

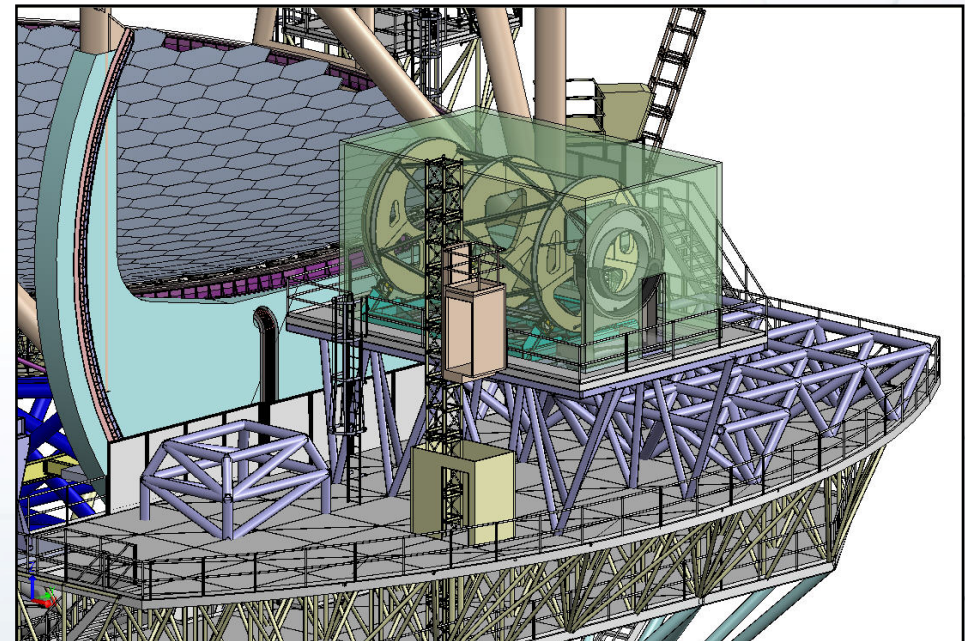
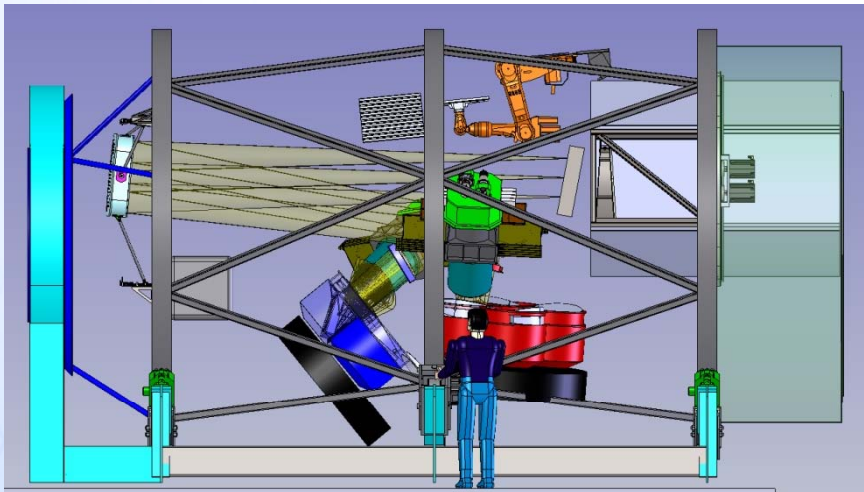
TMT第一期観測装置 WFOSの近況報告

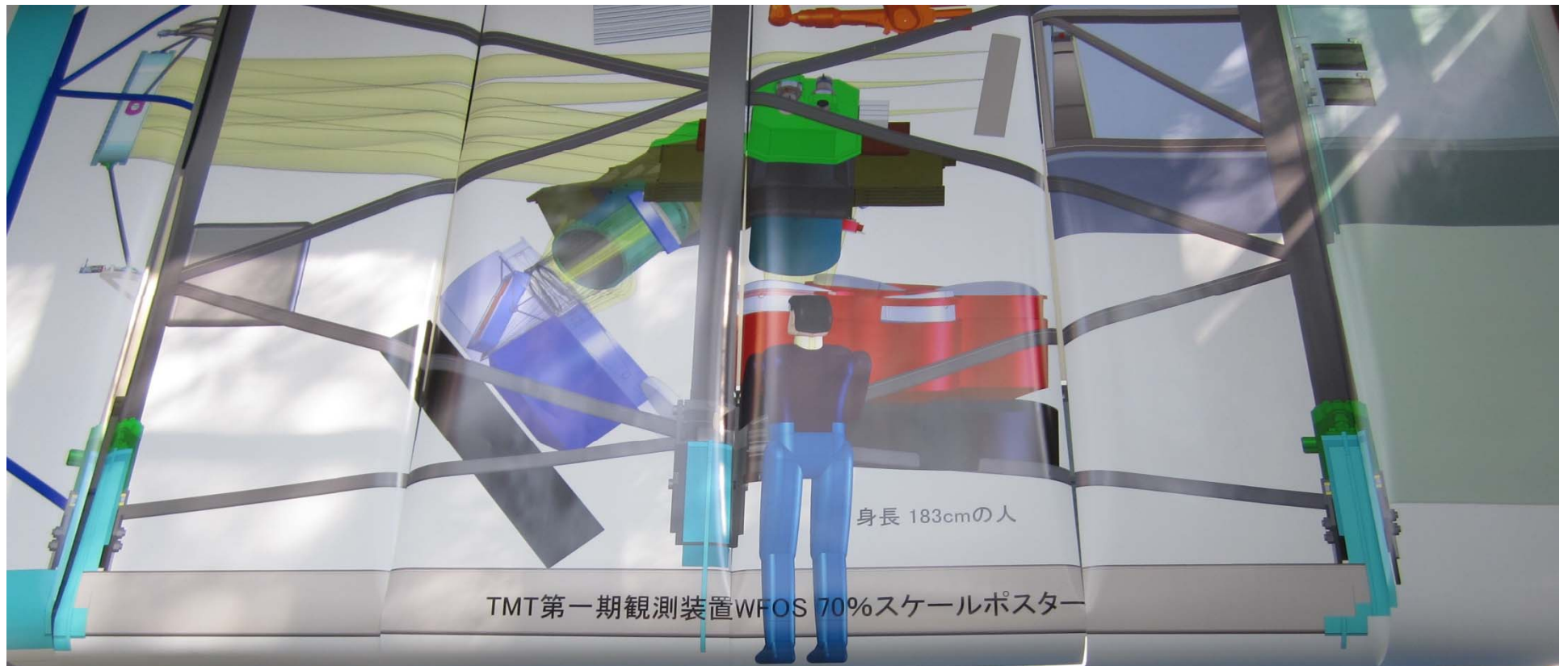
尾崎忍夫(国立天文台)

