

## A13 高精度スマート形状可変鏡試作モデルの開発

田中宏明(防衛大学校), 坂本啓(東京工業大学), 石村康生(JAXA), 稲垣章弥(東工大・院),  
小木曾望 (大阪府立大学), 池田忠繁(名古屋大学), 古谷寛(東京工業大学),  
渡辺和樹, 及川祐, 倉富剛(ウェルリサーチ)

Hiroaki Tanaka (National Defense Academy of Japan), Hiraku Sakamoto (Tokyo Institute of Technology),  
Kosei Ishimura (ISAS/JAXA), Akiya Inagaki (Graduate School, Tokyo Institute of Technology),  
Nozomu Kogiso (Osaka Prefecture University), Tadashige Ikeda (Nagoya University),  
Hiroschi Furuya (Tokyo Institute of Technology),  
Kazuki Watanabe, Yu Oikawa and Takeshi Kuratomi (WEL Research)

### 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おり、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行路誤差（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高精度スマート形状可変鏡システムの研究を進めている<sup>3-5)</sup>。本研究では100GHzを超える電波に対応できるアンテナシステムの実現を目指し、その足掛かりとして、スマート形状可変鏡の試作モデルを設計・開発している。しかし、初期の試作モデル（以降、初期型モデルと呼ぶ）では形状調整用アクチュエータの変位拡大機構部に座屈が生じやすいこと、鏡面形状により所要の変形モードの付与が困難であることなど課題があった<sup>3,4)</sup>。

そこで我々は、上記の問題点の解消を目指し、形状調整用アクチュエータの改良と鏡面形状の変更を実施した。本論文では改良した試作モデル（以降、改良型モデルと呼ぶ）の概要を述べる。

### 2. 高精度アンテナシステム

形状可変鏡を利用した高精度アンテナシステムとしては、主鏡、または、副鏡に形状可変鏡を利用することが考えられる。主鏡を形状可変鏡化する場合、大型の展開鏡面に形状調整用アクチュエータのハーネス等を組み込む必要があり、展開機構等で考慮すべき条件が増えるとともに、主鏡展開の信頼性低下の要因ともなる。そこで本研究におけるスマート形状可変鏡は、アンテナシステムにおける副反射鏡として利用することを想定している。想定するアンテナシステムのイメージを図1に示す<sup>3)</sup>。

このシステムでは、主鏡の変形などに起因する電波の行路誤差を電波ホログラフィや光学的形状計測法により計測し、スマート形状可変型副鏡を用いて補正することで、アンテナシステムとして高精度な光学系を実現することを目指している。主鏡面としては、将来の電波天文観測の要求を満たすよう、100GHzを超える電波に対応できる直径5mクラスの大型ソリッド鏡面を想定している。100GHzを超える電波で運用する場合、鏡面精度としては0.15mmRMS（ $\approx$ 波長/20）より良いことが求められる。そこで想定する高精度アンテナシステムでは、ETS-VI等の実績<sup>6)</sup>から実現が期待できる鏡面精度0.4mmRMS

クラスの主鏡を用い、スマート形状可変鏡による行路誤差補正により、アンテナシステムとして行路誤差を 0.1mmRMS 以下とすることを目指している。

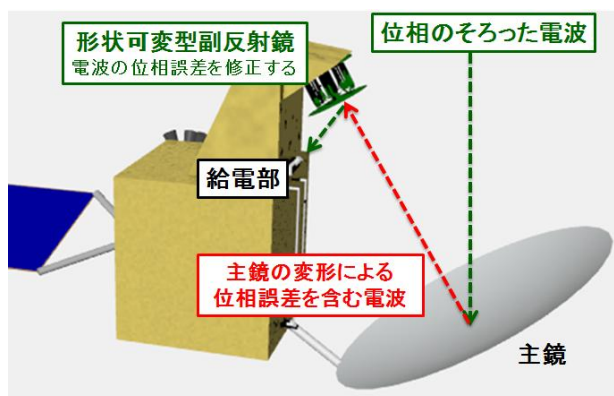


図1 形状可変副反射鏡を用いた高精度アンテナシステム<sup>3)</sup>

### 3. スマート形状可変鏡

スマート形状可変鏡の試作モデルは高い周波数の電波に対応できるソリッド鏡面部とそれを支える支持構造、および、形状を調整するための鏡面調整用アクチュエータから構成される。特に重要な要素となる鏡面調整用アクチュエータに関しては、高い精度(1 $\mu$ m程度)と十分なストローク(サブmm程度)を実現するとともに、鏡面を変形させるのに必要な十分な力を達成できるよう、積層型の圧電アクチュエータと変位拡大機構を組み合わせた構成となっている。当初開発した試作モデル(初期型)の外観を図2に示す<sup>3)</sup>。初期型モデルでは、形状調整用アクチュエータの変位拡大機構部に座屈が生じやすく、切れ目のない鏡面形状のため所要の変形モードの付与が困難であるという課題があった。



