

TTV法による新たな系外惑星研究の展開

福井 暁彦

〈国立天文台 岡山天体物理観測所 〒719-0232 岡山県浅口市鴨方町本庄 3037-5〉

e-mail: afukui@oao.nao.ac.jp



Transit Timing Variations (TTV)法は、トランジット惑星のトランジット周期の変動を観測することでその摂動源となる別の惑星の存在をとらえる惑星検出法である。TTV法は最近手法が確立された比較的新しい惑星検出法であり、今後この手法を用いた新たな系外惑星研究の展開が期待されている。本稿ではTTV法の特徴やこれまでのTTV探索の発展の経緯を概観し、筆者らが行ったホットジュピター WASP-5b に対する TTV 探索について紹介する。さらに、これまでに世界で行われてきたホットジュピターに対する TTV 探索の多くが空振りだった結果を踏まえ、ホットジュピターの軌道と 2:1 共鳴軌道を回る惑星の存在頻度について制限を与える筆者らの研究を紹介する。

1. はじめに

ここ1年あまりの間に、NASAのケプラー宇宙望遠鏡による太陽系外惑星発見のニュースが頻繁に新聞やテレビ、Webなどのメディアをにぎわしている。6個の惑星が同じ主星の周りをコンパクトに周回する系 Kepler-11¹⁾ や某有名SF映画さながらの連星の周りを回る惑星 Kepler-16b²⁾、太陽型星の周りを約290日で公転するハビタブル(生命居住可能)惑星候補 Kepler-22b³⁾、そして初の地球サイズ以下の惑星を含む5個の惑星が公転する系 Kepler-20⁴⁾ などである。ケプラーはそれらに加え、これまでに約2,300個もの惑星の候補天体を検出している⁵⁾。ケプラーによる多くの成果は当初から期待されていたが、2009年の打ち上げから3年足らずでこれほどの成果を上げたことは驚異的であり、その潜在的能力の高さを物語っている。

さて、これらの惑星や惑星候補天体はすべてトランジット法を用いて検出されている。トランジット法は惑星が主星の前を通過する際の主星の減光をとらえる方法であるが、その減光率を測るだけでは、惑星(伴星)の大きさしかわからない。そのため惑星サイズの減光を起こすような「惑星候補」の天体は、実際には惑星ではなく食連星などの誤検出である可能性がある。それらが本物の惑星であることを確かめるためには、主星の視線速度観測などから伴星の質量を測定し、その質量が惑星の範囲内(13木星質量以下)であることを確認することが一番確実である*1。さらに、トランジット惑星の質量を測定することは、その惑星の密度を測定して内部構造を推測するためにも非常に重要である(天文月報2012年1月号の生駒氏の記事参照)。

しかしケプラーが検出するような非常に小さな惑星の質量を、地上から視線速度観測により測定

*1 質量の測定が難しい候補天体については、ケプラーサイエンスチームはBLENDER⁶⁾と名づけられた解析手法を用いて誤検出の統計的確率を計算し、惑星以外の可能性が十分低いことを証明することで惑星であることを特定している。

することは容易ではない。地球のような軽い惑星の質量が測定可能な観測装置は世界でも限られており、また主星の活動度が高い場合は主星表面の視線速度変動（ジッター）が邪魔をして、軽い惑星の質量の測定が困難になるためである。

そこでケプラーのサイエンスチームは、複数の惑星候補が見つかったいくつかの系において、これから紹介する「Transit Timing Variations (TTV)法」という新たな手法を用いることで視線速度法だけに頼らずに惑星の質量を決定している。さらに彼らはTTV法により、トランジットを起こしておらず従来の手法では「見えない」惑星の明確な検出にも初めて成功した。このように、TTV法は近年その手法が確立されてきた新たな惑星検出法であり、今後ケプラーや他の精密トランジット惑星探索において重要な役割を果たすツールとなることが予想される。

また、TTV法は地上観測においても低質量の惑星を探索する手段として注目されている。TTV法はトランジット惑星の軌道と共鳴軌道の惑星に非常に検出感度が高く、地球質量程度の軽い惑星も地上観測から検出可能である。そこで地上望遠鏡によるそのような惑星の探索が、これまで主にホットジュピター（主星近傍の巨大惑星）の系に対して精力的に行われてきた。残念ながらまだ明確な検出には至っていないが、ホットジュピターと共鳴関係の惑星が存在するかどうかはホットジュピターの形成過程に関係するため、TTV法で惑星が見つからない場合もその結果は重要な意味をもつ。

本稿ではTTV法についてその原理や特徴を紹介し、これまでのTTV探索の発展の経緯を概観する。また、筆者らが口径61 cmの望遠鏡を用いて行ったホットジュピター WASP-5b に対する

