

京大3.8m望遠鏡における高コントラスト惑星探査装置 (SEICA)

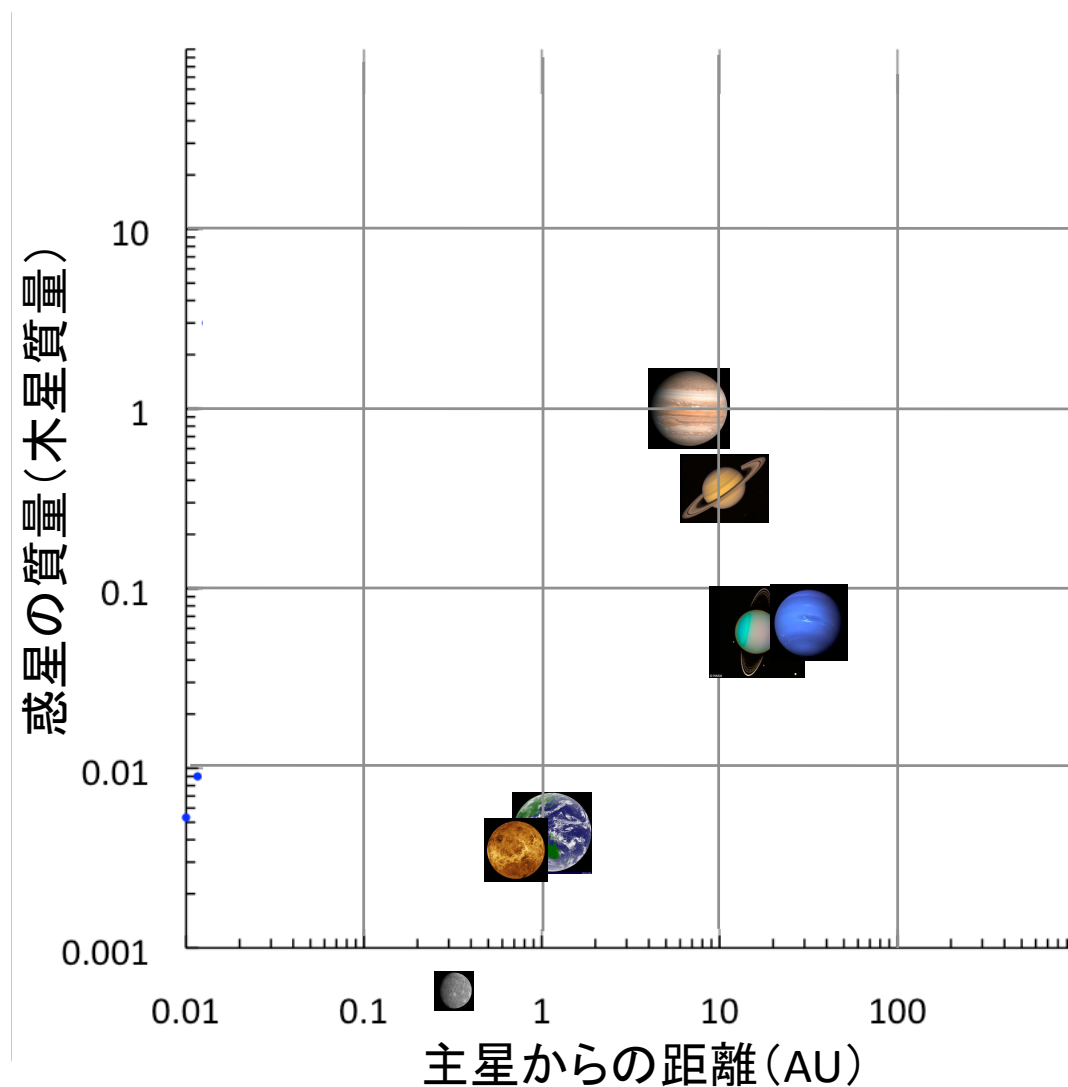
松尾太郎(京都大学)

