

可視，赤外ドップラー法で切り拓く 系外惑星の世界

佐藤 文衛

〈東京工業大学グローバルエッジ研究院 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1〉

e-mail: sato.b.aa@m.titech.ac.jp



惑星をもつ恒星の微小な視線速度変化をとらえるドップラー法は、系外惑星探索の基本的かつ強力な手法である。日本での同手法を用いた惑星探索は2000年に国立天文台を中心としたグループによって本格的に始められた。世界から10年以上遅れをとったが、岡山観測所188cm望遠鏡の可視高分散分光器HIDESとすばる望遠鏡の可視高分散分光器HDSの稼働によってこの種の観測が可能になり、巨星の周りの惑星探索やホット・ジュピター探索で成果を上げてきた。そして今、赤外高分散分光器による新たな惑星探索—低質量星におけるハビタブル地球型惑星探索—に乗り出そうとしている。本稿では、岡山、すばるでの可視ドップラー法によるこれまでの成果と、赤外ドップラー法で目指すサイエンスを紹介する。

1. はじめに

2008年11月現在、約300個の系外惑星が報告されているが¹⁾、その約8割は可視波長域での「ドップラー法」*1—惑星との共通重心を周回する恒星の視線速度変化をとらえる手法—によって発見されたものである。ホット・ジュピター（短周期巨大惑星）やエキセントリック・プラネット（楕円軌道惑星）など多様な系外惑星がこの手法によって発見され、20年来の地道な観測によって木星軌道にある惑星にも手が届き始めている。また、測定精度の向上に伴って海王星クラスの惑星や地球の数倍～10倍の質量をもつスーパー・アースと呼ばれる比較的軽い惑星も見つかってきた。現在、可視域での世界最高精度は1メートル毎秒を切るところまで到達し、地球型惑星の検出へ向けて世界中のグループがしのぎを削っている。

る。太陽に似た恒星で第2の太陽系、第2の地球を探す—この流れは、系外惑星探索のメインストリーム、王道と言える。

一方、惑星をもつ恒星の多様性を追究する流れもある。恒星の質量、金属量、進化段階などに対する惑星系の依存性を調べ、惑星系の形成と進化をより一般的に理解しようという方向である。系外惑星探索開始当初は主な観測対象はいわゆる太陽型星（ここでは晩期F型矮星から早期M型矮星を指す）であったが、最近の数年間ですべて巨星の惑星探索が一つの大きな分野となり、早期型星や散開星団などでの惑星探索も広がりを見せている。こちらの流れは、恒星のどのような性質に注目してサンプルを選ぶかというアイデアが勝負である。筆者らが行っている巨星の惑星探索やホット・ジュピター探索は後者の範疇に入る。新たに挑もうとしている赤外ドップラー法による惑

*1 天文月報第96巻第4号190-194頁「ドップラー法による系外惑星検出」（佐藤文衛）を参照。

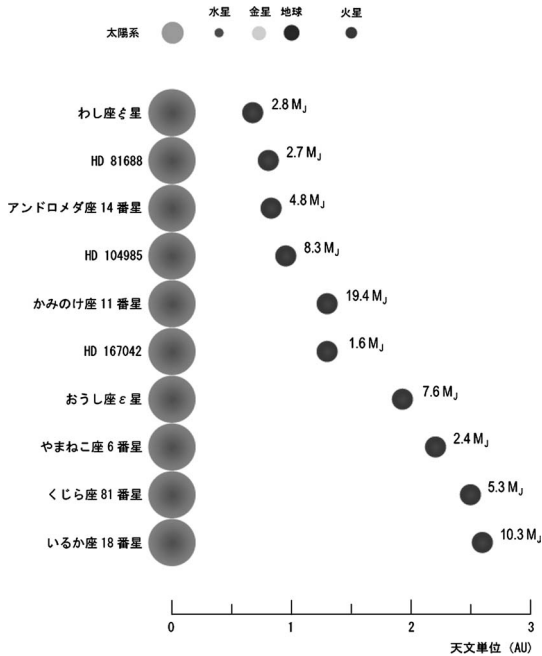


図1 岡山観測所で発見した巨星を回る惑星の模式図。 M_J は木星質量の意。

星探索も基本的に後者と言えるが、地球型惑星を狙う点では前者に通ずるものがある。

2. 巨星の惑星探索

筆者らは、2000年から岡山観測所の188 cm望遠鏡と可視高分散分光器 HIDES*2 を用いて、中質量G型巨星における系外惑星探索を進めている*3。中質量星(1.5-5太陽質量)は主系列段階では高温のためスペクトル中に吸収線が少なく、かつ高速自転により線幅が広がっているため原理的にドップラー法による惑星探索にはあまり適さないが、進化してG型巨星段階になると表面温度が下がり自転速度も小さくなるため、線幅の細い多数の吸収線がスペクトル中に現れ精密な視線速度測定が可能になる。現在、岡山では約300個のG型巨星をモニターしており、これまでに9個の惑星候補天体と1個の褐色矮星候補天体を発見し