- WFOSの紹介
- カメラレンズシステム開発における技術課題
- 最近の国立天文台での活動
 - 多結晶蛍研磨試験結果
 - WFOS光学系に関する検討

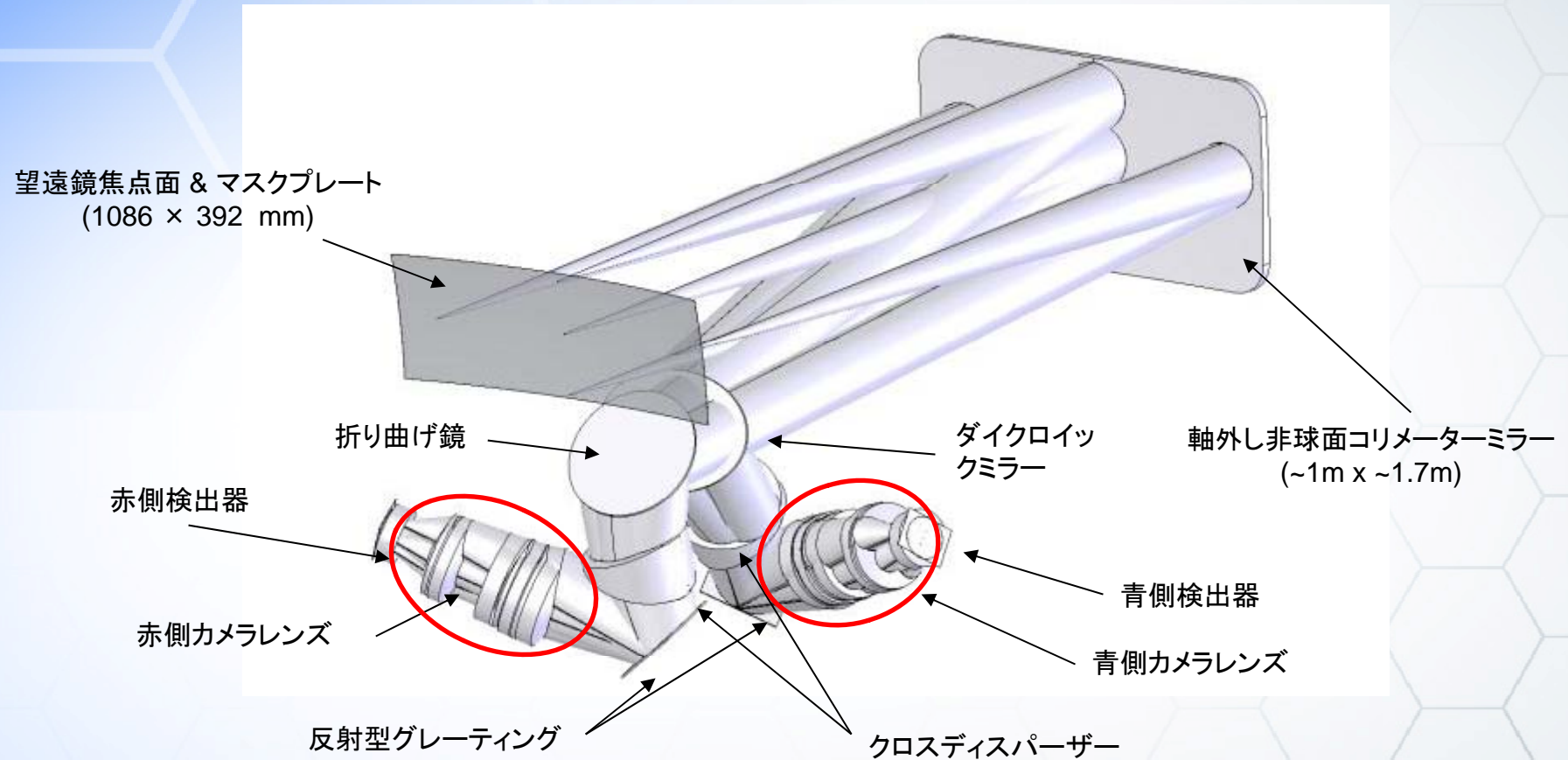
Wide Field Optical Spectrograph (WFOS)

- TMT第一期観測装置の1つ
- 広視野可視光多天体分光撮像装置
- カリフォルニア大学サンタクルーズ (UCSC) がリード
- 国立天文台、ハワイ大学、中国科学技術大学、南京天文光学研究所が協力
- 現在他の研究機関も加えて新たな開発チームの再編が行われている。

