

有限要素法を用いた宇宙用大型展開アンテナの熱変形補正解析

Compensation Analysis of Thermal Deformation Occurred in Space-Use Large Deployable Reflector Using FEM

○正 庄司 香織 (筑波大院)
Kaori SHOJI, Graduate School, Univ. of
Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

正 磯部 大吾郎 (筑波大)
Daigoro ISOBE, Univ. of Tsukuba, 1-1-1
Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

正 白井 基文 (宇宙航空研究開発機構)
Motofumi USUI, Japan Aerospace Exploration
Agency, 7-44-1 Higashi-machi Jindaiji,
Chofu-shi, Tokyo

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

1. 緒言

宇宙機が抱える課題の一つに、著しい温度変化への対応が挙げられる。実際、技術試験衛星 VIII 型 (ETS-VIII : Engineering Test Satellite-VIII) でも、図 1 に示すように日照時と日陰時で大型展開アンテナの鏡面温度が約 200°C 推移した [1]。このとき、アンテナからのビーム中心が地球上で約 60~100[km] 移動する様子が観測された [2]。このビームの移動現象は、大型展開アンテナの熱変形によるものと考えられている [3]。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ため、衛星搭載用アンテナの温度変化による熱変形を制御・抑制する手法を構築する必要がある。そこで本研究では、大型展開アンテナに配置されている展開用パネの残留パネ力を調整することで、打ち上げ後にも能動的に熱変形を補正できるシステムを数値的に検討する。

2. 大型展開アンテナの概要と解析条件

ETS-VIII には、図 2 に示すように六角形のモジュールを 14 個連結させた世界最大級の大型展開アンテナが 2 つ搭載されている。このアンテナの 1 つを数値モデル化したものを図 3 に示す。モジュール間はトラス接合で連結されており、モジュール間の干渉が少ない機構となっている。また、衛星本体から伸びるブームと大型展開アンテナは完全拘束されている。骨組は、炭素繊維強化プラスチック (CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics) のチューブとチタン合金の接合部品

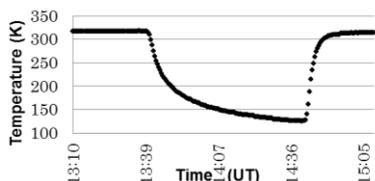


Fig. 1: Temperature of the LDR during Earth eclipse

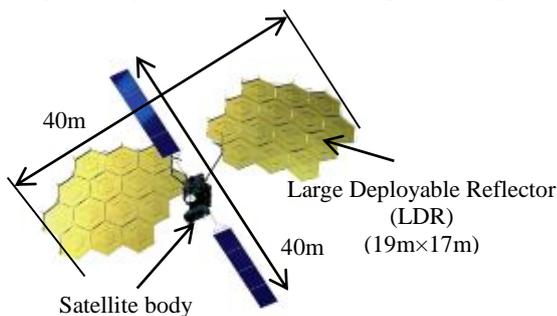


Fig. 2: ETS-VIII (Launched in 2006) © JAXA

(ヒンジ)で構成されており、部材毎に図 4 に示す名称がつけられている。本研究では、パネ・受け骨・ストッパー要素からなるジャンプ傘機構を解析モデルの中に取り入れ、展開後の残留パネ力による内力を斜部材に伝達させた。また、全ての要素に熱ひずみを加えることにより熱変形を考慮した。熱ひずみと温度の関係は、

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

で表される。ここで $\Delta \varepsilon_T$ は熱ひずみ増分、 α は線膨張係数、 ΔT は温度増分である。機械的ひずみと熱ひずみの関係は、

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

で表される。ここで、 ε_m は機械的ひずみ、 ε は全ひずみ、 ε_T は熱ひずみである。本解析で用いる線膨張係数の値には、式(3)に示すように部材の全長に対する CFRP の長さの割合に CFRP の線膨張係数をかけたものと、全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。

