

# 地球型系外惑星の直接観測 に向けた技術開発の躍進

村上 尚史<sup>1</sup>, 西川 淳<sup>2</sup>

〈国立天文台光赤外研究部

〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

<sup>1</sup> e-mail: naoshi.murakami@nao.ac.jp

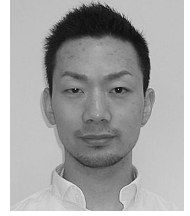
<sup>2</sup> e-mail: jun.nishikawa@nao.ac.jp



村上



西川



横地

## 横地 界 斗

〈東京農工大学工学府 〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16〉

e-mail: 50008834204@st.tuat.ac.jp

太陽系外の地球型惑星を直接観測するためには、惑星より9-10桁も明るい恒星からの光を強力に除去しなければならない。このような観測を可能にするためには、高精度の波面補償光学と、恒星の回折光を減光するコロナグラフが必要不可欠である。本稿では、筆者らが開発を進めている高度な波面補正法（UNI-PAC法）と、恒星光除去能力の向上を目指して新たに提案したコロナグラフ（8分割位相マスク法、2段立体サニャック干渉計）を紹介する。

### 1. 太陽系外の地球型惑星の直接観測

生命の存在する可能性がある第二、第三の地球を発見するためには、ハビタブルゾーンにある地球型惑星の光を直接取り出して分光し、酸素量のような惑星大気組成を調べることが重要である。可視・近赤外域で主星より9-10桁も微弱な惑星光をとらえるため、Terrestrial Planet Finder (TPF) 計画などのスペースミッションによる高コントラスト観測が検討されている<sup>1)</sup>。筆者らは、地上望遠鏡による展開を見ながら、TPF計画への搭載を目指した観測装置の開発を進めている。

太陽系を10パーセク（32.6光年）の距離から観測すると、太陽は5等星に、地球はそこから0.1秒角離れた29等星に見え、地球自体は大型望遠鏡で数時間露出すれば写る程度の暗さである。しかしながら、すぐ近傍の極めて明るい太陽からの光が、地球を直接観測するうえで最大の障害とな

る。このような太陽-地球系から地球の光だけを取り出すには、恒星と惑星を分離する解像力、恒星像の周りにできる回折光の減光、光波面誤差により発生する散乱光（スペckルノイズ）の低減、が必要となる（図1）。

現在までに提案されている高コントラスト観測装置は、中間赤外域のナル干渉計と、可視・近赤外域のコロナグラフとに大別される。先に提案されていたナル干渉計は、複数の望遠鏡を用いて天体干渉計を構築し、打ち消し合う光波干渉（ナル干渉）を利用して恒星光を除去する手法である<sup>2)</sup>。ナル干渉計は、恒星と惑星の強度比が6-7桁に小さくなる10 $\mu$ m波長帯を選択し、不足する解像力を数十m以上の基線（望遠鏡間の距離）で補う。しかしながら、ミッション規模が大きいことや長基線多素子スペース干渉計の技術蓄積の必要性などから、実現には時間がかかりそうである。

一方、あとから発展したコロナグラフは、単一

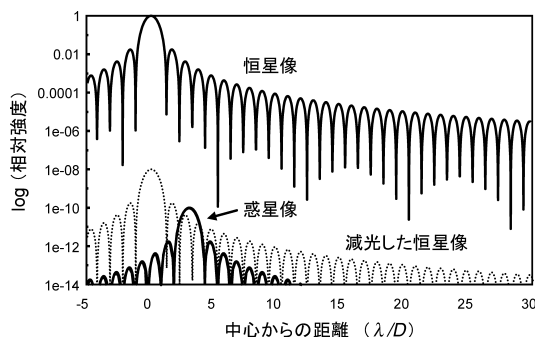


図1 恒星像と惑星像の強度比較. 望遠鏡の口径を  $D$ , 観測波長を  $\lambda$  とすると, 回折限界の解像力はおよそ  $\lambda/D$  である. 可視光で口径 3 m のとき, 0.1 秒角は  $\lambda/D$  の約 3 倍となり, 目標の解像力は得られる. 円形開口の望遠鏡の像面強度 (エアリーパターン) では,  $\lambda/D$  の 3 倍の位置にはピークの  $1/1,000$  程度の回折光が存在しているが, 約 7 桁の減光によって, 惑星を直接とらえることができる. ここにはスペックルノイズは描かれていない.

