

P2-58:小型JASMINE光学系の公差解析と組み立て

○鹿島伸悟¹⁾、丹羽佳人¹⁾、矢野太平¹⁾、宇都宮真¹⁾、郷田直輝¹⁾、小林行泰¹⁾、山田良透²⁾、安田進³⁾

1:国立天文台JASMINE検討室 2:京都大学 3:JAXA

光学系公差解析

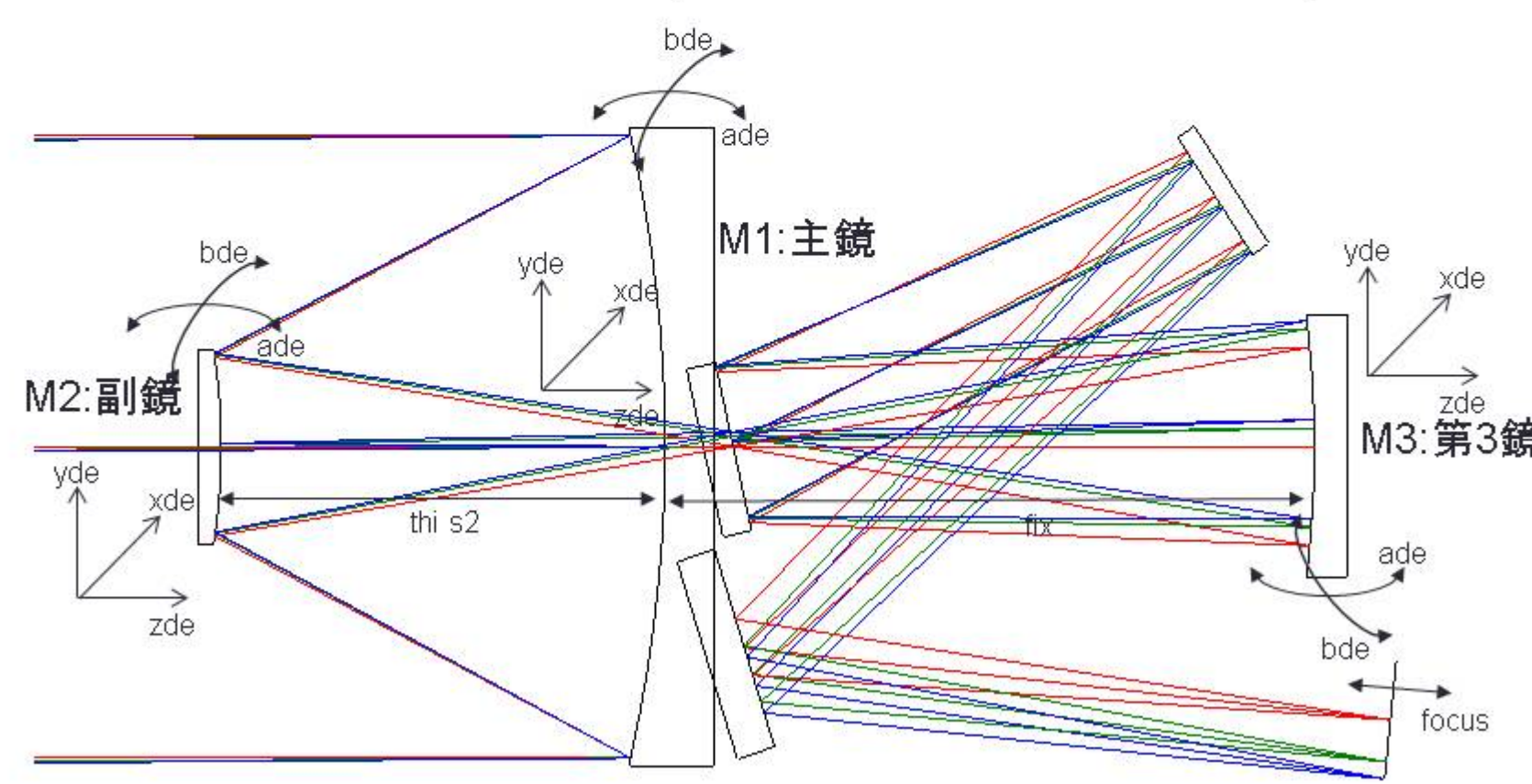
- 公差解析には、波面微分法とモンテカルロ法がある
- 波面微分法は非常に高速であるが、以下の問題がある
 - 各公差(変動=perturbation)は独立であると仮定
 - コンペンセータの動きは連続(分解能無限小)
 - 評価量としてはMTFが波面収差の2者択一
 - 統計処理であるため、公差を振ったレンズデータとしては存在しない
 - 各コンペンセータの調整量も統計量としてしか現れない
 - 最高で3 σ (99.9%)であり、100%の保証が無い
- 今回問題となるのは主に1, 2, 4, 6である
- 絶対に失敗が許されないものに関しては、実際に公差をランダムに振ったデータを作成し、各データを詳細に解析するモンテカルロ法を行う必要がある
- 如何なる解析も可能な詳細データが得られるが、少々時間がかかるのが難点

