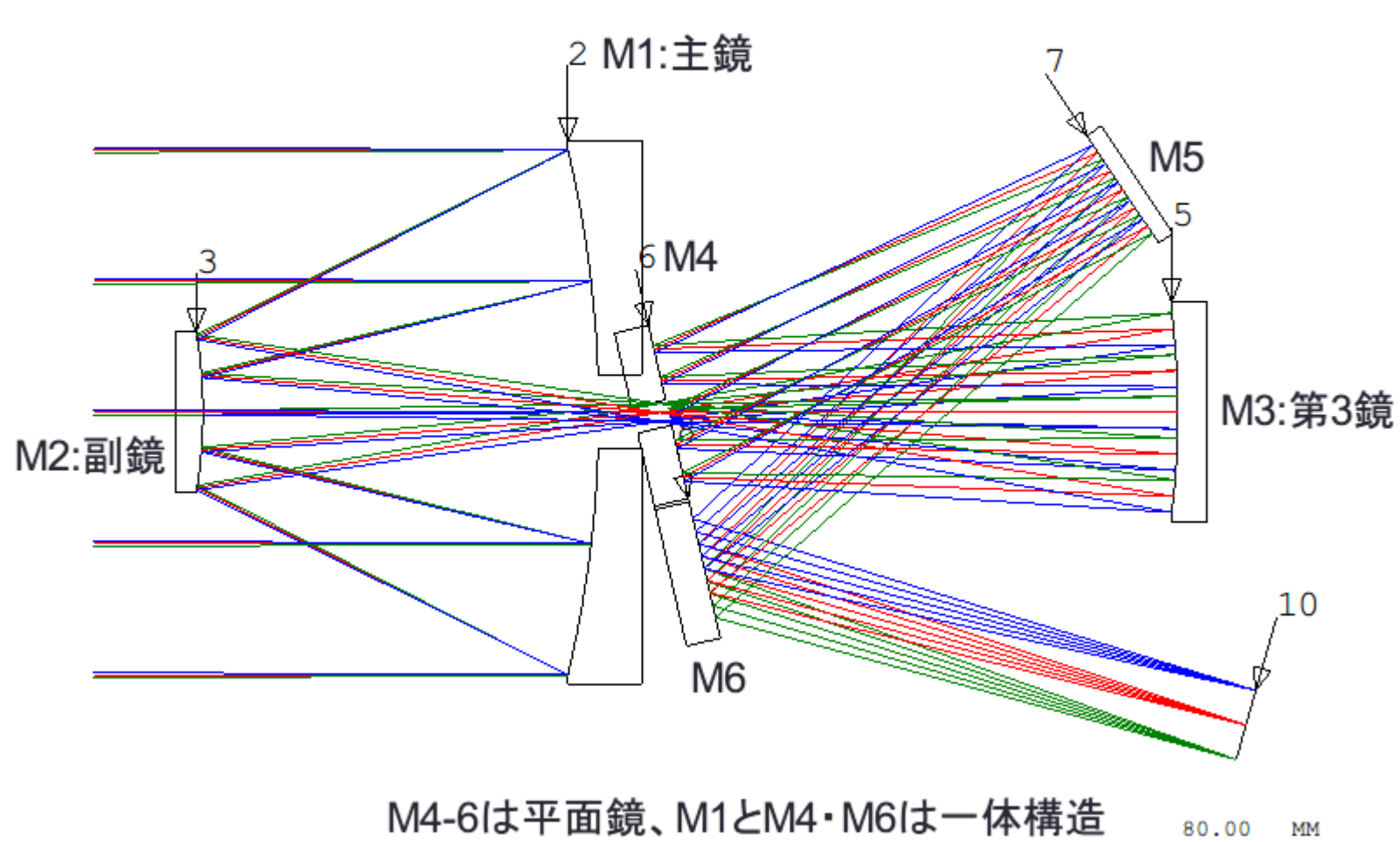


# P-040:小型JASMINEの非球面ミラー形状測定

○鹿島伸悟<sup>1)</sup>、上田暁俊<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>

1:国立天文台JASMINE検討室 2:京都大学

## 小型JASMINE光路図(ミラー形状)

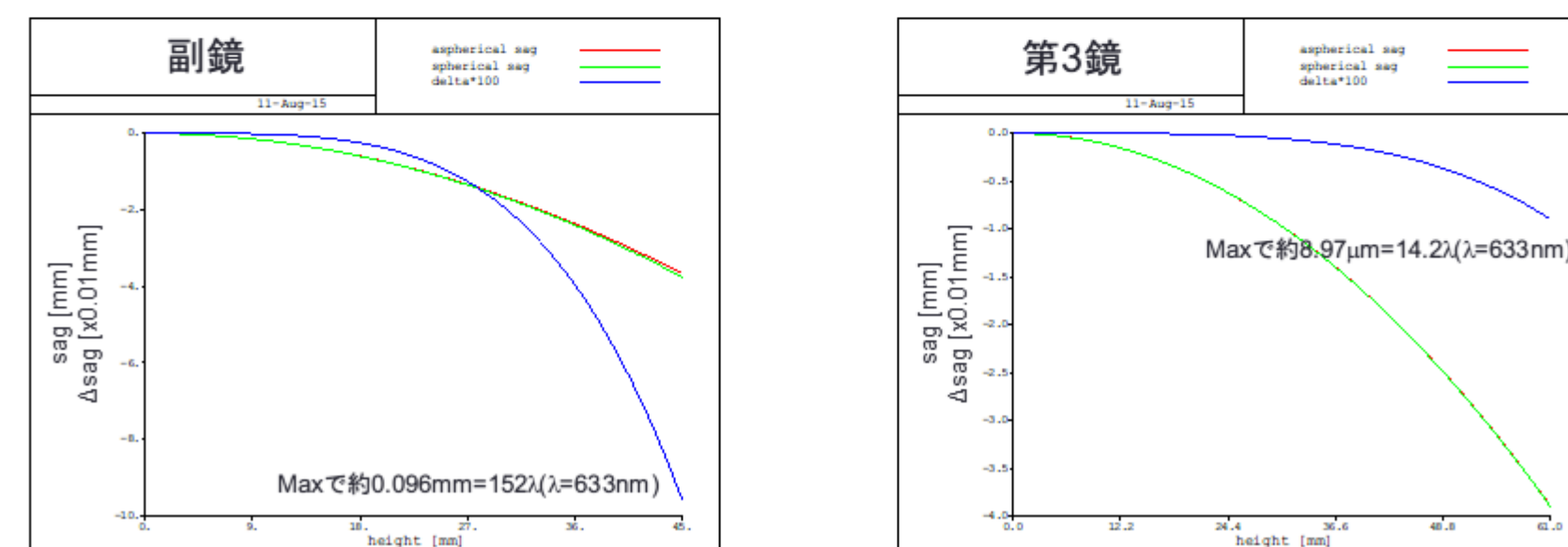


## 背景と目的

- ・小型JASMINEには3枚の**コニックミラー**を用いている
- ・球面ではないため、**非球面量(球面との乖離sag量)**があまり大きいと通常のZygoでは測定できない
- ・主鏡・副鏡・第3鏡の非球面量を計算する
- ・それが5λを超えているようだと、別途測定方法を考えておく必要がある
- ・非球面量の大きな非球面形状の測定には以下の方法がある
  - ① 3次元形状測定機(UA-3P等)で直接測定する
  - ② Zygoのオプションである「非球面測定機構」を用いて、狭い輪帯に分けて測定したものをマージする
