

## B02 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

田中 宏明(防衛大), 小木曾 望, 坂野 文香(阪府大), 樋口 健, 勝又 暢久, 山崎 健次(室工大),  
岩佐 貴史(鳥取大), 岸本 直子(摂南大), 藤垣 元治(福井大), 石村 康生 (早大),  
土居 明広, 中原 聡美, 長谷川 豊(JAXA/ISAS), 河野 裕介(NAOJ)

Hiroaki Tanaka(National Defense Academy of Japan), Nozomu Kogiso, Fumika Sakano(Osaka Prefecture University), Ken Higuchi, Nobuhisa Katsumata, Kenji Yamazaki(Muroran Institute of Technology), Takashi Iwasa(Tottori University), Naoko Kishimoto(Setsunan University), Motoharu Fujigaki(University of Fukui), Kosei Ishimura(Waseda University), Akihiro Doi, Satomi Nakahara, Hasegawa Yutaka(JAXA) and Yusuke Kono(NAOJ)

### 1. はじめに

将来のより高度なミッションに対応するため, より大型で高精度な反射鏡面を有する衛星搭載用アンテナシステムが求められている. そのようなアンテナシステムを実現するために, 必要に応じてその形状を変えることのできる形状可変鏡システムが研究・開発されている<sup>1-3)</sup>. これらは, 軌道上での反射鏡の変形などにより生じる光路誤差(電波の位相誤差)を, 鏡面の形状を適切に変化させることで低減することを目指したものであり, 筆者らも圧電アクチュエータによりアンテナ鏡面の形状調整を行うスマート形状可変鏡システムの開発を進めている<sup>3)</sup>.

開発したスマート形状可変鏡試作モデルの概要を図1に示す. この形状可変副鏡は6つのアクチュエータを有し, スリットで6か所に分けられた花卉型鏡面の各部に変位を与えることができる. 著者らはこれまで, このスマート形状可変鏡試作モデルを組み込んだアンテナシステムを用いて, 衛星からの電波を実際に受信し, 形状可変鏡の駆動による受信電波レベルの変化を計測・評価する機能実証試験を実施している<sup>3)</sup>. この試験で用いた主鏡は, 気球 VLBI-1 号機<sup>4)</sup>の地上局として利用されているもので, 理想的なパラボラ形状に近い形状となっている. この試験では, 形状可変鏡を駆動することで, 光路長誤差を増大させ, アンテナ性能の変化をさせることができることを実証したが, 主鏡の鏡面変形による光路誤差をスマート形状副鏡により補正し, アンテナ性能を改善することについては検証できていない.

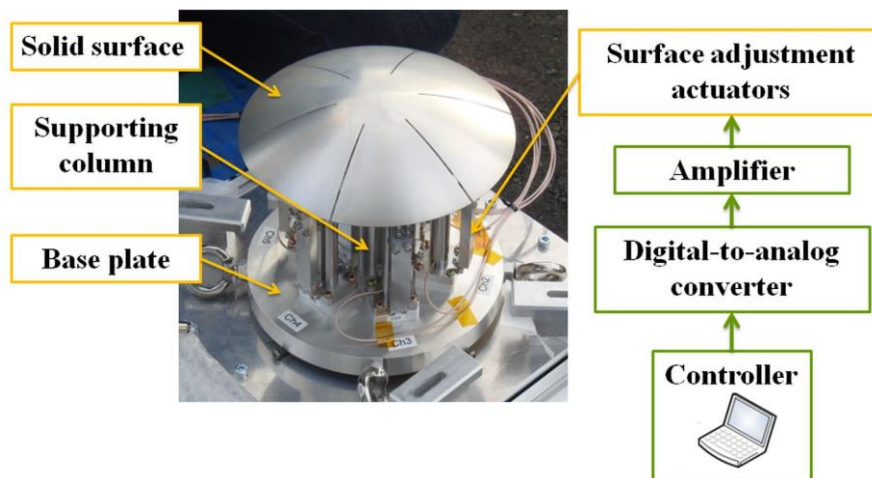


図1 スマート形状可変鏡試作モデル<sup>3)</sup>

また、主鏡の光路誤差を形状可変副鏡により補正する場合、主鏡の変形を高精度に計測する必要があり、著者らも格子投影法による高精度形状・変形計測に関する研究・開発を行っているが<sup>5)</sup>、形状可変鏡システムと高精度計測系を統合したアンテナシステムについては実証ができていなかった。