モンテカルロ公差解析手法概説

- 公差をpとしたとき、乱数を発生させる関数を用いて、 **$\pm p$ 内のランダムな変動を与えたレンズデータを作成する**
- コンペンセータを変数指定し、実際に補正をかけて波面収差ベストにする(理想的に調整した場合を再現)
- 評価項目として、ストレール強度と各コンペンセータの変動量をリストアップする
- 実際の調整量はdiscreteであるため、例えば0.03mm刻みであれば、**調整量を0.03で丸め込み、レンズデータを変更する**
- その際も主鏡・副鏡間距離とCCD位置(focus)は連続調整(調整分解能無限小)可能とする
- 再度このレンズデータでストレール強度をリストアップする
- データをExcellに移し、各値のmin./max./ave./stdev.を求める
- ストレール強度に関してはヒストグラムも作成する

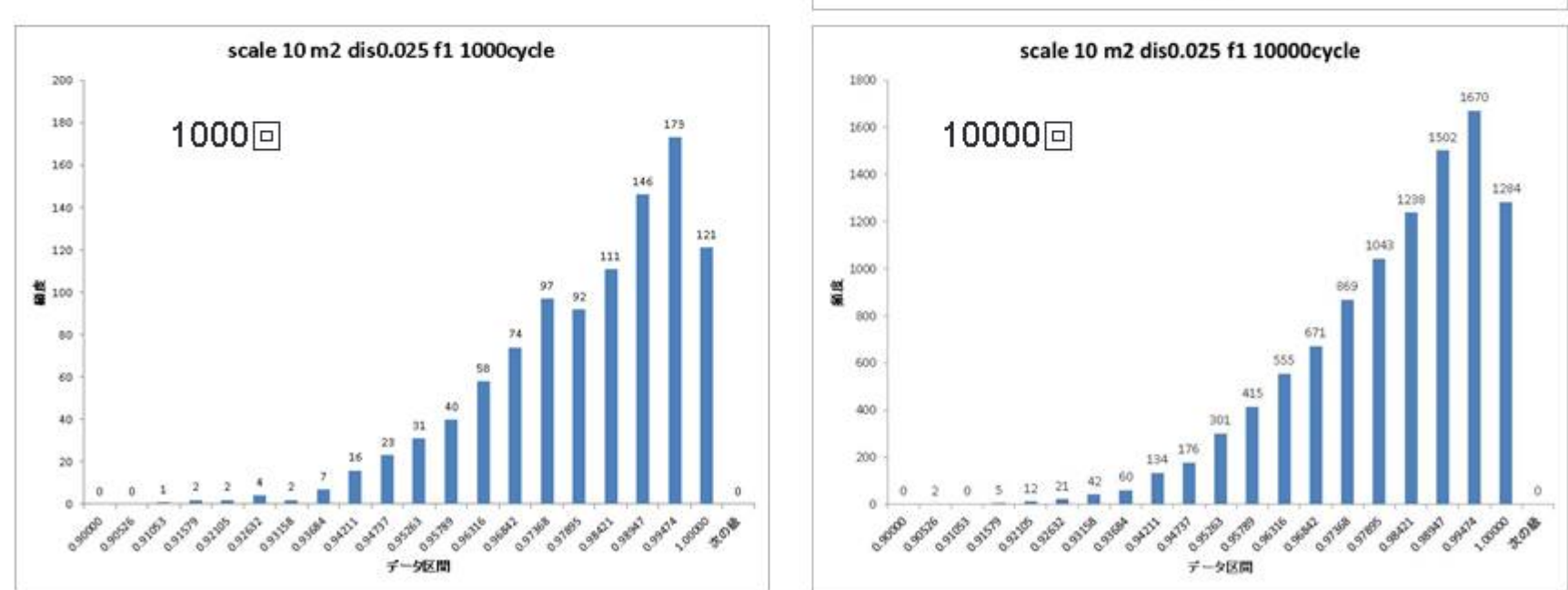
偏心公差解析図説

- 下図のように設定しており、thi s2とCCD位置は常に調整箇所且つ調整分解能は無限小(連続値)としている
- ミラーをコンペンセータにする場合は、そのミラーのxde/yde/ade/bdeを変数とし、zdeに関してはthi s2で吸収している(zdeと両方変数にするのは無意味)



