

薄型合成開口レーダー衛星を実現する展開型スロットアレーアンテナ

Deployable Slot Array Antenna for Quasi- Two Dimensional Radar



齋藤 宏文 (Hirobumi Saito, Ph. D.)

早稲田大学理工学術院 客員教授 工学博士

(Faculty of Science and Engineering, Waseda University, Visiting Professor, Dr. Engineering)

電子情報通信学会、日本航空宇宙学会

受賞：電子情報通信学会論文賞（論文誌B、2016年）、小型衛星搭載用の省電力高速送信機の開発、第19回日本航空宇宙学会技術賞「小型科学衛星“れいめい”」2010年、宇宙航空研究開発機構理事長表彰、「放射線耐性強化半導体集積回路の開発」、2010年、2012年度科学技術分野の文部科学大臣表彰、科学技術賞、開発部門、「宇宙と民生に共通的に利用できる耐放射線性集積回路の開発」、2007年 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference, Outstanding Conference Paper Award, IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers)

著書：アメリカにおける小型衛星開発の動向 日本ロケット協会モノグラフ1 1995、(共著) Small Satellites, Past, Present, and Future (AIAA)、Henry Helvajian, Siegfried W. Janson, Hirobumi Saito(分担執筆), et. al., American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), Japan's Small Scientific Satellite, INDEX (Reimei), pp. 449-485, 2009、(共著) 自由電子レーザとその応用 電気学会 コロナ社, 1990.

研究専門分野：宇宙電子工学、小型衛星工学

あらまし

小型衛星に搭載できる全天候型の地球センサーであるマイクロ波合成開口レーダーに関して、サブメートル級の地上分解能に対応する形状安定性に優れた全CFRP製SARアンテナの研究を行った。X帯で周波数帯域600MHzを持つ2次元導波管スロットアレーアンテナ

の電気設計を行い、線膨張率がアルミニウムの1/10程度である炭素繊維強化プラスチック(CFRP)にて部材製造した。絶縁物であるCFRP表面に、表面導電性を与えるためのめっき処理の技術開発を行った。複雑表面形状を持つCFRPアンテナの電解めっき処理で様々な技術的困難に遭遇した結果、設計値より4dB劣化したアンテナ利得が計測された。めっき工程が簡単な無電解めっきだけを用いる方法も試みて、部分的な改善を得た。

本研究に用いている展開式スロットアレーアンテナは、薄型のレーダー衛星(SAR DiskSat)を可能にするものである。令和4年度後半から、本研究の成果を生かして、高分解能化が容易である高度350km程度の超低高度軌道で、大気抵抗が小さい薄型レーダー衛星SAR DiskSat開発に着手する。

1. 研究の目的

本研究では、小型衛星に搭載できる全天候型の地球センサーであるマイクロ波合成開口レーダーに関して、サブメートル級の地上分解能に対応する形状安定性に優れた全CFRP製SARアンテナの研究を行う。その技術を利用する事により多数機の小型レーダー衛星による高分解能で高頻度の全天候型地球観測が可能となり、我が国の新たなビジネス機会の創生と社会の安全安心に貢献する。

2. 研究の背景

近年の宇宙開発では、多数の小型衛星からなる衛星群ミッションの台頭が著しい。米国Planet Labs社は、観測により、昼間晴天領域の全地球モニタを高い観測頻度で実施している[1]。これにより、地球上のいかなる場所でも、昼間の晴天であれば、1日以下の間隔で光学画像情報を商業的に入手できる。このように小型衛星による地球観測は、フィジカル空間から様々な地球規模の地表情報を収集してサイバー空間に情報を入力することができるセンシングツールとなっている。しかし、光学観測では晴天域の昼間だけの観測となり、グローバルな準リアルタイム情報とはならない。天候と昼夜を問わず高頻度な地表観測を行うためには、マイクロ波合成開口レーダー(Synthetic Aperture

