

分割主鏡シミュレーター

ver 3-IX PSF 評価 — Result I 各要素の PSF への影響

岡山新技術望遠鏡グループ

平成 23 年 6 月 23 日

目次

1	概要	1
2	望遠鏡の星像性能の仕様について	1
2.1	すばる望遠鏡	2
2.2	GTC — Gran Telescopio Canarias	2
3	シミュレーションと PSF の解析	3
3.1	シミュレーション条件	3
3.2	要素ごとの PSF への影響の指標化	4
4	要素ごとの指標からの PSF への影響の結果	5
4.1	要素ごとの指標の計算上の定義	5
4.1.1	セグメントの曲率誤差	5
4.1.2	セグメントの構造関数	5
4.1.3	アクチュエータの駆動	5
4.1.4	セグメントの横ずれ・回転	5
4.2	Strehl ratio 計算領域の半径	5
4.3	計算結果	6
5	結論	6

1 概要

望遠鏡仕様として定義される望遠鏡の最終的な星像の性能は、開発時には望遠鏡に含まれる主鏡・副鏡・ドームの影響などの各要素ごとの性能劣化許容範囲として分解され、各要素についてその範囲に収めるように開発が進められる。この仕様は、星像としての性能として評価値が与えられることになり、それぞれの要素で実際に直接的に測定可能な値に直結しないため、このままでは各要素の開発の際に指標として利用することが困難である。

本レポートでは、分割主鏡シミュレーターとその PSF 出力機能を利用して、分割主鏡に関連するさまざまな要素について、直接的に測定・評価が可能な値でどの程度の誤差が星像の性能の評価値にどう影響するかを評価する。

2 望遠鏡の星像性能の仕様について

ここでは参考のためにいくつかの望遠鏡での性能仕様の例をあげる。

2.1 すばる望遠鏡

すばる望遠鏡の星像誤差は、望遠鏡全体としての分解能が $0.23''$ となる誤差配分の仕様が与えられている。配分仕様は Noguchi et al. (Evaluation of the Subaru Telescope Control System On-shop Test Erection; SPIE 3351, 1998) などにあり、まとめると表 1 のようになる。波長は 400nm 程度? と考えられる。

表 1: すばる望遠鏡での誤差要因の配分

誤差要因	仕様 (")
星像分解能	0.23
望遠鏡	0.20
回折限界	0.013
主鏡	0.10
研磨	0.065
支持	0.070
力誤差	0.02
主鏡形状誤差	0.013
重力変形	0.013
固定点	0.020
風負荷	0.060
熱変形	0.02
鏡面測定/SH	0.02
副鏡	0.04
研磨	0.035
支持	0.020
第 3 鏡	0.04
研磨	0.035
支持	0.020
構造・追尾	0.17
副鏡他	0.12
カセ副鏡	—
装置回転	0.020
追尾	0.12
AG 自身両軸	0.02
AG 支持部	0.017
AZ 角度検出	0.015
EL 角度検出	0.027
AZ トルク変動	0.03
EL トルク変動	0.03
EL 風擾乱	0.038
ドーム内シーイング	0.12

2.2 GTC — Gran Telescopio Canarias

GTC のコンセプトデザイン (GEN/STMA/0012-R) より。

スペック上の目標値としては、M1 の温度むら除き CIR¹ で 0.74 以上が仕様で 0.76 が目標値 (500nm で 0.4"PSF)、M1 の温度むらが入って CIR で 0.70 以上が仕様で 0.74 が目標値。

各コンポーネントに分けた 500nm での誤差配分は表 2 となる。

表 2: GTC での誤差要因の配分

誤差要因	仕様 (")
Image Quality	0.176
Image sie	0.149
Field aberrations	0.051
Diffraction	0.044
Real configuration errors	0.025
M1 surface errors	0.112
Segment figure	0.109
Segment alignment and phase	0.025
M2/M3 surface errors	0.065
M2 surface	0.042
M3 surface	0.050
Active optics	0.053
Measurement	0.033
Active-optics residuals	0.042
Image motion	0.063
Measurement	0.020
Setting noise	0.033
Perturbations	0.050
Local seeing	0.069
Dome	0.055
Telescope	0.025
Mirrors	0.033

