

宇宙用大型展開アンテナの熱変形補正に関する検討

A Study on Thermal Deformation Compensation of Large Deployable Antenna Reflector in Space

庄司香織¹⁾, 磯部大吾郎²⁾, 臼井基文³⁾

Kaori Shoji, Daigoro Isobe and Motohumi 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: s1320932@u.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 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. A signal level of radio wave from the Large Deployable Reflector (LDR) mounted on the Engineering Test Satellite -VIII (ETS-VIII) was observed to change during the Earth eclipse. This phenomenon was assumed to be caused by thermal distortion of the LDR. Therefore, a different means to suppress the thermal distortion is proposed and demonstrated, in this study, by focusing into the internal force generated at the spring used to deploy the antenna. From the numerical results, it is confirmed that the thermal deformation can be suppressed by distributing different spring forces in four parts depending on the distances from the constraint point. Moreover, all apices that support antenna reflector were suppressed with high correction rate by controlling the spring forces and by adjusting the coefficients of thermal expansion of structural members.

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

1. はじめに

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アンテナの鏡面温度が約200℃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60～100km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バネに着目し、バ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ことを目的とする。本稿では、大型展開アンテナを数値モデル化し、熱変形解析および熱変形補正解析を実施した結果について述べる。

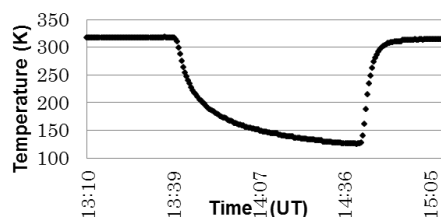


図-1 大型展開アンテナの温度推移[1]

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ユニットを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。ユニット間はトラス接合で連結されており、ユニット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。

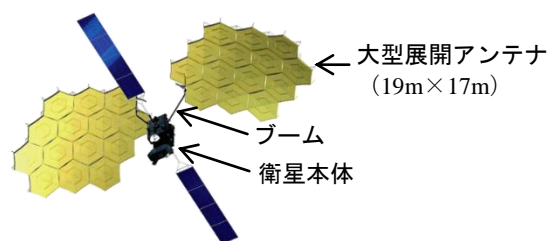


図-2 ETS-VIII の軌道上概観図

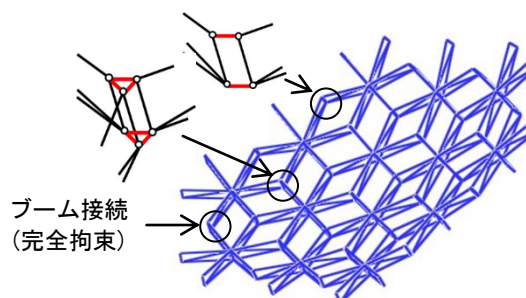


図-3 14ユニットモデルと各ユニット間の結合の様子

各ユニットの骨組は、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(ヒンジ)で構成されており、各部材には図-4に示す名称がつけられている。本研究では、バネ・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、展開後の残留バネ力による内力を斜部材に伝達させた。

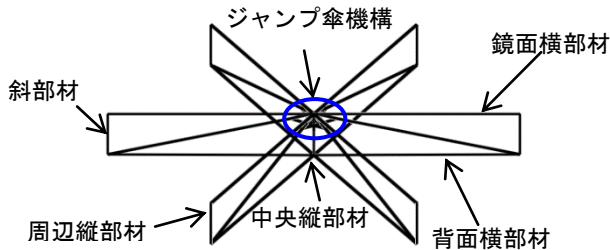


図-4 1ユニットの構成と部材名

本解析で用いる線膨張係数の値には、式(1)に示す通り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。

$$\alpha_c = \frac{l_{CFRP}}{L} \times \alpha_{CFRP} + \frac{l_{チタン合金}}{L} \times \alpha_{チタン合金} \quad (1)$$

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。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、部材ごとに異なる合成線膨張係数をもつという特徴があげられる。また、鏡面横部材は合成線膨張係数が負の値であることから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。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は複雑な挙動を示すことが予想される。

表-1 各部材の材質と合成線膨張係数の値

	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	3.49
周辺縦部材	CFRP	0.277
接合部材	チタン合金	8.8

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、

$$\Delta \varepsilon_T = \alpha \Delta T \quad (2)$$

で表される。ここで $\Delta \varepsilon_T$ は熱歪み増分、 α は線膨張係数、 ΔT は温度増分である。また、機械歪みと熱歪みの関係は、

$$\varepsilon_m = \varepsilon - \varepsilon_T \quad (3)$$

で表される。ここで、 ε_m は機械歪み、 ε は全歪み、 ε_T は熱歪みである。解析に入力する温度推移については、熱衝撃を緩和するために、まず0℃から1℃刻みで50℃まで温度を上昇させたのち、温度一定の定常状態を保つ区間を設けた。その後、大型展開アンテナに取付けられた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2サイクル実施する。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℃から1℃刻みで50℃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ていくこととした。5つ全てのケースにおいて、全ユニット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。