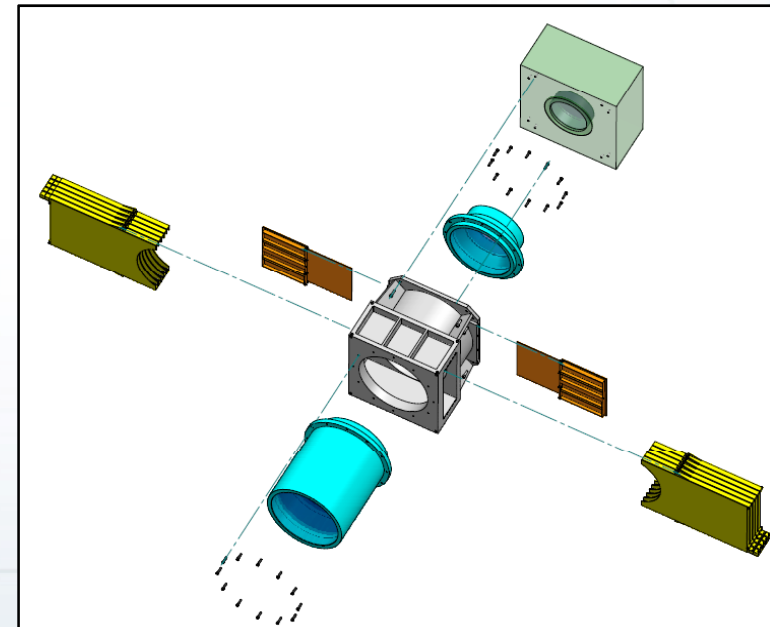
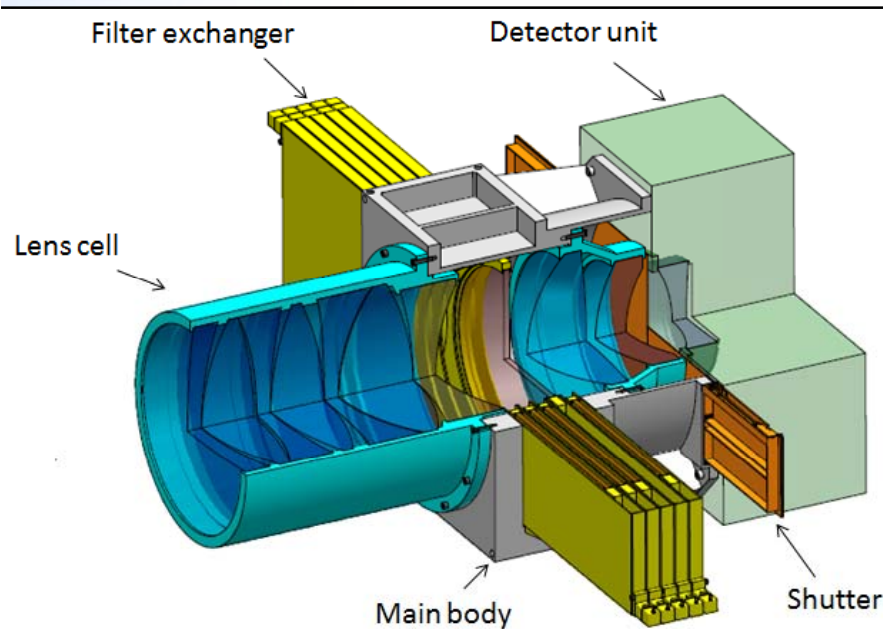




| | |
|------------|--|
| 視野 | 8.3 × 3 arcmin ² (1086 × 392 mm ² 望遠鏡焦点面において) |
| 波長範囲 | 310 – 600 nm (青側) 550 – 1000 nm (赤側) |
| 観測モード | 撮像 ロングスリット分光 多天体スリット分光 |
| 波長分解能 | R~1000, 5000, 8000 (0.75" 幅スリット使用時) |
| コリメーター焦点距離 | 4500 mm |
| カメラレンズ焦点距離 | 600 mm |
| 分光器内瞳径 | 300 mm |
| 検出器フォーマット | 12K × 16K |



- カメラレンズシステム概念検討
 - 硝材調達可能性
 - レンズ加工可能性（ARコーティング含む）
 - レンズ保持機構
 - カメラレンズ性能評価試験手法
 - フィルター交換機構・シャッター
- 最近、光学系の検討にも加わるようになった。



- 2008/6 – 2008/12 Feasibility study phase
- Conceptual design phase (CDP)
 - 2009/6 – 2010/6 CDP Stage 1
 - 2010年度からNAOJ参加
 - 2012/3 – 2013/8 CDP Stage 2
 - 2013/10/29,30 Handover workshop (PI,PM GMTプロジェクトへ) 2年前の発表時

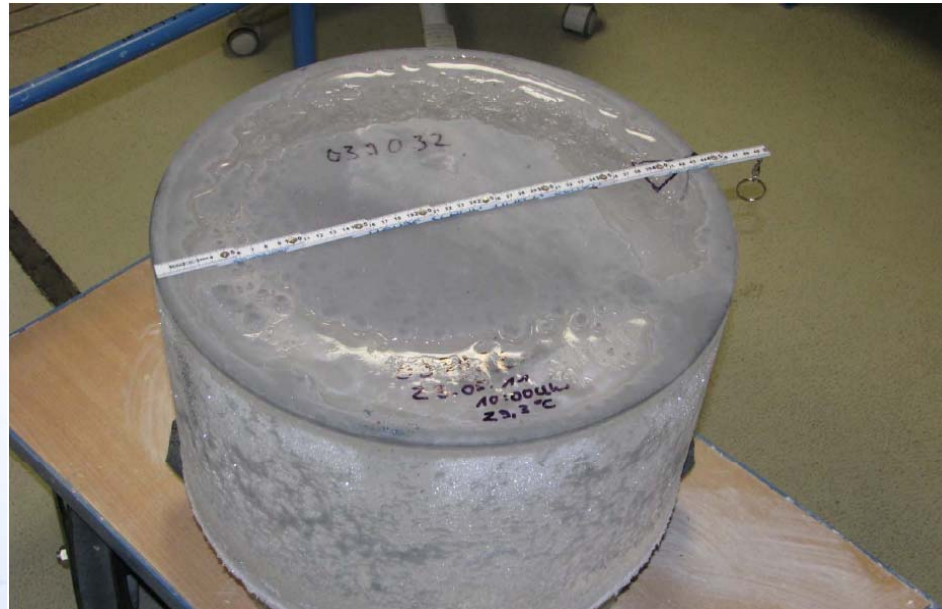
 - 2014/5 – 2015/4 mini-study phase
 - 2015/4/14-17 mini-study review 現在

