

Status of SSPS study at USEF

Takashi SAITO, Shoichiro MIHARA, Yutaro KOBAYASHI, Hiroshi KANAI
Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer (USEF)
2-12 Kanda-Ogawamachi, Chiyodaku, Tokyo, 101-0052 Japan

Abstract

Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer(USEF) has been studying Space Solar Power System(SSPS). Recent activities are presented in this paper.

(1)The first activity is the development and demonstration of several important technologies for the realization of the microwave wireless power transmission(WPT) system. They are beam steering, microwave transmission and microwave power utilization. As for the transmission and utilization, we have developed and tested light weight microwave transmission system and rectenna array. We have put the rectenna array on a rover and demonstrated in the anechoic chamber. In order to use space system, WPT systems must be as light as possible. The target level of the weight to output power ratio in this development was 50g/W, and we have achieved 33g/W. Both transmitter and rectenna arrays are explained with the demonstration results.

(2) As for the space WPT, we have two themes. One is investigation of the multi-bus tethered SSPS. The multi-bus tethered SSPS is a combination of identical unit with power generation, beam control and power transmission. If we build some portion of multi-bus system, we can estimate and evaluate the final system. We will find issues to be solved and build the road map for the development. The other is to find the gap between current phased array technology and phased array technology for SSPS. The light weight, super large, inexpensive and accurate phased array system is one of the most important factors for the realization of SSPS.

USEF における SSPS 検討状況

齊藤孝、三原荘一郎、小林裕太郎、金井宏
財団法人 無人宇宙実験システム研究開発機構
〒101-0052 東京都千代田区神田小川町 2-12

E-mail: {saito, mihara, y.kobayashi, kanai}@usef.or.jp

1. はじめに

財団法人 無人宇宙実験システム研究開発機構では経済産業省および同省関連団体からの委託を受けて宇宙太陽発電システムに関連する調査研究を行ってきた（図1）。その中から最近の活動の状況について紹介する。

2. 作業用ロボットへのマイクロ波送電に関するスタディ

無線エネルギー伝送の応用分野として、移動体（小型無人機、地上作業用ロボット等）に対するマイクロ波送電の検討を実施した。

地上作業用ロボットへの適用例として、電動移動台（ローバ）に対する無線送電の検討を行った。この検討においては、実際にローバに搭載する受電パネルおよび、将来の宇宙での展開を念頭においた軽量化を考慮した送電パネルを試作した。周波数は 5.8GHz である。（図2）

