

V138b: LiteBIRD搭載光学系の開発検討2: 公差解析

○鹿島伸悟¹⁾, 高倉隼人²⁾, 長谷部孝²⁾, 関本裕太郎²⁾, 稲谷順司²⁾, 今田大皓³⁾, 他LiteBIRDメンバー

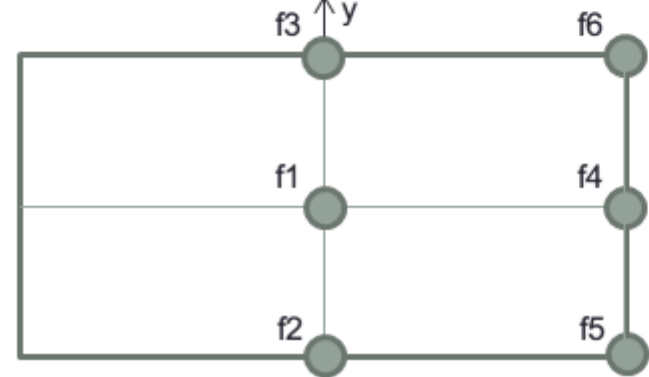
1: 国立天文台 2: JAXA/ISAS 3: LAL, Univ. Paris-Sud, CNRS/IN2P3, Universite Paris-Saclay

評価関数

- ① 波面収差: 最終的にはfeedとのカップリング効率を計算する必要があるが、まだfeedの特性等が確定していないこともあり、SRで行う
 - ② 偏光面回転量: 各画角での主光線に対する偏光面の回転量
 - ③ テレセン性: 各画角での主光線の像面入射角<1度
 - ④ Fno及び扁平率: ABCD行列を用いて、各画角でのxy両方向焦点距離を計算し、その値よりFno(設計値3)及び扁平率(設計値<0.05)を計算する
- SRの許容値は0.95以上であり、先ずはこれに関して検討した(解析1)
- 偏光面回転量に関しては、設計値からのズレ量が2.7(0.045度)以下の精度でknowledgeであれば良い
- 但し、現段階では、この精度で実測できるかどうかが不明であるため、製造誤差で上記の値以上回転しないことを許容値とした場合の解析も行った(解析2)

解析1: 波面収差SR

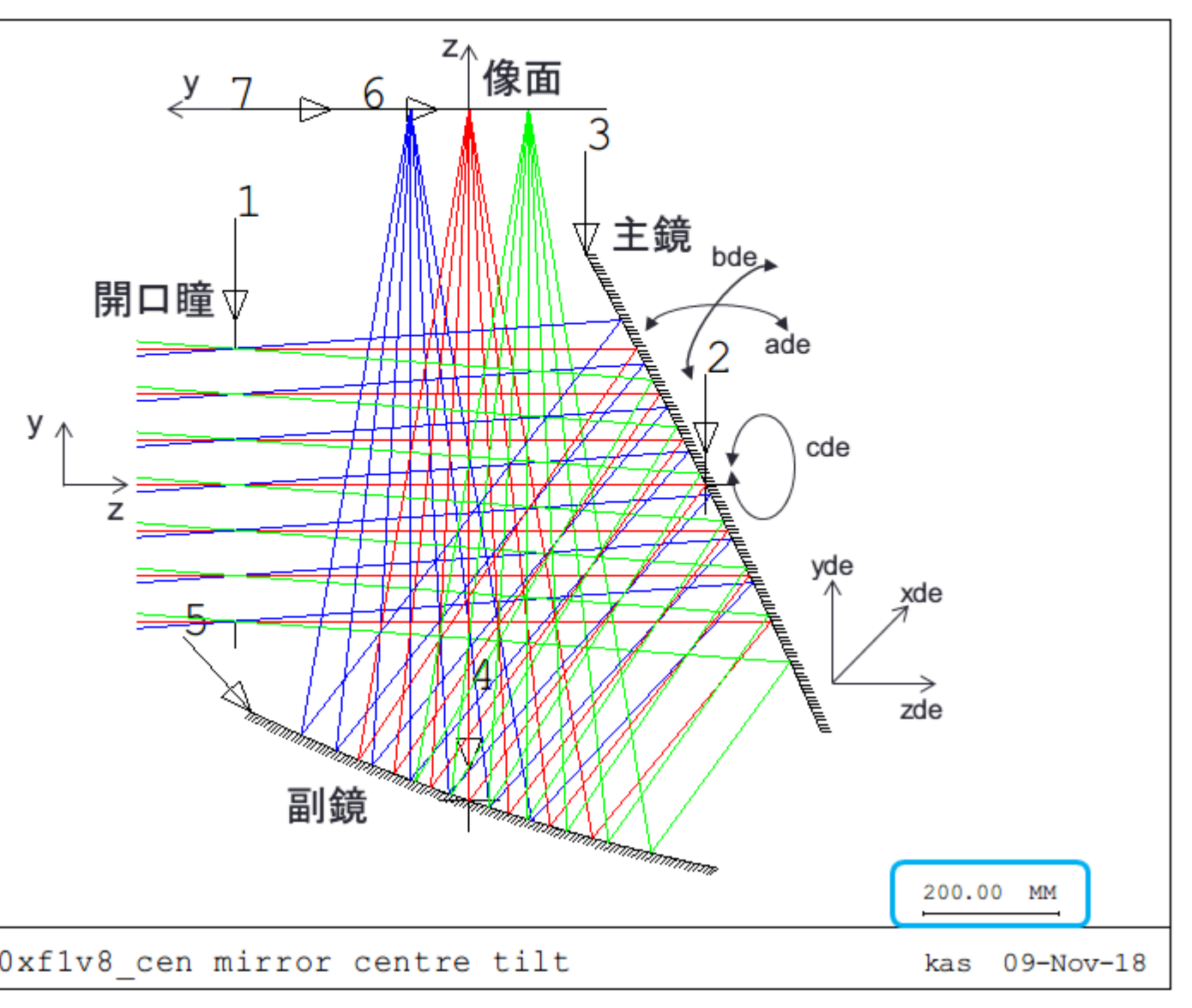
- 波面収差の許容値はSR>0.95なので、先ずはこれに関して偏心感度解析を行った
- 開口の状態、周波数をどうするかであるが、今回は開口径φ400・強度一様・周波数161GHzという最も厳しい条件で行う
- 偏心は6自由度全て(shift*3, tilt*3)で行う
- 回転対称の光学系ではz軸(光軸)周りのtiltは無意味だが、本光学系では有意である
- HWPの有効領域を評価する都合もあり、設計は画角で行っていたが、公差解析は像面(検出器)基準の実像高で行う
- 評価像高は、対称性・矩形検出器を考慮して下図の6点とする
- 何れかの画角(定性的にはf5かf6)のSRが0.95程度になる各偏心量を求める



