

2025年度 国立天文台 先端技術センター ユーザーズミーティング

2025年9月24日

## 地球型系外惑星の直接観測を目指した 高コントラスト後処理法CDI-SANの開発状況2

米田 謙太<sup>1</sup>

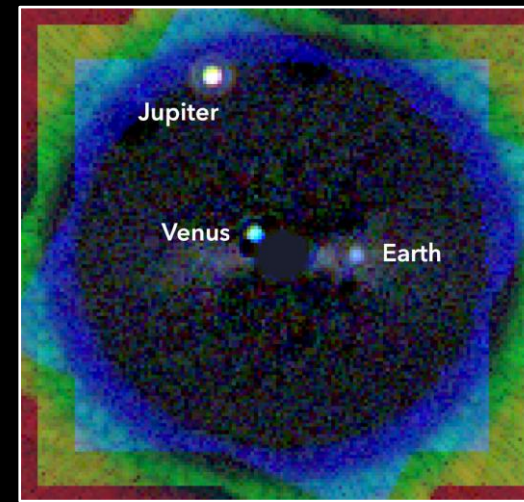
西川 淳<sup>2,3,4</sup>, 早野 裕<sup>2,4</sup> (施設利用代表), 入部 正継<sup>5</sup>, 村上 尚史<sup>3,2,4,6</sup>

(1) 宇宙科学研究所, (2) 国立天文台, (3) アストロバイオロジーセンター, (4) 総合研究大学院大学, (5) 大阪電通大学, (6) 北海道大学

# 研究背景

## ◆系外惑星：太陽以外の恒星を公転する惑星

- 現代天文学における重要な観測ターゲットのひとつ
- 発見数：6000個以上（2025年9月24日現在）<sup>[1]</sup>
- 究極目標
  - ✓ **地球に似た惑星の発見**
  - ✓ **生命活動の痕跡の検出**



約41光年先に太陽系があった場合の直接観測のシミュレーション<sup>[2]</sup>

### 地上望遠鏡の例

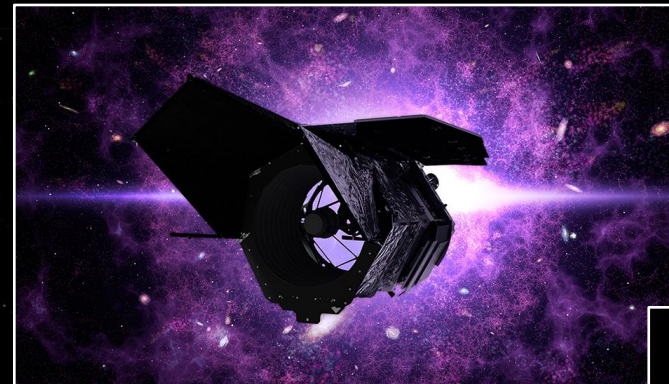


すばる望遠鏡  
(©NAOJ)



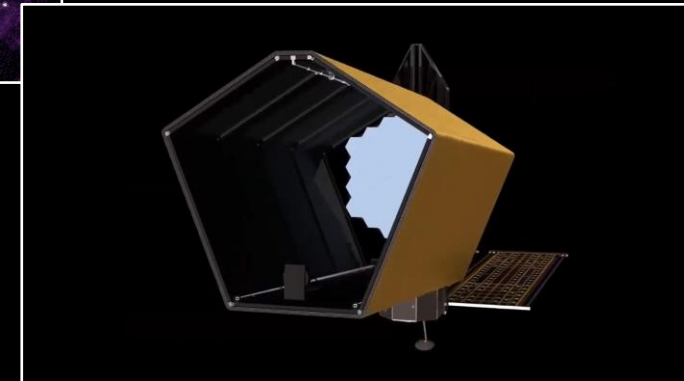
TMT  
2030年代完成目標  
(©NAOJ)

### 宇宙望遠鏡の例



Habitable Worlds Observatory  
(HWO)  
2040年代打上目標  
(©NASA)

Roman宇宙望遠鏡  
2027年打上目標  
(©NASA)