3 シミュレーションと PSF の解析

3.1 シミュレーション条件

PSF シミュレーションの (計算) 条件は以下のように設定した。

- 計算領域 2048pixel 平方
- 位相差マップ分解能 19.4312mm/pixel
- 位相差マップ計算メッシュ 1.94312mm/pixel (PSF 変換にはマップ分解能へ平均化する)
- PSF 計算参照波長 1.6 μ m
- PSF 画像分解能 8.293 mas/pixel
- PSF 画像サイズ 17"
- 理想回折限界サイズ (3.78m 円形鏡) 106.235mas (12.81 pixel radii)

¹像中心での強度比として定義されている。Strehl ratio と違うのかどうかは不明。

計算対象は、セグメント単体について構造関数と曲率誤差、セグメント全体のシステムとしてアクチュエータによるセグメントの駆動、セグメントの横ずれ・回転とする。このうち、セグメント単体の曲率誤差についてはエッジセンサーを取り付ける場所に PCS を配置した場合の最適アクチュエータ補正量²により補正を行い、セグメントの X,Y 横ずれについてもセグメント全体で位相差平均が 0 になるようなアクチュエータ補正量による補正を行う。

ただし、セグメント鏡面の構造関数についてのみ計算メッシュは位相差マップ分解能と同じメッシュを採用している。よって、他の要素について計算し、位相差マップ分解能まで落とした分布を作成してから、独立に計算した構造関数からの位相差分布を足し合わせている。このため、例として図 1 のようにわけて計算を行っている。

PSF の評価における像の中心点は、イメージ中のピークピクセル位置ではなく、画像の X/Y 各軸に対して強度分布の平均点 (x_c, y_c) 、つまりピクセルの強度 $i_{(x,y)}$ に対して

$$\sum_{\forall(x,y)} (x - x_c) i_{(x,y)} = \sum_{\forall(x,y)} (y - y_c) i_{(x,y)} = 0$$

となる点として定義している。このため、回折限界での像分布がそれほど崩れていない状況では正しい Strehl ratio と PSF への影響が出せていると考えられるが、像にピークが存在しないような悪化した状況では誤差は非常に大きくなる可能性がある³。

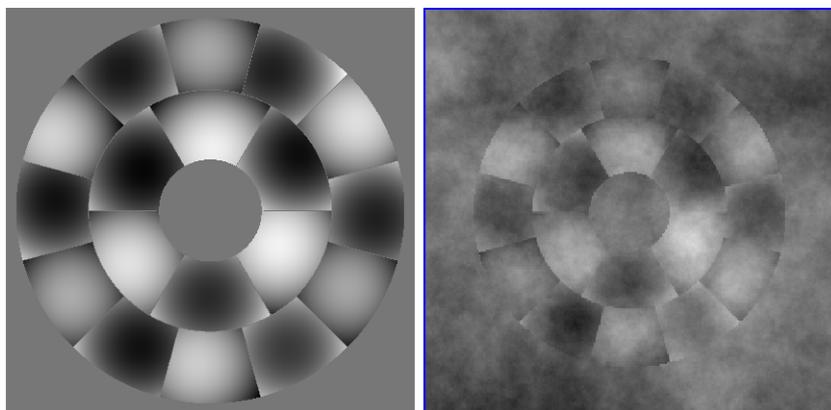


図 1: 左が構造関数以外による計算メッシュそのままの位相差マップ、右が構造関数を入れた全体での位相差マップ。最終的に PSF を求める際には分割主鏡のセグメント間の隙間などの処理のために、右の位相差マップと隙間を考慮した単位ピクセル中の有効面積割合を掛け合わせるため、外側の分割主鏡がない領域の構造関数 (のみ) による位相差マップは無視される。

3.2 要素ごとの PSF への影響の指標化

望遠鏡は分割主鏡であるため、(何らかのサイズの円形開口に対する) 回折限界の完全なプロファイルがそのまま実現されることはない。よって、ある状態での PSF への影響は、回折限界の理論値と比較するのではなく、完全に理想的な状態に設定した場合の PSF の FWHM からの増加分を指標とする。

