

近赤外線分光観測とアストロバイオロジー

平野 照幸^{1,2,3}

〈¹ アストロバイオロジーセンター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈² 国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈³ 総合研究大学院大学 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: hd17156b@gmail.com



太陽系外惑星（系外惑星）と高分散分光観測の関わりは歴史的に深く、視線速度法による惑星探索に加えて、高分散分光観測はトランジット惑星候補の発見確認や惑星軌道・大気等の特徴づけにおいても重要な役割を果たしてきた。2010年代中盤以降は、近赤外線での高分散分光を用いた系外惑星観測が注目されており、低温度星（主にM型矮星）や年齢の若い恒星を対象とした惑星探索や惑星軌道・大気の観測において近赤外線分光観測は強力なツールとなっている。本稿では、アストロバイオロジーセンターで展開している系外惑星の観測研究の中でも、主に近赤外線高分散分光観測を通じて得られた成果を概説する。

1. はじめに

太陽系外惑星（以下、系外惑星）探索の中でも、「宇宙における生命」の発見につながる地球に類似した小型惑星を探索することはアストロバイオロジーセンターの設立当初から中心的な課題となっている。また、我々の住む太陽系・地球を含め「惑星（系）がどのように誕生して進化してきたのか」を理解することも宇宙における生命の起源・普遍性を論じるうえで不可欠な要素である。アストロバイオロジーセンターでは、これらの中心課題に正面から取り組むべく、系外惑星を対象とした天文観測・装置開発・理論研究を多角的に実施しているが、本稿ではこのうち分光観測、特に近赤外線高分散分光を用いた小型惑星探索および惑星形成進化モデルの検証を目的とした系外惑

星系の特徴づけについて紹介する。

2. 近赤外線分光観測とアストロバイオロジー

小型惑星の中でも、水が液体として存在しうる軌道領域である「ハビタブルゾーン」内にある惑星は系外惑星探索でも最も重要なターゲットとなっているが、太陽のようなG型矮星のまわりのハビタブルゾーン内にはこれまで地球型惑星はほとんど発見されていない^{*1}（図1）。これは、系外惑星の主要な探査法である視線速度法・トランジット法において、ハビタブルゾーン内の小型惑星に対する観測シグナルや検出確率が非常に小さく、長期間の観測を必要とすることも相まって極めて発見が困難となっているためである（例えば、周期1年の惑星の発見には少なくとも2,3年の観測を必要とする）。

^{*1} Kepler-452bのように、トランジットで発見されたハビタブルゾーン付近に存在する長周期の小型惑星はごく少数報告されているが、いずれも地球よりも半径等が大きく、中心星も地球から離れていて暗い天体であるため将来の追観測が困難である。

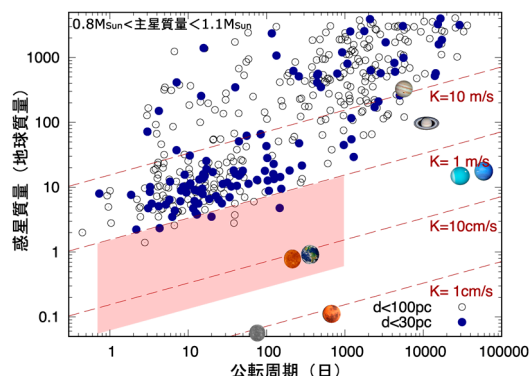


図1 100パーセク以内の太陽型星まわりの系外・系内惑星の周期-質量分布. 右上に向かう各破線は1太陽質量 (M_{Sun}) の恒星を公転する惑星の予想される視線速度振幅. 長周期惑星でなくとも, 視線速度振幅が 1 m s^{-1} を下回る領域 (影付きの範囲) ではほとんど惑星が発見されていない. 系外惑星データはNASA Exoplanet Archive[1] による.

そこで2010年頃から, ハビタブルゾーン内の小型惑星探査の対象として, M型矮星などの低温度・低質量の恒星 (以下, 低温度星) が注目を集めている. 低温度星は半径も小さい (= 地球からの放射エネルギーが弱い) ため, G型矮星に比べてハビタブルゾーンが中心星に近く, さらに小さい恒星質量にも対応して視線速度法による観測シグナル (視線速度振幅) も大きくなるため, ハビタブルゾーン内の小型惑星の発見において非常に有利に作用する. 例えば, G型矮星を公転周期1年でまわる地球質量惑星による中心星の視線速度振幅がわずか 8.9 cm s^{-1} であるのに対し, 質量が0.15太陽質量の晩期M型矮星まわりのハビタブルゾーン内の同質量惑星はおおよそ 1 m s^{-1} となり, 現在の視線速度観測における世界最高精度 ($20\text{--}30 \text{ cm s}^{-1}$) であれば十分に検出可能な大きさとなる.

