

位相マスクコロナグラフの超広帯域化

西川 淳 (国立天文台/総研大/Astrobiology Center(ABC)),
村上尚史 (ABC/国立天文台/総研大/北大),
米田謙太 (宇宙研),
田中洋介 (東京農工大/ABC) 河内夏樹,永木美帆,畠山裕基(東京農工大/国立天文台)
塩谷圭吾 (宇宙研/総研大)

1. Abstract

系外惑星の反射光のスペクトル中にバイオシグナチャーを探すことは、今後の大型望遠鏡計画のひとつの目標となっている。反射光での系外惑星の主星に対するコントラストは、 $1E-8 \sim 1E-10$ である。我々は、回折光を除去するコロナグラフに用いるため、セグメント化されたフォトニック結晶半波長板を3層化して広帯域の渦位相マスクを開発している。

単層の波長板では狭帯域対応のため、速軸方位を調整した3層や5層構造で広帯域化を行ってきた。現在の目標帯域は、地上望遠鏡では、帯域幅39%以上の、(PSI_b1_2025): 600-950nm、(PSI_b2): 900-1800nm、偏光子の補助なしで 10^{-5} が目標となる。宇宙望遠鏡では、帯域約20%で、675-825nmなど、細かく刻み、一偏光に対して、偏光子の補助なしで 10^{-7} 、補助ありで 10^{-11} が目標となる。

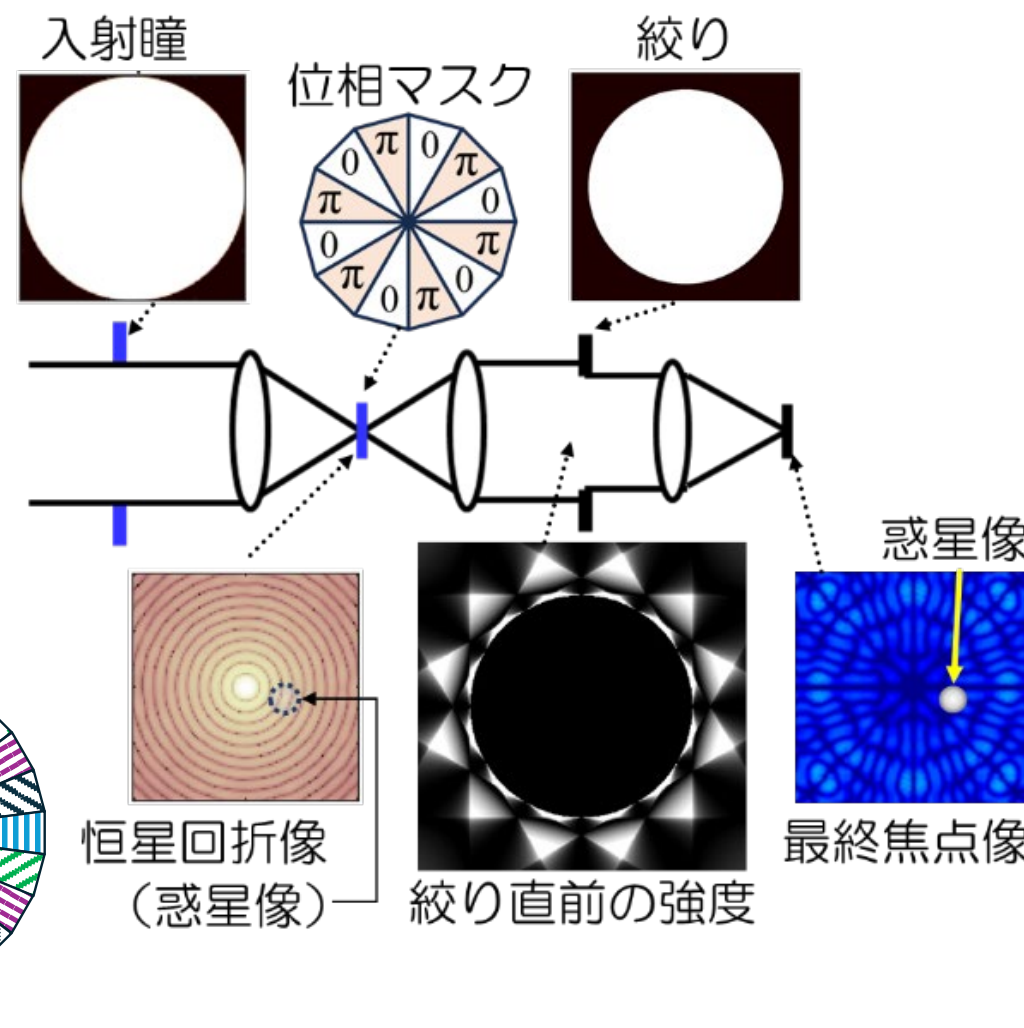
望遠鏡口径が大きくなると角度分解能が上がり、恒星本体の縁からの斜入射光が消えていくため、従来の4次の8分割位相マスクではなく、6次の12分割や24分割に取り組んでいる。すばるの場合、斜入射光対策としては4次でもOKだが、広帯域特性としては6次で良質のものが発見された。

TMT・すばるの向けに、24分割3層位相マスク (超広帯域600-950nm) の基板を製作した。各セグメントと各層の位相差は1.5度~3度のばらつきがあると測定されたが、これを接着合体させたときのコントラスト帯域特性は、設計値に近い超広帯域が得られる予定である。

2. Principle of Phase Mask Coronagraph

位相マスクコロナグラフによる高コントラスト撮像の原理

- 焦点面に恒星回折像が発生(惑星は埋没)
- 位相マスクを設置して光を位相変調
- 再結像された瞳面に絞りを設置し外周に逃げた光を遮る
- 最終焦点面に恒星光は届かないが軸外の惑星光は到達し検出可能



