

東京大学 大学院新領域創成科学研究科  
基盤科学研究系  
先端エネルギー工学専攻

令和元年度

修士論文

1W級マイクロ波放電式イオンスラスターのイオン引き出し性能向上に関する実験的研究  
Experimental Study on Improvement of Ion Optics Performance  
of 1W-Class Microwave Discharge Ion Thruster

2020年1月28日提出

指導教員 小泉 宏之 准教授

47186079 内藤 裕貴

# 目次

1	序論	1
1.1	CubeSat の台頭	1
1.2	超小型推進機の開発動向	1
1.3	CubeSat 用推進機としてのマイクロ波放電式水イオンスラスタ	2
1.4	マイクロ波放電式水イオンスラスタの課題	3
1.4.1	推進剤利用効率の向上の方法及び先行研究	3
1.5	グリッド設計に関する先行研究および課題	4
1.6	研究目的	5
2	原理	6
2.1	マイクロ波放電式イオンスラスタ	6
2.1.1	イオンスラスタ概要	6
2.1.2	ECR 加熱によるプラズマ生成	6
2.1.3	静電加速	9
2.2	四重極質量分析計	14
2.2.1	四重極質量分析計の原理	14
2.2.2	Zero Blast	17
3	実験装置及び実験方法	18
3.1	実験系概要	18
3.2	真空系	19
3.3	マイクロ波供給系	21
3.4	推進剤供給系	23
3.4.1	キセノン供給系	23
3.4.2	水供給系	24
3.5	電源系	27
3.6	四重極質量分析計	29
4	実験方法及び実験条件	30
4.1	アクセルグリッド形状変更実験：Xe	30
4.2	実験手順	32
4.3	実験 2:四重極質量分析計を用いた質量分析	34
5	実験結果	36
5.1	実験 1:グリッド形状変更実験	36
5.1.1	アクセル電流値の時間履歴:Xe	36
5.1.2	グリッド形状ごとのイオンスラスタ性能:Xe	37
5.1.3	ビーム加速後のグリッド形状:Xe	38
5.1.4	推進剤を水としたときのイオン引き出し特性	41

5.1.5	微小孔グリッドを使用したときの特性 . . . . .	41
5.1.6	スクリーン孔数の違いによる特性 . . . . .	43
5.1.7	ビームによるグリッド削り後のイオンスラスト性能 . . . . .	45
5.2	QMS による質量分析結果 . . . . .	45
5.2.1	チェンバ内残留ガス測定 . . . . .	45
5.2.2	キセノン測定結果 . . . . .	46
5.2.3	水測定結果 . . . . .	48
6	考察 . . . . .	50
6.1	アクセル電流値の直撃由来成分の推定 . . . . .	50
6.2	グローバルモデルによるイオン密度計算 . . . . .	52
6.2.1	複数イオンが存在する場合のボーム速度の取り扱い . . . . .	53
6.2.2	中性粒子密度の計算方法 . . . . .	54
6.2.3	イオンの生成・損失のバランス . . . . .	54
6.2.4	イオンと電子の損失量のバランス . . . . .	55
6.2.5	エネルギーバランス . . . . .	55
6.2.6	考慮した反応式 . . . . .	56
6.3	比較結果 . . . . .	57
6.3.1	質量分析の結果から推定される, 多価イオン由来の推力補正係数 . . . . .	59
7	結論 . . . . .	60
8	学術雑誌掲載等 . . . . .	65
9	国内学会における発表 . . . . .	65

## 表目次

1	超小型推進機の性能及び技術成熟度 [6]	2
2	基準電位からのグリッド電位の典型値	9
3	質量分析手法	14
4	ポンプ諸元	19
5	流量制御機諸元	24
6	直流安定化電源の仕様諸元	27
7	非接触電流計の仕様諸元	28
8	四重極質量分析計	29
9	推進剤がキセノンの時におけるアクセルグリッド形状	31
10	ビーム加速条件:Xe	33
11	流量依存性実験のパラメタ:Xe	33
12	質量分析における実験条件:Xe	35
13	質量分析における実験条件:Water	35
14	グローバルモデルで考慮したキセノンの反応式	56
15	グローバルモデルで考慮した水の反応式	57

## 図目次

1	CubeSat 打ち上げ数の推移 . . . . .	1
2	イオンスラスタ作動概要図 . . . . .	7
3	ECR 加熱による電子のエネルギー分布の推移 [27] . . . . .	8
4	ECR 加熱による電子加速機構 [27] . . . . .	8
5	静電加速部構造及び電位分布 [27] . . . . .	9
6	グリッドシステムにおける形状パラメータ [19] . . . . .	10
7	アスペクト比に対する Santelar の係数 . . . . .	11
8	パービアンスに対するアクセル電流値の典型例 . . . . .	13
9	1W 級イオンスラスタにおいて予測されるビーム軌道 . . . . .	13
10	二次元交流は電場中にある質量電荷比 $m/z$ のイオン . . . . .	15
11	Matheiu 方程式の安定領域 . . . . .	16
12	$m/z = 18$ の電圧設定時における, $x$ 方向における質量電荷比 18 のイオンの軌道 . . . . .	16
13	$m/z = 18$ の電圧設定時における, $y$ 方向における質量電荷比 18 のイオンの軌道 . . . . .	17
14	実験系概要 . . . . .	18
15	真空チェンバ . . . . .	19
16	真空系の系統図 . . . . .	20
17	真空引きの手順. 実験終了時にチェンバを真空状態で放置するときは図中の A の部分を実施する. . . . .	20
18	マイクロ波供給系の接続 . . . . .	21
19	発振源及び高周波アンプ . . . . .	22
20	本実験で使用した DC ブロック . . . . .	22
21	マイクロ波電力較正結果 . . . . .	23
22	流量制御機外観 . . . . .	24
23	水供給系概要 . . . . .	25
24	水供給系 . . . . .	25
25	アキュムレータ圧力のフィッティング例 . . . . .	26
26	(24) 式から計算した流量履歴 . . . . .	26
27	電源系接続図 . . . . .	27
28	安定化電源 . . . . .	28
29	差動プローブ . . . . .	29
30	RGA200(SRS 社製). イオン化部, 四重極管, 検出部から構成される. . . . .	30
31	d0.3t0.15-0.25 の厚み分布 . . . . .	31
32	d0.3t0.15-0.25 の外観. 影により微小な凹凸が視認できる. . . . .	32
33	グリッド形状依存性実験の手順 . . . . .	33
34	グリッド形状取得方法の概要 . . . . .	34
35	画像解析手法 . . . . .	34
36	イオンスラスタ及び QMS の位置関係 . . . . .	35
37	同一厚みのグリッドで孔径のみを変えた場合のアクセル電流値履歴 . . . . .	36

38	同一孔径のグリッドで厚みのみを変えた場合のアクセラ電流値履歴 . . . . .	37
39	グリッド形状変更による性能の比較 . . . . .	38
40	d0.3t0.15-0.25 グリッドにおけるビーム加速後の下流面の様子. (a) グリッド中心 近傍 (b) アンテナ直下かつ最大厚みの領域 (c) グリッド孔外周部の領域 . . . . .	39
41	d0.3t0.15-0.25 グリッドにおけるビーム加速後の全孔の面積拡大率 . . . . .	40
42	d0.3t0.3 グリッドにおけるビーム加速後の全孔の面積拡大率 . . . . .	41
43	d0.2t0.3 グリッドにおけるアクセラグリッドへ流入する電流比の加速電圧依存性. 投入マイクロ波電力は 2.0 W. . . . .	42
44	スクリーン電流に対するアクセラ電の比の時間履歴. 加速電圧は 1200 V, マイク ロ波投入電力は 2.0 W である. . . . .	42
45	2 パターンのグリッド間距離におけるアクセラグリッドへ流入する電流比の加速 電圧依存性. 投入マイクロ波電力はいずれも 2.0 W. . . . .	43
46	推進剤流量で整理したときのスクリーン電流. 加速電圧は 1700 V, マイクロ波投 入電力は 2.0 W . . . . .	44
47	中性粒子密度で整理したときのスクリーン電流. 加速電圧は 1700 V, マイクロ波 投入電力は 2.0 W . . . . .	44
48	d0.2t0.3 グリッドを 60 h イオンビームで削った後のイオンスラスト性能. 加速電 圧は 1700 V, 投入マイクロ波電力は 2.0 W である. . . . .	45
49	真空チェンバ内残留ガス分析 . . . . .	46
50	代表的なキセノンにおける測定結果. 5 回連続で掃引し平均化を行っている. . . .	47
51	キセノンにおけるイオン流束の流量依存性. マイクロ波投入電力は 1.5 W である.	47
52	代表的な水プラズマにおける測定結果. 5 回連続で掃引し平均化処理を行ってい る. . . . .	48
53	水プラズマにおけるイオン流束の流量依存性. マイクロ波投入電力は 2.0 W であ る. . . . .	49
54	電荷交換由来のアクセラ電流値の背圧依存性 . . . . .	50
55	推定した直撃ビーム由来のアクセラ電流値履歴 . . . . .	51
56	直撃衝突由来のアクセラ電流値の推定量 . . . . .	52
57	グローバルモデルにおける計算領域の定義. . . . .	53
58	キセノンのイオン存在比の実験値とグローバルモデル結果との比較 . . . . .	58
59	水プラズマのイオン存在比の実験値とグローバルモデル結果との比較 . . . . .	59
60	複数イオンによる推力補正係数 . . . . .	60

# 1 序論

## 1.1 CubeSat の台頭

CubeSat とは、1 辺 10 cm の立方体を 1 ユニットとして、複数のユニットから構成される超小型衛星である。1 ユニットの単位を 1 U という単位で定義し、ユニットの数により 2 U や 6 U など複数ユニットで構成することが可能である [1]。図 1 に 2002 年以降の CubeSat 打ち上げ数を示す [1]。CubeSat 打ち上げ数は年々増加していることが見て取れ、SpaceWorks 社の調査では、CubeSat 含む 100 kg 以下の超小型衛星の市場規模は今後も拡大していくことが予測されている。初めは教育目的から始まった CubeSat ではあるが、従来の主流であった数 100 kg から数トンに及ぶ中大型衛星と比較して、コストの低さや開発期間の短さなどの利点を持つ。一般的に 5 - 10 年と数 100 億円の開発予算を投じる必要がある大型衛星と比較し、CubeSat では開発期間 1-2 年、開発予算は数億円程度である [2]。これらにより、CubeSat 開発には新技術の実証や、人材育成へのハードルが低くなるというメリットを有する。この恩恵を享受しやすい教育機関及びベンチャー企業が中心となり、近年 CubeSat の研究・開発が盛んになっている。

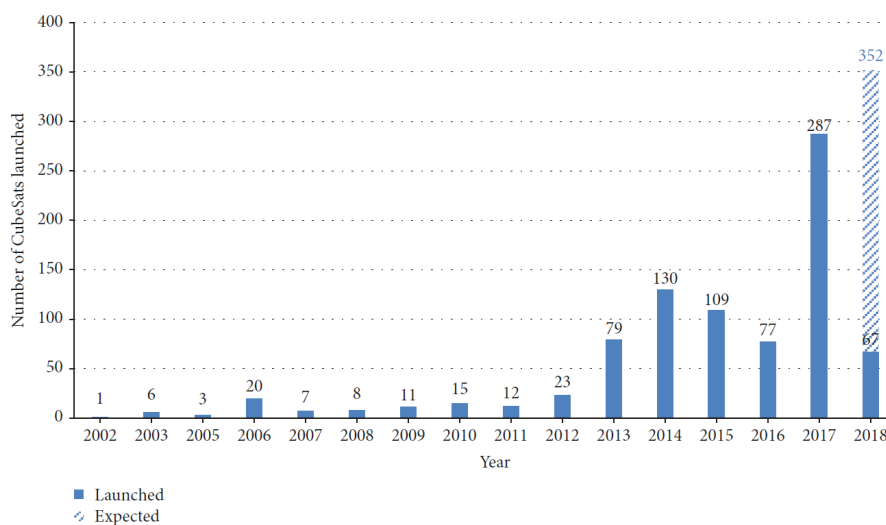


図 1 CubeSat 打ち上げ数の推移

## 1.2 超小型推進機の開発動向

CubeSat はその小型性を活かし打ち上げ数が増加している一方、体積や発電量の制約ゆえに推進機搭載がない例が多く、ミッションの幅が制約されるという欠点をあわせもつ。衛星が能動的に軌道遷移、軌道維持を行うためには推進機の搭載が必須である。CubeSat のさらなる適用範囲拡大のため、超小型衛星搭載を目的とした小型推進機の研究・開発も同様に活発化している。東京大学で

は 6 U サイズのキューブサットに水レジストスラスタを搭載し、EML2( Earth-Moon Lagrange point 2) への探査を目的としている。小型化の対象はコールドガスジェットやレジストジェットに限らず、ホールスラスタなどのより構造が複雑となる電気推進においても小型化が進んでいる。電気推進機は、化学推進と比較して低推力、高比推力という特徴を持ち、搭載衛星の獲得 $\Delta V$ の増加を見込むことができる一方、構造が複雑である。そのため従来から放電室形状を変更したシリンドリカルホールスラスタや、深宇宙探査機はやぶさの推進機である  $\mu 10$  を代表とするマイクロ波放電式イオンスラスタなど、新たなコンセプトを持つ小型電気推進機が考案されている [4][5]。比推力の増加は衛星の活動範囲及び活動時間の増加に直結するため、超小型電気推進機のさらなる性能向上が期待されている。

ここで近年開発されている超小型推進機の種類及び技術的成熟度を表 1 に示す。TRL(Technology readiness levels) は技術成熟度レベルを表し、Level 4 はラボレベルでの実証、level 6 は地上でのシステムとしての技術成立性の確認、level 8 はシステムの運用テスト及び認証試験、そして level 9 が実運用段階を意味する。実運用レベルまで達しているのは現状コールドガススラスタのみである。コールドガススラスタは構造が比較的簡素であり作動実績の多い一方で、比推力が 70 s 程度と低く、獲得 $\Delta V$ が限られるためミッションに制限がかかる。コールドガススラスタと比較して電気推進機の比推力は高く、大きな $\Delta V$ を獲得できる。そのため電気推進機の小型化が注目されるが、推進剤の貯蔵体積を減らすという観点から、液相または固相で貯蔵可能な大抵推進剤を用いる研究もされているが、現状の技術成熟度は TRL 6 である。

表 1 超小型推進機の性能及び技術成熟度 [6]

System	Thrust	Specific Impulse	Technology Maturity
Electrospray	10-120 $\mu$ N	500-5000 s	TRL 6
Gridded Ion thruster	1-10 mN	1000-3500 s	TRL4(Iodine), TRL8(Xenon)
Hall Thruster	10-50 mN	1000-2000 s	TRL4(Iodine), TRL8(Xenon)
PPT	1-1300 $\mu$ N	500-3000 s	TRL8(Teflon), TRL7(Titanium)
Non-toxic thruster	0.1-27 N	220-250 s	TRL6(ADN-Ammonium dinitramide)
Cold gas thruster	0.01-10 N	65-70 s	TRL9(Butane/ $N_{2,gas}$ )
Solar Sails	0.25-0.6 mN	-	TRL6( $85 m^2$ )

### 1.3 CubeSat 用推進機としてのマイクロ波放電式水イオンスラスタ

このように中大型衛星においては豊富な作動実績をもつイオンスラスタを超小型衛星、および CubeSat へ搭載しようとする試みがなされている。50 kg 級の超小型衛星に搭載され宇宙作動を達成したマイクロ波放電式イオンスラスタである MIPS(Miniature Ion Propulsion System) などがその一例である。MIPS は 50 kg 級衛星である「ほどよし 4 号」へ搭載され、宇宙作動に成功した [8]。また、超小型衛星による深宇宙探査の実証として、マイクロ波放電式イオンスラスタとコールドガスジェットが一つの推進剤タンクを共有する統合推進系 I-COUPS (Ion thruster and COLD gas thruster Unified Propulsion System) が開発され、PROCYON へ搭載され、223 時間の宇宙作動を行った [9]。

50 級衛星での作動実績を持つ MIPS と I-COUPS であるが、電源系やガス供給系も含めたシステ



ムとして CubeSat 搭載可能な大きさまで小型化する際、推進剤である高圧ガスを貯蔵するための推進剤供給系が重量及び体積のボトルネックとなる。CubeSat 搭載を意識したイオンスラストでは推進剤を固体燃料や液体燃料へと変更することでこのボトルネックの解消がなされている。Busek では固体貯蔵が可能なヨウ素を推進剤とした RF イオンスラストを開発した [10]。この推進システムは 1.3 U, 比推力 2500 s, 推力電力比が 17 mN/k の性能を有する。また東京大学では MIPS の推進剤を水にすることで進剤供給系の重量を低減する試みがなされ、性能の特性が調査されている [11]。また、同じ水を推進剤としてイオンスラストとレジストジェットを作動させる、統合推進系が考案されており、3 U, 比推力 408 m/s, 推力電力比 5.1 mN/kW が現状の性能である [12]。

代替推進剤として提案されている水は常温常圧で液体のため、液相での貯蔵が可能となるため、推進剤供給系の小型化及び軽量化が期待される。また従来推進剤やヨウ素と比較して水は安全性と取り扱い性が良いという利点をもつ。CubeSat では大型衛星とのピギーバックとしての打ち上げがされることも多いため、安全要求が厳しくなる点からもこの安全性のメリットは大きい。一方、性能面では従来の推進剤であるキセノンやアルゴンと比較して分子量が小さくなることによる推力の低下および、プラズマ化した際に分子の解離によるプラズマ密度の低下や、解離で発生したイオンによる酸化などが懸念されている。しかしながら、このイオンスラストではプラズマ生成方式にマイクロ波放電式を採用しており、直流型のように電極を内部に有さないため、酸化の影響は小さいことが予測される。

#### 1.4 マイクロ波放電式水イオンスラストの課題

マイクロ波放電式水イオンスラストは CubeSat 用推進機としてのポテンシャルがあることを述べたが、実用レベルに向けて以下の課題を持つ。

- 推進剤利用効率が低い (現状 6.9%[11])
- 水プラズマがグリッド寿命に与える影響が未知

比推力  $I_{sp}$  は、ビームの発散や多価イオンによる効率をふくめた推力係数  $\eta_F$ , 推進剤利用効率  $\eta_U$ , 排気速度  $v_{ex}$  を用いて

$$I_{sp} = \eta_F \eta_U \frac{v_{ex}}{g} \quad (1)$$

と表され、推進剤利用効率は比推力に直結する効率である。水イオンスラストの比推力は現状 500 s 程度であり、イオンスラストの中では低く改善の必要がある。これは主に推進剤利用効率が低いことに起因している。

##### 1.4.1 推進剤利用効率の向上の方法及び先行研究

水イオンスラストの推進剤利用効率向上に向けた方法や課題を述べる。推進剤利用効率  $\eta_U$  は、引き出したイオンビーム電流  $I_b$ , 投入推進剤流量  $\dot{m}$ , 推進剤質量  $M$  として

$$\eta_U = \frac{M}{e} \frac{I_b}{\dot{m}_n} \quad (2)$$

となる。また、放電室内部のプラズマ密度が一様だと仮定したとき、ボーム条件下でプラズマから引き出せるイオンビーム電流は

$$I_b = en_p \sqrt{\frac{kT_e}{M}} \exp\left(-\frac{1}{2}\right) \quad (3)$$

とかける。ここで  $n_p$  はプラズマ密度、 $T_e$  は電子温度である。ここで推進剤利用効率を向上させるためには、式3のプラズマ密度を向上させるか、ビーム電流を減らさずに推進剤流量  $m$  を減らすかの2つの方法がある。前者の方法として先行研究では、富田らがプラズマ生成部の改良としてマイクロ波周波数の変更及び放電室高さの変更を行い、ビーム電流と投入電力の比で定義されるイオン生成コストの低下を試みた [13]。後者について、分子流として扱うことができる中性粒子密度のとき、必要な推進剤流量は

$$\dot{m}_n = MC_{\text{grid}} n_n + \frac{M}{e} I_b \quad (4)$$

となる。ここで  $n_n$  は放電室内部の中性粒子密度であり、 $C_{\text{grid}}$  はグリッドシステムの形状によって定まるコンダクタンスである。ここで、コンダクタンスに最も影響を与えるのがアクセルグリッド形状であり、この設計が推進剤利用効率改善の鍵となる。

## 1.5 グリッド設計に関する先行研究および課題

アクセルグリッドには、プラズマからイオンを拡散を抑えたまま加速排気する役割と、イオン源内部の中性粒子の流出を制限する役割を持つ。またアクセルグリッドは高エネルギーの加速イオンに晒されるためスパッタによる構造破壊がグリッドシステムの寿命要因になる [27]。したがってアクセルグリッドの形状設計はイオンスラストの性能及び寿命に大きく影響する。中大型イオンスラストで主流である直流放電型では、主要なプラズマ生成領域で磁場が弱く、プラズマ密度の均一であるため、各孔位置における穴径及び厚みはグリッド全体で均一として設計されている。

一方で、 $\mu 10$  や MIPS のような小型のイオンスラストで採用されているマイクロ波放電式では、プラズマ生成領域が磁場の強い領域であるためプラズマ密度分布の不均一性が指摘されている [14]。したがってマイクロ波放電式イオンスラストにおいてはビーム引き出しの観点での最適形状は孔位置により異なることが予想される。西山らは 100 W 級のマイクロ波放電式イオンスラスト  $\mu 10$  に対し、極小孔のアクセルグリッドをイオンビームにより加工することで穴位置ごとに穴径が異なる形状を実験的に求めた [14]。ある作動点において推進剤利用効率の 66.7 % から 82.4% の性能向上を達成したが、グリッドの加工に 2000 時間を要しており、形状探索時間の削減が課題である。数値計算からのアプローチとして、中野らは、MIPS のグリッド全体を計算領域としてビーム軌道を計算することで、プラズマ密度の不均一性に由来するアクセルグリッドへのビーム直撃を示唆している [15]。また、同様の計算手法を用い、プラズマの不均一性を考慮したうえでグリッドへのビーム直撃がなくなるグリッド厚み分布を提案した [16]。これらの数値計算手法は厚み分布を持つグリッド形状を設計する時間を短縮するため、CubeSat 開発との強いシナジーをもち有用である。しかし、本手法では、ビーム計算に用いる放電室内のイオン電流密度分布は 3D-PIC による計算値を用いているため、実験値を使用していない点や、キセノンでのみ計算されているため、推進剤が水であるときの適用可能性は定かではない。また  $\mu 10$  ではグリッドシステム形状がプラズマ生成部にも影響を与えていることが示唆され、その相互作用が調査されている [17]。したがってマイクロ波放電式水イオンスラストにおけるグリッドシステムの性能向上には穴径及び厚み分布を加えて実験的に形状を模索する必要がある。