日本でも, 低温度星まわりの小型惑星探査を主な目的としてすばる望遠鏡に新たな近赤外線分光器 (InfraRed Doppler 装置: IRD [2, 3]) が計画され, 2015年以降はアストロバイオロジーセン

ターが中心となってその開発・運用を行っている. IRDは低温度星が相対的に明るくなる近赤外線を幅広くカバー (波長 $0.97\text{--}1.75 \mu\text{m}$) する高分散分光器 (波長分解能 $\sim 70,000$) で, 温度安定性のため分光器全体を密閉容器内に封入してある. その他, 補償光学系を用いたファイバー入射や精密波長較正のためのレーザー周波数コムを用いるなど, 視線速度観測のための多くの先進的な要素を組み込んだ装置となっている. 装置としてのIRDの詳細は本特集の別記事にて解説されるため, 天文月報本号別記事「アストロバイオロジーセンターでの装置開発」(小谷隆行) を参照されたい.

アストロバイオロジーセンターでは設立から現在に至るまで, すばる望遠鏡/IRDを主力の観測装置の一つとして小型惑星に焦点を当てた系外惑星の観測研究を実施してきている. IRDによる惑星探査 (発見) の主なターゲットは, 上述したようにM型矮星や褐色惑星などの近赤外線で見える低温度星であるが, このほかにも, 黒点などの恒星活動領域が近赤外線 (可視光線に比べて) コントラストが改善するなどの性質を利用して, 活動性の高い若い (年齢10億年未満の) 恒星なども重要なターゲットとされている. またIRDは, 宇宙から実施が困難な高分散分光観測という強みを活かして, 系外惑星の軌道・大気などの特徴づけにおいても重要な成果を収めている. 以下では, アストロバイオロジーセンターが過去に実施した研究のうち, 主にIRDなどによる近赤外線分光観測を通じて得られた成果を概観する.

3. 近赤外線分光観測による系外惑星研究の成果

3.1 低温度星まわりの小型惑星探査

アストロバイオロジーセンターが主導する低温度星まわりの惑星探査は, 主に (A) 視線速度法による「ブラインド」のサーベイ観測と, (B) 大規模なトランジットサーベイを実施する衛星ミッションとの連携によるフォローアップ観測に

大別される．ここでいうブラインドとは，惑星探査においてトランジットなどの惑星の兆候を示す事前情報が全くない状態を指し，そのサーベイで小型惑星の発見確認を行うには通常非常に多くの観測時間が必要となる．一方，トランジットサーベイとの連携観測では，トランジット惑星候補の検出が衛星による測光観測によって得られている状態で候補天体の観測を行うことになるため，効率的に新規系外惑星の発見確認を行うことが可能となる．その反面，惑星候補の提供が（主に国外の）別のミッションに依存しているため，それらミッションの進捗や同様のフォローアップ観測を実施するチームとの国際競争に晒されるというデメリットも存在する．

上記（A）のブラインドサーベイ観測については，アストロバイオロジーセンターが中心となって国内の複数の機関と共同で低温度星，特に晩期M型矮星（質量0.1–0.3太陽質量程度）を対象としたIRDを用いた「すばる戦略枠観測」（IRD-SSP）を2019年より実施している．IRD-SSPは，約5年間にわたる計175夜を用いたサーベイ観測を行い，晩期M型矮星のハビタブルゾーン内をまわる地球型惑星を複数発見することを目標としている^{*2}．2024年度までの観測で予定されていたサーベイはほぼ完了し，望遠鏡トラブル等によって失われた時間を補償するための観測のみが残っている状況である．これまでのサーベイでIRDが観測したM型矮星は約100天体に上るが，それらの天体の中には，（近接）実視連星あるいは分光連星であることが判明した天体も含まれるため，このうちおよそ80天体に対して視線速度測定が実施されている．さらにその中でも，恒星表面活動や恒星自転による影響が大きい天体は精密視線

速度測定には不利であるため除かれており，現在最終的に50–60天体が長期間の視線速度モニター観測の対象となっている．我々は，後述するようにIRD-SSP観測を通じて，すでにハビタブルゾーン近傍のスーパーアース（Ross 508b）を含む複数の小型惑星を発見しており，サーベイ期間の正式終了後に今後順次新たな惑星の発見報告を行う計画である．

一方，上記（B）のトランジットサーベイ探査との連携による低温度星まわりの惑星探査では，2019年ごろまでは主にケプラー望遠鏡（第二次ミッションである「K2」[4]を含む）で見つかった惑星候補のフォローアップ観測が実施され，2019年以降はトランジット系外惑星探査衛星「TESS」[5]によって同定されたトランジット惑星候補が主なターゲットとなっている．アストロバイオロジーセンターで実施されているトランジット惑星探査，特にMuSCATシリーズを用いた地上測光観測によるフォローアップの概要については本特集号の別記事（9月号）に掲載されることになっている．本稿では，IRDによる集中的な観測がトランジット惑星候補の発見確認に重要な役割を果たしたいくつかの惑星系についてその成果を紹介したい．

