

[研究論文] 高周波放電を用いたイオンマイクロホンの
基礎研究

秋野裕¹・下川博文²

1 博士前期課程電気電子工学専攻

2 電気電子情報工学科

On the Study of a RF Discharge Ionic Microphone

Hiroshi AKINO¹, Hirofumi SHIMOKAWA²

Abstract

This study examined about possibility of the ionic microphone, which works with RF discharge. RF discharge that is circuit configuration of harmonic oscillator produces plasma, and it moves at particle velocity of the sound wave. Consequently oscillation frequency deviation corresponds to the particle velocity of the sound wave. It was possible to obtain the audio signal, when the modulated signal was demodulated. This ionic microphone could response in audio frequency range. Particle velocity frequency response was higher than the ribbon microphone.

Keywords: ionic microphone, RF discharge, atmospheric plasma, particle velocity

1. はじめに

マイクロホンは一般に音響振動を機械振動に変換し、この振動速度あるいは変位を電気信号に変換している。しかし、機械振動する振動板が存在することによって收音できる周波数帯域に制限がある。振動板を持たないマイクロホンが実現できればこの問題を解決できると考えられる。本研究では振動板を持たないマイクロホンの一つであるイオンマイクロホンを実現するための基礎を検討した。

2. 先行技術と本研究について

2.1 実用化されているマイクロホン

音圧を検出する圧力マイクロホンと音波が伝搬するときに発生する粒子速度を検出する速度マイクロホンがある。圧力マイクロホンの代表的なものには携帯電話で使用されるマイクロホンや音圧計測に用いられる標準マイクロホンがある。粒子速度を検出する速度マイクロホンの代表的なものには双指向性リボンマイクロホンがある。このように振動板を駆動する方式には圧力型、速度型、そして

圧力型と速度型を組み合わせたものがある。振動板の機械振動を電気信号に変換する方法には炭素、電磁、コンデンサ、圧電などが用いられる。機械振動する振動板には質量と弾性があることから共振する。駆動力を得る方法と機械電気変換する方法の組み合わせによって周波数応答を平坦にするために質量制御、抵抗制御、弾性制御の制御方式のいずれかが適用される。質量制御では收音帯域の下限に、抵抗制御では收音帯域の中央に、そして弾性制御では收音帯域の上限に振動板の共振周波数を設定し電気音響変換器は設計される[1,2]。しかし共振周波数が存在することからマイクロホンの收音帯域は制限される。

2.2 振動板を持たない電気音響変換器

振動板を持たないマイクロホンには熱線形のように音波の粒子速度を検出するものとレーザを用い空気の密度変化を検出するものがある[3-5]。スピーカにおいては振動板を持たないイオンスピーカが実現されている。音声周波数で振幅変調された高周波放電によって空気が膨張、収縮

し音波が放射される。振動板を持たないために周波数に依存せず一定の電気入力に対して一定の音圧出力が得られるとされる[1,6-10]。帰還発振器を用いたイオンスピーカにおいては入力された電気信号で発振周波数が偏移することが報告されている[10]。このことからプラズマに音波が作用することによって発振周波数が偏移することが予測できる。コンデンサマイクロホンで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するものが実用化されている[11,12]。このため前記プラズマに音波が作用して周波数偏移した信号を復調することによって音声信号が得られると考えた。

2. 3 放電と音波の関係

音波と放電の関わりについては音圧と粒子速度双方が放電の広がりに影響を与えることが報告されている[13]。放電と風速の関係においてはイオン風速計が風速変化に対する応答性と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[14]。放電を用いたマイクロホンとして直流グロー放電を用いたものが提案されているが実用に至ったか否かは不明である[15]。用語としての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.] とあるが、前記の直流グロー放電を用いた提案以降これに関わる先例を見出すことはできなかった[16]。

