

# 技術検討会

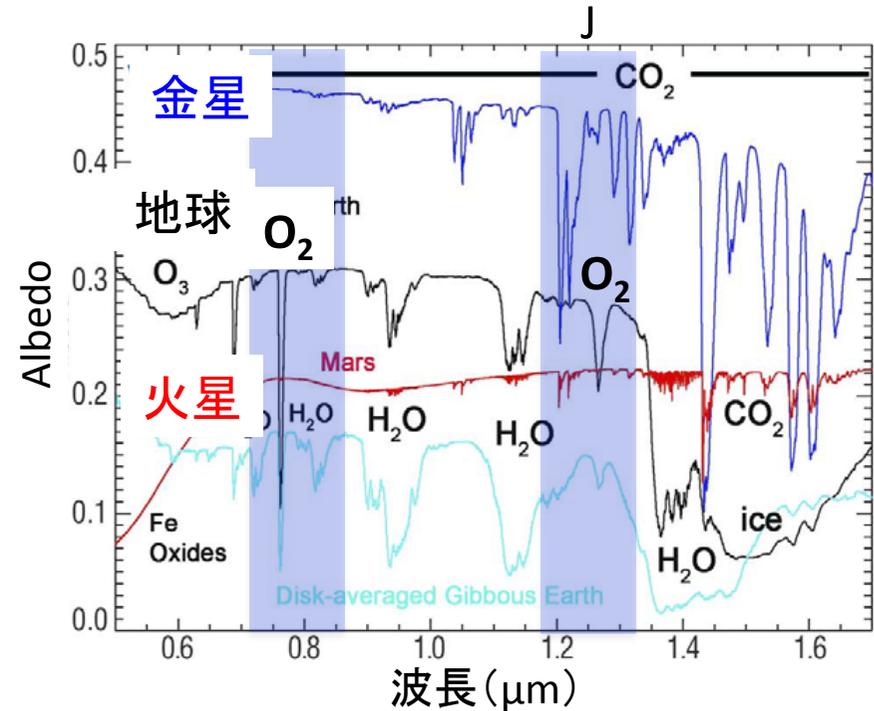
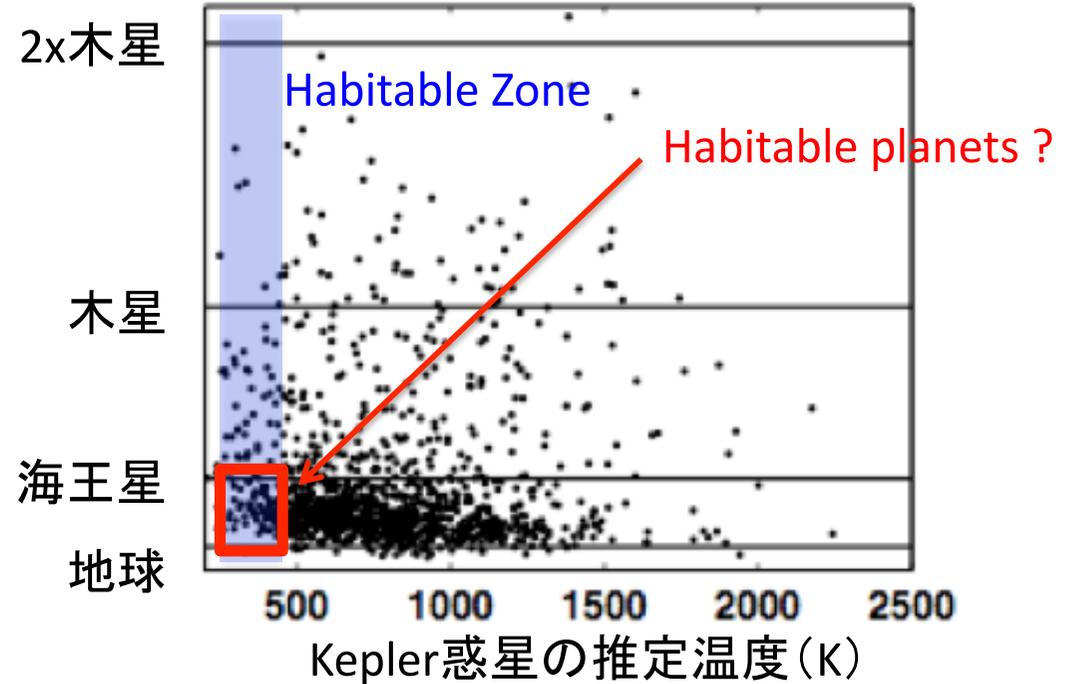
松尾太郎、夏目典明、木野勝、  
入部正継、西田秀哉 他SEITメンバ

# 科学目標

- 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

- 系外惑星研究の最大のマイルストーンは、「**地球型惑星のキャラクタリゼーション**」。
- 大気分光からの深い酸素吸収線(0.76、1.27 $\mu\text{m}$ )は、「**酸素発生型光合成の痕跡**」。