薄型合成開口レーダー衛星を実現する展開型スロットアレーアンテナ

Deployable Slot Array Antenna for Quasi- Two Dimensional Radar

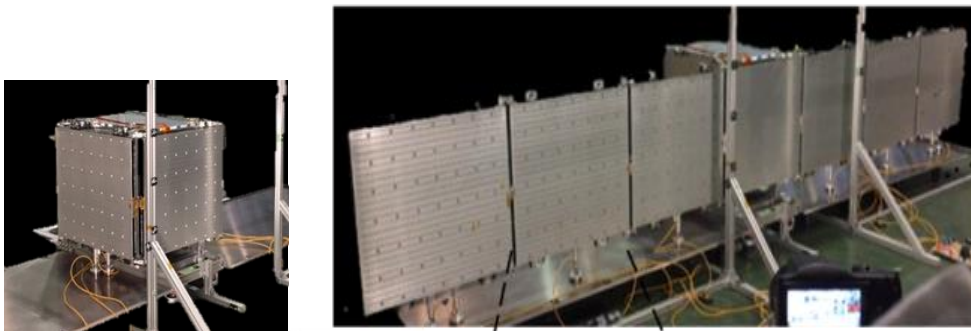
Radar、SAR)*1 搭載の低コストな小型衛星を実現し、多数の小型 SAR 衛星からなる衛星群ミッションが有望視されており、欧米の複数の企業 (Iceye 社[2]、Capella Space 社[3])は数機から 20 機以上の小型 SAR 衛星を軌道上に配置している。

わが国では本研究グループが 2013-18 年に地上分解能 1m の小型衛星搭載用マイクロ波合成開口レーダーを研究開発した[4]。その SAR システムを搭載した小型衛星は、小型 SAR 衛星群を運用して SAR 画像情報を高度処理し販売するスタートアップの民間会社 Synspecive により、2020 年以来合計 3 機の小型 SAR 衛星が打ち上げられた[5]。

現在運用中の小型 SAR 衛星では、図 1 に示すような、展開後には 5mx0.7m になるアラミド紙ハニカムコア

とアルミスキンを利用した展開式 2 次元スロットアレーアンテナ*2 が利用されている。このアンテナは、ハニカムコアや接着剤の誘電体効果がアンテナ特性に影響を与えるため、製造再現性にやや問題がある。またスキンは熱膨張率が大きいアルミ合金、ハニカムコアは熱伝導率の悪いアラミド紙であることから、衛星軌道上での熱変形を抑制するためにサポートパネルが必要である。

今後は、安全保障ミッションにも対応出来るサブメートル級の地上分解能の全天候型準リアルタイム観測センサー、及び高度 350km 以下の超低高度軌道からの高分解能地球観測への需要が急速に高まると予想されている。



(a) 開発済の 100kg 級小型 SAR 衛星のロケット収納状態
(b) 展開された 5mx0.7m のアンテナ

3. 研究の方法と結果

3-1 衛星搭載用の展開式平面 CFRP アンテナ

上記の誘電体効果の問題、熱歪の問題への対策として、アンテナ全体を熱膨張率がアルミのほぼ 1/10 である炭素繊維強化プラスチック (CFRP)*3 製にした 2 次元導波管スロットアレーアンテナの 1/4 部分にあたるサブパネル (350mmx350mm) を試作した[6-10]。これを 4 枚組み合わせることで 1 枚のアンテナパネルが構成できる。衛星からの SAR 観測の地上分解能を 0.5m とするために、アンテナの周波数帯域は 600MHz とし、比帯域は 6.2% である。中心周波数を 9.6GHz とする。アンテナの設計には電磁界解析ソフトウェア HFSS を

用いた。比帯域 6.2% の広帯域化を実現するために二つの方法を取った。i) 給電部、及び放射部導波管の高さ b を規格導波管 (WR-90、 $b=10, 16\text{mm}$) よりも低く $b=5\text{mm}$ にして、スロット共振 Q 値を低く設定する。ii) 放射スロットの幅は、給電側からの距離に応じて 6~10mm として、スロット共振 Q 値を低くした。終端部に近い数個の強結合の放射スロットは、導波管軸から離れているため磁界の軸方向成分が支配的であり、幅広のスロットでも交差偏波放射が抑圧される。設計したアンテナの反射係数 S_{11} は周波数 9.3-9.9GHz (周波数帯域 600MHz) においては -17dB 以下である。ピーク方向の開口効率 は 9.7GHz において約 88% を達