以上を踏まえ、14ユニットモデルを用いてCase 0として熱変形解析を実施したのち、次節に示すCase 1a, Case 1b, Case 2, Case 3の4つの熱変形補正解析を実施した。

3. 結果と考察

(1) 熱変形解析結果

熱変形補正を施さないCase 0の解析では、全ユニットにおいて、拘束点からみて鉛直下向き方向に変位が発生した。特に、ブームとの接続により完全拘束されている2つのユニットでは、周辺縦部材の1つを完全拘束した場合での1ユニットモデルの解析結果と概ね同値となった。1ユニットモデルの解析でも拘束点からみて鉛直下向き方向に変位が発生した。これらの結果から、1ユニットモデルでの解析によって14ユニット全体の傾向を把握することができることを確認した。

また、アンテナ中心部の変位は平均約5.3[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]~[6]を説明できる結果であると言える。隣り合うユニットの変位が累積されるため拘束点から遠くなるほど変位幅が大きくなっていき、最も遠いユニットの中央部で平均約18.2[mm]となった。

以上のように全ユニットで拘束点からみて鉛直下向き方向に変位が発生する理由として、図-5(a)に示す通り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。

(2) 熱変形補正手法の検討と考察

熱変形補正手法について検討するにあたり、全ユニットの変位に対するバネ力の影響を調べるために、まず全ユニットに同じバネ力を与えるCase 1aの解析を実施した。その結果、中央側頂点のZ軸方向変位補正率は、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、図-6に示すように補正の程度によってエリアAからエリアDまでの4つの領域に分けて補正を検討していくことを考えた。それが、Case 1bの解析である。Case 1bでは、エリアごとに図-7に示すバネ力調整を行う。

Case 1bで領域ごとにバネ力の調整を変化させた結果、バネ力の最大値がある等差数列となるとときに、鏡面横部材の中央側頂点のZ軸方向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Z軸方向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-5(b)に示す通り、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。そのため、バネ力を調整する手法だけでは、中央側頂点の補正には効果があるが、周辺側頂点の補正には悪影響となる可能性がある。

そこで、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するCase 2を試みた。1ユニットモデルおよび14ユニットモデルでのCase 0の解析結果から、鏡面横部材の合成線膨張係数の値だけが負の値であり、アンテナの熱膨張・収縮による変形形態への影響が大きいと考えたため、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を検討した。なお、本ケースではバネ力の調整は行っていない。表-2に本ケースでの合成線膨張係数をCase 0と比較する形で示す。本ケースでは、鏡面横部材の合成線膨張係数はそのままに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。使用されている部材のCFRPの線膨張係数（軸方向）は、配向角の関係により元々負の値である。また、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。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、重量増加という問題のない提案である。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。

以上のCase 1bとCase 2の解析結果をふまえ、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Case 3の解析を実施した。Case 3でエリアごとに与えたバネ力を図-8に示す。合成線膨張係数の調整と組み合わせることで、Case 1b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。

