

# アストロバイオロジーセンターにおける 系外惑星系の高コントラスト撮像

葛原 昌幸

〈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〉

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: m.kuzuhara@nao.ac.jp

高コントラスト撮像は系外惑星や星周円盤など太陽系外の惑星系（系外惑星系）を発見し、さらには特徴付けるために有効である。地上望遠鏡や宇宙望遠鏡によって、これまで非常に多くの系外惑星系に関する高コントラスト撮像を用いた研究が進められてきた。アストロバイオロジーセンターでもすばる望遠鏡のSCEXAOやRoman宇宙望遠鏡のコロナグラフ装置などの高コントラスト撮像装置に関わる研究を進めてきた。SCEXAOによる高コントラスト撮像観測からは、星形成領域の若い恒星 AB Aur の周囲に存在する原始惑星系円盤に埋もれた原始惑星が発見された。また、高精度位置天文衛星のデータを利用した新しいターゲット選定とSCEXAOによる高コントラスト撮像を組み合わせた探査から巨大惑星や褐色矮星が複数発見された。Roman宇宙望遠鏡のコロナグラフ装置に対しては、同望遠鏡の打ち上げ以後に行われる高コントラスト撮像観測の準備にアストロバイオロジーセンターから複数名の研究者が参加している。本稿では主にその二つの高コントラスト撮像計画に関連するアストロバイオロジーセンターで行われた研究活動を紹介する。

## 1. 系外惑星系の直接撮像観測の現状

高コントラスト撮像とは、明るい天体の周囲に存在する暗い天体を観測する手法である。また同手法はこれまでも、太陽系外惑星（以下、系外惑星）やそれを形成する母体である原始惑星系円盤、さらには微惑星衝突の残骸であるデブリ円盤などの「系外惑星系」の観測に利用されてきた。しかし、それらの天体と系の中心に存在する恒星の明るさの「コントラスト比」は非常に大きい。例えば、重力収縮により自ら明るく輝いている年齢が若い巨大惑星であってもその中心星に対して近赤外光で5桁ほど暗い（例: [1]）。そのように明るさ

のコントラスト比が極めて大きい天体により構成される系を観測するためには、(1) 天体の星像をシャープにする補償光学、(2) 中心星像の変動に起因するノイズを差し引くための差分撮像、(3) 高効率の光学系や高感度の検出器が要求される。さらに、(4) 中心星光を抑制するためのコロナグラフも鍵となる技術の一つである。

上記の観測技術を駆使した系外惑星系の直接撮像は、地上大型望遠鏡による観測が本格的に開始された2000年あたりから盛んに行われてきた。例えば、日本が誇るすばる望遠鏡では高コントラスト撮像によって系外惑星系を大規模探査するSEEDS計画が2009年から2015年\*1まで進められ

\*1 追加で提案した共同利用時間の観測期間も含む。

た [2]. その結果, 巨大惑星や褐色矮星の直接撮像に成功している [3]. さらに鮮明な画像データを利用した多くの原始惑星系円盤の構造の解析により, 惑星が誕生する現場の理解も進んだ [4].

2015年あたりからは, 補償光学の性能を標準的なものから2倍以上引き上げた極限補償光学を利用した高コントラスト撮像観測も8 m級望遠鏡で世界的に行われている. 例えば, チリにあるジェミニ望遠鏡のGPI (ジーパイ: [5]) やVLTのSPHERE (スフィア: [6]) は8 m級望遠鏡に搭載された高コントラスト撮像装置であり, 2010年代の後半に目覚ましい観測成果をあげた. 北天ではすばる望遠鏡のSCEXAO (スケックスエーオー: [7]) を利用した極限補償光学観測が2010年代の後半に本格的に始まり, 多くの重要な成果が得られている (第2章参照). このような高コントラスト撮像における堅実な技術進歩により今後も多くの興味深い観測成果が得られると期待できる.

そのような着実な進展の一方, 同手法を用いた惑星の観測対象は主に自己放射が強い巨大惑星に限定されている. 高コントラスト撮像の究極的な目標の一つは惑星の「反射光」を検出することである. 例えば, 地球型惑星の反射光の検出は酸素などのバイオシグネチャーの調査も可能にするため学術的な意義が大きい. しかし, 可視光の波長域において地球や木星の太陽に対する光度比は $10^{-10}$ や $10^{-9}$ に匹敵するように, 惑星の反射光は中心星からの放射に比べて圧倒的に弱い. そのため, 系外惑星の反射光の検出は技術的に非常に難しい課題である. それにもかかわらず, 2040年代に打ち上げ予定の宇宙望遠鏡であるNASAのHabitable Worlds Observatory (HWO [8]) のように, 地球型惑星の反射光の検出を目標として掲げるプロジェクトも立ち上がっている. また, 2026年もしくは2027年に打ち上げ予定のRoman宇宙望遠鏡では系外惑星の反射光の検出に必要な技術実証を行うことが予定されている [9].

