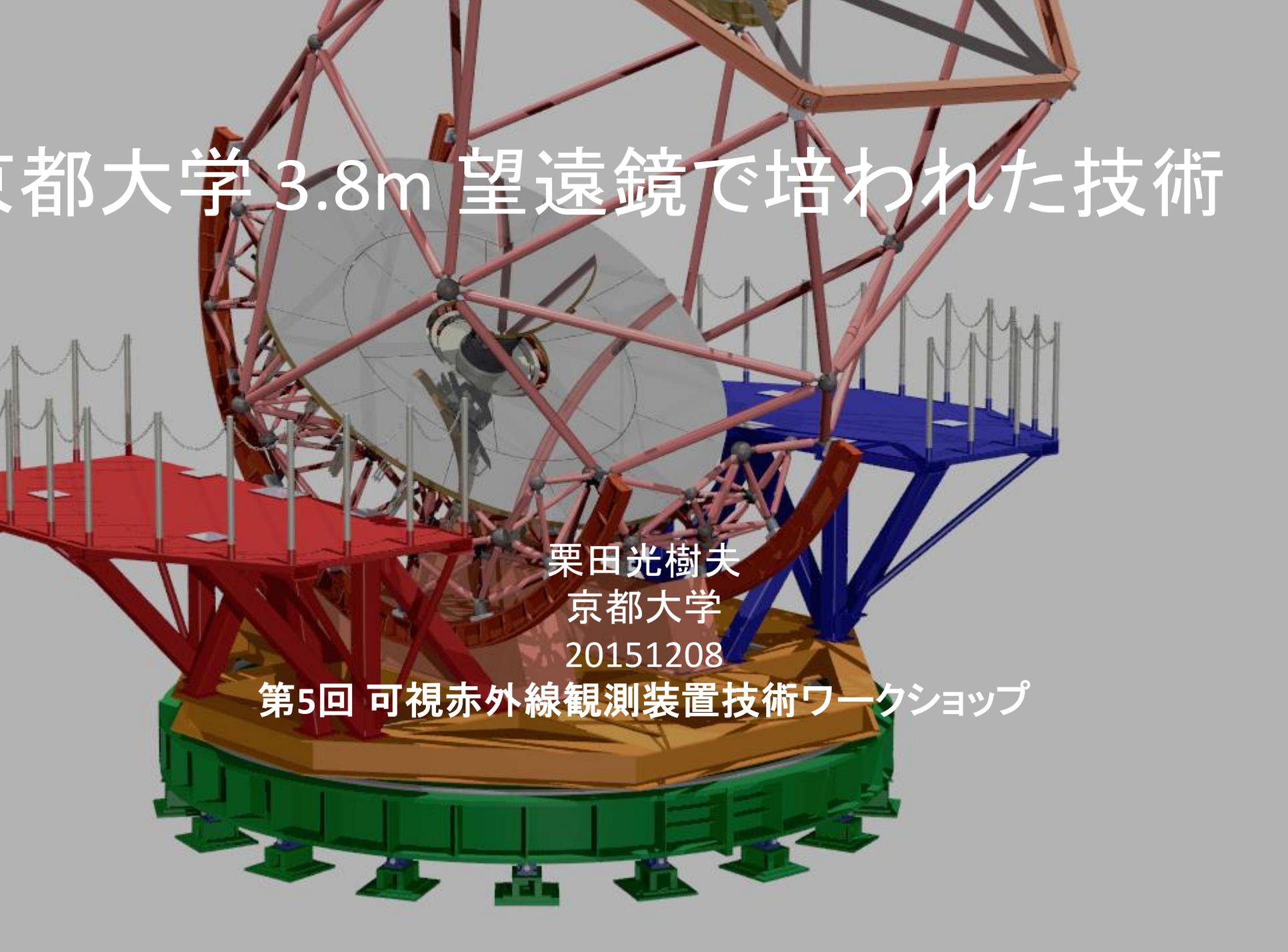


# 京都大学 3.8m 望遠鏡で培われた技術



栗田光樹夫

京都大学

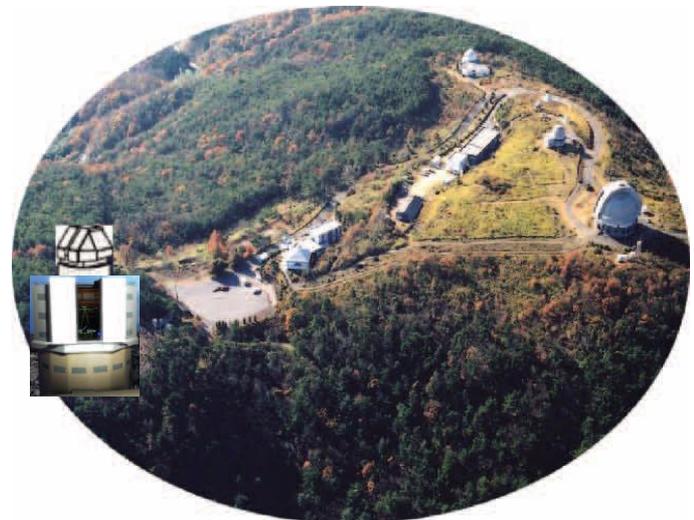
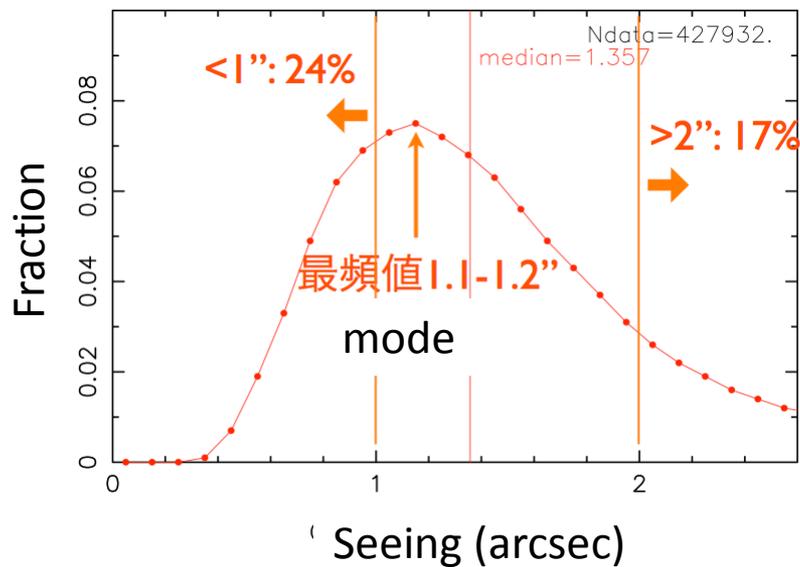
20151208

第5回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ

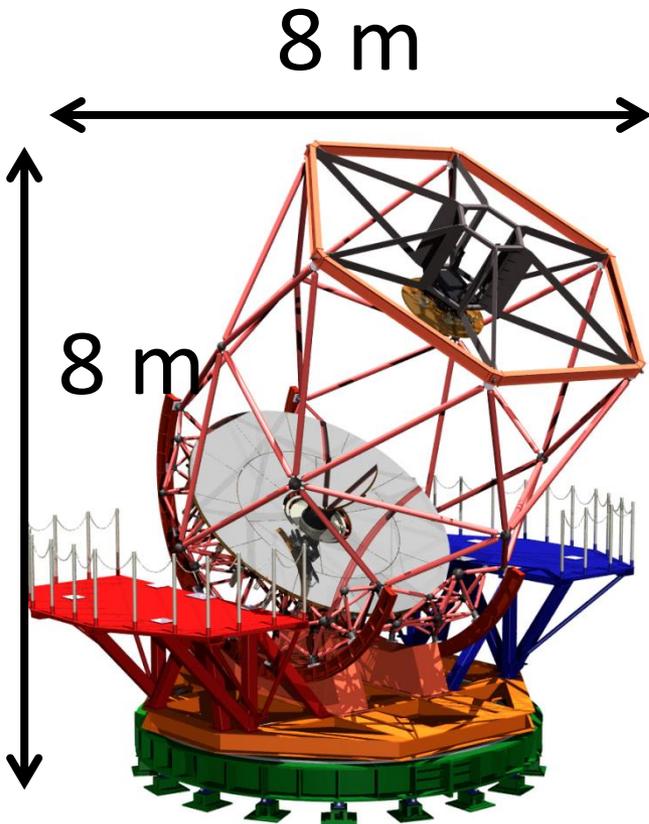
# **INTRODUCTION**

# 観測所

- 標高:380 m
- 晴天率= 50 %
- シーイング: 1.1"



# 望遠鏡の概要



20 ton

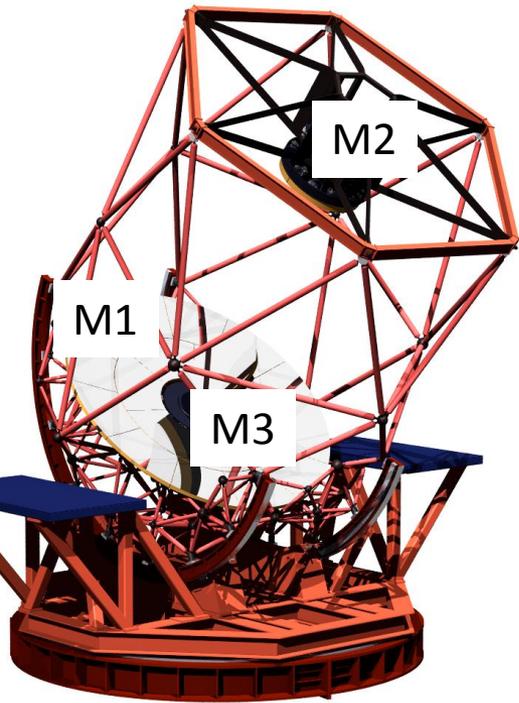
- 口径: 3.8 m
- 焦点: Nasmyth × 2 F/6
- 視野: 10' , 1°
- 観測波長: 0.4 to 4.2  $\mu\text{m}$
- 補償光学: Near-infrared
- 指向速度 < 1 min (whole sky)
- 駆動速度 2° /s

**TECHNOLOGY DEVELOPMENT**  
**ものづくり**

# 技術開発

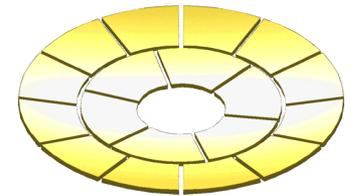
- 鏡加工
- 鏡計測
- 分割鏡
- 軽量構造

# 鏡加工



	形状	曲率半径	大きさ	枚数
主鏡	off-axis Aspheric 軸外し非球面	凹面 5000mm	~1m	6/12
副鏡	aspheric 非球面	凸面 -1667mm	~1m	1
第三鏡	平面	平面	~1m	1

面精度:  $\lambda/20 \approx 30 \text{ nm}$



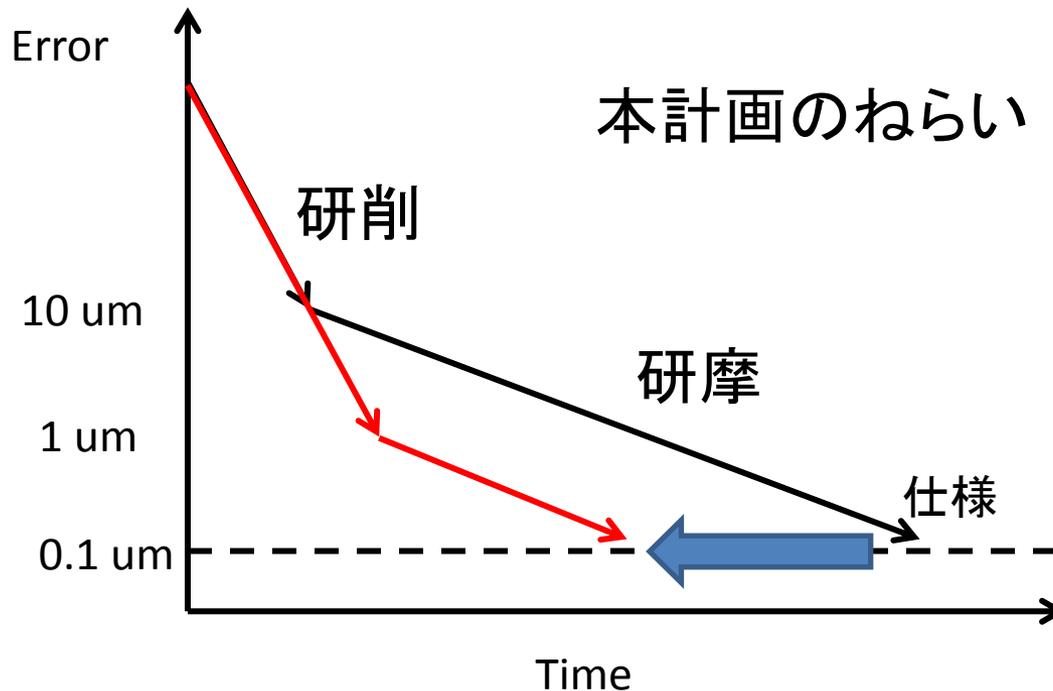
## 問題

このような加工と計測  
技術は国内にない

# 研削と研磨

- 一般的には研削加工のあとに研磨加工
- 研削加工: 砥石で削るため、速いが、荒い
- 研磨加工: 遅いが、滑らか

高精度な研削加工で高速化を狙う



# Mirror Factory

- ベンチャー企業を立ち上げ設立
- 超精密研削加工を用いた高精度な鏡面加工技術の確立を目指す

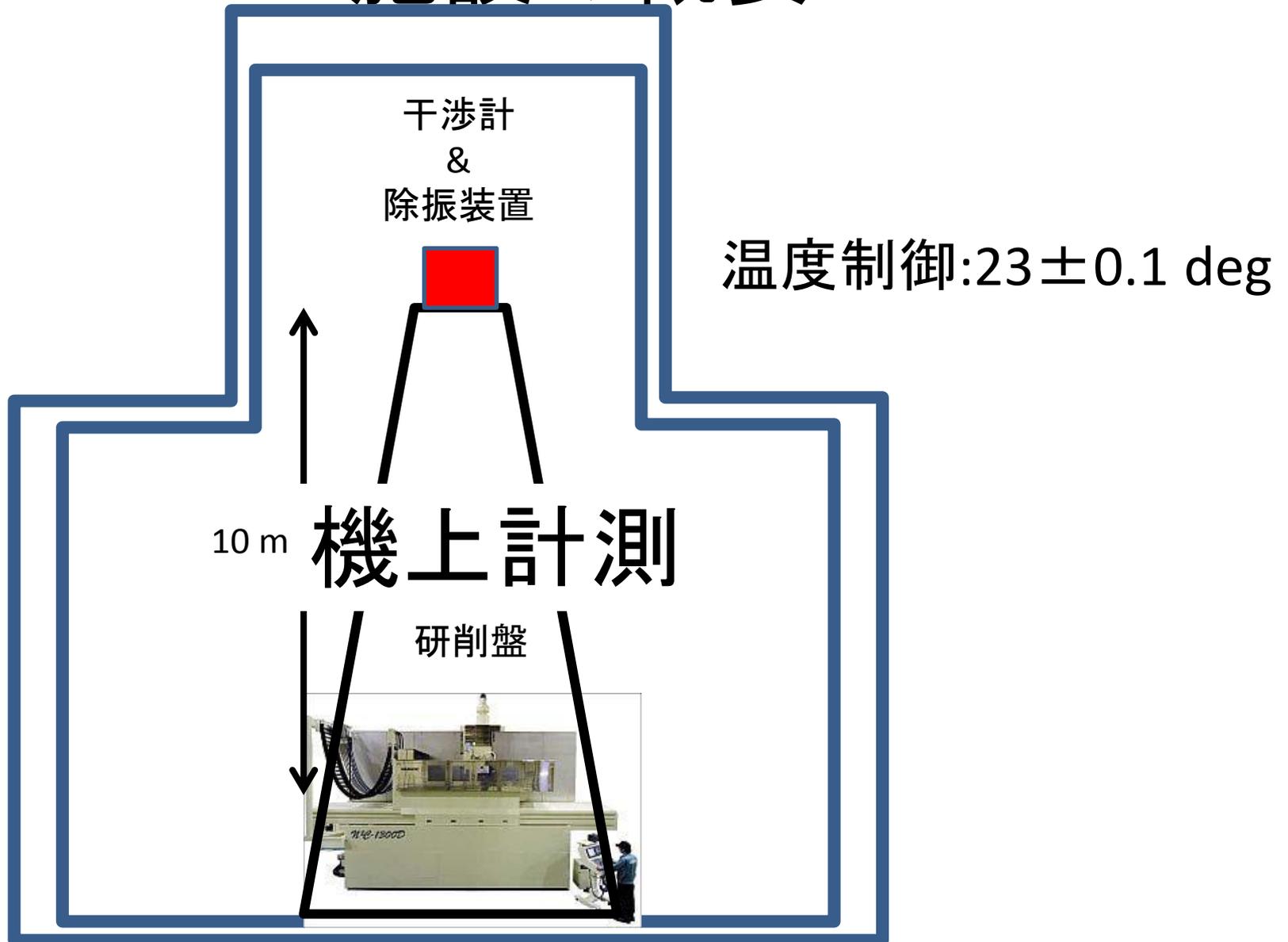


Facility  
Astroaero Space Inc.



