

マイクロ波地上エネルギー伝送実験の概要と進捗

斉藤 孝¹ 三原 荘一郎¹ 中村 修治¹ 伊地智 幸一¹

¹ 財団法人 宇宙システム開発利用推進機構第一技術本部 〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8

1 E-mail: {Saito-Takashi, Mihara-Shoichiro, Nakamura-Shuji, Ijichi-Koichi}@jspacesystems.or.jp

あらまし 財団法人宇宙システム開発利用推進機構(J-spacesystems)〈旧、無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)〉では、将来の電力代替エネルギー源としての宇宙太陽光発電システム(SSPS)に関する調査研究を1990年代から実施してきた。2009年からは経済産業省(METI)からの委託を受けて「太陽光発電無線送受電技術研究開発」事業を推進中である。この研究開発では、次の宇宙実証フェーズへの前段階として、GaN HEMTを用いた薄型・高効率のフェーズドアレイ送電アンテナや、高効率整流用ダイオード素子の実現に向けた技術検討、及びマイクロ波による地上エネルギー伝送実験に向けて取り組んでいる。ここでは、目標とするSSPSシステム案の紹介と、現在取り組んでいる研究開発の概要と進捗状況について紹介する。

キーワード 宇宙太陽光発電、送電部、受電部、マイクロ波電力伝送試験、地上実証試験

Status of Microwave Ground Power Transmission Experiment

Takashi SAITO¹ Shoichiro MIHARA¹ Shuji NAKAMURA¹ Koichi IJICHI¹

¹ Japan Space Systems, Space Systems Division 3-5-8 Shibakoen, Minato-ku, Tokyo, 105-0011 Japan

1 E-mail: {Saito-Takashi, Mihara-Shoichiro, Nakamura-Shuji, Ijichi-Koichi}@jspacesystems.or.jp

Abstract Japan Space Systems (J-spacesystems), formerly known as Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer (USEF), has been studying Space Solar Power System (SSPS), as future electricity alternative energy source since 1990s. From 2009, J-spacesystems started new research and development project of the Microwave Power Transmission ground test under a support of Ministry of Economy, Trade and Industry(METI). This project includes the study for high efficient and thin structured phased array antenna, and the study to realize high efficient rectenna element.

This WPT ground test is intended to be a precursor of next on-orbit demonstration. In this paper, status of this project is introduced.

Keyword SSPS, Microwave Power Transmission, Transmitting Section, Receiving Section, Ground Test

1. はじめに

財団法人宇宙システム開発利用推進機構(J-spacesystems)〈旧、無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)〉では平成12年度から平成19年度まで経済産業省(METI)殿および財団法人機械システム振興協会殿からの委託を受けて、宇宙太陽光発電システム(SSPS)に関する調査研究を行ってきた。その中でSSPSの中核技術であるマイクロ波による無線送受電技術に関し、種々の要素技術検討を実施してきた。また、平成21年度からは「太陽光発電無線送受電技術の研究開発(マイクロ波による精密

ビーム制御技術の研究開発)」について実施中である。これらについてあわせて紹介する。

2. SSPSシステム構想 [1][2]

「太陽光発電利用促進技術調査」(経済産業省殿より受託)の中で、システム専門委員会(佐々木進主査)および送電技術専門委員会(篠原真毅主査)から提唱されたマルチバス型のSSPS案を図1に示す。SSPSを構成するユニットは送電一体型パネル(両面の太陽電池で発電した直流電力をマイクロ波に変換して下面から放射するパネル)を4隅のテ

ザーで吊った発送電システムである。広さ 100m×95m、厚さ 2cm～10cm、重量約 45 トンのユニットは約 2 千 kW のマイクロ波電力を送電する能力を持つ。1 ユニットは構造ユニット(5m×0.5m) 3,800 枚から構成される。25 ユニットから成るユニットアセンブリを 25 連結することにより実用型の 100 万 kW 級のシステムを構築する (図 2)。このとき、一辺は約 2.5km となる。このようにマルチバス型の場合は、システムの規模を自在に拡大することができる。

