

主な技術開発の進捗状況

京大岡山新技術望遠鏡外部評価資料

主な開発項目

本計画には大きく、4つの開発の柱がある。それぞれ、光学素子の計測を行うための計測機器、超精密で高速な研削加工を主とした光学素子の加工技術、複数の鏡を合成し大口径を実現する分割鏡技術、そして機動性の高い望遠鏡を実現する軽量架台構造技術である。それぞれは以下に示すような要素技術の開発に基づく。

- 計測機器
 - CGH干渉計
 - 制振装置
 - 非接触走査型計測器

- 光学素子の加工
 - 研削加工
 - 支持冶具
 - 修正研磨加工
 - 圧力一定研磨（縁研磨）

- 分割鏡制御
 - 位相カメラ
 - シャックハルトマン波面センサ
 - ギャップセンサ
 - アクチュエータ
 - 支持機構
 - 制御アルゴリズム

- 軽量架台
 - 高度軸軸受
 - 構造最適化

開発項目の概要と状況

計測機器

CGH干渉計

内周6枚、外周12枚の形状と曲率を計測する計測システム。波面の生成と合成にコンピュータ・ジェネレイテッド・ホログラム (CGH) を採用した。CGHによる0次光と1次光を巧みに用いて、振動に強く高いコントラストを実現した干渉計である。精度としてP-V = 80 nm, RMS = 15 nm, 再現性として8 nmを達成した。

制振装置

高さ10mの干渉計を支えるタワーの振動を抑える装置。電磁誘導の原理を利用し、シンプルかつ安価に開発した。振幅10 μ m、周波数およそ4 Hzと2.3Hzの振動をそれぞれ振幅1 μ mに抑えることに成功した。

非接触走査型計測器

干渉計の苦手とする凸形状の副鏡や自由曲面を計測するためのシステム。レーザ変位計と研削盤の運動再現性を用いて、非接触で1 mサイズの光学素子をRMS = 20 nmで計測することを狙う。 Φ 650 mmの面積においてRMS = 15 nmの再現性を達成し、要素検証を終了した。

開発項目の概要と状況

光学素子の加工

研削加工

超精密研削盤を用いてメートルサイズの光学面をナノレベルで高速に加工する。現時点で内周セグメント1枚を9日間でP-V = 1 μm の精度で加工することを達成した。

支持治具

加工中のセグメントを保持するための治具。セグメントをフロートした状態で保持し、加工抵抗に対する変形の再現性が高く、修正加工が効率よくできる治具をシンプルかつ安価に開発した。現状で、支持力の誤差は30 gf程度、保持再現性はRMS = 20 nmを達成した。

研磨加工

研削面の面粗さ向上と形状修正を行うプロセス。研削盤に取り付けた2軸駆動の研磨パッドで研磨する。ヤトイを用いた縁の研磨とデコンボリューション法を用いた全体研磨を行い、現状で12日間の工程で仕様を満たす形状精度を達成した。今後はさらに加工工程の短縮を狙う。

圧力一定研磨（縁研磨）

研磨による縁ダレを抑えつつヤトイを必要としない研磨方法。セグメントから研磨パッドがはみ出すことによる圧力の増加を制御し、一定に保つ。現状で縁ダレ幅が2 mmを実現する要素検証が達成された。今後は全面研磨へと拡張する。

開発項目の概要と状況

分割鏡制御

位相カメラ

隣り合うセグメント間の段差（位相）を光学的に検出するカメラ。装置自身の多色レーザーを光源とすることで、天然光源を必要としないため、シーイングの影響を受けず昼間も計測可能。これまでに位相測定と10 μmの段差から位相を合わせることに成功した。現在、ダイオードチューナブルレーザーを用いて第二世代のプロトタイプ試験を行っている。

シャックハルトマン波面センサ

分割式望遠鏡の各鏡の姿勢を光学的に測定する目的のカメラ。目標精度は0.06秒角、視野は30秒角、限界等級はRバンドで8等級である。主鏡をマスクして各鏡に対して2箇所10cmの開口を空けて、36個のマイクロレンズアレイでカメラに一度に結像させる。各点像の理想的な位置からのずれを精度よく測定することで鏡の姿勢の理想的なずれを推定する。

ギャップセンサ

隣り合うセグメント間の段差を検出するセンサ。望遠鏡全体でおよそ60個必要となる。LC発振を計測原理とする。要素検証として、独立した別のセンサで保証を行うことにより、サンプルレート6 Hz、分解能RMS = 10 nm、安定性P-V = 30 nm(温度変化5°Cの環境で13時間)を確認した。今後はセンサの個体差、さらに厳しい耐環境性、長期安定性を実現するための開発を行う。

アクチュエータ

セグメントの姿勢と光軸方向の位置決めを行うアクチュエータ。望遠鏡全体で54本必要とされる。モータ、ボールねじ、減速器からなる。現在、実機架台上で6"/sの姿勢変化の下、RMS = 15 nmの応答性能を達成した。今後、動的特性の詳細調査を行う。

支持機構

セグメントの自重変形と望遠鏡上での固定および、アクチュエータの駆動を鏡に伝達する機構初期設計として、9点支持で自重変形RMS = 30 nm、P-V = 140 nm、構造関数においても十分に仕様を満たす支持点配置を確認した。今後はプロトタイプを作成し、光学検証を行う。

制御アルゴリズム

ギャップセンサ配置から、アクチュエータへの入力値を計算する演算部。鏡の段差においてセンサノイズの増幅をおよそ130%以下に抑えるセンサ配置が見つかった。

開発項目の概要と状況

軽量架台

高度軸軸受

主鏡を真下から直接支える2本の大きな円弧上の高度軸軸受。トラス構造と共に構造全体に曲げモーメントが発生しない効率の良い構造を開発した。すでに製作を終え、高度軸の駆動重量として8トンという軽量さを達成した。

構造最適化

主鏡、副鏡、第三鏡の各光学素子の重力による相対変位を最小に抑えつつ、さらに軽量化を行うための手法。遺伝的アルゴリズムを用いて行った。結果として、主鏡用の54個の節点に関しては0.1 mm、副鏡の主鏡に対する変位として0.39 mm、第三強に関しては0.05 mmを高度角20度から90度の範囲で達成した。

開発状況まとめ

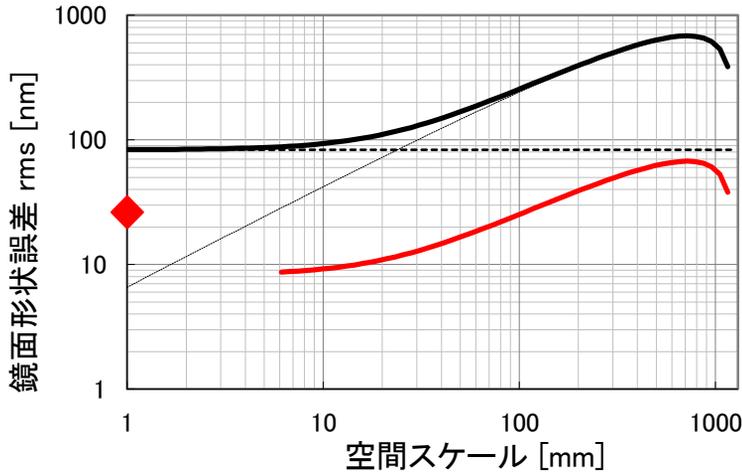
各開発項目が現在どの段階にあるかを以下の表に示す。数字はそれぞれ、1：調査、2：概念設計、3：概念設計検証、4：初期設計、5：詳細設計および実機製作をしめす。主に実験を伴う開発段階は3の概念設計検証段階にあたる。3をクリアし、4の段階に入ることが開発に目途がついたと捉えることができる。