筆者が所属するアストロバイオロジーセンターでは, Olivier Guyon氏主導のもと極限補償光学装置SCEXAOの開発を進めており, 複数の研究者がSCEXAOを利用した観測研究にも取り組んでいる. また, 複数名の研究者がRoman宇宙望遠鏡のコロナグラフ計画にも参加している. 本稿では上記の観測計画を通して得られた成果を中心に, アストロバイオロジーセンターで行われた系外惑星系に対する高コントラスト撮像の研究を紹介する.

## 2. SCEXAOによる高コントラスト撮像

補償光学は波面センサーを利用して波面を測定し, 波面の乱れを可変形鏡を用いて補正する技術である. その結果として, 観測天体に対してスペースから得られるようなシャープな星像が得られる. 補償光学においては, 波面センサーと可変形鏡の素子数が高い方が補正性能が向上する. ただし観測条件にも依存するが, 近赤外の主な波長域において8 m級望遠鏡で回折限界に相当する空間分解能を達成するには約200素子で十分であり, すばる望遠鏡の通常の補償光学であるAO188の素子数は188となっている [10]. 一方, 極限補償光学はそれより一桁多い素子数を利用し通常の補償光学と比較してストレール比を大幅に改善する. ストレール比とは, わかりやすく述べると天体からの光がどれくらい星像中心に集中しているかを示す指標である. したがって, 高ストレール比の星像が得られた場合は, 明るい恒星の周囲に存在する暗い天体の微弱な光を中心星の光から区別しやすくなる. また, ストレール比が高いほどコロナグラフの効果も向上する.

SCEXAOでは2024年にアップグレードされる前は2000素子の可変形鏡を利用していた. その高い素子数のおかげで,  $1.6 \mu\text{m}$ の波長帯では80%以上のストレール比を得ることも可能になった [11]. さらに, SCEXAOは近赤外撮像分光

装置 CHARIS[12] との併用が可能である。CHARISは面分光機能を持ち、撮像と同時に1.2–2.4  $\mu\text{m}$ の波長帯において低分散分光が可能である。これにより惑星大気中に存在する水蒸気やメタンなどの分子による吸収が測定可能になる。また、広帯域の波長を利用した分光差分撮像を利用することで、検出限界も改善される。以下では、SCEXAOとCHARISにより得られた代表的な観測成果を紹介する。

### 2.1 誕生直後の系外惑星系の高コントラスト撮像

AB Aurはおうし座星形成領域に所属する有名なハービッグ Ae/Be 型星であり、これまでも様々な観測の対象となってきた。例えば、SEEDSの観測でもリング構造が検出されている [4]。AB Aur に対しては、テキサス大学サンアントニオ校に現在所属する Thayne Currie 氏の主導の元で SCEXAO を利用した長期的なモニター観測が 2016 年から 2020 年にかけて実行された [13]。同観測から得られた成果を 2022 年に報告した論文 [13] に基づき、本稿では AB Aur に対する SCEXAO 観測の結果を紹介する。

まず特筆すべき点は、中心星から約 92 au 離れたところに放射絶対光度が太陽光度に対して約  $10^{-2.7}$  倍の光源（中心星に対する光度比に換算すると  $3 \times 10^{-5}$ ）が検出されたことである（図1参照）。同光源（以下、AB Aur b）は SCEXAO と CHARIS を利用した観測で 7 回検出された。また、2021 年にハッブル宇宙望遠鏡の STIS を利用した可視光撮像でも検出され、さらに 2007 年に行われたハッブル宇宙望遠鏡の近赤外カメラ NICMOS のアーカイブデータの解析からも確認された。それらの検出に対する軌道解析の結果から、AB Aur b が反時計回りの軌道運動をしていることも確認された。

