

# 熱変形補正を重視した宇宙用大型展開アンテナの デザインに関する基礎的検討

A Basic Study on a Design for Space-Use Large Deployable Reflector  
Focused on Thermal Deformation Compensation

庄司香織<sup>1)</sup>, 磯部大吾郎<sup>2)</sup>, 臼井基文<sup>3)</sup>

Kaori Shoji, Daigoro Isobe and Motofumi Usui

1) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: s1530200@s.tsukuba.ac.jp)

2) 博(工) 筑波大学 教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

3) 博(工) 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, E-mail: usui.motohumi@jaxa.jp)

Space structures need to overcome various severe issues in space. One of these issues is to consider measures for severe thermal conditions. When the Engineering Test Satellite -VIII (ETS-VIII) entered the Earth's shadow, the temperature of the large deployable reflector (LDR) mounted on the ETS-VIII decreased rapidly for about 200 °C. During this eclipse time, a communication beam direction from the LDR was observed to change. The length of this transition was a range of 60- to 100-km on the surface of the earth. In this study, we carried out a basic study on a design for large space structure focused on thermal deformation compensation. We investigated the relation between the shape of a diagonal member after completion of an antenna deployment and the thermal deformation compensation.

**Key Words :** Space Structure, Large Deployable Reflector, ETS-VIII, Thermal Deformation

## 1. はじめに

宇宙構造物が抱える問題の一つに、著しい温度変化が挙げられる。特に宇宙構造物が大型になるほど、温度変化による部材の微小変形が大きな問題となる。図-1に示す技術試験衛星VIII型（以下ETS-VIII）において、衛星が地球の陰に入った際に、搭載している大型展開アンテナからの通信ビームが地球上で約60～100 [km] 移動した[1]。この現象は、大型展開アンテナの熱変形によると考えられている[2]。ETS-VIIIの場合は、ビームが広域な形状のためミッション遂行には問題はなかった。しかし、将来の通信衛星では、高い指向精度を追及していくことが想定される。そのため、衛星搭載用アンテナに生じる熱変形を制御・抑制する手法を考案する必要があるが、その知見は極めて少ない。そこで、先行研究[3,4]では、大型展開アンテナを構成する14モジュールのうちの1つを参考にして数値モデル化し、熱変形時の変位発生メカニズムを明らかにした。また、14モジュールの解析モデルを作成して、複数の手法を組み合わせた熱変形補正解析を行った。その結果、大型展開アンテナの熱変形が要因と考えられる通信ビームの地上移動距離を、熱変形補正前の10分の1に相当する5～10 [km] 程度に抑制できる見込みを得た。特に、大型展開アンテナの展開・収縮に寄与する制動ワイヤおよび圧縮バネ（図-2）を1要素で模擬し、アンテナの骨組がこの要素の両端から受ける力を変化させる、バネ力調整による熱変形補正を試みたところ、大型展開アンテナの構成部材の1つである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いこ

とが示唆された。効率的な熱変形補正を行うためには、斜部材の設計や、CFRP部材とチタン合金接合部の長さの比から算出される合成線膨張係数をどのように改良するかなど、熱変形しにくい、または熱変形を補正しやすくするような工夫を検討できる余地がある。本研究では、熱変形補正の観点に基づく宇宙用モジュール型展開アンテナの構造デザインの提案を目指し、設計内力、熱特性、動作機構の相互関係から、熱変形補正を重視した構造デザイン考案のための基礎的な検討を行うことを目的とす

