

# 赤外線ドップラー IRD による 地球型惑星探査

小谷 隆行<sup>1</sup>・佐藤 文衛<sup>2</sup>

〈<sup>1</sup> 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〉

〈<sup>1</sup> 国立天文台ハワイ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

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

〈<sup>2</sup> 東京工業大学 〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1〉

e-mail: <sup>1</sup>t.kotani@nao.ac.jp, <sup>2</sup>satobn@eps.sci.titech.ac.jp



小谷



佐藤

太陽以外の恒星をまわる惑星は太陽系外惑星あるいは系外惑星と呼ばれ、その探索は現代の天文学の中で最もホットな研究分野の一つです。すばる望遠鏡でも、これまで可視光高分散分光器 HDS を用いた視線速度法観測による巨大なコアを持つ木星型惑星の発見や、高コントラスト赤外線カメラ HiCIAO を用いた直接撮像観測による「第二の木星」の発見などで大きな成果を挙げてきました。そして現在、最新鋭の赤外線高分散分光器 IRD による地球型惑星探索が進行しています。本稿では、IRD 観測装置の概要と同装置を用いたすばる戦略枠観測 IRD-SSP について紹介します。

## 1. Infrared Doppler (IRD)

### 1.1 装置の概要

IRD (InfraRed Doppler) は、すばる望遠鏡用に開発された、恒星の視線速度（ドップラー速度とも呼ぶ）を 2 m/s という非常に高い精度で赤外線を用いて測定し、地球型の系外惑星を発見することを目的とした観測装置です [1]。様々な赤外線技術を集結した最先端赤外線観測装置で、2018 年にすばる望遠鏡における試験観測に成功しました。現在は晩期 M 型矮星まわりに地球型惑星を発見するべく大規模サーベイ観測 (IRD-SSP, 2 章参照) を行っているほか、すばる望遠鏡の共同利用観測に提供されています。そして宇宙望遠鏡によって発見された系外惑星のフォローアップ観測や惑星の特徴を調べる観測など、様々なサイエンスに用いられています。

それでは、IRD ではどのようにして惑星を検出するのでしょうか？ 恒星のまわりに惑星が存在

している場合、恒星と惑星はお互いの共通重心のまわりを公転するため、恒星の光はドップラーシフトと呼ばれる現象により波長がわずかに変化します。波長を非常に細かく見分けることのできる高分散分光器を使えば、この変化を精密に測定し、直接は見えない惑星の存在を確認することができます。ただし惑星は恒星よりも非常に軽いいため、恒星の動きはとても小さく、視線速度の変化はわずかに数 m/s です。この手法は可視光では多く利用されていて、最初の系外惑星の発見も、視線速度を測定する方法によるものでした。

それでは、なぜ新装置が必要なのでしょう？これまで系外惑星の多くは太陽に似た恒星（スペクトル型が F, G, K 型）のまわりで探査が行われていました。近年、M 型矮星という質量が太陽の 1/2 以下の軽い恒星のまわりの惑星が注目されています。恒星が軽いため地球程度の小さな質量の惑星まで発見することが可能になること、M 型矮星は太陽系近傍に最も多く存在する恒星

であることが理由です。また、太陽系の近傍の惑星は将来の地上望遠鏡による惑星の直接撮像や分光観測により、生命の存在を示すバイオマーカーの存在を確認できる可能性があります\*1。ただしM型矮星は低温度で可視光では暗いため、赤外線での観測が不可欠です。IRDはこのM型矮星や若い恒星など低温度天体の視線速度測定に特化した能力を持つ赤外線分光器です。

