

B01 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

○岩崎愛樹(神奈川大・学), 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(JAXA), 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(JAXA), Hirobumi Saito(JAXA), Atsushi Takano(Kanagawa University)

1. 緒言

現在, 人工衛星から地球を観測する際には光学衛星を用いるのが主流である。一方で, 自然災害等の緊急事態が発生した場合には即時的な観測が可能なシステムが求められており, 近年では, 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な合成開口レーダ(SAR: Synthetic Aperture Radar)が注目を集めている [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おり [3], 現在 EM の開発段階である。

本衛星の SAR アンテナは太陽電池パネルと一体型の構造となっており, 展開式のアンテナである。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)。

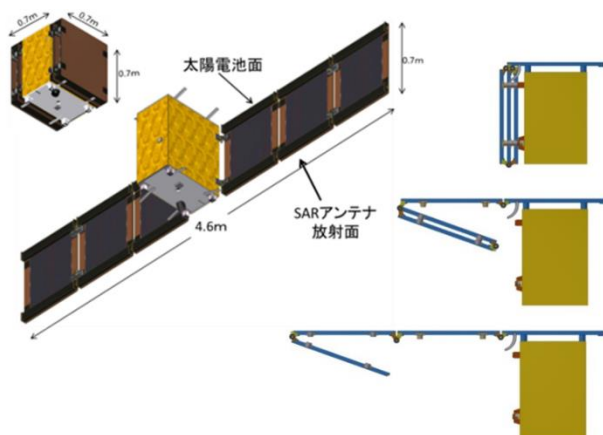


図 1 アンテナ展開形状と展開シーケンス

展開の動力にはばねを用いており, 保持開放機構によって収納しているアンテナを開放すると, 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, アンテナ展開面の形状設計精度として平均平面基準で 1mmRMS が要求されており, それらは表 2 に示すようにいくつかの誤差要因に配分される。

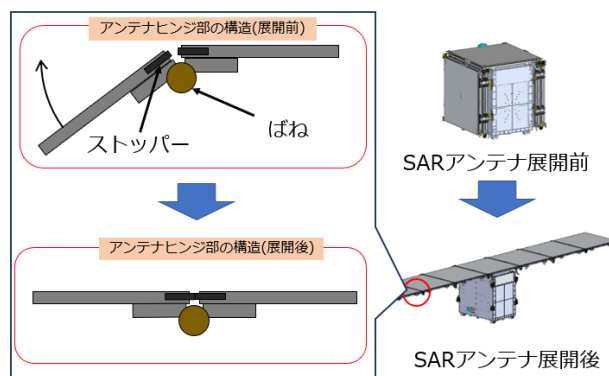


図 2 ヒンジ構造

表 1 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だが, 地上で調整したものを宇宙で展開するため, 複数回の展開動作において展開再現性を担保する必要がある。パネル製造誤差及びアンテナ熱変形における誤差配分については他試験において評価しており, 本稿では EM アンテナの展開再現性の誤差配分について評価した成果を報告する。

2. 展開試験

2.1 試験目的

展開試験の評価事項は複数回における展開再現性及び振動衝撃試験前後における展開再現性の 2 点である。いずれの評価にも RMS を用いた。

2.2 試験方法

2.2.1 試験装置

展開試験は地上で実施し, フォトグラメトリ計測法による三次元計測を行った(図 3)。



図 3 展開試験の様子

計測装置には AICON 3D Systems 社の DPA 計測装置を使用した。計測装置は撮影に使用する専用のカメラ、測定点となるマーカー、各撮影データのマーカー位置を対応付けるコードターゲット、長さを定義するスケールバー及び座標系を定義するクロスバーから構成される。3次元計測を実施するとアンテナ面に貼付したマーカーの3次元座標が出力され、それらの値を用いて評価を行う。AICON 3D Systems 社による計測装置のカタログスペックは $2\mu\text{m}+5\mu\text{m}/\text{m}$ とされている。

地上で試験を実施するにあたり、試験結果の妥当性を担保するために温度変化による影響、重力による影響、計測系の設置コンフィギュレーションの影響に関し検討する必要がある。ただし、温度変化の影響は熱歪計測試験において評価している。熱歪計測試験では室温からおよそ 20°C 加熱し、形状精度を評価した。それに対し本試験においては空調により室温は大きく変動せず、また、直射日光の影響を受けるなど室温に対して温度が大きく異なる要因もないため補正等を実施しないこととした。したがって、以下では重力と計測系設置コンフィギュレーションの影響に際し検証する。

