



宇宙用高精度大型構造物の研究開発:
スマート形状可変鏡

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-10-23 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 田中, 宏明, 坂本, 啓, 石村, 康生, 小木曾, 望, 土居, 明広, 河野, 裕介 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10466/00017104

宇宙用高精度大型構造物の研究開発：スマート形状可変鏡^{*1}

田中宏明^{*2} Hiroaki TANAKA・坂本 啓^{*3} Hiraku SAKAMOTO・石村康生^{*4} Kosei ISHIMURA
 小木曾望^{*5} Nozomu KOGISO・土居明広^{*4} Akihiro DOI・河野裕介^{*6} Yusuke KONO

人工衛星を用いたミッションの高度化に伴い、衛星搭載用のアンテナや望遠鏡といった衛星搭載機器も、より高精度であることが求められる。そのような高精度な機器の実現に向け、軌道上での変形を計測し、アクチュエータにより補正することで高い精度を得る形状可変構造システムが、多くの機関で研究・開発されている。著者らも積層型圧電素子と変位拡大機構を組み合わせたアクチュエータを用いてアンテナ反射鏡面の形状調整を行う形状可変鏡（スマート形状可変鏡）の研究・開発に取り組んでおり、製作したアクチュエータの性能評価や、実際のアンテナシステムに組み込んだ状態での形状可変鏡の有効性確認試験を実施している。本稿では、そのようなスマート形状可変鏡に関して、研究内容を紹介する。

Key Words: Smart Structures, Space Engineering, Space Antennas, Reconfigurable Reflector

1. はじめに

人工衛星を用いた電波天文観測や、衛星通信では大型で高精度な反射鏡アンテナが用いられている¹⁻³⁾。反射鏡アンテナでは開口径が大きいほど高いアンテナゲインを得られるため、ミッションの高度化に伴い反射鏡の大型化が求められている。一方で反射鏡の鏡面形状が理想形状からの誤差を有する場合、その誤差量に応じてアンテナゲインが悪化するため⁴⁾、反射鏡の鏡面精度もアンテナ性能を決める大きな要因となる。一般に電波天文観測用アンテナ反射鏡としては波長の1/20程度、衛星通信用では波長の1/50~1/100といった高い鏡面精度が求められており、高い周波数の電波を用いた運用が期待される将来の大型アンテナ反射鏡の実現において大きな課題となっている。例えば、宇宙航空研究開発機構で開発がすすめられていたASTRO-Gプロジェクトでは開口径9.3mの反射鏡に対して0.4mmRMSの鏡面精度が求められていたほか⁵⁾、現在研究が進められている気球VLBIミッションでは、衛星搭載用ではないが開口径3mのアンテナに対して、0.05mmRMSという非常に高い鏡面精度が要求されている⁶⁾。

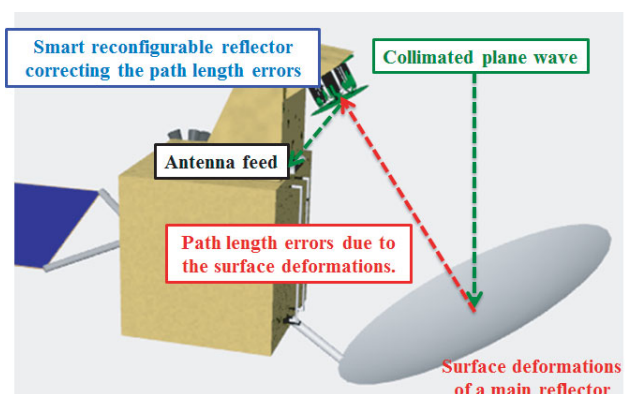
そのような高い鏡面精度のアンテナ光学系を実現するために、必要に応じてその形状を変えることのできる形状可変鏡の利用が期待され、多くの研究がなされている⁷⁻¹⁰⁾。これらは、軌道上での反射鏡の変形などにより生じる行路誤差（電波の位相誤差）を、鏡面の形状を適切に変化させ

