

高効率な熱変形補正を目的としたモジュール型展開アンテナのデザインの検討

A Study on the Designing of Module-Type Deployable Antenna for Highly Efficient Thermal Deformation Compensation

○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 臼井 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

太陽輻射熱による温度変化が著しい宇宙構造物は、大型になるほど熱変形による影響が顕著に表れる。例えば技術試験衛星Ⅷ型（以下、ETS-VIII [1]）では、大型展開アンテナの熱変形により通信ビームが地球表面上で約 60~100[km]移動する様子が観測された[2]。ETS-VIII の場合は、ビーム形状が広域だったため、ミッション遂行に問題はなかった。しかし、将来の通信衛星の通信ビームは、高い指向精度を追及していくことが想定されるため、展開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。この問題に対して先行研究[3]では、合成線膨張係数の変更と展開制御に用いるバネの残留バネ力の調整という 2 つの手法を組み合わせることで、大型展開アンテナの熱変形を高い補正率で補正できる可能性を示唆した。一方で、この手法は残留バネ力の緩和量が大きい（展開用バネの保有力 233[N]のうち最大 175[N]緩和）ため、展開アンテナのパラボラ形状が不安定になる恐れがある。そこで本稿では、最小限のバネ力調整量で効率良く展開アンテナの熱変形を補正するためのデザインを検討する。

2. 大型展開アンテナの概要と解析条件

ETS-VIIIには、14個の六角形モジュールを連結させた大型展開アンテナが搭載されている。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(ヒンジ)で構成されている。この六角形モジュールの1つを数値モデル化したものを図1に示す。本研究では、図2に示すバネおよびリンクロッド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 (Diagonal member) に伝達させた。

解析に入力する温度推移について、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後、宇宙空間において大型展開アンテナで実測された温度データを用いた解析を実施する。大型展開アンテナの温度は50℃から最大約-150℃まで低下する。バネ力も温度推移と同様に、1サイクル目のテレメトリ温度に入る前に、1[N]から233[N]まで線形的に上げていくこととした。バネ力の時刻歴を図3に示す。熱変形補正を試みる場合は、展開用バネの保有力233[N]のうち最大110[N]緩和している。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。各部材の線膨張係数には、CFRPチューブおよびチタン合金接合部の部材全長に対する比率に各々の線膨張係数をかけた値を足し合わせた合成線膨張係数の値を用いる。変位評価点はモジュール中央の頂点とした。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。表1に各部材の材質とヤング率を示す。

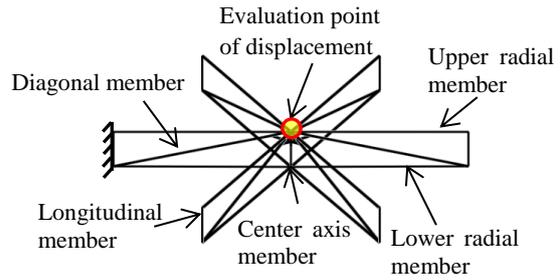


Fig. 1: Structural drawing of 1-module model

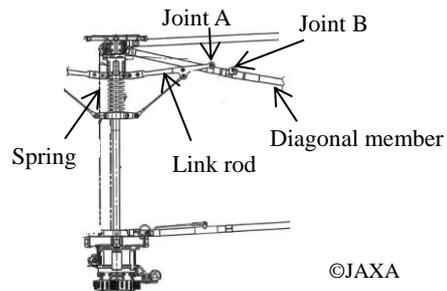


Fig. 2: A sketch of connection between link rod and diagonal member

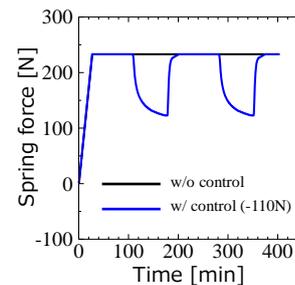
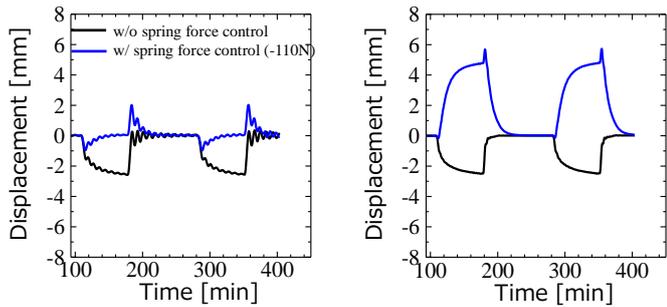


Fig. 3: Applied spring force history

Table 1: Material properties of constituent members [1]

Name of members	Material	Elastic modulus of CFRP (N/mm ²)
Upper radial	CFRP	248,528
Lower radial	CFRP	248,528
Diagonal	CFRP	204,418
Center axis	CFRP	48,910
Longitudinal	CFRP	262,312
Joint	Titanium alloy	-



(a) Young's modulus of members other than diagonal member decreased by 1/10
 (b) Young's modulus of diagonal member decreased by 1/10

