

系外惑星「遠い世界の物語」その15 ～IRD-SSPによるM型矮星Ross 508 を 周回するスーパーアースの検出～

原川 紘季¹, IRD-SSPチーム

(概要) M型星における系外惑星探索は、太陽型星と比較して大規模にサーベイが行われておらず、スペクトル型が中期から晩期M型星では、惑星個々の特徴・分布や統計的な性質についてまだよくわかっていない。すばる望遠鏡戦略枠観測IRD-SSPは晩期M型星をメインターゲットに設定したドップラー法による系統的かつユニークな系外惑星探索プロジェクトで、すばる望遠鏡とIRD (InfraRed Doppler instrument) を駆使して2019年からサーベイを推進してきた。本稿ではIRD-SSPで検出した最初の系外惑星となるスーパーアースRoss 508 bについて報告する。

1. はじめに

これまでに5000個を超える数の系外惑星が検出されている。系外惑星の検出手法としてドップラー法(惑星の重力による恒星のわずかな周期的ふらつきの視線方向の速度変化を星スペクトルのドップラー遷移として捉える手法)とトランジット法(惑星が恒星の光球面の手前を横切る際に恒星が一時的に減光する現象を捉える手法)が主なものとして挙げられ、それぞれおよそ1000, 4000個(2022年10月現在)の系外惑星が検出されている。現在わかっている系外惑星のおよそ90%は太陽型星と呼ばれるF, G, およびK型星周りで報告されているが、これはスペースからの高精度トランジット法の成功と太陽型星が可視光で最も明るく、かつ視線速度精密測定に必要なスペクトル中の吸収線の数が多く存在するため、比較的高い効率で探索が進行できた結果と言える。これに対してM型矮星と呼ばれる有効温度が3500K以下の主系列星については天の川銀河で最も多いタイプの恒星であるにもかかわらず系外惑

星の検出数は300弱にとどまる。これはM型矮星が太陽型星と比べて非常に暗く、さらにその放射量のピークは近赤外の波長域に存在するため、CCDの感度特性も相まって効率的な探索が行われてこなかったという背景がある。したがって、現在でもM型矮星(以降はM型星も同義とする)周りで惑星の分布や頻度はよくわかっていない。最近になり、本稿で紹介するすばるIRDに加え、近赤外線の高分散分光器(CARMENES¹, HPF², SPIRou³など)が稼働を開始してからはM型矮星をメインターゲットに掲げたサーベイが複数立ち上がり、それぞれ精力的なサーベイを展開している。現在では複数の地球型惑星の発見報告がM型星周りでなされ、Teegarden's Star 系[1]などのハビタブルゾーン(HZ; 中心星からの入射光量がちょうどよく、液体の水が存在できる軌道の範囲)内に存在すると考えられるものも見つかってきている。

¹スペインのCalar Alto観測所 3.5 m 望遠鏡に搭載。可視と赤外の2チャンネルを搭載するが、可視光のデータが主に惑星探索で利用されている。

²米国マクドナルド観測所のHobby-Eberly 10 m 望遠鏡に搭載。

³ハワイ マウナケア山頂のCanada-France-Hawaii 3.6 m 望遠鏡に搭載。

1.すばる望遠鏡
harakawa@naoj.org

そのような中、日本でもすばる望遠鏡とIRDを駆使して8メートル超級の望遠鏡としては世界に先んじて晩期M型星周りの惑星探索を展開してきた。本稿ではすばる戦略観測プログラムIRD-SSPのサーベイから検出されたスーパーアースRoss 508 bについて報告する。なお、本稿はHarakawa et al. (2022)[2]を元に執筆している。必要な折、参照されたい。また、図については特に出典が明記されていない限り、[2]に使用した図の変更である。

2. 観測および解析

2.1 IRD-SSP

IRD-SSPはすばる望遠鏡とIRD (InfraRed Doppler instrument) を駆使して晩期M型星を主なターゲットに設定して系統的に系外惑星探索を行うすばる望遠鏡の戦略観測プログラムである。先行して稼働していたCARMENESなどが早期から中期M型星を主要ターゲットとしていることに対して、IRD-SSPではすばる望遠鏡の大口径とレーザー周波数コムを利用した近赤外波長帯域での精密な波長較正を強みとして、これまでほぼ未開拓の晩期M型星をメインターゲットに据えている点がユニークである。サーベイは2019年に開始され、2022年10月現在も継続中である。5年間で合計175夜の観測を行い、将来の惑星の特徴付けの研究に適した地球型惑星の発見と、地球型惑星から巨大惑星の分布を晩期M型星において統計的な制限を与えることを目標としている。

