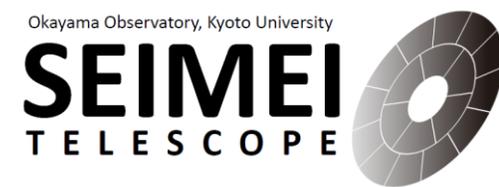


2021-12-08

第10回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ 2021

国立天文台三鷹



# 複屈折結晶を用いた 極限補償光学用波面センサの開発

津久井遼(京大理D2)

協同研究者: 木野勝, 山本広大, 栗田光樹夫(京大理), 松谷晃宏(東工大OFC)

# 内容

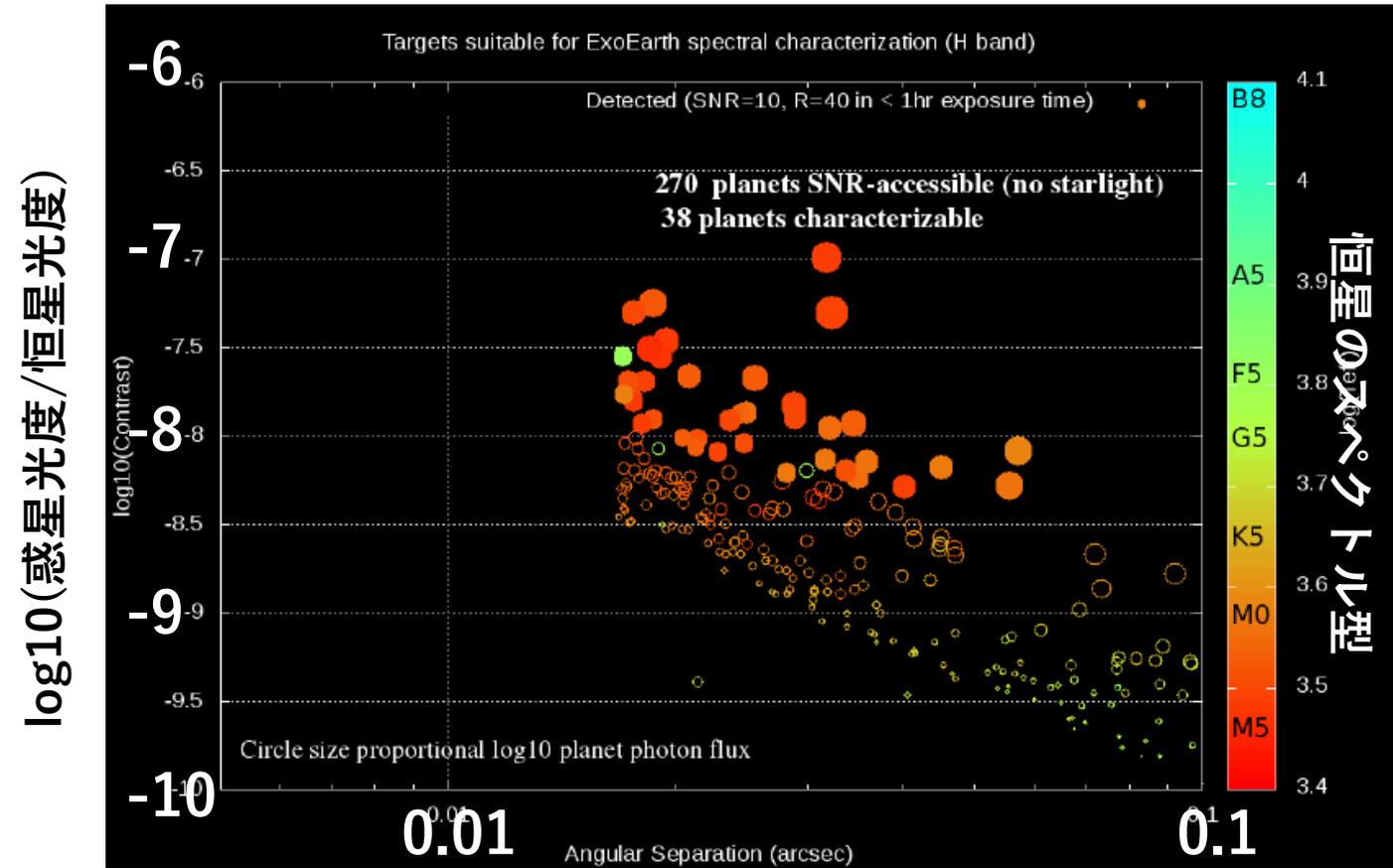
- 研究背景
- 波面センサの原理と設計
- 製作と評価の現状

# 内容

- 研究背景
- 波面センサの原理と設計
- 製作と評価の現状

# 目的と要請

- サイエンス：
  - 惑星形成メカニズムの解明
  - 太陽系外での生命探査
- **太陽系外惑星の直接観測**  
(可視-近赤外)
- 系外惑星は
  - 恒星との離角:  $\sim 0.1'' - 0.01''$
  - 恒星との光度比:  $\sim 5 - 8$ 桁  
(高コントラスト)
- 恒星近傍での  
**高コントラスト観測が必要**

