

Space Demonstration Experiment on WPT from Space to Ground using Small Satellite toward Solar Power Satellite

Koji Tanaka , SPS WG
(JAXA)

Abstract

We are planning a space demonstration experiments on wireless power transmission (WPT) experiment using the small scientific satellite that was developed by ISAS/JAXA toward Solar Power Satellite (SPS). The purposes of the space experiments are to demonstrate a precise directional control from space to the ground, which includes the precise detection of rectenna sites, and the microwave beam control the phased array antenna system, and to clarify the interaction between the intense microwaves and the plasma in ionosphere. Typical microwave power radiated from the transmission antenna panel is around 2kW. This level of microwave power injection will generate a power density above $1,000 \text{ W/m}^2$ within 40 m, and 100 W/m^2 within around 130 m in the ionosphere. Effects of interaction between high power microwaves and plasma in ionosphere can be measured. Also, wireless power transmission efficiency from space to the ground will be evaluated by analyses of the results of space demonstration experiments.

小型科学衛星を用いた長距離無線送電技術実証実験の検討

田中孝治、SPS WG (JAXA)

1 はじめに

太陽発電衛星は、衛星軌道上で発電を行い、無線で地上へ送電を行うシステムである。宇宙空間で太陽光発電を行なうため、資源量の枯渇という問題はなく、昼夜天候を問わず安定にエネルギーを供給するシステムが可能となる。発電のために化石燃料を使用しないため、環境負荷が極めて少ないシステムでもある。

2009年に制定された宇宙基本計画において、9つのシステム・プログラムの1つとして「宇宙太陽光発電研究開発プログラム」が設定され、「10年程度を目途に実用化に向けた見通しをつけることを目標とする」、「3年程度を目途に、大気圏での影響やシステムの確認を行うため、『きぼう』や小型衛星を活用した軌道上実証に着手する」とされた。2013年に見直しが行われ、「宇宙太陽光発電システムについては、我が国のエネルギー需給見通しや将来の新エネルギー開発の必要性に鑑み、無線による送受電技術等を中心に研究を着実に進める。宇宙空間での実証に関しては、その費用対効果も含めて実施に向けて検討する。」とされている。

我々は、宇宙基本計画をもとに、衛星軌道上からの無線による送受電技術実証の検討を開始している。地上での実験に関しては、マイクロ波を用いた地上技術実証実験が、Jspanspacesystems と JAXA を中心として、既に着手されている。[1]

我々は、地上実験の次の開発フェーズとして、マイクロ波を用いたエネルギー伝送技術に関して小型衛星を用いた太陽発電衛星のための軌道上実験計画を検討している。本論文では、現在の検討状況に関

して報告する。

2. 小型衛星を用いた軌道上実験の目的

表1に2009年の宇宙基本計画をもとに検討された商業用SPSに向けての検証計画をしめす。

現在開始されている地上実験から、数百MWクラスの宇宙実証まで段階的技術開発が検討されている。

表1 商業 SPS へ向けての検証計画

実証フェーズ	地上実証実験 (現在進行中)	小型衛星	大型衛星	小型プラント	実証プラント
検証項目	kW Ground	kW Low Earth Orbit	100kW Low Earth Orbit	2MW 1000 km Altitude	200 MW Geostationary Orbit
ビーム制御	数十m	400km	400km(TBD)	1000km(TBD)	36000km
電離層/大気通過実証	-	1kW/m ²	1kW/m ²	1kW/m ²	1kW/m ²
電力送電実証	(Test Rectenna kW)	-	Small Rectenna 10kW	Large Rectenna 2MW	Large Rectenna 200MW
SPS 全機能検証	-	-	10kW	2MW	200MW
電力供給検証	-	-	-	2MW	200MW

最終ターゲットである、商業用太陽発電衛星における無線送電技術に関しては、kmサイズの送電アンテナに数十億個の放射素子が搭載され、軌道上ダイナミクスによるアンテナ形状の変形を考慮しながら、地上からのパイロット信号を用いて、軌道上から地上へと長距離に及ぶ正確なマイクロ波送電技術が必要となる。図1に商業用SPSとして検討されたテザー型SPSを示す。[2]