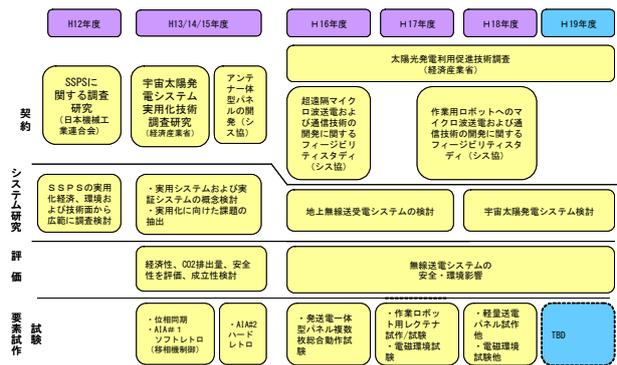


図1 USEF の SSPS 活動状況

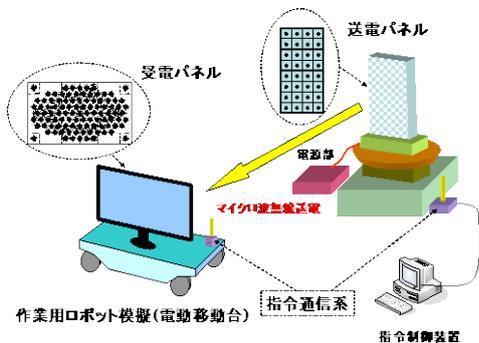


図2 システム構成図

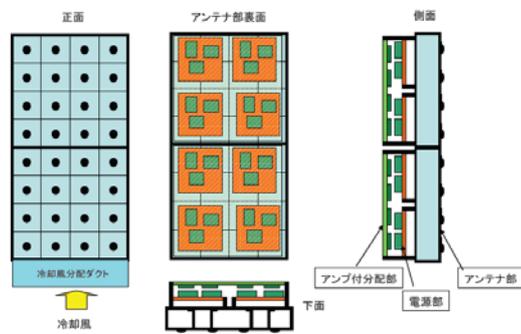


図3 送電部の構成

2.1 送電系

送電系は、半導体を用いた 100W 級の軽量マイクロ波増幅システム（50g/W 以下目標）の試作を行った（図3）（京大大学生存圏研究所 川崎繁男産学官連携教授のご指導）。アンテナはパッチアンテナとし、増幅部は各アンテナエレメントに2段ドライバーアンプと高出力アンプの3段増幅回路を付加し、2ユニットを一つの基板に取り付けた。この回路ユニット2つを持って4素子の最小2次元アレイとした。最小2次元アレイ4ブロックで16素子のユニットとした。全体は2ユニット32素子である。下部からは空冷により温度上昇を抑制した。

試作の結果、質量 4kg、出力 120W が得られ目標指標を達成する 33.3g/W が確認できた。

2.2 受電系

受電系は H18 年度試作の課題であったレクテナの受電効率向上、レクテナを効率の高い条件で作動させるための給電制御部の実現を目標にして試作を行った。

縦長の送電パネルから送られる横に広いビームから効率よくエネルギーを確保するために、横長の形にし (340mm→600mm)、効率向上のために素子間隔を縮めた ($0.908\lambda \rightarrow 0.774\lambda$) (図4)。

給電制御部は、効率よく作動させるため各ブロック 6V (全体 18V) でレクテナからの電力を受けるとして作動させた。これにより、H18 年度の効率 43% から、約 65% へと性能向上が確認できた。(図5)

2.3 総合試験系および試験結果

総合試験系においては、ローバにレクテナと給電制御部を搭載し、ガイドテープに沿って自律的に動く方式とした。走行は、前後往復運動と送電パネルから等距離に動く円弧往復運動とし、バッテリーへの充電状況をモニタすることで電力収支を確認した。(図6、図7)

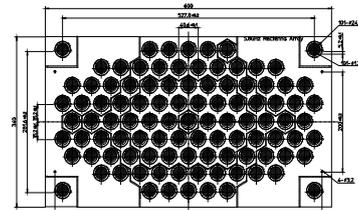


図4 試作レクテナ外形

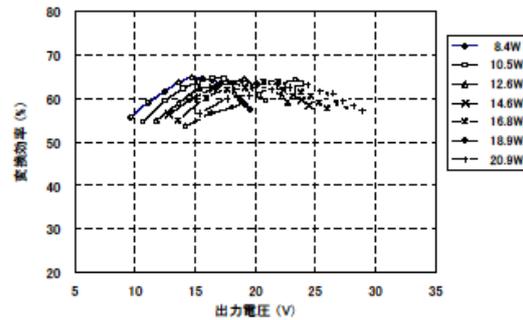
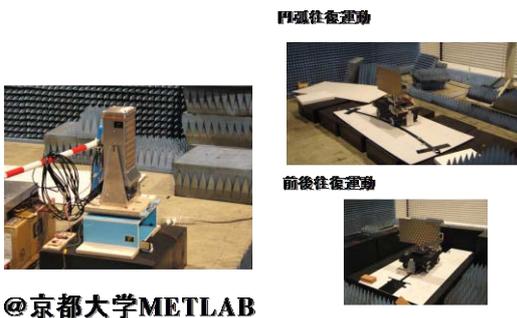


