

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

田中宏明(防衛大), 小木曾望(阪府大), 坂本啓(東工大), 岩佐貴史, 梶浦 至恩(鳥取大),
樋口健(早大), 勝又暢久(香川大), 岸本直子(撰南大), 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 projection shape measurement system, development status 2021

H. Tanaka (National Defense Academy), N. Kogiso (Osaka Prefecture Univ.),
H. Sakamoto (Tokyo Institute of Technology), T. Iwasa, S. Kajjura (Tottori Univ.),
K. Higuchi (Waseda Univ.), N. Katsumata (Kagawa Univ.), N. Kishimoto (Setsunan 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^{1,2)}。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³⁾、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⁴⁾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⁵⁾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暴露試験を

行い、耐宇宙環境特性を評価している⁶⁾。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の⁷⁾、宇宙に近い環境での実証はできていない。そこで我々は、昨年度、格子投影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を提案した⁸⁾。この実証を通して、成層圏気球ミッション用機器としては実環境実証となる技術成熟度 (TRL)7 を、他の耐環境性試験とあわせて宇宙用機器としても相当環境実証となる TRL5 を目指している。

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⁵⁾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。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、格子投影法による計測系と形状可変鏡に絞った構成としている。

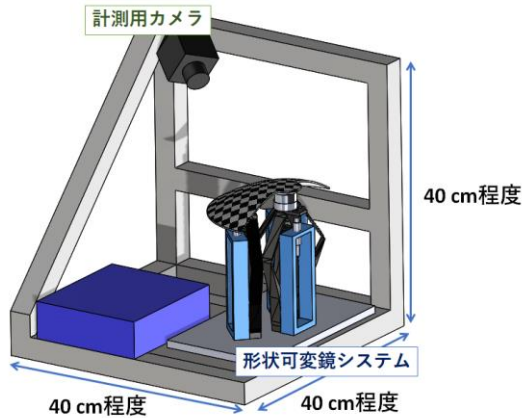


図 1 大気球による実証試験モデルのイメージ

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投影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投影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、格子投影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、温度データと見比べてギャップセンサの出力が予測の範囲内となること。

(M2) 格子投影法系: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： 格子投影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) 格子投影法系： 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、格子投影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タ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・評価も想定している。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. 形状可変鏡部の開発進捗

前節で述べた機能を実現するため、新しい形状可変鏡システムの開発を行っている。現在検討中の形状可変鏡モデルを図 2 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だけの構造としており、3 つのペタル部を有している。この鏡面に対し 3 つの改良型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。旧型の形状可変鏡用アクチュエータを用いた機能確認試験を実施し、これらの駆動モードを実現できることを確認した。詳細は参考文献 9 を参照されたい。

次に、改良型スマートアクチュエータを図 3 に示す。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^{10,11)}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。試作モデルの外観を図 4 に示す。圧電アクチュエータとしては、Piezomechanik 社 PSt 150/10/100 VS15 を用いており、変位拡大機構、及び、ギャップセンサ取り付けジグは CFRP 短繊維入りのナイロン樹脂(Markforged 社 ONYX)を材料として 3D プリンタにて成型した。ギャップセンサは電子応用社 ML-06 を用いた。また、圧電アンプとしては大気球実験を想定しチップ型のアンプである PiezoDrive pDu100B を用いており、圧電アクチュエータに 0~100V の電圧を印加することが可能である。

この改良型スマートアクチュエータに関しては、大気球実験への適用可能性を確認するために、宇宙科学研究所の恒温恒圧槽を用いて、低温低圧環境 (-43.1°C, 3 hPa) での駆動試験を実施している。試験装置概要を図 5 に示す。試験では信号発生器(NF 回路ブロック WF1974)により基本信号を作成し、圧電アンプにて 0~100V に昇圧、アクチュエータに印加した。スマートアクチュエータの出力変位は組み込まれたギャップセンサにより計測するほか、比較のためにレーザー変位計(キーエンス IL-100)でも計測を行った。結果を図 6 に示す。実験結果より、低温低圧環境下でもアクチュエータの駆動は可能であることを確認した。ただし、アクチュエータ出力変位、ギャップセンサ感度の温度依存性などが確認されたため、今後詳細な検討を実施する予定である。この試験に関する詳細は文献 12 を参照されたい。

