日陰時における宇宙用大型展開アンテナの熱変形補正に関する数値解析的検証
(第2報, 内力制御による熱変形補正手法の検討)庄司 香織^{*1}, 臼井 基文^{*2}, 磯部 大吾郎^{*3}Numerical investigations on thermal deformation of large deployable reflector in space
during earth eclipse
(2nd report, investigations to suppress thermal deformation by internal force control)Kaori SHOJI^{*1}, Motofumi USUI^{*2} and Daigoro ISOBE^{*3}^{*1} Graduate school, University of Tsukuba

1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8573, Japan

^{*2} Japan Aerospace Exploration Agency

7-44-1 Jindaiji Higashi-machi, Chofu-shi, Tokyo 182-8522, Japan

^{*3} University of Tsukuba

1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8573, Japan

Received 8 December 2015

Abstract

Space structures encounter various severe environments in space. One of these environments is severe thermal condition where the difference of temperature during day-time and night-time is about 200 degrees Celsius. During this eclipse time, the midpoint of the large deployable reflector (LDR) mounted on the Engineering Test Satellite -VIII (ETS-VIII) was confirmed to deform by approximately 5 mm, which led to a 65 km transition of the footprint of communication beam on the surface of the earth. This phenomenon was assumed to be caused by thermal deformation of the LDR. It was not a critical issue for the ETS-VIII because the communication beam from the LDR tended to spread in the wide range. However, highly accurate pinpoint communication beams are expected to be required in the future, and this transition of the beams may affect the performance of such satellites. Therefore, in this study, a means to suppress the thermal deformation is proposed and demonstrated by focusing on the internal force generated at the springs used to deploy the antenna. According to the numerical results obtained from finite element analyses, the thermal deformations at all apices that support the reflectors were suppressed at a high correction rate by adjusting the coefficients of thermal expansion in the structural members and by controlling spring forces differently in four areas depending on the distances from the constraint point. These results indicate that the transition of the communication beam on the surface of the earth can be decreased to a range of 5 to 10 km.

Key words : ETS-VIII, Large deployable reflector, Space structure, Thermal deformation, Finite element analysis

1. 緒 言

宇宙空間で使用される宇宙機は、厳しい環境変化に耐えながらミッションを遂行しなければならない。この環境変化の一例として、太陽からの輻射熱が宇宙機に当たる日照時と、宇宙機が地球などの惑星の陰に入り太陽光が当たらない日陰時での温度変化が著しいことが挙げられる。2006年に打ち上げられた技術試験衛星Ⅷ型(ETS-VIII: Engineering Test Satellite-VIII)でも、衛星が地球の陰に入った際に、搭載されている大型展開アンテナの温度が約+50℃から-150℃まで-200℃近く推移したことが観測されている。さらに、この温度推移とほぼ一致するタイミングで、大型展開アンテナから送信された電波の受信強度に推移がみられ(臼井他, 2011)、通信ビームの照射位置が約60~100[km]移動したという報告がなされている(藤野他, 2008)。この現象は、アンテナの熱変形が要因であると考えられており(佐藤他, 2010)、これは大型展開アンテナの中心部に約5[mm]の熱変形が発

No.15-00637 [DOI:10.1299/transjsme.15-00637], J-STAGE Advance Publication date : 5 April, 2016

^{*1} 正員, 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

^{*2} 正員, 宇宙航空研究開発機構 (〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1)

^{*3} 正員, 筑波大学

E-mail of corresponding author: s1530200@u.tsukuba.ac.jp

生することに相当する（臼井他，2011）．ETS-VIIIの場合は，ビーム形状が広域であったため通信実験を行う上ではまったく問題がなかった．しかし将来の通信衛星には，大容量ピンポイントの安定した通信システムが期待されている．そのため，温度変化に伴う熱変形を要因とする通信ビームの指向方向のズレを補償できるような対策を施しておく必要がある．そこで本研究では，打ち上げ後にも能動的に大型展開アンテナの形状変形ができるようなシステムについて数値的に検討し，その熱変形を最小限の設計変更でかつ高い補正率で補正する手法を提案することを目的とした．第1報（庄司他，2015）では，大型展開アンテナを形成するモジュールの1つを数値モデル化して熱変形解析を実施し，変位の発生メカニズムを明らかにした．また，アンテナ展開用の圧縮バネの残留バネ力を変化させたところ，モジュール中央部の補正に効果があることが分かった．さらに，14モジュールの解析モデルで熱変形補正を試みない場合の変形挙動を再現し，実際のビームの移動現象を説明できる結果を得た．続く本報では，14モジュールの解析モデルで熱変形補正解析を行い，複数の手法を組み合わせることでアンテナ全体の熱変形を補正した結果について述べる．熱変形解析は，順応型 Shifted Integration 法(ASI 法)（都井，磯部 1992）（磯部，森下 1998）による解析コードに熱応力を導入したものを用いて実施する．

