

多天体補償光学系の基礎実験と 大学からの要望

秋山 正幸(東北大学理学研究科・天文学専攻)
Masayuki Akiyama (Astronomical Institute, Tohoku)

多天体補償光学系の基礎実験:
羽根 一博, 呉 同(東北大学工学研究科・光MEMS)
大屋 真(ハワイ観測所)
ほか多天体赤外分光器グループ

2011/01/18

Key word for next generation adaptive optics systems:
Tomographic reconstruction with multiple guide stars

多数の天体を観測できるようにする。 = 広視野化

レーザー人工星を用いても高い空間分解能を実現できるようにする。 = 高精度化

どちらもキーワードは複数のガイド星を用いたトモグラフィックによる大気揺らぎの3次元構造(=高さ方向への分解)の測定。

既存のレーザーガイド星 補償光学システム

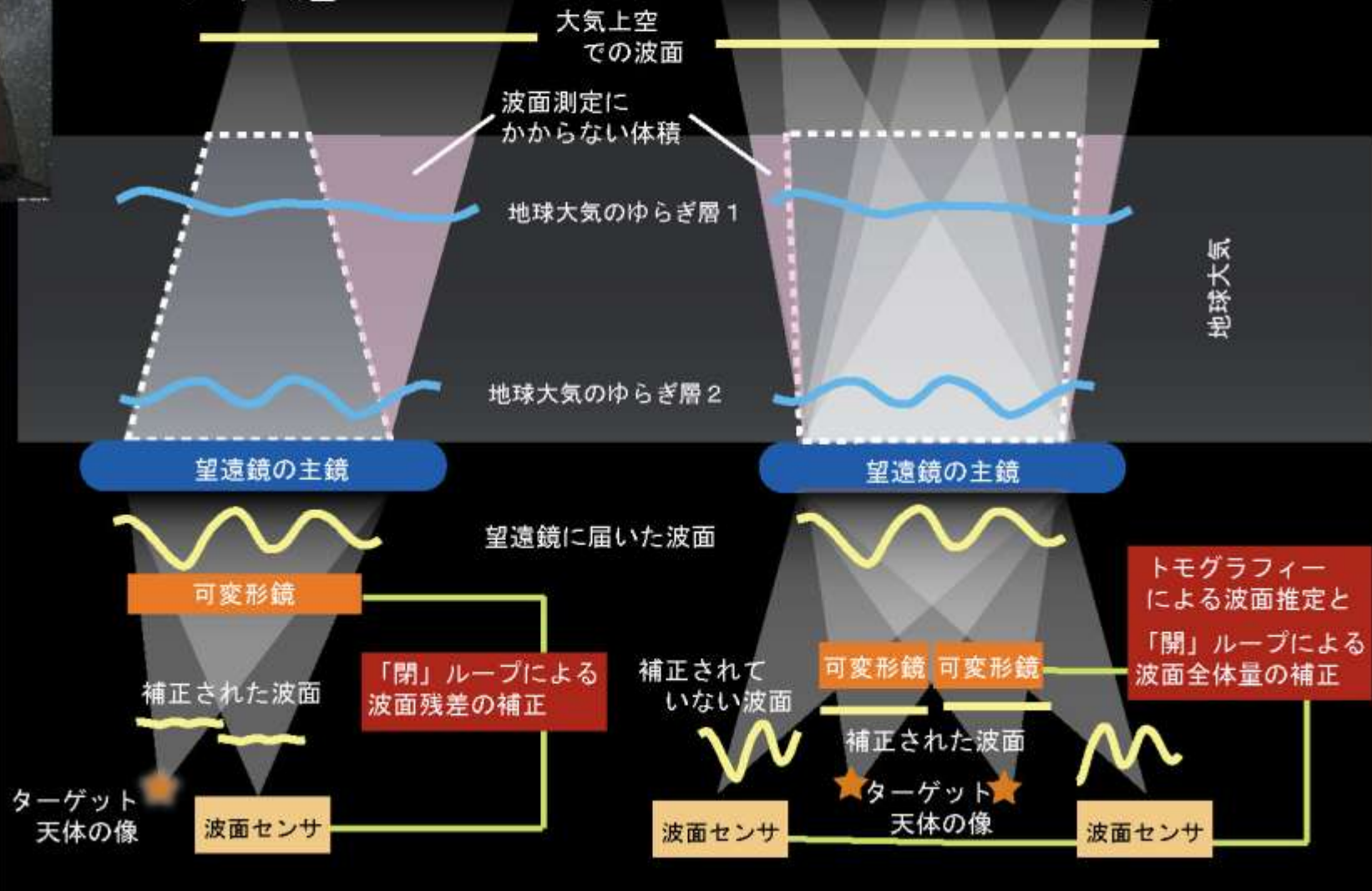
ターゲット天体

レーザーの星

新世代の多天体 補償光学システム

ターゲット天体 ターゲット天体

レーザーの星 レーザーの星 レーザーの星



既存のレーザーガイド星補償光学システム

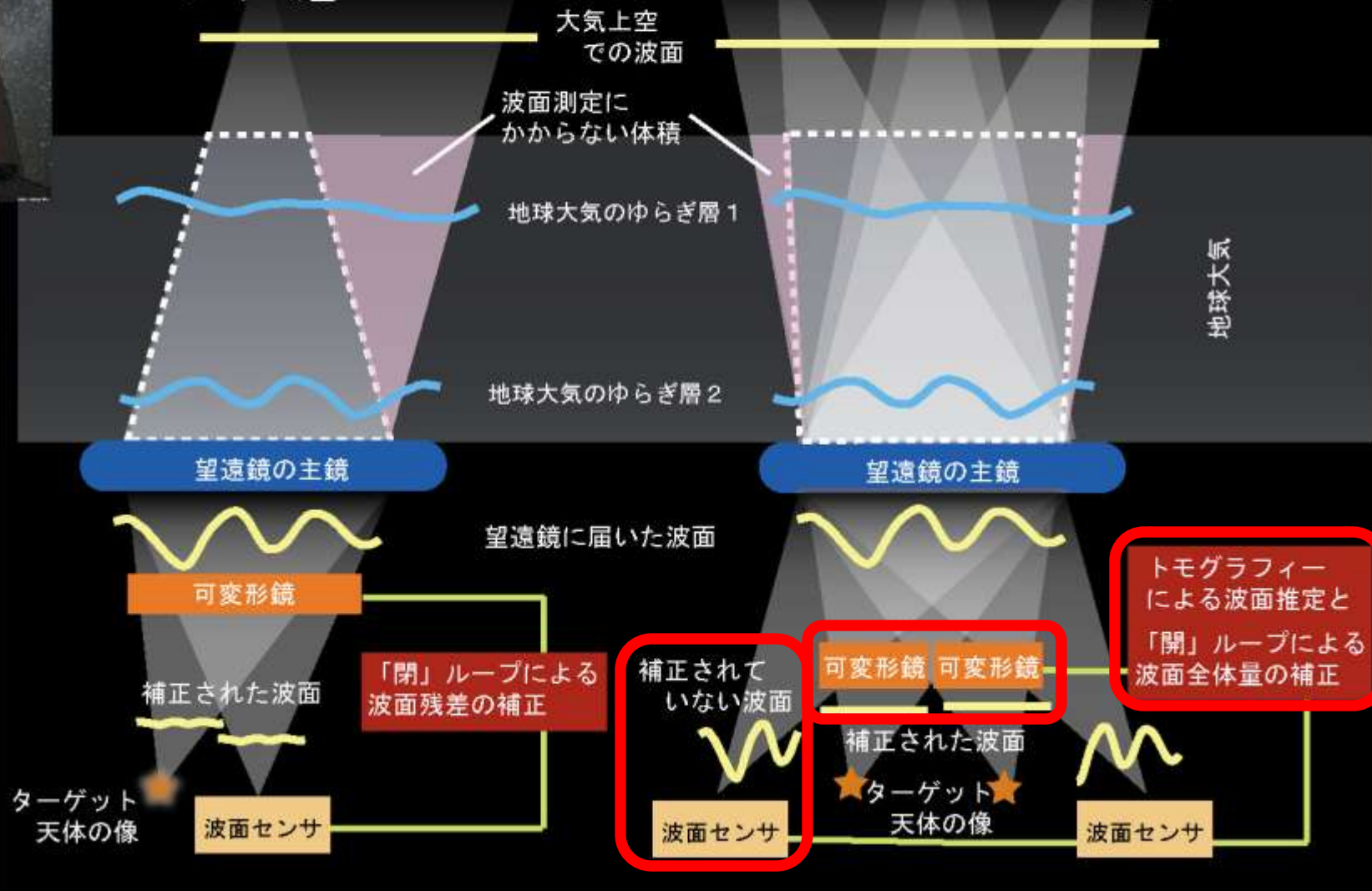
ターゲット天体

レーザーの星

新世代の多天体補償光学システム

ターゲット天体 ターゲット天体

レーザーの星 レーザーの星 レーザーの星



Three R&Ds targeting next-generation AO systems

1. 30m 望遠鏡に向けた多素子大ストローク可変形鏡の開発
 - MEMS 技術を用いた多素子化
2. 30m 望遠鏡に向けた多素子大ダイナミックレンジ波面センサーの開発
 - EM-CCD による高速低ノイズ読み出し、大素子化
3. 次世代補償光学系に向けた高速トモグラフィーのループの確立
 - トモグラフィーアルゴリズム: 数理科学との連携
 - グラフィックボードによる高速並列計算(GPGPU)

基本は TMT-MOAO の実現に向けた基礎開発、それぞれの要素は次世代の他のシステムでも応用可能。

Development of large-stroke (20 μ m) large-elements (3600ele) small MEMS deformable mirror

