

複数の抑制方法を組み合わせることによる 大型宇宙構造物の熱変形補正効果

Effects on Thermal Deformation Compensation for Large Space Structure
by Combining Several Suppression Means

庄司香織¹⁾, 磯部大吾郎²⁾, 臼井基文³⁾

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)

As the sizes of space structure increase, the radio wave transmissions will become more susceptible to small structural deformations. In this study, the Large Deployable Reflector (LDR) mounted on the ETS-VIII communications satellite is used as an example in which radio wave transmissions to the Earth were affected by thermal transition during periods of Earth eclipse. Moreover, a means to suppress thermal deformation is proposed and demonstrated numerically by using a combination of fine tuning the angle of the diagonal member, adjusting combined CTE and force control. As a result, it was confirmed that the combination of several means is important for large and flexible space structure to suppress deformation.

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

1. はじめに

著しい温度推移に見舞われる過酷な宇宙環境の中で数々のミッションを遂行する宇宙構造物は、大型になるほど部材の微小変形が大きな問題となりうる。2006年に打ち上げられたETS-VIII (図-1) では、衛星が地球の影に入り太陽光が遮られた際に、搭載している大型展開アンテナの温度が約200度低下するとともに、地球への通信ビームに指向変動が観測された[1]。この現象は、大型展開アンテナを構成する部材に熱変形が生じたためと考えら

れている[2, 3, 4]。ETS-VIIIは、ビームの形状が広域であったためミッション遂行には問題がなかった。しかし、このような熱変形は通信用衛星のみならず、大型宇宙構造物全般において大きな課題となる。これを踏まえて、先行研究[5]では、1モジュールの解析モデルを用いて、展開完了時の部材角度と熱変形補正の関係を検証した。その結果、モジュール内に配置される斜部材 (図-2, 図-3) の角度がわずかに上に凸となって展開が完了する場合に、モジュールの中央頂点が補正できることがわかった。本

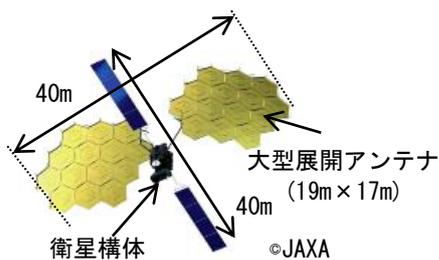


図-1 ETS-VIII

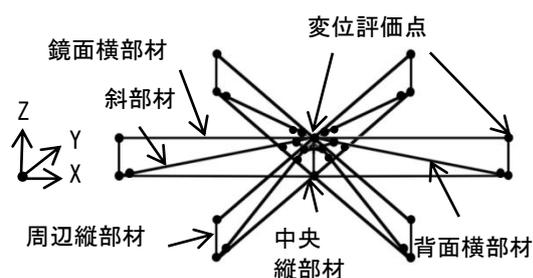


図-3 部材名と変位評価点

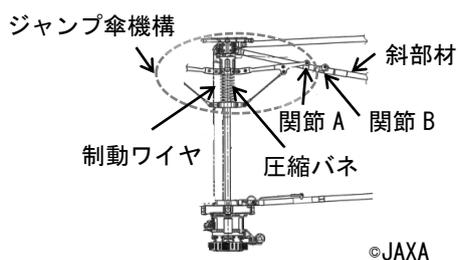


図-2 大型展開アンテナの展開機構

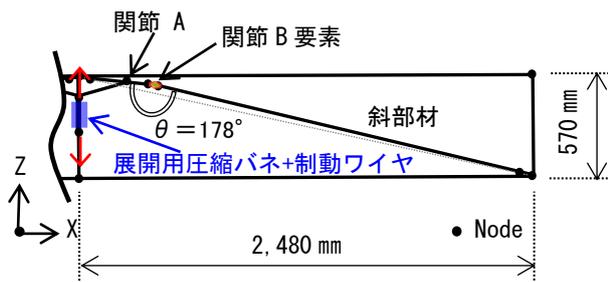


図-4 ジャンプ傘機構詳細図

表-1 大型展開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

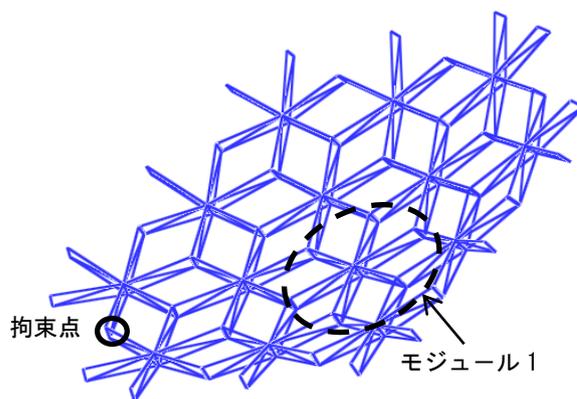


図-5 14モジュールの解析モデル

稿では、大型展開アンテナと同様の14モジュールに解析モデルを拡張し、①展開完了時の斜部材の角度を変更する、②合成線膨張係数の値を設計変更する、③展開用バネの位置を調整する、という3つの熱変形抑制手法を組み合わせた場合の熱変形補正効果を検証する。

2. 解析モデルと解析条件

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。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の比から算出した合成線膨張係数の値を用いる。ETS-VIIIにおける部材毎の合成線膨張係数を表-1に示す。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、ETS-VIIIで用いられた $0.312 [10^{-6}/K]$ から $-0.120 [10^{-6}/K]$ へと変更した。これにより、各モジュール周辺頂点への補正効果が期待できる[3, 4]。熱変形補正をする上で重要な斜部材は、14モジュールの解析モデルにおいても詳細にモデル化すべく、関節Aのほか関節Bを表現する1要素を導入した。関節Bは内力が伝達されるまではトラス、 θ が178度に達した展開完了後は剛節としている。それ以外の斜部材要素は全てラーメン要素とした。斜部材以外の部材は、すべてトラス要素である。