内容

- SEICAの科学的意義
 - 2020年代の系外惑星研究と照らして
- 昨年度の岡山UMからの進捗
- エラーバジェットと予想性能

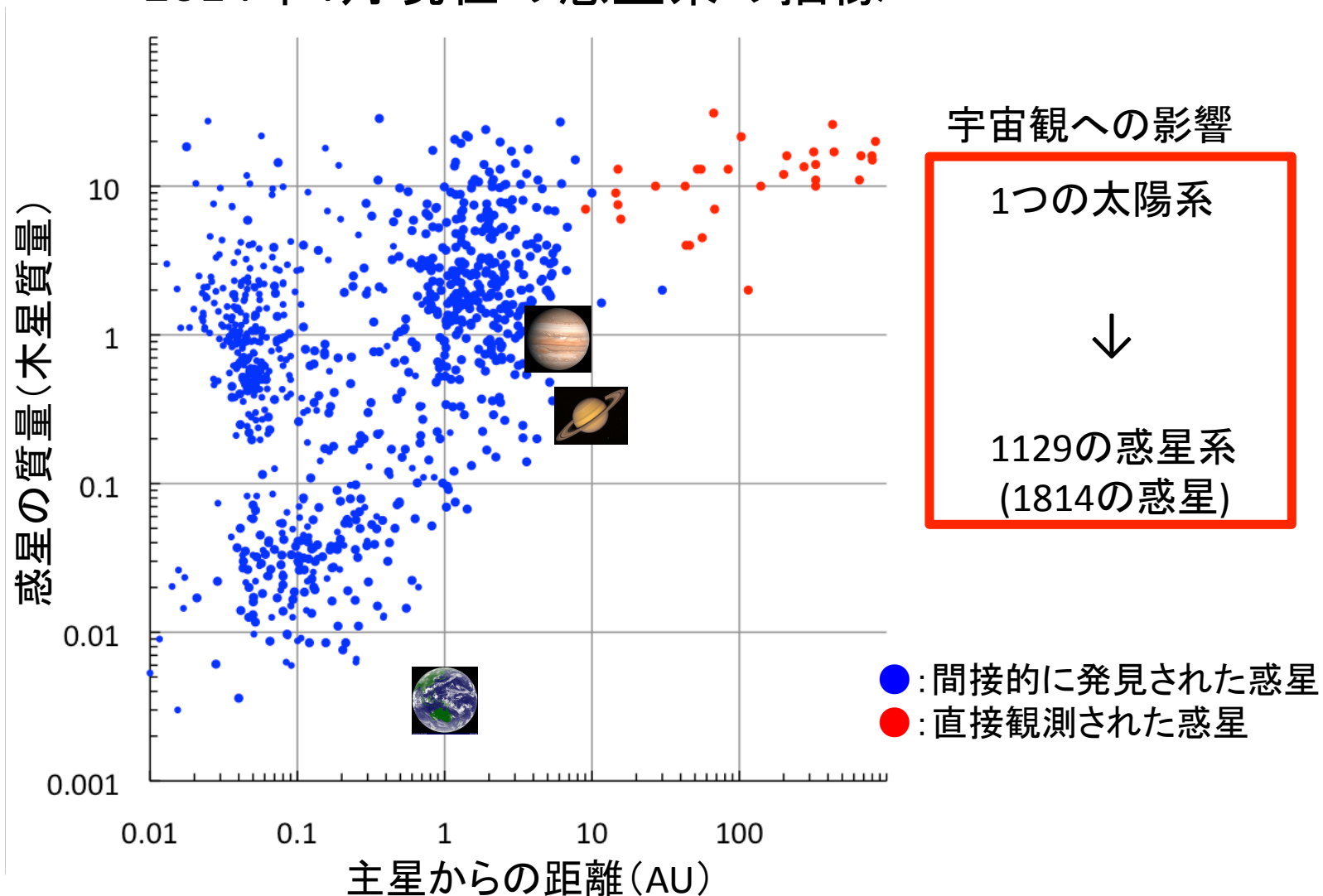
太陽系外惑星の科学的意義

1995年以前の惑星系の描像



太陽系外惑星の科学的意義

2014年4月現在の惑星系の描像



2020年代系外惑星科学の3本の柱

1. 太陽系を含めた多様な惑星系の起源・進化の理解
2. 惑星で起こる物理・化学現象の包括的な理解
3. 地球生命の居住可能性の理解と宇宙における生命現象の探査

2020年代系外惑星科学の3本の柱

1. 太陽系を含めた多様な惑星系の起源・進化の理解

太陽系惑星形成論 → 汎惑星形成論

2. 惑星で起こる物理・化学現象の包括的な理解

太陽系惑星科学 → 系外惑星学

3. 地球生命の居住可能性の理解と宇宙における生命現象の探査

地球生命 → 地球生命の相対化

(生命観の変革)

SEICAと2020年代系外惑星科学の関係

1. 太陽系を含めた多様な惑星系の起源・進化の理解

太陽系惑星形成論 → 汎惑星形成論

2. 惑星で起こる物理・化学現象の包括的な理解

太陽系惑星科学 → 系外惑星学

3. 地球生命の居住可能性の理解と宇宙における生命現象の探査

地球生命 → 地球生命の相対化

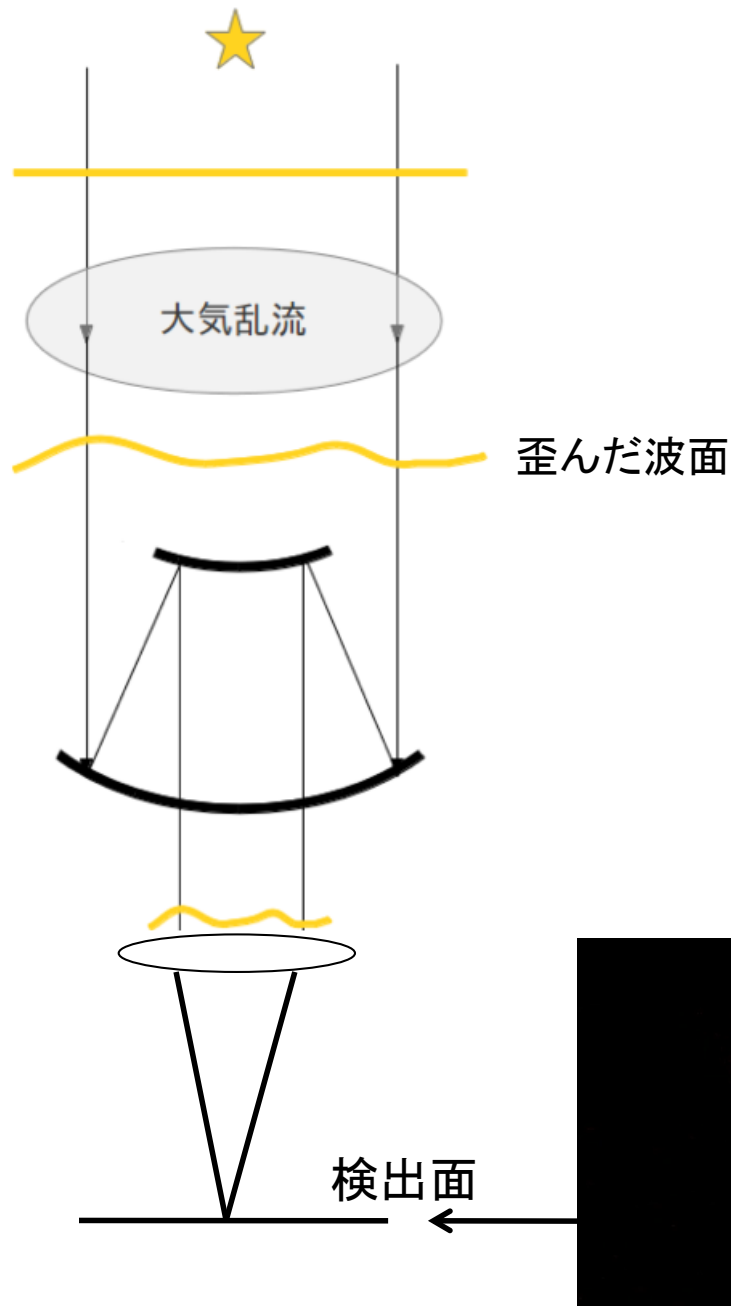
(生命観の変革)

SEICAだけでは、直接3に結びつかないが、それに至る重要なステップ。

内容

- SEICAの科学的意義
 - 2020年代の系外惑星研究と照らして
- 昨年度の岡山UMからの進捗
- エラーバジェットと予想性能

地上観測



温度・(圧力)ムラ ($<1^{\circ}\text{C}$)によって屈折率分布が生じ ($\sim 10^{-6}$)、位相の遅れ・進みが発生。

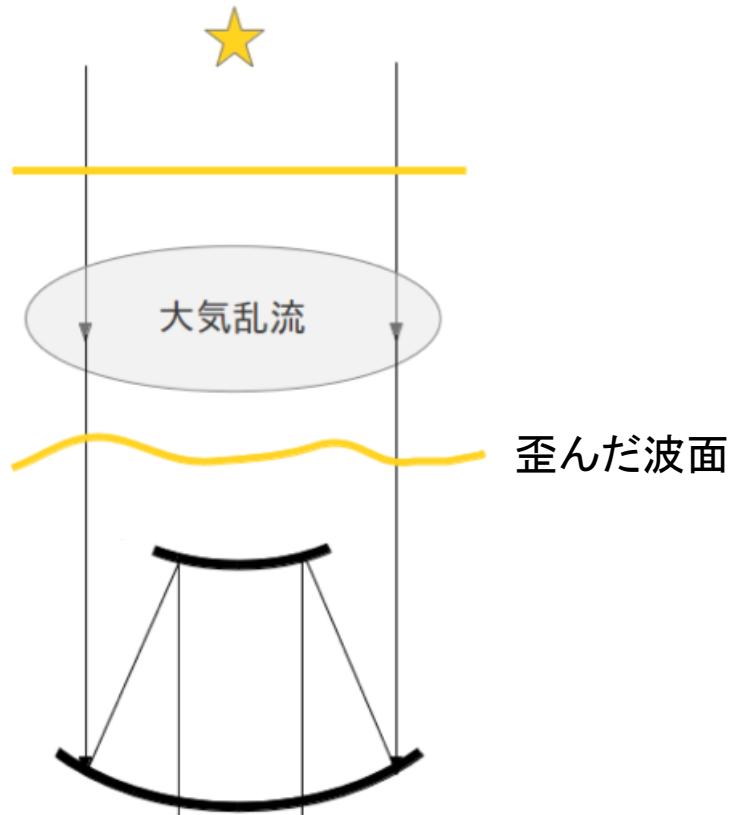
$$\delta n(\lambda) = \alpha(\lambda) \frac{P}{T^2} \delta T + \alpha(\lambda) \frac{1}{T} \delta P$$

