

1. 太陽系外惑星—発見20年で見えてきたもの

田村元秀*

1. はじめに

「この広い宇宙で地球だけが特別の存在なのか？それとも第二の地球はありふれた存在で、そこには生命がいるのではないか？」人類にとって根源的とも言えるこの問いは、2000年以上前の哲学者たちも抱いていたが、これに対する科学的な答えを現在の私たちもまだ知らない。

しかし1995年の太陽以外の恒星の周りの惑星（系外惑星）の発見を契機として、この状況は一変した。太陽系内に留まらず、無数の恒星の周りに地球に似た惑星を探し、そこに生命の証拠を科学的に求めることができる時代が到来した。実際、これを契機に、世界中で系外惑星を対象とする多種多様な天文観測が行われるようになった。その発見数だけに着目しても、20年足らずの短い期間で現在までに確認された系外惑星は既に1800個程度もある。有力な候補まで入れると5000個を超える。

発見数だけでなく、この20年において特筆すべき内容は本稿ではカバーしきれないほど数多いが、マイルストーンの第一は地上巨大望遠鏡による直接観測、第二はケプラー衛星（第4節で詳述）による多数の間接的検出およびこれが初めて可能にした惑星の統計的議論である。本講演では、この2つのテーマを扱う。太陽系外惑星に関する一般向けの幅広い解説としては、田村（2014）がある。

2. 多様な探査手法で発見された多様な系外惑星たち

系外惑星を観測することは容易ではない。もっとも近い恒星でも約1.3パーセク（1パーセクは約 3×10^{16} m,あるいは、地球・太陽の距離 [$1 \text{ au} = 1 \text{ 天文単位}$, 約 1.5×10^{11} m] の約20万倍)も離れており、太陽系内の惑星と比べて数十万倍も遠くにあるからである。現在の技術では探査機を送ることは難しいため、その観測は望遠鏡を用いた天文学的手法に限られる。しかし、その観測の試みは意外にも古く、例えば、アメリカのヴァンデカンブらによって1930年代から数十年にもわたる長期的な探査も行われていた。しかし、いずれも失敗に終わった。

太陽系を10パーセクの距離から眺めた場合、惑星の代表として木星と地球を考えると、太陽との角距離とコントラスト（惑星と太陽との明るさの比）は、それぞれ、0.5秒角と 5×10^8 、および、0.1秒角と 5×10^9 になる。ただし、コントラストは可視光波長で惑星反射光を見たものである。一方、赤外線波長で惑星の熱放射を検出する場合、コントラストは 5×10^7 と 7×10^6 となる。惑星と恒星を空間的に見分けることは現在の技術では可能になっているが、コントラストがあまりにも大きいため、地球大気・望遠鏡・光学系などによる主星の明るい光の広がりによって惑星光が隠されてしまう。あたかも、遠方の灯台のサーチライトのそばで、仄かに光る蛍を見つけるようなものである。そこで、惑星からの光を主星と区別して直接撮像するのではなく、惑星が主星におよぼす影響を間接的に捉える手法が先に成功した。

代表的な系外惑星検出方法としては、(1) 惑星の引力による主星のふらつきを分光的に測定する手法（視線速度法、ドップラー法とも呼ぶ）、(2) 主星の前面を惑星が通過する際の明るさの変化を精密に捉え

* 東京大学大学院理学系研究科・国立天文台。
現所属：自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター。

tamura@nao.ac.jp

© 2018 日本気象学会

る手法（トランジット法）、（3）重力レンズの効果を利用する手法（マイクロレンズ法）、（4）主星の周期的シグナルの惑星公転による時間変化を捉える手法（タイミング法、パルサー法も含む）、がある。これらはいずれも惑星そのものを直接に見分けて観測しているのではないため、間接法である。

最初に成功したのはドップラー法である。たとえば、木星の公転運動により、太陽は約12 m/s でふらつく。現在の技術では、人が歩く速さで恒星が運動することさえ検出できる。1995年のスイスのマイヨールとケロッツによる普通の恒星まわりの最初の系外惑星の発見もこの手法による。新天体は木星の重さの約半分の巨大惑星だったが、何よりも驚きは、その公転周期がわずか約4日で、主星からわずか0.05 auの距離に位置することであった。太陽系でもっとも公転周期の短い水星でも、周期は約88日（軌道長半径は0.4 au）である。新惑星は恒星に近いため表面温度が1000 Kを超える灼熱の木星（ホット・ジュピター）と考えられる。