 - 2015/summer – 2016 ΔCDP
- 2016/Q2 - Preliminary design phase (PDP)
- 2017/Q3 - Final design phase (FDP)
- 2019/Q2 - Fabrication (FAB)
- 2022/Q2 - Integration (INT)
- 2023/Q3 - Assembly, Integration and Verification (AIV)
- 2023/Q4 - Commissioning (COMM)

- 期間: 2014/5 – 2015/4
- 開発チーム再編のためのphase
 - これまでの概念検討で足りない検討を行う。
 - 新規参加機関にWFOSやTMTの理解を深めてもらう。
 - 参加機関の技術レベルをアピールしてもらう。
- WFOSに関心のある研究機関が全て参加
 - 計17: 中国 9、インド 3、アメリカ 3、日本 1、台湾 1
- 検討結果をもとにTMTが新規開発チームを編成する。

- 国際協力の難しさを実感
 - 言葉の壁、コミュニケーションツール、時差

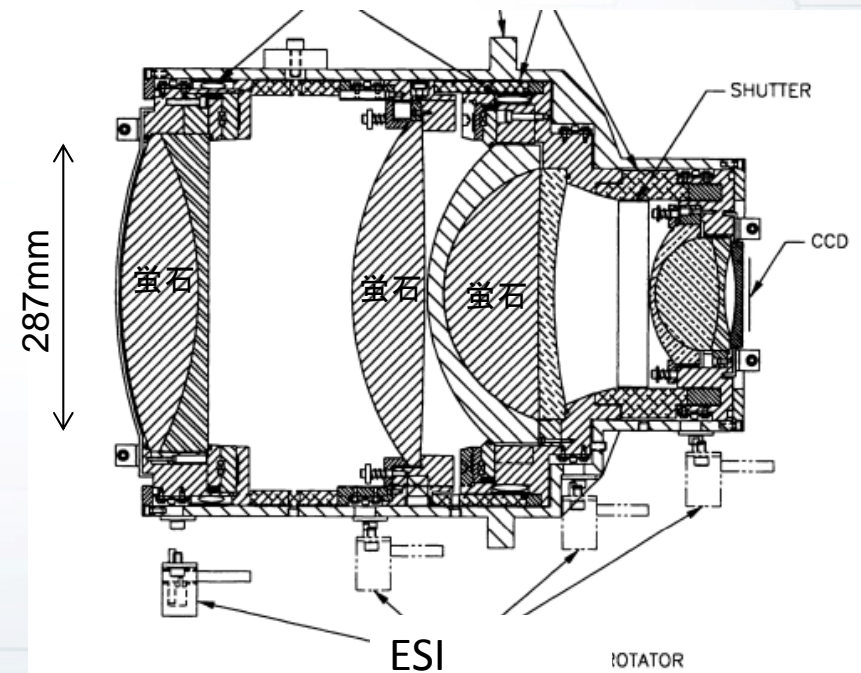
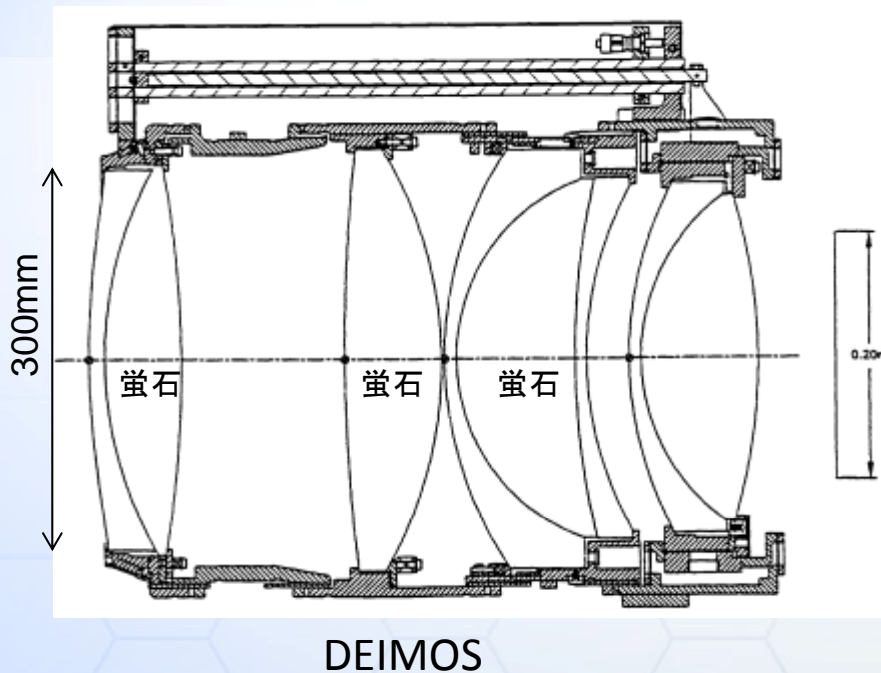
- Hellma materials (ドイツ) がφ440mm, t320mmの蛍石結晶の製造に成功
- 一般光学ガラスもφ400mm以上となると限られた種類しか利用できない。



- 蛍石は熱膨張係数が大きく、かつ脆性
- 加工に際して注意が必要
 - 研磨時の温度管理
 - ARコーティング時の昇温・降温スピード
- 一度は実物大の試作を行う必要がある。

技術課題3: 大口径レンズの保持機構

- WFOSカメラレンズシステムには蛍石レンズと石英レンズが複数使用される。
- 蛍石と石英の熱膨張係数は $18.5 \times 10^{-6}/K$ と $0.55 \times 10^{-6}/K$
 - $20^{\circ}C$ の温度変化、サイズ420mm => 0.155mm と 0.05mmの変化
- 直径300mm程度の蛍石レンズは既に天体観測装置に利用されている。
- 温度変化を補償する機構も考案されていて、実用化されている。



