

# TMTにおける地球型系外惑星の観測的研究

松尾太郎

〈京都大学大学院 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: matsuo@kusastro.kyoto-u.ac.jp



太陽系外惑星科学は、近年の技術革新に伴って、急速に発展している。Thirty Meter Telescope (TMT) がファーストライトを迎える2022年には、近傍星の周りでの低質量惑星の探査が進み、生命を宿す可能性のあるハビタブル惑星も多数発見されていることが期待される。本稿では、TMTまでの展望を踏まえて、TMTがもたらす新しい科学的知見についてレビューする。その中で特に、TMTにおける地球型系外惑星の直接撮像と低・中分散分光観測による特徴づけについて掘り下げたい。そのうえで、太陽系外惑星の科学的意義と照らし合わせながら、本研究分野におけるTMTの役割についても紹介する。

## 1. 太陽系外惑星の科学的意義

1995年に太陽以外の恒星を周回する惑星（系外惑星）が発見されて以来<sup>1)</sup>、現在までに1,000を超える系外惑星が確認されている<sup>2)</sup>。これらの発見は、多様な惑星系の姿を次々と明らかにし、太陽系の比較対象をもたらすことによって、私たちの宇宙観を大きく変えることになった。1995年以前まで太陽系に閉じていた惑星形成論は見直されることを余儀なくされ、「汎惑星系形成論」の構築が試みられている。また、八つの太陽系惑星を詳細に調べる惑星科学は1,000を超える個々の惑星を対象にした「系外惑星科学」という新しい体系的テーマへと発展しつつある。そして、系外惑星分野における究極的な目標が、「宇宙における生命」の発見である。なぜなら、地球生命を宇宙の中の一つの個体として捉え、地球生命の相対化をもたらすからである。その結果、私たちの生命観をも変えることにつながるだろう。宇宙における生命の探査は、急速な技術発展を通して現実味を帯びつつある。

このように、太陽系外惑星という新しい学問領

域は、次の三つの科学的テーマを中心に相互発展する。

1. 太陽系を含めた多様な惑星系の起源を理解する汎惑星形成・進化論
2. 惑星での物理現象を包括的に理解する系外惑星科学
3. 地球生命における居住可能性の理解と宇宙における生命現象の探査

後述のように、TMTはこのいずれの科学的テーマにも新しい知見を与える。その中でも特に、宇宙における生命探査の近未来の計画は、スペースからの4-8 m級のコロナグラフ専用望遠鏡<sup>3)</sup>あるいは地上からの30 m級望遠鏡<sup>4)</sup>が有望である。前者の計画は、Terrestrial Planet Finder (TPF) 計画<sup>3)</sup>に代表されるように、現時点では無期限延期であり、TMTがその最初の一步になる。以下、本稿では光赤外分野において最重要の科学的テーマの一つである地球型系外惑星に焦点を当てて議論を進める。

## 2. 2022年までの展望

TMTがファーストライトを迎える2022年まで

の展望を系外惑星の「探査」と「特徴づけ」の観点から、TMTへの展開を交えつつ述べる。これまで、系外惑星の探査は、惑星の分布<sup>5)</sup>を明らかにすることによって、主に惑星形成論および軌道進化論を発展させている<sup>6),7)</sup>。また、将来の特徴づけのための観測候補天体を供給するという点においても重要な役割を果たしている。一方、惑星の特徴づけは、個々の惑星で起こる物理現象や惑星の化学的性質を観測的に明らかにすることによって、惑星形成や進化の理解を深め、また新しい科学的テーマである系外惑星学を開拓しつつある。

## 2.1 系外惑星の探査

系外惑星を対象にした新しい学問を急速に発展させたのが、惑星の存在を間接的に明らかにした間接法の進展である。間接法とは、惑星が与える主星への影響を、主星の光を観察することで見えない惑星の特徴を詳細に調べる方法である。その代表例が、視線速度法、トランジット法、マイクロレンズ法、アストロメトリ法である。この中で、視線速度法とトランジット法は、2022年のTMTの科学的運用までに、地球質量の惑星の探査において重要な役割を果たすと考えられる。発見された惑星は、TMTにおける重要な観測候補天体になる。初めに、視線速度法とトランジット法を中心に紹介する。