また、水イオンスラストでは水分子の解離によって酸素イオンや水素イオンなどのイオンが存在することが予測され、その割合を測定することがより詳細な水イオンスラストの性能評価に必要である。先行研究では MIPS を対象に、水プラズマについて 3D-PIC による数値計算がなされている [18]。この計算により求めるイオン電流密度分布から前述のようにグリッド全領域をビーム計算することは可能であるが、実験との妥当性が現状評価されていないのが課題である。したがって、まず水イオンスラストにおいてはプラズマ中のイオン種測定が必要である。

## 1.6 研究目的

本研究の目的は以下の 2 つである。

- 1 W 級マイクロ波放電式イオンスラストのイオン加速部形状が性能に与える影響の調査と形状改善による性能向上
- 同スラストにおけるプラズマの質量分析によるイオン種測定とその流量依存性の調査  
これにより 1W 級マイクロ波放電式イオンスラストの推進剤利用効率の改善及び、数値計算の妥当性評価を行うことができ、効率的なグリッド形状模索の重要な指針になると考えられる。

## 2 原理

本章では本研究で使用したマイクロ波放電式イオンスラストの作動原理，静電加速部の設計指針，そして四重極質量分析計の測定原理を述べる。

### 2.1 マイクロ波放電式イオンスラスト

#### 2.1.1 イオンスラスト概要

イオンスラストは静電加速型に分類される電気推進機の一つである。イオンスラストでは供給された推進剤を放電室でプラズマ化し，2枚ないし3枚からなるグリッドに印可される電圧でイオンのみを選択的に加速することで推力を得る。推進機の電気的中性を保つため，電子を供給する役割を果たす中和器と同時に作動させる。最も一般的な電気推進機であるホールスラストと比較したとき，イオンスラストは一般的に高い比推力及び低い推力をとることが多い。また，プラズマ生成部と加速部が明示的に分離していることがイオンスラストの特徴のひとつであり，これによりプラズマ生成部と加速部を独立に性能向上することが可能である。

イオンスラストをプラズマ生成方式で大別したとき，直流放電式，高周波放電式，マイクロ波放電式に分類することができる。最も一般的な方式は直流放電式であり，ホローカソードを電子供給源として放電室内部に電極を設け，電子を加速する。加速された電子が中性粒子と衝突し，電離することでイオン化を行う。電極及び壁面への電子損失を減らすため，カスプ状磁場を形成することが多い。他のプラズマ生成方式と比較して，均一かつ密度の濃いプラズマを生成できる一方，ホローカソードの取り扱い性の悪さや，放電室内に電極を有するため，スパッタによる寿命低下などの問題を持つ。

高周波放電式では MHz 帯の高周波を用いて誘電体容器の内部に変動磁場を印可することで電流を誘起しプラズマを生成する。プラズマに電極が接触しないため寿命向上が期待される一方，イオンの生成領域が壁面近傍になるため壁面損失が増大しやすい。

マイクロ波放電式では GHz 帯のマイクロ波を投入し，電子サイクロトロン共鳴により電子を加熱しプラズマを生成する。代表的なイオンスラストとしてはやぶさの  $\mu 10$  などが挙げられる。

#### 2.1.2 ECR 加熱によるプラズマ生成

本研究で使用したマイクロ波放電式イオンスラストでは，ECR 加熱を利用してプラズマ生成を行う。マイクロ波放電式イオン源の概要図を図 2 に示す。放電室内で電極がプラズマと直接接さず，プラズマ電位と壁面電位の差が小さいため，長寿命化及び高信頼化が望める。

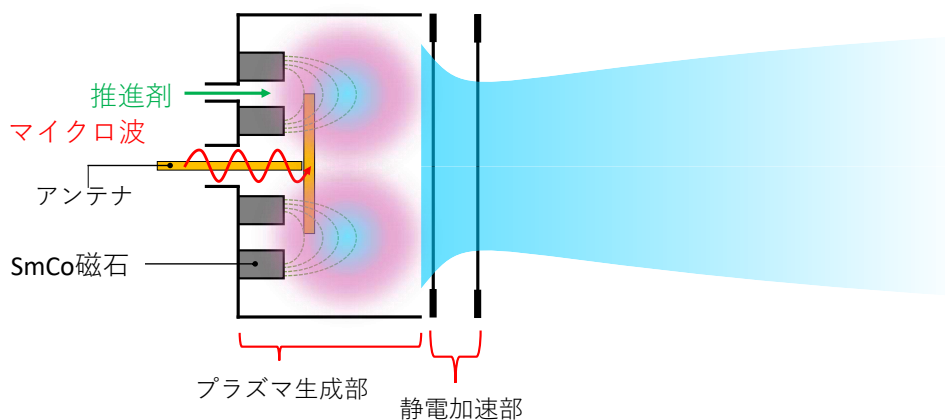


図2 イオンスラスタ作動概要図

一般に電子の加速に ECR( Electron Cycrotron Resonance) 加熱を利用して GHz 帯のマイクロ波を用いることが多い。ECR 加熱は、磁場に束縛されて運動する電子に対し、サイクロトロン周波数と同じ周波数のマイクロ波を投入することで、電子サイクロトロン共鳴を起こすことで電子加速を行う。従って一般的な ECR 加熱方式ではマイクロ波を供給するための空洞部又はアンテナ、そして電子を束縛するためのミラー磁場を有する。

磁場中に存在する荷電粒子はローレンツ力を受け磁力線に巻き付きサイクロトロン運動と呼ばれるらせん運動を行う。このときのサイクロトロン周波数は

$$\omega_c = \frac{eB}{m_e} \quad (5)$$

である。投入するマイクロ波周波数とサイクロトロン周波数が一致する磁束密度に電子が存在するとき、電子は共鳴により加速されエネルギーを得る。十分なエネルギーを得た電子が中性粒子と衝突することで電離を引き起こす。図3に、ECR 加熱による電子のエネルギー分布の推移を示す。電子は図4のように磁場に巻き付きドリフト移動しながら ECR 領域においてエネルギーを得る。本研究で使用したマイクロ波放電式イオンスラスタでは、中心軸を共有した径の異なる2つのリング磁石からなる磁場を構成している。2つの磁石の磁束方向は異なっており、ドーナツ状のミラー磁場を形成する。この磁場に電子はトラップされ、電子共鳴加熱を繰り返しながら往復運動を繰り返す。本研究ではマイクロ波周波数が 4.25 GHz のマイクロ波を投入しているが、このとき対応するサイクロトロン周波数となる磁束密度は 0.15 mT である。

イオンスラスタにおいて、プラズマ生成部における評価指標に式6で定義されるイオン生成コスト  $C_i$  を用いる。

$$C_i = \frac{P_{in}}{I_s} \quad (6)$$

イオン生成コストは小さい値ほどよい。ここで  $P_{in}$  は投入マイクロ波電力、 $I_s$  はスクリーン電流で

ある.

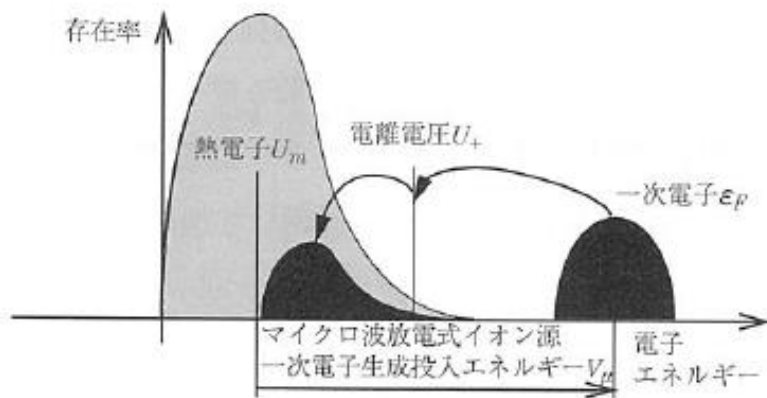


図3 ECR加熱による電子のエネルギー分布の推移 [27]

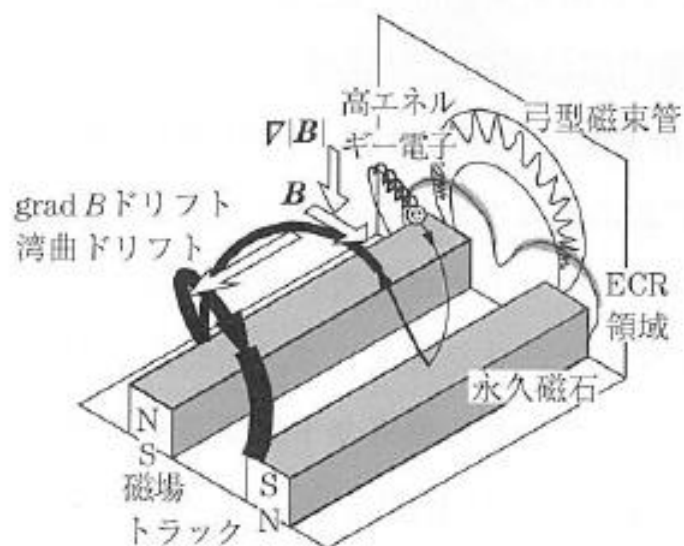


図4 ECR加熱による電子加速機構 [27]

### 2.1.3 静電加速

イオンスラスタでは放電室で生成されたプラズマから推力を得るためイオンの静電加速を行う。図5にイオン加速部の概略を示す。一般的に静電加速部には、多数の孔が開いているグリッドを複数枚用いる。上流側からスクリーングリッド、アクセルグリッド、ディセルグリッドと呼ばれる。それぞれのグリッドに与えられる電位の典型値を表2に示す。これにより図5に示される空間電位を形成する。イオン源からスクリーングリッドの孔から引き出されたイオンは、スクリーングリッド-アクセルグリッド間の逆電位勾配により加速され、アクセルグリッド-ディセルグリッド間の電界により減速されて外部へ放出される。逆電位勾配は下流からの電子の逆流を阻止する役割を持つ。最終的に、イオンはスクリーン電圧に相当する運動エネルギーを得て排気される。

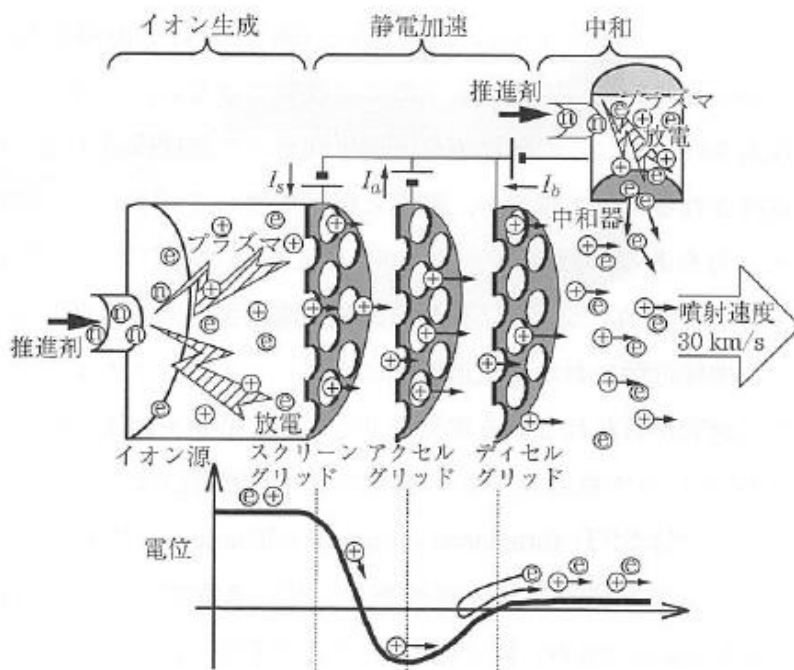


図5 静電加速部構造及び電位分布 [27]

表2 基準電位からのグリッド電位の典型値

名称	典型値
スクリーングリッド	1 - 2 kV
アクセルグリッド	-200 V
ディセルグリッド	0 V

グリッド設計において、各グリッドの孔径及び厚み、そしてグリッド間距離がパラメータとなる。効率的なイオン引き出しを考えた時、スクリーングリッドには大きな開口面積を設け、アクセルグリッドにはイオンビームに収束、下流電子の逆流阻止、中性粒子閉じ込めの目的から小さな孔が用いられる。図6にグリッドシステムにおける形状パラメータを示す。

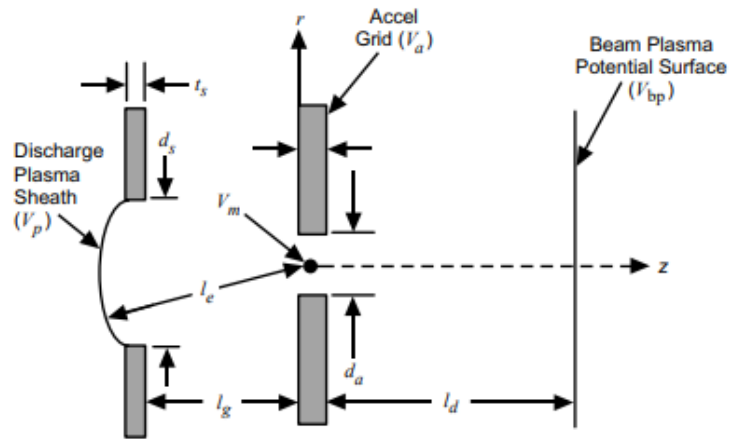


図6 グリッドシステムにおける形状パラメータ [19]

まず，グリッドシステムの形状パラメータが放電室内中性粒子密度に及ぼす影響について述べる．投入推進剤流量，中性粒子密度，そして排気したイオンビーム電流間の関係は式4に示したとおりである．コンダクタンス  $C_{\text{grid}}$  は

$$\frac{1}{C_{\text{grid}}} = \frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_a} \quad (7)$$

である．添え字の s,a はそれぞれスクリーングリッド，アクセルグリッドを意味する．中性粒子の平均自由行程が系の代表長より十分大きい時，分子流として扱うことができ，それぞれのグリッドのコンダクタンスは

$$\begin{aligned} C &= KA\sqrt{\frac{kT}{2\pi M}} \\ &= \frac{\pi d^2 N}{4} K\sqrt{\frac{kT}{2\pi M}} \end{aligned} \quad (8)$$

である． $d$  はグリッド孔径， $N$  は孔数， $K$  は孔のアスペクト比から決まる実験的に求められた係数であり，今回は Santeler の提案する係数 [20] を使用した．

$$K_s = \left(1 + \frac{3d}{4t} + \frac{1}{\frac{4t}{d} + \frac{8}{7}}\right)^{-1} \quad (9)$$

である．係数  $K$  の孔アスペクト比に対する依存性を図7に示す．



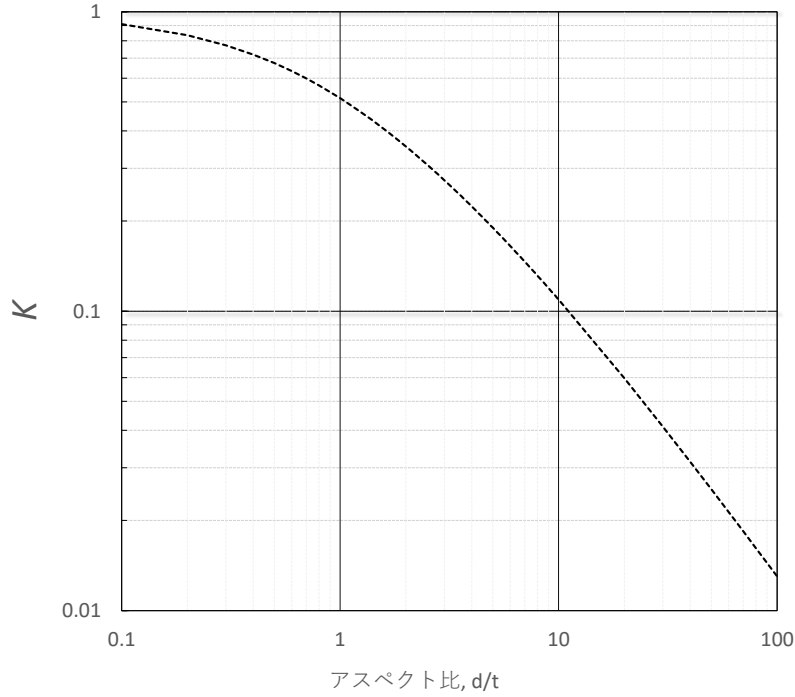


図7 アスペクト比に対する Santelar の係数

一般にスクリーングリッドの孔径はアクセルグリッド孔径より大きく設定される．従って孔の総面積に関して  $A_s \gg A_i$  であり，孔のアスペクト比もスクリーングリッドのほうが大きくとられるため，式7は

$$C_{\text{grid}} \approx C_a \quad (10)$$

と近似できる．つまり中性粒子の閉じ込め性能は主にアクセルグリッドのコンダクタンスにより決定され式(7)から，アクセルグリッド孔径の縮小が最も効果的であることがわかる．

ある密度のプラズマから排出できるイオン電流密度は，ボーム条件下で

$$J_{pt} = en_p \sqrt{\frac{kT_e}{M}} \exp\left(-\frac{1}{2}\right) \quad (11)$$

となる．これに図6のようにスクリーングリッド孔上流に張り出したシース面積を掛け合わせることでビーム電流が決まる．このシースからアクセルグリッド上流面の孔中心までの距離がイオンの静電加速長さ  $l_e$  (図6) である．この  $l_e$  は引き出し条件 ( $n_p, T_e, V_s$  など) が自明でなければ求めることはできない．また引き出しイオン相互に排斥力が働くため  $l_e$  は一意には定まらない．そのため，数値計算などでは近似的に実効電極間距離を

$$l_e = \sqrt{l_g^2 + \left(\frac{d_s}{2}\right)^2} \quad (12)$$

として計算する例が多い．式(11)(12)からわかることとして，スクリーングリッドからの引き出しイオンイオン電流に関してアクセルグリッドの形状依存性はなく，中性粒子閉じ込めの観点では  $d_a$  は小さくする方がよい．

しかしながら、 $d_a$  の過度な縮小はビームの直撃をまねき、スパッタリング損耗を起こす。ビーム直撃あるいは電荷交換反応により発生するスパッタで発生する金属粉に由来するイオンスラストの故障が指摘されているため、アクセルグリッドへ流入するイオン電流は最小にしたい。最適設計されたグリッドでは電子逆流及び直撃由来のイオン成分は0、電荷交換イオン由来のイオン成分はスクリーン電流の1%以下に抑えることができる。このイオン引き出しの評価には、1孔当たりのスクリーン電流  $I_h$  を電位差  $V_s$  の1.5乗で除したパービアンズ  $p_h$  で評価される。

$$p_h = \frac{I_h}{V_s^{1.5}} \quad (13)$$

図8にパービアンズに対するアクセル電流値の一般的な傾向を示す。パービアンズが極端に小さい状態ではプラズマのシースがアクセルグリッド側に凸上に張り出し、ビームが発散することでアクセル電流値が増大する。また、パービアンズが大きいときプラズマのシースは放電室側に凹状に張り出し、ビームが中心軸上で交差し、アクセルグリッドに衝突する。それぞれ、パービアンズリミットおよびクロスオーバーリミットと呼ばれ、イオンスラストの作動はこれらを避けた状態で行うことが望まれる。ここで、ビーム電流が空間電荷制限電流  $J_{si}$

$$J_{sf} = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{M}} \frac{V_s^{3/2}}{l_e^2} \quad (14)$$

であるとしたとき、パービアンズは

$$p_h = \frac{J_{si} \frac{\pi D_s^2}{4}}{V_s^{3/2}} = \frac{\pi}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{M}} \left( \frac{D_s}{l_e} \right)^2 \quad (15)$$

となり、 $\frac{D_s}{l_e}$  の関数となる。 $p_h$  を  $\left( \frac{D_s}{l_e} \right)^2$  で除した値を規格化パービアンズ NP/H と呼び、比電荷  $e/M$  によってのみ定まる定数となるため、グリッドシステム評価に用いられることが多い。しかしながら、1W級のマイクロ波放電式イオンスラストでビーム電流が  $J_{si}$  であると仮定すると、1Aの電流値が算出されるが、実験値では10mAであり、本イオンスラストでは空間電荷制限電流には達していないことが予測される。簡易的な二次元イオンビーム軌道計算であるOPTを用いて、本イオンスラストにおけるプラズマパラメータと作動条件の典型値で計算を行うと、図9のようにクロスオーバーの状態で作動を行っていることがわかる。従って、低電力で作動する本イオンスラストではクロスオーバーによりアクセルグリッド上流側ではビームの広がり小さいが、下流側で大きく発散するようなビーム軌道を許容したうえで形状最適化を行う必要があることがわかる。

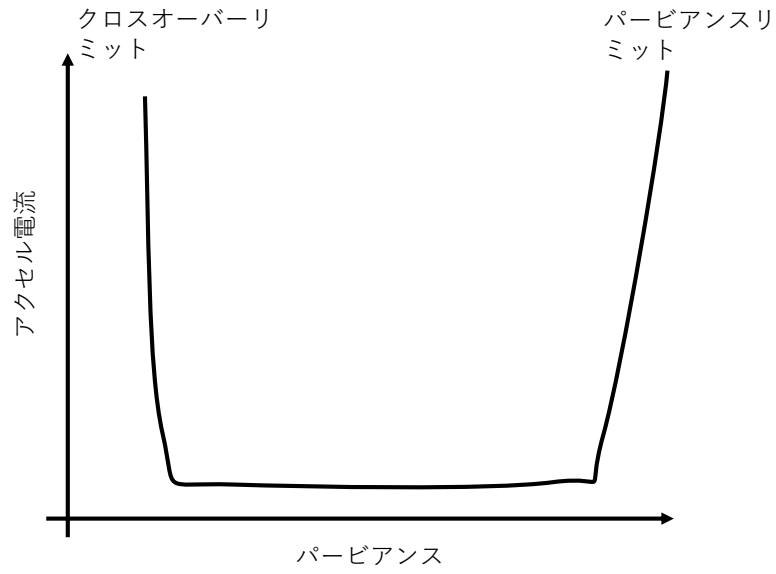


図8 パービアンスに対するアクセラセル電流値の典型例

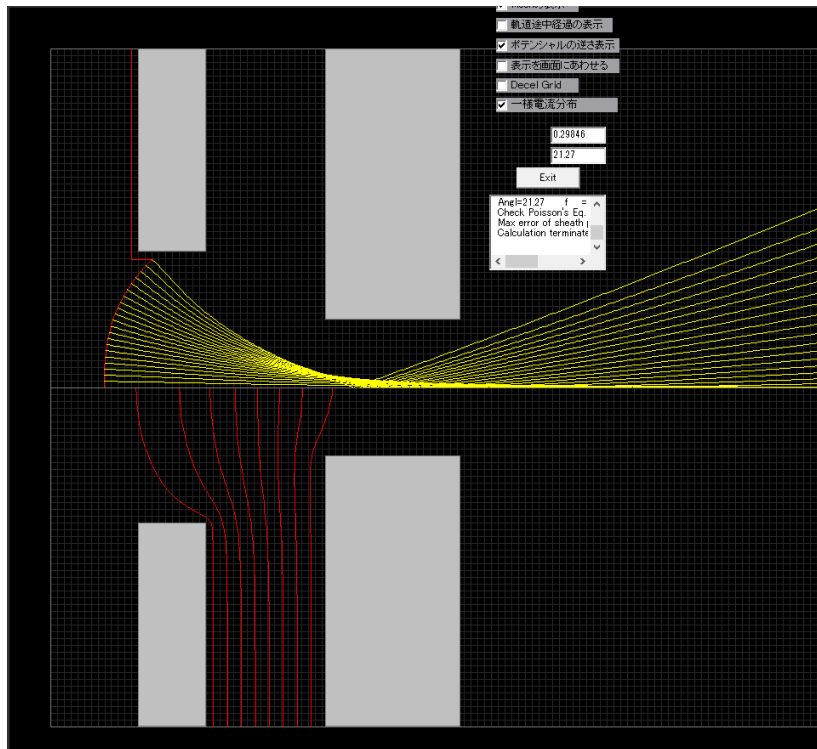


図9 1W級イオンスラストにおいて予測されるビーム軌道

## 2.2 四重極質量分析計

一般に用いられる，イオンをその質量と電荷の比である質量電荷比で分類する方法を表3にまとめた．一般的に最も普及している質量分析計は四重極型である．質量分析計は試料導入部，イオン化部，質量分離部，検出部により構成される．本研究ではプラズマ生成をすでに行ったうえで質量分析を行うため，質量分離部の方法にのみ着目している．イオンスラスタのビーム中のイオン種測定には，二重収束型の一つである EXB プローブが用いられることが多い [28]．先行研究では，イオンスラスタに一般に用いられる推進剤であるキセノンの 1 価イオンと多価イオンの分離が目的であるため，必要分解能が 60 amu 程度となるが，本研究のように水プラズマに着目した時，生成されると予測されるイオンを分離するためには質量電荷比が 1 amu 以下の分解能が求められる．今回は一般に分解能 1 amu 以下を達成しやすい四重極型を用いた．

