

# P-119

## 小型JASMINEの 詳細な熱変形光学解析

---

○鹿島伸悟<sup>1)</sup>、白籟麻衣<sup>1)</sup>、矢野太平<sup>1)</sup>、宇都宮真<sup>1)</sup>、郷田直輝<sup>1)</sup>、小林行泰<sup>1)</sup>、山田良透<sup>2)</sup>、安田進<sup>3)</sup>

1:国立天文台JASMINE検討室 2:京都大学 3:JAXA

# 背景

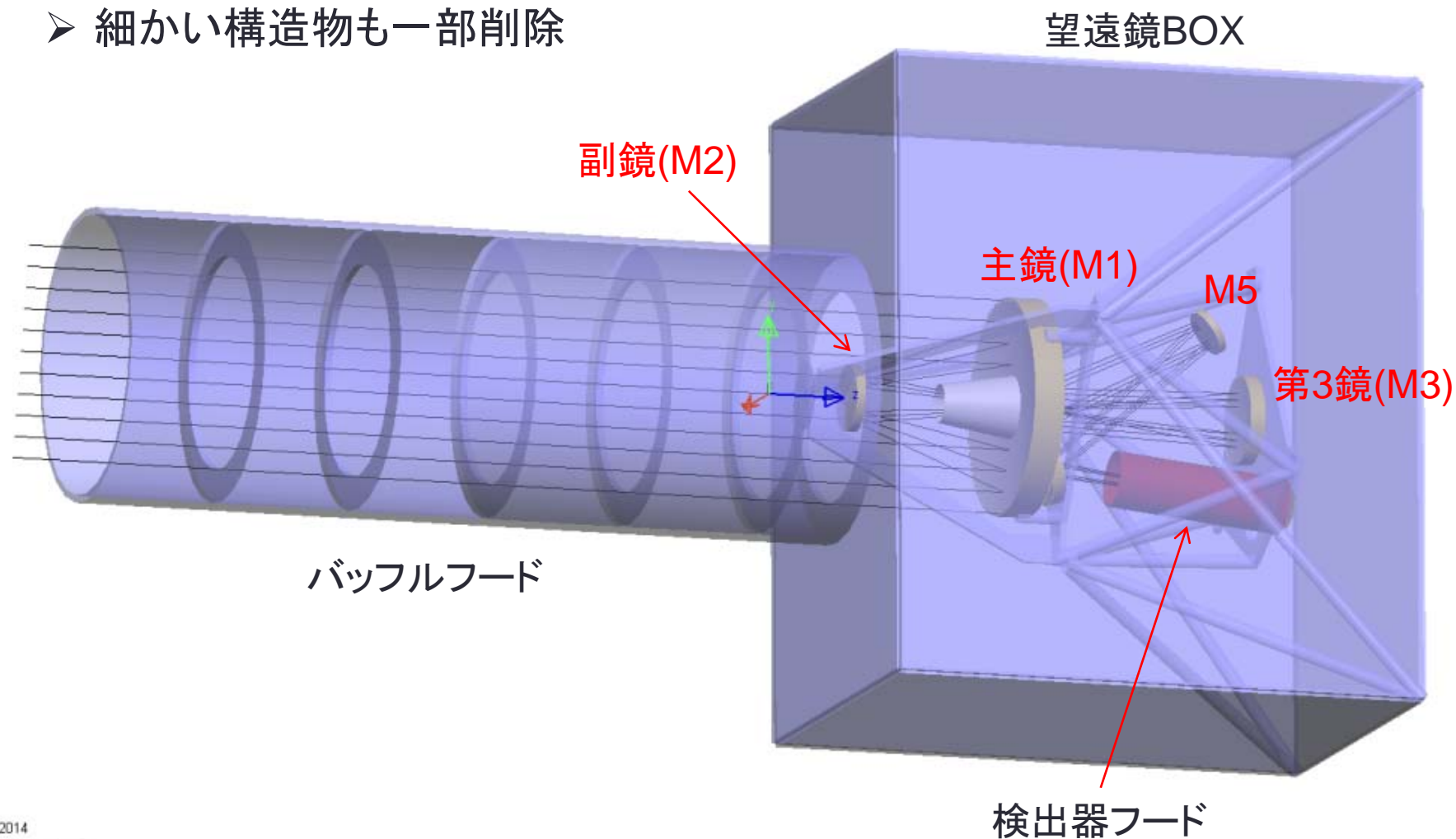
- これまで、像の歪みに最も影響が大きい「瞳から最遠」の最後の平面ミラーの熱変形解析は行っていたが、それ以外の光学素子に関しては行っていなかった
- 構造設計もほぼFixしたため、構造+光学系の望遠鏡全体で詳細な温度解析、及び熱変形解析を行った
- 今回評価するのは、短時間での像の歪みではなく、ミッション期間中における結像性能である
- 温度解析及び計算された温度分布時の各光学素子変形解析は(株)プラネットに依頼した
- その変形データを光学解析ソフトCodeV上で再現し、各状態での性能をチェックする
- 計算は、温度が最高時と最低時を両端として5等分した箇所で行った

