

系外惑星「遠い世界の物語」その1 ~ SEEDSによる太陽型恒星GJ 504を公転する 系外惑星の直接撮像~

葛原 昌幸¹, 田村 元秀²,
SEEDS/すばる望遠鏡/AO188 チーム

(要旨) 直接撮像法は軌道の大きな巨大惑星の探査に有効な手法であり, その大気や組成を調べることも可能にする. 太陽系外惑星や星周円盤を直接撮像探査する戦略的な計画, SEEDSがすばる望遠鏡で進められている. SEEDSは最新の観測装置, 観測技術を採用し120夜の観測時間で探査を行なうことで, これまで知られていなかった系外惑星の知見を得ることを目標としている. その代表的な成果の一つとして, 我々は太陽型主系列星GJ 504を公転する巨大惑星(GJ 504b)の直接撮像に成功した[1]. 本稿では, その惑星の特徴や意義について説明する. また, 普段は紹介する機会が少ないGJ 504bの発見に至るまでのSEEDSにおける我々の活動についても説明する. * [1] Kuzuhara et al. 2013, ApJ 774, 11

1. 系外惑星の直接撮像観測

我々が太陽系“外”惑星の存在を知ったのは, わずか20年ほど前のことである[2]. しかし今では, 観測技術の進歩に伴っておよそ1,000の系外惑星の存在が知られている. これらの系外惑星の観測は, 我々に多くの知見をもたらし, 人類は宇宙に存在する惑星が多種多様であることを知るようになった.

系外惑星は主に視線速度法やトランジット法などの手法によって探査されてきたが, これらの手法は惑星から放たれる光を直接とらえるものではなく, 間接的な手法である. 地球が太陽より可視光でおよそ 10^{-10} 倍暗いことから分かる様に, 惑星はその中心星に対して圧倒的に暗い. このように明るい中心星の光に邪魔された状況で, 惑星の光を見つけ出すことは, 天文観測では極めて難しい課題となる. これは, 例えるならばサーチライトの中をさまよう蛍の光を見つけ出す様なことである. しかし近年, 8m級の主鏡をもつ大型望遠鏡, 補償光学装置や高感度赤外検出器, 惑星と中心星のコントラスト比の障害を克服するための高コントラスト撮像技術が登場し, 系外惑星の直接撮像は決

して「見果てぬ夢」ではなくなってきた. 実際に, 現在の観測技術では巨大ガス惑星の検出に限られるが, 2005年あたりから惑星やその候補天体の撮像に成功したという報告がなされるようになってきた(e.g., [3, 4]). 惑星が放つ光を直接観測し画像におさめることは学問的に利益が大きいばかりでなく, より一般的にも夢のあることであろう. そして, それは今日では現実的な課題なのである.

惑星を直接撮像することで, 我々は惑星の放射フラックス, 中心星に対する位置の情報を得ることができる. さらに, 多波長の撮像観測や, 分光観測を用いることで惑星のフラックスを波長の関数として知ることができる. これは, 惑星の有効温度や大気構造, そして組成などの理解につながる. さらに直接撮像観測では, 他の手法では困難な数10 AUという軌道長半径を持つ大軌道惑星の探査が可能になるが, この点も直接撮像観測による大きな利点と言える. 大軌道惑星の探査が可能になれば, コア集積理論や重力不安定理論, 惑星の軌道進化理論などを検証する新たな観測的資料を得ることができる.

