

SEEDSの5年間

田村元秀

〈東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1〉

〈自然科学研究機構・アストロバイオロジーセンター／国立天文台

〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: motohide.tamura@nao.ac.jp



太陽以外の恒星を周回する惑星（系外惑星）の確たる発見から、僅か20年でその数は2,000個にも達した。これまでの系外惑星探査は、主星と惑星を分離して撮像しない「間接法」が主たる方法であった。しかし、巨大望遠鏡・補償光学・コロナグラフなど近年の天文観測技術の発展により、少なくとも巨大系外惑星に関しては、直接に撮像し分光することが可能になった。すばる8.2 m望遠鏡においては、第1回戦略枠プロジェクトとして、高コントラストカメラHiCIAOと補償光学AO188を用いた直接観測による系外惑星および星周円盤の探査プロジェクト（SEEDS）が2009年に開始され、2015年にその主たるサーベイを完了した。これまでの同種のサーベイの中でも最も野心的な観測であり、土星～海王星あたりに位置する巨大系外惑星の直接検出や多数の円盤における空隙構造および渦巻腕構造の発見など、インパクトのある成果を上げることができた。今後は、より高次の大気乱れを補正する超補償光学SCEXAOと面分光装置CHARISによって、より内側の巨大惑星の直接観測が可能となる。また、TMTにおける地球型惑星の直接観測への道のりも見えてきた。

1. イントロダクション：系外惑星観測の進展

広い宇宙を想うとき、地球はあまりにも小さくてはかない存在に思える。しかし、その限られた場所だけが生命に許された存在の地なのか、それとも、宇宙には幾多の生命の場が存在するのか。ギリシャ時代から続くこの根源的な問いに、ようやく科学的に答えられる時代がきている。そのきっかけは何と言っても系外惑星の発見である。

2015年は、太陽以外の恒星を周回する惑星の発見¹⁾からちょうど20周年にあたる。その間にすでに約2,000個もの確認済み惑星がリストされ、ケプラー衛星による有力な惑星候補も入れると5,000個を超える系外惑星が報告されている。

ここで、太陽系の惑星を簡単に復習しておこう。われわれの太陽系は1個の恒星と8個の惑星からなる。水星、金星、地球、火星は太陽に近く、0.4-1.5 AUに位置する。ここで、1 AUは天文単位で、太陽・地球の平均距離である。それらの質量は0.06-1.0地球質量の軽い惑星であり、主成分は岩石であるため岩石惑星あるいは地球型惑星と呼ばれる。次に、木星と土星がそれぞれ5.2と9.6 AUに位置し、質量は320および95地球質量と重い。主成分は水素ガスなので（巨大）ガス惑星あるいは木星型惑星と呼ばれる。最後に、天王星と海王星がそれぞれ19および30 AUに位置し、質量は15および17地球質量と中間的である。主成分は氷なので氷惑星あるいは海王星型惑星と呼ばれる。この美しい惑星の造詣は、いわゆ

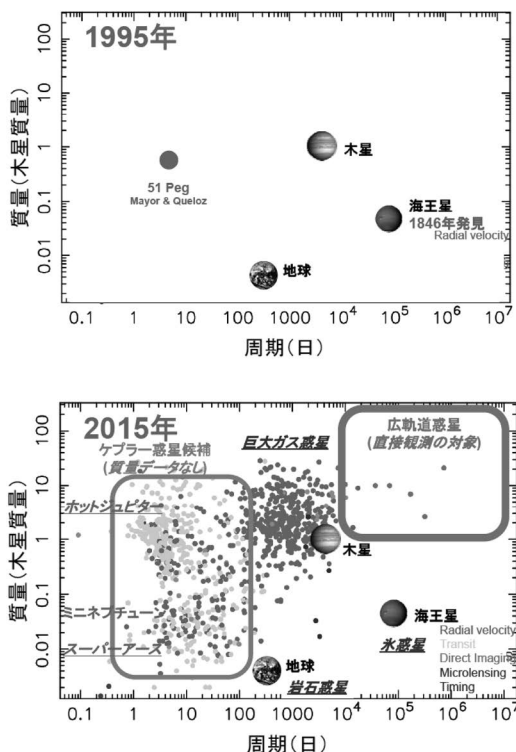


図1 惑星の周期・質量分布。(上) 1995年における太陽系内の代表的3惑星と系外惑星。(下) 2015年時点、約2,000個の系外惑星のうち周期のわかっているもの。ケプラー惑星候補については質量が不明なので、おおよその領域が示されている。直接観測が狙う広軌道惑星の領域も示す。NASA Exoplanet Archive より。

