

# 格子貼付 1 カメラ法を有する形状可変構造実証試験の準備 2022 年度

田中宏明(防衛大), 小木曾望(大阪公立大), 坂本啓(東工大), 岩佐貴史(大阪公立大),  
勝又暢久(香川大), 岸本直子(摂南大), 樋口健(早大), 池田忠繁(中部大),  
土居明広, 佐藤泰貴(宇宙研)

## Demonstration of a deformable structure equipped with grating pasting measurement system FY2022

H. Tanaka (National Defense Academy), N. Kogiso (Osaka Metropolitan Univ.),  
H. Sakamoto (Tokyo Institute of Technology), T. Iwasa (Osaka Metropolitan Univ.),  
N. Katsumata (Kagawa Univ.), N. Kishimoto (Setsunan Univ.), K. Higuchi (Waseda Univ.),  
T. Ikeda (Chubu Univ.), A. Doi and Y. Sato (JAXA)

### 1. はじめに

電波天文や高度な衛星通信などにおいて、高精度な大型反射鏡面は重要な機器であるが、大型の構造物は変形も大きくなりやすく、高精度な光学系の実現は大きな工学課題の一つである。その実現のために、形状可変鏡を用いた高精度光学系に関する研究が世界的になされている<sup>1,2)</sup>。これらのシステムでは、アンテナ主鏡等の変形を計測し、変形により生じる光路誤差を形状可変鏡により補正することで、高精度なアンテナ光学系を実現するものであり、そのため高精度な鏡面変形の計測と形状可変鏡技術が大きな課題となる。我々のグループでは格子投影法を用いた高精度な鏡面変形の計測<sup>3)</sup>、および、圧電アクチュエータを組み込んだ形状可変鏡の開発<sup>4)</sup>に関する研究を行ってきた。

この技術は衛星搭載用の高精度アンテナシステムのほか気球 VLBI 計画<sup>5)</sup>などの成層圏気球を利用した各種プロジェクトでも活用が期待されているほか、その基礎となる高精度な変形計測や圧電アクチュエータを利用した形状補正システムは、それぞれ単独でも将来の高度なプロジェクトの実現において基盤となる技術である。圧電アクチュエータに関しては、ExHAM を利用した圧電材料の宇宙環境曝露試験を

行い、耐宇宙環境特性を評価している<sup>6)</sup>。ただし、ExHAM では電源が無いため、軌道上での動作実証まではできていない、また、計測系と形状可変鏡を統合したシステムに関しては、地上試験においてその有効性を実証しているもの<sup>7)</sup>、宇宙に近い環境での実証はできていない。そこで我々は、格子投影法の一つである格子貼付1カメラ法を用いた高精度変形計測、および、形状可変鏡を統一したシステムの、成層圏気球を用いた機能実証実験(MEDUSA: Morphing Experiment for Durable Smart Antenna)を提案している<sup>8,9)</sup>。

本稿では成層圏気球を用いた高精度変形計測、および、形状可変鏡を統一したシステムの実証試験計画、および試験に向けた2022年10月現在での準備状況の概要を紹介する。

### 2. 大気球実験による実証計画

高精度変形計測、および、形状可変鏡を統一したシステムに関する成層圏気球実験は、衛星搭載用高精度構造システムの実現に向けた1つのステップであるほか、気球 VLBI 計画<sup>5)</sup>における重要コンポーネント(形状可変鏡)の実環境実証となる。

## 2.1 試験装置

試験装置の構成イメージを図 1 に示す(寸法は概算). 本試験ではアンテナ光学系全体ではなく, 格子貼付1カメラ法による計測系と形状可変鏡に絞った構成としている. この形状可変鏡の概要を図 2 に, 実証試験モデルのシステムの概要を図3に示す.