構造ユニットは 10 個の電気的および構造的に等価なモジュールで構成される。モジュールは 16 個のサブアレイで構成される。(図 3)

それぞれの大きさ、重量は以下のように設定した。

- ・モジュール： 0.5 m×0.5 m ×(0.02～0.1) m
- ・モジュール重量： 1.06 kg
- ・サブアレイ： 125mm ×125mm ×(20～100)mm
- ・サブアレイ重量： 66.25 g

多数のテザーユニットを接続して構成するテザー-SSPS

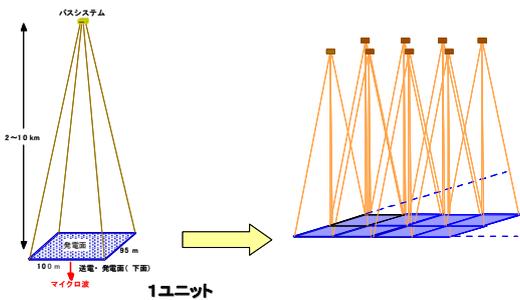


図 1 マルチバス型 SSPS(参照モデル)

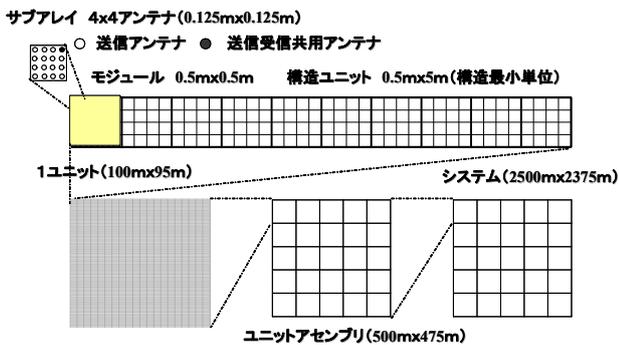
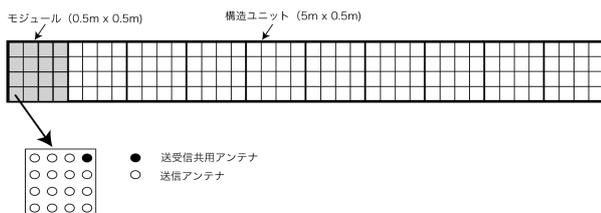


図 2 マルチバス型の階層構造



サブアレイ (4x4 アンテナ)

図 3 構造ユニット、モジュール、サブアレイ

3. 太陽光発電無線送受電技術研究開発[1][2]

3.1. 研究開発の目的

経済産業省では、平成 21 年(2009 年)度より「太陽光発電無線送受電技術研究開発」を開始した。この事業の目的は、宇宙太陽光発電システムの中核的技術であるマイクロ波による無線送受電技術の確立に向け、安全性や効率性等の確保に不可欠な精密ビーム制御技術の研究開発を行うことにより、当該システムの実現を目指すことである。J-spacesystems ではこのうち「マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発」を受託し、現在に至っている。

これは、複数のフェーズドアレイアンテナ間の位相同期を行い、レトロディレクティブ技術を活用し、マイクロ波ビームを受電アンテナに向けて指向制御する精密ビーム制御技術の確立を目指すものである。

また、宇宙太陽光発電システムの発電コストの低減につながる送電効率・受電効率の向上が不可欠であり、特に宇宙へ輸送する送電部については送電パネルの薄型・軽量化は重要である。

3.2. 研究開発の実施体制

本研究開発の実施体制を図 4 に示す。J-spacesystems は METI からの委託を受け、JAXA と連携して無線電力伝送技術の研究開発を行う。J-spacesystems の下では、送電部を三菱電機株式会社(MELCO)が、受電部を株式会社 IHI エアロスペース(IA)が担当している。

なお、レトロディレクティブ技術(ビーム方向制御技術)の研究開発については、独立行政法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)が実施することとしており、本事業の計画立案から屋内及び屋外でのマイクロ波電力電送試験に至るまで、双方が連携・協力して研究開発を実施している。