  - ③ CGH(回折レンズ)を用いて測定非球面と合致する波面を生成する
- ・それぞれに一長一短があるため、これらを比較検討する必要がある

## 各ミラー非球面量

- ・各ミラーの非球面量をグラフで示す
- ・赤線が非球面sag, 緑が近軸球面sag, 青がその差の非球面量(Δsag)
- ・sagに比べてΔsagは桁で小さい為、**100倍して見やすく**してある
- ・よって、縦軸数値の1/100がΔsag
- ・最も小さい第3鏡でも14λであり、通常の干渉計測にはかからない



## 非球面量と測定法

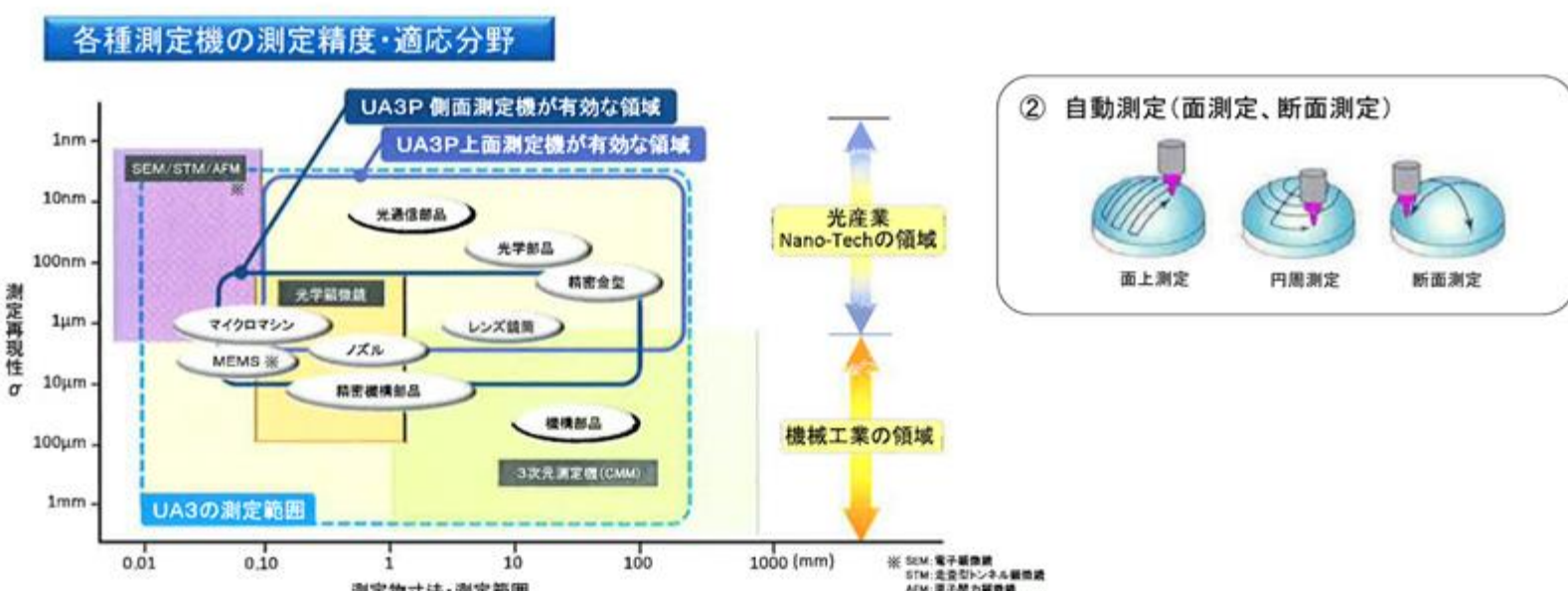
- ・3枚とも非球面量は大きく、**通常のZygo(干渉計)では測定不可**
- ・以下に、3測定法の特性をまとめる
- ・光学メーカーでは①がメインになりつつあるが、初期投資が億単位かかり、建物もこれを想定したものとする必要がある
- ・TMT棟に導入されることを期待したが、残念ながら導入されない⇒「多くのプロジェクトからニーズがあれば…」とのこと
- ・③はCGHの製作精度に測定精度が依存する

