

平成21年6月4日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19360036  
 研究課題名（和文） ナル干渉計と補償光学を融合した高ダイナミックレンジ光学系の研究  
 研究課題名（英文） A study of high dynamic range optics with nulling interferometer and adaptive optics  
 研究代表者  
 西川 淳 (NISHIKAWA JUN)  
 国立天文台・光赤外研究部・助教  
 研究者番号：70280568

研究成果の概要：太陽系以外の惑星を直接検出する高ダイナミックレンジ光学系として、波面誤差補正によるスペックルノイズ除去と惑星よりきわめて強い恒星の回折光の除去を交互に2回ずつ行う、初段補償光学、非対称ナル干渉計、位相振幅補正補償光学、コロナグラフ、からなる4段階複合法を研究した。非対称ナル干渉計の波面誤差拡大効果で実質的に補償光学の限界を超えた波面精度を達成し、コロナグラフで広帯域の回折光の除去などを実証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	12,500,000	3,750,000	16,250,000
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：光計測、惑星探査

## 1. 研究開始当初の背景

1995年に太陽系以外の惑星（系外惑星と呼ぶ）が恒星のドップラー速度の変化によって初めて発見された。2006年までに、恒星の明るさの変化なども使い、間接的に約200個の系外惑星が確認されている。しかし、惑星の光を直接分離観測した例はなく、系外惑星の直接検出は現代天文学の最大の課題の1つとなっていた。直接検出が難しいのは、可視光では惑星が恒星よりもおよそ10桁も暗いため、恒星の回折光や波面誤差によるスペックルノイズ（散乱光）などに埋もれてしまうからである。

瞳関数の改良や焦点像の一部の電場位相を変えるなど、光の干渉や回折などの性質を利用して、強い恒星光を除去し、埋もれていた惑星の光を直接検出する方法（星用のコロナグラフと呼ばれる）が国内外で研究されている。10桁以上の高い消光比と広いダイナミックレンジをもつ撮像光学システムが実現できれば、惑星の直接検出が可能になる。これが可能になれば、第2の地球発見というビッグニュース（ノーベル賞候補の可能性あり）につながるだけに、国際競争と協力の動きが激しい。コロナグラフは10種類以上が提案されているが、それまでの実験では、単

色レーザー光源で9桁、白色光源で6桁、の消光比である。ここで、生命の存在を示す酸素等のスペクトル線を分光するため白色光対応が必要である。シミュレーションによる消光比は10桁を超えるものもあるが、暗い恒星のようなインコヒーレント面光源の白色光のみで実際に消光することは、波面誤差の補正も含めて極めて困難である。

研究代表者および連携研究者らは、コロナグラフ単体や複合手法、および波面補正法について、それまでも研究を進めていた。像面4分割偏光位相マスク法(北大法、村上ら)、立体 Sagnac 干渉計(農工大・電通大法)、コロナグラフに利用されていなかったナル干渉計をコロナグラフの前置光学系とする複合法、光波干渉後の波面誤差補正複素フィルター法などである。しかし、スペックルノイズを10桁まで下げるには、波面精度 $\lambda/10000$  (rms)が必要とされるが、通常の補償光学では到達できないため、コロナグラフ手法だけでなく、光学系の波面誤差の低減法の飛躍的な進展が必要とされていた。

## 2. 研究の目的

コロナグラフおよび波面補償光学系内における光波の電場振幅の振る舞いと瞳面における波面測定補正法を熟考した結果、それまでに開発した複合法を変化合体発展させ、「初段補償光学」+「非対称ナル干渉計 (UNI)」+「位相振幅補正 (PAC) 補償光学」+「コロナグラフ」、という4段階の複合手法によって、波面誤差補正と恒星光消去を交互に2段階に分けて行う、高性能かつ実現性の高い、新たなアイデアを得たところである。

非対称ナル干渉計 (UNI: unbalanced nulling interferometer) では、電場振幅に差をつけた2つの波面の不完全なナル干渉により、恒星光を控えめに消去しつつ位相特異点のない波面を残す。その際、平均電場振幅の減少に伴い相対的な物理量である波面誤差が拡大される。そのため、初段と同程度の性能の補償光学で再び測定補正を行えば、初段では取りきれなかった波面誤差を低減でき、補償光学系の限界を超えて波面補正したことに相当する。このUNIによる恒星光の一部除去と波面誤差の拡大効果は、全光学システムの波面要求精度を緩和する効果があるため、光学系構築の実現性が高まる。

