

直交2重モード誘電体共振器アンテナを用いた 低漏洩マイクロ波送電システムの研究

Study of Low-Leakage Microwave Power Transmission System Using Orthogonal
Dual-Mode Dielectric Resonator Antenna

H30助自98

代表研究者 松 室 堯 之 龍谷大学 先端理工学部 助教
*Takayuki Matsumuro Assistant Professor, Faculty of Advanced Science and Technology,
Ryukoku University*

Recently, microwave power transmission system have been proposed as a means of transmitting offshore renewable energy. One of the challenges in implementing microwave power transmission system in society is the leakage of radio waves to the surrounding environment. Especially in offshore locations, the angle of the transmitting and receiving antennas and the refractive index of the transmission line change due to wind, rain, and weather conditions. Then, a method to control the beam toward the target receiving antenna, called a retro-directive system, is required. However, the conventional retrodirective systems often use different frequencies to avoid interference between pilot and power signals, and cannot operate on transmission paths with frequency characteristics. Therefore, we propose to assign two orthogonal polarizations to the pilot and power signals. Since the amplitudes of the pilot and power signals are very different, an orthogonal dual-mode dielectric resonator antenna with high polarization isolation is used as the antenna element. This study also proposes to apply the retrodirective system to both the transmitter and receiver sides. This system is characterized by the fact that energy leakage to the outside of the system is minimized by repeating the retro-directive process on both the transmission and receiving sides. A simulation using the beam propagation method showed that a low-leakage beam is automatically formed by repeated propagation of the pilot signal and power signal. In an oscillation operation experiment using a phase conjugate mixer, a single loop circuit was able to obtain an oscillation frequency independent of the length of the transmission line. An analysis of an array antenna using the electromagnetic field simulator showed a directivity pattern of the response wave depending on the angle of the incident wave.

研究目的

近年、洋上における再生可能エネルギーの伝送手段として、マイクロ波送電システムが提案されている。一方、マイクロ波送電システムの社会実装上の課題として周囲への電波漏洩

が挙げられる。特に、洋上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変化する。そのため、レトロディレクティブシステムと呼ばれ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必要となる。しかし、従来のレトロディレクティブ

システムではパイロット信号と電力信号の干渉を避けるために異なる周波数が用いられることが多く、周波数特性を持つ伝送路に対応できないという課題がある。

そこで本研究では、パイロット信号と電力信号に直交する2つの偏波を割り当てることを提案する。パイロット信号と電力信号は振幅が大きく異なるため、アンテナ素子には高い偏波アイソレーションを持つ直交2重モード誘電体共振器アンテナを用いる。また、本研究ではレトロディレクティブシステムを送電側と受電側の両方に適用することを合わせて提案する。このシステムは、送電側と受電側でレトロディレクティブを繰り返すことによりシステム外部へのエネルギー漏洩が極小化されるという特徴を持つ。本研究の目的は、直交2重モード誘電体共振器アンテナを用いた両側レトロディレクティブシステムの開発である。

概 要

ビーム型マイクロ波送電では、多数のアンテナ素子を平面上に配置することによって指向性の高いビームを放射してエネルギーを伝送する。この際、パイロット信号と呼ばれる受電アンテナ側から到来した誘導信号の方向へ折り返すことにより電力信号のビームを正確な方向に再放射することで目標の追尾が可能となる。このような機能を持つアンテナをレトロディレクティブシステムと呼ぶ。本研究で提案する両側レトロディレクティブシステムは、送電アンテナと同様に、受電アンテナにおいてもレトロディレクティブシステムを適用したものである。電力信号の一部はカプラによって取り出された後、位相共役回路を通して次のパイロット信号として送電アンテナに向けて再放射される。このようにして、パイロット信号と電力信号によって送受電アンテナの間でフィードバック

ループが形成される。本研究ではまず、ビーム伝搬法を用いたシミュレーションにより、パイロット信号と電力信号が繰り返し伝搬することにより、ビーム収集効率が改善しスピルオーバー比率が低下することを明らかにした。

