

宇宙アンテナ形状制御機構の熱変形の評価と低減法の開発

柏山 礼興 (REO KASHIYAMA)¹⁾, 津久井 謙 (KEN TSUKUI)¹⁾, 坂本 啓 (HIRAKU SAKAMOTO)¹⁾,
田中 宏明 (HIROAKI TANAKA)²⁾, 大熊 政明 (MASAAKI OKUMA)¹⁾

¹⁾ 東京工業大学

²⁾ 防衛大学

1. 序 論

将来予想される天文観測ミッションにおいて、より大型で高精度な宇宙アンテナシステムが要求され、軌道上でアンテナ形状を能動的に制御することを目指した研究開発が行われている。既存の研究の多くは主鏡形状を制御するものだが [1]- [2], 筆者らは次世代の宇宙アンテナシステムとして、Fig.1 のような形状可変副鏡を有するシステムを構想している [3]。本システムはアンテナ副鏡の形状を変化させ、主に大型の主鏡に生じた理想形状からのずれに起因する行路長誤差を補正するものである。Fig. 2 (a) に形状可変副鏡の初期プロトタイプを示す [4]。直径 200mm のスリット入り凸型鏡面の裏から Fig. 2 (b) の形状制御機構で変位を与えて形状制御を行う。形状制御機構は積層型圧電アクチュエータに変位拡大機構を取り付けたものであり、高さ 140mm、幅 65mm である。圧電アクチュエータの最大約 0.1mm の変位を弾性変形を利用した変位拡大機構によって 10 倍に拡大し先端で最大約 1mm の変位を与える。

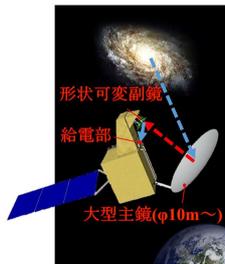
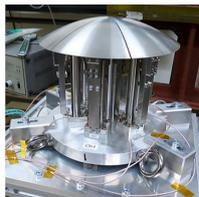
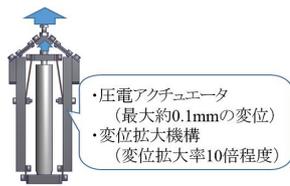


Fig. 1 宇宙形状可変アンテナシステム



(a) 形状可変副鏡プロトタイプ



(b) 形状制御機構

Fig. 2 形状可変副鏡のプロトタイプとアクチュエータ

これまで、恒温槽を用いて形状可変副鏡のプロトタイプの

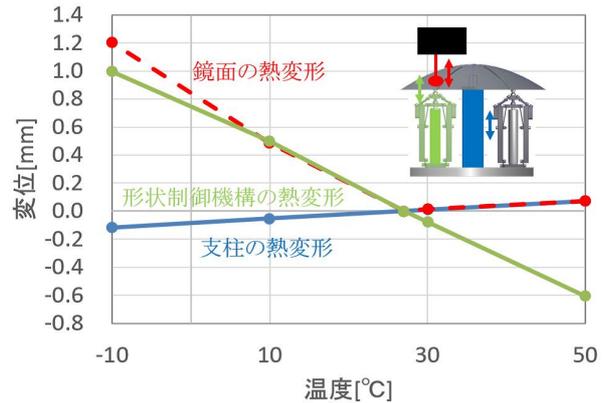


Fig. 3 形状可変副鏡の熱変形

熱変形計測実験がなされた [4]。結果の概要を Fig. 3 に示す。鏡面の熱変形は約 27 °C で傾向が遷移し、その遷移温度以上で鏡面の裏と形状制御機構が離れる。有限要素法 (FEM) 解析から、Fig. 3 のように形状制御機構の熱変形は遷移温度以下、支柱の熱変形は遷移温度以上で鏡面の熱変形と一致し、圧電アクチュエータの熱膨張係数 (CTE) を -5.0ppm/K と推定した。

