

令和4年度

博士学位論文

高抵抗材料コーティンググリッド電極を用いた
コロナ放電方式イオナイザによる誘導電圧の抑制

岩手大学 大学院 工学研究科
電気電子・情報システム工学専攻
高木・高橋研究室

山口 晋一

令和5年3月

2023. 3

目次

第 1 章 序論	1
1.1. はじめに.....	1
1.2. 静電気障害の発生とその防止.....	2
1.2.1. 静電気障害の例.....	2
1.2.2. 半導体デバイス製造工程における静電気障害.....	4
1.2.3. 静電気障害の要因.....	5
1.2.4. 静電気障害の防止.....	7
1.3. 静電気除去装置.....	7
1.4. 空気中の放電で生成されるイオン種について.....	9
1.5. 参考文献.....	11
第 2 章 高速応答可能な除電評価装置の開発	13
2.1. 概要.....	13
2.2. 回路構成.....	14
2.3. 装置の特性評価.....	20
2.3.1. 周波数に対する応答性.....	20
2.3.2. CPM との除電波形の比較.....	22
2.4. まとめ.....	26
2.5. 参考文献.....	26
第 3 章 除電における印可電圧・周波数の影響	27
3.1. はじめに.....	27
3.2. 実験系の構築及び実験内容.....	27
3.2.1. イオン測定回路.....	27
3.2.2. 本系の概略.....	30
3.2.3. 静電誘導の除去.....	35
3.2.3.1 放電電流波形.....	35
3.2.3.2 除電波形.....	38
3.2.4. バイアス電圧および Duty 比変化によるイオンバランス調整.....	39
3.3. 印加電圧波形を矩形波とした場合の特性評価.....	42
3.3.1. コロナ放電特性.....	42
3.3.2. 除電特性.....	49
3.3.2.1. 除電時間計測.....	49
3.3.2.2. イオンバランスおよびバイアス電圧計測.....	54
3.3.3. プレート下部から垂直方向に送風した場合の特性評価.....	58
3.3.3.1. 実験系の構築.....	58
3.3.3.2. イオンバランスおよびバイアス電圧測定.....	61
3.3.3.3. 除電時間計測.....	62
3.3.3.4. バイアス電圧を印加した場合における放電電流波形の解析.....	63
3.3.4. プレートサイズを変化させた場合の除電特性評価.....	67
3.3.4.1. イオン測定回路の容量調整.....	67
3.3.4.2. イオンバランス計測.....	68

3.3.4.3. 除電時間計測.....	69
3.4. 印加電圧の Duty 比を変化させた場合の特性評価.....	71
3.4.1. コロナ放電特性.....	71
3.4.2. 除電特性.....	83
3.4.2.1. 除電時間計測.....	83
3.4.2.2. プレートへの流入電流.....	86
3.4.2.3. イオンバランス計測.....	88
3.5. まとめ.....	90
3.6. 参考文献.....	92
第 4 章 導電性グリッド電極を用いたコロナ放電方式イオナイザにおける誘導電位の抑制.....	93
4.1. はじめに.....	93
4.2. イオナイザ評価システムの構築.....	94
4.2.1. イオン測定回路.....	94
4.2.2. 放電特性.....	96
4.2.2.1. リング・グリッド流入電流波形.....	96
4.2.2.2. リング・グリッド流入電荷量.....	98
4.2.3. 誘導電圧特性.....	101
4.2.4. まとめ.....	102
4.3. 除電における金属グリッド電極がおよぼす影響.....	103
4.3.1. はじめに.....	103
4.3.2. 実験装置.....	103
4.3.3. 放電特性.....	106
4.3.3.1. リング・グリッド流入電流波形.....	106
4.3.3.2. リング・グリッド流入電荷量.....	107
4.3.3.3. リング・グリッド平均電流.....	110
4.3.3.4. ギャップ幅を変化した場合の流入電荷量・平均電流.....	111
4.3.4. 誘導電圧・電流密度特性.....	113
4.3.4.1. 誘導電圧波形.....	113
4.3.4.2. グリッド本数変化における電流密度特性.....	115
4.3.4.3. ギャップ幅変化における電流密度特性.....	117
4.3.4.4. プレート距離変化における電流密度特性.....	119
4.3.4.5. グリッド距離変化における電流密度特性.....	120
4.4. 除電特性.....	121
4.4.1. 周波数変化における除電特性.....	121
4.4.2. グリッド本数変化における除電特性.....	122
4.4.3. 空気圧力変化における除電特性.....	124
4.5. まとめ.....	125
4.6. 参考文献.....	126
第 5 章 高抵抗材料で被覆した導電性グリッドが除電及び静電誘導に及ぼす影響の検証.....	128
5.1. はじめに.....	128

5.2. 除電における高抵抗被覆グリッド電極が及ぼす影響.....	129
5.2.1 実験装置	129
5.2.2 誘導電圧特性.....	131
5.2.2.1 誘導電圧波形.....	131
5.2.2.2 グリッド本数変化における誘導電圧特性.....	135
5.2.2.3 ギャップ幅変化における誘導電圧特性.....	138
5.3. 除電特性.....	140
5.3.1 グリッド本数変化における除電特性.....	140
5.3.2 空気圧力変化における除電特性.....	144
5.3.3 金属グリッドの有無と 4 乗 Ω , 10 乗 Ω 高抵抗被覆導電性グリッドの除電特性.....	145
5.4. まとめ.....	147
5.5. 参考文献.....	148
第 6 章 交流方式バー型イオナイザにおける高抵抗樹脂グリッドが除電及び静電誘導に及ぼす影響の検討.....	149
6.1. はじめに.....	149
6.2. イオナイザ評価システムの構築.....	149
6.2.1 イオン測定回路.....	149
6.2.2 本系の概略.....	150
6.2.3 誘導電圧特性.....	153
6.2.4 除電特性.....	155
6.3. まとめ.....	158
6.4. 参考文献.....	159
謝辞.....	161

第1章 序論

1.1 はじめに

我々の身近なところで経験することができる静電気学的物理現象として帯電現象がある。物体の帯電に帰着する静電気は、複写機やプリンタ、電気集塵機、静電塗装など様々な面で利用され、私たちの生活に貢献している。しかし、各産業分野における生産現場では静電気による多様な障害が深刻な問題となっている。特に半導体デバイス製造分野においては静電気放電や粒子付着が問題視されている。そのため、絶縁体あるいは電氣的に浮遊の金属の表面電荷の中和技術が重要視されている。この静電気障害対策として、コロナ放電方式イオナイザによる電荷中和方法がある⁽¹⁾。

これまで、より高い除電性能を有するコロナ放電イオナイザの開発が進められ、その特性化と最適化が行われてきた。学問的見地からイオナイザにより発生した荷電粒子の挙動は、ファラデーケージを用いたイオン電流計測⁽²⁾、一次元数値解析等によって調べられてきた^(3,4)。また、コロナ放電によって発生したイオン流場中の電荷挙動は航空で使用されるプラズマアクチュエータのような工学的応用にも期待され、世界的に注目されている^(5,6)。

電子デバイスの分野において静電気対策機器として広く使用されているコロナ放電方式イオナイザは、現在除電速度とイオンバランス性能が重要な要求事項である。一方、ハードディスクドライブ (HDD) の製造工程において、 $\pm 5\text{V}$ の静電気対策が行われており、その現場では交流コロナ放電方式のイオナイザの使用が制限されている。理由は、イオナイザからの誘導帯電である⁽⁷⁾。現在、電子デバイスの静電気管理は凡そ $100\sim 300\text{V}$ 程度となっているが、携帯電話に使用される高周波変調復調 IC、高輝度白色 LED、暗視モード対応の高感度大画素数 CMOS イメージセンサの製造工程では、 100V 以下の静電気管理が始まっている。今後電子デバイスの静電気耐性が弱くなることで、同様な課題が出てくる可能性が高い。本研究では、イオナイザの放電電極からの誘導帯電現象を観測し、誘導電圧の緩和とそれに伴い相反する課題と想定される除電能力の維持を研究対象としており、研究背景と経緯について言及する。

1.2 静電気障害の発生とその防止

1.2.1 静電気障害の例

各産業分野における生産現場では静電気による多彩な障害が深刻な問題となっている。繊維、フィルムなど絶縁抵抗が高い高分子関係では、糸のからみによる切断やフィルムのローラへの巻き付きやほこりの付着などの障害が発生する。粉体関係では、生産する段階で篩い（ふるい）を使用して分級する際の篩いの網目との摩擦で帯電し目詰まりを起し、また、空気流送時の帯電障害が発生する。絶縁性でかつ可燃性の石油を扱う分野では、パイプ内を流動するときの流動帯電の危険性を考慮する必要がある。原油タンカーでは、タンク内洗浄中の爆発事故などが発生している。電力関係では、高圧大容量の変圧器の絶縁油が流動帯電により静電気放電を起し、油の絶縁破壊が発生している。これら産業別の静電気障害の例を表 1.1 に示す⁽⁸⁾。

表 1.1 産業別静電気障害の例⁽⁷⁾

産業分野	帯電体	障害の例
高分子	繊維	原糸のより合わせ不良，糸のからみ，糸の切断
	フィルム	ほこりの付着，ローラへの巻き付き，静電気放電（着火源，感電，ピンホール形成）
	その他	ほこりの付着，製品どうしの付着・反発，装置への付着
粉体	粉体	凝集，飛び散り，ふるい分け不良，静電気放電（粉塵爆発，感電）
	流送パイプ	ほこりの付着，静電気放電（着火源，感電）
紙・印刷	紙	インクの飛び散りなどの印刷不良，紙の密着，裏写り
石油	石油	タンク充填中の爆発，タンク油量測定中の爆発
	輸送パイプ	パイプ内側・外側での静電気放電
	その他	タンク洗浄中の爆発
半導体	パッケージ，内部回路	回路の破壊，特性劣化，歩留り低下
	装置類，梱包材，作業者	出荷後の不良（潜在不良）
液晶	ガラスパネル，作業者，装置類	ドライバーIC の破壊，表示部の損傷，製造中のガラスの破壊
電子機器	絶縁材料，作業者，その他	回路・デバイスの破壊，デバイスの潜在不良，回路の誤作動，コンピュータの動作停止，ロボットの誤作動
医療	着衣，その他	酸素タンク内の着火，爆発，麻酔ガスの着火 医療用機器の誤動作
自動車	ガソリンタンク，燃料パイプ，人体	給油時の発火・爆発，走行中エンジンルームからの出火，降車時の静電気ショック
オフィス	着衣，人体，その他	コンピュータ誤動作，コピー用紙のブロッキング感電，ほこりの付着，プリンタ内部の帯電，USB メモリの損傷
その他	絶縁体，導体，人体，装置	静電気放電による通信障害，ヘリコプター接触時における感電，原子炉の窓の破壊，変圧器の絶縁油の帯電による絶縁破壊，ガラスファイバー用撚糸機における巻き付き防止，コーヒーマルで挽かれた豆

1.2.2 半導体デバイス製造工程における静電気障害

本研究では、半導体デバイスの製造工程において発生する静電気障害への対策が背景となっている。同工程のクリーンルームにおける主な静電気障害には、静電気放電（ESD：Electro Static Discharge）と微粒子の静電吸着（ESA：Electro Static Attraction）による異物汚染（Contamination）がある。

これらの障害への対策は、基板（Si ウェーハ、ガラス）やデバイスのみならず、その周辺の機器や機材を全てに対して帯電対策をしておく必要がある。デバイス製造工程では、石英ガラスや種々の高分子物質からなる材料や機材が多く使用され、これらは高い比抵抗を有するため、摩擦、剥離、洗浄、乾燥などの接触分離する過程があると、静電気が発生して数 kV にまで帯電する。デバイス製造工程における物体表面の帯電は、製品の歩留まりに大きく影響するため、万全の静電気対策が要求される。

大規模集積回路（LSI）や液晶ディスプレイ（LCD）の製造において静電気障害が発生する主な要因は次のとおりである⁽¹⁾。

（1）湿式洗浄工程

洗浄液がパイプ、ホース、ノズルなどから高圧・高速で噴出したときに帯電が生じる。また、洗浄液が洗浄物と衝突したときにも帯電が生じる。洗浄後のウェーハや液晶基板を純水から引き上げる際にも帯電が生じる。

（2）乾式洗浄工程

エアナイフにより乾燥する場合やプリント基板、プラスチックフィルムなどに付着したダストをブラシスクライビングによって除去する場合に、摩擦によって静電気が発生する。洗浄物を輸送するローラ部では、洗浄物とローラとの間の接触、摩擦の繰り返しによって静電気が発生する。また、洗浄物が高電圧、大容量に帯電している帯電物体の近くに位置すると、静電誘導で誘導帯電する。

（3）熱処理（アニール）工程

熱処理（アニール）工程は、窒素やアルゴンなど不活性ガス雰囲気中でウェーハを熱処理し、イオン注入した不純物を活性化し、金属をシリサイド化する工程である。アニール装置中で高温処理を行う際にウェーハが帯電する。

（4）搬送工程

松葉式ないしはカセットステーション式やトレースステーション式でウェーハや液晶基板を工程間搬送する場合、搬送途上ないしは工程間受け渡し時の摩擦・接触・剥離・静電誘導により、ウェーハや液晶基板が帯電する。

以上の工程で生じた帯電は、ESD によるデバイスの破壊や、静電気により微小なパーティクルがウェーハに付着し、電子デバイスの歩留の低下を引き起こすことになる。このため、静電気発生抑制対策とともに、効果的な除電・中和が要求されている。

1.2.3 静電気障害の要因

各産業分野において静電気現象が原因となり発生する障害は、大きく2つに分類できる。

- ① 帯電体間に作用する静電気力や誘導現象により発生する障害
- ② 静電気放電による障害

①の静電気力による障害は、ほこりの付着をはじめ、広範囲にわたる工程や業種で非常に多く発生している。

②の静電気放電は、発火の原因となることもあり、可燃性ガスの爆発など重大な事故を起こす原因として恐れられているほか、電子デバイスの破壊、誤動作などを引き起こす。

このような静電気障害は、絶縁体を布で擦るときに発生する摩擦帯電現象として一般にも広く知られている。摩擦帯電のほかにも、静電気障害を引き起こす帯電現象としては、エネルギー準位の差によって電子が移動する接触帯電、剥離帯電、衝突帯電、流動帯電、物体の変形・破壊による帯電、ノズルから液体を噴霧するとき表れる液体の分裂による帯電、紫外線・X線・ガンマ線等の照射による高電子放出による帯電、コロナ放電への暴露による帯電、電子ビーム・イオンビーム照射による電子・イオン補足による帯電、燃焼等の化学反応による帯電、不均一凍結による帯電など、様々な帯電現象が知られている。これらの帯電現象の概要を表1.2に示す⁽⁸⁾。

表 1.2 様々な帯電現象の例⁽⁸⁾

帯電原因	名称・機構	物体	条件・例
接触	接触帯電：エネルギー準位の差に基づく電子移動，イオンの濃度差による移動	個体－個体	異種物質間の接触 温度差のある物体間の接触 電界下での接触
	剥離帯電：密接な接触帯電	個体（フィルムなど）	粘着テープの剥離
	衝突帯電：短時間接触帯電	個体（粉体）－個体	粉体のパイプ内空気輸送（流送帯電）
	流動帯電：個体壁へのイオンの選択吸着など	個体－液体	液体のパイプ輸送
	沈降帯電：個体界面の電荷移動と粒子密度偏り	個体（液体－液体）	液中分散粒子の重力沈降
摩擦	摩擦帯電：接触面増加，荷電粒子放出，温度差，ひずみなど	個体－個体，粉体	異種物質の摩擦，混合（混合帯電）
	非対称摩擦帯電：温度差，ひずみの差など	個体	同種物質間の摩擦（非対称摩擦）
破壊	欠陥内の電荷による帯電	個体	粉砕
分裂	表面・内部の電荷の分離	液体	液体の分離（噴霧）
電磁波照射	光電子放出など	個体	紫外線・X線・ガンマ線照射
コロナ放電	コロナ放電・イオン補足	個体，液体	コロナ放電への暴露
プラズマ	イオン，電子の補足	個体	プラズマ暴露
荷電粒子照射	電子，イオンの補足	個体，液体	電子ビーム，イオンビーム
燃焼	化学反応	個体，液体	化学反応
凍結	イオンの偏析	液体	不均一凍結

1.2.4 静電気障害の防止

静電気障害を防止するためには、静電気の発生を防止することが最良であるが、一般的に静電気の発生防止は極めて困難な場合が多い。2つの材質が異なる物体が接触するときには、必ず物体間での電荷の授受が起こり、静電気帯電が発生する。

電荷の発生を抑制することが最善の策であると考えられるが、この電荷発生抑制には限界があるため、発生した電荷を速やかに漏洩してしまう方法、または帯電体の電荷を中和する方法も考えられる。このように、主な静電気障害の防止対策は、次の3つに整理される。

- ① 静電気発生抑制
- ② 発生電荷の漏洩
- ③ 発生電荷の除去・中和

①の静電気発生抑制については、接触帯電量を少なくするため、接触する物質の組み合わせや接触面積等の条件によって電荷の発生量を少なくする方法であり、「表面の粗さが大きく、硬度が高く、しかも、帯電列上で近い特性にある材料を用いる」ことが望ましいとされている⁽⁸⁾。

②の発生電荷の漏洩については、金属などの導電性の材料が帯電している場合は接地することが有効である。絶縁体の場合には接地しても電荷は漏洩しないため、雰囲気を高湿度にすることや、材料の表面の導電化を実現するために金属皮膜の形成や導電性塗料の塗布、界面活性剤の一種である帯電防止剤の利用などの対策がとられている⁽⁸⁾。

しかし、絶縁体の場合には、これら静電気発生抑制や発生電荷の漏洩は、常に適用できるわけではなく、多くの場合は③の発生電荷の除去・中和の対策がとられる。これは発生した電荷を強制的に除去するための静電気除去装置を用いるものであり、絶縁物の帯電対策に幅広く適用されている。

1.3 静電気除去装置

静電気除去装置（イオナイザ）は、電荷中和に必要な帯電物体と逆極性の電荷を発生し、これを帯電物体へ供給する機能を有する装置である。逆極性の電荷は、雰囲気中の気体分子をイオン化して生成することが一般的であり、イオン生成方式の違いによって分類される。装置は用途に合わせて多くの方式が開発、実用化されており、空気イオン生成方式により放射線式⁽⁹⁾、紫外線式^(10, 11)、軟X線式⁽¹⁰⁻¹²⁾、大気圧グロー方式^(13, 14)、コロナ放電式^(15, 16)等に分類される。

これら方式のうち放射線式は放射能汚染の危険性を有し、軟X線式は外部へ漏えいしないように遮蔽対策等の安全対策が必要であり、また、紫外線式は大気圧下では紫外線は短い距離で吸収されてしまうので減圧下での適用に限定されるなどの安全性での懸念や利用上の制約条件があり、特殊な用途で利用されている。大気グロー方式はグロー放電維持

に必要な陰極加熱やジュール加熱による放電の不安定性がある。そのため、安全で安定した高い除電能力と精度の高い除電を必要とする製造現場などでは、コロナ放電式が多く利用されている⁽¹⁶⁾。

コロナ放電式イオナイザは、除電電極部への高電圧の印加方式により交流方式、直流方式、パルス直流方式の3種類に分類される⁽¹⁾。イオナイザに用いられるコロナ放電の生成には、両極性のイオンを生成する必要があるため、針電極1本、もしくは2本以上に上記3方式の高電圧を印加し、正・負コロナを生成している。

このようにコロナ放電イオナイザは十分に確立された技術であるので、近年では正・負イオンの除電電流のバランス^(3, 4, 17-19)、電極材料の飛散によるコンタミネーションと電極材料の工夫によるその防止^(15, 20)、窒素など特殊雰囲気での除電⁽²¹⁻²⁶⁾、チューブによるイオン搬送⁽²⁷⁻²⁹⁾、正と負の帯電が混在するフィルムの除電⁽³⁰⁾、除電性能の効率化のため針電極の形状⁽³¹⁾、気体温度⁽³²⁾、ガス流量⁽³³⁾、気流効果⁽³⁴⁾の特性化などの研究がなされている。

また近年、コロナ放電式イオナイザによって生成されるイオン流場中の粒子挙動の解明が行われ、イオン電流計測⁽²⁾、窒素雰囲気中の電子のドリフトシミュレーション⁽³⁵⁾、次元解析モデル^(3, 4)によって調べられている。さらに、コロナ放電によって生成されるイオン流場中の粒子挙動の解明は、コロナ放電によって発生したイオン風を利用したプラズマアクチュエータのような工学的応用^(5, 6)やコロナ放電の構造解明による⁽³⁶⁻³⁸⁾大気圧プラズマ物理学への貢献につながるため期待されている。

コロナ放電方式静電気除去装置は、静止した帯電物を短時間で除電し、また、移動する帯電物に対しても帯電レベルを十分に低下させる性能を有する必要がある。除電性能としては「イオンバランス」「除電速度」がある。そして交流コロナ放電方式では、「誘導帯電」の影響が懸念されている。

「イオンバランス」とは、どれだけ0Vに近い状態まで除電できるか、そして、どれだけ0Vに近い状態を保持できるかを示し、除電対象物上の正と負の荷電粒子のバランスで決定される⁽³⁹⁾。

「除電速度」とは、帯電体表面に除電に必要なイオンを単位時間内にどの程度供給できるかにより決定され、イオナイザのイオン生成能力の向上によるイオン量の増加や、イオン輸送の効率化によって決定される⁽³⁹⁾。

「誘導帯電」とは、イオナイザの放電電極に交流の高電圧が印加されることで、交流の電界が発生する。この電界が、除電対象物に交流の電位を誘起させる事である。誘導帯電の影響で、静電気放電（ESD）の発生や潜在不良の発生を懸念されている

1.4 空気中の放電で生成されるイオン種について

図 1.1 に、自然大気中の電離源で生成される大気中のイオン種について記載する。まず、生成する正イオンについて述べる。自然大気中の電離源で大気中の分子が電離され、ただちに $\text{N}_2^+, \text{O}_2^+$ が生成する。その後、 10^{-3} 秒未満の反応時間を経て $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n$ が生成する。その後、 $0.1 \sim 1$ 秒の反応時間を経て $\text{NH}_4^+(\text{H}_2\text{O})_n$ が生成する。その後、1 秒以上の反応時間を経て X をピリジンなどのアミンとした、 $\text{XH}^+(\text{H}_2\text{O})_n$ が生成する。その後、 $10 \sim 10^3$ 秒を経て、生成したイオンは、対消滅および、空気中のエアロゾルへ付着する。

次に、生成する負イオンについて述べる。自然大気中の電離源で大気中の分子が電離され、ただちに $\text{O}_2^-(\text{H}_2\text{O})_n$ が生成する。その後、 10^{-3} 秒未満の反応時間を経て $\text{CO}_3^-(\text{H}_2\text{O})_n$ が生成する。その後、 $0.1 \sim 1$ 秒の反応時間を経て $\text{NO}_3^-(\text{HNO}_3)_m(\text{H}_2\text{O})_n$ が生成する。その後、1 秒以上の反応時間を経て、 $\text{HSO}_4^-(\text{H}_2\text{SO}_4)_m(\text{H}_2\text{O})_n$ が生成する。その後、 $10 \sim 10^3$ 秒を経て、生成したイオンは、対消滅および、空気中のエアロゾルへ付着する⁽⁴⁰⁾。

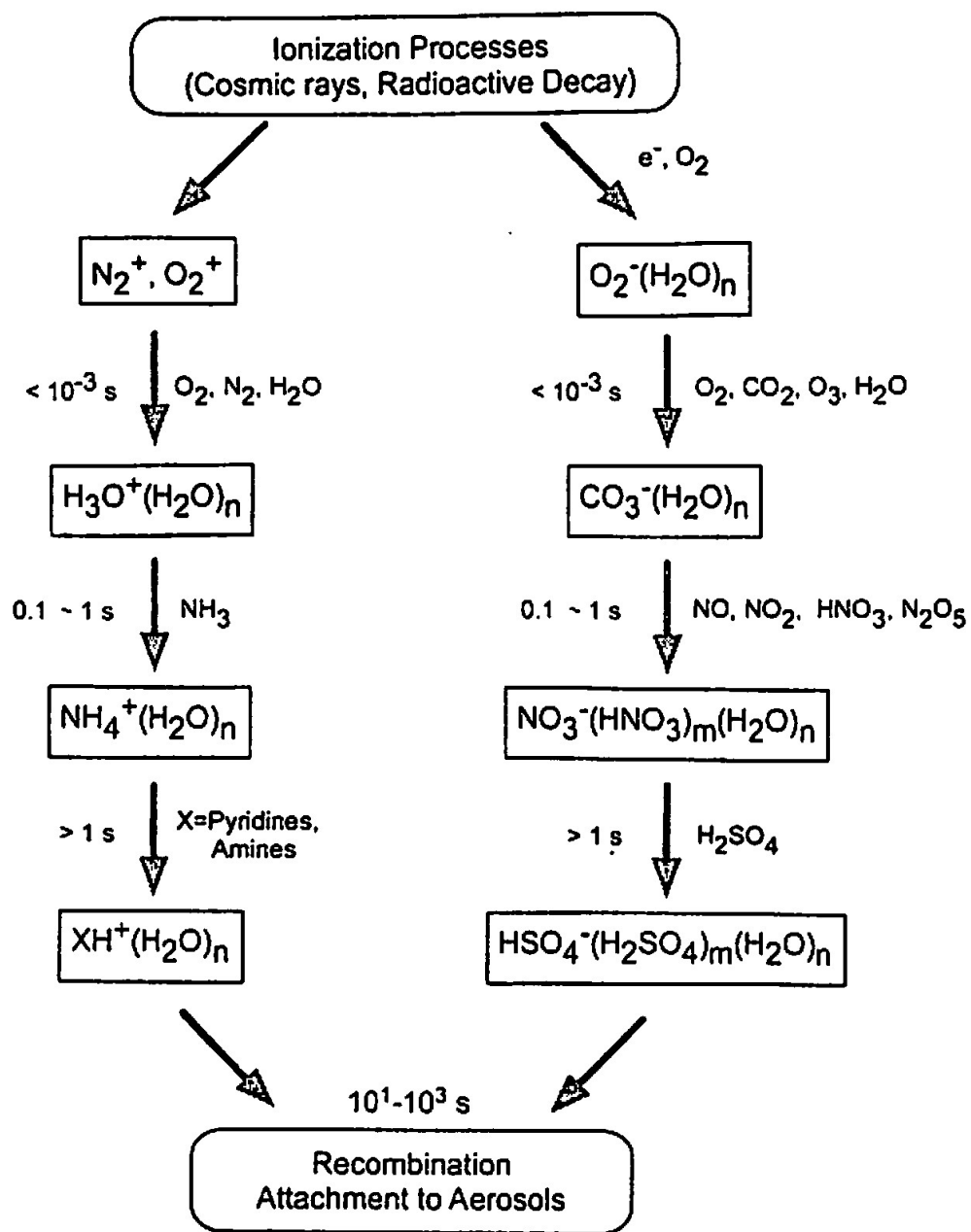


図 1.1 大気中の電離源で生成される大気中のイオン種⁽⁴⁰⁾

1.5 参考文献

- [1] 静電気学会編：新版 静電気ハンドブック(オーム社，1998)
- [2] A. Kazutoshi, Y. Fukada and T. Yasukawa : *J. Electrostat.* **66** (2008) 275-282
- [3] A. Ohsawa : *J. Electrostat.* **63** (2005) 767
- [4] A. Ohsawa : *J. Electrostat.* **65** (2007) 598
- [5] R. Mestiri, R. Hadaji and S. B. Nasrallah : *Phys. Plasmas* **17** (2010) 083503
- [6] R. Mestiri, R. Hadaji and S. B. Nasrallah : *Desalination* **220** (2008) 468-475
- [7] L. Levit, A. Wallash: *Journal of Electrostatics* **47** (1999) 305-313
- [8] 村田雄司：静電気の基礎と停電防止技術(日刊工業新聞社，1998)
- [9] 柴崎猛：アルファ線イオナイザ静電気除去装置，技術委員会 ESD コントロール分科会 (2004)
- [10] Y. Goshō, M. Yamada and M. Saeki : *Jpn. J. Appl. Phys.* **29** (1990) 950
- [11] H. Inaba, T. Ohmi, T. Yoshida and T. Okada : *J. Electrostat.* **33** (1994) 15
- [12] H. Inaba, T. Ohmi, M. Morita, M. Nakamura, T. Yoshida and T. Okada : *IEEE Trans. Semiconduct. Manufact.* **5** (1992) 359
- [13] A. Ohsawa : *J. Electrostat.* **63** (2005) 45-57
- [14] 大澤敦，静電気学会誌 **33**, 3 (2009) 115-120
- [15] C. G. Noll and P. A. Lawless : *J. Electrostat.* **44** (1998) 221
- [16] T. Nomura, K. Ishikawa, N. Aoki, Y. Fukuzaki, T. Todokoro and M. Inoue : *Jpn. J. Appl. Phys.* **30** (1991) 3223
- [17] C. G. Noll : *J. Electrostat.* **49** (2000) 169
- [18] L. Levit, A. Wallash : *J. Electrostat.* **47** (1999) 305-313
- [19] J. S. Chang : *IEEE Trans. Ind. Applicat.* **37** (2001) 1641
- [20] 中山智子，野村信雄，岡村善次，中島和朗，橋元文秋：静電気学会講演論文集 '08, (2008) 35
- [21] J. S. Chang and A. A. Berezin : *J. Electrostat.* **51-52** (2001) 64
- [22] 大久保貴広：修士学位論文(岩手大学 大学院 工学研究科 電気電子工学専攻, 2009)
- [23] 池内達：博士學位論文(岩手大学 大学院 工学研究科 電子情報工学専攻, 2009)
- [24] 池内達，高橋和貴，大久保貴広，藤原民也，電気学会論文誌 A, **129** (2009) 146-152
- [25] 大谷勝，電気学会プラズマ研究会資料，PST-07-4 (2007)
- [26] J. S. Chang, A. A. Berezin and C. G. Noll : *J. Electrostat.* **91** (2001) 1020-1025
- [27] 清水渡，永田秀海，和泉健吉，児玉勉：静電気学会誌 **29** (2005) 62
- [28] A. Ohsawa : *J. Phys., Conference Series* **142** (2008) 012014
- [29] M. Rickard, D. Dunn-Rankin, F. Weinberg and F. Carleton : *J. Electrostat.* **63** (2005) 711-716

- [30] 野村信雄：静電気学会講演文集 ‘96 (1996) 123
- [31] P. Intra and N. Tippayawong : *J. Electrostat.* **68** (2010) 254-260
- [32] C. G. Noll and P. A. Lawless : *J. Electrostat.* **54** (2002) 245-270
- [33] C. G. Noll and P. A. Lawless : *J. Electrostat.* **54** (2002) 271-282
- [34] L. Leger, E. Moreau and G. Touchhand : *IEEE Trans. Ind. Applicat.* **38** (2002) 1478-1485
- [35] K. Yoshida and H. Tagashira : *Jpn. J. Phys. D.* **9** (1976) 485
- [36] M. Goldman and R. S. Sigmond : *IEEE Trans. Electrical Insulation* **EI-17** (1982) 90-105
- [37] D. Antao, D. Staack, A. Fridman and B. Farouk : *Plasma Sources Sci. Technol.* **18** (2009) 1
- [38] J. S. Chang, P. A. Lawless and T. Yamamoto : *IEEE Trans. Plasma. Science.* **19** (1991) 1152-1166
- [39] キーエンス株式会社：除電気ハンドブック
- [40] 長門研吉，空气中的放電で発生するイオン種と化学反応過程：静電気学会誌，**35**，3(2011)102-107
- [41] 高橋克幸，“静電気対策技術としてのイオナイザの選定とその使用方法”，月間 EMC, No.317, 2014, pp.119-128
- [42] 村田雄司監修，“除電装置と除電技術”，2004, シーエムシー出版
- [43] 高橋克幸，後藤章，永田秀海，“静電気対策技術としてのイオナイザの選定とその使用方法”，クリーンテクノロジー，2015.2, pp.1-2
- [44] A. Ohsawa, “2-Delectrohydrodynamic simulations towards zero offset voltage with corona ionizers”, *J. Electrostat.*, **71**, 2013, pp.116-124
- [45] A. Ohsawa, “Computational comparison of charge neutralizations of conductors and insulators with corona ionizers”, *J. Electrostat.*, **71**, 2013, pp.801-807
- [46] A. Ohsawa, “Computer simulations of insulator charge neutralizations with a corona ionizer e Influence of initial surface charge distribution”, *J. Electrostat.*, **71**, 2013, pp.287-293
- [47] A. Ohsawa, “Efficient charge neutralization with an ac corona ionizer”, *J. Electrostat.*, **65**, 2007, pp.598-606
- [48] A. Ohsawa, “Modeling of charge neutralization by ionizer”, *J. Electrostat.*, Volume **63**, Issues 6–10, June 2005, pp.767-768

第2章 高速応答可能な除電評価装置の開発

本章では、静電気計測で一般に使用されているチャージドプレートモニタ(Charged plate monitor: CPM) の代わりとして使用できる除電評価装置を開発し、その特性を、市販されているチャージドプレートモニタと比較し、評価する。

2.1 概要

静電気計測にはチャージドプレートモニタが使用されている。しかし、市販されているチャージドプレートモニタは周波数応答特性が最大 80 Hz 程度と低い。このため、除電を行う際の電荷減衰には応答できるものの、80 Hz 以上の静電誘導には応答できないという欠点がある。したがって、市販のチャージドプレートモニタではイオナイザから生成される空気イオンの静電誘導による影響を評価することが難しい。除電における荷電粒子の挙動は送風だけでなく静電誘導によっても影響される。そのため、除電における荷電粒子の挙動を解析するには、高速応答できるチャージドプレートモニタを開発することで、静電誘導とイオンの流入による影響を分離する必要がある。また、市販のチャージドプレートモニタは高価であるため、より安価な製品を製作するために、オペアンプとコンデンサからなる容量分配型の除電時間評価装置を製作した。そしてその特性を市販のチャージドプレートモニタ (今回は Trek, Model 158) と比較・評価した。

2.2 回路構成

図 2.1 に除電時間評価装置の回路図を示す。除電時間の評価には、高速応答性を可能とするため、オペアンプとコンデンサによって構成した装置を用いた。装置は、イオン捕集プレート、電荷測定コンデンサ C_1 (WIMA, FKP2-33/1000/10, 3 直列, 合計静電容量 33 pF), C_2 (KEMET, PHE448SB4100JR06, 1 nF), オペアンプ (Texas Instruments, OPA454) で構成している。イオン捕集プレートには $150 \times 150 \text{ mm}^2$ の面積のステンレス製の金属板を用い、 C_1 に接続している。電荷測定用コンデンサ C_1, C_2 は、漏れ電流を防ぐため、フィルムコンデンサを用いた。このキャパシタによる分圧で、金属板の電圧 (Plate voltage) は除電時間評価装置の出力電圧 (v_o) に対して 85 倍の値となる。イオン捕集プレートの電位は、 C_1 と C_2 で分圧され、ボルテージフォロワに入力される。オペアンプの入力インピーダンスは $10 \text{ T}\Omega$, バイアス電流は $\pm 100 \text{ pA}$ 以下であり、電荷測定用コンデンサに蓄積した電荷漏洩を抑制している。また、OPA454 は $\pm 50 \text{ V}$ の電圧範囲で動作でき、イオン捕集プレートには最大 $\pm 4.25 \text{ kV}$ まで印加することができる。

図 2.2 には除電時間評価装置の配線図を示している。図 2.3 に除電時間評価装置の概観を示す。OPA454 は表面実装用のため、変換基板 (アスラボ, MSOIC&MSOP-DIPD-8*10) を使用してユニバーサル基板 (サンハヤト, ICB-88G-PBF) 用に変換している。

図 2.4 には除電時間評価装置とイオン捕集プレートを接続した図を示す。イオン捕集プレートは 3 直列にした 33 pF のコンデンサの先端に接続している。

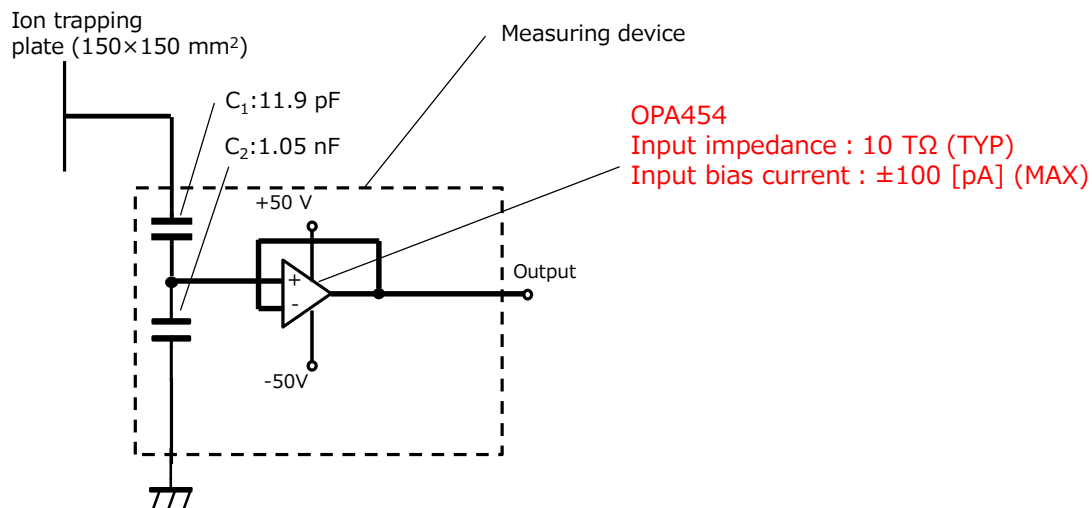


図 2.1 除電時間評価装置の回路図

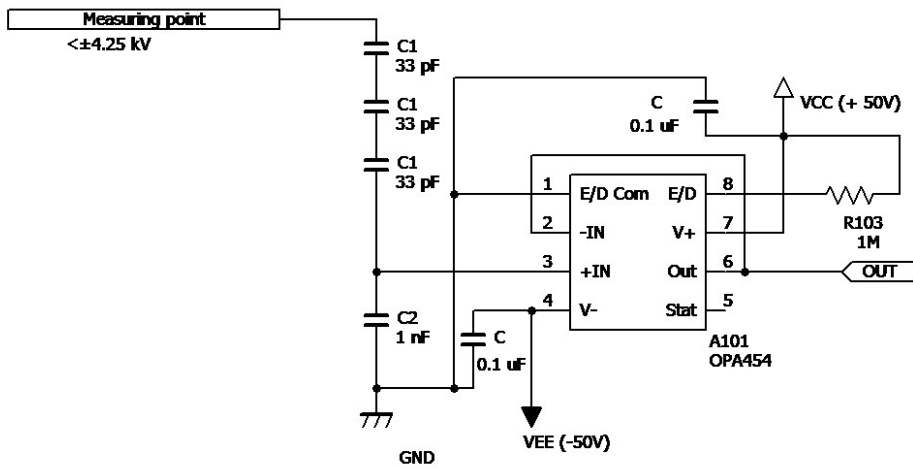


図 2.2 除電時間評価装置の配線図

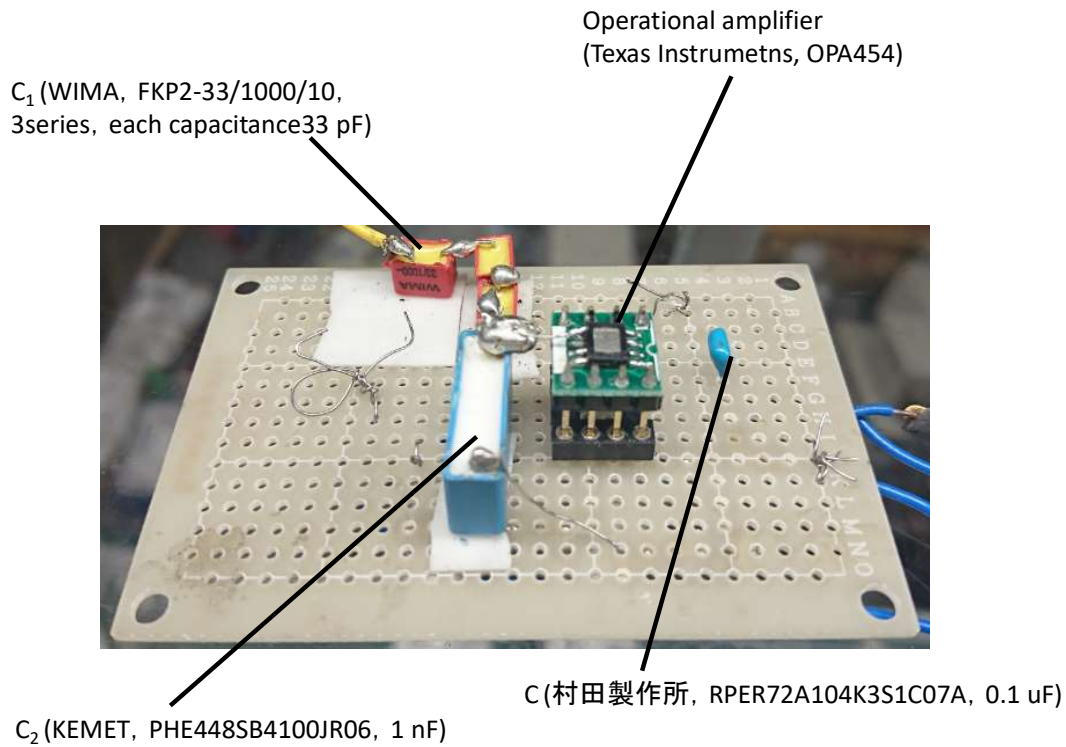


図 2.3 実際の除電時間評価装置の概観 (回路部)

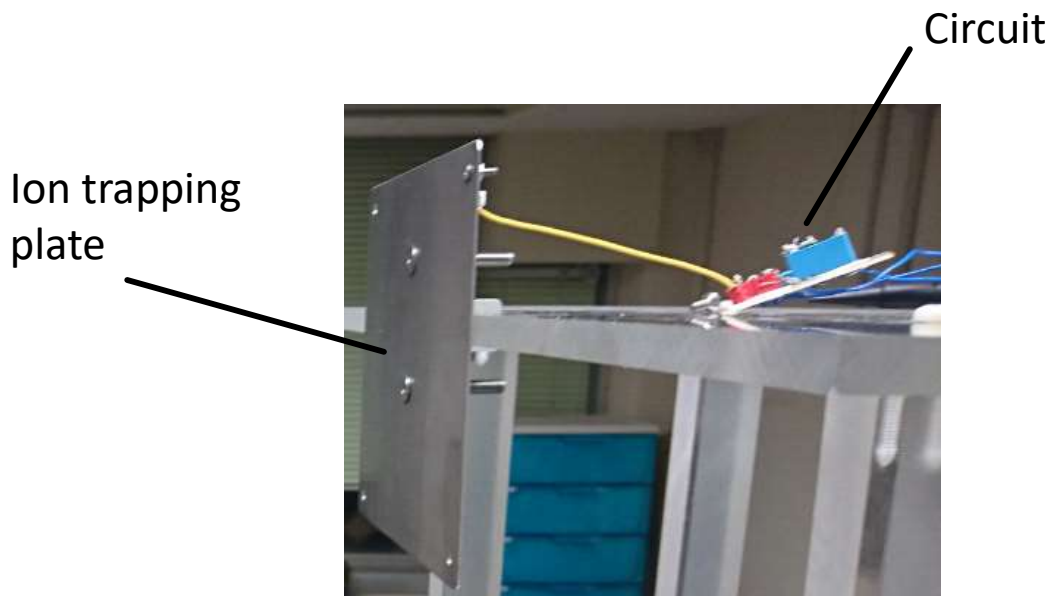


図 2.4 実際の除電評価装置の概観 (イオン捕集プレートに接続)

図 2.5 に C_1 を求める際の実験方法を示す. C_1 については, チャージドプレートモニタ (シシド静電気, H0601, 20 pF) を 1 kV に帯電させた後に C_1 をチャージドプレートモニタに接触させ, キャパシタンスの値を求めた. 手順としては, まず, チャージドプレートモニタを 1 kV に帯電をさせて, 帯電させる. 帯電電荷量は

$$Q=CV$$

より

$$Q=(20\text{p})\times(1\text{k})=20\text{ [nC]} \quad (1)$$

となる. その後に C_1 をチャージドプレートモニタのプレートに接続し, チャージドプレートモニタの読み値からチャージドプレートモニタの電圧 V_x を測定する. これにより以下の式から Q_{CPM} [C] が得られる.

$$Q_{\text{CPM}}=C_{\text{CPM}}\times V_x \quad (2)$$

また, V_x を用いた以下の式から Q_1 [C] が求まる.

$$Q_1=C_1\times V_x \quad (3)$$

今回は C_1 が未知数なので電荷保存則を用いて以下の式

$$Q_1+Q_{\text{CPM}}=Q \quad (4)$$

を立てて①~④を利用すると,

$$V_x\times(C_1+20\text{p})=20\text{ n} \quad (5)$$

となり

$$C_1=(20\text{p}/V_x)-20\text{ p}$$

となって, C_1 が求まる.

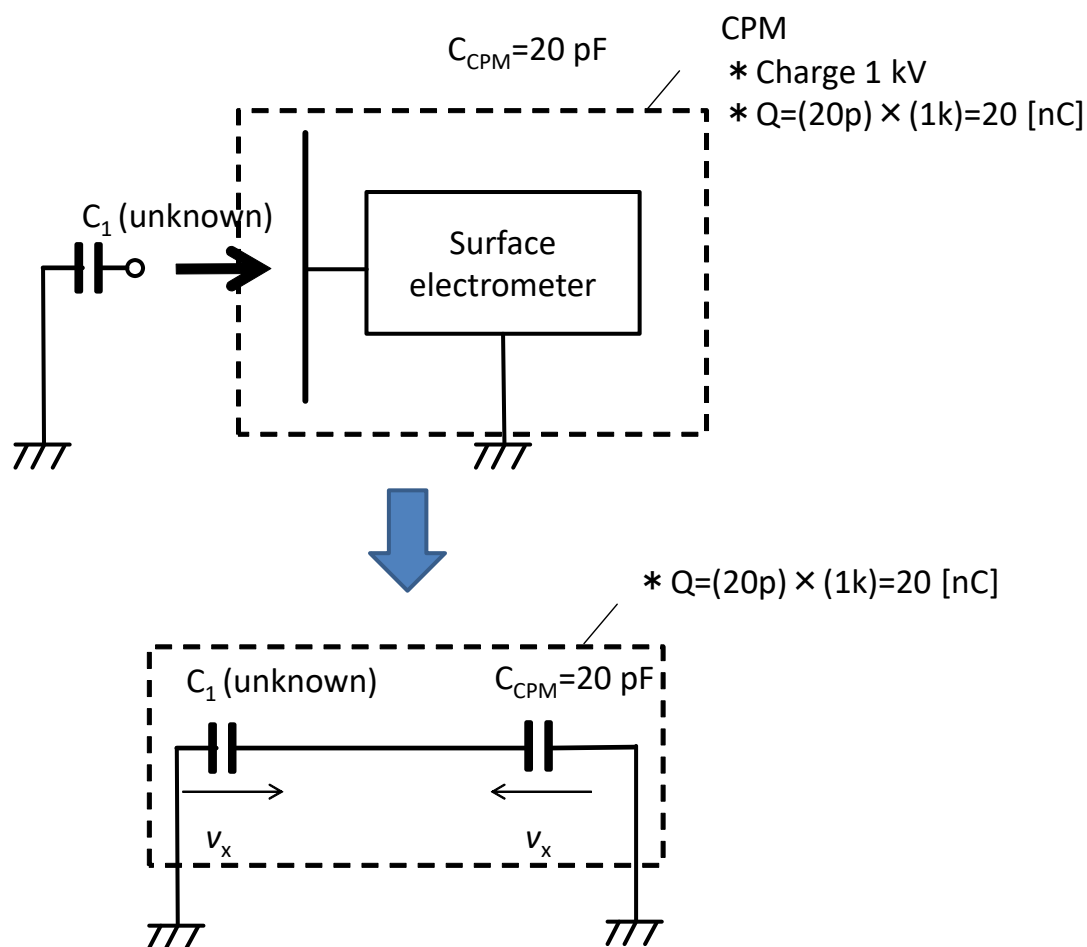


図 2.5 C_1 を求める際の実験方法

図 2.6 に、ボルテージフォロアに接続される合成容量を算出するための回路を示す。チャージドプレートモニタは EOS/ESD 規格や RCJ 規格によりイオン捕集プレート側から見た合成容量が $20 \pm 2 \text{ pF}$ と定められている。しかし、除電評価装置は浮遊容量の影響が避けられず、合成容量の調整が難しい。このため、合成容量を帯電させた後にその放電波形を取得し、その時定数から浮遊容量を含めた合成容量を算出し、合成容量の値を規格内に収めた。手順としては、まず、直流電源 (シンド静電気, スタチラー 35S3-100-N-1) をイオン捕集プレートに接触させ、 -1 kV で帯電させる。この後に、イオン捕集プレートに放電抵抗 (TE Connectivity, HB31G0FZRE, $1 \text{ G}\Omega$) を接触させ、合成容量から電荷を放電させる。この放電波形を元にしてエクセル上でフィッティングを行い、合成容量の値を求める。

図 2.7 にフィッティング結果を示す。フィッティングに使う計算式は RC 放電の式となり放電で抵抗に生じる電圧を v 、放電電圧のピーク値を A 、時間を t 、放電抵抗を R 、回路の合成容量を C_c として、

$$v = A \exp(-t/RC_c)$$

と表される。この式から C_c の値が求まる。図 2-6 から求めた 3 つの合成容量の平均値より、 21.8 pF となる。

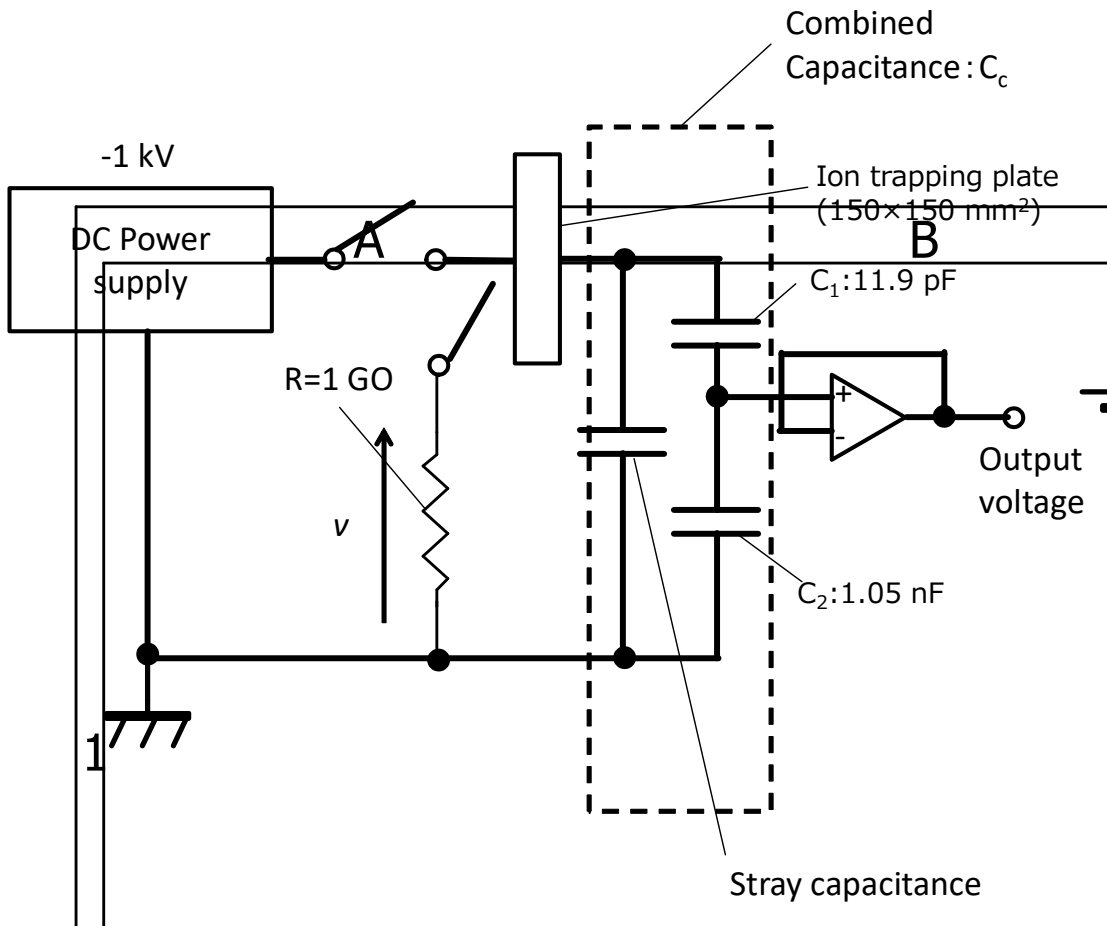


図 2.6 ボルテージフォロアに接続される合成容量を算出するための回路

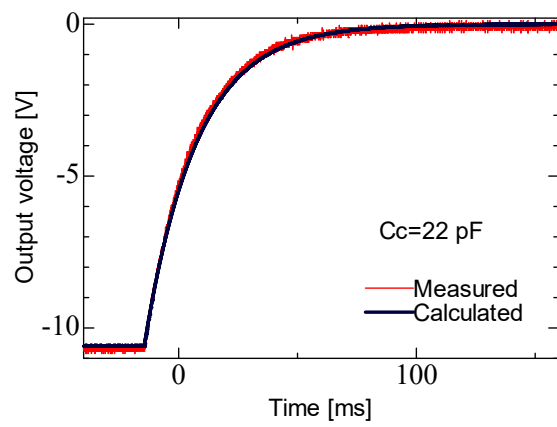
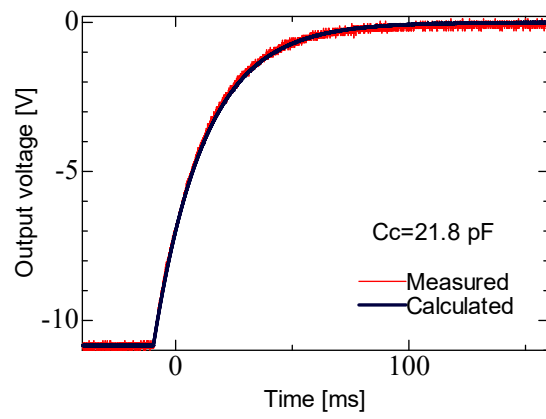
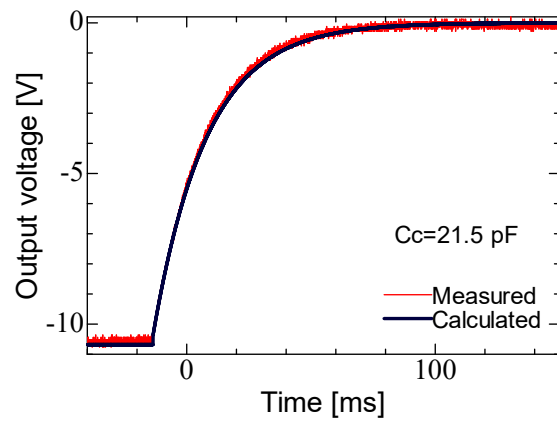


図 2.7 フィッティング結果

2.3 装置の特性評価

2.3.1 周波数に対する応答性

図 2.8 に静電誘導特性の評価に用いた実験装置を示す。150×150 mm² の面積を持つステンレス製の金属板を 100 mm 離し 2 枚設置した。一方の金属板に、高圧電源 (Trek, MODEL615-10) を接続し、正弦波を印加した。振幅は 2 kVp-p とし、周波数を 0.1Hz から 10 kHz まで変化させた。もう一方の金属板には、除電時間評価装置を接続し、金属板に誘導される電圧を測定した。高圧電源が接続された金属板の電位と、評価装置が接続された金属板の電位 ($85 \times v_0$) のゲインは次式を用いて求めた。

$$\text{Gain} = (85 \times v_0) / v_p$$

また、高圧電源が接続された金属板の電位と v_0 の位相差は、電圧が 0 V を通過するときの時間の差に 360 を乗じ、それに周波数をかけたものから求めた。

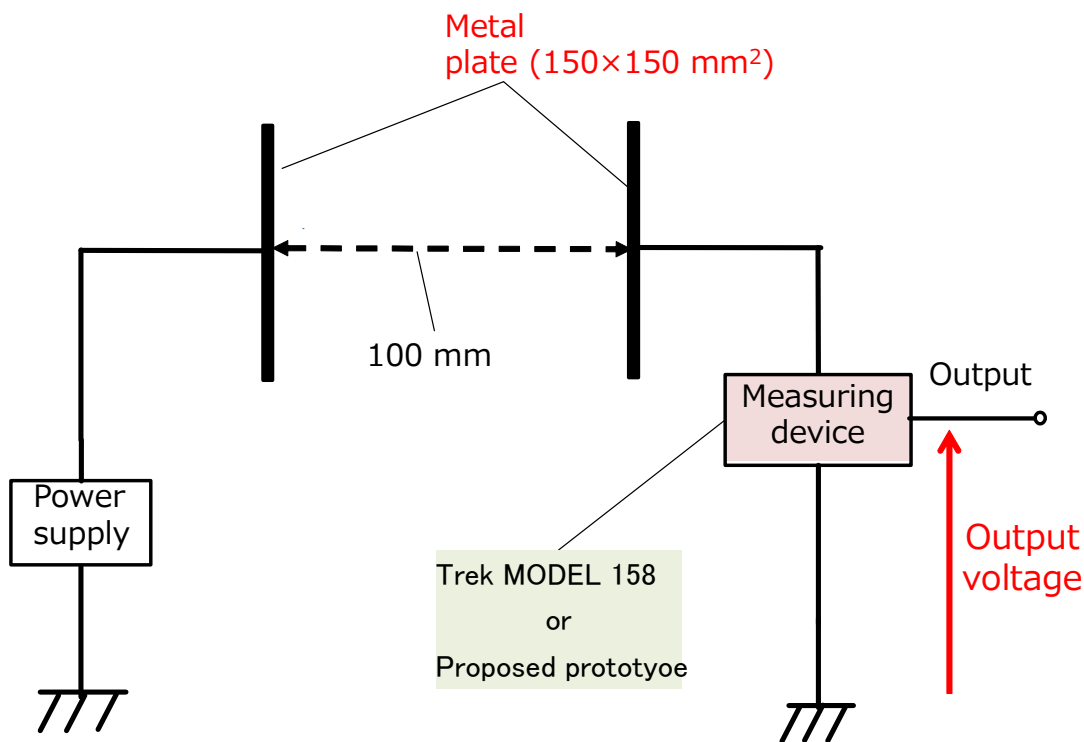


図 2.8 静電誘導特性の評価に用いた実験装置

図 2.9 に除電時間評価装置を用いて取得した静電誘導波形を示す。また、図 2.10 に、市販のチャージドプレートモニタ (Trek INC, Model158) を用いて取得した静電誘導波形の例を示す。周波数は 100 Hz で行っている。図より、除電時間評価装置は、印加電圧と同位相の電圧を出力するが市販のチャージドプレートモニタでは位相ずれが生じ始めていることがわかることがわかる。

