

# 2020年度最優秀研究者賞受賞記念論文 低質量星まわりの太陽系外惑星探査

平野 照幸<sup>1</sup>

2021年9月21日受領, 査読を経て2021年10月11日受理

(要旨) 天の川銀河に最も多く存在する低質量星は太陽型星に比べて系外惑星の探査が遅れており, 特に有効温度が3500Kを下回る中期-晩期M型矮星はそのまわりの惑星の分布や特徴について不明な点が多い. 本稿では, ハビタブルゾーン付近に存在する小型惑星の探査に有利なこれら低質量星に焦点を当て, 最近の系外惑星探査の現状を報告する. 前半部は, 近年の衛星観測(特にK2)によるトランジットサーベイと自ら展開した地上望遠鏡を用いた追観測について紹介し, これら観測によって明らかになった低質量星まわりのトランジット惑星の特徴を概観する. 後半では, 晩期M型矮星を対象とした惑星探査のための近赤外視線速度法の開拓について詳述し, 最近すばる望遠鏡に搭載された近赤外分光器IRDを用いたM型矮星まわりの惑星の観測成果を述べる.

## 1. はじめに

太陽系外惑星(以下, 系外惑星)の存在が確認されてすでに25年以上が経過し, 我々の持つ「惑星系」の概念はこの間に劇的に変化した. 最初に見つかった太陽型星まわりの系外惑星である「ペガスス座51番星b」は公転周期4日あまりの巨大ガス惑星(ホットジュピター)であったが[1], これは「系外惑星系」として太陽系のような姿を想像していた人たちにとって異形とも呼べるものであった. その後観測が進み, ペガスス座51番星bのようなホットジュピターを持つ惑星系は観測バイアスを補正するとそれほど多くはないことが明らかになったが(太陽型恒星の1%未満), 2000年代の視線速度法(惑星の重力による恒星のふらつきをスペクトル線のドップラー偏移としてとらえる手法)によるサーベイ観測や2009年以降の宇宙望遠鏡を用いたトランジット法(恒星の前を惑星が通過して恒星が減光する現象から惑星を検出する手法)を用いた探査によって, 銀河系内の太陽

型恒星のまわりには比較的短周期(< 100日)の地球よりも少し大きいサイズの惑星(海王星サイズの惑星の加えて「スーパーアース」と呼ばれる半径が地球の2倍以下程度の惑星)が最も頻繁に存在することが明らかになった. スーパーアースのような惑星は太陽系には存在せず, 逆に太陽系のように木星サイズの巨大惑星を外側に持つような系外惑星系もそれほど多くないことも明らかになっている[2]. すなわち, 太陽系は系外惑星系も含めた一般の「惑星系」という観点ではむしろマイノリティに属する系と言える.

ではすでに4,500個以上見つかっている系外惑星をもって, 「惑星系の全体像」の理解が進んだかと問われるとそうとも言いきれない. まず, 系外惑星の発見には観測バイアスがつきものであるが, 近年発見件数としてほぼ9割を占めている視線速度法, トランジット法はいずれも短周期かつ(質量もしくは半径が)大きい惑星に対して感度が高いため, 周期十年以上の長周期の惑星やサイズが地球以下の惑星については正確な分布や存在頻度がよく分かっていない. また, 惑星が発見される中心星の特徴についても偏りがあり, これまでに見つかった惑星の約9割

1.自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター  
hd17156b@gmail.com

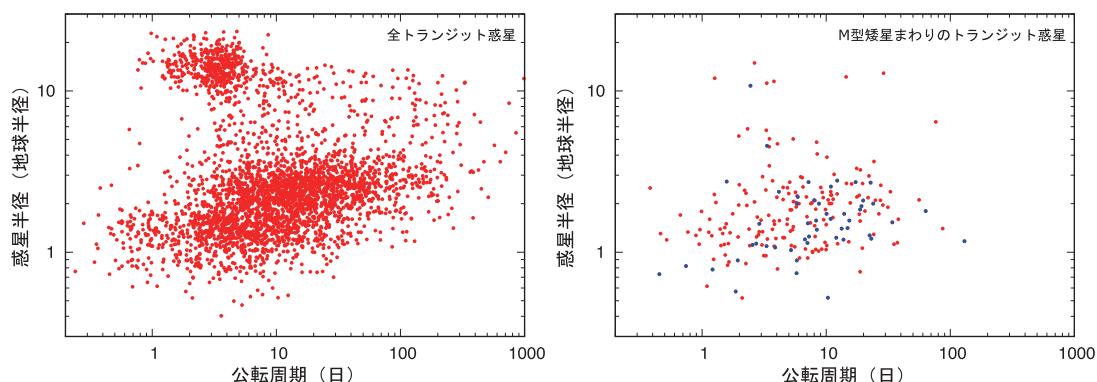


図1: これまで報告されている全トランジット惑星(左)とM型矮星まわりのトランジット惑星(右)の周期と半径の分布。右のパネルでは、2015年以前に知られていた約50個のトランジット惑星を青点で示してある。もとのデータは、NASA Exoplanet Archive(<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>)から取得。

は太陽に似た星(スペクトル型でF, G, K 型の恒星)のまわりで見つかった。これは、太陽型恒星が一般に可視光で明るく、スペクトルも吸収線を豊富に持つことからトランジット法・視線速度法による探査が比較的容易であったことに起因する。一方、我々の銀河系内にはM型矮星と呼ばれる低温度・低質量(一般に質量は太陽の60%以下)の恒星が最も多く(60%以上)存在する事が知られている<sup>1</sup>。図1にトランジット法で見つかった惑星の公転周期と半径の関係をプロットしてある。左のパネルが全ての恒星のまわりの分布図、右のパネルがM型矮星まわりの惑星に限定した場合のトランジット惑星の分布である。このように、太陽型恒星のまわりの惑星についてはある程度詳細な構造が明らかになっている一方で、M型矮星まわりの惑星については主に可視光で暗いことから系外惑星探査が遅れている。

M型矮星まわりの系外惑星探査は、単にこれまであまり良くわかっていなかった低温度・低質量の恒星のまわりでの惑星形成や進化を明らかにするのみならず、宇宙生物学的な観点でも重要になる。低温度かつ半径の小さいM型矮星は、全表面から放射されるエネルギーが太陽型恒星よりも桁違いに小さい

ため、M型矮星まわりの惑星は同じ軌道長半径でも平衡温度が低くなる。そのため、例えば地球上にあるような生命にとって必要不可欠な液体の水が存在する軌道領域(ハビタブルゾーン)は中心星にずっと近い場所になり、公転周期も短くなる。上述したように、トランジット法、視線速度法による系外惑星探査では短周期の惑星ほど検出が容易なため、例えばハビタブルゾーン内の惑星に照準を当てて惑星探査を実施しようとするると必然的にM型矮星は有望な観測対象となる。