項目	①直接測定	②Zygoオプション	③CGH	コメント
測定速度	とても遅い	遅い	速い	②はマージ精度
測定精度	高い	中程度	高い	
測定範囲	line	領域分割	全面一括	
ダメージ	跡が付く	なし	なし	
費用	非常に高価	高価	高価	②~③?
共通化	共通	共通	3種類のCGH	各ミラー用

## ①直接測定 (Panasonic web siteより引用)

『測定できないモノは作れない』UA 3 Pは、さまざまな微細形状測定でナノ精度モノづくりをサポートします。

スマートフォン・DSO・DVDやBlu-rayなどのデジタル家電、ホームセキュリティ、光通信、車載用HUDに欠かせない非球面レンズや自由曲面ミラー及びその金型を、最高0.01μmの精度で測定を実現。簡単操作で加工へのフィードバックもスピーディに対応します。

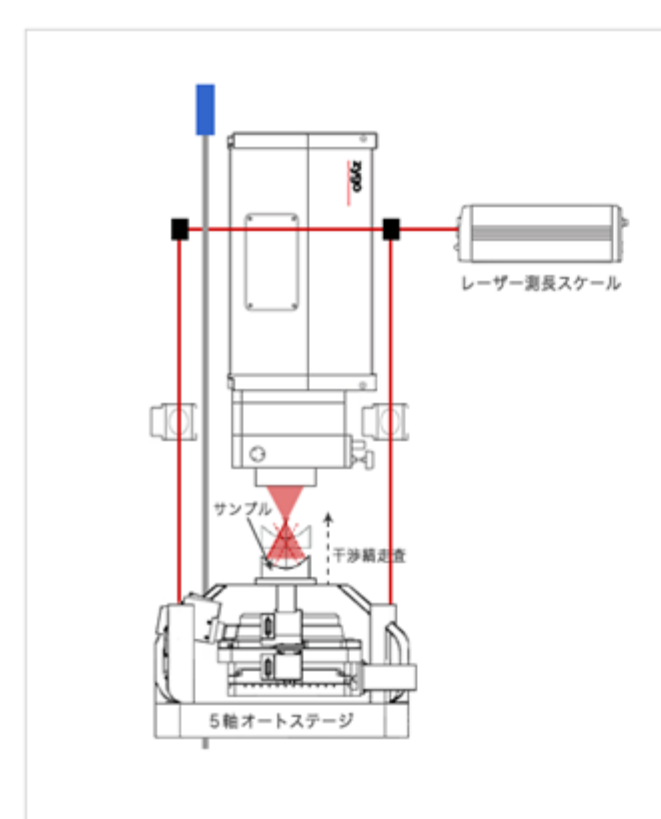


## ②Zygoオプション (Canon web siteより引用)

回転対称非球面レンズの測定 / Surface Flatness

セットアップ例

このセットアップは、軸対称非球面レンズの設計偏差を測定するAsphereアプリケーションのためのハードウェアです。非球面レンズを光軸方向に位置(測定)と移動(移動)して、干渉鏡面データを連続し、非球面形状に対する表面精度を高速で解析します。

