

織物膜を用いた宇宙展開式リフレクトアレーアンテナの概念設計と試作

代表研究者 坂本 啓 東京工業大学 工学院 准教授
共同研究者 戸村 崇 東京工業大学 工学院 テニューアトラック助教

1 概要

本研究は、平織りの織物上にアンテナ素子を貼付し、折り紙技術を用いて極めてコンパクトに収納できる、これまでになく軽量・高収納率の宇宙用リフレクトアレーアンテナの地上実験モデルを構築/評価し、新たな構造概念「折り紙膜ランダム面フェーズドアレーアンテナ」を提示することを目指す。膜面アンテナには高い平面度を要求せず(=ランダム面)、位相調整を電氣的に膜上で行うことで構造/機構の著しい軽量/小型化を可能とする。位相調整には可変容量ダイオードを活用し、アレー構造全体が平面でなくてもアンテナとして機能できる新技術を開発する。

目標として、1m×1mサイズのランダム面リフレクトアレーアンテナのプロトタイプを作成することを目指し、昨年度は可変容量ダイオードを用い位相調整を行うことを達成したが、まだ剛な基板上での基礎実験であった。そこで今年度はフレキシブル基板への実装を実現し、折り畳み可能なフレキシブル・アレーアンテナのプロトタイプ製作までを達成した。具体的には下記ステップを実施した。(A) フレキシブル基板上のアンテナ素子の特性解析・計測、(B) フレキシブルアレーの設計・解析、(C) 50cm×50cm フレキシブルアレーの試作・評価、(D) フレキシブルアレー折り畳み方法の試作・評価、である。本稿では提案の意義を述べた後、(A)～(D)について具体的な内容と成果を報告する。

2 背景と目的

衛星通信において、通信速度、通信距離の向上を目指した大面積をもつ平面アンテナの研究が行われている。人工衛星に搭載される大型平面アンテナは、打ち上げ時の容積、質量の制限から地上で収納し、軌道上で展開する展開型平面アンテナが用いられることが多い。その例として、NASA/JPL から 2018 年に打ち上げられた Mars Cube One (MarCO) , あるいは JPL で研究されているインフレータブルブームを利用した膜上平面アンテナなどがある。これら先行研究からわかるように、人工衛星への搭載を考えた展開型平面アンテナでは、平面アンテナの高い平面形状を維持するために、剛性の高い薄板、あるいは膜上平面アンテナでは剛な支持構造を利用しており、結果として収納効率はあまり高くない。収納効率がより高い展開構造として、JAXA が 2010 年に打ち上げたソーラー電力セイル実証機 IKAROS や、提案者らが開発し、2019 年に打ち上げられたキューブサット(超小型衛星) OrigamiSat-1 (図 2.1) がある。これら 2 例では、剛な支持構造を搭載しないことで、膜上に太陽電池などのデバイスを搭載しながらも高い収納効率を実現した。しかし IKAROS の軌道上データから、膜上のデバイスの影響で膜全体に大きな面外変形を生じることが報告されている。そこで、平面アンテナにおいても、構造の面外変形を許容することができれば、IKAROS のような膜展開構造にアンテナ素子を搭載することによって、展開型平面アンテナの収納効率を飛躍的に向上することができる、と申請者らは考えた。

そこで本研究では、図 2.2 に示すように、リフレクトアレーのアレー素子インピーダンスを能動的にバラクタダイオードにより制御することによって反射位相を調整し、平面アンテナ構造の面外変形によって生じる行路差を打ち消し、電氣的に面外変形を補償することのできるアクティブリフレクトアレーを提案する。本研究では折り畳み可能なランダム面リフレクトアレーアンテナのプロトタイプを作成することを目指す。昨年度は可変容量ダイオードを用い位相調整を行うことを達成したがまだ剛な基板上での基礎実験であった。そこで今年度はフレキシブル基板への実装を実現し 50cm×50cm サイズのプロトタイプ製作までを達成する。具体的には下記ステップを実施する。(A) フレキシブル基板上のアンテナ素子の特性解析・計測、(B) フレキシブルアレーの設計・解析、(C) 1m×1m フレキシブルアレーの試作・評価、(D) フレキシブルアレー折り畳み方法の試作・評価、である。以下では (A)～(C) の電氣的な検討を第 3 節に、(D) の機械的検討を第 4 節に記す。

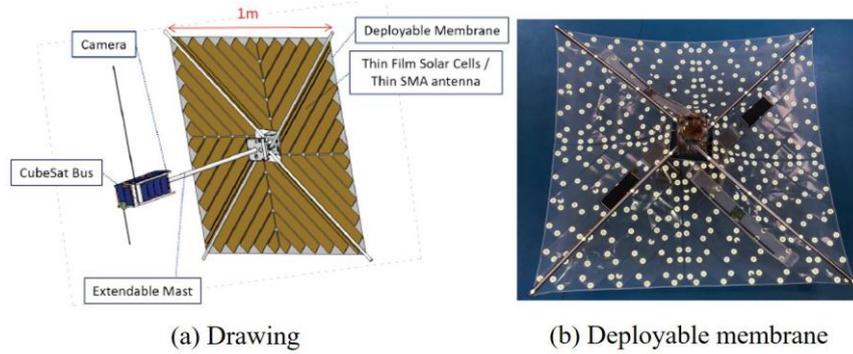


図 2.1: CubeSat OrigamiSat-1 (Tokyo Institute of Technology)