IRDは近赤外線の波長0.97-1.75  $\mu\text{m}$ の光を非常に細かく、波長分解能（波長を分解できる波長の幅で割ったもの）約70,000で分解してスペクトルを測定するための装置です。図1に装置の概略を示します。すばる望遠鏡のナスミス焦点にて、補償光学で大気乱れを取り除いたあと、星の光を光ファイバーに入射します。光ファイバーは望遠鏡の真下にあるクーデ室と呼ばれる地下室に設置された分光器に接続されます。この場所は、すばる望遠鏡ドームの中でも振動や温度変化が少なく、分光器を安定化させるには最適の場所です。分光器は真空チャンバーに納められており、微弱な赤外線を検出するために全体を180 Kに、最終的にスペクトルが記録される赤外線検出器は80 Kに冷却されています。赤外線検出器は世界で最も高感度な検出器であるHAWAII2-RGを2基使用しています。分光器ではエシエル型回折格子を用いて天体の光を非常に細かく分解し、スペクトルを測定します。天体の光と同時に、レーザー周波数コムと呼ばれる波長の基準となる光源のスペクトルも同時に測定し、恒星の視線速度を高精度に測定します。

ただし、地球のような質量の小さな惑星を発見するのは簡単ではありません。なぜなら、観測装置自体が様々な原因により惑星とは関係のない「偽の視線速度変動」を生じさせてしまうため、これを極力小さくすることが、惑星を発見するためには極めて重要です。IRDはそのために以下の

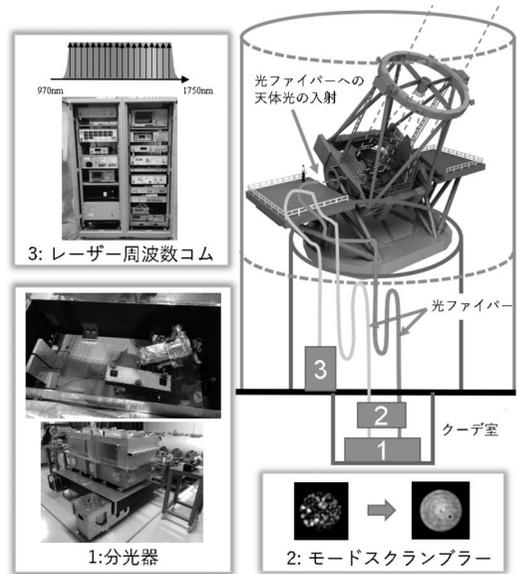


図1 IRD装置の概要。望遠鏡からの光は、ナスミス焦点にて光ファイバーに入射され、望遠鏡の真下に設置された分光器に接続されます。分光器の近くにはモードスクランブラーとレーザー周波数コムが設置されています。

ような3つの技術的ブレークスルーを必要としました。

### 1.1.1 究極の安定性を実現する光学系と温度安定化システム

数m/sという小さな視線速度の変化を検出するには、装置が極めて安定である必要があります。例えば分光器の温度が1°C変化しただけで、見かけ上恒星が数百m/sも動いたかのように見える場合があります。そのような偽の視線速度変動を起こさないためには、分光器全体の温度を0.1°C以下で安定させる必要があります。IRDは様々な場所に温度センサーとヒーターを設置して精密な温度制御を行っています。さらに、温度が変化しても光学素子の形状や位置が変化しないような、「超低熱膨張セラミックス（京セラ製コーゾライト）」と呼ばれる特殊なセラミックスを用いて光

\*1 詳しくは本特集の藤井友香氏の記事をご参照ください。

学定盤，ミラー，回折格子ホルダーなどを製作しました．このように光学定盤も含めた観測装置の大部分に超低膨張セラミックスを用いたのは，IRDが初めてです．

### 1.1.2 モードスクランブラーの開発

分光器が完璧に安定であっても，まだ偽の視線速度を生じさせるものがあります．それは，大気の流れにより生じる星像の変化や，望遠鏡の指向が安定でない場合です．そのような外乱があると，天体の波長が変化したかのように見えてしまいます．この影響を限りなく小さく抑えるために，逆にわざと大きな外乱を与え続けることで，平均すれば常に同じスペクトルを観測できるようにする装置が「スクランブラー（擾乱発生器）」です．IRDでは，様々なタイプのスクランブラーを試験した結果，束になった光ファイバーを一定の周期で曲げ方を変化させる「シーソースクランブラー」，光を500 m以上の非常に長い光ファイバーを通す「静的スクランブラー」，また光をディフューザーという回転するすりガラス状の光学素子を通すスクランブラー，などを組み合わせて使用しています．これによって，どのような観測条件でも常に安定した視線速度の観測が行えるようになっていきます [2]．