視線速度法は、惑星の重力による主星のふらつき（速度）を視線方向に精密に調べることによって、惑星の質量および軌道を決定する方法である。これまでに、ESO/HARPS—High Accuracy Radial velocity Planet Searcher<sup>8)</sup>に代表される、4-8 m級望遠鏡に搭載された超高安定な可視光高分散分光装置は、1 m/sの視線速度変化の測定精度を達成しており、主星極近傍（ $\sim 0.2$  AU以内）のハビタブルゾーン（HZ：惑星表層に液体の水を有する理論的な領域）にある約2倍の地球質量の惑星検出に成功している<sup>9)</sup>。また、2016年に観測を開始する、VLT/ESPRESSO—Echelle Spec-

trograph for Rocky Exoplanet- and Stable Spectroscopic Observationsは、これまでの観測精度を10倍向上させることで、GK型星周りのHZにある地球型惑星の検出も原理的に可能にする計画である<sup>10)</sup>。ただし、恒星活動による見かけの視線速度変化（Jitter）は、観測誤差として寄与し、惑星検出に影響を及ぼす<sup>11)</sup>。これまでに、Alpha Cen Bの高頻度観測から主星のJitterの影響を低減させることによって、周期3日、振幅50 cm/sの視線速度変化の検出に成功しているが<sup>12)</sup>、1年の観測期間にわたって、高精度な観測が実現できるかは今後の検討課題である。このように、光子数の増加による測定精度の向上は難しいため、TMTへの展開は大口徑を活かした暗い恒星周りへの視線速度観測が中心になるだろう。その結果、4-8 m級望遠鏡での結果と合わせて近傍星における惑星探査の完遂が期待される。後述のように、視線速度観測に期待される役割は、近傍星周りの惑星の候補天体をTMTへ提供することであると考える。

FGK型星の可視光高分散分光観測から、最近強い関心を集めているM型星の赤外線高分散分光観測に話を移す。M型星を観測する場合には可視光では暗いので、従来の可視光高分散装置では十分な精度が達成できない。そこで、すばる望遠鏡のIRD—Infrared Doppler計画のように、4-8 m級望遠鏡の近赤外線高分散分光装置において惑星探査の計画が進められている<sup>13),14)</sup>。主星が晩期型星の場合、主星が軽いことやHZが主星の近くに移動するため、必要な測定精度がFGK型星に比べておよそ1桁程度緩和される。その結果、従来の測定精度1 m/sで晩期型星周りのHZにある1地球質量の惑星を検出することができる。また、M型星を観測する別の利点は、FGK型星と比べて地球近傍に豊富に存在することである。TMTから観測可能なM型星は、10 pc以内に100以上あり、TMTに最適な候補天体を提供することができる。

トランジット法は、日食と同じように、偶然に主星と観測者の直線上に惑星が重なることによる主星の減光を観察する方法で、惑星の大きさが測定できる。NASAのKepler衛星は、はくちょう座方向の視野 $10 \times 10$ 度内の3,000光年までの距離にある156,000の星を一度に超精密に測光を行い、惑星半径に関する統計的な研究が進められた<sup>15)</sup>。特に、2-4地球半径の小さな惑星は、恒星が晩期になるにつれて、その存在割合が大きくなり、早期M型星周りではその割合が30%にもなることがわかった。また、最近では、HZ内にある地球半径の惑星(Kepler-186f)の発見が報告された<sup>16)</sup>。しかし、Kepler-186fを含むKepler衛星で発見された多くの地球半径の惑星は地球から遠方であり、TMTでのフォローアップに向かない。そこで、2010年代後半から2020年代の前半にかけて、トランジット観測専用の衛星、TESS(Transiting Exoplanet Survey Satellite)<sup>17)</sup>およびPLATO(Planetary Transits and Oscillations of Stars)<sup>18)</sup>が打ち上げられる。これらの衛星は、Kepler衛星の視野を1領域に固定した観測とは異なり、全天を高頻度に観測する。これによって、近傍の明るい恒星の周りがある、主として周期30日以内の地球半径の惑星の発見が期待される。これらの惑星は、TMTで特徴づけできる距離にあり、重要な観測候補天体になるだろう。

このように、視線速度法およびトランジット法は、TMTがファーストライトを迎える2022年までに

1. 近傍のFGK型星周りのHZより内側にある岩石惑星を含めた低質量惑星
2. 近傍のM型星周りのHZにある低質量惑星の分布を明らかにすることが期待される。特に、2番目のM型星周りの惑星探査は、先に述べたように、地球近傍においてM型星の数が豊富であることやM型星周りで低質量天体の割合が増加することから、TMTにおいて低質量惑星の観測可能な候補天体数が確保されるだろう。その結