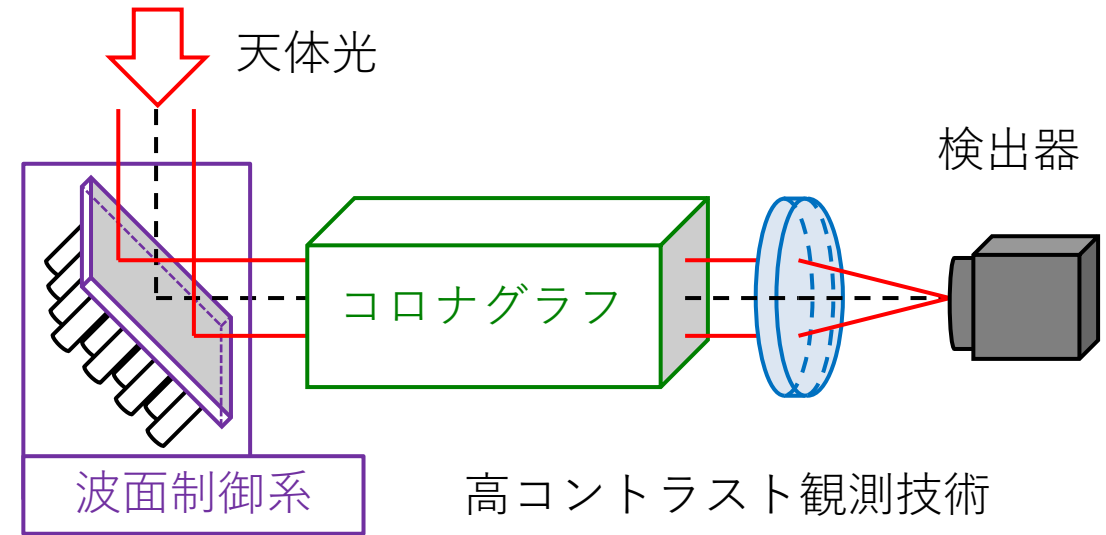
[1] <https://science.nasa.gov/exoplanets/>

[2] The LUVOIR Team, arXiv: 1912.06219 (2019).

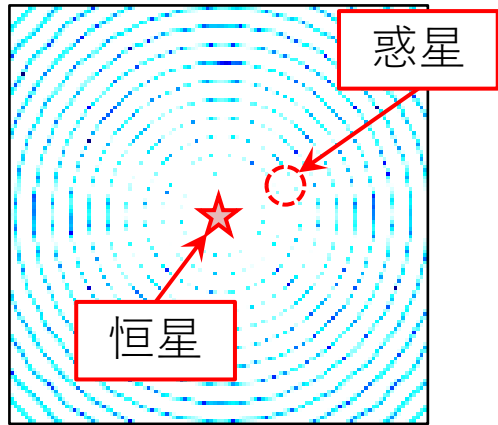
# 研究背景

## ◆系外惑星の直接観測

- 問題：近傍の明るい恒星が惑星の観測を妨げる
  - ✓ **可視光強度比 太陽：地球 =  $1:10^{-10}$**
- 高コントラスト観測技術
  - ① **コロナグラフ**：恒星回折光を抑制
  - ② **波面測定・制御技術**：恒星散乱光を抑制
  - ③ **後処理技術**：残留する恒星光をさらに抑制

