

# 京都3.8m望遠鏡における 極限補償光学の開発

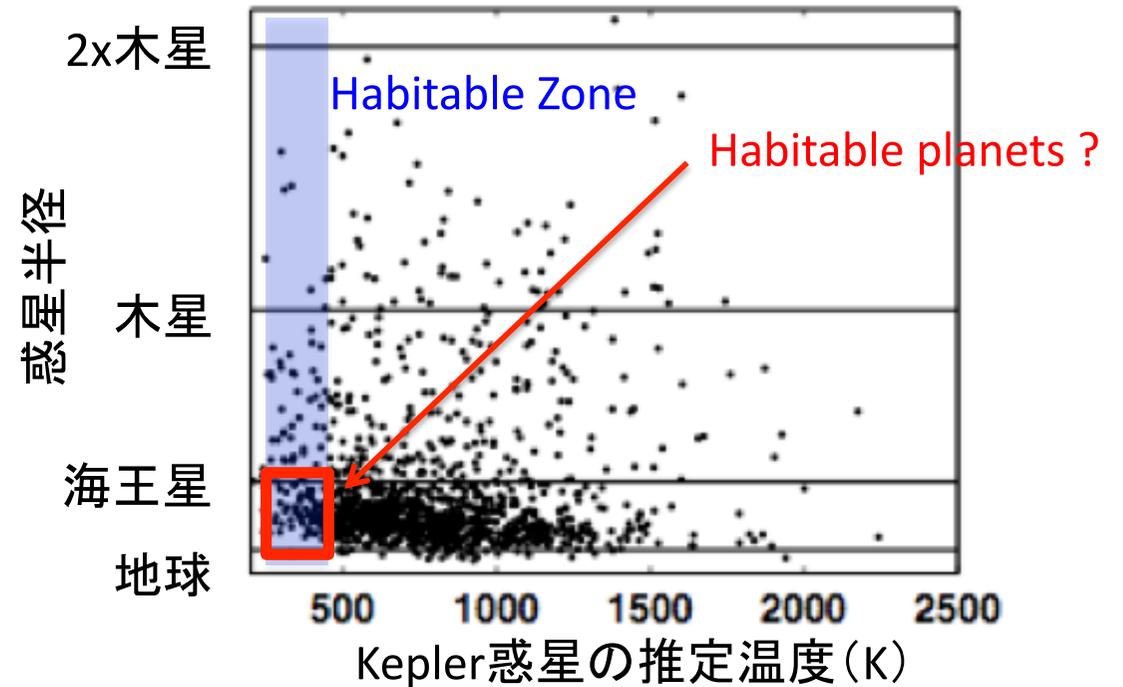
松尾太郎、SEITメンバ他

# 検出からキャラクター化レーションへ

- Kepler衛星により惑星表層に「液体の水」を有する可能性のある惑星が数十個発見されている。

→地球型惑星は豊富に存在

→ 将来の系外惑星研究における究極的目標は、「**地球型惑星のキャラクター化レーション**」。



Kepler衛星によって発見された惑星候補の半径と推定温度  
(Boroucki et al. 2011)