連続渦位相の概念図

半波長板で製作する場合の
6次連続渦位相マスクの軸方位
6次24分割位相マスクの軸方位

3. Photonic Crystal Half-Waveplate

開発中のフォトニック結晶波長板は、東北大学工学部で開発された積層技術を用いており、世界で最も精密な微細構造でセグメント化された波長板が製作される (Fig.1)。この波長板の位相差には波長依存性があり、広帯域化するためには、多層化が必要である。現時点では、直接積層による多層化技術が確立しておらず、1つの基板の別の場所に同時形成したのちカットし、接着して仕上げている。

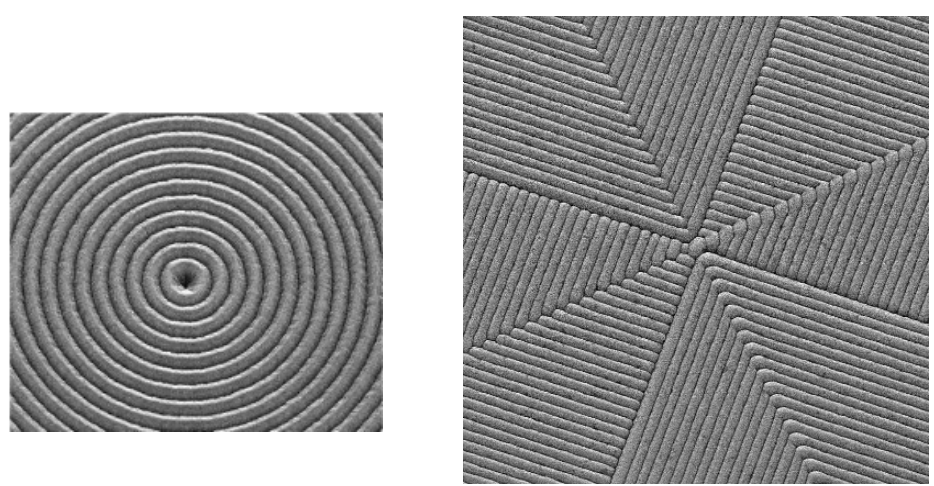


Fig.1 SEM images of 2nd-order vortex and 8OPM (Photonic Lattice Co. Ltd.).

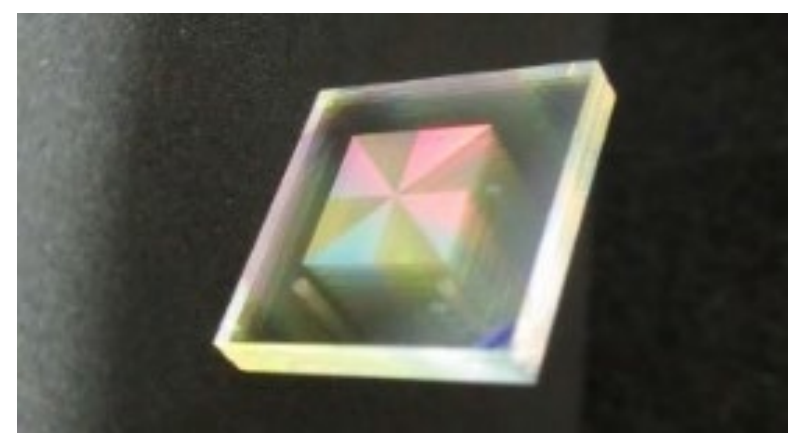


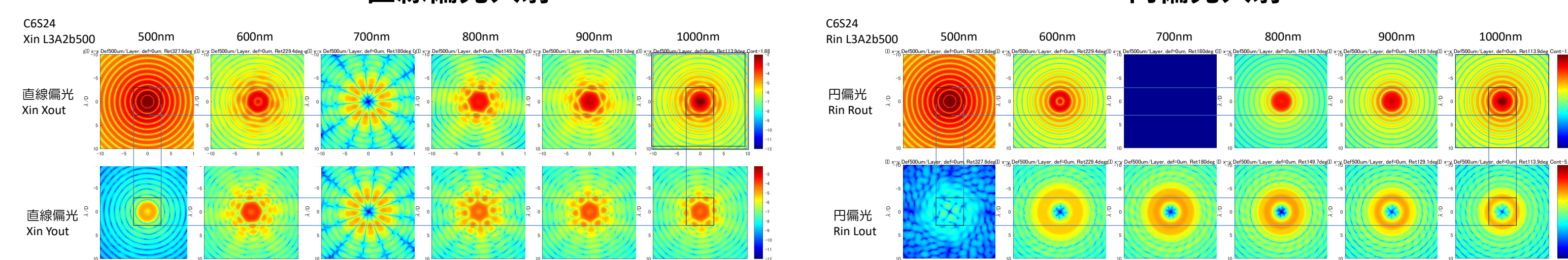
Fig.2 赤外広帯域3層8分割位相マスク

4. Broadband Phase Mask Design by Three-Layer Configuration

広帯域化の設計は、速軸方位角+層間隔+中心波長 (Retardance (λ)) 3つのフリーパラメーターがあり、偏光 (2つの直線偏光入射、2つの円偏光入射) と回折の両方を取り扱って、広帯域に計算し、エアリー第2明環上のコントラストを取り出して評価した。