果、後節で述べるように、TMTに搭載される極限補償光学装置において、惑星の大気組成および表層環境を詳細に調べることにより、M型星周りでの生命居住可能性や宇宙生命を探索することが可能である。また、いくつかのトランジット惑星については、視線速度法の追観測による質量から密度の情報を引き出すことができる。

今後重要な役割を果たすことが期待される、マイクロレンズ法とアストロメトリー法の展望およびTMTへの展開についても述べる。マイクロレンズ法は、惑星の重力によるソース天体の増光現象を観測することによって、主星と惑星の離角や主星と惑星との相対質量を決定できる手法である。これまでに、雪線より外側にある低質量惑星(地球質量の数倍程度)の分布を明らかにした<sup>19)</sup>。これらは、視線速度やトランジット法で探査できない外側の領域の探査を行うため、相補的である。2020年代には、NASAのWFIRST-AFTA計画によって、雪線より外側にある地球質量の惑星の分布を統計的に明らかにすることができ<sup>20)</sup>、さらにKepler衛星の観測結果と合わせて、HZ内にある地球質量の惑星の存在割合を推定することが期待される。しかし、レンズ天体(惑星)の主星の固有運動や質量がわからないため、これまで天の川銀河の恒星分布に基づいてレンズ天体の質量や固有運動を推定していた。そこで、TMTの高解像観測によって、ソース天体とレンズ天体を分離することが可能になり、初めてレンズ天体の固有運動および明るさを計測し、その惑星の質量をモデルからではなく観測的に推定することが期待される。

アストロメトリー法は、天球面での惑星の重力による主星のふらつきによって、惑星質量と軌道を精密に決定することができる。マイクロレンズ法と同様に、主星から離れた領域に感度をもつため、視線速度法やトランジット法と相補的である。これまでの観測では、測定精度の欠如によりアストロメトリー法で検出された惑星はないが、

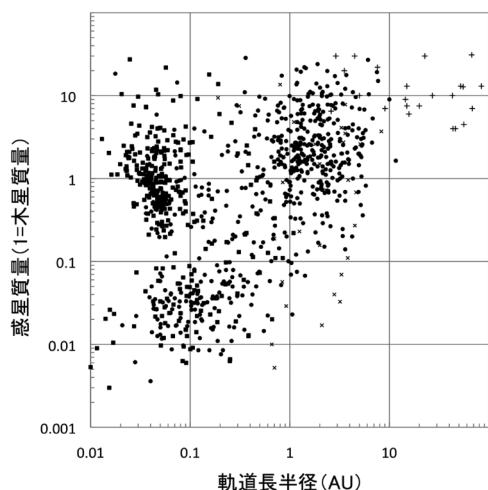


図1 これまでに発見された太陽系外惑星の軌道長半径と質量の分布. ●, ■, ×, +は, それぞれ, 視線速度法, トランジット法, マイクロレンズ法, 直接観測によって発見された惑星を表す.

2020年代までにESAのGaia衛星およびVLT望遠鏡のGRAVITYによって, 1 AUから10 AUにある海王星質量の惑星の発見が期待される<sup>21)</sup>. また, 近傍星の精密な固有運動測定によって, 新たな若い年齢のMoving Groupも同定されることが予想され, 後述のように若い恒星周りでの直接観測による地球型惑星の研究に貢献すると期待される.

最後に, これまでに紹介した手法がTMTまでにどのように進展するのを見ていく. 図1にこれまでに発見された太陽系外惑星の質量と軌道長半径の分布を示す. 視線速度法およびトランジット法で検出された惑星がその大部分を占め, 観測手法の選択効果によって海王星質量から木星質量の惑星は5 AU以内で, 地球質量の10倍以下の惑星は0.4 AU以内で発見されている. マイクロレンズ法は, 雪線以遠で地球質量の10倍以下の低質量惑星から木星質量の惑星まで30程度発見している. これまでの惑星の分布を統計的に調べることによって, 惑星の形成過程および軌道進化についての理解が進められている. 今後, 新しい望

遠鏡および観測装置の進展によって, より長周期で低質量の惑星の探査が進み, また近傍星における惑星探査が複数の手法を用いて完遂するだろう.

## 2.2 系外惑星の特徴づけ

個々の惑星の性質を詳細に調べる惑星の特徴づけは, 現在はトランジット法における分光測光が中心である. また, 後述のように, 主星と惑星を分離して惑星の光だけを捉える直接観測も有力な手法になりつつある. ここでは, この二つの手法の現状とTMTまでの展望について紹介する.

