

博士論文

イオンマイクロホンの研究

Studies on Ionic Microphone

平成25年8月26日

神奈川工科大学大学院工学研究科

電気電子工学専攻博士後期課程

秋野 裕

指導教員 下川博文 教授

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	振動板を持つ電気音響変換器	3
1.3	振動板を持たない電気音響変換器	12
1.4	イオンマイクロホンに関わる先行技術	14
1.5	本論文の目的と構成	16
1.6	本研究に用いた測定環境と測定方法	19
	参考文献	21
第2章	低温プラズマを用いたマイクロホンの検討	24
2.1	はじめに	24
2.2	コロナ放電電極	25
2.3	コロナ放電が発生する放電音	26
2.4	コロナ放電電流に含まれる雑音成分	28
2.5	正コロナ放電の音波に対する応答	30
2.6	まとめ	32
	参考文献	33
第3章	高温プラズマを用いたマイクロホンの検討	34
3.1	はじめに	34
3.2	高温プラズマ発生装置の設計	35
3.2.1	帰還発振器	35
3.2.2	放電電極	37
3.2.3	イオンマイクロホンの構成	41
3.3	実験結果と考察	43
3.3.1	高温プラズマと平板電極間の静電容量	43
3.3.2	音響カプラを用いた音波に対する応答	44
3.3.3	近接音源に対する応答	47
3.3.4	点音源に対する応答	50
3.3.5	高周波放電による音波の発生	53
3.3.6	不活性ガスによる針電極保護	55
3.4	まとめ	60
	参考文献	62

第4章	イオンマイクロホンの信号対雑音比の改善	63
4.1	はじめに	63
4.2	水平方向に高周波放電プラズマを形成したマイクロホンの検討	65
4.2.1	水平方向にプラズマを形成したイオンマイクロホン	65
4.2.2	平板電極および円筒電極の音波に対する応答	66
4.2.3	不活性ガスにヘリウムを用いたときの音波に対する応答	68
4.3	上方に高周波放電プラズマを形成したマイクロホンの検討	70
4.3.1	上方にプラズマを形成したイオンマイクロホン	71
4.3.2	不活性ガスを用いた電極保護	75
4.3.3	最適放電電極寸法, 材料および表面処理	78
4.3.4	検波器および音波導入部の検討	87
4.4	周波数応答と雑音のスペクトル	91
4.5	まとめ	95
	参考文献	96
第5章	結論	97
5.1	まとめ	97
5.2	今後の課題と展望	99
	参考文献	100
	謝辞	101
	本研究に関する論文と特許	102

第1章 序論

1.1 背景

スピーカやマイクロホンなどの電気音響変換器の歴史は Alexander Graham Bell による‘Improvement in Telegraphy’の特許出願 (1876年)^[1] に始まる。当初、スピーカやマイクロホンなどの電気音響変換器は音声通信や拡声などに用いられていた。その後、映画やレコードなど記録媒体の発展と共に、スピーカやマイクロホンは良好な音質を実現するために広い周波数応答と高いダイナミックレンジが求められて進化した。加えて、電気音響変換器に用いる材料技術と製造技術の進化に伴って小型で高い性能を持つスピーカやマイクロホンが実用化されてきた。現在では振動板を持つ電気音響変換器は成熟期に入っている。とりわけ、マイクロホンは携帯電話やカラオケマイクロホンのように日常生活に多く用いられている。今日、マイクロホンは携帯電話などの音響入力デバイスとして **De-facto Standard Model** となっているものがある。携帯電話などの音響入力デバイスとして用いられるマイクロホンは小型で安価であることに加え、機器に組み込むための扱いやすさが求められる。このため、携帯電話用のマイクロホンの技術開発は主にMEMS技術を用いたコンデンサマイクロホンと、これに用いる無機エレクトレットに向けられている^[2]。しかし、コンパクトディスクなどの音楽コンテンツを作成するためには、楽音を良好な音質で収録することが必要である。このため、楽音収録用のコンデンサマイクロホンでは可聴周波数帯域外 (100kHz まで) の収録が研究されている^[3]。

携帯電話用以外のマイクロホンの用途による分類にはコンパクトディスクなどの音楽コンテンツをつくるためのスタジオマイクロホン、ステー

ジに設置して音声あるいは楽音の拡声に用いられるライブサウンドマイクロホン, 放送や番組制作等に用いられるブロードキャストマイクロホン, そして演台や会議場等に設置されるインストールマイクロホンがある. そのため, それぞれの用途に合わせた性能と機能を付与してマイクロホンは設計されている.

スタジオ収録では 50 年以上前に製造されたコンデンサマイクロホンやリボンマイクロホンが現在でも使用されている. このうち, コンデンサマイクロホンでは現在多く用いられている F E T (電界効果トランジスタ)ではなく電子管がインピーダンス変換器に用いられており, 電子管を動作させるために専用の電源装置が必要である. リボンマイクロホンは高い技能が必要な手作業で組み立てられるため生産性が低い. このように欠点を持つマイクロホンであっても, 現在商品化されているマイクロホンに比べて独特な良好な音質を持つことが現在でも使い続けられている理由である. 今日においても, これら過去の技術を用いた新しいマイクロホンの商品化が求められている.

音楽は人に感動を与える. 音質が良好であるときその感動はさらに助長される. このため, 演奏者やサウンドエンジニア等から特に良好な音質のマイクロホンの製品化が求められている. 良好な音質の楽音を収録し, これを音楽コンテンツにするために様々な努力がなされている^[4]. そして, 音質に関わる検討が現在においても続けられている^[5, 6]. これらの要望に応えるためにマイクロホンが進化し続けることが必要である. 電子管やリボンマイクロホンなどの過去の技術を現在の部品技術や生産技術で再現することも重要であるが, これまでに実現できなかった収録方式を用いたマイクロホンを実現することが重要である.

1. 2 振動板を持つ音響変換器

一般に電気音響変換器は振動板を持っている。電気音響変換器の音質に関わる要因には音圧に対する周波数応答を平坦にするための制御方式と、振動板素材の持つ機械的性質があると考えられる。振動板を持つ電気音響変換器は音響振動、機械振動および電気信号が一枚の振動板で結合されている。言い換えると振動板の持つ性質が音響振動、機械振動および電気信号に影響を与える。マイクロホンでは音圧あるいは音圧傾度が振動板を駆動し、振動板の振動を電気信号に変換している。音波を放射するスピーカでは、電気信号で振動板を駆動して音波を放射する。マイクロホンでは音圧あるいは音圧傾度に対する電気信号出力を、スピーカでは電気信号入力に対する放射音圧を平坦にするため制御方式が用いられる^[7, 8]。

マイクロホンの指向性は音圧で振動板を駆動すると無指向性になり、音圧傾度で駆動すると双指向性になる。振動板の振動を電気信号に変換する方法には速度比例型と変位比例型がある。速度比例型にはダイナミックマイクロホンがあり、変位比例型にはコンデンサマイクロホンがある。この駆動する方法と電気信号に変換する方法から、適切な制御方式を用いてマイクロホンは設計される。

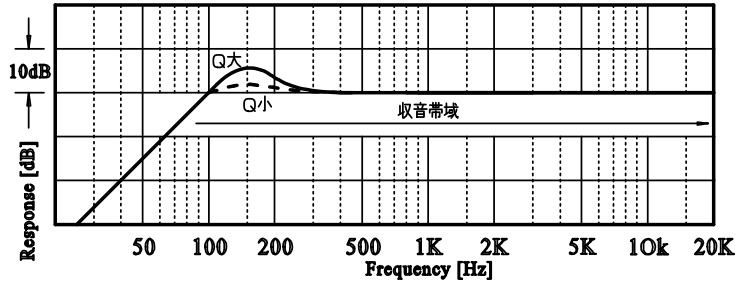
マイクロホンの制御方式を Table 1.1 に示す。Fig. 1.1 は制御方式と代表的な周波数応答である。 Q は振動板の共振周波数における共振鋭度であり、適切に設計することによって共振周波数付近の応答を平坦にすることができる。Fig. 1.1 (a)に示す質量制御では、振動板の共振周波数を收音帯域の下限に設計することによって共振周波数以上の周波数帯域の応答を平坦にすることができる。共振周波数を低く設定するほど收音帯域幅は広がるが感度が低下する。Fig. 1.1 (b)に示す抵抗制御では振動板の共振周波

数を收音帯域のほぼ中央に設計する。 Q を高くすると感度を高めることはできるが收音できる帯域は狭まる。 Q を低くすると收音できる帯域は広がるが感度が低下する。 Fig. 1.1 (c)に示す弾性制御では振動板の共振周波数を收音帯域の上限に設計することによって、共振周波数以下の周波数帯域の応答を平坦にすることができる。共振周波数を高く設計することによって、收音帯域幅を広くできるが感度が低下する。いずれの制御方式においても、收音帯域幅を広く設計すると感度が低下するというトレードオフの関係がある。単一指向性マイクロホンは指向軸を目標に向けることで目的音を容易に收音できる。このため、多くの收音状況で用いられる。 Fig. 1.1 (d), (e) のように質量制御と抵抗制御、あるいは抵抗制御と弾性制御を組み合わせることによって単一指向性を実現することができる。しかし、いずれの制御方式においても空気の付加質量を含む振動板の質量と振動板を元の位置に復元する弾力が必要であることから共振周波数を持ち、收音できる周波数帯域に限界がある。振動板に質量が無ければこのような共振周波数が発生しないことから、広い帯域で動作するマイクロホンを実現することができると考えられる。

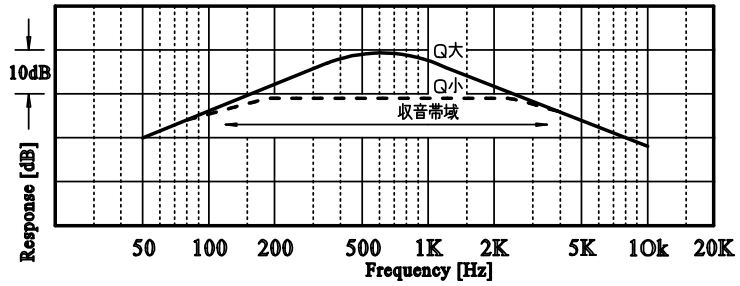
Table 1.1 Control system for microphone.

駆動力	発電方法	制御方式	マイクロホンの種類	マイクロホンの用途
音圧	速度比例	抵抗制御	無指向性	インタビュー用
			ダイナミックマイクロホン	マイクロホン
音圧傾度	変位比例	弾性制御	無指向性	携帯電話
			コンデンサマイクロホン	計測用マイクロホン
音圧傾度	速度比例	質量制御	双指向性	楽音収音用
			リボンマイクロホン	マイクロホン
音圧傾度	変位比例	抵抗制御	双指向性	楽音収音用
			コンデンサマイクロホン	マイクロホン
音圧+ 音圧傾度	速度比例	質量+	単一指向性	カラオケマイクロホン
		抵抗制御	ダイナミックマイクロホン	
音圧傾度	変位比例	抵抗+	単一指向性	楽音収音用
		弾性制御	コンデンサマイクロホン	マイクロホン

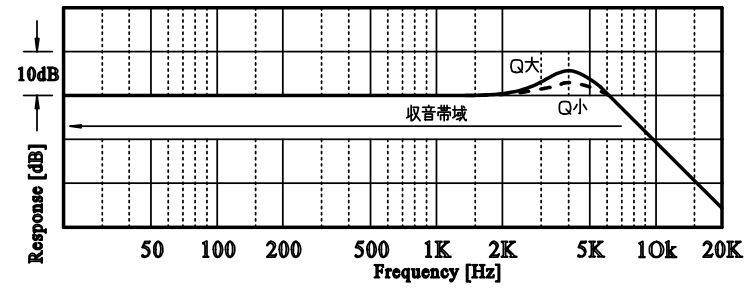
(a) 質量制御



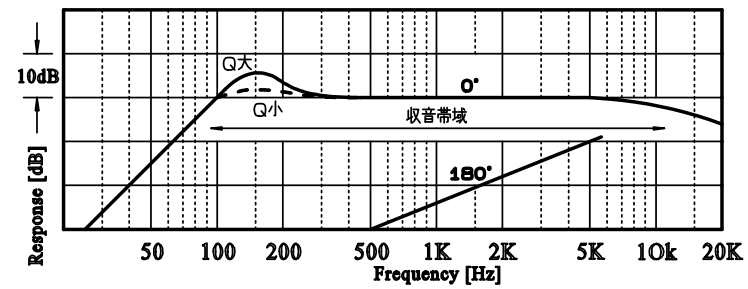
(b) 抵抗制御



(c) 弹性制御



(d) 質量制御+
抵抗制御
(单一指向性)



(e) 抵抗制御+
弹性制御
(单一指向性)

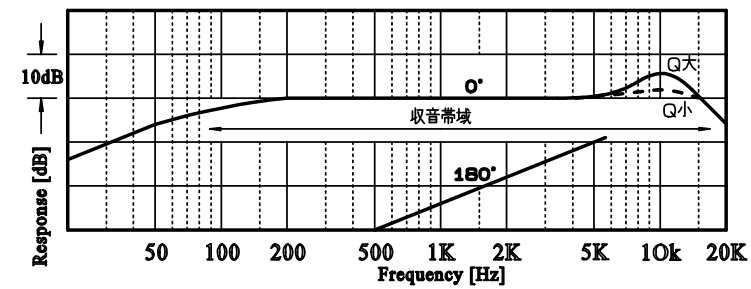


Fig. 1.1 Control system and typical frequency response.

コンデンサマイクロホンは、広い周波数応答と高いダイナミックレンジが得られることから、楽音などの收音に多く用いられる。Fig. 1.2 (a) はコンデンサマイクロホンの振動板と固定極に F E T（電界効果トランジスタ）を用いたインピーダンス変換回路を接続したコンデンサマイクロホンである。電極間に高抵抗を用いて成極電圧を加えると、電荷の移動が制限される。このとき、音波によって振動板が変位して静電容量だけが変化すると、コンデンサの両端の電圧が変化する。Fig. 1.2 (b) はエレクトレットを用いたコンデンサマイクロホンである。成極電圧発生回路と高抵抗が不要であることから、回路構成を簡素にすることができる。

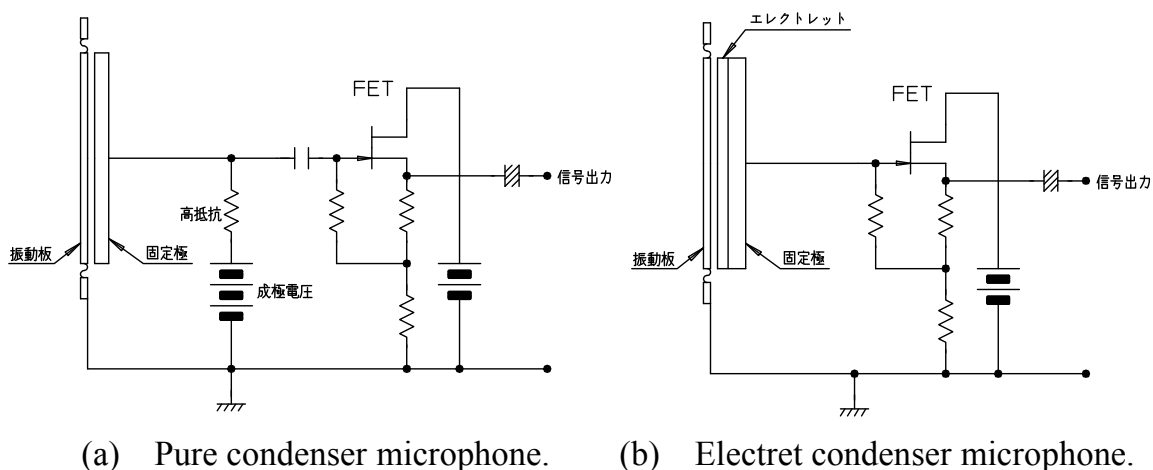


Fig. 1.2 Condenser microphone unit and FET circuit.

振動板と固定極で形成される静電容量は $1 \text{ pF} \sim 100 \text{ pF}$ と小さいことから、F E Tあるいは電子管などの入力インピーダンスが高いインピーダンス変換器を用いる必要である。インピーダンス変換器は入力インピーダンスが高いため、漏洩電流があると雑音を発生する。この漏洩を防止するために、振動板と固定極を含めたインピーダンス変換器の入力部分は高い絶縁性が求められる。絶縁体は高い体積抵抗率を持つ材料であっても、空気

中の湿度が増加すると表面抵抗率が低下する．このため，インピーダンス変換器の入力部分は環境が変化しても安定な絶縁性が必要である．また，静電容量の小さいコンデンサマイクロホンは $1/f$ 雑音が大きくなることが知られている^[9]．

コンデンサマイクロホンは成極電圧が高いほど感度を高めることができる．しかし，振動板と固定極の間に静電吸引力が働き，振動板が固定極に吸着すると故障する．このため，静電吸引力に対する振動板の張力による復元力の比を吸着安定度とし，適切な振動板材料の選択と製造方法を勘案した設計がなされている．このため，振動板の張力設計には制限がある．さらに，成極電圧があることによって振動板は固定極側に静電吸引力があるため動きやすく，反対方向には動きにくい．このことから感度を高めるために成極電圧を高めると高調波歪が増加する^[10]．

携帯電話などに用いられる無指向性コンデンサマイクロホンは弾性制御であることから振動板の張力が高くでき，周波数応答も数 Hz～高域共振周波数（約 20 kHz）まで平坦にすることができる．さらに，エレクトレットを用いることで直流電圧源を用いることなく高い成極電圧を加えることができるので，簡単な構造で高い感度が得られる．

Fig. 1. 3 は携帯電話に用いられる無指向性エレクトレットコンデンサマイクロホンの測定例である．同図から平坦な音圧に対する周波数応答と高い信号対雑音比があることがわかる．しかし，楽音の收音に用いられることはまれである．これは音質が通信用には十分であるが，コンパクトディスクなどの音楽コンテンツをつくるためには不十分であるためと考えられる．

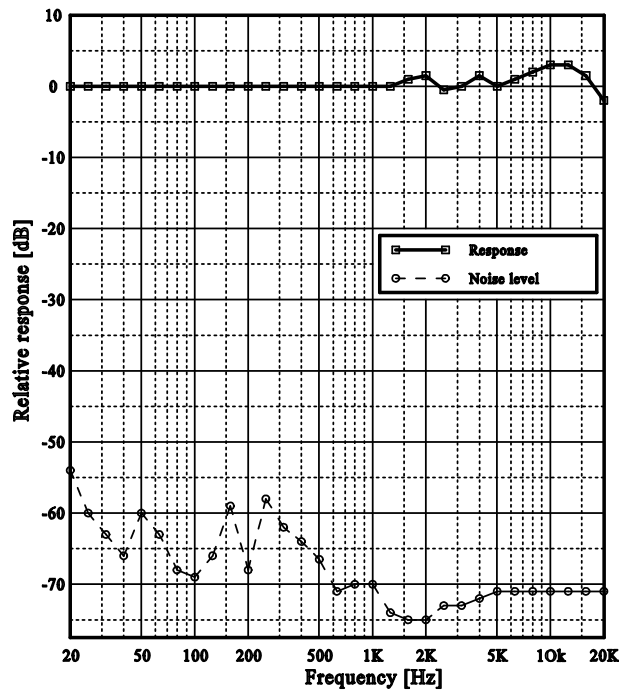


Fig. 1.3 Frequency response and noise spectrum.

(Electret condenser omni-directional microphone unit. ϕ 4.5 mm)

楽音の收音に用いるコンデンサマイクロホンでは振動板の有効振動径が 25 mm 程度の一次音圧傾度型が多く用いられる。このマイクロホンは単一指向性を実現するために抵抗制御と弾性制御が用いられている。このため、低音域の收音限界を広くするために振動板のスチフネスを低くする必要があり、振動板のスチフネスは感度や指向周波数応答とダイナミックレンジなどの性能と音質に大きな影響を与える。Fig. 1.4 は特に歌唱などの楽音收音に多く用いられる単一指向性コンデンサマイクロホン (NEUMANN U87) の測定例である。振動板の有効振動径が大きいことから高い信号対雑音比が得られる。

音圧に対する周波数応答は Fig. 1.3 に示す小型の無指向性マイクロホンの方が優れるが、音質の良否は音圧に対する周波数応答のみには依存しな

いと考えることができる。携帯電話などに用いられる無指向性コンデンサマイクロホンは音波の音圧で振動板を駆動することから、マイクロホンに音源を近接させても周波数応答は変化しない。これに対し、楽音収音用の単一指向性コンデンサマイクロホンは音圧と音圧傾度で振動板が駆動される。このマイクロホンを音源に近接させると音波が球面波になることから、低音域の応答が高くなる近接効果が発生する^[1]。とりわけ、歌唱などで音源がマイクロホンに近接する場合には、近接効果によって低音域が強調される。このために豊かな音質が収音できると考えることができる。前述のリボンマイクロホンの音質が良いことも同様の理由である。

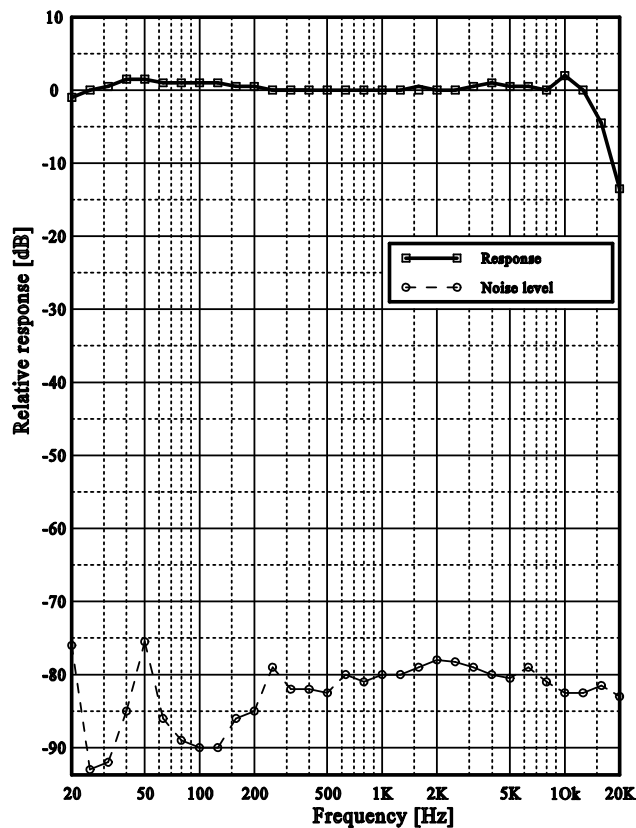


Fig. 1. 4 Frequency response and noise spectrum.
(Studio condenser microphone. NEUMANN U87)

制御方式のほかに、振動板を持つ電気音響変換器の音質に関わる要因には振動板素材の機械的性質がある。スピーカでは、この機械的性質として適切なヤング率、固体伝搬速度、内部損失などがある。しかし、これらは互いに相反する関係があり、今日においても製品の音質を改善する検討が続けられている^[12]。とりわけ、共振周波数付近の周波数帯域では振動板の振動速度あるいは振幅が大きくなることから、振動板自体の機械的性質に加え、弾性支持する部分の変位に対する直線性が性能と音質に大きな影響を与える。

マイクロホンにおいても振動板素材が持つ機械的性質によって音質が左右される。振動板全体を十分制動できないダイナミックマイクロホンやリボンマイクロホンでは振動板の部分共振が発生する。これを防止するために振動板を立体成形する方法や部分共振しやすい部分に機械的制動を加えるなどの方策を施して製品化している^[13, 14]。振動板と固定極が $10\ \mu\text{m}$ ~ $0.2\ \text{mm}$ と狭い間隔で保持されるコンデンサマイクロホンにおいても、振動板素材による機械的性質を改善するために立体成形を施している^[15]。このため、これらの振動板に起因する問題を解決するために振動板が無いマイクロホンを実現する必要がある。

振動板が無いマイクロホンで音波を電気信号に変換するためには、空気の振動と同じように振動する振動板に代わる部分を人工的に形成する必要がある。しかし、音波の粒子速度あるいは粒子変位の振幅が小さいことから十分な感度が得られないことが予測できる。このため、信号対雑音比を確保することが大きな課題になるものと考えられる。一般のマイクロホンでは $54\ \text{dB}$ 以上^[16]、楽音を收音するコンデンサマイクロホンでは $76\ \text{dB}$ 以上の信号対雑音比が必要である。

1. 3 振動板を持たない電気音響変換器

18 世紀末に高温プラズマの一つであるアーク放電が singing arc と呼ばれて音波を放射することが確認され、近年では商業施設向けスピーカとして実用化されている^[17]. アーク放電以外の放電を用いるイオンスピーカには、低温プラズマをコロナ放電で発生させるものと高温プラズマを高周波放電で発生させるものがあり、それぞれ研究され実用化されている^[18]. イオンスピーカは振動板が無いいため高い周波数帯域の音波の放射に優れることから、主に高音再生用のツイータとして商品化されている^[19]. 低温プラズマを用いたイオンスピーカは直流放電電圧に音声信号を重畳することによって音波を放射する. 高温プラズマを用いたイオンスピーカでは、音声信号で振幅変調した高周波放電によって空気が膨張、収縮することで音波を放射する^[20]. コロナ放電を用いるイオンスピーカでは電気入力に対してピークを持つ周波数応答がある^[21]が、高周波放電を用いるイオンスピーカは一定の電気入力に対して一定の音圧出力が得られ、100kHz を超える音波の放射が可能であるとされている^[22]. 高温プラズマを高周波放電で発生させるイオンスピーカでは、放電電源として高い周波数と高い電圧が必要である. これまでに商品化された高温プラズマを用いたイオンスピーカは、かつてテレビ受像機で用いられた水平出力管で帰還発振器を構成している. このイオンスピーカの帰還路には高周波放電部があることから、入力された音声信号で高温プラズマが膨張収縮することによって発振周波数が偏移することが報告されている^[23]. この周波数偏移が放電プラズマに音波を作用させることによって発生するのであれば、周波数偏移を FM 検波することによってイオンマイクロホンの実現が可能であることが考えられる.