ることで低減することを目指したものであり、著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研究・開発を進めている¹⁰⁻¹⁶⁾。形状可変鏡を用いた高精度アンテナシステムの概要を第1図に示す。本稿ではその開発状況と関連する研究を紹介する。なお、第1図のアンテナシステムでは副鏡部に形状可変鏡を設置しているが、主鏡自体の形状制御をはじめとして、アンテナ光学系における形状可変鏡の配置については検討の余地がある。

また、本稿で紹介する研究は電波アンテナを対象としたものであり、「光学観測技術」のイメージである可視光とは波長が異なるが、どちらも電磁波を対象とした観測という点で、ご容赦いただきたい。

2. スマート形状可変鏡

2.1 スマート形状可変鏡試作モデル スマート形状可変鏡の試作モデルは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6本から構成される。開発したスマート形状可変鏡システムの概要と外観を第2図に示す。特に重要な要素と



第1図 形状可変鏡を用いた高精度アンテナシステム¹⁰⁾

^{*1}© 2018 日本航空宇宙学会
 平成28年12月27日原稿受理 Research and Development of High Accuracy Large Space Structures, Smart Reconfigurable Reflector

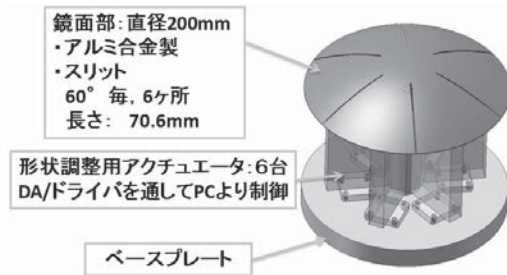
^{*2}防衛大学校 航空宇宙工学科

^{*3}東京工業大学 工学院機械系

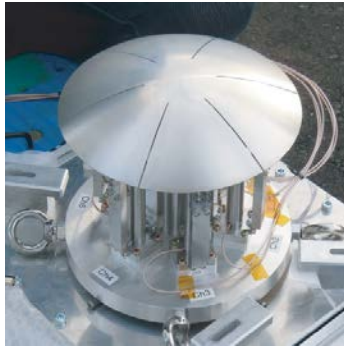
^{*4}宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

^{*5}大阪府立大学 大学院工学研究科 航空宇宙海洋系専攻

^{*6}国立天文台 水沢VLBI観測所



(概要)



(外観)

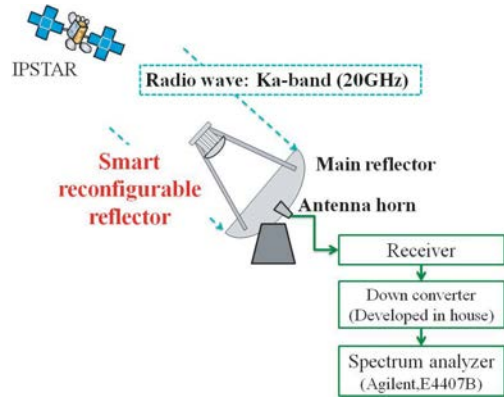
第 2 図 スマート形状可変鏡試作モデル¹¹⁾

なる鏡面調整用アクチュエータに関しては、高い精度 (1 μm 程度) と十分なストローク (1 mm 程度) を実現するとともに、鏡面を変形させるのに十分な保持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。アクチュエータの詳細は 3 節で述べる。

この試作モデルはスマート形状可変鏡システムの有効性確認のために開発されたものであり、鏡面に付与できる変形モードを仮定し、そのモード形状を実現しやすいよう鏡面部にスリットを入れている¹¹⁾。板厚 0.5 mm の双曲面形状となっており、クライムエヌシーデー社にて加工を行った。このモデルではアクチュエータを 60° ごとに 6 本配置しているが、対象とする変形モードに応じて、アクチュエータ位置を最適化することでより高い形状制御性能が期待できる^{17,18)}。

2.2 スマート形状可変鏡の有効性評価試験 スマート形状可変鏡を組み込んだアンテナシステムの有効性を実証するために、アンテナ特性評価試験を実施した¹⁰⁾。この試験では、開発したスマート形状可変鏡試作モデルを気球 VLBI ミッション 1 号機アンテナシステム¹⁹⁾の地上試験装置に組み込み、鏡面形状を変化させながら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した。試験構成の概要を第 3 図に、試験に用いたアンテナシステムを第 4 図に示す。