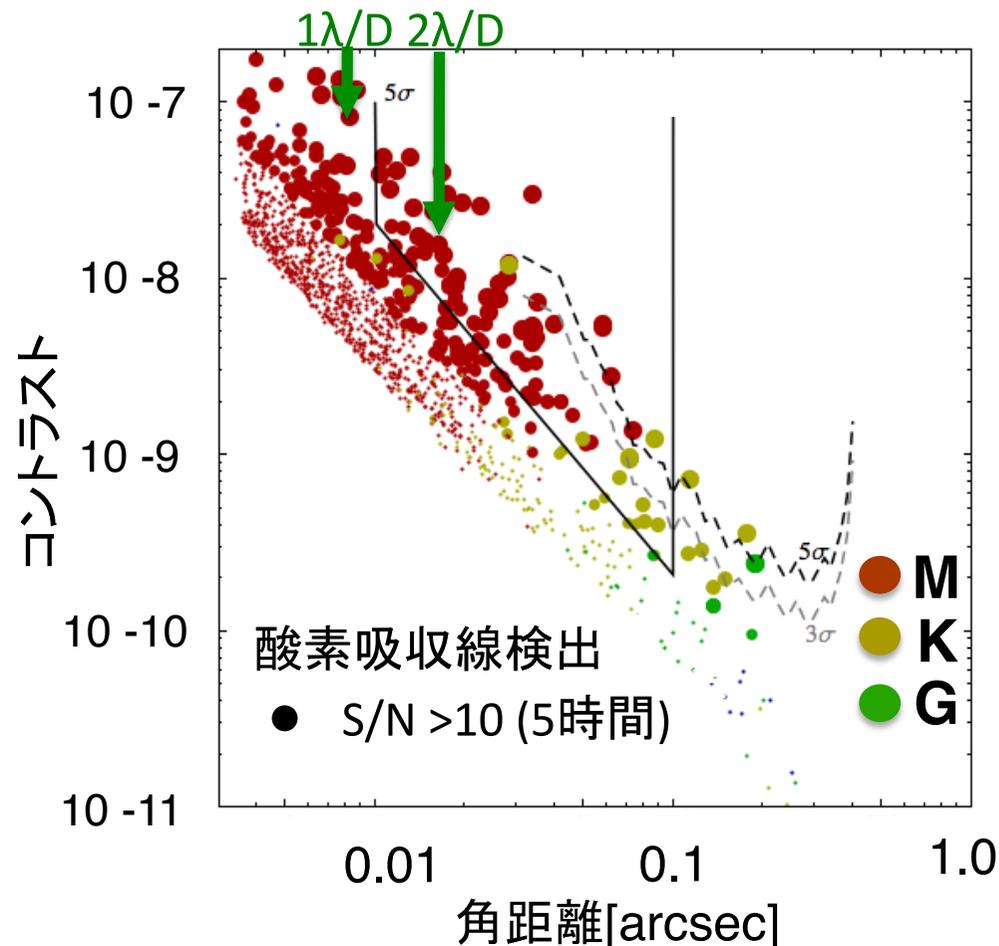


太陽系惑星の理論的スペクトル(Meadows et al. 2005)

# 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

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



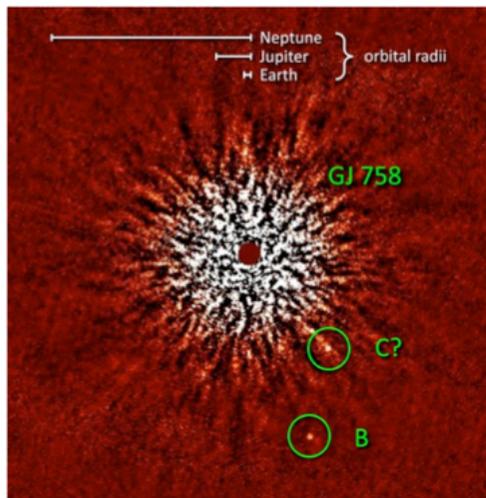
地球型惑星発見のために必要な角距離・コントラスト  
Kawahara et al. (2012); Crossfield (2013)

# 前回の検討会から進んだ事

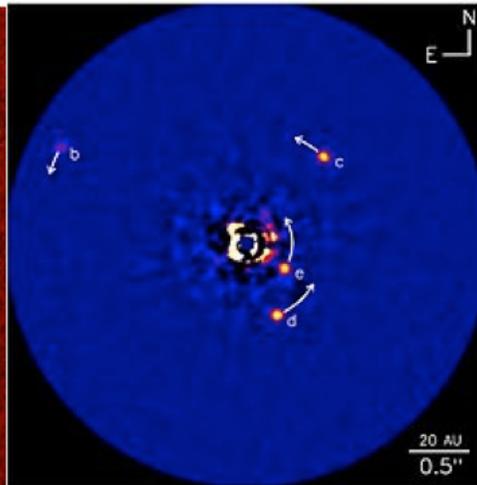
- 実験
  - Woofer 光学系の設計終了(夏目他)
  - Woofer DMの特性試験(入部、西田他)
  - Woofer 計測・制御の光学系構築(夏目他)
  - Tweeter光学系の波面センサの設計(松尾他)
  - 恒温槽・除振台の設計(日本スピンドル他)
- 進め方
  - 予算/計画プロファイルの見通し(松尾他)
  - 人員配置の整理(松尾他)

# 第1世代: SEEDS, Keck, VLT/NACO etc.

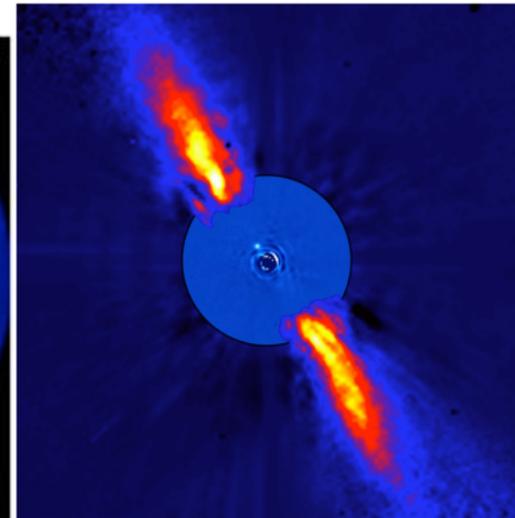
- 第1世代: 太陽系外惑星の直接観測の成功
  - ➔ 若い恒星周りの温かい巨大ガス惑星の撮像  
離角: 0.5秒以遠、コントラスト:  $\sim 10^{5-6}$
- 観測方法: Angular Differential Imaging (ADI)