3.2 アストロバイオロジーセンターが発見を主導した小型系外惑星たち

3.2.1 Ross 508b

IRD-SSPによるブラインドサーベイ観測で発見されたM型矮星まわりの小型惑星の代表例がRoss 508bである．Ross 508は地球から約11.2パーセクにある近傍のM4.5型星で，2019年2月のSSPサーベイ開始当初から視線速度が測定されていたターゲットであった．2021年秋までの

^{*2} 早期M型矮星（質量0.3–0.6太陽質量程度）を含めず，晩期M型矮星にのみ特化しているのは，早期M型矮星の場合可視光域（波長400–800 nm）での視線速度精度の方が近赤外線領域での測定精度よりも高く，（恒星活動による影響を軽減できる以外の）近赤外線観測のアドバンテージがないためである．また，晩期M型矮星は近傍の恒星であっても非常に暗く，3–4 m級望遠鏡では十分な観測精度を確保するのが困難である．

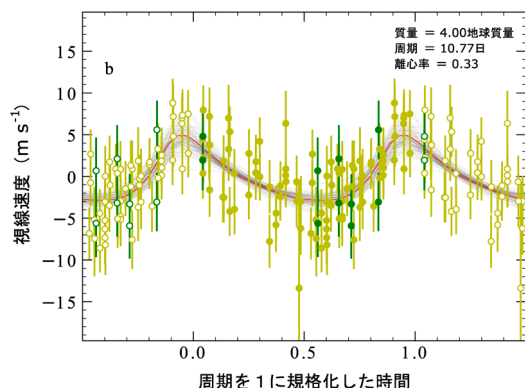


図2 Ross 508の視線速度変化(惑星bの周期10.77日で折たたんだもの)。データ点の色の違いは視線速度を測定した時期の違いを表す。[6]をもとに改変。

IRD観測で約100フレーム(スペクトル)がRoss 508に対して取得され、視線速度データの周期解析の結果、公転周期10.77日のところに小型惑星候補が検出された(図2)。こうしたブラインドの視線速度観測のみで惑星候補が検出された場合、一般にその存在の確認は難しく、黒点等の恒星活動による偽検出ではないことを丁寧に検証する必要がある。我々は、恒星活動と強い相関を持ついくつかのスペクトル指標やMEarthプロジェクトなどによる測光観測データを詳細に調査し、10.77日の周期性が恒星活動のいずれの周期性とも一致しないことを示し、最終的に惑星由来であることを確認した[6]。

発見された惑星Ross 508bは、視線速度変化からその(射影)質量がおおよそ4地球質量と見積もられ、地球よりも少し大きいいわゆる「スーパーアース」に分類されている。また、軌道はわずかに楕円軌道(ただし軌道離心率は0.4程度以下)の可能性があることがわかっている。比較的長周期であることと中心星の光度が太陽光度の0.0036倍程度しかないことなどから、Ross 508bの軌道はハビタブルゾーンの内側境界付近に存在しており、惑星が中心星から受け取る平均フラックスは地球のおおよそ1.4倍と見積もられている(楕円軌

道の場合は一部がハビタブルゾーン内に入っている可能性がある)。質量が4地球質量程度の惑星は地球と同様に主に岩石でできた惑星である可能性が高く[7]、Ross 508bは将来の「バイオシグネチャー探査」において有望なターゲットとなる。なお、近赤外線での視線速度サーベイ観測によって惑星が新規に発見されたのはRoss 508bが初のことであり、本発見は世界的にも貴重な成果となっている。

3.2.2 TOI-1634b, TOI-1685b

アストロバイオロジーセンターはIRD-SSPによる低温度星を対象としたブラインドの視線速度サーベイと並行して、低温度星まわりのトランジット惑星候補のフォローアップ観測も実施しており、これまでに発見に関わった低温度星(M型矮星)まわりのトランジット惑星は数十を数える。このうち、TOI-1634bとTOI-1685bと呼ばれる惑星は、いずれも有効温度3400–3500 KのM型矮星をまわる公転周期が1日未満の「超短周期惑星」であり(公転周期と惑星半径は、それぞれ0.989日、0.669日と1.75地球半径、1.46地球半径)、TESSミッションによるトランジット探査とIRDなどによる地上装置を用いたフォローアップ観測を通じて発見確認された[8]。

