

## 京大岡山 3.8m 望遠鏡計画：副鏡計測技術の開発

江見 直人 (京都大学大学院 理学研究科)

### Abstract

京大岡山 3.8 m 望遠鏡計画は京都大学、名古屋大学、国立天文台および (株) ナノオプトクスエナジーの共同により、国立天文台岡山天体物理観測所に世界初の扇形の分割鏡による光赤外望遠鏡を建設するものである。本講演では望遠鏡製作において重要な要素となる副鏡計測技術の開発状況について説明する。

本望遠鏡の副鏡は  $\phi = 1100$  mm の非球面の凸面鏡である。表面精度は  $\text{RMS} \leq 100$  nm が求められる。計測技術の仕様としては、まず第一に非球面の凸面が計測可能であること、測定精度  $\text{RMS} \leq 50$  nm が求められる。

開発中の計測技術は、変位計を 3 軸直交ステージにより鏡表面を走査させ、得られる点情報から面形状を生成することを原理とする。3 軸直交ステージとして鏡の加工機であるナガセインテグレックス製の研削盤とそれにとりつけたレーザー変位計 (プローブ) によって行う。このため加工機とプローブの再現性が計測精度を決定する。

現時点で加工機とプローブを合わせたシステムでは  $\text{RMS} = 10$  nm の再現性があることを確認した。そこで基礎実験として  $\phi = 150$  mm、曲率半径 1600 mm の球面の凹面鏡を作りプローブ付き加工機で測定をした。評価はフィゾー干渉計を使った。結果はフィゾーとの差が、 $\text{RMS} = 26$  nm となった。

## 1 望遠鏡計画の概要と目的

京大岡山 3.8 m 望遠鏡計画は、国内で最も優れた可視光・赤外線観測場所である国立天文台岡山天体物理観測所の隣接地に、新技術を用いた口径 3.8 m の光学赤外線望遠鏡を建設し、次世代望遠鏡の建設に必要な技術開発を行なうとともに、突発天体現象や星・惑星形成の現場等の観測を通して、日本の天文学研究を推進するものである。この開発は京都大学だけでなく、名古屋大学やその他の大学、国立天文台、(株) ナノオプトクスエナジーなどと共同で進めており、完成後は国立天文台や産業界との密接な連携の下、大学間連携で共同運用する予定である。日本を中心とした地球の半球の中には口径 3 m を超える光学赤外線望遠鏡は存在しないことからガンマ線バーストやブラックホール天体などの突発天体現象を世界に先駆けて分光・偏光観測し、また独自に系外惑星探査を進め、超高分散分光観測から星・惑星形成領域の物理を極めるなど、天文学の最先端を切り開くことが期待されている。

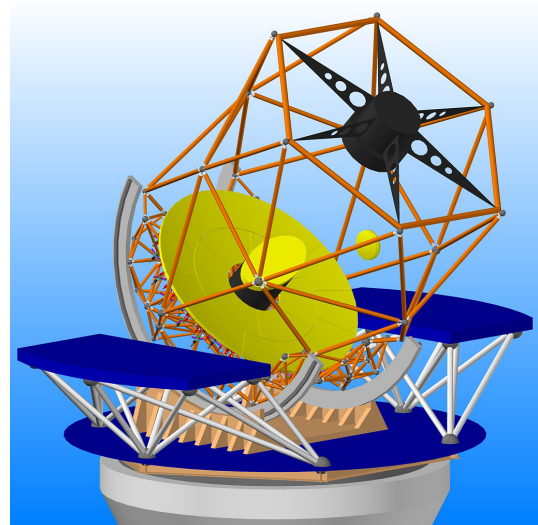


図 1: 3.8m 望遠鏡完成予想図

## 2 副鏡の仕様

本望遠鏡の基本光学系はリッチー・クレチアン系なので、副鏡は形状の凸双曲面である。副鏡の仕様を表 1 に示す。

表 1: 副鏡の仕様

直径	1100 mm
曲率半径	3335 mm
質量	150 kg 以下
鏡中心の厚み	130 mm
最大変形量 (水平支持時)	50 nm 以下
表面精度	RMS $\leq$ 100 nm

計測技術の仕様は、非球面の凸面が計測可能であること、測定精度 RMS $\leq$  50 nm とした。

また軽量化のために鏡の裏面をくり抜き、ハニカム構造を採用する (図 2)。硝材としてクリアセラム Z を使い、ハニカム構造の設計をすることで質量 150kg、鏡面の最大変形量 36nm となり、仕様を満たすことを確認した (図 3)。