項目	進捗度
CGH干渉計	5
制振装置	5
非接触走査型計測器	3
研削加工	5
支持治具	5
修正研磨加工	4
圧力一定研磨（縁研磨）	3
位相カメラ	3
シヤックハルトマン波面センサ	4
ギャップセンサ	3
アクチュエータ	3
支持機構	2
制御アルゴリズム	5
高度軸軸受	5
構造最適化	5

CGH干渉計

- 仕様・目標

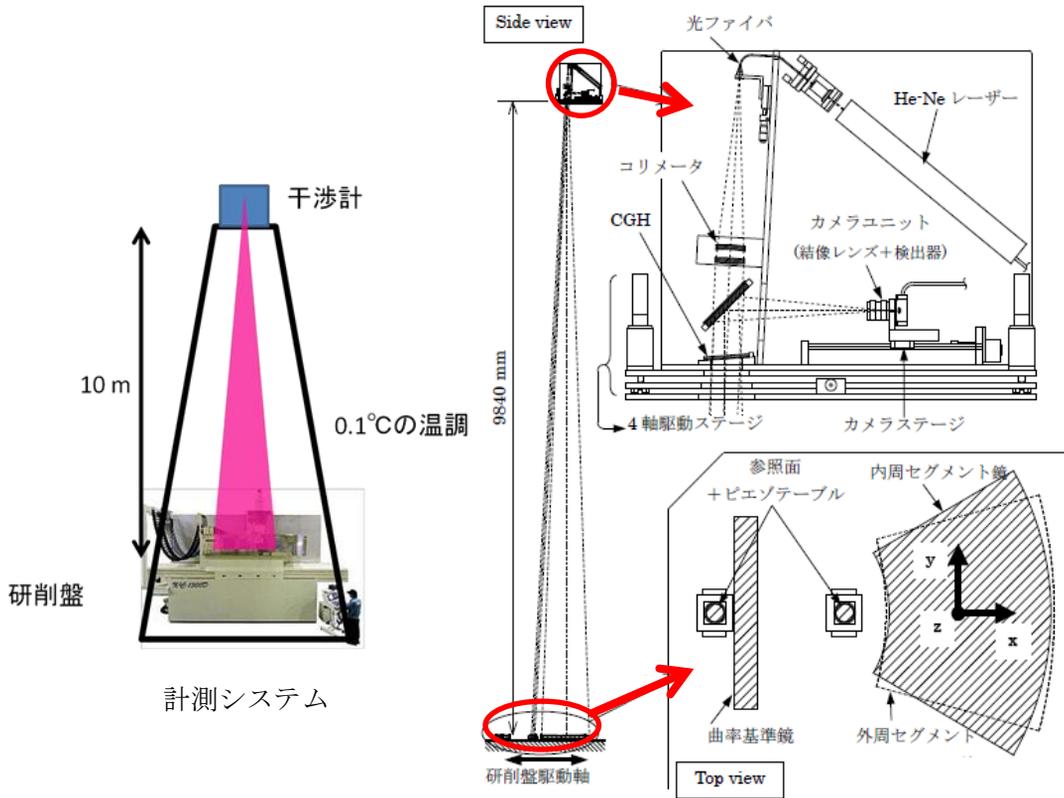
干渉計の計測は図に示すような空間スケールに依存した精度を達成する必要がある。



主鏡計測に許容される誤差（赤線）。回折とシーイングによる波面誤差(黒線)。ただし鏡面誤差と比較しやすいよう1/2倍されている。

- 手法

図に示すようなコンピュータ・ジェネレイティッド・ホログラム (CGH) を用いた計測システムを構築した。



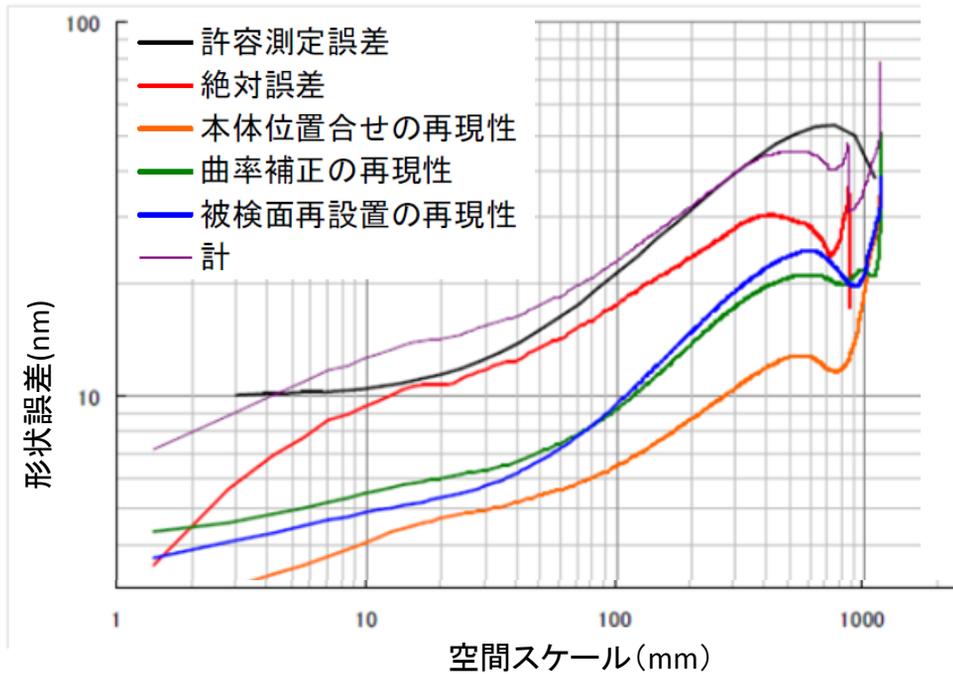
CGH干渉計

右上には干渉計本体、右下には被検面周辺の詳細図を示す。

CGH干渉計

- 到達度

空間スケールで100 mm以下の領域で要求仕様をわずかに満たさないが、要求仕様に十分な安全を取っているため、干渉計としては当初の性能を達成したと判断する。



干渉計の計測誤差と許容値

干渉計による測定誤差の構造関数。黒線は許容される測定誤差。赤線はフィゾー干渉計と比較して求めた絶対誤差。橙線は干渉計本体と被検面間の位置合わせ(z軸を除く)を行った場合の再現性。緑線は曲率基準鏡を用いてz軸の調整を行った場合の再現性。青線はバネ支持台に被検面を再設置した場合の再現性。紫線は4種類の測定誤差の2乗和。