本研究は、この方法の有効性を実証し、この手法を主軸にして、白色光源に対して10桁のダイナミックレンジを達成することを目的とする。

## 3. 研究の方法

研究のための実験光学系は、人工光源、非対称ナル干渉計、位相振幅補正 (PAC: Phase and Amplitude Correction) 補償光学系、コ

ロナグラフ部、から構成される (図1)。

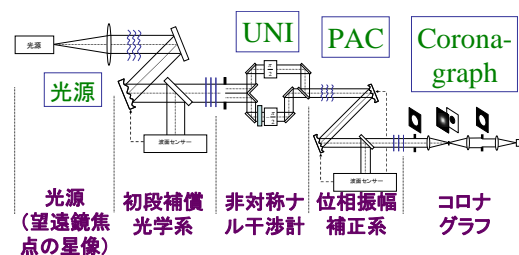


図1 UNI-PACを含む4段階複合法

人工光源は、複数の色のレーザー光源またはランプとピンホールによって望遠鏡の焦点の恒星像を模擬する。初段補償光学系は人工光源の波面誤差を極力抑えることで対応する。UNI部は、当初、消光比1/16、波面誤差の拡大率4倍が得られていたが、消光比1/100、波面誤差の拡大率10倍を目指す。PAC部は、波面センサーのみ稼動し、波面誤差の評価のみ行っていたので、位相と振幅の両方の補正のため2つの可変形鏡を用い、 $\lambda/1000$  rms精度の波面制御を目指す。

コロナグラフは、立体 Sagnac 瞳反転干渉計または4分割偏光位相マスク法を導入する。これらのコロナグラフ候補は、広帯域光に対応する構造を採用しており、また、ナル干渉計との複合性能がよく、計算上は10桁に届く総合性能が狙えるものである。実際には、コロナグラフによる回折光除去と波面補正によるスペックル除去は、片方が抑えられて初めてもう一方の限界が見えるため、予定の性能が出ていないことが判明したときは、原因の究明を行いながらそれぞれを抑えていく。

## 4. 研究成果

(1)UNI-PAC法。光源からの入射波面は約 $\lambda/100$  rmsの精度にすることができ、UNI部の安定化により波面誤差拡大率は約7倍が得られるようになった。このとき、拡大後の波面誤差は $\lambda/15$  rmsに成長する。続くPAC補償光学では位相と振幅の再補正に成功し、約 $\lambda/70$  rmsまで回復したが、これは初期波面換算では $\lambda/500$  rmsの波面精度が達成されたことに相当する。

電場の複素振幅で見ると、ほぼ理論どおりに2つの電場が非対称ナル干渉を起こして平均振幅が落ち、続いて補償光学によって誤差が補正されて分布が小さくなっていることが分かる (図2)。立体 Sagnac コロナグラフを入れて観測した焦点面スペックルのレベルは、UNIのみでは波面精度限界であるが、PACによりさらに低減されることが証明された (図3)。ただし、PACによる低減率はまだ理論どおりではなく、波面誤差が完全に補正しきれていないと考えられる。

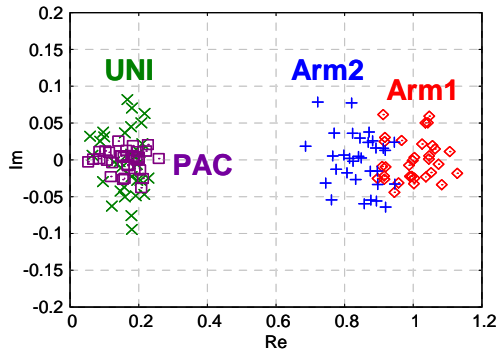


図2 UNI-PACによる複素電場の抑制

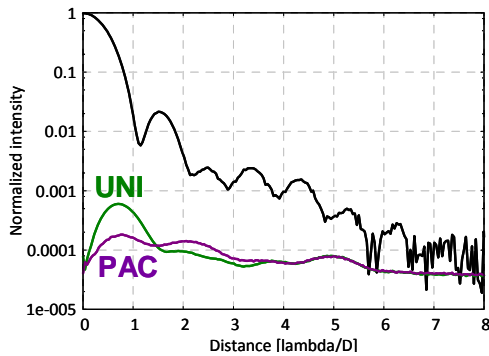


図3 UNI-PACによるスペックルレベルの抑制

(2) コロナグラフ単体。波長に依存しない幾何学的位相による位相反転を用いた立体 Sagnac ナル干渉計型コロナグラフの開発が進み、緑 (532nm) と赤 (633nm) のレーザーによって、アโครマティックにナル干渉が起こることが確認され、 $5\lambda/D$  の位置で6桁、 $15\lambda/D$  の位置で7桁の消光比に達している (図4)。残存光は波面誤差によるスペックルノイズと考えられ、数値シミュレーションでは、 $\lambda/200$  rms のスペックルレベルと一致する。

