

B02 小型衛星用合成開口レーダーアンテナにおける熱変形評価

○松井一吹 (芝浦工業大学・院), 竹谷昇 (JAXA), 岩崎愛樹 (神奈川大学・学), 石村康生 (JAXA), 中村和行 (テクノソルバ), 杉本涼 (JAXA), 間瀬一郎 (NESTRA), 友田孝久 (JAXA), 齋藤宏文 (JAXA)

○Ibuki Matsui (Shibaura Insutitute of Technology), Noboru Takeya (JAXA), Aiki Iwasaki (Kanagawa University), Kosei Ishimura (JAXA), Kazuyuki Nakamura (Technosolver Corporation), Ryo Sugimoto (JAXA), Ichiro Mase (NESTRA), Takahisa Tomoda (JAXA) Hirobumi Saito (JAXA)

1. 序論

近年盛んに打ち上げられている小型衛星は,大型衛星に比べて開発期間が短く,低コストの開発・打ち上げが可能となっている.そのため,大型機では難しかった,小型衛星複数機による高頻度観測が可能となってきている.

また,地球観測衛星においては光学センサを用いた観測がよく行われている.しかし,これらの光学センサは太陽光の反射光を利用して観測を行う為,夜間や降雨時は地表を観測することはできない欠点がある.それに対して,光学センサの欠点を補うものとして,降雨や雲により大きな減衰を受けずに透過するマイクロ波を利用した合成開口レーダーアンテナ(synthetic aperture

radar,SAR)がある.SAR による観測方法は,アンテナから電波を放射し,その反射波を受信することである.SAR 衛星を小型化させて,高頻度打ち上げを行うことにより,全天候において同一点の高頻度観測が可能となる.

宇宙科学研究所では小型衛星搭載のための SAR アンテナの開発⁽¹⁾が行われている.図1に開発中の SAR アンテナの外観を示す.

小型 SAR 衛星に搭載される SAR アンテナは 7 枚の SAR アンテナパネルで構成されている.その内 1 枚は衛星バス部分の 1 面に固定されており,3 枚組 2 セットの SAR アンテナパネルが展開することで,軌道上においてアンテナの形状を獲得する.ロケットで軌道投入を行う際は SAR アンテナが収納されており,軌道投入後に展開される.SAR アンテナへのサイズ要求は展開時に SAR アンテナ全体で 4.9m×0.7m 以上,収納時に片側の SAR アンテナパネル 3 枚分で,0.7m×0.7m×0.15m となっている.

表 1 に SAR アンテナパネル形状精度要求を示す.面精度要求は SAR アンテナ全体で 1mmRMS(平均平面基準)以下となっている.この内,アンテナの熱変形には 0.7mmRMS が割り当てられている.

衛星を小型化するために挙げられる手段としては,搭載コンポーネントの小型・軽量化及び,衛星構造の小型・軽量化の 2 点がある.特に衛星構造の小型・軽量化に関して着目する.開発中の小型衛星搭載用 SAR アンテナでは,太陽電池

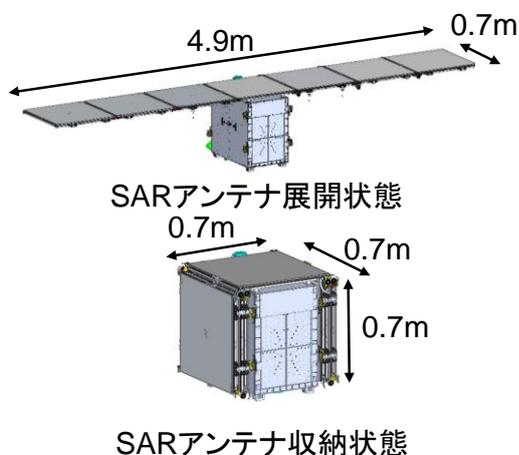


図 1 小型衛星用 SAR アンテナの外観

セルと SAR アンテナを 1 つのパネルに搭載することで、構造の小型・軽量化を図っている。(2)

図 2 に SAR アンテナ構造を示す。小型 SAR 衛星が太陽指向の姿勢を取っている場合、SAR アンテナ構造には 2 つの課題が発生する。1 つ目が熱入力面側に温度変化が大きい太陽電池セルが存在すること、2 つ目は熱入力を抑えたいアルミ製アンテナパネルが存在することである。アンテナパネルは電波特性要求によりアルミ製となっている。これに対して行っている対策が 2 つある。

