

トランジット惑星系の観測で探る 多様な太陽系外惑星系の成り立ち



成 田 憲 保

〈国立天文台・太陽系外惑星探査プロジェクト室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: norio.narita@nao.ac.jp

初めての太陽系外惑星の発見から約20年の時が経ち、すでに数千個に及ぶ数の太陽系外惑星候補が発見されてきている。それらの惑星の軌道や質量の分布からは、宇宙に存在する太陽系外惑星系が実に多様な姿をもつことが示されている。この多様な惑星系がどのように形成されたのかを明らかにしていくため、筆者らはトランジット惑星系に着目して観測を実施してきた。本稿ではそれらの研究の背景と、明らかになった知見、今後必要になる研究の展望について紹介する。

1. はじめに

1995年に恒星の周りで初めて発見された太陽系外惑星（以下、系外惑星）ペガサス座51番星bは、木星質量程度の巨大ガス惑星であり、しかもたった約4.23日という短い周期で公転していた。これは私たちの太陽系の惑星からはとても想像できない惑星である。この事実は、宇宙には太陽系とは全く異なる姿の惑星系が存在するというを示していた。この最初の発見からおよそ20年経ち、これまでに発見された多様な系外惑星の数は、候補も含めればすでに数千個にも及ぶ。

この多様な惑星系はどのようにして誕生したのだろうか？本稿ではそのような惑星系の多様性が生まれた理由を解明するための、惑星形成と移動過程に関する理論的・観測的研究について、これまでの筆者らの研究を交えながら紹介したい。

なお2013年に日本惑星科学会の学会誌「遊・星・人」において、「観測による巨大惑星の軌道進化理論の検証」¹⁾というタイトルで解説を執筆させていただいた。扱うテーマがほぼ同一であるためそちらと内容に一部重複があるものの、本稿は特に系外惑星分野以外の天文学関係者の方に概

要をわかりやすく紹介するため、新しく書き起こした文章である。また系外惑星を専門とされる方には、ぜひ「遊・星・人」での解説も合わせてご覧いただきたい。

2. 系外惑星の多様性

太陽系には、内側に水星・金星・地球・火星の四つの岩石を主成分とする惑星があり、外側には主に水素・ヘリウムのガスでできた木星と土星、さらに外側に水素・ヘリウムのガス成分に加えて水・メタン・アンモニアなどの氷成分を豊富に持つ天王星・海王星が存在している。これらの八つの惑星は、どれもほぼ円軌道で、太陽の赤道面とほぼ同じ公転面を、太陽の自転と同じ向きに公転している。これが1995年まで、私たちが唯一知っている惑星系の姿だった。

一方、図1と図2は、それぞれ2014年8月末の時点でexoplanet.euのウェブサイトに登録されている系外惑星の軌道長半径に対する質量と軌道離心率の分布を、太陽系の惑星とともにプロットしたものである（値が求められている系外惑星のみプロットしてある）。

ここで図1の左側にある軌道長半径が数天文単

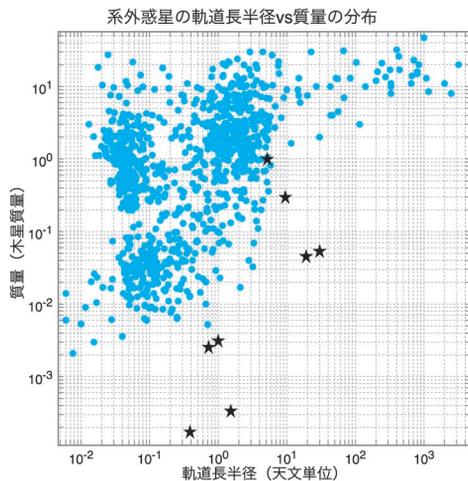


図1 既知の系外惑星（青丸）と太陽系の惑星（黒星）の軌道長半径と質量の分布。

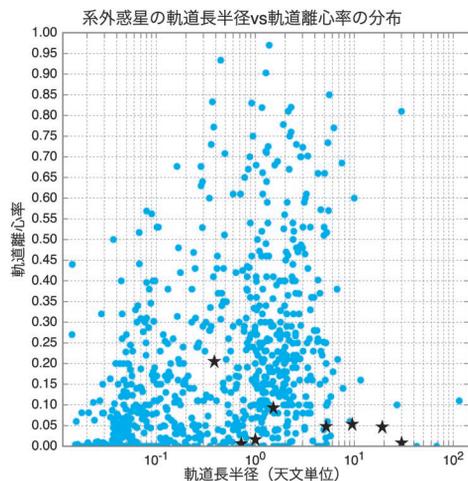


図2 既知の系外惑星（青丸）と太陽系の惑星（黒星）の軌道長半径と軌道離心率の分布。

位以下の惑星の多くは、視線速度法とトランジット法で発見されたものである。また、数天文単位にある0.1木星質量以下の惑星の多くは重力マイクロレンズ法によって発見され、右上の遠方領域にある惑星は直接撮像法によって発見されたものである。なお図の下側の空白領域はまだ観測の検出限界が到達できていない領域であり、今後さらに探査が進んでいく領域である。一方、図2の軌道