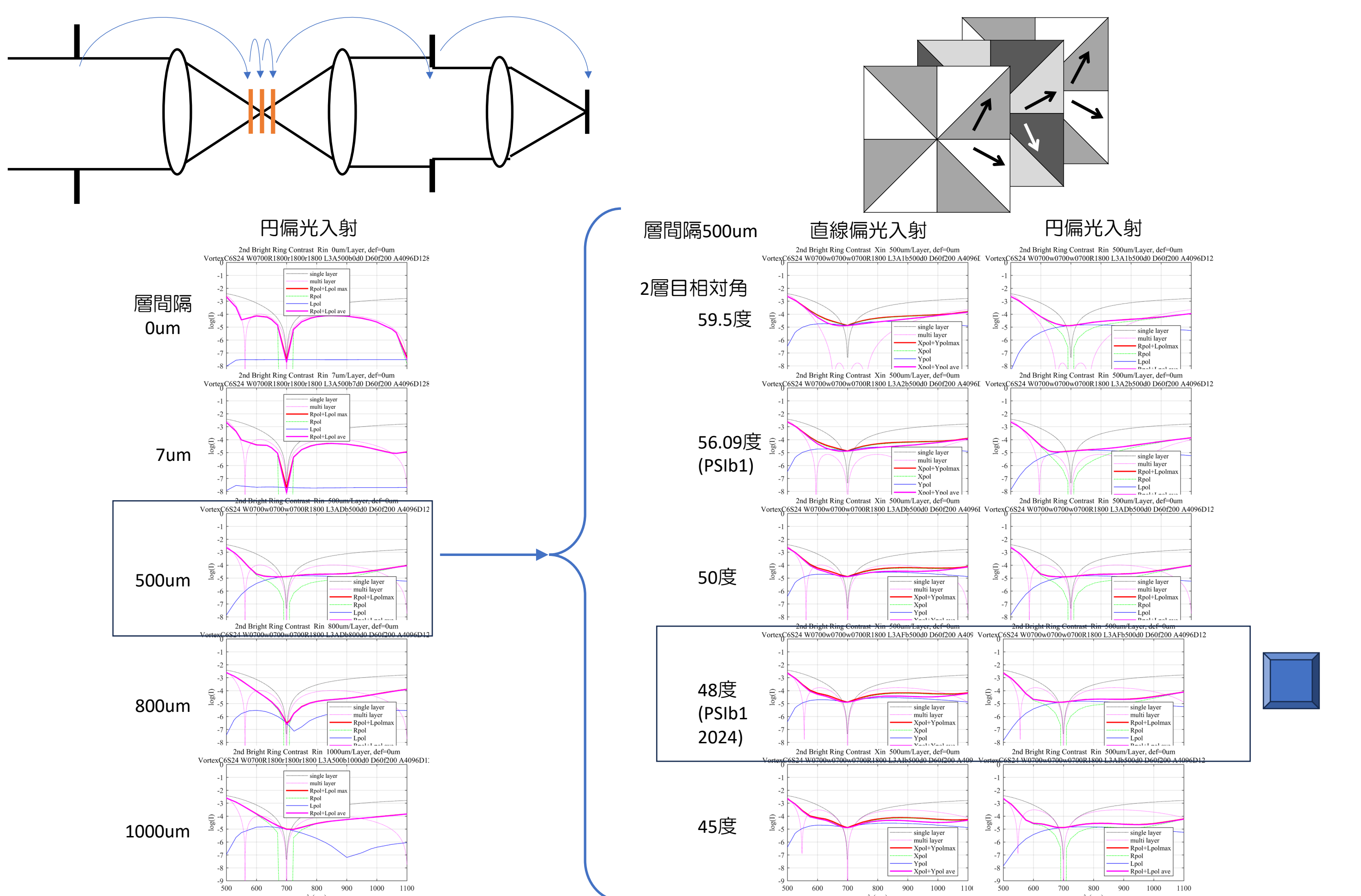
<直線偏光入射>

<円偏光入射>



<層間隔>

<速軸方位角>



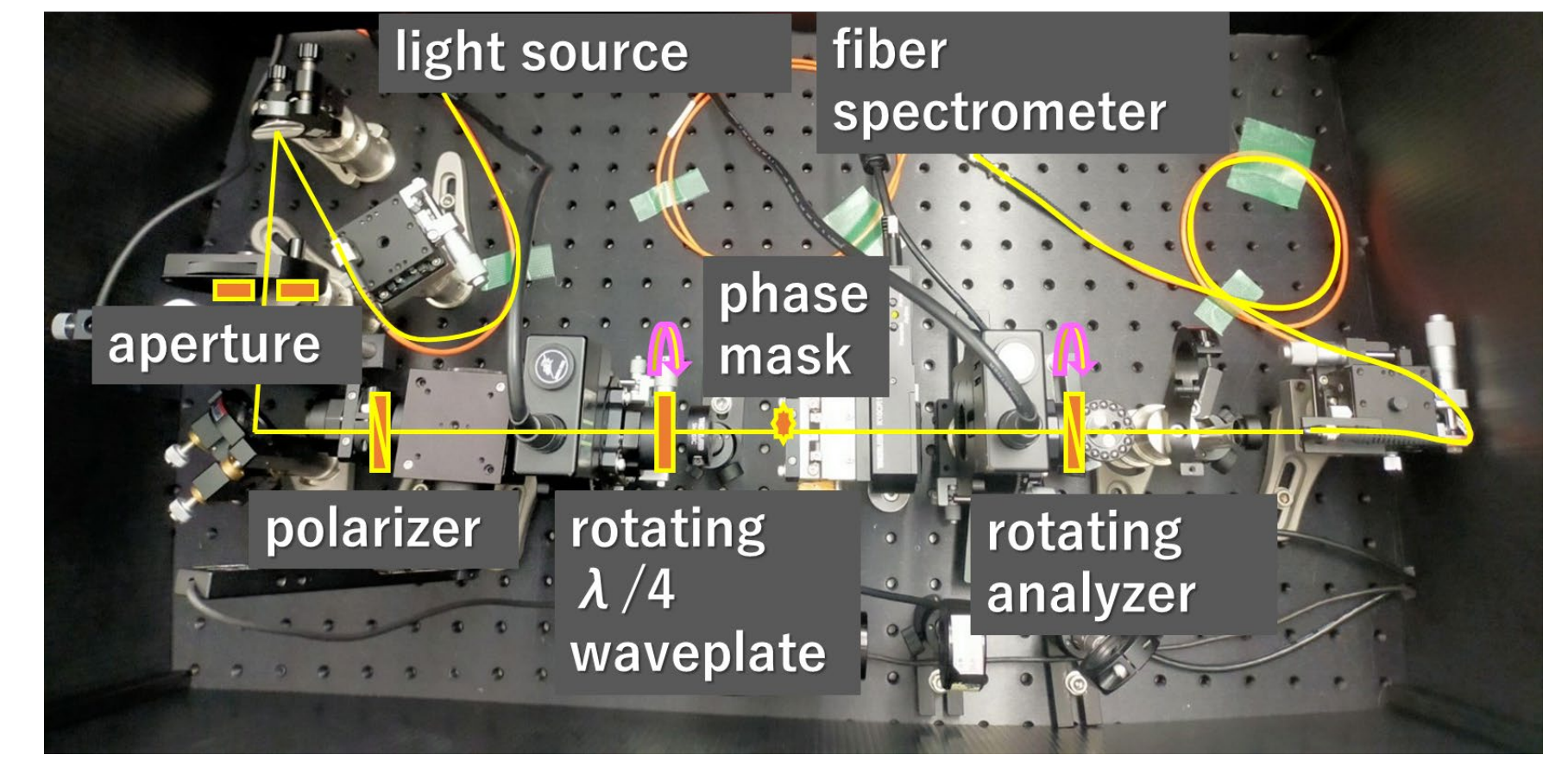
<採用したパラメーター>

名称	波長帯域	中心波長	第2層方位角	層間隔	PSFpeak強度	第2明環強度	後処理後目標値
PSI b1 2024 (New)	600-950nm	700nm	48.00°	550um	—	2.7E-05	1E-08
PSI b1 2021	600-1000nm	723nm	56.09°	0um	1.75E-03 →	→ 7.30E-06	1E-08