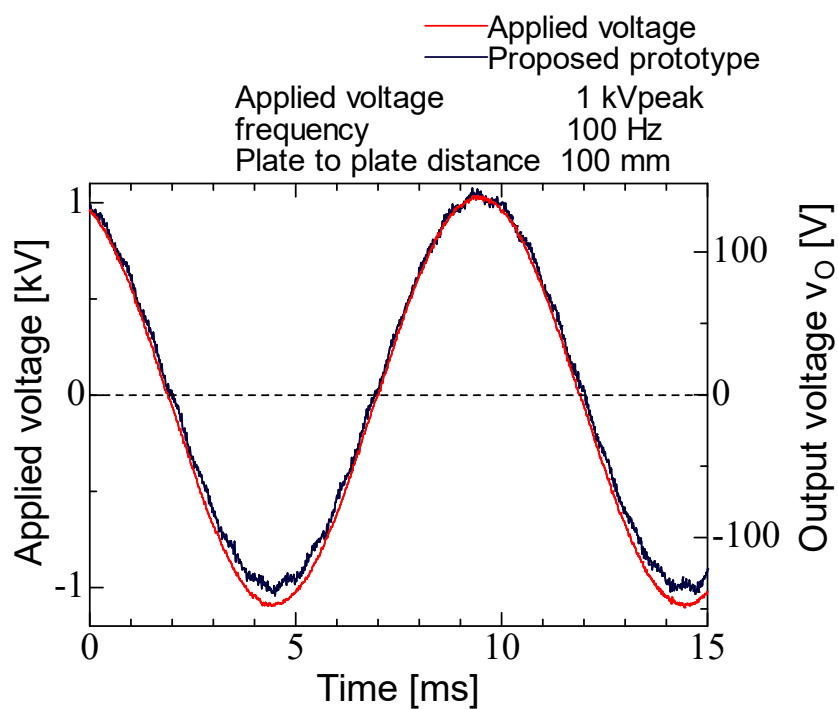


図 2.9 除電評価装置での静電誘導

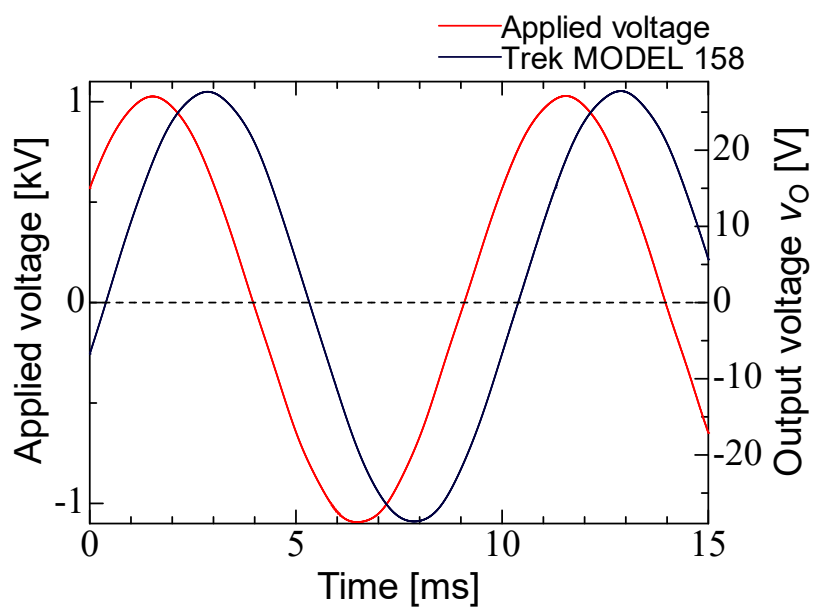


図 2.10 市販のチャージドプレートモニタ (Trek Model158)

図 2.11 に、除電時間評価装置および市販のチャージドプレートモニタのゲイン特性および位相特性を示す。図より、除電時間評価装置でのゲイン特性・位相特性はともに周波数により変化しないが市販のチャージドプレートモニタでは、10 Hz 以降からゲイン特性・位相特性共に徐々に低下していくことがわかる。

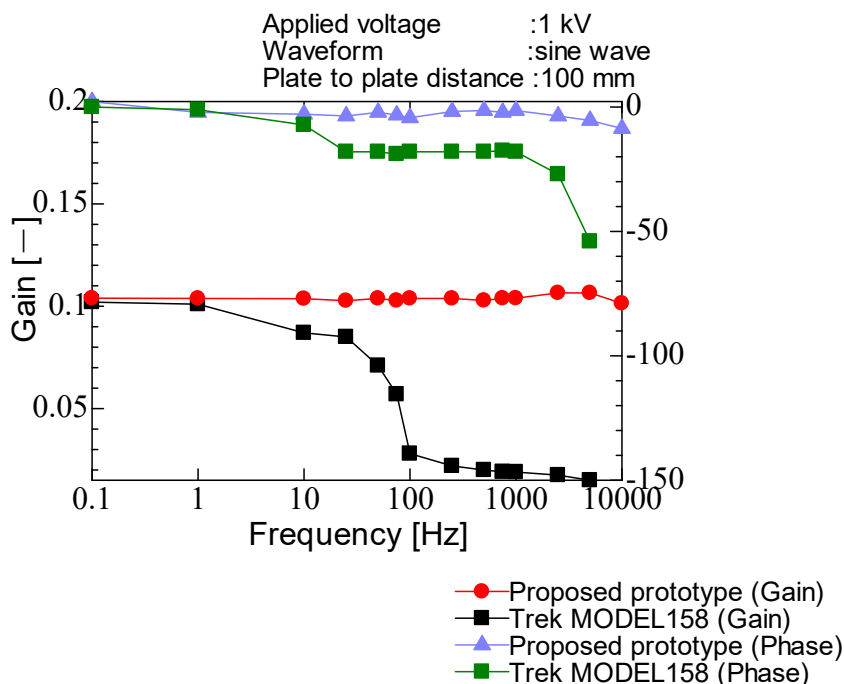


図 2.11 ゲイン特性・位相特性

2.3.2 CPM との除電波形の比較

図 2.12 に除電波形を取得する際の実験系を示す。また図 2.13 に放電領域の概観を示す。タンガステン製の針 (長さ: 16 mm, 半径: 0.75 mm, テーパー角: 20°, 曲率半径: 0.075 mm) を高圧電極に接続し、高電圧針電極を製作した。また、ステンレス製のリング(内径: 12.585 mm, 外形: 12.975 mm) を、その中心が針の先端になるよう設置した。リングは、100 k Ω の抵抗を介し、接地することにより、接地電極として用いた。針の後方には、エアノズル (いけうち, 1/4MTF-R8-010PP-IN) により圧縮空気を注入し、針前方に送風した。風速は針先 5 mm の位置で測定し、17.1 m/s とした。針前方には除電時間評価装置のイオン捕集プレートを設置し除電波形を取得した。針とイオン捕集プレート間の距離は 300 mm とした。針への印加電圧は正弦波であり、振幅を 13 kVp-p とし、周波数を 10, 100, 1 kHz の範囲でそれぞれ変化させた。また、除電後のイオン捕集プレートの電位 (イオンバランス) が 0 V となるように、印加電圧をバイアスして、除電波形を取得した。

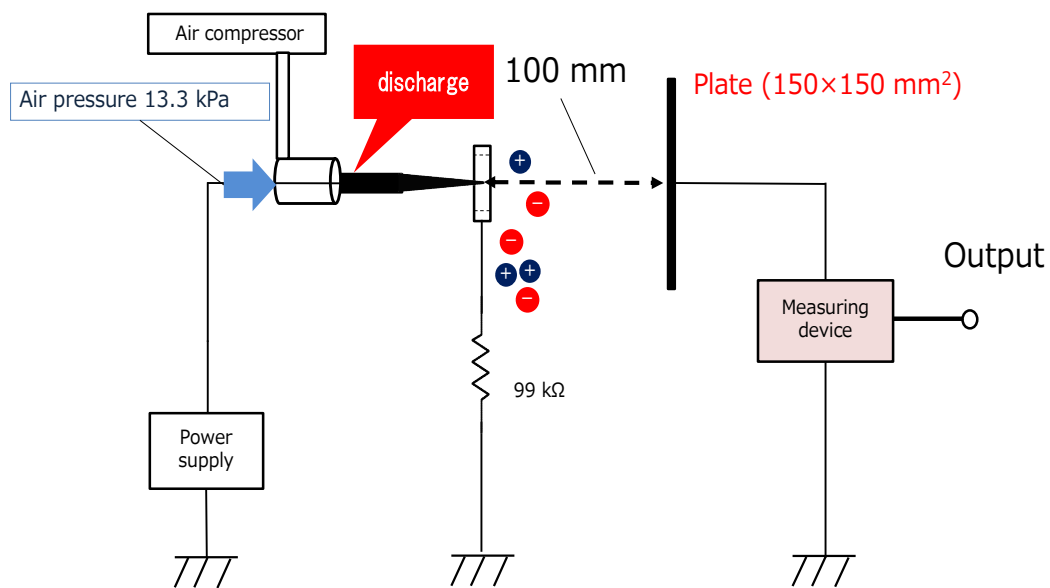


図 2.12 除電波形を取得する際の実験系

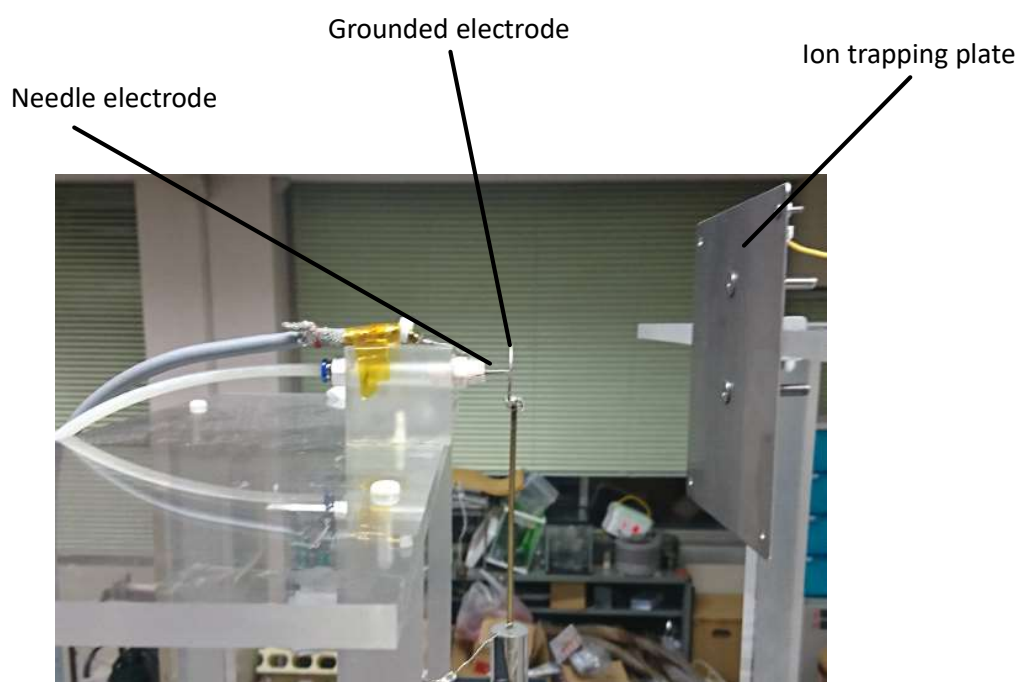


図 2.13 放電領域の概観

図 2.14 に周波数を変化させた場合の除電波形の比較を示す。図より周波数を変化させた場合は、除電時間評価装置と市販のチャージドプレートモニタの除電波形は一致し、製作した除電評価装置がチャージドプレートモニタと同様に使用できるということがわかった。

図 2.15 に風速を変化させた場合の除電波形の比較を示す。図より、風速を変化させた場合でも、除電時間評価装置と市販のチャージドプレートモニタの除電波形は一致し、製作した除電評価装置がチャージドプレートモニタと同様に使用できるということがわかった。

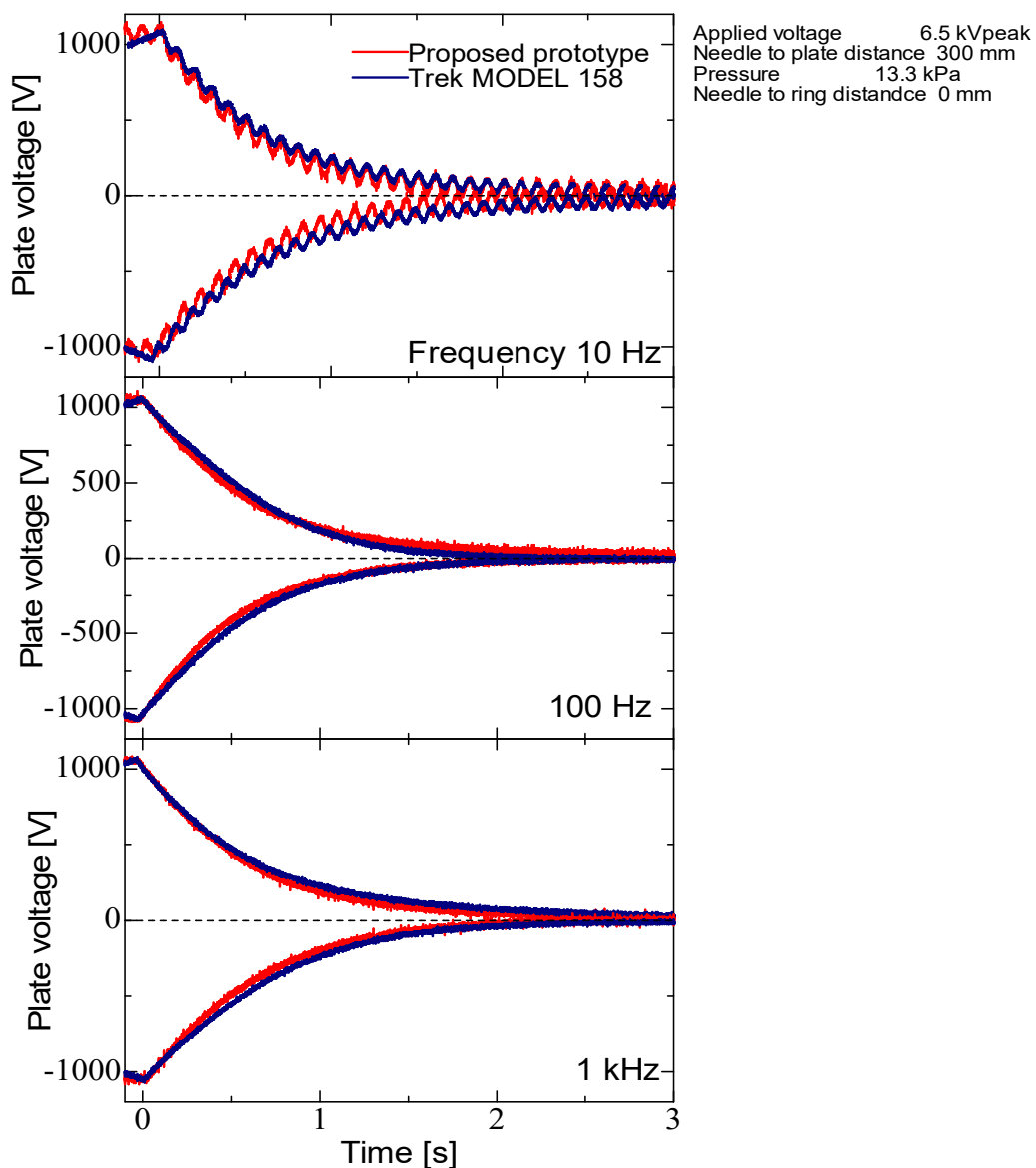


図 2.14：周波数を変化させた場合の除電波形の比較

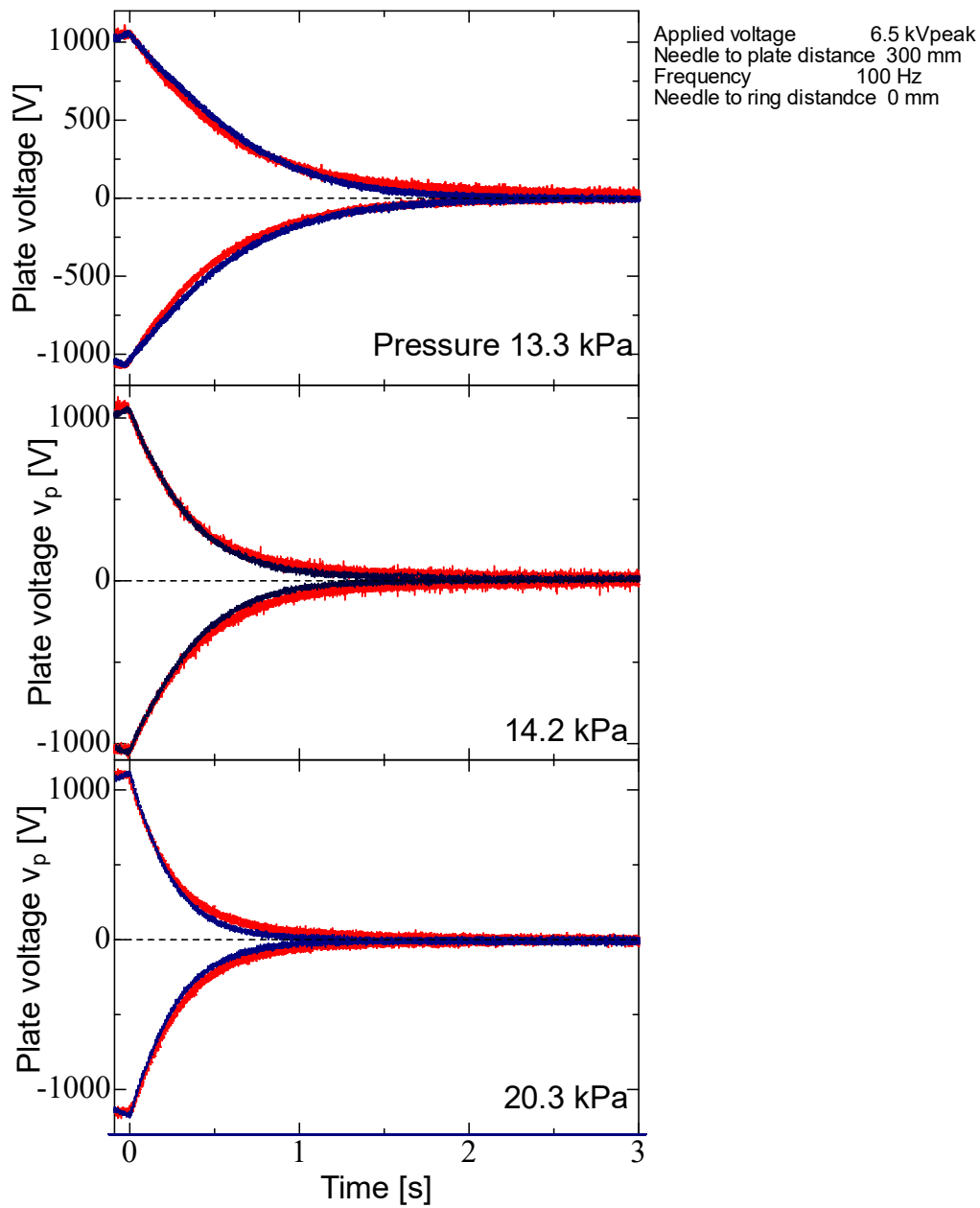


図 2.15 風速を変化させた場合の除電波形の比較

2.4 まとめ

本章では、10 kHz 以上の高速応答を可能とする、除電時間評価装置を開発し、その特性を評価した。この装置は、100 Hz 以上の静電誘導に応答でき、かつ、安価な除電時間評価装置を製作するために、オペアンプとコンデンサからなる容量分配型の除電時間評価装置を製作した。そしてその特性を市販のチャージドプレートモニタと比較・評価した。

結果として、製作した除電評価装置はイオン捕集プレートに最大±4.25 kV まで印加することができ、イオン捕集プレート側から見たキャパシタンスは 21.8 pF であった。また、静電誘導に対する応答性としては、0.1 Hz～10 kHz までゲイン特性・位相特性共に減衰しないことがわかった。そして、風速および周波数を変化させた場合でも市販のチャージドプレートモニタと同一の除電波形を出力し、除電を評価する装置として使用可能であることがわかった。

2.5 参考文献

- (1) H. Kaga, K. Takahashi, K. Takaki, S. Yamaguchi, H. Nagata, T. Yaegashi, “Development of rapid response evaluation device for static elimination”, The 4th Japan-Taiwan Workshop on Plasma Life Science and Technology (JTPL 2017), (2017.6)
- (2) 加賀 裕章, 高橋 克幸, 高木浩一, 高橋克幸, 高木浩一, 山口晋一, 永田秀海: “コロナ放電を用いた除電における印加電圧の周波数の影響”, 第 41 回静電気学会全国大会, 一般公演 D 静電気障災害, pp.59-62, 関西大学 千里山キャンパス (2017, 9)
- (3) 加賀 裕章, 高橋 克幸, 高木浩一, 高橋克幸, 高木浩一, 山口晋一, 永田秀海: “コロナ放電式イオナイザを用いた除電の高効率化”, 応用物理学会東北支部第 72 回学術講演会, B-1 プラズマエレクトロニクス, 秋田大学 手形キャンパス (2017, 12)
- (4) 加賀 裕章, 久保 勝也, 高橋 克幸, 高木 浩一, 山口 晋一, 永田 秀海 “コロナ放電を用いた除電における印加電圧の周波数の影響”, 第 19 回静電気学会春季講演会, 東京大学 工学部 2 号館, (2018.3)

第3章 除電における印加電圧・周波数の影響

3.1 はじめに

静電気計測には、一般にチャージプレートモニタ (Charged plate monitor: CPM)が使用されるが、市販の安価なものは周波数特性が 100 Hz 程度と低い。したがって、市販のものではイオナイザから生成される空気イオンの静電誘導による影響を評価することは難しい。そこで本研究グループでは、第二章で開発した 10 kHz 以上の高速応答可能なイオン測定回路を使用した。本章では、まず開発したイオン測定回路を簡潔に述べる。次に、特性評価に用いた実験系の構築について述べる。次に、除電に寄与する荷電粒子挙動の解明を目的として、印加電圧波形を矩形波とし、周波数や風速を変化させた場合の放電特性、除電特性の評価結果を述べる。前者は、電圧印加時の放電電流波形を取得し、それを基に放電電荷量や換算電流等を計算した。後者に関しては、帯電物に見立てた金属プレートの残留電位 (イオンバランス)、プレートを帯電させ、ある値に減衰するまでの時間である除電時間等の計測を行った。次に、プレートへの荷電粒子の流入を妨げるように送風を行った場合の特性評価の結果を述べる。この評価に関しては、除電空間における荷電粒子の分散や移動度の影響を実験的に調査することを目的としている。また、プレートの大きさの影響を調べるために、プレートサイズを変化させた場合の特性評価を行った。最後に、印加電圧の Duty 比を変化させた場合の特性評価の結果を述べる。

3.2 実験系の構築および実験内容

3.2.1 イオン測定回路

図 3.1 に、イオン測定回路の回路図を示す。本回路は、イオン捕集プレート、電荷測定コンデンサ C_1 (WIMA, FKP2O100331D00K, 3 直列, 静電容量 33 pF), C_2 (KEMET, PHE448SB4100JR06, 1 nF), オペアンプ (Texas Instruments, OPA454) で構成している⁽¹⁾。イオン捕集プレートには $150 \times 150 \text{ mm}^2$ の面積のステンレス製の金属板を用い、 C_1 に接続している。電荷測定用コンデンサ C_1 , C_2 は、漏れ電流を防ぐため、フィルムコンデンサを用いた。このキャパシタによる分圧で、金属板の電圧 (Plate voltage : v_p) はイオン測定回路の出力電圧 (Output voltage : v_o) に対して 85 倍の値となる。イオン捕集プレートの電位は、 C_1 と C_2 で分圧され、ボルテージフォロワに入力される。オペアンプの入力インピーダンスは $10 \text{ T}\Omega$ 、バイアス電流は $\pm 100 \text{ pA}$ 以下であり、電荷測定用コンデンサに蓄積した電荷漏洩を抑制している。また、OPA454 は $\pm 50 \text{ V}$ の電圧範囲で動作でき、イオン捕集プレートには最大 $\pm 4.25 \text{ kV}$ まで印加することができる。イオン捕集プレートと接地間の容量は、 C_1 , C_2 の静電容量および、配線の浮遊容量の合成容量となり、 21.8 pF となる。

図 3.2 に、イオン測定回路の外観を示す。OPA454 は表面実装用のため、変換基板 (アス

ラボ, MSOIC&MSOP-DIPD-8*10) を使用し, ユニバーサル基板 (サンハヤト, ICB-88G-PBF) 用に変換している. 浮遊容量を小さくするため, 図のように空中での配線も行っている. 図 3.3 に, イオン測定回路をイオン捕集プレートに接続した外観を示す. イオン捕集プレートは 3 直列した 33 pF のコンデンサの先端に接続している. このコンデンサにより回路の合成容量を 21.8 pF に調整している.

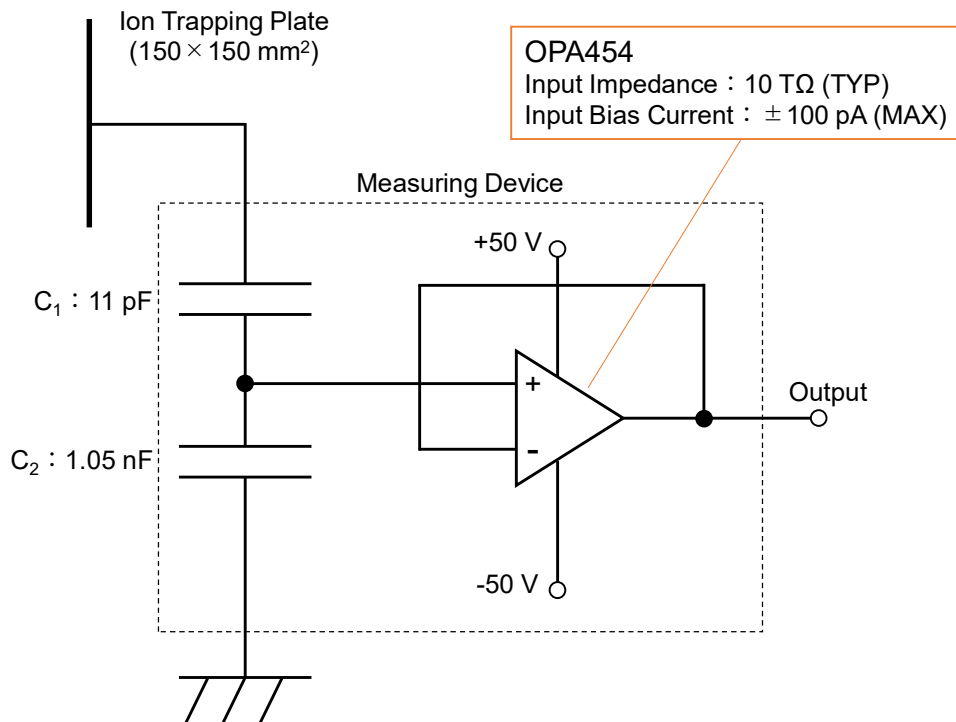


図 3.1 イオン測定回路

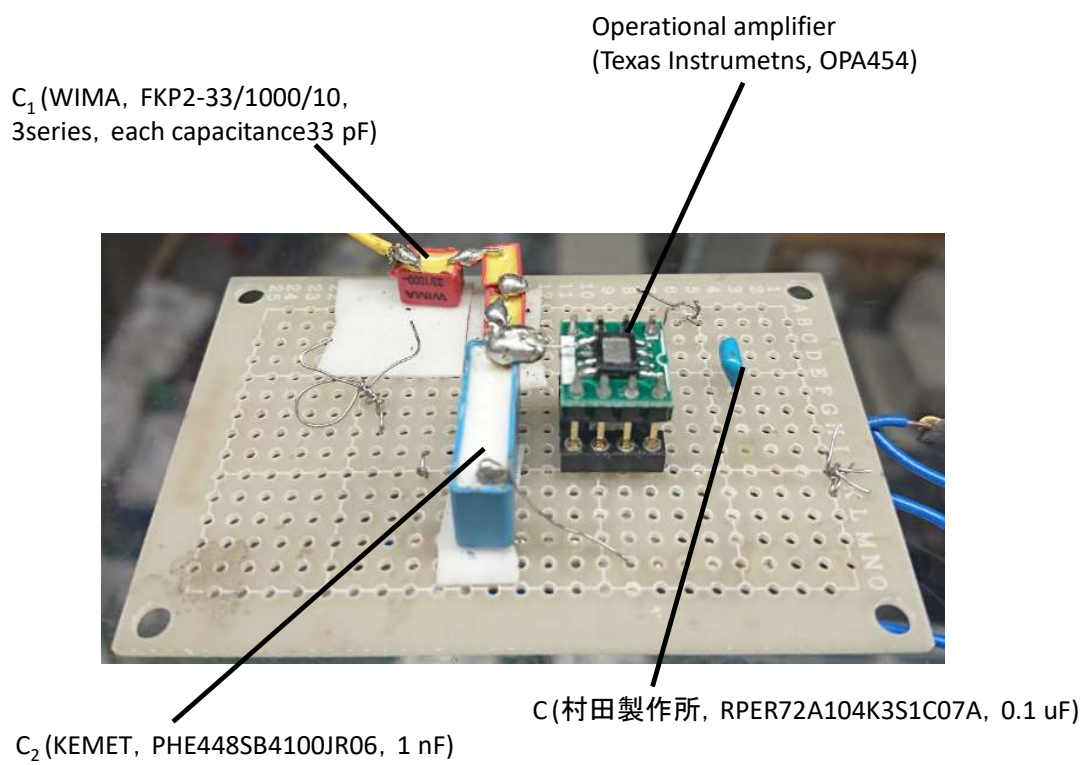


図 3.2 イオン測定回路の外観 (回路部)

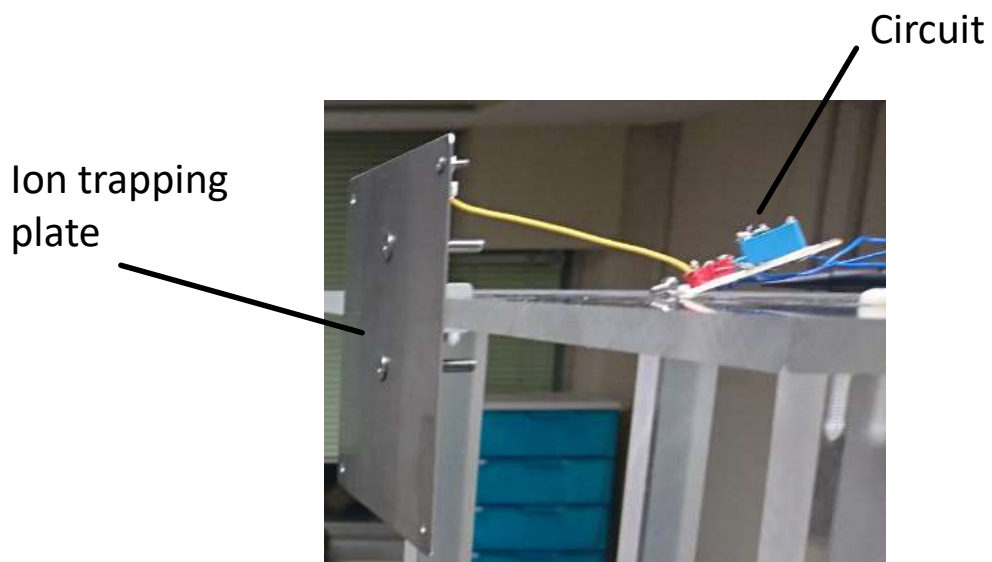


図 3.3 イオン測定回路の外観 (イオン捕集プレートに接続)

3.2.2 本系の概略

図 3.4 に、放電電流波形の取得およびコロナ放電方式イオナイザでの除電における除電時間、イオンバランスの評価に用いた実験系の概略図を示す。タングステン製の針（長さ：16 mm，半径：0.75 mm，テーパ角：20°，曲率半径：0.075 mm）を高圧電極に，ステンレス製のリング（内径：12.6 mm，外径：13 mm）を接地電極として用い，針電極とリング電極間でコロナ放電を発生させ，イオン生成を行っている。生成されるイオンは， H_3O^+ ， NH_4^+ ， CO_3^- ， NO_3^- およびそれらのクラスターイオンなどの正負イオンである⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。針の先端は，リング電極の中心となるように設置した。針電極には高圧アンプ (Trek, Model 20/20C-HS) を用い矩形波を印加した。印加電圧の波形出力はファンクションジェネレータ (nF, WF1974) を用い，この出力を高圧アンプに入力することで 2000 倍に増幅している。振幅値は 7~13 kVp-p，周波数は 10~5000 Hz，Duty 比は 5~95% の範囲でそれぞれ変化させた。リング電極は 99 k Ω の抵抗を介し接地し，抵抗での電圧降下を放電電流として計測した。針の後方には，エアノズル (いけうち, 1/4MTF-R8-010PP-IN) を設置し，エアコンプレッサ (HITACHI, 0.75LE-8S) により圧縮空気を注入し針前方に送風した。圧縮空気の圧力調整はレギュレータ (NIHON SEIKI, BN-3RT1100-6-2K) を用いて行い，7~20.3 kPa の範囲で調整した。針前方には，イオン測定回路のイオン捕集プレートを設置し除電時間を測定し，針とイオン捕集プレート間の距離は 50~500 mm とした。除電時間の測定には，直流電源 (シシド静電気, スタチラー-35S) を用い，イオン捕集プレートに ± 1.1 kV で帯電させた。また，静電誘導を取得する目的で，高電圧部近傍に 99 k Ω の抵抗またはイオン測定回路を介して接地した金属棒 (真鍮, 長さ：100 mm) を設置した。各特性の計測には，デジタルオシロスコープ (Tektronix, DPO2024)，高圧プローブ (PINTEK, HVP-39pro)，プローブ (Tektronix, P6139A) を用いた。また，Duty 比変化での特性評価の際には，一部デジタルオシロスコープ (Tektronix, DPO4104B) を使用している。

図 3.5 に，放電領域の外観を示す。図 3.6 に，針電極からイオン捕集プレート間の風速分布を示す。風速の計測には熱線式風速計 (TENMARS, TM-4001) を使用し，針電極先端からイオン捕集プレートの中心を結ぶ直線上の 5~95 mm (5 mm 間隔) の範囲で行った。図より，風速は針電極から遠ざかるに伴い，指数関数的に減衰することがわかる。表 3.1 には，エアコンプレッサの圧力を 7~20.3 kPa で変化させたときの針電極から 5 mm での風速を示している。

表 3.1 各空気圧力における針電極から 5 mm での風速

Pressure [kPa]	Air velocity [m/s]
7	8.7
8	9.87
9.3	11.3
12.5	15.9
13.3	17.1
14.2	18.9
20.3	40.2

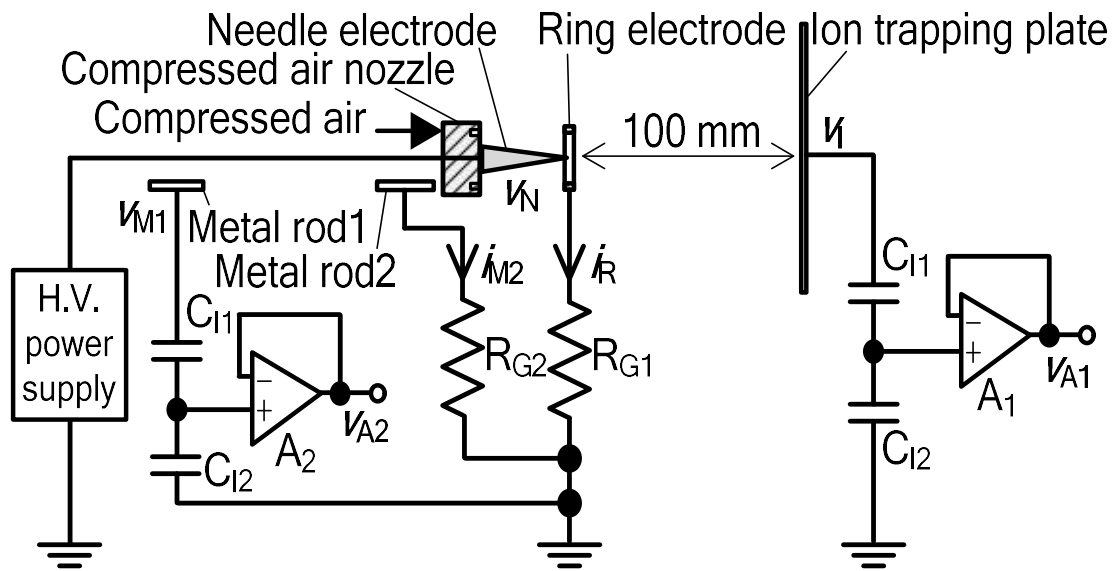


図 3.4 放電特性および除電特性の評価に用いた実験系の概略図

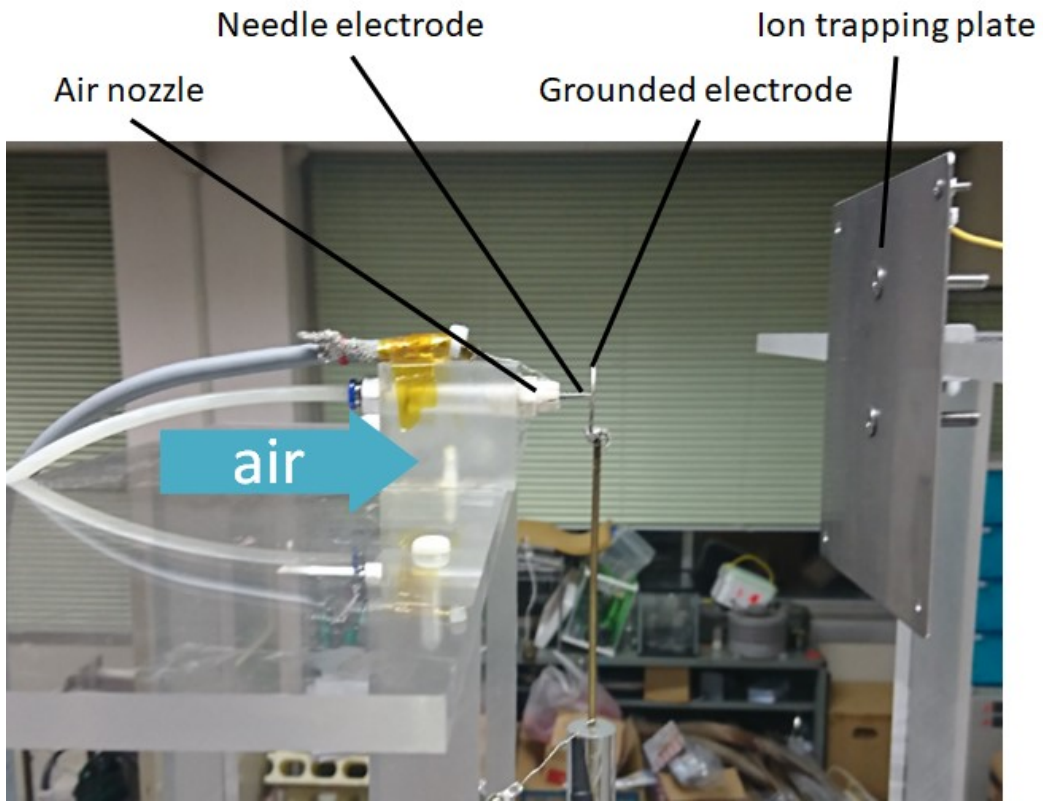


図 3.5 本系における放電領域の外観

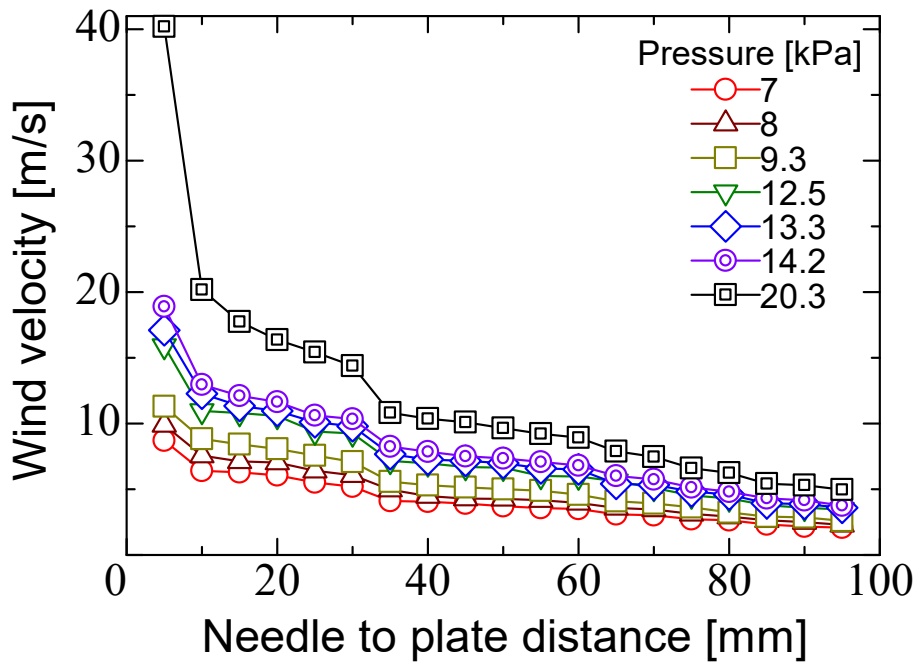


図 3.6 針電極とイオン捕集プレート間の風速分布

コロナ放電により生成されたイオンは、電界によるドリフトと風によってプレート方向に移動する。針電極とプレート間の電界強度 $E(x)$ はラプラス場として式 (3.1) の角田の式より計算される⁽⁵⁾。

$$E(x) = \frac{1}{|x| + \left(\frac{\rho}{4}\right)} \frac{V}{\ln\left(1 + \left(\frac{4d}{\rho}\right)\right)} \quad (3.1)$$

ここで、 d はギャップ長、 ρ は針先端曲率半径、 x は針先からの距離、 V は印加電圧である。図 3.7 に、 $\rho = 200$ [μm], $d=100$ [mm], $V=4.0$ [kV] の条件で計算した電界分布を示す。図より、針電極近傍は数十 kV/cm 程度の高電界であるが、 x の増加とともに電界強度は急激に減衰し、針先から 10 mm 離れると電界強度は 460 V/cm 程度と小さい値となる。また、この電界と式 (3.2) より、電界による正負イオンのドリフト速度 v_D を計算できる。

$$v_D = \mu E \quad (3.2)$$

ここで、 μ は正または負イオンの移動度であり、一般的に、空気中の各イオンの移動度は、正イオン: $1.69 \times 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 負イオン: $2.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ⁽⁶⁾ である。図 3.8 に、式 (3.2) より計算した正負イオンのドリフト速度を示す。図は、正負イオンの違いがわかるように x を $0 \sim 10$ mm の範囲で表示しているが、実際は 100 mm まで計算を行っている。図より、針電極近傍において正負イオンのドリフト速度は数百 m/s 程度であり、電界の減衰とともにドリフト速度も減少していることがわかる。また、正イオンより負イオンの方が大きいことがわかる。これは、負イオンの移動度が正イオンよりも大きいためである。

前述したように、イオンはドリフトと風による運搬によりプレートに到達するため、ドリフト速度と風速からイオンがプレート間を移動する速度 (イオン速度) を評価することができる。これは単純に、ドリフト速度と風速の足し合わせとなり、針先から 5 mm の場合において、正イオンのドリフト速度が 16 m/s , 負イオンが 22 m/s 程度なので、表 3.1 より、エアコンプレッサ圧力が 7 kPa では正イオン速度が 24.7 m/s , 負イオン速度が 30.7 m/s となる。また、エアコンプレッサ圧力が 20.3 kPa では、正イオン速度が 56 m/s , 負イオン速度が 62 m/s 程度である。このイオン速度は、針 - プレート間距離が大きくなればなるほど風速の方が支配的となり、 30 mm 以降ではドリフト速度が風速の半分以下となる。

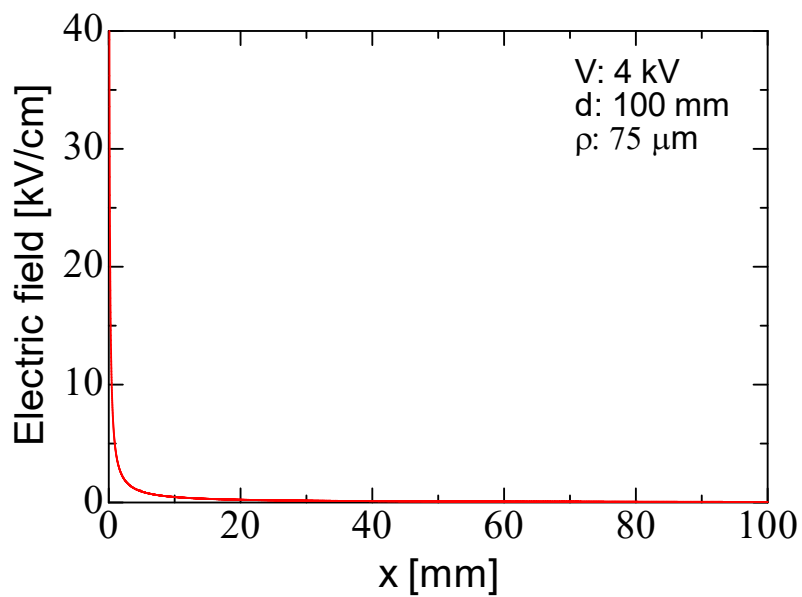


図 3.7 角田の式より計算した針 - プレート間の電界

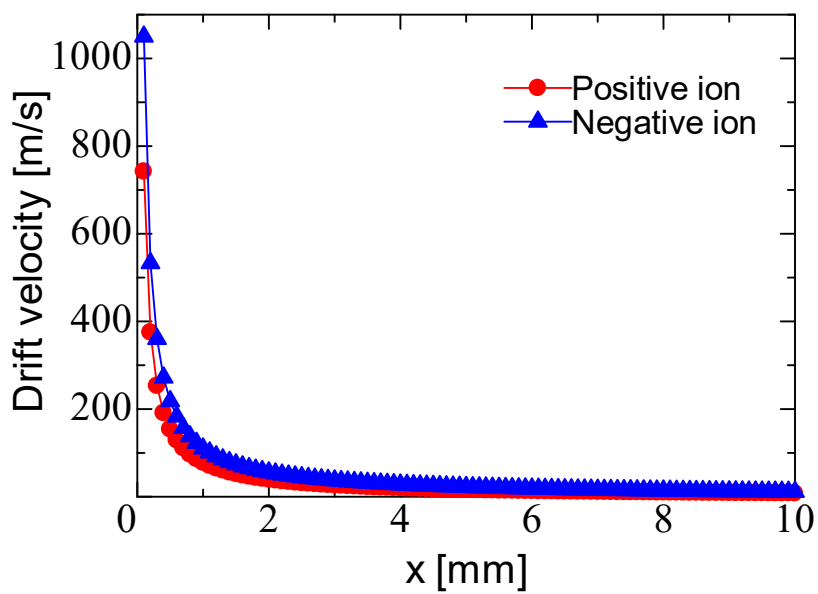


図 3.8 角田の式より計算した電界を基に算出した正負イオンのドリフト速度

3.2.3 静電誘導の除去

3.2.3.1 放電電流波形

3.2.2 において、静電誘導の影響を除去するために金属棒を高圧部に設置したと述べた。ここでは、静電誘導の除去の方法について説明する。

図 3.9 に接地電極に接続した抵抗より得られる電流波形 (I_{ring}) を示し、図 3.10 に金属棒に接続した抵抗より得られる電流波形 (I_{rod}) を示す。このときの印加電圧の波高値は 8 kVp-p の矩形波で周波数は 5 kHz、エアコンプレッサ圧力は 7 kPa としている。図より、印加電圧の dV/dt が 250 V/ μ s で変位電流が 80 μ A 程度と大きいことがわかり、オシロスコープで一周期を取得した場合、分解能が足りないため計測精度が悪い。そのため、一周期で取得するのではなく、正と負の周期に分け、それぞれの周期の変位電流を含む放電電流波形がオシロ上で最大となるよう表示し、その波形を取得した。また、図 3.9 の波形は、放電によりリング電極に流れ込む電流と静電誘導による変位電流が混入している。図 3.10 の方は、静電誘導による変位電流のみであるため、前者から後者の波形を差し引くことで放電電流 ($I_{discharge}$) のみを取り出すことができる (式(3.3))。図 3.11 に、変位電流を除去した放電電流波形を示す。

$$I_{ring} - I_{rod} = I_{discharge} \quad (3.3)$$

図より、正の放電周期では無パルスの Hermstein グローコロナ⁽⁷⁾が観測されていることがわかる。これは、高電圧電極の先端近傍に微小な電離領域をもつ安定した放電であり、放電電流は数 μ A 程度である。負の放電周期ではトリチェルパルス⁽⁸⁾が観測されていることがわかる。このパルス状の放電は、非常に短い立ち上がり時間、短い持続時間で発生し、周期的な性質をもつことが知られている⁽⁹⁾。負極性の放電において、電離によって生成された電子は、図 3.12 に示すように負イオンとなり陽極に向かい移動する。このとき、陰極近傍で生成された負イオンは陰極近傍の電界を弱める働きをするが、負イオンが低電界領域に移動することで近傍の電界は回復する。一方で、電離によって生成された正イオンは外部の電界によって陰極に向かって移動する。移動した正イオンは陰極と衝突することで二次電子放出による電子供給を行い、新たな電子なだれを引き起こす。この電子なだれの生成に伴い電流パルスが生じる⁽¹⁰⁾。これまでに、このパルスに関する数学的モデルや実験的計測によるさまざまな解析が行われている^{(9, (11), 12)}。また、図より、パルスの波高値は 20 μ A 程度、パルス幅は 2 μ s 程度であることがわかる。

また、図より、正から負に極性が切り替わった直後は、パルスが完全に立ち下がる前に次のパルスが発生していることがわかる。負に極性が切り替わった直後は、正の放電周期で生成された正イオンが針電極近傍に存在し、それが針-プレート間の電界を高める働きをするため、パルスの発生頻度が多くなっていると考えられる。また、正極性においても同様に、極性が切り替わった直後は電界が比較的強いため、放電電流が大きくなっている。この波形を用いた解析については 3.3 で述べる。

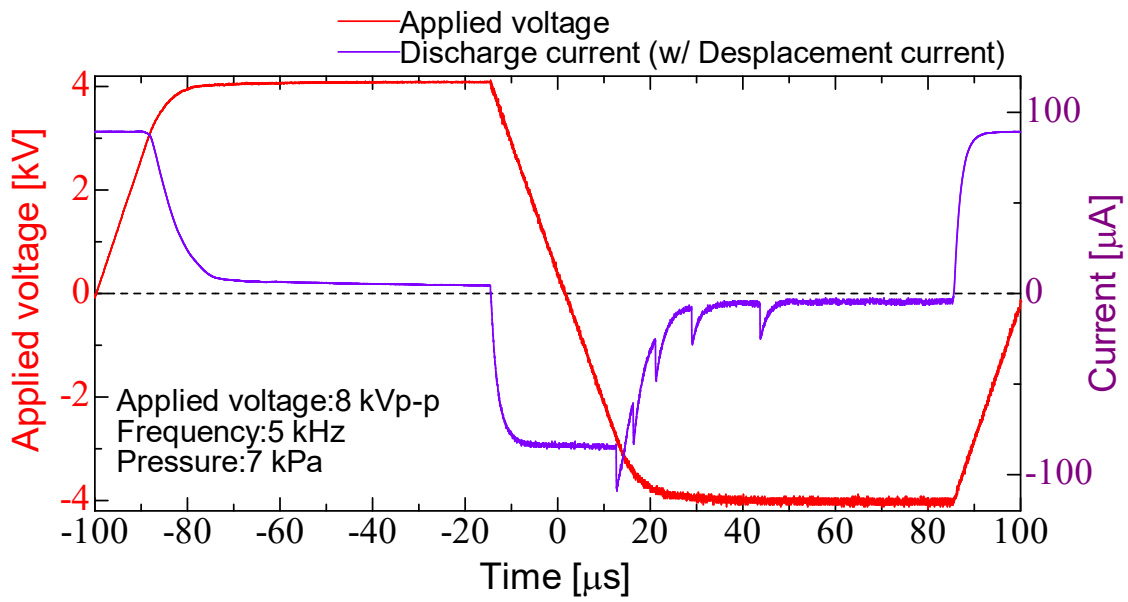


図 3.9 接地電極に接続した抵抗より得られた電流波形

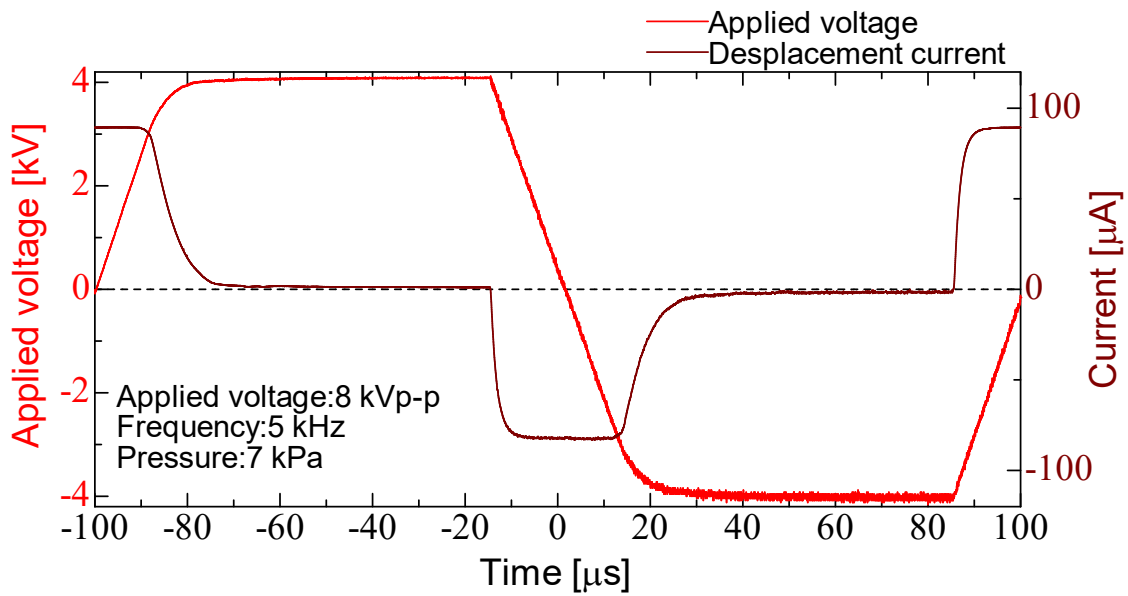


図 3.10 金属棒に接続した抵抗より得られた変位電流波形

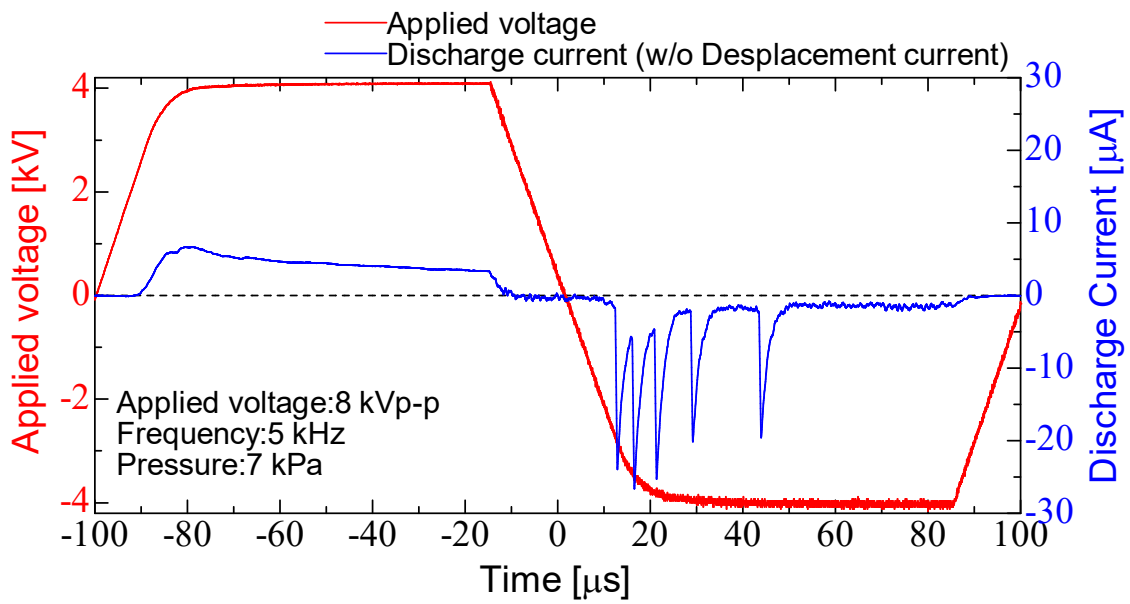


図 3.11 典型的な放電電流波形

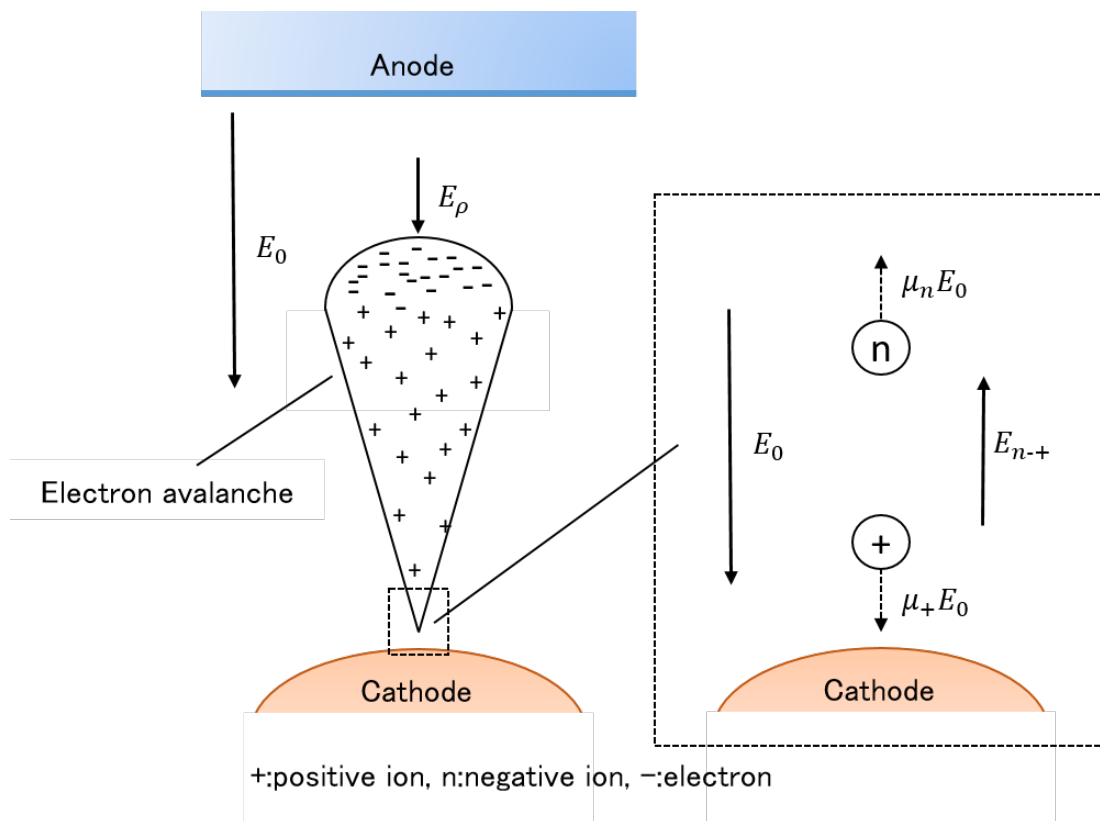


図 3.12 負極性放電の電子なだれとイオンの移動モデル⁽¹⁰⁾

3.2.3.2 除電波形

図 3.13 に、除電波形例を示す。このときの印加電圧の波高値は 8 kV_{p-p} の矩形波で周波数は 100 Hz、エアコンプレッサ圧力は 7 kPa としている。イオン測定回路を接続したプレートの電位 (赤線) には、印加電圧起因の静電誘導電圧が含まれている。これを取り除くことを目的として、静電誘導電圧のみのイオン測定回路を接続した金属棒の電位 (黒線) を取得しており、最終的に、プレート電位から静電誘導の影響を取り除いた波形 (青線) を取得した。

