

水蒸気プラズマから引き出されるイオンビームのイオン種割合の決定

Determination of Ion Beam Current Ratio Extracted from Water Vapor Plasma

中野 正勝¹⁾, 小野 航大²⁾

Masakatsu Nakano¹⁾ and Kohdai Ono²⁾

Abstract: The ion current spectrum of an ion beam extracted from a water vapor plasma was measured by an E×B probe, and the ratio of ion species present in the ion beam was determined using numerical simulations. The emission spectral lines obtained by a spectrometer were used to help identify the species present in the water vapor plasma. In addition, the ion current spectrum of an ion beam extracted from an oxygen plasma was employed as a reference to characterize the peaks of O₂⁺ and O⁺ ions in the ion current spectrum. The experimental results showed that the ion current spectrum has two peaks, the first one consists of O₂⁺ and the second one consists of H₂O⁺, OH⁺ and O⁺ ions, and the peak associated to H⁺ ions was too low to measure. To quantify the ratio of ions from the measured ion current spectrum, peak broadening and blending of current peaks of H₂O⁺, OH⁺ and O⁺ ions were analyzed by strictly modelling the movement of ions by the Monte Carlo method, which yielded the ion current ratios of H₂O⁺:OH⁺:O⁺:O₂⁺=65%:7%:7%:21% and 83%:2%:0%:17% for the high- and low-absorption-power cases.

Keywords : Water vapor plasma, Ion current spectrum, E×B probe, Emission spectroscopy, Numerical simulation

1. 緒言

2009年に軌道投入された東京都立産業技術高等専門学校の「輝汐」を一例とする小型衛星は、低コストで短時間に開発が可能という特徴を持ち、近年の技術革新の追い風を受け、大型衛星と遜色ない機能を実現できるようになった。宇宙探査や地球観測など様々な分野において小型衛星の需要が増加するとの予測があり、高等教育機関、研究機関、民間企業等による小型人工衛星の開発が進んでいる¹⁾。

これまでに開発された小型衛星の多くは宇宙空間における位置制御用のロケットエンジンを搭載しておらず、能動的な制御には限界があった。小型衛星ではロケットエンジンの小型化が必要な一方、推進剤搭載量にも限りがあるため、燃費の良いロケットエンジンが必要である。近年では大幅に燃費に優れ、推進剤量の低減が可能なイオンスラスタの搭載も行われている²⁾。

一般にイオンスラスタでは高圧充填したキセノンガスが用いられるが、小型衛星では高圧タンク等のガス供給系が占める割合が無視できず、液体で貯蔵が可能で人体に無害な“水”を推進剤として用いる研究が行われている³⁾。これは水を水蒸気として供給し、マイクロ波放電によりプラズマ化して、イオンを引き出して加速するものである。水をマイクロ波で加熱して空気力学的に噴射するアークジェットタイプの推進機⁴⁾を搭載した衛星開発を行う会社も出ており、水のロケットエンジンへの適用は近年活発に取り組まれているテーマである。

イオンスラスタの性能は噴射するイオン種に依存するた

め、その性能評価のためには水蒸気から生成されたプラズマからどのようなイオンが引き出されるかを明らかにする必要がある²⁾。イオンスラスタでは、イオンを加速させるために推進剤を電離させる必要があるが、噴射したイオンは回収しないため、イオンの電離に必要なエネルギーが少ない方がよい。水蒸気をプラズマ化する際は、H₂O⁺が最も少ないエネルギーで生成し、よりエネルギーを要する解離電離でOH⁺, O⁺, O₂⁺, H⁺が生成する。したがって、これらイオンの割合を明らかにすることはイオンスラスタの性能評価ならびに性能向上に向けて必要不可欠である。

本稿では、これまでに行った E×B probe による水蒸気プラズマイオンビームの測定実験について述べるとともに、実験で得られた電流スペクトルから数値解析によって水蒸気プラズマイオンビーム中の各種イオンの割合を決定したことについて報告を行う。水蒸気プラズマから引き出されるイオンビームの電流スペクトルは複数のイオン種が重なってピークを形成する複雑なものであったため、E×B probe 内部のイオンの動きを忠実に模擬した計算モデルを作成し、実験結果を再現できるように最適化計算によりイオン種の割合を決定した。なお、実験で使用した E×B probe は本校の専攻科学生が中心となって製作したものである。

