

レクテナアレイシステム特性評価

小澤 雄一郎[†] 藤原 暉雄[†] 藤原 栄一郎[†] 篠原 真毅[‡] 三谷 友彦[‡]

[†] (株)IHI エアロスペース 〒135-0061 東京都江東区豊洲 3-1-1 豊洲 IHI ビル

[‡] 京大大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

E-mail: [†] yuichiro-ozawa@iac.ihico.jp, qfuji@js5.so-net.ne.jp, e-fujiwara@iac.ihico.jp

[‡] {shino, mitani}@rish.kyoto-u.ac.jp

あらまし マイクロ波を用いた宇宙太陽発電システム (SSPS) は、発電衛星から送電されたマイクロ波を地上に設置した膨大な数のアンテナで受電し、整流回路で直流に変換して電力として取り出し利用するシステムである。SSPS の実現には宇宙を飛ばす送電部の高効率化だけでなく、地上の受電部の高効率化も重要な課題である。受電部を構成するレクテナの高効率動作や安定動作にはレクテナを最適条件で動作させ、安定した DC 出力を得るレクテナ制御装置が必要である。しかしこれまで、レクテナやレクテナアレイに関して多数の評価報告があるものの、レクテナ制御装置まで含めたシステム効率の実測・評価の例は見られない。本稿では、個別構成要素ごとに測定した効率の積み上げ推定によるシステム設計結果と、全構成要素を接続した実験の結果を比較することにより、受電システム設計手法の妥当性を評価した結果について報告する。

キーワード レクテナ、マイクロ波送電、宇宙太陽発電システム

I

— Characterization of Rectenna Array System —

Yuichiro Ozawa[†] Teruo Fujiwara[†] Eiichiro Fujiwara[†] and Naoki Shinohara[‡]

[†] IHI AEROSPACE CO., LTD. Toyosu IHI Bldg., 3-1-1 Toyosu, Koto-ku, Tokyo, 135-0061 Japan

[‡] Research Institute for Sustainable Humanosphere Kyoto University,

Gokasho Uji, Kyoto, 611-0011 Japan

E-mail: [†] yuichiro-ozawa@iac.ihico.jp, qfuji@js5.so-net.ne.jp, e-fujiwara@iac.ihico.jp

[‡] shino@rish.kyoto-u.ac.jp

Abstract The microwave receiving system of SSPS has a huge number of rectennas. In the system, a rectenna control unit is necessary to optimize an RF-to-dc conversion efficiency of rectennas and to output stable DC power. The paper reports the characterization result of rectenna array system including the rectenna control unit.

Keyword Rectenna, Microwave Transmission, SSPS

1. はじめに

マイクロ波を用いた宇宙太陽発電システム (SSPS) は、発電衛星から送電されたマイクロ波を地上に設置した膨大な数のアンテナで受電し、整流回路で直流に変換して電力として取り出し利用するシステムである。SSPS は 1960 年代に米国にて提案され、その後米国や日本を中心に実現へ向けた研究が進められてきた [1][2]。さらに近年日本では、地上実証に向けた研究開発および宇宙実証へ向けた検討も進められている [3][4]。

SSPS の実現にはシステムの高効率化が重要な課題の一つであり、宇宙を飛ばす送電部の高効率化だけでなく、地上の受電部の高効率化も必要である。この受電部の大規模レクテナアレイを高効率・安定動作させるにはレクテナを最適条件で動作させ、安定した DC 出力を得るレクテナ制御装置が必要である [5]。しかしこれまで、レクテナやレクテナアレイに関しては多数の評価報告があるものの、レクテナ制御装置まで含めたシステム効率の実測・評価の例は見られない。本報告では、(財)無人宇宙実験システム研究開発機構

(USEF) 殿と (独) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 殿が連携して実施している太陽光発電送受電技術の研究開発において、USEF 殿ご指導の下開発しているマイクロ波電力伝送試験システム受電部の要素実験として、アンテナ、整流回路、レクテナ制御装置の個別評価とともに、高度マイクロ波エネルギー伝送実験装置 (A-METLAB) を利用して全系接続してシステム評価を実施した結果について報告する。

2. レクテナアレイシステム

図 2-1 および表 2-1 に本実験に供したレクテナアレイシステムの構成を示す。アンテナは 64 素子を 0.9λ 間隔で三角形配置し、アンテナ特性改善のため縦方向 2 素子ずつの出力を合成するペア素子化を行った。その結果、整流回路あたりの入力電力が増加することから、耐電力と効率を考慮して整流回路内は回路を 2 並列とした。図 2-2 に 64 素子のアンテナアレイ外観を、図 2-3 には 32 枚使用される整流回路の外観を示す。