2000年には、別の観測方法であるトランジット法が成功した。惑星の軌道面が恒星と地球を結ぶ視線にあるときに、いわば惑星のシルエットをとらえる。この完全に独立な2つの間接法によって惑星の存在が確認されたことにより系外惑星の存在は疑いないものとなった。さらに、両方のデータを併せることにより惑星の半径と質量が求められ、惑星密度を導き、理論と比較して惑星の内部構造に迫ることができる。最近では、トランジット分光観測や赤外線観測から、惑星大気の組成や温度構造を調べることで可能になった。

現在では、それ以外の間接法である、マイクロレンズ法、アストロメトリ法、タイミング法も成功している。

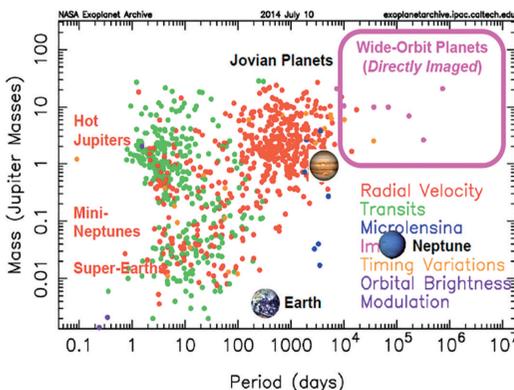
このように多様な天文観測手法で発見された系外惑星は、宇宙に「新世界」があることを教えてくれた。なかでも、水星軌道（公転周期88日）よりも内側に相当する恒星のごく近傍を周回する高温の惑星の存在は想定外であった（第1図）。質量に応じて、ホット・ジュピター、ミニ・ネプチューン、スーパーアースと呼ばれている。スーパーアースは質量が地球より大きい10倍程度以下の惑星の総称で、既に100個以上（ケプラー衛星からの候補は800個以上）発見されている。ほぼ地球サイズの惑星候補もケプラー衛星により300個以上報告されている。このように惑星の新世界が開拓された結果、太陽系が標準的な惑星系の姿かどうかは今後の観測を待たねばならない状況となっている。

しかしながら、これらの系外惑星の存在は、いずれも『間接的』方法によって実証されてきたものである。間接観測の成功後も、長らく直接観測は未成功であった。

3. 第二の木星の直接撮像と惑星誕生現場の解明に成功した SEEDS プロジェクト

系外惑星の直接観測については、2004年頃からいくつかの候補天体があったが、いずれも主星から100 au以上と遠く、太陽系と同列に論じることは難しかった。2008年から、ようやく太陽系サイズや惑星形成論で期待される降着円盤のサイズ（100 au以内）の軌道にある系外惑星が撮像されてきた。これらはいずれも木星質量の約10倍程度かそれ以上という超巨大惑星であったが、太陽系では質量のもっと小さい氷惑星しか存在しないような遠方に存在する。これら遠方巨大惑星と先にのべたホット・ジュピター等の主星に近接した惑星は新しい種類の惑星であるが、現在、この遠方惑星を開拓しているのが、すばる望遠鏡によるSEEDSプロジェクト（Strategic Explorations of Exoplanets and Disks with Subaru; Tamura and SEEDS team 2009）である。

SEEDSは、太陽系外惑星とその形成現場を直接観測によって研究するために、新規に開発された高コントラスト観測装置 HiCIAO（High Contrast Instrument for the Subaru Next Generation Adaptive Optics）と補償光学系 AO188（188-Element Adaptive