TTV探索について紹介し、さらに、これまで多くのホットジュピターにおいてTTV探索が空振りだった結果を踏まえ、ホットジュピターと共鳴関係の惑星の存在頻度について制限を与える筆者らの研究を紹介する。最後にTTV法による今後の系外惑星研究の展望について述べる。

2. TTV 法について

2.1 TTV 法の原理

通常、惑星はその主星の周りを一定の周期で周回しているが、もしその近傍に別の惑星が存在していると、その惑星から重力摂動を受けて周期が一定値から変動する。TTV法は、そのような周期の変動をトランジット惑星のトランジット時刻のずれTTVとしてとらえ、その摂動源となる別の惑星を検出する方法である*2 (図1参照)。TTV

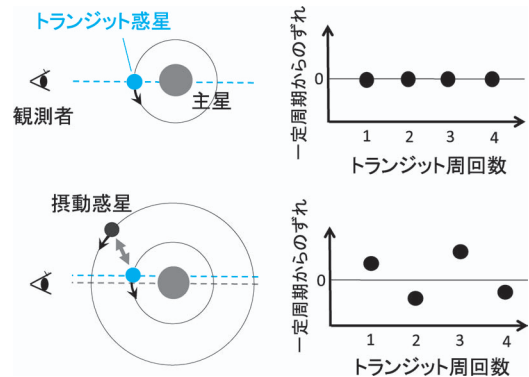


図1 TTV法の概念図。トランジット惑星のみが主星の周りを公転している場合（左上）、トランジットの周期は常に一定になる（右上）。これに対し系に別の惑星（摂動惑星）が存在している場合（左下）、その惑星からの重力摂動によりトランジットの周期は一定値からずれる（右下）。このずれを検出することで摂動惑星を発見することができる。

*2 トランジットの周期変動は別の惑星から受ける直接的な重力摂動のほか、以下の効果でも起こりうる。別の惑星（伴星）の公転により主星から届く光の光路長が周期的に変化する効果⁷⁾、一般相対論効果や別の惑星（伴星）から受ける永年摂動などにより生じる近点経度の移動⁸⁾、潮汐力によるエネルギー散逸⁹⁾など。ただし、いずれも短期的な変動量は微小。

の変動パターン（振幅や変動周期）は摂動源の惑星の質量や軌道に依存するため、TTVを精密に測定することで原理的には摂動惑星の質量と軌道要素をすべて決定することが可能である。

そのような「食の周期変動」自体は食連星において長年研究されており、第二の伴星の影響や星の質量放出、星の活動に伴う扁平率変化¹⁰⁾などさまざまな要因が知られている。また太陽系外惑星として最初に発見された中性子星周りの惑星PSR 1257+12 b, c^{*3}は、パルサーのパルス周期の変動をとらえることで発見されている¹¹⁾。これらの類推から、2005年にAgolらとHolman & Murrayはそれぞれ独立に、トランジット惑星の周期変動の観測からその重力摂動源となる惑星が検出可能かを見積もった。彼らは、トランジット惑星と平均運動共鳴の状態の惑星が存在している場合にTTVの振幅が非常に大きくなり、地球質量程度の軽い惑星も検出が可能となることを示した^{12), 13)}。

平均運動共鳴とは、軌道共鳴のひとつで、惑星の周期が簡単な整数比となるような状態を指し、定期的に同じ場所で会合を起こすために互いの重力摂動が大きくなる。そのような共鳴関係の惑星の存在はめずらしくなく、例えば海王星と冥王星は周期比が2:3の関係にあり、木星の衛星のイオとエウロパとガニメデは1:2:4の関係（ラプラス共鳴）にある。また系外惑星でも、GJ876bとcが1:2の共鳴関係であるのをはじめ、視線速度法によって多くの系で軌道共鳴の惑星が見つかっている。トランジット惑星においても、そのような共鳴惑星の存在によって大きなTTVが引き起こされる可能性は十分に考えられる。

Agolらの計算によると、周期が3日のトランジット・ホットジュピターに対し、その外側の2:1の共鳴軌道に地球質量の惑星が存在した場合、内側のホットジュピターに現れるTTVの振

幅は3分程度に達する。これに対し、地上の口径50 cm程度の望遠鏡と市販の冷却CCDカメラを用いれば、主星の明るさなどにもよるが、トランジットの中心時刻を1分程度の精度で決定することが可能である。つまりTTV法は大口径望遠鏡や高価な観測装置を必要とせずに地球質量惑星を検出できる可能性があり、このことは多くの研究者やアマチュア天文家の関心を集めた。

2.2 これまでのTTV探索の発展経緯

AgolらおよびHolman & Murrayの理論予測を受けて、多数のグループによってTTVの検出のための観測や解析が開始された。最初にTTVの探索を行ったのはSteffen & Agol（Steffenは当時Agolの学生）で、彼らはホットジュピターTrES-1bに対して、論文化されている12回のトランジットの時刻情報を用いて一定周期からのずれの有無を調べた¹⁴⁾。結果、有意なずれは検出されなかったが、彼らは用いたデータが1:2と2:1の共鳴軌道において実際に地球質量の惑星にまで検出感度をもつことを示した。