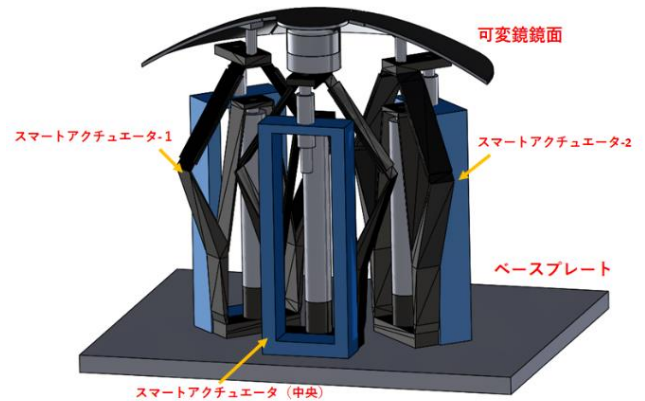


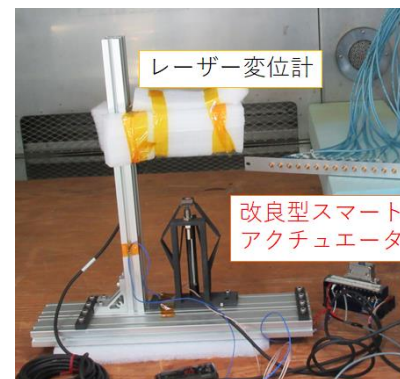
図 2 大気球実験向け形状可変鏡システム概要



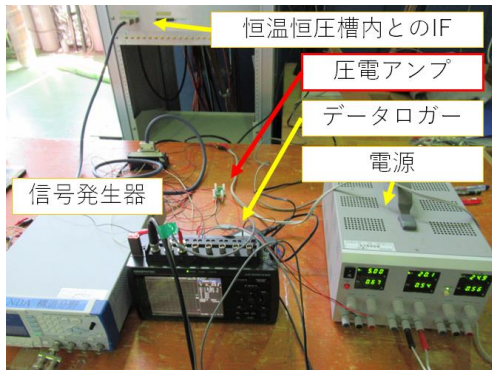
図 3 スマートアクチュエータ概要



図 4 スマートアクチュエータ試作モデル外観



(恒温槽内)



(恒温槽外)

図5 低温低圧環境試験装置

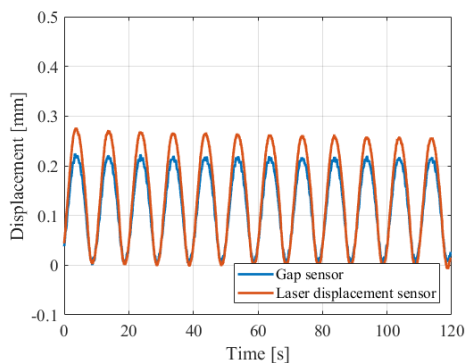


図6 スマートアクチュエータの駆動試験結果
(低温低圧環境下: -43.1°C , 3 hPa)

4. 格子の位相情報を用いた形状計測システム

次に、計測系の準備状況について紹介する。図7に気球実験で計測する副鏡モデルを示す。図に示すように、副鏡モデルの表面には2次元格子が貼付されており、この格子の位相情報を解析することで副鏡の変形量を計測する。

今回の気球実験で採用する計測法は1台のカメラを用いて計測対象物の微小変位量を計測する方法(格子貼付1カメラ法)であり、複数台のカメラを用いる従来の計測法と比べて計測装置を簡素化でき、解析で用いるデータ量も削減できるといった利点がある。そこで、気球実験ではこの利点を活かし Raspberry Pi を用いた簡素な計測システムを構築する。そして、構築した計測システムの軌道上リアルタイム計測への有用性を検証する。以下では、そのための事前検証として、格子貼付1カメラ法の計測精度について検討した結果を紹介する。