両側レトロディレクティブシステムでは、パイロット信号と電力信号によってフィードバックループが形成される。このため、このシステムでは位相共役ミキサーに入力する基準信号のほかに各モジュールに外部から決められた信号が入力されることは無い。したがって、パイロット信号と電力信号が形成するフィードバック回路のループ利得を1としてシステム全体を発振動作させることが合理的である。そこで本研究では、1対の送受電アンテナモジュールを同軸ケーブルで接続することにより、両側レトロディレクティブシステムの発振動作について基礎的な検証を行った。実験においては、トリプルバランスミキサーを用いて2倍波基準信号との乗算により位相共役信号を生成した。また、ゲインブロック増幅器および電力増幅器により全体のループ利得が1以上となるように設計した。さらに、同軸フェーズシフタを用いて、送信モジュールと受信モジュールの位相が等しくなるようにあらかじめ調整をおこなった。その結果、信号発生器からミキサーに入力した半分の周波数である2.45 GHzのみで発振が起こることを確認し、両側レトロディレクティブシステムの基本的な発振動作を単一のループ回路で実現することができた。

パイロット信号および電力信号に同一周波数の信号を用いた場合、振幅が大きく異なるため、アンテナ後段にサーキュレーターを用いるだけでは十分なアイソレーションを得ることができない。そこで本研究では、素子アンテナとして高い偏波アイソレーションを持つ直交2重モード誘電体共振器アンテナを開発し

た。このアンテナは向かい合う2対の磁界結合プローブを持ち、十字型半球誘電体共振器のTE11モードを1対のプローブにより差動励振する。誘電体基板を用いないため表面波モードが発生しない。このため、誘電体共振器はアレーアンテナの放射素子として良好な特性が期待される。さらに、誘電率の不均一性に起因するモード間結合を低減するために十字型構造を適用した。電磁界シミュレーター上に16素子の直交2重モード誘電体共振器アンテナを用いたVan Attaアレーを構成し、レトロディレクティブシステムとしての性能を評価した。Van Attaアレーとは、中心に対して対称なアンテナ素子を同じ経路長で接続することにより構成されるレトロディレクティブシステムである。x方向に電界を持つ入射波（パイロット信号）が、y方向に電界を持つ応答波に変換されるように、マスター・スレーブ周期的境界条件を用いて各アンテナの入出力ポートを理想的に接続した。電磁界シミュレーションの結果、入射波の角度に応じて応答波の角度が変化することが確認でき、全方位の入射波に対しレトロディレクティブ動作を実現することができた。

本文

1. はじめに

二酸化炭素に由来する気候変動問題を根本的に解決するため、カーボンニュートラル社会の実現が全世界で強く求められている。また、日本はエネルギー資源を化石燃料の輸入に大きく依存しており、自給率の向上が喫緊の課題となっている。このような背景のもと、広大な排他的経済水域を活かした洋上風力発電に注目が集まっている。しかし、風況の良い沖合は水深が深くなるため、海底ケーブルの敷設には困難が伴う。近年、遠洋におけるエネルギーの収集・運搬方法として、電気運搬船と呼ば

れるバッテリーを積載した船を充放電する方法が提案されている^[1]。一方、風況が良い天候においては同時に波も高くなるため、海上において船舶と風車をケーブル接続することも容易ではない。そこで、図1に示したのは、洋上風力発電から電気運搬船に向けたマイクロ波送電システムのイメージである。マイクロ波送電では、アレーアンテナの位相差によりビームの指向性を制御し、波による船舶の振動に追従しながらケーブルを繋ぐことなく充電することが出来る。このように、大電力のマイクロ波送電システムを用いて、洋上における安定的な再生電力グリッドが構成されることにより、カーボンニュートラル社会の実現が期待される。

