

小型衛星搭載用織物膜展開リフレクトアレーアンテナの研究開発

Institute of SCIENCE TOKYO

東京科学大学

電気電子系
機械系

戸村崇
坂本啓

鈴木皓大
駒場啄舞

菊地洗成
川島苑果

武田裕貴

セーレン

セーレン株式会社

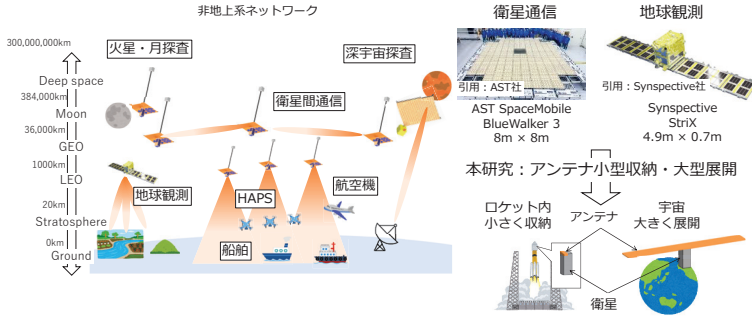
高橋俊之

竹内智也

稲垣俊輔

研究概要

背景・目的



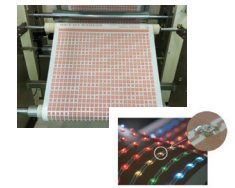
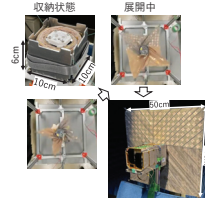
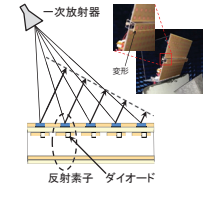
- 低軌道小型衛星コンステレーションによる衛星通信・地球観測網
- アンテナ高利得化→さらなる通信速度高速化・高解像度化
- 目的：小さな収納体積で大きな開口面積の小型衛星搭載用アンテナの実現

研究体制・研究課題

科学大・電気・戸村
アンテナ設計技術

科学大・機械・坂本
折り紙収納展開技術

セーレン社
織物膜銅形成技術



課題

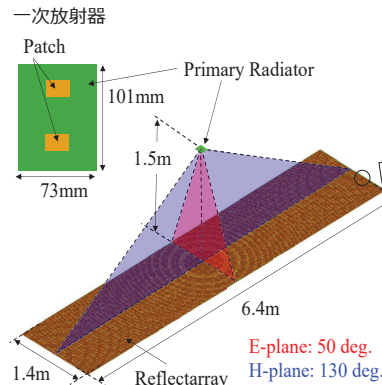
- 剛な構造を要求しないアンテナ様式の実現
- 大型アンテナの小体積への収納，確実な展開
- アンテナ電気特性と折り畳み可能な柔軟構造の両立

目的

- 100kg級衛星に搭載可能な5.8GHz帯9m²膜展開アンテナの実現

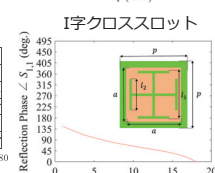
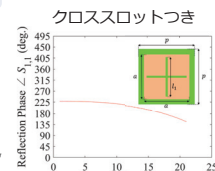
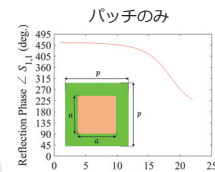
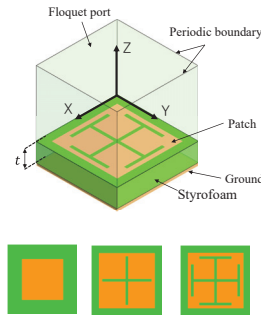
アンテナ電気系