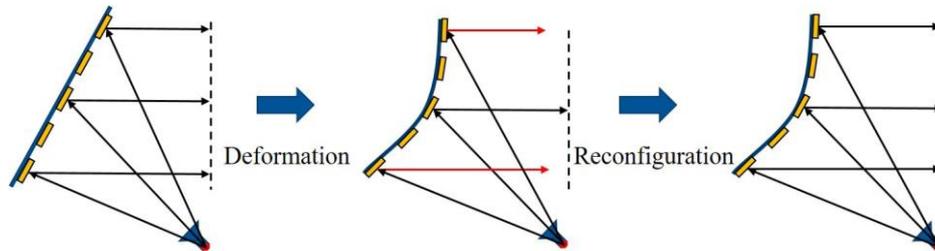


図 2.2: Proposed nonflatness compensation through phaseshifting in Reflectarray[1]

3 折りたたみ可能なリフレクタレーの設計・解析・試作

3-1 電氣的検討の概要

昨年度は可変容量ダイオードを用い位相調整を行い、平面度の補償の実証を達成したがまだ剛な基板上だった。そこで今年度はまず、パッシブ素子についてフレキシブル基板への実装を実現し目標の1m×1mサイズのスケールモデルとしての50cm×50cmプロトタイプ製作までを達成する。さらに数値解析上で、可変容量ダイオードを用いたアクティブアレーの評価までを行う。以下、3-2節では反射素子としてフレキシブル基板を用いた正方パッシブ素子の設計、評価を行う。3-3節では正方パッシブ素子を用いたパッシブアレーの設計を行う。3-4節ではさらに、折り畳みパターンに対応したアレー設計を提案・解析評価する。3-5節では折り畳みが可能なパッシブ素子の設計を行い、それを用いたパッシブアレーの設計を行う。最後に3-6節では昨年度の設計をベースにしたアクティブ化を実施し、今後の開発の課題を明確化する。

なお、中心周波数については、昨年度に引き続き、将来的な宇宙実証機の開発を考えた際に親和性のある5.8GHzとする。

3-2 フレキシブル・パッシブ素子の解析・試作・評価

(1) 解析

HFSSにて解析したフレキシブルなパッシブ素子を評価し、HFSSでの設計に問題がないことを確認した。初めにHFSSにて正方形のパッチ素子の辺の長さを変化させ、反射位相の変化を確認した。反射素子の解析モデルを図3.1に示す。上から正方形パッチ(銅厚み18 μ m)-空気層(厚み5mm)-グラウンド(銅厚み18 μ m)からなる。この反射素子モデルはパッチ素子を貼る放射器側の面とグラウンド面を離す構造を検討しているため基板に空気層が挟んでいる。本解析はのちに導波管を用いた実験で評価することを想定しているため、放射空間は導波管で設定し、大きさは導波管WRJ-5の寸法である47.55mm×22.15mmと設定した。解析結果の反射特性を図3.2に示す。

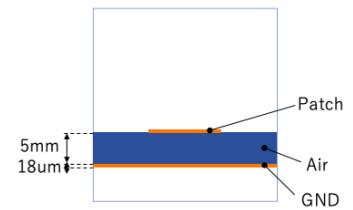
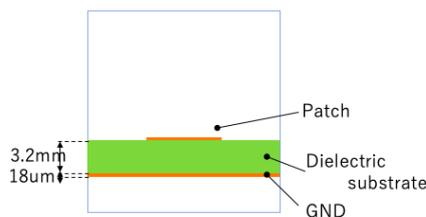
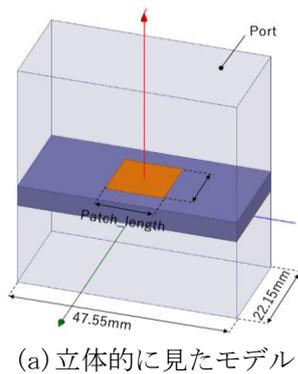


図 3.1: フレキシブル・2層式の反射素子の解析モデル

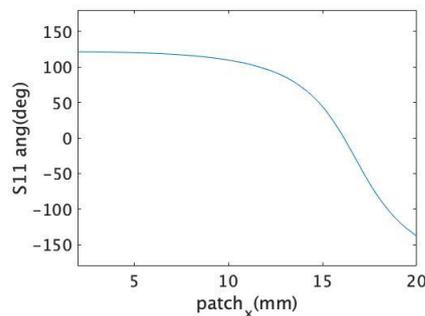


図 3.2: 反射素子モデルの反射位相

(2) 試作と導波管試験

HFSS 解析を行なった反射素子モデルを試作し、導波管計測を行なった。WRJ-5 の導波管を利用し、short には深さが $\lambda/8$ (10.3mm) のものを使用した。供試体として、上から正方形パッチ(銅 厚み $18\mu\text{m}$) - 空気層(厚み 5mm) - グラウンド(銅 厚み $18\mu\text{m}$) からなる反射素子モデルを製作し測定を行う。正方形パッチの長さが、反射位相が 90deg となる 12.68mm, 0deg となる 16.14mm, -90deg となる 18.1mm, の 3 種類の正方形パッチをそれぞれ 2 枚ずつ試作し評価した。それぞれの反射素子の試作品を図 3.3 に示す。解析モデルでは反射素子の下にグラウンド(銅 厚み $18\mu\text{m}$)をつけているが、今回の測定では反射素子の下に導波管の蓋となる short をつけるので、反射素子の試作品にはグラウンド(銅 厚み $18\mu\text{m}$)はつけていない。また解析モデルでは空気層とした部分は、今回の測定では実際に空気とするのではなく図 3.3 のように、アルテ のりパネ 5mm A4 BP-5NP-A4 という発泡スチロールのような空気層としてみなせるような素材を使用した。この素材にオレンジのポリイミドと銅箔のセットを貼り付け、導波管のサイズとなるようにカッターで切り試作した。

