

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02146

研究課題名（和文）超高利得・小型収納・大型展開可能なリフレクトアレーアンテナシステムの創出

研究課題名（英文）Creation of reflectarray antenna systems with ultra-high gain, compact storage, and large deployability

研究代表者

戸村 崇 (Takashi, Tomura)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：10803992

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：超高利得・小型収納・大型展開可能なリフレクトアレーアンテナシステムの創出を目的とし、下記3つの研究課題に取り組んだ。(1)非平面補償技術ではリジッド基板とフレキシブル基板で実現可能は反射素子構造を見出し、リフレクトアレーアンテナを試作評価し、その有効性を示した。(2)折りパターンを満たす反射素子では折りパターン幅とアレー周期の条件を決定し、あらゆる素子位置で折り線をまたがない素子形状を見出した。(3)以上の技術を集結し、超小型衛星OrigamiSat-2に搭載可能な超高利得・小型収納・大型展開リフレクトアレーアンテナシステムを設計した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の目的は超高利得・小型収納・大型展開可能なリフレクトアレーアンテナシステムの創出である。アンテナ形状が不定であったり、アンテナを折り紙構造で折りたたむなどの、従来の常識にはない前提条件がスタート地点となっており、学術的には非平面補償技術や折り線を満たす反射素子など多くの知見が得られた。また、多数の低軌道衛星を用いる無線通信網や地球観測網には通信速度や分解能向上のために高利得アンテナが必要になる。本研究で得られたアンテナシステムはこれらに適用可能であり、無線通信速度の要綱や分解能向上に大きく寄与すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The following three research projects were undertaken with the aim of creating a reflectarray antenna system with ultra-high gain, compact size, and large deployment capability. (1) In non-flat compensation technology, we found a reflective element structure that can be realized using rigid and flexible substrates, and evaluated a reflective array antenna prototype to demonstrate its effectiveness. (2) For reflection elements that satisfy the fold pattern, we determined the conditions for the fold pattern width and array period, and found element shapes that do not cross the fold line at any element position. (3) By integrating the above technologies, we designed an ultra-high gain, compact, and large deployable reflector array antenna system that can be installed on the nano-satellite OrigamiSat-2.

研究分野：アンテナ工学

キーワード：アンテナ リフレクトアレー 展開アンテナ 折り紙 非平面補償

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高利得・小型収納・大型展開アンテナは小型衛星やドローンなどに搭載して高速無線通信やレーダに使用できる。このようなアンテナとして基板上リフレクタレーとメッシュ反射鏡の2種のアンテナが主に研究されている。基板上リフレクタレーは硬い基板上に反射素子を配置し、複数枚の基板をヒンジで収納・展開する構造である。設計・試作が容易という利点があるが、小さく折りたためない、重量が増加するため大型化が困難という欠点がある。メッシュ反射鏡は硬い支持構造と展開機構に金属メッシュを張った構造である。大型化が容易だが、鏡面精度を上げるために重く硬い支持構造と展開機構が必要になる。申請者らは織物膜を Flasher 折り紙パターンで折ることで、展開構造を含む $1 \times 1 \text{m}^2$ の膜を $10 \times 10 \times 10 \text{cm}^3$ に収納可能な構造を示した。展開後の膜に平面度を求めないことで、軽量で小型収納・大型展開構造を実現した。一方で低い平面度と折りパターンはアンテナの特性を大きく劣化する要因である。低い平面度は位相分布の乱れを生じ、折りパターンはアンテナ配置周期の乱れを生じる。もしこれらを電氣的に補正できれば、前述の従来研究二種では実現しえないほどに軽量な、超高利得・小型収納・大型展開アンテナを実現できる。従って平面度の電氣的な補正方法、折りパターンの影響を受けないアンテナ設計論を確立する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は折りたたみ技術を用い超高利得・小型収納・大型展開リフレクタレーアンテナシステムを創出することである。展開膜へ高い平面度を求めないことで大型アレー膜面の小型収納が可能になる。これを実現するために1:変形を能動素子で補償する電磁界的物理現象の解明。2:折りパターンによる周期の乱れを整える設計論の構築。これらの課題を解決し、超高利得・小型収納・大型展開リフレクタレーアンテナシステムを創出する。

