

格子貼付 1 カメラ法を有する形状可変構造実証試験 ～成果報告

田中宏明(防衛大学校), 小木曾望, 岩佐貴史(大阪公立大学), 勝又暢久(香川大学),
坂本啓(東京工業大学), 池田忠繁(中部大学), 岸本直子(関西学院大学),
樋口健(室蘭工業大学), 藤垣元治(福井大学), 土居明広, 佐藤泰貴(宇宙航空研究開発機構)

Demonstration of a Deformable Structure Equipped with Grating Pattern Printing Measurement System – Demonstration Results

Hiroaki Tanaka (National Defense Academy), Nozomu Kogiso, Takashi Iwasa (Osaka Metropolitan University), Nobuhisa Katsumata (Kagawa University), Hiraku Sakamoto (Tokyo Institute of Technology),
Tadashige Ikeda (Chubu University), Naoko Kishimoto (Kwansei Gakuin University),
Ken Higuchi (Muroran Institute of Technology), Motoharu Fujigaki (University of Fukui),
Akihiro Doi, Yasutaka Sato (Japan Aerospace Exploration Agency)

1. はじめに

将来の高度な衛星ミッション実現のために筆者らは圧電アクチュエータを組み込んだ形状可変鏡¹⁾, および, 格子投影法を用いた高精度な鏡面変形の計測²⁾に関する研究を行ってきた. これらの形状可変鏡と計測系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³⁾, 宇宙に近い環境での実証はできていない. そこで我々は, 格子投影法を基に開発した格子貼付 1 カメラ法⁴⁾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実証実験(MEDUSA: Morphing Experiment for DURable Smart Antenna)を提案した⁵⁾. 本稿ではその後のフライトモデル開発, 2023 年 7 月に実施した飛翔実験の結果について紹介する.

2. 大気球実験による実証計画

開発した実証試験機フライトモデルの構成イメージを図 1, 外観を図 2 に示す. 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,

[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た.

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 カメラ法計測系のキャリブレーションの実現を大きな目標としている. 格子貼付 1 カメラ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. アクチュエータを駆動して鏡面全体を並進運動させ, その前後の状態を撮像し, 二つのリファレンス格子画像としてキャリブレーションに用いる. この手順のためには形状可変鏡は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, 格子貼付 1 カメラ法に加えて独立した計測系を有することが

必要なため、ギャップセンサを搭載する。実証試験機に関する形状可変鏡、および、格子貼付1カメラ法の詳細については文献[6,7]を参照されたい。

本実験では飛行機会獲得の可能性を増やすため、成層圏での水平飛行は必要とせず、上昇中に表1に示すアクチュエータ駆動を繰り返し、その際の鏡面画像を撮像することにした。表1に示す各モードは 25 秒で次のモードに移るものとし、モード 1 および 3 の状態での計測画像が格子貼付 1 カメラ法のキャリブレーションにおける基準画像となる。なお上昇中に、空気が薄い環境で圧電アクチュエータを駆動する計画であり、電位差が大きい場合に放電を起こす恐れがある。そこで、本システムでは圧電アクチュエータをバイポーラ駆動することとし⁶⁾、最大電位差を 50 V に抑えた。

電源系は、ギャップセンサ以外の形状可変鏡系、および、LED以外の格子貼付 1 カメラ法の計測系をグレートバッチ社の3B76を3直列とした電源（室温で8.7V程度）で、気球システムとのインターフェースとなるPIIF、SDCC2用にはグレートバッチ社の3B70を2直列（室温で5.8V程度）とした電源を利用した。また、LEDおよびギャップセンサについては、パナソニック社のアルカリ単3電池 LR6XJを12直列とした電源（室温で18V程度）を、低温環境試験により特性を評価した上で利用した。