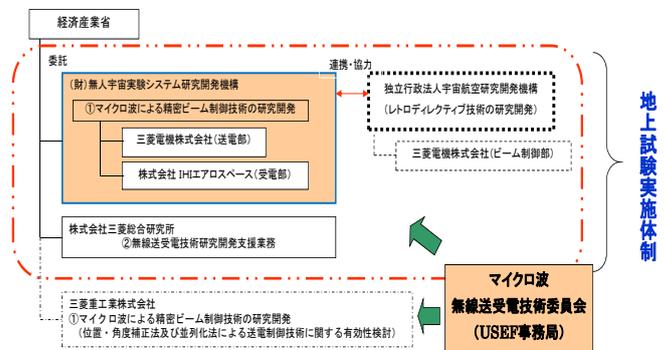


図 4 研究開発実施体制

4. マイクロ波電力伝送試験モデル

4.1. システム構成 [1][2][5][6]

マイクロ波電力伝送試験モデルの概念図を図 5 に示す。

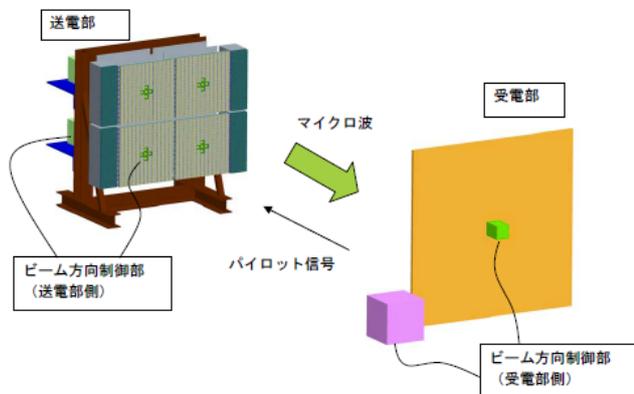


図 5 マイクロ波電力伝送試験モデル

本モデルは、送電部、ビーム方向制御部、受電部から構成される。送電部は軽量薄型のマイクロ波フェーズドアレイアンテナで構成され、電気エネルギーを高効率でマイクロ波に変換する。受電部は、複数のモジュール単位で構成され、空間を伝達してきたマイクロ波を安定的かつ効率的に電気エネルギーに変換する。また、受電部では、高効率ショットキーバリアダイオードの実現に向けての要素研究を行い、マイクロ波から電気への変換効率の向上を目指す。また、ビーム方向制御部は、マイクロ波が意図する方向に向けて精度よく送られるよう、ソフトウェアレトロディレクティブ機能や REV 機能などを用いてマイクロ波ビームの方向制御を行う。

各サブシステムについての説明を以下に記す。

4.2. 送電部[3][5][6]

4.2.1. 基本設計

送電部の開発コンセプトは以下に示すとおりであるが、平成 23 年度は特に 1)~3)に重点をおいて検討を行った。

- 1) キロワット級の大出力
- 2) DC-RF 変換の高効率化
- 3) 超薄型フェーズドアレイの実現
- 4) 源振統制技術の原理検証

送電部のシステムブロック図を図 6 に示す。

送電部の主要な構成部品である送電モジュールは、大電力を送電するフェーズドアレイアンテナであり、源振統制マスター機から配信される基準信号を基に送電マイクロ波を生成する。この送電マイクロ波を HPA モジュールにより送電 DC 主電源からの DC 電力を用い

て増幅する。HPA モジュールで増幅された送電マイクロ波は、サブアレイ内のアンテナ (サブアレイ ANT) で 4 分配され、各アンテナ素子から放射される。また、HPA モジュールで発生した熱はサブアレイ背面のヒートパイプで放熱部まで輸送されファンにより排熱される。