この形状可変鏡では装置サイズを低減するために, 鏡面を双曲面鏡面の半面のみで構成しており, 3つのペタル部を有している. この鏡面に対し3つのスマートアクチュエータを設置した. 中央のアクチュエータに鏡面部を固定している. 各ペタル部のアクチュエータは鏡面部とはクリアランスを有するような構成となっており, ノミナル電圧印加時に鏡面と接する. これにより各ペタル部のアクチュエータを駆動しない状態で,

中央のアクチュエータのみを駆動することにより, 鏡面部の剛体的な動きを可能とするほか, 中央を駆動しない状態で各ペタル部のアクチュエータを駆動することで, ペタルごとの駆動を可能とする. 図 3 に示すように, スマートアクチュエータは, 圧電アクチュエータと変位拡大機構<sup>10,11)</sup>およびギャップセンサ部で構成され, 変位拡大機構先端に設けた張出し部の動きをギャップセンサにて計測することで, アクチュエータの出力変位を評価することができる. 圧電アクチュエータは, バイポーラ駆動を行うこととし,  $-50\sim 50V$  の電圧を印加することで変位を発生させる.

また, 格子貼付1カメラ法は1台のカメラと処理用のコンピュータ(今回はラズベリーパイを利用)から構成される.

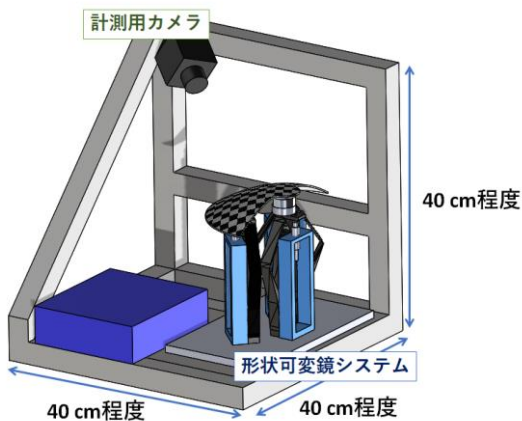


図 1 大気球による実証試験モデルのイメージ

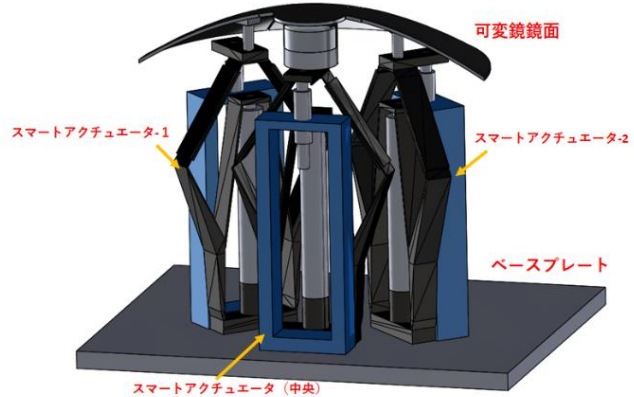


図 2 大気球実験向け形状可変鏡システム概要

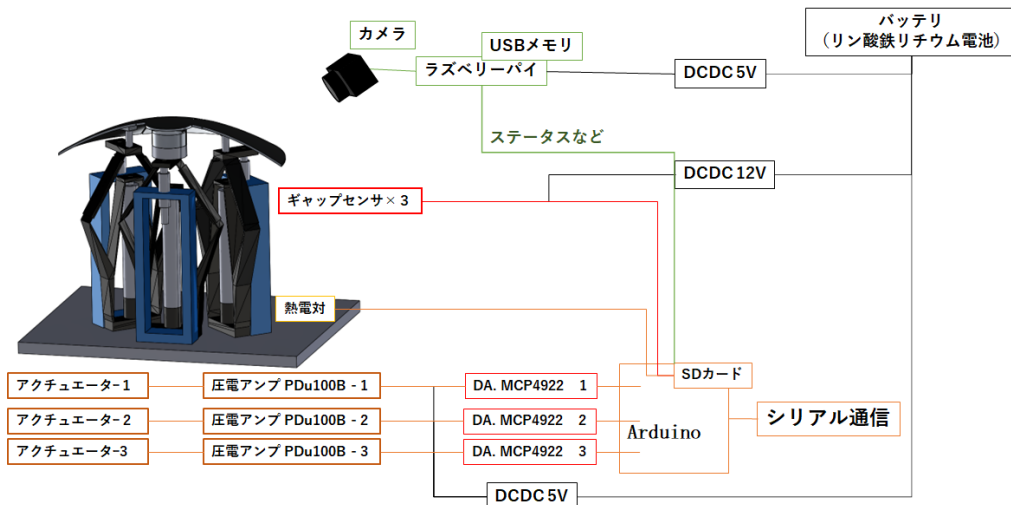


図 3 実証試験モデルシステム概要

## 2.2 実験計画

この大気球実験では、

[1] 気球実験環境下での圧電アクチュエータを有する形状可変鏡の動作実証

[2] 気球実験環境下での格子貼付1カメラ法による面変形計測の実現可能性実証

[3] 変形計測系と形状可変鏡を組み合わせた高精度スマートリフレクタの気球実験環境下での機能実証

を目的とし、気球実験の時間が限られているため、特に形状可変鏡を用いた格子貼付1カメラ法計測系の軌道上キャリブレーションの実現を大きな目標とし、サクセスクライテリアを以下のように定めた。

○ミニマムサクセス： 圧電アクチュエータ系、格子貼付1カメラ法系の両方の動作実証

(M1) 圧電アクチュエータ系:ギャップセンサで動作確認、温度データを考慮したギャップセンサの出力が予測の範囲内となること。

(M2) 格子貼付1カメラ法系:画像の取得と地上キャリブレーションデータによる変形の算出ができること