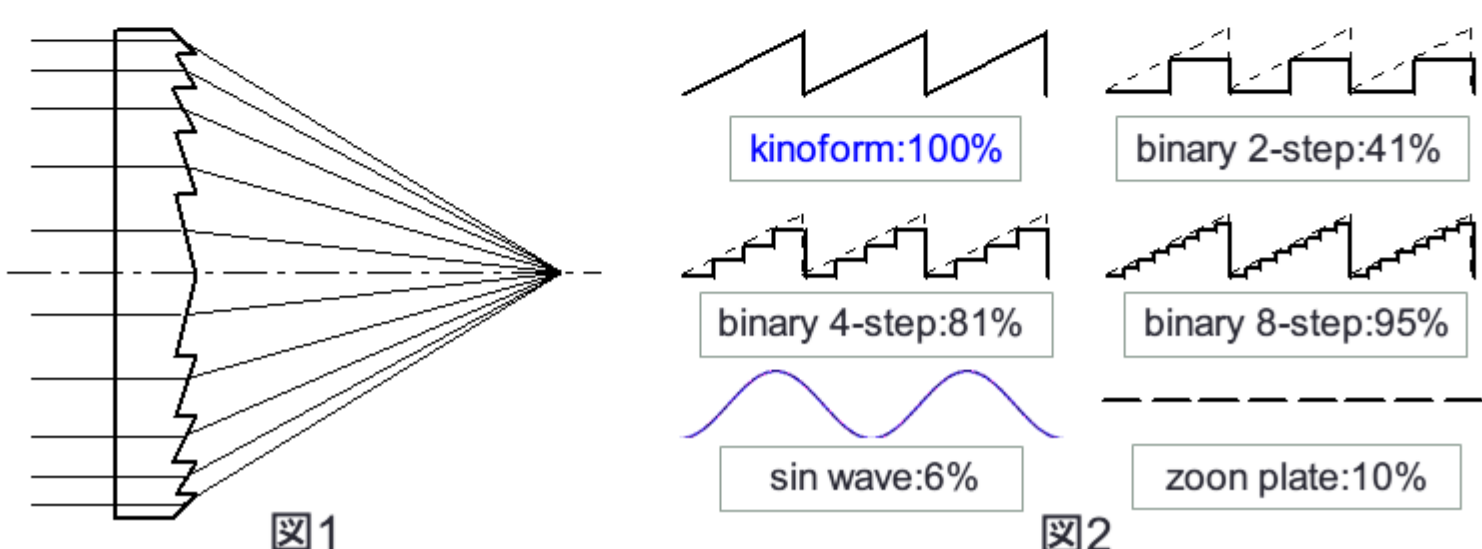


- ・縦置きで図であるが、もちろん横置きでもOK
- ・**非球面を同心円状の輪帯に分け、その範囲内での非球面量が十分小さくなるようにする**
- ・ミラー位置を光軸方向にシフトさせながら**順次輪帯を測定**する
- ・最後にそれらをマージして全面の面精度を求める
- ・昔は手動で行っていたが、現在は自動で測定できるオプションがある



## CGHの原理

- ・通常のレンズは屈折、ミラーは反射で光を屈曲させるが、CGHは図1のように「**回折**」で光を**屈曲**させる
- ・簡単のために、媒質から空気中への回折を考えると、回折の法則は $n \cdot \sin \theta = m \cdot \lambda / p$ となる( $n$ :屈折率、 $\theta$ :回折角、 $m$ :次数、 $\lambda$ :波長、 $p$ :ピッチ)
- ・よって、ピッチを場所毎に変えれば、そこに入射する光線を任意の方向に曲げることが可能となり、**光線制御はピッチのみで決まる**(断面形状には依らない)
- ・では、断面形状は何を決めるかというと、回折効率である
- ・代表的な断面形状と、その際の理論的回折効率を図2に示す

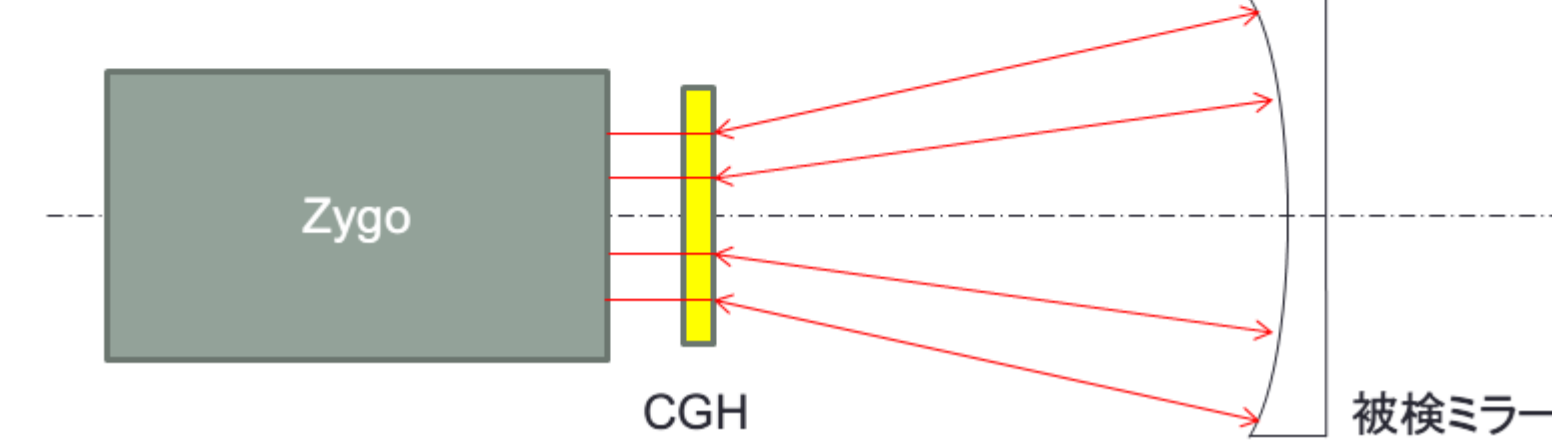


## CGHの特徴

- ・前述のように、ピッチ(輪帯の幅)のみで光線制御ができるため、**任意の非球面波面を生成**することができる
- ・今回は回転対称な波面生成であるが、非対称な波面も自由に生成可能である
- ・通常は工具の都合で製造が困難な**変曲点**(面形状の微係数が正負逆転する点)を持つ非球面でも、特に問題無く製造可能である
- ・ピッチは、超精密旋盤等を用いればかなりの精度で刻めるため、複雑な曲面を製造するより難易度は低い
- ・正確なキノフォームを作るのはやや難しいが、各ゾーンの断面形状は近似球面や直線で良いため、自由曲面等よりは遙かに容易である
- ・欠点として、**波長や入射角が変わると**、 $n$ が変化したり見かけの光路長が変わるため、正確なキノフォームでも**回折効率が低下**する
- ・ただ、**今回は波長633nm、入射角ゼロ度でしか使わない**ため、上記欠点は問題とならず、非常に好適な適用例となる
- ・設計は通常「位相関数法」で行うが、その結果を以降に示す