1 つ目がサポートパネルと呼ばれる低熱膨張の CFRP 構造でアルミ製アンテナパネルを支持していることである。CFRP 構造とアルミ製アンテナパネルは、アルミハニカム構造のスペーサーによって接続されている。これによりアンテナパネルの熱変形を抑制する。

2 つ目はアルミ製アンテナパネルを SAR アンテナパネルごとに独立して取り付けることである。SAR アンテナパネルの間はヒンジによって接続されている。これによりアンテナパネルが熱変形を起こしても、SAR アンテナパネル間の角度変化に影響を与えにくくなるようにしている。これにより、SAR アンテナ全体の平面精度を要求値 1mmRMS 以下に保つように設計している。これらの 2 点の対策により、SAR アンテナの構造を小型

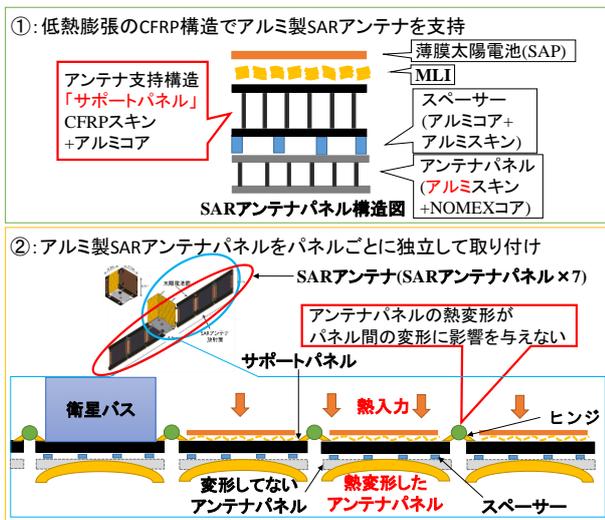


図 2 小型 SAR アンテナ構造説明図

・軽量化させ、かつ熱変形を抑制する。

図 3 に SAR アンテナの性能評価シーケンスを示す。最終的に SAR アンテナが軌道上で要求を満たす電波性能を発揮しているか確認する必要がある。大気中で熱変形試験を行い、解析モデルとの比較評価を行う。熱変形試験では SAR アンテナパネルに熱入力を行い、そのときの温度分布と、変形量を計測する。計測した温度分布を熱解析モデルのパラメーターとして入力し、その結果導出される変形量を、熱変形試験で計測した変形量と比較・評価する。このことにより、熱解析モデルの妥当性を検証する。本研究では、実施した大気中における熱変形試験について報告する。

2. 提案と手法

2.1 熱変形試験の概要

熱変形試験で計測する際の着目点は 2 つある。1 つ目は SAR アンテナを構成する 7 枚の SAR アンテナパネルを繋ぐヒンジである。ヒンジ部は、渦巻バネの力によって展開され、当たり面で展開後の位置が決めるようになっている。2 つ目は SAR アンテナを構成する SAR アンテナパネルである。図 4 に作成した熱変形試験装置の外観を示す。

寸法約 2m×2m のアルミフレーム構造からヒンジで接続された SAR アンテナパネル 2 枚を懸架する。懸架された SAR アンテナパネル #3 の

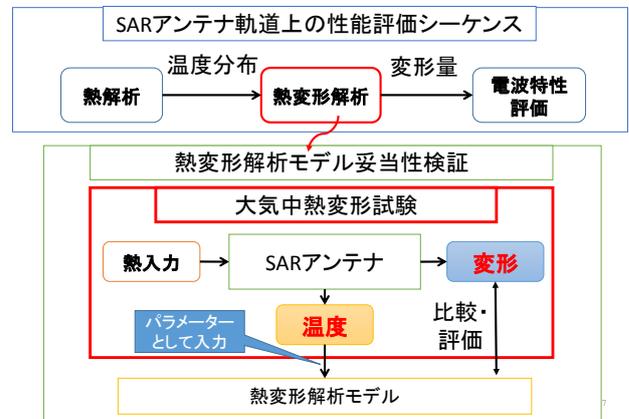


図 3 SAR アンテナ性能評価シーケンス

パネルの背面からヒーターをアルミ板に張り付けた、ヒーターパネルを用いて加熱を行う。

2.2 SAR アンテナへの熱入力方法

SAR アンテナパネルに図 5 に示すように、ヒーターパネルを用いて熱入力を行う。今回の熱変形試験において、熱入力を行う上で押さえておく点は以下の 3 点である。