アンテナ構成

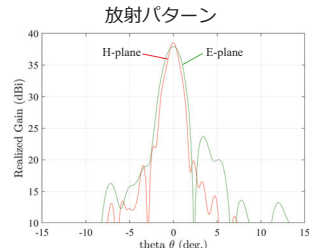
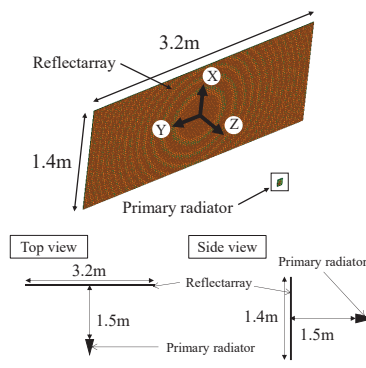


- 一次放射器とリフレクトアレーから構成
- リフレクトアレーは形状の異なる多数の反射素子で構成

反射素子

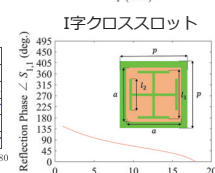
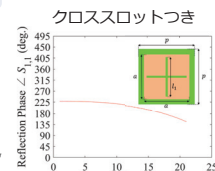
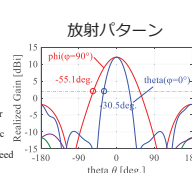
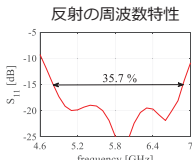
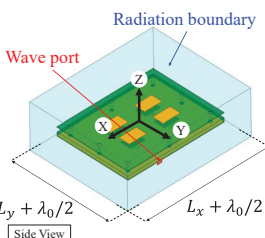


4.5m²展開膜アンテナ



- ビーム幅：短辺方向 2.1deg、長辺方向 1.2deg.

一次放射器



- 無給電パッチ装荷で広帯域特性を実現
- アンテナ素子数と素子間隔でビーム幅調整可能

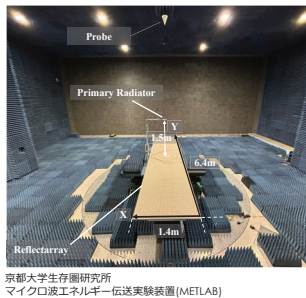
【査読付き誌上发表論文】

- [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. Mitchoo, 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)

近傍界測定



- 指向性利得：41.5dBi @ 5.8 GHz
- 3dBビーム幅：短辺方向0.8deg、長辺方向0.6deg.

【査読付き誌上发表論文】

- [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 x 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)

【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回路パネル, 日本, (2023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ー, 日本, (2024年11月14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, (2025年11月15日)

【受賞リスト】

- [1] 越前学後, 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】

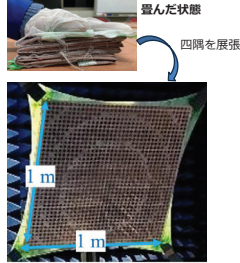
- [1] "宇宙で大きく広がる「折り紙アンテナ」を地上実証," 東京科学大学プレスリリース, (2026年3月26日)

アンテナ機械系

1 m²サイズ膜展開アンテナ

✓ 小さく畳め、広げてアンテナとなる設計の概念検証

- 膜面外周にカタナリー曲線を配置 → 面内に均一な張力を付与
- 二層膜構造
 - アンテナ層とグラウンド層の二層構造
 - 層間に5mmの誘電体層が必要
- ポップアップ式の支持構造により、誘電体層となる空隙を確保する

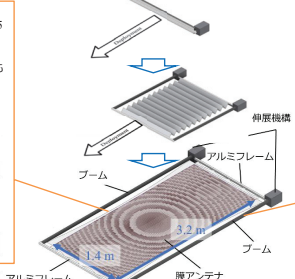
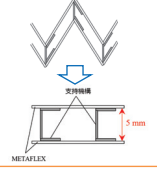


4.5 m²サイズ膜展開アンテナ初期構造

- 構造要求の設定
- 展開後、5mm間隔を保持した二層構成であること
 - 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
 - 収納時の体積は42.5 U (1U = 1000 cm³) 以内であること