大気乱流が及ぼす効果

- ①強度変動 (隣の光との干渉)
- ②到来方向の変動 (屈折率の変動)
- ③星像の広がり (高次の収差の形成)

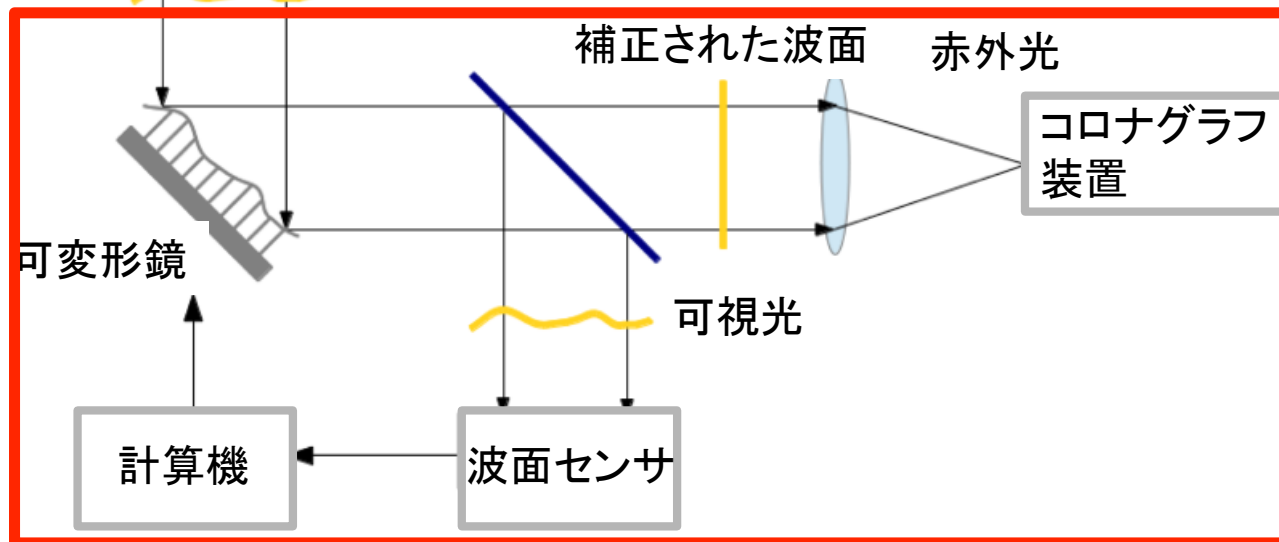
Large Binocular Telescope (LBT)
のOn-skyテスト (LBT press release)

補償光学装置



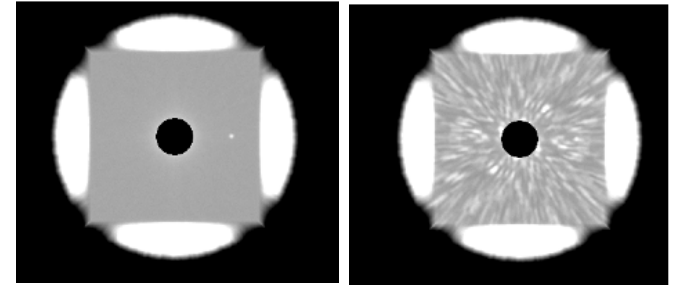
大気ゆらぎにより乱れた波面を計測・補償するシステム

波面計測 → 計算 → 波面補償

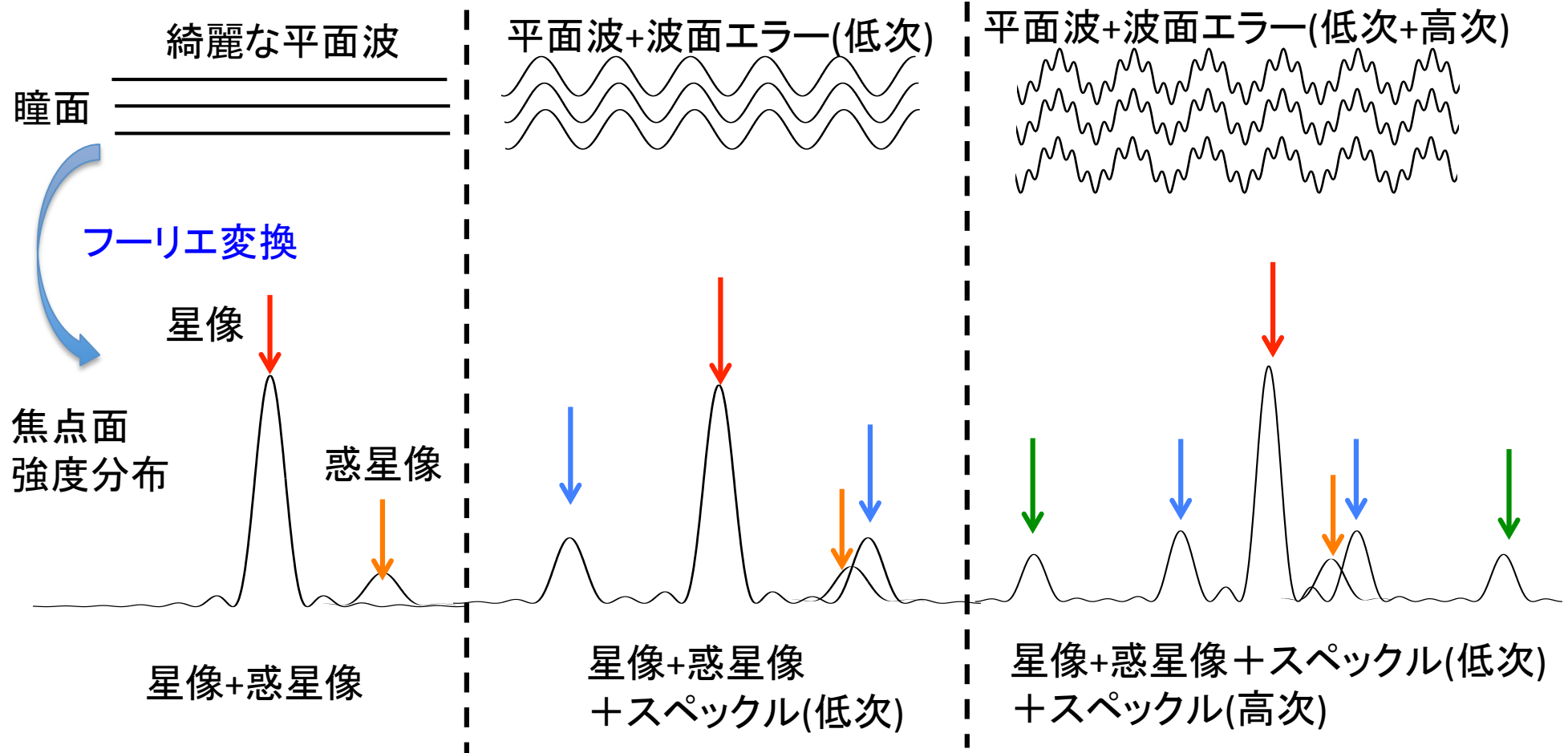


問題提起

- 平面波は綺麗なPSFを結像.
- 波面に僅かな歪みがあるとPSFと同じ形状の光を結像. → 散乱光として観測.
- 歪みの空間周波数で散乱光の結像位置が決定.



