

「月惑星探査の来たる 10 年」第一段階パネルへの意見書

確認： 本意見書は日本惑星科学会が行う「月惑星探査の来たる 10 年」検討の第一段階においてパネルリーダーが意見取りまとめを行うための資料として提出して頂きます。 **将来の月惑星科学・探査において最も重要になるであろう、第一級の科学**について提案して下さい。意見書の内容は公開討論会などで議論の対象となり、最終報告に反映されます。

締めきり： 2010 年 8 月末日

提出： **電子ファイル** (Word または PDF 形式) で「月惑星探査の来たる 10 年」事務局 (decade_sec@wakusei.jp) に送って下さい。事務局で取りまとめて、パネルリーダーに展開します。

- 「月惑星探査の来たる 10 年」検討の詳細については、惑星科学会サーバから資料をダウンロードすることができます。

https://www.wakusei.jp/news/announce/2010/2010_03_10/2010_03_09_introduction.pdf

■ 意見提出先パネル (希望するパネルに○をつけて下さい。複数回答可)

- () 地球型惑星固体探査パネル
- () 地球型惑星大気・磁気圏探査パネル
- () 小天体探査パネル
- (○) 木星型惑星・氷衛星・系外惑星探査パネル

■ 提案タイトル

(太陽系外惑星直接観測：とくに地球型惑星探査とそのキャラクターゼーション)

■ 代表者の氏名・所属・連絡先 (E-mail アドレス, または電話番号と Fax 番号)

(芝井 広・大阪大学・理学研究科、shibai@ess.sci.osaka-u.ac.jp、JTPF ワーキンググループ)

■ 共同提案者の氏名・所属 (適宜追加して下さい; 順不同)

- (田村元秀、国立天文台)
- (中川貴雄、JAXA 宇宙科学研究所)
- (村上 浩・JAXA 宇宙科学研究所)
- (西川 淳・国立天文台)
- (成田憲保・国立天文台、JSPS 特別研究員)
- (松尾太郎・国立天文台、JSPS 特別研究員)
- (村上尚史・北海道大学・工学研究院)
- (塩谷圭吾・JAXA 宇宙科学研究所)
- (小谷隆行・JAXA 宇宙科学研究所)
- (深川美里・大阪大学・理学研究科)

■ 要約 (400 字程度)

1995 年の最初の発見以来、15 年間で 460 個以上の系外惑星が主にドップラー法などの間接法によって検出され、最近では巨大惑星の直接観測ができるようになった。また 2009 年に打ち上げられた Kepler 望遠鏡は、既に 140 個程度の地球型惑星の存在をデータとして示しつつあり、大規模シミュレーションを含む惑星形成理論研究と相まって多くの重要な知見が得られている。今や系外惑星研究は天文学及び惑星科学の最重要課題の一つと認められ、アストロバイオロジーや多くの分野と融合して新しい潮流を形成しつつある。次の最も重要なステップは、「地球型」惑星の大気を直接観測し、我々の地球に似た大気、すなわち水と酸素を含み「生命を育む可能性」がある大気を発見することであろう。このためには、明るい恒星のすぐ隣にある地球型惑星を見分けて直接分光観測する能力が必要であり、地球大気に影響されないスペースからの観測が本質的に有利である。日本独自の高度技術開発を推進するとともに、国際協力によってスペースミッションの実現を目指す必要がある。

■ 本意見書の内容 (テキストおよび図表) をパネルリーダー並びに事務局がパネル討論と各種報告書へ引用することについて承諾しますか? (いずれかに○)

- (○) 承諾する () 承諾しない

■ (上で「承諾する」に○をされた方のみ) 引用時には協力者リストを付加する場合があります。協力者リストに氏名を公表することを希望しますか? (いずれかに○)

- (○) 希望する () 希望しない

太陽系外惑星直接観測：とくに地球型惑星探査とそのキャラクタリゼーション

1. 系外惑星研究の背景と重要性

惑星や月をはじめとする太陽系天体の探査や観測は、京都モデルに代表される太陽系形成理論との共同作業によって、太陽系がどのように誕生しそれぞれの惑星・衛星がどうして固有の性質を持つのかについて解明し、新たな知見をもたらした。研究対象は長い間太陽系内に限られていた。これは太陽系以外の惑星（や衛星）が発見されなかったことが大きな理由であろう。

