

小型衛星搭載用織物膜展開リフレクタレーアンテナの研究開発

Research and Development of Textile Deployable Reflectarray Antennas for Small Satellites

研究代表者

戸村 崇 東京科学大学

Takashi Tomura Institute of Science Tokyo

研究分担者

坂本 啓[†] 稲垣俊輔^{††} 竹内智也^{††} 高橋俊之^{††}

Hiraku Sakamoto[†] Shunsuke Inagaki^{††} Tomoya Takeuchi^{††} Toshiyuki Takahashi^{††}

[†]東京科学大学 ^{††}セーレン株式会社

[†]Institute of Science Tokyo ^{††}SEIREN CO., LTD

研究期間 令和5年度～令和7年度

概要

本研究開発では小さな収納体積で大きな開口面積の小型衛星搭載用アンテナの実現を目的として、5.8GHz 帯 9m² 織物膜展開リフレクタレーアンテナを研究開発した。高利得アンテナ特性と低収納・大型展開を両立するために、リフレクタレーアンテナを織物上に構成した。試作評価の結果 9m² アンテナが 41.8dBi の高いアンテナ利得と 63.6U (1U=1000cm³)に収納できる低収納体積を確認し、優れた電気特性と機械特性の両立を実現した。今後は実用化に向けて課題に取り組み、小型衛星コンステレーションのさらなる革新を実現する。

Abstract

This research and development aimed to realize a small-satellite antenna with a large aperture area and compact stowage. To this end, a 5.8 GHz, 9 m² deployable reflectarray antenna using a textile membrane was developed. To achieve both high gain and compact stowage with large-area deployment, the reflectarray was implemented on a textile. Prototype evaluation confirmed that the 9 m² antenna achieved a high gain of 41.8 dBi while being stowed within 63.6 U, 1U = 1000 cm³, demonstrating an excellent balance between electrical and mechanical performance. Future work will address the remaining challenges toward practical implementation and further advance small-satellite constellations.

1. まえがき

近年、小型衛星群による新たな無線通信や地球観測サービスが実用化されつつある。例えば、米国 SpaceX 社は9000機を超える小型衛星で通信網 Starlink を展開しているが、衛星搭載アンテナのサイズ制約からスマートフォンとの高速な直接通信は難しく、直径 60cm の専用端末を必要とする。一方、米国 AST SpaceMobile 社は、64m² の大型展開アンテナによりスマートフォンとの直接通信を目指しているが、衛星は 1500kg 級と大型化し、多数展開が難しい。小型衛星に大面積アンテナを搭載できれば、直接通信と多数機展開を両立でき、地球全域をカバーする NTN の実現につながる。地球観測分野でも、Synspective 社や iQPS 社は 20 機超の SAR 衛星群による準リアルタイム観測を目指している。高解像度化には大面積アンテナが必要である一方、衛星数が限られるため、同一地点のリアルタイム観測は難しい。より小型の衛星に同程度のアンテナを搭載できれば、打上げ可能な衛星数を増やし、観測頻度を高めることができる。

これらの衛星搭載アンテナは剛なアンテナパネルで構成され、アンテナの大型化に伴い体積および重量が増加し、衛星自身も大型化が求められる。例えば Synspective 社の Strix シリーズには金属筐体で構成する導波管スロットアレーアンテナ¹が用いられている。また NASA の火星探査機には誘電体パネルで構成するリフレクタレーアンテナ²が用いられている。

本研究開発では剛な構造を要求しないアンテナの実現を目標とし、下記 3 つの課題に取り組む。第一に、アンテナ利得を維持するために従来必要とされてきた高い面精度・寸法精度への依存を低減し、剛性の高い構造を用いなくとも性能を確保できるアンテナ様式を実現すること。第二に、大型アンテナを小体積に収納しつつ、宇宙空間で確実に展開・展張し、運用時の剛性を維持する技術を確認すること。第三に、電波の損失を低く抑えるアンテナ電気特性と、折り畳み可能な柔軟構造とを両立することである。

これらの課題を解決するために、3 つの異なる専門分野、アンテナ電気（東京科学大学・戸村）、宇宙構造（東京科学大学・坂本）、織物の研究者（セーレン社）でチームを構成し、本研究開発に取り組む。

アンテナ形式としては、アンテナ大型化に向くリフレクタレーアンテナを採用する。本アンテナは空間を介して各素子に給電するため素子への給電時に電波の減衰がほぼ無い。小型収納および大型展開を可能にするために、織物膜と空気層を使用する。織物膜は柔軟性を有し、単位体積当たりの重量も軽く小型収納に適している。二層膜の一定間隔の離隔を実現するためにカタナリー外形とクロスバーを採用する。高効率な電気特性と柔軟性を両立するために、織物膜への銅パターン直接形成技術を採用する。

本研究開発では 100kg 級衛星に搭載可能な 5.8GHz 帯 9m² 膜展開アンテナを製作し、アンテナ指向性利得 40.0dBi、収納体積 85U (1U = 1000 cm³)を目標とする。

¹ B. Pyne, et al., IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ., vol. 13, pp. 3879–3891, Jul. 2020.

² R. E. Hodge, et al., IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 59, no. 2, pp. 39–49, Feb. 2017.

2. 研究内容及び成果

2.1 膜展開アンテナの電気設計評価

本節では、膜展開アンテナの電気設計と評価について述べる。まず、4.5m²アンテナの電気設計及び評価を詳解し、次に9m²アンテナの試作測定評価結果を説明する。

4.5 m² サイズ膜展開アンテナ

提案アンテナの全体構造を図1に示す。リフレクトアレーアンテナはリフレクトアレーと一次放射器から構成されている。中心周波数は5.8GHz、目標比帯域は13%、一次放射器は5.4GHzから6.2GHzで反射が-15dB以下となることを目標にする。リフレクトアレーは46×106個の素子で構成され、1380mm×3180mmである。人工衛星搭載を想定し、1レイヤ、低F/D比で設計した。一次放射器とリフレクトアレーの距離は1500mmであり、F/D比は0.43である。

