

これまで心がけてきたこと

京都大学 栗田光樹夫
天文・天体物理若手夏の学校
東京大学
20230802

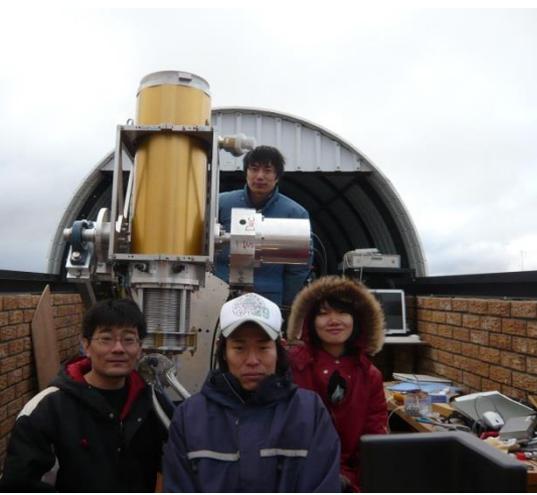
自己紹介 楽しむ、出会い

名古屋大学 Z研(佐藤研)

- 99年 B4 上松天体赤外線観測室
- 00年 M1 南アフリカ赤外線サーベイ望遠鏡(IRSF)
- 05年 D4-助手 超軽量望遠鏡
- 08年 南アフリカ冷却望遠鏡

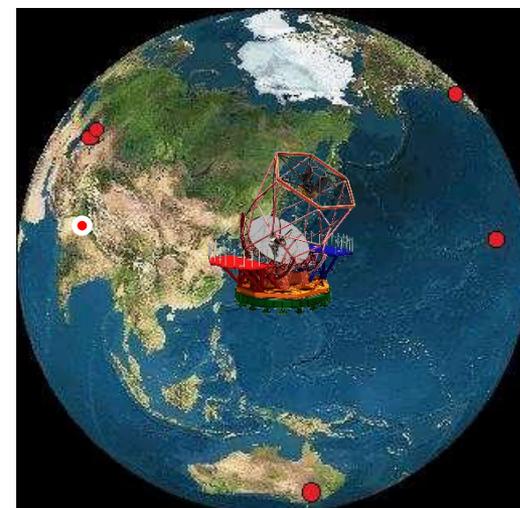
京都大学 宇宙物理学教室

- 18年 せいめい望遠鏡



せいめい

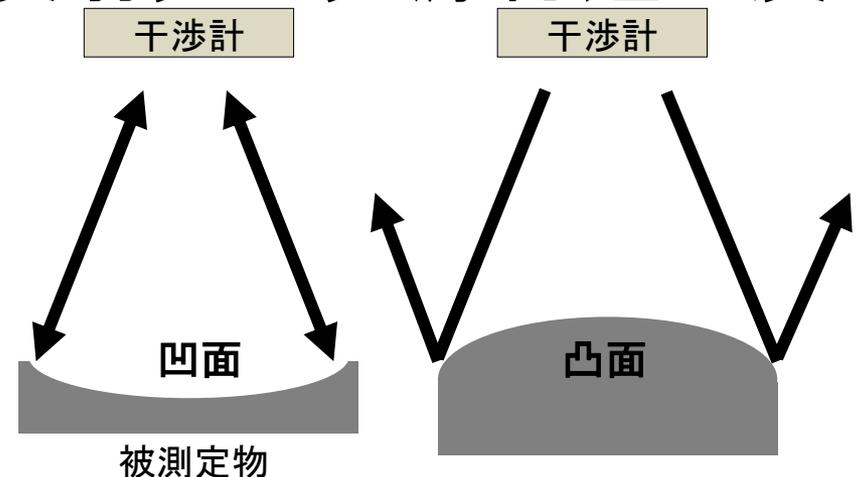
- 2018年度中の完成^{2014が目標だった}
- 岡山天体物理観測所
- 口径: 3.8m (東アジア最大)
- 鏡づくり (計測技術)
- 世界で2例目の分割式望遠鏡
- 軽量架台



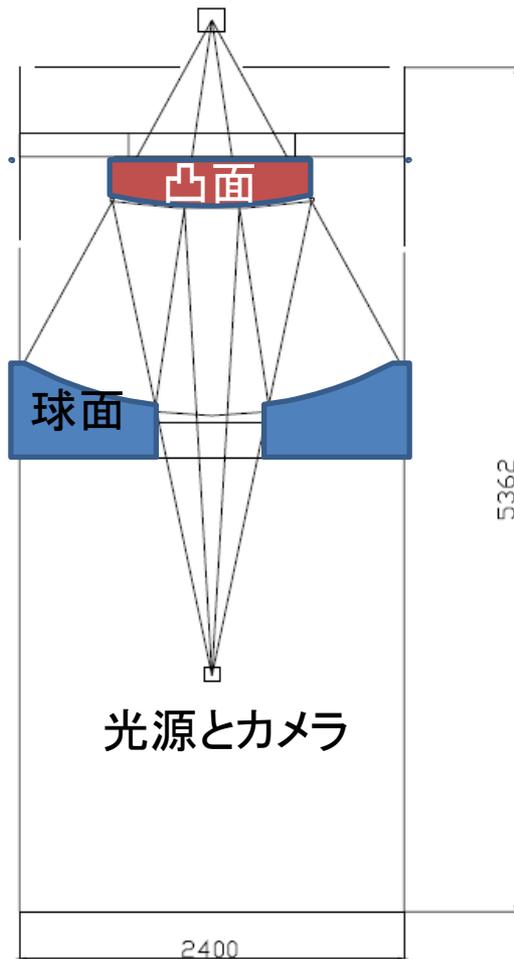
日本周辺の4m級以上の望遠鏡

干渉計の問題点

- 従来望遠鏡の鏡はすべて干渉計で計測された
- 干渉計は光源と干渉縞を得る検出器を被検面の曲率半径付近に置く必要がある
- しかし平面や凸面では反射光が光源付近に戻らないため困難



凸面の干渉計測の例



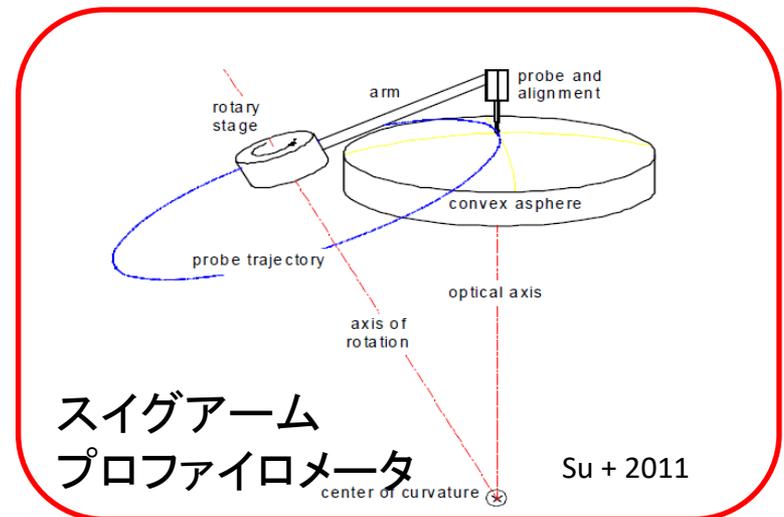
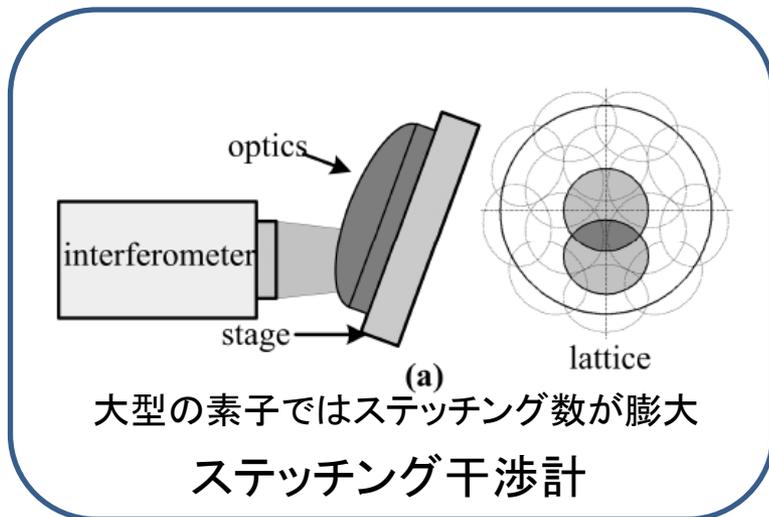
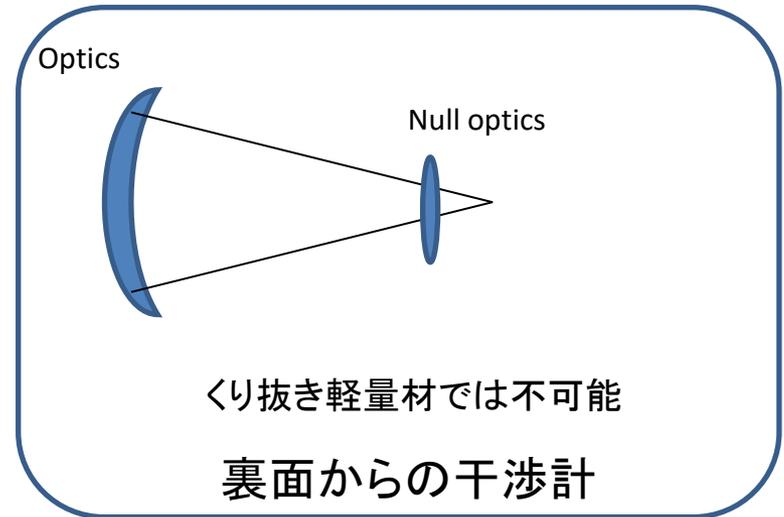
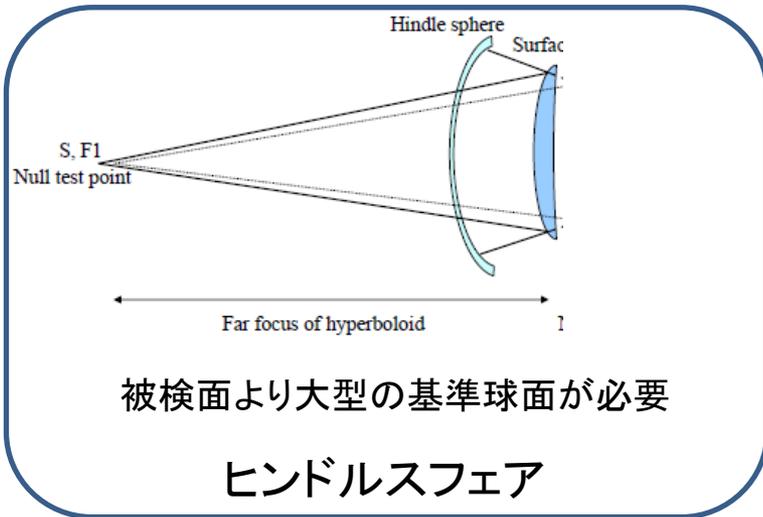
ヒンドル球
VISTA 4m望遠鏡の例



Figure 10: Machining of 2420 mm Hindle sphere ($R_0 = 2510$ mm).

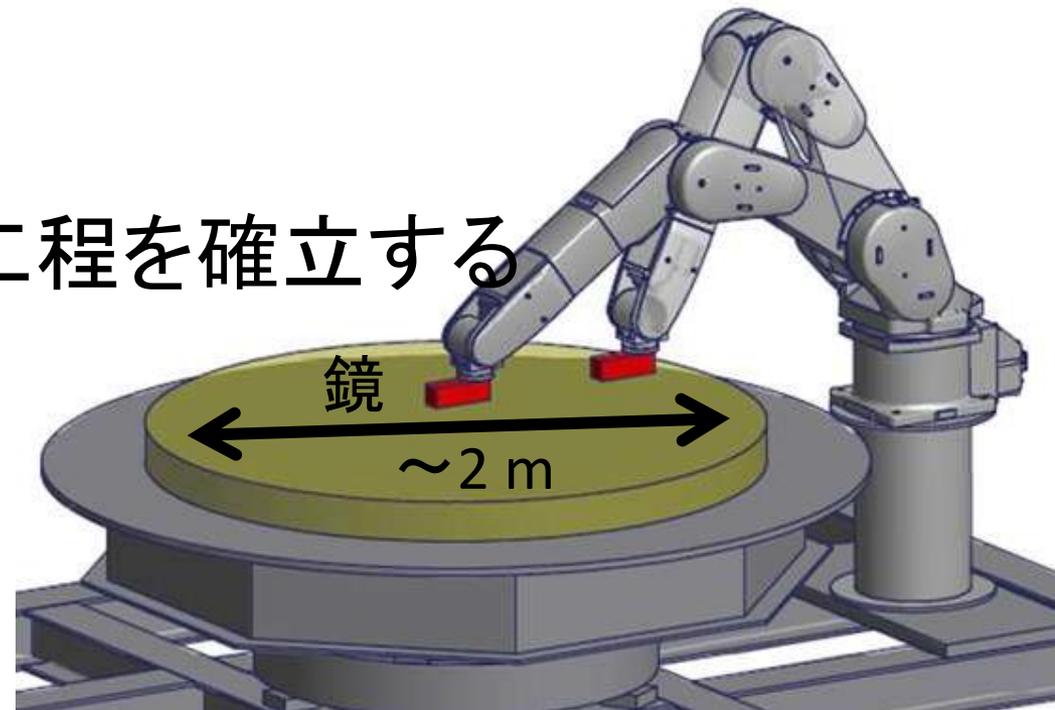
凸面鏡の数倍の大きさの球面鏡によるダブルパス干渉計
球面鏡及びセットアップが極めて大変

従来の計測方法



機械計測の開発のねらい

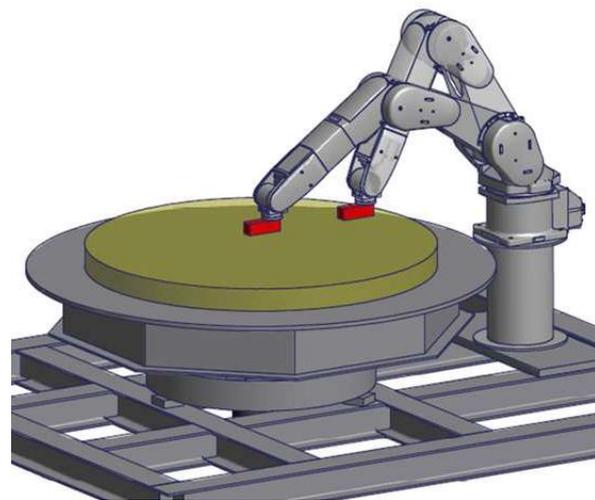
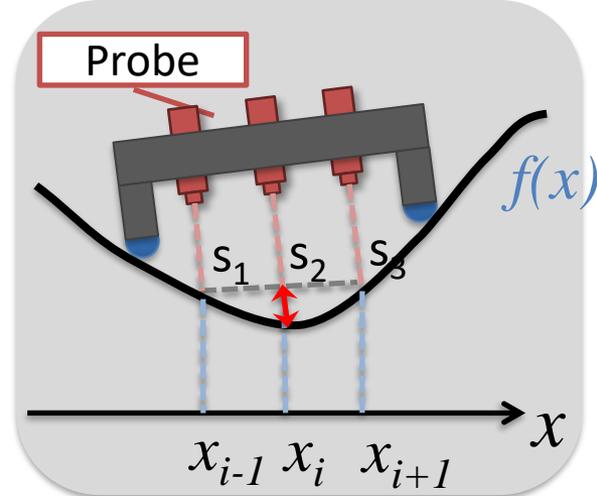
- ロボットアームのみで
- 研磨と
- 計測を
- 機上で行い、
- メートルクラスの
- 自由曲面の製作工程を確立する



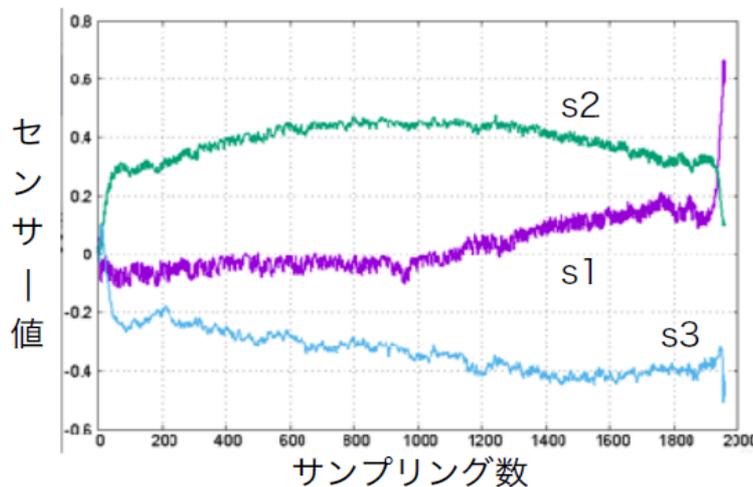
ひきずり3点法

3個のセンサでローカルな曲率を計測し、断面形状を得る

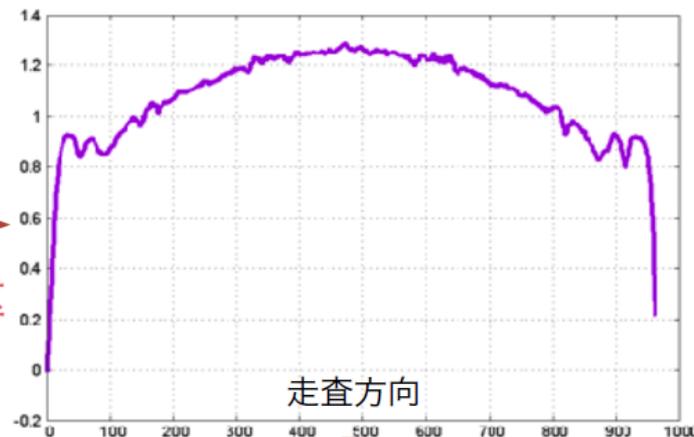
- 無基準で自由曲面を計測可能
 - ただし、曲率は不定
- オン・ザ・マシン計測
 - 効率的で安定なフィードバックシステム
- 耐環境性
 - 通常環境で可能
- 加工機を計測機に拡張可能
 - 計測範囲も無制限
- コンパクト
 - 干渉計のように曲率半径相当の空間は不要
- シンプル・廉価
 - 駆動部の誤差の影響を受けない
 - センサも廉価なもので対応可能



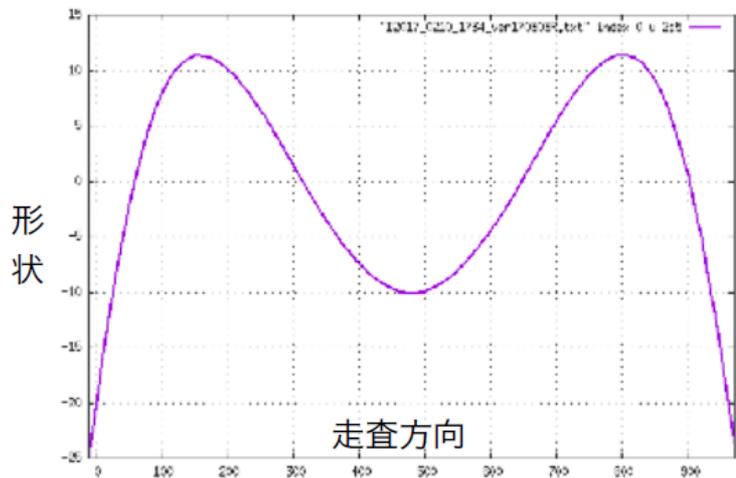
データ処理の流れ



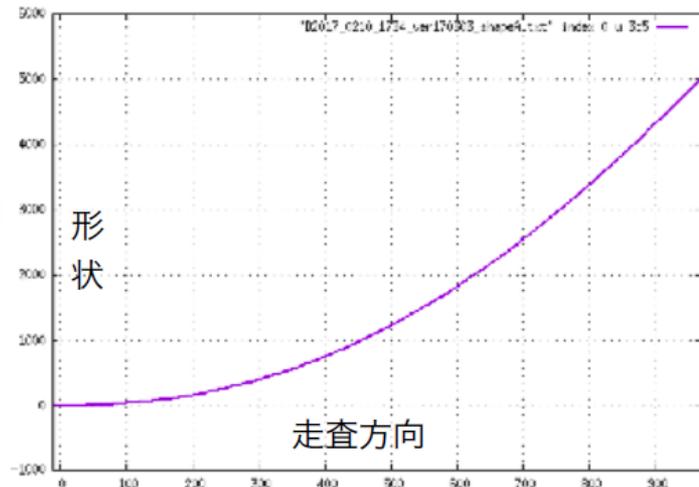
局所曲率
導出



外れ値除去後形状導出

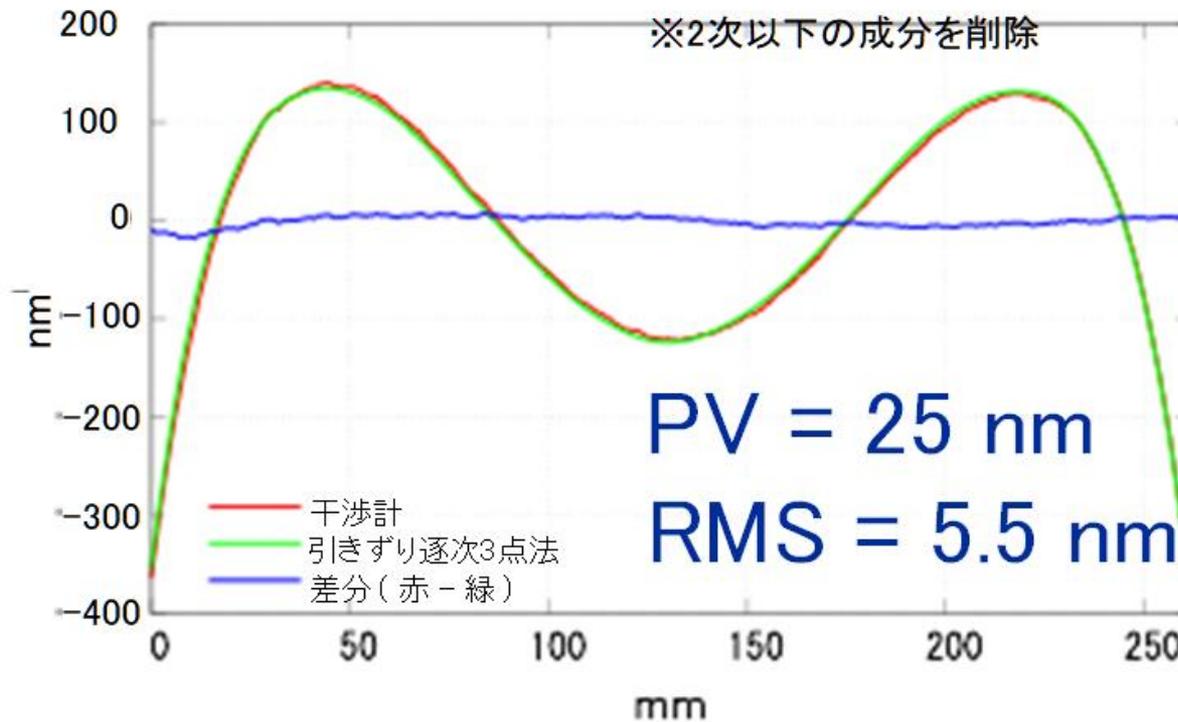
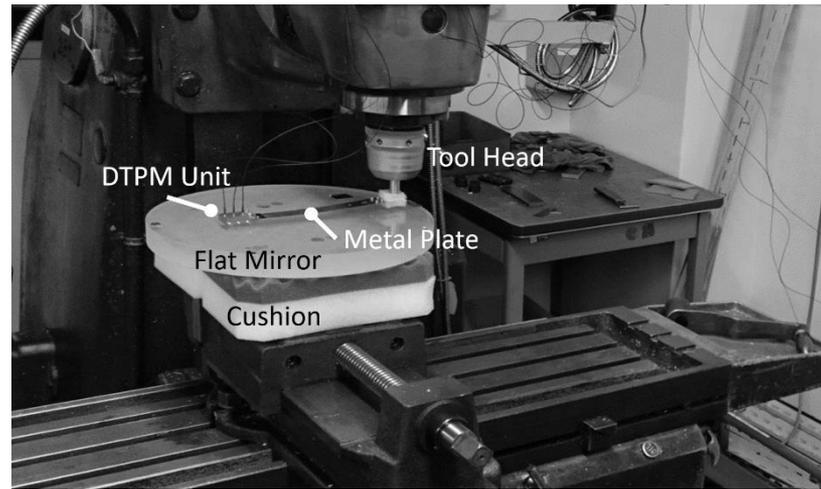


