

# [招待論文]最近のSSPSに関するUSEFの取り組み

三原 荘一郎、斉藤 孝、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2-1-2

E-mail: {mihara, saito, y.kobayashi, 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源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 the USEF

Shoichiro MIHARA, Takashi SAITO, Yutaro KOBAYASHI, Hiroshi KANAI

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

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

**Abstract** The USEF has investigated feasibility of Space solar power system (SSPS) as a alternative future energy resources 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)

システム実用化技術調査研究」[2] (経済産業省より受託))として経済、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の実施、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を行った。[3][4]

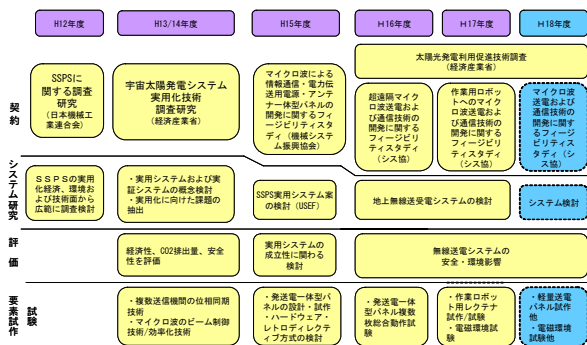


図1 USEFの活動状況

### 2. 概要

#### 2.1. 平成12年度-平成14年度(SSPS全般調査および実用化技術調査)

平成12年度はSSPS全般に関する調査[1]を実施し、平成13、14年度は実用化技術調査(「宇宙太陽発電シ

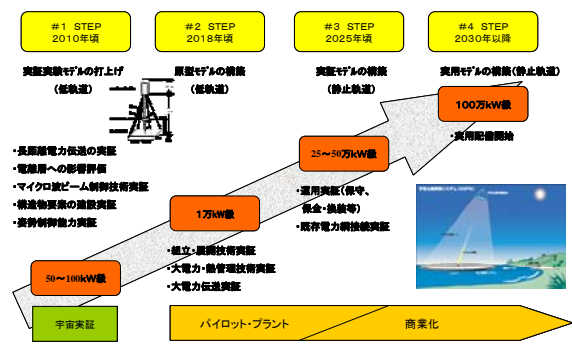


図2 開発ロードマップ

主な成果は、開発ロードマップの作成(図2参照)、実用型SSPSの提案、実証実験衛星の検討[5]、経済性評価、CO2排出評価などである。

「宇宙太陽発電システム(SSPS)実用化技術検討委員会」(茅陽一委員長 [(財)地球環境産業技術研究機構

副理事長／研究所長)) および「宇宙太陽発電システム (SSPS) 専門委員会」(佐々木進委員長[航空宇宙研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究本部教授]) を設置して検討を行った。

## 2.2. 平成 15 年度 (SSPS 構造システム検討等)

平成 15 年度は「SSPS 構造システム検討委員会」(樋口健委員長: JAXA 宇宙科学研究本部助教授) を結成し、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。[6][7][8]

他に、発送電部 (発送電一体型パネル) に関する要素試作を実施した。[9] (マイクロ波委員会 川崎委員長[京都大学客員教授])

## 2.3. 平成 16 年度-18 年度 (太陽光発電利用促進技術調査等)

平成 16 年度-平成 18 年度は「太陽光発電利用促進技術調査」[10][11]を実施中である。調査では、太陽光発電を新エネルギーの有力な候補としてとらえ、それを有効活用するための無線送電技術の検討を行い、発展的応用分野として宇宙太陽光発電を位置づけている。技術検討は発送電委員会 (賀谷委員長[神戸大学教授]) の指導の下に実施し平成 17 年度は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。経済面社会面の検討は利用推進小委員会 (工藤勲委員長[北海道大学名誉教授]) によるレビューを受けている。アセスメントに関しては、宇宙航空研究機構 (JAXA) と合同の委員会 (USEF: アセスメント委員会 (佐々木進委員長 [JAXA 宇宙科学研究本部教授]), JAXA: ワーキンググループ 14) により進めている。

平成 14 年度-15 年度での要素試作品の組み合わせ総合動作試験を平成 16 年度に実施した。[12] (マイクロ波委員会 川崎委員長[京都大学客員教授]) 平成 17 年度には、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ェジビリティスタディを実施し、その中で作業用ロボット用レクテナの試作を行った。(マイクロ波委員会 篠原委員長[京都大学助教授]) [13]