その後、HD209458bやHD189733bなどのいくつかのトランジット惑星においてTTVの未検出が報告された後、2008年に初めてDíazらによって有意なTTVがOGLE-TR-111bに検出された¹⁵⁾。しかし、その後の追観測の結果、残念ながら彼らの検出は誤検出だったことが判明した¹⁶⁾。

その後多数のトランジット惑星においてTTV未検出の報告が続いたなか、Maciejewskiらの観測チームは、ドイツをはじめとする北半球の複数の経度に分布する中小口径(0.6–2 m)の望遠鏡を用いてTTV探索のためのキャンペーン観測を行い、2010年にWASP-3bとWASP-10bにおいて周期的なTTVを検出したと報告した^{17), 18)}。彼らはそれらのTTVを生じさせた要因が、それぞれ2:1および5:3の共鳴軌道を回る惑星の重力摂動である可能性が高いと主張した。これらの検出

*3 ただし主系列星周りで最初に発見された系外惑星は51 Peg bである。

は有意性が十分高くなくまだ明確な検出とは言えないが、2011年12月現在においてこれらのTTVの検出を決定づける結果も否定する結果も出されていない。そのほか PálらはHAT-P-13bにおいて約22分の大きなトランジット時刻のずれを検出し¹⁹⁾、後述するように筆者らもWASP-5bにTTVの兆候を検出したが、現在これらの検出には否定的な追観測結果も報告されている^{20), 21)}。

このような明確なTTVの検出に至らない状況は、ケプラーチームにより破られた。彼らは2010年8月に、同じ主星をトランジットする二つの惑星Kepler-9bとcにそれぞれ振幅が約20分および65分に達する決定的なTTVをとらえたことを発表した²²⁾。そのような非常に大きなTTVの振幅が見られた要因は二つあり、一つはKepler-9bとcの軌道が1:2の共鳴関係にあるということ、もう一つは公転周期が比較的長い（それぞれ約19.2日と約38.9日）ことである。TTVの振幅は摂動を受けるトランジット惑星の公転周期にほぼ比例して大きくなるため¹²⁾、これまで主にターゲットとしていた、周期が数日のホットジュピターで想定されたTTVよりも1桁大きな振幅が観測される結果となった。

またKepler-9は複数の惑星がトランジットする系としても初めて見つかった系である。そのような系は偶然二つの食連星が視線方向に重なって見えているという可能性も残されているが、Kepler-9b, cで観測されたTTVはそれぞれ逆相関の2次曲線的なパターンを示しており、この事実は二つの惑星が重力相互作用をしていて確かに同じ主星の周りを回っている強い証拠となっている。ケプラーチームはこのTTVデータと、6点の補助的な地上の視線速度観測データとを合わせて解析し、それぞれの惑星の質量を精度良く決定して

いる。

つづいて2011年2月に、冒頭で紹介した6個の惑星がトランジットする系Kepler-11の発見が発表された。これらの惑星のうち、一番内側の2個の惑星以外は共鳴関係ではないが、互いに軌道が近いことから一番外側の惑星を除いて有意なTTVが観測されており、このTTVデータからそれぞれの惑星の質量（一番外側の惑星は上限値）が決定されている。TTVデータだけを用いて惑星の質量が決定されたのはこの系が初めてである。

2011年9月には惑星系Kepler-19において、TTV法により初めてトランジットしていない惑星Kepler-19cが明確に発見された。²³⁾ Kepler-19cはその質量や軌道にまだ弱い制限しか与えられていないが、今後のケプラーや地上の視線速度の追加観測によりさらに強い制限が与えられるであろう。そのほか惑星系Kepler-18にも1:2の共鳴関係のトランジット惑星によるTTVが検出され、視線速度観測と合わせて正確な質量が決定されている²⁴⁾。

ケプラーチームはこれら以外にも、すでに約190個の惑星候補天体の中にTTVの兆候を見つけており²⁵⁾、彼らが今後もTTV法によって多くの成果を上げることは間違いないであろう。

3. ニューゼaland B&C 望遠鏡を用いた TTV 探索

筆者らもTTV法による地球質量惑星の検出の可能性に着目し、2008年からニューゼalandマウントジョン天文台の口径61 cm B & C望遠鏡を用いてTTV探索の観測を開始した。同望遠鏡は、普段は隣接する口径1.8 m MOA-II望遠鏡などで探索され見つかった重力マイクロレンズ現象^{*4)}の追観測を行っているが、筆者らはその際