筆者はこうした研究背景のもと、過去5年あまり「低質量星(M型矮星)まわりの系外惑星の発見と特徴付け」を推進してきた。本稿ではその取り組みの中でも、(1) M型矮星まわりのトランジット惑星探査、(2) IRDの開発と近赤外線視線速度測定による系外惑星探査、という2つのテーマを取り上げ、低質量星まわりの探査の現状を紹介する。本稿で扱う低質量星の分類と性質は表1にまとめてある。

表1: M型矮星の分類。スペクトル型のサブタイプと有効温度、質量の関係は[3]に基づくおおよその範囲。 $M_{\odot}$ は太陽質量を表す。なおM型矮星の半径は、大雑把に質量に比例する事が知られている。

名称	サブタイプ	有効温度 (K)	質量 ( $M_{\odot}$ )
早期 M 型星	M0-M2	3500-4000	0.4-0.6
中期 M 型星	M3-M5	3000-3500	0.15-0.4
晩期 M 型星	M6-M9	2400-3000	0.08-0.15

<sup>1</sup>なお、より大質量の恒星が時間進化して低温化した結果M型矮星と同程度の有効温度(3000-4000K)を持つ場合があるが、それらの恒星はM型巨星と呼んで区別される。本稿で扱う「M型星」は全て太陽よりも小さいM型矮星である。

## 2. M型矮星まわりのトランジット惑星探査

M型矮星まわりの惑星の中でも、トランジット惑星は特に重要な観測ターゲットである。というのも、M型矮星は一般に半径の小さいため、同じサイズの惑星であっても恒星の前を惑星が通過した際に減光率が大きくなり(=トランジットがより深く)なり、相対的に大きな観測シグナルが生み出されるためである。例えば、太陽の前を地球(半径比109:1)が通過する様子を仮に太陽系外から観測したとすると、減光率(=トランジットの深さ)は0.01%以下となる。一方、半径が太陽の0.2倍の中期M型星の前を地球と同じ半径の惑星が通過すると、トランジットの深さは約0.2%となり、太陽型星の場合の25倍ものシグナルが観測される。そのためM型矮星は小型惑星を発見する上でも有利になり、晩期M型星(=質量・半径が小さい)ほどその傾向は顕著である。さらに、トランジット惑星に対しては、後述するように惑星大気の「光学的厚み」の波長依存性を利用することで、トランジット中の分光観測により惑星大気の組成、状態を調査することが可能である(透過分光法)。M型矮星まわりのトランジット惑星ではトランジットが深いことに比例して光学的厚みの波長による違いも大きくなるため、透過分光法による(小型)惑星大気の探査においても極めて有利になる。

### 2.1 K2 ミッションとKESPRINTコンソーシアムによる探査

M型矮星を対象としたトランジット惑星探査はこのように良いことづくめに聞こえるが、筆者が本格的にM型矮星まわりのトランジット惑星観測を開始した2014年当時はM型矮星まわりに見つかったトランジット惑星の数はわずか40-50個程度であった。これは、一般にM型矮星が可視光で暗く、2000年代に展開されていた地上トランジットサーベイではM型矮星を主要な観測ターゲットとしていなかったことによるところが大きい。その当時見つかったM型矮星まわりのトランジット惑星のほとんどは、ケプラー宇宙望遠鏡による最初の4年間の「プライムミッション」で検出された惑星で、非常に暗いM型矮星のまわりで見つかったものが多かった。

転機が訪れたのは2013年のことで、この年にケプラー望遠鏡は姿勢制御装置の故障によってプライムミッションを中断した。その後NASAの技術者が中心となって、残った姿勢制御装置と観測機器の活用が検討され、2014年に太陽からの輻射圧による望遠鏡の不安定化をうまく制御することで黄道面に沿った観測領域を順次モニター観測する第二次ミッション「K2」としてトランジット惑星探査が再開された。ケプラー望遠鏡によるプライムミッションでは、はくちょう座方向の同じ領域が4年間継続的に観測されたが、K2では太陽光が鏡に入射するのを避けるために約3ヶ月に一度観測領域を切り替えるという戦略が取られ、新たな観測領域が順次探査された。K2は2014年から2018年9月に最終的に燃料が枯渇するまで、4年半に渡り黄道面に沿った計20領域を観測した(ただし一部の観測領域はお互いに重複しており、同じ星を複数の期間観測していたものがある)。

K2では新たな探査領域がサーベイされたため、プライムミッションに比べて測光データが取得された「明るい」恒星(例えばV等級で13以下)の数は飛躍的に増加した。ただし、K2はもともと想定されていなかったミッションであったため、当初画像データのみが公開され、精密な光度曲線の作成やトランジット惑星候補の検出は世界中のコミュニティに任せられることとなった。そこで筆者は、大学院時代から交流のあった数名の研究者らと協力して、K2で見つ

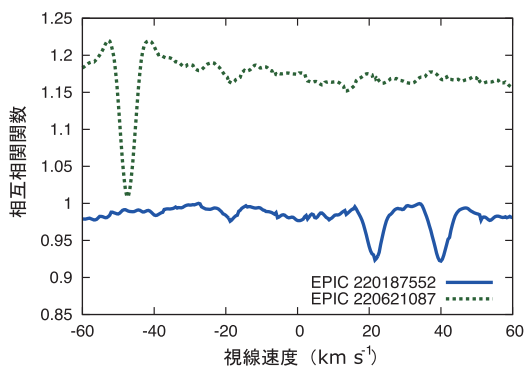


図2: すばる望遠鏡可視光高分散分光器HDSで取得されたM型矮星のスペクトルとM型矮星の理論スペクトルの相互相関関数。相互相関関数は天体スペクトルの平均的なスペクトル線形状を反映する。EPIC 220187552 は2つのスペクトル線があることから分光連星であることがわかる。

るトランジット惑星候補の追観測を目的とした国際チームを立ち上げ、K2データの解析と地上望遠鏡を用いた惑星候補の発見確認を行う共同研究体制を作った。2016年以降は欧州主導の同様のK2追観測チームと合流し、KESPRINTと呼ばれる名称のコンソーシアムとなった。

一般にトランジット惑星探査では、

1. 恒星の測光モニター観測による惑星候補の検出、
2. 高分解能撮像・分光観測・トランジット測光追観測等による惑星候補の偽検出の検証と中心星の特徴付け、
3. 視線速度観測等による独立な確認、

