アストロバイオロジーセンターでの装置開発

小谷隆行^{1,2,3}

〈¹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〉
〈²国立天文台ハワイ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉
〈³総合研究大学院大学 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉
e-mail: t.kotani@nao.ac.jp



1. はじめに

アストロバイオロジーセンター(ABC)では, 太陽系外惑星の探査とその特性を詳細に調べるた めの様々な観測装置を開発しています.また,最 先端の観測装置に必要な基礎技術の開発も積極的 に行っています.

2. 現在運用中の観測装置

赤外線精密視線速度測定装置IRD(Infra-Red Doppler)

IRD (InfraRed Doppler) は、すばる望遠鏡用 に開発された近赤外線の高分散分光装置です. IRDは、M型星と呼ばれる太陽の数分の一以下の 質量を持つ恒星の視線速度を、2 m/sという高精 度で測定し、その周囲を公転する惑星を発見する ことを主目的としています [1]. IRDは2011年か ら開発を開始し、2018年からすばる望遠鏡の共同

利用観測装置に供されており、現在も運用中で す. 2019年からは、M型星周りの惑星探査のため の、すばる望遠鏡戦略枠観測と呼ばれる大規模 サーベイ観測を開始し、間もなく5年間の観測が 終了します. IRDはこれまで, Ross 508というM 型星のハビタブルゾーン(液体の水が存在できる 領域)近くに、地球質量の4倍程度の惑星を初め て発見したり[2]、火星質量惑星の存在に制限を付 けるなどの成果を挙げているほか[3], ホットジュ ピターと呼ばれる惑星の大気中に初めて OH を発 見したり[4],宇宙望遠鏡によって発見された系外 惑星の視線速度フォローアップ観測を行うなど, 様々な成果を挙げています.また恒星物理の分野 でも、IRDの高い分光能力を活かして、M型星や 低金属量星の大気中の元素量測定 [5,6]や、中性 子星合体で生じる重元素による吸収線を恒星大気 中に発見し同定するなど[7]、系外惑星だけでなく 様々な分野においても使われています.



ここからは、IRDの観測装置としての特徴を述 べていきたいと思います. IRDは、波長970 nm から1750 nmの近赤外線を最大70,000の波長分 解能で同時分光できる,高分散分光器とよばれる タイプの装置です、望遠鏡で集めた光は、望遠鏡 のナスミス台と呼ばれる場所で補償光学を用いて 地球大気の乱れを取り除き,回折限界に近い星像 を光ファイバーに入射させます. 真空チャンバー に格納された分光器は、望遠鏡の真下にあるクー デ室と呼ばれる地下室に設置してあり、そこまで 約65メートルの長さの光ファイバーを通して光 を導きます(図1,2). IRDは、主分散素子とし て新規開発した長さ410 mm幅90 mm, ブレー ズ角78.98°の大型エシェル回折格子を用いていま す. 光学系全体は180 K. 検出器は約80 Kまで冷 却して装置由来の赤外線放射を小さく抑え、大 フォーマット近赤外線2次元アレイ検出器 HAWAII2-RG (ピクセル数2048×2048、ピクセ ルサイズ15 µm)を用いることで、高感度・広波 長域・高波長分解能を実現しています.

IRDは惑星探査を可能にするための独自の特徴 があり、以下にそれを説明します.まず、IRDは高 分散分光器としては非常に広い波長域を同時に観 測することができます.恒星の視線速度測定では 恒星スペクトル中の吸収線の波長変動を測定しま すが、吸収線1本だけではせいぜい数百m/s程度 の測定精度しか出ません. そのため, できるだけた くさんの吸収線を同時に測定する必要があります が, IRDではそれらをできるだけ漏らさず測定で きるように広い波長域をカバーしています. 次に, 惑星を発見するには, 視線速度を高精度で測定で