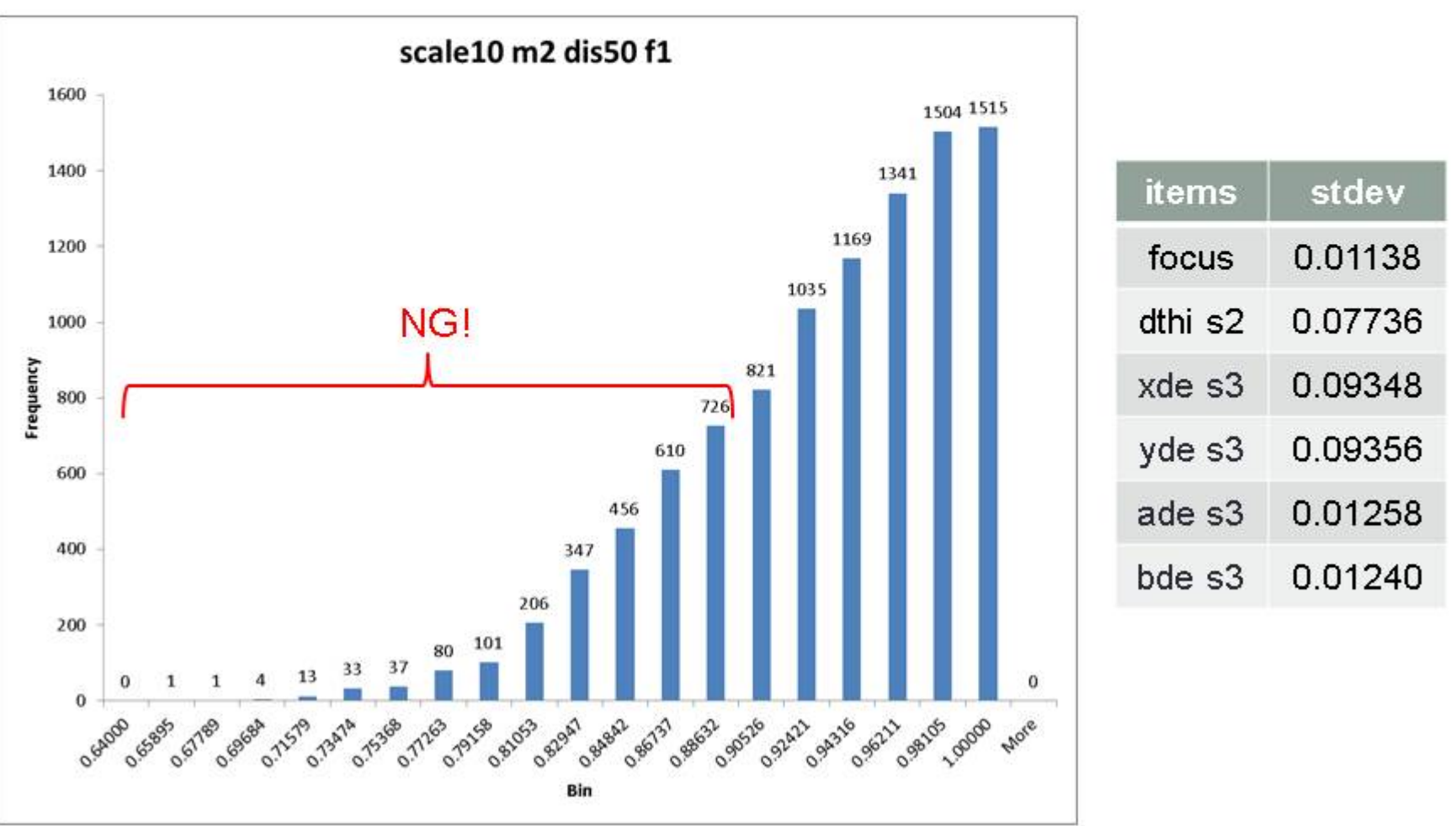
回数の比較

全く同じ条件で、回数を100, 1000, 10000と増やした結果
10000回では非常に綺麗で滑らかな結果が得られる



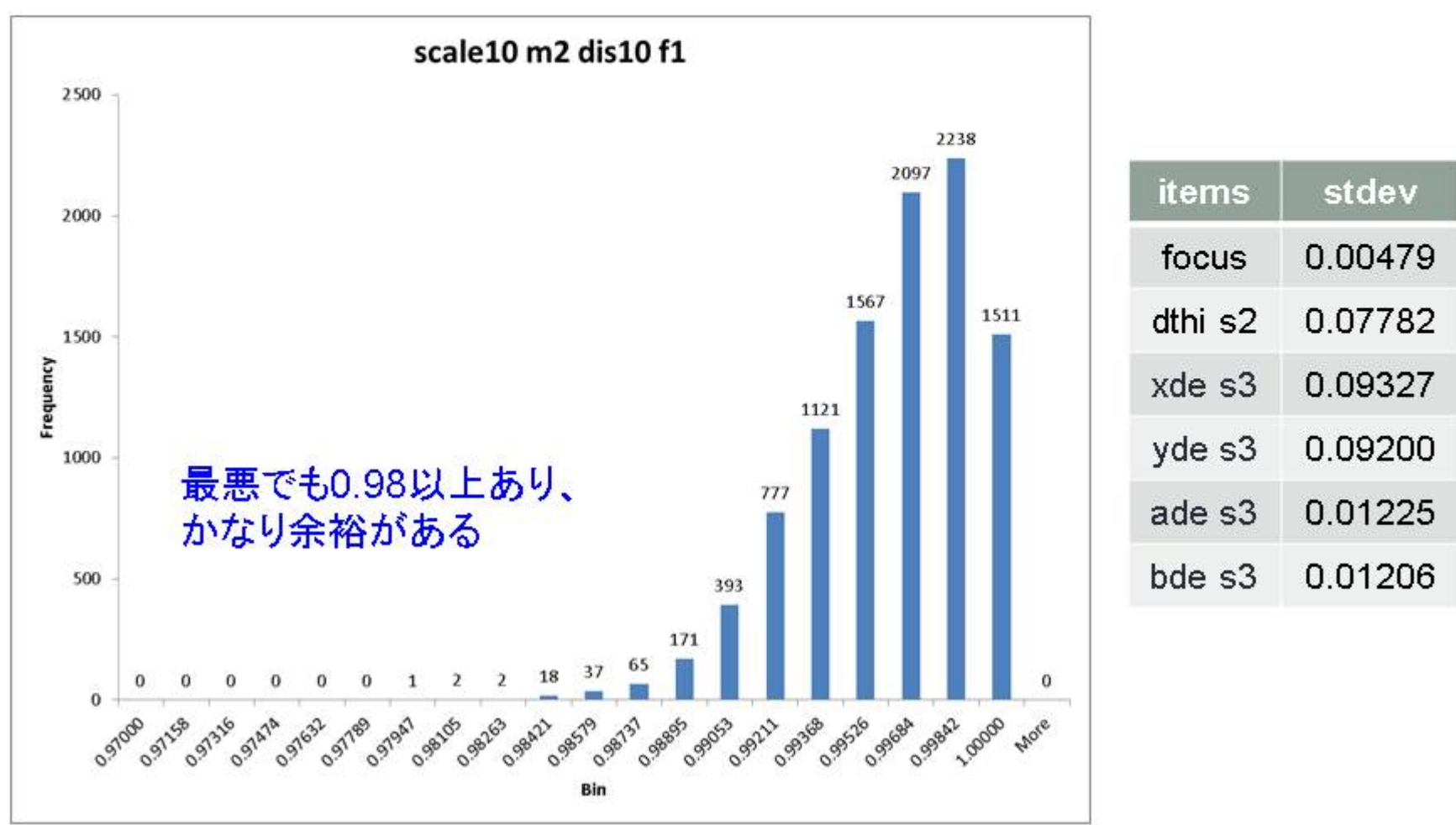
公差解析計算結果例1

- 0.1mmの偏心公差、調整は副鏡、調整分解能は50 μ m
- 許容値は0.9なので、**完全にNG!**



公差解析計算結果例2

- 0.1mmの偏心公差、調整は副鏡、調整分解能は10 μ m
- 許容値は0.9に対して最悪でも0.98なので、**完全にOK!**

