

# 次世代超大型望遠鏡の 広視野補償光学系の光学設計

東北大学 修士2年 高田 大樹

秋山 正幸(東北大学)、大屋 真(国立天文台)、池田 優二(フォトコーティング社)

# 1. イントロダクション

# 前置補償光学系

地表層補償光学

多天体補償光学

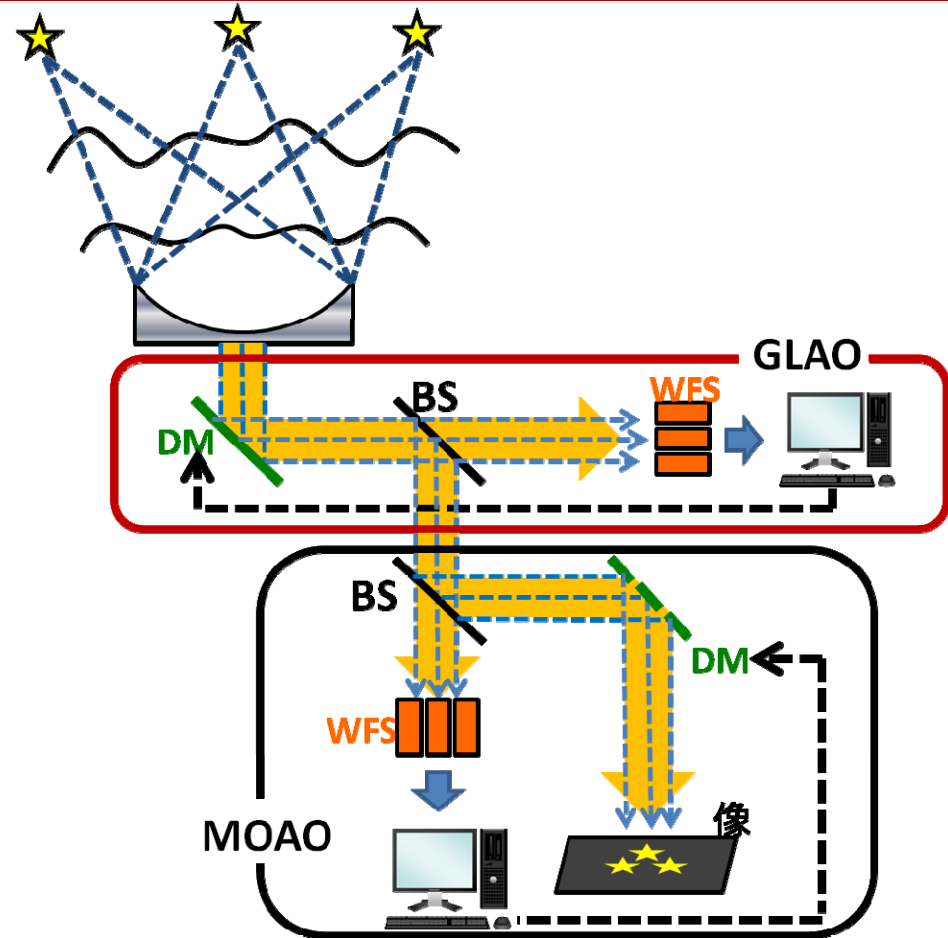
**GLAO**

+

**MOAO**



前置補償光学系



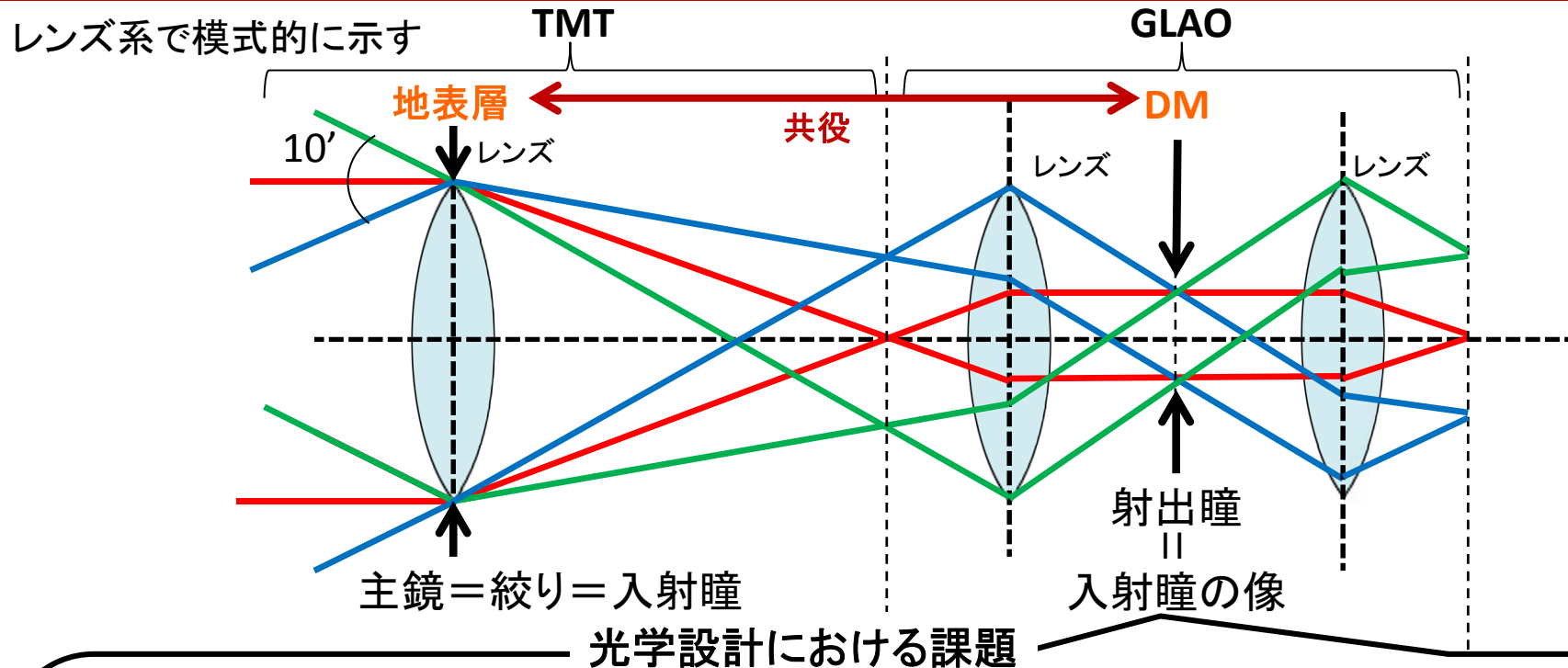
メリット

- 補償光学系の一部が閉ループ化
- 補償されたガイドスター(GS)を用いるためMOAOの精度が向上

特徴

- 視野10分角という広視野を実現
- GLAO単体でも使える補償光学系の設計

# TMTでGLAOの光学設計における課題



- ① 光学系の巨大化
- ② 瞳収差

視野方向によってDM上で当たる位置が異なる

全視野に対して共通の補正ができない!