望遠鏡の光路中で恒星光を除去する手法である. 可視・近赤外線を用いるため, 目標とするコントラストは中間赤外域に比べて高くなるが, 構造が比較的シンプルであることから, 地上望遠鏡や小規模スペースミッションで先に実現し, 徐々に地球型惑星検出に近づいていくと期待される.

TPF 計画に向けて多種多様なコロナグラフが提案されており, 以下のように分類できる.

- (1) 焦点面マスク法<sup>3)-6)</sup>
- (2) 瞳面ナル干渉法<sup>7)-10)</sup>
- (3) 瞳関数改良法<sup>11)-14)</sup>
- (4) スペックル消去 (ダークホール) 法<sup>15)</sup>
- (5) 掩蔽衛星 (外部オカルター) 法<sup>16)</sup>

(1), (2), (5) は恒星像全体を, (3), (4) は回折光の裾野だけを減光する方法であり, これらの複合的手法も発展しつつある<sup>15), 17)</sup>. 日本のグループも, いろいろな優れたアイデアを提案し, 開発を行っている<sup>4), 9), 10), 13), 17)</sup>. 各手法のほとんどは, 理論的に達成可能なコントラストは十分であるが, 惑星探査領域の広さや広帯域光特性, 光学素子・光学系の安定性やミッションの実現可能性, など

において一長一短であり, また進化の途中でもあるので, 一言で優劣を語るのは難しい. 詳細は, それぞれの文献に譲ることとする.

最近のコロナグラフ単体の光学実験では, 7 桁程度のコントラストは得られている<sup>10), 14)</sup>. そのレベルにとどまる要因は, 光波面誤差により発生するスペックルノイズである. 9-10 桁までノイズを下げるためには,  $\lambda/10,000$  rms レベルの波面精度が必要とされ, 高度な補償光学が必須である. 通常の波面センサーをもつ補償光学では, このような波面精度には到達できないとされる. 最終像面に発生するスペックルを逐一除去する (1) と (4) の複合法<sup>15)</sup>では, 人工光源を使って 9 桁を上回るコントラストを達成しているが, 暗い恒星での見通しは得られていない. また, シングルモードファイバーアレイを瞳に置いて波面整形する方法も試されている<sup>8)</sup>. このような力づくの波面補正法が試されるなか, 筆者らは,  $\lambda/1,000$  rms の波面精度でスペックルノイズを 9-10 桁まで低減する, 新たな波面補正法 (UNI-PAC 法) を発案した<sup>18)</sup>. 2 節では, その原理と初期実験結果を紹介する. また, UNI-PAC 法に結合すべきコロナグラフとして筆者らが独自に開発中の, 8 分割位相マスク法<sup>19)</sup>と 2 段立体サニャック干渉計<sup>20)</sup>を 3 節に紹介する.

## 2. UNI-PAC 法<sup>18)</sup>

UNI-PAC 法は, 図 2 に示した光学系レイアウトのように, 初段補償光学, 非対称ナル干渉計 (Unbalanced Nulling Interferometer; UNI), 位相振幅補正 (Phase and Amplitude Correction; PAC) 補償光学, 後段コロナグラフから構成される. 本手法の本質は, UNI の採用である. 初段補償光学を用いて望遠鏡本体のもつ波面誤差を補正しても, 限界精度以下の波面誤差 (例えば  $\lambda/1,000$  rms) が残ってしまう. UNI では, 2 光波の電場振幅に差をつけることにより “不完全な” ナル干渉を起こし, 恒星光をあえて控えめに (例えば 1/100 に) 除