NASAのHubble宇宙望遠鏡は, 宇宙からの超精密な測光分光観測によって, トランジットの時に惑星大気で生じる追加吸収によって惑星大気の散逸や大気組成を明らかにし<sup>22)</sup>, 地上観測と組み合わせた広い波長帯域による観測から雲やヘイズの有無を明らかにした<sup>23)</sup>. また, NASAのSpitzer宇宙望遠鏡は, 2次食(星の裏側に惑星が隠れること)によって惑星の熱放射を観測し, 惑星大気の温度構造や大気のC/Oを明らかにした<sup>24)</sup>. 今後, James Webb Space Telescope (JWST)におけるトランジット分光によって, 近傍のM型星周りの地球の2倍半径までの小さい惑星(スーパーアース)の特徴づけが大きく進展すると考えられる<sup>25)</sup>. 一方, 地上観測においても, VLT/CRIRESに代表される, 波長分解能10万を超える超高分散分光装置を用いて, 惑星の公転運動による視線速度変化から地球大気および主星の成分を分離して, 惑星のみの高分散分光情報を取得することが可能である. これまでに, 惑星大気に含まれる分子の検出に加えて, 惑星大気の風速の測定に成功している<sup>26)</sup>. また, 食を起こしていない若いガス惑星の自転速度も計測された<sup>27)</sup>. 現状は, 主星の輻射により温められた高温の木星型惑星が観測対象の中心であるが, TMTの大きな口径を活かせば, より低質量でより低温度の惑星の特徴づけも可能になることが期待される<sup>28)</sup>.

これまで間接法による惑星探査および特徴づけについて話を展開したが, 直接観測についてもそ

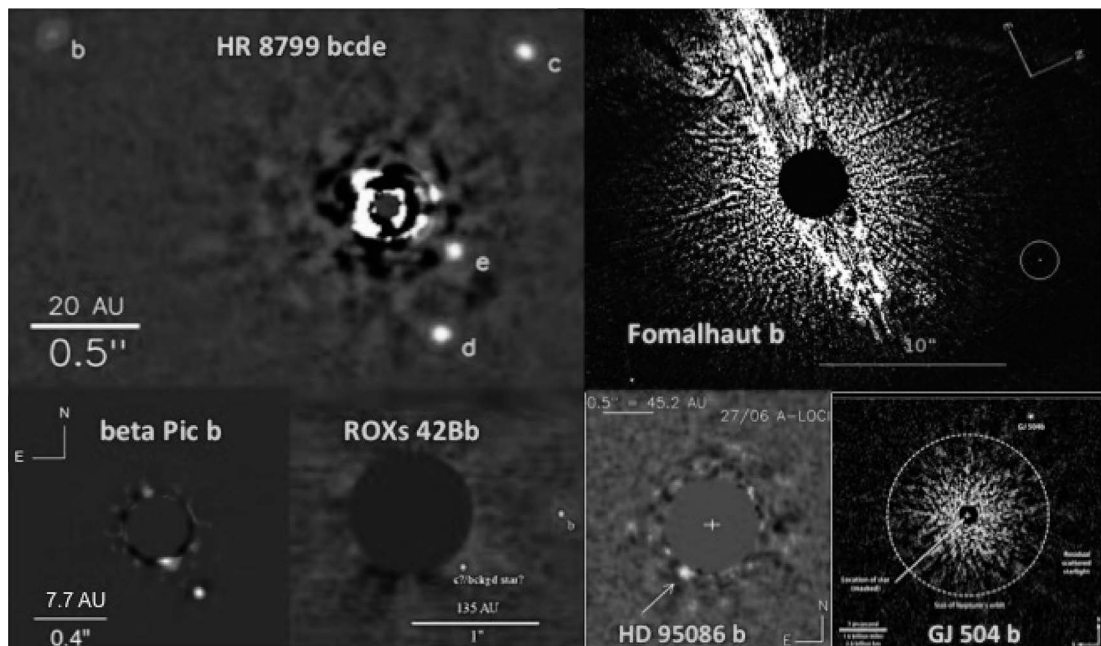


図2 これまでに直接観測された惑星系の姿<sup>29)–33)</sup>.  $\beta$  Pictoris b以外は、汎用の補償光学装置によって取得された。 $\beta$  Pictorisは、第2世代の極限補償光学装置、Gemini Planet Imager (GPI) によって取得された。主星からの散乱光を除去し、10 AU以内にある惑星の光を検出することに成功している。

