

B05 小型 SAR 衛星搭載アンテナの重力補償方法の改良

○岩崎愛樹(神奈川大・院), 竹谷昇(JAXA), 友田孝久(JAXA), 中村和行(テクノソルバ)
久原隆博(テクノソルバ), 石村康生(早稲田大), 齋藤宏文(JAXA), 高野敦(神奈川大)

○Aiki Iwasaki(Kanagawa University), Noboru Takeya(JAXA), Takahisa Tomoda(JAXA)
Kazuyuki Nakamura(Technosolver Corporation), Takahiro Kuhara(Technosolver Corporation)
Kosei Ishimura(Waseda University), Hirobumi Saito(JAXA), Atsushi Takano(Kanagawa University)

1. 緒言

地球を観測する人工衛星には光学衛星を用いるのが主流であるが、夜間や悪天候時には観測ができないという短所がある。一方で、自然災害等の緊急事態が発生した場合といった急性期には即時的な観測が可能なシステムが求められている。合成開口レーダ(SAR: Synthetic Aperture Radar)は人工衛星から放出した電磁波を用いるため、雲を通過しても減衰しにくく夜間時や悪天候時にも観測可能であり、近年注目を集めている^{[1][2]}。

宇宙科学研究所では小型衛星搭載用の SAR アンテナの開発が進められている^[3]。本衛星の SAR アンテナは7枚のアンテナパネルで構成され、太陽電池パネルと一体型の構造となっている。小型衛星に搭載するため展開式の構造を有しており、アンテナ面に突起物が位置することを避けるため巻き込み式の展開方式を採用している(図1)。

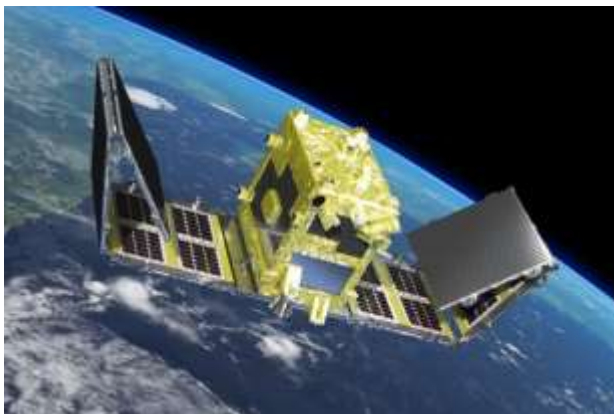


図1 アンテナの展開方式

展開の動力にはばねを用いており、ヒンジ部に内蔵されている。収納しているアンテナを保持開放機構によって開放すると、動力によってパネルが1枚ずつ展開される。ヒンジ部にはストッパーがあり、それをバネで押し当てることで展開時のアンテナ形状を維持する(図2)。十分な分解能を実現するため、アンテナ展開面精度は平均平面基準で1mmRMSのシステム要求があり、それらは表1に示すようにいくつかの誤差要因に配分される。

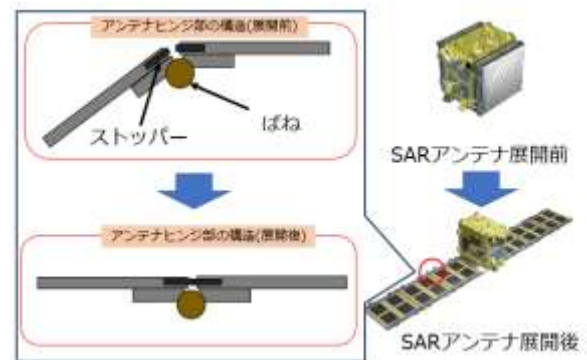


図2 ヒンジ構造

表1 衛星概要

衛星概要	
使用周波数帯	X帯(波長: 約3.5cm)
アンテナ方式	ハニカムパネル スロットアレイ
アンテナの 大きさ	0.7m×4.9m
アンテナ収納時 の大きさ	1.0m×0.8m× 0.8m