○フルサクセス： 軌道上キャリブレーションの実現可能性実証

(F1) 圧電アクチュエータ系： 格子貼付1カメラ法キャリブレーションのための計画された動きができること。

(F2) 格子貼付1カメラ法系： 軌道上キャリブレーションを実施し、想定された手続が実施されたことを確認できること。

(F3) 統合システム： 第3の位置での計測を行い、格子貼付1カメラ法により計測された剛体変位量が、ギャップセンサの出力と0.05mm以下の精度で一致していること。

格子投影法のキャリブレーションでは、間隔をあけた二つのリファレンスの格子画像を利用し計測空間を構築する必要があり、今回の試験では格子を貼付した鏡面自体をリファレンスとして利用することを想定している。そのために形状可変鏡は各ペダル部分の駆動が可能であるほか、鏡面全体が並進運動できることが必要となる。また、駆動性能の評価のために、格子投影法に加えて独立した計測系を有することが必要

となるため、ギャップセンサを搭載する。さらに、本試験は気球実験における混載便、または、他の気球実験へのピギーバックでの試験を想定しているため、小型化する必要がある。

また、成層圏気球試験としては安定した温度、圧力環境が期待できる水平飛行中の評価が理想的だが、実験を有効に利用できるよう上昇中の試験・評価を想定している。上昇中に、計測系のキャリブレーション、形状可変鏡の駆動、変形計測を1セットとして短時間に実施、それを繰り返すことで環境変化が比較的小さい期間での統合システム評価を行う予定である。

## 3. 開発進捗

大気球での実証に向けて、形状可変鏡システムおよび格子貼付1カメラ法に関する研究・開発を進めてきている。その中で、今回利用予定の圧電アクチュエータ: Piezomechanik 社 PSt 150/10/100 VS15, チップ型の圧電アンプ: PiezoDrive 社 pDu100B, ギャップセンサ: 電子応用社 ML-06 について宇宙に近い環境での動作確認試験を行い、動作が可能であることを確認している<sup>12)</sup>。一方で、変位拡大機構は当初、製作コストから CFRP 短繊維入りのナイロン樹脂 (Markforged 社, ONYX) を材料として 3D プリンタにて造型していたが、試験において低温時の駆動に問題があることが分かったため<sup>12)</sup>、低熱膨張金属 IC-LTX を用いた変位拡大機構<sup>11)</sup>に変更することとした。低温低圧環境試験の詳細については、文献 12 を参照されたい。