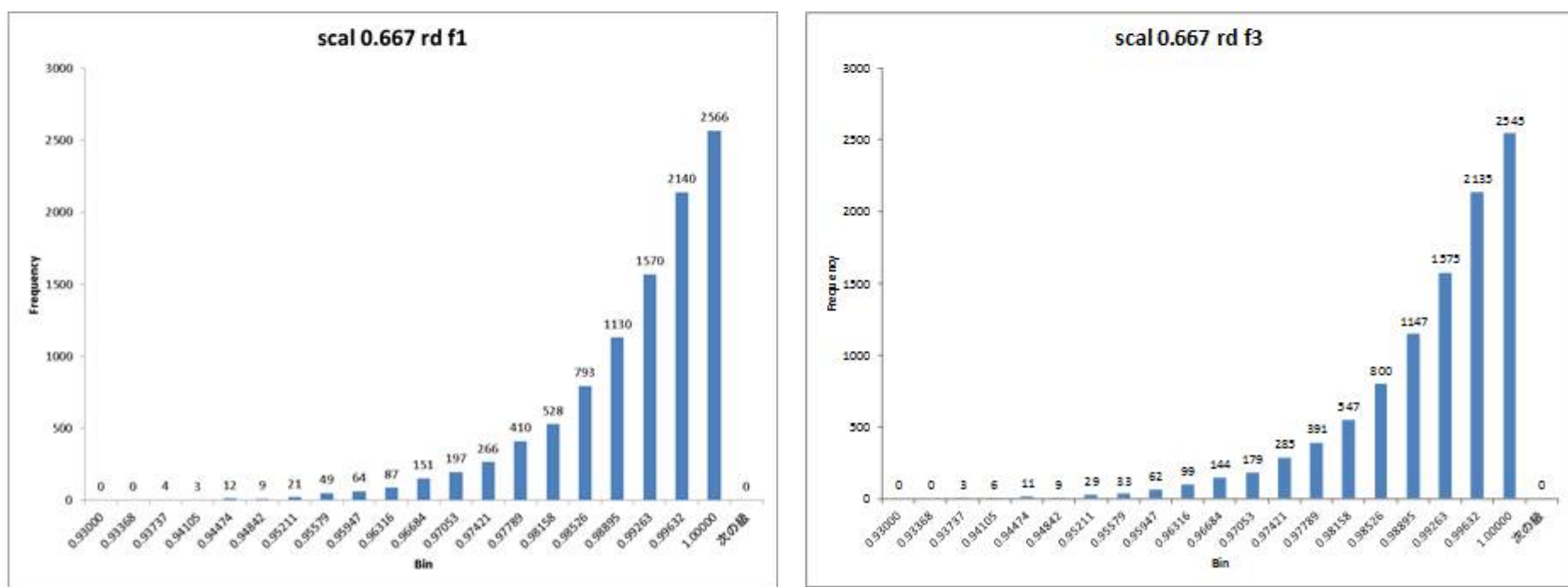


R面変形公差解析

- 与えた公差は、NR(Newton Ring=Power)、AS (Asymmetry=Irregularity)と間隔公差である
- それとは独立に**ランダム面変形(RSE)も考慮**
- NR(Newton Ring=Power)
 - NRは面の曲率半径の変化を表す公差であり、非球面の場合はその近軸曲率半径の変化、平面ミラーもRを持つようになる
 - 光学面としては**軸対称な変形**であり、ミラー間隔等である程度**コンペンセート(補正)可能**