### 1.1.3 極めて安定な波長基準光源レーザー周波数コム

これまで述べた観測装置を安定化させる手法を用いたとしても，まだ数m/sの視線速度測定には十分ではありません．最終的には，絶対的に安定な波長の基準となる光源を，天体と同時に分光観測して，偽の視線速度変動を取り除く必要があります．IRDでは新たに，光通信技術を応用して約0.1 m/sの安定性を持つ「レーザー周波数コム」を開発しました．このレーザー周波数コムは，IRDの波長域の大部分において，一定の周波数間隔でレーザーのような鋭い輝線を発生させるもので，世界でもこのように広い帯域を持つ天文用のレーザー周波数コムは例がありません．図2は

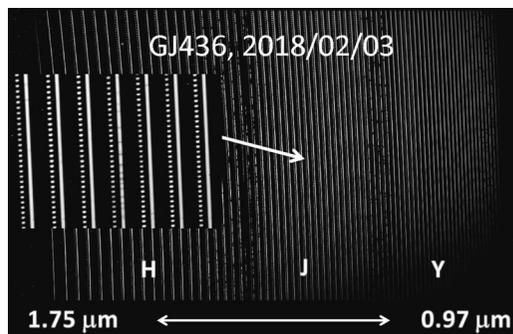


図2 IRDで観測したM型矮星とレーザー周波数コムのスペクトル．点状に連なって見えるのがレーザー周波数コム．

IRDで実際に観測された天体とレーザー周波数コムのスペクトルです．

以上のような技術的な困難を解決し，IRDは約2年の長時間をかけて，2 m/sの安定性でM型矮星の視線速度を測定可能であることを示しました．そして現時点では，近赤外線の高分散分光器としては世界で最も安定なものになりました．

## 1.2 地球型惑星の直接分光観測に向けて：シングルモードファイバー分光モード REACH

IRDは，天体の光を分光器に導くために2種類の光ファイバーを使用しています．一つは，M型矮星の視線速度観測などに用いられ，他の多くの分光器にも利用されているマルチモードファイバーで，光を通すコアの直径は60 μmです．もう一つは，コアの直径が約4 μmしかないシングルモードファイバー（SMF）と呼ばれるものです．光通信に広く用いられていますが，これまでは分光器にはあまり用いられていませんでした．SMFはいくつかの面で近年注目を集めています．一つは，コア直径が小さいために，同じ分光器でも高い波長分解能を達成でき，より詳細なスペクトルを得ることができます．実際IRDでSMFを使用した場合，波長分解は最大70,000から100,000以上に向上します．次に，SMFは特定のモードの光しか通さないという特性のために，常に射出光のパターンが一定であり，先に説明した

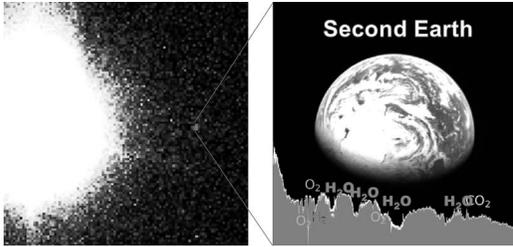


図3 IRDで系外惑星を直接分光観測するイメージ。

モードスクランブラーが不要となります。そのため、現在の10倍以上の極めて安定した視線速度測定が可能になります。そしてこれまでは難しかった、太陽のような恒星のまわりにある地球型惑星の探査が可能になります。最後に、IRDは大気揺らぎの影響を非常に小さく抑える極限補償光学と組み合わせることで、系外惑星を空間的に分解した上で、その光を高精度に直接分光することが可能になります(図3)。このIRDとすばる極限補償光学SCEAOを組み合わせたREACHと呼ばれるモードによって、若い巨大惑星の大気構造をこれまでにない精度で詳細に調べることができるようになります[3]。その他、将来の口径30メートル級望遠鏡を用いることで、地球サイズでかつハビタブルゾーン(生存可能領域)\*<sup>2</sup>にある惑星の大気組成を調べ、生命の兆候を直接探ることができると考えられています。