二次成分
除去

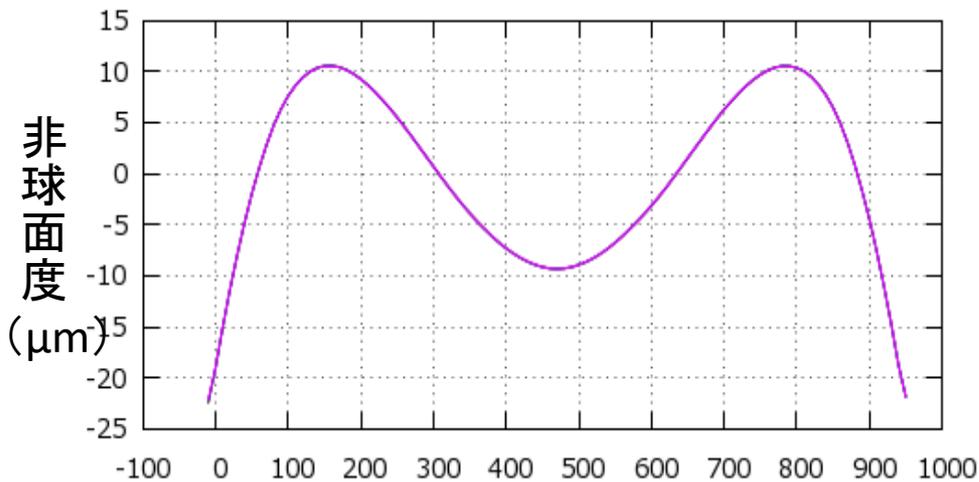


設計値(理想非球面度)と比較して形状誤差を導出

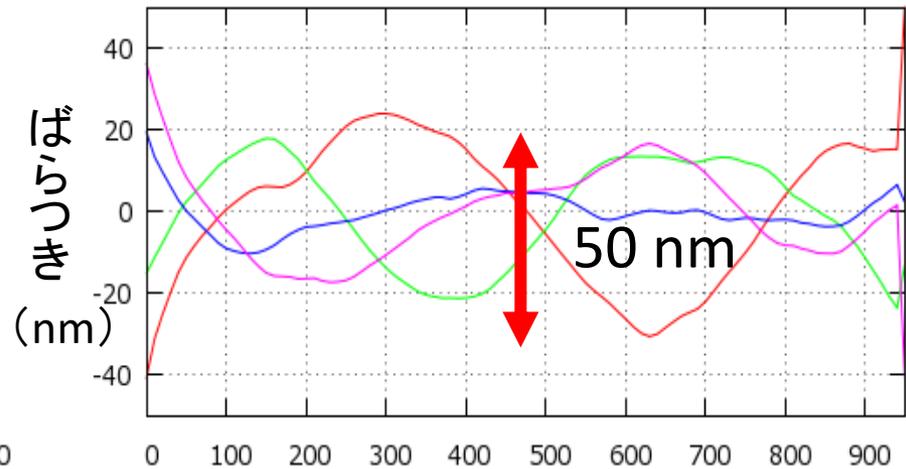
初期試験結果—平面—



計測結果と再現性Φ1000

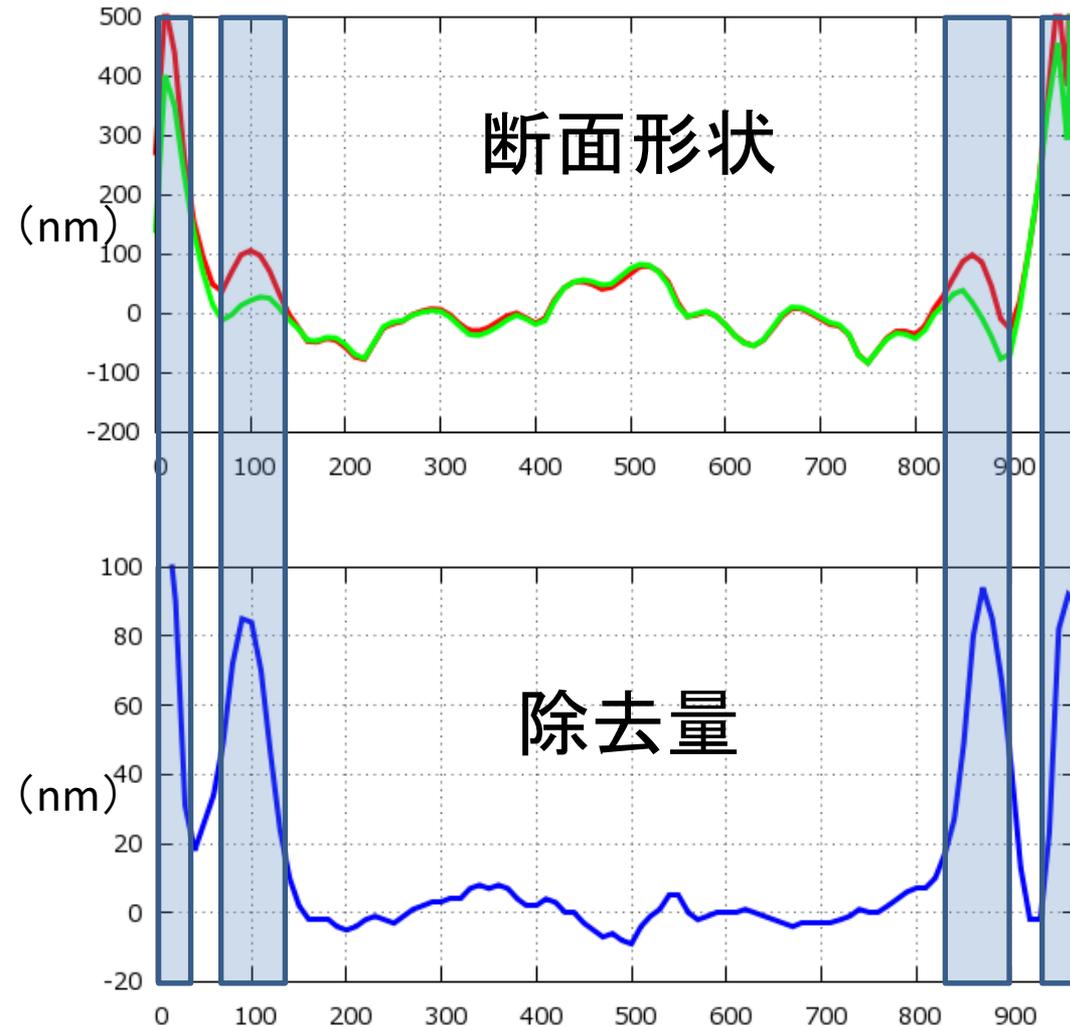


断面距離 (mm)
4回の独立計測結果



断面距離 (nm)
4回の独立計測結果

形状誤差と修正研磨



- 周辺部を除き

P-V \sim 150 nm

RMS \sim 50nm

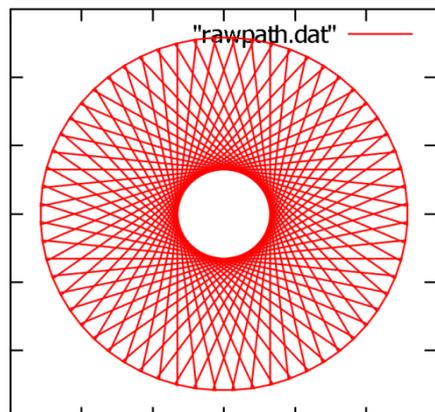
- 軸対称性の高い形状誤差

→軸対称加工のため

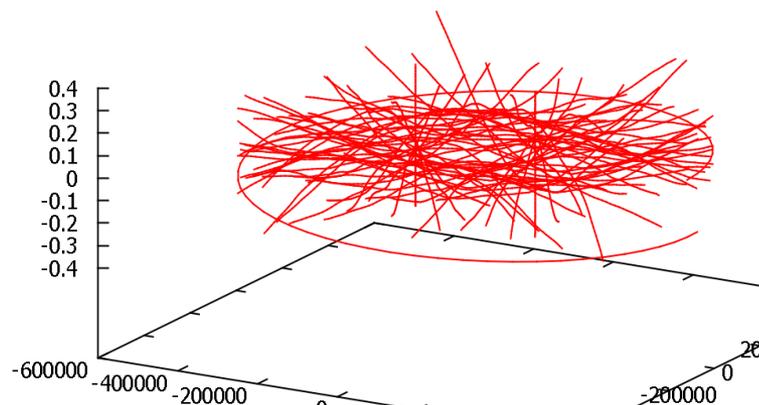
- 一部を修正研磨し改善
- 上記サイクルを1日で実現

- 日をまたいでも10nmレベルの計測再現性

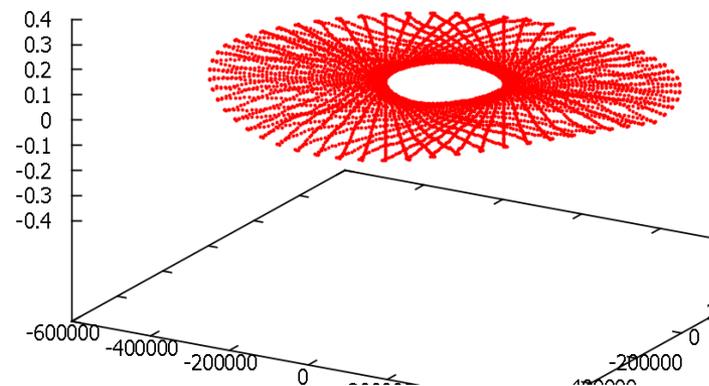
データ処理の流れ



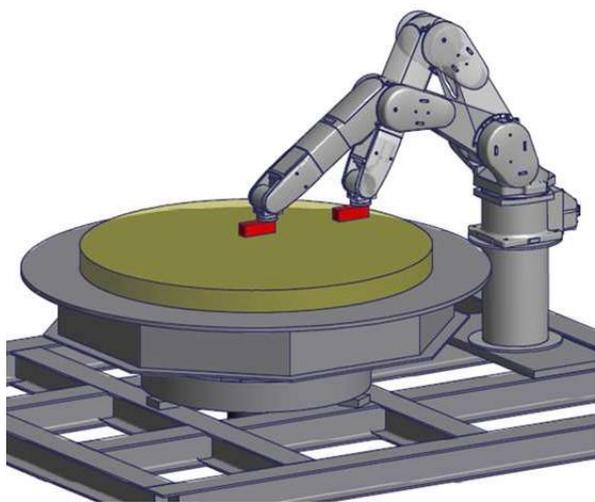
全面計測



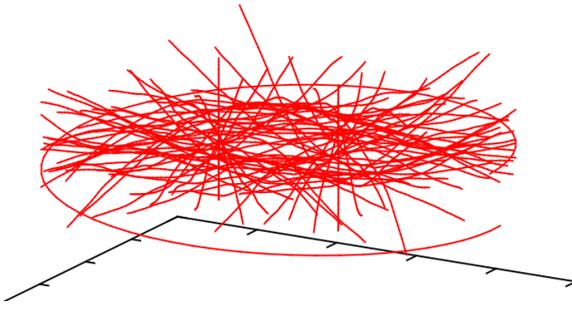
↓ データステッチ



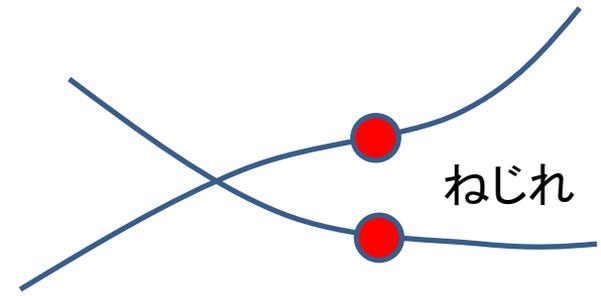
← 評価



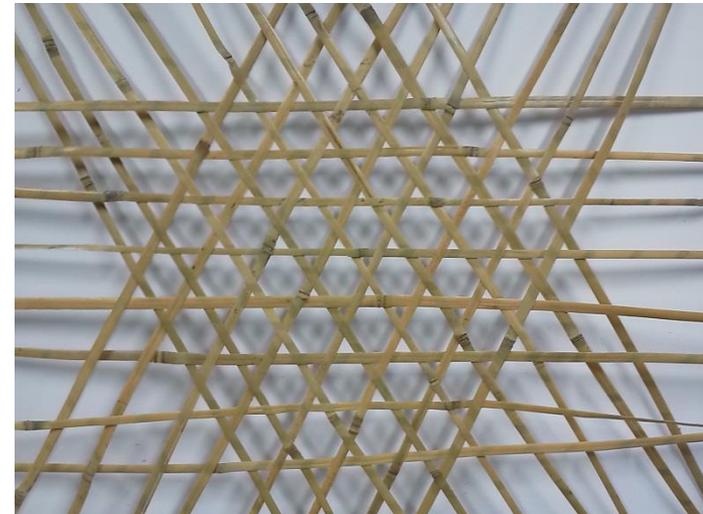
修正加工



本方式

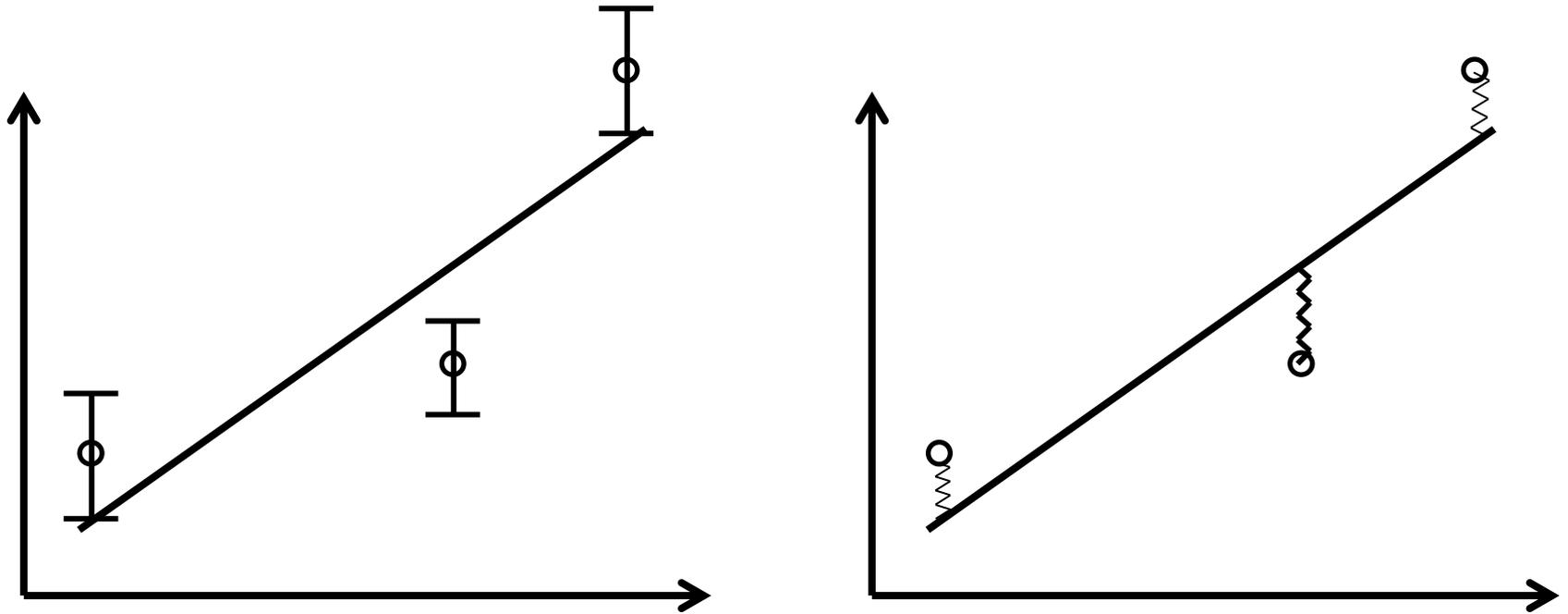


- データを**弾性体**とみなす
データ→弾性体の形
データの精度→弾性体の固さ
- 交点において矛盾があっても、強制的に一致させる
- 弾性体の最小エネルギーを解く
矛盾を全体で共有
- 有限要素法を用いたアルゴリズム



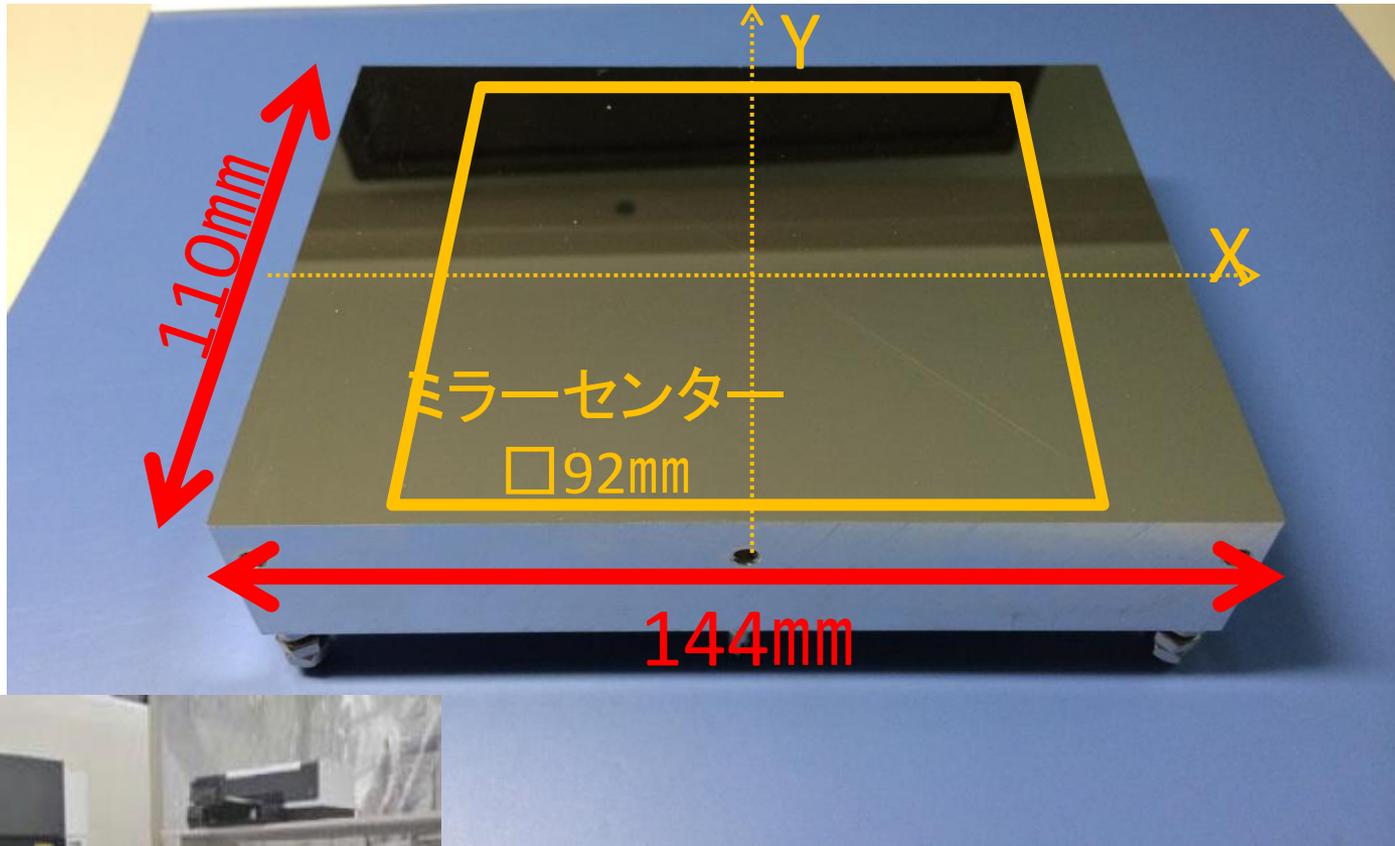
竹細工

数学と力学モデルの等価性

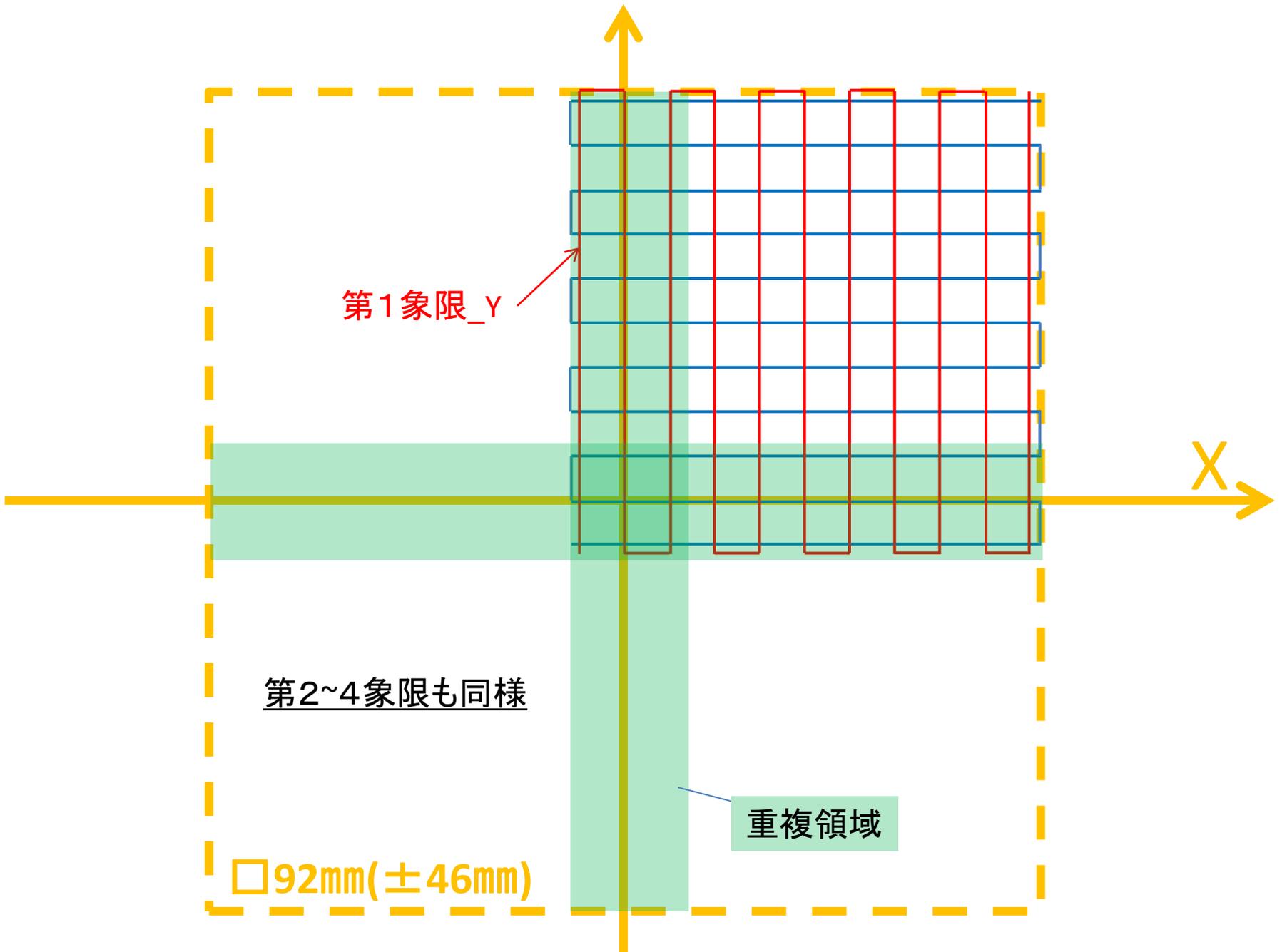


- 理論式を想定
- その自由度をフィッティングパラメータとする
- 最小二乗フィットは力学の**最小エネルギー問題**と等価
- 双方ともデータと理論式そのものの変化するわけではない。