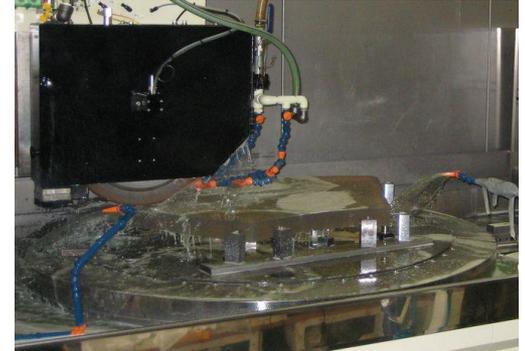
Grinding Machine  
(N2C-1300D)

# 施設の概要

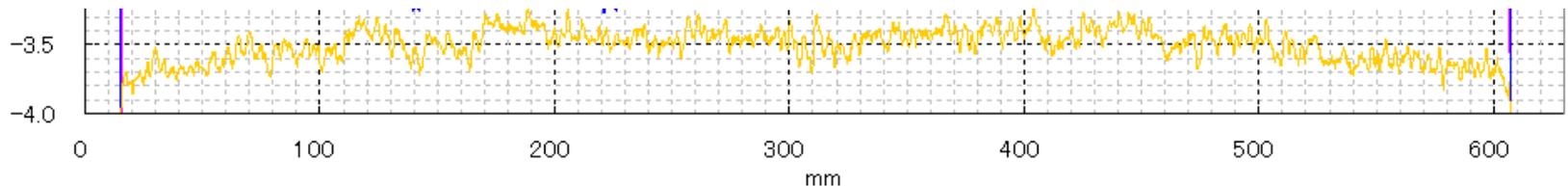


# 研削盤の加工性能

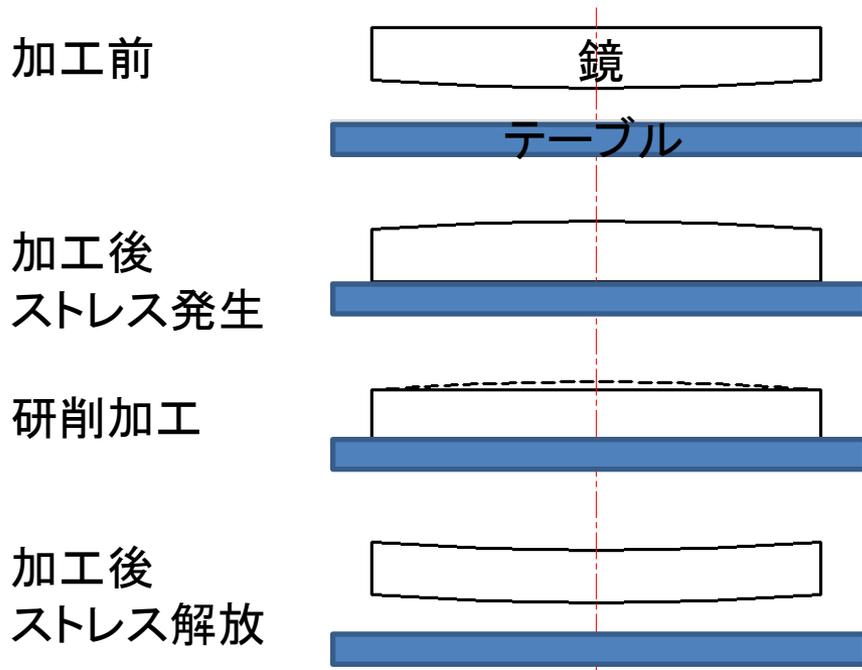
- 大きさ:  $\Phi 610$
- 形状: 平面
- 材料: クリアセラム  
(ゼロ膨張材, OHARA)
- 加工時間: 数時間



形状誤差P-V = 0.4 $\mu$ m



# 支持方法の問題



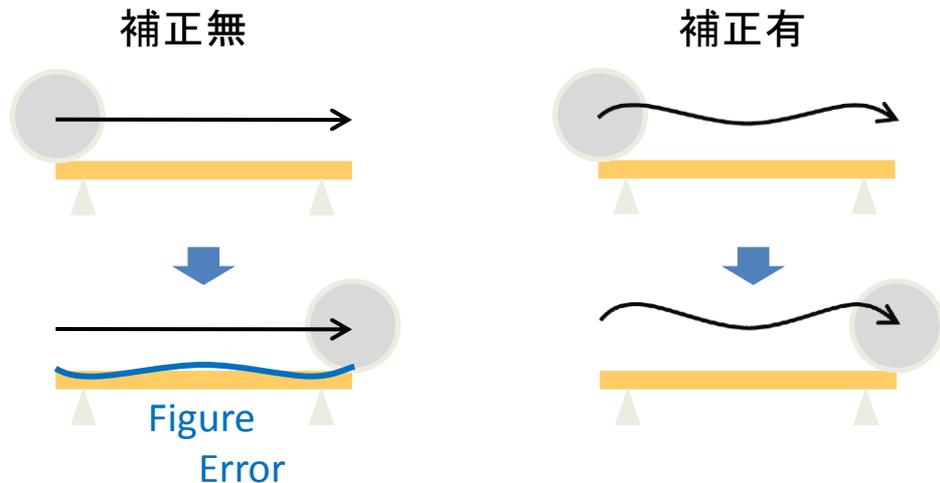
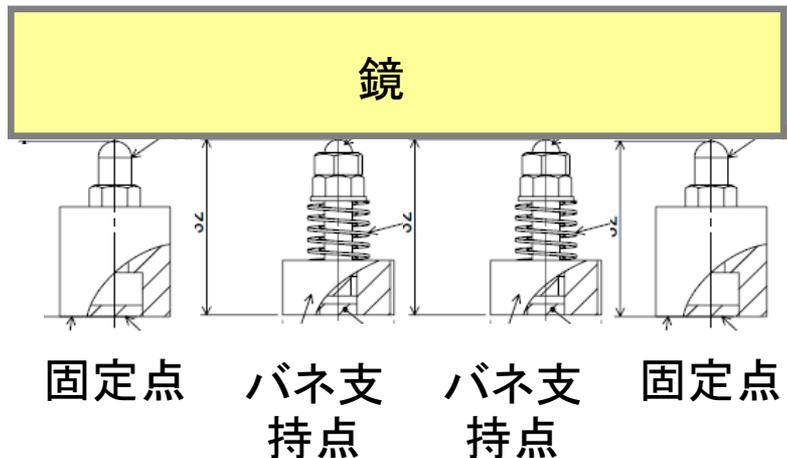
## 問題

せっかくの高精度加工  
がこのままでは役に立  
たない。

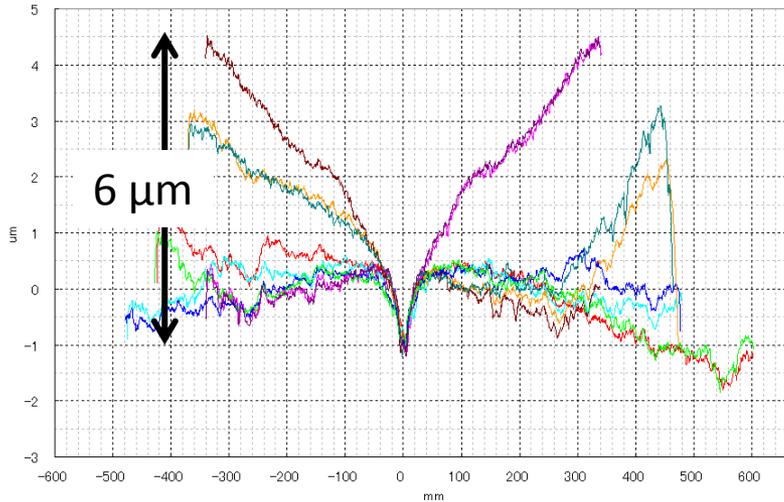
薄くて大きな鏡を直接加工機に載せて加工すると、裏面の形状不一致によりストレスが生じ、加工後に大きく変形する、という問題が発生

# キネマティックサポート

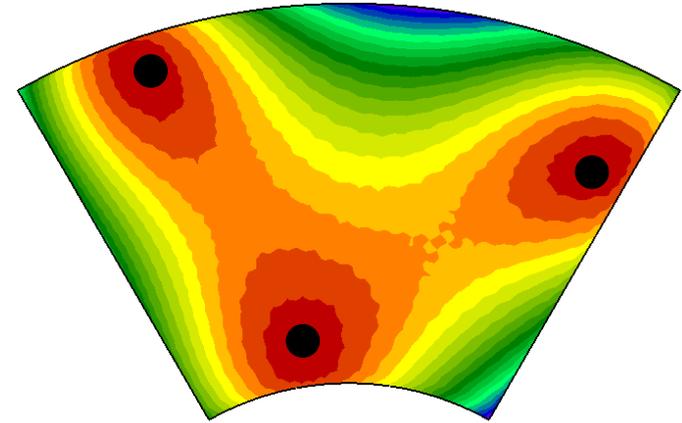
- 過拘束のない3個の固定点
- 静圧受けのための24個のバネ支持点
- 鏡は浮いたような状態で加工されるため、裏面の形状誤差は不問となる。



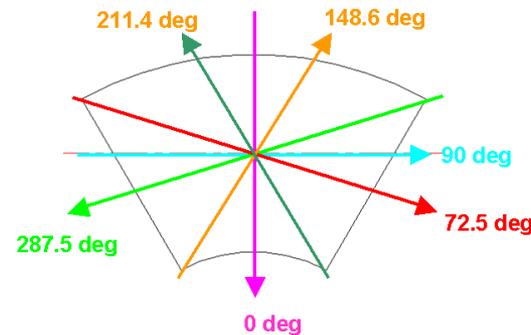
# キネマティックサポート研削



補正なしの場合の形状誤差断面  
(1div = 1 μm)

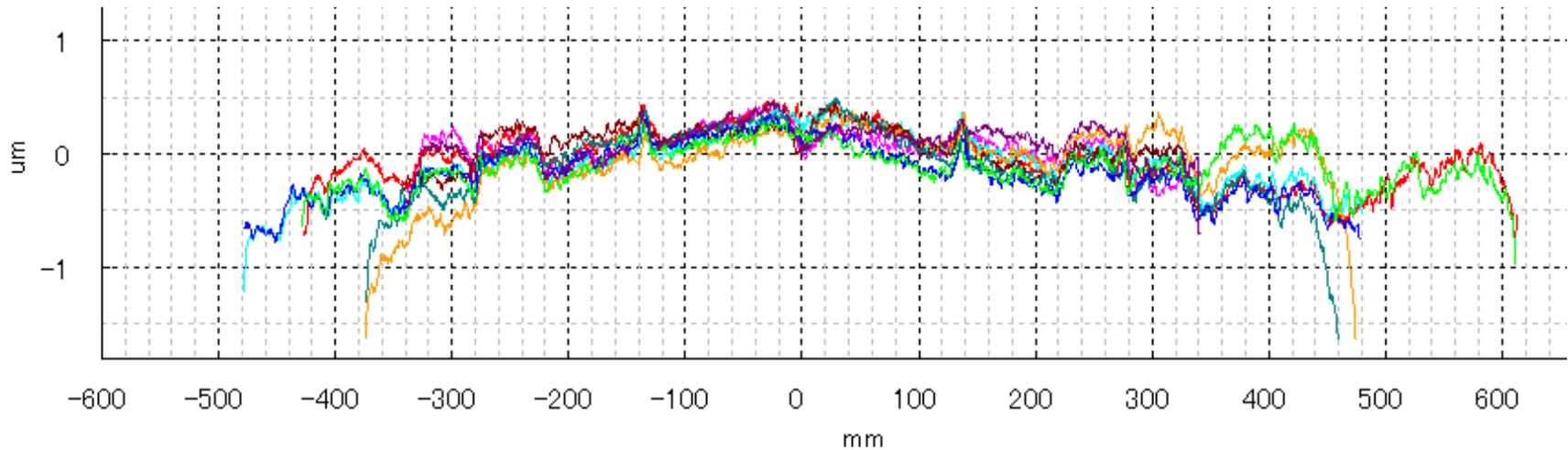


加工圧による変形図  
P-V = 5 μm  
黒丸は固定点



鏡面上における左図の断面パス

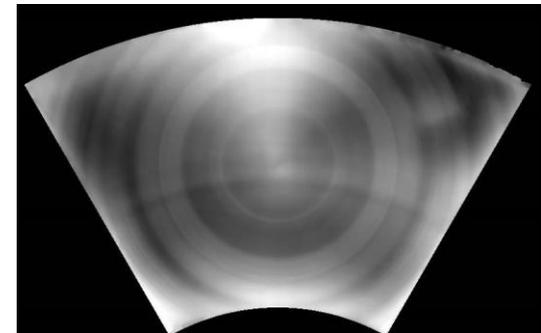
# キネマティックサポート研削



(1div = 1 um)