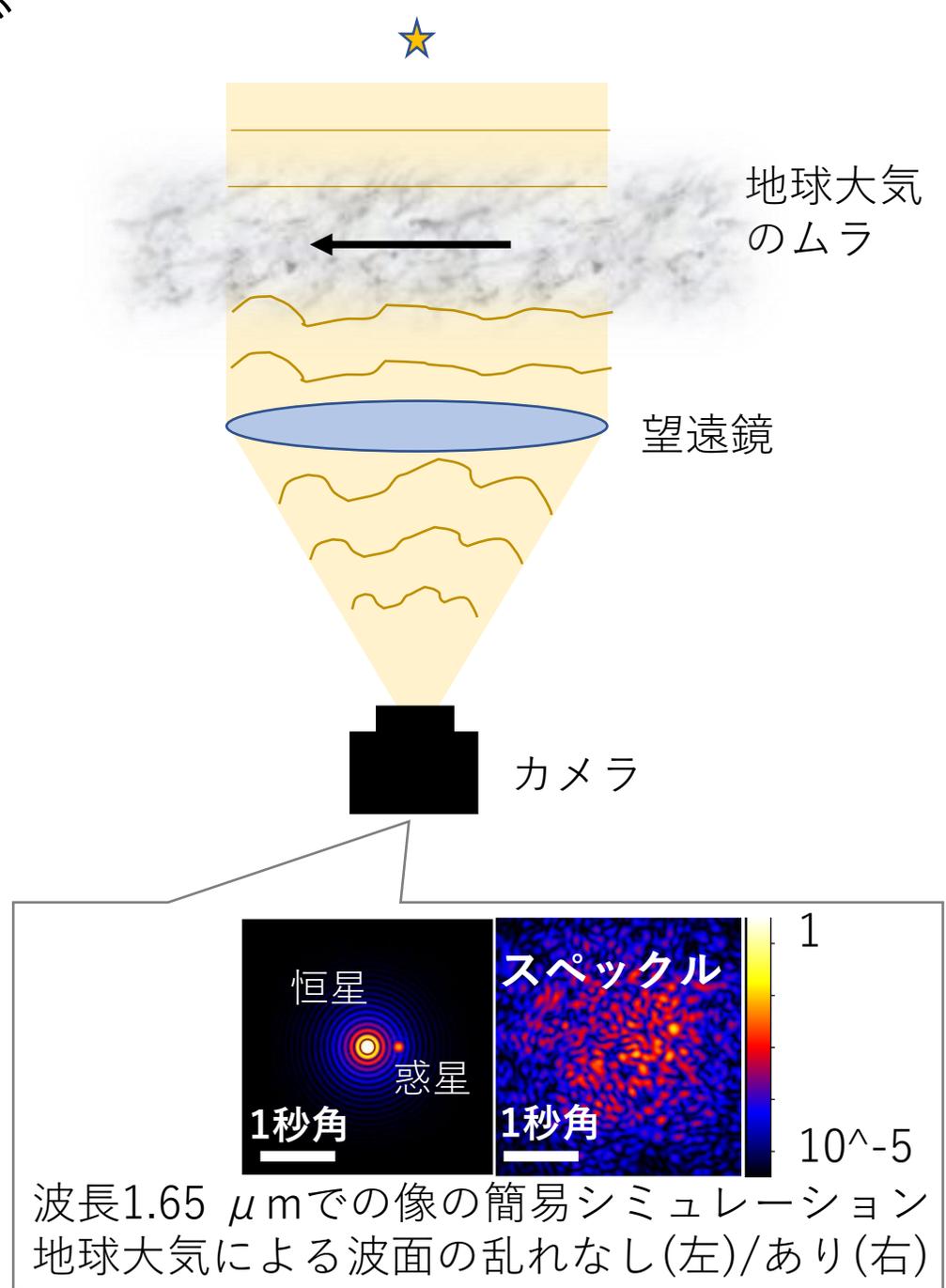


恒星からの離角(arcsec)

地球型惑星の分布(Guyon+2018)  
塗りつぶし：TMTでの目標天体

# 障害：地球大気の揺らぎ

- 地球大気には屈折率ムラが存在
  - 光波面の乱れ
  - 恒星光由来の**スペックル(光斑)**
  - コントラストを制限**
- 屈折率ムラは風で流されていく
  - 波面の乱れも時間変化  
(変動タイムスケール~**1 msec**)
- 安定的に高コントラストを得るには  
**リアルタイムな波面の補償が必要**

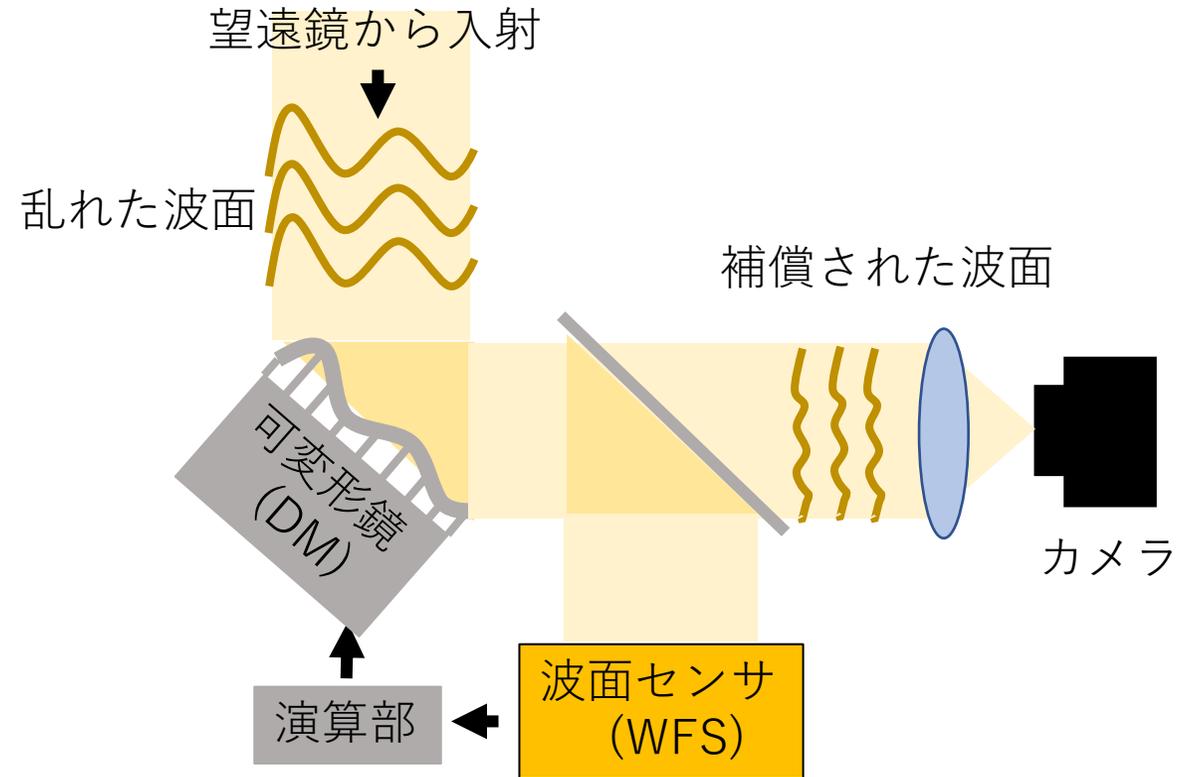


波長1.65  $\mu\text{m}$ での像の簡易シミュレーション  
地球大気による波面の乱れなし(左)/あり(右)

# 極限補償光学(ExAO: Extreme Adaptive Optics)

3/17

- 波面補償によりスペックルを抑圧
  - 高精度 ( $< \lambda / 20 \sim 80 \text{ nm}$ )
  - リアルタイム ( $> 1000 \text{ 回/sec}$ )
- 様々な誤差要素：
  - 波面センサの測定誤差
  - 補償のタイムラグ
    - 波面乱れの残存
    - **スペックルの残存**
    - コントラストの制限( $\sim 4$ 桁)
- **現状：各誤差要素を低減したい**

