

# Space Experiment of Critical Technologies for Solar Power Satellite Using Small Satellite

Koji Tanaka, and Susumu Sasaki (ISAS/JAXA)

## Abstract

Wireless power transmission (WPT) is inherent technology of Solar Power Satellite (SPS). We propose a demonstration of WPT experiment from low earth orbit to the ground using a small satellite. The purposes of the space experiments are to verify and establish the WPT technologies for SPS, which are the direct detection of rectenna sites and the microwave beam control skill with high angular precision, and to clarify the propagation characteristics of the microwave in the ionosphere. Also, suppression of unnecessary power radiation interfering with other microwave utilities and electromagnetic compatibility with the existing infrastructures should be confirmed.

Mission weight is around 360kg. Microwave transmission system converts the DC power into RF power, and radiates RF power from transmitting antenna. The operating frequency will be selected 5.8 GHz or 2.45 GHz. The antenna is a phased array with a retrodirective pointing system. The antenna receives a pilot signal from the rectenna and the phase information of this signal is used to direct the beam in the desired direction. Size of the antenna is 3 m × 3 m. Transmitting power is around 3 kW. Maximum power densities at antenna and at ground are 300W/m<sup>2</sup> and 0.005μW/cm<sup>2</sup>, respectively.

# 小型衛星を用いた SPS 実証実験計画

田中孝治、佐々木進 (ISAS/JAXA)

## 概要

太陽発電衛星実現のための主要技術である軌道上から地上へのマイクロ波送電技術は、チャレンジングな未踏技術であるが、我々はその中枢となる要素技術を小型衛星を用いた宇宙実験により検証することを検討している。宇宙実験は二つの主目的からなる。一つは、大型展開アンテナの構造維持とビーム制御技術を中心としたマイクロ波ビーム制御能力の実証であり、もう一つは、電離層におけるパイロット信号の位相擾乱と主ビームの非線形現象の評価からなるマイクロ波の電離層通過の実証である。また、副次的目的として、軌道上平板パネルの展開方法の実証や既存の通信インフラに対する電磁適合性の実証となる不要波の抑圧レベル評価も検討している。

## 1. はじめに

太陽発電衛星は、現在社会の最大の課題である地球環境問題、エネルギー問題の解決に大きな可能性を持っている。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は社会的に優先度の高い問題に対しその解決のための本格的な挑戦を始める義務がある。太陽発電衛星の成否を握る最大のキー技術である軌道上から地上へのマイクロ波送電技術は、現段階でもチャレンジングな未踏技術ではあるが、その中枢となる要素技術は小型科学衛星を用いて検証することが可能である。小型衛星で実証された中枢技術は、より本格的な中・大型衛星による実証衛星に引き継がれ、さらに実証プラントに発展していくべきものであり、小型科学衛星での実証はその端緒をきる世界で初めての歴史的な挑戦となる。

JAXA 宇宙科学研究本部 (ISAS/JAXA) では 2006 年度、宇宙理学、宇宙工学委員会のもとで小型衛星ワーキンググループを立ち上げ、今年度から設計に向けての活動が開始された。理学ミッションが 10 件、工学ミッションが 6 件である。我々は、工学ミッションの一つとして、太陽発電衛星技術実証ワーキンググループを提案し、その活動が認められている。上記の研究背景を基に、これまで我が国で研究されてきたマイクロ波送電技術を結集し、軌道上から地上へのマイクロ波送電実験を小型衛星計画として企画提案を行っている。

## 2. SPS 小型衛星実験の目的

小型衛星を用いた宇宙実験の目的は、SPS 実現のためにもっとも重要な技術なのであるマイクロ波による無線エネルギー送電技術の実証である。

工学的課題としては、マイクロ波ビーム制御能力の実証である。軌道上のアンテナが形状変形を伴う条件下で、パイロット信号への追従能力実証実験を行う。レトロディレクティブ制御では地上局の誘導電波を用い、正確に数百～数万 km 離れた地上アンテナに向け

て送電する必要がある。静止衛星の場合であれば 1km 離れて 3cm 内に指向する精度となる。この宇宙実験にはアンテナダイナミクスを考慮する必要があり、構造維持とビーム制御の関係を明らかにする必要がある。

理学的課題としては、大電力マイクロ波の電離層通過における物理現象を明らかにし、パイロット信号の位相擾乱と主ビームの非線形現象の評価を行う。電離層プラズマとマイクロ波との相互作用に関しては、以下の 4 項目の現象が主要な評価の対象となると考えられ、影響が少ないと考えられている現象もあるが、宇宙実験による検証が必要である。一つは屈折効果である。これは電離層中の全電子数により影響が異なるが、パイロット信号を用いたビーム制御では影響が少ないと評価されている。磁力線の影響によるマイクロ波のファラディ回転が考えられる。円偏波を使用すれば、影響はほとんどないと考えられている。電離層プラズマの密度不規則構造により、シンチレーション現象が発生する。比較的激しいシンチレーションの場合は、パイロット信号、送電マイクロ波ビーム共に無視できない可能性がある。電離層プラズマと大電力マイクロ波ビームとの非線形現象についても評価検証が必要である。熱的自己収縮現象、マイクロ波密度勾配自己収縮現象、3 波共鳴現象等が考えられる。いずれも、現在想定されている電力密度では影響は少ないと予想されている。

