup>17)</sup>.



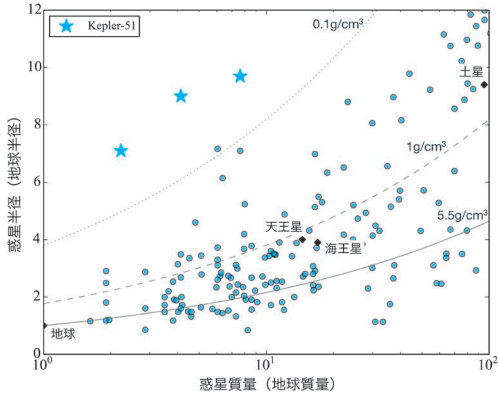


図3 100地球質量（木星のおよそ1/3）以下の系外惑星の半径と質量の関係。データは2016年5月時点でのNASA Exoplanet Archive（脚注1）による。3本の灰色の線は、下から順に平均密度が5.5 g/cm<sup>3</sup>（地球と同じ）、1 g/cm<sup>3</sup>、0.1 g/cm<sup>3</sup>に対応する。星印がKepler-51の3惑星である。

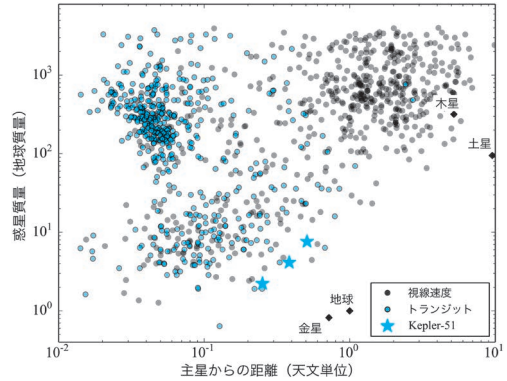


図4 トランジット惑星（青）と視線速度法で発見された惑星（グレー）の質量と主星からの距離の分布。後者の質量は軌道面が視線とそろっていると仮定した場合の値（いわゆる最小質量）。星印がKepler-51の3惑星。

時々刻々と変化させていることの顕れである<sup>\*13</sup>。

この変動のパターンは、惑星の質量についての情報を含んでいる。すなわち、惑星の質量が大きいほど、惑星どうしの重力相互作用が主星からの重力に比して大きくなるので、TTVも大きくなる。また、重力相互作用による軌道の変化には、公転軌道が円と比べてどの方向にどれだけ歪んでいるか（離心率や近星点の向き）もかかわってくる。したがって、これらのパラメータとそこから生じるTTVの関係を、惑星軌道の変化を数値的に解いて調べ、それを“逆に解く”ことで、TTVから惑星の質量を決定することができる。一方、トランジットによって生じる減光の大きさからは惑星の半径が求められるので、結局光度曲線からすべての惑星の質量・半径を決定すること

ができる<sup>\*14</sup>。

このような解析の結果、Kepler-51系の惑星の奇妙な性質が明らかになった。三つの惑星の半径はいずれも地球の7-10倍ほどで、太陽系の土星ほどの大きさをもつ。にもかかわらず、質量はいずれも地球の10倍以下であり、土星より1桁以上小さい。すなわち、太陽系の惑星と比べて（そしてこれまで知られているどの系外惑星よりも）非常に密度の低い惑星であることが明らかになった（図3）。各惑星とも、平均密度はおおよそ0.05 g cm<sup>-3</sup>で、これは硬めの発泡スチロールに相当するらしい。

このような低密度の構造は、地球のような岩石のコアが、質量比で数十%程度の厚いガス（水素・ヘリウム）の大気をまとっていれば理論的には実現可能であるとされる<sup>19)</sup>。しかし標準的な形成シナリオでは、このような軽いコアは重力が