振動板を持たないマイクロホンには熱線型がある。熱線型マイクロホンは、抵抗加熱した熱線に音波の粒子速度が作用すると熱線が冷却されて抵抗値が変化することを検出する。今日では、半導体製造工程に用いられる微細加工によって、可聴周波数帯域で動作する音波の粒子速度センサとして実用化されている^[24]。レーザを用いるマイクロホンには音波の音圧による密度変化を検出するものがある^[25]。このマイクロホンは音波による空気の密度変化を電気信号として検出する。しかし、十分な信号対雑音比を得るためには光路により多くの音圧が加わるように工夫する必要がある^[26]。このほか現在では用いられていないが、大気中で加熱したカソードに対向させたアノードに流れる電流が音波によって変化することを検出する [Triargon Cathodophone] が実用化された^[27]。放電を用いたマイクロホンとして直流放電を用いる方法が提案されている^[28]が、実用に至ったか否かは不明である。IEC 規格で定められた用語としてイオンマイクロホンは [Ionic microphone: Microphone that operates by the interaction between an ionic plasma and the surrounding air.] とある^[29]が、音波に対する応答を報告した先例を見出すことはできなかった。

音波を電気信号変換するために、空気の振動と同じように振動する振動板に相当する部分にプラズマを用いる方法を考えた。イオンスピーカと同様の低温プラズマと高温プラズマの検討を基礎にしてイオンマイクロホンを実現する研究を始めた。

1. 4 イオンマイクロホンに関わる先行技術

音波に対する放電の応答については、音圧と粒子速度双方が放電光の広がりに影響を与えることが報告されている^[30-32]。ここでは、強力音場における直流放電の発光部の挙動から、放電光の進展と広がり気圧の変動によることに加えて音波の粒子速度および粒子変位の振幅により影響を受けることを述べている。放電と風速の関係においては直流コロナ放電がイオン風速計として研究され、風速変化に対する出力の応答性が良いことに加えて風速に対する出力の直線性が良いことが報告されている^[33]。これらのことから、放電プラズマが音波に応答し、音声信号として検出できるものと考えられる。

対向する電極の一方あるいは両方の表面をガラスなどの固体誘電体で被覆し、大気圧程度の気体中で電極間に交流電圧を加えると放電が発生する。このような放電は無声放電、あるいはバリア放電と呼ばれ、音波を発生しないことが知られている。バリア放電では絶縁被覆があることによって電荷が電極に流れ込まない^[34]。このような音波を発生させない放電を用いることによってプラズマを生成できると考えられる。

放電電極に被覆が無い状態においても、高周波を用いる放電では、放電電極間に荷電粒子が捕捉される。平等電界であるときには周波数が1~80 MHz の範囲ではイオンの大部分が電極間に捕捉される。これに対し、針電極と平板電極を用いる不平等電界における大気中の放電では針電極先端から高周波放電が発生する。周波数が10~100 MHz の範囲になると火炎状のプラズマが針電極側から発生して平板電極側に延伸する。この火炎状のプラズマは電子やイオンの密度が高く温度が数千度にも達するとされている^[35]。これらのことから放電によって音波を発生させること無く、

放電電極間にプラズマを留めることでプラズマにマイクロホンの振動板の役割をさせることができると考えられる。

コンデンサマイクロホン回路方式の一つに発振検波式がある。この回路方式のマイクロホンは振動板の変位による静電容量変化を周波数の偏移として検出し、この周波数偏移を FM 検波することによって音声信号を出力している^[36,37]。この方式では回路の入力インピーダンスが低いことから絶縁体の抵抗値が低くても、電荷の漏洩に伴う雑音を発生させない。このため、絶縁体に用いる高分子材料の絶縁性が不十分であった初期のコンデンサマイクロホンでは、しばしばこの発振検波回路方式が用いられた。この発振検波回路は入力インピーダンスを低くすることができるため $1/f$ 雑音が小さい。このため、特に低音域成分の固有雑音を低くできる特徴がある。加えて、直流バイアス型のコンデンサマイクロホンでは振動板に静電吸引力が働き振動板が固定極に吸着する問題があった。一方、発振検波回路を用いるマイクロホンでは静電吸引力が発生しないので、振動板は比較的自由に設計できる利点がある。この発振検波方式を用いた良好な音質を持つコンデンサマイクロホンは現在においてもスタジオ収録などに用いられている。しかし、発振検波方式では回路構成がインピーダンス変換器を用いる回路に比較すると複雑であることに加え、回路部の寸法が大きいためから携帯電話などの小型化が求められる用途には適しない。

この発振検波方式に用いる回路は入力インピーダンスが低く、固有雑音が小さい特徴がある。この回路方式をイオンマイクロホンに用いることによって、放電プラズマの音波に対する応答を音声信号に変換できると考えられる。

1. 5 本論文の目的と構成

本研究の目的は、大気圧放電で発生させたプラズマを質量の極めて小さい振動板として動作させることによって、音波を直接電気信号に変換することである。プラズマを用いるイオンマイクロホンは收音部に質量をほとんど持たないため、制御方式に関わる收音帯域の限界と振動板の機械的性質による音質劣化の無いマイクロホンが実現できると考えることができる。放電プラズマを用いることによって人工的に質量が零と考えることのできる振動板を形成し、放電プラズマで楽音を收音することによって、これまでに無い良好な音質のマイクロホンが実現できると考えられる。

これまで、イオンマイクロホンは実験レベルで実現することができるとされている^[18]。しかし、具体的な大気圧の音波に対する応答を示す先例を確認できなかった。このため、音波による空気の動きを直接電気信号に変換できるイオンマイクロホンの実現のための研究の意義は極めて大きい。

本論文は全5章で構成されている。以下に各章の概要を示す。

第1章では研究の背景、振動板を持つ電気音響変換器、振動板を持たない電気音響変換器およびイオンマイクロホンを実現するために必要な先行技術について述べ、本論文の目的と構成を示した。これまでに実用化されてきた振動板を持つマイクロホンについて述べ、現在用いられているコンデンサマイクロホンの性能からイオンマイクロホンが到達すべき信号対雑音比について示した。振動板を持たない電気音響変換器のうちイオンスピーカは実用化されているが、イオンマイクロホンは動作する先例を見出すことができなかった。イオンマイクロホンの実現に関わる先行技術を活用し、イオンスピーカと同様の放電プラズマを用いることによるイオンマイクロホンが実現できると予測した。加えて、以降の章で用いる音響測

定環境と測定方法を示した。

第2章では、直流コロナ放電を用いて低温プラズマを発生させ、放電によって発生する音波と放電電流の雑音および放電電流から音波に対する応答を検出する方法を検討した。そして、これまでイオンマイクロホンが実現されてこなかった原因を明らかにした。直流コロナ放電が放射する音波には電源に起因するものとコロナ放電に起因するものがあり、放射される音波の音圧が目的音より大きい場合には収音できないことを明らかにした。直流コロナを用いて放電電流から音声信号を検出する方法では、放電電流に含まれる雑音成分に比べ音波に対する応答が低いことが確認された。したがって、これらの結果がこれまでイオンマイクロホンが実現されなかった原因と考えることができる。

第3章では、発振器、放電電極と検出方法を検討してイオンマイクロホンを設計した。このイオンマイクロホンで高温プラズマを発生させ、プラズマに音波を加えると帰還発振器の発振周波数偏移として音波に対する応答を検出することができた。プラズマに加えた音波に対する発振周波数偏移をFM検波することによって、音声信号を取り出すことに初めて成功した。そして、プラズマと針電極に対向する電極との間に音波に応答する静電容量が形成されることを明らかにした。さらに、点音源を用いた測定により、プラズマの音波に反応する部分を明らかにした。しかし、イオンマイクロホンの音波に対する応答は低く、実用化するためには信号対雑音比を改善する必要があることがわかった。このほか、大気中放電であることから、高周波放電においても放電部は音波を放射し、針電極が損耗することを確認した。これらの問題は針電極の表面状態に依存すると考え、不活性ガスを針電極周辺に流すことによって針電極を保護し、音波の放射を

防止した。

第4章では、イオンマイクロホンの信号対雑音比の改善を検討した。放電電力を増加させると音波に対する応答は高まるが、不安定な放電が発生することによって放電電力の増加には限界があった。このため、プラズマ形成の方向、放電電極の形状寸法と表面処理を検討し、音波に応答する安定した高周波放電プラズマを形成する条件を明らかにした。これらの条件を用いることにより放電電力を増加させ、イオンマイクロホンの音波に対する応答を高めた。さらに、検波器の検波感度の向上と音波導入部を検討することによって、イオンマイクロホンの信号対雑音比を改善した。これらの結果から、限られた周波数帯域ではあるが、既存のコンデンサマイクロホンと同等の信号対雑音比を実現することができた。これらのことから、イオンマイクロホンを実用化することが可能であることが明らかになった。

イオンマイクロホンの周波数応答は周波数の増加に伴って出力レベルが減少する。この結果から、イオンマイクロホンは音波の粒子変位の振幅に応答していることを明らかにした。既存のマイクロホンは音波の音圧あるいは粒子速度に比例した出力信号であることに対して、イオンマイクロホンは音波の粒子変位の振幅に比例した出力信号であることが明らかとなった。

第5章は結論であり、本研究で得られた結果の要点と実用化に向けた課題と展望を述べた。

1. 6 本研究に用いた測定環境と測定方法

本研究の音響測定は(株)オーディオテクニカ 成瀬事業所の第一無響室を用いた。無響室の諸元を Table 1. 2 に示す。Fig. 1. 5 は無響室の入り口から見た無響室内部である。音波に対する応答の測定は電子情報技術産業協会 で定められた EIAJ RC-8160 A^[16]を適用した。

Table 1. 2 Anechoic room specification.

施工	日東紡音響エンジニアリング (株)
内部寸法	W=5.5m, D=7.0m, H=5.0m
音圧反射率	60 Hz で 0.1
暗騒音レベル	中央で 17 dB

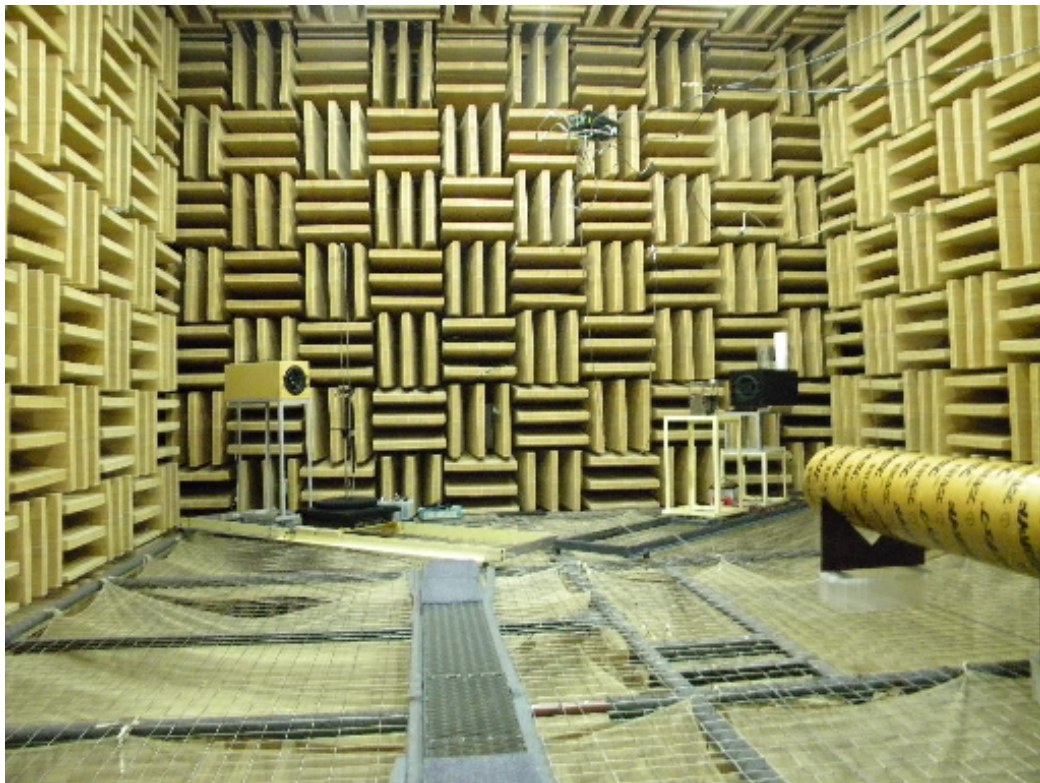


Fig. 1. 5 Aspect of the anechoic room.

音波に対する応答を測定するための音源は、直径が 250 mm の同軸 2 ウェイスピーカを用いた。Fig. 1. 6 は音源の外観、Fig. 1. 7 はスピーカから 0.5 m の位置に測定用マイクロホン (B&K 4192) を設置して測定したときにスピーカが放射する音波の 1 kHz の音圧 1 Pa を基準とした相対レベルである。音圧校正はピストンホン (B&K 4192) を用いた。レベルの測定はオーディオアナライザ (Audio precision SYS2522) を用い、アナライザの 1/3 オクターブバンドパスフィルタを通した。測定に用いた周波数は 1/3 オクターブバンドパスフィルタの中心周波数である。



Fig. 1. 6 Sound source speaker.

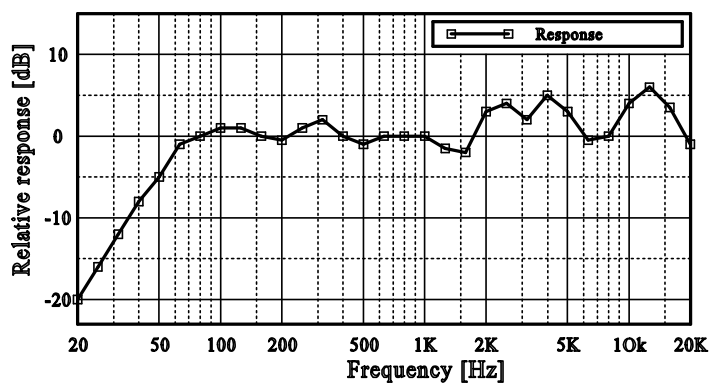


Fig. 1. 7 Frequency response of speaker.

参考文献

- [1] A. G. Bell: US Patent. 174,465, (1876)
- [2] 竹内, 木村, 小倉: 日本音響学会講演論文集, pp. 723-726, (2009. 9)
- [3] 小野, 杉本, 安藤, 野村, 大島, 今永: 信学技報, EA2007-87, pp. 7-12, (2007)
- [4] Phil Ramone: Making Records, Hyperion, (2007)
- [5] 日本音響学会編: 音色の感性学, コロナ社, pp. 122-124, (2010)
- [6] 日本音響学会編: 音楽はなぜ心に響くのか, コロナ社, pp. 11-14, (2011)
- [7] H. F. Olson (西巻訳): 音響工学, 近代科学社, pp. 286-320, (1959)
- [8] 伊藤: 音響工学原論, コロナ社, p. 472, (1955)
- [9] 利光: 日本音響学会誌, **29**, No. 5, pp. 281-292, (1973)
- [10] 溝口: 日本音響学会誌, **31**, No.10, pp. 593-601, (1975)
- [11] 中島: オーディオ工学, 実教出版, pp. 35-36, (1973)
- [12] 石井: 日本音響学会誌, **66**, No.12, pp. 616-621, (2010)
- [13] 秋野: 日本国特許 4,292,071, (2009), US Patent. 7,558,399B2, (2009)
- [14] 秋野: 日本国特許 5,015,027, (2012), US Patent. 8,107,649B2, (2012)
- [15] 秋野: 日本国特許 5,055,203, (2012), US Patent. 8,363,858B2, (2013)
- [16] 電子情報技術産業協会規格, EIAJ RC-8160A, マイクロホン, (2002)

- [17] 前原, 橋本, 井出: 日本機械学会, 環境工学総合シンポジウム'91
講演論文集, [No. 910-41], pp. 499-502, (1991)
- [18] F. Bastien: J. Phys. D: Appl. Phys, **20**, pp. 1547-1557, (1987)
- [19] 佐伯: 無線と実験, 誠文堂新光社, pp. 54-61, (2001. 12)
- [20] 高分子学会編: 静電気ハンドブック, 地人書館, pp. 508-509, (1967)
- [21] P. Bequin, K. Castor, P. Herzog, V. Montembault : J. Acoust. Soc. Am.,
121, No. 4, pp. 1960-1970, (2007)
- [22] H. F. Olson (西巻訳) : 音響工学, 近代科学社, p. 286, (1959)
- [23] 山口: ラジオ技術, アイエー出版, pp. 106-107, (1999. 2)
- [24] H. E. de Bree, P. Leussink, T. Korthorst, H. Jansen,
TheoS. J. Lammerink, M. Elwenspoek: Sensors and Actuators,
A54, pp. 552-557, (1996)
- [25] 園田, 芦川: 音響学会講演論文集, pp. 605-606, (1997. 3)
- [26] 滝澤, 齋藤, 小西, 山崎: 音響学会講演論文集, pp. 595-596, (2003. 3)
- [27] H. Voget, J. Engl, J. Massolle: US Patent. 1,534,148, (1925)
- [28] P. Thomas: US Patent. 1,626,648, (1927)
- [29] IEC 60050 International Electrotechnical Vocabulary
Details for IEV No. 801-26-22, (2011)
- [30] 中根, 平田, 瀬谷: 静電気学会誌, **46**, No. 11, pp. 893-898, (1990)
- [31] 平田, 瀬谷: 日本音響学会誌, **48**, No. 12, pp. 847-853, (1992)

- [32] 中根, 大塚, 宮島, 須山: 日本大学生産工学研究報告, A, **30**, 1, pp. 29-34, (2005)
- [33] 浅野, 衣川: 静電気学会誌, **10**, No. 2, pp. 123-130, (1986)
- [34] 電気学会放電ハンドブック出版委員会編: 放電ハンドブック, オーム社, p. 420, (1998)
- [35] 花岡: 高電圧工学, 森北出版, pp. 92-95, (2007)
- [36] H. J. Griese: J. Aud. Eng. Soc., **14**, No. 17, pp. 329-334, (1965)
- [37] 中村: 放送技術, 日本放送協会, pp.149-154, (1982. 9)

第2章 低温プラズマを用いたマイクロホンの検討^[1]

2.1 はじめに

これまでに、直流コロナ放電で発生させた低温プラズマを用いた電気音響変換器として、音波を放射するスピーカやヘッドホンが研究され商品化されている^[2, 3]。低温プラズマは簡単な電極構成と放電用の電源装置で発生させることができる。スピーカやヘッドホンでは、直流コロナ放電電源の電圧に音声信号を重畳させることによって音波を放射している。直流コロナ放電で低温プラズマを発生させる方法では電極と電極周辺の空気を加熱させず、放電電極と回路構成が簡単であるという利点がある。さらに、放電電極の温度上昇と音波の伝搬速度変化の問題への考慮が不要である。しかし、コロナ放電を用いたイオンスピーカでは、加えた電気入力に対してコロナ放電を用いることによる特有の周波数応答と指向性を持つことが報告されている^[4]。これは、正コロナと負コロナ放電の性質が異なることに加え、イオン風が発生することに起因するとされている。マイクロホンへの応用は実験レベルで実現できるとされている^[2]が、大気圧中での音波に対する応答を示す先例を確認することができなかった。

ここでは、コロナ放電が放射する音波、放電電流に含まれる雑音成分および音波に対する応答を検討し、低温プラズマを用いて音波に対する応答を放電電流から取り出す方法がマイクロホンとしてこれまで検討されてこなかった原因を明らかにする。

2. 2 コロナ放電電極

放電電極には長時間安定したコロナ放電で低温プラズマを発生することができる電子写真用のコロトロンを用いた。Fig. 2. 1 はコロトロンの全体を、Fig. 2. 2 には断面を示す。放電線は直径が $50 \mu\text{m}$ で全長が 276 mm のタングステン線、平板電極は約 80% の開口がある厚さが 0.1 mm のステンレス板である。

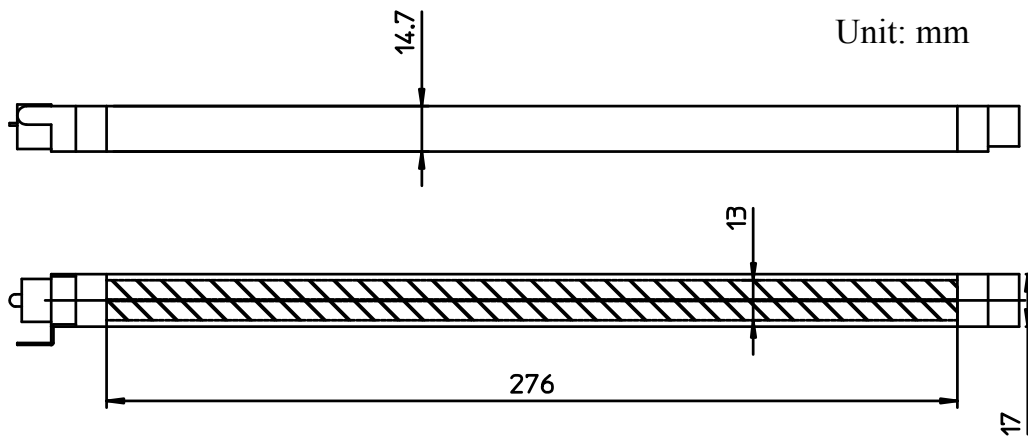


Fig. 2. 1 Corona discharge unit.

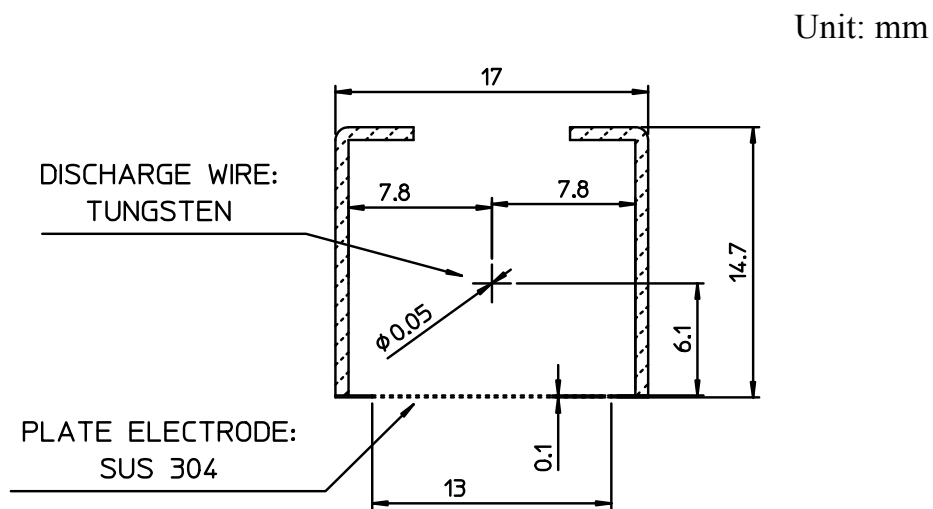


Fig. 2. 2 Cross section of the corona discharge unit.