最初のフェーズである地上実証実験では、マイクロ波を用い、1kW程度の電力を数十m送電することによる技術検証が進められている。構造図を図2に示す。この結果を基に、次のフェーズの軌道上実験では、電力レベルは同程度であるが、400kmにわたる長距離無線送電の技術実証を検討している。特に、

電離層を介した実験が特徴であり、大強度マイクロ波とプラズマの相互作用検証実験が主実験の一つとなる。以下にミッションの目的を示す。

- (1) マイクロ波ビーム制御能力実証（軌道上のアンテナからのマイクロ波ビームが地上からのパイロット信号に追従する能力の実証）
- (2) マイクロ波の電離層通過実証（電離層との非線形相互作用の解明）
- (3) 宇宙-地上間マイクロ波電力伝送の原理実証

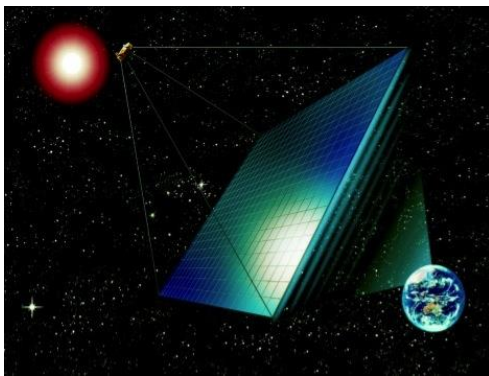


図1 テザー型 SPS[2]



図2 マイクロ波による地上無線送電実験[1]

正確な長距離送電技術を確立することが第一の目的であるが、小型衛星を用いた低軌道からの送電実の場合、衛星速度が速く、静止軌道を用いる実用衛星における条件と比べ、厳しい制約の元での実験となる。また、搭載可能な送電アンテナサイズも限定される。そのような制約の中で、パイロット信号とフェーズドアレーアンテナを用いた方向探知と放射ビームの方向制御及び形状制御技術の検証を目指している。また、大型化のための複数源信間の位相同

期技術の基礎実験を検討している。電磁波を用いた送電技術においては、電磁波が伝搬する媒質の影響を定量的に評価する必要がある。

表2 電離層プラズマとマイクロ波との相互作用

影響	メカニズム	評価
屈折効果	プラズマ(全電子数)による屈折	パイロット信号による誘導を考慮すれば影響は問題とならない。
ファラデー回転	磁場による回転	伝送効率への影響は小さい
シンチレーション	プラズマ密度不規則構造による位相経路長の変動	比較的激しいシンチレーションの場合 $N_e = 5 \times 10^{16}$ electrons/ m^2 $\Delta P = 0.34m$ (波長0.12mの2.78倍)(2.45GHz) $\Delta P = 0.06m$ (波長0.052mの1.16倍)(5.8GHz) パイロット信号、送電ビームともに無視できない可能性がある。
非線形作用	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	熱的自己収縮現象: 数百W/ m^2 - 数十kW/ m^2 まで議論あり マイクロ波密度勾配自己収縮現象: 影響少ないと予想されている 3波共鳴現象: 影響少ないと予想されている

二つ目の目的は、媒質の影響評価を目的としている。電離層プラズマは、大気中におけるマイクロ波の吸収や散乱以外の影響をマイクロ波の伝搬に及ぼす。主要な影響は、屈折効果、ファラデー回転、シンチレーション、非線形作用等である。表2に電離層プラズマとマイクロ波との相互作用に関して、メカニズムと影響評価を示す。シンチレーションに関しては、比較的激しいシンチレーションが生じたときは、影響を無視できない可能性があることが指摘されている。非線形相互作用に関しては、観測ロケットによる先駆的実験がなされているが、本計画ではより詳細な実験を行なう。マイクロ波送電実験の意義の観点からは、非線形相互作用に関する実験には、実用太陽発電衛星の電力密度レベル相当である1,000W/ m^2 が必要である。