60 × 60素子のDMで1素子ズレないためには...

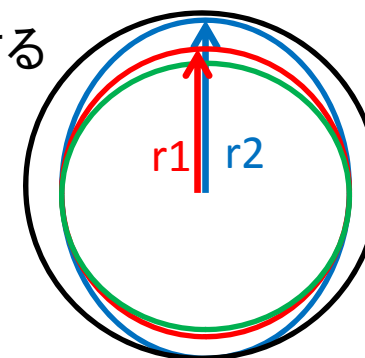
目標: 瞳収差 < 3.3%

瞳収差の評価方法

DM上のフットプリント

中心視野光束に対する  
最大瞳収差ズレ

$$\frac{r_2 - r_1}{r_1} \times 100\%$$



## 2. GLAOの光学設計

# 設計仕様

## 視野10分角を実現する広視野補償光学装置

	仕様
波長域	0.8 ~ 2.5 $\mu\text{m}$
視野	$\phi 10'$
物体距離	無限遠
ミラー枚数	4 ~ 6枚
DMサイズ	$\phi 500$ mm以下
光学系サイズ	6 m立方
瞳収差	< 3.3%
縮小率	0.5
主光線傾角	< 1°
光学系温度	0°C

# 光学設計方法

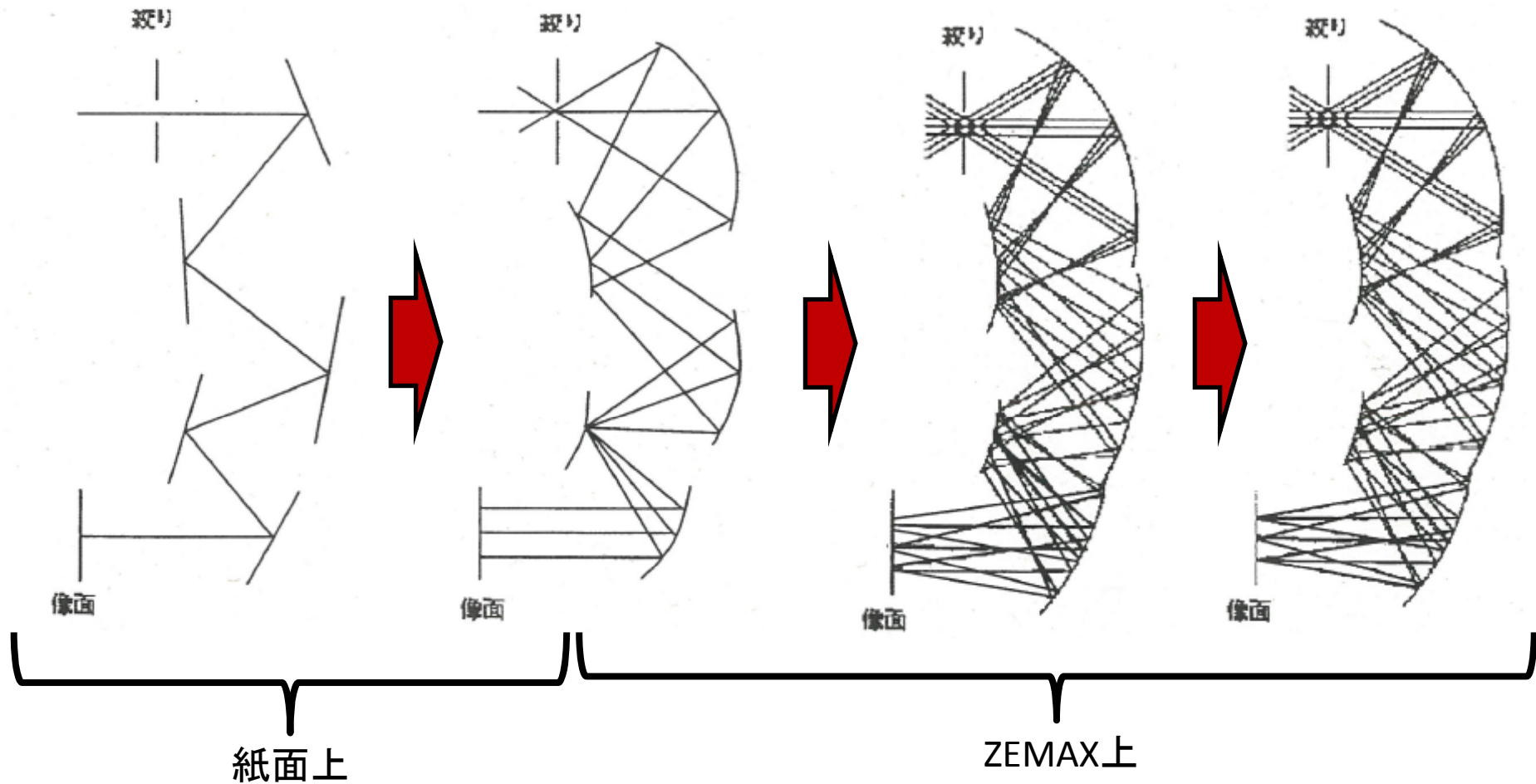
Off-Axial 光学系の光学設計方法 ( 荒木敬介 2002年博士論文より )

