

電離層プラズマ環境模擬のためのマイクロ波放電式酸素イオン源^{*1}

Microwave Discharge Oxygen Ion Source for Ionospheric Plasma Environment Simulation

林 寛^{*2}・趙 孟 佑^{*3}・西山 和 孝^{*4}・國中 均^{*4}

Hiroshi HAYASHI, Mengu CHO, Kazutaka NISHIYAMA and Hitoshi KUNINAKA

Key Words: Microwave Discharge Oxygen Ion Source, Ionospheric Plasma Simulator, Plasma Diagnosis

Abstract: In recent years, concern has been raised about the interference phenomena (chemical reaction, sputtering etc.) between ionospheric plasma and high-voltage space systems such as the International Space Station and so on. In order to solve the physical mechanisms of these phenomena and establish the prevention technology, it is important to accumulate experimental data based on ground simulation tests. Therefore we have developed a cathode-less microwave discharge oxygen ion source for an ionospheric plasma simulator. The oxygen ion source for ionospheric plasma simulation demands plasma density more than 10^{12} m^{-3} and high durability (our target is more than 70 hours). This ion source is capable of generating oxygen plasma of the order of 10^{14} m^{-3} for more than 100 hours with 25 W microwave power and 3 sccm oxygen gas. In order to investigate the operational performance of the oxygen ion source, we conduct various measurement tests such as plasma diagnosis using a single probe, ionic mass spectroscopy by a Quadrupole Mass Spectrometer (QMS), atomic oxygen flux measurement using a silver coated QCM (Quartz Crystal deposition Monitor) and 70 hours operating test etc. This paper reports the experimental results of each measurement tests and assesses performance as an ion source for ionospheric plasma simulator.

1. は じ め に

これからの宇宙開発では国際宇宙ステーション計画、太陽発電衛星、月・惑星探査ミッション等の多様な宇宙ミッションが展開される。これに伴い、将来の宇宙機は著しく大型化及び長期運用化していくと予想される。これは宇宙機が地上と比べて特異で過酷な宇宙環境に長期間にわたって曝露されることに他ならず、そのために宇宙機の耐久性が大幅に低下されることが懸念される。現在、宇宙環境（宇宙線、プラズマ等）が宇宙機に及ぼす影響に関してはそのメカニズムは十分に解明されていない。そのため宇宙フライト実験や地上模擬実験等を通じて現象の発生メカニズムを解明し、その抑制技術を確立することが急務となっている。

国際宇宙ステーション等が航行する低地球軌道（LEO：Low Earth Orbit）では、地球高層大気が太陽からの紫外線等を吸収して解離・電離されるために最高で 10^{12} m^{-3} オーダーの高密度の電離層プラズマで満たされている。電離層プラズマを構成する主要なイオンは酸素原子イオン（ O^+ ）であり、その他に中性粒子の原子状酸素（AO：Atomic Oxygen）が酸素イオンの約 1,000～10,000 倍の密度で存在している。これらの粒子は化学的に活性であり、宇宙機の耐久性の低下の要因となることが知られている。電離層プラ

ズマに曝露された部分の電位が上昇すると、そこに形成されるシース表面の拡大により宇宙機表面にイオンが収集される。荷電粒子であるイオンの収集量は宇宙機の表面電位（シース厚）に依存するため、第 1 図中にも示したように曝露部分の表面積（ L^2 で定義）とシース表面積（ $(L+2D)^2$ で定義）との比率に応じて酸素イオンが支配的な領域と電気的作用を受けない原子状酸素が主役的な領域が存在すると考察される。第 1 図は高度 400 km でのプラズマ環境に曝露された金属材料に対して高層大気粒子が垂直に入射してくる場合を想定して、主たる影響・効果の領域分けしたものである。なお、図中の各領域は高度、イオンの入射方向及び金属材料等によって大きく異なることに予め留意されたい。図中で $\text{Flux}_{\text{ion}} = \text{Flux}_{\text{AO}}$ のラインより上側の領域では、原子状酸素の影響が最も顕著となる。過去の宇宙機においても様々な影響が報告されているため、原子状酸素の影響に関する研究は現在盛んに行われている^{1, 2)}。図中の $\text{Flux}_{\text{ion}} = \text{Flux}_{\text{AO}}$ のラインより下側の領域ではシースの表面積が電圧印加部分の表面積の 1,000 倍以上になる、つまり入射イオンのフラックスが原子状酸素と同等かそれ以上になりイオンの影響が無視できなくなる。この領域において酸素イオンの運動エネルギー E_k （または、電位）が活性化エネルギー E_c やスパッタリングのしきい値 E_{st} を大幅に上回る数百 V 程度の領域では、スパッタリングによる侵食が支配的になると考察される。スパッタリングを試験対象とする場合はガス種に強く依存しないために地上実験装置の都合上、キセノンやアルゴン等の希ガスのイオン

