

共同研究報告書

令和5年 5月12日

研究代表者：

氏名 西川 淳

所属・職 国立天文台・助教

研究題目：焦点面位相マスクとアポダイザによるコロナグラフの開発

1. 成果報告

(1) 研究の実施日程

研究項目	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
エリプソメータ更新と実験					○	○	○	○	○	○	○	○
オフセット光学系構築と実験							○	○	○	○	○	○
アポダイザ設計・製作と実験								○	○	○	○	○

(2) 研究成果

1) 目標：既存のコロナグラフ評価光学系の広帯域化である。従来の 400-700 nm 対応のレンズ系から、PSI blue 全帯域 600-1800 nm に対応可能なように、オフセットパラボラ系への移行を推進する。また、既存光源も可視域に寄っているため、赤外域の光源を追加する。

成果：オフセットパラボラを用いたコロナグラフ評価系が完成し、Defocusを気にせず広い波長帯域でのコントラスト測定が可能になった。追加した光源は850nmと1300nmで、既存の532nm, 635nm, 670nm, 780nm, 980nm, 1064nm, 1550nmと合わせて9波長になった。6段階のNDフィルターを可視赤外対応の反射型に更新し、全波長域で実験可能である。現時点ではCCDカメラで、532nm~1064nmの7波長での測定が可能になった。実験光学系の波面誤差によるスペックルリミットは $\sim 2e-4@2\lambda/D$ 、 $\sim 1e-5@8\lambda/D$ である。これにより、令和3年度に製作した24分割3層位相マスク（設計波長帯域600-1000nm）の回折光除去レベルが明らかになってきた。円偏光子と円検光子で挟んだ場合、帯域内の5波長にて、PSFピークはスペックルリミット以下となり、回折光の除去レベル@第2明環(2.6 λ/D)はPSFピークの1/240で換算して約 $1e-6$ 以下と推定され、生コントラストが悪い地上望遠鏡向けとしては十分である。ただし、2偏光同時に観測するには追加の光学系が必要になるため、円偏光子・円検光子なしでも性能が出ることを目指している。円検光子なしでは、中心波長(732nm)から遠ざかるにつれて、回折光の除去レベルが最大2桁悪化することが分かった。他の3層位相マスクの一部も本光学系で測定した結果、同様の傾向が確認されている。従来、この原因はマスクの位相差の誤差と考えられていたが、次項の

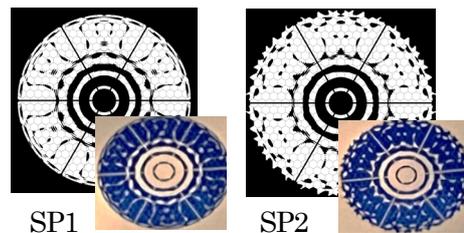
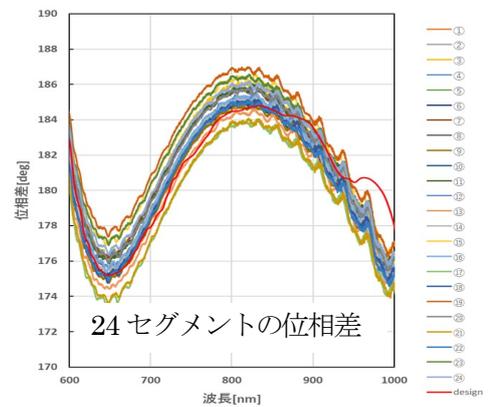
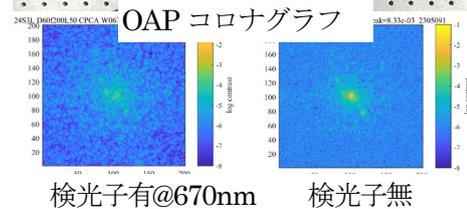
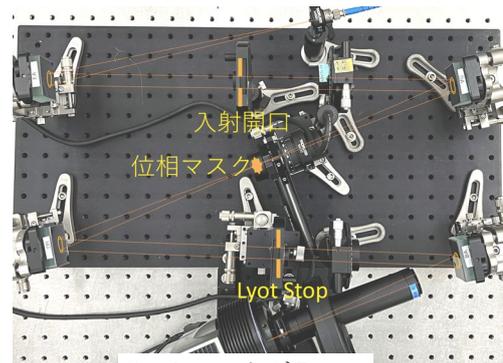
エリプソメーターでの測定により、24分割では位相差に問題はないことが分かる。その結果、位相マスクの絶対位相の誤差の調査を始めている。また、回折光除去レベルがF/数に依存していることが分かり、接着型の3層マスクでは基板の厚みも一因と考えられ調査中である。

2) 目標：位相マスク評価のため、微小面積を測定できるエリプソメーター（偏光特性評価装置）を改良して870nm 以上でも測定を行う。また、偏光が絡むためオフセットパラボラを使わず近赤外への対応を考える。

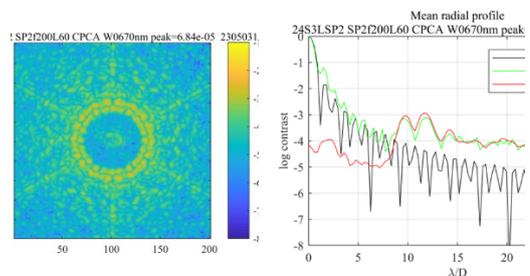
成果：昨年度は、3層 24分割マスクの位相差を測定した結果、600-870nm の範囲で値を得ていたが、分光器の2次光対策を行った結果、550-1050nmで測定が可能になり、設計波長帯域600-1000nm 内において180 度±5度の設計値に非常に近い値を得た。セグメント間誤差は±1.5度である。これらから確保できる第2明環コントラストは1e-5程度で、現在のコントラスト悪化原因は位相差の誤差ではないと結論づけることができた。現在は、絶対位相のセグメント間誤差や基板厚みの影響について調査を継続中である。近赤外への対応は、レンズと分光器を交換する方針を確認した。

3) 目標：24分割マスク対応TMT用アポダイザを設計し製作する。多数の可能性から、性能の良いものを2個程度選んで製作し実証実験を行う。

成果：瞳面アポダイザを併用すれば、位相マスクコロナグラフが性能を発揮しにくい副鏡・スパイダー・セグメント境界のあるTMT主鏡形状においても、惑星探査領域のコントラストを自在に設計できる。従来は8を超える分割の位相マスクでは、境界線上のピクセルの誤差で1e-5程度のコントラストでしか計算できなかった。本研究では、まず、境界線上のピクセルの誤差補正を試行錯誤し、1e-10レベルに至る方法を確認した。その上で、24分割マスクとTMT主鏡形状に対して、瞳面アポダイザの解を1k×1k分解能で計算した。Lyot Stopは副鏡とスパイダーは結局隠さずTMT主鏡の内接円に決定した。瞳面ではTMT主鏡形状をそのまま使うか円形に限定するかを試したが大差はなく、いずれも1e-7のコントラスト@1~10λ/Dで、惑星光透過率70%の解を得て、2種類を候補とした。次にアポダイザの分解能について、2k×2k解を直接計算することは不可能なため、1k解を元にして2k解を得る方法を開発した。さらに4k解を得るに至り製作した。アポダイザと24分割位相マスクを組み合わせた光学実験を行い、8λ/D以内の領域で回折光が抑制され（設計値の1e-7までは見えないが）円形開口とほぼ同じコントラストが得られ、本法の効果を実証した。



2種類のアポダイザ



アポダイザ(SP2)+24分割マスクの焦点像
検光子有 670nm