0nm (左)と4nm (右)の波面歪みがある場合の焦点面イメージのシミュレーション



前回の岡山UMからの進捗

- 地上における高コントラスト装置の設計指針の確立。
 - 補償光学系と高コントラスト光学系の関係性の理解
 - 波面計測と波面補償の理解
- 実験・製作の進捗：
 - 低次波面の補償光学実験の成功
 - 高次波面センサーの設計・要素検証

SEICA 仕様

仕様

Item	Baseline value	Goal value
PSF contrast (I<6mag)@ IWA in H	1×10^{-3}	1×10^{-4}
1-hour 5-sigma detection contrast (I<6mag) at IWA in H	1×10^{-6}	1×10^{-7}
Inner working angle (IWA) in H	0".2	0".1
Maximum correction radius in H	1".3	1".3
Wavelength range	0.9-1.8 μm	0.9-2.5 μm
Spectral resolution	5 (only photometry)	100
Sensitivity (1 hour, 5-sigma)	H=22.5 mag.	H=24 mag.

波面誤差

	AO residual WFE in baseline design	AO residual WFE in goal design
Low spatial frequency (< 2 cycles / pupil)	20 nm	27 nm
Middle spatial frequency	15 nm	5 nm
High spatial frequency (> 12 cycles / pupil)	80 nm	27 nm

高コントラスト用補償光学系 システム設計

- 検出器に入射する波面誤差

λ : 観測波長 (cm)
 h : 歪みの大きさ (cm)
 f : 空間周波数

$$h_{total}(f) = \underbrace{h_{unfitting}(f) + h_{delay}(f) + h_{sensor}(f) + h_{chromatism}(f)} + \dots$$