# 計算詳細内容

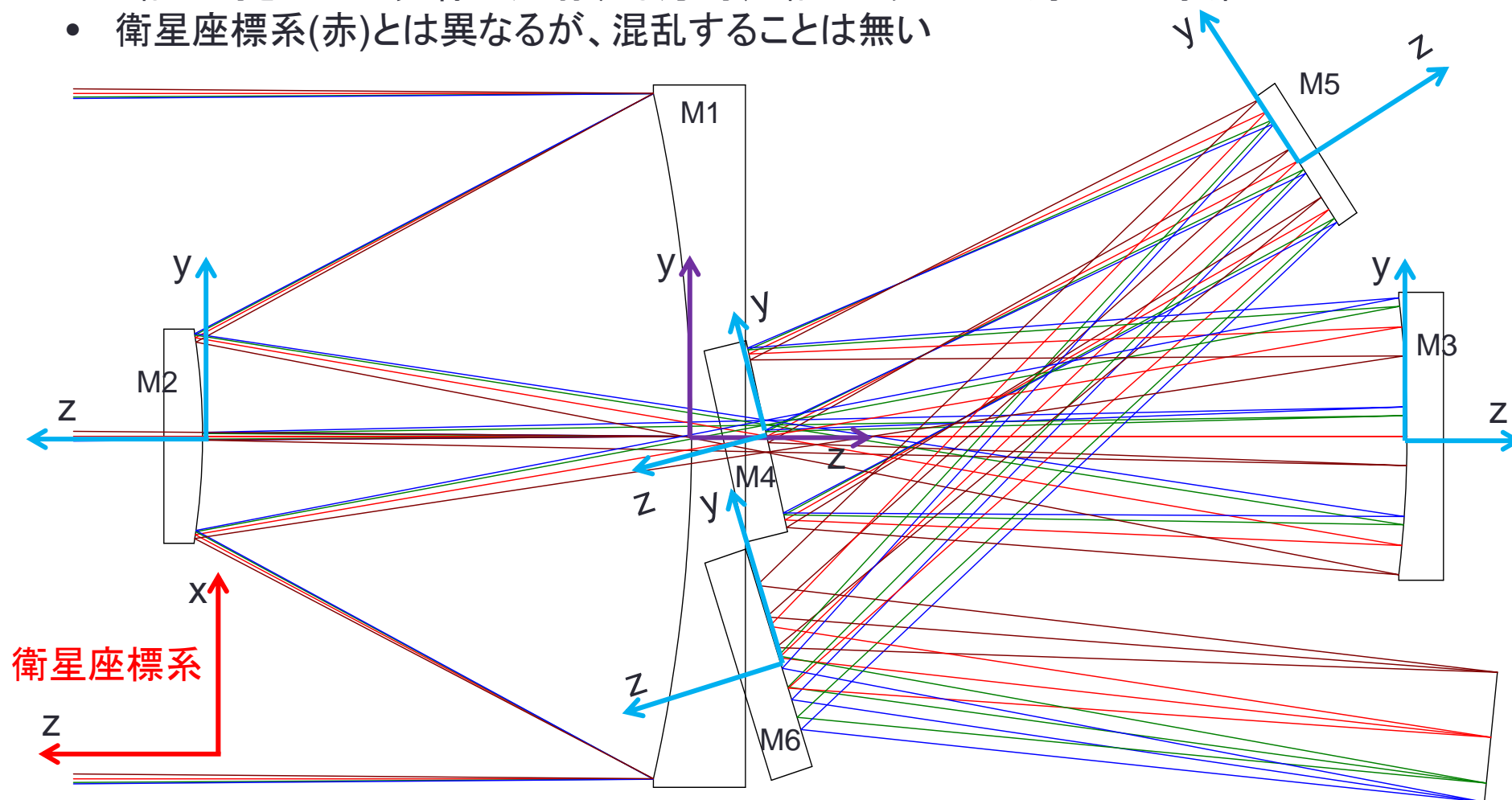
- (株)プラネットからのアウトプットフォーマットに関しては、当初以下のように規定した
  - ① 座標系は各面のlocal座標系(右手系)
    - 各面の光軸位置を座標原点(0,0,0)にとる
    - 平面ミラーに関して言えば、面がxy面、法線方向がz軸
    - 曲面ミラーも同様で、法線方向がz軸
  - ② 面の向きは各面の法線(z軸)の方向余弦で表し、その際はglobal座標準拠とする
    - Global座標原点はどこでも良いが、例えば主鏡中心位置(ここが入射瞳位置なので光学系との整合が良い)
  - ③ 数値データは、各面の(x,y,sag)群と方向余弦(l,m,n)
    - (x,y,z)は行列ではなく、タブ区切りのリスト形式
    - 等間隔である必要はなく、また順序不同でも構わない
    - (x,y z)と(dx,dy,dz)でも、(x+dx,y+dy,z+dz)でもどちらでも良いが、できれば実際に使う後者が良い、(l,m,n)も同様

