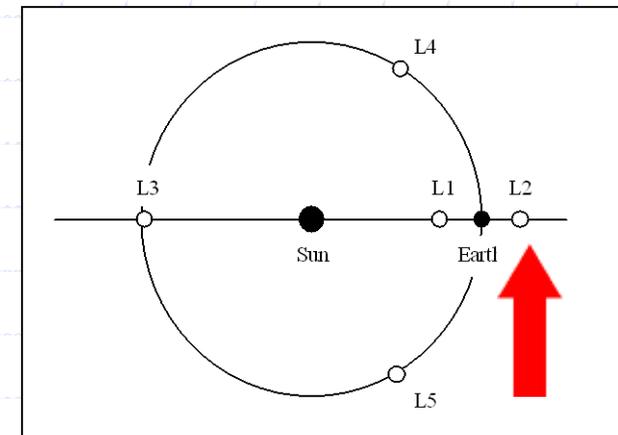
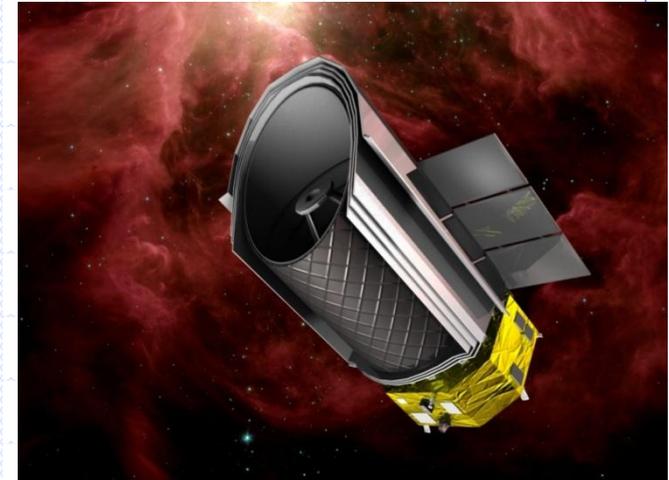


# SPICA中間赤外観測装置にむけた 技術開発

片坐 宏一 ISAS/JAXA

# SPICA Mission Overview

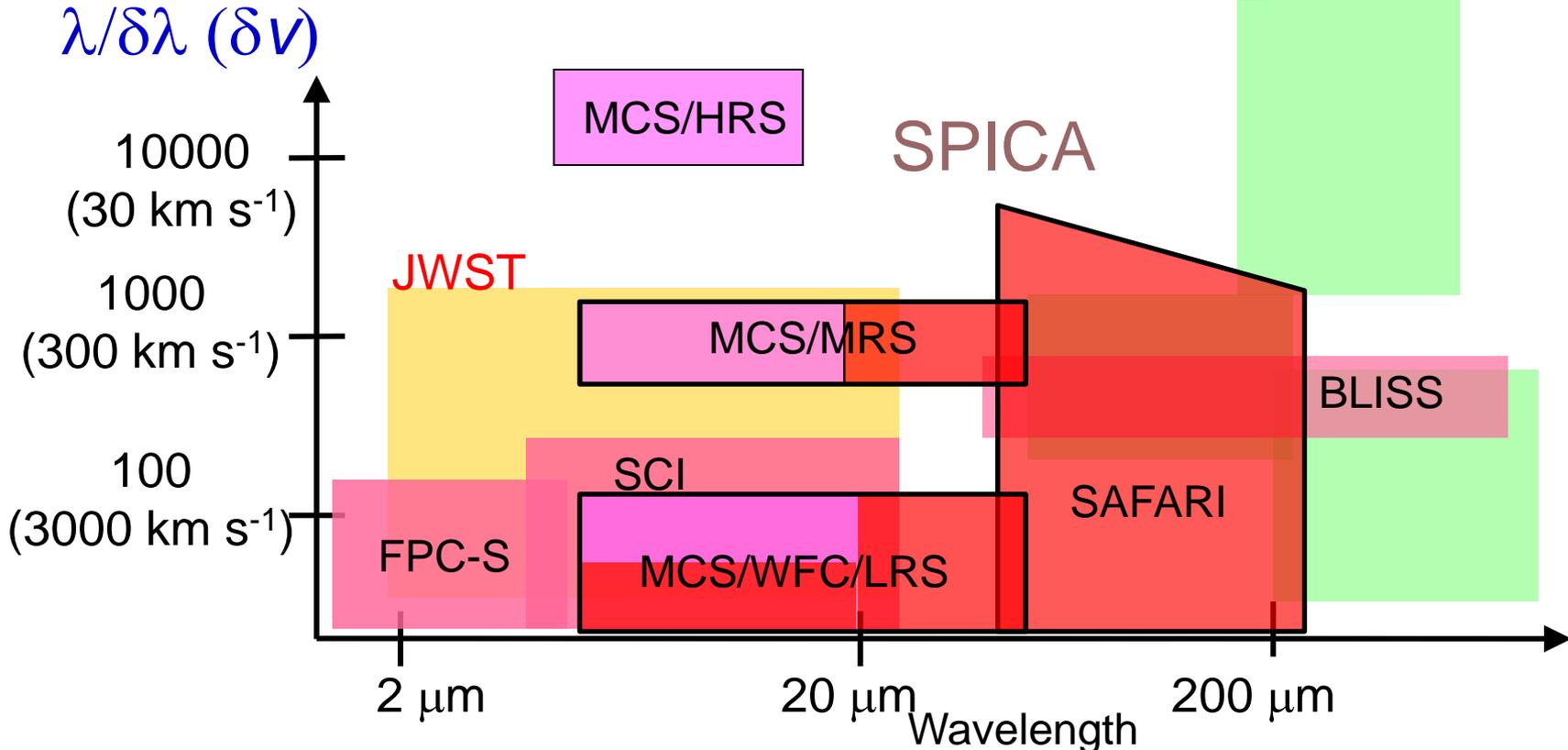
- ◆ Telescope: 3.2m (EPD 3.0m), 6 K
  - Superior Sensitivity
  - Good spatial resolution
- ◆ Core wavelength: 5-210  $\mu\text{m}$ 
  - MIR Instrument
  - Far-Infrared Instrument (SAFARI)
- ◆ Orbit: Sun-Earth L2 Halo
- ◆ Mission Life
  - 3 years (nominal)
  - 5 years (goal)
- ◆ Weight: 3.7 t
- ◆ Launch: FY2018 (original plan)  
-> early 2020s (2022)
- ◆ International mission
  - Japan, Europe, USA, Korea, (Taiwan)





# Focal Plane Instruments

- Mid-IR Camera and Spectrometer (MCS)
- SPICA Coronagraph Instrument (SCI)
- **SPICA Far-IR Instrument (SAFARI)** European Consortium
- **Focal Plane Camera (Guider, Science) FPC** Korea
- **US proposed Instrument** US



Wavelength coverage vs Resolving Power



# Mid-Infrared Camera and Spectrometer

## 5 -- 38 $\mu$ m(--50 $\mu$ m) Camera and Spectrometer

- Wide Field Camera

**広視野**

- 5 arcminutes square FOV x 2,  $\lambda\lambda$  5--25 and 20--38 $\mu$ m

- High Resolution Spectrograph

**高分解能**

- $R \sim 30,000$   $\lambda\lambda$  4--8  $\mu$ m and 12--18 $\mu$ m

- Mid Resolution Spectrograph

**コア波長域 / 正確な測定**

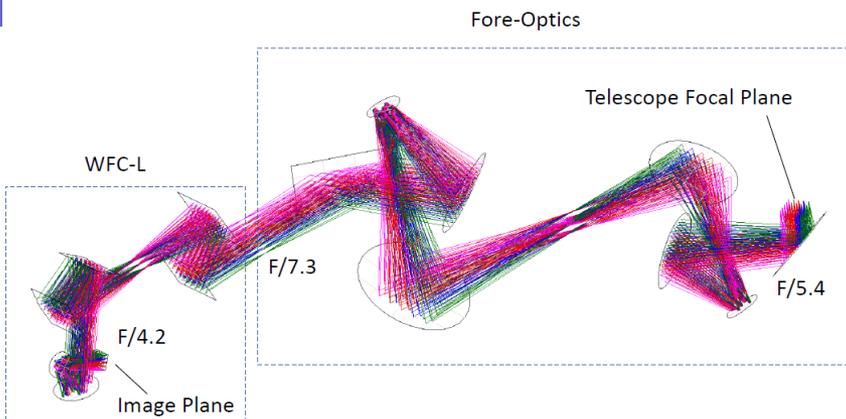
- IFU by image slicer
- $R \sim 1500$ --700  $\lambda\lambda$  (10--20)+(20--36) $\mu$ m at once