ここで、図1のような地上における大電力のマイクロ波送電システムを社会実装するために必須となるのが、低漏洩ビーム形成技術である。受電アンテナ以外の場所に放射したマイクロ波は伝送効率を低下させるだけでなく、システム外部へのスビルオーバーを引き起こす。特に、船舶への送電においては受電アンテナの面積が制限されるため、高速充電のためには電力ビームの高密度化が避けられない。マイクロ波による送信電力が増えるほど、他の無線通信や生態系への影響を抑えるために必要なスビルオーバー比率に対する要求値は厳しくなる。このような課題に対し、これまでマイクロ波送電システムは、主に宇宙太陽発電所の技術と

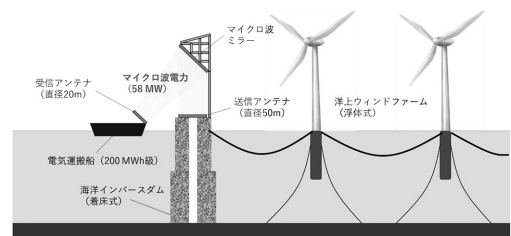


図1 洋上風力発電から電気運搬船に向けたマイクロ波送電システム

して着実な研究開発が進められてきた^[2]。また近年、マイクロ波送電システムに対する期待の高まりを受けて、グリッドレベルの電力ビームを扱う事業を掲げるスタートアップ企業も現れている^[3]。送受電アンテナが正対して静止している場合には、開口面における振幅分布を最適に設計することで低漏洩ビームを形成することが出来る^[4]。しかし、送受電アンテナの相対位置が変動したり、伝搬空間の屈折率が変化したりする場合は、開口面における振幅分布を動的に最適化する必要があるが、そのようなビーム形成手法はほとんど研究開発されていない。

そこで本研究では、送電アンテナと受電アンテナの間でパイロット信号と電力信号を往復させる「両側レトロディレクティブシステム (BRS; Both-side Retrodirective System)」を新たに提案する。本報告書では、まずBRSの概要と低漏洩ビーム形成に関するシミュレーション結果について述べる。次に、位相共役ミキサーを用いたBRSの最も基本的な発振動作に関する実験結果について報告する。さらに、同一周波数のパイロット信号と電力信号を空間的に共存させるために必要な「直交2重モード誘電体共振器アンテナ (OD-DRA; Orthogonal Dual-mode Dielectric Resonator Antenna)」を用いたレトロディレクティブ動作に関して、電磁界シミュレーターによる性能評価を行った結果について述べる。

2. 両側レトロディレクティブシステム

本研究で提案する両側レトロディレクティブシステム (BRS) は、送電アンテナと同様に、受電アンテナにおいてもレトロディレクティブシステムを適用したものである。図2に、BRSのブロックダイアグラムを示す^[5]。まず、送電アンテナにおいて受電アンテナから到来したパイ

ロット信号の位相共役を取り、電力増幅器を通った電力信号を放射する。この電力信号のほとんどは受電アンテナ内部の整流器によって直流電力に変換され電力伝送が実現する。このとき、電力信号の一部はカプラによって取り出された後、位相共役回路を通して次のパイロット信号として送電アンテナに向けて再放射される。このようにして、パイロット信号と電力信号によって送受電アンテナの間でフィードバックループが形成される。この図においては、パイロット信号10 kW、電力信号1 MWの振幅を想定しているため、カプラの結合度は20 dBとなる。

次に、ビーム伝搬法を用いたBRSのシミュレーション結果を図3に示す^[5]。開口径50mのアンテナを10kmの距離を開けて正対させた場合について解析した。パイロット信号および電力信号の周波数は5.8 GHzとした。繰り返し回数をNとして、奇数回がパイロット信号の伝搬、偶数回が電力信号の伝搬に対応する。図3 (a),

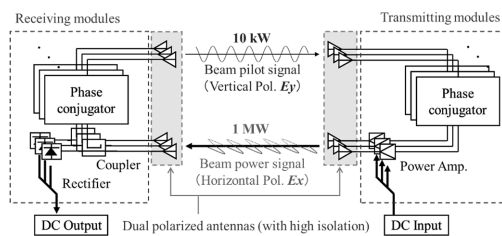


図2 BRSのブロックダイアグラム^[5]