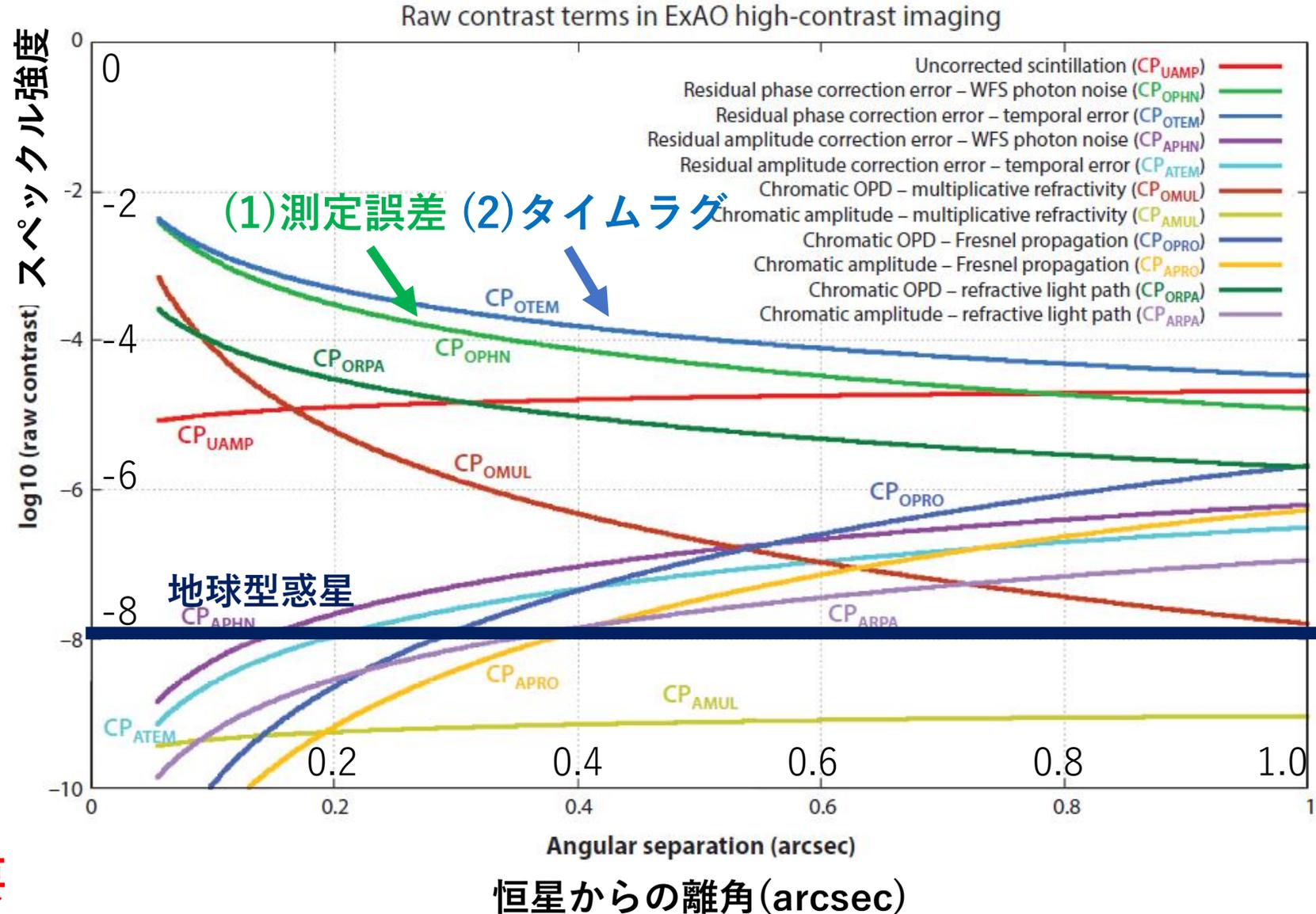


極限補償光学の概念図

# 各誤差要素の寄与

- 主要な誤差要素：
  - (1) 波面センサの測定誤差
  - (2) 補償のタイムラグ
- これらはトレードオフ
  - 例: (2) ラグを減らす
    - 高頻度測定
    - フォトン減る
    - (1) 測定誤差増える
- 両方を減らすには
 