異なる空間周波数の依存性

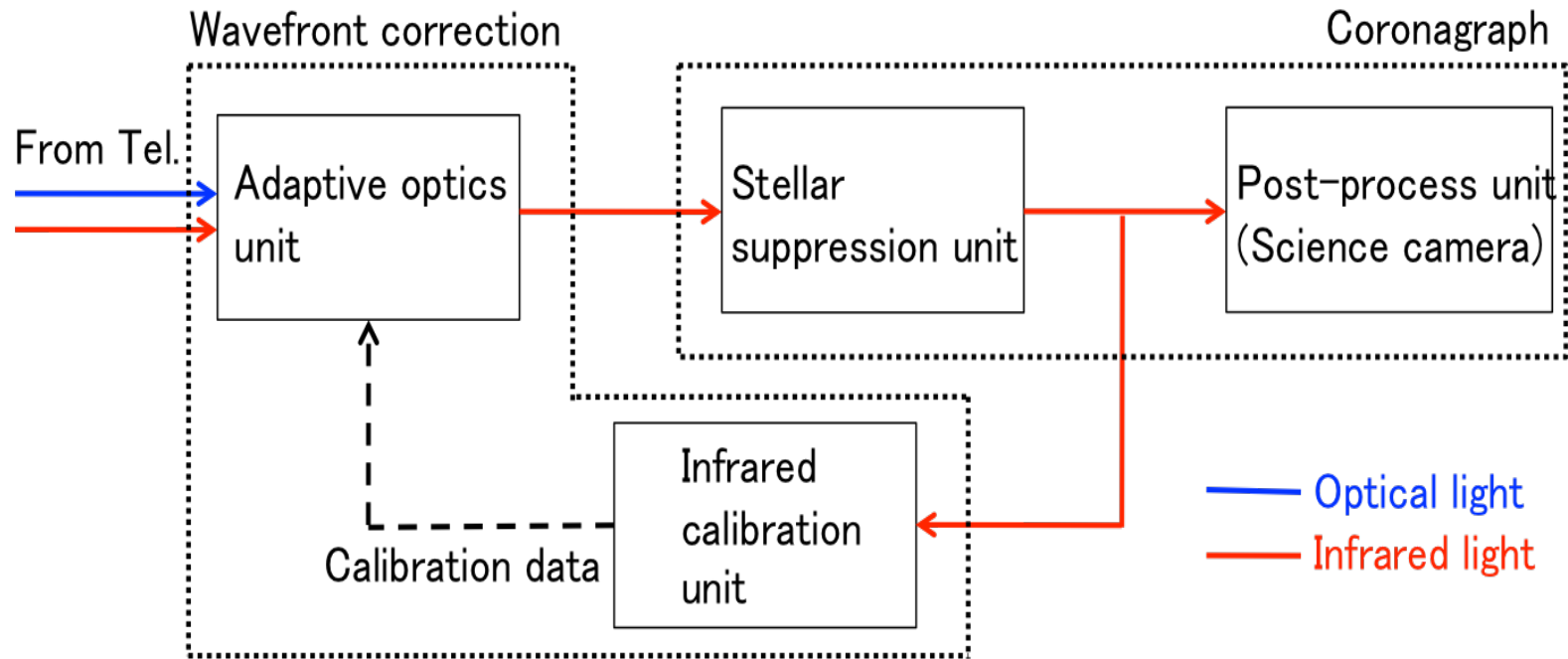
- コントラスト

$$Contrast(f\lambda) \propto \left(\frac{\pi h_{tot}(f)}{\lambda} \right)^2$$

- 波面誤差の最小化のための方策:
 - 空間的に小さいスケールの歪みまで補償.
 - 計測・補償時間を最小化
 - 高精度計測が可能な位相センサーの採用

SEICA 概念図

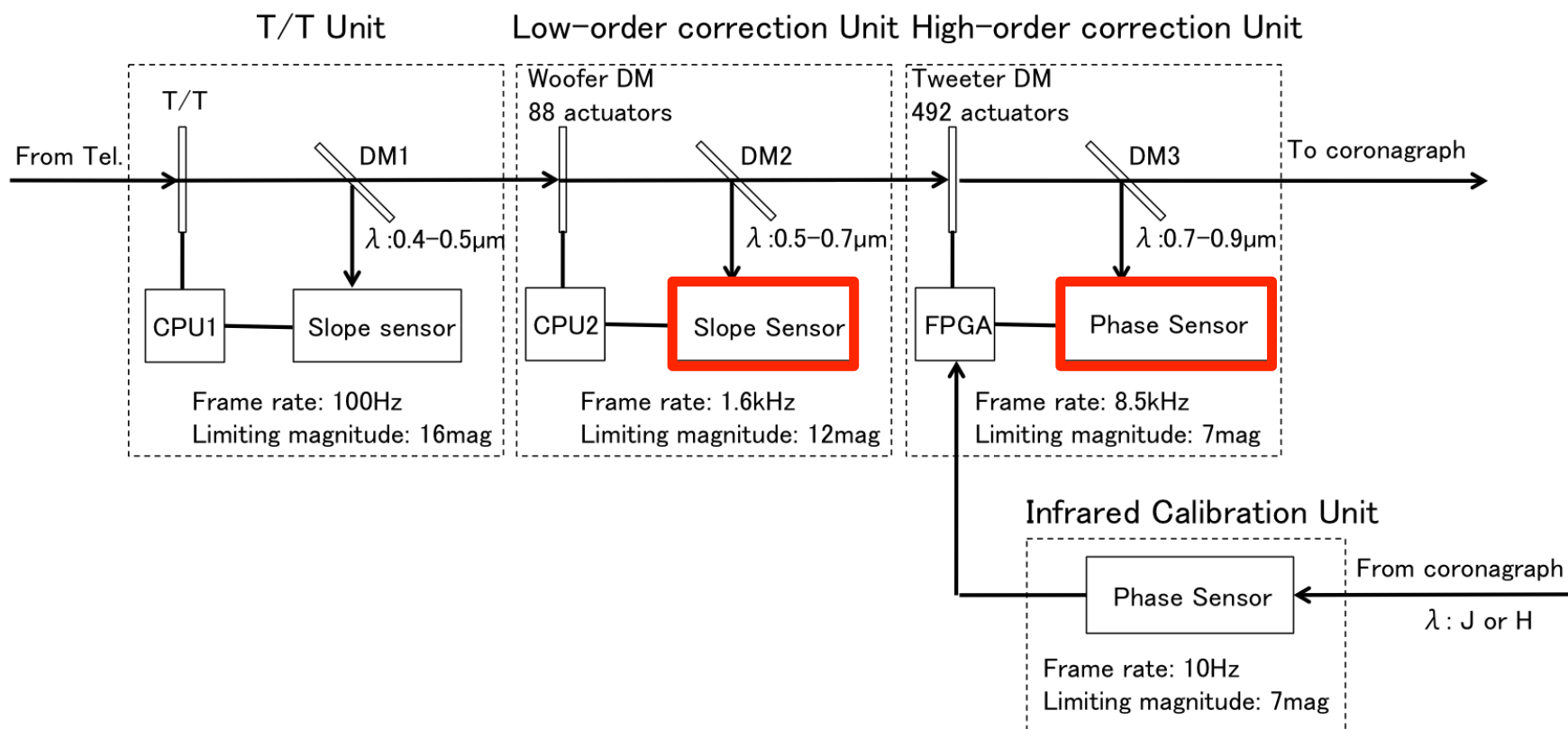
- 地球大気および光学系で発生する波面誤差を補正。
 - コロナグラフまでの波面誤差を計測・補正 (AOの役割)。
 - ポストプロセスで残留波面誤差を極限まで補正 (コロナグラフの役割)。



AO 概念図

● 3段階で計測・補正

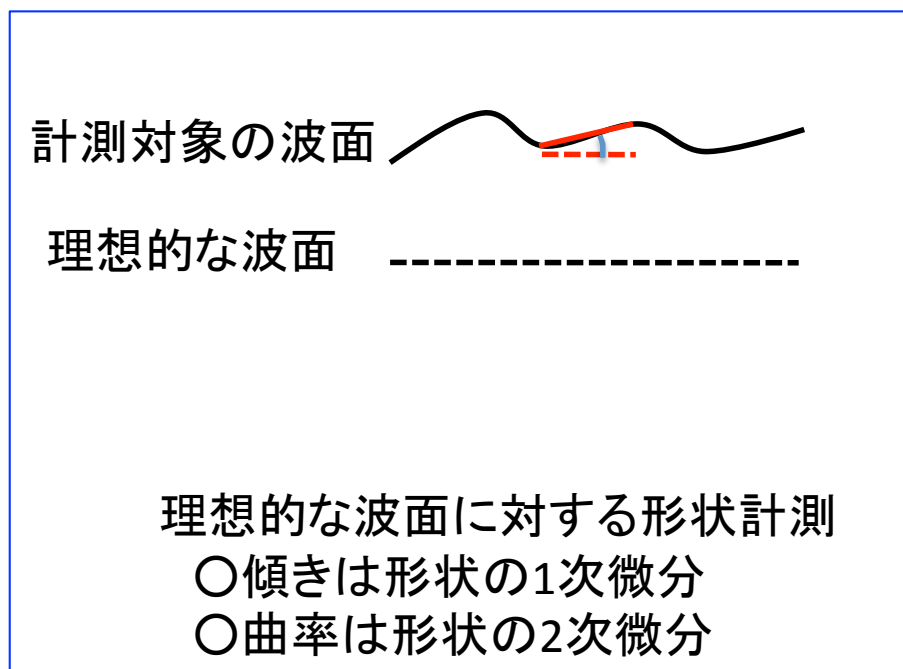
- T/T センサーは広視野 ($3' \times 3'$) を活かしてAGを兼ねる。
- 高次になるにつれて、視野の低減、計測・補正精度の向上、速度の向上。



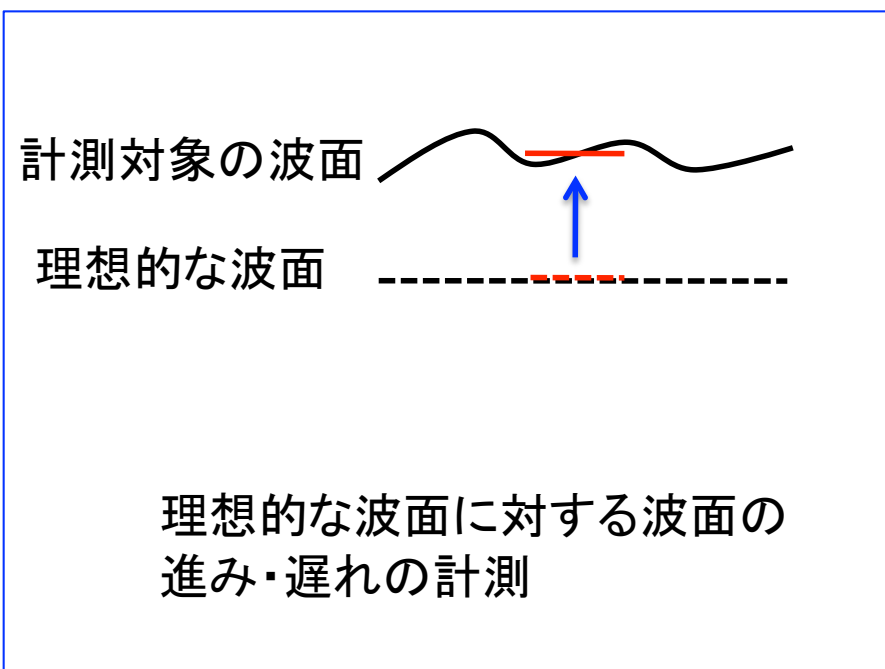
補償光学の波面センサ

- 波面センサは二つの方式に大別：
 - 形状計測：波面の歪みを形状として計測 (例. SHWFS, CWFS etc..)
 - 位相計測：波面の歪みを位相として計測 (例. Pyramid, PDI, SEICAセンサー etc..)