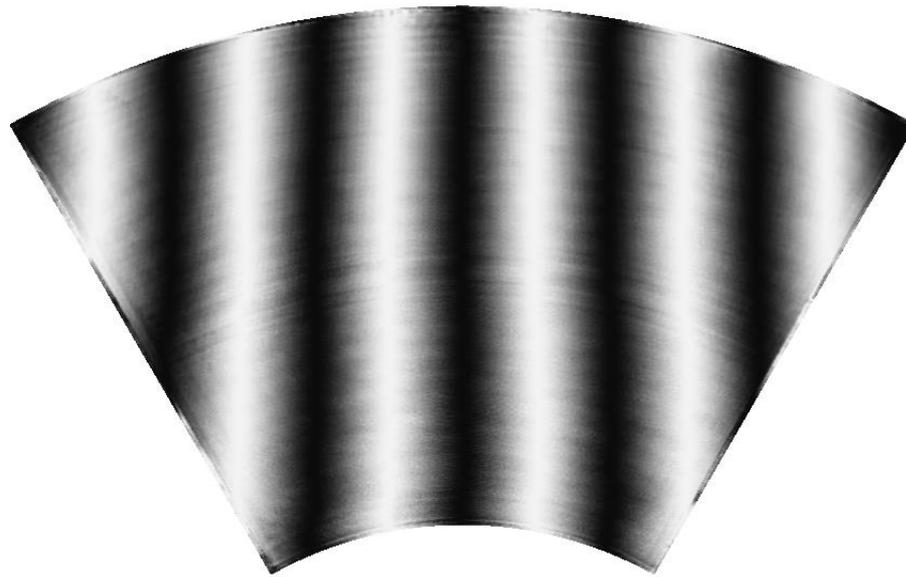
**解決**

**ただのバネとロッドで  
鏡を正しく支持**



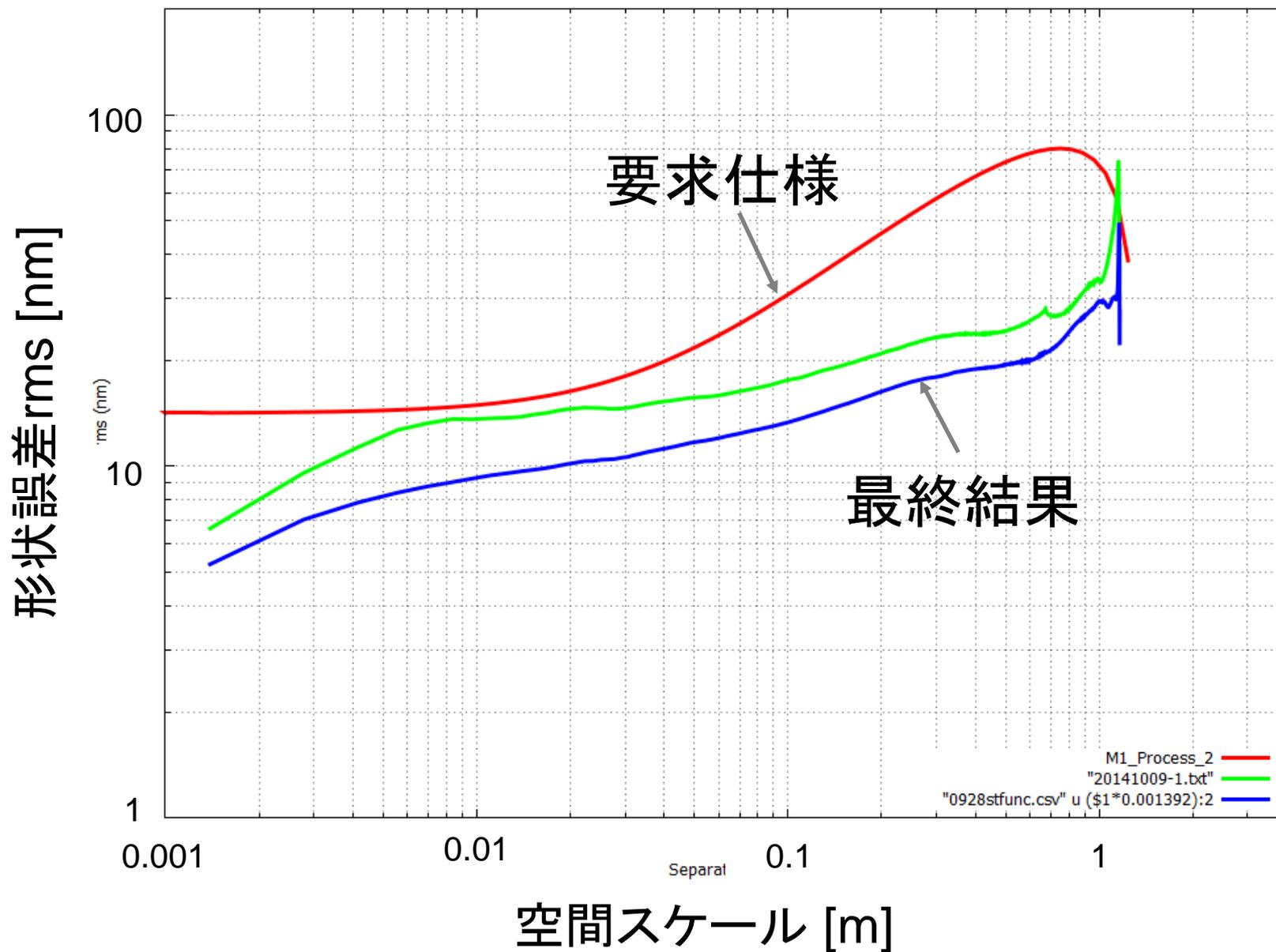
Error map  
-1 um to 1 um

# 最終形状の結果



95%P-V=50 nm,  
RMS=13 nm

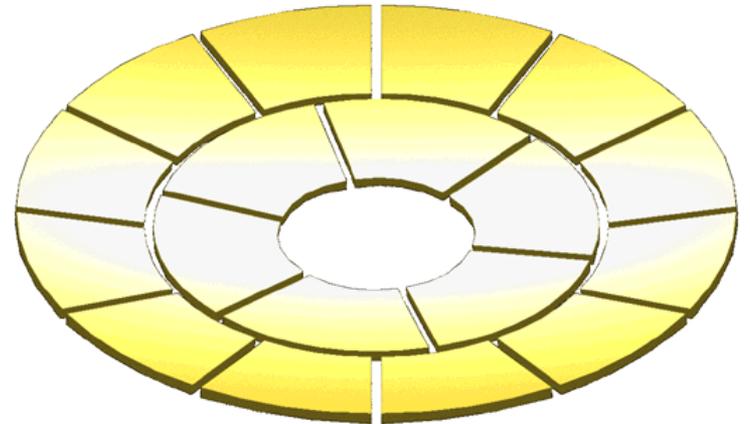
# 構造関数



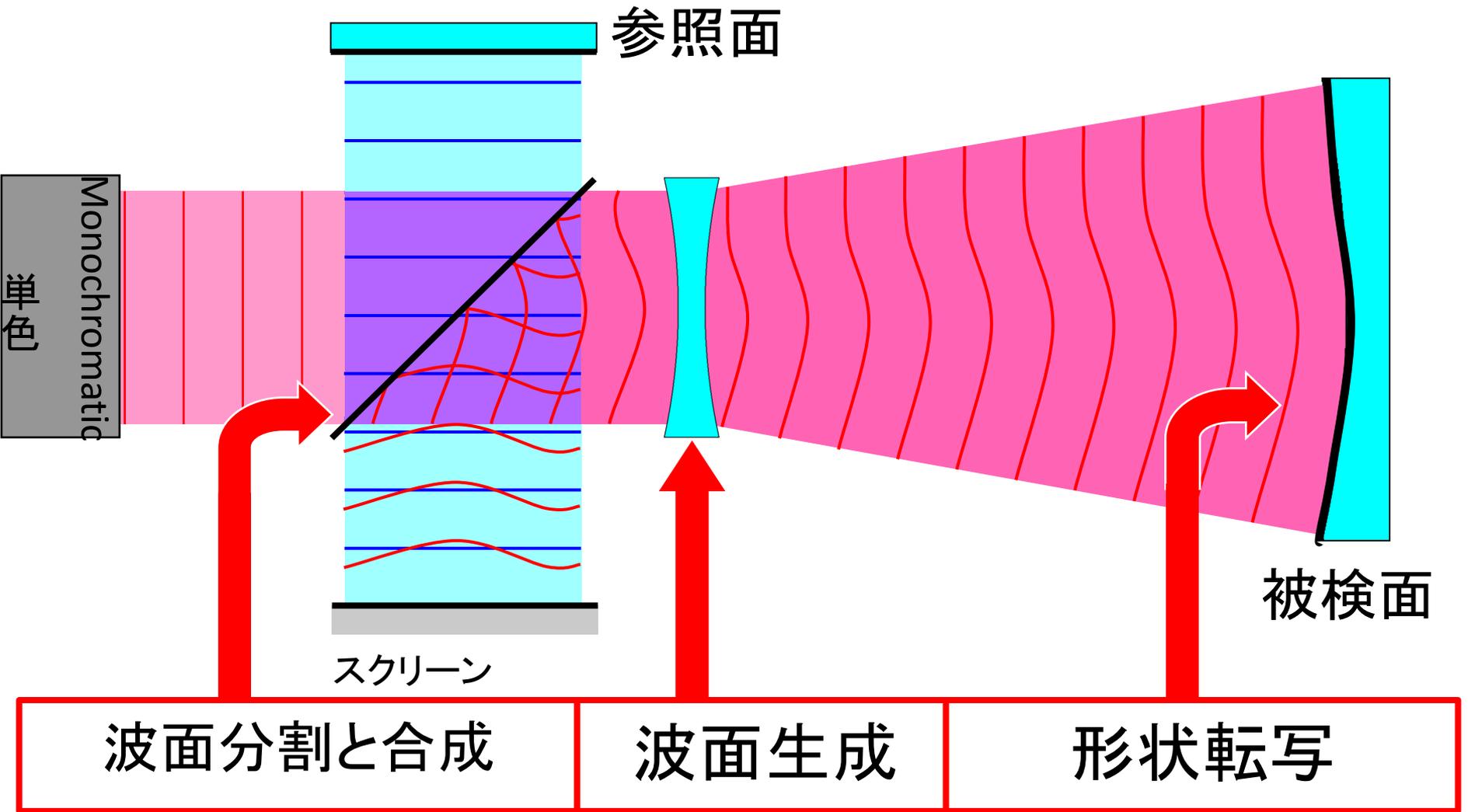
# MIRROR TEST

問題

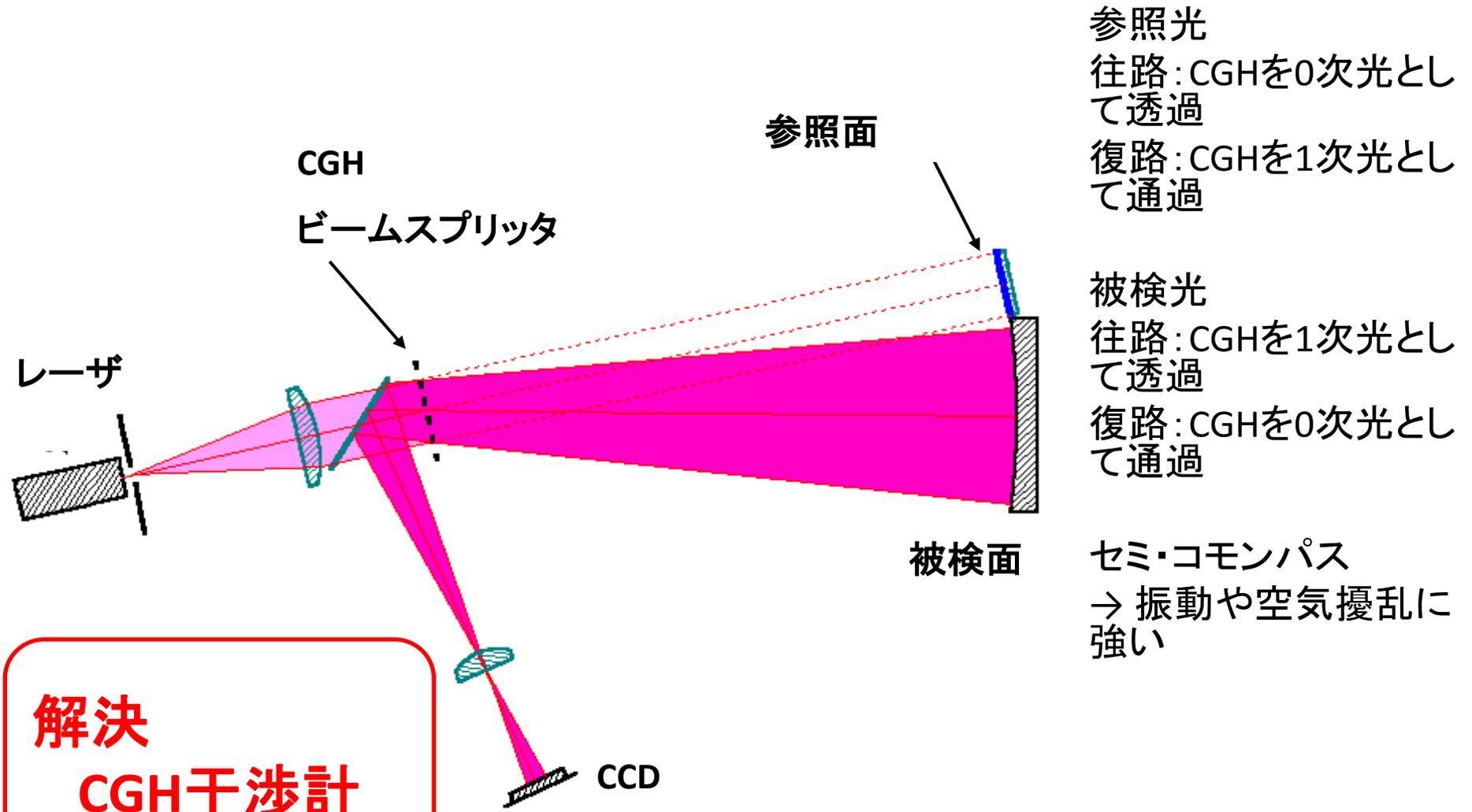
非球面軸外しを計る



# 干渉計の原理

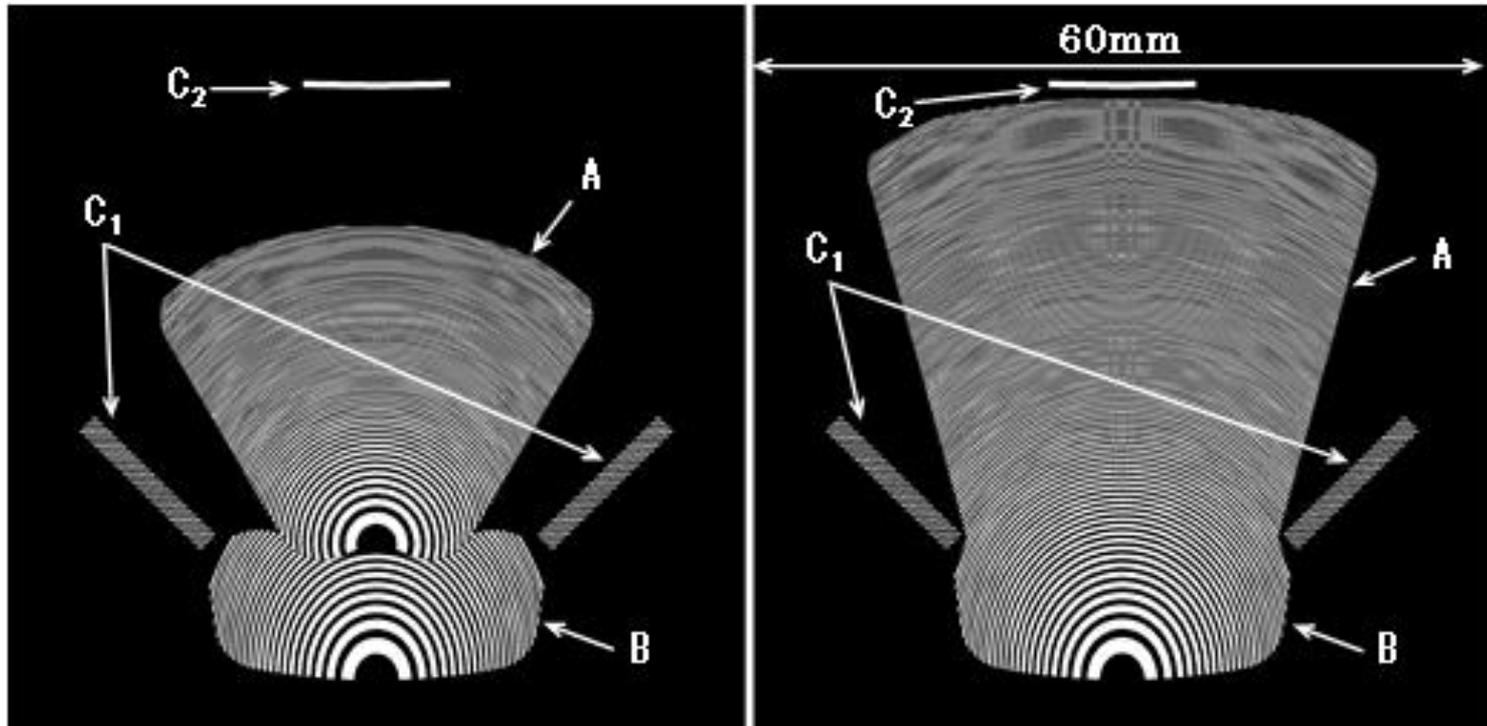


# 主鏡のためのCGH干渉計



**解決**  
**CGH干渉計**

# CGH (Computer Generated Hologram)



# 主鏡のためのCGH干渉計

- ・机上計測により、安定で、迅速なフィードバック

- ・再現性:

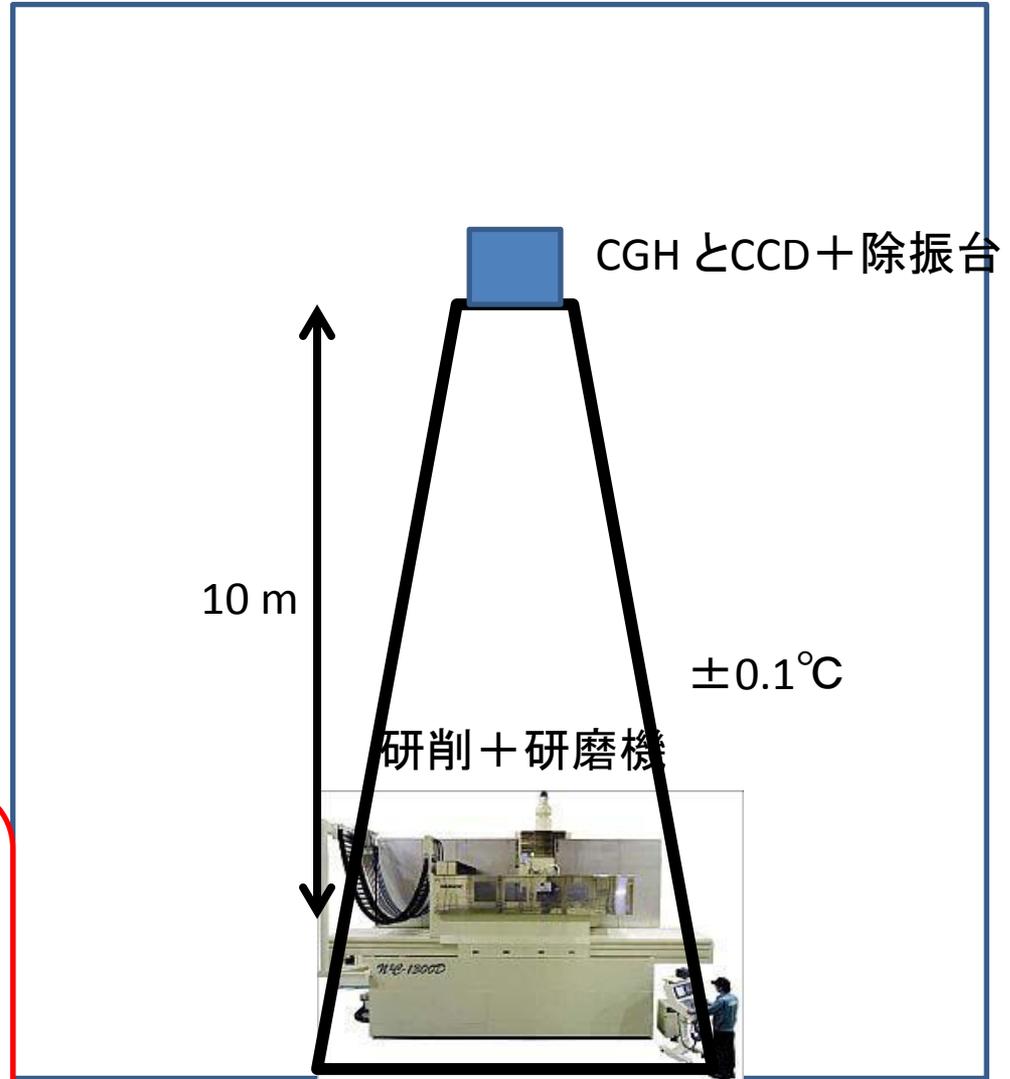
RMS=10 nm

- ・精度:

RMS= 15 nm

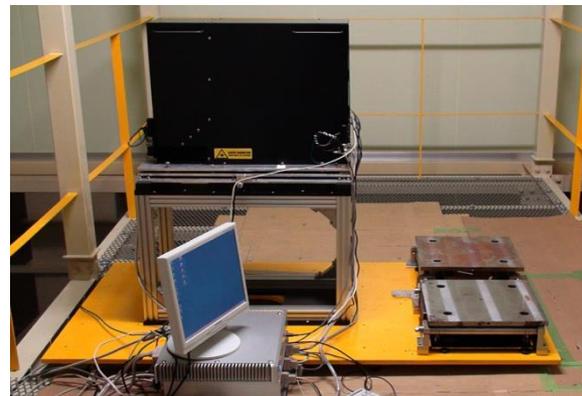
## 問題

当初、タワーが数ミクロン揺れ、計測できなかった。

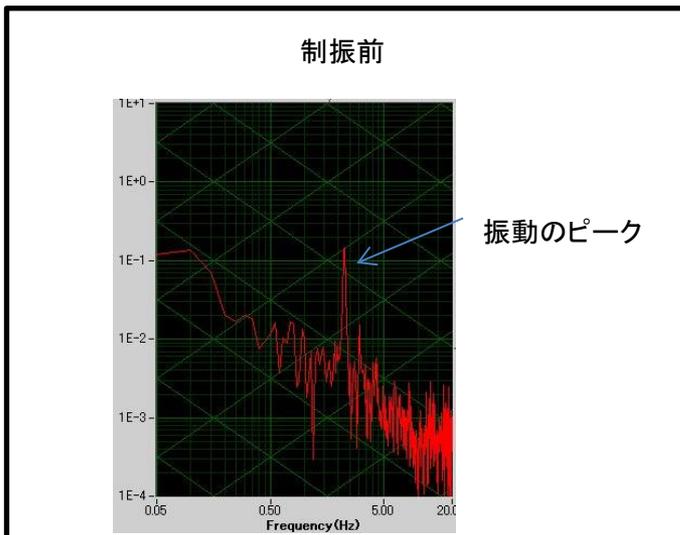
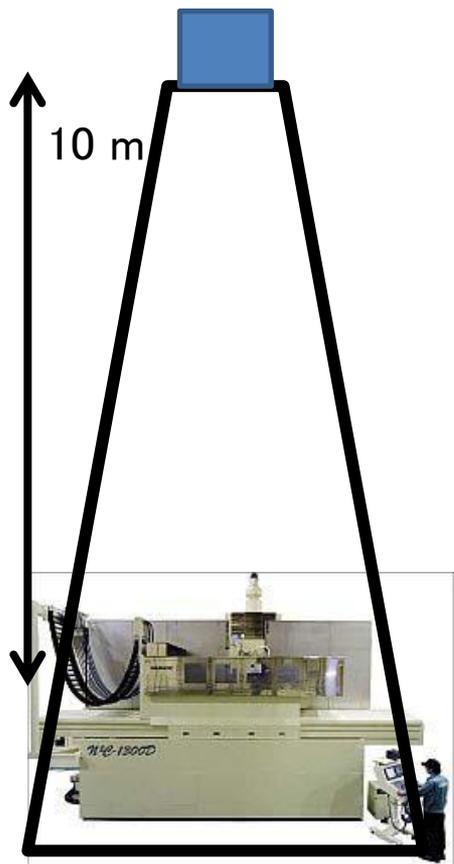
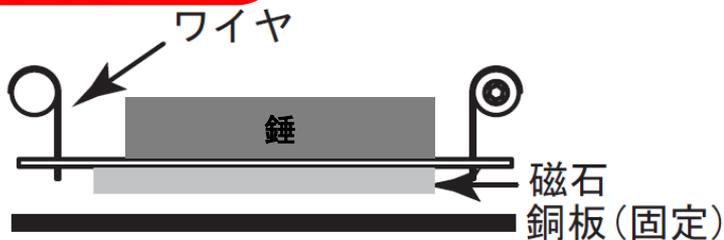


**解決**  
**磁石と振り子で振動を**  
**サブミクロンに抑制**

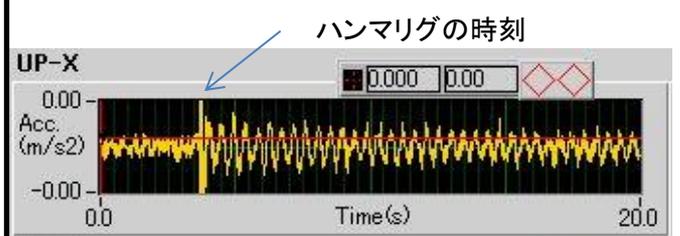
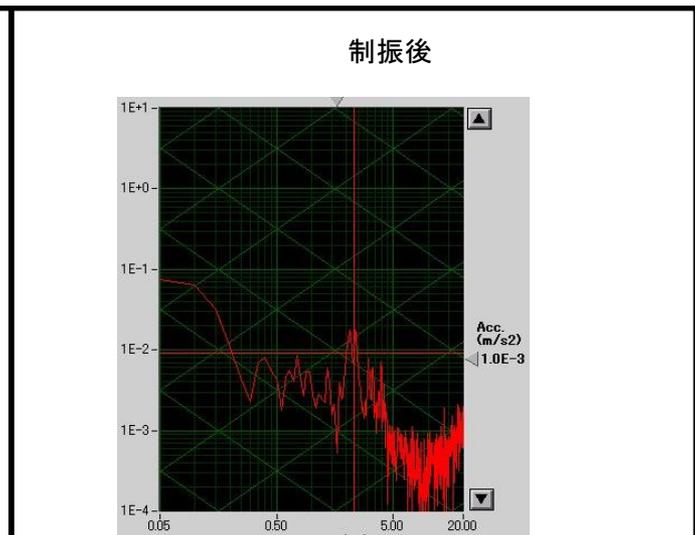
# 制振



