

Engineering Research for SSPS Demonstration Experiment

Susumu Sasaki** , USEF SSPS Study Group, USEF
 **The Institute of Space and Astronautical Science
 3-1-1 Yoshinodai, Kanagawa 229-8510, JAPAN

Abstract

A study team organized by USEF (Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer) has been making engineering researches for SSPS demonstration experiment using a Japanese launch vehicle, H2-A. The demonstration experiment will be a high-power microwave transmission experiment at 100~400 kW from the low earth orbit to ground. The microwave beam at 5.8 GHz will be transmitted from a planar antenna of 16 x 16 m size consisting of a lot of sandwich panel modules combined with solar cells and microwave transmitters. The attitude of spacecraft is controlled by the gravity-gradient force using a truss-tether hybrid system as shown in Fig.1. The objectives of the demonstration experiment are to verify; 1) microwave beaming for power transmission from the orbit to ground, 2) no serious interference with other microwave utilities on ground 3) attitude and shape control of the planar panel for microwave phase control, and 4) deployment of the 16 x 17.6 m panel with 0.1 m thickness. The major engineering subjects for the demonstration experiment are; 1) frequency and phase synchronization for oscillators in the different sandwich panels, 2) high-efficiency and low-loss microwave transmitting system, 3) thermal design for the high-power microwave transmission, 4) system dynamics of spacecraft, and 5) rectenna for low power-density microwave. The current status for the engineering study is summarized in Fig.2. Further investigation is required especially for the retro-directive beam control, deployment of the two-dimensional panel, and the rectenna technology for the low-power density microwave.

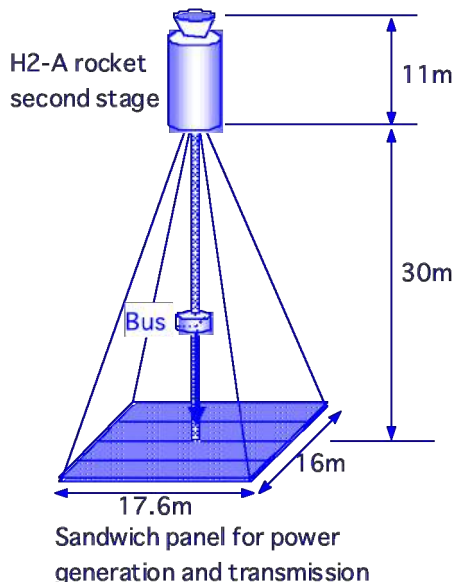


Fig.1 Concept of system configuration.

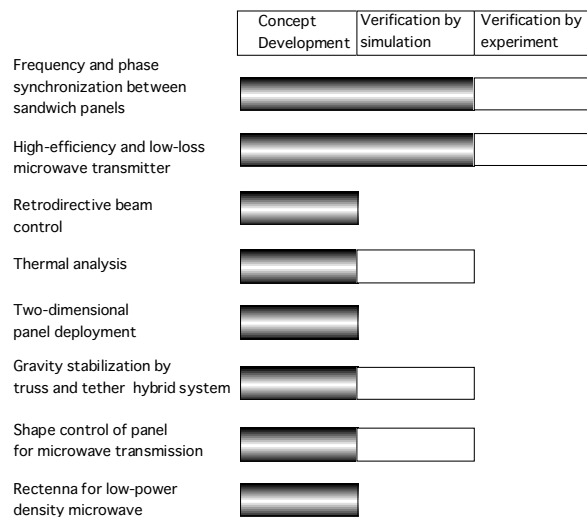


Fig.2 Current status of engineering study.

SSPS実証実験システムの技術的な研究課題

佐々木進*、USEF/SSPS専門委員会、USEF
*宇宙科学研究所

USEFのSSPS専門委員会では大学や研究機関の研究者が中心になって近い将来の実現を目指したSSPS実証実験システムの設計検討を行っている。このシステムは多数の発電電一体型のパネル(サンドイッチパネル)から構成される大型パネルをトラスとテザーで重力安定させる構想である。本報告ではこれまでの設計検討で明らかになった技術的な課題の研究現状と今後行うべき研究について述べる。主要な課題は、1.異なるパネル間での無線による原振の周波数と位相同期の方法、2.高効率低損失マイクロ波回路の実現、3.大電力マイクロ波伝送に対する熱解析、4.テザーとトラスを用いて重力安定させた平板システムの軌道上ダイナミクス、5.低電力密度マイクロ波用の受電アンテナの方式、である。