**高効率な波面センサが必要**



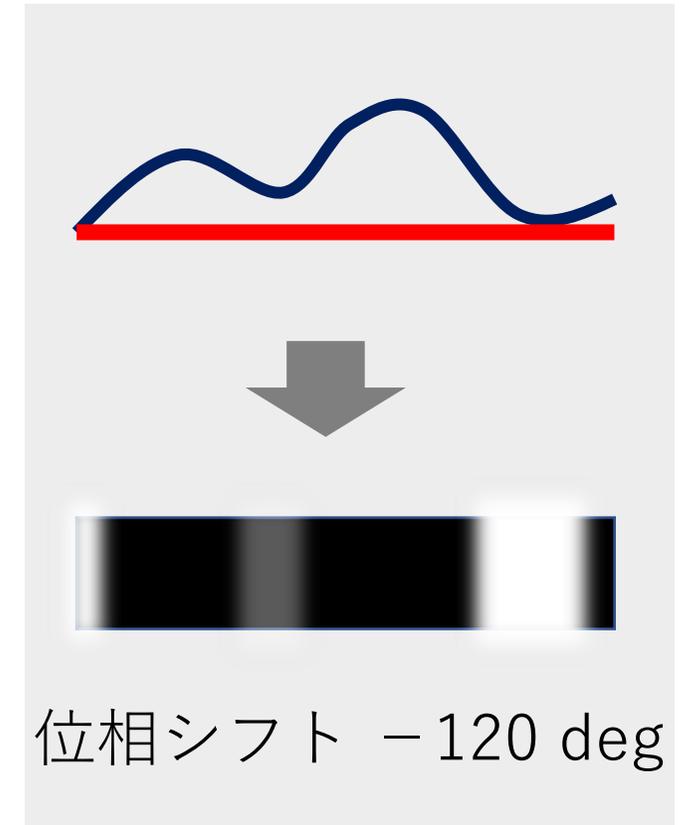
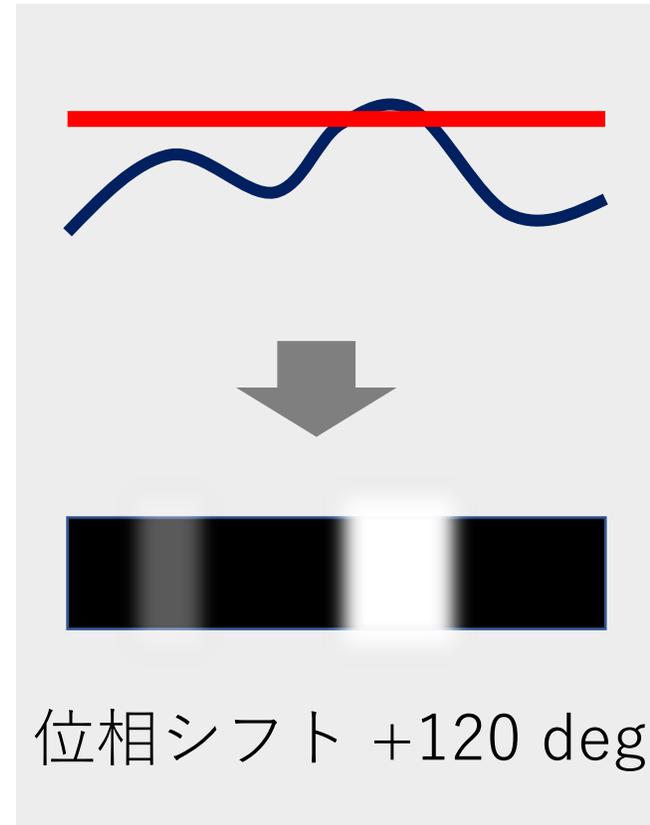
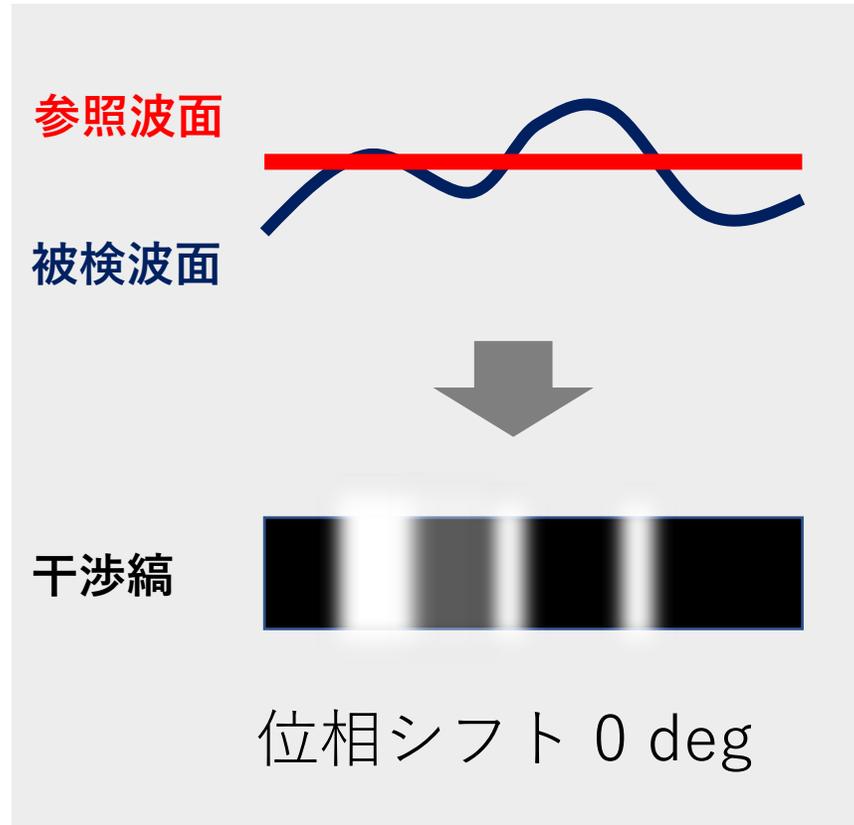
ExAOの各誤差要素によるスペックル強度 (Guyon 2018)  
口径8 m, SHWFS@1 kHz

# 内容

- 研究背景
- 波面センサの原理と設計
- 製作と評価の現状

# 測定原理：位相シフト干渉法

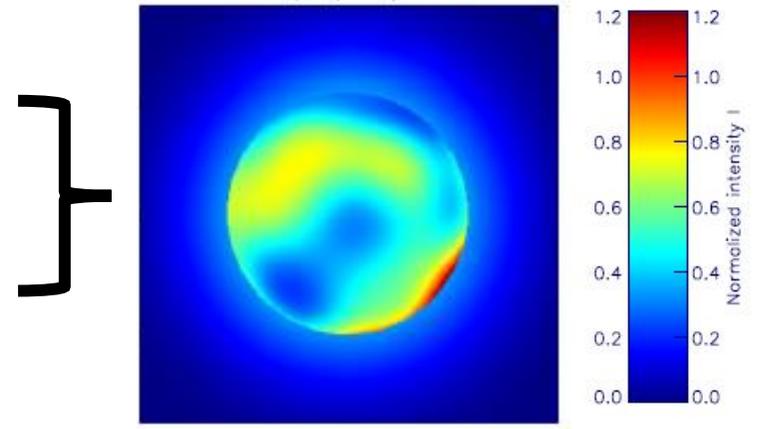
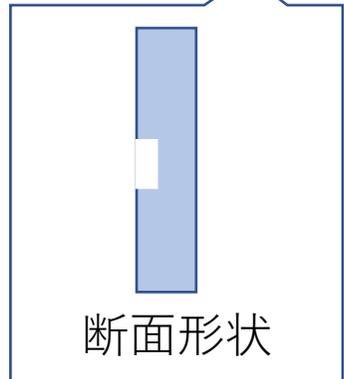
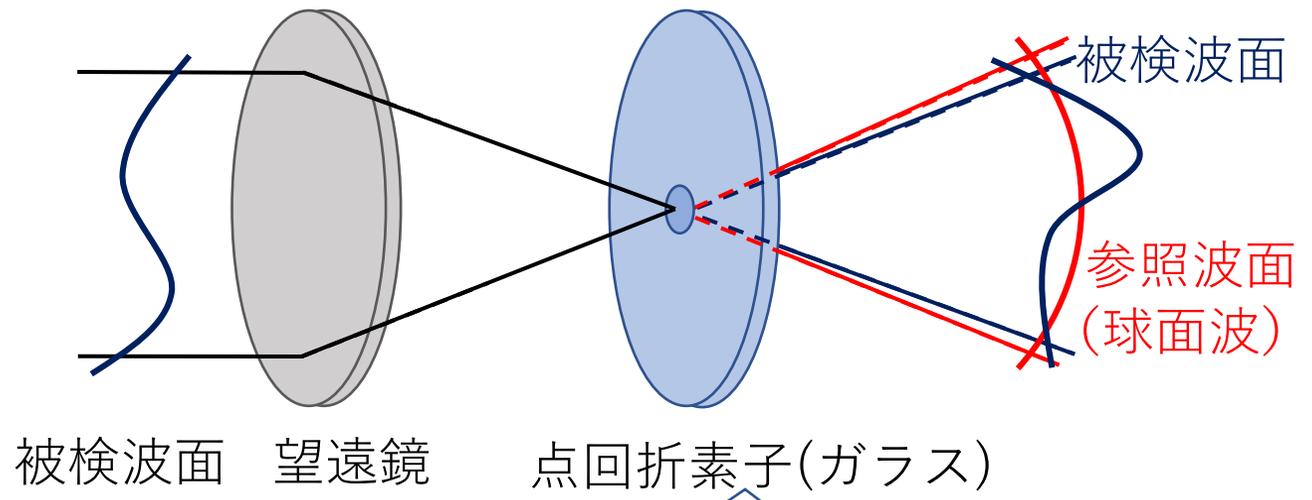
- **高効率**を得やすい
- 3種類の干渉縞(0,  $\pm 120$  deg)から、被検波面の形状を計算