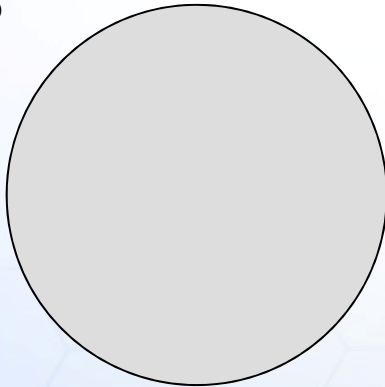
- WFOSカメラレンズで多く用いられる蛍石と石英の屈折率温度依存性は大きく逆符号
- 光学性能の温度依存性が大きいと予想される
- 最終光学性能は運用温度である0°Cで評価したい。
- とはいえ組立調整段階では室温で評価したい。



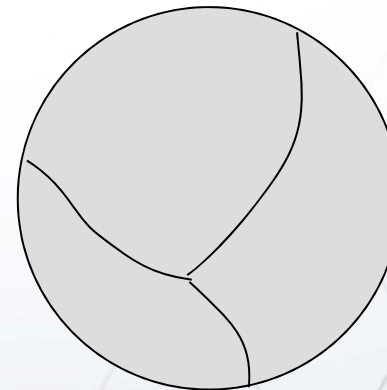
JAXAの大型恒温室
W3m x D4m x H2.6m

- WFOSカメラレンズの直径は~440mm
- 収差補正のために蛍石使いたい
- $\Phi 440\text{mm}$ の蛍石の単結晶は入手が困難なので多結晶を用いなければいけない可能性がある。
- 多結晶を用いると研磨誤差が生じるという懸念がある。

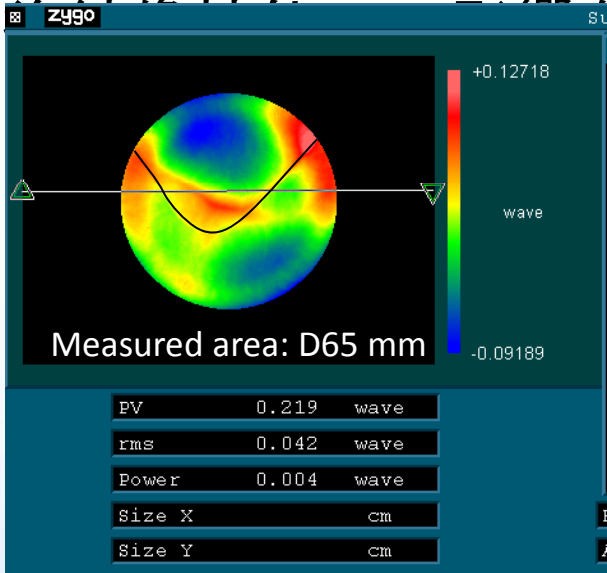
単結晶： 全領域で結晶方位がそろっている

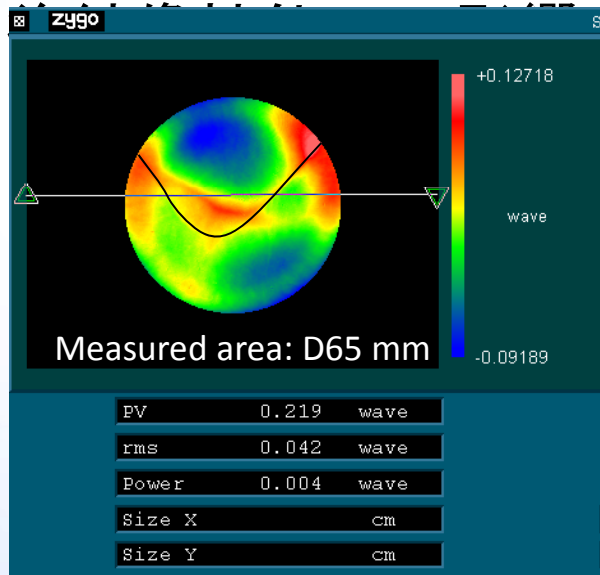


多結晶： 部分的に結晶方位の異なる領域が存在する。



バウンダリー： 多結晶において結晶方位の異なる領域の境界

- $\phi 70\text{mm}$ の平凸レンズ
- 異なる結晶方位を持つ領域の境界で形状誤差が大きくなる。
 - $\sim 139\text{ nm PV}$ 、 $\sim 26\text{ nm RMS}$
- 今  を検証する。

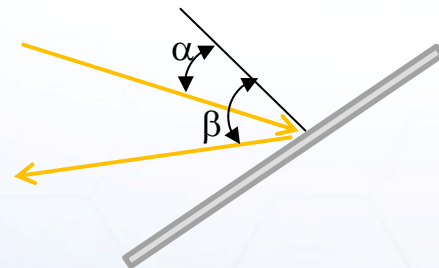
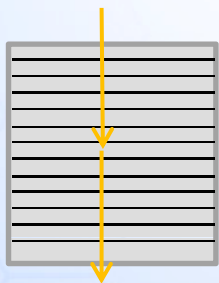
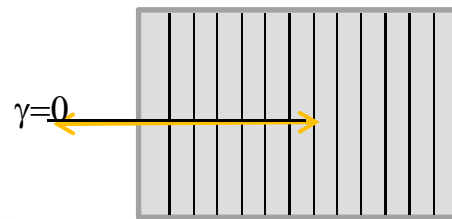


凸面形状誤差測定結果

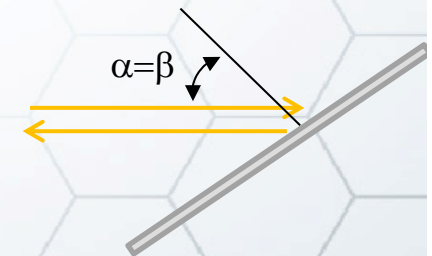
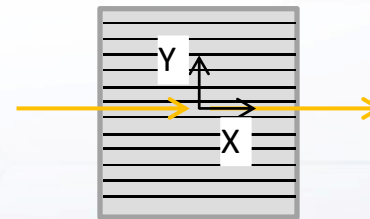
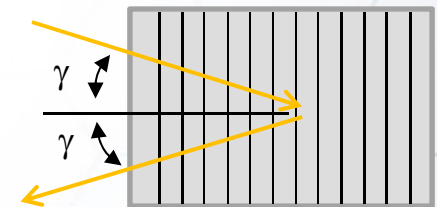
黒線は異なる結晶方位を持つ領域の境界