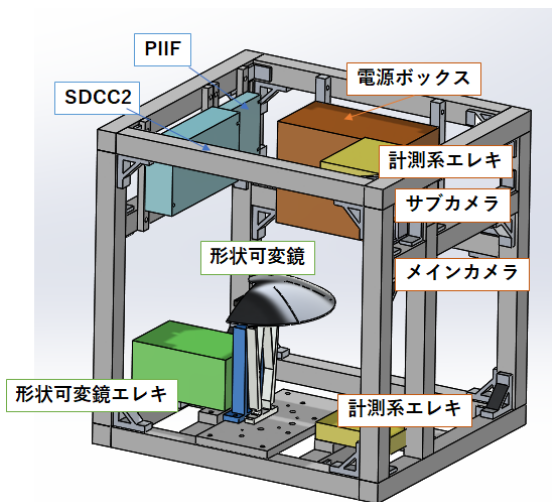


図1 実証試験機の概要

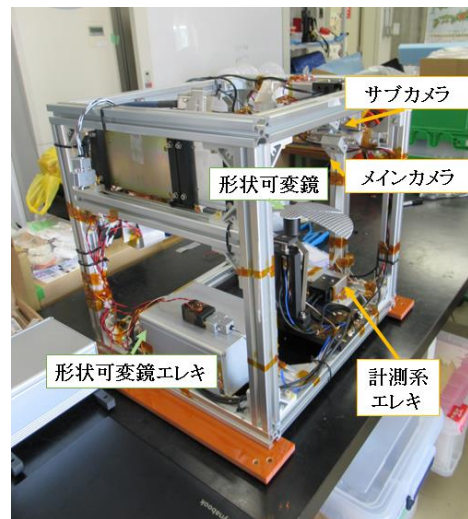


図2 実証試験機の外観

表 1 形状可変鏡アクチュエータの駆動モード

モード番号	印加電圧 [V]
1	+ 50
2	0
3	- 50
4	+25

3. 飛行実験結果

2023年7月27日の早朝、GRAMS 液体アルゴン放射線検出器の気球搭載試験⁸⁾ Gondolaへのピギーバックとして本実証試験機を搭載した気球実験が実施された。

電源オン直後(地上)と放球の約 2 時間 10 分後(成層圏で水平浮遊中)にギャップセンサで計測したアクチュエータの駆動状況を図 3, 4 に示す。これらの図から全体的なドリフトはあるものの、アクチュエータの出力に大きな変化は見られない。アクチュエータ駆動用プログラムの都合でモード切替時に電圧を一度 0 V にするため多少

髭のようなデータが見られるものの、4つのモードが繰り返し生じており所定の駆動を実現できていることから、形状可変鏡は成層圏環境でも問題なく動作可能であることが分かる。この結果より、2節で示した本実験の目標[1]が達成できた。

次に格子貼付1カメラ法は、放球から着水までの時間は3時間程度であり収録された撮影画像の枚数から2台のカメラは故障することなく稼働していたことを確認した。しかし、放球後、Raspberry Piは電源供給の不安定性により再起動を何回か繰り返しており、放球から着水までの間の2分の等間隔での画像の一部は得られなかった。この対策については今後の課題である。成層圏環境で撮影したキャリブレーション画像と形状可変鏡の画像を用いて3次元形状解析を行った。図5はメインカメラで撮影した形状可変鏡であり、解析結果として、図6に形状可変鏡の変位量の分布を示す。アクチュエータ1台を利用して形状可変鏡に変位を与えているため、計測結果は形状可変鏡の場所によらず概ね一定となっている。図5に示した矩形領域(黄色の枠)内のデータ(42500点)を利用し計測精度(平均値からのばらつき)を検証したところ0.015mmとなり、地上における画像計測の精度と同じオーダーであった。これより、今回用いた計測システムは軌道上においても地上と同程度の精度で計測できることを確認した。これらの結果より、2節で示した本実験の目標[2]および[3]が達成できた。

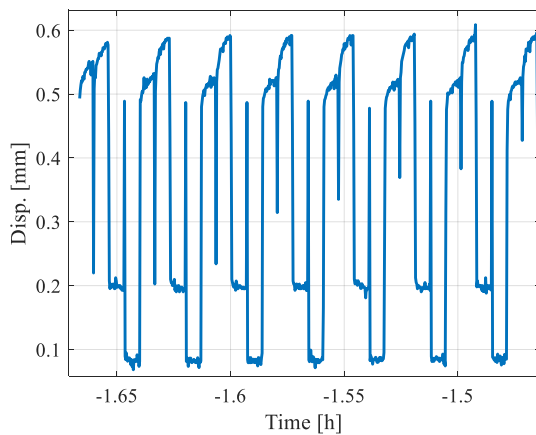


図3 スマートアクチュエータの変位出力履歴
(放球前：電源オン直後)

