

A09 スマート副鏡のための変位拡大機構の性能検証

古谷直也, 小木曾望 (大阪府立大学), 田中宏明 (防衛大学校), 岩佐貴史 (鳥取大学)
Naoya Furutani, Nozomu Kogiso (Osaka Prefecture University),
Hiroaki Tanaka (National Defense Academy of Japan), Takashi Iwasa (Tottori University)

1. 結論

著者らは、宇宙空間で使用する高精度アンテナとして、スマート形状可変鏡を用いた高精度アンテナシステムの開発研究を進めている⁽¹⁾。そのプロトタイプであるスマート副鏡を図1に示す。これは、温度条件によって主鏡に生じる熱変形などで生じる電波の位相誤差を、副鏡でアクティブに補正することで、要求される電波特性を達成することを目標としている。

このプロトタイプで用いられている鏡面調整用アクチュエータは、積層型の圧電アクチュエータ (ピエゾメカニクス社製 PSt 150/10/100 VS15) と変位拡大機構を組み合わせることで、アクチュエータが発生する変位 0.1mm を 1mm に拡大し、副鏡を変形させる^(1,2)。この変位拡大機構プロトタイプを図2に示す。この変位拡大機構は、まず、中央のアクチュエータが伸び、それによる上向き変位によって、変位拡大機構の中央部に斜めに配置されたバネが押し上げられ、それを両側のアームに伝える。このアームの下部は板バネで底板と接続されていて、アームは内側に傾く。その傾きを、上部の斜めに配置された部材からなるリンク部によって、先端を上押し上げるものである。このプロトタイプは、多数の部材がネジ留めされているため、製品間のバラツキも生じやすいし、ガタによって精度や耐久性が低下する可能性が高い。

そこで、著者らは変位拡大機構のガタを防ぐため、コンプライアントメカニズムとして一体化することを検討してきた。コンプライアントメカニズムは、剛体要素とジョイントにより構成される通常のメカニズムとは異なり、構造の適当な位置に柔軟性を付加することによりメカニズムを実現する⁽³⁾。これによって、締結部を無くし、正確性や耐久性の向上、無潤滑、無騒音を実現し、部品数の削減や小型化など、多くの適用範囲が考えられている。

また、変位拡大機構には、頂部の変位を最大化するだけでなく、構造物として、応力や固有振動数に対する要求もあり、これは多目的設計問題と考えることができる。著者らは、この設計問題を ϵ 制約法^(4,5)の考え方に基づいて、単一目的最適設計問題として定式化し、変位拡大機構の最適形状を求めた⁽⁶⁾。

本研究では、図3に示す最適設計で求めた形態をワイヤー放電加工で製作し、そのモデルに対するいくつかの検証実験結果を示す。まず、このモデルには非常に細い部材が含まれているため、加工精度を確認する必要があった。そこで、材料(SUS304)を固溶化処理したのちに、加工パスを調整しながら、3機製作した。その制作精度検証のための形状計測実験を行い、ワイヤー放電加工の加工パスが形状に与える影響を調査した。続いて、変位拡大機構の変形計測では、レーザー変位計による頂部の変形計測と、画像計測の一種である DLT 法⁽⁷⁾による変位拡大

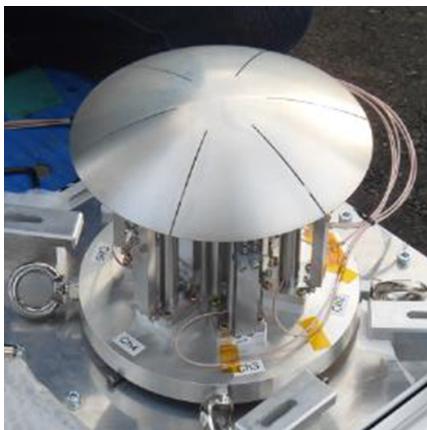


Fig. 1: BBM model of shape variable reflector model⁽¹⁾



Fig. 2: Prototype of displacement expansion mechanism^(1,2)