Currie 氏らは AB Aur b の正体として、その位置に原始惑星系円盤に埋もれた原始惑星が存在する可能性を考えた。しかし通常の撮像観測だけで

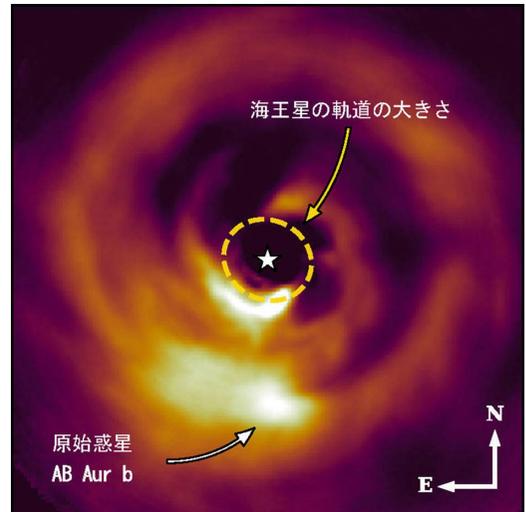


図1 AB Aur に対する SCEXAO/CHARIS の撮像画像。中心星（位置は星印）付近はマスクされている。AB Aur b の中心星に対する軌道長半径は約 94 au と推測されている。画像クレジット：T. Currie/Subaru Telescope

は、原始惑星に起因する放射と、原始惑星系円盤による中心星光の散乱を区別することは難しい。そこで、Currie 氏らは CHARIS の偏光観測の機能に着目した。円盤に散乱された中心星光は偏光するが、周囲の円盤と比較して卓越した偏光が AB Aur b の位置から確認できない場合は、検出した光源が円盤に埋もれた原始惑星に相当する可能性が支持される。実際に AB Aur を SCEXAO/CHARIS の偏光モードを利用して 2020 年 10 月に観測した結果は、AB Aur b の偏光がその周囲の円盤の偏光と比較して強くないことを支持した。さらに、Currie 氏らは SCEXAO と VAMPIRES[14] を組み合わせた観測も 2020 年 10 月に実行した。VAMPIRES には、水素の  $H\alpha$  に対応する狭帯域フィルターが搭載されており、連続光に対応する狭帯域フィルターとの差分を得ることで、 $H\alpha$  放射を測定することが可能である。SCEXAO/VAMPIRES による観測結果では、AB Aur b の位置において  $H\alpha$  の放射と想定される光源が実際に検出された。 $H\alpha$  放射は降着する水素ガスが天体

と衝突することで生じるため、AB Aur bから検出されたH $\alpha$ 放射は原始惑星への質量降着が原因かもしれない。

上記の観測データに基づいてCurrie氏らは、AB Aur bは中心星の散乱光を見ているのではなく、原始惑星系円盤に埋もれた原始惑星からの放射に起因すると結論した。AB Aur bは木星よりも質量が大幅に大きいと期待される。そのような大きな質量の惑星が中心星からおよそ100 auの距離に形成されるのを説明するのに最も自然な理論的過程は、原始惑星系円盤の重力不安定 [15] である。また、重力不安定の場合、原始惑星系円盤の中にスパイラル状の構造ができる可能性が高いが、AB Aurの円盤ではスパイラル状の構造が検出されている [16]。Currie氏らは実際に原始惑星系円盤に対する重力不安定の理論シミュレーションを行い、AB Aur bのような巨大惑星が形成される可能性を示した。

その後も、AB Aurに対する観測結果の報告はCurrie氏らのグループや別のグループによってなされており、AB Aur bの検証も含めて観測が進んでいる [17-19]。そのような発展的研究の進展によりAB Aurの理解が進むことで、惑星の誕生現場に対する理解もまた深まるだろう。

SCEXAOやCHARISはAB Aur以外にも、LkCa 15 [20] やHD 34700 A [21] の原始惑星系円盤の研究に利用された。以上の様に、SCEXAOはその極限的な波面補正性能を活かして惑星形成の現場に対する理解を深めることに活用された。

## 2.2 位置天文と高コントラスト撮像の連携

これまでの高コントラスト撮像による系外惑星探査は主にブラインド探査に基づいてきた(例: [22])。ブラインド探査では一般的に、惑星の存在可能性に対する事前情報を利用せずにターゲットを選定して観測を進める。この方法はターゲット選定のバイアスが少ないため観測結果の統計的な解釈に適している。一方、対象天体の存在頻度が低い場合は「発見効率」が低くなる問題が

ある。そこで筆者のグループでは、惑星や褐色矮星の伴天体を保持する可能性が高い恒星を「固有運動の加速」に基づいて選定することに着目した。固有運動の加速に着目した観測についての説明や、それを利用して得られた成果については、筆者が2023年7月に天文月報に寄稿した記事 [23] で詳しく解説しているの、そちらを参照していただきたい。本稿ではその概要を説明し、同記事の寄稿後に得られた成果についても紹介する。