本実験で明らかとなった本プロトタイプの問題として (i) 形状制御機構の熱変形が大きいこと、(ii) 使用材料の CTE のミスマッチが大きく形状制御機構が鏡面から離れること、(iii) ねじによる組み立て式の変位拡大機構は個体差が大きいこと、の 3 点があった。そこで、まず CTE の均一化・個体差の軽減を目的として Fig. 4 (a) のようにねじ留め多数であった変位拡大機構の一体成形を実施した [5]。本来、形状制御機構の熱変形は圧電アクチュエータと変位拡大機構の CTE のミスマッチにより生じるため、CTE のミスマッチを低減するために変位拡大機構の材料は CTE の小さいスーパーインバーなどを用いる必要がある。そのための初期試作として、まず物性値が既知のステンレスを用いて、一体成型技術の検証を行った。

$$\Delta z' = \frac{b+c \tan \beta + \tan \gamma}{c \tan \alpha + \tan \gamma} \Delta z \quad (1)$$

一体成型型変位拡大機構は、Fig. 4 (b) の各パラメータを用

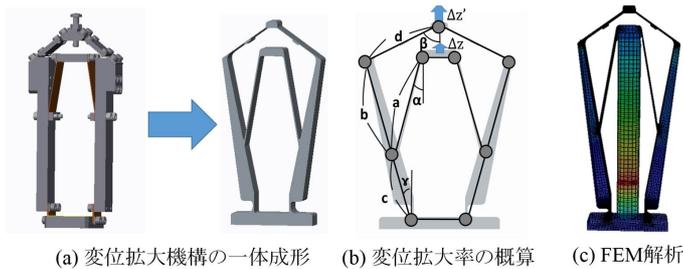


Fig. 4 変位拡大機構の一体成形

いて(1)式で変位拡大率を概算し、Fig. 4(c)のようにFEM解析で詳細なパラメータを決定し設計を行った。放電加工で一体成形した結果、変位拡大率はFEM解析値10.6倍に対して実験値9.23倍となり13%の誤差を含むが塑性変形なく変位拡大率10倍程度の変位拡大機構をステンレスの一体成形で製造できることが明らかになった。

しかし、圧電アクチュエータと変位拡大機構のCTEのミスマッチを低減するために一体成形型変位拡大機構をスーパーインバーなどのCTEの小さい金属で加工可能か検証する必要があり、それでも残留する圧電アクチュエータと変位拡大機構のCTEのミスマッチで熱変形が生じる。そこで本研究では(i)一体成形型変位拡大機構でCTEの小さい材料を用いることで圧電アクチュエータとのCTEのミスマッチを大幅に低減し、(ii)さらに残留する圧電アクチュエータと変位拡大機構のCTEのミスマッチを相殺する熱変形低減を目指した形状制御機構を提案し開発・評価することを目的とする。

本論文の構成は第2節で熱変形低減を目指した形状制御機構の試作・評価を行い、第3節で圧電アクチュエータの熱変形特性について実験・モデル化・FEM解析を行い、第4節で熱変形低減を目指した圧電アクチュエータ・形状制御機構の改良案を提案し、熱変形の推定を行う。

2. 熱変形低減を目指した形状制御機構の試作・評価

本節では熱変形低減を目指した形状制御機構の試作・評価を行う。熱変形低減を目指した形状制御機構をFig. 5に示す。(i)変位拡大機構をスーパーインバー(IC-LTX)で一体成形。(ii)熱膨張調整用金属で変位拡大機構と圧電アクチュエータのCTEのミスマッチを相殺。の2点を変更し、形状制御機構は熱膨張調整用金属挿入分、高さが高くなる。

2.1 スーパーインバー(IC-LTX)の一体成形 設計手法は既往の研究と同様に、(1)式で概算しFEM解析で詳細なパラメータを決定する。ステンレスで一体成形した際の変位拡大率において実験値がFEM解析値より13%小さいことを考慮し、変位拡大機構の設計を行う。実際に放電加工で一体成形した結果をFig. 6に示す。印加電圧150Vで圧電アクチュエータの変位が0.11mmなので実験値の変位