除電時間は、±1.1 kV に帯電したイオン捕集プレートの電圧が ±1 kV から ±100 V まで減衰するのに要する時間と定義し評価した。図に示したような範囲が除電時間であり、オシロスコープの表示から読み取った。図より、除電中イオン捕集プレートに帯電された電荷は、指数関数的に減少していることがわかる。除電開始直後はプレートの電荷と逆極性のイオンが多く引き寄せられ、除電が進むに従いプレートの電荷が中和され、引き寄せられるイオン量が減少するため図のような波形となる。

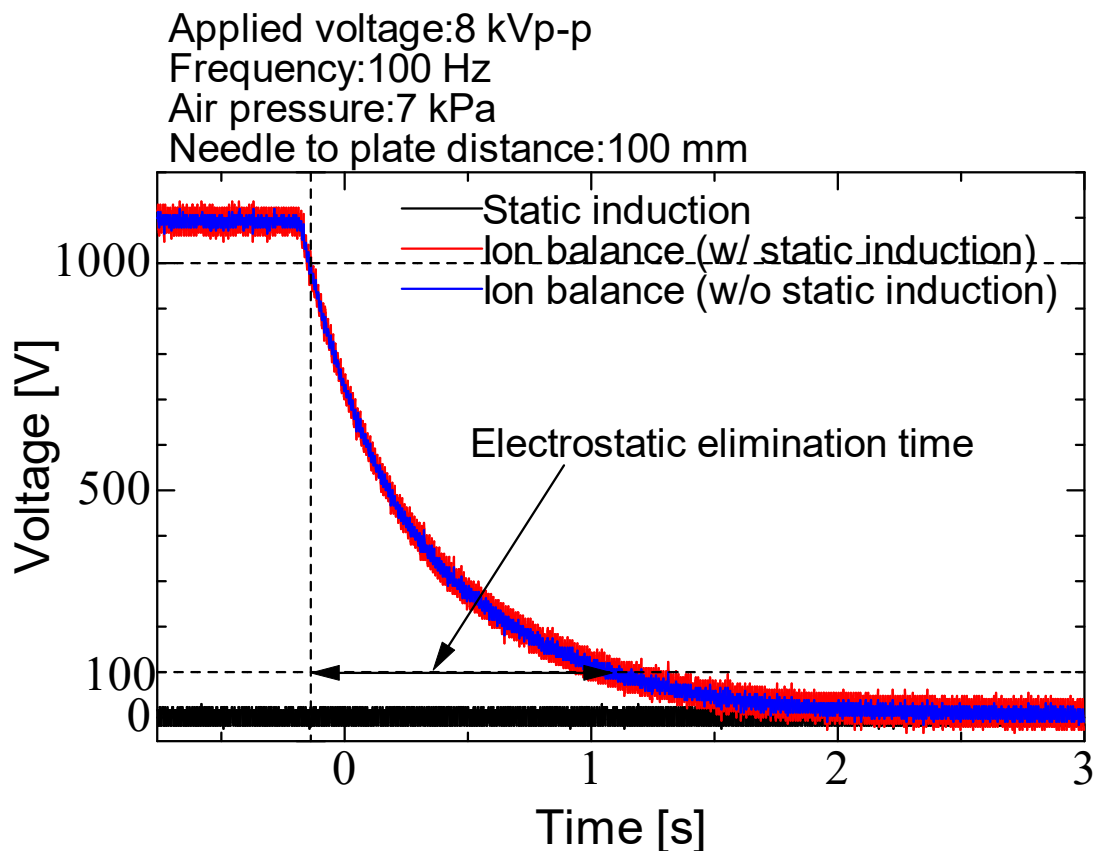


図 3.13 除電波形例

3.2.4 バイアス電圧および Duty 比変化によるイオンバランス調整

除電時間の計測をするにあたり，除電後のプレート電位 (イオンバランス) を 0 V に調整する必要がある．今回，イオンバランスの調整には，印加電圧にバイアス電圧を印加する方法，または印加電圧の Duty 比を変化させる方法を用いた．前者は，3.3 で述べる除電特性評価の際に，後者は，3.4 で述べる除電特性評価の際に用いた．

図 3.14 に，印加電圧にバイアス電圧を加えた場合と加えない場合，または Duty 比を調整した場合と調整しない場合のイオン捕集プレートのイオンバランスを示す．ここで，印加電圧の波高値は 8 kVp-p，周波数は 5 kHz，エアコンプレッサ圧力は 7 kPa としている．図より，バイアス電圧を加えない場合および Duty 比を調整しない場合，イオンバランスは負方向に発散する．これは，イオン移動度の違いや風速の影響により，コロナ放電で生成された正負イオンのプレート到達量に差が生じているためであると考えられる．また，バイアス電圧を加えた場合および Duty 比を調整した場合には，イオン生成量が調整され，イオン捕集プレートに到達するイオンのバランスが良く，プレート電位が 0 V に収束して

いる．このように除電を行う際には，適宜バイアス電圧を加えたり Duty 比を変化させたりし，イオンバランスを調整する必要がある．そのため，除電におけるイオン捕集プレートのイオンバランスを 0 V にするバイアス電圧と Duty 比の周波数特性を調べた．

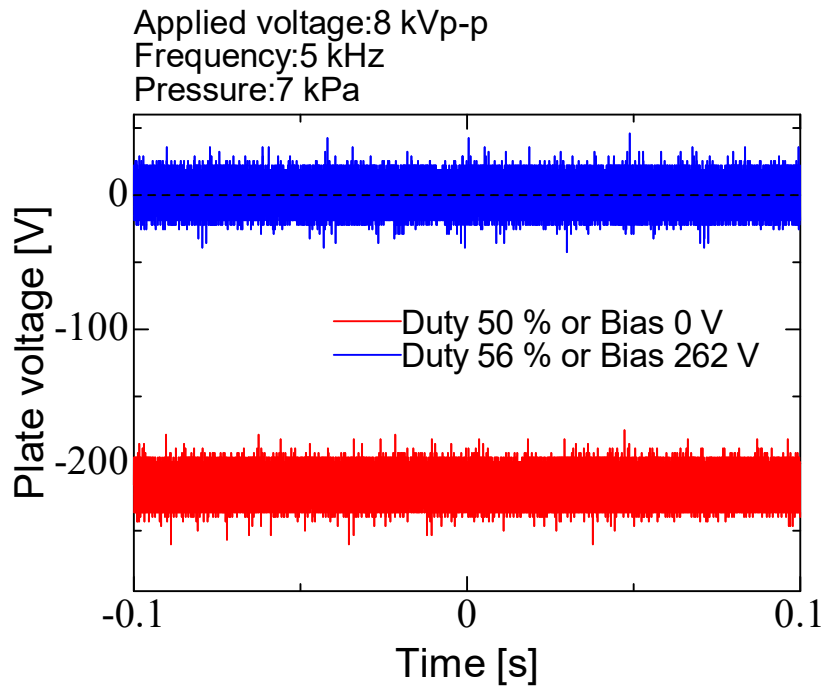


図 3.14 バイアス電圧の印加および Duty 比調整の有無におけるプレート電位波形

図 3.15 に，イオン捕集プレートのイオンバランスから静電誘導による影響を取り除いた波形を示す．このときの印加電圧の波高値は 8 kVp-p，周波数は 250 Hz，エアコンプレッサ圧力は 7 kPa としている．また，印加電圧を直流バイアスし，イオン捕集プレートのイオンバランスが 0 V となるようにしている．図より，イオンバランスは針電極の電位変化に従い変化し，印加電圧と同極性にそれぞれの電位は変化していることがわかる．また，電位変化よりイオンバランスが 0 V のときのイオン捕集プレートに流入する電流量を，式 (3.4)，式(3.5) を用いて求めることができる．

$$Q = CV \quad (3.4)$$

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (3.5)$$

イオン測定回路の合成容量は前述したように 21.8 pF であり，静電誘導の影響を取り除いたイオンバランスは 14.7 Vp-p である．これより，イオンバランスが 0 V のときイオン捕集プレートに流入する電荷量は式 (3.4) より，

$$Q = 21.8 \times 10^{-12} \times 14.7 \approx 0.320 \text{ [nC]}$$

である．また，イオン捕集プレートに流入する電流値は，式 (3.5) より，

$$i = \frac{0.32 \times 10^{-9}}{2.00 \times 10^{-3}} \approx 160 \text{ [nA]}$$

である。このことから、160 nA 程度の電流がプレートに流入していることがわかる。また、プレートの一辺が 150 mm であることより、電流密度 I を求めると、

$$I = \frac{160 \times 10^{-9}}{150 \times 150 \times 10^{-6}} \approx 71.1 \text{ [\mu A/m}^2\text{]}$$

となる。さらに、電気素量 e を用いて、イオンフラックス Γ は、

$$\Gamma = \frac{71.1 \times 10^{-6}}{1.6 \times 10^{-19}} \approx 4.44 \times 10^{14} \text{ [m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{]}$$

となる。表 3.2 に、上記の計算方法で求めた各周波数における電流密度およびイオンフラックスを示す。表より、周波数の増加とともに電流密度、イオンフラックスともに増加する傾向であることがわかった。

表 3.2 各周波数におけるプレートへの流入する電流密度およびイオンフラックス

Needle to plate [mm]		Frequency [Hz]						
		10	50	100	250	500	1000	5000
I [$\mu\text{A/m}^2$]	7 kPa	29.1	39.4	49.2	71.1	101	126	214
	20.3 kPa	41.6	46.6	56.1	73.6	87.8	90.2	215
Γ [$\times 10^{14} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$]	7 kPa	1.82	2.46	3.08	4.44	6.30	7.85	13.4
	20.3 kPa	2.60	2.91	3.51	4.60	5.49	5.64	13.4

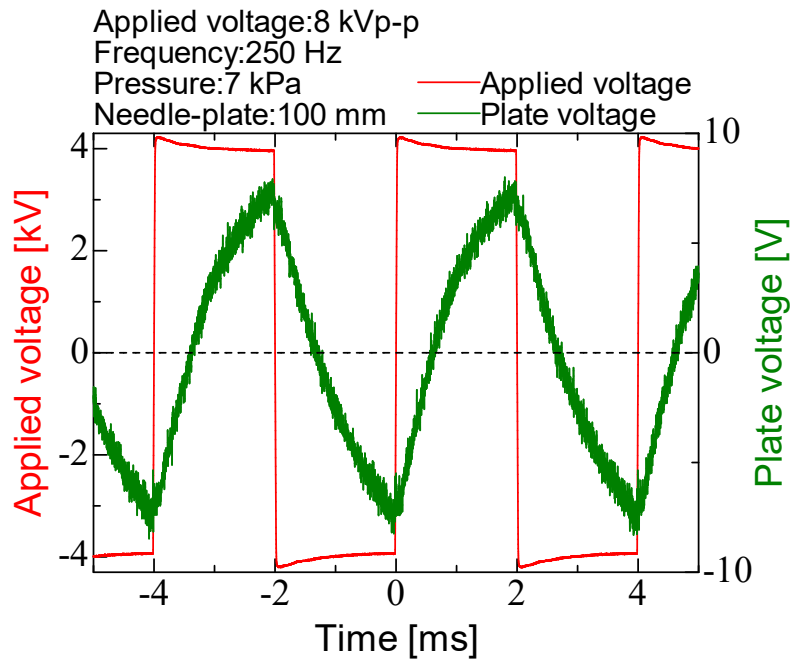


図 3.15 イオン捕集プレートの電位変動 (周波数 : 250 Hz)

3.3 印加電圧波形を矩形波とした場合の特性評価

3.3.1 コロナ放電特性

接地電極に接続した抵抗より得られる放電電流波形については、図 3.11 に示した。また、前述したように、接地電極に流れる電流から金属棒を用いた方法で静電誘導による変位電流を除去している。放電電流波形の計測は、印加電圧の波高値が 8 kVp-p、周波数が 10~5000 Hz、エアコンプレッサ圧力が 7~20.3 kPa で行われた。この放電電流波形を基に、正負の半周期または一周あたり消費エネルギーおよび消費電力、放電電荷量、換算電流を求めた。これらは、以下に示す式 (3.6) ~ (3.9) を用いて、それぞれ算出している。ここで、 T は半周期の時間、または一周の時間、 V_a は印加電圧、 I_d は放電電流である。

$$(\text{Energy consumption}) = \int_0^T (V_a \times I_d) dt \quad (3.6)$$

$$(\text{Power consumption}) = \frac{(\text{Energy consumption})}{T} \quad (3.7)$$

$$(\text{Amount of charge}) = \int_0^T I_d dt \quad (3.8)$$

$$(\text{Calculated current}) = \frac{(\text{Amount of charge})}{T} \quad (3.9)$$

図 3.16 に、周波数および風速を変化させたとき場合における周波数に対する (a) 正半周期、(b) 負半周期、(c) 一周期の消費エネルギーの変化を示す。図より、周波数の増加とともに消費エネルギーは減少傾向であることがわかる。これは、周波数が大きくなるほど一周期の時間が短くなり、放電期間が減少するためであると考えられる。

図 3.17 に、消費エネルギーより算出した周波数に対する (a) 正半周期、(b) 負半周期、(c) 一周期の放電時の消費電力の変化を示す。図より、消費電力は周波数の増加とともに増加傾向であることがわかる。正負の放電において、極性が切り替わった直後は、放電電流が大きくなり、周波数が大きくなるほど極性切替直後の部分の割合が大きくなる。そのため、単位秒あたりの消費エネルギー (消費電力) に換算したときに増加傾向を示したと考えられる。また、風速が大きくなるほど消費電力は減少していることがわかる。これは、風速が大きくなるほどプレート側に輸送されるイオン量が増加し、リング電極に流入するイオン量が減少するためであると考えられる。

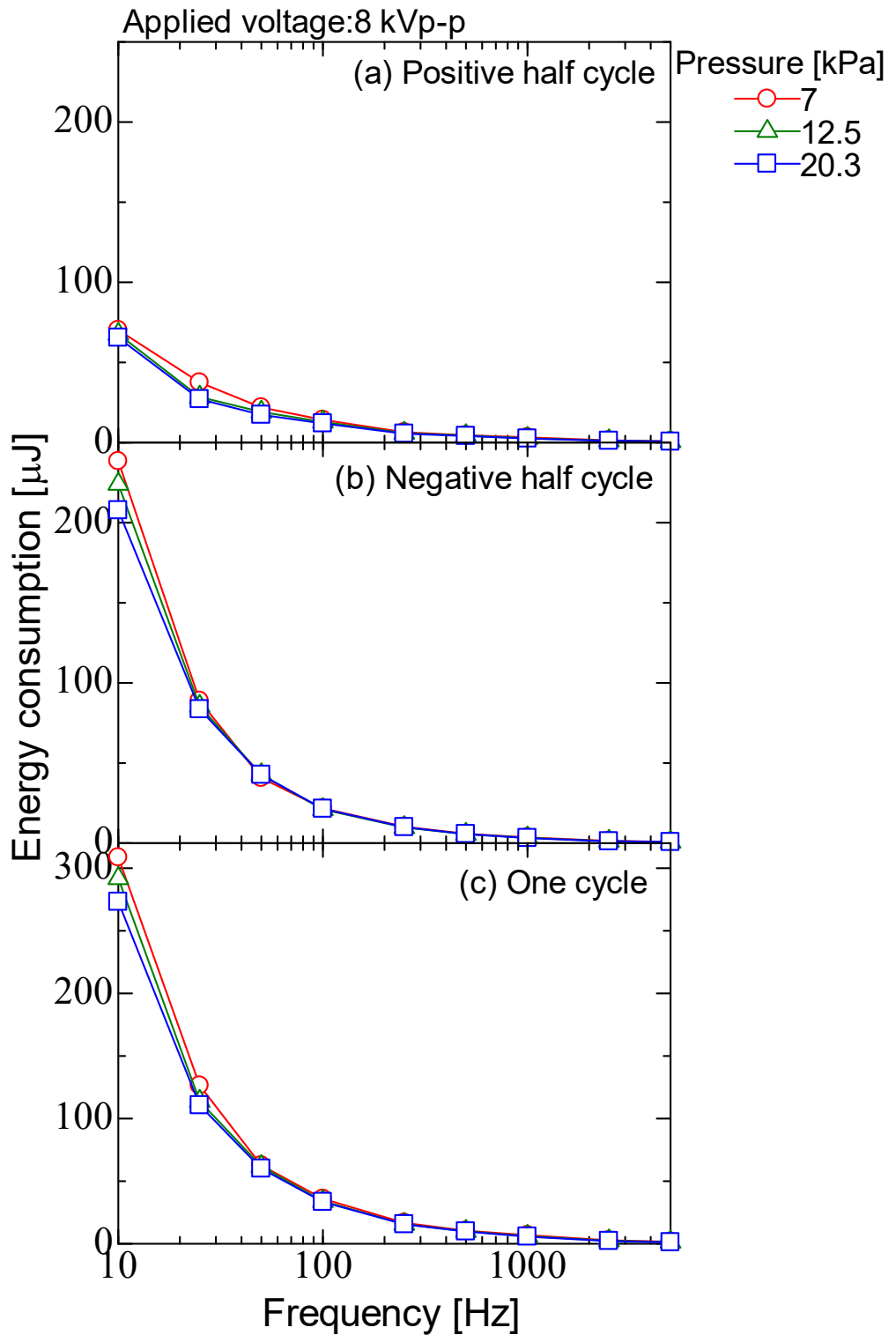


図 3.16 周波数および風速を変化させた場合における
周波数に対する消費エネルギー
(a) 正半周期, (b) 負半周期, (c) 一周期

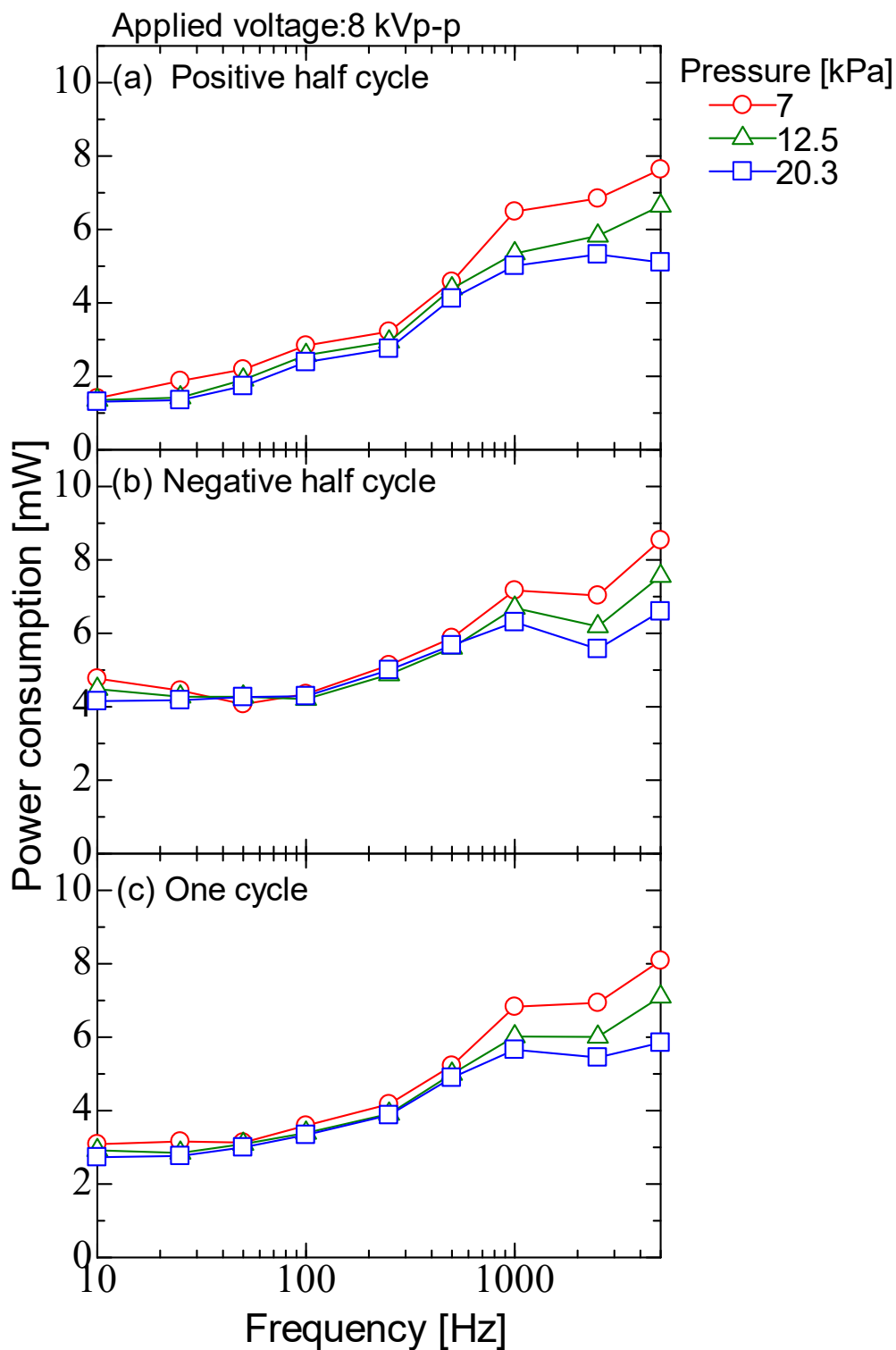


図 3.17 周波数および風速を変化させた場合における周波数に対する消費電力

(a) 正半周期, (b) 負半周期, (c) 一周期

図 3.18 に、周波数および風速を変化させた場合における周波数に対する (a) 正半周期、(b) 負半周期、(c) 一周期の放電電荷量の変化を示す。図より、周波数の増加とともに放電電荷量が減少していることがわかる。これは、周波数の増加とともに半周期あたりの放電期間が短くなるためであると考えられる。また、正の放電電荷量よりも負の方が多いことがわかる。負の直流放電の場合は、正イオンの γ 作用 (正イオンの陰極衝突による二次電子放出) により針電極から電子を供給できることから、安定した放電となる。一方、正の放電の場合は、二次電子の供給は期待できないため、針電極付近の空間において局所的に電子の発生と増倍を行わなければならない。そのため、負よりも不安定な放電となる⁽¹³⁾。今回の場合、周波数が小さくなるほど直流放電の傾向が近づくため、負の放電電荷量の方が多くなったと考えられる。周波数が大きい場合には、極性切替直後の部分の割合が大きいため、正負の放電電荷量が同程度になったと考えられる。

図 3.19 に、放電電荷量より算出した周波数に対する (a) 正半周期、(b) 負半周期の換算電流の変化を示す。図より、正負の半周期どちら場合でも、周波数の増加とともに換算電流は増加傾向であることがわかる。正負の放電において、極性が切り替わった直後は、放電電流が大きくなり、周波数が大きくなるほど極性切替直後の部分の割合が大きくなる。そのため、単位秒あたりの放電電荷量 (換算電流) にしたときに増加傾向を示したと考えられる。また、風速が大きくなるほど換算電流は減少していることがわかる。これは、風速が大きくなるほどプレート側に輸送されるイオン量が増加し、リング電極に流入するイオン量が減少するためであると考えられる。図 3.20 に、周波数に対する一周期の換算電流の変化を示す。図より、一周期の換算電流は周波数の増加とともに 0 A に近づくことがわかる。これより、高周波数では、コロナ放電により生成される正負のイオン量が同程度となることが考えられる。

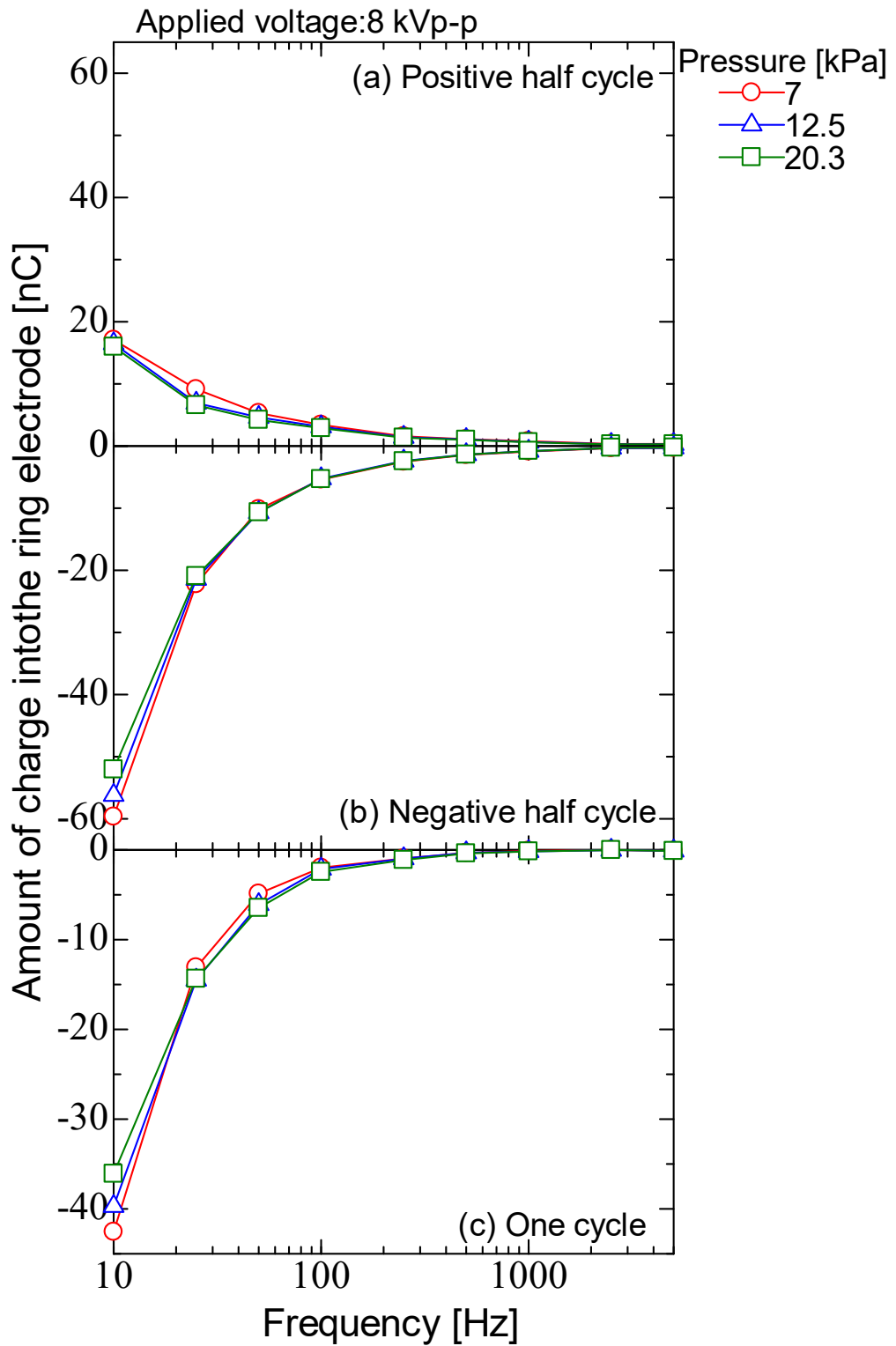


図 3.18 周波数および風速を変化させた場合における周波数に対する放電電荷量

(a) 正半周期, (b) 負半周期, (c) 一周期

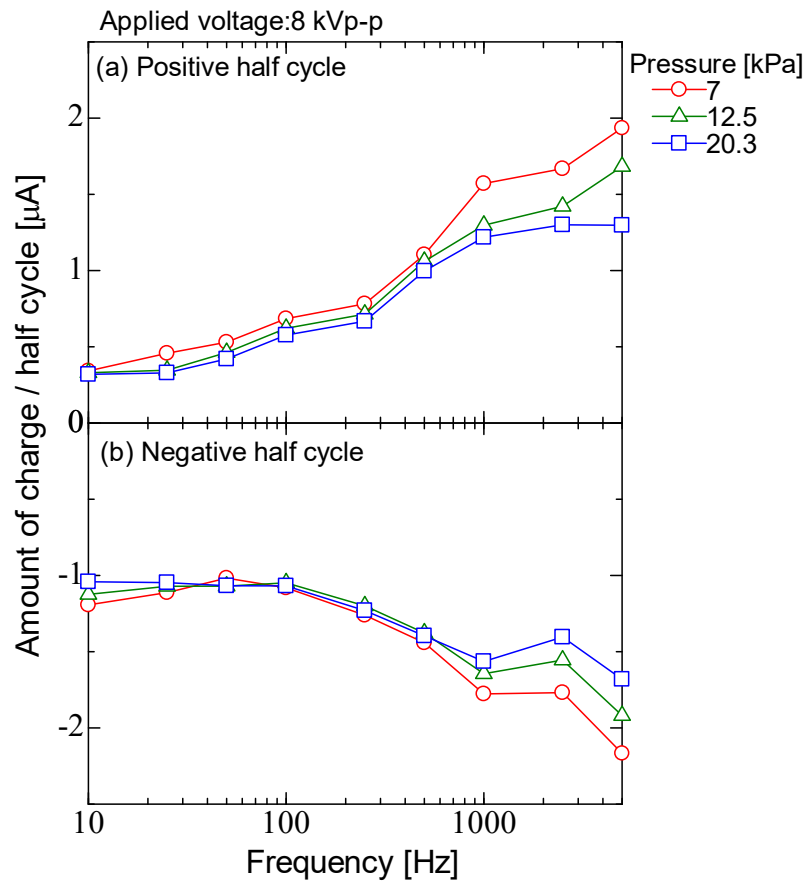


図 3.19 周波数および風速を変化させた場合における周波数に対する換算電流
(a) 正半周期, (b) 負半周期

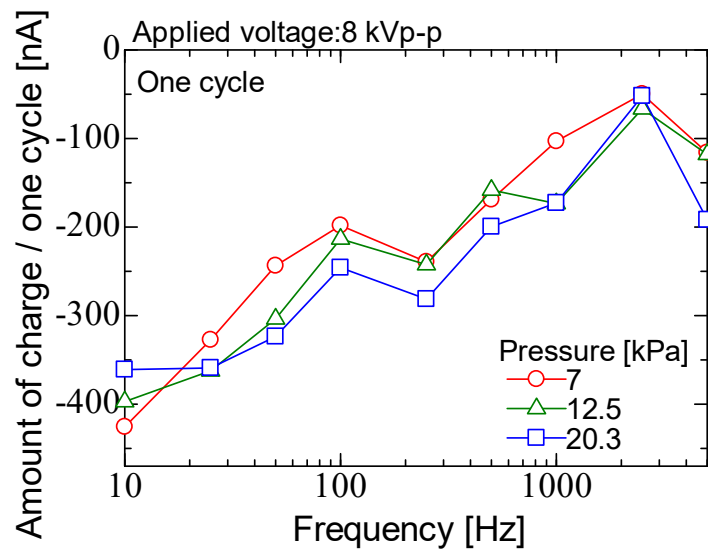


図 3.20 周波数および風速を変化させた場合における周波数に対する一周期の換算電流

3.3.2 除電特性

3.3.2.1 除電時間計測

図 3.21 に、周波数および風速を変化させた場合における周波数に対する (a) 正帯電、(b) 負帯電の除電時間の変化を示す。ここで、印加電圧の波高値は 8 kVp-p、針 - プレート間距離は 100 mm とし、周波数を 10~5000 Hz、エアコンプレッサ圧力を 7~20.3 kPa の範囲で変化させた。図より、風速の増加とともに除電時間は小さいことがわかる。これは、風速が大きいほど、より多くのイオンがプレート側に運搬されるためであると考えられる。また、周波数の増加とともに除電時間は増加しており、風速が大きい場合、周波数に対する除電時間の変化は小さいことがわかる。針先端でのコロナ放電で発生した正負のイオンは、針電極とリング電極間に発生する電界に沿って移動し⁽¹⁴⁾、そのほとんどはリング電極に流入する。また、これらのイオンは、針電極後方からの送風により、針電極前方に輸送される。しかし、図 3.18 に示すように接地電極に流入する放電電荷量は、空気圧力の増加により減少傾向にあるが、そこまで大きな影響はない。周波数が大きくなると、極性の切替が頻繁となり、イオンの空間密度が大きくなり、イオンの再結合が増加する。しかし、風速を大きくすることにより、イオンがより速く運搬される、つまり、イオンの再結合時間が短くなるので、再結合が抑制されると考えられる。そのため、図のように、除電時間が短くなると考えられる。なお、負帯電時は正帯電時と比較し除電時間が長い。これは、正イオンの移動度が負イオンよりも小さいため、プレートに流入するイオン量が減少することが要因として考えられる。

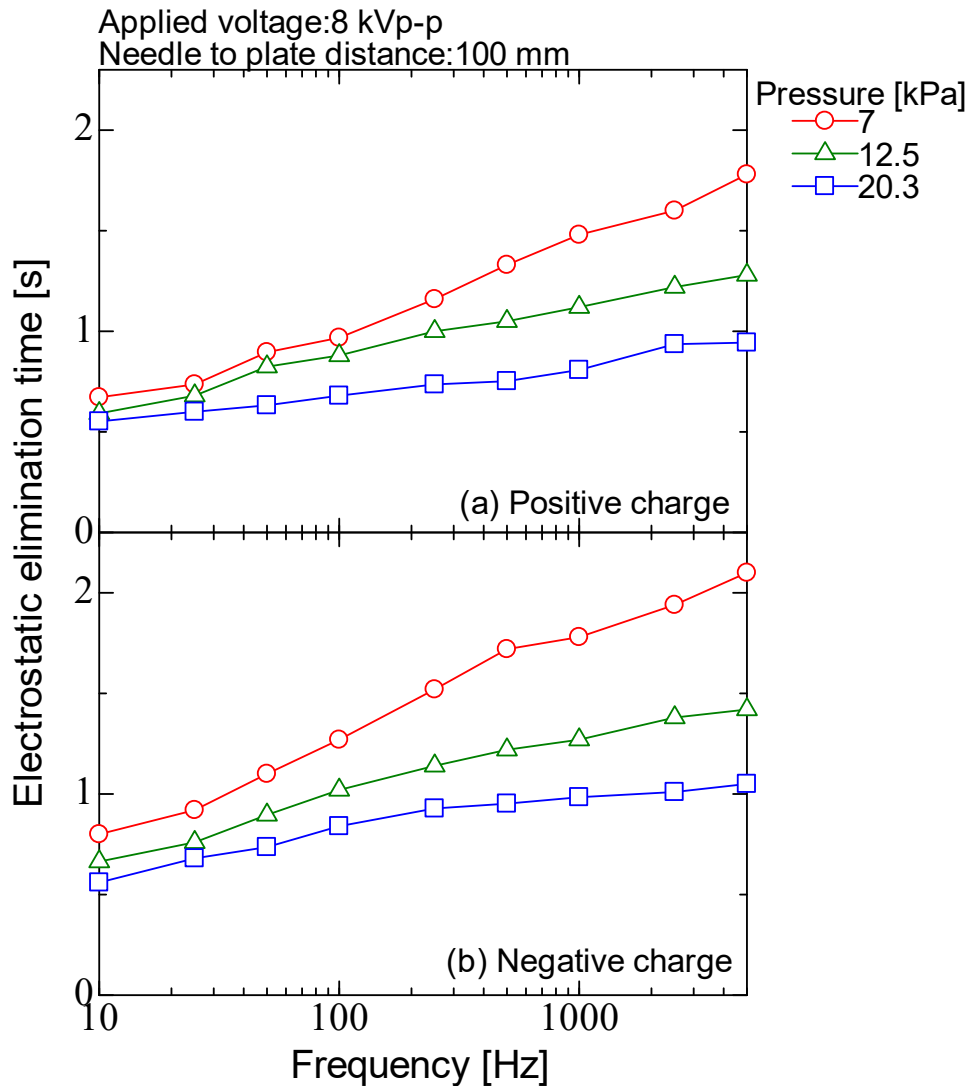
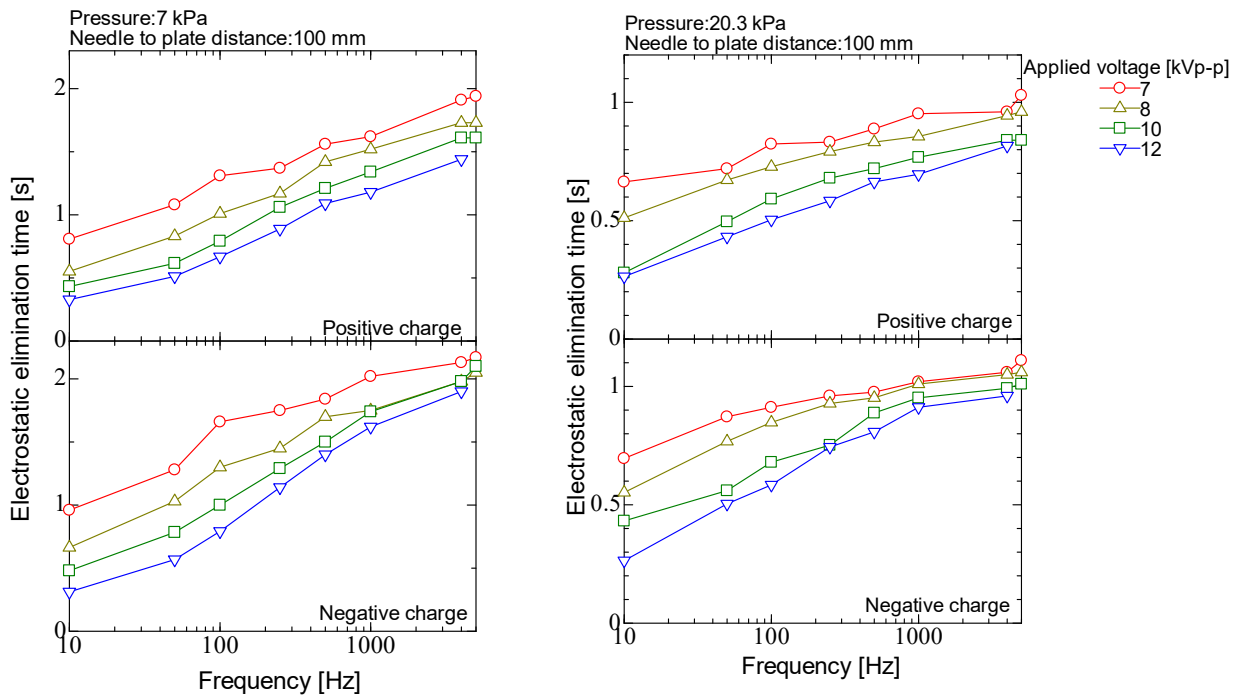


図 3.21 周波数および風速を変化させた場合における周波数に対する除電時間
(a) 正帯電, (b) 負帯電

図 3.22 に、周波数および印加電圧の波高値を変化させた場合における周波数に対する正負帯電それぞれの除電時間の変化を示す。ここで、針 - プレート間距離は 100 mm, エアコンプレッサ圧力は (a) 7 kPa, (b) 20.3 kPa とし、印加電圧の波高値を 7~12 kVp-p, 周波数を 10~5000 Hz の範囲で変化させた。また、印加電圧値が 12 kVp-p において、周波数が 5 kHz の場合には、高圧アンプの性能上、出力できないため、4 kHz までとしている。図より、印加電圧値が大きいほど、除電時間は小さくなるのがわかる。これは、印加電圧値が増加することによって、コロナ放電によるイオン生成量が増加しているためであると考えられる。また、負帯電において、電圧が高いほど除電時間の増加は顕著である。周波数の増加とともに、針電極とリング電極間の電界の時間変化が増加する。そのため、針電

極から生成される正負イオンの極性の切替が頻繁になり，針電極近傍の電界強度が高く保たれる．このことによって，放電が頻繁に起こり，図 3.19 に示したように，正負の換算電流が増加する．そのため，周波数の増加とともに，電極間の空間の正負イオン密度が増加するため，正負イオンの再結合反応が増加する．このために，風速が十分に高くない場合，イオン捕集プレートに到達する前に再結合によって失われるイオン量が増加し，除電時間が増加するものと考えられる．また，正負イオンが高密度で混在することにより，外部からみた空間電荷による電界は低下する．このことより，イオン捕集プレートからの電界による，空気イオンに働くクーロン力が減少し，捕集プレートに到達する空気イオンが減少するものと考えられる．再結合反応および，混在化はイオン密度の増加と，正負の放電の間隔が短くなることにより増加する．また，正イオンの移動度が負イオンよりも小さいことから，正イオンは混在化したイオン群からプレートにより流入しにくい．そのため，図に示したように，負帯電において，除電時間の増加は電圧が高い場合に顕著であることが考えられる．

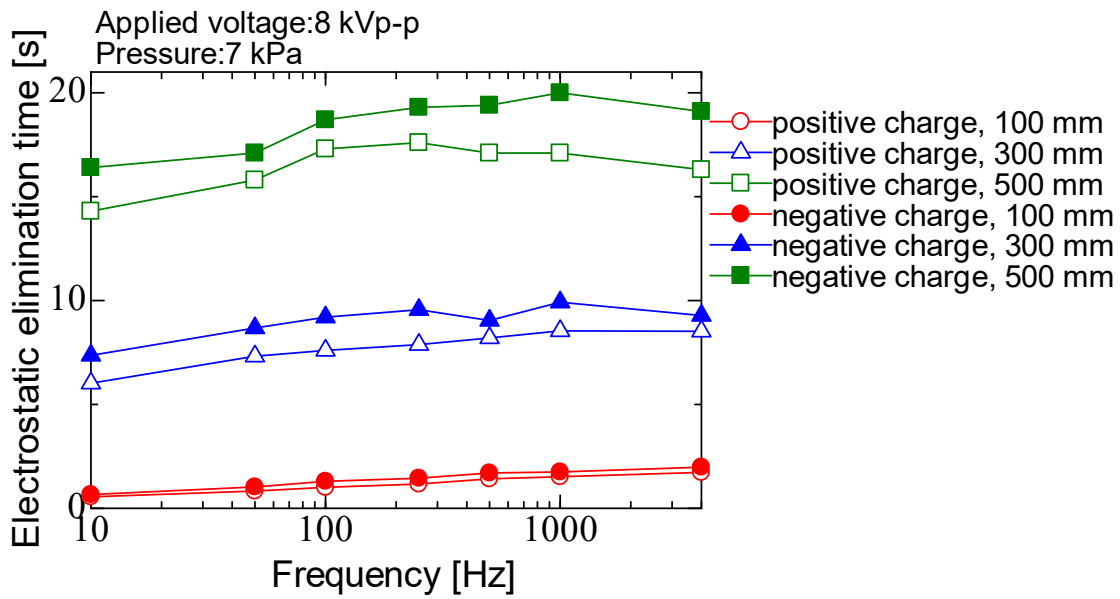


(a) Pressure:7 kPa

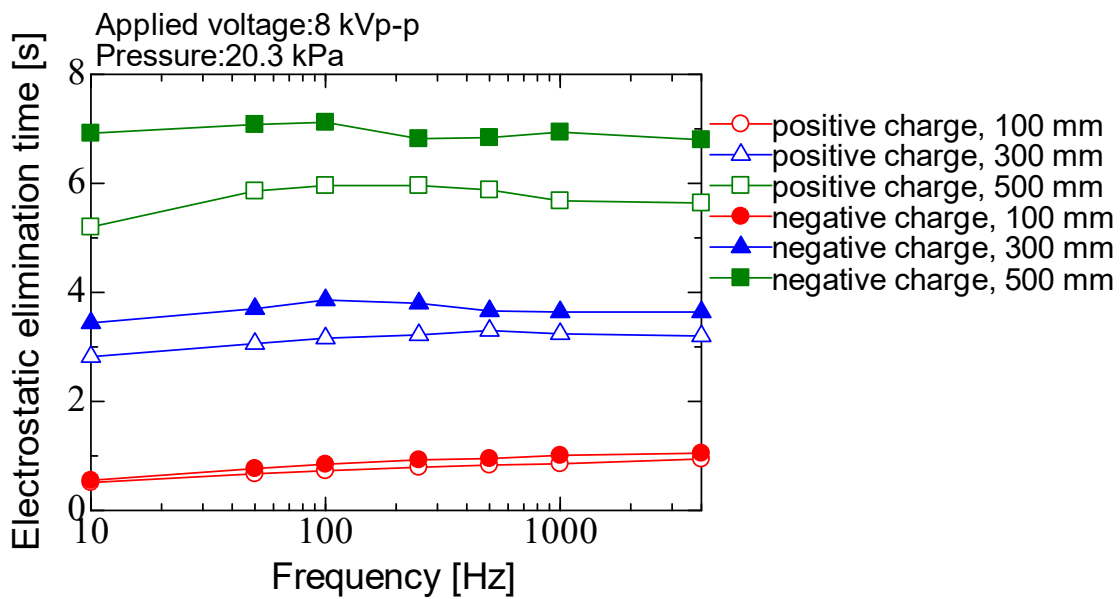
(b) Pressure:20.3 kPa

図 3.22 周波数および印加電圧の波高値を変化させた場合における周波数に対する正負帯電それぞれの除電時間，(a) 7 kPa，(b) 20.3 kPa

図 3.23 に、周波数および針 - プレート間距離を変化させた場合における正負帯電それぞれの除電時間の変化を示す。ここで、印加電圧の波高値は 8 kVp-p, エアコンプレッサ圧力は (a) 7 kPa, (b) 20.3 kPa とし、周波数を 10~5000 Hz, 針 - プレート間距離を 100~500 mm で変化させた。図より、針 - プレート間距離が大きくなるほど除電時間が増加していることがわかる。これは、針 - プレート間距離が大きくなることによりイオンの移動距離が大きくなり、結果としてプレートに到達するイオン量が減少しているためであると考えられる。また、針 - プレート間距離が大きくなるほど、正負帯電の除電時間の差が増加していることがわかる。風速が大きいほど、その差は小さい。針 - プレート間距離が大きくなるほど、そこに発生する電界は小さくなるため、電界によるドリフトに対して風による輸送がほとんどとなる。エアコンプレッサ圧力が大きい場合には空気を押し出す力が強いいため、エアノズルから出た空気は直進的に進行し、イオンがプレートに到達しやすくなる。しかし、圧力が小さい場合には、拡散しやすくなり、移動度の小さい正イオンは拡散する風による影響が大きく、負イオンよりもプレートに到達しにくい。そのため、図のような傾向を示すと考えられる。



(a) Pressure: 7 kPa



(b) Pressure: 20.3 kPa

図 3.23 周波数および針 - プレート間距離を変化させた場合における周波数に対する正負帯電それぞれの除電時間, (a) 7 kPa, (b) 20.3 kPa

3.3.2.2 イオンバランスおよびバイアス電圧計測

図 3.24 に、周波数および風速を変化させた場合における周波数に対するイオンバランスの変化を示す。ここで、印加電圧の波高値は 8 kVp-p、針 - プレート間距離は 100 mm とし、周波数を 10~5000 Hz、エアコンプレッサ圧力を 7~20.3 kPa の範囲で変化させた。図より、周波数が 250 Hz において、イオン捕集プレートの電位の絶対値が最小であり、プレートに流入する正負のイオン量のバランスが良いことがわかる。周波数が 250 Hz よりも小さい場合には、周波数の増加とともに増加している。これは、周波数が小さい場合、負極性での負イオンの生成量が、正極性での正イオンの生成量と比較し、増加しているためであると考えられる (図 3.18)。また、周波数が 250 Hz よりも大きい場合には、周波数の増加とともに減少していることがわかる。周波数が増加するとともに、正負の空気イオンはより混在した状態で、プレートに到達する。そのため、イオンバランスが中性に近づく。一方、混在した空気イオンが、プレートの極近傍に接近した場合、負イオンの移動度は正イオンより高いため、プレートの電位によってより負イオンがプレートに流入しやすくなると考えられる。イオンの混在化は、正負イオンの再結合や、イオン捕集プレートからの電界によるクーロン力の減少を生じさせるため、周波数が高い場合には、イオンバランスが減少することが考えられる。図 3.25 に、周波数および風速を変化させた場合における周波数に対するバイアス電圧の変化を示す。実験条件はイオンバランスのものと同様である。図より、周波数が 250 Hz よりも小さい場合には、周波数の増加とともに減少しており、250 Hz より大きい場合には、周波数の増加とともに増加していることがわかる。バイアス電圧は、このイオンバランスを 0 V に調整したときのものであり、この 2 つは結果からみても相関関係であるといえる。

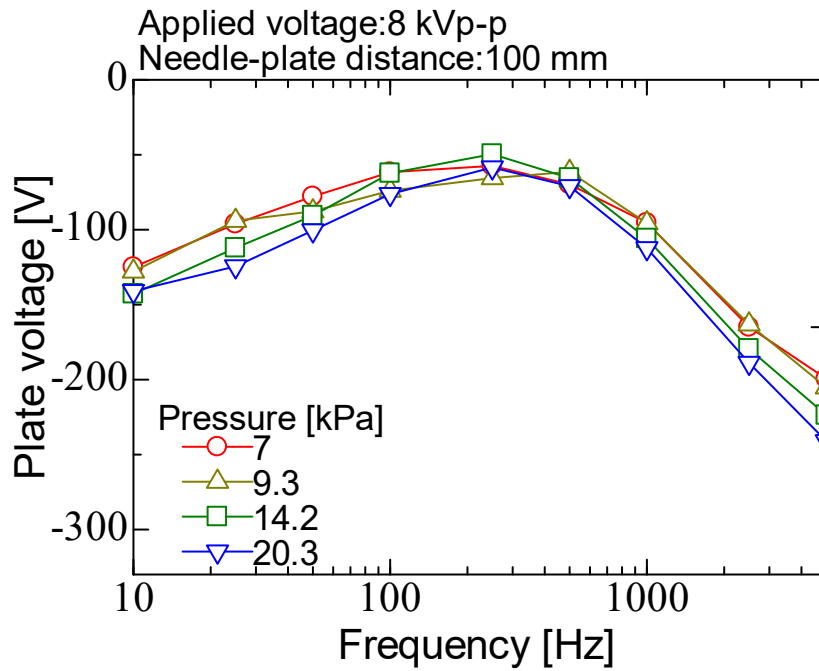


図 3.24 周波数および風速を変化させた場合における周波数に対するイオンバランス

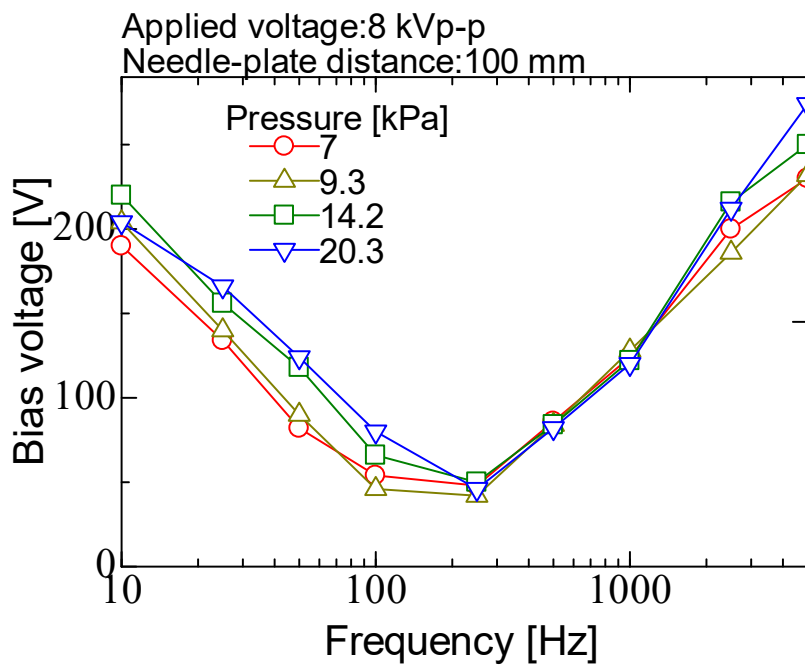
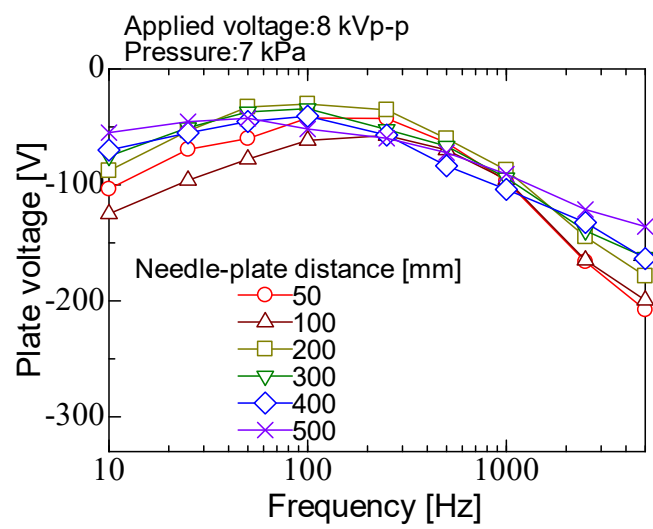
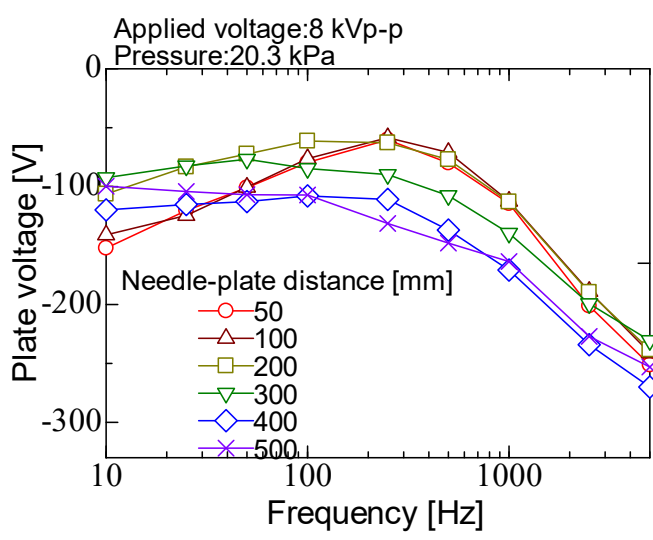


図 3.25 周波数および風速を変化させた場合における周波数に対するバイアス電圧

図 3.26 に、周波数および針 - プレート間距離を変化させた場合における周波数に対するイオンバランスの変化を示す。ここで、印加電圧の波高値は 8 kVp-p、エアコンプレッサ圧力は (a) 7 kPa, (b) 20.3 kPa とし、周波数を 10~5000 Hz, 針 - プレート間距離は 50~500 mm の範囲で変化させた。図より、距離が大きくなるとともに、電位のピーク値が低周波数側にシフトしていることがわかる。生成されたイオンは風によってプレート側に運搬されるが、プレートまでの距離が大きくなるほど、イオンの移動過程におけるドリフトや拡散により、距離が小さい時と比較し、正負イオンがより混在した状態となる。さらに、風速が大きい場合、また、周波数が小さい場合でも距離が大きければ、混在化しやすいため図のような傾向を示したと考えられる。



(a) Pressure: 7 kPa



(b) Pressure: 20.3 kPa

図 3.26 周波数および針 - プレート間距離を変化させた場合における周波数に対するイオンバランスの変化, (a) 7 kPa, (b) 20.3 kPa

図 3.27 に、周波数および印加電圧の波高値を変化させた場合における周波数に対するバイアス電圧の変化を示す。ここで、エアコンプレッサ圧力は 7 kPa、針 - プレート間距離は 100 mm とし、印加電圧の波高値を 7~12 kVp-p、周波数を 10~5000 Hz の範囲で変化させた。また、印加電圧値が 12 kVp-p において、周波数が 5 kHz の場合には、高圧アンプの性能上、出力できないため、4 kHz までとしている。図より、印加電圧値の増加とともに、バイアス電圧は増加していることがわかる。負極性の放電において、印加電圧値が増加するとトリチェルパルスの発生周期が短くなり、グロー放電に近づく。正極性に対して、負極性の放電電荷量が多くなり、イオンバランスが負に大きくなるため、バイアス電圧は増加したと考えられる。