# 惑星を直接「見る」ことで得られるもの

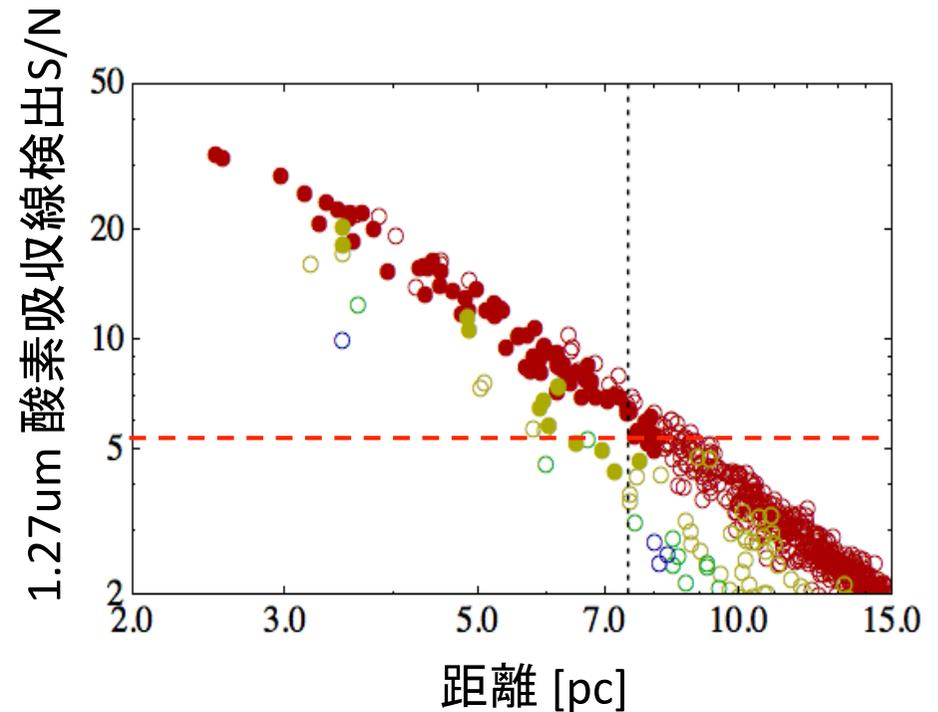
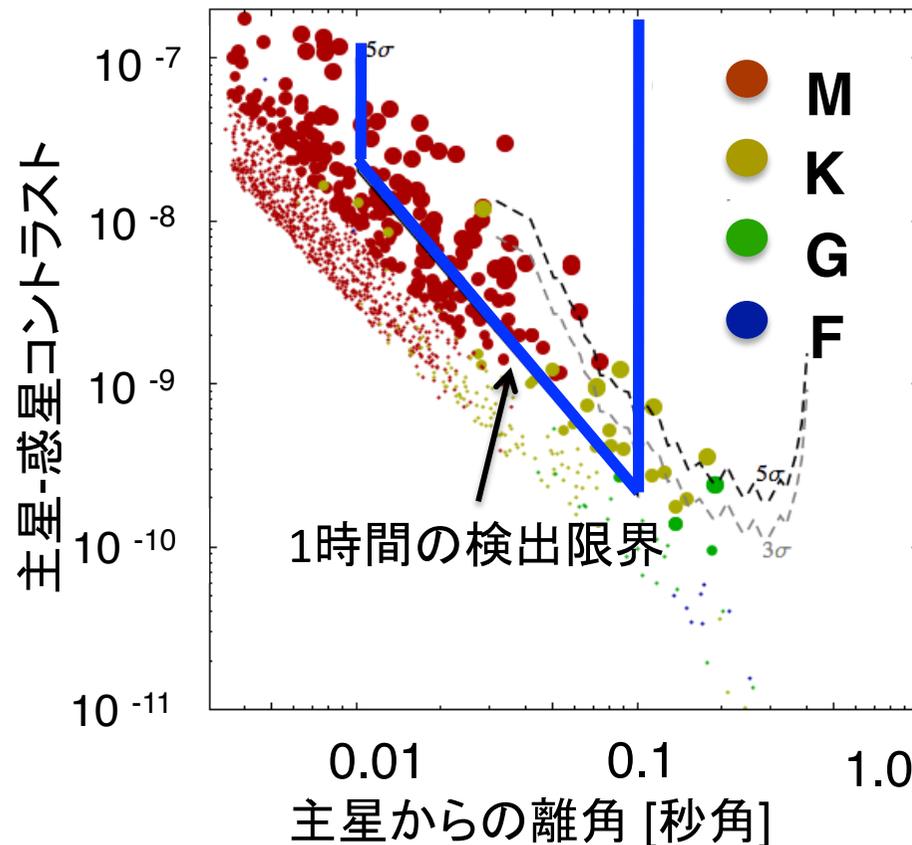
- 惑星からの光の観測で惑星の大気や表層を探ることができる。
- 惑星大気の組成
  - 環境 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ )、
  - 生命の痕跡 (酸素)
- 惑星の表層
  - 表層の組成 (植物、雲、海、陸)
- 温度



かぐやから見た地球 (Jaxaより)

# TMTで地球型惑星を狙えるか？

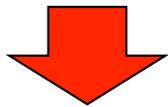
- TMTは地球型惑星探査の直接観測できる最初の機会である。
- K、M型星の周りの惑星の大気分光から酸素の吸収線の検出が可能。