*4 手前の星の重力によって背後の星が増光される現象。名古屋大学や大阪大学、カンタベリー大学などからなるMOAグループ²⁶⁾はこの現象を用いて手前の星に付随する惑星や浮遊惑星の探索を行い、これまでに多くの成果を上げている。

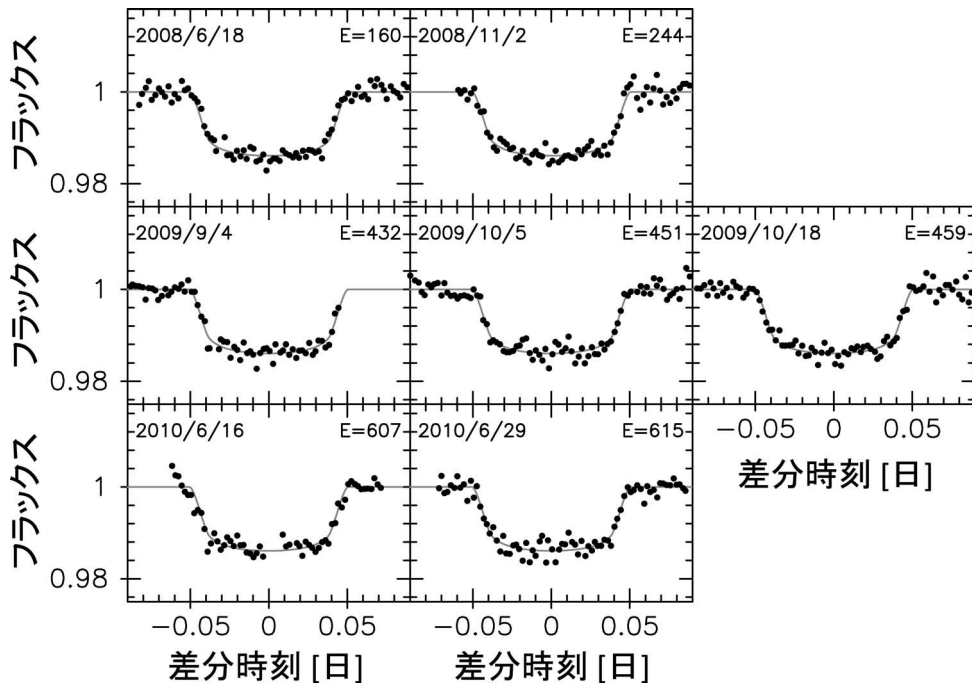


図2 B&C望遠鏡で観測したWASP-5bのトランジット光度曲線. それぞれのパネルは異なる日 (パネル左上記載) の観測データ. 右上のEの値は相対的なトランジット周回数を表す. 横軸はすべてベストフィットのトランジット中心時刻からの相対時刻 [日], 縦軸は規格化したフラックスを表す. プロットは3分にビンニングしたデータ, グレーの実線はベストフィットのトランジットモデル.

間時間を利用してトランジットの測光観測を行った.

2008年当時は南天におけるトランジット惑星探索は北天に比べてあまり進んでおらず、見つかっているトランジット惑星の数は10個あまりであったが、筆者らはその中でも主星が比較的明るく、また大きな減光を生じるいくつかの惑星に絞ってトランジットの測光観測を行った。惑星がトランジットを起こす時間帯にうまく観測条件(昼夜や天候、優先度の高い重力マイクロレンズイベントの有無など)に恵まれる必要があるが、筆者らは2010年までにトランジット惑星WASP-5bのフル・トランジットの観測(トランジット開始から終了までを含んだ観測)に7回成功した。図2に得られたトランジット光度曲線を載せた。

WASP-5bは $V = 12.3$ 等級の太陽型星の周りを

周期約1.63日で公転する、典型的なホットジュピターである。Gillonらは先行研究でWASP-5bの4回のトランジット時刻を用いて、その周期が一定ではない可能性を示していた²⁷⁾。しかしそのうち2回はトランジット中心時刻の決定精度が2分以上と精度の悪いデータを用いていたため、統計的有意性は低かった。筆者らはB & C望遠鏡で得られた7回のトランジットデータからそれぞれのトランジットの中心時刻を35秒から63秒の精度で決定し、さらにGillonらが用いたトランジットデータのうち質の良い2回のデータおよびSouthworthらが口径1.5 mの望遠鏡で観測した2回のトランジットデータ²⁸⁾の再解析を行い、得られた合計11回のトランジット中心時刻を比較した(図3)。その結果、WASP-5bのトランジット周期が 3.7σ の有意性で一定からずれているこ