1. SSPS実証実験の位置づけと目標

SSPSの実用化のためには関連する民生・宇宙技術の展開が必要であるがそれらを組み合わせるだけではSSPSは実現できない。SSPS特有の技術についてはSSPSの研究者がSSPSそのものをターゲットとした研究開発を進める必要がある。図1にこれら研究開発の大きな流れを示す。表1にSSPSを実現するために必要な各分野の研究の内容と手法を示す。軌道上でなければ実証できない項目あるいは地上でも実証できるが軌道上の方がより低コストで効率よく実証できる課題は軌道上で実証することが必要である。表1で示した軌道上で実証すべき課題の内、回転機構、大型ミラーは実用プラントの形態に強く依存するため、実用プラントの形態がより明確になった段階で検討すべき課題と位置づけられる。最初の実証実験では、実用SSPSに共通的な中枢技術で、軌道上でなければ実証出来ない課題として、衛星軌道上から地上目標点へのマイクロ波電力伝送技術について実証を行うことを目指すべきである。具体的には最初の軌道上実証実験では以下の4項目について基礎技術データを取得しSSPS技術としての実証と評価を行う。

- (1) マイクロ波ビーム制御能力実証 (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) 軌道上発電パネルの展開方法の実証
- (3) 軌道上発電パネルのダイナミクスの検証 (マイクロ波のビーム制御が可能な構造形態の維持)
- (4) 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の実証)