先行研究[5]と同様に、図-5に示す本稿の解析モデルでも、展開用圧縮バネとその制動ワイヤを図-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し、この要素の上下端を加力して上端節点を動かすことで、バネ上端の動きを模擬している。展開完了時の斜部材の角度 θ を178度（上に凸）とするという設計変更を施した解析モデルで熱変形解析を実施し、さらに合成線膨張係数の変更および展開用バネの位置を調整する手法を取り入れた熱変形補正解析を実施した。入力温度については、大型展開アンテナで計測された温度データを2サイクル与えた。

なお、解析では運動方程式を解いている。その際、時

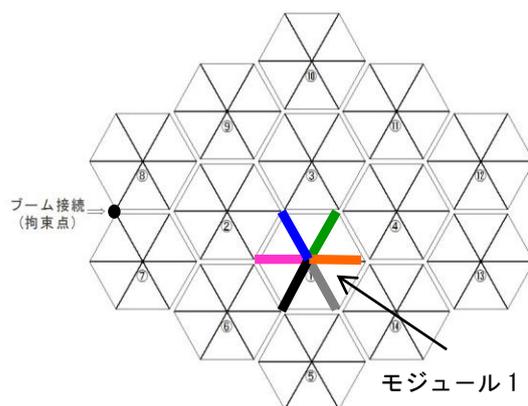


図-6 14モジュールの投影図

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。これらの解析には、Bernoulli-Eulerはり要素を用いた弾性有限要素法を用いる。

3. 解析結果

(1) 熱変形解析

図-6に14モジュールの投影図を、図-7にモジュール1における、熱変形時のモジュール中央変位および周辺変位を示す。中央部分での変位は平均8.4mm、周辺部分は平均6.4mmとなった。大型展開アンテナ全体では、その中央で約6.8mmの変位が発生していた。ETS-VIIIで生じていた熱変形量は、大型展開アンテナの中央部分で約5mm[3, 4]と推測されており、展開完了時の斜部材の角度を変更するのみでは、ETS-VIIIよりも通信ビームの変動量が悪化することが予想される。

(2) 熱変形補正解析

1モジュールの解析結果[5]において、斜部材の角度 θ が180度以上の場合、補正前よりも中央変位が大きくなり熱変形を補正できない、つまり、現況のETS-VIIIと同じ動作機構ではモジュールの中央変位を補正できないこと、また、斜部材の角度 θ が180度より小さい場合は、バネの位置調整によって中央変位が補正可能となることを、動作機構のメカニズムとともに示唆した。この1モジュールでの知見を踏まえて、14モジュールで解析を行った際の、

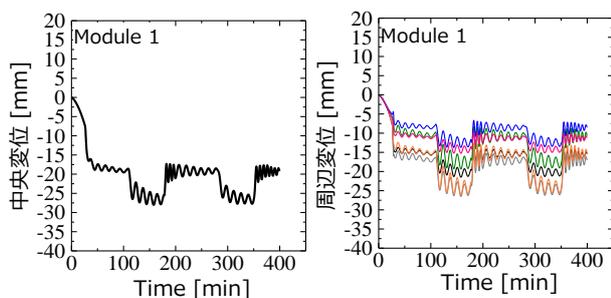


図-7 Z軸方向変位（熱変形解析）

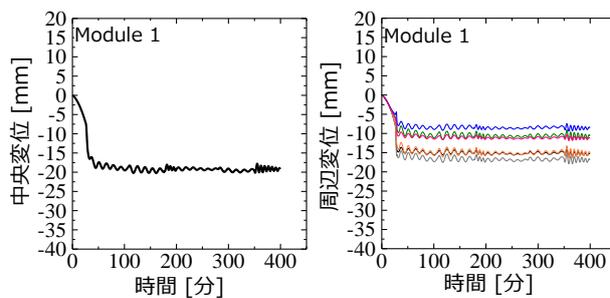


図-8 Z軸方向変位（熱変形補正解析）

モジュール1における中央変位および周辺変位を図-8示す。モジュール中央変位は、斜部材の角度およびバネ位置調整の組合せによって、モジュール周辺変位は合成線膨張係数の設計変更によって、それぞれ精度良く補正できることがわかった。

現在は、最小限の設計変更を重視して、鏡面横部材とともに背面横部材も膨張するように、背面横部材の合成線膨張係数のみを変更しているが、その場合、温度低下時に収縮する斜部材にかかる負荷が大きい恐れがある。今後は、合成線膨張係数を変更する部材の選定方法も検討していくとともに、広く宇宙用大型骨組構造物への設計指針となるような提案を目指す。

4. 結言

本稿では、大型宇宙構造物の一例としてETS-VIIIに搭載された大型展開アンテナをモデル化し、軌道上で生じる熱変形に対して、複数の抑制手法を組み合わせることによる効果を検証した。その結果、熱変形補正に優れた部材角度や合成線膨張係数の組合せがあり、その上で展開用バネの位置を調整するという、複数の手法を組み合わせることで、大型宇宙構造物に生じる熱変形に対して精度の良い補正効果が期待できることがわかった。

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] 臼井 基文, 脇田 和紀, 近藤 健介, レティ タイトン, 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. (<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.
- [5] 庄司 香織, 磯部大吾郎, 臼井 基文: 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, 計算工学講演会論文集CD-ROM, 第22巻, (2017).