

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05396

研究課題名(和文) 純圧電材可変形鏡によるTMT時代における宇宙進化の統計的解明

研究課題名(英文) Development of pure piezo-ceramic deformable mirror for statistical research of cosmic evolution

研究代表者

大屋 真(Oya, Shin)

国立天文台・ハワイ観測所・特任准教授

研究者番号：80399287

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：補償光学装置を用いると大気ゆらぎを補正して地上からでも回折限界の解像度を得ることができる。一方で光学系が冷却されていないと波長 $2\mu\text{m}$ 以上では室温の周辺環境からの熱輻射が背景放射となり雑音が増える。そのため補償光学装置全体を冷却することが望ましいがこれまで十分に研究されていなかった。本研究では補償光学装置の重要構成部品である可変形鏡を、鏡面も含めて単一の圧電材料で製作することに成功した。単一材料を用いてシンプルな機械構造にすることで冷却時の温度変化による鏡面形状変化を抑えることが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

補償光学は大気ゆらぎを補正して回折限界の解像度を達成する技術である。これまで冷却せずに用いることが一般的であったが、本研究では冷却に適した可変形鏡を開発した。赤方偏移の効果により遠方天体は波長が長い赤外線で見られる。その結果を可視光で見られる近傍天体と比較することで宇宙進化について知ることができる。本研究の成果を発展させて冷却補償光学装置を製作することで、そのような観測を感度良く行うことができる。補償光学は大気ゆらぎ以外にも様々な原因による波面歪みの補正に応用可能なので、天文以外の分野にも波及効果が期待できる。

研究成果の概要(英文)：An adaptive optics system is an instrument to realized diffraction-limited resolution observation by canceling the influence of atmospheric turbulence, even from ground-based telescopes. On the other hand, if the system is not cooled, the thermal radiation from the room-temperature surfaces inside the system increases the background noise. Therefore, the cooling of the adaptive optics is desirable, but not developed well yet. In this research, a new type of deformable mirror suitable for cooling has been developed. The deformable mirror is made of only single piezo material including the mirror surface and has a simple mechanical structure. Thanks to the design, the deformable mirror is expected to be less susceptible to the temperature change of the mirror surface figure during the cooling process.

研究分野：補償光学・赤外線天文学

キーワード：光学赤外線天文学 補償光学 可変形鏡

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

初代星や原始銀河などの宇宙黎明期の天体が誕生し宇宙再電離が起こった後、現在に至る宇宙進化過程を探ることは宇宙物理学の課題の一つである。TMT では JWST(James Webb Space Telescope)やすばる望遠鏡の広視野撮像観測で発見される高赤方偏移天体を、分光観測によりつぶさに観測してその姿を統計的に明らかにすることが期待される(例えば図 1 の Hubble Ultra Deep Field 中にある四角で囲まれた  $z=2\sim 6$  の Lyman Break Galaxy 候補天体を空間分解能した観測)。統計数を増やすためには大口径望遠鏡で集めた光を漏らさず使う高効率化が鍵となる。高効率化のためには(a)広視野・多天体化: 限られた時間中で同時観測できる天体数を増やす(図 1 に線で示した多数のピックオフアームの用に)、(b) 高感度化: 光学系透過効率向上やノイズ低減、という方法が有効である。シーイングリミットの観測装置では既に両方を兼ね備えて実現している。例えば VLT(Very Large Telescope)の KMOS(K-band Multi Object Spectrograph)はピックオフ機構による多天体分光器で、熱放射の影響を避けるためピックオフ部分も含めて冷却している。しかし解像力は大気ゆらぎで制限され細かい空間構造は分解できない。

