

# 逆電位アナライザを用いた小型イオンエンジンの放電室プラズマ測定

## Plasma Measurements in a Miniature Ion Engine Discharge Chamber Using a Reverse Potential Analyzer

中野 正勝<sup>1)</sup>

Masakatsu Nakano<sup>1)</sup>

Abstract: One way to improve the specific impulse of an ion engine is to optimize the shape of the grid to increase the confinement of neutral particles. At the same time, the ions that contribute to the thrust must pass through the grid holes to the maximum extent possible without colliding with the inner walls. However, the existing numerical models do not reflect the plasma potential distribution in the discharge chamber, and the accel grid current used to verify the results of grid optimization cannot be adequately reproduced. Since the plasma production region in a miniature ion engine is too small for probe measurements, plasma measurements in the discharge chamber of the ion engine were carried out using a non-invasive retarding potential analyzer (RPA) to determine if it was possible to acquire data for modeling the plasma potential distribution in the discharge chamber. At the same absorbed power and ion extraction current, water, argon, CO<sub>2</sub>, and adamantane were used as propellants, and the difference in plasma potential was determined. The global model for CO<sub>2</sub> ion engine was validated from the obtained data and a suitable reactive species model was selected. It was also investigated whether the local plasma potential in the discharge chamber could be measured by the RPA, and it was found that it was possible by installing a collimator at the RPA inlet and accelerating the ions with sufficient ion extraction voltage.

Keywords : Ion Energy Distribution, Plasma Potential, Retarding Potential Analyzer, Ion Engine Discharge Chamber

### 1. 緒言

イオンエンジンは推進剤を放電室でプラズマ化させて、多数の孔の空いた電極（グリッド）に印加した電位差によりイオンを加速噴射する電気推進の一つである<sup>1)</sup>。米国では1960-70年代に水銀を用いたイオンエンジンが軌道実証され、国内でも1980-90年代には技術試験衛星 ETS-III や ETS-VI でイオンエンジンの軌道上の実証試験が行われた<sup>2-5)</sup>。現在、イオンエンジンは実用の段階にあり、国内では「はやぶさ」や「はやぶさ 2」における惑星間飛行を実現させた他<sup>6)</sup>、「つばめ」による超低高度衛星開発ミッションにも用いられた。商業市場では Boeing の 702SP による静止衛星の 2 基の同時投入にも用いられている<sup>7)</sup>。

現在のイオンエンジンの主流は希ガスであるキセノンを推進剤として用いているが、キセノンは年間世界生産量が 50 トン程度で資源量に乏しい上に種々の分野で需要が高まっている<sup>8)</sup>。そのため、代替となる推進剤の研究が進んでいる。代替推進剤として、希ガスであるクリプトンやアルゴン、水、マグネシウム、亜鉛、ビスマス、ヨウ素、C60 などの研究開発が進められている他、低高度を飛行する場合には大気を取り込んで推進剤として用いる構想もある<sup>9-14)</sup>。

これらの代替推進剤を用いる上での課題の一つは、プラズマ化されイオンとして引き出される推進剤の割合である

推進剤利用効率が低いことである。推進剤利用効率が低いということは推進剤の積載量が増え、ペイロードを低下させる要因となる。

具体例として著者がここ数年扱っている水と二酸化炭素で考えてみる。代替推進剤の中でも水は入手が容易で毒性がないなど利点が多く、小型イオンエンジンに用いられている<sup>15)</sup>。しかしながら、キセノンと比較して分子量が小さく熱速度が大きいため放電室外部に流出しやすく、推進剤利用効率が低下しやすい。二酸化炭素は、有人宇宙活動の副産物として得られ、また、火星の大気等から採取することができる代替推進剤候補である。ただし、水よりも分子量は高いもののアルゴンと同程度でありキセノンと比較すると推進剤利用効率は低くなる。

推進剤の分子量は物理量であり設計等により改善はできない。改善可能な方法はグリッド形状を最適化し、中性粒子の閉じ込めを向上させることである。一方で、推力に寄与するイオンは最大限通過させなくてはならない。具体的な方法としては、グリッドパラメータを最適化してイオンの流れを収束させ、それに合わせた孔径の小さいグリッドを作って中性粒子の閉じ込めをよくすることである。グリッド 1 孔に対してこれを行うのは手間がかかるものの困難ではないが、イオンエンジンの孔数は数百から数千に及ぶ

1) 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科 航空宇宙工学コース

ために全孔の最適化を実験的に行うことはコストがかかって現実的ではない。そこで数値解析による支援が必要となる。

イオンエンジンのグリッド設計分野では数値解析が多用される。特にグリッドの耐久性能の評価を行う際には、数万時間を超える長時間実験を繰り返すことは現実的ではないため、JIEDI tool などのイオンビーム軌道解析コードが整備された<sup>16)</sup>。JIEDI tool では、加速グリッド損耗の原因となる電荷交換イオンの生成に特に着目しており、グリッドから引き出されるイオンビームの電流値が重要なパラメータとされる。一方、放電室内部のプラズマ電位分布はイオンビームの軌道に影響を与え、イオンが加速グリッド内壁に衝突するかどうかを判定するような場合に重要なパラメータである。しかし、JIEDI tool における解析ではもともと加速グリッドが大きく損耗するような場合を想定しているために十分考慮されて来なかった。しかしながら、推進剤利用効率の改善を狙う場合には、加速グリッド電流の有無で孔径の大きさの妥当性が判断されることから、イオンの衝突によって生成する加速グリッド電流の正確な再現が必要である。すなわち、プラズマ電位分布を入れた数値解析モデルが必要とされるが、これまでの数値解析モデルでは特に考慮されて来なかった。