# 小型JASMINE構造+光学系

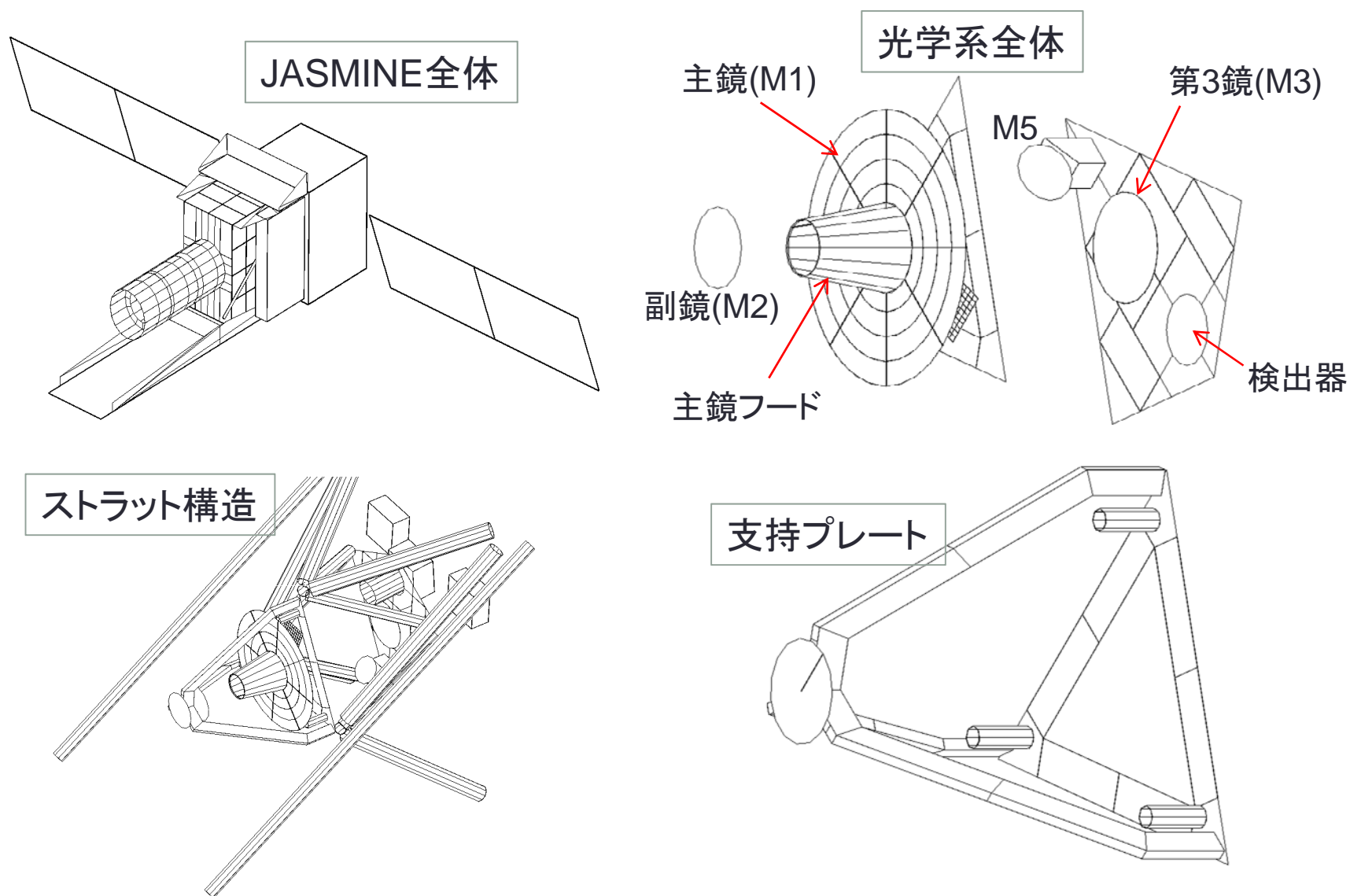
- 外側のサンシールドとラジエータは非表示
- 細かい構造物も一部削除



- 光学設計は視認性の良い下図レイアウトで行っており、その際のglobal座標系は紫
- global座標系のx方向は、紙面奥向き(右手系)
- 各ミラーのlocal座標系はglobal座標系に準拠し、光軸方向をz、紙面上向きをyとする
- 傾いているミラーに関しては下図参照
- z軸の向きは全て光線が入射する方向、x軸はミラーに正対して右手系
- 衛星座標系(赤)とは異なるが、混乱することは無い

