

# A04 圧電アクチュエータを用いたアンテナの行路誤差制御に関する一考察

田中宏明(防衛大学校)

Hiroaki Tanaka (National Defense Academy of Japan)

## 1. はじめに

将来の高度なミッションに対応する衛星搭載用高精度反射鏡システムにおいて、形状可変鏡の利用が検討されている<sup>1,3)</sup>。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・開発を進めている<sup>3,4)</sup>。一方、圧電アクチュエータで用いられている圧電素子は引張力に弱いという問題があり、それを解決するために圧電素子を用いたアクチュエータでは予圧縮が付加される構成となっていることが多い。そのため、圧電素子の圧縮変形はアクチュエータ内の与圧縮力の低減として吸収されるため、多くの圧電アクチュエータでは対象物を引っ張る力を発生させることが難しい特徴がある<sup>5)</sup>。

そのような圧電アクチュエータの特性を考慮した形状可変鏡システムとして、所定の電圧を印加した状態をノミナル状況として利用する方法や、1点での押し引きに2つのアクチュエータを組み合わせる利用するシステムなどが検討されているが、それぞれ電圧無印加時に鏡面形状が理想形状と異なること、1つの制御モードに対して2つのアクチュエータが必要となること、といった問題がある。

一方、反射鏡のアンテナ性能を考える場合、電波の波面がそろっていることが重要であり、揃った波面が一樣にずれること（ピストンモード）は一般的に問題とならない。そこで本研究では、このピストンモードを積極的に利用し、制御モードにピストン成分を付与することで、押しつけのみが可能な圧電アクチュエータによる行路誤差制御を試みる。制御則を導出するとともに、数値シミュレーションを行い、提案方法の有効性を確認する。

## 2. 圧電アクチュエータによる行路誤差制御

### 2.1 行路長差のピストンモードを利用した制御方法

筆者らは形状可変型副鏡を用いて、高精度な光学系を実現する高精度アンテナシステム（図1）を提案し、その重要機器であるスマート形状可変副鏡（図2）の開発を行っている<sup>3,4)</sup>。このアンテナシステムでは、主鏡の変形などに起因する電波の行路誤差をスマート形状可変型副鏡により補正することを想定している（図3）。従来の制御方法では、各圧電アクチュエータに対する制御入力  $\mathbf{p}_c$  は以下の様に求めることができる。

$$\mathbf{p}_c = \mathbf{S}_m^{-1} \Delta \mathbf{e}_d \quad (1)$$

ここで  $\mathbf{S}_m$  はアクチュエータへの入力に対する行路誤差変化を示した感度行列であり、 $\Delta \mathbf{e}_d$  は制御対象となる行路誤差である。しかしこの制御法ではアクチュエータに対して鏡面を引っ張るような変形（負の制御入力）が必要となるケースが多く、前節で述べた圧電アクチュエータの特性から実用面で問題となる場合がある。

そこで本研究では、アンテナ性能に大きな影響を及ぼさない様な行路長差（ピストンモード）を制御入力に取り入れ、圧電アクチュエータへ制御入力を常に正（常に押しつけ力を作用させる）とするよう補正を行うことを考える。その場合の制御入力  $\mathbf{p}_p$  は

$$\mathbf{p}_p = \mathbf{S}_m^- \Delta \mathbf{e}_d + a \mathbf{c}_p \quad (2)$$

であり、ピストンモードの行路誤差  $\Delta \mathbf{e}_p$  から下記の式で求まる補正モード  $\mathbf{c}_p$  を用いて、制御入力を正とするよう入力を加えている（ $a$  はその際の係数）。