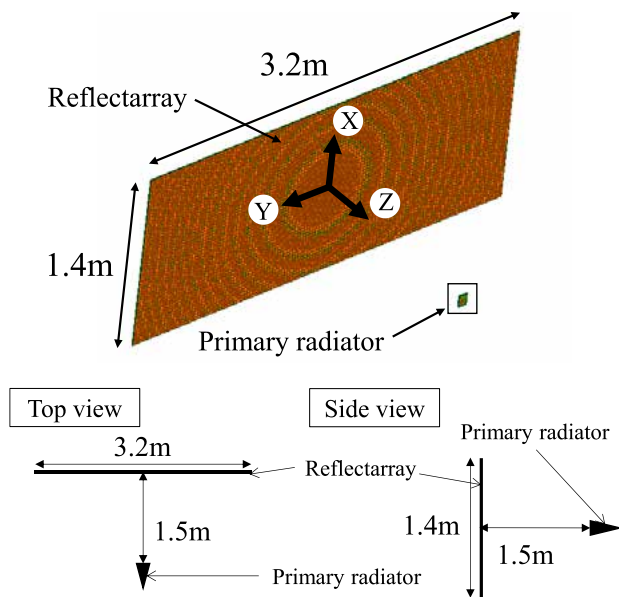


図1 4.5m²アンテナの全体構造

一次放射器解析モデルと層構成を図2に示す。解析には有限要素法を用いており、解析空間には放射境界を、入力部分にはWave portを設定している。一次放射器には設計と試作の容易さからマイクロストリップアンテナを採用した。電磁結合型給電方式を用いており、スロット形状はボウタイ型である。広帯域化のためにアンテナ上面に無給電素子を配置している[5]。2×2素子のアレー構造で設計し、給電回路は並列同振幅同相給電となっている。解析モデルは実際の試作を考慮し治具固定用の穴を設けている。穴の直径 r_h は3mm、穴と基板端との距離 g_h は5mmである。素子間隔はX方向で32mm、Y方向で18mmであり、スピルオーバーと開口効率振幅成分の合計が小さくなるように決定した。アンテナの層構成は上から、パッチ、誘電体基板（基板厚:0.46mm、比誘電率:2.19、誘電正接:0.0006）、空気層（4mm）、パッチ、誘電体基板（基板厚:3.19mm、比誘電率:2.16、誘電正接:0.0009）、ボンディングフィルム（基板厚:0.038mm、比誘電率:2.28、誘電正接:0.003）、グラウンド、誘電体基板（基板厚:0.46mm、比誘電率:2.19、誘電正接:0.0006）、給電線となっている。図3に解析から得た反射特性を、図4に5.8GHzにおける放射パターンを示す。図3に示すように反射-15dB以下となる比帯域35.7%を達成した。図4における正面方向動作利得Realized Gainは12.0dBiであった。材料損失と反射損失の合計は0.2dB以下に抑えることができている。

スピルオーバー損失は0.70dB、開口効率振幅成分は0.60dBと低く抑えることができている。

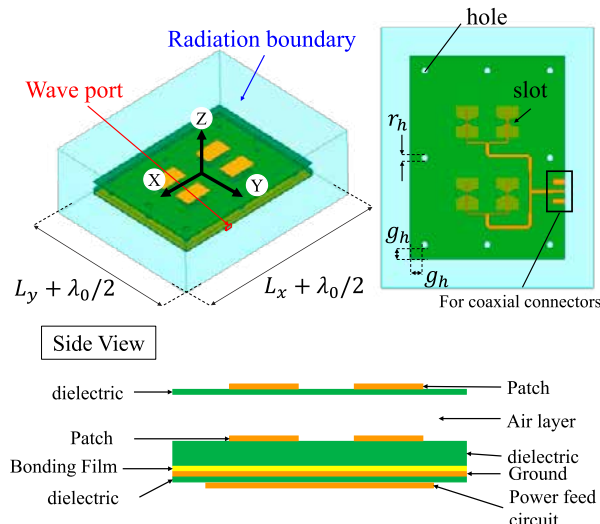


図2 一次放射器の解析モデルと層構成

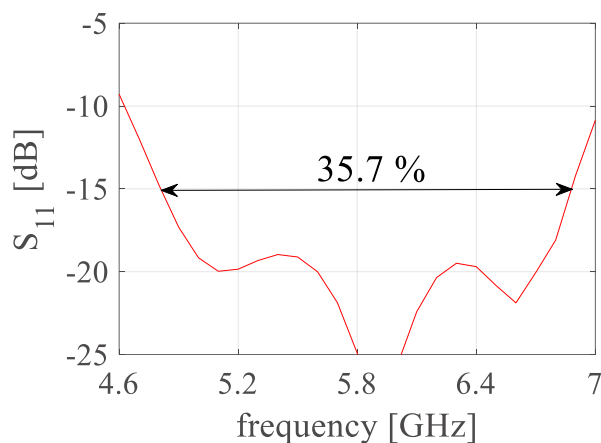


図3 一次放射器の反射の周波数特性

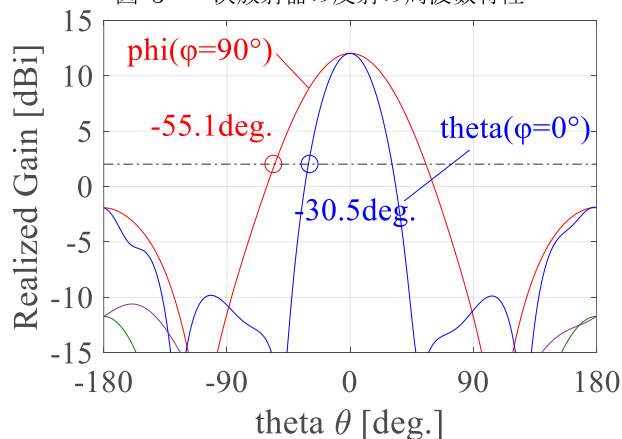


図4 一次放射器の放射パターン (5.8GHz)

反射素子の解析モデルを示す。解析空間上面にはFloquet portを設定しておりmodel1はx偏波、model2はy偏波が設定されている。アレーアンテナに用いることを想定しているため素子間の相互結合を考慮する必要がある。そこで解析空間の両側面に周期境界条件を設定している。解析空間は反射素子から $\lambda_0/2$ の空間をとっている。素子間隔は27mm(約0.52 λ_0)になっている。層構成は、上から金属パッチ（厚み18 μ m）、発泡スチロール（厚み5mm、誘電率1.13、誘電正接0）、グラウンドとなってい

る。図に示す通りパッチ形状は三段階で変化し、はじめは正方形パッチ形状、二段階目は正方形パッチ形状に十字型のスロットを開けた形状、三段階目は二段階目が **I** の字スロット形状になるように二段階目の形状にスロットを追加した形状となっている。一段階目の正方形パッチではパッチ寸法を変化させることで反射位相が変化し、二段階目、三段階目での正方形パッチ寸法は **22mm** 固定でスロット長を変化させることで電流の経路が変化し反射位相が変化する。

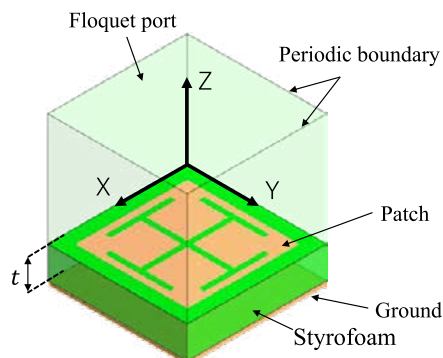
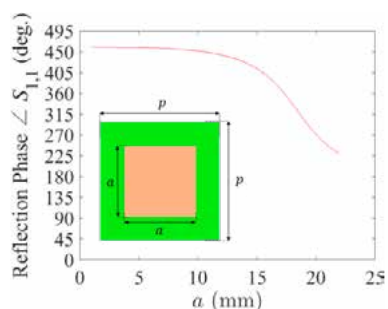
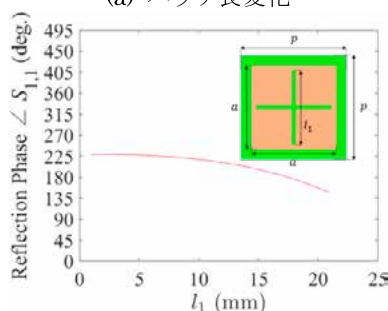