すばる望遠鏡では, 系外惑星および星周円盤を直接撮像探査するための戦略的な探査プロジェクト(Strategic Explorations of Exoplanets and Disks with Subaru; 略称SEEDS)が進められている. SEEDSで

1. 東京工業大学理工学研究所地球惑星科学専攻
日本学術振興会特別研究員
2. 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻
m. kuzuhara@geo. titech. ac. jp

はすばる望遠鏡に併せて、最新の補償光学装置 AO188, 我々が新たに開発した近赤外カメラ HiCIAO を用いる。さらに、Angular Differential Imaging (ADI) などの最新の高コントラスト撮像技術が採用されている。また、合計120夜の観測時間が SEEDS に与えられていることも含めると、SEEDS は過去行なわれた直接撮像探査の中で、最も強力な探査計画であると考えられる。SEEDS の最終的な目的の一つとして、軌道の大きな系外惑星を直接撮像し、その特徴を評価することがあげられる。これまで、系外惑星は20程度の星の周囲で直接撮像されたにすぎない(その中には褐色矮星を公転する天体など、惑星と呼ぶべきものかどうか意見が分かれるものも多く含まれている)。この限られた検出数のため、大軌道惑星の特徴は良く知られていない。従って、その特徴を観測から明らかにしていくことは重要な課題である。また、SEEDS のもう一つの重要な課題として、大軌道惑星の存在頻度などを統計的に導出することがあげられる。これもまた、巨大惑星の形成・進化的理論に対して重要な制限の一つになるだろう。

我々は、SEEDS を2009年秋に開始し、これまで系外惑星の探査を進めてきた。その結果、3つの系外惑星やその候補天体の直接撮像に成功するなど多くの成果をあげてきた。その代表的な成果として、太陽型恒星 GJ 504 から約44天文単位の距離を公転する、これまで直接撮像された惑星の中で最も木星に近い質量や有効温度をもつ惑星(GJ 504b)を発見した(図1)。我々 SEEDS チームはこの発見に至るまで、多くの地道な作業や議論を積み重ねてきたが、その点についてはあまり知られていないだろう。そこで、本稿はまず、普段は紹介する機会の少ない GJ 504b の発見に至るまでの我々の活動について重点を置いて紹介する。その後、その惑星の特徴や発見の意義を説明し、最後に我々の今後の計画について述べる。

2. GJ 504b 発見に至るまで

2.1 観測ターゲット選定

SEEDS はいくつかの観測カテゴリーに分かれているが、各カテゴリーが各々の設定した科学的な目標に基づいてターゲットを選定する。各カテゴリーにおい

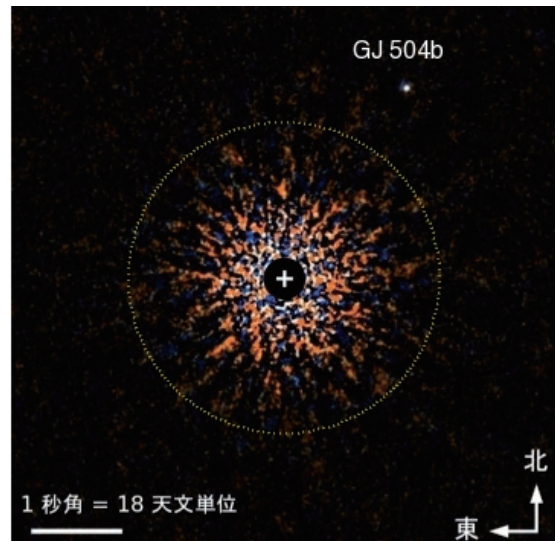


図1: 観測から得た、GJ 504 のJ-band($\sim 1.2\mu\text{m}$; 青)とH-band($\sim 1.6\mu\text{m}$; オレンジ)の2色合成図。中心星の位置は十字で示す。画像上では、GJ 504bは白い像としてみえる。黄色の点線は海王星の軌道長半径に相当する。カラーの図は電子版を参照されたい。[1]の図を一部改訂。