2. 4 本研究のねらい

予備実験で直流コロナ放電の放電電流を検出する方法を試みたが、イオン風とコロナ放電特有のパルス状電流に加え放電線の振動や放電音の発生からマイクロホンの実現は不可能であった。

本研究では高周波放電によるプラズマに音波を加えて音波の粒子速度を検出することをねらいとした。

3. 実験装置

3. 1 回路と接続

Fig. 1 に電子管 6DQ6B を用いた発振器を、Fig. 2 には測定系の構成を示す。帰還路には高周波放電部があり、発振周波数は共振コイルと周波数調整用バリコン VC で設定する。発振周波数は概ね 27 MHz である。共振コイルに隣接

させた検出コイルで発振信号を取り出し、直線検波器で周波数偏移を測定し、検波出力から音声信号を出力した。VC は 50 pF、電子管のプレート電圧は 250 V である。コイルデータは Table 1 に示す。

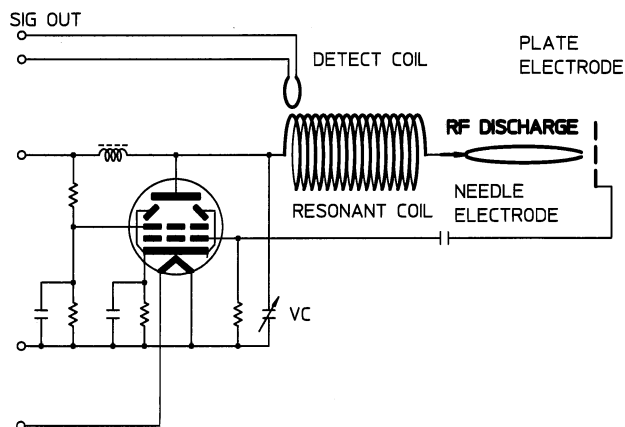


Fig. 1 Discharge generation circuit using electron tube

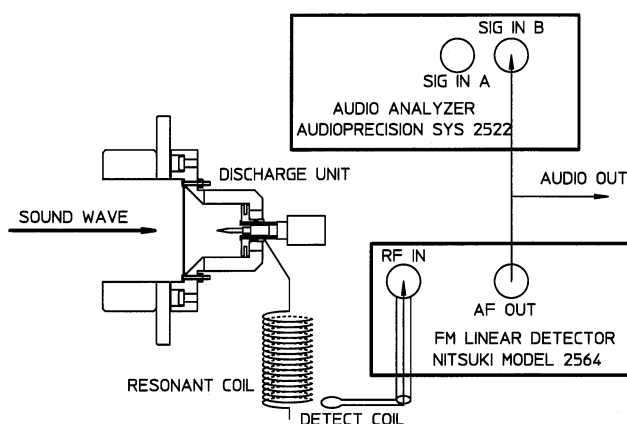


Fig. 2 Experimental setup

Table 1

共振コイル	線径	1 mm
	巻径	30 mm
	巻線間隔	4 mm
	巻数	27 T
検出コイル	線径	1 mm
	巻径	10 mm
	巻数	1 T
共振コイルと検出コイルの間隔		
	軸間距離	25 mm

3. 2 放電電極

Fig.3 に示す音波を透過させる複数の開口のある平板電極に火花放電を防止するセラミック被覆を施し, 先端曲率半径が約 25 μm のタングステン針電極を対向させた. Fig.4 は電極の配置状況である. 針電極は平板電極側に 5 mm 移動できる構造とした. 針電極と平板電極の諸元を Table 2 に示す.