2. 3 コロナ放電が発生する放電音

送電線では不平等電界の電界が高くなるとコロナ放電が発生し、高周波の雑音電波の放射、電力損失に加えて降雨時にはコロナ騒音が激しくなることが知られている^[5]。このため、直流コロナ放電が発生する音波の音圧レベルを測定し、音波の発生による問題点を検討した。

Fig. 2. 3 は直流コロナ放電によって発生する放電音を測定する測定装置の配置図である。平板電極から 10 mm の位置に設置した低雑音測定用マイクロホン（ B&K 4144 ）の出力にオーディオアナライザ（ Audio precision SYS 2522 ）の 1 / 3 オクターブ バンドパスフィルタを通して放射される音圧レベルを測定した。

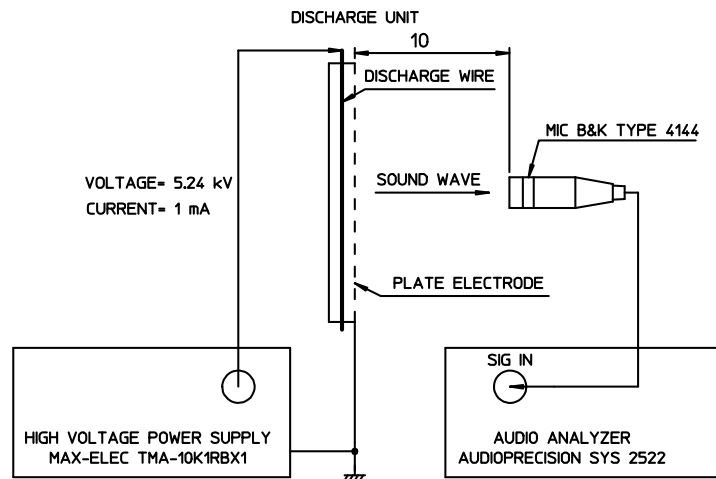


Fig. 2. 3 DC corona discharge noise measurement setup.

Fig. 2. 4 はコロナ放電によって発生した放電音のスペクトルである。300 Hz とその整数倍のピークは電源に含まれるリップルによるものである。直流コロナ放電を用いるイオンスピーカと同様に、電源に含まれるリップルが音波として放射されることが確認できる。負コロナ放電では、1 kHz 以上の周波数帯域において周波数の上昇と共に放電音の音圧レベルが増

加することがわかる。一方、正コロナ放電では、1 kHz以上の周波数帯域での放電音の音圧レベルは低いが、負コロナ放電と比較すると電源に含まれるリップル成分を音波としてより大きく放射する。放電電源のリップル成分による音波の放射が少ない2 kHz以上の帯域での放電音は正コロナ放電においても音圧レベルが22 dB程度の音波の放射されていることが確認できる。電源に含まれるリップル成分を低減するためには、コロナ放電を発生させるために必要な数 kV の電源電圧を低雑音にする必要があることがわかる。

静かな会議室での騒音レベルは一般に 20~25 dB である。直流コロナ放電が音波を発生させるため、会議室のような静かな環境ではコロナ放電から発生する音波があるため、目的音を收音できないことが明らかになった。

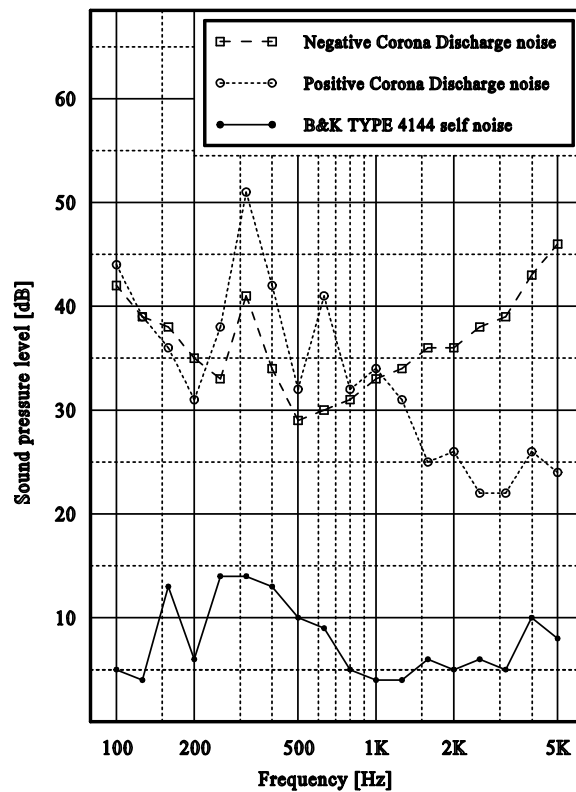


Fig. 2.4 DC corona discharge acoustic noise spectrum.

2. 4 コロナ放電電流に含まれる雑音成分

直流コロナ放電では、イオンの発生と共にパルス状の放電電流があることが知られている。正コロナでは膜状コロナの発生と共にバーストパルスが発生し、負コロナでは負グローコロナの発生と共にトリチェルパルスが発生する^[6, 7]。低温プラズマを用いて音波を検出する方法には、コロナ放電で発生させたプラズマに音波を加えて放電電流から音波に対する応答を検出する方法が考えられる。このため、正負コロナ放電で共に発生するパルス状の電流雑音を測定し、音声信号検出に関わる問題点を検討した。

直流コロナ放電電流に含まれる雑音を測定するために平板電極と接地間に $1\text{ k}\Omega$ の抵抗を接続し、その両端から雑音電流を測定した。測定系を Fig. 2. 5 に示す。

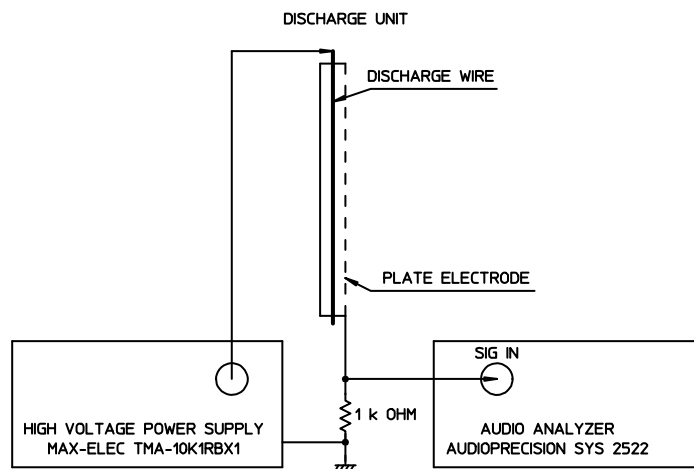


Fig. 2. 5 DC corona discharge current measurement setup.

Fig. 2. 6 は放電電流による信号にオーディオアナライザの $1/3$ オクターブバンドパスフィルタを通して測定した放電電流のスペクトルである。300 Hz とその整数倍に発生するピークは電源に含まれるリップルによるものである。同図から負コロナ放電では 2 kHz 以上の周波数帯域において

周波数の上昇に伴って放電電流に含まれる雑音が増加することがわかる。これに対し、正コロナ放電は負コロナ放電と比較して低い雑音電流である。しかし、コロナ放電が無い時の雑音に比べ、コロナ放電を発生させたときには大きな雑音を伴う放電電流があることから、抵抗の両端の信号を検出する方法ではイオンマイクロホンを用いた低い固有雑音にできないことが明らかである。

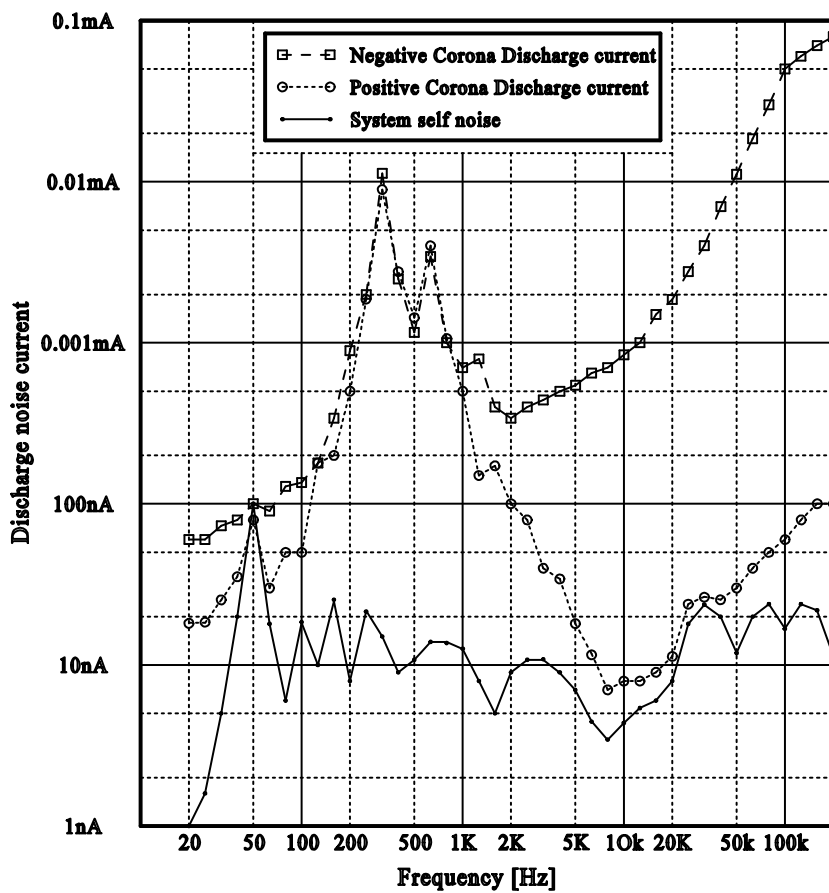


Fig. 2.6 DC corona discharge current noise spectrum.

2. 5 正コロナ放電の音波に対する応答

正コロナ放電は負コロナ放電に比べて放電音と放電電流に含まれる雑音成分が少ないことから、放電部に音波を加えて音圧に対する応答を測定した。予備実験として放電部に口を近づけ音声を加えた。低い周波数での音波と呼気に対する応答が確認できたが、放電電流に含まれる雑音が大きいため中音域以上の音波を加えても応答は確認できなかった。このため、Fig. 2. 7 に示す装置で周波数 60 Hz、音圧レベル 94 dB の音波を平板電極側から加え、平板電極と接地間に接続した 1 k Ω の抵抗の両端から音波に対する応答を測定した。

Fig. 2. 8 はオーディオアナライザの 1 / 3 オクターブバンドパスフィルタを通した信号レベルを、100 Hz の応答で基準化した音波に対する応答である。加えた音波に対して低いレベルの音圧に対する応答が得られることがわかる。

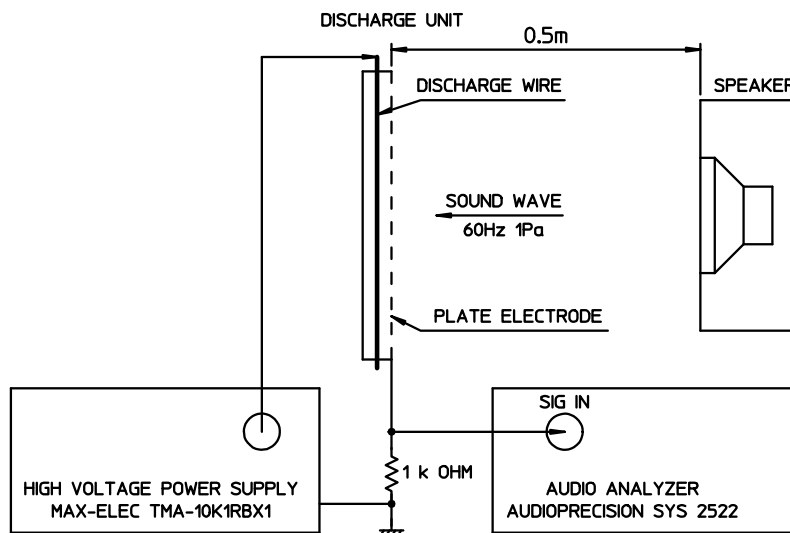


Fig. 2. 7 Sound wave response measurement setup.

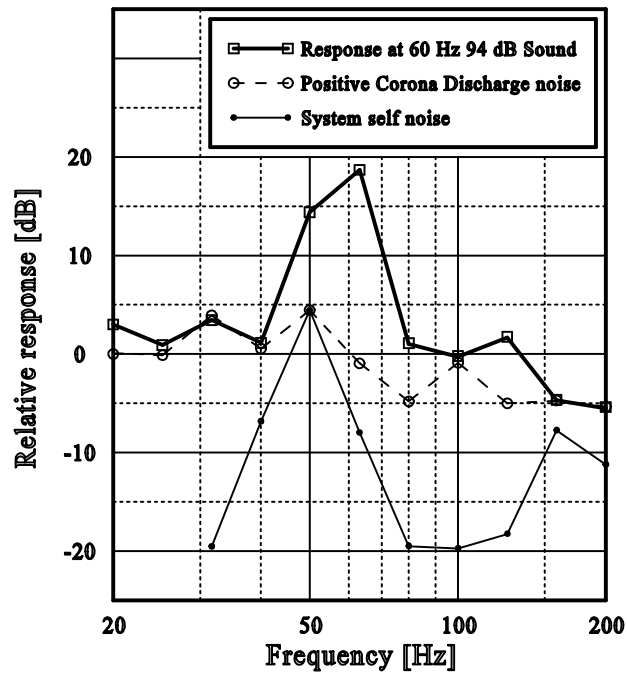


Fig. 2. 8 Spectrum at 60 Hz 94dB sound wave.

2. 6 まとめ

直流コロナ放電を用いた方法では、放電電源に含まれるリップルがイオンスピーカと同様に音波として放射される。この雑音を低減するためには電源電圧に含まれるリップルを小さくする必要があるが、コロナ放電を発生させるために必要な数 kV の電圧を低雑音にすることは困難である。

電源に含まれる雑音による音波の放射のほかに、コロナ放電によって発生する放電音がある。この放電音はコロナ放電の極性によってスペクトルは異なるが、可聴周波数帯域の音波を放射することから收音すべき音源が小さな音圧レベルであるときには目的音を收音できない。

放電電流に含まれる雑音成分もコロナ放電の極性によって異なるスペクトルを持つ。この放電電流の雑音は音波を加えたときの応答に比べて大きいと、高い周波数の音波に対する応答が確認できなかった。

以上の結果が、これまで直流コロナ放電を用いたイオンマイクロホンが実現されてこなかった原因であると考えられる。イオン風速計では風速変化に対する出力の応答性と風速に対する直線性が良いことが報告されている^[8]が、音圧レベル 94 dB の音波の粒子速度は約 2.4 mm / s と小さい。この粒子速度の値は微風速計の測定範囲の下限に近いことから、コロナ放電を用いる方法ではマイクロホンとして必要な音波に対する応答が得られなかったと考えることができる。

参考文献

- [1] 秋野, 下川: 日本音響学会誌, **68**, No.5, pp. 224-231, (2012)
- [2] F. Bastien: J. Phys. D: Appl. Phys, **20**, pp. 1547-1557, (1987)
- [3] 佐伯: 無線と実験, 誠文堂新光社, pp.54-61, (2001. 12)
- [4] P. Bequin, K. Castor, P. Herzog, V. Montembault : J. Acoust. Soc. Am., **121**, No. 4, pp. 1960-1970, (2007)
- [5] 林: 高電圧プラズマ工学, 丸善株式会社, p153, (1996)
- [6] 花岡: 高電圧工学, 森北出版, pp. 68-71, (2007)
- [7] 電気学会放電ハンドブック出版委員会編: 放電ハンドブック, オーム社, p 139, (1998)
- [8] 浅野, 衣川: 静電気学会誌, **10**, No. 2, pp.123-130, (1986)

第3章 高温プラズマを用いたマイクロホンの検討^[1,2]

3.1 はじめに

前章で述べたように、直流コロナ放電で低温プラズマを発生させて音波に対する応答を検出する方法では、コロナ放電によって発生する放電音と放電電流に含まれる雑音成分が音波に対する応答に比べて大きい。このため、イオンマイクロホンの実現が不可能であることが確認できた。そこで、高温プラズマを用いる方法でイオンマイクロホンを検討した。

大気圧放電プラズマでは二つの電極間に誘電体を挿入して交流高電圧を印加するとストリーマが誘電体で遮蔽されることから、アーク放電が発生しない。この放電はバリア放電あるいは無声放電とよばれる^[3,4]。このことから、交流高電圧を用いると放電音が発生しないことが期待できる。これまでのイオンスピーカの研究では3 MHz ~ 30 MHzの高周波放電が用いられている^[5,6]。同様の方法を用いることによってイオンマイクロホンが実現できると考えられる。一般にマイクロホンは水平面内にある音源の收音に用いられることが多い。このため、当初水平方向にプラズマを形成する構造を検討した。放電電極は放電開始電圧を低くする必要があることから、針電極と平板電極の間隔を10 mmとし、発振器の基本発振周波数を約27 MHzに設定して高温プラズマ発生装置を設計した。高周波帰還発振器、放電電極、発振信号の出力方法および検波方法を検討した。これらの結果を基にしてイオンマイクロホンを設計、製作した。このイオンマイクロホンを用いて音波に対する応答と放電に関わる問題点を検討した。

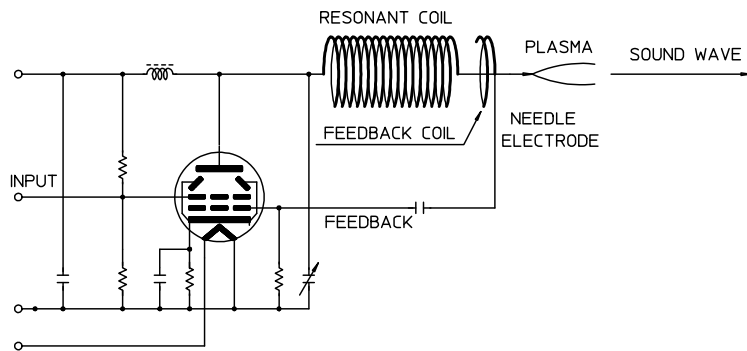
3. 2 高温プラズマ発生装置の設計

高温プラズマを発生させ、これが音波に応答することを確認するために高温プラズマ発生装置を製作した。帰還発振器の構成、放電電極および発振信号の取り出し方を検討し、これらの結果からイオンマイクロホンを設計した。

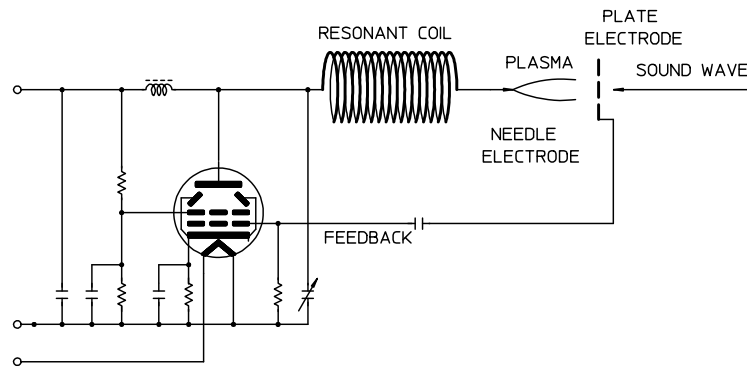
3. 2. 1 帰還発振器

帰還発振器の回路は高周波放電で高温プラズマを発生させるイオンスピーカと基本構成が同じものを用いた。イオンスピーカでは発振周波数が電気入力レベルで偏移しないことが望ましいことから、共振コイルの放電側に近接させて静電結合で発振器の帰還入力を取り出している^[7]。しかし、イオンマイクロホンでは音波による発振信号の変化を大きく取り出す必要があるため、高周波放電部が帰還路の一部となる回路構成とした。Fig. 3.1 にイオンスピーカに用いられた回路構成と本研究であるイオンマイクロホンに用いる回路構成の比較を示した。

イオンマイクロホンでは針電極先端から発生した高温プラズマと平板電極との間に静電容量が形成される。音波を加えると静電容量は変化し、帰還発振器の発振周波数と発振振幅が変化する。この帰還発振器の放電電力の供給方法は容量結合型^[8]に類似している。マイクロホンとして用いるためには、音波を加えたときの発振信号の変化を検出する必要がある。このためには、発振器の帰還入力の静電容量が小さいことが好ましい。これは、信号源が容量性のインピーダンスを持つコンデンサマイクロホンの信号源静電容量とインピーダンス変換器入力容量の関係と同じである。



(a) Schematic of ionic loud speaker.



(b) Schematic of ionic microphone.

Fig. 3. 1 Comparison for ionic loud speaker and ionic microphone.

入力容量を小さくするために、発振回路に用いる能動素子の検討を行なった。半導体素子(MOS FET等)を用いる回路では高い動作電圧を確保できるが、入力容量が250 pFを越えることが確認された。このため、従来のイオンスピーカと同様に高い動作電圧と低い入力静電容量を持つ電子管を用いることにした。電子管には、かつてテレビ受像機に用いられた水平出力管を検討した。そして、現在でも10W程度の出力を持つリニアアンプに用いられ、比較的入手性の良い6DQ6Bを選定した。6DQ6Bの入力容量は約15 pF, 最大供給プレート電圧は770 Vそしてプレート損失は17.5 Wである^[9]。

3. 2. 2 放電電極

高温プラズマを用いるイオンスピーカと同様に、放電電極は針電極と平板電極で不平等電界を形成する構造とした。Fig. 3. 2 は放電電極組立である。高周波放電による高温プラズマは針電極先端から発生し、平板電極側に延伸する。

針電極の寸法は直径 1.5 mm, 先端角度 20° で先端半径は $25 \mu\text{m}$ である。第 2 章で用いた電子写真に用いるコロトロンは大気中で放電させることからタングステン線が劣化して感光ドラムに帯電むらを発生させる。このため、コロトロンではタングステン線に金メッキあるいは白金メッキを施して放電線の劣化を防止している。同様の効果を期待して、針電極にはタングステン生地のものに加え、金メッキと白金メッキしたものを用意した。電極間隔とプラズマの関係を明らかにするために、針電極の先端は平板電極から $10 \text{ mm} \pm 2.5 \text{ mm}$ 移動できる構造にした。

音波をプラズマに加えるために、Fig. 3. 3 に示す音波を透過させる複数の開口のある平板電極を用い、タングステン針電極に対向させた。平板電極は厚み 0.1 mm のステンレス (SUS 304) の板材を、エッジング加工で直径が $\phi 32 \text{ mm}$ の範囲に穴径 0.6 mm, ピッチ 0.8 mm, 60° 千鳥配置の開口を設けた。

電極の表面に絶縁被覆が無い状態で電子管を動作させると、針電極と平板電極間に火花放電が発生して双方の電極が放電による熱で損耗した。このため、放電電極表面に絶縁層を設けることを検討した。針電極にセラミック被覆を設けるとプラズマを点火することができなかった。しかし、平板電極側にのみセラミック被覆を設けるとプラズマが点火でき、火花放電の発生を防止することができた。Table 3. 1 は放電電極の諸元である。

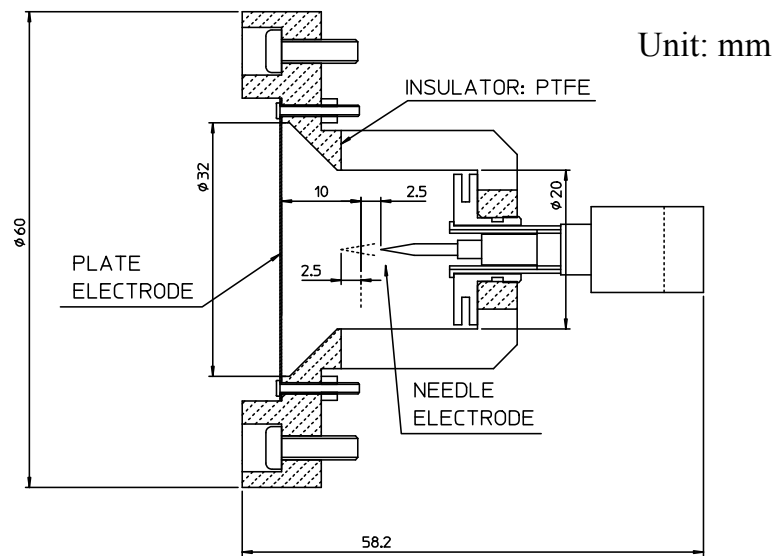


Fig. 3. 2 Discharge unit.

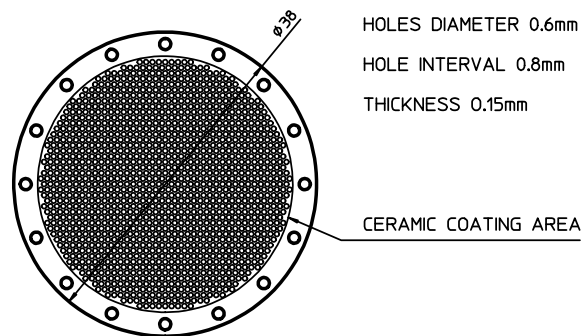


Fig. 3. 3 Plate electrode.

Table 3. 1 Discharge Electrode Data.

Needle electrode	Material	Tungsten
	Tip radius	25 μm
Plate electrode	Material	Stainless steel
	Plate thickness	0.1 mm
Plate electrode ceramic coating		
	Main component	Silica
	Coating thickness	Approx. 0.2 mm

電子管を動作させると、高周波放電プラズマが無い状態でもストレー容量があるために帰還発振器は発振を開始する。この状態で針電極先端部に炭素棒等を接触させる方法で小さな火花放電を発生させると、高温プラズマが点火できる。Fig. 3. 4 は放電の状況である。プラズマの長さは目視で概ね 5 mm である。電子管のプレート電流は非放電時には約 80 mA、放電時には約 130 mA であった。放電時の発振周波数は非放電時に対して低下する。これらの結果から、放電によって発生した高温プラズマと平板電極間には静電容量が形成されたと考えることができる。Fig. 3. 5 はその模式図である。

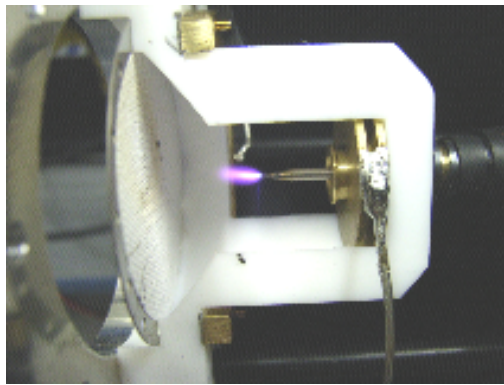


Fig. 3. 4 Aspect of the RF discharge.