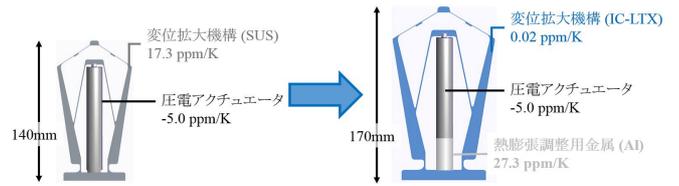


Fig. 5 熱変形低減を目指した形状制御機構

拡大率は10.9倍で、FEM解析値の11.5倍と比べて9.5%ほどの誤差を含むが、スーパーインバー(IC-LTX)でも塑性変形なく変位拡大率10倍程度の変位拡大機構を一体成形で製造できることが明らかになった。また、1周目の戻り値以降2,3周目では印加電圧が0Vでも0.20mmほどヒステリシスが残る。しかしこのヒステリシスは長時間経つと消えることから圧電アクチュエータの印加電圧を0Vにしても電荷が残留し、圧電アクチュエータの意図しない変位を変位拡大機構が拡大したものだと考えられる。

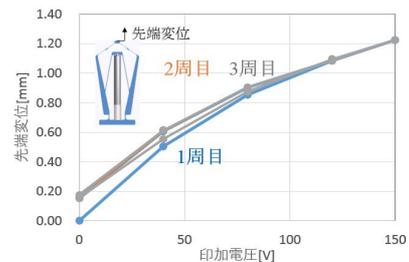


Fig. 6 一体成形型変位拡大機構(IC-LTX)の変位拡大率

2.2 熱膨張調整用金属を用いたCTEミスマッチの相殺 熱膨張調整用金属の材料はCTEが大きいアルミニウムを選定し、高さをFEM解析で設計する。その際、圧電アクチュエータのCTEはFig. 3の形状制御機構の熱変形から推定できる-5.0ppm/Kとした。Fig. 7に熱変形の実験値・FEM解析値を示す。熱変形しない目標値に対して実験値がFEM解析値より6倍大きく、FEM解析値は実験値と大きく異なった。そこで熱膨張調整用金属をアルミニウムからスーパーインバー(IC-LTX)に変更した実験結果をFig. 8に示す。熱膨張調整用金属がスーパーインバー(IC-LTX)だとアルミニウムに比べて熱変形が66%に減少し、熱膨張調整用金属により熱変形低減できることを確認できた。Fig. 7のFEM解析値が実験値と異なる主な原因はInagaki [4]の圧電アクチュエータのCTE推定値-5.0ppm/Kが適正でないと考えた。

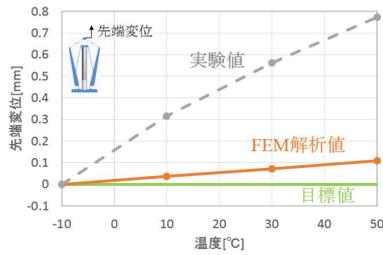


Fig. 7 実験値・FEM 解析値の比較

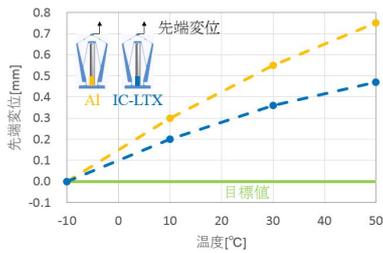


Fig. 8 熱膨張調整用金属材料ごとの熱変形

3. 積層型圧電アクチュエータの熱変形特性のモデル化

第2節で稲垣 [4] が設定した圧電アクチュエータの CTE の推定値が適正でない可能性を示唆した。よって本節では圧電アクチュエータの熱変形計測実験から熱変形特性を理解し、モデル化・FEM 解析から熱変形を推定し、実験値との比較からモデルの評価を行う。Fig. 9 (a) のように恒温層を用いて圧電アクチュエータの熱変形計測を行った。実験結果を Fig. 9 (b) に示す。圧電アクチュエータの熱変形は 25 °C で遷移し、遷移温度以下では CTE が 9.2ppm/K、遷移温度以上では 1.6ppm/K と遷移前後で 83% の差異があった。この実験から圧電アクチュエータの CTE の推定値 -5.0ppm/K は実際とは異なることを確認した。推定値が異なる主な原因は Fig. 3 の実験治具の熱変形のキャリブレーションが不適切だったことが考えられる。