次に、格子貼付1カメラ法と形状可変鏡を組み合わせたシステムの試験を実施した。この試験では、大気球実験を想定した図 3 に示す構成に近いものとなっており、格子貼付1カメラ法による計測は Raspberry Pi を用いて実施し、形状可変鏡側は、Arduino からのデジタル信号を DA 変換素子 (MCP4922) によりアナログ変換した後、チップ型圧電アンプにて増幅しアクチュエータを駆動するシステムとなっている。さらに、アクチュエータの出力はギャップセンサにて計測され、Arduino の AD 変換機能によりデジタル信号化され、

シリアル通信で接続したコンピュータに送られる他，MicroSD カードに保存される．なお，電源系は汎用の安定化電源を用いた．

試験系で用いた格子貼付1カメラ法+形状可変鏡システムの外観を図4に示す．この試験では，形状可変鏡を剛体的に並進させることで，格子貼付1カメラ法システムのキャリブレーションを行ったほか，格子貼付1カメラ法の計測精度の評価も行った．本試験では，外部の評価系としてレーザー変位計も利用した．外部評価系の外観を図5に示す．

今回の試験ではまず，中央のアクチュエータに-50V,および 50V を印加した状態で，格子貼付1カメラ法のキャリブレーション用画像を撮像し，計測空間を構成した．その後，中央アクチュエータの印加電圧を0Vとした際の鏡面の変形を，格子貼付1カメラ法で測定し，同時に中央アクチュエータのギャップセンサによる変位計測，および，レーザー変位計での計測も実施した．結果を表1にまとめる．この結果より，3つの方法による計測結果はほぼ一致しており，格子貼付1カメラ法により数十 $\mu$ 程度の計測誤差での変位計測が可能であることが期待できる．

また提案する大気球を用いた試験系では，カメラにより撮像された画像を USB メモリに保存する予定であり，地上での後処理となるが，格子貼付1カメラ法による鏡面全体の変形評価も可能である．今回の試験で撮像された結果を用いた，鏡面全体での変位評価結果を図6に示す．なお，この様な評価はオンボードのラズベリーパイを用いても可能であり，ラズベリーパイを用いた場合，約 40 秒程度の処理時間となる見通しである．