## 2. IRD戦略枠観測

### 2.1 IRD-SSPが目指すサイエンス

2019年2月に、IRDを用いた晩期M型矮星まわりの地球型惑星探索を目的とした戦略枠観測(IRD-SSP)が始まりました。晩期M型矮星とは、M型矮星のうちの特に温度が低く低質量のものです。主星が軽いので、2 m/s程度の視線速度測定精度があれば地球のような軽い惑星でさえも検

出できるようになり、また、低温のためハビタブルゾーンが中心星の近くに位置することから、長らくハビタブル地球型惑星探索に適したターゲットとして注目されてきました。しかし、このような天体は可視光では暗すぎて、極めて太陽近傍にある特に明るいものを除いて基本的には赤外線では観測できません。そのため、晩期M型矮星は従来の可視光観測が中心だった系外惑星探索では未踏の領域でした。

IRD-SSPは、この領域に初めて本格的に足を踏み入れ、系外惑星探索に新たな地平を切り拓こうとしています。IRD-SSPは、まず2年間計70夜の観測が暫定的に認められてスタートしました。その後、装置性能とサイエンスの意義が改めて評価されて、2020年7月に晴れて残りの3年間計105夜、合計で5年間175夜の観測が正式に認められ今に至っています。

IRD-SSPが目指すサイエンスには、以下の3つの柱があります。

- I. ハビタブルゾーンにある地球質量惑星の探索
- II. スノーライン\*<sup>3</sup>以遠の地球型惑星から巨大惑星までの分布の解明
- III. 小型惑星の移動メカニズム、惑星進化への示唆

そして上記サイエンスのため、以下の具体的なゴールを設定し惑星探索観測を進めています。

①将来の超大型望遠鏡を用いた詳細観測に向けて、太陽近傍のM型矮星まわりにハビタブルゾーン地球質量(ここでは~1-3地球質量を指す)惑星を発見する

②M型矮星まわりのスノーライン以内、以遠の領域における地球型惑星~巨大惑星の分布を明らかにし、惑星形成と進化を包括的に理解する

\*<sup>2</sup> ハビタブルゾーンについては本特集の小玉貴則氏の記事に詳しい解説があります。

\*<sup>3</sup> 雪線とも呼びます。惑星系を形成するガスと塵の円盤では中心星から離れるほど低温になるが、水・アンモニア・メタンなどの水素化合物が凝集し、気体から固体となる温度となる距離のこと。太陽系の場合、水の雪線は約3 au(1 auは地球・太陽の距離)。雪線の内側では岩石惑星が、その外側には氷惑星やガス惑星ができやすくなります。

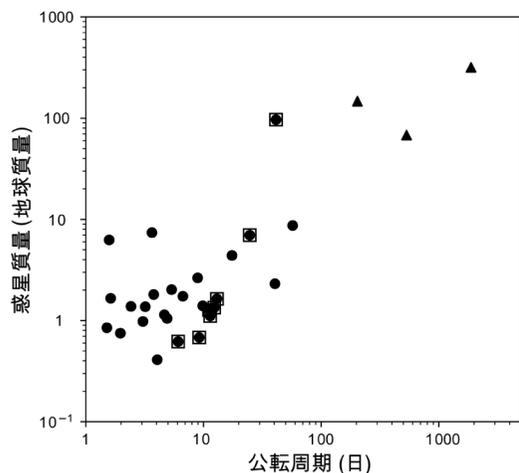


図4 これまでに発見されている低温（表面温度3300 K以下）の晩期M型矮星まわりの惑星の質量・周期の分布（質量が測定されているもののみ）。□はハビタブルゾーンに位置する惑星。▲はスノーライン以遠の惑星。データはNASAのExoplanet archiveに基づきます。

### ゴール①：ハビタブルゾーン地球質量惑星の発見

2021年7月現在、4,000個を超える系外惑星が発見されていますが、そのほとんどはいわゆる太陽型星（FGK型矮星）のまわりで発見されたものです。これに対し、低温（表面温度3,300 K以下）の晩期M型矮星のまわりでは、まだ約30個の惑星しか発見されていません（図4）。このうちハビタブルゾーンに存在する惑星は約10個<sup>4</sup>だけです。ハビタブルゾーンにある地球質量惑星の発見数を増やし、将来の超大型望遠鏡や宇宙望遠鏡などを用いた大気調査などによってそれらの多様性を明らかにしていくことは、地球外生命探査を進める上で極めて重要なステップです。特に、真に生命居住可能な惑星系を発見するためにはできるだけ多くのハビタブル惑星候補を発見しておく必要があります。IRD-SSPの開始時点で既にハビタブルゾーンにある地球質量惑星は発見されていましたが、可視光波長域で特に明るい太陽最

