

# B05 ハニカムサンドイッチ構造を有する衛星搭載アンテナの熱変形に関する検討

○岩崎愛樹(神奈川大・院), 石村康生(早稲田大学), 中村和行, 久原隆博(株式会社テクノソルバ)  
齋藤宏文(JAXA), 喜多村竜太, 高野敦(神奈川大学)

○Aiki Iwasaki(Kanagawa University), Kosei Ishimura(Waseda University),  
Kazuyuki Nakamura, Takahiro Kuhara(Technosolver Corporation),  
Hirombumi Saito(JAXA), Ryuta Kitamura and 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(図1)<sup>[1][2]</sup>。

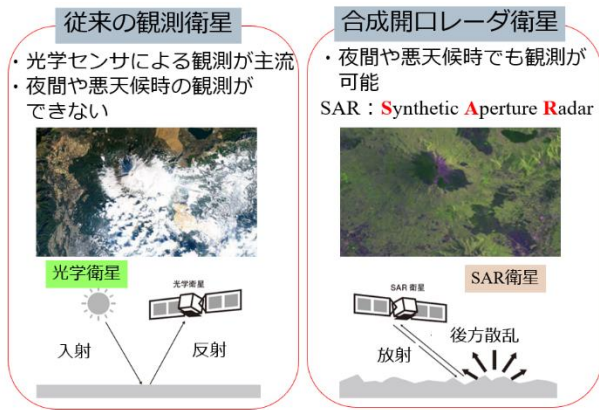


図1 光学衛星と SAR 衛星の違い

高頻度な観測を行うためには複数機による観測が必要となるため、低コストかつ開発期間が短い小型の SAR 衛星が有用である。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<sup>[3]</sup>、太陽電池パネルとアンテナを一体化させることで小型軽量化を実現する。

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。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2)。

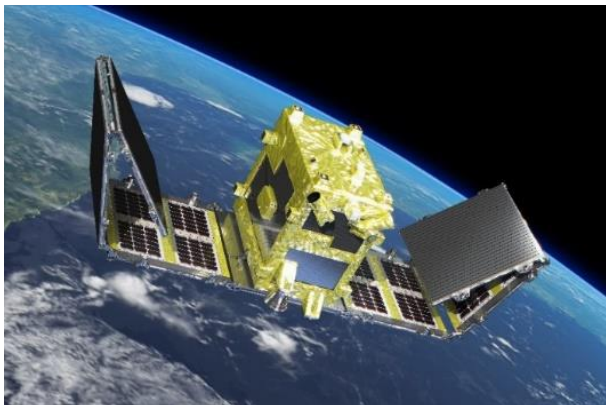


図2 アンテナの展開方式

収納しているアンテナを開放すると、ヒンジ部に内蔵されているばねによってパネルが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3)。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る。

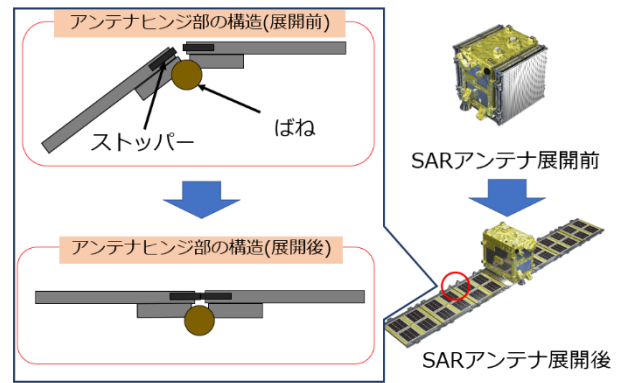


図3 ヒンジ構造

アンテナの形状はレーダの性能に寄与するため、変形を抑制することは有用であると言える。本稿では熱変形に着目し、構造的に熱変形を抑制する手法について検討した成果を述べる。