- **必要なもの：参照波面、3種類の位相シフト**

# ベース：点回折干渉計(PDI)

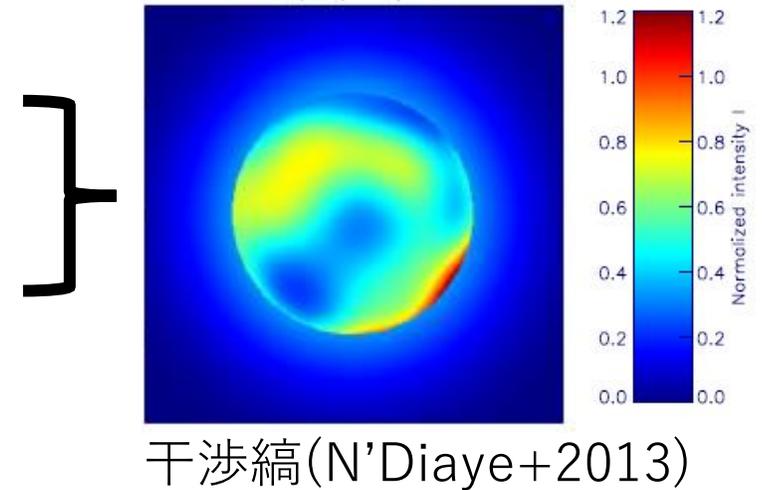
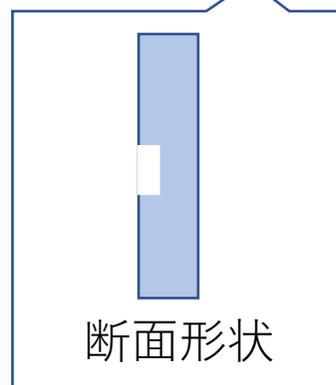
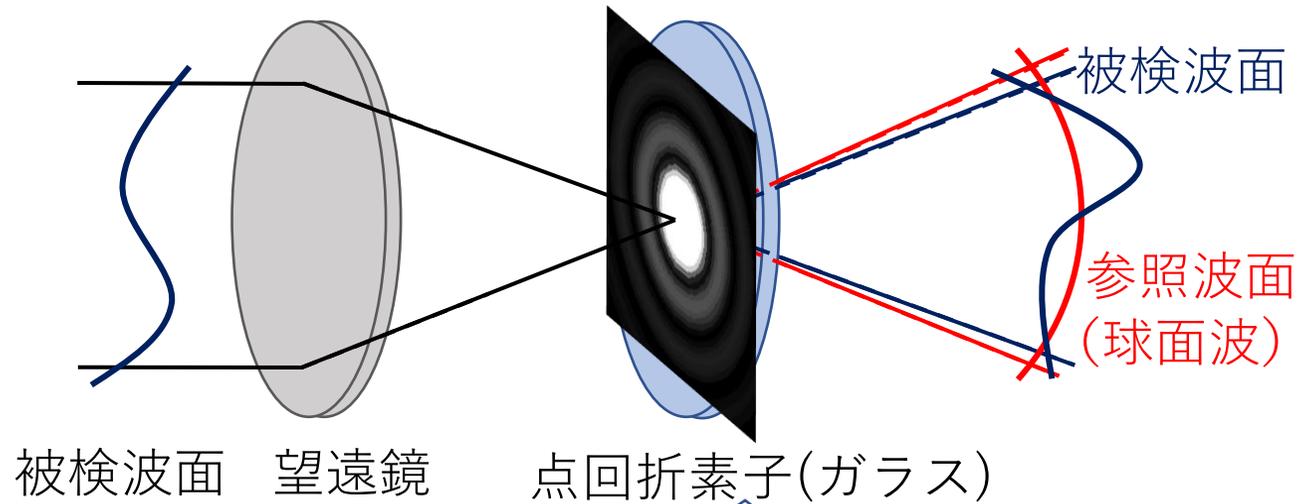
- 点回折素子のピンホールにより
  - 参照波面を生成
  - 位相シフトを設定可能、ただし**1通り**  
→**縮退**



干涉縞(N'Diaye+2013)