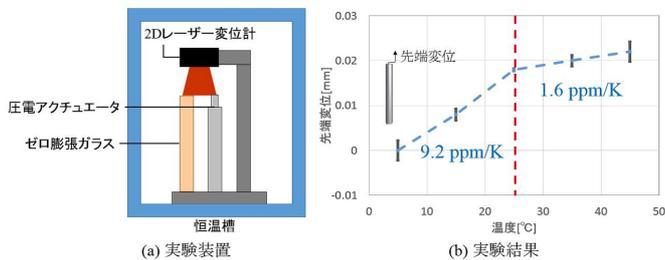


Fig. 9 圧電アクチュエータ熱変形計測実験

Fig. 9 (b) のように CTE が約 25 °C で遷移する原因を考える。圧電アクチュエータの内部構成は Fig. 10 (a) のように圧電素子・ステンレスの CTE の異なる材料で構成され、図に緑色で示した圧電素子が電圧を印加され伸縮し、凸型の

ふたが上下に動くことで変位が生じる。その際、皿ばねの圧縮力で圧電素子の破損を防いでいる。圧電素子の熱変形計測実験より圧電素子の CTE は -1.9ppm/K、ケースの CTE は 17.3ppm/K で CTE のミスマッチが大きい。そのことから、Fig. 10 (b) に示すように約 25 °C の遷移温度を境に皿ばねとケースが離れ、境界条件が変化し折れ曲がると考えられる。また、遷移温度以上の状態だと圧電素子に圧縮力がかからず破損の原因となり、使用には適さない。以上の推定に基づいて Fig. 11 (a) のように皿ばねの予圧縮・ギャップについて、FEM 解析を行った。実験値・FEM 解析値を Fig. 11 (b) に示す。実験値のエラーバーはレーザー変位計の直線性・温度特性に基づく。実験値と FEM 解析値の差とエラーバーを比較し、FEM 解析値は実験値と有意な範囲で一致することを確認した。以上のことから圧電アクチュエータの熱変形特性を理解し、より精緻に熱変形を推定できることが明らかになった。

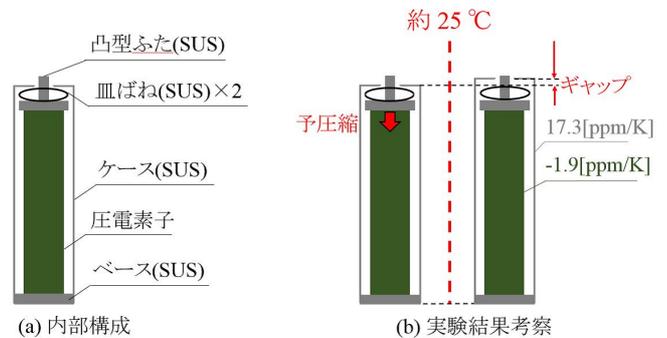


Fig. 10 実験結果考察

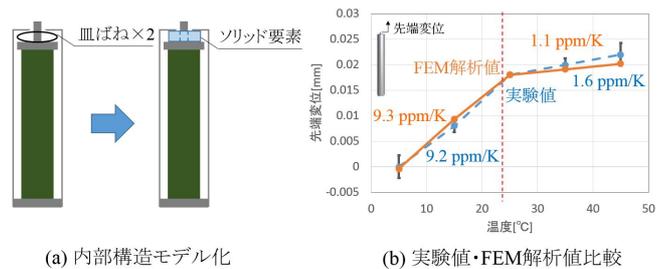


Fig. 11 圧電アクチュエータモデル化

4. 熱変形低減を目指した形状制御機構の改良

第3節で圧電アクチュエータの熱変形特性を理解し、熱変形の推定が可能となった。本節ではその特性を踏まえ、圧電アクチュエータ・形状制御機構の熱変形低減を目指した改良案を提案し、熱変形を推定する。はじめに、圧電アクチュエータの改良案を提案し、熱変形の推定を行う。圧電素子とケースの CTE のミスマッチが大きいことが問題であったので Fig. 12 (a) のようにステンレスであった構成要素を

5. 結 論

スーパーインバー (IC-LTX) に改良して CTE のミスマッチを低減する。圧電アクチュエータとその改良案の FEM 解析値を Fig. 12 (b) に示す。CTE が 9.3ppm/K から -1.1ppm/K と大きく低減され、また状態遷移温度が 25℃から 130℃になることを確認した。