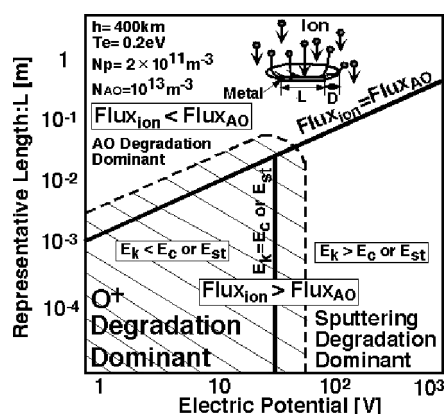
^{*1} © 2004 日本航空宇宙学会

平成 16 年 6 月 8 日原稿受理

^{*2} 九州工業大学大学院工学研究科電気工学専攻

^{*3} 九州工業大学工学部電気工学科

^{*4} 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

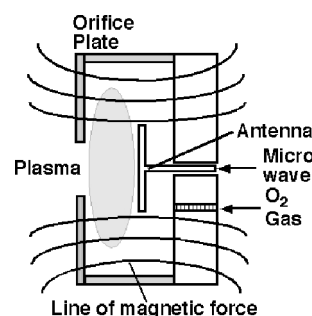


第1図 酸素イオンの影響が顕著になる領域の推測

を用いることが一般的である．近年では金属材料から更に進んで数百～数千 kV のエネルギーを持つ酸素イオンによる宇宙用高分子材料やガラス材料への影響に関する研究もいくつか報告されている^{3,4)}．一方 E_k が E_{st} や E_c と同等または下回る領域（第1図では、 $E_k = E_c$ or E_{st} のラインから左側の領域）では、酸素イオンによる酸化や腐食等の化学的劣化が卓越すると推測される．第1図においてハッチングされた領域に含まれる太陽電池アレイのインターコネクター等のような代表長が数 cm 以下で数 V ～数十 V 程度の電圧で直流バイアスされた電極等が対象となるであろう．

現在の宇宙機では直流送電方式が採用されているが、今後は電圧変換が容易な交流送電方式が主流になると予想される．交流送電ではコンバータ等の高効率化並びに小型軽量化を図るために送電周波数は高い方が有利であり、過去には 400 Hz 及び 20 kHz の周波数が検討された⁵⁾．ケーブル表面にデブリ衝突等により微小なピンホールが生じた場合は、ここからの収集電流は直流に比べて交流の方が格段に増加し、ピンホール周辺において著しい侵食が認められることが報告されている⁶⁾．また、ピンホールがない場合でも、交流送電の電力ケーブル等から電力が漏洩することが指摘されている⁷⁾．交流送電と電離層プラズマの干渉について更に述べると、送電電圧の高低にかかわらず高周波電圧が伝送する導線を被覆する絶縁材表面はプラズマ収集を繰り返すため、特に酸素イオンによる化学的な材料劣化が危惧される．同様の現象は半導体プロセッシング分野で絶縁体薄膜のエッチングや表面改質のための RF バイアス技術として既に応用されている．このような電離層プラズマ中の酸素イオンによる高周波絶縁部の材料劣化は、筆者らの知る限り報告例がなく未だ研究の及ばない分野であり、本研究で扱う酸素イオン源の活躍が期待される新しい領域と言える．

筆者らはこれまで高電圧太陽電池アレイ上における宇宙プラズマ干渉に関して様々な研究に取り組んできた^{8,9)}．この中で筆者らが地上模擬試験に使用してきたプラズマ源は、キセノンやアルゴンを作動ガスとする熱陰極を用いた Kaufman 型プラズマ源である．これを電離層プラズマ模擬を目的に酸素で作動させるとプラズマ源内部の熱陰極が著しく



第2図 マイクロ波放電式酸素イオン源の構造

酸化・消耗されて、大幅に作動寿命が短縮されるために酸素プラズマ生成には適していない．また、プラズマ源としては宇宙の高真空を模擬するために、プラズマ源へのガス流量は極力少ない方が望ましい．そこで筆者らは電離層プラズマ模擬用の酸素イオン源としてマイクロ波放電による無電極プラズマ生成に着目し、特に低ガス背圧下でも長時間の高密度プラズマ生成が期待できる電子サイクロトロン共鳴 (ECR: Electron Cyclotron Resonance) 加熱型イオン源を導入することとした．本研究ではできるだけ短期間で高い信頼性と耐久性を有するマイクロ波放電式酸素イオン源を得るため、地上での耐久試験において約 20,000 時間の耐久性を達成した宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 (ISAS/JAXA) の工学試験探査機「はやぶさ」搭載のマイクロ波放電式イオンエンジンの中和器¹⁰⁾を採用することとした．そこで本稿では酸素を作動ガスとして用いた場合のマイクロ波放電式中和器の点火・動作特性、生成プラズマ特性、耐久性について調査し、マイクロ波放電式中和器の電離層プラズマ模擬用酸素イオン源としての適性を検討評価したので、以下に報告する．

2. マイクロ波放電式酸素イオン源

本研究において酸素イオン源を開発するに際して、筆者らは以下に示す性能目標を設定した．

- 1) 電離層プラズマを模擬するために真空槽内部で 10^{12} m^{-3} オーダーのプラズマ密度を達成すること
- 2) メンテナンス無しで 70 時間以上の運用が可能であること
- 3) マイクロ波放電式中和器としての設計を極力変更しないこと
- 4) できるだけ取扱い及び運転手順が容易であること