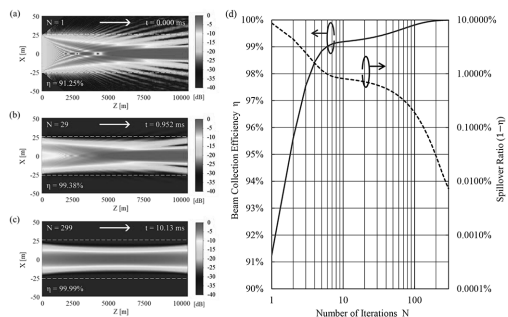


図3 レトロディレクティブ再放射の繰り返しによるビーム最適化^[5]

3 (b), 3 (c) に示したのは、 $N=1, 29, 299$ におけるパイロット信号のビーム断面である。 $N=1$ のパイロット信号には、送電アンテナから起動信号が送られたと仮定し、均一振幅分布かつ送電アンテナの中心に焦点を持つような位相傾斜を与えた。図3 (d) に各繰り返し回数におけるビーム収集効率とスピルオーバー比率を示す。今回の解析では無損失の伝搬媒質を仮定したため、ビーム収集効率とスピルオーバー比率を足すと1になる。まず、 $N=1$ から10程度までの間にアンテナ外部へのサイドローブが急激に減衰することによってビーム収集効率が改善し、その後は徐々に開口面の分布が最適化されていることがわかる。開口面積によって定まるビーム収集効率の理論限界値は超えないものの、理想的な振幅分布で再放射が繰り返される場合、その値に漸近する特性を得ることが出来る。さらに、アンテナ同士が正対していない場合やビーム内に侵入物がある場合においても、最適化されることがシミュレーションによって明らかとなっている^[6]。

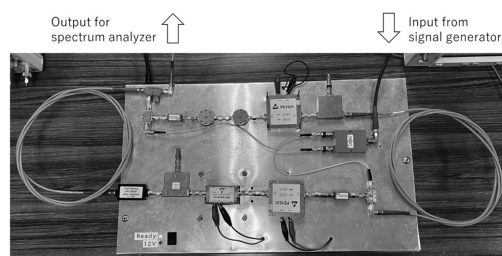
3. 位相共役ミキサーを用いた発振動作実験

前節で述べたようにBRSでは、パイロット信号と電力信号によってフィードバックループが形成される。このため、このシステムでは位相共役ミキサーに入力する基準信号のほかに各モジュールに外部から決められた信号が入力されることは無い。したがって、パイロット信号と電力信号が形成するフィードバック回路のループ利得を1としてシステム全体を発振動作させることが合理的である。そこで本研究では、1対の送受電アンテナモジュールを同軸ケーブルで接続することで、BRSの発振動作について基礎的な検証を行った。

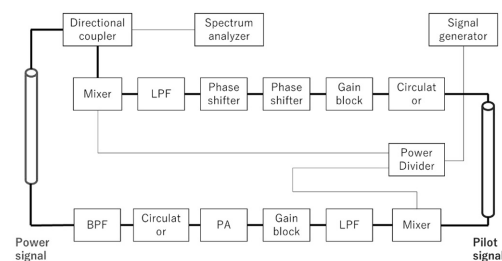
図4に、今回実施した実験の写真およびブロックダイヤグラムを示す。実験には、パ

スタナック製のトリプルバランスミキサー (PE8651)、バンドパスフィルタ (PE8701)、サーキュレーター (PE8401)、ウィルキンソン型電力分配器 (PE2026)、方向性結合器 (PE2204-20)、ゲインブロック増幅器 (PE1521)、GaAs電力増幅器 (PE15A4018)、およびMicrotronics製のローパスフィルタ (LPM50005)、API/Weinschel製の同軸フェーズシフタ (980-3) を用いた。