3. 研究の方法

本研究は(1)非平面補償技術、(2)折りパターン周期を満たす反射素子、(3)超高利得・小型収納・大型展開リフレクタレーアンテナシステムの3つに分け研究を実施する。

4. 研究成果

(1)非平面補償技術

リフレクタレーアンテナの非平面度を補償する素子として、リジッド基板とフレキシブル基板上に構成する2種の反射素子を設計した。リジッド基板上に構成する反射素子を図1に示す。リジッド基板上に正方形パッチを配し、入射電界方向に水平方向にバラクタダイオードを接続する。また、入射電界との結合を防ぐため、入射電界方向とは垂直方向にDCバイアス線を設けてある。バラクタダイオードへの印加電圧を変えることで反射位相を -171 度から 121 度まで変化できることを電磁界解析で明らかにした。本素子による非平面度補償を実証するために 11×11 素子リフレクタレーアンテナを設計した。中央の1列のみ基板法線方向に移動できるようにし、その1列に本素子を用いた。残りの素子についてはバラクタダイオードを搭載しない反射素子を採用し、一次放射器と素子位置の幾何学的な関係より求まる所望位相で素子寸法を決定した。平面時と比較し、変形を与えることでアンテナ利得が低下した。しかしバラクタダイオードへの印加電圧を調整することで、アンテナ利得が上昇し平面時と同程度のアンテナ利得が得られることを確認した。[1]

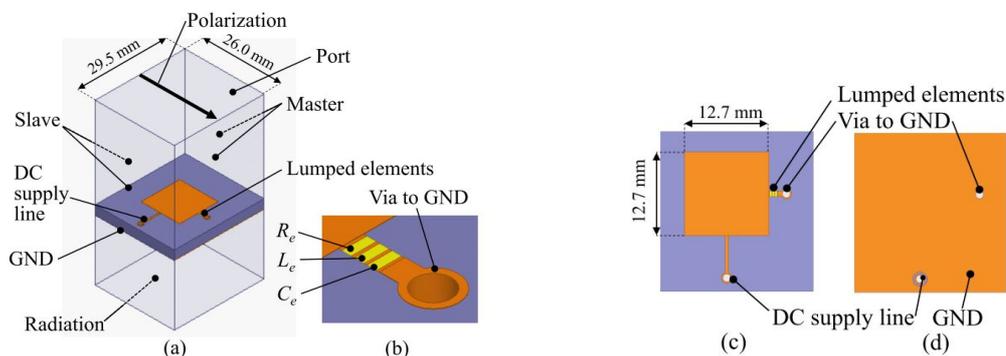


図1 リジッド基板上反射素子 [1]

フレキシブル基板上に構成する反射素子として図2に示す。2枚のフレキシブル基板で構成され、1つはグラウンド、もう1つにH型スロットとバラクタダイオードが搭載されている。スロット直下に配置されたマイクロストリップ線路からバラクタダイオードに給電される。本素子は印加電圧を0Vから15Vまで変えることで343度変えることができる。反射損失は0.53dBと非常に低く抑えられている。

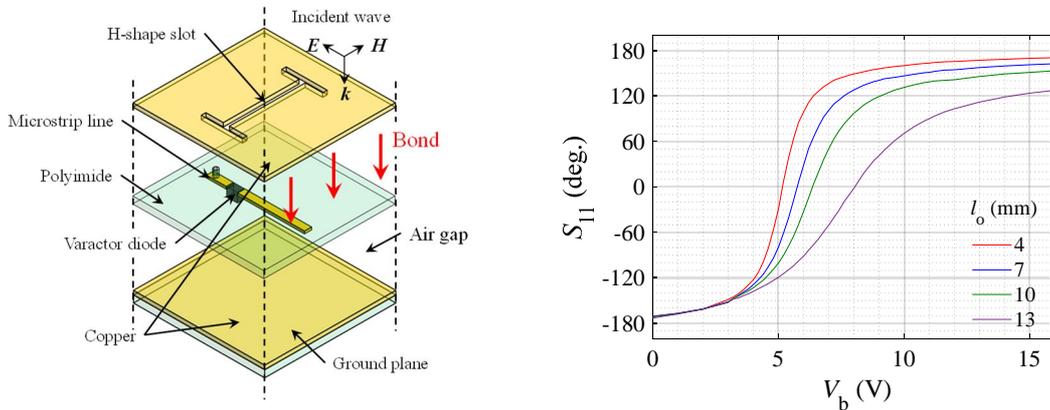


図2 フレキシブル基板上反射素子 [2]