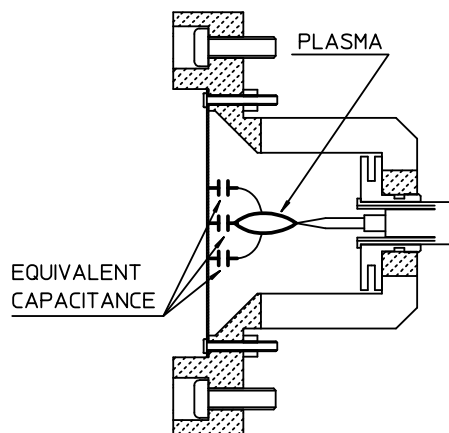


Fig. 3. 5 Plasma and equivalent capacitance.

音波を加えることによって変化する帰還発振器の発振信号を取り出すためには、発振を阻害せずに検波器が動作するために必要なレベルの信号を引き出す必要がある。このため、高圧プローブ (Tektronix P6015A) を用いて発振信号を取り出す部分を検討した。高圧プローブは入力容量 3 pF, 入力インピーダンス 100 M Ω である。Fig. 3. 6 は帰還発振器の回路図である。同図に示す A~D 点に高圧プローブを接続して発振信号レベルとプラズマの大きさを観測した。A~C 点に高圧プローブを接続するとプラズマは縮退し、とりわけ B 点に接続するとプラズマは消失する。このため、検出コイル (1 ターンコイル) を共振コイルに近接させて磁気結合で発振信号を取り出す方法を検討した。検出コイルを共振コイルの A 側から B 側にかけて検出コイルを移動させながら出力レベルとプラズマの大きさを確認した。検出コイルを共振コイルの A 側に位置させたときにプラズマの縮退が小さいことが確認された。D 点では放電時においても検波回路を動作させるために十分な 3 V p-p のレベルが得られた。当初、簡単な AM 検波器を用いて聴音で音声に対する応答の有無を確認したが、低域成分のみが確認できた。これに対し、FM 直線検波器を用いると良好な音声に対する応答が確認された。これらの結果を基にイオンマイクロホンを設計した。

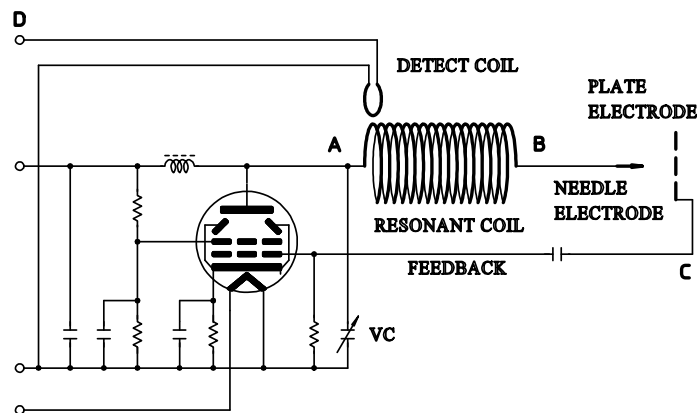


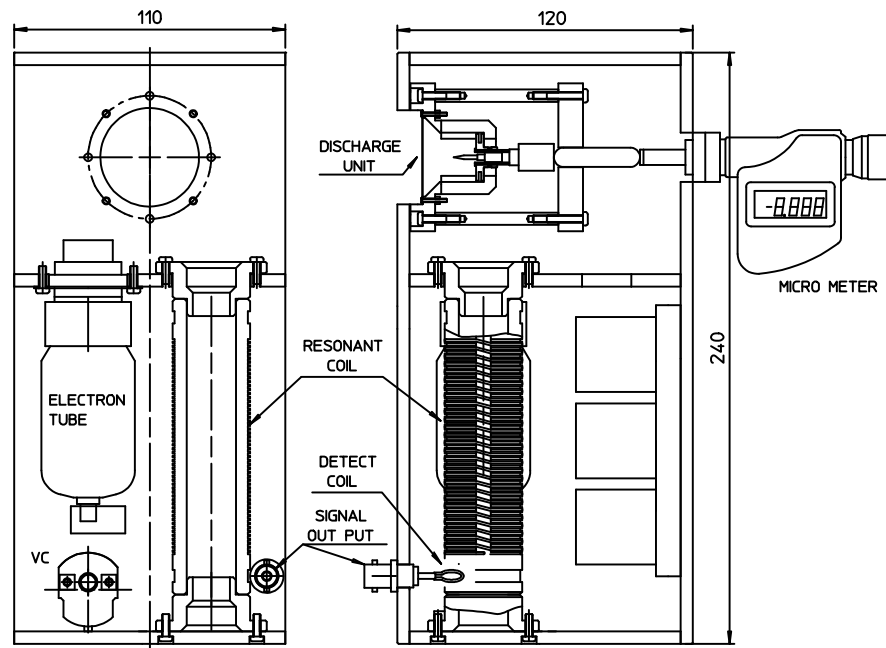
Fig. 3. 6 Oscillation circuit for generating discharge.

3. 2. 3 イオンマイクロホンの構成

Fig. 3. 7は設計したイオンマイクロホンの組立断面図である。設計にあたっては電子管回路，共振コイルおよび検出コイルの配置はストレー容量の増加と寄生発振を防止するために，部品間の配線を最短にすることに留意した。Table 3. 2はコイルデータである。共振コイルが音波等で振動すると発振周波数が偏移することが想定されることから，材料にポリカーボネイトを用いたボビンに線材を巻きつけて固定する方法を用いた。

電極間隔とプラズマの関係を明らかにするために，マイクロメータで針電極先端を平板電極から 7.5~12.5 mm の位置に移動できる構造にした。イオンマイクロホンの回路はイオンスピーカで用いるものと同一であることから，電源に含まれる雑音が音波として放射される。無響室内で放電部から放射される音波を聴音した。このとき，商用電源周波数が音波として放射されていることを確認した。このため，電子管のプレート側の電源には安定化電源装置にリップルフィルタを加え，ヒータ電源は安定化電源装置から鉛蓄電池に変更した。この対策によって商用電源に起因する音波の放射を防止した。

Unit: mm



Cross section in front face. Cross section in the side.

Fig. 3. 7 Cross section of the RF Discharge ionic microphone.

Table 3. 2 Coil Data.

Resonance coil	Wire diameter	1 mm
	Coil diameter	30 mm
	Coil pitch	4 mm
	Number of turns	27 T
Detection coil	Wire diameter	1 mm
	Coil diameter	10 mm
	Number of turns	1 T
Resonance coil and detection coil distance		
	Axial distance	25 mm

3. 3 実験結果と考察

作製したイオンマイクロホンのプラズマの有無による発振周波数差, 音波に対する発振周波数偏移と応答, および放電音を測定した. 放電音の発生は針電極の損耗と相関があることが確認された. このため, 保護ガスを針電極周辺に流す方法を検討した.

3. 3. 1 高温プラズマと平板電極間の静電容量

Fig. 3. 4 および 3. 5 に示した高温プラズマが形成されることによる平板電極との間の静電容量の状態を確認するために, 針電極を移動させて放電時と非放電時の発振周波数差を測定した. Fig. 3. 8 は測定装置の接続図である.

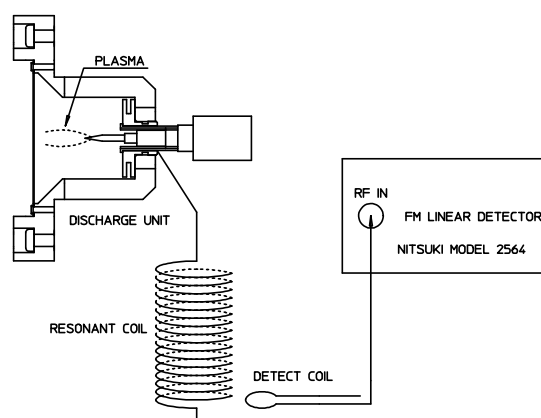


Fig. 3. 8 Experimental setup.

非放電時の発振周波数は約 27 MHz である. 放電時には高温プラズマと平板電極の間に静電容量が形成されることから, 発振周波数が低下する. Fig. 3. 9 は電極間隔を 12.5 mm から 7.5 mm まで 0.5 mm ステップで移動させたときの発振周波数差である. 12.5 mm から 9 mm までの範囲では発振

周波数差は電極間隔に依存する。しかし 9 mm 未満の電極間隔では直線関係が損なわれる。これはプラズマ先端が平板電極に近接して静電容量が損なわれることに起因すると考えられる。

非放電時に両電極間にダミーコンデンサを接続して低下させた発振周波数を測定した。ダミーコンデンサの有無による発振周波数差から、電極間隔が 9.5 mm のときの高温プラズマと平板電極間の静電容量は約 0.2 pF と見積もることができた。

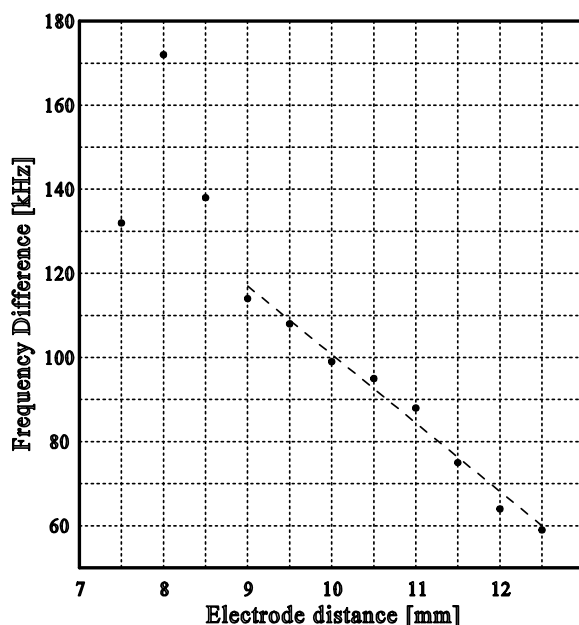


Fig. 3.9 Frequency difference vs. electrode distance.

3. 3. 2 音響カプラを用いた音波に対する応答

プラズマに音声を加えることによって聴音で応答が確認できた。しかし、極めて低いレベルであった。このため、音響カプラを用いて音波を直接放電部に加える方法で音圧に対する応答を測定した。Fig. 3. 10 は測定系の接続図である。100 Hz, 音圧レベル 94 dB の音波を放電部に加え、電極間隔を 12.5 mm から 7.5 mm まで 0.5 mm ステップで変化させた。周波数偏移は

FM 直線検波器で測定した。

Fig. 3. 11 に測定した電極間隔に対する周波数偏移を示す。電極間隔が 9.5 mm～12.5 mm の範囲では発振周波数偏移は電極間隔に依存し、電極間隔が 9.5 mm で最大周波数偏移が得られる。しかし、電極間隔が 9 mm 以下では発振周波数偏移は電極間隔に依存しなくなった。これは、前項と同様にプラズマの先端が平板電極に近接して等価静電容量が損なわれたことに起因すると考えられる。

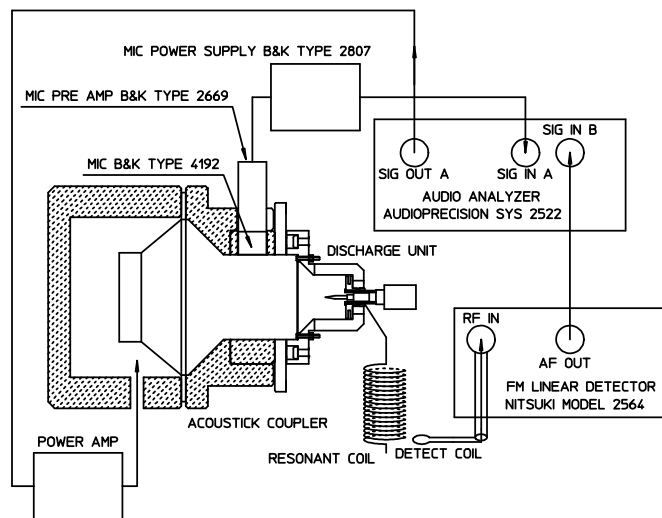


Fig. 3. 10 Setup for sound wave response measurement.

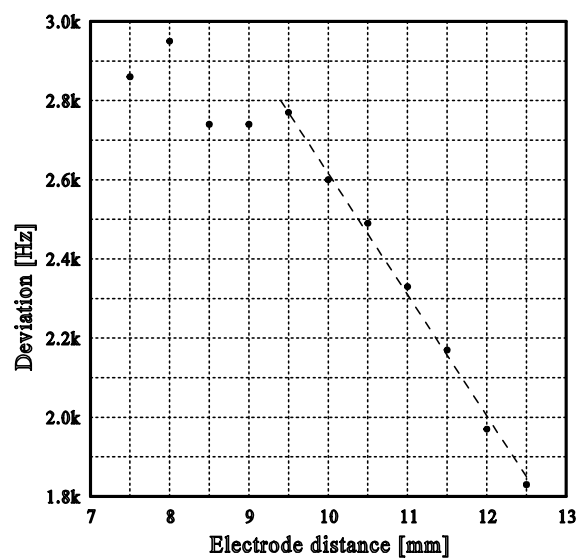


Fig. 3. 11 Deviation vs. electrode distance.

放電部に音波を加え、音波の周波数に対する発振周波数偏移を測定した。音響カプラを用いて音波を加える方法では、音圧レベル 94 dB の 20 Hz の音波を加えると電極間隔が 10 mm のときに音波の粒子変位の振幅が大きくなるため放電が不安定になった。このため、電極間隔を 10 mm から 12.5 mm に変更して測定を行なった。計測用マイクロホンで音圧レベルを確認して放電部に加わる音圧レベルが 94 dB となるように音圧を調整し、1/3 オクターブバンドの中心周波数毎に周波数偏移を FM 直線検波器で測定した。

Fig. 3. 12 は放電部に加えた音波の周波数に対する発振周波数偏移である。100 Hz 以下の周波数帯域では -6 dB / オクターブの直線に近似していることが確認できる。このことから、高温プラズマと平板電極間に形成された静電容量変化は、加えた音波の周波数が低いほど大きくなる可以考虑することができる。

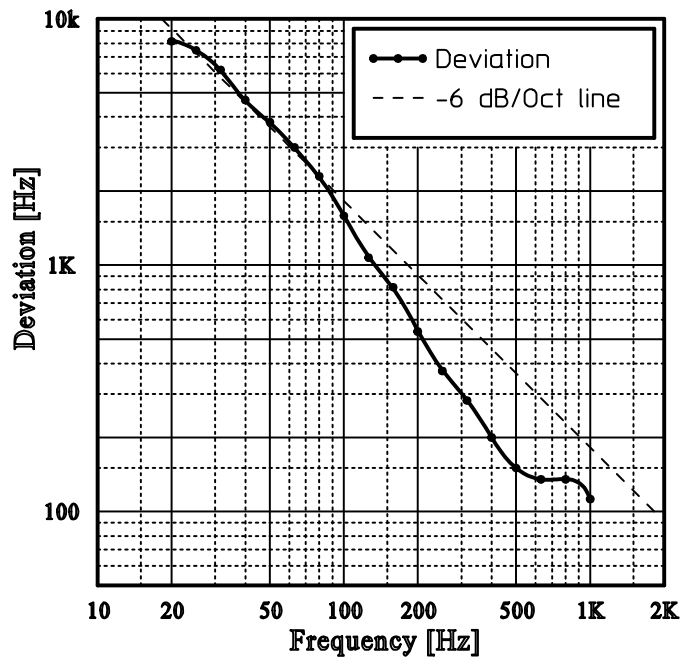


Fig. 3. 12 Deviation vs. sound frequency.

3. 3. 3 近接音源に対する応答

放電部に加えた 1kHz の音波に対する発振周波数偏移が小さいため、イオンマイクロホンの音波に対する応答が低い。このため、音源をイオンマイクロホンに近接させて音波に対する応答を測定した。直径 250 mm のスピーカを音源とし、音源から距離 5 cm にイオンマイクロホンの放電部を位置させ、放電部に音圧レベル 124 dB を加えて測定を行なった。FM 直線検波器出力に 1/3 オクターブバンドパスフィルタを通してレベルを測定した。Fig. 3. 13 は測定状況である。

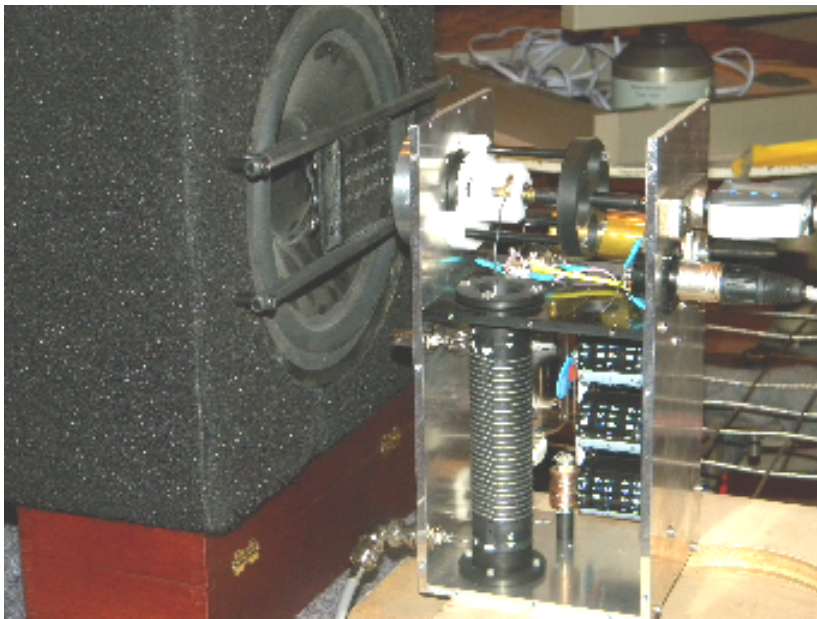


Fig. 3. 13 Aspect of the acoustic measurement for ionic microphone.

Fig. 3. 14 は周波数応答と雑音のスペクトルである。雑音のスペクトルはイオンマイクロホンを動作させた状態で音源から音波を放射させない状態で測定した。音波に対する応答は可聴周波数帯域で概ね $-6 \text{ dB} / \text{オクターブ}$ の直線に近似していることが確認できる。1 kHz における信号対雑音比は約 45 dB である。放電部には音圧レベル 124 dB の音波を加えて測定

したが、マイクロホンの感度は音圧レベル 94 dB の音波を加えて測定される。音圧レベル 94 dB の音波を加えたときに感度は 30 dB 低下するため、信号対雑音比は 15 dB となる。このため、イオンマイクロホンを実用化するためには音波に対する応答を高めて信号対雑音比を改善する必要がある。

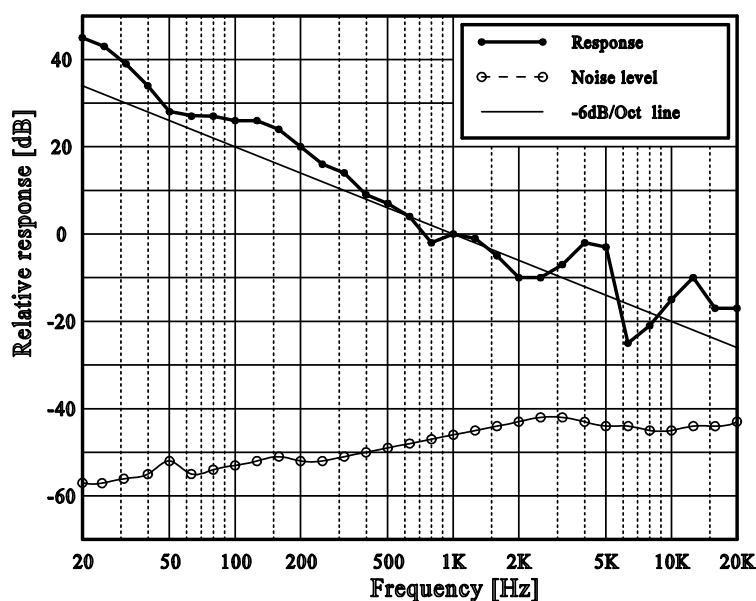


Fig. 3. 14 Frequency response and noise spectrum.

イオンマイクロホンの音波に対する応答は可聴周波数帯域で概ね - 6 dB / オクターブの直線に近似していることから、近接効果によって同様な周波数応答を持つ双指向性リボンマイクロホンと比較した。マイクロホンに音源が近接すると球面波になる。球面波が音圧傾度型マイクロホンに加えられたとき、低域の周波数応答が - 6 dB / オクターブの直線に近似して持ち上がることを近接効果という。双指向性リボンマイクロホンは音圧傾度型マイクロホンであり、音波の粒子速度に比例した出力を持つ。このため、球面波を加えると双指向性リボンマイクロホンは強い近接効果を示す。

Fig. 3. 15 は双指向性リボンマイクロホンの測定状況である。イオンマイ

クロホンと同様に直径 250 mm のスピーカを音源とし、音源からの距離 5 cm の位置に双指向性リボンマイクロホンを設置した。

Fig. 3. 16 は両マイクロホンの周波数応答を比較したものである。リボンマイクロホンでは 500 Hz 以上の帯域で周波数応答が平坦になっている。これに対し、イオンマイクロホンでは高音域まで -6 dB / オクターブの直線に近似していることから、イオンマイクロホンは高い周波数まで音波の粒子速度に応答していると考えることができる。リボンマイクロホンの振動板の寸法は幅 5 mm、長さ 50 mm である。そして、前後の音響端子間距離は約 20 mm である。これに対して、イオンマイクロホンの音波に応答するプラズマは最大直径が約 4mm で長さが約 5 mm と小さい。プラズマが高い周波数でも音波の波長に対して小さいことから、高い周波数まで音波の粒子速度に応答すると考えることができる。

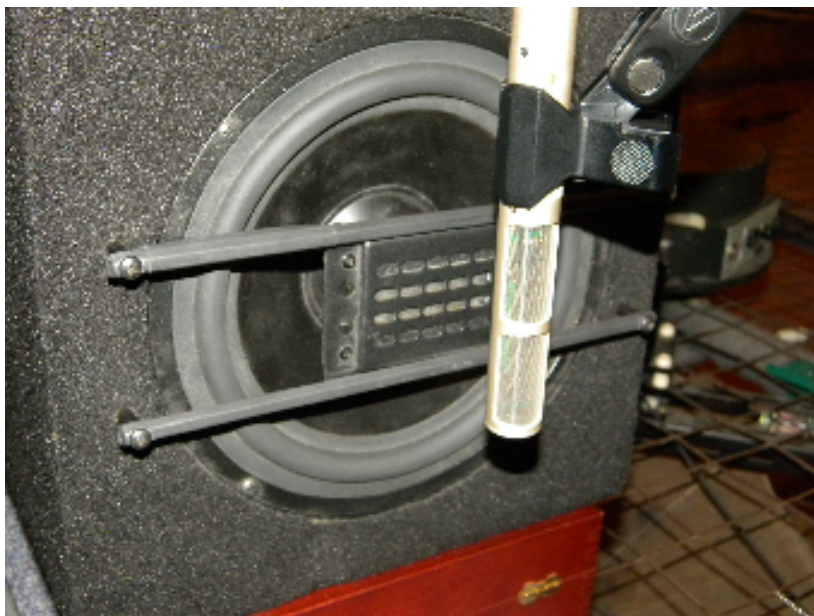


Fig. 3. 15 Aspect of the acoustic measurement for ribbon microphone.

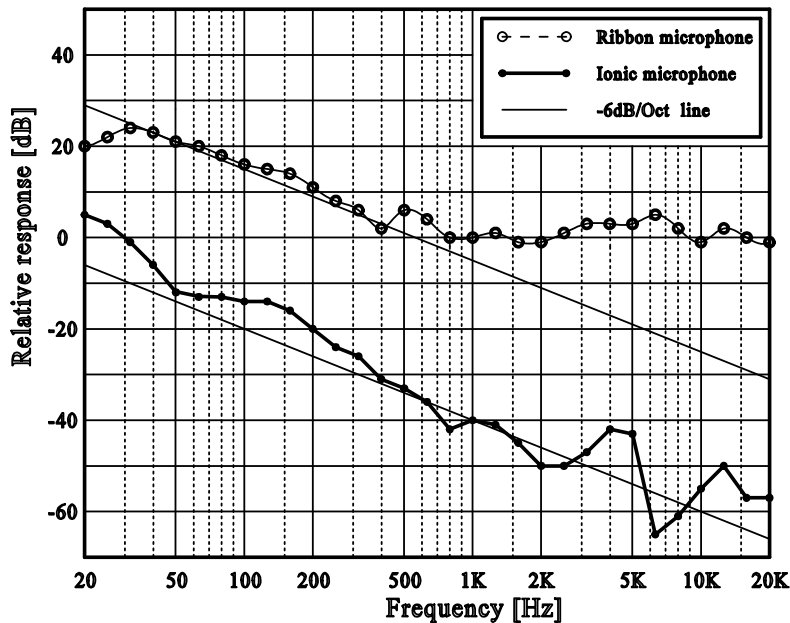


Fig. 3.16 Comparison for ionic microphone and ribbon microphone.

