

B01 宇宙形状可変鏡における変位の連成特性に関する研究

武田 真司 (東工大), 小出 紗瑛 (東工大), 大本 圭祐 (東工大), 坂本 啓 (東工大)
田中 宏明 (防衛大), 石村 康生 (早稲田大), 大熊 政明 (東工大)

1. 序 論

電波天文衛星が 100GHz を超える高周波電波の観測を行うために、衛星に搭載する大型アンテナの高い鏡面精度の達成が求められる。しかし、展開構造において展開後の形状を高精度に保証することは難しい。そこで、鏡面形状を能動的に変形させ、電波の行路差を低減することで、展開後の形状誤差を補正し、結果として高い鏡面精度を達成する形状可変鏡の研究が行われている。電波天文衛星に用いる展開式大型形状可変鏡の例として、NASA が 2021 年打ち上げ予定の、100THz 帯電波観測を目的とした JWST がある [1,2]。JWST は主鏡と副鏡の 2 枚のアンテナを組み合わせたカセグレン式のアンテナシステムを搭載している。JWST は主鏡と副鏡ともに形状可変鏡であり、極めて複雑なシステムとなっている。これに対して著者らは、100GHz 帯という JWST より 10^3 倍波長が長い電波観測を目指し、図 1.1 のようにカセグレン式で副鏡のみを形状可変とするシステムを提案し、試作と地上検証を行ってきた [3-9]。一般に主鏡よりも顕著に小さな副鏡のみを形状可変とすることで、大型の主鏡を形状可変とする場合と比べ駆動機構が小型化・単純化できることが期待される。

これまでに製作された形状可変副鏡のプロトタイプを図 1.2 に示す。本プロトタイプは図 1.2(b) のスリット入り凸型鏡面と、図 1.2(c) のスマートアクチュエータ 6 本から構成される [3,4]。図 1.2(c) 右上のような 3 次元座標系を定義する。スリット入り凸型鏡面は、直径 200mm、板厚 0.5mm のアルミニウム製で、深さ 70mm のスリットにより 6 つの領域 (チャンネル、以降 CH) に分割されている。スマートアクチュエータは積層型圧電アクチュエータと変位拡大機構から構成される。積層型圧電アクチュエータは電圧を印加することで z 軸方向に変形する。その変形を変位拡大機構により 10 倍に拡大し、先端変位 z を出力する。6 分割された凸型鏡面の裏からスマートアクチュエータで押すことで鏡面形状を変形させる。このスマートアクチュエータへの要求は先端変位 z の最大ストロークが 1mm 程度、分解能が $1\mu\text{m}$ 程度である。スマートアクチュエータの全長は 160mm で、変位拡大機構と積層型圧電アクチュエータのケースは低熱膨張合金 IC-LTX (熱膨張係数 0.02ppm/K) により製作されている。また、積層型圧電アクチュエータの圧電素子の熱膨張係数は -1.1ppm/K である。大本ら [8] に

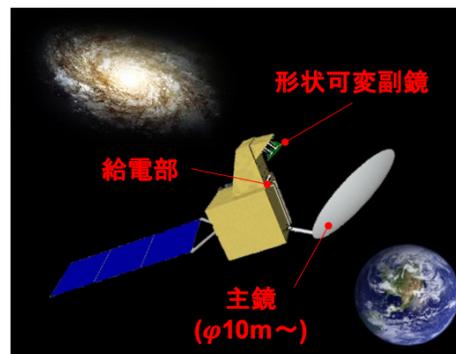
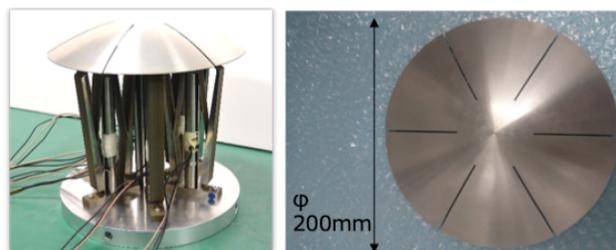
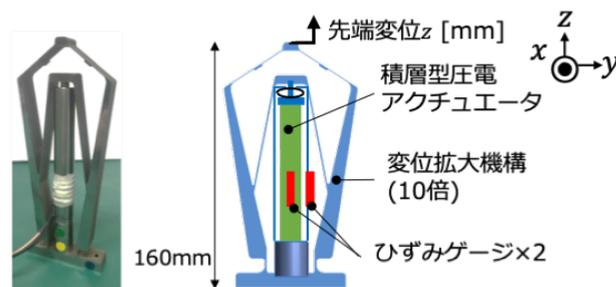


