電子サイクロトロン共鳴放電を用いた宇宙プラズマ 環境シミュレーション実験装置の試作研究*

田原 弘一**・枝光 敏章**・小河 敦**
張 麓璐**・安井 利明**・吉川 孝雄**

(受理1996年11月20日, 掲載決定1997年3月1日)

Development of a Space Plasma Environment Simulator
Using the Electron Cyclotron Resonance Discharge

Hirokazu TAHARA, Toshiaki EDAMITSU, Atsushi OGO,
Lulu ZHANG, Toshiaki YASUI and Takao YOSHIKAWA

(Faculty of Engineering Science, Osaka University, 1-3, Machikaneyama, Toyonaka, Osaka)

(Received November 20, 1996, Accepted March 1, 1997)

1. ま え が き

高度1000 km以下の低地球軌道 (Low Earth Orbit: LEO) 上において, スペースシャトルを往環機とした宇宙ステーション計画, また太陽発電衛星や宇宙工場などの大型大電力宇宙システムの構築が将来構想として検討されている。これらの宇宙構造物は経済性及び実用性の面から数十年から半永久的な利用が考えられているため, その性能を長期間にわたって発揮しなければならない, 必然的に高い信頼性と耐久性が要求される。しかし, これら宇宙飛翔体は宇宙用電気推進機の排流出を含む, プラズマ状態のイオン・電子や活性な原子, 放射線, 紫外線などの過酷な環境に長期間曝されるため, その構造用材料や表面材料の劣化が危惧される^{1,2,3)}。そこで本研究では, プラズマ粒子の衝突による宇宙用材料の劣化を地上で模擬するための実験装置を試作し, そのプラズマ特性を調べると共にシミュレーション実験条件について検討した。

2. 宇宙プラズマ環境シミュレーション実験装置

宇宙飛翔体周りのプラズマ環境を模擬するためには,

プラズマを生成し, それを宇宙機の軌道速度もしくはそれ以上に加速する装置, すなわちプラズマ加速機が必要である。また材料の環境試験ではできる限りクリーンなプラズマを生成しなければならない。本研究では Fig. 1 に示す電子サイクロトロン共鳴 (Electron Cyclotron Resonance: ECR) 放電を利用したプラズマ加速機を試作した^{4,5)}。作動ガス・酸素もしくは窒素はマスフローコントローラを通して径方向内側に4カ所から供給される。2.45 GHzのマイクロ波は方形導波管内 TE₁₀ モードで伝送され, 円形の石英ガラスを通して円筒型の放電室 (内径125 mm, 長さ100 mm) に放射される。放電室の外側からソレノイドコイルにより発散磁場が印加される。放射されたマイクロ波と印加された発散磁場による ECR 加熱によりプラズマが生成される。生成された高温電子が発散磁場に沿って拡散するので電荷分離が起こり, イオンが加速される。ソレノイドコイルにより印加される発散磁場の形状と中心軸上における磁束密度の軸方向変化の計算結果を Fig. 2 に示す。ECR 共鳴に必要な磁束密度 (87.5 mT) の位置は石英ガラス窓から約20 mm 下流となる。直径100 mm, 厚さ3 mmのアルミニウム製サンプルホルダーは石英ガラス窓から700 mm 下流に設置され, 加速されたプラズマ粒子が衝突する。ECR 放電プラズマ加速機はステンレス製真空タンク (直径700 mm, 全長1520 mm) のフランジに取り付けられ

* 平成8年10月30日 第37回真空に関する連合講演会で講演

** 大阪大学基礎工学部 (〒560 大阪府豊中市待兼山町1-3)

Fig. 1 Cross section of electron cyclotron resonance plasma accelerator for space plasma environment simulation.

る。真空タンク内の排気には排気速度 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ のターボ分子ポンプが用いられ、最高到達真空度は $4.7 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ である。

3. プラズマ特性

シミュレーション実験条件を設定するためには、サンプルホルダーに流入するイオンのフラックスを把握しなければならない。それぞれ静電単探針と反射電場型エネルギーアナライザーで測定されるプラズマ密度とイオン速度の積でフラックスが求められる。サンプルホルダーに2つの小穴をあけ、1つには円筒単探針を背後から流れに平行に挿入し、もう一つの穴からイオンを取り込みエネルギーアナライザーに導いた。円筒探針の長さや直径はそれぞれ 4 mm と 0.2 mm であり、その探針はサンプルホルダーから 20 mm 前方、すなわちホルダー全面に形成されるシース（デバイ長約 0.5 mm ）の外側に配置された。印加電場はこの位置で 3 mT 程度であり、電子ラーマ半径は $2 \sim 3 \text{ mm}$ なので探針半径より十分大きく、磁場の影響は無視できると考えられる。