HFSS での解析結果と導波管実験での測定結果の反射位相の周波数特性グラフを図 3.4 に示す。HFSS での解析結果と実験での測定結果は周波数が 5.8GHz の時に最大で 30deg ほどの違いが見られた。剛な基板を用いた場合と比較して HFSS による解析データと実験データの差は増大する結果となった。原因としては、1つは HFSS での解析は空気層を想定して解析を行なったが、今回の実験では空気層に代わるものとして発泡スチロールのようなアルテ のりパネ 5mm A4 BP-5NP-A4 という素材を使用したため、2つ目は素材に銅箔を糊付けするのがスムーズにできず少し空気などが入ってしまったため、だと推測する。概ね合致する傾向は得られたので、この素子の特性を用いてアレー化を行っていく。



(a) Patch_length: 12.68mm



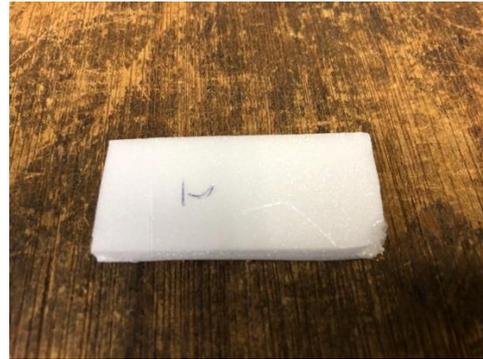
(b) Patch_length: 16.14mm



(c) Patch_length: 18.15mm

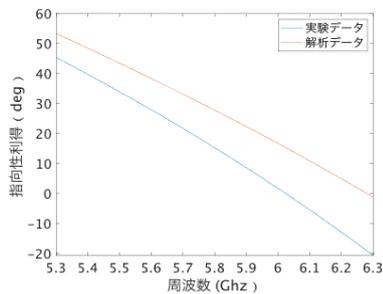


(d) 横から

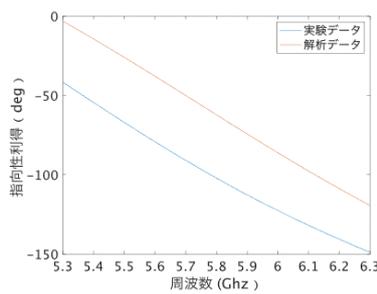


(e) 裏面

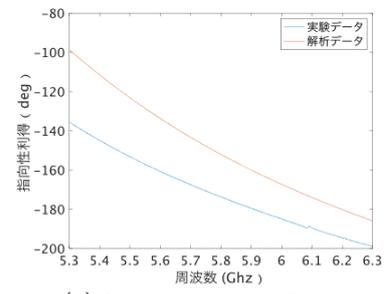
図 3.3: 試作したフレキシブル・2層式の反射素子モデル



(a) Patch_length: 12.68mm



(b) Patch_length: 16.14mm



(c) Patch_length: 18.15mm

図 3.4: フレキシブル反射素子モデルの反射位相の周波数特性

3-3 フレキシブル・アレーアンテナの設計・解析

(1) 素子解析

本項ではアレーアンテナに用いる反射素子の解析を行なった。パッチ素子の辺の長さを変化させ、反射位相の変化を確認する。解析に用いたモデルを図 3.5 に示す。図 3.1 のモデルからの変更点として以下の点を変えている。①フレキシブル基板が 5mm 間隔で展張されたリフレクトアレーを想定しているため、正方形パッチ(銅 厚み $18\mu\text{m}$)-ポリイミド(厚み $50\mu\text{m}$, 誘電率 3.6, 誘電正接 0.038)-空気層(厚み 5mm)-グラウンド(銅 厚み $18\mu\text{m}$)からなるモデルを設計した。②反射方向で素子間隔が 0.8λ とするため、アレーの素子間隔はアレーの放射方向の角度を考慮して, $\text{RadX}=0.67\lambda$, $\text{RadY}=0.8\lambda$ とした。ただし, λ は自由空間波長 51.7mm とする。③パッシブ素子は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。そこで放射空間の境界条件は周期境界を設定をしている。

図 3.6 に解析結果のグラフを示す。グラフより反射位相は $-160\text{deg}\sim 109\text{deg}$ までおよそ 270deg の範囲を調整できることが確認でき、目的とするアレーアンテナを構築できる目途が立った。

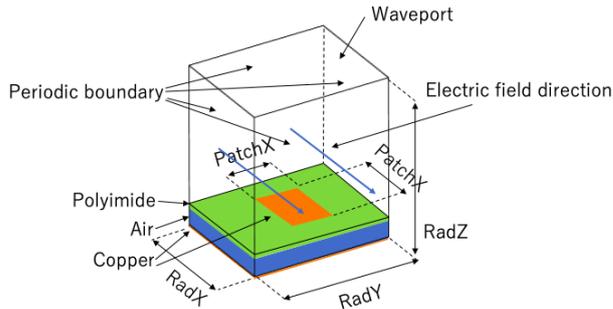


図 3.5: リフレクトアレー用の反射素子の解析モデル

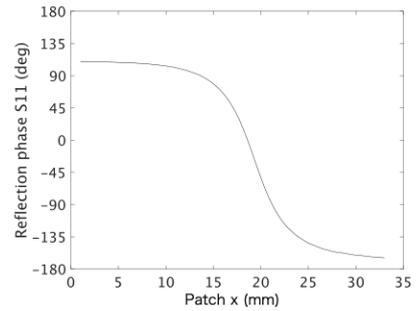


図 3.6: 反射素子の反射位相

(2) アレー設計

前項で解析を行なったパッシブ素子を利用してパッシブアレーの設計を行なった。まずリフレクトアレーの各素子アンテナのパラメータを決定する。反射方向で素子間隔が 0.8λ とするため、アレーの素子間隔はアレーの角度を考慮して、x 方向 $0.67\lambda = 34.64\text{mm}$ 、y 方向 $0.8\lambda = 41.36\text{mm}$ とした。リフレクトアレーは $500\text{mm} \times 500\text{mm}$ とし、素子数は 15×13 素子である。解析モデルを図 3.7 に示す。