2. 実験装置と実験条件

2.1 E×B probe

E×B probe は Wien filter と呼ばれ、荷電粒子の進行方向に対してそれぞれ垂直方向に印加された磁場と電場により

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

2) 東京都立産業技術高等専門学校 専攻科創造工学専攻 航空宇宙工学コース

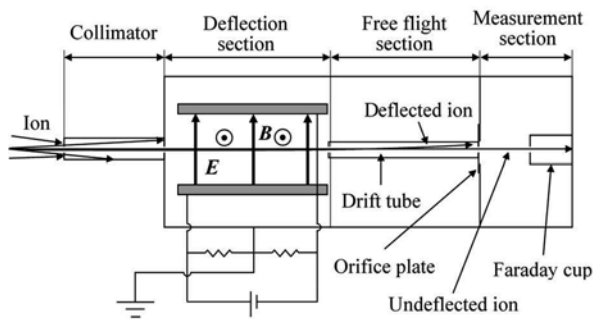


図1 E×Bプローブの模式図。

特定の速度を有する荷電粒子のみを通過させる速度フィルタである⁹⁾¹⁾。

実験で使用した E×B probe の模式図は図1に示す通りである。コリメータ部、偏向部、自由飛行部、電流計測部より構成されている。コリメータには直径 0.4 mm の孔が前後に開いており、イオンの入射角を制限する。コリメータを通過したイオンは次に偏向部へと進入する。偏向部には約 30 mT の磁束密度 B の磁場が電磁石によりかけられており、印加した電界の強度 E に対して速度が $v = E/B$ の関係を満たすイオンのみが直進し、他の速度のイオンは偏向する。直進したイオンは孔径 1.0 mm のオリフィスを通り、ファラデーカップにより電流値として検出される。偏向したイオンはオリフィスを通りできない。検出される電流値は pA レベルと微弱であるためエヌエフ回路設計ブロック社製の超低雑音増幅器 SA-607F2 を用いて 10^{10} 倍に増幅した。イオンがファラデーカップに衝突する際に生じる 2 次電子放出による電流増加を防ぐために、ファラデーカップの前面にメッシュ状の電極を配置し -30 V の電圧を印加した。

E×B probe ではその作動機構上コリメータ孔とオリフィス孔が一直線上に配置される必要がある。出力の高いイオン源を用いる際にはイオンビームの熱入射によって E×B probe 本体の熱変形が生じ、計測結果に影響が出ることが知られているが¹²⁾、本実験で用いたイオン源の出力は数十 W レベルであるため特別な熱制御は行っていない。なお、E×B probe を組み上げた際には、わずかながらコリメータ孔とオリフィス孔にずれが生じることがある。このずれが電場の印加方向と同一もしくは近い場合には、電界強度に予め一定の値を加減してオリフィス方向にイオンビームを偏向させることで解消できる。

E×B probe 計測で得られる電流スペクトルとは、磁束密度を固定し、電界強度を変えて掃引して得られる電流値を電界強度に対してプロットしたものである。磁場と電場による力が釣り合う $v = E/B$ の関係を満たす速度のイオンのみがオリフィスを通りできるが、イオン源から電位差 ΔV によって加速されたイオンは、分子量を M 、アボガドロ数を N_A 、電荷を q とすると速度が $v = \sqrt{2qN_A\Delta V/M}$ で与えられる。すなわち、オリフィスを通りできるのは分子量が $M = 2q\Delta V N_A (B/E)^2$ のイオンに限られる。そのため、電流スペクトルはイオンの分子量に対応した電界強度にピークが表