## 2. 熱変形に関する課題

軌道上における衛星への外部熱入力、太陽からの輻射熱、地球からの輻射熱が想定される。アンテナの変形はレーダの性能に影響があるため、アンテナ内の局所温度差が大きくなった場合に生じる熱変形は性能に悪影響を及ぼす可能性がある。

図4に示す運用パターンにおいて、熱解析によって熱分布の予測を行った結果、日陰から出た後すぐに観測を始めると温度が低下しすぎるために温度差によるアンテナの熱変形が大きくなる可能性が懸念された。そこで、温度が低下しすぎることを避けるため、観測の前に衛星を地心に向けて温めるように運用することで対処することになった。

一方で、構造的に変形を抑制することができれば、こうした運用に対する制約を軽減することができると考えられる。

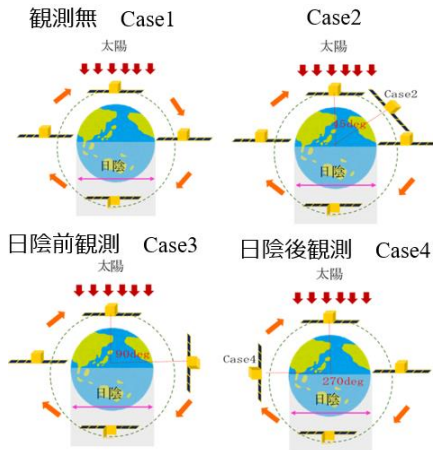


図 4 運用パターン

### 3. アンテナの構造

本衛星のアンテナを構成するパネルは、アンテナパネルとサポートパネル、それらを接続するスペーサから成る。アンテナパネルはアルミスキンとアラミド繊維ハニカムコアのハニカムサンドイッチ構造となっている。また、サポートパネルはCFRPスキンとアルミハニカムコアのハニカムサンドイッチ構造となっている。熱膨張率の大きいアルミ製のアンテナパネルのみでは大きな反りを生じる可能性があり、それを熱膨張率の低いサポートパネルで支持することで抑制する。各パネルの構造を図5に示す。このパネルを7枚接続することでアンテナを構成する。

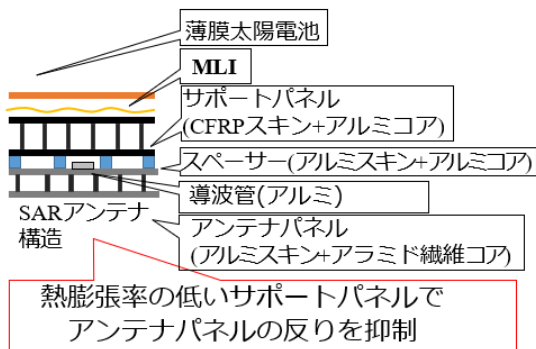


図 5 パネルの構造

各パネルはヒンジによって接続されている。各パネルの熱変形が隣り合うパネルに影響しにくいように、熱膨張率の低いサポートパネルにヒンジを設置している (図6)。

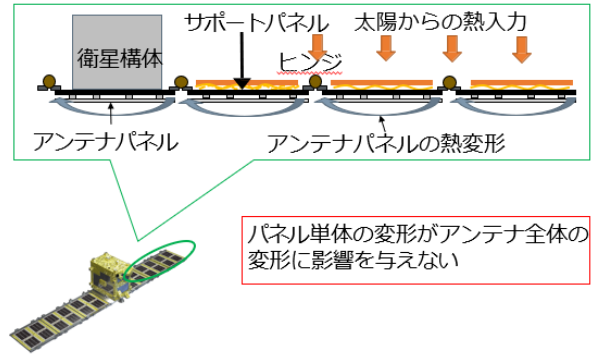


図 6 パネル間の接続

### 4. 大気中熱変形実測試験

本衛星のアンテナは上述の通り各パネルの変形がアンテナ全体の形状に影響を与えにくい構造となっていることから、各パネルの変形に対する検討及びパネル間を接続するヒンジの熱変形を検討することが有用であると考えられる。そこで、EM 熱変形計測試験<sup>[4]</sup>の結果から、それぞれがどの程度影響しているかを確認した<sup>[5]</sup>ところ、ヒンジの熱変形が与える影響は面外方向変位に換算すると 0.06mm 程度であり、パネル単体の面外方向変位 0.2mm に対して非常に小さいことが明らかとなった<sup>[6]</sup>。以上から、パネル単体の変形を抑制することが最も有効であると言える。

