

188 cm 望遠鏡と HIDES による 可視高分散分光観測の新時代

佐藤 文 衛

〈東京工業大学理学院地球惑星科学系〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1〉

e-mail: satobn@eps.sci.titech.ac.jp



2000年から共同利用観測に提供されてきた可視高分散分光器 HIDES は、観測開始当初から視線速度精密測定機能を有し、太陽系外惑星探索や星震学観測などで成果を上げてきたが、2017年末、188 cm 望遠鏡の共同利用終了によって共同利用装置としての役目を終えた。しかしこれは HIDES の引退を意味するものではない、むしろ HIDES はユーザー主体の運用へと移行した 188 cm 望遠鏡とともに、装いを新たにして今後も観測研究に利用され続ける予定である。本稿では、188 cm 望遠鏡と HIDES を用いた視線速度精密測定観測によるこれまでの主な研究成果と、188 cm 望遠鏡の運用の新たな枠組み、そしてこれから行われる新しい観測研究について紹介する。

1. 188 cm 望遠鏡と HIDES を用いた 恒星視線速度精密測定

恒星の視線速度変化を数 m/s 以下という超高精度で測定する技術は 1990 年代に花開き、太陽系外惑星（以下、系外惑星）や恒星微小振動等を検出する手法として現在広く利用されている。例えば系外惑星探索においては、主に晩期型星を周回する地球型惑星から巨大ガス惑星まで、また、中心星近傍の短周期惑星から木星軌道以遠の長周期惑星まで、幅広い質量と軌道半径をもつ惑星に検出感度がある手法として、これまでに約 770 個の系外惑星の発見に用いられている。同手法は、系外惑星検出においてアストロメトリ法や直接撮像法と相補的關係にあり、また、トランジット法によって発見される惑星の質量を決定する手段としても不可欠のものとなっている。

旧岡山天体物理観測所（以下、岡山観測所または岡山）では、2000 年までに竹田洋一氏、神戸栄治氏らの手によって 188 cm 望遠鏡の可視高分散分光器 HIDES にヨウ素ガス吸収フィルターが

導入され、視線速度精密測定による観測研究が始まった¹⁾。以来 17 年間にわたる精力的かつ継続的な技術開発によって現在最高で約 2 m/s 弱という測定精度が実現されており、同程度の口径をもつ望遠鏡の中では世界トップクラスの性能を誇る²⁾。17 年という観測継続期間も世界の名だたる系外惑星探索拠点と肩を並べるものであり、現に公転周期 2,500 日以上 of 惑星系を発見している拠点は世界でも限られている（Lick, Keck, McDonald, AAO, Haute-Provence, La Silla, 岡山）³⁾。188 cm 望遠鏡と HIDES が比較的早い時期から高精度の視線速度観測を実現し、その後安定的に共同利用観測に供されてきたからこそ、岡山がこのような拠点となり得たと言えるだろう。この岡山と同程度以上の測定精度を実現している拠点は国内を含め東アジア地域には存在せず、現時点で岡山の機能を肩代わりできる拠点はほかに存在しない。さらに、このような長期モニター観測は競争倍率が極めて高く観測時間の限られる大口径望遠鏡では実質的に不可能であり、188 cm 望遠鏡のように自由度が高く豊富な観測時間が得られる中

小口径望遠鏡でこそ可能なものである。

2. これまでの成果：系外惑星探索と星震学

この視線速度精密測定技術を利用して、岡山ではこれまで系外惑星探索と星震学の分野においてユニークな観測研究が展開されてきた。以下にその成果を簡単にまとめる。

2.1 中質量G型巨星における系外惑星探索

従来、系外惑星探索の主たる対象は太陽型星 (FGK型の主系列星) であり、同恒星については周回する惑星の統計的分布がかなり明らかになってきている。一方、太陽型以外の恒星については依然として惑星探索が不十分であり、さまざまな恒星における惑星形成・進化を統一的に理解するには至っていない。特に太陽より約2倍以上質量の大きな恒星 (以下、中質量星と呼ぶ) は主系列段階では高温のためスペクトルに吸収線が少なく、また、一般に高速自転によって吸収線の幅が広がっているため、原理的に高い視線速度測定精度を得ることができず、視線速度法による惑星検出は困難である。