の現状とその展望を紹介する。間接法の成功から13年後の2008年に惑星の直接観測に成功し<sup>29),30)</sup>、地上8 m級望遠鏡およびHubble宇宙望遠鏡で若い主星の周りにある形成直後の温かい惑星の探査により、これまでに10例以上の発見が報告された<sup>31)–35)</sup>。図2は、これまでに直接観測で発見された惑星の代表例である。直接観測では、惑星の光を直接捉えることができるので、惑星の基本的なパラメーターを決定することができる。例えば、惑星の明るさや色の観測から惑星の温度や雲の厚さに関する情報<sup>36)</sup>、測光分光観測から大気組成に関する情報を引き出すことができる<sup>37)</sup>。また、現在精力的に単独の褐色矮星に対して行われている観測を応用することが期待される。例えば、長時間の測光観測による自転周期や大気の構造に関する情報の取得<sup>38)</sup>、高分散分光観測によるDoppler Imagingから雲のマッピングまで可能である<sup>39)</sup>。

しかし、図2に示すように、主星近傍では主星の散乱光が明いため、間接法とパラメーター空間で相補的な10 AU以遠の惑星検出にとどまっている。また、主星と惑星の光を完全に分離できないため、精密な測光や分光観測が困難である。これは、補償光学の性能（大気乱流による波面の乱れを補償する能力）が不十分なので、主星の光を打ち消すコロナグラフが理想的に働かないからである。このような背景を受けて、現在複数の4–8 m級望遠鏡で次世代の補償光学、極限補償光学を用いた惑星探査の計画が加速しつつある<sup>40),41)</sup>。すでに、Gemini Planet Imager (GPI) は、極限補償光学のOn-sky観測に成功し、汎用の補償光学装置に比べて1桁以上高いコントラストを達成することに成功した<sup>42)</sup>。今後、極限補償光学技術の成熟が図られ、4–8 m級望遠鏡において1–5 AUにある進化の進んだ巨大ガス惑星の探査および特徴づけが進められる。また、直接撮像された一部

の惑星は、Gaia衛星によるアストロメトリ観測や地上望遠鏡による視線速度法観測で質量や軌道が明らかにされ、惑星形成や進化に新しい知見をもたらすことが期待される。

### 3. TMTがもたらす新しい科学的知見

前節では、TMTの科学的運用が開始されるまでの系外惑星科学の展望について惑星探査と特徴づけの観点から話を進めた。これまでのまとめとして、TMTまでの展望とそれを踏まえたTMTへの展開についてまとめておく。

TMTまでの重要な展開として、

1. 視線速度やトランジット観測による近傍星の周りでの低質量惑星の分布、特にM型星周りでのHZにある地球質量惑星の分布の推定
2. Gaia衛星のアストロメトリ観測による近傍の若いMoving Groupや若い惑星の新規発見
3. JWST衛星でのトランジット分光によるM型星周りの小さい惑星の特徴づけ

また、TMTへの展開として、

4. TMTの集光力を活かした、近傍の暗い恒星周りでの視線速度探査、TESSやPLATO衛星で発見された惑星候補のフォローアップ
5. TMTの高解像撮像を活かした、WFIRST-AFTA衛星や地上望遠鏡のマイクロレンズ観測により発見されたレンズ天体（主星）の固有運動および質量の測定
6. TMTの集光力を活かした、低質量で低温度の惑星の高分散分光観測

TMTは、4から6の科学研究を通して、最初に述べた汎惑星系形成や進化論の構築や系外惑星学の発展に重要な貢献をするだろう。

#### 3.1 地球型系外惑星の直接観測と生命探査

ここまで、4-8 m級望遠鏡をTMTへ拡張することでなす科学的テーマを俯瞰してきた。本稿の最後に紹介するのは、TMTにおける地球型系外惑星に関する科学研究である。これまでの

テーマと同様に、4-8 m級望遠鏡の観測装置と同等の機能を30 m級望遠鏡へ搭載するという作業であり、技術的には連続として捉えることができる。その一方で、科学的には、これまでの延長ではなく、「宇宙における生命」というこれまでの宇宙科学にない要素が絡んでおり、不連続であることを認識することが大切である。具体的には、本題は、地球生命の相対化であり、生命探査が実現されれば私たちの生命観を塗り替えることになりうる。

先述のように、TMTの科学的運用までに近傍のM型星周りの低質量惑星の分布が明らかになる。特に、Kepler衛星の統計的研究から予想されるように、HZにある1地球質量の惑星も多数発見されるだろう。TMTは、このような惑星の測光や分光観測を通じて、生命居住可能性や宇宙生命の有無について調べることができる。TMTが地球型惑星の研究に欠かせない理由は、大別して次の三つである。