既に述べたように本酸素イオン源は、工学試験探査機「はやぶさ」に搭載されているマイクロ波放電式イオンエンジンの中和器を一部改修して活用している．本イオン源が一般的な産業用マイクロ波放電式酸素イオン源と大きく異なる点は第2図にも示したように ECR に必要な磁場形成に電磁石を使用せず、永久磁石を採用していることとマイクロ波電力の発振と導入にマグネトロンや導波管ではなく半導体素子式発振器と同軸ケーブルを用いていることである．このことが直径 35 mm、長さ 21 mm、重量がおおよそ 170 g というコンパクトな構造と優れた運用性の実現に大きく寄

与している．もう一つの特徴は本イオン源が加速電極によるイオンビーム加速を行うのではなく、両極性拡散によりプラズマを放出する後方拡散型イオン源であることである．これにより電離層プラズマと同じような「静かなプラズマ」を模擬すると共に大幅なイオン源の長寿命化が可能となった．更に従来の産業用マイクロ波イオン源よりも高い約 4 GHz のマイクロ波周波数を採用することで、生成プラズマの高密度化を目指している．

放電室内部に作動ガスである酸素 3 sccm を注入し、アンテナからマイクロ波電力を投入すると放電室周囲に配置された永久磁石の磁界とマイクロ波電界との ECR 加熱放電によりプラズマを生成する．放電室内で生成した酸素プラズマは、両極性拡散によりオリフィスプレートを通して真空槽内部に放出される．

3. 酸素イオン源の評価試験

3.1 試験系 筆者らはマイクロ波放電式中和器の電離層プラズマ模擬用酸素イオン源としての適性を評価し、かつその最適な動作条件を調査するために、本稿の 3.2～3.5 節に述べる評価試験を小型真空槽 (第 3 図) を用いて実施した．この小型真空槽は最大高さ 590 mm× 最大幅 440 mm× 最大奥行 490 mm のステンレス製真空槽である．酸素イオン源は真空槽に真空フランジを介して設置され、これに対向するポートから各種測定機器を導入する．その他に真空槽の内部観察、写真撮影のためのビューポートが 3 カ所設けられている．なお、本真空槽は全試験を通じて電氣的に接地され、これを基準電位とした．真空槽内部は粗引き用ロータリーポンプ (排気速度 300 l/min) と本引き用 10 インチ油拡散ポンプ (排気速度 3.0 kl/sec) により真空排気される．その真空度はガス非導入時で 2.6×10^{-4} Pa (1.9×10^{-6} Torr)、酸素 3 sccm 導入時で 5.9×10^{-3} Pa (4.4×10^{-5} Torr) である．

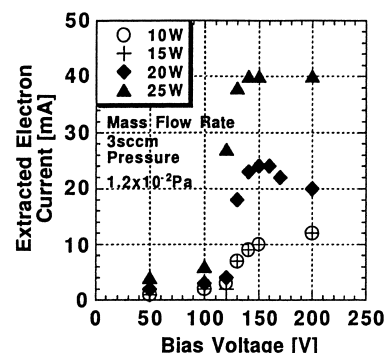
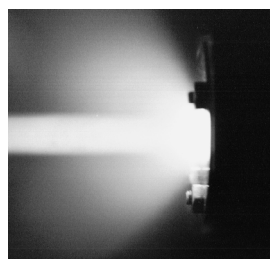
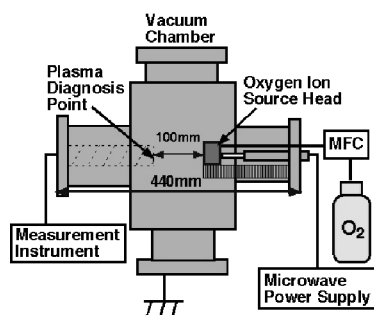
マイクロ波電力は 10～25 W の範囲で半導体式増幅器にて電力増幅して出力している．マイクロ波の進行波と反射波のモニターは、方向性結合器を介して両者を分離して、僅かな電力をディテクターにて検波することによって行っている．酸素ガスはガスボンベからマスフローコントローラを介して、0～3 sccm の範囲で放電室内部に注入される．

3.2 点火・動作特性 マイクロ波放電式中和器は本来キ

セノンを作動ガスとしており、これを酸素で作動させた例はこれまでに無い．酸素はキセノンと比較して電離電圧はほぼ同じであるが、電離断面積が格段に低いためにプラズマ生成が難しく、本中和器が酸素でプラズマ点火が可能であるかは非常に興味深い．そこで筆者らは最初にマイクロ波電力 20 W、酸素流量 1 sccm の条件で酸素プラズマの点火を試みた．その結果、第 4 図に示したようにマイクロ波電力を投入すると同時に淡い黄色の発光は認められた．これにより本中和器がイグナイター等を一切用いることなく自己プラズマ点火によって安定な酸素プラズマ生成が可能であることが確認された．その後、20 W 未満のマイクロ波電力でもプラズマ点火を試みたが、点火できなかった．但し、一度点火した後であれば 10 W 程度までならマイクロ波電力を低下させてもプラズマを維持することが可能であった．