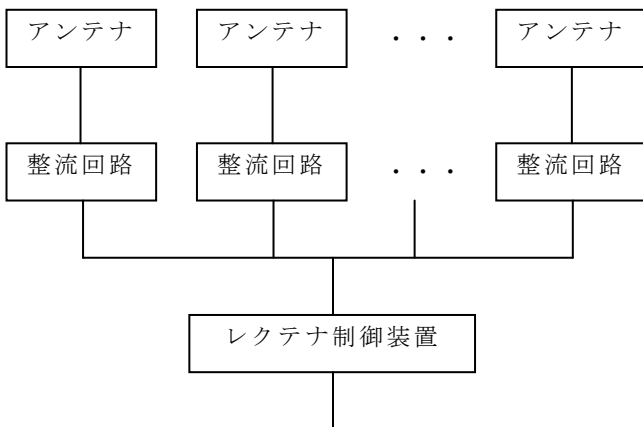
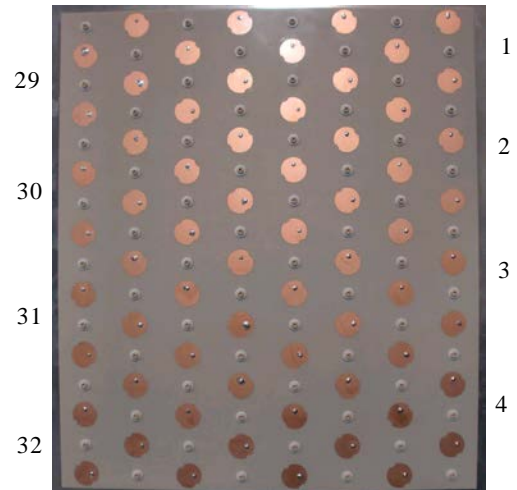


図 2-1 レクテナアレイシステム

表 2-1 レクテナアレイシステム構成

項目	構成	備考
アンテナ配置	三角形配置	
アンテナ間隔	0.9λ	
アンテナ数	64 素子	
アンテナペア数	32 個	
整流回路数	32 回路	1 回路内に 2 整流回路並列
整流回路出力接続	16 並列 × 2 直列	接続変更可
レクテナ制御装置数	1 台	



※番号はアンテナ識別番号。

図 2-2 受電アンテナアレイ外観



図 2-3 整流回路外観

3. 構成要素特性取得

レクテナアレイシステムの評価を実施するにあたり、事前にアンテナ、整流回路およびレクテナ制御装置について個別に特性取得を実施した。

3.1. アンテナ

32 素子のアンテナペアの基本特性を表 3.1-1 に示す。測定対象のアンテナ以外は全て 50Ω 終端を行い、測定を実施した。

表 3.1-1 アンテナペア特性

項目	特性値	備考
周波数	5.8GHz	
構成	2 素子ペア	
動作利得	9.9~11.5dBi	全アンテナ実測
軸比	0.4~1.5dB	代表 10ヶ所実測
アンテナ効率	92.8~96.7%	解析値

3.2. 整流回路

32 個の整流回路の基本特性を表 3.2-1 に示す。整流回路単体の RF-DC 変換効率特性は、同軸ケーブルで RF 電力を印加して取得した。入力電力を 0.2~1.0W、負荷抵抗を 150~250Ω の間で変化させて網羅的に取得し、使用範囲で補間して効率を算出した。

表 3.2-1 整流回路特性

項目	特性値	備考
周波数	5.8GHz	
構成	1 枚の基板に 2 回路を並列接続	図 2-3
RF-DC 変換効率	52.1~62.6%	負荷抵抗 150~250Ω 入力電力 0.2~1.0W

3.3. レクテナ制御装置

レクテナ制御装置は、整流回路を並列・直列接続した出力に接続され、整流回路を高効率に動作させるために、レクテナ出力電圧を一定に保持する。また、負荷に電力を供給するレクテナ制御装置の出力も入力電力や負荷の変動を受けずに電圧を制御する。

整流回路出力は 9V×2 直列=18V とし、これをレクテナ制御装置の入力電圧とした。一方、出力電圧はセルを多数直列接続した蓄電池を想定し、48V とした。この条件で入力電力を 6~16W に変化させたとき、レクテナ制御装置の伝達効率は 91.8~94.6%であった。