- Low Resolution Spectrograph

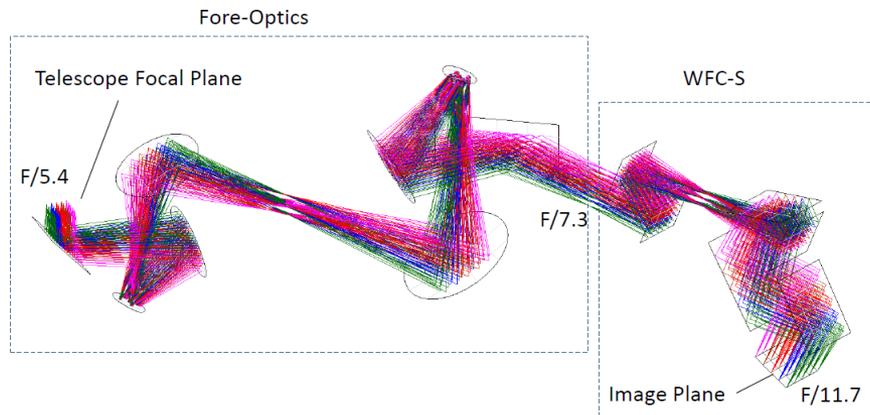
**高感度**

- $R \sim 50$ --100  $\lambda\lambda$  5-26 $\mu$ m and (20-38 or 25-48) $\mu$ m

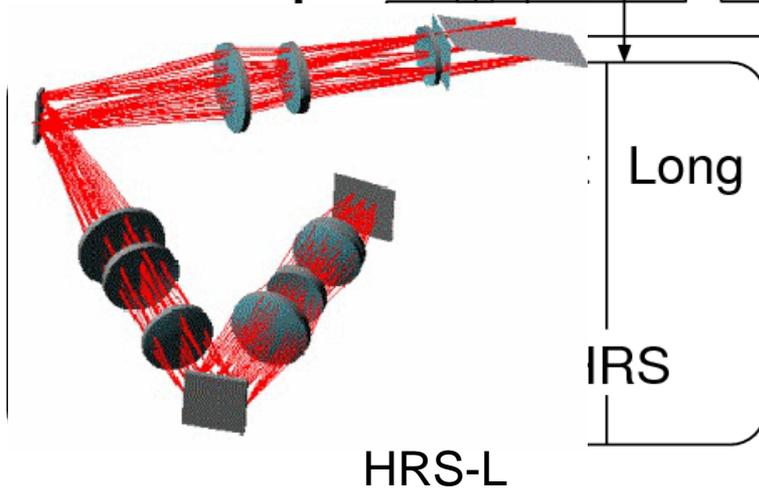
# WFC-L 3D View



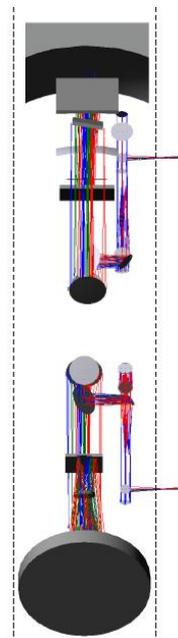
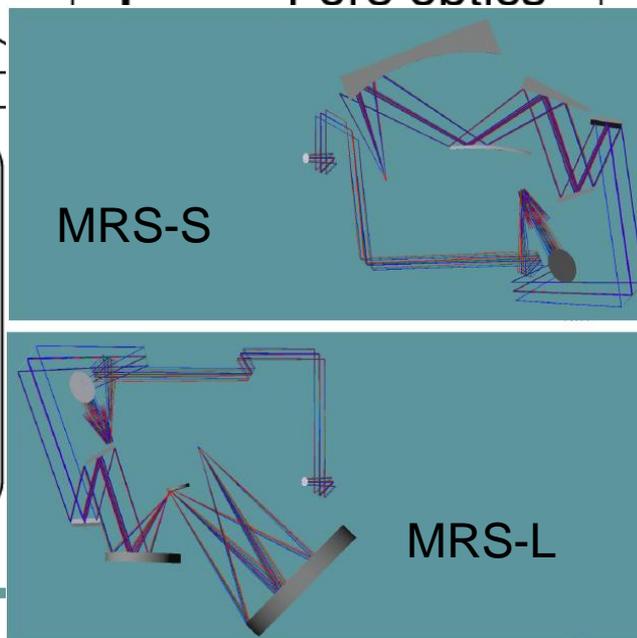
# WFC-S 3D View



## Fore optics



## Fore optics



# 技術開発

- 光学系 広視野反射光学系
- 光学素子 自由曲面鏡
- 光学素子 エマルジョン回折格子
- 光学素子 バンドパスフィルター
- 冷却系 配線
- 機構 極低温モータ
- 構造 軽量構造
- 検出器 Si:Sb, Si:As, extended Si:As

# 光学系開発

## ■ 反射系での広視野光学系

- 色収差なし、可視光で検査
- 単一材料で熱収縮の影響なし、常温で検査
- 扱いやすい材料、広帯域で高い反射コート
  
- 設計の問題 – プロジェクト初期に高い障壁
  - 容易とは言えない
  - 見通しが立てにくい
- 製造の問題
- 調整の問題

# 軸外し反射系

## ◆ 反射系

原理的に波長依存性がなく、色収差なし

可視光での調整が可能

光学マウントとミラーを同一材料で作れば、熱収縮でも相似変形

軸外しであればケラレなし

設計手法が一般的でなく、対応業者が少ない

非常に明るい系では(たぶん)設計が難しい

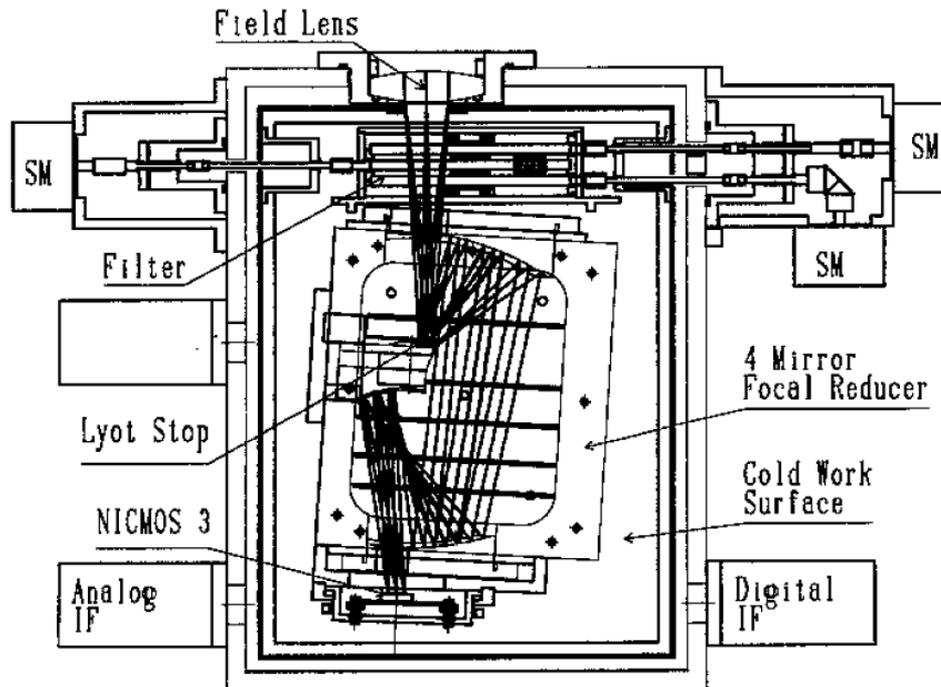
これまで: 個別の工夫

Changさんの理論: 新たな可能性

荒木さんの理論: SPICAの設計

# ◆ PICNIC 近赤カメラ Y.Kobayashi et.al.

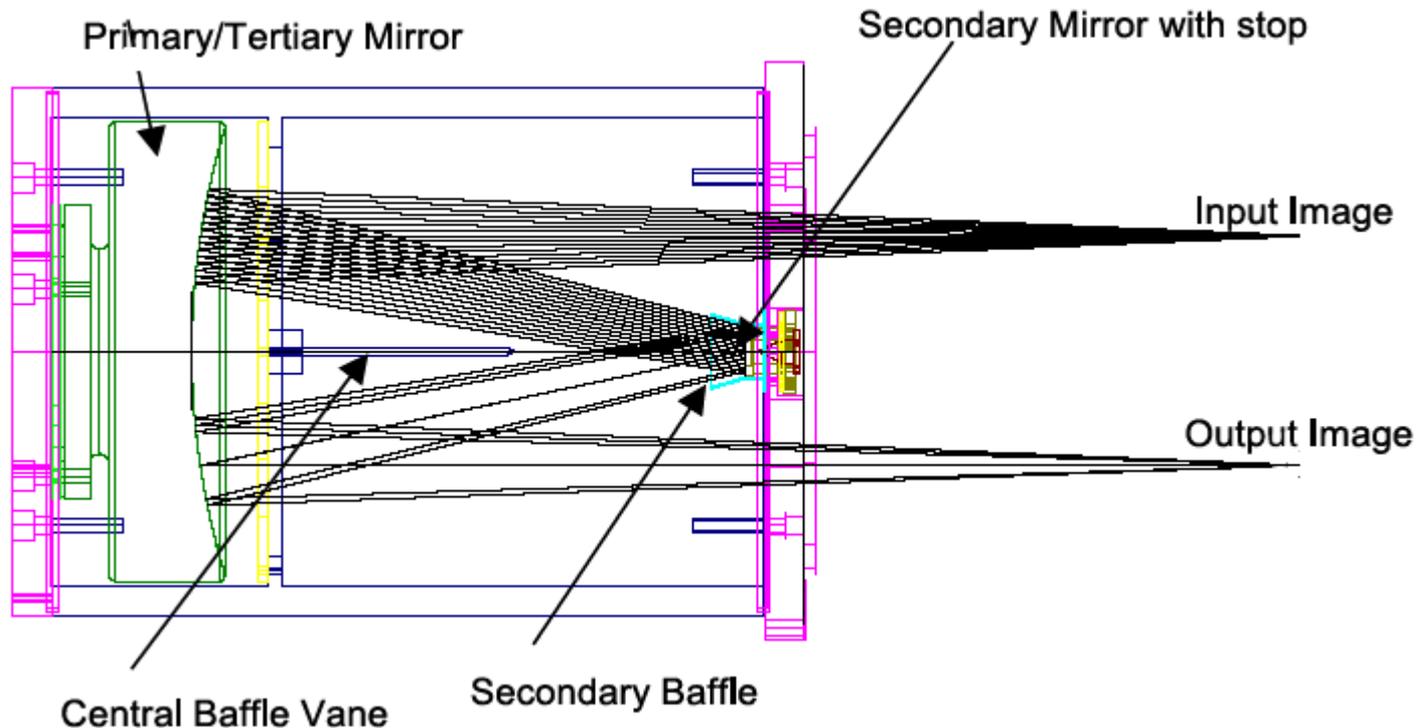
## 軸外し反射系の草分け



◆ Offner 系 : United States Patent 3,748,015, July 24, 1973.