次に、各回路素子の動作について述べる。まずトリプルバランスミキサにおいて、2倍波基準信号との乗算により位相共役信号を生成する。このとき、不要な3倍波が同時に出力されるため、ローパスフィルタを用いて取り除いた。また、ゲインブロック増幅器および電力増幅器の利得により全体のループ利得を1以上とし、最終的には電力増幅器の利得圧縮でループ利得が1となるように設計した。反射波による故障を防ぐため増幅器の出力端にはサーキュレーターを取り付けた。さらに、2つの同軸フェーズシフタを用いて、送信モジュールと



(a) 実験の様子



(b) ブロックダイヤグラム

図4 位相共役ミキサーを用いた発振動作実験

受信モジュールの位相が等しくなるようにあらかじめ調整をおこなった。今回、長距離ビーム伝送空間を模擬したパイロット信号および電力信号用の伝送路には、長さ2.5mの同軸ケーブルを用いた。そして、増幅器のバイアスをかけた状態で、信号発生器（Anritsu製MG3694C）から4.9 GHzの信号を2箇所のトリプルバランスミキサーに入力することにより、発振動作を実現した。

このとき、方向性結合器に接続されたスペクトラムアナライザ（Agilent製E4446A）による出力信号の測定結果を図5に示す。まず、信号発生器からミキサーに入力した4.9 GHzの半分の周波数である2.45 GHzのスペクトルのみで発振が起こっており、スプリアス発振は存在していないことが分かる。この理由として、BRSの発振動作においては、位相共役ミキサーの効果によりパイロット信号と電力信号の伝送路による位相が互いにキャンセルされていることが考えられる。すなわち、BRSにおける発振周波数は、伝送路の距離に依らず信号発生器から入力された基準信号の周波数のみによって定まる。このように、BRSの基本的な発振動作について、単一のループ回路で実現することが出来た。また、発振スペクトルの振幅については、スペクトラムアナライザの入力に30dBのアッテネータを接続していたため、約27dBmの出力であることが読み取れる。電力増幅器

PE15A4018のP1dBレベルは29 dBmであり、サーキュレーターやケーブルの損失を考慮すると、この値により出力レベルが定まっていることが分かる。

4. 直交2重モード誘電体共振器アンテナ

前節の発振動作実験においては、パイロット信号と電力信号の伝送路は同軸ケーブルによって完全に区別されていたものの、実際のシステムでは、同一の空間中を互いに逆方向に伝搬させることになる。すなわち、BRSではすべてのアンテナ素子が同一周波数のパイロット信号と電力信号を放射する。このとき、パイロット信号と電力信号の振幅は大きく異なるため、アンテナ後段にサーキュレーターを用いるだけでは十分なアイソレーションを得ることができない。そこで、素子アンテナとして高い偏波アイソレーションを持つ直交2重モード誘電体共振器アンテナ（OD-DRA）の開発を行った^[7]。

図6に示すように、OD-DRAは向かい合う2対の磁界結合プローブを持ち、十字型半球誘電体共振器のTE₁₁モードを1対のプローブにより差動励振する。球形誘電体共振器のTE₁₁モードが放射する電磁界は微小磁気ダイポールを波源とする球面波と正確に一致する。また、誘電体基板を用いないため表面波モードが発生しない。このため、誘電体共振器はアレーアンテナの放射素子として良好な特性が期待さ

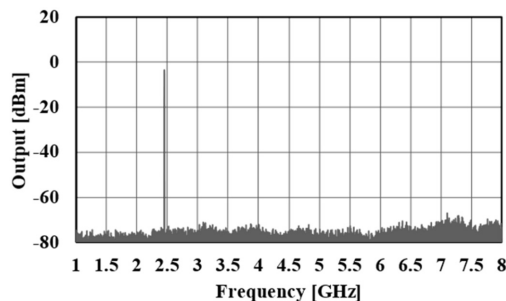


図5 発振スペクトルの実測値

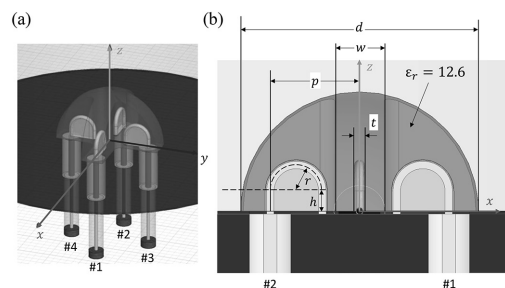


図6 OD-DRAの設計パラメータ^[7]