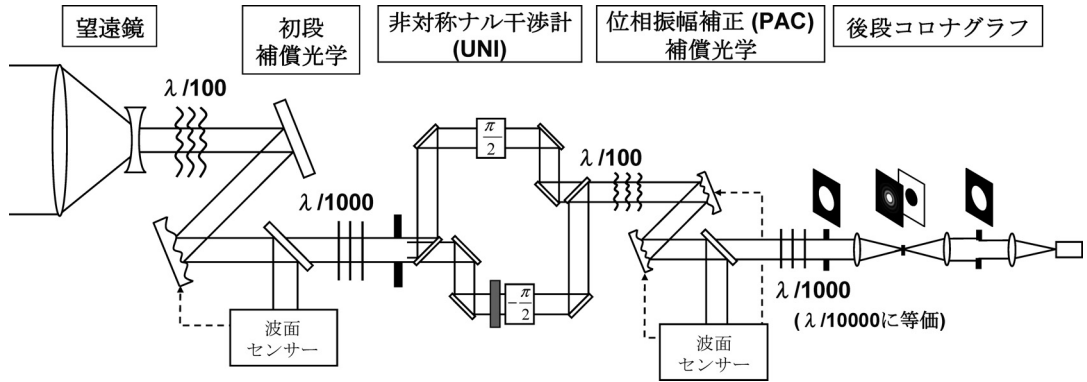


図2 UNI-PAC法を利用したコロナグラフシステムの光学系レイアウト。

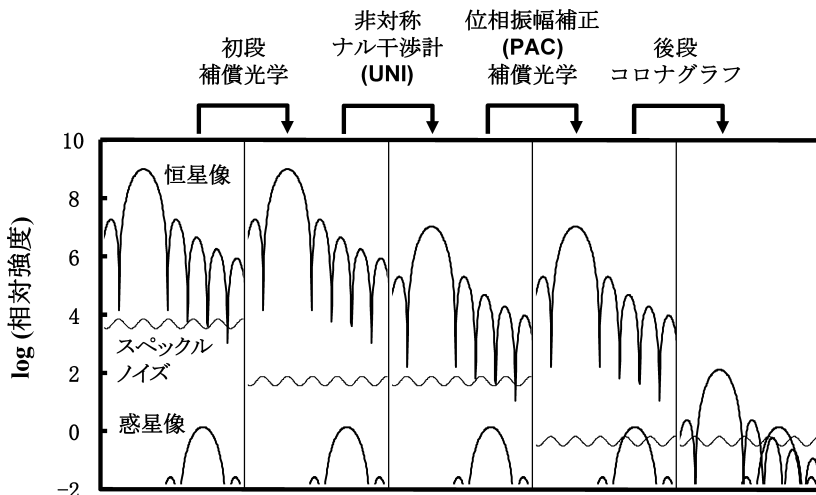


図3 UNI-PAC法の各プロセスに対する像面での効果。

去する。これにより、波面の位相誤差と振幅誤差を(例えば10倍に)拡大することができる。つづいてPAC補償光学により、拡大された波面誤差の測定および補正を行い、初段と同程度の波面精度にする。PAC後に後段コロナグラフを配置することによって、さらに恒星光を除去する。

図3に、各プロセスに対する天体像の様子を模式的に示す。初段補償光学を用いても、スペックルノイズレベルを惑星強度以下にすることはできない。まずUNIにより恒星光を2桁だけ減光させた後、PACにより波面補正を行う。これにより、スペックルノイズが2桁下がり、惑星以下の

強度レベルにすることができる。結果、後段のコロナグラフがクリアすべきコントラストは残り7-8桁に緩和され、 $\lambda/1,000$  rmsの波面精度で達成可能となる。また、初段補償光学とUNI-PACの光学系では、 $\lambda/1,000$  rms以下の波面精度は要求していない。このように、本観測システムは、全光学系を通じて $\lambda/10,000$  rmsの波面精度を必要とせず9-10桁のコントラストを達成できる、他に類を見ない優れた性質をもつ。