可変形鏡の仕様についてAOシミュレーター(Arroyo)を用いて検討

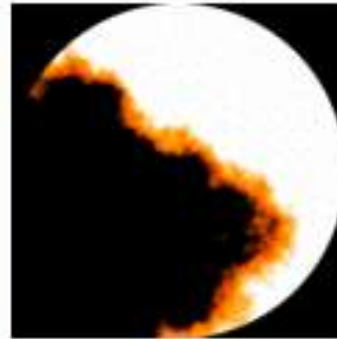
http://www.astr.tohoku.ac.jp/~akiyama/index_Note_TMTinst_DM1.html



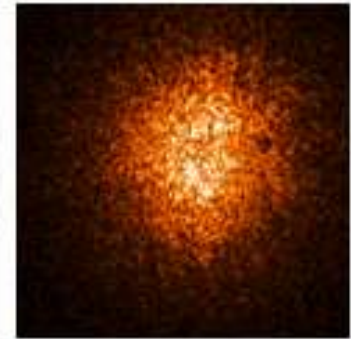
0.000 Wavefront



64x64 DM



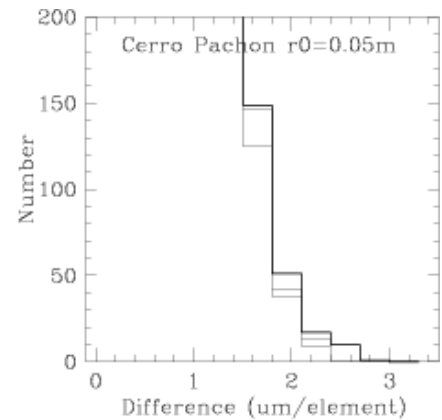
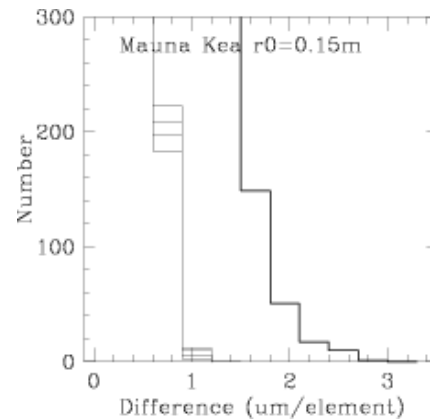
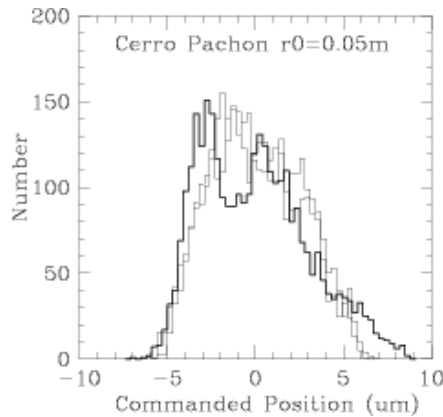
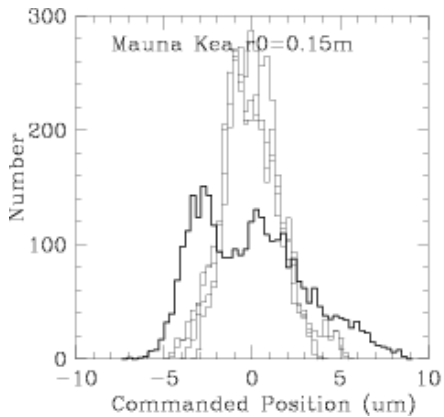
TT+DM Corrected WF



PSF

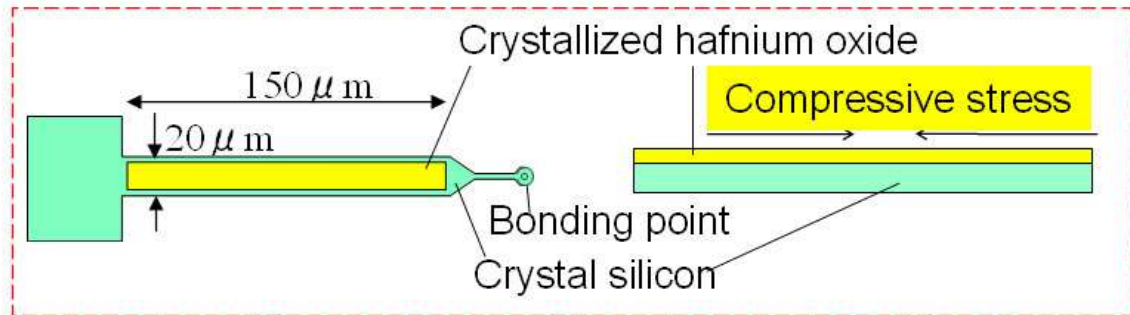
Required displacement for various condition

Required displacement between neighboring elements



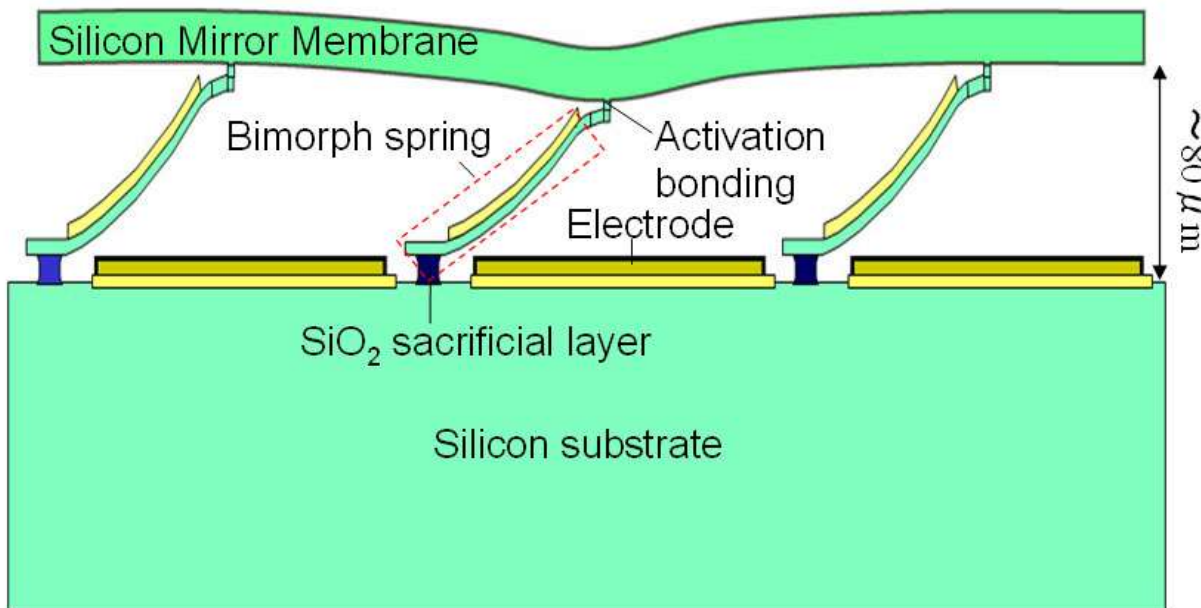
Development of large-stroke (20 μm) large-elements (3600ele) small MEMS deformable mirror (Wu Tong: D1 Hane Lab.)

A new structure membrane MEMS-DM using Si/HfO₂ Bimorph spring



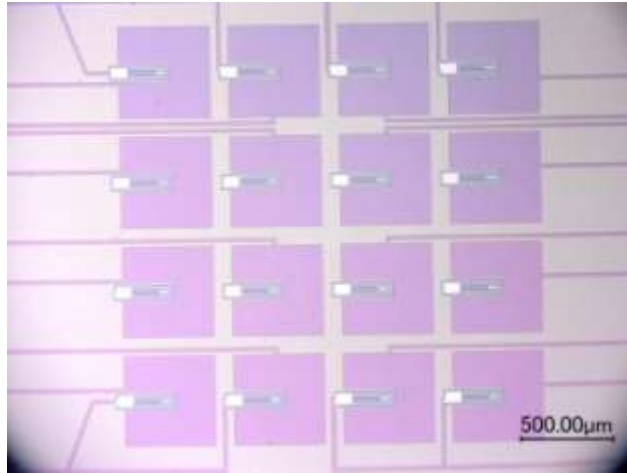
Original Points

1. HfO₂ crystallization-induced stress is used to introduce large out-of-plane deflection.
2. Relatively soft spring structure (small spring constant) instead of fixed posts is used to increase the stroke.
3. High optical quality mirror surface is guaranteed by the top layer of SOI wafer and the Si-Si plasma activation bonding.