## 3. SSPS システム検討結果

### 3.1. 実用型 SSPS モデル

専門委員会では従来の実用型 SSPS の概念にとらわれず、新しい発想での実用 SSPS の概念を生み出すことを試み、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、現実的な技術的可能性をもつ

た実用型システムについて検討を行った。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

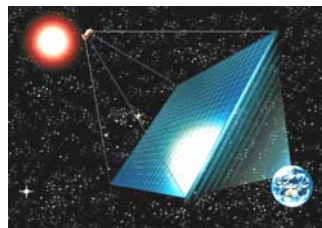


図 3 SSPS 構想図

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、イラストを図 3 に示す。[4][14]

このシステムの特徴は、テザーシステムによる重力傾斜安

定により姿勢が保たれパネルのアンテナ面は常に地球方向を向くため能動的姿勢制御が不要であること、定常的な可動部が無いためロバスト性があること、また発送電一体型パネルの構成要素である規格化された同一のモジュールパネルは低コストの製造、試験、品質保証に寄与することなどが挙げられる。図 4 左に地上での最大電力 1.6GW、平均電力 1GW 級のベースライン型システムを示す。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あると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。

反射鏡により太陽をトラッキングして発送電パネルに反射させて平均発電量を 95% 程度に改善する派生型の構想についても検討を行った。

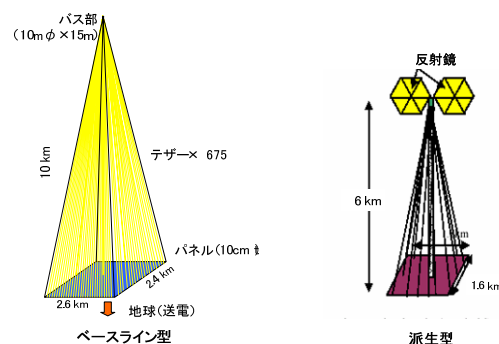


図 4 ベースライン型および派生型

## 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。[15] 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。この観点からシステムの軽量化に寄与する高効率太陽電池、反射鏡（発電パターンの均一化）の採用を前提とした派生型案についても評価を行った。（図 5）

名 称	ベースライン	派生型 1G-1	派生型 1G-2
発電規模(地上)	1GW	1GW	1GW
イメージ図			
特 徴	・太陽電池電力比電力400W/m <sup>2</sup> ・衛星質量32300 ton	・太陽電池比電力600W/m <sup>2</sup> ・衛星質量約23000ton	・太陽電池比電力600W/m <sup>2</sup> ・反射鏡利用 ・衛星質量約15000 ton
初期建設費 (億円)	17,000	13,000	9,800
発電単価 (円/kWh)	13	10	8
発電効率 (円/kWh) @IRR=10%	26	19	15

図 5 実用 SSPS の経済性比較

### 3.2.2. その他の評価

- ・ライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量：化石燃料発電に比べて極めて少なくほぼ原子力発電並みであることが明らかとなった。
- ・制御性評価：本システムでは、重力傾斜安定をベースにして復元力を利用した姿勢制御（ロール軸/ピッチ軸）を行うことが可能であるが、派生案においては太陽輻射圧による姿勢変動を能動的に制御することが必要であることが判明した。[8]

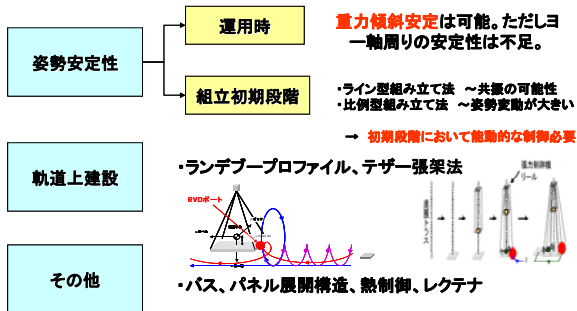


図 6 実用 SSPS 検討内容

- ・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、特にパネルを建設時において、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。[8]

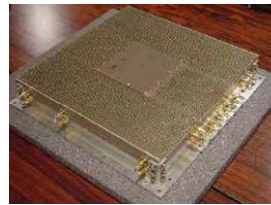
## 4. 要素試作/試験について

要素試作においては、前述の SSPS の基礎となる送電用フェーズドアレイパネル試作と評価、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、移動体用小型レクテナの試作と評価を行った。