PSI b2 2021	950-1800nm	1127nm	51.69°	0um	1.50E-02 →	→ 6.25E-05	1E-08

5. Retardance Measurement

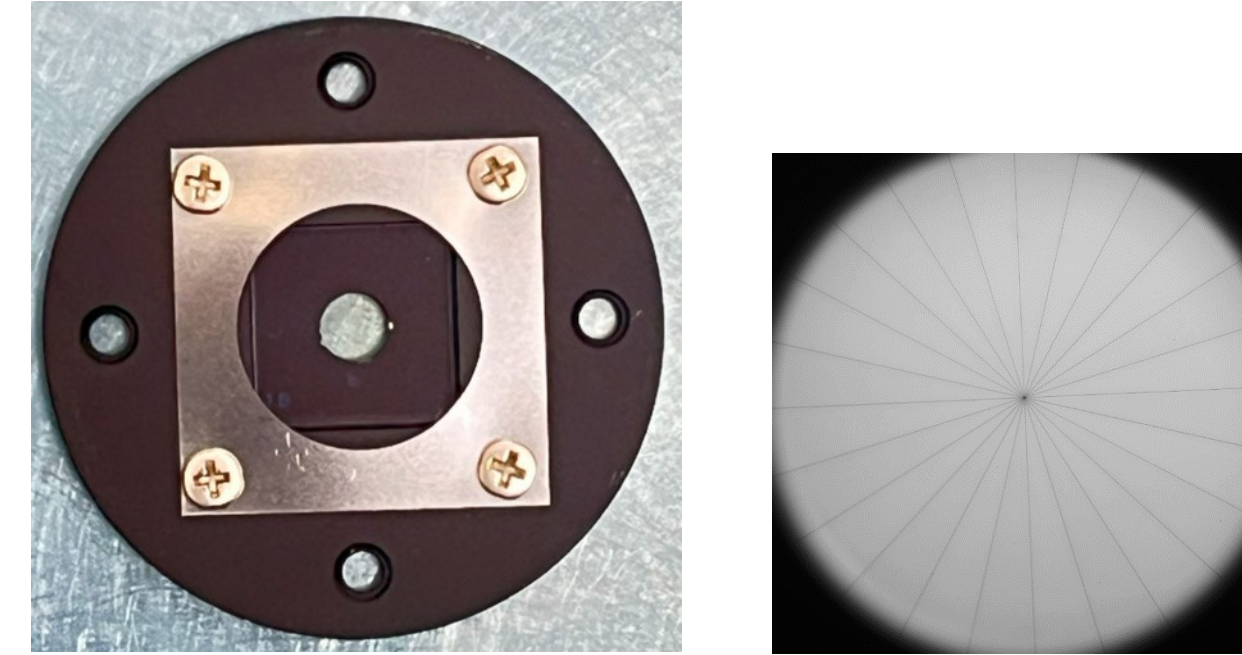
高精度分光エリプソメーター

回転補償子と回転検光子を用いて、位相マスクの偏光特性を測定する装置を、国立天文台のATCに組み上げた。位相マスクの0.2mmφの位相差を測定可能である (村松: 修士論文)。ファイバー光源、シャッター、開口、偏光子、回転補償子、被測定対象 (位相マスク)、試料位置合わせ回転装置、回転検光子、ファイバー分光器、で構成される。位相差の測定精度は 0.1° である。