離心率は主に視線速度法によって明らかになった分布である。

図1を見ると、太陽系の惑星が存在しない領域にも系外惑星は多数存在していることがわかる。例えば、およそ0.2木星質量以上で、0.1天文単位以下のところにある惑星の集団は「ホットジュピター」と呼ばれており、最初に発見されたペガスス座51番星bもこの集団に属している。

一方、図2からは系外惑星の多くが大きな軌道離心率をもっていることがわかる。特に太陽系の水星の軌道離心率である0.2を大きく超えるような惑星は、「エキセントリックプラネット」と呼ばれている。

これらの系外惑星の軌道分布から、宇宙には太陽系とは全く異なる多様な惑星系が存在しているということがわかる。

3. 多様性を生み出すメカニズム

では、このような惑星系の多様性はどのようにして生み出されたのだろうか？ 図1と図2の観測事実をもとに考えてみよう。

太陽系の形成を説明し、惑星形成の標準モデルとして知られている京都モデル²⁾では、木星や土星などの巨大惑星はまず固体物質が集積して成長することで惑星のコアができる。そしてコアが十分な質量（地球質量の10倍程度）をもつと周りのガスを取り込んで、さらに成長することで形成されたと考えられている。

しかし、水や二酸化炭素などが凝固し始めるスノーラインより外側でないと豊富な固体物質が存在しないため、ホットジュピターが現在存在している領域ではそもそもコアとなる固体物質が凝固できないし、巨大惑星を形成するのに必要な材料物質も足りないということになる。つまり、ホットジュピターが最初からその場で形成されたとはい考えられない。そのため、ホットジュピターの存在はこの惑星が外側から移動してきたことを強く示唆している。

この惑星の内側方向への移動は、京都モデルでは（太陽系では）小さいとして考慮されていなかったが、この移動の効果を取り入れると、ホットジュピターの形成も原始惑星系円盤との相互作用による移動として説明することが可能である³⁾。また、惑星と原始惑星系円盤との相互作用による移動を考慮した惑星移動モデルによって、図1のような軌道長半径と質量の分布もある程度説明されている⁴⁾。

しかし、ここで問題となるのは原始惑星系円盤との相互作用による惑星移動では、大きな軌道離心率は励起されないことである。そのため、エキセントリックプラネットの存在を説明するためには、京都モデルを拡張した原始惑星系円盤との相互作用のモデルだけでは足りず、それ以外のメカニズムを考えることが必要となる。

ここで惑星の軌道離心率を大きく変える可能性をもつメカニズムとして、惑星系の他の惑星や伴星との相互作用などが考えられている。例えば、惑星系に他の巨大惑星が存在していて重力散乱を起こすとエキセントリックプラネットが形成されうる⁵⁾。また、惑星系に伴星が存在していて、惑星がその伴星の軌道面に対して約40度以上傾いた軌道をもつと、惑星が最初は円軌道だったとしても古在機構⁶⁾によって大きな軌道離心率をもちうる⁷⁾（図3）。さらに軌道離心率が大きな惑星は、中心星付近を通過する際に潮汐力を受けて軌道長半径が小さくなり、最終的に円軌道のホットジュピターへと進化することができる⁸⁾。

このように、惑星同士の重力散乱や伴星による

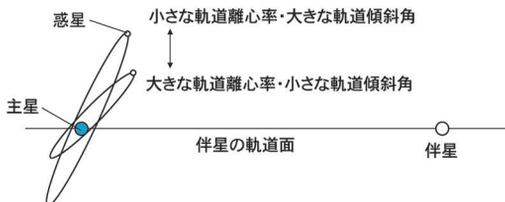


図3 伴星による古在機構によって起こる惑星の軌道変化の模式図。

古在機構によってもホットジュピターの形成は説明でき、これらのメカニズムはエキセントリックプラネットの形成も説明することができる。

4. 観測から得られる手がかり

以上のように、ホットジュピターやエキセントリックプラネットの存在が明らかになるにつれてそれらの形成を説明するためのさまざまな惑星移動理論が提案されてきた。この惑星移動のメカニズムのうち、どのメカニズムが実際の惑星系形成で支配的に働いているのだろうか？あるいは、複数のメカニズムが働いているのであれば、それぞれがどのような割合で実現しているのだろうか？多様な惑星系の形成を理解していくためには、こうした問いの答えを明らかにしていくことが必要だろう。