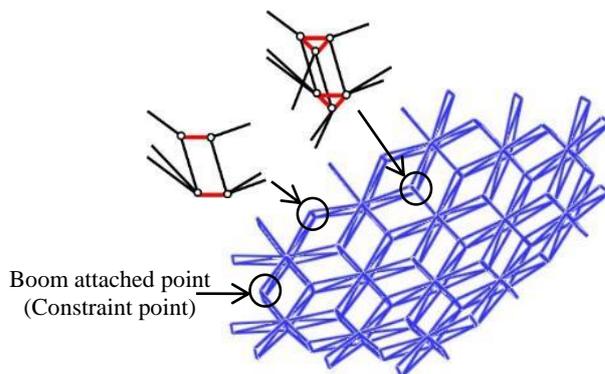


Fig. 3: 14-module model for analysis and the structural connections of the model

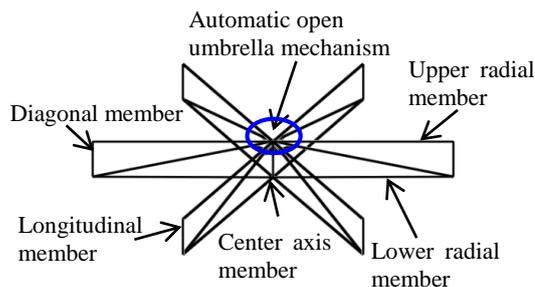


Fig. 4: Structural drawing of 1-module

$$\alpha_c = \frac{l_{CFRP}}{L} \times \alpha_{CFRP} + \frac{l_{チタン合金}}{L} \times \alpha_{チタン合金} \quad (3)$$

ここで、 L は部材全長、 l_{CFRP} 、 $l_{チタン合金}$ 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である。 α_{CFRP} 、 $\alpha_{チタン合金}$ はそれぞれ CFRP 部分の線膨張係数およびチタン合金接合部の線膨張係数である。表 1 に各部材の材質と合成線膨張係数を示す。合成線膨張係数には、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により、部材ごとに異なる値をもつという特徴がある。さらに、鏡面横部材は合成線膨張係数が負の値であるため温度上昇に伴い収縮するが、それ以外の部材は温度上昇に伴い膨張する。以上より、温度変化が生じると大型展開アンテナの骨組は複雑な挙動を示すことが予想される。解析に入力する温度推移については、図 5 に示すように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°C から 1°C 刻みで 50°C 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が安定した後、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)を用いた解析を実施する。温度の与え方と同様に、バネ力についても、1 サイクル目のテレメトリ温度に入る前に、0°C から 1°C 刻みで 50°C まで温度を上昇させる温度変化に合わせ、1[N] から 233[N] まで線形的にバネ力を上げた。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展開駆動機構を上下にスライドさせる機能がある。本稿では、この機能を利用して展開

Table 1: Material properties of constituent members

	Material	Combined CTE (10 ⁻⁶ /K)
Upper radial member	CFRP	-0.182
Lower radial member	CFRP	0.312
Diagonal member	CFRP	0.948
Center axis member	CFRP	3.49
Longitudinal member	CFRP	0.277
Joint member	Titanium alloy	8.8

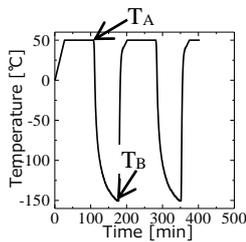


Fig. 5: Applied thermal history

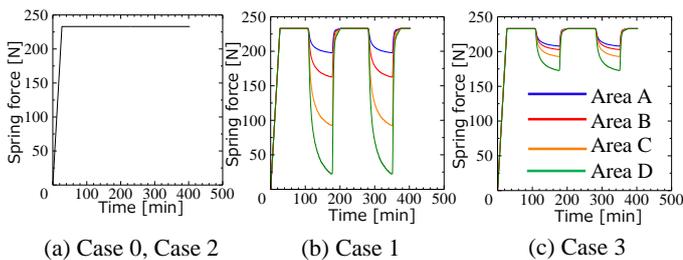


Fig. 6: Applied spring force histories

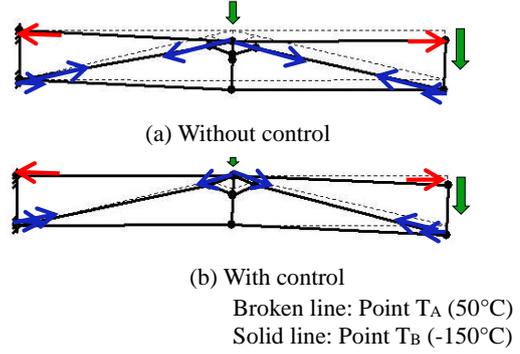


Fig. 7: Schematic diagram of the thermal deformation due to a decrease in the temperature