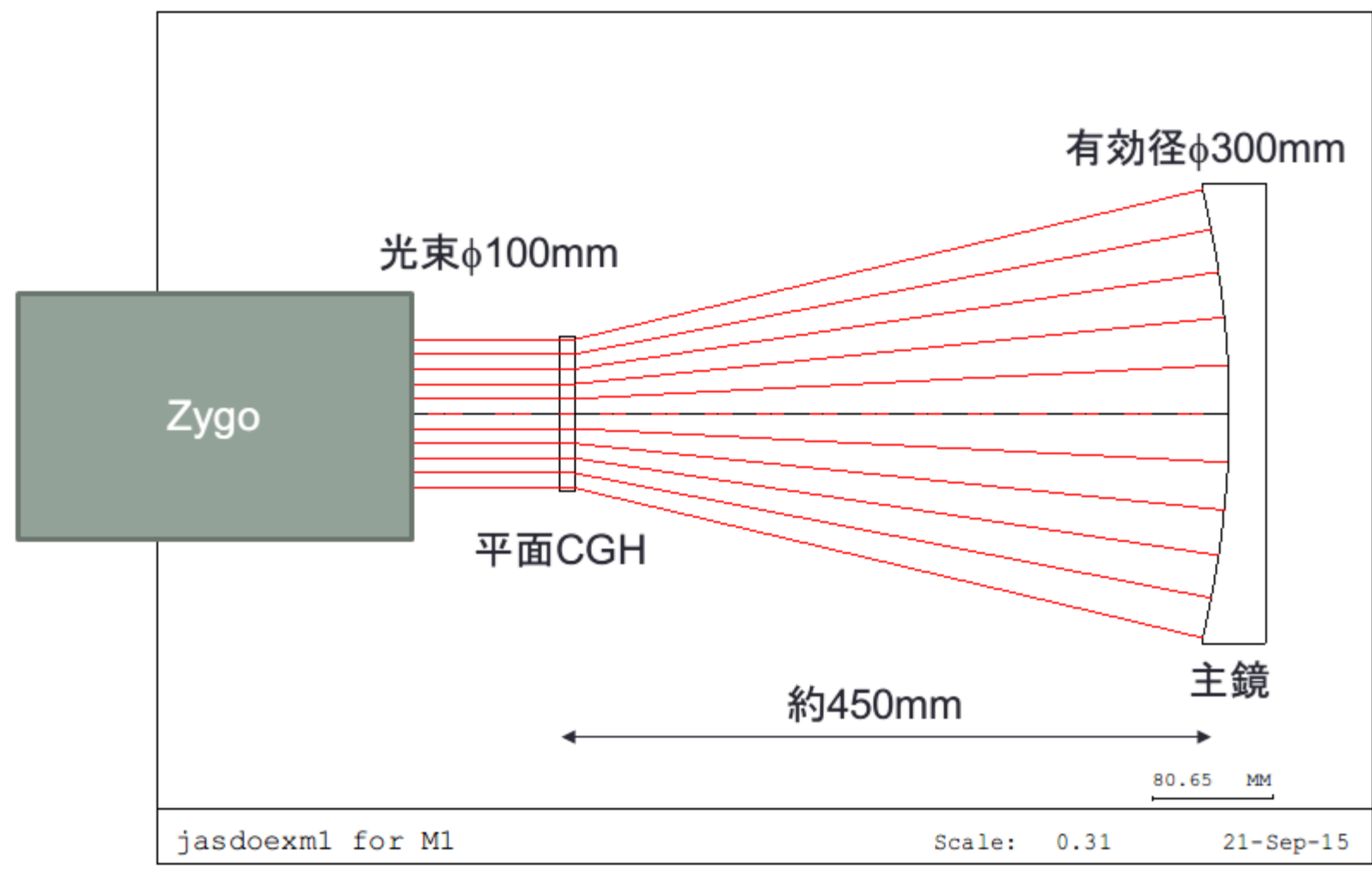
## ③CGH干渉計

- ・通常のZygoの球面原器の代わりに、測定非球面形状と合致する波面を生成する**回折レンズ(CGH)**を用いる
- ・下図のようなレイアウトとなる
- ・CGHは任意の波面を生成可能なため、波面形状を被検ミラーの形状に合わせれば、全光束がミラー面に垂直入射するため、来た光路を逆行してZygo内で干渉測定される
- ・京大3.8m望遠鏡のセグメントミラー測定にも使われている
- ・但し、上記は干渉計から開発しており、干渉方式も異なる