3. 3. 4 点音源に対する応答

双指向性リボンマイクロホンに比べて音波に応答する部分が小さいことから高い周波数においても音波の粒子速度に応答することが確認できた。ここでは、プラズマの音波に応答する部分を明らかにする検討を行なった。

Fig. 3.17 に示す点音源でプラズマに音波を加え応答を測定した。セラミック管の先端の音圧レベルは 94 dB, 周波数は 100 Hz である。音波を放射するセラミック管の先端の内径は 4.7 mm である。この大きさは 100 Hz の音波の波長に対して十分小さいことから点音源とすることができる。これを点音源としてプラズマに音波を加え、音波に対する応答を測定した。

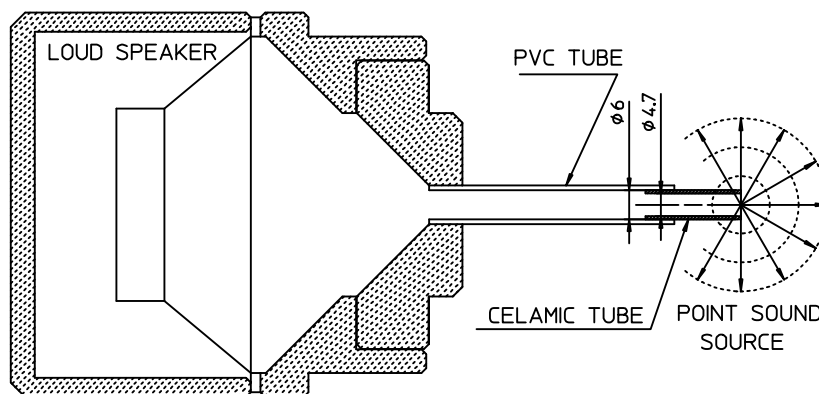


Fig. 3. 17 Point sound source.

Fig. 3.18 は平板電極面上から加えた音波に対する応答である．図に示す数値は平板電極上の最大値を基準とした相対値である．平板電極上の中心と中心から上方での応答は周辺部に比較すると大きい．プラズマの先端が熱で上方に湾曲し，音波に高く応答することが確認できる．

Fig. 3. 19 はプラズマ側方から加えた音波に対する応答である．図に示す数値は平板電極上の音波に対する応答を基準とした相対値である．プラズマの先端の応答が高いが，針電極先端部まで応答があることが確認できる．これらの結果から，プラズマ全体が音波に応答し，特にプラズマの先端部が音波に高く応答していることが確認できる．

Fig. 3. 20 は平板電極中央に開口を設け，プラズマの平板電極側から加えた音波に対する応答である．平板電極上の応答を基準とし，針電極先端部までセラミック管を移動させたときの相対値である．プラズマ全体に音波が加えられたときに応答が最大になったため，プラズマ全体が音波に応答すると考えることができる．

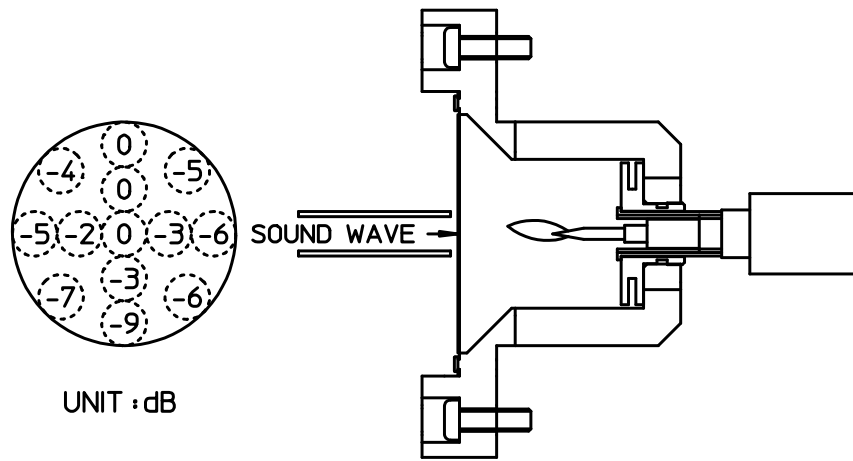


Fig. 3. 18 Sound source on the plate electrode.

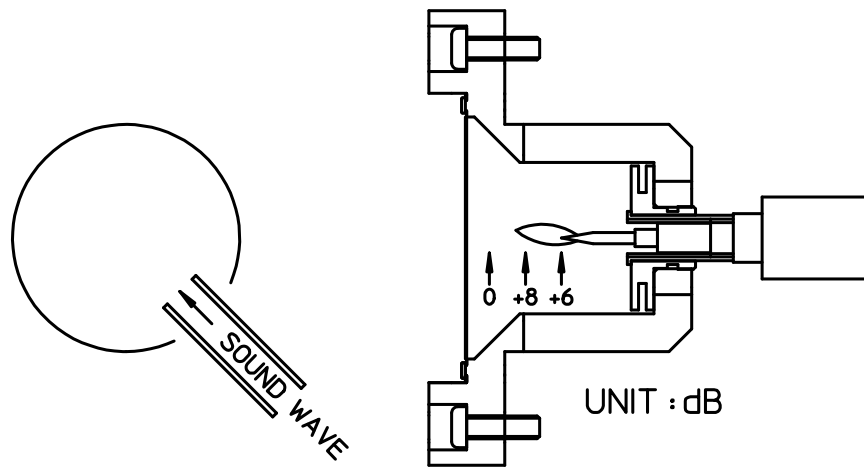


Fig. 3. 19 Sound source on the side of flame.

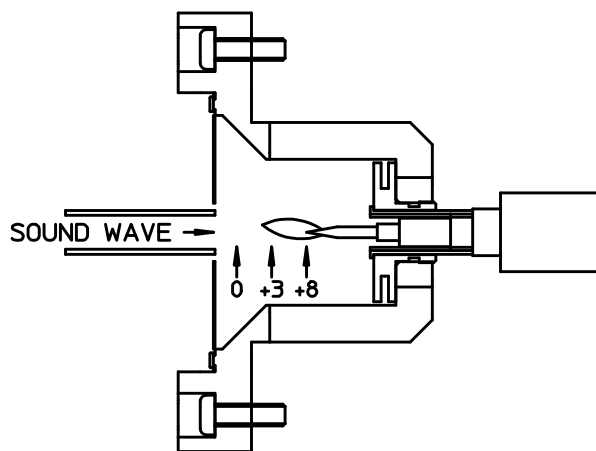


Fig. 3. 20 Sound source from flame top.

3. 3. 5 高周波放電による音波の発生

発振回路と放電部はイオンスピーカとして用いられてきたものと同様の構成であることから、電気信号を入力すると放電部から音波を発生させることができる。このほか、イオンスピーカは故障などで異常放電が発生すると放電音を放射する。この故障を回復するためにイオンスピーカでは放電電極を交換している。

高温プラズマを用いる方法でも断続的な放電音が聴音で確認された。放電音は無響室内では聞き取ることができ、FM 検波出力には大きな雑音が発生した。このため、Fig. 3. 21 に示す構成で放電部から発生する音波を無響室内で測定した。放電音の測定には低雑音測定用マイクロホン (B&K 4144) を用いた。測定用マイクロホンと平板電極の間隔は 10 mm である。

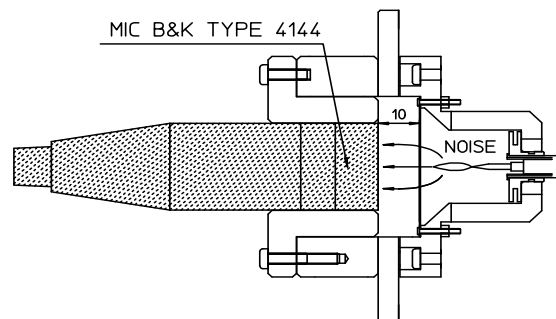


Fig. 3. 21 Discharge noise measurement setup.

Fig. 3. 22 に放電音の周波数成分を示す。レベルの測定には 1/3 オクターブバンドパスフィルタを用いた。プロットは 1/3 オクターブバンドパスフィルタの中心周波数である。放電音が発生しないときの雑音は無響室と測定用マイクロホン (B&K 4144) の測定限界に近いレベルであった。音圧レベルが低いときには、低い周波数と高い周波数において聴覚が低下する。このため、IEC 60268-1 に規定される聴感補正フィルタ (A 特性) を

通して雑音レベルが測定される^[10]. この聴感補正フィルタを通した放電音が発生しないときの音圧レベルは 20 dB 以下であった. このため, 放電音が発生しないときにはイオンマイクロホンが音波を放射しないことが確認できた. しかし, 不定期に発生する放電音は約 2 kHz をピークとする周波数成分を持つことが確認された. 不定期な放電音の発生頻度は針電極の表面処理に依存した. 放電音は針電極の表面処理がタングステン生地, 金メッキ, 白金メッキである順に発生頻度は低下した. 発生頻度は 2 kHz において, 概ねタングステン生地が 5, 金メッキが 3, そして白金メッキが 2 の割合であった. しかし, 発生した放電音の大きさと周波数成分に差異は認められなかった.

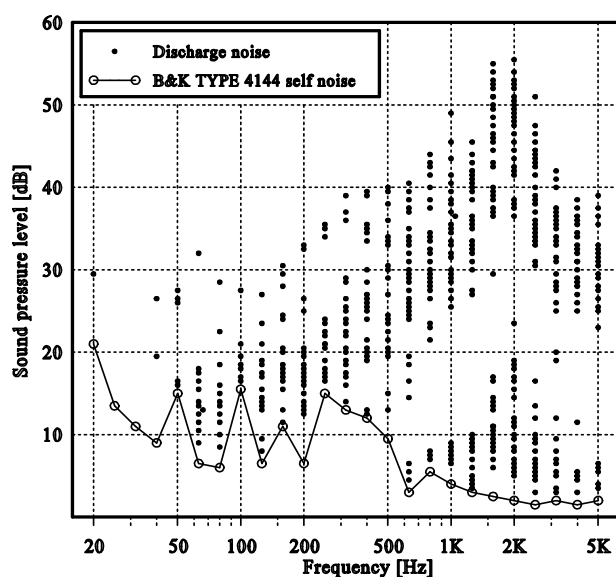


Fig. 3.22 Discharge noise spectrum.

放電開始直後における放電音の発生頻度は低く, 放電時間の経過と共に発生頻度が高くなった. そして, 放電音の発生時には針電極表面に黄色の発光が確認された. これらのことから, 放電音の発生は放電時の針電極表面状態に起因すると考えられる.

3. 3. 6 不活性ガスによる針電極保護

長時間放電させると放電音の発生頻度高くなり、放電が停止した。このとき、針電極先端が損耗して針電極に放電生成物が付着していた。Fig. 3. 23 は大気中で 3 時間放電させた後のタングステン生地針電極である。針電極先端は約 0.4 mm 損耗し、先端部付近に放電生成物が付着している。放電生成物は先端部付近に厚く、根元部に向かって薄く堆積した。針電極は放電による熱によって変色していることが確認できる。この状態ではプラズマを再点火することはできなかった。このため、針電極周辺に不活性ガスを流す方法を検討した。Fig. 3. 24 は針電極に沿って不活性ガスを流すための放電電極組立である。針電極を覆う針電極カバーの側方からガスを導入し、針電極に沿って先端部方向へガス流を流した。

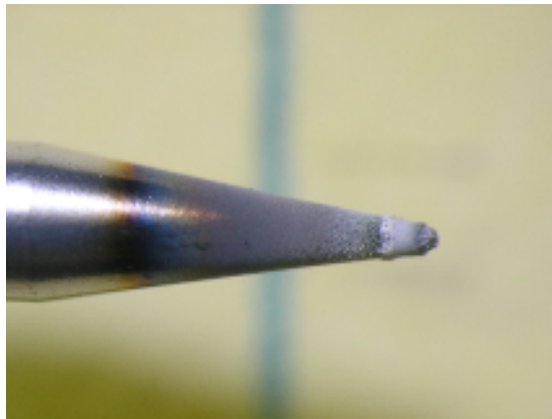


Fig. 3. 23 After 3 hours discharge.

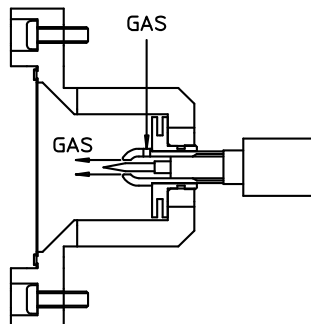
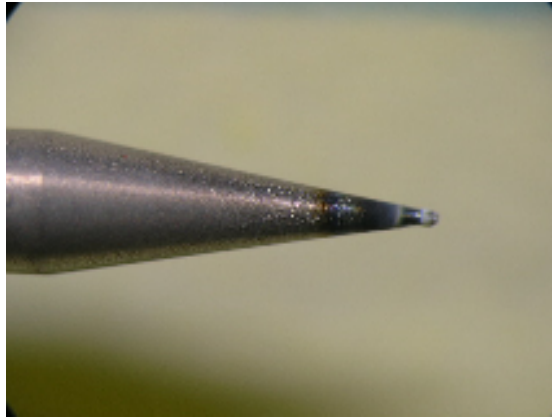


Fig. 3. 24 Discharge unit with gas flow.

Fig. 3. 25 は 0.2 L/min の流量でそれぞれ空気, 窒素とヘリウムを流した状態で 1 時間放電させた後のタングステン生地針電極の外観である. 空気以外では電極の損耗と放電生成物の付着は確認されなかった. ヘリウムでは針電極の根元側まで熱による変色が認められた. 窒素を不純物に含むヘリウムを用いると低換算電界でも衝突電離を起こしやすいとされ^[11], プラズマが針電極根元方向まで延伸して加熱されたためと考えることができる.

直径 250 mm のスピーカを音源とし, 音源から距離 5 cm にイオンマイクロホンの放電部を位置させ, 放電部に音圧レベル 124 dB を加えて音波に対する応答を測定した. Fig. 3. 26 は気流が流れていない時のレベルを基準とし, 空気, 窒素およびヘリウムを流したときの音波に対する応答の相対値である. FM 直線検波器出力に 1/3 オクターブバンドパスフィルタを通してレベルを測定した. ヘリウムを用いると流量の増加に伴って音波に対する応答は低下するが, 周波数応答に変化は少ない. しかし, 空気流と窒素流では流量を増加させると低域の周波数応答が減少することがわかる.

流量が 0.4 L/min 以上のヘリウムでは, 加えた音波の周波数に対して FM 直線検波器出力の周波数が高いほうへシフトすることが聴音で確認された^[12]. このため, ヘリウムを保護ガスに用いる際には音波の伝搬速度が変化することに留意する必要がある.



(a) Air

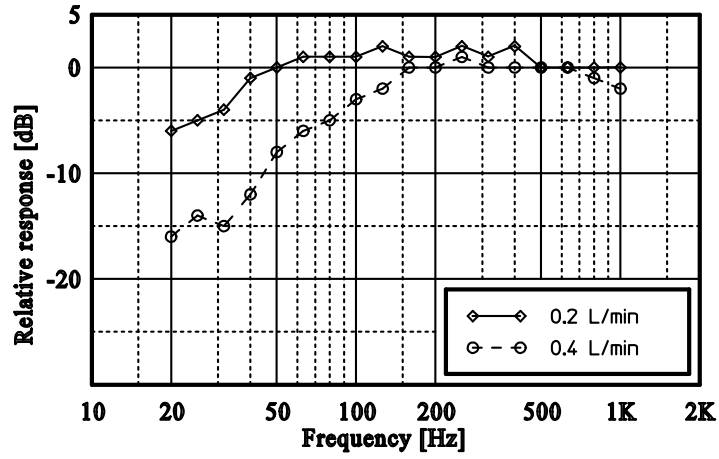


(b) N₂

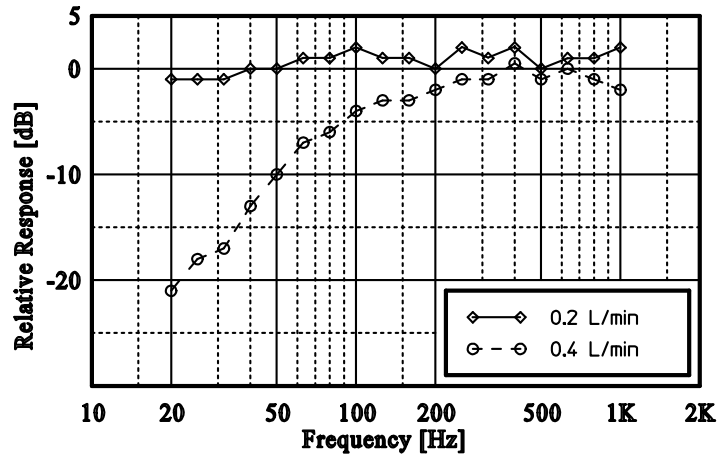


(c) He

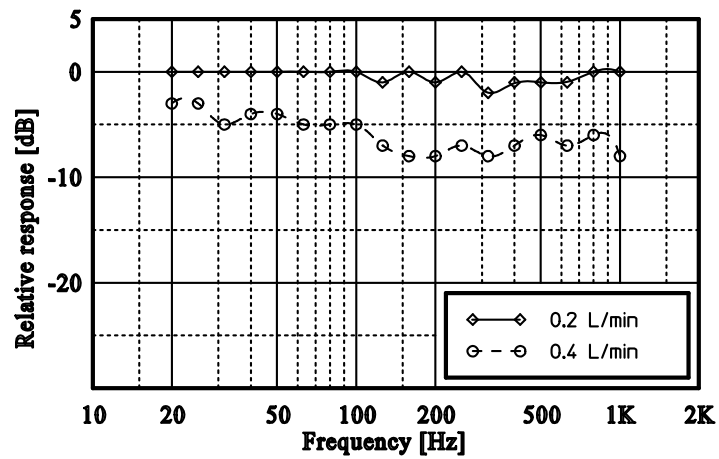
Fig. 3. 25 After 1 hour discharge with gas flow.



(a) Air



(b) N₂



(c) He

Fig. 3. 26 Flow rate vs. frequency response.

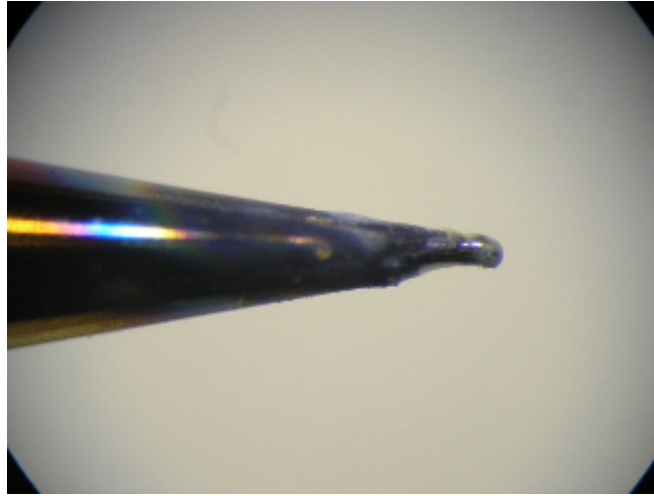


Fig. 3. 27 After 50 hours intermittently discharge with N₂ gas flow.

Fig. 3. 27 は不活性ガスに 0.3 L/min の窒素を用いて 1 日約 7 時間を 7 日間、合計 50 時間放電させた後の針電極の外観である。電極に大きな損耗は無く、放電生成物の付着も少ないことから、放電の維持とプラズマの再点火が可能になった。加えて、不定期に発生していた放電音の発生を抑えることができた。

3. 4 まとめ

帰還発振器を用いた発生させた高温プラズマを用いたイオンマイクロホンを製作した. このイオンマイクロホンの音波に対する応答と放電に関わる問題点を検討した. 得られた知見を以下にまとめる.

(1) 高周波放電で発生させた高温プラズマは音波に応答し, 帰還発振器の発振周波数偏移として検出することができる. この周波数偏移を FM 直線検波器で復調することによって加えた音波に対する音声信号を得ることができる.

(2) 高温プラズマと平板電極間には音波に応答する静電容量が形成される. 針電極と平板電極の電極構成では, プラズマによって形成される静電容量の有無による発振周波数差は電極間隔が 9 mm のときに最大になり, 音波に対する応答は電極間隔が 9.5 mm のときに最大になる. 目視で確認できるプラズマの長さは約 5 mm であることから, 目視できるプラズマの外側に音波に応答する 0.2 pF 程度と見積もられる静電容量が形成されていること考えることができる.

(3) 発振周波数偏移と FM 直線検波器出力は加えた音波の周波数が増加するとレベルが低下することが確認された. これらは -6 dB / オクターブの直線に近似している. このことから, 音波に粒子速度に比例した応答を持つリボンマイクロホンを測定し, 比較した. そして, リボンマイクロホンよりも高い周波数まで音波の粒子速度に応答していることが明らかとなった.