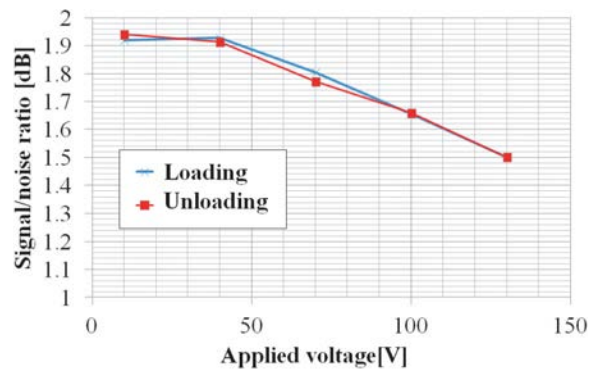
タイのブロードバンド通信用衛星 IPSTAR からの電波 (Ka 帯, 約 20 GHz) をアンテナシステムにて受信し、ダウンコンバータを用いて周波数を落とした後、スペクトラムアナライザにて周波数成分を解析し、受信レベルの計測を行った。アクチュエータへの印加電圧を変化させなが



第 3 図 アンテナ特性評価試験 試験系概要¹⁰⁾

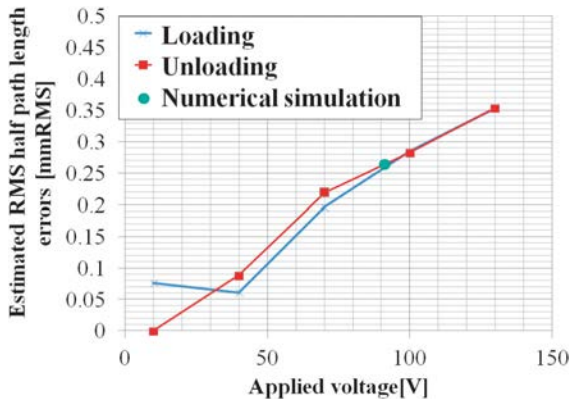


第 4 図 形状可変鏡を含むアンテナシステム¹⁰⁾

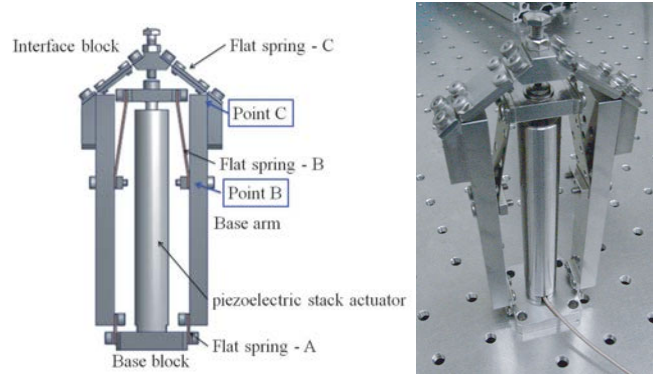


第 5 図 印加電圧と受信レベルの関係¹⁰⁾

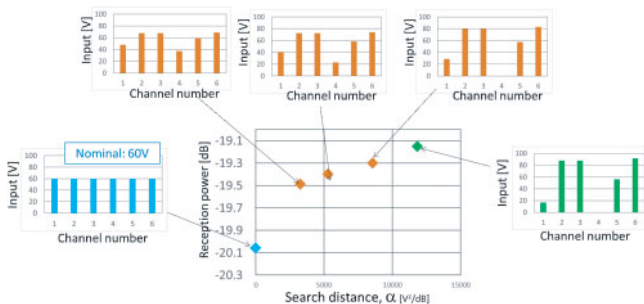
ら、形状可変鏡にデフォーカスモードの鏡面変形を付与し、その時の受信レベルの変化を計測した。各アクチュエータへの印加電圧は、10 V から 130 V まで 30 V 単位で増やした後、30 V 単位で 10 V まで印加電圧を下げた。形状可変鏡の駆動電圧と受信レベルの関係を第 5 図に示す。この結果より形状可変鏡の駆動により、アンテナの受信レベルを変更できることを確認できた。この受信電波レベルの変化量から付与した鏡面誤差量を Ruze 則⁴⁾により推定した結果を第 6 図に示す。またこの図には別途計測した形状可変鏡のある印加電圧における変形量測定結果も合わせて示している。アンテナの受信レベル変化から推定される鏡面誤差量は、同じ印加電圧での形状変化量とよく一致しており、形状可変鏡が想定通りの性能を示していることが