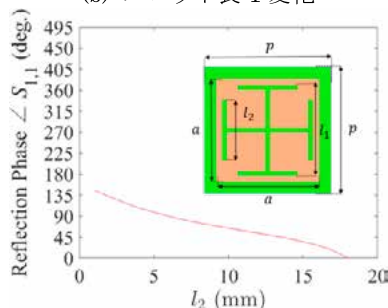
図 5 反射素子単体解析モデル



(a) パッチ長変化



(b) スロット長 1 変化



(c) スロット長 2 変化

図 6 一次放射器の放射パターン (5.8GHz)

後述する製造法で試作したリフレクタレーアンテナをコンパクトレンジで評価した。比較のために同程度の大きさで、従来設計法で設計したアンテナも試作評価した。**5.8GHz** における放射パターンを図 7 に示す。放射パタ

ーンにおける **E** 面、**H** 面のビーム幅はそれぞれ **2.14deg.**, **1.22deg.** であり、正面方向利得は **40.1dBi** であった。動作利得における **E** 面、**H** 面のビーム幅はそれぞれ **2.19deg.**, **1.26deg.** であり、正面方向利得は **38.3dBi** であった。ビーム幅の値が近く、放射パターンの形状も似ていることから試作による誤差は少なく正しい評価ができたといえる。

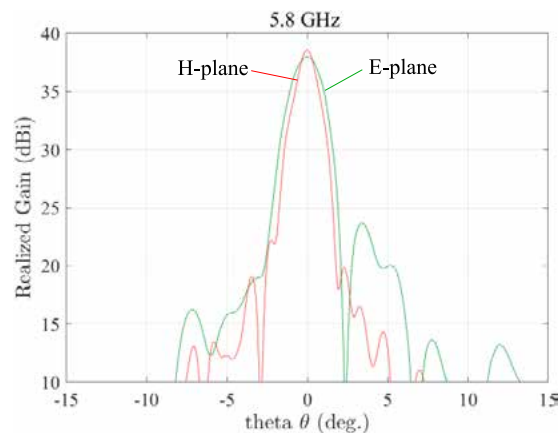


図 7 5.8GHz における放射パターン

9 m² サイズ膜展開アンテナ

図 1 に提案アンテナの全体構造を示す。リフレクタレーアンテナはリフレクタレーと **2×1** パッチアレーの一次放射器から構成されている。中心周波数は **5.8GHz**、一次放射器は **5.4GHz** から **6.2GHz** で反射が **-15dB** 以下となることを目標にする。リフレクタレーは **52×238** 個の素子で構成され、**1404mm×6426mm** である。また、一次放射器とリフレクタレーの距離は **1500mm** である。

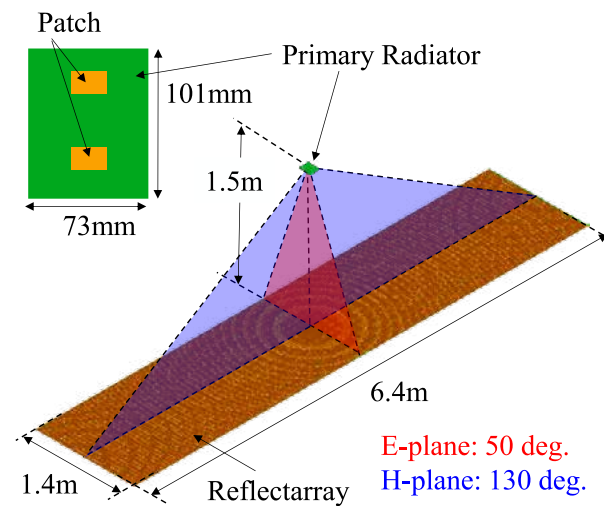


図 8 9m² アンテナの全体構造

図 9 に試作したアンテナの測定の様子を示す。測定には京大大学生存圏研究所マイクロ波エネルギー伝送実験装置(METLAB)共同利用・共同研究を利用した。アンテナの外形は図の **X** 軸方向 **1404mm**、**Y** 軸方向 **6426mm** である。リフレクタレーパッチ層はポリエステル繊維に銅パターンをプリントして試作し、グラウンドには導電性織物を用いた。一次放射器はアルミフレームの治具を製作し、アレー面の中心から **1.5m** の高さに維持した。アルミフレームの側面には電波吸収体を貼り付け、金属によって放射パターンに与える影響をなるべく小さくした。

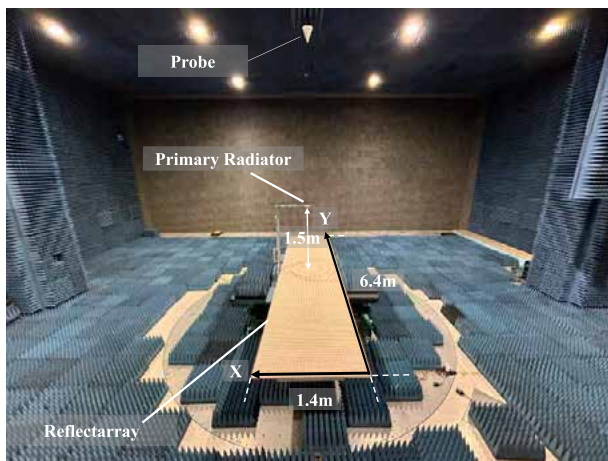
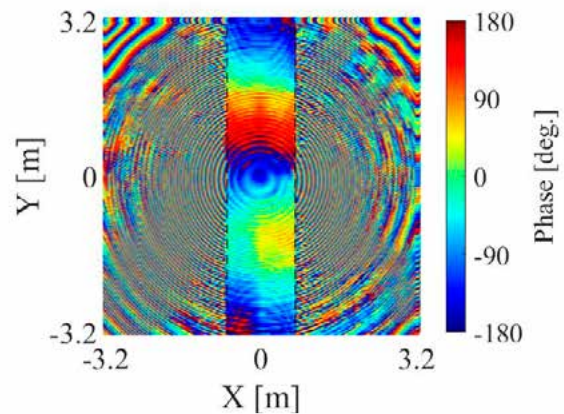


図 9 9m²アンテナの測定



(b) 位相分布

図 10 開口分布

図 10 に測定結果の振幅、及び位相の開口分布を示す。振幅について、アンテナ中心で最大値が出ており、エッジレベルは -20dB 以下である。 $X>0, Y=0$ でパターンが一部乱れているのは一次放射器の固定治具のアルミフレームによる影響が考えられる。位相について、アレー範囲内で Y の値によって位相が変化している。これは、図 5 でも示したように、アレー端には支えがなく、重量でたわみができることによるものと考えられる。また、 $Y<0$ 側で、 $X=0$ の前後で位相が変化している部分がある。今回リフレクトアレーを製作する際、9区画のパネルに分割し、後から治具でつなげたが、つなぎ目の部分で位相が不連続になっていることによるものと考えられる。

図 11 に指向性利得の周波数特性を示す。指向性利得は 5.8GHz で 41.5dBi であった。図 12 に放射パターンの測定値、解析値を示す。解析値は、一次放射器および反射素子単体の有限要素法解析結果からアレーファクターにより計算した。 H 面において、 -3dB ビーム幅は測定 0.8deg 、MATLAB 解析 0.55deg であった。また、測定値のサイドローブが角度 0deg で対称になっていないことが読み取れる。 E 面において、 -3dB ビーム幅は測定 2.2deg 、解析 2.1deg であった。