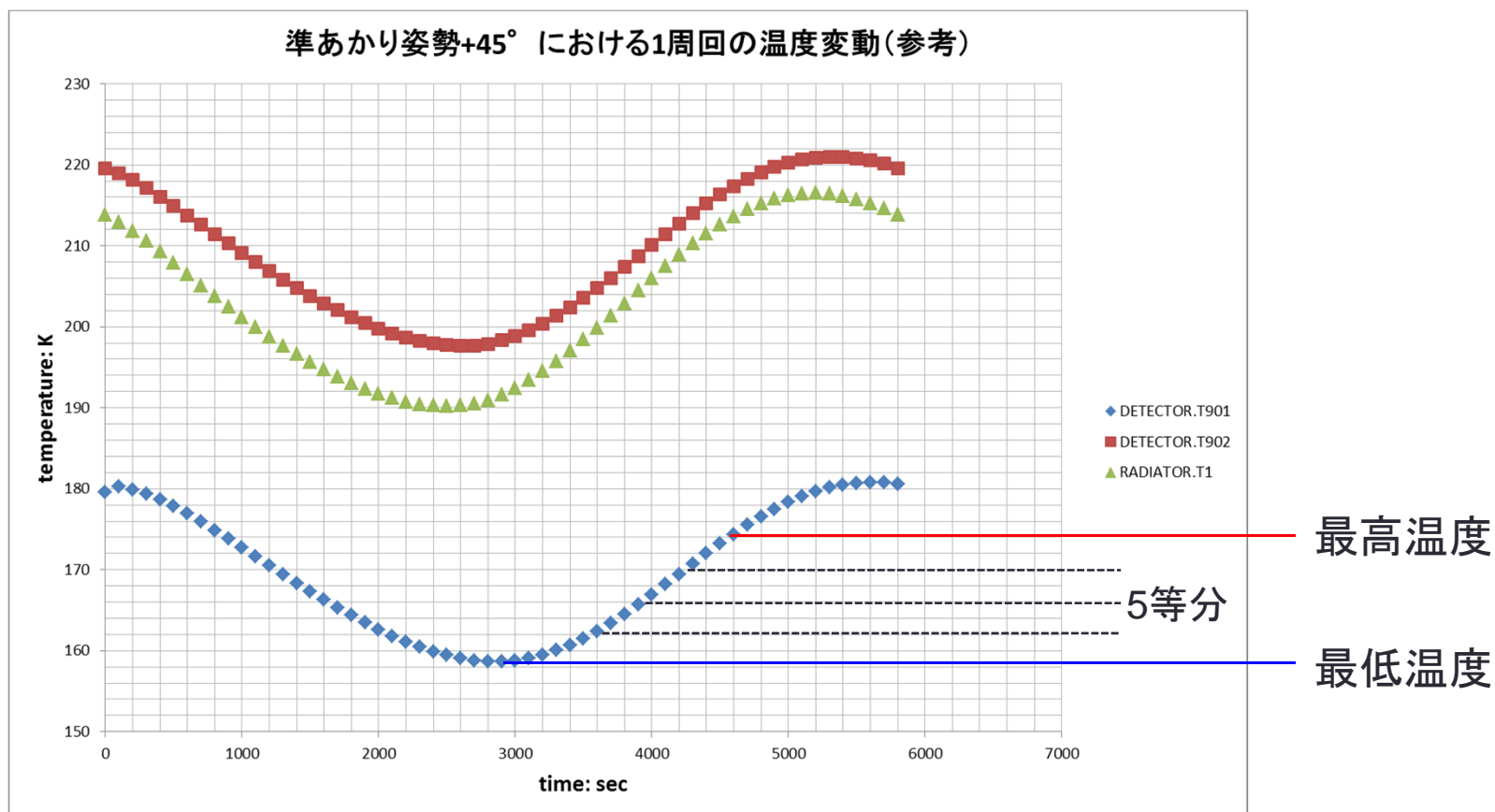


# 温度解析ノード分割図(抜粋)



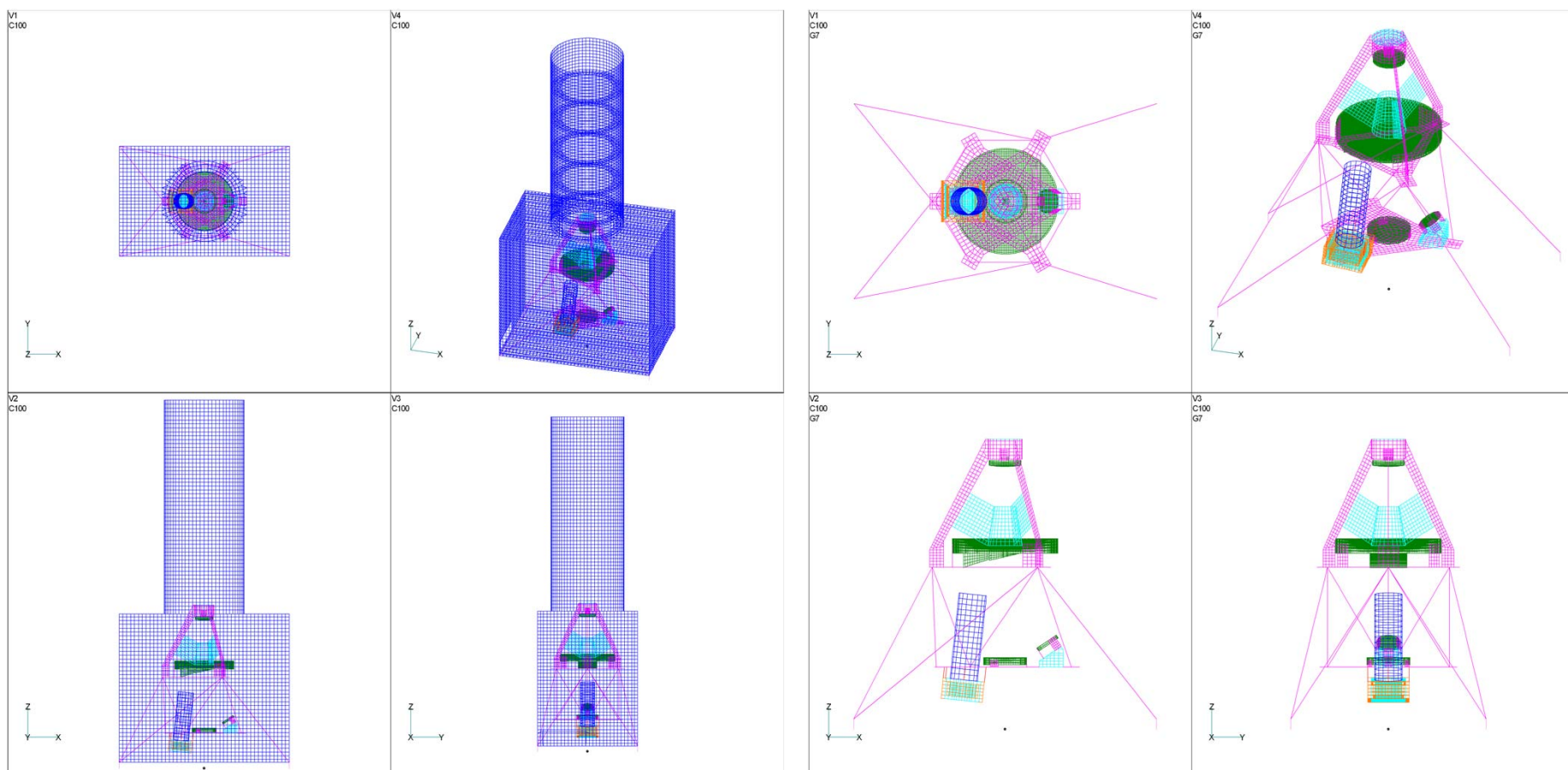
# 1周回の温度変動

- ノミナル候補姿勢での1周回の温度変動を下記する
- 観測は半周回分であり、その中での最高温度時と最低温度時を基準に5等分した位置での熱変形を計算する



# 構造解析ノード分割図(抜粋)

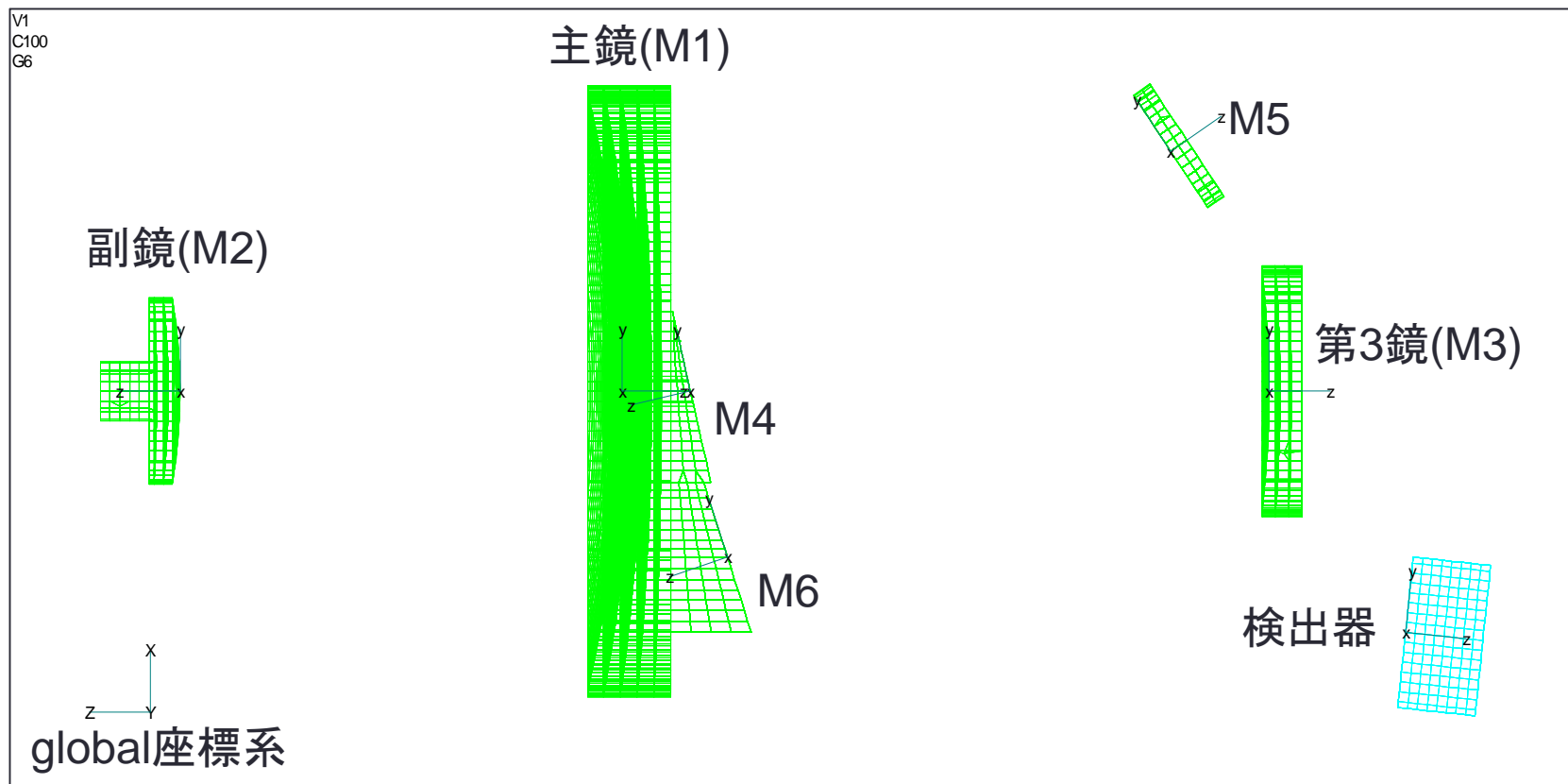
- 構造解析では、温度解析より更に細かくメッシュを切る必要があり、下図に示すようなノード分割になっている





# 光学素子熱変形解析ノード分割図

- 光学素子に関しては特に細かく切る必要があるため、下図に示すような非常に多数のノード分割になっている