- In-plane形式ではブレード付き反射型グレーティングを用いると分散方向にビーム径が拡大または縮小されることが知られている。
- Quasi-Littrow形式ではそのようなビーム形状の変形はないと思っていた。

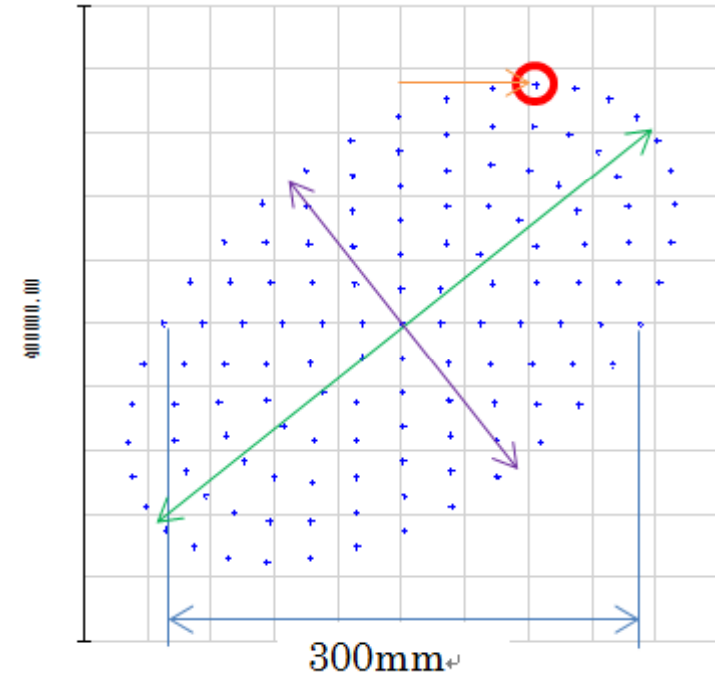
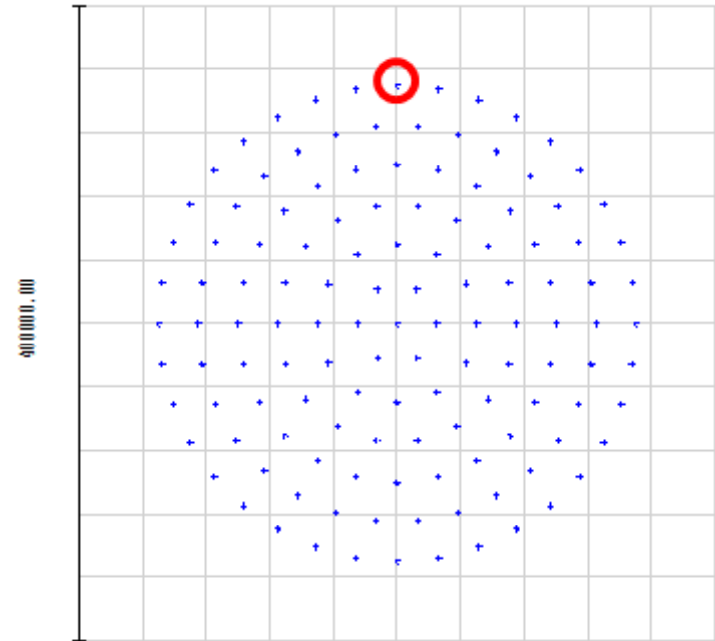
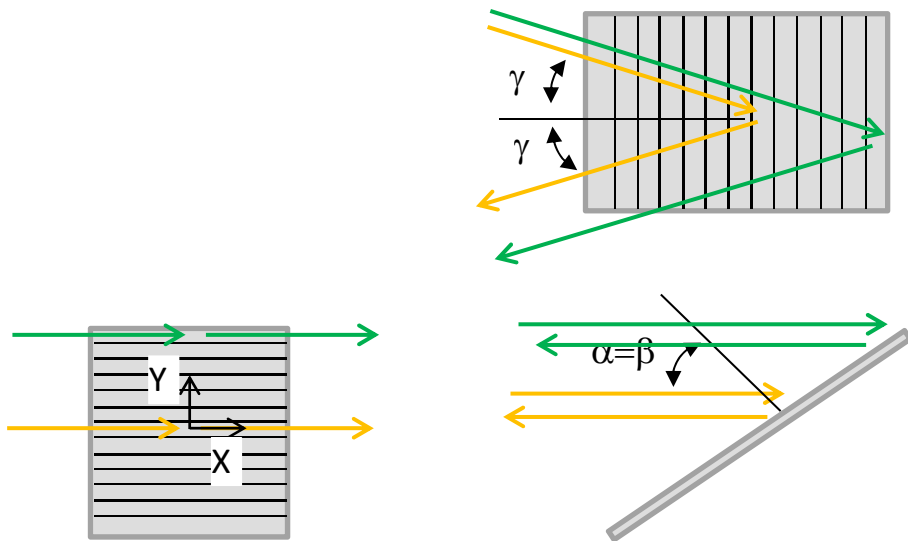
In-plane形式