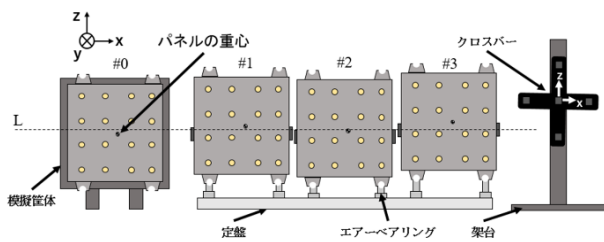


図 4 試験装置模式図

2.2.2 重力の影響

重力の影響に関しては図中 x , y 方向に重力が負荷しないよう設置し (図 4), エアーベアリングで定盤の上に浮上させることで補償している。エアーベアリングの出力は必ずしも一定ではなく、また、三次元計測には 10 分程度の時間を要するため、計測中に出力が変化することが計測結果に影響を及ぼす可能性を懸念した。そこで、展開が完了した状態でエアーベアリン

グへのエアの供給を停止した場合と開始した場合の計測結果を比較した。計測結果及び展開角の定義を図 5 に、計測結果を表 2 に示す。

なお、評価に用いた RMS は平均平面を基準としており、また、剛体変位除去後の各計測点の座標の差分から面外方向に対する差分の RMS を算出した。

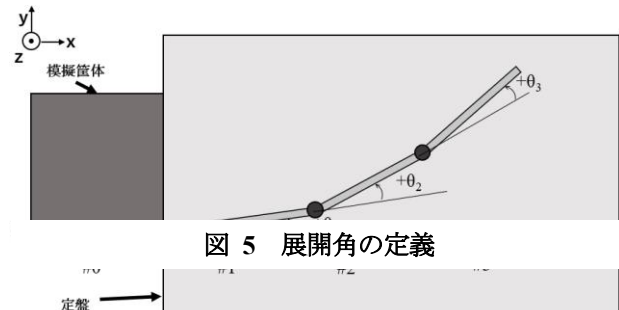


図 5 展開角の定義

表 2 重力補償の検証結果

試験条件	展開角[deg.]			エア圧力[MPa]			RMS[mm]
	θ_1	θ_2	θ_3	パネル#1	パネル#2	パネル#3	
エアベアリングを OFF	-0.1122	0.0338	-0.0188	0.00	0.00	0.00	0.026
エアベアリングを ON	-0.1139	0.0324	-0.0158	0.31	0.30	0.30	0.026
各計測点の座標の差分のRMS							0.014

エアベアリングが RMS の計測に与える影響は要求値 0.4mmRMS に対して 0.014mmRMS 程度であった。実際にはエアベアリングへ供給する圧力は $0.3 \pm 0.05\text{MPa}$ の範囲で調整しているため、展開再現性の評価における影響は本検証結果の範囲内であると考えられる。

2.2.3 計測系設置コンフィギュレーションの影響

計測装置のスケールバーとクロスバーはマーカーとコードターゲットを撮影した際に撮影範囲に収まる位置に設置する。試験の実施場所の都合で振動衝撃試験の前後にスケールバー及びクロスバーを再設置する必要があったため、アンテナ展開後にスケールバー及びクロスバーを移動させる前と後で3次元計測を実施し、その影響を確認した。試験装置の配置を図 6 に、計測結果を表 3 に示す。なお、クロスバーは三次元計測時の座標系を定義する装置であり、スケールバーは長さを定義する装置である。

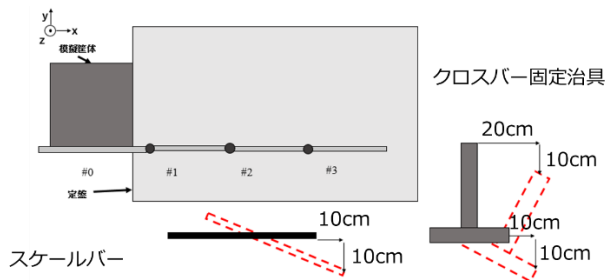


図 6 試験装置設置コンフィギュレーション模式図

表 3 計測系コンフィギュレーションの検証結果

試験条件	展開角[deg.]			RMS[mm]
	θ_1	θ_2	θ_3	
計測装置移動前	-0.1139	0.0324	-0.0158	0.026
計測装置移動後	-0.1000	0.0434	-0.0107	0.050
各計測点の座標の差分のRMS				0.076