5時間積分での1.27um酸素吸収線検出のS/N

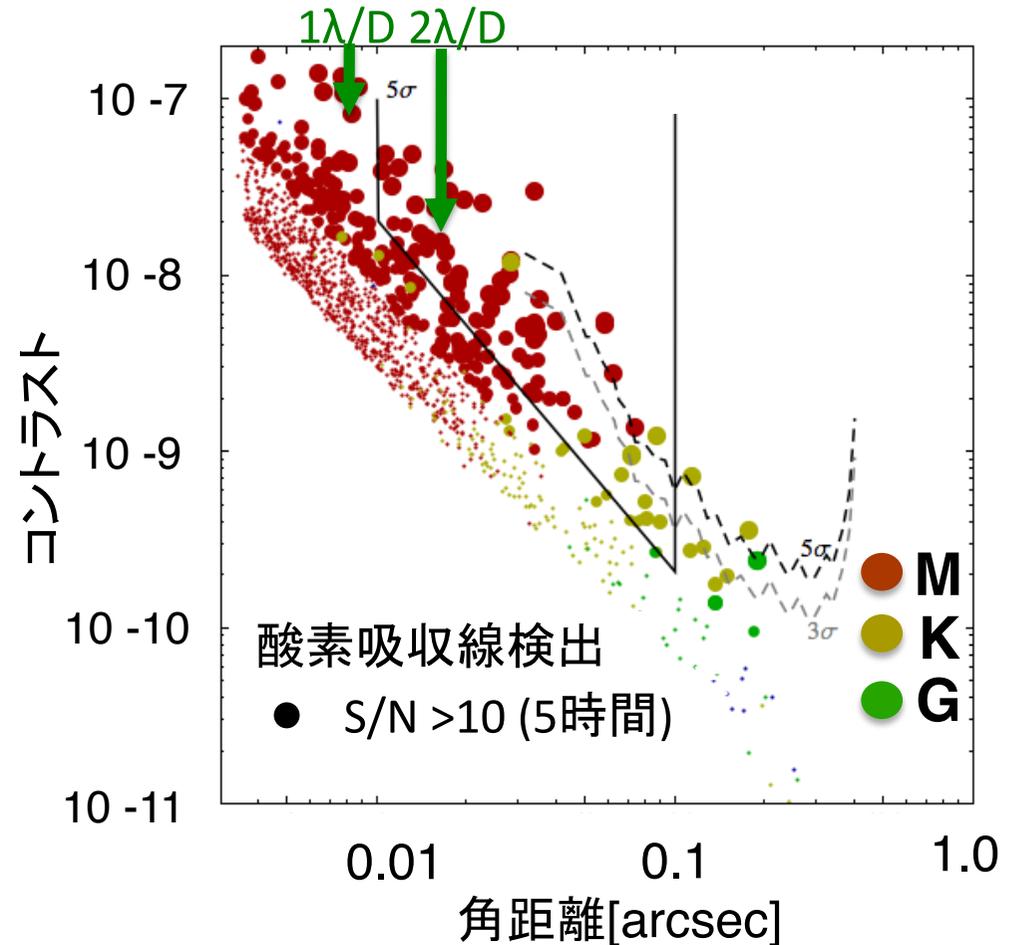
# 仕様要求

- 主要観測バンドJでの  
要求コントラスト( $5\sigma$ )  
 $8 \times 10^{-8}$  乗 @  $1\lambda/D$  (8mas)  
 $2 \times 10^{-8}$  乗 @  $2\lambda/D$  (16mas)  
→ 回折限界での高いコントラスト



新しい要素開発が必須

ハワイから観測できる近傍星周りの  
Habitable Zoneの地球型惑星を想定



地球型惑星発見のために必要な角距離・コントラスト  
Kawahara et al. (2012); Crossfield (2013)

# 実現までのシナリオ

2012-2014

2016-2019

2019-

実験室 → 京大3.8m望遠鏡 → TMT

目標: 2025年のファーストライトを目指す

なぜ京大3.8m望遠鏡か？

## 1. 分割式望遠鏡

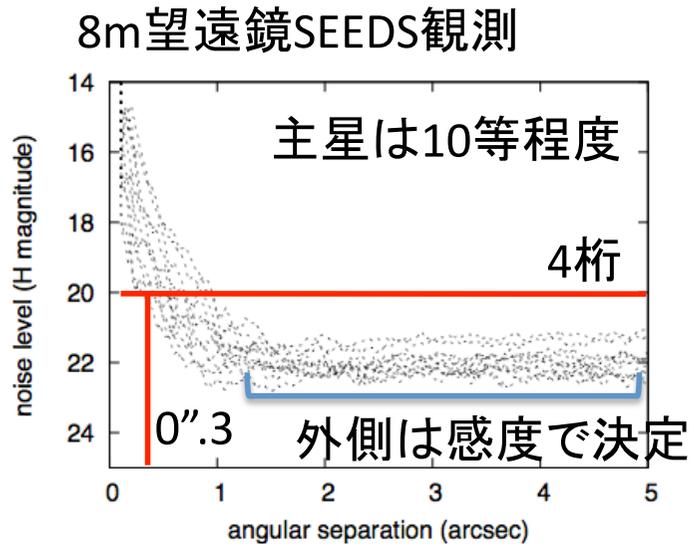
分割式望遠鏡での世界初の超高コントラストの実証。

## 2. 望遠鏡時間

新しい要素技術を有する装置立ち上げには十分な時間が必要。

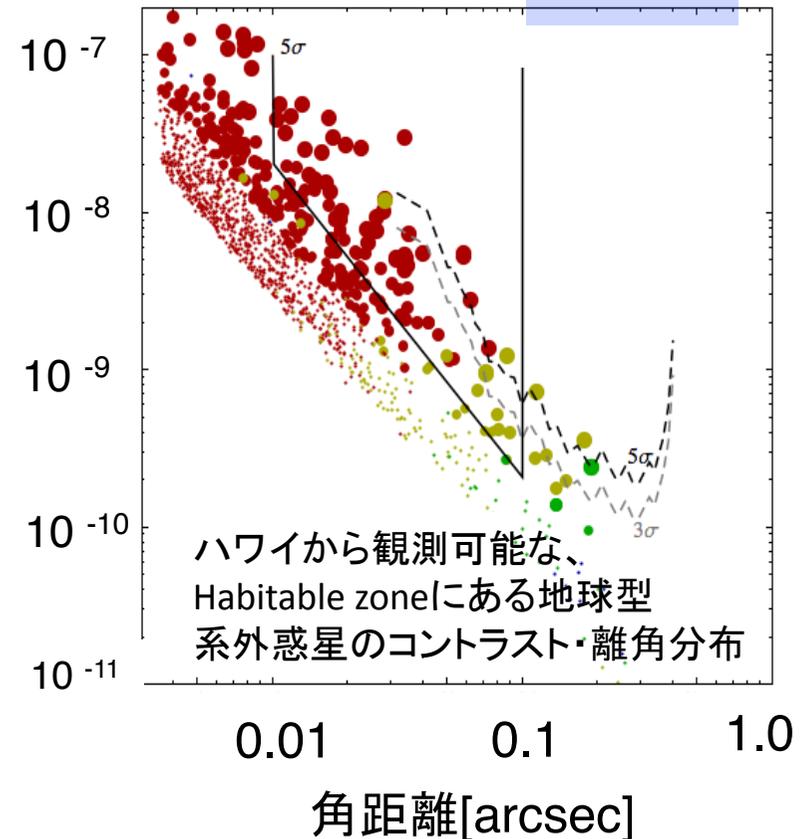
# 現AOを30m望遠鏡へ適用すると...