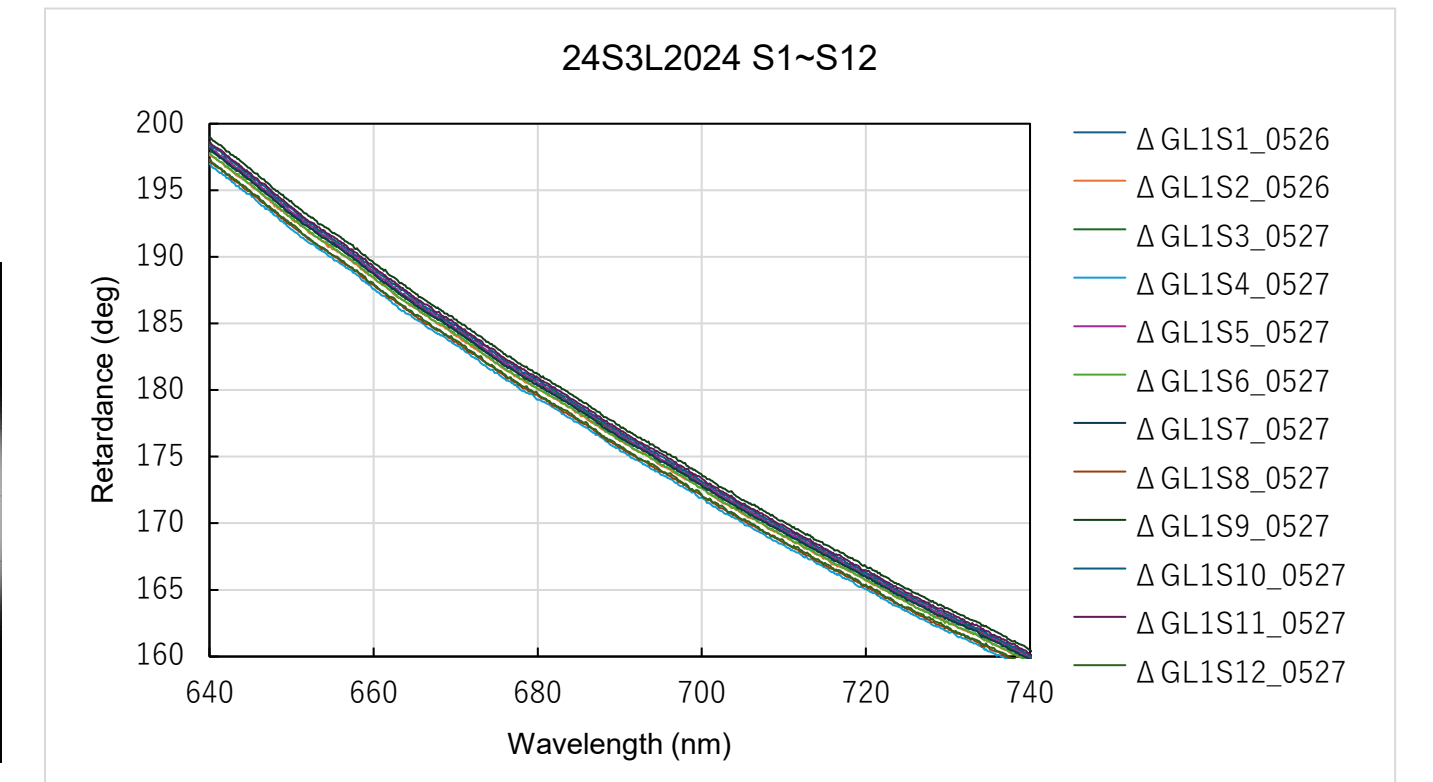


A polarization measurement system for phase masks.

