

# トランジット惑星系の直接撮像観測

高橋 安大

〈東京大学大学院理学系研究科 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: yasuhiko.takahashi@nao.ac.jp



さまざまな惑星の姿を明らかにした視線速度法やトランジット法だが、その観測方法の特性のために主星近傍の天体に偏って観測され、惑星系外縁部の様子を知る手がかりとしては弱い。これは、逆行惑星や高軌道離心率惑星のような特異な惑星系の形成要因を知るには欠点となる。そこで、われわれは中心星から離れた天体に感度のある直接撮像法に着目した。トランジット法や視線速度法によって惑星が発見されている系に対して直接撮像を行うことによって、相補的に、既知の惑星系の外側に未知の天体を発見しようという試みである。本稿では先行研究とわれわれの研究手法および動機、ならびにこれまでの成果について報告する。

## 1. トランジット法と直接撮像法

太陽系外惑星（系外惑星）の歴史は長いとも短いともいえるだろう。古代から人類は地球の外に生命がいるのではないかと、それともわれわれ人類は孤独なのかという問いと常に向き合ってきた。しかしながらそれらの問いは哲学の域にはありこそすれ、科学としての天文学がこのような問いと向き合えるようになったのはつい最近のことである。

近年急速に発展してきたトランジット法はさまざまな惑星の姿を明らかにしてきた。しかし、トランジット法も万能な観測方法ではない。本稿ではまず、トランジット法の欠点を補うべく登場した最も新しい惑星探査方法である、直接撮像法について紹介したいと思う。

### 1.1 トランジット法と短周期惑星

トランジット法は2000年のCharbonneauらによるHD 209458<sup>1)</sup>で初めて成功した方法である。トランジット法の原理は極めてシンプルで、主星の周りを公転する惑星が主星の前を通過するとき主星を隠すために見かけ上主星の明るさが減少

する現象（これをprimary eclipseと呼ぶ）を検出するものである。

このように原理自体は非常に単純だが、短周期惑星に感度が高いということは忘れてはならない。理由は大きくわけて二つある。一つめは、トランジットを起こすには幾何学的に主星、惑星、地球がこの順に一直線に並ばねばならないために、惑星が主星から離れば離れるほどその確率が下がること。もう一つは、食連星や星自身が本質的に変光する変光星などと区別をし、トランジット惑星の公転周期を確認するために数周期の間フォローアップする必要がある、検出に時間がかかることである。

このように、トランジット法では従来の方がある視線速度法よりも得られる情報が多いものの、視線速度法と同様に主星近傍の惑星しか検出が困難だという特徴も併せ持つことは、考慮する必要がある。

### 1.2 直接撮像法

直接撮像法は2008年にKalasらによるフォーマルハウト（みなみのうお座 $\alpha$ 星<sup>2)</sup>とMaroisらによるHR 8799<sup>3)</sup>において成功した。直接撮像法の

原理も非常に単純であり、つまりその名のとおりに惑星の姿を直接画像に収めようという試みである。Kalasらの論文ではハッブル宇宙望遠鏡を用いた可視光観測であったが、一般には後述するように赤外線による観測が専ら行われる。

原理的には非常にシンプルにもかかわらず、直接撮像法が成功するのに多大な時間がかかった原因として多くの技術的問題があった。順番に見ていこう。

例えばHR 8799系（2008年の論文において発見された惑星は外側から順にb, c, dと名づけられており、2010年にさらに内側にeも発見された<sup>4)</sup>）においては惑星bですら主星から $1.73''$ 、惑星eにいたっては $0.37''$ という非常に近傍に存在する。このように、直接撮像法ではいかにして主星近傍に迫れるかが成功の鍵の一つとなっている。そこで主星の光を低減して主星近傍を見るための特殊な装置であるコロナグラフが必要となる。十分な性能をもつコロナグラフの開発が一つの困難である。

実際にコロナグラフを使用する際には、マスクの位置に星を合わせるようにして配置する。しかし地上においては大気揺らぎのために主星の星像が安定せず、コロナグラフ本来の性能を発揮することができない。したがって、星像を安定させるために補償光学装置も必要とされる。これが二つめの困難である。