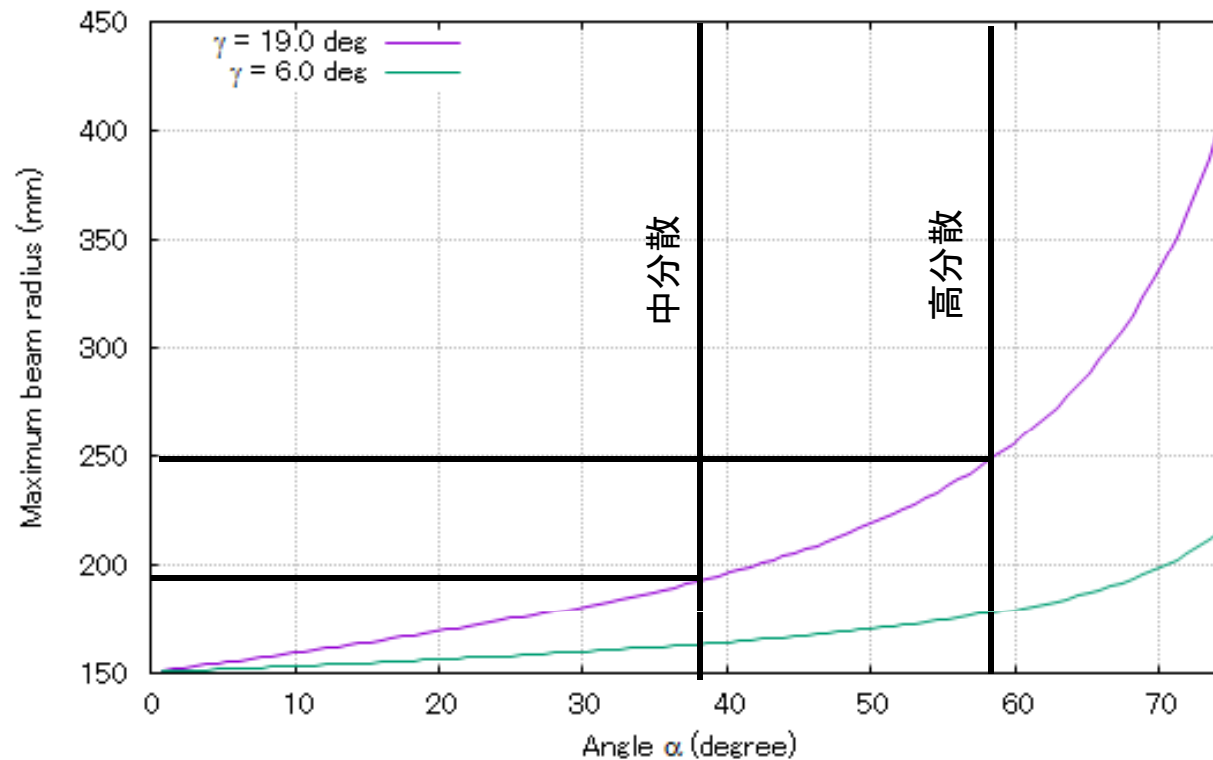
quasi-Littrow形式



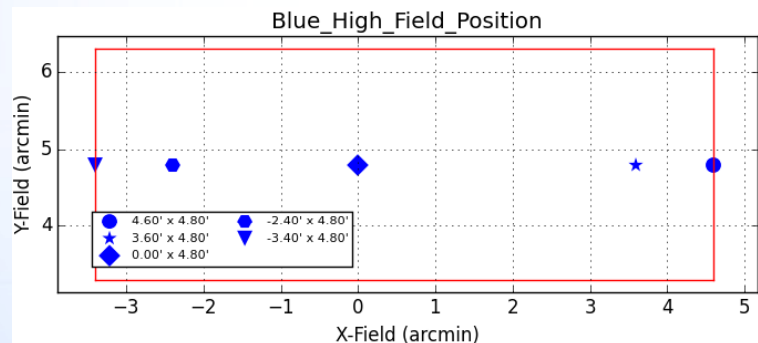
- Quasi-Littrow形式ではビーム形状が歪む
- 射出形状は楕円
- 長直径は入力よりも大きくなる。
- 単直径は入力よりも小さくなる。



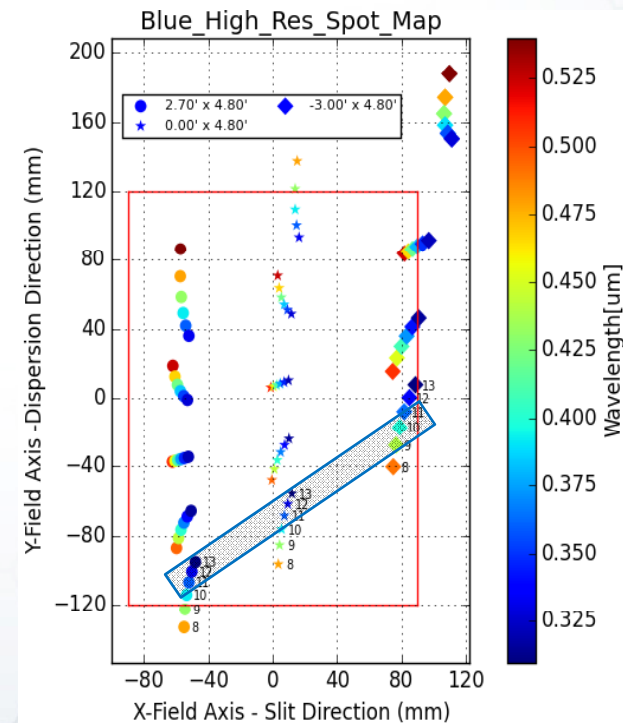
- WFOS
 - 高分散モード: $\alpha = 57.5^\circ$ 、 $\gamma = 19^\circ$
 - 中分散モード: $\alpha = 38.5^\circ$ 、 $\gamma = 19.2^\circ$
- HDS@すばる望遠鏡
 - $\alpha = 71.5^\circ$ 、 $\gamma = 6^\circ$ (Noguchi et al., 2002, PASJ, 54, 885)