4. レクテナアレイシステム評価実験

4.1. 受電アンテナ出力測定と整流効率の推定

高度マイクロ波無線電力伝送用フェーズドアレーを用いて、14.4m 離れた位置に図 4.1-1 に示すように受電アンテナパネルを設置し、受電アンテナ出力の測定を行った。測定では受電アンテナパネルの左右に送電パターンモニタ用アンテナを設置し、送電パターンの安定性を確認した。実験中、送電器の ON/OFF を繰り返しても同条件で送電すれば、送電パターンモニタ用アンテナの出力変動は数 mW レベルであり、安定した送電パターンが得られていることを確認できた。ただし実験では、最初に実施した受電アンテナ出力を基準とし、実験ごとに送電パターンモニタ用アンテナ出力の変化分を用いて受電アンテナ出力を補正している。図 4.1-2 に基準とした受電アンテナ出力分布を示す。

この受電アンテナ出力分布と 3.2 項で取得した整流回路特性から、このアンテナ出力に整流回路を接続した場合の効率推定を行った。効率推定では、入力電力と出力電圧から曲線近似を用いて補間を行った。その結果、推定効率は 48.1~63.2% (平均 58.4%) となった。

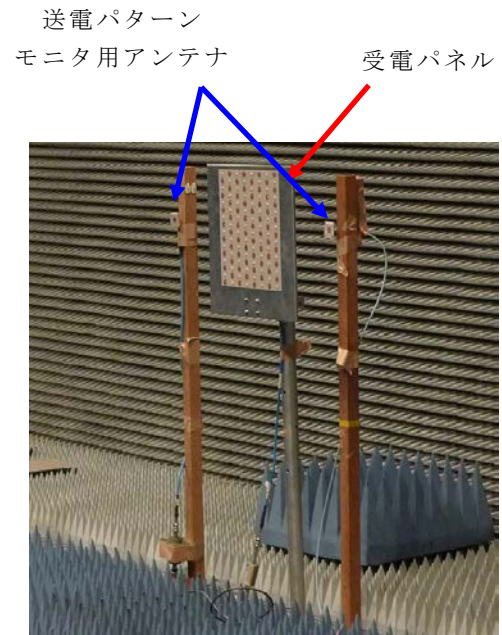


図 4.1-1 受電パネル設置状況

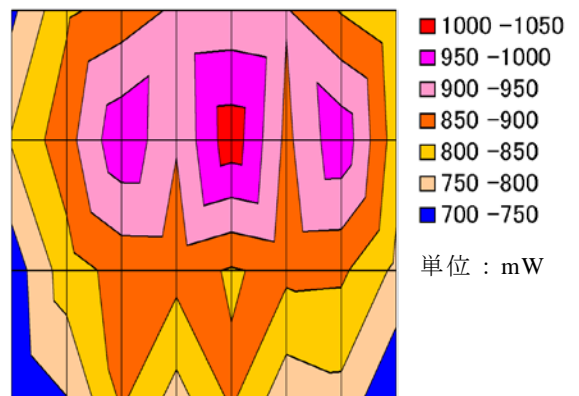


図 4.1-2 受電アンテナ出力分布

4.2. レクテナアレイシステム効率測定

図 4.1-1 に示す受電パネル背面に図 2-3 に示す整流回路を接続し、その出力を 14 並列×2 直列にしてレクテナ制御装置に入力して全系の効率測定を実施した。全体効率は受電アンテナ出力に対するレクテナ制御装置の出力とした。効率測定の結果、全体効率は 53.4%であった。

4.3. 効率の比較

全系を接続した状態での各部の効率と、事前に取得した個別構成要素の特性から積み上げた効率の比較を行い、個別構成要素特性の積み上げによるシステム設計の妥当性について確認した。全系接続時にはレクテナ制御装置の入出力で電圧と電流をモニタし、4.1 項に示した受電アンテナ出力を用いて整流回路およびレ

クテナ制御装置の効率を求めた。一方、個別要素の効率は 4.1 項に示した受電アンテナ出力が整流回路に印加されたとして、3 項で事前に測定した特性から効率を推定した。各々の結果を表 4.3-1 に示す。両者の差異は 2%以下 (0.1dB 以下) であり、よく一致している。