(4) 点音源による測定では, プラズマ全体が音波に応答することが確認された. 針電極と平板電極を用いた電極構成では特にプラズマの先端部付近の応答が高い. 水平方向にプラズマを形成していることからプラズマの

先端部は熱で上方に湾曲している。これに沿って音波に応答する部分も上方に偏っていることが確認された。

(5) 高周波放電でも放電音は不定期に発生し、針電極の表面状態に依存する。放電を継続すると針電極は放電で損耗して周辺に放電生成物が付着し、放電が停止する。針電極の周辺に不活性ガスを流すことによって放電音を防止できる。また、放電電極の損耗と放電生成物の付着を防止できることから長時間放電させることができる。しかし、音波に対する応答が低いことから、イオンマイクロホンの実用化のためには信号対雑音比を改善する必要があることが明らかになった。

参考文献

- [1] 秋野, 下川: 日本音響学会誌, **68**, N0. 5, pp. 224-231, (2012)
- [2] 秋野, 下川: 神奈川工科大学研究報告 B 理工学編, 第 34 号, pp. 45-50, (2009)
- [3] 静電気学会編: 静電気ハンドブック, オーム社, p. 29, (2006)
- [4] 電気学会放電ハンドブック出版委員会編: 放電ハンドブック, オーム社, p420, (1998)
- [5] 柴山: 日本音響学会講演論文集, pp. 227-228, (1975. 10)
- [6] 柴山: 日本音響学会講演論文集, pp. 723-724, (1978. 5)
- [7] 高分子学会編: 静電気ハンドブック, 地人書館, pp. 508-509, (1967)
- [8] 静電気学会編: 静電気ハンドブック, オーム社, pp. 1141-1143, (2006)
- [9] 山川: 世界の真空管カタログ, 誠文堂新光社, p51, (1995)
- [10] 電子情報技術産業協会規格, EIAJ RC-8160A, マイクロホン, (2002)
- [11] 日本学術振興会 プラズマ材料科学第 153 委員会編:
大気圧プラズマ基礎と応用, オーム社, pp. 246-251, (2009)
- [12] 秋野, 下川: 静電気学会講演論文集, pp. 263-266, (2010. 9)

第4章 イオンマイクロホンの信号対雑音比の改善^[1, 2]

4.1 はじめに

第3章で述べたように、高周波放電で発生させた高温プラズマは音波に応答し、帰還発振器の周波数偏移として検出できた。周波数偏移をFM検波することによって加えた音波に対する音声信号を得ることができた。高温プラズマも低音プラズマと同様に放電音を発生させた。高温プラズマが発生する放電音は針電極の損耗と放電生成物の付着に依存した。このため、針電極周辺に不活性ガスを流して放電音の発生を抑え、針電極の損耗と放電生成物の付着を防止した。しかし、これまでの検討ではイオンマイクロホンの感度は低く、音圧レベル 94 dB の音波に対する信号対雑音比は 15 dB 程度であった。このため、イオンマイクロホンを実用化するためには信号対雑音比を改善する必要がある。放電電力を増加させるとプラズマと平板電極の間に形成される静電容量が増加するため、音波に対する応答を高めることができる。しかし、プラズマの先端が平板電極に接すると火花放電が発生して電極が焼損する。この火花放電を防止するために平板電極にセラミック被覆を設けたが、平板電極を用いる方法では十分な音波に対する応答を得ることができなかった。

本章では、イオンマイクロホンの信号対雑音比の改善を検討した。まず、針電極に対向する電極の形状を検討することによって、プラズマとの間に形成される静電容量の増加を図った。次に、プラズマを上方に向けることによって放電電力を増加させた。しかし、放電電力が増加することによっ

て、これまで以上に針電極の損耗が激しくなった。このため、不活性ガスと放電電極の寸法と材料および表面処理を検討した。さらに、FM 直線検波器の検波感度と放電部に音波を取り込む音響端子を検討することによって、イオンマイクロホンの信号対雑音比の改善を図った。

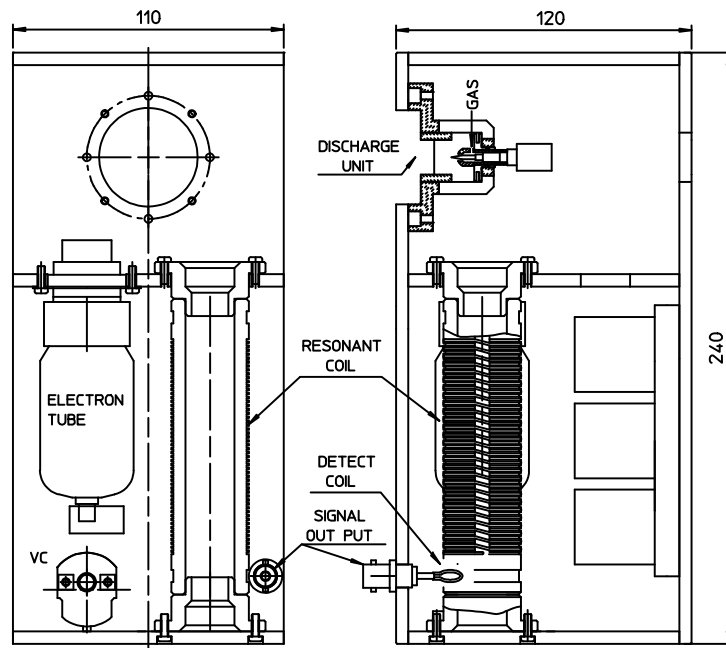
4. 2 水平方向に高周波放電プラズマを形成したマイクロホンの検討

これまで針電極に対向する電極として、プラズマの発生方向に垂直な平板電極を用いてきた。平板電極を用いると、音波に応答する静電容量は主にプラズマの先端部と平板電極によって形成される。プラズマの先端部は目視で最大直径が約 4 mm と小さく、平板電極との間に形成される静電容量は小さくなる。このため、放電電力を増加させてもプラズマの先端が平板電極に接して雑音を発生するため、音波に対する応答を高めることができなかった。第 3 章ではプラズマ全体が音波に応答することが確認できた。このため、これまでの平板電極からプラズマの周囲を囲む円筒電極を検討した。円筒電極を用いるとプラズマに対向する部分の面積が増加することから、プラズマとの間の静電容量の増加が期待できる。そこで、平板電極と円筒電極の音波に対する応答を比較、検討した。

4. 2. 1 水平方向にプラズマを形成したイオンマイクロホン

水平方向に高温プラズマを形成するイオンマイクロホンの組立断面を Fig. 4. 1 に示す。発振回路の構成は Fig. 3. 6 と同じである。針電極の材料はタングステンで、先端半径を 25 μm に加工したものをを用いた。針電極には不活性ガスを供給する構造は Fig. 3. 24 と同一である。

Unit: mm

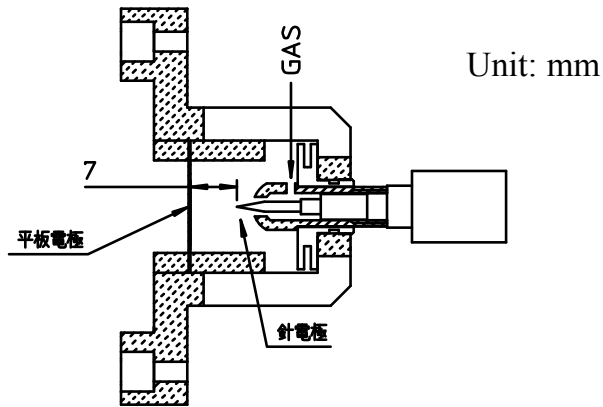


Cross section in front face. Cross section in the side.

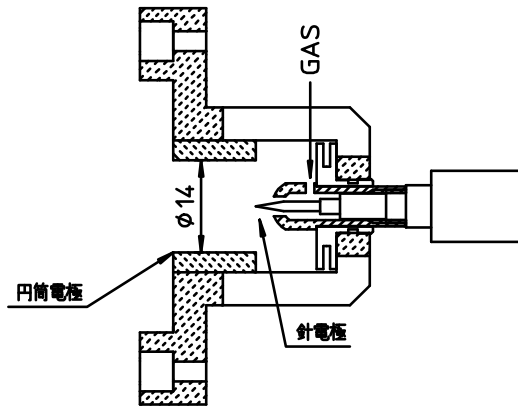
Fig. 4. 1 Cross section of RF Discharge ionic microphone (Horizontal plasma).

4. 2. 2 平板電極と円筒電極の音波に対する応答

プラズマの先端部と周辺部の音波に対する応答を比較するために、針電極と対向する配置の平板電極とプラズマを囲むように配置した円筒電極を用いて、音波に対する応答を比較した。不活性ガスには流量が 0.3 L/min の窒素ガスを用いた。平板電極、円筒電極ともにプラズマに面する部分には火花放電を防止するために、Table 3. 1 に示したセラミック被覆を施した。Fig. 4. 2 はそれぞれの放電電極構成である。Fig. 4. 2 (a) は針電極と針電極の軸に垂直に配置した平板電極の組み合わせであり、Fig. 4. 2 (b) は針電極と針電極と同軸に配置した円筒電極の組み合わせである。無響室内で音源には直径 250 mm のスピーカを用い、音源から放電部までの距離を 0.5 m にして測定した。放電部には音圧レベルは 94 dB の音波を加えた。



(a) Plate electrode.



(b) Cylindrical electrode.

Fig. 4. 2 Discharge unit with N₂ gas flow.

Fig. 4. 3 は平板電極の 1 kHz の音波に対する応答を基準とした平板電極と円筒電極の音波に対する 1/3 オクターブバンドパスフィルタを通した応答である。平板電極に比べて円筒電極の応答は中音域で概ね 6 dB 高いことが確認できる。この感度の増加はプラズマと対向する電極の面積とともに静電容量が増加して、音波に対する応答が向上したことに起因すると考えることができる。

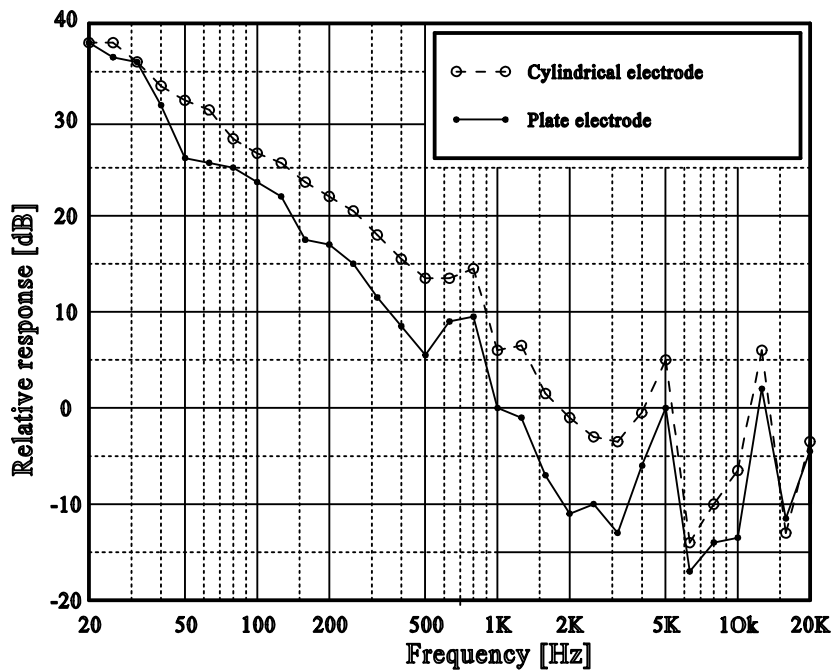


Fig. 4.3 Frequency response of plate electrode and cylindrical electrode.

4. 2. 3 不活性ガスにヘリウムを用いたときの音波に対する応答

ヘリウムを針電極周囲に流した状態で高周波放電させると、Fig. 4.4に一例を示すように窒素流に比べて約20%プラズマが延伸した。無響室内で音源には直径250 mmのスピーカを用い、音源から放電部までの距離を0.5 mにして測定した。放電部には音圧レベルは94 dBの音波を加えた。

Fig. 4.5は円筒電極に内径10 mmのものを用い、ヘリウム流が0.3 L/minのときの1 kHzの応答を基準とした音波に対する応答と雑音のスペクトルである。周波数応答は-6dB/オクターブの直線に沿っていることが確認できる。80 Hzで約58.5 dB、1 kHzで約27.5 dBの信号対雑音比が得られた。不純物として窒素を含む大気圧ヘリウム放電では、放電開始電圧と維

持電圧が低下するとされている^[3]. このことから, プラズマが水平方向に延伸したと考えられる. 不活性ガスにヘリウムを用いることによって, プラズマと円筒電極の対向する面積とともに静電容量が増加して, 音波に対する応答が高くなったと考えることができる.

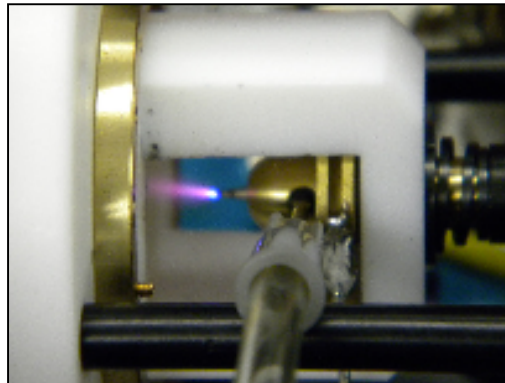


Fig. 4. 4 Aspect of the discharge with He gas flow.

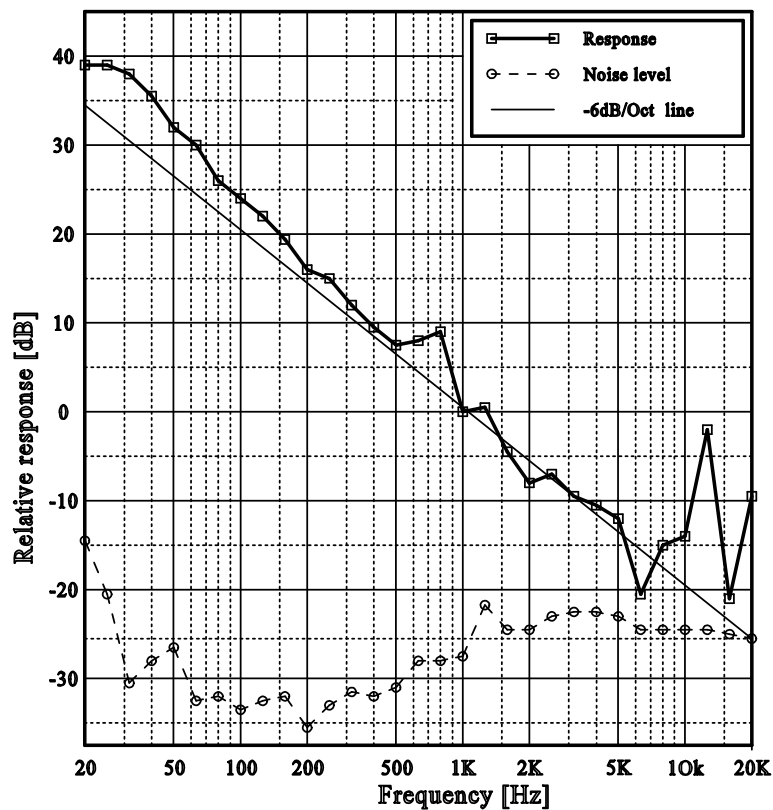


Fig. 4. 5 Frequency response and noise spectrum with He gas flow.

4. 3 上方に高周波放電プラズマを形成したマイクロホンの検討

高周波放電による高温プラズマは針電極先端から発生し、平板あるいは円筒電極側に延伸する。プラズマの先端が平板あるいは円筒電極に到達すると火花放電が発生する。火花放電が発生すると放電電流が急増し、放電音の発生とともに FM 検波出力に雑音が発生する。Fig. 3. 18 で述べたように水平方向にプラズマを形成する方法では、高温プラズマの先端が熱によって上方に湾曲する。とりわけ、円筒電極を用いたときにはプラズマの先端と円筒電極の内壁が近接するため、放電電力を増加すると火花放電が発生する。このため、放電電力を増加させることには限界があった。Fig. 4. 6 は上方に湾曲したプラズマの先端が円筒電極内壁に接して火花放電が発生する状態である。

放電電力を増加させるとプラズマと円筒電極間の静電容量が増加するため、音波に対する応答を高くすることができる。そこで、プラズマを上方に形成する方法を検討した。

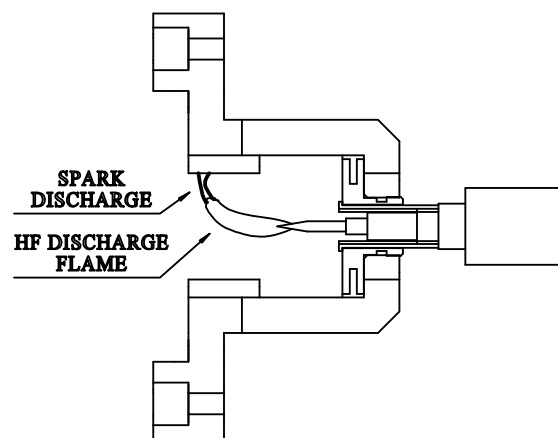


Fig. 4. 6 High-temperature plasma and spark discharge.

4. 3. 1 上方にプラズマを形成したイオンマイクロホン

予備実験で電子管を並列接続することによる放電電力の増加を検討した。電子管を5本以上並列接続すると装置内部の部品間で火花放電が発生し、発振器を安定に動作させることができなかった。このため電子管4本を並列接続したイオンマイクロホンを設計した。

Fig. 4. 7は放電電力を増加させるために電子管 (6DQ6B) を4本並列接続した発振回路である。コイルは Table 3. 2 と同じものを用いた。電子管を並列接続したため入力容量が増加し、発振周波数は約 27 MHz から 26 MHz に低下する。Fig. 4. 8 は実験装置の組立断面図である。

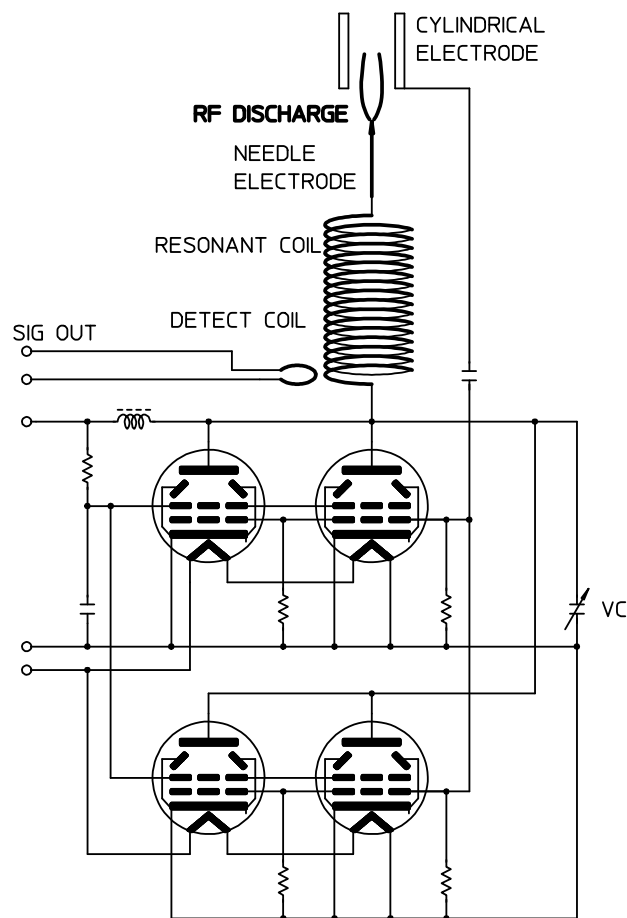


Fig. 4. 7 Discharge generation circuit.

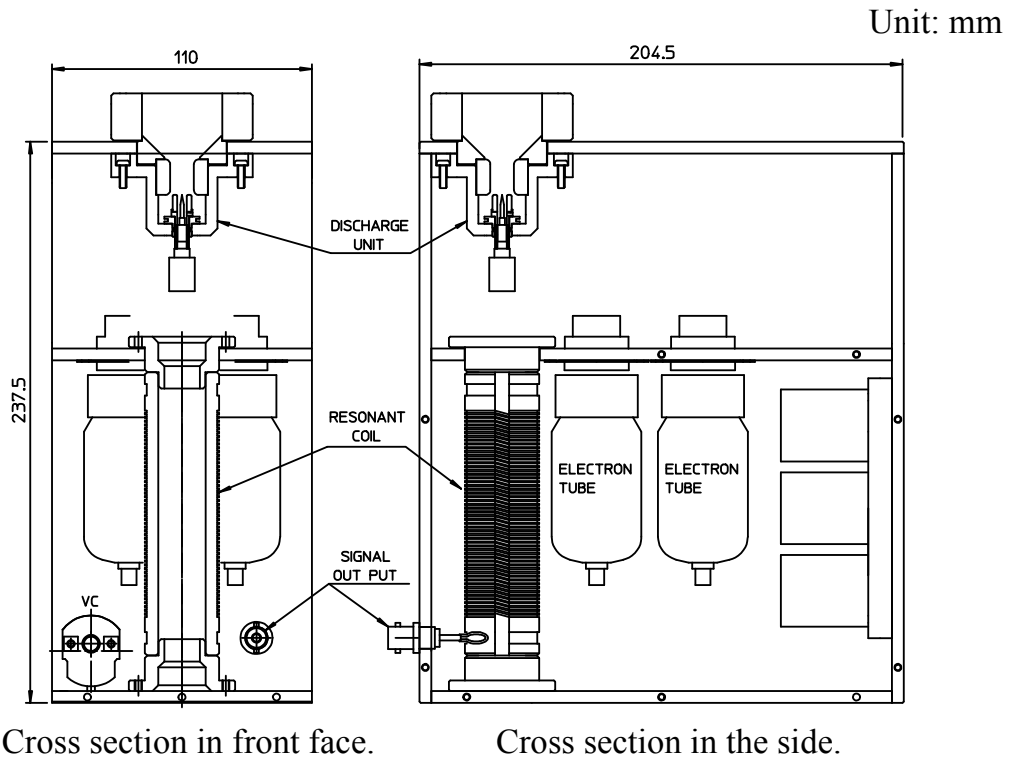


Fig. 4. 8 Cross section of the RF Discharge ionic microphone (Vertical plasma).

Fig. 4. 9 は放電電極構成である。針電極は材料にタングステンをを用い、先端半径を $25\ \mu\text{m}$, $0.5\ \text{mm}$, $0.8\ \text{mm}$ と $1\ \text{mm}$ に加工したものを用意した。先端半径が $0.5\ \text{mm}$, $0.8\ \text{mm}$ および $1\ \text{mm}$ の針電極は直径がそれぞれ $1\ \text{mm}$, $1.6\ \text{mm}$ および $2\ \text{mm}$ のタングステン棒の端部をそれぞれ加工したものである。

Fig. 4. 10 は内径 D , 長さ L の円筒電極である。材料には真鍮(C3604)を用い、切削加工した後の表面にサンドブラスト加工(#100)を施した。サンドブラスト加工によって切削加工によって発生する鋭角部を除去した。

Fig. 4. 11 に示す針電極部には針電極先端部まで不活性ガスで覆うために針電極カバーを取り付けた。針電極カバーは材料にマシナブルセラミックを用いた。

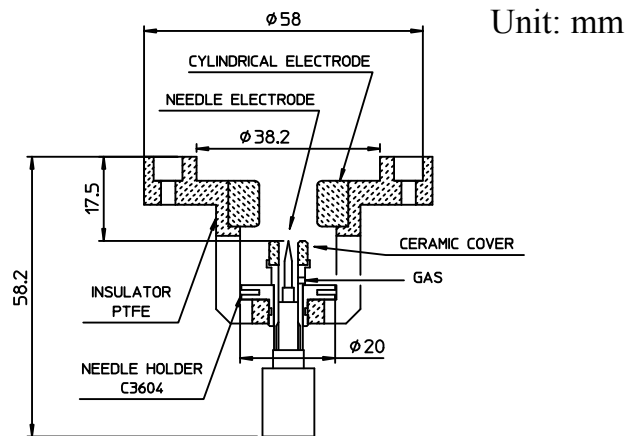


Fig. 4. 9 Discharge unit.

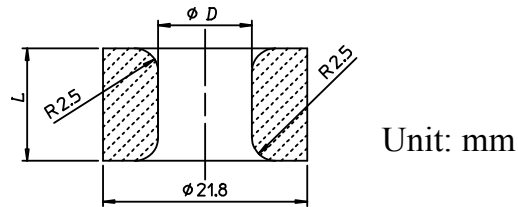


Fig. 4. 10 Cylindrical electrode.

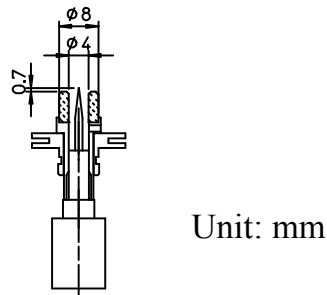


Fig. 4. 11 Ceramic cover for needle electrode.

Fig. 4. 12 は測定系の接続図である．共振コイルに隣接させた検出コイルから取り出した発振信号の周波数偏移を FM 直線検波器で測定した．FM 直線検波器出力からアナライザの 1 / 3 オクターブバンドパスフィルタを通して音波に対する応答を測定した．

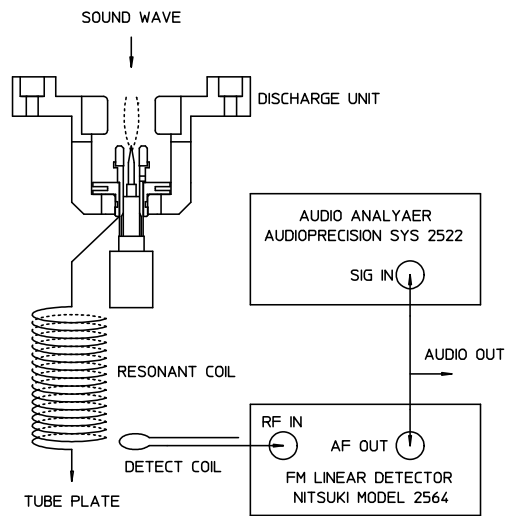


Fig. 4. 12 Experimental setup.

測定は無響室内で行なった。音源には直径 250 mm のスピーカを用い、音源から放電部までの距離は 0.5 m とし、放電部へ音圧レベル 94 dB の音波を加えた。Fig. 4. 13 は上方からイオンマイクロホンに音波を加える装置である。ピストンホン (B&K 4231) で校正した測定用マイクロホン (B&K 4192) を放電部に取り付けてプラズマに加わる音圧を校正した。

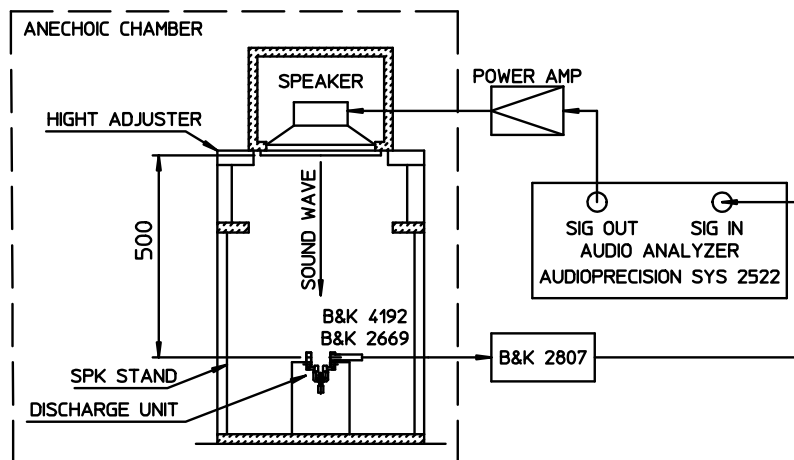


Fig. 4. 13 Acoustic measurement setup.