### 4.1. AIA#1

平成 14 年度は、分離した系を連携させるための位相同期システムの試作を行った。[4]

また、SSPS 送電パネルの一形態として、半導体アンプを用いた小型送電器を適用する場合を想定し、積層型の高効率アクティブ集積アンテナの試作試験を行った(図 7)。[4][16]



AIA # 1 概観写真

AIA # 1 試験セットアップ図

図7 積層型の高効率アクティブ集積アンテナ

### 4.2. AIA#2

さらに平成 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のアンテナ試作試験を行った(図 8)。[9][17]



図 8 ハードウェアレトロディレクティブ AIA

### 4.3. AIA # 1、# 2 組み合わせ試験

平成 16 年度にはこれらの試作要素を組合せて 2 枚の送電パネルの相互協調動作確認を実施した。[12] 試験実施内容/確認内容は以下の通り。(図 9)

- ・ビーム合成確認：正面方向での合成結果確認。主局、従局間の距離を変えても影響が無いことも確認した。
- ・ビーム制御確認：10 度、20 度方向でのビーム合成を確認した。
- ・パネル面補正機能確認：2 枚のパネルに角度誤差が生じたときの補正機能を確認

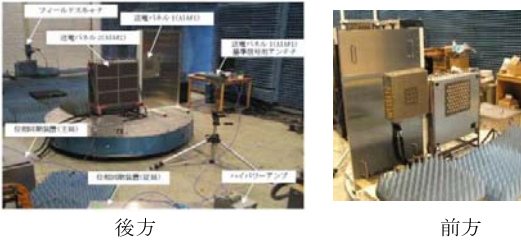


図9 総合試験状況図

#### 4.4. 電磁環境試験

平成 17 年度に電磁環境試験として 2.45GHz 帯と 5.8GHz 帯の電磁放射を対応するレクテナに照射したときの基本波の反射と高調波放射についての試験および評価を行った。

試験は、レクテナのアンテナ単体特性、整流部を含むレクテナ単体特性、レクテナアレイ特性の計測を行った。レクテナ単体の反射特性、高調波放射特性を計測することで、アレイとしての特性が推定可能であることが確認された。[11]

##### 4.4.1. 2.45GHz 帯

京大大学生存圏研究所殿が開発／所有の 2.45GHz レクテナアレイを利用した計測を実施した。[18]

アンテナ素子は八木アンテナで、素子間隔 0.65 波長で 120 素子のアレイである。

アレイ試験の場合に、正面方向からの照射に対する反射輻射が送信アンテナでブロッキングされるため、下方からの放射を行うなど工夫を行った。

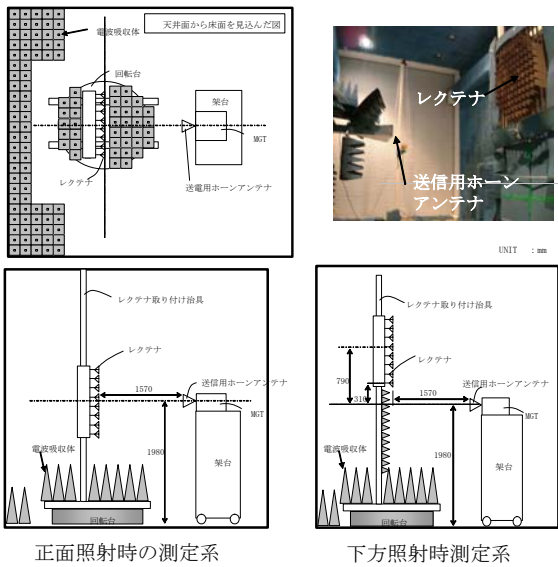


図 10 2.45GHz 帯試験形態

##### 4.4.2. 5.8GHz 帯

(独) 情報通信研究機構 (NICT) との共同研究で、

試験を実施した。アンテナ素子が円形マイクロストリップアンテナで、アレイとして 0.7 波長間隔で 5 素子のリニアアレイでの試験を実施した。

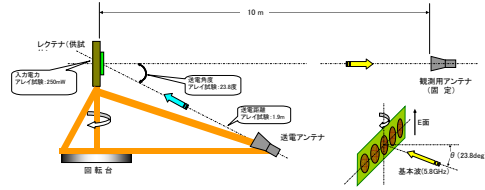
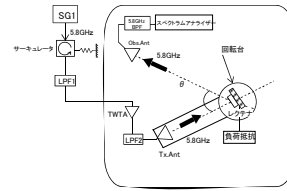