- 各点の実像高は以下ようになる
 - > f1(0,0) f2(0,-93) f3(0,93)
 - > f4(195,0) f5(195,-93) f6(195,93)
- ylに関しては、開口側面が正である
- xlに関しては対称なのでどちらでも良い

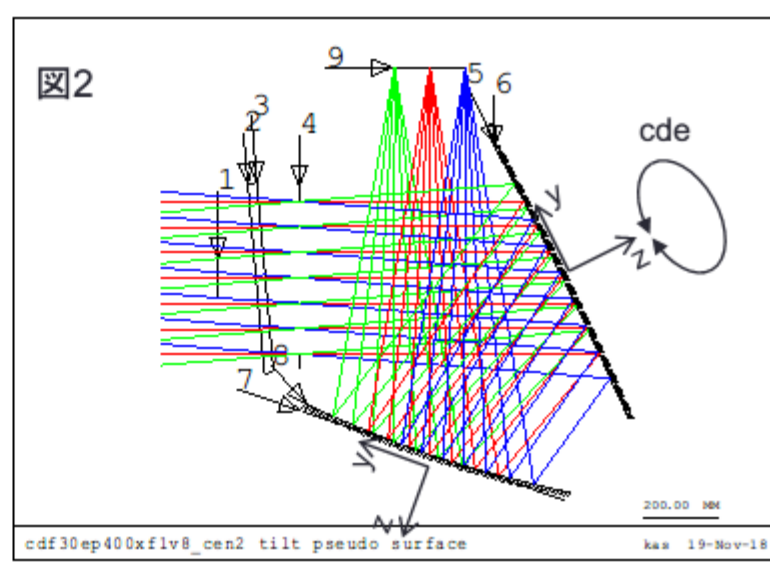
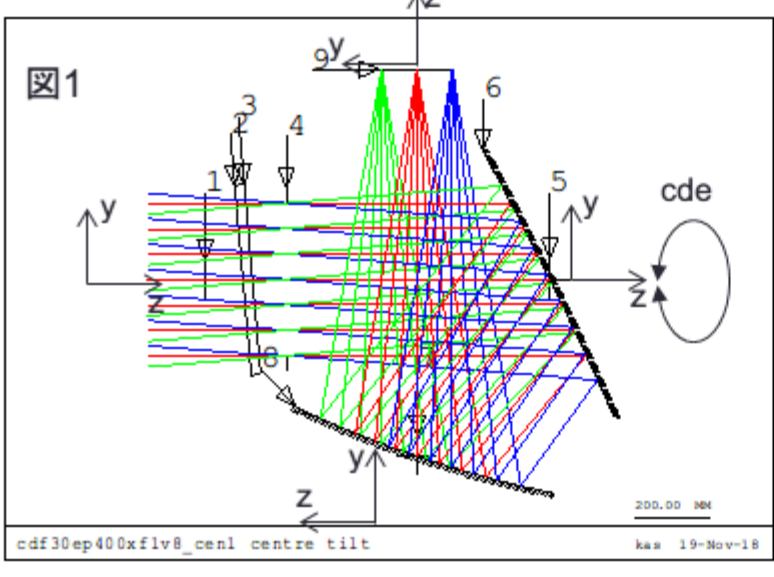
偏心6自由度

- xyz方向のshiftがxde/yde/zde
- xyz軸周りのtiltがade/bde/cde



偏心座標系に関して

- 図1は、いわゆるグローバル座標系である
- 像面は90度傾いたり、M2はzが反転したりしているが、変に傾いた座標系はないため、これはこれで分かりやすい座標系である
- 図2はローカル座標系であり、xy座標軸が各ミラー面に沿っており、それに直交する方向がz軸となる
- ade/bdeとxdeに関してはいずれの座標系でも同じであるが、それ以外は動きが異なる
- 要は、偏心を考える時、グローバル座標で考えるか、ミラー位置でのローカル座標で考えるかの違いであるが、光学系のアライメント公差としては、各ミラーのローカル座標系の方が平等に評価できるため、こちらを採用する