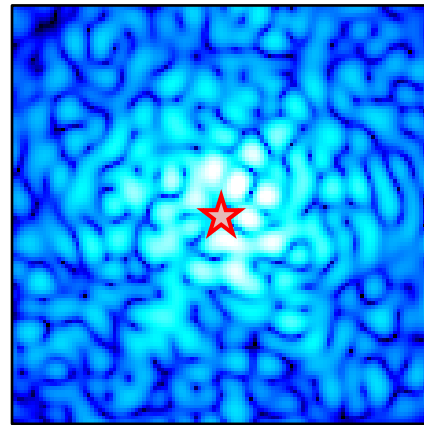


高コントラスト  
観測技術なし

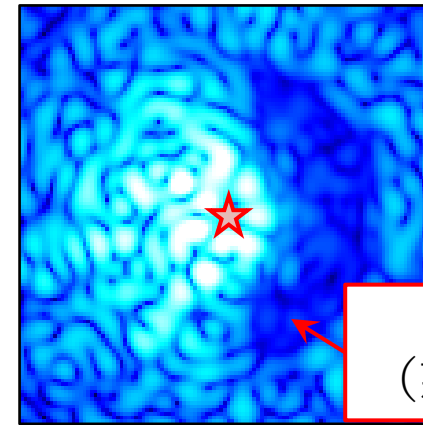


数値シミュレーション

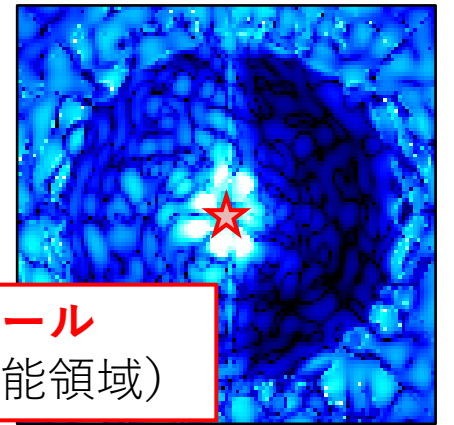
コロナグラフ



波面測定・制御



後処理



**ダークホール**  
(惑星探査可能領域)

$10^{-10}$

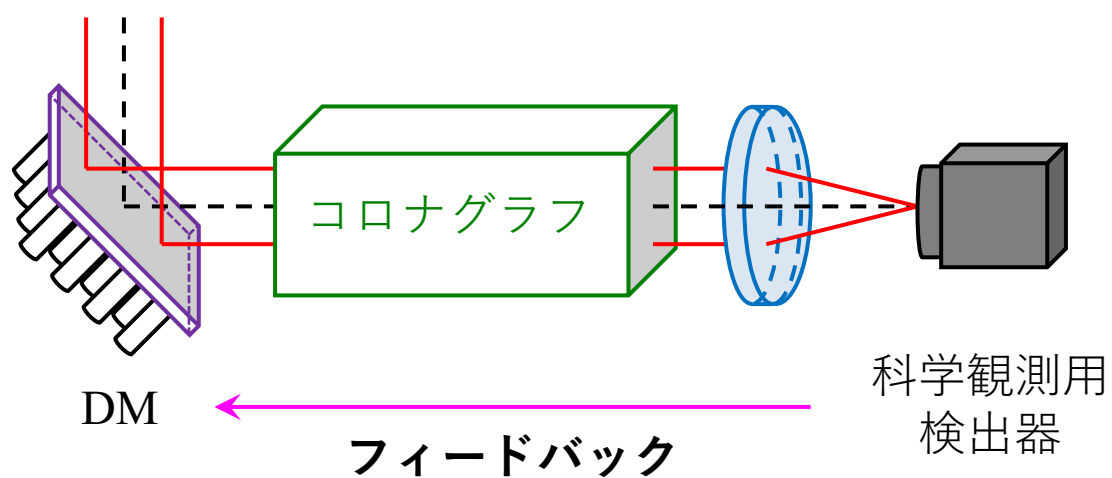
コントラスト (恒星光抑制レベル、対数スケール)