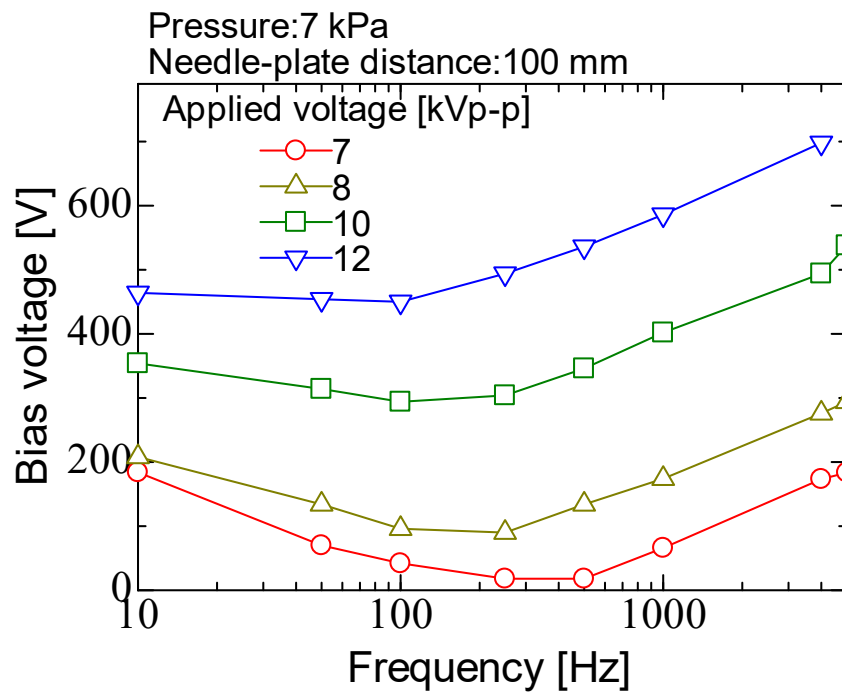


図 3.27 周波数および印加電圧の波高値を変化させた場合における周波数に対するバイアス電圧の変化

3.3.3 プレート下部から垂直方向に送風した場合の特性評価

3.3.3.1 実験系の構築

図 3.28 に、本実験に用いた系の概略図を示す。図 3.29 に、本実験系のプレート近傍の概観を示す。基本的な構成は、3.2.2 で述べたものと同様である。それに加えて、プレートの下部にエアノズル (エバーロイ, AB-10P) を設置し、上方向へ送風を行っている。エアノズルには、エアコンプレッサ (HITACHI, 0.2LE-8S) と圧力調整のためレギュレータ (SMC, IR2000-02) 接続されており、圧力は 0~0.07 MPa の範囲で変化させた。この系を用いて、除電特性であるイオンバランスおよび、バイアス電圧、除電時間の評価を行った。

図 3.30 に、プレート近傍における (a) 正面および (b) 側面から見たときのエアノズルの配置図を示す。図に示したように、エアノズルは、フラット型のものを 2 個使用し、風がプレート全体に広がるようにした。また、エアノズルはプレート下部から 100 mm、プレート面から 5 mm の位置に設置した。図 3.31 に、プレート上の風速の計測点を示す。図に示すように、風速の計測は、上部、中央部、下部それぞれの中心の 3 点で計測を行い、その計測には熱線式風速計を用いた。表 3.3 に、風速の計測結果を示す。表より、プレート下部がもっとも風速が大きく、計測点がエアノズルから離れるとともに風速は減衰していることがわかる。また、圧力の増加とともにすべての計測点において、風速は増加している。

表 3.3 プレート下部から送風した場合における上部、中央、下部の風速

Pressure [kPa]	Air velocity [m/s]		
	Bottom side	Middle	Top side
0.01	2.4	2.0	1.6
0.03	4.8	3.7	3.3
0.05	6.5	4.9	4.4
0.07	8.5	7.1	6

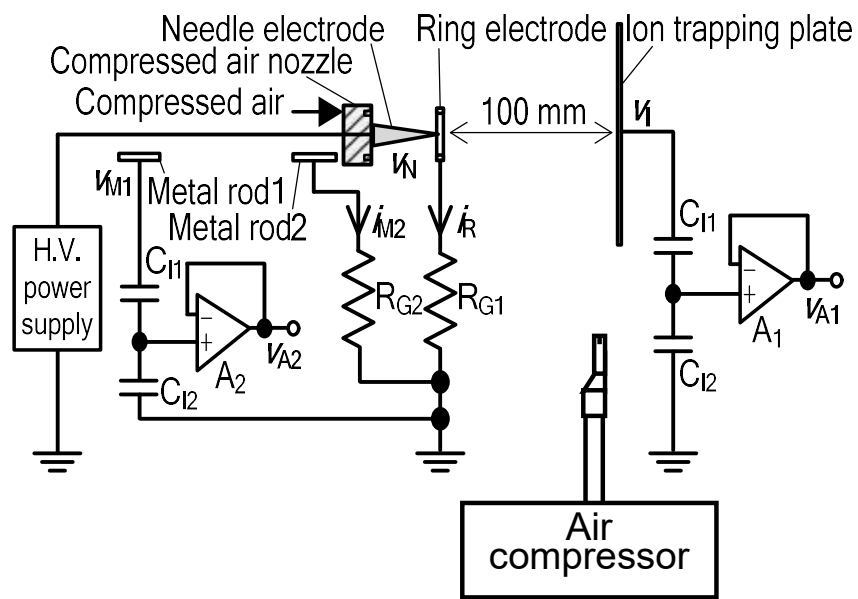


図 3.28 プレート下部から送風した場合の特性評価に用いた実験系の概略図

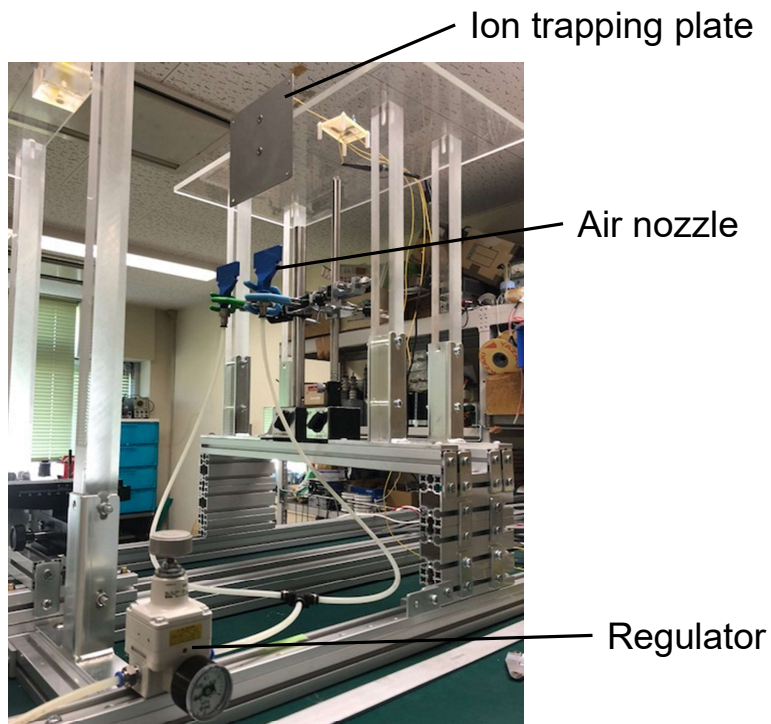


図 3.29 プレート下部から送風した場合の特性評価に用いた実験系のプレート近傍の概観

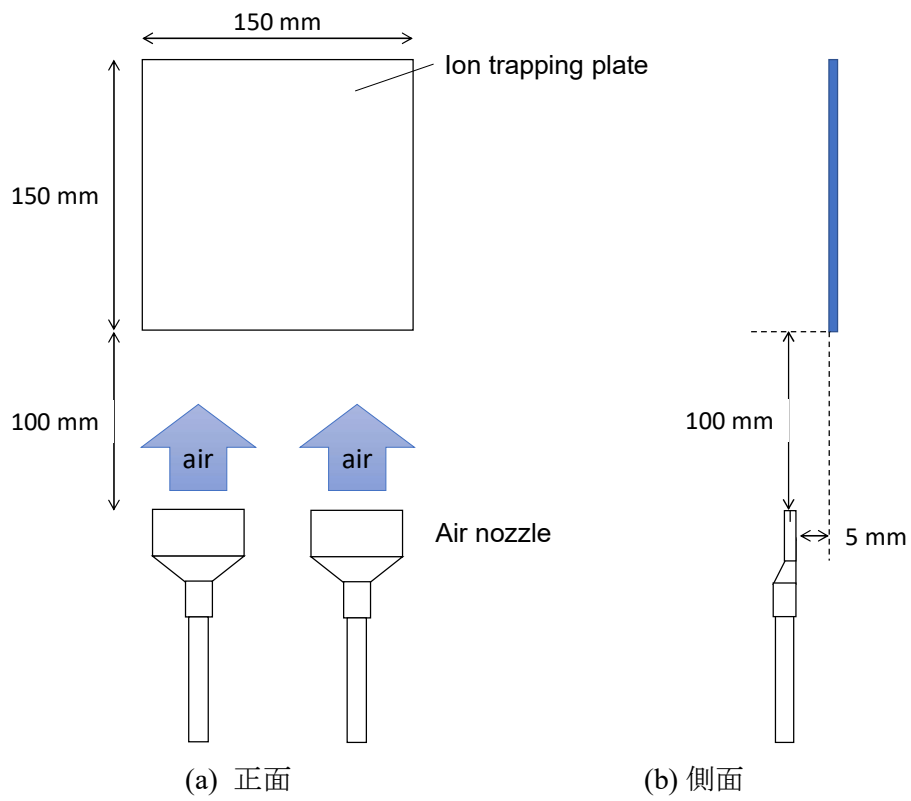


図 3.30 プレート近傍のエアノズル配置図 (a) 正面, (b) 側面

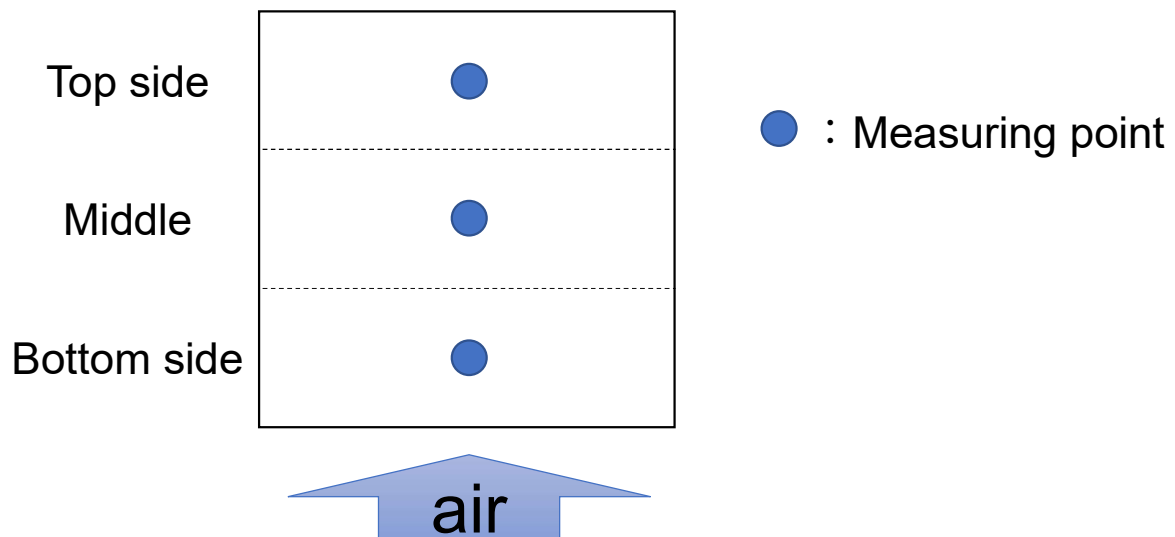


図 3.31 プレート下部から送風した場合におけるプレート上の風速の計測点

3.3.3.2 イオンバランスおよびバイアス電圧計測

図 3.32 に、プレート下部から送風した場合における周波数に対するイオンバランスの変化を示す。ここで、印加電圧の波高値は 8 kVp-p, 針後方に接続したエアノズルに対するエアコンプレッサ圧力は, 7 kPa とし, 周波数は 10~5000 Hz の範囲で変化させた。図より, イオンバランスの傾向は, プレート下部からの送風がないものと比較し変化がないことがわかる。また, プレート下部からの送風の風速が大きくなるほど, イオンバランスは減少していることがわかる。プレート近傍においてイオンの流入を妨げるように送風をした場合, 正負イオンどちらもその影響を受けるが, 移動度の小さい正イオンの方がより影響が大きく, プレートに正イオンが流入しにくくなったため, 図のような結果になったと考えられる。このことから, 空気イオンの移動度の違いに関して, 実験的に検証することができた。

図 3.33 に、プレート下部から送風した場合における周波数に対するバイアス電圧の変化を示す。図より, イオンバランスの結果と同様, 傾向に変化がないことがわかる。また, プレート下部からの送風の風速が大きくなるほど, バイアス電圧は増加する。

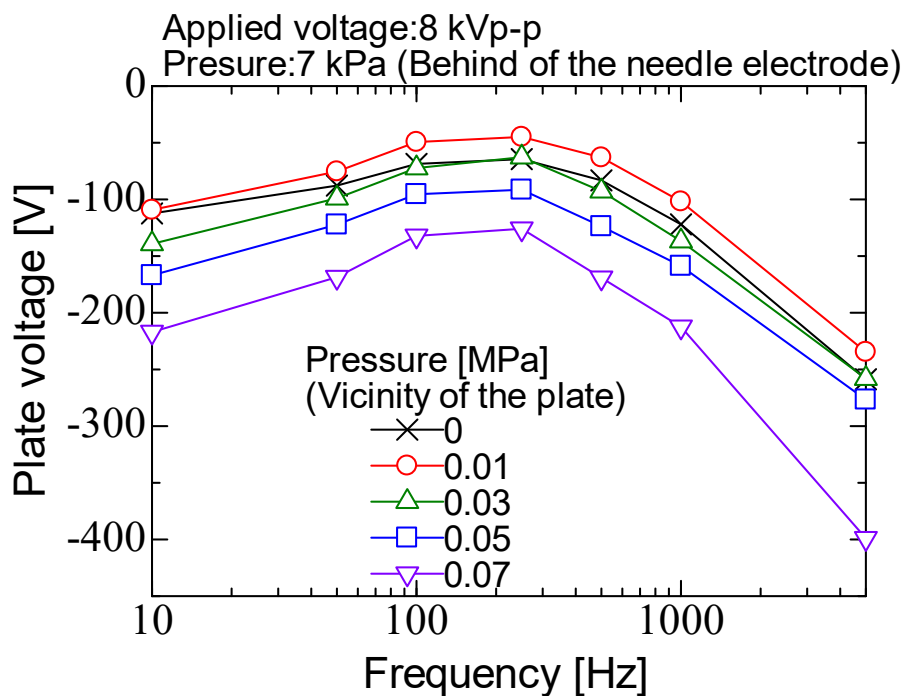


図 3.32 プレート下部から送風した場合における周波数に対するイオンバランス

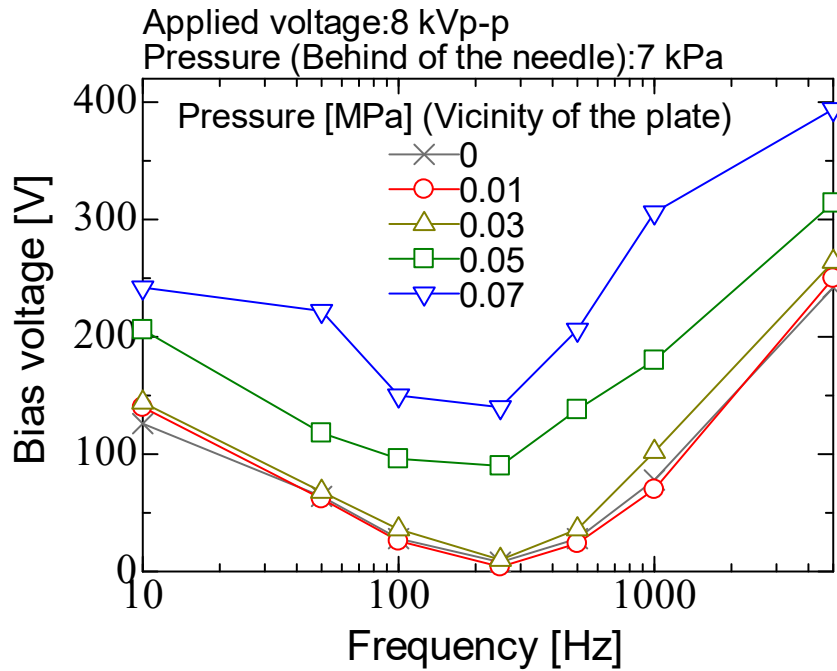


図 3.33 プレート下部から送風した場合における周波数に対するバイアス電圧

3.3.3.3 除電時間計測

図 3.34 に、プレート下部から送風した場合における周波数に対する (a) 正帯電、(b) 負帯電の除電時間の変化を示す。ここで、印加電圧の波高値は 8 kVp-p、針後方に接続したエアノズルに対するエアコンプレッサ圧力は 7 kPa とし、周波数を 10~5000 Hz の範囲で変化させた。図より、正負帯電どちらの場合においても、周波数の増加とともに除電時間は増加していることがわかる。また、プレート下部からの送風の風速が大きくなるほど除電時間は増加していることがわかる。これは、プレート下部からの送風により、プレートに流入するイオン量が減少しているためであると考えられる。また、プレート下部からの送風の風速が 0.03 MPa までは正帯電の方が除電時間は小さいが、0.05 MPa 以上では負帯電の方が小さくなっている。このことから、プレート下部からの送風の風速が大きくなるほど、バイアス電圧は増加する (図 3.33) ため、このバイアス電圧の増加により、正極性の放電電荷量が負よりも多くなった可能性が示唆された。この可能性の検証として、バイアス電圧を印加した際の放電電流波形の計測を行い、放電電荷量および換算電流の解析を行った。この結果については、次頁以降にて述べる。

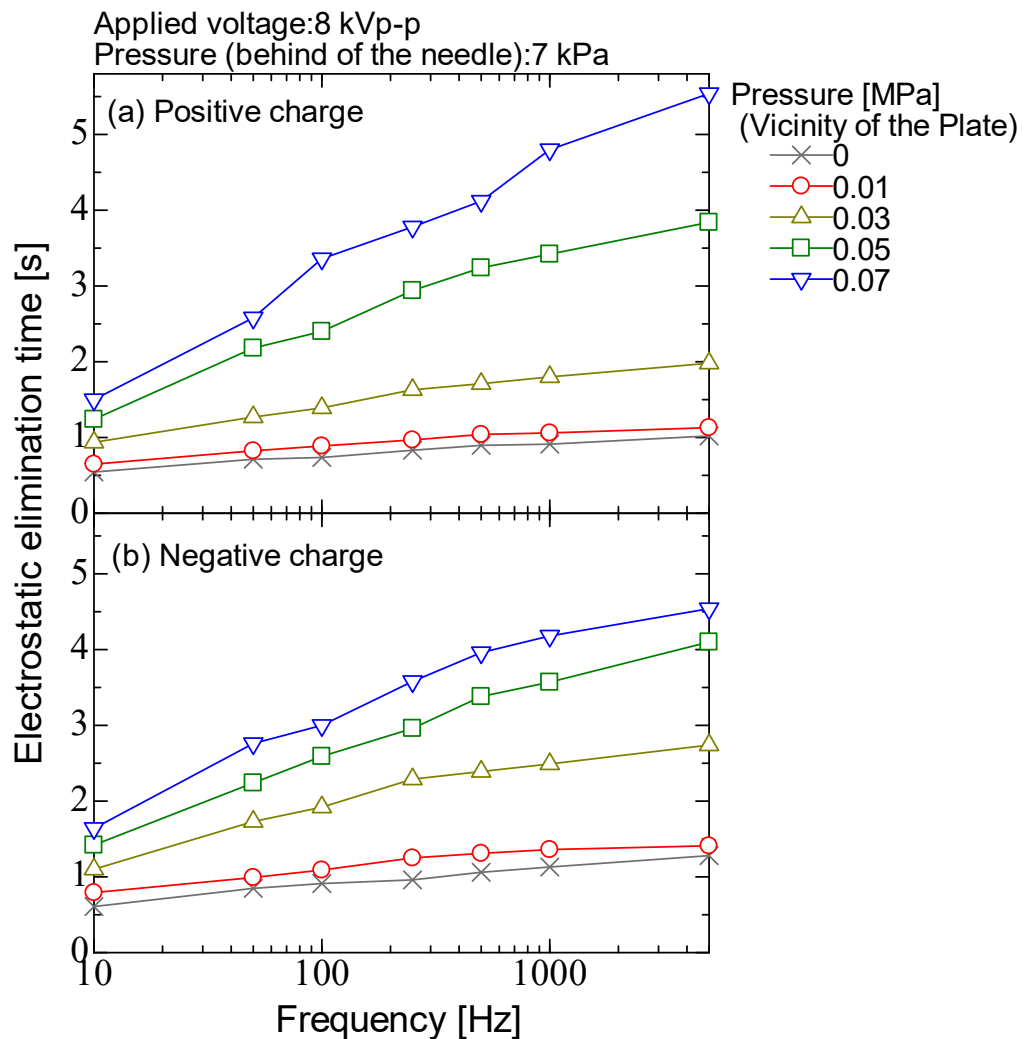


図 3.34 プレート下部から送風した場合における周波数に対する除電時間
(a) 正帯電, (b) 負帯電

3.3.3.4 バイアス電圧を印加した場合における放電電流波形の解析

最初に、プレート下部からの送風がない状況において、バイアス電圧を印加した場合の放電電流波形の解析結果について述べる。解析方法は、3.2.3.1 で述べた方法と同様である。表 3.4 に、今回印加したバイアス電圧の数値を示す。表のようにバイアス電圧を印加した場合の放電電流波形を取得し、解析を行った。ここで、印加電圧の波高値は 8 kVp-p、エアコンプレッサ圧力は 7, 20.3 kPa とし、周波数は 10~5000 Hz の範囲で変化させた。

表 3.4 プレート下部からの送風がない場合におけるバイアス電圧値 [V]

Frequency [Hz]	7 kPa	20.3 kPa
10	172	156
25	124	104
50	68	80
100	38	60
250	10	24
500	20	52
1000	68	114
2500	206	178
5000	256	266

図 3.35 に、バイアス電圧を印加した場合における周波数に対する正負半周期の放電電荷量の変化を示す。図 3.36 に、バイアス電圧を印加した場合における周波数に対する一周期の換算電流の変化を示す。換算電流は、図 3.35 の正負の放電電荷量を足し合わせたものを一周期の時間で除することで求めた。バイアス電圧を印加しない場合、放電によるイオン生成量は負の方が多かった (図 3.18) が、図より、バイアス電圧を印加した場合には、正と負極性の放電電荷量が同程度になることがわかった。

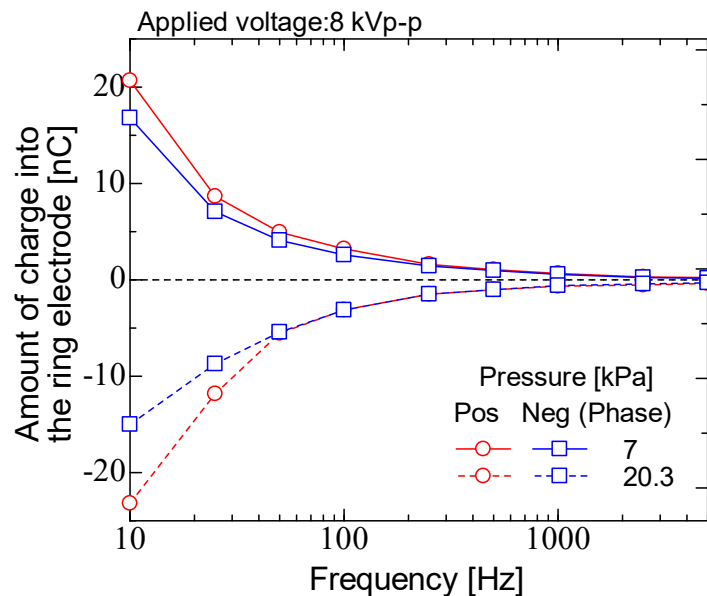


図 3.35 バイアス電圧を印加した場合における周波数に対する正負半周期の放電電荷量

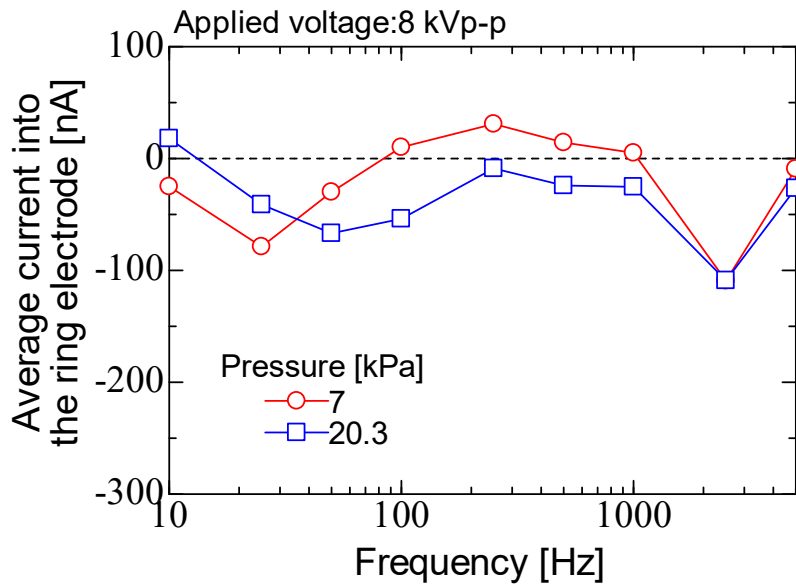


図 3.36 バイアス電圧を印加した場合における周波数に対する一周期の換算電流

次に、プレート下部から送風した状況において、バイアス電圧を印加した場合の放電電流波形の解析結果を述べる。前述したように、プレート下部からの送風がない場合では、正負極性の放電電荷量が同程度になることがわかった。しかし、プレート下部から送風した場合には、バイアス電圧の数値が表 3.4 より大きくなり、正極性の放電電荷量が負極性よりも多くなると考えられる。このことについての検証結果を以下に述べる。

表 3.5 に、プレート下部から 0.07 MPa で送風した場合におけるバイアス電圧の数値を示す。表のようにバイアス電圧を印加した場合の放電電流波形を取得し、解析を行った。ここで、印加電圧の波高値は 8 kVp-p、エアコンプレッサ圧力は 7 kPa とし、周波数は 10~5000 Hz の範囲で変化させた。

表 3.5 プレート下部から送風した場合におけるバイアス電圧値 [V]

Frequency [Hz]	0.07 MPa
10	242
50	222
100	150
500	206
1000	306
5000	394

図 3.37 に、プレート下部から 0.07 MPa で送風した場合のバイアス電圧を印加した場合における周波数に対する正負半周期の放電電荷量の変化を示す。図 3.38 に、プレート下部から 0.07 MPa で送風した場合のバイアス電圧を印加した場合における周波数に対する一周期の換算電流を示す。これらの図より、バイアス電圧が大きい場合において、放電電荷量は負よりも正極性の方が多くなることが確認できた。このことから、図 3.34 に示したような、プレート下部からの送風の風速が大きい場合において、正帯電のよりも負帯電の方の除電時間が小さい、という結果となったのは、やはりバイアス電圧の増加が要因であると考えられる。

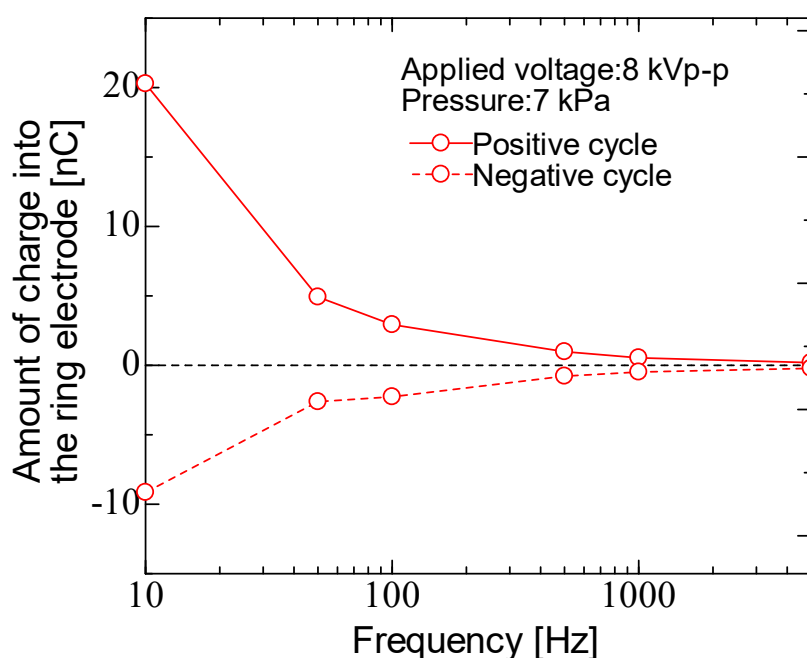


図 3.37 プレート下部から 0.07 MPa で送風した場合のバイアス電圧を印加した場合における周波数に対する正負半周期の放電電荷量

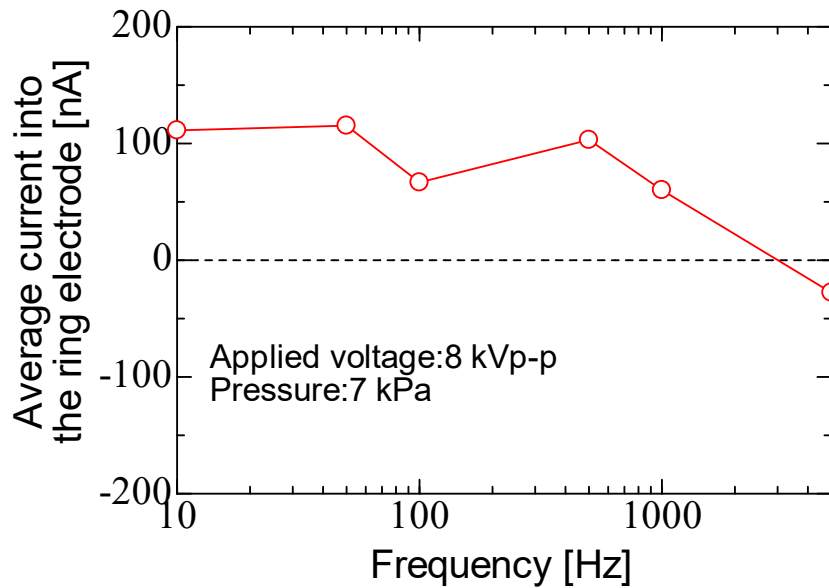


図 3.38 プレート下部から 0.07 MPa で送風した場合のバイアス電圧を印加した場合における周波数に対する一周期の換算電流

3.3.4 プレートサイズを変化させた場合の除電特性評価

3.3.4.1 イオン測定回路の容量調整

プレートサイズを変化させた場合には、プレートサイズに応じて浮遊容量が変化し、プレート側の回路容量も変化する。回路容量の違いにより、プレートに流入するイオン量に差異が生じてしまうため、容量を合わせる必要がある。そのため、図 3.1 に示したイオン測定回路の C_1 をプレートサイズごとに変化させ、回路容量が 20 ± 2 pF になるよう調整した。

表 3.6 に、調整した各プレートの C_1 (33 pF のコンデンサの直列数および容量値) と、プレート電圧 (v_p) と回路の出力電圧 (v_o) の分圧比 (v_o/v_p) を示す。表より、プレートサイズが大きいほど C_1 を小さくする必要があることがわかる。これは、プレートが大きくなるほど、それによる浮遊容量も増加するためであると考えられる。また、 C_1 を変化させたことで分圧比も変化しているため、イオンバランス計測の際には、表の分圧比から実際のプレート電位を求めた。

表 3.6 各プレートの C_1 と分圧比

Plate (one side) [mm]	Number of series	Capacitance of C_1 [pF]	v_o/v_p
50	2	16.5	1 / 59
100	2	16.5	1 / 60
150	3	11	1 / 85
200	4	8.25	1 / 116
250	6	5.50	1 / 144
300	8	4.13	1 / 201

3.3.4.2 イオンバランス計測

図 3.39 に、プレートサイズおよび周波数を変化させた場合におけるプレートサイズに対するイオンバランスの変化を示す。ここで、印加電圧の波高値は 8 kVp-p, 周波数は 10, 250, 5000 Hz, エアコンプレッサ圧力は (a) 7 kPa, (b) 20.3 kPa, 針 - プレート間距離は 100 mm とした。図より、プレートサイズによらず、イオンバランスは一定の傾向であることがわかる。プレート側の回路容量は、すべてのプレートに関して同程度に調整しているため、流入するイオン量はプレートサイズによらず一定となることが示唆された。

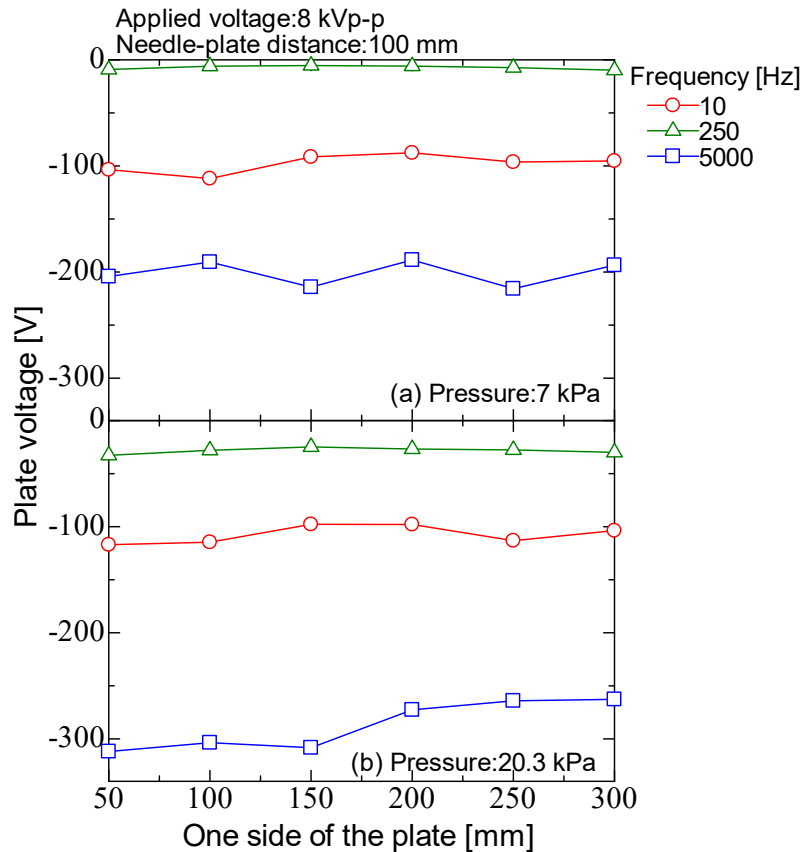


図 3.39 プレートサイズおよび周波数を変化させた場合におけるプレートサイズに対するイオンバランス, (a) 7 kPa, (b) 20.3 kPa

3.3.4.3 除電時間計測

図 3.40 に、プレートサイズおよび周波数を変化させた場合におけるプレートサイズに対する (a) 正帯電, (b) 負帯電の除電時間の変化を示す. ここで、印加電圧の波高値は 8 kVp-p, 周波数は 10, 250, 5000 Hz, エアコンプレッサ圧力は 7, 20.3 kPa, 針 - プレート間距離は 100 mm とした. 図より、プレートサイズが大きくなるほど除電時間は減少するが、250, 300 mm の場合には、反対に増加するような傾向を示すことがわかる. 除電時間が減少する傾向は、プレートが大きくなることで、より多くのイオンを捕集できているためであると考えられる. 除電時間が増加する傾向は、プレートが大きくなることで単位面積あたりの電荷量が減少し、それによるクーロン力が減少するためであると考えられる. しかし、これらは要因の一つとして考えられるものであり、明確な部分は不明である.

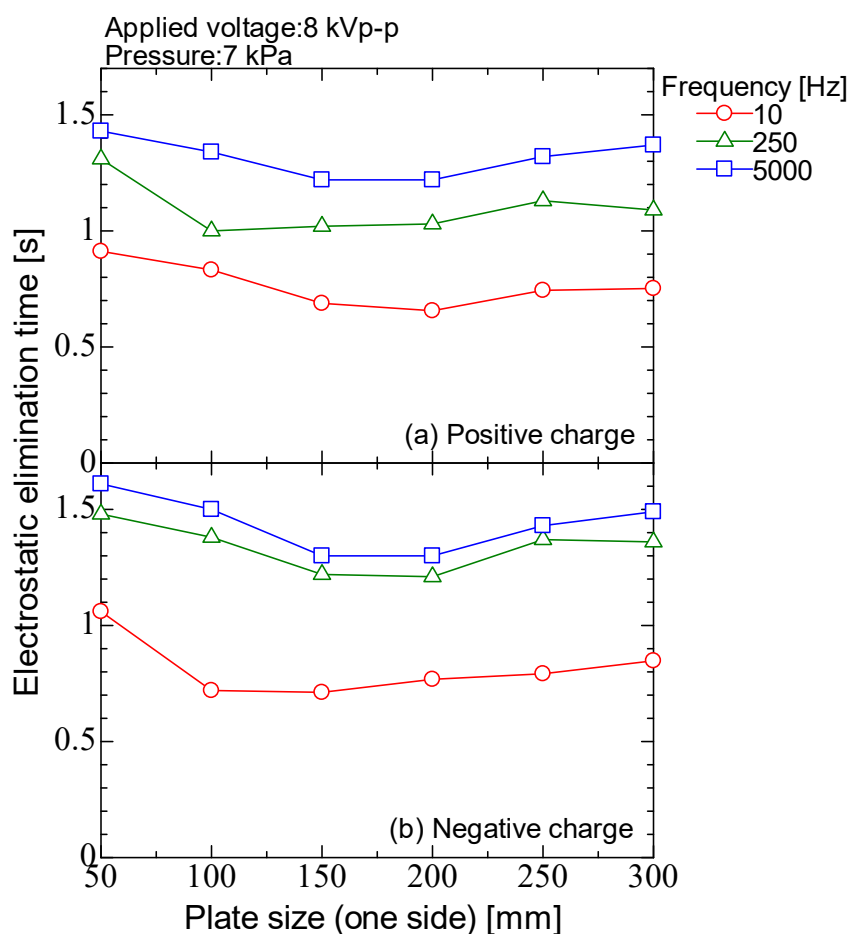


図 3.40 プレートサイズおよび周波数を変化させた場合におけるプレートサイズに対する除電時間, (a) 正帯電, (b) 負帯電

図 3.41 に、プレートサイズおよび針 - プレート間距離を変化させた場合におけるプレートサイズに対する (a) 正帯電, (b) 負帯電の除電時間の変化を示す。ここで、印加電圧の波高値は 8 kVp-p, 周波数は 250 Hz, エアコンプレッサ圧力は 7 kPa とし、針 - プレート間距離を 50~300 mm の範囲で変化させた。図より、一辺の長さが 150 mm 程度までは長さの増加により除電時間が短くなる一方、それ以上はほとんど変化しないことがわかる。このことから、現在の電極の除電範囲は、 $150 \times 150 \text{ mm}^2$ 程度であることが明らかになった。また、図より、針からの距離が大きくなるほど、プレートサイズに対する除電時間の減少幅が増加していることがわかる。針 - プレート間が広がるほど、運搬の過程でイオンはプレート外に逸れやすくなり、さらにプレートが小さい場合には、それは顕著となる。そのため、プレートサイズが 50 mm と小さい場合に除電時間が最も大きく、また、針 - プレート間距離が 300 mm と大きい場合に減少幅が最も大きくなったと考えられる。

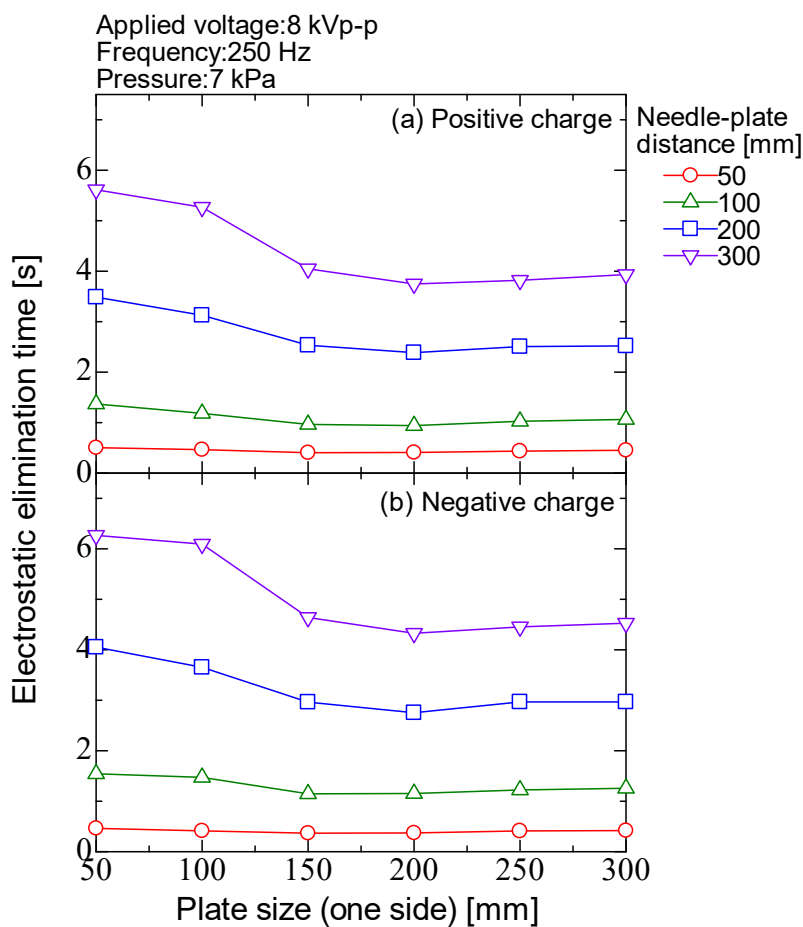


図 3.41 プレートサイズおよび針-プレート間距離を変化させた場合におけるプレートサイズに対する除電時間, (a) 正帯電, (b) 負帯電

3.4 印加電圧の Duty 比を変化させた場合の特性評価

3.4.1 コロナ放電特性

図 3.42 に, Duty 比を変化させた場合の典型的な放電電流波形を示す. ここで, 印加電圧の波高値は 8 kVp-p, 周波数は 5 kHz, エアコンプレッサ圧力は 7 kPa, Duty 比は 60%としている. 本節で述べる Duty 比は, 一周期に対する正極性の周期の割合である. 図より, Duty 比を変化させた場合, Duty 比が 50%のもの (図 3.11) と比較しても放電電流波形に特に変化はないことがわかる. このような波形を取得し, 放電電荷量と換算電流の解析を行った. 放電電流波形の計測は, 印加電圧の波高値が 8 kVp-p, 周波数が 10~5000 Hz, Duty 比が 20~80%, エアコンプレッサ圧力が 7~20.3 kPa で行われた. 解析方法については, 3.3.1 で述べた方法と同様である. ただし, T は正極性および負極性の印加時間, または一周期の時間である.

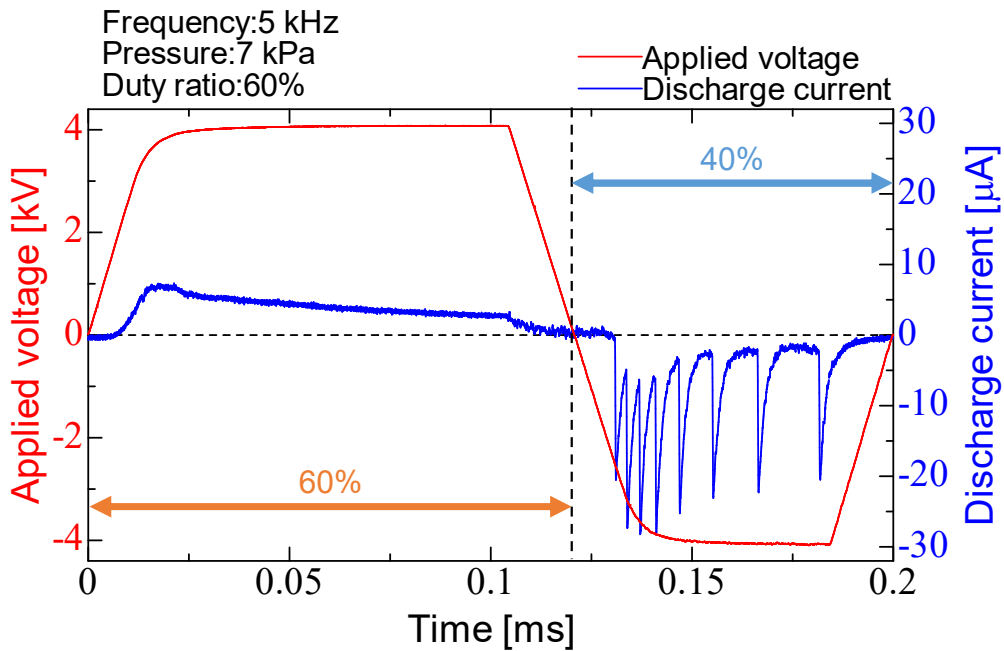


図 3.42 Duty 比を変化させた場合の典型的な放電電流波形

図 3.43 に、周波数および Duty 比を変化させた場合における周波数に対する正極性周期の放電電荷量の変化を示す。ここで、(a) は 7 kPa, (b) は 12.5 kPa, (c) は 20.3 kPa となる。一周期図より、周波数の増加とともに放電電荷量は減少していることがわかる。これは、周波数の増加により、一周期の時間が短くなり放電期間が減少するためである。また、風速の増加においても減少していることがわかる。これは、風速の増加により、プレート側に輸送されるイオン量が増え、リング電極に流入する量が減少するためである。また、Duty 比の増加とともに放電電荷量が増加していることがわかる。図 3.44 に、周波数および Duty 比を変化させた場合における周波数に対する負極性周期の放電電荷量の変化を示す。ここで、(a) は 7 kPa, (b) は 12.5 kPa, (c) は 20.3 kPa となる。図より、Duty 比の増加とともに放電電荷量は減少していることがわかる。図 3.45 に、周波数および Duty 比を変化させた場合における周波数に対する一周期の放電電荷量の変化を示す。ここで、(a) は 7 kPa, (b) は 12.5 kPa, (c) は 20.3 kPa となる。図より、Duty 比が小さいほど負の放電電荷量が多く、Duty 比が大きくなるにつれ一周期の放電電荷量は正の値になることがわかる。

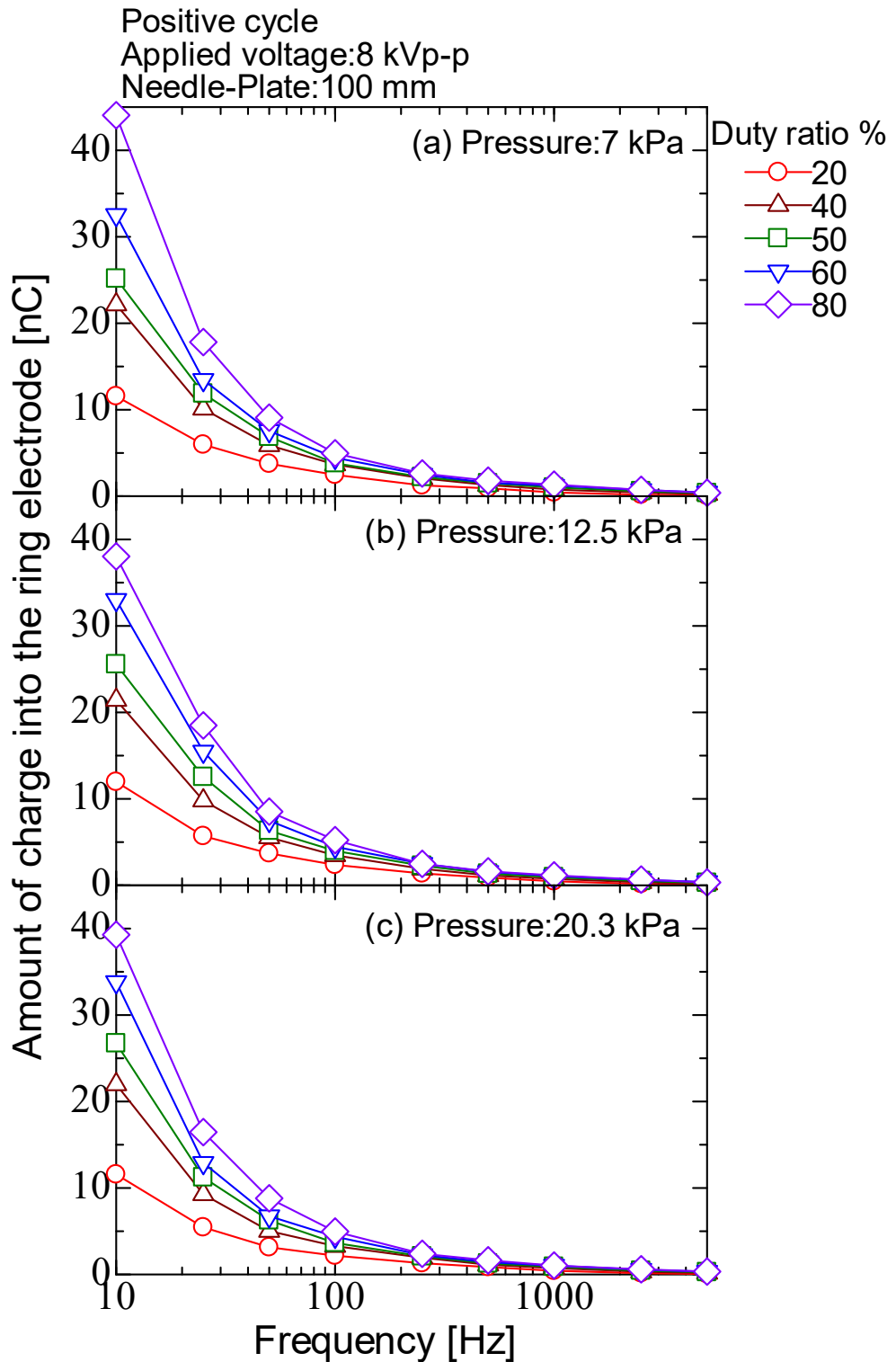


図 3.43 周波数および Duty 比を変化させた場合における周波数に対する正極性周期の放電電荷量
(a) 7 kPa, (b) 12.5 kPa, (c) 20.3 kPa

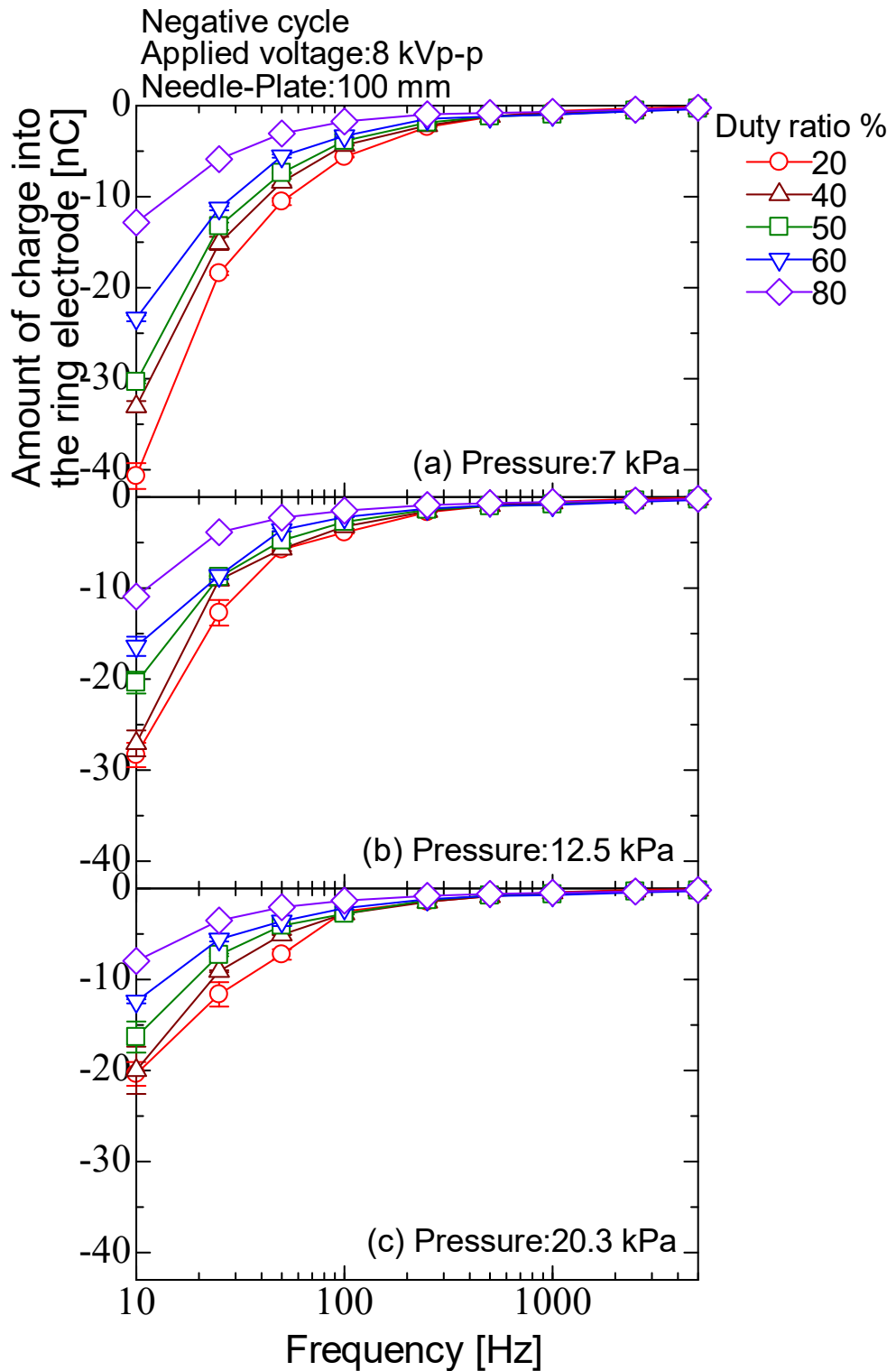


図 3.44 周波数および Duty 比を変化させた場合における周波数に対する負極性周期の放電電荷量
(a) 7 kPa, (b) 12.5 kPa, (c) 20.3 kPa

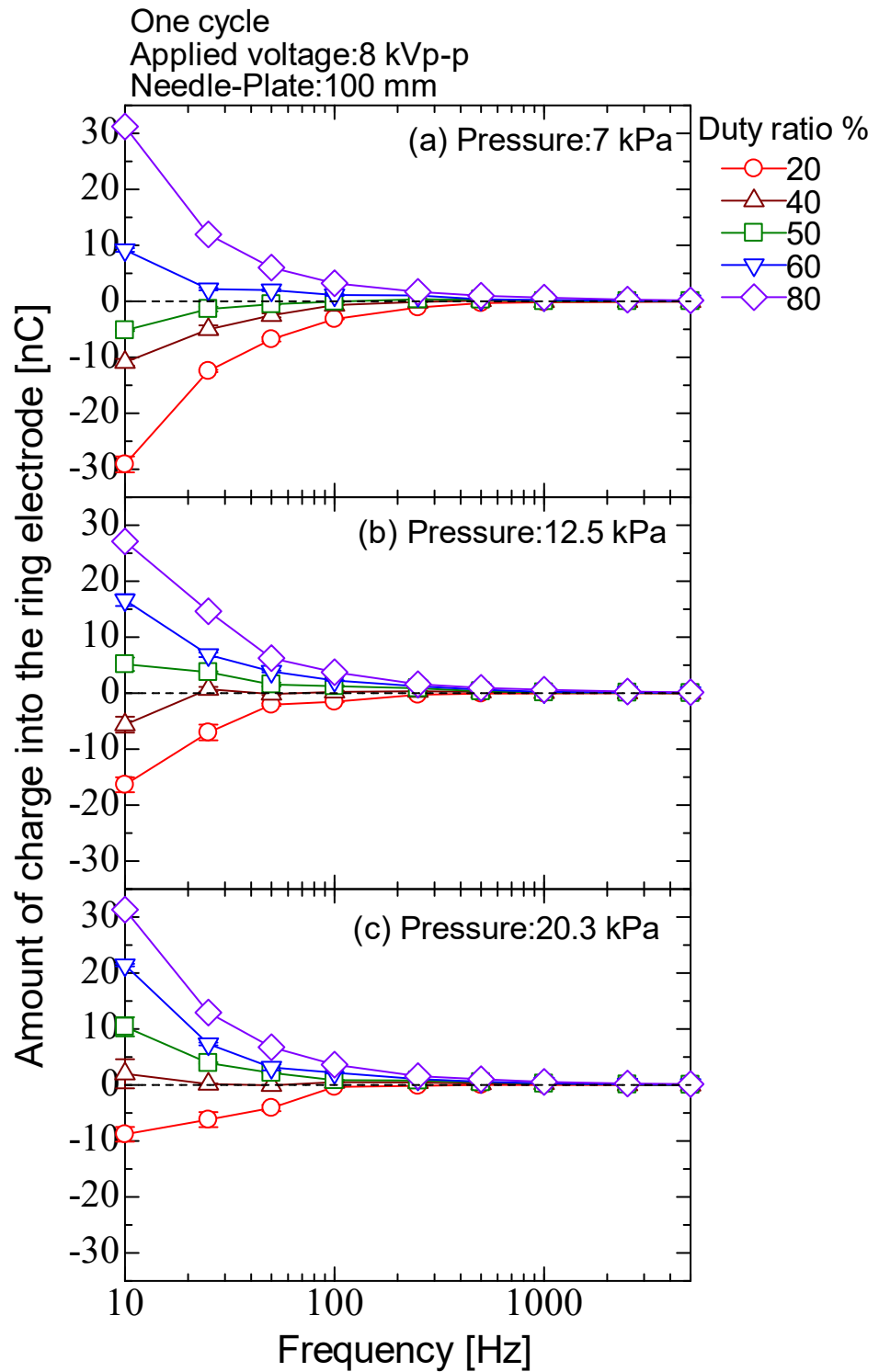


図 3.45 周波数および Duty 比を変化させた場合における周波数に対する一周期の放電電荷量
(a) 7 kPa, (b) 12.5 kPa, (c) 20.3 kPa