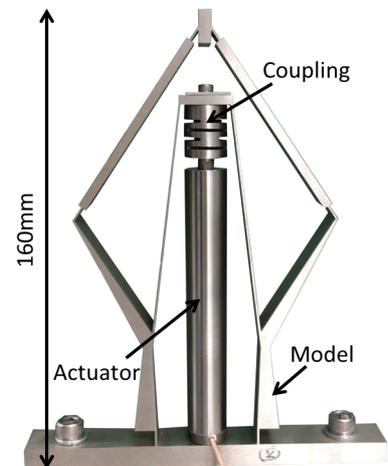


Fig. 3: Optimum configuration of displacement expansion mechanism⁽⁶⁾

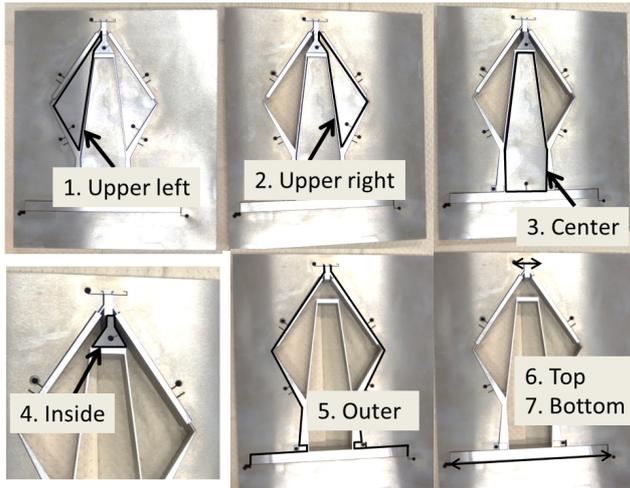


Fig. 4: Cutting pass

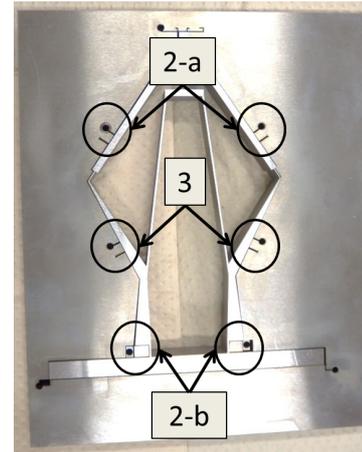


Fig. 5: Cutting pass added in Model2 and Model3

大機構全体の变形計測を行い、解析結果との比較により、検証を行った。また、製造誤差が変位拡大性能へおよぼす影響も調査した。これらの検証を通して得られた高精度スマートアンテナの実現に向けた知見を示す。

また、変形以外の計測として、変位拡大機構の頂部で必要とされる反力の計測結果を付録に示す。

2. 変位拡大機構の製作と構成

2.1 製作手順

最適設計によって得られた図3に示した変位拡大機構は、大阪府立大学 生産技術センターにおいて、ワイヤー放電加工の依頼工作により製作した。このモデルには非常に細かい部材が含まれているため、材料(SUS304)の初期内部応力を除去するために固溶化処理を行い、その後、加工パスを調整しながら、3機製作した。

最初に製造した変位拡大機構 (Model 1) は、図4に示す手順で製作した。

1. 左上の内部を切り出す
2. 右上の内部を切り出す
3. 中央のアクチュエータ取り付け部を切り出す
4. 1, 2 で残っていた上側入力部と出力部の間を切り離す
5. 外周部分を切り落とす
6. 上部と下部を切り離して、完成。

このModel1では外周の切り離しを一つのパスで行っていたが、加工の途中でモデルが横にずれてプログラム通りにカットできず、粗削り部が残るといった問題があった。

そこで、Model2では図5の2-a、2-bで示す箇所に切断パスを追加し、横ずれの軽減を図った。特に、2-bは板バネに相当する細い部分であり、ここの変形が横ずれに大きな影響をおよぼすと考えられたからである。さらに、Model3では図5の3で示す箇所にパスを追加することで、さらなる精度の向上を狙った。

2.2 変位拡大機構の構成

図3に示すように、変位拡大機構には、アクチュエータだけでなく、カップリングを取り付けて使用する。これまでの研究^(8,9)により、 piezoelectric actuator と変位拡大機構の熱膨張係数の不整合が変位拡大機構の性能低下につながる事が明らかになり、熱膨張係数を補正するためのブロックをアクチュエータと直列に並べることで解決できることが示されている。また、アクチュエータに用いる圧電素子は、軸方向荷重には強いが、せん断荷重には弱い性質がある。そこで、アクチュエータにかかるせん断荷重を逃がすために、ブロックではなく、カップリングとすることにした。