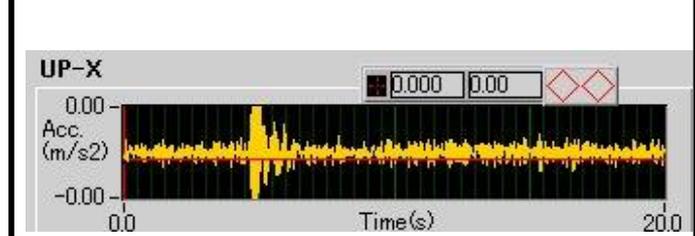
磁気ダンパ  
 振幅 < 1μm



タワーの振動スペクトル



ハンマリング後の減衰の様子



# 副鏡と第三鏡用の機械計測

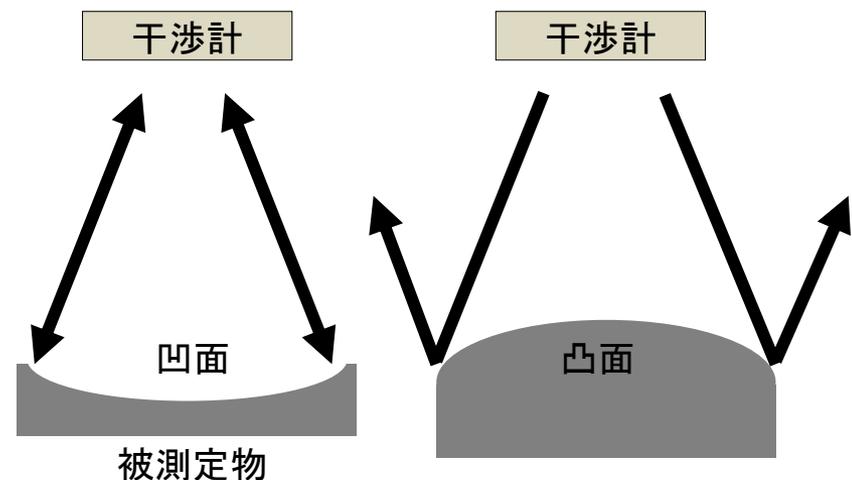
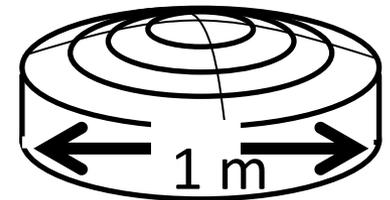
- M2 & M3

- 形 : 凸面と平面

- 大きさ : ~1 m

干渉計が不得意な形状

自由曲面を計測できる測定器が必要

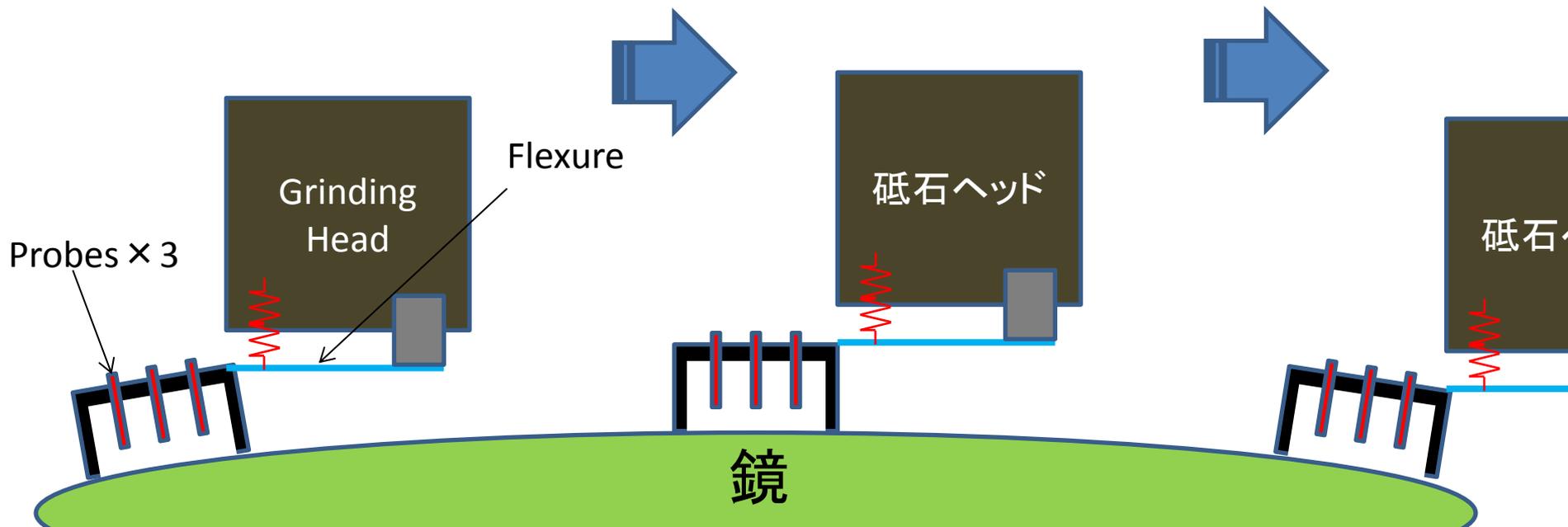


## 問題

干渉計では副鏡の計測が困難

# 3点法

3つのセンサーが直接被検面を走査

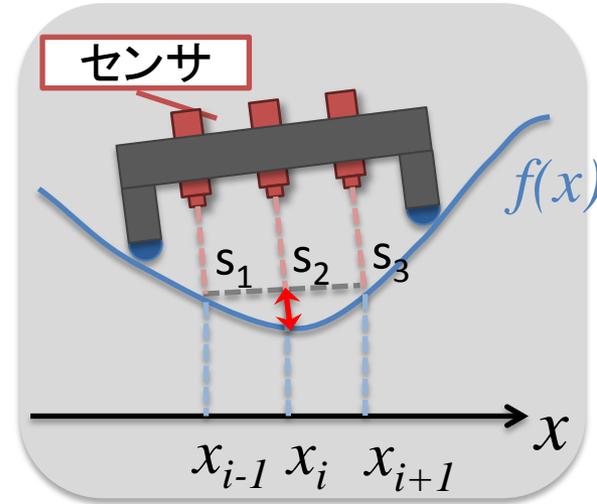


# 原理

## 局所的な曲率を計測

$$s_2 - \frac{s_1 + s_3}{2} + \alpha = \frac{f(x_{i-1}) + f(x_{i+1})}{2} - f(x_i)$$

Initial error



## 曲率を積分して、断面形状を生成

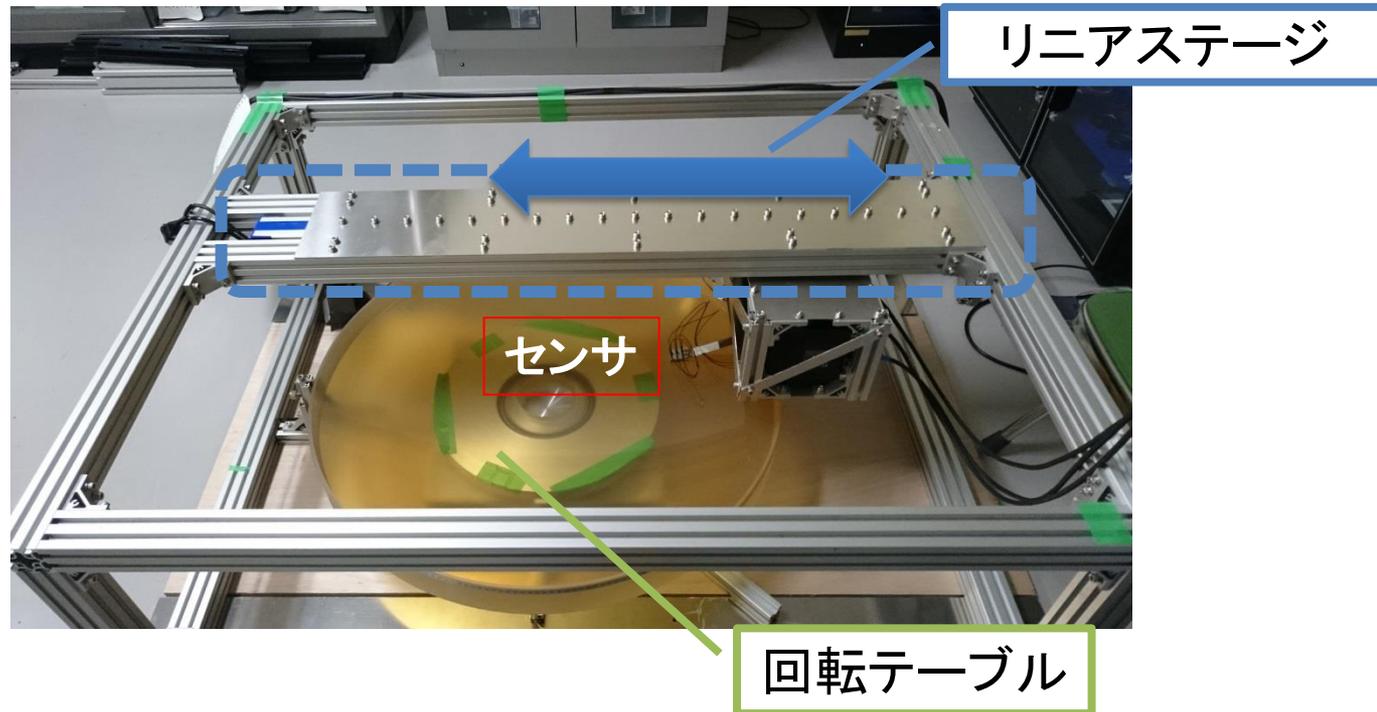
$f(x)$  : 被検面の形状  
 $\alpha$  : センサの初期誤差

# 実験

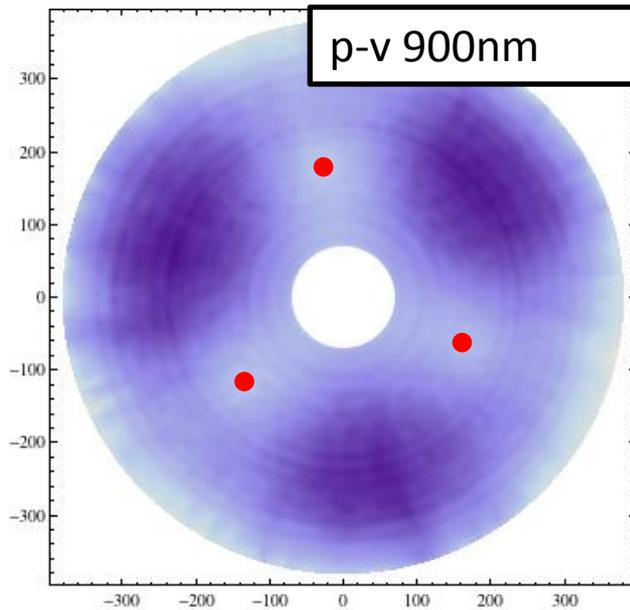
φ800 mm 球面鏡

リニアステージでセンサを引きずる

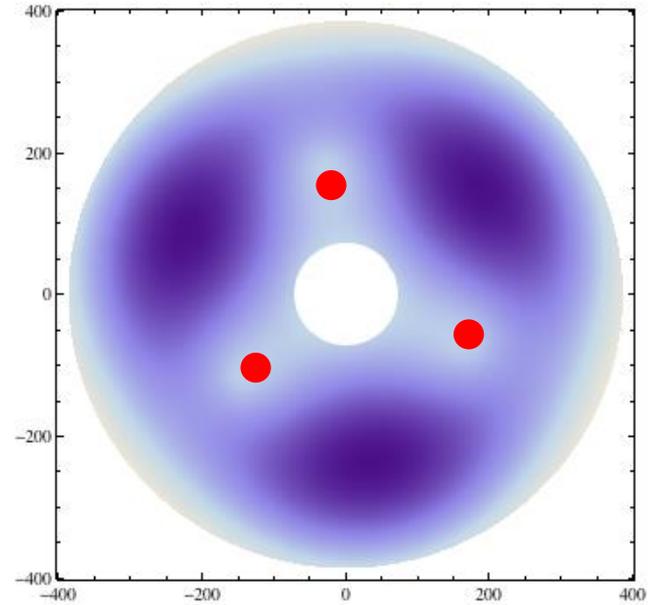
走査するごとに鏡を回転させ合計60本計測



# 結果(低次)



計測結果



FEMによる変形の予想値

赤丸の3点を支持点として鏡をわざと歪めて計測。

# 結果(高次)

This work



Interferometer



前項の左図から右図を引いた結果  
(理想的な支持状態での形状誤差)

理想的な支持状態での干渉計による結果

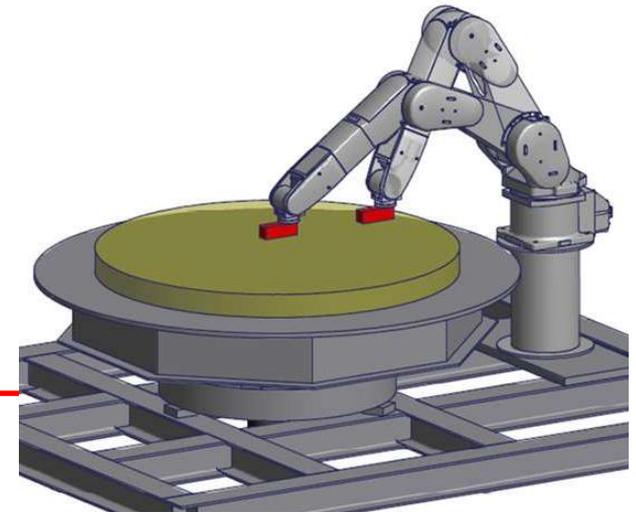
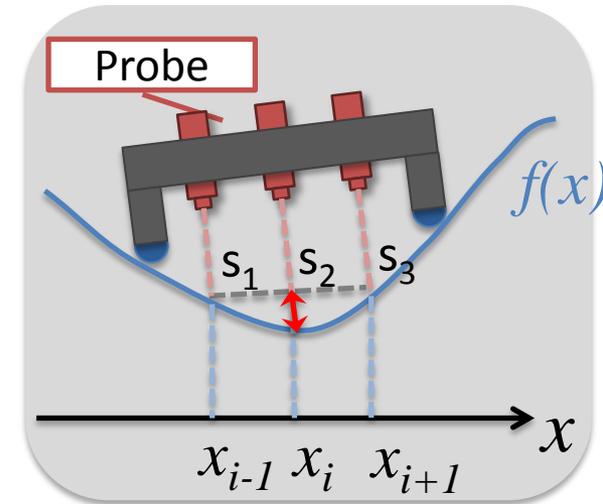
※三つ葉パターンの引き残しがある。これは解析と計測時の支持点の差によるものと考えられる。

# 利点

- 十分な精度
- 単純な測定原理
  - 高精度な運動機構が不要
  - 低コスト
- 環境に強い
- 自由形状が計測可能
- 測定範囲が無制限
  - 大型の鏡に対応
- 機上計測をコンパクトに実現

## 不利な点

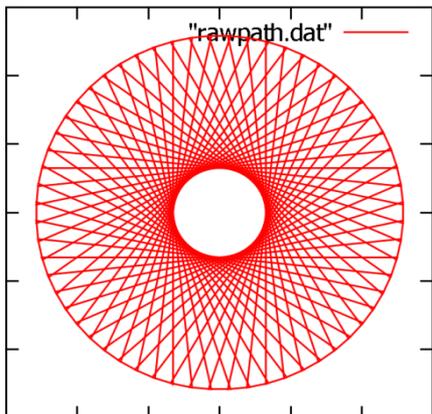
- 低空間分解能



今後

ロボットアームによる計測の自動化

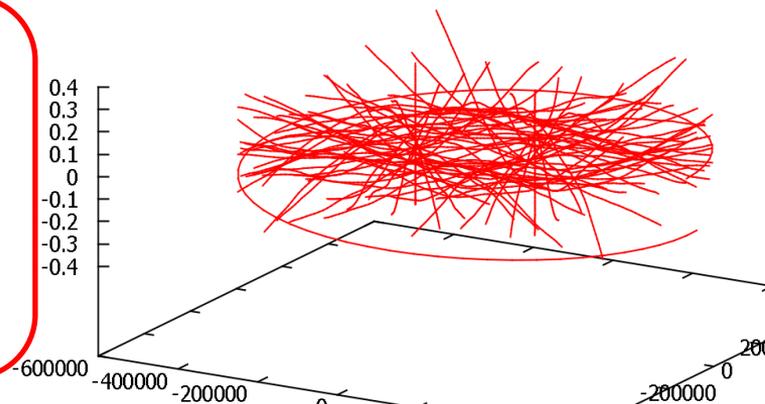
# 弾性体を応用したデータステッチ



走査パス

## 問題

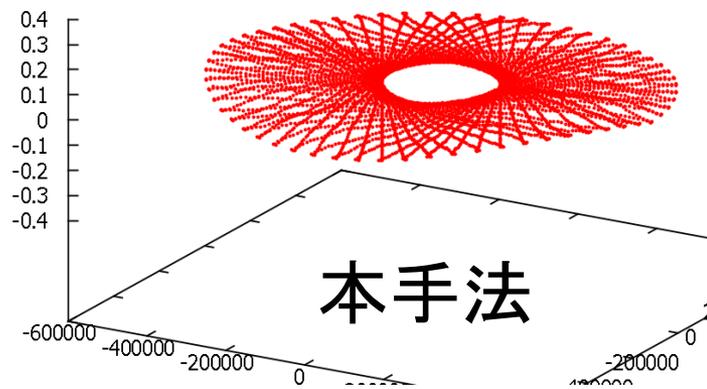
分割計測された  
データはお互いに  
矛盾する



従来の最小二乗法



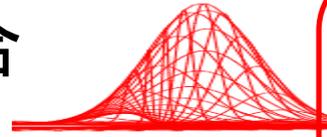
竹かごを編むのと同じ原理



本手法

# 局所構造の抽出

釣鐘型の形状を計測した場合



**解決**

データを柔らかな弾性体とみなすことで高精度にステッチ



従来の最小二乗法



本手法

空間フィルタによってデータは滑らかに接続されるが空間情報は失われてしまう。一方、本手法は抽出可能。

A complex mechanical device, likely a camera or sensor assembly, featuring a central lens and multiple orange arms extending outwards. The device is mounted on a metal frame. The text is overlaid on the image.