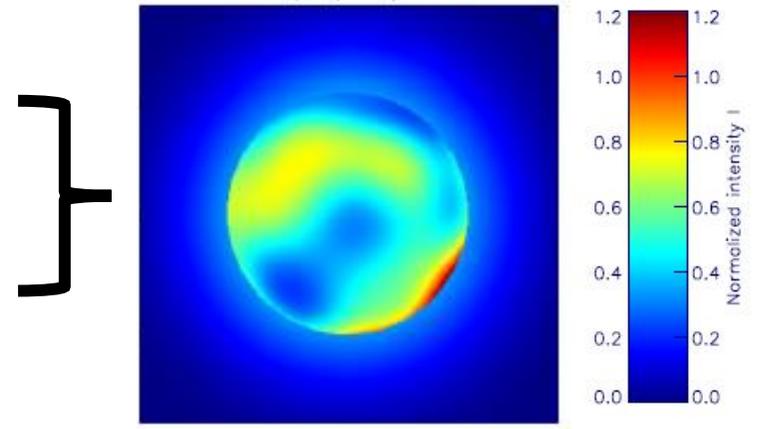
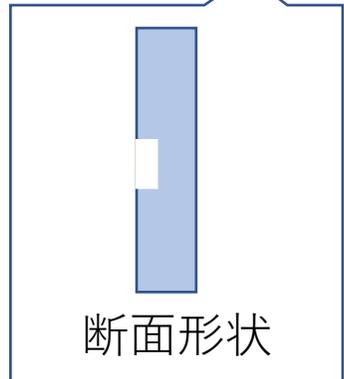
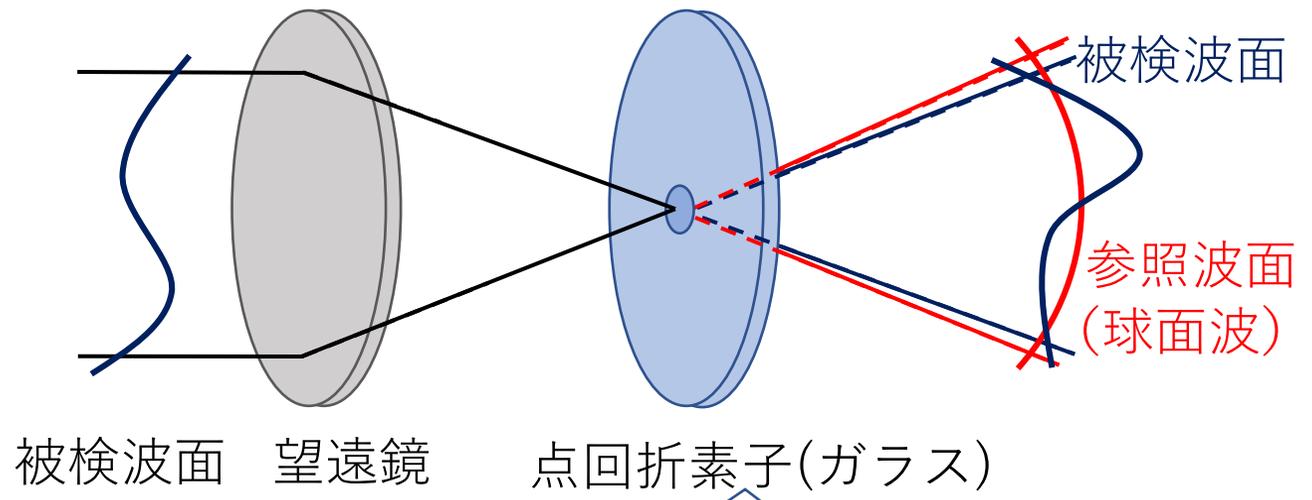
# ベース：点回折干渉計(PDI)

- 点回折素子のピンホールにより
  - 参照波面を生成
  - 位相シフトを設定可能、ただし**1通り**  
→**縮退**



# ベース：点回折干渉計(PDI)

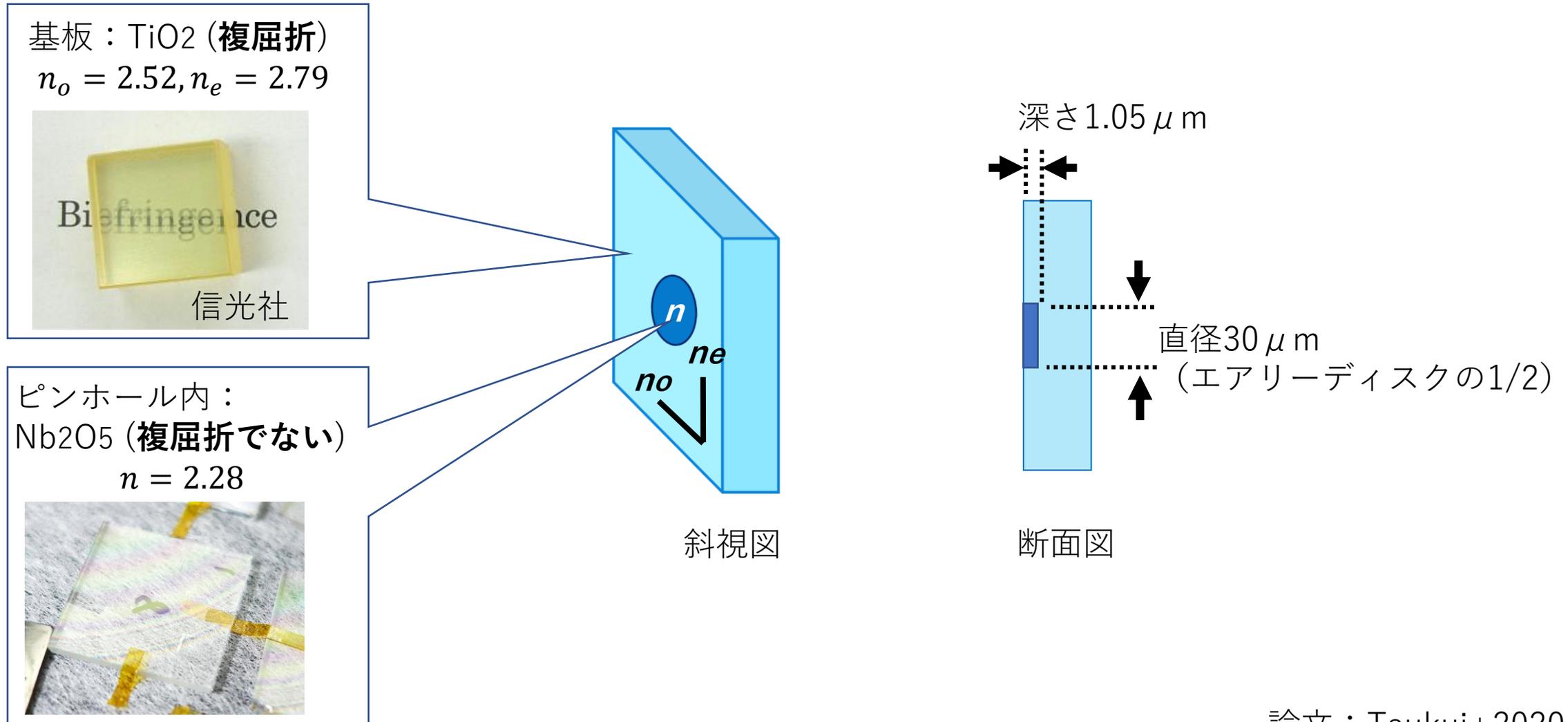
- **点回折素子**のピンホールにより
  - 参照波面を生成
  - 位相シフトを設定可能、ただし**1通り**  
→**縮退**



干涉縞(N'Diaye+2013)