\*14 もう少し正確な言い方をすると、TTVから求まるのは惑星と主星の質量“比”である。というのも、惑星周期のずれは、あくまで惑星間の重力の、(系において支配的な)主星からの重力に対する比率で決まるためである。同様に、トランジット光度曲線から求まるのも惑星と主星の半径“比”であることは、先に注意したとおりである。そもそも光度曲線で次元をもっているのは横軸の“時間”のみであるから、たとえTTVが観測されていても光度曲線のみから質量と半径を別々に決定することは（普通は）できない。実際、質量比と半径比を固定して、主星/惑星の質量と、主星/惑星の半径および軌道のサイズといった系の長さを、系の密度を変えないようにスケールすると、質量・半径は異なるが全く同じTTVを示す系を作ることができる。逆に言えば、主星と惑星の“平均密度”のみであれば、少なくとも原理的には主星のパラメータと独立に光度曲線のみから決定することができる<sup>18)</sup>。

弱すぎて大気を獲得できないか、または、ある程度以上大気を獲得すると暴走的に成長し、木星のようなガス惑星になってしまうと考えられているため<sup>20)</sup>、このような惑星の存在を自然には説明できない。Kepler-51の惑星は、太陽系に対応するものがない中間的な質量の惑星が、予想以上の多様な内部構造をもつことを示す顕著な例であるといえる。

ちなみに、Kepler-51系の3惑星を惑星質量・主星との距離（軌道長半径）の平面上でプロットしてみると（図4）、いずれも視線速度のシグナルが最も小さくなる右下の領域に位置していることがわかる。このような長周期かつ低質量の惑星は、主星がよほど明るくない限り視線速度法による検出は困難である。よって結果的には、このような惑星を発見するうえでTTVが必須のものであったことがわかる。

### 3.3 その後の展開：低温領域からの移動？

折しも、筆者がKepler-51系の解析結果についての論文を発表したのと同時期に、同じく低質量（地球の10倍以下）かつ低密度（約0.1 g/cm<sup>3</sup>以下）の惑星がTTVを用いて複数報告された<sup>21), 22)</sup>。その後も類似の性質をもつ惑星はいくつか見つかり、どうやらこのような一群の低密度惑星が存在するらしいことが明らかになった<sup>\*15)</sup>。また、惑星の質量等のパラメータとそこから生じるTTVの関係の解析的な理解も進展し<sup>17)</sup>、Kepler-51系を含むいくつかの系で得られた軌道の数値積分に基づく結果の信頼性の確認も行われた<sup>23)</sup>。これら一群の惑星は（一部の人々によって）スーパーパフ<sup>20), \*16)</sup>と呼ばれ、ガスが低温・低密度の円盤外部領域（約1 au以遠）で形成されたのち、円盤との相互作用によって内側へ移動したものであるという説が提唱されている<sup>20)</sup>。

また、ケプラーで観測された複数トランジット

系におけるTTVの系統的な解析も進み、惑星の密度は全体として惑星の公転周期（あるいは主星からの距離／入射エネルギーの少なさ）と相関して下がっていく傾向が明らかになりつつある<sup>24), 25)</sup>。この事実、Kepler-51の惑星がその他のトランジット惑星と比較して主星から遠い（図4）ことも整合的である。つまり、低密度の惑星が見つかったことは、実は公転周期の長い系に着目したことの必然的な帰結だったのかもしれない。いずれにせよ、こうした統計的な性質は、未だ謎の多い低質量かつ短周期の惑星の起源を理解する一助となるだろう。

## 4. 非トランジット天体によるTTVと短周期の木星型惑星の起源

前節では、トランジットによって複数の惑星が既に“見えて”いる場合を論じた。一方で、たとえばトランジット惑星を一つしかもたない系において、そのような惑星のTTVからトランジットしていない惑星の存在を検出することも場合によっては可能である<sup>26)</sup>。こうした解析は、摂動源となる天体の公転周期や位相が事前にはわからないため一般により困難であるが、一方でコンパクトな複数トランジット系とは質的に異なる構造をもつ惑星系の発見につながる可能性がある。

そこで本節では、TTVの適用例としては少々風変わりではあるが、そのような非トランジット天体の探索により発見された特異な構造をもつ惑星系と、そこから得られる短周期の木星型惑星の起源についての知見を論じる<sup>27)</sup>。

### 4.1 短周期の木星型惑星のTTV解析

一口に惑星が一つしかトランジットしていない系と言っても、そうした系は（偽検出でないことが確かめられているものに限っても）ケプラーのサンプル中に1,000個ほど存在する。今回筆者は、