る「標準」惑星系形成理論でうまく説明されてきたが、その惑星系のお手本はもちろん太陽系一つしかなかった。

しかし、最初に発見された系外惑星を含め、太陽系内惑星とは質量こそ似ているものの、短周期で恒星のすぐ近く（水星軌道よりも内側）を周回する巨大惑星（ホットジュピター）や、同じく短周期でより軽い惑星（ミニネプチューンやスーパーアース）など、全く予想もしなかった惑星が数多く発見されてきた（図1）。

系外惑星でも、木星型惑星についてはすでに太陽系の木星と似たものが数多く見つかっている。しかし、地球や海王星とほぼ同じ質量と軌道をも

つ確実な例はまだないと言って良い。その理由は、観測手法による制限である。

系外惑星観測法は大別して、惑星そのものを検出する直接法と、惑星は直接に見ずにその影響を検出する間接法がある。直接法は、主星が惑星に比べ余りにも明るく近くにあるため技術的に困難で、まずは間接法が成功してきた。

最初に、惑星の公転運動による主星の周期的な速度ふらつきを高分散分光観測で捉えるドップラー法（視線速度法）が成功し、引き続き、惑星の公転軌道が偶然視線にある場合に周期的に起こる明るさ変化を精密測光観測で捉えるトランジット法が成功した^{2),3)}。さらに、重力レンズ効果による明るさ変化を測光観測で捉えるマイクロレンズ法⁴⁾や主星の周期性への影響を捉えるタイミング法（パルサータイミングを含む）なども成功している。これ以外にも、アストロメトリ法や偏光法などさまざまなアプローチがある^{5),6)}。

しかしながら、これらの手法にはそれぞれ検出しやすい惑星の物理パラメータがある。とりわけ、これまで大成功を収めてきたドップラー法とトランジット法では、主星により近くより重い（大きい）惑星が一番検出されやすい。特に、木星よりも遠方の主星から離れた惑星を検出するためには、その公転周期をカバーするために10年以上の年月が必要となる。

また、ドップラー法もトランジット法も直接に見るのは惑星ではなく主星なので、活動性の高い若い星や、吸収線が少なく半径の大きい重い主系列星における惑星探査には不向きである。

2. なぜ直接観測か？

上記のような理由もあり、これまでの系外惑星探査は年齢が10億年以上の太陽型星が主流であった。しかし、8 m級巨大望遠鏡の性能を活かすための補償光学の発展やハッブル宇宙望遠鏡の活用により、2000年代に入って系外惑星の直接観測の試みや原始惑星系円盤・残骸円盤の直接撮

像観測がなされるようになった。その結果、2000年代中盤から、おおかみ座GQ星bやおうし座DH星bなど巨大惑星（木星質量の10倍かそれ以上）とも呼べる例がいくつか直接撮像により発見されてきた^{7), 8)}。ただし、それらはいずれも主星から100 AU以上と遠く離れており、太陽系とは明らかに形成過程が異なるものとして、それほど大きな関心はひかなかった。

いっぽう、原始惑星系円盤については、すばる望遠鏡でぎょしゃ座AB星やHD 142527などにそれぞれ円盤構造に渦巻腕や巨大な空隙が発見されるなど、円盤の詳細構造と惑星との関係が注目されるようになった^{9), 10)}。これは、残骸円盤（現在は、原始惑星系円盤が進化し、形成された微惑星どうしが衝突して生じたダストが主体の二次円盤と考えられているもの）の微細構造と惑星との関係のアナロジーである。ただし、当時原始惑星系円盤で解明された構造は、太陽系の惑星軌道（以下、太陽系サイズと呼ぶ）よりずっと大きい(>200 AU)のものであった。

そのような中で、2008年にフォーマルハウトとHR8799という二つのA型星、かつ、残骸円盤をもつ重い恒星の周りに惑星が直接撮像により発見された^{11), 12)}。特に後者では、木星の約10倍程度の巨大惑星が一度に三つも発見され、2010年には四つ目の惑星も直接撮像により発見された(HR 8799b-e)¹³⁾。これらはいずれも円に近い軌道を持っており、主星から15–68 AU、つまり、太陽系サイズの惑星系が年齢約1億年のA型星周りに存在することが示された。