偏心感度解析結果

design		f1	f2	f3	f4	f5	f6
主鏡	value	0.9990	0.9981	0.9978	0.9973	0.9660	0.9803
ade	-0.6	0.9985	0.9911	0.9996	0.9943	0.9490	0.9888
	0.6	0.9940	0.9978	0.9922	0.9927	0.9752	0.9660
bde	-1.3	0.9981	0.9951	0.9973	0.9979	0.9787	0.9797
	1.3	0.9981	0.9951	0.9973	0.9919	0.9495	0.9768
cde	-3	0.9641	0.9639	0.9632	0.9736	0.9526	0.9635
	3	0.9641	0.9639	0.9632	0.9526	0.9736	0.9635
xde	-50	0.9983	0.9960	0.9977	0.9980	0.9775	0.9736
	50	0.9983	0.9960	0.9977	0.9933	0.9514	0.9836
yde	-30	0.9990	0.9960	0.9985	0.9985	0.9972	0.9976
	30	0.9973	0.9976	0.9957	0.9957	0.9957	0.9940
zde	-30	0.9964	0.9904	0.9979	0.9927	0.9927	0.9940
	30	0.9947	0.9972	0.9911	0.9952	0.9952	0.9914
副鏡							
ade	-1.1	0.9951	0.9861	0.9982	0.9931	0.9510	0.9814
	1.1	0.9887	0.9930	0.9848	0.9869	0.9636	0.9666
bde	-3.5	0.9959	0.9946	0.9944	0.9928	0.9488	0.9865
	3.5	0.9958	0.9946	0.9943	0.9963	0.9784	0.9702
cde	-10	0.9895	0.9897	0.9923	0.9555	0.9760	0.9804
	10	0.9895	0.9897	0.9923	0.9760	0.9555	0.9804
xde	-50	0.9984	0.9958	0.9982	0.9949	0.9545	0.9885
	50	0.9984	0.9957	0.9982	0.9944	0.9785	0.9661
yde	-8	0.9989	0.9984	0.9978	0.9970	0.9970	0.9978
	8	0.9991	0.9977	0.9979	0.9974	0.9979	0.9978
zde	-30	0.9947	0.9970	0.9912	0.9948	0.9948	0.9945
	30	0.9964	0.9903	0.9979	0.9926	0.9926	0.9939