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、モードス クランブラーを通して安定化された光が、 クーデ室と呼ばれる地下室に設置された分光 器まで導かれます. 精密な視線速度測定のた めに、波長安定な光源である、レーザー周波 数コムを天体と同時に観測します. クレジッ ト: ABC、国立天文台



図2 (左) IRDの真空チャンバーの外観.大きさは約1.5×1mです.(右)真空チャンバー内部に格納されている分 光器光学系とそれを囲む,常温部からの輻射をカットする輻射シールド.クレジット:ABC

きるだけでなく、観測装置由来の系統誤差をでき るだけ抑えて長期間安定して測定できる必要があ ります. IRD はそのために、分光器を極限まで安 定化させています.まず,分光器は年間を通して の温度変化が約±1.7℃と安定したクーデ室と呼ば れる地下室に設置されています. 加えて, 分光器 全体をヒーターで温度制御することで、光学定盤 の温度変動を数週間の短期間では±0.01℃、年間 でも±0.05℃以内に保っています.また.熱膨張率 が非常に小さいゼロ膨張セラミックスを、光学定 盤や放物面鏡,回折格子ホルダーなどに用いてお り、温度変化に対して変形しにくい構造としていま す. さらに、近赤外線での視線速度測定を行う際 に大きなノイズ源となる「モーダルノイズ」を低減 する,独自に開発したモードスクランブラーと呼ば れる装置を搭載しています[8]. モーダルノイズは, 線スペクトル形状が時間変動し, 偽の視線速度変 動を引き起こすもので,装置の温度変化や地球大 気の乱れ、望遠鏡の指向誤差など様々な要因で生 じます. IRDは、光ファイバーに意図的に擾乱を 与え続けたり、あえて500m近い長さの光ファイ バーに光を通したりなどの独自の工夫により、モー ダルノイズの影響を抑えています.

このようにして、できるだけ装置由来の視線速 度変動を抑えるのですが、それだけでは惑星検出 に必要な m/s レベルの安定性は得られません.こ れらに加えて、波長の変化がほとんどなく、広い 波長域でかつ密に輝線を出す光源を、恒星のスペ クトルと同時に観測します.これにより、例えス ペクトルの位置が装置のせいで動いてしまって も、相対位置を測定することでその影響をキャン セルできます.私たちは、東京農工大学と共同 で、天文観測に特化したレーザー周波数コムと呼 ばれる極めて安定な、広帯域の波長較正光源を開 発しました [9].これによって、数年にわたり約 2 m/sの視線速度測定の安定性を実現しています.

またIRDの特徴の一つとして、補償光学と組み 合わせて使用することがあります.これにより分 光器をコンパクトにできるだけでなく、明るい恒 星のすぐ近くにある惑星や褐色矮星のような暗い 伴星を、主星から十分に空間的に分離したうえで、 分光観測が可能になります。図3はIRDによって 取得されたGl 229 Bと呼ばれる、主星がM型星の まわりを公転する褐色矮星の画像とスペクトルに なります. IRDの高い波長分解能と広い波長域, そして補償光学のおかげで, 主星からの光の漏れ 込みをほぼ無視できるレベルまで抑え、褐色矮星 の大気中にメタンや水蒸気などの分子を検出する ことができました [10]. さらに、次に述べる極限補 億光学とIRDを組み合わせることで、より主星の 近くに存在する惑星などの光を高精度で分光可能 な REACH (Rigorous Exoplanetary Atmosphere Characterization with High dispersion coronagraphy)と呼ばれる観測モードもあります[11]. これ はシングルモードファイバー (Single-Mode Fiber, SMF)と呼ばれる、光が通るコアが非常に小さい 光ファイバーに光を導入してIRDの分光器まで導 くことで、波長分解能約100,000の分光観測を実現 します. SMFはコア直径が小さく, 測定の邪魔に なる恒星の散乱光の混入を抑え高精度な惑星光の 分光観測を可能にします.この観測モードにより、 褐色矮星のスペクトル測定と大気組成分析などに 成功しています[12].またSMFは出射光強度分布 が安定しモーダルノイズが存在しないという特徴 を活かして,超高精度の視線速度測定が可能であ ると考えています.将来的には、太陽のような恒 星のまわりを周回する、地球に似た惑星を検出す るために、10 cm/sを切る精度の視線速度測定が望 まれており、IRD はその実現に向けたテストベッ ドとしての役割も担っています.