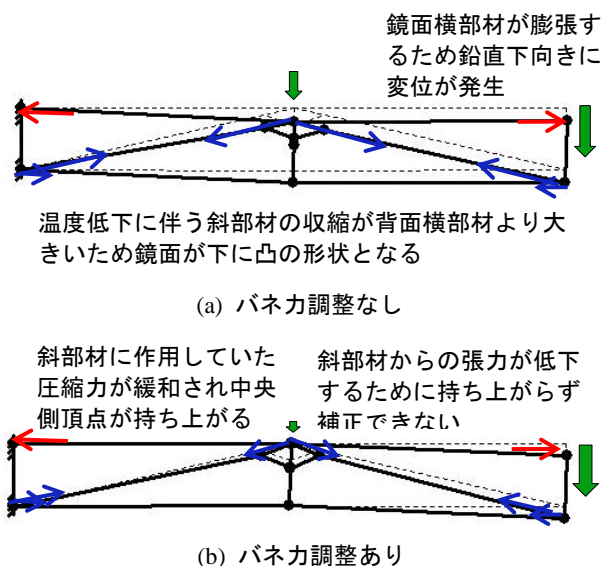


図-5 変位発生メカニズム

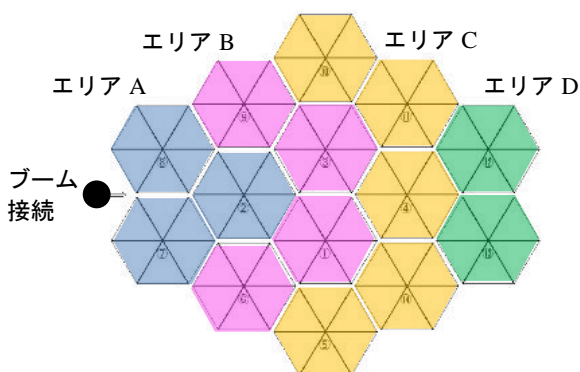


図-6 バネ力を調整するエリア分けの概念図

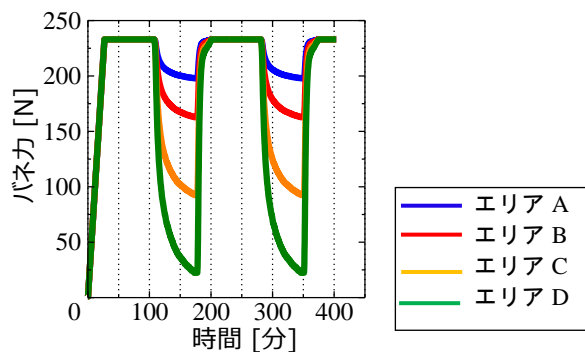


図-7 Case 1b で与えたバネ力

表-2 合成線膨張係数の変更

	合成線膨張係数($10^{-6}/K$)	
	Case 0	Case 2
鏡面横部材	-0.182	-0.182
背面横部材	0.312	-0.012
斜部材	0.948	0.948
中央縦部材	3.49	3.49
周辺縦部材	0.277	0.277
接合部材	8.8	8.8

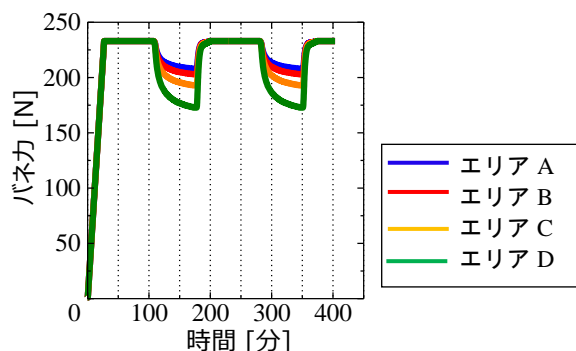


図-8 Case 3 で与えたバネ力

解析結果より、鏡面横部材の中央側頂点のZ軸方向変位は全エリアで良好に補正できた。また、鏡面横部材の背面側頂点のZ軸方向変位に関して、エリアAおよびエリアBでは熱変形による変位をほぼ補正できた。エリアCでは、Case 0で約10.2[mm]発生していた熱変形による変位が約1.6[mm]まで補正された。拘束点から最も遠く、したがって発生する変位も最も大きいエリアDでも、Case 0で約16.7[mm]発生していた変位が約3.1[mm]にまで補正された。全ユニットのうち、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ユニットの補正結果をCase 0と比較する形で図-9、図-10に示す。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60～100km移動していたが、補正後は通信ビームの移動を約5～10kmまで抑えることができる見込みを得たといえる。

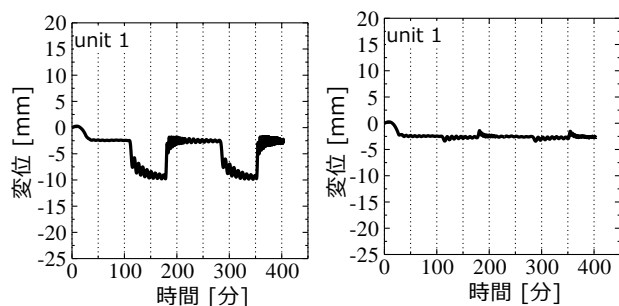


図-9 中央側頂点の変位(左: Case 0, 右: Case 3)

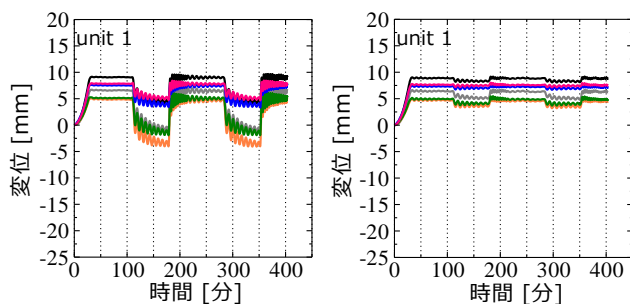


図-10 周辺側頂点の変位(左: Case 0, 右: Case 3)

4. 結言

大型宇宙構造物の熱変形について、本稿では技術試験衛星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、周辺縦部材を完全拘束した1ユニットの解析モデルと同様に、14ユニットの解析モデルでも拘束点からみて鉛直下向きに変位が発生すること、バネ力を調整することで中央側頂点の補正には効果が期待できる一方、周辺側頂点の補正には悪影響となる可能性があることがわかった。

バネ力調整のみによる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つの領域に分けて補正を検討することが分かった。これと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た全ての頂点を高い補正率で補正できた。以上より、60～100kmのビーム移動を5～10km程度まで抑制できる見込みを得た。

参考文献

- [1] 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), 77巻777号, (2011), pp487-499.
- [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), pp15-18.
- [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), pp19-24.
- [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), pp1641-1643.
- [5] 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大会, 通信講演論文集 1, (2009), pp337.
- [6] 臼井 基文, 磯部 大吾郎: 技術試験衛星Ⅷ型の大型展開アンテナの日陰中のアンテナパターン変動とその抑制手法, 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会通信論文集 1, (2011), pp309.