という3つのステップを経て正式にトランジット惑星として認定される。KESPRINTではこれらの作業を各専門家が分担して実施し、K2で得られたデータの解析から独自の「惑星候補」のカタログを作成した。惑星候補の中には、一定の割合で偽検出(false positive)が含まれており、主なものでは(a) 食連星を含む多重連星系(3重連星の中の2つの星が食連星となっている「階層食連星」(HEB) が最も多い)、(b) 測光のアパーチャー内に対象天体(最も明るい)とは別の食連星である背景星が紛れ込んでいるケース(BEB)、(c) 非常に浅い食( $\leq 1-2\%$ )を起こす食連星(EB)、が代表的なトランジット惑星の偽検出である。ケプラー/K2の測光は、一般に各天体で $20 \times 20$ 平方秒を超える測光アパーチャーを採用するため、対象天体以外に近くの別の暗い星の光が紛れ込んでしまうことがしばしば起こる。それがたまたま食連星だったりすると上記(a)、(b)のような偽検出につながってしまうため、各天体ごとにこうしたシナリオを排除する丁寧な追観測が必要となる。

筆者はK2追観測チームの中で上記ステップのうち2. と3. の部分に主に焦点を当て、惑星候補を持つ恒星に対してすばる望遠鏡、岡山188cm望遠鏡等を用いた追観測を実施した。トランジット惑星候補が偽検出かどうかの検証には、高分解能撮像と高分散分光観測が特に有効である。前者は、惑星候補を持つターゲット天体の近く(一般に5秒角以内)にターゲットに付随する伴星や背景星がないかどうか

を確認するのに用いられる。もし近くに別の星が確認された場合、その星が食連星だったときにK2観測で観測された食の深さを説明できるかどうかを検討する。一方、高分散分光観測は、視線速度測定に用いられるほか、単一のスペクトルからでも多くの情報を取り出すことができる。例えば、観測されたスペクトルに対して同じスペクトル型の理論スペクトルと相互相関を計算することで、恒星スペクトル線の「平均的な形」を取り出すことができる。図2に、例として筆者らが惑星候補を持つと同定したM型矮星の高分解能スペクトルから取り出された相互相関関数を示す。相互相関関数は観測された全波長域の平均的なスペクトル線の形状を反映する。EPIC 220621087の相互相関関数は単一の吸収線形状が見られるのに対し、EPIC 220187552はスペクトル中に二つの吸収線が混在している事がわかる。筆者はこうした惑星候補を持つ天体の追観測と各天体ごとの詳細な偽検出シナリオの検討によって、これまでK2で観測された恒星のまわりで100個以上のトランジット惑星の発見確認に貢献している。

## 2.2 M型矮星まわりの惑星の性質

KESPRINTコンソーシアムによるK2天体の観測の中でも、筆者は特にM型矮星まわりの惑星候補に注目して、上記追観測を主導した。上述したように、M型矮星まわりのトランジット惑星の数は2014-2015年当時非常に限られており、一般的な性質もよく分かっていなかったため、多くのM型矮星が観測されたK2をきっかけにM型矮星まわりトランジット惑星探査に取り組んだ。筆者が主導した追観測で確認された惑星の中には、当時数例しか見つかっていなかった中期M型星まわりのミニネプチューンK2-28b(公転周期2.3日)[4]、早期M型星まわりのハビタブルゾーン付近に存在するスーパーアースK2-155d(公転周期40.7日)[5]などが含まれている。なおK2-155系は複数惑星系で、K2-155dを含めて少なくとも3個のトランジット惑星が同じ星を公転している事がわかっている。

2018年頃になるとKESPRINTの活動を含むトランジット惑星探査によりM型矮星まわりで確認された惑星が増えたことで、その統計的な性質を議論することも可能になった。特に筆者らは、M型矮星まわ

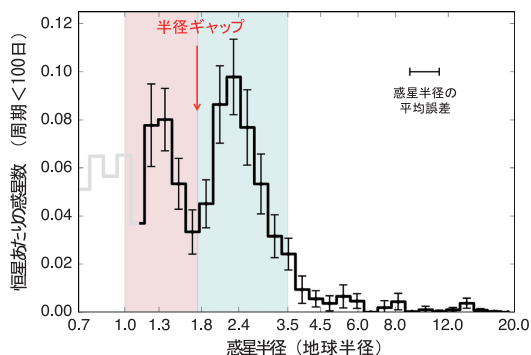


図3: 半径ごとのトランジット惑星の存在頻度(主に太陽型恒星まわりのトランジット惑星の分布:[7]の図を改変).

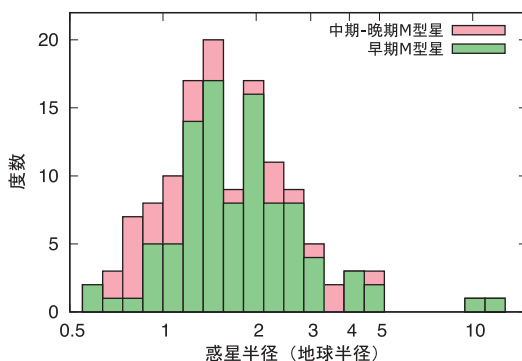


図4: M型矮星まわりのトランジット惑星の半径のヒストグラム(2018年当時:[6]の図を改変).

りの惑星の半径について以下のような特徴を明らかにした。

### 1. 半径ギャップの確認

ケプラー望遠鏡によるプライムミッションによって、トランジット惑星の半径分布(半径ごとの存在頻度)は地球半径の1.5–2.0倍のところに谷(「半径ギャップ」とも呼ばれる)が存在することが報告されている(図3; [7])。このギャップの存在は、中心星近くの原始惑星が大気を獲得後に何らかのポストプロセス(中心星放射による光蒸発や惑星内部熱による剥ぎ取りが有力)によって形成された可能性が高いとされているが[8, 9], 半径ギャップ自体は太陽型恒星まわりの惑星でのみ確認されていたため中心星型依存性などは不明であった。筆者らは、K2で確認された惑星を加えてM型矮星まわりのトランジット惑星について同様に調査したところ、図4のように太陽型星まわりの惑星と同様に半径ギャップと思われる惑星頻度の欠乏が見られた。

### 2. M型矮星の金属量と惑星半径の相関

中心星大気の金属量(ここでは鉄元素の多寡)は、惑星が形成される原始惑星系円盤内の固体物質の量と相関があるとされ、以前から巨大惑星の存在頻度との強い相関があることが知られていた[10]。スーパーアースなどの比較的小型の惑星についても、中心星金属量と惑星存在頻度との相関が度々議論されているが、文献やサンプルによって解釈は異なっておりはっきりした結論は得られていない。筆者らによ