て共通する作業として、ターゲットの年齢を推定する必要がある。その理由は、直接撮像で検出された惑星の質量を推定するためには、その光度と年齢を、惑星の光度を年齢や質量の関数としてモデル化した惑星光度進化理論³と比較する必要があるためである。そのような方法を用いる理由は、惑星の軌道周期が長い場合、力学的な質量測定が困難なためである。恒星の最も基本的な年齢推定方法として、恒星進化理論モデルとその星の観測された光度や有効温度を比較する手法がある。星団の星を多数利用して、そこに含まれる星の年齢を統計的に求める方法も代表的な手法の一つである。しかし、これらの手法はゆっくり光度進化する太陽型主系列星や、星団に属していない恒星に適用するには現実的ではない。

太陽型主系列星の年齢推定法の一つとして、その自転周期を指標として年齢を評価する gyrochronology 法[5]がある。自転周期は非常に高い精度で測定が可能であり、さらに星は主系列に達した後、恒星風によって角運動量を失い自転が時々刻々と遅くなる。そのため、gyrochronology 法は自転周期が測定されてい

3. 巨大ガス惑星は重力収縮によって光を放射するが、ある与えられた質量を持つ惑星光度の時間進化を数値的にモデル化した研究がいくつか存在する。

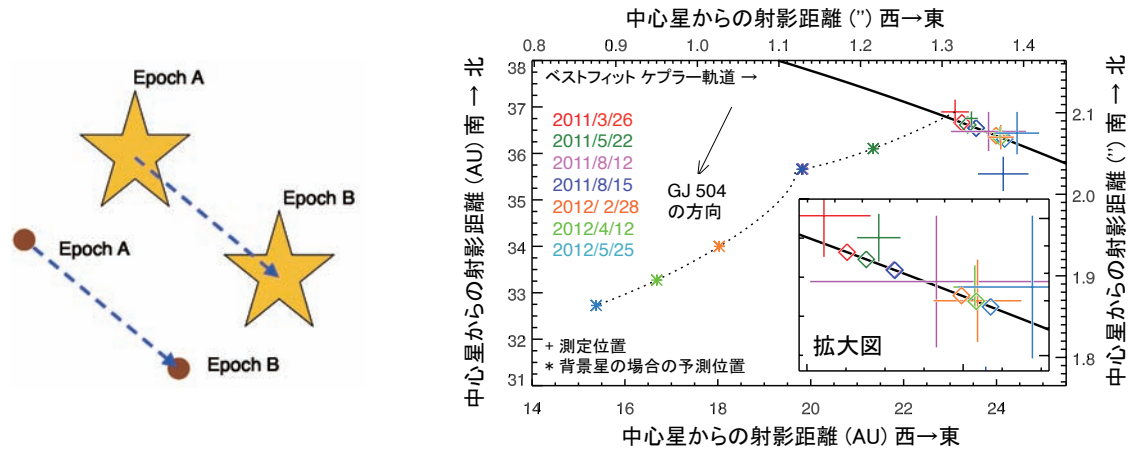


図2：左：検出した光源がターゲットの恒星に束縛しているかどうかを検証するための、固有運動を利用したテストの概念図。光源が惑星ならば共に同じ固有運動をする。一方、惑星(円)が背景星ならば、Epoch AでもEpoch Bでも天球面上を動かないので、主星との位置関係は変化する。右：GJ 504bのGJ 504に対する位置関係を示した図。各測定位置と背景星の場合に期待される位置に対して、それぞれの時期を色で分けて示す。図から明白であるが、フィッティングした場合も、各測定位置はGJ 504bが背景星と仮定した場合は一致しないが、ケプラー軌道でよく再現される。カラーの図は電子版を参照されたい。[1]の図を一部改訂。

る太陽型主系列星に対しては有効な手法であり、星団に含まれていない恒星に対して、他の手法と比較して高い精度で年齢を推定できる。著者は国立天文台で行なわれているあるセミナーの発表のために、たまたま gyrochronology 法について勉強していた。そしてその手法に基づいて多くの星の年齢を推定し、それらを SEEDS の観測ターゲットとして提案した。今回、紹介する GJ 504 の年齢推定にも gyrochronology を用いている(実際の GJ 504 の年齢は、その他の手法も総合的に用いて評価されている)。太陽近傍には、多くの主系列星が存在するが、散開星団などの星団は比較的遠方にある。もし太陽近傍の主系列星の年齢が精度よく推定できれば、地球との距離が近い天体を観測ターゲットに追加できるため、より星近傍が分解可能なり、さらにはより暗い惑星の探査も可能になる。これは太陽近傍の恒星を観測する利点である。