表2 形状設計要求一覧

項目	誤差配分	備考
パネル製造・調整誤差	0.2mmRMS	製造実績
展開再現性 (振動・衝撃前後変動含む)	0.4mmRMS	展開試験
アンテナ熱変形	0.7mmRMS	温度解析/熱歪解析 /熱歪試験

実際にアンテナを展開するのは軌道投入後の一度のみである。しかし、アンテナは地上でコンフィギュレーションを調整したものを宇宙で展開することになるため、複数回の展開動作において展開再現性を保証する必要がある。パネル製造誤差は製造時、アンテナ熱変形における誤差配分については熱変形試験において評価しており^[4]、展開再現性の誤差配分においては展開試験によって評価した^[5]。以前の展開試験において重力補償の方法に改善の余地があることがわかった^[6]。本稿では、重力補償方法の改善を行った成果を報告する。

2. 展開試験

2.1 試験方法

展開試験では片翼の展開動作を複数回行い、それぞれの結果を比較して再現性を評価した。エアージャケットでアンテナを定板の上に浮上させたヒンジ部分を調整し、その後展開動作を複数回行う。展開後に3次元計測を実施し、その結果を用いてパネル間の相対角や面精度を評価した。展開試験のコンフィギュレーションを図3に示す。



図3 展開試験

2.2 試験結果

隣り合うパネルとの展開方向の相対角を計算した結果を図4に示す。衛星構体に取り付けられた#0パネルから#1, #2, #3の3枚のパネルが展開する。試験結果から、振動試験の前後で#0パネルと#1パネルの相対角の傾向に差異があることがわかる。

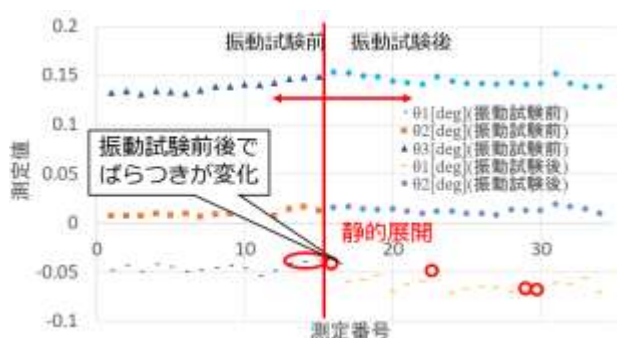


図4 展開角の計算結果

2.3 試験結果の保証項目の検証

振動試験前後で発生した展開角の傾向が変化した原因を追求するため、展開試験の結果を保証する項目に対して、それぞれ検証を行った。補償項目は下記の4点である。

- A: 試験装置設置コンフィギュレーションの影響
 - B: アンテナの保持開放による収納の影響
 - C: 重力補償方法の影響
 - D: 補修のためにパネル1枚を再設置した影響
- Aは振動試験の前後で試験装置を再設置したため、Bは振動試験時にはアンテナを保持開放機構によって収

納していたため、影響について検証を行った。

また、Cは現在の重力補償方法に問題がないかどうかを、衛星構体を反転させて検証した。Dは試験中に補修のために一度取り外したケースがあったため、その影響について検証した。

各計測における面精度の計算結果を図5に示す。試験結果から、特に大きな操作を加えない限り形状設計要求を上回ることにはならないことがわかった。一方で、重力方向を反転させた直後には形状設計要求を大きく上回っている。その後調整を行い形状設計要求範囲に収まっているが、依然として重力方向反転前と比べるとある程度の差異が確認できる。したがって、重力補償方法を改善する必要がある可能性があることがわかった。