図2 高精度スマート形状可変鏡試作モデル(初期型)<sup>3)</sup>

#### 4. 形状調整用アクチュエータ

形状調整用アクチュエータは本形状可変鏡システムにおいて基礎となる要素であり、高い精度( $1\mu\text{m}$ 程度)と十分なストローク( $0.6\text{mm}$ 程度)を達成するために、圧電アクチュエータと変位拡大機構を組み合わせた形で構成されている。圧電アクチュエータとしてはピエゾメカニクス社の PSt 150/10/100 VS15 を利用しており、無負荷状態において、 $150\text{V}$  の電圧印加により  $0.1\text{mm}$  の先端変位を得ることができる。この圧電アクチュエータ先端の変位を変位拡大機構により拡大することで、要求されるストローク ( $1\text{mm}$  以上) を得る。当初開発した初期型のアクチュエータでは、目的を満たす  $1.18\text{mm}$  のストロークと  $26\text{N}$  程度の保持力が得られたが、変位拡大機構部の先端を拘束した状態で  $150\text{V}$  の電圧を印加した時に変位拡大機構部に座屈が見られた<sup>4)</sup>。座屈はアクチュエータ特性における非線形性の要因ともなるため、アクチュエータの改良を行った。初期型のアクチュエータの概要と外観を図3に、改良型のアクチュエータの概要と外観を図4に示す。

改良型のアクチュエータでは IF ブロック、AC ブロック部の形状を見直すとともに、板バネの厚さを変更している。この改良型アクチュエータの先端自由時の印加電圧と先端変位の関係、先端を拘束した場合の印加電圧と発生力の関係を図5に示す。特性評価試験の結果、変位拡大機構部の座屈は見られず、また、図より最大ストローク  $1.095\text{mm}$ 、保持力  $91.7\text{N}$  が得られており、ストロークを維持しつつ、保持力を大きく改善できていることが分かる。6本のアクチュエータの特性のバラツキも小さく、スマート形状可変鏡の形状制御に十分な性能を有していることが確認できた。

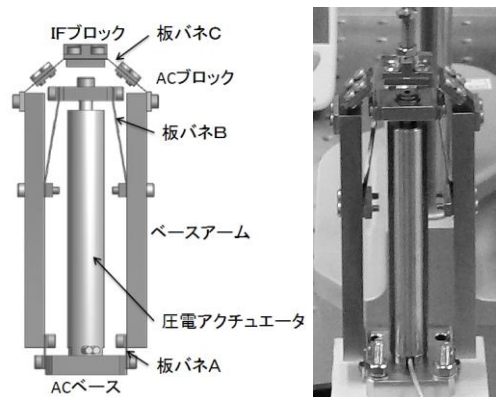


図3 形状調整用アクチュエータ（初期型）の概要（左）と外観（右）<sup>4)</sup>

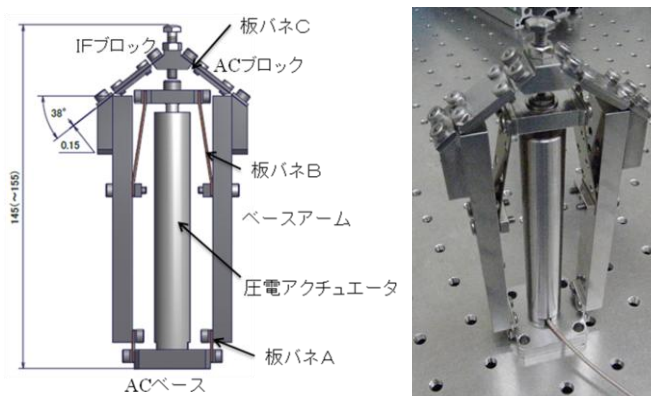
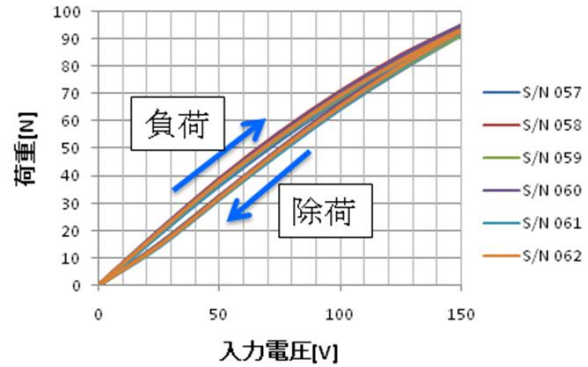
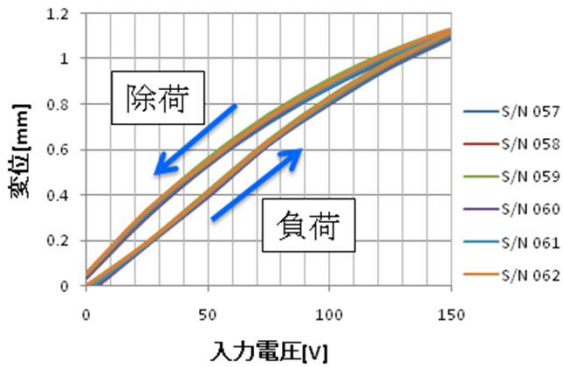