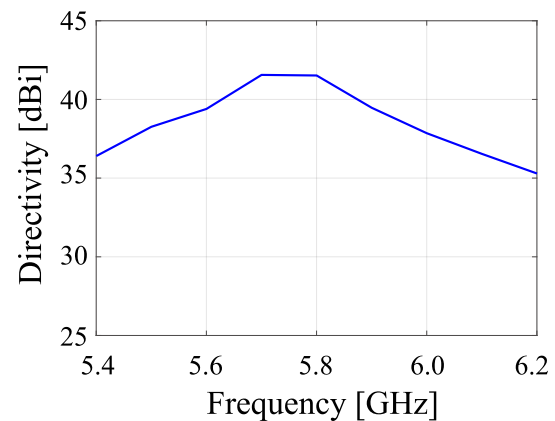
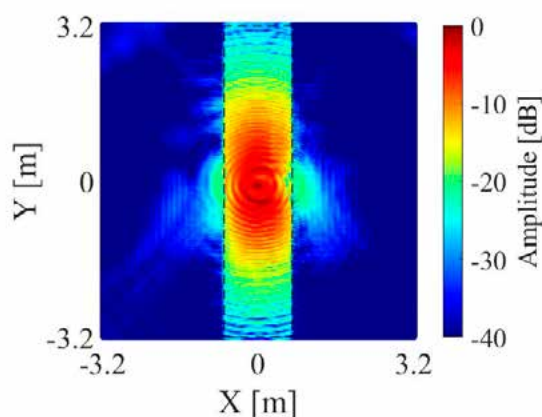
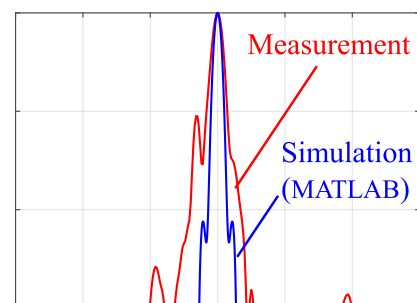


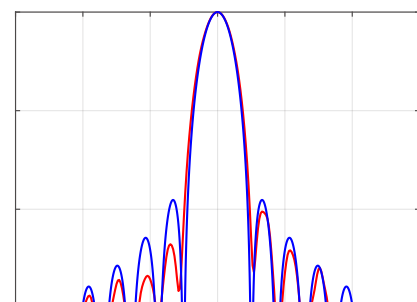
図 11 指向性利得の周波数特性



(a) 振幅分布



(a)H 面



(b)E 面

図 12 放射パターン

2.2 膜展開アンテナの構造設計評価

本節では、膜展開アンテナの構造設計と評価について述べる。まず、本研究で達成を目指す構造要求について説明し、続いて各年度で得られた成果および知見を示す。

主な構造要求は以下の通りである。

1. 展開後、5 mm 間隔を保持した二層構成であること。
2. 展開時の膜のアンテナ部は、3240 mm × 1404 mm の長方形であること。
3. 4.5 m² アンテナの収納時の体積は 42.5 U (1 U = 1000 cm³) 以内であること。

構造設計においては、構造が対称であることから 9 m² の半分である 4.5 m² サイズの膜展開アンテナを試作し、評価を実施した。

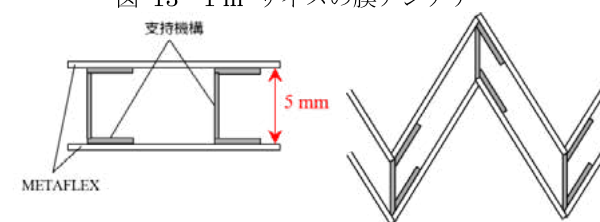
1 m² サイズ膜展開アンテナ

令和 5 年度には、小容積に畳み込み、厚さ 5 mm の平面アンテナを形成できる構造の基本的な設計概念の検討・評価を目的とし、図 13 に示す 1 m × 1 m の膜展開アンテナを試作した。膜材料には、セーレン株式会社が製造する二軸織ポリエステル繊維「METAFLEX®」を用いた。まず、膜面外周には、面内に均一な張力を付与するため、カテナリー曲線を導入した。また、リフレクタレーアンテナは、電波の波長によって決定される厚さの誘電体層を必要とし今回 5 mm 層を要する。初期設計案として、「飛び出す絵本」のようなポップアップ式の支持構造を採用した。2 枚の膜層を 5 mm の間隔で隔てることで、誘電体層となる空隙を確保した。図 14 にポップアップ式支持構造を示す。



(a) 展開時 (b) 収納時

図 13 1 m² サイズの膜アンテナ



(a) 展開時の支持構造 (b) 収納時の支持構造

図 14 ポップアップ式支持構造

4.5 m² サイズ膜展開アンテナの概念設計

令和 6 年度では 4.5 m² サイズの膜展開アンテナを実際の寸法で試作することに取り組んだ。提案する構造の概要を図 15 に示す。また、図 16 に示すように、2 本の開断面複合材ブームを用いて、ジグザグに折り畳まれた 2 層の長方形織物膜を展開する構成とした。図 14 に示すポップアップ式の支持構造を、膜の短辺に平行となるよう 135 mm 間隔で二層間に配置し、5 mm の層間距離を維持する。これらの支持構造は膜の折り目に沿って配置されており、図 14(b) に示すように、収納時には膜とともに折りた

たむことが可能である。展開時に支持構造を直立させるためには、伸展式のブームにより膜面に張力を付与する必要がある。

伸展ブームとして、断面が直径 60 mm、厚さ 0.4 mm、開口角 45°の開断面円筒形状のものを選定した。ブーム材料は CFRP (炭素繊維強化プラスチック)、ヤング率は約 14 GPa である。ブーム長を 3.5 m とした。この結果、理論上の座屈荷重は 293 N と算出される。不確定性を考慮し安全率 2 を適用すると、許容座屈荷重は 146 N である。

また、膜の外周に沿ってカテナリー領域を「せん断吸収境界」³として導入することで、膜をしわのない状態に維持することを目指した。せん断吸収境界は、カテナリーケーブルと膜の間の剛性不一致により生じるせん断力を吸収する役割を有する。織物材はヤング率に比べて、せん断弾性係数が比較的小さいため、せん断吸収境界に適していると想定した。

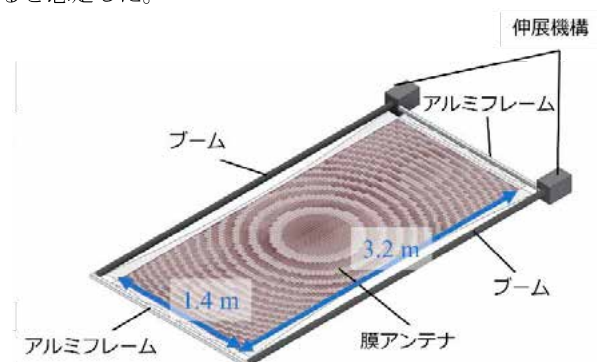


図 15 4.5 m² 膜展開アンテナ初期設計概要



図 16 4.5 m² 膜展開アンテナ展開方法

4.5 m² サイズ一層膜プロトタイプ

令和 6 年度に提案した初期設計に基づき、まず図 17 に示す実物大の単層膜プロトタイプを製作した。以下にその構造およびしわが発生した箇所についての考察を述べる。

本プロトタイプは、3240 mm × 1404 mm のアンテナ部を含む単層膜で構成されており、短辺に取り付けられたアルミフレームを固定することにより、張力を付与する。アンテナ部は 8 つの織物を縫合することで構成した。外周に沿ってカテナリー領域を導入し、長辺側に 1 つ、短辺側に 4 つのカテナリーを配置した。カテナリーケーブルとしては、平紐を縫い付けている。試作の結果、展張時も構造は破断なく概ね平面を形成したが、織物にしわが入った。

しわは図 18 に示す 2 か所で観察された。カテナリー領域のしわを図 18(a) に示す。ただし、これらのしわは、縫合部を超えて内側のアンテナ部まで伝播しておらず、織物材によるせん断吸収境界が、適切に機能している結果であると考えられる。

一方、分割境界に生じたしわを図 18(b) に示す。アンテナ部を構成する 8 枚の織物の縫合境界において発生したものである。このしわは、織物材と縫合部との弾性係数の違いに起因して生じる、せん断力によるものと考えられる。したがって、分割境界におけるしわの低減が課題となる。

³ Leifer, et al., 44th AIAA SDM Conference, AIAA-2003-1984, 2003.