1990年代にスペースから位置天文測定を行ったヒッパルコス衛星と、2010年代の後半からその観測を引き継いだ次世代位置天文衛星ガイアは太陽近傍の恒星に対して極めて精度の高い位置天文データを提供する。さらに、その二つの衛星の位置天文データを比較することで、太陽近傍恒星の固有運動の「加速」を高精度で測定できる。その加速は恒星を公転する伴天体の重力によって引き起こされている可能性が高いため、両位置天文衛星から測定された固有運動の加速は伴天体の事前情報として利用できる。さらに、固有運動加速のデータを軌道解析に利用することで、これまで困難であった直接撮像した惑星や褐色矮星の「力学的質量」も決定することができる。

筆者らは上記固有運動の加速に基づいて選定した太陽近傍恒星をSCEXAO/CHARISを利用して高コントラスト撮像し、その周囲に存在する惑星や褐色矮星の探査を進めてきた。その結果得られた高コントラスト画像の例を図2に示す。以下で発見天体の代表例を簡単に説明する(詳細は [23] の天文月報記事を参照)。まず、HIP 21152 Bの直接撮像がある [24]。我々の探査からヒアデス星団に所属する太陽型の主系列星HIP 21152からおおよそ18 auのところを公転する褐色矮星(HIP 21152 B)の直接撮像に成功した。さらに、固有運動加速データも利用した軌道解析から、その褐色矮星の質量は木星質量( $M_{\text{Jup}}$ )の $28^{+8}_{-5}$ 倍と力学的に決定された。ヒアデス星団の主系列星を公転する褐色矮星以下の質量の伴天体の直接撮像は

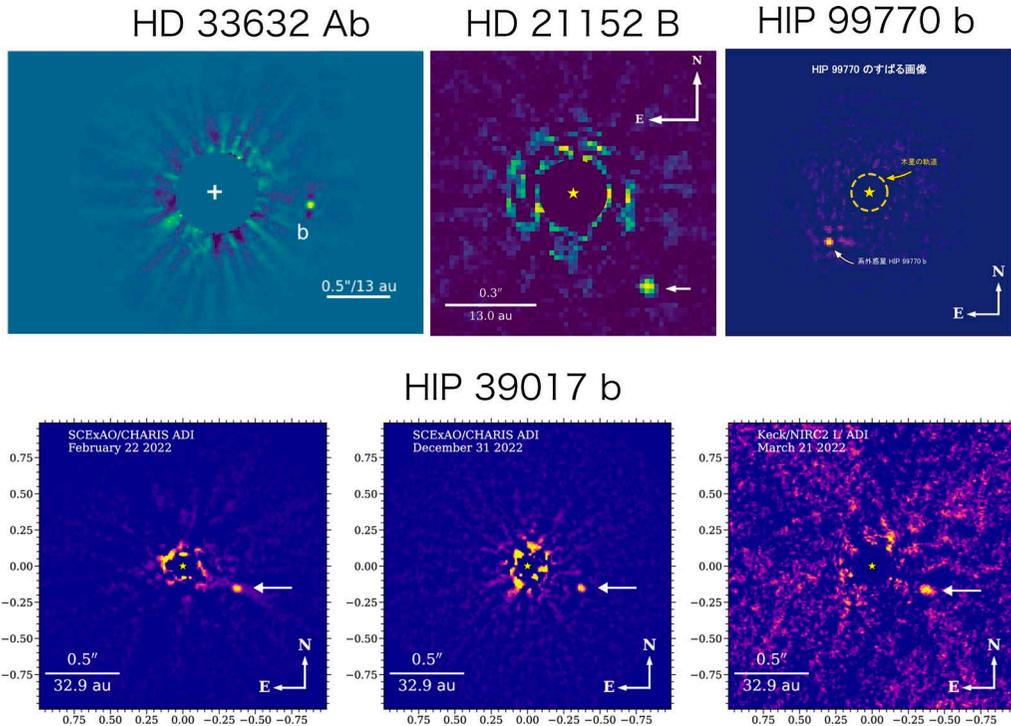


図2 固有運動が加速する太陽近傍恒星に対してSCEXAO/CHARISを用いた探査から発見された巨大惑星や褐色矮星の高コントラスト画像。上段の3つの画像は左からHD 33632A b [27], HIP 21152 B [24], HIP 99770 bに対応する [25]。下のパネルは、HIP 39017 b [26]、そのうち左と真ん中の画像は2022年の2月と12月にそれぞれSCEXAO/CHARIS観測から得られたものである。右の画像はKeck望遠鏡のNIRC2を利用した追加観測によって得られた画像である。画像クレジット：T. Currie, NAOJ/NASA-Ames (上段左), アストロバイオロジーセンター (上段真ん中), Currie/Subaru Telescope, UTSA (上段右), Tobin et al. 2024 [26] (下段すべて：CC BY 4.0ライセンスの下AJで出版)。