熱変形計測試験は2枚のアンテナを吊り下げ、一方のアンテナを拘束した状態でアンテナと平行に設置したヒーターの輻射熱によって加熱し変形を計測している (図7)。また、実測した熱変形の面外方向変位を500倍にしてプロットしたものを図8に示す。全体の変形モードは、中央に設置されている導波管の変形が支配的であることがわかる。

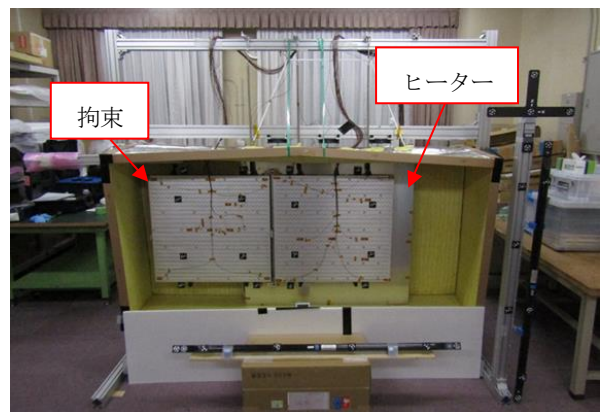


図 7 熱歪計測試験装置

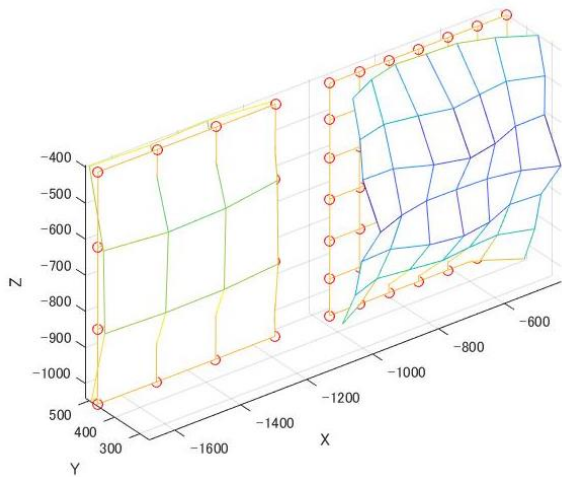


図 8 面外方向変位の実測値 (500 倍誇張)

## 5. 熱変形解析

### 5.1 実測試験と解析の比較

有限要素解析により、パネル単体における熱変形の見積もりを行い、図 8 の熱変形計測試験の実測値と比較した。温度の条件は熱変形計測試験時と同様に室温 (25°C) から 45°C まで加熱し、各温度時は温度平衡状態となる条件を与えた。アンテナパネルの熱変形解析の構成を図 9 に示す。アンテナパネル、サポートパネル、スペーサはそれぞれ 1 枚の板要素で表現し、導波管は板要素を組み合わせた筒で表現している。また、各板要素は剛体要素で接続した。

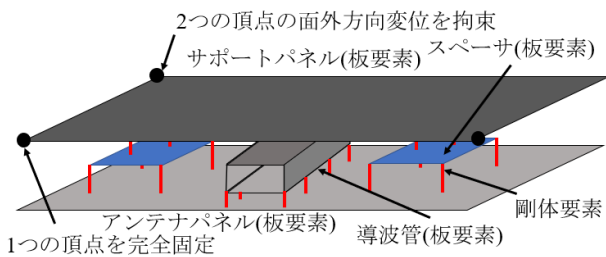


図 9 解析モデルの構成

解析ソフト上ではパネル全体の大きな反りを生じるため、解析結果を比較するには回転を除去して比較する必要がある。そこで、図 10 のようにベストフィット平面を計算し、それを基準に比較を行った。