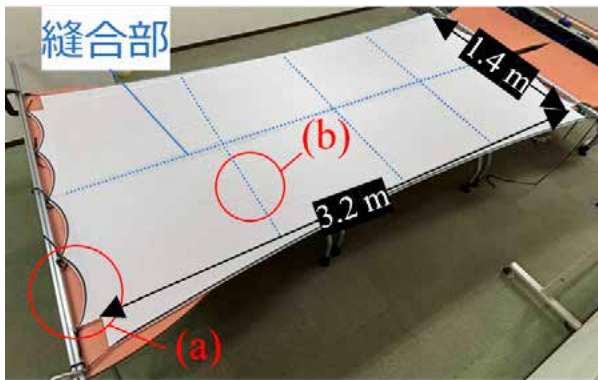
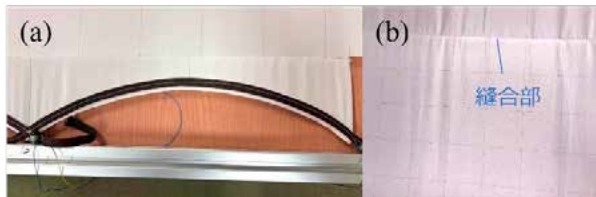


図 17 4.5 m²一層膜プロトタイプ



(a) カテナリー領域のしわ (b) 分割境界のしわ
図 18 しわの発生箇所

4.5 m²サイズ膜展開アンテナ二層化に向けた課題抽出

令和 6 年度に提案した初期構造に関して、主に 2 つの課題が見出せた。第一の課題は、支持構造の製作時に生じる製造誤差である。初期構造では、図 14 に示すようにポップアップ式の支持構造が上下両方の膜層へ貼付して固定する。膜に張力を付与し、二層の相対的な位置を合わせることで支持構造が直立する設計となっており、図 19(a) が理想状態を示す。しかし実際には、図 19(b) のに示すように、支持構造の固定位置にばらつきが生じ、設計値に対して層間距離が減少するという製造誤差が発生する。この誤差の要因の一つは、織物膜材料の伸びやすさにある。また、5 mm の誘電体層に影響を与えない精度で、4.5 m² に及ぶ広大な膜領域に支持構造を固定することは、技術的に極めて困難だと判断できる。

第二の課題は、膜表面の平坦度精度と、ブームの体積・質量の増加との間にある構造的なトレードオフである。膜アンテナにおいて高い平面精度を確保するためには、膜に大きな張力を付与する必要がある。一方で、張力の増加に伴い、その荷重に耐えるためにブームの剛性向上および断面寸法の拡大が必要となり、結果としてアンテナ全体の体積および質量の増加を招く。

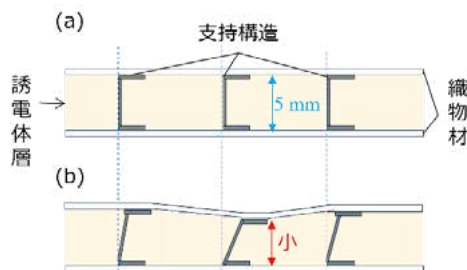


図 19 ポップアップ式型支持構造
(a)理想状態 (b)実際の状態

4.5 m²サイズ膜展開アンテナの改良設計概要

令和 7 年度では、前述の 2 つの課題を解決するため、改良構造を提案した。膜展開アンテナの改良設計の概要を図 20 に示す。本構造は、ブームの伸展により展開し、Z 折りにより収納される。これらの展開・収納機構は初期構造と同一である。収納時の体積を近似計算した結果、31.8 U (1 U = 1000 cm³)、9m² の場合は 63.6U となった。

先行研究として、米国 NASA/JPL の Fang らは、複数のクロスバーを圧縮部材として使用し、膜に張力を与えるリフレクトアレーアンテナを提案している⁴。さらに、カタナリーを分割し、その数を増やすことで、ブームに作用する荷重を低減できることが示されている⁵。そこで本研究では、Fang らの知見を応用し改良構造において初期構造に比べてカタナリーの分割数を増加させるとともに、新たにクロスバーを導入した。さらに、Fang らとは異なり、クロスバーを単なる圧縮部材としてだけではなく、上下の膜層間の支持構造としても利用する。クロスバーには、断面 5 mm、長さ 1.7 m の CFRP 製角柱を想定した。

各クロスバーは膜に直接固定されるのではなく、図 21 に示すように、糸および定荷重ばねを介して膜の端部に接続する。この接続方法により支持位置の製造誤差が、膜面に直接及ぼす影響を緩和すると期待できる。さらに、カタナリーの分割数を増加させることで、ブームに作用する荷重の分散および低減が可能である。提案構造では、長辺側を 5 分割、短辺側を 2 分割という設計を選定した。

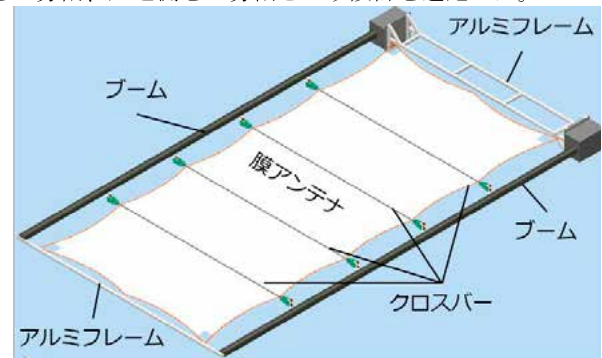


図 20 4.5 m²膜展開アンテナ改良設計概要

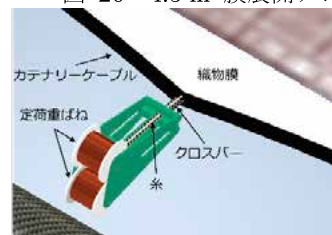


図 21 張力印加機構



図 22 張力印加機構
プロトタイプ

4.5 m²サイズ二層膜プロトタイプ

改良設計に基づき製作した、4.5 m² サイズの二層膜プロトタイプを図 23 に示す。本プロトタイプは、3240 mm × 1404 mm のアンテナ部を含み、アンテナ層およびグラウンド層からなる二層構造で構成される。膜は、アルミフレームとブームからなる外枠によって支持される。短辺と平行に 4 本のクロスバーを等間隔で配置した。アンテナ部は 2 枚の織物を縫縫合することで構成した。これは、従来の 8 分割構成と比較して縫合部の数を削減することで、分割境界におけるしわの低減を図る目的である。また、図 22 にクロスバー両端に取り付けた張力印加機構のプロトタイプ

⁴ Fang, et al., 43rd AIAA SDM Conference, AIAA-2002-1706, 2002.