過去に成功例がなかった。我々の探査はその直接撮像に初めて成功したものであり、その意義は高いと考えている。

次にA型星HIP 99770を公転する巨大惑星(HIP 99770 b)の発見を取り上げる [25]。HIP 99770 bの質量は力学的に14-16  $M_{\text{Jup}}$ として決定された。重水素の燃焼が起きないと考えられている質量が13  $M_{\text{Jup}}$ 以下の天体を一般的に惑星と呼ぶが、HIP 99770 bの質量はこの値よりもわずかに大きい。しかし、中心星に対する質量比や惑星形成の観点に基づくHIP 99770 bは惑星と考えるのが妥当である結論づけられた(詳細は [23] や [25])。また、HIP 99770 bは固有運動加速を指標として

直接撮像により発見された初めての惑星である点は意義がある。

最近でも同手法を利用して新たな発見は続いている。2024年には、HIP 99770同様にA型星のHIP 39017を公転する伴天体(HIP 39017 b)の直接撮像による発見を報告した [26]。HIP 39017 bに対する力学的質量の測定結果(=  $30^{+31}_{-12} M_{\text{Jup}}$ )は褐色矮星の質量範囲と整合性があるが、その決定の誤差は大きい。したがって重水素燃焼の観点から考えても、HIP 39017 bの質量は惑星質量に相当する可能性は排除できていない。HIP 39017に対する直接撮像観測を継続し、さらには今後公開予定のGaia衛星の最新データも利用することでHIP

39017 bの質量推定を改善することが期待される。

### 2.3 SCEXAOのアップグレードと大規模探査計画

SCEXAOはTMTなどの巨大望遠鏡を視野に入れた技術開発のテストベッドとしての役割も併せ持つ。そのため、SCEXAOの観測機能は随時アップグレードされている。さらに国内外の様々な研究機関が、自ら開発した装置を試験するためにSCEXAOと組み合わせた観測も進めてきた。それらのアップグレードのうち、2025年にはAO3K[28]との併用が可能になった。AO3Kは約3000素子の可変形鏡を持つため、その大規模な素子数によって波面補正が向上すると期待できる。さらに、現在では赤外線波面センサー(NIR WFS)をAO3Kと組み合わせることも可能となった[29]。一般的な補償光学装置は波面測定に可視光を利用するが、NIR WFSは1.8  $\mu\text{m}$ までの赤外線を波面測定に利用する。NIR WFSは可視光では暗くて波面測定が難しいM型星やダストによる減光が強い星形成領域の天体に対して特に効力を発揮するが、サイエンス光と波面測定の光を揃えることでコントラスト性能の改善も期待できる\*2。

Currie氏と筆者の主導のもと我々はSCEXAOとCHARISを利用した大規模な高コントラスト撮像探査を2024年に開始した。その探査ではAO3KやNIR WFSも利用している。同探査はすばる望遠鏡の интенシブプログラム(通常よりも大規模な観測プロポーザルを提案する枠組み)を利用して2026A期まで継続予定であり、合計32夜の観測時間が割り当てられている。同探査の観測対象は2.2節で説明した加速する固有運動を示す太陽近傍恒星であるが、その探査により今後も重要な観測成果が得られるだろう。

### 3. Roman宇宙望遠鏡コロナグラフ計画コミュニティへの参加

Roman宇宙望遠鏡は広視野可視赤外観測装置であるWFI[30]と、コロナグラフ装置の二つの観測装置を持つ。WFIは様々な天文学の研究に対して利用される予定であるが、コロナグラフ装置の目的は高コントラスト撮像技術のスペースでの実証である。太陽と地球の可視光での明るさのコントラスト比は $10^{-10}$ に匹敵するが、そのコントラスト比を克服するためには様々な技術的課題に挑む必要がある。Romanコロナグラフ装置は、それらの必要な技術的要素を実証することを目指している。具体的には、約580 nmの波長で $10^{-7}$ の高コントラスト撮像性能を実証することが最優先目標として設定されている[9]。またベストエフォートの目標の一つとして、上記の要求性能を超えて巨大惑星からの反射光が検出可能になる $10^{-9}$ のコントラスト性能の達成を目指している[9]。日本からはJAXA宇宙科学研究所を通して、偏光機能やコロナグラフマスク基板に関する装置面でRoman宇宙望遠鏡コロナグラフ装置に貢献している\*3。

