

A Rectenna Array on a Cylindrical Conductor and its Application

Yoshiyuki FUJINO and Yoshihiko MIZUGUCHI
ATR Adaptive Communications Research Lab.
(E-mail: fujino@acr.atr.co.jp)
Fax: +81-774-95-1508

Microwave power transmission is a useful technology for transporting energy to distance places. Furthermore, it can be applied to high-altitude radio relay systems, space solar power satellites, and space robots on a space platform. In this technology, a rectenna is a device that extracts dc power from a transmitted microwave. This paper describes our development of a rectenna array mounted on a conducting cylinder that has no degradation of efficiency due to variation of incident angle on the horizontal plane. We also changed the frequency to C-band (5.8 GHz) instead of the conventional S-Band (2.45 GHz) to miniaturize the transmitter and rectenna.

Our calculations showed that the output power ratio between the planar rectenna array and the proposed cylindrical rectenna array remained at 68%. This demonstrates the validity of the cylindrical rectenna.

This rectenna can also be applied to energy transmission to a cylindrical multi-joint robot from a space platform.

円筒形導体上のレクテナアレーとその応用

藤野義之, 水口芳彦
ATR 環境適応通信研究所
(E-mail: fujino@acr.atr.co.jp)
Fax: 0774-95-1508

1. まえがき

マイクロ波電力伝送は高々度無線中継システムや宇宙応用, ロボット応用などの分野で大変興味深い技術である. 筆者らは高々度無線中継用として主にS帯を使用したマイクロ波受電用レクテナを開発し, MILAX(Microwave Lifted Airplane eXperiment)[1]や ETHER(Energy Transmission toward High altitude Airship ExpeRiment)[2]といったデモンストレーション実験を行ってきた. しかしながら, 宇宙応用やロボット応用のためには送受電システムの小型化が必要になり, このための一手段として, 送受電システムの高周波化を行うことが挙げられる.

今回, 従来マイクロ波電力伝送に使われていたS帯 (2.45GHz) より高いC帯 (5.8GHz) を使用し, 円筒状の多関節ロボット等へのマイクロ波電力伝送を目指し, 円筒形導体上に配置されたレクテナアレーを検討したので報告する. 本レクテナは素子を円筒形導体上に配置し, 円筒の周方向の入射角の変動に対して効率が低下しないレクテナアレーであり, この出力電力を平面レクテナアレーの出力電力と比較し, その低下量について考察した.

2. レクテナ素子の構成

図1に提案するレクテナアレーの構成を示す. 円筒の側面に円形マイクロストリップアンテナ(CMSA)を素子とするレクテナを張り付けた構造をしており, 円筒半径を a , CMSA 半径を b としている. また, 偏波は円筒径方向としており, C帯(5.8GHz)でのマイクロ波電力伝送を想定している.

次に図2にレクテナ素子[3]の詳細図を示す. マイクロ波はCMSAに入射し, 結合ピンを通じて裏面の整流回路に導かれる. 整流回路は入出力フィルタとダイオードを組み合わせた構成としており, 入力フィルタにはLPFを, ダイオードはメイコム社のMA46135-32を使用した. 整流回路の入射電力対レクテナ効率(入射電力対出力電力の比)を図3に示す. 最高レクテナ効率は負荷抵抗 350Ω で69%であったが, これはダイオードの個体差により65~75%の間で変動している. また, 最適負荷抵抗は150~450 Ω の間で大きく変動していた. 次章においてレクテナをアレー化したときの特性を推定するが, この際にはこれらのばらつきに関わらず, 図3の結果を代表値として使用している.