ここで補償光学の性能を測る尺度である、フリード長とストレール比について触れておこう。フリード長とは、波長の長さに対して大気揺らぎの大きさが小さいとみなせる開口の大きさのことであり、フリード長が長いほど広い範囲が大気揺らぎを補正されているということになる。そして可視赤外領域で波長 $\lambda$ に対してフリード長はおよそ $\lambda^{1.2}$ に比例するという関係がある。言い換えると、比較的波長の長い近赤外線であればフリード長が長くなるために補償光学のパフォーマンスが上がる。これが直接撮像において赤外線観測が

よく行われることの一つ目の理由である。

ストレール比とは、星像が完全に安定しているとき（言い換えると、回折限界のとき）の星像の中心強度に対して、実際に検出される星像の中心強度の比のことである。したがって、完全に大気揺らぎが補正されているときはストレール比は1となり、補正が弱くなるにつれてしだいに0に近づいていく。実際にすばる望遠鏡の補償光学AO188では、ストレール比はKバンド（中心波長 $2.2\ \mu\text{m}$ ）において最も良い条件で0.6程度まで改善するが、これによって星像がシャープになるために淡い惑星も検出しやすくなる。

しかし、それでも主星の明るさに対する検出可能な明るさの比であるコントラストは、Hバンド（中心波長 $1.6\ \mu\text{m}$ ）において $10^{-6}$ 程度が要求され、検出器もこれに対応したダイナミックレンジをもたねばならない。また、検出される惑星の位置を精密に測るためにピクセルスケールも非常に小さいものが望まれるだろう。これらの検出器に対する要件が、三つめの困難となる。

以上をまとめると、直接撮像で必要とされる技術には、主星の明るさを抑えるコロナグラフと星像を改善する補償光学、明るい天体のみならず暗い天体をも検出し細かい分解能をもつ検出器の三つの壁があった。それゆえ、直接撮像法は2008年まで成功を待たねばならなかったのである。

このような技術的困難を乗り越えてまで直接撮像によって系外惑星を撮像するには、ほかの観測方法にはない特徴があるからにほかならない。一つは観測時の惑星の位置を精密に測れるので、何回か観測することによって原理的には軌道の決定ができるということだ。実際、フォーマルハウト系やHR 8799系、がが座 $\beta$ 星系などでは惑星の軌道に制限がついている。二つめに、惑星の測光値と大気モデルを利用すれば、主星の年齢の見積もりを惑星系の年齢に援用して惑星の質量や半径などを見積もることができることである。最後に、他の惑星探査法とは異なって主星から遠く離

れた惑星に感度があることである。実際に、フォーマルハウト系の惑星bは主星から約120 AUほど離れていると見積もられており、これは他の手法では検出できない値である。

ただし、現在までには軌道に基づく力学的な惑星質量導出には至っていない。このため、直接撮像観測では惑星候補の明るさのみから質量を導いており、その不定性があることに注意されたい。用いるモデルによっては、上記のどの惑星候補も惑星質量を超えてしまう可能性がある。

## 2. HiCIAO と SEEDS

### 2.1 HiCIAO と観測モード

ここで、実際に直接撮像を行うための装置として、すばる望遠鏡のナスマス焦点の観測機器であるHiCIAOについて説明しておく。HiCIAOは‘Hi’gh ‘C’ontrast ‘I’nstrument for the Subaru Next Generation ‘A’daptive ‘O’pticsの略で、系外惑星の直接撮像を第一の目的として作られた高コントラスト撮像装置である<sup>5)-7)</sup>。図1にHiCIAOの設

計概念図を載せた。HiCIAOは2,048×2,048という非常に大きいサイズの赤外検出器が9.5 mas/pixelという細かいピクセルスケールをもっていることが特徴の一つである。例えばジェミニ望遠鏡のコロナグラフ撮像装置であるNICIは赤外アレイサイズが1,024×1,024の2枚で、ピクセルスケールは18 mas/pixelであることから、HiCIAOはより細かく星像をフィットできることがわかる。これによりHiCIAOの視野は10"×10"となるが、直接撮像をするには十分な視野である。