また、副次的課題として、将来の大型パネルアンテナ建設のための、軌道上平板パネルの展開方法の実証、不要波の抑圧レベル評価や既存の通信インフラに対する電磁適合性の実証も同時に実施を検討している。

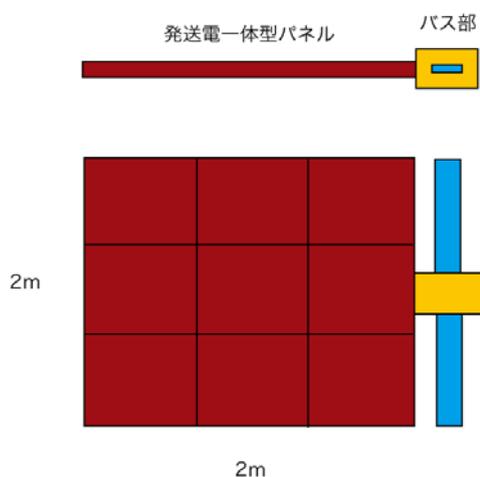
従来、衛星を用いた SPS 実証実験計画は H2-A を 1 機を用いる大型衛星[1]の利用が検討されてきたが、小型衛星は、サイズ、重量とも厳しい制約が加わる。しかし、上記の目的のためには十分に可能と考えている。

### 3. SPS 小型衛星のコンフィギュレーション

図 1(a)、(b)に現在検討している SPS 小型衛星のコンフィギュレーションを示す。いずれもバス部は、小型衛星用として開発される共通バスの利用を考えている。図 1(a)は 3 軸姿勢制御型である。地上受信設備通過の際、姿勢制御を実施し、送電アンテナを地表と正対させる。図 1(b)はテザーSPS[2]の技術実証も含むコンフィギュレーションである。テザーSPS は重力傾斜を利用した受動的姿勢制御を採用し、発電部の太陽指向のための能動制御稼働部を省いた、ロバストな設計思想を採用したより実現性の高いシステムとして検討されている。ミッション部は発送電一体型パネルを用いる。図 2(a)に概略図を示し、図 2(b)に機能ブロック図を示す。発送電パネルの一方の面にはアンテナ素子を配列した送電面、もう一方の面は太陽電池を貼った発電面となる。但し、発電に関しては共通バスとしての太陽電池パネルを用いる選択もある。パネル内部には、バッテリー、電力制御回路、マイクロ波回路、パネル展開駆動装置、バスインターフェース回路等が組み込まれている。図 2(a)は位相制御マグネトロン(PCM)を想定した場合である。その場合、パネル内には PCM と

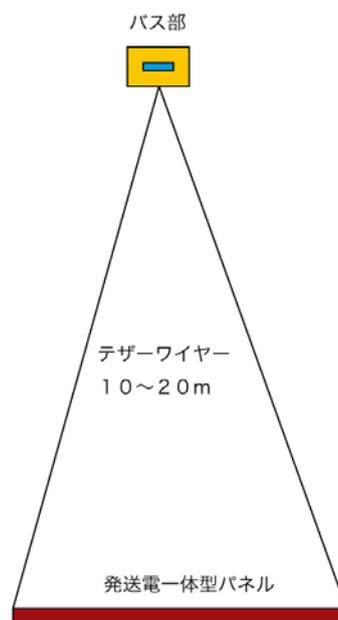
PCM 用高電圧電源が組み込まれる。また、パネルアンテナは複数のモジュールから構成され、モジュール間の信号は無線 LAN を用いる計画である。小型 SPS ではモジュール間の信号を無線で通信する予定であるが、次のステップの大型衛星では、電力を各モジュールで独立させて、モジュール間の結線をなくす構成を検討している。

(a)



三軸姿勢制御型

(b)



テザー型

図 1 SPS 小型衛星のコンフィギュレーション

(a)

パネル概略図

(b)

機能ブロック図

図 2 発送電一体型パネル

#### 4. SPS 小型衛星実験の構想

衛星重量は 600kg として各リソースの検討を行っている。そのうちミッション重量は

360kgと想定している。マイクロ波送電能力に関しては、現状のマイクロ波回路技術が120kg/Wであることから、3kW程度の送電能力が期待できる。アンテナサイズは3m×3m=9m<sup>2</sup>程度である。送電用マイクロ波の周波数は2.45GHzか5.8GHzである。マイクロ波回路としては、マグネトロンと半導体回路の組み合わせ、または、高出力半導体での構成を検討している。ビーム制御には搭載CPU制御及び地上からのパイロット信号によるソフトウェアレトロディレクティブ方式である。位相制御精度は5ビットである。衛星にはプラズマ計測器、電子エネルギー分析器、波動受信機等の観測機器を搭載し、プラズマとマイクロ波の相互干渉に関する理学実験を行う。テレメトリは共通バスのサブシステムを用い、高速レートで1Mbps、低速レートで40kbpsである。コマンドも共通バスを使用し、4kbpsを想定している。衛星の軌道は