半径Rの凸面と半径2Rの凹面を同一曲率中心におく  
多くの赤外カメラで採用

下の図はUSNO1.55m望遠鏡のカメラ



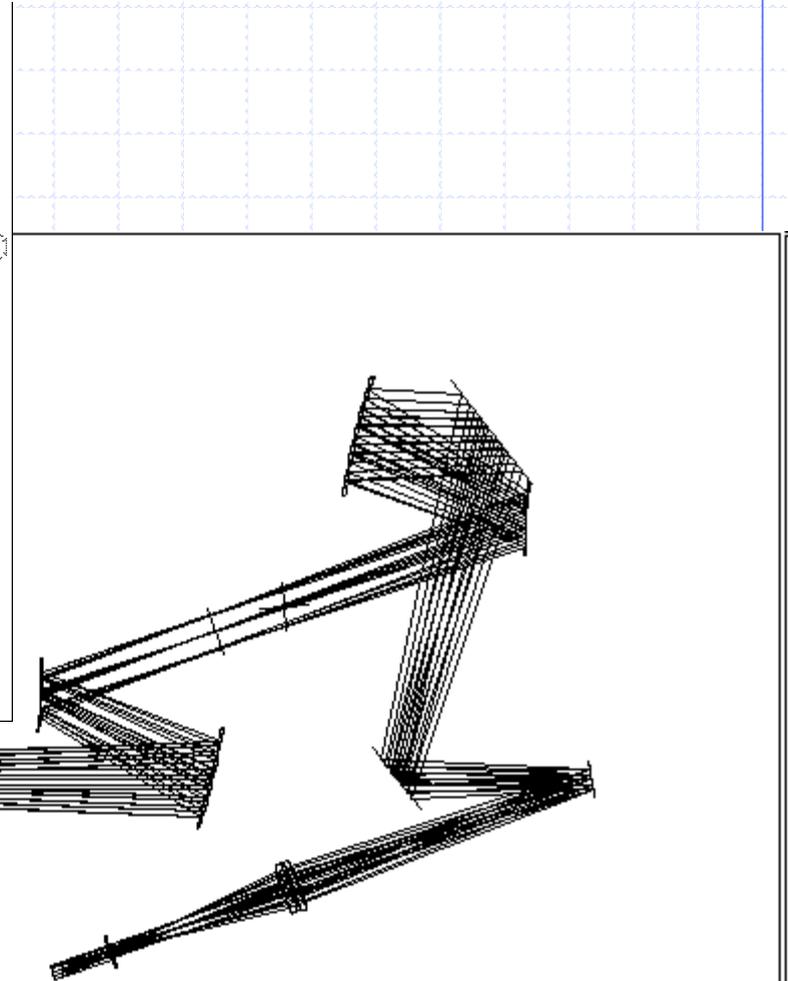
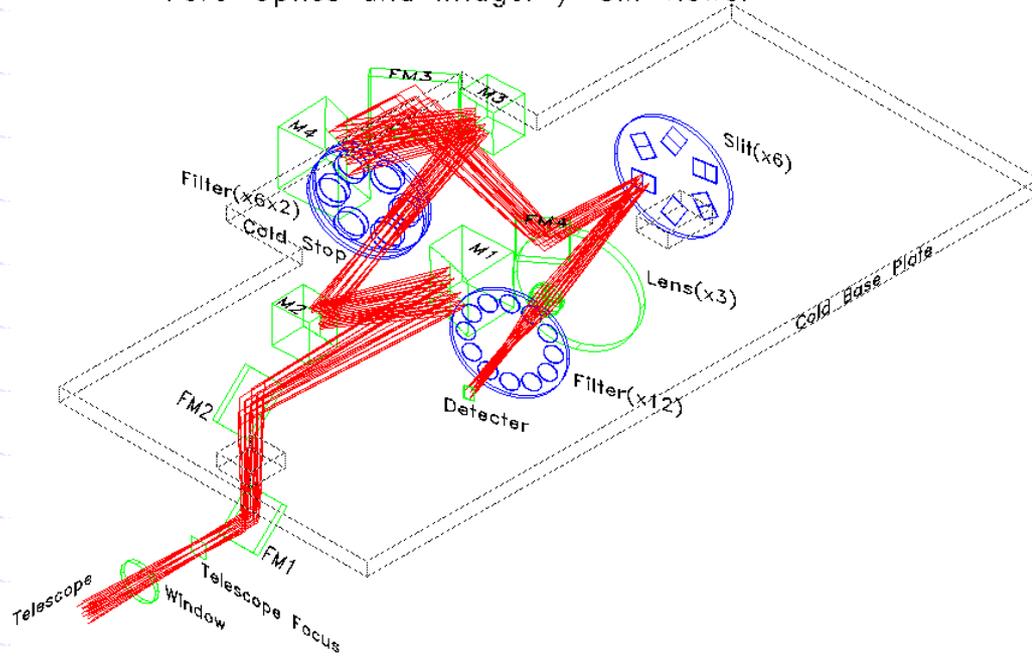
ASTROCAM SPIE 4841 564



# COMICS光学系

COMICS

Fore-Optics and Imager / Slit viewer



100.00 MM

## 設計

共通の軸を持った凸面と凹面の組合せでユニットを作る

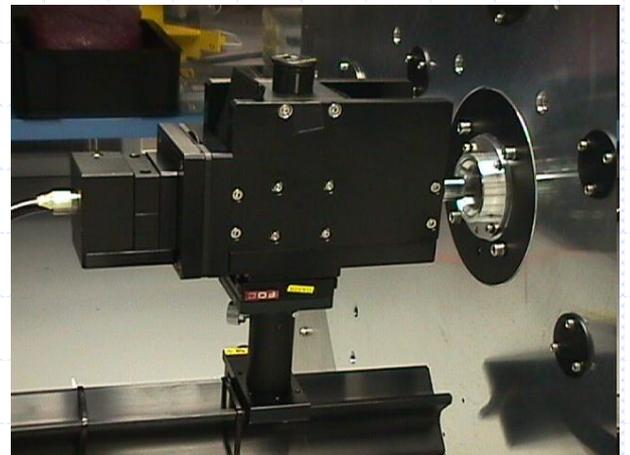
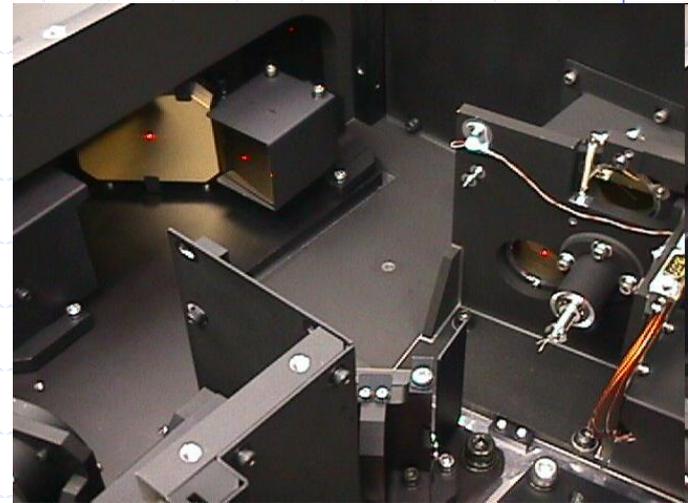
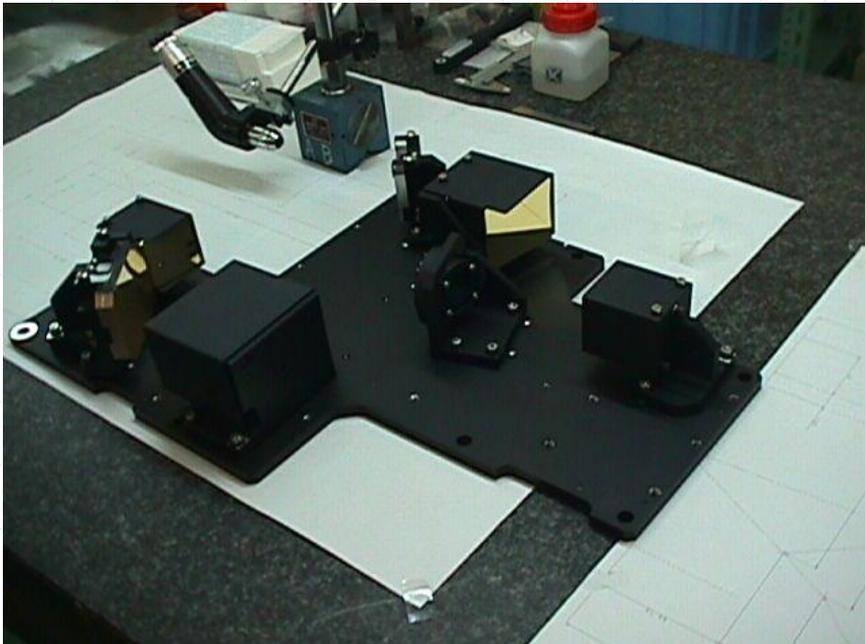
一つのユニットで、平行光 $\leftrightarrow$ 収束光