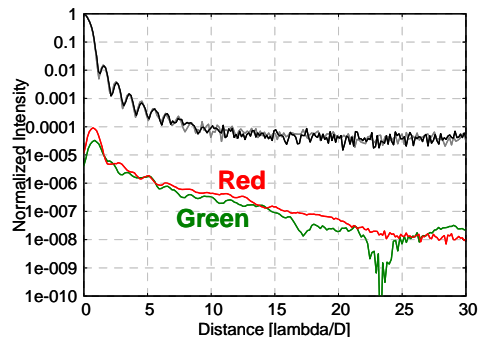


図4 立体 Sagnac 干渉計のアโครマティックな回折光の減光

立体 Sagnac 干渉計は、光軸上の点光源は理論的には完全に消光できるが、光軸からの角度がずれるとその2乗に比例したリーク光

が発生する。大きさを持つ恒星では4桁程度しか消光できないため、立体 Sagnac 干渉計を2段にし、角度の4乗に比例する特性で(図5)、10桁消光できるアイデアを提案した。

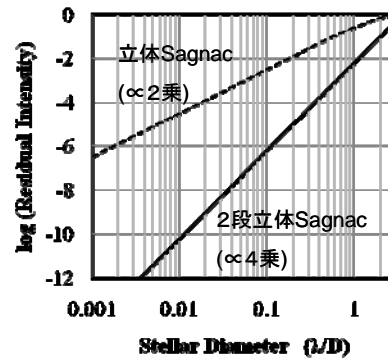


図5 2段立体 Sagnac 干渉計の4次特性

4分割位相マスク法は、単体では立体 Sagnac 干渉計と同じ2乗の特性であるが、瞳孔形状変形法とのハイブリッドにより回折光がさらに低減できることが示された。また、8分割マスク法を提案し (図6)、入射角に対して4乗特性を持つこと (図7)、および、偏光による幾何学的位相を用いた広帯域での回折光低減の可能性を示した。