第1図 系外惑星の公転周期（日）と質量（単位：木星質量）の分布図。発見方法により色分けしている。

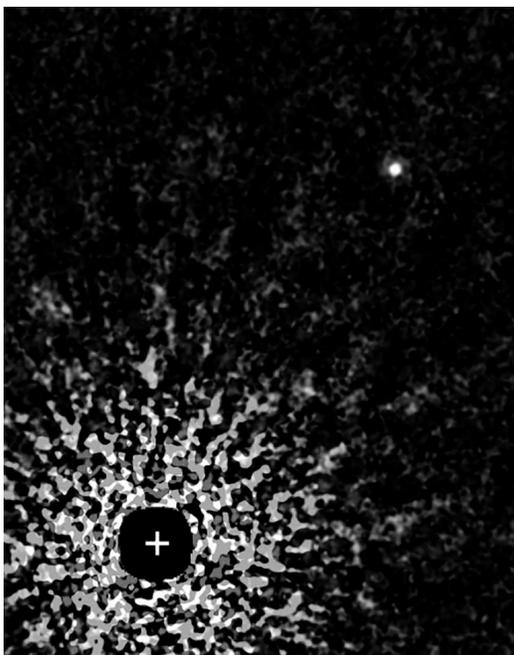
Optics) を用いて、2009年から開始されたすばる望遠鏡における戦略的観測プロジェクトである。国内外の約120人のメンバーが参加している(研究代表者: 田村元秀)。褐色矮星を除いた普通の恒星まわりの太陽系サイズの系外惑星系の直接撮像例はまだ10例に満たないが、そのうち3例の報告が SEEDS プロジェクトによるものである。

なかでも、2013年8月に公表された GJ 504 b という太陽型星の惑星は、最小質量が3木星質量と、直接撮像された惑星の中では最も軽い惑星の発見となった(第2図)。地球から約60光年の距離にあり、軌道長半径は約44 au である(Kuzuhara *et al.* 2013)。直接観測された惑星の質量は、測定された明るさを理論進化モデルと照合して推定するが、結果の不定性は若い惑星ほど大きい。GJ 504 b 以前に直接観測で検出されていた系外惑星はいずれも非常に若いので推定質量の幅も大きく、用いるモデルによっては推定質量が14木星質量以上となり、惑星ではなく褐色矮星(重水素の核融合で発熱し得る天体)である可能性を排除できな

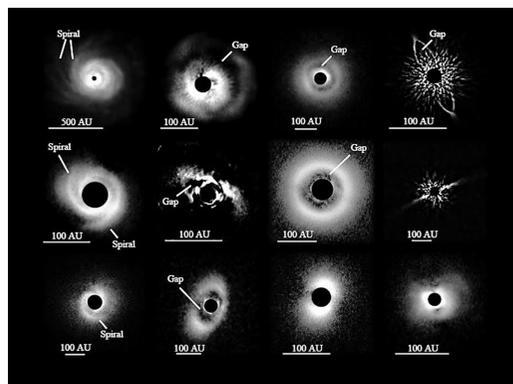
かった。しかし GJ 504 b は年齢2億年と比較的年老いているので、用いるモデルによる質量推定の不定性は小さい。すなわち、GJ 504 b は用いる天体光度進化モデルによらず惑星と呼べる唯一の撮像された系外惑星である。更に興味深いことに、これ以外に撮像された惑星はいずれも赤い近赤外線カラーを示すが、GJ 504 b のみ青いカラーを示す。木星も同じ傾向があるので、この意味でも第二の木星と呼べるだろう。

さらに、SEEDS プロジェクトでは惑星の誕生現場である原始惑星系円盤と残骸円盤の直接観測も進めている。これらの円盤は中心星の反射光で輝いているため、反射光の偏光を捉える高コントラスト観測が有効である。これにより、これまで観測できなかった中心星のごく近く(0.1秒角)の円盤を捉え、太陽系サイズの微細構造を調べることが可能になった。その結果、多数の円盤において空隙構造や渦巻構造を発見した(第3図)(Hashimoto *et al.* 2011; Thalmann *et al.* 2010; Muto *et al.* 2012; Hashimoto *et al.* 2012; Kusakabe *et al.* 2012; Mayama *et al.* 2012; Grady *et al.* 2013; Follette *et al.* 2013)。これらの構造は、惑星と円盤の相互作用によって生じうるため、惑星存在の兆候と考えることもできる。実際、そのうちの数天体では円盤内に惑星候補も報告されている(Kraus and Ireland 2012; Quanz *et al.* 2013)。