1次元データの事例



平面鏡をUA3Pで計測



第1象限_Y

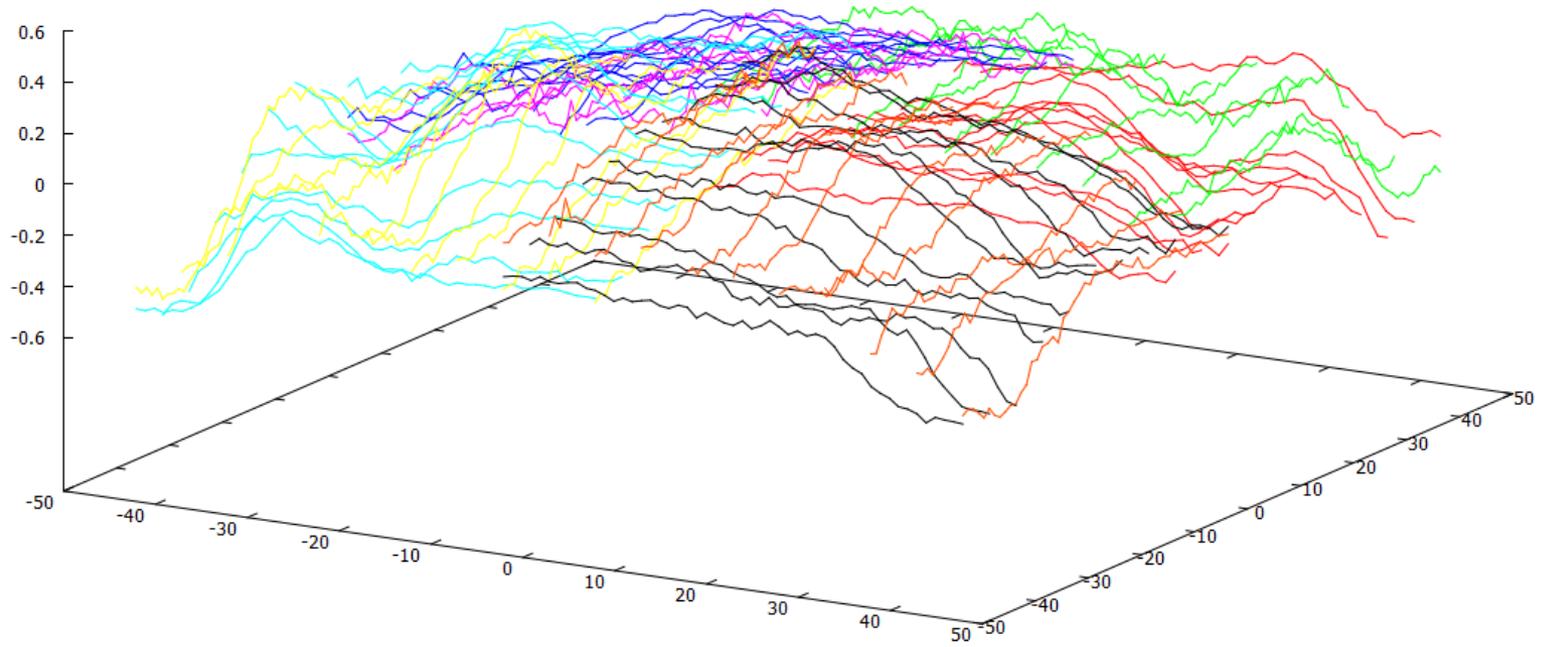
第2~4象限も同様

重複領域

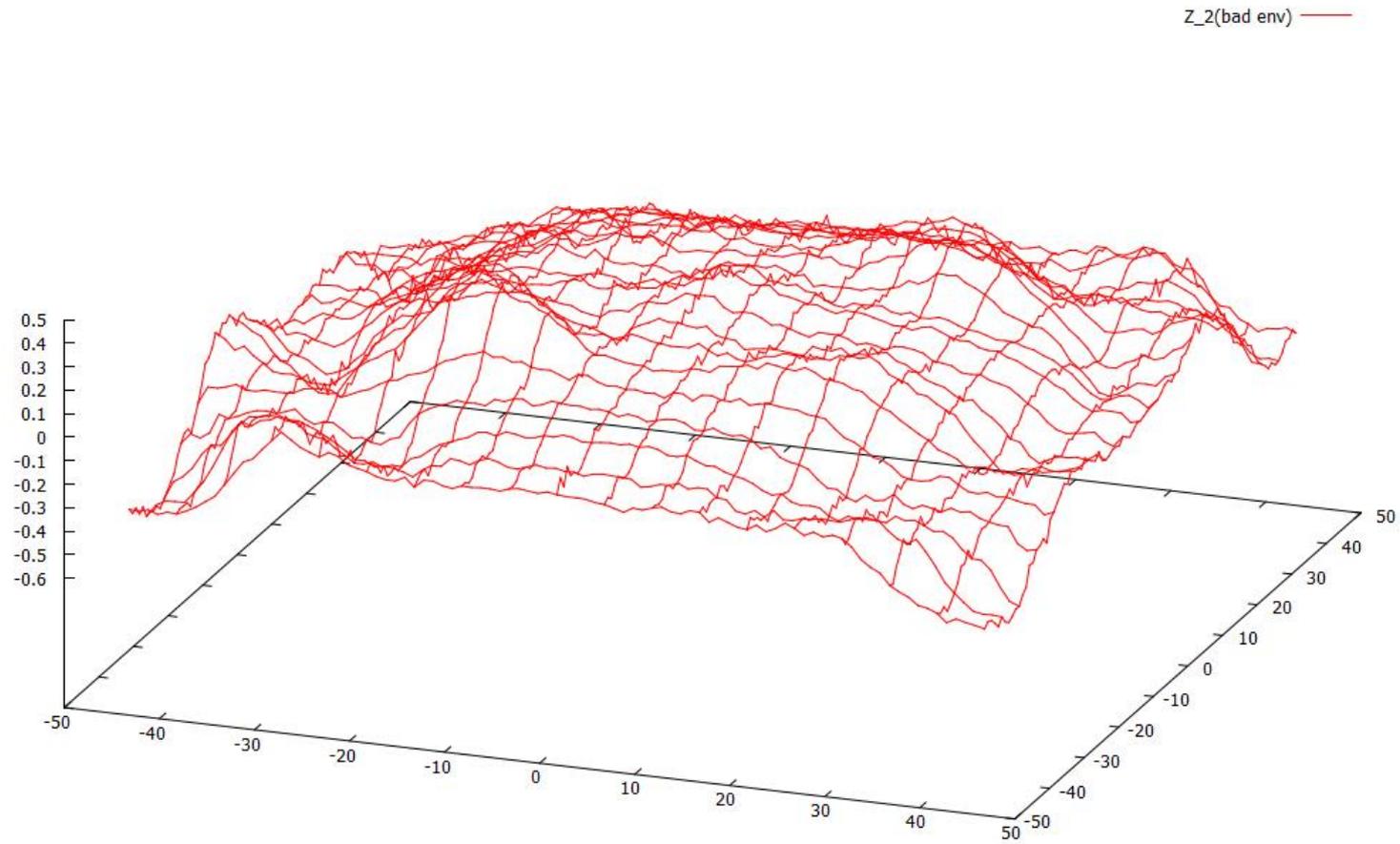
□92mm(±46mm)

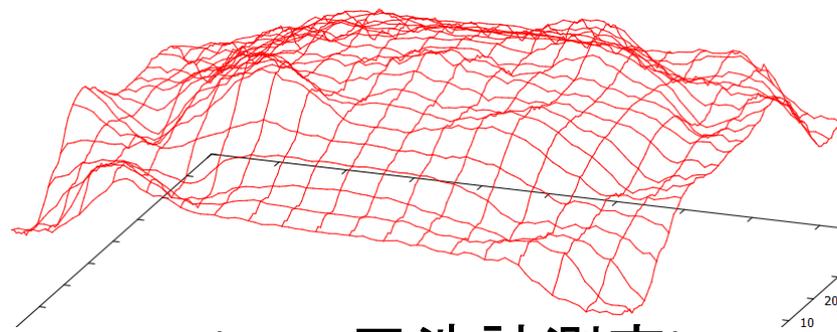
UA3Pが設置されている部屋のドアを開けた状態での計測

系列データのねじれが大きい

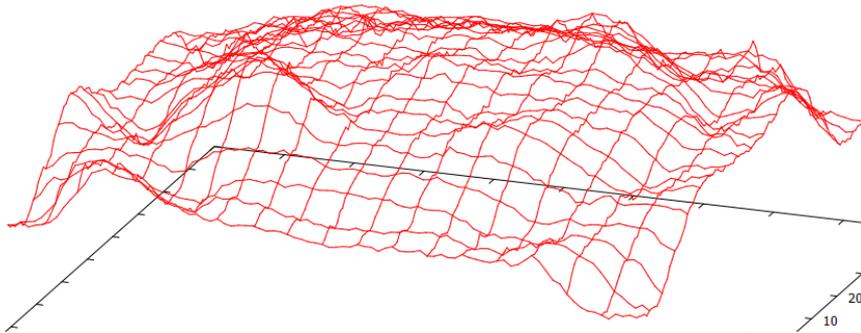


4つの象限をステッチした結果(悪環境測定)

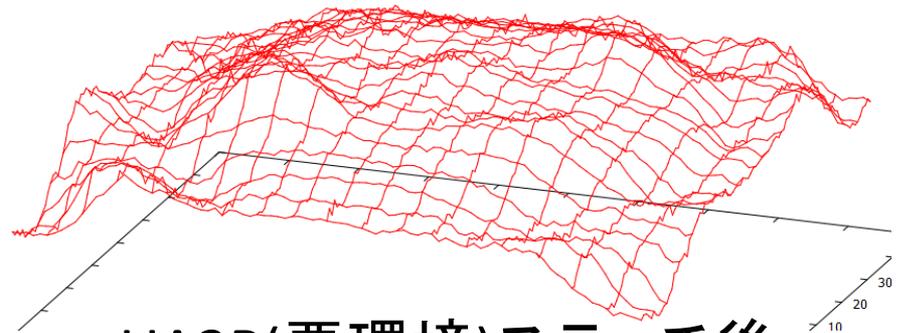




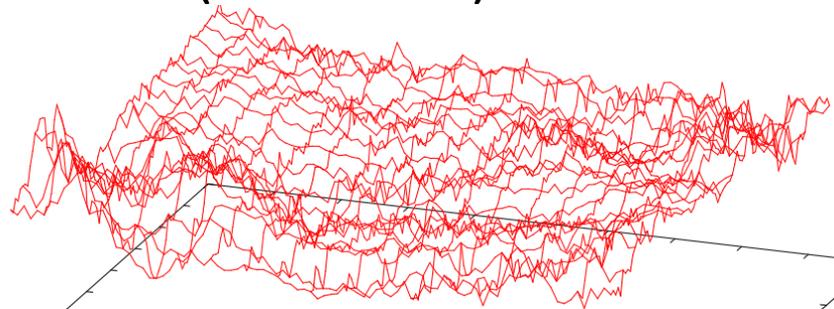
(Zygo干渉計測定)



UA3P(通常環境)ステッチ後

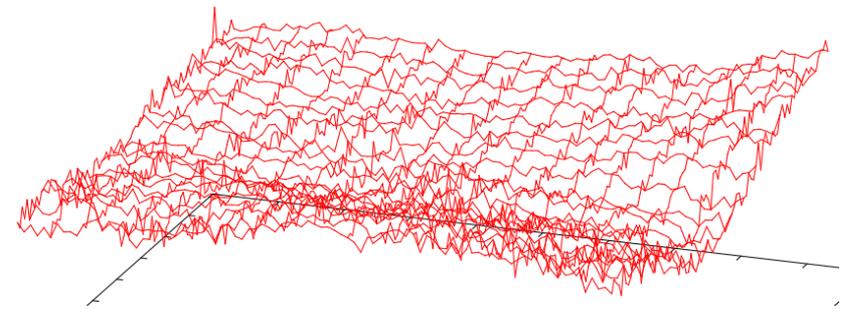


UA3P(悪環境)ステッチ後



UA3P—Zygo(通常環境)

PV=321nm, RMS=55nm

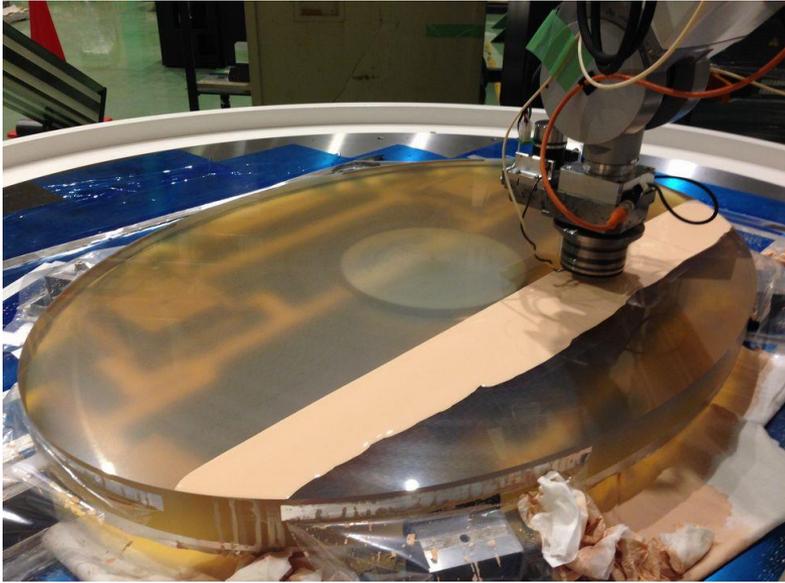


UA3P—Zygo(悪環境)

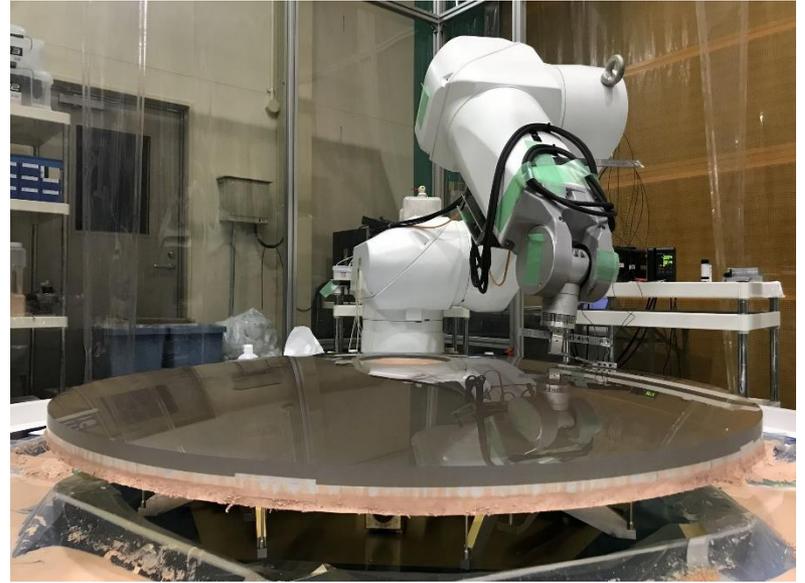
PV=264nm, RMS=40nm

象限のつなぎ目がなめらかで悪環境でも通常環境と同様の結果が得られる

研磨と計測の様子



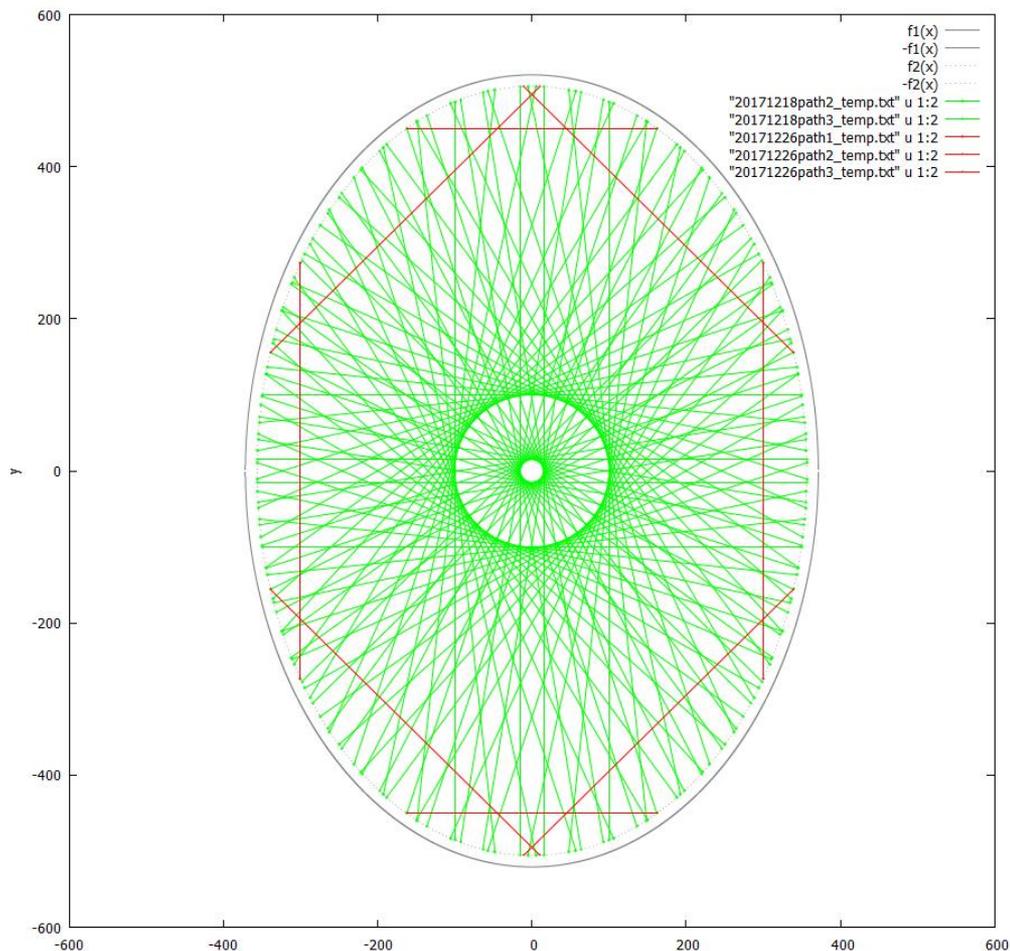
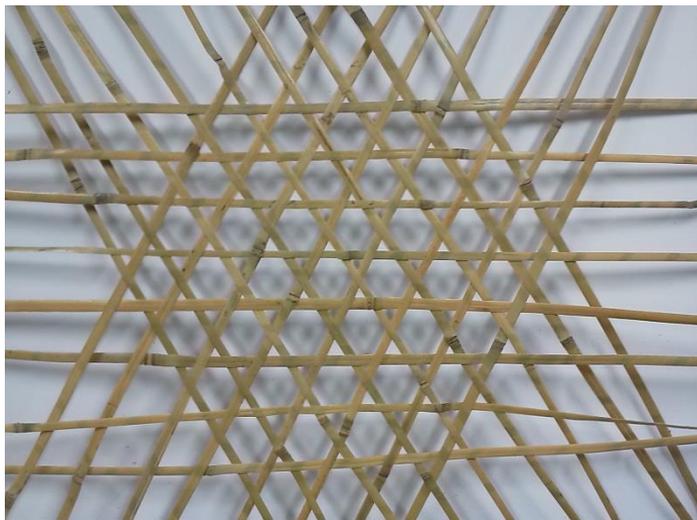
第三鏡(平面)の研磨



副鏡(凸非球面の計測)

第三鏡(平面)の計測

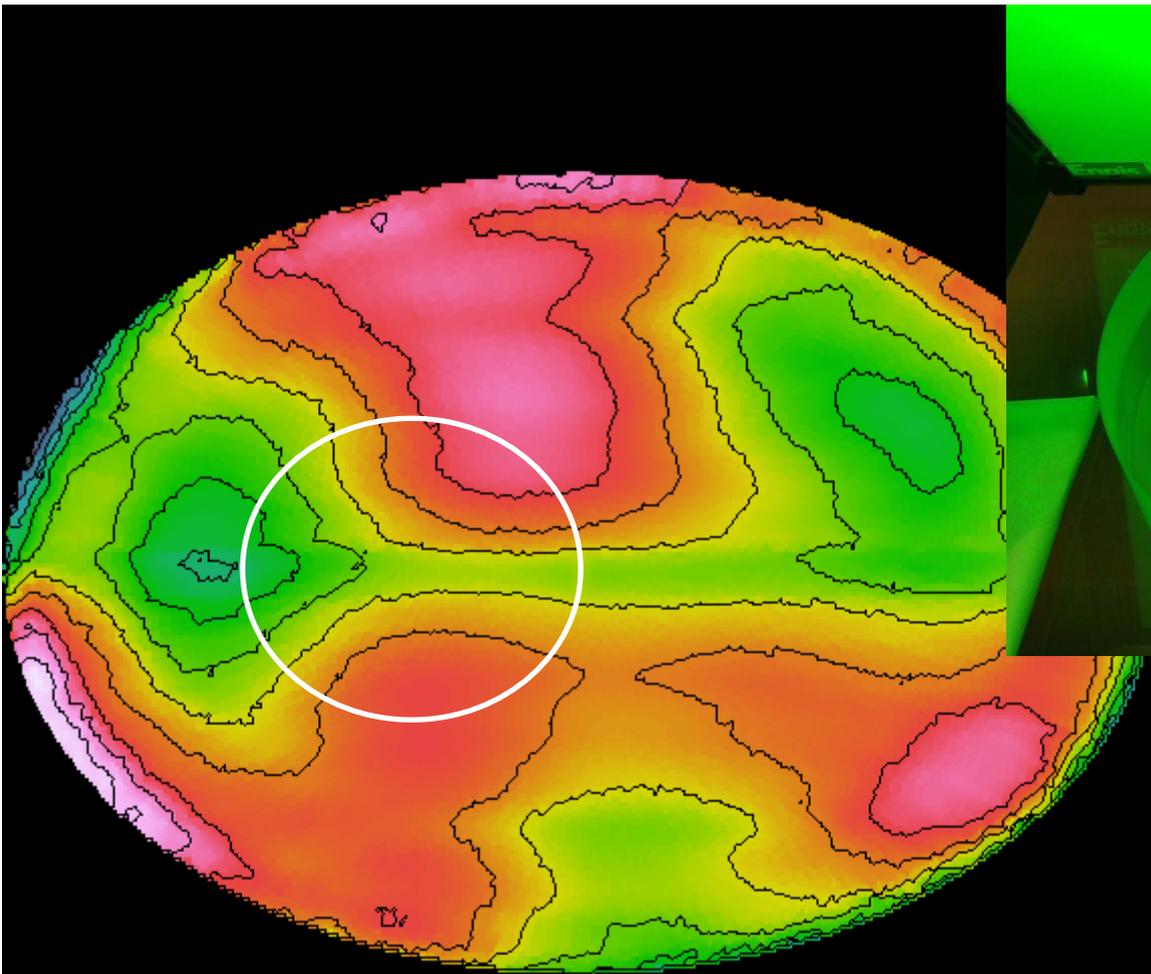
- 計測開始点・終了点での中央のセンサの位置は縁から15 mm内側
- $\phi 100$ に外接する60本、 $\phi 15$ に外接する40本の合計100本 + 8本