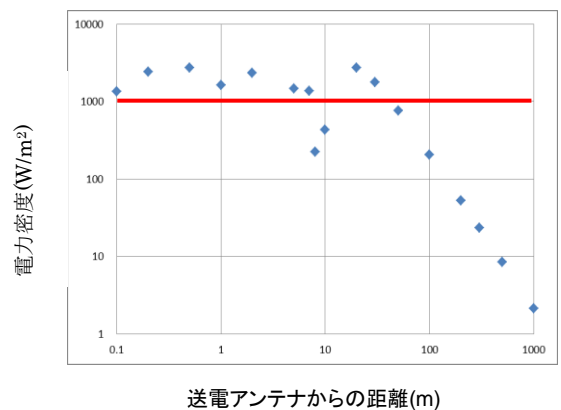


図3 送電アンテナ前面の電力密度

一例としてアンテナの直径を $\phi 1.9\text{m}$ 、送電電力を 2kW とした場合の送電アンテナからの距離とマイクロ波の電力密度(ビーム中心)の関係を図3に示す。約 40m までの領域で 1000W/m^2 、 80m までで 230W/m^2 、 135m までで 100W/m^2 が実現できる。周波数は 5.8GHz である。地上での電力密度は $16\mu\text{W/m}^2$ 程度となる。

3つめの目的は、軌道上から地上へのマイクロ波送電実験により、太陽発電衛星システムにおけるエネルギー効率の評価と技術課題の明確化、技術開発ロードマップの検証である。

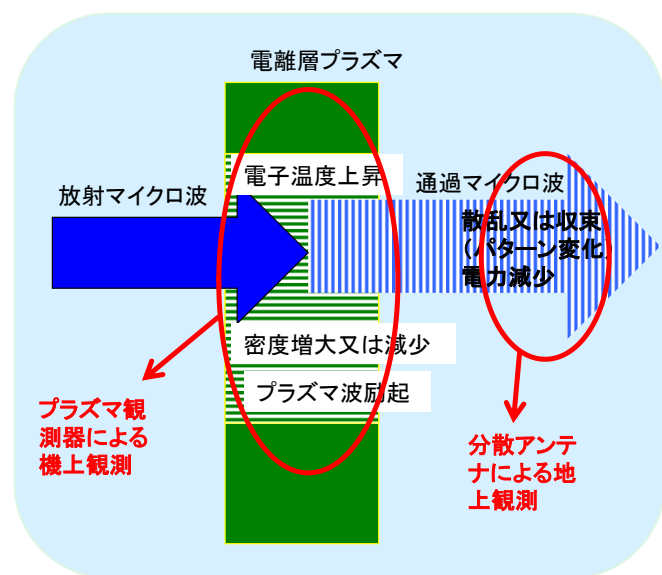


図4 小型衛星実験構想

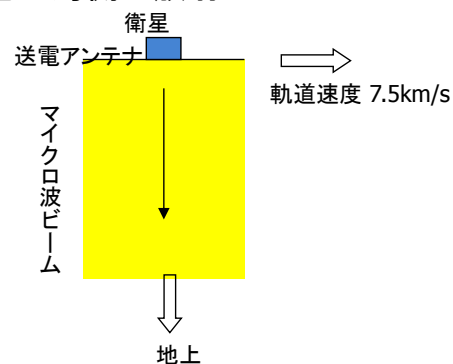
3 ミッション構想

小型衛星を用いた実験構想を図4に示す。表1にミッションシナリを示す。マイクロ波送電における電離層プラズマの影響を、衛星に搭載した観測機器によるその場観測と地上の受信機群によるマイクロ波の電力とパターンにより評価を行う。但し、我々は、図5(a)、(b)に示す2種類の実験モードを検討している。モードAは地上へ向けてマイクロ波を放射し、地上に設置した観測機器群を用いる実験モードである。放射電力強度を変えて地上で放射パターンと強度を計測することで、マイクロ波ビームの方向制御精度、ビーム形成、伝搬路の影響評価を実施する。モードBでは、電離層プラズマと大電力マイク