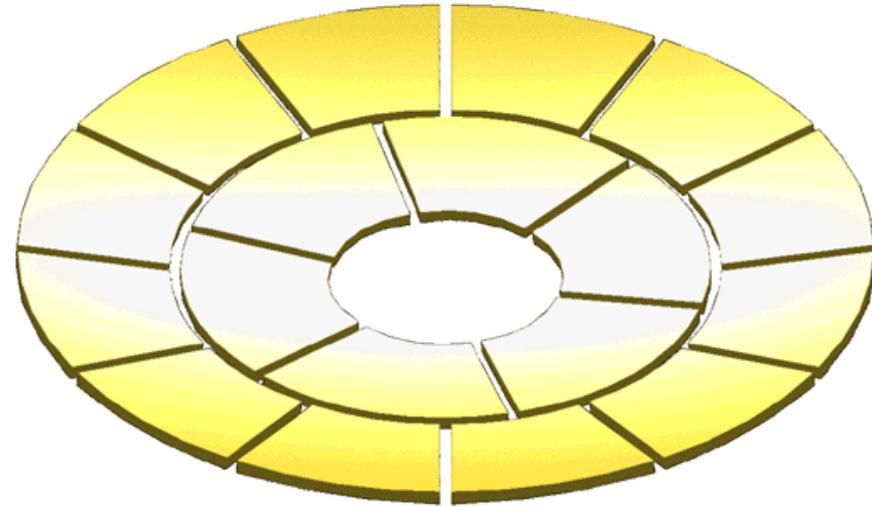
# セグメント主鏡制御装置の 開発状況

木野 勝氏のスライドより

# 3.8m望遠鏡の分割主鏡

## I主鏡全体

口径	: 3.78 m
曲率半径	: 10 m
表面形状	: 双曲面
分割数	: 内周6 + 外周12

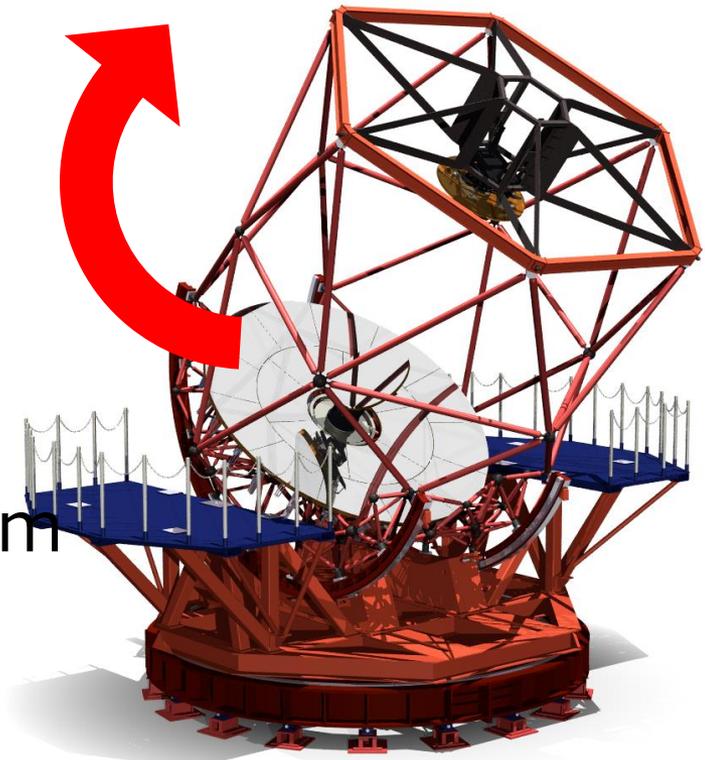


## IIセグメント鏡

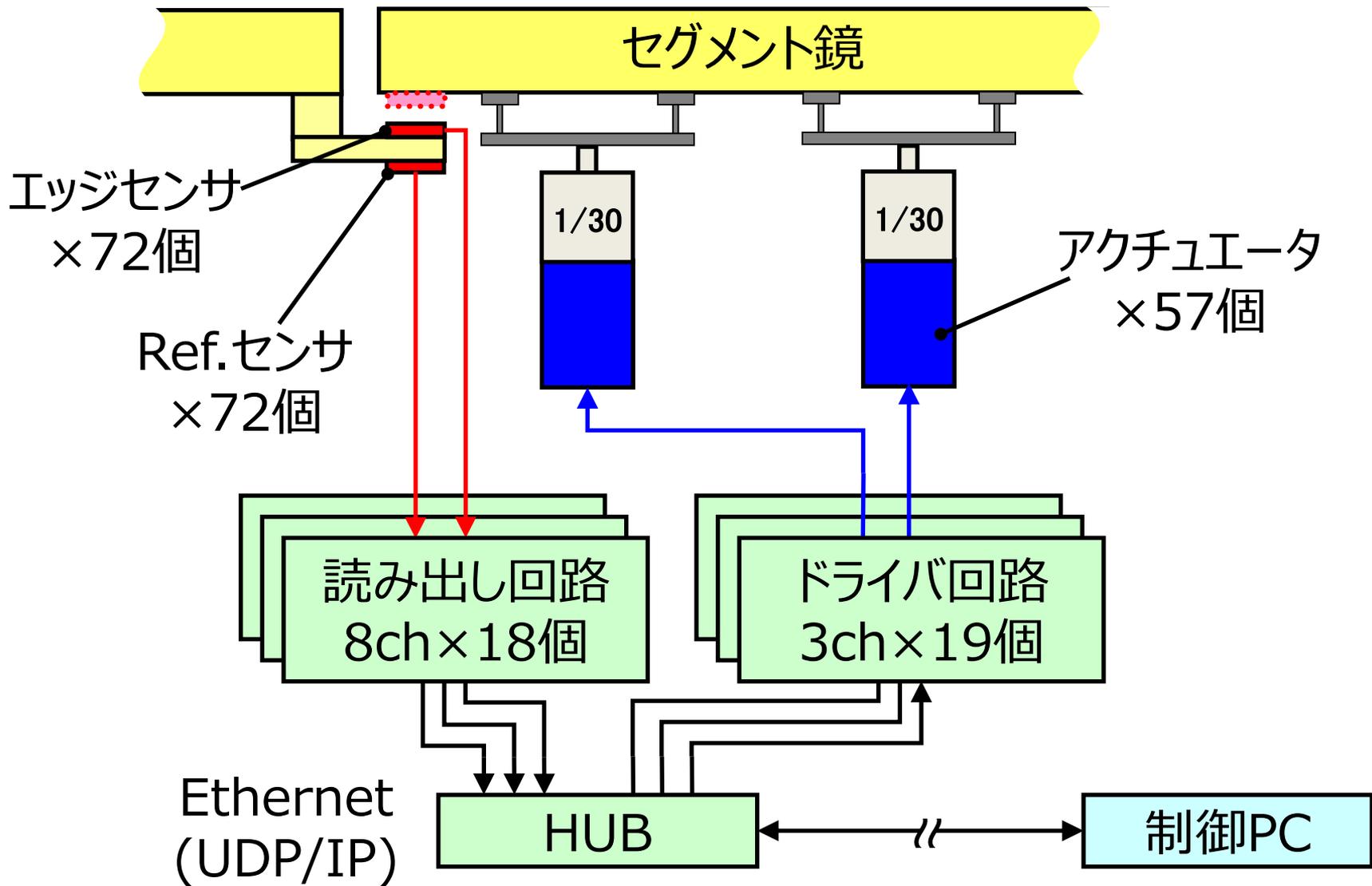
大きさ	: 対角~1.2 m
重さ	: 約70 kg
設置精度	: rms $\leq$ 30 nm

## III外乱

架台の重力変形・熱変形	: $\sim 100 \mu\text{m}$
風圧	: 300 nm @ 1 Hz
	8 nm @ 10 Hz



# 制御システムの構成



## I非干渉化行列

- ・導出（18枚）
- ・誤差伝播の評価（18枚）

## Iアクチュエータの伝達関数

- ・特性の測定

## I支持構造の伝達関数

- ・機械設計  
（内周リング・内周・外周）
- ・特性（静的・動的）の測定

## Iセンサモデル

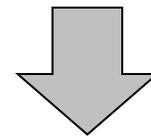
- ・特性の測定

## I制御システムモデル構築

- ・制御ソフトの作成

## I制御・通信システムの入手

- ・制御用計算機
- ・アクチュエータドライバ
- ・センサ読出し回路



I実機（or 単純化モデル）で動作検証

## アクチュエータ

ステッピングモータ + 樹脂潤滑の送りねじ

ストローク : 30 mm

分解能 : 3  $\mu\text{m}$ /フルステップ

## 減速機

弾性変形を使ったテコで1/30に減速

ストローク : 1.0 mm

分解能 : 100 nm/フルステップ

### 課題

アクチュエータの推力と分解能が足りない。

1/30出力



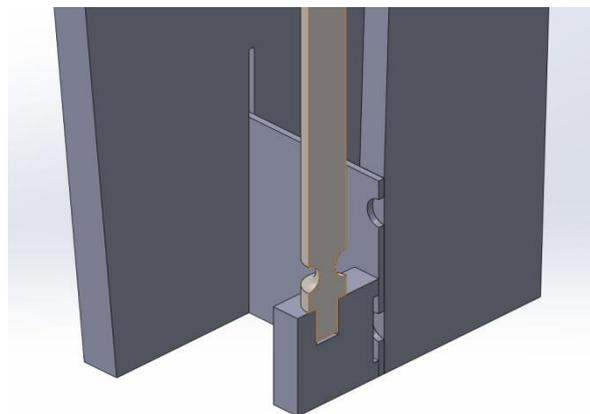
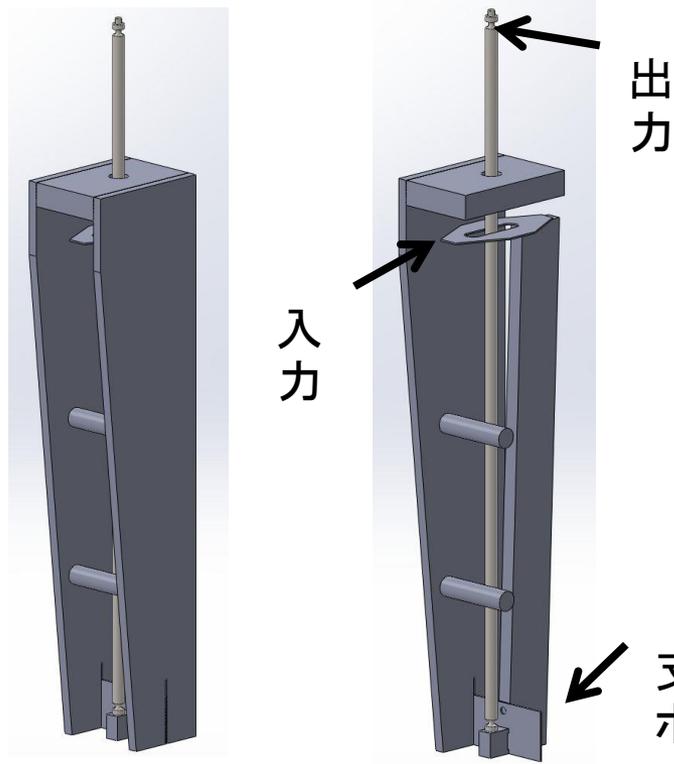


# 減速器

分解能100nm  
推力7kgw

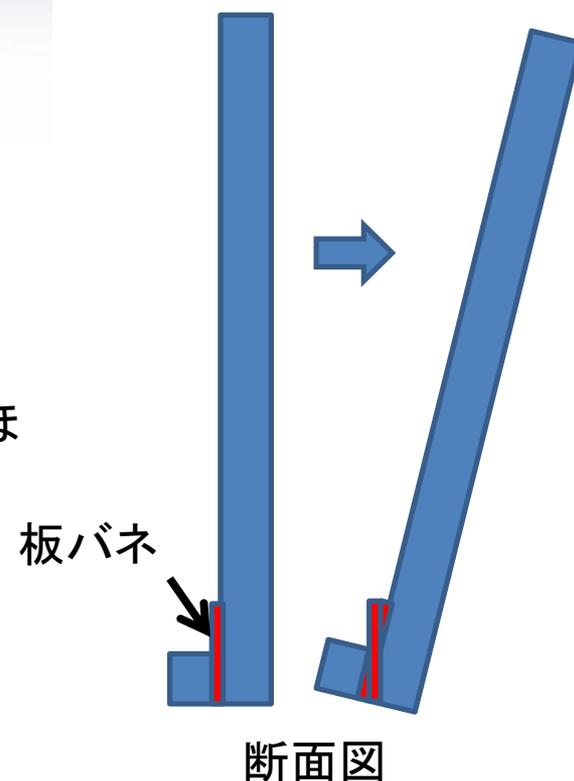
10 nm以上の分解能と50kgf以上の  
の推力が要求される。

減速比(テコ比) 30



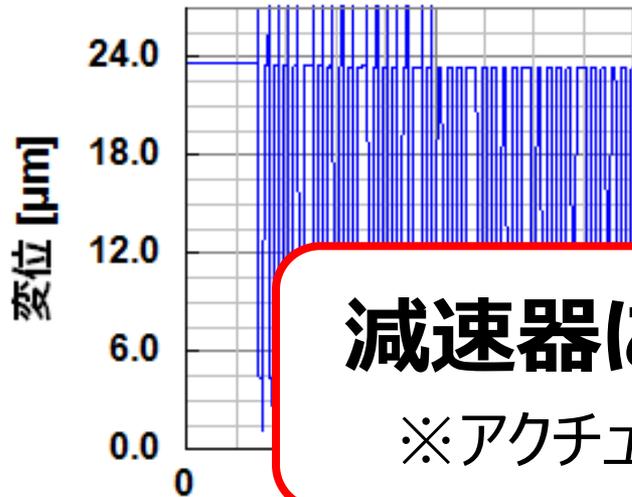
支点はただの板

- ねじれ中心は板の中心
- 中心は完全に不動
- z方向には硬い
- y方向の強度は出力にほとんど効かない
- 低ストレス
- 低コスト



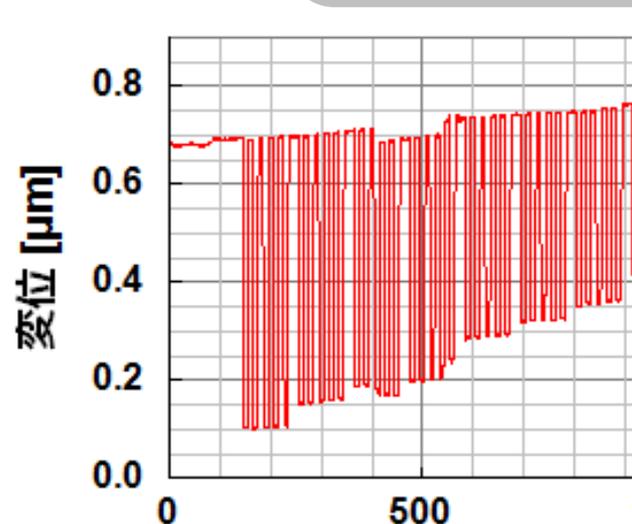
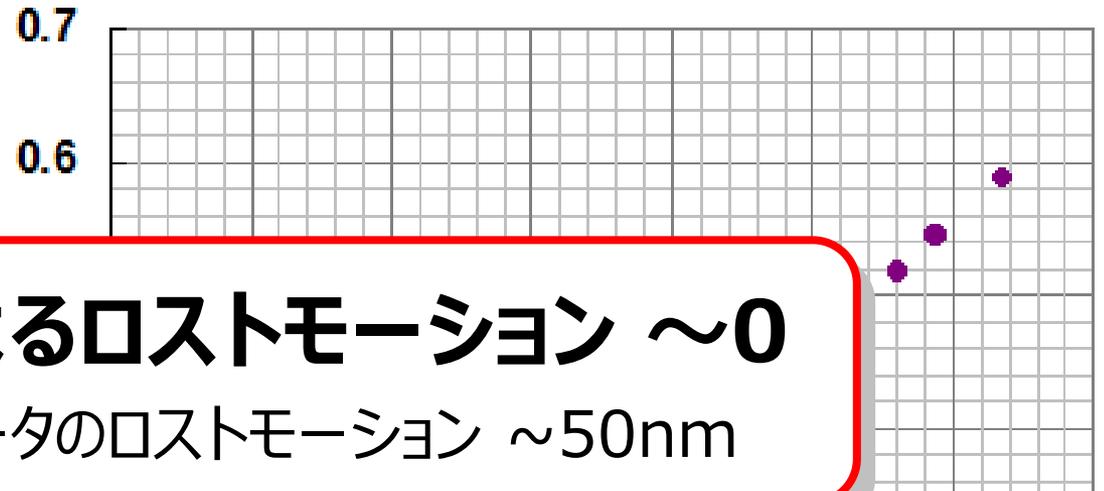
# 減速器の静的特性

## I 振幅 $20\mu\text{m}$ → $1\mu\text{m}$ の矩形波で駆動

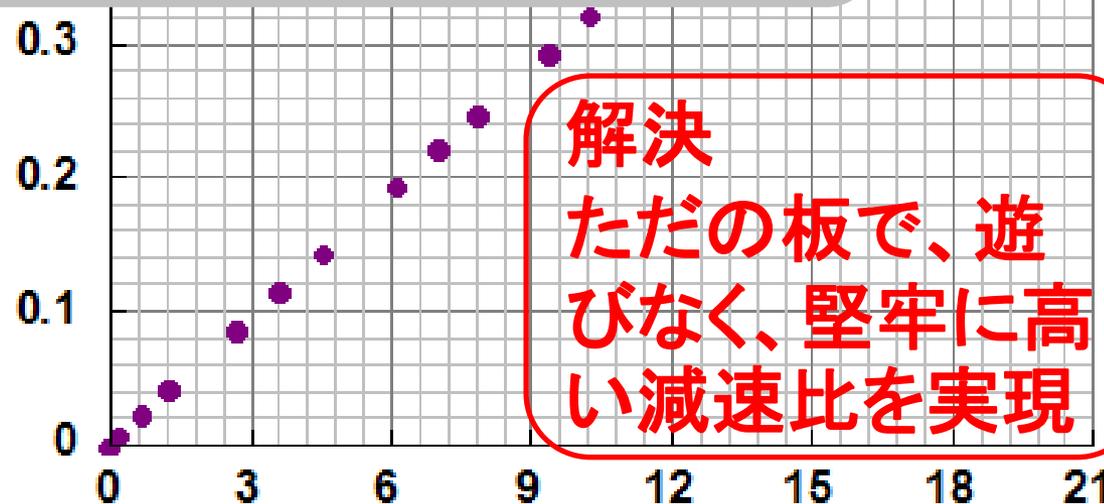


**減速器によるロストモーション  $\sim 0$**

※アクチュエータのロストモーション  $\sim 50\text{nm}$



1/30 減速比



**解決**

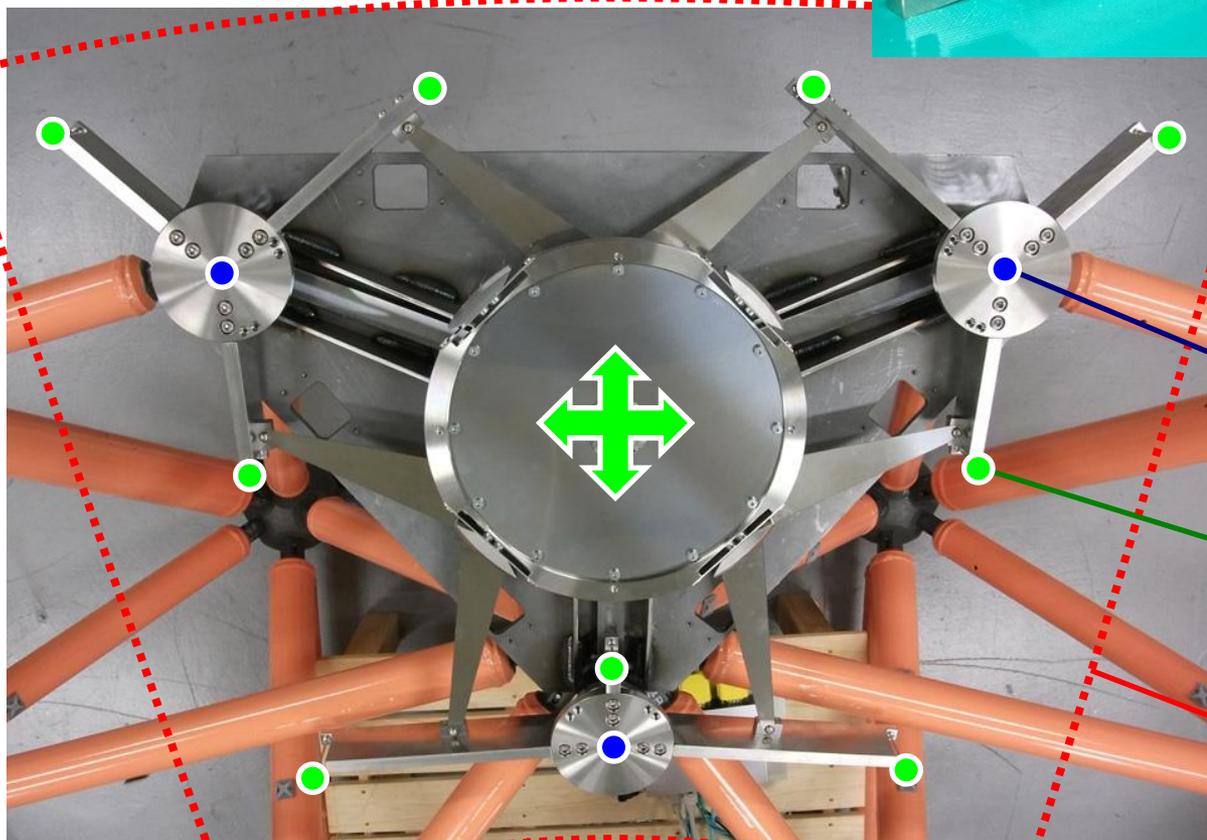
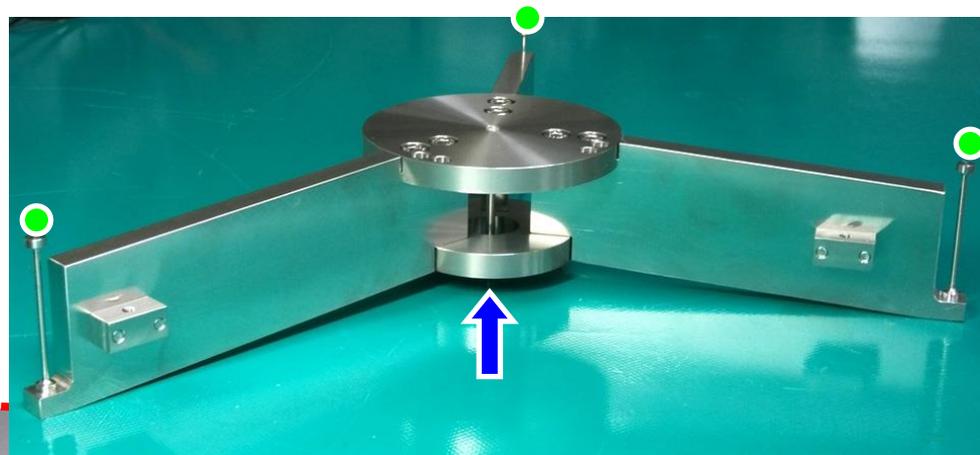
**ただの板で、遊びなく、堅牢に高い減速比を実現**