図 3.46 に、放電電荷量より算出した周波数に対する正極性周期の換算電流の変化を示す。ここで、(a) は 7 kPa, (b) は 12.5 kPa, (c) は 20.3 kPa となる。図より、周波数の増加とともに換算電流は増加していることがわかる。これは、周波数が大きくなるほど極性切替直後の部分の割合が大きくなるためである。また、Duty 比が 20% の場合には、他の Duty 比の結果とは異なる傾向を示した。図 3.47 に、放電電荷量より算出した周波数に対する負極性周期の換算電流の変化を示す。ここで、(a) は 7 kPa, (b) は 12.5 kPa, (c) は 20.3 kPa となる。図より、高周波数において、Duty 比の増加とともに換算電流が増加していることがわかる。Duty 比が大きくなるほど負の放電期間は短くなり、正から負に極性が切り替わった直後の割合が増加するため、同周波数において換算電流が増加したと考えられる。また、正極性の場合でも似たような傾向がみられるが、正よりも負極性の方が極性切替直後の放電量が多いため、負極性の傾向の方が顕著となったと考えられる。図 3.48 に、放電電荷量より算出した周波数に対する一周期の換算電流の変化を示す。ここで、(a) は 7 kPa, (b) は 12.5 kPa, (c) は 20.3 kPa となる。図より、Duty 比が 20~60% の場合、周波数変化による変動幅は 200 nA 程度であることがわかる。また、Duty 比が 80% の場合には、周波数の増加とともに増加していることがわかる。Duty 比が小さい場合には放電期間の長い負極性の傾向、Duty 比が大きい場合には放電期間の長い正極性の傾向に似た傾向となったと考えられる。

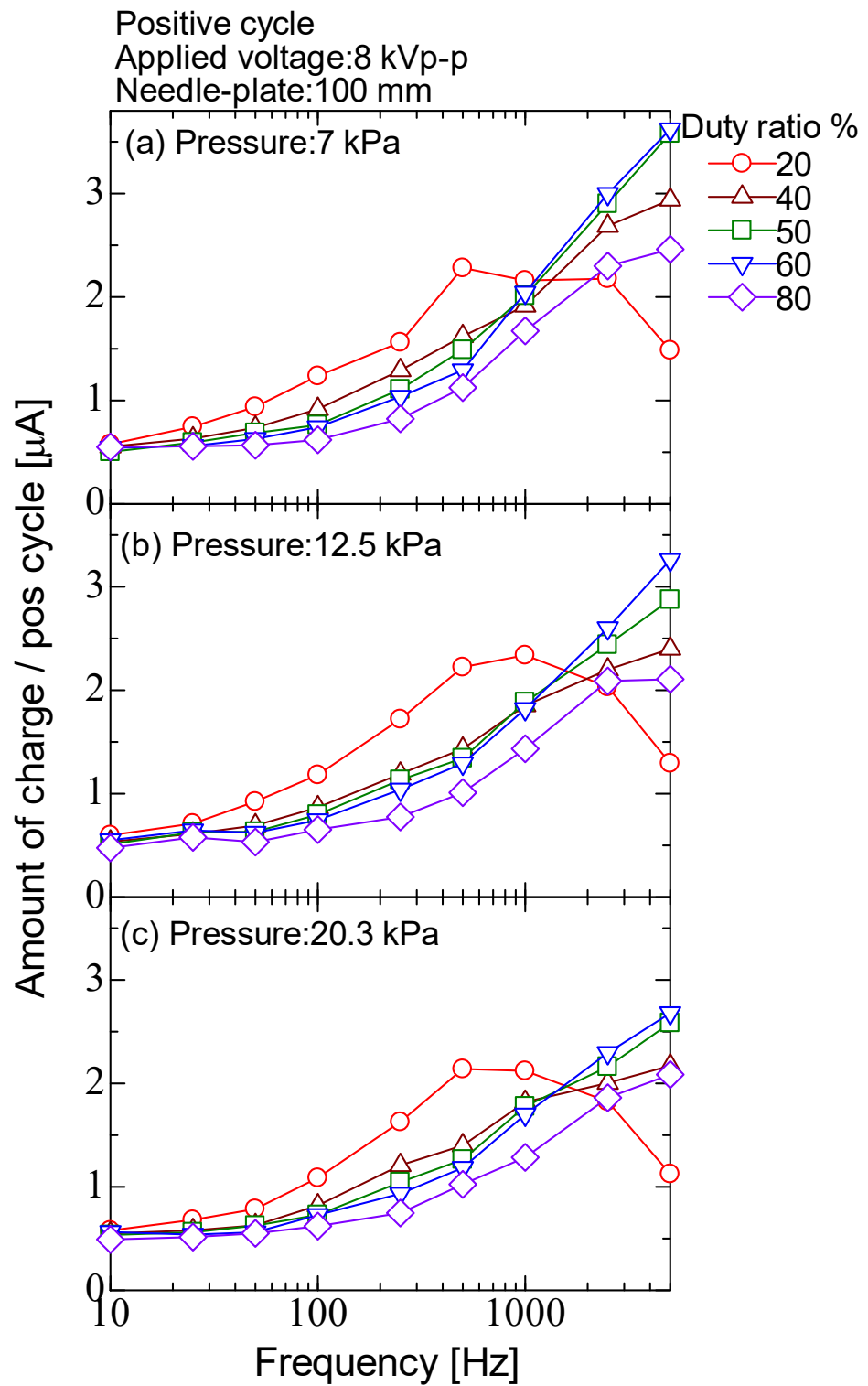


図 3.46 周波数および Duty 比を変化させた場合における周波数に対する正極性周期の換算電流

(a) 7 kPa, (b) 12.5 kPa, (c) 20.3 kPa

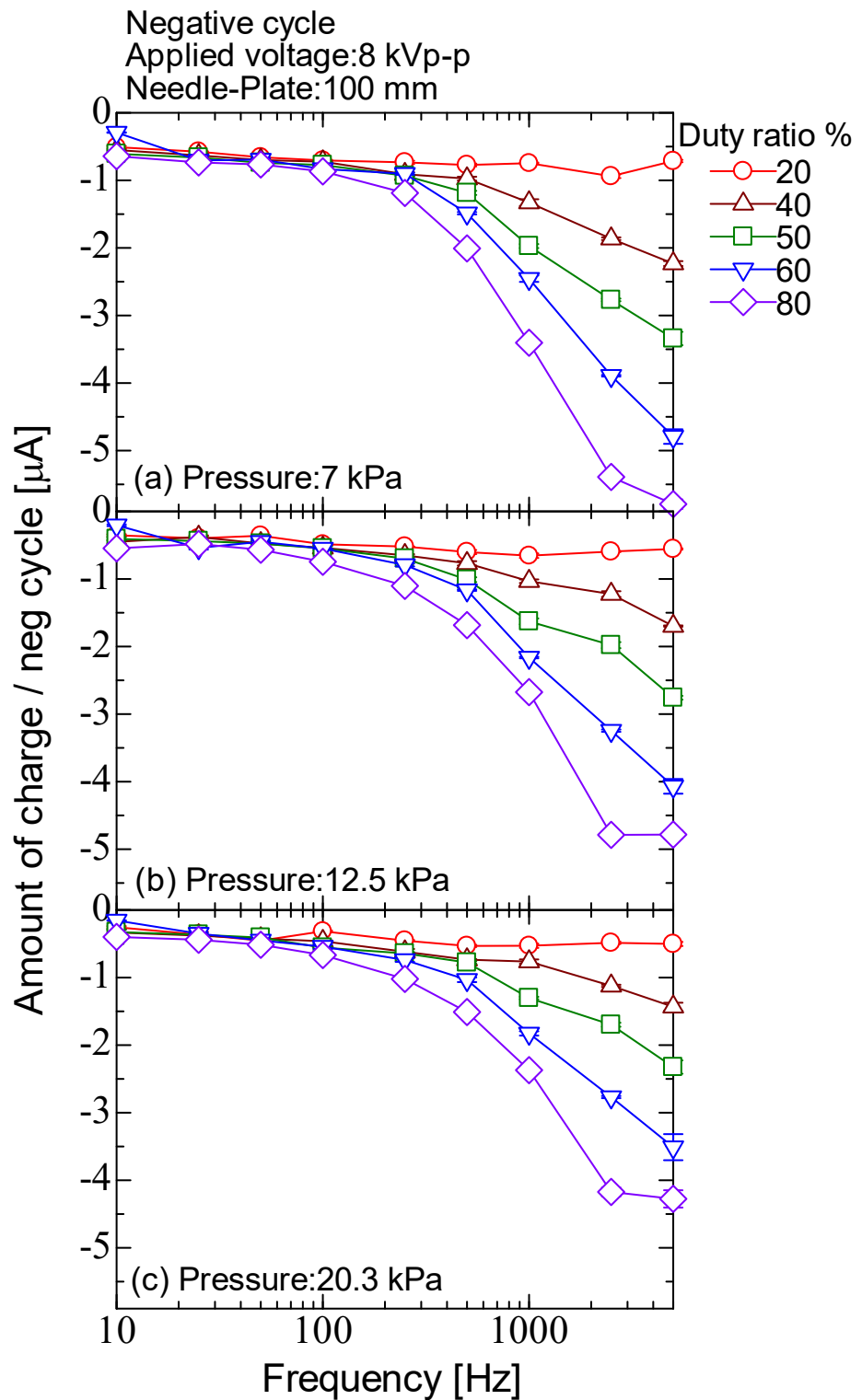


図 3.47 周波数および Duty 比を変化させた場合における周波数に対する負極性周期の換算電流

(a) 7 kPa, (b) 12.5 kPa, (c) 20.3 kPa

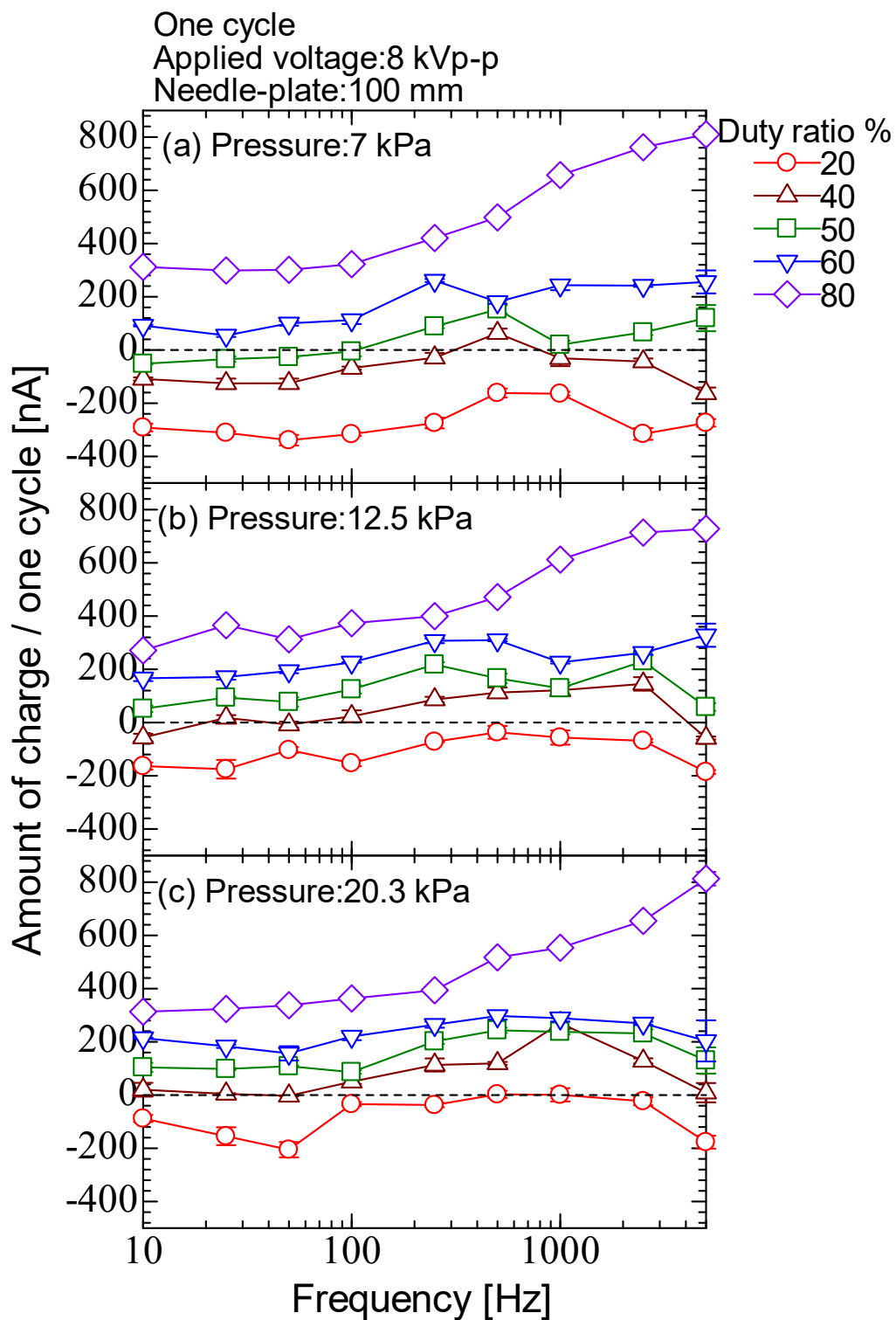


図 3.48 周波数および Duty 比を変化させた場合における
周波数に対する一周期の換算電流
(a) 7 kPa, (b) 12.5 kPa, (c) 20.3 kPa

3.2.3 で述べたように、放電波形の取得は正と負の周期それぞれで行っている。しかし、周波数が大きく、Duty 比が 20%や 80%の場合には、印加電圧の dV/dt の影響により正もしくは負極性の計算期間が短くなってしまい、正しく算出できていない可能性がある。図 3.49 に、周波数が 5 kHz、Duty 比が 80%の場合における負極性の放電電流波形を示す。他の条件は、印加電圧の波高値が 8 kVp-p、エアコンプレッサ圧力は 7 kPa である。図のように、負極性を拡大して表示した場合、正極性の変位電流は観測することができないため、印加電圧の立ち上がりの部分 (灰色で示した部分) は無視して計算していた。しかし、周波数、Duty 比がともに大きい場合には、この部分の割合が大きくなるため、立ち上がり部 (正周期なら立下り部) も含めた計算をし、本当に無視していいかを確認する必要がある。立ち上がり、立下り部を無視せず計算するには、正と負の周期を分けて取得するのではなく、一周期で波形を取得すればよい。そこで、一周期での波形取得のため、オシロスコープ (Tektronix, DPO4104B) のハイレゾモードを用いた。これは、垂直軸の分解能を 8 bits から 11 bits に変更しての測定が可能になるモードである。これにより、分解能が大きくなり、一周期での波形観測が可能となる。図 3.50 に、ハイレゾモードで計測した Duty 比 20%における周波数に対する正極性の換算電流の変化を示す。図 3.51 に、ハイレゾモードで計測した Duty 比 80%における周波数に対する負極性の換算電流の変化を示す。図 3.52 に、ハイレゾモードで計測した Duty 比変化における周波数に対する一周期の換算電流の変化を示す。ここで、印加電圧の波高値は 8 kVp-p、エアコンプレッサ圧力は 7 kPa とし、周波数は 100~5000 Hz の範囲で変化させた。これらの図より、一周期で波形を取得し立ち上がり、立下り部を考慮して計算した換算電流の傾向は、各周期で波形を取得したものと比較し、傾向に変化がないことがわかる。これより、各条件における傾向の比較の際には、立ち上がり、立下り部を無視しても問題ないと考える。ただし、周波数と Duty 比が大きくなるほど、数値としては正確性に欠けるため、その場合には上記のような計測が必要となる。

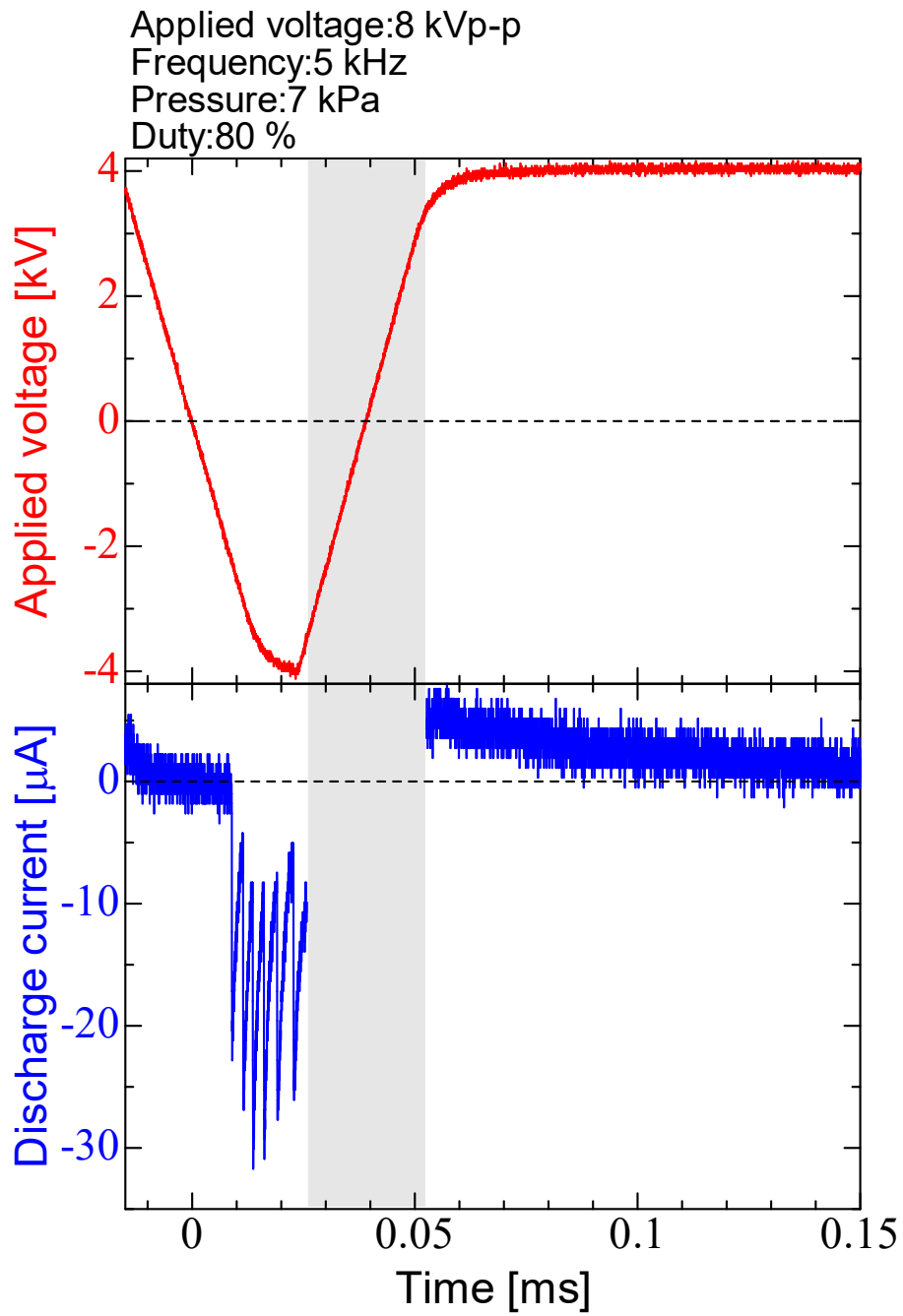


図 3.49 負極性の放電電流波形 (周波数 : 5 kHz, Duty 比 : 80%)

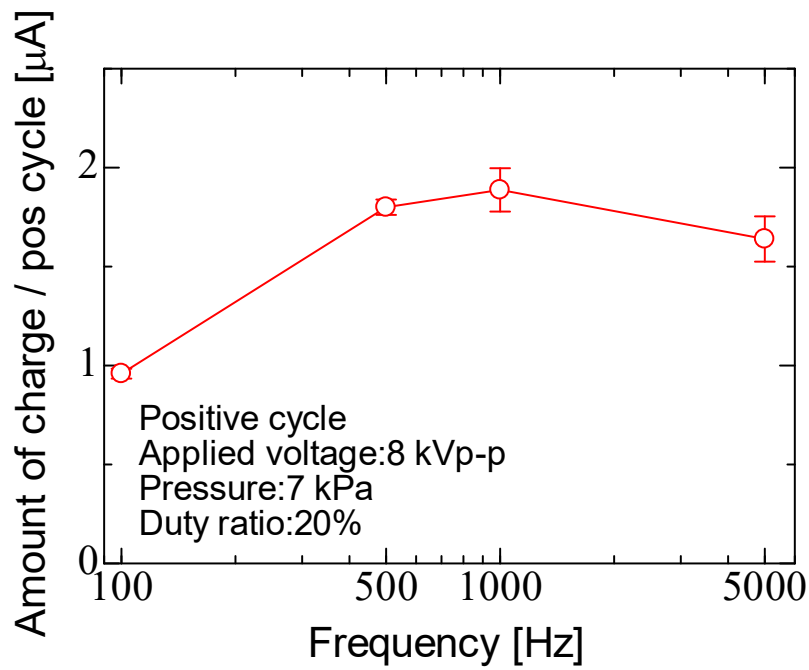


図 3.50 Duty 比 20%における周波数に対する正極性の換算電流 (ハイレゾモード)

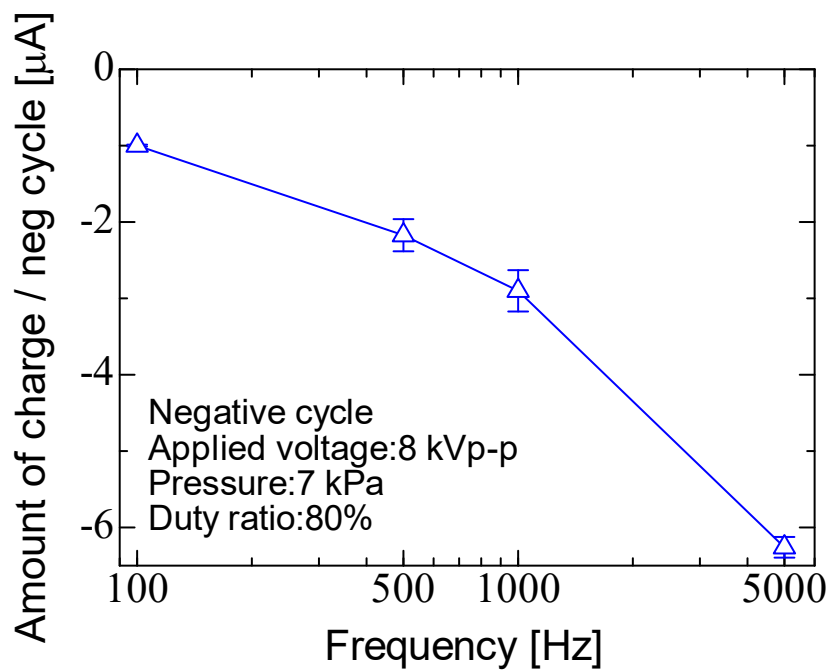


図 3.51 Duty 比 80%における周波数に対する負極性の換算電流 (ハイレゾモード)

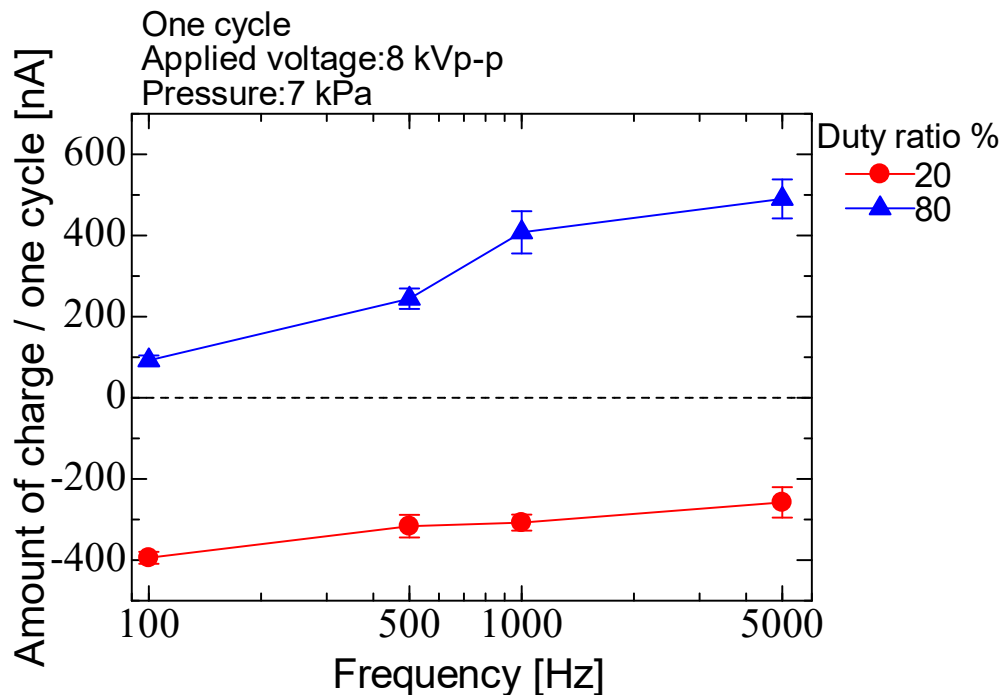


図 3.52 Duty 比変化における周波数に対する一周期の換算電流 (ハイレゾモード)

3.4.2 除電特性

3.4.2.1 除電時間計測

図 3.53 に、イオンバランスを 0 V にしたときの Duty 比および、そのときの周波数に対する除電時間の変化を示す。ここで、印加電圧の波高値は 8 kVp-p、エアコンプレッサ圧力は 7 kPa とし、周波数を 10~5000 Hz の範囲で変化させた。図より、イオンバランスを 0 V にするための Duty 比は、今回の周波数の範囲では 10% よりも小さい変化幅であることがわかる。また、除電時間については、バイアス電圧でイオンバランスを調整したもの (図 3.21) と比較し、同様の傾向であった。図 3.54 に、イオンバランスを 0 V にしたときの Duty 比および、そのときの印加電圧の波高値に対する除電時間の変化を示す。ここで、周波数は (a) 10 Hz, (b) 250 Hz, (c) 1 kHz, エアコンプレッサ圧力は 7 kPa とし、印加電圧の波高値は 8~13 kVp-p の範囲で変化させた。図より、イオンバランスを 0 V にするための Duty 比は、今回の印加電圧の範囲では 10% よりも小さい変化幅であることがわかる。また、除電時間については、バイアス電圧でイオンバランスを調整したもの (図 3.22) と比較し、同様の傾向であった。

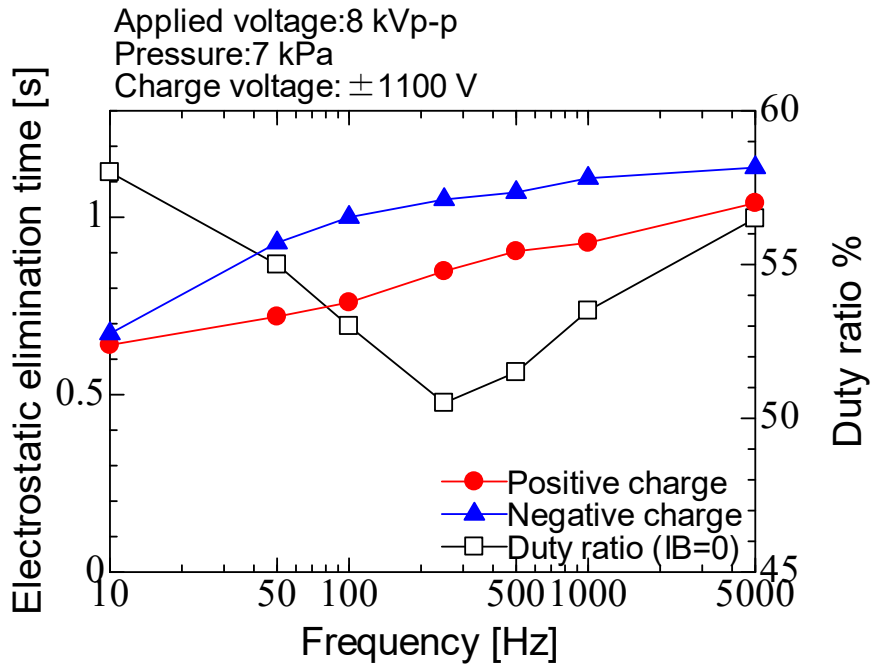
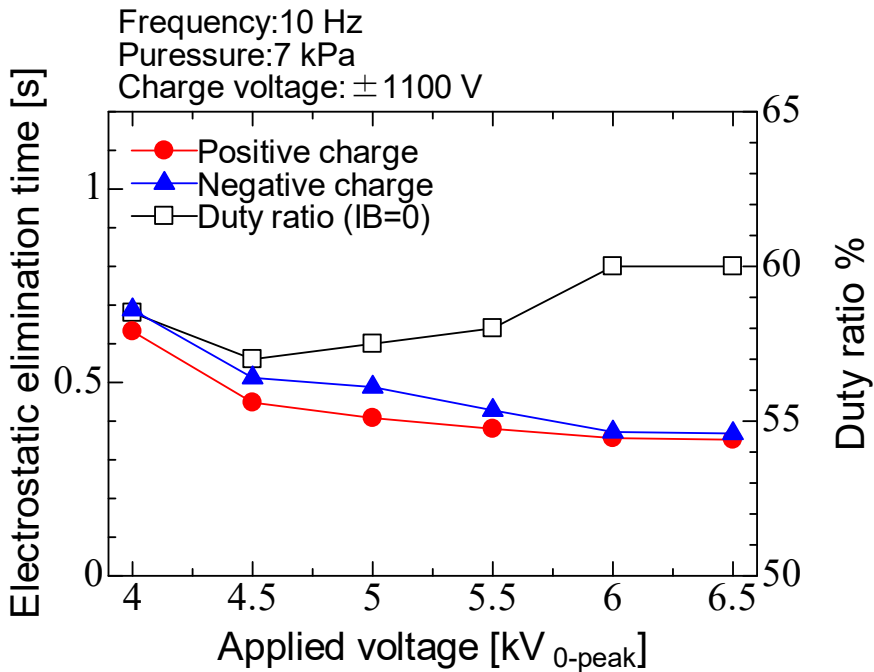
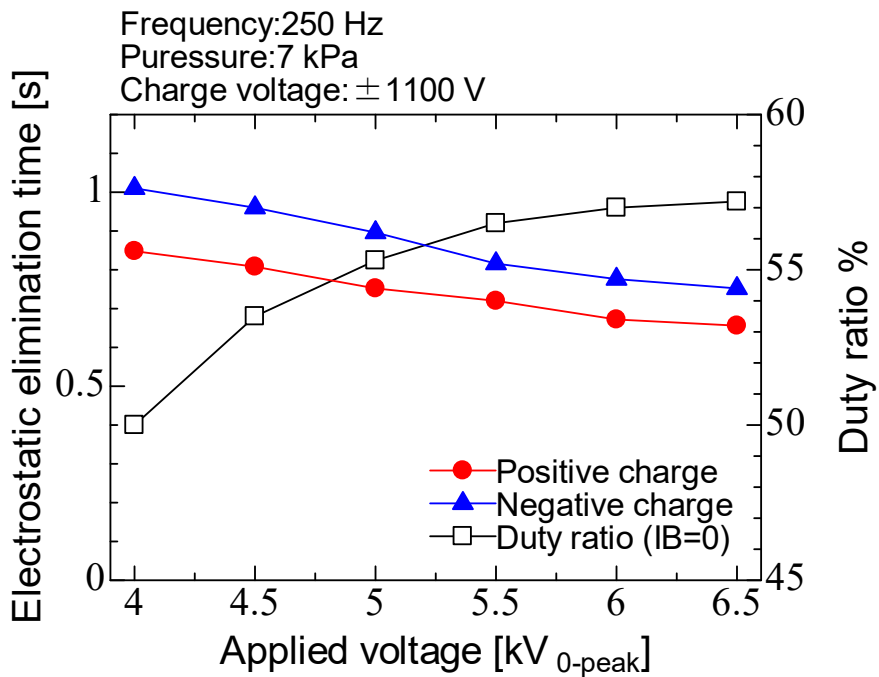


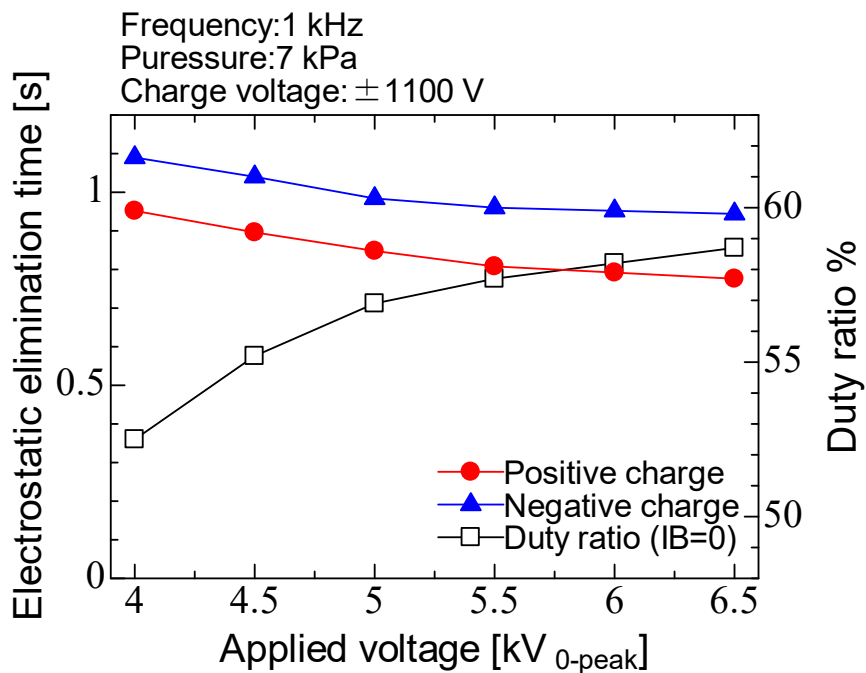
図 3.53 イオンバランスを 0 V にしたときの Duty 比およびそのときの周波数に対する除電時間



(a) Frequency: 10 Hz



(b) Frequency: 250 Hz



(c) Frequency: 1 kHz

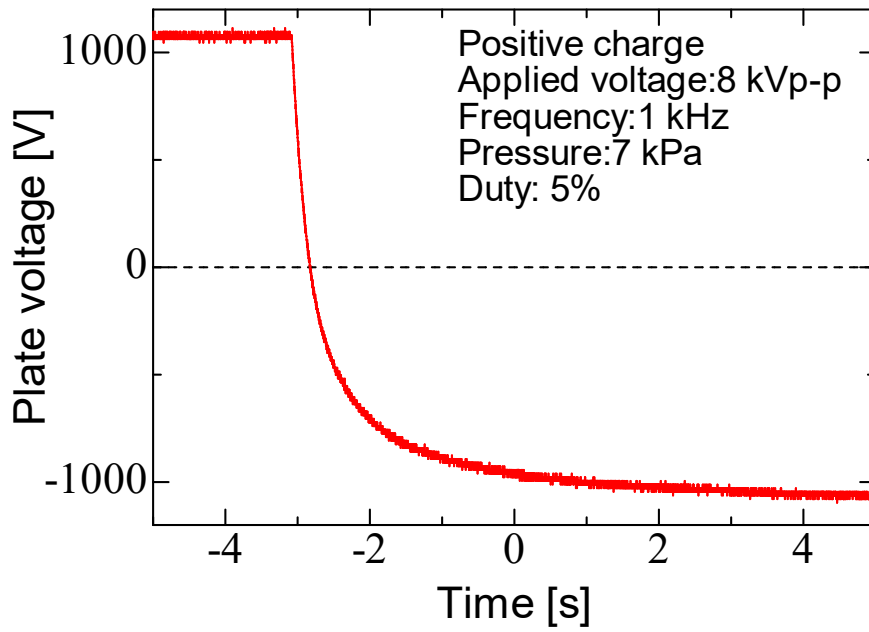
図 3.54 イオンバランスを 0 V にしたときの Duty 比および印加電圧の波高値に対する除電時間

(a) 10 Hz, (b) 250 Hz, (c) 1 kHz

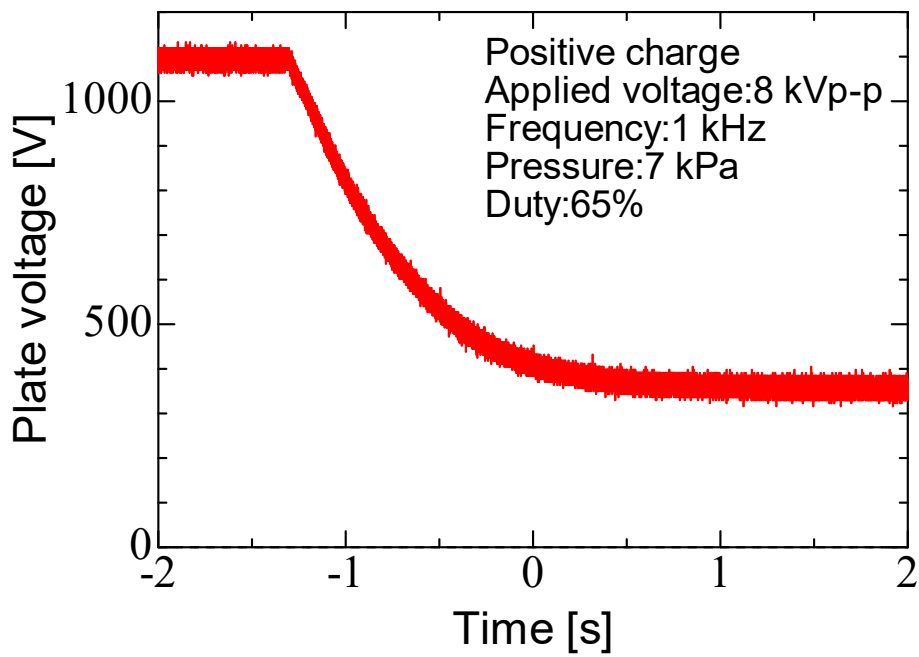
3.4.2.2 プレートへの流入電流

Duty 比変化によるプレートへの流入電流を調べるために、プレートを ± 1.1 kV に帯電させた場合における様々な Duty 比の除電波形を取得した。そして、その波形より計測した減衰時間および式 (3.4), 式 (3.5) を用いて、流入電流量を求めた。今回、減衰時間は、プレート電圧が $\pm 1000 \sim \pm 500$ V となるまでの時間とした。図 3.55 に、正帯電の場合における Duty 比が (a) 5%, (b) 65% の除電波形を示す。ここで、印加電圧の波高値は 8 kVp-p, 周波数は 1 kHz, エアコンプレッサ圧力は 7 kPa としている。図より、正帯電において、Duty 比が小さいほど 500 V までの減衰時間は早いことがわかる。負帯電においては、Duty 比が大きいほど -500 V までの減衰時間は早くなる。

図 3.56 に、Duty 比を変化させた場合における Duty 比に対する (a) 正帯電, (b) 負帯電の流入電流量の変化を示す。ここで、印加電圧の波高値は 8 kVp-p, 周波数は 1 kHz, エアコンプレッサ圧力は 7 kPa とし、Duty 比を 5~95% の範囲で変化させた。また、Duty 比が 65% より大きい場合では、プレートの電圧が 500 V 以下にならないため、流入電流量を算出できなかった。負帯電においても同様の理由により、35% より小さい場合の流入電流量は求めていない。図より、Duty 比を変化させることにより、帯電物に流入する電流、つまりイオン量を連続的かつ線形的に制御できることがわかった。Duty 比の調整によるイオンバランスの調整は、正負の電圧波高値を別々に制御しイオンバランスを制御する従来の方式と比較し、高圧電源の電氣的設計という観点から容易かつ安定した制御が可能となる。



(a) Duty ratio: 5%



(b) Duty ratio: 65%

図 3.55 正帯電の場合における除電波形, Duty 比 : (a) 5%, (b) 65%

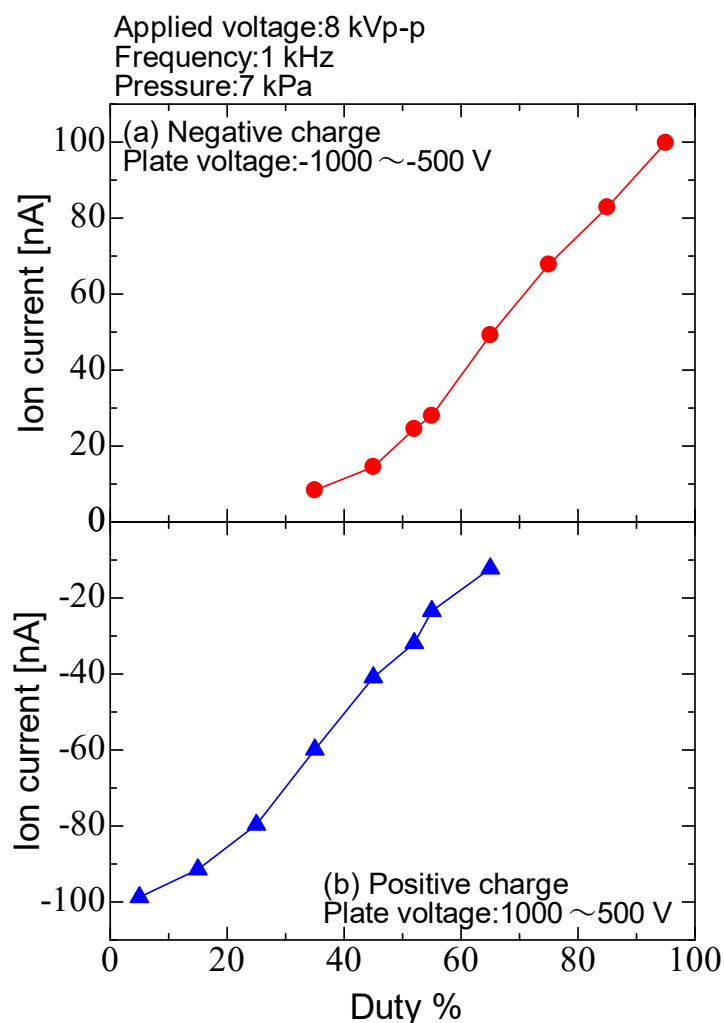
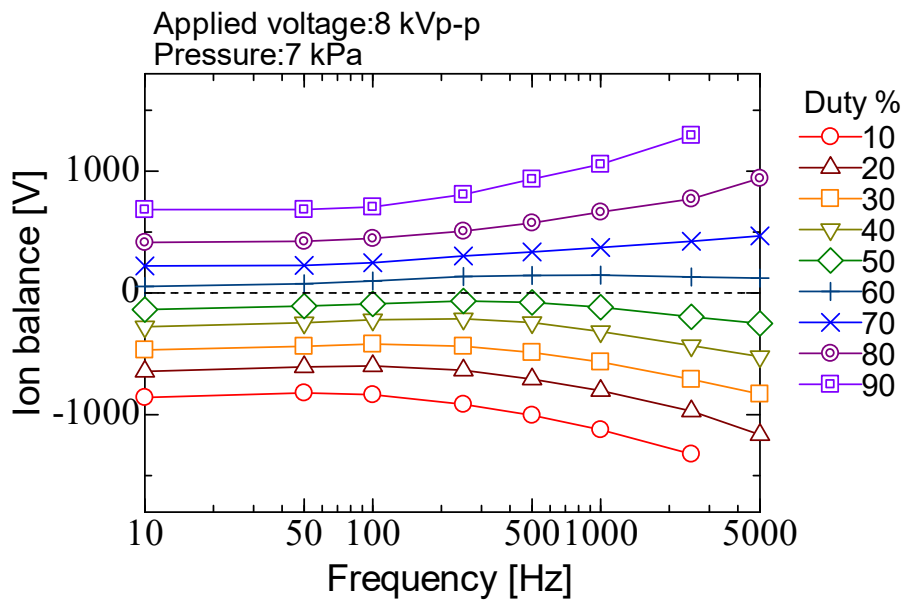


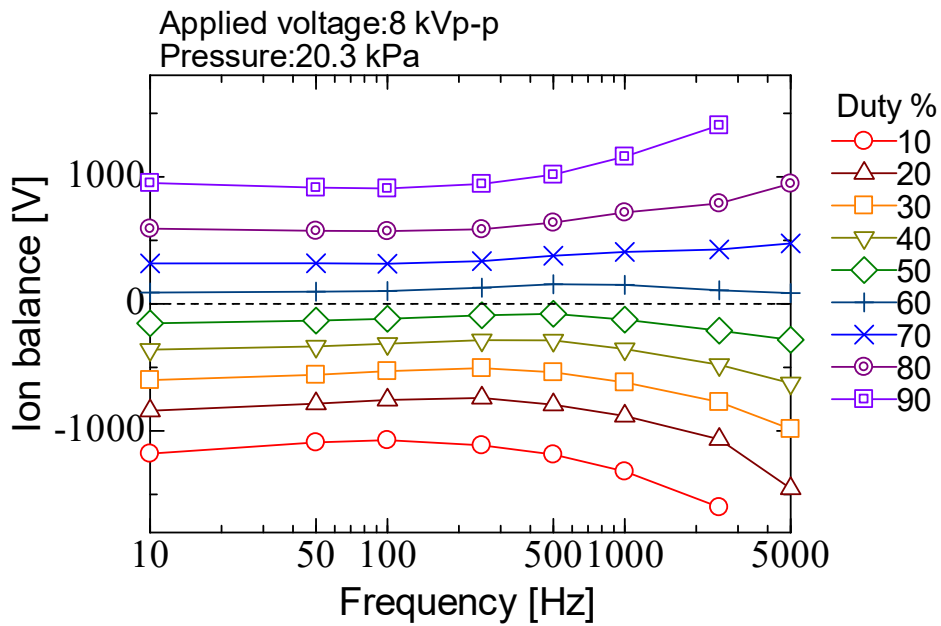
図 3.56 Duty 比を変化させた場合における Duty 比に対するプレートへの流入電流
(a) 負帯電, (b) 正帯電

3.4.2.3 イオンバランス計測

図 3.57 に、周波数および Duty 比を変化させた場合におけるイオンバランスの変化を示す。ここで、印加電圧の波高値は 8 kVp-p, エアコンプレッサ圧力は (a) 7 kPa, (b) 20.3 kPa とし、周波数を 10~5000 Hz, Duty 比を 10~90% の範囲で変化させた。図より、イオンバランスは、Duty 比が 10~50% では負の値, 60~90% では正の値となることがわかる。また、周波数の増加とともに、イオンバランスの絶対量は増加していることがわかる。図 3.48 に示したように、Duty 比が 80% 前後では換算電流が増加傾向であるため、イオンバランスも増加していると考えられる。Duty 比が 50% 以下の場合には、電流はほぼ一定の傾向を示しているが、空気イオンの移動度 (負イオン > 正イオン) の影響により、周波数の増加とともに減少していると考えられる。



(a) Pressure:7 kPa



(b) Pressure:20.3 kPa

図 3.57 周波数および Duty 比を変化させた場合における
周波数に対するイオンバランス

(a) 7 kPa, (b) 20.3 kPa

3.5 まとめ

本章では、除電に寄与する荷電粒子挙動の解明を目的として、印加電圧の条件を変化させた場合や実験系を変化させた場合におけるコロナ放電特性や除電特性の評価を行った。コロナ放電特性としては、取得した放電電流波形から放電電荷量や換算電流等の算出を行い、除電特性としては、イオンバランスやバイアス電圧、除電時間の計測を行った。その結果、以下の知見が得られた。

(i) 印加電圧波形を矩形波とした場合の特性評価

- 一周期の放電電荷量は、低周波数において負極性の方が多いが、周波数の増加とともに換算電流が 0 A に近づくことから、正負の放電電荷量は同程度となることが示唆された。
- 除電時間は、周波数の増加とともに増加傾向であることが確認された。これは、周波数が大きくなると極性の切替が頻繁になり、それにより、除電空間における正負イオン密度が増加し、再結合により消滅するイオンが増加するためであると考えられる。
- イオンバランスは、周波数が 250 Hz よりも小さい領域では、周波数の増加に伴ってプレート電圧が 0 V に近づくことがわかった。また 250 Hz よりも大きい領域では、周波数の増加とともにプレート電圧が 0 V から離れて行く傾向が見られた。低周波数では、正極性よりも負極性の放電電荷量が多いこと、高周波数では、正イオンの移動度よりも負イオンの移動度の方が大きいことが要因として考えられる。
- 空気イオンの移動度の違いによる影響を実験的に評価することを目的に実施した、針後方からの送風とは別に、プレート下部から送風した場合のイオンバランス計測において、プレート下部からの送風の風速が大きくなるほどイオンバランスは減少することから、移動度の大きい負イオンがプレートに流入しやすいことを確認し、空気イオンの移動度の違いによる影響を実験的に評価できた。
- プレートサイズを変化させた場合での除電時間計測において、プレートの一辺が 50~150 mm では除電時間が減少するが、それ以降は変化しないことから、現在の系における除電範囲は、プレートサイズが 150×150 mm² 程度までであることが確認された。

(ii) 印加電圧の Duty 比を変化させた場合の特性評価

- 換算電流は、Duty 比が 50%以下では周波数による変化はなく、Duty 比が 80%程度では周波数の増加とともに増加傾向であることが確認された。
- 除電波形を取得しプレートへの流入電流量を算出した結果より、Duty 比を変化す

ることで、帯電物へ流入する電流量を連続的かつ線形的に制御できることが示唆された。

- イオンバランスは、周波数の増加とともに、また、Duty 比が 10%、90%に近づくほど、絶対量が大きくなることが確認された。Duty 比が大きい場合には、電流が増加傾向であること、Duty 比が小さい場合には、空気イオンの移動度の違いが要因であると示唆された。

3.6 参考文献

- (1) K. Takahashi, H. Kaga, K. Kubo, K. Takaki, S. Yamaguchi and H. Nagata “Development of ion measuring system for AC corona discharge”, 電気学会論文誌 基礎・材料・共通部門 (A 部門), Vol.138, No.11 (2018)
- (2) K. Nagato, Y. Matsui, T. Miyata and T. Yamauchi “An analysis of the evolution of negative ions produced by a corona ionizer in air”, *International Journal of Mass Spectrometry*, Vol.248, pp.142-147 (2006)
- (3) K. Nagato and M. Nakauchi “Experimental study of particle formation by ion-ion recombination”, *The Journal of Chemical Physics*, Vol.141, 164309 (2014)
- (4) H.E. Manninen, A. Franchin, S. Schobesberger, A. Hirsikko, J. Hakala, A. Skromuils, J. Kangaslioma, M. Enn, H. Junninen, A. Mirme, M. Sipila, T. Petaja, D. R. Worsnop and M. Kulmala “Characterisation of corona-generated ions used in a Neutral cluster and Air Ion Spectrometer (NAIS)”, *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol.4, pp.2767-2776 (2011)
- (5) 角田美弘：「大気中負針コロナパルス波形の解析」, 電学誌, Vol.80, No.858, pp.301-309 (1960)
- (6) K. Nagato and T. Ogawa “Atmospheric Ion Mobility Spectra near the Ground”, *Planet Space Science*, Vol.36, No.2, pp.163-176 (1988)
- (7) W. Hermstein “Die Stromfaden-Entladung und ihr Ubergang in das Glimmen”, *Arch. Elektrotechnik*, Vol.45, pp.209-224 (1960)
- (8) G. W. Trichel “The mechanism of the Negative point to plane corona near onset”, *Physical Review*, Vol.54, pp.1078-1084 (1938)
- (9) P. Sattari, C. F. Gallo, G. S. P. Castle and K. Adamiak “Trichel pulse characteristics – negative corona discharge in air”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.44, 155502 (2011)
- (10) 猪原武士：「超臨界状態を含む加圧二酸化炭素におけるナノ秒パルス放電の開始機構に関する研究」, Kumamoto University Repository System (2012)
- (11) P. Dordizadeh, K. Adamiak and G. S. P. Castle “Parametric study of the characteristics of Trichel pulses in the needle-plane negative corona discharge in atmospheric air”, *Journal of Electrostatics*, Vol.84, pp.73-80 (2016)
- (12) P. Dordizadeh, K. Adamiak and G. S. P. Castle “Experimental study of the characteristics of Trichel pulses in the needle-plane negative corona discharge in atmospheric air”, *Journal of Electrostatics*, Vol.88, pp.49-54 (2017)
- (13) 行村建編著：「放電プラズマ工学」, オーム社, pp.31-32 (2008)
- (14) 原雅則, 秋山秀典：「高電圧パルスパワー工学」, 森北出版株式会社, pp.68-76 (2004)

第 4 章 導電性グリッド電極を用いた交流コロナ放電方式イオナイザにおける誘導電位の制御

4.1 はじめに

現在、携帯電話やパーソナルコンピュータなどの各種電子機器はさらに高速化、大容量化、低消費電力化、省スペース化されることが求められている。そのためには、電子デバイスの高集積化に伴う半導体の線幅ルールの微細化と、プリント基板 (PCB : Printed Circuit Board) 実装時における電子デバイス配置の高密度化は、不可欠である。電子デバイスの高集積化により、動作電圧は低下する。また、配置の高密度化により、配置間隔と電子デバイス同士を接続するため配線間隔が狭まる。このように電子デバイスの製造や、電子機器の組み立て工程において、電子デバイスの誤動作、潜在不良や破壊、電子デバイス実装時における損傷や配線の短絡といった静電気障害が発生し、製造歩留の低下が顕著に現れることが懸念される^(1,2)。これらの静電気対策として、除電装置を用いて帯電物に非接触で除電・中和させる方法が用いられている。最近では、交流イオナイザからの誘導帯電による不具合も報告されてきた。

従来、イオナイザの除電性能として、除電速度が重視されてきたが、電子デバイスといった対象物の残留電位が高い場合や、誘導電圧によって問題が生じることがある。本章では、対象物への静電誘導の影響の抑制を目的とし、グリッド電極をコロナ放電電極前方に配置することによるコロナ放電と除電の特性に及ぼす影響を評価した^(3,4)。

4.2 イオナイザ評価システムの構築

4.2.1 イオン測定回路

図 4.1 に、イオン測定回路の回路図を示す。本回路は、イオン捕集プレート、電荷測定コンデンサ C_1 (WIMA, FKP2O100331D00K, 3 直列, 静電容量 33 pF), C_2 (KEMET, PHE448SB4100JR06, 1 nF), オペアンプ (Texas Instruments, OPA454) で構成している⁽¹⁾。イオン捕集プレートには $150 \times 150 \text{ mm}^2$ の面積のステンレス製の金属板を用い、 C_1 に接続している。電荷測定用コンデンサ C_1, C_2 は、漏れ電流を防ぐため、フィルムコンデンサを用いた。このキャパシタによる分圧で、金属板の電位 (Plate voltage : v_p) はイオン測定回路の出力電圧 (Output voltage : v_o) に対して 85 倍の値となる。イオン捕集プレートの電位は、 C_1 と C_2 で分圧され、ボルテージフォロワに入力される。オペアンプの入力インピーダンスは $10 \text{ T}\Omega$ 、バイアス電流は $\pm 100 \text{ pA}$ 以下であり、電荷測定用コンデンサに蓄積した電荷漏洩を抑制している。また、OPA454 は $\pm 50 \text{ V}$ の電圧範囲で動作でき、イオン捕集プレートには最大 $\pm 4.25 \text{ kV}$ まで印加することができる。イオン捕集プレートと設置間の容量は、 C_1, C_2 の静電容量および、配線の浮遊容量の合成容量となり 20.1 pF となる。

図 4.58 に、イオン測定回路の外観を示す。OPA454 は表面実装用のため、変換基盤 (アスラボ, MSOIC&MSOP-DIPD-8*10) を使用し、ユニバーサル基盤 (サンハヤト, ICB-88G-PBF) 用に変換している。浮遊容量を小さくするため、図のように空中での配線も行っている。図 4.3 に、イオン測定回路をイオン捕集プレートに接続した外観を示す。イオン捕集プレートは 3 直列した 33 pF のコンデンサの先端に接続している。このコンデンサにより回路の合成容量を 20.1 pF に調整している。

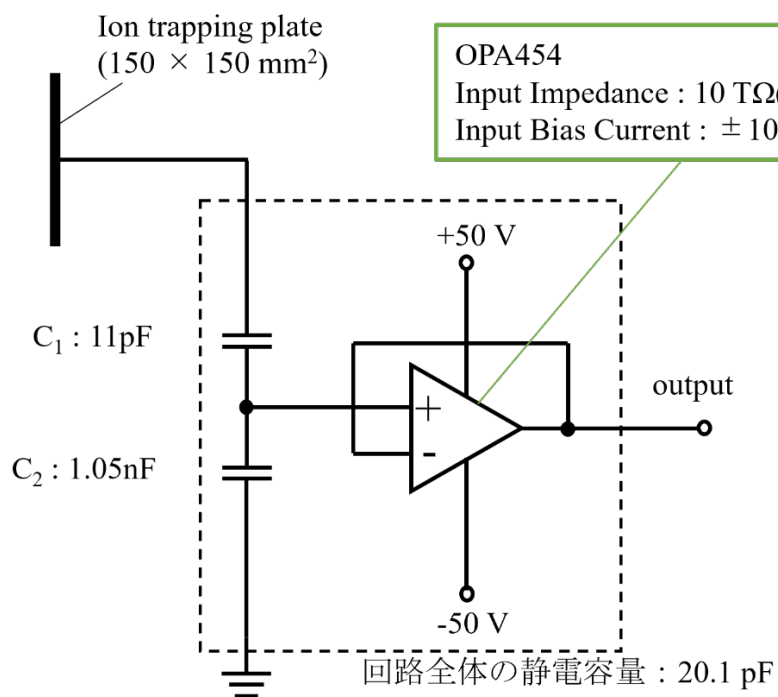


図 4.1 イオン測定回路

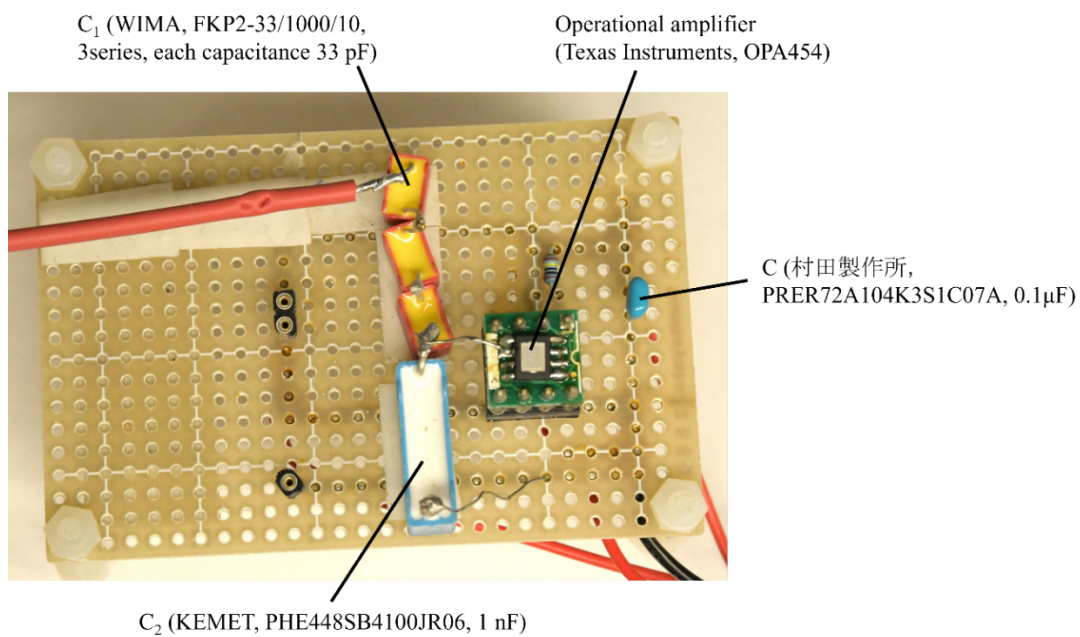


図 4.58 イオン測定回路の外観 (回路部)