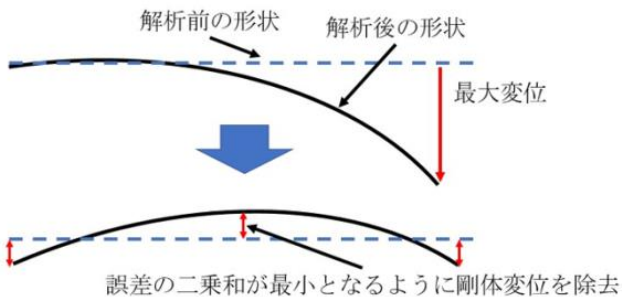


図 10 パネル全体の回転の処理

上述した条件で解析を実施した結果を図 11 に示す。コンター図と実測の変形図を比較すると、同様の変形モードが表現できていることがわかる。

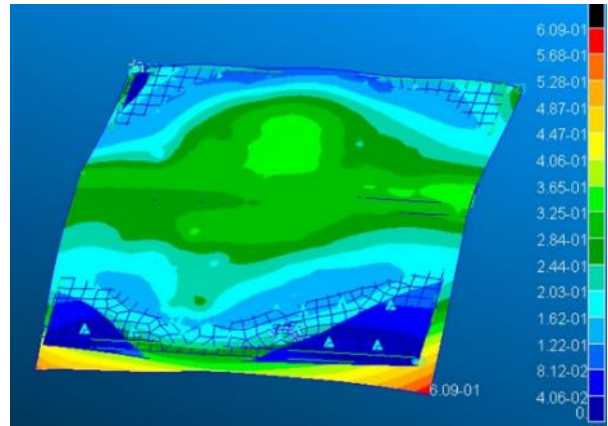


図 11 実測試験と同じ条件の解析結果コンター図

また、モデルの回転を除去し、ベストフィット平面を基準に RMS と最大変位を算出して実測値と比較した。結果を表 1 に示す。以上の結果から、妥当な解析結果を得ることができたと考えられる。

表 1 RMS と最大変位の実測値と解析結果の比較

	RMS[mm]	最大面外方向変位[mm]
実測(ベストフィット平面基準)	0.115	0.218
解析(ベストフィット平面基準)	0.181	0.237

### 5.2 スペーサを導波管方向に延長

熱変形の実測 (図 8) や解析結果 (図 11) から、導波管の変形がパネル全体の变形モードに対して支配的であることがわかる。そこで、スペーサを導波管方向に延長した場合 (条件①) と導波管に垂直な方向に延長した場合 (条件②)、いずれの方向にも延長した場合 (条件③) の 3 通りの解析を行い、それぞれ比較した。図 12 に元々のスペーサの位置を、図 13 に導波管方向に延長した場合のスペーサ位置を、図 14 に解析結果のコンター図を示す。変形の大きさは異なるものの、類似した変形モードが確認できる。

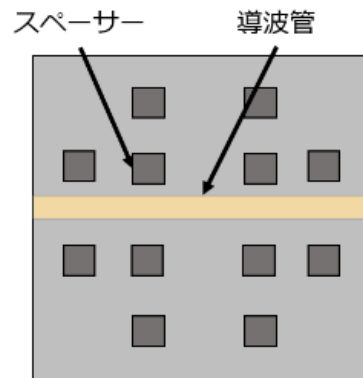


図 12 スペーサの位置 (元々)