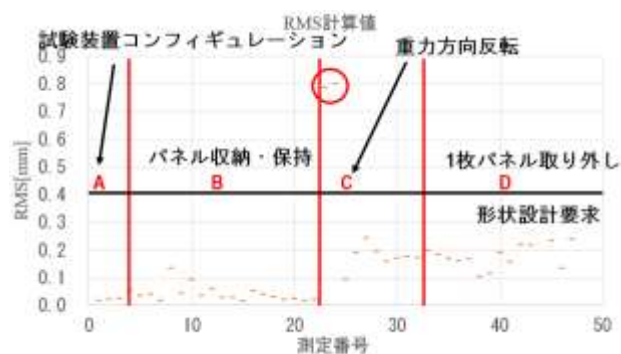


図5 展開試験結果の補償項目の検証

3. 重力補償方法の改善

3.1 重力補償方法の課題

従来はエアージャケット内のばねで重力補償を行い、アンテナの調整をしていた。バネの長さを短くせざるを得ないため、比較的ばね定数が大きいものを使用することになり、わずかな寸法調整によって反力が大きく変わるため内力の不整合を抑制しにくいことが課題であった。そこで、アンテナのヒンジ部調整時の重力補償を上から吊るす方法に変更することで、改善をした。改善後のアンテナ調整時の重力補償状態の模式図を図6に、外観図と寸法図を図7に示す。

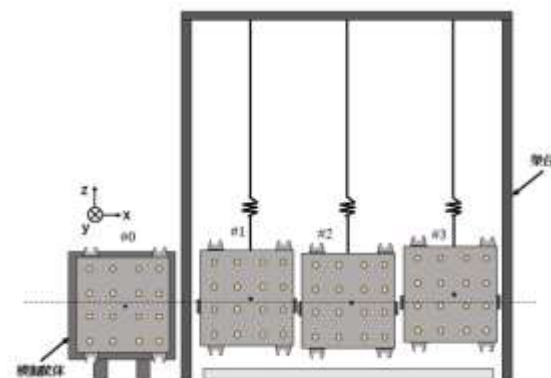


図6 アンテナ調整時の重力補償状態の模式図

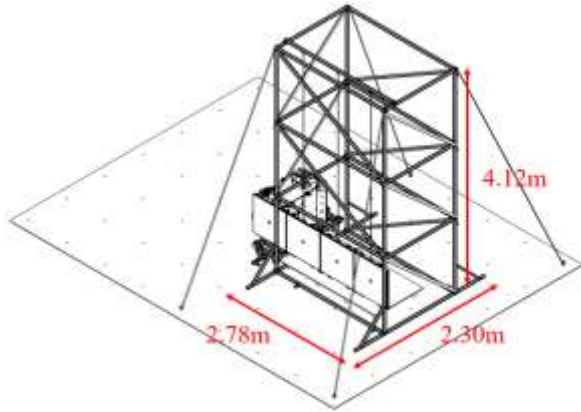


図 7 重力補償装置の外観図

3.2 アンテナの重力補償調整

調整において重要な点はパネル長手方向に対して重心で吊り下げられていることと、ばねによって大きな内力が発生しないことである。アンテナの長手方向と重力補償位置の変更点を図 8 に示す。

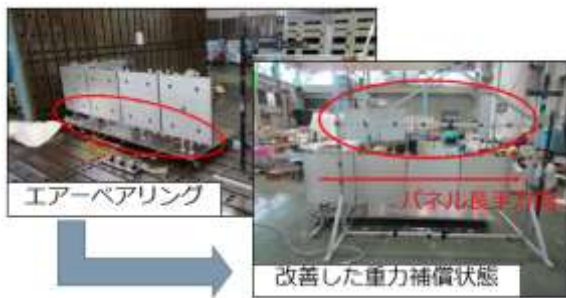


図 8 重力補償位置の変更

長手方向に対して重心位置で吊り下げられていない場合、重心を中心にモーメントが発生するため、アンテナパネルの拘束点であるヒンジ部に比較的大きな負荷がかかる可能性がある。アンテナ調整時にはパネルの横に重力補償装置の上部からおもりを下げた糸を垂らし、パネルの鉛直方向の辺と平行であることを目視にて確認する。このときの様子を図 9 に示す。