1. 光学系の骨組み決定

2. パワー配置

3. 低次収差補正

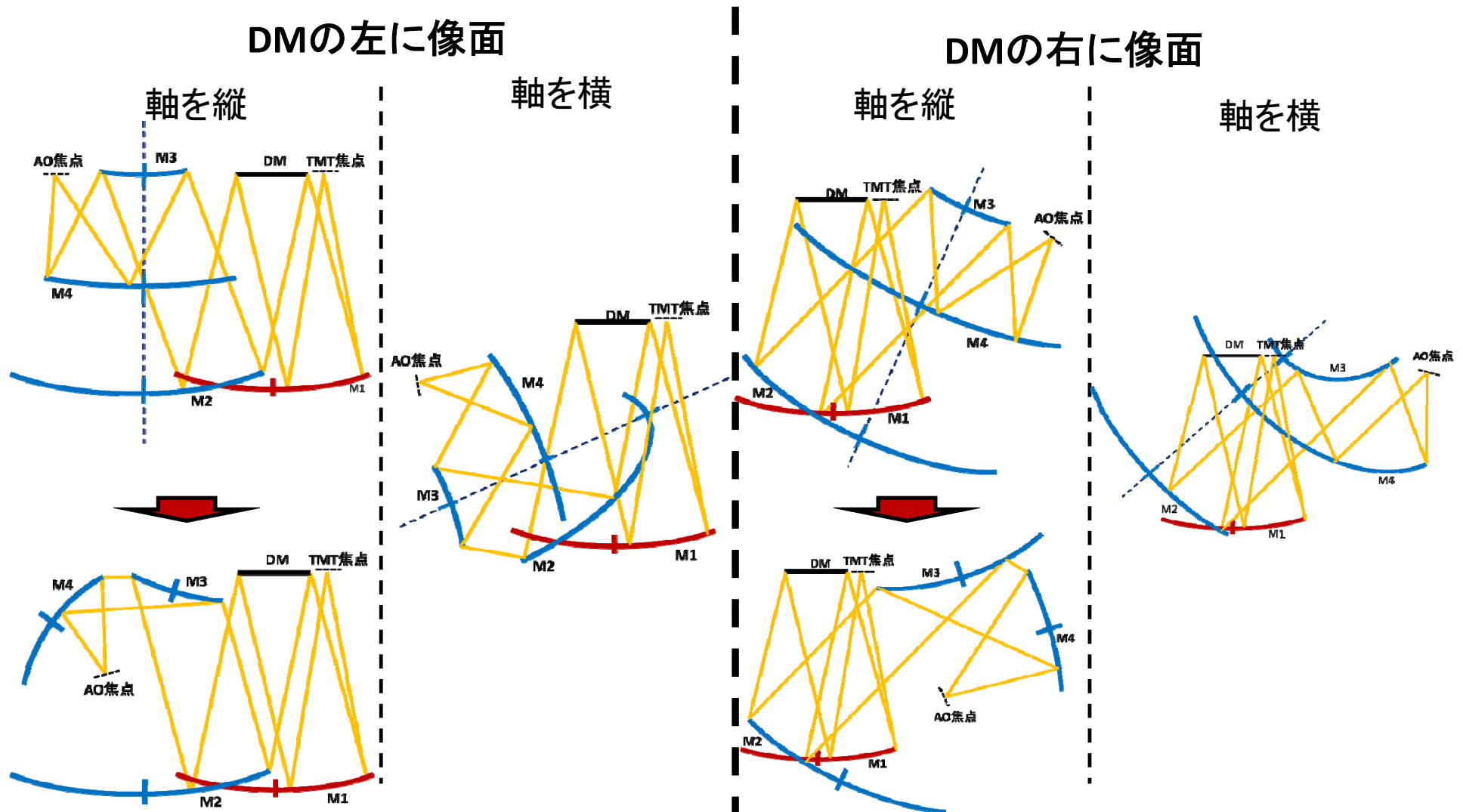
4. 高次収差補正



⇒ 初期値としてどのような設計モデルを作るかが重要

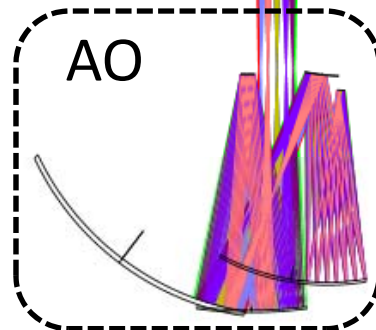
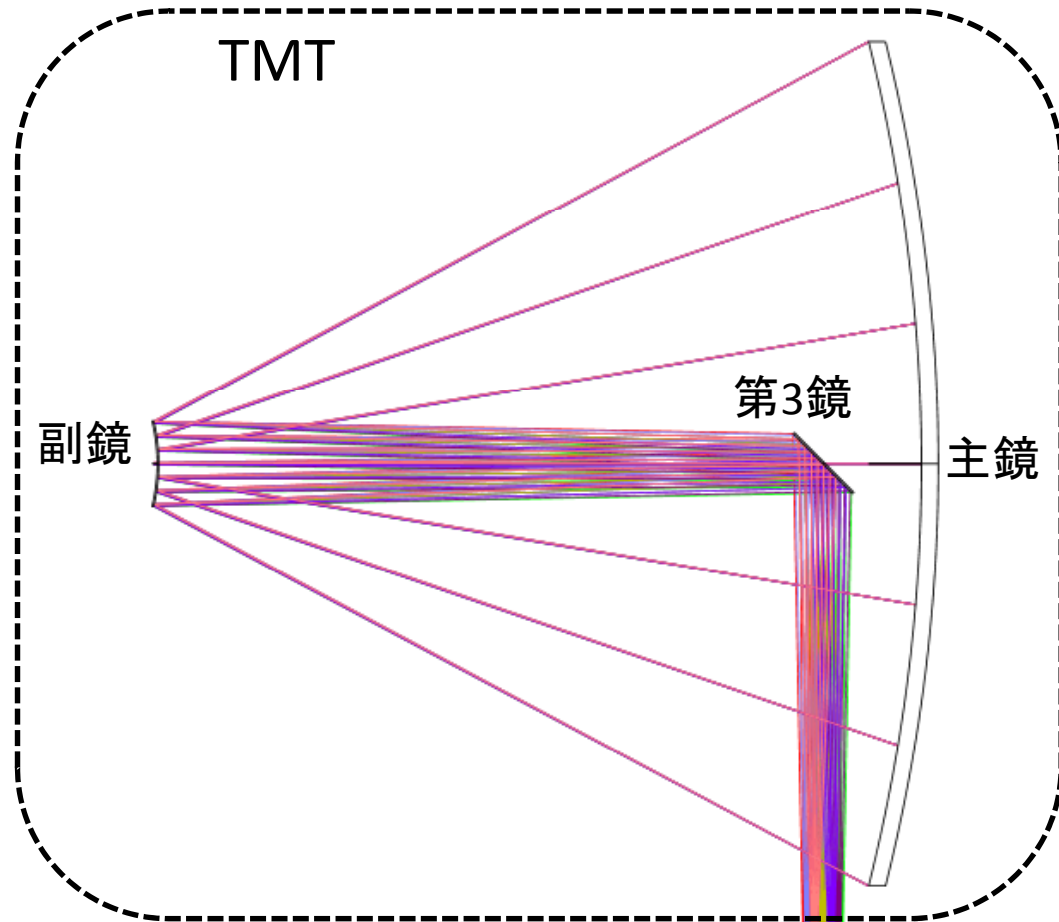
# 設計モデル