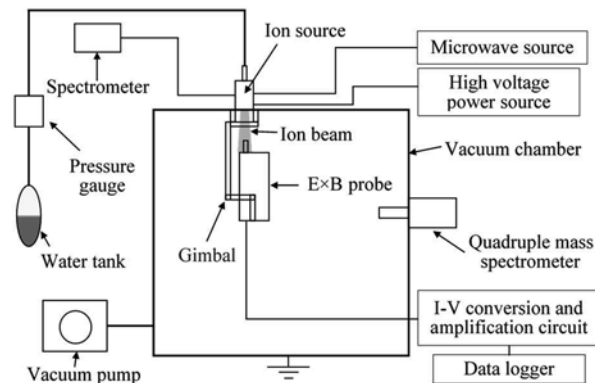


図2 実験装置の概略図。

れる分布となる。電流スペクトルが分かれば、ピークの電界強度からイオン種が推定され、電流値を比較することでイオンの割合を推定することができる。

2.2 真空容器・イオン源・分光器

実験装置の概略を図2に示す。ステンレス製の 800 mm 角の真空容器上部に取り付けられたイオン源からイオンを引き出し下へ加速・噴射する。イオン源の放電室内部は光ファイバを経由した分光器により分光され、プラズマ中のイオンや中性粒子を同定する。イオン源の下には 2 軸のジンバルに据え付けられた E×B probe が取り付けられ、イオンビームに対する向きを機械的に制御する。イオン源と E×B probe 内部のファラデーカップまでの距離は 365 mm である。

イオン源は ARIOS 社製のマイクロ波ラジカル源 EMRS-211Q を用いた。この装置はイオン源としても使用可能で、石英管中の Electron Cyclotron Resonance (ECR) 領域に 2.45 GHz のマイクロ波を導入して ECR プラズマを生成する。水は飽和水蒸気として供給し、供給圧力と配管のコンダクタンスから流量を求めた。コンダクタンスは空気を Mass Flow Controller を用いて流量制御しながら同時に圧力を計測することで算出した。生成したプラズマ中のイオンは電位差 1.0 kV が印加された 19 孔のグリッドから加速される。電位差 1.0 kV は水を用いたイオンスラストにおいて想定されている数値である⁹⁾。なお、今回の実験では中和器は使用せず、イオンは E×B probe 表面や真空容器内壁に衝突することで電気的に中和される。

分光器は HR400CG-UV-NIR (Ocean Optics 社製) を使用した。発光スペクトルから、原子、分子、イオンを同定するために NIST の Atomic Spectra Database¹³⁾ と分子ガスのスペクトルのデータブック¹⁴⁾ を参照した。

2.3 実験条件

水蒸気プラズマから引き出されるイオンビームの E×B probe 測定を表1に示す条件で行った。飽和水蒸気の供給量は固定し (24–25 $\mu\text{g/s}$)、吸収パワーを大小の (a) 50 W と (b) 26 W とした。吸収パワーはプラズマへの入射パワーから反射パワーを引いたものとして定義した。また、水蒸気プラズマに含まれる酸素分子イオン O_2^+ と酸素イオン O^+ の同定を行うために、純酸素を作動ガスとして供給した実験も行

表 1 イオンビームの引き出し実験条件

	(a)	(b)	(c)	(d)
供給ガス	水蒸気		酸素	
吸収パワー [W]	50	26	40	25
質量流量 [$\mu\text{g/s}$]	25	24	14	13
ビーム電流 [mA]	1.5	0.53	0.92	0.96

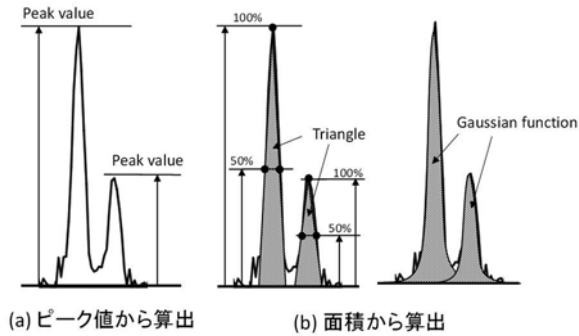


図 3 電流スペクトルのフィッティング法.

った. 酸素は流量 13–14 $\mu\text{g/s}$ で供給し, 吸収パワーを大小の (c) 40 W と (d) 25 W とした. 実験中の真空容器内の圧力は 3.5×10^{-3} – 1.0×10^{-2} Pa であった.

電流スペクトルを得る際には電界強度の値を変化させる. 電界強度はヒステリシスの有無を確認する目的で電極間電圧を最小-最大-最小と三角波状に変化させて掃引し, 1つの条件に対して 8 回, 合計 16 個のデータを取得した. 計測結果にヒステリシスが見られなかったことから, 以降の E×B probe の計測結果は取得した 16 個のデータの平均値である.