本手法の原理実証実験も順調に進み、原理の確認は最終段階にきている。実験では、UNIによる波面誤差の拡大<sup>21)</sup>(図4)のあと、PACによる波

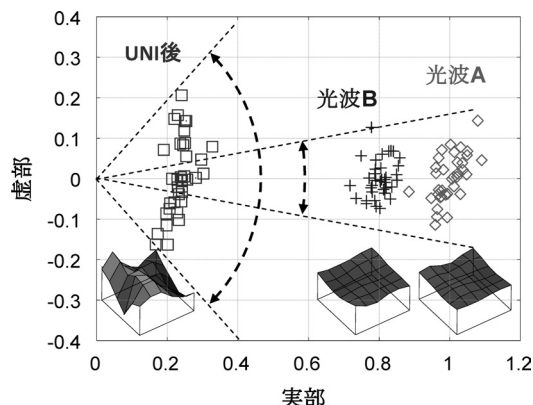


図4 UNIによる波面誤差拡大の観測結果. 波面電場の複素振幅分布と位相の形状を表示. 原点から見込む角度(破線矢印)は, 波面誤差の大きさの目安となる. 振幅の違う $\lambda/110$  rmsの二つの光波(光波A, B)が干渉し,  $\lambda/17$  rmsの波面 (UNI後) を生成.

面補正を行い, 理論どおりの電場複素振幅の変遷が確認されている. UNI-PACの後段には, 7-8桁のコントラストを達成するコロナグラフが必要となる. 次節に, UNI-PACに結合するべく新たに開発中の二つのコロナグラフを紹介する.

### 3. 新開発の高次コロナグラフ

ナル干渉を利用するコロナグラフ(1節の(1)や(2)など)では, 理論的には点光源は完全に消去できる. しかしながら, 恒星に大きさがある場合は, 光軸から傾いた光が入ってくるため完全に

は消去できず, 残存光が恒星サイズのべき乗に比例して強くなる. 観測ターゲットとなる近傍の恒星は, 望遠鏡の解像力( $\lambda/D$ )の0.01倍程度の大きさを持ち, 十分に減光するためには, 4次以上のコロナグラフが必要となる. 筆者らは, 残存光特性が2次だった従来の方法(4分割位相マスク法<sup>3),4</sup>, 立体サニャック干渉計<sup>10</sup>)を4次に引き上げた, 8分割位相マスク法<sup>19</sup>と2段立体サニャック干渉計<sup>20</sup>)を開発中である. これらは, 実現性や中心星近傍の観測能力も高く, 広帯域光特性やUNI-PAC法との相性も良いため, 将来の観測ミッションの有力な候補になりうると期待される.

#### 3.1 8分割位相マスク法<sup>19</sup>)

8分割位相マスク法の原理を図5に示す. 本手法は, 望遠鏡の焦点面に8分割位相マスク(恒星像を8領域に分割し,  $0, \pi$ の位相変調を与える素子)を置く. 4分割法と同様に, 8分割位相マスクにより, 瞳再結像面では瞳の内側で恒星光強度がゼロとなる. 瞳の外側の光を絞り(リオストップ)で遮断して天体を再結像すると, 恒星光が除去されて惑星光のみを取り出すことができる. 図6は, 4分割と8分割位相マスク法による観測の数値シミュレーション結果である. 図6の結果から, 8分割位相マスク法により検出能力が飛躍的に向上していることがわかる. 筆者らは, ネマティック液晶素子を利用した8分割位相マスクを

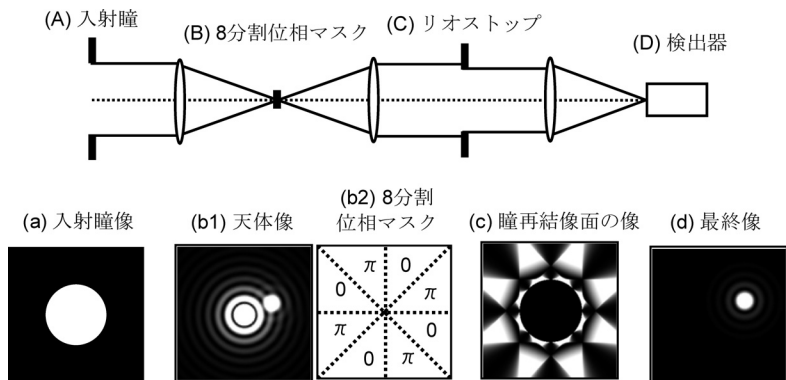


図5 8分割位相マスク法の原理図.