そこで、本研究では高精度計測系と形状可変鏡を組み合わせた統合システムを構築、その機能を確認するとともに、主鏡変形による光路誤差を形状可変副鏡で補正し、アンテナ性能を改善できることを実証する。

## 2. 試験概要

本試験では、気球 VLBI-1 号機の地上局主鏡に対して、格子投影法による高精度変位計測システムとスマート形状可変副鏡を組み込み、高精度形状可変アンテナシステムを構築した (図 2)。このアンテナシステムを用いて、タイのブロードバンド通信用衛星 IPSTAR からの電波(Ka 帯, 約 20GHz)を受信し、ダウンコンバータを用いて周波数を落とした後、スペクトラムアナライザにて受信レベルの計測を行う (図 3)。受信レベルの評価ではアンテナ光学系の指向方向変化を補正できるよう、5 点法を用いる。試験では、ノミナル状態での計測を行った後、主鏡面に対して 44.1 N の荷重 (4.5kg の錘) を負荷、主鏡を変形させることで光路誤差を与え、電波の受信レベル評価を行う。その後、格子投影法により主鏡面上の複数点の変位を計測<sup>6)</sup>、計測結果を基に Zernike 多項式を用いて鏡面全体変形を推定し、最適化を用いた制御入力決定を行う<sup>7)</sup>。得られた制御値を形状可変副鏡に入力、光路長変化を与え、主鏡変形による光路誤差を低減する。その後、受信レベル評価を行うことで、高精度計測系と形状可変鏡を統合したシステムの機能を実証するとともに、主鏡変形による光路誤差の形状可変副鏡による補正の効果を確認する。これら試験の流れを図 4 に示す。格子投影法による主鏡変形計測や、最適化を用いた制御入力決定の詳細については、文献 6, 7 を参照されたい。なお、スマート形状可変鏡の駆動に関して、可変鏡の各圧電アクチュエータは 0~1 mm の伸長が可能であるが、引張りが難しいため、0.5 mm 伸ばした状態をノミナル位置として、そこから ±0.5 mm の駆動を可能としている。