図 9 アンテナの吊り下げ位置の調整

アンテナのヒンジ部を接続した状態でパネルを吊り下げているばねの伸び量がそれぞれ 1 枚のパネルを吊り

下げたときの伸び量と等しくなるように調整し、吊り下げ紐の長さも適切であることを確認した。吊り下げに使用したばねの特性と、調整結果を図 10 に示す。

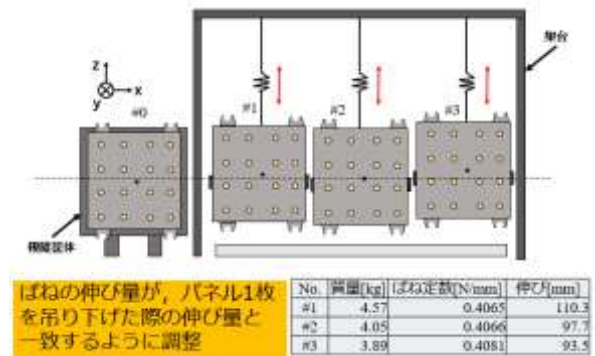


図 10 使用したばねと調整結果

3.3 重力補償方法の検証結果

今回の重力補償方法はアンテナの組立展開調整時の重力補償で実施した。展開再現性の評価の際はエアベアリングによる重力補償の状態で行っている。本試験においては、エアベアリングで展開動作を行った後に、重力補償装置によって吊り下げを行う。吊り下げた状態でアンテナの組み立てコンフィギュレーションを調整し、重力補償装置によって吊り下げたまま少し揺らして 3 次元計測及び評価を行った。また、その後重力方向を反転させ、同様にエアベアリングによる重力補償で展開させた後に吊り下げて 3 次元計測を行った。展開角、面外方向のねじれ角、面内方向のねじれ角、RMS を算出し、最終的な評価には RMS を用いた。図 11, 12, 13 に算出した相対角を示す。

計算結果の図 11 から、パネル#0 とパネル#1 との展開角において重力方向反転前後で微小な差異が発生していることがわかる。一方で、その他の相対角においては重力方向反転前後で顕著な差異は確認されなかった。