図5 レクテナアレイ受電効率



@京都大学METLAB

図6 試験実施状況

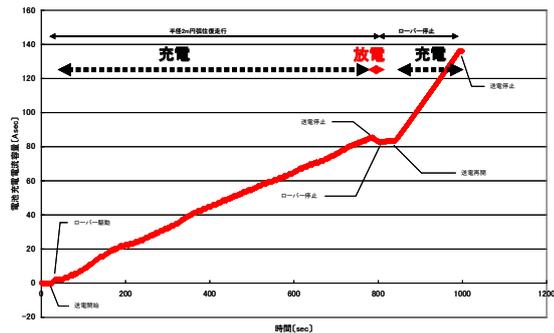


図7 試験結果 (電力収支)

図7において、走行中にマイクロ波によるエネルギー伝送でローバの駆動とバッファ用電池の充電を行い、送電停止で放電、再度マイクロ波送電で充電モードに入ることがわかる。また、ローバにマイクロ波送電中も無線リンクでローバのモニタおよび指令送信が可能なが確認できた。

3. 太陽光発電利用促進技術調査

H16 年度より、本テーマの下に検討を実施中である。内容は、(1)システム検討、(2)発送電技術検討、(3)アセスメント検討 (安全面・環境面、経済・社会面の検討) である。

3.1 システム検討

(1) 地上無線送電システム (H16-17 年度)

マイクロ波増幅器、送電アンテナ、受電アンテナなどに関する技術について調査し、無線送電技術の応用として地上無線送電システムの検討を行った。検討の結果、地上の応用システムとしては、中長距離の大電力のマイクロ波送電はアンテナ規模等から現実的ではなく、短距離の小電力利用が適当であることがわかった。

(2) 宇宙太陽発電システム (H18-19 年度)

H15 年度まで検討を実施した実用型 SSPS システムに対して、さらに実現性に重きを置いたマルチバステザーシステムを前提に検討を行っている。

(図 8) (JAXA/ISAS 佐々木教授提案)

本システムにおいては、特に以下の利点がある。最小単位の 4×4 のアンテナ、太陽電池等関連回路から構成されるサブアレイ (12.5×12.5cm) をベースに最小の電気ユニットのモジュール (50×50cm)、それを組み合わせた構造ユニット (0.5×5m) がシステムのベースであり、この小単位の構成要素の開発を進めていくことで、地上室内試験、地上屋外試験および制約の範囲内での軌道上実証試験等へも移行することが可能である。(図 9)

構造的にも電気的にも同一な構成要素のため、大量生産によるコストダウンが期待できる。

軌道上実証段階において、エネルギー送電に至るまでの間でビーム制御機能等が低い電力密度の電波で確認可能である。(図 10)

現在、構造・ダイナミクス、熱検討、軽量化構造、展開アクチュエータ等の検討を進めている。

多数のテザーユニットを接続して構成するテザー-SSPS

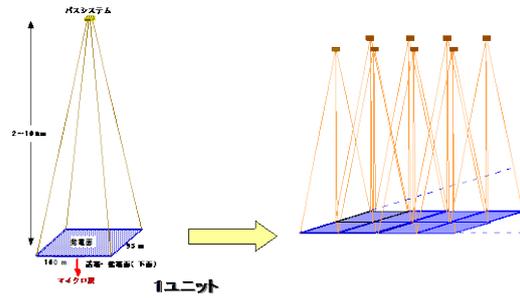


図 8 マルチバステザーシステム

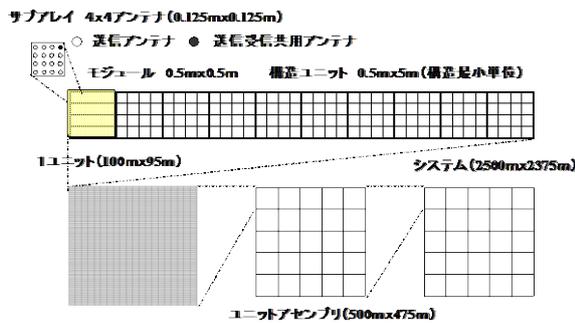
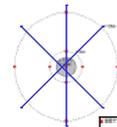