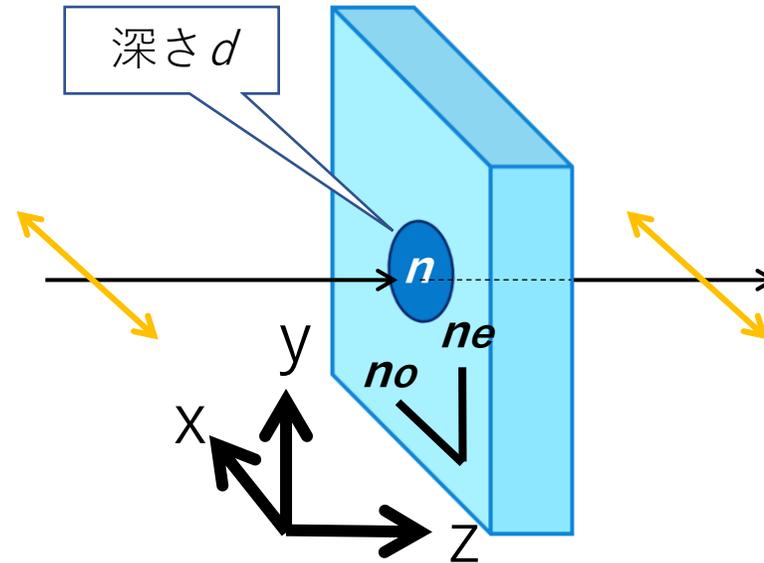
# 新方式の点回折干渉計

- 3通りの位相シフトを作るため、点回折素子に**複屈折結晶(TiO<sub>2</sub>)**を利用



# 本方式の原理

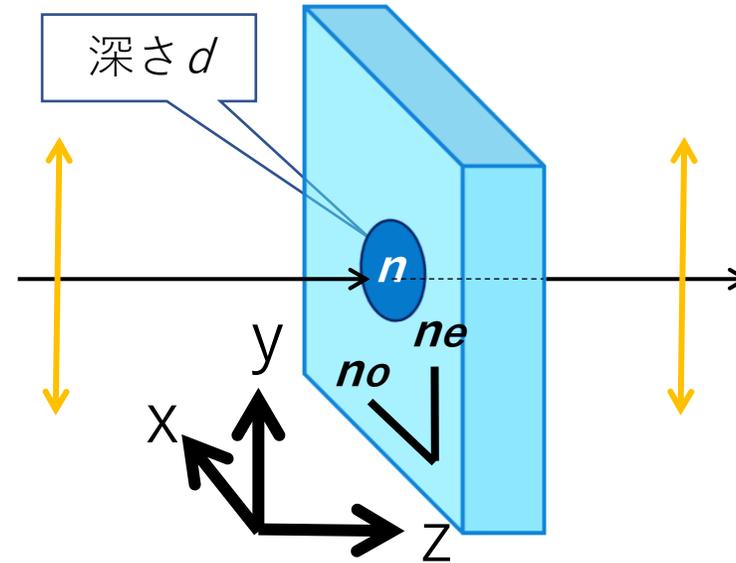
- 複屈折性と表面での鏡面反射を利用  
→ 1台で3通りの位相シフトを作る



光路	ピンホール内外の光路差	位相シフト
透過, 偏光方向x	$(n - n_o)d$	$\approx -120 \text{ deg}$
透過, 偏光方向y	$(n - n_e)d$	$\approx -240 \text{ deg} = 120 \text{ deg}$
反射	0 (鏡面反射)	0 deg

# 本方式の原理

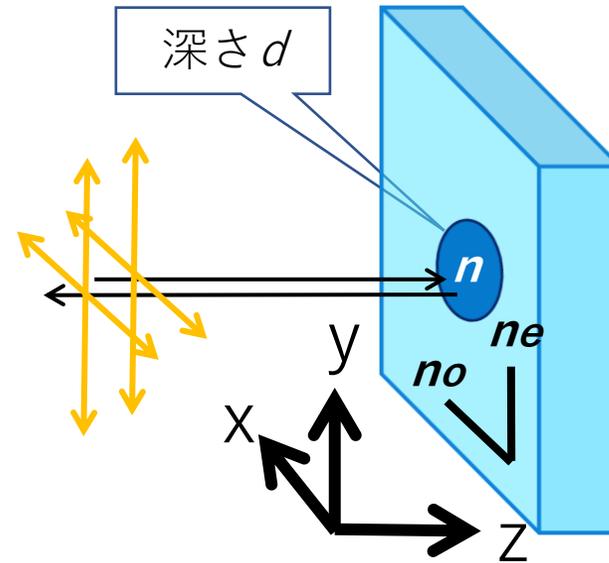
- 複屈折性と表面での鏡面反射を利用  
→ 1台で3通りの位相シフトを作る



光路	ピンホール内外の光路差	位相シフト
透過, 偏光方向x	$(n - n_o)d$	$\approx -120 \text{ deg}$
透過, 偏光方向y	$(n - n_e)d$	$\approx -240 \text{ deg} = 120 \text{ deg}$
反射	0 (鏡面反射)	0 deg

# 本方式の原理

- 複屈折性と表面での鏡面反射を利用  
→ 1台で3通りの位相シフトを作る



光路	ピンホール内外の光路差	位相シフト
透過, 偏光方向x	$(n - n_o)d$	$\approx -120 \text{ deg}$
透過, 偏光方向y	$(n - n_e)d$	$\approx -240 \text{ deg} = 120 \text{ deg}$
反射	0 (鏡面反射)	0 deg

# ピンホール径の最適設計

- 測定誤差はピンホール径に依存

ピンホール**大**  $\begin{cases} \rightarrow \text{参照波面の乱れ大} & \rightarrow \text{誤差大} \\ \rightarrow \text{干渉縞のコントラスト(S/N)大} & \rightarrow \text{誤差小} \end{cases}$