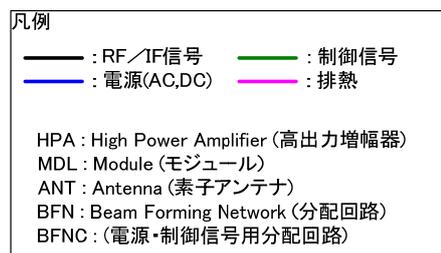
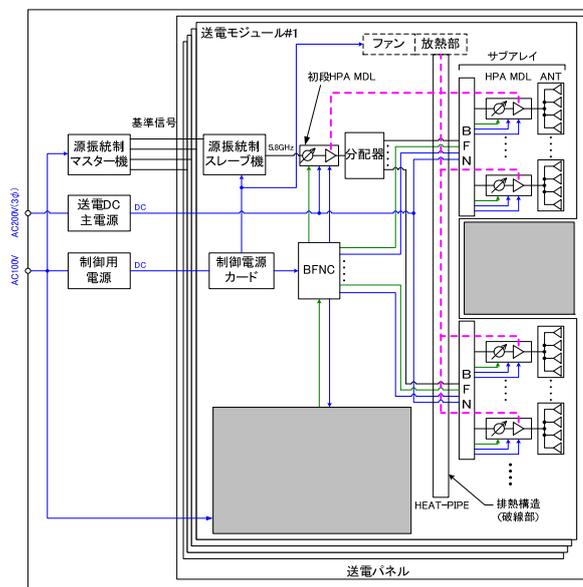


図 6 送電部システムブロック図

送電部の仕様案を、表 1 に示す。

表 1 送電部仕様案

項目	送電部仕様案
使用周波数	5.8GHz ±75MHz (右旋円偏波)
システム構成	4 送電モジュール構成
モジュールサイズ	約 0.6m×0.6m
ビーム拡がり角	全システムで約 3 度のビーム形成 (-3dB ビーム幅)
モジュール質量	19kg 以下 (サブアレイ部分のみ)
送電出力	<ul style="list-style-type: none"> ・最大出力 : 400W 以上 / 送電モジュール 1,600W 以上 / (4 送電モジュール) ・低出力モード (最大出力の約 5% 程度) を持つこと。
アンテナ素子間隔	0.65 波長 ±0.02 波長 (33.6mm ± 1mm) 波長 : 約 51.7mm (中心周波数に対応)

マイクロ波増幅器効率	平均 60%以上 (最終段増幅器の電力付加効率)
移相器	5bit (MMIC 移相器)
運用時間	1 分以上 (送電出力 400W/送電モジュールの高出力モードにおいて)
送電部総合効率	30%以上
基準信号の配信	有線配信
アンテナ素子数	300 素子以上/送電モジュール。 各送電モジュールの中央部にビーム方向制御装置を設置するためのスペースを確保する。
マイクロ波増幅器個数	76 個以上/送電モジュールとして 1 増幅器で 4 素子アンテナに給電する。
サブアレイ厚さ	40mm 以下
排熱構造	送電部とは別構造の排熱構造を設置し、熱対策を行う。

平成 22 年度までに得られた要素検討結果などを送電部全体の設計に反映し、送電モジュールの出力・効率および厚さ・質量に対する性能配分を行った。

性能配分を行ううえで、電気性能（出力・効率）と薄型・軽量化を両立するための方針は表 2 のとおりである。

この方針に従って、送電部の主要性能の 4 項目について設計目標値を設定し、それを実現するために各構成部品に対して性能配分を行った。（表 3）

表 2 性能配分の方針

項目	方針
サブアレイ ANT	最終段増幅器の後段にあり、総合効率への寄与が大きいため、薄型化よりも低損失化を優先する。
HPA モジュール	電気性能（出力・効率）と薄型・軽量化の両立を目指す。
給電部 (BFN)	出力・総合効率への寄与が小さいため、薄型・軽量化を優先する。RF の分配と制御系（電源・制御信号）の分配を一体基板で実現することにより薄型化を図る。

表 3 主要な設計目標値

項目	仕様値	設計目標値
送電出力	400W/モジュール以上	411W/モジュール
送電部総合効率	30%以上	35%
サブアレイ厚さ	40mm 以下	34mm
サブアレイ質量	19kg 以下	19kg