形状計測

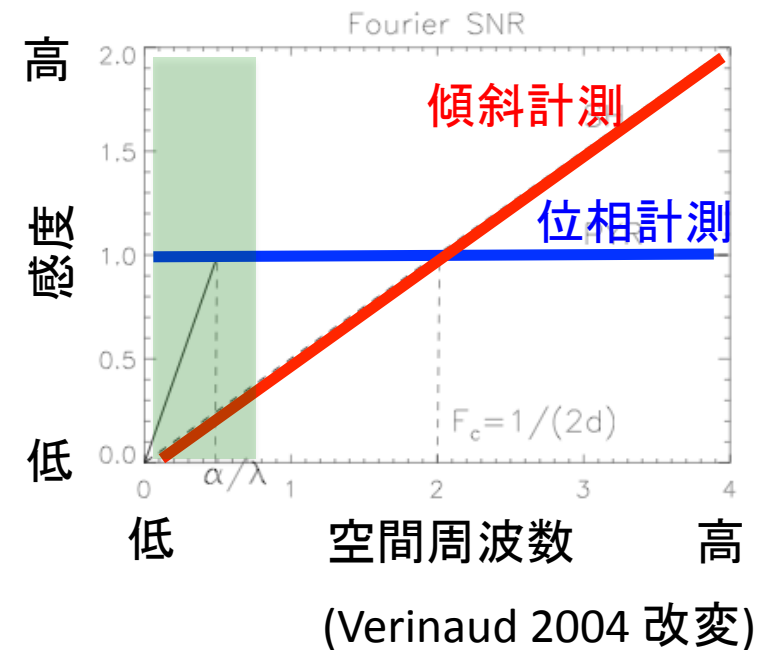


位相計測



形状計測 vs. 位相計測

- 空間周波数ごとのセンサ感度
 - **形状センサ**: 位相導出に1回(傾斜)、2回(曲率)の積分。
 - 感度は低空間周波数(Tip/Tilt)で悪化。
 - **位相センサ**: ダイレクトに位相を導出。
 - 感度は空間周波数に無依存。
- ダイナミックレンジ
 - **形状センサ**: 高いダイナミックレンジ
 - **位相センサ**: 計測波長の1波長程度



	ダイナミックレンジ	低空間周波数の感度
形状計測	$\gg \lambda$	×
位相計測	$\sim 1\lambda$	○

高次波面センサー：方式

方式:

- 同時に4つの干渉縞を計測

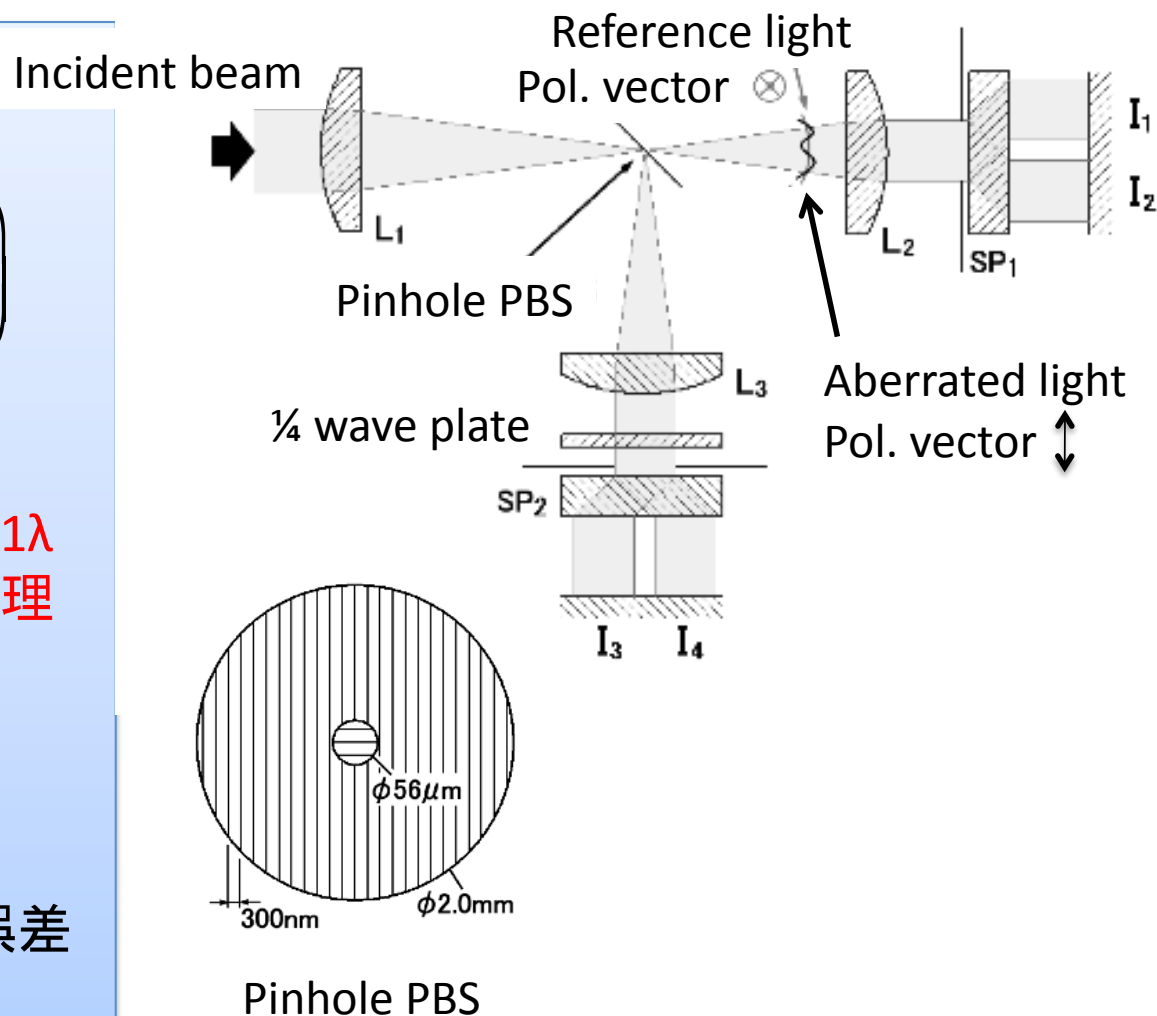
$$\varphi = \arctan\left(\frac{I_0 - I_\pi}{I_{\pi/2} - I_{-\pi/2}}\right)$$

利点:

- エネルギー損失 ~ 0%.
- 計測範囲: 隣り合う測定点が 1λ 以下であれば、原理的に無限大。

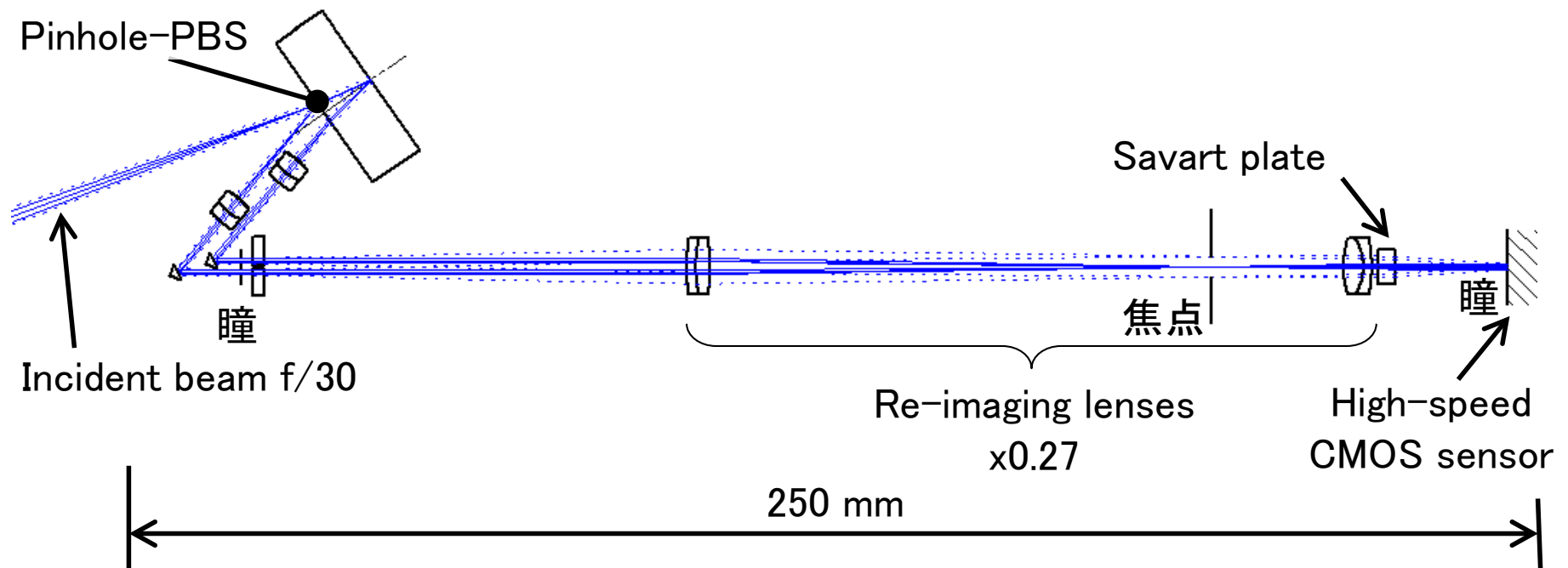
← 同じ位相測定タイプの non-modulated pyramid は 0.5λ .