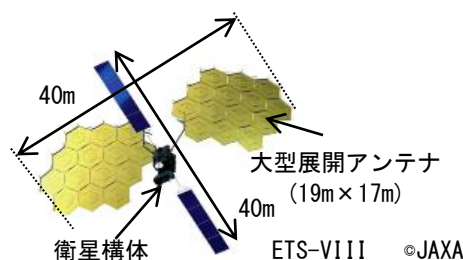


図-1 モジュール型宇宙構造物の一例

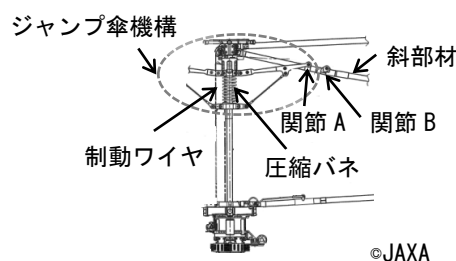


図-2 アンテナの展開機構

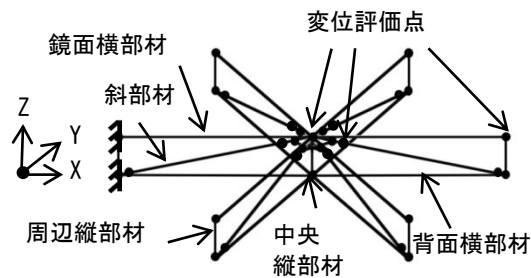


図-3 解析モデルと部材名

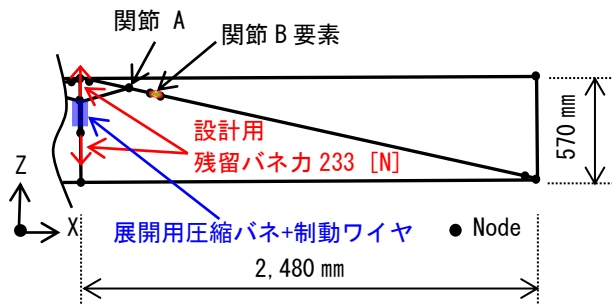


図-4 ジャンプ傘機構詳細図

る。本稿では、斜部材を先行研究[3,4]からさらに詳細にモデル化した1モジュールの解析モデルを作成し、設計内力が生じた展開完了時の動作機構と熱変形補正効果との関係を検証する。熱変形解析には、Bernoulli-Eulerはり要素を用いた弾性有限要素法を用いる。

## 2. 大型展開アンテナの概要と解析条件

大型展開アンテナの展開機構を図-2に示す。圧縮バネが上方へ動くときアンテナが展開し、その動きは、関節Aを介して主要部材に伝達される。骨組は、炭素繊維強化プラスチック（以下CFRP）のチューブとチタン合金接合部品（ヒンジ）で構成されている。大型展開アンテナの1モジュールを参考に、図-3に示す1モジュールの解析モデルを作成した。先行研究[3,4]と同様に、本稿の解析モデルでも、展開用圧縮バネと制動ワイヤを図-4に示すように1つの梁要素で表現した。上端は自由、下端は中央縦部材に拘束とすることでバネ上端の動きを模擬し、設計内力（斜部材で6.7 [N] 圧縮力）を斜部材に伝達させた。また、先行研究[3,4]では、関節Aと関節Bが極めて近い位置にあることから、2つで1つの関節と見なして、図-2中の関節Aの位置にモデル化していた。しかし本稿では、斜部材の形状に着目した動作機構の違いと熱変形補正効果との関係を検証したい。そのため、関節Aと関節Bを分け、新たに関節Bを表現する1要素を解析モデルに導入した。

解析に入力する温度推移については、大型展開アンテ

表-1 アンテナ構成部材の物性値

	材質	合成線膨張係数 ( $10^{-6}/K$ )
鏡面横部材	CFRP	-0.182
背面横部材	CFRP	0.312
斜部材	CFRP	0.948
中央縦部材	CFRP	3.490
周辺縦部材	CFRP	0.277
接合部材	チタン合金	8.800

ナで計測された温度データを2サイクル与えた。また、本解析では、部材の全長に対するCFRPおよびチタン合金接合部品の長さ割合から算出した合成線膨張係数の値を用いる。合成線膨張係数は、表-1に示すように部材毎に値が異なることから、複雑な熱変形挙動を示すことが予想される。

以上を踏まえ、図-5に示す3つの動作機構から展開後の斜部材位置と熱変形補正効果との関係を検証する。動作機構Aは、設計内力（斜部材で6.7 [N] 圧縮力）発生時の斜部材の角度 $\theta$ を183度とした。ETS-VIIIの形状に最も近い解析モデルである。動作機構Bおよび動作機構Cでは、角度 $\theta$ をそれぞれ180度、175度とした。