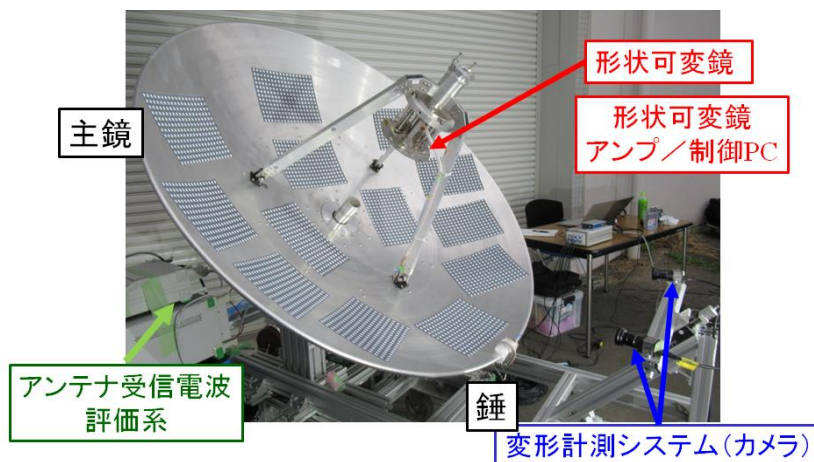


図 2 高精度変形計測システムと形状可変鏡と統合した高精度形状可変アンテナシステム

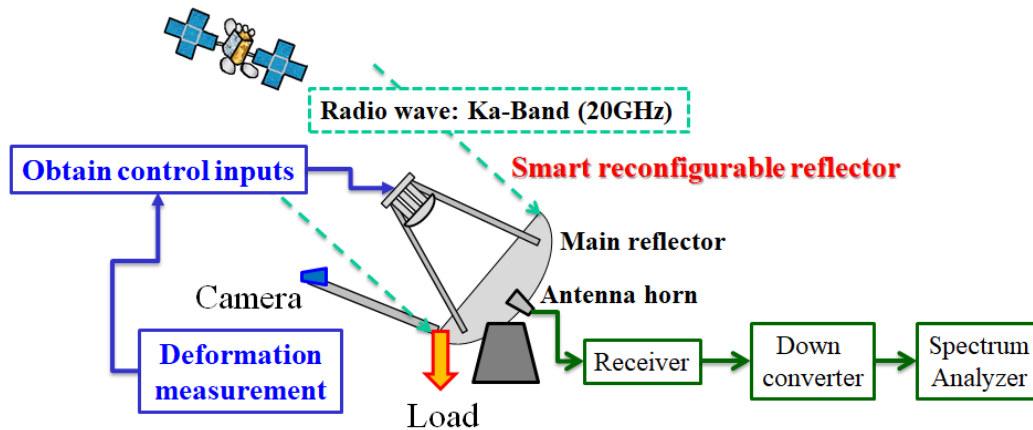


図3 高精度形状可変アンテナシステム実証試験 試験系概要

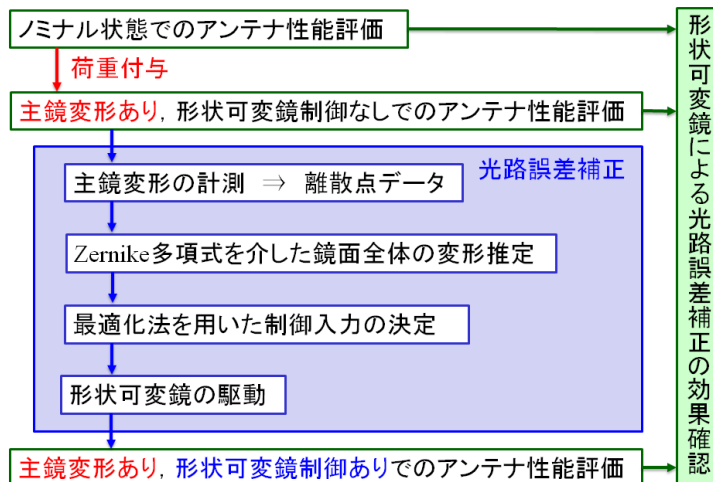


図4 実証試験の流れ

### 3. 試験結果

試験では、荷重を付与した後、格子投影法により、鏡面上の7領域の変形を計測<sup>6)</sup>、形状可変鏡による制御に利用した。この際、変形計測における解析時間を短縮するため、1カメラ法により求めた二次元格子領域中央位置での相対変位量を変形推定に利用した。鏡面上での計測箇所を図5に、各点での変形量を表1に示す。

次に、変形計測結果を基に、鏡面全体の変形形状を推定した。本試験前に実施した変形の事前評価試験、および、数値解析結果から、変形モードとしてはZ(1,-1)およびZ(2,2)が支配的であることが分かったため、その2つのモードおよび、Z(0,0)(Piston)、Z(1,1)(Horizontal Tilt)を加えた4モードを評価対象として、7点の変位計測結果を分解、荷重付与時の各モードの大きさを評価した。その結果、Z(2,2)モードが支配的であり、振幅が0.572 mmであることが判明したため、この変形形状を基に制御入力の決定を行った。なお評価の結果、Z(1,-1)モード成分も生じていたが、Tiltモードはアンテナの指向方向誤差となり、アンテナ性能評価に用いている5点法により補正が可能であるため、スマート形状可変副鏡による補正対象からは外している。

次に、推定された主鏡変形に対して、形状可変副鏡を駆動させた際にトータルでの光路誤差を最小化するように最適化により制御入力を決定した<sup>7)</sup>。最適化には範囲制約つきメモリ制限 BFGS 法 (L-BFGS-B 法) を適用した。詳細は文献 7 を参照されたい。得られた制御入力を表 2 に示す。形状可変鏡の鉛直方向上下に配置されている ch.3 および 6 がアンテナ主鏡側に、その他の 4 本が副鏡側に動く入力となっている。ただ今回の試験では、付与した変形が大きく、アクチュエータの出力が、ストロークの最小、または、最大値に張り付く形となっている。

これらの試験の各ステップにおけるアンテナ受信レベルを表 3 に示す。この表より、荷重負荷による鏡面変形により、ノミナル値より受信レベルが 0.267 dB 低下したものが、形状可変鏡による光路誤差補正により、ほぼ 0.1dB 改善していることが分かる。この結果より、主鏡変形による光路誤差を形状可変副鏡で補正し、アンテナ性能を改善できることを確認できた。一方で、アンテナ受信レベルが一部改善にとどまる理由であるが、アクチュエータのストローク不足、および、6 ペタル-6 アクチュエータからなる形状可変副鏡では主鏡の変形を完全には表現できないこと、が考えられる。前者に関して、試験で用いた形状可変鏡は 100 GHz 程度の電波を用いるアンテナへの適用を目指して開発したものであるが、今回の試験では適切な電波源がなかったことより、波長の長い 20 GHz の電波を用いている。そのため、アンテナ性能変化の評価を可能とするために実際に想定されるより大きな変形を与えていることに起因するものであり、高い周波数を用いる場合には現在のストロークで問題ないと考えている。後者については、アクチュエータ数を増やすことによる形状可変副鏡で再現できる変形の表現力向上や、主鏡と形状可変鏡のトポロジーを合わせる（例：6 枚分割主鏡に対して、副鏡も 6 枚分割主鏡とする）ことで生じる変形モードを一致させるなどで対応が可能である。