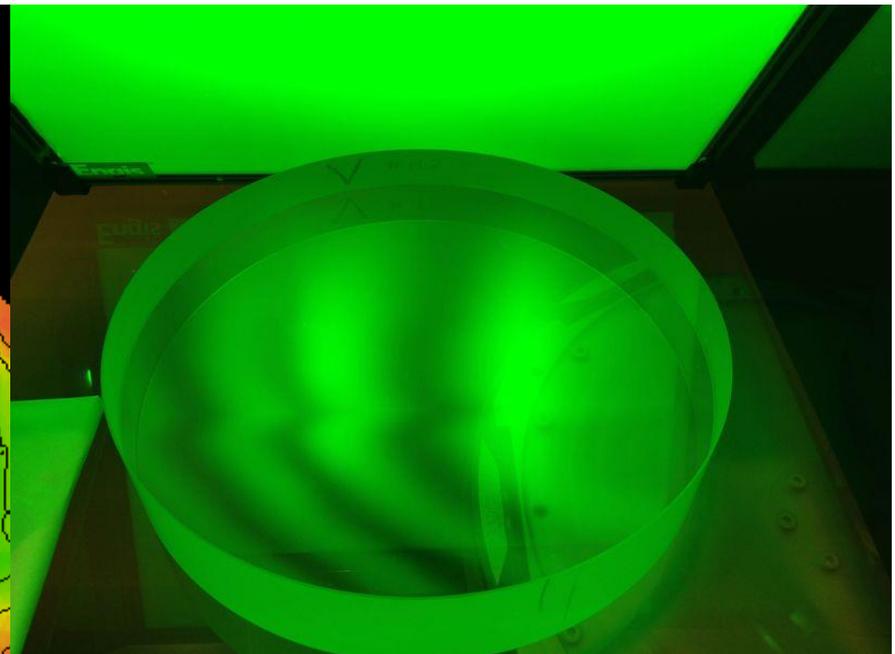
3点法での計測パス

赤線のパスはステッチングでの補正効果が高いので追加した。

途中形状をニュートン法で確認

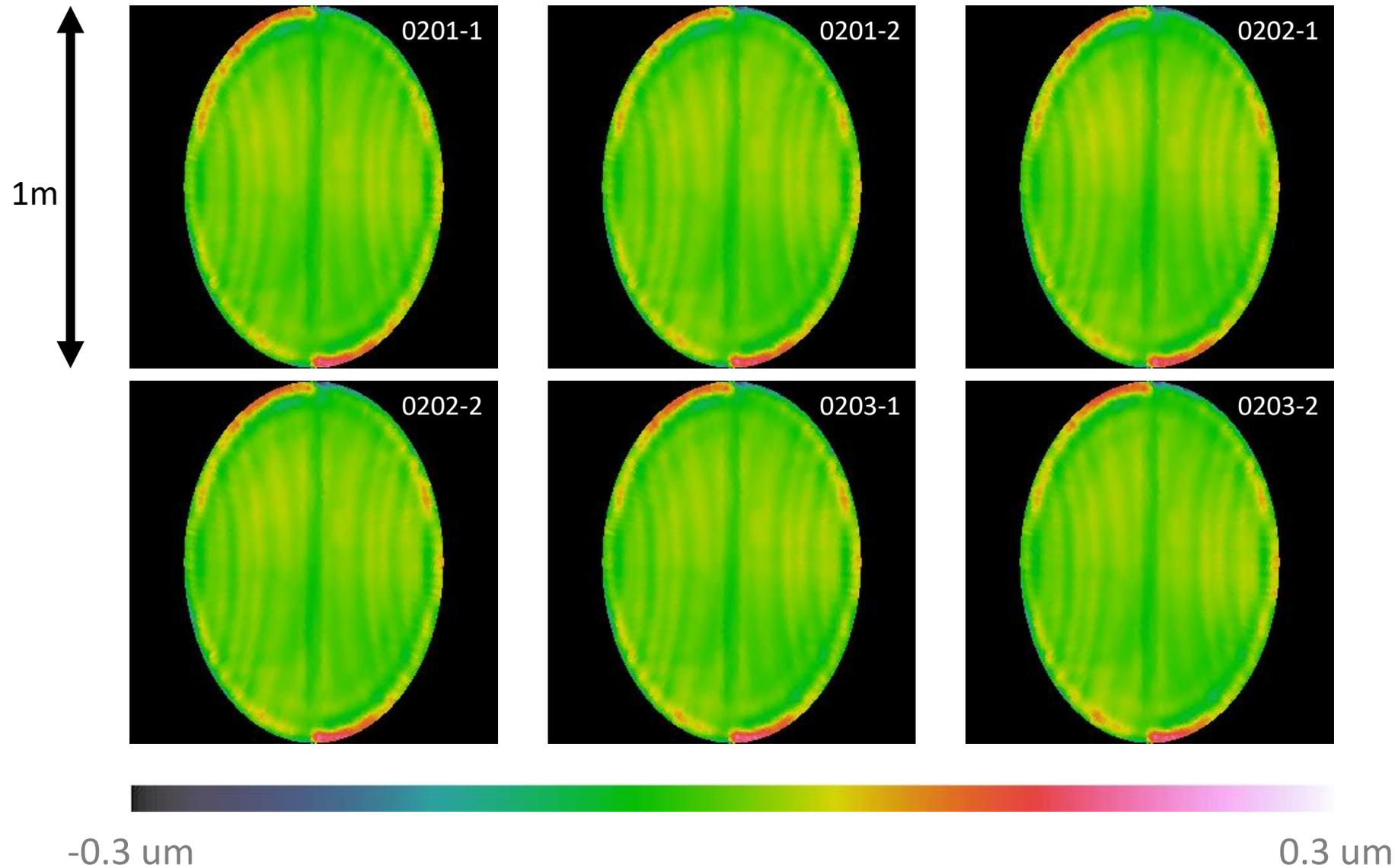


3点法+ステッチングでの結果

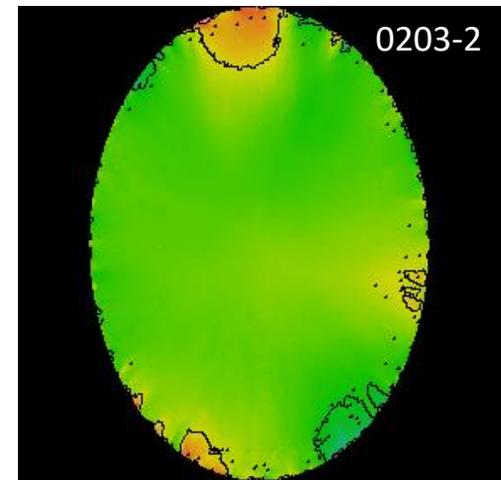
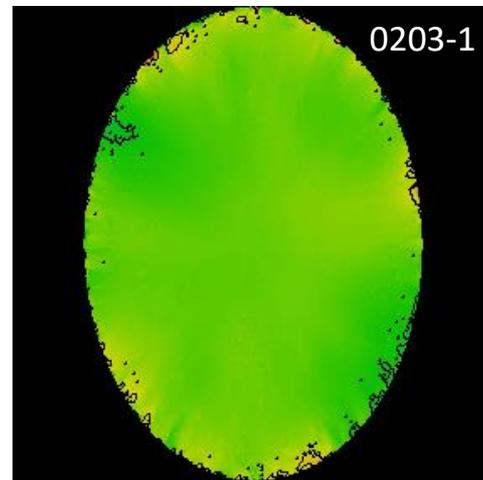
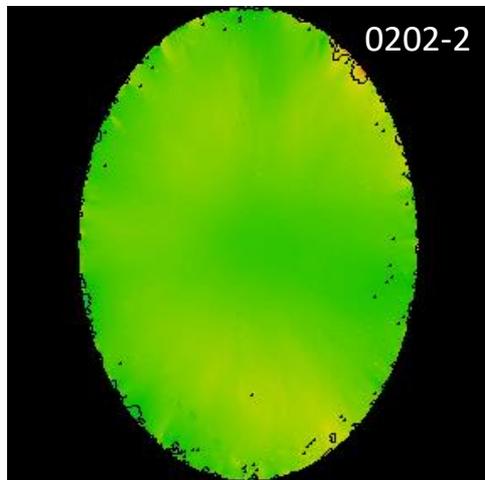
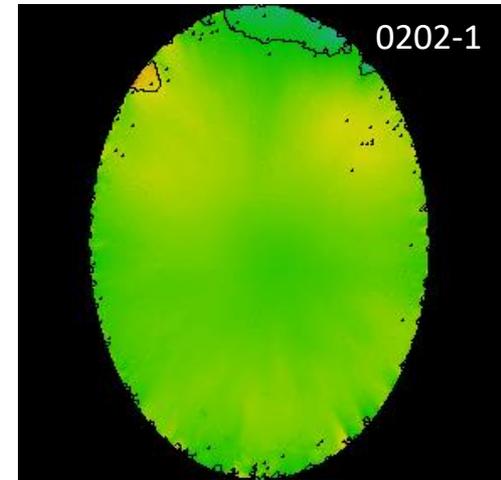
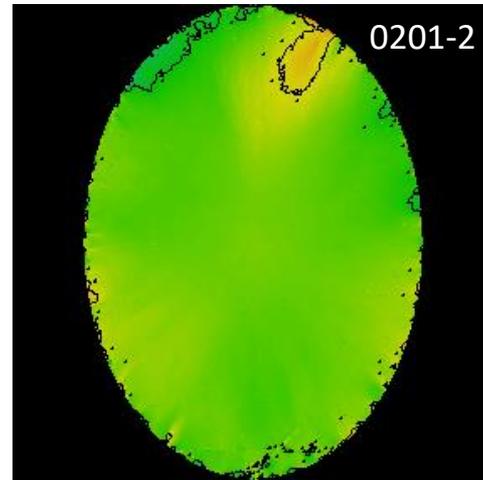
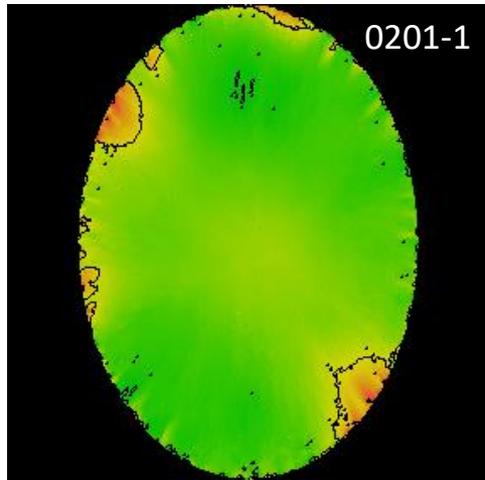


中央付近に特徴的な谷型の形状誤差を検出したので、ニュートン法での検証を試みた。3点法とニュートン法の結果は定性的に一致した。

計測再現性 同じ鏡を6回計測



計測再現性 (平均との差)



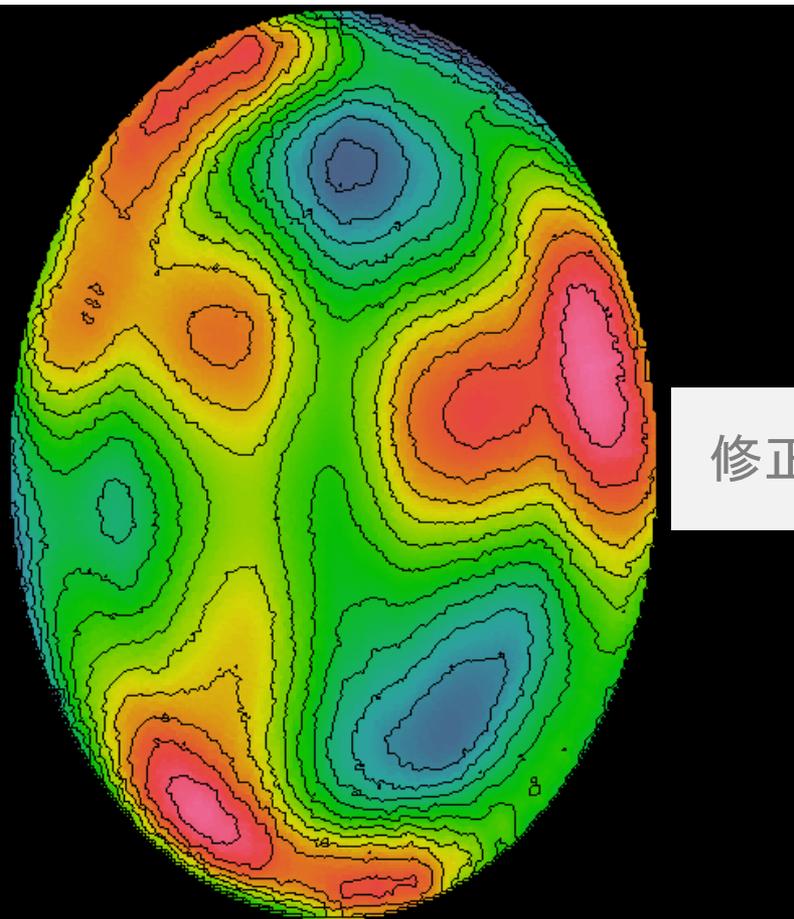
-60 nm

等高線の間隔: 20 nm

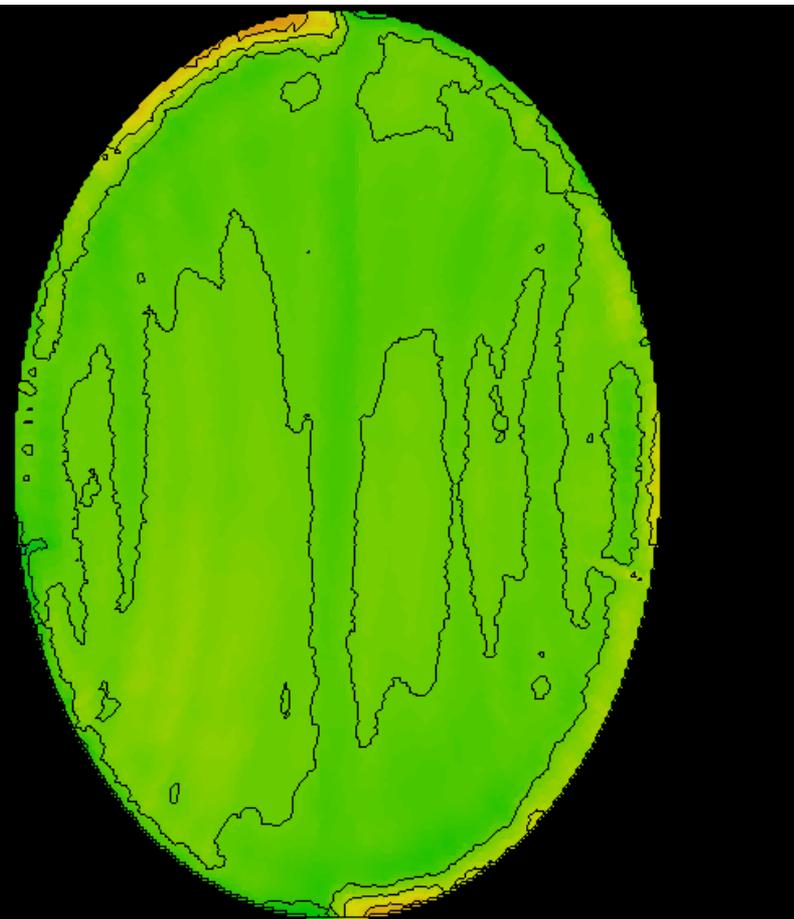
60 nm

形状誤差履歴(2次成分除去後)

フラッシュ研磨後



修正 × 5

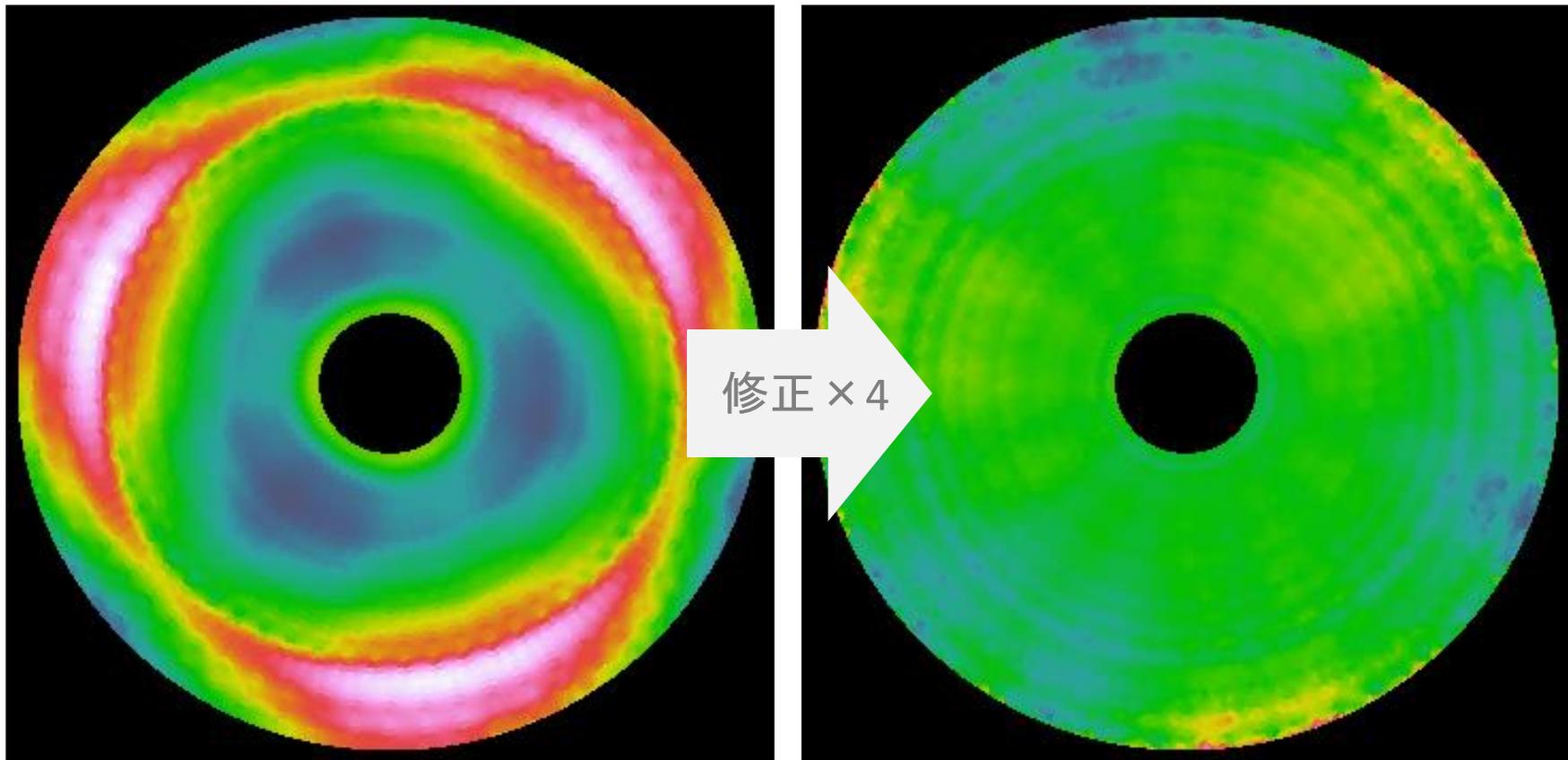


-900 nm

900 nm

等高線の間隔: 100 nm

非球面凸面鏡



P-V = 2,400 nm
RMS = 550 nm

RMS = 35 nm

およそ3週間で修正加工を終えた。

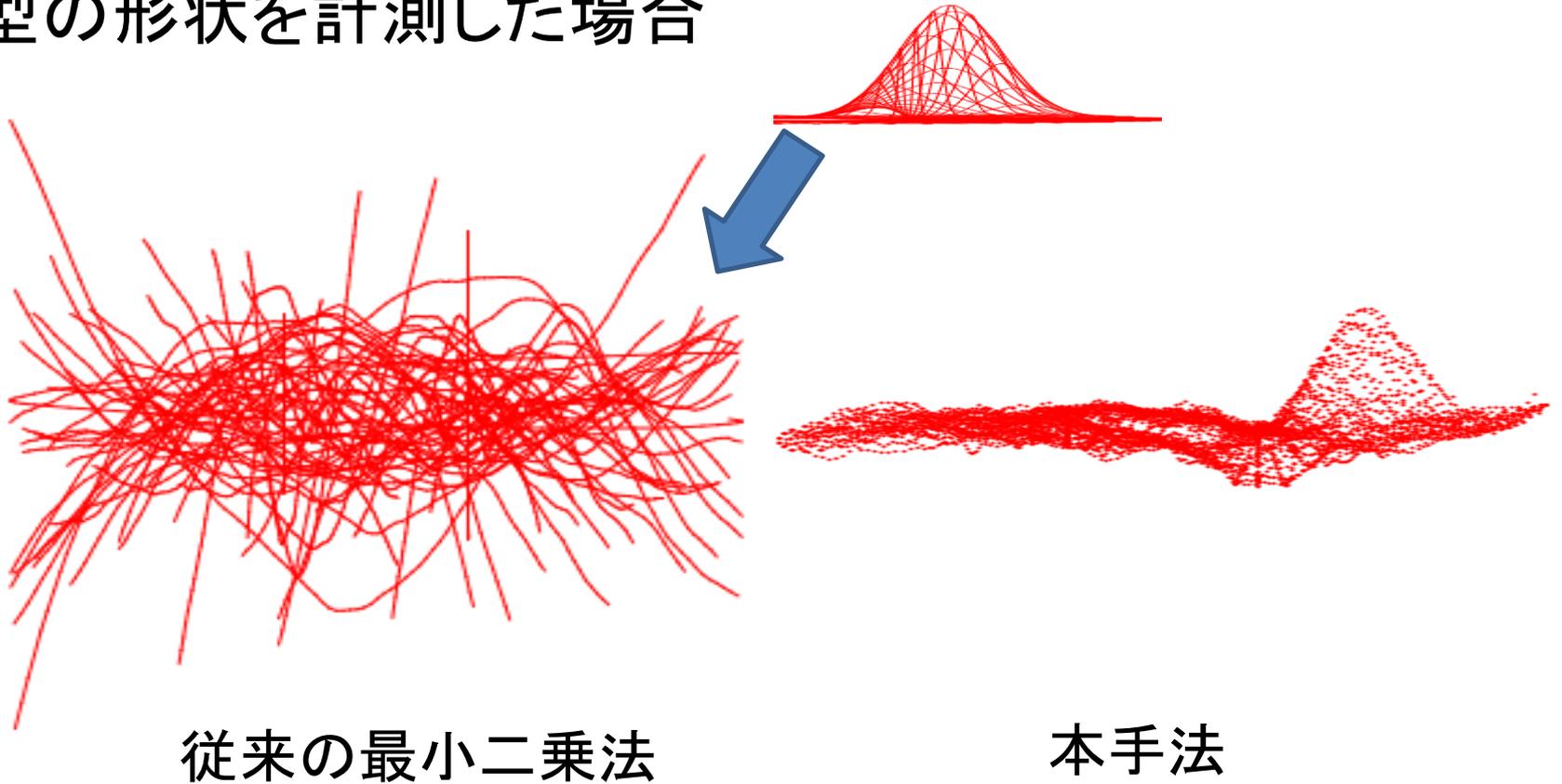
鏡製作のまとめ

- 高精度な研削加工により研磨工程を短縮化
- 実焦点を有する凹面に対してはCGH干渉計を開発
- 凸面と平面に対しては機械計測を開発
- 弾性体理論を応用したデータ処理システムを開発
- 国内初の自由曲面の計測と製造技術を確立

	研削	研磨	計測法	加工時間
主鏡	N2C-1300D	N2C-1300D	CGH干渉計	1か月/枚
副鏡	N2C-1300D	ロボット	3点法	1.5か月
第三鏡	N2C-1300D	ロボット	3点法	1.5か月

