

# [招待論文] SSPS に関する USEF の活動状況(2007 年度)

小林裕太郎、三原荘一郎、斉藤孝、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: { y.kobayashi, mihara, saito, kanai }@usef.or.jp

**あらまし** USEF 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、将来の電力代替エネルギーとしての宇宙太陽発電システム (SSPS) に関する調査研究を行ってきた。これまでの調査研究の概要と、要素試作および評価の概要について説明する。

**キーワード** 宇宙太陽発電、太陽発電衛星、SPS、SSPS、新エネルギー、USEF、マイクロ波送電

## Recent activities for SSPS at USEF(FY2007)

Yutaro KOBAYASHI, Shoichiro MIHARA, Takashi SAITO, Hiroshi KANAI

Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer (USEF) 2-12 Kanda-Ogawamachi, Chiyodaku, Tokyo, 101-0052  
Japan

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

**Abstract** USEF has investigated feasibility of Space solar power system (SSPS) as an alternative future energy resource under a support of METI (The Ministry of Economy, Trade and Industry) and the other related agency. The outline of system feasibility study and development and evaluation of key units are explained in this document.

**Keyword** Space solar power system, Solar power satellite system, SPS, SSPS, Alternative energy resources, USEF, microwave energy propagation

### 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。これらの調査研究プロジェクトの概要と活動の状況について紹介する。(図1参照)

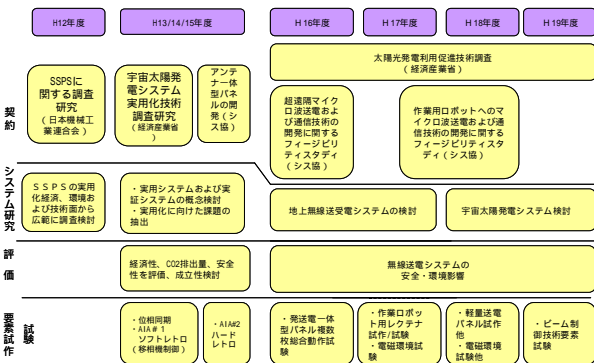


図1 USEF の活動状況

### 2. 概要

#### 2.1. SSPS システム検討

平成 12 年度からは SSPS 全般に関する調査[1]、実用化技術調査の中で経済、環境及び技術面から SSPS の実用化に向けての検討を行うとともに、要素技術につ

いての試作実施、実証実験システム及び実用段階での SSPS の具体案についての検討、経済性評価、CO<sub>2</sub> 排出評価なども実施した。 [2][3][4]

平成 15 年度は、構造システム、SSPS システムの姿勢安定、軌道上建設、軌道上運用等を検討した。

#### 2.2. 要素試作試験

平成 14 年度より、2 種のアクティブ集積アレイの試作および組み合わせ試験等を実施した。平成 17~18 年度には、無線送電の地上応用として、作業用ロボットに対する搭載用レクテナ、軽量化送電パネルの試作試験を行った。

#### 2.3. 太陽光発電利用促進技術調査等

平成 16 年度からは太陽光発電利用促進技術調査として、地上無線送電系の検討を、平成 18 年度からは、宇宙からの無線送電を前提とした検討を実施した。

また電磁環境調査として、レクテナからの電磁波の計測を行った。安全・環境に関しては、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と合同の委員会により進めた。

### 3. SSPS システム検討結果

#### 3.1. 実用型 SSPS モデル

平成 13～15 年度の専門委員会では巨大な平面状の発送電一体型パネルとこの上方の遠く離れたバス部とを複数のテザーによって結合した単純な構造で、アクティブな姿勢制御が不要な現実的な技術的可能性をもった実用型システムについて検討を行った。[5][6] この発送電一体型パネルは上面が太陽電池セル、下面がフェーズドアレイアンテナと太陽電池セルから構成されているもので、構想図を図 2 に示す。[5]

発送電パネルは約 2.6km×2.4km で約 10km の複数のテザーによりバス部から吊下げられており、厚さ 10cm で 100m 四方のサブパネルから構成される。

本ベースラインモデルでは発電量は時間変動し、太陽電池面を太陽指向制御した場合の 64% の電力が平均電力として取得できる。そのため、電力のピークロード対応のシステムと定義づけられる。

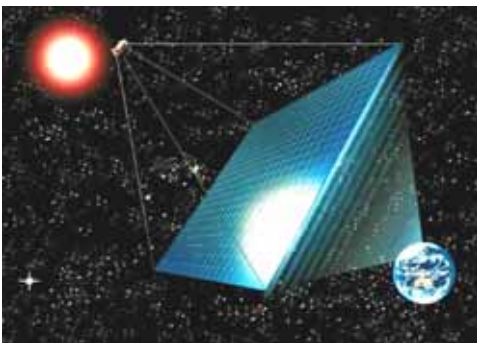


図 2 SSPS 構想図

#### 3.2. 実用型 SSPS 評価

##### 3.2.1. 経済性

経済性モデルを用いて、発電事業として SSPS を構築する場合の採算性を評価した。その結果、システムの建設費に占める輸送コストの割合が大きく発電単価の上昇につながることから、SSPS の実用化を実現するためには輸送コスト（打上げコスト）を現在の 1/100 以下に抑えることが必要であり、宇宙機システムの総質量が建設費に直接効くことから総質量の軽減化が重要であることがわかった。