高次の非球面係数をいれて、強引に最適化解を求めている

## 組み立て、テスト

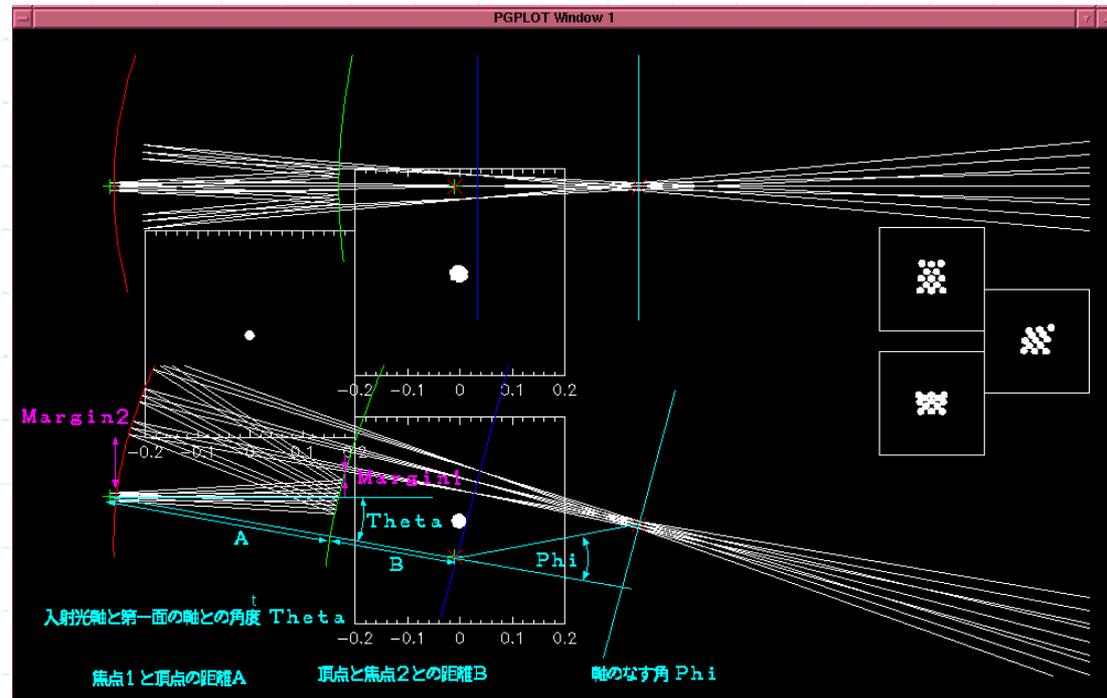
室温で、レーザ・顕微鏡・CCDを用いて調整

そのまま冷却して、まったく問題なし。



## ◆ MIRSIS: 中間赤外イメージスライサーの設計

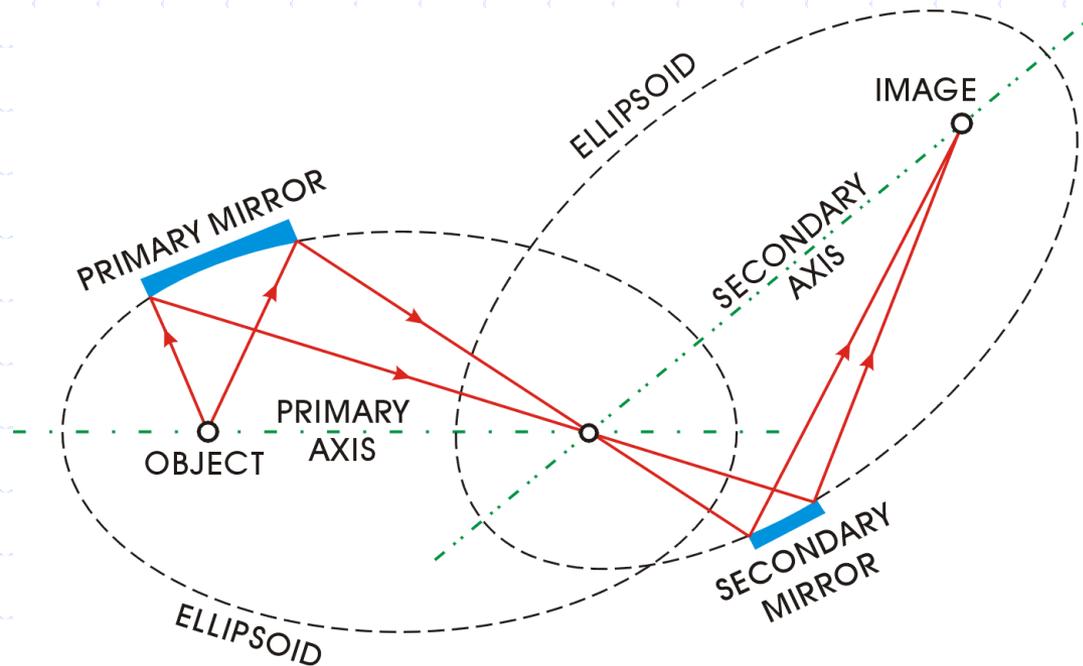
- 理想光学系設計における理想レンズを凹面凸面の組で実現  
平行光線を焦点への収束光線に変換する系
- 入射瞳と出射瞳の関係も条件とする
- ひとつの焦点を共有する二つの二次曲面 (Changのconfocal条件)
- 二次曲面の入射側焦点を入射瞳、出射側を出射瞳位置におく
- 軸外しの角度、点間距離の4パラメータを絨毯爆撃して最適解を探す



# 軸外し反射光学系設計の新しい指針: Seunghyuk Changの系

-- 図はSeunghyuk Changさんより --

- ◆ 共通の焦点を持つ二枚系にし、軸は共通にしない  
Confocal System



## ◆ OPLの展開

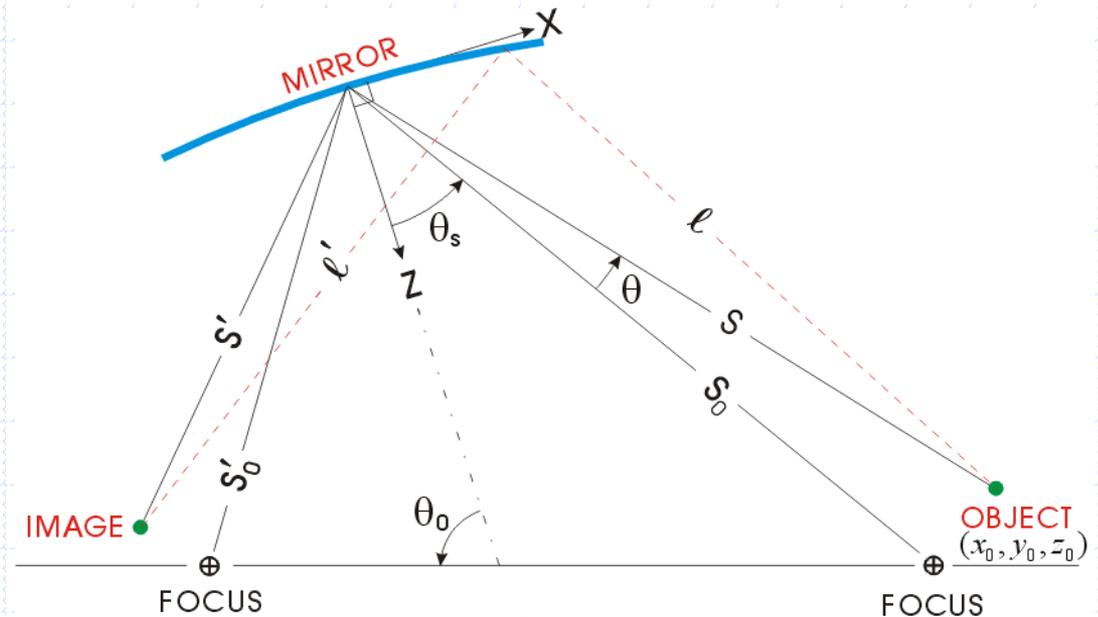
ミラー面での主光線位置を原点にする座標系でOPLを展開

二次曲面の焦点間ではOPLは一定  $s'_0 + s = \text{const.}$

焦点から少し離れた点では、OPLは一定にならない $\Rightarrow$ これを展開

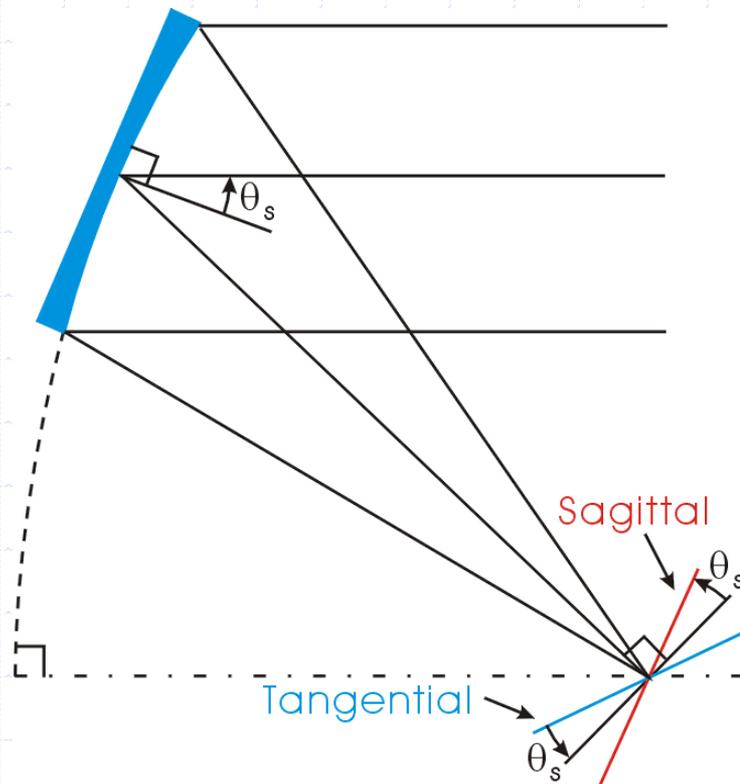
$$OPL = \ell + \ell' = s + s' + \underbrace{A_1 x^2 + A_1' y^2}_{\text{Astigmatism}} + \underbrace{A_2 x^3 + A_2' xy^2}_{\text{Coma}} + O(4)$$

Astigmatism Coma



## ◆ Astigmatism がゼロの面

軸外し系ではsagittal面とtangential面で異なるため大きな非点収差

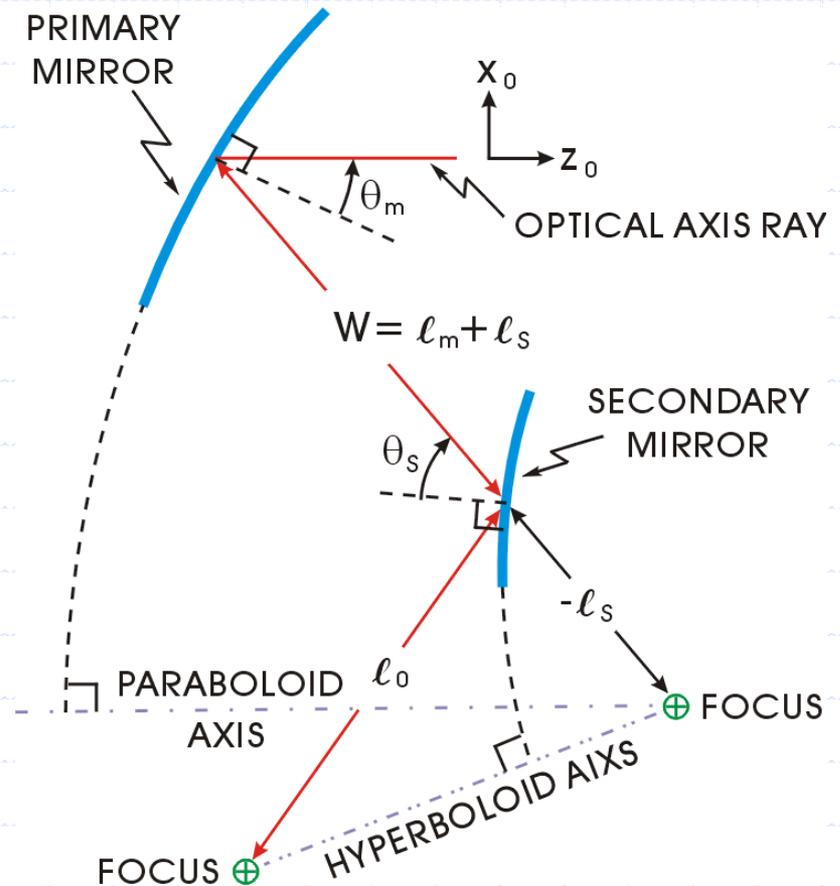


◆ 二枚鏡系では非点の項を消せる！

$$\frac{\ell_m}{R_m} \sin 2\theta_m = \frac{\ell_s}{R_s} \sin 2\theta_s$$

◆ コマの項は放物面と同じに！

$$ATC = \theta \frac{3x_0^2}{4f^2}$$



**軸外し二枚系が放物系と同じ性能を持つ！**

傾いていた非点ゼロ面を二枚系により打ち消しあった(多分、)

