

[招待論文] USEF の SPS 関連衛星計画

佐々木進[†]、USEF SSPTS 専門委員会

† 宇宙科学研究所 〒229-8510 相模原市由野台 3-1-1

E-mail: sasaki@newslan.isas.ac.jp

あらまし USEF (無人宇宙実験システム研究開発機構) の宇宙太陽発電システム (SSPTS) 実用化技術検討委員会の下に組織されている SSPTS 専門委員会では、将来想定される実用型 SPS (Solar Power Satellite; 太陽発電衛星) の検討を行うとともに、SPS の中枢技術の軌道上実証実験の概念検討とそのために必要な試作研究を行っている。実証実験の検討は 2001 年 7 月に始まり現在まだ継続中であるが、本稿では最近の検討状況について報告する。最終的な検討結果は 2003 年 3 月までにまとめることにしている。

キーワード USEF, 宇宙太陽発電, 実用型 SPS, 実証実験

SPS Study at USEF

Susumu Sasaki[†] and USEF SSPTS Technical Study Group

The Institute of Space and Astronautical Science

E-mail: sasaki@newslan.isas.ac.jp

Abstract A technical study group is organized under the USEF (Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer) committee on the SPS technologies for practical use. The study group has developed a concept of the commercial SPS in the future and investigated space experiments in the near future to verify the essential technologies for SPS. The study group is also leading development of the hardware for laboratory experiments. This paper reports the results of the study conducted since July 2001. Final results of the study and associated laboratory experiments will be reported in March 2003.

Keyword USEF, Solar Power Satellite, Commercial SPS, Demonstration Experiment

1. 実用型 SPS の概念

1968 年に Peter Glaser により SPS の最初のアイデアが提案されて以来これまで数十もの種類の SPS が提案されている。USEF 専門委員会ではこれまでの概念にとらわれず以下を要求事項として平均出力 1GW 級の新しい SPS の創造を試みた。

- (1) 発電素子、送電素子など多数使う要素部品はハイテク民生品、低コスト大量生産品を活用。
- (2) 構造・機構はローテク、ロバスト。即ち能動的な姿勢制御と可動部を持たない。
- (3) 送電はモジュール化してエネルギーの集中を回避。
- (4) 情報は LAN で集中管理。
- (5) モジュールは完全規格化。

これらの要求事項を満たす実用型 SPS として以下のようなイメージの SPS を考えた。送電は図 1 に示すような薄型の平板モジュールとし、モジュールを

機械的に接続して、無線送電に必要な大面積アンテナ平面を構成する。モジュール間には有線の電気信号のインターフェイスはもたない。これにより、モジュールの完全規格化とモジュール単位での着脱が容易に可能となり、電力システムとしてロバスト性が確保される (電力集中なし、不具合伝搬なし)。また、製造、試験、インテグレーション、メンテナンスが容易となる。モジュールを多数接続した大型送電パネルは図 2 に

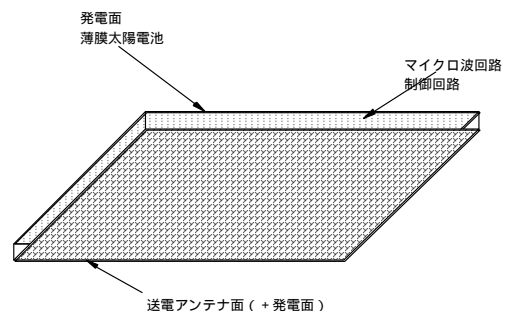


図 1 送電一体型パネル

示すような10km級のテザーでバス部と接続して重力安定を図る。テザーは吊り橋のように多数用いてマイクロ波送電に必要な平面度を維持するとともにデブリ衝突に対し冗長をなすものとする(数百mおき、数十〜百本程度)。各モジュールの電氣的な制御は全モジュールを見おろすテザー先端のバス部の制御中枢から無線LANで行われる。最大送電出力は1.75GW、平均送電出力は1.1GWである。このモデルは太陽指向するシステムと比較すると同じ平均電力を発生するためには約60%増の発送電面を必要とし、発電電力が時間的に変動するという問題があるが、能動的な姿勢制御が不要、可動部が不要、熱的な成立性が高い、受電アンテナを小さくすることが可能(但しマイクロ波のエネルギー密度の上限については考慮が必要)といった長所を持つ。今後バッテリーの長寿命化に技術革新があれば蓄電機能を付加することにより上記の問題点も回避できる可能性がある。ただしこのモデルはシステムダイナミクスの点からの成立性は未だ充分評価されていないので今年度引き続いて検討を行っている。