図4 形状調整用アクチュエータ（改良型）の概要（左）と外観（右）



(印加電圧と先端変位：先端拘束なし)

(印加電圧と発生力：先端拘束あり)

図5 形状調整用アクチュエータ（改良型）の特性

### 5. スマート形状可変鏡面

初期型モデルでは、スリットなしの鏡面を用いていたが、デフォーカスモードなど、重要な変形モードを実現することが難しかった。また、CFRP製の鏡面であったため、曲げ剛性に異方性があり、高精度な形状制御を行う上で、難易度を上げる要因となっていた。そこで、現在のアクチュエータ数（6本）で、所定の変形モードを実現でき、また曲げ剛性における異方性を低減できるよう、アルミニウム合金製の鏡面にスリットを入れた改良型モデルを開発した。開発した鏡面の概要と外観を図6に示す。鏡面部はクライムNCD社製作のアルミ合金(A6061-T651)製の双曲面鏡で、板厚は約0.5mmである。鏡面形状は今年度中に計画しているアンテナ特性評価試験のアンテナ光学系に合わせて、式(1)に示す双曲面形状となっている。

$$z = \sqrt{0.03894 \left( 1 + \frac{r^2}{0.02693} \right)} \quad (1)$$

本鏡面部に対して汎用のFEMコードABAQUSを用いた変形付与解析を実施した。解析モデル及び形状調整用アクチュエータ相当位置を図7に、デフォーカスモードの付与結果を図8に示す。なおアクチュエータの出力は、解析上強制変位として取り扱っている。図8より、目的のデフォーカスモードが適切に付与されていることが分かる。