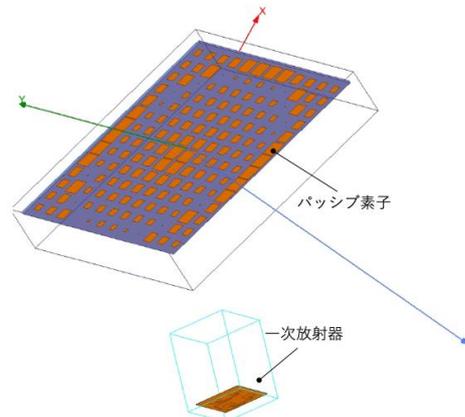


図 3.7: フレキシブル・アレーアンテナの解析モデル

設計したフレキシブル・リフレクトアレーアンテナの E 面、H 面の主偏波、交差偏波の放射パターンを図 3.8 に示す。指向性利得は 23.5dBi 、サイドローレベルは -19dB 以下、交差偏波は -19.4dB 以下の解析結果を得られた。精度を高く設計ができれば指向性利得は 27dBi ほどになるはずであるが、 23.5dBi と少し低くなってしまっているのは、設計したパッシブ素子では位相の調整ができていない範囲がおおよそ 90deg 分存在し、位相調整が十分でないことによるものと推察される。限界は存在するものの、アンテナとしての性能予測ができたので、次はこれを折り畳み可能なパターンへ変更していく。

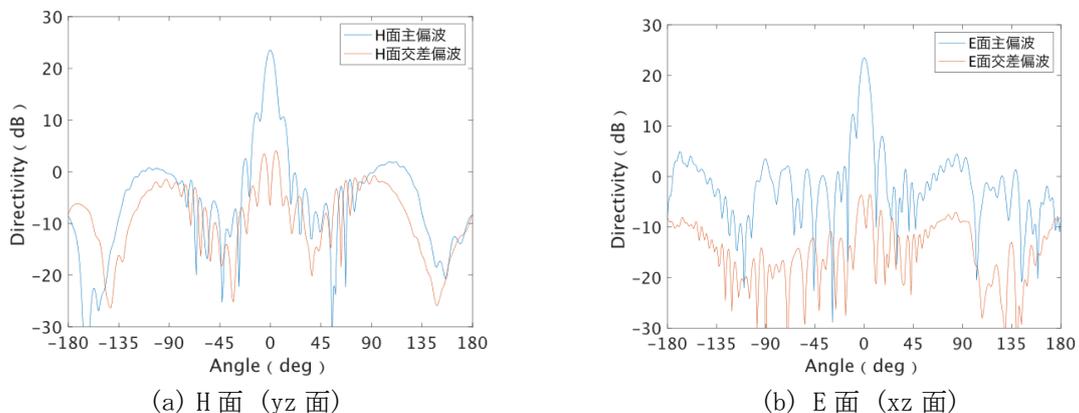


図 3.8: フレキシブル・アレーアンテナの放射パターン

3-4 折りたたむことを想定した設計変更・解析・試作

(1) 素子設計・解析

本項ではリフレクタレーを折りたたむことを想定した反射素子の設計を行なった。リフレクタレーの折り畳みの仕方として図 3.9 のような折り目を想定する。本項での設計では図 3.7 中の黒い正方形を 1 単位格子とし、多様なパッチ形状について、素子の大きさを変え反射位相の変化を確認した。試行錯誤の結果として採用した設計案について以下に記す。

設計案を図 3.10 に示す。放射空間を $\lambda/2 \times \lambda/2$ ，反射素子は前節と同様，パッチ素子(銅 厚み $18\mu\text{m}$) - ポリイミド(厚み $50\mu\text{m}$ ，誘電率 3.6，誘電正接 0.038) - 空気層(厚み 5mm) - グラウンド(銅 厚み $18\mu\text{m}$) としている。また，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。そこで前節と同様，放射空間の境界条件は周期境界を設定している。HFSS 解析結果を図 3.11 に示す。