$$\mathbf{c}_p = \mathbf{S}_m^- \Delta \mathbf{e}_p \quad (3)$$

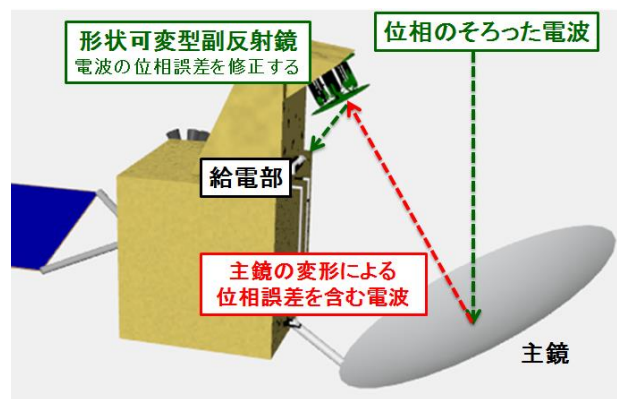


図1 形状可変副反射鏡を用いた高精度アンテナシステム<sup>3)</sup>

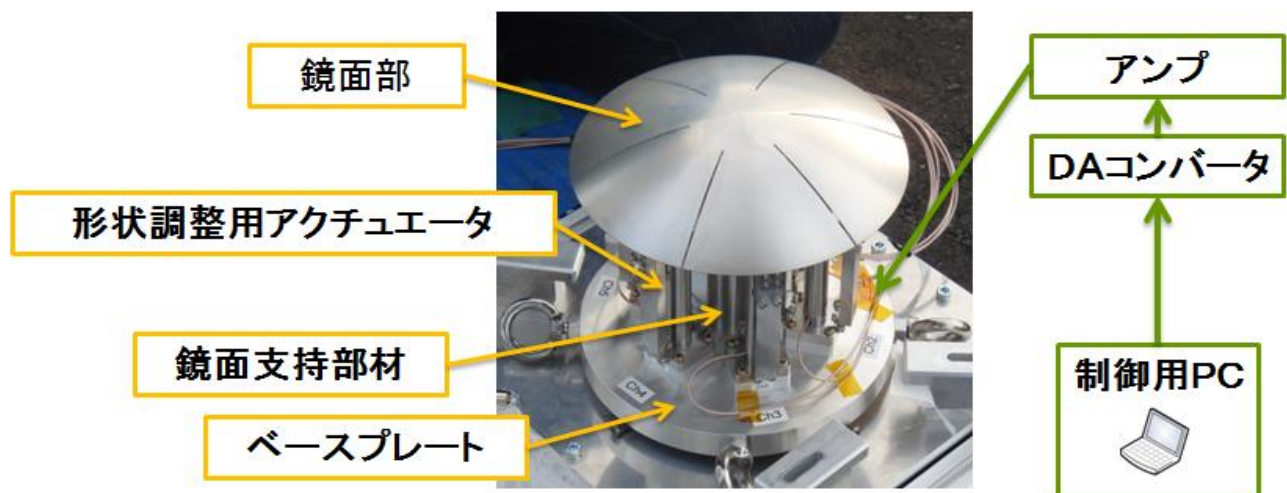


図2 高精度スマート形状可変鏡試作モデル<sup>4)</sup>

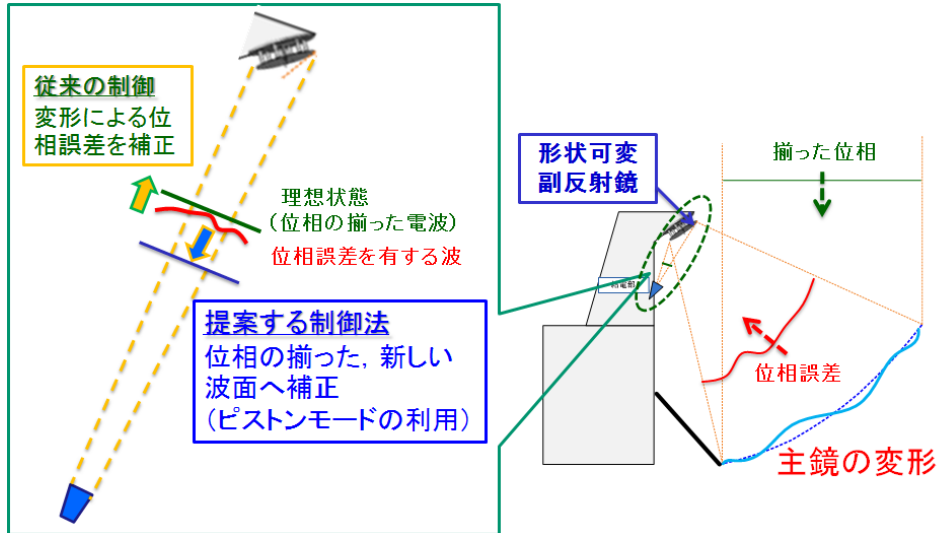


図 3 形状可変副反射鏡を用いた行路誤差補正法

## 2.2 提案方法を適用するための形状可変鏡システムの構成

提案する制御方法を用いる場合、アンテナ光学系に対してピストンモードの行路長差を付与する必要があるが、図 2 に示す現在の形状可変鏡構成（図 4 の従来構成）ではピストンモードを付与することが難しい。そこで図 4 の提案構成に示すように鏡面支持部材をアクチュエータ（圧電アクチュエータの他、粗動アクチュエータを用いることも可）で置き換える形状可変鏡構成を提案する。この構成では取り付け前の鏡面形状を少し深めに製作し、アクチュエータを組み付ける際に予変形を与え理想的な反射鏡形状とする。これにより、ピストンモード付与時にも各アクチュエータには押しつけ力が付与される他、電圧無印加時においても所望の形状を維持することができる。

	従来構成	提案構成
電圧無印加時		
ノミナル状態 (想定光学鏡面)	 電圧印加でノミナル形状を実現	 電圧印加なしでノミナル形状を実現
曲率増加制御	 印加電圧を減らすことで実現	 中央アクチュエータへの電圧印加で実現