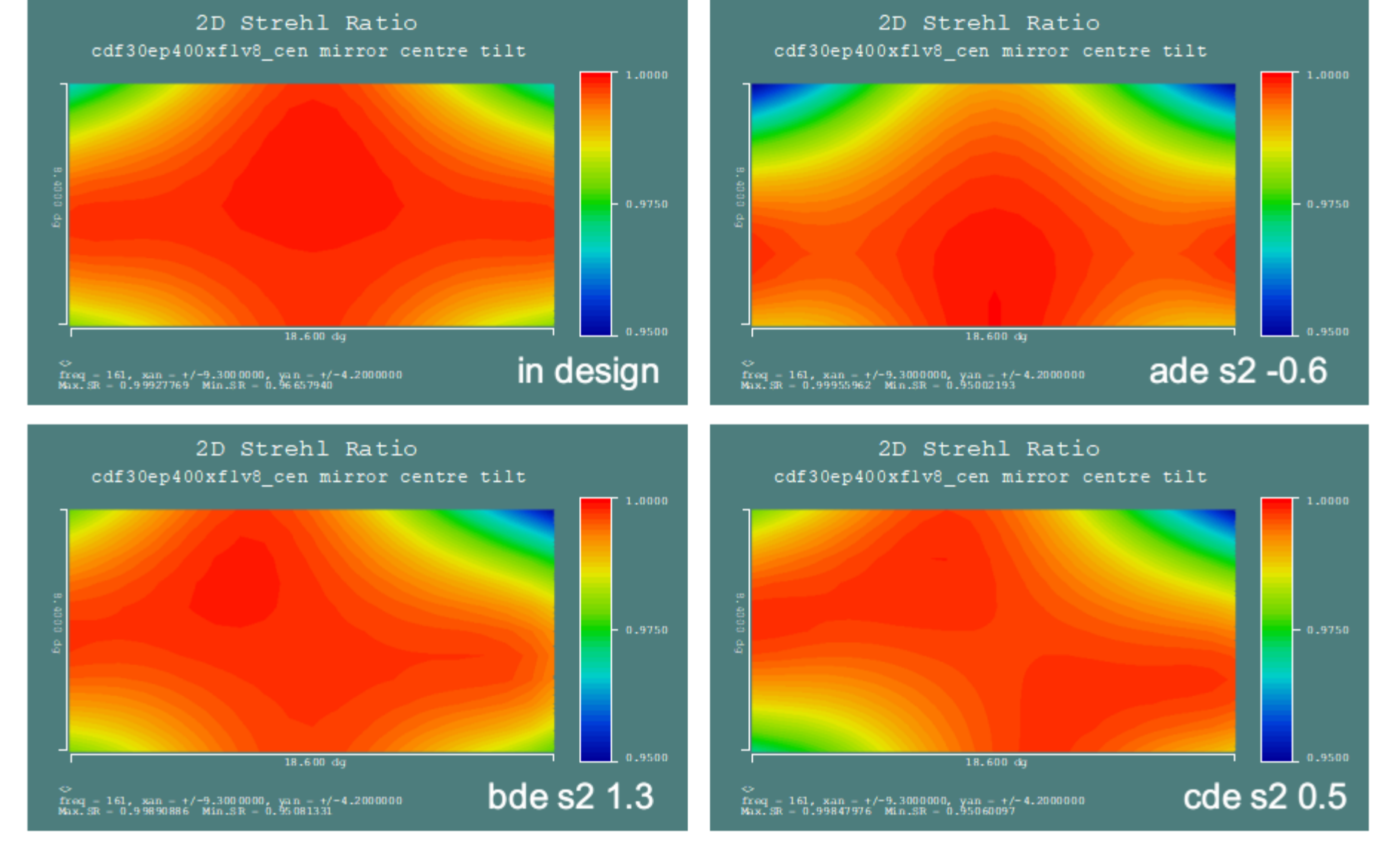
titの単位は[度], shiftの単位は[mm]である

ミラーの傾きはそれなりに効いているが、基本的にシフトは全然効かない

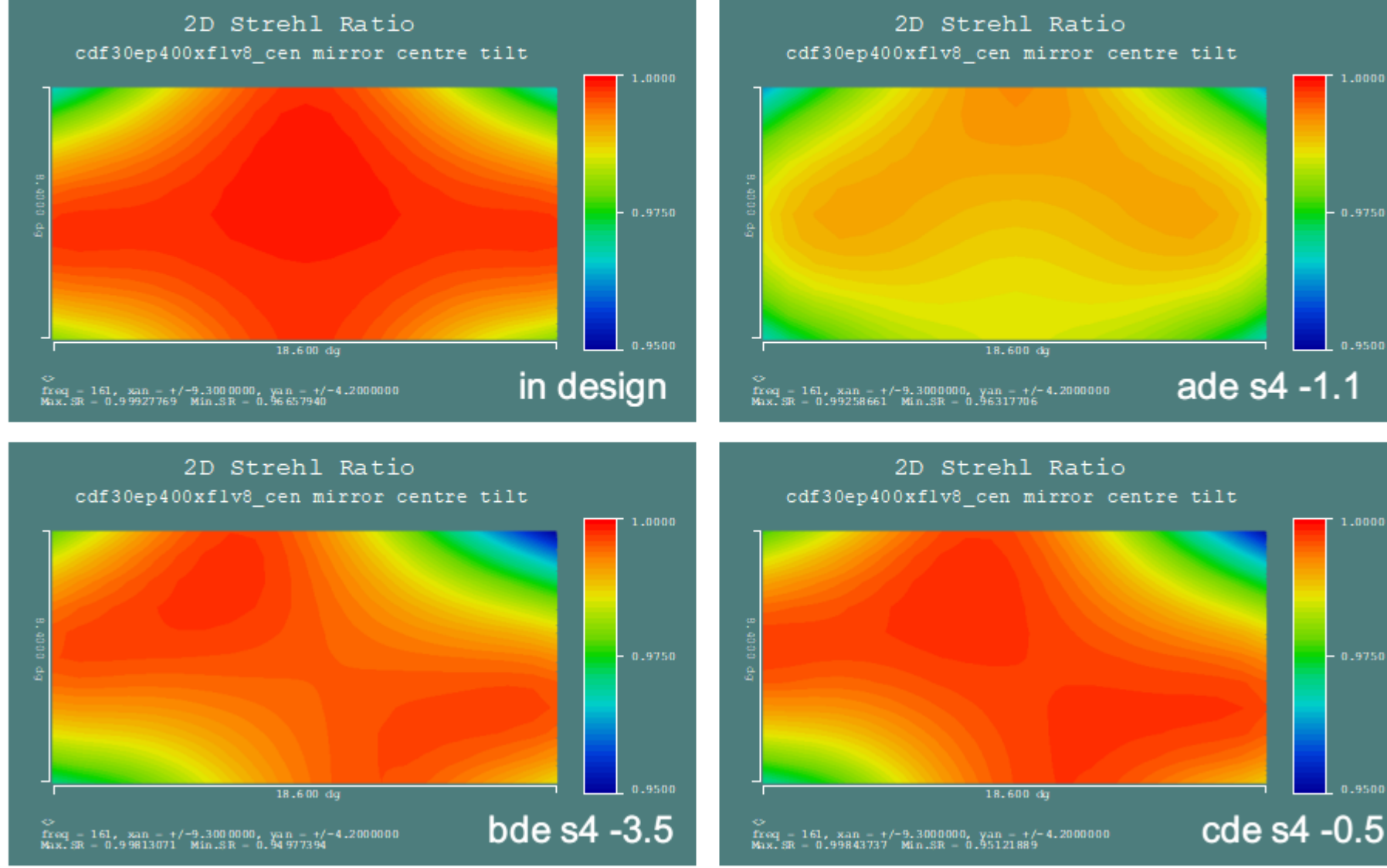
cdeもあまり効いていないが、これは座標系をローカル座標系にしたため、「面内回転」となったからである

やはり、集光性能に効くのはミラーの面外方向への傾きであり、これに関する結果を視野全域のSR図で示す

SR感度解析結果: 主鏡tilt



SR感度解析結果: 副鏡tilt



最終的な公差設定

- 途中経過は省略し、最終的に設定した公差を下記する(tiltは度, shiftはmm)