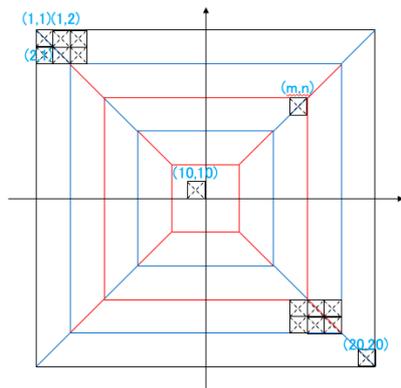


図 3.9: アレーアンテナの折り畳み線

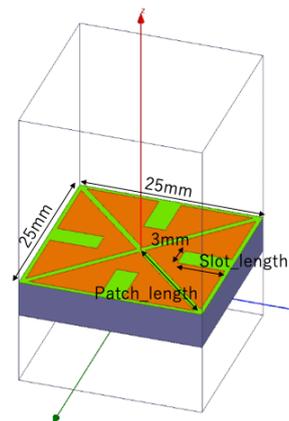


図 3.10: 反射素子の解析モデル

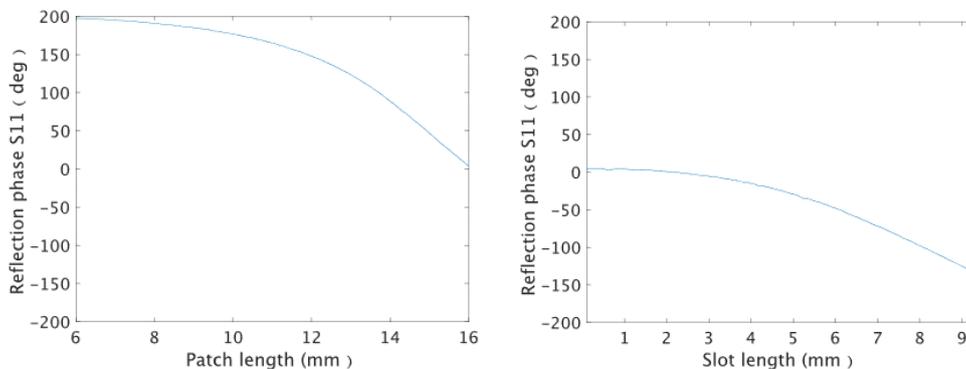


図 3.11: 反射素子の反射位相

先に設計したアレーアンテナは，幅広い反射位相の調整が可能であることから，提案した反射素子のモデルを利用して設計を行っていく。

(2) アレー設計・解析

前項で解析を行なったパッシブ素子を利用してフレキシブル・パッシブアレーの設計を行なった。反射素子の配置は図 3.9 を想定しており，素子数は 20×20 素子である。別途，本研究で設計したマイクロストリップアンテナを加えた解析のモデルを図 3.12 に示す。アレーアンテナとマイクロストリップの位置関係は微調整した鏡面諸元に従って設定した。なお図 3.12 の座標軸は放射方向としている。

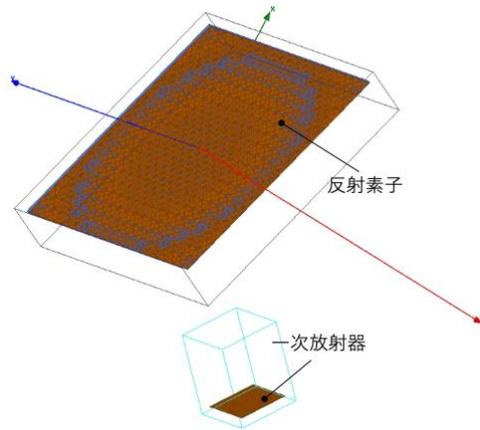


図 3.12: 折り畳みを想定したフレキシブル・アレーアンテナの解析モデル

設計したフレキシブルかつ折り畳みパターンに対応したリフレクトアレーアンテナのE面,H面の主偏波,交差偏波の放射パターンを図 3.13 に示す. 指向性利得は 25.4dBi, サイドローレベルは-25dB 以下, 交差偏波は-26.6dB 以下の解析結果を得られた. 良好な結果が得られたため, この設計で試作を行い実験的な評価を行っていく.

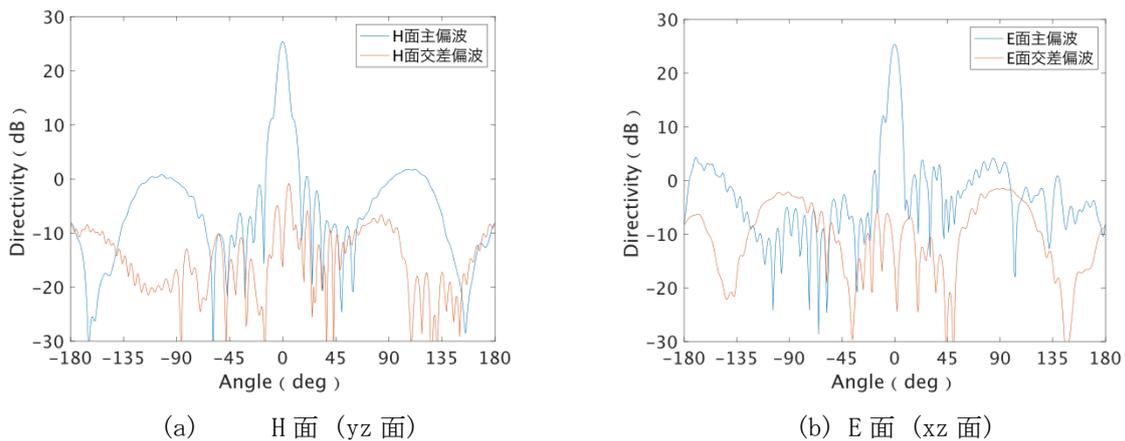


図 3.13: 折り畳みを想定したフレキシブル・アレーアンテナの放射パターン

(3) 試作と評価

上記の設計に基づき, フレキシブルな 2 層式の折り畳み可能なパッシブ・アレーアンテナ (500mm×500mm サイズ) を試作した. 電波暗室で評価した. この成果については, 現在出版準備中である.