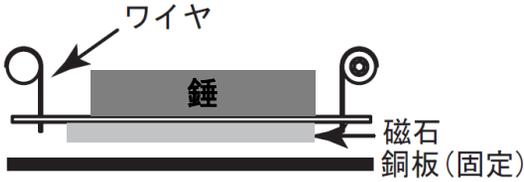
制振装置

- 仕様・目標

干渉計を載せた高さ10 mのタワーの振動を振幅にして1 μm 以下に抑える必要がある。

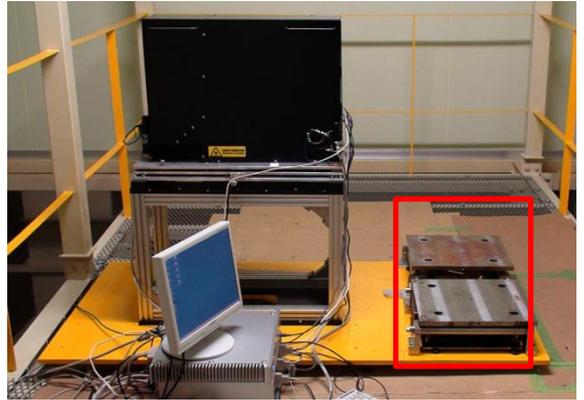
- 手法

下図に示す減衰装置を干渉計の載るタワーの天頂部に設置した。振動は2方向独立なので、振動数をチューニングした2つの制振装置を製作した。



制振装置の概念図

タワーの天頂部に固定された銅板に対して、磁石の取り付けられたゴンドラが振り子運動を行い銅板と磁石の相対運動により粘性抵抗が生じる。

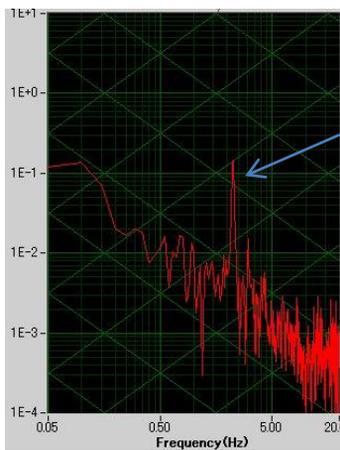


測定塔上に設置したCGH干渉計
右の2個の鉄板は測定塔の振動を抑えるための制振装置。

- 到達度

タワーの振幅は10 μm が1 μm に収まった。

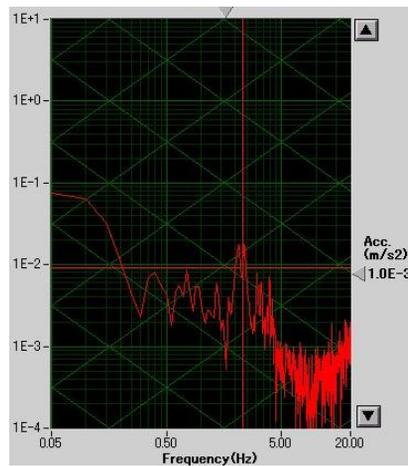
制振前



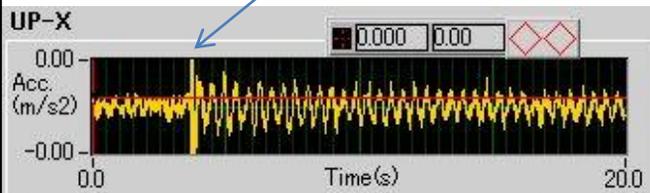
振動のピーク

タワーの振動スペクトル

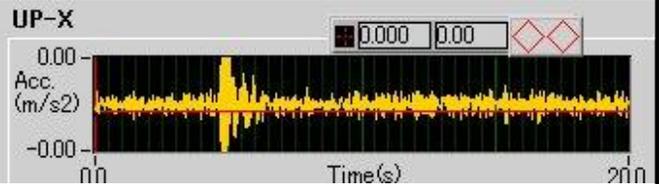
制振後



ハンマリングの時刻



ハンマリング後の減衰の様子



非接触走査型計測器

- 仕様・目標

加工機上のワークを移動することなく、測定分解能 $RMS < 20 \text{ nm}$ 、測定範囲 $> \Phi 1 \text{ m}$ 、測定時間 < 3 時間程度の自由曲面を計測できること。

- 手法

研削盤の砥石ヘッドに取り付けたレーザ変位計（キーエンス製LT9000）で計測する。研削盤が3次元計測器のベンチの役割を果たす。センサに対温度変動の改良を行い、安定性の向上を図った。

研削盤の主な仕様

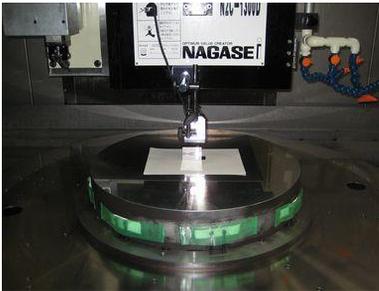
項目	スペック
駆動軸	XYZ3軸+テーブル回転軸
分解能	1 nm
X軸ストローク	2500 mm
Y軸ストローク	300 mm
Z軸ストローク	950 mm

レーザ変位計の主な仕様

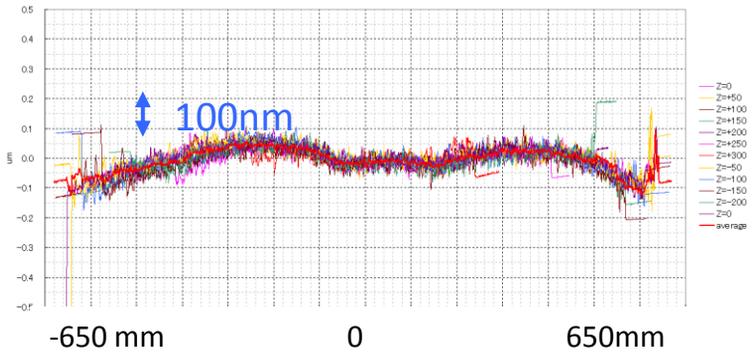
項目	スペック
分解能	10 nm
測定レンジ	$\pm 0.3 \text{ mm}$
測定スポット	$\Phi 2 \text{ }\mu\text{m}$
サンプルレート	$< 1562.5 \text{ Hz}$
Z軸駆動範囲	5 mm

- 到達度

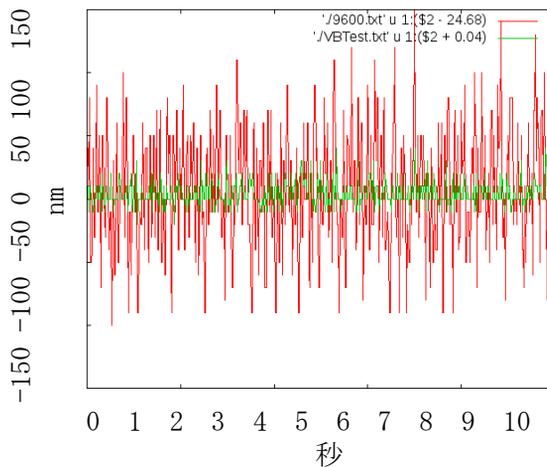
研削盤の駆動再現性は $RMS = 15 \text{ nm}$ を達成した。またセンサの分解能は $RMS = 9 \text{ nm}/50 \text{ Hz}$



再現性実験の様子



12回の計測結果



センサの分解能試験

研削加工

- 仕様・目標

数日で1 μm の精度で1メートルサイズの鏡の加工を行う。

- 手法

超精密研削盤（ナガセインテグレックス製）を0.05°Cに温調された部屋に設置し、#170, #1200, #2500砥石で加工を行う。

研削盤の主な仕様

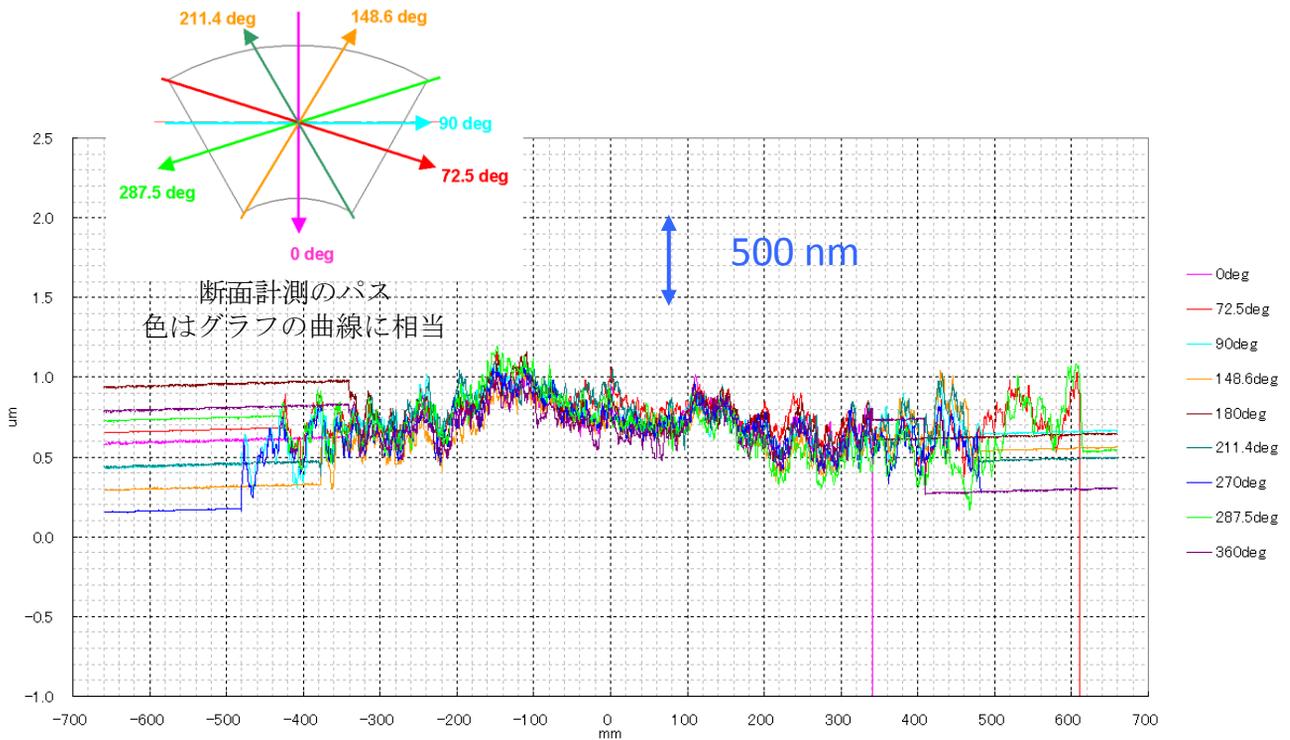
項目	スペック
駆動軸	XYZ3軸+テーブル回転軸
分解能	1 nm
X軸駆動範囲	3 mm
Y軸駆動範囲	5 mm
Z軸駆動範囲	5 mm