2.2 すばる望遠鏡での観測

2011年3月、日本はその月に未曾有の大災害となった東日本大震災を経験していた。我々 SEEDS 観測チームは、その大震災が起きたおよそ10日後、観測のためにハワイのマウナケア山に向かった。震災直後であったため、著者がハワイに向かった便の中には人がほとんどいなかった。このときの観測には GJ 504 が

ターゲットとして含まれており、また実際に無事観測することができた。観測チームは、観測後に簡易解析をして、観測の達成度を確認するが、GJ 504 の簡易解析画像からは、非常に暗い光源 (GJ 504b) が存在しているのが確認できた。一回の天文観測からは、検出した光源が背景の星か、その中心星に付随する天体かどうかを判断できない。しかし、GJ 504 は銀河面から70度ほど離れていることもあり、背景星が入ってくる確率は非常に小さい。そのため、著者は画像を見た際、「これはけっこう有望なのではないか」と感じた。また、帰国後に行なった本解析でもやはり検出が確認された。

宇宙のあらゆる天体は地球から見てそれぞれ固有の運動をしている。GJ 504 は太陽近傍にあるため、その天球面上での固有運動が非常に速い。従って、もし今回検出された光源が背景の天体であるならば、GJ 504b と GJ 504 の天球面上での位置関係は比較的早く変化する。SEEDS 観測の位置測定精度ならば、この変化を数ヶ月後の観測で確認することができる。一方、お互いが重力的に束縛されている場合、位置変化はほとんど生じない(図2参照)。そこで、GJ 504b が背景星かどうかを検証するために、我々は2011年5月に GJ 504 を再観測した。その結果、見事再検出することに成功した。このときの観測では HiCIAO の光学系

を少し変更していた結果、ピクセルスケールが変わっており、初めは重力的に束縛されていた場合に期待される位置に光源が現れずがっかりした覚えがある。しかし、その光学系の変更の影響をデータ解析時に補正した結果、背景星の場合期待される位置からは測定した位置が明らかにずれており、GJ 504bはGJ 504に束縛されている可能性が非常に高いことが分かった(図2)。それをより確かにするために、我々は2011年8月から2012年の5月の間にさらに5度観測を行なった。そうして得た合計7回の位置測定はGJ 504bが背景星ではないことを結論するためには十分なデータになった。さらに、7回の測定位置はわずかながら変化していたが、その位置変化はGJ 504を中心とするケプラー軌道で説明できることが分かった。また、その7回の観測の際は、1.2, 1.6, 2.1, 3.8 μm の波長のデータを取得したが、各波長での測光観測から求められたGJ 504bの色は惑星の様な低温天体でないとい説明できない色であった。観測に用いられた、3.8 μm の波長はHiCIAOでは使えない波長であるため、IRCSという別の赤外線カメラを用いた。著者は大学院生になって初めて解析したデータがIRCSのものであった。そのため、IRCSの特性についての知識やデータ解析の経験を有していたため、今回のデータ解析はそれほど苦にならなかった。過去に得たIRCSのデータ解析の経験やgyrochronologyの知識が今回の研究に活かされたわけであるが、これはAppleのSteve Jobsが述べた様に、過去に打った点が今につながり線になったのではないかと、著者が少しばかり感じた瞬間になった。