30m望遠鏡版  
AO188/HiCIAO



外挿  
(外挿の仕方は後ほど)

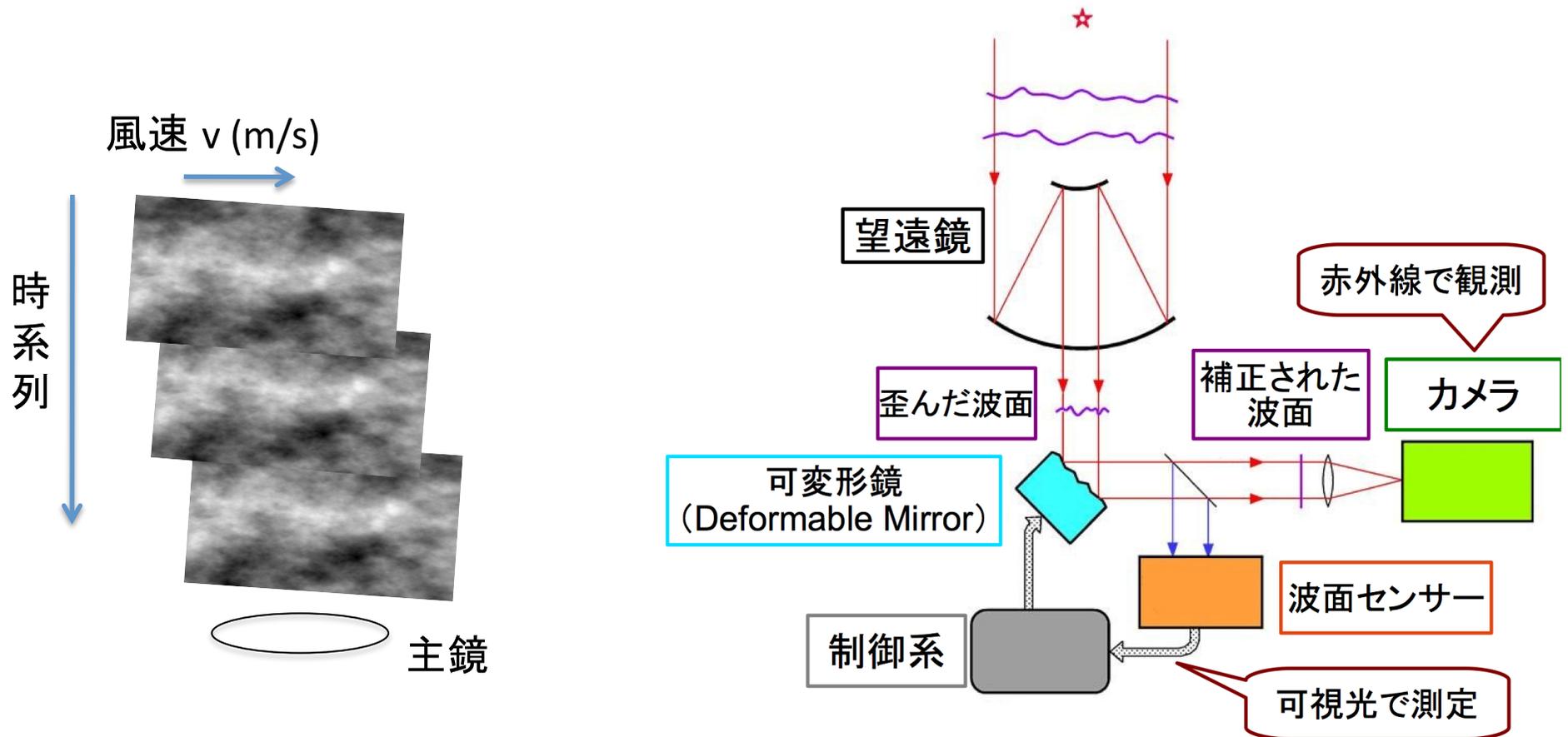
ト  
コ  
ハ  
ス  
ト  
コ



様々な恒星周りでの  
AO188/HiCIAOの検出限界 ( $1\sigma$ )  
(山本他 2013)

地球型系外惑星の直接観測は難しい...

