小型衛星による太陽発電衛星技術の実証計画

2011年2月

18 -

資源問題と地球環境問題解決のために

利

用



何故太陽か?

太陽からの地球へのエネルギーは 1.77x10¹⁷Watt 現在の人類のエネルギーの消費量の 10,000倍 → 太陽エネルギーは人類のエネルギー源

として大きな可能性を持っている。

何故宇宙か?

地球周辺の宇宙空間での太陽光のエネル ギー密度は1,350W/m²

地上での太陽光の年間平均エネルギー密 度は100~200W/m²

理由:夜の存在、曇天・雨天の存在、大気 による減衰

➡ 宇宙空間から地上への効率の良い電力 輸送が可能であれば宇宙空間を太陽エネ ルギー取得の場として利用することが有望。

エネルギーシステムとしての特徴



宇宙での太陽光からのエネルギー取得の効率は 地上太陽光利用の場合の5~10倍。

~無線送受電の効率は50%が期待できる。

従ってこのシステムは地上の太陽光利用に比べ 2.5~5倍の高い効率で電力を供給できる可能 性を持っている。

クリーンで大規模なエネルギーシステムの可能性
取得可能エネルギー:実質的に無制約
安定性:高い(天候、昼夜の影響なし)
EPT(Energy Payback Time):数年以下
·コスト:10~30円/kwH
·CO₂負荷:化石燃料火力発電の数十分の一以下

日本のSPSシステム代表的設計例(1GW級)



Basic Model

太陽非追尾マイクロ波型 発送電一体型パネル2kmx1.9kmx(2-10)cm^t テザー (5-10km)による重力安定 100mx100mパネルのユニット構成 マルチバス方式 総重量2万トン 単純、低い電力効率(64%)

Advanced Model

太陽追尾マイクロ波型 ミラー(反射鏡):2.5 km x 3.5 km, 1000トンx2式、100[~]300g/m² ミラーはフリーフライヤー 発電部:直径1.25km 集光倍率:4倍 送電部:直径1.8km 総重量:10,000トン以下(目標) 複雑、高い電力取得効率

Laser Model

太陽追尾高集光レーザー型 1モジュール:10MW、50トン ミラー(反射鏡):100mx100mx2式 ラジエーター:100mx100m 二次光学系、レーザーモジュール:120m 集光倍率:数百倍 システム:100モジュール接続、12km 総重量:5,000トン(目標) 複雑、システムが小型、雲の影響 イクロ波送電技術の地上実証

夕口波出力

法胃迫離

1.2m x 1.2 m, 4cm 厚さ 4 サブパネル構成(可動) 1.6 kW, 5.8 GHz, 素子変換効率 ≥60 % パイロット信号を利用した制御 直径2.5 m、素子変換効率 > 70 % 50 m (typical)



商用SPS本格的建設·運用 (1SPS/year)

小型実証計画の前提

1. 目的

マイクロ波無線送電技術がSPSに適用可能であることを実用条件に近いコンフィギュ レーションで実証(マイクロ波ビームを軌道上から地上の規定点に正確に指向させる 技術の実証、及び、高電力密度マイクロ波の電離層通過実証)。

2. 規模

実験プラットホームは小型衛星(ミッション重量200kg)または国際宇宙ステーション(JEM)(ミッション重量500kg)を前提。

3. 時期

地上実証実験の次のステップの研究としてできるだけ早期に実施(3-4年後からプロ ジェクトスタート、その後4年程度で実証完了)

4. 適用技術

地上実験等で確立(実証)された技術を用いて軌道上実証実験を実施。

5. 体制

JAXAが主導的な役割を果たすが、All Japanの体制で実施することを前提。

軌道上実験の目的

主目的 (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随する能力の実証) (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)

副目的

- (3)マイクロ波送受電の電力効率評価(実験と解 析)
- (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)



SSPS小型実証実験の構想

ミッション期間 1年程度で実証目的を達成する 実験プラットホーム 小型衛星または国際宇宙ステーションJEM 軌道 小型衛星の場合は370kmの準回帰軌道、国際宇宙ステー ションの場合はその所定軌道 想定ミッション重量 200kg~500 kg 送電パネル(0.8mx0.8mx(0.02 ~ 0.1)m)、4 ~ 9枚、 構成 制御•電源部、観測機器 3kW~10kW(4枚パネル~9枚パネル) 送電電力規模 衛星本体の3軸制御。スペースステーションの場合はパネ 姿勢制御 ル面の90度回転制御。 土1°以内 姿勢制御精度 小型衛星の場合スラスター(3N)による維持(共通バスとして準備) 軌道維持 送雷周波数 5.8 GHz帯(周波数認可による) マイクロ波回路 |半導体構成(地上での実証済み技術の使用)| マイクロ波ビーム制御 搭載CPU制御及び地上からのパイロット信号によるレトロ方式 プラズマ計測器、電子エネルギー分析器、波動受信機 観測器 実験場所(送電場所) 日本でのS帯アップリンク局のある場所 国際的なキャンペーンとしての実施も考慮(候補国:米、欧、ロ シア、中国、インド、赤道諸国等)。 136 µ W/m²(最大)(9枚パネル、8.6kW出力の場合) 地上電力密度 ビームサイズ 直径 約20km