さらに、このアクチュエータには、 $\pm 0.5\text{mm}$ と大きな寸法公差があり、変位拡大機構への取り付け時に不具合が生じる可能性がある。つまり、アクチュエータ寸法が規定値より小さい場合には変位拡大機構とアクチュエータの間に隙間が生じ、一方で寸法が規定値より大きい場合には変位拡大機構にアクチュエータを取り付けられなくなる可能性がある。そこで、カップリングでその誤差を吸収することになっている。

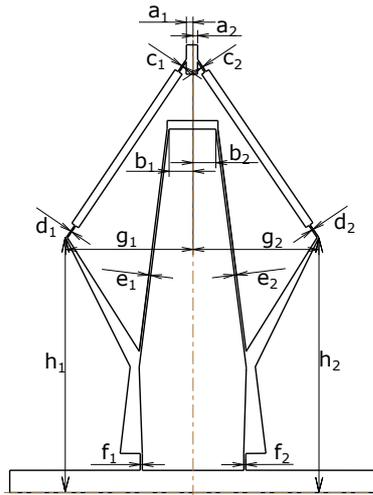


Fig. 6: Dimension symbols for measurement

Table 1: Dimension measuring result (mm)

	Designed	Without actuator			With actuator	
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2
a_1	2	2.710	2.365	1.880	2.450	2.348
a_2	2	1.303	1.631	2.123	1.566	1.645
b_1	8.294	8.819	8.489	8.255	8.491	8.340
b_2	8.294	7.809	8.079	8.331	8.136	8.245
c_1	0.5	0.514	0.483	0.482	0.512	0.466
c_2	0.5	0.489	0.534	0.529	0.484	0.550
d_1	0.5	0.502	0.464	0.404	0.499	0.470
d_2	0.5	0.420	0.532	0.500	0.403	0.505
e_1	0.7	0.670	0.680	0.714	0.645	0.696
e_2	0.7	0.658	0.735	0.690	0.674	0.689
f_1	0.7	0.686	0.722	0.719	0.705	0.736
f_2	0.7	0.663	0.716	0.703	0.663	0.716
g_1	45	45.337	45.113	45.221	44.931	45.238
g_2	45	44.321	44.621	45.370	44.283	44.321
h_1	91.057	90.923	91.012	90.884	91.051	90.972
h_2	91.057	91.248	91.163	90.867	91.252	91.116

3. 変位拡大機構の形状計測実験

製作した3機の変位拡大機構の製作精度を確認するため、大阪府立産業技術総合研究所の3次元形状計測機(ミツトヨ製 Quick Vision Pro)を用いて、変位拡大機構の形状を計測した。この装置は、ガラス台上に置いたワークの下から光をあて、ワークの陰影部からエッジを検出し、その位置座標を CCD カメラで認識する。計測精度は約 $1\mu\text{m}$ である。

アクチュエータを取り付けない状態と取り付けた状態で、3機の変位拡大機構の計測を行った。計測で得られた形状データを 3DCAD に取り込み、図 6 に示す図面の寸法に変換し、比較検証した。なお、図 6 に示す寸法記号は以下に示す通りで、添え字の 1 と 2 はそれぞれ中心軸の左側と右側を示す。

a : 出力部幅, b : 入力部幅, c : 上部バネの上側付け根の厚さ, d : 上部バネの下側付け根の厚さ
 e : 中央部バネの厚さ, f : 下部バネの厚さ, g : 張り出し部の幅, h : 張り出し部の高さ

計測結果を表 1 に示す。なお、アクチュエータを取り付けた状態での計測は、後述する DLT 法による画像計測により、確認が必要であることがわかったために、いくつかの実験の後で、アクチュエータ無、アクチュエータ有の両方を再計測した。Model 3 はアクチュエータ付の計測は行っていないため、アクチュエータ無の計測結果のみを示している。

まず、アクチュエータ無の計測結果から、特に、出力部幅 a 、張り出し部の幅 g 、張り出し部の高さ h の値を比較すると、Model 1 は左右非対称性が強いのにに対し、Model 2, Model 3 は非対称性が弱まっていることがわかる。これより、加工パスの変更には、一定の効果があったと言える。一方で、板バネ部の厚さは約 0.05mm 以下の不整合が存在し、出力部も $0.2\text{--}0.3\text{mm}$ 程度の左右のずれは残っている。