# 現AOは何が問題か？



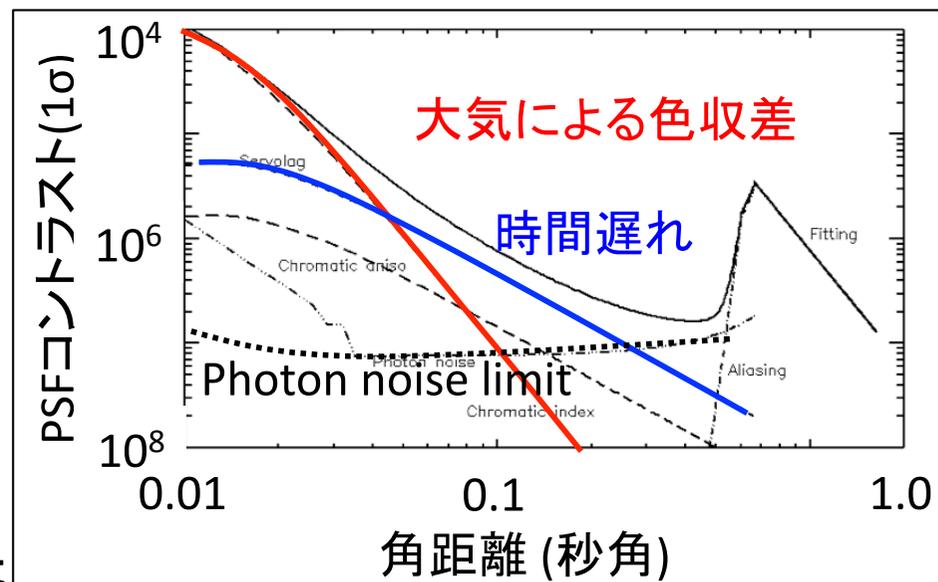
補償光学系の概念図

- 波面計測と補償のタイミングのずれ
- 計測波長と観測波長のずれ

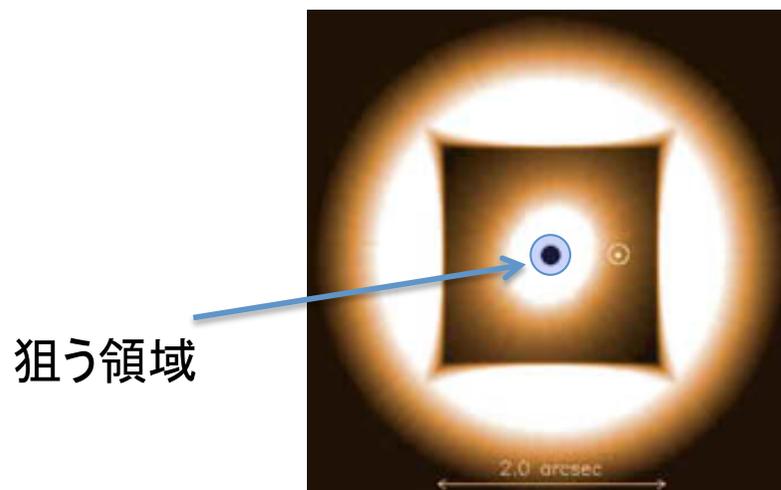
# 装置設計

- 主星からの散乱光の要因は、
    - 制御の時間遅れ
    - 色収差
- (補償光学系のセンサ波長は可視光  
観測波長は近赤外線)

- 内側の惑星探査に特化した  
新技術が必要！
- 鍵は、
  - 「計測・補償の**高速化**」、
  - 「**イメージング波長**での計測・補償」



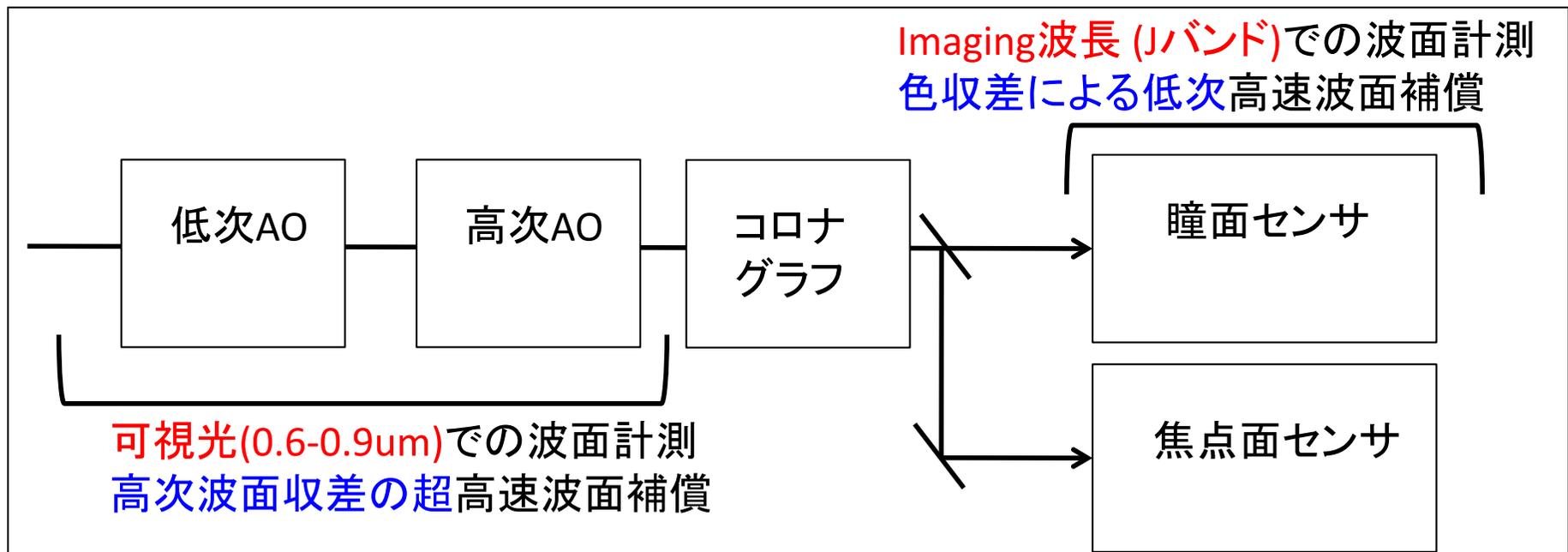
大気補償光学+コロナグラフ後のコントラスト  
(e.g., Verinaud+ 2008; Kasper+ SPIE 2012)