こうした数値解析モデルの構築のためには、放電室内部におけるプラズマ電位の分布を実験的に知る必要がある。通常、放電室内部のプラズマ情報はプローブ計測により取得されるが、プローブ計測は侵襲的な方法であり、また、対象となるイオンエンジンは小型であってプラズマが生成する領域も数 mm の範囲と微小領域であることから簡単にデータを得ることはできない。そのためグリッド全孔を対象とした数値解析では Particle-in-Cell/Monte Carlo Collision (PIC-MCC) による数値解析の結果を用いて放電室プラズマ諸量を与えたが<sup>17,18)</sup>、PIC-MCC 計算自体が多大な計算コストがかかることや、計算結果も実験値を厳密に再現できてはいない点で問題がある。いずれにせよ、プローブ計測で放電室内の電位分布が分かったとしても、それぞれの電位の場所から流れ出るイオンの量を示すイオンのエネルギー分布までは分からず、数値解析技術も十分ではない。

そこでイオンのエネルギー分布が取得可能で非侵襲的な計測方法を確立することを目的として、逆電位アナライザ (Retarding Potential Analyzer: RPA)<sup>19)</sup>を用いた計測に着手した。推進剤としては、代替推進剤として現在研究している水、二酸化炭素、アダマンタンを用いるとともに、実験データの蓄積が多いアルゴンも使用した。目的としたのは、逆電位アナライザでプラズマ電位やイオンのエネルギー分布などの放電室のプラズマの情報を得ることができるのかを確認することと、グリッド孔ごとにそれらのデータが取得可能かを確かめることである。また、イオンエンジンのグローバルモデル<sup>20,21)</sup>のような実験との比較による検証が必須な数値解析モデルに対して、得られたデータが使用可能かどうかを検証した。

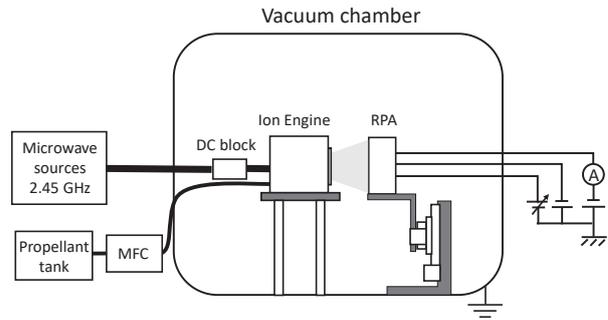
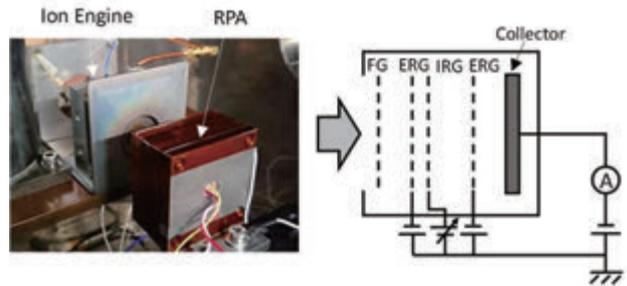
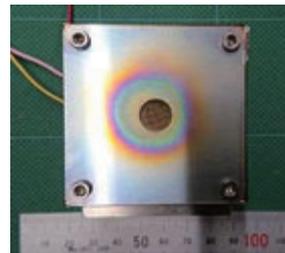


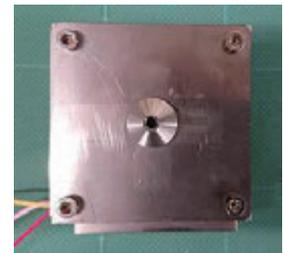
図1 RPA 実験の系統図



(a) RPA の外観とグリッドに印加する電圧



(b) 低電流計測用孔



(c) 高分解能計測用孔

図2 RPA の外観とグリッド構成

## 2. 実験装置の説明

図1に実験装置の系統図を示す。一辺が約 800 mm のステンレス製の角型真空容器内にイオン源と逆電位アナライザが設置されている。イオン源内部では Electron Cyclotron Resonance (ECR) 放電によりプラズマが生成しておりイオンが引き出される。このイオンを捕獲し、エネルギー別に抽出することができれば放電室内部で生成したイオンの電位に関する情報を得ることができる。これを行うための測定機器が逆電位アナライザである。

逆電位アナライザはイオン源の正面 10 mm の場所に設置され、イオン源との横方向の相対位置は XY ステージにより真空容器外部から変更可能である。真空容器内部はロータリーポンプとターボ分子ポンプにより減圧され、実験時の圧力は  $1.0 \times 10^{-2}$  Pa 未満である。逆電位アナライザとイオン源の詳細については以下で説明する。

### 2.1 逆電位アナライザ

逆電位アナライザについて図2に示す。イオンビームが入射する側から、Floating Grid (FG), Electron Retarding Grid (ERG), Ion Retarding Grid (IRG), Electron Retarding Grid (ERG), Collector で構成される。FG は RPA 内部に外部プラズマの影

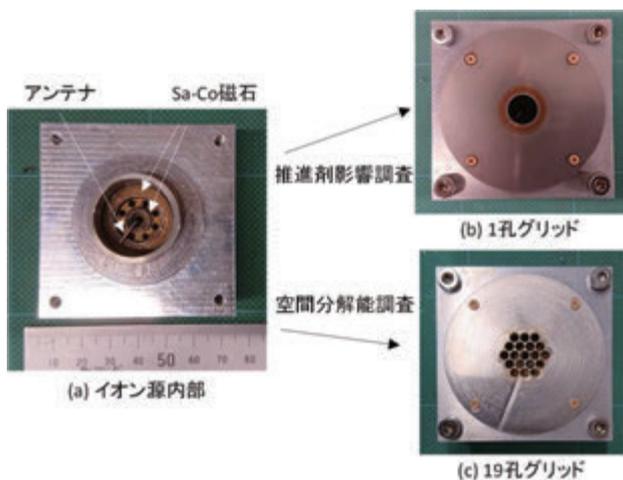


図3 イオン源—(a) イオン源内部, (b)  $\phi 10$  mm 1孔グリッド, (c)  $\phi 3$  mm 19孔グリッド.