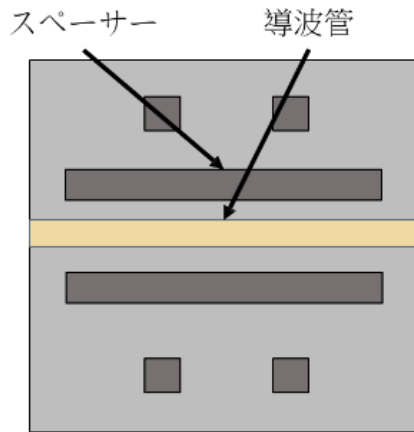


図 13 スペーサの位置 (条件①)

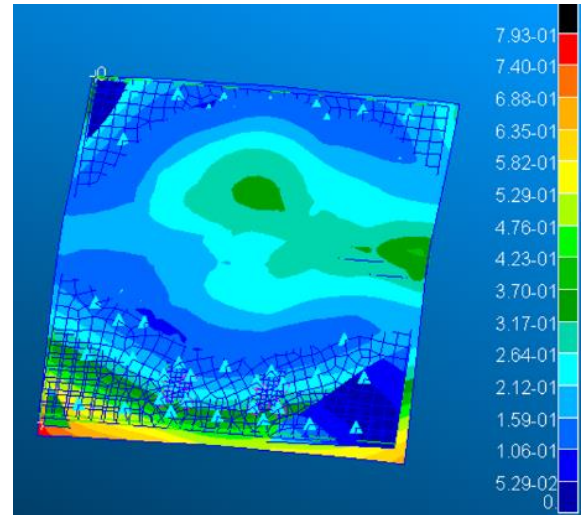


図 16 面外変位コンター図 (条件②)

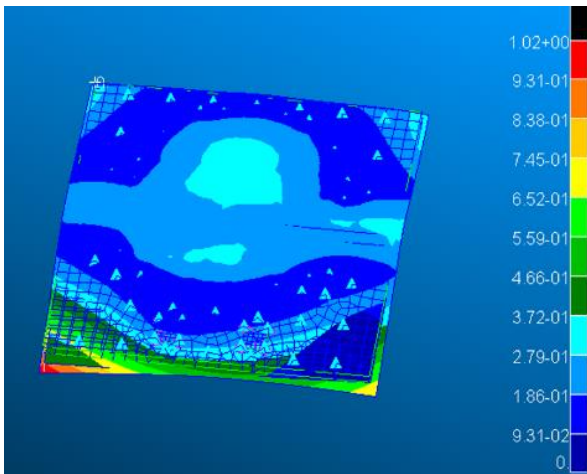


図 14 面外変位コンター図 (条件①)

#### 5.4 いずれの方向にも導波管を延長

導波管の水平方向と垂直方向それぞれにスペーサを延長した場合はいずれも大きな変化はなかった。そこで、いずれの条件も与えたスペーサ形状で解析を実施した。その結果を図 17 及び図 18 に示す。この条件ではアンテナパネルとサポートパネルの非常に広い範囲をスペーサによって接続することになるが、本条件でも変形量が多少変化するのみであり、変形モードに大きな違いは確認できなかった。

#### 5.3 スペーサを導波管に垂直な方向に延長

次に、導波管に垂直な方向にスペーサを延長した場合の解析結果を示す。この条件でも変形モードは大きく変わらず、変形量が多少変化する程度であった。

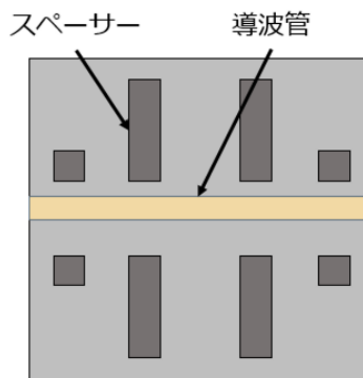


図 15 スペーサ位置 (条件②)