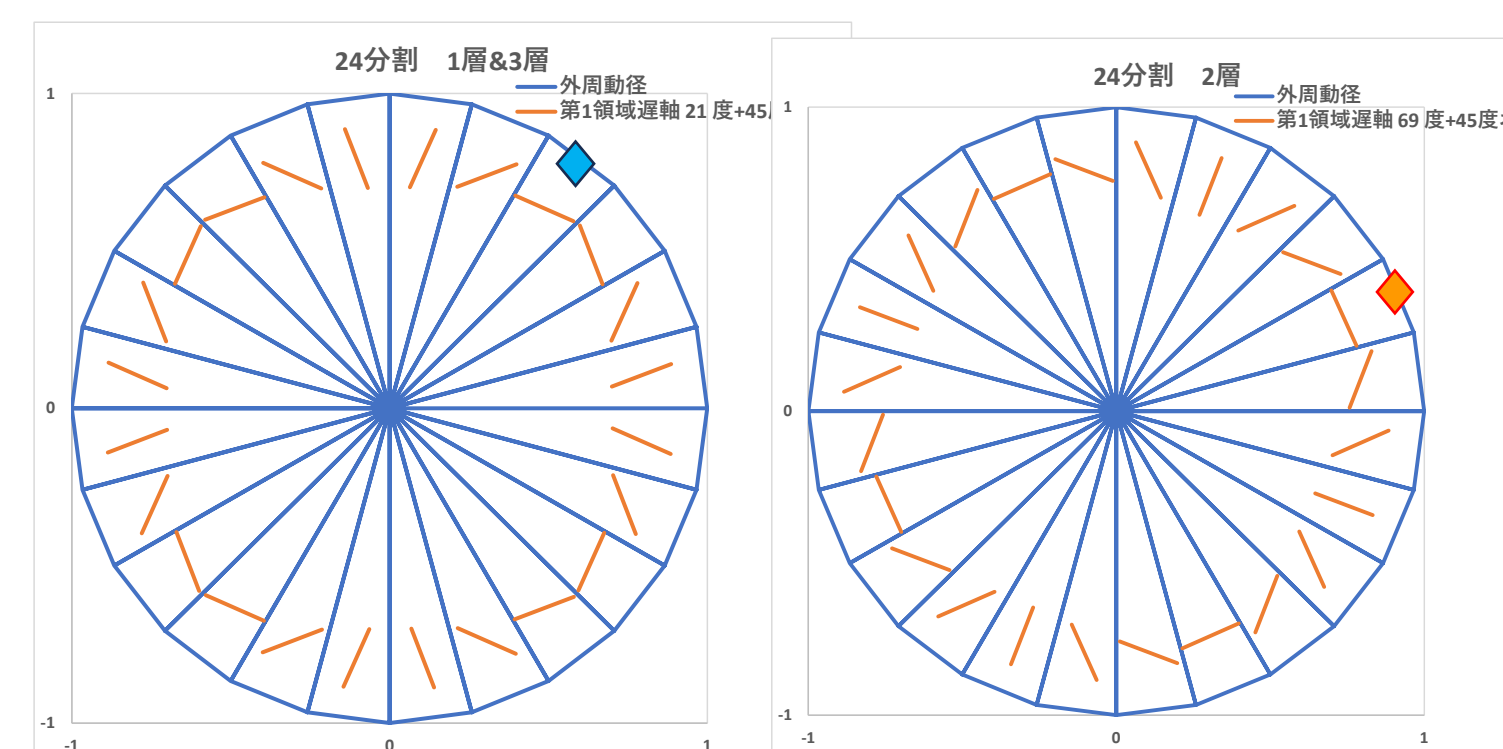
24分割位相マスク、接着用各層の位相差



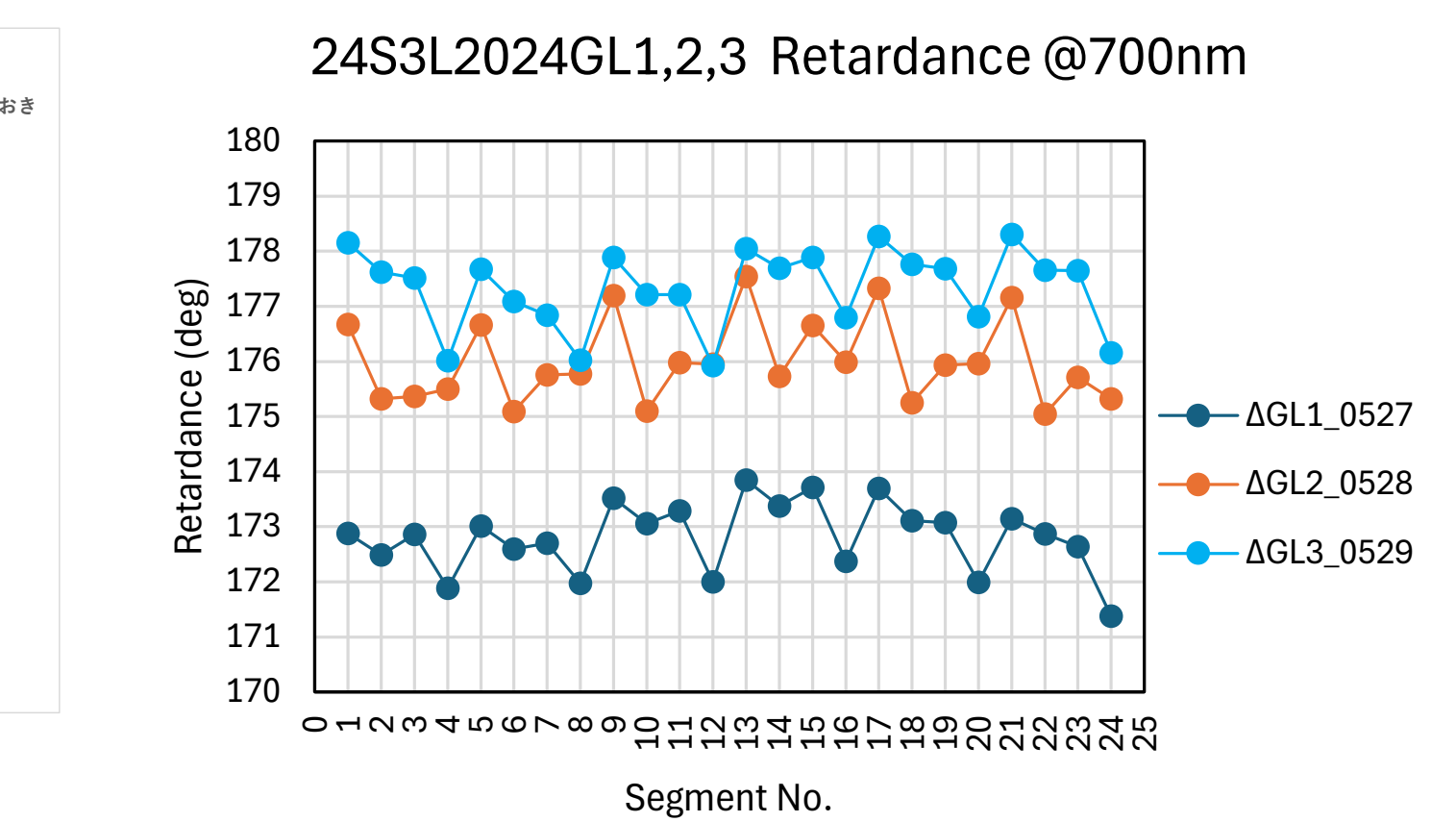
24分割3層位相マスク(24x3) 接着前



第1層の第1~12セグメントの位相差波長依存性は各セグメントで類似。



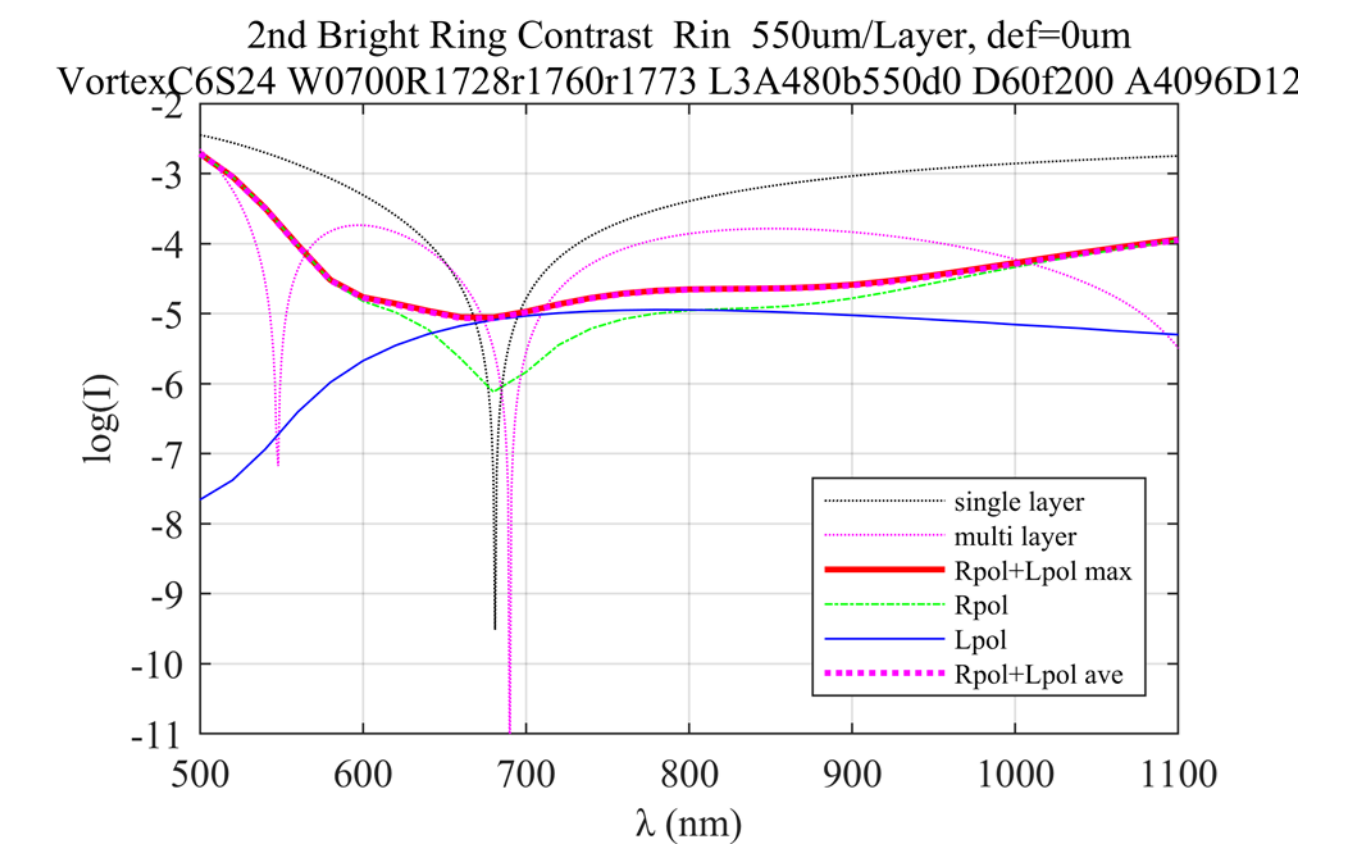
24分割マスク 第1層と第3層の速軸方位
第2層の速軸方位 (第1層+48°)



セグメント間誤差は最大 ± 1.5 度。方位にランダムに依存。原因調査中。層間誤差は、約2度。

3層化時の達成コントラストの推定

各層の平均位相差 (測定値) を入れて計算 \Rightarrow
 $180 + [-7.19, -4.00, -2.67 \text{ deg}]$
設計コントラスト \square と比して大きな遜色なし