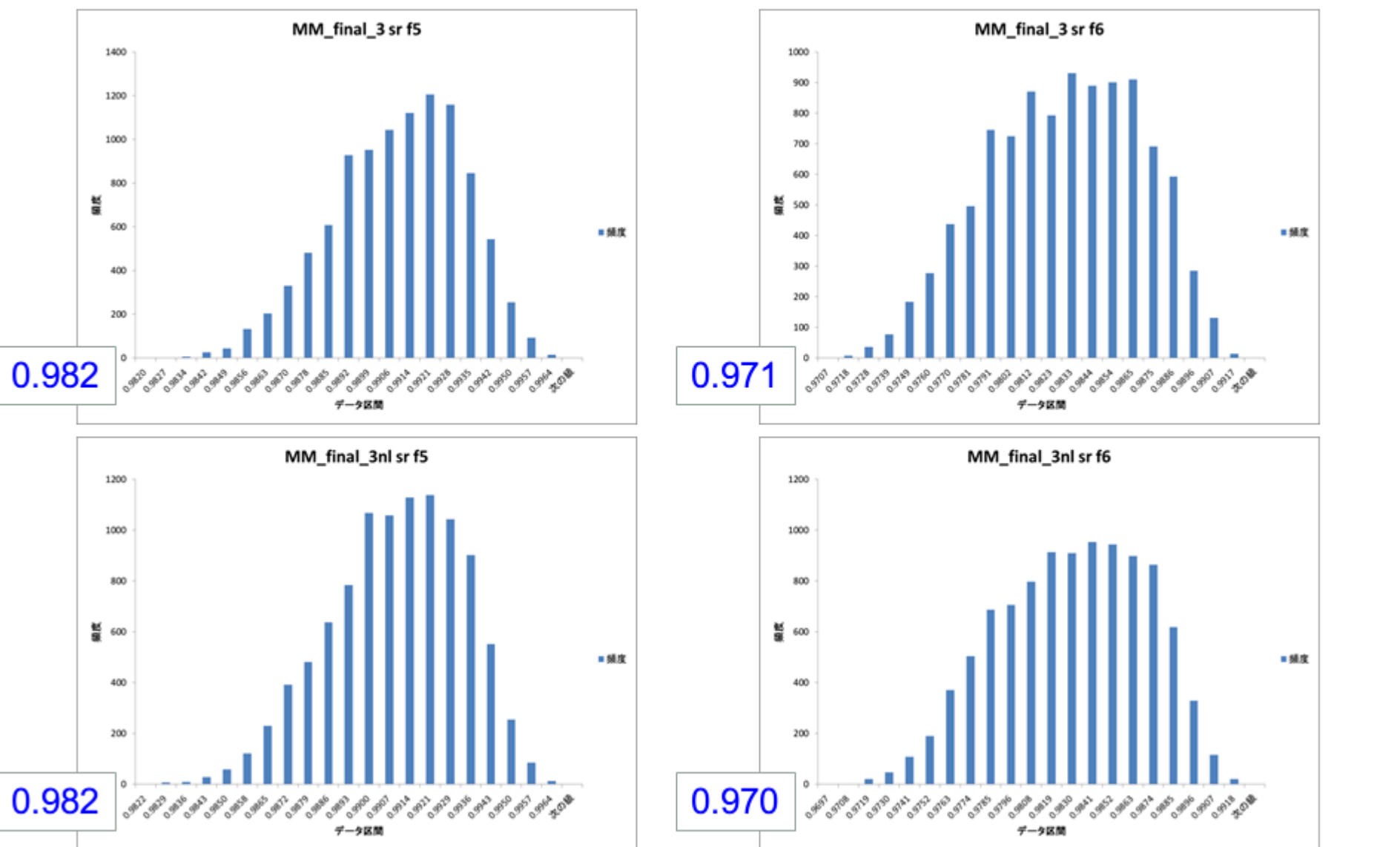
	ade	bde	cde	xde	yde	zde
M1	0.2	0.3	0.2	10	10	5
M2	0.2	0.5	0.2	10	5	5