小型衛星を用いたマイクロ波送電実験の案

軌道:低高度周回軌道 (370 km) 衛星重量:400 kg 実験機器重量: 200 kg 姿勢制御: 3-軸制御 送電電力: 3.8 kW 観測器:プラズマ計測器、電子エ ネルギー分析器、波動受信機





宇宙ステーション日本実験モジュール(JEM)でのマイクロ波送電実験案

Panel Size Frequency Output Power 2.4 m x 2.4 m 5.8 GHz 8.64 kW

実験コンフィギュレーション



地上

実験運用シークエンス(地上局への放射実験)



期待される成果(1) マイクロ波ビームの軌道上から地上局への制御実証



アレイアンテナ理論に沿ったビームが形成されることを実証(回折限界まで絞られたガウス型 ビームの形成、ヌル点幅3度)。

レトロディレクティブ理論に沿ってビームが制御されることを実証(制御精度0.5度(TBD))。 これらが実証されれば、静止衛星軌道から地上レクテナへのマイクロ波電力伝送のビーム形 状、制御精度の定量的な評価が可能となる。





実用レベルの強度のマイクロ波(100-1000W/m²)を電離層で放射した場合、どのような相互作 用がどの程度の強さで発生するか(マイクロ波が受ける影響、電離層に与える影響)を評価する。 電離層通過時に実用上問題になるような電力損失が無いこと(損失1%以下)、電離層に強い影響がないこと(密度変動数十%以下(暫定値))を実証する。

電離層に於ける加熱と非線形作用のこれまでの研究状況

現象名	メカニズム	現象	実用SPSでの問題	実用SPSでの現象の 時間スケール	実用SP Sでの 現象の 空間ス ケール	研究例	電離層で の観測例	軌道上 小規模 実験で の検知 の可能性
電離層 電子加熱	電子がマイクロ波 により振動。電子 がイオンと衝突す ると位相がずれマ イクロ波のエネル ギーが電子に渡さ れ電子加熱。	電 上 ム ム ー ム マ フ 天 度 に の プ ラ 度 度 、 ビ の プ ラ ズ 底 の 、 ピ の フ 、 ビ の フ 、 ビ の の 、 マ の の 、 で の の の の の の の の の の の の の の の の	F層での電離層の穴 、短波通信への影響。 230W/m ² はこの解 析できまった(Holway and Meltz,1973)が、 後年、非弾性散乱 を考慮すると短波 通信に影響するレ ベルにならないと判 断されている(Duncan and Goldon, 1981)。	加熱は電子・イオン 衝突周波数(1kHz 程度) イオンの運動を伴うマ クロな密度減少は数 秒-十数秒)(マイクロ 波ビームスケール/イ オン音波速度)。 イオン音波速度: 1-5km/s	横:ビ ームの直 径 縦:数十 km(F層)	<u>Gurenvich,</u> <u>1978,</u> 100W/m ² (2.48GHz)で 217度K上昇 (550W/ m2,5.8GHz に相当)	なし	電子 度 上 昇 、 密 度 減 少
	電子がマイクロ波 により振動。電子 がガスと衝突する と位相がずれマイ クロ波のエネルギ ーが電子に渡され 電子加熱。	電上 上 ム ム 、 中 マ 、 密 加 (本 少)。	下部電離層の密度 増大。特に実用上 の影響は指摘され ていない。	加熱は電子・ガス衝 突周波数(数kHz程度) イオンの運動を伴うマ クロな密度減少は数 秒-十数秒)(マイクロ 波ビームスケール/イ オン音波速度)。	横:ビ ームの直 径 縦:数十 km(高度 100km 付近)	<u>Holway,Jr,</u> <u>1973</u> 閾値780W/ m ² (5.8GHz 換算)	なし	なし(下 部電離 層は加 熱不能)
熱 己現 現象(て性)	マイクロ波加熱に よりビーム内部の 電子温度が上昇し 圧力が大きくなる ためビーム内部の プラズマ密度が 減少。これにより 屈折率が変化しマ イクロ波が収縮、 更にビーム内部の マイクロ波密度が 大きくなり電子温 度が上昇して不安	プ密き離ス大部で電のプ密減ブ密き離ス大部で電のプ密減マ大の電、度い離生温昇ズの、マ大ので、方の下層。度、マイ	F層での電離層の穴 、短波通信への影響。 ビームパターンの変 化(集中、揺動)。	加熱は電子イオン衝 突周波数 1(kHz)、 電子・中性ガス衝突 周波数(数kHz程度)。 イオンの運動を伴う ビーム全体の変動の タイムスケールは秒 ー十数秒。	横一直び粗ケ縦 にの及状スルサ縦(F層)	<u>Duncan and</u> <u>Behnke,1978</u> 閾値 11.4kW/ m ² (5.8GHz 換算) 粗密スケー ル数百 m(MHzの 場合)	<u>Duncan and</u> <u>Behnke,</u> <u>1978</u> Arecibo実験 (1977) 5MHz, 200kW 密度変動5% 粗密幅 500m	近 の 電 度 、 、 動