IRDは惑星をドップラー法で検出することを主眼に開発された近赤外線高分散分光器で、波長範囲は0.97から1.75 μm までをカバーし、分解能は $R \sim 70000$ である。検出器は近赤外線の感度が高いHawaii2-RG(H2RG)を2つ導入して近赤外波長域に感度を最適化することで、晩期M型星のように近赤外に放射エネルギーのピークがある低温度の星で効率的にドップラーサーベイが可能である[3]。

2.2 恒星パラメータ推定

Ross 508はKoizumi et al. (2021)[4]によりスペクトルサブタイプの推定が、またIshikawa et al.

(2022)[5]により組成解析が行われており、それぞれM4.5および金属量⁴ $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.20 \pm 0.20$ と得られているため、中期から晩期型にかかるM型星であることが報告されている。金属量も誤差の範囲で太陽組成と同じであると言える。固有運動、年周視差(すなわち距離)、および基本的な測光値は位置天文観測衛星Gaia、地上赤外線全天サーベイの2MASSおよび全天赤外線観測衛星WISEにより測定されているので、これらのデータからスペクトルエネルギー分布の解析を行い有効温度 (T_{eff}) と光度 (L_*) の推定を行った。半径 (R_*) や質量 (M_*) および表面重力 ($\log g$) については測光値と先に求めた有効温度、および金属量から経験則を適用することで推定することができる[6, 7]。導出された各パラメータの値は表1にまとめた。

表1: Ross 508の基本的な物理量。

スペクトル型	M4.5
$[\text{Fe}/\text{H}]$	-0.20 ± 0.20
T_{eff} (K)	3071^{+34}_{-22}
L_* (L_{\odot})	$3.589^{+0.067}_{-0.071} \times 10^{-3}$
R_* (R_{\odot})	0.2113 ± 0.0063
M_* (M_{\odot})	0.1774 ± 0.0045
$\log g$ (cgs)	5.039 ± 0.027

2.3 データ解析および軌道推定

取得された全103個のデータについてIRDに最適化された解析パイプラインを用いて、2次元の画像データとして記録された分光器データからスペクトルの抽出(一次元化)を行った[8]。同時に取得されたレーザー周波数コムと星スペクトルそれぞれについて標準的なエシエル分光器データ解析手順に従った。

視線速度精密測定には、安定した装置温度状態と精密な波長校正のための参照光源が必要となる。IRDでは参照光源としてレーザー周波数コム(以降、コム)を搭載しており、露光中に星スペクトルとコムを同時に並べて照射できるようになっている。これに