特徴、課題	電圧無印加時に想定鏡面形状とならない。 ストローク: $\pm D_{max}/2$	電圧無印加時に想定鏡面 曲率増加時にピストン運動を併用 ストローク: $\pm D_{max}$

図 4 ピストンモードを付与するための形状可変鏡システム構成

### 3. 数値シミュレーションによる有効性検証

#### 3.1 解析モデルと解析方法

提案制御法の有効性を検証するため、行路誤差制御に関する数値解析を実施した。解析モデルとしては現在開発中の気球 VLBI 1 号機の光学系 (図 5) に形状可変型副鏡を組み込んだもの<sup>5)</sup>を想定し、構造解析および放射特性解析を行った。構造解析では汎用 FEM コードの ABAQUS を用いて剛性行列を作成し、Matlab により制御入力に対する変形形状を算出した。構造解析モデルを図 6 に示す。アクチュエータは中央および周方向に 60 度毎 6 か所の計 7 つを用いることとする (図 7)。構造解析の結果を基に、アンテナの放射特性を評価する。電波の周波数は 20GHz (波長 15mm) とし、給電部はエッジレベル-12dB のガウスビームとした。放射特性解析では幾何光学近似レイトレースにより開口面上の強度・位相分布を算出し、開口面分布法<sup>5)</sup>により放射特性を算出した。ノミナル状態における解析モデルの放射特性を図 8 に示す (ゲイン: 49.886[dBi])。

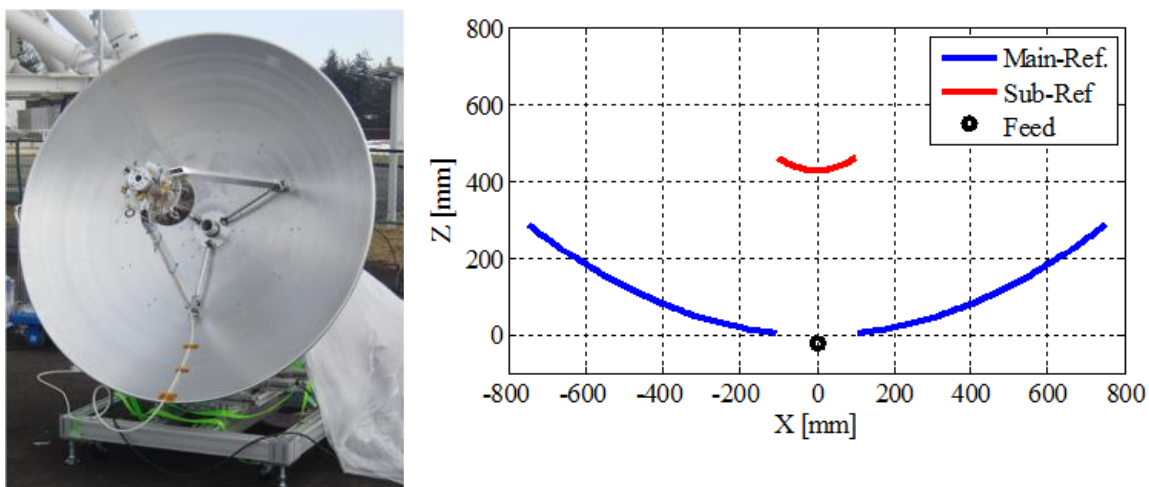


図 5 想定するアンテナ光学系 (気球 VLBI 1 号機の光学系で副鏡を形状可変鏡化)