要求値 0.4mmRMS に対して各計測点の座標の差分の RMS は 0.076mmRMS 程度であった。また、実際には試験装置は同じ位置に再配置しており、大きく位置が変わることはなく、少なくとも影響は同程度の範囲であると考えられる。

3 展開試験結果

3.1 試験条件及び概要

実施した試験条件を表 4 に示す。本来、運用時には一度のみの展開であるが、再現性を評価するにあたって何度も展開動作を実施する必要があった。そこで、アンテナに過負荷を与えないために、展開動作は動的展開と静的展開を実施した。動的展開は展開動力であるばねの力で展開させ、静的展開は手で支えながら衝撃の加わらないよう展開させた。

表 4 試験条件一覧

振動試験前		振動試験後	
測定番号	試験条件	測定番号	試験条件
1	動的展開	16	静的展開
2	動的展開	17	動的展開
3	動的展開	18	18の条件でエアのみOFF
4	動的展開	19	動的展開
5	動的展開	20	動的展開
6	動的展開	21	動的展開
7	動的展開	22	静的展開
8	動的展開	23	動的展開直後
9	動的展開	24	動的展開1時間後
10	動的展開	25	動的展開3時間後
11	動的展開	26	動的展開6時間後
12	動的展開	27	動的展開直後
13	静的展開	28	動的展開15分後
14	静的展開	29	動的展開30分後
15	静的展開	30	静的展開
		31	静的展開
		32	動的展開
		33	動的展開

本試験の結果を図 7 に示す。要求値 0.4mmRMS に対して RMS は十分小さく、形状精度要求を満たしていることが確認できた。また、前章で示した重力の影響や計測系設置コンフィギュレーションの影響を加味しても十分満たしていると言える。評価の際には試験

1 を基準に最小二乗誤差となるよう剛体変位を除去している。剛体変位除去後の形状を基準の試験 1 の計測結果と重ね、面外方向変位を 1000 倍した変形図を図 8 に示す。

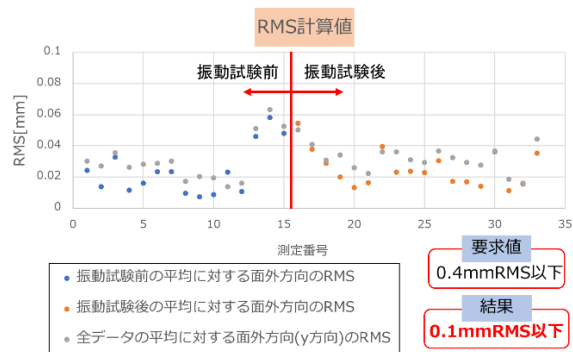


図 7 RMS 計測結果

図 8 中の上図が動的展開時の変形図を示し、下図が静的展開時、上下それぞれの右側の図が振動試験後、左側が振動試験前の結果を示している。以上から、動的展開時と比較して静的展開時は展開状態が不十分である傾向が確認された。そこで、複数の観点から展開形状を評価した。

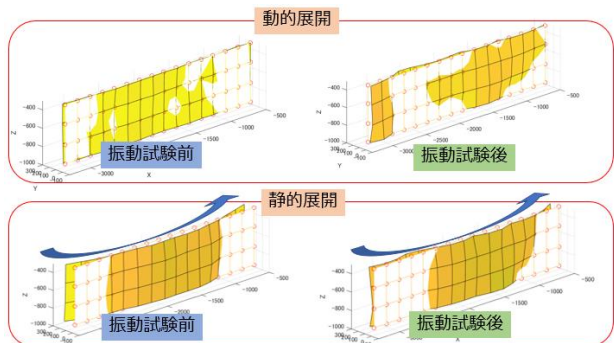


図 8 変位を 1000 倍した変形図

3.2 展開試験結果詳細

図 9 に各計測時の展開角の計測結果を示す。 θ_2 及び θ_3 において全ての計測を通して安定しており、大きな変化は確認されなかった。一方で、 θ_1 においては振動衝撃試験前後でばらつきの傾向が大きく変化していることがわかる。また、動的展開に対して静的展開の際には展開状態が不十分である傾向が確認された。