1 つ目は SAR アンテナパネルの温度上限である、サポートパネルの温度が約 50°C 以上にならないようにする。これは使用している接着剤の剥離を懸念した結果となっている。

2 つ目は SAR アンテナパネルの厚み方向の温度差を約 10°C つけるようにすることである。軌道上で、SAR アンテナパネルを搭載した小型衛星を太陽指向の姿勢で運用する場合、太陽からの熱入力は太陽電池セルから行われる。今回の熱変形試験においては、SAR アンテナパネルに電池セルと、MLI は取り付けずに試験を行う。そのため、本試験の熱入力面はサポートパネルとなる。これより、本試験ではサポートパネル側から熱入力を行い、サポートパネルとアンテナパネルとの温度差を 10°C になるようにする。

3 つ目は SAR アンテナパネルの面内の温度分布が均一になるようにすることである。本試験は大気中で実施するため、室内空気の影響で上下方向(図 5 中の Z 軸方向)において温度差が生じる。

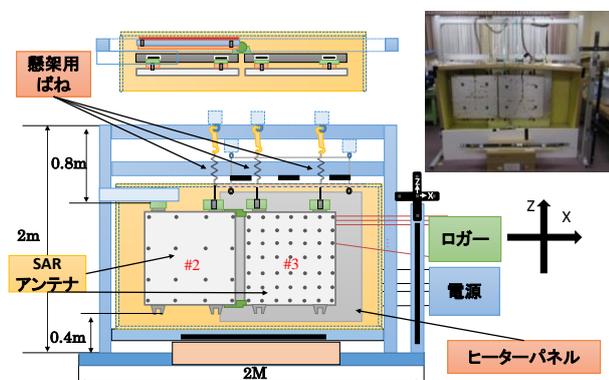


図 4 大気中熱変形試験装置外観

このために本試験では、SAR アンテナパネルの Z 軸方向の温度を考慮し、ヒーターパネルへの供給電力を調整する。このことにより SAR アンテナパネル Z 軸方向の温度分布を均一にする。そのため図 5 に示すように、ヒーターパネル上面のヒーターは供給電力を高くして、下面のヒーターは供給電力を小さくにする。

また、本試験では SAR アンテナパネルとヒーターパネルの周囲に、断熱用グラスウール製の壁を作っている。これにより室内の空気対流による温度変動を抑える。また、この断熱壁の天井部分には穴が空けられており、その上方に CPU ファンが取り付けられている。CPU ファンにより SAR アンテナパネル周りの空気は常に上方に吸い出されるようになっている。これにより、ヒーターによって加熱された空気が SAR アンテナパネル上部に留まらないようにしている。

熱入力を行う際の試験手順は次のように行う。図 5 に示すように、サポートパネルの MLI 側の面がおよそ 35°C になるよう、500mm×300mm の寸法のヒーターへ供給電力をする。ヒーターパネルの上面:中面,下面のヒーターにそれぞれ 0.15,0.1,0.02(W/cm²)の電力供給を行う。SAR アンテナパネルが熱平衡に到達後、次はサポートパネルの MLI 側の面の温度がおよそ 45°C にな