さまざまな惑星移動理論の妥当性を検証するためには、それぞれの理論モデルの仮定や予言が実際に成り立っているかどうかを観測によって調べることが必要である。筆者らはこれまで、(1) 主星の自転軸に対する惑星の公転軸の傾き（以下、公転軌道傾斜角）と、(2) 惑星系の外側にある天体の探査、に着目して惑星移動理論の観測的検証に取り組んできた。それぞれについて、まず理由を説明しよう。

(1) については、惑星の軌道離心率を大きくするような物理過程では、同時に惑星の公転軌道傾斜角も初期値より大きくなる可能性がある。惑星が原始惑星系円盤の中で誕生し、その円盤の回転軸が主星の自転軸とそろっていたとすれば、惑星の公転軸は主星の自転軸と最初はほぼそろっていたと考えられる。そのため、惑星の公転軌道傾斜角は惑星が形成してからどのような物理過程を経てきたのかを示す手がかりを与えてくれる。

(2) については、惑星同士の重力散乱や伴星由来の古在機構による惑星移動ではそれを引き起こす外側の惑星や伴星が必要になるため、惑星系の外側に何があるかを明らかにすることが惑星移動

の原因の手がかりとなるためである。特に、惑星の軌道離心率や公転軌道傾斜角の情報だけでは惑星同士の重力散乱と伴星由来の古在機構のどちらのメカニズムによるものなのかを判別することが難しいため、個々の惑星系がどのように形成されたのかを知るためには、やはり惑星系の全体像の情報が必要である。

以上の情報を集めるため、筆者らはトランジット惑星系をターゲットとして三つの観測的研究を行ってきた。以下ではそれぞれの方法論を紹介しよう。

4.1 ロシター効果の測定

系外惑星におけるロシター効果は、トランジット惑星が主星の前を通過する際に、惑星が主星の自転を隠すために起こる、主星の視線速度のケプラー運動からのずれである。この効果はもともと食連星系において古くから知られており⁹⁾⁻¹¹⁾、系外惑星系においても2000年に最初に発見されたトランジット惑星HD209458b¹²⁾に対して、同じ年に検出が報告された¹³⁾。

この効果の面白い点は、トランジットの時間経過とともに惑星が隠す主星の自転速度成分が変化していくため、ロシター効果をトランジット全体にわたって継続的に観測することで、天球面上で

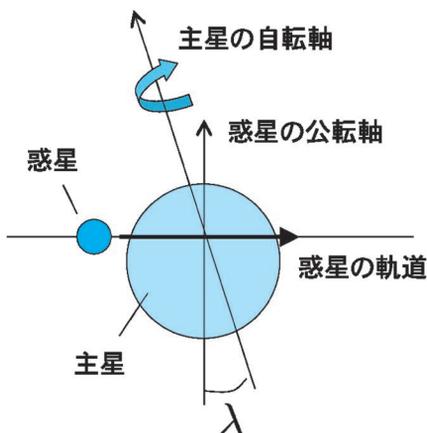


図4 惑星の軌道と主星の自転軸の関係と、ロシター効果の観測量 λ の模式図。

惑星が主星の自転に対してどのような傾きをもって通過していったのかを知ることができる点にある(図4)。これにより、トランジット惑星系では惑星の公転軌道傾斜角(の天球面射影角)を測定することが可能となる。ロシター効果の測定についての研究は、2012年3月の平野照幸氏による天文月報特集記事¹⁴⁾でも紹介されているので、合わせてご覧いただきたい。

4.2 長周期視線速度変動の測定

個々の惑星の軌道離心率や公転軌道傾斜角の情報に加えて、惑星系の外側に何かがあるのかという情報は、その惑星系の形成を明らかにするために重要である。まず、主星から数天文単位から10天文単位程度まで離れた領域にある天体(巨大惑星や褐色矮星)を探索する有力な方法として、長周期視線速度変動の測定がある。

ある惑星系に対して数年以上の時間をかけて行う長周期視線速度測定は、数天文単位以内の惑星であれば惑星の軌道を決定することもでき、また10天文単位程度までの巨大惑星あるいは褐色矮星なら視線速度の長期トレンド($\dot{\gamma}$)を検出することができる。

視線速度の長期トレンドは、観測期間の視線速度の変化率が一定であるならば、 $\dot{\gamma} \sim GM \sin i/a^2$ (ただし、 G は重力定数、 M 、 i 、 a はそれぞれ長期トレンドを引き起こす天体の質量、軌道傾斜角、軌道長半径)と書くことができるため、トレンドを引き起こす外側の天体の有効質量と軌道長半径に対して大まかな制限をつけることができる。