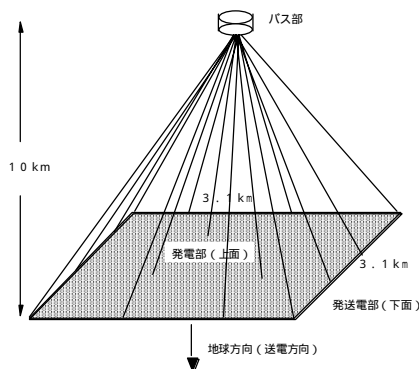


図2 多数のテザーを用いた実用型SPSの概念

2. 実証実験の概念

2.1 実験の目的

実用型SPSの実現に向けて現段階で実証すべき最も重要な技術課題は、軌道上から地上へのマイクロ波電力伝送である。具体的には以下の4項目について基礎技術データを取得しSPS技術としての実証と評価を行う。

- (1) マイクロ波ビームの制御能力実証(軌道上のアンテナダイナミクスの条件の下でのパイロット信号への追従能力)
- (2) 電力システムとしての効率評価
- (3) 不要波の抑圧レベル評価(既存の通信インフラに対する電磁適合性)
- (4) SPSとしての運用性評価(運用基準の確立)
上記(1)〜(3)については図3に示すような

マイクロ波と電離層との相互作用が関与するが、その影響評価は軌道上から地上へのマイクロ波送電実験によってのみ可能である。

2.2 実証実験の要求事項

ミッションは2年以内程度で目的を達成する。送電電力規模は、マイクロ波送電能力で100kW以上できれば数百kWの規模を目標とする。将来のSPSに直接つながらないような実証実験システム固有の技術は、実証実験のミッション達成上の合理的な理由がない限り採用しないことを原則とする。衛星システムはミッション部(送電実験機器部)とバス部(衛星基幹部)に区分する。バス部には新規技術を持ち込まないがミッション部には以下の技術を適用する。

- ・ 送電一体型のユニット式のパネル(各ユニットは有線の電氣的インターフェイスは持たない方式)
- ・ パネルは折り畳んで打ち上げ、軌道上で展開・ラッチする方式
- ・ 姿勢安定はテザー、トラスによる重力安定を目標
- ・ 太陽電池は大量生産が可能な薄膜タイプの民生品
- ・ 送電回路素子は大量生産が可能な民生品
- ・ 送電の周波数は5.8GHz帯
- ・ 送電部は電子管と半導体のハイブリッド方式
- ・ パネル間の原振の周波数と位相は無線LANで同期
- ・ ビームの方向制御は地上からのパイロット信号によるリトロディレクティブ方式

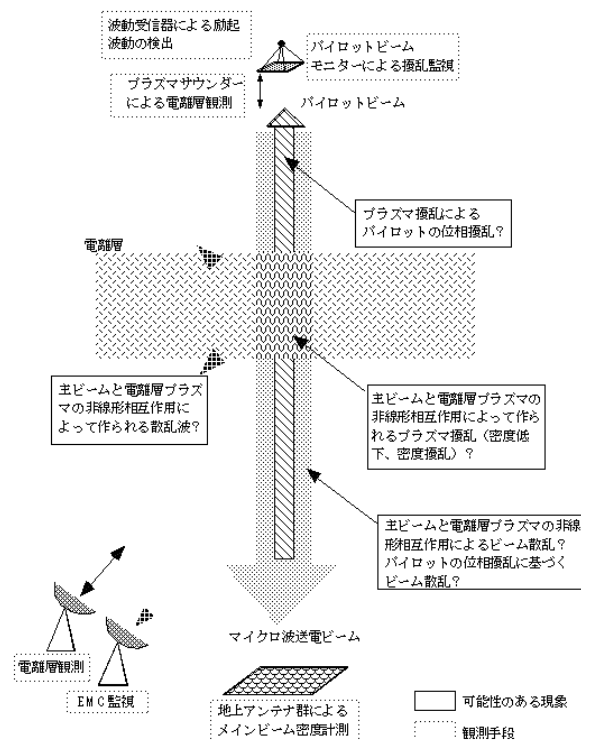


図3 軌道上からのマイクロ波送電実験におけるマイクロ波と電離層との相互作用のプロセス

表 1 昨年度検討した 3 種類の実証実験モデル

実証実験モデル	アンテナ面積	展開方式	姿勢制御方式
100kW級送電実験	100m ²	パネル展開	能動制御
200kW級送電実験	200m ²	屏風展開	トラスによる重力安定
400kW級送電実験	400m ²	屏風展開	テザーによる重力安定

軌道は LEO (高度 350 km - 600 km 程度) を前提とする。実験場所は日本に限らないが、日本を含む。打ち上げ条件は H2A 1 機で実現可能な実証実験を検討のベースラインとする。ただし他のより大型の商業ロケットを用いた場合の実験システムと その場合に可能となるミッションについても検討する。設計基準は USEF の先行プロジェクトである SERVIS で確立される民生品の宇宙転用技術をできるだけ適用する。