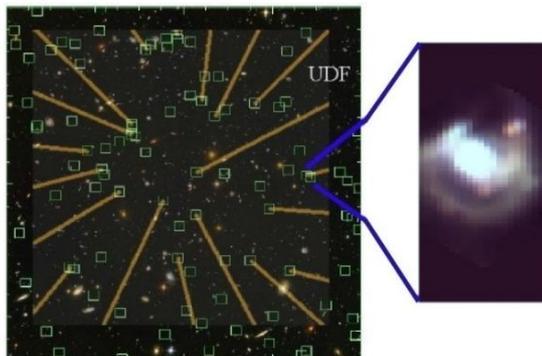


図 1: 空間分解した多天体観測の模式図

#### (1) 補償光学

大気ゆらぎを補正して回折限界の解像度を達成し、検出感度を向上させる技術として補償光学がある。現在では地上大型望遠鏡に標準装備されており Thirty-Meter-Telescope(TMT) など次世代超大型望遠鏡においても開発が進んでいる。

#### (2) 多天体補償光学開発の現状と課題

補償光学分野でも広視野にある天体をピックオフして同時観測を実現する新制御方式を取り入れた多天体補償光学系が提案されている。研究代表者も多天体補償光学装置実証実験の国際連携プロジェクトである RAVEN の日本側主担当者として、8m 望遠鏡では世界初のオンスカイ実証実験をすばる望遠鏡で成功させた(Lardiere+14, SPIE, 9148, 1G)。しかし装置は非冷却であり、熱放射の影響を受けている(大屋他、日本天文学会 2015 年秋季年会 V218a; 図 2)。TMT 多天体補償光学系の場合では少なくとも -30 以下に冷却することが要求仕様となっているが、冷却に関する実証は世界的にも未着手である。

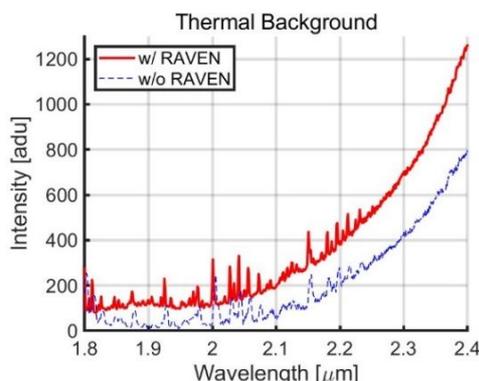


図 2: 熱雑音増加(RAVEN の例)

#### (3) TMT 用多天体補償光学開発への課題

冷却に加えて次の点も考慮が必要になる。口径が大きくなると大気ゆらぎによる開口中の波面誤差が大きくなり、それを補正する可変形鏡に要求される変形量が大きくなる。各ピックオフアーム中の可変形鏡への負担を軽減するために、視野全体に共通する地表層成分を補正する前置光学系の検討を行った。その結果、視野の周辺部分では非点収差が大きいことが解り、これを補正する能動光学素子があることが解った。

### 2. 研究の目的

可変形鏡はその補償光学装置の中で大気ゆらぎの変動に合わせて変形し、位相ゆらぎをキャンセルする重要部品である。また能動光学素子として機能することもできる。前述の様な背景を踏まえて簡素な構造で安価に製造でき、かつ冷却可能な可変形鏡の開発を行う。この可変形鏡を採用することによって TMT(Thirty Meter Telescope)などの次世代 30m 望遠鏡において高赤方偏移天体のつぶさな観測を高効率で行い宇宙進化の歴史を解明することを最終的な目的とする。本研究の範囲では斬新な純圧電材可変形鏡を製作し、基本的な性能試験を行う。

### 3. 研究の方法

TMT 多天体補償光学装置用可変形鏡に求められる要件として「ストロークが大きい」、「冷却可能」、「多数使用するため構造が簡単で安価であること」が挙げられる。現在天体観測に使用されている主な可変形鏡の種類として(a)圧電素子を用いたもの、(b)ボイスコイルを用いたもの、

(c)MEMS(Micro Electro-Mechanical System)技術を用いたものが挙げられる。これらうち(b)は発熱が大きい、(c)は変形量が小さいという問題がある。(a)には2つの方式があり、一つは「モルフ」式もう一つは積層アクチュエータ式である。積層アクチュエータ式はピエゾが変形する方向に鏡面を押し出すタイプであるが、一つの素子では変形量が足りないため変形させる方向に複数の素子を直列に積み重ね、各素子に高電圧を並列に印加することで天体観測に十分な変形量を得るようにしている。このアクチュエータに必要な素子数分だけ並べることになるが、機械的に大きく重くなり、電気的にも配線が複雑になる。一方の「モルフ」式はバイメタルのように、圧電素子の薄板とそれに張り合わせる材料の伸びの違いによる反りを利用して圧電素子の変形方向と垂直な方向に鏡面を変形させる方法である。貼り合わせる材料がガラス等の鏡材の場合がモノモルフ型、圧電素子同士を貼り付けてそれぞれ反対方向に変形させる場合がバイモルフ型である。

