

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：34316

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13759

研究課題名（和文）ビームの自己収束効果を持つ両側レトロディレクティブシステムの基礎研究

研究課題名（英文）Basic study of a both-side retrodirective system for self-convergent microwave beam

研究代表者

松室 堯之（Matsumuro, Takayuki）

龍谷大学・先端理工学部・助教

研究者番号：60802923

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究において、送受電アンテナの両側でレトロディレクティブ動作を行うことにより形成される自己収束ビームの基本的性質を明らかにすることができた。特に、ビーム内に侵入した異物を回避する効果があることが新たに明らかとなった。また、直交2重モード誘電体共振器アンテナを点対称に接続することで、方位角および仰角に追従可能な平面レトロディレクティブアレイを実現できた。さらに、自己収束ビーム形成の原理実証に向けて平行平板導波路における2次元ビームの伝搬特性を明らかにし、多数の円穴を用いたビームプロファイルの測定手法を開発することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大電力の長距離マイクロ波送電システムを社会実装するためには、周囲への電波漏洩をいかに抑えるかという課題がある。本事業により、筆者らが提案した両側レトロディレクティブシステムの有効性を示すことができた。この技術は、沖合において風力や太陽光で発電されたエネルギーをマイクロ波により無線で沿岸まで伝送するために必要不可欠な技術という点で、二酸化炭素を排出しない持続可能なエネルギー利用の拡大に資するという社会的意義がある。また、提案システムの解析によりビーム内に侵入した物体を回避するという興味深い物理現象を明らかにすることが出来たという点において、特に学術的意義のある成果が得られたといえる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the fundamental properties of the self-convergent beam formed by retrodirective operation on both sides of the transmitting and receiving antennas were clarified. In particular, it was newly revealed that the beam is effective in avoiding foreign objects entering the beam. Moreover, by connecting orthogonal dual-mode dielectric resonator antennas in a point-symmetric manner, a planar retrodirective array that can follow azimuth and elevation angles was realized. Furthermore, we were able to clarify the propagation characteristics of the two-dimensional beam in the parallel-plate waveguide for the proof-of-principle of self-convergent beam formation and develop a measurement method for beam profiles using a large number of circular holes.

研究分野：アンテナ・伝搬

キーワード：レトロディレクティブ 自己収束ビーム 誘電体共振器アンテナ 平行平板導波路 ビーム伝搬特性

### 1. 研究開始当初の背景

持続的に発展可能な社会の実現に向けて、化石エネルギー消費から再生可能エネルギー利用への転換が求められている。広大な排他的経済水域を持つ我が国では、洋上における風力発電や潮力発電が有効である。近年、再生可能エネルギーの伝送手段として、図1に示す洋上マイクロ波送電システムが提案された[1]。洋上マイクロ波送電システムは、海底ケーブルや架空線と比較して、船舶との衝突事故の恐れが低く、漁業・海上交通に与える影響は極めて軽微である。一方で、マイクロ波送電システムの中心的課題は周囲への電波漏洩をいかに抑えるかという問題である。特に、洋上マイクロ波送電システムにおいては、風雨や気象条件によって送受電アンテナの角度や伝送路の屈折率が時間的に変化する。目標の受電アンテナに向けてビームを制御する手法が求められる。時間的に変動する目標に対してビーム方向を制御する手段として、レトロディレクティブと呼ばれる手法が知られている[2]。レトロディレクティブとは、目標となる受電側から到来したパイロット信号を用いることにより、信号の到来方向に電力信号を再放射する技術である。図2にレトロディレクティブの原理を示す。位相共役回路を用いることでパイロット信号の到来方向に電力信号を放射する。