⁵ Fang, et al., 9th AIAA Applied Aerodynamics Conference, AIAA-2001-1342, 2001.

イプを示す。各機構は 2 つの定荷重ばねで構成されている。これによりカテナリーケーブルに張力を付与することで、二層の織物膜を一定張力で保持する構成である。また織物の縫合部分を最小の 1 か所だけにし、さらにしわが入りにくい縫合法へ改良した。

展開試験の様子を図 24 に示す。プロトタイプは構造的な破綻を生じることなく、正常に展開された。展開後においても、クロスバーおよびブームに座屈は確認されなかった。以上より、提案した改良設計の実現可能性が確認された。

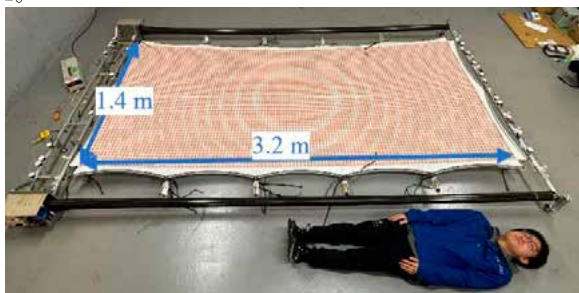


図 23 4.5 m² 二層膜プロトタイプ

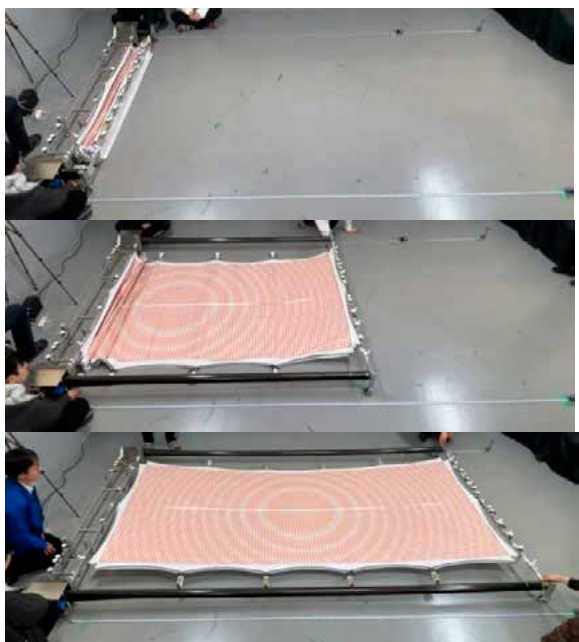


図 24 展開試験

さらに、形状計測を行った。図 25 に示すように地面に対して膜を垂直に立てた状態で、重りを用いて吊るすことで重力補償を行った。計測には、SHININING 3D 社 EINSTAR VEGA を用いた。アンテナ部全体および中央部の RMS を算出した。ここで中央部とは、図 25 に示す左右端のクロスバー間の領域を指す。計測結果を図 26 に示す。算出した Root-mean-square (RMS) 値は、アンテナ部全体では 0.651 mm、特に中央部では 0.549 mm と、1mm 以下の精度であった。

加えて、縫合箇所の減少、および縫合法の改良により、アンテナ部分の織物のしわはほぼ観察されなかった。

材料の評価

上記構造の試作と並行して、織物と平紐から構成されるアンテナ部に使用している材料の剛性と強度を評価した。これにより、破断が起きる可能性の箇所を事前に特定することができる。引張試験機（島津製作所製 AGX-20kNVD）

による試験を実施した。図 27 左に試料の例と、強度評価結果を示す。同図右に変位と荷重の関係の一例を示す。

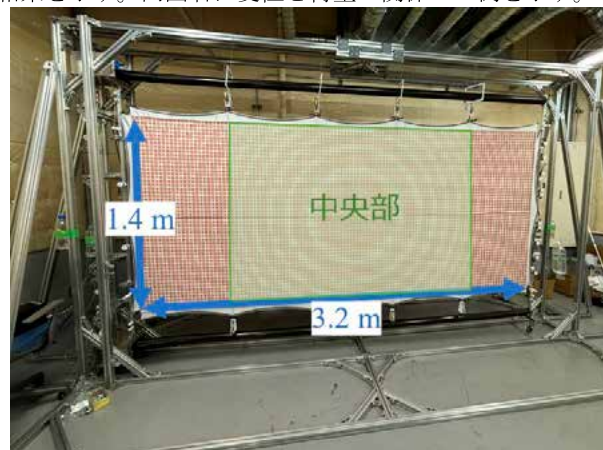


図 25 重力補償した 4.5 m² 二層膜プロトタイプ

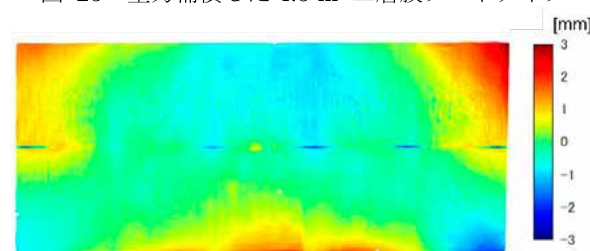


図 26 アンテナ部の形状計測結果

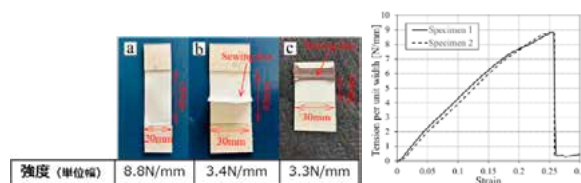


図 27 織物材と縫合部の強度評価

(右のグラフは試料 a の結果の一例)

これらの結果から、織物の縫合により、縫合に沿った方向には弾性率が上がることで、一方で縫合に直交する方向には強度が 1/3 程度まで低下すること、したがって縫合の強度に対して安全余裕を有する張力を選択すれば良いことがわかった。試作時の張力は最大 0.01N/mm であり、300 以上の安全率を有していることが確認できた。

次に地球低軌道で特に材料を劣化させる原子状酸素 (AO) を照射した材料の、照射前後の強度変化と、走査電子顕微鏡による断面観察を行った (AO 照射量は $3.28 \times 10^{20} \text{ atoms/cm}^2$)。まず、強度の変化については、被覆がない場合は織物材の強度が約 38% 低下した。一方で、耐 AO 性能を有するシルセスキオキサン誘導体 (SQ コート) を塗布した試料、および全面を銅で被覆した試料の両方について、有意な強度低下がないことが確認できた。

図 28 に断面の Si 分布画像を示す。SQ コートは Si を含むため緑色に撮像している。AO 照射前後ともに、SQ コーティングが織物材の繊維間および表面を被覆していた。これにより、AO 照射による材料劣化を避けることができることがわかった。