バイモルフ型の場合は、変形量をモノモルフ型の倍にすることができ、構造の対称性から温度変化による影響を受けにくい利点がある。一方で欠点としては、セラミックである圧電素子は表面が凸凹でそのままでは鏡面にならないため表面に樹脂のレプリカを貼り付けるか、ガラスを貼り付けた後で研磨する必要がある。また制御電極を両面のピエゾ素子の間に置くために、構造が複雑になる。モノモルフ型は、構造が単純でバイモルフ型のような問題がないことが利点である。しかし、欠点は材料の熱膨張率が異なるため、温度変化による変形を免れないことである。

両方の利点を兼ね備え、欠点を解消する究極の方式が本研究で開発する圧電材料自体を鏡面に用いた純圧電材方式のモノモルフ型可変形鏡である(図3)。この純圧電材可変形鏡は世界初の試みである。圧電素子は多孔質であるため鏡材には適さないとされていた。しかしセラミック製造会社と議論を重ねるうちに、緻密に製造した圧電素子そのものを鏡材として使用できる見通しが出てきた。この純圧電材可変形鏡は特にTMT用多天体補償光学装置に適した特長を備えているので設計を飛躍的に簡略化することができ、光学素子数を減らして高感度を保つことができる。そこで本研究では圧電材料を鏡面に仕上げることで、バイモルフ型とモノモルフ型の利点を兼ね備えた可変形鏡を製作する。

### 純圧電材可変形鏡

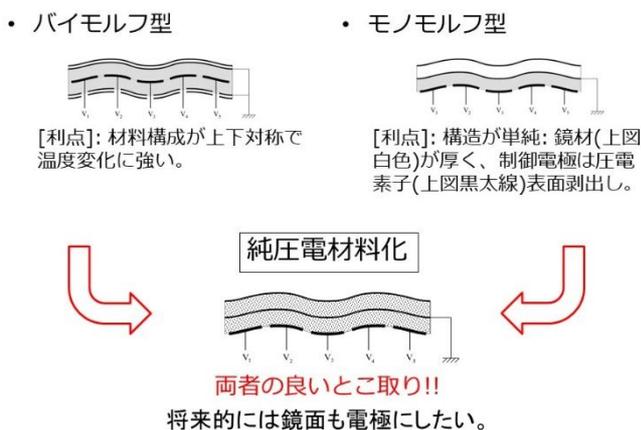


図3: 純圧電材可変形鏡の利点を模式的に示したもの

## 4. 研究成果

### (1) 設計

共振周波数や変形量が実現可能な範囲になるように考慮して設計を行った。以下では、可変形鏡の基板直径を  $a$ 、基板厚(片側)を  $h$  とする。

共振周波数 固定端の円板の場合には 次で式で表される。

$$f_1 = \frac{\alpha_1^2}{2\pi\sqrt{3}} \left(\frac{h}{a^2}\right) \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}}$$

ここで  $E$  はヤング率、 $\sigma$  はポアソン比、 $\rho$  は質量密度、 $\alpha_1$  は定数で値は 3.1961 である。

### 最大変位

円板中心での最大変位量  $z$  を見積もる。簡単のためモノモルフ式の場合は、バイモルフ式の半分であるとした場合、

$$\Delta z = \frac{1}{16} \left(\frac{a}{h}\right)^2 V d_{31}$$

ここで  $V$  は印加電圧、 $d_{31}$  は圧電定数である。

### 実用的な設計値の検討

基板厚と直径という基本設計値の複数の値に対して  $f_1$  と  $z$  の値を解析的に評価したのが表1である。 $f_1$  と  $z$  の数式を合わせて考えると、同じアスペクト比であれば  $z$  は同じだが、径が小さいほど  $f_1$  は大きくなるのが解る。