るK2の追観測では、M型矮星まわりの惑星候補の発見確認を実施する中で分光観測による中心星パラメータの推定も行っており、得られる情報の中には金属量も含まれている。そこで、筆者らは発見した惑星を含めたM型星の金属量とそのまわりで見つかったトランジット惑星の半径の関係を調査したところ、早期M型星(有効温度が3500–4000KのM型矮星)ではあまり有意な相関は見なかったが<sup>2</sup>、中期-晩期M型星(有効温度が3500K以下のM型矮星)については中心星金属量と各系で見つかった最大のトランジット惑星の半径に図5のような相関が見られた。

上記1. や2. は、いずれもM型矮星まわりの惑星の形成進化を理解する上で貴重な情報となる。例えば、M型矮星は同じ軌道長半径の惑星でも太陽型星に比べて中心星から受け取るフラックスはずっと弱い反面、全波長での(ポロメトリックな)フラックスに対してX線や紫外線(XUV)として照射されるエネルギーは相対的に大きいことが知られている。半径ギャップがM型矮星でも存在するという事実は、半径ギャップの形成にポロメトリックなフラックスよりもむしろ惑星大気の光蒸発により強く関係するXUVによる寄与が大きい可能性を示唆している。また、M型矮星のまわりでは惑星形成時に存在した原始惑星系円盤の質量も太陽型星まわりの円盤に比べて小さい事が知られているが、太陽型星まわりの惑星ではそれほど顕著に見られていない惑星サイズ

<sup>2</sup>ただし3地球半径を超える惑星は全て太陽を超える金属量を持つM型矮星のまわりでのみ見られた。

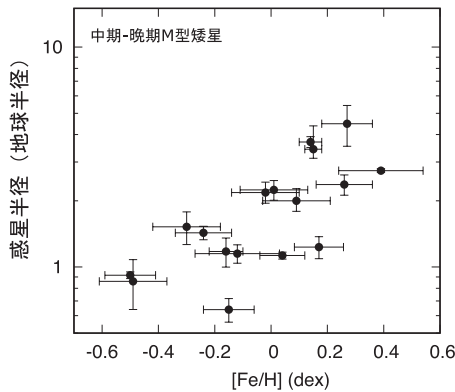


図5: 有効温度 $T_{\text{eff}} < 3500\text{K}$ の中期-晩期M型矮星の金属量とそのまわりのトランジット惑星の半径。横軸の $[\text{Fe}/\text{H}]$ は恒星大気中の水素に対する鉄元素の多寡を表し、太陽と同じ数密度比を持つ場合が $[\text{Fe}/\text{H}]=0$ として10を底とした対数で表される(すなわち鉄元素の数密度が太陽の10倍の場合は $[\text{Fe}/\text{H}]=1.0$ )。複数のトランジット惑星が見つかった系については、系内の最大の惑星の半径をプロットしてある([6]の図を改変)。

と中心星金属量の相関が見られたことで、中期-晩期M型矮星のまわりではスーパーアース以上の比較的大きな惑星の形成に鉄を始めとする固体物質の多寡が極めて大きな役割を果たしているという示唆が得られた。ただし、現時点ではこうした低質量星まわりの惑星の特徴や相関について明確な結論を得るには時期尚早という他ない。現在進行中のTESS<sup>3</sup>ミッションを始めとするM型矮星まわりの惑星のさらなる発見と特徴付けによって、今後ケプラー/K2ミッションで得られた知見の検証を行っていく必要がある。

### 3. IRDの開発と近赤外線視線速度測定による系外惑星探査

#### 3.1 晩期M型矮星まわりの惑星探査

ケプラープライムミッション、K2、最近ではTESSによるトランジット惑星探査はM型矮星まわりの惑

星の存在頻度や特徴について過去10年間で多くの事実を明らかにしたが、一方でこれらの衛星トランジットサーベイはM型矮星まわりの惑星探査について以下のような短所がある。まず、一般に望遠鏡口径が小さく、観測は主に可視光ブロードバンドで行われるため発見できる惑星は中期M型星(～M5)までで晩期M型星まわりの惑星検出感度は低い。次に、トランジットが起こる確率は恒星半径と惑星の軌道長半径の比( $R_*/a$ )にほぼ比例するため、軌道長半径の大きくなる長周期の惑星の検出効率は低くなる。(特に晩期)M型矮星は恒星半径も小さいためトランジット法による長周期惑星の発見が難しい。さらに、K2やTESSによるサーベイでは1観測領域あたりの観測期間が短い(TESSは1セクターあたり約1ヶ月間のみ)、30日を超えるような長周期の惑星については著しく感度が悪化する。

したがって、特に晩期M型矮星(M5～)まわりの惑星探査を実施する上では口径の小さい衛星によるトランジット探査よりも口径の大きい地上望遠鏡を用いた探査のほうが向いている場合が多く、実際にトランジット法では地上望遠鏡を用いた晩期M型矮星のサーベイ観測によりこれまでで最も低温な恒星まわりのトランジット惑星系であるTRAPPIST-1系が見つかった[11, 12]。また、地上観測では大口径望遠鏡による視線速度測定による系外惑星探査も晩期M型矮星まわりで惑星を発見する上で有望である。視線速度法もトランジット法と同様に短周期かつ質量の大きい惑星に対して検出感度が高いが、トランジット確率(～ $R_*/a$ )のような著しい観測バイアスはないため、比較的長周期の惑星に対しても検出感度が高いとされる。惑星の軌道運動による恒星の視線速度変化の振幅  $K$  は

$$K = 212908.30 \left( \frac{M_*/M_{\odot}}{P_{\text{orb}}/\text{day}} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{q \sin i_o}{(1+q)^{\frac{2}{3}} \sqrt{1-e^2}} \quad (\text{m s}^{-1}) \quad (1)$$

と表される。ここで、 $M_*$  は中心星質量、 $P_{\text{orb}}$  は惑星公転周期、 $q$  は惑星と中心星の質量比(= $M_p/M_*$ )、 $i_o$  は観測者の視線方向と軌道公転軸のなす角度、 $e$  は軌道離心率である。すなわち、 $K$  は $M_*^{-2/3}$  にほぼ比例するため、同じ質量と周期を持つ惑星であっても質量の小さいM型矮星の方が相対的に大きな観測シグナルが生み出される。1節で述べたように、