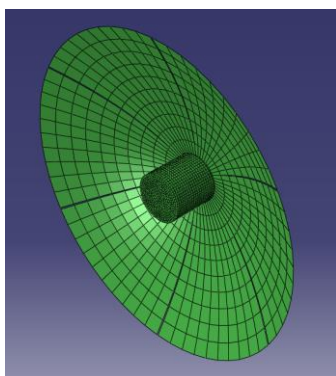


図 6 構造解析モデル

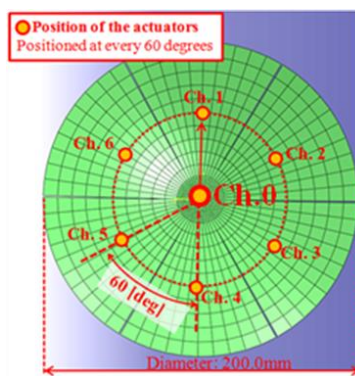


図 7 アクチュエータ配置

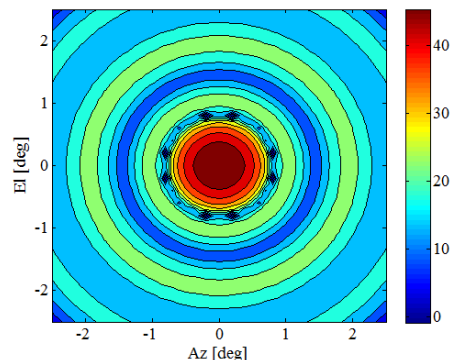


図 8 ノミナル状態での放射特性

#### 3.2 ピストンモードに相当する行路長差の付与

次に提案する制御法において重要なピストンモードについて検討を行う。今回の制御法において利用するピストンモードはアンテナ光学系の行路長差に関するものであり、副鏡鏡面の剛体並進と異なることを考慮する必要がある。例えば、副鏡鏡面を-Z 方向に 1mm 移動させた際の行路誤差は図 9 の様になり、行路長に関するピストンモード補正を行った後に行路誤差として 0.197mmRMS の誤差が生じる。

そのため、副鏡の鏡面を剛体的に移動するだけでは、行路長差のピストンモードは達成できないため、鏡面の剛体並進に加え、生じる行路誤差を抑える変形を付与する必要がある。なお鏡面変形は電波の入射、反射両側で行路長に影響を与えるため、変形量の約2倍が行路誤差となることに注意されたい。

先の副鏡鏡面のZ方向剛体並進の際に生じる変形を形状可変鏡で補正し、行路長差のピストンモードに相当する制御量をアンテナ光学系に与えることを想定し、補正量を(3)式より算出した。補正を含めピストンモードを実現する際の制御入力を表1に、その結果の行路誤差と対応する放射特性を図10,11に示す(共に $\alpha=1$ のケース)。図より鏡面の移動に対応する2mmの行路誤差がほぼ開口面全体で得られており、ピストンモードを補正した後の行路誤差は0.041mmRMSと完全なピストンモードではないものの実用上問題ない誤差量となっている。対応するアンテナゲインは49.885dBiと、ノミナル状態とほぼ同等の結果が得られている。

表1 ピストンモードの行路長差を実現するための制御入力 ( $\alpha$ : 基準となる行路長差)

	Ch-0	Ch-1	Ch-2	Ch-3	Ch-4	Ch-5	Ch-6
入力	$\alpha$	$1.16\alpha$	$1.16\alpha$	$1.16\alpha$	$1.16\alpha$	$1.16\alpha$	$1.16\alpha$

