

## 相変化を利用したスピーカ\*

武岡 成人\*<sup>1</sup> 柴田 隼吾\*<sup>1</sup> 山崎 芳男\*<sup>1</sup>

【要旨】 現在広く使われているダイナミックスピーカの基本原理は約 80 年間変わっておらず、音質の向上を目指した結果ホーンを併用していた真空管増幅の時代と比しても変換効率は下がっている。我々はこれまで超伝導を用いたスピーカや振動板のないマイクロホン提案してきた。本稿では、媒質の相の変化に伴う体積変化に着目し高効率電気音響変換を目的とした電気音響変換システムを提案する。相変化に伴う体積変化と音響出力の関係を考察し、制御方法の提案を行った。それら提案手法に関して NaCl 水溶液を用い各種測定を行い歪の低減、媒質濃度及び再生装置に関して検討した。

キーワード 電気音響変換器, 通電加熱, 気相, 液相, プリディストーション

Electroacoustic transducer, Joule heating, Gas phase, Liquid phase, Pre-distortion

## 1. ま え が き

現在広く使われている電気音響変換器, ダイナミックスピーカは 1925 年にアメリカの C.E. Rice と E.W. Kellogg により発表されたものに基づいている。その後様々な検討が積み重ねられ今日の性能を得るに至っているが、その原型は 80 年近く変わっていないと言える。電気音響変換効率に着目すると真空管増幅器の時代でこそホーンを併用し 10% 近くあったが、近年ではトランジスタの登場などもあり容易に大出力が得られることから性能に重きが置かれ 1% 以下となっているのが現状である。

我々はこれまでエッジやダンパによる損失をなくした超伝導スピーカ [1] やコンデンサスピーカ [2] を用いた高効率電気音響変換機, 従来のマイクロホンでは困難であった広い收音面積を持つ振動板のないマイクロホンの提案 [3] を行ってきた。また、近年は熱音響効果を用いた熱音響システムの研究 [4] も行っている。

ところでエネルギー変換効率の高いシステムとして火力発電や原子力発電が挙げられるがこれらは 17 世紀に発明された蒸気機関の原理に基づいている。蒸気機関は水の液相, 気相への相変化時に起こる圧力変化を利用して動力を得ている。また、近年ペルチェ素子に代表される熱電変換素子の研究も行われており小規模での熱電変換も少しずつではあるが可能になってき

ている。

そこで本稿では高効率電気音響変換を目的にこれまであまり注目されてこなかった相変化に着目し、塩化ナトリウム水溶液を用いたスピーカの試作, 実験を行ったので報告する [5]。将来的には相変化に伴う体積収縮を利用した測定音源など様々な応用が考えられる。

## 2. 相変化の音源としての利用

## 2.1 水の相変化

多くの物質は固体, 液体, 気体の三つの状態からなり、それぞれ固相, 液相, 気相と呼ばれる。物質は周囲の圧力と温度などの物理量の変化によってある相から別の相へ変化し、相が変化することにより物質の性質や体積などの状態が変化する。

水を例にとると、1 気圧では 0°C 以下が固相, 0°C ~ 100°C で液相, 100°C 以上で気相へと変化していく。

一般的に最も体積変化が大きい相変化は液相から気相への変化時の気化膨張である。例えば水の場合、1 気圧における水蒸気の 100°C での状態方程式は、 $P = 1 \text{ atm}$ ,  $R = 0.082 \text{ atm}/^\circ\text{C}\cdot\text{mol}$ ,  $T = 373 \text{ K}$ ,  $n = 1/18 \text{ mol/g}$  とすれば、

$$V = \frac{nRT}{P} \quad (1)$$

$$= 1.6922 \quad (2)$$

となる。水  $1 \text{ mm}^3$  が理想状態で水蒸気になると  $1,692 \text{ mm}^3$ , 約 1,700 倍もの体積になる。二酸化炭素 (ドライアイス) の常温での固相から気相への相変化で約 750 倍, 液体窒素の気相への相変化では約 700 倍の体積膨張となる。

ここで 1 kHz の正弦波を音圧レベル 100 dB で出力する点音源について考える。時間平均の音響出力  $\bar{W}$  は、

\* Phase-change loudspeaker,  
by Shigeto Takeoka, Jungo Shibata and Yoshio Yamasaki.

<sup>1</sup> 早稲田大学大学院国際情報通信研究科  
(問合せ: 武岡成人  
e-mail: takeoka@acoust.rise.waseda.ac.jp)  
(2005年3月31日受付, 2005年9月9日採録決定)