それ以外にも、Romanコロナグラフ装置のCommunity Participation Program(CPP)へJAXA宇宙科学研究所を通して日本の研究者が複数名参加している。CPPでは同コロナグラフ装置の技術実証のための準備や、その観測を利用した科学研究計画の立案などが進められている。アストロバイオロジーセンターからは筆者のほか、村上尚史氏、水木敏幸氏、John Livingston氏、西川淳氏、田村元秀氏がCPPに参加している。なかでも、村上尚史氏は日本の他機関の参加者も含めて日本チームの代表者を務めている。2025年の3月にはカリフォルニア大学サンタバー

\*2 波面測定に利用された赤外線光の全部または一部がサイエンス光としては利用できなくなることには注意。

\*3 日本の天文学コミュニティからはコロナグラフ装置以外にも、Roman宇宙望遠鏡WFIで得られる膨大な観測データを受信するためのJAXA地上局による受信協力などに貢献している。

バラ校でCPPの対面会議が行われたが、アストロバイオロジーセンターからは筆者のほかに、村上氏、水木氏、Livingston氏が参加した。なお、CPPへはアストロバイオロジーセンターの他に日本からはJAXA宇宙科学研究所や国立天文台などの機関の研究者が参加している\*3。

我々のCPPでの活動の一つは、Romanコロナグラフ装置の偏光モードにおける観測やデータ解析の準備を進めることである。同偏光観測準備チームは水木氏が共同代表者を務めている。その他にも水木氏やLivingston氏がデータ解析ソフトウェアの開発に貢献している。また、高コントラストを得るためのダークホールという観測機能については参照星の準備観測に筆者や水木氏が参加している。ダークホールは補償光学を利用した波面の動的制御によって恒星の散乱光（スペckル光）を打ち消す観測機能であるが、それを適用する際は参照星を観測し波面をモデル化する [31]。しかし、参照星に求められる条件が多いのがボトルネックになる。具体的には、V等級で3等よりも明るいことや、視直径が2ミリ秒角よりも小さいこと、連星でないことが条件となる [32]。これらの条件を満たす天体は希少であると予想されるが、適切な参照星のリストを事前に作成することは、Romanコロナグラフ計画の成功のために極めて重要な課題である。またダークホールの観測機能については、性能の強化を目指した観測モードの検討に西川氏や村上氏が、JAXA宇宙科学研究所からは米田謙太氏が参加している。

Romanコロナグラフ計画に対して我々日本チームは技術実証だけではなく、科学面の準備にも貢献している。Romanコロナグラフは技術実証が第一目標であるが、その面で問題がなければ科学的に意義のある天体を観測ターゲットに選ぶことができる。例えば、580 nmの波長帯で中心星に対して $10^{-7}$ の光度比を持つ伴天体を検出できれば技術実証の目的が果たされ、さらに科学研究も進めることが可能になる。そこで科学研究の

準備の一環として、筆者らがRoman宇宙望遠鏡とすばる望遠鏡の協調観測プログラムへ観測提案白書を提出した。日本のRoman望遠鏡への貢献の一つとして、すばる望遠鏡の100夜をRoman宇宙望遠鏡との協調観測に利用できるようになった。提案された研究計画の中で審査の結果採択されたものは2027年以降にすばる望遠鏡で実行される。それにより、すばる望遠鏡とRoman望遠鏡の観測による相乗効果が様々な研究分野に対して期待できる。我々の白書では、第2.3節で紹介した探査をRomanコロナグラフ計画により適応させたものを提案したが、その主旨は以下である。まずは、Romanコロナグラフ装置で検出可能な天体をすばる望遠鏡の探査から発見する。次に、その天体に対してRomanコロナグラフ装置の撮像や分光、さらにはすばる望遠鏡の低高分散分光観測を実行する。最終的に、それらの観測から得た可視光から近赤外にわたる測光・分光データを用いて惑星や褐色矮星を特徴づけることを試みたい。実際に観測が実行されれば、惑星や褐色矮星の大気を理解するための貴重なベンチマークデータが得られる。