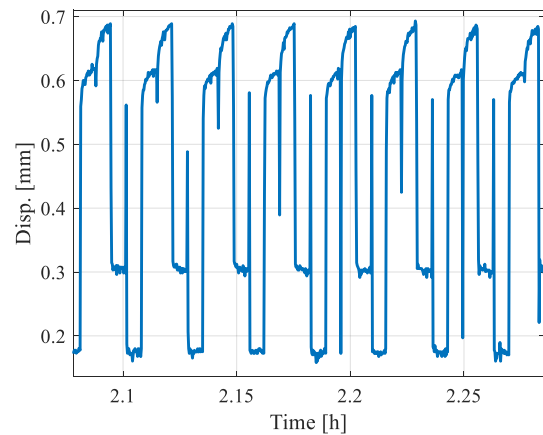


図4 スマートアクチュエータの変位出力履歴
(成層圏で水平浮遊時：放球の約2時間10分後)

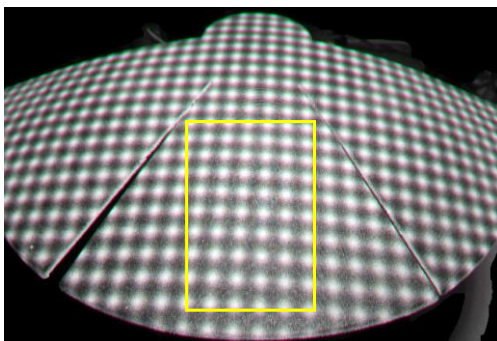


図5 形状可変鏡の撮影画像

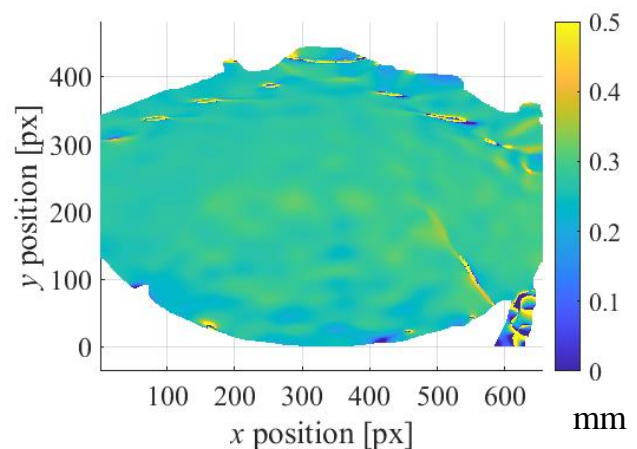


図6 形状可変鏡の計測結果

4. まとめ

格子貼付1カメラ法を有する形状可変構造実証試験のフライトモデルを開発した。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、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、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、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た。

2023 年 7 月 27 日、GRAMS 液体アルゴン放射線検出器の気球搭載試験ゴンドラへのピギーバックとして、MEDUSA の飛翔実験が実施された。得られたデータから、形状可変鏡用の変位拡大機構付きアクチュエータが、成層圏環境においても気球打上げ前の地上環境と、ほぼ同じ変位出力を実現できていることが確認できた。また、格子貼付1カメラ法による計測システムに関しても、成層圏環境下において格子付きアンテナ鏡面を撮影できること、その画像から格子貼付1カメラ法により変形を評価できることが確認できた。また、その際の計測精度は地上における画像計測の精度と同じオーダーであった。これらの結果より、本研究での 3 つの目標を達成できたと言える。

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」および、JSPS 科研費 23H01607 の助成を受けて実施されたものである。また、本実験を進めるにあたり JAXA 大気球実験グループからグレートバッチ社の電池を提供いただいたほか、同グループ 山谷 昌大様より多大なるご支援をいただいた。感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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, Aerospace Technology Japan, vol. 19, pp. 384-391, 2019.
- 3) H. Tanaka, et al., Experimental Demonstration of Deformable Reflector Antenna System with High Accuracy Deformation Measurement, Acta Astronautica, vol. 194, pp. 93-105, 2022.
- 4) 山脇崇史, 他, 格子貼付1カメラ法相対変位計測システムを対象とした計測誤差の検証法, 第 30 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, No.21-55, 2021.
- 5) 田中宏明, 他, 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, 2022 年度 大気球シンポジウム.
- 6) 田中宏明, 他, 成層圏気球実験用形状可変鏡システムの開発・評価, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, 3O14,2023.
- 7) 岩佐貴史, 他, 格子画像を印刷した副鏡モデルの相対変位計測, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, 3O15,2023.
- 8) 小高裕和, 他, 宇宙ガンマ線観測・暗黒物質探索実験 GRAMS に向けた液体アルゴン放射線検出器の気球搭載技術の確立, 2022 年度 大気球シンポジウム.