3. イオン種の割合の決定法

3.1 簡易的な決定法

電流スペクトルからイオンの割合を求めるには, 図 3(a) のようにピーク値に基づく方法, 図 3(b) のようにピーク値と半値を結んだ三角形の面積から算出する方法やガウス関数や特殊な指数関数でフィッティングを行って囲まれた面積から算出する方法など種々のものがある. ピークがイオン種と一対一に対応している場合にはどの方法の適用も難しくはない. 一方で, 複数のイオン種のピークが重なることで一つのピークが形作られている場合には, 図 3 の方法を用いてそれぞれのイオン種を明らかにすることは困難である.

3.2 数値解析による方法

複数のイオン種が重なって一つのピークを形成する場合には, 前節のピークに対してフィッティングを行う簡易的な方法は有効ではない. 後に示すが, 本論文の実験で取得される水蒸気プラズマからの電流スペクトルも複数のイオンが重なり合って一つのピークを形成している.

そのため, 本研究では, 実験的に得られた広がりや重なりが多い電流スペクトルから各イオン電流の割合を推定するために, E×B probe におけるイオンの動きを忠実に再現する計算モデルを構築し, モンテカルロ法を用いた最適計算

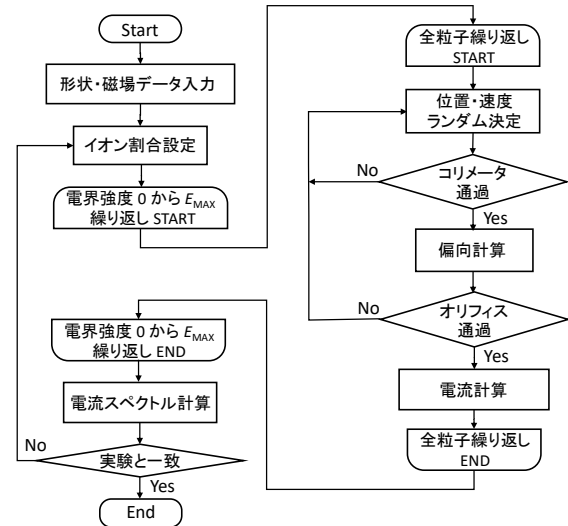


図 4 数値解析モデルのフローチャート.

により各イオン種の割合を決定した. そのフローチャートを図 4 に示す. 計算においては, 簡略化のため, 偏向部における磁場と電場は一樣であるものとし, 偏向部以外での磁場や電場による荷電粒子への影響は無いものとする. すなわち, E×B probe に入射するイオンビームは偏向部でのみ進行方向とは垂直な力を受け, その他の部分では直進する.

イオンビーム中に含まれるイオン種は実験結果などから予め決めておく. 各イオン種の割合が決まっている場合には, その割合を入力値として与える. コリメータ上流から多数のイオンを模擬した粒子をイオンの熱速度とグリッドに印加した電位差による加速分を加えた速度で与える. 模擬粒子の位置は一樣乱数からランダムに与え, 熱速度も Maxwell 分布になるように一樣乱数からランダムに生成する. 模擬粒子がコリメータ孔を通過できるかどうかは模擬粒子の軌道から幾何学的に決定し, 通過できたものは偏向部において一樣な磁場と電場のもとで速度変化と位置の変位を計算する. その後, オリフィスまで軌道を追跡し, オリフィス孔を通過できたものを電流値として記録する. 磁束密度を固定して, 電界強度を変えて, 上記の計算を行うことで電流スペクトルを得ることができる.

イオン種の割合を決定する際には, 実験データの近似式の作成等に用いられる最小 2 乗法を用い, モンテカルロ法によりその値を決定した. 具体的には, イオン種の割合をランダムに仮定して電流スペクトルを求め, 実験で得られた電流スペクトルと計算で得られた電流スペクトルとの差を電界強度毎に 2 乗して加算した和が最小となるようにイオン種の割合を繰り返し計算により更新していった. ロバストなモンテカルロ法を用いることで, ノイズを含む電流スペクトルであってもイオン種の割合を決定できる.