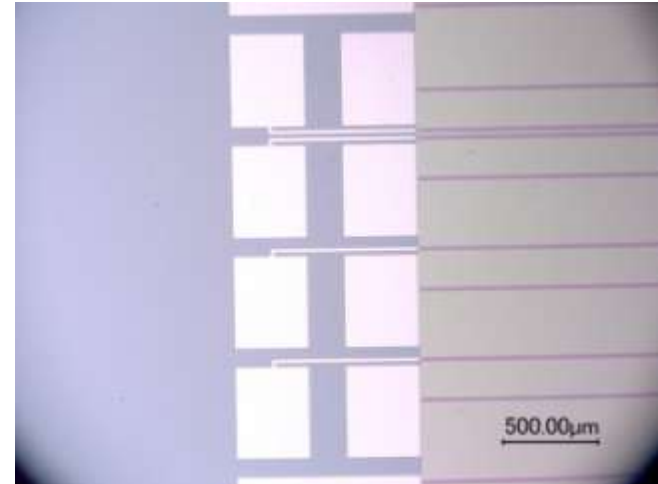


Large-stroke MEMS-DM Structure

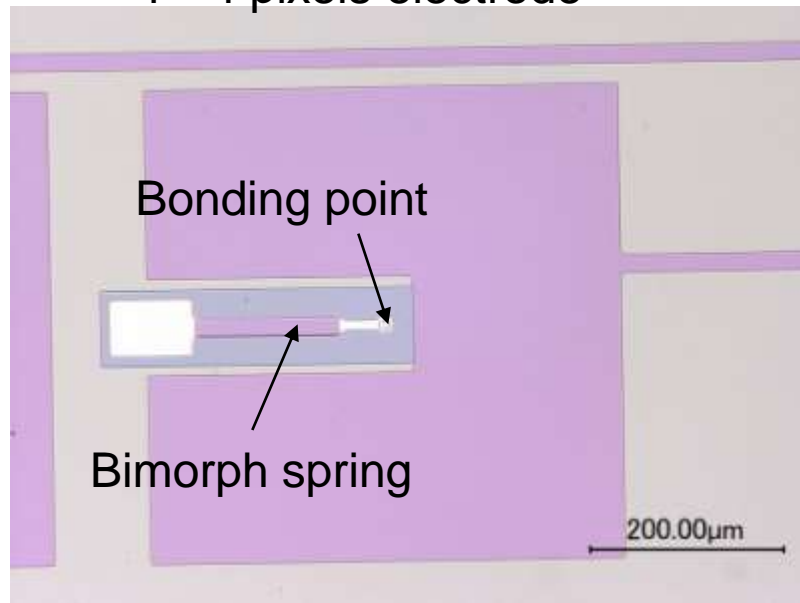
Development of large-stroke (20 μm) large-elements (3600ele) small MEMS deformable mirror (Wu Tong: D1 Hane Lab.)



4 \times 4 pixels electrode



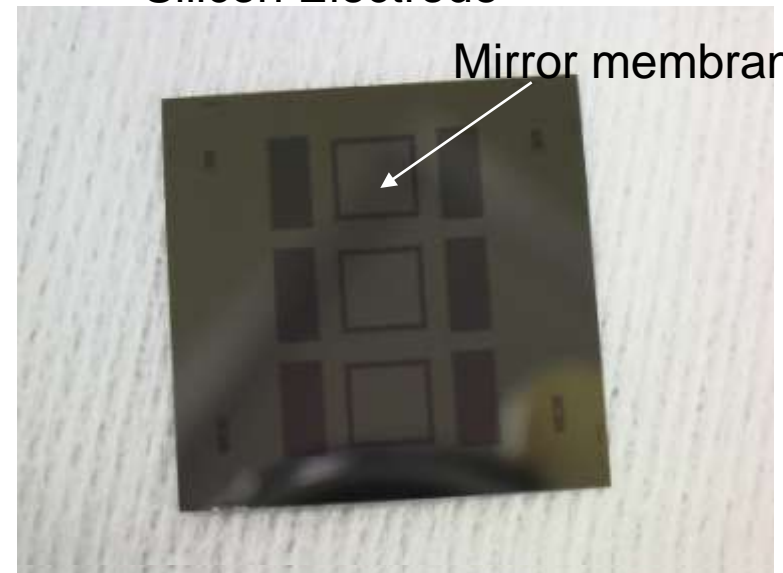
Silicon Electrode



Bonding point

Bimorph spring

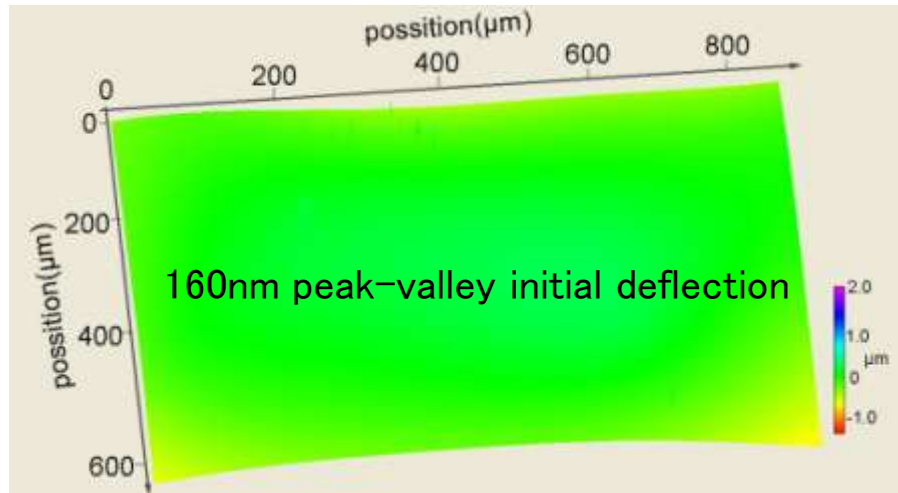
200.00 μm



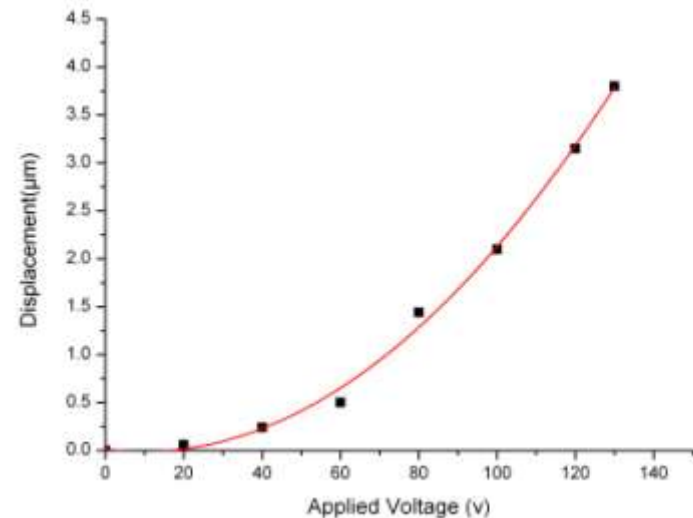
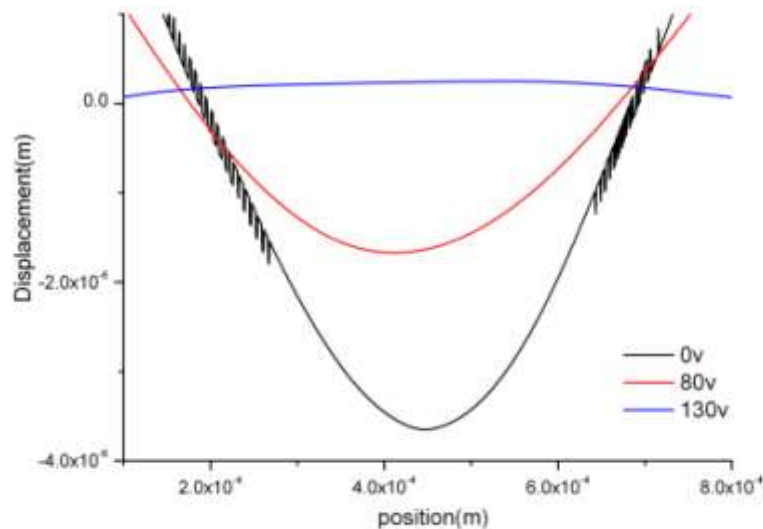
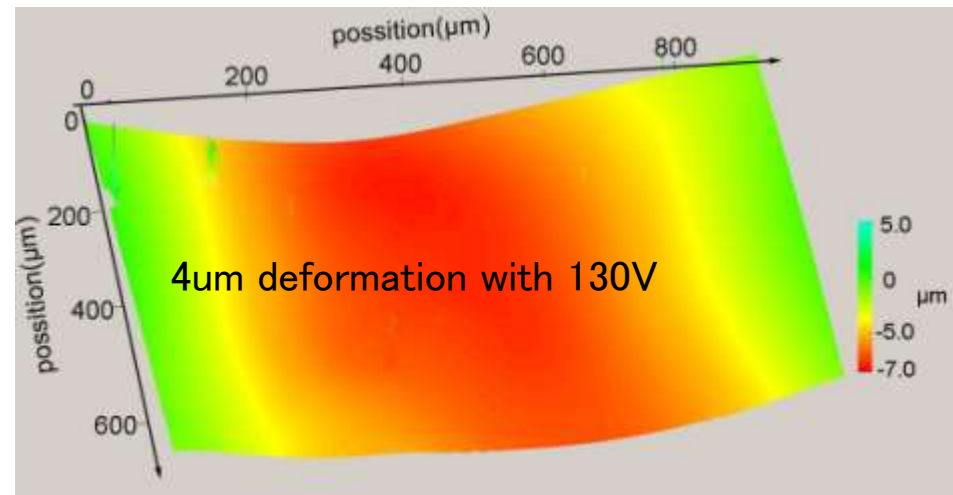
Mirror membrane

Mirror chip with 1 μm silicon membrane

Development of large-stroke (20 μm) large-elements (3600ele) small MEMS deformable mirror (Wu Tong: D1 Hane Lab.)



Mirror profile at 0V



Development of large-stroke (20um) large-elements (3600ele) small MEMS deformable mirror (Wu Tong: D1 Hane Lab.)