ETS-VIIIの現状設計では、関節Bは角度 $\theta$ が大きくなる方向には回転可能な関節となっており、展開不達の事態に備えてアンテナを収納できる機構となっている。しかし本稿では、3種類いずれの解析モデルも展開完了後は剛節として解析しており、ETS-VIIIにみられる収納動作機構を反映していない。この点は今後の課題であり、展開完了後の関節の取り扱いも含めて、熱変形を補正しやすい構造デザインを検討する必要がある。

本稿では、図-5に示す3つの動作機構に対し、下記に示す4つの解析を実施した。Case 1およびCase 3では、温度履歴に連動してバネ上端の位置をZ軸方向負の方向へ動かしている。Case 2では、複数回の解析を行い検証した上で、背面横部材の合成線膨張係数を、0.312 [ $10^{-6}/K$ ] から-0.204 [ $10^{-6}/K$ ] へと変更した。この値を、Case 3でも用いている。

- Case 0 : 熱変形の再現
- Case 1 : バネ位置調整による熱変形補正
- Case 2 : 合成線膨張係数 $\alpha_C$ の変更による熱変形補正
- Case 3 : Case 1 + Case 2

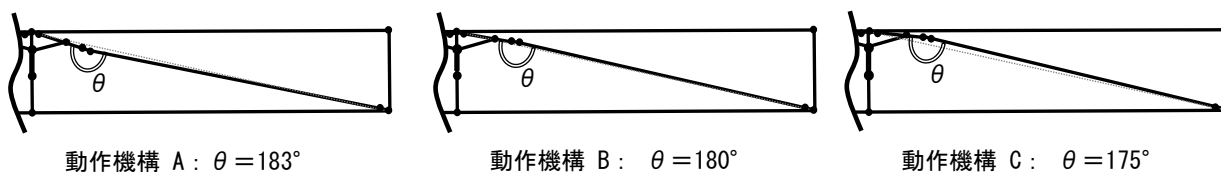


図-5 解析で用いる3種類の動作機構

なお、解析では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。

### 3. 結果と考察

動作機構A、動作機構Bおよび動作機構Cにおける中央頂点、周辺頂点、および関節BでのZ軸方向変位をそれぞれ図-6、図-7、図-8に示す。黒線はCase 0：補正なし、青線はCase 3：補正ありでの時刻歴である。また、変形の模式図を図-9に示す。

#### (1) 動作機構 A

熱変形を再現したCase 0では、図-6(a)および図-6(b)に示すように、温度が低下すると、鏡面が下に凸の形状となった。これは、表-1に示すように斜部材の合成線膨張係数が背面横部材よりも3倍大きいため、図-9(a)に示すように斜部材の収縮量が背面横部材よりも3倍大きいからである。また、中央・周辺ともに鉛直下向きに変位が生じた。これは、鏡面横部材は膨張し、それ以外の部材は収縮するためである。そこでCase 3では、背面横部材の合成線膨張係数を変更した後、温度履歴に合わせて時々刻々とバネ位置調整をする熱変形補正を実施した。その結果、周辺頂点は、背面横部材の合成線膨張係数を変更したことにより補正された。一方で、Case 2で合成線膨張係数を変更しても中央頂点への補正効果は極めて小さく、これに加えてCase 3でバネの位置を調整した結果、補正前よりも変位が大きくなり熱変形を補正できなかった。図-6(a)、図-6(c)および図-9(a)に示すように、バネの位置を下げると連動して関節Bおよび中央頂点がともに下方へ移動する。そのため、熱変形時に下方へ移動する中央頂点の動きを補正できなかったものと考えられる。これはCase 1でも同様の傾向であり、合成線膨張係数を調整するCase 2の影響ではないことも確認されている。