Fig. 1.1 考案されている形状可変アンテナシステム



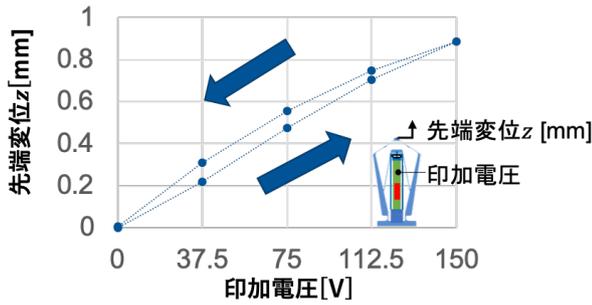
(a)形状可変副鏡の外観 (b)スリット入り凸型鏡面の外観



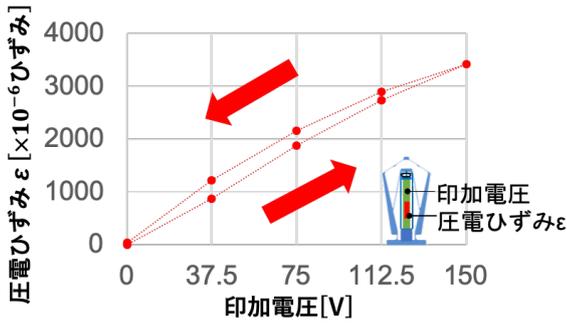
(c)スマートアクチュエータの外観と内部構造

Fig. 1.2 形状可変副鏡のプロトタイプ

よると、低熱膨張合金 IC-LTX の熱膨張係数は圧電素子の熱膨張係数に比べて十分小さいため、低熱膨張合金 IC-LTX を用いた変位拡大機構と積層型圧電アクチュエータのケースの熱膨張を無視できると仮定している。一つのスマートアクチュエータには、積層型圧電アクチュエータの圧電素子とそのケースの外側の 2 箇所にひずみゲージが貼り付けられている。どちらのひずみゲージも z 軸方向のひずみを計測する。ケースに貼り付けたひずみゲージは、ケース自体の熱膨張を無視できると仮定するため、ひずみゲージの熱変形誤差のみを計測している。したがって、二つのひず



(a)先端変位



(b)圧電ひずみ

Fig. 1.3 スマートアクチュエータ単体のヒステリシス特性

みゲージの値の差をとることで、ひずみゲージの熱変形誤差を相殺できる。この二つのひずみゲージの値の差を圧電ひずみ ϵ とする。この圧電ひずみ ϵ は、圧電素子の電圧印加による伸びと、圧電素子の熱膨張分のひずみを含む。スマートアクチュエータ単体に印加電圧を与えた時の先端変位 z と圧電ひずみ ϵ のグラフを図 1.3 に示す。図 1.3(a) より印加電圧と先端変位 z にはヒステリシスが見られるが、図 1.3(b) より印加電圧と圧電ひずみ ϵ でも同様のヒステリシスが見られる。これよりアクチュエータ単体では圧電ひずみ ϵ を読むことで先端変位 z を一意に推定された。