4.2.2. 要素検討

平成 23 年度は、平成 22 年度の要素検討の成果を反映し、HPA モジュール（デバイス・実装・垂直給電回路を含む）の設計及び性能検証を行った。その結果、全ての評価項目において、設計目標値を満足する良好な結果が得られた（表 4）。今後は、本成果をもとに、サブアレイ試作の詳細設計を行っていく予定である。

表 4 HPA モジュール試作品の評価結果概要

項目	システム要求値	設計値	評価結果
出力電力	平均 37.8dBm 以上(平均 6.1W 以上)	同左	平均 37.90dBm(6.17W) 最大 38.25dBm(6.68W) 最小 37.58dBm(5.73W)
電力付加効率	平均 40.2%以上	同左	平均 41.50% 最大 42.58% 最小 39.57%
移相量精度	3°rms 以下	同左	2.1°rms
不要放射	平均 -60dBc 以下	同左	平均 -65.7dBc 最大 -63.7dBc 最小 -69.7dBc
寸法	62mm ×62mm ×16mm 以下	62mm ×62mm ×14.6mm	62.0mm×62.0mm ×14.62mm
質量	110g 以下	92g	平均 91.3g 最大 91.5g 最小 91.1g

送電部サブアレイの具体的なイメージを得るため、アンテナとデバイスを一体化した構造をサブアレイアンテナ試作品（アンテナ基板）と HPA モジュール試作品を用いてサブアレイ部の一体化イメージを製作し、18.6mm の厚みを実現できることを確認した（図 7 参照。厚みはアンテナ基板の上面から HPA モジュール下面までの厚さ）。

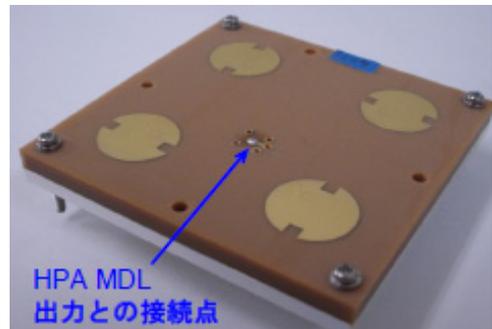


図 7 サブアレイアンテナ試作品

4.3. 受電部 [4][6]