次に酸素イオン源の動作特性を把握するために、イオン源下流 15 mm の位置に単孔径 10 mm の電子抽出電極を配置して抽出電極のバイアス電圧と抽出電子電流の特性を測定した．これによりマイクロ波電力 (10～25 W)、ガス流量 (1～3 sccm) に対する酸素イオン源の動作特性を評価した．第 5 図並びに第 6 図にマイクロ波電力と酸素流量に対するイオン源の動作特性を掲げる．第 5 図よりマイクロ波が 15 W 未満では動作特性に大きな差異は見られないが、20 W を上回ると急激に抽出電子電流が増加し、マイクロ波電力の増大の効果が著しく現れている．一方、第 6 図の酸素流量に対する特性に注目すると、マイクロ波電力の場合より顕著ではないにしろ酸素流量の増加に伴って大きな電子電流が抽出できた．このことから本酸素イオン源を作動させるためには 20 W 以上のマイクロ波電力と 3 sccm 程度のガス流量が必要であることが分かった．特にマイクロ波電力による効果が顕著であることが認識された．

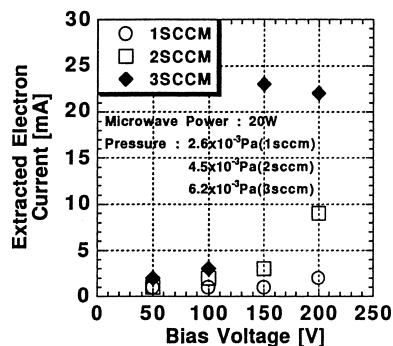
3.3 生成プラズマ特性 イオン源下流 100 mm にモリブデン製平板プローブ (表面積 1.63×10^{-4} m²) を取り付けマイクロ波電力、オリフィスプレート内径をパラメータとして生成プラズマ特性 (特にプラズマ密度) を診断した．当初は酸素流量もパラメータとする予定であったが、2 sccm 以下の流量ではプラズマ生成が不安定になる傾向が見られたため、止むを得ず酸素流量は 3 sccm 固定とした．なお、診断対象となるプラズマが拡散プラズマであるため、イオン源からの漏れ磁場は無視できるものとみなしてプローブ



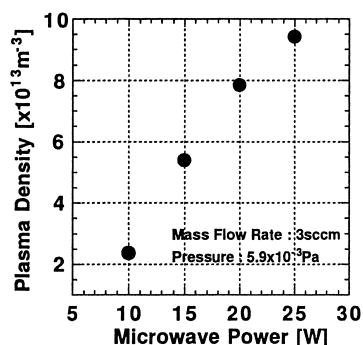
第 3 図 酸素イオン源評価用小型真空槽

第 4 図 作動中の酸素イオン源の様子

第 5 図 抽出電子電流-電圧特性のマイクロ波電力依存性



第6図 抽出電子電流-電圧特性の酸素流量依存性



第7図 プラズマ密度のマイクロ波電力依存性

はイオン源に対向するように固定した．プローブ表面は酸素プラズマによって酸化膜が形成されるため，定期的にプローブ表面をサンドペーパーで研磨することによって酸化膜を除去した．

マイクロ波電力をパラメータとした場合の生成プラズマ診断の結果を第7図に示す．ここに示されるようにプラズマ密度は目標性能の 10^{12} m^{-3} オーダーを大幅に上回っており，マイクロ波電力の増大に伴い著しく増加している．また，オリフィスプレートの内径を6, 10, 20 mm としてプラズマ特性を診断し直径が10 mm の場合で最も高いプラズマ密度が得られ，20 mm の場合では大幅にプラズマ密度が低下した．従って，酸素イオン源としてはオリフィスの内径を更に従来の大きさより拡大する必要があることが分かった．なお，電子温度と空間電位の値は動作条件によって大きく異なるがそれぞれ4~18 eV, 4~35 V の範囲であった．

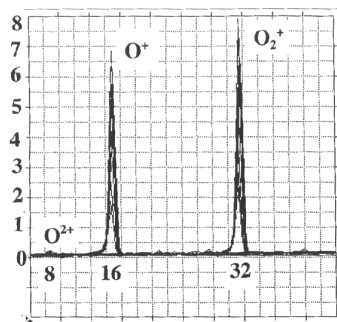
3.4 プラズマ組成の分析 イオン源から放出されるプラズマ中の粒子組成を分析した．生成プラズマ中には生成の対象とする酸素原子イオン (O^+) の他に，酸素分子の直接電離や解離により生成される酸素分子イオン (O_2^+) や原子状酸素が大量に含まれている．まず最初に ANELVA 社製四重極質量分析器 (QMS: Quadrupole Mass Spectrometer) AQA-200 を用いてプラズマ中の O^+ と O_2^+ の密度を算出した．QMS は本来真空槽中の残留ガスの分圧を測定するために，測定ガス粒子を分析管中で電子衝撃によりイオン化し，これを四重極マスフィルターで質量分離することによりマスペクトルを検出する質量分析器である．本研究ではイオン源起源のイオンのみを検出するため，フィラ

メントを点灯せずにイオン源から拡散して分析管中の流入してくるイオンのみを検出した．第8図に酸素プラズマのマスペクトルを示す．本マスペクトルでは質量電荷量がそれぞれ8, 16, 32の位置にマスピークが検出されている．これはそれぞれ酸素原子の二価イオン (O^{2+})，酸素原子の一価イオン (O^+)，酸素分子イオン (O_2^+) であるが，このマスペクトルから生成プラズマ中のイオンの殆どが O^+ , O_2^+ であることが分かる．イオンディテクターで検出された各イオン電流値から各イオンの組成の割合 (密度比) を算出すると O^+ が38%, O_2^+ が62%となった．これを予めシングルプローブで診断したイオン源下流100 mm でのプラズマ密度 $1 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ に割り振ると各イオンの密度は $3.8 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ (O^+), $6.2 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ (O_2^+) と算出され， O_2^+ が O^+ の2倍近く生成されていることが判明した． O^+ の密度も実際の LEO 上より高いことが確認できた．