表3 質量分析手法

型式	原理
四重極型	連続したイオンビームの高周波二次元四重極電場中の軌道安定性に基づく分離
二重収束型	偏向した連続イオンビームの磁場中でのローレンツ力に基づく運動量による収束と電場による運動エネルギーによる収束を組み合わせた分離
飛行時間型	パルス状イオンビームの飛行時間の違いに基づく分離
イオントラップ型	トラップされたイオンの高周波 3 次元四重極電場中の起動安定性に基づく分離
イオンサイクロトロン共鳴型	トラップされたイオンの磁場中でのサイクロトロン周波数による分離

### 2.2.1 四重極質量分析計の原理

本章では四重極質量分析計 (以下 QMS) の原理についてまとめる．QMS ではイオンの高周波 2 次元四重極電場中における軌道安定性による分離を行う．図 10 のように，4 つの導体棒に直流成分  $U$  及び交流成分  $V$  をもった電圧がかかった場において，その中心に質量  $m$ ，電荷  $q$  の粒子が存在するときの安定性を考える．このとき任意の位置における電位は

$$\Phi = (U + V \cos \omega t) \frac{-x^2 + y^2}{r^2} \quad (16)$$

である．この時，各成分の運動方程式は

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} - 2q(U + V \cos \omega t) \frac{x}{r^2} = 0 \quad (17)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + 2q(U + V \cos \omega t) \frac{y}{r^2} = 0 \quad (18)$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = 0 \quad (19)$$

となる. とくに  $x, y$  方向の運動方程式に関して,  $\tau = \frac{\omega t}{2}$   $\alpha = \frac{8qU}{mr^2\omega^2}$   $\beta = \frac{4qV}{mr^2\omega^2}$  として書き直すと

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} - (\alpha + 2\beta \cos 2\tau)x = 0 \quad (20)$$

$$\frac{d^2y}{d\tau^2} + (\alpha + 2\beta \cos 2\tau)y = 0 \quad (21)$$

となる. 式 (20) は Matheiu 関数と呼ばれ,  $\alpha, \beta$  により解の安定性が決まり, その領域を示したものが図 11 である.  $\alpha, \beta$  の比, つまり直流電圧と交流電圧の比を一定にした直線上では, ある範囲の質量電荷比を持つイオンのみが 2 次元で安定な領域を持つことが分かる. このように, 電圧比を一定にしたうえで電圧をある範囲で掃引することによって, 電圧に応じた質量電荷比のイオンのみが安定的に四重極を通過し検出器で測定することができる.

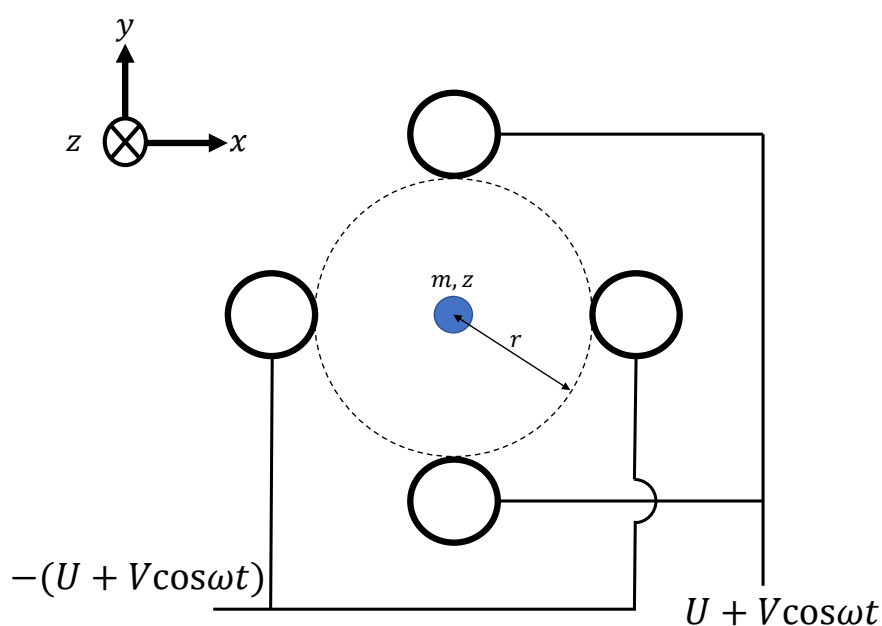


図 10 二次元交流は電場中にある質量電荷比  $m/z$  のイオン

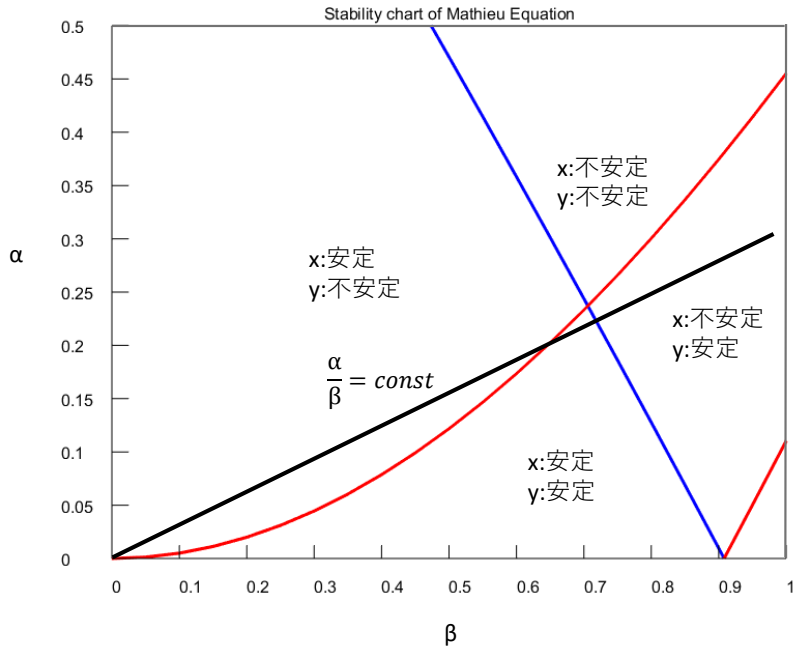


図 11 Matheiu 方程式の安定領域

質量電荷比  $\frac{m}{z} = 18$  を測定するときの電圧  $U, V$  を四重極に印加した時，質量電荷比 18 のイオンの軌道を図 12 に示す。

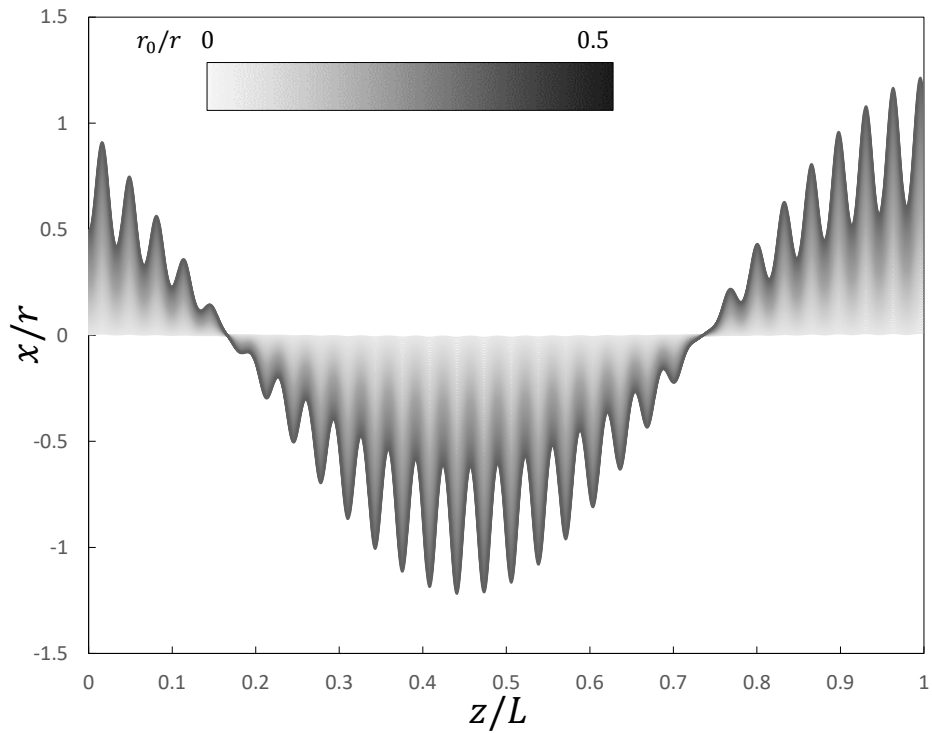


図 12  $m/z = 18$  の電圧設定時における，x 方向における質量電荷比 18 のイオンの軌道

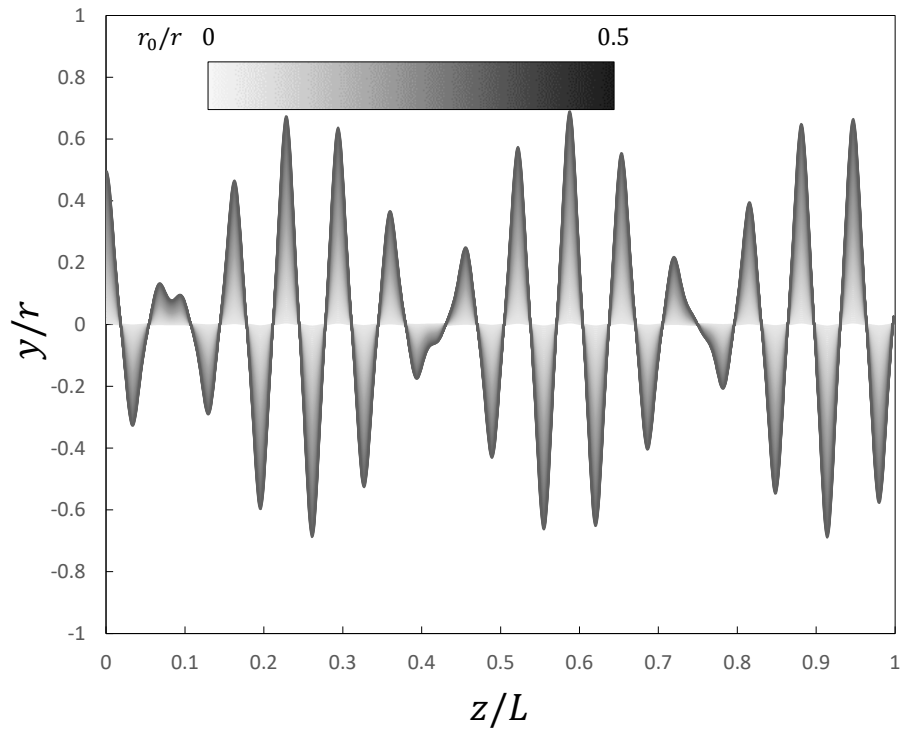


図 13  $m/z = 18$  の電圧設定時における,  $y$  方向における質量電荷比 18 のイオンの軌道

### 2.2.2 Zero Blast

四重極質量分析計はその簡易性ゆえ広い分野で用いられているが, 質量電荷比の低い領域, 特に水素の分離時に”Zero Blast”と呼ばれる分離不具合が生じる. 四重極に印可する電圧が小さくなるため, 質量の大きいイオンの分離が不完全になることに由来する, 流入する電流値の増大が原因である.

### 3 実験装置及び実験方法

#### 3.1 実験系概要

本実験系の概要図を図 14 に示す。真空環境をつくる真空系，推進剤を供給するガス供給系，マイクロ波を投入するマイクロ波供給系，そしてグリッドへの電圧を印可する電源系からなる。以下の章では，各系に対しての詳細をまとめた。

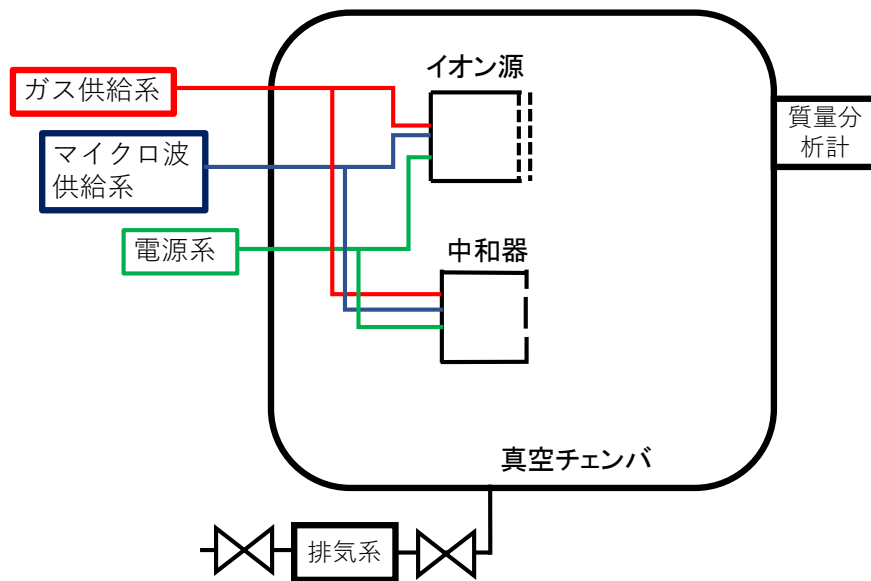


図 14 実験系概要





図 15 真空チェンバ

### 3.2 真空系

本研究では内径 1 m の真空チェンバ及び、ターボポンプとロータリーポンプからなる排気系を用いて、実験前到達背圧  $9 \times 10^{-3}$  Pa の真空環境を作っている。ポンプの仕様を表 4 に示した。真空系の系統図を図 16 に示す。チェンバ内圧力を測定する真空計として、Pfeiffer Vacuum 製の PKR251 を使用した。この真空計は、ピラニ真空計とコールドカソード真空計が複合しており、大気圧から  $10^{-7}$  Pa までの圧力範囲を測定可能である。真空引きをする際の手順をフローチャートにしたものを図 17 に示す。

表 4 ポンプ諸元

ポンプ名	製造会社	型番	動作差圧	排気速度
ロータリーポンプ	大亜真空	GHP-1300	1300 L/mm	
ターボ分子ポンプ	島津	TMP-803M	800 L/s (N <sub>2</sub> )	

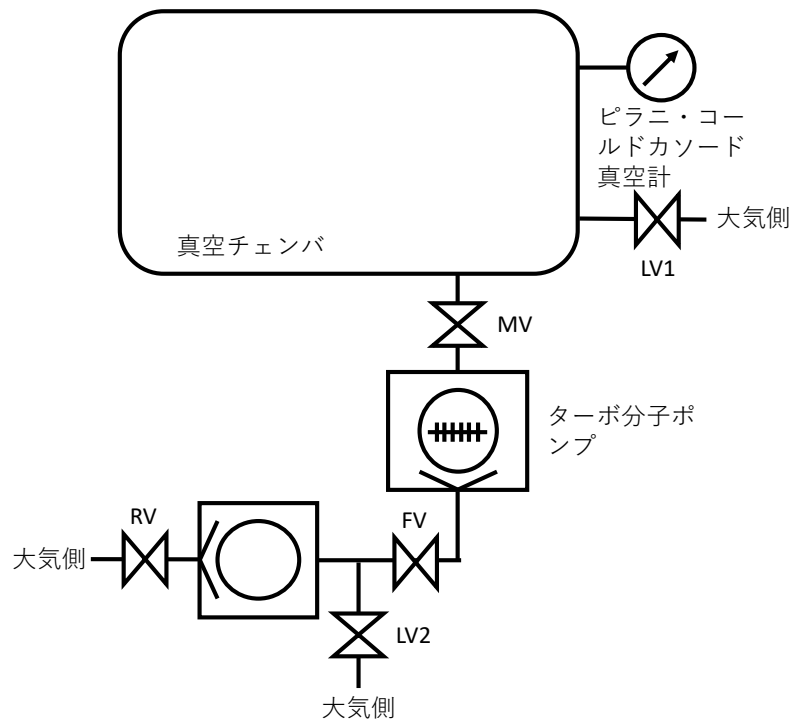


図 16 真空系の系統図

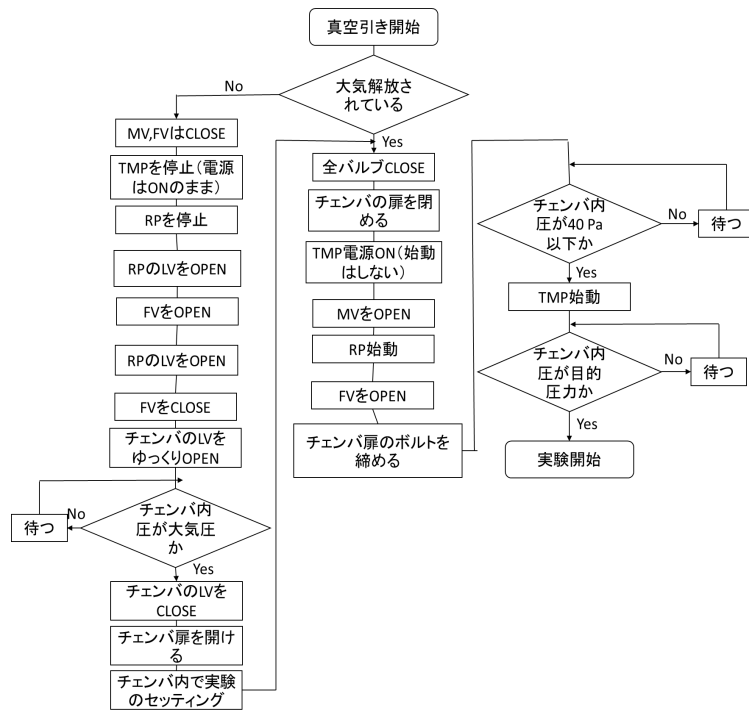


図 17 真空引きの手順。実験終了時にチェンバを真空状態で放置するときは図中の A の部分を実施する。

### 3.3 マイクロ波供給系

マイクロ波供給系は、上流から 4.25 GHz 発振源、高周波アンプ、そして真空チェンバを挟んで 2 つの DC ブロック (DCB) を通じて放電室へマイクロ波を供給している。発信源及び高周波アンプを図 19, DCB を図 20 に示す。DCB は放電室由来の高電圧から高周波アンプを保護する目的で導入されており、冗長系として直列に 2 つ接続されている。マイクロ波の投入電力及び反射電力はアンプ内の検波器によって測定される。伝送路や DCB における減衰を考慮し、放電室の代替としてパワーメータまたは全反射器をとりつけ、アンプの出力する電圧と、放電室位置における電力を結びつける較正を実験前に行う。較正結果の代表例を図 21 に示す。