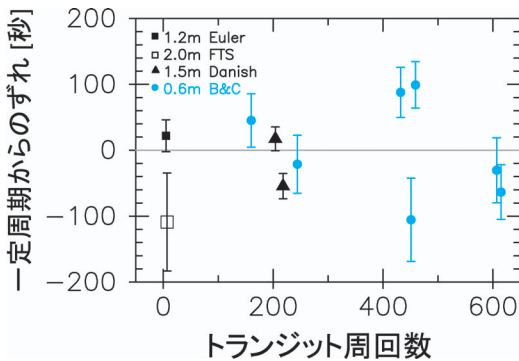


図3 WASP-5bのトランジット中心時刻の一定周期からのずれ [秒]。横軸は相対的なトランジット周回数。シアンはB & C望遠鏡で得られたデータを示す。白抜き四角, 黒四角, 黒三角はそれぞれ口径1.2 m Euler望遠鏡, 口径2 m FTS, 口径1.53 m Danish望遠鏡で観測された先行研究のデータを筆者らが再解析したもの。データの直線フィットに対する χ^2 の値は32.2 (自由度=9)。

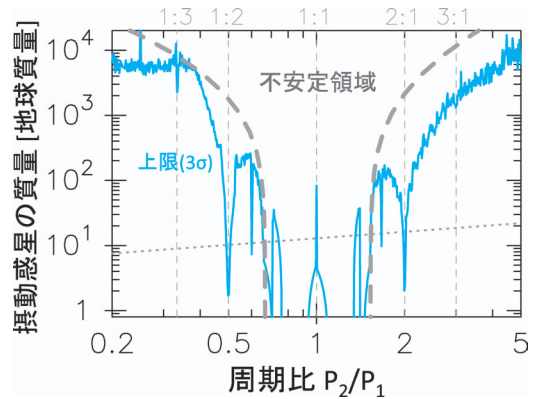


図4 惑星系WASP-5に存在しうる摂動惑星の質量の 3σ 上限 (シアン実線)を示す。横軸は摂動惑星とWASP-5bの周期比。太い破線より内側は力学的に不安定となる領域。縦の破線は共鳴軌道の位置を示す。点線は視線速度データから得られる質量上限。トランジット時刻データは1:2と2:1の共鳴軌道において視線速度データよりも強い制限を与えている。

どがわかった²⁹⁾。

このTTVの検出が本当だとすると、その振幅は50秒程度となる。この大きさのずれは他の惑星からの摂動以外の原因では説明がつかないため、新たな惑星が存在する証拠ということになる。しかしその検出の統計的有意性は十分ではなく、何らかの系統誤差の可能性も否定できない。さらに、最近Hoyerらは、WASP-5bに対する測光の追観測とトランジット時刻の誤差の再検討を行い、われわれの検出したTTVの存在に否定的な結果を示している²¹⁾。

光度曲線に現れる系統誤差の評価は簡単ではなく(2012年1月号の筆者の記事を参照)、その方法に議論の余地があると言える。しかし、いずれにしても今回のわれわれの観測から、WASP-5bで観測されるTTVの振幅は最大でも50秒であるということが言える。このことから、この系に存在しうる第二の惑星の質量に上限を与えることが可能である²⁹⁾。

図4は3体数値シミュレーションにより求め

た、WASP-5bと同一軌道面上を回る追加惑星の質量上限(シアン実線、 3σ 信頼域)を表す。横軸は二つの惑星の周期比で表してあり、縦のグレーの破線は共鳴軌道の位置を示している。また太い破線より内側の領域は二つの惑星が重力的に安定に存在できない領域を示しており、点線は視線速度のデータから与えられる質量上限を示している。

この図から、1:2と2:1の共鳴軌道においてトランジット時刻データは視線速度データよりも1桁程度強い制限を与えられていることがわかる。今後の測光もしくは視線速度の追観測によって、これらの上限を超えない低質量の惑星の存在が明らかになるか、あるいはより強い質量上限を摂動惑星に対して与えることが可能になるであろう。