2.2 すばる望遠鏡極限補償光学装置 SCExAO

太陽系外惑星を主星から空間的に分離して 撮像・分光を行うには、地球の大気乱れを極限ま で小さく抑え、主星の散乱光を惑星と同レベル 以下の強度に小さくする補償光学が必須です. SCExAO (Subaru Coronagraphic Extreme Adap-



 図3 (上) IRDのファイバー入射モジュールで撮像した褐色矮星 Gl 229 B. 円は IRD の光ファイバーの視野 0.48秒 角を示します. クレジット: ABC
 (下) IRDで取得した Gl 229 Bの近赤外線スペクトル. 点は観測データ,実線はいくつかのモデルによるフィットの結果 [10].

tive Optics) [13] は、大気の乱れをリアルタイム で測定・補正し、回折限界像を得る補償光学装置 の中でも、極めて高速かつ高精度で波面を測定・ 補正することができる装置で、ABCのメンバーで もある, Olivier Guyon 氏が主導して開発を進め てきました (図4). SCExAOは、一連のユニーク な観測装置と組み合わせることで、系外惑星の直 接撮像や, 原始惑星系円盤の高精度撮像などを実 現してきました. ここでは、その観測装置を紹介 したいと思います. CHARIS (Coronagraphic High Angular Resolution Imaging Spectrograph) は, プリンストン大学を中心に開発された、IHKバン ドの高解像度面分光装置であり、SCExAOに搭載 された観測装置の中で最も多く使用されてきた, 撮像と低分散分光を同時に行うことが可能な装置 になります[14]. また SCExAO は, その高い波面 補正能力により,通常の補償光学では困難であっ た,可視光での回折限界レベルの補正を行うこと



図4 SCExAOと付随する観測装置の外観(点線内).
 SCExAOの右側にある筐体に収められた装置
 は,すばる望遠鏡の補償光学装置AO188(撮影当時). クレジット: ABC

ができます. VAMPIRES (Visible Aperture Masking Polarimetric Imager for Resolved Exoplanetary Structures) は,まさにその可視光での回折 限界撮像および偏光差分撮像を行うことができる

ユニークな観測装置です[15]. ほかにも, MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector)と呼ば れる,光子のエネルギーを直接測定する近赤外線 のフォトンカウンティング・撮像分光カメラもあ り,光子の特性を利用したユニークな伴星検出が 可能です[16].また,高速カメラと高速で偏光軸 の向きを変えることができる偏光素子を組み合わ せ,従来よりも偏光差分における系統誤差を低減 できる Fast PDI (Polarization Differential Imaging)と呼ばれる観測モードもあります.

SCExAOには、その性能と観測装置だけでは ない、ユニークな特徴があります。それは、新し い技術のテストベッドとしての役割です。系外惑 星を観測するのは、技術的に非常にチャレンジン グであり、様々な技術開発を必要とします。しか も世界での競争も激しいため、開発とテスト、観 測のサイクルをできるだけ早く回して、開発のス ピードを上げることが重要です。SCExAOは、 新しい技術をキャッチアップし、すぐに試せる機 会を提供しています。これは、将来の口径30 メートル級望遠鏡に搭載される観測装置のテスト ベッドとしての役割も兼ねています。