Fig. 4: Sensitivity of members in thermal deformation and control

3. 解析結果

3-1 部材感度と熱変形補正率

最も熱変形補正率に影響を与える部材を特定するために、図2に示す5種類の主要部材のヤング率を変更して熱変形解析および熱変形補正解析を実施した。斜部材以外の4種類の部材のヤング率を全て10分の1に変更した場合の結果を図4(a)に、斜部材のヤング率のみを10分の1に変更した場合の結果を図4(b)に示す。図4(a)に示す結果は、斜部材以外の4種類の部材のヤング率を個々に変更した場合でも同様の傾向を示しており、ヤング率を変更しない場合での熱変形補正結果[4]とほぼ変わらなかった。また、図4(b)に示す結果では補正率が200%を超えていることから、斜部材の感度が最も高く、熱変形補正率は斜部材の剛性に強く依存することが分かった。なおこの傾向は、ヤング率を10倍に変更した場合でも同様であった。そこで、斜部材をより詳細にモデル化して熱変形補正解析を実施した。その結果を次節に示す。

3-2 斜部材中の関節位置と熱変形補正率

リンクロッド (Link rod) と斜部材は、図2に示すJoint Aで接続されており、Joint Aから数cmずれた位置に、斜部材を折り曲げて展開アンテナを収納するためのJoint Bがある。Joint Bで斜部材がしなることにより、展開後のアンテナの形状が保持されている。そこで、熱変形補正に最適な構造デザインを検討するために、まずJoint Bを導入した解析モデルを作成し、熱変形補正率との関係を調べた。その解析結果を図5に示す。Joint Bの位置がJoint Aから5mm離れているものをモデルA、60mm離れているものをモデルB、100mm離れているものをモデルCとする。

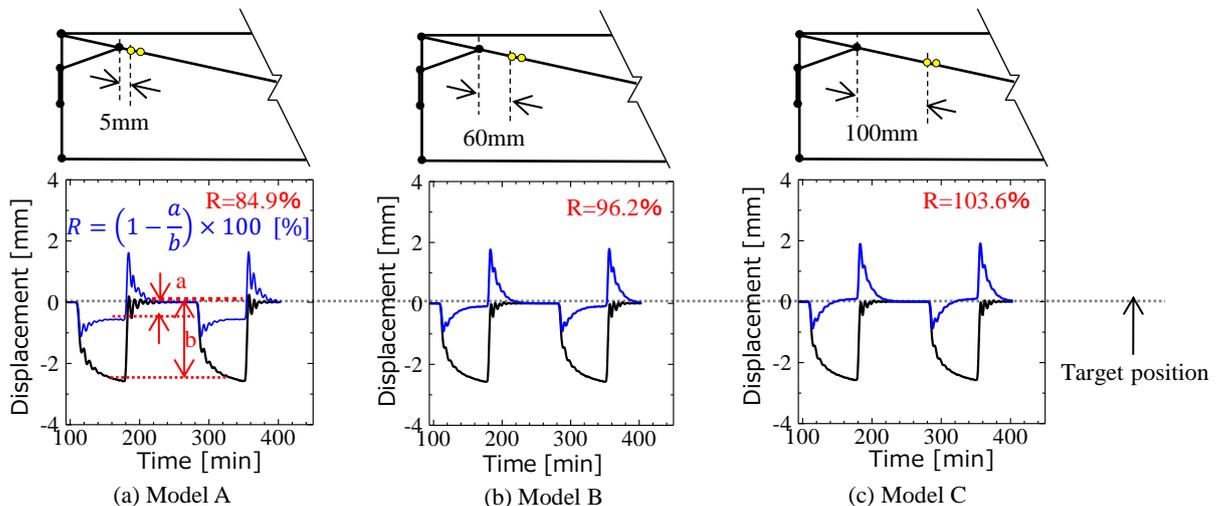


Fig. 5: Relation between the location of Joint B and the correction rate of thermal deformation

のをモデルCとする。モデルBが最も現況に近い解析モデルである。最も温度が低下したときの熱変形量に着目し、熱変形補正を行わない場合の変形量と、熱変形補正を行った場合の変形量の比から熱変形補正率Rを算出している。補正率が100%を超えているモデルCは、-110[N]よりも絶対値の小さなバネ力調整量で補正率がほぼ100%に達することができることを意味している。また、モジュール中央からJoint Bの位置が遠くなるほど斜部材のたわみ量は大きくなるため、熱変形補正率が大きくなっている。このことから、熱変形補正率はJoint Bの位置に依存しており、先行研究よりも小さい残留バネ力調整量で熱変形が補正できるようなJoint Bの位置がある可能性が示唆された。

4. 結言

モジュール型展開アンテナに生じる熱変形を、より小さいバネ力調整量で効率的に補正するような構造デザインを検討するために、5種類の主要部材のヤング率を変更することで熱変形補正率に対する部材感度解析を行った。その結果、最も熱変形補正率に対して感度が高い部材は、斜部材であることが分かった。これを踏まえ、斜部材中のJoint Bを導入した解析モデルを再構築し、Joint Bの位置と熱変形補正率の関係を調べた。その結果、Joint Bの位置がモジュール中央から遠くなるほど、小さい残留バネ力調整量で熱変形が補正できる可能性が高いことが分かった。今後は、斜部材の剛性と関連付けながら、より補正率の高いJoint Bの位置を特定するとともに、アンテナの収納展開動作への影響も視野に入れた構造デザインの提案を目指す。

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] 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).
- [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), p. 15-00351, (2015).