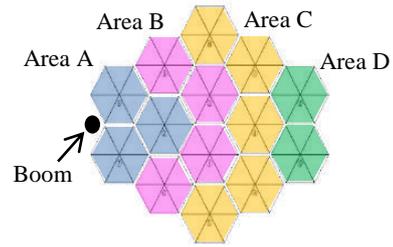


Fig. 8: Schematic diagram of the partitions used to distribute the different spring forces

用圧縮バネの残留バネ力の値を調整した解析を行った。まず、Case 0 として 14 モジュールの解析モデルを用いて熱変形解析を実施したのち、Case 1, Case 2, Case 3 の 3 つの熱変形補正解析を実施した。各ケースでのバネ力の時刻歴を図 6 に示す。また、全てのケースにおいて、全モジュールの鏡面横部材の中央側端点および周辺側端点を変位評価点とした。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。

3. 解析結果

3-1 熱変形解析 熱変形補正を施さない Case 0 の解析では、全モジュールにおいて、鏡面に対し鉛直下向き方向に変位が発生した。また、アンテナ中心部の変位は平均約 5[mm]であり、通信ビームの指向方向のずれに換算すると約 0.1[degree]、つまり地球上での地表面軌跡に換算すると約 60[km]となることから、実際のビームの移動現象[4]を説明できる結果であると言える。また、拘束点から遠いモジュールほど初期位置からの変位幅が大きくなることが確認された。以上のように全モジュールで鏡面に対し鉛直下向き方向に変位が発生する理由として、図 7 (a) に示すように斜部材の合成線膨張係数が背面横部材に比べて約 3 倍大きいため、斜部材の収縮量が大きいという点と、温度低下によって背面横部材は収縮するが鏡面横部材は膨張する点の 2 つの要因が考えられる。

3-2 熱変形補正解析 熱変形補正手法について検討するにあたり、まず全モジュールに同じバネ力調整を行った結果、中央側頂点の鏡面に対する鉛直下向き方向変位への補正率は、拘束点からの距離に応じて異なることが分かった。そこで、Case 1 として図 8 に示すようにエリア A からエリア D までの 4 つの領域に分けてバネ力の調整幅を変えることで補正を検討した。解析の結果、バネ力の最大値がある等差数列となるときに、鏡面横部材の中央側頂点の鏡面に対する鉛直下向き方向への変位は最も良い補正率を示した。しかし、鏡面横部材の周辺側頂点の鏡面に対する鉛直下向き方向への変位ではほとんど補正の効果がみられなかった。これは図 7