→ 効率最大化(誤差最小化)には最適設計が必要

- シミュレーションにより測定誤差を予測

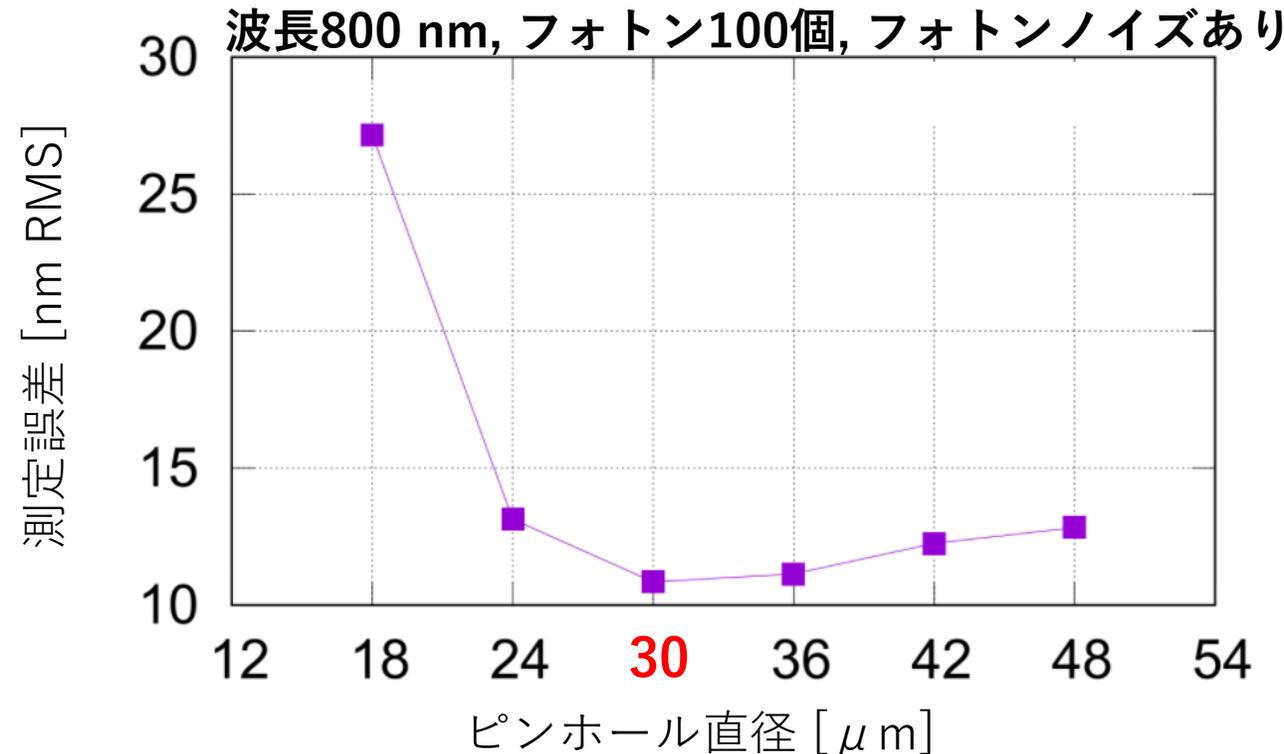
→ ピンホール直径を  **$30\ \mu\text{m}$**  に決定  
(エアリーディスクの1/2)

- 標準的な他方式と比較

→ 同一フォトン数の下で高精度

→ **高効率**

※ツェルニケ波面センサより測定レンジ大



# ピンホール径の最適設計

- 測定誤差はピンホール径に依存

ピンホール**大**  $\begin{cases} \rightarrow \text{参照波面の乱れ大} & \rightarrow \text{誤差大} \\ \rightarrow \text{干渉縞のコントラスト(S/N)大} & \rightarrow \text{誤差小} \end{cases}$

→ 効率最大化(誤差最小化)には最適設計が必要

- シミュレーションにより測定誤差を予測

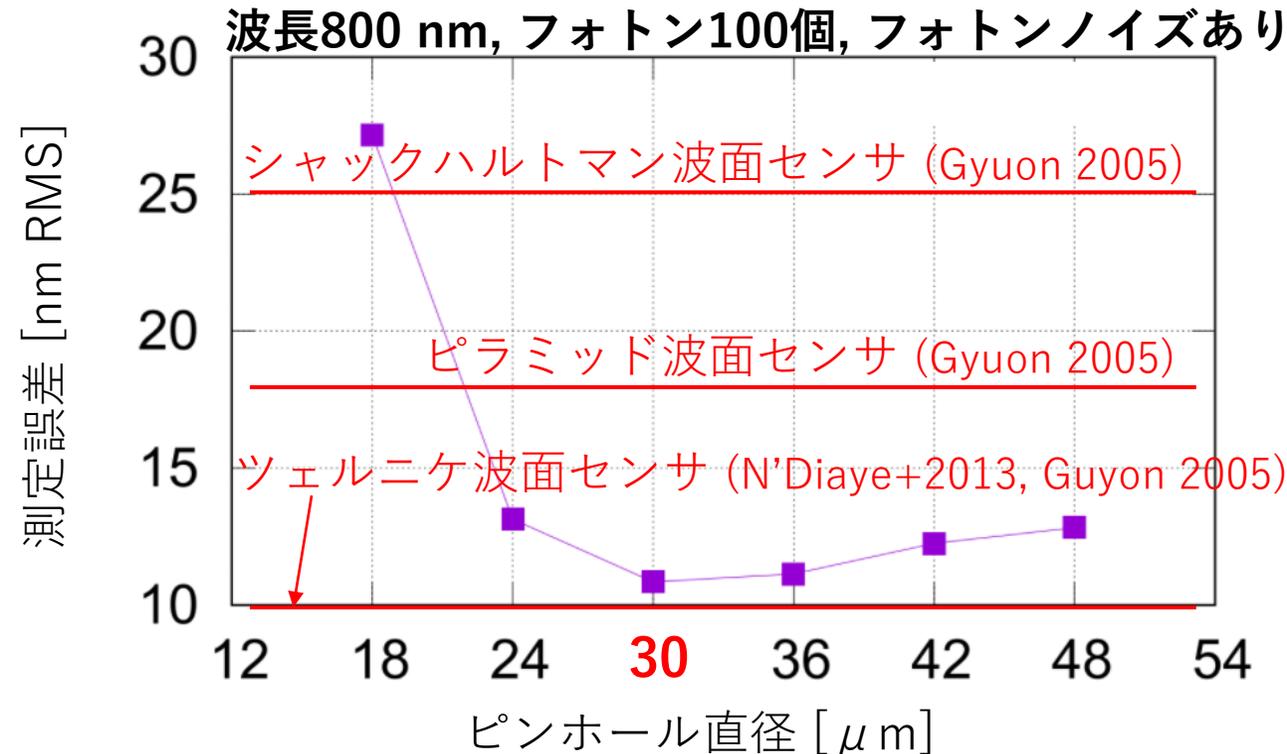
→ ピンホール直径を **30  $\mu\text{m}$**  に決定  
(エアリーディスクの1/2)

- 標準的な他方式と比較

→ 同一フォトン数の下で高精度

→ **高効率**

※ツェルニケ波面センサより測定レンジ大



# 内容

- 研究背景
- 波面センサの原理と設計
- 製作と評価の現状

以降、非公開