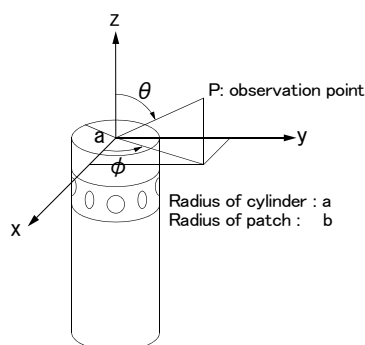


図1 円筒形導体上のレクテナアレー

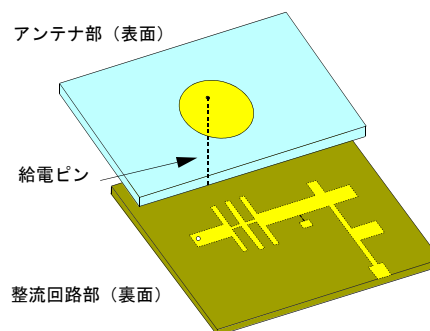


図2 レクテナ素子の構成図

アンテナ部は円筒上に設置した1素子のCMSAであり、その指向性及び利得は参考文献[4]により計算することができる。今回の周波数5.8GHz及び基板比誘電率2.17およびパッチ半径9.6mmを代入すると、正面利得の円筒半径依存性の理論値は図4に示すとおりとなる。利得は偏波によって異なり、 ϕ 方向（円筒径方向）偏波で円筒半径が65mmのとき7.7dBiであった。

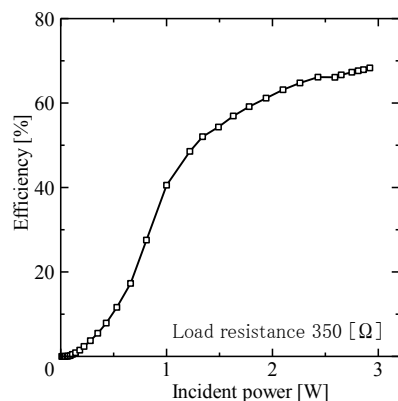


図3 入射電力対レクテナ効率の実験値

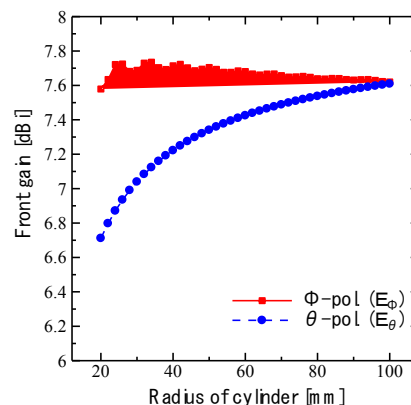


図4 円筒半径対正面利得の理論値

3. レクテナアレー化の検討

これらの基礎データから、円筒形導体上レクテナ素子をアレー化した時の特性について推定する。アレー化時の特性は以下の手順で推定する。まず、円筒上のアンテナ1素子の利得の理論値と入射電力束密度(Pfd)から素子へ入射電力を推定する。次に、図3の整流回路部の入射電力-効率特性の実験値（代表値）から、効率を推定し、各レクテナ素子の出力電力を計算する。これを素子数分繰り返して算術和を求めることでレクテナアレーの出力電力の評価値を求めている。なお、レクテナ素子は個別に最適負荷抵抗で終端することを仮定する。

アレー化に際しては、素子アンテナ間隔を固定し、素子数を円筒半径と同時に変化させることとした。今回、素子アンテナ間隔は実現可能な最小値である0.88波長を使用した。図5に素子数対レクテナ半径を示す。

円筒形導体上レクテナアレーでは、平面レクテナアレーと比較し ϕ の大きい方向での効率の改善が望める反面、正面方向の効率に関しては平面レクテナアレーより悪くなる。そこで、円筒形導体上アレーの $\phi=0^\circ$ 方向の電力(P_c)と、円筒形導体上アレーと同じ投影面積をもつ平面アレーの電力(P_p)から、電力比を次式で定義する。

$$r = \frac{P_c}{P_p} \quad (1)$$

なお、 P_c および P_p が入射電力を示すか、出力電力を示すかはその都度区別する。電力比が素子数（円筒半径に比例）によってどのように変化するかを3種類の入射電力密度(Pfd)について検討した。このとき、円筒形導体上のCMSAのパターンの理論値と、図3で示す入出力特性の実験値を用いて推定を行った。結果を図6に示す。入射電力に関する電力比は素子数の増加に伴い、87%で一定値となっている。これに対して、出力電力に関する電力比は入射電力密度(Pfd)に依存して変化し、 $Pfd=2.2\text{kW/m}^2$ で68%となる。低電力束密度で電力比が低下するのは図2に示すレクテナの効率特性の非線形性によるものである。