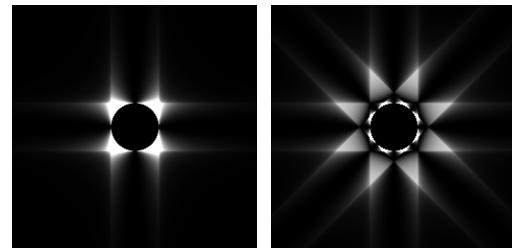


図6 4分割と8分割位相マスク法の瞳像

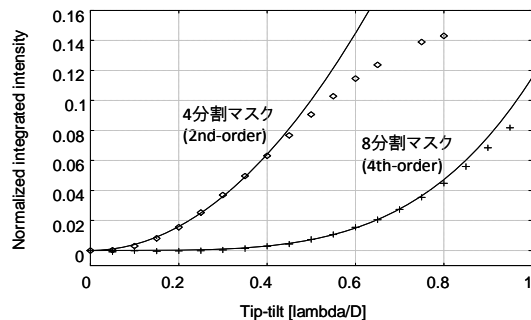


図7 4分割と8分割位相マスク法の特性

これらの新しいコロナグラフは、単体でもトップクラスの性能を有するもので、今後の発展が期待できる。また、UNI-PAC 法との結合による総合性能の向上も期待できる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① 村上尚史, 西川淳, 横地界斗 2009、地球型系外惑星の直接観測に向けた技術開発の躍進、天文月報、102、195-200、査読無
- ② Nishikawa, J., Abe, L., Murakami, N., Kotani, T., “Precise Wavefront Correction with an Unbalanced Nulling Interferometer for Exo-Planet Imaging Coronagraphs” *Astron. & Astrophys.* 489, 1389-1398 (2008). 査読有
- ③ Nishikawa, J., Yokochi, K., Abe, L., Murakami, N., Kotani, T., Tamura, M., Kurokawa, T., Tavrov, A. V., Takeda, M., “Virtual wavefront compensation and speckle reduction in coronagraph by unbalanced nulling interferometer (UNI) and phase and amplitude correction (PAC)”, *Proc. SPIE*, 7010, 70102A-1-70102A-5 (2008). 査読有 (SOCによる)
- ④ Murakami, N., Uemura, R., Baba, N., Nishikawa, J., Tamura, M., Hashimoto, N., Abe, L., “An Eight-Octant Phase-Mask Coronagraph”, *Publ. Astron. Soc. Pacific* 120, 1112-1118 (2008). 査読有
- ⑤ Murakami, N., Uemura, R., Sato, Y., Baba, N., Nishikawa, J., Tamura, M., “Four-Quadrant Phase Mask Coronagraph with Jacquinot-Lyot Stop,” *Astrophys. J.*, 677, p. 1425-1432 (2008) 査読有.
- ⑥ Tavrov, A., Nishikawa, J., Tamura, M., Abe, L., Yokochi, K., Kurokawa, T., Takeda, M., “Achromatic interfero-coronagraph with two common-path interferometers in tandem”, *Applied Optics*, 47, 4915-4926 (2008). 査読有
- ⑦ 西川淳, “太陽系以外の惑星を検出するナル干渉計”, *光学* 37 巻 10 号 595-599 (2008) 査読無
- ⑧ Murakami, N., Uemura, R., Baba, N., Shibuya, H., Nishikawa, J., Abe, L., Tamura, M., Hashimoto, N., Laboratory experiments on the 8-octant phase-mask coronagraph, *Proc. of SPIE*, 7010, 70101J-1-8 (2008) 査読有 (SOCによる)
- ⑨ Murakami, N., Abe, L., Tamura, M., Baba, N., “Common-path spectropolarimetric differential imager using variable channeled spectrum”, *Astrophys. J.* 661, 634 (2007) 査読有
- ⑩ Tavrov, A., Nishikawa, J., Tamura, M., Abe, L., Yokochi, K., Kurokawa, T.,

Takeda, M. 2007, Common-path achromatic interferometer- coronagraph: images from a breadboard demonstrator”, *Applied Optics* 46, 6885-6895、査読有

- ⑪ Zubko, N., Baba, N., Morisaki, S., Murakami, N. 2007, Polarization degree analysis of objective spectrum in polarization differential stellar coronagraph, *Optics Express* 15, 12189、査読有

[学会発表] (計 20 件)

- ① Nishikawa, J., Yokochi, K., Murakami, N., Abe, L., Kotani, T., Tamura, M., Kurokawa, T., Tavrov, A. V., Takeda, M., Coronagraph methods on precise wavefront compensation (UNI-PAC) and deep achromatic nulling The 2nd Subaru International Conference, Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity, 2009 Mar 12, Kona, USA
- ② Murakami, N., Yokochi, K., Nishikawa, J., Tamura, M., Baba, N., Uemura, R., Hashimoto, N., Abe, L., Tavrov, A. V., Kurokawa, T., Takeda, M., Development of 4th-Order Nulling Coronagraphs for Partially Resolved Stars, The 2nd Subaru International Conference, Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity, 2009 Mar 12, Kona, USA
- ③ 村上尚史, 植村亮介, 馬場直志, 西川淳, 田村元秀, 橋本信幸, Lyu ABE, 太陽系外惑星直接撮像のための 8 分割位相マスクコロナグラフの開発 第 9 回宇宙科学シンポジウム、2009 年 1 月 5 日、JAXA、相模原市
- ④ 横地界斗, 黒川隆志, 西川淳, 村上尚史, 田村元秀, 武田光夫, Lyu ABE, 小谷隆行, Alexander TAVROV, TPF のための高精度波面補正法と立体 Sagnac Null 干渉型コロナグラフ、第 9 回宇宙科学シンポジウム 2009 年 1 月 5 日、JAXA、相模原市
- ⑤ 村上尚史, 西川淳, 田村元秀, 芝井広, 太陽系外の地球型惑星の直接観測ミッションの動向 (2008)、第 52 回宇宙科学技術連合講演会、2008 年 11 月 7 日、淡路夢舞台国際会議場、兵庫県
- ⑥ 横地界斗, 西川淳, 村上尚史, Lyu ABE, 小谷隆行, 田村元秀, Alexander TAVROV, 武田光夫, 黒川隆志, 系外惑星直接観測のための非対称ナル干渉計と補償光学による高ダイナミックレンジ光学システム、日本光学会年次学術講演会、2008 年 11 月 5 日、つくば国際会議場、茨城県
- ⑦ 西川淳, 村上尚史, 田村元秀, 横地界斗, 黒川隆志, Lyu ABE, 小谷隆行, Alexander TAVROV, 武田光夫, 非対称ナル干渉と補償光学を融合した系外惑星直接検出のための