筆者らは、中質量星が進化して低表面温度・低速自転となった「晩期G型巨星」では高い視線速度測定精度を得ることができ、かつ脈動などによる恒星自身の視線速度変動も比較的小さいため、視線速度法による惑星検出が可能なのに気がついた。そこで、中質量星における惑星系の発見とその性質の解明を目的として、2001年に晩期G型巨星を対象とした大規模な系外惑星探索を世界に先駆けて開始した⁴⁾。以降2017年末まで途切れることなく観測を続け、この間、G型巨星における初の系外惑星⁵⁾、散開星団における初の系外惑星⁶⁾、特徴的な複数惑星系⁷⁾等を含む38個の系外惑星・褐色矮星を発見または独立確認し、この分野で世界をリードしてきた (図1)。岡山発のこの系外惑星探索プロジェクトは、その後野口邦男氏、泉浦秀行氏らのリードで中国⁸⁾

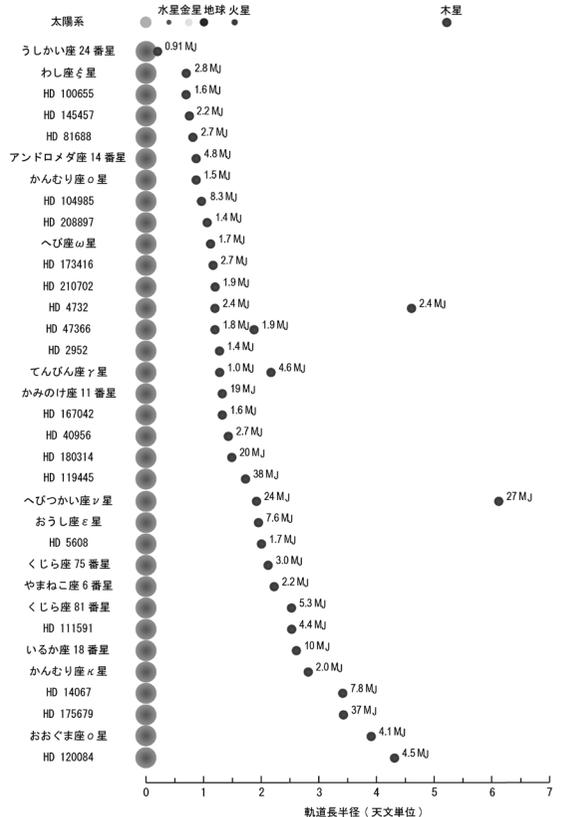


図1 岡山188 cm望遠鏡とHIDESが発見・独立確認に寄与した巨星を回る系外惑星の模式図。横軸は軌道長半径、図中の数字は木星質量を単位とする惑星の質量。一番上には比較のため太陽系を示す。

や韓国⁹⁾、トルコ・ロシア¹⁰⁾との共同研究に発展し、さらにオーストラリアの望遠鏡を使った共同観測も行われた^{3,7)}。2015年には、国際天文学連合が実施したキャンペーンによって19の系外惑星系に名前がつけられたが、そのうちの6系は岡山で発見されたものである (本号の福井暁彦氏の記事参照)。

2.2 太陽型星における系外惑星探索

太陽型星周りの惑星の統計的性質は比較的良好にわかっているとは言っても、そのほとんどが中心星から3天文単位以内の惑星についてのものであり、より遠方に存在する惑星についての知見は現在ほとんどわかっていない。特に3-10天文単

位あたりの領域は、ガス惑星のコア形成が促進される場であると考えられており、惑星形成の理解にとって本質的に重要な領域である。最近の研究では、原始惑星系円盤の特徴が金属量によって異なるという指摘もあるため、さまざまな太陽型星における遠方惑星の分布を明らかにすることは、太陽系との比較という点からも重要である。しかし、この領域に存在する惑星は種々の惑星探索において検出が困難なことで知られており、例えばトランジットの発生確率は極めて低く、直接撮像でも10天文単位以内の惑星については検出が難しい。このような遠方惑星を発見する現在最も着実な方法は、長期的観測によって中心星の視線速度変動を検出することである。

原川紘季氏は、2004–2006年頃に筆者や井田茂氏らによって行われた、すばる望遠鏡などを用いた短周期惑星探索プロジェクト「N2K」が取得した大量の高金属量太陽型星のデータに着目した。原川氏は、長いベースラインをもつN2Kの優位性を活かし、高金属量星周りの長周期惑星の検出とその性質の理解を主眼として、これらの天体のフォローアップ観測を2009年から岡山で行ってきた。このプロジェクトからはこれまでに五つの惑星が発見され、そのうち二つは軌道長半径が4天文単位に迫る長周期惑星であるなど、岡山ならではの成果が上がっている¹¹⁾。