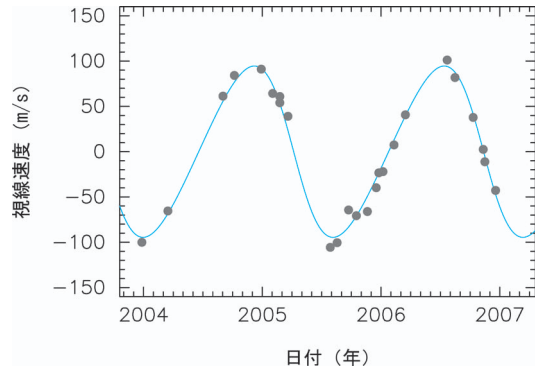


図2 ヒアデス星団に属する巨星の一つ、おうし座ε星の視線速度変化。周期約590日で約8木星質量の惑星が公転していると考えられる。

た(図1)。これにより、太陽型星だけでなく中質量星の周りでも惑星が形成されることが明らかになった。また、われわれの発見は現在知られている巨星周りの惑星の約半数を占め、この分野ではわれわれが世界をリードしていると言える。現在、すばる望遠鏡でのサーベイや、中国、韓国、トルコの研究者との共同研究を合わせて合計約800個の巨星をモニターしており(目標は1,000個)、巨星周りの惑星系の統計の確立を目指している。

これまでの発見で特筆すべきものの一つに、ヒアデス星団の巨星における散開星団初の惑星発見が挙げられる²⁾(図2)。星団内の恒星は等時曲線から精度良く年齢が決められるので(ヒアデス星団は約6億年)、その年齢における惑星の姿が明確に描き出される。また、星団内の恒星は年齢と化学組成が一様とみなせるので、恒星の質量が星団内での主要なパラメーターとなり、惑星系の中心星質量依存性を調べる良いサンプルとなる。ヒアデス星団では過去に約100個の太陽型星でドップラー法による惑星探索が行われたが、少なくとも数倍の木星質量以上の巨大惑星は発見されなかった³⁾。これに対しわれわれの観測では、三つ

*2 天文月報第96巻第6号291-302頁「岡山高分散エンセル分光器 HIDES」(泉浦秀行氏)を参照。

*3 天文月報第97巻第6号315-327頁「岡山プラネットサーチプロジェクト—巨星の惑星探し—」(佐藤文衛)を参照。

の中質量巨星（約2.7太陽質量）のうちの一つで約8木星質量の惑星が見つかった。このことは質量の大きい恒星ほど巨大惑星をもつ確率が高い可能性を示唆している。同様の傾向はフィールド星についても示唆されており⁴⁾、原始惑星系円盤の質量と関係がある、つまり、重い恒星ほど重い円盤を有し、重い惑星が生まれやすいのではないかとされている。

巨星を回る惑星は軌道長半径の分布にも特徴がある。太陽型星の周りでは、公転周期が数日から10年以上の軌道まで万遍なく巨大惑星が見つかるのに対し、巨星の周りでは約0.7 AU（周期約140日）以遠にしか見つからない⁵⁾。サーベイ対象の巨星の半径はただか太陽の10–20倍、軌道長半径にして約0.05–0.1 AUなので、巨星近傍0.1–0.7 AUは惑星の欠乏領域になっているようである。中心星の金属量と惑星との関係も興味深い。太陽型星では金属量の多い星ほど惑星をもつ確率が高いことはよく知られており、惑星形成シナリオとしてコア集積モデルを支持する事実の一つと言われているが、巨星でこれまでに見つかる惑星系ではそのような傾向は見られない⁶⁾。このような統計的性質は、今後惑星のサンプル数をさらに増やし検証する必要がある。

3. ホット・ジュピター探索

ドップラー法からは惑星の軌道と質量下限値しかわからないが、同時にトランジット（惑星の恒星面通過による中心星の掩蔽現象）が検出される場合は中心星の減光量から惑星の大きさがわかり、ドップラー法から求められる質量と合わせて惑星の平均密度、ひいては内部構造が推定できる。しかし、トランジットは惑星の軌道傾斜角が90度（軌道面が視線方向に平行）に近い場合にしか起こらないので、その確率は中心星の至近距離にあるホット・ジュピターでもせいぜい10%程度と低い。筆者を含む東工大を中心としたグループはアメリカのグループ（N2K コンソーシアム）