間近に迫るRoman宇宙望遠鏡の打ち上げや、その後取得される実際のデータを利用した技術実証や科学研究に向けて、我々はRomanコロナグラフ計画への貢献を今後も着実に進めていきたいと考えている。それらの取り組みはRoman宇宙望遠鏡を利用した研究だけではなく、HWOのような将来計画へも繋がっていくと筆者は期待している。

## 4. 最後 に

上記のようにアストロバイオロジーセンターでは、すばる望遠鏡のSCEAO計画やRoman宇宙望遠鏡コロナグラフ計画に携わって高コントラスト撮像の研究活動を進めてきた。また本稿では紹介しきれないが、アストロバイオロジーセンターの研究者はそれ以外にも多くの高コントラスト撮像に関わる研究活動を進めてきた。例えば、アス

トロバイオロジーセンターから筆者と田村氏が James Webb Space Telescope (JWST) の初期科学研究プログラムにおける高コントラスト観測の共同研究活動に参加した(例 [33, 34])。また、2019年には高コントラスト撮像の国際的な研究会である “In the Spirit of Lyot 2019” を主催し、高コントラスト撮像に携わる世界中の研究者が最新の研究成果を発表し議論する意義のある機会を設けた。同研究会を含む、本稿では紹介しきれない様々な高コントラスト撮像の研究活動に関してはアストロバイオロジーセンターの年次報告 [35] を参照していただきたい。

SCEExAO やその関連装置である CHARIS や VAMPIRES は共同利用装置として、日本の研究者を中心に世界中の研究者が利用できる。Roman 宇宙望遠鏡においては、そのデータ解析ソフトウェアなどの様々な製作物、さらには Roman 宇宙望遠鏡の観測データや関連して得られたすばる望遠鏡のデータは世界中の研究者が利用可能になる。このようにアストロバイオロジーセンターにおける高コントラスト撮像での取り組みは同組織としての研究活動だけではなく、国内外の系外惑星や星・惑星形成の研究に大きく貢献してきたと筆者は考えている。SCEExAO の観測計画やアップグレードは引き続き計画されており、それに伴って今後も多くの重要な観測成果が得られるだろう。Roman 宇宙望遠鏡コロナグラフ計画からも 2026 年以降に予定されている打ち上げ以後、多くの心踊るデータが生み出されるだろう。

高コントラスト撮像はその技術的進展に伴い、ほかの観測手法との相乗効果も期待できるようになってきた。今後はその技術的進展がさらに加速し、視線速度法(2025年天文月報の関連シリーズ、平野照幸氏の記事を参照)で発見された惑星の直接撮像も現実的になるだろう。HWO や TMT などの将来計画では、高コントラスト撮像を通して、視線速度法で検出された地球型惑星を直接検出することが期待されている。アストロバ

イオロジーセンターの将来的な重要目標は、そのような地球型系外惑星の反射光の検出を通して太陽系外の生命の存在可能性に迫ることである。我々は今後も、SCEExAO や Roman 計画での装置開発や科学研究、さらにはその後の次世代装置開発の研究を通して、その究極目標に挑んでいきたいと考えている。

## 謝 辞

本稿を寄稿する機会を与えて下さった2025年天文月報編集委員の日下部展彦氏に感謝します。本稿で紹介した、アストロバイオロジーセンターの様々な高コントラスト撮像の研究活動を後押しして下さったセンター長の田村元秀氏に感謝いたします。また、本稿の原稿を丁寧に読みコメントをして下さったアストロバイオロジーセンターの村上尚志氏とカリフォルニア州立大学の鶴山太智氏にも感謝します。本稿で紹介した研究活動はすばる望遠鏡の SCEExAO 計画と Roman 宇宙望遠鏡計画におけるものになっております。本稿で紹介した SCEExAO による成果にはコロナ禍で行われた観測結果が多く含まれています。そのような大変な状況にも関わらず、すばる望遠鏡運営に尽力して下さいました方に感謝いたします。SCEExAO 計画は Olivier Guyon 氏や Julien Lozi 氏のリーダーシップのもと SCEExAO チームによる多大な努力がなければ成し遂げられませんでした。深く感謝いたします。Roman 宇宙望遠鏡や同望遠鏡のコロナグラフ計画の日本の活動において様々な調整をして下さっている JAXA 宇宙科学研究所の宮崎翔太氏、山田亨氏、大阪大学の住貴宏氏に感謝いたします。その他にも Roman 宇宙望遠鏡コロナグラフ計画 CPP でリーダーシップを発揮して下さいっている Vanessa Bailey 氏を中心に、同計画の参加者すべての方に感謝いたします。最後に、本稿で紹介した研究活動を進めるにあたって協力していただいたすべての方に感謝したいと思います。どうもありがとうございました。