ロ波との相互作用をその場観測を行なうことで、より定量的な影響評価を実施する。モードAでは、衛星は高速度で移動するため、マイクロ波が照射されるプラズマ領域は短時間で変化する。従って、プラズマとマイクロ波の相互作用を評価するには現象を生じさせる時間が十分ではない。従って、モードBを用いることによる、相互作用検証の実験モードを設定した。

(a)

モードA 地上局側に放射



(b)

モードB 速度ベクトル方向に放射

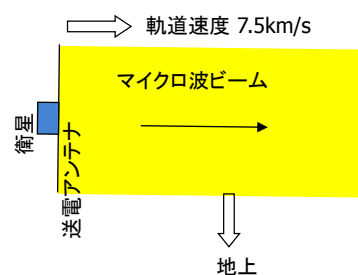


図5 実験モード

表3にミッションの概要を示す。ミッション期間は1年、衛星プラットフォームには、小型科学衛星用に開発された標準バスを用いる。標準バスは、太陽電池パドル系、電源系、姿勢制御系、推進系、衛星マネジメント系、通信系、熱制御系から構成される。想定ミッションの質量は 200kg である。

ミッション機器は、マイクロ波送電システムと観測機器、ミッションバスから構成される。ミッション部のブロック図を図6に示す。観測機器は、プラズマ計測装置と波動受信機からなる。ミッションバスは、大電力マイクロ波実験のためにミッション用

バッテリーとミッション用搭載計算機から構成される。観測アンテナ/プローブ、観測機器及びミッションバスは標準バスの上部に搭載される形態となる。図 7 にミッション機器を搭載した衛星概略図を示す。

表 3 ミッション概要

項目	内容
ミッション期間	1年程度
実験プラットフォーム	小型科学衛星
想定ミッション重量	200kg
ミッション機器構成	送電システム(φ1.9m, t:数cm)、4ブロック構成、制御・観測機器・ミッションバス
送伝電力	Typ. 2kW(1kW~4kW) 5GHz帯を使用
姿勢制御	3軸制御
軌道維持	スラスター
観測機器	プラズマ計測機器、 波動受信機
軌道	370kmの準回帰軌道
実験場所	日本でのS帯アップリンク局のある場所(勝浦局が候補)。国際協力の実施も考慮(マレーシア、インドネシア、米、欧、他)
ビームサイズ	20~30km
地上施設	パイロット信号 UPLINK 局(数十W~kW級)(実験局) 受信アンテナアレイ(分散アンテナによるビームパターン及びEMCの計測、送電周波数及び高調波) 追跡管制局(JAXA局)

て、低出力モードでの送電実験を行なう。地上では、パイロット信号アップリンク局の周囲にパワーモニター群を設置し、マイクロ波のビーム形状の計測を行なう。低出力モードと高出力モードでの放射パターン、ビーム制御精度の比較により、特に電離層の影響評価が可能となる。