高精度形状可変鏡実現のため、本プロトタイプを用いた地上実験により、熱変形や個体差による影響を低減させる設計改善と評価が行われてきた [3-9]。また、図 1.2(a) のようにスマートアクチュエータと凸型鏡面を統合した状態で、鏡面の z 軸方向変位 (以降、鏡面変位) z を一定に保つ、図 1.4 のようなフィードバックシステムが開発された [8]。このシステムは鏡面変位 z と圧電ひずみ ϵ が一対一に対応しているという仮定のもとに、目標鏡面変位 z に対応した圧電ひずみ ϵ で一定に保つ制御を行っている。また、このシステムはある一つの CH の鏡面変位 z を得るために、その CH の圧電ひずみ ϵ のみを調整している。すなわち、各 CH それぞれを独立的に制御している。これにより、スマートアクチュエータ単体の圧電素子起因のヒステリシスは除去可能である。しかし、凸型鏡面を統合した時の、機構起

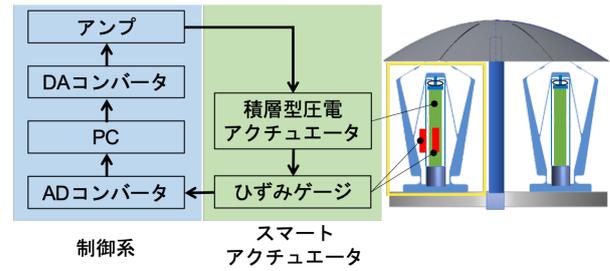


Fig. 1.4 フィードバック制御系ダイアグラム



Fig. 2.1 計測装置

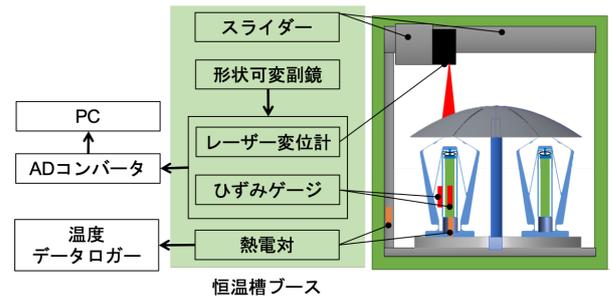


Fig. 2.2 計測系ダイアグラム

因のヒステリシスの問題を小出らが示唆した [9]。

そこで本研究では、100GHz 帯の電波観測に向けた形状可変副鏡のプロトタイプを用いた実験で、圧電ひずみ計測フィードバック系による鏡面変位のヒステリシス除去性能の評価を目的とする。これを達成するために、本研究では (i) 圧電ひずみと鏡面変位の対応関係の評価、および (ii) 圧電ひずみと鏡面変位関係の再現性の評価を行う。

2. 圧電ひずみと鏡面変位の対応関係評価

2.1 実験の目的・方法 本章では、スマートアクチュエータ 6 本と凸型鏡面を統合した状態で、圧電ひずみ ϵ と鏡面変位 z の対応関係を評価する。まず、変位の連成特性計測を行い、連成特性による圧電ひずみ ϵ と鏡面変位 z への影響を定量化する。続いて、フィードバック制御実験を行い、連成特性がフィードバック制御による形状制御に与える影響を定量化する。ここで連成特性とは、6 つの領域に分割された凸型鏡面において、一つの鏡面領域が

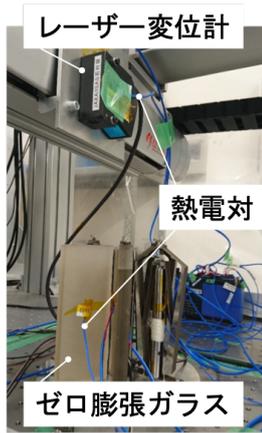


Fig. 2.3 ゼロ膨張ガラスを用いた計測系の熱変形校正の様子

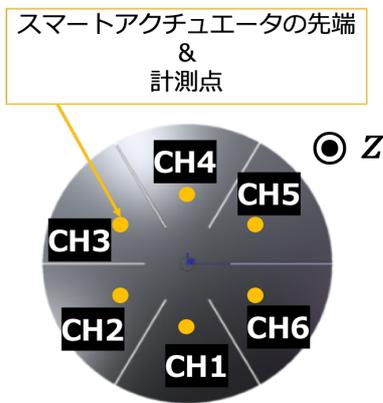
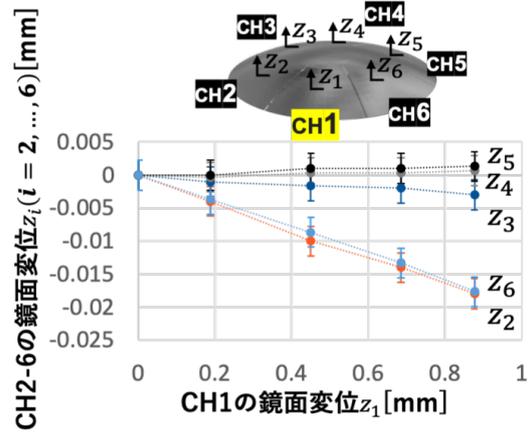