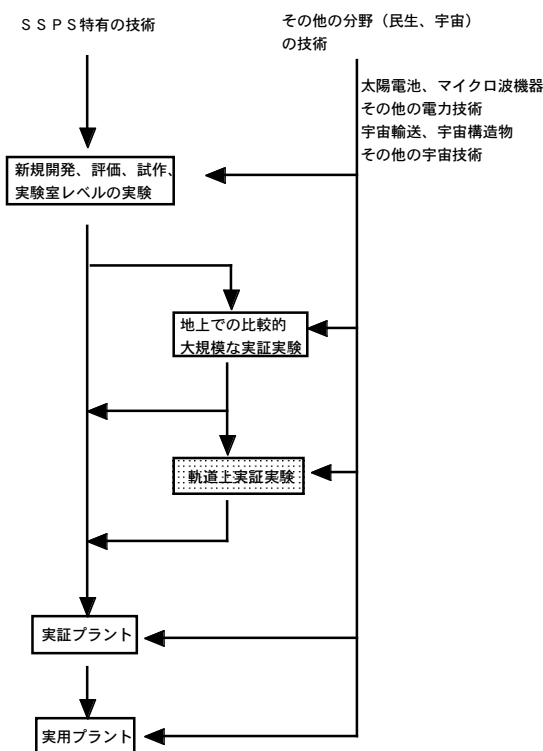


図1 軌道上実証実験の位置づけ

表1 SSPS技術課題に対する技術開発と実証（塗りつぶしは軌道上実証が必須でかつ第一段階での実証が必要と思われる事項）

分野	技術課題	前提となる産業技術・宇宙技術の展開	宇宙太陽発電技術としての開発と実証			
			新規技術開発・評価・実験室実験	地上実証実験	軌道上実証	備考
発電	高効率（対重量、対面積）、低コスト	産業用太陽電池の高効率・低コスト化				
	耐宇宙環境		耐放射線性評価 高電圧放電防止技術	放射線照射実験 高電圧放電実験	耐放射線性実証 宇宙高電圧発電技術実証 （対プラズマ環境）	高電圧技術はバス電力方式、電子管方式に適用
送電	ビーム制御		位相制御技術の開発	数十m～数kmでの送電実証	数百km、軌道条件でのビーム制御実証、電離層通過実証	
	高効率・低コストマイクロ波増幅・制御	携帯電話など通信産業がリードする高効率・低コスト・低損失マイクロ波素子の開発	システムとしての高効率・低損失回路技術の開発	熱真空試験	宇宙環境下での熱的成立性の実証	
宇宙電力	低損失集配電	大規模地上太陽発電所の技術展開	システムとしての高効率・低損失集配電技術の開発			バス電力方式に適用 将来的には超電導技術も視野
	ロータリジョイント電力技術		可動部での電力伝送技術の開発	熱真空試験 耐久試験	宇宙環境下での熱的成立性・耐久性の実証	バス電力方式に適用
	高効率電圧制御器	電力産業がリードする高効率民生電圧制御器	システムとしての高効率電力制御技術の開発	熱真空試験	宇宙環境下での熱的成立性の実証	高電圧技術はバス電力方式、電子管方式に適用
	高効率蓄電	パソコン・携帯電話などの産業がリードする高効率・低コスト・軽量のバッテリーの開発	システムとしての高効率充放電技術の開発			衛星側で蓄電する方式に適用
大型構造物	構造物建設	SSPS以外の大型宇宙構造物技術の展開	自動展開方式開発	模擬展開実験	軌道上での構造物要素の建設実証	
	形態維持・姿勢制御		送電アンテナの形態維持技術、姿勢制御技術開発		軌道上での送電に必要な精度での形態維持・姿勢制御能力実証	
	回転機構		回転機構開発		宇宙環境下での耐久性実証・軌道上での姿勢擾乱データ	回転部を持つ方式に適用
	大型ミラー		薄膜材料開発 薄膜ミラーの展開技術開発		軌道上での発電部への集光能力実証 耐宇宙環境性の実証	ミラー部を持つ方式に適用
熱システム	大容量排熱	パソコンなどの産業機器がリードする局所的な高効率低コスト熱輸送技術	システムとしての熱輸送、排熱技術	システムとしての熱真空試験	システムとしての熱的成立性の実証	
受電	高効率・低コストマイクロ波受電・整流回路	通信産業がリードする高効率低コストの電力取得用のダイオード	システムとしての高効率受電技術の開発	送電部との組み合わせ実証実験 耐候性試験	送電部との組み合わせ実証	
	既存電力網との接続	電力産業がリードする大容量電力接続技術				
	大容量蓄電	電力産業がリードする低コスト大容量蓄電技術				地上側で蓄電する場合に適用
宇宙輸送	低コスト・大量輸送技術	革新的宇宙輸送技術の展開 宇宙輸送産業の展開				産業の展開には顧客が必要だが、SSPSが顧客になりうる
	軌道間輸送技術	大規模低コスト電気推進技術				

実証実験で得られる技術データに基づき、実用SSPSの電力システムとしての総合電力効率の評価、既存の通信インフラに与える影響の評価、エネルギーシステムとしての運用性の実証

行うとともに、次フェーズの地上での研究開発、軌道上実証実験、実証プラントへ至る技術的な課題を明らかにする。

2. 現在検討中の実証実験システム

高度370 kmに投入する衛星の17.6 m x 16 mのパネル（アンテナの実効サイズは16 m x 16 m）からマイクロ波送電実験を行う。H2Aロケット1機で実現できることを前提に、ロケットは次世代の低軌道15トンタイプを想定する。衛星システムは、ロケットの第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する。バス部はトラス上で全系の重心点に取り付ける。姿勢安定用マス部（H2Aロケット第2段と展開機構の合計）3.7トン、バス部（バス部システムと展開機構の合計）1.2トン、トラス部（バス部の上側と下側の合計）200kg、パネル部13トンが重量配分の目安である。送電部の電力比重量は、現段階では30 g/W~90 g/W（熱構造を含む）の値を設定値として用いている（アレイ電力合成出力100~300 KWに対応）。実験は図3に示すように、地上受電局の上空通過の2分前から最大出力の10%での実験を開始し、天頂で約17秒の最大出力での送電実験、その後約2分間で10%出力実験を行うものとする。