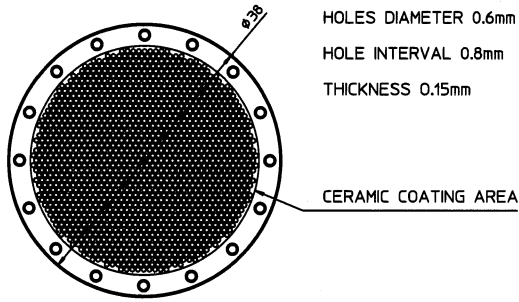


Fig. 3 Plate electrode

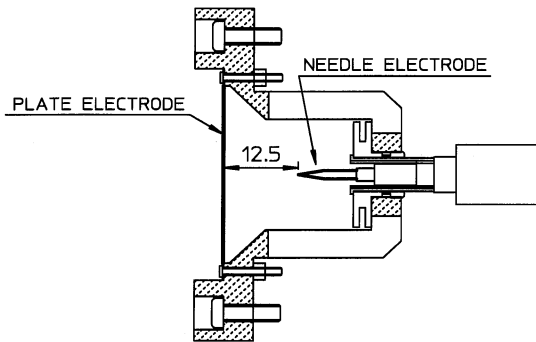


Fig. 4 Discharge unit

Table 2

針電極	素材	タングステン
	先端半径	約 25 μm
平板電極	素材	ステンレス
	板厚	0.15 mm
平板電極セラミック被覆	主成分	シリカ粒子
	被覆厚	約 0.2mm

4. 実験結果と考察

4. 1 高周波放電の発生

平板電極表面にセラミック絶縁層を設けることによって火花放電に移行することなく安定な放電を発生させることができた. 電子管のプレート側に共振コイルがあるこ

とから放電が無い状態でも発振が始まる. この状態で針電極に小さな火花放電を発生させることによって持続放電が始まる. Fig. 5 は放電の状況である.

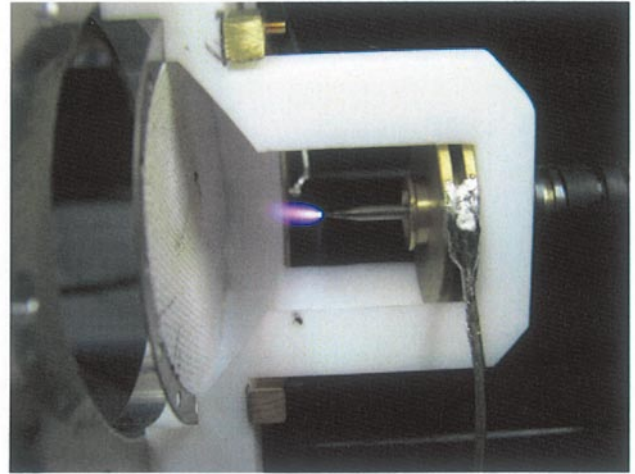


Fig. 5 Aspect of the RF discharge

放電が始まると発振周波数が下降する. 周波数調整用のバリコンで周波数を調整し, 検出コイルからの発振波形をほぼ正弦波に近づけると安定した放電炎とすることができる. 放電炎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で約 80 mA, 放電時では約 130 mA であった. 放電によって発生したプラズマによって平板電極との間にコンデンサマイクロホンと等価な静電容量が形成されたと考えられる. プラズマがコンデンサマイクロホンの振動板に, 平板電極がコンデンサマイクロホンの固定極にそれぞれ相当すると考えることができる. Fig.6 はその模式図である.

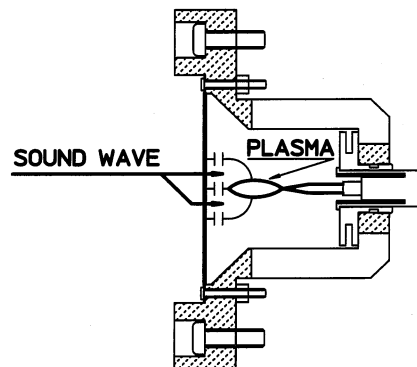


Fig.6 Plasma and equivalent capacitance

針電極を平板電極側に 7.5 mm から 12.5 mm まで移動させたときの放電時と非放電時の発振周波数差を Fig. 7 に示す. 9 mm から 12.5 mm の範囲では電極間隔と発振周波