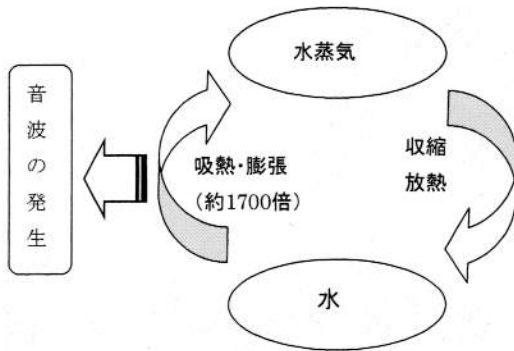


図-1 水の液気相変化と音波の発生

$A$ : 点音源の強さ ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $\rho_0$ : 空気の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  
 $c$ : 音速 ( $\text{m}/\text{s}$ ) とすると

$$\bar{W} = \frac{\rho_0 \omega^2 |A|^2}{8\pi c} \quad (3)$$

であり [6],  $\bar{W} = 10^{-2}$ ,  $\rho_0 = 0.594$ ,  $c = 391.5$  ( $100^\circ\text{C}$ ),  $\omega = 1,000 \times 2\pi$  とすると, 点音源の強さ  $|A|$  は,

$$|A| = \sqrt{4.2 \times 10^{-6}} = 2.04 \times 10^{-3} \quad (4)$$

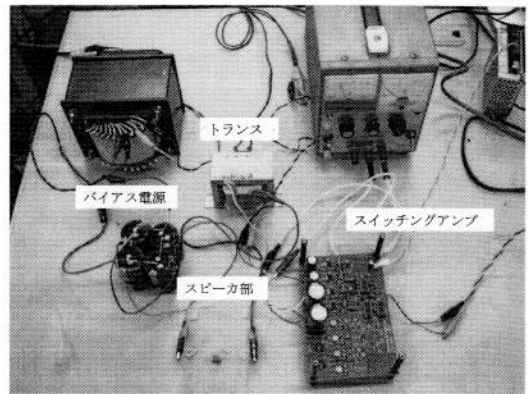
となる。これは理想的に気体の噴出・吸入が行われると仮定すると, 水でいえば大気圧条件下で 1 秒間に 1.2g 程度が相変化している状態に相当する。熱による相変化を考えると, 水は一般の液体と比較して気化熱が 2,250 kJ/kg と特に高く, 水の相変化による上記の音響出力を実現するには 1,361 W の熱量が 1 秒間に放熱, 吸熱される必要がある。

図-1 に示すように媒質を水として加熱により音響信号の再生を行う場合, そのままでは効率が低いとはいえないが発音の直接の駆動源は相変化による体積変化である。従って熱エネルギーの制御・循環が重要であり, 必ずしも式 (3) で示される体積変化量に相当する気化熱がそのまま消費電力になるわけではない。

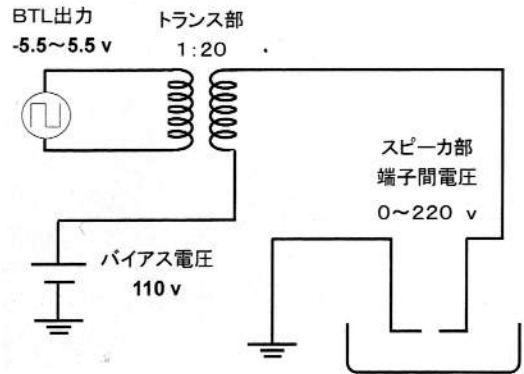
## 2.2 制御方法

提案するスピーカでは相変化に伴う気圧の変動を音源とする。従って相変化に要する熱エネルギーもしくは圧力の制御を媒質に施す必要がある, 本論文では大気圧状態で熱エネルギーの増減による相変化の制御を試みる。

電気エネルギーを熱エネルギーに変換する主な方法は大きく分けて外部加熱と内部加熱とがある。外部加熱はコンロに代表されるように, ヒータ等で被加熱体の外部から内部へと熱を伝える方式である。この方式は被加熱体の熱伝導性に左右されるので加熱に時間がかかり, また熱変換効率が悪い。



(a) 外観



(b) 構成

図-2 実験装置図

これに比べて内部加熱は通電加熱やマイクロウェーブオープン, いわゆる電子レンジに利用されている誘電加熱に代表されるように, 被加熱体そのものを発熱させる方式である。この方式では熱伝導性に左右されないで印加エネルギーに対して被加熱体の温度が迅速に対応する。誘電加熱は数 MHz~数十 MHz の高周波交流の電界中における誘電体での双極子の摩擦熱を利用しており, 通電加熱では被加熱体に数 Hz~数 kHz の電流を直接流すことによって, 被加熱体から生じるジュール熱を利用している。本論文では可聴領域の音を再生することを目的としていることから, 通電加熱による液相から気相への相変化の制御を試みた。

## 3. 制御装置

### 3.1 試作装置

試作した装置の外観及び構成を図-2 に示す。FET を用いて  $\pm 5.5\text{V}$  の BTL デジタル出力段を作製し, 標準化周波数 700 kHz の高速 1bit 信号で駆動している。スイッチング出力信号に対し昇圧比 1:20 のトランスを用い, また 110V の直流成分を加えることにより 0~220V の出力端子間電圧を得ている。スイッチン