##### 3.2.2. その他の評価

軌道上建設、ランデブードッキング(RVD)、パネル部の展開・組立、テザー張架など、全般にわたって実用型 SSPS の建設方法を検討した。検討の結果、特にパネルの建設時において、姿勢安定が十分ではなく能動制御やパネルの組み立て、展開方法についての更な

る検討が必要であることが判明した。 [7]

#### 4. 要素試作・試験について

要素試作においては、SSPS の基礎となる送電ビーム制御確認用の送電用フェーズドアレイパネル試作、および無線エネルギー伝送確認用として作業用ロボットへの無線送電関連試作（移動体用小型レクテナおよび軽量化半導体送電パネル）を行った。電磁環境試験としてレクテナからの基本波反射/高調波輻射の計測も行った。

##### 4.1. AIA#1、AIA#2 および組合せ試験

平成 14 年度には、アクティブ集積アレイ（AIA）として、ソフトウェアレトロ方式を前提とした AIA#1 の試作（移相器利用）[8]、平成 15 年度には、受電側からのパイロット信号を受信し、パイロット信号方向へ RF 電力を放射するハードウェア方式のレトロディレクティブ機能を有する AIA#2 の試作を行った。[9][10]

平成 16 年度にはこの二組の AIA の協調動作を確認するための組合せ試験を行った。 [11]（図 3）

AIA #1(FY13-14):移相器によるSWレトロ



AIA #2(FY15):HWレトロ



AIA #1/#2(FY16):組み合わせ



図 3 AIA#1,#2 および組合せ試験

##### 4.2. 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）に対するマイクロ波送電の検討を実施した。[12][13]

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い、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てマイクロ波無線送電走行実験を実施した。（図 4）[14][15]

送電パネルについては、半導体を用いた周波数 5.8GHz、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 5）

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 段ドライバアンプと高出力アンプの





いという問題がある。そこで、分離された送信波源間をアレイアンテナとしたとき、アレイ開口上で所望の位相波面を形成するために、各波源の位相同期を確立することを目的に、テザー-SSPS マルチバスの源振を統制するアルゴリズムの検討と、そのアルゴリズムの妥当性を確認するための要素試験を行った。(図9)

主局(マスター機)の基準発信器(源振)から従局(スレーブ機)に送信してマイクロ波の往復での位相量を測定し、その半分の位相量を移相器にて補正して従局に送信して各局の基準信号位相を同期させるもので、試験は有線で実施し本源振統制アルゴリズムの妥当性が確認された。

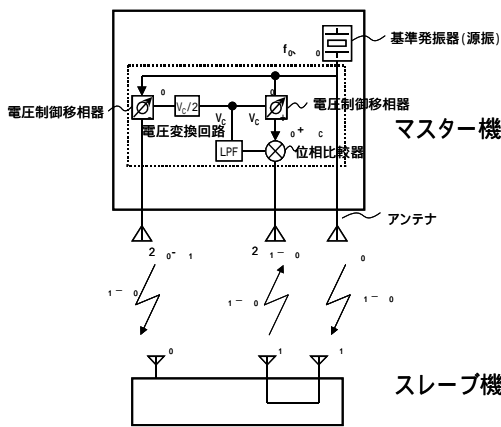


図9 源振統制システムブロック図

## 5. 太陽光発電利用促進技術調査

平成16~19年度に本テーマの下に検討を実施した。内容は、(1)システム検討、(2)送電技術検討(3)アセスメント検討(安全性・環境面、経済面、社会面の検討)である。[14][17][18][19]

### 5.1. システム検討

#### 5.1.1. H16-17 検討 地上への適用

平成16~17年度の検討では、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現実的であることがわかった。[20]

#### 5.1.2. H18-H19 検討 宇宙への適用

平成15年度まで検討を実施した3.1項に記載した実用型SSPSシステムに対して、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システム検討および

基礎研究フェーズで取り組むべきシナリオを検討した。(JAXA/ISAS 佐々木教授提案システム)[21]