(2) 折りパターン周期を満たす反射素子

小型収納・展開を実現するためにリフレクトアレーアンテナを折り紙技術で折りたたむ必要があり、折りパターンを図3(a)に示す。折れ線上に反射素子が配置されると、反射素子上に折しわが発生しアンテナ利得の低下につながる。そこで、アンテナ素子周期 p を折り幅 w の $\sqrt{2}$ 倍となるように設計することで、単位素子上に周期的に折り線が生じるようになる(図3(b))。この折り線をまたがない反射素子形状として図3(c)に示す、ひし形パッチとクロススロットの組合せを提案した。本反射素子形状により反射位相 326 度変化できることを確認した。本アンテナ素子を用いてアンテナを設計試作評価し、アンテナ利得 23.6dBi を実現できることを確認した[3]。

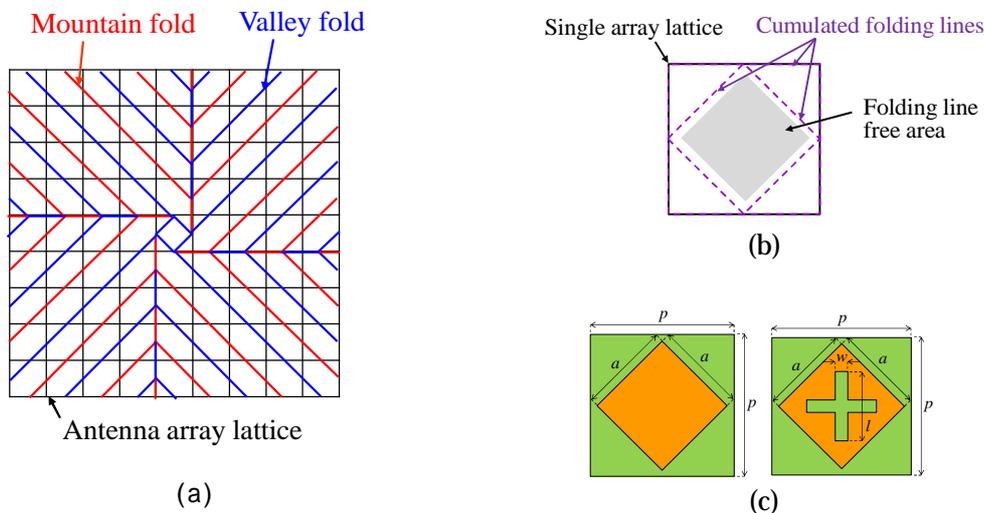


図3 フレキシブル基板上反射素子 [3]

(3) 超高利得・小型収納・大型展開リフレクトアレーアンテナシステム

超小型衛星 OrigamiSat-2 への搭載を目指し、上述のアンテナ設計技術を使用したりフレクトアレーアンテナを設計した[4][5]。本リフレクトアレーアンテナは2枚の織物膜の間にコの字型に曲げたフレキシブル基板を接着する構成である。1枚の織物膜は誘電体であるが、他方の織物膜は導電性であり、グラウンド板として機能する。フレキシブル基板は基材としてポリイミドを使用しており、反射素子を銅箔パターンで構成している。フレキシブル基板は、織物膜2層を離す支持構造としても機能しており、電気的および機械的な役割を果たしている。電磁界解析によりアンテナ利得 19.5dBi の特性を得ている。