れる。さらに、誘電率の不均一性に起因するモード間結合を低減するために十字型構造を適用した。比誘電率12.6のアルミナ材料を想定して共振周波数5.8 GHzのアンテナを設計した。このとき、図6に示したOD-DRAの設計パラメータの値は、それぞれ $h=1.6\text{mm}$ 、 $w=3.5\text{mm}$ 、 $d=16\text{mm}$ 、 $t=0.7\text{mm}$ 、 $p=6\text{mm}$ 、 $r=1.75\text{mm}$ である。

本研究では、電磁界シミュレーター上に16素子のOD-DRAを用いたVan Attaアレーを構成し、レトロディレクティブシステムとしての性能を評価した。ここで、OD-DRAの素子間隔は0.7波長とした。Van Attaアレーとは、中心に対して対称なアンテナ素子を同じ経路長で接続することにより構成されるレトロディレクティブシステムである^[9]。位相共役回路を必要としないため、電磁界シミュレーターのみを用いて基本的な性能を評価することが出来る。x方向に電界を持つ入射波（パイロット信号）が、y方向に電界を持つ応答波に変換されるように、マスター・スレーブ周期的境界条件を用いて各OD-DRAの入出力ポートを理想的に接続した。図7に示すように、入射波の頂角 θ および方位角 ϕ が変化した際における応答波の放射パターンを評価した。

図8に、入射波の頂角 θ を10度に固定し、方

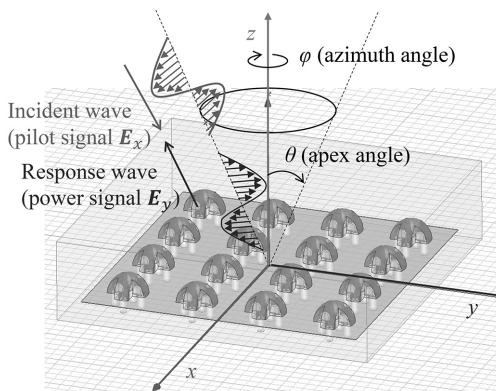


図7 OD-DRAを用いたVan Attaアレーの解析モデル^[7]

位角 ϕ を0度から360度まで60度ごとに变化させた場合における応答波のパターンを示す。方位角 ϕ が0度および180度のときTM入射、90度および270度のときTE入射となり、それ以外の角度はハイブリッドモードとなる。入射波の角度に応じて応答波の角度が変化しており、全方位の入射波に対しレトロディレクティブ動作を確認することが出来た。しかし、応答波のピーク指向性利得の値は、入射波の角度によって1dB程度のリップルを持っていることが分かる。この原因は、アンテナ素子数が少ない場合、アンテナの位置によって整合条件が異なるためと考えられるが、今後詳細な検討が必要である。

5. まとめ

本稿では、洋上風力発電へのマイクロ波送電を目的とした低漏洩ビーム形成手法として、直交2重モード誘電体共振器アンテナ(OD-DRA)を用いた両側レトロディレクティブシステム(BRS)を提案し、その実現に向けた基礎的な研究開発の結果について報告した。ビーム伝搬法を用いたシミュレーションでは、パイロット信号と電力信号の伝搬が繰り返されることにより、自動的に低漏洩ビームが形成されることを示した。位相共役ミキサーを用いた発振動作実験では、単一のループ回路により伝送路の長さに依らない発振周波数を得る