多数のテザーユニットを接続して構成するテザー-SSPS

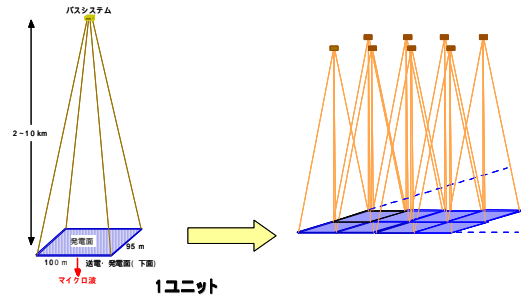


図10 マルチバステザーシステム

テザー-SSPSは平面状の発電一体型パネルをテザーで吊って安定させるタイプのSSPSである。テザー-SSPSは図10に示すようなテザー-SSPSユニットを多数連結して構成される。テザー-SSPSのユニットは発電一体型パネル(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送電システムである。広さ100m×95m、厚さ2cm~10cm、重量約45トンのテザー-SSPSは約2MWのマイクロ波電力を地上に送電する能力を持つ。この発電一体型パネルは発電、送電機能を持つ構造的にも電気的にもまったく同じ送電モジュール(5m×0.5m)3,800枚から構成される。先端のバス部でマイクロ波の基準信号を発生し、各モジュールへ原振の周波数と位相同期を無線LANで提供するため、モジュール間の有線のインターフェイスを持たない。

テザー-SSPSユニットを25×25連結することにより実用型の100万kW級のSSPSを構築する。連結方式として、シングルバス方式と、バス部を独立分離したままでパネル部をラッチして連結するマルチバス方式がある。バス分離型の方式の場合は、システムの規模を自在に拡大することができる。625(25×25)基のテザー-SSPSを正方形に結合して100万kW級のSSPSを構成した場合その大きさは一辺約2.5kmとなる。5.8GHzの周波数を使用する場合、地上に必要なレクテナの大きさは径3.5kmである。

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のアンテナから及び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 11)

- ・ 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に貢献する。
- ・ 軌道上実証試験段階において、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 12)

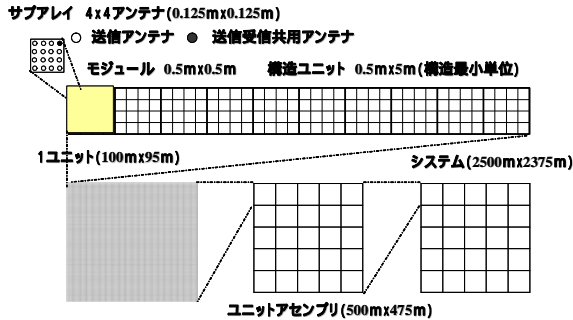
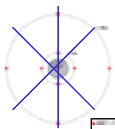


図 11 サブアレイからシステムまで



段階	パネルサイズ	中央電力密度	メインローブ半径	検証方法
ユニット段階	100m x 95m	0.0005mW/cm <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	1.9 km	レクテナ電力計測
建設途中36%	1500m x 1425m	25.4mW/cm <sup>2</sup>	1.3 km	レクテナ電力計測
建設途中64%	2000m x 1900m	80.3mW/cm <sup>2</sup>	1 km	レクテナ電力計測
完成時100%	2500m x 2375m	196mW/cm <sup>2</sup>	0.8 km	レクテナ電力計測

図 12 システム構築とシステム検証

## 5.2. 送電技術検討

平成 16~17 年度は地上での無線送電を前提に、検討を実施した。平成 18~19 年度は将来の 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および今後の開発課題の方向性の検討を行った。(図 13)

(京都大学 生存圏研究所 篠原准教授まとめ) [19]

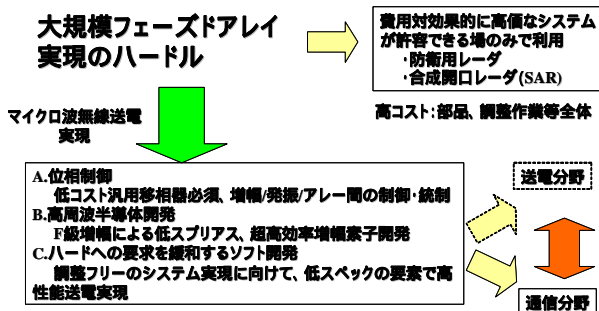


図 13 大規模フェーズドアレイ実現のハードル

現在は、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。

## 5.3. アセスメント

### 5.3.1. 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。こうした諸問題について、最新時点での研究動向の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た。[13][19]

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も実施した。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実施した。4.3 項の電磁環境試験は、環境面の検討の一環として実施した。[13][19]

### 5.3.2. 経済面・社会面の検討[13]

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。

また将来の応用としての SSPS を対象に、要素技術の将来動向も含めた無線送電太陽光発電システムの経済性評価を実施し、砂漠など地上での大規模太陽光発電案と経済性について比較した。宇宙太陽発電は軽量化により、宇宙への輸送コストを削減することが有効であり、一方、地上大規模太陽光発電はベースロードであるためには、夜間の電力供給を行うための蓄電にコスト的課題がある。

## 6. 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 CO<sub>2</sub> 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、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。

## 7. 謝辞

本論文記載の4.2項記載の研究は、(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。

### 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] 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
- [13] Mihara S., et al. Overview of Activities for Space Solar Power system in USEF, IAC-05-C3.1.02, Oct 2005
- [14] 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
- [15] 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
- [16] 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)
- [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20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