このほかにも、太陽型星からなる連星系を対象とした系外惑星探索が豊田英里氏、加藤則行氏らによって行われた^{12), 13)}。

2.3 太陽型星および巨星における星震学

恒星の微小振動を利用して恒星内部を探る学問は、1980年代後半の日震学の成功によってその重要性が実証された。同じ手法を一般の恒星に対して適用する「星震学」は、振動が極めて微小であるが故の観測の困難さから長年進展がなかったが、2000年以降の視線速度精密測定技術の著しい進歩や、超精密測光観測衛星の登場によって大きく開花した。今や星震学は系外惑星研究におい

ても、中心星の物理パラメータを、ひいては惑星の物理パラメータを精密に決定する手段として欠かせないものとなっている。

岡山では、神戸栄治氏、安藤裕康氏らによってHIDESを用いた太陽型星や巨星における星震学観測研究が進められてきた。特に、長年振動検出の真偽に論争があった「こいぬ座 α 星（プロキオン）」の地上国際キャンペーン観測に参加し、同星における非動径振動の確実な検出と、自転による活動領域のモジュレーションによると思われる長周期変動の検出という重要な成果を上げた¹⁴⁾。巨星の観測においても同様に国際キャンペーン観測に参加し¹⁵⁾、また、巨星周りの系外惑星探索プロジェクトと連携して惑星をもつ巨星の振動観測を進めた¹⁶⁾。先に述べたように、岡山は東アジア地域において星震学に必要な数m/s以下の視線速度測定観測が可能な唯一の拠点であり、経度をまたいだ国際キャンペーン観測の際に重要な拠点となっている。

3. 新たな船出：共同利用の終了とユーザー主体運用への移行

視線速度精密測定技術を用いた研究で成果を上げてきた188 cm望遠鏡とHIDESであるが、2017年末をもって国立天文台による共同利用観測が終了した。さらに、2017年度末には共同利用を推進する国立天文台のCプロジェクトとしての岡山観測所が終了した。筆者が知る限り少なくとも20年前（筆者が修士学生の頃）からそのような話はあったが、本当に終了したわけだ。共同利用終了後の188 cm望遠鏡の扱いについては2015年秋の岡山ユーザーズミーティングで正式に国立天文台長から方針が示され、翌2016年秋のユーザーズミーティングでは国立天文台は188 cm望遠鏡の運用はしないがインフラとしては維持し（更地にすることはなくなった）、大学連合や地元自治体等で運用するならば協力するという方針が示された。

筆者らは、最近の大改修や自動運転化によって性能が大幅に向上した188 cm望遠鏡はこれからが本当の使い時であると思っており、188 cm望遠鏡でしかできない研究があると考えている。そこで、188 cm望遠鏡の継続利用を希望する大学連合というかユーザー連合の中心となるべく、東京工業大学では理学院の地球惑星科学系と物理学系、およびWPI拠点である地球生命研究所の教員とが参加して、2017年4月に理学院の学院研究センターである「系外惑星観測研究センター (Exoplanet Observation Research Center)」を立ち上げた。時を同じくして国立天文台との協議が始まり、2018年7月には国立天文台、東京工業大学、浅口市の間で188 cm望遠鏡運用に関する三者協定が締結された。この協定には、国立天文台は東京工業大学を中心とする研究教育機関等（研究・教育用途）および浅口市（観光・教育用途）の利用に望遠鏡を提供し、東京工業大学は同望遠鏡を利用する研究教育機関等を代表して望遠鏡を借り受け、国立天文台と協力して望遠鏡の維持・管理を行うことがうたわれている。2018年7月