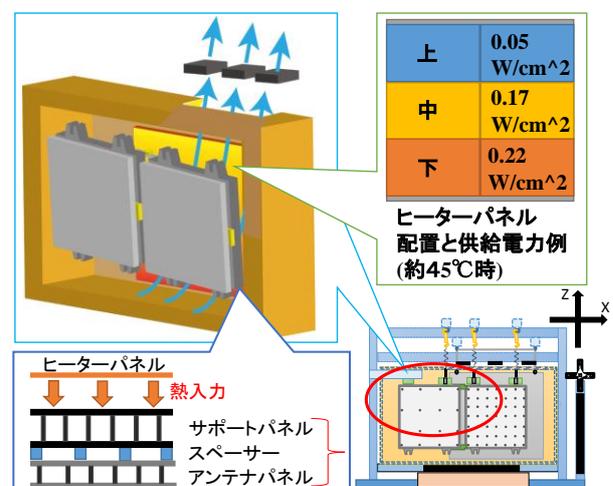


図 5 ヒーターパネル配置と供給電力

るようにヒーターに電力供給を行う。この時ヒーターパネルの上面:中面,下面に対して0.22,0.17,0.05(W/cm²)の電力供給を行う。その後熱平衡状態に到達すると,次は再びサポートパネルの MLI 側の温度がおおよそ 35°Cになるようにヒーターパネルへの供給電力を調整する。その後 35°C熱平衡状態到達後にヒーターへの電力供給を切り,室温まで戻す。本試験では熱平衡状態になる条件を SAR アンテナパネル上の各点温度変動が,±0.5°C/20分になることとしている。

2.3 温度計測方法

本試験において,SAR アンテナの温度を計測する方法は2つある。

1つ目の計測方法は熱電対を SAR アンテナパネルの各部に貼り付けて,温度を離散的に計測する方法である。熱電対を SAR アンテナパネルに取り付ける際のポイントを以下に述べる。

まず SAR アンテナパネルの厚み方向の温度を計測する必要がある。そのため,SAR アンテナパネルの平面方向の同一点において,サポートパネルの厚み方向の MLI が貼られる側と,スペーサーが取り付けられる側及び,アンテナパネルの表と裏の計4点に熱電対が貼られる。

また SAR アンテナの平面方向に対しても熱電対の配置を考慮している。本試験は大気中で温度計測を行うため,地面に対して上下方向(Z軸方向)に温度差が付きやすい。そのため SAR アンテナパネルの Z 軸方向に,複数点の熱電対を配置している。また,SAR アンテナパネルにおける X 軸方向に関しては対称性を考慮して配置数を削減している。

加えて SAR アンテナパネルの間を接続するヒンジ部分の温度も計測する。

2つ目の計測方法はサーモビューアで SAR アンテナパネルを撮影して温度分布を連続的に計測する方法である。この計測により SAR アン

テナパネル内にヒートスポットが存在しないか確認することができる。

2.4 パネルの拘束条件

SAR アンテナパネルを実験装置のフレームに取り付けることにより,SAR アンテナパネルを拘束する。図 6 に取り付けに関しての図を載せる。SAR アンテナパネルは変位拘束1点と力拘束3点により実験装置のフレームから吊られている。この際のポイントを以下に2点述べる。

1つ目は SAR アンテナパネル#2 と#3 の平行度を調整可能な点である。力拘束点3点にはそれぞれバネとターンバックルが取り付けられている。ターンバックルの長さを調整することで,SAR アンテナパネル#2 と#3 の懸架点の図6中の Z 軸方向に位置を調整することが出来る。これによりパネル間を繋ぐヒンジに余計な力がかからない様に調整する。

2つ目は SAR アンテナパネル#2 の1点を6自由度変位拘束することで,変形量計測時に SAR アンテナパネル#2 を基準平面とすることである。

2.5 パネル変形の計測方法

本試験では SAR アンテナパネルの熱変形

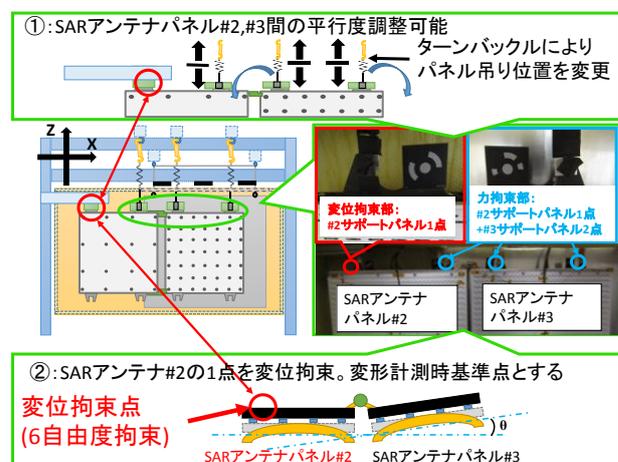


図 6 SAR アンテナパネル拘束条件

をフォトグラメトリにより計測する.使用したフォトグラメトリの計測精度は $2\mu\text{m}\pm 5\mu\text{m}$ である.このフォトグラメトリは,計測対象の SAR アンテナパネルに座標検出用のマーカーを貼り,フォトグラメトリにより計測対象を複数の方向から撮影することで,座標群を取得する.座標検出用のマーカーを貼る際のポイントが2つある.