図 11 5.8GHz 帯試験形態

#### 4.5. 作業用ロボットへのマイクロ波送電に関するステディ

無線エネルギー伝送の応用分野として、移動体に対するマイクロ波送電の検討を実施した。[13]

##### 4.5.1. 小型無人機に対する送電

MAV,UAV という小型無人航空機の災害観測等への応用が期待されており、研究がなされている。[19][20] 長時間運用やシステムの活用のためには、特にエネルギーの伝送が重要なテーマである。

現状は、東大でマイクロ波伝送[21]、近畿大学のレーザー伝送[22]が検討されている。

平成 17 年度の検討では、小型無人機の動向から必要無線送電の電力密度の検討を実施した。翼面積、空気抵抗、小型無人機の質量等の関係から、必要電力と電力密度等の検討を実施した。検討結果の一部を図 12 に示す。

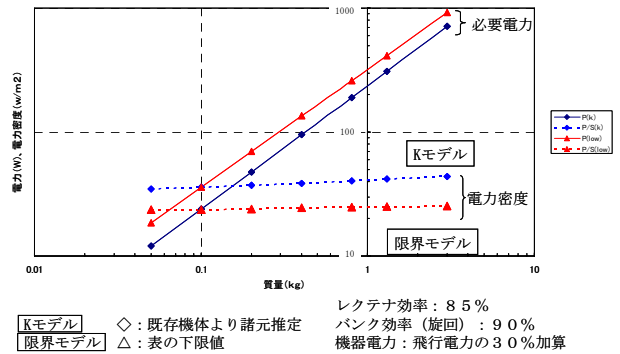


図 12 小型無人機に対するエネルギー伝送



#### 4.5.2. 地上作業用ロボットに対する無線電力検討

地上作業用ロボットとして、ローバに対する送電の検討を行った。この検討においては、実際にロボットに搭載するレクテナおよび、将来の宇宙での展開を念頭おいた軽量化を考慮した送電パネルを検討した。ただし、検討に当たっては電波暗室での試験を前提とした、運用に対応するシステムとした。

##### (1) 送電パネル検討

5.8GHz帯の2次元アクティブアレイとして検討を実施した。(送電出力200W、64素子、256mm角)

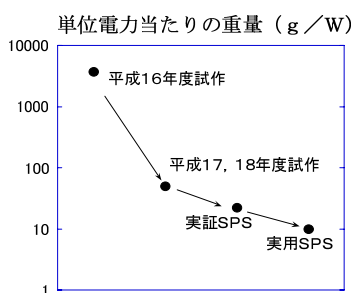


図13 開発目標

開発に当たっては、軽量化を目指して、1素子あたり出力4W、単位電力あたりの質量50gを目標にした。平成17年度は、ブレッドボードモデルとハイブリッドICモデルによる

基礎設計を行った。平成18年度にはMMIC化した小型軽量パネルを試作する予定である。

##### (2) レクテナパネル検討

レクテナの検討に当たっては、効率的な受電を目指した配列、レクテナ素子の接続方法、負荷変動への対応を考慮した。検討の結果レクテナ素子は3角配置とし、接続は3ブロックに分けて、ブロック内並列接続、3ブロックを直列接続した。(レクテナ素子：

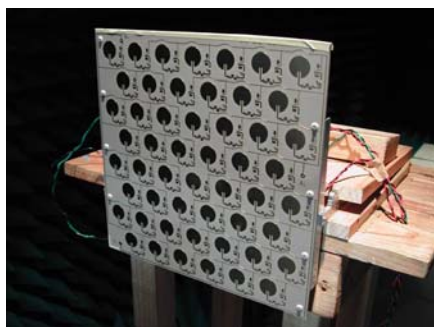


図14 レクテナアレイ

空洞後置マイクロストリップアンテナ、アレイ52素子、340mm角、重量1kg以下達成)レクテナの効率を最大限生かすためには、負荷給電制御方法として定電圧制御方式を利用することが必要である。今回の試作では、素子の効率は70%以上達成したが、アレイとしては43%程度であった。

##### (3) 今後の課題

18年度の課題としては以下の通り。

- ア. 送電系：高誘電率基板への回路移植
- イ. 送電系：高排熱実現

- ウ. 受電系：円偏波対応、レクテナアレイ効率向上
- エ. 負荷変動に対する安定電力供給実現
- オ. 作業用ロボットに対する送電実験 (TBD)

