

# 低漏洩ビーム型マイクロ波電力伝送と リング配列アレーアンテナの基礎検討† Fundamental Study on Low-leak Microwave Power Transmission and Ring-arranged Array Antenna

松室 堯之<sup>\*1†</sup>・石川 容平<sup>\*1</sup>・篠原 真毅<sup>\*1</sup>  
Takayuki MATSUMURO, Yohei ISHIKAWA and Naoki SHINOHARA

宇宙太陽発電システムをはじめとする定点間のビーム型マイクロ波電力伝送においては、人体や生態系への影響を最低限に抑え、且つ通信システム等との電波干渉を引き起こさないために、マイクロ波ビームのエネルギー漏洩を低く設計する技術の開発が必要である。本研究は、球面波を合成することにより最適なビーム電磁界をハードウェアの制約がない状態で設計し、次にビーム電磁界に対応するアンテナを設計する手法を提案する。また、回転対称性の高いビームを形成するアレーアンテナとして、同心円状にアンテナ素子を配置したリング配列アレーアンテナの基礎的検討について報告する。

In the beam type microwave power transmission between fixed points, including space solar power system, well-confined microwave beam is necessary to be designed for minimizing the impact on human health and the ecosystem, and avoiding radio interference with the wireless communication system. We firstly determine an ideal electromagnetic beam field by combining spherical waves with no hardware restriction. The transmission antenna is designed in order to represent the ideal beam. In this paper, concentric ring-arranged array antenna for representing a high rotational symmetry beam is discussed.

**Keywords** : マイクロ波電力伝送, 合成球面波, 低漏洩ビーム, アレーアンテナ

## 1. はじめに

マイクロ波電力伝送は放射する電磁界を用いるため、大型のアンテナを用いてビームを形成することにより、長距離の無線電力伝送が可能である。宇宙太陽発電システムにおいては、静止軌道から地上までエネルギーを運ぶ方法のひとつとして検討されている。マイクロ波電力伝送は、レーザを用いたエネルギー伝送方式と比較して、天候による影響がより少ないという特徴を持つ。しかし、静止軌道から地上までエネルギーを伝送するためには、直径 2 km 程度の超大型アレーアンテナが必要であり、システムの実現には量産による部品の高品質化・低価格化が求められる。量産効果を実現するためには、地上におけるビーム型マイクロ波電力伝送などの早期市場投入が有効である。

宇宙のように豊富な再生可能エネルギーを持つもうひとつの場所として、海洋が挙げられる。現在、風力発電所等の再生可能エネルギー由来の電力を海上輸送する手段とし

て、マイクロ波電力伝送システムを用いることが提案されている<sup>1)</sup>。第 1 図に示すように、海上におけるマイクロ波電力伝送システムにおいては、直径 50 m 程度の大型アレーアンテナを用いることにより、最大 20 km 離れた場所にエネルギーを伝送することが出来る。一方で、地上や海上におけるマイクロ波電力伝送システムの社会実装における最大の課題は、周囲への電波漏洩である。人体や生態系への影響を最低限に抑え、且つ通信システム等との電波干渉を引き起こさないためには、マイクロ波エネルギーのシステム外への漏洩を低く設計する技術が必要である。



第 1 図 海洋の再エネ利用とビーム型電力伝送

† 第 1 回宇宙太陽発電シンポジウム, 2015 年 12 月 15-16 日, 東京にて発表

‡ Corresponding author: Takayuki MATSUMURO  
E-mail: takayuki\_matsumuro@rish.kyoto-u.ac.jp

\*1 京大大学生存圏研究所

〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄,  
Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto Univ.,  
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan.

## 2. リング配列アレーアンテナ

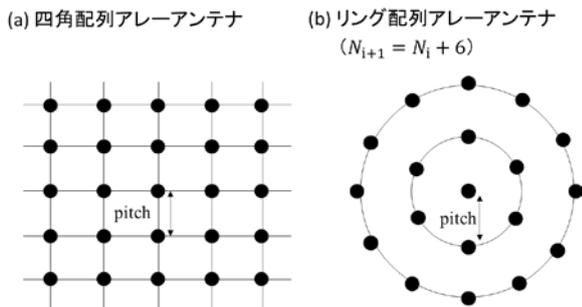
本研究では、低漏洩なマイクロ波ビームを設計する方法として、球面波を合成することにより最適なビーム電磁界をハードウェアの制約がない状態で設計し、次にビーム電磁界に対応するアンテナを設計する手法<sup>2)</sup>を採用する。この方法を用いることにより、マイクロ波ビームの伝搬空間全体を考慮した設計が可能である。また、球面波を合成することにより得られるビームは球面波の次数に応じた設計パラメータを持つため、ガウスビーム<sup>3)</sup>と比較して高い設計自由度を持つという特徴がある。