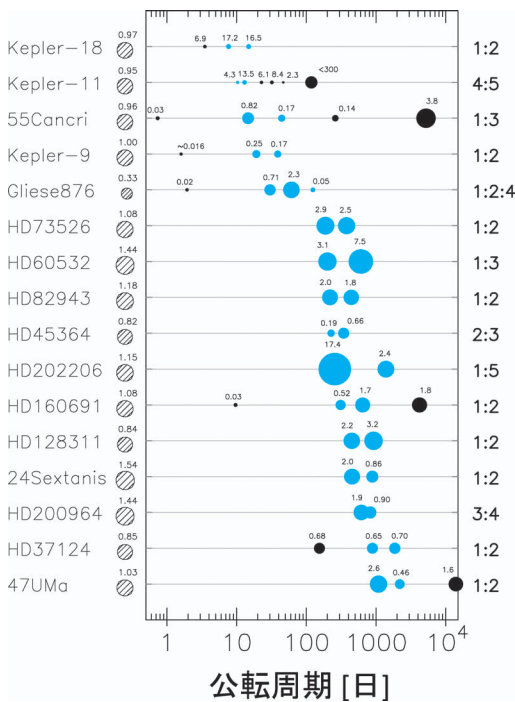


図5 これまでに視線速度法やトランジット法で見つかった、軌道共鳴の惑星（シアン）の公転周期分布を示す。縦軸右は軌道共鳴の惑星の周期比。黒丸は軌道共鳴をなしていない惑星。丸の大きさは惑星質量の3乗根でスケールしたもの、上の数字は惑星の質量 [木星質量 (Kepler-11とKepler-18のみ地球質量)] を示す。Kepler-9の最短周期の惑星(Kepler-9d)は質量が求まっていないため、似た半径をもつCoRoT-7bの質量を適用。縦軸左は主星の名称を示し、その質量を丸の大きさ（質量の3乗根でスケール）と数字 [太陽質量] で示す。これまでに軌道共鳴のホットジュピター（周期約10日以下の巨大惑星）は見つかっていない。

4. ホットジュピターと軌道共鳴の惑星の存在確率

これまでに視線速度法による惑星探索によって多くの惑星系に軌道共鳴の惑星ペア（もしくはそ

の候補）が見つかっており、その割合は複数の惑星が見つかった系の約3分の1にも及ぶ³⁰⁾。理論的にも二つの惑星が相対的にゆっくりと軌道移動を起こす場合に軌道共鳴に捕らわれやすいことが示されており³¹⁾、実際に惑星は軌道進化の過程で共鳴関係を形成しやすいということが言える。しかし、これまでにホットジュピターを含むような軌道共鳴の惑星ペアは見つかっていない（図4にこれまでに見つかった軌道共鳴の惑星の公転周期分布を示す）。これはホットジュピターがその形成過程において軌道共鳴の惑星を保持しにくいという可能性を示しているが、観測バイアスの可能性もあり^{*5}、これまであまり明確ではなかった。この傾向が、これまでのTTV探索によってより明らかであることがわかってきた。

これまでのTTV法による惑星探索は主に、大きな減光が観測でき、また発見されたトランジット惑星の大多数を占めるホットジュピターに対して精力的に行われてきた。しかし、軌道共鳴の惑星に対するその非常に高い検出感度にもかかわらず、まだホットジュピターと共鳴な軌道を回る惑星の明確な検出には至っていない。また、ケプラー衛星はこれまでにKepler-9、Kepler-11およびKepler-18の三つの惑星系において軌道共鳴の惑星による明確なTTVを検出しているが、実はこれらの惑星はいずれもホットジュピターではなく、周期が比較的長い、あるいはもっと低質量の惑星である（図5参照）。

ホットジュピターの形成メカニズムについてはいくつかの異なるモデルがあり、どれが正しいか（あるいはどれが支配的か）について論争が続いている（詳しくは本号の平野氏や高橋氏の記事を参照のこと）。モデルは大きく「惑星散乱モデル」と「惑星-円盤相互作用モデル」に分けることができる。惑星散乱モデルの場合、巨大惑星が他の

*5 ホットジュピターの多くはトランジット探索によって見つかったため、別の軽い惑星を検出できるほど十分な視線速度観測が行われていない場合がある。

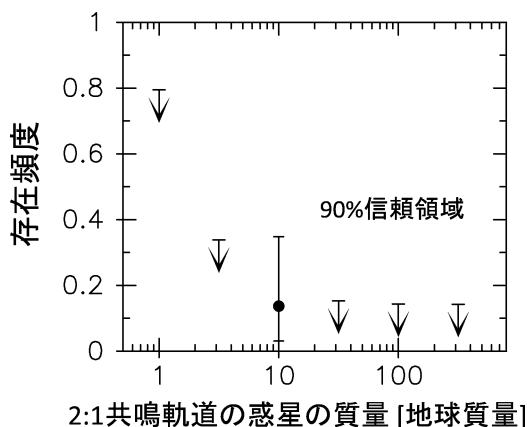


図6 ホットジュピターの外側の2:1共鳴軌道における惑星の存在頻度 [個数/log(Mp)]. 誤差棒付きのプロットは, Maciejewskiらの系WASP-3における惑星検出が本物であるとしたときの90%信頼領域, 下向き矢印は90%信頼領域の上限値を表す.