Fig. 2.4 鏡面変位の計測位置

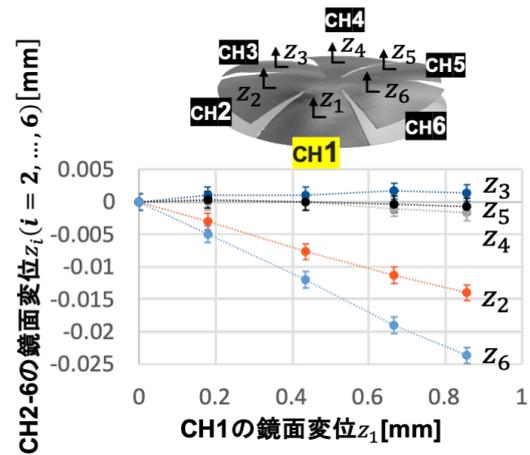
他鏡面領域の変形の影響を受けることと定義する。圧電ひずみ ε の計測については、先行研究と同様に、積層型圧電アクチュエータのケース自体の熱膨張を無視できると仮定する。

スマートアクチュエータの圧電ひずみ ε と鏡面変位 z の計測には図 2.1 の計測装置を用い、計測系ダイアグラムは図 2.2 の通りである。2 本のスライダーにレーザー変位計を取り付け、スライダーを駆動させることで鏡面内の各点を計測する。熱電対と温度データロガーによって恒温ブース内の温度をモニターし、温度定常状態での圧電ひずみ ε と鏡面変位 z を計測する。また治具の熱変形、およびレーザー変位計の温度特性による影響を校正するため、図 2.3 のように熱膨張係数がほぼ 0 であるゼロ膨張ガラスを計測する。

図 2.4 のように、スリットにより分割された凸型鏡面の 6 つの領域を、それぞれ CH1 から CH6 と振り分ける。各 CH の鏡面裏には一つずつスマートアクチュエータが配置されている。これらスマートアクチュエータの頂点の真上をレーザー変位計により計測することで、CH1-6 の鏡面変位 z_i ($i = 1, \dots, 6$) を得る。なお、CH1-6 の圧電ひずみを ε_i ($i = 1, \dots, 6$) とする。計測結果の鏡面変位 z に関するエラーバーはレーザー変位計の測定精度、および治具の熱変



(a)CH2-6が0Vを基準としたCH2-6の鏡面変位



(b)CH2-6が150Vを基準としたCH2-6の鏡面変位

Fig. 2.5 CH1 の鏡面変位に対する CH2-6 の鏡面変位

形から推定される計測誤差を示す。また圧電ひずみに関するエラーバーはひずみゲージの測定精度から推定される計測誤差を示す。

2.2 変位の連成特性計測 初めに、CH1 に最大約 1mm までの鏡面変位 z_1 を与えていく時の、隣合う CH2-6 の鏡面変位 z_i ($i = 2, \dots, 6$) を計測する。計測パターンは次の二種類である。第一に CH1 が 0V、CH2-6 が 0V 時のそれぞれの鏡面位置 z を基準とする場合の計測結果を図 2.5(a) に示す。第二に CH1 が 0V、CH2-6 が 150V 時のそれぞれの鏡面位置 z を基準とする場合の計測結果を図 2.5(b) に示す。どちらのパターンでも CH1 の約 1mm までの上昇に比例して、CH1 の両隣りに位置する CH2 と CH6 の鏡面が約 0.02mm 下降する傾向が見られた。これは 1 つの鏡面の変形に対して、鏡面全体のひずみエネルギーが最小化するように変形したためと考えられる。