GPIのシミュレーション図  
<http://planetimager.org>

# 装置設計

環境(恒温槽、除振台)



低次AO: 低次(空間スケールの大きい)の波面エラーを補償するシステム  
高次AO: 高次(空間スケールの小さい)の波面エラーを補償するシステム

# 各項目の仕様要求

- 仕様要求:  $4 \times 10^{-6}$ 乗 @  $1\lambda/D$   
 $1 \times 10^{-6}$ 乗 @  $2\lambda/D$

項目	仕様要求
低次波面センサ・補償	1kHzサンプリング => 波面残差 200nm (S~ 0.3@J)
高次波面センサ・補償	5kHzサンプリング => 波面残差 30nm (S~ 0.9@J)
コロナグラフ	コントラスト $10^{-6}$ 乗@ $1\lambda/D$
瞳再配置	ポストプロセス $10^{-6}$ 乗
焦点面計測	リアルタイム補償 $10^{-6}$ 乗
恒温槽	1時間あたりの温度揺らぎ 10mK

# 2012 岡山UM

	低次 AO 波面 センサ	低次 AO 波面 補償	高次 AO 波面 センサ	高次 AO 波面 補償	コロナクラフ	腫 センサ	焦点面 センサ	環境 (恒温槽・除振)
調査・仕様	■	■	■	■			■	■
概念設計						■		
要素検証								
仕様検証					■			
PDR	■	■	■	■	■	■	■	■
詳細設計 実機製作								

調査・仕様:

方式の調査、仕様要求設定

概念設計:

方式の概念設計

要素検証:

数値計算・実験により方式の  
要素検証

仕様検証:

要求仕様に対する方式の  
検証

PDR:

外部委員による評価

← 仕様要求を満たせば  
PDRへ進む。

← PDRをクリアすれば  
実機へ搭載。

# プロジェクト進行

	環境(恒温槽・除振)										
	焦点面センサ										
	腫センサ										
	コロナクラフ										
	高次 AO波面補償										
	高次 AO波面センサ										
	低次 AO波面補償										
	低次 AO波面センサ										
調査・仕様											
概念設計											
要素検証											
仕様検証											
PDR											
詳細設計											
実機製作											

# 体制

- 日本からは25名の研究者・大学院生が参加。
- アメリカの高コントラストグループと共同提案で合意。2016年にTMTへ提案書を提出。
- 技術的交流の活発化。

TMT 高コントラスト Working Group (名前は検討中)

提案代表者: 松尾太郎

サイエンスWG

河原創  
(東京大学)

極限補償光学

Bruce Macintosh  
(スタンフォード)

コロナグラフ

小谷隆行  
(国立天文台)