近傍星を対象とした観測が中心の現状ではこれ以上のサンプルの増加は期待できません。一方、IRD-SSPのような近赤外波長域での観測では少し暗めの星にまで惑星探索の範囲を広げることができるため、将来のフォローアップに適した地球質量までの重要な惑星サンプルを増やすことができます。

### ゴール②：惑星形成と進化の解明

図4についてスノーラインに注目すると、スノーライン以内で見つかっているのは数地球質量以下の小型惑星が中心です。スノーライン以内の惑星分布は惑星の移動速度によって違いが生じると考えられ、小型惑星に比べて相対的に巨大惑星が少ないという傾向は定性的には速い移動（大きく成長する前に内側に移動する）を示唆します。しかし、これは巨大惑星形成領域であるスノーライン以遠の惑星分布と併せて議論する必要があります。惑星形成論や太陽型星を対象とした視線速度観測の結果からは、M型矮星ではそもそも惑星の材料物質が少なく巨大惑星の存在頻度は低いと予想されています。その一方、別の手法による惑星探索では巨大惑星も豊富に存在することを示唆する結果もあり、観測結果には大きな乖離が生じています。

IRD-SSPの観測では、スノーライン以遠の地球型惑星から巨大惑星までを検出することができます。図5は、IRD-SSPの5年間の観測で検出が期待される惑星の分布の一例を表しています。太陽型星まわりの惑星系の分布から得られる知見をもとに、晩期M型矮星まわりの惑星分布をシミュレーションしたものです。例えばパラメータの一つとして惑星の移動速度を変えると内側領域の惑星分布に違いが見られることが予想できます。このようなシミュレーションをもとに惑星検出数の予想を立てると、IRD-SSPでは5年間で数十個の地球型惑星（このうち少なくとも数個はハビタ

<sup>4</sup> 有名なものにTRAPPIST-1系の惑星があります。詳しくは本特集の堀安範氏の記事を参照。

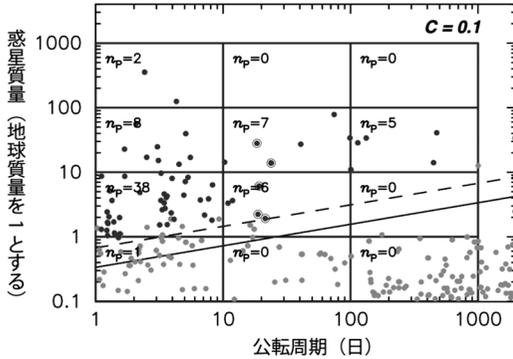


図5 IRD-SSPで検出される惑星分布のシミュレーションの一例（比較的速い惑星移動の場合）<sup>[4]</sup>。実線、破線はそれぞれ中心星の視線速度振幅1, 2 m/sに相当。この線の上側に位置する点がIRD-SSPで検出可能な惑星を示します。図中各枠内の数字 ( $n_p$ ) はそれぞれの枠内に入る惑星の数。

ルゾーンに存在) を含む60個以上の惑星発見が見込まれます。これにより、スノーラインの内側から外側まで広範囲にわたる軌道領域の惑星分布を直接解明し、上記問題に決着をつけることができると期待されます。

## 2.2 IRD-SSPの観測

### 2.2.1 ターゲット選定

IRD-SSPで地球型惑星探索の対象となる晩期M型矮星は、事前のスクリーニング観測によって入念に選ばれています。まず、IRD-SSPが始まる前に国内外の中小口径望遠鏡を用いて数百個のM型矮星に対して低分散分光観測を行い、有効温度等の基本的なパラメータを決定しました<sup>[5]</sup>。さらに、 $H\alpha$ 輝線の強度から自転速度と活動性を評価しました。自転速度が大きい星は地球質量惑星の検出に必要な高い視線速度測定精度が出せず、また、活動性が高い星は恒星自身の視線速度変動が大きいため低質量惑星の検出には向いていません。自転速度が十分に小さく活動性の低