- AS(Asymmetry=Irregularity)
 - ASは直交する2方向の曲率半径の差であり、**非軸対称な変形**
- ランダム面変形(RSE=Random Surface Error)
 - RSEは**ランダムな微小凹凸**であり、rmsで考える
- ASとRSEはその性質上、コンペンセート(補正)不可能**である

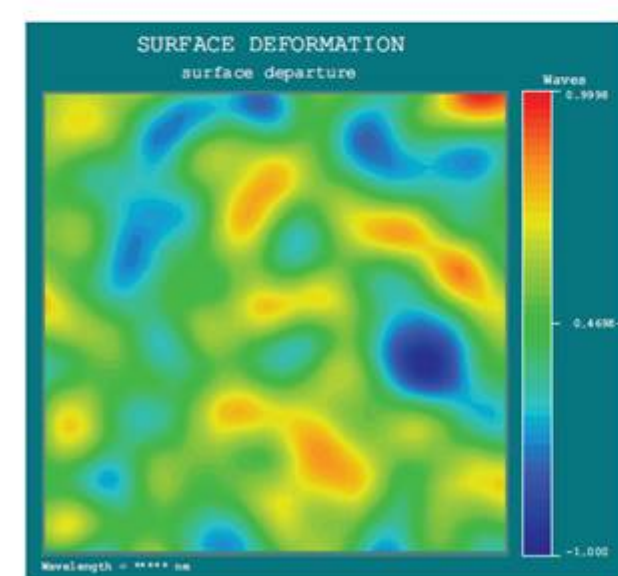
R面変形公差解析計算結果例

- AS $\lambda/15$ 、間隔公差0.13mmの場合
- 調整分解能は無限小
- 左が軸上性能、右が最軸外の性能であるが、最悪でも0.935なので、合格ライン