こうして直接観測から得られた巨大惑星の情報と惑星の兆候と思われる円盤構造を結び付けることによって、円盤から巨大惑星が生まれる過程に制限を付けることができるだろう。SEEDS サーベイが完成することによって、このような遠方惑星の統計と成因の解明



第2図 すばる望遠鏡とHiCIAOカメラで直接に撮像された「第二の木星」GJ 504 b (右上の点状天体)。中心の明るい主星からの光(左下)の影響は抑制されている。+は主星の位置で、主星・惑星の距離は約44 au。クレジット: 国立天文台。



第3図 すばる望遠鏡とHiCIAOカメラで直接に撮像された若い恒星のまわりの円盤。クレジット: 国立天文台。

が期待される。また系外惑星の発見にとどまらず、そのスペクトルを高コントラストで分光観測し、大気中の一酸化炭素と水蒸気を発見することにも成功している (Konopacky *et al.* 2013)。

4. ケプラー衛星によるトランジット観測の展開とハビタブル惑星

大気の揺らぎの影響の無い宇宙空間からの観測は、地上に比べて10倍以上もの精密なトランジット測光を可能にする。2009年3月に打ち上げられたケプラー衛星は、はくちょう座の方向の約15万個の星の明るさの変動を測る最強のトランジット観測装置である (Borucki *et al.* 2011)。2013年1月までに2036個の恒星を回る2740個の惑星が公表された。第4図はそれらの半径と表面温度 (中心星の明るさと惑星の公転周期から推定) の分布である。惑星の質量が軽いほど、また、公転周期が長いほど検出が難しいため、統計的議論には、公転周期を限り、検出限界を考慮した補正が必要となる。ケプラー衛星の観測により初めて、公転周期が85日未満 (太陽系では水星より内側に相当) の惑星に限ったものであるが、地球型惑星を含む系外惑星の質量別頻度が得られ (Fressin *et al.* 2013; Howard *et al.* 2012; Ford *et al.* 2011)、このような短周期惑星の頻度 (恒星100個あたり) は、木星型惑星で約2個、海王星型惑星およびスーパーアースで約20個、地

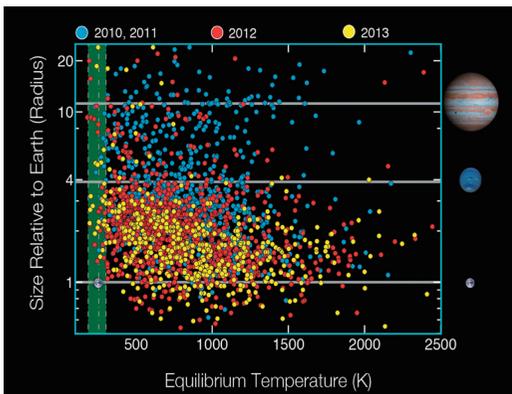
球型惑星で約17個となり、巨大惑星と比べ軽い惑星の方が多かった。第二の地球と呼べるような周期が365日程度で地球質量の惑星はまだ報告されていないが、長い期間の観測により検出可能となる。そこで、当初の3.5年の運用予定に加えてさらに3.5年の延長が許可されたところであったが、2013年に入って姿勢系トラブルがあり、8月には系外惑星の観測が断念されたのが残念である。しかし、全てのデータの公開によって、ハビタブルゾーンにある地球型惑星の統計にまで言及できることが期待されている。

これまでに発見されたハビタブル惑星は、地上観測などにより既に15個程度、ケプラー衛星による候補が90個程度報告されている。たとえば、ケプラー-186という太陽質量の0.5倍の恒星 (赤色矮星) の周りには、ほぼ地球半径のハビタブル惑星が発見された (Quintana *et al.* 2014)。また、映画スターウォーズの舞台となったような、連星を周回するハビタブル惑星 (Kepler-47 (AB) c) も実際に発見されている (Orosz *et al.* 2012)。