また、アクチュエータ有無について比較すると、Model 1 ではアクチュエータを取り付けることで、左右非対称性が緩和されていることがわかる。

4. 変位検証実験

4.1 変位計測実験

除振台に変位拡大機構の底面を固定し、圧電アクチュエータに最大 150V 、最小 0V 、周期 1s の正弦波を与える。そのときの入力部の変位 u_{in} 、最頂部の上方向の変位 u_v と横方向の変位 u_h の 3 種類の変位量を、それぞれ 3 台のレーザー変位計(キーエンス製 LK-G80(繰り返し精度 $0.2\mu\text{m}$), LK-G150(繰り返し精度 $0.5\mu\text{m}$), IA-030(繰り返し精度 $2\mu\text{m}$))を用いて同時に測定する。実験装置の概要を図 7 に示す。なお、入力部の変位は直接測定することができないため、図 8 のように薄板を入力部に取り付け、その変位を測定する。

4.2 DLT 法による変形計測実験

DLT 法 (Direct Linear Transformation Method) は、複数台のデジタルカメラで撮影した画像から、被計測物に貼付したターゲット点の 3 次元座標を計測し、被計測物の 3 次元形状を復元する画像計測法の一つである⁽⁷⁾。

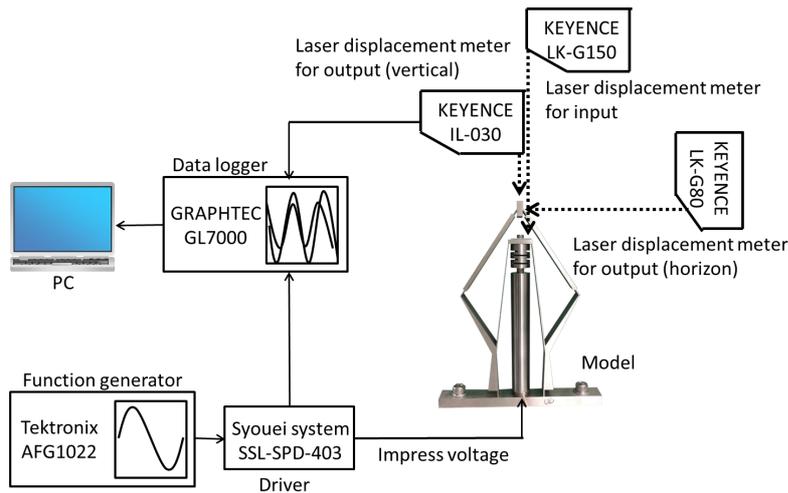


Fig. 7: Experimental setup for displacement measurement



Fig. 8: Thin plate used for measuring input displacement



Fig. 9: Experimental device for displacement measurement by DLT method

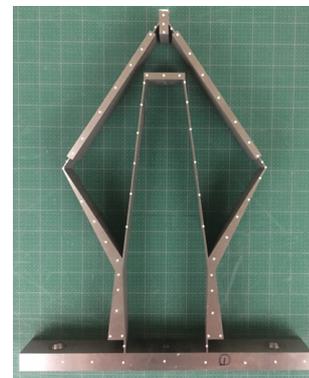


Fig. 10: Target markers for DLT method

Table 2: Material constant of SUS304 used for this prototype

Young's modulus (GPa)	167.0
Density (g/cm ³)	7.87

計測実験は、図9に示すように、変位拡大機構を除振台に固定し、3台のカメラを用いて計測する。なお、変位拡大機構には、図10に示すように直径1.0mmの白いターゲット点を貼付している。そして、電圧を印加しない場合(0V)と最大電圧(150V)を印加した場合で撮影を行い、ターゲットの移動量から、変形量を計測する。ここでは、入力部の変位 u_{in} 、最頂部の上方向の変位 u_v と横方向の変位 u_h に加え、張り出し部の横方向ならびに縦方向変位 $w_{1x}, w_{1y}, w_{2x}, w_{2y}$ を示す。なお、 w_1 が左側、 w_2 が右側の張り出し部に対応する。

このDLT法による変形計測の精度は、これまでの経験や、変位拡大機構の大きさ、撮像する画像の大きさなどから、 $10\mu\text{m}$ 程度であることを確認している。