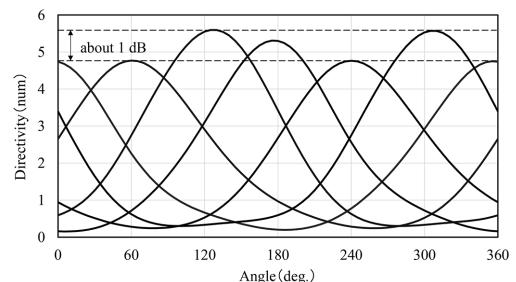


図8 応答波の指向性パターン ($\theta=10^\circ$)^[7]

ことが出来た。電磁界シミュレーターを用いたOD-DRAの解析では、入射波の角度に応じた応答波の指向性パターンを得ることが出来た。このように、本研究によって今後のシステム開発に向けた各要素技術の基礎的な性能評価を完了することが出来た。

参考文献

- [1] 電気運搬船 - Ocean Power Grid | PowerX, Inc., <https://oceanpowergrid.jp> (2023年10月13日アクセス)
- [2] C. T. Rodenbeck et al., "Microwave and Millimeter Wave Power Beaming," in *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 1, no. 1, pp. 229-259, Jan. 2021, doi: 10.1109/JMW.2020.3033992.
- [3] EMROD | Power Anywhere, <https://emrod.energy> (2023年10月13日アクセス)
- [4] R. C. Hansen, J. McSpadden and J. N. Benford, "A universal power transfer curve," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 5, pp. 369-371, May 2005, doi: 10.1109/LMWC.2005.847718.
- [5] T. Matsumuro, Y. Ishikawa, M. Yanagase and N. Shinohara, "Both-Side Retrodirective System for Minimizing the Leak Energy in Microwave Power Transmission," 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Kyoto, Japan, 2018, pp. 780-781, doi: 10.23919/APMC.2018.8617637.
- [6] 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, 5 巻, p. 29-34, Feb. 2020, doi: 10.24662/ssps.5.0_29.
- [7] T. Matsumuro and T. Ishizaki, "A Planar Retrodirective Array using Dual-mode Dielectric Resonator Antennas," 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Osaka, Japan, 2021, pp. 335-336, doi: 10.23919/ISAP47053.2021.9391498.
- [8] E. Sharp and M. Diab, "Van Atta reflector array," in *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 8, no. 4, pp. 436-438, July 1960, doi: 10.1109/TAP.1960.1144877.

今後の研究の見通し

両側レトロディレクティブシステムによる低漏洩ビーム形成を実験的に検証するためには、複数の送受信アンテナ素子が空間的に結合した状態で発振動作させる必要がある。このための具体的な手法として、平行平板導波路を用いることを考えている。直線状に配置した送受信アンテナ素子を平行平板導波路で挟み込むことにより、2次元状のビームを伝搬させる。また、パイロット信号と電力信号に対し、別々の平行平板導波路を設けることで、それぞれの信号を理想的に分離される。さらに、平行平板導波路に微小な測定孔を多数設置することにより、伝搬中のビーム形状を正確に測定することが出来る。このように、着実なステップを踏んだ研究開発により、長距離大電力のマイクロ波送電システムを具体化していきたいと考えている。

本助成金による主な発表論文、著書名

[学術論文]

- 1) Takayuki Matsumuro, Yohei Ishikawa, Naoki 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, Oct. 2019, doi: 10.1587/transele.2019MMP0011.

[国際会議]

- 1) T. Matsumuro, Y. Ishikawa, M. Yanagase and N. Shinohara, "Both-Side Retrodirective System for Minimizing the Leak Energy in Microwave Power Transmission," 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Kyoto, Japan, 2018, pp. 780-781, doi: 10.23919/APMC.2018.8617637.
- 2) T. Matsumuro and T. Ishizaki, "A Planar Retrodirective Array using Dual-mode Dielectric Resonator Antennas," 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Osaka, Japan, 2021, pp. 335-336, doi: 10.23919/ISAP47053.2021.9391498.