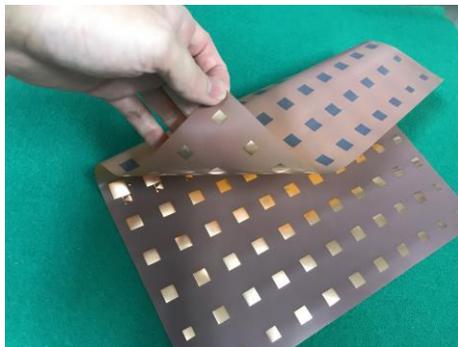


図1.14: フレキシブル基板を用いたリフレクトアレー

3-5 アクティブ素子の設計・解析

(1) 目的

昨年までの本研究グループの研究[1]では、アクティブ素子を利用して、非平面度に対応した位相調整が可能なリフレクタレーの設計を行っていた。まずは基礎研究として剛な基板上で解析的・実験的に評価を行った。このアクティブ素子ではバラクタダイオードの印加電圧を変化させることで、反射位相を変化させることができる。約 120deg の範囲の位相調整が可能となることがわかっている。しかし、この先行設計では、アクティブアレーに利用する素子としては位相範囲が比較的小さくリフレクタレーアンテナの素子として十分な反射位相の調整を行うことができない可能性がある。そこで今年度は、アレー面をフレキシブル化すると同時に、反射位相の範囲がより広い範囲で行えるアクティブ素子の設計を行なった。

(2) 設計・解析

今回フレキシブル基板での実装を行うので、先行設計とは誘電体基板として使われている材料、基板の厚さ、設計周波数が全て異なる。そこで本節では先行設計のモデルを元に今年度使用する誘電体基板、設計周波数に置き換え反射位相範囲が先行設計と同等となるよう設計を行なった。

昨年の設計を参考にし、本設計では図 3.15 のようなモデルを設計し、各パラメータの値を検討した。3-4 節まで設計したパッシブ素子と同様に、素子面とグラウンド面を離す構造のアレーアンテナを使用することを想定しているため、反射素子は上から、パッチ素子(銅 厚み 18 μ m)-ポリイミド(厚み 50 μ m, 誘電率 3.6, 誘電正接 0.038)-空気層(厚み 5mm)-中間層(銅 厚み 18 μ m)-ポリイミド(厚み 50 μ m, 誘電率 3.6, 誘電正接 0.038)-Phase tuning line(銅 厚み 18 μ m)とした。設計後に導波管を用いて測定することを想定しているため、放射空間は導波管に設定している。

さらに先行設計との構造的な変更点として、今年度はラジアルスタブをなくした。このラジアルスタブは周波数帯域を広くするために使われており、本研究では周波数は 5.8GHz を使用するため周波数帯域が広くなる必要が無いと判断したためである。

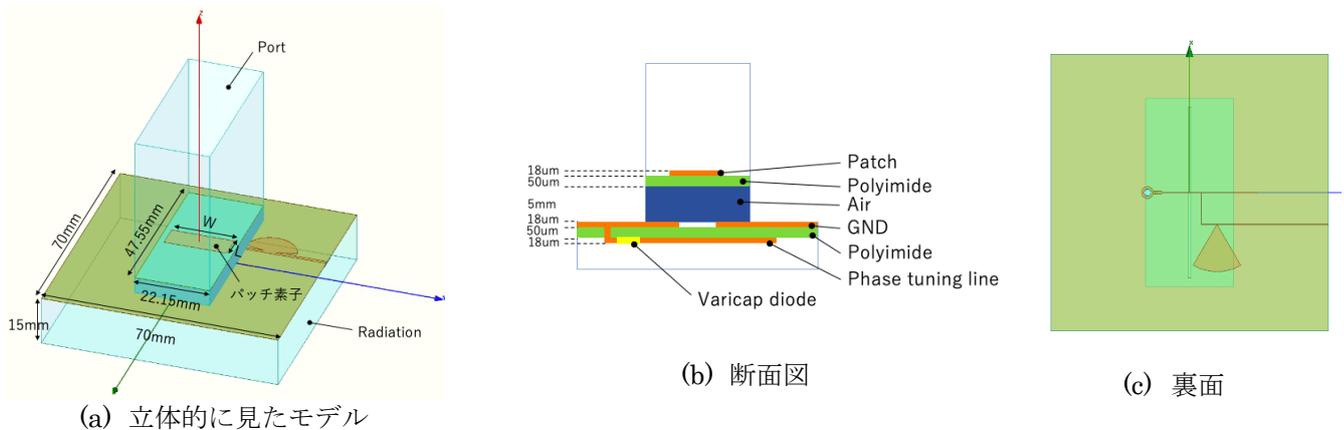


図 3.15: 設計したアクティブ素子のモデル

(3) 解析結果

反射位相が先行設計より拡大したフレキシブル・アクティブ素子の設計を行なった。結果として約 280deg の反射位相範囲を持つアクティブ素子が設計できることがわかった。一方で、課題として反射の利得が減少する結果ともなった。フレキシブルかつ位相調整可能なアクティブアレー実現のために克服すべき課題が明確化できた。