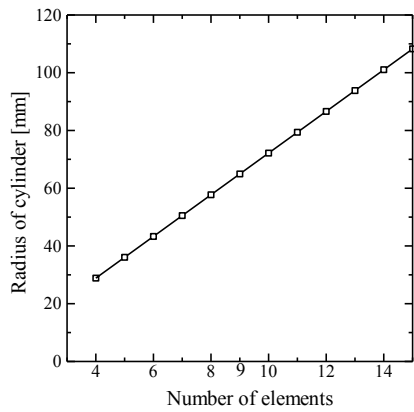


図5 素子数対円筒半径

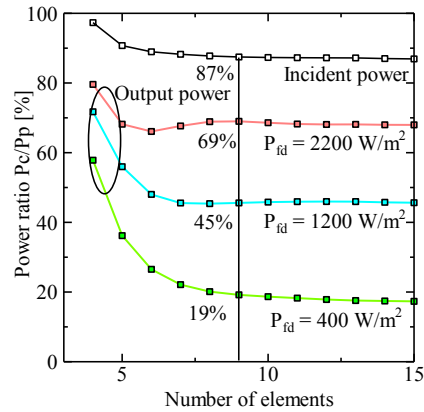


図6 素子数対アレー出力電力の理論値
(素子間隔 0.88λ , ϕ -方向偏波)

4. マイクロ波送電実験

次に、電波暗室内でマイクロ波電力伝送実験を行って円筒形レクテナアレーの指向性を得た。測定系を図7に示す。送信アンテナから送電された 5.8GHz の電磁波は、 0.6m 離れたレクテナに入射する。切り離し導波管は入射電力密度の測定用であり、レクテナと同じ位置に置き換える。レクテナ素子は、それぞれの最適負荷抵抗で終端されており、アレーの出力電力はそれぞれの素子の出力電力の算術和としている。

図8に1素子の円筒導体上レクテナの ϕ 方向の指向性の理論値と評価値を示す。ピーク付近で両者は良く一致するが、広角方向で誤差がある。これは、送電アンテナのパターンが無視できず、円筒を照射する送信マイクロ波に強度分布があるためと考えられる。