\*15 地球の数倍程度の質量の惑星でも厚いガスの外層をもちうるという事実はまた、惑星質量のみに基づいてその居住可能性を議論することの困難も示している。

\*16 Super-Puff. 気の抜けた名前である。

その中でも“ウォームジュピター” (warm Jupiter) と呼ばれる公転周期が10日から100日程度 (主星からの距離に直すとおおよそ0.1-0.5 au) の木星型惑星 (ここでは半径が地球の8倍以上のものとした) について解析を行った。これらはホットジュピターよりもやや公転周期が長い、太陽系の惑星と比べるとやはり主星の非常に近くを公転している惑星である。

ウォームジュピターに着目した背景は混み入った内容になるのでここでは詳述しないが<sup>\*17</sup>, 一言でいえばその軌道進化のプロセスを探るためである。標準的なパラダイムでは、短周期の木星型惑星 (ホットジュピターやウォームジュピター) は、太陽系における木星と同様に主星から遠方 (数au以遠) で形成されたのち、その軌道が1桁 (!) ほど収縮して現在に至ったと考えられている。しかし、このような惑星の移動がどのように生じたかについては明確な結論は得られていない。そこで、これらの惑星に付随する天体の有無や、(存在すれば) その性質を調べることで、移動の過程を探る手掛かりを得ようというのである (この点は4.3節でもう少し具体的に述べる)。

さて、ケプラーデータ中には、トランジットしているウォームジュピター (ただし、複数トランジット系に属さないものに限った<sup>\*17</sup>) が23個存在する。これらについて系統的にTTVを調べた結果、Kepler-448系とKepler-693系と呼ばれる二つの系で顕著なシグナルを検出した (図5の黒点)。しかも、2天体とも前節 (図2) で論じたKepler-51系における正弦波状の変動とは異なる特有のパターンを示している。これはある意味では狙いどおり、通常の数トランジット系とは異

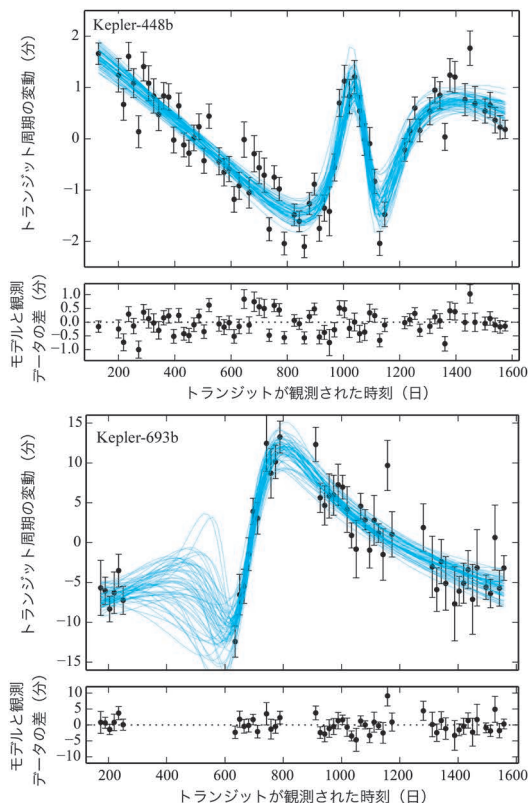


図5 Kepler-448 (上) および Kepler-693 (下) のウォームジュピターで検出されたTTV (黒点) とその力学的モデル (実線)。複数の線はモデルの不定性の幅を示している。

なる構造が示唆されるわけだが、実はこのようなシグナルが惑星系で検出された例はほとんどなかったため、筆者もその要因がわからずしばらく放置していた。しかし、後に別の研究<sup>29)</sup> の過程で、三つ以上の恒星からなる多重連星系ではこのような形状の食の周期変動がしばしば見られることを知り<sup>\*18</sup>, それらの系の構造を参考にして前節と同様な手法で解析を試みたところ、観測され

<sup>\*17</sup> 詳細 (なぜ特にウォームジュピターなのか、あるいは複数トランジット系ではダメなのか) は筆者の投稿論文<sup>27)</sup> をご参照いただきたい。惑星が大きくトランジット時刻が測定しやすい、周期が短いためトランジット回数が多いといった実際上の利点もあるが、一番の理由は近傍に摂動源となる何らかの天体が存在すべきであるという理論的予言<sup>28)</sup> があるためである。