<sup>3</sup>2018年にNASAが打ち上げたトランジット系外惑星探査専用の宇宙望遠鏡で、合計 $24^{\circ} \times 96^{\circ}$ の視野角をカバーする超高視野観測により明るい恒星まわりのトランジット惑星探査を実施している。最初の3年間の観測で、2021年10月の時点ですでに4511個の惑星候補を検出している。

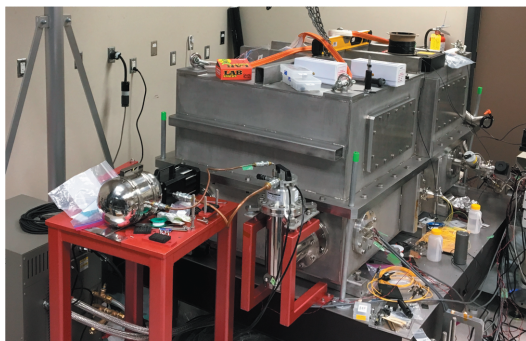


図6: ハワイ大学ヒロキャンパスの実験室で安定性試験を実施していた当時のIRD 分光器の写真。光学系は真空チェンバー(灰色の箱)の中に全て格納されている。

M型矮星は低温で半径も小さいことでハビタブルゾーンやスノーラインが中心星近くに存在するため、視線速度法による探査はこうした領域に存在する惑星の頻度や特徴を探る上で大変有利となる。

### 3.2 IRD の概要

視線速度法による晩期M型矮星まわりの系外惑星探査を行う上で、近赤外線での観測が有効である。これは、一般に中期-晩期M型矮星は可視光で暗い一方、波長800nmを超える近赤外線では明るく、高精度視線速度測定に必要なS/N比を達成しやすいからである。日本では2012年頃からM型矮星を対象とした近赤外視線速度観測を実施する計画が検討され[13]、筆者も開発に参加したIRD (InfraRed Doppler instrument) と呼ばれる近赤外高分散分光器が2017年にすばる望遠鏡に搭載された[14]。IRDは、波長950nmから1730nm(Y; J;H バンド)の非常に広い波長域を一度でカバーする近赤外分光器で、約70,000の高波長分解能を達成する。図6にIRD分光器の写真を示すが、IRDは世界の他の視線速度測定専用分光器(例えば、ESO/HARPSやCAHA3.5m/CARMENES)と同様に検出器を含む分光器全体をチェンバーの中に入れて高い精度で分光器の温度を制御することで、温度変化に起因するスペクトルの変化(ドリフト)を最小化し、高精度な視線速度測定を実現するというコンセプトが採用されている。

一般に系外惑星探査に必要な高確度・高精度な視線速度測定( $1-2 \text{ m s}^{-1}$ )を実現するには、可視光・近赤外線を問わず、得られたスペクトルの「正確な」

波長を知ることが不可欠である。通常、高分散分光観測(波長分解能50,000以上)ではカメラの検出器上でのスペクトルの1ピクセルがカバーする速度分散は $1 \text{ km s}^{-1}$ 程度であるため、上記 $1-2 \text{ m s}^{-1}$ を達成するには1ピクセルの「1000分の1」程度のスペクトル線の「ずれ」を検出する必要がある。ところが、通常の分光器による観測では分光器内の温度変化によって1晩の観測中でも0.1-1ピクセル程度のスペクトル位置のドリフトが起こる<sup>4</sup>ため、正確な視線速度の計算には天体スペクトルの波長を同時に知る波長の「ものさし」が必要となる。

IRDはチェンバー内で分光器の温度を安定化させてはいるものの、それだけでは $1-2 \text{ m s}^{-1}$ という視線速度精度を達成させるには不十分であるため、天体の光と一緒に波長較正用のレーザー光源(レーザー周波数コムと呼ばれる)を分光器内に入射させる。レーザー周波数コムは無数の輝線が周波数空間で等間隔に並んだスペクトルを生成するため、これを天体の光と同時に分光器に入射させることで天体観測時の波長のものさしとして機能させることができる。厳密には、レーザー周波数コムのスペクトルの輝線を波長ごとに詳しく解析し、輝線の形や位置の変化を追跡することで天体スペクトルの吸収線の変化のうち装置由来の成分を補正する。これにより分光器として理論上 $1 \text{ m s}^{-1}$ 以下の視線速度精度を達成する。

### 3.3 近赤外視線速度測定の開拓

上述したように、IRDは広い波長域をカバーする安定化された分光器とレーザー周波数コムにより原理的には $1 \text{ m s}^{-1}$ という近赤外線でのかつてない視線速度精度を目指して製作されたが、実際に近赤外線で見線速度を高精度に導出するには可視光での視線速度測定にはないいくつかの課題をクリアする必要があった。この中には、赤外線検出器(IRDはHAWAII2RGと呼ばれる検出器を採用)の特性が可視光分光器に用いられる通常のCCDとは異なる点や天体と波長較正用のファイバーのモダリティが近赤外線では顕著なことなどが含まれるが、最大の問題は可視光での視線速度測定では無視でき

<sup>4</sup>主に温度変化による光学素子の形状の変化、分光器内の空気屈折率の変化のために起こる。

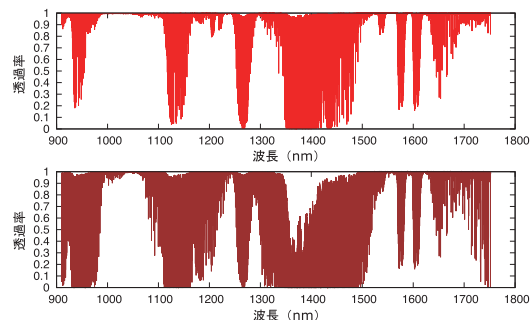


図7: IRD波長域における, ハワイ島マウナケア山頂での地球大気透過スペクトル(LBLRTM[15]による理論モデル)の例。上のパネルは大気水分量・観測エアマスが小さく, 大気吸収が特に少ない場合の透過率で, 下のパネルは標準的な観測条件における大気の透過率をプロットしてある。

ていた地球大気由来の水, 酸素等のスペクトル線が大量に近赤外スペクトルでは入ってしまうことであった。

図7に, IRDのカバーするスペクトル波長域での地球大気の透過光スペクトル(理論モデル)を示す。IRDで視線速度を測定する波長域ほぼ全域に渡って地球大気の吸収線が入っているため, 観測される天体スペクトルから恒星の視線速度を測定するにはどの波長帯でもこの地球大気透過光スペクトルの影響を考慮する必要がある。さらに, 地球大気の透過光スペクトルは観測天体の天体高度(エアマス)や観測時の大気中の水分量等によって常に変化するため(上下のパネルはその違いの一例), 画一的な透過率の補正ではなく各スペクトルごとに最適化された補正をする必要がある。