研削盤（右下はオペレータ）

- 到達度

9日間で形状誤差 P-V =500 nm、RMS = 150 nmを達成した。



非球面非軸対称加工をした後の理想形状から誤差
各線は鏡の様々な方向の断面形状を示す。

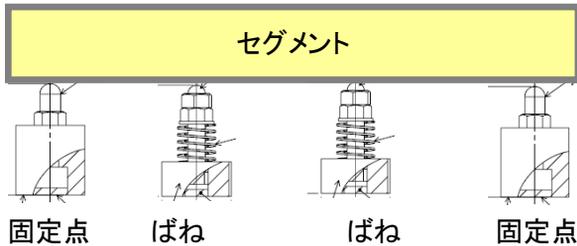
支持治具

- 仕様・目標

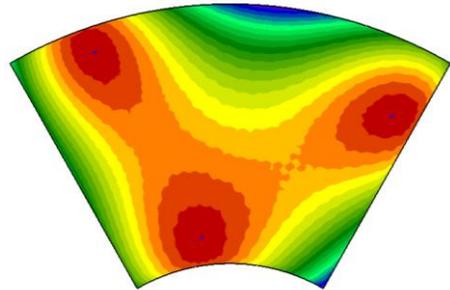
加工中のセグメントを保持するための治具。セグメントをフロートした状態で保持し、加工抵抗に対する変形において20 nm程度の再現性を有し、修正加工が効率よくできること。

- 手法

研削盤上に24個のバネと3点の固定点を所定の位置に配置し、その上に鏡を置く。合計27点の支持荷重が均等になるようにあらかじめバネの固さを調整しておく。横方向の拘束にはセグメントの外周に板ばねをあてる。研削加工時の加工抵抗をあらかじめ計測し、加工抵抗によるセグメントの変位をFEM計算で見積もる。この変位量を加工時に補正值として加えることで、フロート研削でありながら、理想形状を実現する。



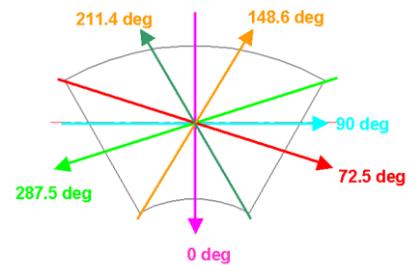
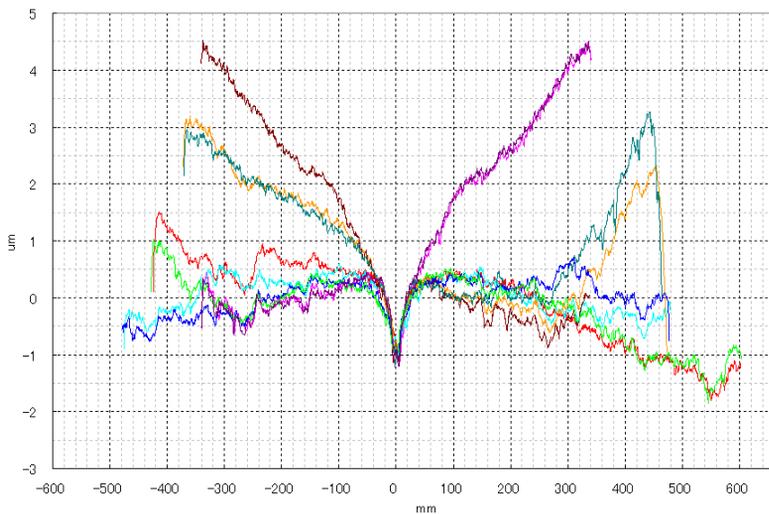
支持治具の模式図



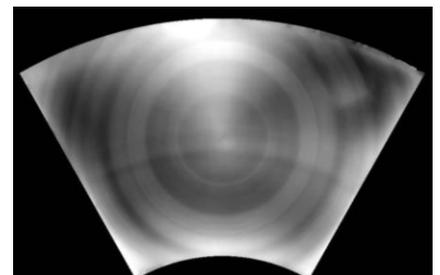
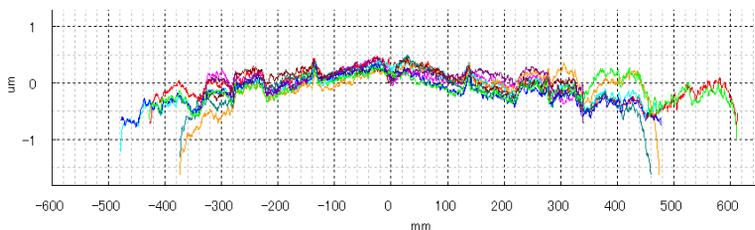
内周セグメントの加工抵抗による変形青が最大でおよそ5 μm 。この変形マップを加工時に補正值として指令値に加える。

- 到達度

シンプルかつ安価に開発した。現状で、支持力の誤差は30gf程度、保持再現性はRMS = 20 nmを達成した。



断面計測のパス色は左図に曲線に相当



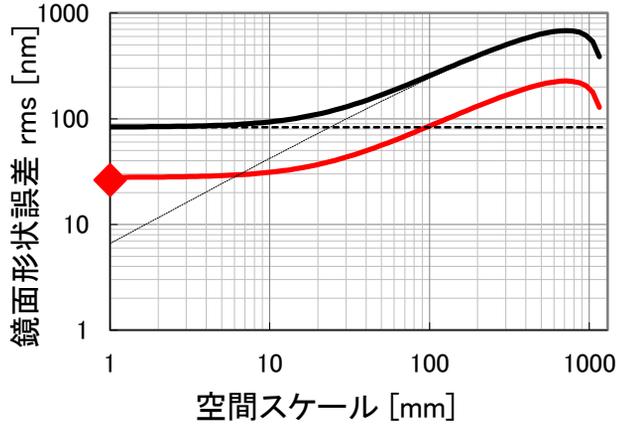
形状誤差
コントラストは±1 μm

補正值なしの形状誤差（上図）と補正值有の形状誤差（下図）。

修正研磨加工

- 仕様・目標

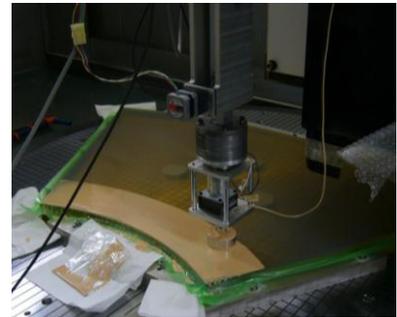
研磨工程の目的は、1) 面粗さの向上と2) 形状修正である。目標精度としては構造関数に従う。