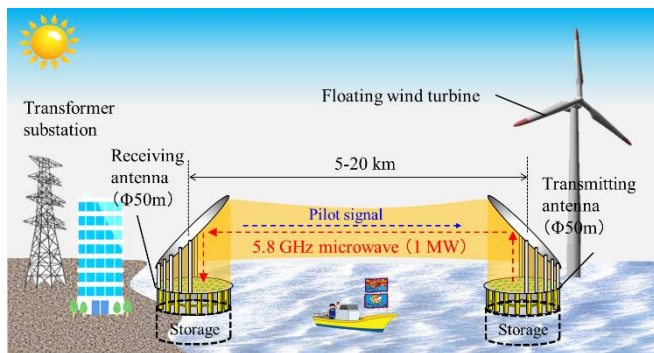


図1: 洋上マイクロ波送電システム

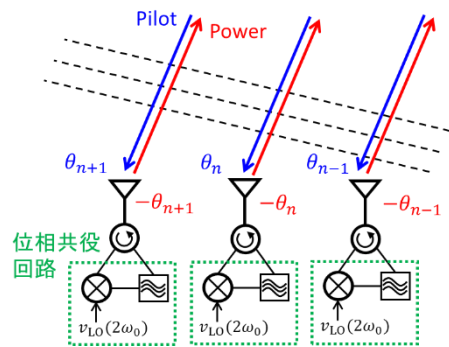


図2: レトロディレクティブの原理

### 2. 研究の目的

従来のマイクロ波送電システムの研究では、レトロディレクティブは送電側のみに用いられていた。それに対し申請者らは、レトロディレクティブを送電側と受電側の両方に適用した「両側レトロディレクティブシステム」を新たに考案した。受電側のレトロディレクティブにおいては、図2に示したパイロット信号と電力信号が入れ替わる。図3に両側レトロディレクティブシステムの概要を示す。実際のシステムは多数のアレーアンテナ素子と後段回路から構成されるが、この図ではひとつのアンテナと回路で模式的に表した。このシステムでは、パイロット信号および電力信号によってひとつのループ伝送路が構成される。パイロット信号と電力信号は偏波面によって区別するため、アンテナ素子には高い直交性を持つ偏波共用アンテナ（例えば、直交2重モード誘電体共振器アンテナ）を用いる。

事前の検討により、この両側レトロディレクティブシステムを用いることで、レトロディレクティブの繰り返しによりビーム伝送効率が向上するという「ビームの自己収束効果」を持つことが示唆されていた。そこで本研究では、両側レトロディレクティブシステムの性質を明らかにすることを目的として、基礎的な研究を遂行した。