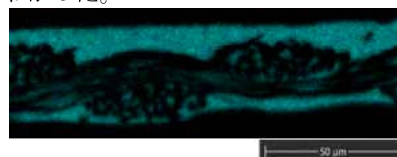


図 28 耐 AO 性能を有する SQ コーティング剤で被覆した METAFLEX 材の断面の Si 分布画像

2.3 織物アンテナの製造

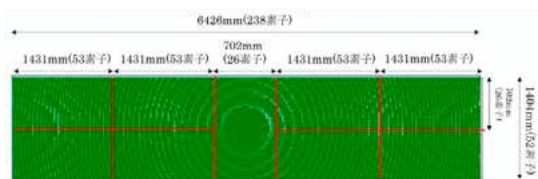
本節では先述の織物膜アンテナの製造について述べる。織物膜上に放射素子を形成し、 9 m^2 の織物アンテナ膜の作成を実現した。織物膜上への放射素子形成および織物膜アンテナ試作および特性評価は下記 3 つの手順からなり詳述する。

手順 1：アンテナ素子パターン印刷

共同研究機関の東京科学大学設計のアンテナ素子パターンの図面（図 29）をもとに印刷用パターンデータを作成。アンテナ素子パターンはアンテナサイズ 9 m^2 （サイズ： $1.404\text{m} \times 6.426\text{m}$ ）を 9 分割にて作成した。続いてそのデータを用いてポリエステル糸を使用した織物（平織り）上へめっき触媒をテキスタイル用ロール to ロール連続搬送インクジェット印刷装置にて印刷を実施した（図 30(a)）。織物ロール上にアンテナ素子パターンの印刷を完了した。

手順 2：アンテナ素子パターン導電化

アンテナ素子パターンが印刷された織物にテキスタイル用ロール to ロール連続搬送無電解めっき装置を用い、無電解銅めっきを実施した（図 30(b)）。織物ロール上へのアンテナ素子パターンへの銅めっきを完了した。その後、織物ロール上から 9 分割された各シートを接合し、 9 m^2 の織物膜アンテナが完成した（図 31）。

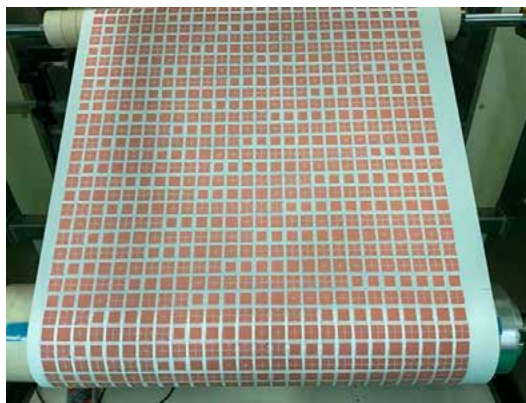


※赤線は 9 分割のライン

図 29 アンテナ素子パターン図面



(a) めっき触媒が印刷された
アンテナ素子パターン



(b) 銅めっきされたアンテナ素子パターン

図 30 アンテナ製造工程



図 31 9 m^2 織物膜アンテナ 完成品

手順 3：折り曲げ耐久性の確認

織物膜アンテナの小片サンプルで卓上型耐久試験機を用いアンテナ膜の折り畳みを想定した折り曲げ耐久性評価を行なった。手順 2 で作成した織物膜アンテナから小片サンプル（タテ $100\text{mm} \times$ ヨコ 100mm ）を切り出し、表面抵抗率の初期値を抵抗率計：ロレスタ EPMCT-T360（三菱ケミカルアナリティック社製）を用いて測定し、卓上型ラムシェル型耐久試験機 DR11MR4-CS（ユアサシステム機器社製）を用いて曲率半径 0.5mm 、折り曲げ角度 180° において試験を実施した（図 32）。折り曲げ試験 100 回後の表面抵抗率を測定し、初期値との比較を行った結果、目標の初期値の 5 倍以下（ $200\text{m}\Omega/\square$ 以下）を達成していることを確認した（図 33）。

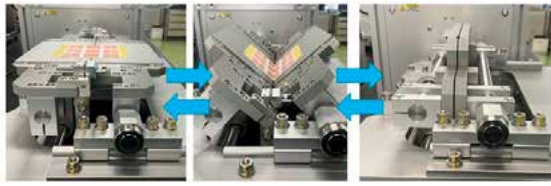


図 32 折り曲げ試験の様子

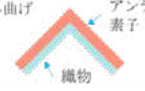
折り曲げ方向 (断面図)		初期 (mΩ/□)	屈曲後 (mΩ/□)	抵抗上昇率 (倍)	Ave. (倍)
外曲げ 	N1	24.2	38.3	1.58	1.53
	N2	23.2	33.0	1.42	
	N3	23.7	37.4	1.58	
内曲げ 	N1	24.7	56.4	2.28	2.27
	N2	25.1	57.5	2.29	
	N3	28.4	63.5	2.24	

図 33 折り曲げ試験結果

原子状酸素耐久性の評価

今回、織物膜アンテナの実用化に向けた宇宙環境耐性試験として、織物膜アンテナへの原子状酸素の照射試験を行った。アンテナと同構成の材料を作成し、その表面に耐 AO コート剤のコーティングを行い、AO に対する耐性効果の評価として質量保持率を確認した。使用した耐 AO コーティング剤はシルセスキオキサン誘導体「OX-SQ (以下 SQ コート)」(東亜合成株式会社製)を使用した。試験材料はアンテナ基材部と同じポリエステル織物とアンテナ素子部と同構成のポリエステル織物+Cu 膜を準備し、各々の表面に SQ コート剤のコーティングを行い試験材料の作成を行った(図 34)。今回のコーティングでは表層に膜厚 10~15μm の SQ コート層を形成した(図 35)。試験設備は神戸大学工学研究科宇宙環境研究グループ田川研究室の原子状酸素照射設備を使用した(図 36)。照射条件は下記(図 37)の条件で行った。試験の結果、SQ コートをすることで表面に金属皮膜を形成しているポリエステル織物+Cu 膜については質量保持率が 99%から 100%に向上した。表面に高分子材料が表面に露出しているポリエステル織物については顕著に効果が現れ、質量保持率が 78%から 98%まで向上したことを確認した。(図 38)。

試験材料	SQコート	試験外観 (サイズ: 70mm×15mm)
ポリエステル織物 (アンテナ基材部)	無し	
	有り	
ポリエステル織物+Cu膜 (アンテナ素子部同構成)	無し	
	有り	