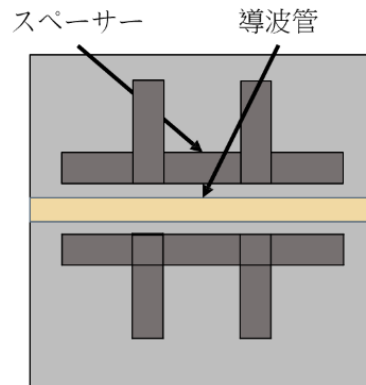


図 17 スペーサ位置 (条件③)

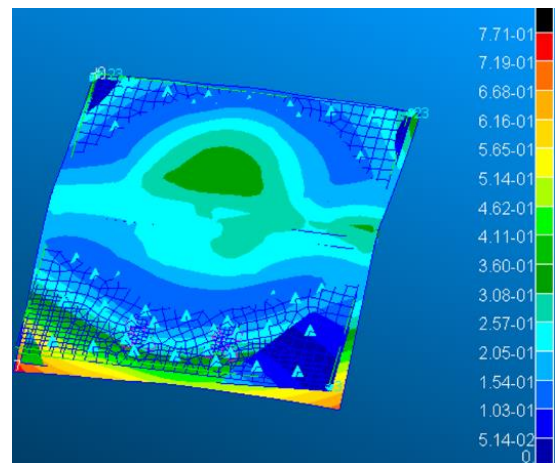


図 18 面外変位コンター図 (条件③)

#### 5.4 解析結果の比較

図 14, 16, 18 の解析結果から、ベストフィット平面を基準とした RMS 及び最大面外方向変位を計算した結果を表 2 に示す。元々のスペーサ位置の条件と比べて大きな変化もなく、傾向としては僅かに変形が大きくなることが確認できた。

以上の結果から、スペーサを一枚のシェル要素で表現したことが大きな変化が確認できなかった要因である可能性がある。実際にはスペーサは厚みのあるハニカムサンドイッチであり、アンテナパネルが膨張するとせん断変形を生じると考えられる。しかし、一枚のシェル要素でモデルを作成しているためせん断変形は表現できていない。

今後はシェル要素で表現していたスペーサを図 19 に示すようなソリッド要素に置き換え、精度の向上を図る。

表 2 RMS と最大変位の解析結果 (条件①～③)

解析条件	RMS[mm]	最大面外方向変位[mm]
スペーサー変更前	0.1811	0.2372
導波管方向	0.2128	0.3198
導波管垂直方向	0.1958	0.2695
上記両方の条件	0.1984	0.2792

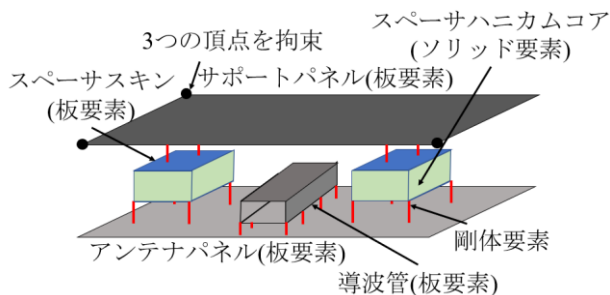


図 19 解析モデルの改善方針

#### 6. 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) パネル単体の熱変形を構造的に抑制することで衛星の運用に対する制約を軽減することができる。
- (2) 2枚のハニカムサンドイッチパネルを接続する構造において、接続部品のせん断剛性を加味したモデルに改良することで、パネル接続の条件を変更した場合の違いをより正確に表現できると考えられる。

#### 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] 石村康生, 齋藤宏文, 中村和行, 松井一吹, 岩崎愛樹, 竹谷昇, 友田孝久, 馬場満久, 竹内伸介 小型 SAR アンテナ構造の EM 開発 第 60 回構造強度に関する講演会 1B21 2018 年.
- [6] 岩崎愛樹, 中村和行, 久原隆博, 石村康生, 齋藤宏文, 高野敦 小型衛星搭載用 SAR アンテナの熱変形の構造的な抑制 第 61 回構造強度に関する講演会 1A07 2019 年.