超短周期惑星はその中心星から受け取るフラックスの大きさから「ハビタブル環境」とは無縁の存在と言えるが、なぜそのような短周期の惑星が存在するのかその起源については統一的な見解は得られていない。超短周期惑星は、そのほとんどが半径が地球の2倍未満で大気をほぼ持たない岩石惑星であることが知られており、TOI-1634bおよびTOI-1685bについても我々はIRDを用いた視線速度測定による質量測定から、内部組成が地球と同様に主に岩石と鉄でできた惑星である可能性が高いこと示した(図3)。超短周期惑星の起源は小型惑星の形成・長期進化と密接に関連しており、特にハビタブルゾーンが中心星近くに存在する低温度星では重要なテーマである。

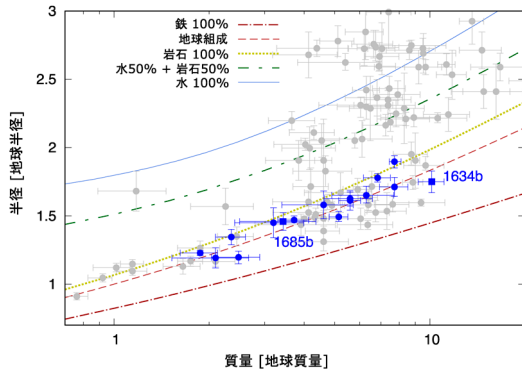


図3 系外惑星の半径と質量の分布. 半径と質量の関係から系外惑星の内部組成を制限することが可能で、ここでは図中左上にある各組成を仮定した場合の理論曲線が描かれている. 超短周期惑星とそれ以外の既知の惑星をそれぞれ青と灰色の点でプロットしてある. [8]をもとに改変.

3.2.3 K2-415b, GJ 12b

低温度星まわりの系外惑星探査では、IRD-SSPで観測されていた天体が独立なトランジット惑星探査によって（トランジット）惑星候補を持つと報告され、SSP観測による過去の視線速度データがすぐさま惑星の発見確認に役立ったというケースもある。例えば、晩期M型矮星K2-415はK2ミッションで観測され、その測光データの解析からトランジット惑星候補が検出されていたが、2019年から始まったIRD-SSP観測でもLSPMJ0908+1151という天体名で視線速度が測定されていた。我々は、K2により惑星候補が見つかった天体とIRD-SSPの観測対象となっている天体リストの相互参照を行い、IRDによる視線速度データを確認することでK2で検出されていた公転周期4.02日のトランジット惑星候補の偽検出シナリオ（食連星などの可能性）を排除した [9]。確認されたトランジット惑星K2-415bは半径がほぼ地球と同じ大きさ（1.015地球半径）の惑星

で、K2-415は地球サイズの惑星を持つ最も低温・低半径の恒星の一つであることから（＝トランジットが相対的に深くなる）、地球型惑星を対象とした将来の大気観測において優先順位の非常に高いターゲットとなっている。

2024年に発見されたGJ 12bは、TESSミッションでトランジットが報告された金星サイズ（0.96地球半径）の惑星で、こちらも独立にGJ 12の惑星探査を実施していたIRD-SSPの視線速度データなどを参照することで発見確認を行った^{*3}。GJ 12bは周期12.76日でM型矮星GJ 12を公転し、中心星の光度から見積もられるハビタブルゾーンの内側境界付近に軌道が位置することがわかっている（惑星のアルベドが0の場合のGJ 12bの平衡温度は約315 K） [10]。特に、GJ 12は地球から約12パーセクという近傍に位置しており、地球以下の小型惑星を持つ天体としては将来の追加観測の極めて有望なターゲットである。予想される惑星質量および視線速度振幅が小さいことから、IRDによる視線速度測定では現時点で惑星質量の上限のみ（3 σ 上限で3.9地球質量）が得られている状況であるが、我々は最近もIRDによる観測を継続しており、今後GJ 12bの精密な軌道や物理特性（平均密度など）を明らかにする計画である。

3.3 系外惑星の軌道傾斜角測定

上述したように、アストロバイオロジーセンターでは将来のバイオシグネチャー探査を念頭に置き、生命を宿する惑星（系）の発見に向けた探査を推し進めているが、同時に惑星系の起源と進化を研究することで生命を宿する惑星系の必要条件などの解明にも努めている。系外惑星の観測研究で惑星発見と並んで重要なのが、見つかった惑星系に対する特徴づけ（characterization）であり、特徴づけによって惑星の形成進化史や惑

^{*3} TESSによる測光観測では一部観測されてない時期にトランジットを起こしていたため公転周期が曖昧であった。公転周期の決定にはMuSCATシリーズによる地上トランジット観測が重要な役割を果たした。