薄型合成開口レーダー衛星を実現する展開型スロットアレーアンテナ

Deployable Slot Array Antenna for Quasi- Two Dimensional Radar

成している。方向性利得の解析値は図4に実測値とともに示されている。

3-2 CFRP アンテナ部材の試作

前項までのアンテナ設計過程を経て、CFRP アンテナの部材製作を行った。図2は2次元スロットアレー(約350x350mm、14x14アレー)のCFRP製部材である。後処理であるめっき厚みの予想値として20umを考慮した製造寸法を設定した。仕上がり寸法精度は、中子寸法や機械加工で規定される部位は0.05mm以下であるが、CFRP積層の加圧工程で規定されるCFRP厚みの精度は0.1mm程度である。放射スロットのある広い面積の放射面は加圧されにくいいため、目標値より0.2mm厚い出来上がりとなった。



図2 試作したアンテナ CFRP 部材

3-3 CFRP アンテナのめっき処理

本研究で当初から採用したCFRPアンテナのめっきでは、

i) CFRP めっきのアンカー効果⁴のための表面粗しエッチング処理、 ii) 無電解ニッケルめっき⁵、 iii) 無電解銅めっき、 iv) 電解銅めっき⁶、 v) 電解銀めっきというプロセスを用いた。電解めっきを複雑形状のCFRPアンテナに適用すると、i) 電極を扁平な導波管(内径5mmx20mm)に挿入する複雑さ、 ii) めっき反応が数分で終了するため、新鮮なめっき液を強制的に迷路構造に供給する必要性があり、放電事故や流量不足などのワークマンシップ不具合を誘発しやすい。

実際のアンテナ部材のめっき工程では、i) 複雑な配置のめっき電極でのショート事故、 ii) めっき液の注入ホースの折れ曲がりによる注入量の不足、 iii) 複雑なめっき治具の絶縁処置などの不具合が発生した。このため、めっき層を硝酸にて剥離し、2回目のめっき処理を行った。しかし、めっき層の剥離処理がエポキシ樹脂に過酷すぎた結果、エポキシ表面層が溶解して、表面が荒れて機械精度が失われ、更に炭素繊維がほつれ出る状態となった。

炭素繊維のほつれを丹念に清掃するなどの措置を行ったが、荒れたCFRP表面にめっき処理が不完全にされている状態であり、表面の荒れ、めっき層の不均一、炭素繊維の露出ほつれが部分的にみられる。

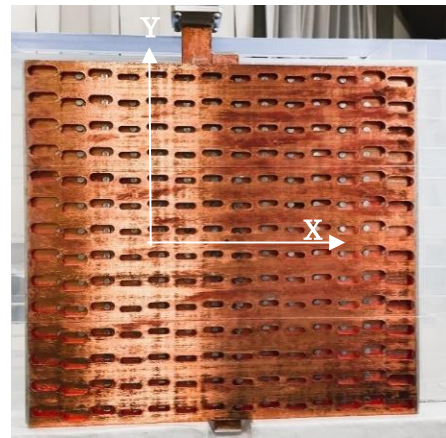


図3 めっき後のCFRPアンテナ。

3-4 CFRP アンテナの特性測定

以上のようにして問題を抱えつつも試作したCFRPアンテナに対して、近傍界測定、遠方界計測と反射測定を実施した。図4には、遠方界計測によるピークアンテナ利得値、近傍界計測による方向性利得の計測値、及び電磁界解析による方向性利得を周波数の関数として示した。近傍界計測からの方向性利得は、解析値から約2dB程度劣化している。遠方界計測からのアンテナ利得は、近傍界計測の方向性利得と比較して、約2dBの劣化が見られる。