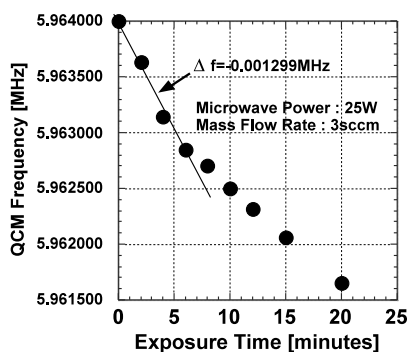
次に銀蒸着水晶振動子 (QCM: Quartz Crystal deposition Monitor) を用いた測定¹¹⁾ により原子状酸素のフラックスを見積った．銀は原子状酸素や酸素イオンによって著しく酸化されてしまう性質を有しており，これに伴う QCM の質量増加分 dM を共振周波数の低下分 df から，次式で示される関係を利用して QCM 表面に付着した原子状酸素の個数を見積ることができる．

$$df = -(f^2/N\rho) \cdot dM/A \quad (1)$$

ここで f は基準共振周波数， N は周波数定数， ρ は水晶の密度， A は QCM の曝露面積である．本研究では INFICON 社製銀蒸着 QCM センサーをイオン源下流に設置して，その共振周波数の変化を INFICON 社製蒸着モニタ XTM/2 を用いて測定した．酸素プラズマの曝露時間は20分である．なお，原子状酸素のみによる酸化を実現するために，文献12) に示される手法を参考にしてセンサー周辺をメッシュ状イオンリペラーで取り囲み，これに予めプローブ診断で求めた空間電位より高い電圧 (本試験では40 V とした) を印加して酸素イオンを反射させた．また，予めプラズマ点火をしない状態でセンサーを酸素ガスに30分間曝露し，質量変化が生じないことを確認した．本測定方法では銀に対する酸素付着確率及び反応確率は100%と仮定して原子状酸素量を見積った．そのため，本測定の結果はフラックスの最低値を与えることになり，実際のフラックスは更に大きいことに留意する必要がある．銀蒸着 QCM の酸化特性を第9図に示す．この図において縦軸は QCM 共振周波数，横軸は曝露時間を示しているが，これを見ると酸素プラズマ曝露開始から約6分前後で酸化特性の傾きが異なっている．これは銀の酸化速度が曝露初期の段階では曝露面における酸化が支配的であるために直線的になり，次第に酸化が進行してくると酸化層内部における拡散律速によって放物線則に従うためである．そのため，原子状酸素のフラックス測定にはプラズマ曝露初期の傾きが急激な領域を用いる必要がある．曝露後6分間の QCM 周波数変化から求めた原子状酸素のフラックスは， $2.6 \times 10^{15} \text{ atoms/cm}^2 \cdot \text{sec}$



第8図 酸素プラズマのマスペクトル(縦軸の検出イオン電流値で単位は $\times 10^{-10}$ A, 横軸は検出イオンの質量電荷量比 M/Z)

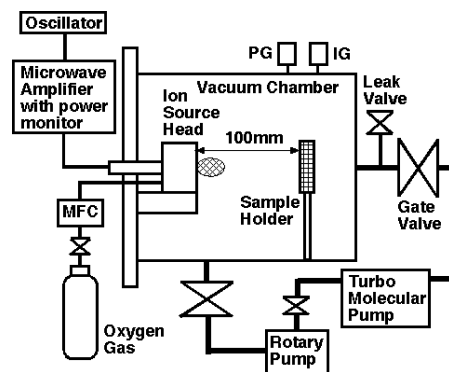


第9図 銀蒸着水晶振動子の酸化特性(図中の Δf は曝露後6分間のものである)

と見積られた。フラックスは粒子の密度と速度の積と定義されるので、ここで原子状酸素の速度は熱運動平均速度であると想定すれば、原子状酸素の密度は $1.5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ と算出される。

3.5 70時間運用試験 本酸素イオン源が実際の運用に移行された場合、その年間当りの総稼動時間は数百～数千時間程度が想定されている。更に試験によっては1週間程度は真空槽を大気開放することができないため、イオン源のメンテナンスが全くできないケースも予測される。そのような背景を踏まえて筆者らは1日当りの稼動時間を平均10時間と想定して、既述のようにメンテナンスなしで70時間の運用を可能とする性能目標を設定した。実際に本イオン源が目標の耐久性を有していることを実証するために、実際の動作条件で70時間の作動試験を行った。本試験はイオン源を70時間連続運転させ、プラズマ点火後3時間ごとに生成プラズマ特性、供給マイクロ波電力、イオン源の表面温度を測定し、本イオン源が安定に稼動し、かつ一定のプラズマ条件を維持できることを評価検討するものである。プラズマ診断はシングルプローブをイオン源下流100mmに設置して行った。また、表面温度の測定は熱電対温度計を用いてイオン源の外壁の温度を測定した。更に放電室内部の酸化状況を調査するため、試験の前後でイオン源の分解点検と電子天秤を用いて特に劣化が懸念されるアンテナの質量測定を実施した。