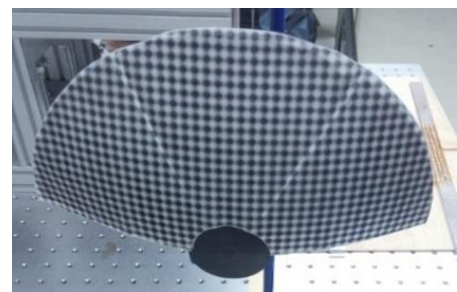


図7 副鏡モデル

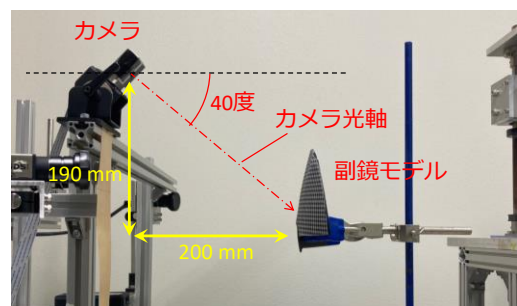
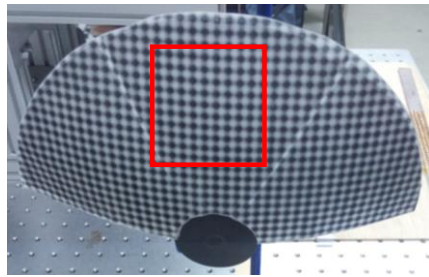
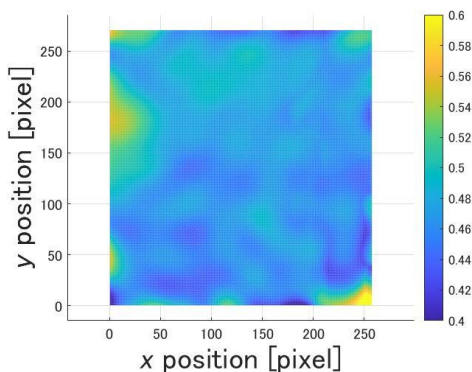


図8 計測コンフィグレーション

図8に格子貼付1カメラ法の計測コンフィグレーションを示す。この計測機器配置は気球実験を想定したものである。計測実験では副鏡モデルを0.5mmほど水平移動させ、その時の変位量を対象に格子貼付1カメラ法の精度を検証した。図9に計測結果を示す。図(a)は計測範囲(図中赤枠)を示し、図(b)は計測結果を示している。計測範囲内の全画素数は約70,000画素であり、縦横方向に10本の格子が撮影されるように設定している。図9(b)に示す相対変位量の平均値は0.47mmとなっており、0.03mmの精度で計測できていることがわかる。また、図に示すように計測結果は場所によってばらつき、その標準偏差は0.01mm程度であった。解析に要した時間は30秒程度であり、Raspberry Piによる簡素化された計測システムで短時間、高精度かつ高解像度計測が十分に行えることを示す結果となっている。ただし、複数回計測を行うと計測精度の再現性に0.05mm程度のばらつきも見られ、今後は計測の安定性を向上させていく必要があることと、実環境下(低温低圧)における計測システムの耐久性について検証していく必要がある。



(a) 計測範囲



(b) 相対変位分布

図9 副鏡モデル中央ペタルの計測結果

5. まとめ

格子投影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、気球運用環境下での機能実証にむけた準備状況を紹介した。形状可変鏡に関しては、重要な構成要素であるスマートアクチュエータの低温低圧環境試験を実施し、低温低圧環境下でもアクチュエータの駆動が可能であることを確認した。ただし、アクチュエータ出力変位の低下などが確認されたため、機器の温度依存性についてさらなる検討が必要である。また、計測系については気球実験を想定した機器構成について検討を行い、比較的短時間に計測が可能であることを確認するとともに、高精度な計測を可能とするレイアウトに関する見通しを得た。

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) 小木曾望, 他, ExHAM によるピエゾ素子の宇宙環境曝露実験, 第 65 回宇宙科学技術連合講演会, 4J03, 2021.
- 7) 田中宏明, 他, 高精度計測系と形状可変鏡を統合した高精度アンテナシステムの実証試験, 第 35 回宇宙構造材料シンポジウム, B2,2019.
- 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, 大気球実験に向けた改良型形状可変鏡の検討, 第 63 回構造強度に関する講演会, 3A01, 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) K. Gotou, et al., Actuator Design for Space Smart Reflector to Reduce Thermal Distortion, Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 14, No. ists30, 2016, pp. Pc_25-Pc_31.
- 12) 田中宏明, 他, 大気球実験によるスマート形状可変鏡システムの実証～計画と進捗, 第 65 回宇宙科学技術連合講演会, 4J11, 2021.