計測に許容される測定誤差と構造関数
鏡面の許容形状誤差（赤線）。回折とシーイングによる波面誤差（黒線）。

- 手法

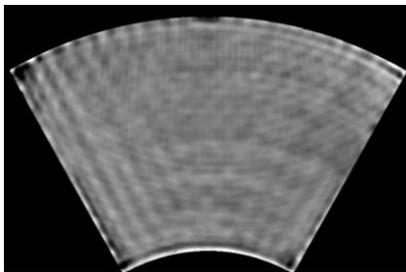
研削盤に傾斜2軸駆動を有する研磨ヘッドを取り付け、研削盤と同期運転させながら全面を研磨する。形状修正は形状誤差と研磨パッドの除去パターンによりデコボリューション法を用いて行う。



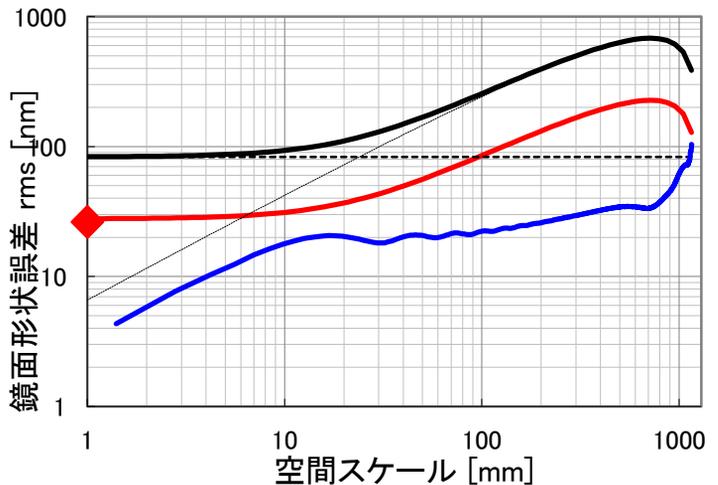
研磨の様子

- 到達度

構造関数にて仕様を満たす修正研磨を達成した。



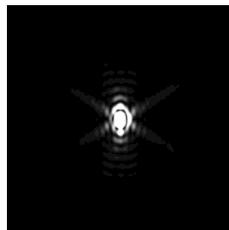
コントラストは±100 nm
修正研磨後



形状誤差の構造関数
赤線は許容誤差。青線は左図にあるセグメントの形状誤差
黒線は大気と回折限界から決まる構造関数。



誤差ゼロのPSF



2011年12月時のPSF

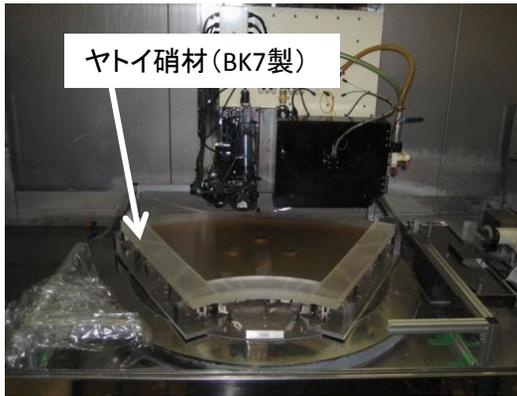
圧力一定研磨（縁研磨）

- 仕様・目標

分割鏡式望遠鏡の場合、各セグメントは縁まで正確に研磨する必要がある。縁ダレ幅の許容誤差を以下の2つの条件から2 mmと決めた。1) 位相カメラの機能を損なわない。2) セグメント間のギャップ幅と同程度。

- 手法

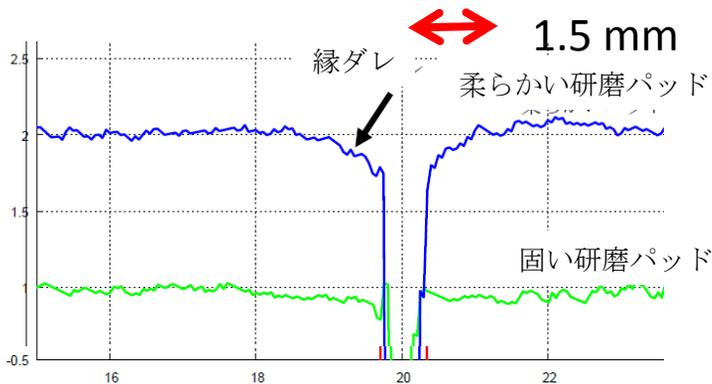
2つの手法の技術開発中である。1つはヤトイを周囲において事実上縁の無いような連続的な研磨を実現する方法、もう一つは、縁でも研磨圧力が一定となるように制御する方法である。



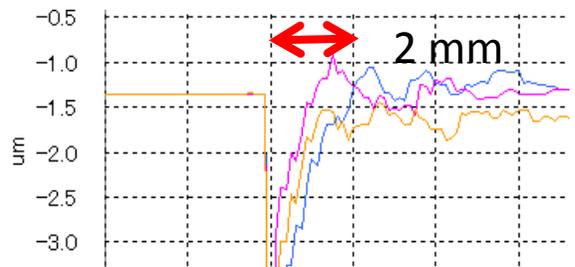
ヤトイ研磨の様子

- 到達度

要素検証として、ヤトイ研磨において理想的なヤトイ配置であれば縁ダレ幅は0~1.5 mmであり、圧力制御研磨の場合は2 mm程度であることが分かった。



ヤトイ研磨の縁ダレ
縁ダレ幅は柔らかいパッドで1.5 mm程度
固いパッドでは縁ダレが確認できない



圧力制御研磨の縁ダレ
縁ダレ幅は2 mm程度

位相カメラ (PCS)

- 仕様・目標

位相測定カメラ (PCS) は分割鏡の光軸方向の相対位置を光学的に確認するシステムで、分割鏡の相対的な光学原点出しに使用する。

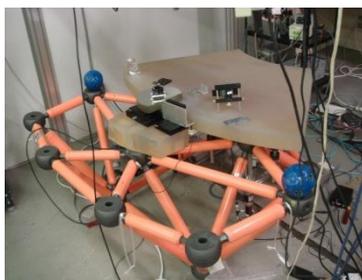
項目	位相カメラ仕様
測定点数	18
センサ分解能	12 nm
センサ絶対精度	100 nm
測定レンジ	260 μm
センサ応答速度	< 60 sec

- 手法

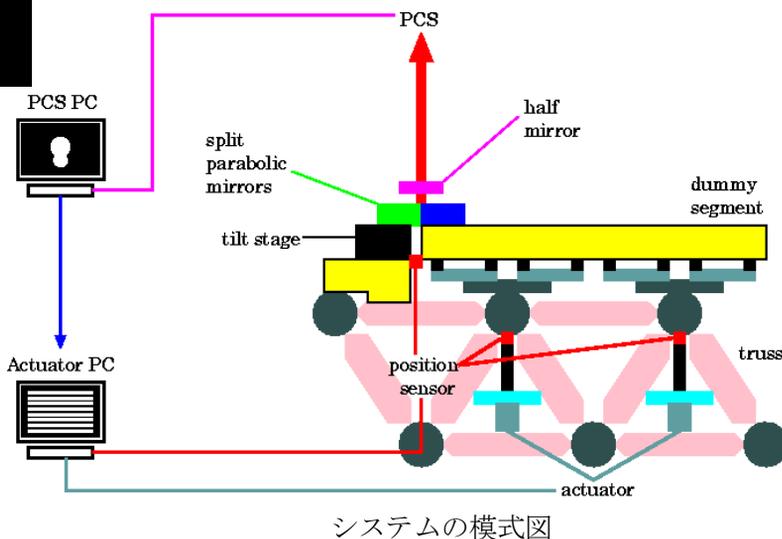
分割鏡の境界部の光で集光された点源像の、分割鏡間の位相差による形状の変化。干渉の効果により下図のように変化する。13段階で識別ができれば、波長可変レーザーと組合せて $\pm 10 \mu\text{m}$ 以内の光学原点(鏡間の位相差が0になる点)を決定できる。