筆者は, こうした分光器の温度不安定性によるスペクトルのドリフトと地球大気吸収の影響をそれぞれ考慮した上で天体スペクトルから正確な視線速度を測定する方法論についていくつか検討した。レーザー周波数コムから導出したスペクトルの絶対ドリフトを各スペクトルの小区間ごとに補正する手法など様々な手法を試したが, 最終的に最も高い視線速度精度が達成された「スペクトルの順方向モデリング」を採用することに決めた。この手法は, 天体の(地球大気による吸収を受ける前の)本来のスペクトル(以下, テンプレートと呼ぶ)を観測スペクトルから再構築し, このテンプレートを用いて分光器で取得されるスペクトルを地球大気吸収等を含めてモデル化する

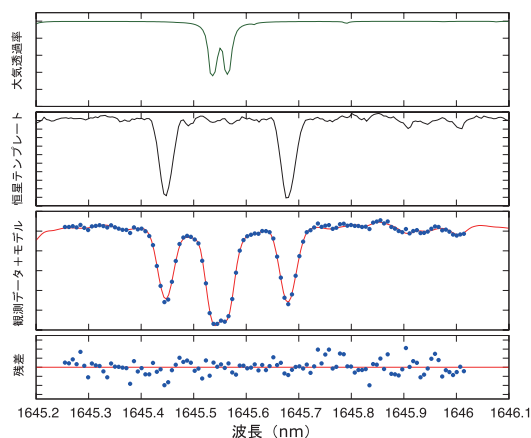


図8: 順方向モデリングを用いたフィットによりGJ436のある観測スペクトル(青点)から視線速度が導出される様子。各パネルは, 上から地球大気の透過光スペクトル $T(A; \lambda)$ , 地球大気吸収を含まない恒星テンプレートスペクトル $S(\lambda)$ , 観測スペクトル(青点)と最適モデル(赤の実線), 観測スペクトルと最適モデルの残差をそれぞれ表す。

ことで天体の視線速度を精密に導出する。すなわち, 観測されるスペクトル $f_{\text{obs}}(\lambda)$ は

$$f_{\text{obs}}(\lambda) = k(\lambda) \times \left[ S \left( \lambda \sqrt{\frac{1+v_{\star}/c}{1-v_{\star}/c}} \right) T \left( A; \lambda \sqrt{\frac{1+v_{\text{tel}}/c}{1-v_{\text{tel}}/c}} \right) \right] * \text{IP}, \quad (2)$$

とモデル化され, この中に含まれる天体の視線速度 $v_{\star}$ を導出する[16]。ここで,  $k(\lambda)$ はスペクトルの連続光成分を表す多項式で,  $*$ は畳み込み積分を表す演算子である。 $S(\lambda)$ は天体スペクトルのテンプレートで, 観測された複数のスペクトルを使って天体由来のスペクトル線と地球大気吸収由来のスペクトル線を分離し, さらに分光器由来のスペクトル線の広がりを取り除くことで生成する。 $T(A; \lambda)$ は理論モデルによる地球大気透過光スペクトルで, 大気の状態(エアマス, 水分量)を表すパラメータAが含まれる(Aは天体の視線速度 $v_{\star}$ と同時に最適化される)。IPは分光器由来のスペクトル線の広がり方を表す関数(点拡がり関数)で, 同時に取得されるレーザー周波数コムのスペクトルから求められる<sup>5</sup>。図8に, IRDで取得されたスペクトルを順方向モデリングによりフィットす

<sup>5</sup>レーザー周波数コムスペクトルに対して「最小二乗逆畳み込み」と呼ばれるアルゴリズムを適用することで各瞬間ごとの点拡がり関数が導出される。



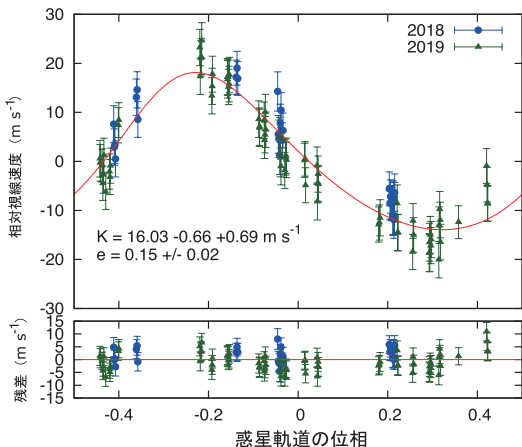


図9: IRDで取得されたM型矮星GJ436の視線速度変化(上のパネル)。惑星の位相は、トランジット中心時刻(観測者、惑星、中心星がこの順に一直線に並ぶ時間)が0となるように定義される。下のパネルは、観測された視線速度の最適モデル(赤線)からの残差を表す。

る様子を示す。

順方向モデリングは、正確な地球大気モデルスペクトルと観測時の点拡がり関数が既知の場合最も高精度な天体視線速度測定法となると期待される。しかし、近赤外域の地球大気透過光スペクトルについては理論モデルと観測されるスペクトルが一致しない場合がしばしばあり、またレーザー周波数コムスペクトルから観測時の点拡がり関数をどの程度正確に取り出せるか定かではない。そこで筆者らは、IRDのエンジニアリング観測で取得したいくつかのM型矮星のスペクトルを実際に解析し、上記順方向モデリングを適用することで視線速度を導出した。図9はその結果の一例で、周期約2.6日の海王星型惑星を持つGJ436の視線速度変化がプロットされている(惑星の公転周期で折り畳んである)。得られた視線速度振幅( $K = 16-17 \text{ ms}^{-1}$ )は文献値とほぼ一致し、上記順方向モデリング法による視線速度解析パイプラインの性能が確認された。達成された1スペクトルあたりの視線速度精度(内部誤差)はほとんどが $2.0-2.5 \text{ ms}^{-1}$ であったが、これは近赤外線を利用する同様の高分散分光器<sup>6</sup>と比較してもこれまでに達成された世界最高水準の視線速度測定精度である。