サンプルホルダー近傍における酸素のプラズマ密度と電子温度のサンプルホルダー電位に対する依存性を Fig. 3 に示す。横軸は接地電位を基準としたサンプルホルダーの電位を表している。プラズマ密度は $1.0 \sim 3.0 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ であり、サンプルホルダーの電位が低くなるほど少し増加している。一方、電子温度は $6 \sim 12 \text{ eV}$ の範囲でばらつきが見られ、その傾向はホルダーの電位が低くなるほど顕著に現れている。窒素ガスの特性もほぼ同様の傾向を示した。

Fig. 2 Magnetic field lines and strength generated by solenoidal coils.

Fig. 3 Plasma density and electron temperature vs. sample holder potential characteristics for oxygen.

エネルギーアナライザーによって検出されたイオンコレクタ電流とその微分形の一例を Fig. 4 に示す。横軸はサンプルホルダーの電位 V_h に対してエネルギー選択を行う G_2 グリッドにかかった阻止電圧、すなわちイオンの入射エネルギーを表している。黒丸は阻止電圧に対して測定されたコレクタ電流であり、実線はその電流を阻止電圧で微分したものでイオンのエネルギー分布を表す。 V_s は単探針測定によるプラズマ空間電位である。イオンはサンプルに入射する前に $V_s - V_h$ なる電位差、すなわちシースにより加速される。シースにより与えら

Fig. 4 Typical ion collector output of electrostatic ion energy analyzer.

れるエネルギーを平均入射エネルギー（エネルギー分布関数のピーク点）から差し引くと、イオンのシース直前の速度を見積もることができる。発生イオンを原子イオン（ O^+ もしくは N^+ ）と仮定すると、それらの軸方向速度は本作動条件の範囲でそれぞれ 9~12 km/s, 10~14 km/s となった。以上から、酸素イオンのフラックスは Fig. 5 に示されるように $1.0 \sim 3.0 \times 10^{19}$ ions/m²s, 窒素のそれは $1.0 \sim 4.0 \times 10^{19}$ ions/m²s と見積もられた。さらに、サンプルホルダーの電位を調整することにより、イオンのサンプルへの入射エネルギーを調整できることがわかった。また、プラズマ流中の原子状酸素のフラックスは、銀をプラズマ流に曝し、酸化銀生成による質量増加を測定することにより求められた。水晶振動子を用いた測定の結果、原子状酸素のフラックスは $8 \sim 12 \times 10^{18}$ atoms/m²s となった。

4. ま と め

ソレノイドコイルの発散磁場を用いた電子サイクロトロン共鳴放電型プラズマ加速機と大排気量のターボ分子ポンプにより低圧下でクリーンな反応性プラズマ流を生成することができた。本宇宙プラズマ環境シミュレーション

Fig. 5 Ion flux and incident ion energy vs sample holder potential characteristics for oxygen.

装置では異なる粒子を同時に実際の宇宙環境と同じ比率で照射することができないので、照射条件は各粒子について設定される。高度400 kmにおける1年間分の酸素イオンの照射に必要な時間は1133秒、原子状酸素のそれは250時間と設定された。窒素イオンでは41秒となった。粒子の衝突速度はサンプルホルダーの電位を調整することにより実際の衝突速度に近づけることができた。但し、本プラズマ源のプラズマ分光測定の結果、生成イオンは原子イオンばかりでなく分子イオンも存在することが確認されたので、今後分子イオンの量とその材料照射への影響を明確にする必要がある。

〔文 献〕

- 1) H. Tahara, L. Zhang, M. Hiramatsu, T. Yasui, T. Yoshikawa, Y. Setsuhara and S. Miyake: J. Appl. Phys., 78 (1995) 3719.
- 2) 田原弘一, 張 麓璐, 平松美樹, 安井利明, 吉川孝雄: 日本航空宇宙学会誌, 43 (1995) 170.
- 3) 田原弘一, 張 麓璐, 平松美樹, 安井利明, 吉川孝雄: 真空, 38 (1995) 391.
- 4) H. Tahara, A. Ogo, L. Zhang, T. Yasui and T. Yoshikawa: 20th Int. Symp. on Space Technol. and Science, Gifu, ISTS-96-b-38p, 1996.
- 5) 田原弘一, 小河 敦, 張 麓璐, 安井利明, 吉川孝雄: 日本航空宇宙学会誌, 1997, 印刷中.