図 9 サブアレイからシステムまで



段階	パネルサイズ	中央電力密度	メインロープ半径	検証方法
ユニット段階	100m x 95m	0.0005mW/cm ²	19 km	レクテナ中央及び r=10km, 3km のアンテナ各 4本で電波強度を計測
ユニットアセンブリ段階	500m x 475m	0.3mW/cm ²	3.8 km	レクテナ電力及び r=3km のアンテナ各 4本で電波強度を計測
建設途中16%	1000m x 950m	5mW/cm ²	1.9 km	レクテナ電力計測
建設途中36%	1500m x 1425m	25.4mW/cm ²	1.3 km	レクテナ電力計測
建設途中64%	2000m x 1900m	80.3mW/cm ²	1 km	レクテナ電力計測
完成時100%	2500m x 2375m	196mW/cm ²	0.8 km	レクテナ電力計測

図 10 システム構築とシステム検証

3.2 発送電技術検討

H16-17 年度は地上での無線送電を前提に、検討を実施してきた。現在は、将来の SSPS における無線送電技術を前提に、SSPS を実現するための障害/克服しなければならない課題の洗い出しを実施している。(図 11) (京都大学 生存圏研究所 篠原准教授まとめ)

現状では、フェーズドアレイシステムは、高いコストを許容することのできる状況 (レーダ等) で利用されているが、SSPS は通常のレーダとは全く規模の異なる大規模システムであり、システムの製造原価低減のみならず、試験調整の自動化等のすべての面でのコストダウンが不可欠である。H18 年度より、課題の洗い出しおよび現状の把握を進めており、今後の開発課題の把握と方向性の確認を行っている。

そのほか、低電力レクテナの試作試験等も実施している (地上低電力エネルギー伝送、SSPS の地上レクテナの電力密度低下が生ずる周辺部からの電力確保)。

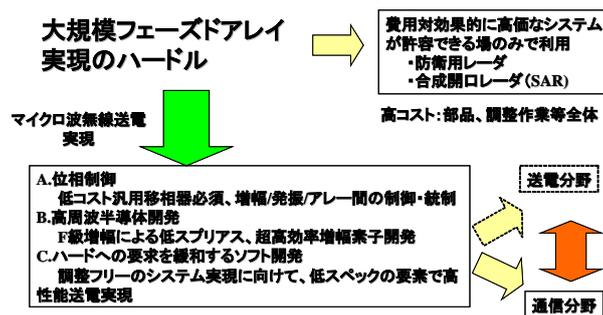


図 11 大規模フェーズドアレイ実現のハードル

H18 年度より、課題の洗い出しおよび現状の把握を進めており、今後の開発課題の把握と方向性の確認を行っている。

3.3 安全性・環境面の検討

地上の無線送電から宇宙太陽発電（SSPS）に至るまで、無線送電規模の各段階に応じた解決すべき諸問題（環境影響、安全性など）がある。こうした課題について、研究動向の最新の状況把握等を行なうなど、無線送電システムのアセスメントに向けた調査を実施している。

環境問題への対応から無線送電の影響について調査の必要な生態系（動植物）および地球環境の要素についての洗い出しと検討を実施した。電子機器や航空機・人工衛星などのマイクロ波に対する電磁環境要求についての調査も行った。レクテナからの再放射を調査した電磁環境試験を、環境面の検討の一環として実施した。

3.4 経済面・社会面の検討

山間部・離島などの離隔地を含む国内の電力供給の現状を調査するとともに無線送電システムの適用可能性とシステムが具備すべき条件などを検討した。今後は将来の応用としての SSPS を対象に、砂漠など地上での大規模太陽光発電利用案との経済性比較を行う。

4. おわりに

SSPS は、地上における太陽エネルギー利用と異なり昼夜や天候に左右されることなく電力の供給が可能であること、電力供給時の CO₂ の排出はゼロであること等の極めて優れた特徴を有しており、将来の実用化が期待されている。