アクチュエータ振幅 [ $\mu\text{m}$ ]

# 鏡面支持構造

ホイップルツリー : 9点

ラテラル支持



駆動点

支持点

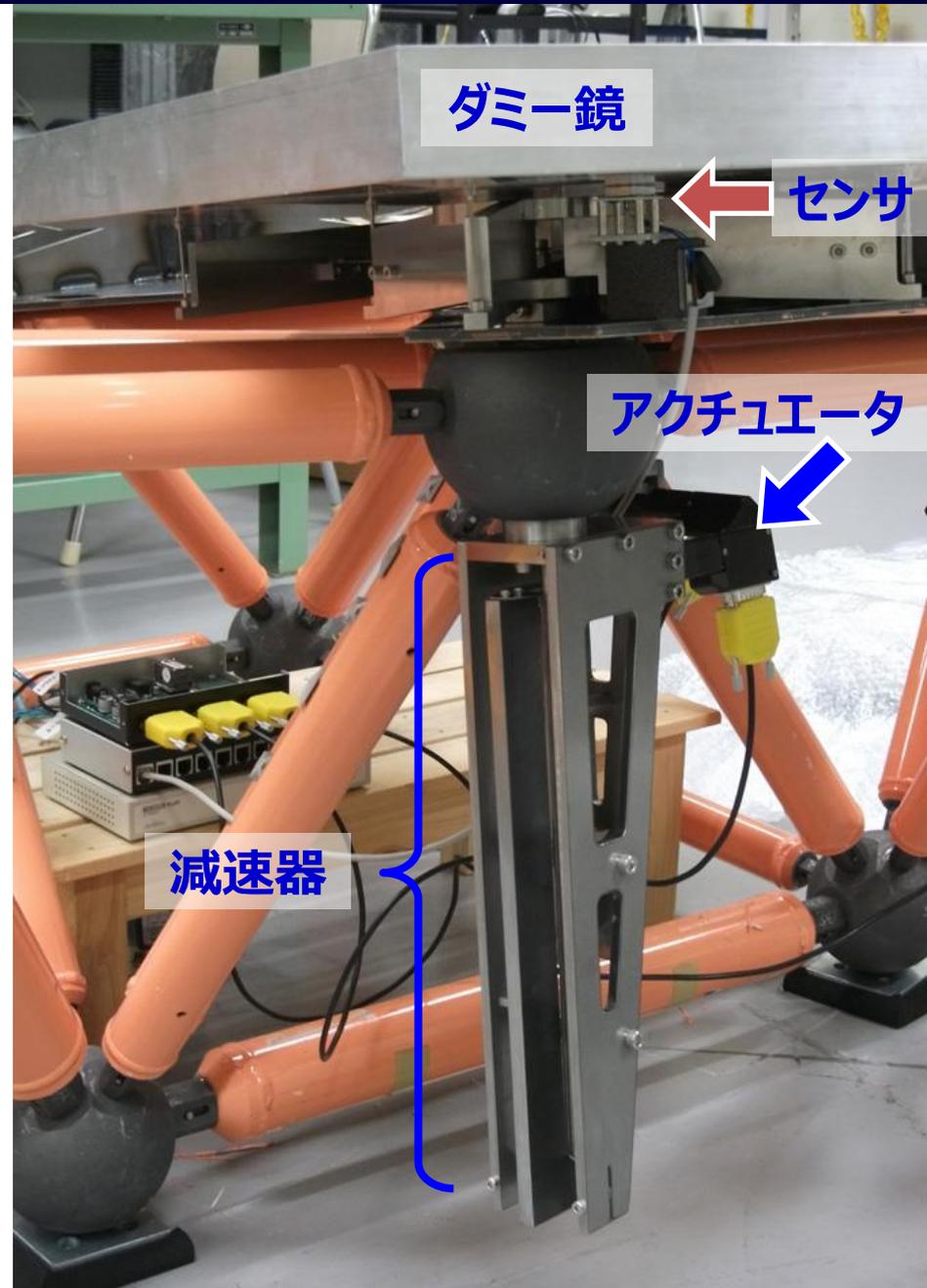
分割鏡外形

## I 実験機材 (実機と同等)

- アルミ製ダミーセグメント
- ホイップルツリー
- 1/30減速器
- Zaberリニアアクチュエータ

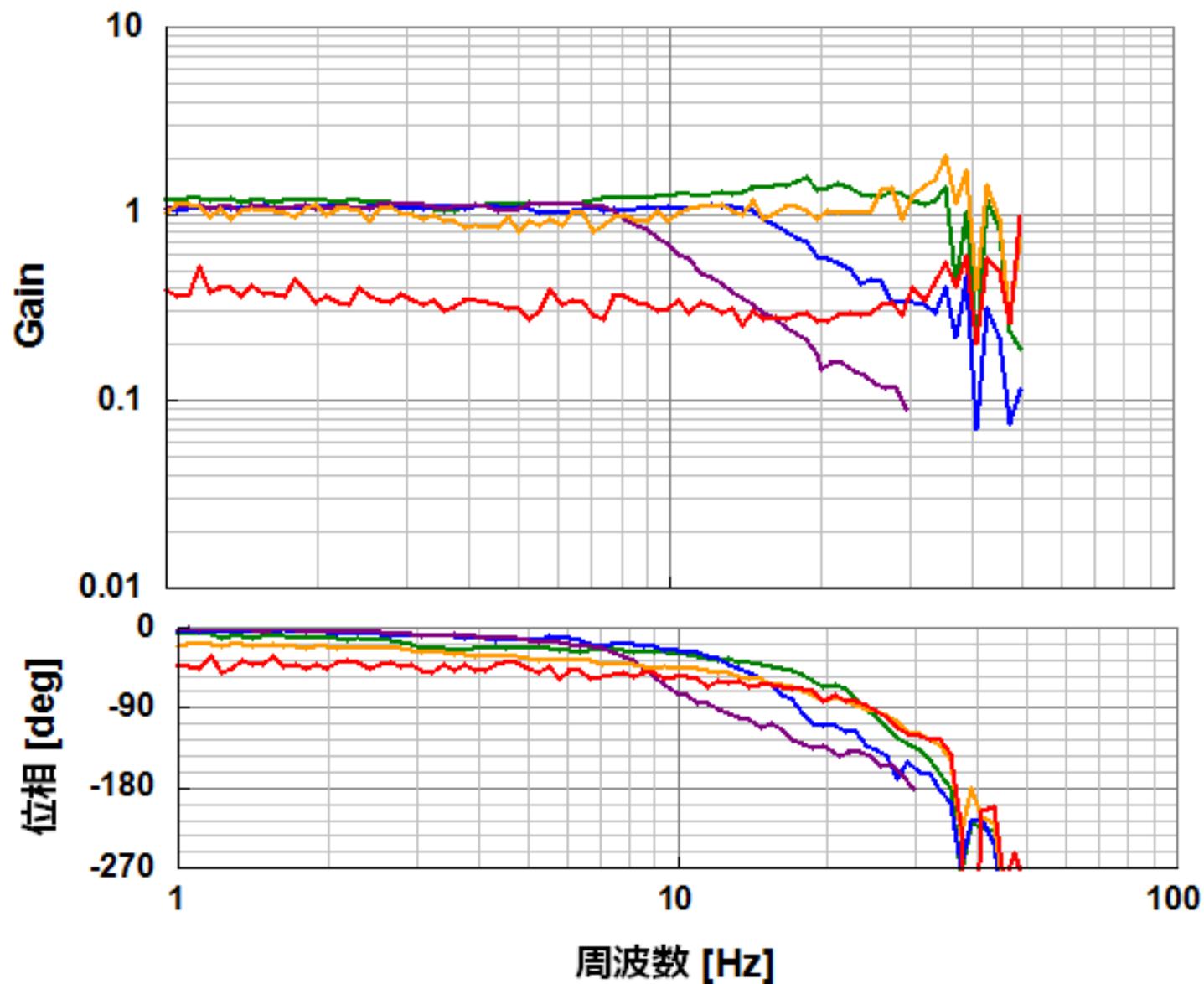
## I 測定点

- 減速器の出力軸付近



# 開ループでの特性

## I 周波数 1~50Hz の正弦波でスキャン



## 実験機材は同じ

## フィードバック条件

- 制御量：位置
- 操作量：速度

偏差に比例した速度指令値

→ **積分制御** に相当

- 周期：1/200秒



# 小さな外乱に対する応答

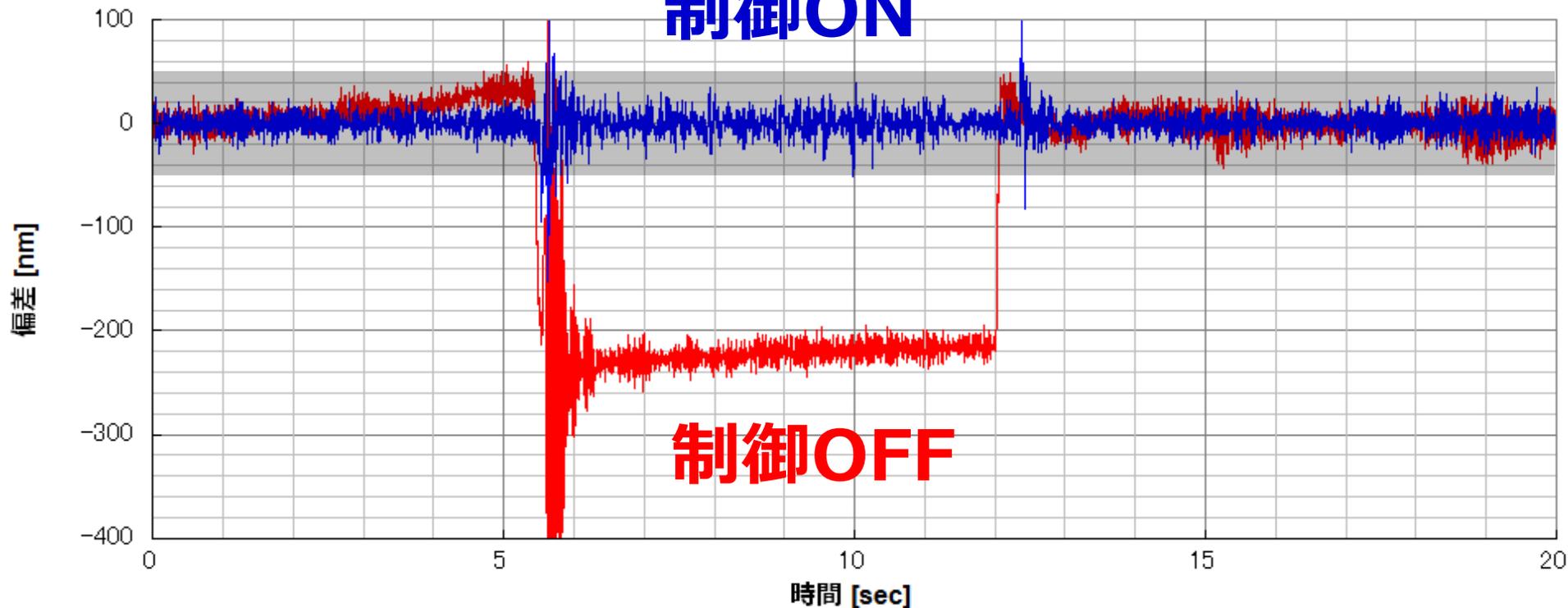
■ 重さ90gwのアルミ片を鏡面上に置く → 退ける

- 風の影響 : 60gf @1Hz  
(屋外での風速 10m/s)