この観測装置のもう一つの特徴はDI, ADI, PDI, SDIと呼ばれるさまざまな観測モードに対応していることである。DIはDirect Imagingの略で、通常の撮像モードを指す。ADI, PDI, SDIはすべて中心星の光とノイズとを低減し、コントラストを下げるために利用されるものである。

PDIはPolarization Differential Imagingの略で、特に円盤のような偏光成分をもつ天体に対して用いられる。SDIはSpectral Differential Imagingの略である。この方法では、惑星候補天体のような低温度星に特有のスペクトルを利用する。これらの手法はコントラストを低減させるのに非常に有効であるが、発展的であるのでここではこれ以上の説明を割愛する。

直接撮像法において現在のところ最も重要なのは、ADIである。ADIはAngular Differential Imagingの略であり、望遠鏡の瞳面を天球面に対して固定する撮像モードである<sup>8)</sup> (図2参照)。具体的には、撮像する際に天頂方向を検出器上で固定する。こうすると、時刻に応じて視差角 (parallactic angle, 天頂方向と北の方向のなす角度) が変化するために、伴星は中心星を中心に回転するように撮像される。これによって、望遠鏡の光学系に由来するスパイダーやスペckルノイズ<sup>\*1</sup>

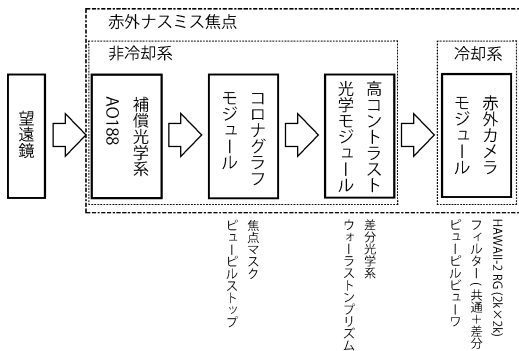


図1 HiCIAOの概念設計図。コロナグラフモジュールだけでなく、高コントラストモジュールが組み込まれることによって、より高いコントラストを達成する。

\*1 スパイダーは、望遠鏡の副鏡を支える支え、あるいはそれによって回折される光によるノイズのこと。スペckルノイズは、微妙に歪んだ波面が干渉して現れる粒状のノイズのこと。特にスペckルノイズはそのままでは候補天体と区別するのが難しい。どちらも光学系に由来するので、光学系を固定する観測法であるADIでは回転しないため、ADIで回転する候補天体との区別が可能になる。

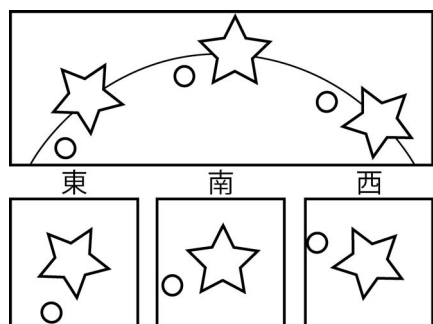


図2 ADIの原理を表した模式図。中心星を視野中心に固定すると、日周運動に合わせて候補天体は中心星の周囲を回転する様子がわかる。回転角は天体の高度などに影響される。

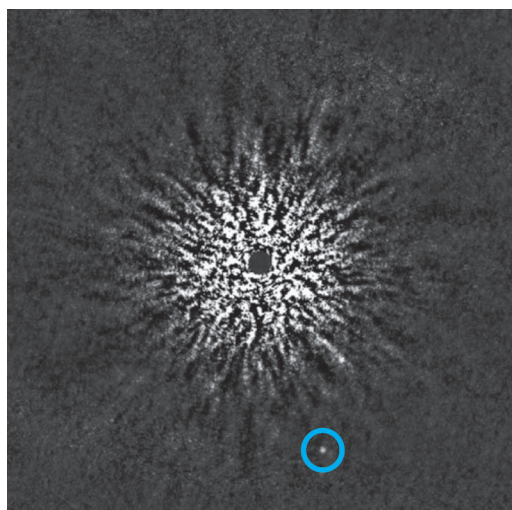


図3 HiCIAOが発見したG型星GJ 758とその周りに写っている惑星候補天体。中心星から1.9に位置する。すばる望遠鏡2009年12月3日のプレスリリースより改変。