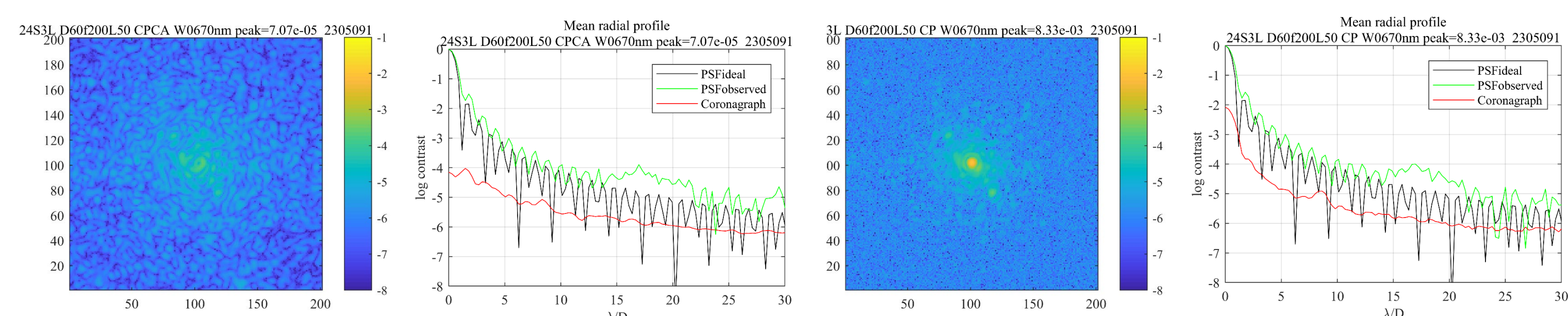
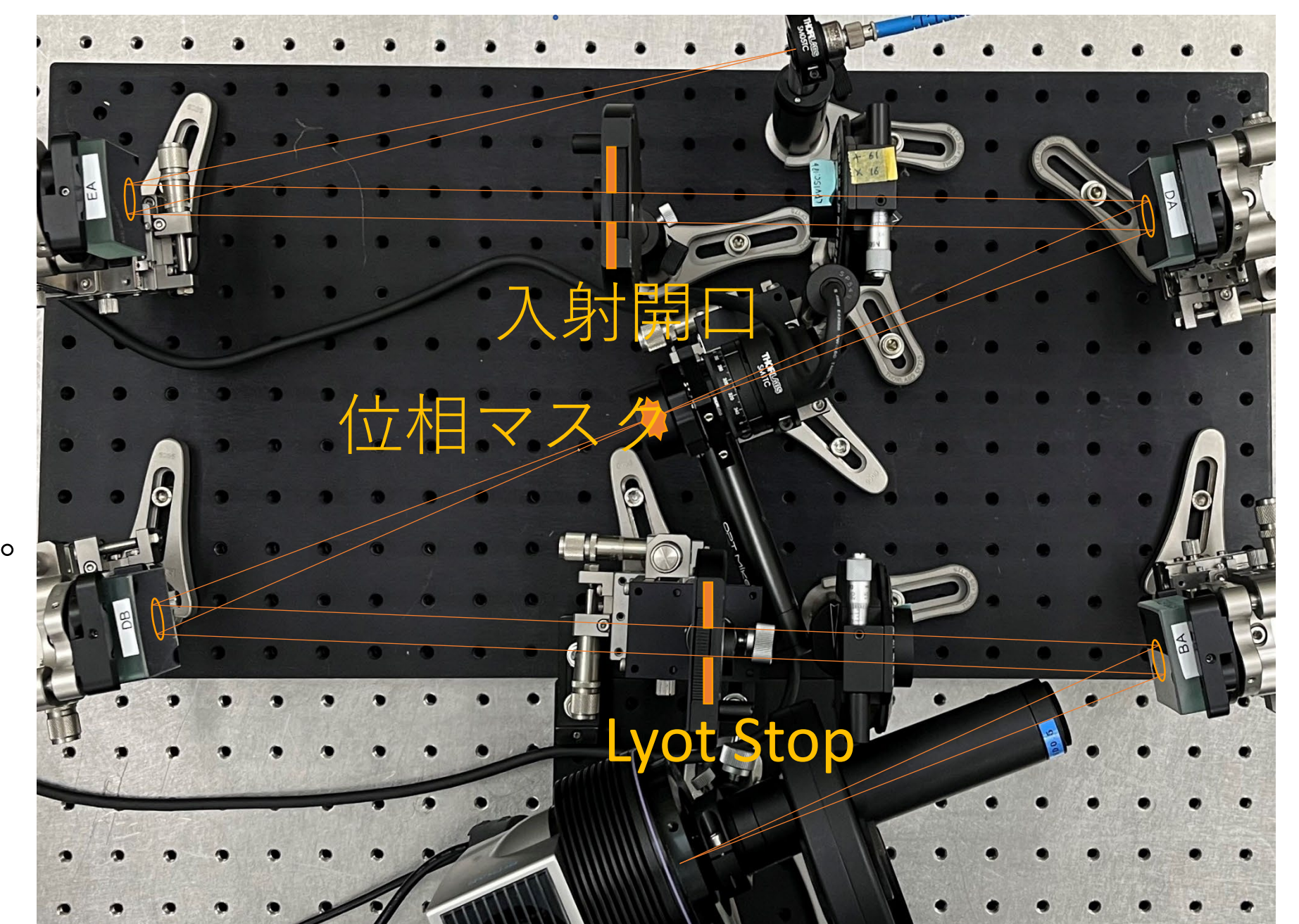


6. Contrast Evaluation

超広帯域コロナグラフ

オフセットパラボラでコロナグラフを構成してある。現在の測定波長は532nm~1064nm (レーザー7波長)。

PSIb1(2024)は3層化後に評価予定。



(a) 検光子有 (b) 検光子無し
3層24分割位相マスク(2021)のコロナグラフ実験による焦点像と Mean Radial Profile (670nm)

7. Conclusions and Future prospects

- 位相マスクを超広帯域化する3層構造の設計の際、速軸方位角+層間隔+中心波長を変えて、偏光と回折の両方を取り扱って、広帯域に計算し、エアリー第2明環上のコントラストで評価した。
- PSIb1(2024) 600-950nmの解として、速軸方位角 48° 、層間隔 $550 \mu\text{m}$ 、中心波長 700nm を得た。
- 24分割位相マスク接着用基板3枚を製作した。
- 各層の位相差は、 ± 1.5 度の範囲に収まり、セグメント間誤差は ± 1.0 度に収まっている。
- 3層接着積層時の推定コントラストは、設計値に対して大きな遜色はない。
- 本年度、接着を行い完成の予定。

謝辞

本研究は2021/22/23/24年度のTMT 戦略基礎開発研究経費の助成を受けた。

実験は国立天文台先端技術センターにおいて行われた。

Murakami, N., Nishikawa, J., et al. Proc. SPIE 9912, 99126G (2016).

Nishikawa, Murakami, et al. SPIE, 11447, 114474T (2020)

Nishikawa, J., Murakami, N., Tanaka, Y., Muramatsu, H., Yoneta, K., and Asano, M., "Sixth order segmented vector vortex phase masks and shaped pupils for future telescopes," SPIE 13096, 130969J (2024).