ランダム面変形解析手法

- 入力パラメタは波長単位での面精度rmsと相関距離
- 通常は各凹凸に相関はないため、小さな値(デフォルトでは1e-6)を指定すれば良い
- 下図のようなランダムな面形状を500回与え、その際の性能劣化量のアンサンプル平均を取る
- この手法は現状**統計手法でしか使えないため、3 σ で考える**



- 64x64の格子上にランダムな面形状を設定し、平滑化したサンプル
- こういったものを各面に適用する

ランダム面変形計算結果

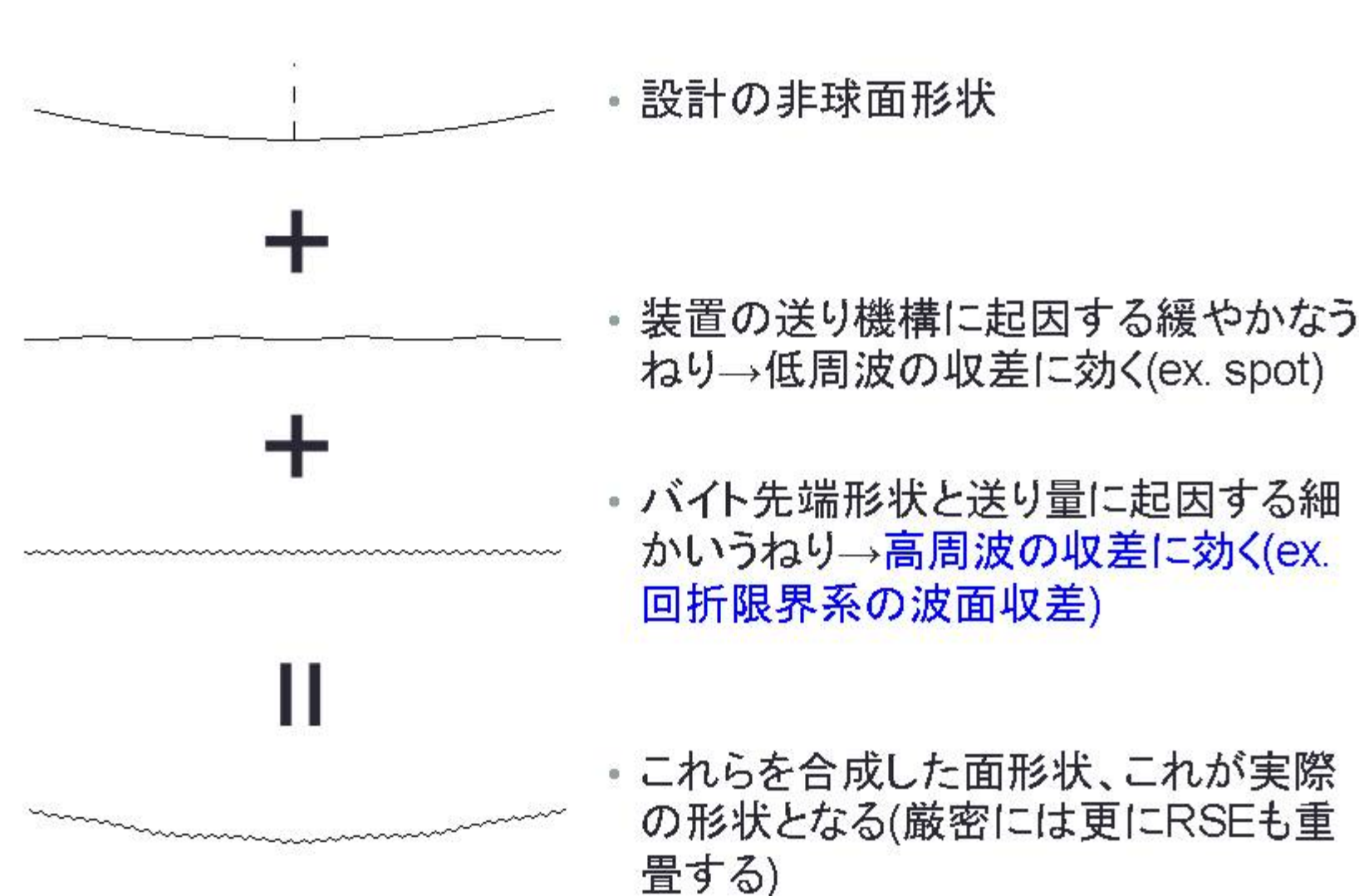
- 相関距離は1e-6、つまり相関無しを仮定
- 面精度rmsを波長(632.8nm)単位で $\lambda/50 \sim \lambda/100$ 与えたときの波面収差rmsとストレール強度を計算
- このようなパターンでは、PVとrmsの比は約6になるため、**rmsで $\lambda/50 \sim \lambda/100$ に対応するPV値は $\lambda/8.3 \sim \lambda/16.7$ となる**
- 3 σ で99.9%ということは、10000回当たり10回はこの値を下回る事になり、**モンテカルロに比べれば甘い判断**である
- これを考えると、やはり $\lambda/80 \sim \lambda/90$ (rms)、 $\lambda/13.3 \sim \lambda/15$ (PV)は必要と思われる