といった準静的なノイズは、視野に固定されて検出器に写る。一方、欲しい候補天体のシグナルは刻一刻と回転するから、ノイズとシグナルを区別することができるようになる。以上がADIでのメリットである。解析時には、まずサイエンス画像をそのままメジアンで足し合わせてしまう。すると、候補天体のシグナルは回転のために画像に

よって場所が異なるので消えてしまうが、一方で準静的なスパイダーやスペckルノイズは消えずに残る。こうして作った画像を参照画像として全ての画像から引き算をすることで、ノイズが低減された画像を得ることができる。最後に各画像の回転角分を逆回転してから再び足し合わせると、候補天体のシグナルが浮かび上がってくる。このような解析手法を古典的ADIと呼んでいる。現在は、従来のADI（古典的ADI）をより発展させたLOCIと呼ばれる方法<sup>9)</sup>で古典的ADIでは一度にすべての画像をすべての領域で足し合わせて参照画像を作成していたために、わずかに変動するノイズの変化を拾いきれず、ノイズ低減に難があった。LOCIではそれぞれの画像に対して、パッチワークのようにさまざまな画像をつなぎ合わせたり足し合わせることで、最適な参照画像を作成する。これによって、古典的ADIよりもさらにノイズの低下した画像を得ることができ、多数の惑星候補天体の検出につながった。

HiCIAOでは以上の処理を施した1時間積分のHバンド撮像において、主星から1"離れた5σコントラストが $4 \times 10^{-6}$ になるように設計されており、この値は実際に達成されている。この数値は1,000万年の惑星系で3木星質量、1億年で7木星質量の天体が検出できるコントラストである<sup>10)</sup>。実際に、2009年にThalmannら欧米と日本の共同グループは、実際にHiCIAOを用いて世界初のG型星周りの惑星候補天体を発見することができた<sup>11)</sup> (図3参照)。

## 2.2 SEEDSによる惑星探査

すばる望遠鏡では初の戦略的観測としてSEEDS (Subaru Strategic Exploration of Exoplanets and Disks; PI: 田村元秀氏) を2009年から5年計画で遂行している。この計画ではHiCIAO とAO188を用いて、若い天体の周りの直接撮像惑星探査や円盤の撮像を5年間で120夜行う。SEEDSではすでにGJ758以外にも惑星候補天体をいくつか発見しており、近いうちに新たな



成果が発表できるものと期待されている。

また、われわれトランジット惑星系グループも SEEDS に所属して、以下に示すトランジット惑星系の直接撮像観測を行っている。この中でわれわれはすでに30天体以上を観測し、それらのいくつかに候補天体を検出している。現在これらの天体について解析と追観測を行っているところである。

### 3. トランジット法と直接撮像法との組み合わせ

前述してきたように、惑星系の主星近傍を狙うのに非常に強力なトランジット法と、惑星系の外縁部を狙うのに強力な直接撮像法の組み合わせはとても相性がよく、この二つを組み合わせることで惑星系を内側と外側から迫れる。各観測法によって検出された天体が軌道長半径の異なる領域を占めていることが図4にはっきりと示されている。

一方、欠点も存在する。トランジット法では大

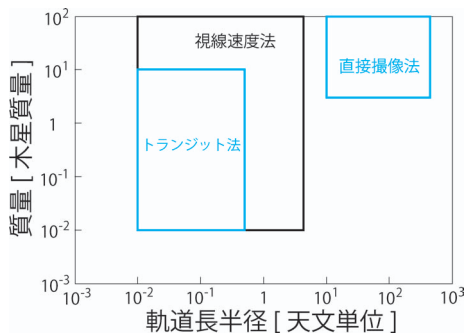


図4 トランジット法と直接撮像法によってこれまで見つかった天体がパラメーター空間で占める典型的な領域。横軸が軌道長半径（直接撮像の場合は天球面に射影した、中心星からの距離の場合もある）で、縦軸が木星質量を単位にした質量を表す。