1 つ目は SAR アンテナパネル#2 にマーカーを貼る際に,SAR アンテナパネルが基準の座標面として扱える程度の数である 4×4 個のマーカーを貼っている点である.

2 つ目は SAR アンテナパネル#3 にマーカーを貼る際に,SAR アンテナパネルに搭載されている導波管による折れ変形を考慮した計測をすることが出来るよう, 7×7 個のマーカーを貼り付けている点である.

3 結果と考察

熱変形モデルを開発する際に,その妥当性の裏付けとして比較資料となる,大気中環境下における熱変形試験計測データの報告を行う.

3.1 温度計測と経過時間の計測結果

図7に熱電対による温度計測結果を時間経過と対応させて示す.本試験では,サポートパネル

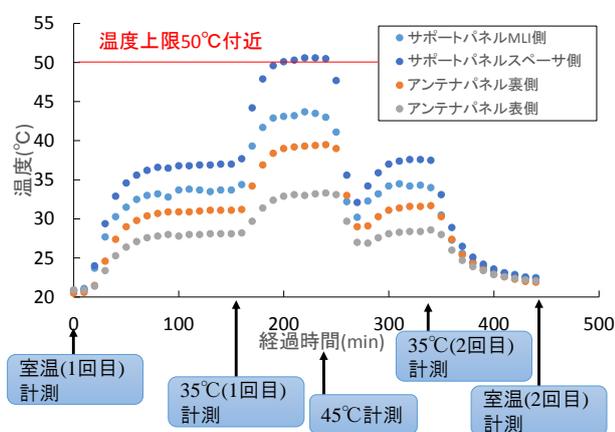


図7 熱電対温度計測-時間経過グラフ

の温度が室温時約 20°C ,約 35°C ,約 45°C の3水準の温度になるよう SAR アンテナに熱入力を行っている.図7のグラフより,サポートパネルの MLI が取り付けられる側の温度が定義した温度変動 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}/20$ 分の条件を満たしており,温度平衡状態になっていることが分かる. また,SAR アンテナパネルの組み立てに使用される接着剤の剥離を考慮して設定した温度上限約 50°C の条件も満たしていることが分かる.

3.2 SAR アンテナパネル温度分布

図8にサポートパネルの MLI が取り付けられる側と,アンテナパネルの表側の温度差を SAR アンテナパネルの上の位置と対応させたグラフを示す.このグラフより,サポートパネルとアンテナパネルの温度差は 10°C 付近の温度差が付いたことが分かる.

またC点 17.2°C ,D点 14.8°C の温度差がついていることが分かる.このことより SAR アンテナパネルに搭載されている導波管付近の温度差が大きくなっていることが分かる.このような結果が示された理由としては,ヒーターパネルにより加熱された空気が SAR アンテナパネルの構造を通過していく際に,導波管付近に暖か

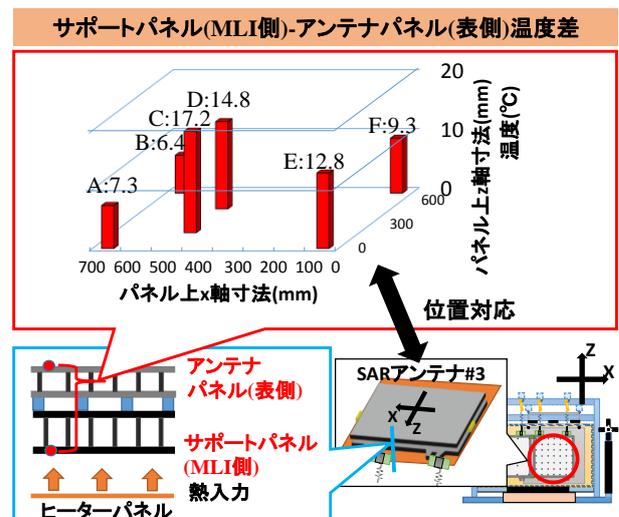


図8 熱電対計測温度差-位置対応グラフ

い空気が留まる為、C 点と D 点の温度差が大きくなったと考えられる。

また、図 9 にサーモビューアで計測した温度測定結果を示す。35℃と、45℃温度計測時の計測結果画像より、導波管周りの温度が周囲の温度に比べて高くなっており、熱電対で計測した計測結果と同じ傾向が見られることが分かった。