4. 結果と考察

4.1 水蒸気プラズマと酸素プラズマの電流スペクトル

E×B probe による測定結果を図 5 に示す. 図 5(a) と 5(b) が水蒸気を用いた場合に得られた電流スペクトルであり, 下

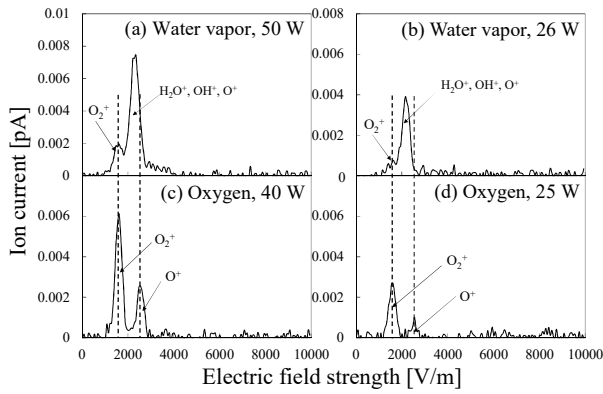


図5 E×B probe で得られた電流スペクトル: (a) 水蒸気, 吸収パワー 50 W, (b) 水蒸気, 吸収パワー 26 W, (c) 酸素, 吸収パワー40 W, (d) 酸素, 吸収パワー 25 W.

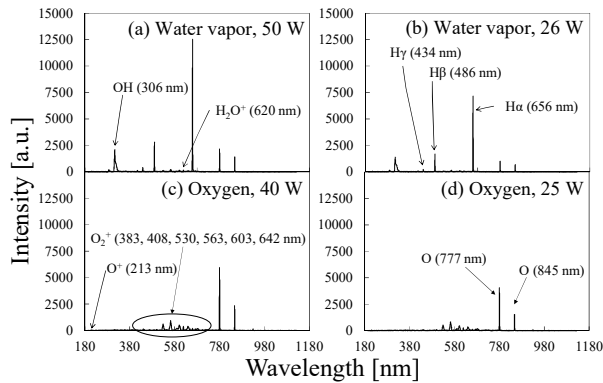


図6 発光スペクトル分布: (a) 水蒸気, 吸収パワー 50 W, (b) 水蒸気, 吸収パワー 26 W, (c) 酸素, 吸収パワー40 W, (d) 酸素, 吸収パワー 25 W.

の図 5(c) と 5(d) が酸素を用いて得られた電流スペクトルである。どちらの電流スペクトルにも 2 つのピークが表れ、その電界強度の比は約 $\sqrt{2}$ であった。したがって、それぞれのピークは分子量で 2 倍の違いがあるイオンにより形成されていることが分かる。なお、電界強度 $E = 4000\text{--}9000$ V/m において検出されるイオン種は水蒸気プラズマ中に存在しないため、検出された電流はバックグラウンドなノイズであり、その値は $0.5\text{--}0.7$ fA で最大ピーク値の約 8–14%程度である。

放電室内部の発光分光測定の結果を図 6 に示す。水蒸気プラズマの発光スペクトルを図 6(a) と 6(b) に、酸素プラズマの発光スペクトルを図 6(c) と 6(d) に示す。水蒸気プラズマでは、 H , H_2O , H_2O^+ , OH , OH^+ , O , O^+ , O_2^+ のスペクトルが、酸素プラズマでは O , O^+ , O_2^+ のスペクトルが確認できた^{13,14}。酸素プラズマでは O_2^+ と O^+ が確認できることから、電流スペクトルの左のピークは O_2^+ であり右のピークは O^+ であると考えられる。なお、酸素の 1 価電離 $\text{O}_2 + e^- \rightarrow \text{O}_2^+ + 2e^-$ の断面積は解離電離 $\text{O}_2 + e^- \rightarrow \text{O}^+ + \text{O} + 2e^-$ の断面積よりも数倍程度大きいいため O_2^+ が生成しやすいが、計測された図 5(c) と