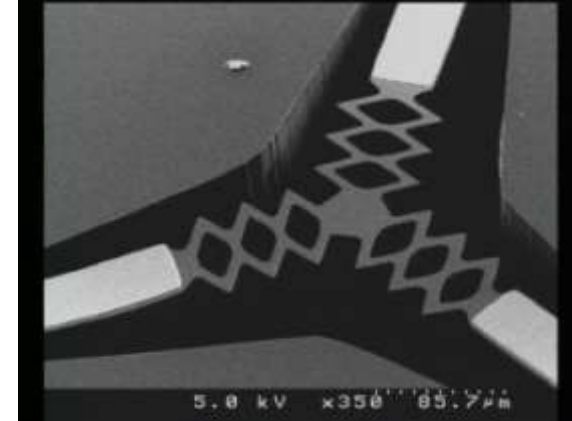
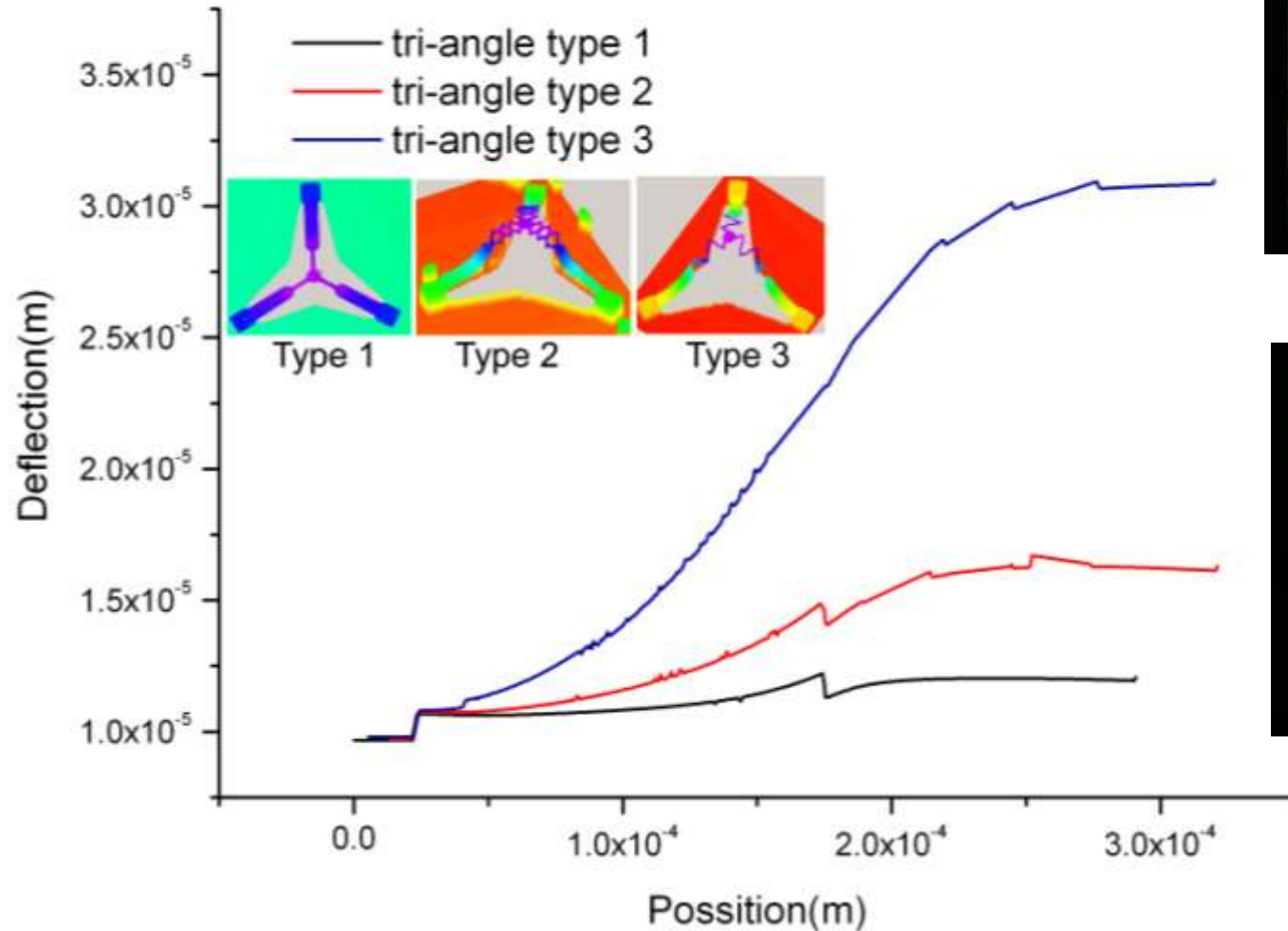
現状：1回目の試作からの改良を進めているところ。

- 初期形状を平面にする。
 - 片方固定の構造ではなく両方固定の構造にする。
- ばね構造でできるギャップを拡大する。
 - 結合部分の柔軟性を高める。

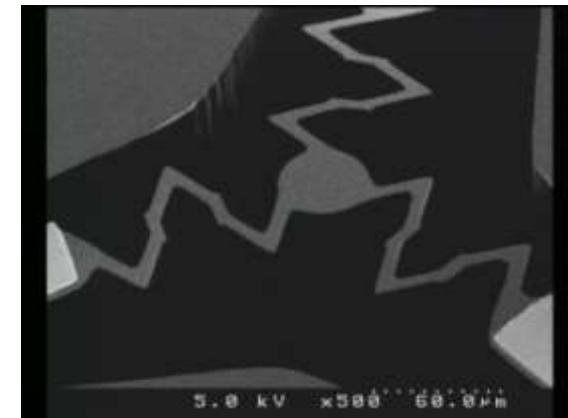
Development of large-stroke (20 μ m) large-elements (3600ele) small MEMS deformable mirror (Wu Tong: D1 Hane Lab.)

Deflections measured by

Polytec Topography Measurement System (TMS)



Tri-angle type 2



Tri-angle type 3

High-dynamic range, large element number wavefront sensor :
Wavefront measurements with 50cm university telescope (B4 Y.Ohno, C.Hara)

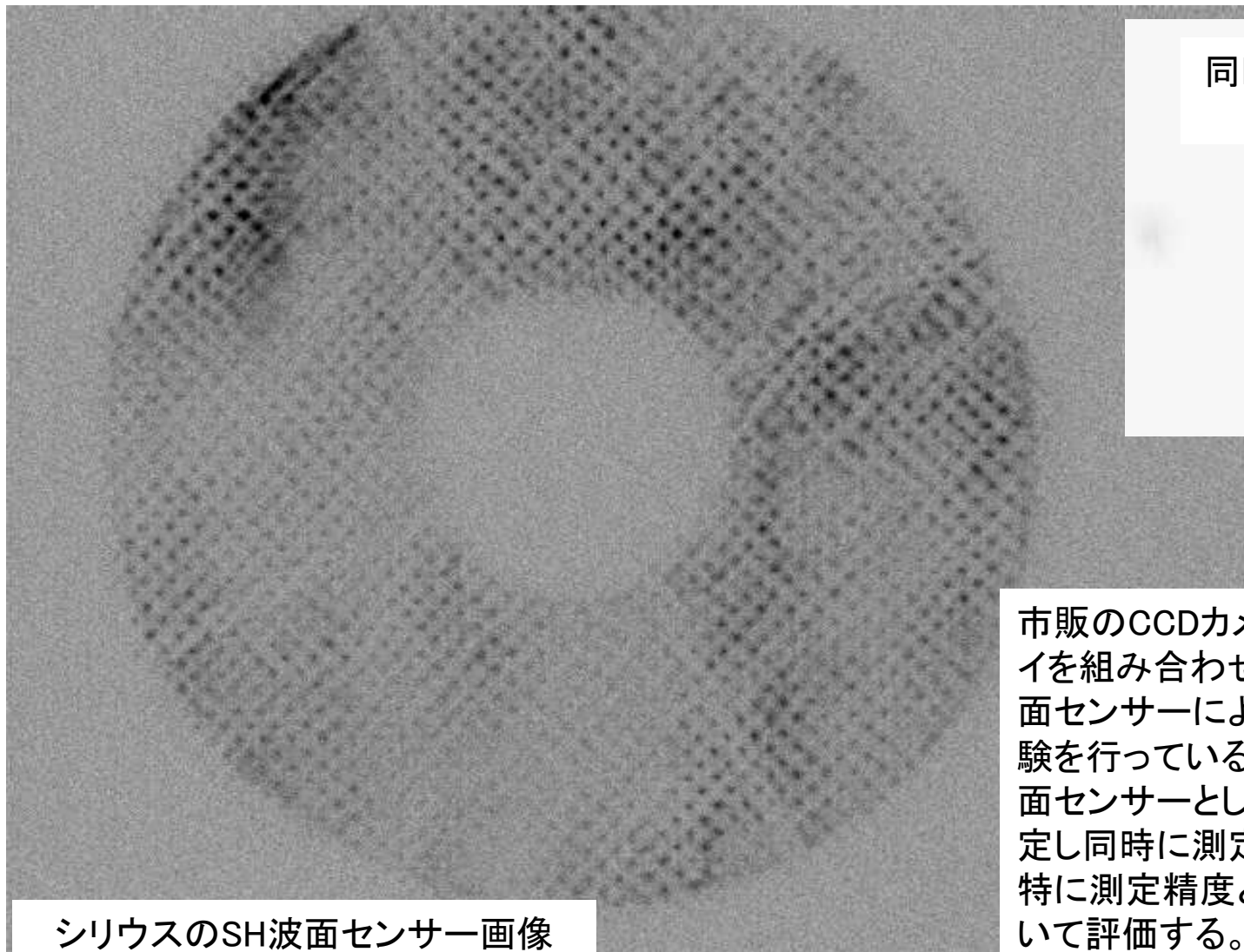


市販のCCDカメラとマイクロレンズアレイを組み合わせたシャックハルトマン波面センサーによる波面測定の基本実験を行っている(学部生卒業研究)。波面センサーとして較正し波面形状を推定し同時に測定したPSFと比較する。特に測定精度とダイナミックレンジについて評価する。

SH波面センサーリファレンス画像

High-dynamic range, large element number wavefront sensor :

Wavefront measurements with 50cm university telescope (B4 Y.Ohno, C.Hara)