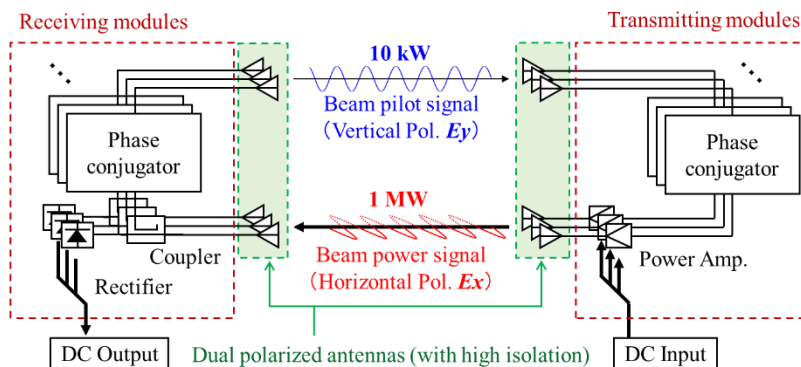


図3 両側レトロディレクティブシステムの概要

### 3. 研究の方法

- (ア) マイクロ波分野においては通常、波長オーダーの構造について解析することから電磁界シミュレーターとしては有限要素法などが用いられることが多い。しかし我々が想定する直径 50m のアンテナを解析することは難しい。そこで、本研究では両側レトロディレクティブにおけるビームプロファイルおよび伝送効率の解析手法として、主に光領域の解析で用いられるビーム伝搬法 (BPM) を使用した。
- (イ) これまでの検討において、両側レトロディレクティブシステムの実現に必要な偏波アイソレーションレベルを持つアンテナ素子として、「直交 2 重モード誘電体共振器アンテナ」を開発した。しかし、これをアレー化した際のレトロディレクティブ特性については未検証であった。そこで、本研究では誘電体共振器アンテナを用いて平面レトロディレクティブアレーを構成し、パイロット信号として平面波が入射した場合の特性について、有限要素法による電磁界シミュレーターによって解析した。
- (ウ) 両側レトロディレクティブシステムによるビームの自己収束効果は、シミュレーションでは確認できたものの実験による検証が求められる。しかし、平面アレーアンテナにより自由空間中をビーム伝搬させた場合、ビーム形状の測定が困難という課題がある。そこで本研究では、線上に配置したアレーアンテナを平行平板導波路によって挟み込むことで、伝搬中のビームに与える影響を最低限に抑えながら形状を測定するシステムを考案した。また、2次元空間中を伝搬するビームの距離特性について、理論的な検討を行った。

### 4. 研究成果

- (ア) ビーム伝搬法 (BPM) によるシミュレーターを用いた両側レトロディレクティブシステムの解析により、アンテナが正対する場合だけでなく、中心軸がずれている場合でも伝搬を繰り返すことにより最適状態に収束することが示された[3]。また、ビーム内に電波を吸収するような侵入物が存在する際、それを回避するようにビームが収束するという現象が明らかとなった[4]。収束時のビーム断面分布を図 4 に示す。この現象は、研究当初においては全く予期していなかった新たな発見であった。このことは、両側レトロディレクティブシステムが、外部への電波漏洩を最低限に抑えるだけでなく、ヒトや動物が誤ってビーム内に侵入した際、その影響を極小化する効果があることを意味する。
- (イ) 誘電体共振器アンテナを 4 素子×4 素子の 16 素子並べることにより構成した解析モデルを図 5 に示す。信号の入出力ポートに周期的境界条件を用いることによりバンアッタアレーを構成した。誘電体共振器の結合プローブの高さと誘電体共振器の厚みは、垂直に平面波を入射したとき設計周波数の 5.8 GHz で最大の指向性が得られるように調整した。このような条件の下で、平面波の入射角を変化させることによりレトロディレクティブ動作によって得られる応答波の特性を調べた。その結果、若干の角度誤差がみられたものの仰角および方位角の変化に対してレトロディレクティブ機能が動作することを確認できた[5]。

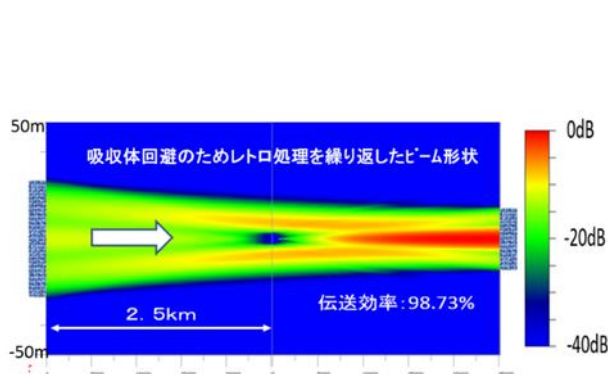


図 4 提案システムによる侵入物の回避[4]

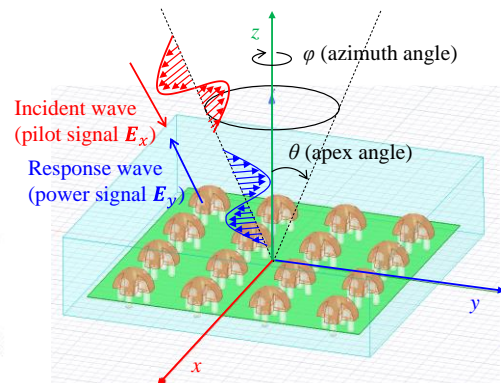


図 5 誘電体共振器アンテナの解析[5]