参考文献

- [1] K. Omoto, et al., "Proof-of-concept on misalignment compensation for 5.8-GHz-band reflectarray antennas by varactor diodes," IEEE Access, vol. 9, pp. 54101-54108, Apr. 2021.
- [2] 武田, 戸村, 坂本, "スロット結合線路にバラクタダイオードを実装した反射位相可変フレキシブル基板リフレクトアレーの設計," 信学技報, AP2022-250, pp.93-96, Mar. 2023.
- [3] 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, Apr. 2024.
- [4] G. Nakayama, et al., "Space demonstration of two-layer pop-up origami deployable membrane reflectarray antenna by 3U CubeSat origamisat-2," AIAA/USU Conf. Small Satellites, SSC23-WVIII-03, Aug. 2023.
- [5] 戸村崇, 他, "OrigamiSat-2 搭載膜展開リフレクトアレーアンテナ," 宇宙科学技術連合講演会, 3009, Oct. 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Omoto Keisuke, Tomura Takashi, Sakamoto Hiraku	4. 巻 9
2. 論文標題 Proof-of-Concept on Misalignment Compensation for 5.8-GHz-Band Reflectarray Antennas by Varactor Diodes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 54101 ~ 54108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3071090	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Machida Masato, Tomura Takashi, Sakamoto Hiraku, Fukao Tomohiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Stretchable-Substrate-Impregnated Fabric: Deployable Reflectarray Antennas for CubeSats	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 58562 ~ 58572
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2024.3392562	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計31件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 12件）