このように長周期視線速度変動の測定を行うことで、10天文単位程度までの惑星系の外側に存在する巨大惑星や褐色矮星の有無を調べることが可能となる。

4.3 高コントラスト直接撮像

数十天文単位以遠にもなると、巨大惑星や褐色矮星でも主星に与える視線速度変化はかなり小さくなるため、視線速度法によって検出することは困難になる。

その代わりに惑星系の最遠部を探索する方法として、高コントラスト直接撮像観測がある。この方法は、補償光学と組み合わせた高空間分解能の直接撮像観測装置を用いることで、主星よりも極めて微弱な明るさの天体を検出することが可能となる。現在8 m級の大型望遠鏡に搭載されている高コントラスト直接撮像装置では、およそ0.1秒角程度より外側で 10^{-4} – 10^{-6} 程度のコントラストを達成することができる。トランジット惑星が発見されている惑星系は、太陽からだいたい数十から数百パーセクの距離にあるため、この方法では数天文単位より外側の天体を探索することができる。

ただし、これまでトランジット法で系外惑星探査が行われてきた恒星は、一般に年齢が10億年程度以上の年老いた恒星であり、巨大惑星はその年齢では冷えてしまっているため、現在の観測装置ではそれらの巨大惑星を直接検出することは難しい。そのため、現在の高コントラスト直接撮像観測で可能なことは、惑星系の外側に暗い伴星や褐色矮星があるかどうかの判別にとどまる。しかし、それだけでも古在効果を引き起こす外側の天体が惑星系に存在するかどうかを明らかにすることができるため、惑星系の軌道進化のメカニズムを制限する重要な観測情報を与えてくれる。

この方法についての解説は、2012年3月の高橋安大氏による天文月報特集記事¹⁵⁾でも紹介されているので、合わせてご覧いただきたい。

5. これまでにわかったこと

筆者らは4章で紹介したような方法を用いて、これまでトランジット惑星系に対する観測を実施してきた。また、世界の複数の観測チームが同様の観測を実施しており、ここではそれらの観測の全体からわかってきたことと、われわれの代表的成果を紹介する。

5.1 ロシター効果の観測結果

筆者らは2006年からすばる望遠鏡の高分散分

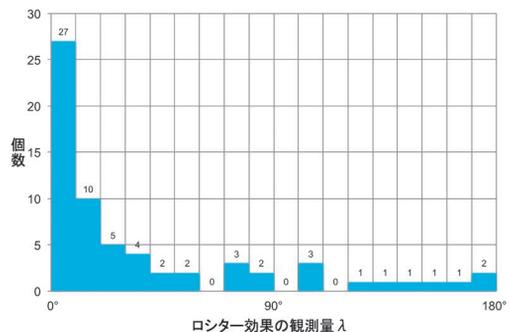


図5 2013年までに得られたロシター効果の観測量λのヒストグラム。

光器HDS (High Dispersion Spectrograph) を用いてロシター効果の測定を開始した。2000年に報告されたHD209458bの観測結果以来、2007年まではすべてのトランジット惑星の公転軌道傾斜角は小さく、主星の自転軸と惑星の公転軸がほぼそろっているという結果が得られていた。しかし、2008年にGuillaume Hebrardらによって初めてXO-3bというトランジット惑星で有意な軌道の傾きが報告された。その後、2013年までに65個程度のトランジット惑星系でロシター効果の観測結果が報告されている。

図5は2013年時点でのロシター効果の観測量λの分布を表したものである。この結果を見ると、ロシター効果が測定されたトランジット惑星の約3分の1は惑星の公転軌道傾斜角が有意にゼロから外れており、大きく軌道が傾いたり、あるいは逆行して公転していることが明らかとなった。このうちすばる望遠鏡のHDSでは、5個のトランジット惑星で有意な軌道の傾きが検出されている。

その後このトランジット惑星の公転軌道傾斜角の分布と、主星のパラメーターの間の相関についていくつかの考察がなされた。まず2010年には、軌道が有意に傾いたトランジット惑星は表面に対流層が発達していないおよそ6,250 Kより高温の恒星に多く存在しており、表面が対流層になっている6,250 Kより低温の恒星ではほとんどの惑星

で軌道が主星の自転とそろっているという指摘が Joshua N. Winn らによってなされた¹⁶⁾。これは主星近傍を公転する惑星による潮汐力が主星の対流層に影響を与えて、主星の自転軸が惑星の公転軸にそろえられてしまうという可能性を示唆している。

さらに、主星からやや離れた惑星や質量の小さな惑星では、6,250 K より低温の主星でも軌道が傾いている場合があることや、軌道の傾きと主星の年齢との相関等から、惑星の公転軌道傾斜角はもともとランダムに分布しており、その後惑星の潮汐力が主星の自転軸をそろえているという論文が、Simon Albrecht らによって2012年に発表された¹⁷⁾。

この考えの意味するところは、もし惑星形成時には惑星の公転軸は主星の自転軸とそろっていて、惑星の公転軌道傾斜角の傾きはその後の惑星移動によってのみ生み出されるのだとしたら、ランダムな公転軌道傾斜角を生み出す移動メカニズム、すなわち重力散乱や古在機構による惑星移動が支配的であるという可能性を示している。あるいは別の可能性として考えられるのは、惑星移動以外にも主星の自転軸と惑星の公転軸をずらす何らかのメカニズムがあるということである。