局所構造の抽出

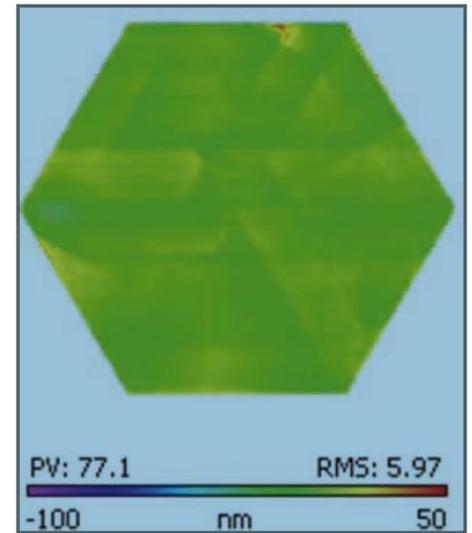
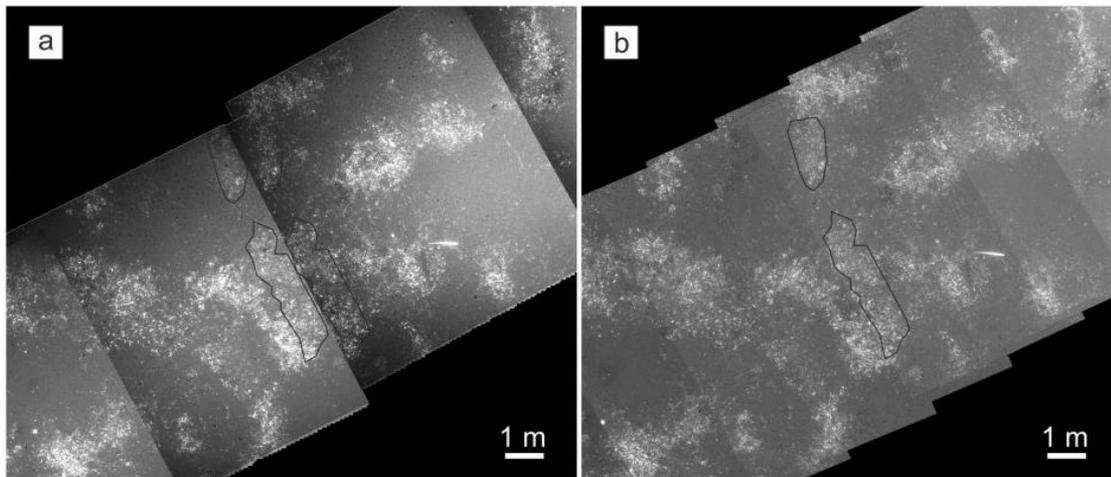
釣鐘型の形状を計測した場合



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。

データ接続（ステッチ）と課題

- 接続境界に不自然な段差が生じる。

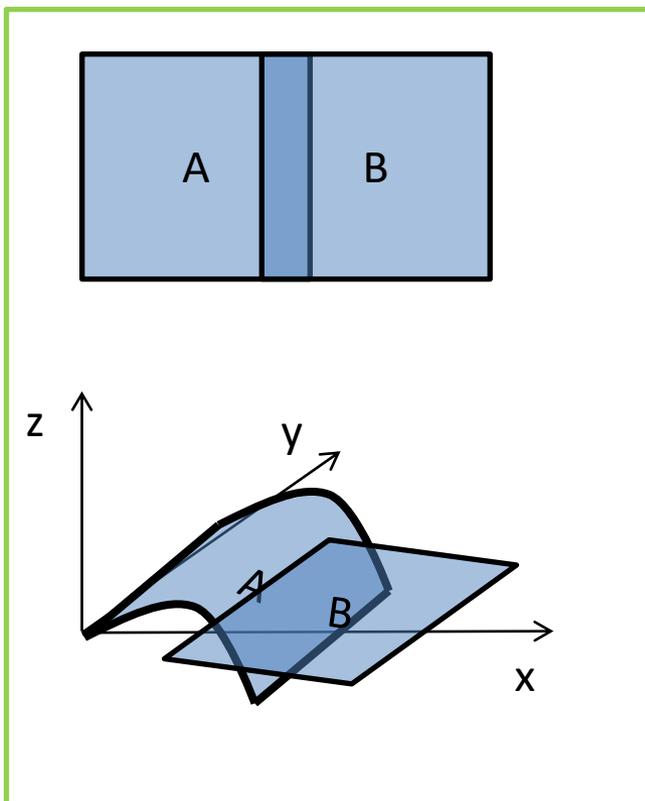


ステッチングによる筋状の偽パターン
(国立天文台 TMT計画書)

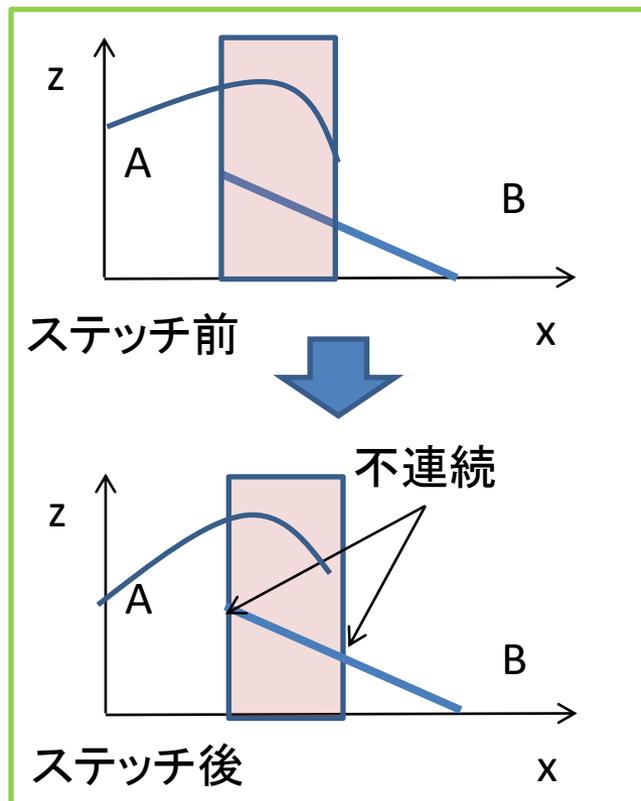
<http://geolog.egu.eu/category/geosciences-instrumentation-and-data-systems/>

剛体的なデータ接続（画像の場合）

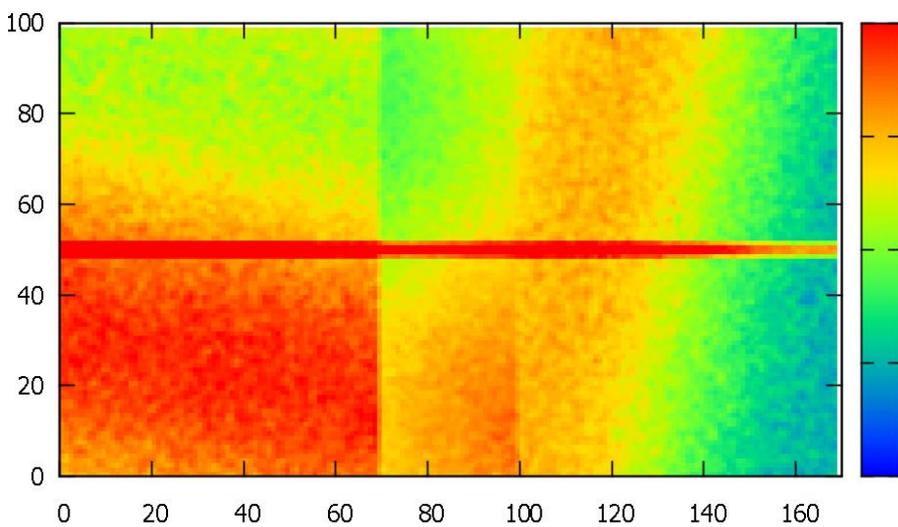
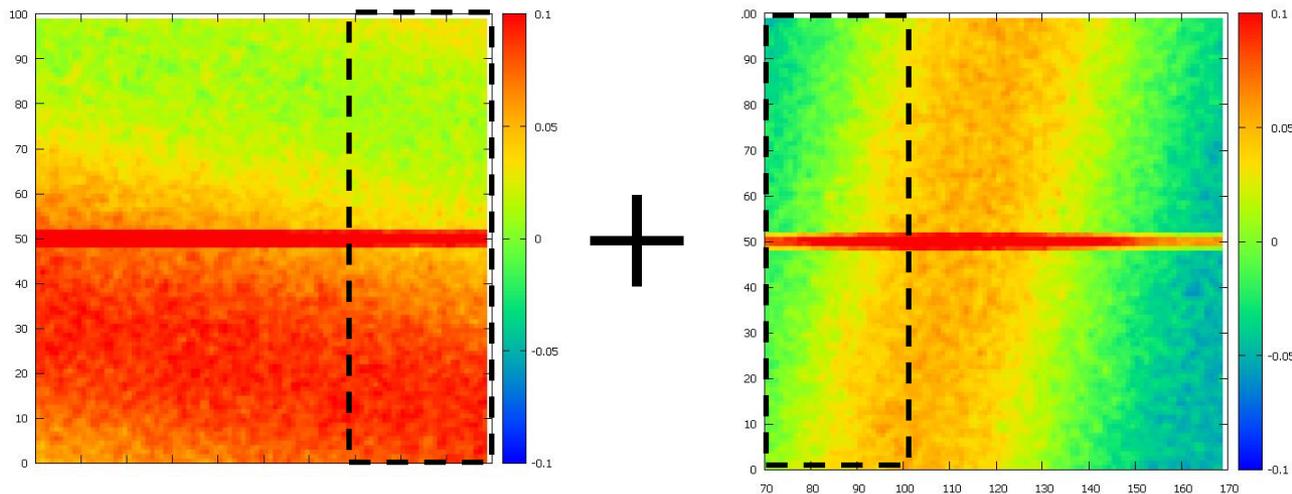
- 重なった領域の偏差が最小になるように傾きとシフトのみを補正
 - データを**剛体**として扱う
- 不連続さは解消しない



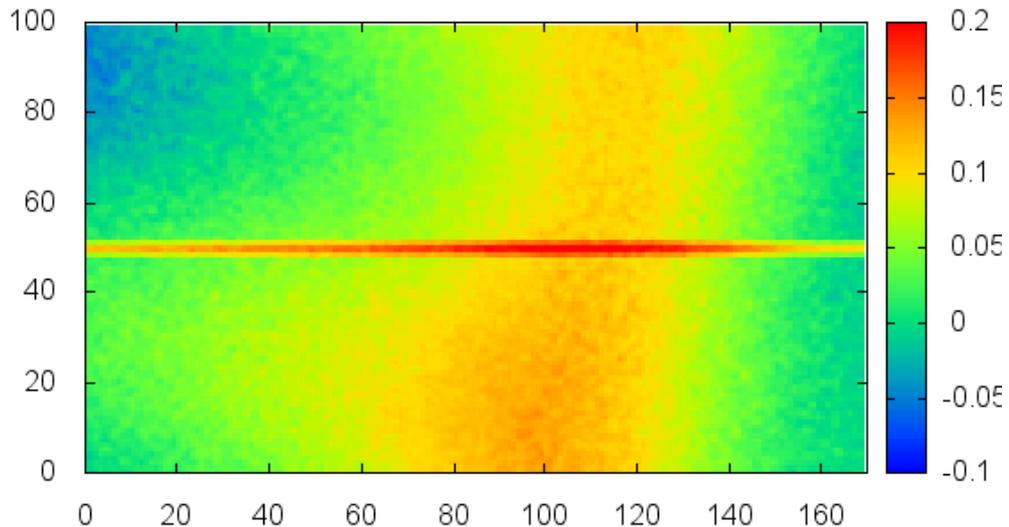
傾きシフト以外の誤差を持つとき



例：2次元データ

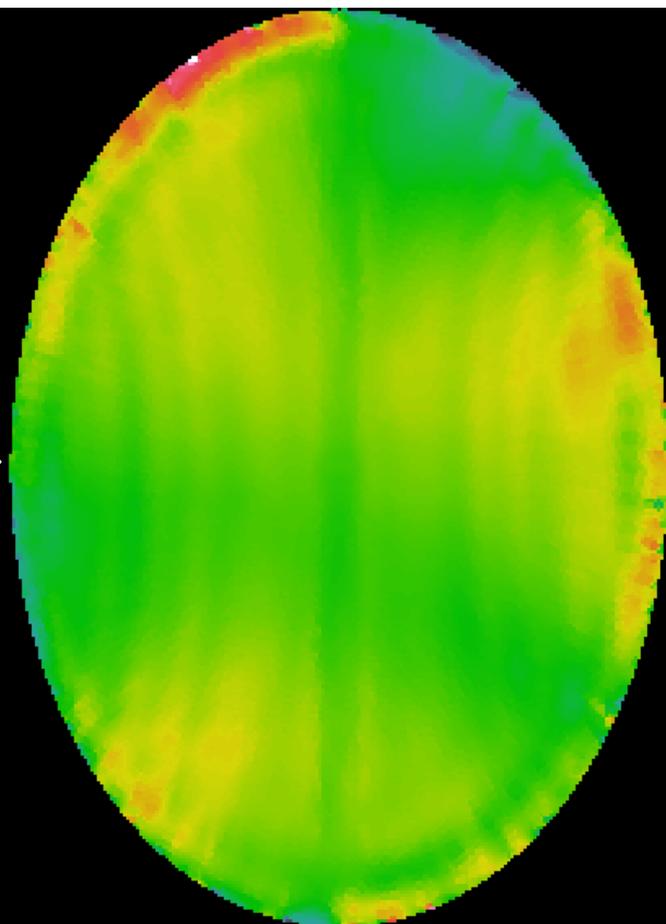
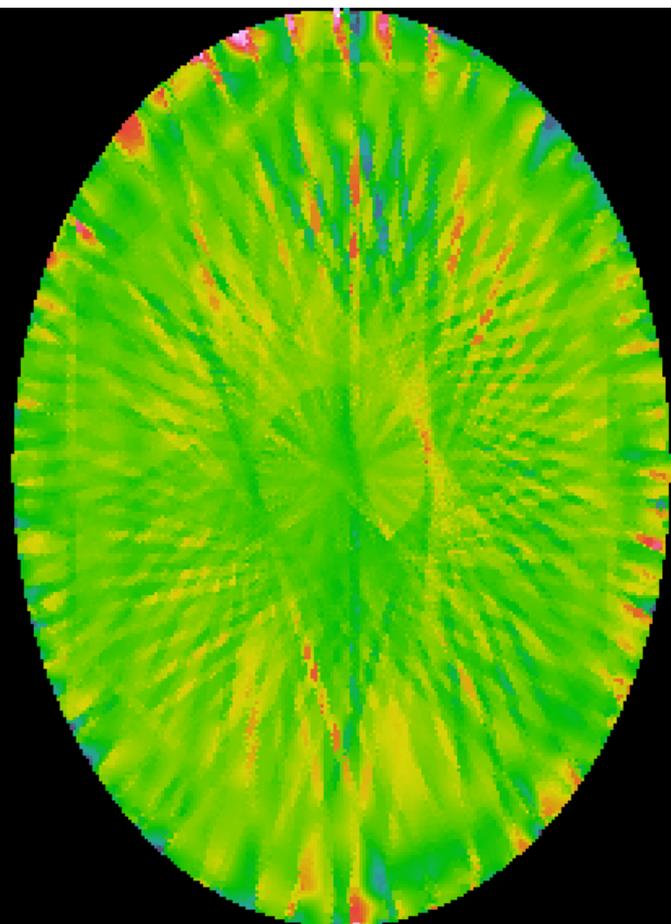


従来方式



本方式(弾性体)

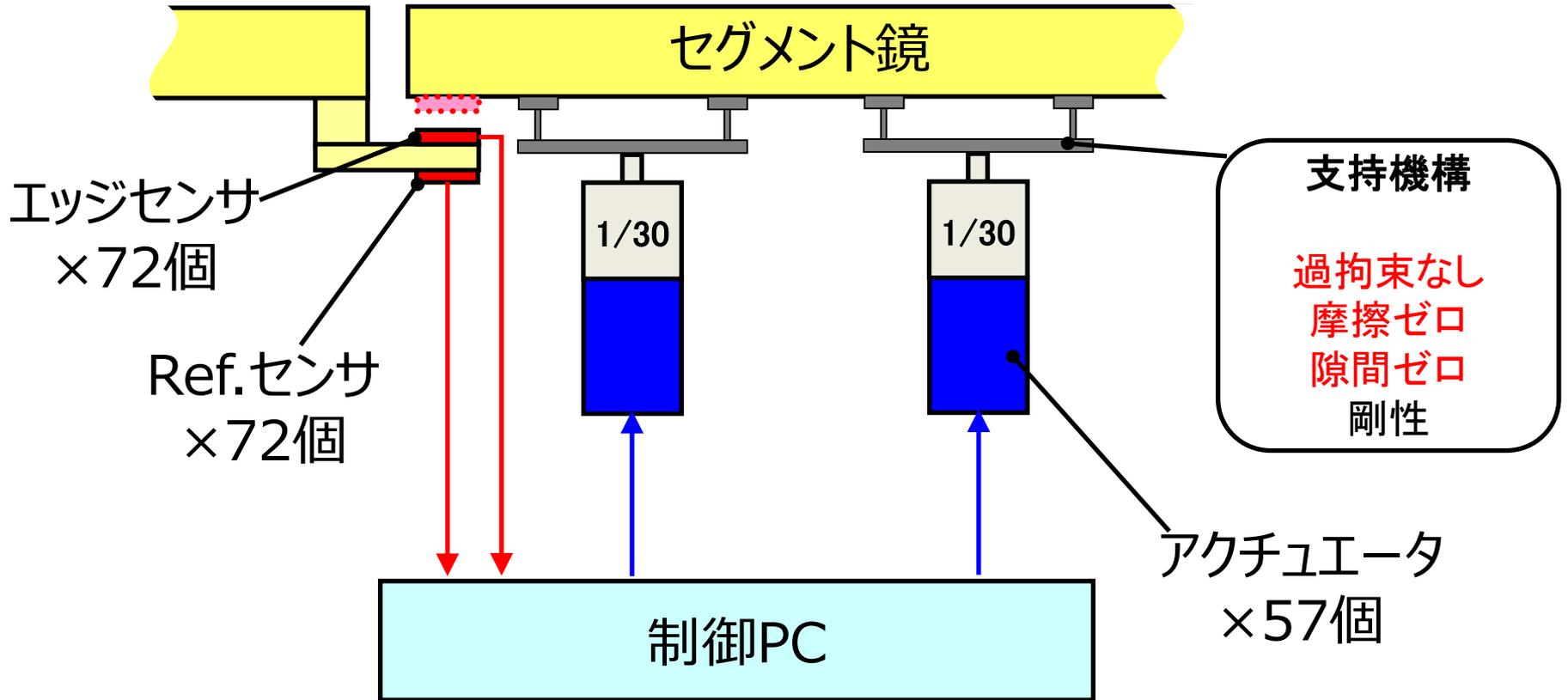
ステッチ前後



-600 nm

600 nm

分割鏡のシステム

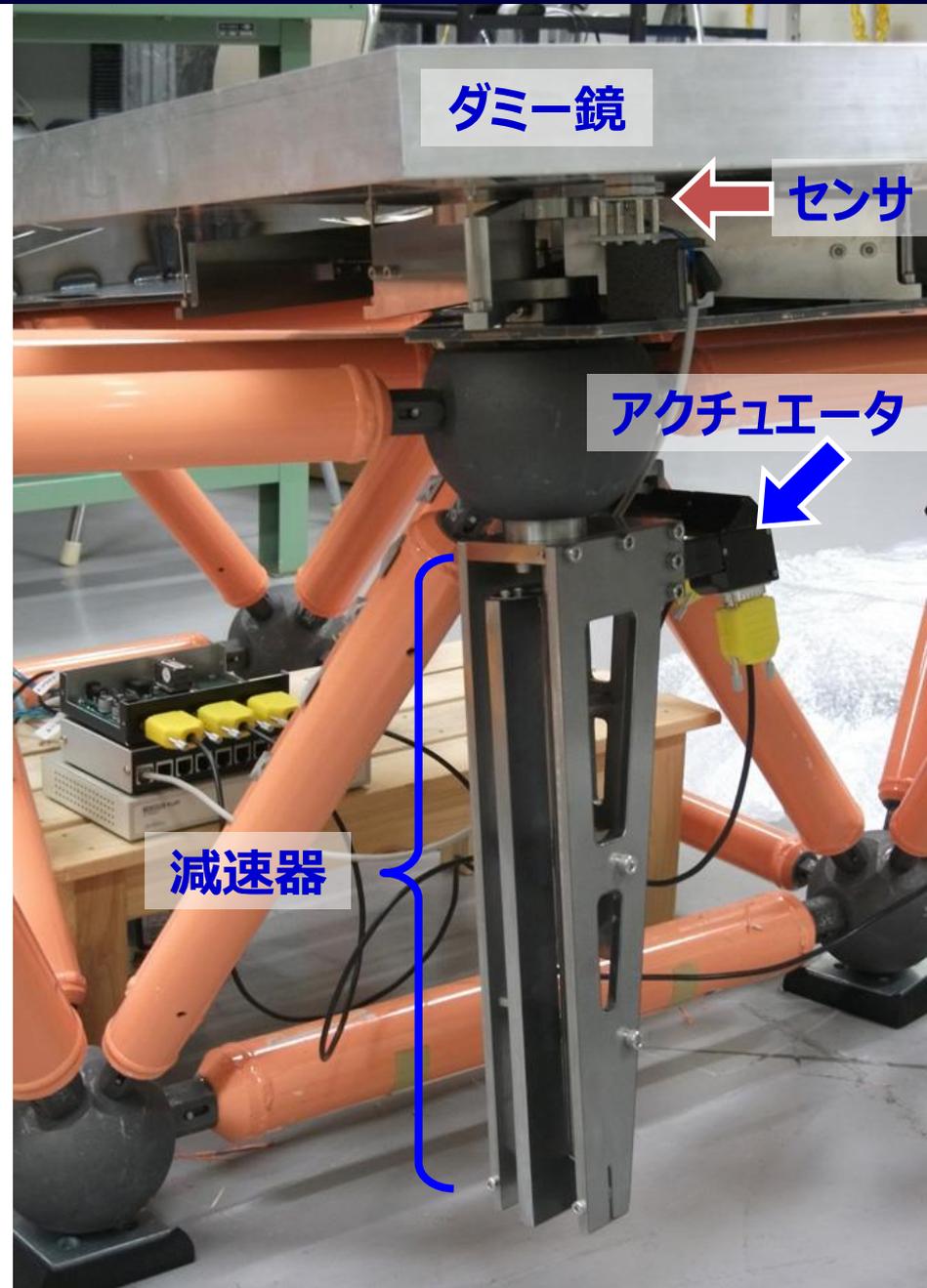


I 実験機材 (実機と同等)

- 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



外乱に対する応答

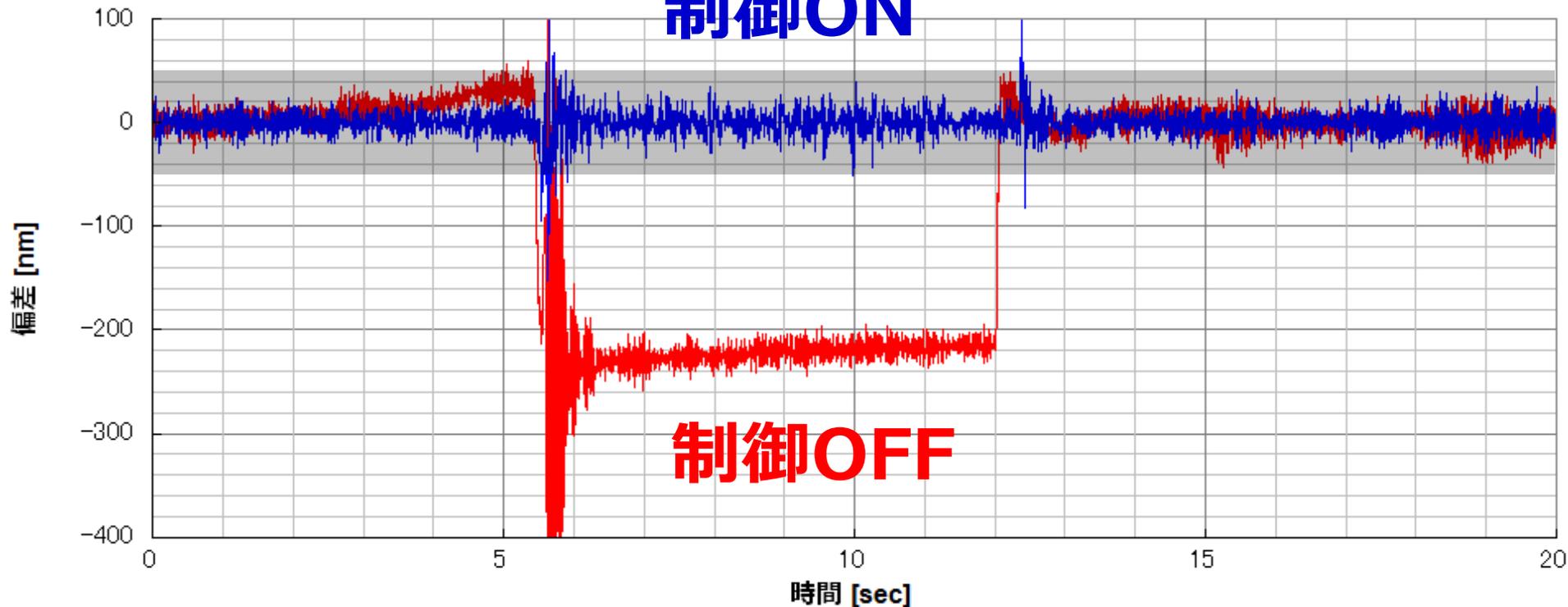
重さ90gwのアルミ片を鏡面上に置く → 退ける

- 風の影響 : 60gf @1Hz
(屋外での風速 10m/s)