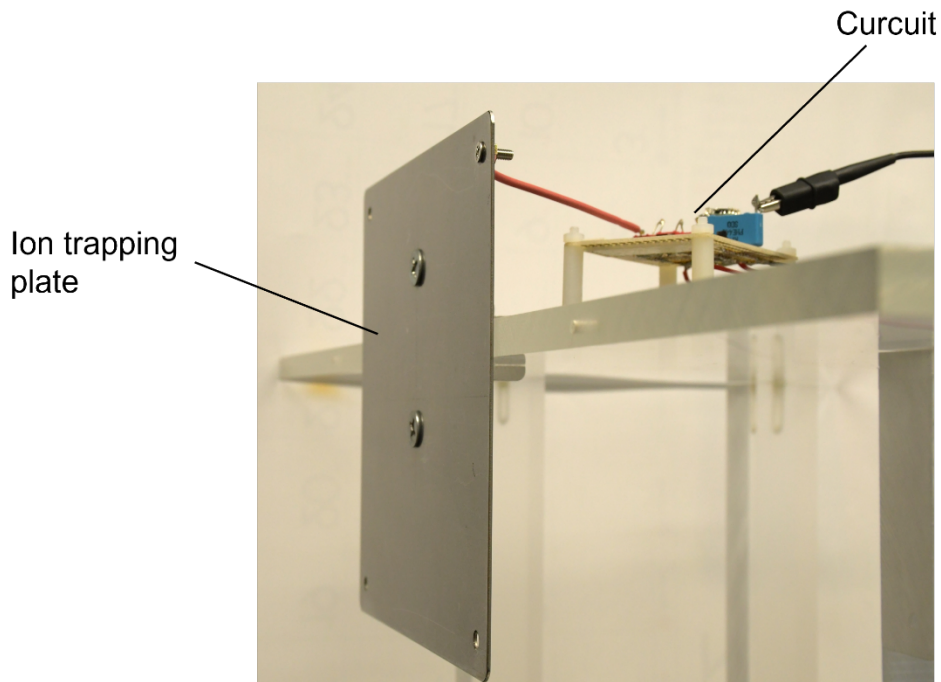
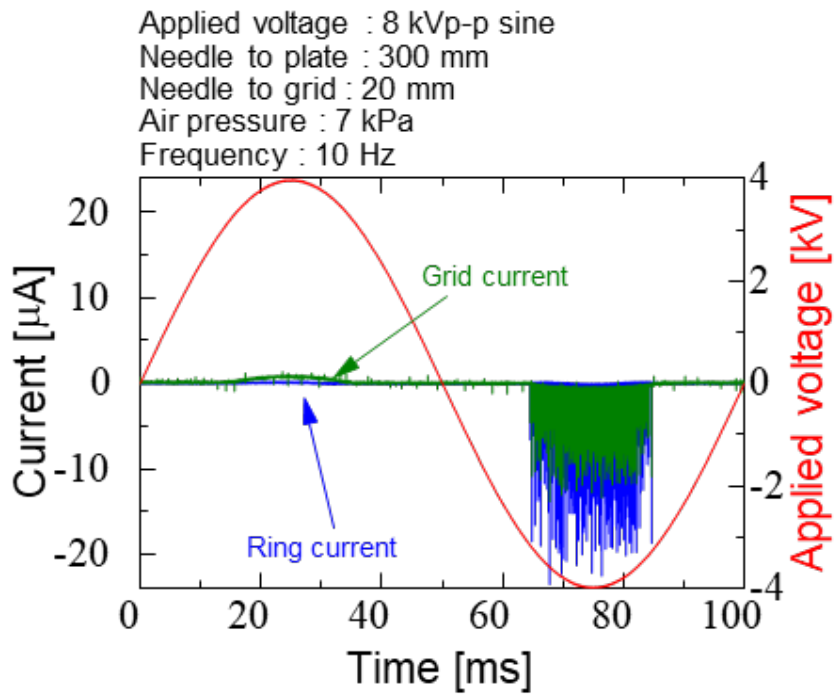


図 4.3 イオン測定回路の外観（イオン捕集プレートに接続）

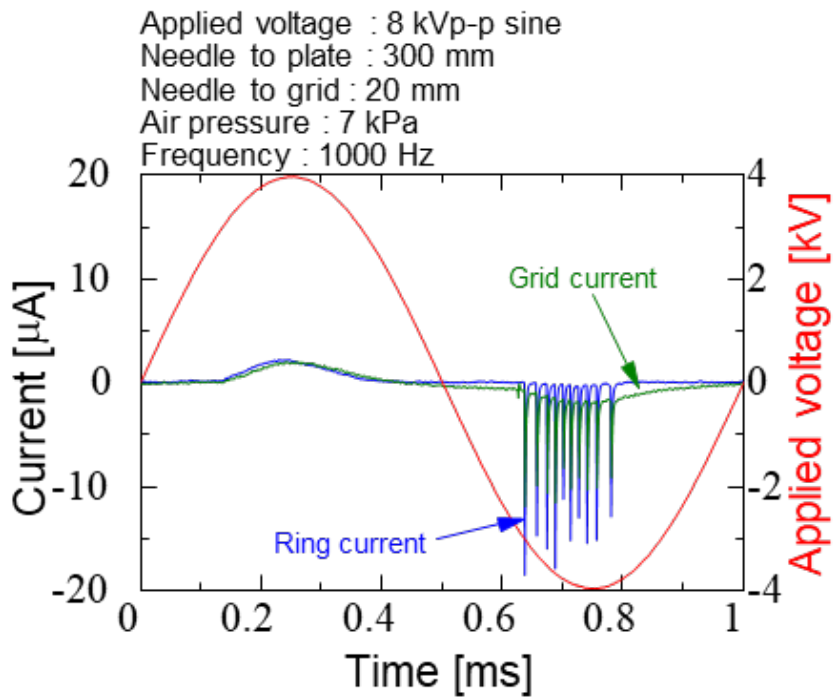
4.2.2 放電特性

4.2.2.1 リング・グリッド流入電流波形

図 4.4 に、リング流入電流，グリッド流入電流，印加電圧を示す．ここで，印加電圧は $8 \text{ kV}_{\text{p-p}}$ の正弦波，針-グリッド間距離は 20 mm ，針-プレート間距離は 300 mm ，空気圧力を 7 kPa とした．周波数は $10 \sim 5000 \text{ Hz}$ まで変化させ，図では(a) 10 Hz ，(b) 1000 Hz を示す．図より，正極性ではグロー状コロナ放電，負極性ではトリチェルパルス放電が発生していることがわかる．しかし，周波数が 10 Hz のときリング流入電流の正極性ではほとんど電流の流入が見られず，グリッド流入電流では電流の流入が見られた．また，周波数が 1000 Hz では正極性放電区間においてリング，グリッド電極ともに電流の流入が見られた．



(a) 10 Hz



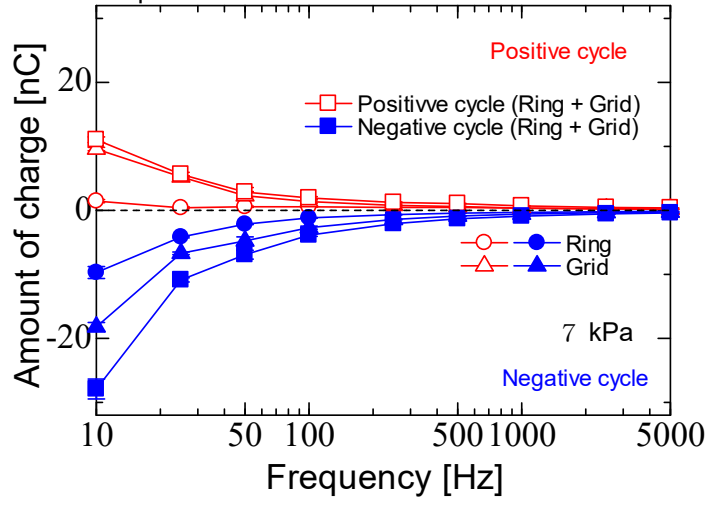
(b) 1000 Hz

図 4.4 リング流入電流，グリッド流入電流，印加電圧波形

4.2.2.2 リング・グリッド流入電荷量

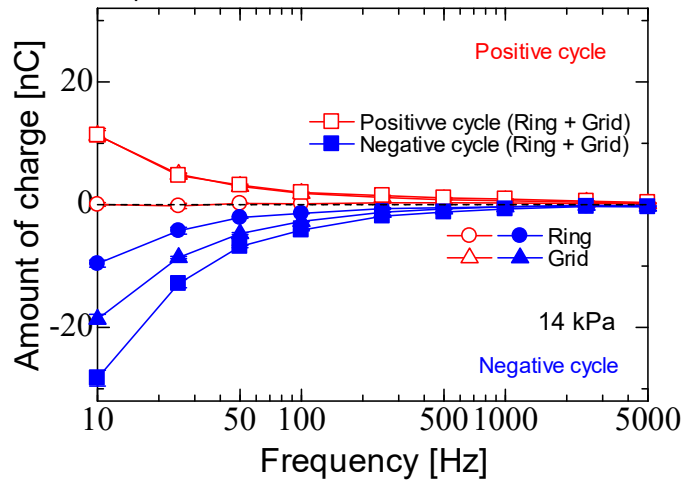
図 4.5 に、リング流入電荷量，グリッド流入電荷量の周波数依存性を示す．ここで，印加電圧は $8 \text{ kV}_{\text{p-p}}$ の正弦波，針-グリッド間距離は 20 mm ，針-プレート間距離は 300 mm とし，空気圧力は $7 \sim 21 \text{ kPa}$ まで変化させ，図では(a) 7 kPa ，(b) 14 kPa と(c) 21 kPa を示す．図より，正極性放電区間においてグリッドに流入する電荷量がほとんどであり，リング電極にはほとんど流入しないことがわかる．特にその傾向は低周波数において顕著であり， 10 Hz のときグリッド電荷量が約 10 nC であるのに対して，リング電荷は約 1.5 nC であった．負極性区間においても，正極性区間と同様にリング電荷量よりもグリッド電荷量が多い結果となった．しかし，正極性区間とは異なり，正極性区間よりもリング電極，グリッド電極ともに流入電荷量が多くなっており，グリッド電荷量の約半分の電荷量がリング電極に流入している結果となった．これらの結果は，グリッド電極を針先から 20 mm の位置に配置したことで，グリッド電極方向の電界が強まり，グリッド電極方向のドリフトが強まったためであると考えられる．また，正極性区間よりも負極性区間のほうが流入電荷量が多かった要因として，負極性放電のほうが正極性放電よりも放電強度が強く，放電領域も広いため，針-リング電極間のドリフトが強まり，リング電極に電荷が流入しやすいためであると考えられる．また，空気圧力を増加した場合には，リング電極に流入する電荷量は減少し，一方でグリッド電極に流入する電荷量は増加する．これは，風速の増加によって電離領域で生成されたイオンがグリッド方向に輸送されたことが考えられる．

Applied voltage : 8 kVp-p sine
 Needle to plate : 300 mm
 Needle to grid : 20 mm
 Air pressure : 7 kPa

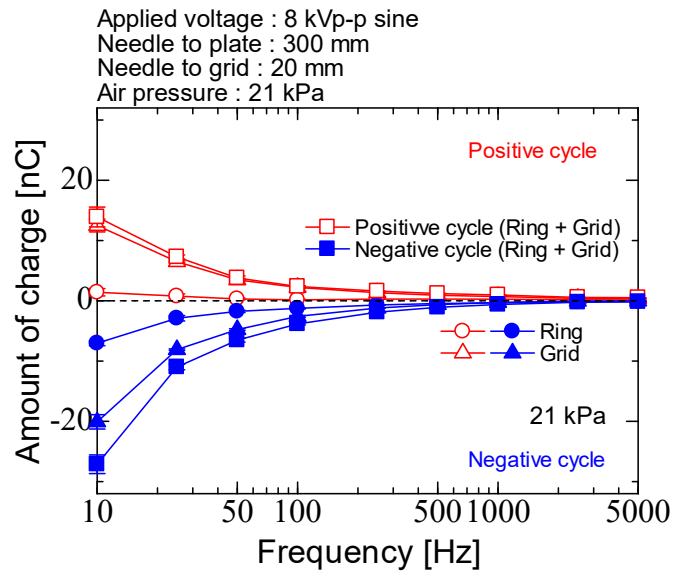


(a) 7 kPa

Applied voltage : 8 kVp-p sine
 Needle to plate : 300 mm
 Needle to grid : 20 mm
 Air pressure : 14 kPa



(b) 14 kPa



(c) 21 kPa

図 4.5 リング流入電荷量, グリッド流入電荷量の周波数依存性
 (a) 7 kPa, (b) 14 kPa, (c) 21 kPa

4.2.3 誘導電圧特性

図 4.6 に、周波数を変化させた場合の誘導電圧特性を示す。ここで、印加電圧は 5 kV_{p-p} の正弦波、針-グリッド間距離は 20 mm、針-プレート間距離は 100 mm、空気圧力は 7 kPa とした。図より、周波数によらず誘導電圧は約 2 ~ 3 V_{p-p} となった。グリッド電極がない場合においては、誘導電圧が 20 V_{p-p} 以上となるため、約 10 分の 1 に誘導電圧が抑制されており、グリッド電極を針先に配置することで十分に電界が遮蔽されていることがわかる。

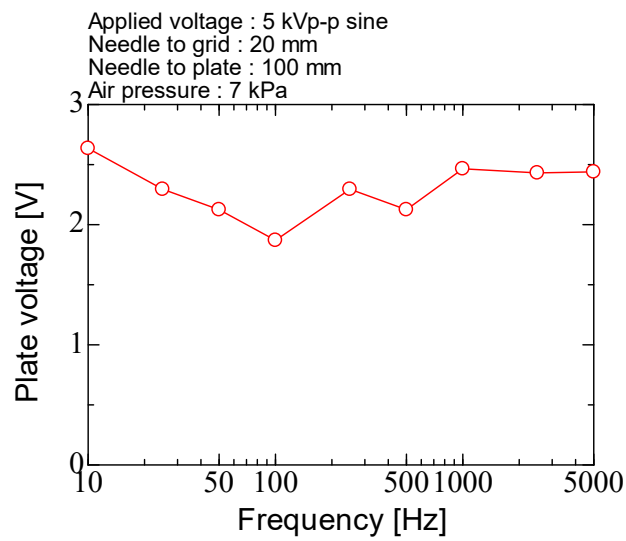


図 4.6 周波数を変化させた場合における誘導電圧

4.2.4 まとめ

4.2 では、変位電流が流れることにより発生する誘導電圧の抑制を目的として、針先から 20 mm の位置に導電性のグリッド電極を配置し、周波数を変化させた場合の放電特性、誘導電圧特性を取得した。

周波数を変化させた場合の放電特性においては、正極性ではグロー状コロナ放電が、負極性ではトリチェルパルス放電の発生が見られた。正極性放電区間において、低周波数では、リング電極への電流の流入がほとんど見られず、グリッド電極への電流の流入が多く見られた。しかし、高周波数では、リング電極、グリッド電極ともに電流の流入が見られた。また、流入電荷量においても、正極性、負極性ともにリング電極よりもグリッド電極へ流入する電荷量が多くなることがわかった。正極性放電区間にリング電極に流入する電荷量は、電流と同様にほとんどなく、グリッド電極に多くの流入が見られた。しかし、負極性放電区間にリング電極に流入する電荷量は、グリッド電極に流入する電荷量の約半分となっている。この要因として、負極性放電は放電領域が広く、パルス状の放電のため放電強度が強いことで正極性放電よりもリング電極に電荷が流入しやすいためであると考えられる。

周波数を変化させた場合の誘導電圧特性においては、周波数によらず誘導電圧は約 2 ~ 3 V_{p-p} となった。グリッド電極がない場合においては、誘導電圧が 20 V_{p-p} 以上となるため、約 10 分の 1 に誘導電圧が抑制された。このことからグリッド電極を針先に配置することで十分に電界が遮蔽されていることがわかった。

4.3 除電における金属グリッド電極が及ぼす影響

4.3.1 はじめに

産業分野において、静電気によってさまざまな問題が引き起こされる。電子デバイスの分野では製品に帯電した電荷が静電気放電によって容易に破壊され、また帯電した電荷により周囲の塵やほこりが引き寄せられて製品のコンタミネーションや劣化を引き起こす^{(1)~(3)}。それらの静電気対策としてコロナ放電イオナイザが安全性の高さと取り扱いの容易さから広く用いられている。中でも、交流コロナ放電イオナイザは単一の電極から正負のイオンを供給することができるため、省スペースかつイオンを均一に供給することができ、様々な場面で利用されている。一方で交流を利用しているため、対象物との距離や電圧によって変位電流が流れ、数十 V 程度の誘導電圧が発生する。そのため、電子デバイスなどの精密機器の除電では、交流コロナ放電式イオナイザが発生させる変位電流によって ESD や動作の不具合を引き起こす可能性が考えられ、静電誘導の抑制と効率的な除電の実現を目的として、対象物と放電電極の間に導電性材料で作られたグリッド状の電極を設置し、グリッド電極のギャップ幅及び金属棒本数を変化させ、除電と静電誘導に及ぼす影響の検討を行った。

4.3.2 実験装置

図 4.7 に、実験装置概略図を示す。また、図 4.8 に実験装置の電極部の外観を示す。ここで、実験装置の高圧部およびイオン捕集プレートとイオン測定回路は図 4.1 と同様の回路を用いる。本実験では、図 4.1 で使用したグリッド電極支持枠とは異なる、銅板のグリッド支持枠を使用した。

図 4.9 に導電性グリッドの構成を示す。導電性グリッドは、ステンレス製の円筒状金属棒 ($\phi 3 \text{ mm}$, 長さ 250 mm, SUS304), 銅板 (縦幅 230 mm, 横幅 30 mm, 厚さ 1 mm), アクリル (縦幅 230 mm, 横幅 20 mm, 厚さ 10 mm) から構成されている。銅板には金属棒を通すことができる $\phi 3 \text{ mm}$ の穴が複数開いており、金属棒を通すことで導通する。ステンレスと銅板の接触抵抗は十分小さいため、その接触抵抗による電位差はほとんどない。銅板は 4 種類用意し、穴の間隔を 1, 3, 5, 7 mm とし、任意に金属棒のギャップ間隔を変更することができる。

実験条件として、誘導電圧の測定には、印加電圧を $5 \text{ kV}_{\text{p-p}}$ の正弦波、除電時間および放電特性の測定には $8 \text{ kV}_{\text{p-p}}$ の正弦波を用い、イオンバランスは印加電圧をバイアスすることで調整を行った。針と捕集プレートの距離は 100 ~ 300 mm とし、針とグリッド電極の距離は 20 mm とした。コンプレッサから封入する空気圧力は 7 ~ 21 kPa まで任意に変化させた。

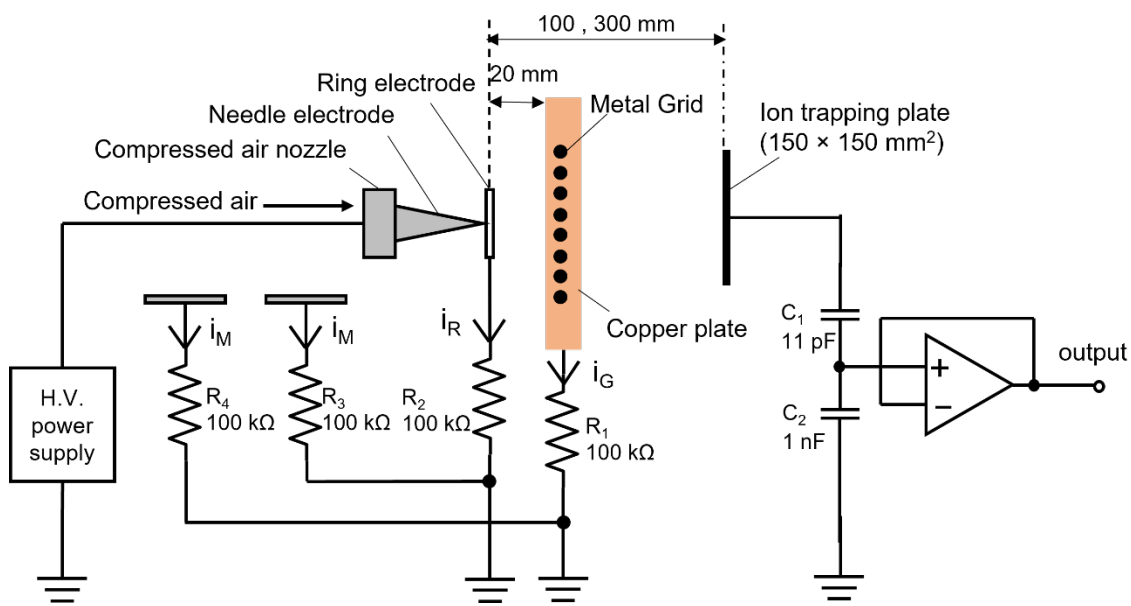


図 4.7 実験装置概略図

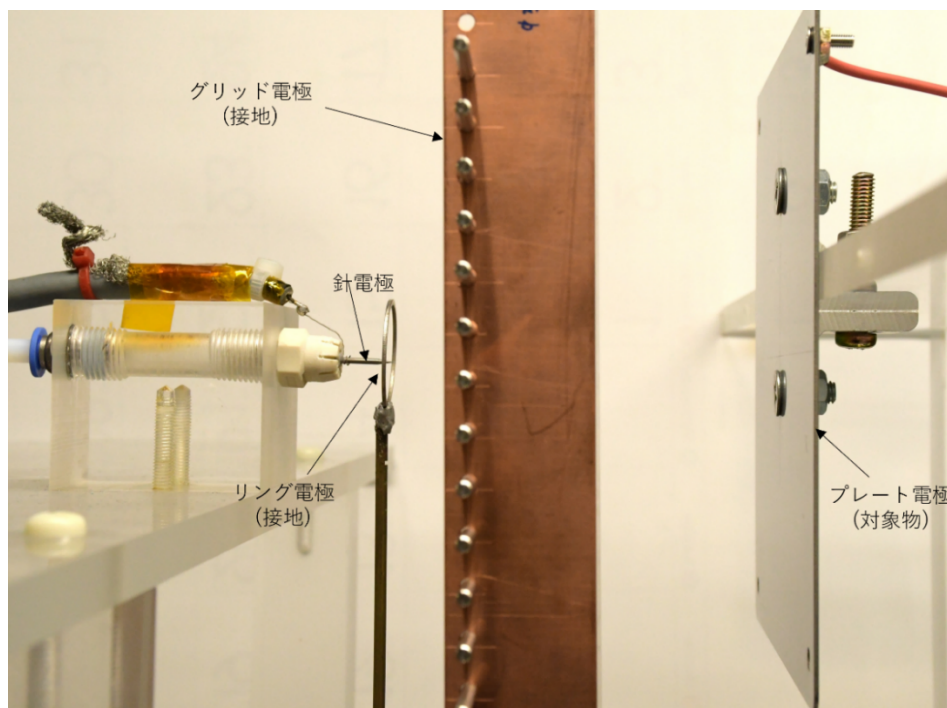


図 4.8 実験装置電極部の外観

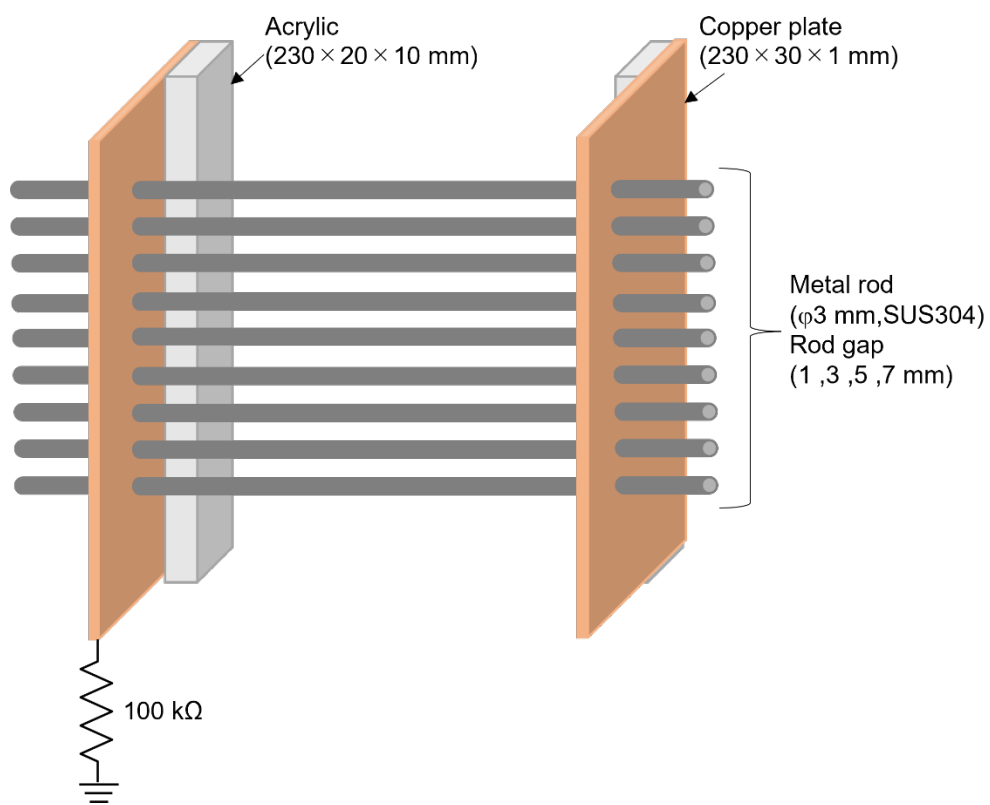


図 4.9 導電性グリッド図

4.3.3 放電特性

4.3.3.1 リング・グリッド流入電流波形

図 4.10 に、リング流入電流，グリッド流入電流，印加電圧を示す．ここで，印加電圧は $8 \text{ kV}_{\text{p-p}}$ の正弦波，針-グリッド間距離は 20 mm ，針-プレート間距離は 300 mm ，空気圧力を 7 kPa ，ギャップ間隔は 1 mm とし，見かけ上の幅を 103 mm とした．周波数は $10 \sim 5000 \text{ Hz}$ まで変化させ，図では(a) 10 Hz と(b) 1000 Hz を示す．図より，正極性ではグロー状コロナ放電，負極性ではトリチェルパルス放電が発生していることがわかった．しかし，周波数が 10 Hz のとき正周期ではリング電極への流入電流がほとんど見られず，グリッド電極へはわずかに電流の流入が見られた．また，周波数が 1000 Hz のとき，正周期においてリング電極，グリッド電極ともに電流の流入が見られた．

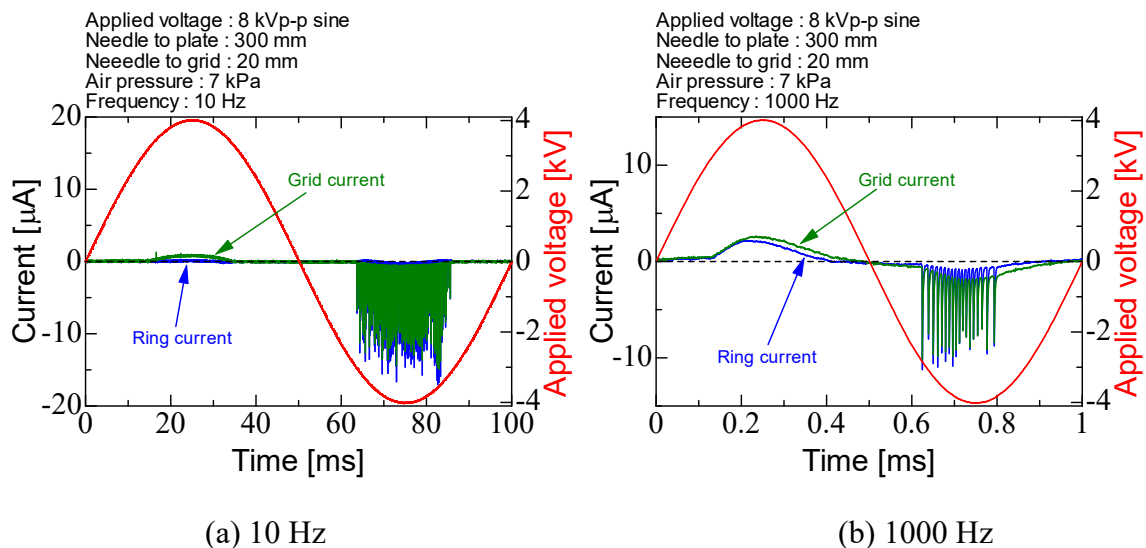
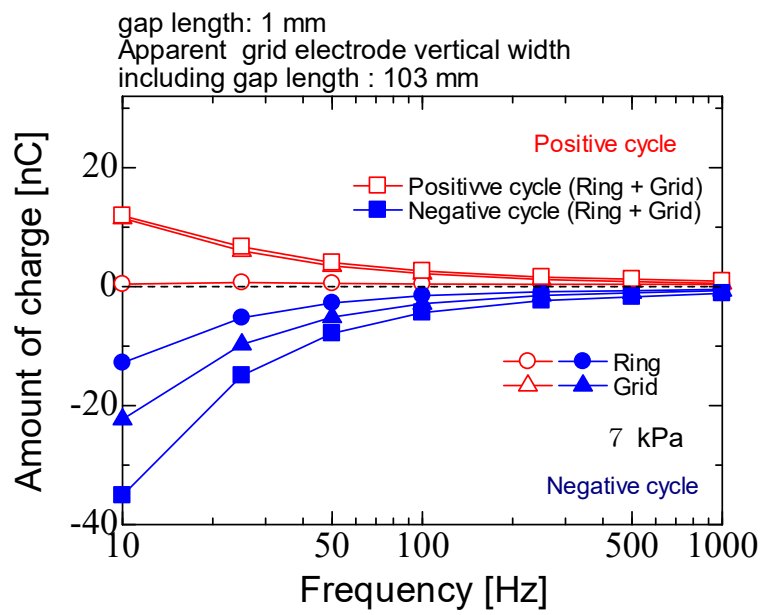


図 4.10 リング流入電流，グリッド流入電流，印加電圧波形

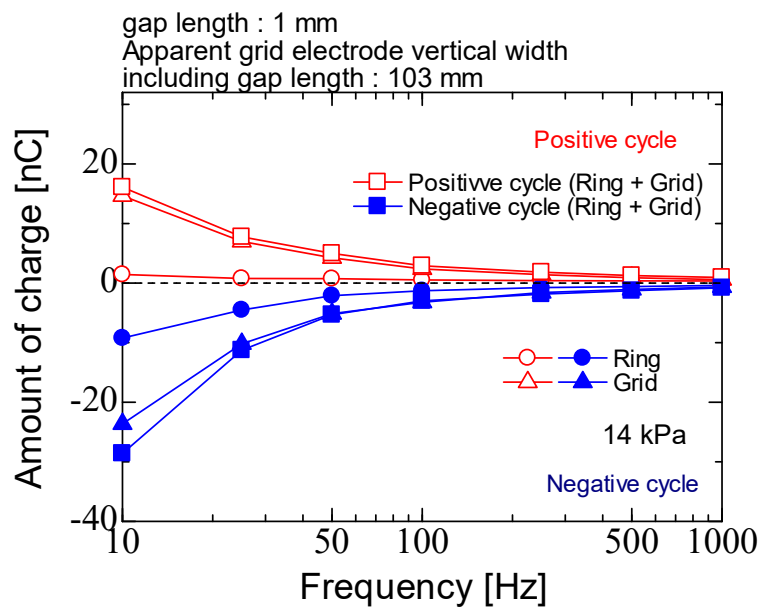
4.3.3.2 リング・グリッド流入電荷量

図 4.11 に、リング流入電荷量、グリッド流入電荷量の周波数依存性を示す。ここで、印加電圧は $8 \text{ kV}_{\text{p-p}}$ の正弦波、針-グリッド間距離は 20 mm 、針-プレート間距離は 300 mm 、ギャップ間隔は 1 mm とし、見かけのグリッド電極幅は 103 mm とした。また、空気圧力は $7 \sim 21 \text{ kPa}$ の範囲で変化させ、図では(a) 7 kPa 、(b) 14 kPa と(c) 21 kPa を示す。図より、正極性放電区間においてグリッド電極に流入する電荷量がほとんどであり、リング電極に流入する電荷量はほとんど見られない。特にその傾向は低周波数において顕著であり、 10 Hz のときグリッド電荷量が 16 nC であるのに対して、リング電荷量は $1 \sim 2 \text{ nC}$ であった。負極性放電区間においてもグリッド電荷量がリング電荷量に対して大きくなる結果となった。しかし、正極性に比べて、その流入電荷量は多くなっており、グリッド電荷量のおよそ半分程度の電荷量がリング電極に流入している結果となった。これは、負イオンの移動度 ($2.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})^{(4)}$) は正イオンの移動度 ($1.69 \times 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})^{(4)}$) よりも高く、よりリング電極へ電荷が流入しやすいことが要因として考えられる。また、放電の極性効果により、負周期の場合コロナ放電がパルス状になるため局所的な電界強度が強くなり、放電領域、電離領域ともに広くなり、ドリフトの影響がより顕著になるためだと考えられる。針-リング電極における電界強度は 10^5 V/m 程度であり、リング電極方向へのドリフト速度は負イオンの場合 24 m/s 、正イオンの場合 16.9 m/s 程度となる。

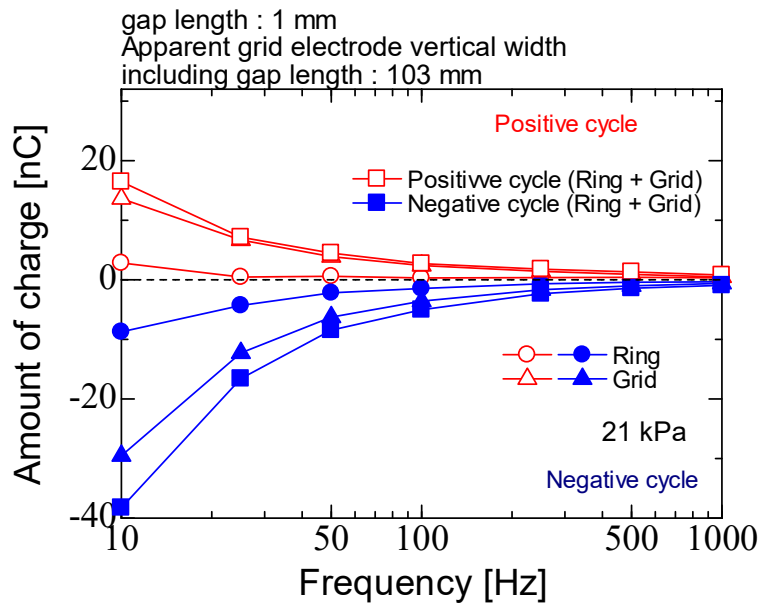
図 4.12 に、グリッド電極に流入する電荷量の割合を示す。図より空気圧力が増加した場合には、グリッド電極へ流入する電荷量は増加する。これは、電離領域で生成されたイオンがリング電極に流入する前に、風によってグリッド電極方向へ輸送されたためだと考えられる。



(a) 7 kPa



(b) 14 kPa



(c) 21 kPa

図 4.11 周波数を変化した場合のリング・グリッド放電電荷量
(a) 7 kPa, (b) 14 kPa, (c) 21 kPa

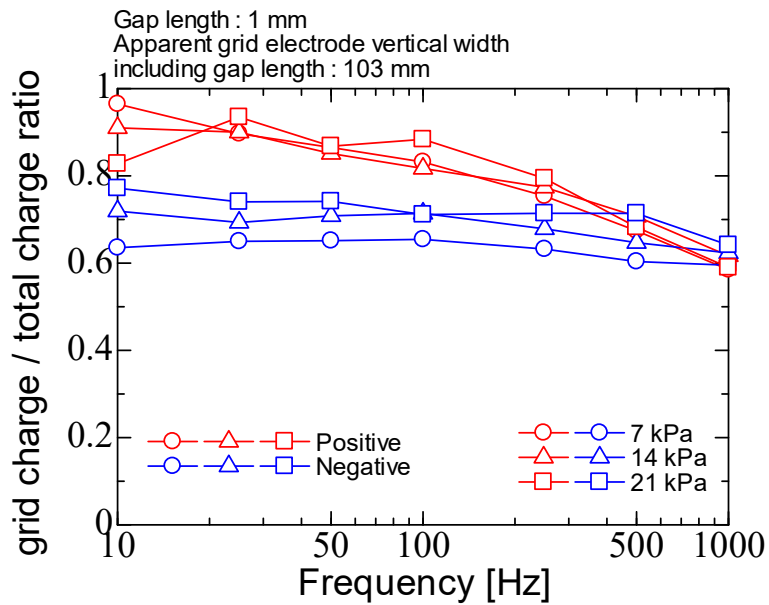


図 4.12 周波数を変化した場合のグリッド電極に流入する電荷量の割合

4.3.3.3 リング・グリッド平均電流

図 4.13 に、空気圧力を変化した場合のリング平均電流、グリッド平均電流の周波数依存性を示す。ここで、印加電圧は $8 \text{ kV}_{\text{p-p}}$ の正弦波、針-グリッド間距離は 20 mm 、針-プレート間距離は 300 mm 、ギャップ間隔は 1 mm とし、見かけの電極幅は 103 mm である。また、空気圧力は $7\sim 21 \text{ kPa}$ まで変化させた。図より、ほぼすべての条件において平均電流が負になることがわかる。これは、負極性放電がより強い放電であるためであると考えられる。空気圧力依存性では、リング平均電流の場合には圧力が小さいほど、平均電流は負になるが、グリッド平均電流の場合には、圧力が大きいほど平均電流が負になることがわかった。これは、空気圧力の増加に伴って、リング電極へ流入する負イオンが減少し、グリッド電極へ流入する負イオンが増加したことが要因であると考えられる。また、風速の増加によってグリッド電極への正イオンの流入量も増えるが、その増加量は負イオンに比べて小さいため、このような結果になったと考えられる。

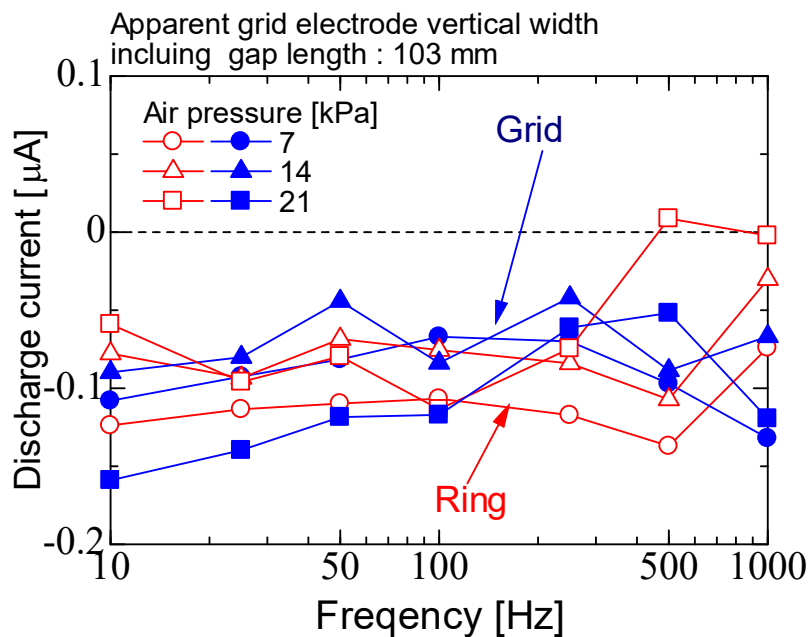


図 4.13 空気圧力を変化した場合のリング平均電流、グリッド平均電流の周波数依存性

4.3.3.4 ギャップ幅を変化した場合の流入電荷量，平均電流

図 4.14 に，ギャップ幅を変化した場合のリング，グリッド流入電荷量を示す．ここで，印加電圧は $8 \text{ kV}_{\text{p-p}}$ の正弦波，針-グリッド間距離は 20 mm ，針-グリッド間距離は 300 mm ，ギャップ間隔は 1 mm ， 7 mm とし，見かけのグリッド電極幅はそれぞれ 103 mm ， 113 mm とした．空気圧力は 7 kPa とした．図より，リング電荷量は正極性放電区間ではグリッド間隔が大きいほど，正周期電荷量は大きい，負極性放電区間ではグリッド間隔が大きいほど，負周期電荷量は小さい．一方でグリッド電荷量をみると，正極性放電区間では正周期電荷量の差はほとんどなく，負極性放電区間ではグリッド間隔が大きいほど電荷量が小さいという結果が得られた．また，周波数が増加し 500 Hz 付近を超えると，流入電荷量の差はほとんど見られなくなった．これは，周波数が増加したことで，イオンの混合する領域が増えて見かけ上の電位が低くなり，グリッド，リングに捕集されるイオンが変化しなくなったことが要因だと考えられる．低周波数において差がみられたのは，単一のイオン領域によって空間のポテンシャルが増加し，グリッド間隔がより狭い 1 mm のときに捕集されたためだと考えられる．

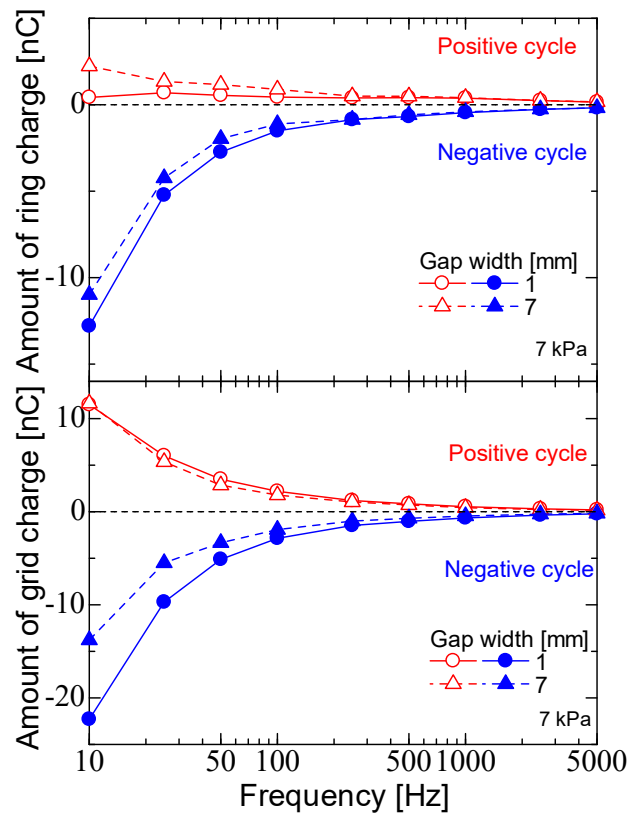


図 4.14 ギャップ幅を変化した場合のリング，グリッド流入電荷量

4.3.4 誘導電圧・電流密度特性

4.3.4.1 誘導電圧波形

図 4.1 に、ギャップ幅を変化した場合の誘導電圧波形を示す。ここで、印加電圧は 5 kV_{p-p}の正弦波、針-グリッド間距離は 100 mm、ギャップ幅は 1~7 mm とし、金属棒は 2~18 本まで変化させた。イオン測定回路および、針から捕集プレートまでの空間は空間中のキャパシタンスと測定回路のキャパシタンスの直列となっているため、イオン測定回路の出力波形は印加電圧波形と同じ正弦波が観測される。図より、金属本数が同じ場合グリッド幅が 7 mm のときの誘導電圧が最も小さくなり、ギャップ間隔が小さくなるほど誘導電圧が大きくなることがわかった。

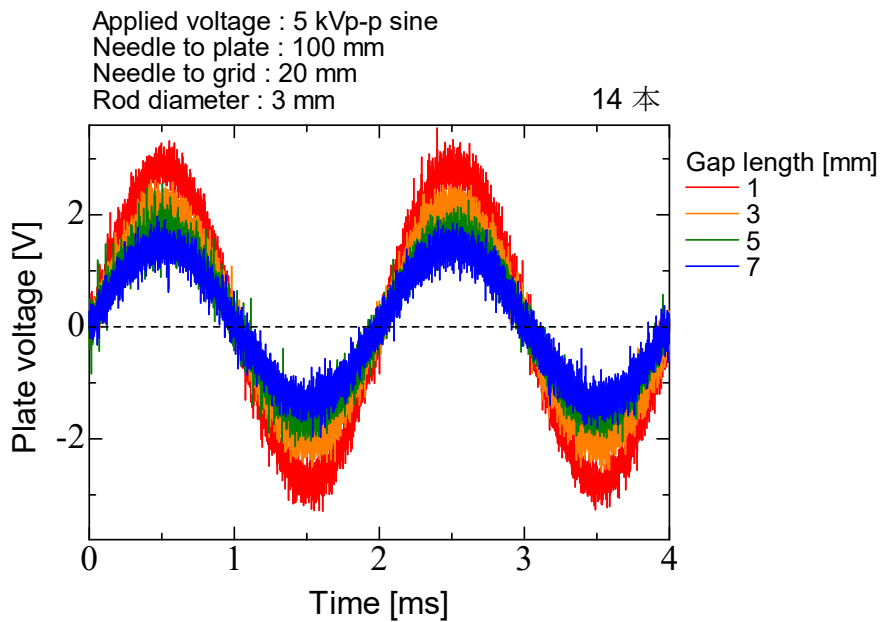


図 4.15 ギャップ幅を変化した場合の誘導電圧波形

また，図 4.159 に，金属棒を 0 本にした場合の誘導電圧波形を示す．図より，金属棒がない場合にはおよそ $21 \text{ V}_{\text{p-p}}$ の誘導電圧が生じることがわかる．図 4.1 と図 4.159 を比較すると，グリッドがあることで電界を遮蔽し，誘導電圧が減衰していることがわかる．

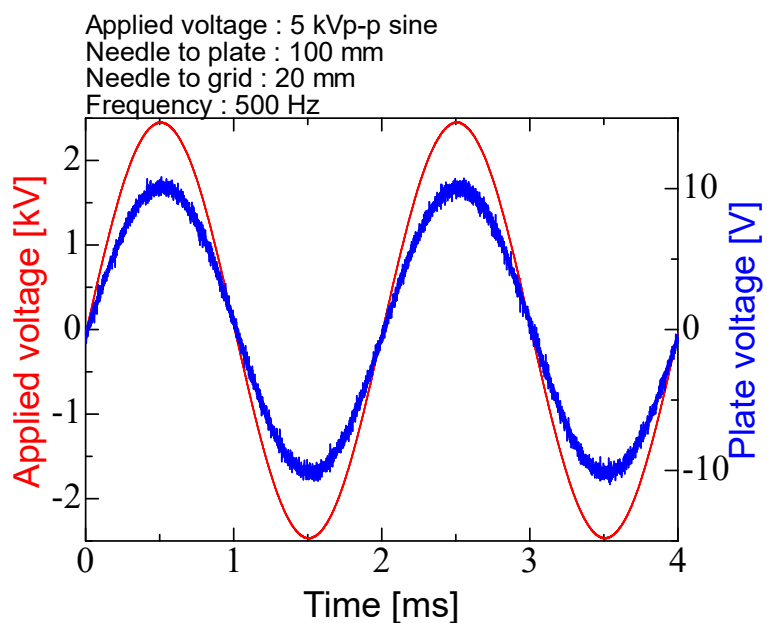


図 4.159 グリッド電極がない場合の誘導電圧波形，印加電圧波形

4.3.4.2 グリッド本数変化における電流密度特性

図 4.1 に、グリッド本数を変化した場合の電流密度特性を示す。ここで、印加電圧は 5 kVp-p の正弦波、針-グリッド間距離は 20 mm、針-プレート間距離は 100 mm、ギャップ幅は 1 ~ 7 mm とし、金属棒は 2 ~ 18 本まで変化させた。図より、グリッド本数によらず、常にギャップ幅が広いほど、電流密度は低いことがわかった。また、本数が多いほど、電流密度は減衰するが、その減少率は徐々に低下することがわかる。これは、電極本数を増やすことで電界の遮蔽領域が広くなり、電流密度は減衰するが、針先の電界はプレート中心方向が最も強く、水平方向に行くほど電界強度が弱まるため、電界の遮蔽による誘導電圧への影響が小さくなったことが要因だと考えられる。また、図より、金属棒本数が 2 本の場合には約 $10 \mu\text{A}/\text{m}^2$ の電流密度であるが、グリッド電極がない場合には $19.1 \mu\text{A}/\text{m}^2$ 程度の電流密度であるため、針先-プレート中心の強電界部を遮蔽することで、誘導電圧を抑制することができる。

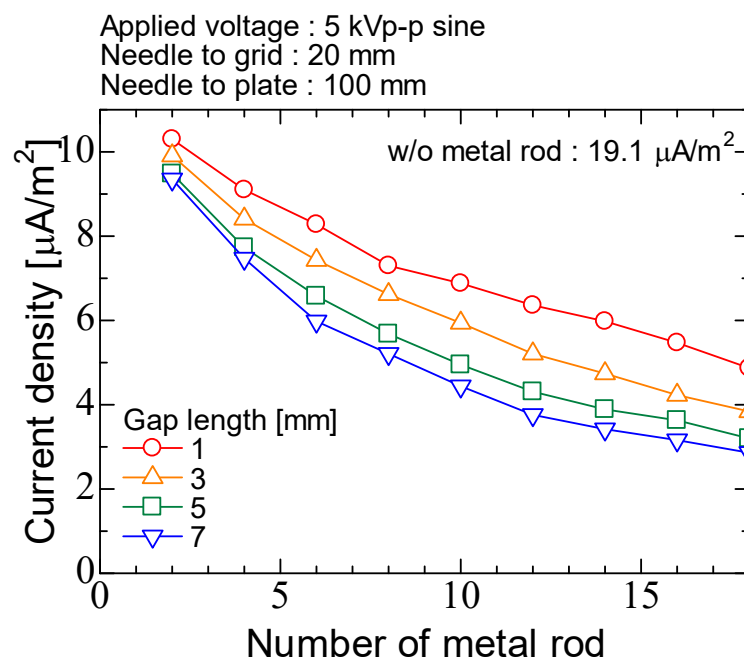


図 4.17 導電性グリッド電極の金属棒本数を変化した場合の電流密度特性

図 4.18 に、ギャップ長を含む見かけのグリッド電極幅に対する電流密度特性を示す。ここで、印加電圧は 5 kVp-p の正弦波，針-グリッド間距離は 20 mm，針-プレート間距離は 100 mm，ギャップ幅は 1~7 mm とし，金属棒は 2~18 本まで変化させた。図は，横軸をギャップ長を含む見かけのグリッド電極幅としている。図より，電流密度は見かけのグリッド電極幅の増加に伴って減衰していることがわかる。結果から，ギャップ幅 1~7 mm の条件において，グリッド電極の本数ではなく，見かけ上の幅が増加することで誘導電圧を抑制できることがわかった。これは，ギャップ幅が電界の遮蔽に十分効果がある程度に小さいため，電極間の電界が十分に遮蔽され，また，見かけのグリッド電極幅が広がることで，水平方向の電界を遮蔽できるためであると考えられる。

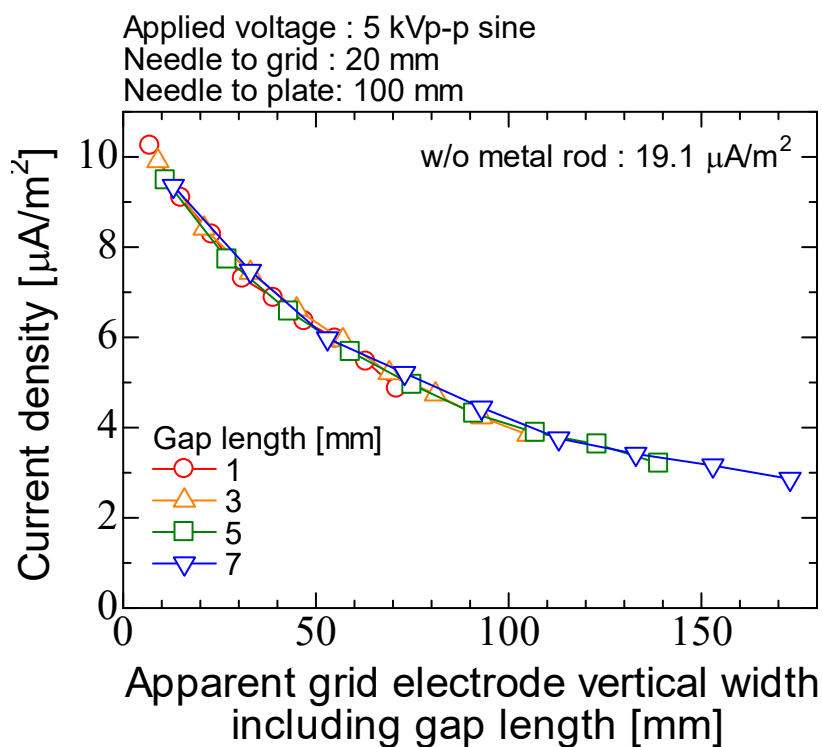


図 4.18 ギャップ長を含む見かけのグリッド電極幅に対する電流密度特性

4.3.4.3 ギャップ幅変化における電流密度特性

図 4.19 に、ギャップ幅を細かく変化した場合の電流密度特性を示す。ここでは、図 4.20 のようにグリッド電極の金属棒の本数を固定し、ギャップ幅を 1 mm から 41 mm まで 4 mm ずつ変化させて誘導電圧の最下点を測定した。ここで、印加電圧は 5 kV_{p-p} の正弦波、針-グリッド間距離は 20 mm、針-プレート間距離は 100 mm、グリッド電極の本数は 4 本とした。図より、金属棒本数が増えるにしたがって、電流密度の最下点をとる見かけのグリッド電極幅は広がることがわかる。また、ギャップ幅が狭い場合には、どの本数においても電流密度が大きくなる。これは、電界の回り込みの影響により、電流密度が大きくなると考えられる。また、ギャップ幅が広い場合にも、電流密度が大きくなる。これは、ギャップ幅が広いことで電界の回り込みは抑制されるが、ギャップ間を通り抜けやすくなることで電流密度が大きくなると考えられる。よって、適切なギャップ幅と金属棒の本数で誘導電圧を抑制できると考えられる。

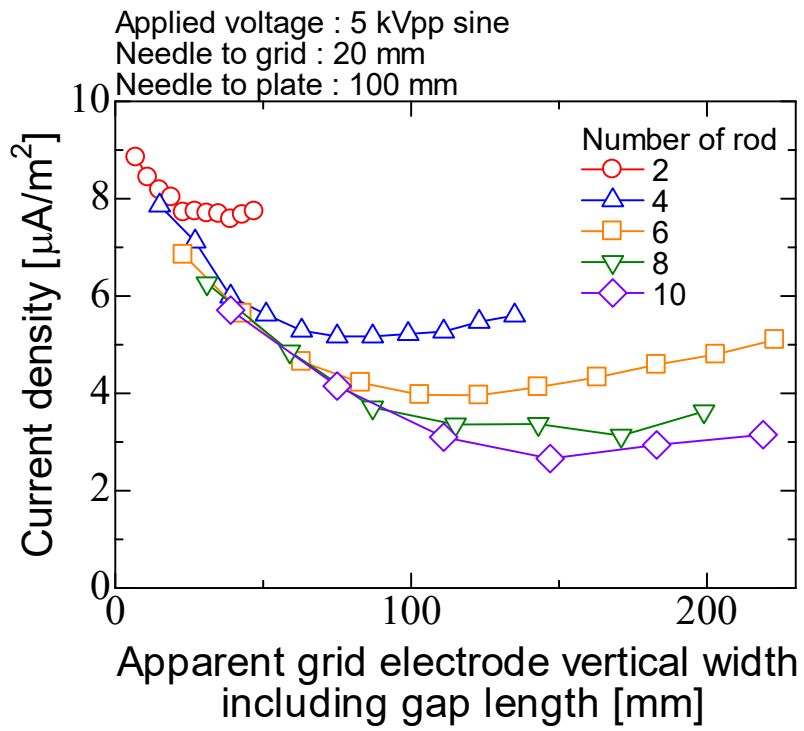


図 4.19 ギャップ幅を含む見かけのグリッド電極幅における電流密度

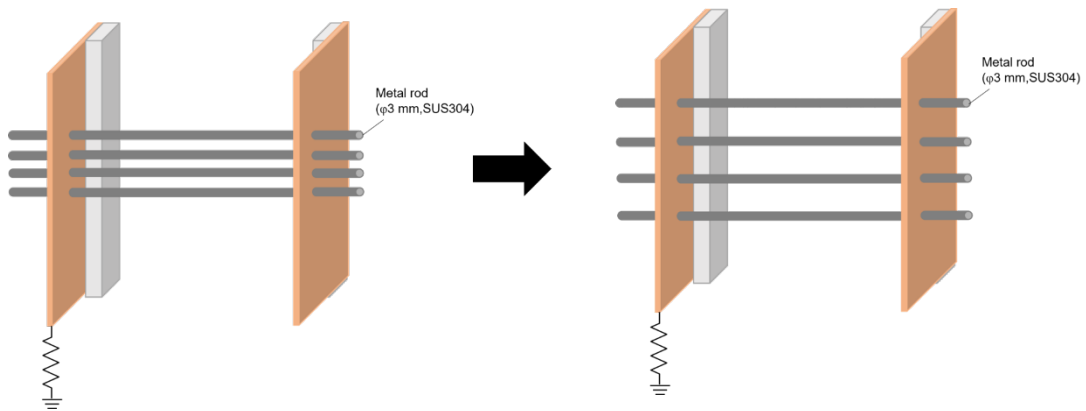


図 4.20 本数固定でギャップ幅を変化させた場合のグリッド電極

4.3.4.4 プレート距離変化における電流密度特性

図 4.21 に、プレート距離を変化した場合の電流密度特性を示す。ここで、印加電圧は 5 kV_{p-p} の正弦波、針-グリッド間距離は 20 mm、針-プレート間距離は 50, 100, 150 mm、グリッド電極の金属棒本数を 4 本とした。また、図 4.20 のように金属棒を固定し、ギャップ幅を 1 mm から 41 mm まで 4 mm ずつ変化させて誘導電圧の最下点を測定した。図より、針-プレート間距離が広がるにつれて電流密度が小さくなることがわかる。また、どの距離においても見かけのグリッド電極幅が約 75 mm の場合に誘導電圧が最も小さくなる。このことから、プレートの約半分の断面積を遮蔽することで誘導電圧を抑制できると考えられる。