以上のように、ロシター効果の測定は宇宙に軌道が大きく傾いたり、逆行したりする惑星が実在することを明らかにしたものの、その起源についての議論はまだ完全に決着が着いていない。惑星移動とは関係なく主星の自転軸と惑星の公転軸がずれるメカニズムが存在するのかどうかや、惑星の潮汐力による主星の自転軸のそろえ直しだけで全ての λ の分布が説明できるのかどうかなどは、今後のさらなる観測による解明が期待されている。

5.2 長周期視線速度変動の測定結果

トランジット惑星系では、先にトランジットの測光観測から惑星の公転周期がわかっているため、その周期をカバーする程度の視線速度しか測

定されないことが多く、発見者らがあまり長期の視線速度変動を測定していないことが多かった。

そこで筆者らはトランジット惑星系のロシター効果の測定と一緒に、それらの惑星系の長周期視線速度変動の測定を実施してきた。また、イギリスの Nawal Husnoo からもトランジット惑星の軌道離心率の精度向上という目的とともに、長周期の視線速度変動の有無を確認している¹⁸⁾。

これらの観測の結果、HAT-P-7, XO-2, TrES-4 などのトランジット惑星系で有意な長周期視線速度変動が発見された。これらの視線速度変動はトランジット惑星の発見時には報告されていなかったもので、別の外側の惑星の存在を示唆するものである。

5.3 高コントラスト直接撮像の観測結果

筆者らはすばる望遠鏡の高コントラスト直接撮像観測装置 HiCIAO (High Contrast Instrument for the Subaru Next Generation Adaptive Optics) と AO188 を用いた戦略枠プロジェクト「SEEDS」のメンバーとして、特に既知の惑星系の外側領域を探索するサブカテゴリチームに参加し、エキセントリックプラネットの系やトランジット惑星系などの観測を行ってきた。ここでは特に惑星が大きな軌道離心率(軌道離心率 e が0.7以上)や大きな軌道の傾き(λ が 30° 以上)をもつ惑星系20個程度の観測結果を紹介しよう。

まず、有意な軌道離心率をもつエキセントリックプラネットの系では、伴星をもつものも、もたないものも存在しており、その伴星の存在確率は通常のフィールド星とあまり変わらないという結果が得られた。この結果は、伴星の有無はエキセントリックプラネットの形成には無関係であることを示しているように見える。特に、伴星が存在しない系でエキセントリックプラネットが存在しているということは、惑星同士の重力散乱によって軌道進化した惑星系が存在していることを示している。

一方で、有意な軌道の傾きをもつトランジット

惑星系では、伴星候補の存在する割合が通常のフィールド星よりも統計的に有意に多いという結果が得られた。この結果は、まだ伴星候補が本当にその惑星系に付随しているかどうかの固有運動の確認が完了していないため確定ではないが、エキセントリックプラネットの系とは対照的に、伴星の存在が有意な公転軌道傾斜角と相関がある可能性がある。この可能性を追究するためには、伴星の確認観測を実施して伴星の存在確率を正確に求めることや、伴星の存在する系での惑星軌道進化や公転軌道傾斜角に対する理論的研究が望まれる。

5.4 逆行惑星系HAT-P-7の場合

これまでに紹介した三つの観測手法（ロシター効果の測定による公転軌道傾斜角の測定、長周期視線速度測定による外側の巨大惑星探査、高コントラスト直接撮像による外側の伴星探査）の観測を全て実施したトランジット惑星系として、HAT-P-7の観測結果とそこからわかったことを紹介しよう。

筆者らはハワイ時間の2008年5月29日の夜にすばる望遠鏡のHDSを用いて、この惑星系で発見されたホットジュピター HAT-P-7bのロシター効果の測定を行った。図6がその観測で得られたロシター効果と、そのベストフィットモデルである。この図を見ると、この惑星のロシター効果は最初に見かけ上恒星が近づいたように見え、その

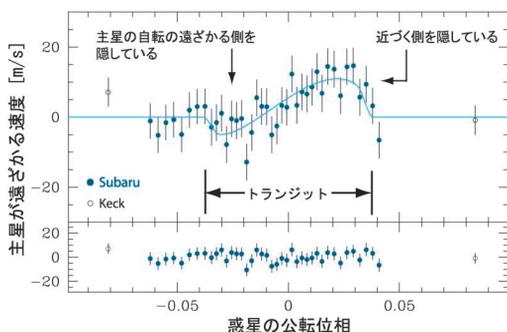


図6 ハワイ時間2008年5月29日の夜に観測されたHAT-P-7bのロシター効果。

後恒星が遠ざかっているように見える。これは惑星がまず主星の自転の遠ざかっている側を隠し、その後で主星の自転の近づいてくる側を隠したことを意味している。この結果、この惑星は統計的に有意に λ が90度を超えており、逆行して公転して見えることが明らかとなった¹⁹⁾。