試験の結果、イオン源は70時間に渡って極めて安定に稼動し、プラズマ特性も電子温度が15eV前後、プラズマ



第10図 電離層プラズマ環境シミュレータの構成図

密度は時間の経過と共に僅かに低下する傾向が見られたが、約 $1 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ の密度を達成していることを確認した。プラズマ密度が僅かに低下した理由についてはイオン源におけるプラズマ生成量自体が減少したことも否定はできないが、シングルプローブ表面に酸化膜が形成されたためにプローブ電流が減少したことも大きな要因であると思われる。いずれにしてもその低下量は僅かであり、シングルプローブ法の測定誤差等を考慮すれば、ほぼ一定値を維持していると判断して問題ない。酸素イオン源表面の温度は約70°Cを維持しており、イオン源内部の永久磁石に影響を与えないことが分かった。試験後の分解点検でも特に問題となるような劣化、破損は認められなかった。コネクター等も含めたアンテナ系の質量測定の結果でも0.28mgの質量減少が確認されたが、これも特に問題のない量である。これらの結果から、本イオン源が目標とする耐久性を有していることが実証された。なお、本イオン源は70時間運用試験以外の試験でも30時間程度運転されており、本研究における通算稼動時間は100時間を超えている。

3.6 電離層プラズマ環境シミュレータ ここで筆者らが本研究で構築した電離層プラズマ環境シミュレータを第10図に示す。本シミュレータは真空槽、真空排気系、イオン源ヘッド、マイクロ波電源、ガス供給系から構成されている。ステンレス鋼(SUS-304)製真空槽は直径が400mm、長さが600mmの円筒形であり、その内部にはイオン源下流に材料サンプルを固定するためのサンプルホルダーが設けられている。真空槽内部は粗引き用のGVD100A型ロータリーポンプ(排気速度:120l/min)と本引き用のUTM150型ターボ分子ポンプ(排気速度:11.4kl/min)から成る真空排気系でガス導入が無い場合で $1.5 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ ($1.4 \times 10^{-6} \text{ Torr}$)、3sccmの酸素ガスを導入時で $4.0 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ ($3.0 \times 10^{-4} \text{ Torr}$)の真空度が達成される。酸素イオン源は真空槽の端にある開閉扉に真空フランジを介して設置されており、同じフランジに設けられたポートからマイクロ波電力と酸素ガスを導入される。半導体素子式発振器から発振された発振周波数4GHzのマイクロ波は、パワーアンプにて25Wに電力増幅され、セミリジットケーブルを通じてイオン源に供給される。作動ガスである酸素は、ガスボンベからマスフローコントローラを介してイオン源に注入される。本シミュレー

タの運用状況 (真空度, イオン源へのマイクロ波電力, ガス流量等) は, コンピュータにより自動的に監視, 制御することが可能である.

3.7 電離層プラズマ環境シミュレータにおけるプラズマ診断 本イオン源の基本的な動作特性並びに生成プラズマ特性の評価試験がほぼ完了した後で本酸素イオン源の最終的な性能確認試験を行った. 本試験では前述の電離層プラズマ環境シミュレータにイオン源を設置し, サンプルホルダーの位置 (イオン源下流 100 mm) でのプラズマ診断を実施した. プラズマ診断の結果は電子温度 7.0 eV, プラズマ密度 $8.8 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ であった. これはイオン源の単体試験におけるプラズマ診断の結果とほぼ同じ結果であり, 実際の電離層プラズマ環境シミュレータにおいても目標とするプラズマ特性が得られることが確認された. 本試験では初めて本電離層プラズマ環境シミュレータをフルシステムで作動させ, 全てのシステムが十分に機能することを確認できたことも大きな成果であった. 本試験を完了したことにより, 本酸素イオン源の基本的な評価試験は全て終了した.

4. 検 討 評 価

4.1 動作特性の評価 本研究ではマイクロ波放電式中和器による酸素プラズマの生成に成功した. 従来の作動ガスであるキセノンに比べれば大きなマイクロ波電力とガス流量を要するが, イグナイター等の補助的な点火装置を用いることなく円滑に自己プラズマ点火できることは, 本中和器が優れたプラズマ点火特性を有していることの証しと言える.

次に本酸素イオン源の動作特性について評価したい. キセノンで作動させた場合は, 数十 V のバイアス電圧で数百 mA オーダーの電子電流が抽出できる. 一方, 酸素では 100 V 以上のバイアス電圧がなければ電子の抽出が殆どできず, 抽出できる電子電流も最大で 40 mA 程度であり, 電離断面積の低さにより放電室内におけるプラズマ生成量が極めて少なくなっていることが顕著に現れている.

本研究ではイオン源からの抽出電子電流-電圧特性からマイクロ波電力, ガス流量に対する動作特性を調査し, 酸素イオン源として最適なマイクロ波電力及びガス流量が示された. 作動ガスの電離断面積 σ は, ガス粒子と衝突する電子の運動エネルギーに大きく依存し, そのことは以下に示されるような半実験式で示されることが知られている¹³⁾.

$$\sigma = (K/EV_i) \ln(E/V_i) \quad (2)$$

ここで K は定数, E は電子の運動エネルギー, V_i は電離電圧である. (2) 式を踏まえて考察すればマイクロ波電力の増大に伴い電子の運動エネルギーが著しく増加し, これにより電離断面積が大きくなったことが放電室内におけるプラズマ生成量の増加につながったと考察される.