一方で、上記のような低漏洩ビーム電磁界の形成にはアンテナ素子の複素振幅分布を持たせる必要がある。また、低漏洩ビーム電磁界は伝播軸に対して回転対称な位相を持つ。そこで本研究では、低漏洩ビームを形成するアンテナ方式として、第2図に示すようなリング配列アレーアンテナを提案する。リング配列アレーアンテナにおいては、同一リング上のアンテナ素子は同相同振幅で励振するため、構造パラメータ数を極小化することが出来る。さらに、リング単位で測定し、診断および調整することにより精密なビーム形成が可能となることが期待される。

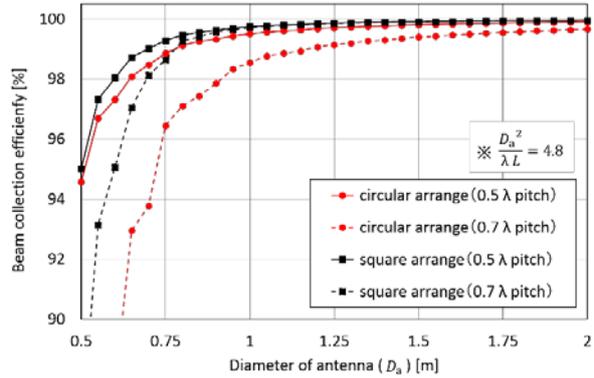
## 3. 低漏洩ビーム形成のシミュレーション

リング配列アレーアンテナの基本特性を明らかにするため、計算機シミュレーションを用いてアレーアンテナから放射するビーム電磁界を計算し、四角配列とリング配列を比較した。計算には、各アンテナ素子の放射電磁界を線形に重ね合わせる方法（電界合成法）を用いた。受電アンテナの大きさは、送電アンテナと同じ大きさとした。アンテナ素子は直線偏波の微小磁気ダイポールアンテナを仮定した。各アンテナ素子の複素振幅は、アンテナ開口面における球面波の合成電磁界<sup>2)</sup>に比例させた。送電マイクロ波の周波数は5.8 GHzとした。

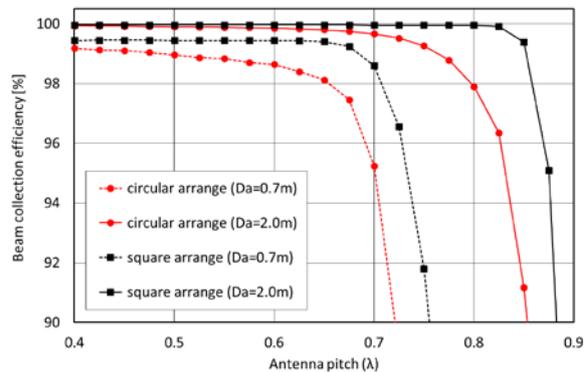
第3図に、送電アンテナの直径 $D_a$ を0.5 mから2.0 mまで変化させた場合のビーム収集効率（総放射電力に対して受電アンテナ面に到達した電力）を示す。このとき、受信アンテナの距離 $L$ は、各アンテナ直径に対し $D_a^2/\lambda L=4.8$ （修正されたフリスの公式で効率がほぼ1となる条件）を用いた。各アレーアンテナの素子間隔は0.5波長または0.7波長で固定した。アンテナが小さい場合、四角配列およびリング配列どちらの場合もビーム収集効率が減少していることが分かる。これは、アンテナ素子を用いた電磁界の離散化が影響していると考えられる。回転対称のリング配列の方が、球面波への結合に対して離散化の影響が顕著に表れた。



第2図 平面アレーアンテナの配列方式



第3図 アンテナ直径によるビーム収集効率の変化



第4図 アンテナ間隔によるビーム収集効率の変化

さらに第4図に、特に送電アンテナの直径 $D_a$ が0.7 mと2.0 mの2種類について、各アンテナ素子の間隔0.4波長から0.9波長まで変化させた場合のビーム収集効率を示す。直径0.7 mの場合、アンテナ間隔を小さくしても効率が100%に漸近していない。これは、アンテナサイズが波長に対して十分大きくないことによる影響と考えられる。直径2.0 mの場合に対して直径0.7 mは小さいアンテナ間隔でも効率が低下している。このことから、アンテナ離散化の影響が大きく出ていることが分かる。

これらの結果より、リング配列は四角配列に対して位相と振幅の構造パラメータ数が大幅に低減されている（直径2 mの場合、アンテナ数1500個程度に対してリング数は20程度）にもかかわらず、アンテナが十分大きい場合には四角配列と同等の特性を示すことが分かった。すなわちリング配列は、大型アレーアンテナによる低漏洩ビームの設計に有効であるといえる。

## 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—究極の再エネと究極の省エネを狙う—, マイクロウェーブ展 (MWE2014) 基調講演(2014).
- 2) 松室堯之, 石川容平, 石川峻樹, 篠原真毅: 球面波の合成電磁界を用いた高いエネルギー閉じ込め性を持つマイクロ波ビームの設計, 電子情報通信学会無線電力伝送研究会 WPT2015-11 (2015).
- 3) 宇野孝, 柴田国明, 三枝健二, 高野忠: 無線電力伝送のためのガウスビームの解析, 電子情報通信学会総合大会講演集 (2015).

(2016. 1. 18 受付)