- DM前の光学系 ⇒ DM前で複雑な収差が発生しないようにミラー1枚で設計
- DM後の光学系 ⇒ ミラー3枚を使い、軸対称系を作るモデル

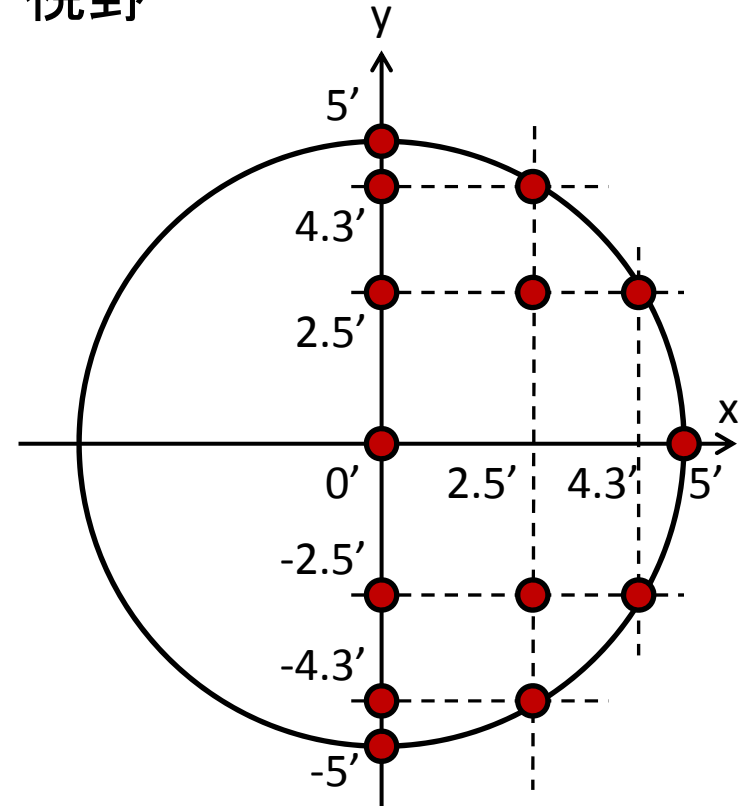




# 光学系(全体像)と視野



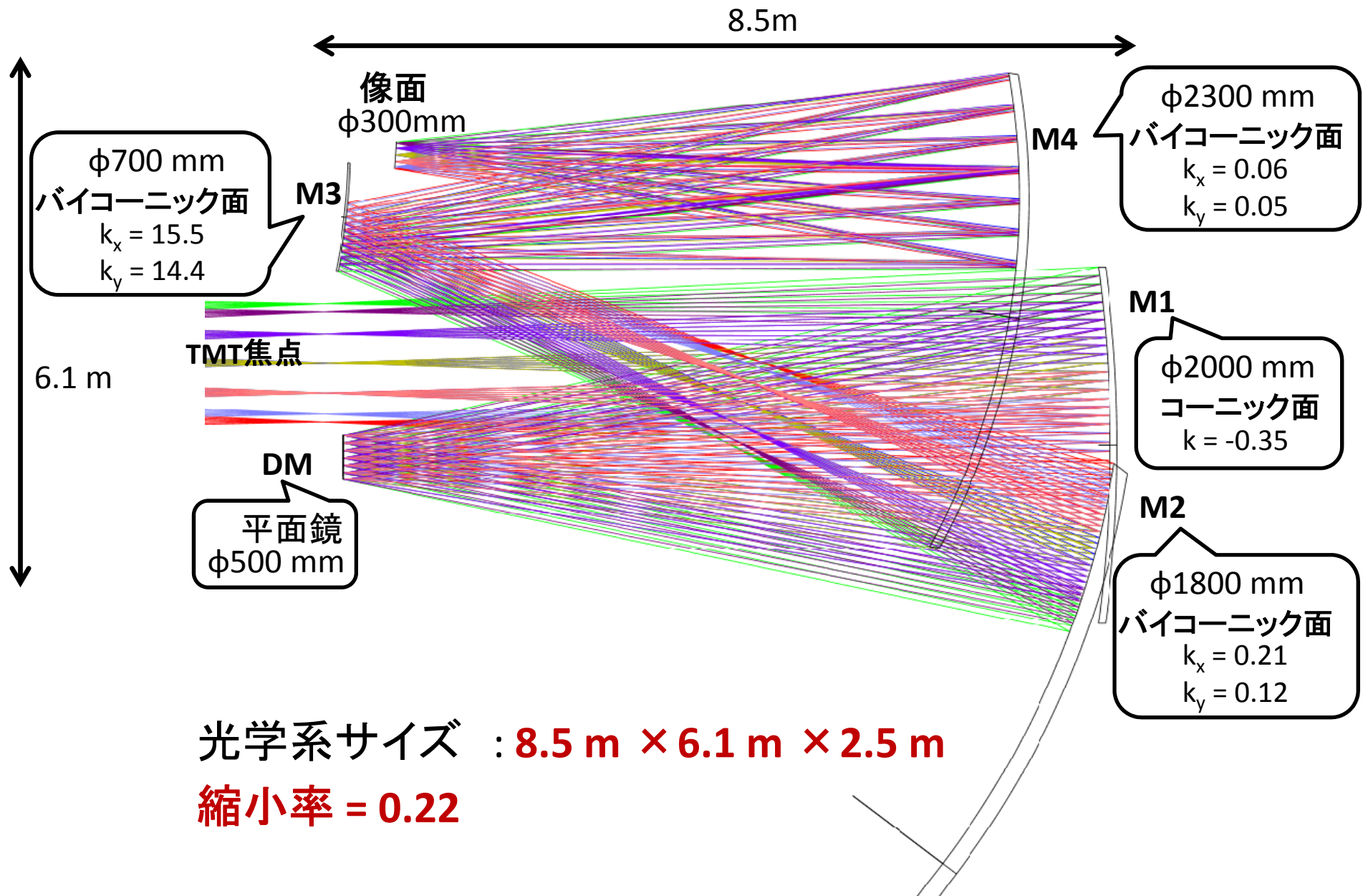
視野



視野数: 12

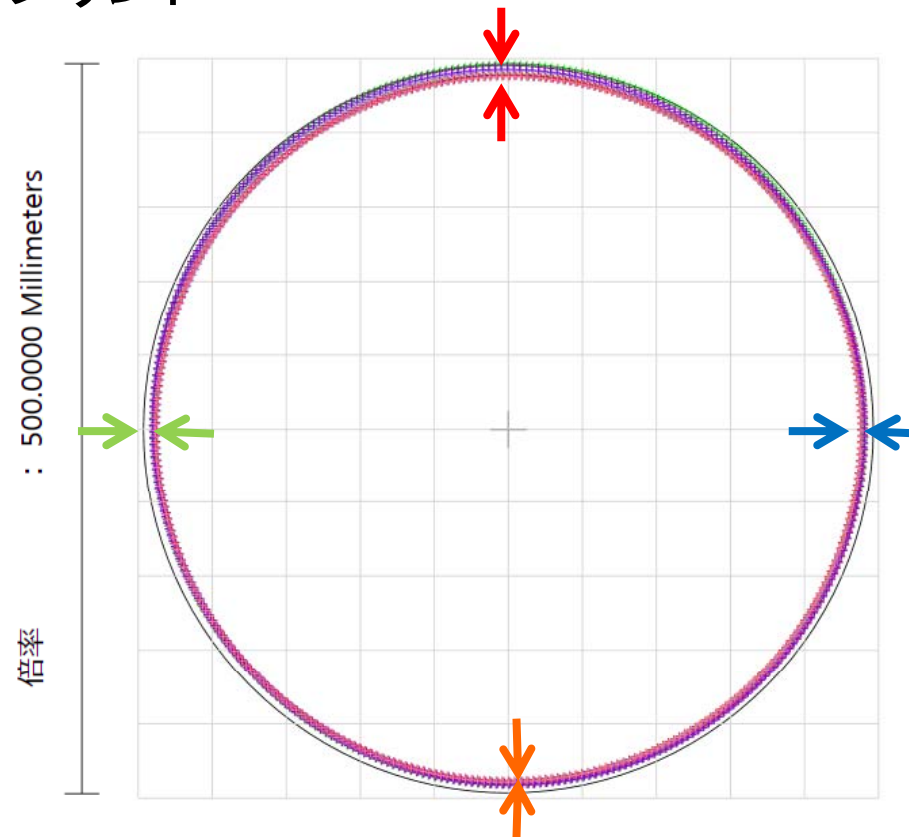
それぞれの色は  
視野方向の違いを表わす

# 光学系 (AOのみ)



# 瞳収差

DM上でのフットプリント



視野中心光束に対する**最大瞳収差 = 3.06%**

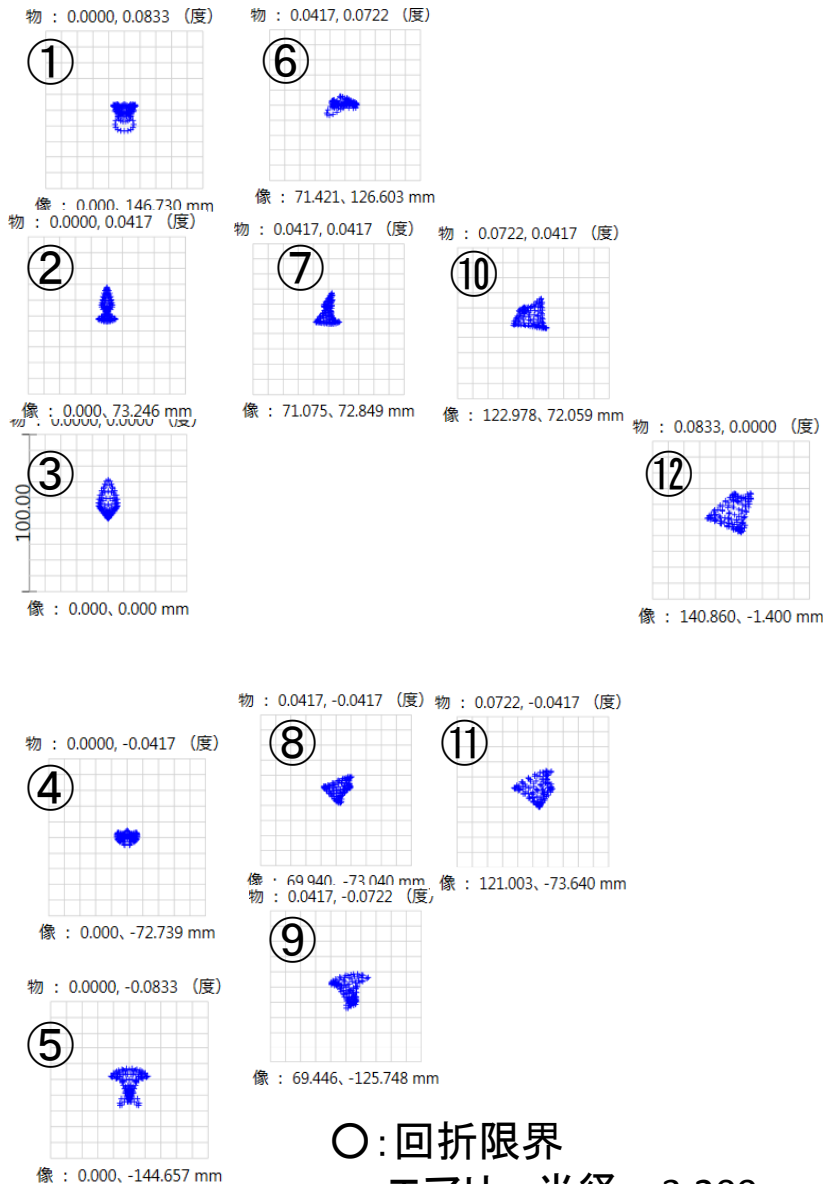