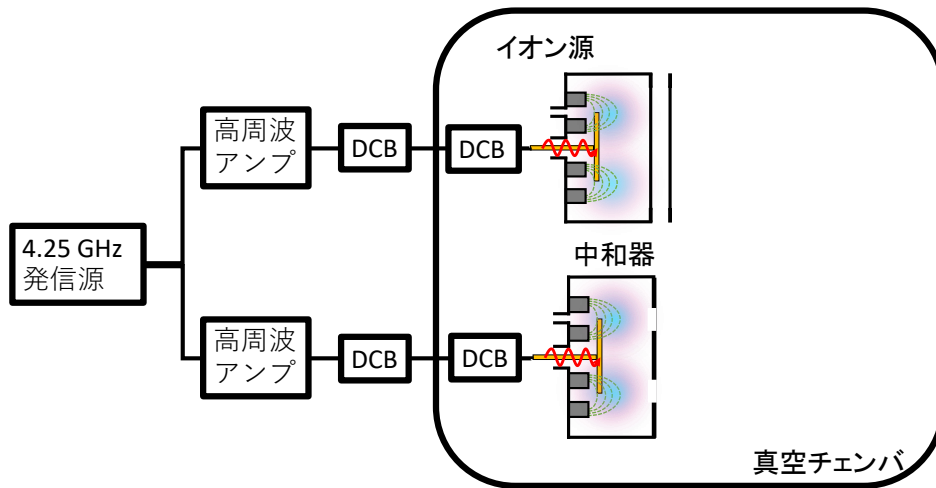


図 18 マイクロ波供給系の接続

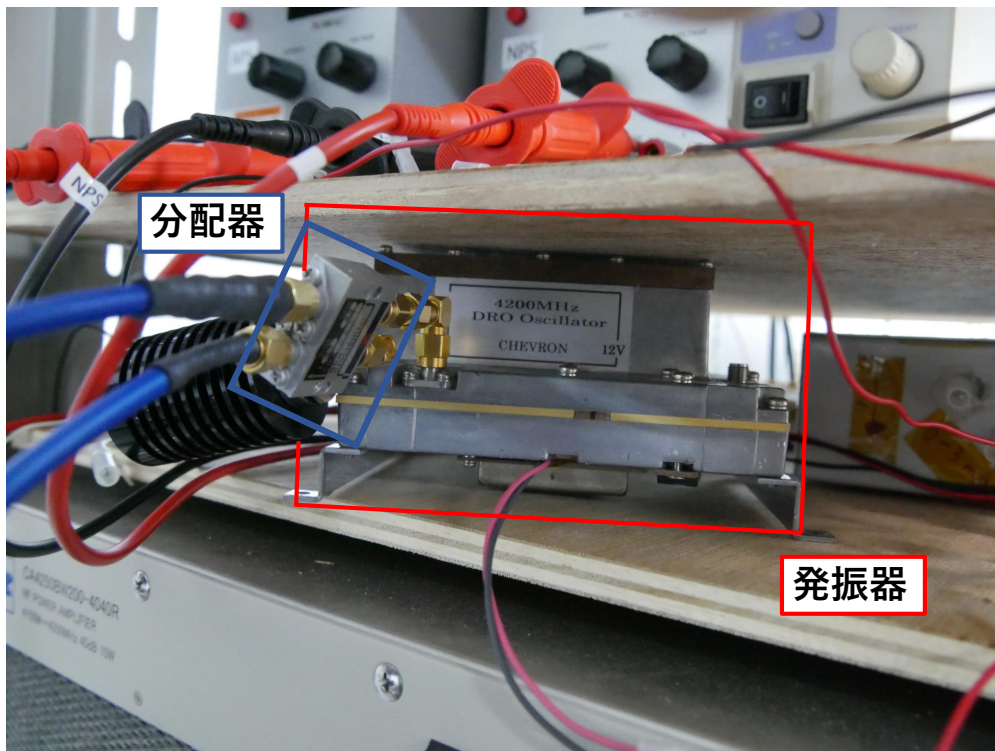


図 19 発振源及び高周波アンプ



図 20 本実験で使用した DC ブロック

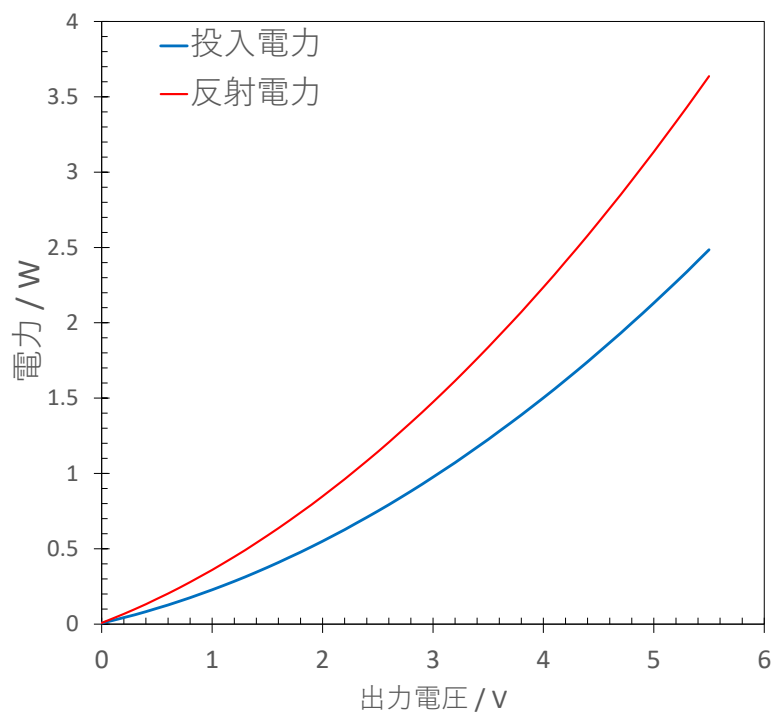


図 21 マイクロ波電力較正結果

### 3.4 推進剤供給系

本研究では推進剤としてキセノンおよび水の両方を用いた。それぞれ供給方法が異なるため、各推進剤の供給方法について詳細を記述する。

#### 3.4.1 キセノン供給系

推進剤としてキセノンを用いる際の流量制御は堀場エステック社製のマスフローコントローラー(以下 MFC)を用いた。MFC の外観を図 22, 仕様を表 5 に示す。キセノンはガスボンベに貯蔵され、レギュレータを介して減圧されたのちに MFC により流量制御され、放電室へ供給される。



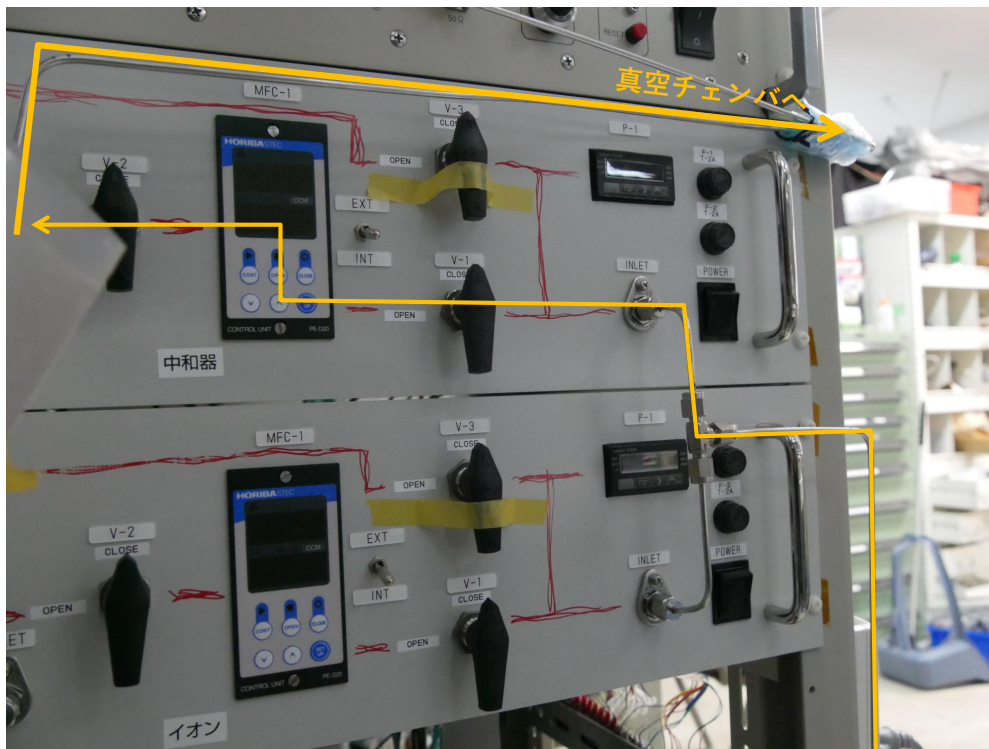


図 22 流量制御機外観

表 5 流量制御機諸元

製造会社	型番	動作差圧	出力範囲	流量精度
堀場エステック	SEC-Z512KX	1SCCM	50 - 300 kPa	0-1 sccm ± 1.0 %F.S.

### 3.4.2 水供給系

推進剤として水を用いる際、図 23 に示す水供給系を用いて水を供給した。本供給系は真空チェンバ内に設置され、水タンク、アキュムレーターからなり、それぞれバルブで仕切られている。アキュムレーター内の圧力は Bang-bang 制御により一定に制御されている。アキュムレーター内圧力とイオンスラストへの供給流量の関係は以下のように求められている。アキュムレーター内の気体を理想気体であると仮定すると、状態方程式は (22) 式ようになる。

$$PV = nRT \quad (22)$$

次に、アキュムレーター内圧力を一時的にあげた後に RV : CLOSE → MV:OPEN の手順で得られるアキュムレーター内の圧力履歴を (23) 式を用いてフィッティング係数  $A, B, C, D$  を算出する。

$$P(t) = A \exp(Bt - C) + D \quad (23)$$

(22),(23) 式から計算される、(24) 式を用いてアキュムレーター内圧力と流量を関係づけている。アキュムレーター内圧力を (23) 式でフィッティングした例を図 25 に示す。

$$\frac{dm}{dt} = M \frac{dn}{dt} = \frac{MV}{RT} B(P - D) \quad (24)$$

Bang-bang 制御による流量の精度は R.D. ± 4.1 % である。

RV : Regulation Valve  
MV : Main Valve  
P : Pressure sensor

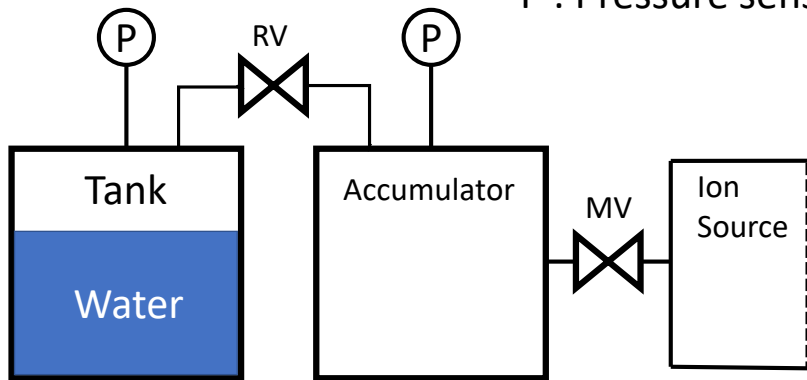


図 23 水供給系概要

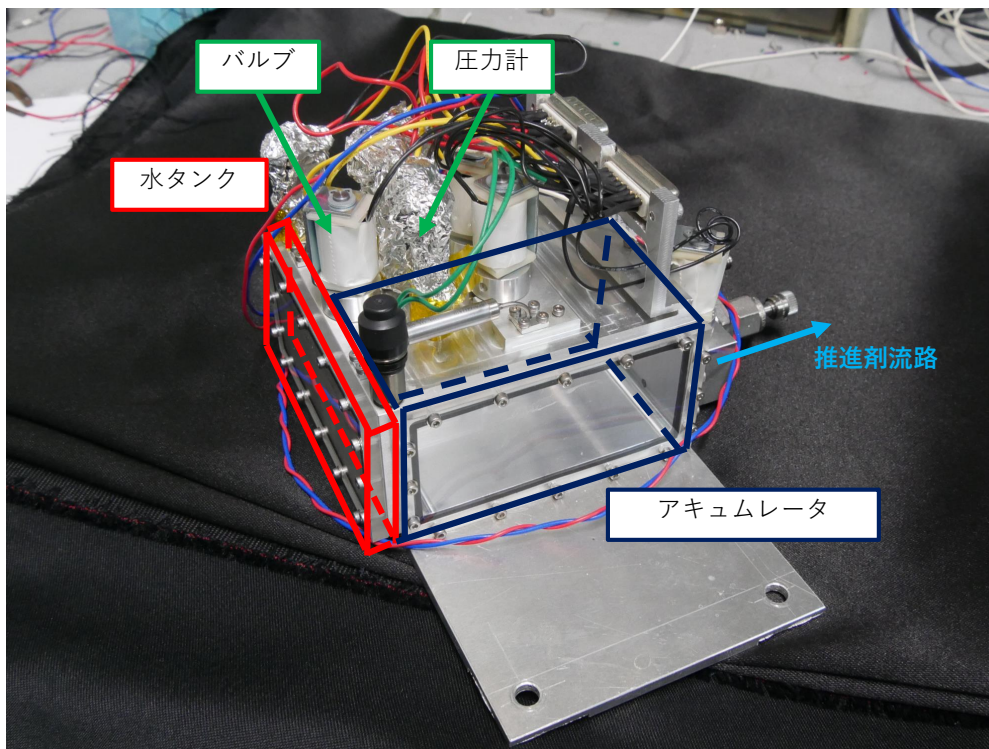


図 24 水供給系

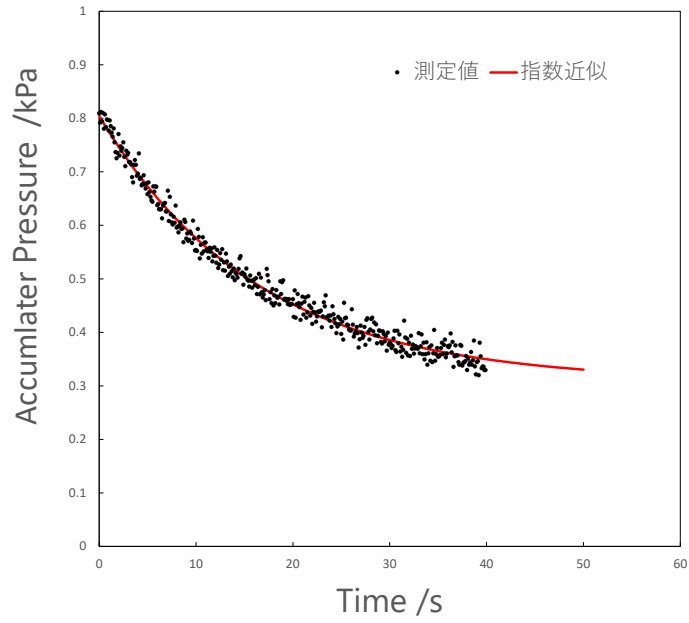


図 25 アキュムレータ圧力のフィッティング例

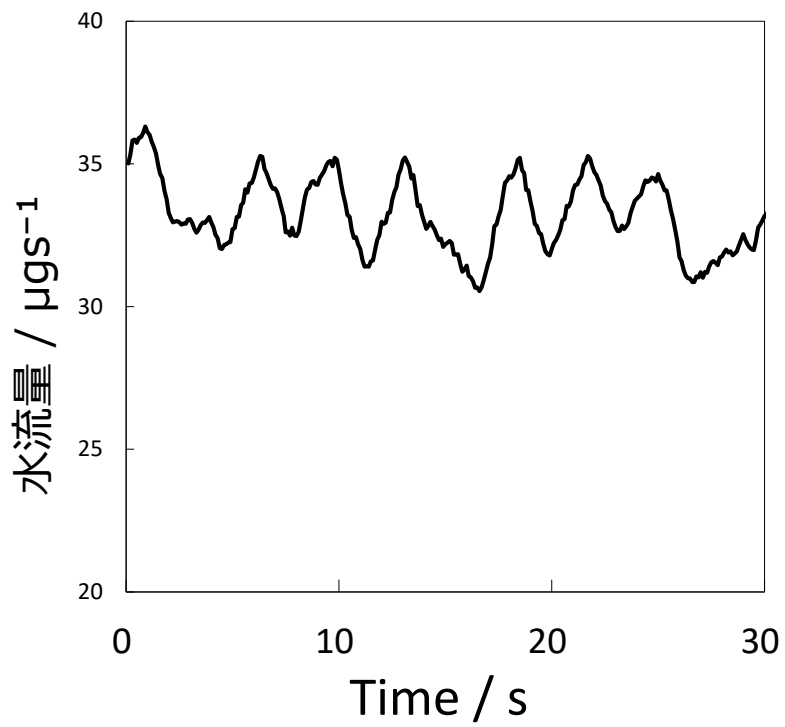


図 26 (24) 式から計算した流量履歴



### 3.5 電源系

本実験における電源系の接続図を図 27 に示す。イオン源放電室及びスクリーングリッドは導通しており、スクリーン電源により正の電位が与えられている。アクセルグリッド及び中和器は負の電位が与えられており、それぞれチェンバーと同じグラウンドを基準電位としている。本実験で用いた 3 種の電源装置を表 6 に示す。アクセル電源及び中和器用電源の端子間電圧は、差動プローブ(横河電機製, MODEL 700925)を用いて測定し, LabVIEW で記録した。電流値は各電源の下流で測定しており, アクセル電流及び中和器電流は非接触電流計を用いて計測し, Labview で記録した。非接触電流計の仕様を表 7 に示す。また, 4.25 GHz 発振器への電源供給として安定化電源から 12 V を供給している。

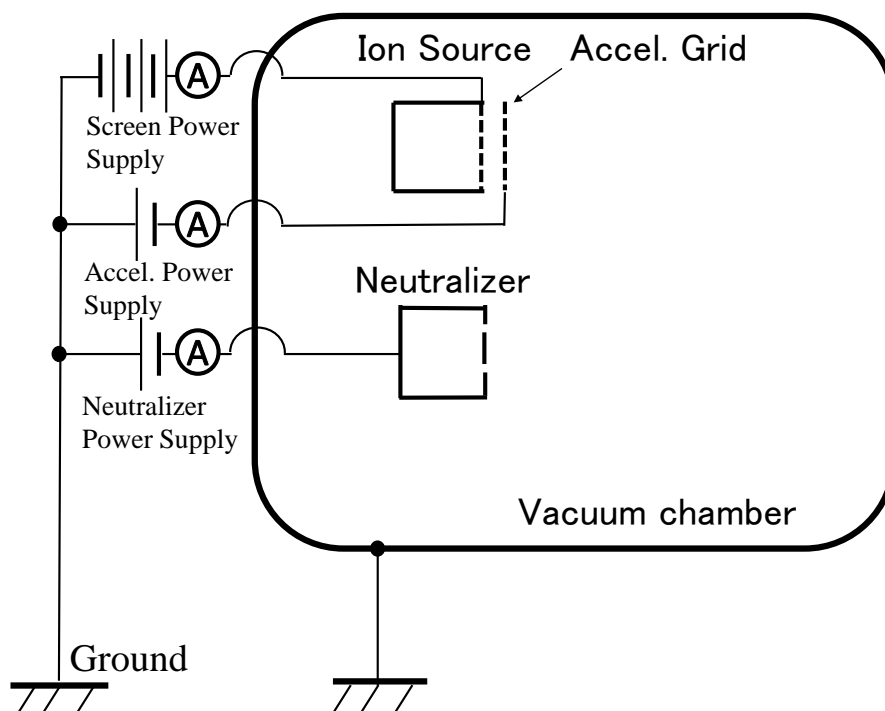


図 27 電源系接続図

表 6 直流安定化電源の仕様諸元

名称	製造会社	型番	最大出力電圧	最大出力電流
スクリーン電源	松定プレジジョン	HAR-2P30	2000 V	15 mA
アクセル電源	松定プレジジョン	PL-650-0.1	650 V	100 mA
中和器電源	松定プレジジョン	PL-120-0.6	120 V	600 mA

表 7 非接触電流計の仕様諸元

名称	製造会社	型番	測定電流値	測定精度
中和器用	太陽工業 (株)	HDCC-30 m A-DI	0 - 30 mA	F.S. $\pm$ 3 %
アクセル電流用	太陽工業 (株)	HDCC-3 m A-DI	0 - 3 mA	F.S. $\pm$ 3 %



図 28 安定化電源



図 29 差動プローブ

### 3.6 四重極質量分析計

本研究で使用した四重極質量分析計は SRS 社の RGA200 である。仕様を表 8 に示す。また外観図及び概要図を図 30 に示す。

表 8 四重極質量分析計

名称	値
電極棒長さ	0.114 m
電極棒を内接する円の直径	5.53 mm
検出器	ファラデーカップ
分解能	< 1.0 amu
測定可能範囲	1-200 amu

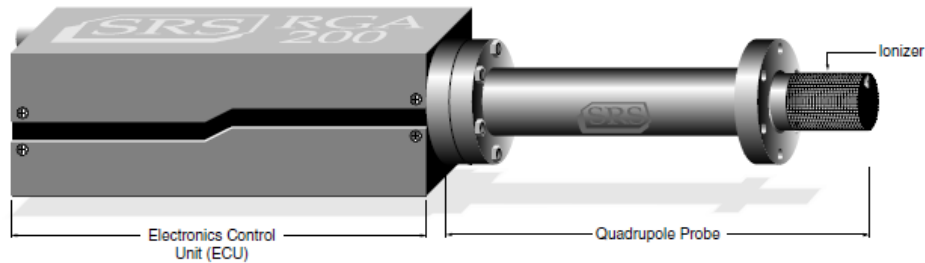


図 30 RGA200(SRS 社製). イオン化部, 四重極管, 検出部から構成される.

## 4 実験方法及び実験条件

### 4.1 アクセルグリッド形状変更実験 : Xe

本研究ではアクセルグリッド形状を実験的に変更し, アクセル電流値及びビーム衝突によるグリッド損耗を解析する. 本研究で使用したアクセルグリッドを表 9 に示す. 命名は  $d$ (穴径 / mm) $t$ (厚み / mm) とした. ここで,  $d0.4t0.4$  のみ, グリッド孔の上下にテーパーがついており, かつ Mo 製である. その他のグリッドはすべて SUS304 製である. また,  $d0.3t0.15-0.25$  のみ, 厚みに分布を有している. MIPS の全孔を計算領域としてビーム計算を実施することで, 数値計算上ではビーム直撃が 0 になりかつ中心から 0,4,7.55 mm の位置の厚みが最大になる形状で設計されている [16].  $d0.3t0.15-0.25$  の厚み分布の設計値及びダイヤルゲージで実測した厚みを図 31 に, 実際のグリッドの外観を図 32 に示す.