第6図 印加電圧と受信レベルから推定される鏡面誤差¹⁰⁾



第8図 形状調整用アクチュエータ試作モデルの概要と外観¹³⁾



第7図 受信電力情報を用いたアンテナ制御結果¹²⁾

分かる。なお今回のアンテナシステムでは鏡面変形を付与しない初期状態で適切な光学系となっているため、形状可変鏡の駆動により、アンテナの受信電波レベルが低下しているが、初期の鏡面誤差がある場合には、受信レベルの改善が期待できる。

なお本試験の際に、高温下で形状可変鏡が駆動できなくなる問題が生じた。この問題については3.3節で詳しく述べるが、形状調整用アクチュエータ構成部材の線膨張係数の不一致が原因であることが判明している¹⁶⁾。

2.3 受信電波強度情報を用いたスマート形状可変鏡の制御試験 次にスマート形状可変鏡による変形付与により、アンテナとしての受信電波強度が変化することをを用いた制御試験を実施した¹²⁾。試験ではまず、行路誤差を有するアンテナ光学系に対して、形状調整用アクチュエータを1本ずつ駆動し、アクチュエータへの入力電圧に対する受信レベル変化（感度）を求めた。その感度行列を用いて制御方向を決定しラインサーチを行い、受信レベルを最大化できるアクチュエータへの制御入力決定した。試験結果を第7図に示す。この図より、本制御方法によりアンテナの受信レベルが改善されていることが確認できる。この結果より、直接的な行路誤差の計測ができない場合でも、形状可変鏡を用いたアンテナ性能の改善が可能であることが示された。

3. 形状調整用アクチュエータ

3.1 変位拡大機構付圧電アクチュエータ試作モデル 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 μ m程度）と十分なストローク（1mm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構成とした。まずは変位拡大機構の機能確認およびスマート形状可変鏡試作モデルへの組み込みのため、部材の結合にネジを用いた試作モデルを、ウェルリサーチ社に依頼し開発した¹³⁾。アクチュエータ試作モデルの概要と外観を第8図に示す。

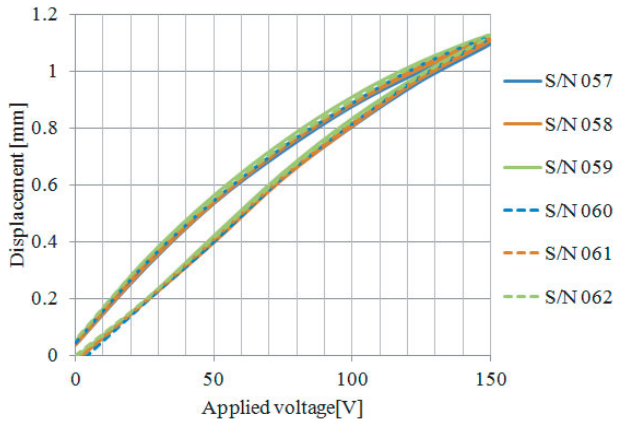
圧電アクチュエータとしてはピエゾメカニクス社のPS150/10/100 VS15を利用しており、無負荷状態において、150Vの電圧印加により0.1mmの先端変位を得ることができる。この圧電アクチュエータ先端の変位を変位拡大機構により拡大することで、要求されるストロークを得る。変位拡大機構の動作概要は以下の通りである。

(1) 圧電アクチュエータ先端の変位により、板バネBがベースアームを内側に引き込む。このとき、板バネBの取り付け角度による変位増加と、板バネAを支点としたテコの効果により、拡大された変位がベースアーム先端で生じる。（ただし、ベースアーム先端の変位は紙面左右方向に生じる。）