- 図中各素子の座標系は前述のlocal座標系、左下はglobal座標系である



# CodeVでの解析手法

- CodeVには、変形を表す形状データ(x,y,sag)を、任意の面形状で fittingする機能がある
- 任意の面形状とは、例えば高次非球面、Zernike多項式面、spline面、xy多項式面などである
- 変形は通常光軸非対称に起こるため、回転対称な面では当然 fittingできない
- 偏心データもパラメタにすれば原理的には可能であるが、複雑になり過ぎるため、取り扱いも面倒になる
- そこで今回はZernike多項式面を用いてfittingしたが、Zernike面には下記の長所がある
  - 直交関数系であるため、fitting解が一意に決まる
  - 低次の各項が特徴的な変形に対応しているため、成分に分けて考えることができる
  - 係数だけで偏心と変形の両方を表せる(前述の方向余弦データは不要)

# Zernike多項式面

CodeVのZernike多項式面は以下の式で表される

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=1}^{66} C_{(j+1)} Z_j$$

ここで

$z$	$z$ 軸に平行な面のサグ量
$c$	頂点曲率 (CUY)
$k$	コーニック定数 (222 ページの説明を参照)
$r = \sqrt{x^2 + y^2}$	半径距離
$Z_j$	$j$ 番目のゼルニケ多項式 ( $j$ の範囲 : 1 ~ 66)
$C_{j+1}$	$Z_j$ の係数