2. 大型展開アンテナの概要

ETS-VIIIの軌道上外観図を図1に，1モジュールの概観を図2に示す．ETS-VIIIには，世界最大級の大きさを持つ

Fig. 1 General sketch of ETS-VIII (C) JAXA (Shoji et al., 2015)

Fig. 2 Single module for LDR (C) JAXA (Shoji et al., 2015)

Fig. 3 Structural drawing of deployable mechanism (C) JAXA (Shoji et al., 2015)

2つの大型展開アンテナが搭載されている。ETS-VIIIの大型展開アンテナは、折り畳み式の六角形1モジュールを14個連結させたモジュール連結構造である。このようなモジュール連結構造には、①1つのモジュールの評価試験および解析結果からアンテナ全体の特性を把握できる、②連結するモジュールを増やすことでさらにアンテナ口径を拡張できる将来性がある、という長所がある（庄司他，2015）。1モジュールの基本構成の内、部材軸力により内力を保持している展開トラス構造が大型展開アンテナの主構造であり（目黒，1999）、熱変形が生じた際にアンテナ形状に与える影響が最も大きいと考え、今回の解析では、この展開トラス構造を数値モデル化し、熱変形補正解析を実施する。

図3に展開機構の概要を示す。全ての部材に図に示す名称がつけられている。中央縦部材（Center axis member）にアンテナ展開用の圧縮バネがあり、それがスライドして機構を押し上げることでゆっくりとアンテナが展開する。展開後の残留バネ力は受け骨部材を介して斜部材（Diagonal member）に伝達され、斜部材に発生する軸力は6.7 [N]（圧縮）と計算される。

3. 熱変形に関する部材特性

3・1 熱ひずみ

本研究では、全ての要素に次式に示す熱ひずみを加えることにより熱変形を考慮した。

$$\Delta \varepsilon_T = \alpha \Delta T \quad (1)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon_T$ 、 ΔT および α はそれぞれ熱ひずみ増分、温度増分、線膨張係数である。また、機械的ひずみと熱ひずみの関係を次式に示す。

$$\varepsilon_m = \varepsilon - \varepsilon_T \quad (2)$$

ここで、 ε_m および ε はそれぞれ機械的ひずみ、全ひずみである。

3・2 合成線膨張係数

大型展開アンテナの鏡面を支持している各モジュールの骨組みは、炭素繊維強化プラスチック（CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastics）のチューブおよびチタン合金の接合部品（ヒンジ）で構成されている。そこで、解析に用いる線膨張係数の値は、部材長に対するCFRPの長さの割合にCFRPの線膨張係数をかけたものと、部材長に対するチタン合金の接合部品の長さの割合にチタン合金の線膨張係数をかけたものとを足し合わせた合成線膨張係数の値を用いる。合成線膨張係数の算出式を次式に示す。

Table 1 Dimensions and material properties of constituent members

	Material	CFRP laminate (degree)	Dimensions (mm)	CTE of CFRP ($10^{-6}/K$)	Combined CTE ($10^{-6}/K$)	Elastic modulus of CFRP (MPa)
Upper radial member	CFRP	(0/15/90/-15/0)	22×0.4×2305	- 1.07	- 0.182	248.5
Lower radial member	CFRP	(0/15/90/-15/0)	20×0.4×2328	- 1.07	0.312	248.5
Diagonal member	CFRP	(0/15/90/-15/0)	20×0.4×2308	- 0.33	0.948	204.4
Center axis member	CFRP	(0,90)/(±45)/(0,90) /(±45)/(0,90)	20×1×573	2.97	3.490	48.9
Longitudinal member	CFRP	(0/15/90/-15/0/0)	20×0.48×554	- 1.11	0.277	262.3
Joint member	Titanium alloy	-	-	-	8.800	-

$$\alpha_c = \frac{l_{\text{CFRP}}}{L} \times \alpha_{\text{CFRP}} + \frac{l_{\text{Titanium}}}{L} \times \alpha_{\text{Titanium}} \quad (3)$$

ここで、 L は部材長、 l_{CFRP} 、 l_{Titanium} はそれぞれ CFRP 部分の長さおよびチタン合金接合部の長さ、 α_{CFRP} 、 α_{Titanium} はそれぞれ CFRP の線膨張係数およびチタン合金の線膨張係数である。