4.3.1. 基本設計

レクテナアレイ（受電面）の概観を図 8に、受電部の構成を図 9に示す。

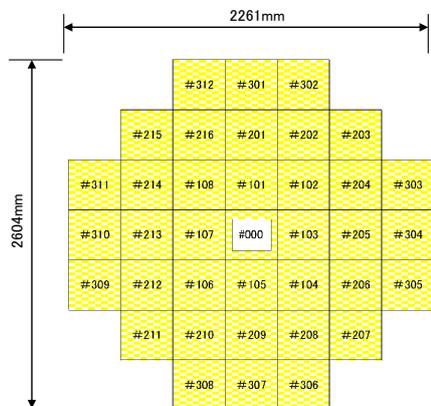


図 8 レクテナアレイ（受電面）

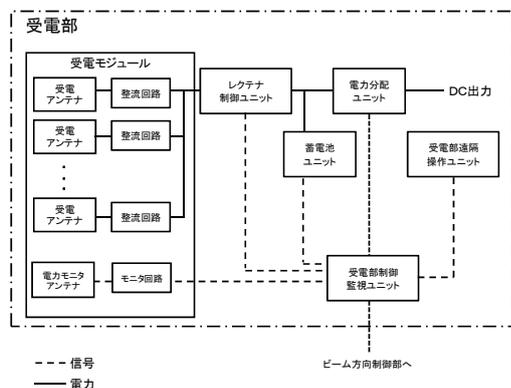


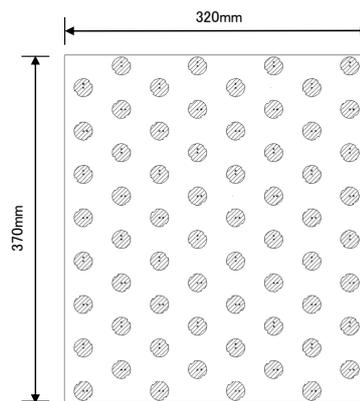
図 9 受電部の構成

受電部の設計仕様案を表 5に示す。

表 5 受電部の設計仕様案

項目	設計仕様
受電パネルサイズ	2.60m×2.26m
受電パネル枚数	1枚（レクテナアレイは37個の受電モジュールで構成）
受電パネル支持方法	レクテナを支持し自立可能な架台を有する。（角度調整機能、可搬機能）
ダイオード	ショットキーバリアダイオード
RF-DC変換効率	50%以上（アンテナ～レクテナ制御ユニット出力） 80%以上（改良型ダイオード）
電磁再放射抑制	レクテナアレイで発生する2次～4次高調波再放射を抑制する入力フィルタを有する。
自動点検計測機能	故障したレクテナを含む受電モジュールの特定、故障レクテナの特定を行う。

受電モジュールの概観を図 10に示す。



受電モジュール B（中央部以外）

図 10 受電モジュール（アンテナ面）

平成 22 年度までの検討から、現在入手可能なショットキーバリアダイオードの中から整流回路の製造性も考慮して、高効率なダイオードを選定した。

RF-DC 変換効率に関する効率は以下のとおりであり、

- ・アンテナ偏波効率
- ・整流回路効率
- ・レクテナ制御ユニット効率

これらを総合した受電部効率は 56.8[%]となった。

4.3.2. 要素検討

(1) 改良型ダイオード

マイクロ波電力伝送試験モデルの受電部には市販のレクテナ素子を使用するが、将来に向けてより高効率のショットキーバリアダイオードを並行して研究開発している。

平成 22 年度の 1 次試作検討結果を生かし、ダイオードの構造の最適化設計、設定した製造工程に基づく試作品の製作と特性データの取得を行った。最も注目すべき効率(ダイオードの RF-DC 変換効率)は、既存市販ダイオードの特性を上回る成果を得ており、引き続き、高い目標値の達成実現を目指して、ポイントを絞った検討を進める。(図 11)

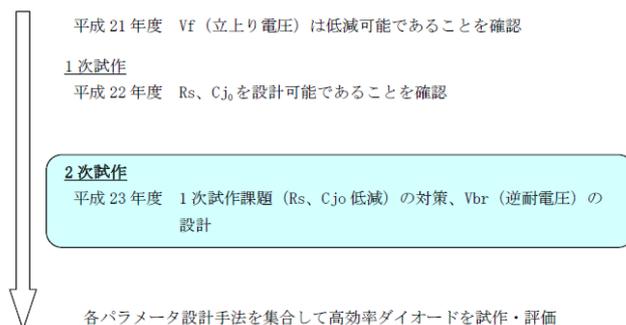


図 11 ダイオードの要素検討

5. マイクロ波電力伝送試験 [1][2][6]

5.1. 試験の目的

(1) 屋内試験

マイクロ波電力伝送試験モデルの一部を使用し、屋内試験施設（電波暗室内）において単体送電モジュールのビーム制御精度の確認試験を実施し、伝送距離10m以上において角度精度0.5度rms（rms：二乗平均平方根）の達成を目標とする。

(2) 屋外試験

マイクロ波電力伝送試験モデルを使用し、屋外試験地において複数送電モジュールの協調動作試験（4枚の各送電モジュールから発生するマイクロ波の位相を合わせ、その結果、最大の電力が得られることを確認する試験）を実施し、伝送距離50m程度において無線送電システムとしての性能確認を実施する。

- 大出力（kW級）の送電パネルを使用し、
- レトロディレクティブ方式および素子電界ベクトル回転法（REV法）などの技術で精密にマイクロ波ビームを制御し、
- ある程度の電力効率