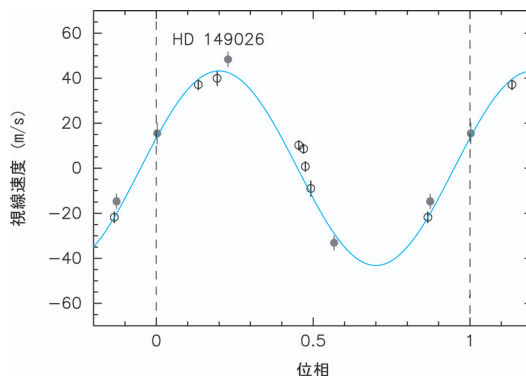


図3 太陽型星 HD 149026 の視線速度変化。横軸は位相、縦軸は視線速度（単位 m/s）。黒丸がすばる、白抜きがケックでの観測点。

と協力して、2004年からすばると高分散分光器 HDS を用いてホット・ジュピター探索を始めた。ホット・ジュピターを集中的に探索し、トランジットを起こす惑星を見つけようというものである。

2005年、早速すばるで一つ目のホット・ジュピターを発見した。HD 149026 という太陽型星を周期約3日で公転する惑星である⁷⁾（図3）。そして、つづく測光観測でなんといきなりトランジットも受かってしまった。これにより惑星の質量は土星の約1.2倍、半径は土星の約0.9倍と決まり、密度が土星の約2倍あることがわかった。密度が高いということは重元素が多いということになるが、理論モデルからの推測ではこの惑星の内部には地球質量の約70倍もの固体コアがあるという結果となった。このような超巨大コアの存在は惑星の形成メカニズムとしてコア集積モデルを支持するが、そのあまりの巨大さゆえに惑星形成理論に新たな謎を投げかけることにもなった⁸⁾。

この発見に勢いを得て、2006年にはインテンシブ・プログラムとして20夜の観測を行った。その中で見つかった HD 17156 という恒星を周回する惑星も面白い⁹⁾。公転周期は約21日で軌道長半径は0.15 AU であるが、離心率が0.67と非常に大きいため近星点では0.05 AU にまで中心星

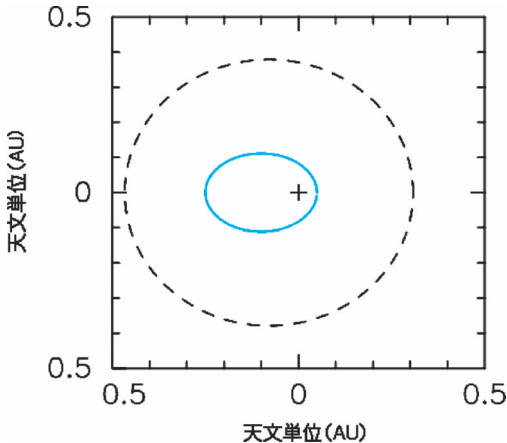


図4 HD 17156を周回する惑星の軌道(実線)。破線は太陽系の水星軌道。

に近づく(図4)。このくらい至近距離になると潮汐力が効きエネルギーの散逸が起るので、この惑星の軌道は徐々に楕円から円になり、最終的にホット・ジュピターへと進化するのではないかと考えられる。ホット・ジュピターの形成シナリオはいくつか提案されているが、その中の一つ「ジャンピング・ジュピター」モデルでは、複数の惑星の重力散乱によって一つの惑星が内側に弾き飛ばされてホット・ジュピターになる¹⁰⁾。この惑星のように比較的短周期で大きな離心率をもつ惑星はこのプロセスでできた可能性が高い。さらに驚くことに、なんとこの惑星でもトランジットが受かってしまった(観測したのはイタリアのアマチュアなど)¹¹⁾。すばるは系外惑星の軌道の傾きを知っているのだろうか。今後、この惑星に対しても内部構造や大気構造の研究が進むと期待される。

4. 赤外ドップラー法で探すハビタブル地球型惑星

現在、ドップラー法で見つかった系外惑星の質量は地球質量の約4倍から木星質量の10倍以上、中心星の質量は約0.3-4太陽質量にわたっている。このパラメーター空間をさらに軽いほう

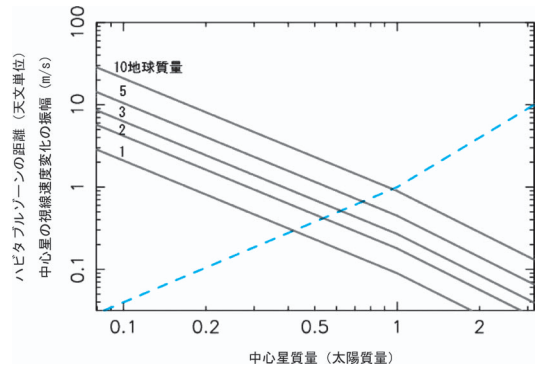


図5 ハビタブルゾーンにある惑星が中心星に及ぼす視線速度変化。横軸は中心星の質量(太陽質量を1とする)。縦軸は視線速度変化の振幅(実線; 単位はm/s)とハビタブルゾーンの距離(破線; 単位はAU)。例えば、0.1太陽質量の恒星の周りのハビタブルゾーンは0.04 AU付近で、そこにある1地球質量の惑星による中心星の視線速度変化は約2 m/s。