²PCS 配置点での理想鏡面からのずれの二乗平均が最小になるような補正量。

³が、そもそもその場合に PSF から精度よいシーイングを定義することは困難であり、このレポートでターゲットになるようなレベルの PSF への影響の値にならないため、最終的な評価基準としてはそれほど問題にはならない。

4 要素ごとの指標からの PSF への影響の結果

4.1 要素ごとの指標の計算上の定義

4.1.1 セグメントの曲率誤差

曲率誤差は製造・設置時の最悪ケースを想定し、ある指標 x に対して奇数 ID のセグメントは $-x$ の曲率を、偶数 ID のセグメントは $+x$ の曲率を持つという設定とする。なお、ここでの ID はシミュレーターでのセグメントの定義のものとする。

このため、正確に各セグメントの曲率を全て測定できた場合⁴、より影響が小さい配置を実現可能ともいえる。

4.1.2 セグメントの構造関数

セグメントの構造関数は r_0, σ の 2 パラメータのみとし、鏡面のローカルなざらつきの指標である σ は 14nm に固定する。

なお、構造関数を入れない場合は、この σ についても導入しない。つまり、構造関数を入れない場合は $r_0 = \infty$ とするのではなく、まったく構造関数による影響を考えないことを意味する。

4.1.3 アクチュエータの駆動

アクチュエータの駆動については、現実の制御では特異ベクトルのモードごとに制御パラメータを変えるような制御を行うことになるため、個々のアクチュエータごとでのシミュレーションにおいて PSF への影響が最大になる配置はどのようなものになるかは明らかでない。このため、今回は単純化のために、特異ベクトルのモードを考慮することなく、全アクチュエータについてパラメータの値 x に対して $\pm x$ の範囲内の一様乱数で振られるような制御量を与えることとした。

4.1.4 セグメントの横ずれ・回転

セグメントの横ずれ・回転について、両方ともどのような状況になるかはセグメントの取り付け位置に非常に依存する⁵ことから明示的に分布を与えることはせず、アクチュエータの駆動量と同じく一様乱数で与えることとした。

4.2 Strehl ratio 計算領域の半径

計算半径を変えた場合、中央に抜けのある円形鏡では第一明環が明るくなる PSF となることから Strehl ratio の値が変化することが考えられる。実際にいくつかの条件において、Strehl ratio を計算する領域の半径を変えた場合のグラフが図 2 となり、理想的な鏡面の場合は Strehl ratio は第一暗環より少し外側までは下がって、そのあとは上昇する傾向が出る。逆に鏡面に擾乱がある場合はその効果が薄れ、積分範囲を広げることによる Strehl ratio の頂上の影響のみが見られるようになる。

これらを考慮すると、できるだけ狭い半径で計算するほうがよいが、逆に中央では計算ピクセルによる離散化効果が見られて変動が激しくなるので、少し大きくとる方が望ましいともいえる。このため、その中間として、計算半径を 1.5pixel とした。

⁴この正確な測定では、測定時の曲率測定誤差が十分無視できる程度に小さいことを仮定する。つまり、曲率測定の誤差やバイアスが測定値 (全セグメントの測定値の平均など) に比して数桁小さい値であることを仮定する。