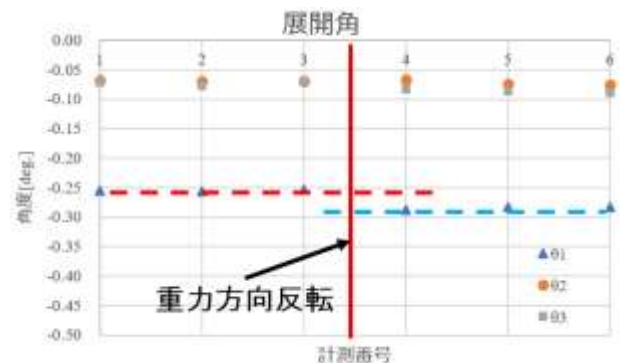


図 11 展開角の計算結果

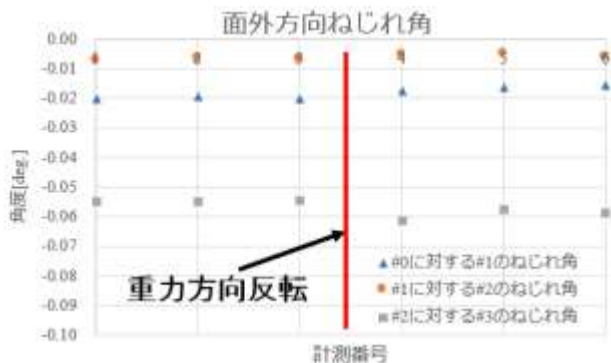


図 12 面外方向ねじれ角の計算結果

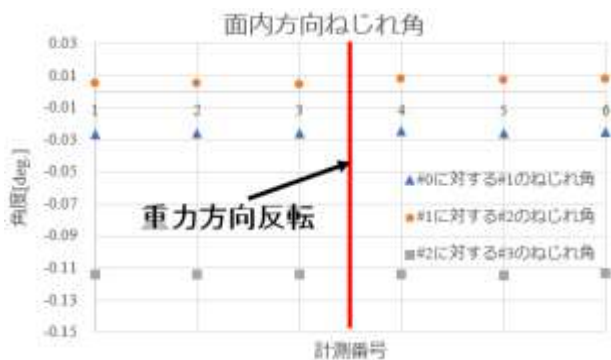


図 13 面内方向ねじれ角の計算結果

図 14 に RMS の計算結果を示す。いずれの RMS も十分に形状設計要求範囲内であり、重力方向反転前後でも顕著な差異は確認されなかった。しかしながら、パネル#0 とパネル#1 との展開角において重力方向反転前後で微小な差異が発生している点に関しては依然として改良の余地があると考えられる。特にパネル#0 とパネル#1 の相対角はアンテナ全体の展開面精度に与える影響が大きいため、形状設計要求範囲内ではあるが、より高精度なアンテナを実現するためには今後も検討を続けるべきであると考えられる。

現段階では本稿の改良に加えて、衛星構体に取り付けられたパネル#0 と、そこにヒンジで接続されるパネル#1 との調整に角度測量器を用いることを検討している。

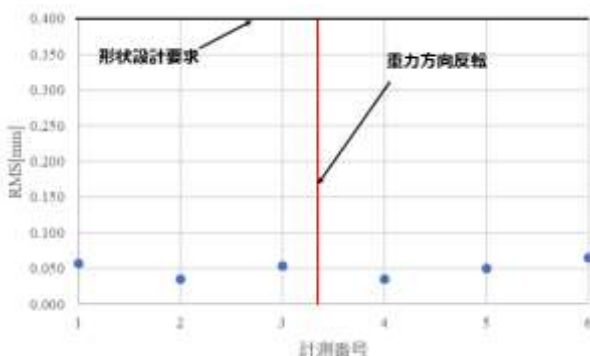


図 14 RMS の計算結果

4. 結言

現在宇宙科学研究所で開発中の小型衛星搭載用の SAR アンテナのコンフィギュレーション調整における重力補償方法の改善を行い、以下の結論を得た。

- (1) 改善した重力補償方法が有効であることが、試験によって確認された
- (2) FM の展開試験時には、エアベアリングで展開したアンテナを本手法によって重力補償した状態でコンフィギュレーション調整を行う
- (3) パネル#0 とパネル#1 間の調整には、未だ改良の余地があり、角度測量器等を用いてアンテナと構体の調整を行うことを検討する。

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) により、科学技術振興機構を通して委託されたものです。

参考文献

- [1] 和田紗希, 齋藤宏文, 中村和行, 友田孝久, 田中宏明 小型衛星用合成開口レーダアンテナの展開と熱歪の面形状計測 第 60 回宇宙科学技術連合講演会講演集 2N05 2016 年.
- [2] 友田孝久, 和田紗希, 中村和行, 松村健三, 竹内伸介, 田中宏明, 金子智喜, 齋藤宏文 小型衛星合成開口レーダ (MicroXSAR) アンテナパネルの地上展開試験 第 59 回宇宙科学技術連合講演会講演集 2N08 2015 年.
- [3] 和田紗希 小型衛星における太陽電池パドルとアンテナパネルの共用化の検討 東京大学修士論文 2016 年.
- [4] 松井一吹, 竹谷昇, 岩崎愛樹, 石村康生, 中村和行, 杉本涼, 間瀬一郎, 友田孝久, 齋藤宏文 小型衛星合成開口レーダアンテナにおける熱変形評価 第 33 回宇宙構造・材料シンポジウム B02 2018 年.
- [5] 岩崎愛樹, 竹谷昇, 友田孝久, 中村和行, 久原隆博, 石村康生, 齋藤宏文, 高野敦 小型合成開口レーダ衛星搭載アンテナの展開再現性評価 第 33 回宇宙構造・材料シンポジウム B01 2018 年.
- [6] 岩崎愛樹, 馬場満久, 竹谷昇, 友田孝久, 中村和行, 久原隆博, 石村康生, 齋藤宏文, 高野敦 小型合成開口レーダ衛星搭載アンテナの地上展開試験を通じた展開性能評価 日本航空宇宙学会第 49 回年会講演会 1E03 2018 年.