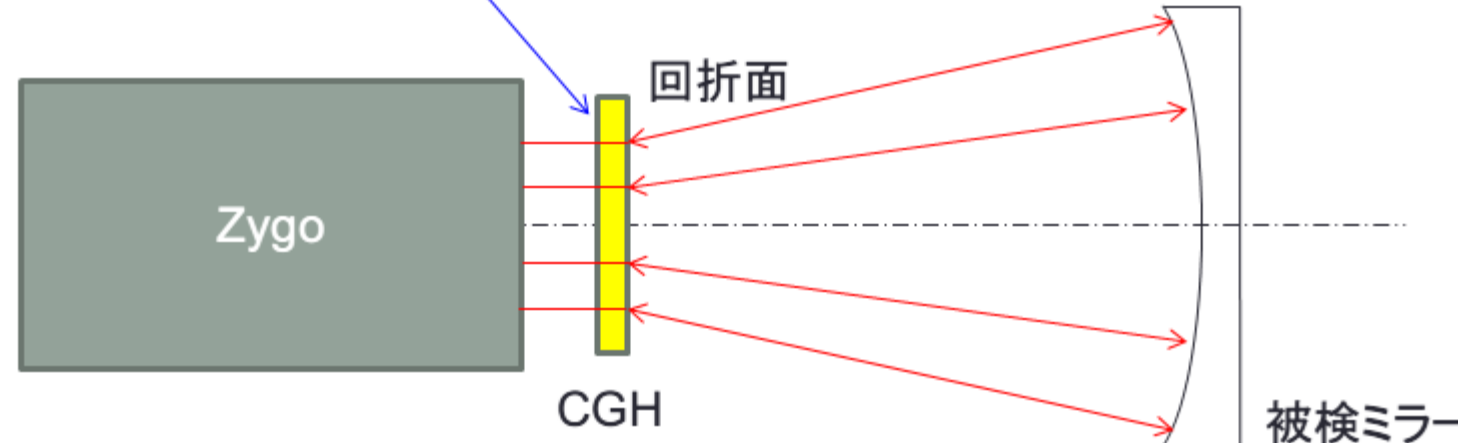
## ③CGH干渉計:主鏡用 v1

- ・まずは**両面平面型のCGH**として設計を行った
- ・Zygoの口径は一般的な4inchを想定してφ100mmとした



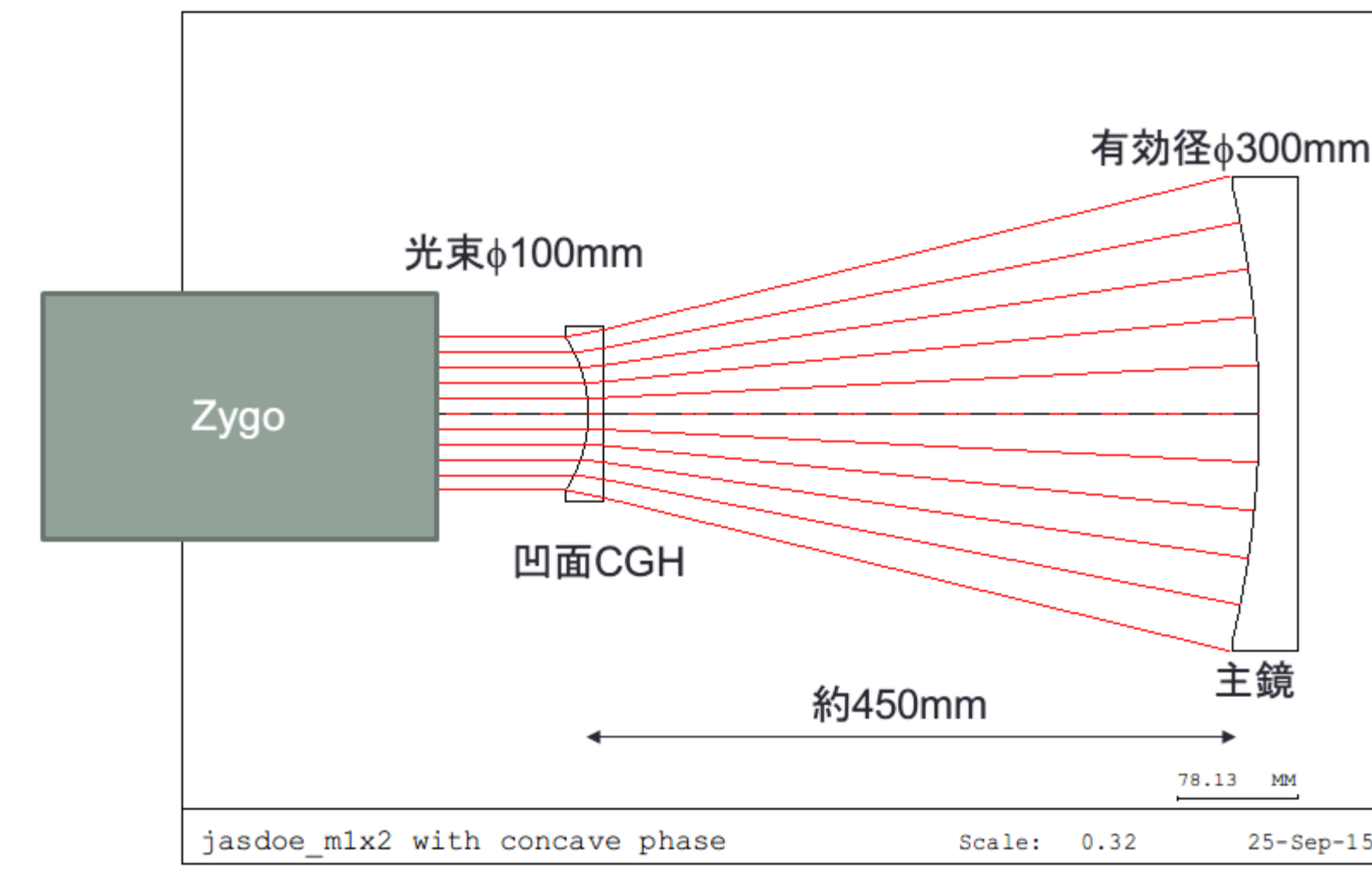
## ③CGH干渉計:製造性考慮

- ・簡単のため両面平面ベースのCGHで設計したが、凹面鏡の球面パワー成分までCGHで作るとピッチが細くなりすぎ製造が困難になるため、**回折面と反対の面**を凹面や凸面にする必要がある