⁵取り付け位置により重力のかかる方向が異なるため。

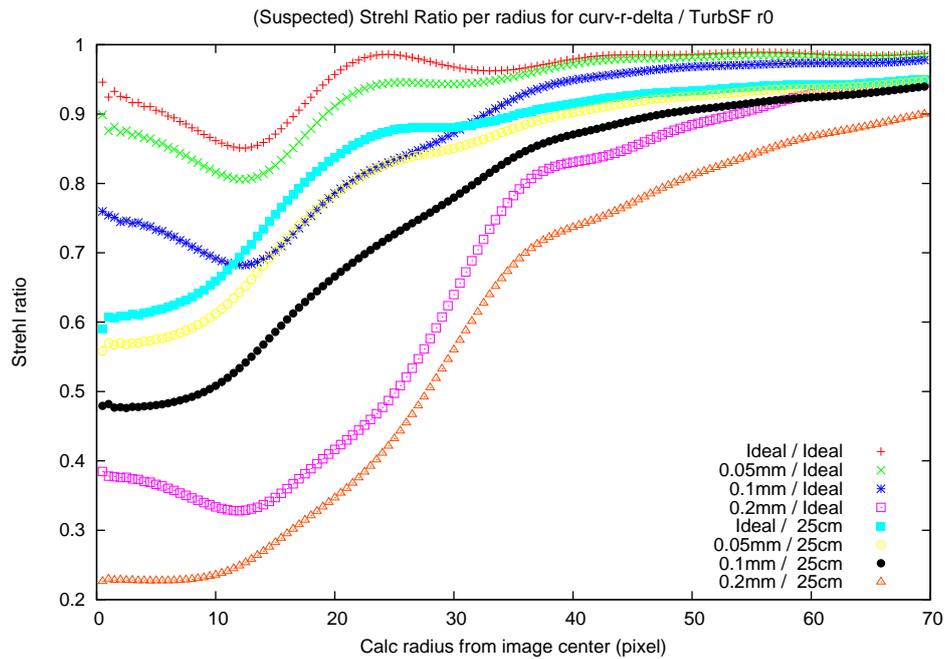


図 2: 計算半径を変えて求めた Strehl ratio のグラフで、横軸が計算半径、縦軸が Strehl ratio。

4.3 計算結果

計算結果について、PSF への影響が $10''$ を超えるような値を示した計算パラメータの組については、その計算は精度がない (PSF を正確に測定できないほどに像がぼらばらになっている) と判断して無効データとした。

構造関数・曲率誤差・アクチュエータ駆動量に対する結果は表 3 のようになった。また、セグメントの横ずれ・回転のみを入れた場合の結果は表 4 のようになった。なお、全ての要素が理想的な鏡面の場合の 3.78m 回折限界からの影響の増加分は 41mas であり、表の単位は全て mas である。

表 3: 計算結果 I — 構造関数・曲率誤差・アクチュエータ駆動量

アクチュエータ 曲率誤差 [μm]	理想位置				$\pm 50\text{nm}$				$\pm 100\text{nm}$			
	± 0	± 50	± 100	± 200	± 0	± 50	± 100	± 200	± 0	± 50	± 100	± 200
構造関数なし	0	40	83	258	54	68	105	288	118	131	169	397
$r_0 = 70\text{mm}$	2167	2073	2246	4022	2368	2214	2341	3977	3063	2810	2895	4526
$r_0 = 250\text{mm}$	134	148	192	452	143	161	207	480	209	227	281	617
$r_0 = 920\text{mm}$	41	59	100	283	63	78	116	310	124	138	179	418

なお、2つの表からもわかるように、今回の解析は分割主鏡という一つの光学コンポーネントにおける複数の要素に対するものであり、その結果は単純なガウス関数の足し合わせとはならないことに注意する必要がある。

5 結論

各要素ごとに 100mas の影響に収まる範囲のおおよその目安は以下のようになる。

- アクチュエータの制御算差が一様乱数の場合 $\sim \pm 75\text{nm}$
- 曲率誤差が \pm が交互に並んでいる場合 $\pm 100\mu\text{m}$

表 4: 計算結果 II — セグメント横ずれ・回転

方向 補正	X [mm]		Y [mm]		θ [°]
	あり	なし	あり	なし	
0.01	6.4	400	12.3	269	20.2
0.05	6.4	—	21.3	—	63.4
0.1	13.6	—	15.4	—	133.9
0.5	22.8	—	33.6	—	2439

- r_0 は 250mm より多少よい (大きな) 値であることが望ましい
- セグメントの横ずれは理想的に補正されているという仮定の下ではほとんど影響しない
- セグメントの横ずれがまったく補正されないとすると 0.01mm より十分小さくなる必要がある
- セグメントの回転は $\sim 0.07^\circ$

ただし、100mas の影響を及ぼす (完全に独立な) 要素が n 個あった場合、全体としての影響は $100\sqrt{n}$ mas になることに注意する必要がある。いまの場合、同じ主鏡上での影響の評価であり、完全には独立でないため、総合的にはこの $100\sqrt{n}$ より小さな影響に収まると考えてよい。