1. TMTの高い集光力
2. TMTの高い解像力
3. TMTの高いコントラスト

M型星周りの反射光によって輝いている地球型惑星は、およそ25から30等と予想される。暗い惑星を検出するための集光力が必須である。また、M型星周りのHZの主星からの距離は0.1 AUなので、10 pcの距離にある惑星系に対して主星と惑星を空間的に分離するためには0.01秒角の空間分解能が必要である。このような高空間分解能を達成できる望遠鏡はTMTを含めた30 m級望遠鏡だけである。最後に、TMTは4-8 m級望遠鏡に比べて高いコントラストを原理的に達成することが可能である。補償光学は、大気乱流によって歪んだ波面を即時に計測し、補償する。大気の変動時間は非常に短い（ $\sim 1$  ms）ので、その歪んだ波面を補償するには、その変動時間に比べて10倍速く計測することが求められる。その結果、非常に短い露光時間（ $\sim 100$   $\mu$ s）で波面を精

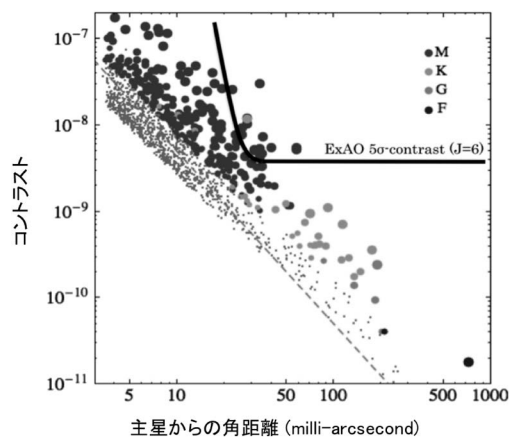


図3 TMTにおける近傍星周りにおける1地球半径の惑星の直接観測に関する可能性の評価。TMTで観測可能な近傍星周りのハビタブルゾーンに一つの地球類似惑星が存在すると仮定し、点はその惑星の検出に必要な離角とコントラストを表す。実線は、現状の技術に基づいた極限補償光学装置 (ExAO) の1時間積分で到達可能な離角とコントラストである。現状の技術において、10のM型星の周りで地球類似惑星の直接観測が可能である。

度良く計測しなければいけない。計測精度は、光子数で決定されるので、口径が大きいほど、より高い精度で波面を計測できる。高精度に計測ができれば、波面の歪みを取り除けるので、コナグラフが十分に働く。国内および海外の専門家との議論に基づいて、現状の技術で可能な極限補償光学装置から予想される検出性能を導出した。その結果を図3に示す。また、TMTで観測可能な近傍星の周りのHZに惑星が一つ存在すると仮定して、その惑星のコントラストと離角の分布も併せて示す。現状の技術でもM型星の周りにおいて10以上の地球型惑星を直接観測できる。この予想性能は、検出器技術などが発展すれば、さらに向上するものであり、TMTの科学的運用を迎える頃には観測対象が増加することが期待される。このように、TMTにおいて地球型惑星の直接観測が可能であることがわかった。

惑星が検出されれば、次は特徴づけである。地

球型惑星における特徴づけには、生命居住可能性の検証と地球類似生命の探査が挙げられる。前者については、20年前に提案された理論的な生命居住可能性領域 (HZ)<sup>43)</sup> の観測的な検証である。HZは、主星のフラックスに基づいて、惑星を全球の平均的な気候として捉えることで、「惑星表層に存在する液体の水」の存在可能性を考えた。この際に重要となるのが、温室効果ガスとして働くメタンや二酸化炭素である。幸い、主要な観測波長帯 (J, H, Kバンド) はこれらのガスの吸収線が存在するので<sup>44)</sup>、低分散分光観測によるメタンや二酸化炭素の存在有無を通して生命居住可能性に関する理解が進められる。また、生命居住可能性の観点から外れるが、形成直後の地球における大気の酸化還元問題についても調査できる。つまり、初期の地球は水素ガスで覆われた還元的な大気を保持していたのか、あるいは金星のような二酸化炭素ガスで覆われた酸化的大気を保持していたのかということである。そこで、還元的なメタンガスと酸化的な二酸化炭素ガスを指標として、形成直後や進化後の大気の酸化還元について調べることが可能になるだろう。先に述べたように、2022年までにGaia衛星によるアストロメトリ観測で近傍の若い恒星が大量に発見され、初期の地球環境を統計的に調べることが期待される。