(ウ) 本研究で新たに考案したビーム測定系を図 6 に示す。平行平板導波路に小さな穴を空け、電界プローブを差し込むことによりビーム伝搬に影響を与えずに断面の振幅分布を測定することが出来る。このような実験系を開発することにより、両側レトロディレクティブシステムによるビームの自己収束効果の原理を検証することができると考えられる。しかし、平行平板導波路において素元波は円周上に拡散するため、自由空間中とはビーム伝搬特性が異なる。フリスの伝搬公式を参考に、平行平板導波路におけるビーム収集効率  $\eta$  の理論式を以下の通り導出した[6], [7]。

$$\eta = 1 - e^{-\tau'}, \text{ ただし } \tau' = \frac{L_t L_r}{\lambda D}$$

ここで  $L_t$ ,  $L_r$  は 2 次元におけるアンテナ、すなわち線アンテナの長さである。また、 $\lambda$  は波長、 $D$  はアンテナ間の距離をそれぞれ表す。図 7 に示すように平行平板導波路を実際に開発し、VNA を用いてビーム伝搬特性を測定した結果、遠方におけるビーム収集効率は理論式とほぼ一致することを示すことができた[7]。今後は、さらに大型の予算を獲得し、図 6 に示したシステムを開発することで、両側レトロディレクティブシステムにおけるビーム自己収束効果の原理実証達成を目指す。

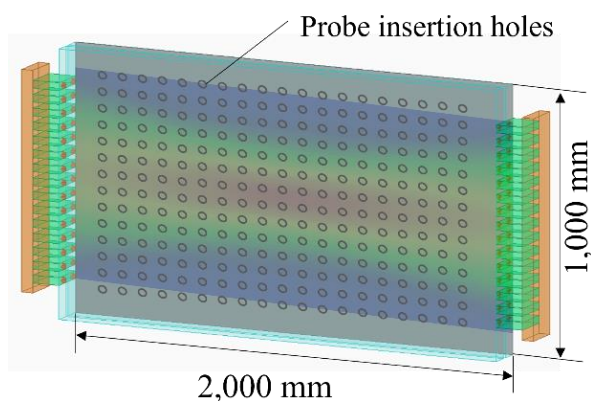


図 6 原理実証システムの概要

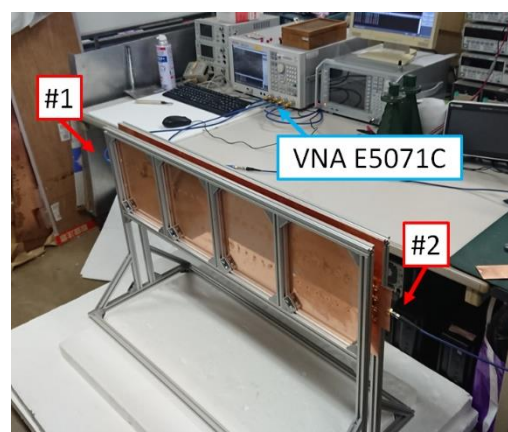


図 7 開発した平行平板導波路[7]