しかし、1995年にペガサス座51番星で太陽以外の恒星を周回する惑星が発見され、状況が一変した。2010年現在、太陽系外には既に460個を超える惑星が発見されている。その中には、公転周期が数日以下の惑星、あるいは恒星から数十天文単位以上離れた場所を公転する巨大惑星などが発見されるなど、太陽系内には見られないさまざまな軌道要素や質量を持つ惑星が宇宙に存在することが明らかになっている。また、現在活躍中のKepler望遠鏡などによって、ここ数年で数多くの地球型惑星や木星型惑星を周回する衛星の発見が期待される。特にハビタブルゾーン（恒星から適度な距離にあるために液体の水が存在できるような領域のこと）に地球型惑星が発見されれば、太陽系外惑星に関する研究は大きなステップを踏むことができる。今や太陽系内の月惑星研究にとって、太陽系外惑星の研究は大きな影響を持つ。太陽系外惑星やその衛星も含めた比較惑星学の構築によって、太陽系内の月惑星をより良く理解でき研究が進展すると期待される。今後の月惑星探査においては**惑星科学と天文学との垣根を超えて**宇宙に存在する惑星・衛星の多様性と普遍性を探ることが、ますます重要になると考えられる。2017-2027年代においては、太陽系以外の地球型惑星に生命が存在するののかという極めて重要な疑問に対する答えを求めるために、太陽系外地球型惑星を直接観測する探査計画が推進されていくことが予想される。日本が世界で主導的な役割を果たすことが強く望まれる。

このような「太陽系外惑星科学」の現状と見通しを踏まえて、JAXA宇宙科学研究所JTPFワーキンググループでは、**特定のミッション提案を推進するのではなく、将来この研究分野の発展に比することを目的として高度基礎技術開発を推進し、目指すべき研究の方向を検討を継続してきた**。特に以下の記述する可視赤外波長域での高コントラスト観測技術の開発と、赤外線干渉計技術の展開に重点を置いている。

2. 可視～近赤外域での高コントラスト撮像装置の開発状況

世界中でさまざまな高コントラスト撮像装置（恒星光を打ち消して系外惑星を直接撮像するための装置）が提案され、研究開発が進められている。日本でも独自の研究開発が活発に行われており、その技術は着実に進歩し成果を挙げている。

巨大惑星検出のための技術としては、地上では既にすばる望遠鏡用のコロナグラフHiCIAOなどの実用機が稼働している。スペースでは、2018年打上を目指す赤外線天文衛星SPICAへの搭載を目指してバイナリ瞳マスク法が宇宙科学研究所で開発され、室内実験において 10^{-7} レベルのコントラストが実証されている（Enya et al. 2007; SPICAからの意見書参照）。一方、国立天文台ハワイ観測所を中心に、コロナグラフPIAA（Phase-Induced Amplitude Apodization）法の開発が行われている。本手法は、光量損失が少なく恒星の近傍での観測能力が高いなどの利点を持ち有望である。検証実験により 10^{-7} レベルのコントラストを実現しており（Guyon et al. 2010）、HiCIAOに搭載される予定である。しかしJWSTのコロナグラフ装置も含めて、これらは地球型惑星の直接観測には向いていない。

むしろ地球型惑星検出のための技術としては、上記PIAAを利用したスペースコロナグラフ計画（Pupil-mapping Exoplanet Coronagraphic Observer, PECO）が有望である。また、北大・国立天文台グループは、8分割マスクコロナグラフ法を提案している。近年、フォトリソグラフィを利用した8分割マスクの試作が行われ、高コントラストの実現に成功している（図1）。本成果はNASA/JPLなど海外からも注目されている。地球型惑星検出に必要な 10^{-10} のコントラストを実現するためには、光波面を $\lambda/10000$ の精度でフラットにしなければならないが、国立天文台・東京農工大グループは、独自の波面補正装置を提案し、技術開発を進めている（図2）。これらの手法は、地球型惑星直接検出ミッションの搭載装置の有力な候補である。また、いずれも最近になって飛躍的に高いコントラストの実証に成功している。このようにスペースミッションに適したコロナグラフの技術的基盤が、着実に形成されつつある。

3. 赤外域での干渉計技術の開発状況

可視光コロナグラフとともに、中間赤外線スペース干渉計の研究開発が進められているが、現在欧米で提案されているコンセプトは、惑星の検出とキャラクターゼーションにおいて技術的に未成熟であると判断されている。一方、国内では世界初の試みである遠赤外線干渉計 FITE が今年秋に初フライトを予定している (Kohyama et al. 2008)。これは遠赤外波長域において 4 秒角の空間分解能を持つ干渉計である。