<sup>\*18</sup> これらの系では、前節で論じたような“公転周期が整数比に近い効果”ではなく、摂動天体との距離に応じて潮汐力で軌道が歪む効果や、食を生じる部分系の重心の移動に伴って生じる光の到達時間差 (Rømer delay) の効果によるTTVが主要な成分になるため、必然的にその形状も異なる<sup>30)</sup>。脚注19も参照。

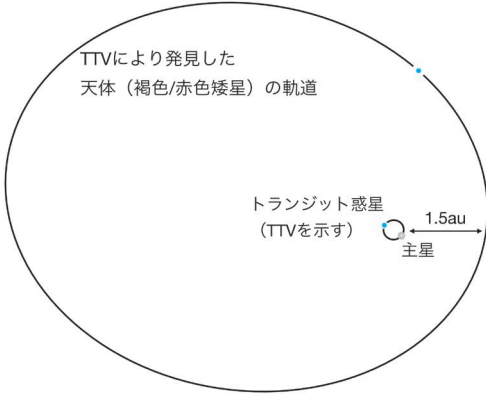


図6 Kepler-448系を“上”（内側のトランジット惑星の角運動量の向き）から見た模式図。Kepler-693系も質的には同様の構造をもつ。観測者（地球）は紙面の左側はるか遠方に位置しており、内側の惑星はそこから見てトランジットしている。

たシグナルを再現することができた（図5の実線）。その結果、これらの系の特異な構造が明らかになった。

#### 4.2 惑星系近傍を公転する褐色／赤色矮星

TTVのモデル化によって得られた系の構造を図6に模式的に示す。トランジットしているウォームジュピターに摂動を及ぼし、そのTTVの要因となっている三つめの非トランジット天体は、トランジット惑星の外側、数auスケールの大きく歪んだ（離心率の大きな）軌道を公転しており、最も近いところで内側のウォームジュピター系（サイズは0.1 auスケール）から1.5 au程度まで接近する。このとき内側の系に瞬間的に大きな摂動が加わるため、急激なトランジット周期の変動（図5上：時刻1,000日付近，下：700日付近）が生じ、その他の部分は外側天体の公転周期に対応したなだらかな変動を示す。特にこの最

接近時の周期変動の大きさは、外側の天体からの重力の大きさ、つまり質量に比例し、それぞれ木星の約20倍（Kepler-448）と約150倍（Kepler-693）であることがわかった。したがってこれらの天体は、惑星というよりはむしろ褐色矮星、Kepler-693に至っては赤色矮星である可能性が高い（不定性はともに30%程度あるので、後者は褐色矮星の可能性も残されている）。惑星系の周りに伴星が検出されること自体はよくあることだが、このように惑星系から数auという近傍で見つかることは稀であり、本当に赤色矮星であればこれまで知られている中で最も惑星系の近くに位置するものである<sup>31), \*19</sup>。

さらにKepler-693系では、内側のトランジット惑星の公転軌道面と、外側の天体の公転軌道面が約50°ずれていることが判明した<sup>\*20</sup>。これはトランジット時刻に加え、トランジットの継続時間の変動を利用したものである。外側天体の軌道面がずれていると、惑星軌道の法線方向にも力が加わるため、惑星軌道の向き（つまり軌道傾斜角）が変化する。すると、トランジット中に惑星が恒星面を横切る“弦”の長さが増えるため、トランジットの継続時間も変動する（図7）。このような変動をTTVと同時にモデル化することで、主にTTVから決まる惑星質量等の情報と併せて軌道面のずれが推定できる。

今回TTVで発見したような天体は、根気強く視線速度の長期モニタリングを行えば原理的には検出可能である<sup>\*21</sup>。しかし、上記のような系の3次元構造の決定が可能なのはトランジット惑星系ならであり、これは系の形成史を探るうえで貴重な情報となる<sup>\*22</sup>。そこで最後に、今回発見した系の構造が、短周期の木星型惑星の起源に