- ・下図だとZygo側の面を凹球面にして、**回折面は非球面成分だけを生成**するようにすれば良い(球面は高精度に製造・測定可能なので問題無し)
- ・CGHには色々な断面形状があるが、Zygoと組み合わせてMirau型干渉計として使う場合は、**不要次数光の発生しないキノフォーム形状**が望ましい
- ・正確なキノフォーム形状に製造するのは難しいが、光学メーカー・大学の研究室等、製造できる場所はそれなりにある



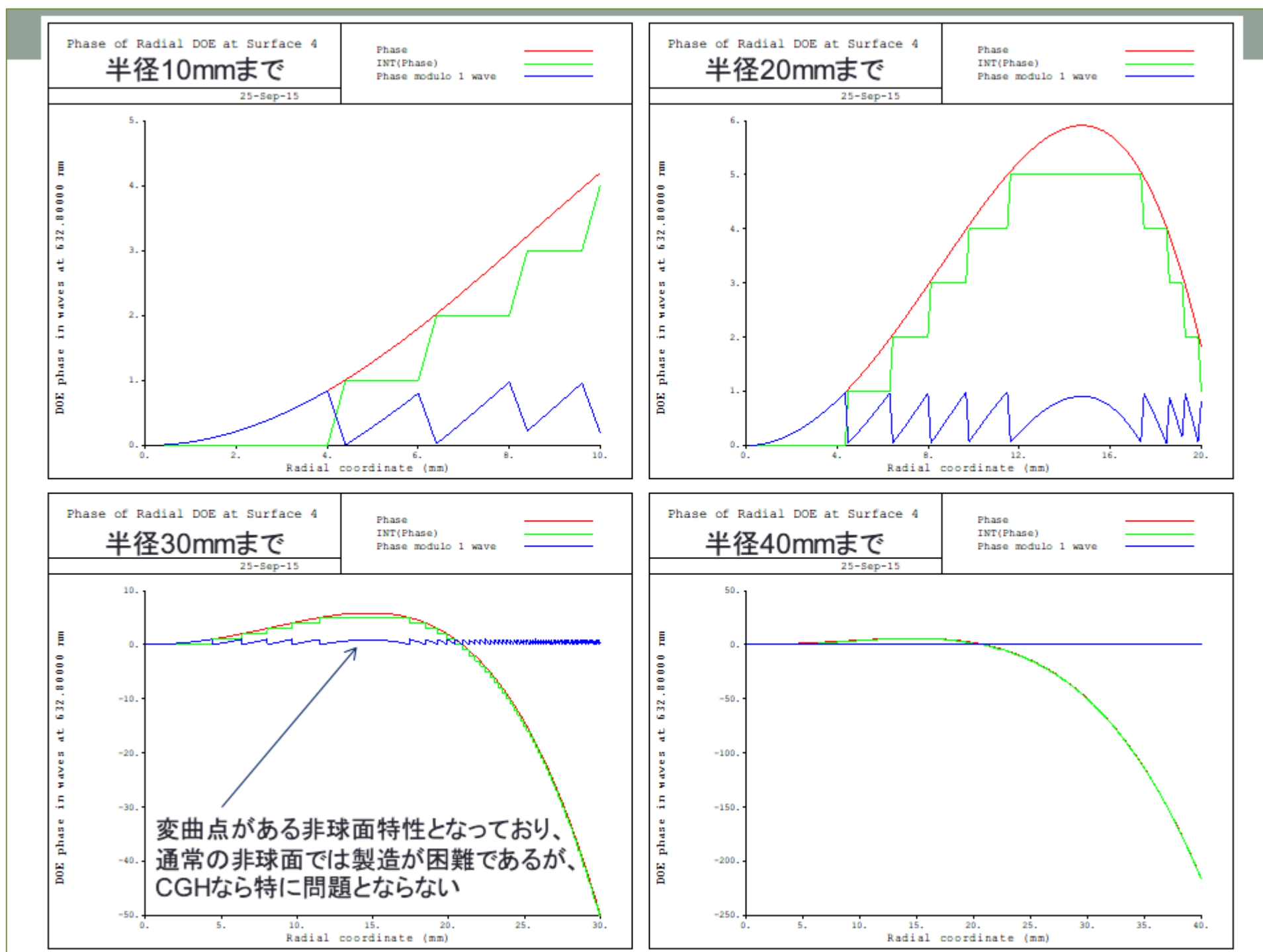
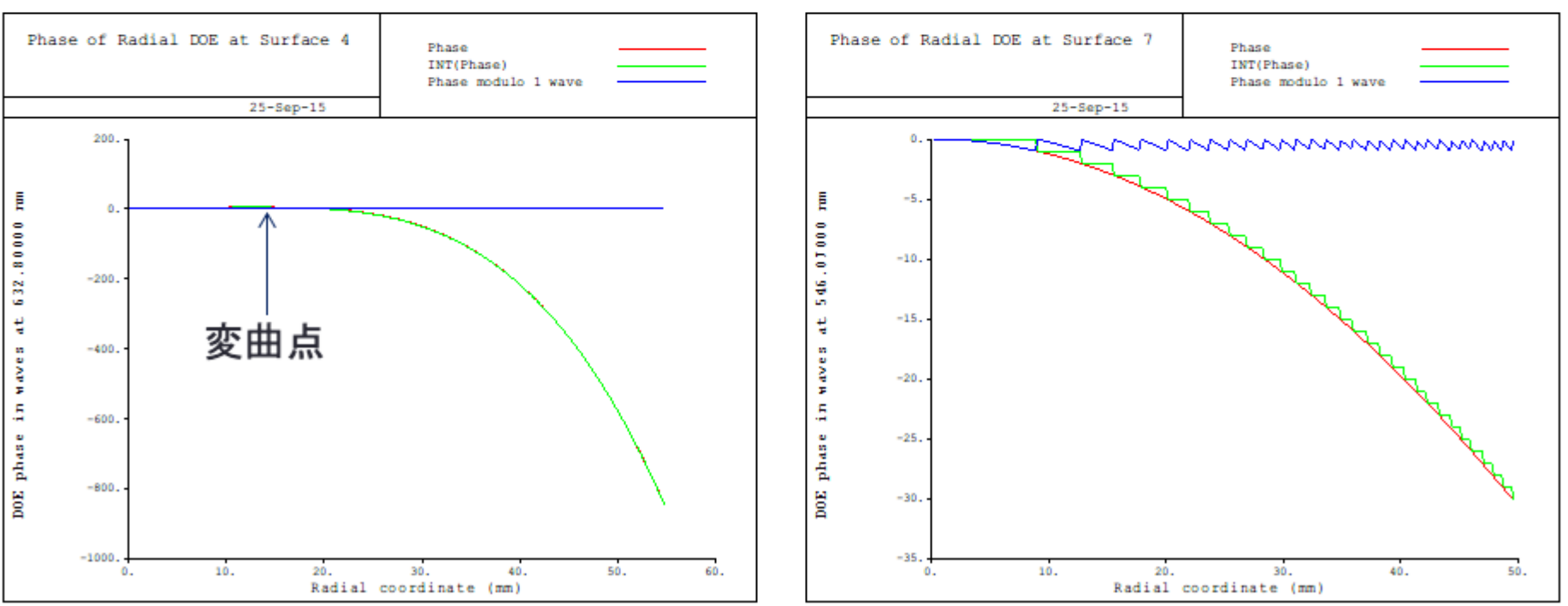
## ③CGH干渉計:主鏡用 v2