さらに、国立天文台と NASA/JPL はスペース干渉計に革新をもたらす新しい手法を創案した (Matsuo et al. 2010)。宇宙空間では観測波長を切れ目なく連続的に取れることに着目すると、連続的に天体干渉計の基線を変化させる代わりに連続的分光データから惑星系の輝度分布と惑星のスペクトルを取得することができるというアイデアであり、従来手法に比べて次の優位性を持つ。(A) 2 基線の観測から惑星系の輝度分布を、1 基線の観測から惑星のスペクトルをそれぞれ取得できる。また、図 3 は 10pc にある惑星系を本手法に基づいて再生した結果であるが、(B) 単一望遠鏡と同様にクリーンな天体の輝度分布が再生され、(C) 直接撮像において問題となるスペックルが完全に除去され、(D) 非対称な構造をもつ系外黄道光の影響を受けにくいことが分かる。さらに、(E) 疑似地球のスペクトルを従来に比べて約 10 倍高い波長比分解能、 $R \sim 200$ で取得し、バイオマーカーであるメタン、アンモニア、一酸化窒素の検出を可能である (図 4 参照)。この手法は、米国研究者を始め、系外惑星の各方面の研究者から注目され始めており、2025 年以降の実現を目指す太陽系外生命探査ミッションへの応用が期待される。

4. 今後の展開

上に述べたような基礎技術開発の進展を受け、将来計画としては

- (1) 太陽近傍の数十個以上の FGK 型恒星を探査し、その周りの地球型惑星を検出する。
 - (2) そのうち、軌道半径が水を液体に保つ条件にあるものに関して惑星大気分光を行う。
- を目指すことが妥当である。手法は二通りである。

A. 可視光から近赤外波長域におけるコロナグラフ望遠鏡

スペースにおいて、1.5m クラスの可視光単一望遠鏡で高コントラストを追求した観測を行うと、太陽近傍 (数十光年以内) の数 10 個の G 型惑星を 2-3 年のタイムスケールで探査できる。将来的には 4-6m クラスの可視光単一望遠鏡で約 150 個の G 型惑星を探査することも視野に入れる。このミッションのためには、軽量望遠鏡の鏡面歪みによる波面乱れを高精度に補正する補償光学 (スペース AO) の基礎開発や最新型コロナグラフの開発が必須となるが、これらの技術は 2010 年代中頃までに達成できるであろう。

B. 中間赤外線干渉計

中間赤外線では、惑星のエネルギー放射がピークになるため、主星と惑星のコントラストが相対的に小さくなる。また、地球大気を特徴付ける水や酸素 (オゾン) の強い吸収バンドが存在する。この波長で動作する中口径 (3-4m) クラスの望遠鏡を 2 台あるいは 4 台並べて干渉計が実現できると、太陽近傍 (数十光年以内) の惑星を探査できると予想される。技術的にはコロナグラフ以上に困難な課題が多いが、この点についても、日本のオリジナルなアイデアの実現をめざすべきであろう。

地球型系外惑星検出は人類共通の大目標であり、世界各国でミッション検討が進められてきたが、NASA も ESA も実現可能性の高いミッション計画の策定に至っていない。2010 年 8 月に公表された US decadal report では重力マイクロレンズ観測による惑星検出も行う広視野赤外線宇宙望遠鏡 (WFIRST) が大型スペース計画の一位に推されたが、地球型惑星大気の特徴づけができない。日本の惑星科学・天文学コミュニティは、実績のある理論研究、地上観測に加えてユニークな技術開発を積極的に推進することにより、太陽系外惑星探査ミッションを世界と協力して 2017-2027 年代に実現することが期待される。

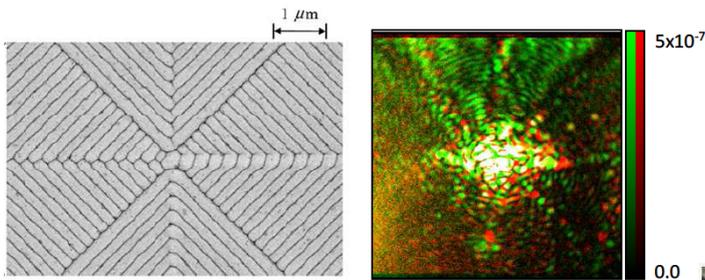


図1 (左) フォトニック結晶 8 分割マスク試作品の電子顕微鏡写真。(右) 8 分割マスクコロナグラフの実証実験結果。除去された恒星モデルの 2 波長合成画像。(Murakami et al. 2010)