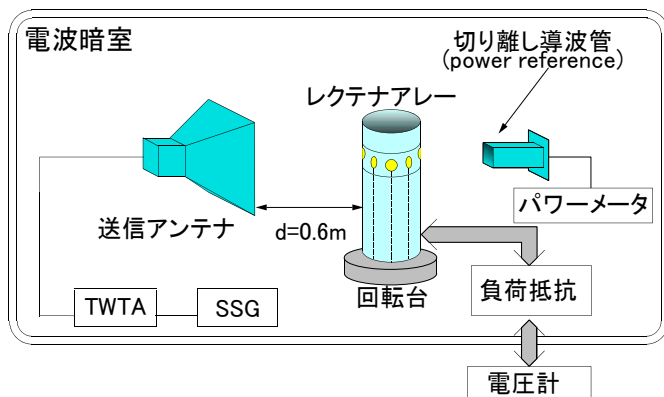


図7 マイクロ波送電実験系

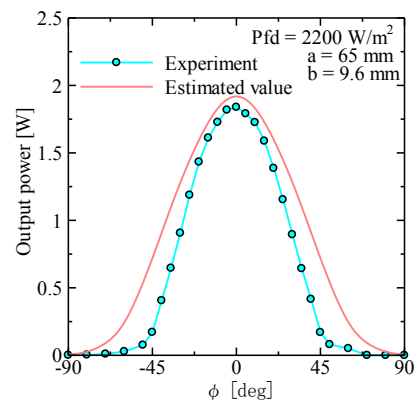


図8 1素子レクテナの出力電力の角度特性

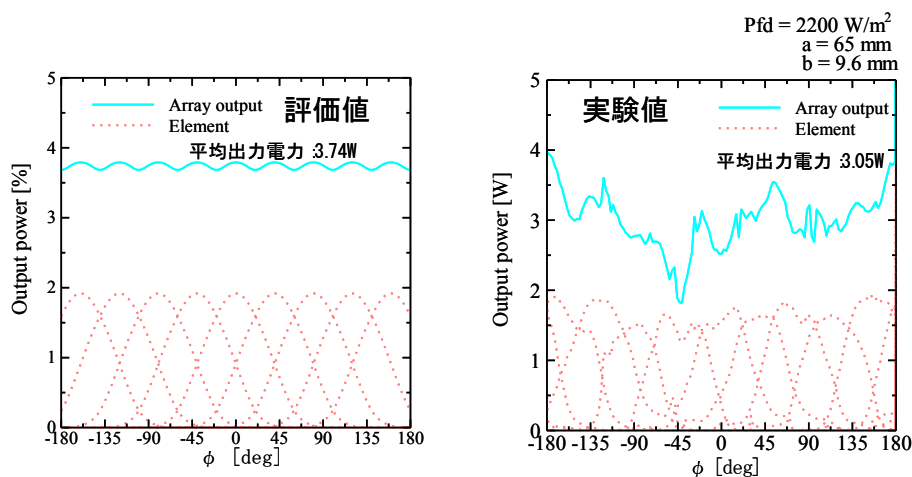


図9 円筒形レクテナアレーの出力電力の角度特性の実験値及び理論値

図9に円筒導体上レクテナアレーの出力電力の指向性の評価値と実験値を示す。実験値は評価値と比較してばらつきが大きいことがわかる。 ϕ 方向1周にわたる角度平均の出力電

力の平均値は評価値が 3.74W に対し、実験値は 3.05W であった。この 0.7W (約 20%) の誤差は、レクテナ素子のばらつきや、円筒を照射する送信マイクロ波の強度分布などが原因として考えられる

5. 応用例

円筒形導体上レクテナアレーの応用例を図 10 に示す。宇宙プラットフォームの構築や維持管理を行うための、円筒をつなぎ合わせたような形状をしている多関節のロボットである。これらのロボットに向け、プラットフォーム上からアクティブフェーズドアレー等を用いてロボットの胴体部に向けてマイクロ波を照射することで、ロボットを駆動する電源を得ることができる。また、狭い空間へ有効に電力を送電するため、今回用いた C 帯(5.8GHz)での電力伝送が有効となると考えられる。

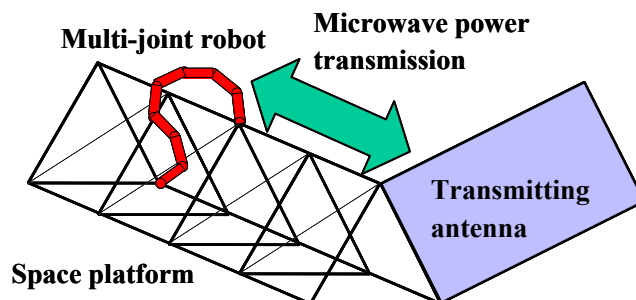


図 10 円筒導体上レクテナアレーの応用例

6. まとめ

円筒形導体上のレクテナアレーの検討として、アンテナ素子のパターンの理論値と円筒形導体上レクテナ素子のレクテナ効率の実験値から、平面レクテナと比較した出力電力低下率が最大 68%程度となることを示し、さらに出力電力の角度特性について評価を行った。また、本レクテナアレーの応用例に関して説明した。

今後、アレー化した場合の出力電力パターンを改善する予定である。

参考文献

- [1] 藤野, 藤田, 沢田, 川端, “M I L A X用レクテナ”, 第 1 2 回宇宙エネルギーシンポジウム, 宇宙科学研究所, pp.57-61, Mar. 1993.
- [2] Y. Fujino, M. Fujita, N. Oghara, N. Kaya, S. Kunimi, and M. Ishii, “A planar and dual polarization rectenna for HALROP microwave powered flight experiment”, Space Energy and Transportation, Vol.1, No.4, pp.246-257, Dec. 1996.
- [3] 坂, 藤野, 藤田, 賀谷, ” Cバンドレクテナに関する実験”, 1997 信学総全大, B-1-64, Mar. 1997
- [4] K-M. Luk and K-F. Lee, “Characteristics of the cylindrical-circular patch antenna”, IEEE Trans. on Antenna and Propag., Vol. 38, No. 7, pp. 1119-1123, Jul. 1990