4. 3. 2 不活性ガスを用いた電極保護

Fig. 4. 14 は 10 分間大気中で放電させた後の先端半径が $25 \mu\text{m}$ のタングステン針電極の外観である。不活性ガス流が無い場合には短い時間で針電極先端が約 1.2 mm 損耗し，周辺に放電生成物が付着して放電が停止した。この状態ではプラズマの再点火が不可能であった。放電時には針電極から強く黄色に発光するプラズマが発生し，激しい放電音の発生とともに FM 検波器出力から大きな雑音を確認された。

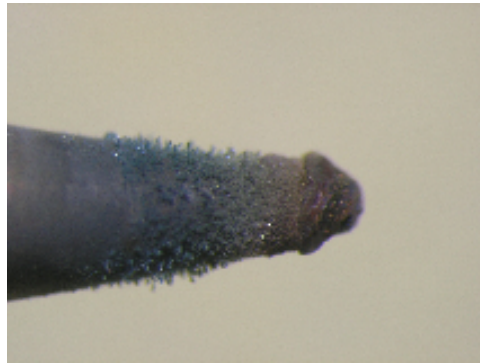


Fig. 4. 14 After 10-minutes in air.

先端半径が $25 \mu\text{m}$ のタングステン針電極は極めて短い時間で損耗するが，針電極の先端半径が大きいほど損耗が少ないことを確認した。このため，先端半径を 0.8 mm に加工した針電極を用いて不活性ガス種による効果を検討した。Fig. 4. 15 は 100 Hz の音波を加えたときの電子管のプレート電圧に対する発振周波数偏移である。不活性ガスの流量を 0.3 L/min とし，窒素とヘリウムを比較した。ヘリウム流より窒素流の発振周波数偏移が大きいため音波に対する応答が高くなると考えられる。プラズマが上方に形成されると円筒電極内にヘリウムが浮揚して留まらないためにヘリウムは音波に対する応答が窒素に比べて小さいと考えられる。このため，以降の実験には不活性ガスに窒素を用いた。

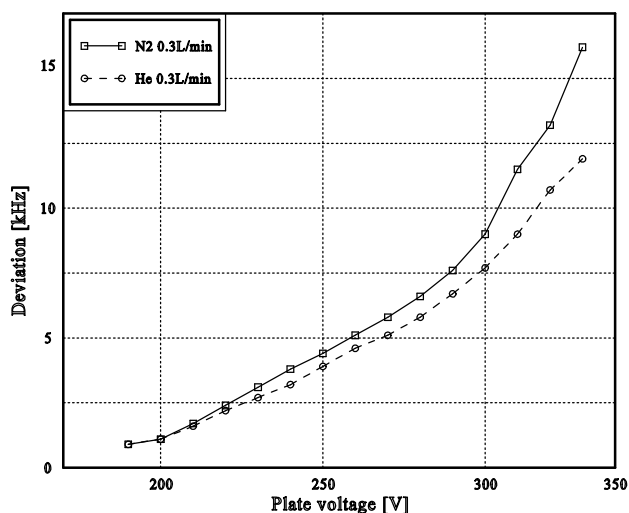


Fig. 4. 15 Deviation caused by N₂ and He gas.

イオンマイクロホンを動作させた状態で流量が過大であると、聴音で FM 検波器出力からの雑音が増加することが確認された。このため、窒素の流量に対する雑音の関係を測定した。長さ L が 12 mm, 内径 D が 10 mm の円筒電極を用い, 針電極には先端半径 0.8 mm のものを用いた。Fig. 4. 16 は 0.3 L/min の 1 kHz のレベルを基準にしたガス流量に対する雑音のスペクトラムである。1.2 L/min 以上の流量では 250 Hz をピークとする雑音が増加した。音圧傾度型マイクロホンの風雑音と同様に低域成分の雑音レベルが大きいことが確認できる。火花放電発生時には流量を 1.2 L/min 以上にすると火花放電を消弧することができる。しかし, 0.3 L/min 未満の流量では不活性ガスの電極保護効果が失われ, 針電極先端が損耗した。

Fig. 4. 17 は電子管に流れるプレート電流と流量の関係を示したものである。流量が 0.5 L/min を超えると流量の増加に伴ってプレート電流が減少する。Fig. 4. 18 は流量に対する 1 kHz の応答を基準にした周波数応答である。流量が増加するほど低域の周波数応答が低下する。これは流量が増加するほど気流によってプラズマの直径が減少し, これに伴う放電電力の

減少が低域の周波数応答を低下させていると考えることができる。

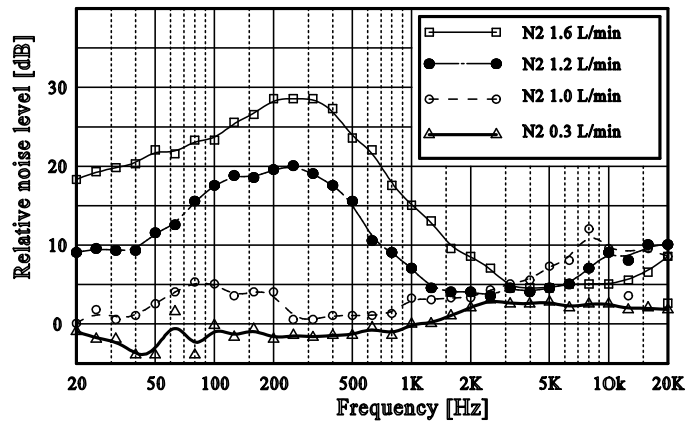


Fig. 4. 16 Variation in noise spectrum due to N₂ flow rate.

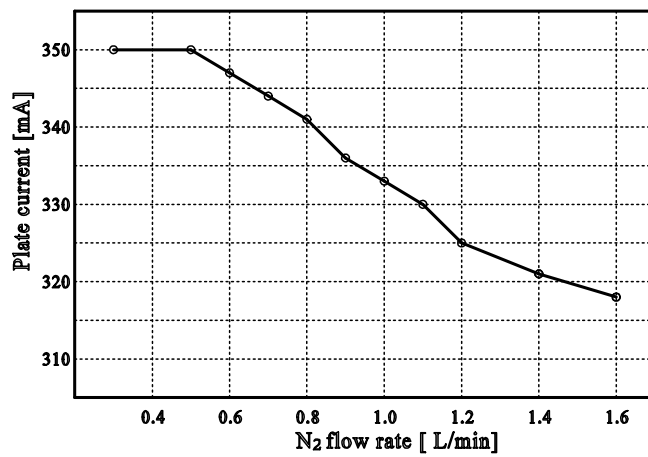


Fig. 4. 17 Electron tube current relative to N₂ flow rate..

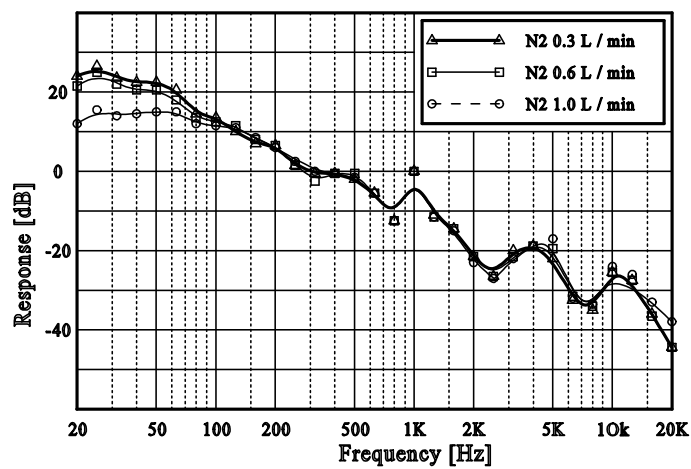


Fig. 4. 18 Variation in frequency response due to N₂ flow rate.

4. 3. 3 最適放電電極寸法, 材料および表面処理

針電極の先端半径の寸法と放電安定性の関係について検討した. 円筒電極には長さ L が 12 mm, 内径 D が 10 mm のものを用いた.

Fig. 4. 19 は約 10 分間 0.5 L/min の窒素流中で高周波放電させた後のそれぞれの針電極外観である. Fig. 4. 20 は上方から写した放電プラズマである. 針電極の先端半径が $25\ \mu\text{m}$ と 0.5 mm では電子管のプレート電圧が 200 V と低くてもプラズマは点火できるが, 放電電力を増加させると Fig. 4. 20 (a) のように針電極から強く発光するプラズマが発生した. 放電後の針電極先端は Fig. 4. 19 (a), (b) のように熱による変色と損耗が認められた.

針電極の先端半径が 1 mm では電子管のプレート電圧を 350 V 以上にするとプラズマを点火することができた. しかし, 針電極と円筒電極間に Fig. 4. 20 (c) のように火花放電が発生した. 放電後の針電極先端は Fig. 4. 19 (d) のように熱による変色は認められなかった.

針電極の先端半径が $25\ \mu\text{m}$ と 0.5 mm では強い発光とともに放電音が放電部から発生し, FM 直線検波器出力にも雑音を確認された. 同様に, 先端半径が 1 mm では火花放電の発生とともに放電音が放電部から発生し, FM 直線検波器出力にも雑音を確認された.

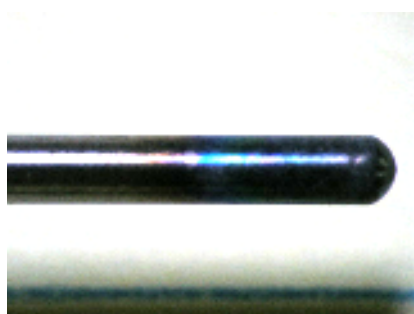
0.8 mm の先端半径の針電極では Fig. 4. 20 (b) のように安定したプラズマが形成される. このとき, 先端部には Fig. 4. 19 (c) のように熱による変色はあるが, 放電音および FM 検波器出力に放電による雑音は発生しなかった. 先端半径が 0.8 mm の針電極では不安定な放電に移行せずに放電電力を増加できることから, 以降の実験には先端半径が 0.8 mm の針電極を用いた.



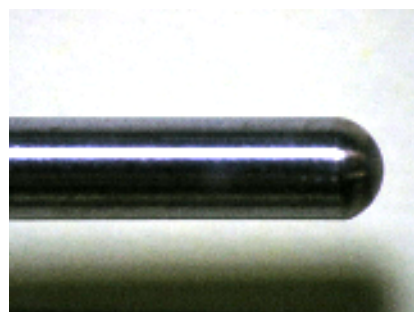
(a) $25 \mu\text{m}$



(b) 0.5 mm

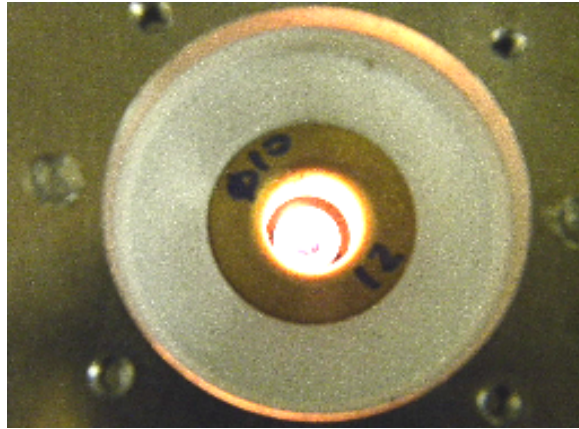


(c) 0.8 mm

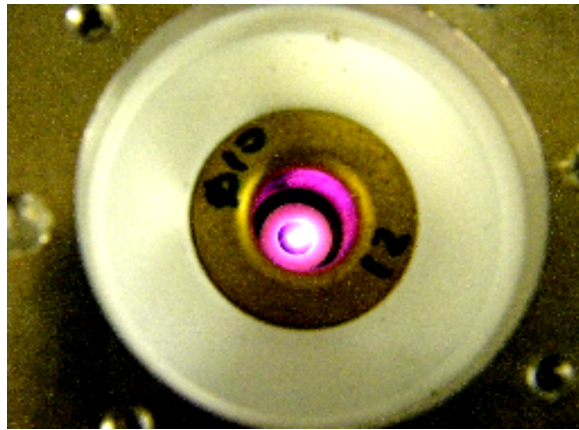


(d) 1.0 mm

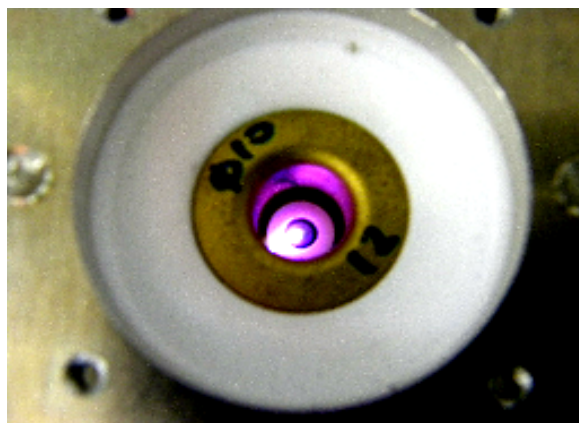
Fig. 4. 19 Needle electrode appearance after 10-minute discharge.



(a) $25\ \mu\text{m}$ and $0.5\ \text{mm}$



(b) $0.8\ \text{mm}$



(c) $1.0\ \text{mm}$

Fig. 4. 20 Appearance of discharge.

最適な円筒電極の寸法を検討するために、音波に対する応答と放電の安定性を検討した。Fig. 4. 21 は 0.5 L/min の窒素流における、長さ L が 15 mm の円筒電極の内径 D に対する 1 kHz の音波に対する最大値を基準にした応答である。針電極には先端半径 $25\ \mu\text{m}$ と $0.8\ \text{mm}$ のものを用いた。内径 D が小さくなるほど音波に対する応答は向上する。しかし、内径 D が 9 mm 以下になると、Fig. 4. 20 (c) と同様の火花放電が発生して放電音が発生し、音波に対する応答が低下する。このため、以降の実験には円筒電極の内径 D が 10 mm のものを用いた。

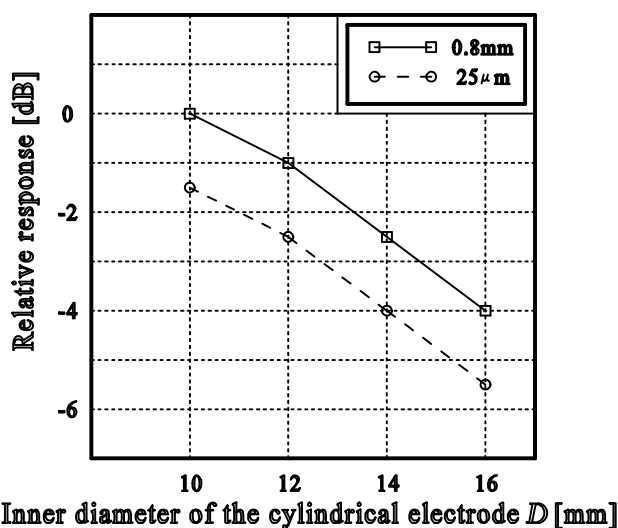


Fig. 4. 21 Response dependence on cylindrical electrode diameter.

Fig. 4. 22 は 0.5 L/min の窒素流における円筒電極内径 D が 10 mm のものを用い、円筒電極長さ L に対する 1 kHz の音波に対する最大値を基準とした応答である。針電極には先端半径 $25\ \mu\text{m}$ と $0.8\ \text{mm}$ のものを用いた。円筒電極の長さが 4 mm 未満では Fig. 4. 20 (c) と同様の火花放電が発生した。円筒電極の長さ L が 4 mm から 10 mm までは長さの増加にともなって音波に対する応答は向上するが、12 mm を超えると長さの増加に伴って応答は

低下する．このことから，針電極先端部付近のプラズマが主に音波に対して応答していると考えることができる．針電極先端半径が $25\ \mu\text{m}$ に比べ $0.8\ \text{mm}$ では応答が $2\sim 3\ \text{dB}$ 高い．これは針電極先端のプラズマに接している部分の面積が大きいことに起因すると考えられる．このため，以降の実験には針電極先端半径が $0.8\ \text{mm}$ のものを用いた．

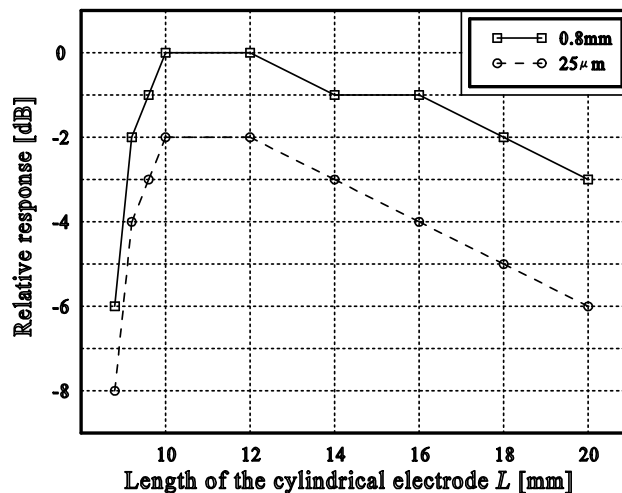


Fig. 4.22 Response dependence on cylindrical electrode length.

これまでの結果から信号対雑音比が大きくできる条件で測定した周波数応答と雑音のスペクトルを Fig. 4.23 に示す．先端半径が $0.8\ \text{mm}$ の針電極と，内径 D が $10\ \text{mm}$ で長さ L が $12\ \text{mm}$ の円筒電極の組み合わせである．窒素流は $0.5\ \text{L/min}$ である．同図から音波に対する周波数応答は概ね $-6\ \text{dB/オクターブ}$ の直線に沿っていることがわかる． $80\ \text{Hz}$ では $70\ \text{dB}$ ， $1\ \text{kHz}$ では $50\ \text{dB}$ を超える信号対雑音比を得ることができた．Fig. 4.5 に示した水平方向に形成したプラズマと比較すると，信号対雑音比は $80\ \text{Hz}$ で $11\ \text{dB}$ ， $1\ \text{kHz}$ で $22\ \text{dB}$ 以上高くなった．このため，以降の実験では，この放電電極の組み合わせと $0.5\ \text{L/min}$ の窒素流を用いた．

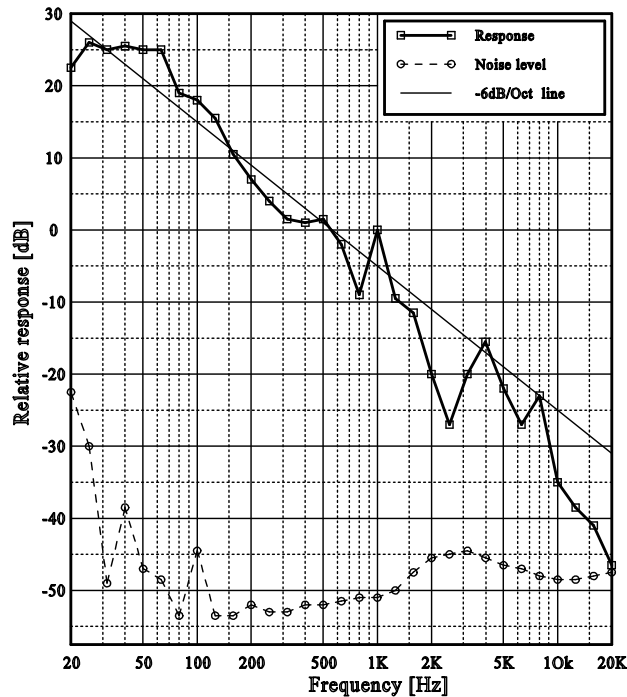


Fig. 4. 23 Frequency response and noise spectrum.

これまでの放電電極に関わる検討では針電極にはタングステン、円筒電極には銅合金を用い、電極表面には誘電体層を設けなかったが安定な放電を実現できた。このため、本実験で用いた高周波放電はバリア放電ではないと考えることができる。放電初期には放電音の発生と雑音の増加は確認されなかった。しかし、Fig. 4. 20 (c) のような火花放電が繰り返されるとFM直線検波器出力に不規則な雑音が発生した。このため、放電電極材料と表面処理の影響を検討した。火花放電はプラズマに呼気などの気流が加わったときと放電電力が過大なときに発生する。

Fig. 4. 24 は火花放電が発生した後の円筒電極の内壁の1例である。下部の小さな放電痕はプラズマに気流を加えたときに発生し、その上部の比較的大きな放電痕は過大な放電電力を加えたときに発生した。Fig. 4. 25 はプラズマに気流を加えたときに発生する火花放電である。

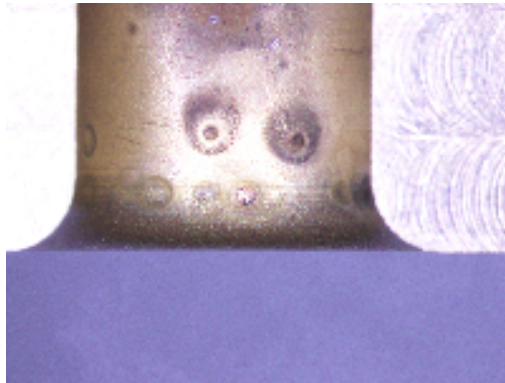


Fig. 4. 24 Discharge mark on brass cylindrical electrode.

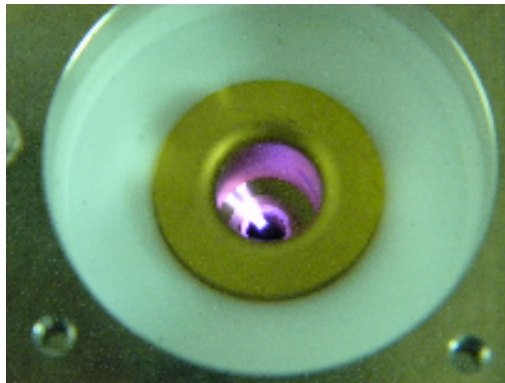


Fig. 4. 25 Appearance of spark discharge.

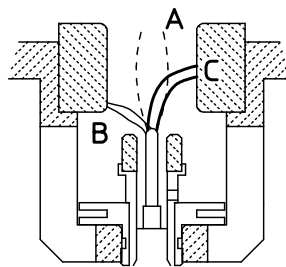


Fig. 4. 26 Spark discharge path.

Fig. 4. 26 は火花放電の放電経路である. A は火花放電が発生していないときのプラズマである. B は気流を加えたことによって発生した火花放電

の放電経路である。気流が加わることによって不活性ガス流が乱され、針電極から円筒電極内壁下部に火花放電が発生すると考えられる。Cは過大な放電電力が供給されたときに発生する火花放電の放電経路である。BとCのいずれの状況においても火花放電の発生によって円筒電極内壁には放電痕が残り、放電痕の部分と針電極の間に火花放電が繰り返される。これらの結果から、火花放電の発生によってプラズマの外側と円筒電極の内径の状態が不均一になったと考えられる。

これに対し、針電極先端は火花放電が発生しても Fig. 4. 19 (c) のように変色しているが放電痕を確認することはできない。このため、火花放電が発生した針電極先端をサンドペーパー (#1000) で研磨した後に再び放電させた。不定期な雑音は研磨前の針電極を用いたときと同様に発生した。Fig. 4. 27はこの針電極を用いて30分間放電させた後の針電極先端である。変色にむらがあることが確認できる。これらのことから、火花放電の発生によって両電極の表面が不均一になり、放電状態が時間変化することによって不定期な雑音が発生すると考えられる。

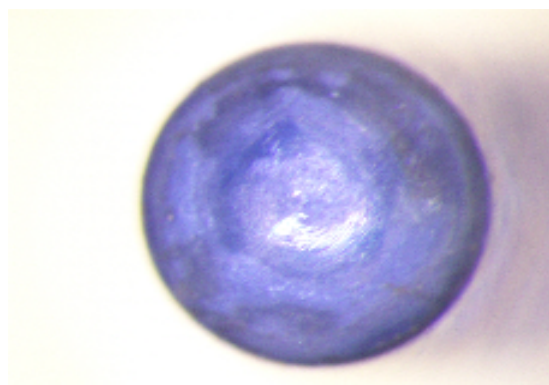


Fig. 4. 27 Tungsten needle electrode after 30 minute discharge.

このため、両電極をアルミニウムで製作し、表面をアルマイト処理した放電電極を検討した。アルミニウムには A5052 を用い、アルマイト層の厚みは $30\ \mu\text{m}$ である。

Fig. 4. 28 は 30 分間放電させた後の円筒電極内壁である。気流を加えても Fig. 4. 25 のような火花放電は発生せず、円筒電極内部に放電痕は認められない。

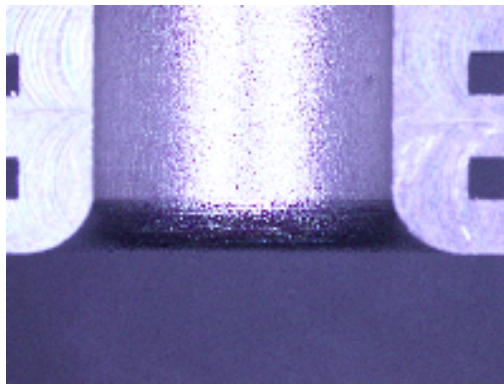
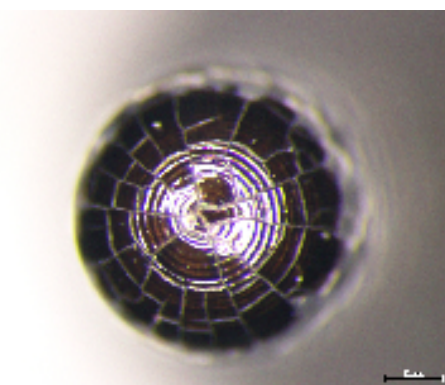


Fig. 4. 28 Inner wall of aluminum cylindrical electrode after 30 minute discharge.