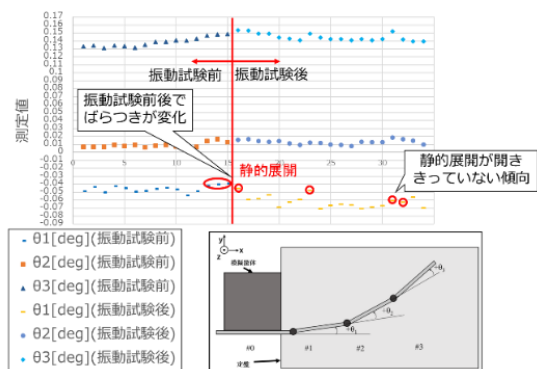


図 9 展開角計算結果

次に、隣り合うパネルの面外方向の相対角を図 10 に示す。これらの結果からもパネル#0 とパネル#1 の相対角の傾向が振動試験前後で変化しており、パネル#1 がパネル#0 に対する角度が小さくなっていることがわかる。

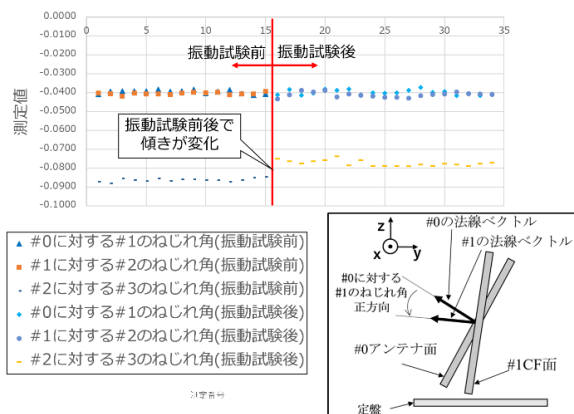


図 10 面外方向ねじれ角計算結果

隣り合うパネルの面内方向の相対角を図 11 に示す。これより、振動試験前に実施した静的展開時の計測結果から傾向が変化しており、パネル#1 のパネル#0 に対する相対角が大きくなっていることがわかる。

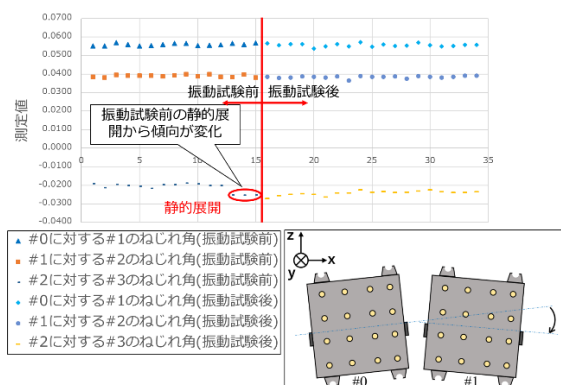


図 11 面内方向ねじれ角計算結果

3.3 原因の推定と検証予定

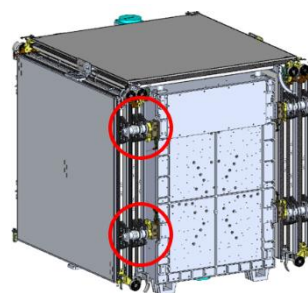


図 12 保持開放機構の位置

前節の結果から形状要求精度を十分に満たしている一方で、振動衝撃試験前後において計測結果のばらつきが拡大したと、静的展開時と動的展開時で計測結果に差異が生じていたことがわかった。以上の原因として考えられるのは、

保持開放機構によってパネルを収納保持したことによる影響である。

実際にパネルを収納する際には図 12 の保持開放機構によって強力に保持収納する。展開試験時には収納した状態を手で支えていた。

これらの影響を確かめるため、保持開放機構によるパネル保持収納前後において動的展開及び静的展開を複数回実施し、計測結果を比較する。

4. 結論

現在開発中の小型合成開口レーダ衛星搭載アンテナの形状評価を目的とした展開試験を実施し、以下の結論を得た。

- (1) アンテナの形状精度を RMS 値によって評価した結果、形状精度要求を十分に満たしている
- (2) 振動試験前後において形状精度要求の範囲内で展開状態の差異がある
- (3) 動的展開及び静的展開において形状精度要求の範囲内で展開状態の差異がある

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.