# Changさんの系

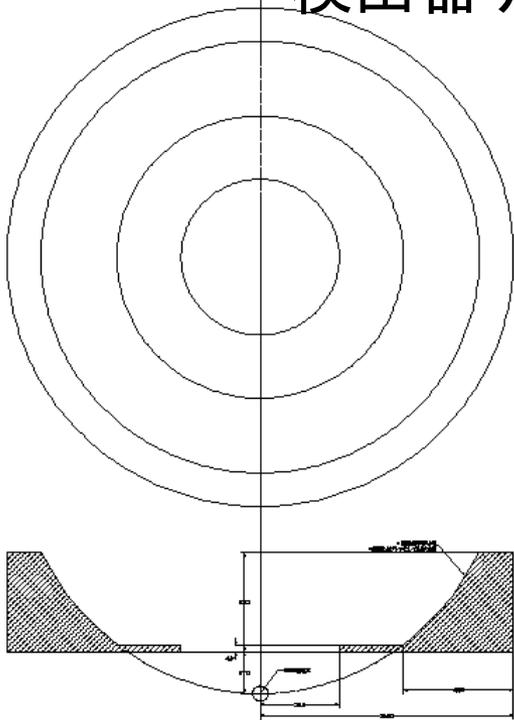
MIMIZUKU(東大天文センターのTAO用中間赤外装置)