3. 開発中の観測装置

3.1 南アフリカ近赤外線ドップラー装置SAND

北天では、IRDなどの近赤外線でのドップラー サーベイが進んでいますが、南天ではそもそも近 赤外線での高精度ドップラー測定が可能な装置が 少なく、サーベイが手薄な状態にあります.そこ で私たちは、南天での高精度ドップラー観測を進 めるために、大阪大学が南アフリカ・サザーラン ド観測所に建設したマイクロレンズ法による系外 惑星探査を目指す口径1.8メートルのPRIME望 遠鏡に搭載する、近赤外線分光器SAND (South Africa Near-infrared Doppler)を開発中です[17]. SANDは、IRDと似た分光器ですが、IRDよりは 短波長側の波長850-1080 nmのz・Yバンドと呼 ばれる波長域において、波長分解能65,000とい う高分解能でスペクトルを同時に取得することが できる設計になっています.この波長域は,次に 述べるSANDの主目標である,M型星のまわり の地球型惑星探査と,若い恒星のまわりの惑星探 査のために最適化されたものになっています.

SANDの目的は主に2つあります.一つは,近 傍M型星のまわりに地球型惑星を発見すること です. SANDの特徴としては、望遠鏡の口径が 小さいかわりに、すばる望遠鏡のような大口径望 遠鏡と比べるとフレキシブルに潤沢な観測時間を 確保できる利点があるため.明るいM型星を集 中的に観測するという戦略を取ります. これによ り、既に惑星を持つことが知られている恒星系に 対して長期間高頻度で追観測を行うことで、これ まで知られていなかった惑星を発見するといった ことが可能になると考えています.また、この高 頻度観測は、第2の目標である、若い恒星のまわ りの惑星探査に非常に有用です、近年、直接撮像 などで原始惑星系円盤内に生まれたばかりの惑星 が見つかってきましたが、若い惑星がその後どの ような進化をたどり,成熟した惑星系に至るかは 不明な部分が多く,解明が待たれています.

SANDは、PRIME望遠鏡と分光器を光ファイ バーで接続して使用するのですが、PRIMEは銀 河中心部分をモニター観測するため、望遠鏡の主 焦点と呼ばれる部分に広視野赤外線カメラを取り 付けており、通常の望遠鏡にある副鏡やカセグレ ン焦点・ナスミス焦点がありません。それではど うやって、光ファイバーに望遠鏡で集めた光を入 れるのでしょうか.SANDでは、PRIMEの主焦点 カメラのレンズとレンズの間に光を横に取り出す ための出し入れ可能なミラーを設置し、トップリ ングと呼ばれる望遠鏡上部のリング状の構造に光 を送り、そこで光ファイバーに光を入射させます。 分光器は、望遠鏡ドームに隣接した温度コント ロールされた安定な部屋に設置されます(図5).

SANDは、PRIME望遠鏡とのファイバー結合 により観測を行いますが、サザーランド観測所に



図5 (左) SANDの装置構成の概要. 望遠鏡トップリングにて光をファイバーに入射し,真空チャンバー内の分光器 へと導きます.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. (右) SAND の分光器を収める真空チャンバー. クレジット: ABC

は、周辺に数多くの望遠鏡が設置されています. 私たちは、その中のいくつかの望遠鏡とSAND をファイバーで結合して観測する計画を推進中で す. これにより、さらにフレキシブルで多くの観 測時間を得ることが可能になると考えています. これは、恒星の視線速度測定のような、高頻度か つ長期間のモニター観測には非常に役に立ちま す. 中でも検討が進んでいるのは、名古屋大学の 口径1.4メートル望遠鏡IRSFとファイバー結合を する計画で,名古屋大学・鹿児島大学と共同で進 めています. IRSFは、PRIME 望遠鏡から約200 メートル離れていますが. これを光ファイバーで 繋ぐことになります (図6). 私たちが使用する 近赤外線用のファイバーは透過率が非常に高く, 200メートル程度であれば大きな損失なく光を伝 送することができます.また,サザーランド観測 所には、口径11メートルのSALTと呼ばれる大 口径望遠鏡もあります. 暗い天体の観測には. SALTの大口径は非常に魅力的であり、SALTと の結合には解決するべき技術的なハードルがあり ますが、ぜひ実現したいと考えています.これら が実現すれば、世界的に類を見ない、複数望遠鏡 をファイバーで結合したユニークな観測装置とな るでしょう.