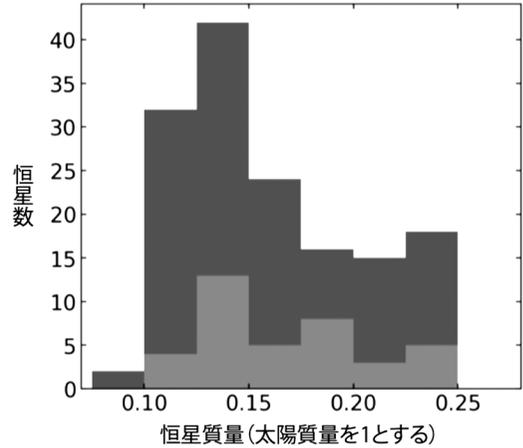


図6 事前観測によって選定された約150星（濃い色）と、さらにIRD-SSP用に絞り込まれた約40天体（淡い色）の質量分布。

い、地球型惑星探索に適した星だけを約150個選定し、最終的にはさらにこれらをIRDでのスクリーニング観測で約60個に絞り込みます(図6)。

### 2.2.2 スクリーニングからモニタリングへ

事前のスクリーニング観測とIRDを用いたスクリーニング観測によって低質量惑星の探索に適していると判断された晩期M型矮星に対しては、集中的な視線速度モニター観測が実施されます。各天体に対してそれぞれ約2年間で80回の観測を目標にモニター観測を実施し、ハビタブルゾーンにある地球質量惑星の検出が可能なレベルにまで検出限界を下げます。これまで2年間の観測で一部の天域を除いて順調にスクリーニングが進み、2020年6月からいよいよ集中的なモニター観測が始まりました。IRD-SSPの観測は基本的にほぼ毎月半夜単位で数日から一週間程度にわたって割り当てられており、短周期の視線速度変動も漏れなく検出できるように組み立てられています<sup>\*5</sup>。

図7は、IRDで測定した、事前スクリーニングをパスした天体の視線速度変動(RMS)の分布

\*5 このような観測割当はこれまですばる望遠鏡では実現困難でしたが、IRD-SSPが走っているおかげで時間軸方向を追求する他のIRD観測課題との時間交換も可能になり、IRDを用いたサイエンスの幅が広がっています。

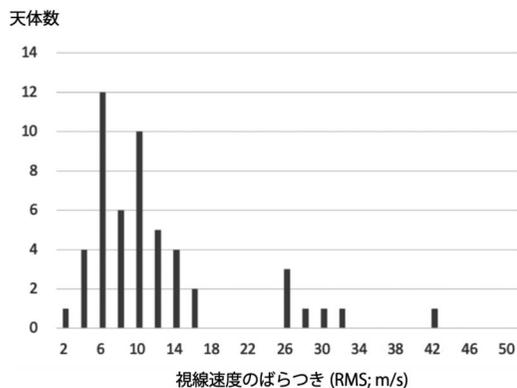


図7 IRDによる視線速度変動の分布の初期観測。多くの天体は地球型惑星探索に適した小さな (<10 m/s) 視線速度変動を示しています。

を示しています。予想通りほとんどの天体は小さな視線速度変動 (10 m/s未満) を示しており、恒星の活動性が低いと考えられるため、これらに対しては今後地球型惑星探索のために集中的なモニター観測が行われます。一方、10 m/s以上の変動を示す天体も存在します。これらには短周期から中周期の褐色矮星以下クラスの伴天体が存在するか、あるいは長周期の伴星が存在する可能性があります。既知の情報や事前スクリーニング観測によって可能な限り連星系は除外していますが、完全には除き切れないため、IRDによるスクリーニング観測も必要なのです。