響が及ばないように設置するものであり, ERGは ERGより下流の領域に電子が入り込むのを排除するために設置する. FG, ERGの順に通過したイオンは IRGに印加された電位によりエネルギー別に選別され, Collectorでコレクタ電流として検出される. 二つ目の ERGは Collectorに衝突したイオンによる二次電子放出を抑制するために設置する. なお, RPAの機構上 ERGと IRGの間には正の電荷しか存在せず空間電荷の影響を強く受けるためにグリッド間の距離を小さくする必要があるのである. そのため, 経験的にデバイ長さをを用いて

$$d \approx 4\lambda_D \quad (1)$$

となるように設計される<sup>19)</sup>. 本実験のイオン源の場合, いずれの作動条件でも式(1)から求められる値は 0.5 mm を超えるため, それぞれのグリッドは SUS304製のメッシュを用いて製作し, メッシュとメッシュの間は 0.5 mm のテフロンシートを用いて絶縁した.

RPAの入口部分は, 低電流密度イオンを収集するための広い開口部を有する直径 10 mm のものと<sup>22)</sup>, 比較的密度が高いイオン流を空間解像度高く取るための直径 3 mm のものがある. 直径 3 mm のものには入射イオンの方向を制限するための長さ 10 mm のコリメータを設けている.

コレクタに入射するイオン電流が十分に大きい場合にはシャント抵抗を用いて電流値を計測し, イオン電流が微小な場合は株式会社エヌエフ回路設計ブロックの広帯域電流増幅器 SA-605F2 を用いて増幅している.

測定では, イオン源の性能からイオンのエネルギー分布が 0–100 V の範囲と想定し, IRGに印加する電圧をイオン源のスクリーン印加電圧が 0 V の場合に 0–100 V, スクリーン印加電圧が 200 V の場合に 0–300 V として三角波の掃引を行っている. ERGの電圧は−30 Vとした.

## 2.2 イオン源

イオン源としては, 2.45 GHz のマイクロ波によりプラズマを生成する ECR イオン源を使用した. イオン源の放電室内部とグリッド前面を図 3 に示す. サマリウムコバルト製のリング状磁石を対に配置することにより磁場を形成して

おり, 内側の磁石の外径 8 mm から外側の磁石の内径の 14 mm の間に ECR 領域 (磁束密度 87.5 mT) が存在する. ECR 領域ではイオン生成が活発であり, グリッドから引き出されるイオン電流値も ECR 領域の正面で大きくなる傾向がある.

実験では推進剤によるプラズマ諸量の違いを明らかにするために, アルゴン, 水, 二酸化炭素, アダマンタンを用いてプラズマを生成した. 推進剤の流量は, プラズマでのマイクロ波吸収電力と引き出しイオンビーム電流値がどの推進剤でも同程度になるように制御した. アルゴンと二酸化炭素については Horiba 製のマスフローコントローラ SEC-E40MK3-10CCM を用いて流量を制御した. 水については貯気室で気化させて水蒸気とし, 流量はオリフィスにより制御した. アダマンタンも同様に昇華させてガス状にしたものを流路途中に設けたオリフィスで流量制御している.

イオンを引き出して加速噴射するために用いられるグリッドについては, 豊田らの RPA の実験に習い<sup>19)</sup>, 直径 10 mm の一孔のオリフィスを設けたものと, 小型イオンエンジンと同様の多孔 (19 孔) のものを用いた. グリッドへの印加電圧については, 無印加のものとスクリーングリッドに 200 V, 加速グリッドに −300 V を印加したものの 2 つの場合で行った. 通常の加速グリッドの印加電圧は −150 V 程度であるが, IRG 電源の印加電圧の上限が 300 V であったために, スクリーン電圧を 200 V とする代わりに加速グリッド電圧を下げることでイオンの引き出し性能を確保した.

## 3. データの解析方法

実験で得られるデータは図 4(a)のような IRG 電圧とコレクタ電流の時系列変化である. IRG 電圧を三角波で掃引してコレクタ電流を計測する. この例ではスクリーン電圧を印加せずに自然にグリッド孔から漏れ出るイオンの電流値を測定した.

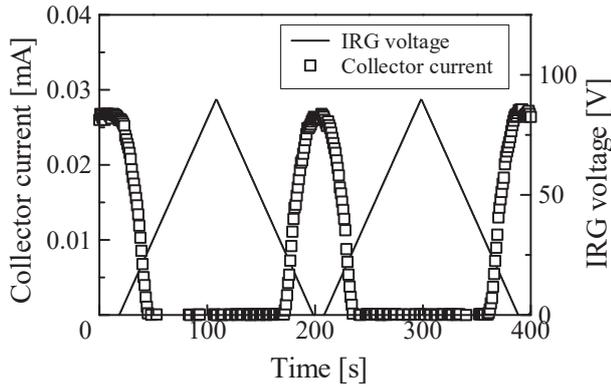
データの解析においては, 取得されたデータからイオンのエネルギー分布を算出していく. 図 4(a)のグラフを, 横軸を IRG 電圧とし, 縦軸をコレクタ電流としてプロットし直すと, 図 4(b)のシンボル口のプロットとなる.

イオンのエネルギー分布関数は, このプロットから,

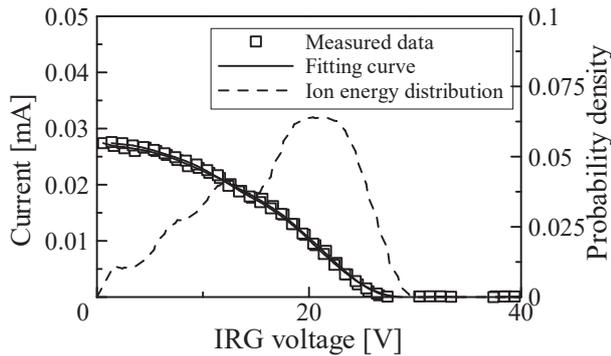
$$f(E) = -\frac{1}{I_{co}} \frac{dI_c}{dV_{IRG}} \quad (2)$$

により算出する. 具体的には, データのノイズを除去するために対象とするデータの前後の複数点を用いて曲線のフィッティングを行い, そのフィッティング曲線の傾きから式(2)を評価している. 得られた傾きを結んだものが図 4(b)のイオンのエネルギー分布関数である.