星大気の獲得（喪失）機構、惑星系内での物質進化等の理解が進むと考えられている。

例えば、惑星の軌道傾斜角（ここでは惑星の公転軸と中心星自転軸のなす角度）は系外惑星系の角運動量進化、長期安定性を議論するうえで重要な観測量である。主にトランジット惑星系に対する「ロシター効果」*4の観測によって系外惑星の軌道傾斜角は制限されており、巨大惑星に対する過去の観測で系外惑星系では中心星の自転軸と惑星の公転軸が揃っていないものが一定数（3分の1程度）含まれていることが明らかになっている [13]。これは、惑星が太陽系のように原始惑星系円盤内で誕生し、大きく軌道が不安定化することなく進化してきたという従来の仮説に疑問を投げかけるものとなっており、系外惑星系の形成進化史についてはいまだに議論が続いている。

我々は、IRDなどを用いた既知の系外惑星系の特徴づけを通じて惑星の形成過程、力学進化等の解明を進めており、特に近赤外線観測を活かした低温度星や年齢の若い恒星をまわる惑星の軌道傾斜角測定でいくつかの鍵となる成果を収めた。2018年にIRDで観測したTRAPPIST-1系は、中心星が0.1太陽質量を下回る極めて低質量・低温な恒星で、そのまわりを7つの地球型系外惑星がトランジットしていることが知られている。その中でも惑星d（公転周期4.05日）、e（周期6.10日）、f（周期9.21日）は古典的なハビタブルゾーンの内側にある可能性がある。我々は、TRAPPIST-1系の3つの惑星（トランジットを起こした順に惑星e, f, b）が一晩にトランジットするという稀有な機会が偶然にもIRDが共同利用観測を開始した直後の2018年8月31日（UT）にあったため、その機会を活用してIRDによるトランジット分光観測を実施した（図4）。ロシター効果に加え

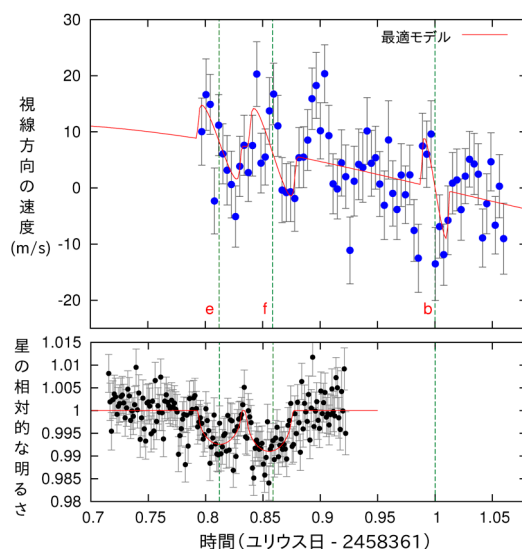


図4 （上）IRDで観測したTRAPPIST-1の視線速度変化（2018年8月31日）。（下）マクドナルド天文台1 m望遠鏡による同時測光観測データ。各パネルでは、最適モデルを実線で描いてある。縦の破線は、各惑星のトランジット中心時刻を表す（トランジットした順に惑星e, f, b）（クレジット：アストロバイオロジーセンター）。

て「ドップラートモグラフィー」と呼ばれる吸収線プロファイルの変化を可視化する手法を用いて3つの惑星の軌道傾斜角を測定し、TRAPPIST-1の自転軸が惑星公転軸に対してほとんど傾いていないという結果を得た（惑星が同一軌道面を公転していると仮定した場合の軌道傾斜角（天球面に射影）は $\lambda = 19^{+13}_{-15}$ ） [14]。この結果は、ハビタブル惑星候補を持つTRAPPIST-1系が太陽系と同様に、原始惑星系円盤内で誕生後に目立った軌道の攪乱を経験することなく現在まで進化してきたことを示唆している。これは太陽系基準では当然に思えるが、傾いた軌道が多数観測されている系外惑星系においてはハビタブル惑星候補に関する貴重な観測事実と言える。

*4 惑星のトランジット中に中心星の視線速度を測定すると、恒星自転と惑星による恒星面の一部掩蔽が起こる影響でスペクトル線が歪み、特徴的な視線速度変化として観測される現象。ロシター効果の観測から天球面上での惑星の軌道傾斜角（ λ ）を測定することできる [11, 12]。