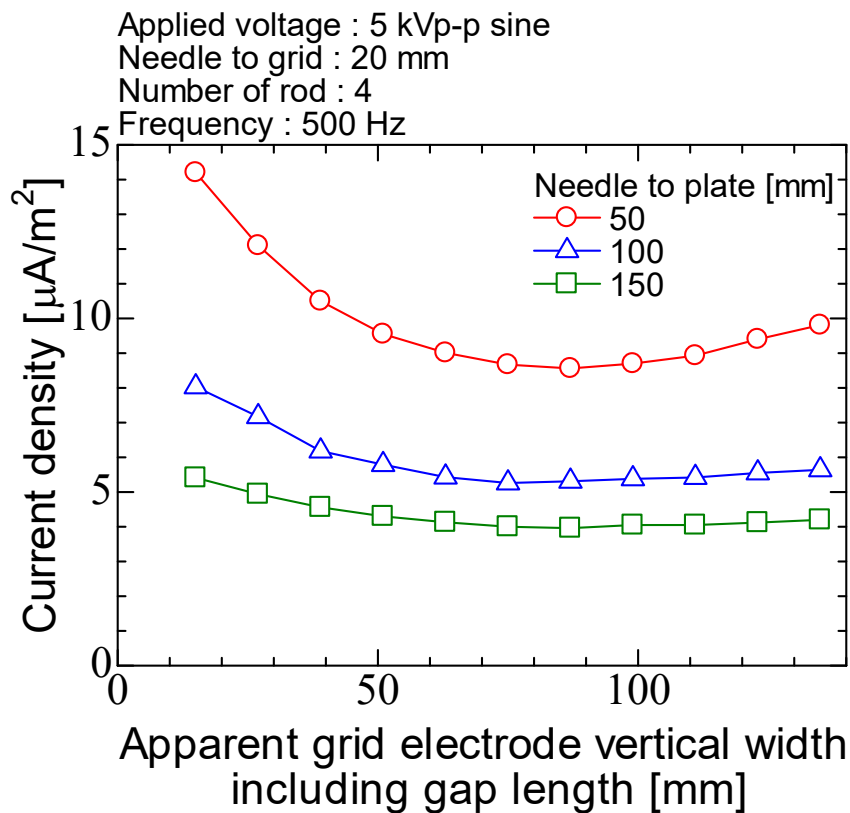


図 4.21 プレート距離変化における電流密度特性

4.3.4.5 グリッド距離変化における電流密度特性

図 4.22 に、グリッド距離を変化させた場合の電流密度特性を示す。ここで、印加電圧は $5 \text{ kV}_{\text{p-p}}$ の正弦波、針-グリッド間距離は 20 mm 、 50 mm とし、針-プレート間距離は 100 mm 、金属棒本数は 4 本とし、図 4.20 のように金属棒本数を固定し、ギャップ幅を 1 mm から 41 mm まで 4 mm ずつ変化させて誘導電圧の最下点を測定した。図より、グリッド距離が近いほど電流密度が小さいことが分かる。また、針-グリッド間距離が 20 mm 、 50 mm どちらにおいても見かけのグリッド電極幅が 75 mm の場合に電流密度が最小になる。この結果から、プレートの約半分の断面積を遮蔽することで誘導電圧を抑制できる。

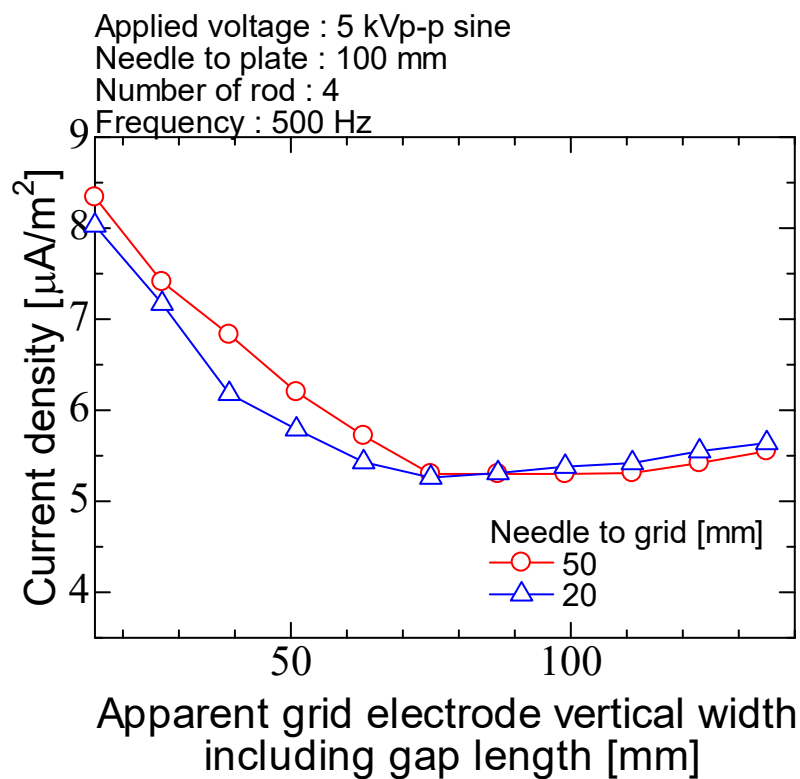


図 4.22 グリッド距離を変化させた場合の電流密度特性

4.4 除電特性

4.4.1 周波数変化における除電特性

図 4.23 に、ギャップ間隔を変化させた場合の除電時間の周波数依存性を示す。図では (a) 正帯電時と (b) 負帯電時を示す。ここで、印加電圧 8 kV_{p-p} の正弦波、針-グリッド電極間距離は 20 mm、針-プレート間距離は 100 mm、ギャップ幅は 1~7 mm とし、グリッド電極の本数は 18 本で、空気圧力は 7 kPa とした。図より、すべての周波数でギャップ幅が狭いほど除電時間が長いことがわかる。除電時間を取得する際には、印加電圧をバイアスして正負イオンの生成量を調整しているため、ギャップ幅の変化で生じる放電特性への影響は除電時間の結果に影響を及ぼさない。そのため、この結果は空間を輸送されるイオンがグリッド上で捕集されたことが大きな要因であるといえる。また、低周波数で、グリッド幅ごとの除電時間の影響が最も大きく、周波数が増加するほどギャップ幅の変化による除電時間への影響は小さくなる。これは、周波数が低いほどイオン輸送空間に単一極性のイオンの領域が形成され、空間の電位が増加し、グリッド電極とイオン間の電界が強まったことが要因であると考えられる。また、高周波数の領域では、本実験で用いた正弦波印加電圧が、周波数が長くなるほど印加電圧の立ち上がりと立ち下りの速度が早くなり、空間中のイオン密度が増加したため除電時間が短くなったと考えられる。また、正帯電時よりも負帯電時のほうが除電時間が長い。負イオンの移動度 ($2.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$) は正イオンの移動度 ($1.69 \times 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$) よりも高いためであると考えられる。

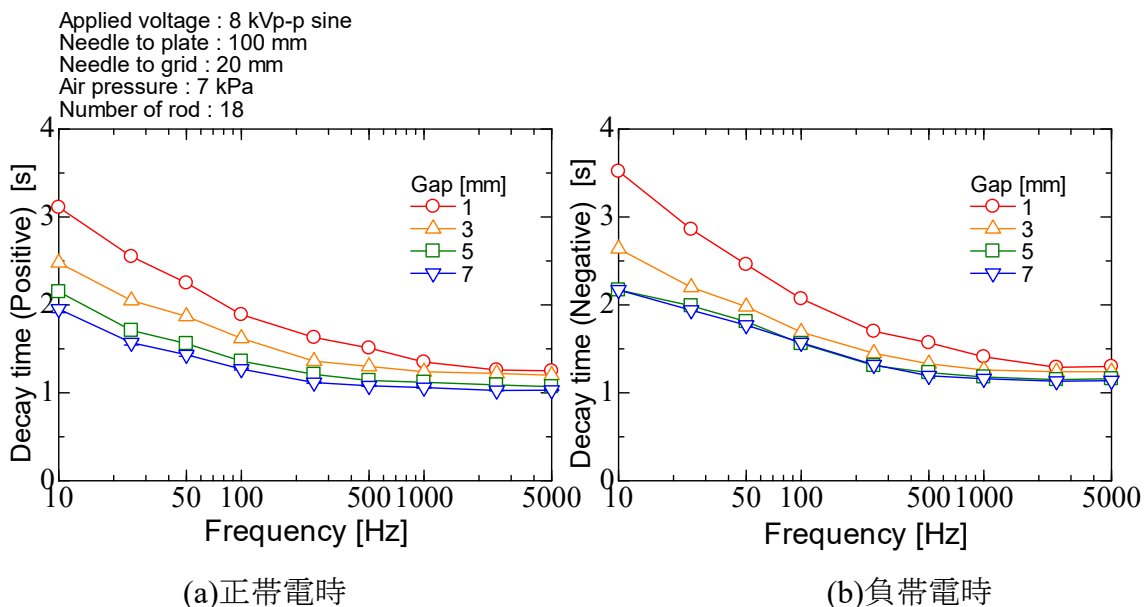


図 4.23 ギャップ幅を変化させた場合の除電時間の周波数依存性

4.4.2 グリッド本数変化における除電特性

図 4.24 に、グリッド電極の金属棒本数を変化させた場合の除電時間およびギャップ幅を変化させた場合の除電時間を示す。ここで、印加電圧は $8 \text{ kV}_{\text{p-p}}$ の正弦波、針-グリッド間距離は 20 mm 、針-プレート間距離は 100 mm 、ギャップ幅は $1, 7 \text{ mm}$ とし、グリッド電極の金属棒本数は $2 \sim 18$ 本まで 2 本ずつ変化させ、空気圧力は 7 kPa とした。図より、グリッド電極の金属棒の本数を増やすにしたがって除電時間は増加することがわかる。特に、ギャップ間隔が狭く、周波数が低い場合にその傾向が顕著である。

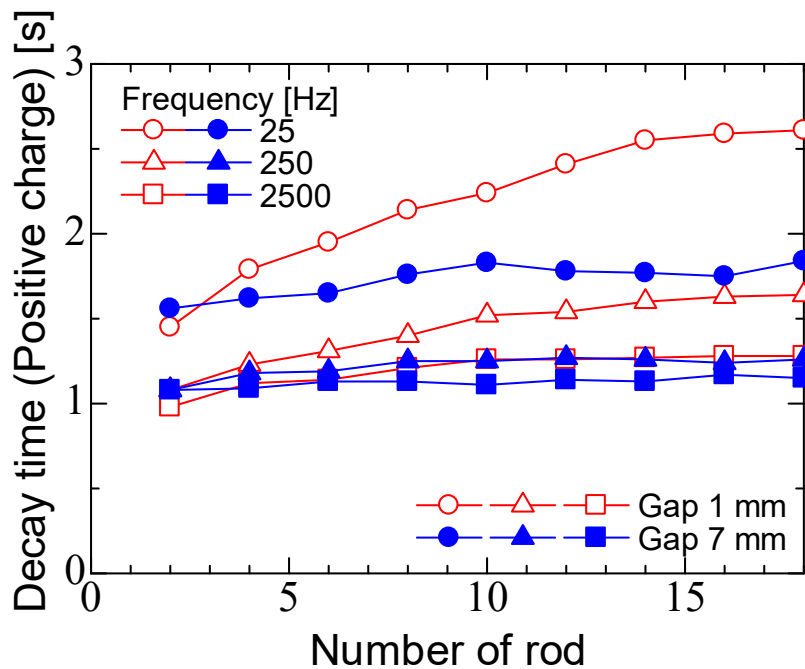
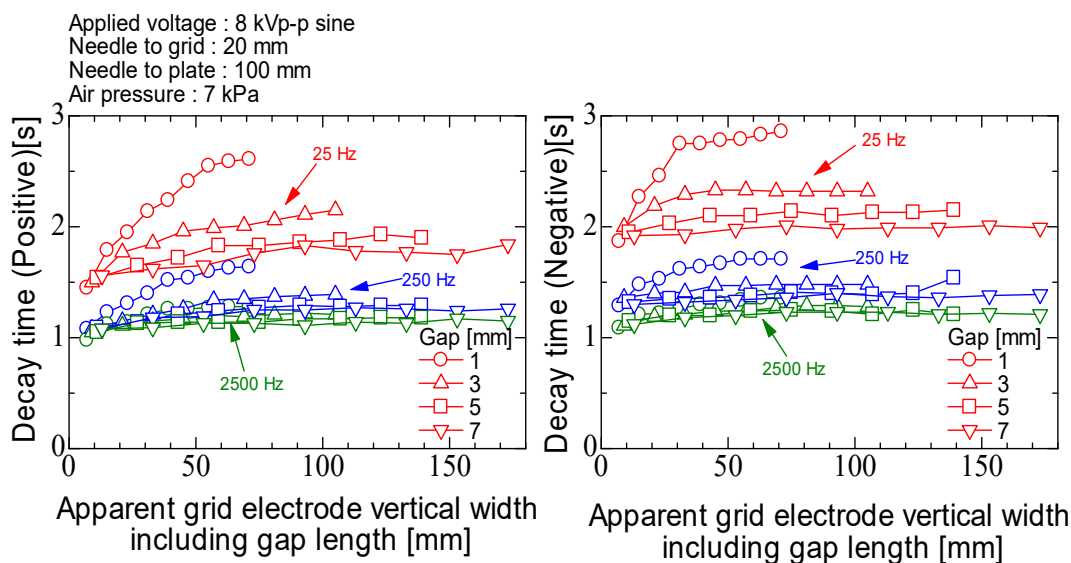


図 4.24 グリッド電極の金属棒本数を変化させた場合の除電時間

図 4.25 に、図 4.24 の横軸はギャップ長を含む見かけのグリッド電極幅とした場合の除電時間を示す。図より、両極性の除電において、周波数が低いほどグリッド間隔およびグリッド幅の影響を強くうけることがわかる。また、負極性の場合には、垂直軸が 40 ~ 50 mm 以上広がると除電時間はほとんど変化しないことがわかる。一方で、正極性の除電では垂直軸が 60 mm 以上で除電時間の変化が小さくなる。この結果から、正帯電の除電に寄与する負イオンは正イオンより広い領域に拡散し、除電空間を輸送されている可能性がある。



(a) 正帯電時

(b) 負帯電時

図 4.25 ギャップ長を含む見かけのグリッド電極幅における除電時間

4.4.3 空気圧力変化における除電特性

図 4.26 に、空気圧力を変化させた場合の除電時間を示す。ここで、印加電圧は 8 kV_{p-p} の正弦波、針-グリッド間距離は 20 mm、針-プレート間距離は 100 mm、ギャップ幅は 3 mm とし、グリッド電極の金属棒の本数は 18 本、空気圧力は 7 ~ 24.5 kPa とした。図の結果より、空気圧力が高いほど除電時間が短いことがわかる。

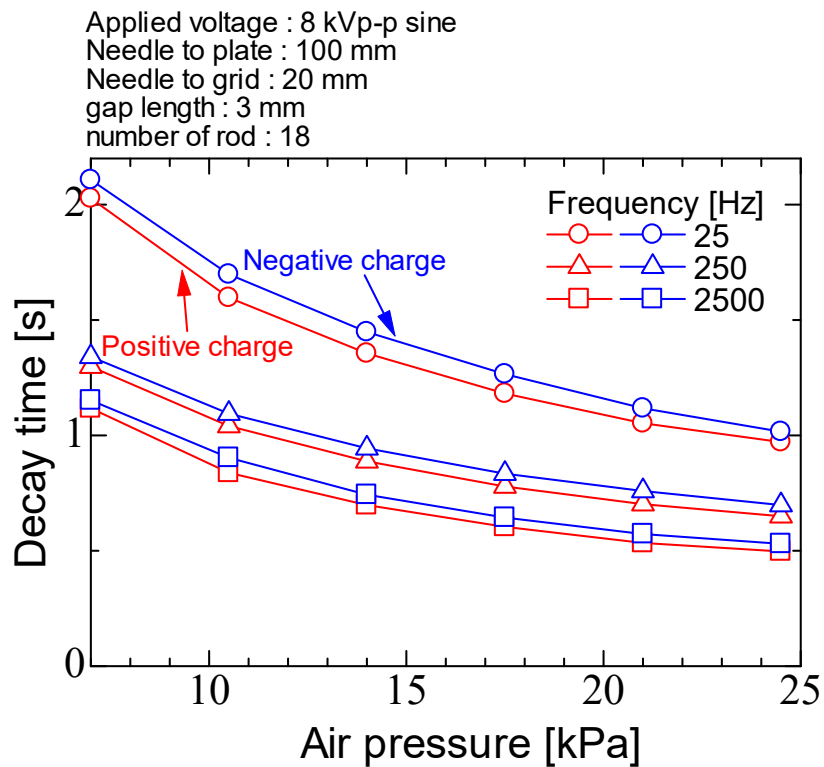


図 4.26 空気圧力を変化した場合の除電時間

4.5 まとめ

4.3 と 4.4 では、静電誘導の抑制と効率的な除電の実現を目的として、対象物と放電電極の間に導電性材料で作られたグリッド状の電極を設置し、除電と静電誘導に及ぼす影響の検討を行った。

グリッド電極を配置した場合のリング電流、およびグリッド電流は、放電極性によって異なり、負極性放電ではパルス状のトリチェルパルス放電で、広い電離領域と高い移動度によって、グリッドおよびリング電極に流入し、グリッド電流の約半分程度の電流がリング電極に流入することがわかった。正極性放電は、グロー状コロナ放電であり、負極性に比べて無パルス、小さい電離領域をもつため、低周波数領域ではリング電極にほとんど正イオンは流入せず、グリッド電極に流入する。周波数が増加すると放電強度が大きくなることで、両極性放電の流入電流は増加する。

グリッド電極を配置した場合の誘導電圧・電流密度特性では、グリッド電極がない場合に比べて、顕著に誘導電圧は低下した。また、ギャップ間隔 1 mm、本数 2 本の場合においても、グリッド電極がない場合に比べて約半分の電界遮蔽効果がみられた。また、電極本数が多く、また、ギャップ間隔が広いほど電流密度の抑制効果が大きく、ギャップ 7 mm、本数 18 本のとき、電流密度は約 $3 \mu\text{A}/\text{m}^2$ まで減衰した。ギャップ幅を細かく変化させた場合の電流密度特性では、金属棒本数が少なく、ギャップ幅が狭いときは電界の回り込みの影響で電流密度が大きくなるが、金属棒本数が少なく、ギャップ幅が広いときにはギャップ間を通り抜けることができるため電流密度が大きくなると考えられる。よって、適切なギャップ幅および金属棒本数で電界を遮蔽することにより誘導電圧を抑制できると考えられる。

グリッド電極を配置した場合の除電特性では、周波数が高く、またギャップ幅が広いほど除電時間が早いことがわかった。また、本数を増加すると、捕集されるイオンが増加することで除電時間が遅くなる。加えて、低周波数ではギャップ間隔による除電時間への影響が大きく、高周波数ではギャップ間隔による影響が小さいことがわかった。これは周波数が高くなることで正負イオンの混ざり合う領域が増加し、見かけ上の電位が 0 V に近づき、グリッド電極で捕集されるイオンが減少していることが考えられる。

4.6 参考文献

- (1) 佐藤崇志, 高橋宏治, 古井英則, 池畑隆: “イオナイザを活用した生産現場の静電気対策に関する研究”, TRANSACTIONS OF JASVET VOL 33 (2017), pp.42-48
- (2) 大津孝佳, 堂山英之, 石塚裕康, 鷺坂功一: “静電気放電に於ける電子デバイスの保護素子と静電気対策材料の効果の比較”, 宇宙環境シンポジウム, pp.107-111
- (3) K. Takahashi, K. Takaki, I. Hiyoshi, Y. Enomoto, S. Yamaguchi and H. Nagata “Development of a corona discharge ionizer utilizing high voltage AC power supply driven by PWM inverter for highly efficient electrostatic elimination”, IntechOpen. Electrostatics-Applications in Physics, Chemistry, Biology and Others, DOI:10.5772/intechopen.88352
- (4) L. Levit and A. Wallash “Measurement of the effects of ionizer imbalance and proximity to MR head handling”, Journal of Electrostatics, Vol.47, pp.305-313 (1999)
- (5) M. A. Noras and D. Pritchard “Ion imbalances on an ionizer-controlled work surface”, Journal of Electrostatics, Vol.64, pp.310-315 (2006)
- (6) L. Baril, M. Nichols, A. Wallash “Degradation of GMR and TMR Recording Heads Using very short duration ESD Transients”, IEEE Transaction on Magnetics, Vol.38, Issue.5 (2002)
- (7) J. E. Vinson, J. J. Liou, “Electrostatic discharge in semiconductor devices : an overview”, Proceeding of the IEEE, Vol.86, Issue2 (1998)
- (8) K. Nagato and T. Ogawa “Atmospheric Ion Mobility Spectra near the Ground”, Planet Space Science, Vol.36, No.2, pp.163-176 (1988)
- (9) K. Takahashi, H. Kaga, K. Kubo, K. Takaki, S. Yamaguchi and H. Nagata “Development of ion measuring system for AC corona discharge”, 電気学会論文誌 基礎・材料・共通部門 (A 部門), Vol.138, No.11 (2018)
- (10) K. Nagato, Y. Matsui, T. Miyata and T. Yamauchi “An analysis of the evolution of negative ions produced by a corona ionizer in air”, International Journal of Mass Spectrometry, Vol.248,

pp.142-147 (2006)

- (11) K. Nagato and M. Nakauchi “Experimental study of particle formation by ion-ion recombination”, *The Journal of Chemical Physics*, Vol.141, 164309 (2014)
- (12) H.E. Manninen, A. Franchin, S. Schobesberger, A. Hirsikko, J. Hakala, A. Skromuils, J. Kangaslioma, M. Enn, H. Junninen, A. Mirme, M. Sipila, T. Petaja, D. R. Worsnop and M. Kulmala “Characterisation of corona-generated ions used in a Neutral cluster and Air Ion Spectrometer (NAIS) ”, *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol.4, pp.2767-2776 (2011)

第 5 章 高抵抗材料で被膜した導電性グリッドが除電及び静電誘導に及ぼす

影響の検証

5.1 はじめに

現在、携帯電話やパーソナルコンピュータなどの各種電子機器はさらに高速化、大容量化、低消費電力化、省スペース化されることが求められている。そのためには、電子デバイスの高集積化に伴う半導体の線幅ルールの微細化と、プリント基板 (PCB : Printed Circuit Board) 実装時における電子デバイス配置の高密度化は、不可欠である。電子デバイスの高集積化により、動作電圧は低下する。また、配置の高密度化により、配置間隔と電子デバイス同士を接続するため配線間隔が狭まる。このように電子デバイスの製造や、電子機器の組み立て工程において、電子デバイスの誤動作、潜在不良や破壊、電子デバイス実装時における損傷や配線の短絡といった静電気障害が発生し、製造歩留の低下が顕著に現れることが懸念される^(1,2)。これらの静電気対策として、除電装置を用いて帯電物に非接触で除電・中和させる方法が用いられている。最近では、交流イオナイザからの誘導帯電による不具合も報告されてきた。

従来、イオナイザの除電性能として、除電速度が重視されてきたが、電子デバイスといった対象物の残留電位が高い場合や、誘導電圧によって問題が生じることがある。本章では、対象物への静電誘導の影響の抑制を目的とし、高抵抗被膜グリッドグリッド電極をコロナ放電電極前方に配置することによるコロナ放電と除電の特性に及ぼす影響を評価した^(3,4)。

5.2 除電における高抵抗被膜グリッド電極が及ぼす影響

5.2.1 実験装置

図 4.7 に、実験装置概略図を示す。また、図 4.8 に実験装置の電極部の外観を示す。ここで、実験装置の高圧部およびイオン捕集プレートとイオン測定回路は 4.1 と同様の回路を用いる。本実験では、4.2 で使用したグリッド電極支持枠とは異なる、銅板のグリッド支持枠を使用した。

図 4.9 に高抵抗被膜グリッドの構成を示す。10 乗 Ω 高抵抗被膜導電性グリッドは、ステンレス製の円筒状金属棒 (ϕ 3 mm, 長さ 250 mm, SUS304) に被覆され、銅板 (縦幅 230 mm, 横幅 30 mm, 厚さ 1 mm), アクリル (縦幅 230 mm, 横幅 20 mm, 厚さ 10 mm) から構成されている。銅板には金属棒を通すことができる ϕ 3 mm の穴が複数開いており、金属棒を通すことで導通する。ステンレスと銅板の接触抵抗は十分小さいため、その接触抵抗による電位差はほとんどない。銅板は 4 種類用意し、穴の間隔を 1, 3, 5, 7 mm とし、任意に金属棒のギャップ間隔を変更することができる。図 5.4 に、高抵抗被膜導電性グリッドを示す。

実験条件として、誘導電圧の測定には、印加電圧を 5 kV_{p-p} の正弦波、除電時間および放電特性の測定には 8 kV_{p-p} の正弦波を用い、イオンバランスは印加電圧をバイアスすることで調整を行った。針と捕集プレートの距離は 100 ~ 300 mm とし、針とグリッド電極の距離は 20 mm とした。コンプレッサから封入する空気圧力は 7 ~ 21 kPa まで任意に変化させた。

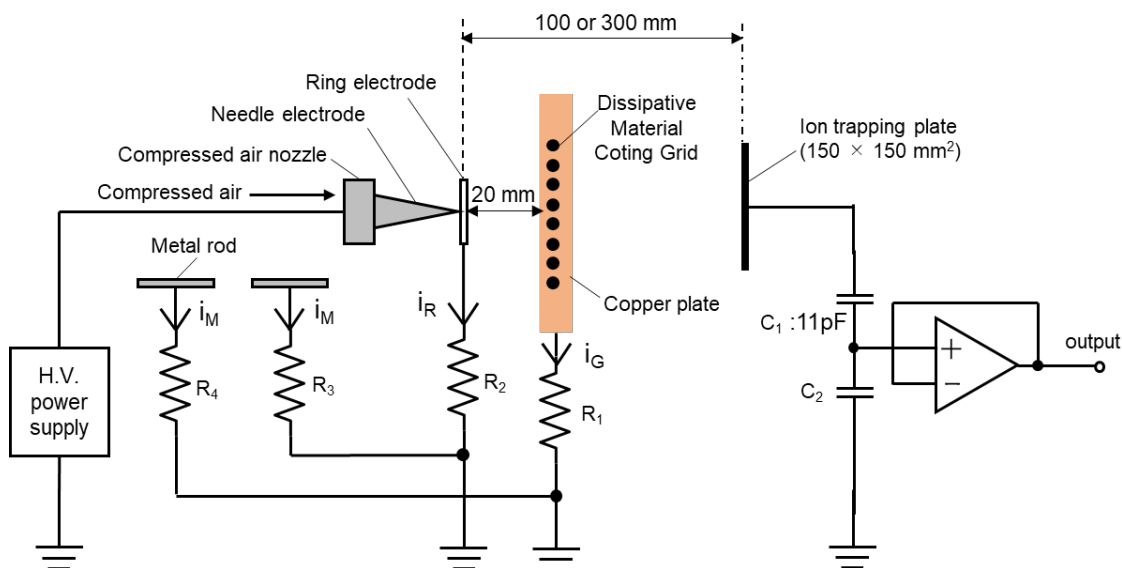


図 5.1 実験装置概略図

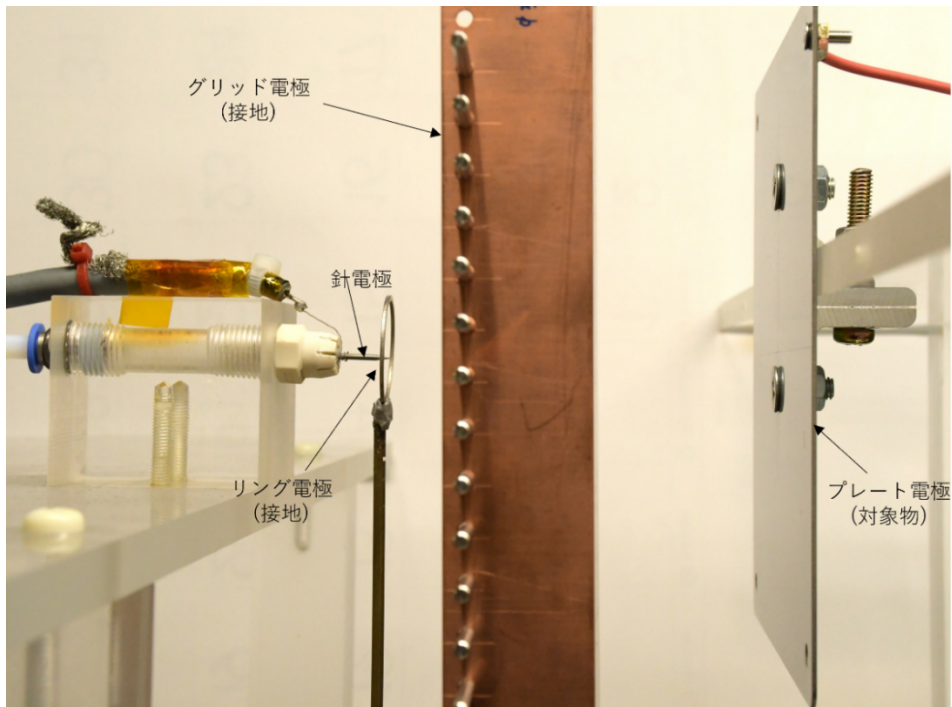


図 5.2 実験装置電極部の外観

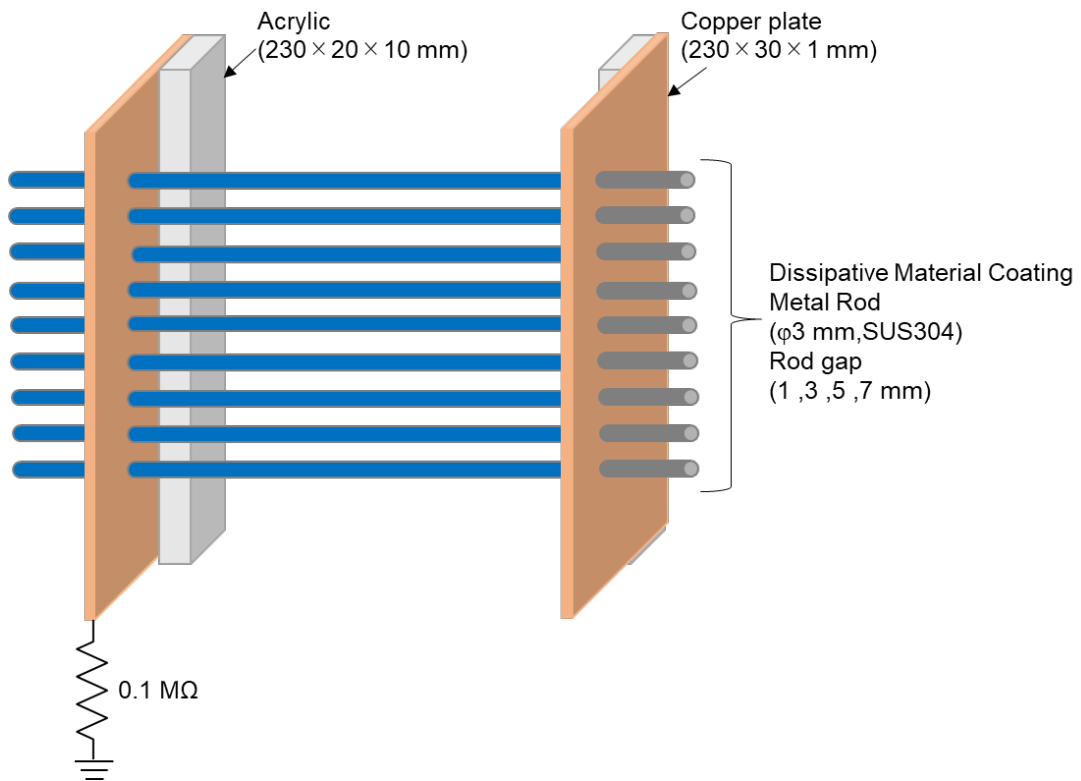


図 5.3 高抵抗被膜グリッド図

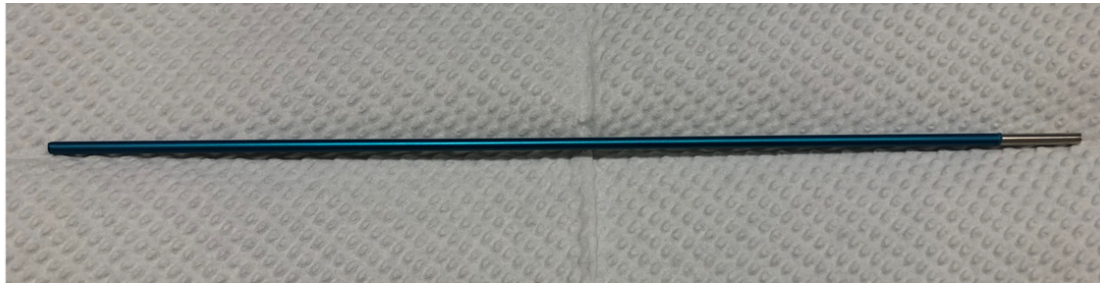


図 5.4 高抵抗被膜導電性グリッド

5.2.2 誘導電圧特性

5.2.2.1 誘導電圧波形

図 4.1 に、 $10 \times \Omega$ 高抵抗被覆導電性グリッドのギャップ幅を変化した場合の誘導電圧波形を示す。ここで、印加電圧は $5 \text{ kV}_{\text{p-p}}$ の正弦波、周波数 500 Hz 、放電針-グリッド間距離は 20 mm 、放電針-プレート間距離は 100 mm 、ギャップ幅は $1 \sim 7 \text{ mm}$ とし、グリッドの本数は 14 本とした。イオン測定回路および、針から捕集プレートまでの空間は空間中のキャパシタンスと測定回路のキャパシタンスの直列となっているため、イオン測定回路の出力波形は印加電圧波形と同位相で、同じ正弦波が観測される。図より、グリッド本数が 14 本と同じ場合、グリッド幅が 7 mm のときの誘導電圧が最も小さくなり、ギャップ間隔が小さくなるほど誘導電圧が大きくなり金属グリッドと同様の傾向となった。

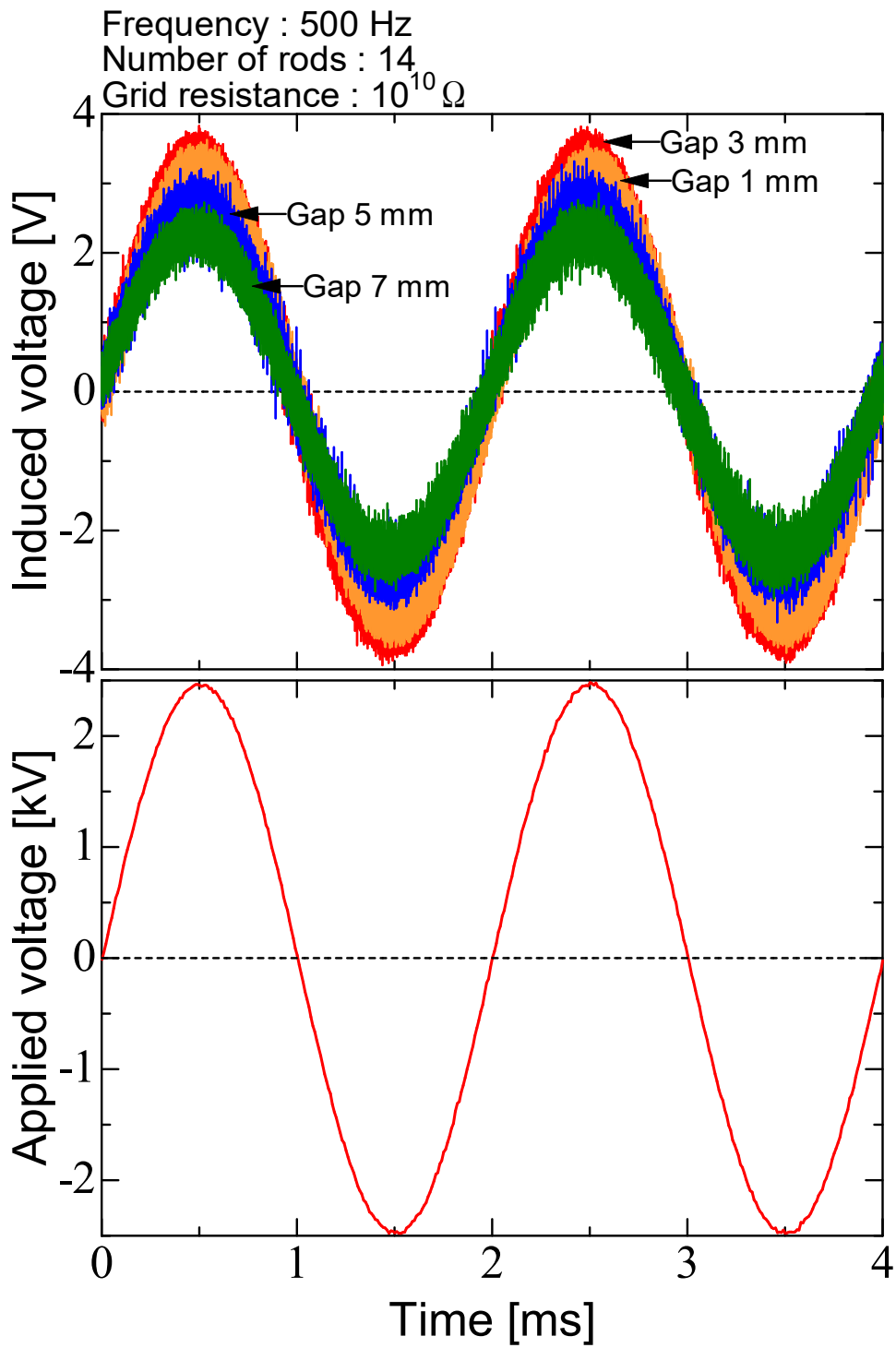


図 5.5 ギャップ幅を変化した場合の誘導電圧波形（上）
 と印加電圧波形（下）

図 5.6 に、金属グリッド、 $4 \times \Omega$ と $10 \times \Omega$ の高抵抗被膜グリッドの誘導電圧を示す。ここで、印加電圧は $5 \text{ kV}_{\text{p-p}}$ の正弦波、周波数 500 Hz 、放電針-グリッド間距離は 20 mm 、放電針-プレート間距離は 100 mm 、ギャップ幅は 3 mm とし、グリッドの本数は 14 本とした。金属グリッドの誘導電圧抑制効果と $4 \times \Omega$ の高抵抗被膜グリッドの抑制効果がほぼ同等のレベルであった。一方、 $10 \times \Omega$ 高抵抗被膜グリッドの誘導電圧抑制効果はやや劣った。誘導電圧の値は、金属グリッドでは換算値で $4.7 \text{ V}_{\text{p-p}}$ であったのが、 $10 \times \Omega$ 高抵抗被膜グリッドでは、 $5.6 \text{ V}_{\text{p-p}}$ と少し高くなったが、高い誘導電圧の抑制効果が有る事がわかった。誘導電圧の上昇は、高抵抗被覆が電界の影響を受けて電位を帯びるためと考えられる。被膜の抵抗値が異なっても、位相が変わらないことがわかった。

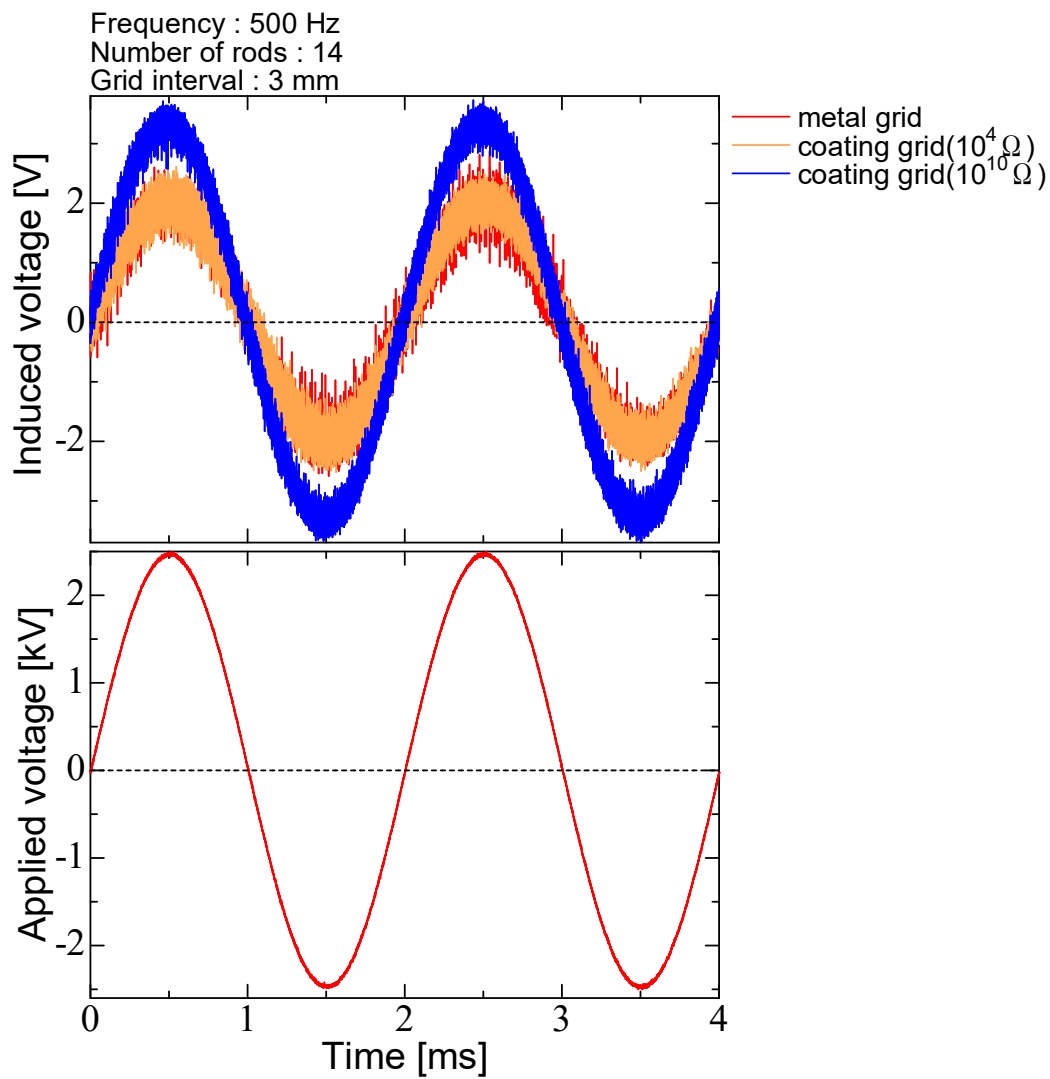


図 5.6 金属, 4 乗 Ω と 10 乗 Ω の高抵抗被膜グリッド誘導電圧波形 (上)
 印加電圧波形 (下)

5.2.2.2 グリッド本数変化における誘導電圧特性

図 4.1 に、10 乗 Ω 高抵抗被膜導電性グリッドの本数を変化した場合の誘導電圧特性を示す。ここで、印加電圧は $5 \text{ kV}_{\text{p-p}}$ の正弦波、放電針-グリッド間距離は 20 mm 、放電針-プレート間距離は 100 mm 、ギャップ幅は $1 \sim 7 \text{ mm}$ とし、グリッドは $2 \sim 18$ 本まで変化させた。図より、グリッド本数によらず、常にギャップ幅が広いほど、誘導電位は低いことがわかった。また、本数が多いほど、電位は低くなるが、その減少率は徐々に低下することがわかる。これは、電極本数を増やすことで電界の遮蔽領域が広くなり、誘導電圧は減少する。針先の電界はプレート中心方向が最も強く、水平方向に行くほど電界強度が弱まるため、電界の遮蔽により誘導電圧が減少する。また、図より、高抵抗被膜導電性グリッド本数が 2 本の場合には約 $15 \text{ V}_{\text{p-p}}$ の電圧であるが、グリッド電極がない場合には $21.4 \text{ V}_{\text{p-p}}$ であるため、針先-プレート中心の強電界部を遮蔽することで、誘導電圧を抑制することができる。金属グリッドと比較すると、ギャップ幅が広がることによる誘導電圧低減効果の差が見えにくくなっている。これは、高抵抗被膜の膜厚の不均一が影響していると考えられる。

図 4.18 に、ギャップ長を含む見かけの 10 乗 Ω 高抵抗被膜導電性グリッド電極幅に対する誘導電圧特性を示す。ここで、印加電圧は $5 \text{ kV}_{\text{p-p}}$ の正弦波、放電針-グリッド間距離は 20 mm 、放電針-プレート間距離は 100 mm 、ギャップ幅は $1 \sim 7 \text{ mm}$ とし、グリッドは $2 \sim 18$ 本まで変化させた。図は、横軸をギャップ長を含む見かけのグリッド電極幅としている。図より、誘導電圧は見かけのグリッド電極幅の増加に伴って減衰していることがわかる。結果から、ギャップ幅 $1 \sim 7 \text{ mm}$ の条件において、グリッド電極の本数ではなく、見かけ上の幅が増加することで誘導電圧を抑制できることがわかった。これは、ギャップ幅が電界の遮蔽に十分効果がある程度に小さいため、電極間の電界が十分に遮蔽され、また、見かけのグリッド電極幅が広がることで、水平方向から回り込む電界を遮蔽できるためであると考えられる。金属グリッドでは、同じ傾向を示していたが、高抵抗被膜導電性グリッドでは、ギャップ幅 1 mm の条件で誘導電位が低くなった。これは、高抵抗被膜の膜厚の影響が出ている可能性が有る。

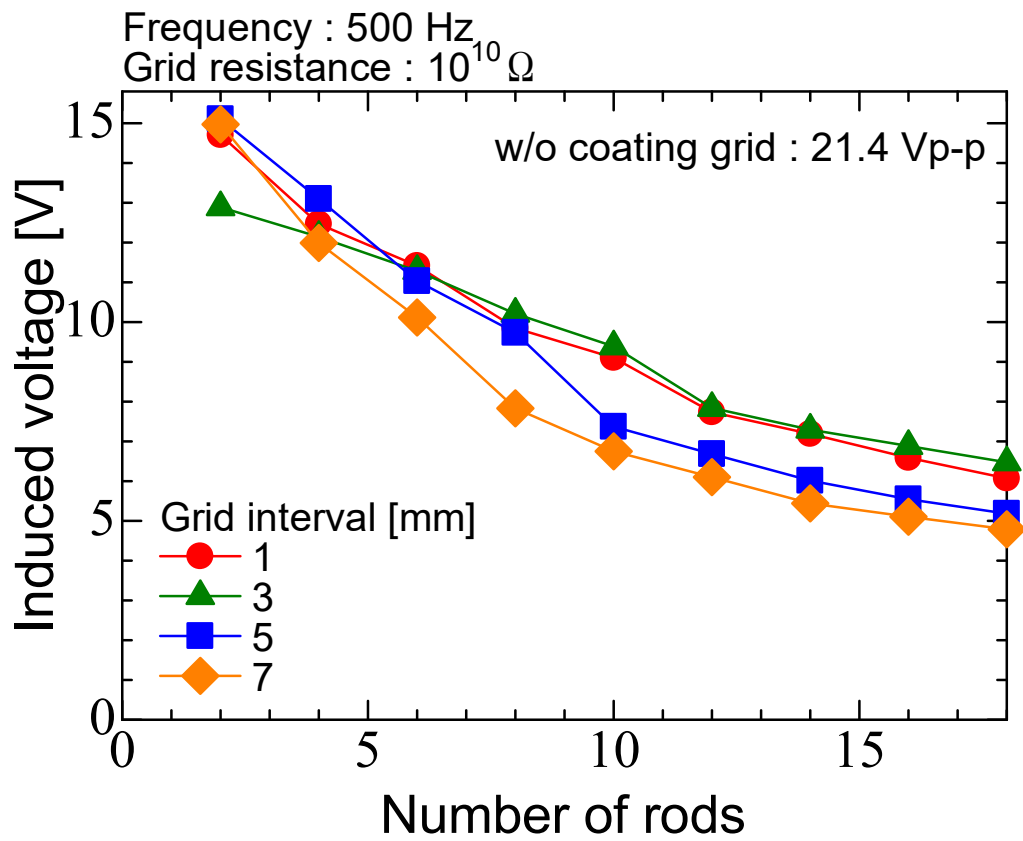


図 5.7 高抵抗被膜導電性グリッド電極の本数を変化した場合の誘導電圧特性

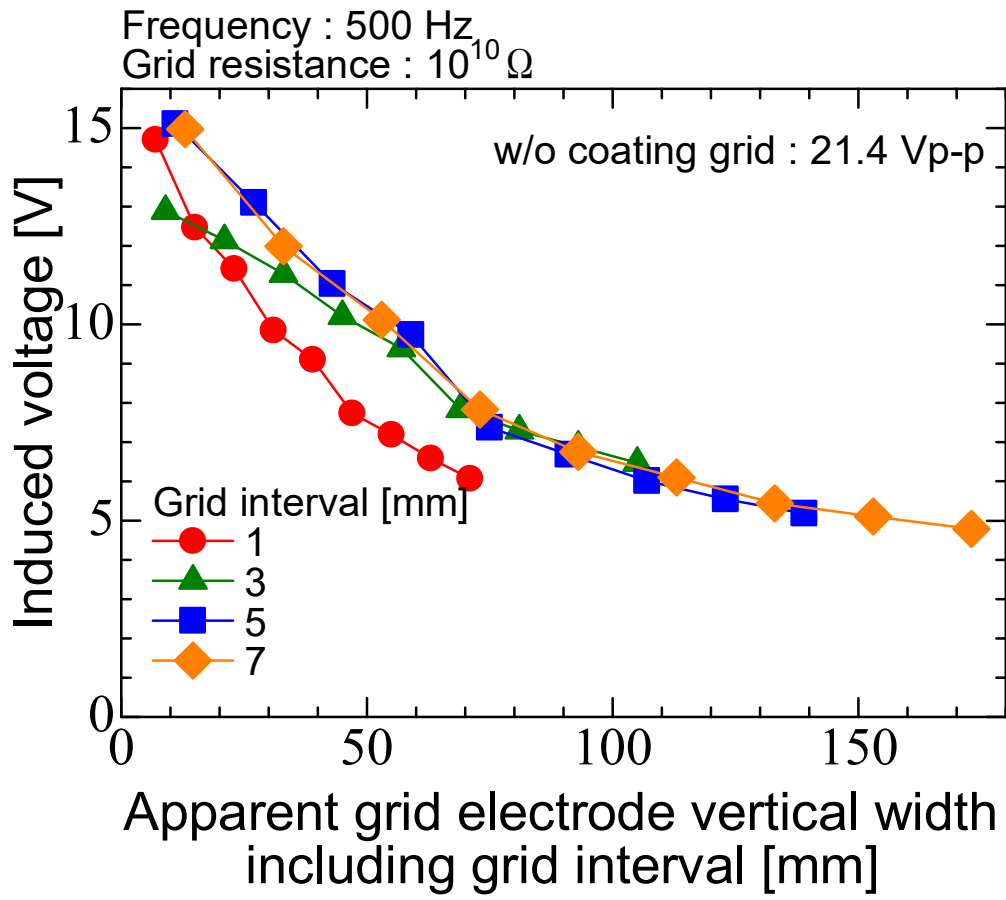


図 5.8 ギャップ長を含む見かけの高抵抗被覆グリッド電極幅に対する誘導電圧特性

5.2.2.3 ギャップ幅変化における誘導電圧特性

図 4.19 に、 $10 \times \Omega$ 高抵抗被膜導電性グリッドのギャップ幅を変化させた場合の誘導電圧特性を示す。ここでは、図 4.20 のように $10 \times \Omega$ 高抵抗被膜導電性グリッド電極の本数を固定し、ギャップ幅を 1 mm から 41 mm まで 4 mm ずつ変化させて誘導電圧の最下点を測定した。ここで、印加電圧は 5 kV_{p-p} の正弦波、放電針-グリッド間距離は 20 mm、放電針-プレート間距離は 100 mm、グリッド電極の本数は 4 本とした。図より、高抵抗被膜導電性グリッド電極の本数が増えるにしたがって、誘導帯電電圧の最下点をとる見かけのグリッド電極幅は広がるのがわかる。また、ギャップ幅が狭い場合には、どの本数においても誘導帯電電圧が大きくなる。これは、水平方向からの電界の回り込みの影響により、電界強度が大きくなると考えられる。また、ギャップ幅が広い場合にも、誘導電圧が高くなる。これは、ギャップ幅が広いことで電界の回り込みは抑制されるが、ギャップ間を電界が通り抜けやすくなることで誘導電圧が高くなると考えられる。よって、適切なギャップ幅と金属棒の本数で誘導電圧を抑制できると考えられる。また、ギャップ幅が広がることにより誘導電圧が揺らぐのは、高抵抗被膜の膜厚の不均一性が原因と考えられる。

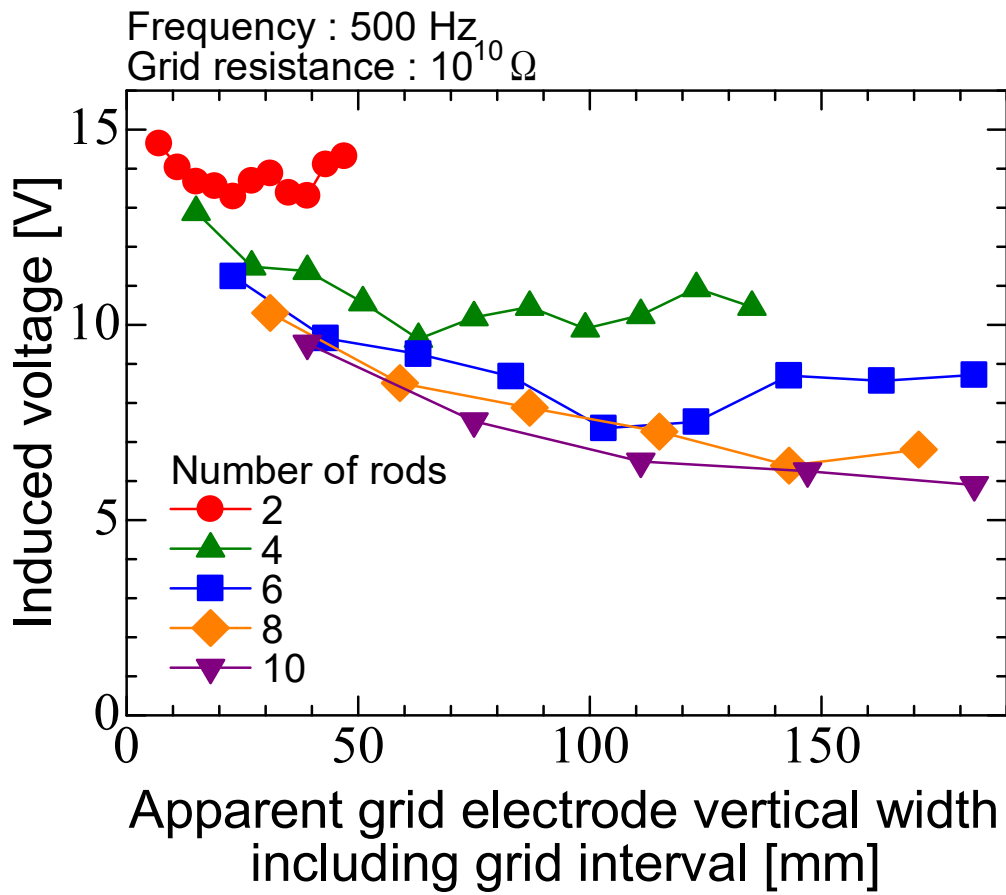


図 5.9 ギャップ幅を含む見かけのグリッド電極幅に対する誘導電圧

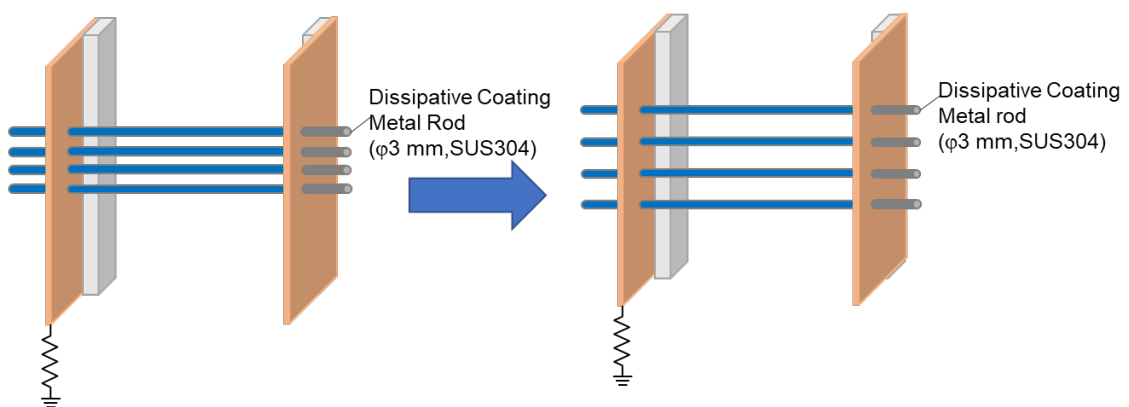


図 5.10 本数固定でギャップ幅を変化させた場合の高抵抗被膜導電性グリッド電極

5.3 除電特性

5.3.1 グリッド本数変化における除電特性

図 4.24 に、 $10 \times \Omega$ 高抵抗被膜導電性グリッド電極の本数を変化させた場合の除電時間およびギャップ幅を変化させた場合の除電時間を示す。ここで、印加電圧は $8 \text{ kV}_{\text{p-p}}$ の正弦波、放電針-グリッド間距離は 20 mm 、放電針-プレート間距離は 100 mm 、ギャップ幅は 1.7 mm とし、グリッド電極の金属棒本数は $2 \sim 18$ 本まで 2 本ずつ変化させ、空気圧力は 7 kPa とした。図より、グリッド電極の金属棒の本数を増やすにしたがって除電時間は増加することがわかる。特に、ギャップ間隔が狭く、周波数が低い場合にその傾向が顕著である。同じ周波数の場合、ギャップ間隔狭いと除電時間が増加する。 25 Hz でグリッド間隔 1 mm 時、金属グリッドの場合は、 15 本を超えると除電時間の増加は飽和して行く傾向にあったが、高抵抗被覆導電性グリッドの場合は、 18 本まで除電時間の増加傾向は継続していた。 18 本以上でも除電時間は増加して行く可能性が有る。これは、ギャップ間隔が狭くグリッド全体の幅が比較的狭いため、イオナイザから生成されたイオンの流れが、グリッドの外側に回り込んでいる事が考えられる。負帯電の場合も同じような傾向を示した。