続いて、CH2-6 の印加電圧を全て 0V、75V、150V に揃えたそれぞれのパターンで、CH1 の圧電ひずみ ε_1 に対する CH1 の鏡面変位 z_1 の計測結果を図 2.6 に示す。鏡面位置 z と圧電ひずみ ε はすべて CH1 が 0V、CH2-6 が 0V 時を基

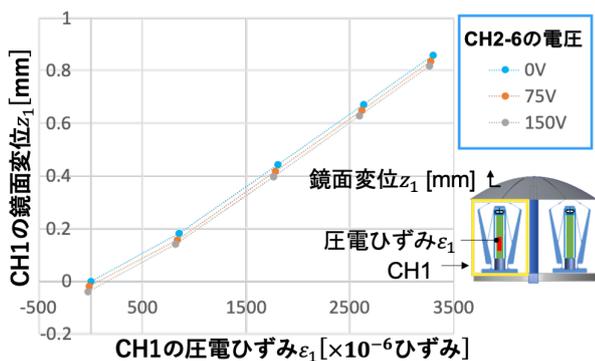


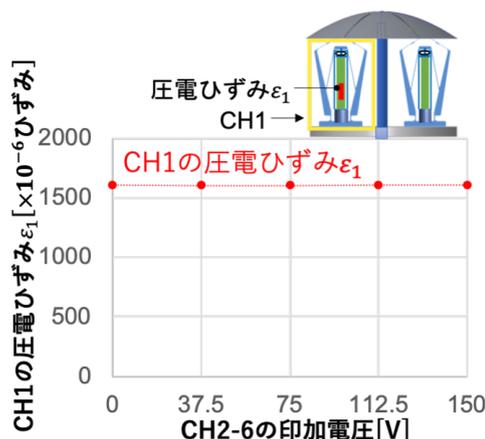
Fig. 2.6 他チャンネル電圧の依存性

準としている。異なる CH2-6 の印加電圧による、CH1 の圧電ひずみ ϵ_1 と鏡面変位 z_1 のグラフの傾きに違いは見られなかった。しかし、同じ圧電ひずみ ϵ_1 において、CH2-6 の印加電圧が大きいほど鏡面変位 z_1 が小さい。CH2-6 の印加電圧が 0V と 150V では同じ圧電ひずみ ϵ_1 に対して、鏡面変位 z_1 に約 0.04mm の差が見られた。この計測結果より、一つの CH の圧電ひずみ ϵ と鏡面変位 z は一対一に対応しておらず、他 CH の印加電圧に依存した機構起因のヒステリシスが明らかになった。これは鏡面変位の連成により、スマートアクチュエータが、鏡面から受ける反力が増加したためと考えられる。凸型鏡面と統合した状態では、各 CH をそれぞれ独立的に制御する現フィードバックシステムでは、連成特性による機構起因のヒステリシス除去は難しいと考察される。したがって、次節では連成特性影響下でのフィードバック制御実験を行い、現フィードバックシステムの機構起因のヒステリシス除去可能性を定量的に評価する。

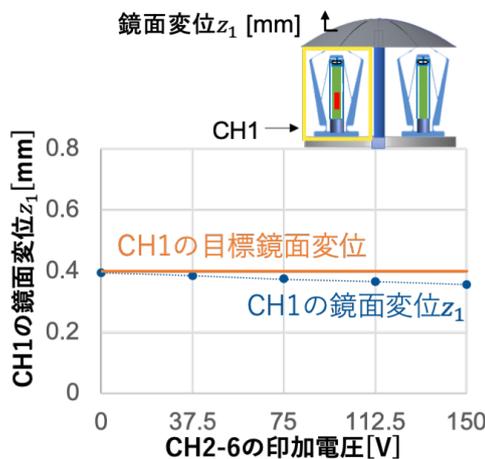
2.3 フィードバック制御実験

図 2.7 にフィードバック制御実験の結果を示す。CH1 の目標鏡面変位を 0.4mm とする。図 2.7(a) は CH2-6 の印加電圧に対する CH1 の圧電ひずみ ϵ_1 を表しており、圧電ひずみはほぼ一定値に制御されている。図 2.7(b) は CH2-6 の印加電圧に対する CH1 の鏡面変位 z_1 を表しており、CH2-6 の印加電圧が上昇するほど CH1 の鏡面変位 z_1 は減少し、0V と 150V では鏡面変位 z_1 に約 0.04mm の減少が見られた。実験結果より、圧電ひずみフィードバック系では、約 0.04mm の鏡面変位誤差が含まれることが明らかになった。