抵、視線速度法での追観測を必要とする\*2。視線速度法では精密に恒星の視線速度を測定するために、多くの吸収線をもつ安定した恒星大気が必要とする。このため、恒星が数十億年程度のF、G、K型星でなければならないことが多い。

他方、直接撮像法では惑星は若ければ若いほど、あるいは重ければ重いほど近赤外線で見出しやすいことを見込める（図5を参照）。なお、近赤外線では系外惑星の直接撮像を行うもう一つの理由がこれである。トランジット惑星系に対する直接撮像の場合、前述のように十分に年老いた系を撮像するから、検出される天体は必然的に重くなければならない。典型的には褐色矮星\*3以上の質量の天体のみが検出できる。

本来惑星を検出するべき直接撮像法であるのに、褐色矮星のような重い天体しか検出されないのは本末転倒のように思える。しかし、質量が大きいということは、以下のサイエンスに利用するにはかえってメリットともなりうるのである。

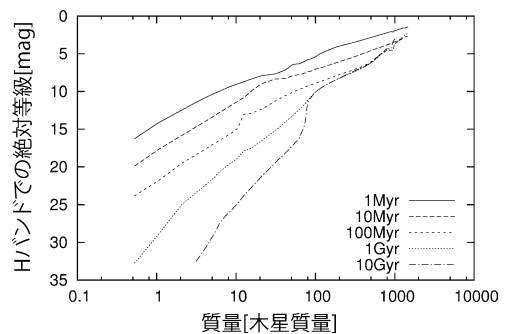


図5 Baraffeらによる大気モデルであるCONDモデル<sup>12)</sup>をプロットしたもの。これを利用して、年齢と質量の関数として天体の等級を見積もることができる。縦軸がHバンド（中心波長1.6  $\mu\text{m}$ ）での絶対等級、横軸が天体の質量を木星を単位として表したものである。線の違いはそれぞれ年齢を表している。

\*2 視線速度法による追観測を必要としない特殊な例として、TTVが挙げられる。トランジット系にTTVが観測される場合、トランジット法単独で惑星系を確定することができる。詳細は本誌収録の福井曉彦氏の記事を参照のこと。

\*3 惑星よりも重く（約13木星質量以上）、恒星よりは軽い（約80木星質量以下）天体。惑星よりは重いために重水素やリチウムなどの一部の元素は燃焼できるが、普通の水素が燃えるほどは重くない。

#### 4. “不規則”な惑星と理論予測

われわれがトランジット惑星系を直接撮像しなければならない理由は、トランジット惑星系のなかでも“不規則”な惑星がどのように形成されるかが理解できるということにある。例えば“不規則”な惑星の例であるエキセントリック・プラネットや逆行惑星の系は、惑星形成後に重力的な効果が働いた結果だと考えられている。それらの系に対して直接撮像を行い惑星系外側に重い天体の有無を調べることで、重力的効果の種類を切り分けることが可能になるのである。もう少し詳しく説明していこう。

視線速度法やトランジット法でこれまでに見つけてきた惑星が示しているのは、従来の惑星形成理論では説明できないような惑星、すなわちホット・ジュピターやエキセントリック・プラネット、逆行惑星の存在である。本誌の平野照幸氏の記事にあるように、これらの惑星は、円盤との相互作用や惑星散乱、古在効果を経て形成されることが理論側から予測されている。とすれば、観測側が行うべきはこの解答への答え合わせであるが、きちんと観測的に検証されたとは言いがたいのが現状である。ただし円盤内に埋もれている惑星を直接検出するのは現在の観測の技術では非常に難しいので、すでに円盤が散逸していて惑星のみが存在している条件で働く現象である惑星散乱と古在効果について検証を試みるのが妥当であろう。