5. 変位検証実験結果と有限要素解析との比較検証

5.1 有限要素解析の結果

各モデルの形状計測により得られたデータから作成したCADモデルを用いて、ABAQUSによる変形解析を行った。境界条件として、底面を固定し、アクチュエータ取り付け部の水平方向変位を固定し、アクチュエータを模擬したばね要素に上向きの変位 0.1mm を負荷する。なお、材料定数としては、表2に示すヤング率を用いた。これは、変位拡大機構を製作した残材から作製した試験片を引張試験で計測した値であり、カタログ値である 193GPa に比べて約15%低い。なお、アクチュエータ取り付けによる変形でひずみが生じるが、ここでは、その変形自体が小さいことから初期ひずみは無視している。

解析結果を表3に示す。入力変位や縦方向の出力変位にモデル間で大きな差はなく、頂部の上方向変位 u_v は 1mm 以上と、設計要求を満足していることがわかる。ただ、Model 1ではアクチュエータ無の形状から得られた変形は

Table 3: Analytical result obtained by ABAQUS

	Designed	Without actuator			With actuator	
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2
u_{in} (mm)	0.088	0.085	0.083	0.086	0.084	0.083
u_v (mm)	1.056	1.03	1.02	1.00	1.05	1.01
u_h (mm)	-2.96×10^{-4}	-0.230	0.025	0.038	0.12	0.10
w_{1x} (mm)	1.07	0.893	1.050	1.020	0.998	1.084
w_{1y} (mm)	0.33	0.282	0.333	0.326	0.311	0.346
w_{2x} (mm)	-1.07	-1.20	-1.02	-0.98	-1.163	-0.960
w_{2y} (mm)	0.33	0.369	0.314	0.310	0.356	0.297
Max stress (MPa)	181.0	181.3	191.4	180.5	193.8	212.1

Table 5: Displacement measurement result by DLT method

	Model 1	Model 2	Model 3
u_{in} (mm)	0.084	0.076	0.093
u_v (mm)	1.090	1.002	1.046
u_h (mm)	0.103	0.094	0.056
w_{1x} (mm)	1.039	0.954	1.015
w_{1y} (mm)	0.325	0.302	0.280
w_{2x} (mm)	-1.249	-1.116	-1.105
w_{2y} (mm)	0.335	0.312	0.296

Table 4: Displacement measurement result by laser displacement meter

	Model 1	Model 2	Model 3
u_{in} (mm)	0.086	0.087	0.085
u_v (mm)	1.069	1.077	1.075
u_h (mm)	0.107	0.069	0.058

Table 6: Reaction force of displacement expansion mechanism through piezoelectric actuator

	Model 1	Model 2	Model 3
Reaction force (N)	50.1	50.5	47.5

頂部の横変形が大きい。張り出し部の横変形変位 w_{1x} , w_{2x} の絶対値の差も大きく、非対称性が大きい。しかし、アクチュエータ有の形状に対しては、その変形量は減少し、非対称性が減っていることがわかる。

5.2 レーザー変位計による変位計測結果と DLT 法の計測結果との比較

レーザー変位計による変位計測結果を表4に、DLT法による変位計測結果を表5に示す。頂部の変形は若干の違いがあるが、二つの手法でほぼ同じ値が得られていることがわかる。

Model 1 の頂部の横変形は、Model 2 と Model 3 に比べて、大きい。また、DLT法で得られた張り出し部の変位を比べても、Model 1 は非対称性が大きい。これは、Model 1 が左右非対称になっていることが原因であり、解析結果の傾向とも一致する。

表3に示した解析結果と比較すると、Model 1, Model 2 とともに、アクチュエータを取り付けることによって非対称性が減じた形状に対する結果と、ほぼ同じと言える。

6. 反力計測実験

最後に、反力計測実験の結果を示す。変位拡大機構は、図1に示したように、副鏡を変形させるためのものである。このため、頂部を固定したときに、アクチュエータによって10N以上の反力を発生させることが求められる。変位拡大機構の最適設計⁽⁶⁾では、解析モデルの境界条件として頂部に90Nの下向き荷重を負荷した条件を設定して、この反力条件を、直接、反映させていなかったため、試験で検証を行った。

そこで、荷重変位計測装置(スタンド:イマダ製 FSA-1KE, フォースゲージ:日本電産シンボ製 FGP-10)に変位拡大機構を固定し、アクチュエータに最大電圧150Vを負荷したときに発生する力を計測した。その結果を表6に示す。どのモデルも約50Nの反力を発生していて、性能要求を十分に満足していることがわかる。