右の瞳収差 : 0.91%  
左 " : 0.88%  
下 " : 0.65%



- 最大瞳収差 < 3.3%を達成
- 全体として瞳収差量が低い

# スポットダイアグラム @0.8 μm

## 最終像面でのスポットダイアグラム



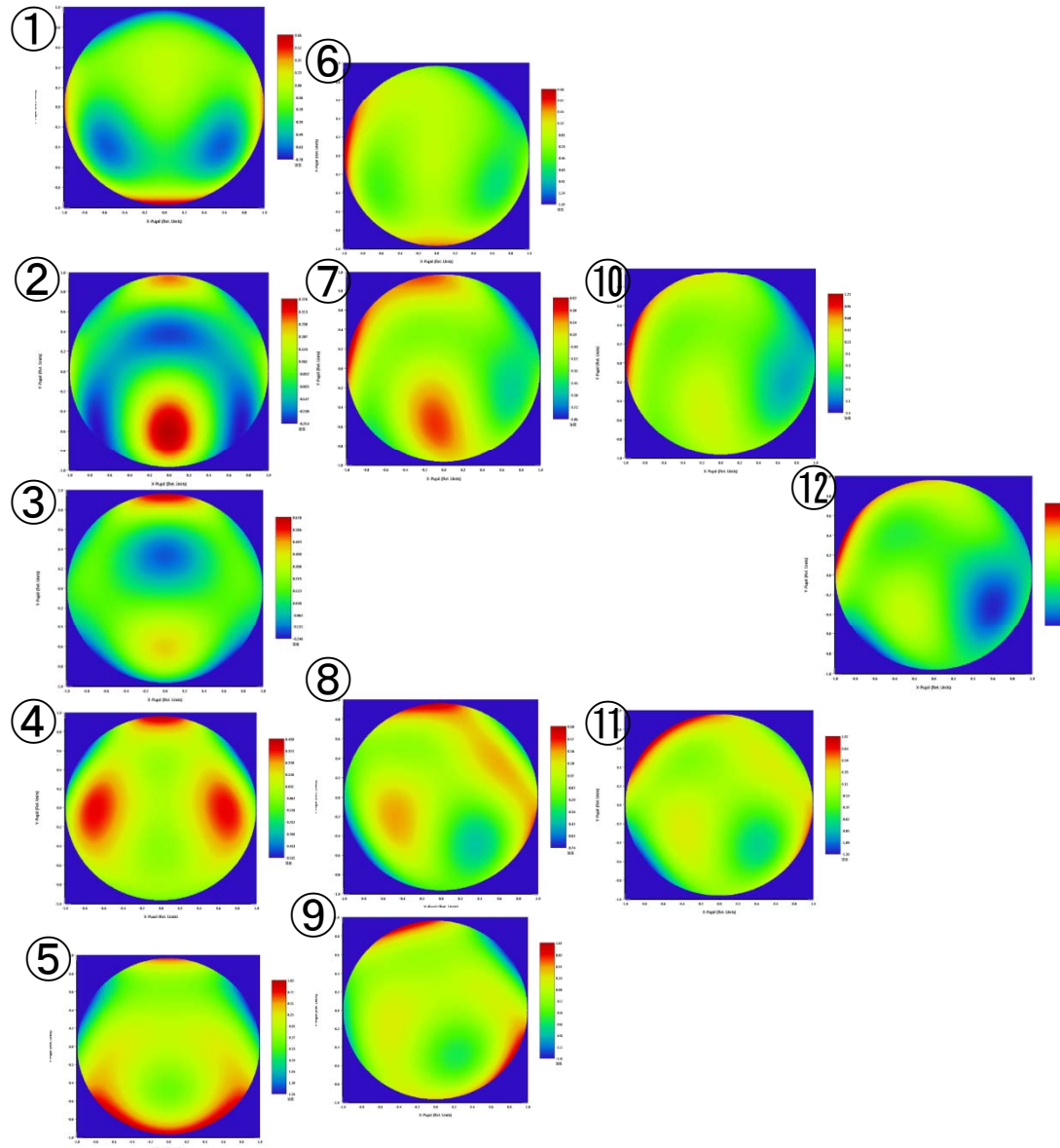
視野	RMS半径 [μm]	GEO半径 [μm]
①	5.83	13.2
②	7.90	20.1
③	8.32	21.1
④	4.52	6.8
⑤	9.40	17.5
⑥	6.00	13.5
⑦	8.00	17.4
⑧	7.30	13.6
⑨	8.94	16.1
⑩	9.35	16.9
⑪	9.87	18.3
⑫	11.4	21.0