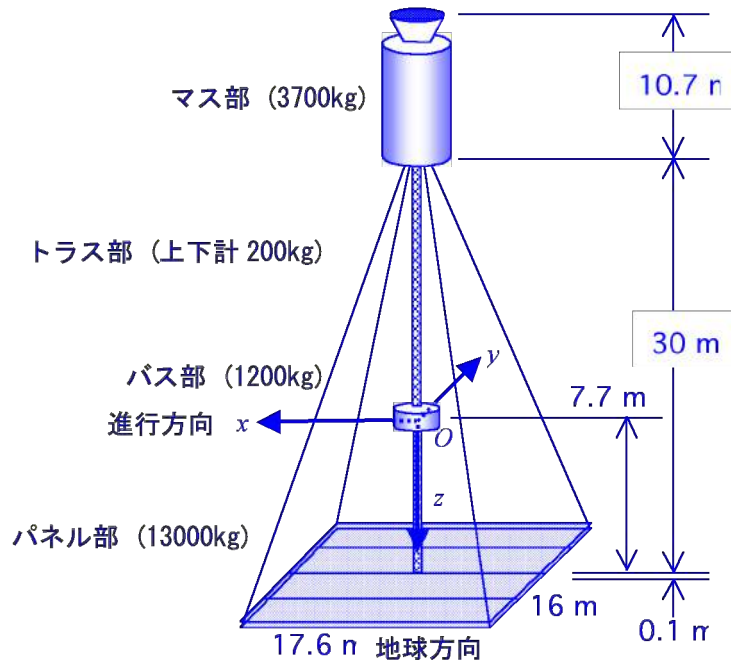


図2 システムコンフィギュレーション

オンボードコンピュータによる制御（直下点への送電）
-2分

レクテナからのパイロット信号による制御（±10度）
-8秒 0 +8秒

オンボードコンピュータによる制御（直下点への送電）
-2分

370 km

地上アンテナ群

900 km 900 km

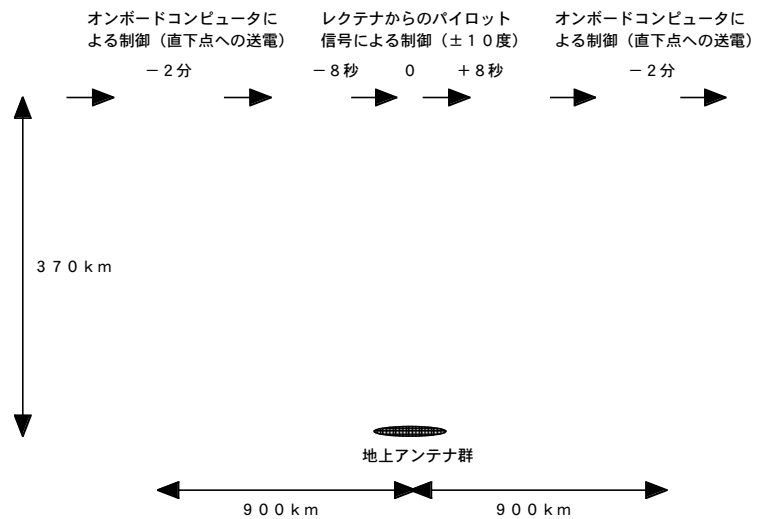


図3 送電実験のシナリオ

3. 実証実験の技術的課題

2で示した概念の実証実験にかかわる主要な技術課題は、(1) レトロディレクティブ制御を行うための各パネルの原振の周波数と位相の同期、(2) 高効率低損失送電システムの実現、

(3) 熱的成立性の検証、(4) 軌道上の衛星システムのダイナミクスがマイクロ波送電に必要な要求を満たすことの検証、(5) 低電力密度マイクロ波用のレクテナの考案、である。以下これらの課題の検討状況について述べる。

(1) 無線LANによるパネル間の原振の周波数と位相の同期

多数のパネルで構成されるマイクロ波送電アンテナは、個々のパネルは剛体としても軌道上では全体として柔軟構造物として振る舞う。レトロディレクティブ方式で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させるためには、送電パネル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。異なる送電パネル間の原振の周波数と位相を無線で同期させる方式(無線によるパネル間のレンジング、周波数・位相情報伝達)について計算機シミュレーションで原理の確認を行い、現在実験室実験のための装置を開発中である。

(2) 高効率低損失送電システムの実現

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、低損失化、小型化を図る必要がある。増幅と位相制御についてはマグネトロンと半導体のハイブリッド方式を考えている。位相器については近未来技術であるMEMS(Micro Electro Mechanism System)、半導体アンプについては最新の5.8GHz帯高効率HBTが候補である。現在入手可能な素子を用いて実験室実験用の装置の製作を行っている。試作試験により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明らかにし、実証実験に適用的な高効率低損失送電システムの性能を明らかにする。

(3) パネルの熱的成立性

マグネトロン、電池、DC/DCコンバーター、アンテナアレイ電源、導波管、アンテナアレイを含む発送電一体型パネルの熱解析を行っている。第一段階の検討では、アンテナアレイは最高60℃、最低-25℃、太陽電池は最高70℃、最低-30℃、内部パーツは最高30℃、最低0℃の結果が得られた。局所的な発熱源であるマグネトロンの温度は熱容量に強く依存し、アルミ換算で数百gの熱容量を持たせる必要があることが解析されている。