- ・主鏡用のCGHを、**回折面と反対側を凹面(球面)**にした設計例
- ・それ以外の条件は前述のv1と同じである



## 主鏡用CGH製造性チェック

- ・左下がv2のCGHのsag data、右は以前中部大工学部で製造したもののsag dataであり、今回のCGHも実際はこのようなキノフォーム形状になるが、**ピッチが細すぎてギザギザが見えていない**
- ・v1に示した平面型ではリング数が**10000本**程度必要であり、これは到底製造出来ない
- ・前面を凹面にしたもので**900本**程度必要だが、これは製造可能範囲内である
- ・900本は1次光の場合であり、2次光・3次光を使えば450本・300本となる
- ・但し、その場合は溝深さが2倍・3倍になるので、所謂アスペクト比は同じになる



## まとめと今後の課題

- ・小型JASMINEで用いる非球面は**非球面量が大きく、通常の干渉計では測定できない**ことが分かった
- ・そのような非球面の高精度測定方法である3手法の長短所を整理した
- ・最も非球面量の大きな主鏡用でも、製造できそうなCGHが設計できることを示した
- ・非球面量の小さな**副鏡・第3鏡用のCGHは更に簡単に設計・製造可能**である
- ・前面を凹面にする必要があるが、**球面は高精度に研磨及び「測定」が可能**なのでそれほど問題ではないと思われる
- ・10000本のリング数でも高精度に作れる技術があれば、平面型の方が望ましいが、コストが跳ね上がると思われる
- ・小型JASMINEのミラーは**全て光軸対称**なので、CGHの製造や干渉計のセットアップも比較的容易であり、**実現性は高い**と考える
- ・以上より、測定精度や費用を鑑み、小型JASMINE非球面ミラーの測定にはCGH干渉計を用いることを考えている
- ・全体の開発日程とリンクさせ、クリティカルとなるCGH製造に関して十分考慮したCGH干渉計の開発日程を立て、実施していくことが今後の課題である