表9 推進剤がキセノンの時におけるアクセルグリッド形状

名称	孔径 / mm	厚み / mm
d0.4t0.4	0.4	0.4
d0.4t0.3	0.4	0.3
d0.3t0.3	0.3	0.3
d0.3t0.15-0.25	0.3	0.15-0.25
d0.4t0.3	0.4	0.3
d0.3t0.15	0.3	0.15
d0.2t0.3	0.2	0.3

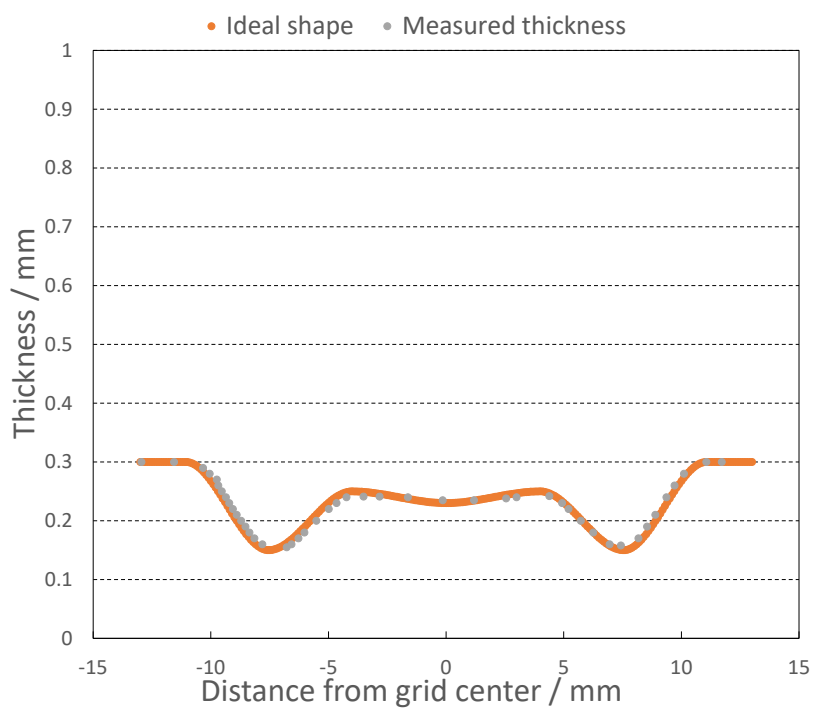


図31 d0.3t0.15-0.25 の厚み分布



図 32 d0.3t0.15-0.25 の外観。影により微小な凹凸が視認できる。

## 4.2 実験手順

アクセルグリッド形状変更による推進性能の変化を見るため、図 33 に示す手順で実験を実施した。ビーム加速時の条件を表 10 にまとめた。グリッドに印可する電圧はグリッド形状によらず一定であり、本実験ではビーム形状を変化させない条件で実験を実施するため、スクリーン電流量を実験条件に設定し、マイクロ波投入電力を変化させた。また、グリッド形状によりコンダクタンスが変化するため、d0.4t0.4 における流量  $24.1\mu\text{g/s}$  を基準とした。d0.4t0.4 におけるグリッドコンダクタンスを  $C_0$ 、流量を  $m_{n0}$  とおくと、形状変更した際の流量は式 (4) から

$$m_n = \frac{C}{C_0} m_{n0} + \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) \frac{M}{e} I_b \quad (25)$$

と定義し、流量を決定した。

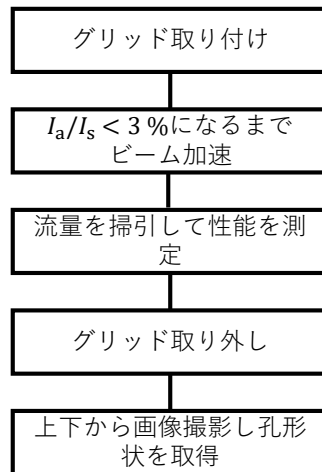


図 33 グリッド形状依存性実験の手順

表 10 ビーム加速条件:Xe

パラメタ	条件
スクリーン電圧	1500 V
アクセル電圧	-350 V
スクリーン電流	5.5 mA
推進剤流量	式 (25) から求まる値 $\mu\text{g/s}$

表 11 流量依存性実験のパラメタ:Xe

パラメタ	条件
スクリーン電圧	1500 V
アクセル電圧	-350 V
推進剤流量	6 - 30 $\mu\text{g/s}$
投入マイクロ波電力	1.5 W

ビーム加速によりスクリーン電流に対するアクセル電流の比  $\frac{I_a}{I_s}$  が 3% 以下になったのち、表 11 に示す条件で流量に対する依存性を確認した。流量依存性に着目したのは、グリッドコンダクタンスの変化により、特に低流量側における性能変化が期待されるからである。

流量依存性をみた後、アクセルグリッドを取り外し、図 34 に示すように上下垂直方向からバックライト法による穴形状をカメラにより撮影した。取得した画像データは ImageJ を用いて解析した。ImageJ による画像解析のフローを図 35 に示す。フリーパラメタとして、Threshold の閾値が存在するため、Threshold に対する平均孔面積を取得し、線形領域で誤差評価を行った。

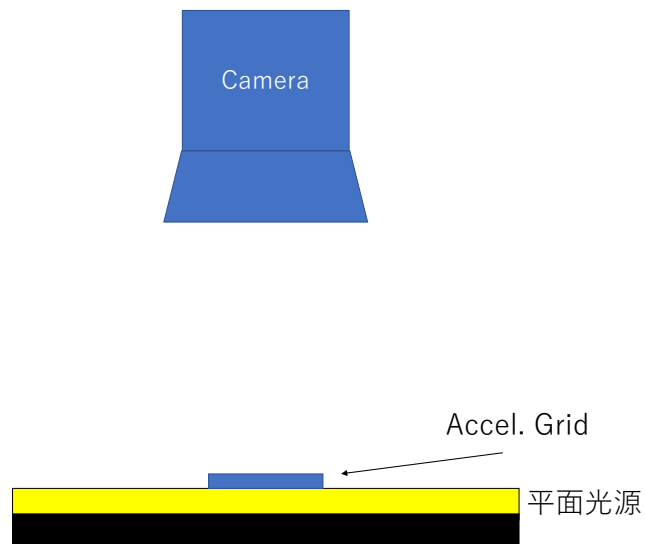


図 34 グリッド形状取得方法の概要



図 35 画像解析手法

#### 4.3 実験 2:四重極質量分析計を用いた質量分析

本研究では四重極質量分析計を用い、キセノンプラズマ及び水プラズマの質量分析を試みた。イオンスラストと QMS の位置関係を示した図が図 36 である。まず、四重極質量分析計による水プラズマ測定の前に、従来のキセノンを推進剤とした場合においてまず測定を実施した。MIPS では依然多価イオンの割合は未だ測定されておらず、また他のイオンスラストにおける先行研究が豊富なため比較が容易であるからである。



また，本研究ではイオンスラストへ投入する電力及び流量を振ることで測定イオンのその依存性を明らかにした．各パラメータの測定範囲を表 12 と表 13 に示す．各パラメータごとに 5 回の測定を行った．

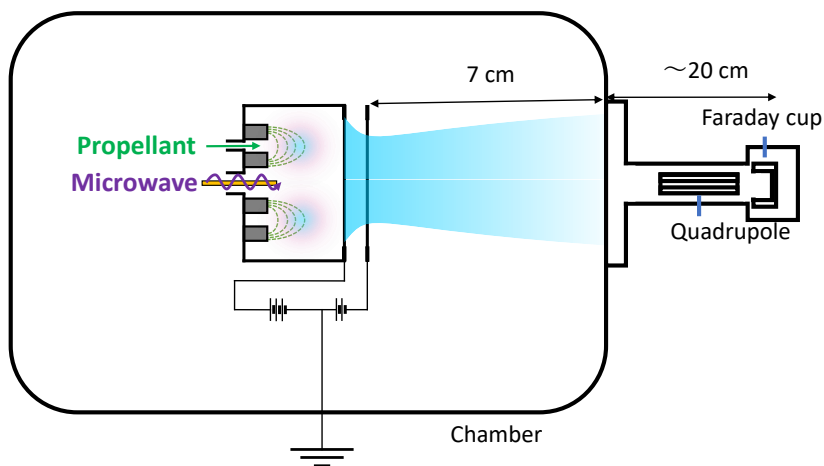


図 36 イオンスラスト及び QMS の位置関係

表 12 質量分析における実験条件:Xe

パラメタ	条件
推進剤	Xenon
投入電力	0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,3.0
推進剤流量	20,25,30,35,40,45
加速電圧	0

表 13 質量分析における実験条件:Water

パラメタ	条件
推進剤	Water
投入電力	1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0
推進剤流量	25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70
加速電圧	0

## 5 実験結果

### 5.1 実験 1: グリッド形状変更実験

#### 5.1.1 アクセル電流値の時間履歴: Xe

アクセルグリッド形状変更実験におけるアクセル電流の時間履歴を示す。作動時間は、アクセル電流値がスクリーン電流値に対して 3 % 以下でありかつ十分定常状態になるまで行った。作動条件は表 10 に示すとおりである。まず、同一厚みで孔径が異なるグリッドでまとめたものを図 37 に示す。グリッド孔径を縮小すると、初期のアクセル電流値が増大していることが読み取れる。これはアクセルグリッドへのビーム直撃が増えていると考えられる。一方で、グリッド縮小をしても 10 h 程度でアクセル電流値は十分定常状態に落ち着いていることが見て取れる。図 38 には、同一孔径で厚みを 3 種類変化させた場合のアクセル電流値履歴を示す。直観通りであるが、厚みが増大することでアクセル電流値は大きくなるのがわかる。ここで、数値計算による形状を採用した  $d0.3t0.15-0.25$  と、それに対し最も薄い厚みだけを採用した  $d0.3t0.3$  では全体を通しほとんどアクセル電流値が変わらないことがわかる。これは、 $d0.3t0.15-0.25$  における、 $0.15\text{mm}$  より厚い領域はグリッドへのビーム直撃にはほとんど寄与していないことがわかる。一般にグリッドの構造破壊は孔と孔が径が拡大することにつながりよりも 2 箇所孔の中央に衝突する電荷交換由来のイオンスパッタにより、厚みが 0 になることで生じる。従って厚みがより多いほうがグリッド寿命は向上する。

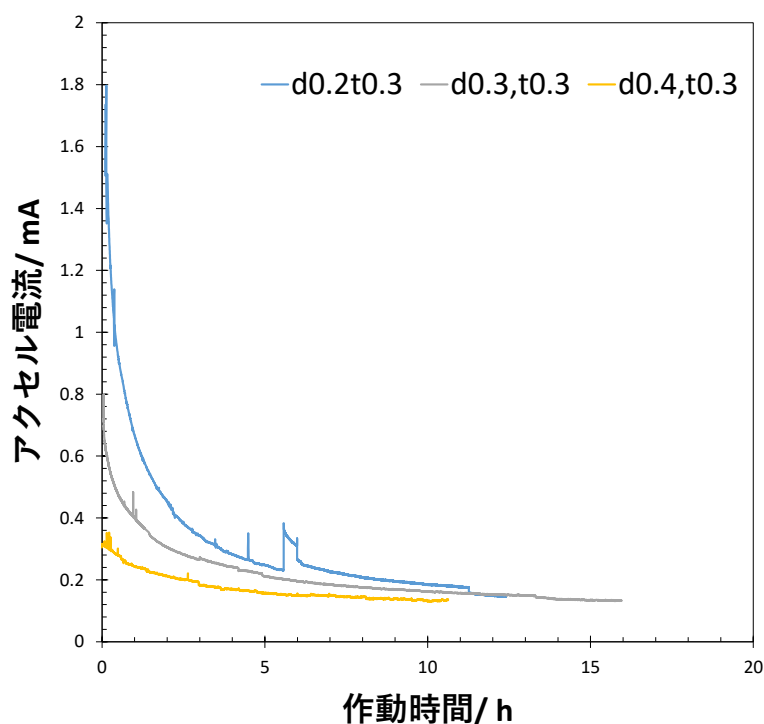


図 37 同一厚みのグリッドで孔径のみを変えた場合のアクセル電流値履歴

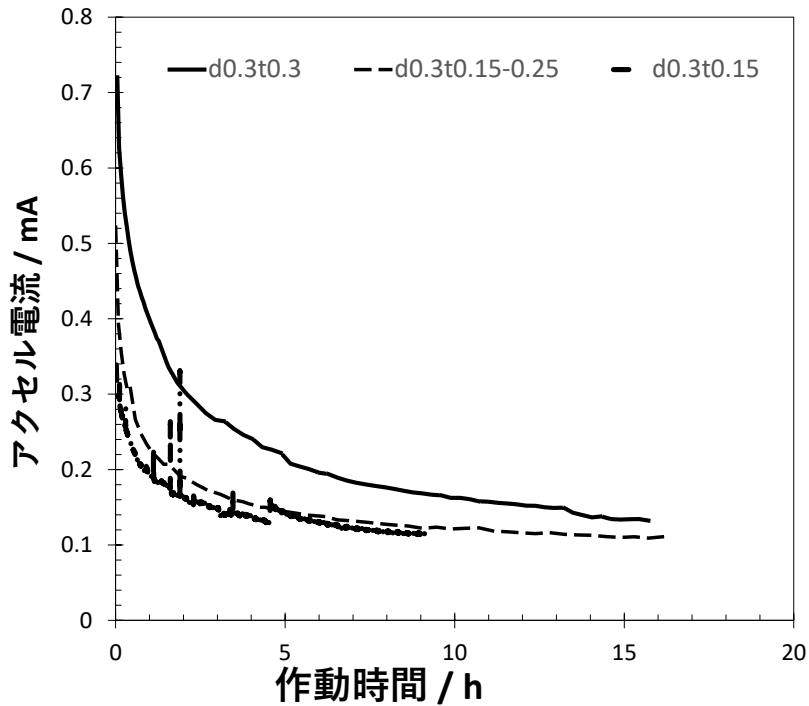


図 38 同一孔径のグリッドで厚みのみを変えた場合のアクセル電流値履歴

### 5.1.2 グリッド形状ごとのイオンスラスト性能: Xe

グリッド形状によるイオンスラストの性能変化を見るために、推進剤利用効率を

$$\eta_U = \frac{M}{e} \frac{I_b}{\dot{m}_n} \quad (26)$$

，イオン生成コストを

$$C_i = \frac{P_{in}}{I_s} \quad (27)$$

と定義し、横軸を推進剤利用効率、縦軸をイオン生成コストとしてプロットしたものを図 39 に示す。またこの結果は、同一電力で流量のみを掃引して得ている。まず、低推進剤利用効率の領域ではイオン生成コストにグリッド形状依存性がないことがわかる。これは、流量を増加させていくと、スクリーン電流量が飽和状態に達していることを意味する。従ってアクセルグリッド形状依存性がないことは妥当である。つぎに、推進剤利用効率が増えていく、つまり推進剤流量を下げていくと、まず d0.4t0.4 のイオン生成コストが急上昇する。イオン生成コストの上昇はスクリーン電流値の減少を意味する。d0.4t0.4 のみ、孔にテーパーがついているため実質的なコンダクタンスが最も小さい。つまり同一流量時に最も中性粒子密度が低いため、一番最初にイオン生成コストが上昇する。次点で、d0.4t0.3 及び d0.3t0.3 のイオン生成コストが上昇し始める。より低流量側 ( $\eta$  0.6) 程度まで行くと、他のグリッドと差異は少なくなるが、 $\eta$  が 0.5 から 0.6 の領域では、d0.3t0.15-0.25 及び d0.2t0.3 のイオン生成コストが比較的低いことがわかる。

特異な点として、d0.3t0.15 のグリッドの性能が非常に高いということである。最も薄いグリッドであるため、中性ガス閉じ込めの観点では効率は高くないが、低流量時に優れた性能を発揮することが確認できる。これはグリッド形状によるコンダクタンスの変化では説明できない。この結果

は、アクセルグリッド形状が中性粒子密度以外の要素でプラズマ生成領域に影響を及ぼしていることを示唆している。

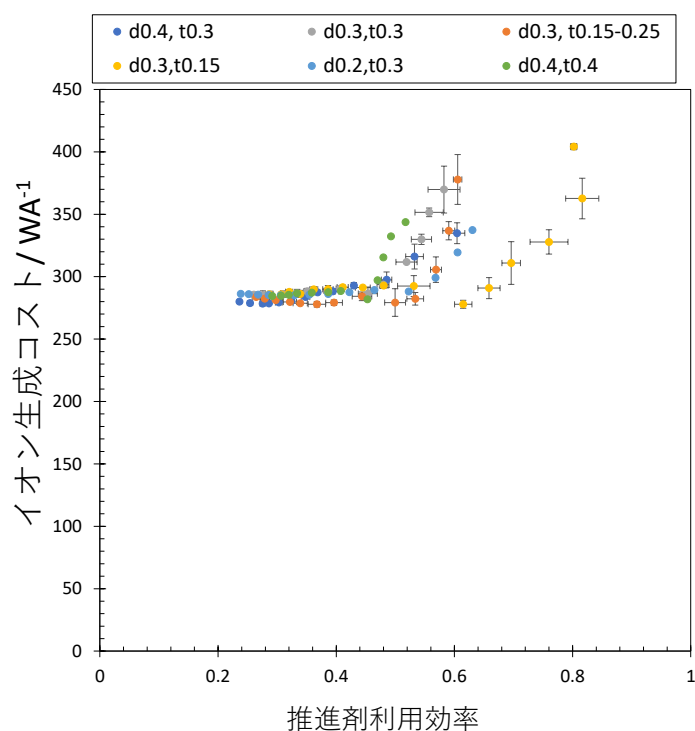


図 39 グリッド形状変更による性能の比較

### 5.1.3 ビーム加速後のグリッド形状:Xe

ビーム加速後のグリッド損耗の様子を取得した。図 40 に d0.3t0.15-0.25 における下流から撮影した画像を示す。まず (a) はグリッド中心近傍の削れを示しており、非軸対称的な削れかたをしていることがわかる。(b) はアンテナ直下に位置する領域であり、最もプラズマ密度が濃い領域でもある。グリッドの削れが最も小さい領域である。(c) は外周に位置する孔であり、内側の孔から排出されるビームとの排斥力で、外周部側に張り出すような形で非軸対称的に削れている。

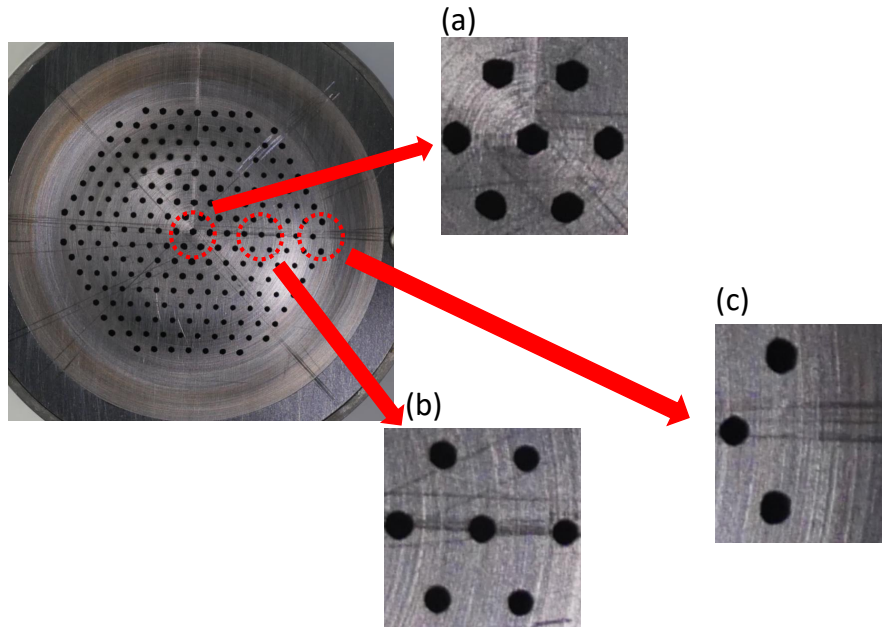


図 40 d0.3t0.15-0.25 グリッドにおけるビーム加速後の下流面の様子. (a) グリッド中心近傍 (b) アンテナ直下かつ最大厚みの領域 (c) グリッド孔外周部の領域

図 41 に d0.3t0.15-0.25 の全孔における設計値に対する穴径拡大率を示す. グリッド中心からの孔位置を  $r$  として, 3 領域にわけて特徴を読み取る. まず  $0 < r < 4$  の領域では上流面に対して下流面の拡大率が大きいことがわかる. このことから, 下流面側でのみ穴径の拡大が起こっていると考えられ, グリッドはより薄くする必要があることを示唆している. また, 拡大率のばらつきが他の領域と比較して大きいことも読み取れる. これは, 放電室内部のアンテナ形状に起因している. 本研究で使用しているマイクロ波放電式イオンスラストではハンドル型のアンテナ形状を採用しているため, グリッド中心付近では, ハンドルの腕に相当する部分が存在することで, 非軸対称性なプラズマ生成が起こっている. ばらつきの大きさはこのアンテナの非軸対称性にあると考えられる. 次に  $4 < r < 6$  においては上下面において拡大率が少ないことがわかる. これはアンテナ上流ではプラズマ密度が濃く, 発散が少なくビームを排気できているからである.  $6 < r$  では, 上流面の穴径の拡大率が大きい, 上下における拡大率の差異は小さいことがわかる.

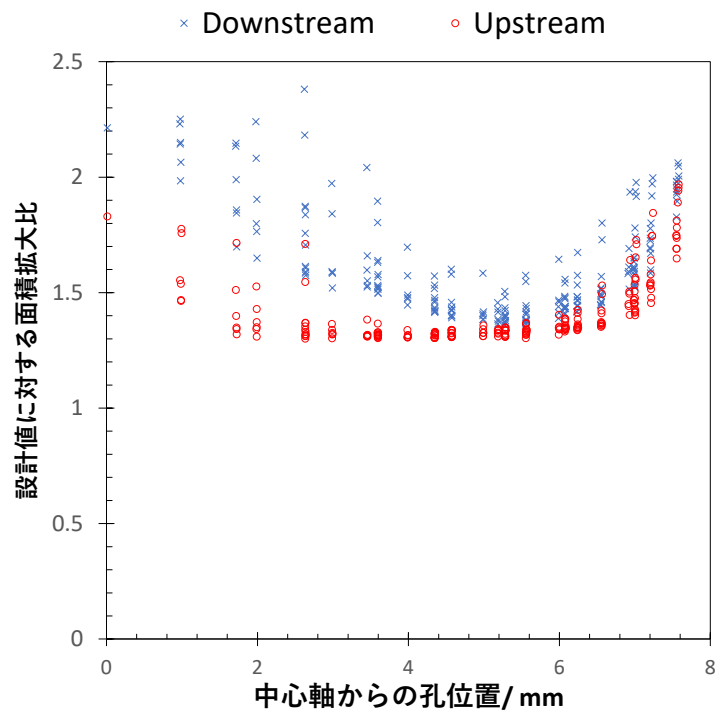


図 41 d0.3t0.15-0.25 グリッドにおけるビーム加速後の全孔の面積拡大率

d0.3t0.3 においても同様にグリッドの削れかたについて読み取れる点を述べる。  $0 < r < 4$  の領域では、d0.3t0.15-0.25 と同様の傾向が見て取れ、下流においてビーム発散による直撃があることが示唆される。また  $4 < r < 6$  に関しては同様に上下ともに削れは少なく、d0.3 の穴径に対して 0.3mm の厚みを有してもビームの直撃は少ないことがわかる。  $6 < r$  では上流面の拡大もあるが、上下の拡大率の差異が大きい。

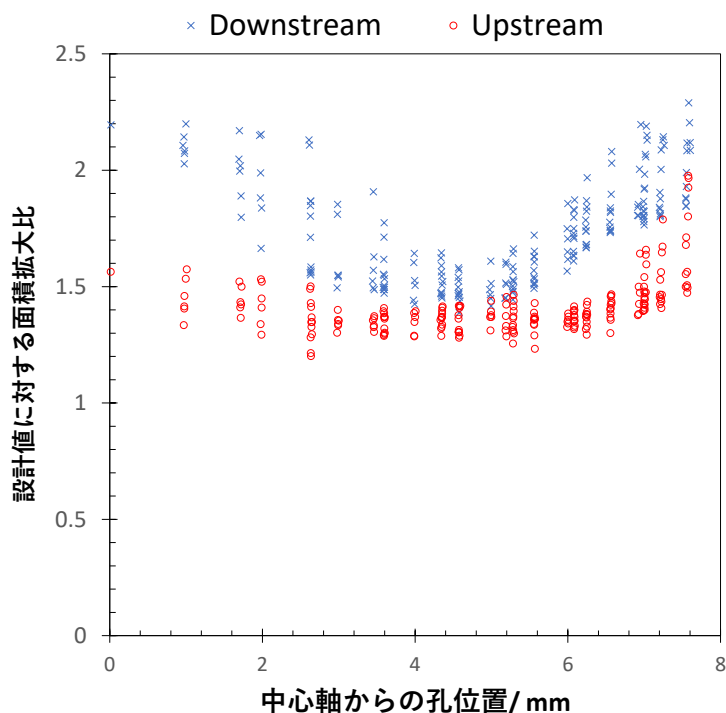


図 42 d0.3t0.3 グリッドにおけるビーム加速後の全孔の面積拡大率

#### 5.1.4 推進剤を水としたときのイオン引き出し特性

#### 5.1.5 微小孔グリッドを使用したときの特性

d0.2t0.3 のアクセルグリッドにおける，加速電圧 1200 V でグリッド形状加工を行っているときの，アクセル電流値の加速電圧に対する依存性を測定した結果を図 43 に示す．また，ビーム加工によるアクセル-スクリーン電流比の時間履歴を図 44 に示す．60 h 程度のビーム排気で，10 % 程度まで減少した．不連続的な電流値の変化は，実験実施日が異なることに起因する．初期形状においては，加速電圧 900 V で極小値を取ることがわかる．長時間イオンを加速し続けることで，ビームの衝突によりグリッドが損耗し，電流量が減少する．最終的に 50 h 程度で，一般的によく見られる桶状の形状が観測される．電圧が低い側では，750 V 以下において急激にアクセル電流値が上昇する．これはシースが下流側に大きく張り出し，パービアンスリミットに達しているためである．50 h までの結果から，グリッド間距離 0.35 mm 時における，ビームを効率的に排気することができる電圧は 750 - 1200 V であることがわかる．推進剤がキセノンの時，図 37 の作動時間が 0 である値を，スクリーン電流値 5.5 mA で除すると，加速電圧 1850 V かつ同形状のグリッドで 33 % である．このパラメータに対応する水の時のアクセル-スクリーン電流比は 60 % 前後に相当し，キセノンの場合よりも多い電流がアクセルグリッドに衝突していることがわかる．これは水の場合にビームの発散角が大きくなっていることを示している．