表 1 に各部材の物性値を示す。大型展開アンテナの骨組みは、部材ごとに異なる合成線膨張係数の値をもつ。これは、CFRP が様々な配向角をもつこと、および、部材全長に対するチタン合金接合部の長さの比率が異なるためである。また、鏡面横部材 (Upper radial member) は合成線膨張係数が負の値を示すことから温度が上昇すると収縮するが、それ以外の部材は温度上昇により膨張する。このことから、温度変化が生じると、大型展開アンテナの骨組みは複雑な挙動を示すことが予想される。

4. 解析モデル

4・1 大型展開アンテナのモデル化

大型展開アンテナは、六角形のモジュールを 14 個組み合わせることで 1 つの鏡面を構成している。図 4 に、鏡面側からみた 14 モジュールの位置関係とモジュール間の結合の様子を示す。衛星本体から伸びるブームは、モジ

Fig. 4 Allocation sketch of the modules and structural connections of the model (upper view) (Shoji et al., 2015)

Fig. 5 14-module model for analysis (Shoji et al., 2015)

ジュール7およびモジュール8の周辺縦部材 (Longitudinal member) の上下点と完全拘束されている。モジュール間は長さ約 40 [mm] のチタン合金部材によりピン拘束されており、モジュール間で機械的な干渉の少ない機構となっている。14 モジュールの解析モデルを図 5 に示す。モデル化にあたり、本研究では考慮すべき外的要因が温度推移のみであり要素の変形も微小であることが考えられるため、微小・弾性変形領域における解析では 1 部材 1 要素で十分に精度の高い解が得られることが知られている (磯部, 加藤, 2007) (磯部, 山口, 2012), Bernoulli-Euler の仮定に基づく 3 次はり要素を用いた。

また図 6 に示すように、解析モデルの中に展開用圧縮バネ要素 (Spring element), 受け骨要素 (Stretcher element) からなるジャンプ傘機構 (Automatic open umbrella mechanism) を導入した。展開用圧縮バネのバネ定数は $k = 0.48$ [kgf/mm] であり、展開後は 233 [N] のバネ力が残る設計となっている。展開後のバネの長さは約 70 [mm], 斜部材に発生する設計軸力は 6.7 [N] (圧縮) である (臼井他, 2011)。これらの条件を満たす軸剛性をもつはり要素により展開用圧縮バネをモデル化した。斜部材は 4 要素分割とし、両端に長さ 10 [mm] のトラス要素を 1 つずつ配置し、残り 2 要素をラーメン要素とする。このようにモデル化することで、4 要素で 1 本のトラス部材を表現している。中央縦部材は、1 部材 2 要素のラーメンとし、中央節点にバネ要素の下側節点を接続させている。バネ要素は、下側節点のみを中央縦部材と共有するラーメン要素である。上側節点は受け骨部材を表現する要素に接続されている。それ以外はすべて 1 部材 1 要素のトラス要素である。

要素を結合しているチタン合金接合部については、微小長さのため剛性は考慮せず、熱変形効果のみを CFRP チューブとの合成線膨張係数として数値的に加味している。ETS-VIII の大型展開アンテナには、アンテナの展開を制御するため、制動ワイヤを駆動部のプーリに巻き取ることでジャンプ傘機構を上下にスライドさせる展開制御機構 (Reflector deployment controller) がある。制動ワイヤを巻き取ると、直ちにジャンプ傘機構が下方に移動する。展開後の残留バネ力は受け骨要素を介して斜部材に伝達されるため、ジャンプ傘機構が下方に移動すると斜部材に伝達される圧縮力が変化する。本稿では、この機能を利用して展開用圧縮バネの残留バネ力の値を調整した解析結果を示す。また、ここでは簡単のためにジャンプ傘機構の下端を中央縦部材に固定し、展開用圧縮バネの残留バネ力を変化させることで、斜部材に伝達される力を調整することを試みた。なお本論文の解析は、展開終了後の大型展開アンテナを対象としているため、ねじやボルトの締め付け具合によってわずかに生じるひずみ (ミスアライメント) や、展開に必要な微小クリアランスの影響、製造誤差および組立誤差等は考慮に入れていない。

Fig. 6 Modeling of an automatic open umbrella mechanism (Shoji et al., 2015)

Fig. 7 Applied thermal history

Fig. 8 Applied spring force histories

4・2 解析条件

第1報（庄司他，2015）で実施した14モジュールの解析モデルを用いた熱変形解析をCase 0とし、本報ではさらに、以下に示すCase 1からCase 3の3パターンの熱変形補正解析を実施する．合成線膨張係数の値の変更による熱変形補正は、先行論文（臼井他，2011）でも実施されている．一方本稿では、バネ要素および受け骨要素から成るジャンプ傘機構を解析モデルに導入しており、部材に生じる内力の表現方法が先行論文（臼井他，2011）とは異なっている．したがって、本稿でも改めてCase 2として合成線膨張係数の調整を行っている．