この逆行を示すロシター効果は、翌年の2009年6月30日にMITのWinnらのグループによるすばる望遠鏡HDSでの観測で独立に確かめられた²⁰⁾。これによって、初めての逆行惑星の発見が2009年8月に発表された。なお、この初めての逆行惑星の発見の際に起こったいくつかの裏話については、日本惑星科学会での解説論文¹⁾に詳細を記載しているので、興味があれば別途ご覧いただきたい。

この発見の後、筆者らはこの惑星系の長周期視線速度の測定と高コントラスト直接撮像の観測を実施した²¹⁾。まず、図7が2008年と2010年に観測したHAT-P-7の視線速度を表しており、長周期視線速度変動を考慮しない場合は2010年の視線速度に 40 m s^{-1} あまりの残差が残ってしまっていることがわかる。同様の長周期視線速度変動

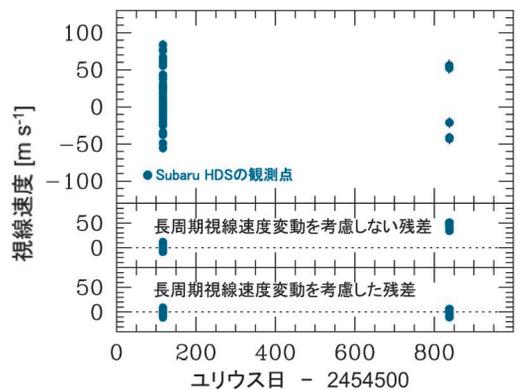


図7 すばる望遠鏡のHDSで観測されたHAT-P-7の2008年から2010年にかけての視線速度変動。横軸はユリウス日、縦軸は視線速度と残差を示している。HAT-P-7bによる視線速度に加えてHAT-P-7cによる長期トレンドが見えている。

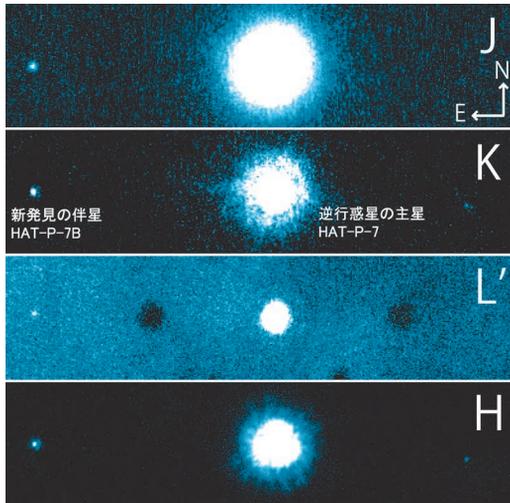


図8 すばる望遠鏡のHiCIAO+AO188 (J, K, Hバンド) とIRCS+AO188 (L'バンド) で観測されたHAT-P-7の高コントラスト直接撮像画像。上から順にJ, K, L', Hバンドでの結果で、画像の上が北、左が東を示している。

はWinnら²⁰⁾とHusnooら¹⁸⁾によっても確認されており、この惑星系では周期10年程度以上のところに別の巨大惑星あるいは褐色矮星HAT-P-7cが存在していることが明らかとなった。

次に、すばる望遠鏡の高コントラスト直接撮像装置HiCIAOおよびIRCS (Infrared Camera and Spectrograph) と補償光学装置AO188を組み合わせた直接撮像観測の結果が図8である。この図では上が北、左が東であり、左に写っている天体が新しく発見された伴星HAT-P-7Bである。

この直接撮像観測では、2009年から2012年にかけての天球面上での運動(固有運動)の確認によって実際にHAT-P-7に付随している伴星であることが確認され、さらに複数のバンドでの測光によって伴星はM5.5型の0.25太陽質量程度の低質量星であることも明らかになった。また、伴星は天球面上で主星からおよそ1,200天文単位ほど、実距離でおよそ1,500天文単位前後の距離にあって、主星の年齢の範囲内で惑星系にあるスノーライン以遠の巨大惑星に古在機構を起こすこ

とが可能であることも明らかとなった。

以上の観測によって明らかとなったHAT-P-7という惑星系の姿は以下のようなものである。まずこの惑星系は1,500天文単位ほど離れたF8型星(HAT-P-7)とM5.5型星(HAT-P-7B)からなる連星系で、HAT-P-7には公転周期2.2日で逆行軌道をもつホットジュピターHAT-P-7bと、公転周期が10年程度以上の巨大惑星(あるいは褐色矮星)HAT-P-7cが公転している。