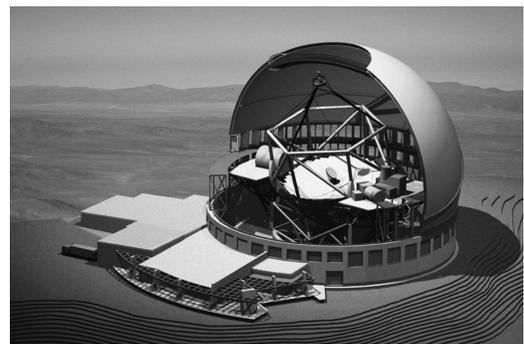
5. 将来計画

第二の地球を探索する観測は今後10年で大きく進展すると考えられている。地球型系外惑星の大気を調べ、水・酸素など地球大気に特徴的なスペクトル、あるいは、植物のクロロフィルのスペクトルを観測し、生命存在の証拠をリモートセンシングにより捉えることは、次世代望遠鏡の大きな使命と言える。そのためには、惑星を直接にとらえることが不可欠である。

それらを実現するための次世代望遠鏡と観測装置の検討が進みつつある。日本でも、2021年に完成予定の口径30 mの次世代超巨大望遠鏡 TMT (Thirty



第4図 ケプラー衛星が発見した惑星候補 (丸印) とハビタブル惑星候補を、惑星半径と表面温度を軸にプロットしたもの。丸印の色分けは発見年を表わす。左側の緑色影領域がハビタブルゾーン (表面に液体の水が存在可能) に対応する。クレジット: NASA。



第5図 TMT望遠鏡の完成想像図。クレジット: TMTプロジェクト。

Meter Telescope ; 第5図) のための系外惑星専用観測装置の検討が行われている (Matsuo *et al.* 2012). それ以降の計画である JTPF (Japanese Terrestrial Planet Finder ; JTPF WG 2004) や WFIRST (Wide-Field Infrared Survey Telescope ; Content *et al.* 2013) などのためのコロナグラフ (中心星の光を遮る装置) の基礎開発も活発である。また, 近未来では, すばる望遠鏡のための地球型惑星探査装置 IRD (InfraRed Doppler instrument for the Subaru telescope; Tamura *et al.* 2012) や惑星分光装置 CHARIS (Coronagraphic High Angular Resolution Imaging Spectrograph ; Peters-Limbach *et al.* 2013) の開発が急ピッチで進んでいる。さらに, 姿勢制御装置故障後のケプラー衛星の再利用により黄道面に沿った惑星探査を進めるプロジェクト K2やケプラーの後継機とも言える次期トランジット衛星 TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite ; 2018年打上げ予定) も進行している。IRD や TESS や K2は, 将来の第二の地球の撮像の観測対象を発見するために不可欠であろう。

このように系外惑星研究は, 今後も天文学・惑星科学において重要な発見をもたらす事が期待されるだけでなく, アストロバイオロジーという「宇宙における生命」の研究に不可欠な情報を提供する基盤分野となるだろう。