1. 発表者名 坂本啓, 戸村崇, 白根篤史, 岡田健一
2. 発表標題 折り紙技術を用いた展開式・非平面膜面アレーアンテナの宇宙実証
3. 学会等名 宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 戸村崇, 坂本啓
2. 発表標題 大型展開パッチ・リフレクタレーアンテナの機械的・電氣的構成のトレードオフ評価
3. 学会等名 宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田裕貴, 戸村崇, 坂本啓
2. 発表標題 折り畳み収納リフレクタレーアンテナの展開における変形補償の研究
3. 学会等名 信学技報
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田裕貴, 戸村崇, 坂本啓
2. 発表標題 フレキシブル基板一層で構成するリフレクタレーの反射位相制御
3. 学会等名 信学総大
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村真也, 坂本啓, 町田理人, 戸村崇
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Tomura, M. Machida, and H. Sakamoto
2. 発表標題 Simulation results of a foldable reflectarray composed of four triangular notched patches
3. 学会等名 Int. Symp. Antennas Propag. (ISAP) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Shirane, T. Tomura, H. Sakamoto, and K. Okada
2. 発表標題 Ultra-lightweight deployable antenna membrane technology for future non-terrestrial 6G network and earth observation
3. 学会等名 AIAA/USU Conf. Small Satellites (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Kato, H. Sakamoto, T. Tomura, and M. Okuma
2. 発表標題 Phase adjustment algorithm for deformation compensation of non-flat reflectarray antenna
3. 学会等名 Int. Symp. Antennas Propag. (ISAP) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Tomura, K. Omoto, and H. Sakamoto
2. 発表標題 Simulation of a 5.8-GHz-band active reflectarray for non-flat structures
3. 学会等名 IEEE Int. Symp. Antennas Propag. (AP-S) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 町田理人, 戸村崇, 坂本啓
2. 発表標題 折り畳み可能なフレキシブル基板パッシブリフレクタレーの設計
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 戸村崇, 坂本啓
2. 発表標題 面外変形によるリフレクタレーアンテナの利得低下量の一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤雅己, 坂本啓, 戸村崇, 大熊政明
2. 発表標題 非平面アレーアンテナの平面度補償のための位相調整アルゴリズムの検討
3. 学会等名 宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 戸村崇, 大本圭祐, 坂本啓
2. 発表標題 反射位相制御によるリフレクタレーアンテナの非平面度補償
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 黒川晴希, 鈴木皓大, 中山弦, 坂本啓, 戸村崇
2. 発表標題 プリント基板上ビームチルトアレーの内層給電による不要放射抑圧設計
3. 学会等名 信学ソ大
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木皓大, 黒川晴希, 中山弦, 坂本啓, 戸村崇
2. 発表標題 超小型衛星搭載用展開型直線偏波・円偏波変換リフレクトアレーアンテナの設計
3. 学会等名 信学ソ大
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 戸村崇
2. 発表標題 リフレクトアレーアンテナの基礎と小型衛星への適用
3. 学会等名 信学技報
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 戸村崇, 黒川晴希, 中山弦, 鈴木皓大, 坂本啓, 越智淳伎, 永井和希, 安原光彦, S.S. Yeon
2. 発表標題 OrigamiSat-2 搭載膜展開リフレクトアレーアンテナ
3. 学会等名 宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坂本啓, 戸村崇, 森谷元喜, M. Delburg, 竹田有希, 永井和希, 金丸宙, 中山弦, 押野太一, 佐藤 匠, 三本喜貴, 濱藤颯真, 黒川晴希, 木谷洸一, 豊田晃大, S.S. Yeon, 安原光彦, 越智淳伎, 桑颯太, 白根篤史, 岡田健一
2. 発表標題 折り紙構造による超高利得展開リフレクトアレーアンテナ技術の宇宙実証キューブサットOrigamiSat-2
3. 学会等名 宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 武田裕貴, 戸村崇, 坂本啓
2. 発表標題 スロット結合線路にバラクタダイオードを実装した反射位相可変フレキシブル基板リフレクトアレーの設計
3. 学会等名 信学技報
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒川晴希, 中山弦, 武田裕貴, 戸村崇, 坂本啓
2. 発表標題 超小型衛星搭載リフレクトアレーアンテナ一次放射器用プリント基板ビームチルトアレーの設計
3. 学会等名 信学ソ大
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村真也, 永井和樹, 戸村崇, 坂本啓
2. 発表標題 アンテナ面とグラウンド面の二層を有する膜面アンテナの収納・展開
3. 学会等名 宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武田裕貴, 戸村崇, 坂本啓
2. 発表標題 フレキシブル基板リフレクトアレーアンテナのバラクタダイオードによる反射位相制御
3. 学会等名 信学技報
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永井和希, 坂本啓, 戸村崇, 田村真也, 武田裕貴
2. 発表標題 二層型宇宙膜面アレーアンテナの展開形状評価
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Tomura, Y. Takeda, H. Kurokawa, and H. Sakamoto
2. 発表標題 Design of reconfigurable reflectarray antennas on flexible substrates with varactor diodes mounted on slot-coupled microstrip lines
3. 学会等名 European Conf. Antennas Propag. (EuCAP) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Tomura
2. 発表標題 Non-flatness compensation reflectarray antennas by varactor diode mounted reflection elements
3. 学会等名 Vietnam-Japan Int. Symp. Antennas Propag. (VJISAP) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Sakamoto, T. Tomura, A. Ochi, K. Nagai, M. Moritani, G. Nakayama, and T. Oshino
2. 発表標題 Space demonstration of two-layer deployable membrane reflectarray antenna with popup book mechanism
3. 学会等名 AIAA Sci. Technol. Forum Expo. (SciTech) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 H. Kurokawa, G. Nakayama, Y. Takeda, T. Tomura, and H. Sakamoto
2 . 発表標題 Design of a planar beam-tilt array for primary radiators of CubeSat-onboard reflectarray
3 . 学会等名 Int. Symp. Antennas Propag. (ISAP) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 G. Nakayama, M. Moritani, T. Tomura, H. Sakamoto, S. Koike, T. Oshino, Y. Mitsumoto, K. Nagai, S. Kanamaru, T. Sato, H. Kurokawa, S. Saito, A. Ochi, D. Mitchao, S. Tamura, Y. Takeda, T. Yanagi, K. Kidani, K. Toyoda, S.S. Yeon, M. Yasuhara, K. Suzuki, R. Maeda, S. Kume, A. Shirane, and K. Okada
2 . 発表標題 Space demonstration of two-layer pop-up origami deployable membrane reflectarray antenna by 3U CubeSat origamisat-2
3 . 学会等名 AIAA/USU Conf. Small Satellites (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 G. Nakayama, H. Kurokawa, T. Tomura, and H. Sakamoto
2 . 発表標題 Design of 5.8-GHz-band deployable reflectarray antennas for cubesat
3 . 学会等名 IEEE Int. Workshop Electromagnetics: Appl. Student Innovation Competition (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 T. Tomura
2 . 発表標題 Origami foldable and deployable reflectarray antennas for CubeSats
3 . 学会等名 Int. Conf. Antennas Electromagn. Syst. (AES) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Tomura
2. 発表標題 Origami folding reflectarray and space multiplexing antennas for 6G
3. 学会等名 KIEES Antenna Technology Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	坂本 啓 (Sakamoto Hiraku) (40516001)	東京工業大学・工学院・教授 (12608)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------