4 飛び出す絵本の仕掛けを用いた 2 層折り畳み法の検討

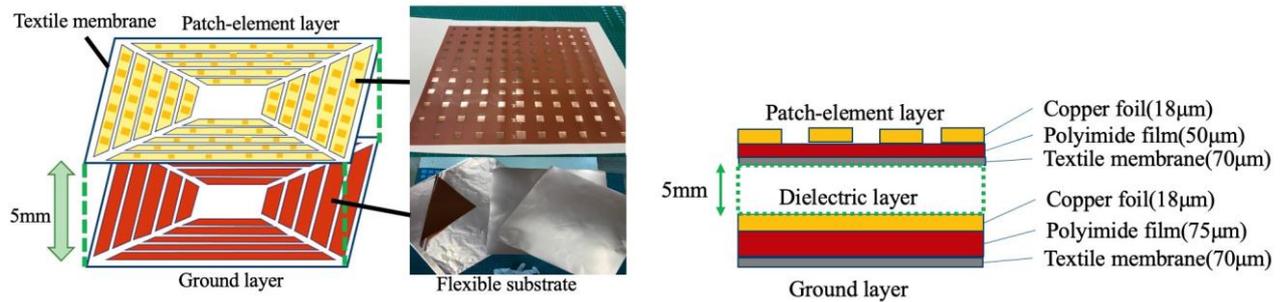
4-1 概要

昨年度までに 1m \times 1m の折り畳み可能なアンテナ構造のモックアップを作ってきたが、3 章で議論してきた

ような2層式に対応したものではなかった。本章では、電氣的検討から要請された「5mmの間隔を有する2層のフレキシブル基板」のコンパクトな収納を可能にする折り畳みパターン設計・試作を行う。今回新たに飛び出す絵本の仕掛けを用いた基板間支持機構を導入する設計を提案する。一方で昨年度までの試作から用いてきた、平織布の柔軟性を活用し厚さの影響を吸収してコンパクトに折りたたむ設計は踏襲して用いていく。

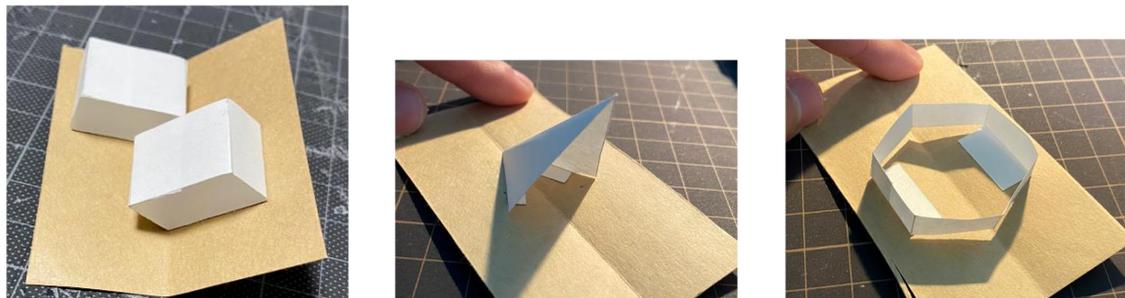
4-2 提案する飛び出す絵本を活用した収納方式

本研究で提案する膜構造の概要を図4.1に示す。パッチ素子面、及びグラウンド面は、短冊上に切り分けたフレキシブル基板を織物膜に添付して制作する。ここで、フレキシブル基板とはポリイミドフィルムと銅箔の二層からなる極薄の基板である。平織物（以降、織物膜と呼称）は軽量・極薄かつ高い伸縮性を持つ膜で、収納時の基板に掛かる負担を軽減するために採用した。また、本研究では上記電氣的検討に基づき誘電体層（空隙）の厚さを5mmとした。



(a) Constitution of space-membrane antenna (b) Cross section

図 4.1: Deployable antenna overview



(a) Plane 4-link mechanism (b) Spherical 3-link mechanism (c) Spatial 6-link mechanism

図 4.2: Examples of pop-up book mechanism

4-3 飛び出す絵本の機構の活用

飛び出す絵本には大きく分けて図4.2のような機構がある。今回の目的には(a)の4節リンクが活用できると期待できるが、そのクランク機構を支持機構として2層間に挟むだけでは、上から荷重がかかった際にすぐに機構が折り畳まれて潰れてしまう。しかし、荷重を分散するように機構の配置数を増やしてしまうと、それだけアンテナの重量と容積が増えてしまい、軽量・高収納率である膜構造の利点を損ねる。

そこで、クランク機構の運動に着目すると、その運動は同一平面内のみで行われ、運動方向と直交する方向には動くことがない。したがって、並列配置ではなく、各クランク機構の運動方向が直交するような配置方法を取れば、互いに運動が拘束されて、安定した機構として成立すると考えた。クランク機構を飛び出す絵本の機構として畳めるように機能させるには、折り線に対して直交する向きに配置すればよい。

以上の検討から、図4.3に示すような2層式の折り畳み構造であれば、展開後に形状が保て、かつコンパクトにたためると予測ができた。

4-4 2層式・フレキシブル基板の収納法のプロトタイプ製作

上記の設計コンセプトに基づき、50 cm × 50 cm のプロトタイプ製作を行なった。また、プロトタイプの収納性の評価、および機構の安定性の評価を行った。

(1) プロトタイプの諸元

本研究では、実際のフレキシブル基板ではなく、ほぼ等価な剛性・厚さを持った紙を用いてプロトタイプを製作した。図 4.3 にその設計概要を示す。パッチ素子面・グラウンド面に関しては織物膜の上に、基板に見立てた紙を接着している。また、2層間の支持機構についても同様に紙を折ることで製作した。

(2) プロトタイプの評価

まず、製作したプロトタイプの収納性の評価を行った。図 4.4 に収納の過程を示す。飛び出す絵本の機構がしっかりと機能し、展開時の 50cm × 50cm × 0.5cm の大きさから、6.5cm × 6.5cm × 4cm の収納容積にまで折り畳むことができ高い収納効率を実現することができた。次に、展開形状の安定性も荷重試験により高いことを示すことができた。以上の機械的な研究成果も発表準備中である。