SEEDSは開始直後、GJ 758という恒星に対して褐色矮星または質量の大きいガス惑星に相当する伴星を発見した。それ以後、星周円盤の華やかな成果を多く発表していたが、2011年3月までは惑星探査を粛々と進める中、実は惑星は検出されていなかった。そこで、中盤に差し掛かったSEEDSプロジェクトとしてもインパクトのある惑星の検出が望まれていた。GJ 504bは、まさにそのような時期に発見されたのである。さらに、後述する様にGJ 504bはこれまで発見された系外惑星と比較して多くの興味深い特徴を有しており、非常に重要な成果となった。観測天文学は天候との戦いである。天体観測に最適な場所と知られているマウナケアといえども、毎晩晴天に恵まれる訳ではない。実際に、SEEDSでも悪天候のため観測できないとい

うことが決して少なくはなかった。この3月の観測で天候に恵まれていなければ、または何かトラブルがあれば、GJ 504を観測することはできていなかったかもしれない。我々は運がよかったのは確かだろう。しかし以下で説明する様に、我々の日頃の積み重ねがあったからこそ、無事取得したデータを惑星の発見として報告することができたのもまた事実である。

2.3 SEEDSチームの日々の活動

SEEDSは今でこそ多くの成果を論文として発表しているが、その成果を世に出せたのはSEEDSメンバーおよび、これまですばる望遠鏡に携わってきた人全ての努力の賜物である。SEEDSで用いているHiCIAOやAO188の観測装置はそれを開発するための科学研究費申請の段階から、多くの準備・作業があった。全ての例をあげることはできないが、ここでは、いくつかその作業についても説明する。

SEEDSが120夜という非常に多くの観測時間を得るには、それが本当に科学的に有益であるかどうかを審査する必要がある。その審査のためのプロポーザル準備や、計画を煮詰めるための多くの作業をこなす必要があった。また当然のことながら、完成した直後の装置は、それが期待通り働いているかどうかを検証する作業が必要になる。さらにデータの較正のための観測データを取得し、補正用のプログラムを作成する必要がある。例えば、HiCIAO観測では天体位置の測定精度が重要になるため、光学的歪みを補正するために多くの試験を行ない、慎重に議論を重ねてきた。また、HiCIAOの赤外検出器は新しい種類のもので、そのデータの較正に対しても観測チーム内で慎重に議論をして、方法を構築した。観測装置の保守・改良、データ解析方法の検討、データ解析ソフトの開発・バグ出しなどの細かい点から、全体としてのプロジェクトの進め方まで、SEEDS代表者の田村元秀教授を中心として、ほぼ毎週ミーティングを開いて対応してきた。ハワイに観測に行くと言っていると、よくうらやましがられるが、現地で観光できるようにスケジュールは組まれていない。さらに冬の観測になれば、夕方5時には出発して、朝7時に望遠鏡ドームから帰るというスケジュールであり、酸素の薄い山頂に長い間滞在しなければならない。その日のターゲットの簡易解析が終わっていなければ、宿泊所に戻った後に仕事をするこ

ある。2011年12月の観測の際には、21日から翌月の1日(つまり、正月)まで著者を含めた観測チームはマウナケアの山頂で観測をすることになり、決して楽とは言えない状況だった。

また、SEEDSの各カテゴリーでは、それぞれの設定したテーマの解明のためにそのメンバーが必要な仕事を多くこなしてきた。さらに、全体でそれぞれのカテゴリーの目的・進捗を確認するために月に1度の全体会を行い、さらに年に少なくとも1度は顔を合わせて議論を重ねてきた。その際の会議では、SEEDSには外国の研究機関の研究者も多く参加しているため、当然英語が用いられる。

このように、期待する成果をあげるために多くの作業をこなしてきたが、その中には非常に泥臭いことも多く含まれている。GJ 504bの発見を報告する論文の原稿を作成する際にも著者は、非常に細かいことも含めて一つ一つの問題を共同研究者と協力しながら検討し、つぶしていった。もちろん、このような作業は全てのプロジェクトで、またあらゆる研究で共通することであり、SEEDSに限られたことではないだろう。しかし、この記事で紹介するGJ 504bの発見を含めて、SEEDSの全ての研究成果が多く小さな積み重ねの上に成り立っていることをやはり述べておきたい。