- 光学系を工夫する事で振幅誤差も同時に計測可能.



光学系デザイン

- サイズ: 250 x 100 mm
- 2回の瞳再結像光学系.
(PBS以後の光学系収差は測定誤差にならない。
被検光と参照光は同じ光路のため。)
- 計測誤差 (キャリブレーションなし): ~ 20nm



補償シミュレーション

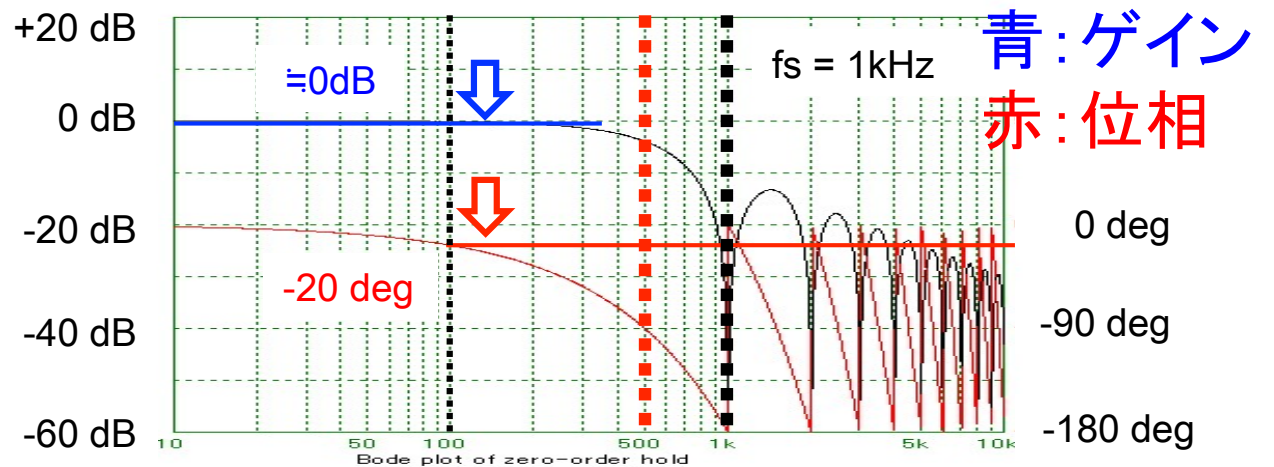
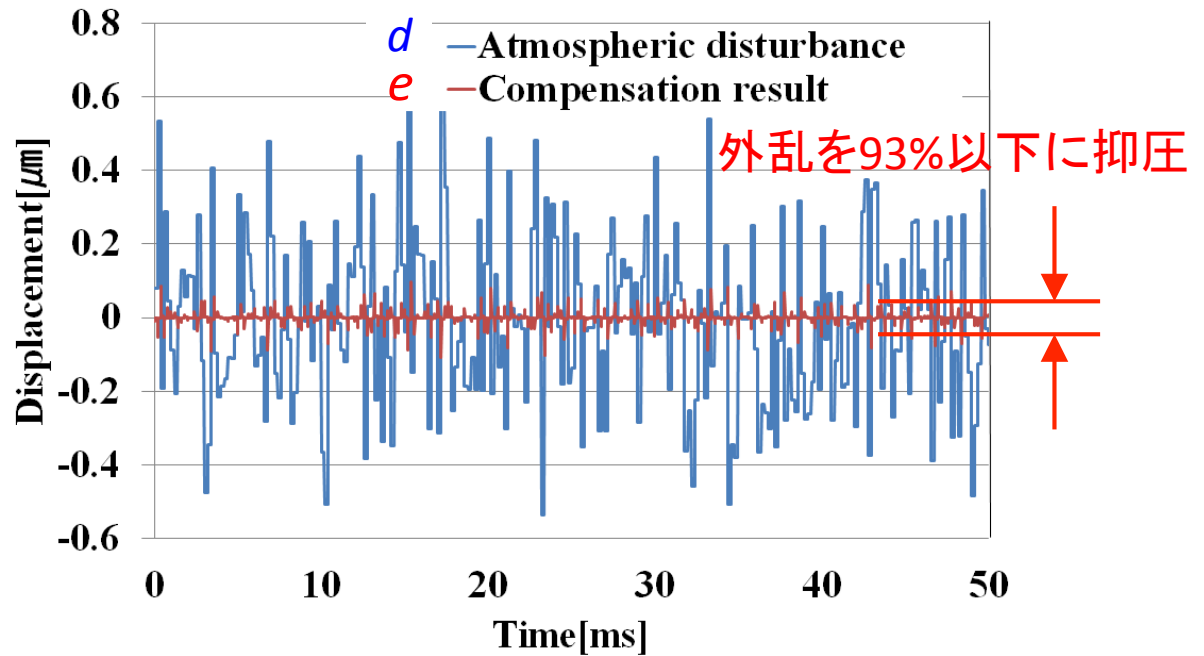
- 補償デバイスのシステム同定試験