ガス流量の効果についてはガス流量の増加に伴い, イオン源の放電室内の作動ガス粒子の数密度が増加したことにより, 電子との衝突確率が増大したためにプラズマ生成量が増加したと考えられる. 従って, プラズマ生成量を増

大させることのみを考慮すれば, マイクロ波電力とガス流量は大きい方が望ましいことになる. しかし, マイクロ波電力の増大はイオン源温度を著しく高くし, ガス流量の増加は真空槽内部の真空度を悪化させてしまうことに他ならない. そのような事情から酸素イオン源の動作条件としては, マイクロ波電力は 20 ~ 25 W 程度, ガス流量は 3 sccm が適当であると判断される.

4.2 プラズマ特性の評価 本酸素イオン源から放出されるプラズマの特性は 3.3 節で述べた通りだが, 電子温度に関してはキセノン作動時 (約 3 eV) や実際の電離層プラズマ (0.2 eV) より高くなっており, プラズマ密度は目標とする電離層プラズマの密度を超えている. 電子温度に関しては本イオン源が生成するプラズマが高電子温度を特徴とする ECR 加熱プラズマであることに加えて, 酸素の電離断面積が小さいためにプラズマ中の電子が比較的高エネルギー状態を維持しているためと考察している. 電子温度が電離層プラズマよりもかなり高くなっているが, 他の研究機関¹²⁾ で用いられる酸素イオン源においてもほぼ同等の電子温度となっているようである. 高電圧宇宙機を想定して試料に 400 V 程度の電圧をバイアスする場合等は特に支障はないと思われるが, 他の場合を考慮すると電子温度を引き下げることが今後の重要な課題であると認識している. プラズマ密度に関しては電離層プラズマを大幅に超えるプラズマ密度が得られており, 酸素イオン源として当初の性能目標を達成できたと言える. 次に生成中の粒子組成について評価する. 第 1 表に本イオン源の生成プラズマと電離層 (高度 500 km) における各粒子の密度とフラックスを示した.

まず O^+ について評価すると, 密度及び照射量共に LEO 上より高く, 電離層プラズマ模擬に十分な生成量を達成できている. 一方, 副産物として生成される O_2^+ については, LEO 上の 100 万倍以上も生成されており, O^+ と比較しても約 2 倍以上の密度である. 理想としては殆ど全てのイオンが O^+ であることが望ましいが, 第 1 表に示したように本イオン源に要求されるイオン密度は達成できているが, O^+ より O_2^+ の方が圧倒的に多くイオン組成は電離層プラズマと異なっている. 原子状酸素に関しても LEO 上の 10 倍以上の密度であり, 生成プラズマ中で最も多く存在している. これは酸素原子の電離電圧 (13.61 eV) に比べて, 酸素分子の電離電圧 (12.06 eV) や解離電圧 (7 eV) が低いことに起因する. なお, イオン源の動作条件 (マイクロ波電力, ガス流量) を変化させても各粒子の密度が一様に変化するだけで, 全体の粒子組成はあまり変化しない. 電離層プラズマに適合したイオン組成に関しては, 他のマイクロ波放電式酸素イオン源^{3, 14)} においてもあまり達成されていない. 但し半導体プロセスにおける SOI (silicon on insulator) 用マイクロ波放電式酸素イオン源によってプラズマ中の全イオンのうち 9 割が O^+ であるイオン組成を実現した例がある¹⁵⁾. このイオン源は非共鳴型イオン源であり, 宇宙プラズマシミュレータ用イオン源として必要な低ガス背圧下における高密度プラズマ生成には不適である.

第 1 表 本イオン源と電離層の粒子組成の比較

構成 粒子	密度 [m^{-3}]		フラックス [$/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$]	
	酸素イオン源	LEO (@500 km)	酸素イオン源	LEO (@500 km)
O^+	3.8×10^{13}	10^{12}	3.2×10^{13}	10^{11}
O_2^+	6.2×10^{13}	10^7	3.7×10^{13}	10^4
AO	$>1.5 \times 10^{17}$	10^{16}	$>2.6 \times 10^{15}$	10^{15}

LEO 上のフラックスの値は、衛星表面の電位を 0 V として算出したものである。

4.3 耐久性の評価 本研究では通算で 100 時間以上の酸素イオン源の運転を行うことができ、当初の目標であった 70 時間を大幅に上回る耐久性を達成できた。全試験を通じて致命的な破損等もなく、今後更に高い耐久性が十分に期待できる。他者が開発したマイクロ波放電式酸素イオン源も目標の耐久性が 150 時間以上とされているものが多く^(14, 15)、本イオン源の耐久性も遜色のないものである。この過程の中には放電室内部（特にアンテナ表面）がやや酸化していることが確認された。これはむしろ放電室内部に酸化膜が形成されることによってそれ以上の酸化の進行を食い止めていると考えられ、イオン源の耐久性の向上に寄与していると思われる。作動時のイオン源表面の温度も 70°C 前後であり、高温に弱い永久磁石の減磁等の影響も全くない。マイクロ波放電によるプラズマ生成を採用することにより、従来の熱陰極を用いたイオン源では到底実現できない耐久性を実現することができたと言える。ただ、長時間の稼動ではプローブ表面の酸化によってプラズマ診断に支障を与えることが懸念されるため、プラズマ診断法も酸化膜の影響を受け難い高周波プローブ等の活性プラズマに適したものに改善する必要があると考えられる。