に広げる手段として期待されるのが赤外域でのドップラー法である。約0.3太陽質量より軽い恒星(晩期M型矮星、褐色矮星)は低温のため放射のピークが近赤外から赤外域にあり、可視域では非常に暗くなる。そのため、すばるや、さらには30 m望遠鏡をもってしても可視域での精密ドップラー観測には限界があり、効率の良い赤外での観測が必須となる。また、中心星が軽いので軽い惑星に対しても視線速度変化が大きくなり、仮に1メートル毎秒の測定精度が出せれば数地球質量から1地球質量の惑星にまで手が届く。しかも、中心星が低温なのでいわゆるハビタブルゾーンが中心星に近づき、ハビタブルゾーン内にある地球型惑星の検出が可能となる(図5)。このような赤外高分散分光器をすばるに搭載すれば、太陽近傍にあるJ、H等級で9-10等(V等級では13等以上)の低質量星1,000個以上が探策のターゲットとなり、0.2-0.4太陽質量星のハビタブルゾーンにある地球型惑星の統計、0.1太陽質量星のハビタブルゾーンにある1地球質量惑星の検出など魅力的なサイエンスが展開できるだろう。

また、赤外ドップラー法には、可視ドップラー法には不向きな若い恒星でも惑星探索ができるという利点もある。若い恒星は活動性が高く表面に黒点などが多くと考えられるが、これが自転に伴って移動すると、見かけ上視線速度が変化し惑星検出の障害になる。しかし赤外域では黒点とその他の部分のコントラストが下がるため、可視域に比べてこの影響が少ない。実際、最近 TW Hya という T Tauri 型星で可視ドップラー観測によって惑星を発見したという報告がなされたが¹²⁾、別のグループが赤外ドップラー観測を行ったところ視線速度変化は見られなかった¹³⁾。これは、可視域で見られた変動は黒点のような恒星表面の模様によるものであることを意味していると同時に、可視で変動の大きい恒星でも赤外では惑星探索が可能になることを示している。こうした若い恒星での惑星探索によって惑星系の形成と進化のより初期段階にアクセスできる意義も大きい。

5. おわりに

以上述べたように、日本での可視ドップラー法による系外惑星探索は後発ながらもアイデア勝負で活路を見だし、今やそれなりにこの分野の一角を占める存在になった(と思いたい)。測定精度の向上にも引き続き取り組んでおり、岡山では現在最高2メートル毎秒の精度を達成している¹⁴⁾。一方、赤外ドップラー法は世界中で今まさに開発にしのぎが削られているところである。われわれも可視での経験を活かし、この新しい分野に是非参入したいと思っている。

参考文献

- 1) 系外惑星に関する最新情報が載っているサイト <http://exoplanet.eu/>
- 2) Sato B., et al., 2007, ApJ 661, 527
- 3) Paulson D. B., Cochran W. D., Hatzes A. P., 2004, AJ 127, 3579
- 4) Johnson J. A., et al., 2007, ApJ 670, 833
- 5) Sato B., et al., 2008, PASJ 60, 539
- 6) Takeda Y., Sato B., Murata D., 2008, PASJ 60, 781
- 7) Sato B., et al., 2005, ApJ 633, 465
- 8) Ikoma M., Guillot T., Genda H., Tanigawa T., Ida S., 2006, ApJ 650, 1150
- 9) Fischer D. A., et al., 2007, ApJ 669, 1336
- 10) Nagasawa M., Ida S., Bessho T., 2008, ApJ 678, 498
- 11) Barbieri M., et al., 2007, A&A 476, L13
- 12) Setiawan J., et al., 2008, Nature 451, 38
- 13) Huelamo N., et al., 2008, A&A 489, L9
- 14) Kambe E., et al., 2008, PASJ 60, 45

Quest for Extrasolar Planets by Optical and Infrared Doppler Technique

Bun'ei SATO

Global Edge Institute, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550

Abstract: To detect tiny wobble of stars in radial velocities due to gravitational pull of planets is a powerful technique to find extrasolar planets. We have made outstanding discoveries in planet searches around giant stars and in searches for hot-Jupiters with this technique by using high dispersion spectrographs at Okayama Astrophysical Observatory and Subaru Telescope so far. We are now trying to develop a new infrared high-dispersion spectrograph aiming to search for habitable rocky planets around low-mass stars. We here introduce our latest results obtained by the optical Doppler technique, and discuss future prospects for planet searches by the infrared Doppler technique.