表1 試験結果

	計測された変位量 [mm]
ギャップセンサ	0.13
格子貼付1カメラ法	0.12
レーザー変位計	0.12

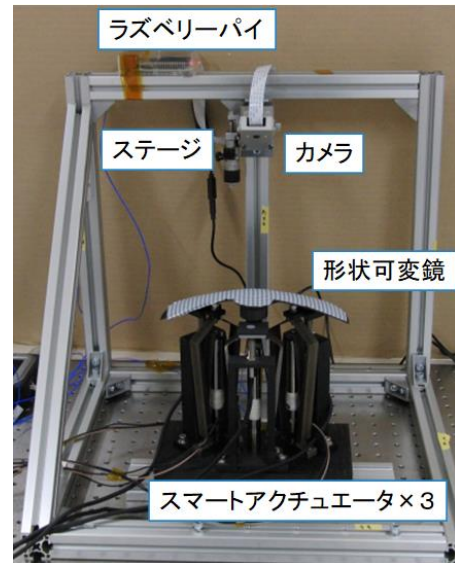


図4 格子貼付1カメラ法と形状可変鏡を統合したシステムの外観



図5 外部評価系外観

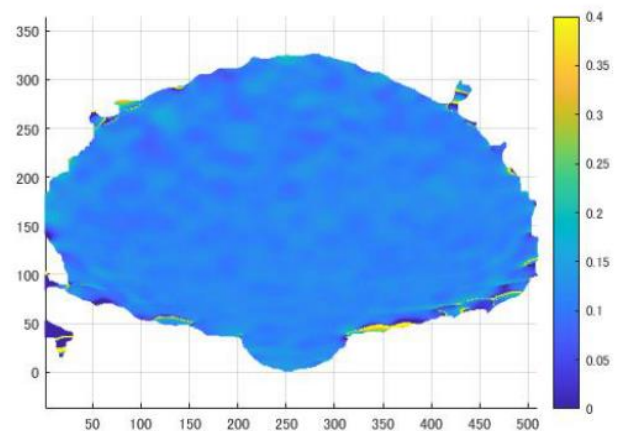


図6 格子貼付1カメラ法による鏡面全体の変形評価結果

#### 4. まとめ

格子貼付1カメラ法を用いた高精度変形計測, および, 形状可変鏡を統一したシステムの大気球実験による機能実証にむけた準備状況を紹介した. 実証試験に向けた重要機器については低温低圧環境試験を通して, 成層圏環境でも動作が可能であることを確認したほか, 格子貼付1カメラ法と形状可変鏡を組み合わせた試験を実施し, 電源系以外は気球実験を想定した機器を用いた形状可変鏡の駆動により, 計測系のキャリブレーションが可能なること, 計測精度としては数十 $\mu\text{m}$ 程度が期待できることを明らかにした. 現在は電源系などを準備中であり, システムの構築を早急に行う予定である.

#### 謝辞

本研究は, ISAS/JAXA の戦略的開発研究費「光学観測高度化に向けた高精度構造・材料システム統合」の支援を受けて実施されたものである.

#### 参考文献

- 1) H. Fang, et al., Experimental Study of a Membrane Antenna Surface Adaptive Control System, 52nd AIAA/ASME/ASCE/ AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, AIAA2011-1828,2011.
- 2) L. da Rocha-Schmid, et al, Parametric Design and Analysis Process of In-Orbit Reshaping Space Reflector Antennas, 3rd International Conference Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas, 2018.
- 3) K. Yamazaki, K. Higuchi, N. Katsumata, T. Iwasa, N. Kishimoto, M. Fujigaki, Deformation Measurement and the Analysis of Main Reflector for High Structural Accuracy Antenna System, 32nd ISTS, 2019-c-42, 2019.
- 4) H. Tanaka, et al. , Development of a Smart Reconfigurable Reflector Prototype for an Extremely High Frequency Antenna, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, pp.764-773, 2015.
- 5) A. Doi, et al., A Balloon-Borne Very Long Baseline Interferometry Experiment in the Stratosphere: Systems design and developments, Advances in Space Research, pp.779-793, 2019.
- 6) Kogiso, N. et al: Result of Exposure Experiment of

Piezoelectric Actuators Using ExHAM, 33rd ISTS, 2022-c-16, 2022.

7) H. Tanaka, et al., Experimental demonstration of deformable reflector antenna system with high accuracy deformation measurement, Acta Astronautica, vol. 194, pp. 93-105, 2022.

8) 田中宏明, 他, 高格子投影法計測系を有する形状可変構造の実証計画について, 2020年度大気球シンポジウム, isas20-sbs-028, 2020.

9) 田中宏明, 他, 高格子投影法計測系を有する形状可変構造実証試験の準備 2021年度, 2021年度大気球シンポジウム, isas21-sbs-007, 2021.

10) 高巢 遥, 伊藤 誠, 小木曾 望, 複数の応力評価方法を用いた変位拡大機構の多目的最適化に関する比較検討, 第29回設計工学・システム部門講演会, 1210, 2019.

11) R. Kashiyama, H. Sakamoto, M. Okuma, H. Tanaka, K. Ishimura, Athermalization of Deformable Reflector's Actuators for Radio Astronomy Satellites, AIAA-2018-1199, AIAA Spacecraft Structures Conference, SciTech2018, Kissimmee, Florida, Jan. 8-12, 2018.

12) 田中宏明, 他, 成層圏気球実験に向けた形状可変鏡システムの低温環境動作特性評価, 第66回宇宙科学技術連合講演会, 1G08, 2022.