惑星での生命探査は、酸素発生型光合成の副産物として生じる酸素分子の検出を通して、惑星上での光合成生物の有無を調査することができる<sup>45)</sup>。実際、地球大気における酸素分率の歴史を見ると、20億年以前では現在の1/1,000未満であり、非生物活動 (大気に含まれる水蒸気の紫外線分解) による酸素分子の蓄積では、20億年という長い月日をかけても現在の酸素分率に到達できないことを意味する<sup>46)</sup>。したがって、地球のような環境を考慮すれば、酸素分子は有力な生命探査の指標 (バイオマーカー) であると言える。図4は、近傍星周りのHZに仮想的に地球を置いた場合に、その惑星に対してTMTの5時間積分で酸

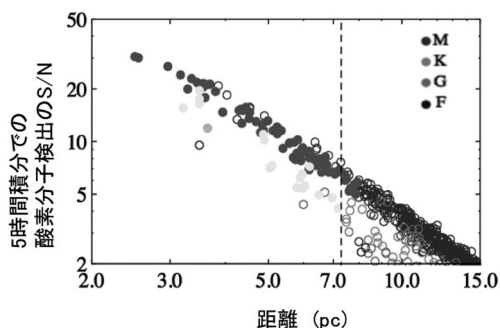


図4 TMTにおける近傍星周りにある惑星上の酸素分子検出に関する評価<sup>47)</sup>。点は図3と同様である。TMTの高い感度を活かすことで、7 pc以内にある近傍星の周りで地球類似惑星の大気から酸素分子を検出することが可能である。ただし、酸素分子検出の前に惑星検出が必要なので、実際にはこれよりも候補天体数は減少する。

酸素分子の検出可能性を評価した結果である。TMTの高い集光力を活かせば、7 pc以内にある惑星について  $S/N > 5$  で酸素分子の検出が可能である<sup>47)</sup>。宇宙における生命探査は、光合成生物の代謝による高効率な酸素発生機構を探すとこと言い換えることができる。ただし、注意が必要なのは、生命が存在しない場合においても、水蒸気の光分解により現在の地球に相当する酸素も生成が可能であることが示されたことである<sup>48)</sup>。今後、さまざまな角度から、酸素検出による生命存在の誤認の恐れについての検討が重要な課題であろう<sup>49)</sup>。

#### 4. 最後 に

現在、2020年代の光赤外線将来計画書の議論がサイエンス検討班・地上班・スペース班に分かれて進められている。筆者は、サイエンス検討班・系外惑星班の班長として携わっている。その立場から最後に本稿のフォーカスを超えるが、2020年代の光赤外のプロジェクトのあり方とTMTの位置づけについてこの場を借りて意見したい。日本の光赤外コミュニティでは、これま

でにない多様性・独自性のある研究・プロジェクトが展開されている。これは、新しい科学的テーマの種を蒔いて、芽を育てる作業である。基礎研究において種を植えて芽が出ないことが一般であり、多様性を維持することは基礎科学において重要である。その一方で、天文学の一プロジェクトにかかる費用は他の分野に比べて莫大であり、プロジェクトの立ち上げには十分な吟味も必要である。現状、光赤外線コミュニティの人員は限られており、すべてのプロジェクトを支えるだけの人員が確保されているのか筆者は疑問を感じている。

2020年代の光赤外線計画書の作成においては、光赤外コミュニティ内でのプロジェクトの相対化にとどまるのではなく、日本が進めるべき科学テーマについて波長を超えた議論を展開し、光赤外コミュニティにおけるプロジェクトの先鋭化を行うことも必要ではないかと感じている。本稿では、TMTにおける地球型系外惑星の特徴づけ、特にその惑星における生命の探査について紹介した。この点において、TMTは私たちの生命観を転換させる契機をもたらす可能性がある。地球型惑星における生命探査は、宇宙観に影響を及ぼす重力波やビッグバン宇宙の解明とならび日本の進めるべき課題であり、TMTは重要な役割を果たすと考えている。

#### 謝 辞

本稿は、TMTにおける地球型系外惑星の観測検討およびTMTのISDTsの検討報告書に基づいています。地球型系外惑星における検討は、河原創氏、小谷隆行氏、村上尚史氏、田村元秀氏、Second-Earth Imager for TMT (SEIT) 計画のメンバーなくしてできないものでした。また、TMTにおける極限補償光学の実現可能性の検討において、Bruce Macintosh氏、高見英樹氏、大屋真氏、Second-generation Exoplanet Imaging with Coronagraphic AO (SEICA) プロジェクトのメ