図2 開発中の高精度波面補正装置 (UNI-PAC) の試験機 (Nishikawa et al. 2010)。意図的に不完全なナル干渉計を作り、残存光源に対し波面補償をかけることによって、実効的な波面精度を向上させるユニークな手法である。

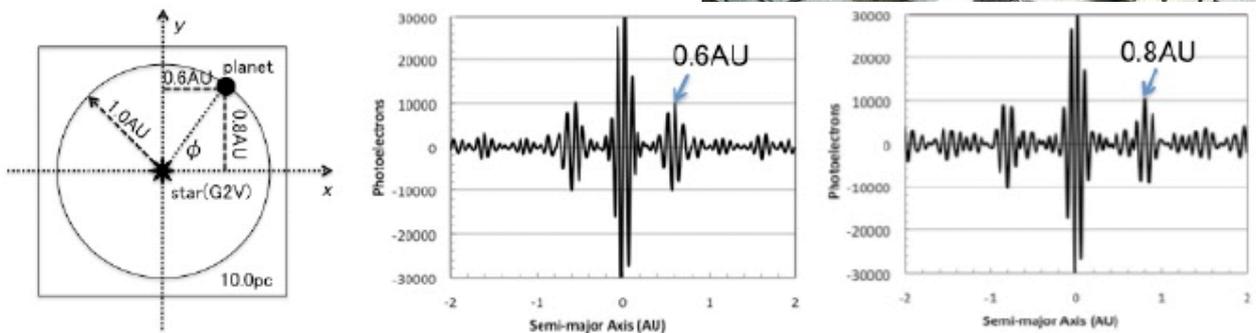


図3 : (左) 10pc にある惑星系の概念図。主星は太陽型星 (G2V) で有効温度 5600K の黒体である。ターゲットの疑似地球は、軌道長半径 1AU で有効温度 265K である。(中央と右) 本手法に基づいて再生された、一次元の惑星系の輝度分布。左と右はそれぞれ図4における x 方向と y 方向の一次元の輝度分布である。また、非対称な系外黄道光が光源として含まれる。

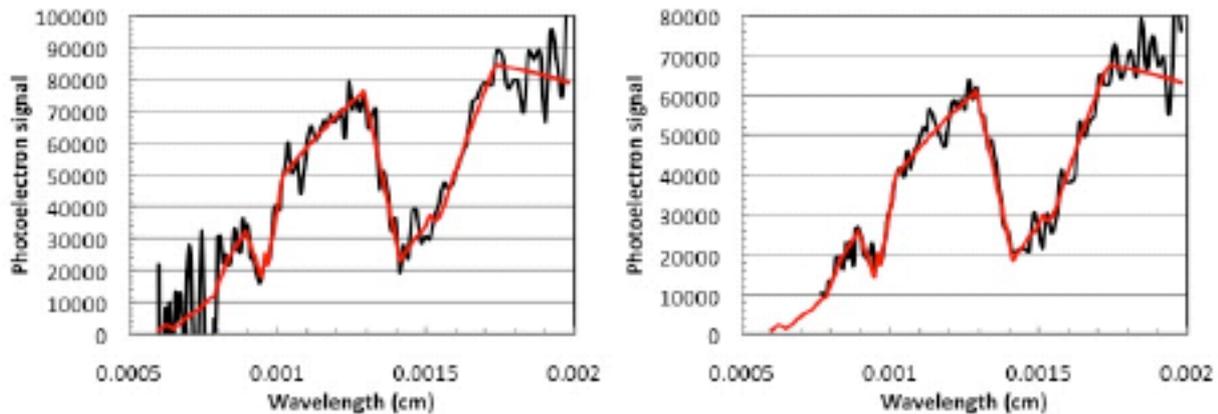


図4 : 本手法を用いて再生された、G 型星周り (左) と K 型星周り (右) の疑似地球放射スペクトル。

参考文献

Enya, K. et al. 2007, A&A, 461, 783
 Guyon, O. et al. 2010, PASP, 122, 71;
 Kohyama, T. et al. 2008, SPIE, 7013, 70133O-10
 Matsuo, T. et al. 2010, SPIE, 7734, in press
 Murakami, N. et al. 2010, ApJ, 714, 772
 Nishikawa, J. et al. 2010, SPIE, 7731, in press