図 4 のようにイオン源に電圧を印加せずにイオンを放出する場合, イオンの持つエネルギーはイオンの生成場所の電位を反映する. 今回使用しているイオン源は ECR 放電方式でありイオンは様々な電位の場所で生成している. そのためイオンのエネルギー分布は幅広いのものとなり一意に放電室のプラズマ電位を定めることが不可能である. そこで本



(a) コレクタ電流と IRG 電圧の関係



(b) データのフィティングによるイオンのエネルギー分布の算出。

図 4 RPA における取得データの処理

論文では最も多くのイオン電流が流れてくる場所の電位をプラズマ電位として考える。

なお、一般に放電室内部のプラズマの電位については、イオンと電子の質量  $M$  と  $m_e$ 、および電子温度  $T_e$  を用いて Wall potential の式

$$\phi_w = \frac{T_e}{2} \ln \left( 0.44 \frac{M}{m_e} \right) \quad (3)$$

を用いて概算することができる。電子温度による違いはあるが、プラズマ電位は推進剤の分子量が大きいものほど高くなる。

#### 4. 数値解析

イオンエンジンの放電室内部の現象を簡易的に理解することを目的として、エネルギーと流量の収支に着目して作られるのがグローバルモデルである<sup>20,21,23-26</sup>。アルゴン<sup>24</sup>、ヨウ素<sup>29</sup>や水<sup>20</sup>に対するグローバルモデルはこれまでに作られているが、二酸化炭素のグローバルモデルはなかったことから新たに作成を行った。二酸化炭素は分子性の推進剤であることから反応種モデルが重要となるが、そもそも二酸化炭素をイオンエンジンの推進剤として使用することに着目した研究は少ないことから反応種の適切な選定に関する理解は進んでいない。

**4.1 対象領域** 解析対象とするのは図 5 に示すイオンエンジンの放電室とグリッドである。放電室は直径  $D$ 、長

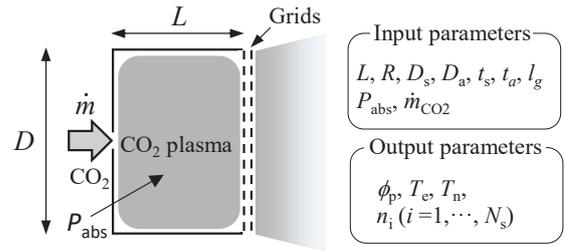


図 5 グローバルモデルにおける解析領域・変数

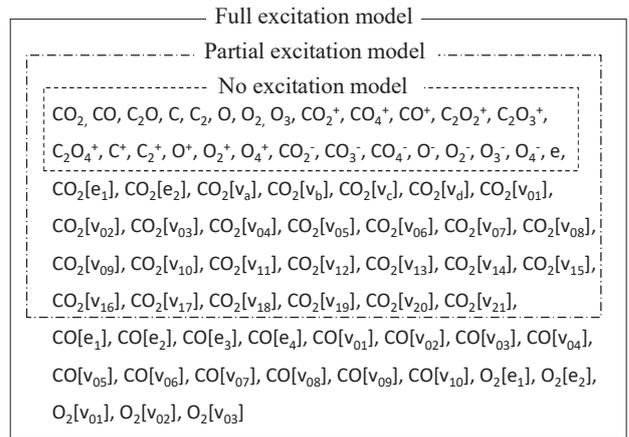


図 6 二酸化炭素を推進剤とするイオンエンジンのグローバルモデルの反応種モデル（鍵カッコ内は励起モードを示す）。

さ  $L$  の円筒形で表す。放電室には  $\text{CO}_2$  ガスが投入され、推進剤に  $P_{\text{abs}}$  のパワーが吸収される。出力パラメータは、プラズマ電位  $\phi_p$ 、電子温度  $T_e$ 、中性粒子温度、各化学種の数密度  $n_i$  である。

**4.2 反応モデル** 二酸化炭素の反応モデルとして詳細なものの一つは Antwerp model と呼ばれ、Kozak らによって二酸化炭素のプラズマ分解等の解析用途に開発された<sup>27,28</sup>。Kotov らはこのモデルを 1D のプラグ流れに用いるとともに、二酸化炭素のプラズマ解析に利用可能なライブラリ REACNET を公開した<sup>29,30</sup>。今回このライブラリ（化学種 72、反応式 3448 に関するデータベースが含まれる）を用いて反応レートと非弾性衝突におけるエネルギー損失を算出した。

このモデルは二酸化炭素のプラズマ分解を目的の一つとして開発され、常圧付近の作動条件において実験と矛盾の無いようにチューニングされている。したがって、必ずしもイオンエンジンの放電室内のような低圧条件向けに開発されたモデルではない。また、化学種と反応式の数が多いと、3次元計算向けの用途には不適である。そこで反応種の中から励起種を除いた No Excitation (NE) model と  $\text{CO}_2$  の励起種まで含めた Partial Excitation (PE) model、ならびに全てを含んだ Full Excitation (FE) model の 3 つに分けて計算を行い、RPA の計測データを用いて適切な反応モデルを選択していく。それぞれのモデルに含まれる反応種を図 6 に示す。