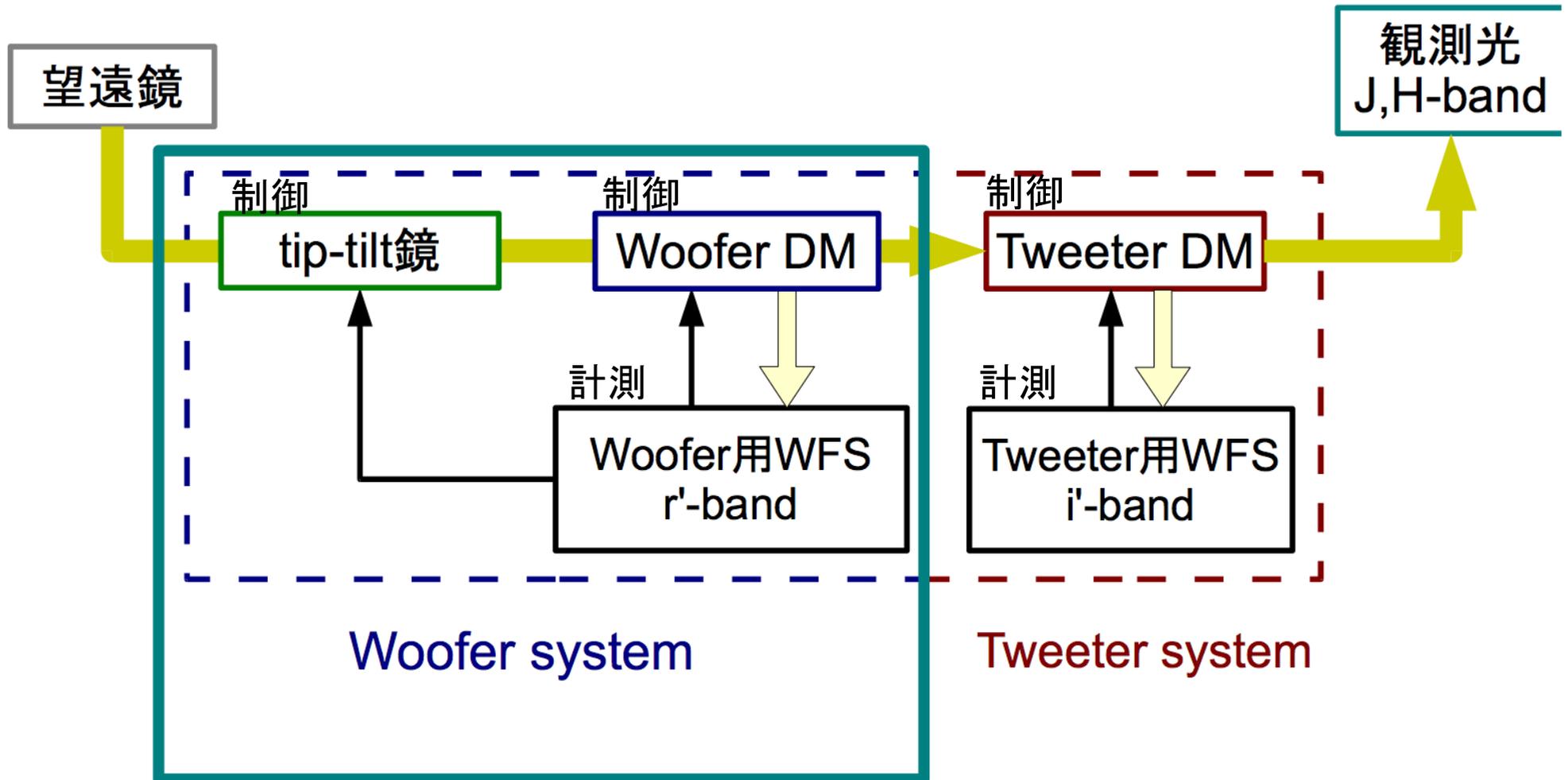
検出器

Ben Mazin  
(UC サンタ  
バーバラ)

# 実装の計画

- 方針:モジュールごとに装置を組み上げる。  
恒温槽はモジュールごとに設計中(日本スピンドル社)。
- FY2013-2015
  - 室内実験、実機組み上げ
- FY2016前半
  - 極限補償光学のファーストライト
- FY2016後半
  - 極限補償光学+コロナグラフ
- FY: 2017 -
  - 瞳再配置モジュールとの組み合わせ
- FY: 2018 -
  - 焦点面センサモジュールとの組み合わせ
  - Kinetic Inductance Detector (MKIDs)のテスト

# 極限補償光学系



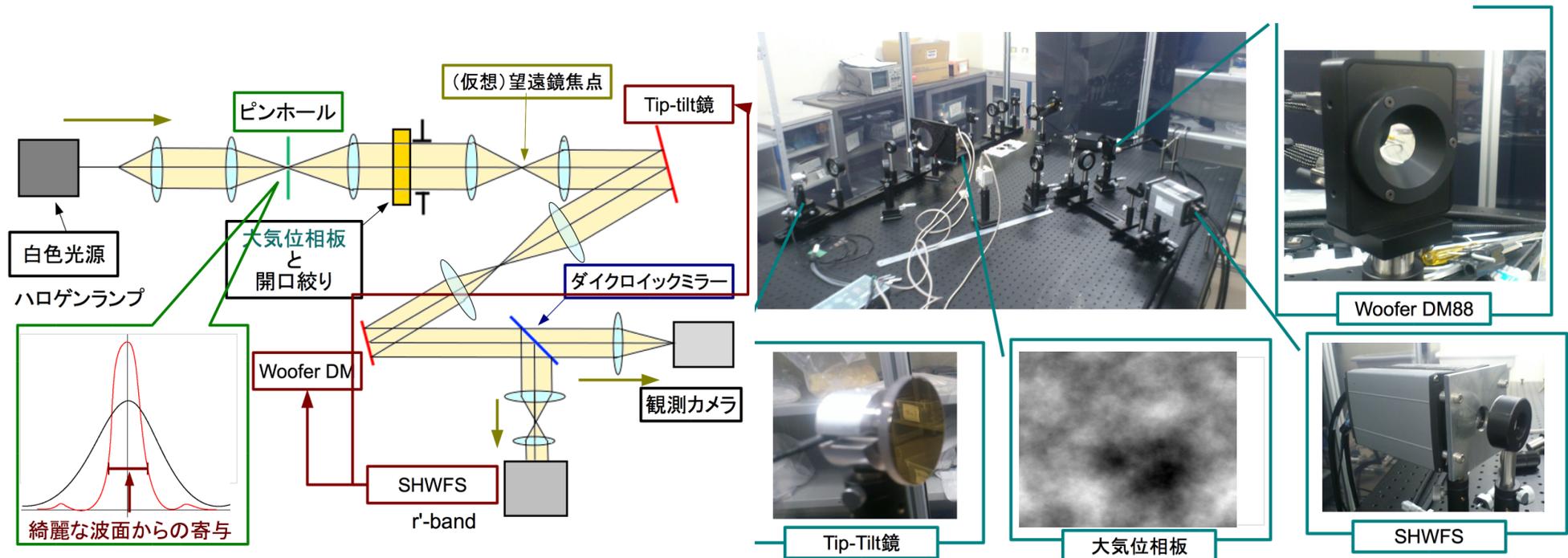
# 補償光学実験

## ○ 低次波面計測・補償の実験:

Shack-Hartmann波面センサ + Tip/Tilt, 88素子可変形鏡

○ 計測: 300Hzサンプリング (=⇒ 1kHzサンプリング目標)