- Case 0：熱変形の再現（第1報（庄司他，2015）で実施）
- Case 1：バネ力調整による熱変形補正
（全てのモジュールに対し一様な大きさでバネ力を調整する）
- Case 2：合成線膨張係数の値の変更による熱変形補正
- Case 3：合成線膨張係数の値の変更およびバネ力調整による熱変形補正
（Case 2の条件に加え、拘束点からの距離に応じてバネ力の調整幅を変更する）

解析で与える温度の時刻歴を図7に示す．解析に入力する温度推移については、急激な温度変化による解析モデルの不安定状態を緩和するために、まず0℃から1℃刻みで50℃まで温度を上昇させた．その後、温度一定の定常状態を保つ区間を設けてモデルの形状を安定させ、大型展開アンテナに取付けてある温度センサで計測された温度データ（以降、テレメトリ温度）を入力することとした．実際には、春と秋に数十日程度、衛星が地球の陰（日陰）に入る時間帯が発生する時期がある．そこで本解析では、温度変化を幾度か経験することを考慮し、同じテレメトリ温度履歴を2サイクル与え、1サイクル目と2サイクル目の間は温度一定の定常状態を十分長く設けることとした．静止衛星の速度は約3 [km/s]であり、地球の陰に入る際はアンテナ全体が等しく温度変化すると考えられるため、与える温度履歴は全モジュールとも同一とする．

解析で与えるバネ力の時刻歴を図8に示す．バネ力についても、温度の与え方と同様に1サイクル目のテレメトリ温度に入る前に線形的に1 [N] から233 [N] まで上げる．温度が50℃に達したときバネ力は233 [N] となる．その後、Case 1とCase 3では温度履歴に合わせてそれぞれ図8(b)および図8(c)に示すように残留バネ力の大きさを調整する．なお、展開開始時のバネ力は633 [N] だが、今回は展開後に発生する熱変形を対象としているため、解析で用いる残留バネ力の初期値は233 [N] としている．

また、テレメトリ温度が入力される前の定常状態では、モジュールの位置が自由に動けるようにモジュール間の接合要素の軸剛性を元の値の $1/10^{10}$ 倍と柔らかくした．このようにすることで、各モジュールに過剰な内力が発生しないようにした．バネ力および温度がそれぞれ233 [N]、50℃一定となり、各モジュールの内力推移が安定した後、図7に示す t_0 点（ $t=93.5$ [min]）でモジュール間の結合部材の軸剛性を元の値に戻した．その後、テレメトリ温度下での解析に入る．なお、解析では共役勾配法（CG法）により運動方程式を解いている．その際、時間増分を長め（32秒）と設定しているため、実質的には準静的解析となっている．

5. 解析結果

5・1 バネ力調整による熱変形補正 (Case 1)

バネ力を調整することによる熱変形補正の効果を調べるために、図 8 (b) に示すように、全てのモジュールに対し一様な大きさでバネ力調整を行った。バネ力は、最大 140 [N] 緩めている。図 9 および図 11 に、鏡面横部材の中央側頂点および周辺側頂点でのアンテナ鏡面に対する鉛直方向変位を示す。変位は、大型展開アンテナの形状が安定し、モジュール間の結合部材の軸剛性を元の値に戻した (図 7 中 t_0) 点を基準とし、鏡面側を正、背面側を負としている。図 9 より、鏡面横部材の中央側頂点の鏡面に対する鉛直方向変位への補正率は、拘束点から

Fig. 9 Displacements occurred in direction normal to the reflector surface on the center side of the upper radial member in Case 1. This result has shown that the thermal deformation could be suppressed by distributing different spring forces in four areas depending on the distances from the constraint point.

Fig. 10 Schematic diagram of the partitions used to distribute the different spring forces

の距離に応じて異なることが分かった. そこで Case 3 では, 図 10 に示すように拘束点からの距離に応じてエリア A からエリア D までの 4 つの領域に分け, その領域ごとにバネ力の調整幅を変えることで補正を検討する.

一方で図 11 より, 周辺側頂点の変位は Case 0 の結果 (庄司他, 2015) とほぼ変わらなかったことから, 熱変形に対する補正効果が極めて小さいことが分かった. バネ力調整の有無による変位発生メカニズムを図 12 に示す.

Fig. 11 Displacements occurred in a direction normal to the reflector surface on the peripheral side of the upper radial member in Case 1. As a result of controlling spring forces uniformly in all modules, only the center side of the upper radial member was suppressed successfully and there was no suppression effects at the peripheral side of the upper radial member.