3.3 SAR アンテナパネル変形量計測結果

図 10 にフォトグラメトリにより撮影した SAR アンテナの変形量計測結果を示す。図 10 中の 45℃温度計測時の結果より、SAR アンテナには 2 種類の現象により引き起こされる 3 種類の変形モードがある。

1 つ目の現象が貼り合わせた材料間の熱膨張係数の差により反り変形を起こすバイメタル効果である⁽³⁾。

この現象の影響を受けている変形モード A がある。図 10 中の変形モード A で示しているように、アンテナパネル及び、パネル同士を接続するアルミスペーサを構成する材料アルミニウム(AL) の熱膨張係数は、サポートパネルを構成する材料 CFRP 比べて約 10 倍大きい。そのため、図 10 中変形モード A の赤色で示される、アルミスペーサでアンテナパネルとサポートパネルが接続されている領域が、バイメタル効果の影響により変形していると考えられる。

2 つ目の現象は同一物体の表裏の温度差に

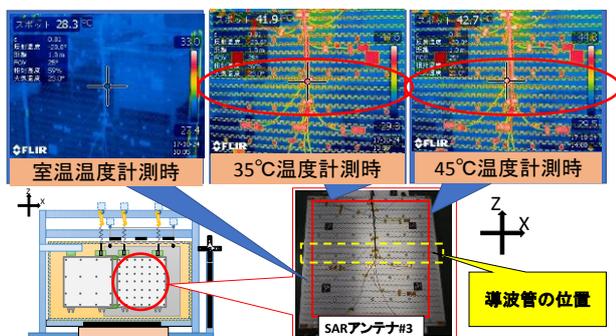


図 9 サーモビューアによる温度計測結果

よる変形である。この現象の影響を受けている変形モード B と C の 2 つがある。

まず、図 10 中変形モード B の赤色で示される領域に示すように、アルミニウム製アンテナパネルの裏側に設置されている導波管の影響が考えられる。この導波管の表裏には約 3℃温度差が付いており、このことにより Y 軸方向に反る変形をしたと考えられる。

次に、図 10 中変形モード C の赤いに示すように図 7 のアンテナパネルの表裏の温度差結果においてアンテナパネルの裏面の方が表面より約 5℃ほど高くなっていることが分かる。このことよりアンテナパネルの四隅が Y 軸方向に向かって反り変形を起こしていることが分かる。

上記の 3 つの変形モードを踏まえた上で、図 10 よりサポートパネルを 45℃目安に、SAR アンテナパネルを加熱した時のアンテナパネル表側(SAR アンテナ放射面)の変位は、最大で 0.4mm 程度であることが分かった。

また図 11 に室温、35℃、45℃の温度水準時の変形量計測結果を示す。この結果を見ると、ヒーターパネルによる熱入力を行う前の、室温(1 回目)温度計測時の結果と熱入力を行い、冷却後に計測した室温(2 回目)温度計測時の結果を比較すると、変形の差は見られないことが分かる。これ

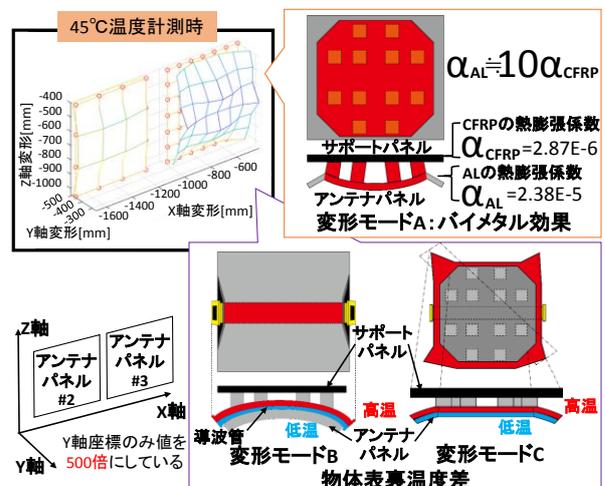


図 10 SAR アンテナパネル変形モード考察

より,熱変形によるヒステリシスは見られないことが分かった。

3.4 SAR アンテナパネル変形角度計測結果

図 12 にフォトグラメトリで計測した座標系を数値処理し,SAR アンテナパネル#2 と#3 間の展開角度に変換したものを示す.この結果より,どの温度水準においても,3.3 章で触れたアンテナパネルの表側(SAR アンテナ放射面)の変位 0.4mm に比べて,最大で 0.06mm 程度値が出ており,1桁小さい変位となっている. このことに