このように伴星と二つの巨大惑星が存在するような惑星系では、もし最初に伴星の軌道面が惑星の軌道面から約40度以上傾いていた場合、伴星が外側の巨大惑星に対して古在機構を起こし、それによって傾いた外側の巨大惑星が内側の巨大惑星に古在機構を起こすという「連続的古在機構」²²⁾が起きる可能性がある。また、もし二つの軌道面が初めは約40度以上の傾きをもっていなくても、巨大惑星同士の重力散乱が起きて軌道の傾きが変わると、古在機構の初期条件が満たされる可能性がある。

今回のHAT-P-7の場合には、(1)逆行するホットジュピターが存在している、(2)スノーライン以遠に別の巨大惑星がある、(3)古在機構を引き起こすことが可能な伴星がある、という三つの観測事実から、古在機構が逆行惑星の形成に関与していた可能性が高いと考えられる。

ここで紹介したHAT-P-7の観測結果は数多くある惑星系の一例に過ぎないが、このような方法で個々の惑星系の姿を明らかにしていくことができれば、その多様な成り立ちを調べていくことが可能となるだろう。

6. 新たな取り組みと残された謎

ここまでは筆者らが過去5年あまりに取り組んできた観測的研究をもとに多様な惑星系の成り立ちの研究の現状を紹介してきたが、ここではそれ以外の方法による研究と、まだ残されている謎について簡単にまとめて紹介しよう。

最近では、ロシター効果以外に惑星の公転軸と主星の自転軸の傾きの関係を調べる方法として、恒星の自転軸が天球面となす角度（ここでは主星の自転軸傾斜角と呼ぶ）をトランジット惑星系で測定するという試みが注目されている。これはトランジット惑星系では惑星の公転軸は天球面にほぼ平行なことを利用して、主星の自転軸傾斜角を測定することができれば、ロシター効果と同様に惑星の公転軸と主星の自転軸のなす角度が有意に傾いているかどうかを調べることができるためである。

主星の自転軸傾斜角を調べる一つの方法としては、分光観測によって得られる主星の見かけの自転速度 $V \sin I_s$ (V が真の自転速度、 I_s が主星の自転軸傾斜角)と、長期測光モニタリング観測から得られた主星の自転周期 P 、そして分光観測などから得られる主星の半径 R_s の三つの観測量を用いて、 I_s を求めるというものがある²³⁾。

もう一つ最近注目されている方法は、ケプラー宇宙望遠鏡の高精度な長期測光データをもとに星震学を用いて I_s を求めるという方法である²⁴⁾。この方法による特に面白い観測結果として、二つの惑星がトランジットしている複数トランジット惑星系 Kepler-56 において、主星の自転軸が天球面に対して有意に傾き、二つの惑星の公転軸から有意にずれていることが明らかとなった²⁵⁾。この惑星系には長周期の視線速度トレンドがあり、外側に伴星があることがわかっているが、その伴星による古在機構でたまたま二つの惑星がわれわれから見てトランジットをする軌道になってしまった可能性もあるものの、この観測結果は主星の自転軸が最初から惑星の公転軸とそろっていなかった、あるいは主星の自転軸が惑星の存在とは無関係に傾いてしまったなどの解釈も考えられ、重要な観測結果となっている。今後は Kepler-56 のような惑星系が他にも存在するのか、存在するとしたら惑星系の全体像はどのような姿なのかを調べる研究が必要である。そのため Kepler-56 の

ような複数トランジット惑星系でのロシター効果の測定や、主星の自転軸傾斜角の測定が今後の重要な研究テーマの一つとなるだろう。

このような観測結果によって、現在理論的研究で新たな議論の種となっているのは、そもそも惑星形成の現場で惑星の公転軸が主星の自転軸とそろっていなかったのではないかという可能性²⁶⁾と、あるいは恒星が大気重力波（一般相対論ではなく流体力学の重力波）によって自発的に自転軸の向きを変えてしまう可能性²⁷⁾ などである。これらの可能性については理論的に可能性が指摘されているが、まだ観測によって検証がなされていない。もしこれらの現象が起きているとしたら、そもそもロシター効果などで測定された惑星の公転軌道傾斜角は惑星移動の過程とは無関係ということになってしまう。今後は原始惑星系円盤と主星の自転軸のなす角の測定（例えば、原始惑星系円盤と主星から噴き出すジェットのなす角の測定など）から、こうした可能性が真実かどうかを検証していくことが必要である。

また、Albrecht らが提案したように惑星の公転軌道傾斜角がもともとランダムなのかどうかを調べるためには、潮汐力による主星の自転軸のそろえ直しがまだ起こっていないような若い惑星に対して公転軌道傾斜角を測定していくことが必要である。そのためには今後若い惑星系でのトランジット惑星探しが重要となるだろう。折しも、Kepler の第2期探査計画として2014年から実施されている K2 計画や、2017年に打ち上げられる予定の全天トランジットサーベイ衛星 TESS²⁸⁾ (Transiting Exoplanet Survey Satellite) などでは星形成領域もトランジットサーベイに含まれる予定となっており、今後は若いトランジット惑星系の観測も大事になってくるだろう。