○: 回折限界  
 エアリー半径 = 3.209 μm = 0.0067"

スポットサイズが  
 回折限界程度まで小さくできた。

# 波面収差マップ @0.8 $\mu\text{m}$

最終像面での波面収差マップ



視野	RMS [ $\lambda$ ]	PTV [ $\lambda$ ]
①	0.24	1.44
②	0.15	0.63
③	0.15	0.93
④	0.13	0.94
⑤	0.41	2.58
⑥	0.29	2.26
⑦	0.23	1.37
⑧	0.22	1.35
⑨	0.31	2.49
⑩	0.40	2.65
⑪	0.32	2.40
⑫	0.40	2.38

全視野で波面PTV < 2.65 $\lambda$

# 仕様と設計値の比較

	仕様	設計結果
波長域	0.8 ~ 2.5 $\mu\text{m}$	0.8 ~ 2.5 $\mu\text{m}$
視野	$\phi 10'$	<b><math>\phi 10'</math></b>
物体距離	無限遠	無限遠
ミラー枚数	4 ~ 6枚	4枚非球面 + DM
DMサイズ	$\phi 500$ mm以下	$\phi 500$ mm
光学系サイズ	6 m立方	<b>8.5 m <math>\times</math> 6.1 m <math>\times</math> 2.5 m</b>
瞳収差	3.3%	<b>3.06%</b>
縮小率	0.5	<b>0.23</b>
主光線傾角	$< 1^\circ$	<b><math>&lt; 3.5^\circ</math></b>
光学系温度	0 $^\circ\text{C}$	0 $^\circ\text{C}$

## 良い点

- 視野10分角を瞳収差  $< 3.3\%$
- スポットサイズが充分小さい。
- 縮小率が良いため、  
その後の光学系を小さくできる。

## 改善点

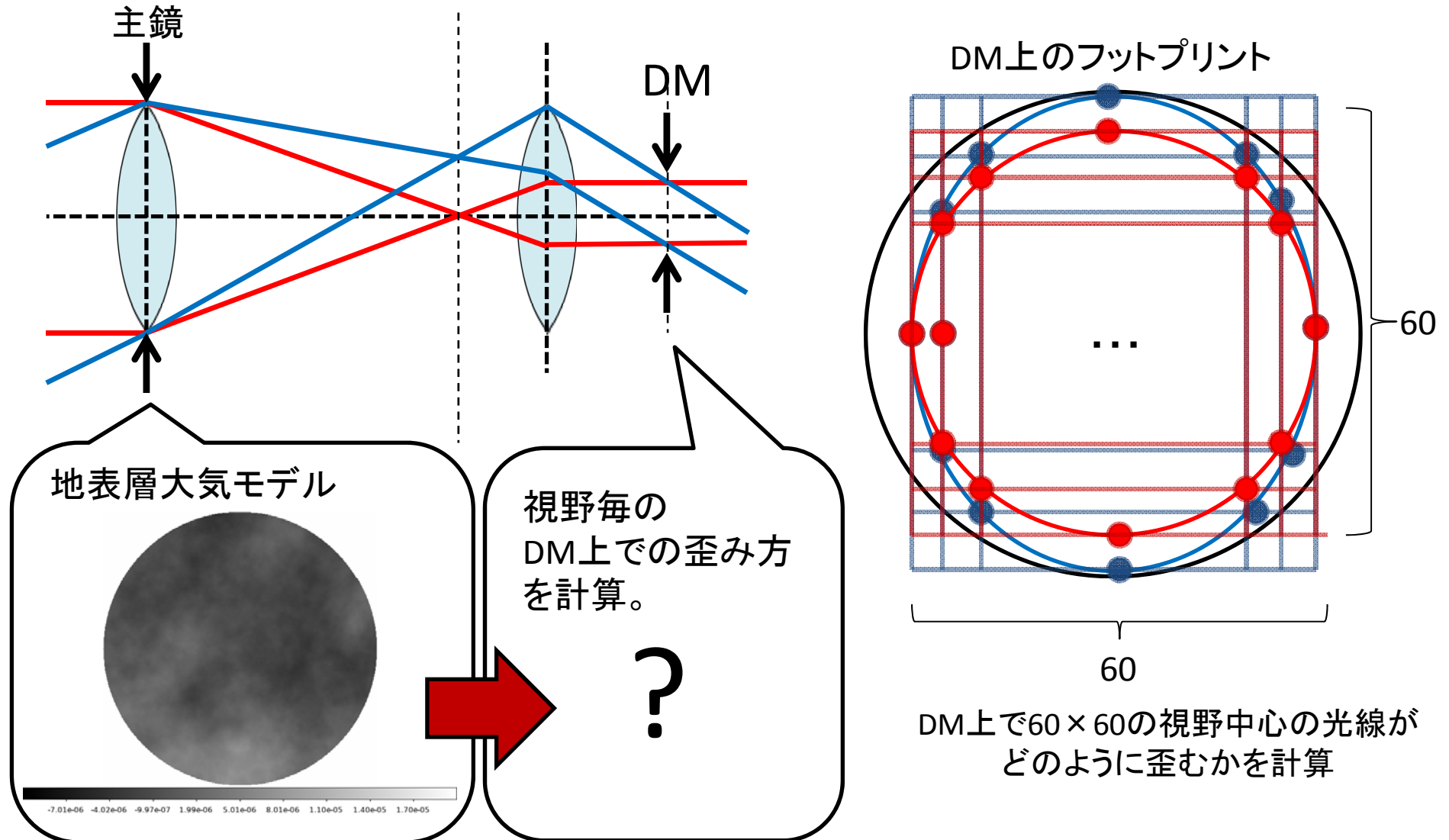
- 主光線傾角  $< 1^\circ$
- 光学系の大きさを可能な限り小さく。