回転対称で、超精密切削旋盤加工で作れる

国立天文台の先端技術センター

精密切削加工後のワイヤ放電加工法で同時に数枚製作

→ 検出器テスト用の光学系



# 荒木さんの非共軸系

詳しくは O plus E 2011/5

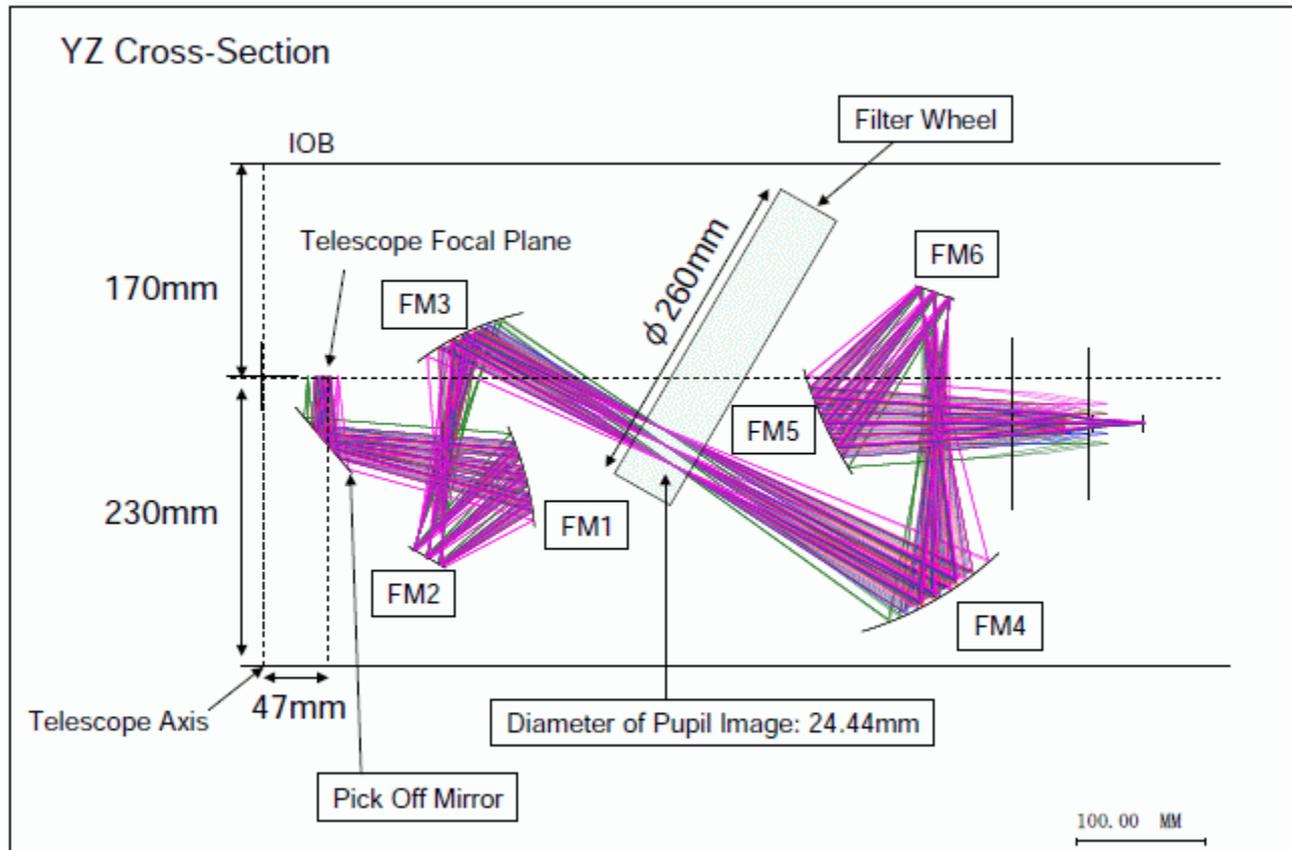
収差論の発展と今後の課題：キャノン 荒木敬介

光学設計における新しい非球面定義式：

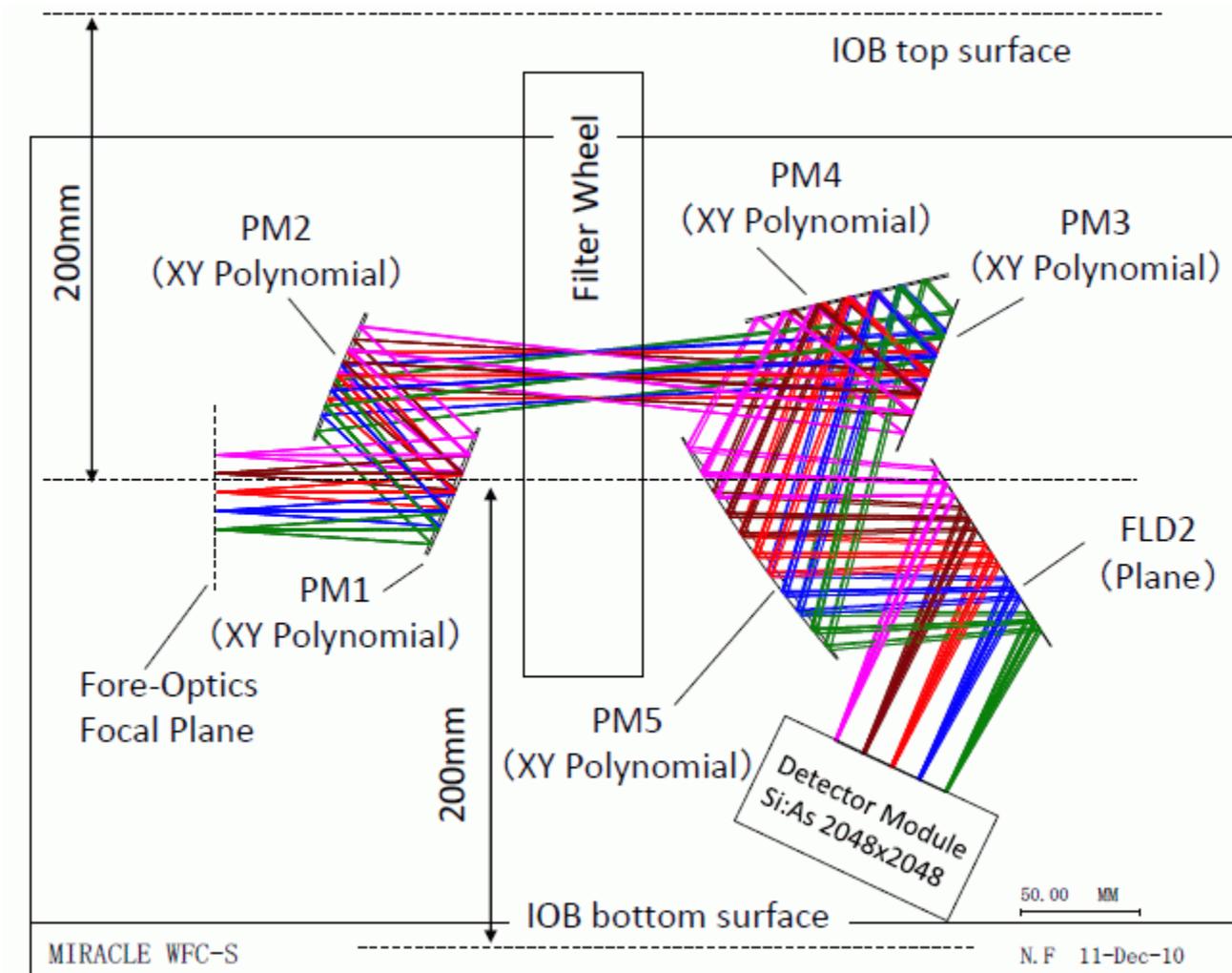
サイバネットシステム 秋山健志

これを受け継いで、藤代/池田(京都産業大学)で設計

# Fore-optics (YZ)



# WFC-S optics



# 自由曲面鏡

- 自由曲面鏡の製作手法で平面を試作
- 切削圧力の測定

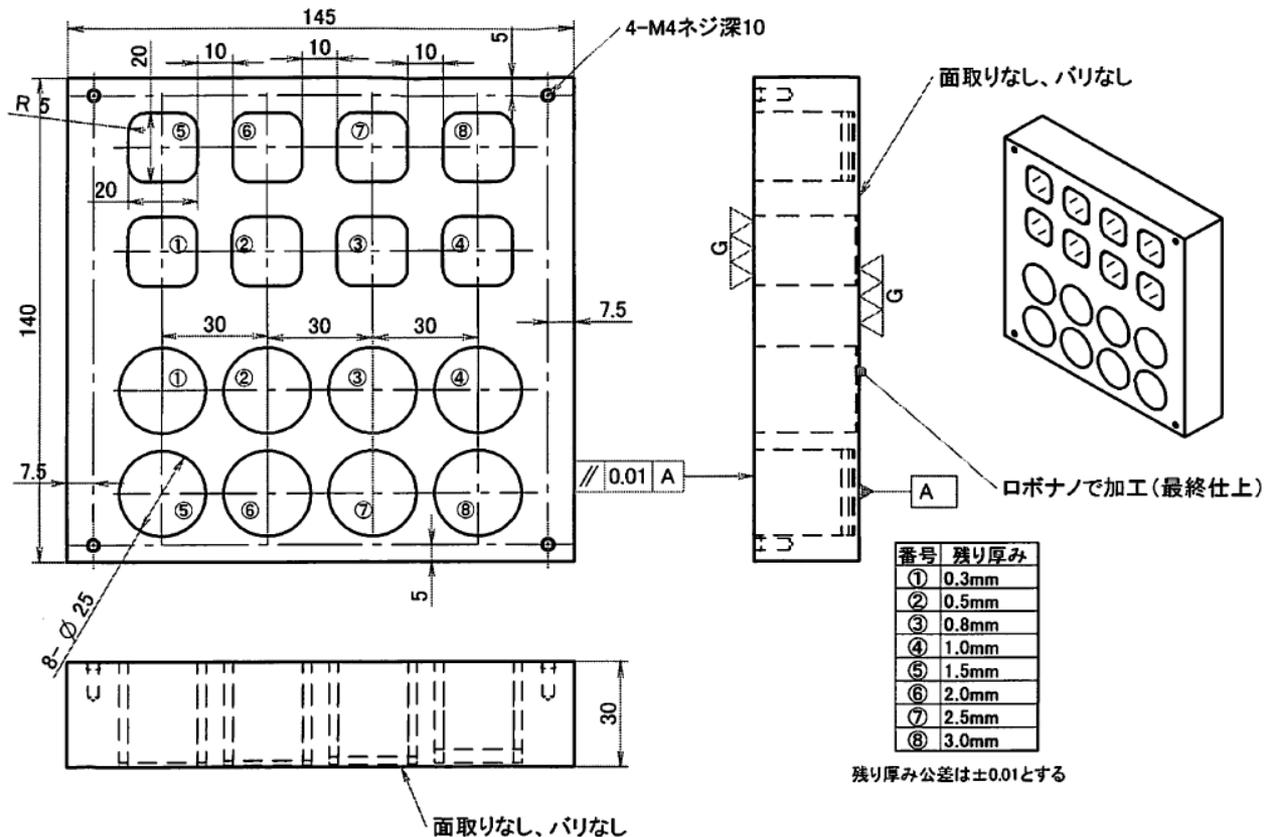
# ミラー形状

## ミラーの形状

面厚さ 0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0mm

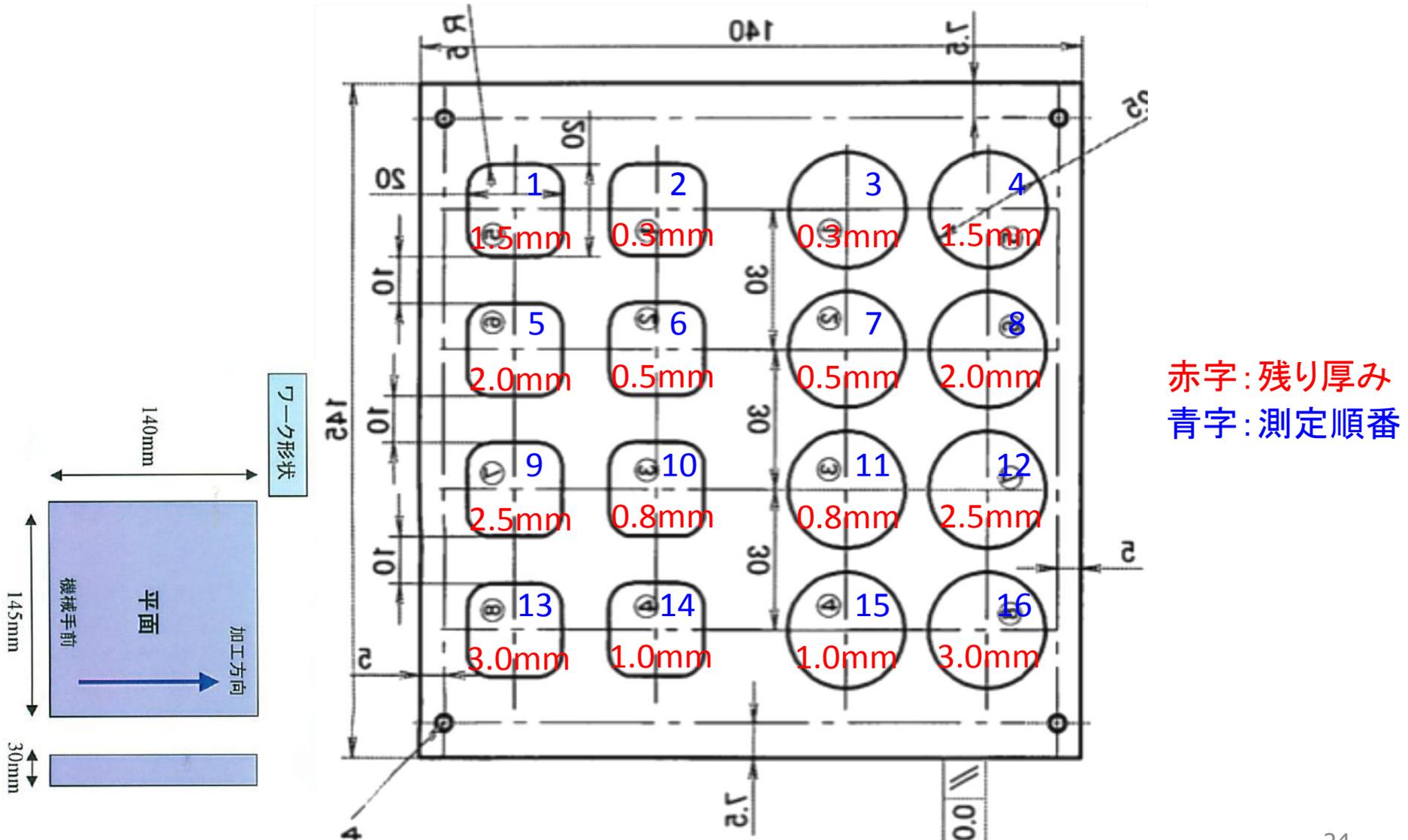
くり抜き形状は直径25mmの円と20x20mmの矩形の2種類

ミラー材料 A6061



# 形状測定

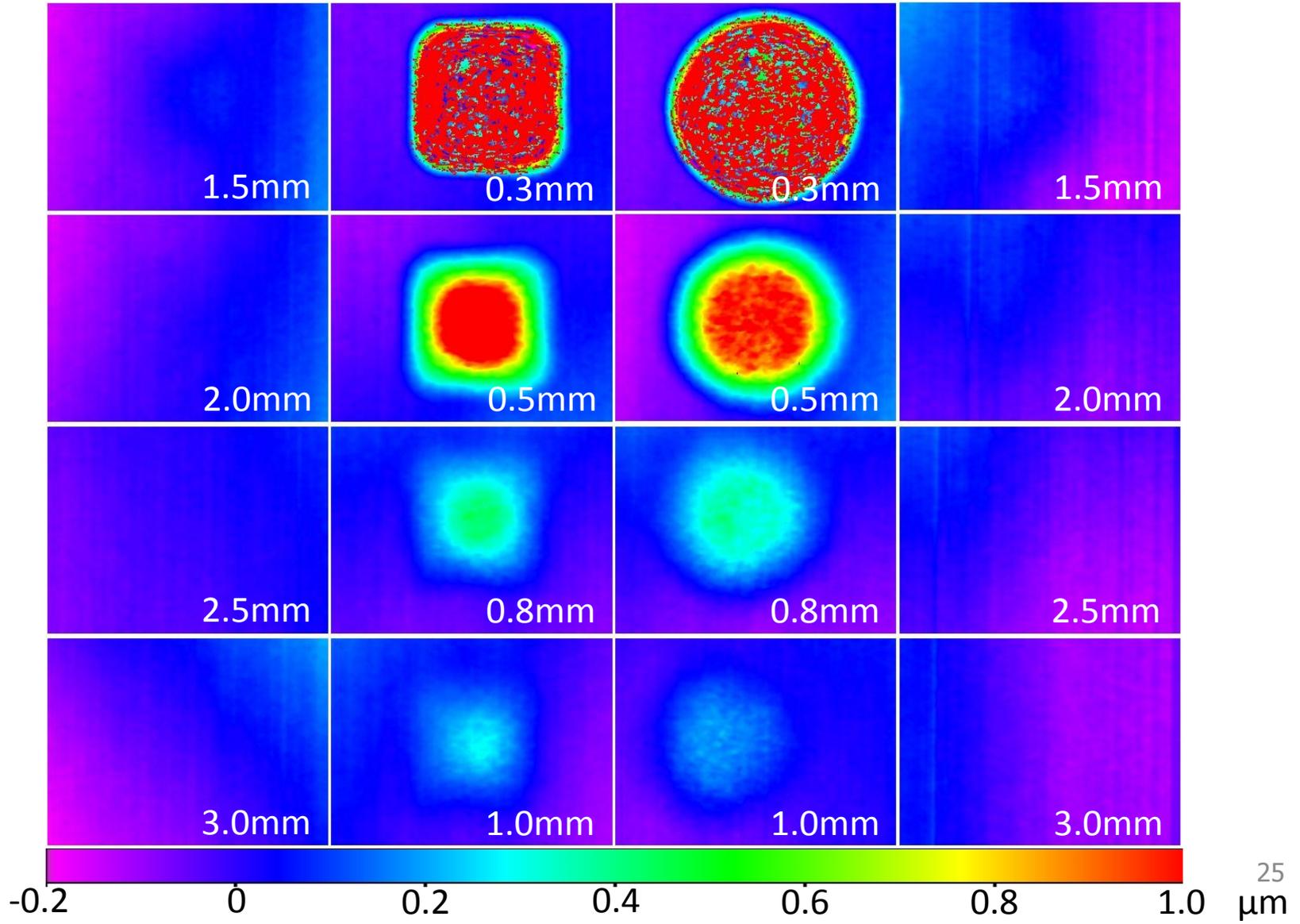
Zygo干渉計により、各くり抜き場所の鏡面形状を測定



鏡面から見た測定時の穴の配置

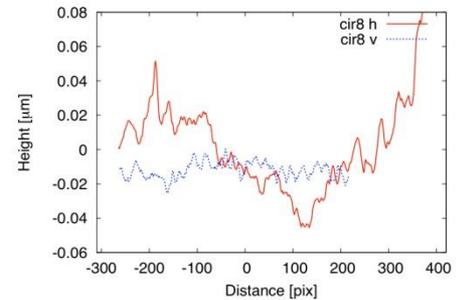
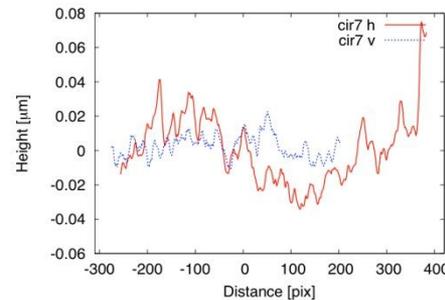
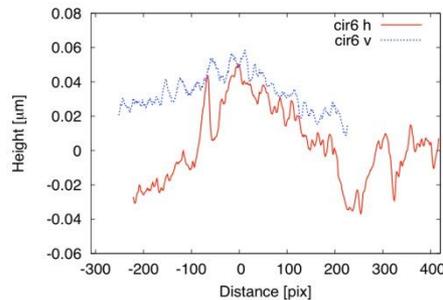
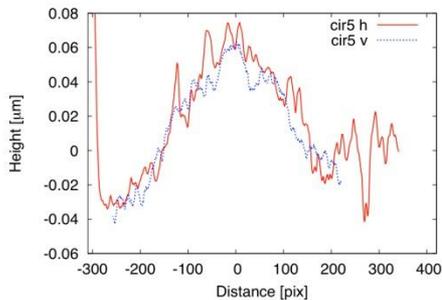