- 10000回を2回行ったため、ヒストグラムにするほどではないFnoと扁平率に関しては統計値を下記するが、いわゆる近軸量相当の1次量であり全く問題無い

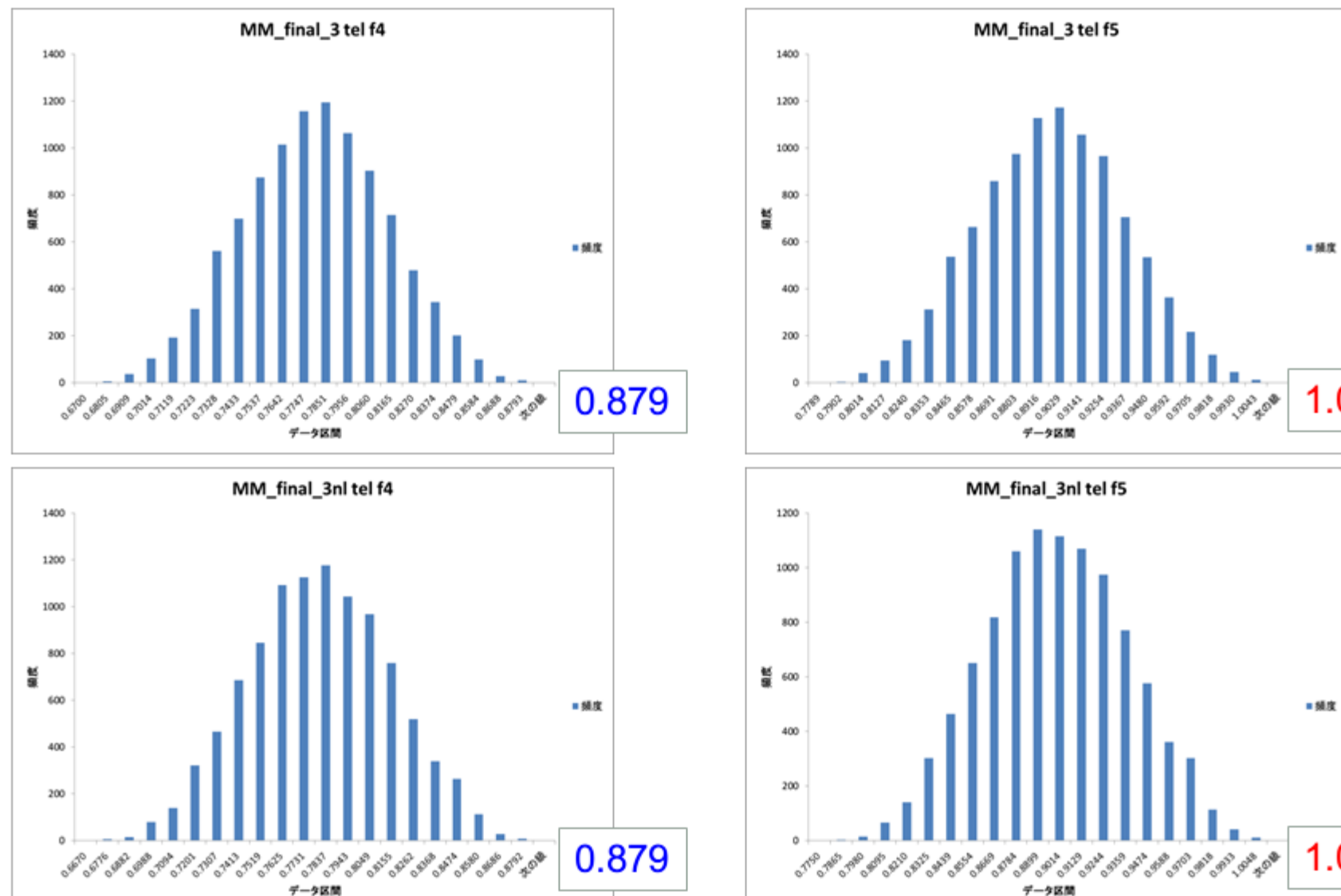
	fno f1	fno f2	fno f3	fno f4	fno f5	fno f6	flt f1	flt f2	flt f3	flt f4	flt f5	flt f6	
min	3.0196	3.0448	2.9944	3.0300	3.0617	3.0018	min	0.0211	0.0101	0.0311	0.0169	0.0079	0.0255
max	3.0409	3.0649	3.0167	3.0534	3.0846	3.0259	max	0.0228	0.0110	0.0339	0.0216	0.0118	0.0309
ave	3.0300	3.0547	3.0052	3.0417	3.0730	3.0138	ave	0.0220	0.0106	0.0325	0.0193	0.0099	0.0284
stdev	0.0034	0.0032	0.0036	0.0036	0.0036	0.0037	stdev	0.0003	0.0002	0.0005	0.0007	0.0006	0.0008

	fno f1	fno f2	fno f3	fno f4	fno f5	fno f6	flt f1	flt f2	flt f3	flt f4	flt f5	flt f6	
min	3.0193	3.0445	2.9943	3.0292	3.0604	3.0016	min	0.0211	0.0101	0.0312	0.0169	0.0079	0.0256
max	3.0405	3.0647	3.0162	3.0535	3.0845	3.0257	max	0.0228	0.0110	0.0339	0.0216	0.0118	0.0310
ave	3.0299	3.0547	3.0052	3.0417	3.0729	3.0137	ave	0.0220	0.0106	0.0325	0.0193	0.0099	0.0284
stdev	0.0035	0.0032	0.0037	0.0037	0.0036	0.0037	stdev	0.0003	0.0002	0.0005	0.0007	0.0006	0.0008

波面収差SR

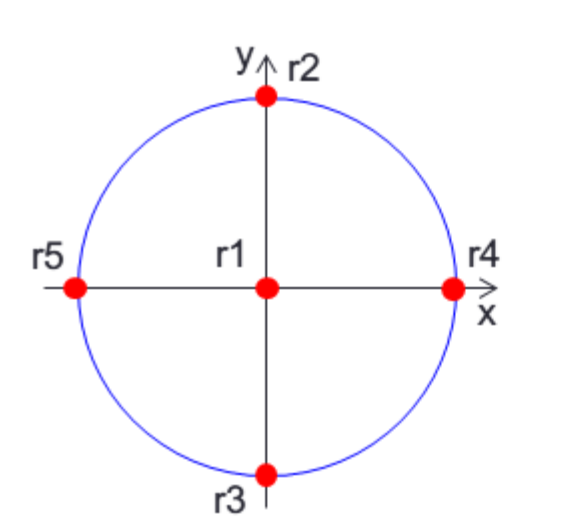


Telecentricity



解析2: 偏光面回転量

- 1本の光線追跡で求める偏光面回転量を評価関数として公差解析を行った
- これまでの計算は、各画角の主光線のみの計算であったが、それをxy両方向の最大マージナル光線でも行った
- 数の青丸を入射瞳とすると、r1が主光線、r2とr3がy方向最大マージナル光線、r4とr5がx方向最大マージナル光線であり、この5本の光線の偏光面回転量を計算した



- 画角は6種類であるため、合計30本の光線に対して偏光面回転量を計算する
- Mueller MatrixやStokes Parameterと異なり、計算は非常に速い
- 当初「偏光面回転量」を計算していたが、公差による変化量を見た方が分かり安いため、設計値との差分を求めた