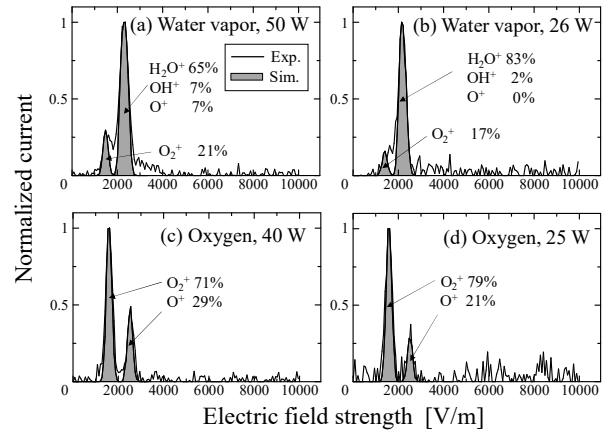


図7 数値解析による電流スペクトルの再現値。

5(d) のピークを比較すると、 O_2^+ を示す左のピークが高くなっており整合性が取れている。

一方、水蒸気プラズマでは、発光分光の結果から、分子量の大きい O_2^+ が左のピークを作り、 H_2O^+ , OH^+ , O^+ が右のピークを形成したものと考えられる。本実験では磁束密度を固定していたことから、同一のイオンであれば、水蒸気プラズマと酸素プラズマのいずれの電流スペクトルにおいても同じ電界強度でピークが表れるはずである。そこで、図 5(c) と 5(d) における左のピークと右のピークを図 5(a) と 5(b) に伸ばして重ねると (図中の点線)、左のピークはほぼ一致するのに対し、右のピークは水蒸気を用いた場合で左側にずれた。このことから、水蒸気プラズマの左のピークは O_2^+ である一方で、右のピークは O^+ の他に O^+ よりも分子量の大きい H_2O^+ や OH^+ イオンが加わって形成されたと推定される。なお、 O_2^+ や O^+ の生成に伴って H^+ も生成しているはずであるが、分子量比から推定される電界強度 10000 V/m 付近にはピークが検出されなかった。これはイオン化されずに放出された H_2O と H^+ との電荷交換衝突による影響と考えられ、実験条件から算出するとファラデーカップ到達までに H^+ の約 70% が減衰したことになる¹⁵。一方、 H_2O^+ の減衰は一桁小さい 7% である¹⁶。本実験ではピーク値に対して 8–14% のランダムなノイズが計測されているが、これまでの数値解析などから H^+ の生成量を約 10% と見積もると、減衰によってファラデーカップに到達するイオンは約 3% であり、バックグラウンドノイズよりも小さく検出は困難である。

4.2 数値モデルによるイオン種割合の定量化

実験より得られた図 5(a)–(d) の電流スペクトルから、数値解析により各イオン種の割合を決定する。水蒸気プラズマからは H_2O^+ , OH^+ , O_2^+ , O^+ イオンが引き出されたものとした。 H^+ については実験で得られた電流スペクトルに H^+ のピークが見られていないため算出の対象とはしなかった。酸素プラズマからは O_2^+ と O^+ が引き出されるものとした。なお、実験において、コリメータやオリフィスの取り付け位置がずれている場合には、電流スペクトルが左右のどちらかにシフトする。また、電流スペクトルの広がりはいオン温度

に左右されることから、電界強度のずれとイオン温度を数値解析における変数に含めた。

図 7 に数値解析で得られた電流スペクトルを領域として示す。水蒸気プラズマから引き出されたイオンビームにおいて $\text{H}_2\text{O}^+:\text{OH}^+:\text{O}^+:\text{O}_2^+$ の比は吸収パワーの大きい (a) で 65:7:7:21, 吸収パワーの小さい (b) で 83:2:0:17 であった。イオン種の割合は供給ガスの電離エネルギーと解離エネルギーの大小とに関係しており、水蒸気プラズマでは最もイオン化しやすい H_2O^+ の割合が大きくなる。また、図 7(a) と 7(b) を比較すると吸収パワーの大きい (a) で H_2O^+ の割合が下がり、他のイオンが増加していることが分かる。酸素を用いた場合には、 $\text{O}_2^+:\text{O}^+$ の比は吸収パワーの大きい (c) で 71:29, 吸収パワーの小さい (d) で 79:21 となり、吸収パワーの大きい (c) では O_2^+ の割合が下がり O^+ の割合が増えていた。これは O_2^+ よりも O^+ の方が電離に必要なエネルギーが高く、 O^+ 生成には大きな吸収パワーが必要だからである。

以上のように、E×B probe 計測によって得られた電流スペクトルに対してイオンの挙動を忠実に再現した数値解析を行うことにより、イオンビーム中のイオン種の割合を定量的に明らかにすることができた。