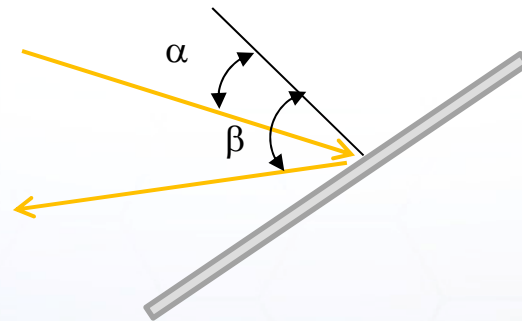
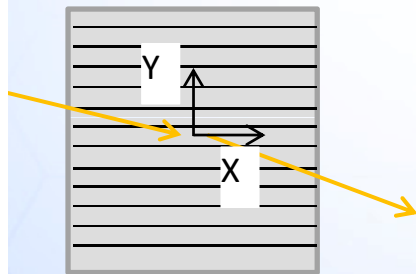
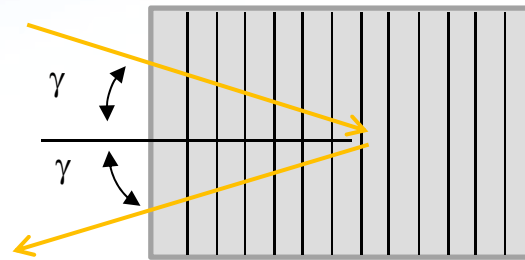
- Quasi-Littrow形式ではスリットが大きく傾く
 - In-plane形式では傾かない



インドのグループの解析結果



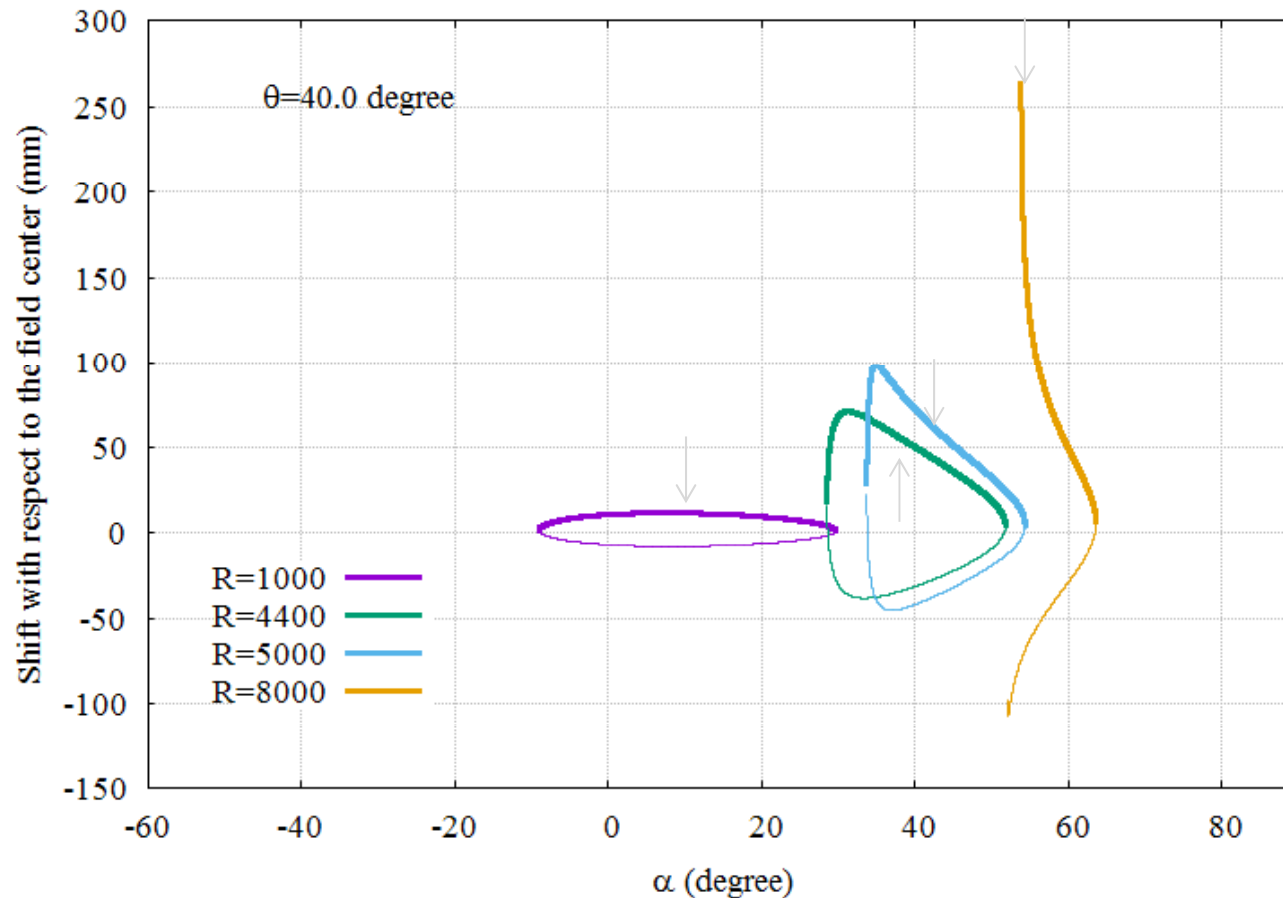
Quasi-Littrowとin-planeの中間的な形式ではどうなるか？



$\alpha > \beta$: minification
 $\alpha < \beta$: magnification

- Quasi-Littrowからminificationの方向へは単調にスリットの傾きが小さくなる。
- Quasi-Littrowからmagnificationの方向へは一旦傾きが大きくなった後、急激に小さくなる。

PLASMA OPTICS
LIBRARY OPTICAL PRIN



色の違いは波長分解能Rの
違い
太線はスリット中央に対す
る一方の端の位置ずれ量
細線はもう一方のずれ量
矢印はquasi-Littrowの場
合の位置

- 硝材の調達可能性
 - 蛍石は現状でMax ϕ 440mm
 - 利用できそうな光学ガラスの種類は限られている
- ケラレ
 - ビーム径の拡大はケラレを増大させる。
- スリットの傾き
 - minificationのin-planeに近づけるとスリットの傾きは小さくなるが、ビーム径の拡大が生じる
- グレーティング効率
- 透過型分散素子の可能性

- **WFOSの技術課題**
 - ◇ 大口径硝材
 - ◇ 大口径蛍石レンズ製造
 - ◇ 大口径レンズの支持機構
 - ◇ 光学性能テスト
- **国立天文台での最近の活動**
 - ◇ カメラシステム概念検討(本講演には含まれず)
 - ◇ 多結晶蛍石研磨試験
 - ◇ WFOS全体光学系検討