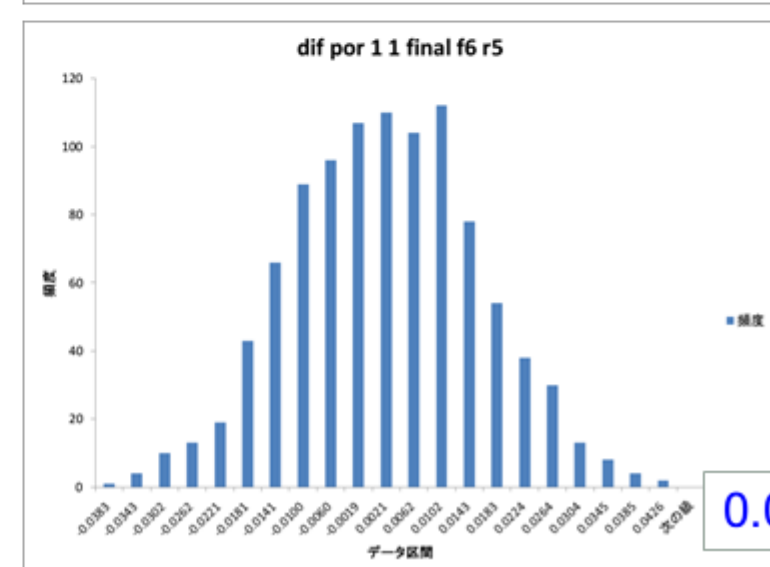
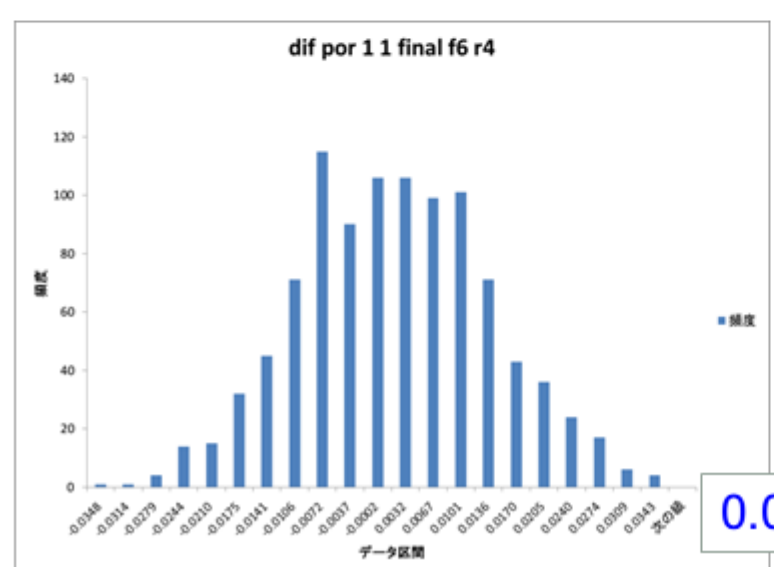
感度解析

- 上記の感度解析は波面収差SRIに基づいたものであるが、今回は偏光面回転量に基づいて再度感度解析を行った
 - 各ミラーにtilt=0.1度、shift=1mmを与えた際の偏光面回転量を計算した
 - 最も悪いf5とf6に関して、下表に示す
- ① 最も効いているのは、主鏡のbdeと副鏡のcdeである
 - ② 次に効いているのは、主鏡のade、副鏡のbdeとなる
 - ③ その次が、副鏡のadeである
- 予想通り、shiftは殆ど効いていないが、これは単体の場合である
 - 大凡であるが、効きを定量的に示すと、①:②:③=10:4:1という感じである
 - この配分に従い、公差を割り振って公差解析を行う
- | | dec | f5 r1 | f5 r2 | f5 r3 | f5 r4 | f5 r5 | f6 r1 | f6 r2 | f6 r3 | f6 r4 | f6 r5 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ade s2 0.1 | -0.02276 | 0.02346 | 0.02233 | 0.03502 | 0.01081 | 0.02372 | 0.02458 | 0.02299 | 0.03588 | 0.01141 | 0.01141 |
| bde s2 0.1 | -0.01171 | -0.01032 | -0.01249 | -0.01197 | -0.01123 | -0.01163 | -0.02410 | -0.01919 | -0.01028 | -0.00297 | -0.00297 |
| cde s2 0.1 | -0.00100 | 0.00136 | -0.00219 | 0.00035 | 0.00055 | 0.00055 | 0.00176 | -0.00090 | 0.00118 | 0.00036 | 0.00036 |
| xde s2 1 | -0.00115 | -0.00109 | -0.00121 | -0.00114 | -0.00117 | -0.00100 | -0.00093 | -0.00107 | -0.00097 | -0.00101 | -0.00101 |
| yde s2 1 | -0.00026 | -0.00028 | -0.00026 | -0.00026 | -0.00025 | -0.00028 | -0.00031 | -0.00027 | -0.00028 | -0.00028 | -0.00028 |
| zde s2 1 | -0.00022 | -0.00023 | -0.00021 | -0.00010 | -0.00010 | -0.00024 | -0.00027 | -0.00024 | -0.00010 | -0.00041 | -0.00041 |
| ade s4 0.1 | -0.01144 | -0.01230 | -0.01083 | -0.01369 | -0.00933 | -0.01196 | -0.01290 | -0.01124 | -0.01384 | -0.01043 | -0.01043 |
| bde s4 0.1 | -0.02582 | -0.02914 | -0.02272 | -0.02670 | -0.02565 | -0.03837 | -0.04239 | -0.03464 | -0.03928 | -0.03827 | -0.03827 |
| cde s4 0.1 | -0.00433 | -0.00432 | -0.00429 | -0.00443 | -0.00429 | -0.00433 | -0.00433 | -0.00433 | -0.00433 | -0.00433 | -0.00433 |
| xde s4 1 | 0.00102 | 0.00057 | 0.00108 | 0.00110 | 0.00103 | 0.00129 | 0.00126 | 0.00126 | 0.00133 | 0.00130 | 0.00130 |
| yde s4 1 | 0.00001 | 0.00001 | 0.00000 | 0.00003 | -0.00001 | 0.00002 | 0.00002 | 0.00001 | 0.00005 | -0.00001 | -0.00001 |
| zde s4 1 | 0.00022 | 0.00023 | 0.00021 | 0.00008 | 0.00035 | 0.00022 | 0.00024 | 0.00021 | 0.00007 | 0.00039 | 0.00039 |