制御ON

制御OFF

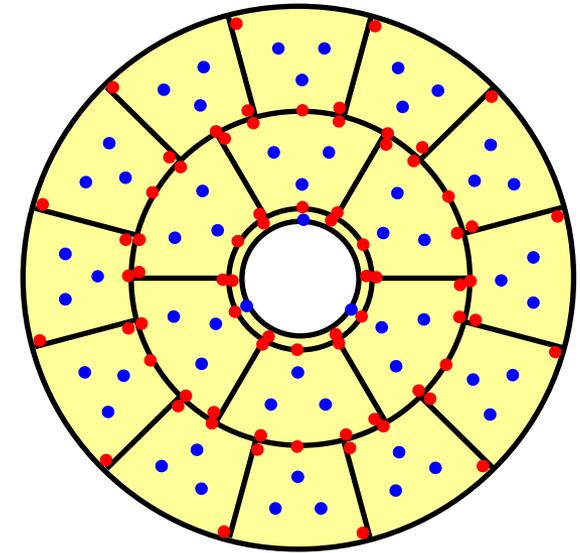


制御アルゴリズム

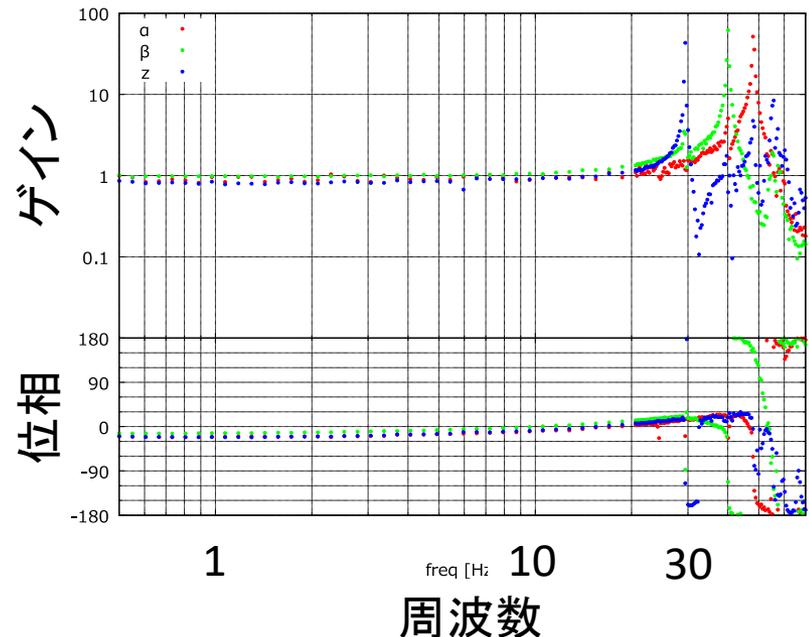
センサ アクチュエータ

$$\begin{pmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & \cdots & k_{1,m} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ k_{n,1} & \cdots & \cdots & k_{n,m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{pmatrix}$$

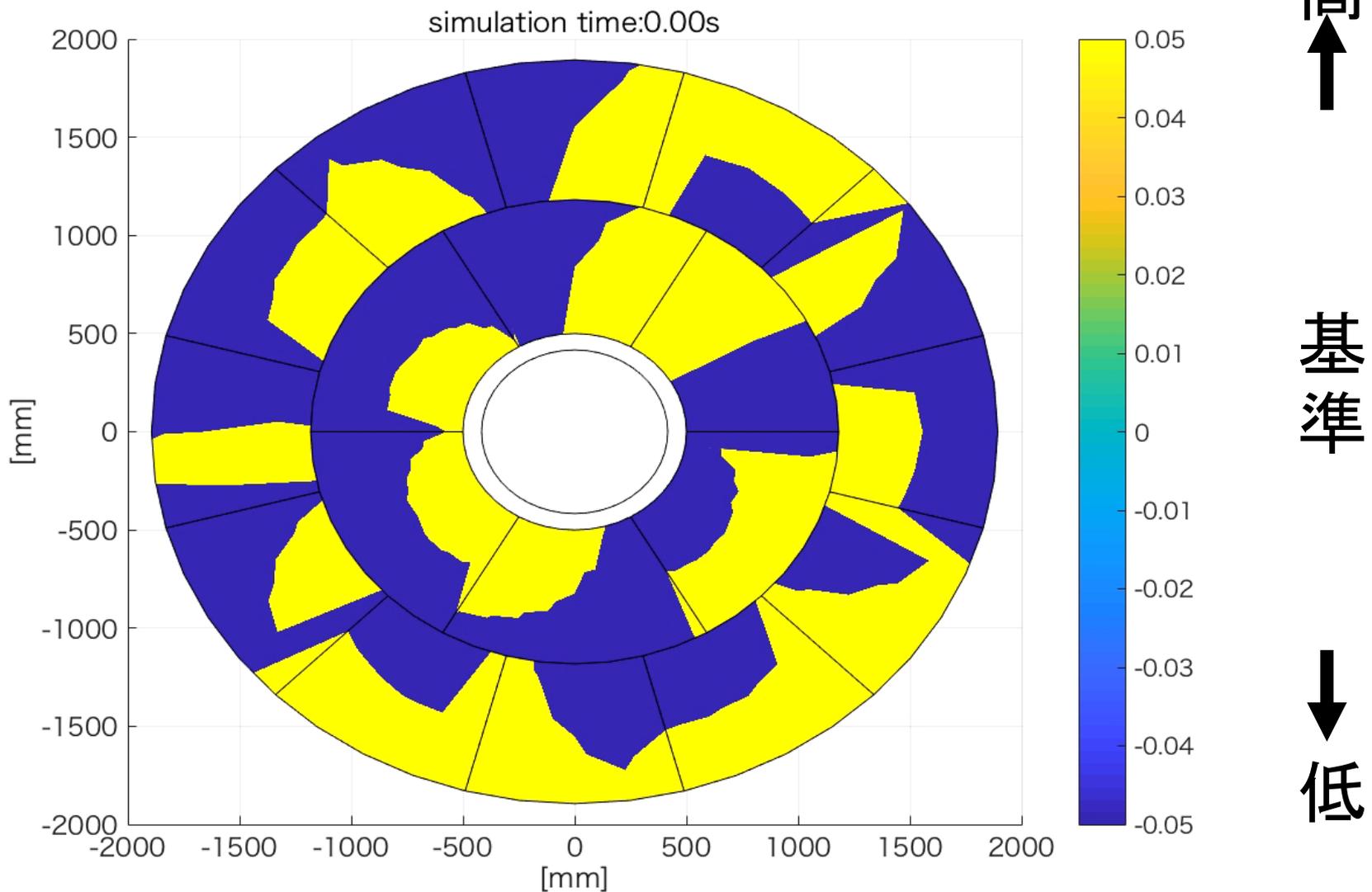
センサ値とアクチュエータの関係を行列表現し、固有値と固有ベクトル(変形モード)を評価し、制御剛性の高い配置を検討する



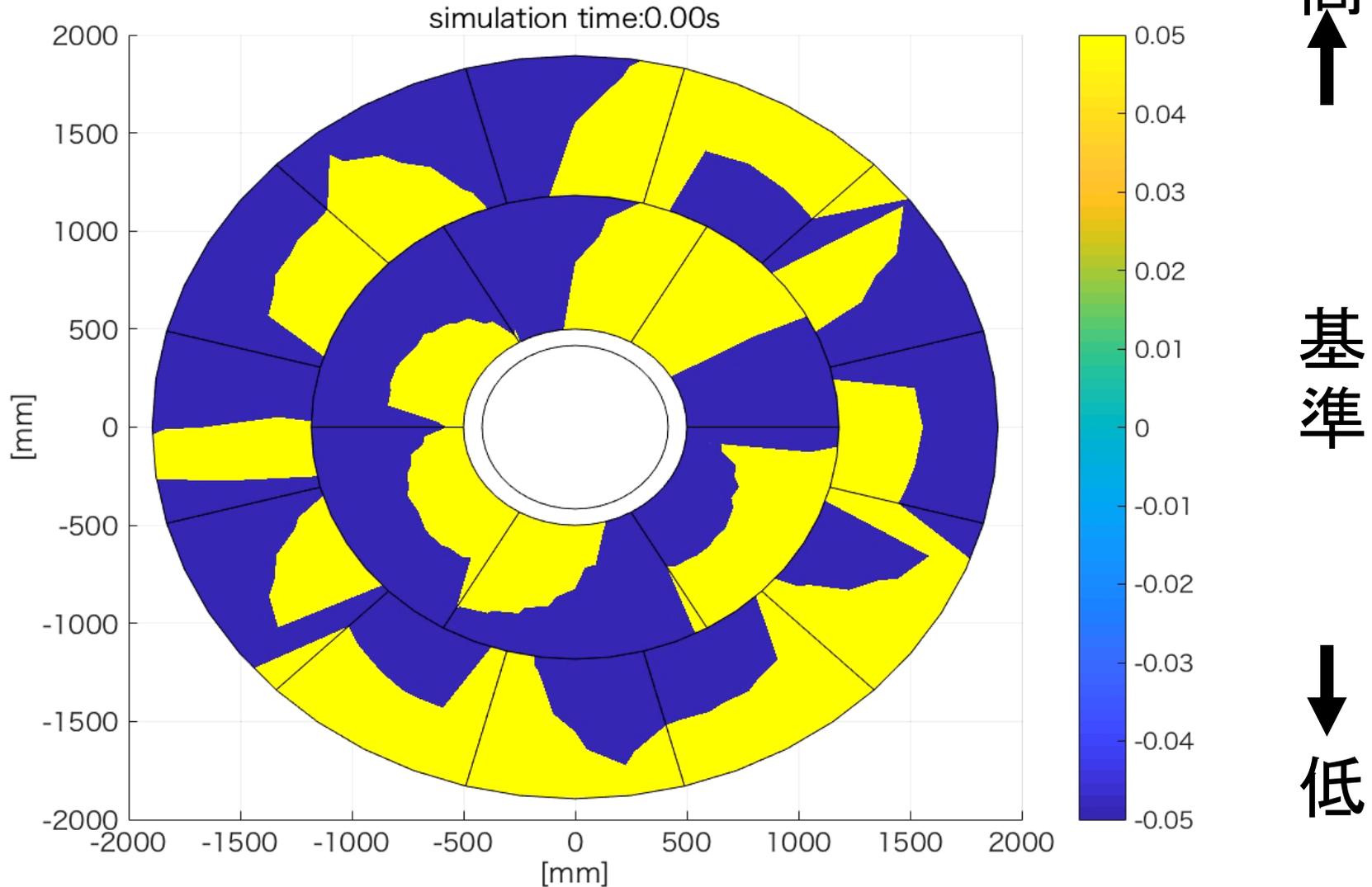
センサとアクチュエータの配置

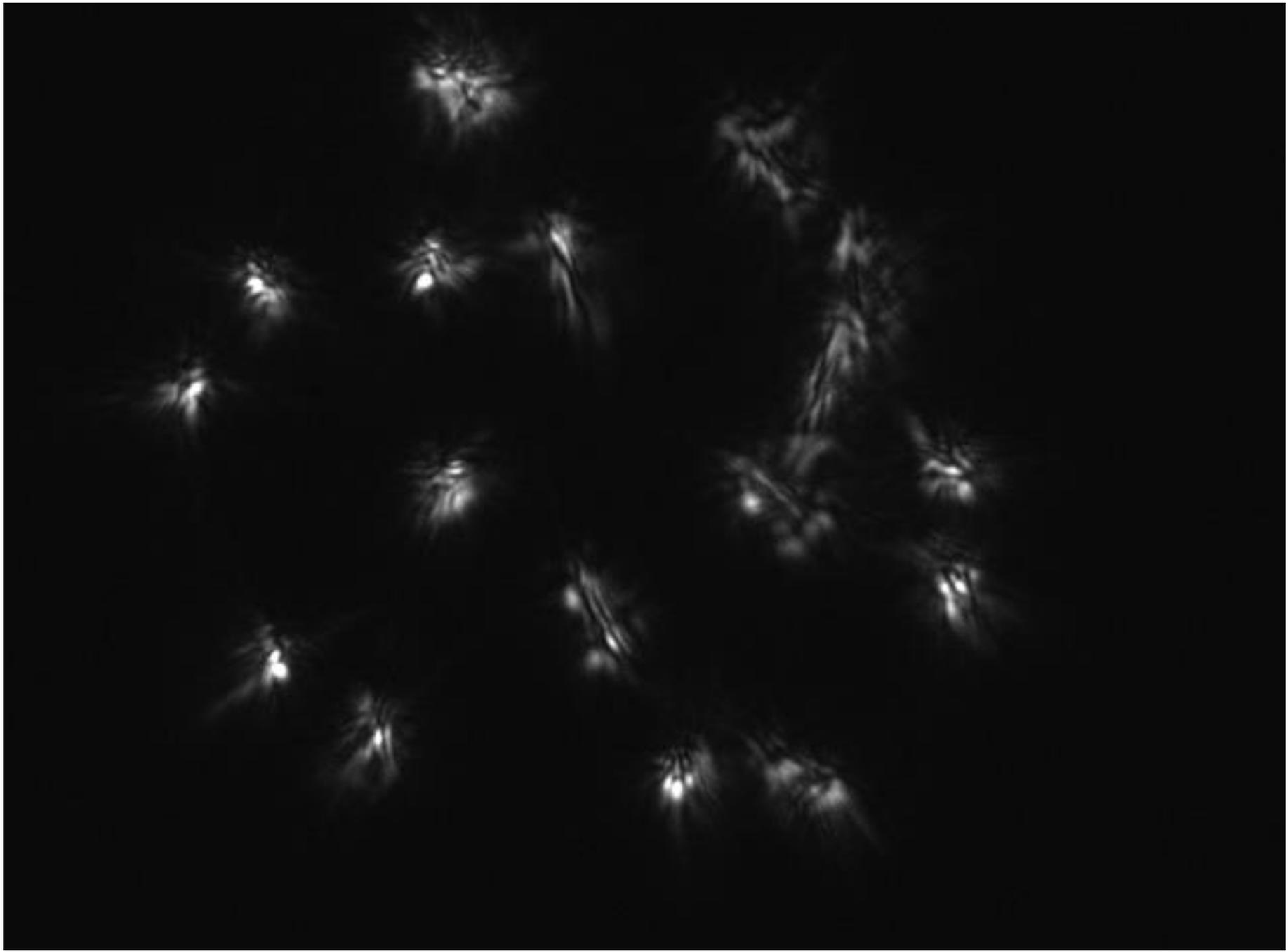


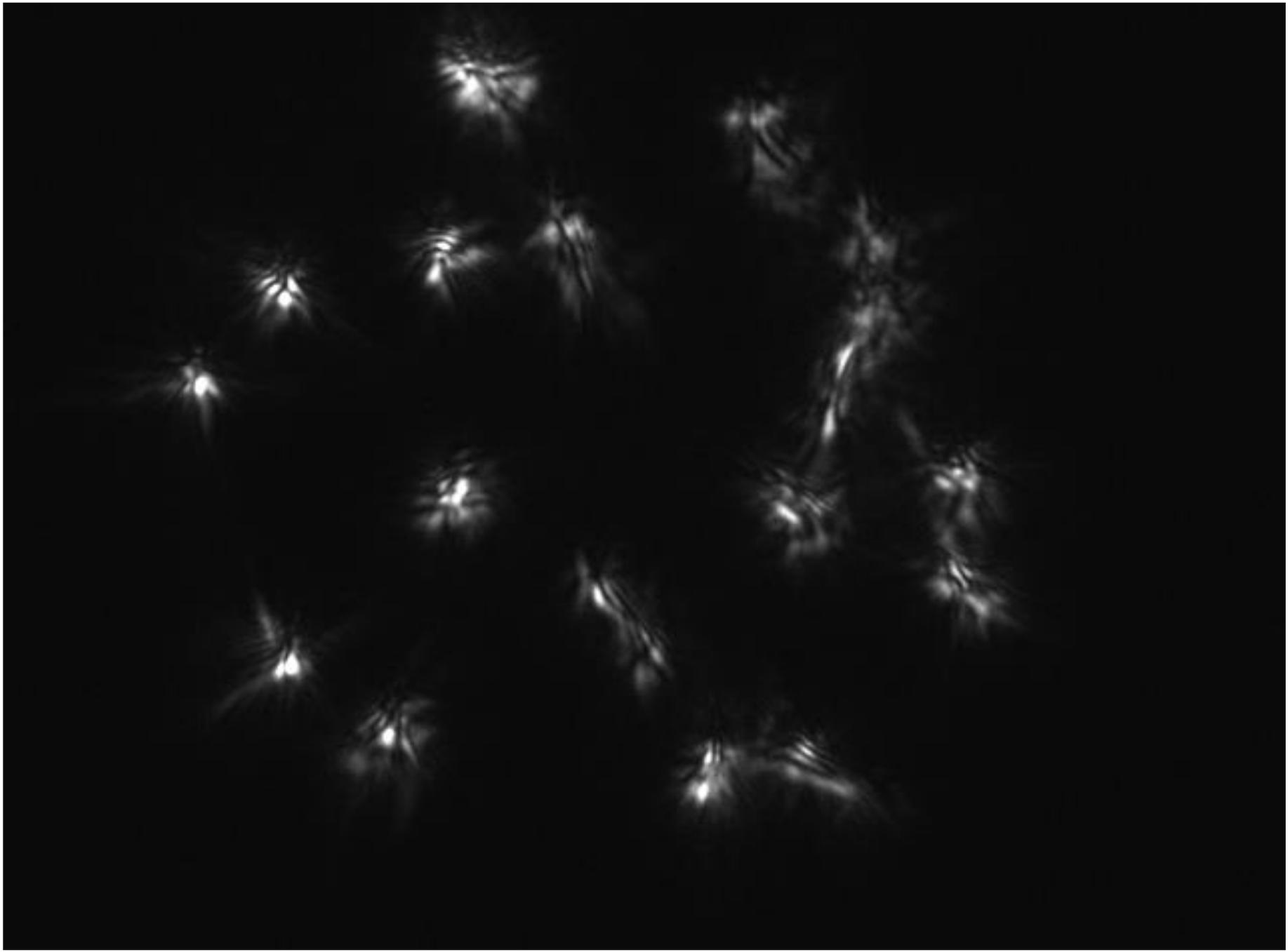
シミュレーション結果(分散制御)

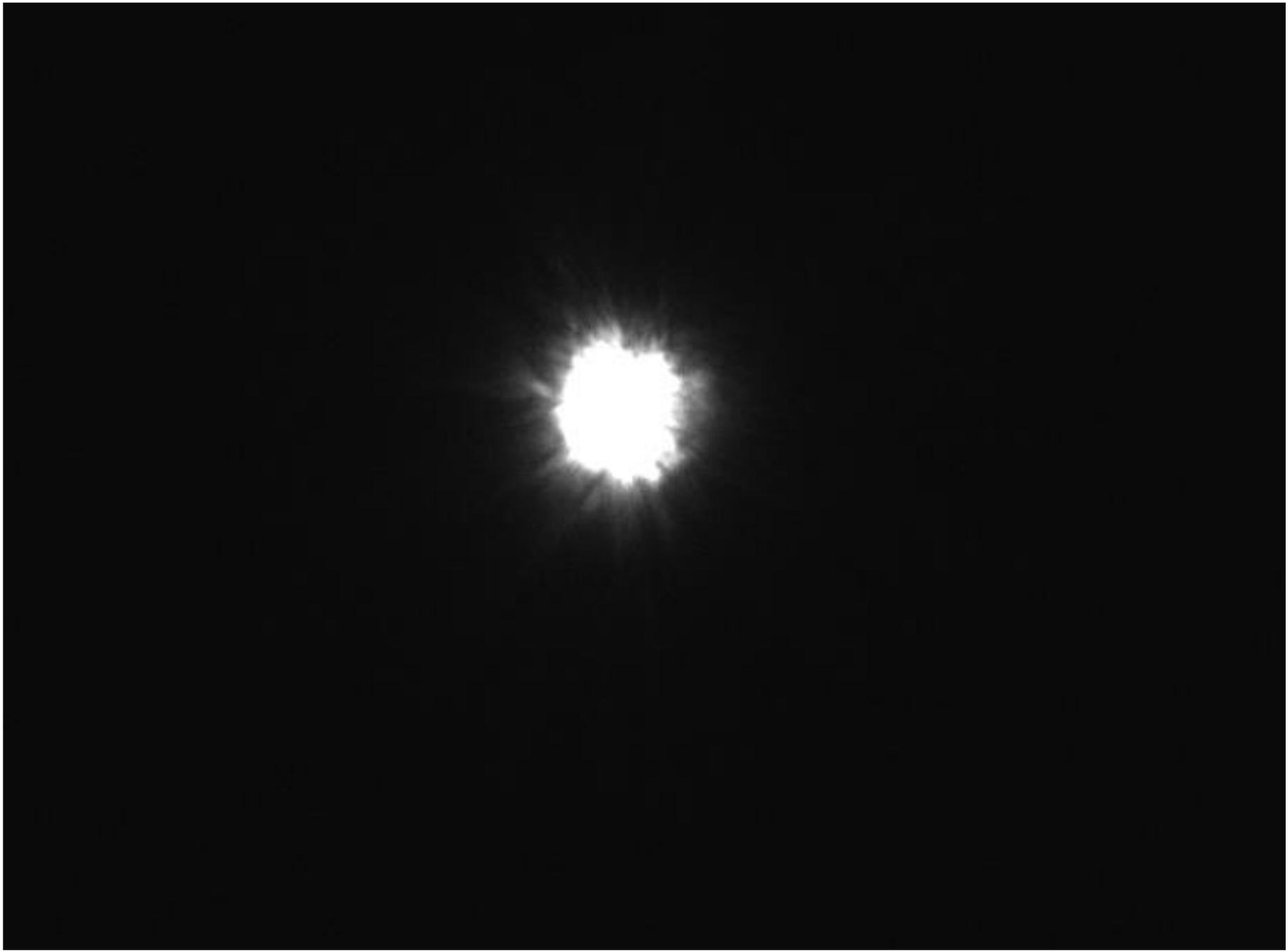


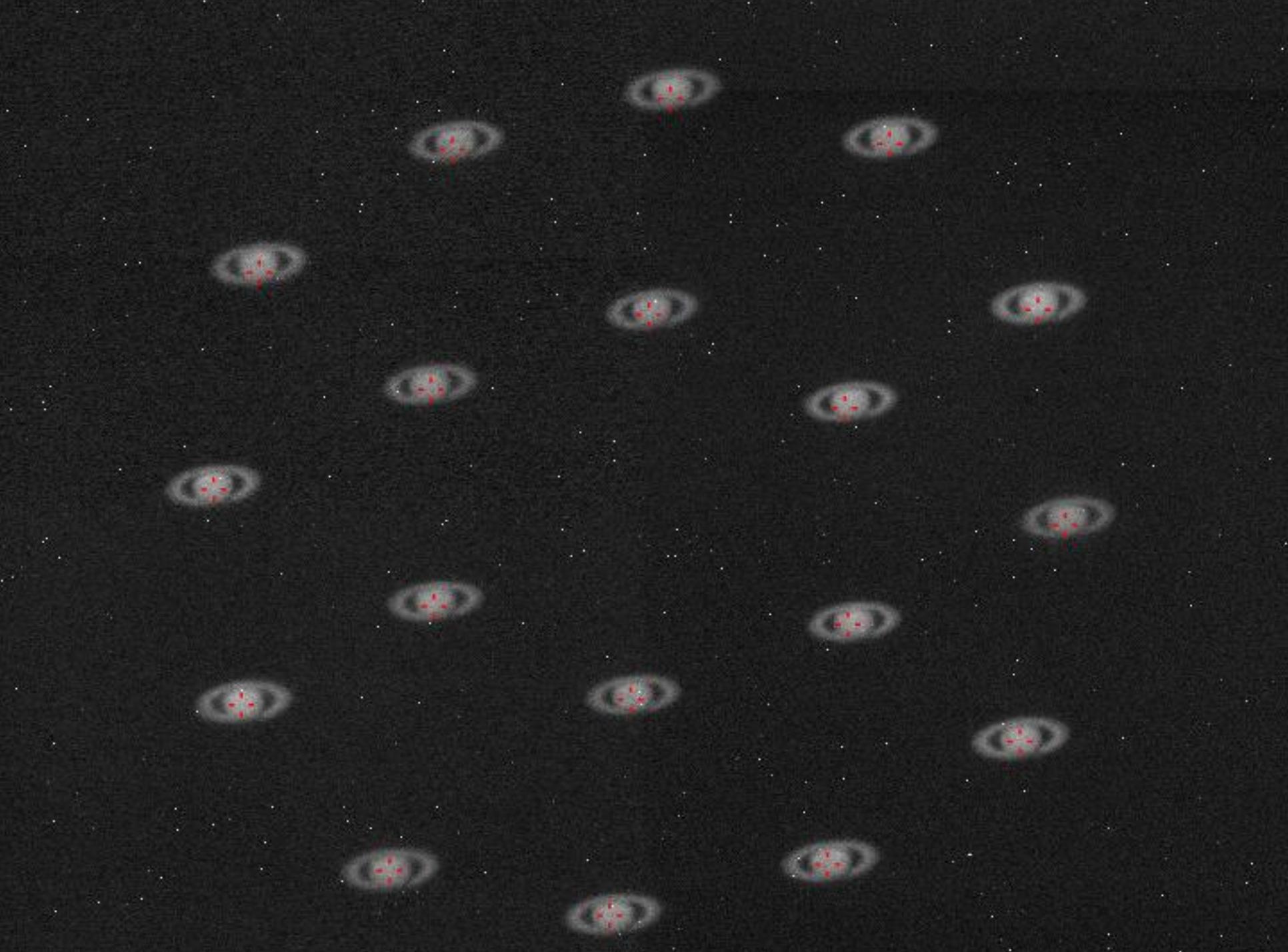
シミュレーション結果(集中制御)