$10^{-5}$

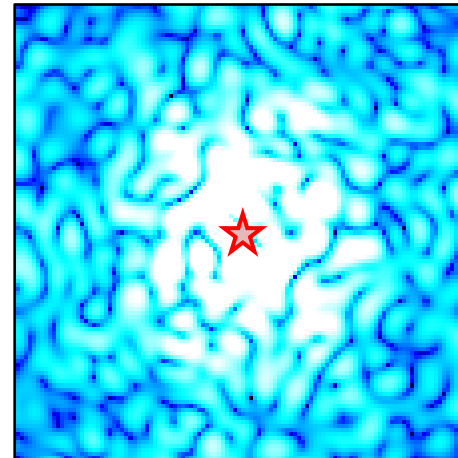
# 波面測定・制御技術

## ◆波面収差に起因する恒星散乱光を抑制する

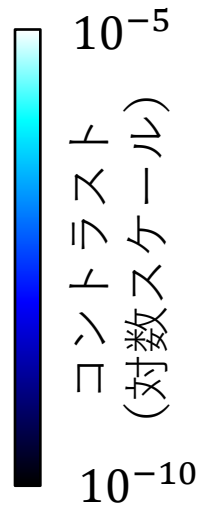
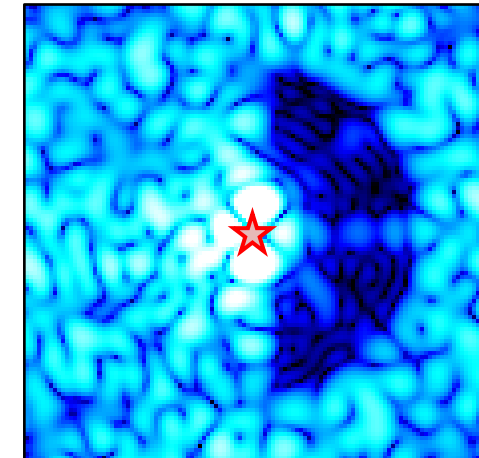
- コロナグラフ：恒星散乱光を抑制できない
- 波面収差の原因（地上/宇宙）：光学素子の面粗さ
  - ➔ 高コントラストに特化した波面測定・制御
  - ✓ 波面測定：科学観測用検出器で測定
  - ✓ 波面制御：一般的に可変形鏡 (DM) を用いて、恒星散乱光を抑制するように波面を制御
- **Speckle Area Nulling (SAN) 法**<sup>[1]</sup>
  - ✓ 少ない波面測定・制御回数で、惑星探査可能領域の形成が可能
  - ✓ 波面制御デバイスから検出器までの光伝播モデルが不要



コロナグラフあり



波面測定・制御あり

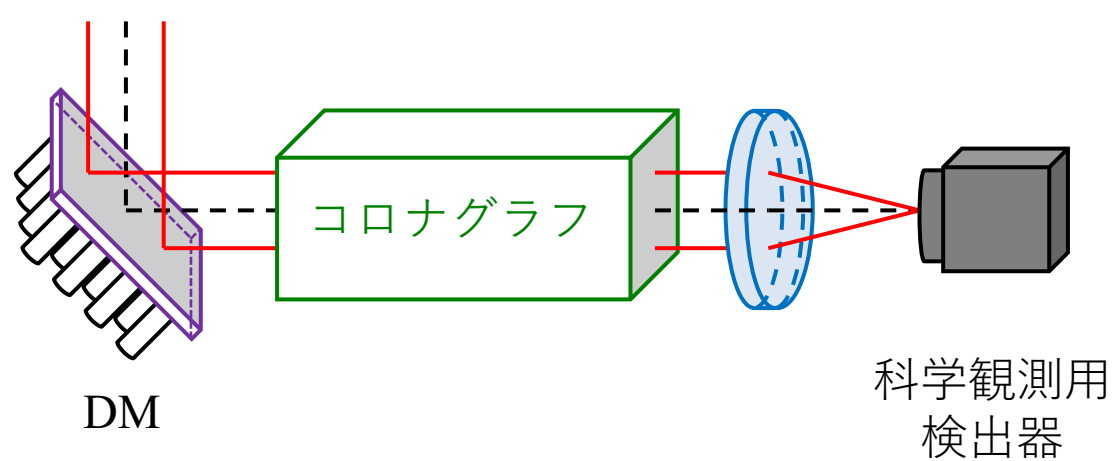


[1] M. Oya et al., *Opt. Rev.*, **22**, 736 (2015).