Fig. 12 Schematic diagram of thermal deformation due to drop of temperature. Displacements are magnified by 50 times (10 times for the spring element). The deformation occurred due to the upper radial member, with a minus value of the combined coefficient of thermal expansion (CTE), expanded when the temperature decreased. Furthermore, the CTE of the diagonal member was three times larger than that of the lower radial member, which helped the member to shrink largely. Therefore, the deformation occurred in downward direction. Due to the spring force control, center side of upper radial member was lifted while peripheral sides remained deformed in downward direction since compression force generated at the diagonal member was reduced. Consequently, the thermal deformation was almost suppressed only at the center side of upper radial member. These results show the same tendency as that of 1 module model, and thus the advantage of module structure was confirmed.

図中の破線および実線は、図 7 に示す t_A 点、 t_B 点での変形状態の模式図を表している。バネ力調整による熱変形補正を行わない場合、14 モジュールにおいても 1 モジュールでの熱変形解析と同様に、温度低下に伴い鏡面横部材は膨張し背面横部材 (Lower radial member) が収縮する。また、背面横部材に対し斜部材の収縮が 3 倍大きいことから、温度が低下すると図 12 (a) に示すように鉛直方向に変位が発生する。一方、温度推移に合わせてバネ力調整を行うと、図 12 (b) に示すように斜部材に発生している内力が緩和されるため中央側頂点は持ち上がり補正されるが、斜部材が突っ張る力を弱めているため周辺側頂点はほとんど補正できない。このように 14 モジュールの解析モデルを用いた場合でも、1 モジュールの解析モデルを用いた熱変形解析と同様の変位発生メカニズムとなったことから、2 章で述べたモジュール連結構造の利点が改めて確認された。

5・2 合成線膨張係数の値の変更による熱変形補正 (Case 2)

鏡面横部材の周辺側頂点の変位補正を検討するために、Case 2 として合成線膨張係数の値の組み合わせを適正化したモデルで熱変形補正解析を実施した。Case 1 の結果から、鏡面横部材の合成線膨張係数だけが負の値であり、熱膨張・収縮によるアンテナの変形形態への影響が大きいことと、打上げ時の環境に耐えることを考慮し、最小限の設計変更を抑えることで熱変形補正を試みた。

合成線膨張係数を変更する部材を策定するにあたり、中央縦部材は、強度設計上、打上げ時の激しい振動や音圧に耐えるために最も重要な部材であり、チタン合金接合部品を短くすることによる影響を懸念し変更しないこととした。斜部材は、展開用バネによる内力が最も大きく、展開後のアンテナ形状を保つ上で重要な部材であると考え、Case 2 では変更しないこととした。また、斜部材のヒンジ位置や剛性が熱変形補正率に大きく影響を与えることが予想されるため、今後はヒンジ位置も含めて斜部材の設計を工夫する余地があるものと思われる。周辺縦部材は、合成線膨張係数の絶対値が最も小さく、周辺縦部材だけで大型展開アンテナの熱膨張・収縮を抑えるのは難しいと考え変更しないこととした。以上より、最小限の設計変更で最大限に熱変形補正を試みるため、鏡面横部材と背面横部材の合成線膨張係数の値の組み合わせに着目した。具体的には、チタン合金部品の長さを調整することで重量増加の恐れがある鏡面横部材の合成線膨張係数はそのままにし、複数回の解析を行い検証した上で、表 2 に示すように背面横部材の合成線膨張係数を $0.312 \times 10^{-6} [K]$ から $-0.005 \times 10^{-6} [K]$ へと変更した。CFRP の線膨張係数 (軸方向) は、配向角の関係により負の値であること、部材全体の合成線膨張係数はチタン合金接合部の長さによって変化することから、背面横部材の合成線膨張係数を負の値へ変更することは、チタン合金部品の長さを数%短くすることに相当する。これは、実際のハードウェアとしては問題となることはなく (臼井他, 2011)、重量増加の可能性が小さい提案となっている。なお本稿では、バネ要素および受け骨要素から成るジャンプ傘機構を解析モデルに導入しており、部材に生じる内力の表現方法が先行論文 (臼井他, 2011) とは異なっている。したがって、本稿でも改めて合成線膨張係数の調整を行っている。また、Case 2 ではバネ力の調整は行っていない。

大型展開アンテナの形状が安定し、モジュール間の結合部材の軸剛性を元の値に戻した (図 7 中 t_0) 点以降における、拘束点から最も遠く変位が大きいモジュール 13 での鏡面横部材の中央側頂点の変位の時刻歴を図 13 に、周辺側頂点の変位の時刻歴を図 14 に、それぞれ Case 0 と比較する形で示す。背面横部材の合成線膨張係数を負

Table 2 Optimal combination of the combined CTE

	Material	Combined CTE ($10^{-6}/K$)	
		Case 0	Case 2, Case 3
Upper radial member	CFRP	-0.182	-0.182
Lower radial member	CFRP	0.312	-0.005
Diagonal member	CFRP	0.948	0.948
Centre axis member	CFRP	3.490	3.490
Longitudinal member	CFRP	0.277	0.277
Joint member	Titanium alloy	8.800	8.800

Fig. 13 Suppression effects at the center side of the upper radial member. We attempted to suppress the thermal deformation that occurred not only in the center side but also in the peripheral sides of the upper radial member by adjusting the combined CTE of the structural members in Case 2. The center side of the upper radial member was suppressed successfully.