偏光面回転量計算結果: OK

- 下表のように公差設定(tiltの単位は[分])し、1001回計算させたもの
- 最も偏光面回転量が多いf6の3光線に関してヒストグラム図示
- 最大でも0.043<0.045なので一応OK

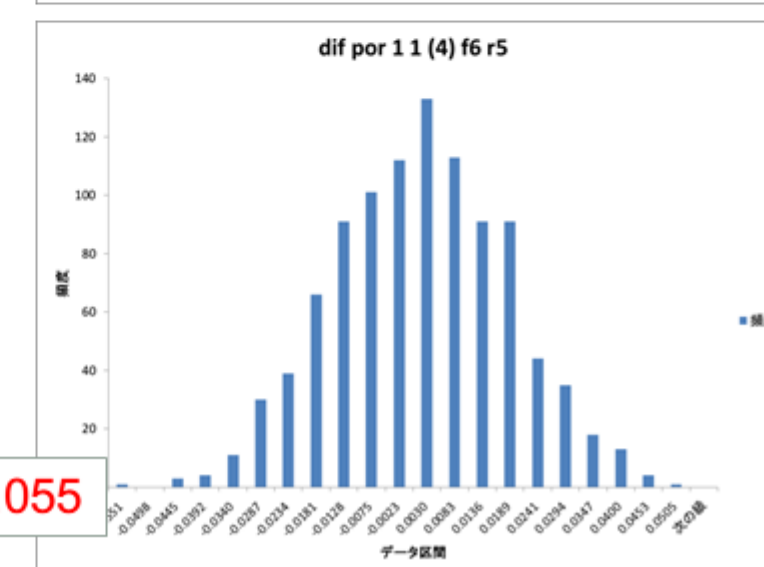
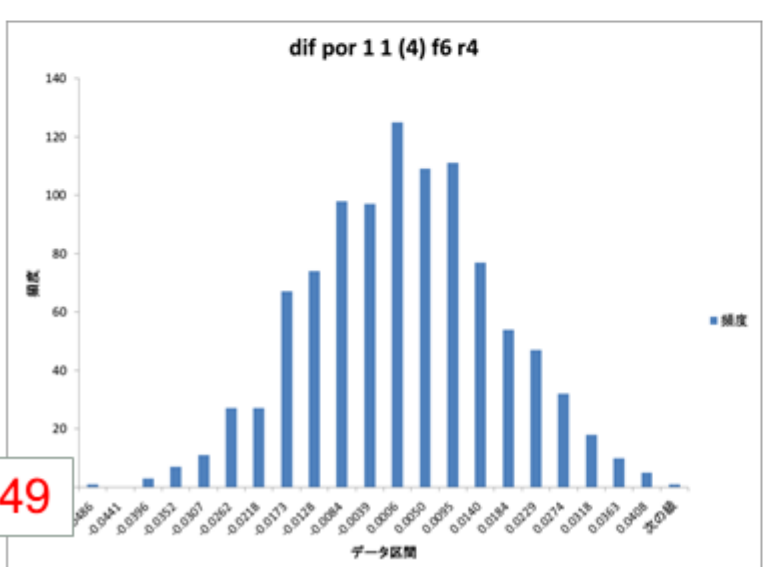
	ade	bde	cde	xde	yde	zde
M1	1	0.5	5	1	1	1
M2	3	1	0.5	1	1	1



偏光面回転量計算結果: NG

- 最も公差が厳しい箇所を0.5分から1分にして、1001回計算したもの
- 軒並み最大偏光面回転量が0.045を超えており、NGと判断
- やはり1分ではダメそうである

	ade	bde	cde	xde	yde	zde
M1	1	1	5	1	1	1
M2	3	1	1	1	1	1



まとめと今後の課題

- ミリ波光学系であるため、tilt 0.2度/shift 10mmといった非常に緩い公差でも、波面収差的には劣化が少なく、全く問題無い
- 実際には10mmずらして作る方が難しいくらいで、緩いメカ公差でも0.1度/1mm程度は十分可能であり、調整等も不要である
- 他方、Telecentricityや偏光面回転量は波長が長い恩恵が全く受けられないため、かなり厳しい公差が必要となる
- Telecentricityに関しては、検出器ユニット内の偏心や、望遠鏡と検出器との相対偏心等も含まれるため、実際には今回よりもっと厳しい公差が必要となり、現在解析中である
- 偏光面回転量に関しては非常に厳しいtilt 30秒という精度が必要となる
- Tilt 30秒は「1m行って145μm」に相当するためかなり厳しいが、決して不可能な値ではないため、一応解はある
- 実機で高精度に偏光面回転量が測定できれば、この公差は不用となる
- また今回は、影響が大きいと思われる偏心公差に関して解析したが、今後面精度(面変形)に関しても、詳細な公差解析を行う予定である