Zernike係数そのものは、下記の式で定義されている

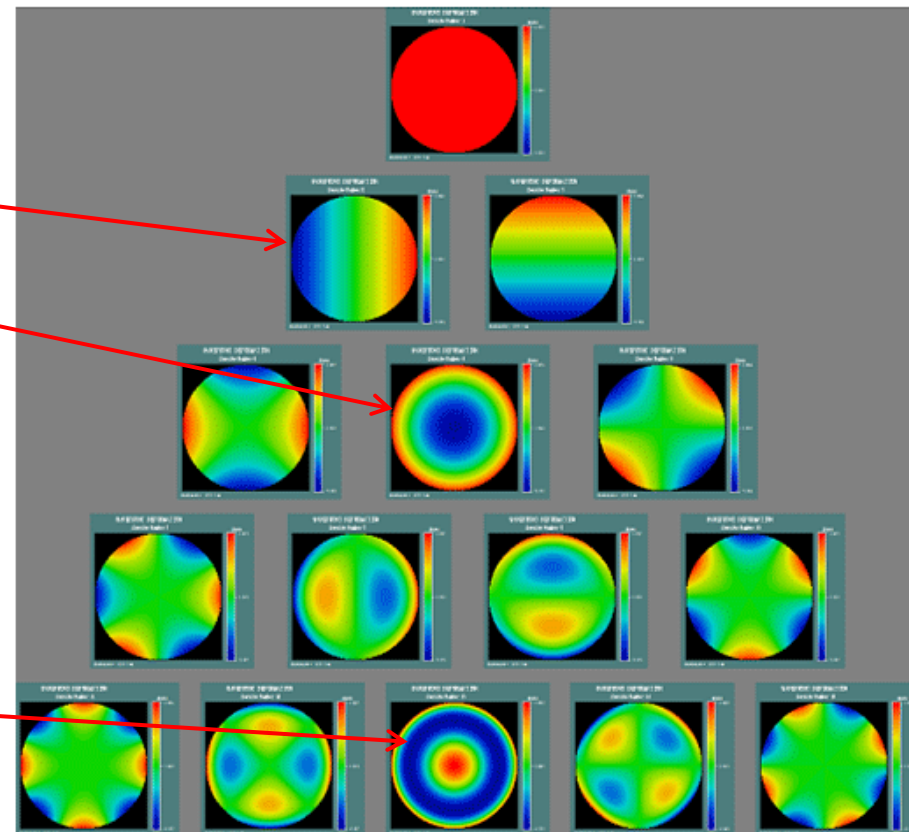
$$W(x, y) = W(\rho \sin \theta, \rho \cos \theta) = W(\rho, \theta)$$

$$= \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n A_{nm} \cdot R_n^{n-2m}(\rho) \cdot \begin{cases} \cos |n-2m| \theta & : n-2m \geq 0 \\ \sin |n-2m| \theta & : n-2m < 0 \end{cases}$$

$$R_n^{n-2m}(\rho) = \sum_{s=0}^m (-1)^s \frac{(n-s)! \rho^{n-2s}}{s!(m-s)!(n-m-s)!}$$

- 低次の各項の意味と、その時の形状を下記する
- 例えば第2,3項はそれぞれx,y方向の傾きを表しているため、この値からtilt量を求めることができ、ゼロにすることでtiltなしの場合の評価も可能となる
- 第5項はフォーカスシフトであり、面の場合は光軸に沿ってのshift成分
- 第13項は球面形状を表すため、例えば平面ミラーに変形で生じたパワー成分を見積もることも可能となる

項	次数				
	n	m	n-2m		
1	0	0	0	1	定数項
2	1	0	1	$\rho \cos \theta$	傾き (Tilt) X成分
3		1	-1	$\rho \sin \theta$	Y成分
4	2	0	2	$\rho^2 \cos 2 \theta$	非点収差 (0度と90度方向)
5		1	0	$2 \rho^2 - 1$	フォーカス・シフト
6		2	-2	$\rho^2 \sin 2 \theta$	非点収差 ( $\pm 45$ 度方向)
7	3	0	3	$\rho^3 \cos 3 \theta$	
8		1	1	$(3 \rho^3 - 2 \rho) \cos \theta$	3次のコマ X成分
9		2	-1	$(3 \rho^3 - 2 \rho) \sin \theta$	Y成分
10		3	-3	$\rho^3 \sin 3 \theta$	
11	4	0	4	$\rho^4 \cos 4 \theta$	
12		1	2	$(4 \rho^4 - 3 \rho^2) \cos 2 \theta$	
13		2	0	$6 \rho^4 - 6 \rho^2 + 1$	3次の球面収差
14		3	-2	$(4 \rho^4 - 3 \rho^2) \sin 2 \theta$	
15		4	-4	$\rho^4 \sin 4 \theta$	