Fig. 14 Suppression effects at the peripheral side of the upper radial member. The thermal deformation that occurred in the peripheral sides of upper radial member cannot be suppressed sufficiently by controlling spring forces alone. Therefore, we attempted to suppress the thermal deformation that occurred in the peripheral sides of the upper radial member by adjusting the combined CTE of the structural members in Case 2. This method resulted in some suppression effects at the peripheral side of the upper radial member.

の値に変更したことにより、温度低下時に収縮しようとする斜部材に対して背面横部材が膨張するようになり、変位発生メカニズムが変化した。その結果、各モジュールの鏡面に対する鉛直方向変位が小さくなり、鏡面横部材の中央側頂点のみならず、鏡面横部材の周辺側頂点についても Case 1 では見られなかった一定量の補正効果が確認された。

5・3 合成線膨張係数の値の変更およびバネ力調整による熱変形補正 (Case 3)

Case 1とCase 2の解析結果を踏まえ、Case 2よりも熱変形補正率を高めるために、Case 3として合成線膨張係数の値を適正化した上でさらにバネ力調整による補正を試みる解析を実施した。合成線膨張係数の値は、Case 2で最も良い補正率となったときの組み合わせをCase 3でも用いた。与えるバネ力は、拘束点からの距離に応じて図10に示す4つの領域に分け、複数回の解析を行った上で図8(c)に示すようにエリア毎のバネ力の調整幅を決めた。4章で述べたように展開後の残留バネ力は233 [N] であり、そのバネ力をエリアAで最大115 [N]、エリアBで最大135 [N]、エリアCで最大155 [N]、拘束点から最も遠いエリアD では最大175 [N] 緩和している。

図15および図16に、鏡面横部材の中央側頂点および周辺側頂点でのアンテナ鏡面に対する鉛直方向変位を示す。また、表3に鏡面横部材の中央側頂点の最大変位量およびモジュール毎の周辺側頂点の最大変位量の平均を示す。まず表3の結果で、対称の位置にあるモジュールにおいて面外変位に差が生じている。これは、4.2節で述べたように、テレメトリ温度が入力される前の定常状態において、各モジュールの内力推移が安定するまでに対称に配置したモジュールの節点がわずかに移動していることが要因である。

Fig. 15 Displacements occurred in direction normal to the reflector surface on the center side of the upper radial member in Case 3. We aimed to suppress these displacements more effectively in Case 3 by adjusting the combined CTE of the structural members and by then controlling spring forces differently in four areas. As a result, the thermal deformations are almost suppressed at the center side of the upper radial member.

Fig. 16 Displacements occurred in a direction normal to the reflector surface on the peripheral side of the upper radial member in Case 3. The thermal deformations are almost suppressed not only at the center side of the upper radial member but also at the peripheral sides.

Table 3 Maximum displacements toward rear side of the reflector obtained for each module in each case. The displacements in Case 3 were drastically reduced in all areas compared with the original case (Case 0). Particularly, the average maximum displacements were decreased from approximately 5 mm (in Case 0) to 0.5 mm (in Case 3) at modules 1 and 3, which located at the center of the LDR, where the electric field strength became the highest. These results indicate that the transition of the communication beam on the surface of the earth can be decreased to a range of 5 to 10 km.