#### (2) 動作機構 B

熱変形を再現したCase 0では、動作機構Aと同様に、温度が低下すると鏡面が下に凸の形状となった。また、中央・周辺ともに鉛直下向きに変位が生じた。Case 3を実施した結果、周辺頂点は補正できたが、中央頂点への補正は極めて小さかった。図-7(a)、図-7(c)および図-9(a)に示すように、動作機構Bでも、動作機構Aと同様に関節Bと中央頂点は同じ方向に動作している。そのため、中央頂点が補正できなかったと考えられる。しかし、動作機構Aのように中央頂点の変位補正状況が悪化することはなかった。この結果より、バネ位置調整による熱変形補正効果を発揮しやすい形状があるものと予想される。

#### (3) 動作機構 C

動作機構Aおよび動作機構Bでの結果を踏まえて、動作機構Cでは、アンテナ展開完了時の斜部材が上に凸の形状となるように改良した。熱変形を再現したCase 0での熱変形形状は、動作機構Aおよび動作機構Bと同様、鏡面が下に凸の形状となり、また、中央・周辺ともに鉛直下向き

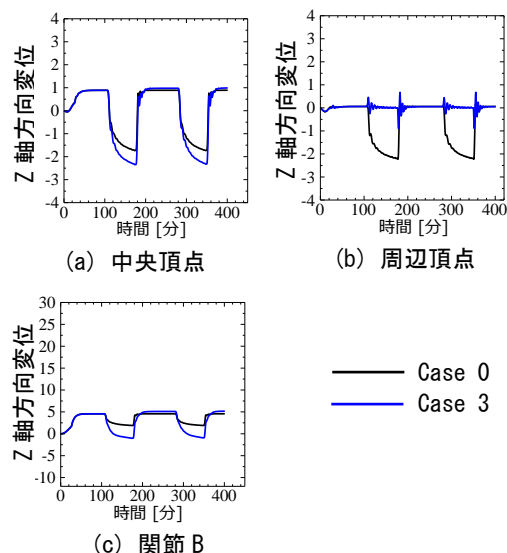


図-6 動作機構 A における熱変形補正の結果

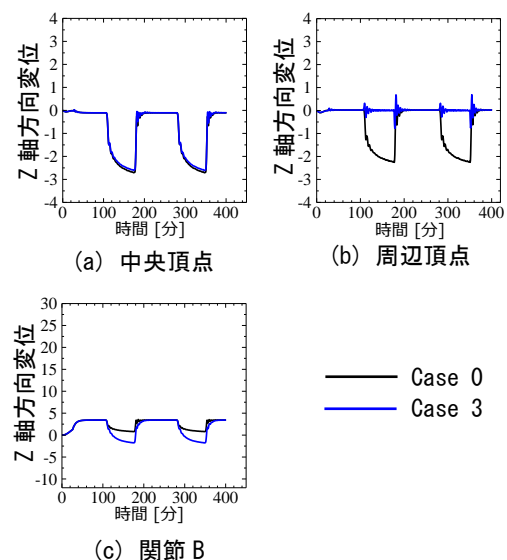


図-7 動作機構 B における熱変形補正の結果

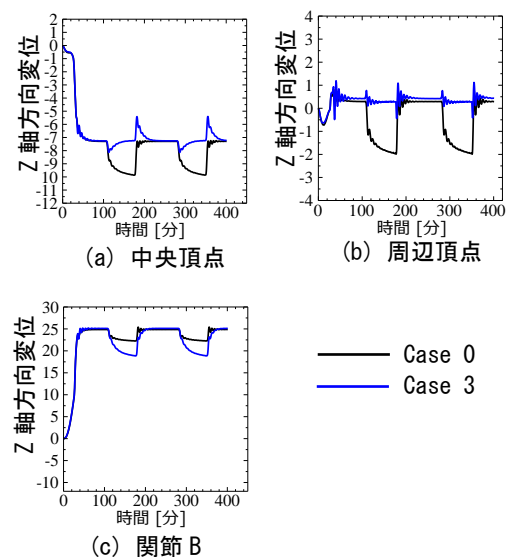


図-8 動作機構 C における熱変形補正の結果

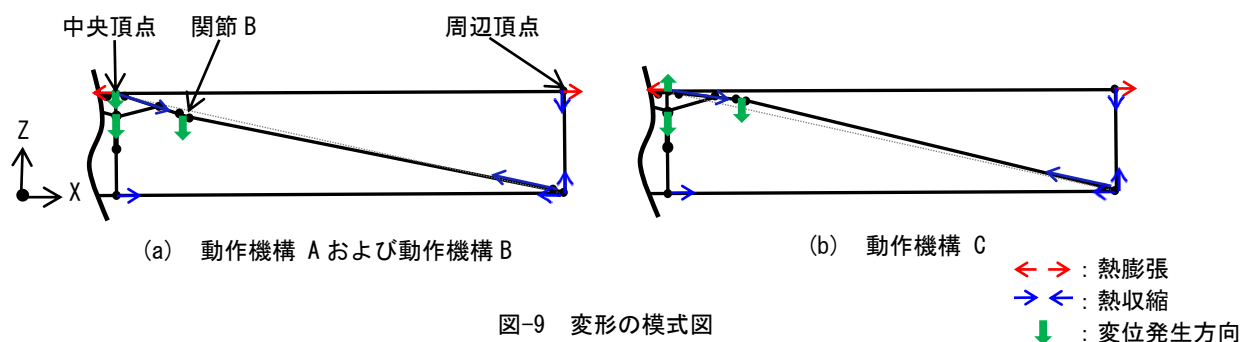


図-9 変形の模式図

に変位が生じた。Case 3を実施した結果、図-8(a)、図-8(c)に示すように、動作機構Cでは、関節Bと中央頂点は逆方向に動作しており、中央・周辺ともに熱変形が補正された。図-9(b)に示すように、動作機構Aおよび動作機構Bと同様に動作機構Cでも、パネの位置を下げると、これと連動して関節Bが下方へ移動する。しかし、動作機構Cでは、アンテナ展開完了時の斜部材が上に凸の形状であり、関節Bが下方へ移動すると、斜部材の投影距離が長くなる。そのため、中央頂点が持ち上げられ熱変形が補正されたものと考えられる。以上より、熱変形補正に優位な部材位置がある可能性があると言える。