数差に直線関係がある。これは電極間隔が狭まるにしたがってコンデンサマイクロホンに例えると振動板の有効面積が大きくなったことと等価になると考えることができる。9 mm 以下の電極間隔では直線性が損なわれる。これはプラズマが平板電極に近接し等価的コンデンサが損なわれることが原因と考えられる。

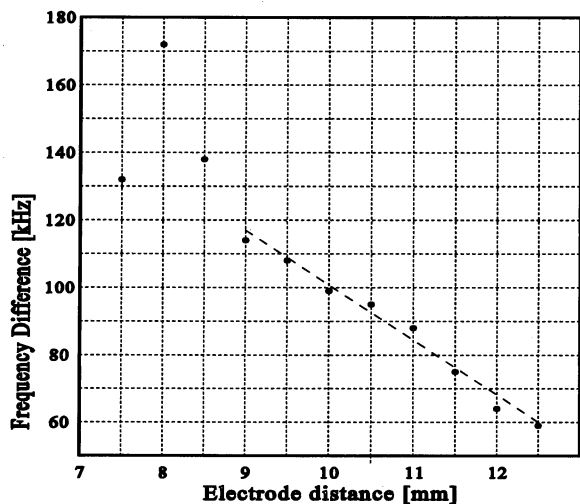


Fig. 7 Frequency difference vs. electrode distance

4. 2 電極間隔と周波数偏移

電極間隔と音波による発振周波数の偏移を測定した。Fig. 8 の構成で 100 Hz の音波を放電部に直接加える方法で行った。音圧は 94 dB SPL (1Pa) である。Fig. 9 は電極間隔と発振周波数偏移の関係である。電極間隔が 9.5 mm ~ 12.5 mm の範囲であるとき電極間隔と音波による発振周波数偏移が比例関係にあることがわかる。ここでも 9.5 mm より電極間隔が狭まると放電炎が平板電極に近接して等価的なコンデンサの関係が損なわれると考えられる。