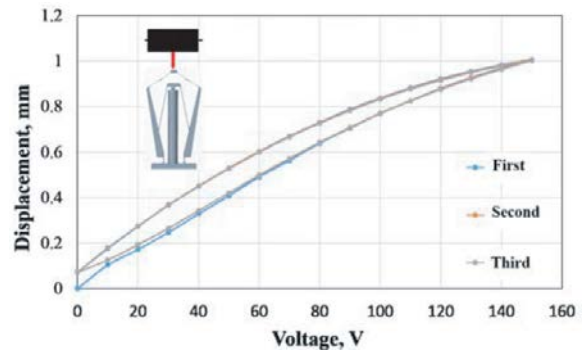
(2) ベースアーム先端での変位を板バネCを介してIFブロック部（ソリッド鏡面との取り付け部）に伝えることで、拡大された変位の発生方向を紙面上下方向に変換する。

開発した試作モデル（6体）に対して、印加電圧と出力変位の関係を計測した。結果を第9図に示す。150Vの電圧印加時に1.1mm程度の変位が発生しており、目標である1mm以上のストローク（10倍以上の変位拡大倍率）が得られていることが確認できた。また別途実施した保持力確認試験では、150V印加時に90Nを超える保持力が実現できており、これらの試験結果から本変位拡大機構付アクチュエータが形状可変鏡用アクチュエータとして十分な能力を有していることが確認できた。先に述べた2節の試験は、このアクチュエータ試作モデルを形状可変鏡試作モデルに組み込み実施している。

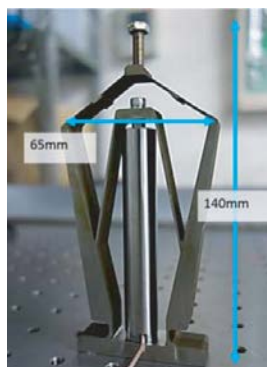
3.2 変位拡大機構へのコンプライアントメカニズムの適用 3.1節で述べたアクチュエータ試作モデルは、機能確認のため板バネやネジを多用した構造となっているが、ネジ部のガタによって精度や耐久性が低下する可能性が高



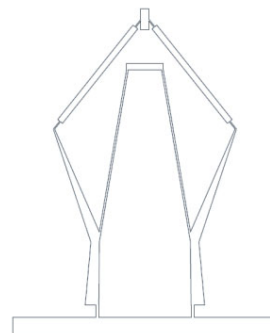
第9図 圧電アクチュエータ試作モデルの印加電圧と変位の関係¹³⁾



第11図 コンプライアントメカニズムによる変位拡大機構を有するアクチュエータの印加電圧と変位の関係¹⁴⁾



第10図 コンプライアントメカニズムからなる変位拡大機構を有する圧電アクチュエータ¹⁴⁾

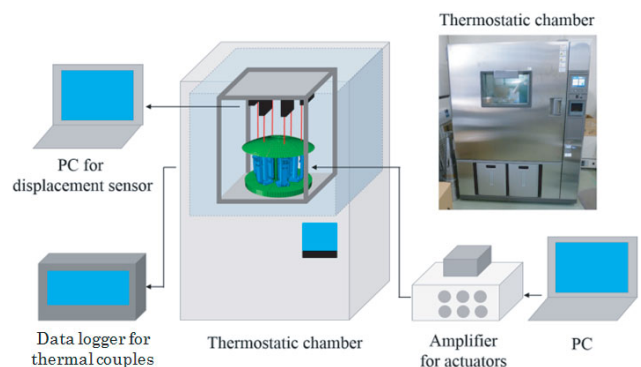


第12図 最適化された変位拡大機構形状とアクチュエータ¹⁵⁾

く、剛性低下を招く恐れがある。また、打上げ時の振動により、これらのネジが外れてしまう恐れもあるため、変位拡大機構にコンプライアントメカニズムを適用した一体型の変位拡大機構の開発を行った。まず、試作モデルの変位拡大機構を基に、変位拡大機構部の構造をリンク機構としてモデル化し、そのリンク機構モデルを用いて一体型の変位拡大機構を試作し、性能評価を行った¹⁴⁾。一体型変位拡大機構を有するアクチュエータの外観を第10図に、印加電圧-変位関係を第11図に示す。この結果より、コンプライアントメカニズム化した変位拡大機構でも1mmを超える変位を実現できていることが確認できた。