一方で、パネの位置を調整すると、温度低下による部材収縮とも相まって、斜部材に生じている圧縮力が大幅に緩和される。斜部材は、アンテナの形状を保持する上でも重要な部材であることを鑑みると、動作機構Cで行ったCase 3の熱変形補正手法が最善であるとは言い難い。今後は、関節Bの位置および合成線膨張係数を変更する部材の選定方法なども含めた構造デザインの提案を検討していく予定である。

#### 4. 結言

本稿では、宇宙用モジュール型展開アンテナに生じる熱変形を制御・抑制する手法を考案するために、展開完了時の部材位置が異なる3つの動作機構を数値モデル化し、熱変形解析および熱変形補正解析を実施した。アンテナの展開・収納に寄与する関節Bを、展開完了後は剛節として熱変形補正を試みた結果、熱変形補正に優位な部材位置が存在する可能性が示唆された。今後は、ETS-VIII

にみられる収納動作機構を反映した解析モデルでも同様の熱変形補正解析を実施するとともに、関節Bの位置や展開完了後の取り扱い、また、合成線膨張係数を変更する部材の選定方法なども含め、効率的な熱変形補正を可能とする構造デザインの提案を検討する必要がある。

#### 参考文献

- [1] 藤野 義之, 佐藤 正樹, 織笠 光明: 大型反射鏡面展開アンテナを有する衛星の軌道上でのビーム変動, TECHNICAL REPORT IEICE SPS2008-11, pp15-18, 2008.
- [2] 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, pp19-24, 2010.
- [3] 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, p. 15-00351, 2015.  
(<http://doi.org/10.1299/transjsme.15-00351>).
- [4] 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2報, 内力制御による熱変形補正手法の検討), 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 836, p. 15-00637, 2015.  
(<http://doi.org/10.1299/transjsme.15-00637>).