今後、SSPS の実用化のためには、各種の課題の認識と対策を行い、その上で有効性・実現性を地上での検証、更には宇宙での実証を通じて確認しステップアップしていく必要がある。また、環境・安全に関するアセスメントも進め、パブリックアクセプタンスを獲得できるシステム構築が必要である。

5. 謝辞

本論文で紹介した「作業用ロボットへのマイクロ波送電に関するスタディ」は、(財)機械システム振興協会が日本自転車振興会の補助金の交付を受け、その財源を基に(財)無人宇宙実験システム研究開発機構が受託した事業である。

また試験実施に当たっては、京都大学生存圏研究所、株式会社アイ・エイチ・アイ・エアロスペース、合資会社次世代技術の関係者の皆様から多くのご支援を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献：

- [1] 宇宙太陽発電に関する調査研究報告書、USEF、(社)日本機械工業連合会、平成13年3月
- [2] Kobayashi T., et al., Space Solar Power System (SSPS) Study for Realization of the Terrestrial Power Utilities, IAC-02-R.1.04, Oct 2002
- [3] Kobayashi T., et al., Case Study from Economic Aspects of the Space Solar Power System (SSPS) in Japan, IAC-02-R.3.08, Oct 2002
- [4] Ohmura M., and Sasaki S., et al. SSPS Engineering and Experimental Demonstration System, IAF-03-R-3, Oct 2003
- [5] Sasaki S., et al., Tethered Solar Power Satellite, ISSN1349-1113, JAXA RR-03-005E, 2004
- [6] 小林裕太郎, 斉藤孝, 金井宏 : USEF における宇宙太陽発電関連 1B02、宇科連、平成16年11月
- [7] Kobayashi Y., et al., Space Solar Power System for Terrestrial Power Utilities, SPS'04/WPT5, June 2004
- [8] T.Kimura, et al., Development of Highly Efficient Active Integrated Antenna, Proc. Of SPS' 04, 2004
- [9] 水野他、PLL ヘテロダイン方式ハードウェアレトロディレクティブアンテナの開発、2004 宇科連講演集、pp98-102, 平成16年11月
- [10] マイクロ波による情報通信・電力伝送用電源・アンテナ一体型パネルの開発に関するフィージビリティスタディ報告書、USEF、(財)機械システム振興協会、平成16年3月
- [11] 超遠隔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、USEF、(財)機械システム振興協会、平成17年3月
- [12] 植松弘行, 杉浦弘幸, 苗村康次, 山本直幸, 深井和夫, 三原荘一郎, 篠原真毅, 2.45GHz レクテナアレイからの電磁再放射特性, 信学技報 SPS2005-20(200603)
- [13] 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、USEF、(財)機械システム振興協会、平成18年3月
- [14] Mihara S., et al. Overview of Activities for Space Solar Power system in USEF, IAC-05-C3.1.02, Oct 2005
- [15] 長野賢司, 石井忠司, 川崎繁男, 藤原暉雄, 中山師生, 高橋吉郎, 佐々木進, 篠原直毅, 田中孝治, 久田安正, 藤野義之, 三原荘一郎, 安西徳夫, 小林裕太郎, 作業用ロボットへのマイクロ波送電実験報告、信学技報、SPS2006-22
- [16] 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、USEF、(財)機械システム振興協会、平成19年3月
- [17] Mihara S., et al. Activities results of Experiments for Space Solar Power Systems at USEF, IAC-06-C3.3.2, Oct. 2006
- [18] 三原荘一郎, 小林裕太郎, 斉藤孝, 金井宏 : USEF における宇宙太陽発電システム検討活動 3H07、宇科連、平成18年11月
- [19] 太陽光発電利用促進技術調査成果報告書、(財)無人宇宙実験システム研究開発機構、平成19年3月
- [20] 三原荘一郎, 小林裕太郎, 斉藤孝, 金井宏, 最近のSSPSに関するUSEFの取り組み、信学技報、SPS2005-25
- [21] Sasaki S., et al. Construction scenario for tethered Solar Power Satellite, IAC-06-C3.1.06, Oct 2006