2.3 実証実験のモデルコンセプト

昨年度の検討では表 1 及び図 4 に示すような 3 種類の実証実験のモデルの概念検討を行った。この検討では現状で適用可能な技術をできるだけ幅広く適用して、実証実験の実現可能性を様々な立場から評価できるモデルを考えた。各モデルの設定は、以下の考え方で行っている。送電電力レベルは少なくとも 100 kW できれば数百 kW を考えることとし、最小電力のモデルとして 100 kW モデル、最大電力のモデルとして 400 kW モデル、その中間として 200 kW モデルを考えることとした。送電モジュールの放射電力レベルは集光を考慮しないので、将来とも定常では最大 300 W/m² 程度であるが、間欠運転を考慮してモデル検討では 1000 W/m² をベースとした。従って送電アンテナの面積は、100 kW, 200 kW, 400 kW の各電力レベルに応じて 100 m², 200 m², 400 m² となる。送電回路素子としては、マグネトロンと半導体ベースの 2 種類が候補として考

えられるがマグネトロンベースのものは送電モジュールの厚さが 15 cm 程度、半導体ベースのものは 5 cm 程度と考えられるため、ロケットのノーズフェアリングの搭載容量を考慮して、100 kW 100 m² モデルはマグネトロンと集積アレイアンテナの組合せオプション、200 kW 200 m² モデルはマグネトロンを種信号として使用したアクティブ集積アレイアンテナオプション、400 kW 400 m² モデルは半導体のオプションを適用した。但し 400 kW モデルの場合は H2A の搭載能力をこえる可能性が高い。展開及び姿勢制御方式は比較的小型なものに適用可能なパネル展開、能動姿勢制御方式を 100 kW 100 m² モデルに、大型のものに適用できる屏風展開、重力安定方式を 200 kW 200 m² モデルと 400 kW 400 m² モデルに適用した。また、200 kW 200 m² モデルにはトラス方式、400 kW 400 m² モデルにはテザー方式を適用した。ただし上記の電力レベルの設定、アンテナ面積の設定、技術オプションの組合せはあくまでも検討例であり、電力レベルと技術オプションが直接対応している訳ではない。

今年度は高度 370 km に投入する衛星の 18.4 m x 1.6 m のパネル (アンテナの実効サイズは 16.8 m x 1.6 m) からマイクロ波送電実験を行うモデルを現在検討している。衛星システムは、図 5 に示すように H2A ロケット第 2 段 (約 3.1 トン) を姿勢安定用マスとして使用し、トラス及びテザーで送電一体型パネルと接続した重力安定型としている。バス部

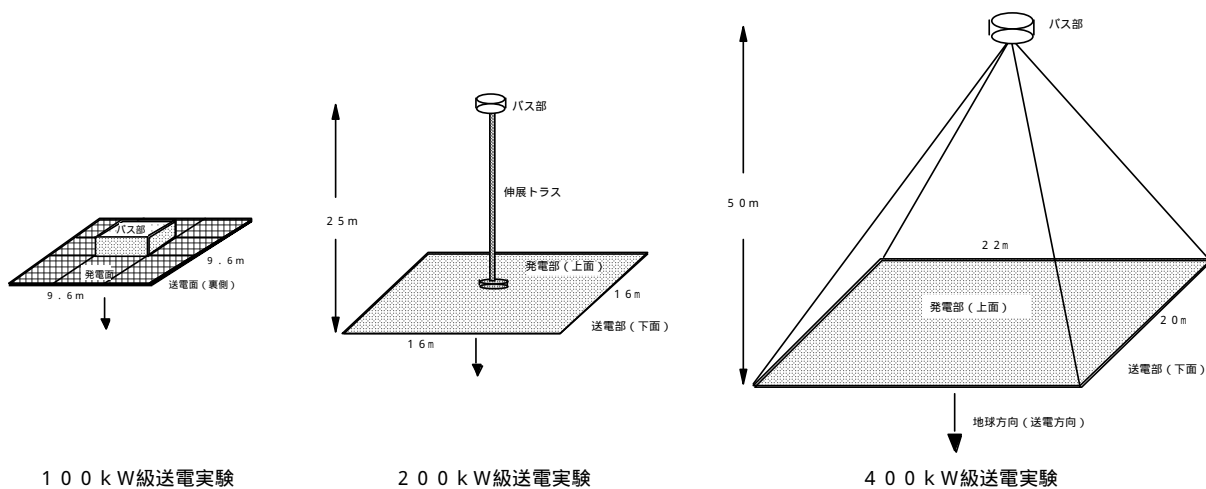


図 4 昨年度検討した 3 種類の実証実験モデルのコンフィギュレーション

はトラス上の重心点に取り付ける。昨年度の検討をベースに、姿勢安定用のマス以外の総重量は8500kgとし、発送電ミッション6800kg、展開ミッション800kg、バス900kgを目安に検討中である。ただし重量は、今年度のマイクロ波送電部の試作とトラス及びテザーの技術的検討の進行に伴い見直すこととしている。また発送電部の電力比重量は昨年度の検討から、当面は15g/W～45g/Wの値を用いることとし、試作や調査検討の結果を基に最終的に実現可能な数値を採用することとしている。