直接撮像は技術的には困難であるが、上記のように主星から離れた惑星を数少ない観測で発見することができる。ドップラー法やトランジット法のようにほぼ一周期をカバーする必要はなく、背景星でないことを確認する観測だけが必要となるためである。

さらに、惑星自身からの光子を直接に捉えるため、得られる惑星パラメータは間接法よりも多彩

である。恒星年齢と惑星の進化モデルを仮定して、明るさからその質量を求めることができる。また、多数回観測すれば、アストロメトリを行い、惑星の力学的質量を得ることもできる。多波長観測により惑星のカラーを調べ、大気成分を議論することができる。もちろん時間をかけてスペクトルを得れば、惑星大気分析も可能となり、惑星の有効温度・表面重力も得ることが（原理的には）できる。いわば究極の系外惑星観測法なのである。

3. SEEDSサーベイ

このような系外惑星研究の発展を背景にSEEDSサーベイが2009年に始まった¹⁴⁾。SEEDSでは、とりわけ年齢10億年未満の太陽型恒星とそれより重い恒星の探査に集中した。かつ、遠方惑星の形成原因となりうる円盤微細構造を描くために円盤をもつような非常に若い恒星も観測対象とした。具体的には、近傍星(NS)、ムービンググループ(MG)、残骸円盤(DD)、星形成領域(YSO)、散開星団(OC)というカテゴリにわけ、それぞれの専門家がターゲット選択から観測手法の最適化・解析・論文化までを担当した。NSカテゴリは、さらに、大質量星、M型星、白色矮星、光彩活動や空間運動から若い年齢である星などのサブカテゴリで検討を深めた。それぞれのカテゴリで約100個の天体がリストされ、合計すると430個以上の天体が観測された。このうち、約80個は円盤の探査にも使われる観測手法を用いたので、合計約500天体の惑星・円盤探査を行ったことになる。すばる望遠鏡で観測が可能な赤緯−40度以上でRバンド等級が15等より明るいものが観測対象となった。惑星探査としては、年齢100–1,000万年、1億年程度、1–10億年程度の三つの段階をカバーしており、惑星軌道進化など時間変化などを研究することもできるようになっている。SEEDSはこれまで行われた直接観測の中で最も野心的なサーベイとなった。

観測に用いた装置は当時完成直後のHiCIAO近赤外線コロナグラフカメラと補償光学AO188である。HiCIAOは赤外ナスマス焦点に設置され、 $2,048 \times 2,048$ 素子のHgCdTeアレイ（HAWAII2-RG）を用い、ピクセルスケールは0.0095 arcsec/pixelである。アレイ検出器読出エレキにはASICコントローラーを用い、フレキシブルな読み出しを可能にしている。

SEEDSプロジェクトには、すばる望遠鏡における第1回戦略枠として120夜が配分された。サーベイは2009年10月に開始され、2015年1月に一部のフォローアップ観測を除いて、所定のサーベイが完了した。その間、HiCIAO装置による時間ロス合計でも1夜未満であった。サーベイは近赤外波長のHバンド（1.65ミクロン）で行われ、有望な天体はほかの波長でフォローアップ観測が行われた。

HiCIAOでは、通常の撮像（DI）モード以外にも、偏光を用いた差分撮像（PDI）、波長の違いを利用した差分撮像（SDI）、恒星に対する回転角の差を利用した差分撮像（ADI）などを利用できる。SEEDSサーベイでは、専らADIとPDIを利用した。120夜の平均晴天率は74%で、ほぼマウナケアにおける晴天率と同じである。また、一天体あたりの積分時間は30-60分であり、従来よりも暗い惑星の検出も可能となっている。

SEEDSプロジェクトは、筆者を代表とする日本主導のプロジェクトであるが、プリンストン大学（米）やマックスプランク天文学研究所（独）など1/3は海外メンバーであり、広範な国際協力の下に推進された。メンバーは最大時には120名に達した。