惑星散乱と古在効果に特徴的に見られるものとして重要なのは、高い軌道離心率および惑星公転軸と主星自転軸の間の有意なずれである。惑星散乱では、観測されるような散乱後の軌道から散乱前の軌道を推測するのは事実上不可能であるから、直接的な証拠によって惑星散乱を検証するのはかなり難しい。そこで、われわれは古在効果の方に着目する。つまりトランジット法や視線速度法で見つかったエキセントリック・プラネットや

逆行惑星の外側に、古在効果の重力源となる未知の天体が存在することを期待して直接撮像を行うのである。前述のように、トランジット惑星系の直接撮像法によって検出される天体は必然的に重い天体に限られるものの、重い天体であればあるほど古在効果は無視できなくなるはずである。言い換えると、古在効果の可能性の上限を調べていることになる。もし候補天体を検出できなかったとしてもそれは古在効果を否定するだけであり、間接的に惑星散乱の可能性を支持するから、無意味な観測にならない点も重要だ。

直接撮像法によって古在効果の影響を調べるには、検出された天体の質量と、推定される軌道長半径（あるいは軌道長半径の下限値）から計算を行う。古在効果によって惑星の軌道離心率および軌道傾斜角は振動するが、この振動の周期は天体の公転周期に影響される。この周期、すなわち古在効果の効くタイムスケールと惑星系の年齢を加味してシミュレーションを行い、その結果現在の惑星系の姿を説明するのに古在効果の影響が十分大きいレベルならば、その系では古在効果が起こっていたと考えられる。一方、古在効果の影響が小さければその系では古在効果以外の影響によってエキセントリック・プラネットおよび逆行惑星が誕生したと考えられ、一般的には惑星散乱が発生したと推定される。惑星散乱は単一の惑星の系では発生しえないから、もしこれまでにその系で単一の惑星しか発見されていないならば追加の惑星を探す重要な手がかりとなるだろう。

トランジット惑星系の直接撮像では、さらに興味深いサイエンスもできるようになる。例えば、直接撮像で検出された候補天体が伴星であるとき、古在効果の有無にかかわらず主星を回る惑星の形成段階において重要な影響を与えた可能性を議論できる。連星系には非常に大きい軌道離心率をもつものがあり、その場合伴星が主星の非常に近傍まで接近する。伴星による重力の影響は無視できないだけに、この接近により惑星系の姿を完

全に変えてしまう可能性もあるからだ。連星系での惑星形成はまだまだわかっていないことが多いので、検出だけでもさまざまな議論ができると言える。

もう一つ重要なことは、主星の近傍に直接撮像で何かしらの天体を検出した場合、実際には伴星でなかったとしてもトランジットの結果そのものに影響を与えるということである。例えば現在打ち上げられ、多くの驚くべき成果を上げているトランジットサーベイ用衛星であるケプラー衛星のピクセルスケールは約 $4''/\text{pixel}$ である。つまり、これ以下の離角で天体が主星近傍に存在していたとすると、この二つの天体が検出器上で区別できないために二つの天体の合成等級を一つの天体の明るさと見積もらざるをえない。しかしトランジットは実際には一つの天体にしかトランジットを起こさないから、結果的にトランジットの深さを過小評価しているかもしれないのである。このように、検出ありはもちろん、検出なしでも科学的にさまざまな点で有意義であるところも非常に魅力的だ。

## 5. 直接撮像による天体探し

それでは実際に、トランジット惑星系に対する直接撮像の研究の現状について紹介したいと思う。HiCIAOのような高コントラストの撮像装置は新しく、世界中でも数は多くないために研究例も多くはない。しかし先行研究で報告された伴星候補天体の位置と、新しい観測での伴星候補天体との位置を両方用いることによって、伴星候補天体の軌道を決めるのに非常に役立つ。

### 5.1 先行研究例

視線速度法やトランジット法などの間接法で発見された惑星を保持する恒星を大規模に直接撮像した例はいくつか存在する。古くはケック望遠鏡とリック望遠鏡を用いた Patience ら<sup>13)</sup>の論文が挙げられる。当時は系外惑星のサンプル数も少なく、また装置の性能も不十分であったものの、