表 4.3-1 レクテナアレイシステム効率測定結果

	全系接続	個別要素積上げ
整流回路	57.1%	58.4%
レクテナ制御装置	93.5%	94.2%
合計	53.4%	55.0%

なお、本来は 32 個のアンテナペア出力を 16 並列×2 直列の接続を行う計画でいたが、この構成でマイクロ波を印加したところ、4 素子が短絡故障したため、正常である残りの 28 素子を用いて実験を行うこととした。故障した整流回路は取り外し、アンテナ出力は 50 Ω 終端した。4.1 項の整流回路単体の状態では故障は発生せず、また故障発生時は印加電力の高い整流回路が故障するわけでもなかった。過去にも同様の報告があり、今後原因究明と対策が必要である [6]。

4.4. レクテナ故障時のアンテナ特性

整流回路が故障した場合に、アンテナ特性に与える影響の有無について実験を行った。受電パネル中央のアンテナ No.14 出力をパワーセンサでモニタし、以下の条件でその出力の変動を確認した。図 4.4-1 に No.14 アンテナ出力の変動を示す。

- 実験 1：全て 50 Ω 終端
- 実験 2：全て 50 Ω 終端（実験 1 の再現確認）
- 実験 3：受電パネル最外周オープン、他 50 Ω 終端
- 実験 4：受電パネル外周 2 周オープン、他 50 Ω 終端
- 実験 5：モニタ周囲 1 周オープン、他 50 Ω 終端
- 実験 6：全てオープン
- 実験 7：No.1～13 整流回路、他 50 Ω 終端
- 実験 8：全て整流回路

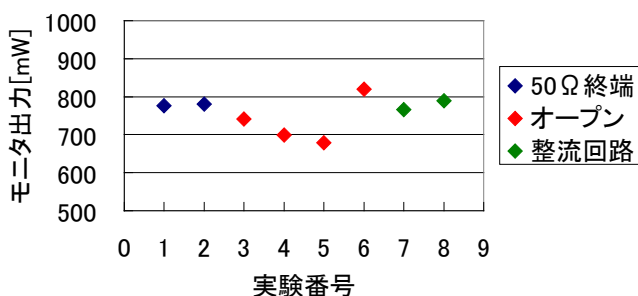


図 4.4-1 周辺アンテナ負荷による影響

実験の結果、50 Ω 終端もしくは 50 Ω に整合が取れた整流回路を接続した場合には中央のモニタアンテナ出力は全 50 Ω 終端した場合を基準に±2%以内の変動で安定しているが、受電パネル内に出力オープンのアンテナが存在すると、-13～+6%と大きく変動することが確認できた。

過去に送電アレイアンテナに破損素子が存在した場合のアレイアンテナ動作利得に与える影響が解析によって示されている [7]。受電系においても受電アンテナ負荷の整合が崩れることによって、周囲アンテナとの相互結合量に変化してアンテナ出力が変動していると考えられる。

5. まとめ

A-METLAB を利用し、実際に空間を伝播してきたマイクロ波をアンテナから入射させて、レクテナアレイシステムの評価を行った。その結果、構成要素個別に取得した特性データの積み上げによる効率設計と、全系接続状態での効率測定結果はよく一致し、設計手法の妥当性を確認できた。今回は実験用に試作した BBM レベルの装置であったため効率が 50%程度であったが、今後入力電力に応じた整流回路最適化やコネクタ接続削減などによって効率改善を図って行く。また今回、整流回路を並列接続した場合にレクテナ故障が発生したため、この原因究明と対策が引き続き課題である。

最後に、アンテナ測定に関してご助言いただきました日本電業工作(株)王鵬様に感謝致します。

文 献

- [1] Glaser, P.E., "Power from the Sun; Its Future", Science, 162, pp.857-886, 1968
- [2] DOE and NASA report, "Satellite Power System; Concept Development and Evaluation Program", Reference System Report, Oct. 1978. (Published Jan. 1979)
- [3] 三原 莊一郎 他, "USEFにおけるSPSへの取組み", 第13回 宇宙太陽発電衛星システム (SPS) シンポジウム講演要旨集, pp.34-39, Oct. 2010.
- [4] 佐々木 進, "JAXAにおけるSSPSの研究状況と課題", 第13回 宇宙太陽発電衛星システム (SPS) シンポジウム講演要旨集, pp.29-33, Oct. 2010.
- [5] (財)機械システム振興協会, "作業用ロボットへのマイクロ波送電および通信技術の開発に関するフィージビリティスタディ報告書-要旨-", pp.34-55, Mar. 2007.
- [6] 藤原 暉雄 他, "並列接続状態でのレクテナ動作について", 信学技報, SPS2008-06, Jul. 2008
- [7] 今野 佳祐 他, "電力伝送用超大規模アレイアンテナにおけるランダムに分布した破損素子の影響", 信学技報, WPT2011-04, Jul. 2011.