7. 結 び

本稿では筆者らがこれまでに行ってきた観測的研究をもとに、多様な惑星系の成り立ちについて

明らかになってきた知見と、今後の研究の展望について紹介してきた。

しかし前節で述べたことからわかるように、この分野の研究はまだ全く終わっておらず、むしろ新しくわかった観測事実によってまた新たな謎が生まれて混沌としている段階である。

今後は本稿で紹介したような観測的研究を継続するだけでなく、前節で紹介したようなこれまで考えられていなかった物理を取り入れた理論的な研究と、さらにその観測的検証も重要となってくるだろう。また、惑星系の全体像を明らかにするために必要となる長期に安定した高精度な視線速度測定装置や、より高い性能をもつ高コントラスト直接撮像装置の開発も強く期待されている。

これらのさまざまな手法による研究の協力によってこの分野の研究がさらに発展し、多様な惑星系がどうやってできたのかという問いに対する答えが今後明らかになることを期待して、本稿を終わりとしたい。

謝 辞

本稿は2013年度の研究奨励賞の受賞により執筆させていただきました。ここで紹介させていただいた筆者の研究は、多くの共同研究者の皆さんのご協力をいただいで得られたものです。日頃から共同研究をさせていただいている皆さんに、この場を借りて厚く御礼申し上げます。また、今回私を研究奨励賞にご推薦いただいた田村元秀教授（東京大学大学院理学系研究科／国立天文台太陽系外惑星探査プロジェクト室）に深く感謝いたします。なお、太陽系外惑星の研究分野での研究奨励賞は佐藤文衛さん（2005年度研究奨励賞）に続いてまだ二人目だと伺いました。太陽系外惑星の研究がこれからさらに国内で盛んになり、今後は太陽系外惑星の研究分野から多くの研究奨励賞が出ることを期待し、私もそれに貢献していければと考えております。

参考文献

- 1) 成田憲保, 2013, 遊・星・人22, 242
- 2) Hayashi C., et al., 1985, *Protostars and planets II* (University of Arizona Press, Tucson, AZ), p. 1100
- 3) Lin D. N. C., et al., 1996, *Nature* 380, 606
- 4) Ida S., Lin D. N. C., 2004, *ApJ* 616, 567
- 5) Rasio F. A., Ford E. B., 1996, *Science* 274, 954
- 6) Kozai Y., 1962, *AJ* 67, 591
- 7) Wu Y., Murray N., 2003, *ApJ* 589, 605
- 8) Wu Y., Lithwick Y., 2011, *ApJ* 735, 109
- 9) Holt J. R., 1893, *Astro-Physics* 12, 646
- 10) Rossiter R. A., 1924, *ApJ* 60, 15
- 11) McLaughlin D. B., 1924, *ApJ* 60, 22
- 12) Charbonneau D., et al., 2000, *ApJ* 529, L45
- 13) Queloz D., et al., 2000, *A&A* 359, L13
- 14) 平野照幸, 2012, *天文月報* 105, 131
- 15) 高橋安大, 2012, *天文月報* 105, 148
- 16) Winn J. N., et al., 2010, *ApJ* 718, L145
- 17) Albrecht S., et al., 2012, *ApJ* 757, 18
- 18) Husnoo N., et al., 2012, *MNRAS* 422, 3151
- 19) Narita N., et al., 2009, *PASJ* 61, L35
- 20) Winn J. N., et al., 2009, *ApJ* 703, L99
- 21) Narita N., et al., 2012, *PASJ* 64, L7
- 22) Kita R., et al., 2010, *Astrobiology* 10, 733
- 23) Hirano T., et al., 2012, *ApJ* 756, 66
- 24) Chaplin W. J., et al., 2013, *ApJ* 766, 101
- 25) Huber D., et al., 2013, *Science* 342, 331
- 26) Lai D., et al., 2011, *MNRAS* 412, 2790
- 27) Rogers T. M., et al., 2012, *ApJ* 758, L6
- 28) Ricker G., et al., 2015, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1(1), 014003, in press

Uncovering Planet Formation and Migration Mechanisms *via* Observations of Transiting Exoplanetary Systems

Norio NARITA

National Astronomical Observatory of Japan,
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Past discoveries of extrasolar planets have revealed the diversity of planetary systems. To understand how such diverse planetary systems form, it is important to study planet formation and migration mechanisms. I review some theoretical models for planet formation and migration and introduce observational studies to test such models. I summarize previous results, recent developments, and future prospects of studies for uncovering planet formation and migration mechanisms.