鏡の段差と強度分布の変化
左上から右下に向かって $-\pi$ から π の位相に相当する段差



実験の様子



システムの模式図

- 到達度

これまでに達成した数値を以下の表にまとめる。今後はより厳しい環境変動での性能を確認した後、量産時に必要となる個体差を調査する。



位相が合っている状態での5色レーザーのスポット
左より 633, 612, 604, 594, 543nm

項目	位相カメラ仕様	到達値
測定点数	18	-
センサ分解能	12 nm	12 nm
センサ絶対精度	100 nm	-
測定レンジ	1 mm	10 μm
センサ応答速度	< 60 sec	-

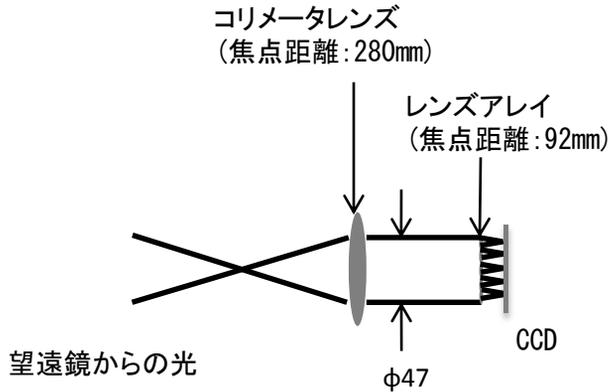
シャックハルトマンカメラ

- 仕様・目標

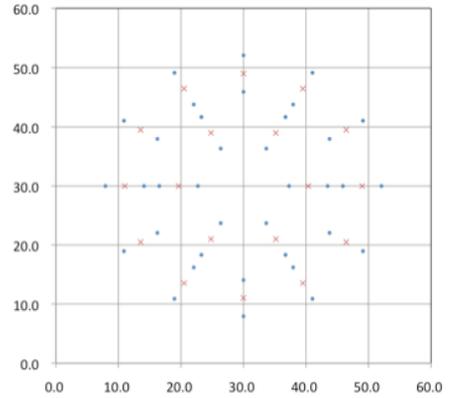
視野30秒角、分解能0.06秒角で分割鏡の姿勢を光学的に測定するカメラ。限界等級はRバンドで8等級。

- 手法

瞳再結像光学系で、再結像された瞳に36箇所のレンズ（レンズの直径は主鏡面で10cmに相当）を並べて、36箇所のスポットを2048x2048のCCDカメラに結像させる。主鏡の姿勢の理想的な位置からのずれは、スポットの結像位置から測定する。解析では、内部光源によるレンズアレイの収差を予め測定しておき、恒星の光で測定されたスポットの位置ずれからレンズアレイの収差による位置ずれの効果を取り除いて鏡の姿勢を求める。



光学系概念図



再結像された瞳位置にあるレンズアレイの開口の位置（青丸）と鏡の中心位置（赤×）。単位はmm

- 到達度

レンズ直径1mmのF値の大きい、製作の難しいレンズであるが、レンズ製作の工程を工夫することにより、偏芯10分以内のレンズアレイを製作する事に成功した。実験室で実機に使用するCCDカメラとコリメータレンズを用いて要求仕様を満たすことを確認後、実機製作を開始する。

ギャップセンサ

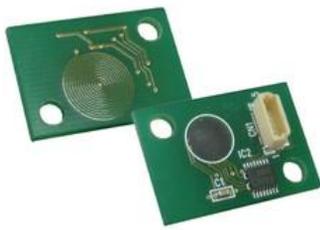
仕様・目標

分割鏡制御に用いるギャップセンサの満たすべき仕様を右の表にまとめる。

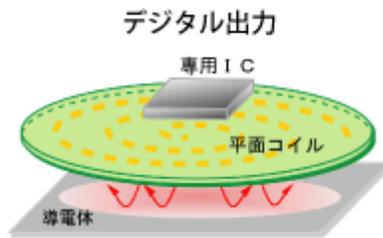
項目	仕様
分解能	RMS < 10 nm
安定性	50 nm/10h
リニアリティ	> 90%
サンプルレート	> 2 Hz
測長レンジ	TBD
温度変化	< 0.1°C/min
湿度変化	< 1 %/min

手法

日本システム開発製のDS2001を用いる。センサの動作原理は対向板との距離に応じて変動するLC発振のカウンタ計測するものである。センサの値は温度などの環境変化で変動する。これを補正するために、対向板との間隔を固定した別のセンサを用いる。

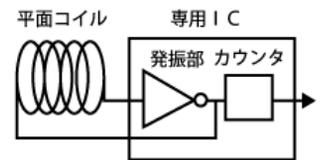


センサ



センサ模式図

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

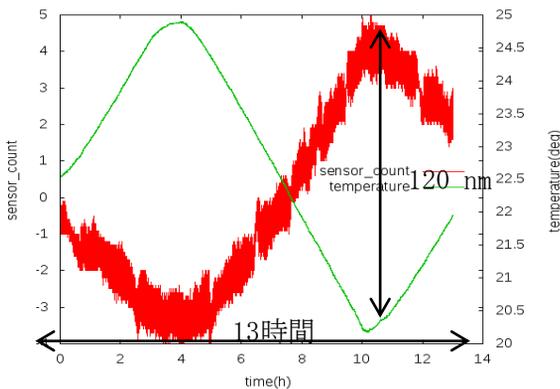


到達度

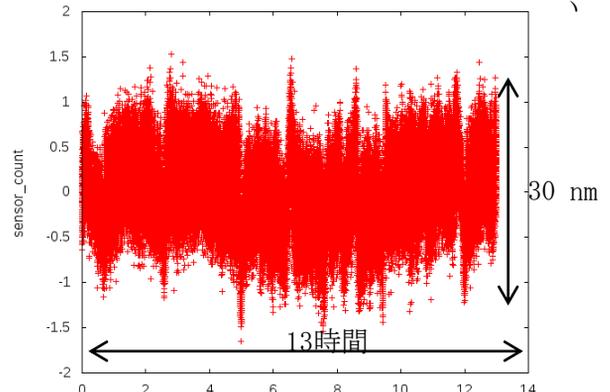
これまでに達成した数値を以下の表にまとめる。今後はより厳しい環境変動での性能を確認した後、量産時に必要となる個体差を調査する。

項目	仕様	達成値
分解能 (RMS)	RMS < 10 nm	10 nm
安定性 (P-V)	50 nm/10h	30 nm/13h
リニアリティ	> 90%	> 90%
サンプルレート	> 10 Hz	6Hz
測長レンジ	TBD	0.5 mm
温度変化	< 0.1°C/min	0.02°C/min
湿度変化	< 1 %/min	

仕様と到達度の比較



5度の温度変化時のセンサの値



補償後のセンサの安定性

アクチュエータ

- 仕様・目標

アクチュエータに必要な仕様を右の表に示す。

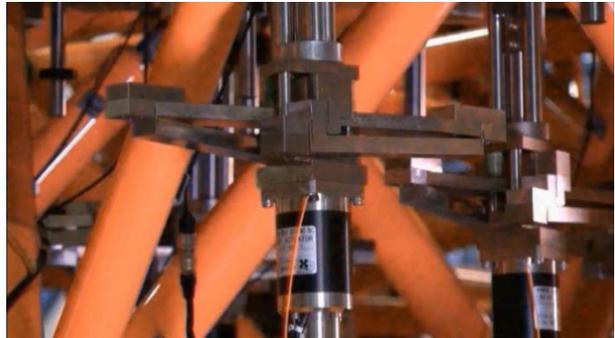
項目	仕様
分解能	RMS < 15 nm
リニアリティ	> 90%
帯域	> 2 Hz
ストローク	> 1 mm
推力	> 300 N