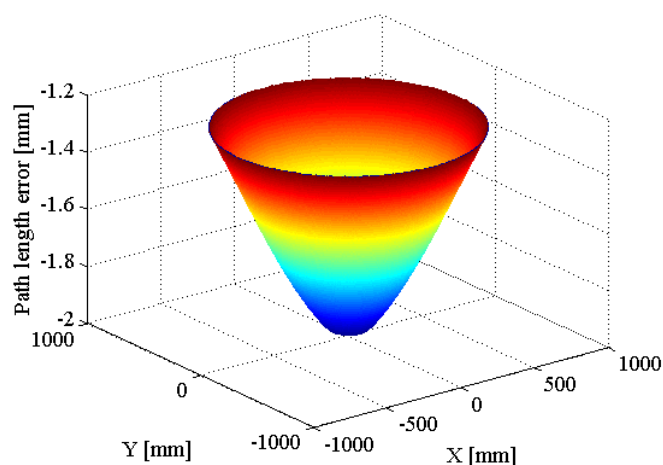


図9 副鏡の剛体並進によるアンテナ行路誤差 (-Z方向へ1mm)

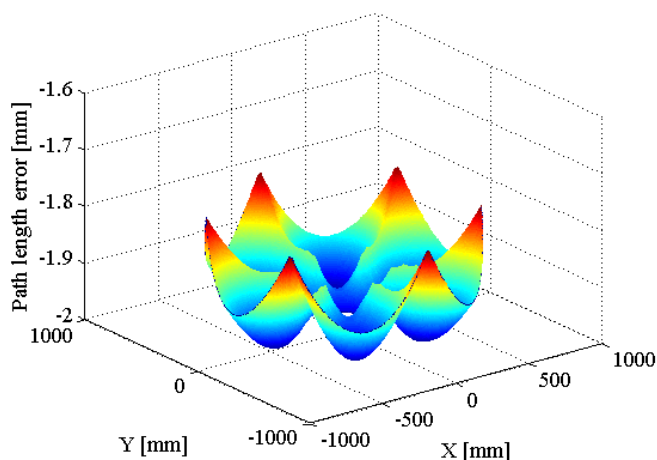


図10 形状可変鏡による補正後のピストンモード

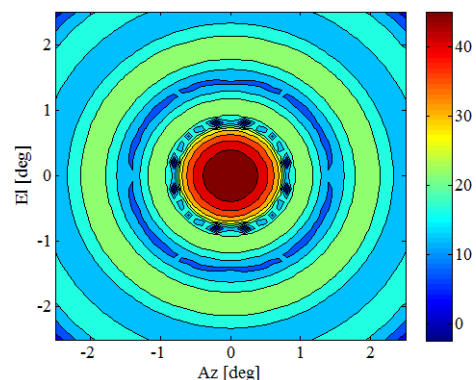


図11 ピストンモード付加後の放射特性

### 3.3 行路誤差制御シミュレーション

主鏡面の変形による行路誤差を、副鏡により補正する数値シミュレーションを行い、提案制御方法の有効性を確認する。主鏡の変形モードとしては Trefoil モード(Z(3,3))を想定し、鏡面上に 1mmRMS の鏡面誤差があるものとする。変形に対応する行路誤差を図 12 に示す。この鏡面変形によりアンテナゲインは約 0.96dB 低下し 48.929dBi となる。主鏡変形を有する光学系におけるアンテナ放射特性を図 13 に示す。鏡面変形の影響でアンテナゲインが大きく低下した他、周方向 3 次の鏡面変形に対応して主ビーム形状も三角形型に変化している。

この主鏡変形による行路誤差を形状可変副鏡により補正する。従来の制御法および、それにピストンモード利用してアクチュエータへの入力を正とする提案制御法による制御入力の算出結果を表 2 に示す。提案した方法により当初引張力に相当する負の制御入力が必要であったアクチュエータに対して、0 または正の制御入力を得られている。この制御入力による行路誤差制御結果を図 14 に、その際のアンテナの放射特性を図 15 に示す。制御の結果、行路誤差は 0.564mmRMS まで改善され、アンテナゲインも 49.710dBi と大きく回復した。なお制御後の行路誤差が比較的大きく残っている理由は、今回の形状可変鏡のトポロジー、アクチュエータ配置が Trefoil (Z(3,3))の誤差モード形状を完全に補正する構成となっていなかったことによる<sup>6)</sup>。形状可変鏡のトポロジーおよびアクチュエータ配置の最適化については今後の課題としたい。