⁴慣例的に鉄と水素の存在比を太陽と対数スケールで比較した量を指す。

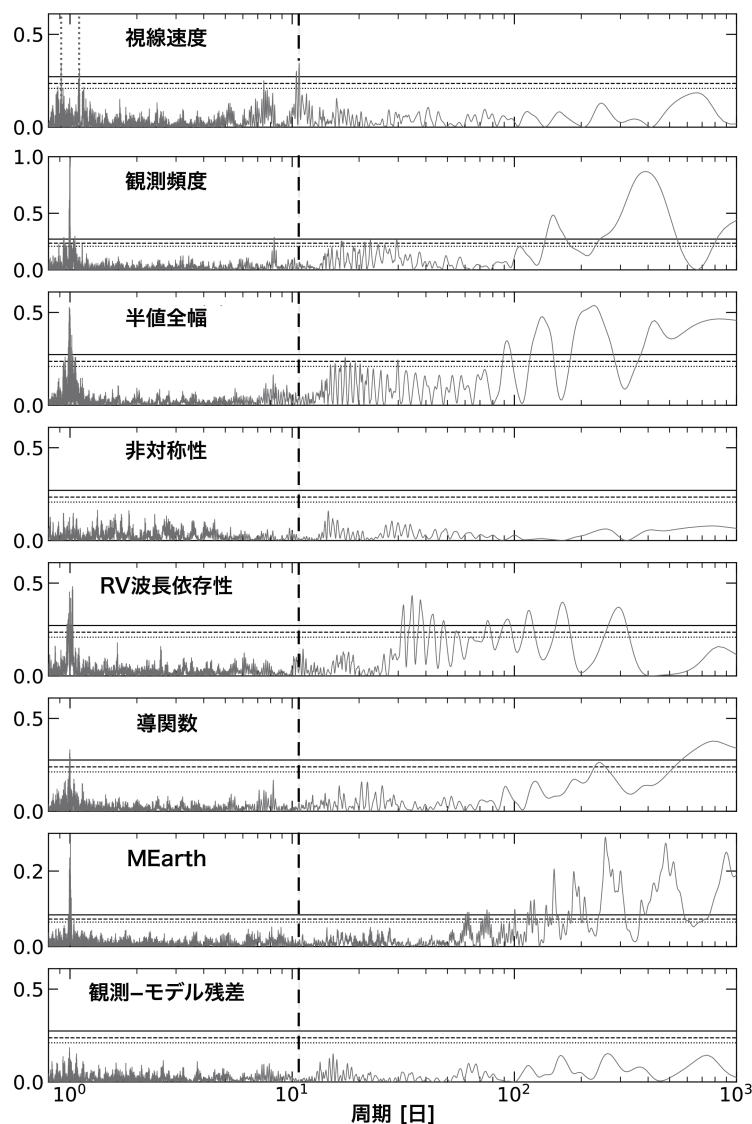


図1: 視線速度および各種解析の周期解析結果。縦向き破線・図最上段の点線はそれぞれ10.7日周期と推定されたエイリアシング周期の位置を示す。横向き破線・破線・実線はそれぞれFAP (False Alarm Probability) と呼ばれる測定誤差による偽検出可能性のうち、5%、1%、0.1%に相当する値をあらわしている。

よって露光中の装置由来のスペクトル吸収線輪郭の変形 (Instrumental Profile; IP) をコムスペクトルから高精度に推定することができ、解析されたIPを星スペクトルにも適用することでドップラーシフトが精密に測定できるようになる[9]。

導出された視線速度 (Radial Velocity; RV) の時系列データについて周期解析を行った結果を図1に示す。10.7日付近の周期にもっとも強いシグナルが

認められた⁵。検出された周期についてマルコフ連鎖モンテカルロ法による軌道推定を行い、ベイズ情報量基準による比較の結果、今回得られたRV変動が

⁵周期解析の結果では他にもいくつかの有意と見られる周期が認められた。しかしこれらはすべて観測の頻度に起因するエイリアシング (折り返し雑音) の可能性が高く、また後述の推定された軌道モデルと観測RVの残差に有意な周期性が何もなく、10.7日周期だけが物理的に有効な周期であると結論した。

表2: Ross 508 b の主な軌道パラメータ.

K_b (m/s)	$3.92^{+0.60}_{-0.58}$
P (日)	$10.77^{+0.01}_{-0.01}$
e	$0.33^{+0.13}_{-0.15}$
σ_{jitt} (m/s)	$1.76^{+0.46}_{-0.48}$
$M_b \sin i$ (M_{\oplus})	$4.00^{+0.53}_{-0.55}$
a_b (au)	$0.05366^{+0.00056}_{-0.00049}$

ら表2にまとめられる軌道パラメータが尤もらしいことが分かった. なお, K_b は振幅, P は軌道周期, e は軌道離心率, σ_{jitt} は恒星の活動と装置それぞれに由来するノイズを合算した量, $M_b \sin i$ はドップラー法で推定される惑星の最小質量(恒星運動の視線方向の速度成分のみから質量を推定するため, 軌道傾斜角*i*だけ不定性が残る), a_b は惑星の軌道長半径を表す. また, RVと惑星軌道のベストフィットモデルを図2に示す. 本稿では詳細は割愛しているが, 2021年8, 9月に取得されたRV測定値に 8 m s^{-1} 程度の系統的ずれ(オフセット)が含まれている可能性が示唆された. 原因はよくわかっていないが, 恒星のフレアなどの突発的な現象, あるいは観測施設の電気工事の影響でこの時期のコム発生装置の温度制御を直前まで変則的にせざるを得なかったことも影響していた可能性がある. そのため, この時期に取得されたデータについてオフセットのパラメータを与えた場合とそうでない場合, またそれに関連してRV長期トレンドの有無でモデルを分けて全4通りのモデルを比較しており, 長期RVトレンドの有無や離心率について検討している. 結果としてオフセットを含み, かつ長期トレンドは含まれないモデルが尤もらしいことがわかった.