電離層に於ける加熱と非線形作用のこれまでの研究状況(続き)

			4					
現象名	メカニズム	現象	実用SP Sでの問題	時間スケール	空間ス ケール	研究例	電離層で の観測例	軌道上 小規模 実験で の検知 の可能性
マイクロ 波密度勾 配自己収 縮現象 (不安定性)	電配子度向に、マリンでのが不発した。一次のにない。「「「「」」では、「」では、「」では、「」では、「」では、「」では、「」では、「	プ密さラ存ば電のプ密減クロイズがもがれ。度、マームのマームのマームのマームの、注意の、このでは、「はいた」では、「はいた」では、「はいた」では、「ない」では、「ない」では、「ない」では、「ない」では、	F 電 の 短 信 影 ー の 短 信 影 ー 一 々 変 集 揺 動) 。	初期フェーズ の電子応答は 電子プラズマ 周波ンの運動 イオンの運動 を伴うマクロ な密中数秒)(マイクロ波ビ ームスケール /イオン音波速 度)	横一径縦ラがす域こ発る性:ビの プマ在領どもす能り。	<u>京大(平成18年度USEF報告、電情</u> <u>学会誌1995年No.12、篠原、松本)</u> 時間スケールは電子プラズマ周波数 (MHz) 100サイクル程度、30%の密度減少、 進行方向側にはデバイ長の200倍 程度(3m)あるいはビーム系の100 倍程度。	なし	プラズ マラ波、ズ マラ密 し の 計 測
3波共鳴現 象 (不安定性)	電ラ相、波波の大学では、ないないでは、ないないです。 電ズ互方プラントでは、ないないないです。 などに、 て、たいでして、 で、 たいで、 で、 たいで、 たいで、 たいで、 で、 たいで、 たいで、	後波ロず数れ方るマンは))電ダグ電方(波かがるにプ波波電励子ンに2散イシに2時で、伝ラ((ま子励波ピより乱クわ波 前わズオた波。のンり度	ビーム のエネ ルギー の散逸	イオンプラズ マ周波数 (kHz) 電子プラズマ 周波数 (MHz)	横一径縦ラ波相励間 ニズの速起程 をしたしました。 はのした。 はのです。 はのです。 はのです。 はのです。 はのです。 はのです。 はのです。 はのです。 はのです。 はのです。 はのです。 はのです。 はのです。 はのです。 はのです。 はのです。 はのです。 はのです。 はのです。 に、べのです。 に、べのです。 です。 のです。 です。 のです。 です。 です。 です。 です。 です。 です。 です。 です。 です。	 Fejer et al.,1979 ブリロアン散乱閾値:0.1W/m²(5.8GH z相当) ラマン散乱閾値 0.1W/m²(5.8GHz相当) 3.7x10-5W/m² 篠原,2005 2.45GHz230W/m²で(加熱による飽和を考慮)、 ラングミュア波 6.9mV/m サイクロトロン高調波(27mV/m) 主ビームの0.01%以下 松本等、1995 シミュレーションによると100Ωe(電子サイクロトロン周波数)程度から おお問わしるの後ブロードのスピクロ 	<u>篠原,2005</u> MINIX実 験(電の し 4.9kV/m)で乱れた。 ラン波: 170mV/m以 上 イク 高 サンズ	散波方、ズ、ズ密温測11(波)ラ波ラマの度度

本計画の小型実証実験で観測が期待される現象



			モードA	モードB	
マイクロ波照射	方向	地上方向	軌道速度方向		
同一プラズマセ	グメントへの照射	0.2ms	10ms		
	研究課題	観測・実験の可能性			
	電離層電 子加熱	F層電子加熱	Δ	0	
		F層プラズマ密度減少	х	0	
		下部電離層電子 加熱・プラズマ密度増 加	x	x	
	熱的自己 収縮現象(不安定性)	電子加熱	Δ	0	
電離層通 過実証		プラズマ密度減少	×	0	
	マイクロ波 密度勾配 自己収縮現 象 (不安定性)	加熱·電子密減少	0	0	
		プラズマ密度減少	×	0	
	3波共鳴現象 (不安定性)	後方散乱波、プラズ マ波、電子温度上昇	0	0	
マイクロ波 ビーム制 御実証	地上局へ	のビーム制御実験	0	×	

SPSを目指した実験としてさらに意義ある実験 として実施するための付加案

1. Areciboのような電離層加熱局からのRF放射実験(衛星側はプラズマ) (温度、密度)及びプラズマ波動計測)と組み合わせて、電離層と電波

の非線形相互作用研究の総合キャンペーンとして実施する。

2. 近傍のサブサテライトで電力を受ける実験を付加する。

- 3. 地上局からのパイロット信号の位相シンチレーションを正確に測る実 験を付加してより充実した実験として実施。
- 4. パネル展開を将来のSPSに適用可能な大型構造物建設技術の要素 技術実証として実施。
- 5. 小型のレーザー送電実験と組み合わせて実施。