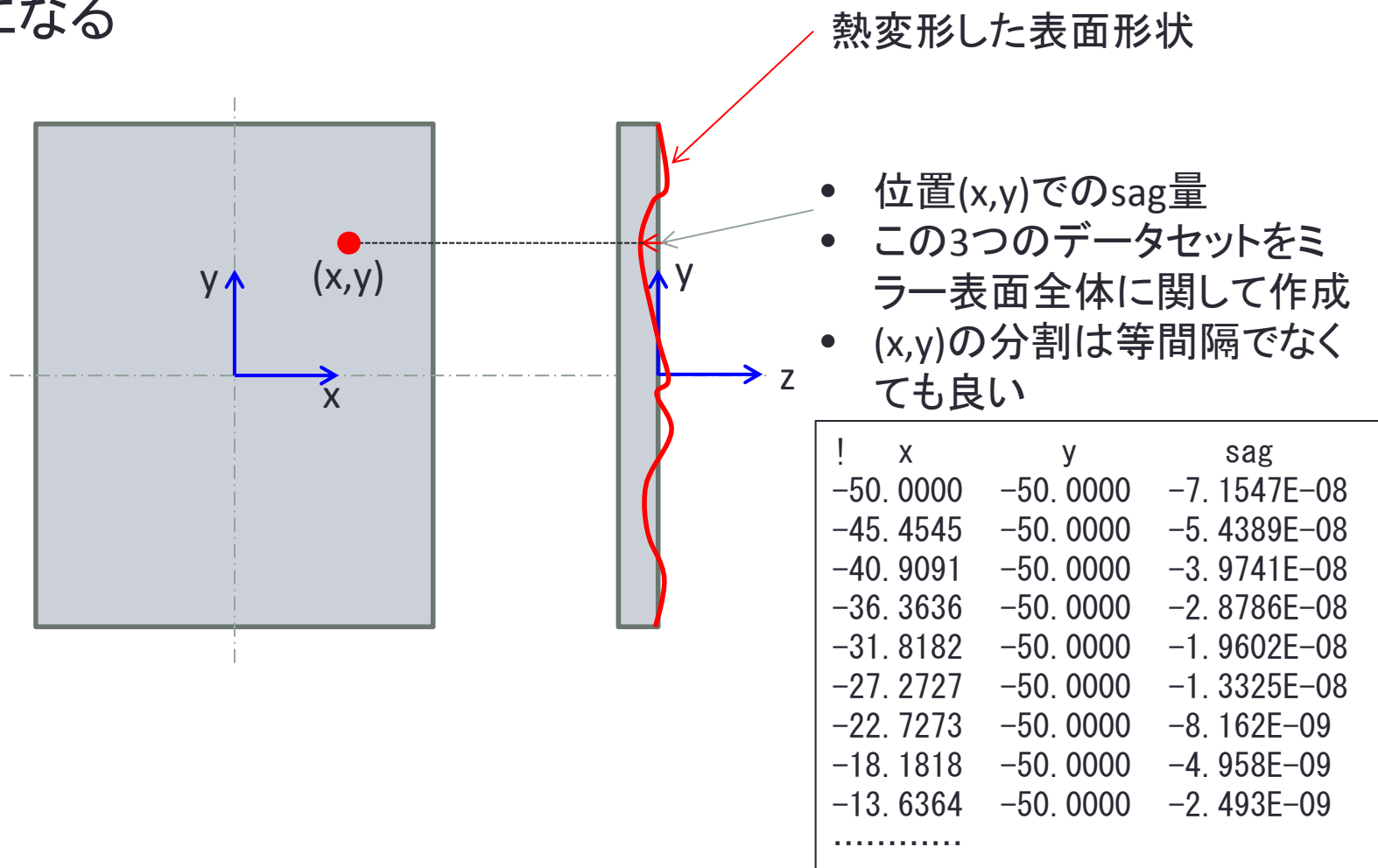


# CodeVでの計算の流れ

- ① 形状を表すデータを、(x,y,sag)というテキストデータで作成
- ② Fittingに使う面形状を指定し、パラメタを変数とする
  - 非球面ミラーに関しては近軸の曲率半径とZernikeの各係数、平面ミラーの場合はZernike係数のみを変数指定
  - Zernike関数は瞳径(面の場合は有効径)で正規化された関数であるため、各面の有効径を正しく指定
- ③ Fitting実行: 具体的には、各(x,y,sag)との乖離量のrmsが最小になるようにパラメタを動かす自動設計を行う
- ④ Fittingが完了したら、rmsが十分小さくなっていることを確認し、Zernike係数を書き出す
- ⑤ これを全ての面(6面)に関して行う
- ⑥ 6面分のZernike係数が揃ったら、これらを全面に適用することで、ある温度環境での再現データが完成する

# CodeVでの計算の流れ

- $(x,y,sag)$ データを、平面ミラーの場合で図示すると以下のようになる



## まとめと今後の予定

- ここまで準備をしておき、昨年中にはデータが出るはずであったが、(株)プラネットに提供したモデルに間違いが見つかったり、検出器周りの熱設計に時間がかかったりしたため、データは間に合わなかった
- そのため、今回は手法等を報告するだけに留める
- 実際の作業はマクロ化してあるため、毎回手作業で行う訳ではなく、ほぼ自動で行われる
- 後は、6面全部のデータを反映させて作成したレンズデータを使って、波面収差・エンサークルドエナジ・ディストーションやデフォーカス量を評価する予定である
- 遅くとも1月中にはデータが出そういため、これを用いた性能評価の結果に関しては、2015年春の天文学会にて報告する予定である

補遺として、温度勾配によりどのような変形が生じるのか、直感的なイメージを持つための解析結果について下記する(計算は安田氏)