以上のアンテナ特性の劣化は、近傍界分布の乱れ、及びアンテナ内部に抵抗損失が発生しているためである。CFRPめっき工程に伴う炭素繊維のほつれや炭素繊維素地の抵抗損失がその原因と推測される。

薄型合成開口レーダー衛星を実現する展開型スロットアレーアンテナ

Deployable Slot Array Antenna for Quasi- Two Dimensional Radar

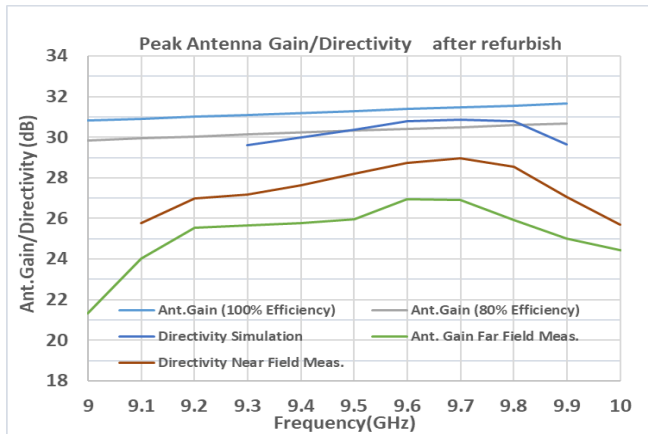


図4 アンテナの方向性利得の設計解析値(青)、近傍界実測値(茶色)、及び遠方界アンテナ利得(薄緑)の周波数依存性。青と灰色の直線は開口効率 100%、80%を示す。

3-5 CFRP めっき処理工程の課題

この電解めっきの問題を改善するために、上記プロセスをすべて無電解めっきで実施する改良を行った。CFRP 平板と CFRP 導波管を試験サンプルとした。長さ 400mm、内径 20mmx10mm の CFRP 矩形導波管に全工程を無電解めっきで処理することとした。電極、及び、めっき速度が遅いためめっき液をポンプで強制注入する必要がなくなり、めっき工程は非常に簡素になった。しかし、めっきアンカー効果を高めるために行う表面粗しエッチング時間の設定は、CFRP 表面のエポキシ層の状態に敏感であることが問題となった。エッチング時間が過少であるとめっきが CFRP 表面に食い込む程度が不足し、過大であると CFRP 表面が荒れ炭素繊維が露出状態になり、めっきがうまく乗らなくなる。この現象は、本 CFRP アンテナで実施した電解めっき処理でも共通に起きていたと推測される。本 CFRP アンテナのような複雑な形状の CFRP 製品では、形状や製法に応じて、プレプリグの種類や厚み、剥離フィルム使用の有無、CFRP 成型後の機械切削の有無により、CFRP 表面の炭素繊維の露出状態、エポキシ樹脂層の厚みが微妙に異なり、めっき処理に最適な表面エッチング時間が異なってくる。

この問題は、たとえ無電解めっき工程を採用しても、

さまざまな表面状態を含む複雑形状の CFRP のめっき処理では、適切な表面粗し処理は単純なエッチング処理ではできないという事を意味している。この問題がいままで見過ごされてきたのは、CFRP へのめっき条件を探索する試験サンプルが、すべてほぼ均一な表面状態の物であった可能性がある。この問題は、今後に残された課題である。

4. 将来展望

今後の数 100 機以上の小型衛星群ミッションには、ロケットフェアリングに多数機衛星を積み重ねて数 10 機の同時打ち上げが可能な、薄型収納形状の衛星が必要であると予測されている。米国 AeroSpace Corporation は、CubeSat*7 よりも太陽パネルやアンテナの等の開口面積が必要なミッションに適する disk 状の衛星 DiskSat を提案している [11, 12]。筆者らの開発した展開式スロットアレーアンテナを用いた小型 SAR 衛星は、薄型収納形状に発展させることが可能である。