GJ758  
(Thalmann et al. 2009)



HR8799  
(Marois et al. 2010)

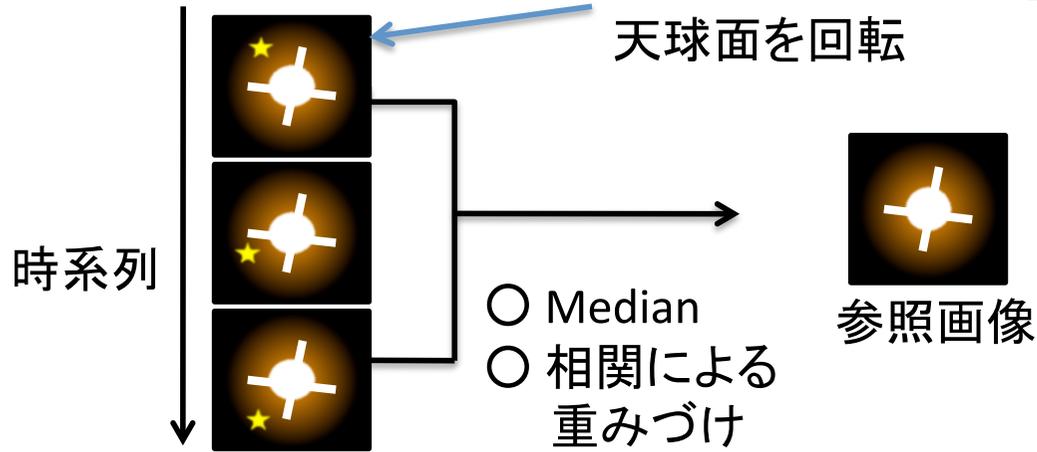


B Pictoris  
(Lagrange et al. 2008)