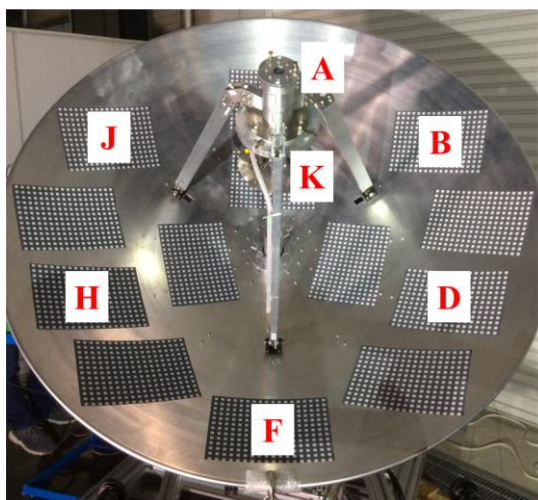


図 5 変位計測位置

表 1 変位計測結果

位置	光軸方向の変位 [mm]
A	0.958
B	1.134
D	1.157
F	-0.164
H	1.366
J	1.266
K	0.968

表 2 スマート形状可変鏡の各圧電アクチュエータへの制御入力量

Ch.	1	2	3	4	5	6
入力 [mm]	-0.5	-0.5	0.5	-0.5	-0.5	0.5

表 3 試験におけるアンテナ受信電波レベルの変化

アンテナ状態	受信電波レベル
ノミナル (主鏡変形なし, 制御なし)	-37.576
主鏡変形あり, 制御なし	-37.843
主鏡変形あり, 制御あり	-37.742

#### 4. 結論

高精度変形計測システムと形状可変鏡を統合した高精度形状可変アンテナシステムを構築, 実際の衛星からの電波を用いて性能評価試験を実施した. この試験を通して, 高精度計測系と形状可変鏡を組み合わせた統合システムとしての機能を実証した. また, 主鏡変形による光路誤差を形状可変副鏡で補正し, アンテナ性能を改善できることを実証した. 一方で形状可変鏡駆動によるアンテナ受信レベル改善は一部改善にとどまっている. 原因として, アクチュエータのストローク不足や, 現在の形状可変副鏡システムでは主鏡の変形を完全には表現できないことなどが考えられる. 前者は将来ミッション等で想定している高い周波数の電波を利用する場合は現状のストロークで十分であり, 後者については, アクチュエータ数を増やすことや, 主鏡と形状可変鏡のトポロジーを合わせることなどで対応が可能と考えている. これらの知見を, 今後の形状可変鏡を含むアンテナ光学系の設計に生かしていきたい.

#### 謝辞

本研究は, JAXA 宇宙科学研究所の戦略的開発研究費の支援のもと実施された.

#### 参考文献

- 1) L. Datashvili, et al.: Mechanical Investigations of in-Space-Reconfigurable Reflecting Surfaces, 32nd ESA Antenna Workshop on Antennas for Space Applications, 2010.
- 2) J.R. Hill, K.W. Wang, H. Fang and U. Quijano: Actuator grouping optimization on flexible space reflectors, Proc. SPIE 7977, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, 2011.
- 3) H. Tanaka, et al.: Development of a smart reconfigurable reflector prototype for an extremely high-frequency antenna, Journal of intelligent material systems and structures, Vol.27, 2016, pp.764-773.
- 4) A. Doi, et al.: A balloon-borne very long baseline interferometry experiment in the stratosphere: Systems design and developments, Advances in Space Research, Vol. 63, 2019, pp. 779-793.
- 5) 岩佐 貴史, 樋口 健, 岸本 直子: 大型高精度宇宙構造物のための高解像表面形状計測, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 67, 2019, pp. 359-365.
- 6) 山崎 健次, 他: 高精度アンテナシステム実証試験におけるアンテナ主鏡高精度計測, 第 35 回宇宙構造・材料シンポジウム, B03, 2019.
- 7) 坂野 文香, 他: スマート副鏡のアクチュエータ入力最適化のカセグレンアンテナ実験による検証, 第 28 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, B04, 2019.