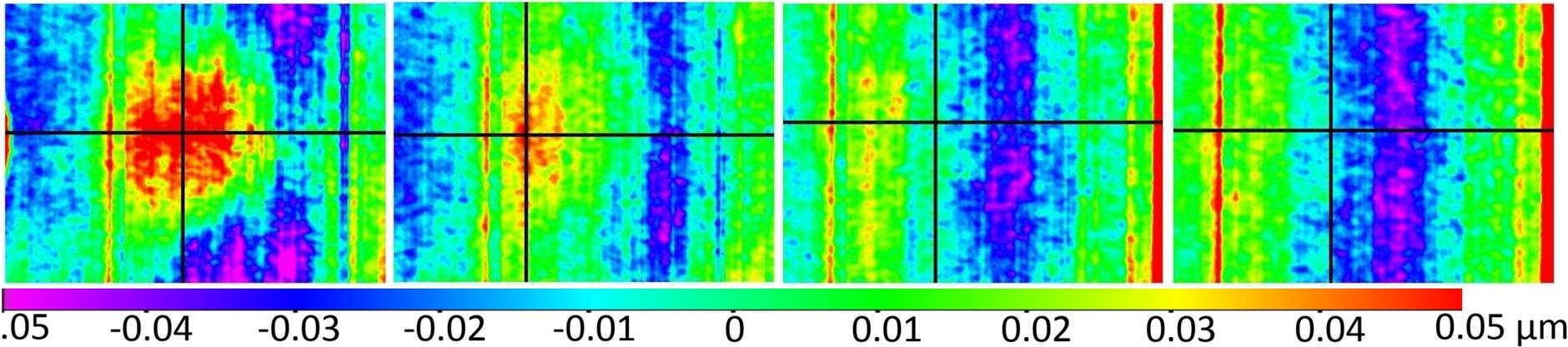
# 結果1

面形状の測定結果 (0.3mm厚の場合は測定レンジ外)



# 肉抜き形状:円形

4隅のデータから平均平面を作成し、引き算後の形状



# 平面度

厚さ3.0mmのデータから平面度を見積もる  
データの全体的な傾きは補正済み  
面全体のpeak to peak でおおよそ0.15 $\mu$ m  
横方向の断面での変位が卓越  
縦方向の断面での変位は peak to peak 0.03 $\mu$ m程度  
切削におけるワーク位置:機械の奥行き方向での変位が大きい

# 結果2:典型的なデータ (Prefの測定結果を例に示す)

表面構造その1  
「うろこ」

## Surface Statistics:

Ra: 9.17 nm  
Rq: 11.35 nm  
Rz: 94.22 nm  
Rt: 175.28 nm

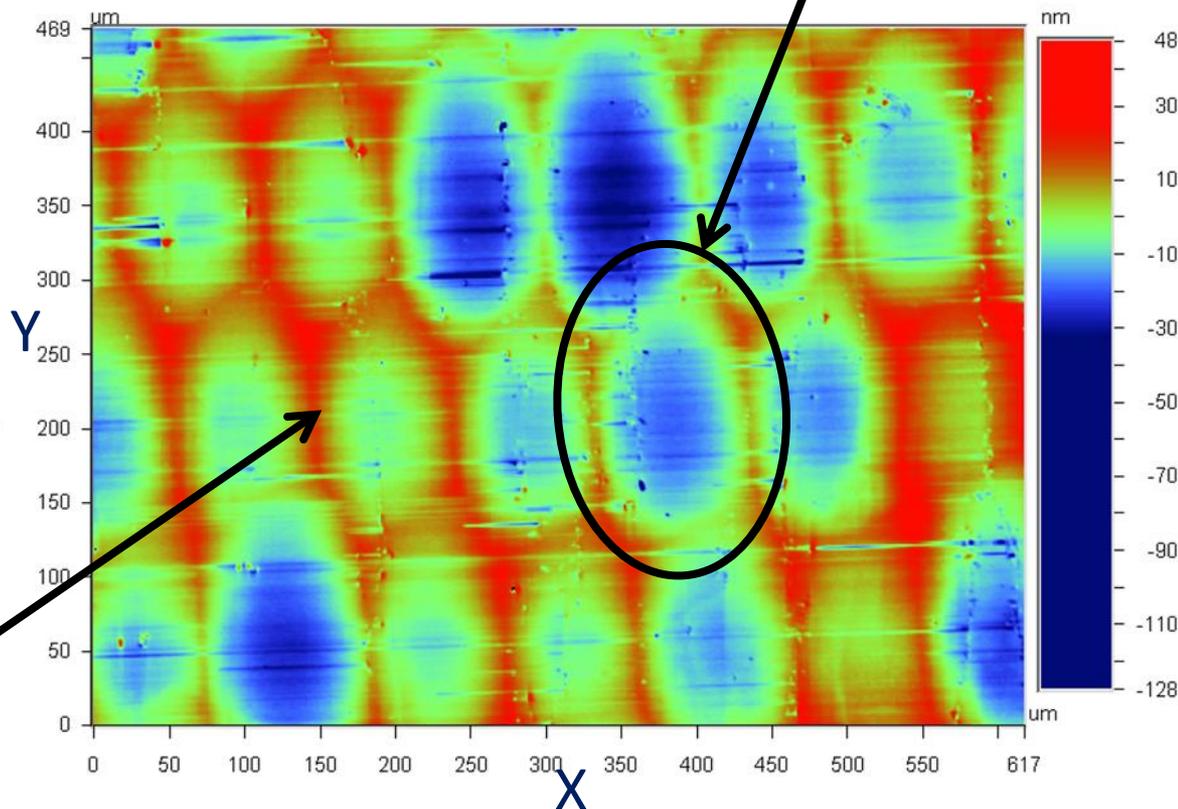
## Set-up Parameters:

Size: 736 X 480  
Sampling: 840.00 nm

## Processed Options:

Terms Removed:  
Tilt

表面構造その2  
「すじ」



- 主要な微小構造は、「うろこ」と「すじ」
- どちらも凹み
- Ra, Rq (rms) の主要因はうろこ。
- 同じセッティングで(測定箇所も変えずに)測っても、Ra, Rq に±5%程度のばらつきができる。

# 表面粗さの測定

## P3.0

### Surface Statistics:

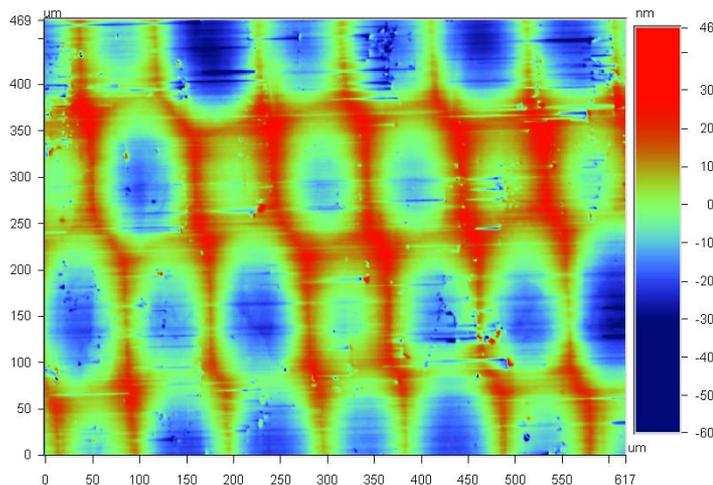
Ra: 9.12 nm  
Rq: 11.23 nm  
Rz: 83.64 nm  
Rt: 106.15 nm