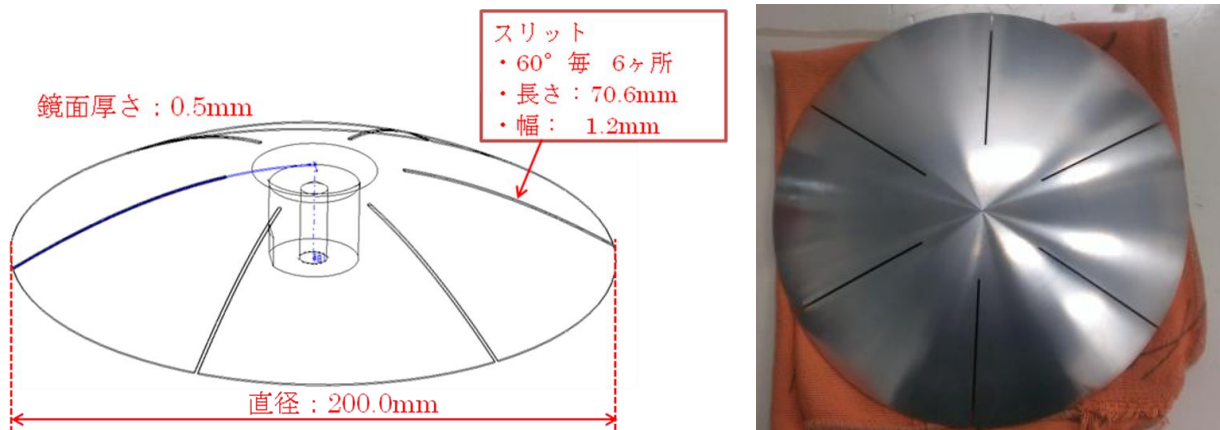


図6 スマート形状可変鏡 鏡面部（改良型）の概要（左）と外観（右）

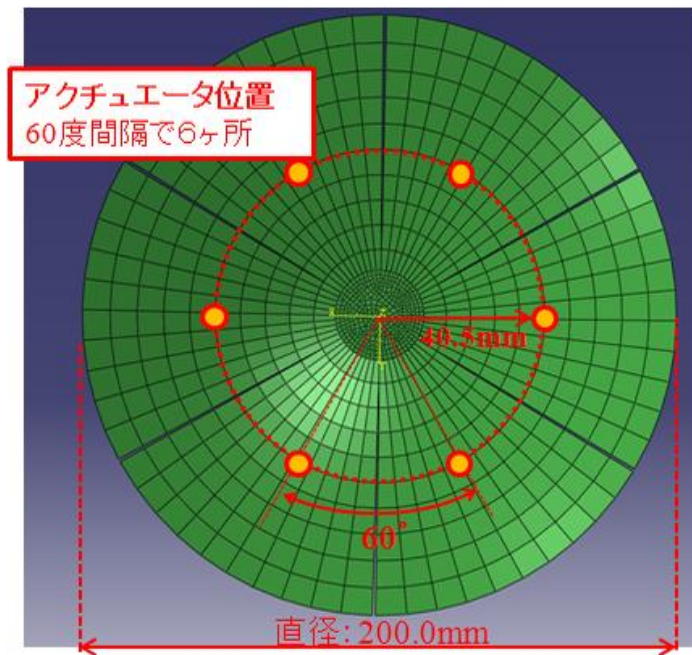


図7 解析モデルと想定するアクチュエータ位置

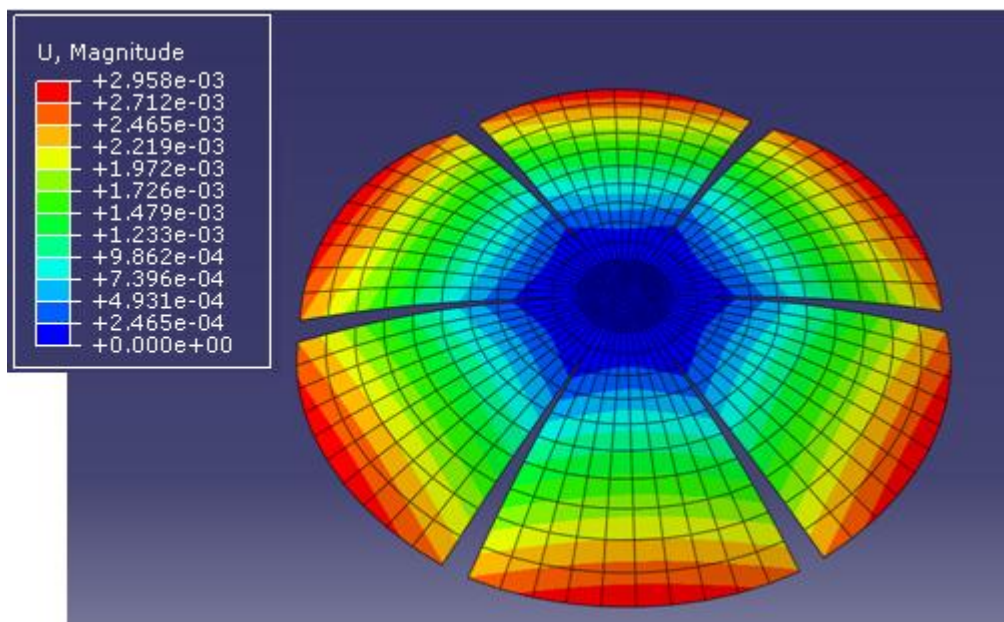


図8 デフォーカスモードの付与結果：最大変位（2.958mm）

## 6. まとめ

スマート形状可変鏡の改良型試作モデルを設計・開発した。形状調整用アクチュエータの保持力を向上させるとともに、鏡面形状を変更し、目的の変形モードの付与を可能とした。これらの改良されたアクチュエータおよび鏡面部分を組み込んだ、スマート形状可変鏡の試作モデル（改良型）を図9に示す。このスマート形状可変鏡は、アンテナシステムにおける形状可変鏡の副反射鏡としての利用を想定したもので、今後アンテナシステムとしての性能評価試験などに利用する予定である。



図9 高精度スマート形状可変鏡試作モデル（改良型）

#### 謝辞

本研究は、JAXA 宇宙科学研究所の戦略的研究開発費の支援のもと実施された。

#### 参考文献

- 1) L. Datashvili, H. Baier, B. Wei, J. Hoffman, E. Wehrle, L. Schreider, C. Manganot, J.S. Prowald, L. Scolamiero and J.C. Angevain: 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) 田中 宏明, 他: 高精度形状可変鏡の初期実験モデルの開発, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 1K07,2013.
- 4) 及川 祐, 他: 圧電素子を利用したスマートアクチュエータの開発, 第57回宇宙科学技術連合講演会, 1K05,2013.
- 5) 稲垣 章弥, 他: 高精度形状可変鏡の初期実験モデルによる評価, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 1K08,2013.
- 6) 宮坂 明宏, 他: フライトデータによる ETS-VI 搭載大形反射鏡の熱設計評価, 日本航空宇宙学会誌, Vol.44, pp.190-195, 1996.