○ 制御: Tip/Tilt (BW: 100Hz), Woofer DM (BW: 1kHz)  
(PID コントロール)

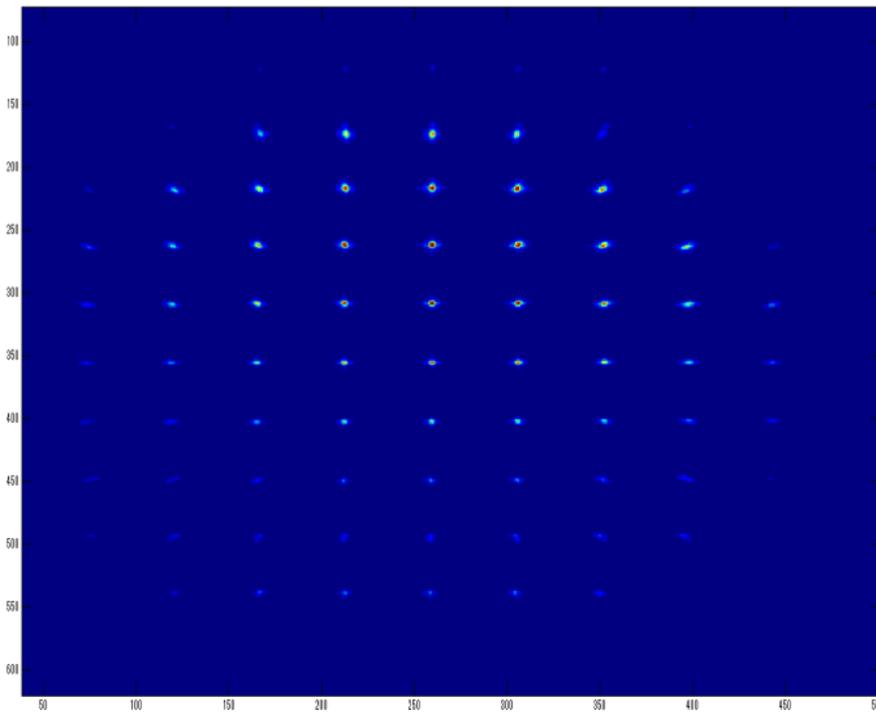


光学実験の概念図

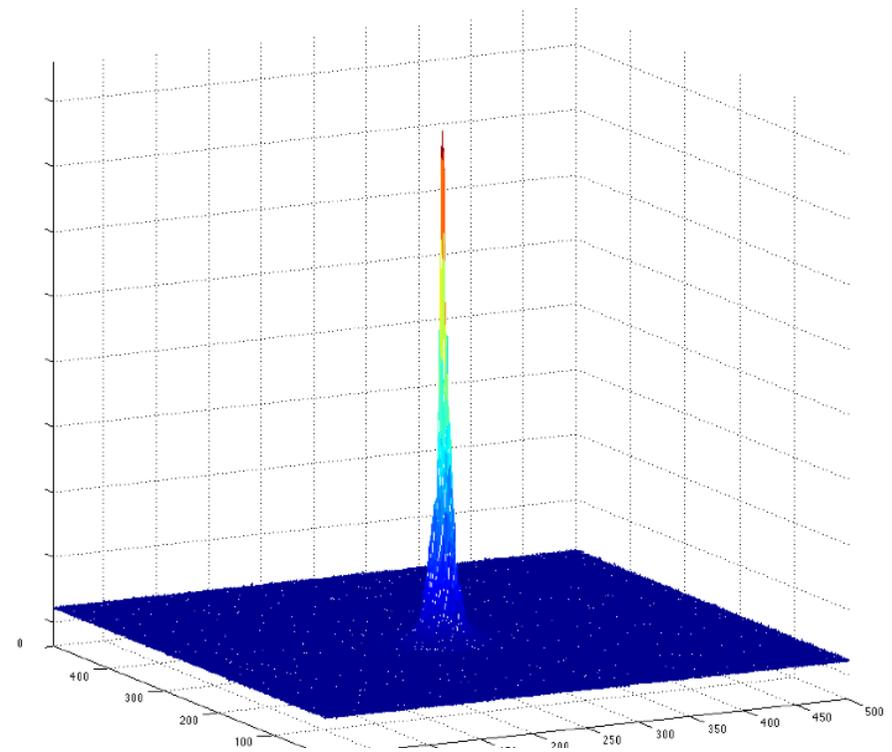
光学実験の様子

# 結果

- 大気位相板を回した状態（風速6m/s）においてシュトレール比0.3を達成。



Shack-Hartmann Wavefront Sensor



Science camera

# まとめ

- 本実験は、地球型系外惑星の直接観測につながる重要なプロジェクト。
- FY2016に極限補償光学のファーストライト目標。
- 極限補償光学は、すばる/IRDの高分散 ( $R \sim 100,000$ )・小型化が可能。