で無線電力伝送を行なう。そのエネルギーを受電部で回収して再度電気エネルギーに再生できることを示す。

試験実施に当たって留意すべき事項として、

- 技術面：パイロット信号やメインのマイクロ波ビームのマルチパス防止、すなわち、地上での反射波の影響を除くため、送電部あるいは受電部を地面から離して設置する
- 法制面：電波法、電波防護指針などの法令を遵守する必要がある。

5.2. 試験内容

送電部から50m離れた受電部開口面における電力束密度分布について検討した。送電出力を設計目標値である411W/送電モジュールの条件で算出した電力束密度分布を図12に示す。なお、最大値は受電部の中央で 315W/m^2 (31.5mW/cm^2) である。実際の送電モジュール出力の変動などを考慮して、電力束密度の最大値として 315W/m^2 (TBD) $\pm 20\%$ (TBD) とした。

1.6kW以上のマイクロ波を送電部から送り、受電パネルでこのマイクロ波エネルギーを受け取り、約350W程度の電気エネルギーとして取り出す計画である。

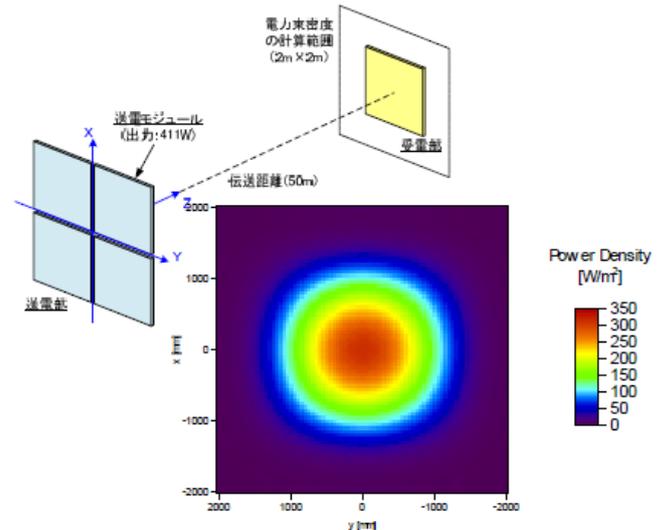


図 12 受電部開口面付近の電力束密度分布

6. まとめ

本研究開発（平成21～26年度予定）も半ばを過ぎ、現在、基本設計と関連の要素試作を実施中である。試作評価結果からは、設計目標達成の見通しが得られつつある。

今後は最終年度に実施予定のマイクロ波電力伝送試験の計画具体化と準備に向けて、より詳細な検討を実施してゆく予定である。

文 献

- [1] 布施, 斉藤, 三原, 伊地智, 苗村, 本間, 佐々木, 小澤, 藤原; “マイクロ波地上エネルギー伝送実験の概要と進捗”, 第5回マイクロ波無線電力伝送時限研究委員会研究会, 2011年3月
- [2] 布施, 斉藤, 三原, 伊地智; “マイクロ波無線電力伝送地上実験に向けた開発検討”, 第55回宇宙科学技術連合講演会, 2011年11月
- [3] 佐々木拓郎, 本間幸洋; “マイクロ波無線電力伝送用送電部の開発”, 第55回宇宙科学技術連合講演会, 2011年11月
- [4] 小澤雄一郎, 藤原暉雄, 藤原栄一郎, 篠原真毅, 三谷友彦; “レクテナアレイシステム特性評価”, 第11回宇宙太陽発電と無線電力伝送に関する研究会 (METLAB研究会) / 電子情報通信学会第10回無線電力伝送時限研究専門委員会 (通算38回) 研究会, 2012年3月
- [5] 本間幸洋, 佐々木拓郎; “マイクロ波電力伝送地上実証システムの開発”, 信学技報, vol. 111, no. 436, SANE2011-168, pp. 47-52, 2012年2月
- [6] 平成23年度「太陽光発電無線送電技術研究開発 (マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発)」成果報告書, 平成24年3月, 無人宇宙実験システム研究開発機構