惑星から散乱（あるいは永年摂動）を受けて軌道離心率や軌道傾斜角の大きな変化を経て形成されるため、他の惑星と軌道共鳴の状態を保持する可能性は低い。これに対し惑星-円盤相互作用モデルでは、巨大惑星がガス円盤に沿って比較のおだやかに主星近傍に近づくため、その過程で他の惑星と軌道共鳴になりやすいと考えられる³²⁾。主星に近づくにつれて共鳴状態がいずれ解けてしまう可能性もあるが、理論シミュレーションにおいてホットジュピターと軌道共鳴の惑星が形成される可能性が示されているものもある³³⁾。

そこで、もしTTV法によって観測的にホットジュピターと軌道共鳴の惑星の存在確率を制限することができれば、理論モデルに対する強い制限になりうる。そこで筆者らは、これまでに論文として公開されている15個のホットジュピターのトランジット中心時刻とその誤差の情報を用いて、ホットジュピターの外側の2:1共鳴軌道における惑星の存在確率に制限を与える計算を行った。TTV法は2:1共鳴軌道に最も高い検出感度をもつが、これら15個のホットジュピターの中

で、これまでにWASP-3bにのみ、2:1共鳴軌道の惑星によるTTVの検出が主張されている¹⁷⁾。この検出はまだ確定的ではないが、ここではこの検出を本物として扱うことで、存在確率により保守的な上限値を与えることにした。

それぞれのホットジュピターのトランジット時刻データに対する2:1共鳴軌道の惑星の検出効率を惑星の質量の関数として計算し、尤度法を用いてその存在確率（の上限値）を計算した。その結果を図6に載せる。横軸は2:1共鳴軌道惑星の質量、縦軸はその存在確率を表しており、下向きの矢印は90%信頼域の上限値、誤差棒付きのプロットはWASP-3bにおけるTTV検出が2:1共鳴軌道の惑星起因とした場合の、90%信頼区間を示している。

この計算の結果、ホットジュピターの外側の2:1共鳴軌道において30地球質量以上の惑星の存在頻度は15%以下（90%信頼域）であることがわかった。これはホットジュピターと軌道共鳴にある惑星の存在頻度を初めて定量的に計算した結果であり、15%以下という存在頻度の上限値は、ホットジュピターと軌道共鳴の惑星を多く形成してしまうような理論モデルへの強い制限といえる。今後さらに統計数が増えれば、共鳴惑星の存在確率へのより強い制限が可能になり、ホットジュピターの形成過程の解明への一つの手がかりとなるであろう。

5. 今後の展望

TTV法は、その手法が2005年に提案され、2010年に明確な検出がなされたばかりの比較的新しい惑星検出手法である。今後この手法を用いて系外惑星研究のさまざまな進展が期待されている。

その一つは、複数の惑星がトランジットする系における惑星の質量決定法としての側面である。ケプラーなどの宇宙望遠鏡による精密トランジット惑星探索が進むなか、視線速度法では観測が難

しい軽い惑星の質量決定法として今後ますます重要度が高まるであろう。また高精度なTTVの観測から、非常に軽い天体の検出が期待される。火星質量程度の超低質量惑星や太陽系外衛星^{*6}、1:1共鳴軌道を回るトロヤ群天体などが検出されるようになるであろう。

また、前節で述べたようなホットジュピターの形成モデルへのより強い制限が今後可能になるであろう。これまでに検出が報告されているTTVの検証観測や、TTVが検出されていない系に対する継続的な追観測を行うことで、共鳴惑星の存在頻度にさらに強い制限を与えることができる。また、ロシター効果（本号平野氏の記事を参照）の観測から得られる公転軸の傾き角との相関を調べることも面白いであろう。公転軸が傾いている系では軌道共鳴の惑星の頻度が少ない、などの傾向がわかってくれば、どのモデルで形成されたホットジュピターが支配的かがわかってくる可能性がある。

また、TTV法は惑星系の立体的な構造も明らかにすることが可能である。二つの惑星がトランジットしている系でも、それらが同一軌道面を公転しているとは限らない。実際は「×」印のように、互いの軌道面が大きく傾いている可能性も考えられるためだ。そのような複数惑星系の相互軌道傾斜角の情報は個々の惑星系の力学的進化を理解する上で非常に有益であるが、従来の惑星観測法だけではその測定が困難であった^{*7}。それに対し、それぞれのトランジット惑星の精密なTTVを観測することで、3次元の力学的相互作用の情報が得られるため、比較的低質量の惑星の系でもそれらの相互軌道傾斜角を決定（制限）する

ことが可能になる³⁶。われわれの太陽系内の惑星の軌道は相互に7度程度傾いているが、これが他の惑星系においても普遍的なものであるかどうか、将来の高精度なTTV観測から明らかにすることができるであろう。

さらに、比較的長周期のトランジット惑星を「はしご」として使い、TTV法でその外側の共鳴軌道を回る惑星を探すことで、ハビタブル惑星を見つけれられる可能性がある。冒頭に紹介したKepler-22bは周期約290日のハビタブル惑星候補であるが、そのような長周期の惑星はトランジットを起こす幾何学的な確率が極めて低い（Kepler-22bのトランジット確率は約0.06%）。そのためケプラーでも発見できるハビタブル惑星の数には限りがある。しかしTTV法でトランジットをしていないハビタブル惑星も見つけることができれば、ハビタブル惑星の発見数が増え、その存在頻度についてより詳しい議論ができるようになるであろう。