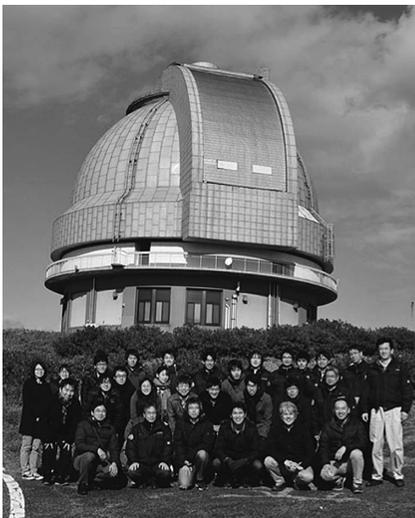


図2 2017年12月11日、岡山に集った188 cm望遠鏡ユーザー有志、岡山分室や元観測所員の協力を得ながら、ユーザーが分担して各種作業を実施し始めている。

27日には三者協定に基づいて設置された第一回運用協議会が浅口市にて開催され、新たな枠組みでの188 cm望遠鏡の運用がスタートした。

これらの動きと並行してユーザー側では188 cm望遠鏡運用委員会を組織し、実際の運用に関わる意志のある多くのユーザー（東京工業大学、東京大学、岡山理科大学、京都大学、アストロバイオロジーセンター、国立天文台などの教員、ポスドク、学生）とともに、岡山分室の協力を得ながら具体的な運用体制を構築しつつある（図2）。現在、望遠鏡・ドームの定期的な点検、主鏡洗浄、装置交換作業などをユーザーが主体となって実施し始めており、2018年9月には188 cm望遠鏡の主鏡再蒸着作業も国立天文台の協力のもと無事に終わることができた。また、例年岡山の施設を使用して行われていた広島大学かなた望遠鏡の主鏡再蒸着作業も、岡山の新たな運用の枠組みのもとで無事実施された。浅口市も188 cm望遠鏡を用いた観望会の開催を始めており、様々な新しい企画が検討されている（本号の栗野諭美氏の記事参照）。

始まったばかりの新しい運用形態はまだ問題山積で前途多難、大きな冒険ではあるが、とにかく新たな航海へと漕ぎ出した。後は振り返らず、ひたすら前を向き突き進んでいくだけである。

4. 今後の展開：生命を有する惑星の探索へ

これまで188 cm望遠鏡とHIDESで行われてきた観測研究は今後も続けたいと考えているが、新たな船出にはやはり新たな研究プロジェクトがふさわしい。現在大規模改修中のHIDESも近々観測を再開し、新たな時代が幕を開ける。このような新時代に向けたプロジェクトの一つとして、筆者らが始めようとしている「高精度ドブラー観測で探る太陽型星周りのハビタブル惑星」を以下に紹介する。このプロジェクトは、自然科学研究機構アストロバイオロジーセンターのサテライト研究（2017-2019年度）として採択されている。

4.1 太陽近隣の明るい太陽型星を対象としたハビタブル惑星候補の探索

宇宙における生命の起源と進化、およびその特殊性または普遍性を解明することは、理学の究極的な目的の一つである。Kepler 宇宙望遠鏡は、ハビタブル地球型惑星候補を含む数千個の系外惑星を発見するという大きな成果を上げたが、残念ながらこれらの惑星は大半が太陽から遠く離れた恒星にあるため、生命指標の調査につながるような詳細観測には不向きである。今後は、できるだけ太陽の近くにある恒星、なかでも太陽型星に生命を有する可能性のある惑星を発見することが重要なテーマとなる。

そのための手段として最適なのは、可視光視線速度法である。視線速度法は恒星当たりの惑星検出率が高いため、特定の恒星について惑星検出を狙うのに適している。現在北天では欧米のグループが合計約 100 星を約 1 m/s の測定精度でモニター観測しているが、これらのグループは低質量惑星を検出しやすい活動性の低い“静かな”星を狙っているため、高年齢（数十億歳程度）の晩期 G 型から早期 M 型星を主な観測対象としている。

一方、太陽近隣には若い GK 型星や質量の大きな F 型星なども存在している。できるだけ太陽の近くにある太陽型星に惑星を発見し、将来惑星大気や表層環境の違い、進化、さらには生命存在の条件等を明らかにするためには、これらの恒星に対する惑星探索も欠かせない。しかし、この種の恒星は磁気活動などに起因する恒星自身の視線速度変動が比較的大きいため、低質量惑星の検出にはより多くの連続的な観測が必要となる。このような観測はほぼ専用の望遠鏡でしか実施できないため、これまであまり行われてこなかった。

本プロジェクトでは、共同利用が終了し観測形態の自由度が増す 188 cm 望遠鏡と、大改修によって安定度が増す HIDES の利点を最大限活かし、現行の惑星探索からは除かれている若い恒星や高質量星を含む、太陽のごく近隣に位置する明るい太