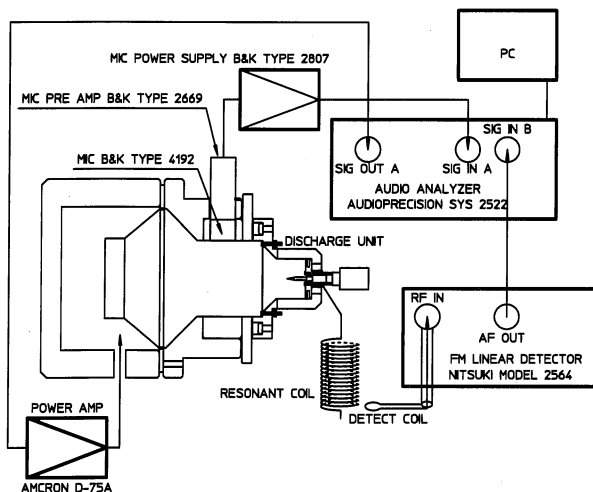


Fig. 8 Setup for diffusion sound source measurement

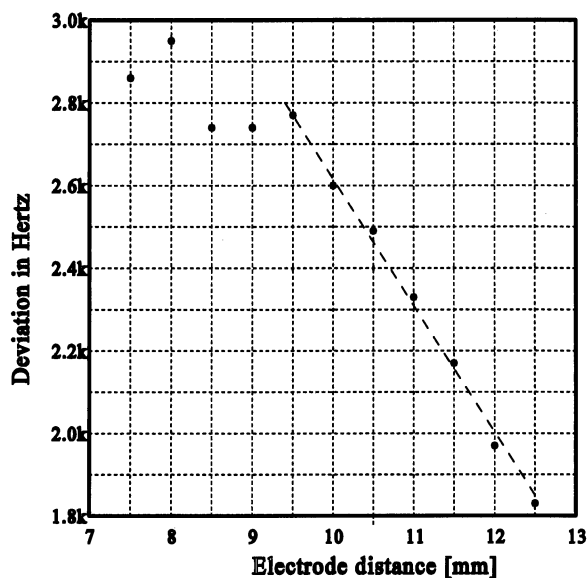


Fig. 9 Deviation vs. electrode distance

4. 3 球面波による粒子速度の検出

音圧傾度で動作するマイクロホンでは音源からの距離を近接させることによって低域の周波数応答が周波数の低下に応じて上昇する近接効果によって粒子速度による応答を容易に確認することができる[17]。Fig. 8 の構成で音波は放電部付近で拡散することから球面波が発生し、周波数は低くなるほど粒子速度成分は増加する。Fig. 10 に音波の周波数に対する発振周波数の偏移を示す。100 Hz 以下の周波数帯域では近接効果の直線に良く一致している。100 Hz から 1 kHz の帯域での周波数偏移の低下はスピーカ前部の空洞による音響インピーダンスの影響と考えられる。

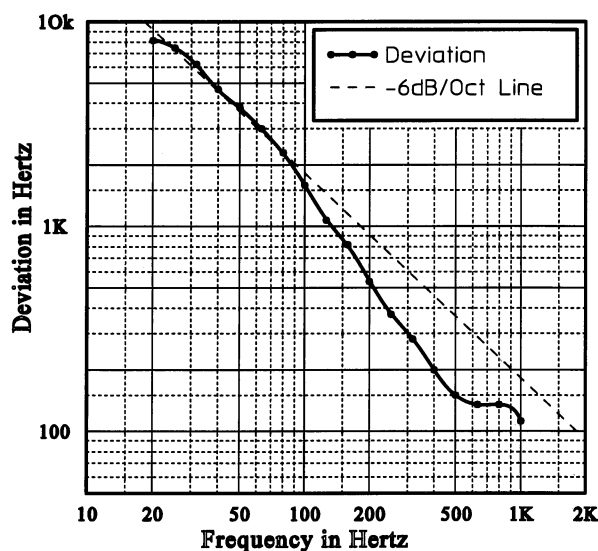


Fig. 10 Deviation vs. sound frequency

4. 4 可聴周波数での応答

音源から 5 cm イオンマイクロホンを離して実際に接話マイクロホンとして使用される状況を模して音波に対する応答を測定した。音圧は 124 dB SPL である。S/N が極めて低いことから 1/3 オクターブバンド幅フィルタを通してレベルを測定した。Fig. 11 では音波に対する出力レベルが概ね -6 dB/Oct の直線上にあることが確認できる。このことから可聴周波数帯域では音波の粒子速度に反応していると考えられる。雑音成分は発振器の発振が開始すると増加し、放電の有無によって大きく変化しない。発振を停止させると雑音は直線検波器の自己雑音まで低下する。雑音は発振器が帰還発振器であることと電子管を用いていることから周波数の安定度が低いことに起因すると考えられる。一般のマイクロホンが測定される条件での S/N は 6 dB と極めて低い。