グリッド間距離を変更したときの，アクセル-スクリーン電流比を図 45 に示す．グリッド間距離を大きくした時，グリッド間にかかる電場が弱くなるため，高電圧側にグラフ形状がシフトすることが予測される．結果から，高さが大きい場合 (0.65 mm) において極小値をとる加速電圧が上昇していることが読み取れる．また，加速電圧 1800 V 付近で電流比が逆転することが確認された．この結果は，水イオンスラストにおいて加速電圧を高くした状態で効率の良いイオン排気を行うため

には，グリッド間距離を高くすることが有効であることを示す．

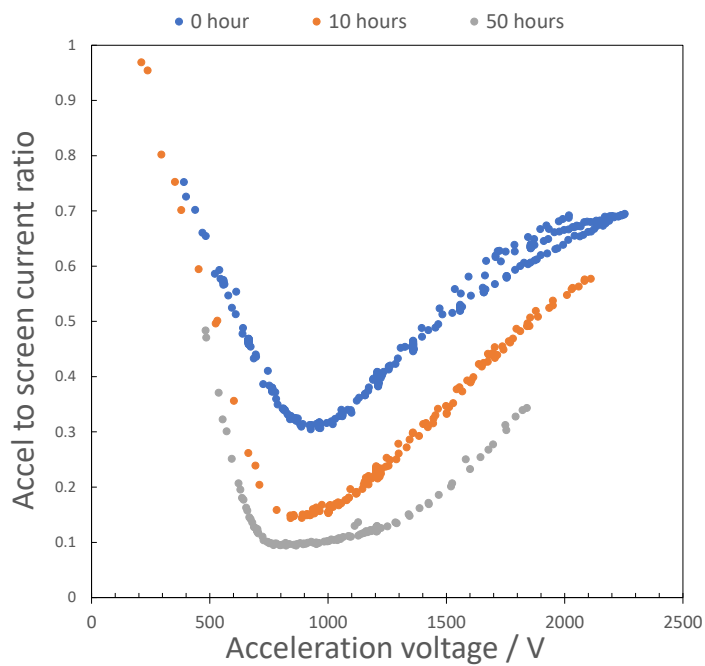


図 43 d0.2t0.3 グリッドにおけるアクセルグリッドへ流入する電流比の加速電圧依存性．投入マイクロ波電力は 2.0 W．

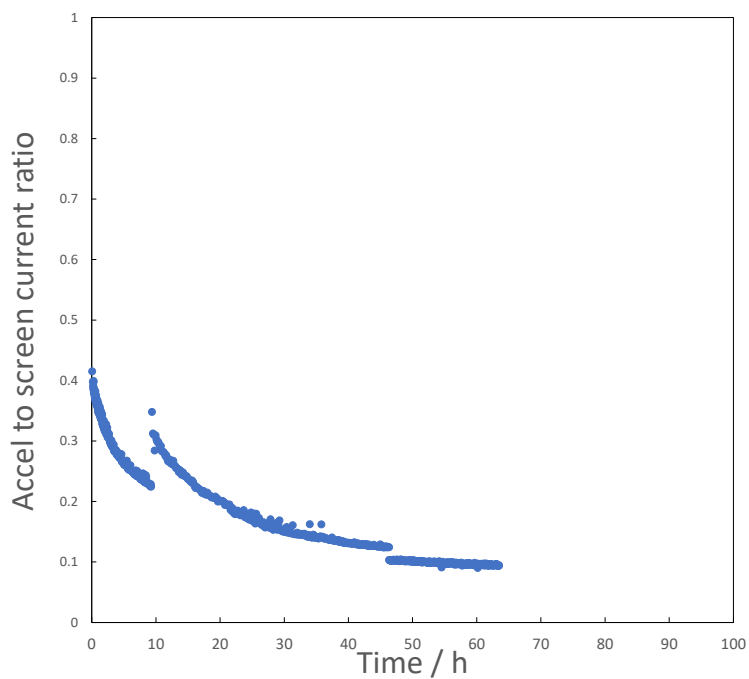


図 44 スクリーン電流に対するアクセル電の比の時間履歴．加速電圧は 1200 V, マイクロ波投入電力は 2.0 W である．



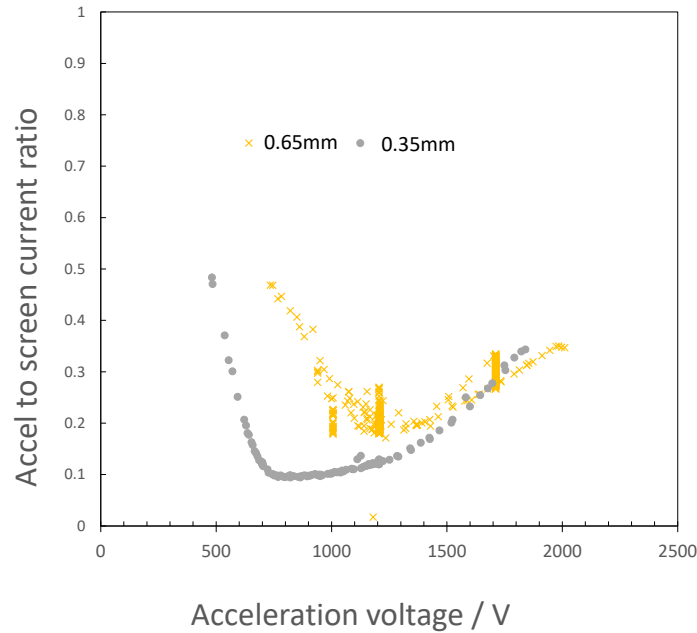


図 45 2 パターンのグリッド間距離におけるアクセルグリッドへ流入する電流比の加速電圧依存性. 投入マイクロ波電力はいずれも 2.0 W.

#### 5.1.6 スクリーン孔数の違いによる特性

スクリーングリッドに設ける孔面積は、引き出すことができるイオンの総量と漏れ出る中性粒子の量のトレードオフで性能に影響を及ぼす。本研究で使用した、2つのタイプの孔数を持つグリッドシステムにおいて、孔数及び孔を開ける領域がスクリーン電流量へ与える影響を調べた。2つのタイプのスクリーングリッドは、一つの孔面積は同一で、孔数が 211 と 289 と異なるものを使用した。289 孔をもつグリッドのほうが、より外周部までスクリーン孔が存在する。まず、投入推進剤流量で整理したグラフを図 46 に示す。また、分子流を仮定して式 35 計算することができるグリッドシステムのコンダクタンスから、内部の中性粒子密度を計算し、横軸を書き換えたグラフを図 47 に示す。図、211 孔のグリッドのほうがより低流量で作動させることができることを示している。これはコンダクタンスの違いによる中性粒子の閉じ込め性能による影響である。図 47 からは内部の中性粒子密度でそろえているため、孔数の違いによる性能差を見て取れる。グラフからは、孔数 211 と孔数 289 では  $2 \times 10^2 \text{m}^{-3}$  近辺ではスクリーン電流量にそれほど差異はないことがわかる。この結果は、289 孔グリッドのみ持つ外周部におけるイオン排気の割合が少ないことを示唆している。

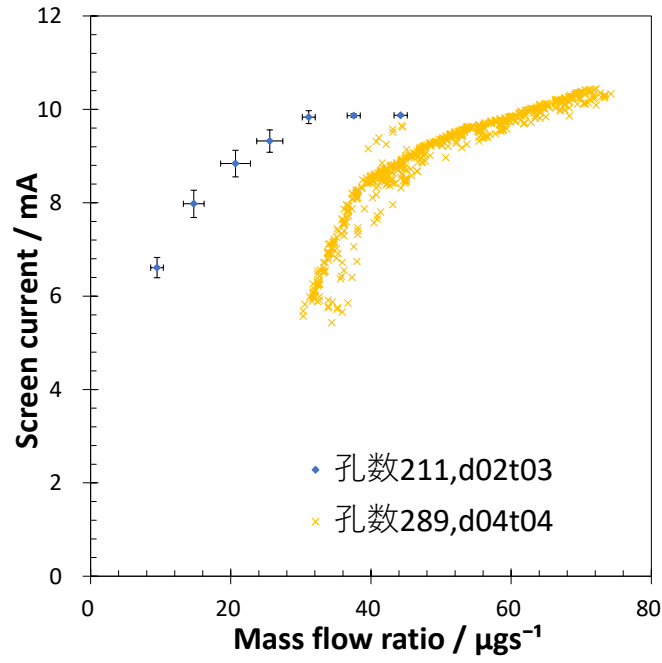


図 46 推進剤流量で整理したときのスクリーン電流。加速電圧は 1700 V, マイクロ波投入電力は 2.0 W

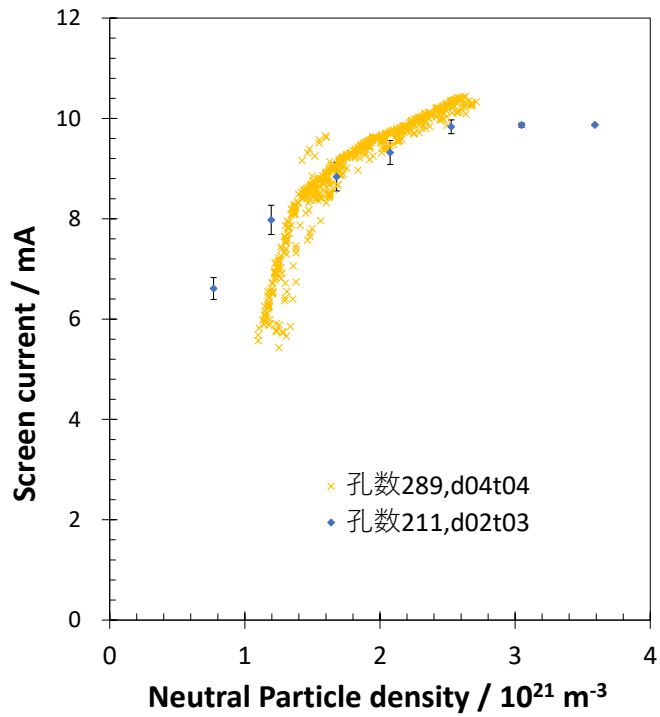


図 47 中性粒子密度で整理したときのスクリーン電流。加速電圧は 1700 V, マイクロ波投入電力は 2.0 W

### 5.1.7 ビームによるグリッド削り後のイオンスラスト性能

図 48 に、d0.2t0.3 グリッドを 60 h 程度ビームで削った後のビーム電流および推進剤利用効率を示す。ビーム電流値は 30  $\mu$ g/s 投入時に極大値をとる。このように極大値を持つ傾向は、放電室内部の中性粒子密度を増加させていったとき、プラズマ密度が飽和しスクリーン電流が定常になり、その後グリッド孔近辺での中性粒子密度増加による、電荷交換由来のアクセラ電流値が増加するためである。プラズマ密度が流量に対し飽和する原因は現状不明である。推進剤利用効率は流量に対し反比例しており、最大で 9 % 程度まで本実験では達成した。

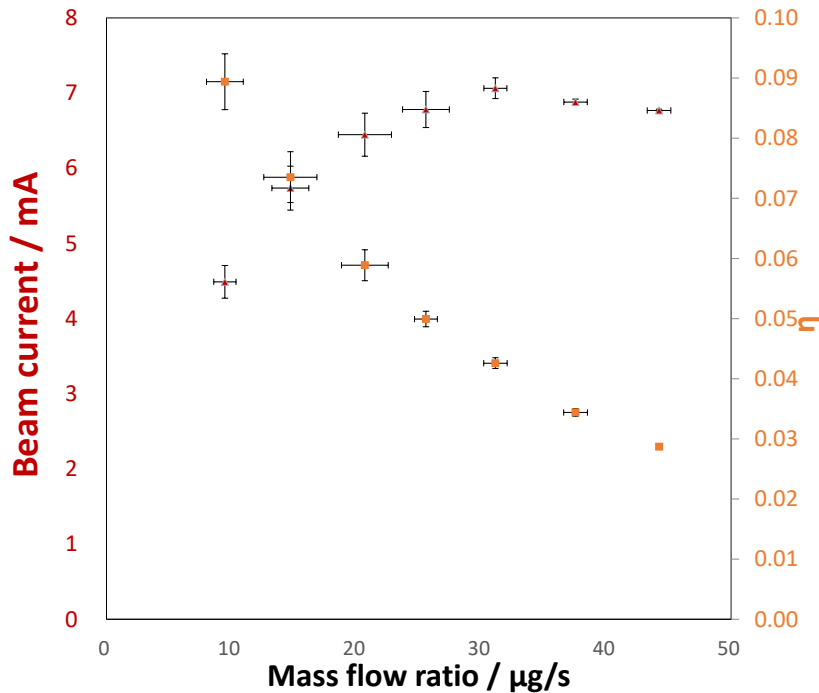


図 48 d0.2t0.3 グリッドを 60 h イオンビームで削った後のイオンスラスト性能。加速電圧は 1700 V, 投入マイクロ波電力は 2.0 W である。

## 5.2 QMS による質量分析結果

### 5.2.1 チェンバ内残留ガス測定

次に、QMS を用いた質量分析の結果を示す。プラズマ着火の前に真空チェンバ内の残留ガスをイオンフィラメントによりイオン化させ測定した結果を図 49 に示す。一番強度が大きいものが  $m/z=18$  の水であり、真空チェンバのベーキングを実施していない点や、水の脱ガス速度は大気より十分遅いことを考慮すると妥当である。一方で、 $m/z=28$  や  $m/z=32$  といった、水よりも脱ガス速度が十分大きいガスが検出されていることから、チェンバにリークが存在していることがわかる。酸素分子は特に、水プラズマの解離で発生するイオンと競合する。

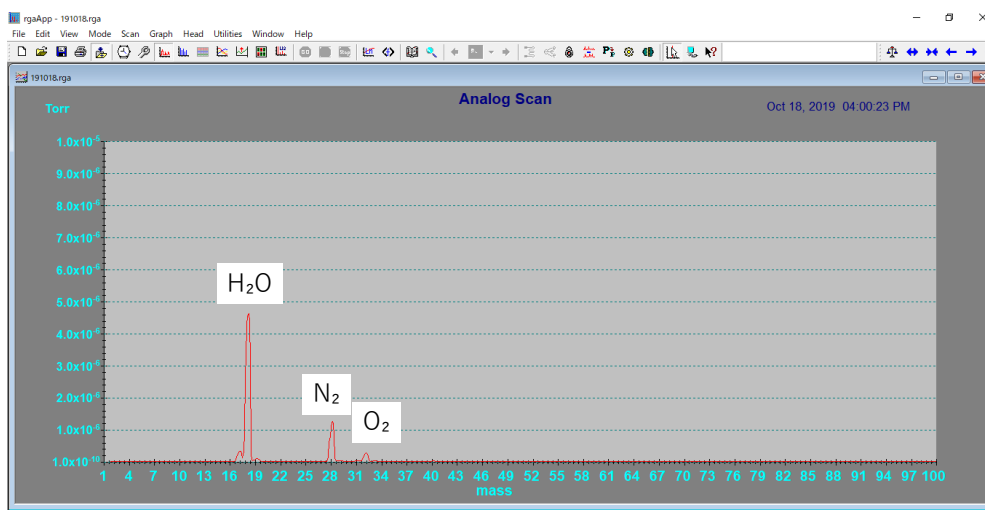


図 49 真空チェンバ内残留ガス分析

### 5.2.2 キセノン測定結果

キセノンにおける代表的な測定結果が図 50 である。まず、キセノンの 1 価イオンと考えられる質量電荷比 131.5 の周辺に多数のピークが立っていることが読み取れる。これはキセノンの安定同位体の影響だと考えられる。キセノン 1 価イオンの半分に位置する質量電荷比にもピークが立っていることが確認される。質量電荷比からはキセノン 2 価イオンが測定されていると考えられる。同様に、 $1/3$  に位置する場所にもピークが立っており、キセノン 3 価イオンが測定されていると考えている。競合する質量電荷比が近いものとして、二酸化炭素 ( $m/z=44$ ) などが考えられるが、 $m/z=32$  に検出されている酸素またはキセノン四価イオンが混合しているピーク値から考えて、二酸化炭素の割合は十分少ないと予測される。 $m/z=32$  周辺のピークに関しては、リークにより存在する酸素由来の酸素分子イオンとキセノン 4 価イオンの質量電荷比が近い領域である。図 49 の結果よりチェンバ内における酸素の存在が確認されているため、酸素とキセノン 4 価の分離は本計測からはできない。

キセノンプラズマのイオン流束比率の流量依存性を図 51 に示す。イオン流束比率は図 50 の結果から安定同位体をすべて考慮してガウスフィッティングを行い、面積を電荷で除することで流束を算出し、その分率を表している。図 50 で検出されているキセノン 2 価イオンの強度、実際のキセノン 2 価イオンの流束の 2 倍の値が出ていることに注意されたい。キセノンプラズマにおいておよそ 10% が 2 価イオンであり 1% 程度の 3 価イオンが存在することがわかる。

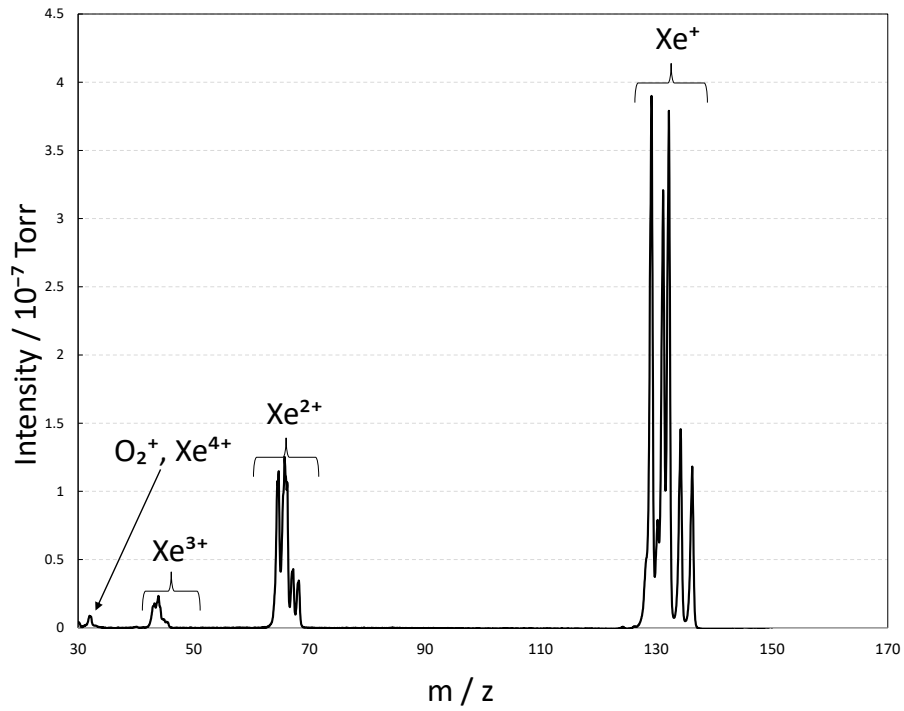


図 50 代表的なキセノンにおける測定結果. 5回連続で掃引し平均化を行っている.

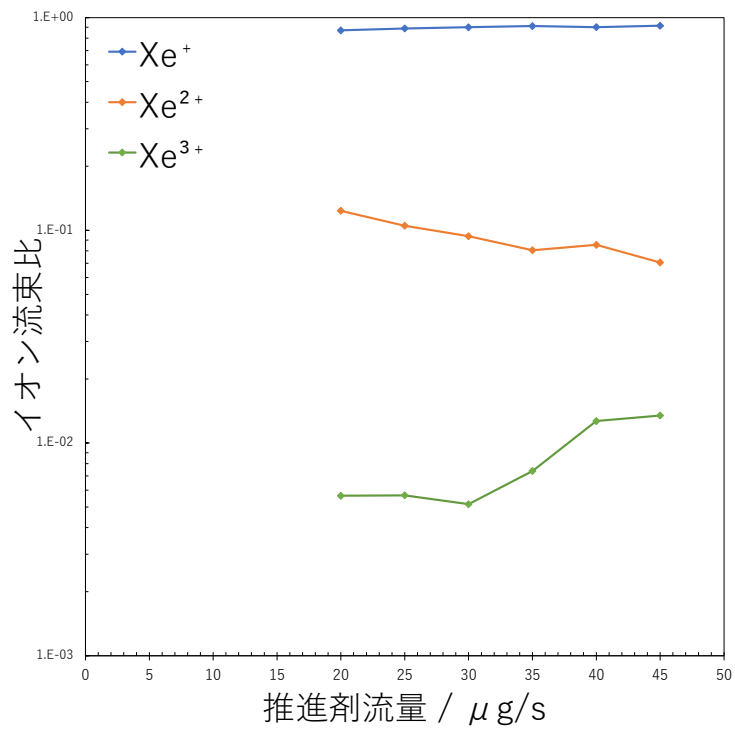


図 51 キセノンにおけるイオン流束の流量依存性. マイクロ波投入電力は 1.5 W である.