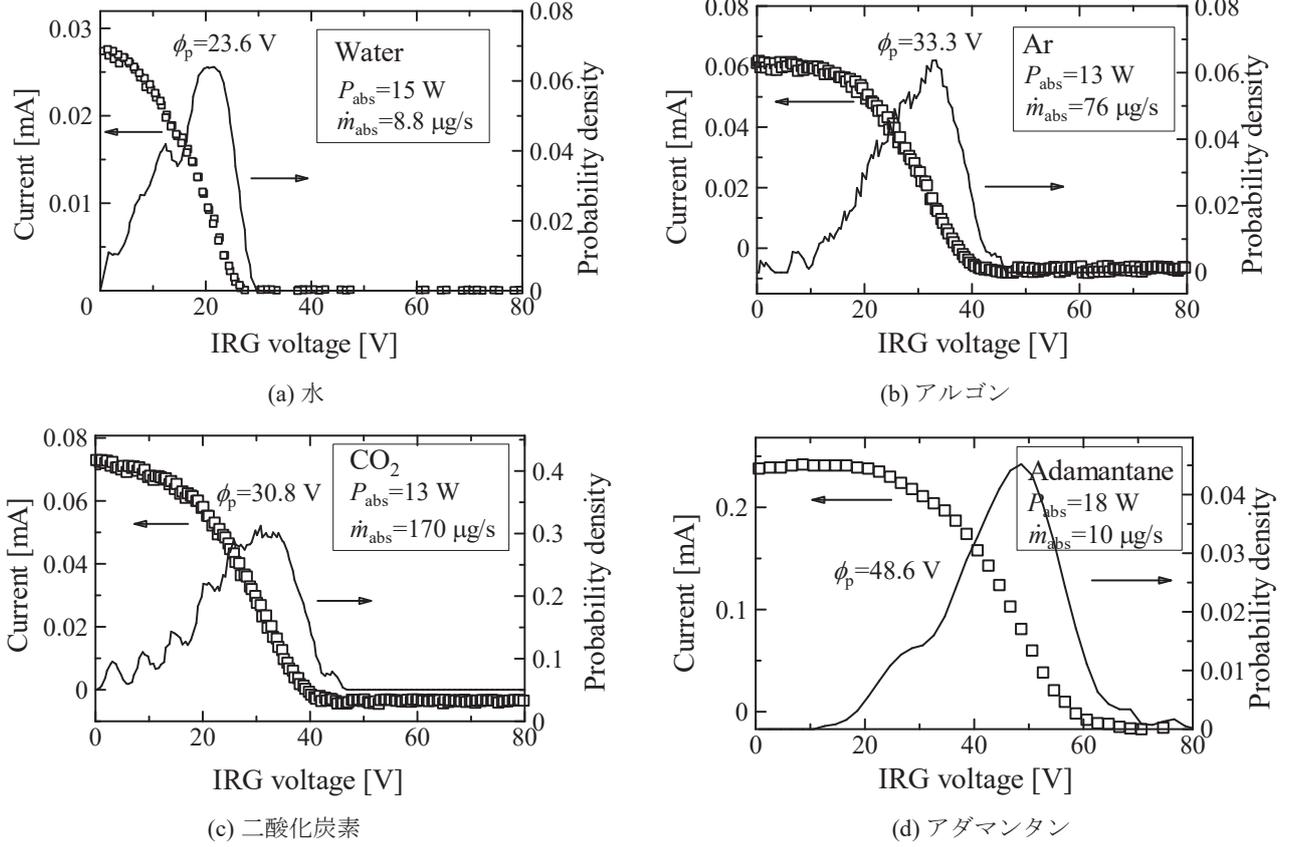


図7 推進剤ごとのコレクタ電流とイオンのエネルギー分布

**4.3 定式化** 放電室内のプラズマに吸収されるパワーについて次のパワーバランスの式

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{ee}} + P_{\text{eh}} + P_{\text{ek}} + P_{\text{ik}} \quad (3)$$

が成り立つ。ここで、非弾性衝突による電子と重粒子のエネルギー損失項  $P_{\text{ee}}$  と  $P_{\text{eh}}$  は REACNET に各化学種の数密度と電子温度を与えることによって計算される。 $P_{\text{ik}}$  はイオンに与えられる運動エネルギーで、 $P_{\text{ek}}$  は電子に与えられる運動エネルギーである。

各反応種の粒子数密度は化学反応による生成と損失のつり合いから

$$\dot{m}_{\text{in},i} - \dot{m}_{\text{out},i} = M_i(S_i V_c - \Gamma_{\text{wall},i}) \quad (4)$$

である。ここで、 $\dot{m}_{\text{in},i}$  は化学種  $i$  の流入量で  $\dot{m}_{\text{out},i}$  は流出力である。 $S_i$  は各化学種の正味の生成率である。イオンの壁面損失は、 $A_{\text{wr}}$  は放電室壁面の周方向面積、 $A_{\text{wl}}$  は前後壁面積、 $A_{\text{SG}}$  はスクリーングリッドの孔以外の面積として

$$\Gamma_{\text{wall},i} = n_{\text{sr},i} v_{\text{B},i} A_{\text{wr}} + n_{\text{sl},i} v_{\text{B},i} (2A_{\text{wl}} - \gamma A_{\text{SG}}) \quad (5)$$

で評価し、イオンは壁面で中和するものと考えて、中和後は生成した粒子の流束に加える。例えば、 $\text{CO}_2^+$  が壁面で損失した場合には  $\Gamma_{\text{CO}_2}$  に  $-\Gamma_{\text{CO}_2^+}$  を加える。なお、イオン源中心部と壁面近傍では粒子の数密度が異なることからシース端での各粒子の数密度を

$$n_{\text{sr},i} = 0.8n_i \left(4 + \frac{D}{2\lambda_i}\right)^{-0.5}, \quad n_{\text{sl},i} = 0.86n_i \left(3 + \frac{L}{2\lambda_i}\right)^{-0.5} \quad (6)$$

として与える<sup>22)</sup>。イオン源からの流出量  $\dot{m}_{\text{out},i}$  については、イオンはボーム速度  $v_{\text{B},i}$  を用いてスクリーン孔からの流出量を算出し、中性粒子については加速グリッドのコンダクタンスで評価する<sup>31)</sup>。ボーム速度はシステムボーム速度ではなく化学種個別のボーム速度を与えた。なお、イオン源への流入量  $\dot{m}_{\text{in}}$  については二酸化炭素の流量を与える。