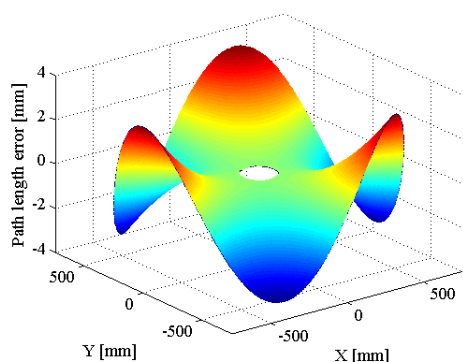


図 12 想定する主鏡面変形による行路誤差

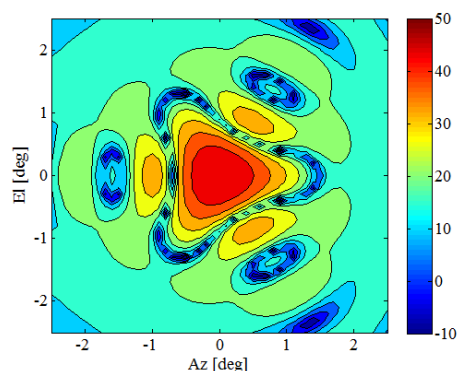


図 13 主鏡変形を含むアンテナ光学系の放射特性

表 2 主鏡変形を補正するための制御入力

アクチュエータ No.	制御入力 (従来法) [mm]	制御入力 (提案手法) [mm]
0	0.023	0.481
1	0.526	1.022
2	-0.496	0
3	0.527	1.024
4	-0.495	0.001
5	0.527	1.024
6	-0.496	0

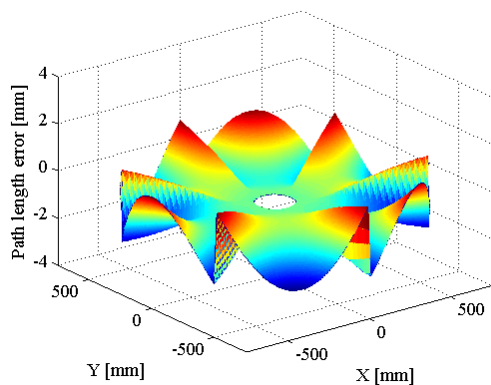


図 14 提案方法による制御後の行路誤差

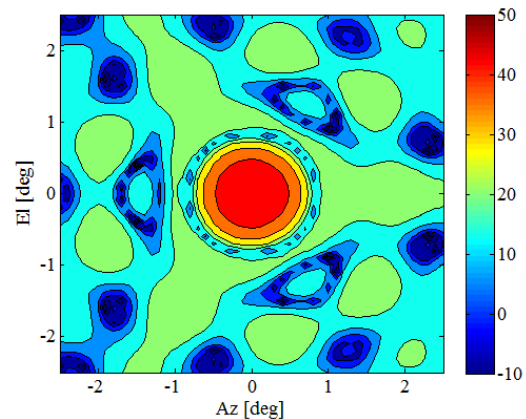


図 15 提案方法による制御後のアンテナ放射特性

#### 4. まとめ

対象物への引張力の負荷が苦手な圧電アクチュエータに対して、アンテナ光学系行路誤差のピストンモードを利用した新しい制御方法を提案し、その有効性を検証した。本制御方法は、従来の感度行列を用いる制御入力決定法にピストンモードを実現するオフセットを加え、アクチュエータへの制御入力を正にするものである。鏡面誤差を補正する数値シミュレーションを行い、提案方法が行路誤差制御において有効であることを確認した。

#### 謝辞

本研究は、JAXA 宇宙科学研究所の戦略的研究開発費、および、JSPS 科研費 26249131 の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- 1) L. Datashvili, H. Baier, B. Wei, J. Hoffman, E. Wehrle, L. Schreider, C. Mangenot, 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) H.Tanaka, et al.: Development of a Smart Reconfigurable Reflector Prototype for an Extremely High Frequency Antenna, 25<sup>th</sup> International Conference on Adaptive Structures and Technologies, #30, 2014.
- 5) 花山 英治, 高野 忠: 開口面分布法と電流分布法を用いた多面近似アンテナの放射特性の解析, 電子情報通信学会論文誌. B-II, J77-B-2(1), pp.35-43, 1994.
- 6) 田中 宏明, 他: スマート形状可変鏡 スリット入り鏡面モデルの開発・評価, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 3B02,2014.