図 34 試験水準

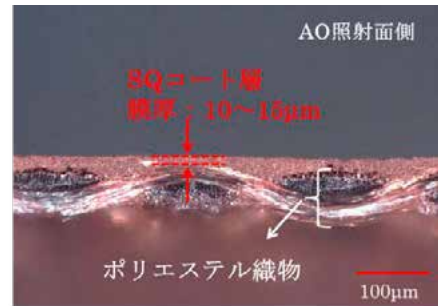


図 35 織物膜アンテナの SQ コート後の断面



図 36 原子状酸素照射試験設備

条件
照射量 : $3.28 \times 10^{20} \text{atoms/cm}^2$
衝突速度: 平均5.9km/s

図 37 照射条件

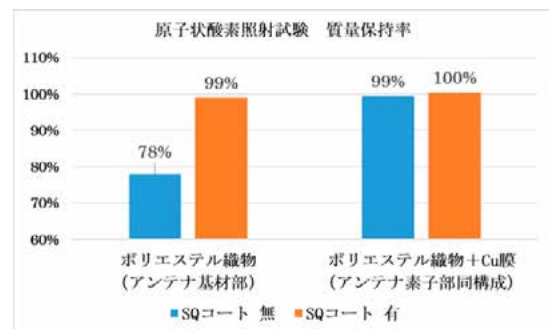


図 38 原子状酸素照射試験結果 質量保持率

アンテナ製造のまとめ

今年度実証した大きな面積 (9m²) で柔軟性があり折り曲げに強い特長をもつ織物上へのアンテナパターンを形成する技術は、少ない収納体積で大きく展開可能なアンテナ膜を実現する他者にはないオリジナルな基盤技術である。9m²を実証できたことで衛星用アンテナとしての実用可能性が示された。また今回、宇宙環境耐性を考慮した織物膜アンテナへの耐原子状酸素コーティングの検討としてシルセスキオキサン誘導体のコーティングと原子状酸素照射試験を実施し、織物膜アンテナの宇宙環境耐久性についても可能性が示された。今後、小型衛星メーカーへのアピールが可能になることが期待される。

3. 今後の研究成果の展開

本研究開発では小型衛星搭載用のリフレクトアレーアンテナを研究開発し、織物膜を採用することで低収納容量かつ高利得なアンテナ特性を実現した。本研究による製品化および実用化に向けて、今後は3つの課題に取り組んでいく。1つ目は宇宙環境耐性の向上であり、織物膜そのものの材料の見直しやコーティング技術を活用し、原子状酸素や紫外線への耐性を向上させる。2つ目は宇宙での実証であり、実際に本アンテナを小型衛星に搭載し低軌道上でアンテナ利得や本アンテナを用いた場合の通信や観測性能を評価する。3つ目は非平面補償およびビーム走査機能の追加であり、反射位相可変素子を搭載したリフレクトアレーアンテナを設計し、さらなるアンテナ利得の向上、アンテナ機能の高性能化を目指す。これらの課題を開発し、小型衛星コンステレーションのさらなる革新を実現する。

4. むすび

本研究開発では小さな収納体積で大きな開口面積の小型衛星搭載用アンテナの実現を目的として、5.8GHz帯9m²織物膜展開リフレクトアレーアンテナの研究開発を実施した。高利得アンテナ特性と低収納・大型展開を両立するために織物膜へ銅パターンを直接形成し、リフレクトアレーアンテナ形式を採用した。アンテナ電気、構造、織物膜製造の3つの独自技術を組合せ本目的を実現した。

アンテナ電気系では、まず4.5m²アンテナの設計を実施し、無給電装荷素子による広帯域一次放射器とクロススロットつき矩形パッチによる反射素子を設計した。次に9m²アンテナを設計し、後述の織物膜により試作評価し高利得な特性を確認した。

アンテナ機械系では、まず1m²展開膜アンテナを試作し、展開時に二層が5mm離れる飛び出す絵本方式のポップアップ機構を設計した。次に4.5m²アンテナを設計し、二層間にクロスバーを配置する構成とし、低収納体積を実現できることを確認した。

アンテナ製造ではアンテナ素子パターンをロール to ロールのめっき触媒印刷と無電解めっきを組合せる方式で製造し、低抵抗特性を実現した。また、折り曲げ試験や原子状酸素の耐久性も評価した。

以上の技術を組合せ、9m²アンテナが41.8dBiの高いアンテナ利得と63.6U(1U=1000cm³)に収納できる低収納体積を確認し、優れた電気特性と機械特性の両立を実現した。実用化に向けて、宇宙環境耐性、宇宙実証、非平面補償・ビーム走査化の課題に取り組み、小型衛星コンステレーションのさらなる革新を実現する。

【査読付き誌上発表論文】

- [1] K. Suzuki, H. Kurokawa, G. Nakayama, M. Yasuhara, A. Ochi, S. S. Yeon, H. Sakamoto, and T. Tomura, "A 5.8-GHz-band origami deployable reflectarray antenna for CubeSats," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 74, no. 4, pp. 3142-3153, (2026年1月27日早期公開)
- [2] M. Machida, T. Tomura, H. Sakamoto, and T. Fukao, "Stretchable-substrate-impregnated fabric: deployable reflectarray antennas for CubeSats," IEEE Access, vol. 12, pp. 58562-58572, (2024年4月23日)

【査読付き口頭発表論文】

- [1] H. Sakamoto, T. Tomura, T. Komaba, S. Kawashima, T. Takeuchi, S. Inagaki, and T. Takahashi,

"Fabrication and evaluation of two-layer woven textile deployable reflect-array antenna structure," AIAA Sci. Technol. Forum Expo. (SciTech), AIAA 2026-1832, (2026年1月8日)

- [2] A. Ochi, H. Sakamoto, T. Tomura, R. Sakurai, G. Nakayama, D. Mitchao, A. Shirane, and K. Okada, "OrigamiSat-2: 3U CubeSat demonstrator for two-layer pop-up origami deployable membrane reflectarray antenna," AIAA/USU Conf. Small Satellites, SSC25-P1-73, (2025年8月12日)
- [3] T. Tomura, K. Suzuki, H. Sakamoto, S. Inagaki, T. Takeuchi, and T. Takahashi, "Design of c-band 4.5-m² flexible reflectarray antennas by textile with copper pattern plating," IEEE Int. Symp. Antennas Propag. (AP-S), TU-UB.2P.3, (2025年7月15日)

【口頭発表】

- [1] 菊地洗成、武田裕貴、坂本啓、戸村崇、稲垣俊輔、竹内智也、高橋俊之、"衛星搭載用 5.8GHz 帯 1.4m × 6.4m 織物展開型リフレクトアレーアンテナの測定、" 信学技報、WPT2025-76、pp.102-105、(2026年3月3日)
- [2] 川島苑果、駒場啄舞、坂本啓、戸村崇、稲垣俊輔、竹内智也、高橋俊之、"製造誤差を考慮した二層織物展開リフレクトアレーアンテナ構造の設計改良と評価、" 宇宙科学技術連合講演会、4N13、(2025年11月28日)
- [3] 越智淳伎、戸村崇、黒川晴希、坂本啓、"ビーム走査・非平面補償可能な軽量膜リフレクトアレーアンテナの設計・評価、" 宇宙科学技術連合講演会、2J02、(2025年11月26日)

【申請特許リスト】

- [1] セーレン(株) 稲垣俊輔、竹内智也、高橋俊之、展開型アンテナ用導電回路パネル、日本、令和5年12月18日
- [2] 東京科学大 戸村崇、坂本啓、セーレン(株) 稲垣俊輔、竹内智也、高橋俊之、電磁波反射シート及び展開型アンテナ用リフレクトアレイ、日本、令和6年11月11日
- [3] 東京科学大 戸村崇、坂本啓、セーレン(株) 稲垣俊輔、竹内智也、高橋俊之、リフレクトアレー用電磁波反射シート、日本、令和7年11月15日

【受賞リスト】

- [1] 越智淳伎、Student Poster Award "Honorary Mention"、"OrigamiSat-2: 3U CubeSat Demonstrator for Two-Layer Pop-Up Origami Deployable Membrane Reflectarray Antenna"、2025年8月13日

【報道発表リスト】

- [1] "宇宙で大きく広がる「折り紙アンテナ」を地上実証"、東京科学大学プレスリリース、2026年3月26日