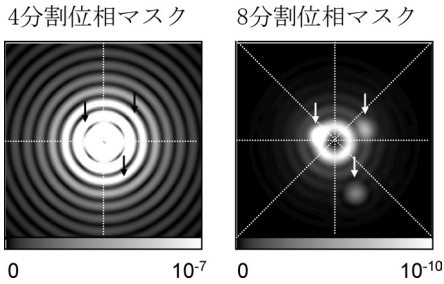


図6 サイズをもつ恒星に対する、4分割および8分割位相マスク法の数値シミュレーションによる比較。矢印は惑星モデルの位置、白い点線は位相マスクの境界線を表す。恒星サイズは  $0.02\lambda/D$  とした。また、惑星/恒星強度比と離角は、 $5 \times 10^{-10}$  ( $1.5\lambda/D$ )、 $10^{-10}$  ( $3\lambda/D$ )、 $5 \times 10^{-11}$  ( $5\lambda/D$ ) とした。

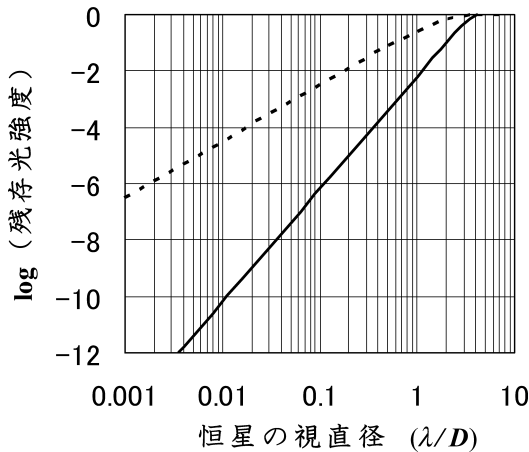


図7 1段と2段立体サニャック干渉計の残存光特性。1段(点線)に比べて2段(実線)の場合は4次特性のため、恒星直径が  $0.01\lambda/D$  で10桁を超えるコントラストに達する。

試作し、4次の残存光特性を実験的に確かめている<sup>19)</sup>。今後は、より高精度なマスクを製作し、白色光で8桁のコントラスト達成を目指す。

### 3.2 2段立体サニャック干渉計<sup>20)</sup>

立体サニャック干渉計とは、一つのビームスプリッターで二つに分かれた光を、6枚の鏡で構成した閉じた立体的な光路で反射させて元のビームスプリッターに戻し、ナル干渉させる手法である<sup>10)</sup>。本手法の利点は、共通光路であるため安定

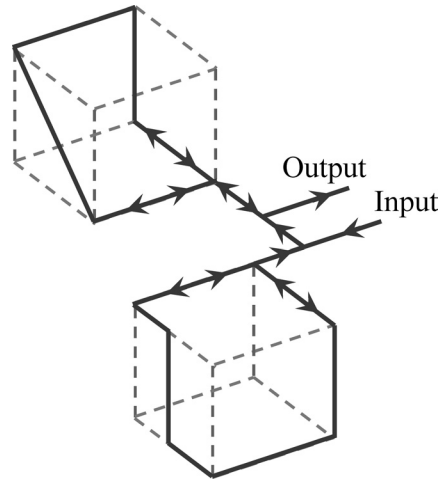


図8 2段立体サニャック干渉計の光学系レイアウト。光路上に鏡や偏光素子を配置する。

な干渉状態が得られ、幾何学的位相(電場の反転効果)によって広帯域なナル干渉が実現できる点である。これまでの実験で、二つの波長に対してほぼ同等のナル干渉が起こることが証明されている。現在達成されているコントラストは、離角が  $0-15\lambda/D$  において4-7桁であり、波面誤差によるスペックルノイズ限界となっている。立体サニャック干渉計単体(1段)の場合、2光波干渉の効果により、残存光強度が恒星サイズに対して2次の特性となる。筆者らは、本手法を2段重ねて4光波干渉とすることにより、4次の特性を実現できる解を得た(図7)。実際の光学配置案も見つけ(図8)、実証実験を進めている。

## 4. おわりに

地球型系外惑星の直接観測ミッションは、莫大な予算規模などの理由により、国際協力なしには実現不可能と考えられている。TPF計画などの将来ミッションは、今後の予算状況や国際協力体制などに応じて、装置設計やミッションスケールが大きく変わっていく可能性がある。このような状況のなか、日本が参加できる余地は十分にあると考えられる。これらの観測ミッションに日本が大