3. GJ504bの特徴と意義

以下では、中心星GJ 504(年齢: $1.6^{+0.3}_{-0.2}$ 億年、質量: 太陽の1.2倍)を公転していることを確認したGJ 504bの特徴を説明する。まずGJ 504bの質量であるが、その近赤外線光度と年齢(中心星の年齢と等しいと仮定)を惑星の光度進化モデルと比較することで導出した(図3)。最も一般的に用いられているモデル[6]を採用した場合、GJ 504bの質量は木星質量(M_{Jup})の $4^{+4.5}$ 倍に相当する。この質量は過去直接撮像された惑星(e.g., HR 8799b[3])と比較して、最低値の一つである。この質量推定における一つの重要な注意点として、これまで発表されている全ての惑星光度進化モデルが無視できない不定性を持つことがある。特に問題な点として、惑星光度進化は、未だ十分に制限されていない惑星の熱的な初期条件(物理的には、初期エントロピー)に依存する点があげられる[7]。近年、従来想定されていたよりもガス惑星がより低温の状態から進化を

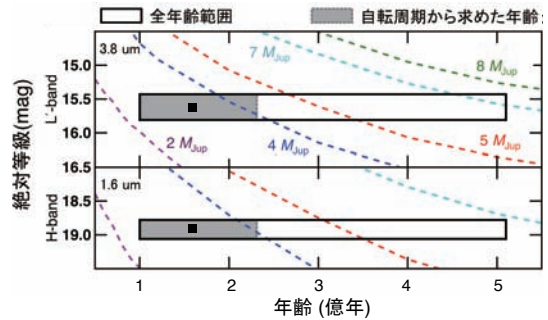


図3: 惑星の光度進化モデル[6]との比較による質量推定。破線がそれぞれ図中に示された質量の惑星の光度進化を示す。上のパネルはL-band($\sim 3.8 \mu\text{m}$)、下のパネルはH-band($\sim 1.6 \mu\text{m}$)の波長での光度進化にそれぞれ対応する。また、黒の四角は1.6億年に相当する。仮に上のパネルに着目すると、GJ 504bの質量が $2-8 M_{\text{Jup}}$ に相当することが図から分かる。本研究ではGJ 504惑星系の年齢推定として、今回用いた手法で最も直接的な手法であるgyrochronologyから推定される年齢($1.6^{+0.3}_{-0.2}$ 億年)が最も適切であると結論した。最終的には、全年齢範囲と今回用いた全ての波長の光度からの質量推定を考慮して、GJ 504bの質量を推定した。カラーの図は電子版を参照されたい。[1]の図を一部改訂。

始めるモデル(cold-startモデル)が提案された[7, 8]。仮に、そのモデルを最も有名な直接撮像された惑星の一つであるHR 8799b(年齢: ~ 3 千万年、質量: $\sim 5 M_{\text{Jup}}$)に適用した場合、惑星と褐色矮星の質量の境界を天文学的に定義する質量($13-14 M_{\text{Jup}}$)よりも推定結果が優位に大きくなる。この例にデモンストレーションされるように、初期条件不定性の影響は直接撮像された惑星の質量推定において大きな問題である。しかし、この初期条件への惑星光度進化の依存性は惑星が年をとれば収束していくことが知られており、特に年齢がおよそ1億年を超えると、設定した初期条件によらず惑星光度はほぼ同じになることが理論計算より導かれている[7, 8]。そのため、GJ 504bにcold-startモデルを適用した場合、推定される質量は惑星と褐色矮星の境界質量以下になる可能性が高い(つまりGJ 504bの場合、初期条件不定性によって生じる質量推定の不定性はおよそ $10 M_{\text{Jup}}$ 以下になる)。これは、過去に直接撮像された系外惑星と比較して、GJ 504bの質量推定のモデル不定性への依存が非常に小さく、その推定値の信頼度が非常に高いことを意味している。