本章の実験結果より、ある CH の圧電ひずみ ϵ と鏡面変位 z の関係は、他 CH 依存性により一対一に対応していないことが明らかになった。そこで、次章ではその対応のなさについての再現性を評価する。再現性が確認できれば、その再現性をもとに 6 つの CH の圧電ひずみ ϵ_i ($i = 1, \dots, 6$) から各 CH の鏡面変位 z_i ($i = 1, \dots, 6$) が推定でき、機構起因のヒステリシスが除去可能と評価できる。



(a)CH1の圧電ひずみ



(b)CH1の鏡面変位

Fig. 2.7 フィードバック制御実験

3. 圧電ひずみと鏡面変位関係の再現性評価

3.1 実験の目的・方法

本章では、圧電ひずみ ϵ と鏡面変位 z 関係の再現性評価として、各 CH への電圧印加順序の違いによる鏡面変位 z を定量化する。計測系は第 2.1 章に示したものと同様である。

各 CH への電圧印加順序として図 3.2 の 3 通りの順序で印加する。印加順序 (i) は CH1-2-6-3-5-4, (ii) は CH4-5-3-6-2-1, (iii) は CH2-3-4-5-6-1 である。はじめ全 CH の印加電圧が 0V の状態から、各順序で 150V 印加させた時の CH1 の鏡面変位 z_1 を計測する。各順序において、各 CH の初期鏡面位置をそれぞれ統一するため、計測前に図 3.1 のスマートアクチュエータと鏡面の接触部分にある調整ネジを用いて、各 CH の初期鏡面位置の調整を行なった。初期鏡面位置の調整は、レーザー変位計で計測しながら、設定した鏡面位置 z の $\pm 0.002\text{mm}$ 以内のズレを許容した。計測結果の鏡面変位 z に関するエラーバーはレーザー変位計の測定精度、治具の熱変形から推定される計測誤差、および許容した初期鏡面位置のズレを示す。