# 瞳収差量の評価

瞳収差 < 3.3% ⇒ 瞳収差がDM1素子分ズレない。

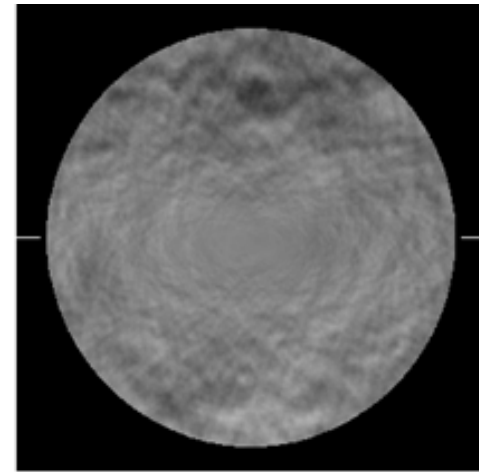
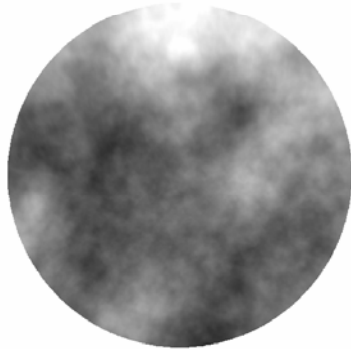
次に、現在の瞳収差量でGLAOとしての性能を満たすかを計算



# 瞳収差量の評価

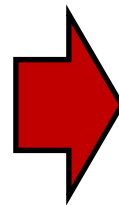
DM上での光の位相差

平均波面 (DM上での全視野平均)



視野 x

— (マイナス)