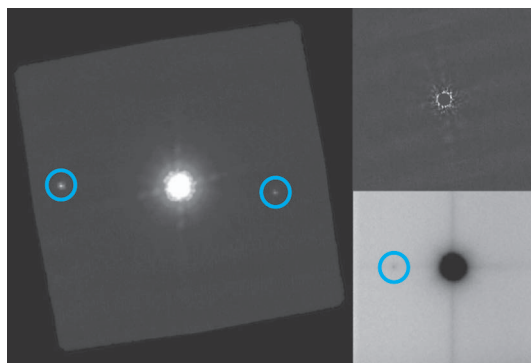


図6 左がHiCIAOを用いて撮られたHバンドのHAT-P-7と二つの候補天体で視野は $12'' \times 12''$ 。右上がそれにADI/LOCIと呼ばれる特殊な画像処理を施したHAT-P-7近傍。視野は $6'' \times 6''$ である。右下はAstraLuxのzバンド(中心波長 $0.92 \mu\text{m}$ )で視野は $12'' \times 12''$ 。いずれも上が北で左が東を指す。成田ら<sup>15)</sup>より改変。

HD 114762, おうし座 $\tau$ 星, はくちょう座16番星が伴星を持っていることを撮像によって明らかにしている<sup>13)</sup>。最近のものではRobertsら<sup>14)</sup>の論文でAEOS望遠鏡と補償光学を用いて64個の系を観測し, うち15個に伴星を検出したと報告した。このうち7個は新しい伴星候補であるという。しかしこれらのどちらもエキセントリック・プラネットや逆行惑星のような“不規則な”惑星に特化したものとは言いがたい。

### 5.2 HAT-P-7の例

以上の現状を踏まえ, われわれは世界で初めて惑星が逆行している可能性が示唆された惑星系であるHAT-P-7系<sup>15), 16)</sup>の直接撮像を試みた。この系においては何らかの軌道進化が発生したと考えるのが妥当である。そこで古在効果の可能性を検証するために, われわれはHAT-P-7をすばる望遠鏡/HiCIAOと補償光学AO188を用いて直接撮像したところ, 主星近傍に伴星候補天体を二つ検出した。候補天体は, そのどちらかが伴星である可能性がある。さらに, Calar Alto望遠鏡のAstraLux Norte ラッキーイメージングカメラの画像

から候補天体のカラーを求めた<sup>17)</sup> (図6を参照).  
すると、質量はどちらも晩期のM型星程度  
(0.08-0.2太陽質量)と見積もられることもわ  
かった。

しかしながら計算の結果、これらの候補天体が  
真に伴星であったとしてもこの天体が惑星に古在  
効果を与えた可能性はかなり低いことがわかつた。  
また Winnらによって示唆された惑星候補天  
体cの存在(これは直接撮像法では受からな  
い)<sup>16)</sup>が正しいとするならば、古在効果の可能性  
はさらに小さくなる。したがって、この系におい  
ては古在効果は否定され、惑星散乱が過去に起  
こっていた可能性を示唆する。このような観測を  
積み重ねることによって、惑星の軌道進化のメカ  
ニズムを統計的に明らかにできるようになる。

## 6. おわりに

本稿では直接撮像法とその特徴について記述し  
た後、トランジット惑星系に対して直接撮像を行  
うことにどのような意義があるのかについて説明  
をしてきた。直接撮像法は技術的困難があるもの  
の、惑星の情報を直接得られるなど、メリットは  
非常に大きい観測手法である。2008年に初めて  
成功したゆえに技術的にもまだ改善の余地が残さ  
れており、今後も期待の大きい方法だ。

トランジット惑星系の直接撮像法は、トラン  
ジット法によるサーベイのように広い領域を一度  
に調べることができないので、当分の間は個々の  
天体について地道に一つずつ撮像していくしか  
ない。しかし、エキセントリック・プラネットや  
逆行惑星のようなある特徴をもった惑星を十分  
な数で調べることができれば、古在効果と惑星  
散乱のどちらが統計的に支配的なのかについて  
、あるいはそれら特徴と惑星散乱や古在効果  
との相関について一定の理解をすることができ  
ると思われる。現在の研究の目標はここに焦  
点を合わせていると