ンバーには重要なコメントをいただきました。最後に、2020年代の光赤外線将来計画書の系外惑星サイエンス班のメンバーには、太陽系外惑星の科学的意義および展望において貴重な示唆をいただきました。この場を借りて、本検討にかかわっていただいた皆様に深く感謝いたします。

### 参考文献

- 1) Mayor M., Queloz D., 1995, *Nature* 378, 355
- 2) <http://exoplanet.eu/>
- 3) TPF-C Flight Baseline Mission—ASTRO2010 Mission RFI
- 4) Matsuo T., et al., 2012, *SPIE* 8446, 84461K
- 5) Cumming A., et al., 2008, *PASP* 120, 531
- 6) Ida S., Lin, D. N. C., 2004, *ApJ* 604, 388
- 7) Matsuo T., et al., 2007, *ApJ* 662, 1282
- 8) Avila G., et al., 2004, *SPIE*, 5492, 669
- 9) Mayor M., et al., 2009, *A&A* 507, 487
- 10) Riva M., et al., 2014, *SPIE* 9147, 91477D
- 11) Huelamo N., et al., 2008, *A&A* 489, L9
- 12) Dumusque X., et al., 2012, *Nature* 491, 207
- 13) Mahadevan S., et al., 2012, *SPIE* 8446, 84461S
- 14) Kotani T., et al., 2014, *SPIE* in press
- 15) Howard A. W., et al., 2012, *ApJS* 201, 15
- 16) Quintana E. V., et al., 2014, *Science* 344, 277
- 17) Ricker G. R., et al., 2014, *arXiv:1406.0151*
- 18) Rauer H., et al., 2013, *arXiv:1310.0696*
- 19) Cassan A., et al., 2012, *Nature* 486, 375
- 20) WFIRST-AFTA SDT Final Report 2013
- 21) Casertano S., et al., 2008, *A&A* 482, 699
- 22) Richardson L. J., et al., 2007, *Nature* 445, 892
- 23) Ehrenreich D., et al., 2014, *arXiv:1405.1056*
- 24) Madhusudhan N., et al., 2011, *Nature* 469, 64
- 25) Deming D., et al., 2009, *PASP* 121, 952
- 26) Snellen I. A. G., et al., 2010, *Nature* 465, 1049
- 27) Snellen I. A. G., et al., 2014, *Nature* 509, 63
- 28) Kawahara H., et al., 2014, *ApJ* 212, 27
- 29) Marois C., et al., 2008, *Science* 322, 1348
- 30) Kalas P., et al., 2008, *Science* 322, 1345
- 31) Marois C., et al., 2010, *Nature* 468, 1080
- 32) Lagrange A. M., et al., 2010, *Science* 329, 57
- 33) Kuzuhara M., et al., 2013, *ApJ* 774, L11
- 34) Rameau J., et al., 2013, *ApJ* 779, L26
- 35) Currie T., et al., 2014, *ApJ* 780, L30
- 36) Barman T., et al., 2011, *ApJ* 733, 65
- 37) Janson M., et al., 2013, *ApJ* 778, 4
- 38) Biller B., et al., 2013, *ApJ* 778, 10
- 39) Crossfield I. J., et al., 2014, *Nature* 505, 654
- 40) Beuzit J-L., et al., 2008, *SPIE* 7014, 41
- 41) Matsuo T., et al., 2014 *SPIE* in press
- 42) Macintosh B., et al., 2014, *PNAS* in press
- 43) Kasting J. F., et al., 1993, *Icarus* 101, 108
- 44) Selsis F., et al., 2005, *Lectures in Astrobiology Volume 1*
- 45) Leger A., et al., 1993, *A&A* 277, 309
- 46) Canfield D. E., 2005, *Annual Review Earth Science* 33, 1
- 47) Kawahara H., et al., 2012, *ApJ* 758, 13
- 48) Wordsworth R., Pierrehumbert R., 2014, *ApJ* 785, L20
- 49) Domagal-Goldman S. D., et al., 2014, accepted in *ApJ*

### Observational Studies of Terrestrial Planets with TMT

Taro MATSUO

*Department of Astronomy, Graduate School of Science, Kyoto University, Kita-Shirakawa-Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan*

Abstract: Exoplanet studies have been rapidly developed in association with recent technological innovation. By 2022, when the Thirty Meter Telescope (TMT) will see the first light, planet searches will be mostly completed around nearby stars and will find a number of low-mass planets in habitable zone. In this article, I review expected scientific knowledge about exoplanets brought by the TMT and explore the role of low-resolution spectroscopy of terrestrial planets with the TMT in more detail. I also have a comment on the role of the TMT in 2020's.