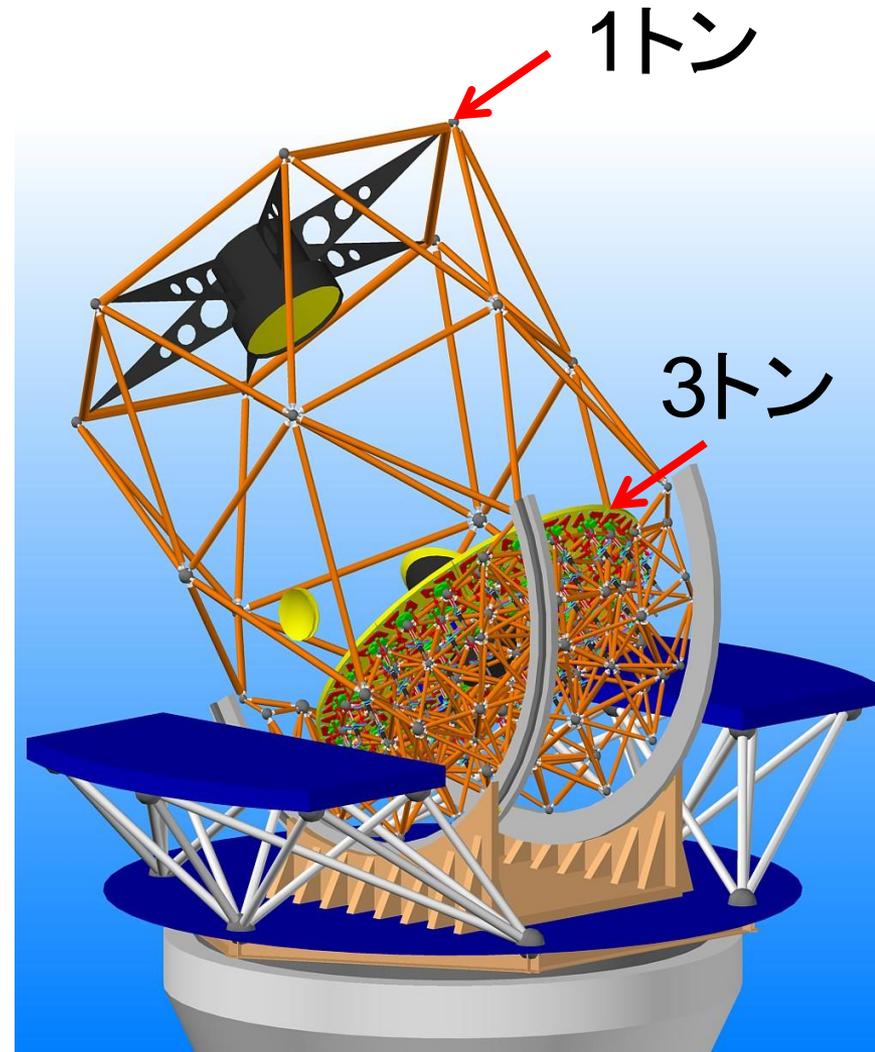


NGC 6916

軽量な構造

重たい鏡をより軽い構造で
変形を小さく抑えて支えたい

遺伝的アルゴリズムによる
最適化

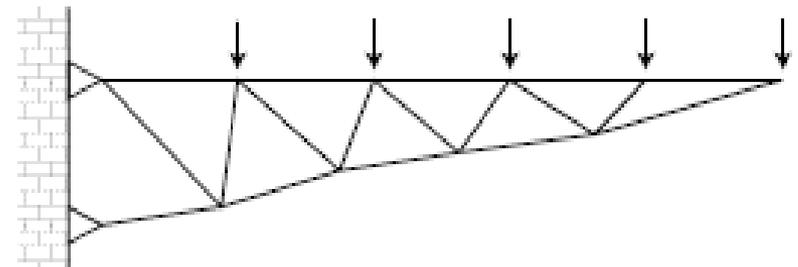
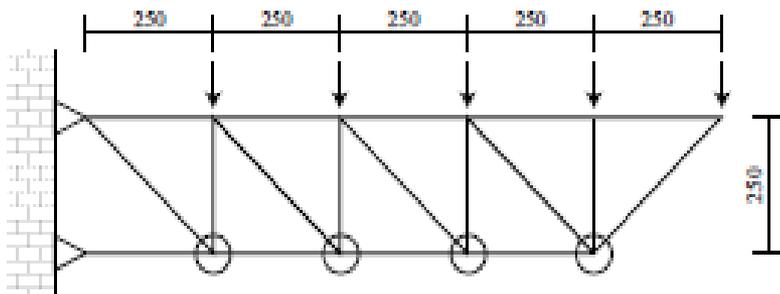


遺伝的アルゴリズムによる最適化

遺伝的アルゴリズムとは構造設計における最適化の手法のひとつである。

目的とする性能を数値化し、その数値を評価しながらより優れたモデルを目指す。

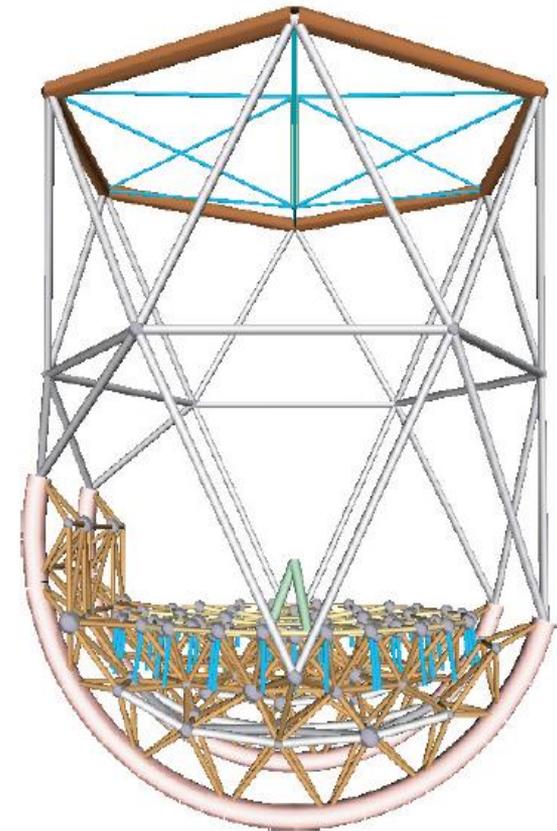
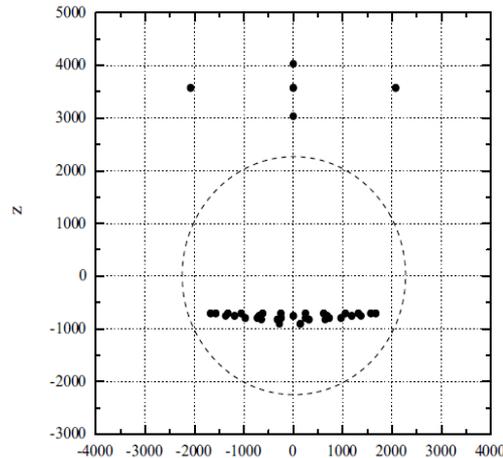
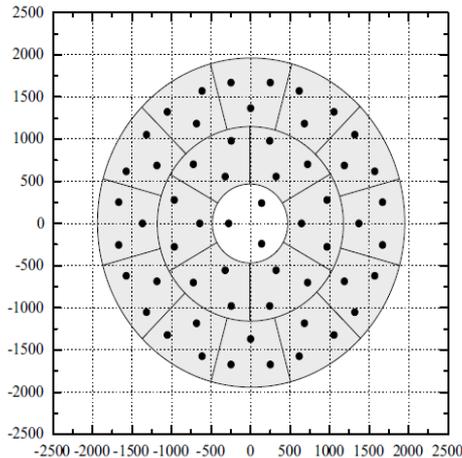
その際に**生命の進化**と同様に、1)進化の前後(親と子)間で情報を共有(**遺伝**)、別のモデルとの比較・合成(**交叉**)、不連続な変化(**突然変異**)をおこなう。



遺伝的アルゴリズムによる最適化の一例

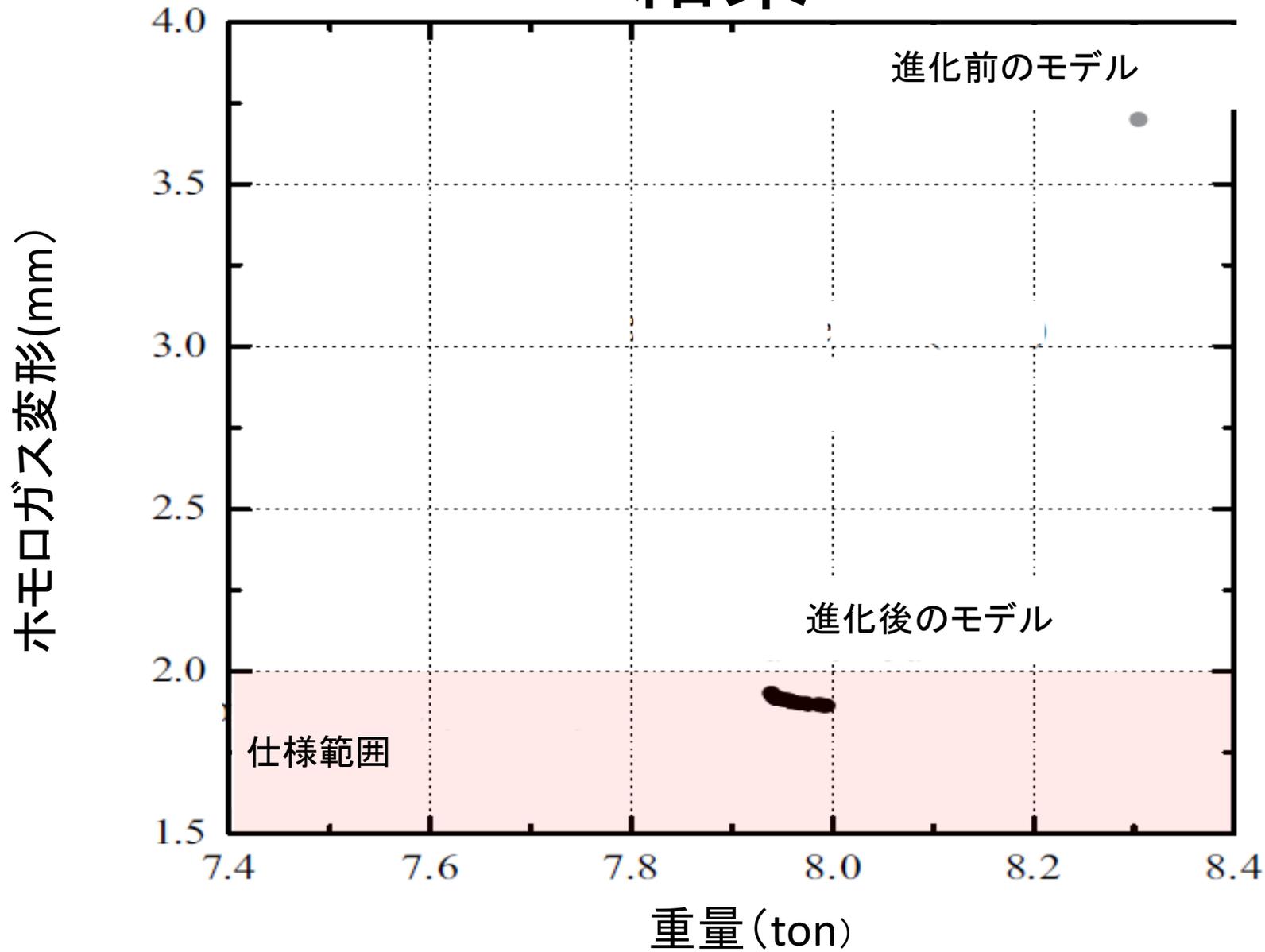
最適化条件

- 幾何条件 光学系支持用節点などの座標を固定
- 境界条件 鏡筒の支持点を固定
- 光学条件 光路上に構造物なし
- 部材条件 JIS規格品のみ

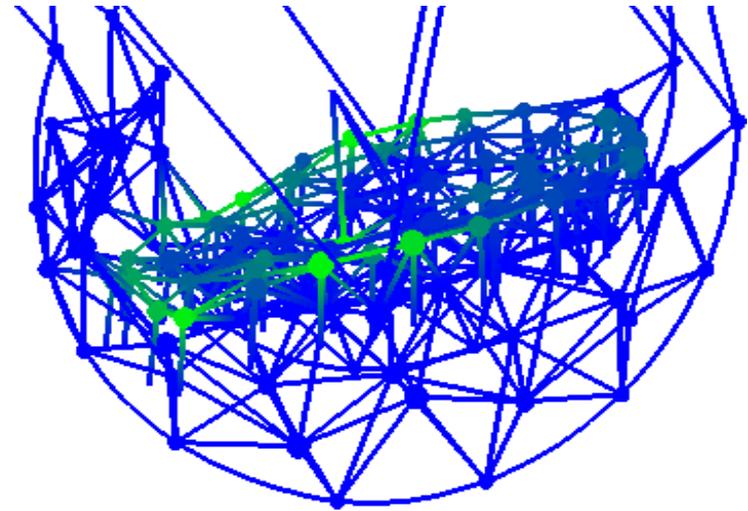
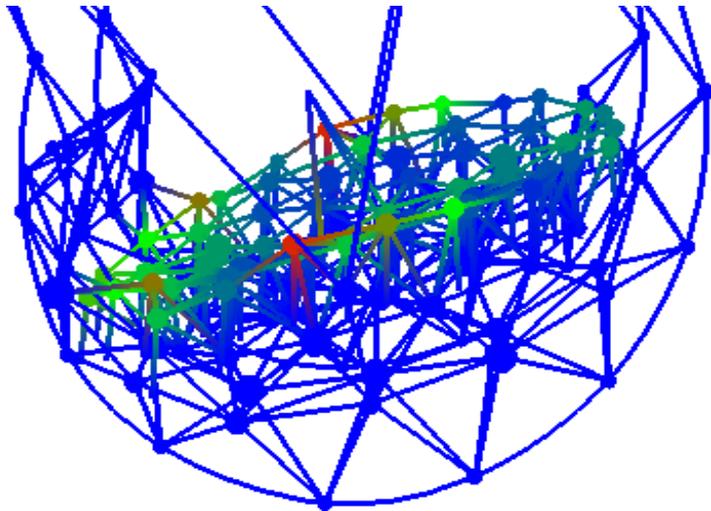
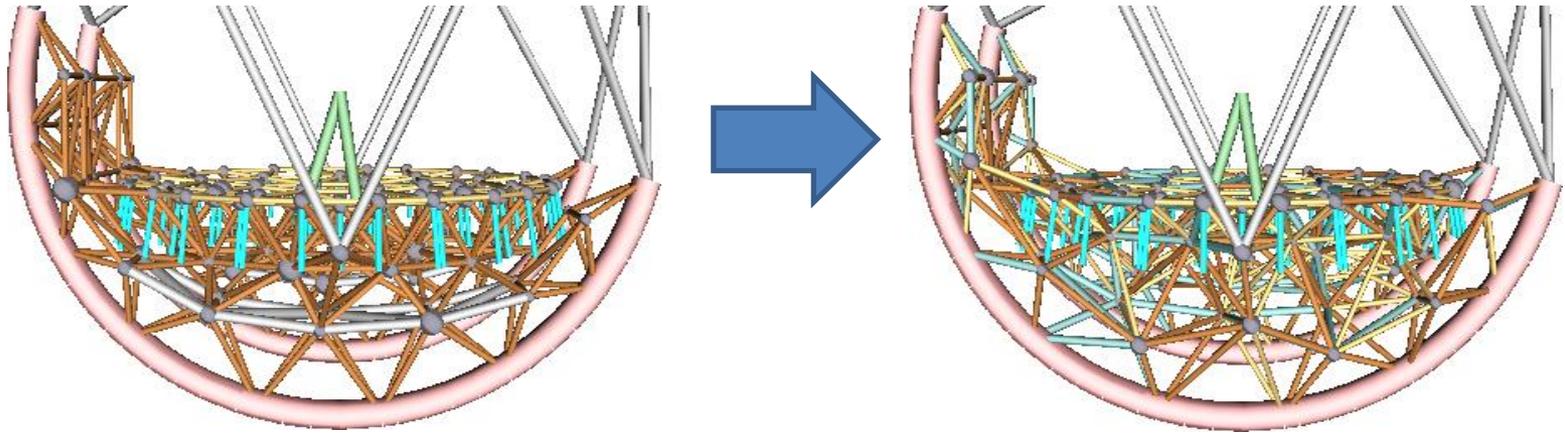


初期親モデル

結果



結果



0%

200%

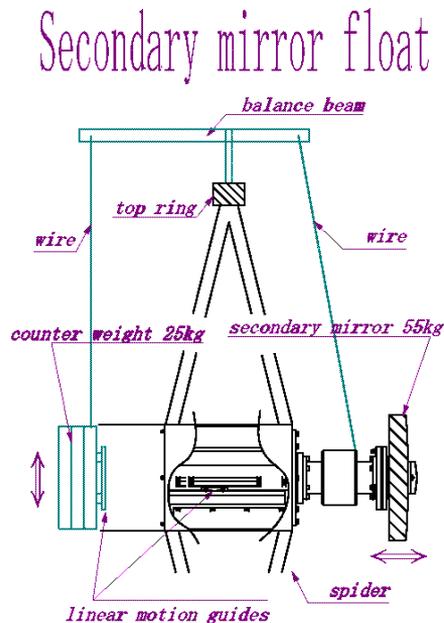


許容変形量

せいめい望遠鏡以前

不勉強も武器になる(若手の特権)

- 若いうちの失敗は恥ずかしくないし、温かく見守ってもらえる
- 自由な発想と挑戦をしてほしい



4年生の時の自動調整機構



1.4m望遠鏡に取り付けられた

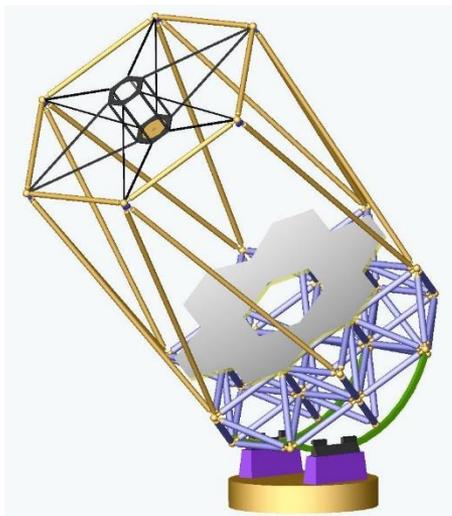
By all means



ダメもとで太陽工業(株)に相談し、望遠鏡のトラス構造の試作を行った

By all means

- やりたいことの実現にはあらゆる手段を用いる



D1の時に着想した望遠鏡
高度軸だけで試験を試みた

研究組織			
	氏名	所属機関	職名/学年
共同研究者	(代表者名)		
	栗田 光樹夫	名古屋大学大学院理学研究科	D1
	佐藤 修二	名古屋大学大学院理学研究科	教授
	長田 哲也	名古屋大学大学院理学研究科	助教授
	河合 利秀	名古屋大学理学部	技官
	吉田 道利	国立天文台岡山天体物理観測所	助教授
	舞原 俊憲	京都大学大学院理学研究科	教授
	岩室 史英	京都大学大学院理学研究科	助教授
	吉沢 正則	国立天文台位置天文・天体力学研究系	助教授
天文台側担教官氏名 所属研究系等 吉沢 正則 国立天文台位置天文・天体力学研究系			電話番号 0422-34-3786
必要経費（前年度に採択されたテーマの継続を希望する場合、及び次年度にわたって計画を希望する場合は前年度及び次年度の欄にも記入すること。）			

採択通知には259/1000万円の知らせとともに「学生がこのような金額を申請するのはいかがなものかという意見もありました」

By all means



望遠鏡を実証実験するために、実験棟の床をタダで平坦にした。



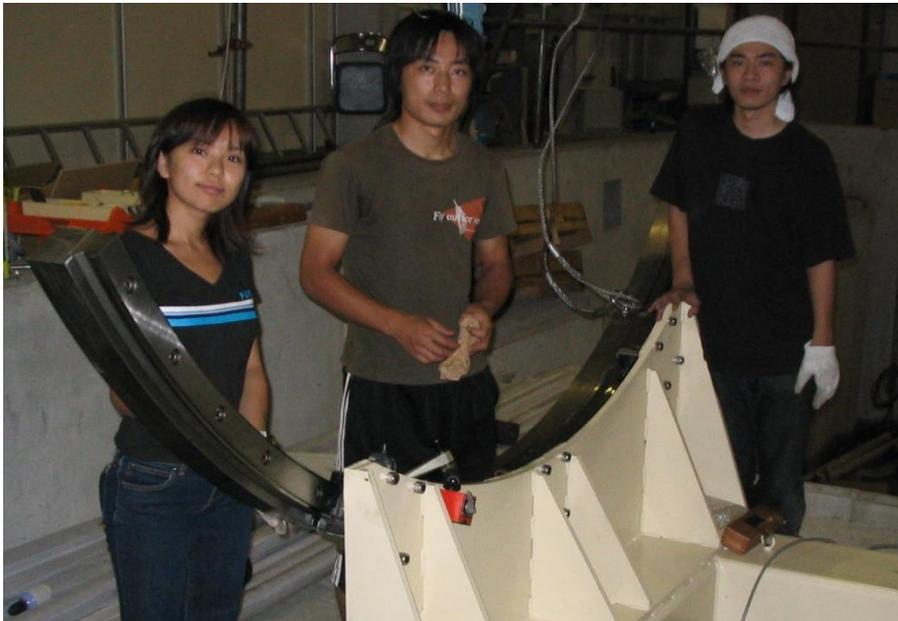
森島君と手作業で試みたが挫折
(2003年)