TRAPPIST-1のほかにも、IRDはいくつかの低温星まわりの系外惑星に対して軌道傾斜角の測定に成功している。一般に褐色矮星を除く低温の恒星は自転速度が小さく（自転周期が長いものが多いのに加えて恒星半径が小さいため）、ロシター効果の観測等による軌道傾斜角の測定が困難であるが、誕生直後の若い恒星に関しては自転周期が短く、トランジット分光観測による測定が可能になる。年齢が若い系外惑星は軌道傾斜角測定による惑星系の軌道進化の研究において特に重要なターゲットとされ、中心星の潮汐力による角運動量進化を経験する前の原始的な軌道の特徴を探れるという特筆すべき利点がある。我々は2020年以降、AU Mic b, K2-25b, K2-33bなどの若い系外惑星（年齢約1000万年–6億年、半径は地球の3–5倍程度の海王星型惑星）をIRDで観測し、惑星軌道傾斜角の制限によっていずれの惑星系でも惑星公転軸と中心星自転軸がほぼ揃っている可能性が高いことを突き止めた。いずれも惑星形成時の角運動量の初期条件を議論するうえで重要な結果だと言えるが、近年はほかの若い惑星の観測からも一般に年齢1億年未満の惑星系では惑星軌道は形成時の角運動量を反映して中心星自転軸と直交しているものが支配的であることが判明している^{*5}。

3.4 惑星大気の観測

近赤外線を含む系外惑星系の分光観測では、軌道傾斜等の惑星の物理的特性に加えて、大気観測を通じて惑星の化学特性についても調査が可能である。系外惑星の大気観測は惑星の形成環境や大気進化の過程を明らかにするうえ、将来のバイオシグネチャー探索においても中心的な役割を果たすと期待される。現時点で惑星大気が主に検出・調査されて

いるターゲットは木星型・海王星型の巨大惑星がほとんどであり、アストロバイオロジーセンターが進める系外惑星大気研究においてもそうしたガス惑星を対象とした観測がこれまで実施されてきた。

地上大型望遠鏡を用いた高分散分光による系外惑星大気の観測は、(1) 個別のスペクトル線の解析によって系外惑星の上層大気（水素、ヘリウム、アルカリ元素など）を探索する手法と、(2) 相互相関法によって（個別には同定が難しい）多数のスペクトル線を同時に解析し、大気モデルとの比較を行う手法の二つに大別される。(1) は主にトランジット惑星系に対する「透過分光」を通じて実施され、(2) は透過分光に加えて惑星からの微弱な熱放射を捉える「放射分光」もしばしば用いられる。これらの手法は、ターゲットや解き明かしたい大気の特性にに応じて使い分け（あるいは組み合わせ）られる。

近赤外線領域にある中性ヘリウムの三重線（波長1083 nm）は、水素に次いで多いとされるヘリウムをガス惑星の大気中で調べる上で格好のプロブとなっており、トランジット惑星系に対するヘリウム線の透過分光観測によって大気散逸を含む外層大気の広がりを定量化することが可能である。特に、1083 nmのヘリウム三重線を生成する励起状態の形成には恒星からのX線・紫外線（XUV）による基底状態からの遷移（一度イオン化したものが再結合する場合も含む）が寄与するため、中心星放射による長期間の惑星大気加熱・散逸を議論するうえで本観測は非常に有用とされている^[17]。我々は、短周期系外惑星に見られるスーパーアースの統計的欠乏（半径ギャップ）^{*6}と中心星放射による惑星大気散逸機構の関係を調

^{*5} ただし、ごく最近年齢300万年程度の遷移円盤を持つIRAS 04125+2902というT-タウ型星のまわりで誕生直後のトランジット惑星が発見され、惑星の公転面と円盤面が有意にずれていることが報告された^[15]。惑星の誕生後に軌道がそのような短時間でどのようにしてずれたのかははっきり分かっていない。

^{*6} 半径が1.5地球半径から2.0地球半径の範囲の惑星の存在頻度がその前後のサイズの惑星（1.5地球半径以下または2.0地球半径以上）に比べて統計的に有意に少ない特徴は半径ギャップと呼ばれる^[18]。現在の標準シナリオでは、もともと薄い大気を持っていた惑星が中心星からの放射等によってほとんどの大気を喪失することで半径ギャップが形成されたと考えられている。

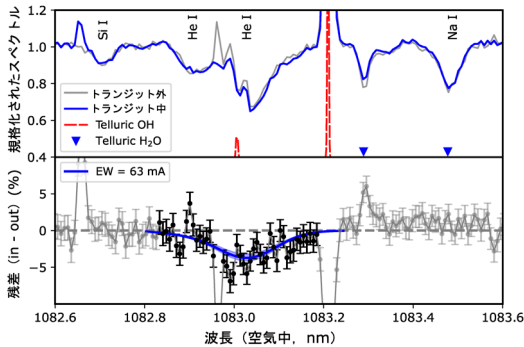


図5 K2-33bの透過分光観測。(上)トランジット中とトランジット外の複数のフレームをそれぞれ平均して比較したもの。(下)トランジット内外の平均スペクトルの残差。ヘリウム線(He I)で数%の超過吸収が確認できる。[16]をもとに改変。