次に、より効率的な変位拡大機構の実現を目指し、多目的最適設計法を利用した変位拡大機構の設計に着手した¹⁵⁾。この研究では、最大応力、固有振動数などの種々の制約のもとで出力変位を最大化する問題として定式化し最適化を実施した。得られた形状および実際に製造された変位拡大機構を第12図に示す。今後はこの最適化された変位拡大機構付アクチュエータの評価を実施する予定である。

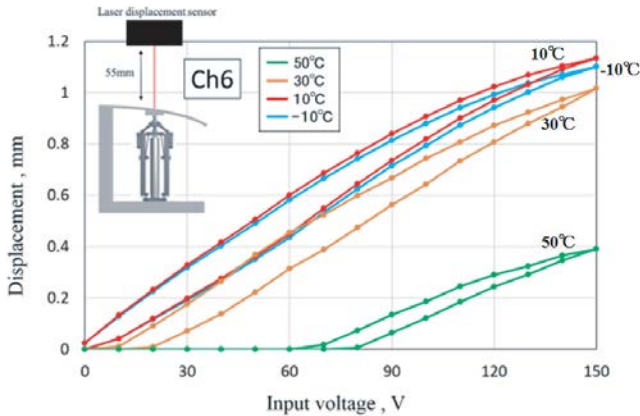
3.3 線膨張係数に起因する問題点と解決方法 2.2節で述べたように、スマート形状可変鏡の有効性評価試験の際に、高温下で形状可変鏡が駆動できなくなる問題が生じた。その現象を確認するため、恒温槽を用いて様々な温度下における印加電圧と形状可変鏡の鏡面変位の関係を評価



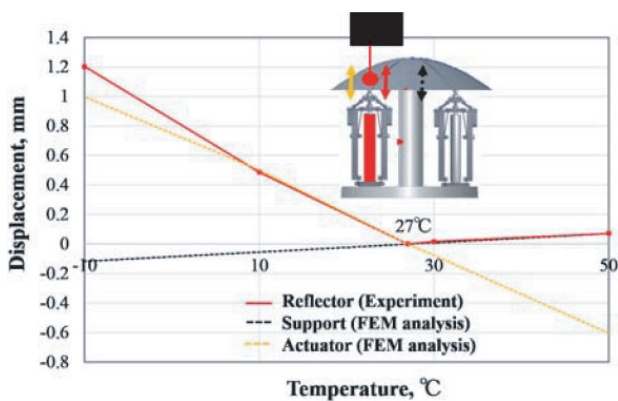
第13図 恒温槽内での変位付与試験構成¹⁶⁾

した^{14,16)}。試験装置構成を第13図に、各温度環境における印加電圧と変位の関係を第14図に示す。第14図より、温度上昇に伴い形状可変鏡の発生可能な最大変位量が低下し、50℃の環境下では60Vまでの印加電圧では変位を発生できていないことが分かる。次に、電圧印加がない場合の、温度と鏡面部変位の関係を第15図に示す。この図より鏡面部の変位が、ある点で折れ曲がりを示していることが分かる。この折れ曲がり点を超えた温度での変位量は、ほぼ支柱部の線膨張係数から予測される変位と一致しており、このことはアクチュエータ先端が鏡面から離れてしまっていることを示している。

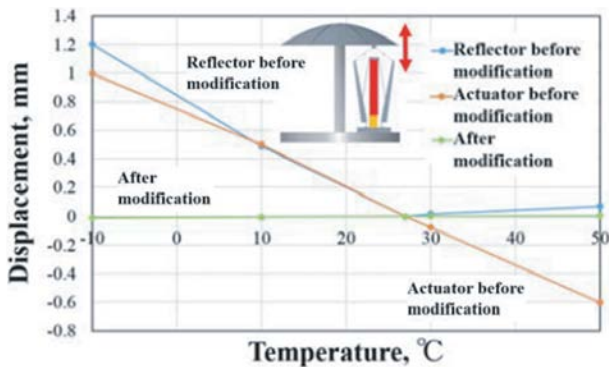
ここで変位拡大機構はステンレス製であり、圧電アクチュエータは圧電セラミクスとステンレス製ケースの複合体である。これらの線膨張係数を考えると、複合構造である