参考文献

- [1] Marois, C., et al., 2008, *Science*, 322, 1348  
 [2] 田村元秀, 2016, *天文月報*, 109, 243  
 [3] 葛原昌幸, 工藤智幸, 2016, *天文月報*, 109, 257  
 [4] 橋本淳, 工藤智幸, 2016, *天文月報*, 109, 325  
 [5] Macintosh, B., et al., 2014, *Proceedings of the National Academy of Science*, 111, 12661  
 [6] Beuzit, J. L., et al., 2019, *A&A*, 631, A155  
 [7] Jovanovic, N., et al., 2015, *PASP*, 127, 890  
 [8] <https://habitableworldsobservatory.org/home> (2025.3.19)  
 [9] Bailey, V. P., et al., 2023, *Proc. SPIE*, 12680, 126800T  
 [10] Minowa, Y., et al., 2010, *Proc. SPIE*, 7736, 77363N  
 [11] Currie, T., et al., 2019a, *Proc. SPIE*, 11117, 111170X  
 [12] Groff, T. D., et al., 2016, *Proc. SPIE*, 9908, 99080O  
 [13] Currie, T., et al., 2022, *Nat. Astron.*, 6, 751  
 [14] Norris, B., et al., 2015, *MNRAS*, 447, 2894  
 [15] Durisen, R. H., et al., 2007, in *Protostars and Planets V*, ed. B. Reipurth, D. Jewitt, & K. Keil (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press), 607  
 [16] Hashimoto, J., et al., 2011, *ApJ*, 729, L17  
 [17] Zhou, Y., et al., 2023, *AJ*, 166, 220  
 [18] Dykes, E., et al., 2024, *ApJ*, 977, 172  
 [19] Bowler, B. P., et al., 2025, *AJ*, 169, 258  
 [20] Currie, T., et al., 2019b, *ApJ*, 877, L3  
 [21] Uyama, T., et al., 2020, *ApJ*, 900, 135  
 [22] Nielsen, E. L., et al., 2019, *AJ*, 158, 13  
 [23] 葛原昌幸, 2023, *天文月報*, 116, 360  
 [24] Kuzuhara, M., et al., 2022, *ApJ*, 934, L18  
 [25] Currie, T., et al., 2023, *Science*, 380, 198  
 [26] Tobin, T. L., et al., 2024, *AJ*, 167, 205  
 [27] Currie, T., et al., 2020, *ApJ*, 904, L25  
 [28] Lozi, J., et al., 2024, *Proc. SPIE*, 13097, 1309703  
 [29] Lozi, J., et al., 2022, *Proc. SPIE*, 12185, 1218533  
 [30] Domber, J. L., et al., 2022, *Proc. SPIE*, 12180, 121801O  
 [31] Pogorelyuk, L., et al., 2022, *J. Astron. Telesc., Instr., Syst.*, 8, 019002  
 [32] Wolff, S. G., et al., 2024, *Proc. SPIE*, 13092, 1309255  
 [33] Hinkley, S., et al., 2022, *PASP*, 134, 095003  
 [34] Carter, A. L., et al., 2023, *ApJ*, 951, L20  
 [35] <https://www.abc-nins.jp/study/> (2025.3.19)

**High-Contrast Imaging of Exoplanetary Systems Led by the Astrobiology Center**

**Masayuki KUZUHARA**

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

*NAOJ, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: High-contrast imaging is a useful method for discovering and characterizing exoplanets and circumstellar disks. Ground- and space-based telescopes have contributed to revealing numerous exoplanetary systems via high-contrast imaging observations. The Astrobiology Center has advanced the studies of high-contrast imaging through the SCExAO and Roman Coronagraph projects. SCExAO observations led to the discovery of a proto-planet embedded in a protoplanetary disk around the young star AB Aur, which is a member of a star-forming region. Additionally, the combination of SCExAO direct imaging and a new target selection technique based on precision astrometry enabled the discovery of multiple substellar companions, including a giant planet and brown dwarfs. Researchers from the Astrobiology Center have also participated in preparations for high-contrast imaging observations to be conducted with the Roman Space Telescope. This article mainly introduces the research activities of the Astrobiology Center related to the SCExAO and Roman Coronagraph projects.