参考文献

- Borucki, W. J. *et al.*, 2011 : Characteristics of Kepler planetary candidates based on the first data set. *Astrophys. J.*, **728**, doi:10.1088/0004-637X/728/2/117.
- Content, D. A. *et al.*, 2013 : Wide field instrument preliminary design for the Wide Field Infrared Survey Telescope. *Proc. SPIE*, **8860**, doi:10.1117/12.2025496.
- Follette, K. B. *et al.*, 2013 : Mapping H-band scattered light emission in the mysterious SR21 transitional disk. *Astrophys. J.*, **767**, doi:10.1088/0004-637X/767/1/10.
- Ford, E. B. *et al.*, 2011 : Transit timing observations from Kepler. I. Statistical analysis of the first four months. *Astrophys. J. Suppl.*, **197**, doi:10.1088/0067-0049/197/1/2.
- Fressin, F., G. Torres, D. Charbonneau, S. T. Bryson, J. Christiansen, C. D. Dressing, J. M. Jenkins, L. M. Walkowicz and N. M. Batalha, 2013: The false positive rate of Kepler and the occurrence of planets. *Astrophys. J.*, **766**, doi:10.1088/0004-637X/766/2/81.
- Grady, C. A. *et al.*, 2013 : Spiral arms in the asymmetrically illuminated disk of MWC 758 and constraints on giant planets. *Astrophys. J.*, **762**, doi:10.1088/0004-637X/762/1/48.
- Hashimoto, J. *et al.*, 2011 : Direct imaging of fine structures in giant planet-forming regions of the protoplanetary disk around AB Aurigae. *Astrophys. J. Lett.*, **729**, doi:10.1088/2041-8205/729/2/L17.
- Hashimoto, J. *et al.*, 2012 : Polarimetric imaging of large cavity structures in the pre-transitional protoplanetary disk around PDS 70: Observations of the disk. *Astrophys. J. Lett.*, **758**, doi:10.1088/2041-8205/758/1/L19.
- Howard, A. W. *et al.*, 2012 : Planet occurrence within 0.25 AU of solar-type stars from Kepler. *Astrophys. J. Suppl.*, **201**, doi:10.1088/0067-0049/201/2/15.
- JTPF WG, 2004 : JTPF 太陽系外地球型惑星検出ミッション. http://ironkon.jp/2004pro/files/hikari_sekigai_group/doi_ori/JTPF041213.pdf (2016.11.03閲覧).
- Konopacky, Q. M., T. S. Barman, B. A. Macintosh and C. Marois, 2013 : Detection of carbon monoxide and water absorption lines in an exoplanet atmosphere. *Science*, **339**, doi:10.1126/science.1232003.
- Kraus, A. L. and M. J. Ireland, 2012 : LkCa 15: A young exoplanet caught at formation? *Astrophys. J.*, **745**, doi:10.1088/0004-637X/745/1/5.
- Kusakabe, N. *et al.*, 2012 : High-contrast near-infrared polarization imaging of MWC480. *Astrophys. J.*, **753**, doi:10.1088/0004-637X/753/2/153.
- Kuzuhara, M. *et al.*, 2013 : Direct imaging of a cold Jovian exoplanet in orbit around the Sun-like star GJ 504. *Astrophys. J.*, **774**, doi:10.1088/0004-637X/774/1/11.
- Matsuo, T. *et al.*, 2012 : Second-Earth Imager for TMT (SEIT): Concept and its numerical simulation. *Proc. SPIE*, **8446**, doi:10.1117/12.926039.
- Mayama, S. *et al.*, 2012 : Subaru imaging of asymmetric features in a transitional disk in upper Scorpius. *Astrophys. J. Lett.*, **760**, doi:10.1088/2041-8205/760/2/L26.
- Muto, T. *et al.*, 2012 : Discovery of small-scale spiral structures in the disk of SAO 206462 (HD 135344B): Implications for the physical state of the disk from spiral density wave theory. *Astrophys. J. Lett.*, **748**, doi:10.1088/2041-8205/748/2/L22.
- Orosz, J. A. *et al.*, 2012 : Kepler-47: A transiting circumbinary multiplanet system. *Science*, **337**, doi:10.1126/science.1228380.

- Peters-Limbach, M. A. *et al.*, 2013 : The optical design of CHARIS: An exoplanet IFS for the Subaru telescope. *Proc. SPIE*, **8864**, doi:10.1117/12.2024070.
- Quanz, S. P., A. Amara, M. R. Meyer, M. A. Kenworthy, M. Kasper and J. H. Girard, 2013 : A young protoplanet candidate embedded in the circumstellar disk of HD 100546. *Astrophys. J. Lett.*, **766**, doi:10.1088/2041-8205/766/1/L1.
- Quintana, E. V. *et al.*, 2014 : An Earth-sized planet in the habitable zone of a cool star. *Science*, **344**, doi:10.1126/science.1249403.
- 田村元秀, 2014 : 第二の地球を探せ! — 「太陽系外惑星天文学」入門. 光文社新書, 光文社, 246pp.
- Tamura, M. and SEEDS team, 2009: Subaru strategic exploration of exoplanets and disks with HiCIAO/AO188 (SEEDS). *AIP Conference Proceedings*, **1158**, 11, doi:10.1063/1.3215811.
- Tamura, M. *et al.*, 2012 : Infrared Doppler instrument for the Subaru Telescope (IRD). *Proc. SPIE*, **8446**, doi:10.1117/12.925885.
- Thalmann, C. *et al.*, 2010 : Imaging of a transitional disk gap in reflected light: Indications of planet formation around the young solar analog LkCa 15. *Astrophys. J. Lett.*, **718**, doi:10.1088/2041-8205/718/2/L87.
-