- デバイスの線形性
- 過渡特性

- 補償シミュレーション

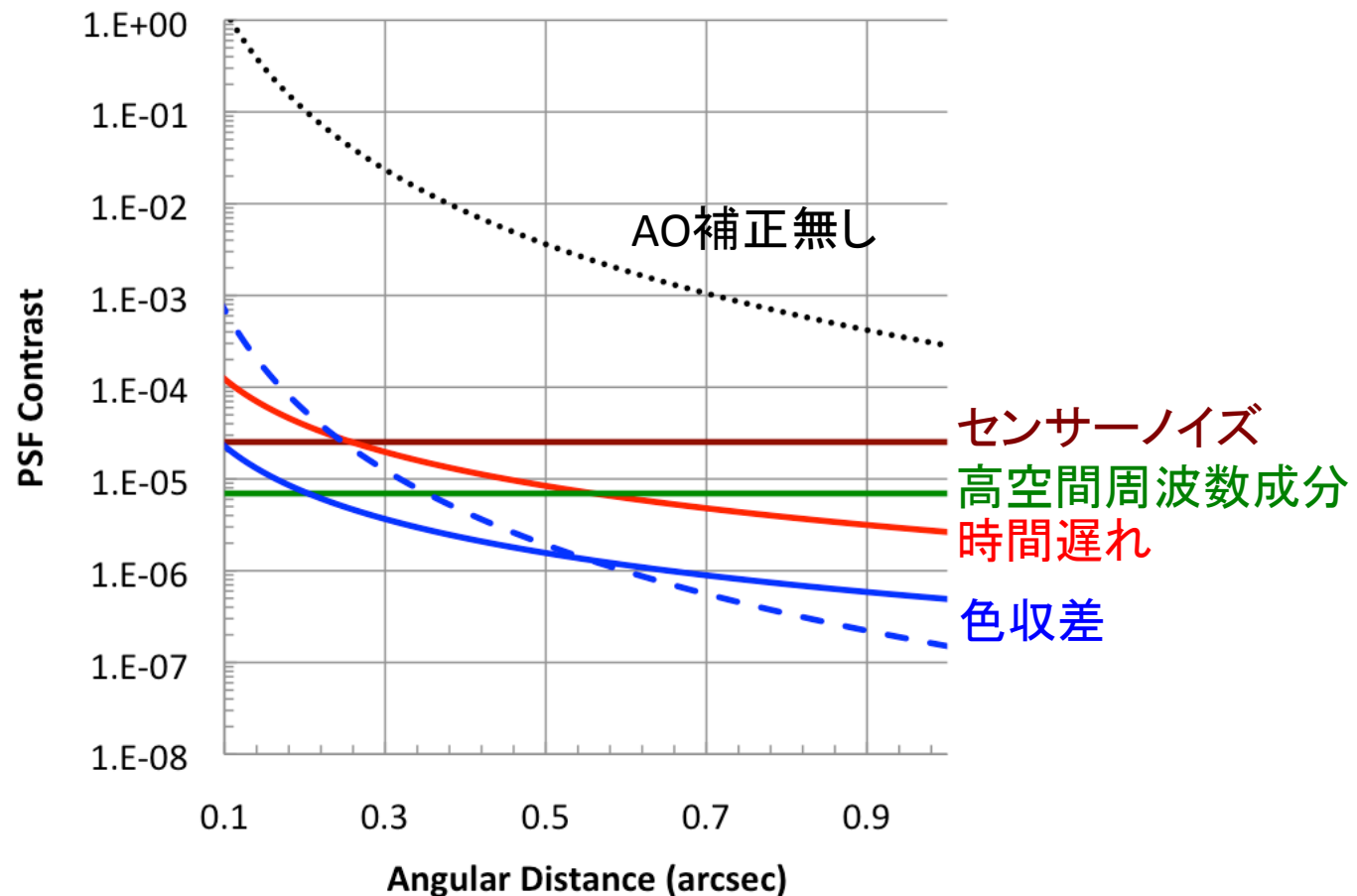
- 大気を入力、
- 1kHzのサンプリング

→ 100Hzで外乱を93%以下に抑圧



PSFコントラスト

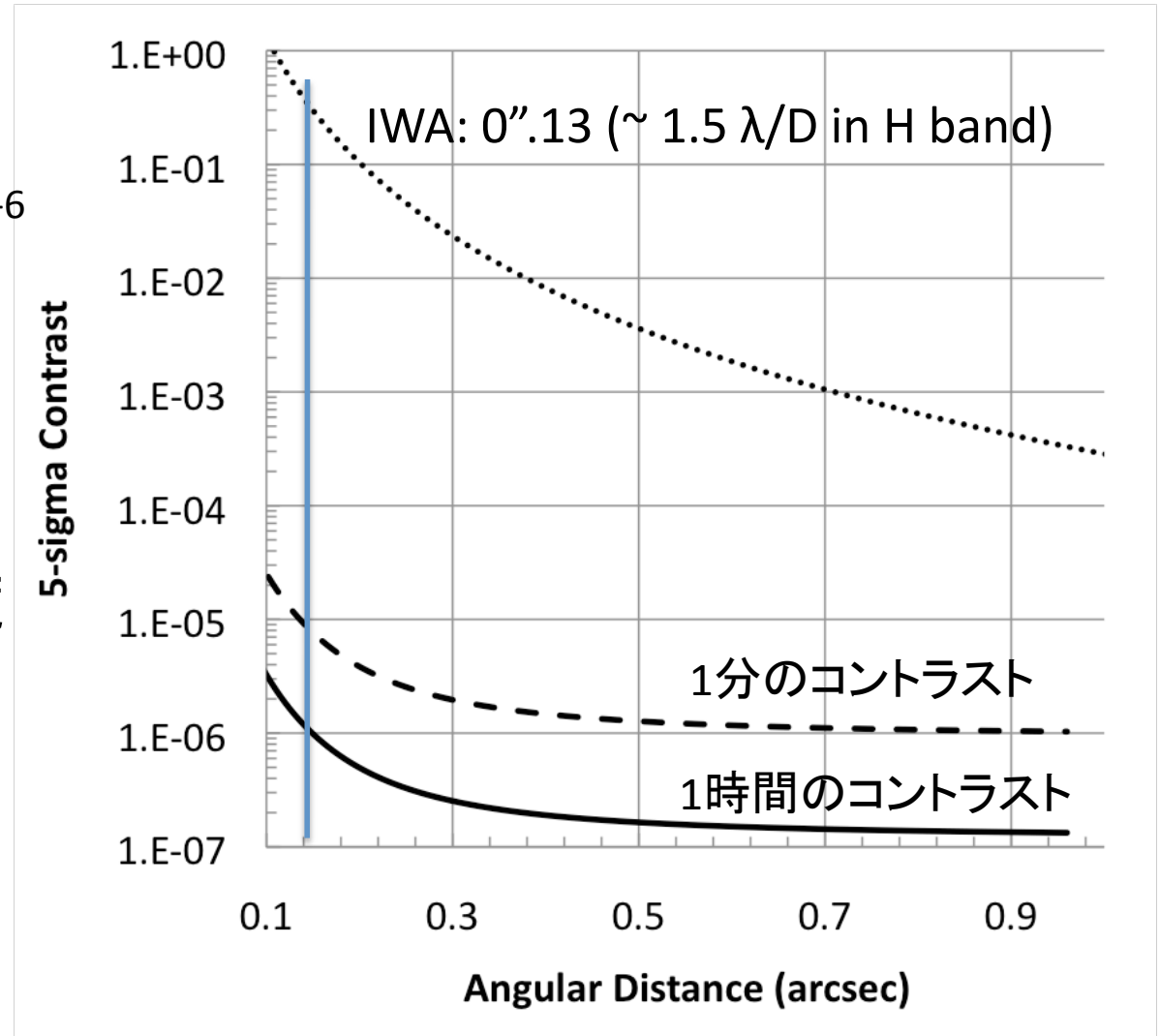
- エラーのバランスが同程度になるように設計。
- (補正できない色収差)で内側のコントラストが制限。



検出コントラスト

IWAで1時間コントラスト: 10^{-6}
→ 要求仕様を満たす

SEICAの1分積分とSEEDSの
1時間積分の性能が同程度



まとめ

- SEICAは地球型系外惑星のサイエンスに至重要なステップである。
- 地上高コントラスト装置の設計方針について目処をつけた。
- 要求仕様である0.1秒角で 10^{-6} 乗コントラストを達成できる見通し。