査するため、IRDを用いた透過分光観測をいくつかのトランジット惑星系で実施してきた。これまでに十数個の系外惑星に対してヘリウム線の透過分光観測が行われたが、そのほとんどの惑星ではヘリウム大気による超過吸収は検出されず大気散逸等の兆候は見られなかった。ただし、年齢が特に若い系外惑星(K2-33b, HIP 67522b)では図5に例を示したように、ヘリウム三重線での強い超過吸収が観測され、大規模な大気散逸が発生している可能性が高いことを明らかにした[16]。この結果は、惑星大気の散逸・進化が主に中心星からのXUV照射によって駆動されるという「光蒸発」仮説と整合的であるが(恒星XUV放射は年齢が1億年未満の特に若い時期に強力であるため)、観測されている系外惑星の分布を説明するには系の年齢とともに大気散逸率がどのように変化するかなど、さらなる観測を通じた検証が必要である。

アストロバイオロジーセンターでは、(2)の相互相関法を用いた惑星大気観測も推進してい

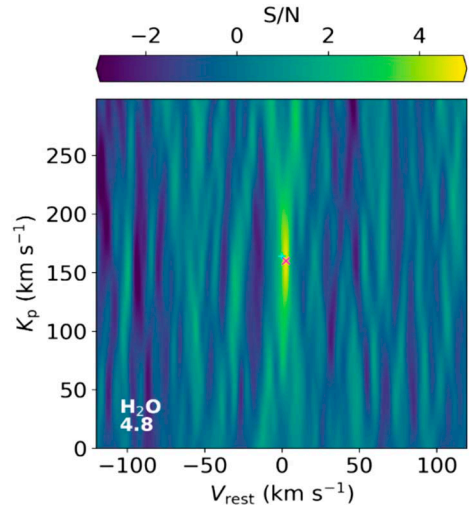


図6 検出されたHD 149026b大気中の水のシグナル(検出S/N比のマップ)。相互相関法を用いた大気観測については、惑星大気の個別のスペクトル線を分離できないため、モデルスペクトルと観測スペクトルの相互相関関数のピークを解析して検出を議論する。その際、この図のように惑星の視線速度の振幅(K_p)と恒星の固有視線速度(V_{rest})を変数とする場合が多い(クレジット: アストロバイオロジーセンター)。

る。本大気観測は、ターゲットとなる惑星の放射光(または透過光)スペクトルの理論テンプレートを作成し、それと実際に高分散分光観測で取得される恒星(＋惑星)スペクトルとの相互相関関数を計算してその時系列データを解析することで、恒星スペクトル中に現れるわずかな惑星大気シグナルを探る手法である[19]。これまでの観測では、IRDを用いたウルトラホットジュピター^{*7} WASP-33bなどの放射分光観測が行われ、系外惑星大気として初めてヒドロキシラジカル(OH)分子を検出するなどの成果を上げている[20]。ヒドロキシラジカル分子は、極端に高温な環境で水分子が解離して生成されたと考えられており、WASP-33bのような極限環境を持つ惑

^{*7} 高温な中心星のごく近傍を公転する特に高温のホットジュピターを指し、中性原子・イオン状態の金属を大気中に持つなど通常の惑星とは異なる大気特性を持つ。

星は大気中の化学反応や循環等を調査するテストベッドとなっている。WASP-33bのほかにも、相互関係法を用いた大気観測としてHD 149026bと呼ばれるホットサタンが調査されており（観測にはスペイン・カラルアルト天文台3.5 m望遠鏡の近赤外線分光器CARMENESが使用された）、透過分光データからの解析からHD 149026bの大気中に水（水蒸気）が検出されている（図6）。高分散分光観測による系外惑星大気中の水の検出は、将来の30–40 m級望遠鏡を用いた地球型惑星を対象としたバイオシグネチャー探査において重要なマイルストーンにもなっている。なお、HD 149026bのデータ解析はアストロバイオロジーセンターの大学院生が主導した [21]。

4. まとめ・今後の展望

本稿では、アストロバイオロジーセンターが実施してきた研究の中でも、2010年代半ばから急速に発展した近赤外線高分散分光を用いた系外惑星観測について概観した。近赤外線観測は低温度星や若い恒星に対して強みを持ち、これらの天体はハビタブル惑星候補の探査と惑星形成進化論の検証等で極めて重要な役割を果たす。小型惑星探査では、我々はすばる望遠鏡の近赤外線分光器IRDを用いた晩期M型矮星まわりのブラインドの視線速度サーベイを実施している。その成果として、すでにRoss 508bなどのユニークな小型惑星を発見しており、サーベイ終了後の今後数年以内にさらなる発見報告を予定している。また、IRDを用いた視線速度測定は、K2、TESSなどの衛星によるトランジット惑星探査との連携観測でも強力なツールとなっており、我々は2030年代、2040年代のハビタブル惑星候補の特徴づけを目的とした将来観測において最優先となりうる惑星（K2-415b、