- 超高コントラスト撮像法(3)、日本天文学会 2008 年秋季年会、2008 年 9 月 13 日、岡山理科大学
- ⑧ 村上尚史、西川淳、田村元秀、横地界斗、黒川隆志、武田光夫、馬場直志、吉澤正則、偏光ナル干渉ビームコンバイナを用いたコロナグラフの開発、日本天文学会 2008 年秋季年会、2008 年 9 月 13 日、岡山理科大学
- ⑨ Yokochi, K., Tavrov, A. V., Nishikawa, J., Abe, L., Tamura, M., Takeda, M., Kurokawa, T., Achromatic characteristics in 3-D Sagnac interferometer based on geometric phase shift Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2008 May 5, San Jose, USA
- ⑩ 村上尚史、植村亮介、馬場直志、澁谷宙、西川淳、Lyu ABE、田村元秀、橋本信幸、8 分割位相マスクコロナグラフの開発、日本天文学会 2008 年春季年会、2008 年 3 月 25 日、国立オリンピック記念青少年総合センター、東京
- ⑪ 横地界斗、Alexander TAVROV、西川淳、Lyu ABE、田村元秀、武田光夫、黒川隆志、幾何学的位相によるナル干渉計の波長無依存性、Optics and Photonics Japan 2007, 2007 年 11 月 26 日、大阪大学
- ⑫ Baba, N., Furuta, H., Murakami, N., Geometric phase modulator for IR nulling interferometer, Advanced Infrared Technology and Applications 9, Leon, Spain, 2007 Oct. 7-12
- ⑬ 西川淳、Lyu ABE、村上尚史、Alexander TAVROV、田村元秀、MIRA プロジェクト、系外惑星探査プロジェクト、小谷隆行、横地界斗、黒川隆志、武田光夫、非対称ナル干渉と補償光学を融合した系外惑星直接検出のための超高コントラスト撮像法(2)、日本天文学会 2007 年秋季年会、2007 年 9 月 27 日、岐阜大学
- ⑭ 村上尚史、植村亮介、馬場直志、佐藤陽一郎、西川淳、田村元秀、系外惑星直接撮像のためのナル干渉型コロナグラフとジャキノ開口の組み合わせ、2007 年秋季 第 68 回応用物理学学会学術講演会、2007 年 9 月 4 日、北海道工業大学、札幌市
- ⑮ Yokochi, K., Nishikawa, J., Murakami, N., Abe, L., Kotani, T., Tamura, M., Kurokawa, T., Tavrov, A., Takeda, M., Precise wavefront correction with unbalanced nulling interferometer for direct detection of exo-planet, The 7th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, Seoul, Korea, 2007 Aug. 26
- ⑯ Kotani, T., Nishikawa, J., Yokochi, K., Murakami, N., Abe, L., Tamura, M., Kurokawa, T., Tavrov, A., Takeda, M., Low speckle noise coronagraph with UNI+PAC, Spirit of Bernard Lyot: The Direct Detection of Planets and Circumstellar Disks in the 21st Century, University of California, Berkeley, CA, USA, June 04, 2007
- ⑰ Abe, L., Tamura, M., Nishikawa, J., Murakami, N., Enya, K., Tanaka, S., Nakagawa, T., Kataza, H., High contrast imaging activities in Japan, Navigator Program Forum - 2007, Pasadena, USA, 2007 May 17

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西川 淳 (NISHIKAWA JUN)  
国立天文台・光赤外研究部・助教  
研究者番号：70280568

### (2) 研究分担者

(平成 19 年度)

黒川 隆志 (KUROKAWA TAKASHI)  
東京農工大学・大学院共生科学技術本部・教授  
研究者番号：40302913  
武田 光夫 (TAKEDA MITSUO)  
電気通信大学・電気通信学部・教授  
研究者番号：00114926  
田村 元秀 (TAMURA MOTOHIDE)  
国立天文台・光赤外研究部・准教授  
研究者番号：00260018  
村上 尚史 (MURAKAMI NAOSHI)  
国立天文台・光赤外研究部・  
日本学術振興会特別研究員 (PD)  
研究者番号：80450188

### (3) 連携研究者

(平成 20 年度)

黒川 隆志 (KUROKAWA TAKASHI)  
東京農工大学・大学院共生科学技術本部・教授  
研究者番号：40302913  
武田 光夫 (TAKEDA MITSUO)  
電気通信大学・電気通信学部・教授  
研究者番号：00114926  
田村 元秀 (TAMURA MOTOHIDE)  
国立天文台・光赤外研究部・准教授  
研究者番号：00260018