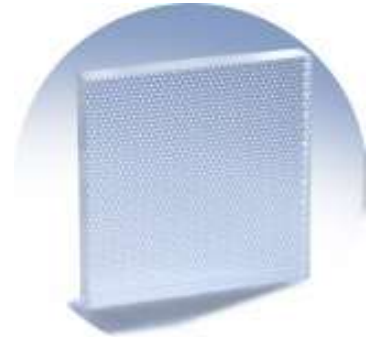
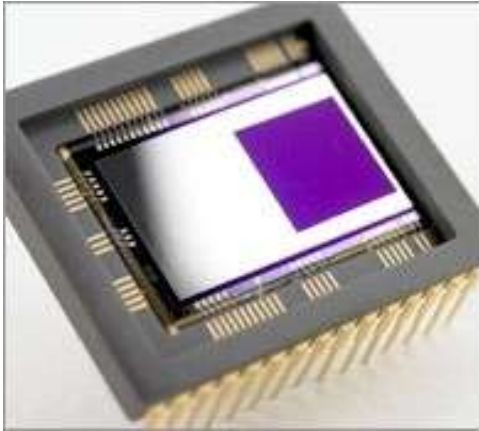
シリウスのSH波面センサー画像
(可視)~1s, 60fps



同時に観測した
PSF画像

市販のCCDカメラとマイクロレンズアレイを組み合わせたシャックハルトマン波面センサーによる波面測定の基本実験を行っている(学部生卒業研究)。波面センサーとして較正し波面形状を推定し同時に測定したPSFと比較する。特に測定精度とダイナミックレンジについて評価する。

High-dynamic range, large element number wavefront sensor : With Electron-multiplication-CCD

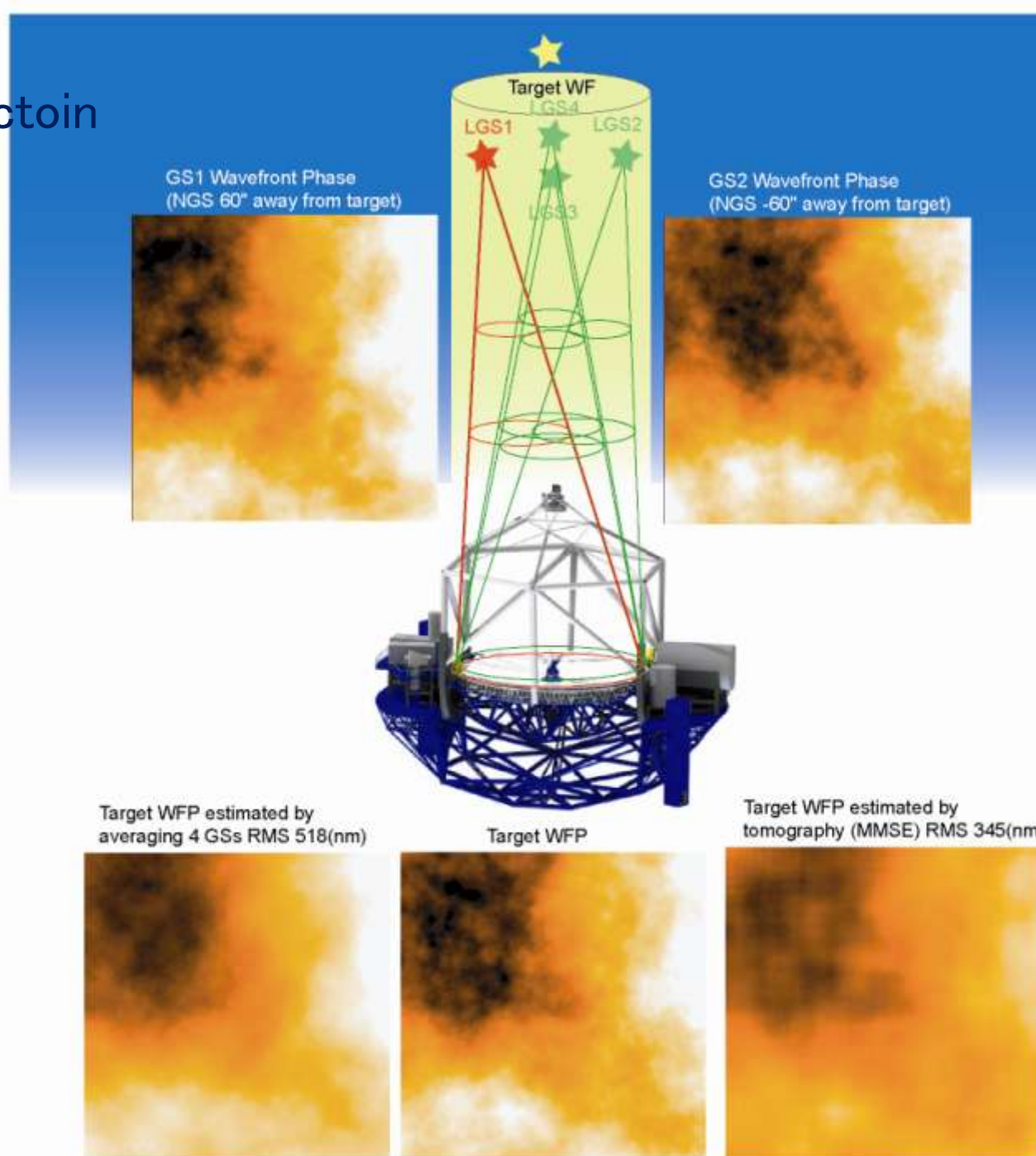
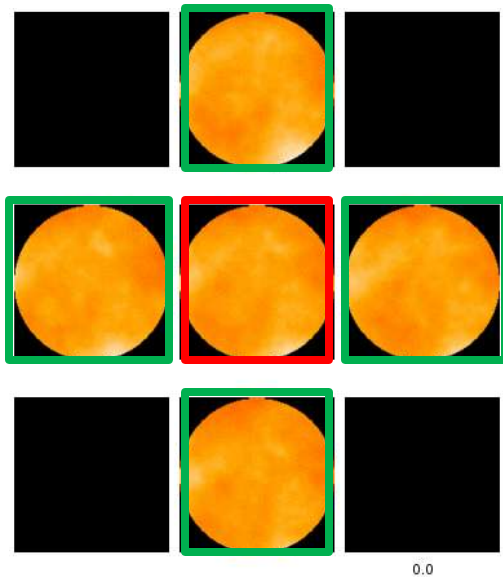


高速(1000フレーム毎秒)、低読み出しノイズ(増幅後 $1e$ 以下)の電子増幅CCD(electron-multiplication CCD: EM-CCD: 写真左)の読み出し試験を行い、マイクロレンズアレイと組み合わせて高速、大ダイナミックレンジのシャックハルトマン波面センサーを作成し、その評価を行う。

- 1) EM-CCD (写真左) は E2V より既に購入済み。
- 2) 読み出し回路製作についてカナダのメーカーに発注中(写真中)。
- 3) 市販のマイクロレンズアレイ(写真右)を購入して組み合わせる。
- 4) 多天体補償光学系で用いるためにヘッド部分の小型化を図った独自のデュワーを作成する。読み出し試験を進めてから設計。

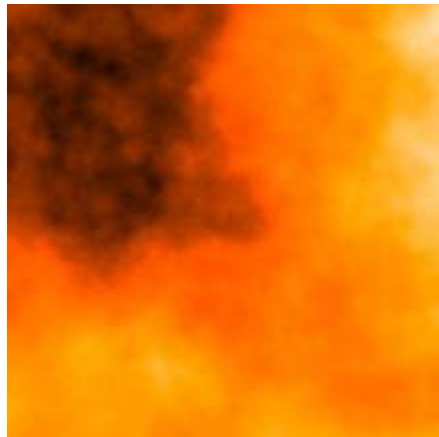
Tomographic reconstruction

周辺の4個の星(下図緑枠:ガイド星と想定)の波面(位相差)の情報から中心の星(下図赤枠:ターゲットと想定)の波面の推定をする。



Tomographic reconstructoin

フーリエ空間での推定アルゴリズムを用いて計算した実際の波面の推定結果の一例を下に示す。まだ十分な精度の推定ができていない。ガイド星の置き方のパラメータなどを変えてさらにテストを試みる。(詳しくは http://www.astr.tohoku.ac.jp/~akiyama/index_Res_TMTinst.html)



ターゲット方向の波面

MK r0=0.20m
RMS=3405nm

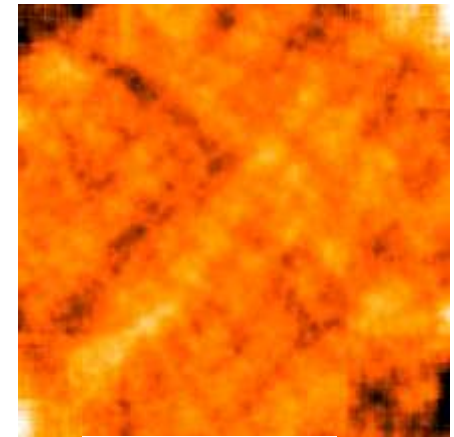


推定した波面



推定の残差
(同じスケール)

RMS=176nm



推定の残差
(強調)



□ GPGPU による高速並列計算の導入

- 波面センサーから出てくるデータレートは 180Mbyte/s/WFS 程度。
- おもな演算は行列の掛け算。データ転送速度が十分早ければ十分高速に計算可能。Required: 200 Gflops < Current: 500 Gflops
- 実際に後述する実験室システムにGPU搭載のPCを組み込んで実証する。

