

スペース赤外望遠鏡のための低温可変形鏡の開発

高橋 葵 (総合研究大学院大学 宇宙科学専攻)

Abstract

我々は、スペース赤外望遠鏡での波面誤差を補正するために、極低温下での運用に耐えうるような MEMS 技術を用いた可変形鏡を開発し、現在 1024 素子からなる極低温用可変形鏡の動作評価を行っている。今回、従来に比べてより安価にかつ容易に波面誤差を補正する技術として、小型の可変形鏡を光学系に加えるという方法を紹介する。

1 Introduction

地球大気の影響（吸収、熱放射）がないスペース望遠鏡は、天文学の発展において重要である。しかし、スペース赤外望遠鏡では以下の 2 つの原因から望遠鏡の鏡面に变形が生じる。1 つ目の原因は、重力からの解放である。望遠鏡を含む観測衛星は地上の重力影響下で製造、組み立てが行われるが、一度軌道に打ち上げられると無重力下で観測運用が行われるため、この重力からの解放によって鏡面の变形が起こる。また 2 つ目の原因に、望遠鏡冷却による熱変形が挙げられる。赤外線観測では望遠鏡や装置自身からの熱放射により感度が悪化するため、望遠鏡を極低温へ冷却する必要がある。しかし、望遠鏡を冷却すると各素材の熱膨張率の違いにより熱変形が生じるのである。これらの原因により变形した鏡面で天体からの赤外線が反射されると、入射時は平行光とみなすことができた天体からの赤外線に波面誤差が生じ結像性能が悪化する。

従来、これらの問題に対しては設計の工夫、シミュレーション、および地上試験で可能な範囲での検証等による対策がとられており、これらの設計や検証には多額の費用と労力を要してきた。しかし、もし小型の可変形鏡（Deformable Mirror、以下 DM）を光学系に追加することで打ち上げ後に軌道上で波面補正ができれば、コスト削減、開発期間の短縮、リスクの低減という点で非常に有効である。

ただし既存の DM は極低温では使えないため、我々は極低温用に特別な基板設計を持つ MEMS 技術を用いた DM（以下、MEMS-DM）を開発した。これまで、プロトタイプ 32 素子 MEMS-DM が 95K で許容

誤差の範囲内で（最大変位 200 nm、Dispersion 数十 nm）動作することが確認済みである (K.Enya et al. (2009))。そして現在、1024 素子 MEMS-DM の極低温 5K での動作確認に向けて準備を行っている。

2 極低温 DM の構造

常温 DM によく使われる原理の一つにピエゾ圧電効果があるが、この効果は低温では効きづらくなるため、この原理により極低温で鏡面素子を変位させることは難しい。一方 MEMS-DM の場合、クーロン力で鏡面素子を変位させるため原理的には温度によらず、また多素子でコンパクトな DM が実現できる。そこで我々はこの MEMS-DM に着目し、極低温で動作する MEMS-DM の開発に取り組んでいる。

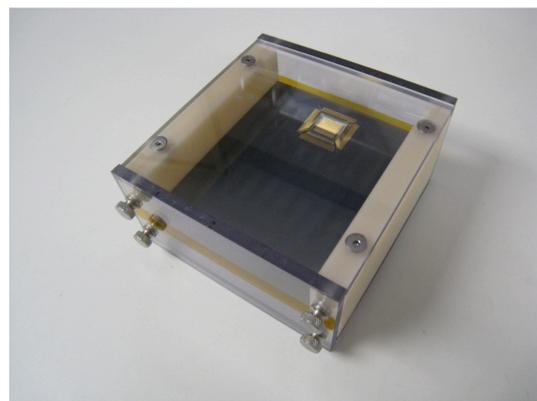


図 1: ケースに入れられた 1024 素子極低温用 MEMS-DM のチップおよび回路基板

既存の MEMS-DM は常温での利用を想定してお

り、DM チップとそれを支える基板との熱膨張率の違いにより冷却時にストレスがかかる。よって我々は MEMS-DM を極低温 (~ 5 K) で使えるように、通常はセラミック素材の基板をチップと同じシリコン素材とし、また DM チップと周辺部分との接触をなるべく抑える工夫をした。なお、通常は DM チップを保護するための窓があり DM チップとその窓の間は窒素ガスで満たされているが、冷却時に真空にする必要があることや DM チップが窓から熱ストレスを受ける可能性があることから、この窓をなくした。DM チップは Boston Micromachines Corporation 社で商業用として売られているものを使用し、 $32 \times 32 = 1024$ 素子からなる鏡面を持つ。各素子の面積は $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ であり、BMC 社が出している仕様によると最大変位は $1.5 \mu\text{m}$ である。

3 鏡面測定方法

冷却状況下での DM の動作を確認するため、極低温 DM を 5K まで冷却する必要がある。その冷却には 図 2 のような PINOCO チャンバーを用いる。このチャンバーは底面積 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 、高さ 30 cm の内部空間があり、下部に取り付けられた 2 つの GM サイクル冷凍機により 5 K まで冷却され、冷媒が不要である (K.Enya. et al. (2012))。側面には窓が 1 つと多数の配線コネクタが備え付けられているので、このチャンバー内に極低温 DM を設置しチャンバー側面のコネクタで DM 制御用のケーブルを繋ぎ、またチャンバー側面の窓から DM 鏡面を見ることができ。