<sup>\*19</sup> 一方で、軌道の力学的安定性という観点では、最接近時の1.5 auという距離は惑星から十分に“遠い”ため問題ない<sup>32)</sup>。このような系の階層性は、実は三重連星系（三つの恒星からなる系）でしばしば見られるものであり、今回のTTVが三重連星系の示すものと似ているのもそのような階層性ゆえである。

<sup>\*20</sup> Kepler-448系では、外側天体の軌道面の角度についての制限は弱く、ずれている解もそろっている解もともに許される。

<sup>\*21</sup> ただしKepler-448系では、主星の高速自転が原因で視線速度が精度良く求まらないため、TTV以外での発見は難しい。

<sup>\*22</sup> というよりも、これこそがTTVを用いて今回のような研究を行った主な動機の一つである。



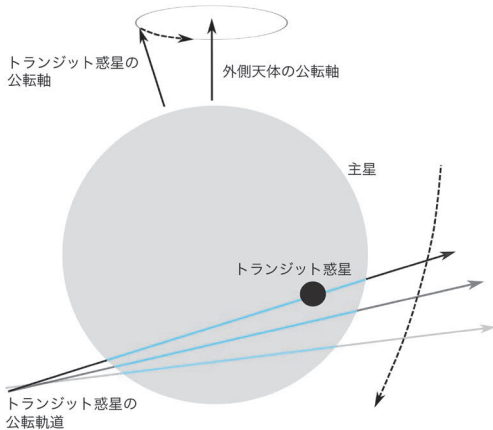


図7 Kepler-693系で観測されたトランジット継続時間変動の概念図。トランジット惑星の公転軸（軌道角運動量のベクトル）が外側天体の公転軸の周囲をゆっくりと回転（歳差運動）することに伴い、トランジット惑星の公転軌道の向きが徐々に変わる（各々の移動の向きは点線の矢印で示した）。これにより、トランジットの際に惑星が恒星面上を通過する部分（青色の線分）の長さが時間とともに変化し、それに比例してトランジットの継続時間も変化する（この場合は短くなる）。

ついてどのような示唆を与えるかを考えてみたい。

### 4.3 短周期惑星の起源：惑星は移動したか？

Kepler-693系で軌道面のずれた伴星が検出されたことは大きな意味をもつ。筆者は、天体どうしの重力相互作用による軌道の長期にわたる進化を解くことで<sup>33), 34)</sup>、傾いた伴星からの摂動により内側のウォームジュピターの軌道離心率が数千年の時間スケールで大きく振動している可能性が高

いことを見いだした<sup>\*23</sup>。さらに離心率が大きい時期には惑星が主星の非常に近くまで接近するため、惑星が潮汐力によって歪められ、その際に生じるエネルギーの散逸によって惑星軌道が収縮しつつある可能性があることもわかった。実は、このような“何らかの重力相互作用による離心率の励起とそれに伴って生じる潮汐散逸”という過程は、先に触れた木星の軌道収縮機構として提唱されている有力なシナリオの一つである<sup>35)-37)</sup>。今回TTV（とトランジット継続時間の変動）が示した系の構造は、このような潮汐散逸による惑星軌道の収縮が生じている証拠を捉えたものかもしれない<sup>\*24, \*25</sup>。

さらに、話はここで終わりではない。今回発見した伴星は離心軌道にあり、主星から約1.5 auまで接近する（図6）。したがってもし伴星が惑星形成時点ですでに存在した場合、木星を（たとえば）1 au以遠で形成することはそもそも不可能である<sup>\*26</sup>。したがって、惑星の軌道が前述の機構で収縮した（あるいはしている）というのが正しいとしても、そのスタート地点は1 auよりずっと内側でなければならない。これは“短周期の木星型惑星は遠方から移動してきた”というパラダイムそのものに疑問を投げかける結果であり、木星型惑星が主星に比較的近い領域で形成したことを示すものかもしれない。実は、このようなホット／ウォームジュピターの“その場形成”のシナリオは、ケプラーによるコンパクトな複数惑星系の発見等により近年（再）検討がなされており<sup>38)-40)</sup>、今回発見した系はその直接的証拠とな

\*23 一部の解では、いわゆる古在機構による離心率の振動と近点引数の移動が見られた。この非自明な力学機構については、天文月報2015年6月号に小久保英一郎氏による解説がある。