- 手法

リニアアクチュエータ（ハーモニック・ドライブ・システムズ製LAH-46）に10:1減速機構を取り付けた。



リニアアクチュエータ
LAH-46



実機架台に取り付けられた減速機構とLAH-46

項目	LAH-46仕様
分解能	69 nm
ロストモーション	> 5 $\mu\text{m}/\text{mm}$
最大送り速度	> 3.7 mm/s Hz
ストローク	> 13 mm
推力	390 N

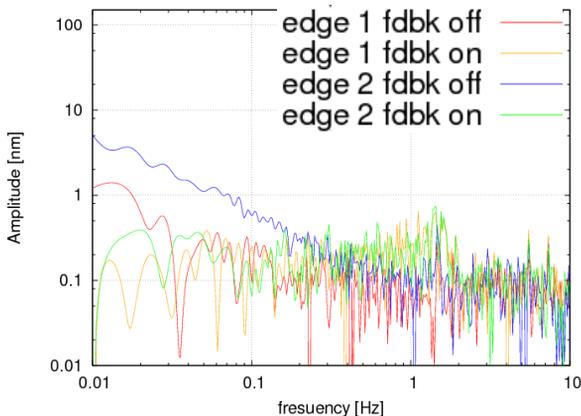


位相カメラを用いた検証実験

扇型のブランクの下に3個のアクチュエータを配置しブランクを背面から操作し、位相を合せる実験。

- 到達度

これまでに達成した数値を以下の表にまとめる。また応用実験として、実機架台上で6” /sの姿勢変化の下、RMS = 15 nmの応答性能を達成した。今後、動的特性の詳細調査を行う。



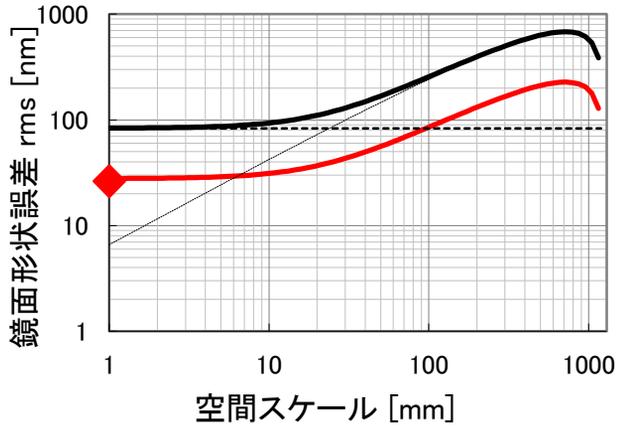
実機架台上での段差周波数特性
縦軸は鏡の段差、横軸は周波数

項目	仕様	達成値
分解能	RMS < 15 nm	RMS < 15 nm
リニアリティ	> 90 %	> 90 %
帯域	> 2 Hz	-
ストローク	> 1 mm	1.3 mm
推力	> 300 N	>3000 N

支持機構

- 仕様・目標

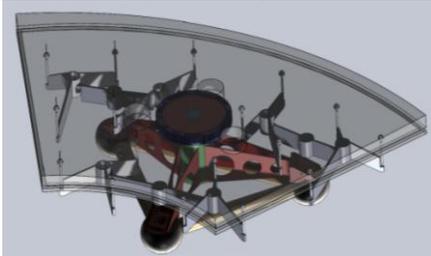
セグメントの自重変形と望遠鏡上での固定および、アクチュエータの駆動を鏡に伝達する機構。



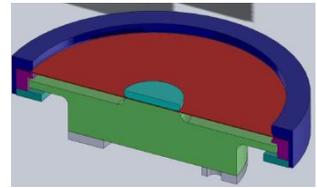
計測に許容される測定誤差と構造関数鏡面の許容形状誤差（赤線）。回折とシーイングによる波面誤差（黒線）。

- 手法

アキシアル方向の支持は3組のWhiffle Tree（計9点支持）で構成する。横方向には鏡中央に取り付けたダイアフラムで固定する。



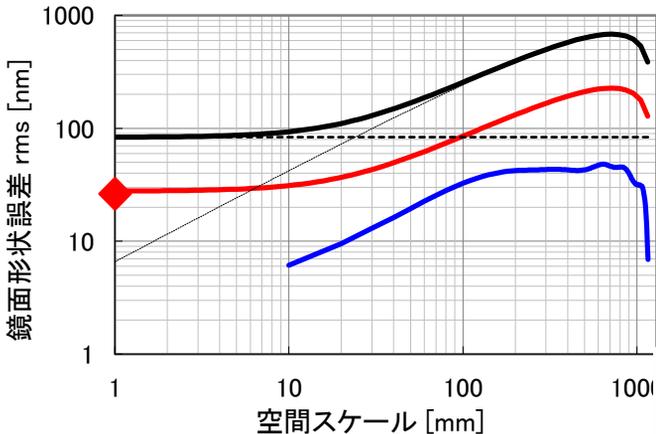
18点支持の場合の支持機構の概念図



ダイアフラムの概念図

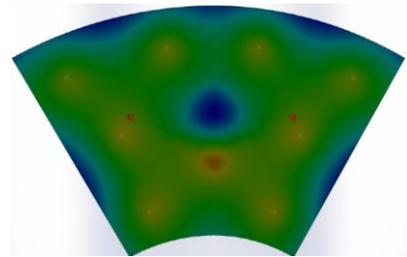
- 到達度

初期設計として、9点支持で自重変形RMS = 30 nm、P-V = 150 nm、構造関数においても十分に仕様を満たす支持点配置を確認した。今後はプロトタイプを作成し、光学検証を行う。

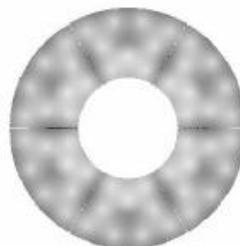


自重変形の構造関数

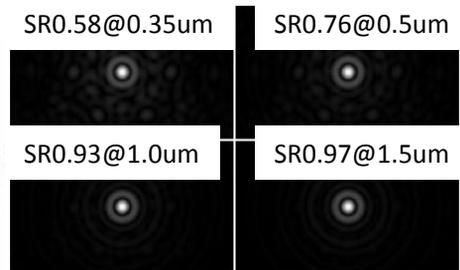
赤線が9点支持による自重変形。青線は鏡の許容形状誤差黒線は大気と回折限界で決まる構造関数。



支持点による自重変形
RMS = 30 nm, P-V = 150 nm



9点支持と2011年12月時の鏡の位相誤差



左図の位相マップで得られるPSFとSR

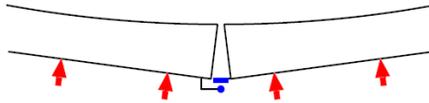
制御アルゴリズム

- 仕様・目標

ギャップセンサ配置から、アクチュエータへの入力値を計算する演算部。演算部での要求精度は仕様は、星像FWHMにして $0''.028$ とする。また主鏡制御全体では $0''.091$ である。

- 手法

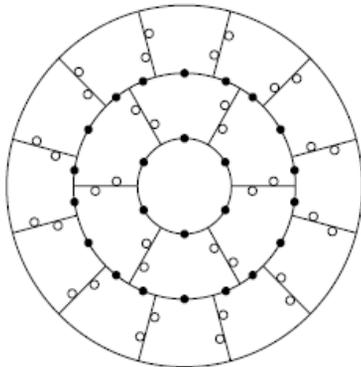
18枚のセグメント1枚当たりおよそ3個、全体で60個のセンサを用意する。鏡、アクチュエータ、センサ、演算部から成る静的モデルシミュレータを開発し、センサ配置の最適化と、各要素のノイズ解析を行った。