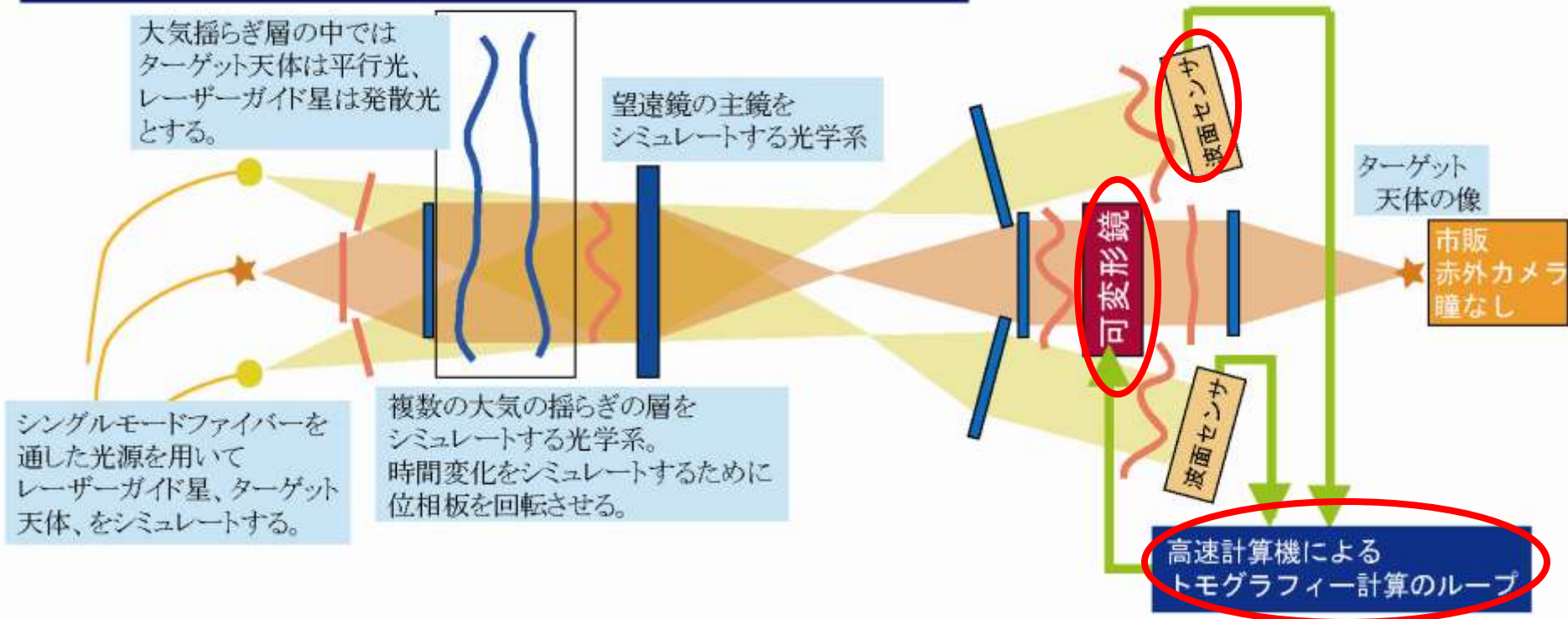
□ アルゴリズムの確立

- どこまで推定精度を上げられるか？
- 数理科学分野との連携を始める。新学術(画像科学)に参加。

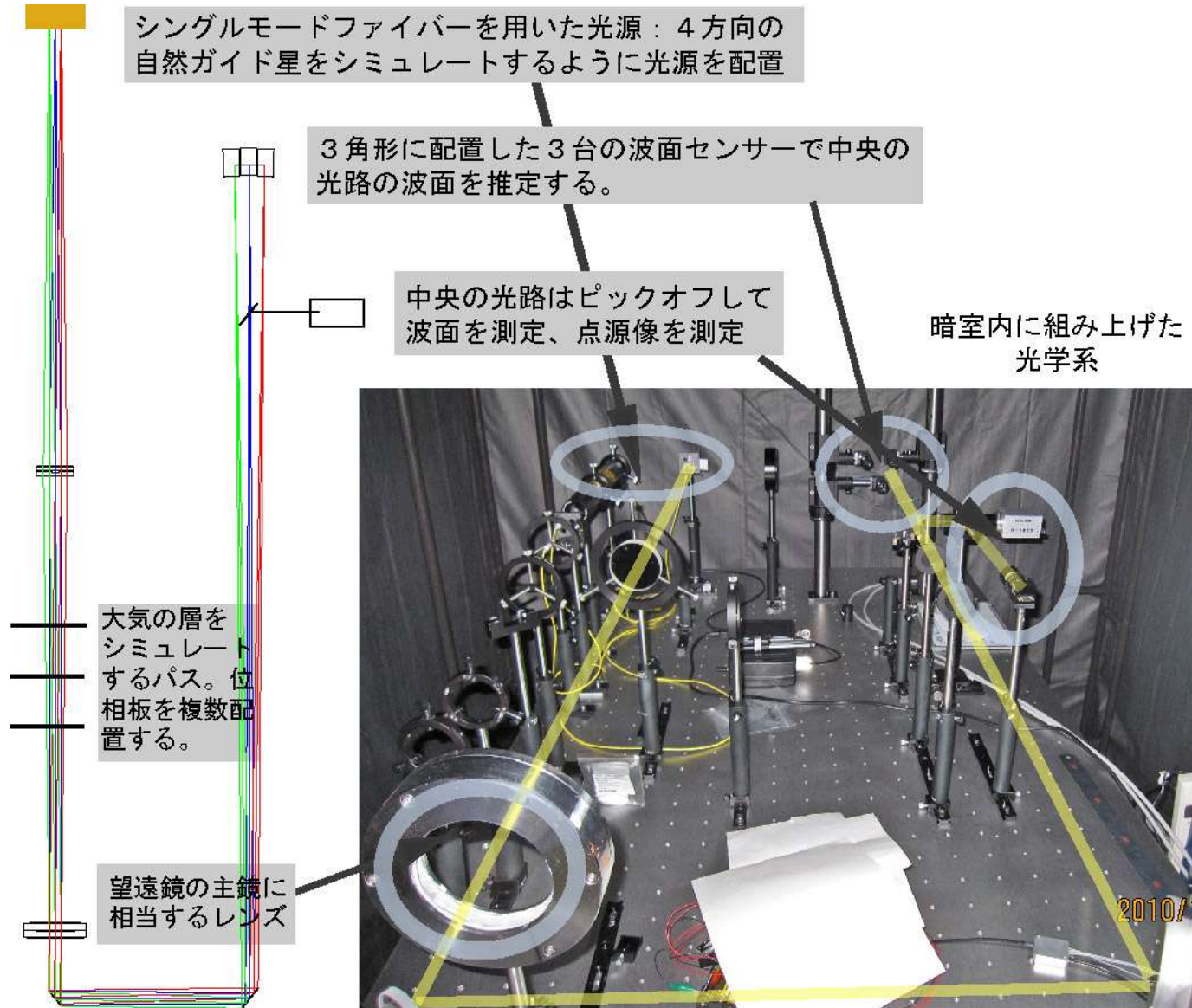
Optics lab. Simulater of MOAO system

実験室で多天体補償光学系のシミュレーションを行う。模擬ガイド星、大気乱流、波面計測を組み合わせ、実際に可変形鏡を動かしたうえで、赤外線で点源の観測を行う

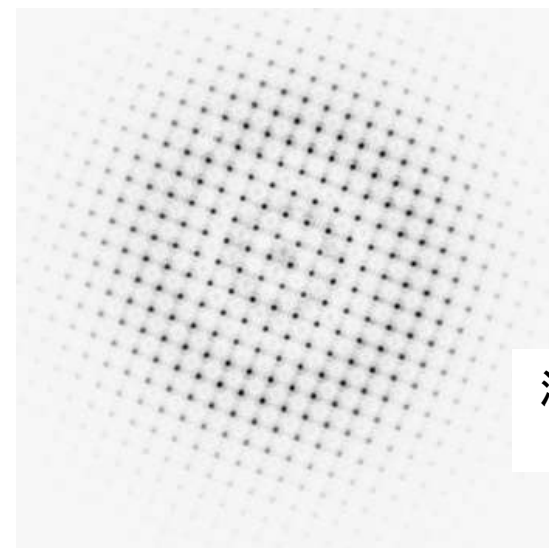
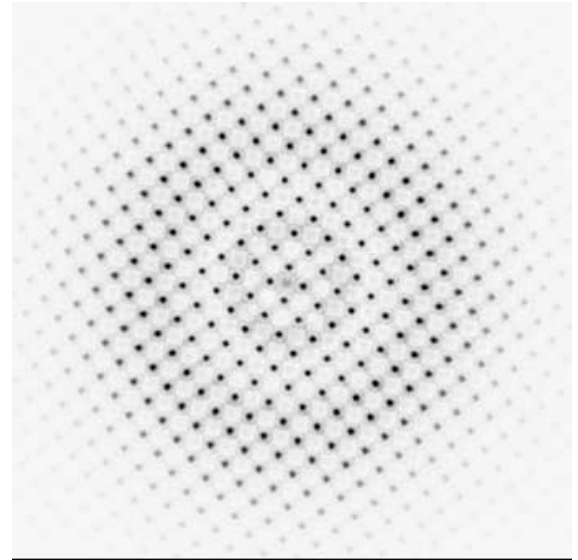
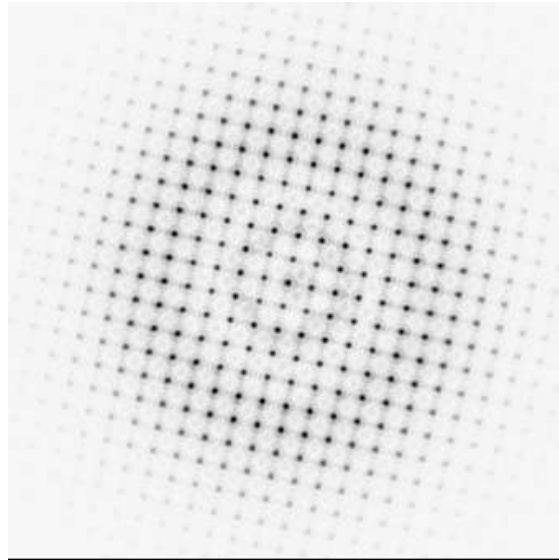
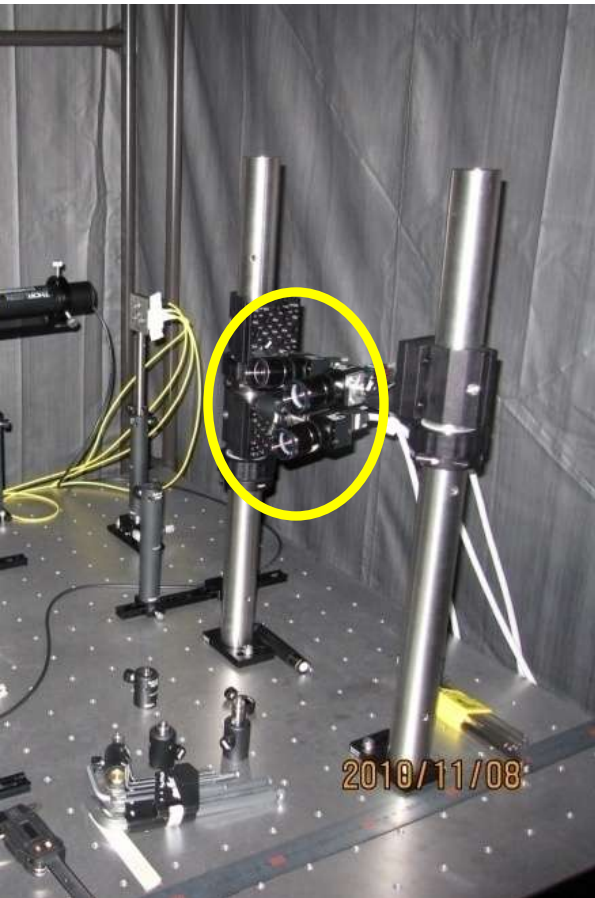
多天体補償光学システムを実証するための実験室システム