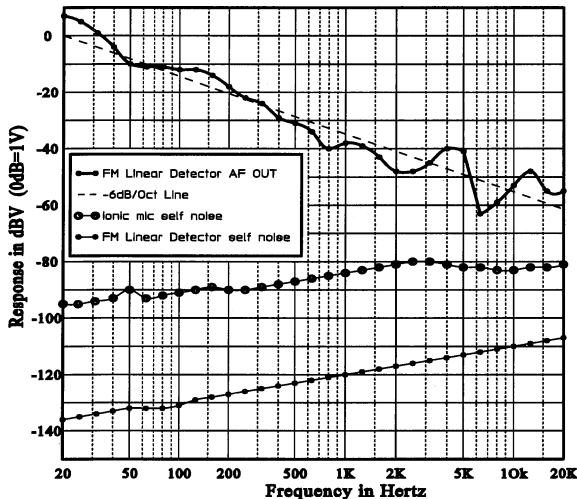


Fig. 11 Frequency response and noise spectrum

4. 5 リボンマイクロホンとの比較

双指向性リボンマイクロホンは音波の粒子速度に比例した出力を得ることができる[1]。市販の小型リボンマイクロホンと比較した。Fig. 11 の測定方法と同様に測定した。Fig. 12 はイオンマイクロホンと双指向性リボンマイクロホンの出力レベルの相対比較である。リボンマイクロホンでは 500 Hz 以上の周波数帯域では周波数応答が平坦になり近接効果が無くなっている。イオンマイクロホンにおいては 20 kHz 付近まで近接効果が確認できる。これは既存の音圧傾度型マイクロホンの音響端子間距離が極めて短いものと等価であり、高い周波数まで粒子速度成分を捉えていると考えることができる。

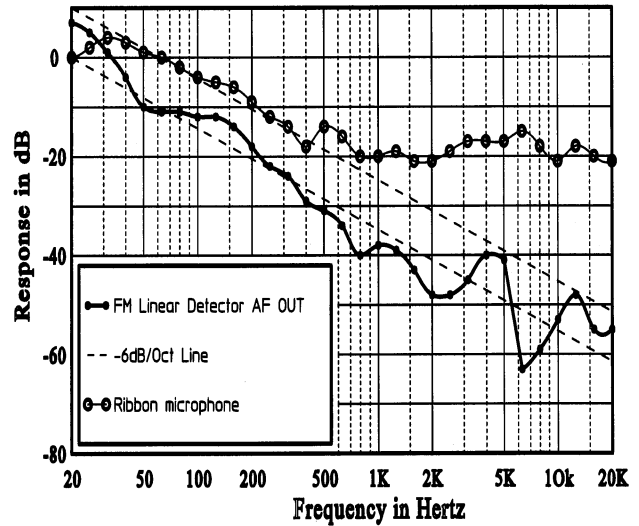


Fig. 12 Comparison for ionic microphone and ribbon microphone

4. 6 放電による音波の発生

発振回路はイオンスピーカとして用いられてきた回路構成であることから放電部から音波を発生させることができる。しかしマイクロホンにとって音波の発生は不都合である。電子管に供給する電源にハムなどの雑音成分が含まれているときには聴感でも音波の発生が確認された。このため電源に十分な安定化と低雑音化を施すことによって電源に関わる音波の発生を抑えることができた。Fig. 13 の構成で放電部の平板電極から 10 mm の位置に 1 インチ計測用マイクロホンを音響的に結合させて放電音を測定した。

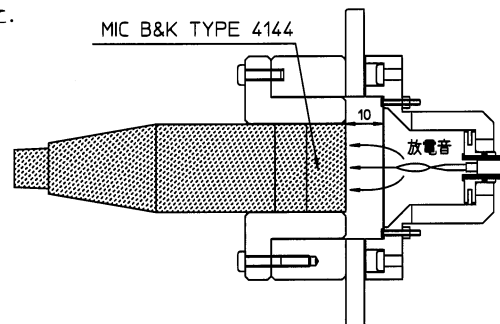


Fig. 13 Discharge noise measurement setup

Fig. 14 に放電音の周波数成分を示す。レベルの測定には 1/3 オクターブバンド幅フィルタを用いた。プロットはフィルタの中心周波数である。放電による音波の発生が無いときには無響室と計測用マイクロホンの測定限界に近い極めて低いレベルであった。この状態では聴感補正 (A ウェイト) フィルタを通したレベルでも 20 dB SPL 以下であることからスタジオ用マイクロホンとしても十分なレベ

ルであった。しかし、不定期に放電音が発生し、この周波数成分は約 2 kHz をピークとした 6 dB/Oct の周波数成分をもつことが確認された。不定期な放電音の発生頻度は表面処理に依存する。針電極がタングステン生地、金メッキ、白金メッキの順に発生頻度は低下するが、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。