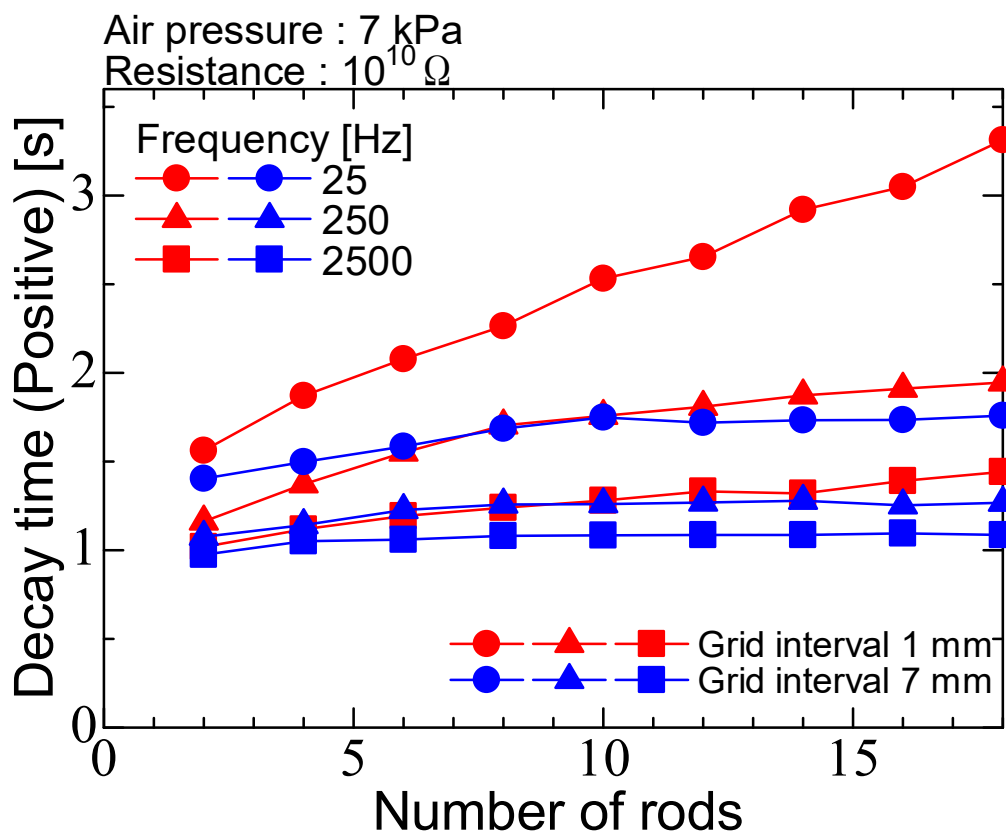
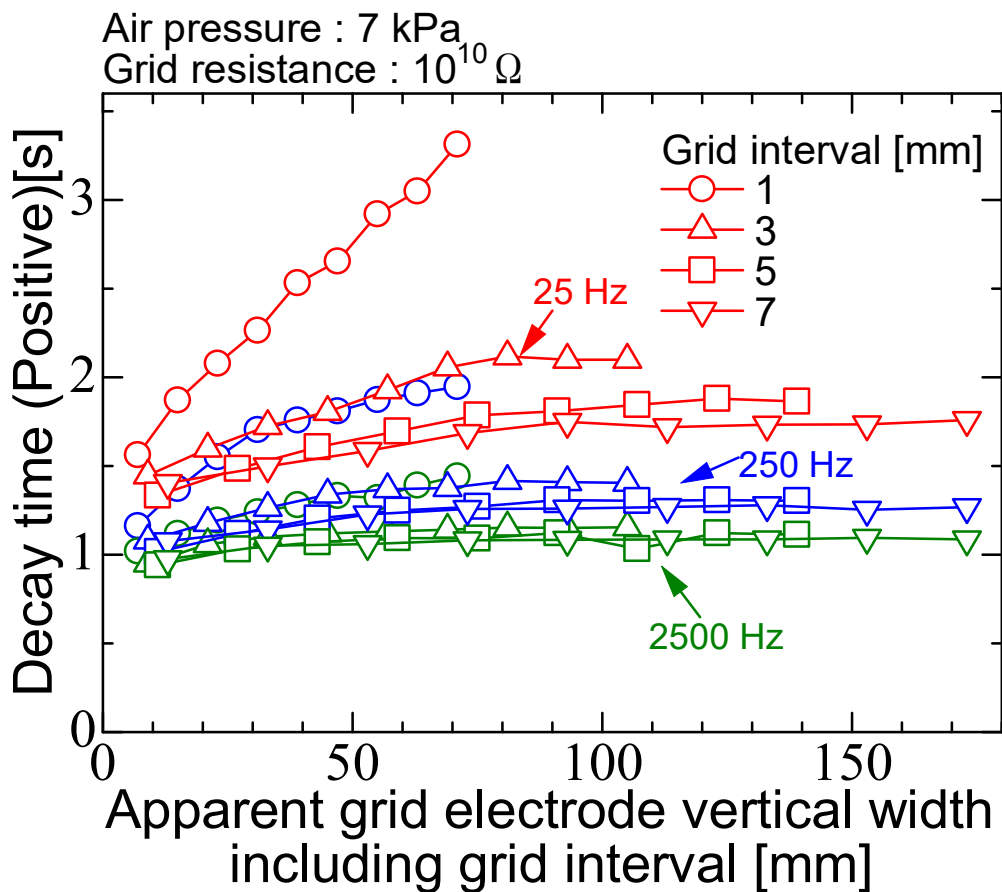
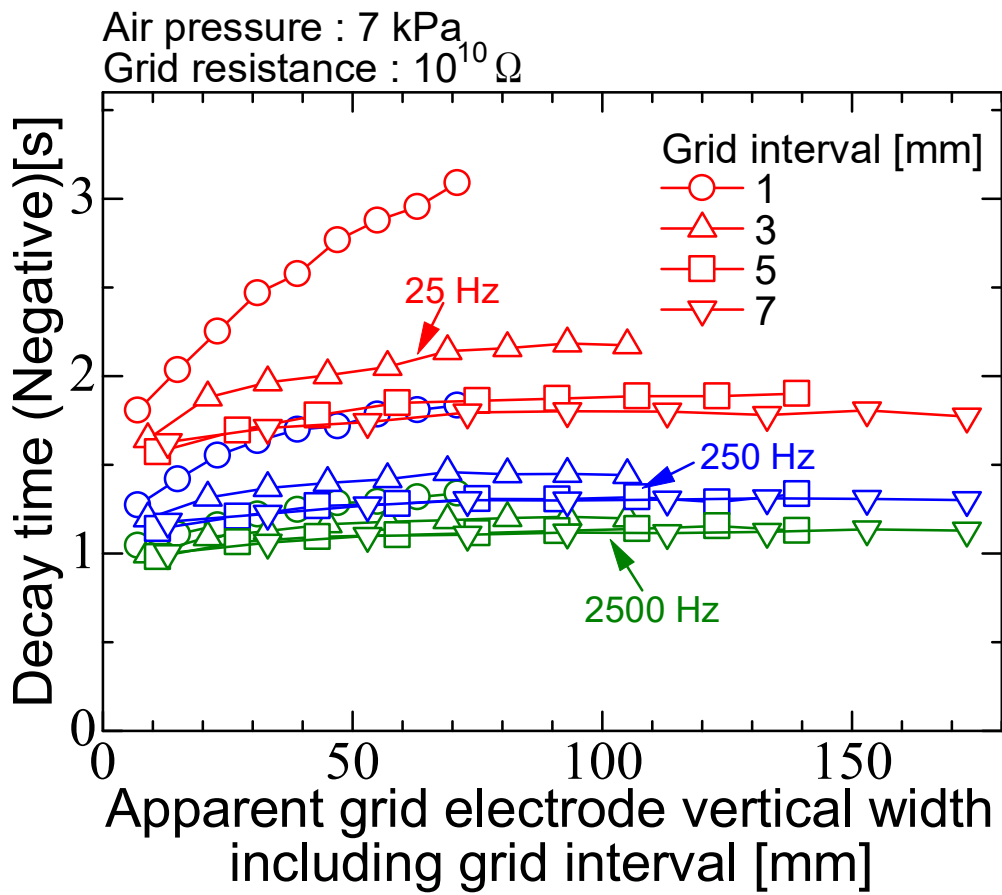


図 5.11 高抵抗被覆導電性グリッド電極の本数を変化させた場合の除電時間

図 4.25 に、横軸をギャップ長を含む見かけのグリッド電極幅とした場合の除電時間を示す。(a) は正帯電時 (b) は負帯電時となる。図より、両極性の除電において、周波数が低いほどグリッド間隔およびグリッド幅の影響を強くうけることがわかる。グリッド間隔 1 mm の条件以外では、250 Hz, 2500 Hz 時に除電特性はほぼ同等と言える。また、負極性の場合には、垂直軸が 40 ~ 50 mm 以上で、250 Hz 以上の場合除電時間はほとんど変化しないことがわかる。一方で、正極性の除電では垂直軸が 80 mm 以上で除電時間の増加が小さくなる。この結果から、正帯電の除電に寄与する負イオンは正イオンより移動度が高く広い領域に拡散し、除電空間を輸送されている可能性がある。



(a) 正帯電時



(b) 負帯電時

図 5.12 ギャップ長を含む見かけのグリッド電極幅における除電時間

(a) 正帯電時 (b) 負帯電時

5.3.2 空気圧力変化における除電特性

図 4.2613 に、空気圧力を変化させた場合の除電時間を示す。ここで、印加電圧は 8 kV_p の正弦波、放電針-グリッド間距離は 20 mm 、放電針-プレート間距離は 100 mm 、ギャップ幅は 3 mm とし、 $10 \text{ 乗 } \Omega$ 高抵抗被膜導電性グリッド電極の本数は 18 本、空気圧力は $7 \sim 24.5 \text{ kPa}$ とした。図より、空気圧力が高いほど除電時間が短く、周波数による除電時間の差も減少して行くことがわかる。金属グリッドと比較すると、 25 Hz での除電時間の差が大きくなっている。これは、正帯電の除電に寄与する負イオンは正イオンより移動度が高く、除電効果が高まったためと考えられる。

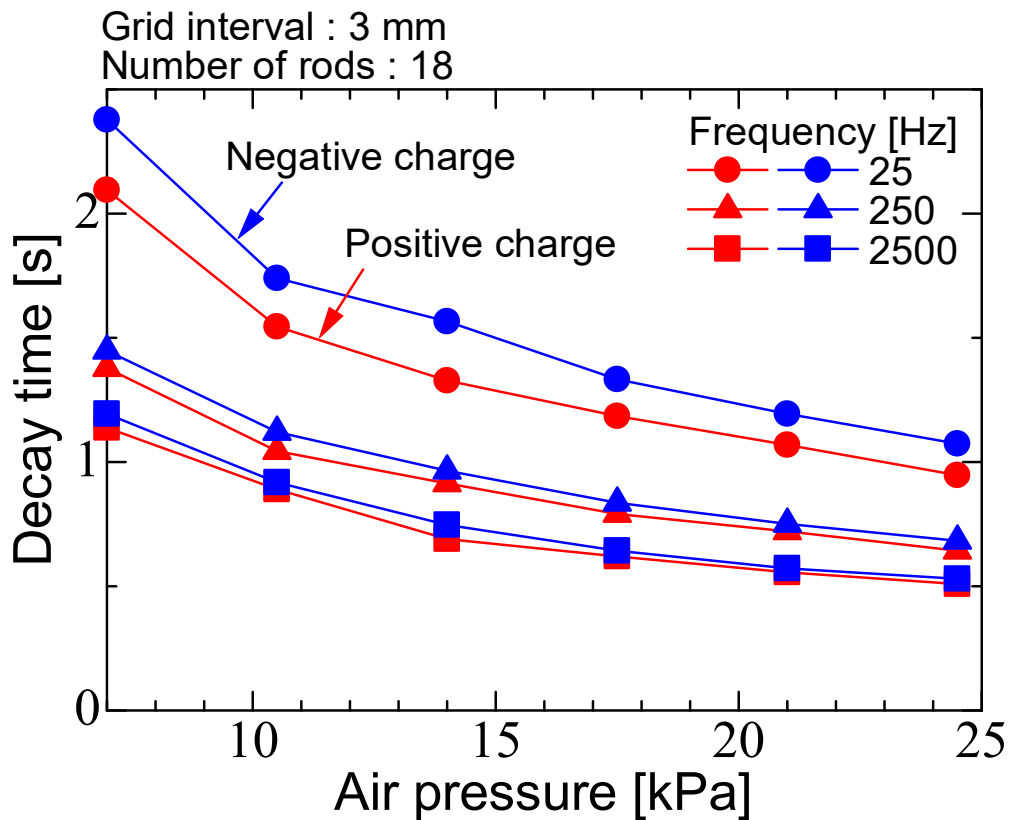


図 5.13 空気圧力を変化した場合の除電時間

5.3.3 金属グリッドの有無と 4 乗 Ω 10 乗 Ω 高抵抗被覆導電性グリッドの除電特性

図 4.26 に、金属グリッドの有無と 4 乗 Ω 10 乗 Ω 高抵抗被覆導電性グリッドの除電特性を示す。ここで、印加電圧は 8 kV_{p-p} の正弦波、放電針-グリッド間距離は 20 mm、放電針-プレート間距離は 100 mm、ギャップ幅は 3 mm とし、グリッド電極の金属棒の本数は 16 本、空気圧力は 7 kPa とした。図より、グリッド無しの状況では、除電時間は周波数にあまり依存しない事がわかる。グリッドを設置した場合、除電時間は長くなるが周波数が増加して行につれ除電時間が減少して行く。これは、放電針から生成される正負のイオンが、周波数が上がることによりきめ細かくなってゆくことで、単位容積当たりの見かけ上の電荷量（電位）が低くなり、クーロン力でグリッドに捕集されるイオンが少なくなるためと考えられる。高抵抗被覆導電性グリッドの場合、10 乗 Ω と抵抗値が高い方が 4 乗 Ω と低い場合より除電時間が速い事がわかった。これは、クーロン力で引き寄せられたイオンが表面抵抗値の差により捕集の量に変化したためと考えられる。

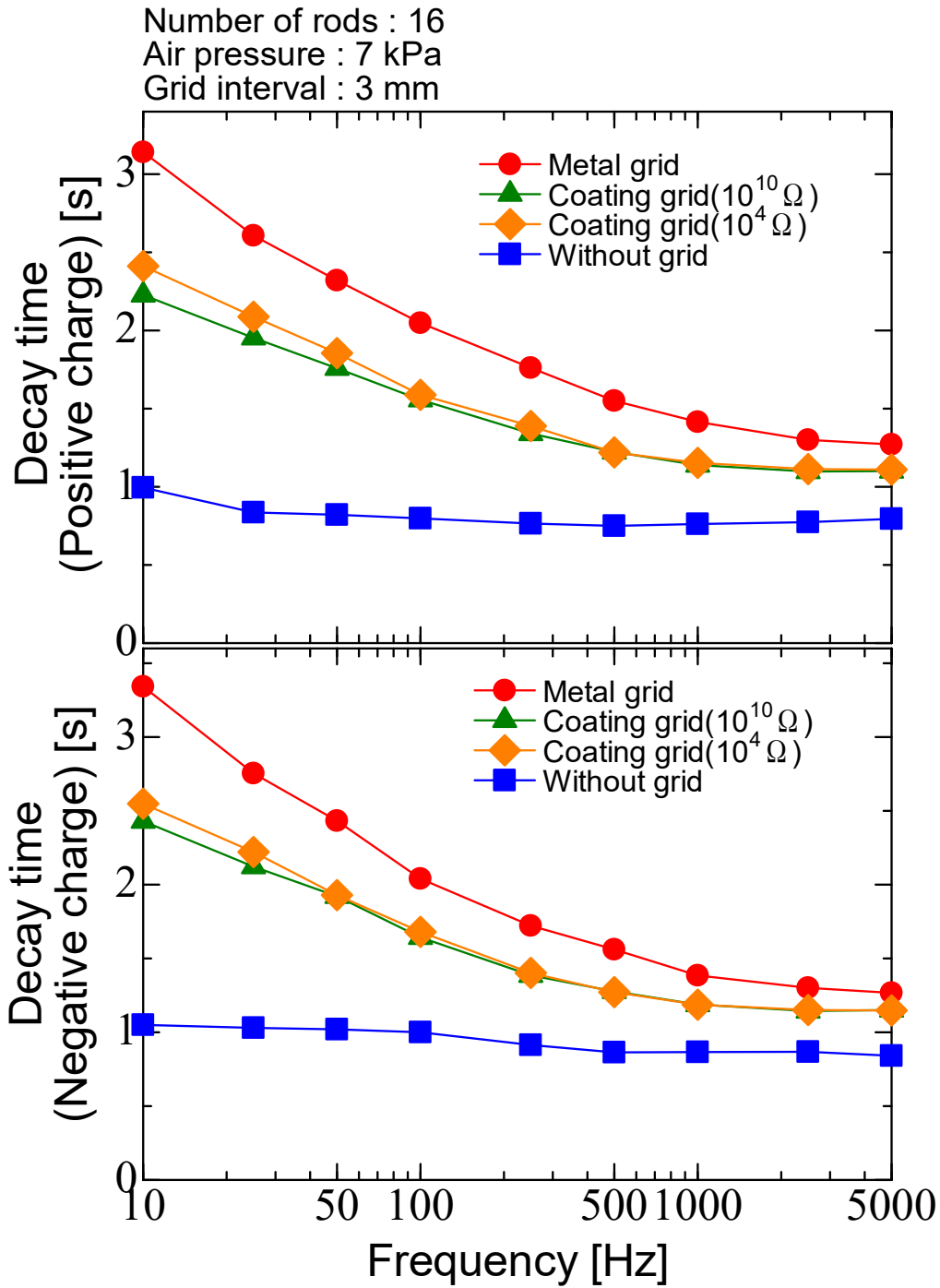


図 5.14 金属グリッドの有無と 4 乗 Ω 10 乗 Ω 高抵抗被覆導電性グリッドの除電特性

5.4 まとめ

本章では、静電誘導の抑制と効率的な除電の実現を目的として、対象物と放電電極の間に高抵抗被膜導電性グリッド電極を設置し、除電と静電誘導に及ぼす影響の検討を行った。

高抵抗被覆導電性グリッド電極を配置した場合の誘導電圧では、グリッド電極がない場合に比べて、顕著に誘導電圧は低下した。また、ギャップ間隔 1 mm、本数 2 本の場合においても、グリッド電極がない場合に比べて約半分の電界遮蔽効果がみられた。また、電極本数が多く、また、ギャップ間隔が広いほど誘導電圧の抑制効果が大きく、ギャップ 3 mm、本数 14 本のとき、換算値で 5.6 V まで抑制できた。高抵抗被覆導電性グリッド数が少なく、ギャップ幅が狭いと電界の回り込みの影響で誘導電圧が大きくなる。また、グリッド本数が少なく、ギャップ幅が広いときも電界がギャップ間を通り抜けることができるため誘導電圧電が大きくなると考えられる。よって、適切なギャップ幅およびグリッドの本数で電界を遮蔽することにより誘導電圧を抑制できると考えられる。

高抵抗被覆導電性グリッド電極を配置した場合の除電特性では、周波数が高く、またギャップ幅が広いほど除電時間が早いことがわかった。また、本数を増加すると、捕集されるイオンが増加することで除電時間が遅くなる。加えて、低周波数ではギャップ間隔による除電時間への影響が大きく、高周波数ではギャップ間隔による影響が小さいことがわかった。これは周波数が高くなることで正負イオンの混ざり合う領域が増加し、空間の見かけ上の電位が 0 V に近づき、グリッド電極で捕集されるイオンが減少していることが考えられる。

ギャップ長を含む見かけのグリッド電極幅変化による除電特性において、負極性の場合には、垂直軸が 40 ~ 50 mm 以上広がると除電時間はほとんど変化せず、正極性の除電では垂直軸が 60 mm 以上で除電時間の変化がほとんどなくなる。これは、正帯電の除電に寄与する負イオンは正イオンより広い領域に拡散し、除電空間を輸送されている可能性がある。

5.5 参考文献

- (1) 佐藤崇志, 高橋宏治, 古井英則, 池畑隆: “イオナイザを活用した生産現場の静電気対策に関する研究”, TRANSACTIONS OF JASVET VOL 33 (2017), pp.42-48
- (2) 大津孝佳, 堂山英之, 石塚裕康, 鷺坂功一: “静電気放電に於ける電子デバイスの保護素子と静電気対策材料の効果の比較”, 宇宙環境シンポジウム, pp.107-111
- (3) K. Takahashi, K. Takaki, I. Hiyoshi, Y. Enomoto, S. Yamaguchi and H. Nagata “Development of a corona discharge ionizer utilizing high voltage AC power supply driven by PWM inverter for highly efficient electrostatic elimination”, IntechOpen. Electrostatics-Applications in Physics, Chemistry, Biology and Others, DOI:10.5772/intechopen.88352
- (4) L. Levit and A. Wallash “Measurement of the effects of ionizer imbalance and proximity to MR head handling”, Journal of Electrostatics, Vol.47, pp.305-313 (1999)
- (5) M. A. Noras and D. Pritchard “Ion imbalances on an ionizer-controlled work surface”, Journal of Electrostatics, Vol.64, pp.310-315 (2006)
- (6) L. Baril, M. Nichols, A. Wallash “Degradation of GMR and TMR Recording Heads Using very short duration ESD Transients”, IEEE Transaction on Magnetics, Vol.38, Issue.5 (2002)
- (7) J. E. Vinson, J. J. Liou, “Electrostatic discharge in semiconductor devices : an overview”, Proceeding of the IEEE, Vol.86, Issue2 (1998)
- (8) K. Nagato and T. Ogawa “Atmospheric Ion Mobility Spectra near the Ground”, Planet Space Science, Vol.36, No.2, pp.163-176 (1988)

第 6 章 交流方式バー型イオナイザにおける高抵抗樹脂グリッドが静電誘導および除電能力に及ぼす影響の検討

6.1 はじめに

コロナ放電式イオナイザ（イオナイザ）は、静電気対策に広く用いられている⁽¹⁾。求められる性能は、除電速度やイオンバランスである。近年、電子デバイスの静電気放電耐性の低下に伴い、装置内部の高電圧発生部からの電界に起因する誘導電位を低く抑える事が要求されている。本稿では、静電気拡散性領域材料（表面抵抗値：4 乗～11 乗 Ω ）のグリッドを放電電極近傍に設置した場合の誘導電圧と、除電速度への影響についてその効果を観測した⁽²⁾。

6.2 イオナイザ評価システムの構築

6.2.1 イオン測定回路

イオン測定回路は、5,2,1 と同等の回路を使用した。図 4.58 に、除電時間測定に使用したイオン測定装置の外観を示す。これは、チャージドプレートモニタ（シシド CPM-301）で、イオナイザの性能評価に使われている。6.2.4 の除電特性の計測用として使用した。この装置は、静電気対策に関する国際規格 61340 に準拠している。プレートはアルミ製、15 cm×15 cm のプレートサイズ、静電容量は 20 pF（±10 %）、測定方式はドリブンシールド型で、プレート自体の静電容量をキャンセルすることで、20 pF の静電容量を装置本体内部へ移動させているためプレートの厚さを薄くする事ができ、大きさも任意に変更する事が可能。改良することで、静電容量の変更も可能となっている。除電特性の測定は、プレートの電圧を±1,000 V 以上に帯電した後、1,000 V から 100 V まで減衰した時間を計測する。

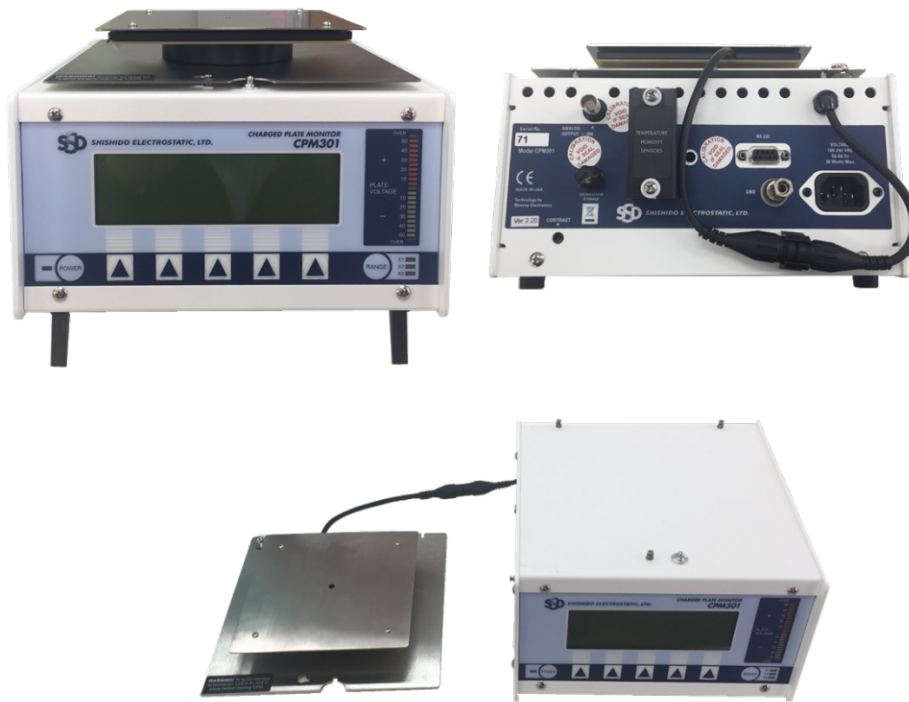
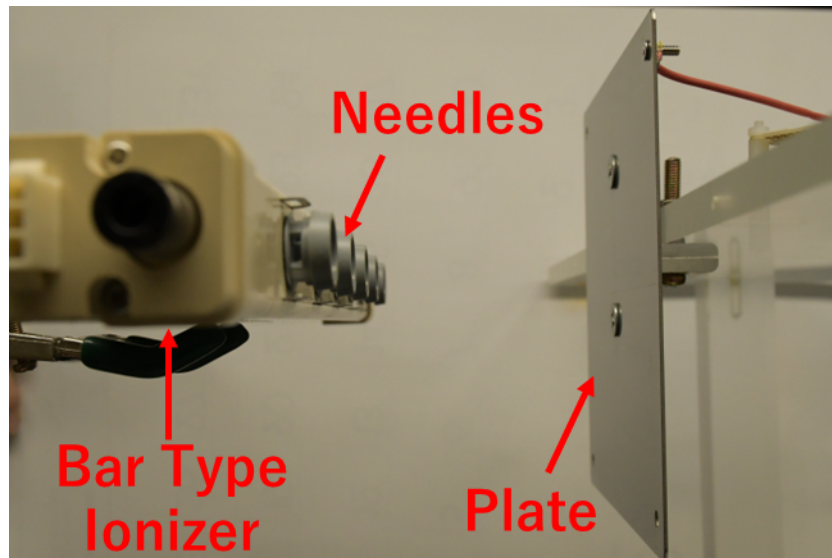


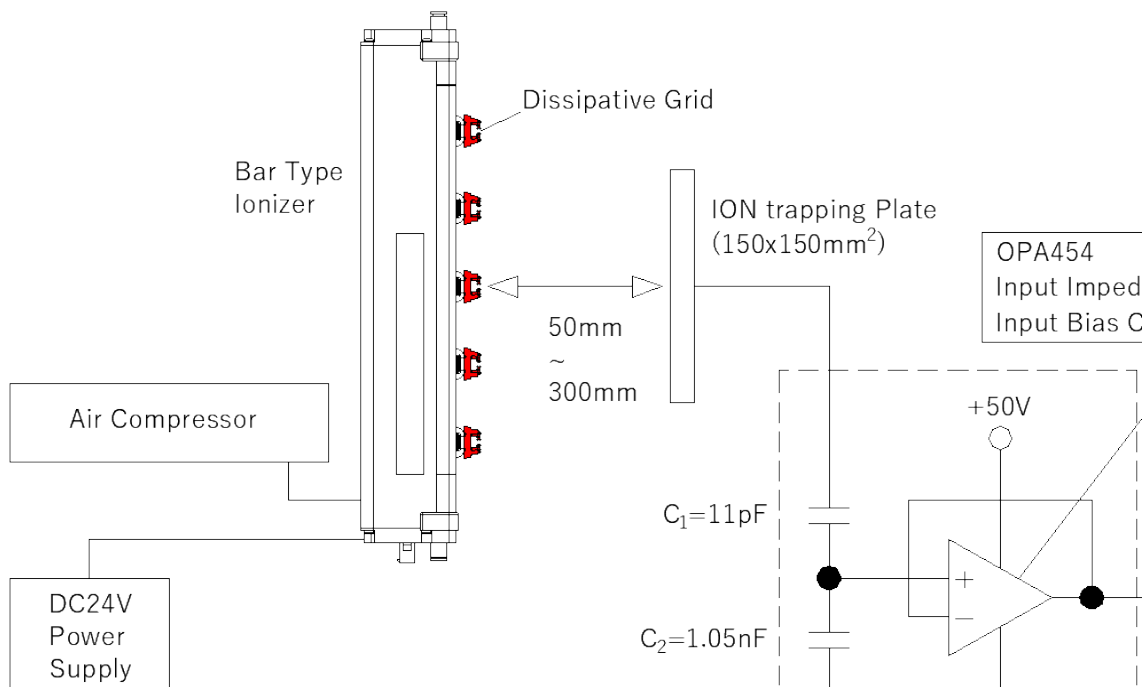
図 6.1 イオン測定回路の外観（チャージドプレートモニタ）

6.2.2 本系の概略

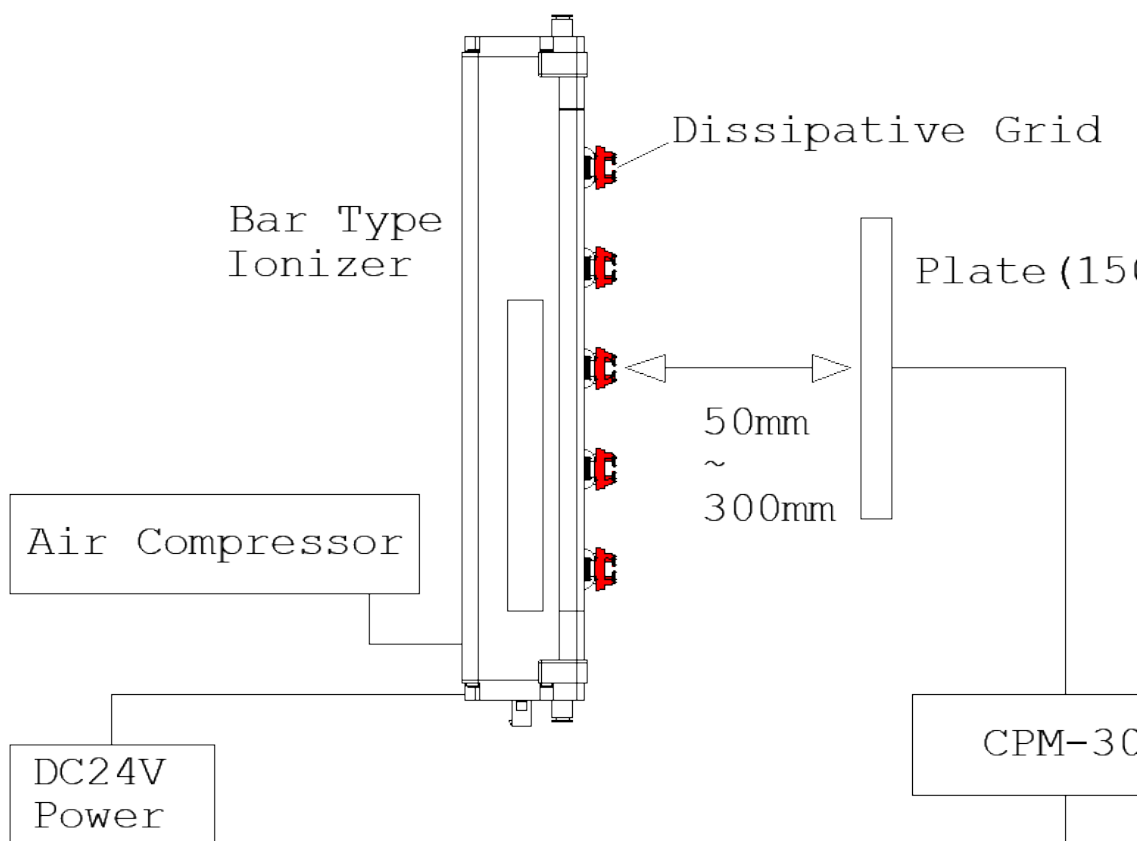
図 6.2 に、(a) 測定部、(b) 誘導電圧測定装置概略図、(c) 除電時間測定装置概略図を示す。イオナイザは、シシド静電気株式会社製交流方式バー型 CABX-350 を使用，放電針は前章までの実験に使用したものと同等のタングステン製の針（長さ：16 mm，半径：0.75 mm，テーパ角：20°，曲率半径：75 μm ）が装着されている。対向電極は電極の外側に配置されている。放電針と対向電極間でコロナ放電を発生させ，イオン生成を行っている。放電針の前方に高抵抗樹脂製のグリッドを装着し，放電針外側の接地された対向電極に接続した。外部から圧縮空気を注入することで圧力を調整し，0.1 ~ 0.5 MPa の範囲で変化させて調整している。圧縮空気は，コンプレッサ (HITACHI, 0.75LE-8S) から供給され，フィルタレギュレータ (KOGANEI, FR150-01-BG-F1) によって減圧と過剰な水分の除去を行った後，マスフローコントローラー (FCO, CUBEMFC1100-4S2-100L-AIR) によって調整している。実験条件として，イオナイザ内部の電源からは 20 kV_{p-p} を出力し，周波数は約 250 Hz で駆動されている。イオナイザとイオン捕集プレートの距離は 100 mm，減衰測定時は 50 ~ 300 mm と変化させた。



(a)測定部



(b) 誘導電圧測定装置概略図



(c) 除電時間測定装置概略図

図 6.2 (a) 測定部と (b) 誘導電圧測定装置概略図 (c) 除電時間測定装置概略図

図 6.3 に、放電電極と高抵抗樹脂グリッドの断面図を示す。高抵抗樹脂グリッドは、直径 22.5mm、高さ 13.5 mm の円形で先端部の四方から内側に四角く細長いグリッドが内側にせりだしている。

図 6.4 (a) は高抵抗グリッド装着前、図 6.4 (b)は 高抵抗グリッド装着時の外観を示す。このように、グリッドは放電電極を含めノズル全体を覆う形で配置され、放電に影響が出ないようにグリッドと放電電極の距離を調整し、グリッドの表面抵抗値を $6 \times 10^9 \Omega$ とした。

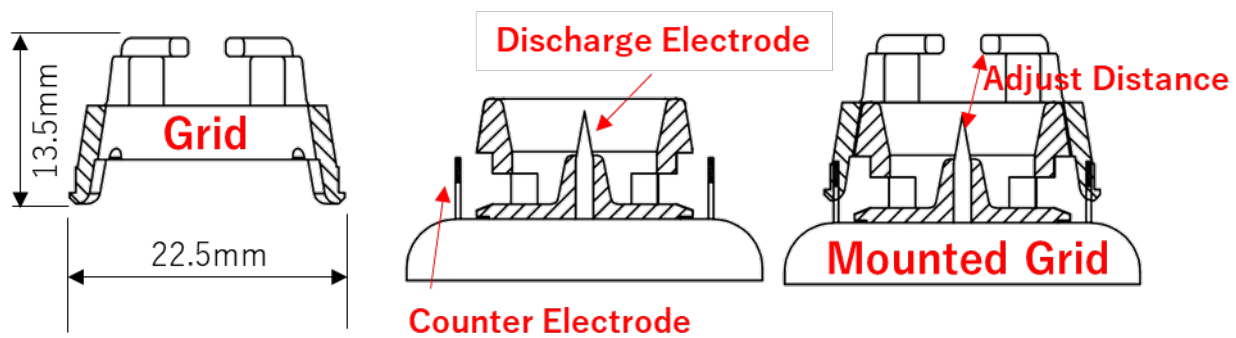
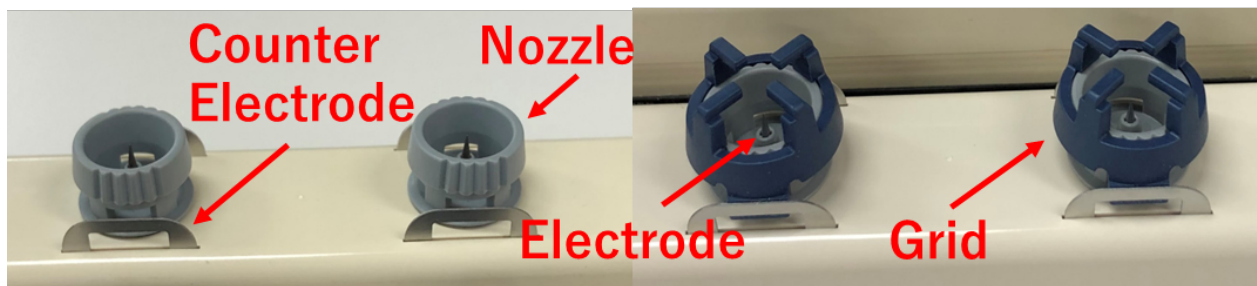


図 6.3 放電電極と高抵抗樹脂グリッドの断面図



(a) (b)
図 6.4 放電電極(a)とグリッド装着時の放電電極(b)

6.2.3 誘導電圧特性

図 4.4 に、バー型イオナイザの放電電極から 100 mm の距離、高電圧印可周波数 250 Hz において、プレートに誘起される誘導電圧波形を示す。放電電極への印可電圧の波高値は ± 10 kV である。図より、放電電極前方に高抵抗樹脂グリッドを設置することにより、誘導電圧の最大値が減少することがわかる。また、グリッドの設置による誘導電圧の位相に影響が無いことがわかった。図 6.6 に、イオン捕集プレートをバー型イオナイザの放電電極から 50 mm から 300 mm まで変化させた場合の誘導電圧の値を示す。測定時の温度は 26.7 °C、相対湿度は、49 %RH。誘導電圧測定時のバー型イオナイザの動作においては、圧縮空気は投入していない条件で測定を行った。図より、プレートに誘起される電圧は、距離を離してゆくとともに減少することがわかる。100 mm の距離では、グリッド無の場合、 210 V_{p-p} の誘導電圧が観測された。グリッドを設置した場合、誘導電圧の波高値は 125 V_{p-p} に抑制されることが観測され、約 40 %程度の誘導帯電電圧の抑制が確認された。これにより、電子デバイスの製造装置内や製造工程において電子デバイスから 100 mm の距離にバー型イオナイザを設置しても、通常行われている静電気対策と同等レベルの環境にすることが可能となる。

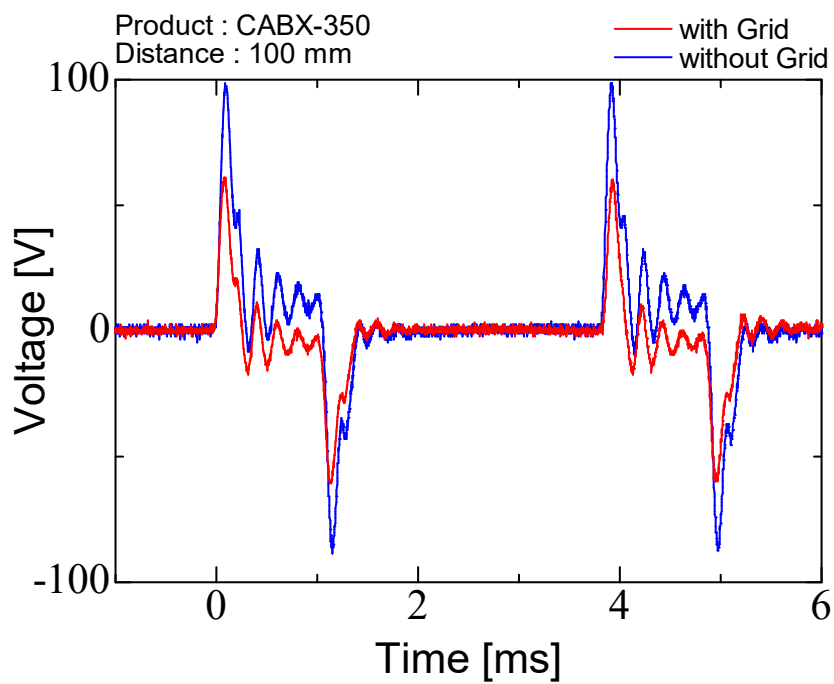


図 6.5 イオナイザからの誘導帯電波形

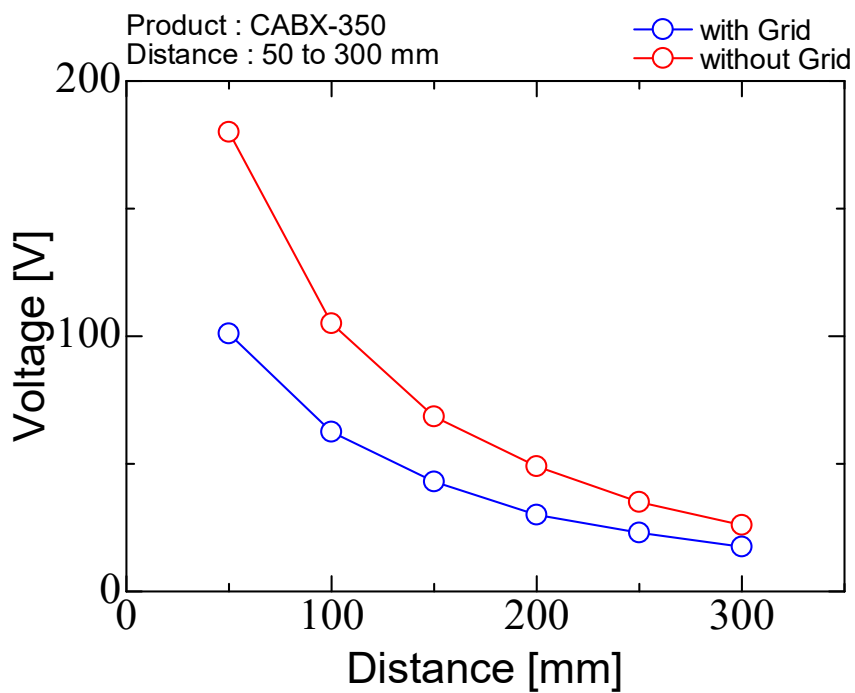
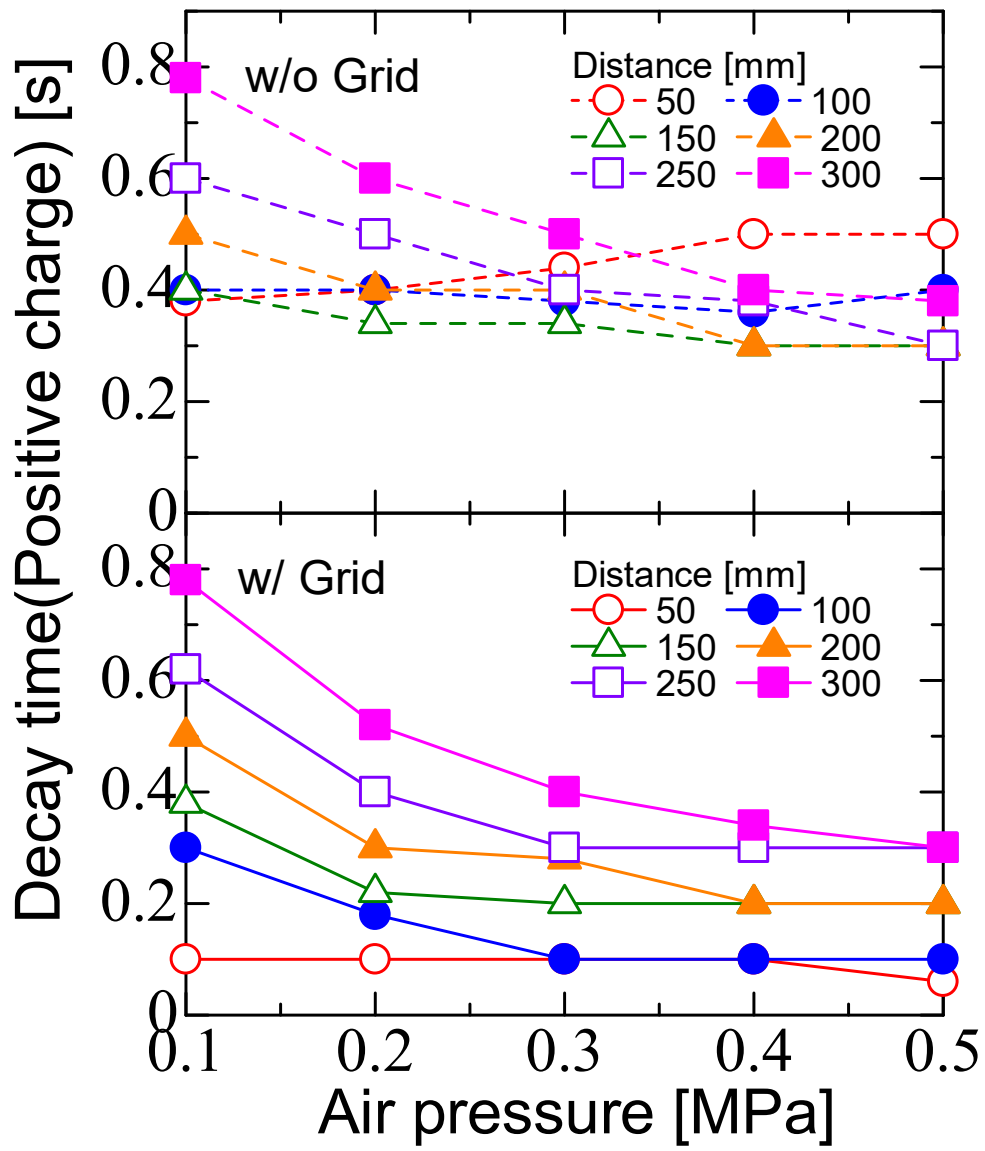


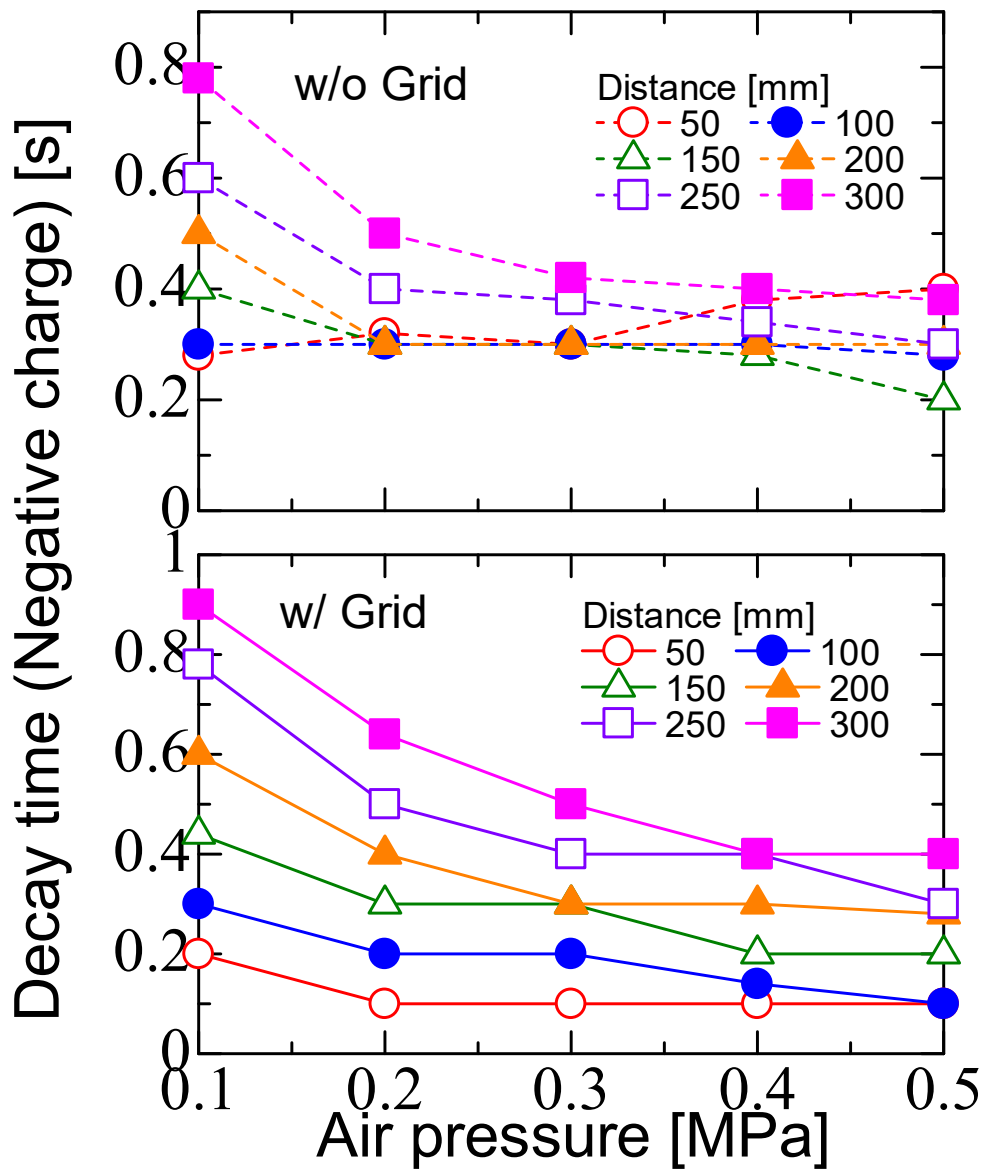
図 6.6 誘導帯電電圧

6.2.4 除電特性

図 6.7 に、(a)正除電時(+Decay) と(b)負除電時(-Decay)の、高抵抗樹脂グリッド設置の有無における、除電時間と圧縮空気の圧力との関係を示す。交流型イオナイザの場合、生成される正負のイオンは主に空気流によって搬送されるため、イオナイザの除電性能は空気流量と比例的な関係となる。圧縮空気は、本体側面のエア継手より供給し、放電電極の根本付近から噴出する。図より、グリッドの有無に依らず、プレートの設置距離が減少するほど、また、空気流量が増加するほど除電時間が短くなることがわかる。ここで、グリッド無の場合、設置距離が 200 mm 以下の条件では、空気流量を増加させても、除電時間は、0.4 秒前後で飽和することがわかる。一方、グリッドを装着した場合、設置距離を 200 mm 以下にしても、空気流量の増加により、除電時間は飽和せず、距離 50 mm、空気圧力 0.2~0.3 MPa で、正除電負除電ともに 0.1 秒となった。負除電の場合、0.1 MPa の圧力の場合やや除電能力が低くなっていたが、それ以外の条件では同様の傾向を示した。ここで、除電対象物の帯電電位と同極のイオンは除電に寄与しない為、対象物の近傍に留まり極性が異なる除電に寄与するイオンと結合し消滅してしまうので、除電効率の低下を引き起こす可能性がある。静電気拡散性材料のグリッドを設置することによって、除電時間の飽和を解消していることが考えられるが、今後詳細についての検討が必要である。



(a) 正除電



(b) 負除電

図 6.7 高抵抗樹脂グリッド設置の有無における、
除電時間と圧縮空気の圧力との関係

(a) 正除電, (b) 負除電

6.3 まとめ

本章では、交流方式バー型イオナイザにおける高抵抗樹脂グリッドが静電誘導および除電能力に及ぼす影響の検討を行った。交流イオナイザの放電電極前方に静電気拡散性材料で製作されたグリッドを設置することにより、放電電極から 100 mm の距離で誘導電圧を約±62 V まで抑制することができた。これは、今までの同形式のイオナイザでは達成できなかった。また、IEC 国際規格の要求事項では、ESD 対策区域内のすべてのアイテムの帯電電圧を±100 V 以下にしなければならない。今回の対策で、規格が要求する環境を提供できるようになった。これにより、特に対応が困難と言われていた、半導体製造装置内部や電子デバイス製造工程において、イオナイザの設置距離を近づけたい環境でも、問題なく使用できるようになった。また、高抵抗樹脂グリッドの設置により、イオナイザの放電針から 200 mm 以内の設置距離における除電能力の向上も確認された。

今後は、高抵抗樹脂の形状、表面抵抗値を変化させることで、より高い誘導帯電電圧抑制効果が見込めないか、200 mm 以内における除電能力をさらに向上させる事が出来ないか、それぞれの要因を精査し調査研究を継続してゆく予定。

6.4 参考文献

- (13)高橋克幸:「静電気対策技術としてのイオナイザの選定とその使用方法」, 月刊 EMC, No. 317, pp. 119-128 (2014)
- (14)山口晋一:「グリッド電極を用いたコロナ放電式イオナイザにおける交流電界制御」, 静電気学会全国大会 (2019)
- (15)高橋克幸:「PMW 制御小型交流電圧電源を用いた超低オフセット電圧型イオナイザの開発」, 第24回 RCJ EOS/ESD/EMC シンポジウム (2014)
- (16)K. Takahashi, H. Kaga, K. Kubo, K. Takaki, S. Yamaguchi and H. Nagata: “Development of an ion measuring system for AC corona discharge”, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, Letter, Vol. 138, No.11, pp.551-552 (2018. 11)
- (17)佐藤崇志, 高橋宏治, 古井英則, 池畑隆: “イオナイザを活用した生産現場の静電気対策に関する研究”, TRANSACTIONS OF JASVET VOL 33 (2017), pp.42-48
- (18)大津孝佳, 堂山英之, 石塚裕康, 鷺坂功一: “静電気放電に於ける電子デバイスの保護素子と静電気対策材料の効果の比較”, 宇宙環境シンポジウム, pp.107-111
- (19)村田雄司: “静電気の基礎と停電防止技術”, 日刊工業新聞社 (1998)
- (20)静電気学会編:「新版 静電気ハンドブック」, オーム社, (1998)
- (21)高橋克幸:「静電気対策技術としてのイオナイザの選定とその使用方法」, 月間 EMC, No.317, pp.119-128 (2014)
- (22)K. Takahashi, K. Takaki, I. Hiyoshi, Y. Enomoto, S. Yamaguchi and H. Nagata “Development of a corona discharge ionizer utilizing high voltage AC power supply driven by PWM inverter for highly efficient electrostatic elimination”, IntechOpen. Electrostatics-Applications in Physics, Chemistry, Biology and Others, DOI:10.5772/intechopen.88352
- (23) A. Ohsawa “Modeling of charge neutralization by ionizer”, Journal of Electrostatics, Vol.63, pp.767-773 (2005)
- (24) A. Ohsawa “Efficient charge neutralization with an ac corona ionizer”, Journal of Electrostatics, Vol.65, pp.598-606 (2007)
- (25) L. Levit and A. Wallash “Measurement of the effects of ionizer imbalance and proximity to MR head handling”, Journal of Electrostatics, Vol.47, pp.305-313 (1999)
- (26) J. S. Chang “Neutralization theory of static surface charges by an ionizer under wide gas pressure environments”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.37, pp.1641-1646 (2001)
- (27) M. A. Noras and D. Pritchard “Ion imbalances on an ionizer-controlled work surface”, Journal of Electrostatics, Vol.64, pp.310-315 (2006)
- (28) A. Ohsawa and N. Nomura “Continuously balanced pulse-DC ionizer to minimize the offset voltage”, Journal of Electrostatics, Vol.79, pp.16-19 (2016)
- (29) J. S. Chang and A. A. Berezin “Neutralization of static surface charges by a flow stabilized

- corona discharge ionizer in a nitrogen environment”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.51-52, pp.64-70 (2001)
- (30) J. S. Chang, A. A. Berezin and C. G. Noll “Neutralization of static surface charges by an ac ionizer in a nitrogen and dry air environment”, Journal of Applied Physics, Vol.91, No.3, pp.1020-1025 (2002)
- (31) D. Nemoto, W. He, T. Matsuo, N. Sato, T. Ikehata and K. Okano “Static elimination performance of a corona ionizer in nitrogen-based electronegative gases”, DOI:10.1109/IAS.2015.7356749 (2015)
- (32) D. Nemoto, Y. Kristanto, W. He, T. Matsuo, N. Sato, K. Okano and T. Ikehata “Electrostatic neutralization characteristics of an AC-corona-discharge-type ionizer in mixed N₂-O₂, N₂-SF₆ atmosphere”, Electronics and Communications in Japan, Vol.100, No.1 (2017)
- (33) A. Ohsawa “In-tube transport of ions for charge neutralization”, Journal of Physics: Conference Series, Vol.142 (2008)
- (34) M. Rickard, D. Dunn-Rankin, F. Weinberg and F. Carleton “Characterization of ionic wind velocity”, Journal of Electrostatics, Vol.63, pp.711-716 (2005)
- (35) P. Intra and N. Tippayawong “Effect of needle cone angle and air flow rate on electrostatic discharge characteristics of a corona-needle ionizer”, Journal of Electrostatics, Vol.68, pp.254-260 (2010)
- (36) C. G. Noll “Temperature dependence of dc corona and charge-carrier entrainment in a gas flow channel”, Journal of Electrostatics, Vol.54, pp.245-270 (2002)
- (37) C. G. Noll “Charge-carrier extraction from air and nitrogen gas streams that entrain charge from dc corona ionizers”, Journal of Electrostatics, Vol.54, pp.271-282 (2002)

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々からご指導やご高配を賜りました。ご支援を頂きました皆様に謹んで御礼申し上げます。

はじめに、高木浩一教授に御礼申し上げます。本研究に関する事柄だけではなく、高電圧パルス・プラズマに関する幅広い知見をお持ちの立場からのアドバイス、社会人の小職にとって新たな考え方や発見がありました。大変お世話になりありがとうございました。

高橋克幸准教授に御礼申し上げます。本研究に関わる事だけに限らず、コロナ放電、高電圧、静電気の中和や除去における幅広い知識と経験を背景に、数多くの適切なお指導、ご助言をいただきました。大変お世話になりありがとうございました。

研究を始めた当初から実験などの支援を頂きました、研究室歴代の大学院生の方々に御礼申し上げます。加賀裕章さん、久保勝也さん、内御堂駆さん、中田江理子さん、実験の仕方、実験結果の考察に関することまで、一から協力をいただきました。勉強不足で至らない点がたくさんあったとは思いますが、何時も丁寧に対応していただきましてありがとうございました。

大学院へ通うことを快く承諾して頂きました、シシド静電気株式会社代表取締役の竹内隆一様、業務との兼ね合いが難しい時でも適切なアドバイスとご対応をいただきました。日々のご支援、有難うございました。

研究に使用いたします導電性コーティング材料を供給して頂きました、株式会社松本技研代表取締役社長の松本頼興様、難しい素材へのコーティングと素材に対するアドバイスを頂きました。大変参考になり、有難うございました。

最後に、岩手大学での約6年間、精神的に支えていただいた家族に心より感謝を申し上げますとともに、感謝の辞とさせていただきます。