3.2 TMT用観測装置の開発

ABCは, IRD, SCExAOなどで開発した装置・



図6 PRIMEとIRSF望遠鏡. SANDはPRIME望遠鏡 ドームに隣接した部屋に設置されます. PRIMEとIRSFを光ファイバーで結合する計画 を進めています. クレジット: ABC

技術をベースとして,将来の口径30メートル望 遠鏡TMT (Thirty Meter Telescope) 用観測装置 の開発にも深く関わっています.

MODHIS (Multi-Object Diffraction-limited High-resolution Infrared Spectrograph) はTMT 第1期装置として,米国・カナダ・日本などの国 際協力で開発中の,シングルモードファイバーを 用いた近赤外線回折限界高分散分光器です[18]. MODHISに先立って,ほぼ同じ機能を持つ分光 器部分の技術実証を兼ねて,Keck望遠鏡用近赤 外線回折限界分光器HISPEC (High resolution Infrared Spectrograph for Exoplanet Characteri-

zation)の開発が進んでおり,2026年以降の観測 開始を目指しています.ABCは、分光器の核心 部分とも言える,高効率かつ回折限界性能を持つ エシェル回折格子と、シングルモードファイバー の接続を自動で切り替え,高頻度な分光器の較正 を行うためのファイバー交換機を新規に開発し, 提供しています.

HISPEC・MODHISの目標は,直接殺属され た惑星やトランジット惑星に対して高感度な近赤 外線高分散分光観測を行い,惑星大気組成や構造 の解明を目指すことと,30 cm/sという超高精度 かつ高安定な視線速度測定により,M型星まわ りの地球型惑星の検出することになります.また HISPECとMODHISの分光器部分は,TMTの第 2期装置として提案中の,系外惑星系直接撮像分 光装置PSI (Planetary System Imager) [19]の分光 器へと発展させることが想定されており,これに よりM型星まわりの地球型惑星の直接撮像分光 観測とバイオシグネチャー探査が可能になると考 えています.

HISPEC・MODHISは、極めて高い視線速度 安定性を実現したり、高精度に惑星大気分光を 行ったりするために、分光器光学系の性能に対す る要求は非常に厳しいものがあります.特にエ シェル回折格子は、これまでの分光器ではあまり 追及されてこなかった、回折限界を達成できる回 折波面平坦性(<30 nm rms)と、暗いM型星や 系外惑星を観測するために、非常に高い回折効率 を達成することが求められます. 私たちが開発し たエシェル回折格子は、高い回折波面の平坦性を 実現するために、切削性が非常に良いゲルマニウ ムを基板とし、基板に直接回折格子を刻み込む方 式を取っています. ゲルマニウムは, 光を基板内 に透過・反射させるイマージョン型回折格子とし て使用されることが多いですが、私たちはゲルマ ニウム製回折格子の回折波面の平坦性に着目し. 反射型の回折格子として使用します.切削性に優 れた材料とキヤノンによる高精度加工機のおかげ



図7 (上)開発した HISPEC 用エシェル回折格子. (下)電子顕微鏡で撮影した格子の様子(左図は倍率1000倍,右図は倍率500倍).表面が極めて高精度に製作されているのがわかる.クレジット:ABC,キヤノン

で、極めて波面平坦性が高く、また理論的な回折 効率に限りなく近い、非常に高性能なエシェル回 折格子を開発することができました [20] (図7). またこの回折格子は、ほぼすべてが単結晶ゲルマ ニウムでできているため、冷却した場合の歪みが 極めて小さいことも、試作回折格子により確認し ています.