いって良いだろう。

また、これまで補償光学からの制限により  
主星が明るい大・中質量星の場合にしか直接  
撮像を行えなかったのが、レーザーガイド補  
償光学の開発により、さらに低質量天体にも  
その範囲を広げられることは直接撮像にと  
って大きなメリットである。現在すばる望  
遠鏡用に開発中の赤外ドップラー装置に先  
んじて伴星および惑星の存在を知ることが  
できれば、赤外ドップラー装置で検出され  
うる惑星に制限をつけることも可能である。  
これは再度軌道進化の理論に対して試練を  
与え、より軌道進化を理解するのに役立つ。

さらに、惑星系の安定性の理解は、今後  
一段と発見例が増えると思われるハビタ  
ブル・プラネット\*4の議論の礎となるだ  
ろう。地球外生命体は存在するのかとい  
った議論のためには、まずはハビタブル  
・プラネットが安定して存在していな  
ければならないからである。

系外惑星の形成問題の理解は、翻って  
われわれ太陽系の理解につながる。普  
遍的だと思われた太陽系の姿が、系外  
惑星の発見を通して実は特殊な例か  
もしれないと議論されることもあるよ  
うに、系外惑星の軌道進化の研究が、  
太陽系の歴史を知る重要な手がかり  
となるかもしれない可能性を秘めて  
いる。

## 謝辞

本稿を執筆するにあたって、共同研究者  
である成田憲保氏から多大なアドバイ  
スをいただいた。また、特集を組むに  
あたって、福井暁彦氏、平野照幸氏  
からも有意義なアドバイスをいただ  
いた。われわれの研究はすばる望遠  
鏡戦略観測であるSEEDSの一部と  
して扱われている。PIであり指導  
教員でもある田村元秀氏と、SEEDS  
グループのみなさんに感謝している。

\*4 可居住惑星。現在は、液体の水が表面に存在しうる惑星を指すことが多い。



## 参考文献

- 1) Charbonneau D., et al., 2000, ApJ 529, L45
- 2) Kalas P., et al., 2008, Science 322, 1345
- 3) Marois C., et al., 2008, Science 322, 1348
- 4) Marois C., et al., 2010, Nature 468, 1080
- 5) Tamura M., et al., 2006, Proc. SPIE 6269, 62690V
- 6) Hodapp K. W., et al., 2008, Proc. SPIE 7014, 701419
- 7) Suzuki R., et al., 2010, Proc. SPIE 7735, 773530
- 8) Marois C., et al., 2006, ApJ 641, 556
- 9) Lafrenière D., et al., 2007, ApJ 660, 770
- 10) Barman T. S., et al., 2001, ApJ 556, 885
- 11) Thalmann C., et al., 2009, ApJ 707, L123
- 12) Baraffe I., et al., 2003, A&A 402, 701
- 13) Patience J., et al., 2002, ApJ 581, 654
- 14) Roberts L. C. Jr., et al., 2011, AJ 142, 175
- 15) Narita N., et al., 2009, PASJ 61, L35
- 16) Winn J., et al., 2009, ApJ 703, L99
- 17) Narita N., et al., 2010, PASJ 62, 779

## The Direct Imaging Observations on Transiting Extrasolar Planetary Systems Yasuhiko TAKAHASHI

*The University of Tokyo, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Though the transit method has revealed many figures of extrasolar planets, both the radial velocity and the transit method are more sensitive to closer planets to the central stars due to their peculiarity. Therefore they cannot be clues to outer regions of planetary systems. This should be a drawback in investigating the formation of eccentric and tilted planets. In order to inspect the outer regions, we have focused on the direct imaging method, which has a high sensitivity to distant objects from central stars. Observing systems with known planets discovered by the radial velocity and the transit method in a means of the direct imaging method, we have aimed to detect outer planets or objects in systems with inner planets complementarily. In this article I introduce our method, motivation, previous studies and outcomes up to now.