ズレが大きいと、  
外側に向かうに従い波面残差が大きくなる

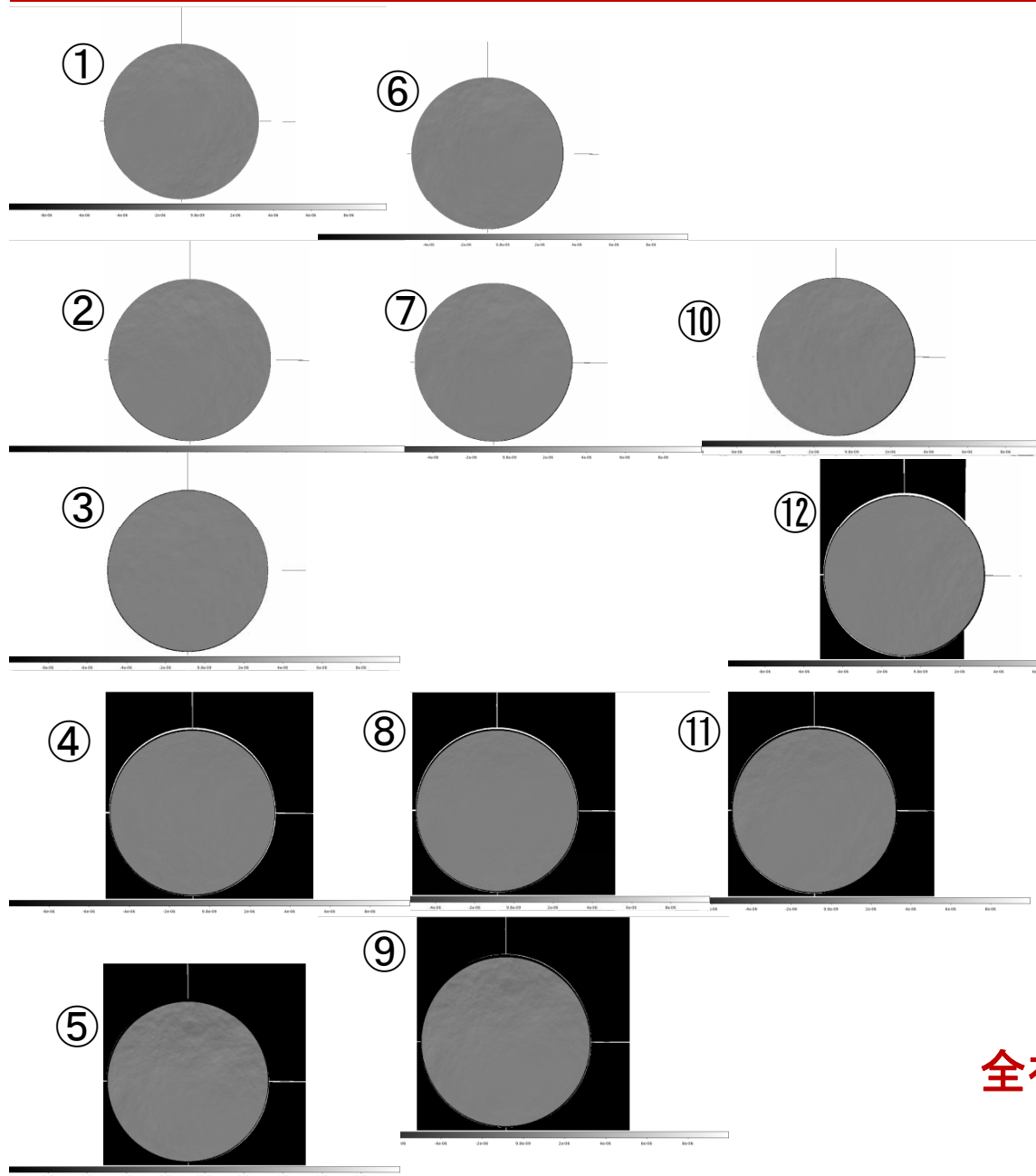
- 波面残差RMS の計算
- FFTを行い、PSFを計算



最大瞳収差3.06%での  
GLAOの性能評価



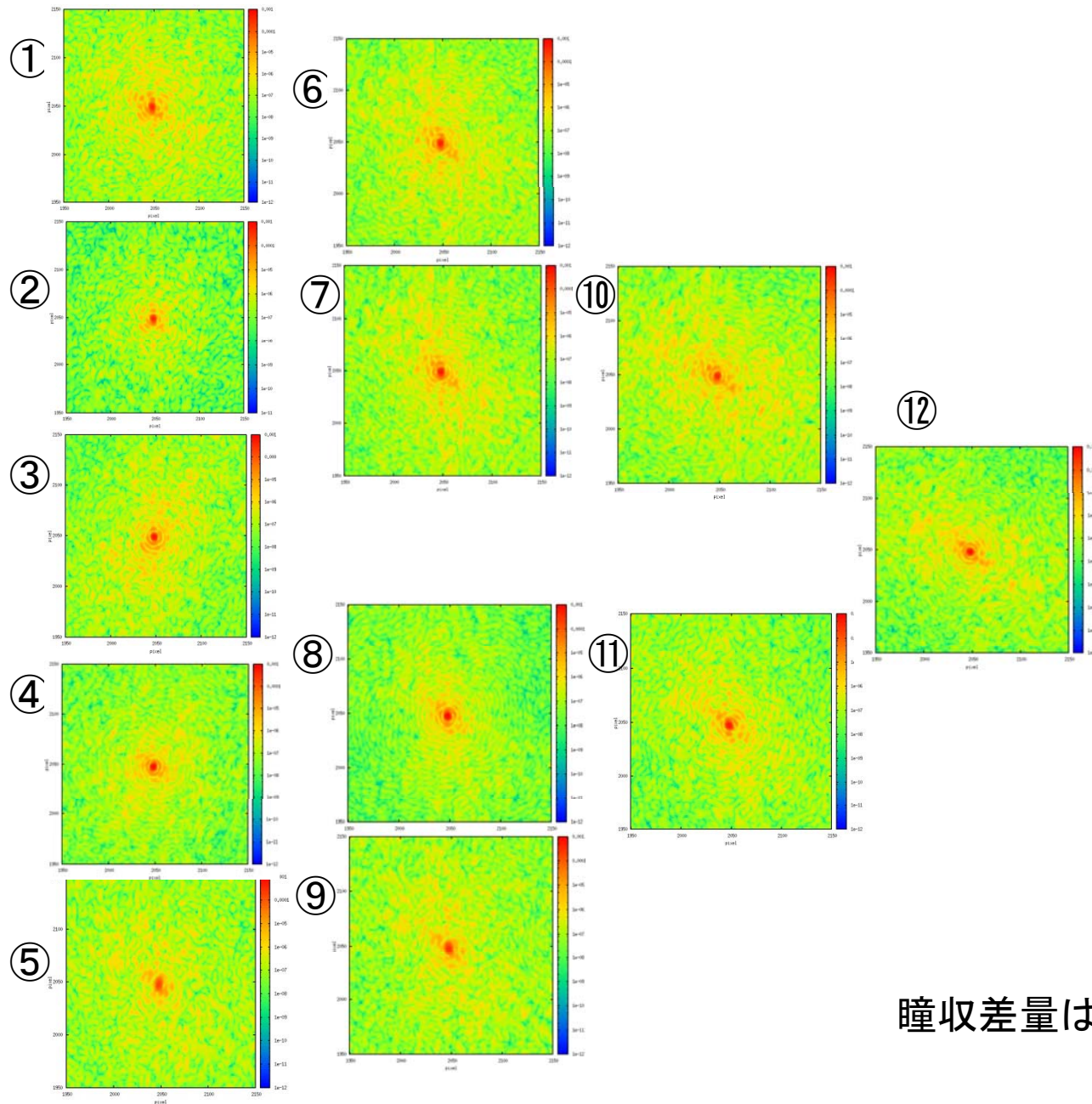
# 波面残差RMS値 @0.8 μm



視野x – 平均波面	波面残差[nm]
1	175
2	166
3	125
4	111
5	289
6	161
7	147
8	107
9	243
10	157
11	146
12	117

全視野の波面残差 < 289 nm

# 波面残差のPSF @0.8 $\mu\text{m}$



視野	FWHM [秒角]
1	0.0075
2	0.0074
3	0.0069
4	0.0070
5	0.0090
6	0.0074
7	0.0073
8	0.0071
9	0.0086
10	0.0070
11	0.0074
12	0.0069

回折限界: 0.0067"

瞳収差量は補償光学系として許容量

# 3. まとめ

## まとめ

### TMTで視野10'を達成するGLAOの光学設計

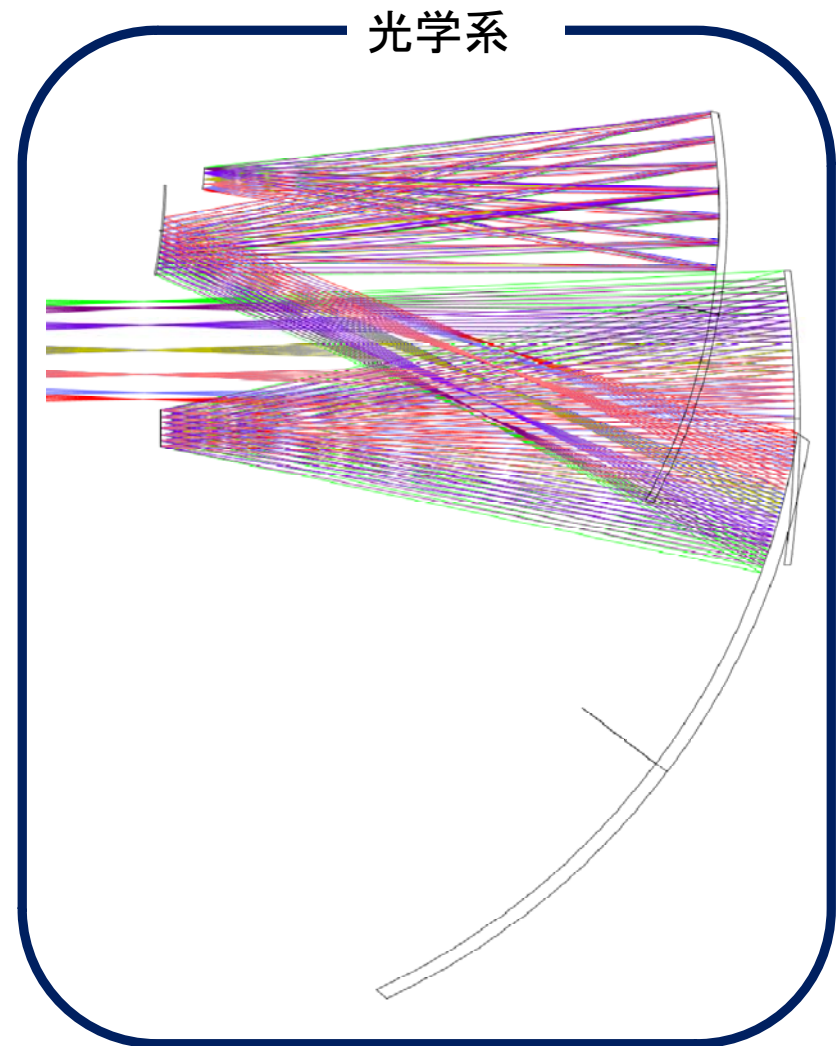
#### 今回の光学系

- 大きさ = 8 m × 6 m × 3 m
- 最大瞳収差 = 3.06%
- 縮小率 = 0.23
- 主光線傾角 < 3.5°

スポットダイアグラムは回折限界程度まで小さい。  
瞳収差量はGLAOとして許容値。

## 今後

- 光学系の大きさを可能な限り小さく。
- 主光線傾角を小さく。
- 面形状の簡単化



ご清聴ありがとうございました。