センサ（青）、鏡、アクチュエータ（赤矢印）の模式図

- 到達度

鏡の段差においてセンサノイズの増幅をおよそ130%以下に抑えるセンサ配置が見つかった。また、鏡の形状誤差、曲率誤差、鏡の位置誤差、および制御誤差の結像性能への影響を評価した。これよりセンサとアクチュエータ、支持機構および鏡の曲率誤差への許容値を算出した。



最適なセンサの配置
丸印がセンサ

鏡の段差と曲率誤差の結像性能への影響
FWHM（ミリ秒角）

鏡の段差 (nm)	鏡の曲率誤差(um)	
	0	±50
0	41	59
±50	63	78

鏡の位置の結像性能への影響
FWHM(ミリ秒角)

誤差 (mmまたは度)	鏡の位置の結像性能への影響 FWHM(ミリ秒角)		
	X	Y	Z
0.01	6.4	12.3	20.2
0.05	6.4	15.4	63.4

上記2つの表の最悪値を取ると $0''.1$ となり、仕様を満たさないが、このシミュレーション結果より、それぞれのエラーバジェットが以下のように判明した。また、要素レベルではすべて要求誤差を十分にクリアしているため、主鏡制御で要求される許容誤差 $0''.091$ も満たせると期待できる。

鏡の位置の結像性能への影響

鏡の位置と回転誤差はトラス節点の変位の最悪値（望遠鏡高度30度）

項目	許容誤差	到達値
曲率誤差	±50 um	±40 um
センサとアクチュエータ分解能	±50 nm	±30 nm
鏡位置誤差	0.05 mm	P-V = 0.037 mm
鏡の回転誤差	0.05 度	P-V < 0.01 度

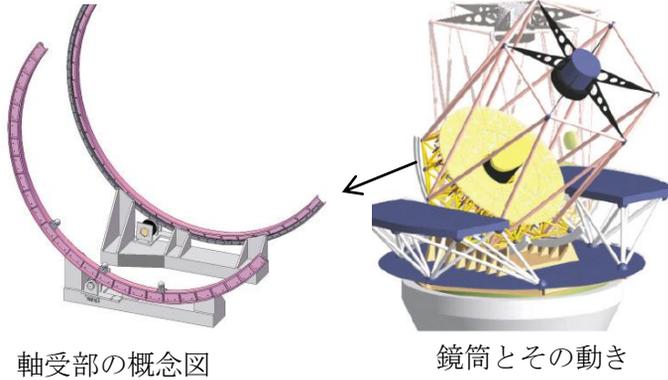
高度軸軸受

- 仕様・目標

高度軸まわりの駆動重量（鏡筒の重量）を10トン以下を目標とする。

- 手法

2本の大きな円弧上の軸受をトラス構造を基調とした鏡筒の直下に配置し、構造力学的に効果的な構造物を設計する。

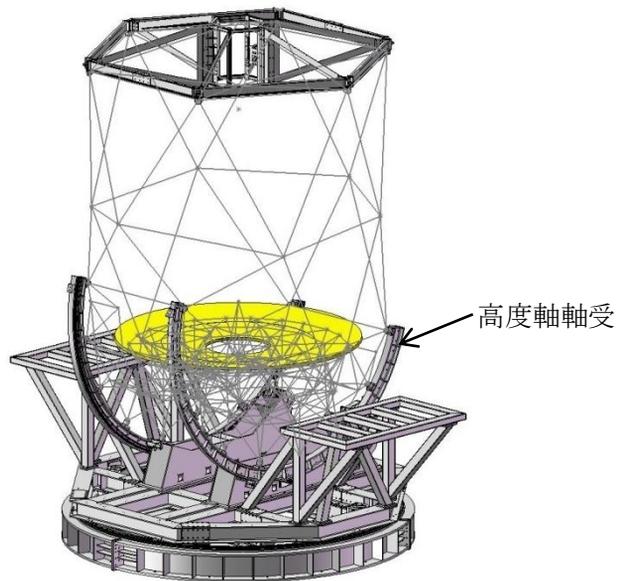


軸受部の概念図

鏡筒とその動き

- 到達度

鏡筒構造物のみで4.5トンの設計を得た。なお、光学系等の非構造物を加えると、鏡筒重量は7.9トンである。これは従来の望遠鏡に比べておよそ1/5の重さ。



望遠鏡の概念設計

線はトラス部分を、黄色は主鏡をそれぞれ示す

最適化

- 仕様・目標

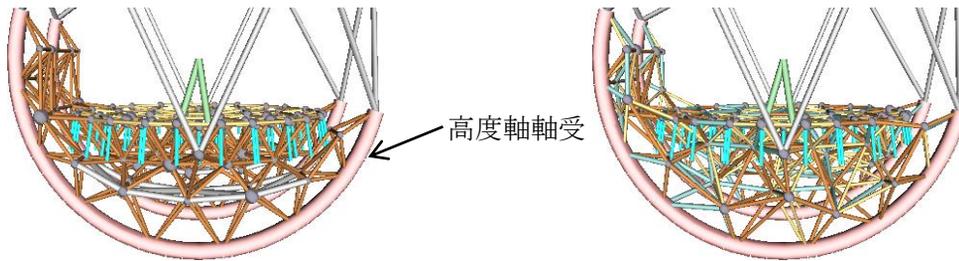
鏡筒構造のうちトラス構造部分の軽量化を図りつつ、同時にホモログス変形量をより小さくする。許容ホモログス変形は、主鏡面の3方向 $< 0.1\text{mm}$ 、副鏡の主鏡に対する横ずれ < 2.0 、第三鏡の光軸方向 $< 0.05\text{mm}$ 。

- 手法

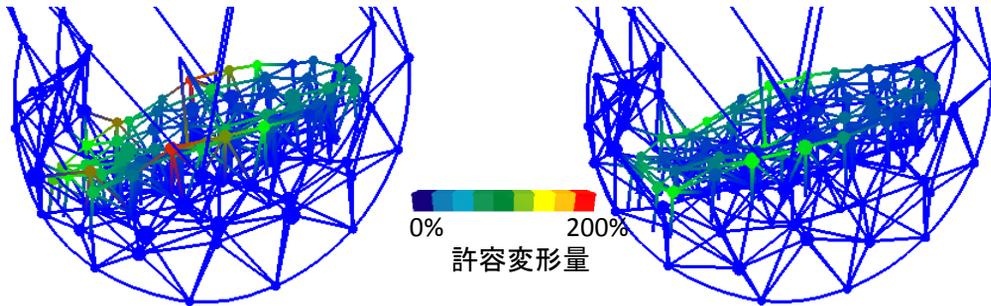
遺伝的アルゴリズムを用いた最適化プログラムを開発し、先項で挙げた概念設計に最適化を施した。

- 到達度

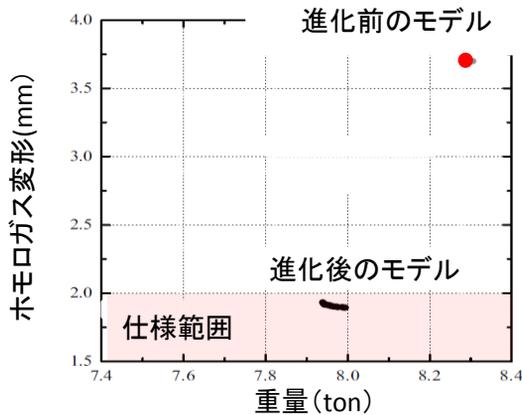
主鏡用の54個の節点に関しては 0.1mm 、副鏡の主鏡に対する変位として 0.39mm 、第三鏡に関しては 0.05mm を高度角 20 度から 90 度の範囲で達成した。



主鏡付近の構造物の最適化の様子
左が最適化前、右が最適化後のモデル



ホモログス変形の最適化の様子
左が最適化前、右が最適化後のモデル。



仮組された鏡筒と高度軸軸受
白い部分は主鏡ダミー