謝 辞

本稿を執筆する機会を与えてくださり、また筆者の研究において多くのアドバイスをいただいた成田憲保氏にたいへん感謝いたします。本稿は筆者の博士論文の内容を拡張したものです。共同研究者であるMOAのメンバー、田村元秀氏、平野照幸氏に深く感謝いたします。また多大なご指導、ご助言をいただいた伊藤好孝教授、犬塚修一郎教授、渡邊誠一郎教授、阿部文雄准教授、住 貴宏准教授に深くお礼申し上げます。

^{*6} TTVとトランジットの継続時間の変化(Transit Duration Variations; TDV)、および衛星が主星を掩蔽する効果を組み合わせることで系外衛星を検出する手法がKippingにより提案されている³⁴。

^{*7} 視線速度データに対する力学モデル計算から軌道共鳴の惑星の相互軌道傾斜角が求められているが³⁵、非常に高いS/N比が要求されるため質量が大きい惑星の場合に限られる。また複数トランジット惑星系においてそれぞれの惑星のロシター効果を観測することで原理的に相互軌道傾斜角の測定が可能であるが、惑星が小さい場合は難しい。

参考文献

- 1) Lissauer J. J., et al., 2011, *Nature* 470, 53
- 2) Doyle L. R., et al., 2011, *Science* 333, 1602
- 3) Borucki W. J., et al., 2012, *ApJ* 745, 120
- 4) Fressin, F., et al., 2011, *Nature*, published online (doi: 10.1038/nature10780)
- 5) Batalha N., 2011, Kepler Science Conference (<http://kepler.nasa.gov/Science/ForScientists/keplerconference>)
- 6) Fressin F., et al., 2011, *ApJS* 197, 5
- 7) Irwin J. B., 1959, *AJ*, 64, 149
- 8) Miralda-Escudé J., 2002, *ApJ* 564, 1019
- 9) Watson C. A., Marsh T. R., 2010, *MNRAS* 405, 2037
- 10) Applegate J. H., 1992, *ApJ* 385, 621
- 11) Wolszczan A., Frail D. A., 1992, *Nature* 355, 145
- 12) Agol E., Steffen J., Sari R., Clarkson W., 2005, *MNRAS* 359, 567
- 13) Holman M. J., Murray N. W., 2005, *Science* 307, 1288
- 14) Steffen J. H., Agol E., 2005, *MNRAS* 364, L96
- 15) Díaz R. F., et al., 2008, *ApJ* 682, 49
- 16) Adams E. R., et al., 2010, *ApJ* 714, 13
- 17) Maciejewski G., et al., 2010, *MNRAS* 407, 2625
- 18) Maciejewski G., et al., 2011, *MNRAS* 411, 1204
- 19) Pál A., et al., 2011, *MNRAS* 413, 43
- 20) Southworth J., et al., 2012, *MNRAS*, published online (doi:10.1111/j.1365_2966.2011.20230.x)
- 21) Hoyer, s., Rojo, P., López-Morales, M., 2012, *ApJ*, accepted (arXiv: 1201.3616)
- 22) Holman M. J., et al., 2010, *Science* 330, 51
- 23) Ballard S., et al., 2011, *ApJ* 743, 200
- 24) Cochran W. D., et al., 2011, *ApJS* 197, 7
- 25) Ford E. B., et al., 2011, *ApJS* 197, 2
- 26) <http://www.phys.canterbury.ac.nz/moa/>
- 27) Gillon M., et al., 2009, *A&A* 496, 259
- 28) Southworth J., et al., 2009, *MNRAS* 396, 1023
- 29) Fukui A., et al., 2011, *PASJ* 63, 287
- 30) Wright J. T., et al., 2011, *ApJ* 730, 93
- 31) Lee M. H., Peale S. J., 2002, *ApJ* 567, 596
- 32) Thommes E. W., 2005, *ApJ* 626, 1033
- 33) Fogg M. J., Nelson R. P., 2007, *A&A* 472, 1003
- 34) Kipping, D. M., 2011, *MNRAS* 416, 689
- 35) Correia A. C., et al., 2010, *A&A* 511, 21
- 36) Nesvorný D., 2009, *ApJ* 701, 1116

A Novel Approach to Extrasolar Planets: using The TTV Method

Akihiko FUKUI

Okayama Astronomical Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, 3037-5 Honjo, Kamogata, Asakuchi, Okayama 719-0232, Japan

Abstract: The transit timing variation (TTV) method is a novel technique recently established for detecting exoplanets. In this article, I provide an overview of the TTV method and its recent developments, as well as present our observations of searching for TTVs in WASP-5b. Additionally, I illustrate our approach to placing a limit on the occurrence rate of planets at 2 : 1 mean motion resonance with a hot Jupiter, based on the mostly-null results of the past TTV searches.