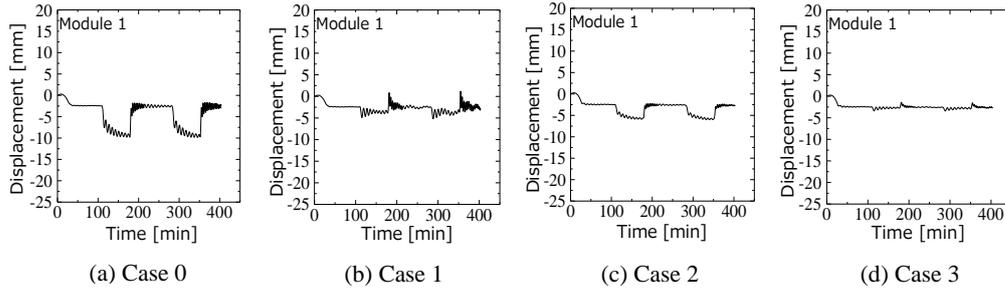


Fig. 9: Suppression effects at the center side of the upper radial member

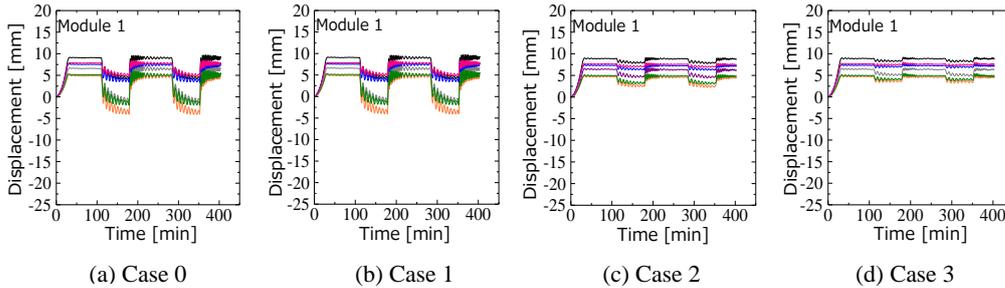


Fig. 10: Suppression effects at the peripheral side of the upper radial member

(b)に示すように、バネ力の調整だけでは熱による形状変化を元の形状に復元できないこと、接合部がすべてピン関節という極めて柔軟な構造物であるため、ある節点が上下に動いたとしても、他端の節点が連動して上下に動きにくいことが要因であると考えられる。

そこで、Case 2として合成線膨張係数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 0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と考え、鏡面横部材と背面横部材の合成線膨張係数の組み合わせを検討した。具体的には、鏡面横部材の合成線膨張係数はそのままにし、背面横部材の合成線膨張係数を $0.312 \times 10^{-6} [K]$ から $-0.012 \times 10^{-6} [K]$ へ変更した。使用部材である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ため、重量増加の可能性が小さい提案となっている。なお、本ケースではバネ力の調整は行っていない。解析の結果、Case 2でも鏡面横部材の中央側頂点はすべてのエリアにおいて補正の効果がみられた。また、合成線膨張係数の組み合わせを適正化したことで、バネ力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ことがわかった。

Case 1とCase 2の解析結果を踏まえ、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。図6(c)に示すように、合成線膨張係数の調整と組み合わせることで、Case 1に比べてバネ力の調整幅が小さくても熱変形が補正できるように改良された。解析の結果、鏡面横部材の中央側頂点の鏡面に対する鉛直下向き方向への変位は全エリアで良好に補正できた。代表して通信ビームの電界強度が最も大きいアンテナ鏡面中央部の1モジュールの補正結果をCase 0と比較する形で図9、図10に示す。Case 1、Case 2に比べて中央側頂点および周辺側頂点の全ての変位が良好に補正できていることがわかる。以上より、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を約5~10[km]まで抑えるこ

とができる見込みを得たと言える。

4. 結言

大型宇宙構造物の熱変形について、技術試験衛星 VIII 型(ETS-VIII)に搭載された大型展開アンテナを数値モデル化し、熱変形解析および4つの熱変形補正解析を実施した。熱変形解析より、全モジュールにおいて、鏡面に対し鉛直下向き方向へ変位が発生した。アンテナ中心部の変位が平均約5[mm]となり、実際のビームの移動現象を説明できる結果を得た。また、拘束点から遠いモジュールほど初期位置からの変位幅が大きくなることが確認された。熱変形補正解析を行った結果、拘束点からの距離によって4つの領域に分けてバネ力を調整することで補正を検討できることが分かった。さらに、合成線膨張係数の調整を組み合わせたところ、バネ力だけでは補正できなかった周辺側頂点も含め、全ての頂点を高い補正率で補正できた。以上より、60~100[km]のビーム移動を5~10[km]程度まで抑制できる見込みを得た。

参考文献

- [1] 白井 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), 77巻777号, (2011), pp.487-499.
- [2] 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, (2008), pp.15-18.
- [3] 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.
- [4] 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 No12, (2008), pp.1641-1643.