2.4 恒星活動

太陽の表面には彩層活動による黒点や白斑が観測されるように, 恒星表面の明るさは一様ではなく, 部分的に恒星の活動領域が暗く, もしくは明るくなると考えられる. 恒星は自転しているので, こういった部分的な明るさの変化は分光学的には恒星の自転速度による吸収線の広がり, 非対称かつ自転周期に対応して変動することを意味する. したがって周期的なRV変動の原因は恒星の重力による実際の恒星の運動だけでなく, こうした恒星活動による

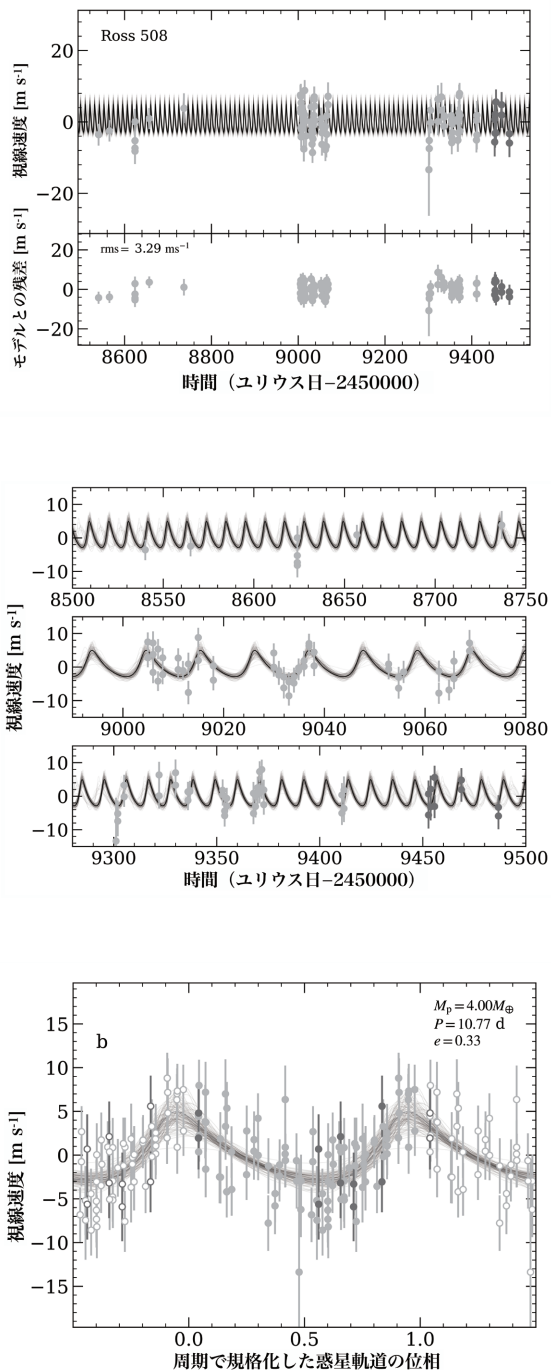


図2: Ross 508のRVとベストフィットモデル. 濃い実線がベストフィットモデルを示す. 薄い実線は事後分布からランダムに抽出した100通りのパラメータを反映している. 丸点は観測されたRVを表し, 特に濃い丸点は軌道推定の際にオフセットを与えた点. 下段図の白抜き丸点はRVを軌道位相で繰り返したものの.

吸収線の広がりや形状(線輪郭)の周期的変動による擬似変動の可能性がある。一方でドップラー遷移による変動は線輪郭の変形が起らないため、ドップラー法での惑星探索では線輪郭とRVの時間変動について周期性や相関を調査して恒星活動による変動と区別をすることが不可欠である。我々はMEarthというM型星に特化したトランジット惑星サーベイによる測光データに加えて、線輪郭の形状について半値全幅・非対称性・波長依存性・導関数の計4種類の指標で測定を行った。さらに、それぞれについて周期解析を行った結果、10.7日付近にはRV変動以外の周期性が認められないことを確認した(図1)。ここまでの検証から、我々が得られたRV周期変動は恒星の活動やエイリアシングによる擬似的なものではなく、実際のドップラー遷移によるものである可能性が最も高いことが確かめられたことになる⁶。