表 1: 基板厚と直径に対する共振周波数と最大変位の解析的な見積

基板厚 (片側) [mm]	外径(小さ目)			外径(大き目)		
	直径 [mm]	共振周波数 [Hz]	最大変位 [ $\mu\text{m}$ ]	直径 [mm]	共振周波数 [Hz]	最大変位 [ $\mu\text{m}$ ]
0.3	30	929	37	35	683	51
0.4	35	910	28	40	697	37
0.5	40	871	24	45	688	30
0.6	45	826	21	50	669	26
0.7	50	781	19	---	---	---

表 1 中で、ある基板厚に対して外径が小さ目の場合は共振周波数が高いが最大変位は小さくなる設計、一方で外径が大き目の場合は最大変位は増加するが共振周波数は低下する設計になる。PZT の加工や完成品の強度を考えると厚さは 0.3mm が実用的な下限になる。達成できる共振周波数と最大変位、製作可能性を考慮して、赤字で示した値を候補とした。

有限要素法による確認  
設計値を最終決定する前に、 で選択した値に対して有限要素法(FEM)による確認を行った(図 4)。

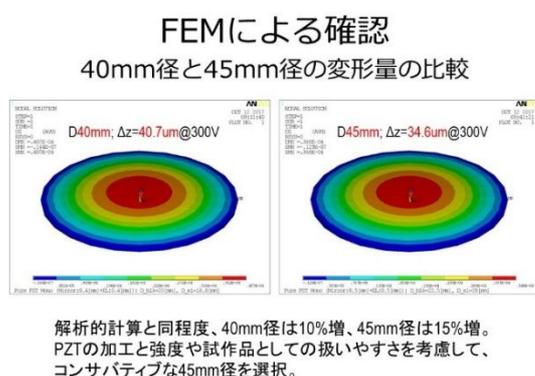


図 4 : FEM により変形量を確認した。

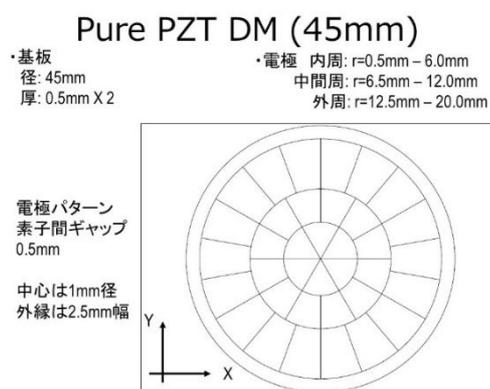
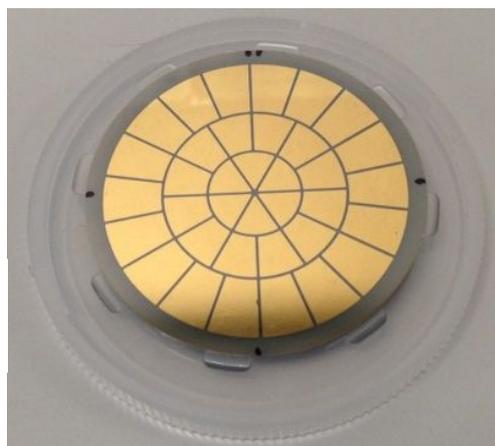


図 5 : 最終的な設計パラメータ。

最終的に基板直径 45mm(有効口径 25mm) で 36 個の制御電極は裏面上に配した構造とした(図 5)。

(2) 製作  
京セラ株式会社により製作された純圧電材可変形鏡を図 6 に示す。電極がある裏面側を撮影したものである。鏡面である表面は、ホルダーに入った状態の写真が下の図 7 に表示されている。現在は試作段階なので鏡面に金属の蒸着は行っていない。

図 6 : 製作された純圧電材可変形鏡  
(電極がある裏面側)



(3) 実験  
純圧電材可変形鏡に対して面粗さ測定、変形量測定、冷却の実験を行った。

面粗さ  
現在達成できている研磨後の PZT の面粗さは 4nmRa 程度となっている。研磨された光学材料の ~1nmRa に比べると大きいですが、鏡面として使用可能なレベルに達していることが確認できた。