### 5.2.3 水測定結果

水プラズマにおける測定結果を示す。図 52 に代表的な測定結果を示す。まず  $m/z=18$  である水イオンを中心に、分解能は 1 amu 程度でピークが分離できていることが読み取れる。それぞれの質量電荷比から予測されるイオンを図 52 に示している。  $m/z=1.5$  周辺に大きな強度が測定されている。ここではゼロブラスト (章 2.2.2) による分離不具合が起こっていると考えられる。他のイオン種と比較して急峻なピークが立っているほか、ガウスフィッティングが困難であるため、図 53 に示すイオン流束比の流量依存性では水素イオンを取り除いた結果を示している。図 53 からは各イオン種の流束の全体量に対する比率が読み取れる。概して最も比率が大きいイオンが  $H_2O^+$  である。  $OH^+$  ,  $O^+$  ,  $O_2^+$  は流量を増加させると割合が減少している。一方で、  $H_2O$  に  $H^+$  が結合した  $H_3O^+$  は流量に対し正の相関を持つ。

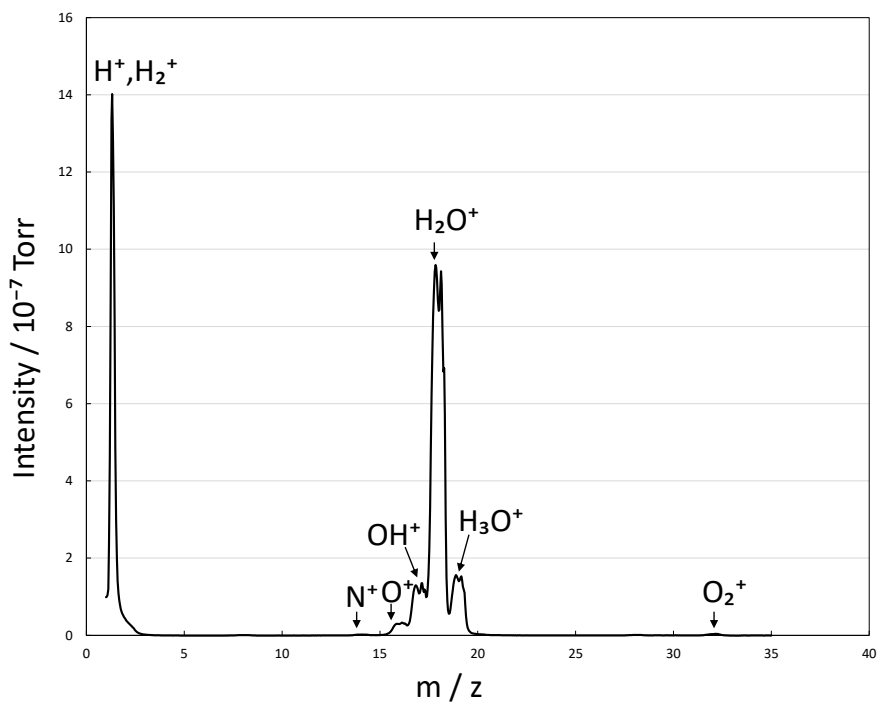


図 52 代表的な水プラズマにおける測定結果。5 回連続で掃引し平均化処理を行っている。

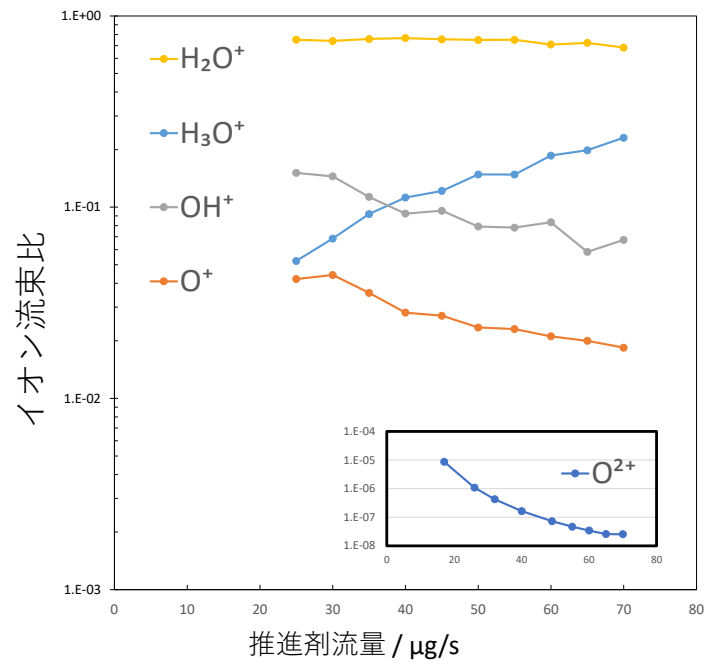


図 53 水プラズマにおけるイオン流束の流量依存性. マイクロ波投入電力は 2.0 W である.

## 6 考察

### 6.1 アクセル電流値の直撃由来成分の推定

実験で実測できるのはアクセル電流値そのものであり、由来となっている成分ごとに測定することは困難である。しかしながら、ビーム直撃 (Direct Impingement) 由来のイオンは 1850 V もの電位差による加速を得てグリッドに衝突する。これに対し電荷交換 (Charge EXchanged) 由来のイオンは高々 350 V でのエネルギーしかないので、スパッタ率に大きく差があることが予測される。このことから、図 37 に見えている、10 時間オーダーで大きくアクセル電流値が減少するのは D.I. 由来によるものが大きいとみることができ。D.I. によるグリッドの削れが収まった後、CEX による削れが進行していくと考えると、10 時間程度削った後、背景圧力に対するアクセル電流値の依存性を測定することで、CEX 由来のアクセル電流値の特性を取得することができる。ここから得た電流量を、図 37 から差し引き、

$$I_{aDI} = I_{accel} - I_{aCEX} \quad (28)$$

として計算すると図 55 のようになる。

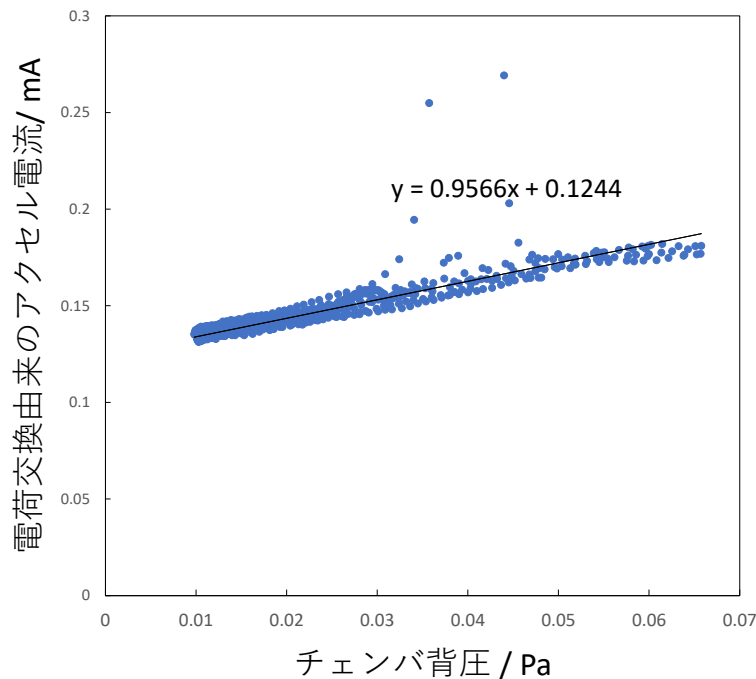


図 54 電荷交換由来のアクセル電流値の背圧依存性



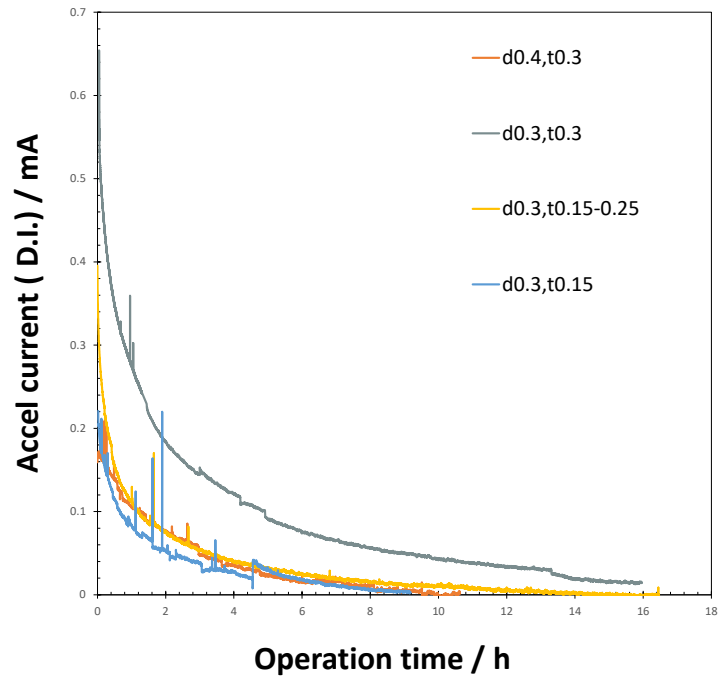


図 55 推定した直撃ビーム由来のアクセラ電流値履歴

図 55 から,

$$n_i = \frac{1}{e} \int I_{aDI} dt \quad (29)$$

と積分を行うことでグリッドに直撃したイオンの電荷量として、評価したものが図 56 である。d0.4t0.3 と d0.3t0.3 で比較すると、穴径を 0.1 mm 縮小したことによって 3 倍以上の直撃由来の電荷量が増えていることがわかる。一方で、厚みを減らしていくことで電荷量が減っていく。

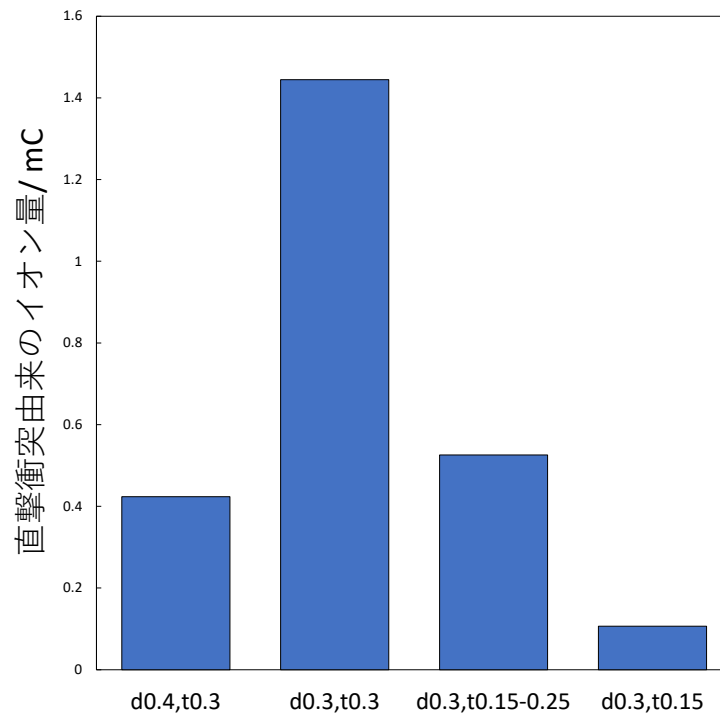


図 56 直撃衝突由来のアクセラ電流値の推定量

## 6.2 グローバルモデルによるイオン密度計算

四重極質量分析計を用いて測定した流量に対するイオン流束の比について、グローバルモデルによる計算と比較を行う。マイクロ波放電式イオンスラストでは磁場形状により、内部のプラズマ密度は分布を持っているが、本モデルでは放電室内のプラズマパラメータは空間的に一様であり、準定常状態であると仮定する。また、プラズマは准中性状態であるとし、中性粒子は平均自由工程が系の代表長よりも長い、分子流として扱う。プラズマ生成領域は図 57 のように定義した。イオンの損失面積  $A_i$  を円筒表面積，電子の損失面積  $A_e$  を磁石表面面積と定義する。

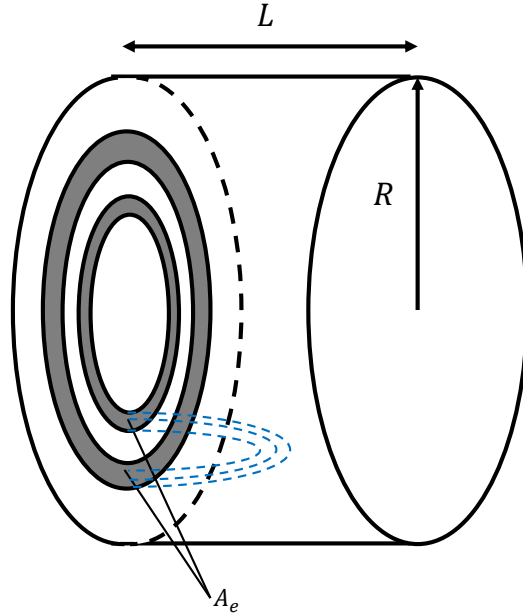


図 57 グローバルモデルにおける計算領域の定義.

このモデルでは

- イオンの生成・損失のバランス
- イオンと電子の損失量のバランス
- エネルギーバランス

の 3 つのバランス式を解くことでプラズマパラメタを求める。まず、前提として、本研究で生成するプラズマの電離度は数 % 程度であることが推測されるため、内部の粒子のほとんどは中性粒子の状態で存在する。したがって、反応式として主に中性粒子と、他の粒子との相互作用によるものが支配的となる。そこで、中性粒子は 1 種類しか考慮しない。次に、考慮するイオンのナンバリングを  $j$  として、密度は  $n_{i,j}$  と表記する。考慮する反応のナンバリングは  $k$  とする。まず、第一の仮定であるプラズマの准中性から、

$$\sum_j n_{i,j} = n_e \quad (30)$$

が成り立つ。

### 6.2.1 複数イオンが存在する場合のボーム速度の取り扱い

水プラズマのように、複数のイオン種により構成されるプラズマにおけるボーム速度の設定について述べる。Baalrud らは、異なるイオン種の間が生じる速度差がある閾値より大きいと不安定性が強化され、イオン間の摩擦により、最終的にすべてのイオン種で同一のボーム速度になると主張する [21]。2 種のイオンの速度をそれぞれ  $V_i, V_2$  としたとき、

$$\Delta V \geq \Delta V_c \quad (31)$$

$$\Delta V_c \equiv \sqrt{\frac{1+\alpha}{2\alpha}} \sqrt{v_{T1}^2 + \alpha v_{T2}^2} \quad (32)$$

がシステムボーム速度を適用することができる条件である．ここで  $\alpha = n_1 M_2 / (n_2 M_1)$  である．システムボーム速度を用いるか否かで大きく影響を与えるのは，水プラズマにおける水素イオンの割合である．そこで，水イオンと水素イオンについて， $\Delta V$  を各々が個別のボーム速度を持ったと仮定したときの速度差として計算すると，

$$\Delta V = \sqrt{\frac{kT_e}{M_{H^+}}} - \sqrt{\frac{kT_e}{M_{H_2O^+}}} = 2 \times 10^4 \text{ m/s} \quad (33)$$

であり， $\Delta V_c = 2 \times 10^3 \text{ m/s}$  と計算できるため，式 (31) の条件を満たす．今回のグローバルモデルにおいて，イオン種に関わらずボーム速度はシステムボーム速度  $u_{sb}$  を用いる．システムボーム速度は

$$u_{sb} = \sqrt{\sum_i u_{b,i}^2 n_i / n_e} \quad (34)$$

である [21]．

### 6.2.2 中性粒子密度の計算方法

中性粒子密度は分子流では式 (4) として扱う．再度表記すると

$$n_n = M C_{\text{grid}} n_n + \frac{M}{e} I_b \quad (35)$$

である．ここで，本実験では質量分析の分解能を下げないという観点から，グリッドへの加速電圧を 0 V として実験を行った．実験値から考察すると外部へ排気するビーム電流は 0 としても差し支えない．したがってグローバルモデル計算上では式 (35) で  $I_b = 0$  とした．なお，グリッド孔は，中性粒子は拡散により漏れ出るが，イオンや電子に関しては壁面と同様に損失する場所として計算していることに注意されたい．

### 6.2.3 イオンの生成・損失のバランス

イオンの生成は主に中性粒子と電子の衝突による電離反応あるいは中性粒子とイオンの衝突による電荷交換で行われる．損失は壁面へボーム速度で損失するあるいは中性粒子との電荷交換により起こる． $j$  番目のイオンが満たす，イオンの生成量と損失量のバランスは

$$\sum_k K_{j,k,p} n_{k,1} n_{k,2} = n_{i,j} A_{\text{eff}} u_{sb} + \sum_k K_{j,k,1} n_{k,1} n_{k,2} \quad (36)$$

となる．ここで  $K_{j,k,p}$  は， $j$  番目のイオンが  $k$  番目の反応式において生成される側にあれば，その反応式のレートコンスタントを用い，なければ  $K_{j,k,p} = 0$  とする． $K_{j,k,1}$  はその損失側で同様に扱う． $A_{\text{eff}}$  はプラズマのシースを考慮した実効的なイオンの損失面積である．放電室を半径  $R$ ，高さ  $L$  の円筒形状と考えると，

$$A_{\text{eff}} = 2\pi h_L R^2 + 2\pi h_R R L \quad (37)$$

である．ここで，

$$h_L = \frac{n_{is}}{n_i} \Big|_{\text{axial}} = \frac{0.86}{(3 + L/2\lambda)^{1/2}} \quad (38)$$

$$h_R = \frac{n_{is}}{n_i} \Big|_{\text{radial}} = \frac{0.8}{(4 + R/\lambda)^{1/2}} \quad (39)$$

として計算を行った．

#### 6.2.4 イオンと電子の損失量のバランス

プラズマが准中性を保つためには、イオンと電子の損失量がバランスする必要がある。つまり、

$$A_{i, \text{eff}} \sum_j \Gamma_{i,j} = \Gamma_e A_{e, \text{eff}} \quad (40)$$

が成立すればよい。流束をそれぞれ書き下せば、電子の速度分布がマクスウェル分布に従うとして

$$A_{i, \text{eff}} u_{\text{sb}} \sum_j n_{i,j} = \frac{1}{4} n_e v_{\text{the}} \exp \left\{ - \left( \frac{\Phi_p}{T_e} - \frac{1}{2} \right) \right\} A_{e, \text{eff}} \quad (41)$$

とかける。式 (41) に、式 (30)(34) を適用することで

$$\Phi_p = T_e \left\{ \frac{1}{2} - \ln \left( u_{\text{sb}} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{e T_e}} \frac{A_{i, \text{eff}}}{A_{e, \text{eff}}} \right) \right\} \quad (42)$$

として計算した。

#### 6.2.5 エネルギーバランス

アンテナを介して放電室に投入するマイクロ波は、以下のエネルギーによって損失すると考えられる。

- 中性粒子の電子衝突による電離エネルギー  $P_{\text{iz}}$
- 中性粒子の電子衝突による励起エネルギー  $P_{\text{ex}}$
- 中性粒子の電子衝突による振動エネルギー  $P_{\text{vib}}$
- 中性粒子の電子衝突による回転エネルギー  $P_{\text{rot}}$
- 中性粒子と電子の弾性衝突による損失エネルギー  $P_{\text{elas}}$
- イオンが壁面へ運ぶエネルギー  $P_{\text{w},i}$
- 電子が壁面へ運ぶエネルギー  $P_{\text{w},e}$

$j$  番目のイオンが電離により消費するエネルギーは、電離のポテンシャルを  $U_{\text{iz},j}$  として

$$P_{\text{iz},j} = K_{\text{iz},j} n_n n_e V U_{\text{iz},j} \quad (43)$$

である。励起、弾性衝突、回転、振動に関しても同様に、

$$P_{\text{ex}} = K_{\text{ex}} n_n n_e V U_{\text{ex}} \quad (44)$$

$$P_{\text{elas}} = K_{\text{elas}} n_n n_e V U_{\text{elas}} \quad (45)$$

$$P_{\text{rot},m} = K_{\text{rot},m} n_n n_e V U_{\text{rot},m} \quad (46)$$

$$P_{\text{vib},m} = K_{\text{vib},m} n_n n_e V U_{\text{vib},m} \quad (47)$$

である。回転、振動エネルギーに現れる添え字  $m$  は考慮する準位のナンバリングである。次に、 $j$  番目のイオンが壁面へ運ぶエネルギーは、プラズマポテンシャルを用いて

$$P_{\text{w},i,j} = \Gamma_{i,j} A_{i, \text{eff}} e \Phi_p \quad (48)$$

と求められる。電子はシースを乗り越えた速度そもつものだけが流入し、さらにポテンシャル分だけ減速されるので

$$\begin{aligned}
P_{w,e} &= n_e A_{e,\text{eff}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\sqrt{2e\phi/m_e}}^{\infty} v_z \left( \frac{1}{2} m_e v^2 - e\phi \right) f(\mathbf{v}) d\mathbf{v} \\
&= \Gamma_e \cdot 2kT_e A_{e,\text{eff}}
\end{aligned} \tag{49}$$

となる。最終的にパワーバランスは、マイクロ波が吸収するエネルギーを  $P_{\text{abs}}$  として

$$P_{\text{abs}} = \sum_j P_{\text{iz},j} + P_{\text{ex}} + \sum_m P_{\text{vib},m} + \sum_m P_{\text{rot},m} + \sum_j P_{\text{w},i} + P_{\text{w},e} + P_{\text{elas}} \tag{50}$$

を考えればよい。

以上、3つのバランス式 (36),(41),(50) と准中性の式 (30) を用いて各種イオンの密度及び電子温度、プラズマポテンシャルを計算した。

### 6.2.6 考慮した反応式

キセノン、水プラズマにおいて考慮した反応式を表 14 と表 15 に示す。仮定として、中性粒子は一種類しか考慮していない。また、逆反応は考慮していない。イオン化の逆反応は、イオンと電子の3体結合で起こるが、レートコンスタントが著しく低く無視しても影響がないからである。また、水プラズマにおいて負イオンは無視している。先行研究による3D-PIC計算では、主な生成イオンである水プラズマに対し数%程度の負イオンしか存在しないことが示唆されている。

表 14 グローバルモデルで考慮したキセノンの反応式

No.	Reaction	Reaction type	Rate constant	Ref.
1	$\text{Xe} + e \rightarrow \text{Xe} + e$	Elastic scattering	$K(\epsilon)$	[24]
2	$\text{Xe} + e \rightarrow \text{Xe}^* + e$	Electric excitation	$K(\epsilon)$	[24]
3	$\text{Xe}(J=0) + e \rightarrow \text{Xe}(J=1) + e$	Rotational excitation	$K(\epsilon)$	[24]
4	$\text{Xe} + e \rightarrow \text{Xe}^+ + 2e$	Ionization	$K(\epsilon)$	[24]
5	$\text{Xe} + e \rightarrow \text{Xe}^{2+} + 3e$	-	$K(\epsilon)$	[24]
6	$\text{Xe} + e \rightarrow \text{Xe}^{3+} + 4e$	-	$K(\epsilon)$	[24]