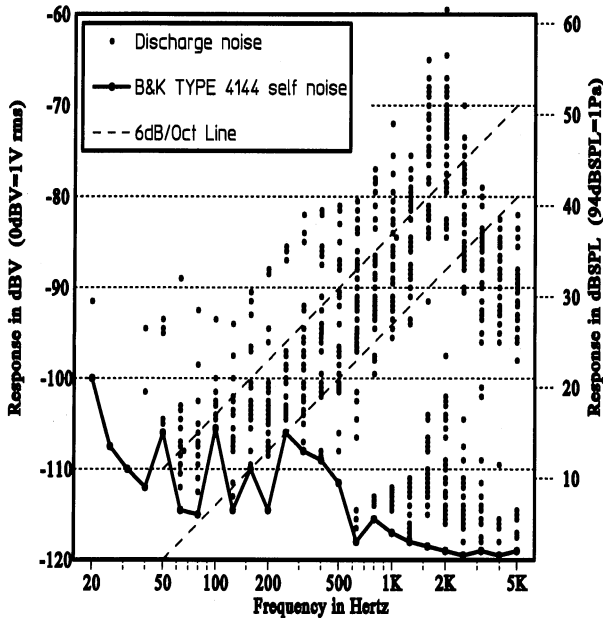


Fig. 9 Discharge noise spectrum

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 高周波放電を用いることによってプラズマが形成され、これと平板電極間の静電容量が音波の粒子速度で変化する。帰還発振器ではこの変化が周波数偏移として検出でき、これを復調することによって音声信号を取り出すことができる。
- (2) 可聴周波数帯域では音波の粒子速度に応答し、リボンマイクロホンと比較しても高い周波数まで粒子速度に応答している。
- (3) 高周波放電が発生する放電音はマイクロホンとして十分に低いレベルにすることができる。しかし不定期に発生する放電による音波の発生はマイクロホンとして不都合である。

今後、放電音の低減と低雑音発振器を検討しマイクロホンとして実用化を目指したい。併せて可聴周波数帯域外の収音も検討する。

参考文献

- [1] H. F. OLSON, 西巻正郎訳: 「音響工学」, 近代科学社, p286-326, (1959).
- [2] 伊藤毅: 「音響工学原論」, コロナ社, p472, (1955).
- [3] H. E. de Bree *et al.*, *Sensors and Actuators*, A 54, P552-557, (1996).
- [4] 松島功: 特開平5-227597, 工業技術院.
- [5] 園田義人, 芦川直子: 日本音響学会講演論文集, p605-606, 平成9年 3月.
- [6] Klein, S: *Acoustica*, Vol. 4, p77-79, (1954).
- [7] 高分子学会編: 「静電気ハンドブック」, 地人書館, p508-510, 昭和42年.
- [8] F. Bastien: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 20, p1547-1557, (1987).
- [9] 菊原治: 「ラジオ技術」, アイエー出版, p61-64, 1998 (12).
- [10] 山口侃: 「ラジオ技術」, アイエー出版, p106-107, 1999 (2).
- [11] H. J. Griese: *J. Aud. Eng. Soc.*, vol. 14 (17), p329-334, (1965).
- [12] 中村仁一郎: 「放送技術」, 日本放送協会, p149-154, 昭和57年9月.
- [13] 中根, 大塚, 宮島, 須山: 日本大学生産工学研究報告A, 第38巻 第1号, p29-34, 2005(6).
- [14] 浅野, 衣川: 静電気学会誌, Vol. 10 (2), p123-130, (1986)
- [15] P. Thomas: US Patent 1,626,648., (1924)
- [16] IEC 60050 International Electrotechnical Vocabulary Details for IEV, number 801-26-22, IEC 2009
- [17] 中島平太郎: 「オーディオ工学」, 実教出版, p35-36, (1973)