電荷バランスについては、電子がマックスウェル分布をしていると考えると、壁面への電子の流束とイオンの流束が一致する条件から

$$\frac{1}{4} e v_e e^{-\frac{e(\phi_p - \phi_s)}{kT_e}} \{A_{\text{sr}} \sum_i n_{\text{sr},i} + (2A_{\text{rl}} - A_{\text{SG}}) \sum_i n_{\text{sl},i}\} = \sum_i q_i (\Gamma_{\text{wall},i} + \gamma n_{\text{sl},i} v_{\text{B},i} A_{\text{SG}}) \quad (7)$$

となる。イオンに与えられる運動エネルギーは

$$P_{\text{ik}} = \sum_i q_i \phi_p (\Gamma_{\text{wall},i} + \gamma n_{\text{sl},i} v_{\text{B},i} A_{\text{SG}}) \quad (8)$$

であり、電子に与えられる運動エネルギーは

$$P_{\text{ek}} = 2kT_e \sum_i \frac{q_i}{e} \Gamma_{\text{wall},i} \quad (9)$$

より算出する。以上の式を連立させる。

## 5. 結果および考察

### 5.1 図の概略説明

詳細な説明に先立ち実験から得られた図の概要を説明する。図7はイオンエンジンの放電室に流す推進剤を、水、アルゴン、二酸化炭素、アダマンタンとした場合の IRG 電

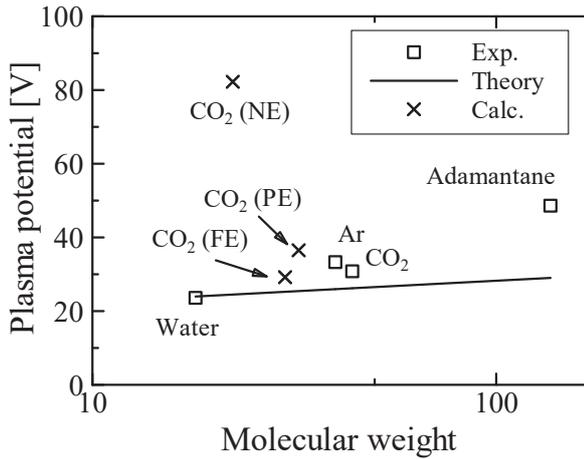


図 8 プラズマ電位と推進剤分子量.

圧に対するコレクタ電流とイオンのエネルギー分布関数の関係である。RPA の入口は図 2(b)の広い口径のものを用いた。□は実験的に取得したデータ，実線は式(2)に基づいて求められたエネルギー分布である。

これらグラフの作成において，水，アルゴン，二酸化炭素では，複数回の IRG の掃引データを用いてグラフを作成したが，アダマンタンの場合には一回の掃引からグラフを作成した。アダマンタンの計測において RPA の FG に昇華したアダマンタンが固化して付着したことで 2 回目以降の掃引時に電流値の大幅な低減をまねき，最終的に電流の計測が出来なくなったからである。このことは昇華性推進剤を用いた場合の RPA の計測の難しさを表している。

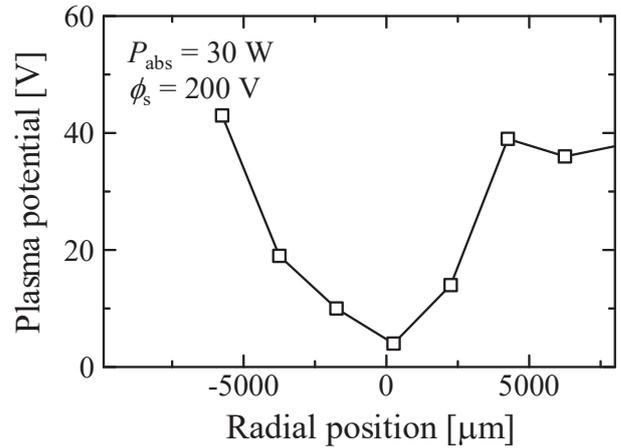
図 8 は図 7 で得られた結果を推進剤の分子量を横軸にしてプロットし直したものである。式(3)による理論曲線とグローバルモデルの計算結果も示している。

図 9 はイオン源に対して，RPA の位置を変化させて取得したプラズマ電位であり，RPA を用いて孔ごとのイオンのエネルギー分布が取得可能かをスクリーンの印加電圧を変えて調査したものである。

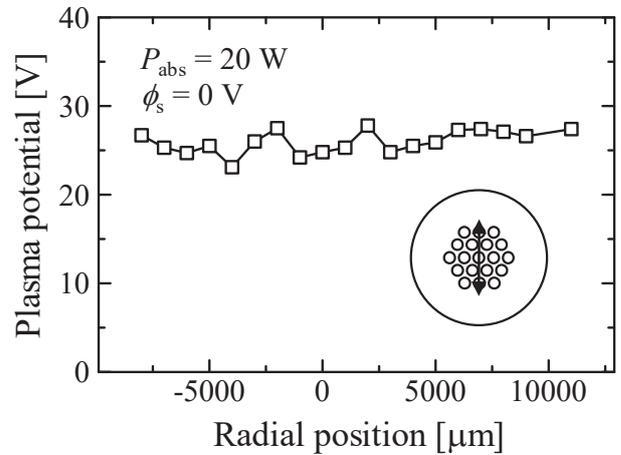
## 5.2 推進剤による違い

図 7 に推進剤ごとのイオンのエネルギー分布を示す。コレクタ電流からイオンのエネルギー分布が良好に求められていることが分かる。いずれの結果からもイオンのエネルギー分布は広く，様々な電位の場所でイオンが生成していることを示しており，従来の JIEDI tool で用いられているイオンが同一の放電室プラズマ電位を持つというモデルは十分ではないことを示している。

推進剤の違いに着目すると，水を推進剤とした場合のプラズマ電位は 23.6 V，アルゴンは 33.3 V，二酸化炭素は 30.8 V，アダマンタンは 48.6 V となり，推進剤ごとに違いがあった。これらの値を推進剤の分子量の関数としてプロットしたものが図 8 である。水，二酸化炭素，アダマンタンではプラズマ化する際に解離により分子量が変化するが，解離前のものを分子量としている。図中には，式(3)の理論式も示している。この理論式の評価においては，アルゴンを用いた場合に ECR 放電で計測される典型的な電子温度の 5 eV



(a) 印加電圧 200 V



(b) 印加電圧 0 V

図 9 局所的な放電室内プラズマ電位の取得可能性評価 (推進剤は CO<sub>2</sub> を使用) .