✓ まず「一層膜構造」を設計・試作

- ポップアップ式支持構造
- 膜の短辺に平行となるよう135mm間隔で二層間に配置し、5mmの層間距離を維持
 - 収納時、2折りにより膜とともに折りたたむことが可能

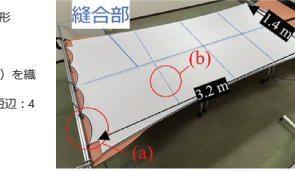


- フレーム
- 開断面円筒形状
 - 直径φ0 mm、厚さ0.4 mm、開口角45°
 - 材料：CFRP（炭素繊維強化プラスチック）
 - ヤング率：約14 GPa
 - フレーム長：3.5 m
- 座屈荷重：293 N
安全率：2
許容座屈荷重：146 N

一層膜プロトタイプ

プロトタイプ構成

- アンテナ部
 - 3240 mm × 1404 mmの長方形
 - 8枚の織物を縫合
- カタナリー部
 - アンテナ部の外周に配置
 - カタナリーケーブル（平紐）を織物材に縫合
 - カタナリー数-長辺：1、短辺：4
- アルミフレーム
 - 短辺と平行に配置
 - カタナリーケーブルと接続



しわの発生

- (a) せん断吸収境界
- 織物材がカタ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
 - アンテナ部へのしわの伝播を防止
- (b) 縫合部
- 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が原因

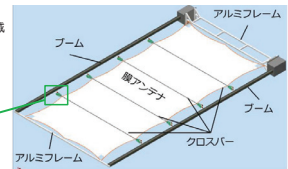
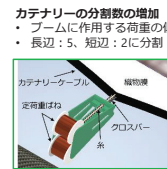
初期構造の課題

- 二層間の支持構造の製造誤差管理が困難
 - 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
 - 織物材の伸縮性が要因の一つ
 - 5mmの誘電体層に影響を与えない精度での、4.5 m²二層膜の製作は困難
 - 支持構造を「貼り付ける」ことなしに二層膜を実現する設計の検討
- 膜の平面精度とフレームの体積・質量のトレードオフ
 - 平面精度を高めたが、大きな張力をかけるためにはフレームの剛性強化（断面寸法の拡大）を要し、システム全体の質量増、収納サイズの大増を招く
 - カテナリーシステムの再設計 + METAFLEXの縫合手法の改善

4.5 m²サイズ膜展開アンテナ改良構造

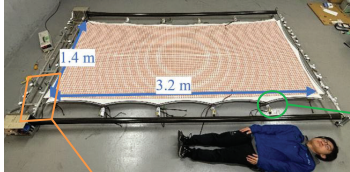
✓ 設計改良を行い、実寸法の「二層膜」を試作

- クロスバーの導入
 - 圧縮部材として荷重を負担
 - 支持構造として層間距離を維持
 - 断面5mm、長さ1.7mのCFRP製角柱を使用
- 各クロスバーは膜に直接固定されず、糸定荷重ばねを介して膜の端部に接続される
- 支持位置の製造誤差が、膜面に直接及ぼす影響を緩和



二層膜プロトタイプ

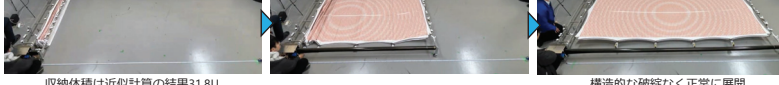
プロトタイプ構成



- アンテナ部
- 3240 mm × 1404 mmの長方形
 - 2枚の織物を縫合-縫合部のしわの低減
- カタナリー部
- アンテナ部の外周に配置
 - カタナリーケーブル（平紐）を織物材に縫合
 - カタナリー数-長辺：5、短辺：2
- 収納体積
- 4.5 m²アンテナ：31.8 U (1U=1000 cm³)
 - 9 m²アンテナ：63.6 U

