

大電力マイクロ波とプラズマとの相互作用に関する基礎実験

田中孝治(ISAS/JAXA)、片野 将太郎(東海大)、高浦直己 (理科大)

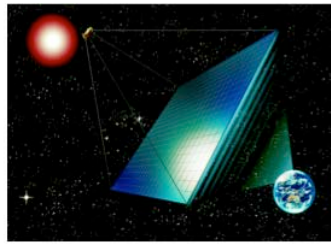
はじめに

埋蔵資源の枯渇と温室効果ガスの増加による地球の温暖化は、人類共通の課題である。その解の一つとして、宇宙環境をエネルギー取得の場として開拓する太陽発電衛星 (SPS) が注目されており、エネルギー基本計画及び宇宙基本計画にもその推進が言及されている。

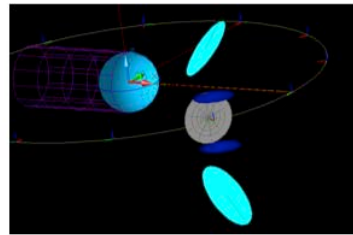
SPS は、1968 年に米国のピーターグレーザー博士により初めて提案され、我が国のみでなく、米国、欧州、中国等各国で研究がなされている。SPS は、衛星軌道上で巨大な太陽電池パネルを建設し、得られた電気エネルギーをマイクロ波に変化して地上に送るシステムである。我が国のリファレンスシステムを図 1 に示す。将来の実用的 SPS としてベーシックタイプのテザー型 SPS とアドバンスモデルが検討されている。

検討されているテザー型 SPS では、 $2.5\text{km} \times 2.45\text{km}$ という巨大な送電アンテナから、 1.6GW 程度のマイクロ波を地上の受電設備に向けて放射する。この時、マイクロ波ビームの中心電力密度は約 1kW/m^2 となる。また、過去の SPS の検討でもっとも有名な DOE/NASA の検討におけるリファレンスシステムでは、 230W/m^2 の電力密度が想定されている。放送、通信や測位などの従来の宇宙環境における電波利用とは桁違いの電力密度となる。このような条件において SPS では、衛星軌道上から地上へのマイクロ波無線電力送電において方向探知や方向制御、宇宙環境への影響等を実用化のための開発段階の早期において明らかにする必要がある。主要な電離層プラズマの影響は、屈折効果、ファラデー回転、シンチレーション、非線形相互作用等である。表 1 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实验がなされている。表 2 に過去の観測ロケットの実験を示す。共鳴による波動励起等が観測されているが、閾値等の検証は、今後の課題である。また、電子温度やプラズマ密度への定量的な影響の評価も課題として残されている。

本研究は、地上実験により、電離層プラズマと大電力マイクロ波との非線形相互作用に関する現象を明らかにし、将来の観測ロケットや小型衛星を用いた宇宙実験における搭載機器の仕様検討の条件取得を目的としている。宇宙科学研究所のスペースプラズマ設備の中型チャンバを用いて、予備的实验に着手した。その結果に関して報告する。



Basic Microwave-type Model
(Jspacesystems/METI)



Advanced Microwave-type Model
(JAXA/MEXT)

図1 日本で検討されている太陽発電衛星

表1 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 $\Delta P = 0.34$ m(波長0.12mの2.78倍)(2.45GHz) $\Delta P = 0.06$ m(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

表2 過去の観測ロケット実験

	MINIX	ISY-METS
	S520-6 Mother-daughter	S520-16 Mother-Daughter
Frequency (GHz)	2.45	2.41
Radiated Power	830W(Magnetron) (from Horn antenna)	832W (Array antennas : 16elements×13W×4Paddles)
Power Density	15W/cm2	0.1W/cm2
Measurement Instruments	Frequency Analyzer: 0-18MHz probe	Probe : Electron Temperature, Electron Density Wave Receiver: HF(500KHz-10MHz) VLF(100Hz-15KHz)
Results	Plasma wave •Electron plasma frequency •Electron cyclotron Frequency	Plasma wave •Electron plasma frequency

実験装置

実験装置の概要を図2に示す。直径1m、奥行き1.8mの中型チャンバを使用した。プラズマ源には磁場型拡散プラズマ源を使用し、作動ガスにはアルゴンを使用した。その時の真空度は 8.8×10^{-3} Pa程度である。電子温度、電子密度の計測にはラングミュアプローブを用いた。大電力マイクロ波源には、マグネトロンを用いた。周波数は、現在のSPSの検討で多く用いられている5.8GHzである。発振出力は0-700W、パルス幅は50ms-250msである。マグネトロンの出力部にはアイソレータ、ダミーロード、パワーメータを接続し、

放射マイクロ波の電力を計測した。マグネトロンからの放射マイクロ波のスペクトルを図 3 に示す。チャンバ内部には、フレキシブル導波管を介してホーンアンテナを設置してチャンバ内部にマイクロ波を放射した。