#### 参考文献

- [1] 石川容平, “マイクロ波ミラー衛星と海洋インバースダムを中核としたグローバルスマートグリッド構想,” マイクロウェーブ展 2014 基調講演, KA01-01, Dec. 2014.
- [2] C. Pon, “Retrodirective array using the heterodyne technique,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 12, no. 2, pp. 176–180, Mar. 1964.
- [3] T. Matsumuro, Y. Ishikawa, and N. Shinohara, “Basic Study of Both-Sides Retrodirective System for Minimizing the Leak Energy in Microwave Power Transmission,” IEICE Transactions on Electronics, vol. E102.C, no. 10, pp. 659–665, 2019.
- [4] 石川容平, 松室堯之, 篠原真毅, “無線電力伝送路における電波吸収体を回避する自動的ビームフォーミング,” 宇宙太陽発電, vol. 5, pp. 29-34, 2020.
- [5] T. Matsumuro and T. Ishizaki, “A Planar Retrodirective Array using Dual-mode Dielectric Resonator Antennas,” 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 335-336, 2021.
- [6] K. Yukawa, T. Matsumuro, T. Ishizaki and Y. Ishikawa, “Basic Study on Two-Dimensional Beam Propagation Characteristics in Parallel Plate Waveguide,” 2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI), pp. 35-36, 2021.
- [7] 湯川一樹, 松室堯之, 石崎俊雄, 石川容平, “ビーム収束実験に向けた平行平板導波路の開発,” 電気学会 電子デバイス研究会, no. 59, pp. 15-20, EDD-21-062, Dec. 2021.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 MATSUMURO Takayuki、ISHIZAKI Toshio	4. 巻 -
2. 論文標題 A Planar Retrodirective Array using Dual-mode Dielectric Resonator Antennas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)	6. 最初と最後の頁 335 - 336
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ISAP47053.2021.9391498	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 MATSUMURO Takayuki、ISHIKAWA Yohei、SHINOHARA Naoki	4. 巻 E102.C
2. 論文標題 Basic Study of Both-Sides Retrodirective System for Minimizing the Leak Energy in Microwave Power Transmission	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 659 - 665
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2019MMP0011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 石川 容平、松室 堯之、篠原 真毅	4. 巻 5
2. 論文標題 無線電力伝送路における電波吸収体を回避する自動的ビームフォーミング	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 宇宙太陽発電	6. 最初と最後の頁 29 - 34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24662/ssps.5.0_29	査読の有無 無
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 T. Matsumuro, Y. Ishikawa, M. Yanagase, N. Shinohara	4. 巻 -
2. 論文標題 Both-Side Retrodirective System for Minimizing the Leak Energy in Microwave Power Transmission	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 2018 Asia-Pacific Microwave Conference	6. 最初と最後の頁 780 - 781
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/APMC.2018.8617637	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yukawa Kazuki、Matsumuro Takayuki、Ishizaki Toshio、Ishikawa Yohei	4. 巻 -
2. 論文標題 Basic Study on Two-Dimensional Beam Propagation Characteristics in Parallel Plate Waveguide	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)	6. 最初と最後の頁 35 - 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/APS/URSI47566.2021.9704452	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 松室堯之、石崎俊雄
2. 発表標題 誘電体共振器アンテナを用いた平面レトロディレクティブアレー
3. 学会等名 電子情報通信学会 2020年ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuki Yukawa, Takayuki Matsumuro
2. 発表標題 Research on Beam Propagation Characteristics in Parallel Plate Waveguide
3. 学会等名 Thailand-Japan Microwave Student Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takayuki Matsumuro, Toshio Ishizaki
2. 発表標題 A Planar Retrodirective Array using Dual-mode Dielectric Resonator Antennas
3. 学会等名 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 湯川一樹、松室堯之、石崎俊雄、石川容平
2. 発表標題 平行平板導波路における二次元ビーム伝搬特性の研究
3. 学会等名 電子情報通信学会 2021年総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川 容平, 松室 堯之, 篠原 真毅
2. 発表標題 障害物への衝突事故を回避するマイクロ波ビームの可能性と原理考察
3. 学会等名 第5回宇宙太陽発電(SSPS)シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Matsumuro
2. 発表標題 Both-Side Retrodirective System for Minimizing the Leak Energy in Microwave Power Transmission
3. 学会等名 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yukawa Kazuki, Matsumuro Takayuki, Ishizaki Toshio, Ishikawa Yohei
2. 発表標題 Basic Study on Two-Dimensional Beam Propagation Characteristics in Parallel Plate Waveguide
3. 学会等名 2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI) (国際学会)
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------