Optics lab. Simulator of MOAO system (B4 Y.Ohno, C.Hara)

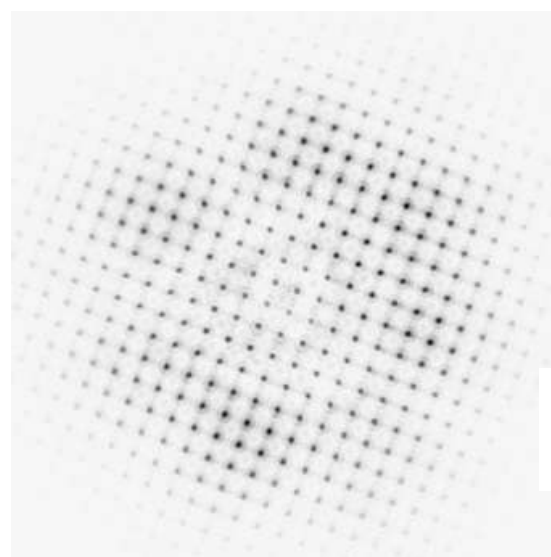
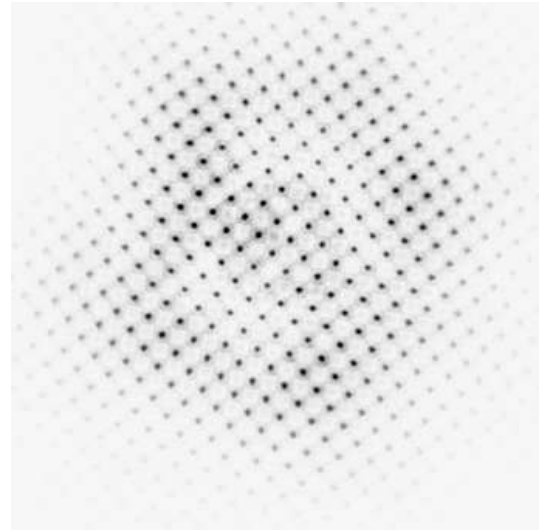
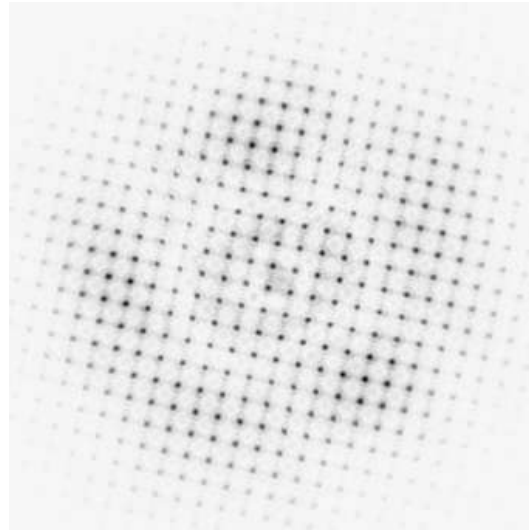
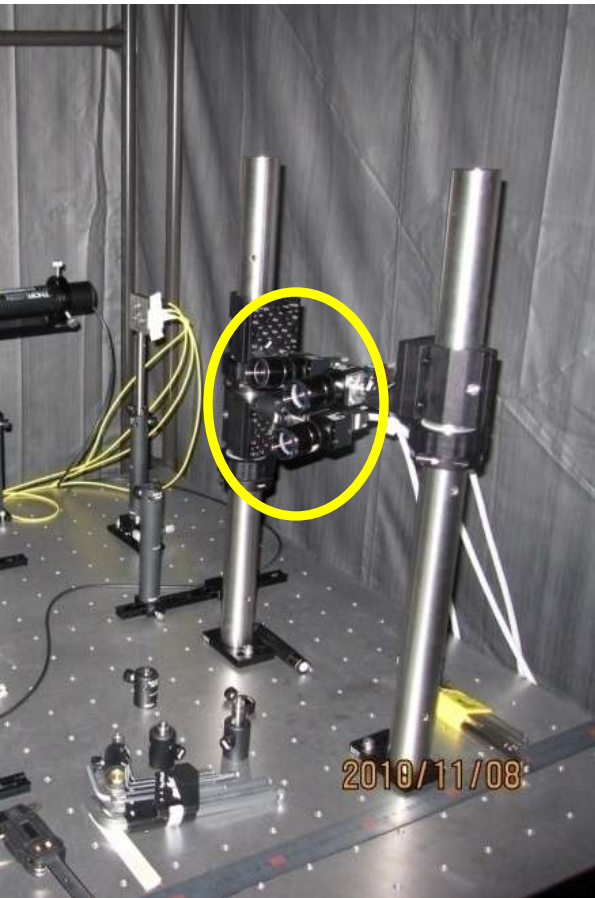


Optics lab. Simulator of MOAO system (B4 Y.Ohno, C.Hara)



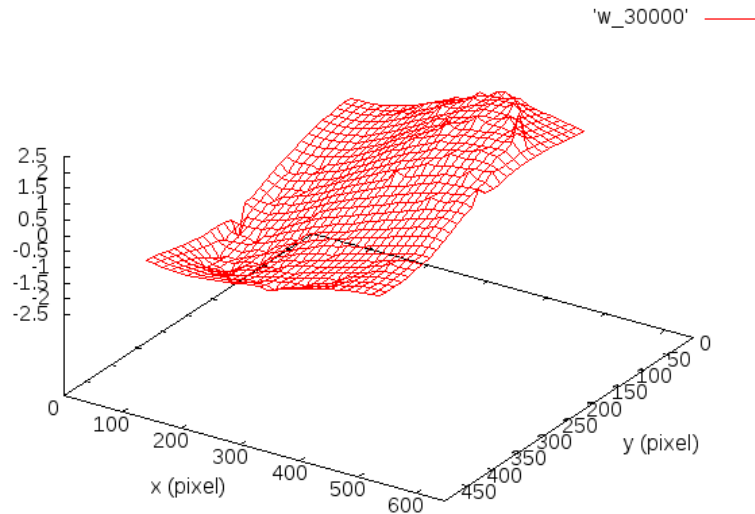
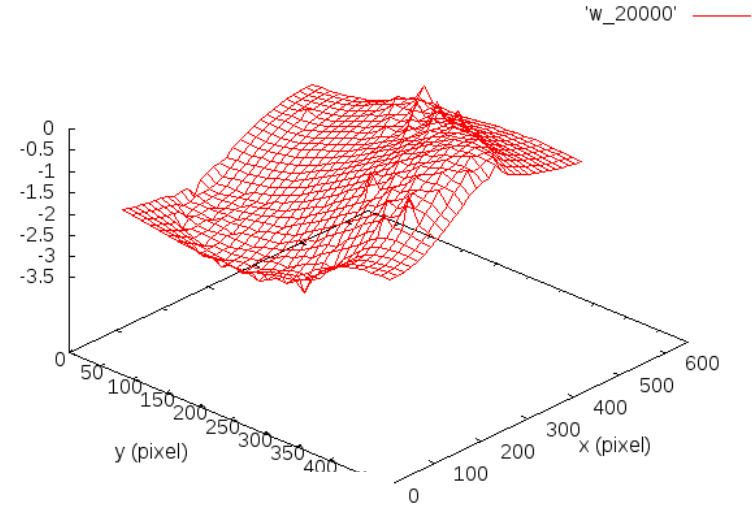
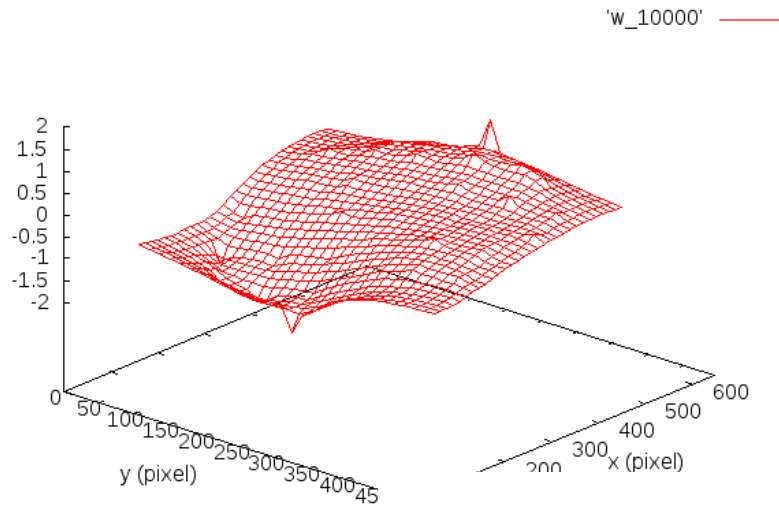
波面センサーリファレンス画像