7. 考察

3機製作した変位拡大機構のうち、最初に製作したModel 1の非対称性が大きかったことから、性能検証に加え、形状の非対称性が変形におよぼす影響も調べた。まず、加工パスを工夫することで、形状の非対称性は無視できるほど小さくなり、十分な形状精度で加工できることが明らかとなった。

また、DLT法による画像計測を通して、アクチュエータの有無によって形状が変化することが明確となり、そのわずかな形状の違いにより、アクチュエータによる変形の非対称性が左右されることがわかった。この形態は、変位拡大機構として上方方向に変位を拡大しやすい形態であり、設計要求は満足できている。一方で、水平方向のせん断変形に対する剛性が低く、非対称な変形を生じやすい形状であることが、検証実験を通して明らかとなった。

せん断変形に対して頑強な構造について考察した上で、さらなる変位拡大機構の性能向上に取り組むことが必要である。

8. 結論と今後の予定

本研究では、高精度宇宙構造として著者らが開発を進めているスマート副鏡の構成部品である変位拡大機構を、最適設計によりコンプライアントメカニズムとして求めた構造形態を、ワイヤー放電加工で制作し、その性能検証を行った。

- 変位拡大機構には細長い部材があるが、製作手順を工夫することで、ワイヤー放電加工によって十分な形状精度で加工できることを、3次元形状計測により明らかにした。
- 変位拡大機構が頂点部の設計条件を満足できることを、変位計測によって確認した。また、レーザー変位計による計測とDLT法による画像計測がよく一致していることも確認できた。
- 非対称になってしまったモデルに生じる横変形を解析と実験で比較する過程で、アクチュエータの取り付けによる形状変形が生じていて、それがアクチュエータによる変位拡大機構の変形に影響をおよぼすことを有限要素法による解析結果と比較することで、明らかにした。また、これにより、DLT法による画像計測の有用性を確認できた。
- 変位拡大機構が反力の要求性能を満たすことも確認した。

これらの検証結果から、コンプライアントメカニズムとして一体化した変位拡大機構の有用性を示すことができた。

一方で、この構造形態は、せん断変形に対する剛性が低いこと、非対称性変形が生じやすいという問題がある。ここには示していないが、この形態では振動要求を満足できていないことがわかっている。今後は、せん断方向の揺れに頑強な構造について考察した上で、さらなる変位拡大機構の性能向上に取り組む。

謝辞

本研究を遂行するにあたって、JAXA宇宙科学研究所「戦略的開発研究費」およびJSPS科研費26249131の助成をいただいた。変位拡大機構の製作にあたっては、大阪府立大学生産技術センター技師 庄村満氏に多大なる協力をいただいた。また、形状計測においては大阪府立産業技術総合研究所 主任研究員の安木 誠一氏、研究員の川村 誠氏に便宜を図っていただいた。また、計測操作には大阪府立大学工学域学生の田中博基君の協力をいただいた。DLT法の計測にあたっては、鳥取大学技術部技術職員の村松隆司氏、大学院生の下田尚樹君の協力をいただいた。ここに謝意を表する。

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*, **27-6**, (2016), pp. 764-773.
- (2) 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).
- (3) O. Sigmund, On the design of compliant mechanisms using topology optimization, *Mechanics of Structures and Machines*, **25-4**, (1997), pp. 493-524.
- (4) K. M.iettinen: *Nonlinear multiobjective optimization*, Kluwer, (1999)
- (5) 野村壮史 他: トポロジー最適化を用いた誘電体共振器アンテナの設計: 電磁界と構造力学に関する多目的最適化, *電子情報通信学会技術研究報告 AP*, **108-148**, (2008), pp. 171-176.
- (6) 古谷直也 他: 多目的最適設計法を利用した変位拡大機構のトレードオフ解析, 第60回宇宙科学技術連合講演会, 3H08, (2016)
- (7) 岩佐貴史 他: せん断負荷を受ける矩形膜の面外変位の確率分布モデルの検討, *膜構造研究論文集*, **27**, (2014), pp. 39-44.
- (8) A. Inagaki, et al.: Experimental study of reflector shape control under various thermal conditions, *AIAA SciTech*, AIAA2015-1399, (2015)
- (9) K. Gotou, et al.: Actuator design for space smart reflector to reduce thermal distortion, 30th ISTS, 2015-c-49, (2015).