第 14 図 各温度での印加電圧と形状可変鏡鏡面変位の関係¹⁶⁾



第 15 図 印加電圧 0 V での温度と鏡面変位の関係¹⁴⁾



第 16 図 線膨張係数を考慮した形状可変鏡設計結果¹⁴⁾

圧電アクチュエータの線膨張係数は厳密には分からないものの、線膨張係数の小さい圧電セラミクスを内部に有するため、変位拡大機構の線膨張係数より小さいと予想される。その場合温度上昇に伴い、変位拡大機構が圧電アクチュエータより大きく変形するため、相対的にその差分だけ変位拡大機構に負の変位が入力されることとなる。その負の変位が変位拡大機構により拡大され、高温時にアクチュエータ先端が鏡面から離れてしまったと考えられる。このように、変位拡大機構付アクチュエータ、および鏡面系の部材間での線膨張係数の不一致が今回の問題の原因であったと考えられる。

この線膨張係数の不一致による問題を解決するために、

我々は、圧電アクチュエータと並列に線膨張係数の高い材料を設置、全体での線膨張係数を調整することで、ゼロ膨張に近い形状可変鏡システムを実現する設計方法を提案し、数値解析によりその有効性を示している（第 16 図）。今後は、この設計方法を用いて設計した変位拡大機構付アクチュエータの製造を行う予定である。

4. ま と め

変位拡大機構付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研究・開発状況について紹介した。スマート形状可変鏡システム試作モデルを開発し、アンテナシステムに組み込んだ評価試験を行い、形状可変鏡システムの有効性を確認した。アクチュエータについては、コンプライアントメカニズムを用いた一体型変位拡大機構の開発を行うとともに、最適化による変位拡大機構の高性能化を実施している。また、形状可変鏡システムの部材間の線膨張係数の違いに起因する問題を解明し、それを解決できる設計方法を検討している。

研究グループではこれらの研究のほかに、高精度形状可変鏡アンテナの実現を目指し、圧電アクチュエータの耐振動・衝撃特性評価^{20,21)}にも取り組んでいる。こちらについても有意義な研究結果が得られているので、参照されたい。

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。また、本研究の一部は JSPS 科研費 26249131 の助成を受けたものである。研究の遂行にあたり、高精度スマート鏡面架台研究グループの方々には多くのご支援をいただいた。ここに深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) Natori, M. C., Hirabayashi, H., Okuizumi, N., Iikura, S. and Nakamura, K.: A Structure Concept of High Precision Mesh Antenna for Space VLBI Observation, 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA-2002-1359, 2002.
- 2) Meguro, A., Harada, S. and Watanabe, M.: Key Technologies for High-Accuracy Large Mesh Antenna Reflectors, Acta Astronautica, **53** (2003), pp. 899-908.
- 3) Imbriale, W. A., Gao, S. and Boccia, L.: Space Antenna Handbook, Wiley, Hoboken, NJ, 2012.
- 4) Levy, R.: Structural Engineering of Microwave Antennas: For Electrical, Mechanical, and Civil Engineering, IEEE Press, Piscataway, NJ, 1996.
- 5) Higuchi, K., Kishimoto, N., Meguro, A., Tanaka, H., Yoshihara, M. and Iikura, S.: Structure of High Precision Large Deployable Reflector for Space VLBI (Very Long Baseline Interferometry), 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA-2009-2609, 2009.
- 6) Satou, Y., Doi, A., Ishimura, K., Tanaka, H., Ogi, Y., Higuchi, K., Kono, Y. and Kimura, K.: Development of High Precision Reflector for Balloon-Borne Radio Telescope, 30th International Symposium on Space Technology and Science, 2015-c-31, 2015.
- 7) Fang, H., Quijano, U., Bach, V., Hill, J. and Wang, K. W.: Experimental Study of a Membrane Antenna Surface Adaptive Control System, 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, AIAA-2011-1828, 2011.