制御ON

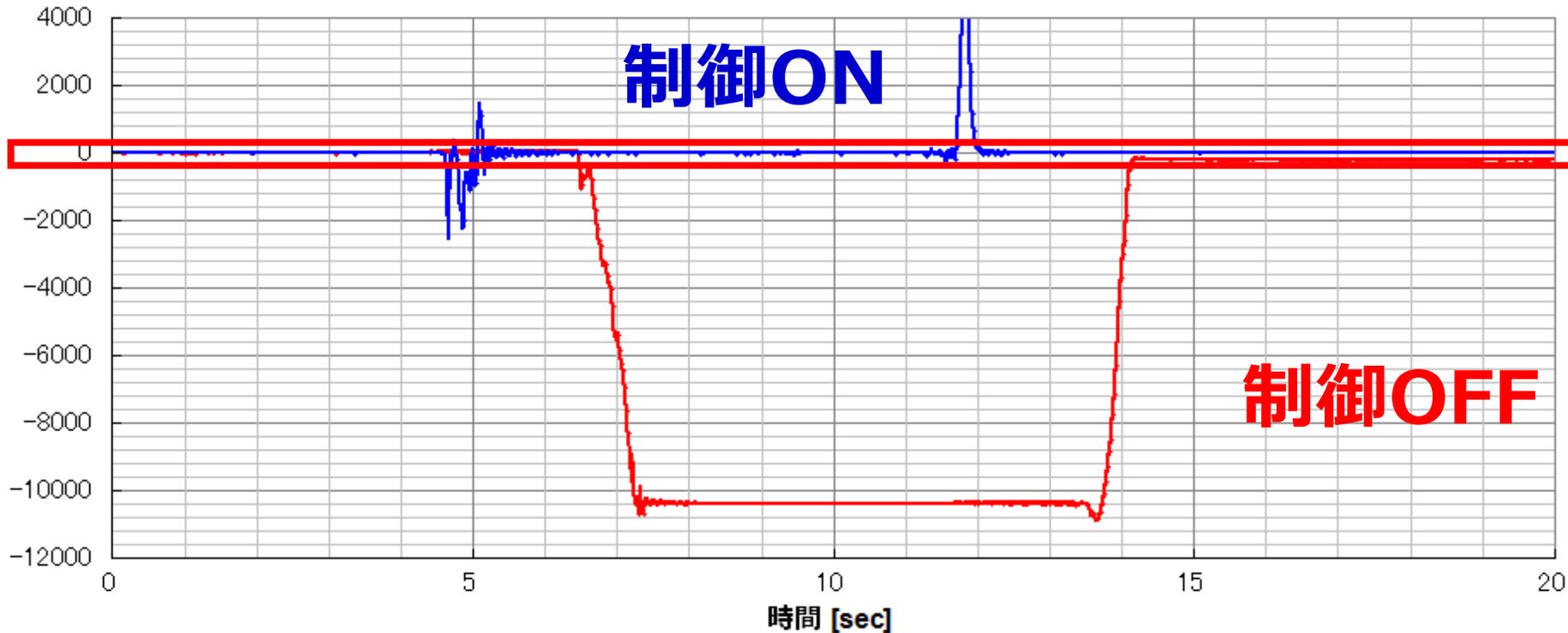
制御OFF



# 大きな外乱に対する応答

重さ4.4kgwの鉄球を鏡面上に置く → 退ける

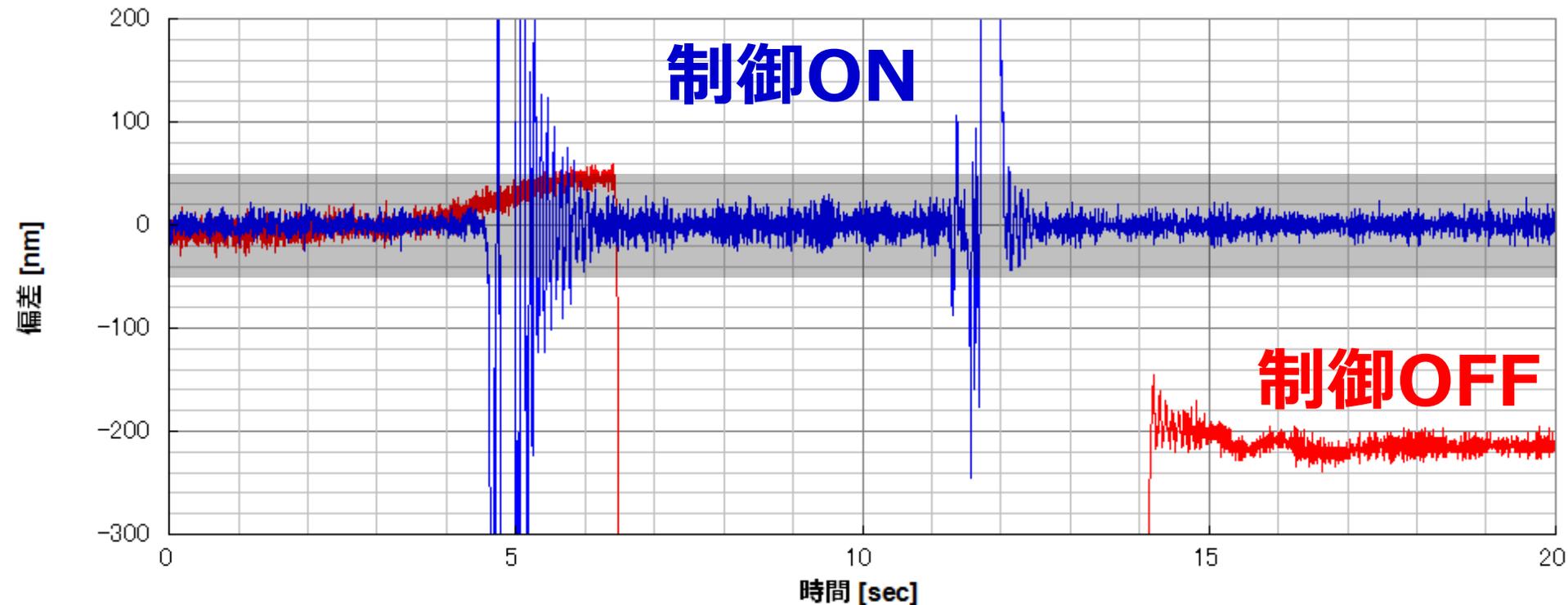
- EL.54°→90°の重力変化



# 大きな外乱に対する応答

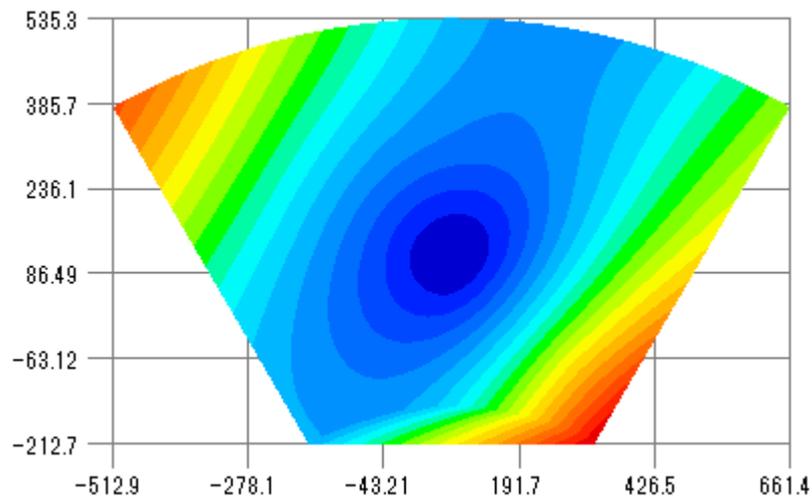
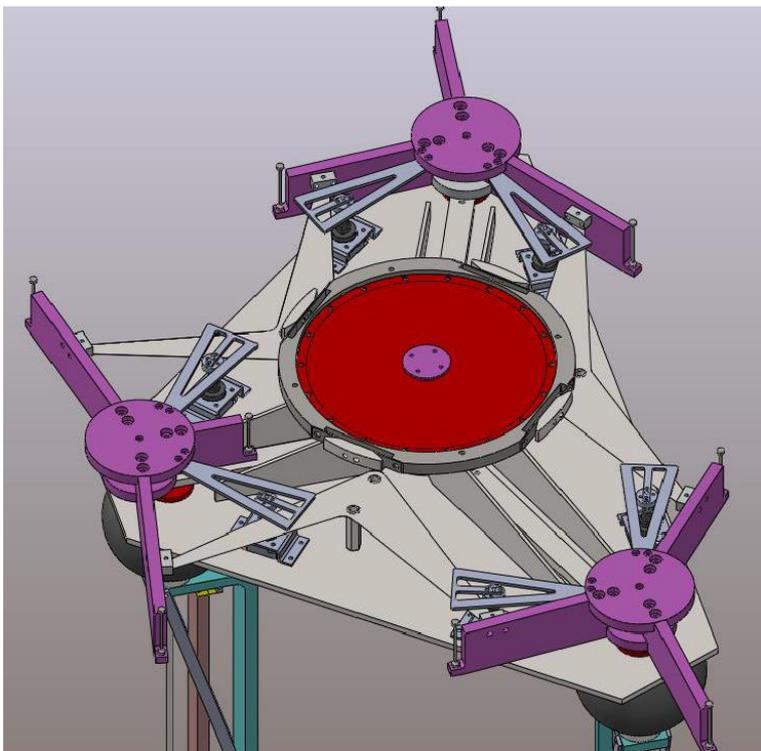
重さ4.4kgwの鉄球を鏡面上に置く → 退ける

- 非現実的な負荷変動

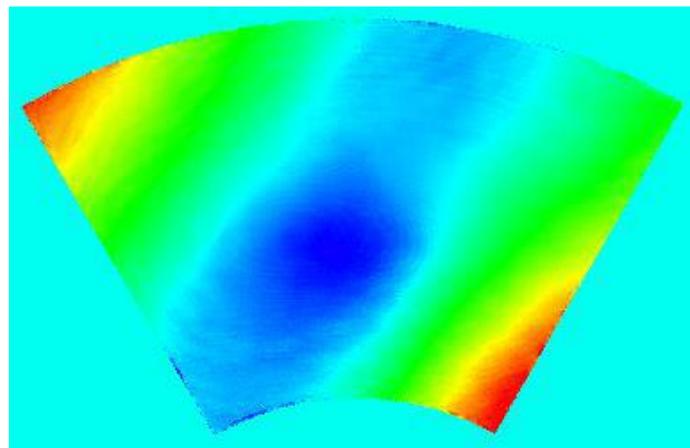


# 主鏡支持機構

## Warping Harness (板バネによるトルク)

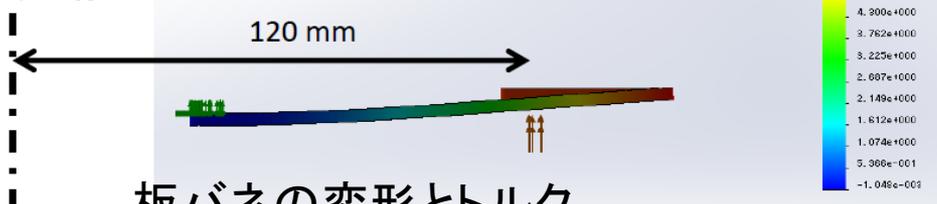


FEMでの予想値



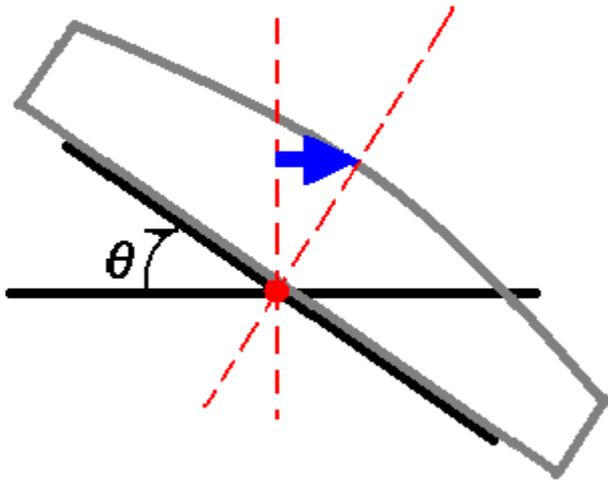
動作結果(干渉計での計測)

ツリー中心線

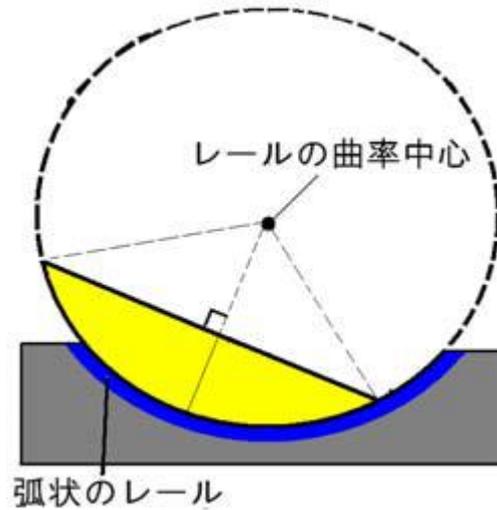


板バネの変形とトルク

# 副鏡支持機構



裏面からの駆動  
頂点が移動する



ゴニオ式  
2軸が困難

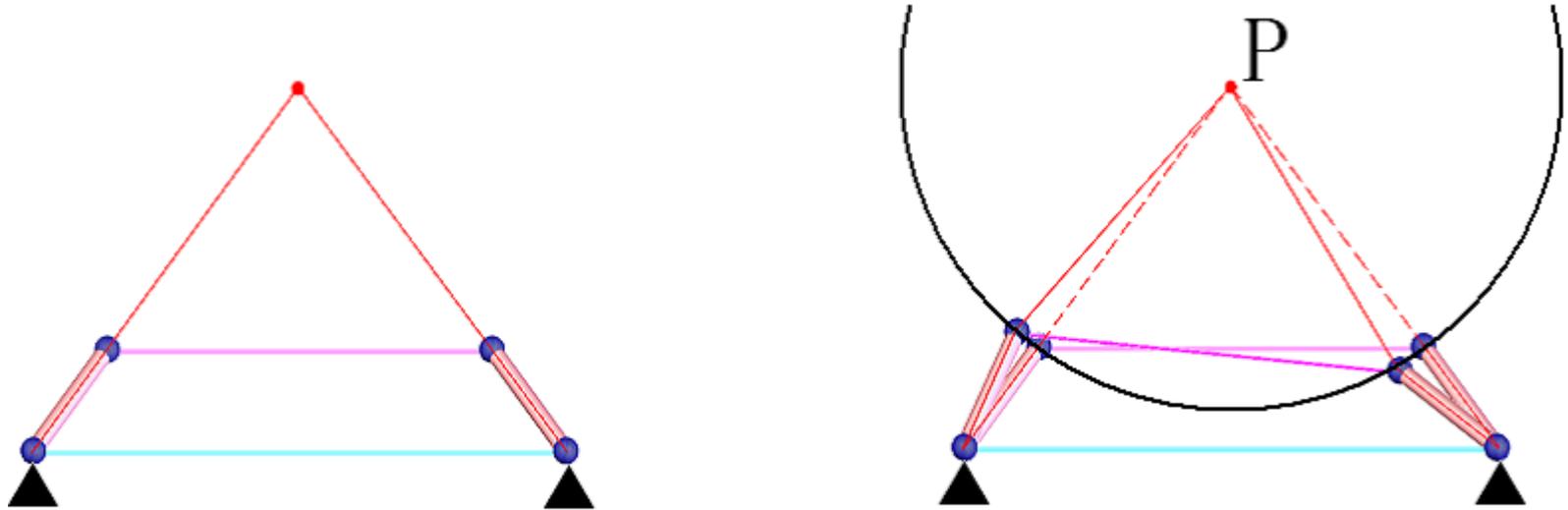


Hexa-Pod  
(PIのHPより)  
高価

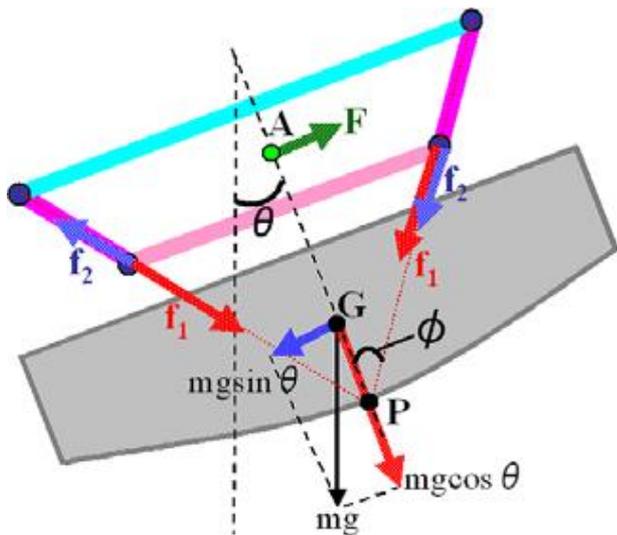
**課題**

**廉価で単純で頂点を  
不動にしたい**

# 副鏡支持機構



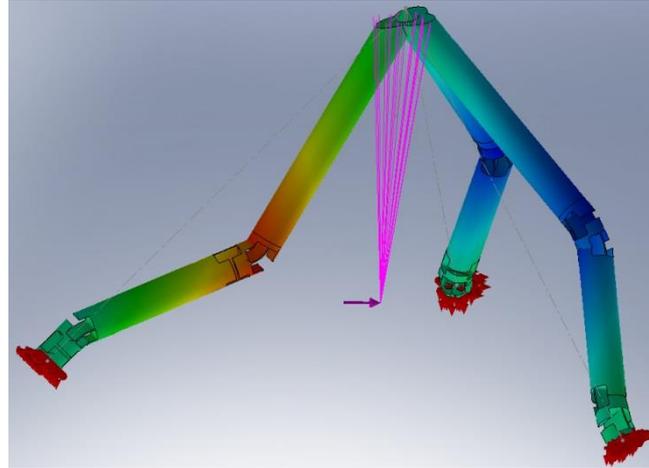
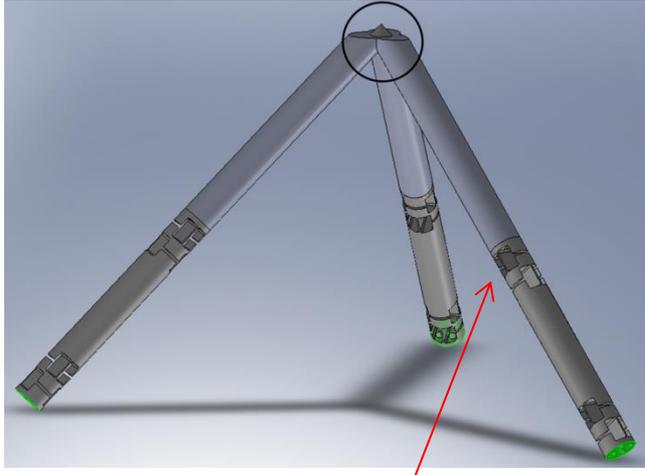
リンク機構を用いることで、ロッドの仮想交点に不動点ができる



鏡の荷重をリンクロッドが担うため、アクチュエータはほぼ副鏡を回転させるだけの小さな推力を発生するだけでいい。

この頂点の動きを確認

# 副鏡支持機構



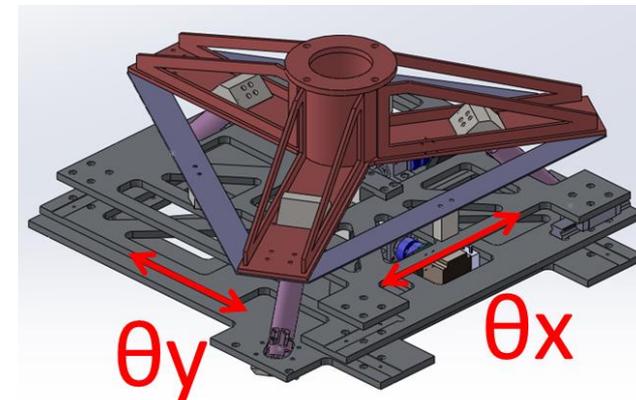
**解決**  
3本の棒で準不  
動点を実現

ジンバルのような弾性関節  
関節より上位は完全剛体

FEMによる解析結果

1°傾斜させた際の副鏡頂点のずれ(um)

	dx	dy	dz
$\theta_x$	0.064	1.1	0.045
$\theta_y$	0.77	-0.033	-0.030



# **LIGHTWEIGHT STRUCTURE**

# 軽量な構造

- 突発天体のための高速駆動
  - 軽量で固い構造
    - 巨大な円弧状の高度軸
    - トラス構造
    - ホモロガス変形と遺伝的アルゴリズム



鏡筒の重量は従来の1/5に

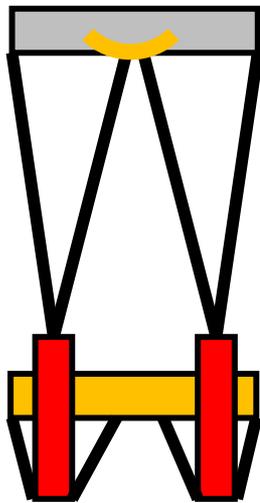


# 円弧状の高度軸

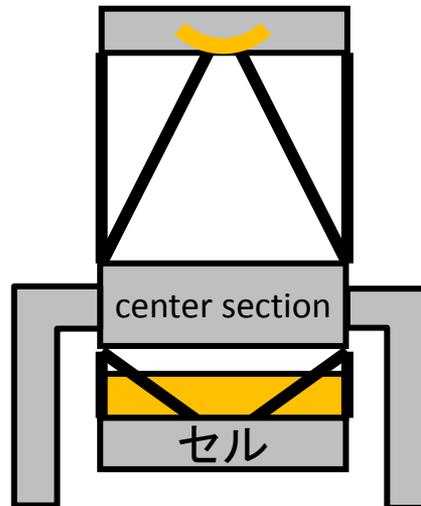
主鏡がこの構造により直接真下から支えられるために、変形しにくく、より軽量で安定に支えられる。

力学的に効率の良い構造

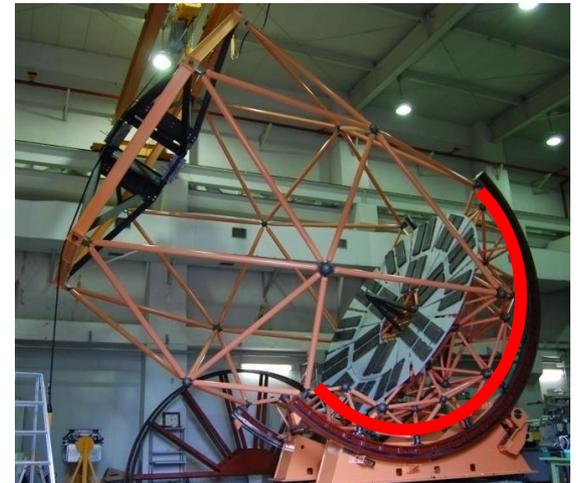
従来型では、主鏡は周辺で支えられる弱い主鏡セルによって支えられる。



本構造

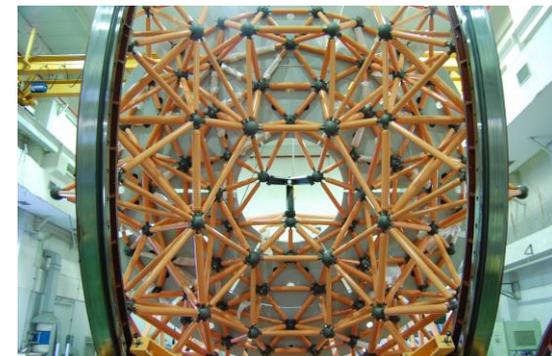


従来の構造



# トラス構造

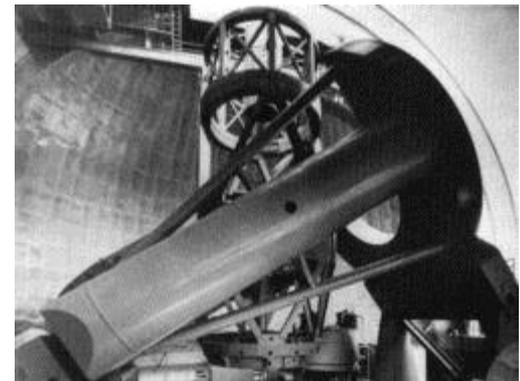
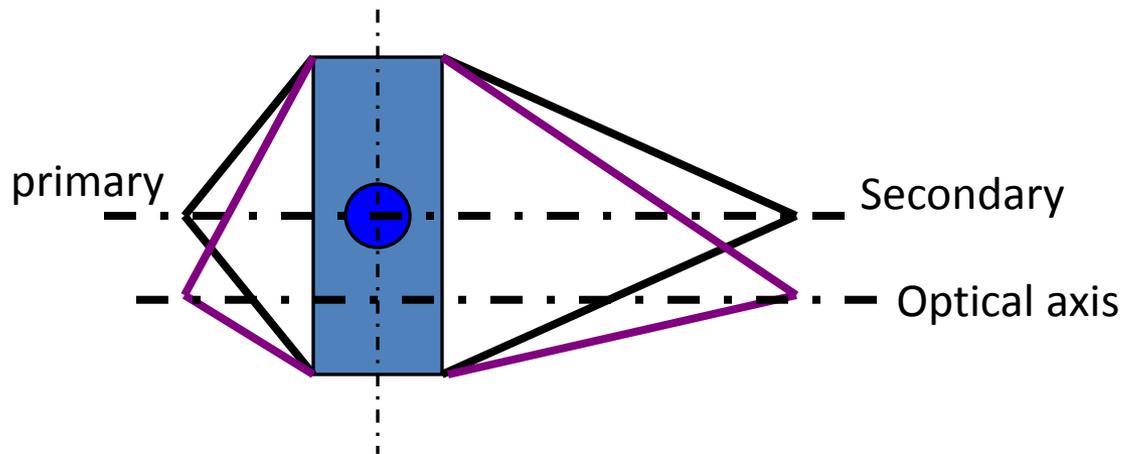
- 引張圧縮力のみ(曲げモーメントがはたらかない)で効率的な構造
- 利点
  - 軽くて強い(電波望遠鏡では良く使われる)
  - 断面が小さく風の抵抗を受けにくい
  - 熱容量が小さい→陽炎を起こしにくい
  - 表面積が大きく、熱慣性が小さい