2. Ross 508 b

検出された惑星Ross 508 bの主な特徴としては最小質量約 $4.00M_{\oplus}$ のスーパーアースで、軌道長半径およそ0.054 au であること、軌道離心率は誤差が大きく、実効的な制限が付けられていないものの、 $e \sim 0.33$ と高めである可能性があることなどが挙げられる。惑星の他に遠方に他の天体がいることを示唆するような有意な長期RV変動は確認できなかった。高精度位置天文衛星のデータGaia Early Data Release 3によれば、Ross 508 は別の未確認の天体から加速を受けている可能性が高いことがわかった。ただし現時点ではRVの長期トレンドは確認できていない。したがって、今後の継続的な観測でRVオフセットの影響を抑えつつ離心率をより高精度に決定すると同時に、伴天体についても存在に制限をつけることで、系全体の描像や形成シナリオを明らかにすることができるだろう。

Ross 508は太陽よりも低い有効温度のためにHZ

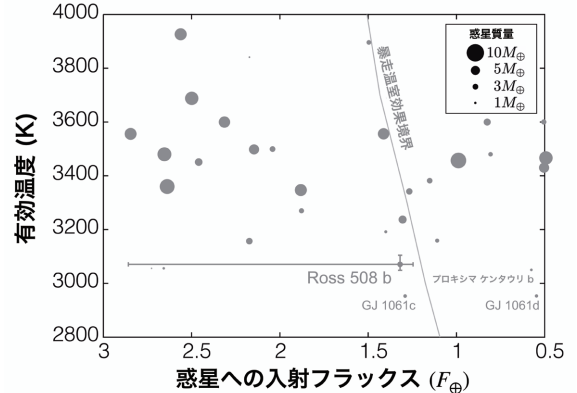


図3: これまでにM型星で見つかった地球型惑星の中心星有効温度とHZ内側境界の位置関係。

が中心星に近い位置に存在する。Ross 508 bの軌道で受ける平均的な入射光量は、離心率の不定性の影響が大きいもの、おおむね地球が太陽から受け取る量の1.3倍程度と推定された(図3)。この日射量から、Ross 508 bの軌道は平均的にはHZの内側境界とされる暴走温室効果が起こる境界よりも内側に位置すると考えられる。ただし、ベストフィットの離心率(0.33)では、軌道の遠日点周辺がHZ内に掛かっているという状況にあるため、将来的な30メートルクラスの望遠鏡による惑星の表層環境や生命探索のターゲットとして重要なターゲットとなると期待される。

3. まとめ

我々はIRD-SSPから最初の系外惑星としてRoss 508 b を報告した。近赤外波長域のみを使用したドップラー法によるスーパーアース検出としては事実上初の例となる。IRDが近赤外ドップラー法として最高レベルの精度を達成しつつ、単独での惑星検出が可能であることが示されたと言える。これまでもCARMENESなどからM型星周りのスーパーアース検出の報告があったが、いずれもCAEMENESの可視光チャンネルやHARPSデータなどを合わせた高精度なフォローアップによる寄与が大きいものであった。

本報告により、IRD-SSPが可視光では観測が困難である晩期M型星の惑星について包括的に探索

⁶ここで調査した線輪郭解析は可視光での惑星検出に際しては多くの前例があるものの、近赤外波長域で同様の解析を行った前例がなかったため、最も慎重に検討を重ねた点である。今後これらの解析についてもIRD-SSPとして成果を発表する機会があると期待される。続報を待たたい。

を進められるというアドバンテージを持つことが明らかになったと言える。今後もIRD-SSPによる惑星探索を精力的に展開し、新たな惑星の発見はもとより、近赤外波長域での恒星活動の指標について得られた知見などを報告する計画である。

参考文献

- [1] Zechmeister M. et al., 2019, A&A 627, A49.
- [2] Harakawa H. et al., 2022, PASJ 74, 904.
- [3] Kotani T. et al., 2018, in Proc. SPIE 10702, 1070211.
- [4] Koizumi Y. et al., 2021, PASJ 73, 154.
- [5] Ishikawa H. T. et al., 2022, AJ 163, 72.
- [6] Mann A. et al., 2015, ApJ 804, 64.
- [7] Mann A. et al., 2019, ApJ 871, 63.
- [8] Kuzuhara M. et al., 2018, in Proc. SPIE 10702, 1070211.
- [9] Hirano T. et al., 2020, PASJ 72, 93.

著者紹介

原川 紘季

すばる望遠鏡 RCUH職員。東京工業大学大学院理工学研究科 地球惑星科学専攻 博士後期課程修了。博士(理学)。国立天文台TMT推進室プロジェクト研究員、アストロバイオロジーセンター特任研究員を経て2018年12月より現職。専門は系外惑星探索。