を用いている。実験データと理論式の傾きにやや相違があるが，分子量の増加に伴ってプラズマ電位が大きくなる傾向は同じである。

また，図 8 に示される 3 つの×は二酸化炭素のグローバルモデル計算において図 6 に示される反応種モデルを変えて得られた結果である。グローバルモデル計算では，CO<sub>2</sub><sup>+</sup>，O<sub>2</sub><sup>+</sup>，O<sup>+</sup>等の種々のイオンが生成するために横軸の分子量はそれらイオンの平均分子量を用いた。励起種を含まない No excitation model のプラズマ電位は実験値ならびに理論曲線の値よりも 3-4 倍大きくなった。この原因は，本来 CO<sub>2</sub> の励起に用いられるパワーが消費されずに，シース部でのイオンと電子のパワー消費に用いられたためにプラズマ電位が上がったと考えられる。一方で，CO<sub>2</sub> の励起を考慮した Partial excitation model と全ての励起種を含んだ Full excitation model では実験値との整合性はよい。したがって，二酸化炭素のグローバルモデルにおいては，CO<sub>2</sub> の振動励起は含むべきであることが分かる。一方で，Partial excitation model と Full excitation model との差は小さく，反応種モデルに CO や O<sub>2</sub> の励起種を含む必要があるかまではこの結果だけでは判断できない。

### 5.3 局所的な放電室プラズマ電位の測定可能性

図9は局所的な放電室プラズマ電位の取得可能性について、二酸化炭素を推進剤に用いた場合に得られたグラフである。RPAのイオン入射部には高解像度測定用の図2(c)のコリメータを用いた。

図9(a)は推進剤流量が7.5 sccmでプラズマの吸収パワーが30 Wのものである。スクリーン電圧を200 Vとしたもので、イオンを積極的に引き出したものである。得られた放電室内のプラズマ電位は、中心部分で低く、周辺で高い分布を示している。これはリング状の磁石を用いてECR放電させる際に見られる典型的な電位分布であり<sup>17, 18)</sup>、放電室内部のプラズマの電位分布が取得可能であることを示す。

図9(b)では推進剤流量を5.0 sccmとし、マイクロ波の吸収パワーを20 Wとした場合で、スクリーン電圧を0 Vとしたものである。すなわち、イオン源には電圧を印加せず、放電室内部とコレクタの電位差のみでイオンが加速されている。得られた放電室内のプラズマ電位は25 V程度で位置とは無関係にほぼ一定となった。

図9(a)と(b)の結果から、スクリーン電圧を印加した場合にはグリッド孔近傍のイオンが引き出されるために放電室内部のプラズマ電位情報を反映するのに対して、スクリーン電圧を印加しない場合にはグリッド孔周辺のイオンも流入する余地があるために平均化した電流値が計測されたと考えられる。以上の結果から、放電室の局所的なプラズマ電位の取得は可能であるが、放電室内部のプラズマ電位の分布を得るためにはある程度のスクリーン電圧を与えてイオンを引き出すことが必要であることが分かる。

## 6. まとめ

キセノンに代わる代替推進剤を用いた場合の課題の一つは推進剤利用効率の低さである。推進剤利用効率を向上させるためには中性粒子の閉じ込めを良くする必要があり、グリッド形状の最適化が必要である。イオンエンジンの放電室内のプラズマ電位分布を正確に知ることで、数値解析によってグリッドの最適化を効率よく行うことが可能となる。

本研究では、それら放電室内のプラズマ諸量を実験的に得るために、放電室プラズマに対して非侵襲な計測を行うことができる逆電位アナライザを製作し、データの取得を行った。小型イオンエンジンに対して、推進剤を水、アルゴン、二酸化炭素、アダマンタンと変えて行った実験では、得られたデータからいずれの推進剤に対してもイオンのエネルギー分布を構築することができた。また、プラズマ電位は推進剤分子量に対して増加する結果となり、理論的に予測される結果と整合した。逆電位アナライザによる計測データは二酸化炭素を推進剤とするイオンエンジンのグローバルモデルの妥当性評価に用いることができた。また、逆電位アナライザのイオン入射部にコリメータを設置してイオンの入射方向を制限するとともに十分なスクリーン電圧を印加してイオンを引き出すことによって放電室内部の局所的なプラズマ電位を計測することができた。

今回の研究により逆電位アナライザを用いた計測の有用性を確認することができた。今後はプローブ測定などの別の計測手段と比較することで逆電位アナライザによる測定の精度向上を目指したい。