Area	Module No.	Evaluation point	Case 0 [mm]	Case 1 [mm]	Case 2 [mm]	Case 3 [mm]
A	8	Center side	2.4	0.6	2.4	0.6
		Peripheral side*	0.8	1.1	0.2	0.3
	2	Center side	3.8	1.4	2.7	0.3
		Peripheral side*	2.2	1.8	0.6	0.2
	7	Center side	2.4	0.7	2.4	0.7
		Peripheral side*	0.8	1.2	0.2	0.4
B	9	Center side	5.0	3.0	3.0	0.4
		Peripheral side*	3.2	3.2	0.9	0.8
	3	Center side	7.7	4.9	3.8	0.4
		Peripheral side*	6.2	5.3	1.9	0.9
	1	Center side	7.5	4.7	3.7	0.1
		Peripheral side*	6.1	5.2	1.7	0.8
	6	Center side	4.7	2.9	2.8	0.3
		Peripheral side*	3.1	3.1	0.6	0.7
C	10	Center side	10.0	7.3	4.5	0.9
		Peripheral side*	7.4	7.5	2.6	1.5
	11	Center side	13.8	10.8	5.7	1.8
		Peripheral side*	10.6	10.9	3.9	2.3
	4	Center side	12.6	9.3	5.2	0.8
		Peripheral side*	11.2	9.7	3.4	1.7
	14	Center side	13.4	10.5	5.3	1.4
		Peripheral side*	10.3	10.4	3.5	2.1
	5	Center side	9.3	7.0	3.9	0.6
		Peripheral side*	7.9	7.3	1.9	1.3
D	12	Center side	19.6	15.9	7.4	2.4
		Peripheral side*	15.5	15.9	5.7	3.2
	13	Center side	19.5	15.8	7.2	2.2
		Peripheral side*	15.3	15.8	5.5	3.0

*: Displacements on the peripheral side are calculated from the average of all apexes on each module.

図 15 および表 3 より、鏡面横部材の中央側頂点の補正率は Case 2 よりさらに向上していることが分かる。また、図 16 および表 3 より、鏡面横部材の周辺側頂点においては、Case 3 が最も良いことが分かる。これは、背面横部材の合成線膨張係数を負の値に変更したことに加え、Case 3 で残留バネ力による斜部材の内力（圧縮力）を緩和したことから、斜部材に対する背面横部材の抵抗力がより効果的に発揮されたためと考えられる。このように 2 つの補正法を組み合わせる利点として、バネ力調整のみで熱変形を補正する場合 (Case 1) に比べて、より小さい調整幅で高い補正率を達成できることが挙げられる。最も電界強度の高いアンテナ中央部に関係するエリア B に着目すると、残留バネ力を最大 140[N] 調整した Case 1 で補正率が 50%程度だったのに対し、2 つの手法を組合せた Case 3 では、より小さいバネ力調整幅 (135[N]) で高い補正率 (90%程度) を達成している。以上より、合成線膨張係数の値を適正化した上で、拘束点からの距離に応じた 4 つの領域ごとにバネ力の調整幅を変える手法を組み合わせることで、アンテナ全体の熱変形を良好に補正できていることが確認できる。特に、電界強度が最も大きいアンテナ鏡面中央部に位置するモジュール 1 とモジュール 3 の最大変位量の平均が約 0.5 [mm] となることから、補正前は通信ビームの中心が約 60~100 [km] 移動していたところを、補正後は通信ビームの移動量を約 10 分の 1 の 5~10 [km] に抑えることができる見込みを得た。

6. 結 言

本稿では、宇宙用大型展開アンテナの熱変形を要因とする通信ビームの指向方向のズレを補正するために、展開用バネの残留バネ力を利用するなど内力制御による熱変形補正を数値的に検証した。合成線膨張係数の値を適正化した上で、拘束点からの距離に応じた 4 つの領域ごとにバネ力の調整幅を変える手法を組み合わせる熱変形補正を試み、以下の知見を得た。

- ・ 合成線膨張係数の組み合わせを適正化すると、鏡面横部材の中央側頂点の変位だけでなく、バネ力調整だけではほとんど補正できなかった周辺側頂点の変位も調整できる。
- ・ 拘束点からの距離に応じて 4 つの領域に分けて補正を検討できる。
- ・ 合成線膨張係数の値を適正化した上でさらにバネ力調整による補正を試みた結果、アンテナ鏡面を支持するすべての頂点を高い補正率で補正できた。
- ・ 補正前は通信ビームの中心が約 60~100 [km] 移動していたが、補正後は通信ビームの移動量を約 10 分の 1 の 5~10 [km] に抑えることができる見込みを得た。

本稿では、すでに ETS-VIII の大型展開アンテナに搭載されているジャンプ傘機構に着目し、残留バネ力を変化させることで、斜部材に伝達される力を制御することを試みた。熱変形補正解析を行ったところ、バネ力調整による熱変形補正を試みる場合、斜部材のヒンジ位置や剛性が最も補正率に影響を与える可能性が高く、斜部材の設計が重要になることが考えられる。今後は、より小さいバネ力調整幅で能動的に熱変形を補正できるような部材の設計方法を検討するなど、熱変形しにくい、または熱変形を補正しやすくなるような工夫を検討できる余地があるものと思われる。

文 献

- 藤野義之, 佐藤正樹, 織笠光明, 大型反射鏡展開アンテナを有する衛星の軌道上でのビーム変動, 電子情報通信学会信学技報 (2008), pp.15-18.
- 磯部大吾郎, 加藤昭博, フレキシブル・リンク系のモデルベースド・フィードフォワード制御, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.4 (2007), pp.625-631.
- 磯部大吾郎, 森下真臣, ASI 有限要素法による大規模宇宙骨組構造のデブリ衝突解析, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 64, No. 627(1998), pp. 2726-2733.
- 磯部大吾郎, 山口良規, ロボットアームの強度的危険性を回避する動作計画法, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78, No.793 (2012), pp.3239-3254.