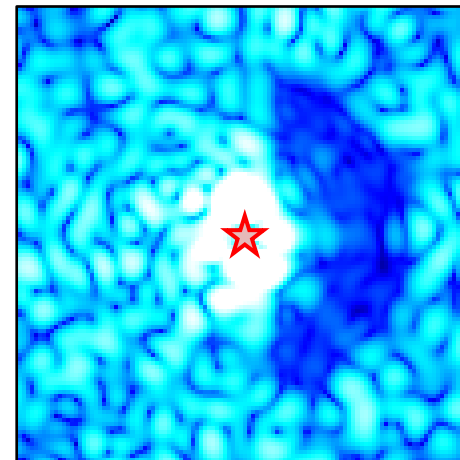
# 後処理（ポストプロセス）技術

## ◆その他の要因で残留する恒星光を抑制する

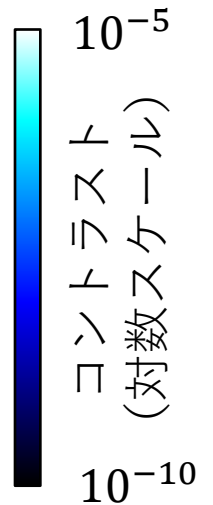
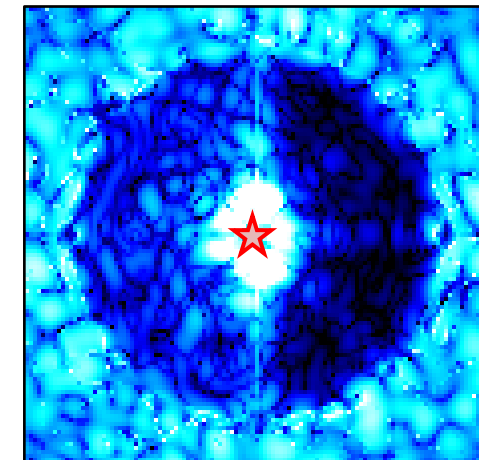
- 差分撮像を用いた後処理技術
- 恒星光が残留する要因
  - ✓ 例) 従来の波面測定・制御技術よりも高速に変動する波面収差
    - 地上：極限補償光学でも取り除けない波面収差
    - 宇宙：望遠鏡姿勢制御に伴う装置変形
- **Coherent Differential Imaging on Speckle Area Nulling (CDI-SAN) 法<sup>[1]</sup>**
  - ✓ 波面変動よりも高速に、5種類の波面変動と同期した焦点面強度測定を繰り返し実行
  - ✓ 得られた積算強度測定値を用いた**後処理により、残留恒星光のみを減算**



変動成分ありの積算強度



後処理あり



[1] J. Nishikawa, *Astrophys. J.*, **930**, 163 (2022).