また、HISPECは様々な較正用光源を分光器内 に導き、高頻度で分光器の較正を行うことで、装 置由来の視線速度変動をモニターし補正すること になっています.そのためには、高効率かつ安定 的に、コア直径が数ミクロンしかないシングル モードファイバーに、天体や較正用光源を入射さ せることが必要です.これを実現するのが、私た ちが開発したファイバー交換機と呼ばれる装置で す.このファイバー交換機は、元々 IRD・REACH 用に開発したものを、さらに高機能化したものに なります.

最後に、2027年ごろ打ち上げ予定のRoman宇 宙望遠鏡に対して、日本からは、ABC・東京大

学・JAXA・北海道大学・国立天文台などが協力 して, 偏光素子・コロナグラフマスク基板・カメ ラ光学系の一部といった光学素子の提供に貢献し ています.

このように、ABCは、最先端の系外惑星研究 を推進するために、観測装置と基礎技術開発を重 視しており、また装置開発・観測・理論が歩調を 合わせて、系外惑星分野を発展させることが重要 だと考えています.

参考文献

- [1] Kotani, T., et al., 2018, Proc. SPIE, 10702, id. 1070211
- [2] Harakawa, H., et al., 2022, PASJ, 74, 904
- [3] Kuzuhara, M., et al., 2024, ApJL, 967, L21
- [4] Nugroho, S. K., et al., 2021, ApJL, 910, L9
- [5] Ishikawa, H. K., et al., 2020, PASJ, 72, 102
- [6] Aoki, W., et al., 2025, PASJ, Advance Access
- [7] Tanaka, M., et al., 2023, ApJ, 953, 17
- [8] Ishizuka, M., et al., 2018, PASP, 130, 065003
- [9] Serizawa, T., et al., 2025, JATIS, 10, 025006
- [10] Kawashima, Y., et al., 2025, accepted for publication in ApJ, arXiv:2410.11561
- [11] Kotani, T., et al., 2020, Proc. SPIE, 11448, 1144878
- [12] Kasagi, Y., et al., 2025, submitted
- [13] Jovanovic, N., et al., 2015, PASP, 127, 890
- [14] Groff, T. D., et al., 2016, Proc. SPIE, 9908, 99080O
- [15] Norris, B., et al., 2015, MNRAS, 447, 2894
- [16] Walter, A. B., et al., 2020, PASP, 132, 125005
- [17] Takahashi, A., et al., 2024, Proc. SPIE, 13096, 1309669
- [18] Mawet, D., et al., 2024, Proc. SPIE, 13096, 130960W
- [19] Fitzgerald, M. P., et al., 2022, Proc. SPIE, 12184, 1218426
- [20] Kotani, T., et al., 2024, Proc. SPIE, 13100, 131005T

Instrumentation at the Astrobiology Center Takayuki Kotani^{1,2,3}

¹Astrobiology Center, 2–21–1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181–8588, Japan

²National Astronomical Observatory of Japan, 2–21–1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181–8588, Japan ³Astronomical Science Program, The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 2–21–1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181–8588, Japan

Abstract: At the Astrobiology Center (ABC), a variety of instruments are being developed and operated for the exploration of exoplanets. This article introduces these instruments. Currently operational systems include the InfraRed Doppler (IRD), a high-resolution near-infrared spectrograph used with the Subaru Telescope for planet detection via the radial velocity method, and SCExAO, an extreme adaptive optics system for direct imaging and spectroscopy of exoplanets. Instruments under development include SAND, a high-resolution near-infrared spectrograph designed for radial velocity surveys in the Southern Hemisphere, and MODHIS and HISPEC, diffraction-limited near-infrared spectrographs for the future Thirty Meter Telescope (TMT). In addition to developing instruments, ABC is also actively engaged in the development of key enabling technologies essential to achieving state-of-the-art science, such as laser frequency combs, high-efficiency echelle gratings, fiber switchers, etc.