4. SEEDSの結果のまとめ

SEEDSの結果の詳細については、本特集号のほかの記事に譲る。ここではその科学的成果についてごく簡単にまとめた。個々の文献もそれぞれの記事を参照されたい。

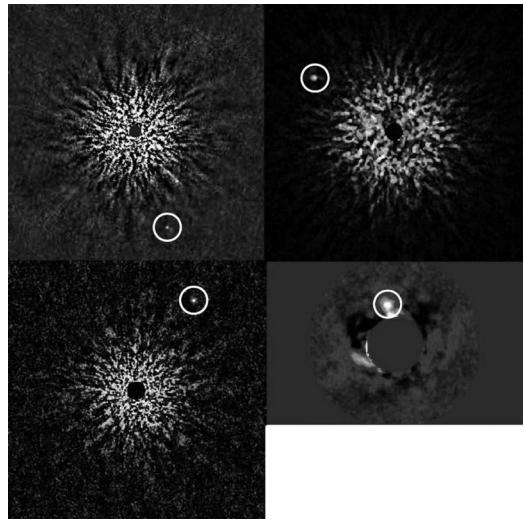


図2 SEEDSによる直接撮像により検出された惑星（候補）の画像。左上：GJ 758b、右上：アンドロメダ座カップ星b、左下：GJ 504b、右下：HD 100546b。惑星のみかけの軌道長半径はそれぞれ、1.9秒角（29 AU）、1.1秒角（55 AU）、2.5秒角（44 AU）、0.5秒角（12 AU）。

SEEDSは四つの惑星あるいはその候補の直接撮像に成功した（図2）。GJ 758b（距離16パーセク）は、G9型で1.0太陽質量の太陽型恒星を周回する10-30木星質量の天体である。見かけの軌道長半径は29 AUである。アンドロメダ座カップ星（距離52パーセク）は、B9型で2.5太陽質量の中質量恒星を周回する12.8木星質量の天体である。GJ504 b（距離18パーセク）は、G0型で1.2太陽質量の太陽型恒星を周回する3-4.5木星質量の天体である。HD 100546b（距離97パーセク）は、年齢500-1,000万年のハービックBe型星を周回する15木星質量以下の天体である。

巨大惑星の統計について、SEEDSの全サンプルを用いた結果はフォローアップの完成を待つ必要があるが、一部データを用いた初期の解析によると、10-100 AUに5-70木星質量の天体がある確率は約2%と推定される。

これ以外にも、プレアデス星団における3個の褐色矮星の撮像、逆行惑星の原因となる伴星の直

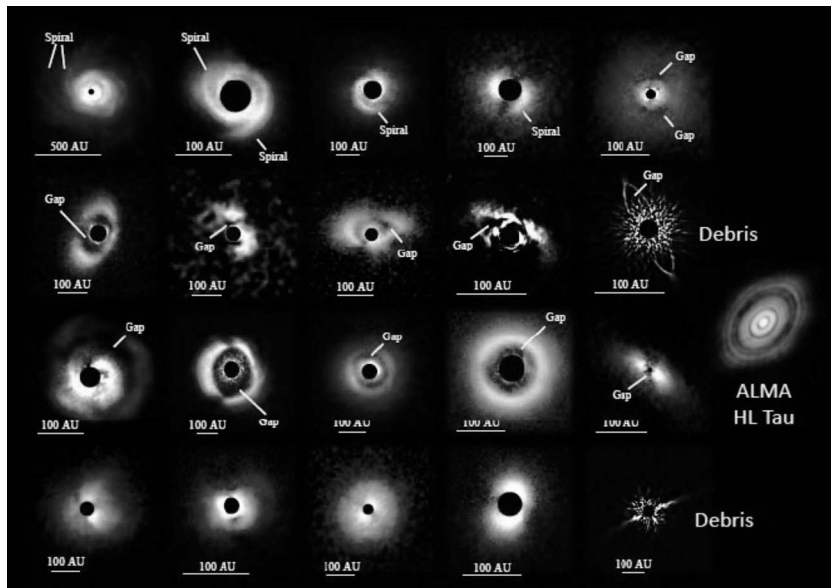


図3 SEEDSによる直接撮像で検出された円盤の画像。偏光強度を表している。Debrisと示された残骸円盤以外は原始惑星系円盤である。比較のために、ALMAの長基線キャンペーンで公開されたHL Tauの画像も示した。SEEDSの画像（近赤外線）は、円盤表面近くにあるダストによる中心星からの光の散乱光を見ている。ALMAの画像（サブミリ波）は、円盤赤道面近くにあるダストの熱放射を見ている。工藤智幸氏・次号の橋本淳氏の稿を参照。

接撮像による発見、ドップラー法の長期トレンドの原因となる伴星の発見など数多くの結果が得られ、過去の同種のサーベイを凌駕している。

さらに、円盤の詳細構造の解明については、SEEDSはほかの8 m望遠鏡による同種の観測を質・量ともに大きく上回る成果を上げている。これまでに20個以上の円盤構造を解明し、ハービック Ae型星（AB Aur, SA O206462, HD 142527, HD 169142, MWC 480, MWC 758, SR21, WLY f8）や Tタウ型星（LkCa15, PDS70, USco J1604, UX Tau, Sz91, RY Tau, GM Aur, SU Aur, GG Tau, TW Hya）、残骸円盤天体（HR 4796A, HIP 79977）の円盤の詳細構造が解明され、出版されている。