\*24 ただし、潮汐散逸の効率については、理論的にも観測的にもきわめて理解が乏しいため、本当に十分な量の散逸が生じているかを断言することは難しい。

\*25 ちなみに今回のウォームジュピターの軌道はどちらも0.2-0.3ほどの離心率をもつため、円盤との相互作用によって移動したとするシナリオとは相性が悪い。実は、ホットジュピターよりやや遠くを公転するウォームジュピターの多くはそのような特徴をもっており、これこそ人々が伴（惑）星との相互作用をもち出す所以である。

\*26 そのような軌道は力学的に不安定ということもあるが、そもそも伴星の重力によって1 au程度より先では円盤が切断されているだろう。

りうるものである。もちろん、ウォームジュピターがまず主星から数auのところで作られて内側に移動し、その後外側の天体がさらに遠くから移動してきたという可能性も否定されたわけではない。しかし、そのような一連のイベントが適切なタイミングで生じるためには、追加の仮定（過去にもう一つ天体が存在した等）やパラメータの微調整が必要となる可能性が高く、実現は必ずしも容易ではないように思われる<sup>27)</sup>。現段階で答えは明確ではないが、このような系の存在は、短周期惑星の起源について再考を促すものかもしれない。

## 5. まとめと展望

本稿では、ケプラー宇宙望遠鏡の長期にわたる継続的な高精度測光データで可能となったTTVを用いた研究を、コンパクトな複数トランジット系と非トランジット天体という2種類の対象に即して紹介した。これらはそれぞれ、低質量惑星の物理的性質と短周期の木星型惑星の形成という系外惑星系に特有の問題を、他の手法とは異なる観点から探るものであり、TTV解析の有用性を示す好例といえるだろう。本稿ではこれらの問題をほぼ独立に取り上げたが、両者は最終的には短周期惑星の形成において惑星の移動が果たす役割という観点から統一的に理解されるべきものであり、そうした理論的な枠組みの構築にケプラーによる観測的制限が貢献することを期待したい。

また、TTVはケプラーのデータを最大限活用するのみでなく、ケプラーに引き続き計画されている衛星によるトランジットサーベイでも威力を発揮し続けるだろう。米国NASAがケプラーの次に打ち上げる全天サーベイ衛星TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite, 2018年予定)<sup>41)</sup>では、それぞれの恒星を継続して観測する期間がケプラーより短いため、TTVのみで同等な成果を挙げることは難しいと思われる。一方で、分光観測が容易なより明るい星がターゲットになるた

め、視線速度データとTTVの組み合わせが低質量惑星の精密な質量推定に役立つだろう。このような試みは、一部が故障したケプラーを用いて現在も継続しているK2ミッション<sup>42)</sup>で発見された惑星等ですでに始められている<sup>43)</sup>。また個別の興味深い系については、地上からの追観測やハッブル、スピッツァーといった既存の宇宙望遠鏡、欧州ESAによるPLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars)<sup>44)</sup>等のデータと組み合わせで引き続きベースラインを延ばしていけば、その分だけより詳細な系の特徴づけや新たなTTVの検出が期待できるだろう。

最後に、本稿でお話したのはケプラーによる測光データ活用のほんの一例であり、ほかにもさまざまな興味深い現象・天体が観測されている。興味のある方はぜひ文献2をご参照いただきたい。

## 謝辞

本稿の科学的な内容の詳細については、筆者の投稿論文<sup>9), 27)</sup> および修士論文<sup>10)</sup> をご覧いただきたい。これらの成果は、大学院の指導教員である須藤靖氏、ケプラー宇宙望遠鏡のデータを紹介してくださった平野照幸氏をはじめ、共同研究者の方々のご協力の賜物である。特に河原創氏には、原稿について有益なコメントをいただいた。また、本稿執筆の機会を与えてくださった大栗真宗氏にはこの場をお借りして感謝を申し上げたい。