# ADI観測

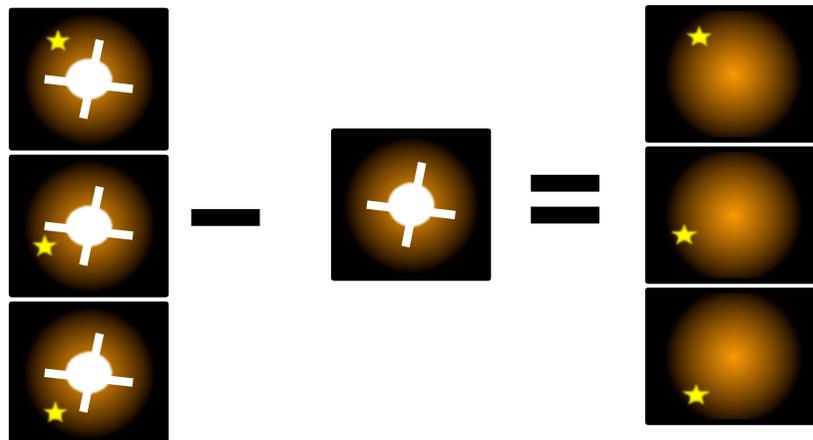
手順1: 参照画像の作成

スペックルパターンをカメラに固定  
天球面を回転

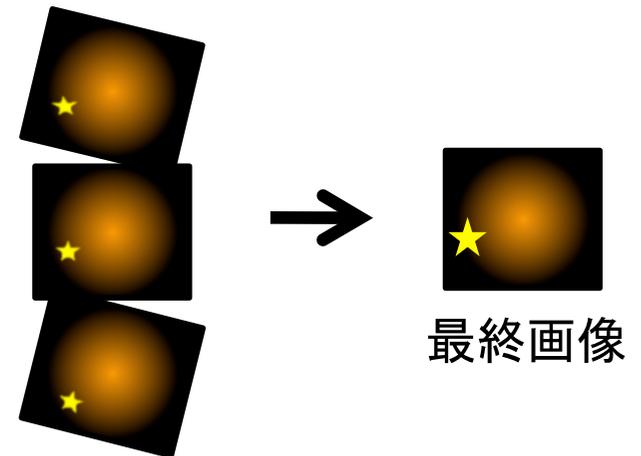


取得される画像

手順2: スペックルパターンの差し引き



手順3: 回転・結合



# ADI観測は何が問題か

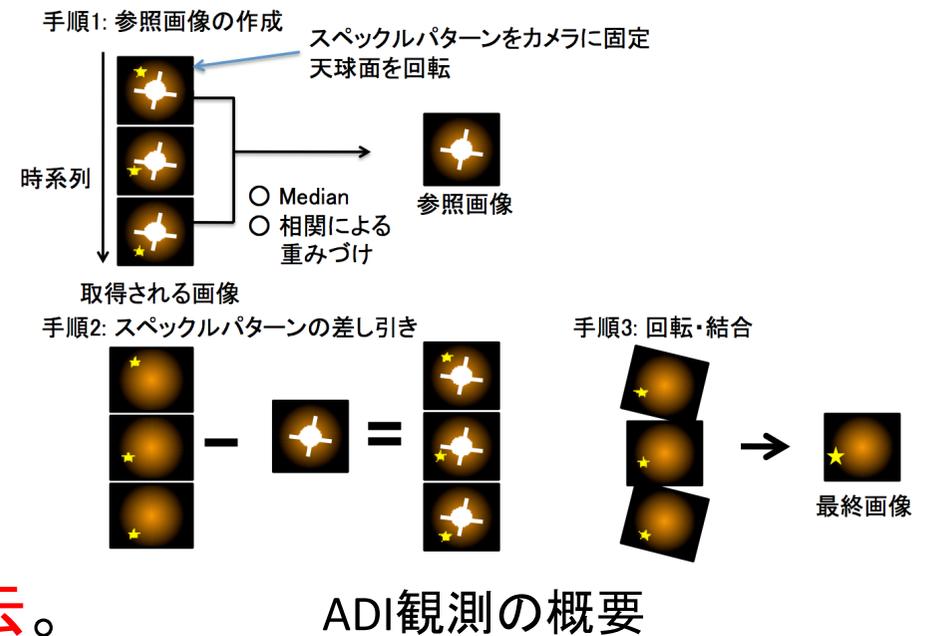
- 主星近傍での検出限界の改善なし
- 主星近傍では回転が不足！

→ 惑星は検出面で動かないので  
惑星とスペックルが分離不可。

- 時間分解能(後で説明)
- 数フレームの情報を基に  
スペックルを推定。

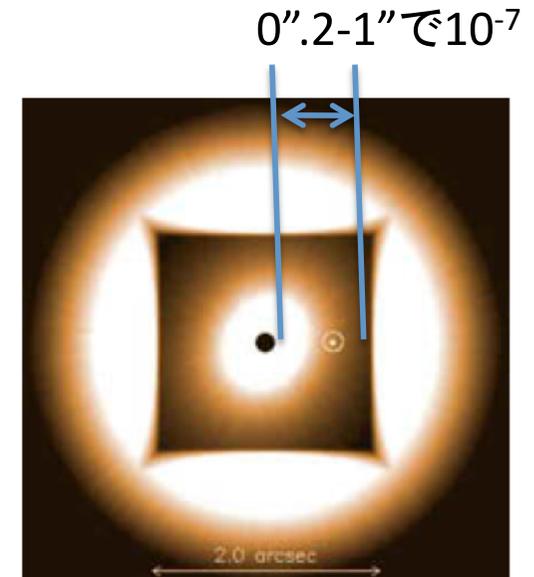
→ 数分より長いスペックルだけを除去。

→ 主星近傍のコントラストの  
改善にはつながらない



# 第2世代 : SCExAO, GPI, SHERE

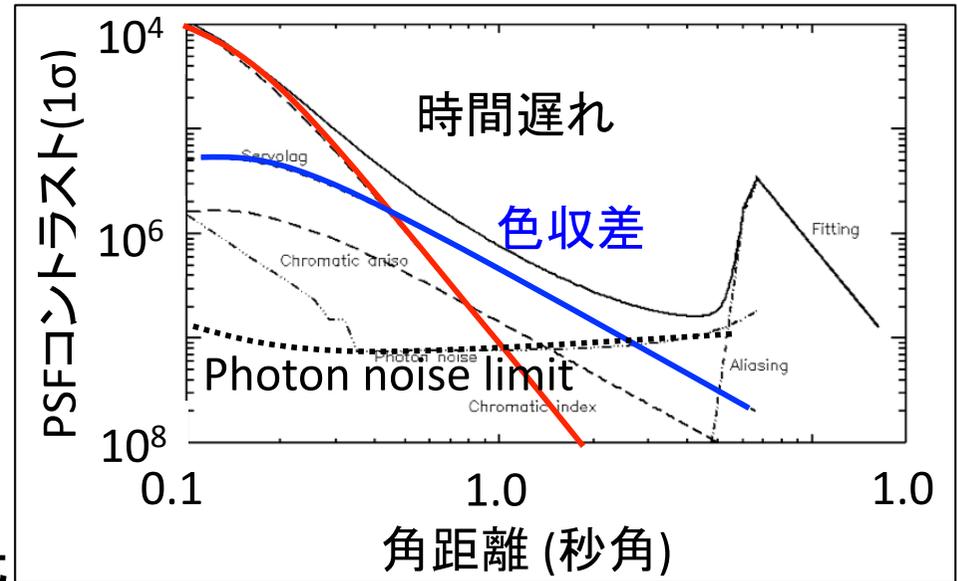
- 「リアルタイム補償」が鍵。
- 第2世代: 極限補償光学
  - 極限: より高次(小さい空間スケール)の揺らぎまで補償
- GPI (PI. B. Macintosh):
  - 2013年10月から観測開始?
  - 4000素子レベルの可変形鏡の搭載
  - 波面誤差レベル:  $\sim 30\text{nm}$
  - $0''.2$ 以遠で $10^{-4}$ 乗の生コントラスト



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

# 第3世代：？

- 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)

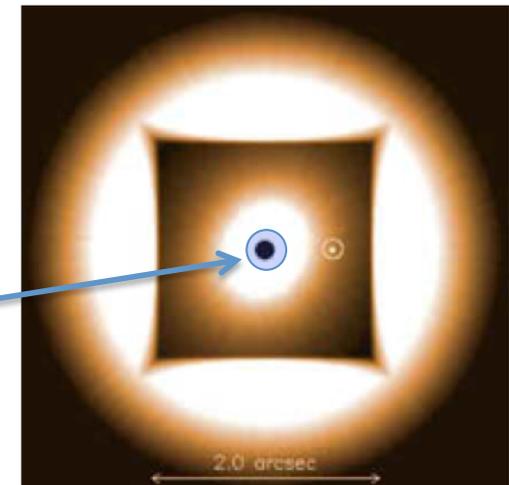


大気補償光学+コロナグラフ後のコントラスト  
(e.g., Verinaud+ 2008; Kasper+ SPIE 2012)