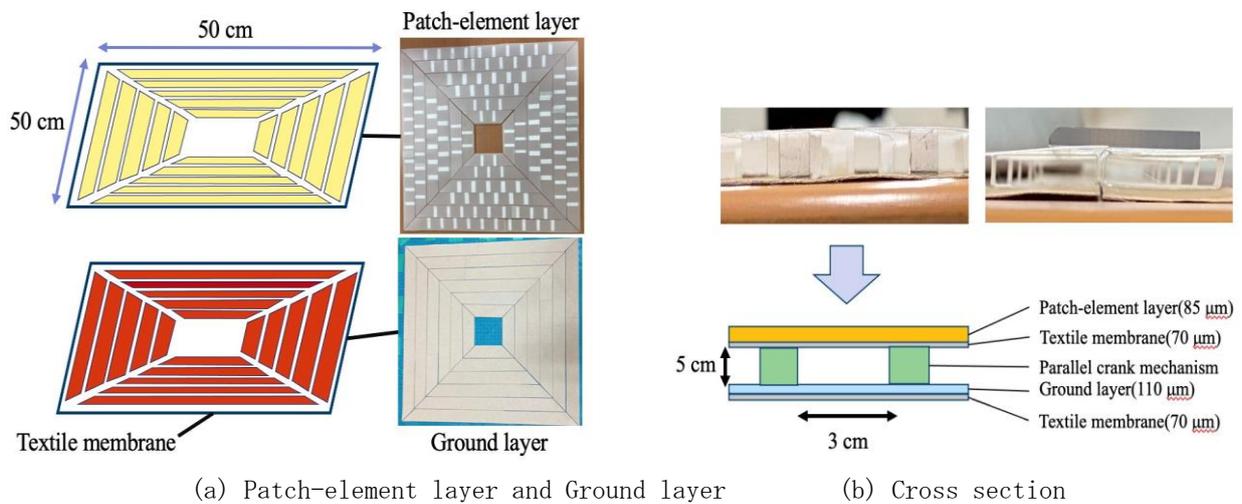


図 4.3: Prototype overview

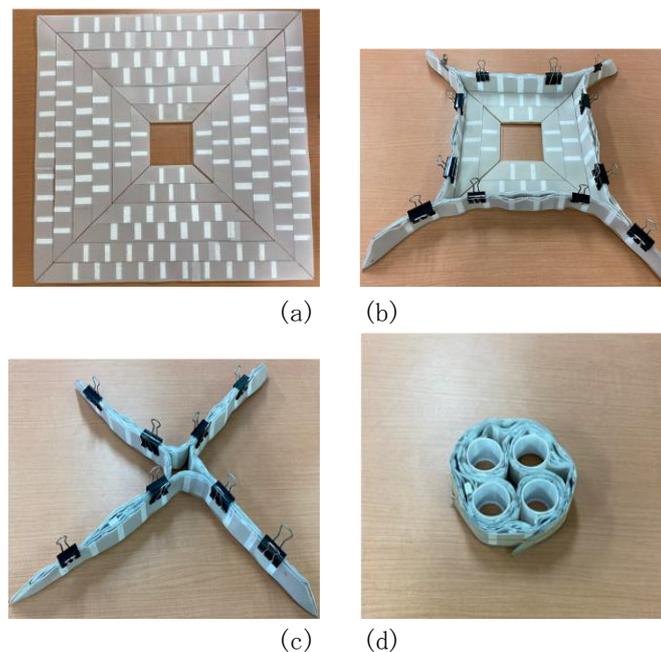


図 4.4: Packaging process

5 結論と今後の発展

以上により、提案手法の電氣的/機械的プロトタイプを構築し、評価することを達成した。電氣的には、剛な基板上では位相調整を実証したものの、フレキシブル基板化と位相調整の両立に存在する課題を明確化した。機械的には、フレキシブル基板と同等な剛性・厚さの材質でのプロトタイプを実施した。次のステップは、実際の基板材料を用いることと、サイズを1m×1mに拡大することである。研究の過程で多くの発見があり、国際会議発表2本、国内会議発表5本、国際ジャーナル出版1本という多くの研究成果をもたらした。今年度の研究成果に基づき、著者らは2021年度より、超小型衛星を用いた宇宙実証ミッションのペイロード開発を行っていく。

【参考文献】

- [1] K. Omoto, T. Tomura, H. Sakamoto, "Proof-of-Concept on Misalignment Compensation for 5.8-GHz-Band Reflectarray Antennas by Varactor Diodes," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 54101-54108, 2021, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3071090>.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Simulation of a 5.8GHz-band active reflectarray for non-flat structures	2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation	2020年7月
反射位相制御によるリフレクトアレーアンテナの非平面度補償	電子情報通信学会ソサイティ大会	2020年9月
非平面アレーアンテナの平面度補償のためのアルゴリズムの検討	第64回 宇宙科学技術連合講演会	2020年10月
Phase adjustment algorithm for deformation compensation of non-flat reflectarray antenna	International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) 2020	2021年1月
折り畳み可能なフレキシブル基板パッシブリフレクトアレーの設計	電気情報通信学会総合大会	2021年3月
面外変形によるリフレクトアレーアンテナの利得低下量の一検討	電子情報通信学会総合大会	2021年3月
飛び出す絵本の機構を用いた宇宙展開膜面アレーアンテナ構造の提案	日本機械学会 2021年度年次大会	2021年9月 (発表予定)
Proof-of-concept on misalignment compensation for 5.8-GHz-band reflectarray antennas by varactor diodes	<i>IEEE Access</i>	2021年4月