By all means

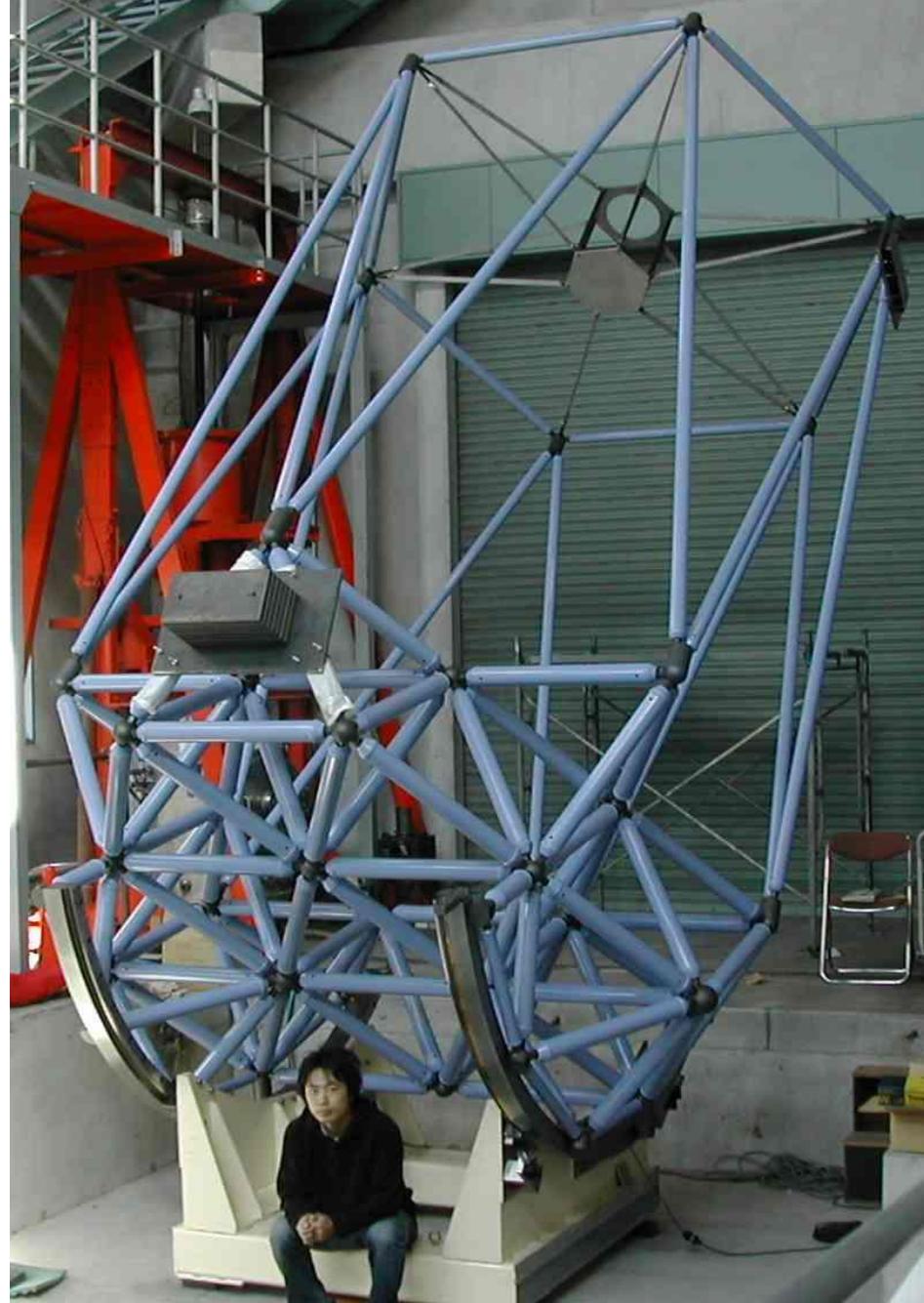


By all means



溶接もした

このころ環境学研究科の大森博先生と偶然出会い、遺伝的アルゴリズムによる最適化研究が始まる

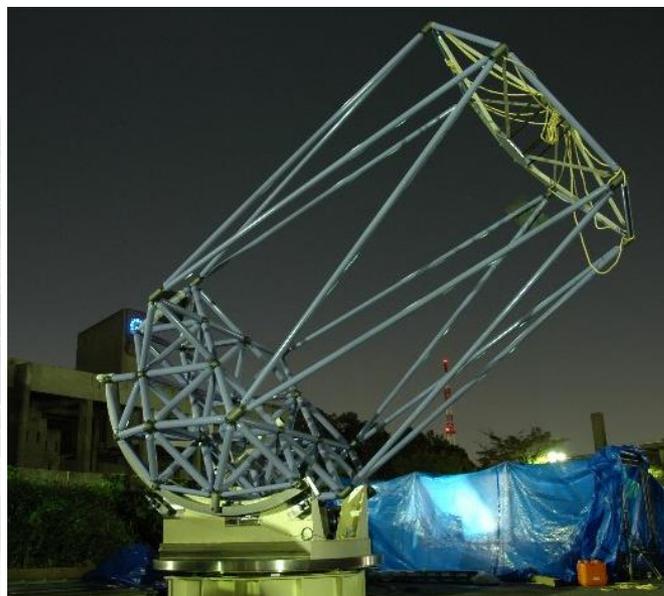


完成

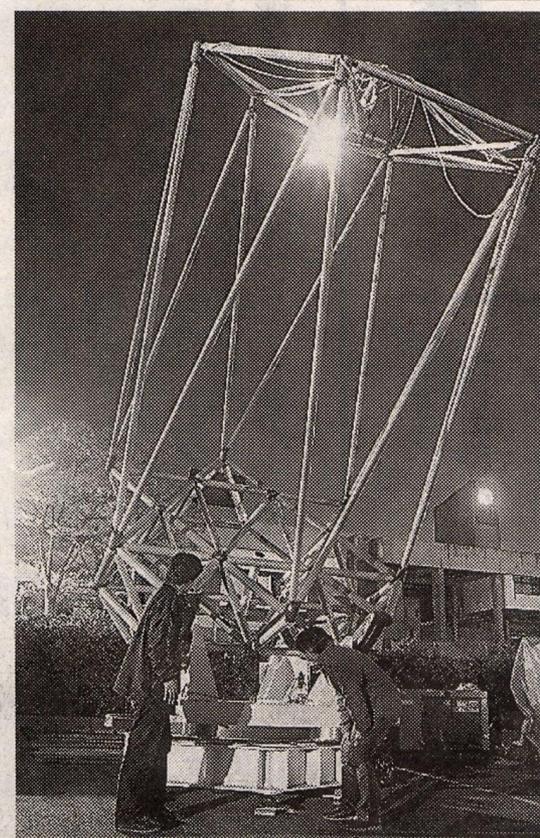
By all means



軽量さのおかげで1日で完了



豊田講堂の前庭での屋外試験
大学と交渉し、4台分の駐車スペースを借りた



超軽量望遠鏡を試験 名大

名古屋市千種区の名古屋大学構内で12日夜、同大学「光・赤外線天文学研究室」が開発した新型の超軽量望遠鏡の稼働試験があった—写真、林敏行撮影。

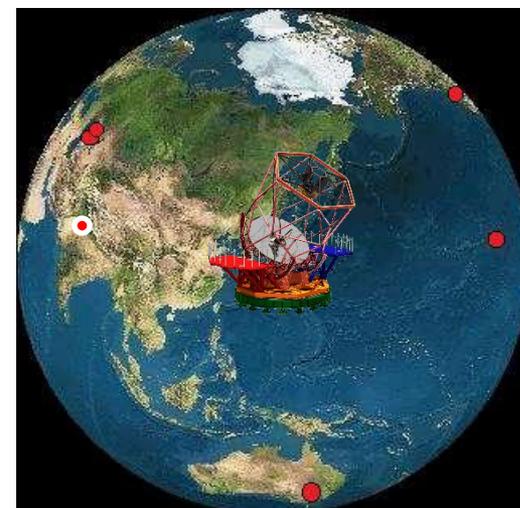
高さは約7㍍、重さは約5㍏。口径3㍍までの鏡を載せられる。本体をフレーム構造にしたことで、従来の10分の1程度に軽量化できた。空気が薄く観測に適する高所にも運びやすくなる。

12日の試験では、望遠鏡が、高精度で目的の星を追尾できることを確かめた。07年に試験に使った望遠鏡を完成させ、チリに運んで宇宙の水素分子を観測する計画だ。

せいめい望遠鏡

せいめい

- 2018年度中の完成^{2014が目標だった}
- 岡山天体物理観測所
- 口径: 3.8m (東アジア最大)
- 世界で2例目の分割式望遠鏡
- 鏡づくり(計測技術)
- 軽量架台



日本周辺の4m級以上の望遠鏡

仲間を増やす

チーム内で努力するだけが開発ではない

- 手を動かす開発メンバーは事実上5名ほど
- みなモノづくりは好きだが、分割鏡技術などを知らない。鏡も作ったことがない。
- 専門家の共同研究者を増やすことに努めた
 - 大森先生との成功例が念頭にあった
 - 制御: 山田先生、軸屋先生(名大)、入部先生(大阪電気通信)、企業
 - 精密加工: 島田先生(大阪電気通信)、庄司先生(東北大)、企業
 - 計測: 清野先生(東北大)、宇田先生(大阪電気通信)
 - 構造: 大森先生(名大)、企業
- 土曜日の技術検討会を52回開催
 - いつのまにか参加者が50名を超える
- 自分も天文学会以外の学会に積極的に参加した

チームの知見と
人材不足

アドバイザ探し

アドバイザが
共同研究者に

チームの知見と
人材が増大

チームの知見の
スピンアウト

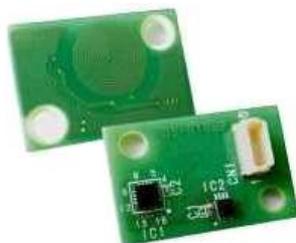
できることが広がり好循環が生まれた

原点に立ち返る—急がば回れ—



某メーカーの変位センサ(5万円)

環境依存が強く、使えないがメーカーは対応してくれず、改良に数年を要していた

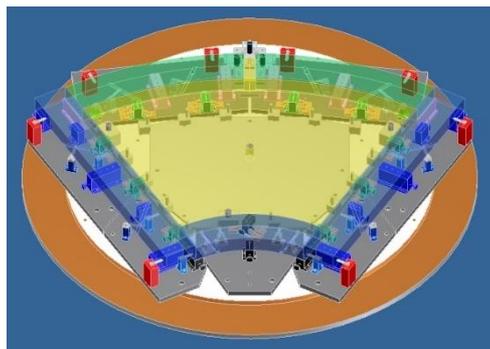


別のメーカーに似たセンサを発見(数千円)

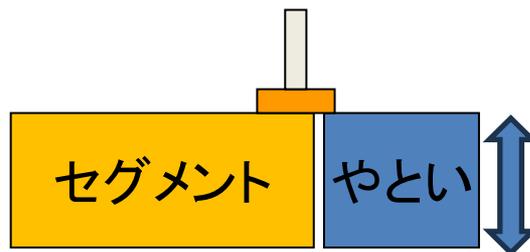
動作原理が判明し、メーカーと共同開発に発展。我々のアイデアをもとに性能アップと製品化に



基板を低熱膨張ガラス、回路を金メッキ、読み出し発振数のカウントアルゴリズムを変更



研磨で縁ダレが発生し、その対策に数年を要していた



縁ダレが改善せず、原因が段差なのか加工条件なのかが判明しない



ガラス板にスクラッチを入れ、そこを研磨した→縁ダレした

作業フェーズ

新技術

既存B

既存C

• 初期設計

• 詳細設計

• 発注

• 組立・実証試験

• 完成

作業フェーズ(悪い例)

新技術

既存B

既存C

• 初期設計

• 詳細設計

• 発注

• 組立・実証試験

• 完成

夏休みの宿題にしない

- せいめいの場合、研削加工、軽量架台と主鏡の計測技術が新技術であり、確立していた
- それらをエンジンとしてプロジェクトが進んだ
- しかし、分割鏡技術（制御、センサ、アクチュエータ、支持機構）、研磨技術、副鏡と第三鏡の計測技術が未完成あるいはまったく手付かずだった

- 未完成の技術の開発は後回しになりがち。作りやすいところから開発を進めると、未完成の技術への境界条件が狭まり、ますます実現が困難になる
- **自分の好きなこと、得意なこと**から開発していくとこの手のミスを犯しがちになるので注意

大学のものづくり

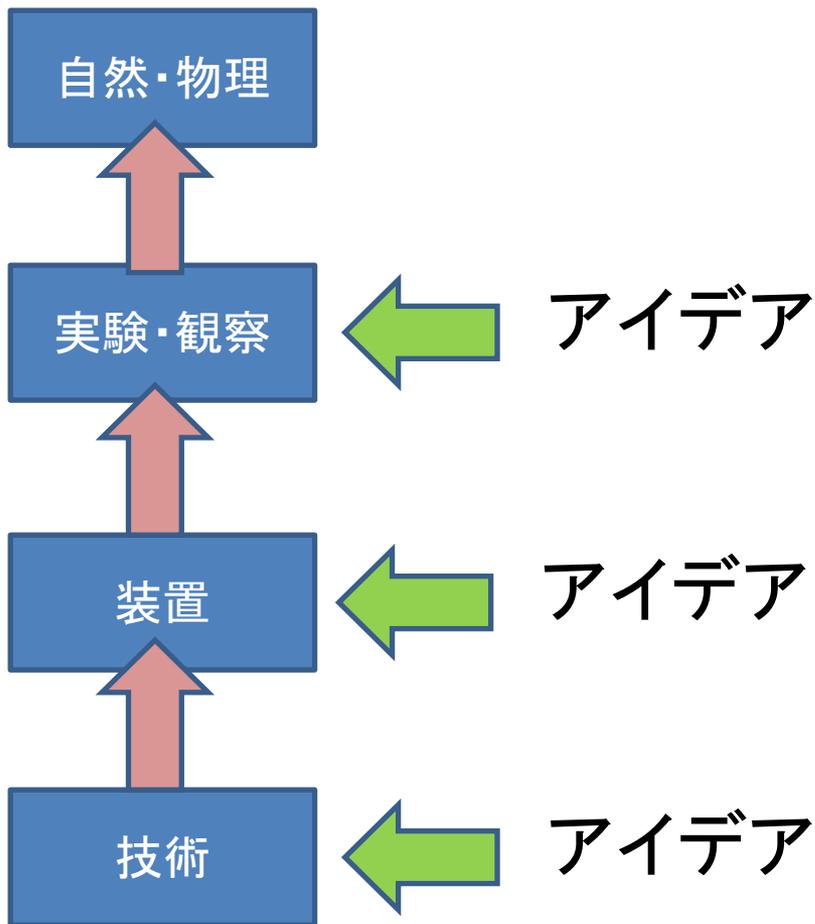
なぜ科学者が実験装置を作る必要があるのか



地球の大きさ(エラトステネス)
落体(ガリレオ)

地球の自転(フーコー)
慣性(ガリレオ)

分光(ニュートン)、万有引力定数(キャベンディッシュ)、光の波動性(ヤング)、原子核(ラザフォード)、電気素量(ミリカン)

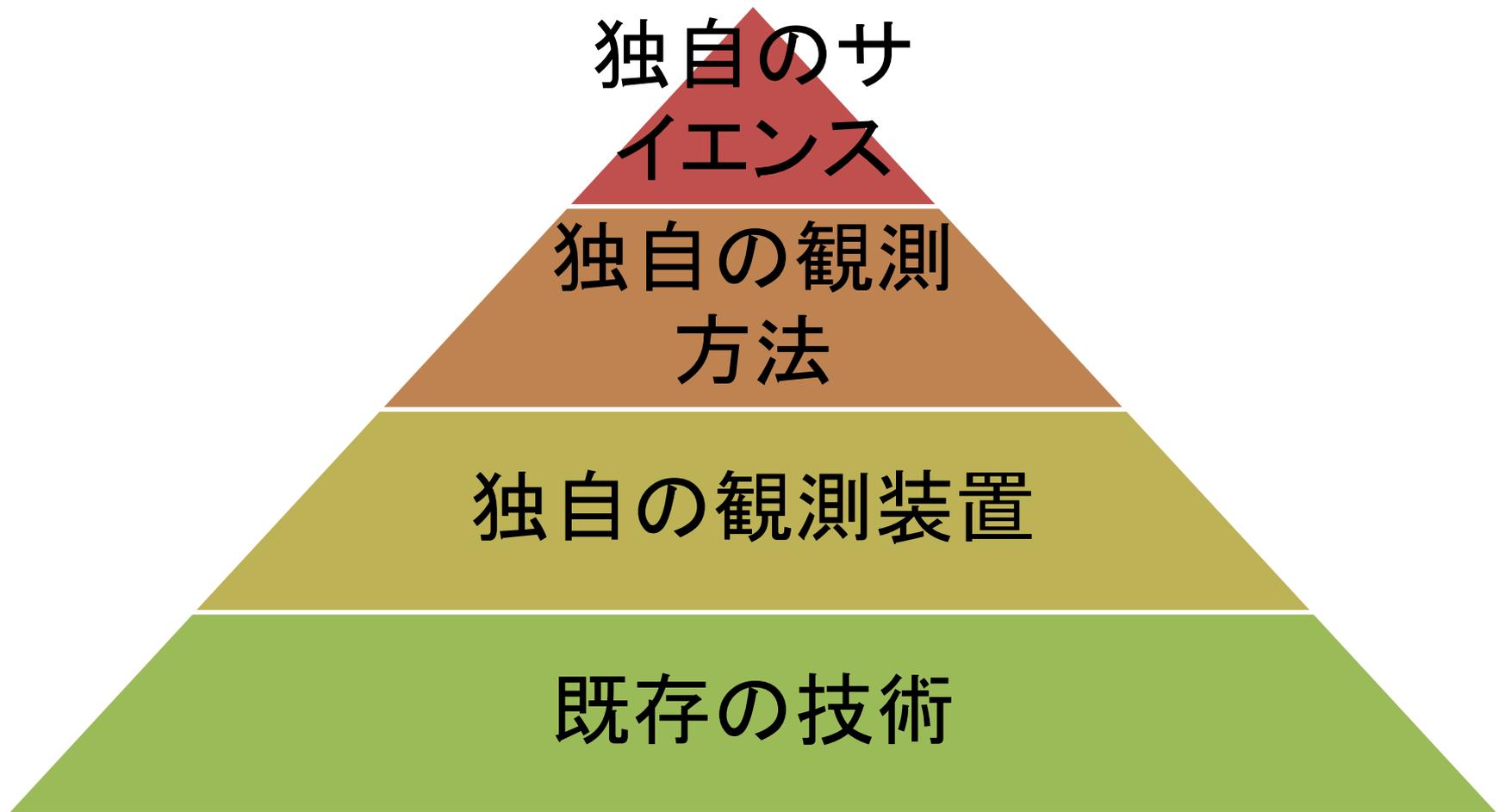


自然や物理の理解が目的だが、それには実験方法、装置の工夫、さらには技術の開発によって実現した研究が数多くある。

良い装置開発とは

- 開発には主に2種類ある
 - 新規性の高い開発
 - 単純労働な開発
- 成功のためには、できるだけ単純労働な開発を心がける
- 初期調査が重要
- 既存の技術に少しの新技術

良い装置開発のイメージ



できるだけ下の要素で手抜きをして、上の要素で独自性を出すやむを得ず下の要素に努力が支払われる

良い装置開発のイメージ

例: 固有運動
銀河回転

独自のサイエンス

例: 宇宙大規模構造

独自の観測方法

例: 赤方偏移、
トランジット
年周視差

独自の観測装置

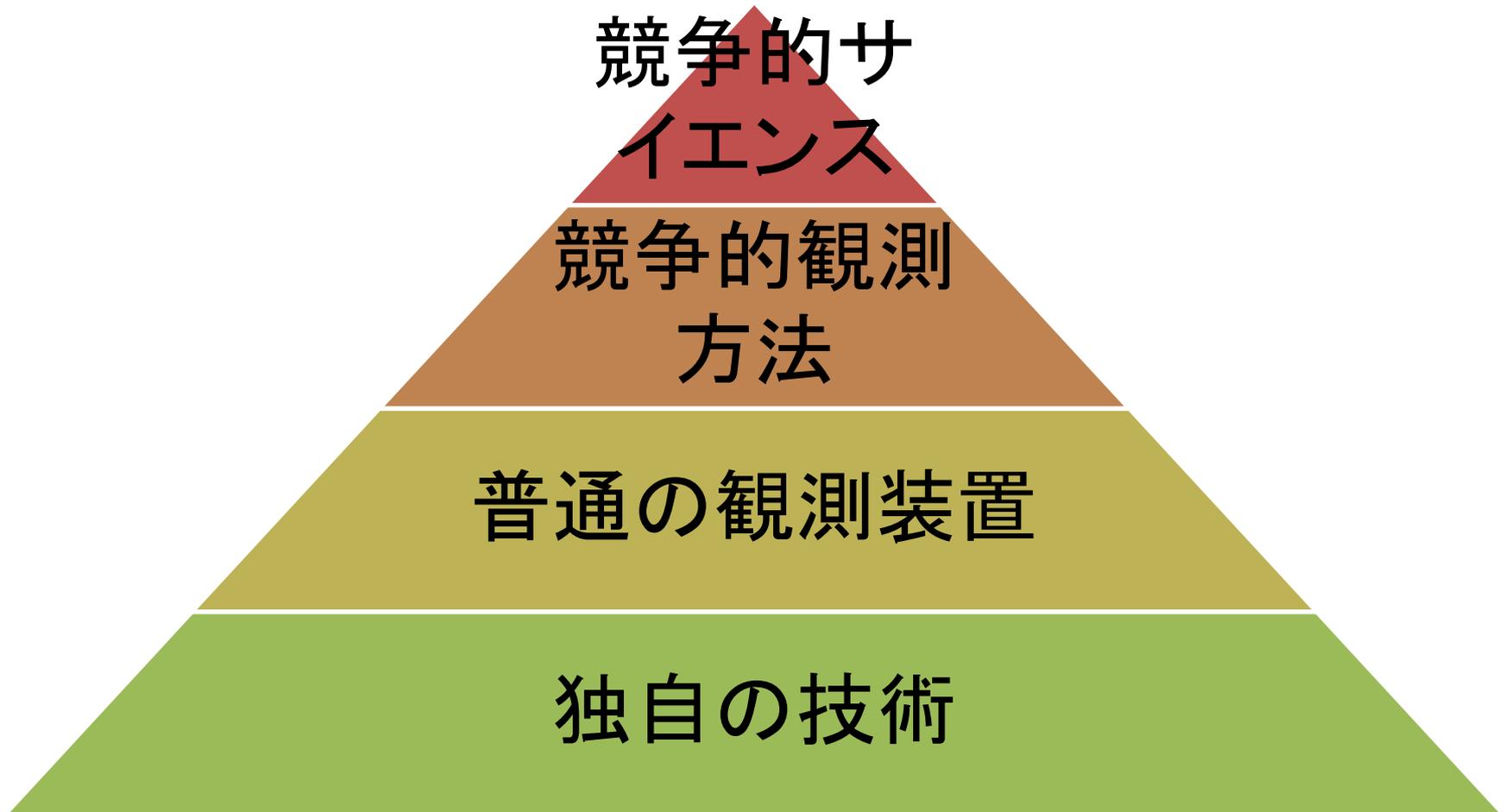
例: RVと広分散分光器
ヘリオグラフ
ガリレオの望遠鏡
フーコーの振り子

既存の技術

例: 光電子増倍管
補償光学

できるだけ下の要素で手抜きをして、上の要素で独自性を出す。やむを得ないときに独自の技術を開発する。その技術が実現すると開発者として最高にハッピー

悪い装置開発のイメージ



競争的サイエンスは独自のサイエンスに比べて一般的に評価されやすいですが、ここではサイエンスの価値は議論しません

せいめいの進化

- せいめいで培った鏡加工ベンチャー企業を立ち上げた
- 特許を複数登録し、使用料を獲得
- インドネシアに姉妹望遠鏡ができた
 - 海外の大型望遠鏡はほぼすべてコピーがあり、それが一つの目標でもあった