また、質量推定と同様の手法でGJ 504bの有効温度を導いた結果、その有効温度はおよそ500 Kであることもわかった。この有効温度は過去直接撮像された惑

星の有効温度と比較すると、最低温の値である。GJ 504bがそのように低温であることは、惑星大気にメタンの吸収があることから確認された[9]。もう一つ興味深い特徴として、GJ 504bの近赤外での色が過去直接撮像された惑星と比べると非常に青いことがわかったが、これはGJ 504bの大気中の雲の量が過去直接撮像された惑星と比較すると少ないことを示唆している。最後に、GJ 504bは太陽型の主系列星を公転する系外惑星として最も確実な直接撮像例である。以上の様な特徴をもつ系外惑星はこれまで観測されていなかったが、本研究はそのような特徴を持つ惑星を発見し、それが実際にこの宇宙に形成される可能性があることを初めて観測的に示したということで科学的な意義が高い。GJ 504bは中心星から44 AU離れたところに発見されたが、標準的な惑星形成理論に基づくと、そのような軌道の大きな惑星が“その場”でコア集積過程に従って形成される可能性は低い。従って、その起源としてはガス円盤の重力不安定過程によって直接現在の位置に形成されたか、またはコア集積過程で内側に形成された後、他に形成されたガス惑星との力学的な相互作用の結果、外側に散乱された可能性を検討する必要がある。現在得られている観測データからはそのどれがGJ 504bの起源としてもっともらしいかを結論するのは困難である。しかし、GJ 504の惑星系を様々な観測手法で、今後さらに観測していくことでそのヒントを得ることができると我々は期待している。例えば、視線速度法や次世代の直接撮像観測装置を用いて、内側の惑星を探索することができれば、散乱が起きた場合必要な相互作用の相手の存在に対して制限を与えることができるかもしれない。また、GJ 504bの多波長測光観測や、分光観測をすることで、大気の組成について制限を与えることもその起源を明らかにするための糸口になるはずである。

4. まとめと今後

SEEDSはGJ 504bを発見するということが、系外惑星の研究を少なからず前に進めることができただろう。また、惑星や星周円盤に対する論文をそれ以外にも多く出版しているが、これらも惑星の研究の発展に大きく貢献するものになるだろう。今後は、GJ 504も含めた重要な天体を追加観測することでさらなる知

見が得られるはずである。また、まだ多く残っている未観測のターゲットを観測することで、系外惑星を新たに発見する可能性もある。さらに、今後はSEEDSの全探査結果を統計的に分析し評価した結果を発表する予定である。これらの成果は、我々の惑星に対する理解を深めるだけでなく、“地球型惑星の直接撮像”の様な挑戦的な研究課題を達成するための重要な試金石になるだろう。

謝辞

本研究は日本学術振興会からの助成金をもとに行いました。感謝致します。この記事の図は[1]に掲載されている図を改訂して作成されたが、AASから転載許可を頂いています。

参考文献

- [1] Kuzuhara, M. et al., 2013, ApJ 774, 11.
- [2] Mayor, M. and Queloz, D., 1995, Nature 378, 355.
- [3] Marois, C. et al., 2010, Nature 468, 1080.
- [4] Lagrange, A.-M. et al., 2010, Science 329, 57.
- [5] Mamajek, E. E. and Hillenbrand, L. A., 2008, ApJ 687, 1264.
- [6] Baraffe, I. et al., 2003, Astron. Astrophys. 402, 701.
- [7] Marley, M. S., 2007, ApJ 655, 541.
- [8] Spiegel, D. S. and Burrows, A., 2012, ApJ 745, 174.
- [9] Janson, M. 2013, ApJL 778, L4.