なお、窓の前には干渉計などを乗せるためのステージが取り付けられており、その逆側には、重心バランスをとるために重りを載せるステージが用意されている。今回は、この干渉計用ステージに 4D technology 社の干渉計を乗せ、窓を通して DM 鏡面にレーザー光を当てることで DM 鏡面形状を測定する (図 2)。ただし、約 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ の DM 鏡面全体とその周りの部分まで見るため、本来は直径 9 mm の円形ビームをビームエクパンダーを用いて直径 4.5 cm の円形ビームに変換した。

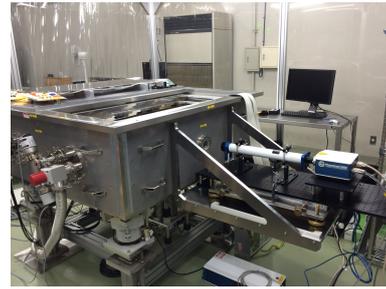


図 2: 宇宙科学研究所特殊実験棟にある PINOCO チャンバーと 4D technology 社製干渉計

4 性能評価の現状

実際の極低温 DM の鏡面形状を測定する前に、まずは比較的扱いやすい常温 DM を用いてテスト測定を行っている。現在このテスト測定により実際の測定に現れる外部からの様々な影響を調べている段階である。現時点での状況を以下にまとめる。

- チャンバーの窓を通しての鏡面測定に成功した (図 3)。
- 1 素子だけの動きまで検出できることを確認した。
- 素子にかける電圧を上げるほど素子の変位が大きくなることを確認した。
- 同時に同電圧で周りの素子も一緒に多素子まとめて変位させた場合、1 素子のみで変位させた場合よりも大きく変位する (図 4)。また、同電圧をかけたにもかかわらずより中心に近い素子の方が大きく変位する。(メンブレン式の DM のため、電圧をかけられた素子が周りの変位しない素子に引っ張られることが原因と考えられる。)
- チャンバーの窓の影響は RMS 数十 nm 程度のノイズとして現れる。
- 電圧をかけない (つまり鏡面を変形させない) 場合でも、DM 鏡面の端の部分がなだらかに下がるプロファイルを示し、端に近いところではノイズも大きい。

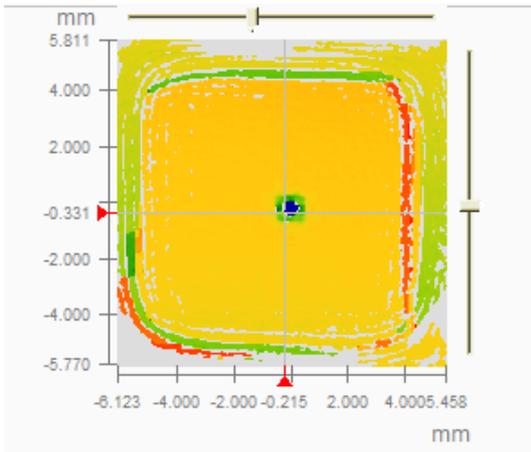


図 3: 中央部分の素子を $3 \times 3=9$ 素子まとめて変位させたときの測定データ。中央部分の青くなっているところが、電圧がかかって凹んだ部分。

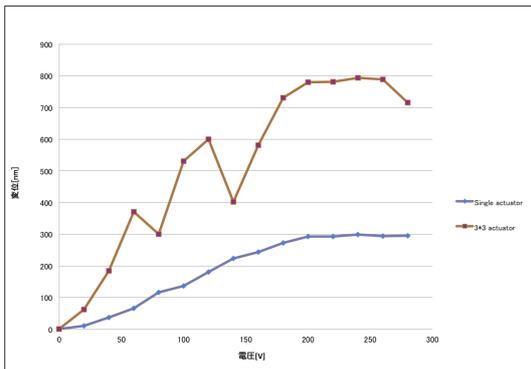


図 4: 鏡面の中心部の素子に電圧をかけた場合の電圧-変位の関係。青い線が 1 素子だけに電圧をかけた場合、赤い線がその周りの素子も含めて $3 \times 3=9$ 素子に同じ電圧をかけた場合の変位を示す。

5 今後の測定

現在行っている常温 DM でのテスト測定は、これにより洗い出した様々な外部からの影響をもとに極低温 DM の正しい鏡面形状データを得るためである。よって、今後は常温 DM でのテスト測定の結果をもとに、極低温 DM での測定において測定環境を工夫する、もしくは測定データを補正することで、外部からの影響を取り除くことが必要である。なお、実際に極低温 DM に対して行う測定としては現段階で以下のような例を予定している。

1. いくつかの箇所、1 素子のみで変位させた場合、多素子まとめて変位させた場合のそれぞれについて電圧-変位の関係を調べる。
2. ある特徴的な鏡面形状（例えば波打った形状など）の再現精度を調べる。
3. ツェルニケモードを用いて任意の鏡面形状の再現精度を調べる。

Reference

K.Enya. and H.Kataza. and P.Bierden. 2009. PASP 121 260

K.Enya. and K.Haze. 2012. Proc.SPIE 8442 84425C