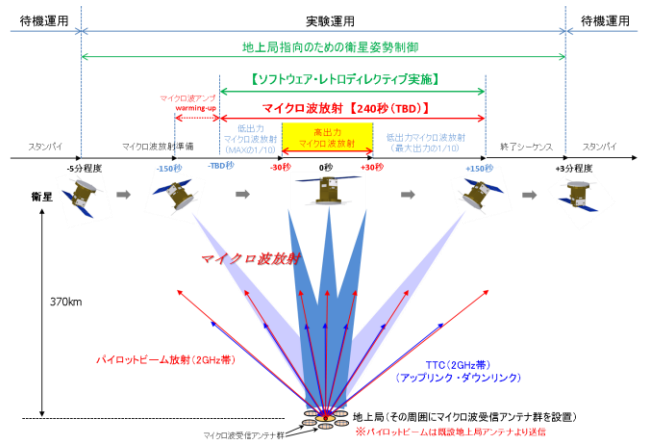


図 7 実験シーケンス：モード A

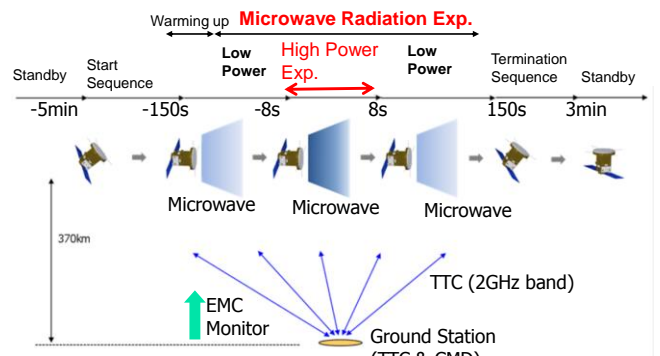


図 8 実験シーケンス：モード B

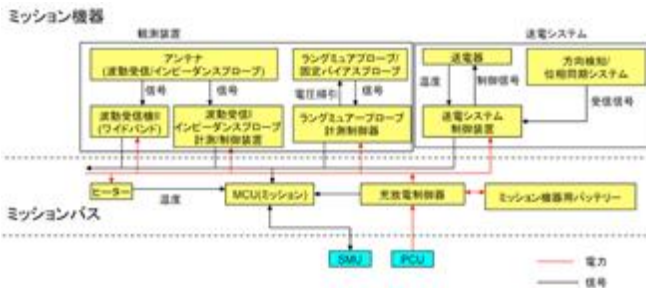


図 6 ミッション部ブロック図

4 ミッションシーケンス

図 7、図 8 にミッションシーケンスを示す。モード A では、パイロット信号送信局の上空通過 5 分前から送電実験シーケンスを開始する。2 分前くらいから、最大出力の 1/10~1/100 の放射電力モードで位相同期、方向探知、方向制御実験を開始する。局の直上±8 秒間において、最大電力でのマイクロ波放射実験を行なう。局上空通過後の約 2 分間におい

マイクロ波ビームのフットプリント



図 9 局直上通過時のフットプリント

図9にモードAにおいて衛星が地上局直上を通過した時のフットプリントを示す。第一ノル点までの半径は約10km、半径15km程度内に受信機群を設置してビーム強度とパターンの計測を行う。

図8のモードBにおけるミッションシーケンスにおいても、高出力モードでのマイクロ波放射実験は16秒間程度を検討している。この実験シーケンスでは、マイクロ波を照射している領域に観測機器を搭載した衛星が飛行し、電離層中の電子温度、電子密度の変化、励起される波動の計測を行なう。低出力及び高出力モードでの比較により、電離層プラズマと大電力マイクロ波の相互作用を明らかにできると考えている。

6 まとめ

我々は、SPS実現のために無線送電技術に関して、宇宙実験の検討を行っている。現在進められている地上デモンストレーションの次フェーズの位置づけである。プラットフォームには小型科学衛星用標準バスを想定している。マイクロ波無線送電技術が太陽発電衛星に適用可能であることを、電離層プラズ

マ中の電力密度を実用太陽発電衛星に近い条件で実証する検討を行なっている。主目的はマイクロ波ビームを衛星軌道上から地上の目標点に正確に指向させる技術の実証、及び、大電力マイクロ波の電離層通過実証である。

小型衛星という制約上、電力を地上で取得することは難しいが、方向制御精度とビーム形状制御の正確な評価により、無線による長距離電力伝送に関しても評価を行ない、太陽発電衛星実現を目指した実験として有意義な実験であると認知されるような内容である。

文 献

- [1] S Sasaki, 2009, "Microwave Power Transmission Experiment on Ground for SPS Demonstration", ISTS paper no 2009-h-28.
- [2] S Sasaki, K Tanaka, K Higuchi, N Okuizumi, S Kawasaki, N. Shinohara, K Senda, & K Ishimura, "A New Concept of Solar Power Satellite: Tethered-SPS", Acta Astronautica 60 (2006), pp 153-165. (雑誌例 2) W. Rice, A. C. Wine, and B. D. Grain, diffusion of impurities during epitaxy, Proc. IEEE, vol.52, no.3, pp.284-290, March 1964.