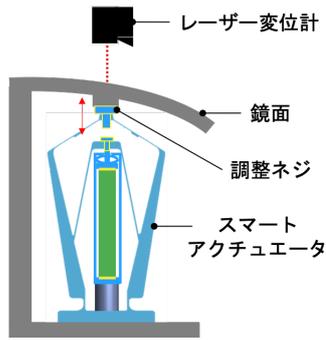


Fig. 3.1 スマートアクチュエータと鏡面の接触部分

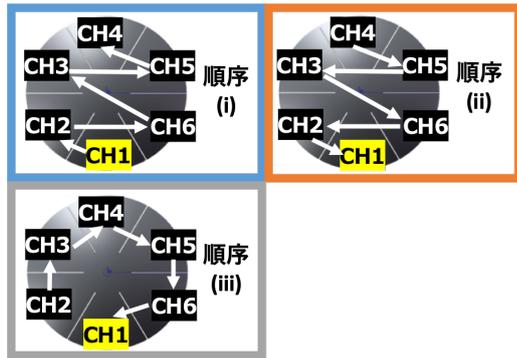


Fig. 3.2 電圧印加順序

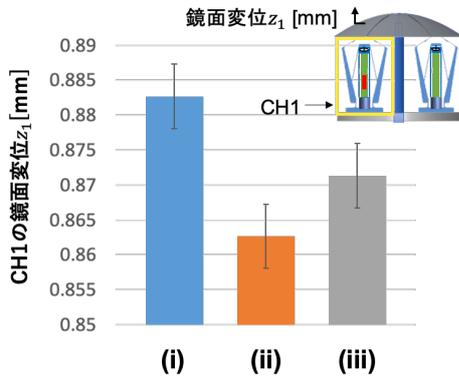


Fig. 3.3 電圧印加順序の違いによる鏡面変位

3.2 鏡面変位の計測結果 電圧印加順序の違いによる CH1 の鏡面変位 z_1 の計測結果を図 3.3 に示す。印加順序 (i) と (ii) で CH1 の鏡面変位 z_1 の違いが大きく、印加順序 (i) のエラーバーの下端と印加順序 (ii) のエラーバーの上端との差から、約 0.01mm の有意な差が見られた。計測結果より、鏡面変位 z が電圧印加順序に対する経路依存性が明らかになった。この経路依存性の原因として、鏡面の変形に分岐が生じるためと考えられる。

本章の実験結果より、鏡面変位 z の経路依存性が確認された。第 2 章で得られた結果も踏まえ、連成特性により、圧電ひずみ ϵ と鏡面変位 z の関係は 1:1 に対応しておらず、その関係の高精度な再現性が低いことが明らかになった。

4. 結 論

100GHz を超える電波観測を目的とした電波天文衛星を想定した形状可変副鏡において、圧電ひずみ計測による鏡面変位のヒステリシス除去可能性評価として、圧電ひずみと鏡面変位の計測を行い、結果として以下の二つを明らかにした。第一に、提案機構のヒステリシスには、「圧電素子」と「その他の機構」に起因する二種がある。第二に、圧電ひずみ計測だけでは、後者の機構起因のヒステリシスを除去することが難しく、約 $1\mu\text{m}$ の分解能要求に対し、機構由来のヒステリシスが $40\mu\text{m}$ 程度と無視できない大きさである。今後、設計の改良などが求められる。

本論文で残された課題として、機構/フィードバック系の改良により、ヒステリシスを除去できるシステムへ改良が必要である。機構の改良として連成特性を軽減/除去する凸型鏡面の改良、鏡面変位の直接計測の検討が挙げられる。

謝 辞

本研究は、ISAS/JAXA 戦略的開発研究費「高性能科学観測にむけた高精度構造・材料の研究開発」の活動の一環として実施した。

文 献

- (1) M. A. Greenhouse, "The James Webb Space Telescope: Mission Overview and Status", AIAA SPACE 2012 Conference & Exposition, 2012.
- (2) R. M. Warden, "Cryogenic Nano-Actuator for JWST", 38th aerospace Mechanism Symposium, 2006.
- (3) 田中宏明, 坂本啓, 石村康生, 稲垣章弥, 小木曾望, 池田忠繁, 古谷寛, 渡辺和樹, 及川祐, 倉富剛, 「高精度スマート形状可変鏡試作モデルの開発」, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, 2013.
- (4) 田中宏明, 坂本啓, 石村康生, 小木曾望, 池田忠繁, 古谷寛, 渡辺和樹, 及川祐, 倉富剛, 「高精度形状可変鏡の初期実験モデルの開発」, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 2014.
- (5) A. Inagaki, H. Sakamoto, H. Tanaka, K. Ishimura, M. Okuma, "Experimental study of reflector shape control under various thermal conditions", 2nd AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA SciTech Forum, 2015.
- (6) K. Gotou, H. Sakamoto, A. Inagaki, H. Tanaka, K. Ishimura, M. Okuma, "Actuator design for space smart reflector to reduce thermal distortion", Transactions of the Japan society for aeronautical and space scientists, aerospace technology Japan, 2016.
- (7) R. Kashiwama, H. Sakamoto, H. Tanaka, K. Ishimura, M. Okuma, "Athermalization of deformable reflector's actuators for radio astronomy satellites", 2018 AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA SciTech Forum, 2018.
- (8) 大本圭祐, 「宇宙アンテナ形状制御機構の駆動状態での熱変形の評価と制御」, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 2018.
- (9) 小出紗瑛, 「熱膨張律不整合を低減させた形状可変鏡の熱変形特性計測」, 第 63 回宇宙科学技術連合講演会, 2019.