次に、適した CTE の熱膨張調整用金属を選定し、形状制御機構の熱変形を推定する。圧電アクチュエータ改良案の CTE は -1.1ppm/K で、圧電アクチュエータ・熱膨張調整用金属の高さの比から熱膨張係数の CTE は 4.2ppm/K だと圧電アクチュエータと変位拡大機構の CTE のミスマッチが相殺可能である。そこで、CTE が 4.2ppm/K に近いスーパーインバーの IC-364 (CTE=4.0ppm/K) を熱膨張調整用金属に選定する。その形状制御機構の改良案は Fig. 13 (a) のように (i) スーパーインバー (IC-LTX) の変位拡大機構、(ii) 圧電アクチュエータの改良案、(iii) スーパーインバー (IC-364) の熱膨張調整用金属、の 3 つで構成され、FEM 解析による熱変形の推定値を Fig. 13 (b) に示す。稲垣ら [4]- [5] の形状制御機構は 50℃で 0.7mm ほどだった熱変形が、改良案では 0.05mm であり熱変形が 7% と大きく低減することを確認した。

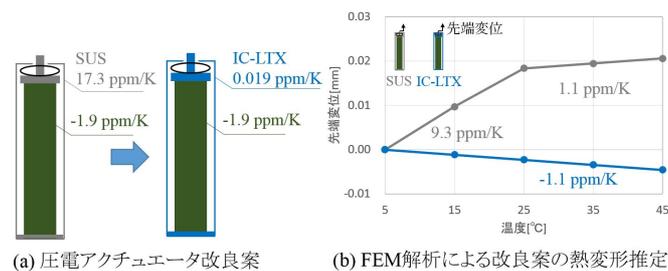


Fig. 12 圧電アクチュエータ改良案と熱変形推定

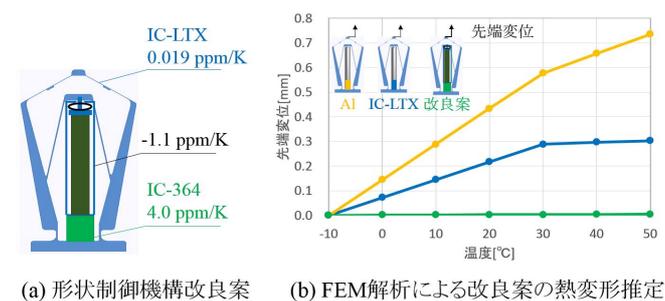


Fig. 13 形状制御機構改良案と熱変形推定

本研究では、熱変形低減を目指した形状制御機構を提案・試作・評価を行い、新たに圧電アクチュエータの CTE の推定値が異なっていた問題を明らかにし、CTE を正しく推定できる FEM 解析モデルを製作した。また、熱変形低減を目指した圧電アクチュエータ・形状制御機構の改良案を提案し、熱変形の推定を行った。本研究では以下の 3 点が明らかになった。

1. スーパーインバー材 (IC-LTX) により変位拡大率 10 倍程度の変位拡大機構が一体成形可能
 2. 熱膨張調整用金属により熱変形低減が可能
 3. 積層型圧電アクチュエータの熱変形の推定が可能
- 今後は熱変形低減を目指した形状制御機構改良案の試作・評価を行う。

謝 辞

本研究は ISAS/JAXA 戦略的開発研究費「大型高精度工学架台に関する研究」の支援のもと実施されました。また、助言下さった石村康生先生 (ISAS)、小木曾望先生 (大府立大) を始めとする同研究グループの皆様へ感謝します。

参考文献

- [1] Bradford, Samuel and Agnes, Gregory and Ohara, Catherine and Shi, Fang and Peterson, Lee and Hoffman, Samuel and Wilkie, Keats, "Piezocomposite actuator arrays for correcting and controlling wavefront error in reflectors", 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA, 2012
- [2] Datashvili, Leri S and Baier, Horst and Wei, Bin and Endler, Stephan and Schreider, Ludovic, "Design of a morphing skin using flexible fiber composites for space-reconfigurable reflectors", 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2013
- [3] 田中宏明, 坂本啓, 石村康生, "高精度形状可変鏡の初期実験モデルの開発", 宇宙科学技術連合講演会講演集, 2013.
- [4] 稲垣章弥, "形状可変宇宙アンテナ構造の温度依存性に関する研究", 東京工業大学, 2014.
- [5] 後藤宏太, "形状可変宇宙アンテナ構造の変位拡大機構に関する研究", 東京工業大学, 2015.