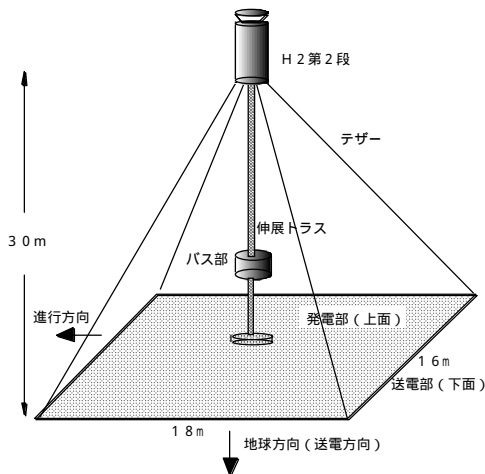


図5 現在検討中のトラス・テザーハイブリッド型実証実験モデル

2.4 試作研究

本年度はマイクロ波送電に関して2項目の試作研究を行っている。実用型SPSで必要とされる数百m～1km級のマイクロ波送電アンテナは、図6に示すように軌道上では部分的には剛体としても全体としては柔軟構造物である。剛体として取り扱うことのできる単位を同一の電気・構造機能を持った送電ユニットとすれば、ユニットを単純に接続することにより(大型であることを意識することなく)任意の大型アンテナを構成することができる。この場合、アンテナ全体として地上の受電所に正確にマイクロ波のビームを指向

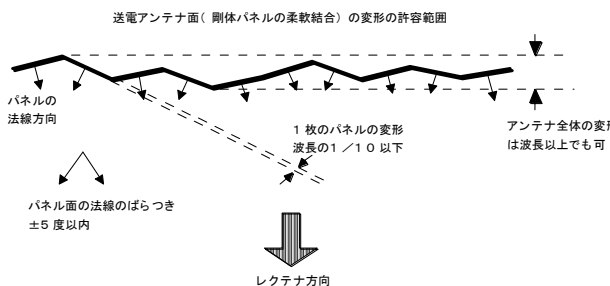


図6 軌道上での大型アンテナ面のダイナミクス

させるためには送電ユニット間で原振として使用するマイクロ波の周波数と位相を同期させる必要がある。このため異なる送電ユニット間の原振の周波数と位相を無線で同期させる技術について試作を行っている。さらに、波源、受信部、位相制御部、増幅部、送電アンテナを組み合わせたシステムとしてのマイクロ波送信器の高効率化、小型化を図るための試作研究も行っている。位相器については最先端技術であるMEMS(Micro Electro Mechanism System)、アンプについては最新の5.8Ghz帯高効率HBTを検討して、現在の技術で到達可能な低損失高効率のハイパワー送電システムの最大性能を試作により明らかにすることを目指している。

3.課題と展望

USEFのSSPS専門委員会で検討した新しい実用SPSの概念と近未来に実施すべき実証実験の目標と関連する試作研究について紹介した。実証実験に至るまでには、送電システムの効率向上、アンテナダイナミクスを考慮したビーム制御方式について技術的課題がある。発送電一体型の平板構造のパネル展開については、ヒンジ、アクチュエーター、ラッチの機構に技術的課題があり今後試作を含む研究が必要と思われる。パネルを多数接続した大型平板とトラス・テザーを組み合わせたシステムのダイナミクスについてはシミュレーションによる解析が必要である。各パネルの振動の周波数特性と振幅の情報はマイクロ波のビーム制御のフィードバック性能に反映される。これらの技術課題に見通しを得れば実証実験衛星の本格的な設計のフェーズに入ることができる。

4.終わりに

本稿で紹介した技術的検討結果はUSEF専門委員会メンバーとUSEF事務局メンバーを中心とした共同作業で得られたものである。現在の専門委員会メンバーは、朝倉啓一郎(一橋大)、阿部宣之(産総研)、石村康生(北大)、稲谷芳文(宇宙研)、小川博之(宇宙研)、川崎繁男(東海大)、佐々木進(宇宙研)、篠原真毅(京大)、泉田啓(金沢大)、田中孝治(宇宙研)、中須賀真一(東大)、樋口健(宇宙研)、藤野義之(通信総研)の13名である。

参考文献

- 平成12年度宇宙太陽発電システムに関する調査研究報告書(平成13年3月)
- 「SSPS実用化技術検討委員会」平成13年度中間報告書(案)(平成14年3月)