- 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」

始めに着手する部分

狙う領域

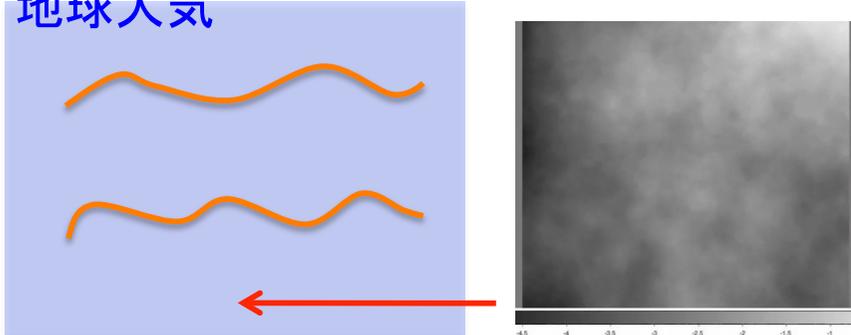


GPIのシミュレーション図  
<http://planetimager.org>



# 観測装置光学系

地球大気



主鏡

望遠鏡開口面での位相

- SEIT光学系:  
「補償光学系」+  
「高コントラスト光学系」で構成。

• 役割:

補償光学系:

- 可視光(0.6-0.9 $\mu\text{m}$ )での波面計測
- 高次波面収差の超高速波面補償

高コントラスト光学系:

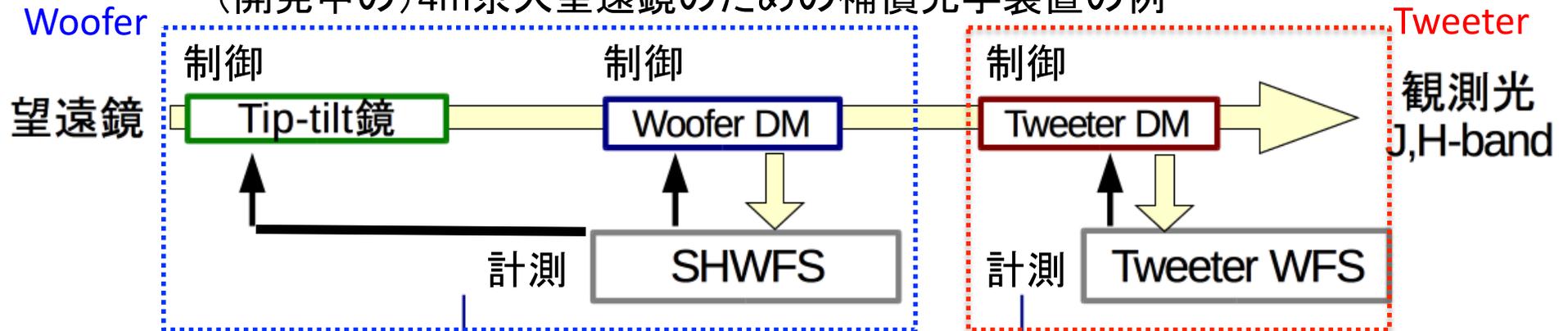
- Imaging波長 (Jバンド)での波面計測
- 色収差による低次高速波面補償

目標:

0.1-2秒角で10の-5乗生コントラスト

# 極限補償光学系構成

\* (開発中の)4m京大望遠鏡のための補償光学装置の例



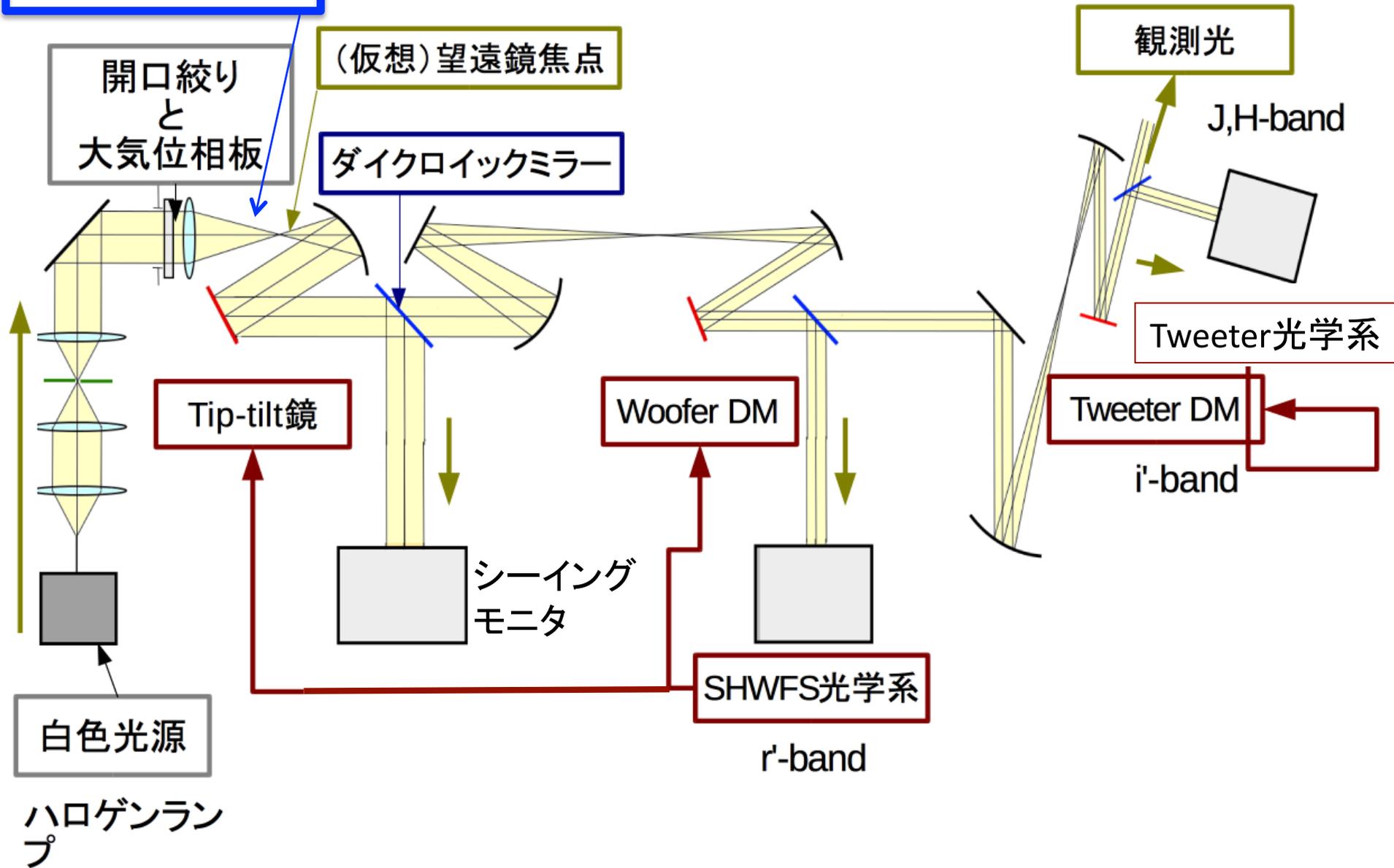
- tip-tilt補正
- 高速ステアリングマウント (PI製)
- r'-band (観測バンド)
- 12等 (限界等級)
- 80Hz (制御帯域)