円軌道、高度370kmの3日の準回帰軌道が一つの候補である。実験コンフィギュレーションを図3に示す。実験（送電）場所は日本に加え、米、欧、ロシア、中国、インド等でも受信を行い、国際的なキャンペーンが可能である。上記、小型衛星の規模では送電周波数5.8GHz、高度370km、アンテナサイズが9m<sup>2</sup>、送電電力3kWの場合、送電電力密度はアンテナ部で300W/m<sup>2</sup>、衛星から50m離れたところで150W/m<sup>2</sup>、地上電力密度最大0.005μW/cm<sup>2</sup>である。電力受電実験としては平均的には放送衛星受信アンテナサイズでLEDが点灯可能な規模に過ぎない。地上施設としては、パイロット信号UPLINK局として1~10kW級の送信設備が必要であり、JAXA局はその候補である。ビームパターンの計測には受信アンテナアレイを用いる。同時にEMCの計測と送電周波数及び高調波の評価を実施する。衛星管制はJAXAの追跡局を使用する。衛星運用は受信局上空で1パスあたり約5分間の実験が可能である。1日に3パス程度実験が可能であり、3日に1回真上通過のタイミングがある。実験モードとしては搭載CPU制御によるマイクロ波ビーム制御モードと地上からのパイロット信号でビーム方向制御を行う誘導電波制御モードが考えられる。

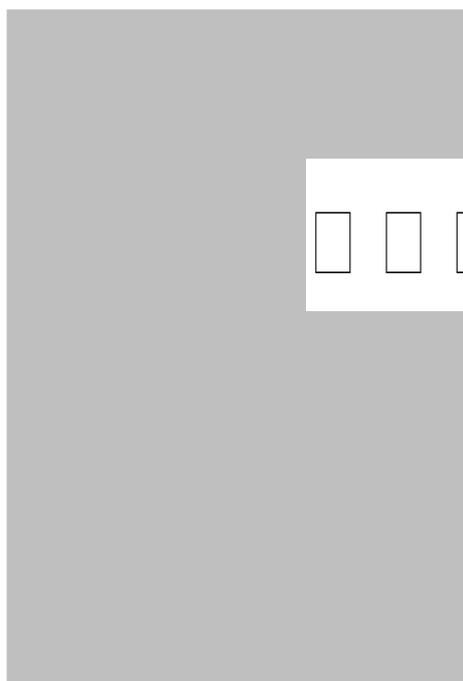


図3 マイクロ波送電実験

## 5. SPS 小型衛星実験の課題

SPS 小型衛星は5年程度の期間での開発から打ち上げを想定している。したがって、ほぼ開発済技術の使用が前提となる。以下は、SPS 小型衛星実現のための主要課題である。

(1)マイクロ波増幅方式：従来から電子管か半導体かという議論は繰り返されてきたが、最近では半導体でも GaN 素子の応用で、電子管に匹敵する出力が得られるようになってきた。マイクロ波回路内の前段で大出力マイクロ波を発生させて分配し放射する方式、源信からの信号を分配/位相制御した後に増幅・放射する方式いずれも電子管、半導体によらず選択できる。したがって、本議論は、マグネトロン方式あるいは半導体方式で重量の観点からのトレードオフとなる。

(2)マイクロ波制御方式：ソフトレトロディレクティブ方式を前提としているが、ハードウェアレトロディレクティブ方式も考慮しておく必要がある。

(3)姿勢制御方式：衛星リソースから考えると3軸制御方式が有力であるが、リソースによりテザー方式も検討する。

(4)バス部との電氣的、構造的インターフェース：小型衛星用共通バスの利用が前提であるため、ミッション部への電力供給方法や信号インターフェースは課題である。

(5)パネル展開方法：確実性の高い二次元パネルアンテナの展開が必要であるとともに、アンテナ面の形状変化の影響を評価するために形状を変形する機構が必要となる。

(6)地上受信局：ビームパターン計測のためのアンテナ群の設置、国際キャンペーンの展開を検討する必要がある。

## 6. まとめ

我々は、ISAS/JAXA 宇宙理学、宇宙工学委員会のもとで組織された小型衛星 WG の一つとして、SPS 小型衛星計画を検討している。無線送電に関する宇宙実験は、わが国が世界に先駆けて実施してきた分野であり、小型衛星のプラットフォームを利用した計画は、ロケット実験の次に位置するフェーズとして期待できる。

## 参考文献

[1] (財)無人宇宙実験システム研究開発機構：宇宙太陽発電システム実用化技術調査研究、宇宙太陽発電システム(SSPS)実用化技術検討委員会、専門員会「SSPS 実証実験システム概念検討書(案)」，平成 15 年 3 月。

[2] (財)無人宇宙実験システム研究開発機構：平成 18 年太陽光発電利用促進技術調査成果報告書別冊 システム専門委員会報告書，平成 19 年 3 月。