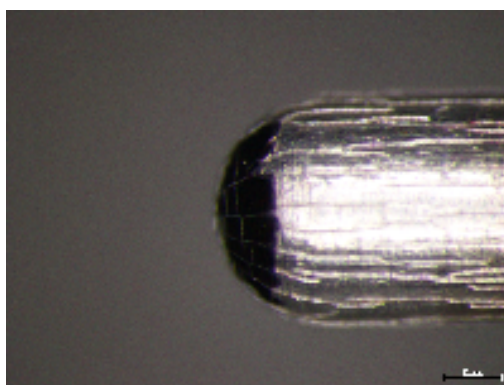
Fig. 4. 29 は 6 時間放電させた後の針電極の外観である。変色部はプラズマが発生している部分とほぼ同じであった。放電部に気流を加えるとプラズマは円筒電極内壁に接触するが、Fig. 4. 25 のような火花放電には移行しない。このように、放電電極表面に絶縁層を設けることによって放電電極間の電界の移動が制限され、火花放電が防止できると考えられる。

Fig. 4. 29 の電極表面にあるクラックはアルマイト加工時にアルマイト皮膜と素材であるアルミニウムの熱膨張係数の差によって発生する。室温では剥離しないが針電極が高温になるとクラックが有ることによってアルマイト層が脱落することがある。アルマイト層が剥離するとアルミニウ

ムが露出し，FM 直線検波器出力に雑音を発生させた．このためイオンマイクロホンを実用化するためには耐クラック性のあるアルマイト加工を検討する必要がある．



(a) Top of the needle electrode.



(b) Side of the needle electrode.

Fig. 4. 29 Aluminum needle electrode appearance after 6-hour discharge.

4. 3. 4 検波器および音波導入部の検討

これまで述べたように，不活性ガスと放電電極の検討によって信号対雑音比が改善される．しかし，これまでの検討によって信号対雑音比は改善したが FM 直線検波器には固有雑音があるため，固有雑音以下のレベルが検出できないことが明らかになった．このため，FM 直線検波器の復調感

度を高めて信号レベルを向上させる検討を行った。本実験で用いた FM 直線検波器はパルスカウント型である。復調感度を 3 倍にするために、復調周波数を従来の 1.8 MHz から 600 kHz に変更した。

Fig. 4. 30 は Fig. 4. 23 の周波数応答とノイズレベルを基準として FM 直線検波器の復調感度向上によって改善された信号対雑音比である。アルマイト処理したアルミニウム電極を用いたイオンマイクロホンに復調感度を高めた FM 直線検波器を用いたときには 160 Hz 以上の帯域では信号対雑音比が高まることが確認できる。復調感度の向上による音波に対する応答の向上は 10 dB であることから、10 dB を超える信号対雑音比の改善は放電電極をアルマイト処理したアルミニウム電極に変更したことによって雑音が低下したことによると考えることができる。しかし、160 Hz 未満の周波数帯域では信号対雑音比が改善されない。これは、放電電源に含まれる雑音成分と高周波放電によるものと考えられる。

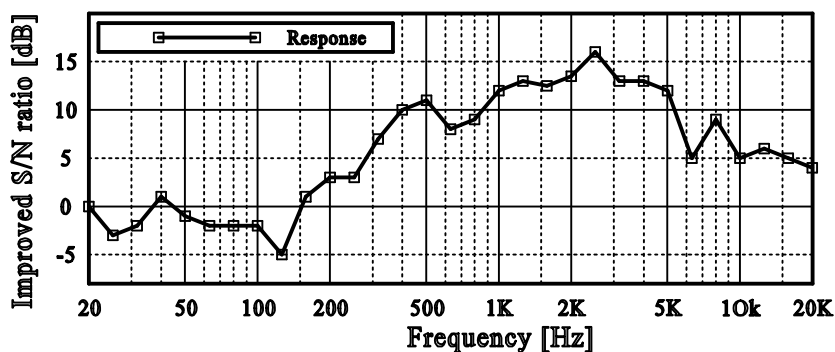


Fig. 4. 30 Increases in signal-to-noise ratio due to improved FM demodulator and anodized aluminum electrode.

FM 直線検波器の復調感度が改善されたことから、さらにイオンマイクロホンの音波に対する応答を高めることを検討した。初期のマイクロホンは音波による振動板の駆動力を向上させるためにホーンを音波導入部に

取り付けていた^[4]。ホーンはホーン内側の断面積が音波取入口から振動板部に向かって減少することから、振動板に加わる音圧を高めることができる。同様の方法でイオンマイクロホンの音波に対する応答を高めることを検討した。Fig. 4.31 はホーンを取り付けたときの放電部の組立断面図である。ホーンは加工が容易な半径 110 mm で設計したものを用了。

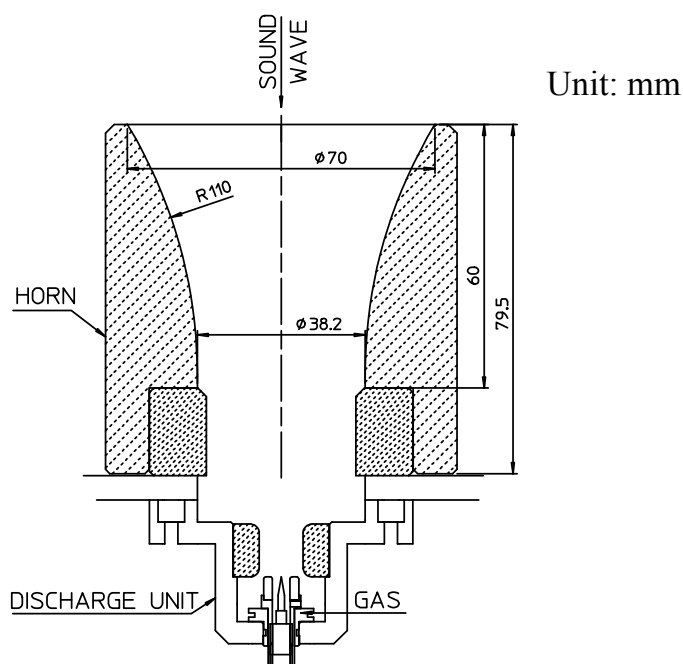


Fig. 4.31 Discharge unit with horn.

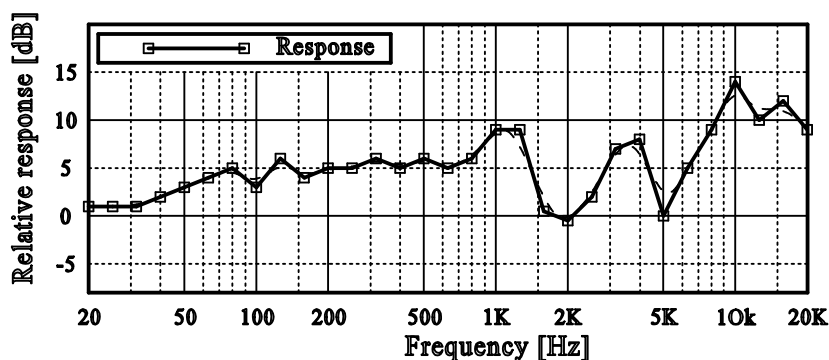


Fig. 4.32 Increase in responses caused by using horn.

Fig. 4. 32 は放電部に音圧レベル 94 dB の音圧を加え、ホーンを取付ける以前の周波数応答を基準として、ホーンを取付けたときに上昇した音波に対する応答である。50 Hz 以上の周波数帯域で音波に対する応答が改善されているが、2 kHz と 5 kHz では周波数応答に効果がみられない。ホーンを適切に設計することによって周波数応答の低下を軽減できると考えられる。しかし、現在用いられているマイクロホンにはホーンを用いたものが存在しないことから、ホーンを用いない音波の導入方法を検討する必要がある。

4.4 周波数応答と雑音のスペクトル

これまでに検討してきたイオンマイクロホンの最適条件を Table 4. 1 に示す. この最適条件を適用したイオンマイクロホンの音圧に対する周波数応答と雑音のスペクトルを Fig. 4. 33 に示す. 周波数応答は音圧レベル 94 dB の音波を加えて測定し, 1 kHz の応答で基準化したものである.

Table 4. 1 Optimum condition.

不活性ガス	ガス種	窒素	
	流量		0.5 L/ min
針電極	材料	アルミニウム	
	表面処理	アルマイト	30 μ m
	先端半径		0.8 mm
円筒電極	材料	アルミニウム	
	表面処理	アルマイト	30 μ m
	内径		10 mm
	長さ		12 mm
FM 直線検波器	復調周波数		600 kHz
音波導入部	ホーン	Fig. 4. 31	

最も高い信号対雑音比は 200 Hz で 78 dB である. これは, 楽音を收音するスタジオコンデンサマイクロホンと同等の信号対雑音比である. 200 Hz 以下の周波数では周波数が低くなるに従って雑音が増加し, 200 Hz 以上の周波数では周波数が高くなるに従って音波に対する応答が低下することによって信号対雑音比が低下する. しかし, 63 Hz から 1.25 kHz までの周波数では信号対雑音比が 60 dB 以上であることから, マイクロホンとして実用化できると考えられる.

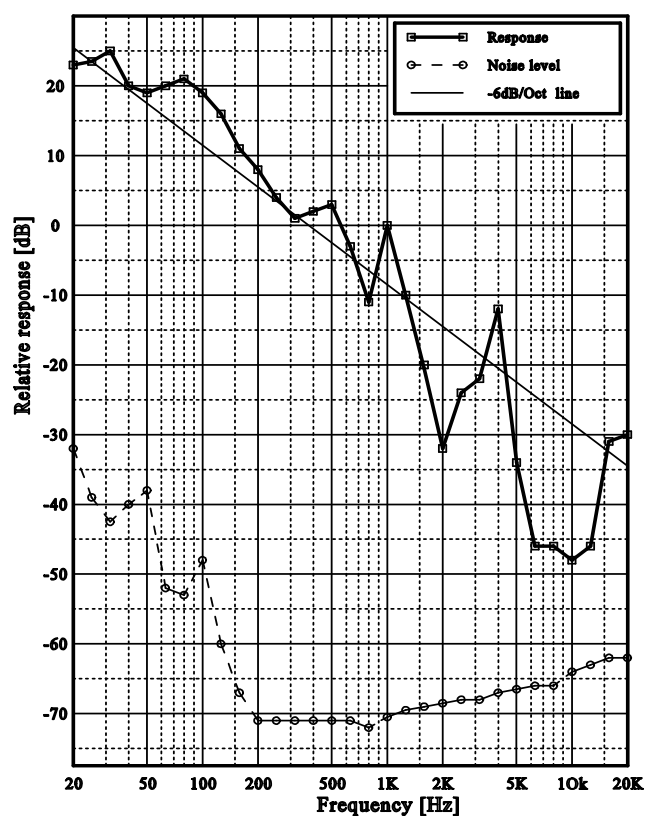


Fig. 4.33 Optimum frequency response and noise spectrum.

音波に対する応答は - 6 dB / オクターブの直線に沿った周波数応答である。空気の密度 $\rho = 1.21 \text{ kg / m}^3$ ，音速 $c = 343 \text{ m / s}$ とすると，平面波の音響インピーダンス Z_a は

$$Z_a = \rho c \quad (1)$$

である。音圧レベル 94 dB は音圧 1 Pa である。音圧 P を 1 Pa とすると，音波の粒子速度 u は

$$u = P / Z_a \quad (2)$$

であることから $u = 2.4 \times 10^{-3} \text{ m / s}$ である。

音波の粒子変位の振幅 ζ は

$$\zeta = u / 2 \pi f \quad (3)$$

となる^[5]。このため，音波の粒子変位振幅 ζ の周波数応答は - 6 dB / オクタ

ープの直線になる．このことから，イオンマイクロホンは音波の粒子変位の振幅に比例した応答が得られると考えることができる．

振動板を持つ双指向性リボンマイクロホンは音波の粒子速度に応答し，無指向性コンデンサマイクロホンは音波の音圧に応答する^[4]．振動板を持たない熱線を用いたマイクロホン^[6]は音波の粒子速度に応答し，レーザを用いたマイクロホン^[7]は音波の音圧に応答する．これらに対してイオンマイクロホンは音波に粒子変位の振幅に応答することが明らかとなった．

周波数が 1 kHz で音圧 $P=1$ Pa のとき，音波の粒子変位の振幅は $\zeta=3.8 \times 10^{-7}$ m である．周波数が 1 kHz のとき，イオンマイクロホンの信号対雑音比は 70 dB であるため雑音レベルでは音波の粒子変位の振幅は $\zeta=1.2 \times 10^{-10}$ m となる．このことから，イオンマイクロホンは nm オーダの音波の粒子変位振幅を検出できると考えられる．

Table 4.2 は音圧レベル 94 dB の音波をイオンマイクロホンに加えたときの基本波に対する全高調波歪+雑音のレベルの比である．周波数は基本波から 20 kHz までの帯域で測定した．500 Hz 以下の周波数では音波に対する応答が高いことから全高調波歪成分が支配的であり，5 kHz 以上の周波数では音波に対する応答が低下するため雑音成分が支配的であると考えられる．200 Hz から 5 kHz までの帯域の高調波歪+雑音は 2 %以下であることから，高調波歪+雑音はこれまで測定してきたイオンマイクロホンの音波に対する応答に大きな誤差を与えない．また，1 kHz の基本波に対する全高調波歪+雑音の比は 1 %以下であることから，このイオンマイクロホンのダイナミックレンジは 70 dB 以上であることがわかる．

Table 4.2 Total harmonic distortion plus noise.

周波数 [Hz]	THD+N [%]
200	1.9
500	1.6
1k	0.38
2k	0.38
5k	1.7

4. 5 まとめ

第3章までのイオンマイクロホンは音圧レベル94 dBの音波に対する応答が低く信号対雑音比は15 dB程度であった。このため、信号対雑音比を改善する検討を行なった。本章で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 平板電極を円筒電極に替えることでプラズマと電極の間の静電容量が増加して、音波に対する応答を高めることができた。プラズマを上方に向けることによって放電電力を増加させることができたが、放電電力の増加に伴い不安定な放電が発生した。不活性ガス種と流量、放電電極の寸法と表面処理を最適化することによって安定な放電を実現できた。さらに、FM直線検波器の検波感度を向上させることによって信号対雑音比を改善し、音波導入部にホーンを用いることによって加えた音圧に対する応答を高めることができた。

(2) イオンマイクロホンの信号対雑音比は特定の周波数帯域ではあるが、既存の振動板を持つコンデンサマイクロホンと同等のレベルに達した。さらに、FM直線検波器を改善することによって中高域の信号対雑音比を向上させることが見込めるが、低域の雑音は電源装置を含めた放電部の改良が必要である。

(3) イオンマイクロホンの音波に対する応答は -6 dB /オクターブの直線に沿った周波数応答である。このことから、プラズマと針電極に対向する電極間に形成される静電容量の変化は音波の粒子変位の振幅に依存すると考えることができる。1 kHzにおける粒子変位の振幅の検出限界は nm オーダであることが明らかになった。

参考文献

- [1] 秋野, 下川: 日本音響学会誌, **68**, No. 5, pp. 224-231, (2012)
- [2] 秋野, 下川: 日本音響学会誌, **69**, No. 10, pp. 529-537, (2013)
- [3] 日本学術振興会 プラズマ材料科学第 153 委員会編:
大気圧プラズマ基礎と応用, オーム社, pp. 246-251, (2009)
- [4] H. F. Olson 西巻訳: 音響工学, 近代科学社, pp. 286-326, (1959)
- [5] 大野, 山崎: 機械音響工学, 森北出版, pp. 9-11, (2010)
- [6] H. E. de Bree, P. Leussink, T. Korthorst, H. Jansen,
TheoS. J. Lammerink, M. Elwenspoek: Sensors and Actuators,
A54, pp. 552-557, (1996)
- [7] 園田, 芦川: 音響学会講演論文集, pp. 605-606, (1997. 3)

第5章 結論

5.1 まとめ

本論文ではイオンマイクロホンに関わる検討を述べてきた。これまでに、イオンマイクロホンの可聴周波数帯域での応答を示す先例を見出すことができなかった。このため、低温プラズマを用い、放電電流を検出する方法ではイオンマイクロホンを実現できないことを明らかにした。これに対し、高温プラズマを用いる方法では、発振周波数偏移から音波に対する応答を検出することに初めて成功した。放電を安定化し、検波感度と音波の導入方法を改善することによって、イオンマイクロホンが実用化できることを示した。これらに関わる結果については各章ごとに結論として述べられている。ここでは要点のみを記述する。

(1) コロナ放電で発生させた低温プラズマは放電音が発生し、目的音の音圧が小さいときには收音が不可能である。放電電流に含まれる雑音成分が大きいことに対して音波に対する応答が低い。このため、コロナ放電で発生させた低温プラズマではイオンマイクロホンを実現することは不可能であった。

(2) 高周波放電で発生させた高温プラズマは平板電極の間に静電容量を形成する。この静電容量は音波に応答し、帰還発振器の発振周波数偏移として検出できる。発振周波数偏移をFM検波することによって加えた音波に対する音声信号が得られる。

(3) 高温プラズマ全体が音波に応答し、既存の音波の粒子速度を検出するリボンマイクロホンに比べ、高い周波数まで音波の粒子速度に応答する。

(4) 電極構造と材料、および電極を保護する不活性ガスを加える方法を

適切に設計することによって、放電にともなう電極の損耗や雑音の発生を抑えることができる。

(5) イオンマイクロホンの音圧に対する周波数応答は $1/f$ の直線に近似し、音波の粒子変位の振幅に比例する。

(6) $1/3$ オクターブバンドパスフィルタを用いた 1 kHz での信号対雑音比は 70 dB を超える。音圧レベル 94 dB での音波の粒子変位の振幅は約 $2.4\ \mu\text{m}$ であり、雑音レベルでの音波の粒子変位の振幅は 0.12 nm である。このことから、イオンマイクロホンは 1 kHz の音波の 0.12 nm をこえる粒子変位振幅を検出することができる。

高周波放電で発生させた高温プラズマを用いることによってイオンマイクロホンが実現できることを明らかにした。可聴周波数の全帯域で動作することから音質に優れたマイクロホンを実現できると考えられる。

レーザーを用いて音波の密度変化を検出するマイクロホンは音波の音圧を検出し、熱線風速計と同じ方法で音波を検出するマイクロホンは音波の粒子速度を検出した。これらに対し、高周波放電を用いたイオンマイクロホンは音波の粒子変位を検出するマイクロホンであると考えられる。特に、低い周波数領域では音波の音圧に対する応答が高く、交番気流の風速を高い信号対雑音比で検出するセンサーとしての応用も考えられる。

5. 2 今後の課題と展望

本研究で検討した高温プラズマを用いるイオンマイクロホンは従来に無い音波の粒子変位を直接電気信号に変換するマイクロホンであるが、実用化には既存のマイクロホンに比べて以下の課題がある。

(1) 現在の実験装置は不活性ガス供給装置、FM 検波器と電源装置などを含めると、事務机 1 脚程度の大きさがある。イオンマイクロホンの放電部は小さいが、電子管を収納する外筐が必要である。実用化にあたっては全体の大きさを小型に設計する必要がある。

(2) 既存のマイクロホンの周波数応答は音圧に対して平坦であるのに対し、イオンマイクロホンの周波数応答は $1/f$ に沿うことから、フィルタ等を用いて音圧に対する周波数応答を補正する必要がある。一般にフィルタを用いると信号対雑音比が劣化することから、さらにイオンマイクロホンの音波に対する感度を向上させることが必要である。

解決すべき課題があるが、イオンマイクロホンの実用化が可能であると考えられる。今後、前記課題を解決して実際に使用されるマイクロホンの実用化を目指したい。

現在、マイクロホンにおいてもデジタル出力が要求されつつある^[1]。イオンマイクロホンでは音波によって発振周波数が偏移する。このため、FM 検波して電圧振幅変化に変換することなく、直接デジタル信号を出力することができると考えられる^[2, 3]。音波を電圧振幅に置き換えることなく直接デジタル信号に変換できる電気音響変換器の実現が望める。

参考文献

- [1] Audio Engineering Society, Inc: AES standard for acoustics, AES42-2010, Digital interface for microphones, (2006)
- [2] S. D. Feste, M. Bianchessi, N. Serina: US Patent. 5,886,656, (1999)
- [3] 秋野: 日本国特許 4,383,695, (2009), US Patent. 6,928,173, (2005)

謝辞

本研究を始めるにあたり、就学を許可下さった神奈川工科大学関係各位、(株) オーディオテクニカ松下取締役社長、相田元取締役役に厚く御礼申し上げます。本研究を進めるにあたり、終始御指導いただきました神奈川工科大学電気電子情報工学科下川博文教授に深く感謝するとともに厚く御礼申し上げます。本論文をまとめるにあたり神奈川工科大学電気電子情報工学科荒井俊彦教授、小室貴紀教授、板子一隆教授そして東京電機大学工学部情報通信工学科金田豊教授に貴重なご意見、ご指導をいただき御礼申し上げます。

幾徳工業大学（現神奈川工科大学）学部生であった当時にトランスデューサの魅力を教えてくださった小林武先生、当時から現在に至るまで公私にわたり御助言いただいた高島信哉先生、マイクロホン技術の楽しさを教えてくださった元（株）オーディオテクニカ秋庭吉男先輩、マイクロホン技術の基礎を教えてくださった元アイワ（株）溝口章夫博士、多くの先生、先輩、同僚そして後輩の皆さんに御世話になりました。心より感謝申し上げます。

大学院就学時には不在間に業務を負担いただいた（株）オーディオテクニカ技術部3課の皆さん、本研究に関して多くの御意見を下さった下川研究室の皆さんに感謝いたします。

最後に、応援してくれた家族、研究を陰でささえてくれた妻由美子に感謝します。

本研究に関する論文と特許

1. 論文

- (1) 秋野 裕, 下川博文

“大気圧プラズマを用いたイオンマイクロホンの基礎研究”

日本音響学会誌, Vol. 68, No. 5, pp. 224-231, 2012

- (2) 秋野 裕, 下川博文

“イオンマイクロホンのS/N比改善の検討”

日本音響学会誌, Vol. 69, No. 10, pp. 529-537, 2013

2. 国際会議（査読付き）

- (1) Hiroshi Akino, Hirofumi Shimokawa, Tadashi Kikutani and Jackie Green

“On the study of Ionic Microphone”, Convention Paper 8745

Audio Engineering Society 133rd convention

San Francisco, CA, USA, 2012 Oct 26-29.

3. 紀要等

- (1) 秋野 裕, 下川博文

“高周波放電を用いたイオンマイクロホンの基礎研究”

神奈川工科大学研究報告 B 理工学編, pp. 45-50, 2010.3.

4. その他

(1) 秋野 裕, 下川博文

“高周波放電を用いたイオンマイクロホンの基礎研究”

第33回 静電気学会全国大会, 東京都市大学

10pC-4, pp. 155-158, 2009.9.

(2) 秋野 裕, 下川博文

“高周波放電を用いたマイクロホンの検討”

日本音響学会 2010年春季研究発表会, 電気通信大学

1-5-21, pp. 701-704, 2010.3.

(3) 秋野 裕, 下川博文

“イオンマイクロホンの基礎研究”

第34回 静電気学会全国大会, 鳥取大学

15aC-15, pp. 263-266, 2010.9.

(5) 秋野 裕, 下川博文

“イオンマイクロホンの基礎研究”

日本音響学会 2011年春季研究発表会, 早稲田大学 西早稲田キャンパス 1-9-9, pp. 631-634, 2011.3.

(6) 秋野 裕, 下川博文

“高周波放電プラズマを用いたイオンマイクロホンの研究”

第35回 静電気学会全国大会, 東京理科大学 神楽坂校舎

13aC-13, pp. 261-264, 2011.9.

(7) 秋野 裕, 下川博文

“高周波放電を用いたイオンマイクロホン”

日本音響学会 2012 年春季研究発表会, 神奈川大学 横浜キャンパス 3-1-10, pp. 773-776, 2012.3.

(8) 秋野 裕, 下川博文

“イオンマイクロホンの改善に関わる検討”

第 36 回 静電気学会全国大会, 八戸工業大学 13pC-5, pp. 135-138, 2012.9.

5. 特許

- (1) 日本国 特許 4,860,520 号, “ヘッドホン”
- (2) 日本国 特許 5,281,428 号, “マイクロホン”
- (3) 日本国 特許公開公報 2011-15337, ”電気音響変換器”
- (4) 日本国 特許公開公報 2011-188037, “電気音響変換器”
- (5) 日本国 特許公開公報 2011-205298, “電気音響変換器およびその製造方法”
- (6) 米国 特許 US 8,311,246 B2, “MICROPHONE”