5. ま と め

マイクロ波放電式中和器を電離層プラズマ環境シミュレータ用酸素イオン源として活用するため、酸素を作動ガスとした場合のマイクロ波放電式中和器の動作特性、生成プラズマ特性、耐久性について調査し、酸素イオン源としての適性を評価した。動作特性では初めて酸素プラズマの生成に成功すると共に、動作条件としてはマイクロ波電力 20 ~ 25 W、ガス流量 3 sccm が最適であることを確認した。生成プラズマ特性を診断した結果、当初の目標である 10^{12} m^{-3} 以上のプラズマ密度を達成していることが確認できた。70 時間運用試験により目標とする耐久性を有していることを確認し、更に全試験を通じて 100 時間以上の運転が行われ、目標よりも高い耐久性を有していることが分かった。その一方で本研究はマイクロ波放電式中和器としての設計を極力変更しないことを基本方針として進めてきたが、磁気回路やマイクロ波アンテナなどに適切な改良を講じて、本酸素イオン源の更なる性能向上を図って改良を進めていくことがこれからの課題であろう。以上のことを総合すると、いくつかの改良点はあるがマイクロ波放電式中和器は電離層プラズマ環境シミュレータ用酸素イオン源として利用するための基本的な性能を有しており、電離層プラズマ環境模擬用酸素イオン源として活用できることが確かめられた。

2004 年 5 月現在、本研究で構築された電離層プラズマ環

境シミュレータは、九州工業大学サテライト・ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー (SVBL) にてほぼ整備作業が完了しており、2004 年度中の本格的な運用開始を目指して、最終的な準備作業を進めている。

本研究に際して宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部並びに九州工業大学趙研究室の諸氏をはじめとする多くの方々より多大なる御指導と御協力をいただきました。ここに厚く感謝いたします。また、本研究は (財) 日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として行ったものであることを付記します。

参 考 文 献

- 1) 田川雅人：低軌道宇宙環境における材料劣化現象とその地上シミュレーション，真空，**44** (2001)，pp. 506-511.
- 2) 大前伸夫：低軌道における原子状酸素の問題，真空，**38** (1995)，pp. 587-592.
- 3) 田原弘一，張 麓璐，平松美樹，安井利明，吉川孝雄：高エネルギーイオン照射による宇宙用高分子及びガラス材料の化学構造変化，日本航空宇宙学会誌，**43** (1995)，pp. 170-177.
- 4) 野澤 毅，佐々木進，横田俊昭，太田正廣，河野 汀，臼井基文：SPS2000 のプラズマ環境下における材料劣化の評価，第 12 回宇宙エネルギーシンポジウム (平成 4 年度)，宇宙科学研究所，1993，pp. 149-153.
- 5) Simon, W. E. and Nored, D. L.: Manned Spacecraft Electrical Power System, Proc. IEEE., **75** (1987)，pp. 277-307.
- 6) Stillwell, R. P., Stevens, N. J., Crawford, G. K., Strader, S. R. and Valles, J. R.: AC System-Plasma Interactions, IEEE Trans. Nucl. Sci., **35** (1988)，pp. 1394-1399.
- 7) Hastings, D. H., Barnett, A. and Olbert, S.: Radiation from Large Space Structures in Low Earth Orbit with Induced Alternating Current, J. Geophys. Res., **93** (1988)，pp. 1945-1960.
- 8) 趙 孟佑，白石 康，匹田政幸，國中 均：MUSES-C 搭載高電圧太陽電池のプラズマ干渉，日本航空宇宙学会論文集，**49** (2001)，pp. 268-277.
- 9) 趙 孟佑，白石 康，豊田和弘，匹田政幸：低地球軌道用放電抑制型高電圧太陽電池アレイの基礎開発実験，日本航空宇宙学会論文集，**50** (2002)，pp. 215-222.
- 10) Funaki, I., Satori, S. and Kuninaka, H.: Low-Power Microwave Electron Source for Ion Engine Neutralizer, Jpn. J. Appl. Phys., **37** (1998)，pp. 4228-4229.
- 11) Matijasevic, V., Garwin, E. L. and Hammond, R. H.: Atomic Oxygen Detection by a Silver-Coated Quartz Deposition Monitor, Rev. Sci. Instrum., **61** (1990)，pp. 1747-1749.
- 12) 田原弘一，小川 敦，張 麓璐，安井利明，吉川孝雄：電子サイクロトロン共鳴放電型プラズマ加速器を用いた宇宙プラズマ環境シミュレータの開発研究，日本航空宇宙学会誌，**45** (1997)，pp. 396-403.
- 13) 電気学会：電子・イオンビーム工学，オーム社，東京，2001，p. 12.
- 14) 村上 寛，綿引和実，岩崎 晃，工藤 勲：酸化膜作成用小型イオン源の試作，真空，**34** (1991)，pp. 256-258.
- 15) 関 孝義，登木口克己：大電流酸素イオン注入用マイクロ波イオン源の特性，真空，**42** (1999)，pp. 670-675.