Optics lab. Simulator of MOAO system (B4 Y.Ohno, C.Hara)



位相板を入れた後の
画像

Optics lab. Simulater of MOAO system (B4 Y.Ohno, C.Hara)



再構成された波面。
トモグラフィックな推
定はこれから。

CT広視野補償光学系の試験年次計画（新学術:計画研究で申請）

準備状況

2011(H23)年度

2012(H24)年度

2013(H25)年度

2014(H26)年度

2015(H27)年度

R&D1 小型多素子大ストローク可変形鏡の開発

揺らぎの補正素子の開発

羽根一博（連携研究者）と共に
工学研究科既存施設を活用し実行

羽根一博（連携研究者）と共に
本申請経費にて研究員を雇用して実行

小型プロトタイプ -ver1試作	小型プロトタイプ -ver2試作	64x64素子プロト タイプ-ver1試作	64x64素子プロト タイプ-ver1駆動	64x64素子プロト タイプ-ver2駆動
小型プロトタイプ -ver1駆動評価	小型プロトタイプ -ver2駆動評価	64x64素子駆動 回路製作	64x64素子プロト タイプ-ver2試作	

R&D2 多素子高速高絶対精度の波面センサー開発

揺らぎ測定高速カメラの開発

大学院生を中心に国立
天文台共同開発にて実行

大学院生を中心に本申請経費にて実行

小型EMCCD 波面センサー 高速読み出し試験	小型EMCCD 波面センサー製作 小型EMCCD 波面センサー評価	大型EMCCD 波面センサー製作 大型EMCCD 波面センサー評価	大型EMCCD波面 センサー1台製作	大型EMCCD波面 センサー1台製作
-------------------------------	--	--	-----------------------	-----------------------

R&D3 CT広視野補償光学系の実証

推定アルゴリズムの確立、高速化

研究代表者が国立
天文台大学支援にて実行

秋山正幸（研究代表者）
が若手研究(B)応募中で実行

研究代表者が国立天文台補償光学グループ
（連携研究者）と共に本申請経費にて実行

多天体補償光学系 シミュレータ 光学系の立ち上げ	波面測定の 精度評価 GPGPU並列計算の 波面推定への導入	波面推定の 高精度化 GPGPU並列計算に よる高速化の実証	波面センサー2台 での波面推定の 確認	波面センサー3台 可変形鏡 を合わせた CT広視野補償 光学系の評価
--------------------------------	---	---	---------------------------	--

実機製作の評価
取りまとめ

すばる望遠鏡
での実証機へ
組み込み試験

30m望遠鏡で
実現可能な
概念設計の確立

2020年代 30m望遠鏡の時代へ

現在検討している広視野補償光学系は
すばるで試験 (RAVEN:大屋さんトーク にも要素技術 - GPGPU,
波面センサー - の部分できちんと絡む、ビクトリア大学、ハワ
イ観測所との共同研究)、
30mで実機として実現を目指すタイムスケール
大学のグループとしては種まきのフェーズ



Our approach as a university group, and our demand

1. 開発要素の確定、仕様の確定、アイデアの掘り起こし
 - 波面センサーの実験やトモグラフィーの実験は今この段階。学部生の卒業研究としてまとめれば良い。
 - 基礎実験に対する予算 <1,000K JPY
2. アイデアを確認するための基礎実験
 - 可変形鏡の開発やGPGPU AO-ループは今この段階。修士や博士論文としてまとめれば良い。
 - ポスドク雇用、共通要素技術(読出回路など)の流用で加速
 - 小さい枠の予算 ~1,000K JPY
3. 実機で使えるものにするためメーカーを巻き込んでの開発
 - 可変形鏡の次のステップ。素子の評価や望遠鏡での試験観測が博士論文としてまとめれば良い。
 - まとまった予算 >10,000K JPY
4. 観測装置としての実現…

University group demand regarding Subaru/TMT development

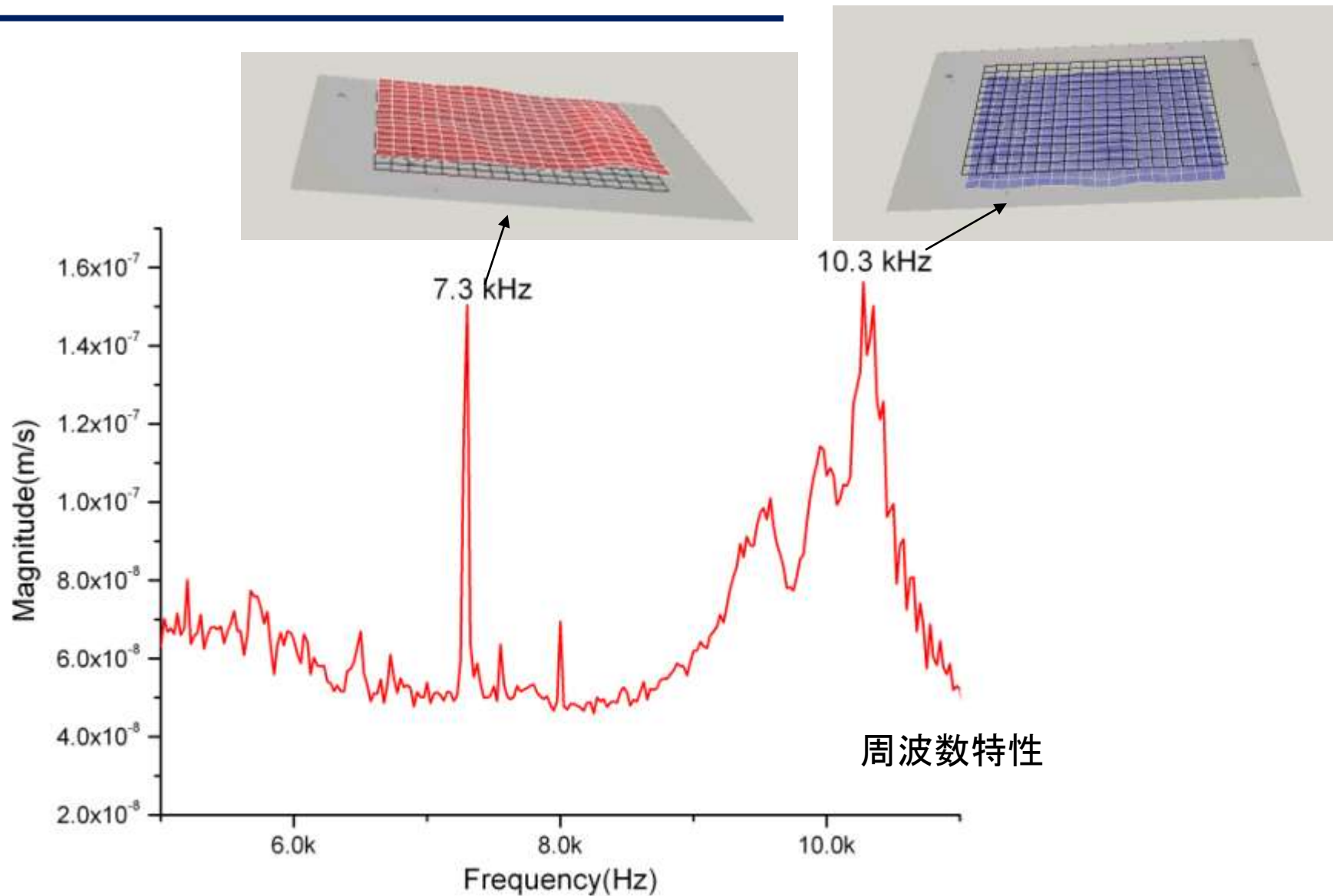
- 要素技術(光学系、検出器、真空、分散素子、コーティング)に関して育成した人間を全分野について大学のグループでキープし続けることは無理。要素技術の各分野について先端センターに継続的に開発を進める「共同利用」係を置いてほしい。
 - ❖ 例:メシア活動の継続? 赤外への発展?
 - ❖ 分散素子の継続的開発(VPH; 海老塚さんトークなど)
 - ❖ 天文台技術職員の長期派遣
- あるいは大学間で協力を進めることも必要。
 - ❖ 定期的に(地上?)光赤外技術ワークショップを開く?
- 倍率の高い競争的資金だけではとんがった活動だけが取り上げられる。細々した基礎開発を継続的にサポートする予算枠が欲しい。
 - ❖ 共同開発の公募を1年に一度でなく複数回にする?

- 光赤外分野としてすばるで培った何を持って国際協力に参画するのか？
 - ❖ それぞれの要素技術の開発について(ゆるい)ロードマップを作成する必要性は？

- 光赤外分野以外(多波長、工学系、光学系、地球物理系)へどのように装置開発の連携を広げるか？
 - ❖ 定期的なワークショップを広い範囲に宣伝して行うことでそ野を広げられるか？
 - ❖ 多分野での認知度を上げて間接的に予算獲得につながるか？

- “International TMT fund” を用いた開発につなげる。

Development of large-stroke (20um) large-elements (3600ele) small MEMS deformable mirror (Wu Tong: D1 Hane Lab.)



Development of large-stroke (20um) large-elements (3600ele) small MEMS deformable mirror (Wu Tong: D1 Hane Lab.)