- 低次収差補正
- Woofer DM88素子 (ALPAO製)
- r'-band
- 12等
- 250Hz
- SR=0.49

- 高次収差補正
- Tweeter DM1000素子 (BMC製)
- i'-band
- 7等
- 2000Hz
- SR=0.9

キャリブレーション  
光源ユニット

# 実験室での光学系



観測光

J,H-band

Tweeter光学系

Tweeter DM

i'-band

Woofer DM

SHWFS光学系

r'-band

Tip-tilt鏡

シーイング  
モニター

(仮想)望遠鏡焦点

ダイクロイックミラー

開口絞り  
と  
大気位相板

白色光源

ハロゲンランプ

# 室内実験

ハロゲン光源 (400-2200nm)

大気位相板



夏目他

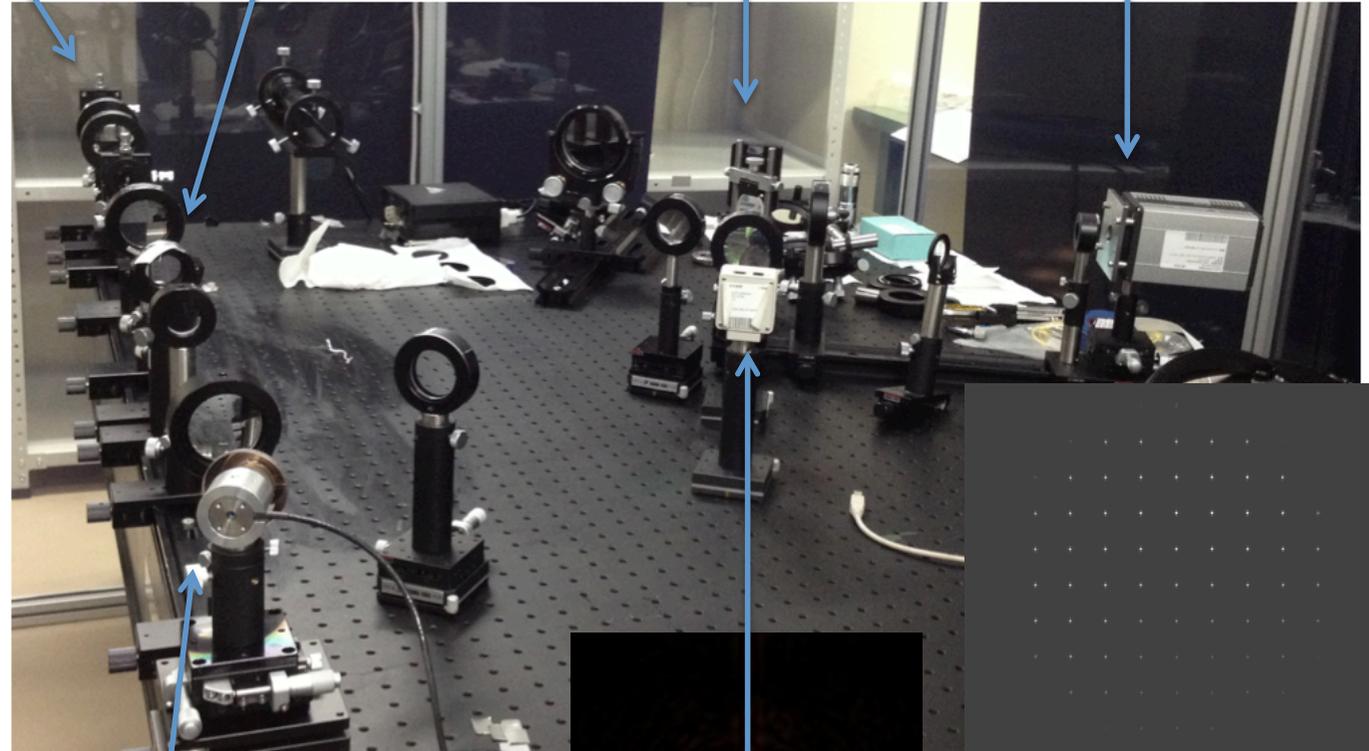
SHWFS

現状:

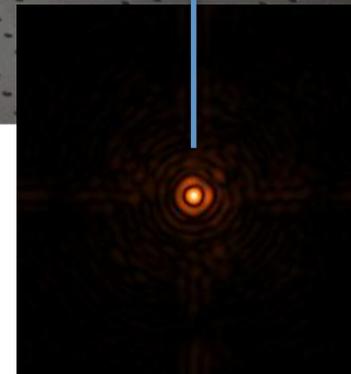
- レンズ光学系での制御

今年度のA/I:

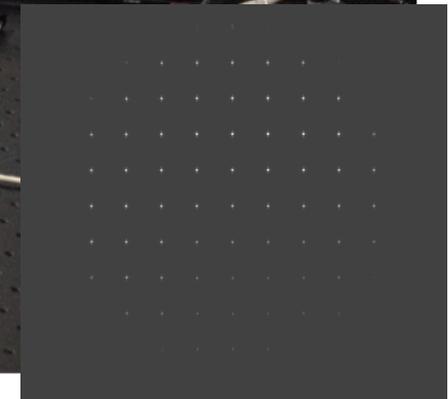
- 実機(軸外し鏡)を用いた  
Woofer光学系の制御完成  
(SR: ~ 0.5 目標)



Tip/Tilt鏡



サイエンス像



SHWFSの取得像

# DM88試験

## ○静的特性

i-Fizeauによる計測

- 電圧 vs 変位置量

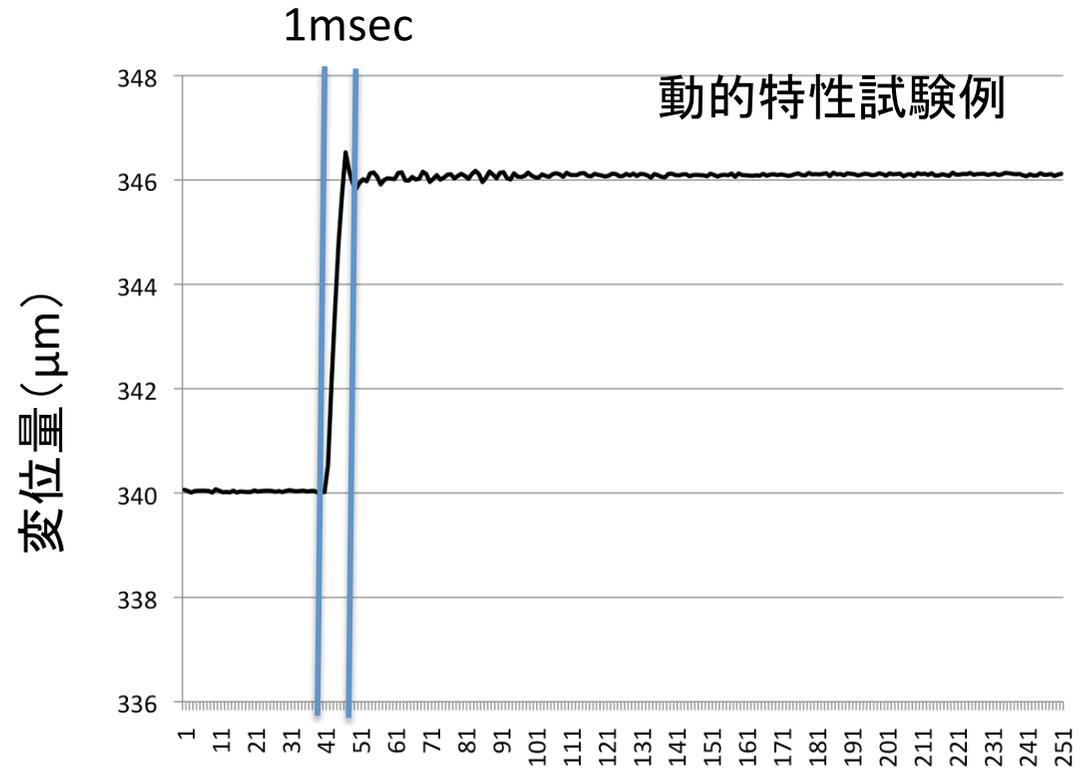
- 重ね合わせ試験

→ 線形性の確認

## ○動的特性

干渉計変位(SI)センサ

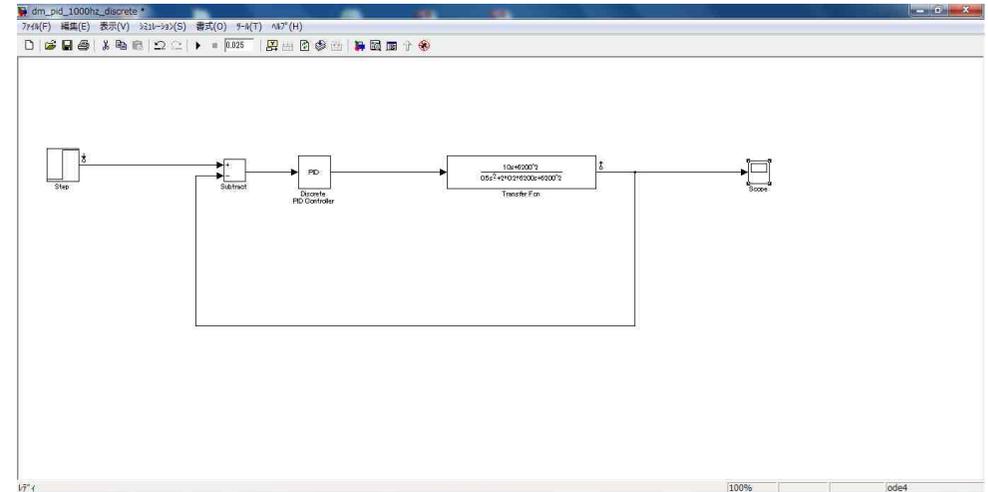
- ステップ信号入力



# 制御設計

入部、西田他

- DM88の静的特性試験、動的特性試験に基づいて、システム同定を行なっている。
- 2次の伝達関数を想定。



制御モデルのブロック図



PDIなしの応答図



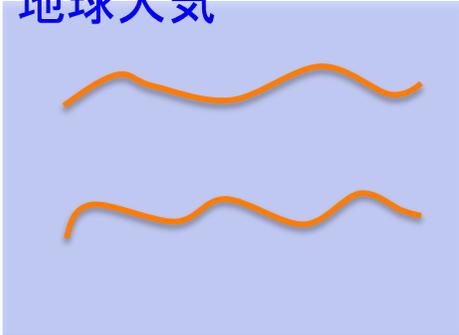
PDIありの応答図

# 極限補償光学系

松尾他

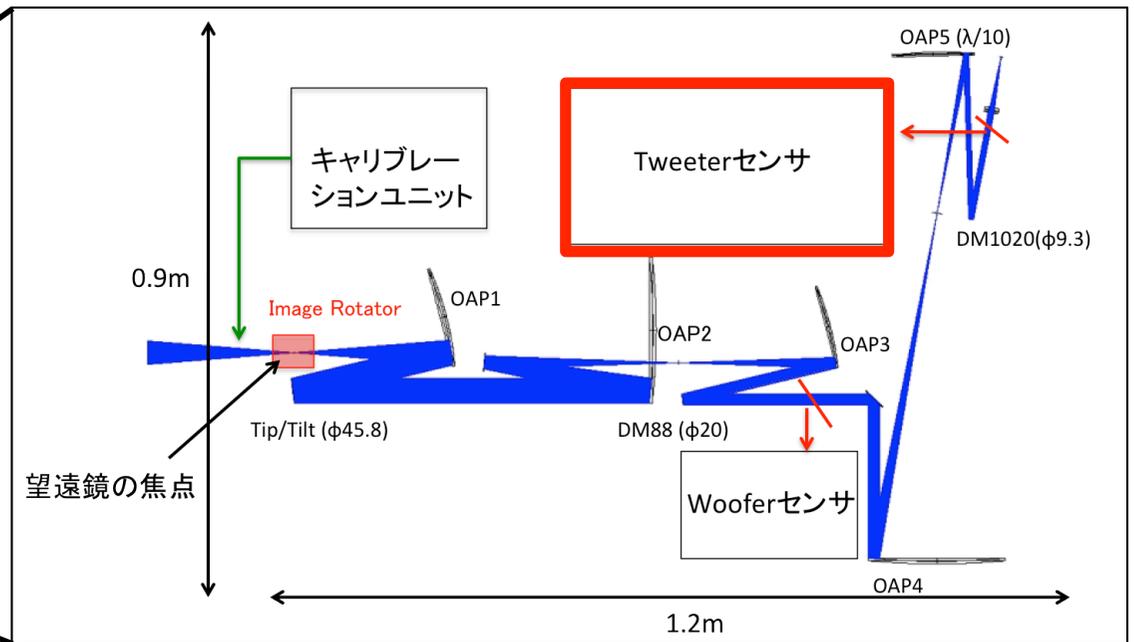


地球大気



主鏡

補償光学系



京大補償光学系の全体図

仕様: Woofer-Tweeterの2段制御

- Woofer: DM88 + Shack Hartmann-WFS
- Tweeter: DM1k + Tweeter位相センサ

AO性能の決定する最重要な要素

# 予算

- 獲得済予算

	2013年度	2014年度	2015年度
基盤A	1720	720	680
共同開発経費	350	?	?