面精度	$\lambda/50$		$\lambda/60$		$\lambda/70$		$\lambda/80$		$\lambda/90$		$\lambda/100$	
	rms	SD	rms	SD	rms	SD	rms	SD	rms	SD	rms	SD
f1	0.0359	0.9504	0.0299	0.9653	0.0256	0.9745	0.0224	0.9804	0.0199	0.9845	0.0179	0.9874
f2	0.0358	0.9507	0.0299	0.9653	0.0256	0.9745	0.0224	0.9804	0.0199	0.9845	0.0179	0.9874
f3	0.0358	0.9507	0.0299	0.9653	0.0256	0.9745	0.0224	0.9804	0.0199	0.9845	0.0179	0.9874

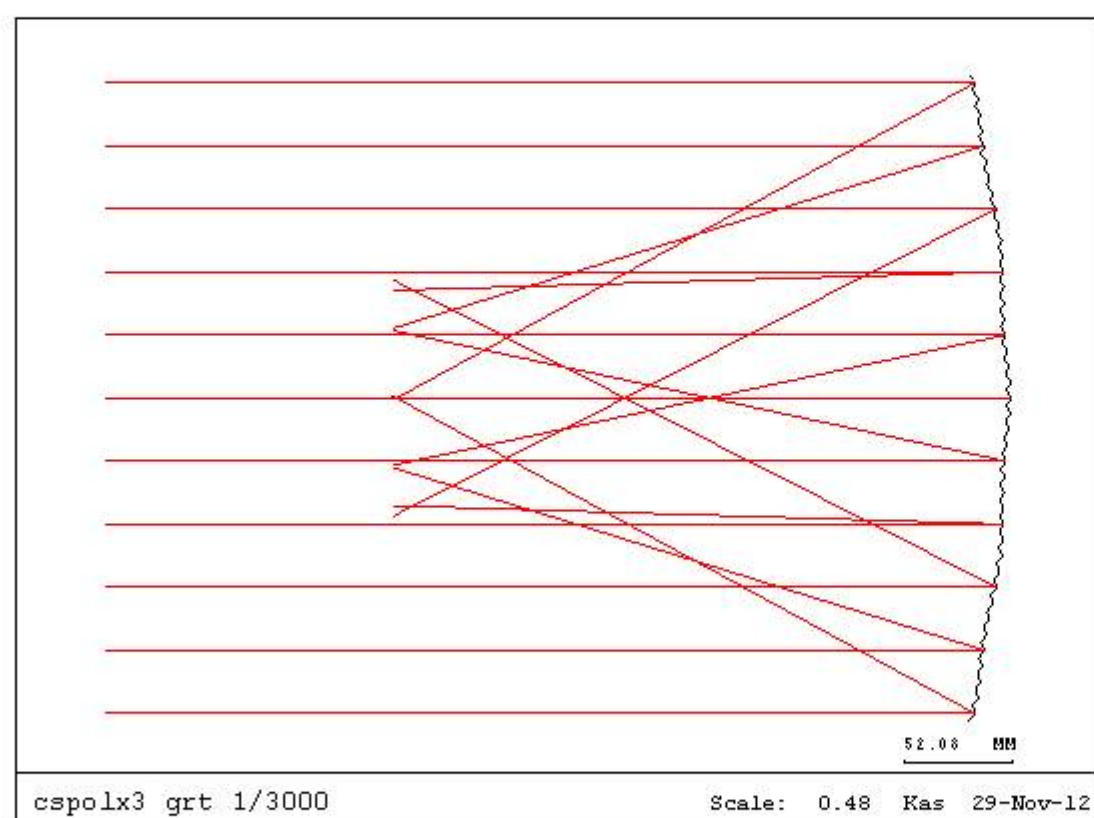
非球面形状の公差解析

- 非球面形状の公差には以下のようなものがある
 - 形状そのものの設計値からの乖離:NRやAS、コニック係数や非球面係数のズレである
 - 製造機器のバイト先端形状等に依存する**細かい周期のうねり**
 - 製造機器のステージ送りの揺動に起因する**大きな周期のうねり**
- これを解析するためのUDS(User Define Surface)機能
 - UDS (User Define Surface)機能は、標準では用意されていない任意の形状の面を作成するための機能
 - FortranあるいはCで、面形状とその微係数を表すプログラムを作成する
 - コンパイルしてDLLを作成し、リンクさせてCodeVを起動することにより、CodeV上で使えるようになる
- $$sag(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + D^{10}r + a_1 \cos\left[2\pi \frac{c_1}{er}\right] + a_2 \cos\left[2\pi \frac{c_2}{er}\right]$$
- a_1, a_2 は各振幅(=PV/2)、 c_1, c_2 は半径あたりの各周期、erは有効半径
- このような形状を解析できるプログラムを作成済みである

非球面の公差解析概念図



ASP+dual_cos_wave UDSの例



- 左図は目に見えるように大きな振幅を入れたもの
- 第1cosは振幅1mm、周期2/半径である
- 第2cosは振幅1mm、周期20/半径