- 目黒在, 技術試験衛星VIII型に搭載される大型展開アンテナ反射鏡面, 日本機械学会誌, Vol.102, No.965 (1999), p.241.
- 佐藤正樹, 藤野義之, 織笠光明, 軌道上における技術試験衛星 VIII 型 (ETS-VIII) 搭載大型展開アンテナのパターン特性測定 (研究速報, 特集 安心・安全な社会を支える衛星通信とその応用技術論文), 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J91-B, No.12 (2008), pp.1641-1643.
- 佐藤正樹, 藤野義之, 織笠光明, 高畑博樹, 臼井基文, 山佐靖彦, ETS-VIII 搭載大型アンテナの食時間帯におけるビーム変動, 電子情報通信学会総合大会, 通信講演論文集 1 (2009), p.337.
- 佐藤正樹, 織笠光明, 藤野義之, 川崎和義, 山本伸一, 三浦周, 平良真一, 軌道上における衛星搭載大型展開アンテナビームの指向方向の変動, 電子情報通信学会信学技報 (2010), pp.19-24.
- 庄司香織, 臼井基文, 磯部大吾郎, 日陰時における宇宙用大型展開アンテナの熱変形補正に関する数値解析的検証 (第 1 報, 熱変形補正の基礎的検討および熱変形再現解析), 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 830 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00351.
- 都井裕, 磯部大吾郎, 骨組構造の有限要素崩壊解析における順応型 Shifted Integration 法, 日本造船学会論文集, No. 171(1992), pp. 363-371.
- 臼井基文, 脇田和紀, 近藤健介, レティタイタン, 松井康将, 磯部大吾郎, 宇宙用大型展開アンテナの熱変形抑制手法について, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.77, No.777 (2011), pp.2107-2119.

References

- Fujino, Y., Satoh, M. and Orikasa, M., Beam variation of large-scale deployable antenna mounted on satellite in geostational orbit, IEICE Technical Report, Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (2008), pp.15-18 (in Japanese).
- Isobe, D. and Kato, A., Model-based feed-forward control of flexible link systems, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.25, No.4 (2007), pp.625-631 (in Japanese).
- Isobe, D. and H. Morishita, M., Debris impact analysis of large-scale space structures by using ASI-FEM, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Series A, Vol. 64, No. 627(1998), pp. 2726-2733 (in Japanese).
- Isobe, D. and Yamaguchi, Y., A motion planning scheme to avoid structural damage of robotic arms, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.78, No.793 (2012), pp.3239-3254 (in Japanese).
- Meguro, A., Large deployable antenna reflectors mounted on engineering test satellite VIII, Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.102, No.965 (1999), p.241 (in Japanese).
- Satoh, M., Fujino, Y. and Orikasa, T., Characterization of large-scale deployable antenna pattern equipped with engineering test satellite VIII on orbit, Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, IEICE Technical Report, Series B, Vol.J91-B, No.12 (2008), pp.1641-1643 (in Japanese).
- Satoh, M., Fujino, Y., Orikasa, T., Kohata, H., Usui, M. and Yamasa, Y., Beam direction shift of large-scale antenna on ETS-VIII during eclipse, Proceedings of the General Conference of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Series 1 (2009), p.337 (in Japanese).
- Satoh, M., Orikasa, T., Fujino, Y., Kawasaki, K., Yamamoto, S., Miura, A. and Taira, S., Beam direction variation of large-scale deployable reflector antenna on the satellite orbit, IEICE Technical Report, Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (2010), pp.19-24 (in Japanese).
- Shoji, K., Usui, M. and Isobe, D., Numerical investigations on thermal deformation of large deployable reflector in space during earth eclipse (1st report, fundamental investigations to suppress thermal deformation and thermal deformation analysis), Transactions of the JSME (in Japanese), Vol. 81, No. 830 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00351.
- Toi, Y. and Isobe, D., Adaptively shifted integration technique in the finite element collapse analysis of framed structures, Transactions of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.171 (1992), pp.363-371 (in Japanese).
- Usui, M., Wakita, K., Kondo, K., Thanh, L. T. T., Matsui, Y. and Isobe, D., Suppression of thermal deformation of the large deployable reflector, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.77, No.777 (2011), pp.2107-2119 (in Japanese).