<sup>6</sup>例えば、CAHA3.5m/CARMENES NIR チャンネル、CFHT3.6m/SPIRou, HET10m/HPF など。

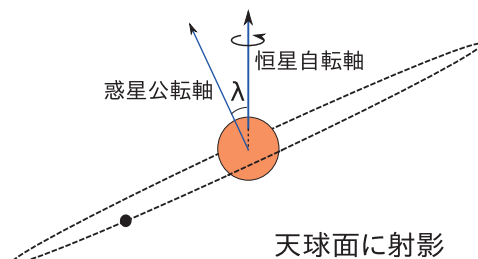


図10: 軌道傾斜角 $\lambda$ の定義。ロスター効果の観測により、星の自転軸と惑星公転軸が天球面上でなす角度を制限できる。[18] から転載。

### 3.4 IRDを用いたM型矮星周りの小型惑星の特徴付け

IRDを用いた近赤外域での高精度視線速度測定法が確立されたことで、IRDチームは2019年に晩期M型矮星を対象とした大規模な視線速度惑星サーベイ(すばる戦略枠観測:SSP)を開始した。最初の2年間のサーベイで最近ようやく初期的な成果が出始めつつあるが、そうしたサーベイ観測の紹介は本稿では割愛し、筆者らがこれまで実施したIRDを用いた別の観測成果について簡単にご紹介したい。

IRDは近赤外の広範囲の波長域を一度にカバーするため、視線速度法による惑星の発見以外にも様々な系外惑星のサイエンスに活用することが可能である。例えば、トランジット中の分光観測による系外惑星大気の探査やロスター効果を用いた系外惑星の軌道傾斜角の測定が代表的な高分散分光観測による系外惑星の特徴付けである。前者は、透過分光法と呼ばれ、トランジット中に中心星の一部の光が惑星大気をかすめてくる際に波長ごとに大気の光学的厚みが異なることを利用して惑星大気の組成や状態を制限する手法である。特にIRDの波長域(950-1730 nm)には、ヘリウム、水、酸素、ヒドロキシラジカル、一酸化炭素等の原子・分子のラインが多数存在し、いずれも惑星形成時の周辺環境や惑星大気の時間進化(散逸)等を観測的に探る上で重要な要素となる。IRDによる観測ですでにそうした大気組成はいくつかの系外惑星で調査されている[17]。詳細についてはこれら参考文献を参照されたい。

トランジット中の分光観測では、恒星視線速度の特徴的な変化(トランジット中に自転している恒星面

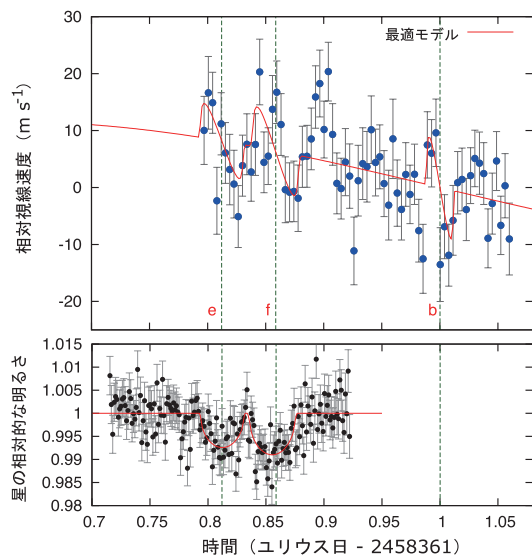


図11: TRAPPIST-1系の3つの惑星に対するロシター効果の観測(ハワイ時間2018年8月30日). 上のパネルはIRDによる視線速度測定の結果を表し, この日は惑星e, f, bがこの順番に中心星をトランジットした. 下のパネルは米国マクドナルド天文台の1m望遠鏡で同時観測されたTRAPPIST-1の光度曲線(惑星eとfのトランジットのみ観測). [19]の図を改変.

の一部が隠されることによる吸収線プロファイルの変化に由来し, ロシター効果と呼ばれる[18])から恒星の自転軸と惑星の軌道公転軸のなす角度(図10:ここでは軌道傾斜角と呼ぶ)の制限も可能である. 系外惑星の軌道傾斜角は, 本来惑星形成時の円盤と中心星の角運動量の向きや大きさを反映すると考えられているが, 惑星同士の重力散乱など, 形成後の系の軌道進化によって大きく変化することも知られている. 実際, ロシター効果による軌道傾斜角測定によって, 多くの系外惑星系で惑星の軌道面と中心星の赤道面が揃っていないことが確認されている.

これまでのロシター効果の観測では, そのほとんどが太陽型恒星まわりの巨大ガス惑星を対象としている. 一方, M型矮星まわりの惑星に対して軌道傾斜角が制限された例は非常に限られており, 2021年の時点で4,5例ほどしかない. これは, M型矮星が一般に可視光で暗い天体であるのと若い星を除いて自転速度が小さい( $v \sin i \lesssim 1 \text{ km s}^{-1}$ )事が主な原因となっている. M型矮星は惑星の形成現場となる原始惑星系円盤の質量が小さくスノーラインが中心星に近い, など太陽型恒星とは大きく異なるいくつか

の特徴を持っており, 惑星の形成進化の観点で観測的に未解明の点が多い. M型星まわりの惑星の軌道傾斜角の分布を太陽型星まわりの惑星の分布と比較することにより異なる中心星環境の惑星の形成進化に対する知見を深める事が可能となる.

筆者らは, IRDが近赤外で高いS/N比のスペクトルを取得できるという特性を生かして, いくつかのM型矮星まわりの惑星に対してトランジット分光観測による軌道傾斜角の測定を試みた. これまでに, TRAPPIST-1, けんびきょう座AU星, K2-25系などのM型矮星まわりの惑星に対してIRDによるロシター効果の測定を行い, 各惑星の軌道傾斜角 $\lambda$ を精密に制限した(いずれも $\lambda$ は $0^\circ$ と一致した). 特にTRAPPIST-1系については, 7つの地球型トランジット惑星のうち3つ(惑星b, e, f:この内, eとfはハビタブルゾーン内に存在すると考えられている)が1晩にトランジットを起こすという偶然あった機会を捉え, 3種類のトランジットを順番に観測することでこれまで報告がなかった地球型惑星に対する軌道傾斜角の測定を実施した(図11). 結果として, 「トランジット前半に正方向, 後半に負方向」という視線速度変化が観測され, 詳細なモデル化によって3つの惑星の公転軸と中心星自転軸は揃っている可能性が高いことが明らかになった( $\lambda = 1^\circ \pm 28^\circ$ )[19]. この観測によってTRAPPIST-1系では, 形成時に円盤と中心星が同じ角運動量の方向を共有していた可能性が高いことが確認された<sup>7</sup>. TRAPPIST-1は有効温度が2500–2600Kの極めて低温度の恒星であるため, 可視光では非常に暗く, 口径8–10mの望遠鏡に搭載された可視分光器でも観測は困難である. IRDはこうした低温度の恒星まわりの惑星を特徴付ける上で極めてユニークな装置といえる.