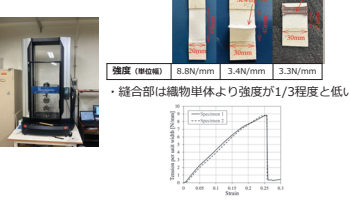
- 形状計測
- 地面と垂直に立て、重りを用いて吊るすことで重力補償
 - RMS 全体：0.651 mm
 - 中央部：0.549 mm

展開試験



材料の評価 ✓ METAFLEXの縫合部の強度、および原子状酸素(AO)の影響を評価

材料引張試験の実施



AO照射前後の強度変化を評価 (SQ: 耐AOのコーティング剤)

サンプル	AO照射後の強度低下
SQ無 アンテナ膜同等	約38%減
SQ無 被覆率100%	変化なし
SQ有 基材のみ	変化なし
SQ有 アンテナ膜同等	変化なし
SQ有 被覆率100%	変化なし

・SQコートしない銅の被覆により高いAO耐性が得られる

断面観察

試料をエポキシ樹脂で包埋 → ウルトラミクロトームによる切削で表面を作成 → Osプラズマコートで導電性処理

Si分布画像から、AO照射前後ともに、SQコーティングがMETAFLEXの繊維間および表面を被覆していることを確認

アンテナ製造

セーレン株式会社 (総合繊維業)

セーレン株式会社

社会課題を解決するセーレンの「新常識」

- 豊かで住みよい社会へ、技術革新を
- 地球環境問題の解決をめざして、環境負荷の低減を
- 人生100年時代より健康で、快適な暮らしを

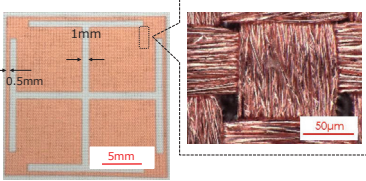
研究開発センター (坂井市)

福井県

セーレン本社 (福井市)

織物膜アンテナ 物性評価

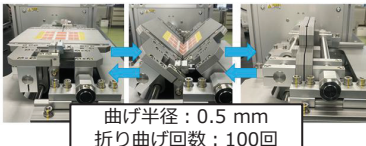
1. パターニング性



項目	実力値
L/S	0.5mm/1.0mm
全長誤差	0.5%以内
表面抵抗値	35mΩ/sq 以下

~12GHz (X-band) 適応可能

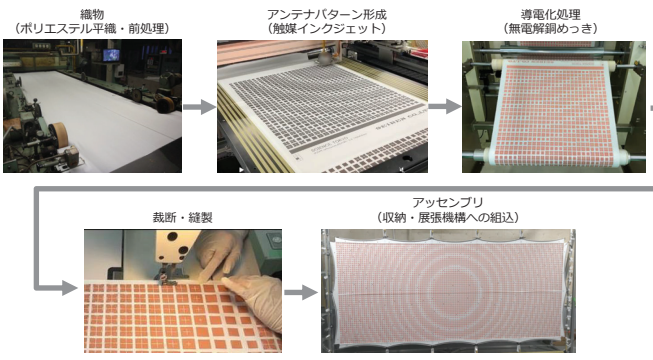
2. 折曲げ耐久性



折り曲げ方向	抵抗上昇率(倍)
山折り	1.53
谷折り	2.27

収納 ⇄ 展開の繰り返し動作に対応

織物膜アンテナ 製造プロセス



- 既存の繊維加工プロセス発展 = 高い生産性
- スケラブル / 異形対応 = 高い設計自由度
- 柔らかくしなやかで折り癖が付きにくい = 高い収納性・展張性・作業性

織物膜アンテナ 耐宇宙環境開発

【課題】

ポリエステル繊維は宇宙環境耐久性 特に 低軌道 (LEO) における原子状酸素 (AO) に対して懸念あり

【開発内容・目標】

- AO耐性剤 (SQコート) 膜形成
- AO照射時のポリエステル劣化状態の確認

【成果】

- 凹凸ある繊維基材に対して均一なSQコート膜の形成
- AO照射試験によりSQコートの有用性確認