- ベースはR6000の放物面
- 入射瞳径 ϕ 300mm

これまで様々な場面で活用してきたが、計算は極めて正確であり、実際の非球面との対応関係もそこそこ確認できた

公差解析結果一覧

- 公差解析の結果をまとめる
- 偏心に関しては**調整で頑張る**か(Case1)、**測定しながらの組立で頑張る**か(Case2,3)の**3ケース**が考えられる
- それとは**独立に各ミラーの面精度**がある
- 面精度には、ASとRSE、及び未検討の非球面形状誤差がある
- NRと間隔公差に関しては、そこその公差であれば間隔調整とフォーカシングで補正できるため、ここには記載していない
- Case3はM3調整**であり、いくつかの観点(構造の容易さや精度、重心位置等)で副鏡調整より適当な可能性がある

	Case 1	Case 2	Case3	Comment
偏心(shift/tilt)	10 μ m/10"	0.1mm/1.7"	20 μ m/20"	主鏡・副鏡の相対偏心
副鏡/M3調整	tiltのみ10"	5軸10 μ m/10"	5軸50μm/50"	必要軸と分解能
AS	<0.13	<0.13	<0.13	直交する2方向のパワー差
面精度(rms)	$\lambda/80 \sim \lambda/90$	$\lambda/80 \sim \lambda/90$	$\lambda/80 \sim \lambda/90$	PVで言うと $\lambda/13.3 \sim \lambda/15$

考察及び今後の予定

- 公差解析に関してインハウスでの検討はほぼ終了したが、実際の調整は外部メーカーに委託するため、委託先を決めて、そこで再度詳細検討をしてもらう必要がある
- 非球面特有の形状誤差に関しては、製造装置に強く依存するため、製造先メーカーを確定し、そこでの環境を鑑みて行う必要がある(現状ではキャンを考えている)
- 調整方法に関しては現状3案を考えているが、実際に調整を担当するメーカー・構造・熱設計担当メーカーの3社で詳細を詰めて貰うことになる
- これまでは望遠鏡も200K程度に冷やすことを考えていたため真空チャンバ内の低温環境で性能評価を行う必要があったが、ここに来て望遠鏡は常温 $\sim 0^\circ$ C程度でも良い可能性が出てきた
- 0° Cではあまり意味がないが、結露しない温度に設定できれば「真空」は不要となるため、光学調整や評価は格段にやりやすくなる
- 真空の影響は小さいが、重力の影響はあるため、望遠鏡を回転させての性能チェックは必要である
- 光学的には、ミラー材質を合成石英からクリアセラムに変えればOK