(4) システムダイナミクスと熱歪み

全体を剛体と扱った場合の振動(ピッチ角変動)は、離心率が0.1以下であれば、空力、太陽輻射圧を考慮しても3.5度以下である。システムの柔軟性を考慮した場合も、パネルやテザーの剛性を適切に仮定した場合パネルの振動は数Hz以下である。また各部の変位は数mm程度であることがシミュレーションにより示されている。これらの数値はマイクロ波の位相制御を行うための要成範囲内である。また、パネル間の温度差による熱歪みの影響も考慮されている。

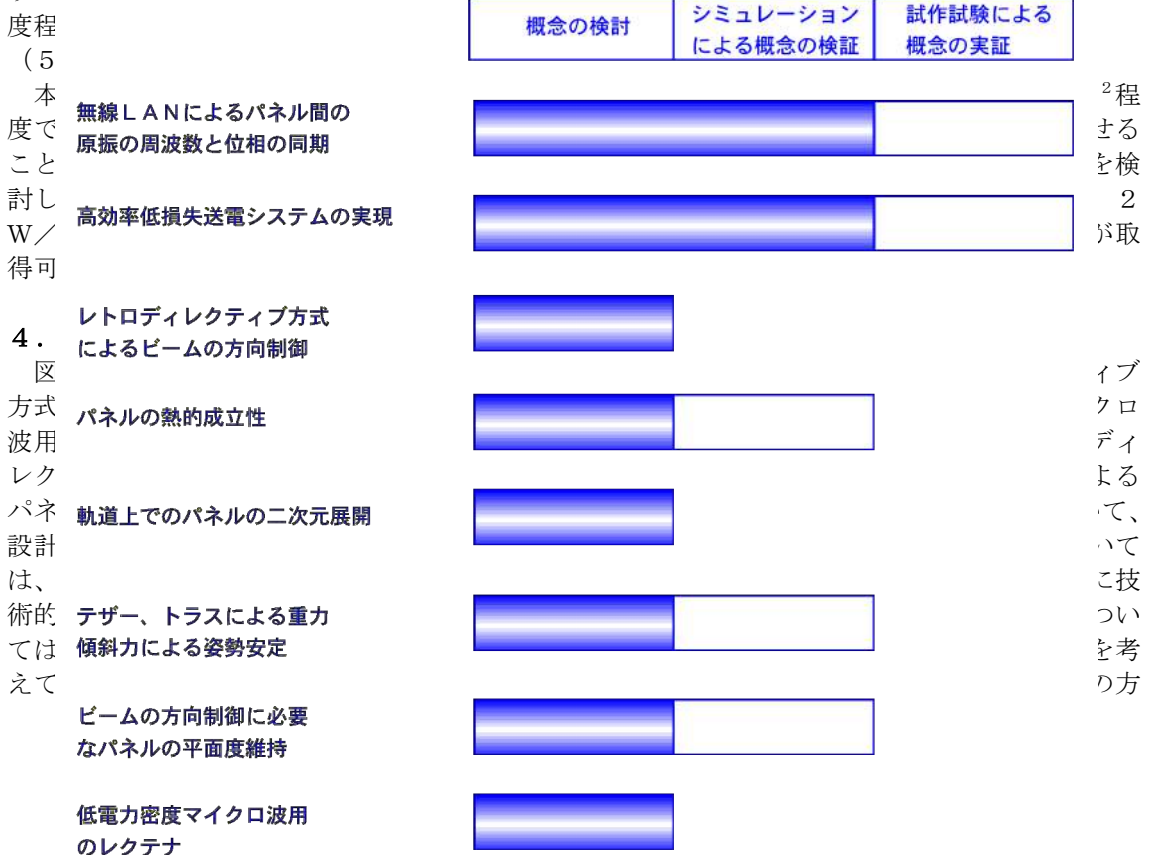


図4 技術的な課題の検討状況

向制御に必要なパネルの平面度維持、についてはシミュレーションと解析により概念の基本的な検証は完了したが、今後さらに詳細な検討と部分試作による実証が必要である。

5. おわりに

本検討は、USEFのSSPS専門委員会及び分科会に参加している以下の研究者と、USEFのメンバーで行われている。
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）、奥泉信克（宇宙研）、川崎繁男（東海大）、小島広久（東京科技大）、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）、戸田義継（産総研）、中須賀真一（東大）、樋口健（宇宙研）、藤井裕矩（東京科技大）、藤野義之（通信総研）（敬称略）