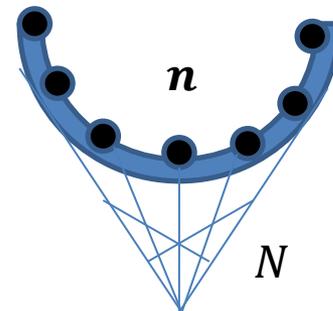
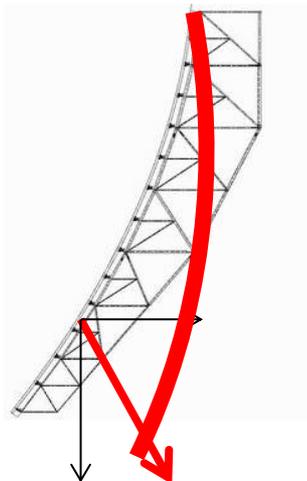
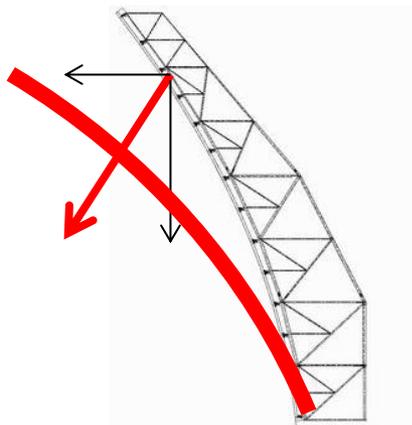
主鏡の裏面構造

# 最適化

- ホモログラス変形
  - 変形しても光学系の関係を維持した変形を目指す
  - 古くはヘール5m望遠鏡でセルリエトラスが最初。
    - 主鏡と副鏡の位置関係を維持



# 電波望遠鏡でのホモロガス



重力変形下でも放物面を維持

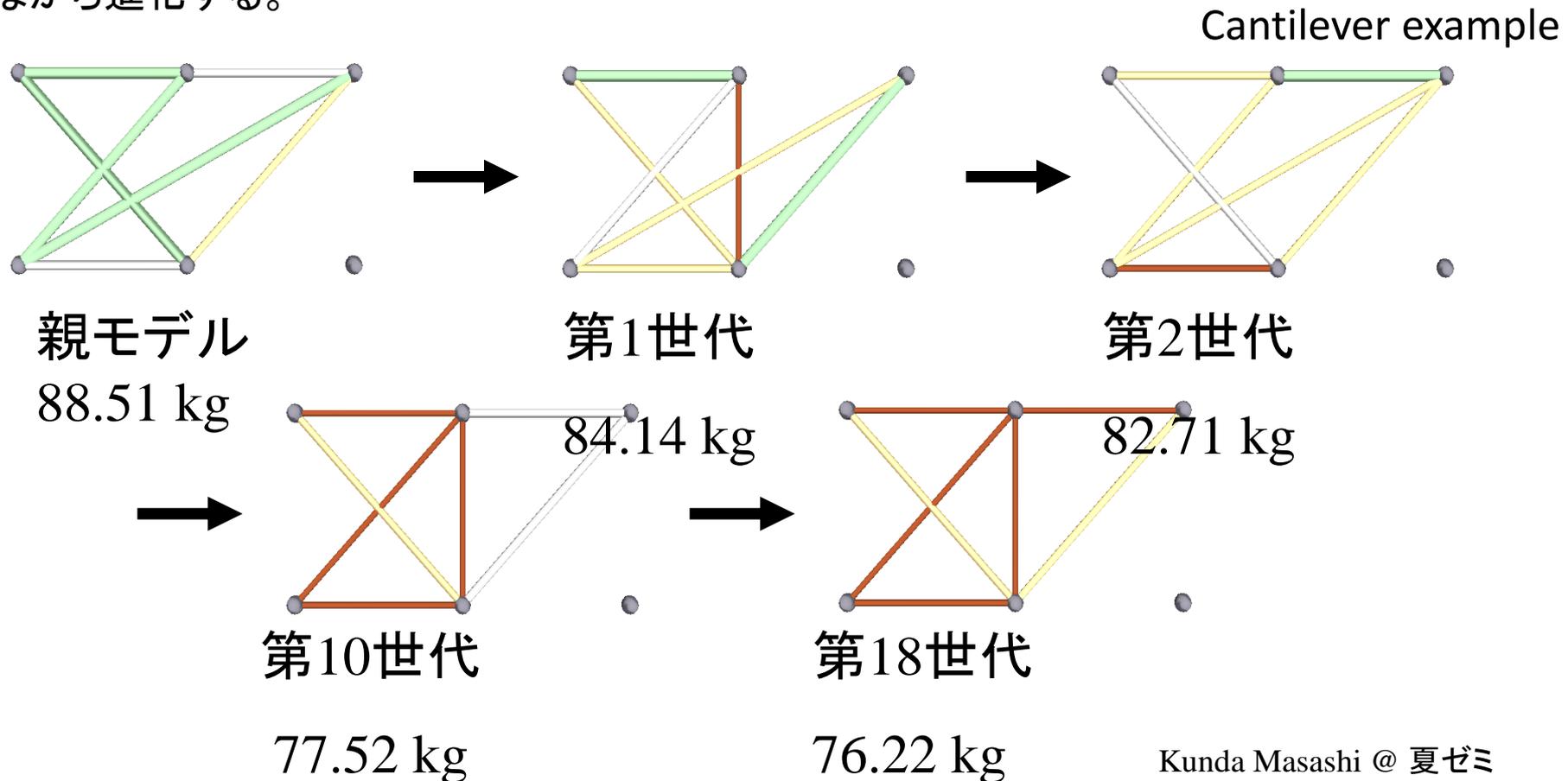
鏡面上の $n$ 点を選択。この $n$ 点が放物を維持するように構造を設計  
設計変数 $N$ が以下の条件を満たせば設計できるはず。

設計変数

$$N > n$$

# 遺伝的アルゴリズムによる最適化

遺伝的アルゴリズムとは、最適化問題への数値解析手法のひとつ。相反する複数の目的から最良の解を探索する際に、モデルが生命のように選択、交叉、突然変異をしながら進化する。



# 遺伝的アルゴリズムによる最適化

ホモロガス性能の要求 (仰角. 88~20 度)

- M1用の節点変位 <math><0.1\text{ mm}</math>
- M2用の節点変位 <math><0.4\text{ mm}</math>
- M3用の節点変位 <math><0.05\text{ mm}</math>

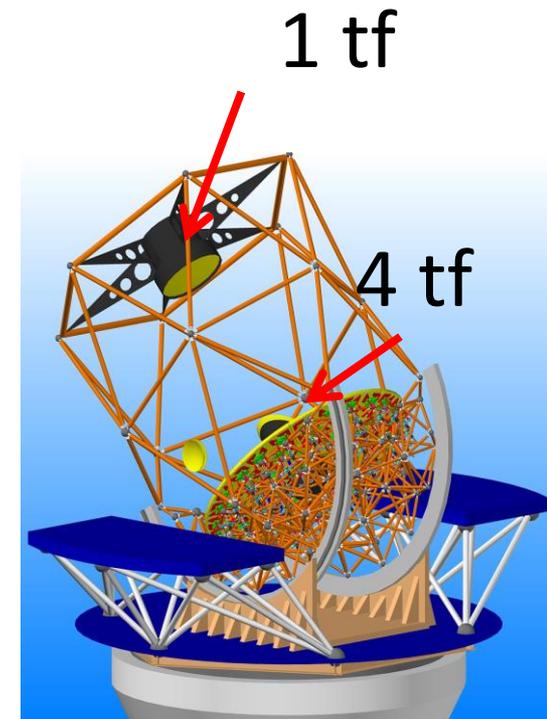
設計変数

- 接点の位置 (削除も含む)
- パイプの断面積 (削除も含む)

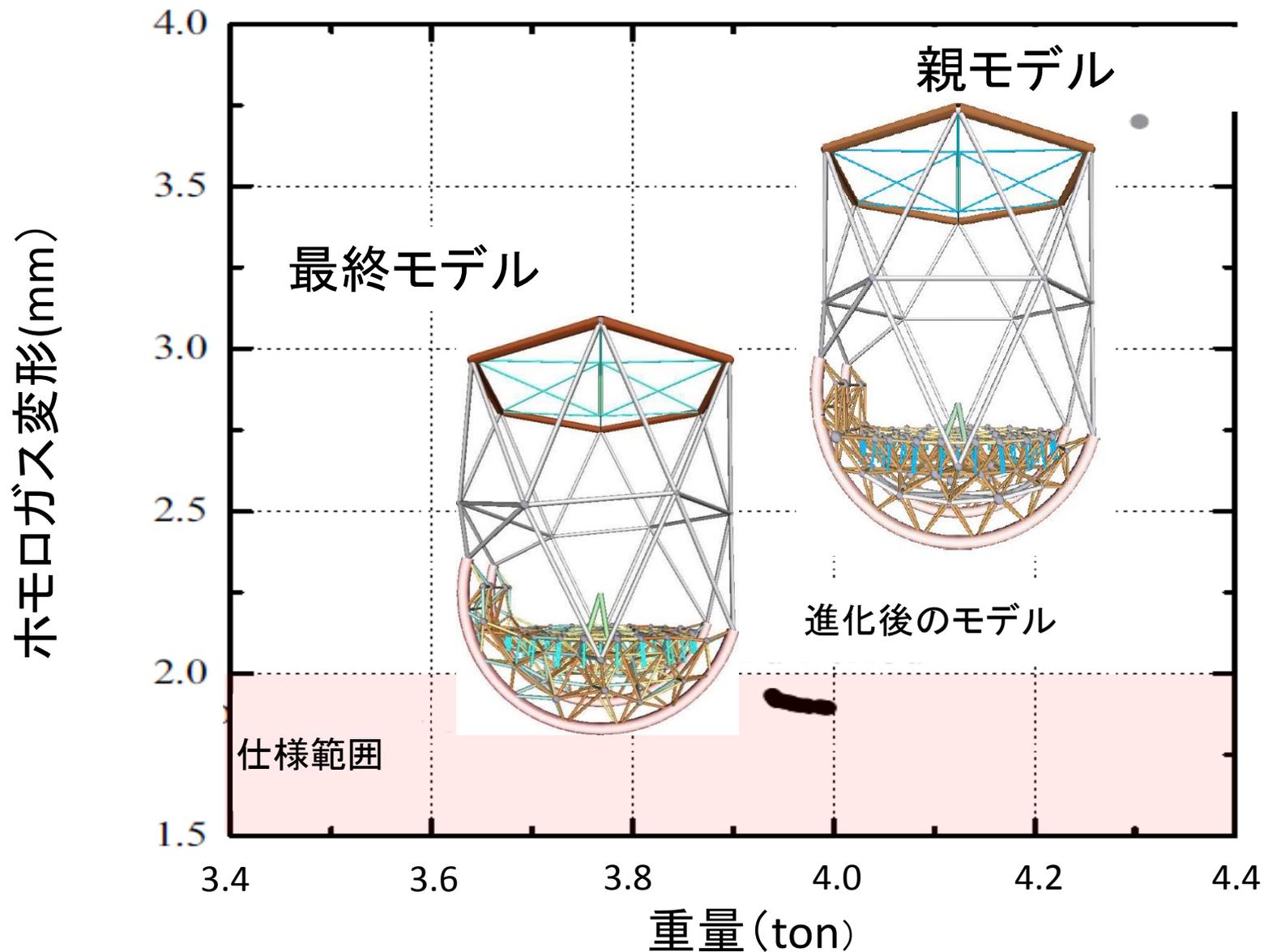
JISからの未選択

交叉レート: 0.8

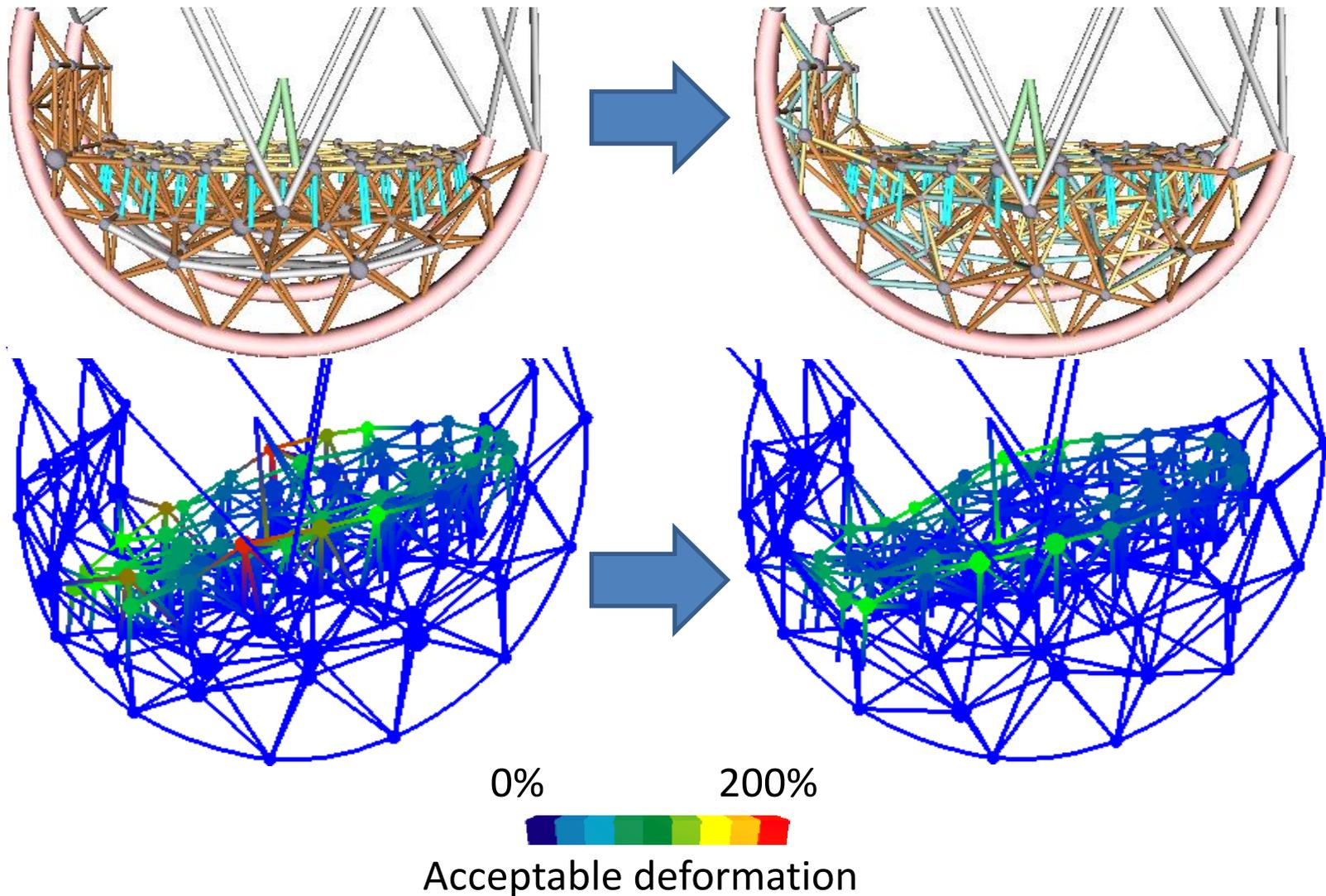
突然変異レート: 0.01



# 遺伝的アルゴリズムによる最適化



# 遺伝的アルゴリズムによる最適化



# 最後に・・・

## TMTとの比較

- 大きさ
  - 全く異なる。しかし鏡などの個々の大きさは同じ
- 主鏡の外形
  - 制御と機械の観点で六角に比べて花びら型のメリットは極めて小さい
- 主鏡制御
  - 力制御はインテリジェントだが、このサイズなら位置制御で十分
- シーイング
  - 1.5倍ほど異なるので、鏡に関する仕様は若干ゆるい
- 環境
  - とくに気温変化の幅が大きい。センサやシステムのヒステリシスに関する要求は極めて厳しい

# 参考資料

## 以下をご覧ください。

<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/psmt/kentoukai.html>

Kyoto  
University  
3.8m Telescope

京都大学3.8m望遠鏡

 サイエンス  
SCIENCE

 寄付  
DONATION

 メンバーブログ  
BLOG

### 京大3.8M望遠鏡計画

〒606-8502  
京都市左京区北白川追分町  
京都大学大学院理学研究科  
宇宙物理学教室  
TEL 075-753-3890

〒607-8471  
京都市山科区北花山大峰町  
京都大学大学院理学研究科附属  
花山天文台

トップページ  
TOP PAGE

計画について  
ABOUT  
PROJECT

お知らせ  
NEWS

観測所  
OBSERVATORY

ドキュメント  
DOCUMENTS

## ドキュメント DOCUMENTS

### 技術関連資料

技術検討会発表資料

第38回望遠鏡および観測装置会議 2015年10月3日(土) キャンパスプラザ京都 計測自動制御学会共催



[計画全体の進捗状況\(長田\)](#)  
[Keck台長のコメント\(栗田\)](#)  
[スーパーフレア\(野津\)](#)  
[高分散分光器\(岩室\)](#)  
[極限補償光学\(山本\)](#)  
[KOOLS\(松林\)](#)  
[ロボット研磨\(所・高橋\)](#)  
[ロボット干渉計\(栗田\)](#)  
[光学支持機構\(細野\)](#)  
[制御\(木野\)](#)

第37回技術検討会 2015年7月18日(土) キャンパスプラザ京都 計測自動制御学会共催

[補償光学\(山本\)](#)  
[面分光\(松林\)](#)  
[進捗状況\(長田\)](#)  
[ロボット研磨機開発\(所・高橋\)](#)