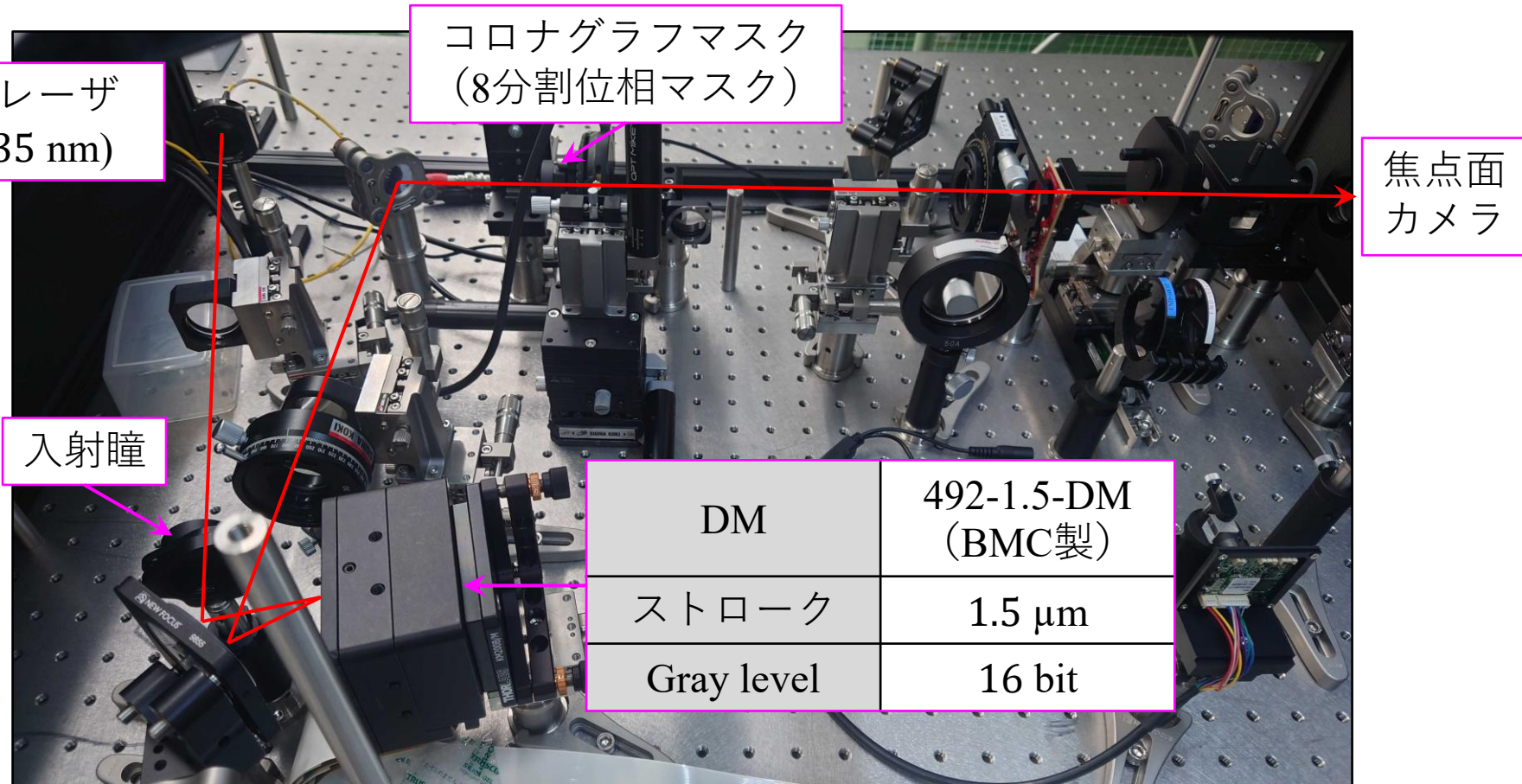
# 室内実験：SAN法、CDI-SAN法

## ◆国立天文台の高コントラスト観測テストベッド

- 開発棟3号館205号室のクリーンブース内に光学系を構築

実験光学系（導電プラダンボックス内）

実験系外観<sup>[1]</sup>



[1] K. Yoneta et al., *Proc. SPIE*, **12680**, 126800D (2023).

# 室内実験：SAN法、CDI-SAN法（PC制御）

## ◆SAN法、CDI-SAN法を組み合わせて、 $9.0 \times 10^{-8}$ のコントラストを達成

➤ SAN法：波面変動を与えずに実行

✓ ターゲット領域内コントラスト： $1.4 \times 10^{-5}$  →  $1.2 \times 10^{-7}$

➤ CI-SAN法：SAN実行後に、波面変動を与えて実行

✓ ターゲット領域内コントラスト： $2.7 \times 10^{-7}$  →  $9.0 \times 10^{-8}$

✓ 変動によって悪化したコントラストを、変動前のコントラストまで改善

※実験結果の画像は非公開

# 今後の展望

## ◆室内実験

- 現行光学系を用いた実験
  - ✓ コントラストの制限要因の究明
  - ✓ FPGAを用いた高速制御CDI-SAN法の実証
- 新規光学系の構築
  - ✓ **レンズ光学系**
    - 2つの波面制御デバイスによる波面測定・制御技術開発
  - ✓ **OAP光学系**
    - 広い波長域での波面測定・制御技術開発

## ◆望遠鏡実装

- **宇宙望遠鏡**
  - ✓ Roman望遠鏡/CGI：SAN, CDI-SAN法をそれぞれ**ゲスト波面制御技術のひとつとして提案中**  
→ **HWO**
- **地上望遠鏡**
  - ✓ せいめい望遠鏡/SEICA：FPGAを用いた高速波面測定・制御技術の実装を計画
  - ✓ すばる望遠鏡/SCExAO：既存の設備を用いた実装を計画  
→ **TMT/PSI**