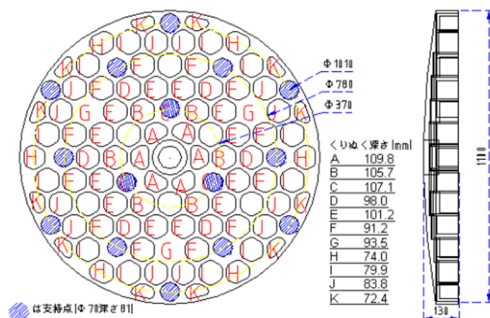


図 2: 副鏡のハニカム構造。青い斜線部は支持点を表す。

### 3 既往の研究

鏡の測定技術として一般的なのが干渉計を使った測定である。計測面で反射された光と原器となる参照面で反射された光とを干渉させ、干渉縞を見ることによって計測面と参照面のずれを測定するものである。図 4 の絵のように、被測定面が凹面ならば干渉計から出た光は再び干渉計に戻るので測定できるが、凸面の場合は干渉計から出た光は反射すると拡散してしまうので計測範囲が限定される。大型の凸面となるとさらに難しくなるので、新しい技術が必

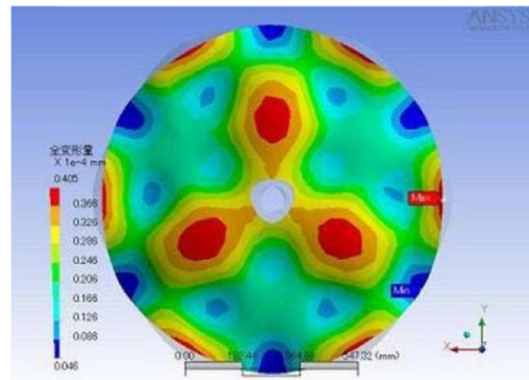


図 3: FEM 解析による副鏡の変形マップ。15 点支持により副鏡面を下にして水平に吊り下げたときの鏡面変形を示す。最大変形量は 36 nm となっている。

要である。

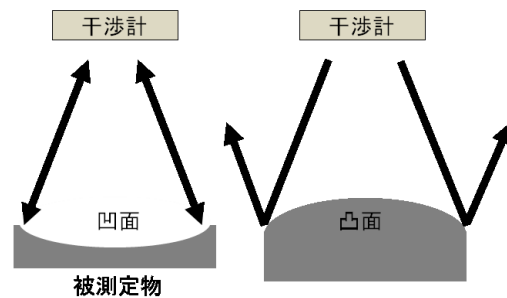


図 4: 凹面と凸面の光の反射

そこで、大型の副鏡を計測するためにアリゾナ大学が開発したのが Swing-arm coordinate measuring machine (以下、スイングアーム) である。これは従来の光学的な測定方法とは異なり、副鏡の表面をなぞるようにプローブ (変位計) を動かして計測する機械的な方法である。図 5 のように、副鏡の近似球面の中心を通る軸で回転するアームの先にプローブを取り付けることで、アームの回転という一軸のみの運動で表面上を精度よく測ることができ、副鏡を回転させることで図 6 のようなスキャンパスで計測することができる。スキャンパスの交点の位置でデータを縫い合わせ、点群のデータから面形状を生成する仕組みである。

我々が鏡の加工に使うナガセインテグレックス製の研削盤 (図 7) は直行 3 軸方向と 2 つの回転軸での

運動が可能である。また表 2 の通り優れた運動性能を持つので、スイングアームの方法と同じようにこの研削盤にプローブを取り付け、測定器にすることにした。さらに現時点で研削盤とプローブを合わせたシステムでは RMS=10 nm の再現性があることを確認した。

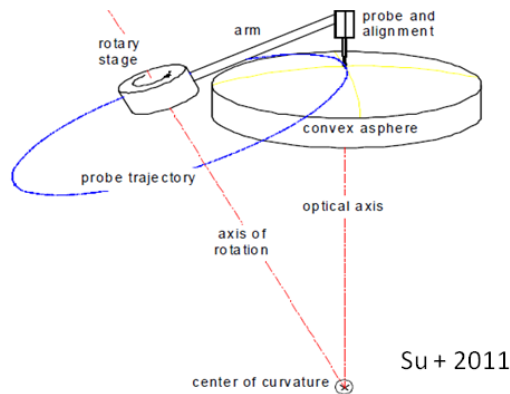


図 5: スイングアームの仕組み (Su et al. 2013)

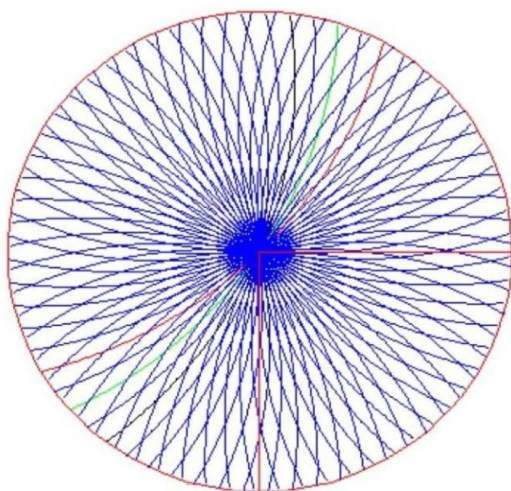


図 6: スイングアームのスキャンパス (Su et al. 2013)