## 4. まとめと今後の展望

本稿では, 低質量星(M型矮星)まわりの系外矮星探査の現状について紹介した. 筆者がM型矮星を対象とした惑星探査を開始した2014年頃は, 確認されていたM型矮星まわりのトランジット惑星の数は

<sup>7</sup>複数のトランジット惑星を持つ系の場合惑星同士はほぼ同じ軌道面を持つが, 過去のロシター効果の観測からこの軌道面が必ずしも中心星の赤道面と一致しないことが明らかになっている.

40 - 50個程度で、しかもそのほとんどは2013-2014年にケプラー望遠鏡プライムミッションによって確認された暗いM型矮星まわりの惑星であった。その後筆者らの研究も含めたK2の成果や最近ではTESSで見つかった惑星候補の追観測によってM型矮星まわりのトランジット惑星の数は急激に増加し、現在ではその数は200個余りとなっている。惑星数が増加したことにより、本稿で紹介したような惑星半径と中心星金属量との相関など興味深い特徴が徐々に明らかになっては来ているが、より多くのサンプルを用いた正確な評価や惑星形成論を背景とした相関の解釈については今後の研究に委ねたい。

トランジット法による大規模な探査に加えて、最近では近赤外線視線速度法によるM型矮星まわりの系外惑星探査も世界的に流行している。すばる望遠鏡にも、2017年に晩期M型矮星を対象とした視線速度探査のための近赤外分光器IRDが搭載され、筆者もシミュレーションや実験による性能評価や解析パイプラインの整備においてプロジェクトに貢献した。IRDを用いた晩期M型矮星まわりの惑星サーベイ(SSP)は現在も進行中で、近い将来IRDによる最初の惑星の発見が報告される予定である。この他にも、近赤外高分散分光観測は可視光観測にはなかった「新しい目」を提供しており、トランジット惑星の軌道や大気の特徴付けを始め、ユニークな観測成果が今後も続々と出てくることが期待される。

最初の発見から25年余りの探査によって系外惑星については非常に多くの事が明らかになり、系外惑星探査は「発見から詳細な特徴付けの時代に入った」と見る動きもある。実際、間もなく(2021年12月)に打ち上げ予定のJames Webb宇宙望遠鏡(JWST)やハワイ島マウナケアに建設予定の30メートル望遠鏡(TMT)等による探査によって、2020年代は系外惑星大気の観測で数多くのブレイクスルーがもたらされることが確定的となっている。しかし本稿で見てきたように、惑星の分布や特徴が詳細に調査されているのは系外惑星の中でも一部の集団(主に主系列太陽型星まわりの短周期惑星)のみであり、低質量星や若い恒星まわりの惑星、長周期惑星など、惑星系の全体像については未知の部分の方が大きい。今後は、惑星「発見」と軌道・大気等の「特徴付け」を系外惑星観測の両輪として相補的に進めて

いくことが求められる<sup>8</sup>。

系外惑星の詳細な特徴付けにおいては、今後「太陽系内惑星」についての知見を活用する機会が増加することが予想され、系内惑星・衛星の観測や探査で培われてきた手法が系外惑星観測で応用されることで新たなブレイクスルーがもたらされる可能性がある。同時に、系内天体の諸問題を考察する上で系外惑星の統計的性質をステレオタイプとして活用する機会も出てくるのではないかと期待される。系外惑星の詳細な分布・特徴が明らかになるにつれて、改めて「惑星系」としての太陽系の位置付け(普遍性や特異性)もはっきりしてくると考えられ、2020年代はこうした惑星系の全体像の理解が進む極めて重要な時期になるだろう。

## 謝辞

本研究はJSPS科研費19K14783の助成を受けたものです。

本稿は、2020年度最優秀研究者賞受賞記念論文として執筆しました。受賞にあたって、推薦書を執筆して頂いた田村元秀氏、選考委員の皆様へ感謝致します。本稿で紹介した研究のうち、K2ミッションを利用した低質量星まわりのトランジット惑星探査については、KESPRINTコンソーシアムの研究活動に基づくものです。KESPRINTの新旧メンバー(特に共同で立ち上げに関わったRoberto Sanchis-Ojeda氏)と、追観測に協力して頂いた共同研究者の皆様へ御礼申し上げます。また、本稿後半で紹介したIRD分光器の開発と観測、データ解析を一緒に行ったIRDチームのメンバーに厚く御礼申し上げます。本稿では全てを紹介しきれませんでした。筆者の研究のほとんどは共同研究者の方に支えられています。大学院の指導教官であった須藤靖氏、研究員時代の受け入れ教官であった佐藤文衛氏を始め、これまでお世話になった共同研究者の皆様へこの場を借りて感謝申し上げます。最後に、本稿を注意深く読み有益なコメントを返して下さった査読者の方へ御礼申し上げます。

<sup>8</sup>日本でもTMTによる将来観測の検討に加えて、2020年代後半の衛星観測によるトランジット系外惑星探査(ExoJASMINE)が計画されている。

## 参考文献

- [1] Mayor, M. and Queloz, D., 1995, *Nature* 378, 355.
- [2] Rowan, D. et al., 2016, *ApJ* 817, 104.
- [3] Kraus, A. L. and Hillenbrand, L. A., 2007, *AJ* 134, 2340.
- [4] Hirano, T. et al., 2016, *ApJ* 820, 41.
- [5] Hirano, T. et al., 2018a, *AJ* 155, 124.
- [6] Hirano, T. et al., 2018b, *AJ* 155, 127.
- [7] Fulton, B. J. et al., 2017, *AJ* 154, 109.
- [8] Owen, J. E. and Wu, Y., 2013, *ApJ* 775, 105.
- [9] Ginzburg, S. et al., 2018, *MNRAS* 476, 759.
- [10] Johnson, J. A. et al., 2010, *PASP* 122, 905.
- [11] Gillon, M. et al., 2016, *Nature* 533, 221.
- [12] Gillon, M. et al., 2017, *Nature* 542, 456.
- [13] Tamura, M. et al., 2012, *Proc. SPIE* 8446, 84461T.
- [14] Kotani, T. et al., 2018, *Proc. SPIE* 10702, 1070211.
- [15] Clough, S. A. et al., 2005, *JQSRT* 91, 233.
- [16] Hirano, T. et al., 2020a, *PASJ* 72, 93.
- [17] Nugroho, S. K. et al., 2021, *ApJL* 910, L9.
- [18] 平野照幸, 2014, *遊星人* 23, 133.
- [19] Hirano, T. et al., 2020b, *ApJL* 890, L27.