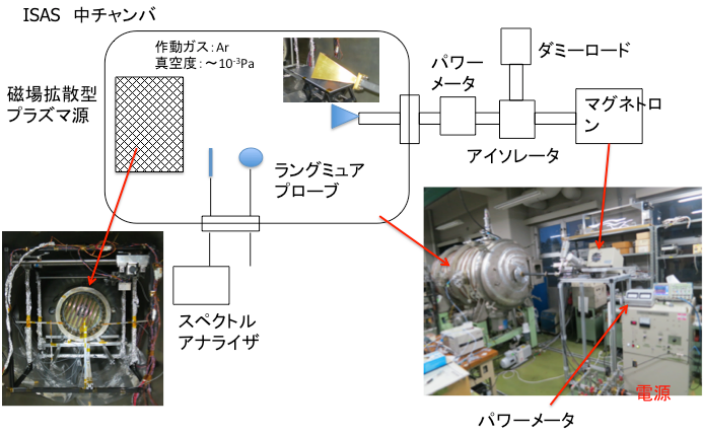


図 2 実験装置の概要

また、励起波動を計測するため、チャンバ内部にアンテナを配置し、スペクトルアナライザで計測を行った。

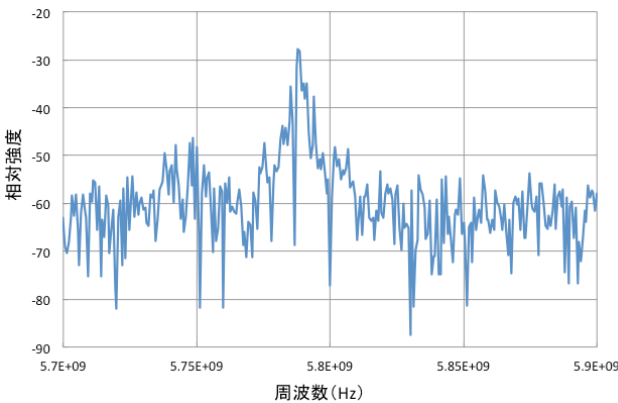


図 3 マグネトロンからマイクロ波スペクトル

結果及び考察

ラングミュアプローブに固定バイアス電圧を印加し、マイクロ波を照射したときのプローブ電流の変化を図 4 に示す。照射電力は 140W から 700W まで変化させた。空間制限電流領域におけるプローブ電流は式 (1) で表される。この時、 V_p は電極電位、 d はシース厚、 v_0 はシース端電位であり、 $v_0 = kT_e/2e$ である。

$$I_p \propto (V_p - V_0)^{\frac{3}{2}}/d^2 \quad \text{-----} \quad (1)$$

(1)式より、マイクロ波照射時の電子温度を推定した結果を図 5 に示す。マイクロ波未照射時のプラズマ密度は $1.3 \times 10^5/\text{cc}$ 、電子温度は 1.27eV である。

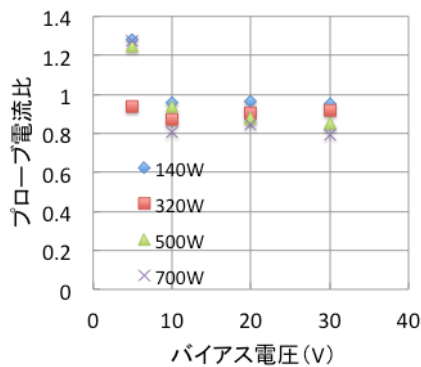


図4 プローブ電流

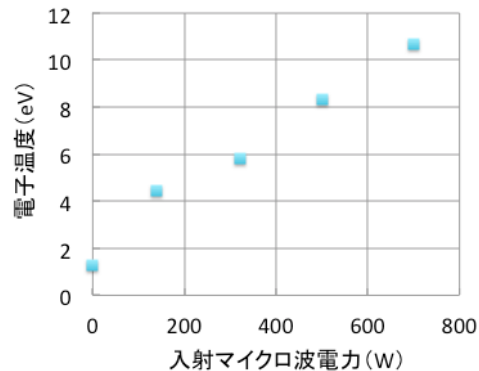


図5 電子温度

マイクロ波を 700W 程度まで入射した際、数 eV の電子温度の上昇の可能性があることがわかった。

プラズマ中で励起される可能性のある波動の周波数を図 6、7 に示す。

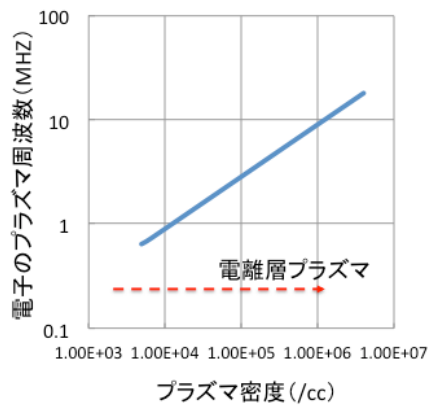


図6 電子プラズマ周波数

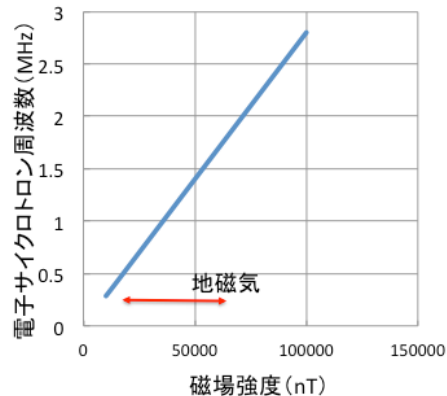


図7 電子サイクロトロン周波数

電子密度に対応する電子プラズマ周波数を図 6 中の青の実線で示し、電離層中のプラズマ条件での周波数を破線で示した。磁場強度に対する電子サイクロトロン周波数を図 7 中の青の実線で示し、地磁気の場合での周波数を赤の実線で示した。

図 8 にマイクロ波入射時の波動計測結果を示す。マイクロ波の入射電力は 700W である。特定の周波数領域での振幅の変化は本実験条件では見られなかった。

まとめ

プラズマと大電力マイクロ波との相互作用を明らかにするための予備的実験に着手した。固定バイアスを印加したプローブ電流の計測から、マイクロ波入射時、入射電力に関連して変化があることがわかった。しかし、電子温度、密度の変化に関しては、より詳細な計測が必要である。また、今回の実験では、マイクロ波入射による優位な波動励起は観測されなかった。受信感度条件を見直した実験が継続する予定である。