## 4 基礎実験

基礎実験として  $\phi=150$  mm、曲率半径 1600 mm の球面の凹面鏡を作り、この方法で測定し、フィゾー干渉計で評価をした。このときプローブの数は 1 つで、研削盤は X-Y の 2 軸同時制御運転をした。

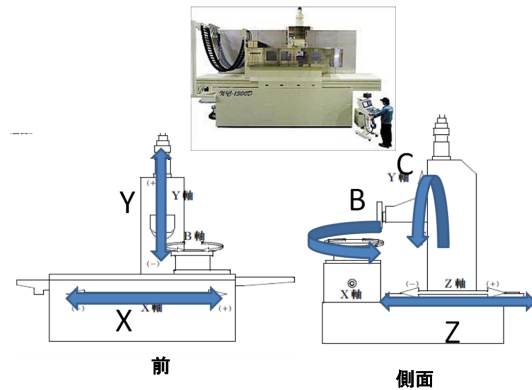


図 7: 研削盤 (ナガセインテグレックス製)

表 2: 研削盤のスペック:真直度と位置決め。作業範囲  $\phi = 1400$ 。

	真直度 (P-V)	位置決め精度 (P-V)
x	0.38 $\mu\text{m}/1000$ mm	0.40 $\mu\text{m} / 2250$ mm
y	0.32 $\mu\text{m} / 200$ mm	0.17 $\mu\text{m} / 280$ mm
z	0.35 $\mu\text{m} / 1000$ mm	0.16 $\mu\text{m} / 1000$ mm

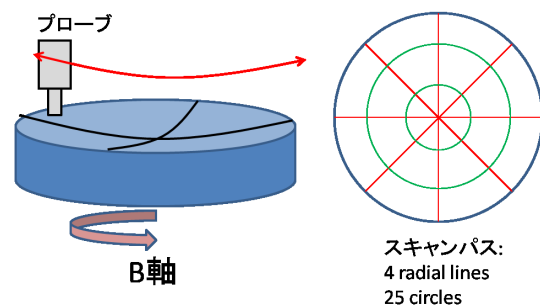


図 8: 実験の模式図。図では円を 2 つしか書いてないが、実際は 25 の円をスキャンした。

## 5 結果と考察

上記基礎実験の結果を図 9 に示す。

図 9 より、本研究では目標であった RMS=50 nm を達成した。しかしフィゾー干渉計と比べると精度が悪い。改善すべきことは、1. 研削盤の運動からくる誤差を除去すること、2. プローブのスキャンパス、3. 点群データから尤もらしく面を生成するアルゴリズムの必要性、が挙げられる。

1. は、計測時に一つのプローブを使うのではなく二つ以上のプローブを使うことで改善できる。2. に

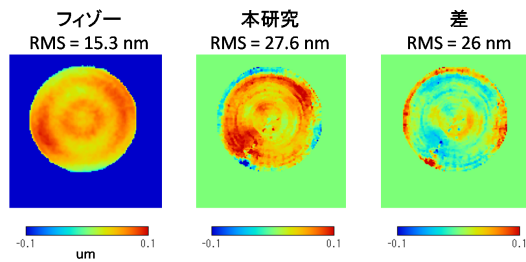


図 9: 基礎実験結果

関しては、今回の実験だと円の中心ほどスキャンパスの交点が多く、面全体で見ると測定精度のばらつきが出てしまう。また、スイングアームの方法では一軸のみの運動で測定できるが、我々の方法だと X-Y 方向の二軸運動での測定なので、その分測定誤差も大きくなる。改善案としては、既存の研削盤にさらに新しいアームを取り付け、一軸のみの運動かつ均等なスキャンパス交点を得られる測定方法を考えた。現在、その方法が可能かどうか検討中である。また、干渉計を使った計測など、他の副鏡計測方法も調査が必要である。3. に関しては、最尤度法やデータ補間などを考えている。

また、実験で使用したプローブには数マイクロメートル/ の温度ドリフトがあることも確認され、温度ドリフトの補償方法の開発も必要である。

## 6 まとめ

大型の望遠鏡は副鏡も大型になることは言うまでもなく、さらに副鏡は一般的に凸形状なので計測が難しい。したがって、その計測技術の開発は必要不可欠である。そこで我々が考える計測技術は、干渉計を使った光学的な計測ではなく、機械的に鏡表面を走査して計測する方法である。鏡加工に使う研削盤は数百ナノの精度で動くので、これにプローブを取り付け鏡の表面を計測する。基礎実験を経てさらに改善するべき点が見つかったので、この点の改善を行う。同時に、他の計測技術として干渉計を使った光学的な方法も候補として捨てずに研究を進めつつもりである。

## Reference

Peng Su. 2012. Swing-arm optical coordinate measuring machine

JH Burge. 2008. Optical metrology for very large convex aspheres