### 5. 太陽光発電利用促進技術調査

平成16年度-18年度においては、本テーマの下に検討を実施中である。内容は、(1)技術面の検討、(2)安全面・環境面の検討、(3)経済面の検討、(4)社会面の検討である。[10][11]

#### 5.1. 技術面の検討

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、無線送受電技術の応用として地上無線送受電システムの検討を行った。地上系の無線送電システムとしては、5.8GHz、距離1km、受電電力10kwを前提にシステム検討を行った。図15に検討したシステム案を示す。平成16年度はシステム検討、平成17年度は特にビーム制御の成立性を検討した。

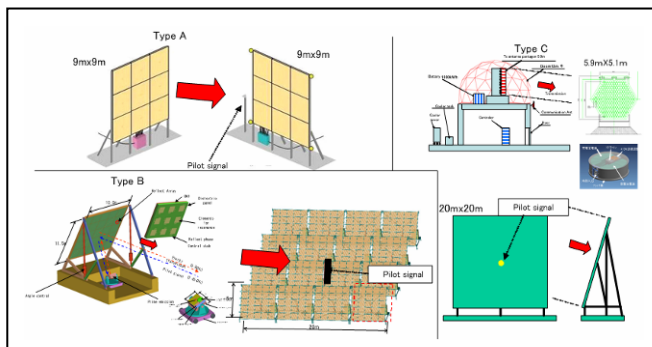


図15 地上無線送受電システム案

平成18年度は、地上無線送受電システムに限定しないシステム検討を実施する。

#### 5.2. 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、実現のためには技術的問題のほかにも、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これまでもある程度検討されてきてはいるが、最新時点での研究動向の把握等を行なうなど、無線送受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。4.4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。

### 5.3. 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受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。また要素技術の将来動向も含めた地上無線送受電システムのコスト概算を行った。

今後は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受電太陽光発電システムの経済性評価を実施する。このとき、砂漠など地上における大規模太陽光発電利用案との対比において、SSPS の経済性・事業性について検討する。

### 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。

#### 参考文献

- [1]平成12年度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]宇宙太陽光発電システム実用化技術調査研究平成13年度中間報告、USEF、平成14年3月
- [3] Kobayashi T., et al., Space Solar Power System (SSPS) Study for Realization of the Terrestrial Power Utilities, IAC-02-R.1.04, Oct 2002
- [4]宇宙太陽光発電システム実用化技術調査研究報告書、USEF、平成15年3月
- [5] Ohmura M., and Sasaki S., et al. SSPS Engineering and Experimental Demonstration System, IAF-03-R-3, Oct 2003
- [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]平成15年度宇宙太陽発電システム(SSPS)構造システム検討委員会 SSPS 実用システム案の検討報告書、USEF、平成16年3月
- [9] 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

- [10] 平成16年度太陽光発電利用推進技術調査成果報告書、USEF、平成17年3月
- [11] 平成17年度太陽光発電利用推進技術調査成果報告書、USEF、平成18年3月
- [12] 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
- [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] Sasaki S., et al., Tethered Solar Power Satellite, ISSN1349-1113, JAXA RR-03-005E, 2004
- [15] 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
- [16] T.Kimura, et al., Development of Highly Efficient Active Integrated Antenna, Proc. Of SPS'04,2004
- [17] 水野他、PLLヘテロダイン方式ハードウェアレッ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
- [18] 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)
- [19] 赤坂剛史、田辺安忠、戸塚千晴、“飛行ロボット HK-MAV シリーズの製品開発”、川田技法、Vol.25 2006、P36-P41
- [20] 辰己薫、廣川類、實松洋平、鈴木真二、土屋武司、久保大輔、“小型自律飛行ロボットシステムの開発と飛行試験”、日本航空宇宙学会誌 Vol.54, No.625, 2006年2月、P41-441-5)
- [21] H.Takayanagi, R.Ozawa, K.Katsunaga, H.Ertel, Y.Oda, H.Koizumi, K.Komurasaki, Y.Arakawa, “Microwave Energy Transmission for Micro Aerial Vehicles by Phased Array Antenna”, 2005.Oct. IAC-05-C3.3.07
- [22] 武田和也、河島信樹他、カイトプレーンへのレーザーエネルギー伝送、第25回宇宙エネルギーシンポジウム、2006年3月10日(口頭発表) <http://www.phys.kindai.ac.jp/users/knobuki/homepage/study.htm>