挑戦的萌芽	240	50	-
新学術	300	-	-
基盤B	450		

- 申請中と申請予定

	2013年度	2014年度	2015年度
TMT基礎戦略	940 (申請中)	?	?
光研究	250 (申請予定)	?	?

製作費用について(ある程度)の目処。

→ スケジュールへの見通しが立つ

# FLまでのスケジュール

		2013		2014		2015		2016	
		4-9月	10-3月	4-9月	10-3月	4-9月	10-3月	4-9月	10-3月
全体					Woofe-Tweeter組み合わせ試験 →	補償光学系と高コントラスト系の組み合わせ試験 ←	予備期間	On-Sky実験	→
						除振台と恒温槽のインストール →			
補償光学系									
	Woofe光学系 (共同開発研究費)	Shack-Hartmann波面センサと88素子可変形鏡の組み合わせ制御試験 →							
	Tweeter光学系 (基盤A)	新しい広帯域波面センサの構築/実証 →		新しい波面センサと1000素子可変形鏡の組み合わせ制御試験 ←					
高コントラスト光学系									
	コロナグラフ (新学術:新機軸)	SPLINEの高精度化の検討(2ch化、安定化、高コントラスト化) →	SPLINE実機に向けた各種素子設計・製作 →	SPLINE実機組立・試験 →					
	瞳再配置法 (基盤B)	瞳再配置法のアルゴリズムの改良と最適なコロナグラフ選定 →							
		瞳再配置法の新しい固定式分割鏡(7素子)の試作 →		瞳再配置法の新しい固定式分割鏡(100素子)の開発 →	コロナグラフとの組み合わせ試験 →				
	焦点面波面センサ (本予算)	3Dカメラの実証 →		3DカメラとDM144の組み合わせ制御試験 →	コロナグラフとの組み合わせ試験 →				