陽型星に対する集中的な視線速度観測を実施する。約 1 m/s の高精度をもって、数カ月の連続観測を含むかつてない規模の稠密かつ長期間の視線速度モニター観測を敢行し、それぞれのハビタブルゾーンを含む軌道範囲においてまずはスーパーアース以上の惑星の有無を確立することを目指す。

4.2 金属量と年齢の異なる太陽型星における巨大惑星分布の調査

生命保有惑星の発見からさらに進んで、将来、惑星が生命を保有するに至る条件を観測的に解明するには、年齢や質量、金属量等が異なるさまざまな恒星における惑星系の姿を明らかにする必要がある。しかし、実は惑星系の観測的な理解が最も進んでいる太陽型星であっても、年齢が 10 億歳より若い惑星系の様子はほとんどわかっていない。例えば、短周期巨大惑星（ホットジュピター）は遠方で形成された巨大惑星が内側に移動したものと考えられているが、若い恒星における惑星の検出例が少ないため、移動の時間尺度やメカニズムについて観測的な制約が得られていない。また、惑星移動は原始惑星系円盤の寿命や質量に大きく左右されるが、これらと相関する中心星金属量と惑星分布の関連も未解明である。巨大惑星の形成と軌道進化は他の惑星の形成や進化にも大きな影響を及ぼすため、さまざまな年齢や金属量をもつ恒星について巨大惑星の分布を明らかにすることが重要である。

本プロジェクトでは、まず 188 cm 望遠鏡で 10 年以上にわたって進められてきた、高質量太陽型星を対象とした視線速度法による惑星探索を継続推進し、遠方巨大惑星の存在をさらに調査する。これに加えて、若い太陽型星を対象とした惑星探索を新たに展開し、特にこれまでに惑星が発見されていないプレアデス星団（年齢約 1 億歳）内の太陽型星に対する集中的な惑星探索を実施する。1 億歳という年齢は巨大惑星の軌道進化の時間尺度を制約するうえで十分に若く、同星団における短周期惑星の分布は惑星の形成・進化過程の

解明に直結する。このように、年齢と金属量の異なる恒星における巨大惑星の分布を明らかにし、巨大惑星形成のより一般的な描像を得ることを目指す。

ここで述べた系外惑星探索計画は、これから行われる観測研究の一例である。これら以外にも今後は188 cm望遠鏡の機動性を活かした観測や柔軟な時間割付を活かしたモニター観測、全球的なネットワーク観測など、他の望遠鏡ではできない、あるいは実行が難しい観測研究を積極的に展開し、188 cm望遠鏡とHIDESを擁する岡山を高精度可視高分散分光観測の世界的拠点の一つとしてさらに大きく発展させていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 竹田洋一, 2003, 天文月報, 96, 303
- 2) Kambe, E., et al., 2008, PASJ, 60, 45
- 3) Sato, B., et al., 2013, ApJ, 762, 9
- 4) 佐藤文衛, 2004, 天文月報, 97, 315
- 5) Sato, B., et al., 2003, ApJ, 597, L157
- 6) Sato, B., et al., 2007, ApJ, 661, 527
- 7) Sato, B., et al., 2016, ApJ, 819, id.59
- 8) Wang, L., et al., 2012, RAA, 12, 84
- 9) Jeong, G., et al., 2018, A&A, 610, id.A3
- 10) Yilmaz, M., et al., 2017, A&A, 608, id.A14
- 11) Harakawa, H., et al., 2015, ApJ, 806, id.5
- 12) Toyota, E., et al., 2009, PASJ, 61, 19
- 13) Katoh, N., et al., 2018, PASJ, 70, id.60
- 14) Arentoft, T., et al., 2008, ApJ, 687, 1180
- 15) Beck, P. G., et al., 2015, A&A, 573, id.A138
- 16) Ando, H., et al., 2010, PASJ, 62, 1117

New Era of Optical High-Dispersion Spectroscopy Using HIDES and 188 cm Telescope

Bun'ei SATO

Tokyo Institute of Technology, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8551, Japan

Abstract: HIDES started open-use observations in 2000. Since then it had produced many scientific results in the field of exoplanets and asteroseismology using a technique of precise radial-velocity measurements, and it finished the open-use observations at the end of 2017. However, it does not mean that HIDES is retired but it marks the beginning of a new era for HIDES and 188 cm telescope. In this article, I briefly summarize the main results obtained by precise radial-velocity measurements with HIDES to date, show the new framework of operation of 188 cm telescope from 2018, and introduce new observational researches to be carried out with HIDES and 188 cm telescope.