## 謝辞

本研究はJSPS科研費JP20K04928の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 荒川義博, 國中均, 中山宜典, 西山和孝, “イオンエンジンによる動力飛行”, コロナ社(2006).
- [2] Cybulski R. J., Shellhammer D. M., Lovell R. R., Domino E. J. and Kotnik J. T., “Results from SERT-I Ion Rocket Flight Tests,” NASA Technical Note D-2718, 1965
- [3] Beattie, J. R. and Matossian, J. N.; Mercury Ion Thruster Technology, NASA CR-174974, 1989.
- [4] Kitamura, S., Nagano, H., Nakamura, Y., Kudo, I. and Machida, K., “ETS-III Ion Engine Flight Operations in the Extended Mission Period,” J. Propulsion, 2 (1986), pp.513–520.
- [5] Shimada, S., Satoh, K., Gotoh, Y., Nishida, E., Terukina, I., Noro, T., Takegahara, H., Nakamaru, K., and Nagano, H., “Development of Ion Engine System for ETS-VI,” IEPC-93-009.
- [6] 細田聡史, 國中均, イオンエンジンによる小惑星探査機「はやぶさ」の帰還運用, プラズマ・核融合学会誌, Vol.86, No.5 (2010), pp. 282–292.
- [7] Feuerborn, S. A., Perkins, J. and Neary, D. A., Finding a Way: Boeing’s All Electric Propulsion Satellite, AIAA 2013-4126, 2013.
- [8] Herman, D. A., Unfried, K. G., “Xenon Acquisition Strategies for High-Power Electric Propulsion NASA Missions,” GRC-E-DAA-TN23905, Joint-Army-Navy-NASA-Air Force (JANNAF) Spacecraft Propulsion Subcommittee (SPS) Meeting, June 3, 2015
- [9] Holste, K., Dietz, P., Scharmann, S., Keil, K., Henning, T., Zschätzsch, T., Reitemeyer, M., Nauschütt, B., Kiefer, F., Kunze, F., Zom, J., Heiliger, C., Joshi, N., Probst, U., Thüringer, R., Volkmar, C., Packan, D., Peterschmitt, S., Brinkmann, K.-T., Zaunick, H. -G., Thoma, M. H., Kretschmer, M., Leiter, H. J., Schippers, S., Hannemann, K., Klar, P. J., “Ion Thrusters for Electric Propulsion: Scientific Issues Developing a Niche Technology into a Game Changer,” Review of Scientific Instruments 91, 061101 (2020).
- [10] Leifer, S. D., Rapp, D. and Saunders, W. A.: Electrostatic Propulsion Using C60 Molecules, Journal of Propulsion and Power, 8 (1992), pp.1297–1300.
- [11] Tsay, M., Frongillo, J., Zwahlen, J. and Paritsky, L.: Maturation of Iodine Fueled BIT-3 RF Ion Thruster and RF Neutralizer, 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA 2016-4544, 2016.

- [12] 西山和孝, “大気吸込式イオンエンジンの検討”, 宇宙技術 Vol.4 (2005), pp.21-27.
- [13] 安達美咲, 山本直嗣, 中野正勝, 大川恭志, 船木一幸, イオンエンジンの推進剤としての昇華性物質の検討, 宇宙太陽発電, 5 (2020), pp. 65-67.
- [14] 中野正勝, 山本直嗣, 大川恭志, 船木一幸, 昇華性物質を推進剤とするイオンエンジンの性能評価, 宇宙太陽発電 Vol.6 (2021), pp.1-4
- [15] <https://pale-blue.co.jp/index.html>
- [16] Nakano, M., “Three-Dimensional Simulations of Grid Erosion in Ion Engines,” *Vacuum* 83 (2007) pp.82–85.
- [17] Nakano, M., Nakamura, K., Naito, Y., Nakagawa, Y., Takao, Y. and Koizumi, H., “Computational Design of a High-Efficiency Accelerator Grid for a Miniature Ion Thruster by Full-Aperture Ion Optics Simulations,” *AIP Advances*, 9 (2019), 035343.
- [18] Nakano, M., Nakamura, K., Nakagawa, Y., Tomita, D., Takao, Y. and Koizumi, H., “Numerical Simulation of Full-Aperture-Pair Ion Optics in a Miniature Ion Thruster,” *Physics of Plasmas*, 25 (2018), 013524.
- [19] Enloe, C. and Shell, J., “Optimizing the Energy Resolution of Planar Retarding Potential Analyzers,” *Review of Scientific Instruments*, 63 (1992), pp. 1788.
- [20] 中野正勝, 各務聡, 二酸化炭素を推進剤とするイオンエンジンのグローバルモデル, STEP-2020-048, 令和 2 年度宇宙輸送シンポジウム, オンライン, 2021/1/15.
- [21] Nakano, M. and Kakami, A., “Global Model for Ion Thrusters Using Carbon Dioxide as Propellant,” *Frontier of Applied Plasma Technology*, Vol. 13 No. 2 July 2020, pp.22–28.
- [22] 豊田裕司, 牛尾康一, 山本直嗣, 中島秀紀, 小型マイクロ波プラズマ推進機の性能向上に関する研究, STEP-2013-081, 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム.
- [23] Lee, C. and Lieberman, M. A., “Global Model of Ar, O<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, and Ar/O<sub>2</sub> High-Density Plasma Discharges,” *Journal of Vacuum Science & Technology A*, Vol.13 (1995), pp. 368–380.
- [24] Chaberta, P., Arancibia Monreal, J., Bredin, J., Popelier, L., and Aanesland, A., “Global Model of a Gridded-Ion Thruster Powered by a Radiofrequency Inductive Coil,” *Physics of Plasmas* Vol.19, No.7, 073512 (2012)
- [25] Grondein, P., Lafleur, T., Chabert, P., and Aanesland, A., “Global Model of an Iodine Gridded Plasma Thruster,” *Physics of Plasmas* 23, 033514 (2016)
- [26] Nakagawa, Y., Koizumi, K., Naito, Y. and Komurasaki, K., “Water and Xenon ECR Ion Thruster-Comparison in Global Model and Experiment,” *Plasma Sources Science and Technology* Volume 29, Number 10, 105003 (2020).
- [27] Kozak, T. and Bogaerts, A. “Splitting of CO<sub>2</sub> by Vibrational Excitation in Non-Equilibrium Plasmas: A Reaction Kinetics Model,” *Plasma Sources Sci. Technol.* 23 (2014) 045004
- [28] Heijkers, S. Mousavi, S. T., Graef, W., Mihailova, D. Kozak, T., Bogaerts, A. Dijk, J., “A Comprehensive Chemical Model for the Splitting of CO<sub>2</sub> in Non-Equilibrium Plasmas,” *Plasma Process. Polym.* 14(2017) 1600155
- [29] Kotov, V. and Koelman, P. M., “Plug Flow Reactor Model of the Plasma Chemical Conversion of CO<sub>2</sub>,” *Plasma Sources Sci. Technol.* 28(2019), 095002
- [30] <https://jugit.fz-juelich.de/v.kotov/reactnet>
- [31] Santeler, D. J., “New Concepts in Molecular Gas Flow,” *Journal of Vacuum Science & Technology A*, Vol. 4, No. 3(1986), pp. 338–343.