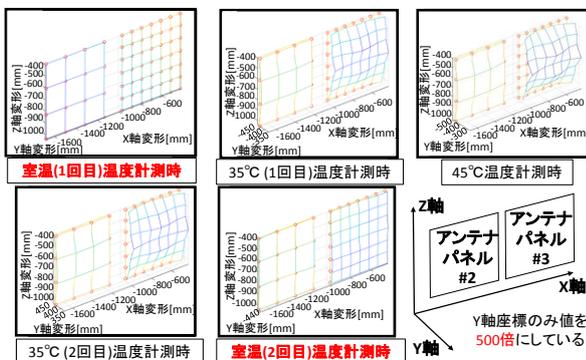


図 11 フォトグラメトリによる変形量計測結果

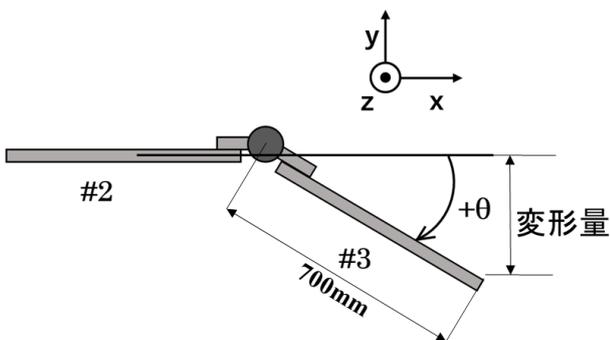


図 12 SAR アンテナパネル展開角度図

表 1 温度別展開角度-変形量結果

サポートパネルMLI側温度[°C]	展開角[deg]	変位[mm]
室温1回目	0.0059	0(基準)
35°C1回目	0.011	0.062
45°C	0.0097	0.046
35°C2回目	0.0103	0.054
室温2回目	0.009	0.038

より,ヒンジの熱変形の影響は SAR アンテナパネル自体の熱変形と比べると無視できる程小さいことが分かった。

4 結言

熱解析モデルの妥当性を評価する際に使用する熱変形データを計測するために,大気中における熱変形試験を実施した。

計測温度に関しては,試験設定として定めたサポートパネルの上限温度<約 50°C及び,サポートパネルとアンテナパネルの間で 10°C付近の温度差が実現できていることが分かった.このことより,目的とした温度条件を満たしていた。

また計測した変形量に関しては,SAR アンテナパネル1枚の変位は最大0.4mm程度に対してヒンジの熱変形による変位は最大で 0.06mm程度であった.この結果は SAR アンテナパネルの熱変形に比べて無視できる程小さいことが分かった。

今後の展望としては本研究で計測した温度と変位データを用いて,熱変形解析モデルと比較・評価を行い,熱変形解析モデルの妥当性を検証する。

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.ここに感謝の意を表します。

参考文献

- Hirobumi Saito, Akbar, Prilando Rizki Ravindra Vinay,Hiromi Watanabe, Atsushi Tomiki , Jiro Hirokawa, Zhang Miao, Shirasaka Seiko,COMPACT X-band SYNTHETIC APERTURE RADAR with DEPLOYABLE PLANE ANTENNA –PROJECT of a100kg-CLASS SAR SATELLITE -,10th IAA Symposium on Small

Satellites for Earth Observation, Berlin, April

20-24, (2015)

- 2) 和田紗希, 杉本涼, 間瀬一郎, 石村康生, 馬場満久,
中村和行, 齋藤宏文, 太陽電池兼用小型 SAR アン
テナの熱設計, Proceedings of the 17th Space
Science Symposium, ISAS/JAXA, (2017)
- 3) 市川直樹, 黒河治久, 矢島信之, 小鍛冶繁, 鈴木章夫,
大型パネルの表裏温度差による熱変形の評価,
日本航空宇宙学会誌 第 40 巻 第 461 号, 6/1992