表 15 グローバルモデルで考慮した水の反応式

No.	Reaction	Reaction type	Rate constant	Ref.
1	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2\text{O} + e$	Elastic scattering	$K(\epsilon)$	[25]
2	$\text{H}_2\text{O}(J = 0) + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}(J = 1) + e$	Rotational excitation	$K(\epsilon)$	[25]
3	$\text{H}_2\text{O}(J = 0) + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}(J = 2) + e$	-	$K(\epsilon)$	[25]
4	$\text{H}_2\text{O}(J = 0) + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}(J = 3) + e$	-	$K(\epsilon)$	[25]
5	$\text{H}_2\text{O}(000) + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}(010) + e$	Vibrational excitation	$K(\epsilon)$	[25]
6	$\text{H}_2\text{O}(000) + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}[(100) + (001)] + e$	-	$K(\epsilon)$	[25]
7	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}^* + e$	Electronic excitation	$K(\epsilon)$	[25]
8	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + 2e$	Ionization	$K(\epsilon)$	[25]
9	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{OH} + \text{H}^+ + 2e$	Dissociative ionization	$K(\epsilon)$	[25]
10	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H} + \text{OH}^+ + 2e$	-	$K(\epsilon)$	[25]
11	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^+ + 2e$	-	$K(\epsilon)$	[25]
12	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^{2+} + 3e$	-	$K(\epsilon)$	[25]
13	$\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}^+ \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}$	Charge transfer	$1.7 \times 10^{-15}$	[26]
14	$\text{H}_2\text{O} + \text{OH}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + \text{OH}$	-	$3 \times 10^{-15}$	[26]
15	$\text{H}_2\text{O} + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}$	-	$3 \times 10^{-15}$	[26]
16	$\text{H}_2\text{O} + \text{O}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + \text{O}$	-	$2.33 \times 10^{-15}$	[26]

### 6.3 比較結果

グローバルモデルにより算出したイオン密度から計算した、各種イオンの存在比と、実験で測定したイオンの流束比を比較する。今、イオンのボーム速度はイオン種によらずシステムボーム速度で排気されると考えることができる。イオンスラストからイオン検出器までに明示的に進行方向に電場はかかっていないため、検出器近傍においてもこのシステムボーム速度が維持されていると考えることができる。したがって、本プラズマでは実験で測定している流束比はイオンの密度比と等価であるとみなせる。図 58 にキセノンでの実験結果と計算結果の比較を示す。キセノンでは、グローバルモデルから予測されるよりも多い割合で多価イオンが存在することがわかる。またここで、実験で測定しているのは放電室から 20 cm 下流であることを考慮すると、多価イオンは放電室からファラデーカップまでの間に中性粒子との電荷交換で損失するため、放電室内はより多い割合で多価イオンが存在することが示唆される。流量に対する依存性は、3 価イオンに関しては定性的な傾向は一致を見せるものの、2 価イオンでは流量に対する依存性が異なる。若干の傾向の違いは見られるものの、オーダーとしては比較的一致している。本実験による測定で、約 10% の割合で 2 価イオンが、約 1% の割合で 3 価イオンが存在することがわかった。多価イオンは、1 価イオンと比較よりも高いエネルギーを持って壁面へ衝突するため、スパッタリングを引き起こす影響が多い点や、測定されるビーム電流から計算される推力と実際に出ている実推力とのずれの要因となる。

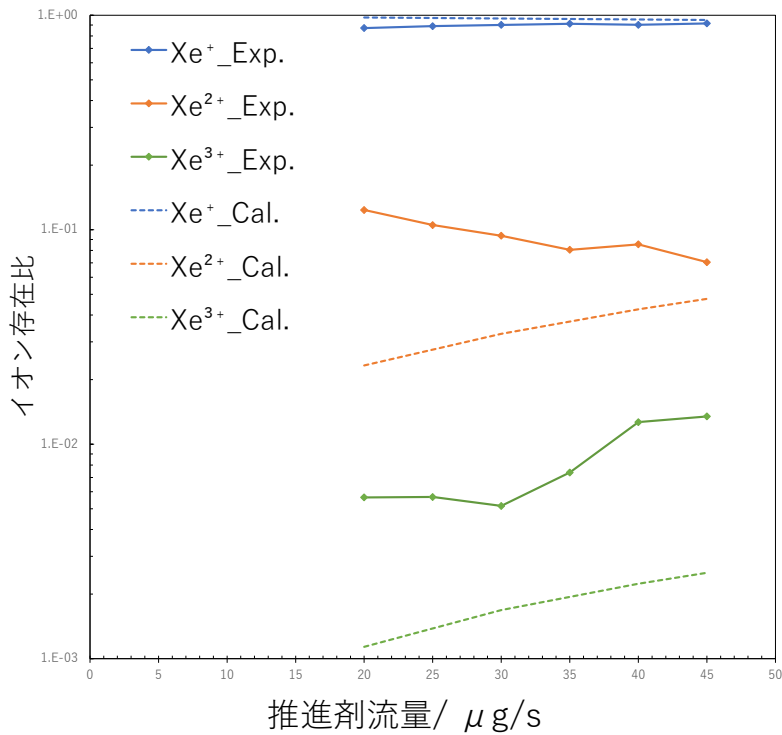


図 58 キセノンのイオン存在比の実験値とグローバルモデル結果との比較

次に、水プラズマにおける測定結果との比較を図 59 に示す。まず流量に対する依存性について考察する。図 59 から、実験結果と計算結果で定性的な傾向はどのイオン種でも一致している。流量を増やすと内部の中性粒子密度が増え、電子温度は下がる。このとき表 15 からわかるように、解離電離のレートコンスタントは電子温度依存性があり、かつ電子温度とレートコンスタントは一般的に正の相関をもつ。従って解離電離により生じるイオンに関して、流量を上げると減少傾向がみられると考えられる。一方で  $\text{H}_3\text{O}^+$  は解離ではなく電荷交換によって主に生成される。流量増加に伴う中性粒子密度増加によって、 $\text{H}_3\text{O}^+$  の割合は増加すると考えられる。定量的には、酸素イオンや、水素イオン以外では比較的良い一致が確認される。酸素イオンは実験値が多く出ている。真空チェンバ内に存在する酸素分子による影響が考えられる。実験結果からの事実として、チェンバ内の微小なリークが確認されており、微小ながら酸素分子イオンに該当する質量電荷比 32 にピークが検出されている。これはイオンスラスト下流に存在する酸素分子とイオンの電荷交換で生じている。しかし、ピークの強度は酸素イオンで検出された強度の 10% 程度であるため、酸素分子からさらに発生する酸素イオンの影響はさらに小さいことが予測される。従って、実験で測定された酸素イオンのピーク値はおおよそ放電室由来のものであると考えられ、グローバルモデルで仮定していない要素によるずれからこの差が生じていると考えられる。グローバルモデル計算では、負イオンの存在を無視している。負イオンはプラズマポテンシャル及びボーム速度に対し影響を与えることが予測される。負イオン自体はプラズマポテンシャルに拘束されるため、外部への流出は少ないが、これらのプラズマパラメタへの影響が可能性として考えられる。



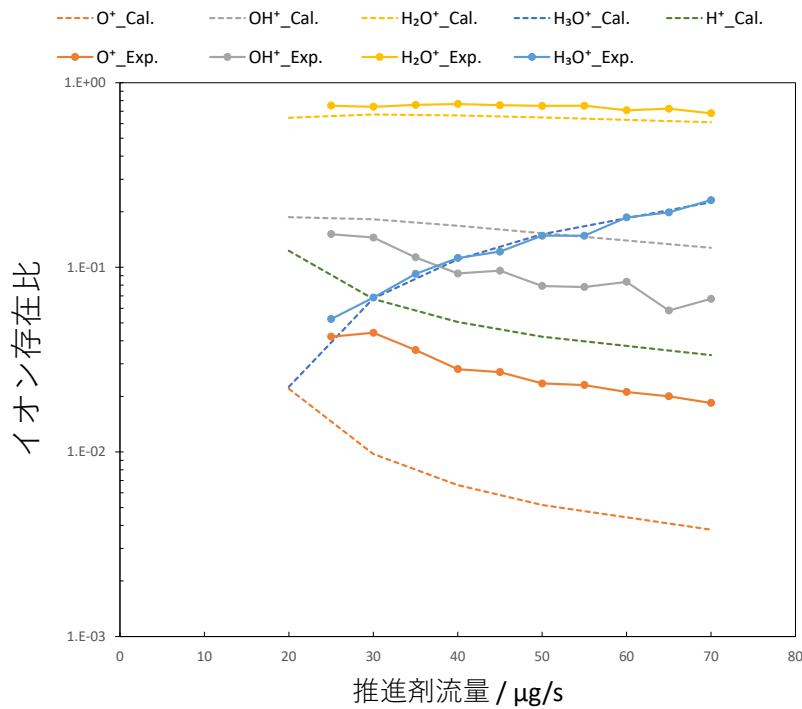


図 59 水プラズマのイオン存在比の実験値とグローバルモデル結果との比較

### 6.3.1 質量分析の結果から推定される、多価イオン由来の推力補正係数

QMS による質量分析及びグローバルモデル計算による妥当性の確認により、比較的妥当なイオン種ごとの存在比を算出できた。この比率を用いて、イオンスラストの解離イオンによる推力補正係数を見積ることができる。水イオンスラストでは、複数イオンが存在することによる推力補正係数を

$$\eta_{\text{multi}} = \frac{\sum_i m_i n_i}{\sum_i m_{\text{H}_2\text{O}} n_i} \quad (51)$$

と定義して計算を行う。水プラズマに対して、水素のデータを含めた場合と含めない場合の 2 通りを実験値を使用して計算したものと、Global モデルによる計算値を使用して計算したものを図 60 に示す。実験値と計算値による結果の差異は主に水素の測定結果に起因している。解離およびビームの発散を含めた推力補正係数  $\eta$  は、スラストスタンドを用いた実測により、0.92 であることがわかっている。発散による推力補正係数を一般的なイオンスラストで測定されている 0.95 と仮定すると、解離による推力変化の割合も 0.95 程度であると考えられる。測定時の水素のピークをそのまま用いると、水素の割合は 27 - 45% となり、解離による推力低下割合が 0.8 以下となり先行研究の結果と整合性が取れない。従って、プラズマ中の水素の割合はグローバルモデルによる計算値に近い、1 - 10% 程度であることが予測される。

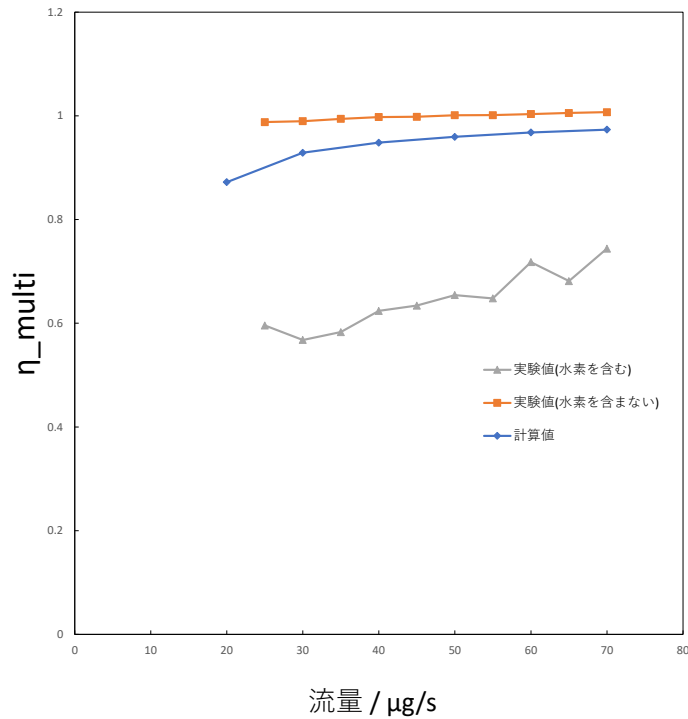


図 60 複数イオンによる推力補正係数

## 7 結論

本研究は、1 W 級のマイクロ波放電式イオンスラストについて、アクセルグリッド形状変更による推進性能の変化、及び質量分析によるプラズマ中のイオン種の存在比を測定。以下の知見を得た。

- 最も薄いグリッド (d0.3t0.15) において、最も高い推進剤利用効率を達成した。この傾向はグリッドコンダクタンスの変化だけでは説明できず、プラズマ生成部と相互作用を引き起こしている可能性を示唆する。
- ビーム加速を行ったグリッドに対し画像解析を行うことでグリッド形状改善に対する知見を得た。グリッド中央部では、数値計算による厚み分布よりさらに薄くする必要がある、グリッド外周部では孔径を拡大する必要がある。
- 水イオンスラストにおいて、グリッドシステムの加速電圧、グリッド間距離、そしてスクリーン孔数及び孔分布に対する依存性を実験的に調査した。
- キセノン及び水プラズマに対し質量分析を行った。分解能 1 amu 以下の測定に成功し、グローバルモデルとの計算結果と比較して定性的な傾向及びオーダーの一致から、測定の妥当性を確認した。
- 質量分析結果から複数イオン種による推力補正係数を推算した。水素の実測値に不確実性が大きいため、今後の課題として水素の測定信頼度の向上が残る。

## 参考文献

- [1] T. Villela, C. A. Costa, A. M. Branão, F. T. Bueno, and R. Leonardi, "Towards the Thousandth CubeSat: A Statistical Overview," *International Journal of Aerospace Engineering*, Vol.2019, Article ID 5063145, doi.org/10.1155/2019/5063145.
- [2] D.J. Barnhart, T. Vladimirova and M.N. Sweeting, "Very-Small-Satellite Design for Distributed Space Missions," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol.44, No.6, pp.1294-1306, 2007.
- [3] R. Funase, S. Ikari, Y. Kawabata, S.Nakajima et al., "Flight Model Design and Development Status of the Earth-Moon Lagrange Point Exploration CubeSat EQUULEUS Onboard SLS EM-1," 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, SSC18-VII-05, 2018.
- [4] 小林充宜, 古久保裕介, 川上天誠, 藤原恭兵, 多川真登, 田原弘一 et al., "超小型月探査機搭載用シリンドリカルホールスラスタの性能特性とイグナイタを用いた発散磁場型電子源の開発," *Space Transportation Symposium, STEP-2017-070*, 2017.
- [5] I. Levchenko, K. Bazaka, Y. Ding, Y. Raitses, S. Mazouffre, T. Henning et al., "Space micropropulsion systems for Cubesats and small satellites: From proximate targets to furthestmost frontiers," *Applied Physics Reviews*, Vol.5, 011104, 2018, doi: 10.1063/1.5007734.
- [6] J. C. Poscoa, O. Teixeira, G. Filipe,"A REVIEW OF PROPULSION SYSTEMS FOR CUBESATS," *Proceedings of the ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Pittsburgh, PA, USA, Nov.9-15, 2018.
- [7] S. Stanley R., P. Frederick P., and R. Robert, "The NASA technology push towards future space mission systems," *IAF Paper 88-033*, October 1, 1988.
- [8] H. Koizumi and K. Komurasaki, "Development and Flight Operation of a Miniature Ion Propulsion System," *Journal of Propulsion and Power*, May 24, 2018, doi: 10.2514/1.B36459.
- [9] H. Koizumi, H. Kawahara, K. Yaginuma, J. Asakawa, Y. Nakagawa, Y. Nakamura et al., "Initial Flight Operations of the Miniature Propulsion System Installed on Small Space Probe: PROCYON," *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, Vol. 14, No. ists30, pp.13-22, 2016.
- [10] M. Tsay, J. Frongillo, K. Hohman, "LunarCube: A Deep Space 6U CubeSat with Mission Enabling Ion Propulsion Technology," 29th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, Utah, SSC15-XI-1 , 2015.
- [11] Y. Nakagawa, H. Koizumi, H. Kawahara, and K. Komurasaki, "Performance characterization of a miniature microwave discharge ion thruster operated with water," *Acta Astronautica*, Vol.157, pp.294-299, 2019.
- [12] H. Koizumi, Y. Takao, M. Nakano, R. Funase, "Assessment of Micropropulsion System Unifying Water Ion Thrusters and Water Resistojet Thrusters," *Journal of Spacecraft and Rockets*, June 23, 2019, doi: 10.2514/1.A34407.

- [13] 富田大貴, 中川悠一, 小泉宏之, 小紫公也, ”水イオンスラストにおけるマイクロ波周波数及び放電室高さがイオン引き出し性能に及ぼす影響,” 日本航空宇宙学会論文集, Vol.66, No.6, pp.153-158, 2018, DOI: 10.2322/jjsass.66.153
- [14] K. Nishiyama, Y. Toyoda, S. Hosoda, Y. Shimizu, and H. Kuninaka, ”An Ion Machined Accelerator Grid for a 20-cm ECR Ion Thruster,” J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol.8, pp.1590-1594, 2009.
- [15] M. Nakano, K. Nakamura, Y. Nakagawa, D. Tomita, Y. Takao, and H. Koizumi, ”Numerical simulation of full-aperture-pair ion optics in a miniature ion thruster,” Physics of Plasmas 25, 013524, 2018; doi: 10.1063/1.5008802
- [16] M. Nakano, N. Nakamura, Y. Naito, Y. Nakagawa, Y. Takao, and H. Koizumi, ”Computational design of a high-efficiency accelerator grid for a miniature ion thruster by full-aperture ion optics simulations,” AIP Advances 9, 035343, 2019; doi: 10.1063/1.5090413
- [17] 山下裕介, 月崎竜童, 谷義隆, 神田大樹, 西山和孝, ”ビーム加速時の中性粒子密度に着目したマイクロ波イオンスラスト  $\mu 10$  のプラズマ生成部と加速部の相互作用の調査,” 第 63 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JASS-2019-4307, Nov.6-8, 2019.
- [18] K. Nakamura, Y. Nakagawa, H. Koizumi, and Y. Takao, ”Numerical Analysis of a Miniature Microwave-discharge Ion Thruster Using Water as the Propellant,” Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., Vol. 61, No. 4, pp. 152–159, 2018; DOI: 10.2322/tjsass.61.152
- [19] Dan M. Goebel and Ira Katz, ”Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters,” John Wiley & Sons, 2008, ISBN 978-0-470-42927-3.
- [20] D. J. Santeler, ”New concepts in molecular gas flow,” Journal of Vacuum Science & Technology A 4, 338, 1986; doi.org/10.1116/1.573923
- [21] S. D. Baalrud, C. C. Hegna, and J. D. Callen, ”Instability-Enhanced Collisional Friction Can Determine the Bohm Criterion in Multiple-Ion-Species Plasmas,” Physical review letters 103, 205002, 2009; doi:10.1103/PhysRevLett.103.205002
- [22] C. Lee, and M. A. Lieberman, ”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 13, 368 (1995); doi: 10.1116/1.579366
- [23] K. Nakamura, H. Koizumi, M. Nakano, and Y. Takao, ”Effects of negative ions on discharge characteristics of water plasma source for a miniature microwave discharge ion thruster,” Physics of Plasmas 26, 043508, 2019; doi.org/10.1063/1.5092754
- [24] D. Mathur and C. Badrinathan, ”Ionization of xenon by electrons: Partial cross sections for single, double, and triple ionization,” Physical Review A, Vol.35, Feb. 1, 1987.
- [25] Y. Itikawa, and N. Mason, ”Cross Sections for Electron Collisions with Water Molecules,” Journal of Physical and Chemical Reference Data 34, Vol.1, 2005.
- [26] S. V. Avtaeva, A. A. General, and A. Kel'man, ”Kinetic model for low-density non-stationary gas discharge in water vapour,” Journal of Physics D: Applied Physics 43, 2010.
- [27] 荒川義博, 國中均, 中山宣典, 西山和孝, ”イオンエンジンによる動力航行,” コロナ社, 2006, ISBN 4-339-01228-9.
- [28] K. Hirano, Y. Toyoda, A. Kibe, N. Yamamoto and H. Nakashima, ”EXB プローブを用い

たイオンエンジンにおけるイオンビーム特性の測定,” Engineering Science Reports Kyushu University, Vol.35, No. 1, pp. 1-5, 2013.

## 謝辞

本論文を執筆するにあたり、たくさんの方々の御指導ご鞭撻を頂きました。最後に皆さまへの感謝を述べたいと思います。学部4年の時から3年間根気強く御指導いただきました、小泉宏之准教授にまずは感謝を申し上げます。資料の書きかたから実験手法、プレゼンのコツにいたるまで、研究の基本をすべて教えていただきました。また研究室運営の観点でも学ぶ面は多かったです。特に学生に対しても不要な上下関係を作らないという姿勢には感銘しました。小紫公也教授には研究室輪講でご指導を頂きました。小紫先生の常に研究を考える姿勢や物理的背景を重視したコメントなど、現象への深い洞察からいつも刺激を受けました。中川さんにはB4の時から様々にご指導いただきました。いつも研究の方向性などもアドバイスいただき、参考にしてばかりでした。柳沼特任助教、浅川特任助教には日々MTGや学会前などに、鋭いご指摘をいただき、自分の考察力の甘さを幾度となく認識する機会を与えてくれました。関根さんはプラズマに関して的確なアドバイス、ご指摘をいただき非常に参考になりました。またオフのときははっちゃけ具合も参考にしたいです。田中さんは先輩であるにもかかわらず同期のようなフレンドリーさで接していただき、柏生活が和やかになりました。安宅君は研究に対する熱意をひしひしと感じ、イオン班同期としても切磋琢磨できる仲間であったと思います。龍野君の作業の速さには日々感銘を覚えていました。神田君は同期としてフレンドリーかつ的確な質問をしてくれるため研究を見直すことができました。山田君は就活仲間としてともに戦いました。これからもよろしく。本郷の秋山、菊池、王には日々MTGでフィードバックを大量にいただきました。後輩である元木君、白須君、高崎君には、プラズマや実験器具に関して教えていく中で自分の理解の浅さを再認識することができました。田原さんは、日々発注などの業務を引き受けていただき、のびのびと研究に打ち込むことができました。最後に、大学院進学まで援助をしていただいた両親、家族に感謝を致します。

## 関連研究発表

### 8 学術雑誌掲載等

M. Nakano, N. Nakamura, Y. Naito, Y. Nakagawa, Y. Takao, and H. Koizumi, "Computational design of a high-efficiency accelerator grid for a miniature ion thruster by full-aperture ion optics simulations," AIP Advances 9, 035343, 2019; doi: 10.1063/1.5090413

### 9 国内学会における発表

内藤裕貴, 中野正勝, 中川悠一, 小泉宏之, 小紫公也, "マイクロ波放電式小型イオンスラストのアクセルグリッド最適化に向けた基礎実験," 平成 29 年度宇宙科学連合講演会, ポスター発表, 久留米, 2018 年 11 月.

内藤裕貴, 中野正勝, 中川悠一, 小泉宏之, 小紫公也, "1W 級マイクロ波放電式イオンスラストのアクセルグリッド形状最適化に関する実験的研究," 平成 30 年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原, 2019 年 1 月.

内藤裕貴, 元木 嵩人, 安宅泰穂, 中川悠一, 小泉宏之, 小紫公也, "1W 級マイクロ波放電式水イオンスラストのビーム中のイオン種計測," 平成 30 年度宇宙科学連合講演会, ポスター発表, 徳島, 2019 年 11 月.