大きく貢献するためにも、現在行われているコロナグラフ開発などを中心に、関連する技術開発が早急に進展することが重要である。

## 謝 辞

本稿の研究の一部は、筆者（村上）が日本学術振興会特別研究員として行っている研究を基にしており、科学研究費補助金（20・4783）の支援により行われています。また本研究は、科学研究費補助金（特定領域公募研究：19015009、基盤 B: 19360036、萌芽：20656013、18656018）、JAXA 搭載機器基礎開発実験費、の支援を受けています。実験のための設備を利用させていただいた、国立天文台先端技術センターに感謝いたします。本研究は、Lyu Abe 氏、小谷隆行氏、植村亮介氏、Alexander Tavrov 氏、田村元秀准教授、黒川隆志教授、馬場直志教授、武田光夫教授をはじめ、多くの方々の継続的なご協力、貴重なご助言、ご指導をいただきながら進行中です。この場をお借りして御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Traub W. A. et al., 2006, Proc. SPIE 6268, 62680T
- 2) Bracewell R. N., 1978, Nature 274, 780
- 3) Rouan D, Riaud P., Boccaletti A., Clénet Y., Labeyrie A., 2000, PASP 112, 1479
- 4) Baba N., Murakami N., Ishigaki T., Hashimoto N., 2002, Optics Letters 27, 1373
- 5) Kuchner M. J., Traub W. A., 2002, ApJ 570, 900
- 6) Foo G., Palacios D. M., Swartzlander G. A. Jr., 2005, Optics Letters 30, 3308
- 7) Baudoz P., Rabbia Y., Gay J., 2000, A&AS 141, 319
- 8) Shao M., Wallace J. K., Levine B. M., Liu D. T., 2004, Proc. SPIE 5487, 1296
- 9) Nishikawa J., Kotani T., Murakami N., Baba N., Itoh Y., Tamura M., 2005, A&A 435, 379
- 10) Tavrov A. V., Nishikawa J., Tamura M., Abe L., Yokochi K., Kurokawa T., Takeda M. 2007, Applied Optics 46, 6885
- 11) Guyon O., 2003, A&A 404, 379
- 12) Kasdin N. J., Vanderbei, R. J., Spergel D. N., Littman M. G., 2003, ApJ 582, 1147
- 13) Enya K., Tanaka S., Abe L., Nakagawa T., 2007, A&A 461, 783
- 14) 塩谷圭吾, SPICA ワーキンググループ, 2007, 天文月報 100, 400
- 15) Trauger J. T., Traub W. A., 2007, Nature 446, 771
- 16) Cash W., 2006, Nature 442, 51
- 17) Tanaka S., Guyon O., Pluzhnik E. A., Abe L., Enya K., Nakagawa T., 2007, Proc. In the Spirit of Bernard Lyot: The Direct Detection of Planets and Circumstellar Disks in the 21st Century.
- 18) Nishikawa J., Abe L., Murakami N., Kotani T., 2008, A&A 489, 1389
- 19) Murakami N., Uemura R., Baba, N., Nishikawa J., Tamura M., Hashimoto N., Abe L., 2008, PASP 120, 1112
- 20) Tavrov A. V., Nishikawa J., Tamura M., Abe L., Yokochi K., Kurokawa T., Takeda M., 2008, Applied Optics 47, 4915
- 21) Yokochi K., Nishikawa J., Murakami N., Abe L., Kotani T., Tamura M., Kurokawa T., Tavrov A. V., Takeda M., 2007, CLEO/Pacific Rim, ThG1-2, 1, 966

## New Technology for Direct Detection of Extrasolar Earth-like Planets

Naoshi MURAKAMI and Jun NISHIKAWA

National Astronomical Observatory, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Kaito YOKOCHI

Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Naka-cho, Koganei, Tokyo 184-8588, Japan

Abstract: For direct detection of extra-solar Earth-like planets, an adaptive optics system and a high-contrast imager are needed to suppress bright stellar light to a level of  $10^{-9}$ – $10^{-10}$ . We present a novel wavefront compensation method called UNI-PAC and two advanced coronagraphs, an eight-octant phase-mask coronagraph and dual 3D-Sagnac interferometer which can obtain achromatic and high rejection ratio of the stellar light.