表 2: 基盤厚と直径に対する共振周波数と最大変位の解析的な見積

面種別	PZT (研磨前)	PZT (研磨後)	比較 Zerodure (光学研磨製品)
Ra [nm]	380	4	0.68

### 変形量

内側 2 周分 (光学ビーム内に相当) の 18 個の電極に 300V の電圧を掛けて Zygo 干渉計により測定した結果を示す (図 7)。変形量が大きいため干渉縞が細かくなりすぎない中心部分しかデータが取得できていないが、直径 11.1mm の範囲で  $7.6 \pm 4.8 \mu\text{m}$  と非常に大きな変形量を達成している。変位量は直径の 2 乗に比例するので、電圧が印加されている直径 24mm に換算すると  $22.4 \mu\text{m}$  に相当する。FEM で直径 24mm として計算した場合の変形量の  $26.8 \mu\text{m}$  と同程度である (Sec.3 の FEM 計算は最外周まで電圧を掛けている)。



図 7: 実験用に配線を施しホルダーに固定された純圧電材可変形鏡。左は表面、中央は裏面、右は干渉計による変形量測定。

### 冷却実験

温度低下による変形を調べるため恒温槽に入れて  $-30$  まで冷却する試験を行った。参照比較面 (2 種類) と可変形鏡を回転ステージに載せて切り替えることで、相対的な変形を測定する構成にした。回転ステージに乗せた状態で Zygo 干渉計の前で各鏡の位置・傾きを調整しておくことで、恒温槽内で鏡を切り替えても光学系を再調整することなくデータ取得が可能になる (図 8)。

当初は Thor labs の波面センサを恒温槽中に入れて変形を測定する予定であったが、冷却により故障したので外付けにすることにした。その他、冷却時に回転ステージが回らなくなる、恒温槽の窓が曇るといったトラブルに対処して再試験の準備を完了した。新型コロナウイルス感染症の流行が終息すれば試験を実施したいと考えている。

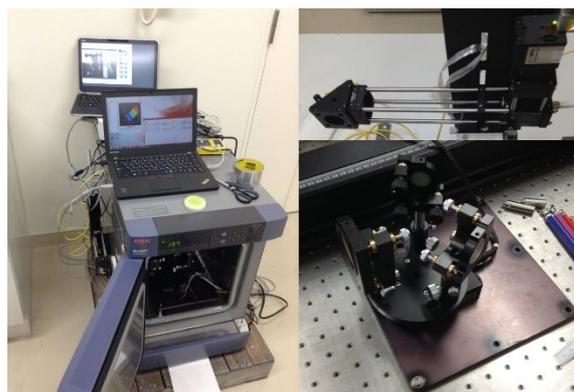


図 8: 恒温槽での測定装置

### (4) まとめと今後

純圧電素子可変形鏡の試作品が完成し、基礎的な実験を行った。面粗さは  $4\text{nmRa}$  程度が達成できており、変形量もほぼ設計時の想定通りであることが確認できた。冷却試験については冷却に伴う実験機器の問題が生じた。これらの問題には対処済で次の実験の機会を待っている。冷却に伴う様々な問題は、将来補償光学装置を冷却する際の良い経験になった。

冷却時の性能やヒステリシスを考慮した制御については、新型コロナウイルス感染症の影響で本研究期間内では十分に検証しきれなかったが今後も研究を進展させて行きたいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大屋真、樽田順、坂部健太、池田優二、馬目威男、堀内雅彦、柳橋健太郎、向井伸二、渡邊誠、秋山正幸
2. 発表標題 純圧電材料可変形鏡の開発
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	池田 優二  (Ikeda Yuji)		
研究協力者	樽田 順  (Taruta Jun)		
研究協力者	坂部 健太  (Sakabe Kenta)		
連携研究者	秋山 正幸  (Akiyama Masayuki)  (50425401)	東北大学・理学研究科・教授   (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	渡邊 誠  (Watanabe Makoto)  (10450181)	岡山理科大学・理学部・准教授    (35302)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関