## 参考文献

- 1) Borucki W. J., et al., 2010, Science 327, 977
- 2) Borucki W. J., 2016, Rep. Prog. Phys. 79, 036901
- 3) Petigura E. A., Howard A. W., Marcy G. W., 2013, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 110, 19273
- 4) Winn J. N., 2011, in Exoplanets, ed. S. Seager (Tucson, AZ, Univ. of Arizona Press), 55-77
- 5) Holman M. J., Murray N. W., 2005, Science 307, 1288
- 6) Agol E., Steffen J., Sari R., Clarkson W., 2005, MNRAS 359, 567
- 7) Steffen J. H., et al., 2012, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 109, 7982
- 8) Becker J. C., et al., 2015, ApJ 812, L18

- 9) Masuda K., 2014, ApJ 783, 53
- 10) 増田賢人, 2014, 修士論文 (東京大学)
- 11) Fabrycky D. C., et al., 2012, ApJ 750, 114
- 12) Steffen J. H., et al., 2012, MNRAS 421, 2342
- 13) Steffen J. H., et al., 2013, MNRAS 428, 1077
- 14) Hirano T., et al., 2012, ApJL 759, L36
- 15) Masuda K., et al., 2013, ApJ 778, 185
- 16) Lithwick Y., Xie J., Wu Y., 2012, ApJ 761, 122
- 17) Deck K. M., Agol E., 2015, ApJ 802, 116
- 18) Sanchis-Ojeda R., et al., 2012, Nature 487, 449
- 19) Lopez E. D., Fortney J. J., 2014, ApJ 792, 1
- 20) Lee E. J., Chiang E., 2016, ApJ 817, 90
- 21) Ofir A., Dreizler S., Zechmeister M., Husser T.-O., 2014, A&A 561, A103
- 22) Jontof-Hutter D., Lissauer J. J., Rowe J. F., Fabrycky D. C., 2014, ApJ 785, 15
- 23) Agol E., Deck K., 2016, ApJ 818, 177
- 24) Jontof-Hutter D., et al., 2016, ApJ 820, 39
- 25) Hadden S., Lithwick Y., 2017, AJ 154, 5
- 26) Nesvorný D., et al., 2012, Science 336, 1133
- 27) Masuda K., 2017, AJ, in press (arXiv:1706.04990)
- 28) Dong S., Katz B., Socrates A., 2014, ApJL 781, L5
- 29) Masuda K., Uehara S., Kawahara H., 2015, ApJL 806, L37
- 30) Borkovits T., Rappaport S., Hajdu T., Sztakovics J., 2015, MNRAS 448, 946
- 31) Triaud A. H. M. J., et al., 2017, MNRAS 467, 1714
- 32) Mardling R. A., Aarseth S. J., 2001, MNRAS 321, 398
- 33) Xue Y., Suto Y., 2016, ApJ 820, 55
- 34) Xue Y., Masuda K., Suto Y., 2017, ApJ 835, 204
- 35) Wu Y., Murray N., 2003, ApJ 589, 605
- 36) Rasio F. A., Ford E. B., 1996, Science 274, 954
- 37) Wu Y., Lithwick Y., 2011, ApJ 735, 109
- 38) Batygin K., Bodenheimer P. H., Laughlin G. P., 2016, ApJ 829, 114
- 39) Boley A. C., Granados Contreras, A. P., Gladman B., 2016, ApJL 817, L17
- 40) Huang C., Wu Y., Triaud A. H. M. J., 2016, ApJ 825, 98
- 41) Ricker G. R., et al., 2014, Proc. SPIE 9143, 914320
- 42) Howell S. B., et al., 2014, PASP 126, 398
- 43) Weiss L. M., et al., 2016, AJ, in press (arXiv: 1612.04856)
- 44) Rauer H., et al., 2014, Exp. Astron. 38, 249

## Exploring the Architecture of Transiting Exoplanetary Systems with High-Precision Photometry

**Kento MASUDA**

*Department of Astrophysical Sciences, Princeton University, 4 Ivy Lane, Princeton, NJ 08544, USA*

Abstract: A transiting planet gravitationally perturbed by another body in the same system exhibits aperiodic transit signals. This phenomenon is termed transit timing variations (TTVs). In this article, I describe how dynamical modeling of TTVs in the high-precision, continuous photometry data from the *Kepler* spacecraft serves as a valuable probe of physical properties, geometric architectures, and the dynamical history of transiting exoplanetary systems.