DiskSat のもう一つの特徴は、薄型の衛星であるため、空気抵抗力を小さくできる利点を生かして、250-350km の低高度の軌道 (VLE0、very low earth orbit) に投入し電気推進を用いて軌道を維持することができる。SAR 観測では、信号対雑音比 (SNR) は、高度の 3 乗に逆比例するため、VLE0 での運用は、非常に有利である。薄型の DiskSat SAR 通常の 500-600km の軌道では地上分解能 3-1m、高度 350km 程度の VLE0 では 1-0.25m の SAR 観測も可能性がある [13]。本年度後半から、本研究の成果を活用した薄型の小型 SAR 衛星の開発プロジェクトに着手する予定である。

図5は、提案する DiskSat の外形形状である。

薄型合成開口レーダー衛星を実現する展開型スロットアレーアンテナ

Deployable Slot Array Antenna for Quasi- Two Dimensional Radar

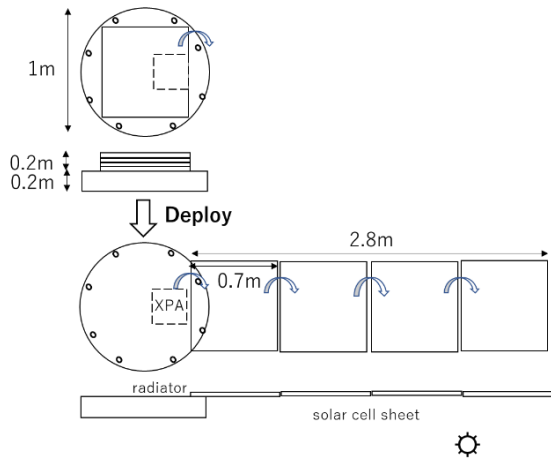


図5 展開式平面スロットアレーアンテナを搭載した薄型レーダー衛星 SAR DiskSat

おわりに

小型衛星に搭載できる全天候型の地球センサーであるマイクロ波合成開口レーダーに関して、サブメートル級の地上分解能に対応する形状安定性に優れた全CFRP製SARアンテナの研究を行った。複雑表面形状を持つCFRPアンテナの電解めっき処理で様々な技術的困難に遭遇した結果、設計値より4dB劣化したアンテナ利得が計測された。めっき工程が簡単な無電解めっきだけを用いる方法も試みて、部分的な改善を得た。引き続きCFRPへのめっき処理の問題の解決を継続していく。

本研究に用いている展開式スロットアレーアンテナは、薄型のレーダー衛星(SAR DiskSat)を可能にするものである。令和4年度後半から、本研究の成果を生かして、高分解能化が容易である高度350km程度の超低高度軌道で、大気抵抗が小さい薄型レーダー衛星SAR DiskSat開発に着手する。

用語解説

*1 合成開口レーダー(SAR)

レーダーの一種で、航空機や人工衛星に搭載し、移動させることによって仮想的に大きな開口面(レーダーの直径)として働くレーダー。

*2 スロットアレーアンテナ

導波管や平面平板などの導体で包まれた導波路や共振器の一部に複数のスロットを切り、それらを素子ア

ンテナとして動作させたスロットアレーアンテナを、多数アレー状に配置して全体として動作させるアンテナ。

*3 炭素繊維強化プラスチック(CFRP)

炭素繊維で樹脂を強化した複合材料であり、マトリックス(母材)にはエポキシ樹脂のような熱硬化性樹脂が多く用いられる。軽量で高強度な特性を持ち、熱膨張率が非常に小さい。

*4 CFRPめっきのアンカー効果

絶縁物であるCFRPのエポキシ樹脂にめっき処理を行うためには、最初に無電解めっきを行う必要がある。金属表面にめっきする場合には、金属結合によりめっき層が金属母材に密着する。これに対してCFRP表面に無電解めっきをする場合には、金属結合が生じないため、このままでは密着力が不足する。このため、まずCFRP表面を荒してその凹凸面に無電解めっきを施し密着力を増すことを行う。この効果をアンカー効果と呼ぶ。

*5 無電解めっき

電解めっきとは異なり、通電による電子ではなく、めっき液に含まれる還元剤の酸化によって放出される電子により、液に含浸することで被めっき物に金属皮膜を析出させるめっきの一種である。電解めっきのように通電を必要としないため、素材の形状や種類にかかわらず均一な厚みの皮膜が得られ、プラスチックやセラミックスのような不導体にもめっき可能である。