5. まとめ

イオンスラストの性能評価や改良において、プラズマから引き出されたイオンビーム中のイオン種の割合の定量的な把握は必要不可欠である。本研究では、E×B probe を用いて水蒸気プラズマから引き出されるイオンビームの電流スペクトルを取得し、イオンの挙動を忠実に再現した数値解析モデルを用いてイオン種の割合を決定した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) E×B probe を用いて水蒸気プラズマと酸素プラズマから引き出されるイオンビームの電流スペクトルを取得し、発光分光測定と合わせてイオン種の特定を行った。酸素プラズマでは O_2^+ と O^+ のピークが独立して観測されたが、水蒸気プラズマでは O_2^+ のピークと H_2O^+ , H^+ , O^+ が重なったピークが得られた。
- (2) E×B probe 内部におけるイオンの動きを忠実に再現した数値解析を行うことによって、水蒸気プラズマにおいて見られた複数のイオン種が重なり合ってきたピークからでも個別のイオン種の割合を定量的に算出することができた。

6. 参考文献

- [1] B. Lal, E. R. Blanco, J. R. Behrens, B. A. Corbin, E. K. Green, A. J. Picard, A. Balakrishnan, "Global Trends in Small Satellites," 2017.
- [2] Y. Arakawa, H. Kuninaka, N. Nakayama, and K. Nishiyama, "Ion Engines for Powered Flight in Space," Corona Publishing, Tokyo, 2006, pp. 18–20 (in Japanese).
- [3] H. Koizumi and H. Kuninaka, "Development of a Miniature Microwave Discharge Ion Thruster Driven by 1 W Microwave Power," J. Propul. Power, 26 (2010), pp. 601–604.
- [4] H. Koizumi, K. Komurasaki, J. Aoyama, K. Yamaguchi, "Engineering Model of the Miniature Ion Propulsion System for the Nano-Satellite: HODOYOSHI-4," Trans. JSASS, Aerosp. Tech. Jap., 12, ists29 (2014), pp. Tb_19–Tb_24.
- [5] H. Koizumi, H. Kawahara, K. Yaginuma, J. Asakawa, Y. Nakagawa, Y. Nakamura, S. Kojima, T. Matsuguma, R. Funase, J. Nakatsuka, K. Komurasaki, "Initial Flight Operations of the Miniature Propulsion System Installed on Small Space Probe: PRO-CYON," Trans. JSASS, Aerosp. Tech. Jap., 14, ists30 (2016), pp. Pb_13–Pb_22.
- [6] Y. Nakagawa, H. Koizumi, H. Kawahara, and K. Komurasaki, "Performance Characterization of a Miniature Microwave Discharge Ion Thruster Operated with Water," Acta Astronaut., 157 (2019), pp. 294–299.
- [7] K. Nakamura, Y. Nakagawa, H. Koizumi, Y. Takao, "Numerical Analysis of a Miniature Microwave Discharge Ion Thruster Using Water as Propellant," Trans. JSASS, 61 (2018), pp. 152–159.
- [8] K. D. Diamant, B. L. Zeigler and R. B. Cohen: Microwave Electrothermal Thruster Performance, J. Propul. Power, 23 (2012), pp. 27–34.
- [9] R. P. Vahrenkamp, "Measurement of Double Charged Ions in the Beam of a 30 cm Mercury Bombardment Thruster," AIAA Paper No. 73-1057, 1973.
- [10] R. Shastry, R. R. Hofer, B. M. Reid and A. D. Gallimore, "Method for Analyzing ExB Probe Spectra from Hall Thruster Plumes," AIAA Paper 2008-4647, 2008.
- [11] K. Hirano, Y. Toyoda, A. Kibe, N. Yamamoto, H. Nakashima, 35, No. 1, pp. 1–5, 2013.
- [12] L. Liu, G. Cai, F. You, X. Ren, H. Zheng, and B. He, "Improving the viability and versatility of the E×B probe with an active cooling system," Review of Scientific Instruments 89, 043502 (2018).
- [13] <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>
- [14] R. W. B. Pearse, A. G. Gaydon, "The Identification of Molecular Spectra," 1941.
- [15] S. Mada, K-N. Hida, M. Kimura, L. Pichl, H-P. Liebermann, Y. Li, and R. J. Buenker, "Charge Transfer and Electronic Excitation in Collisions of Protons with Water Molecules below 10 keV," Phys. Rev. A, 75, 022706(2007).
- [16] C. R. Lishawa, R. A. Dressler, J. A. Gardner, R. H. Salter, and E. Murad, "Cross Sections and Product Kinetic Energy Analysis of $\text{H}_2\text{O}^+-\text{H}_2\text{O}$ Collisions at Suprathermal Energies," J. Chem. Phys., 93 (1990), pp. 3196–3206.