SEEDSプロジェクトによる欧文査読論文はすでに39編が出版・受理されている。

5. 今後の系外惑星観測計画

系外惑星探査の競争は激しく、直接観測につい

ては次世代の装置が今年から海外望遠鏡でも稼働し始めている。ジェミニ南望遠鏡のGPIとVLT望遠鏡のSPHEREである。いずれも大規模サーベイを既に開始しており、51 Eri bなどの初期成果も出ている¹⁵⁾。これらはHiCIAOにはない面分光機能をもつ。

いっぽう、すばる望遠鏡でも2000素子相当の超補償光学SCEXAO¹⁶⁾と面分光装置CHARIS¹⁷⁾の開発が進んでおり、前者は望遠鏡における調整中、後者は2016年度からの稼働を計画している。次々と最新技術を投入できるテストベッドとも言えるSCEXAOの特徴を活かして、より先進的なコロナグラフを用い、主星のごく近傍（回折限界距離）まで迫ることができよう。

このような直接観測のほか、すばる望遠鏡では地球型惑星を検出するための高精度赤外線分光器IRD¹⁸⁾の開発も進んでいる。波長校正のための光周波数コム、赤外ファイバー、高感度赤外線

検出器など最先端赤外線技術を展開した装置となった。これによって、太陽近傍の赤色矮星（M型星）周りの地球型惑星候補が多数検出されるだろう。すばる望遠鏡で培われてきた直接観測の技術を、現在建設中のTMT 30 m望遠鏡に応用することによって¹⁹⁾、第二の木星ならぬ、生命の兆候を含む第二の地球探しが実現できると期待される。

謝辞

SEEDSプロジェクトは、HiCIAOおよびAO開発メンバー、SEEDSメンバー、すばる望遠鏡ビルダー、ハワイ観測所およびすばる室メンバーの貢献がなければ成り立ちませんでした。心より感謝申し上げます。また、太陽系外惑星探査プロジェクト室やアストロバイオロジーセンターのメンバーにも日頃のサポートに御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Mayor M., Queloz D., 1995, *Nature* 378, 355
- 2) Charbonneau D., et al., 2000, *ApJ* 529, L45
- 3) Henry G. W., et al., 2000, *ApJ* 529, L41
- 4) Bond I. A., et al., 2004, *ApJ* 606, L155
- 5) 田村元秀, 2015, 「太陽系外惑星」, 日本評論社
- 6) 田村元秀, 2014, 「第二の地球を探せ! —太陽系外惑星天文学入門」, 光文社
- 7) Itoh Y., et al., 2005, *ApJ* 620, 984
- 8) Neuhauser R., et al., 2005, *A&A* 435, L13.
- 9) Fukagawa M., et al., 2004, *ApJ* 605, L53
- 10) Fukagawa M. et al., 2006, *ApJ* 636, L153
- 11) Kalas P., et al., 2008, *Science* 322, 1345
- 12) Marois C., et al., 2008, *Science* 322, 1348
- 13) Marois C., et al., 2010, *Nature* 468, 1080
- 14) Tamura M., 2009, *AIP Conf. Proc.*, 1158, 11
- 15) Macintosh B., et al., 2015, *Science* 350, 64.
- 16) Jovanovic N., et al., 2015, *PASP* 127, 890
- 17) Groff T. D., et al., 2014, *Proc. SPIE* 9147, id. 91471W 10 pp.
- 18) Kotani T., et al., 2014, *Proc. SPIE* 9147, article id. 914714 12 pp.
- 19) Matsuo T., et al., 2012, *Proc. SPIE* 8446, article id. 84461K, 8 pp.

Five Years of SEEDS

Motohide TAMURA

*University of Tokyo / ABC & NAOJ of NINS,
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: About 2000 confirmed exoplanets have already been discovered and their diversities are extraordinary. Most of the exoplanets discovered so far are detected by indirect methods because the direct imaging of exoplanets needs to overcome the extreme contrast between the bright central star and the faint planets. Using the large Subaru 8.2-m telescope, the most ambitious high-contrast direct imaging survey to date for giant planets and planet-forming disks has been conducted, the SEEDS project.