*6 電解めっき

電流を使うめっき法であり、めっきしたい物質を含む溶液、熔融塩、または、固体電解質からその物質を還元させ、電導性のある物体にその物質(金属など)の薄い層を形成させる。

*7 CubeSat

10×10×10cmサイズ(重量1.33kg以下)の形状のユニットを単独もしくはつなぎ合わせた形状の超小型な人工衛星である。ピギーバック衛星として打ち上げられることを前提としており、打ち上げ費用を極力抑えることができる。近年、多数のCubeSatが開発され、打ち上げられるようになり、共通化された各種の搭載機器が販売されるようになり、宇宙開発の敷居を著しく下げる貢献をしている。

薄型合成開口レーダー衛星を実現する展開型スロットアレーアンテナ

Deployable Slot Array Antenna for Quasi- Two Dimensional Radar

参考文献

- [1] 齋藤宏文、金岡充晃、"いつでもいどこでも宇宙から撮像—リアルタイムアースイメージ—、" 電子情報通信学会誌 Vol.97、No.7、pp.576-581、電子情報通信学会、2014.
- [2] O. Antropov、J. Praks、M. Kauppinen、P. Laurila、V. Ignatenko and R. Modrzewski、"Assessment of Operational Microsatellite Based SAR for Earth Observation Applications、" 2018 2nd URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC)、Meloneras、pp. 1-1、2018.
- [3] G. Farquharson、W. Woods、C. Stringham、N. Sankarambadi and L. Riggi、"The Capella Synthetic Aperture Radar Constellation、" IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium、Valencia、pp. 1873-187、2018.
- [4] B. Pyne、Hirobumi Saito、Prilando Riziki Akbar、Jiro Hirokawa、Takashi Tomura、and Koji Tanaka、"Development and Performance Evaluation of Small SAR System for 100-kg Class Satellite、" IEEE J. Selected Topics in Appl. Earth Observation and Remote Sensing、vol.13、p.3879、2020.
- [5] K. Orzel、S. Fujimaru、T. Obata、T. Imaizumi、and M. Arai、"The On-orbit Demonstration of the Small SAR Satellite. Initial Calibration and Observations、" 2022 IEEE Radar Conference、Mar. 2022.
- [6] 齋藤宏文、石村康生、戸村崇、広川二郎、田中孝治、"小型 SAR 衛星用の形状安定性に優れた軽量 CFRP 製展開パネルスロットアレーアンテナの開発(その1)". 2L12。第64回宇宙科学技術連合講演会、2020年10月27-31日
- [7] 齋藤宏文、石村康生、戸村崇、広川二郎、田中孝治 "小型 SAR 衛星用の形状安定性に優れた CFRP 製展開パネルスロットアレーアンテナの開発" 電子情報通信学会アンテナ電波伝搬研究会 AP2021-1、オンライン開催、2021年4月16日
- [8] 齋藤宏文、広川二郎、戸村崇、石村康生、田中孝治、
- "小型 SAR 衛星用の形状安定性に優れた軽量 CFRP 製展開パネルスロットアレーアンテナの開発(その2)"、第65回宇宙科学技術連合講演会 4D13、山形、オンライン開催、2021年11月9-12日
- [9] 齋藤宏文、石村康生、広川二郎、"小型衛星搭載の展開式並列給電スロットアレーアンテナによる高分解能、広域な SAR 観測の検討" 電子情報通信学会宇宙航行エレクトロニクス研究会、旭川、2022年7月27-29日
- [10] 齋藤宏文、石村康生、戸村崇、広川二郎、小型合成開口レーダー衛星用の CFRP 製 2 次元スロットアレーアンテナの試作、電子情報通信学会アンテナ電波伝搬研究会 機械振興会館、及びオンライン併催、2022年12月15日

関連文献

なし

この研究は、令和元年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、令和2~3年度に実施されたものです。