### 2.2.3 M型矮星の大気パラメータ、化学組成決定

惑星の検出とともに重要なのは、中心星の素性をよく明らかにすることです。例えば惑星の質量決定には中心星の質量の情報が必要ですし、中心星の性質は惑星の性質とも密接に関わっています。中でも、惑星形成の母体となる原始惑星系円盤の金属量を反映していると考えられる中心星の金属量は、惑星形成を理解する上で極めて重要なパラメータです。太陽型星では、中心星の金属量と巨大惑星の頻度に正の相関があることが知られており、また、原始惑星系円盤の寿命と金属量の相関も示唆されています。これらの情報は惑星の形成・進化を明らかにする上で重要ですが、M

型矮星のまわりの惑星系においてはまだよく分かっていません。

この一因として、M型矮星のまわりで見つまっている惑星数がまだ少ないということと、M型矮星の金属量を推定するのが難しいということが挙げられます。特に中期から晩期のM型矮星は可視光で暗いため従来の可視高分散分光器では高精度の観測が困難です。また、低温大気に対する解析手法も確立していません。IRD-SSPでは、IRDで取得される良質の近赤外高分散スペクトルを用いて、これら低温度星の大気パラメータや化学組成を決定する手法を確立することも重要なテーマの一つとなっています [6]。

### 2.3 IRD-SSPの今後と将来

IRD-SSPは現時点で約2年半が経過し、順調にモニター観測を続けています。周期的と思われる変動を示す天体も複数見つかっており、データを蓄積しながら確認作業を進めています。

IRD-SSPで見つかる期待される多様な惑星達は、TMTを始めとする将来の超大型望遠鏡を用いた詳細観測のよいターゲットになると期待されます。TMTでは、M型矮星のまわりのハビタブルゾーンにある地球型惑星の直接検出、そしてキャラクター化が期待されています。これが可能になれば、太陽系外の生命探査へ向けた大きなステップとなることでしょう。しかし、ハビタブルゾーンにある惑星が「本当の意味でハビタブル惑星として判断可能かどうか」は、中心星からの距離以外の惑星の様々な環境に依存します。例えば、フレアなどの中心星の活動は惑星環境に無視できない影響を及ぼします。また、惑星大気中の雲の存在は惑星の表面環境に影響を及ぼすことに加えて、大気中に存在する分子の吸収線の検出可能性にも関係します。したがって、TMTなどで観測できるようなハビタブル惑星候補をたくさん検出しておくことが、真のハビタブル惑星の発見には欠かせません。

赤外線でしか観測できない晩期M型矮星まわりの地球型惑星探索は、IRDのような赤外線分光器の独壇場です。今後、IRDが発見する「第2、第3の地球」の報告にご期待ください。

### 参考文献

- [1] Kotani, T., et al. 2018, Proc. SPIE, 10702, 1070211
- [2] Ishizuka, M., et al., 2018, PASP, 130, 988, 065003
- [3] Kotani, T., et al. 2020, Proc. SPIE, 11448, 1144878
- [4] [https://subarutelescope.org/Science/SACM/Senryaku/IRD\\_180520235849.pdf](https://subarutelescope.org/Science/SACM/Senryaku/IRD_180520235849.pdf) (2021.7.9)
- [5] Koizumi, Y., et al., 2021, PASJ, 73, 154
- [6] Ishikawa, H. T., et al., 2020, PASJ, 72, 102

## Exploring Earth-Like Planets Using InfraRed Doppler (IRD)

Takayuki KOTANI<sup>1</sup> and Bun'ei SATO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Astrobiology Center, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

<sup>1</sup>*Subaru Telescope, National Astronomical Observatory, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

<sup>1</sup>*SOKENDAI, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

<sup>2</sup>*Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro, Tokyo 152-8551, Japan*

Abstract: Planets orbiting stars other than the sun are called extrasolar planets or exoplanets, and a quest for them is one of the hottest topics in astronomy today. Subaru telescope has achieved significant results in this field, such as a discovery of a jovian planet having a huge solid core by radial-velocity method and that of a jupiter analog by high-contrast infrared imaging camera. And now a quest for earth-like planets is ongoing with a state-of-the-art infrared Doppler instrument, IRD. Here we introduce IRD and its Subaru-Strategic-Program, IRD-SSP.