### Set-up Parameters:

Size: 736 X 480  
Sampling: 840.00 nm

### Processed Options:

Terms Removed:  
Tilt  
Filtering:  
None



## P2.5

### Surface Statistics:

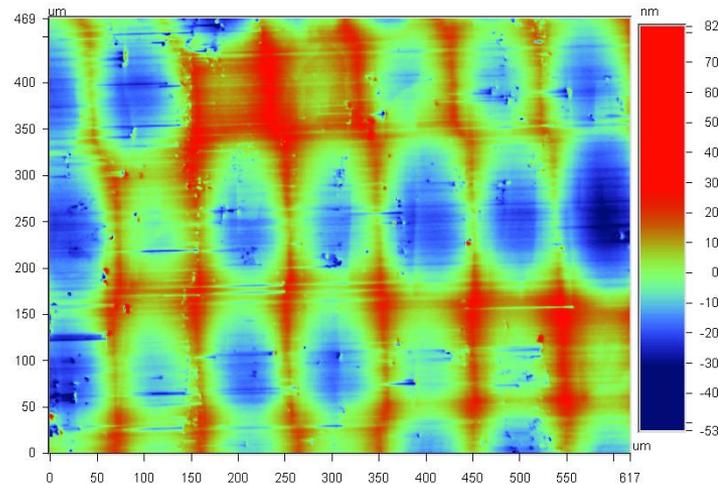
Ra: 9.04 nm  
Rq: 11.13 nm  
Rz: 94.00 nm  
Rt: 134.62 nm

### Set-up Parameters:

Size: 736 X 480  
Sampling: 840.00 nm

### Processed Options:

Terms Removed:  
Tilt  
Filtering:  
None



## P2.0

### Surface Statistics:

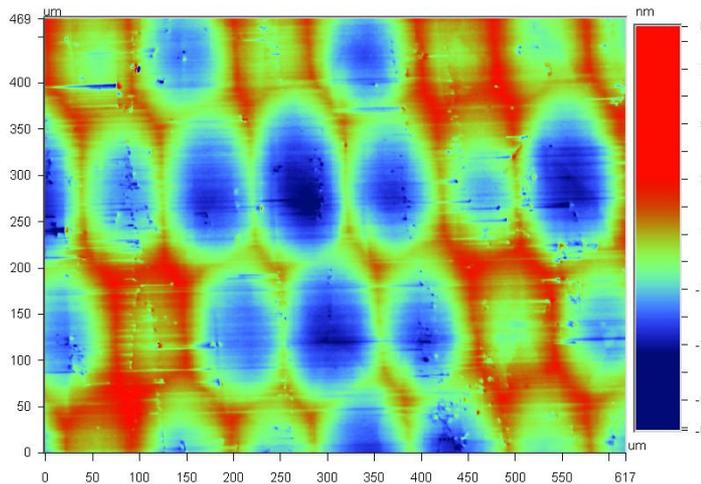
Ra: 10.60 nm  
Rq: 12.87 nm  
Rz: 91.76 nm  
Rt: 146.46 nm

### Set-up Parameters:

Size: 736 X 480  
Sampling: 840.00 nm

### Processed Options:

Terms Removed:  
Tilt  
Filtering:  
None



## P1.5

### Surface Statistics:

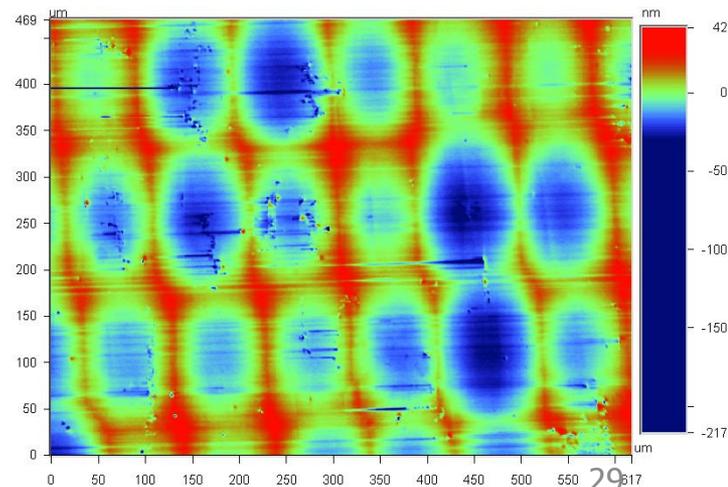
Ra: 9.50 nm  
Rq: 12.50 nm  
Rz: 205.70 nm  
Rt: 258.77 nm

### Set-up Parameters:

Size: 736 X 480  
Sampling: 840.00 nm

### Processed Options:

Terms Removed:  
Tilt  
Filtering:  
None



# 表面形状の測定箇所 たいする依存性

- Pref, P3.0~P1.5 では Rqは9~10nm 程度、測定再現性からこの間の値の違いは有意とは言えない。
- P1.0 から pos0.3 にかけては劣化の傾向がみられる
  - Ra, Rq の増大
  - うろこの大きさ、位置の乱れ
- 典型的な表面微細構造は「うろこ」と「すじ」。どちらも凹み。両者のうち、Raの主要因はうろこ

面番号	厚さ[mm]	Ra[nm]	Rq[nm]
Pref	30	9.17	11.35
P3.0	3.0	9.12	11.23
P2.5	2.5	9.04	11.13
P2.0	2.0	10.60	12.87
P1.5	1.5	9.50	12.50
P1.0	1.0	9.44	11.84
P0.8	0.8	14.60	18.16
P0.5	0.5	23.26	30.35
P0.3	0.3	77.42	90.69

# 変形の解析

円盤の周辺固定、中心集中荷重での変位(w:変位, a円盤半径,h厚さ)

$$w_{max} = 0.217 \cdot P \frac{a^2}{h^3}$$

より(機械工学便覧) 円盤中心での点荷重Pを変形量wより推定する

変形量は傾き成分を差し引いた変形画像から中心部付近の値を読み取ったものを用いる

円盤厚さ[mm]	変形量[μm]	力[N]
3.0	0	-
2.5	0	-
2.0	0.04	0.65
1.5	0.08	0.55
1.0	0.2	0.41
0.8	0.4	0.42
0.5	1.1	0.28
0.3	測定範囲外	-

変形量は中心に0.5[N]程度の力を加えた場合と等価である。

切削時に刃から受けた力で変形したものが、測定するときには元に戻るため凸にふくらむとすればこの0.5[N]がおおよその切削圧になる。

# 第一回試作まとめ

- 平面加工における面精度は方向性により差があり、機械奥行き方向にはpeak to peakで $0.15\mu\text{m}$ 程度、機械の左右方向にはpeak to peakで $0.03\mu\text{m}$ 程度。
- 軽量化リブ構造を考えるには、切削時にかかる力が $0.5[\text{N}]$ 程度だと仮定して許容変形量以内に収まるように設計すればよい。
- 切削パラメータを変えるとこの変形力も変わると考えられるが、それについては将来の課題。

# 光学系の次なる課題

- もっと大きな自由曲面鏡を
  - 現状 140mm角程度 → 200mm程度まで
- アライメントをとるには
  - 望遠鏡収差の再現: CGHか？
- ネジとシム・あるいは別の何か

# 光学系：光学素子

- エマルジョン回折格子 池田
- フィルター
  - 新しいアプローチ 榎坪/上塚
  - 多層膜干渉フィルターもいろいろと
- イメージスライサー

## 冷却のために

- 配線の開発:配線熱流入が許容しがたい
  - マンガンフレキケーブル  
出来たが、切れやすい
  - 極薄の銅フレキケーブル 塩谷
  - りん青銅 0.05mmΦx3本より線 いい感じ
- SPICAの熱要求に答えるにはさらに開発-要

# 検出器開発 BIB検出器

■ Petroff and Stapelbroek (US Patent No.4 568 960) による。

## ■ 構造

□ 光を吸収するIR-active層

■ heavily doped

□ ブロック層

■ high purity

□ 電極

■ ブロック層側とサブストレート側

■ 正面／背面入射に応じて透明電極

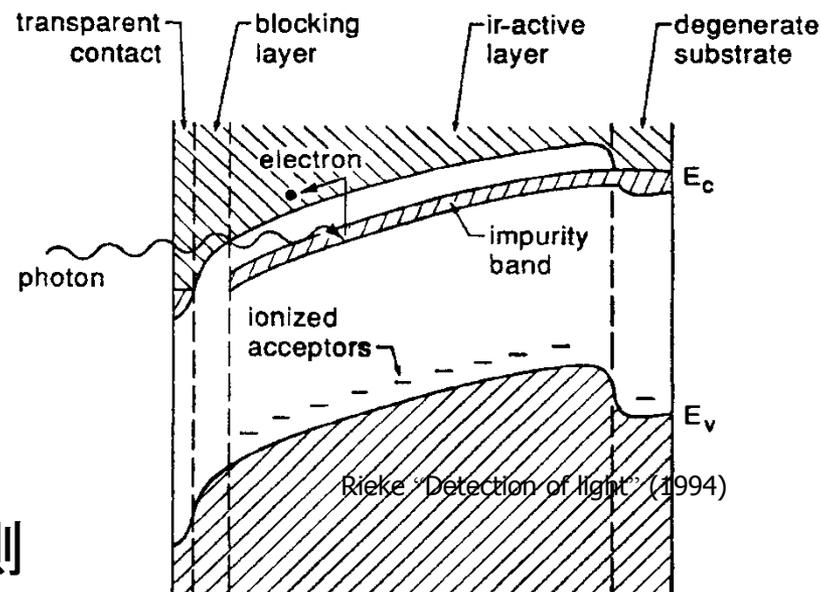


Figure 4.6. Band diagram for Si:As BIB detector.

# 検出器の開発

## ■ 1K x 1K Si:Sb

DRSでの開発

TAA(技術援助合意)を結んで検出器技術者とやりとり

128x128 Si:Sb を購入、テスト

1Kx1K ROICは入手済み、未テスト

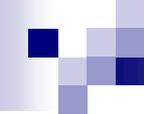
BIB構造の最適化設計と試作を実施中

ドーピング量とドーピング厚さ、製造工程を6通り検討しモデル計算

実際に6通りのウェハ作成、テスト

チップキャリア設計:来年度

検出器製造:予算が通れば



- Si:As 2K x 2K

Raytheon

JWST/MIRIのBIB結晶設計を利用

ROICは既存1Kx1K設計を4枚並べて2Kx2K

来年度はチップキャリアを設計

予算が通れば、製造に

## ■ Si:As 1K x 1K long wavelength option

ドーピング量を増やすと不純物順位が広がる

→ 長波長に感度が伸びる

暗電流も増える、ブロック層純度等に敏感

動作温度を下げれるSPICAには可能性あり

DRSでの長波長化研究が進んでいる

SPICA用に50 $\mu$ mまで伸ばすものを

現状:地球観測用試作品の評価