GJ 12b等）の発見確認に貢献している。

惑星探査と並行して、アストロバイオロジーセンターでは見つかった惑星の特徴づけにも努めており、近赤外線高分散分光という文脈では、ロスター効果等を用いた軌道傾斜角測定や透過分光・放射分光による系外惑星大気の観測でも、惑星系の形成・進化、大気モデル等の検証で鍵となる成果を上げた。本稿では紹介しきれなかったが、系外惑星以外にもIRDや関連装置であるREACHを用いた褐色矮星の大気観測でも新規性の高い結果 [22] を発表している。

アストロバイオロジーセンターでは今後も高分散分光による系外惑星探査は継続する。特に高精度視線速度観測は、「質量」という惑星の持つ特性の中でも最も基本的な物理量を提供するため、今後もその重要性が失われることはなく^{*8}、継続的な装置開発とデータ解析技術の開拓が不可欠となっている。アストロバイオロジーセンターでは、2040年代に稼働を予定しているHabitable Worlds Observatory (HWO) などによる将来のハビタブル惑星候補の特徴づけを実施するための準備として、その観測対象となる惑星の発見を目指して太陽型星まわりの地球型惑星探査を2030年代に実施する計画である。具体的には、高効率かつ超広帯域の可視光高分散分光器を開発し、太陽型星で未踏領域である視線速度振幅が「 cm s^{-1} オーダー」の小型惑星（図1の影付きの領域）の探査を行う。こうした系外惑星探査における「低温度星から太陽型星への回帰」を通じて、我々の住む太陽系の惑星系としての位置づけの再確認も目指している。

^{*8} トランジット観測との連携や将来の直接撮像観測による地球型惑星探査においても、惑星質量の測定は最も重要なステップの一つである。特に、直接撮像観測では観測量である惑星の反射・放射フラックスのみからは精密な質量推定が困難であり、惑星質量の不定性は惑星大気の特徴づけにも不定性を生む。

謝 辞

この原稿の執筆は、天文月報編集委員であるアストロバイオロジーセンターの日下部展彦さんに提案していただきました。また、天文月報編集委員の鈴木大介さん、宮本祐介さんには本原稿を丁寧に読んでいただき有益なコメントをいただきました。この場を借りて感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/> (2025, 04.02)
- [2] Tamura, M., et al., 2012, Proc. SPIE, 8446, 84461T
- [3] Kotani, T., et al., 2018, Proc. SPIE, 10702, 1070211
- [4] Howell, S. B., et al., 2014, PASP, 126, 398
- [5] Ricker, G. R., et al., 2014, Proc. SPIE, 9143, 914320
- [6] Harakawa, H., et al., 2022, PASJ, 74, 904
- [7] Zeng, L., et al., 2019, PNAS, 116, 9723
- [8] Hirano, T., et al., 2021, AJ, 162, 161
- [9] Hirano, T., et al., 2023, AJ, 165, 131
- [10] Kuzuhara, M., et al., 2024, ApJ, 967, L21
- [11] Winn, J. N., et al., 2005, ApJ, 631, 1215
- [12] 平野照幸, 2012, 天文月報, 105, 131
- [13] Albrecht, S. H., et al., 2022, PASP, 134, 082001
- [14] Hirano, T., et al., 2020, ApJ, 890, L27
- [15] Barber, M. G., et al., 2024, Nature, 635, 574
- [16] Hirano, T., et al., 2024, MNRAS, 530, 3117
- [17] Oklopčić, A., & Hirata, C. M., 2018, ApJ, 855, L11
- [18] Fulton, B. J., et al., 2017, AJ, 154, 109
- [19] Brogi, M., et al., 2012, Nature, 486, 502
- [20] Nugroho, S. K., et al., 2021, ApJ, 910, L9
- [21] Rafi, S. A., et al., 2024, AJ, 168, 106
- [22] Kawashima, Y., et al., 2024, arXiv e-prints, arXiv: 2410.11561

Near Infrared Spectroscopy and Astrobiology

Teruyuki HIRANO^{1,2}

¹*Astrobiology Center, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

²*National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

³*SOKENDAI, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Exoplanets and high-dispersion spectroscopy have historically had a close relationship, and high-dispersion spectroscopy has played an important role not only in exoplanet searches using the radial velocity method, but also in confirmation of transiting-planet candidates and characterization of planetary orbits and atmospheres. Since the mid-2010s, exoplanet observations using high-dispersion spectroscopy in the near-infrared have been attracting attention, and it has been proved to be a powerful tool in planet searches and planet characterization for cool stars (mainly M dwarfs) and very young stars. In this article, we review the research activities at the Astrobiology Center and present results of exoplanet explorations obtained through near-infrared high-dispersion spectroscopy.