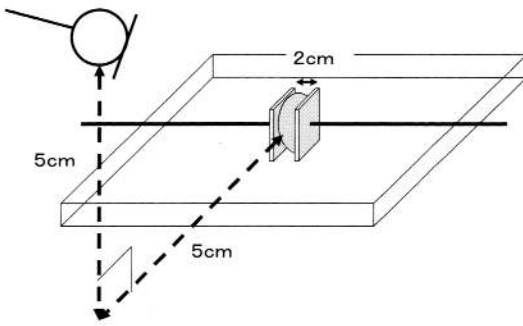
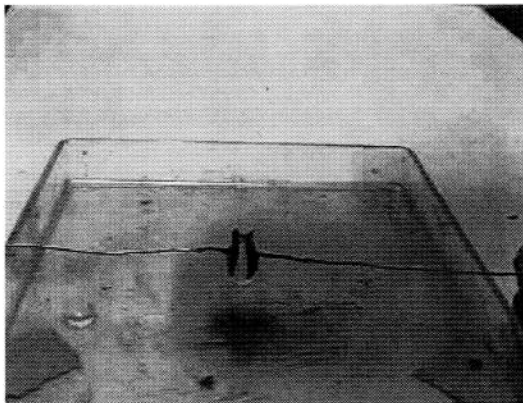


図-3 測定の様子



(a) 外観

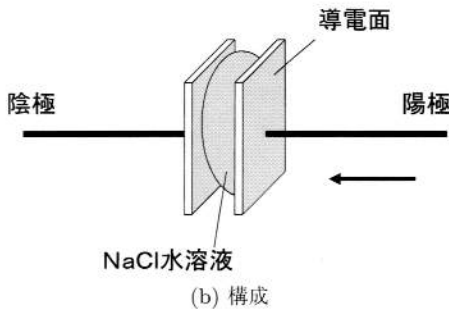
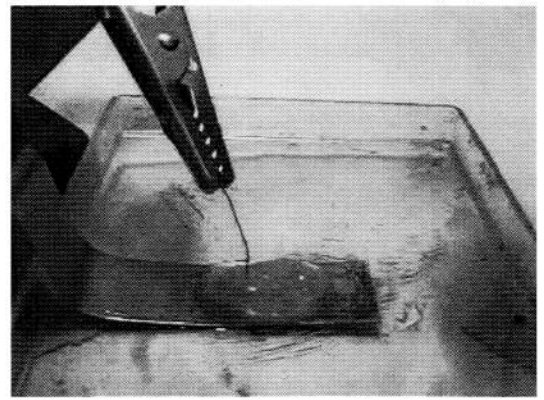


図-4 平行面電極

グアンプの採用により加熱に際して理論上損失のない構成を試みた。直流成分は4章で述べる高次歪の軽減の目的から印加している。各測定は原則として1kHz、220V<sub>pp</sub>の正弦波を出力し図-3に示すように水平方向に5cm、高さ方向に5cmの箇所での收音することにより行った。

媒質には入手が容易で有害な気体を生成しない点から塩化ナトリウム(99.5%以上)を超純水(抵抗率10MΩ·cm以上)に溶かして使用した。

スピーカ部にて使用する電極は、図-4に示すように向かい合わせた5mm×5mmの白金の電極面を2mm間隔で平行に固定し電極面間に媒質を表面張力



(a) 外観

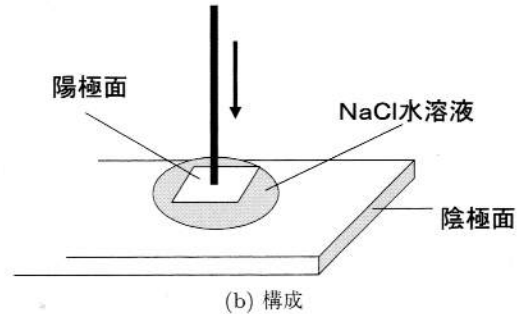


図-5 平板電極

で満たす手法を用いた。5.1節においては小面積の電極を扱うことから図-5に示すように敷いた大きな陰極面に3mm間隔で陽極面を向かい合わせて固定する手法を用いた。いずれの場合も6.0×7.7×1.5cmのプラスチック製の皿上に設置し、媒質1mm<sup>3</sup>で端子間を満たし通電加熱を行った。図-4の手法は媒質が表面張力で空中にあることから振動で落下することもあるが図-5の手法と比較して端子間以外の媒質や壁、電極面自体の影響の軽減を期待した。また、電極面の材質は当初鉄を用いていたが電気分解による化合物が発生することから白金を用いたところ電極の溶解はほとんど見られなかった。

### 3.2 端子間抵抗

一般に電解質溶液の抵抗  $R$  と導電率  $\kappa$  について次のような関係式が成り立つ。

$$R = \frac{\rho \times l}{S}, \quad \kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{R} \cdot \frac{l}{S} \quad (5)$$

ただし  $R$ : 抵抗 [Ω],  $S$ : 面積 [m<sup>2</sup>],  $l$ : 経路長 [m],  $\rho$ : 抵抗率 [Ω·m],  $\kappa$ : 導電率 [S/m] である。

本手法では通電加熱により相変化を制御して音場を発生させている。従って電圧制御であれば  $W = V^2/R$  から発熱量と抵抗値は反比例する。

試作したスピーカの媒質である NaCl 水溶液の濃度

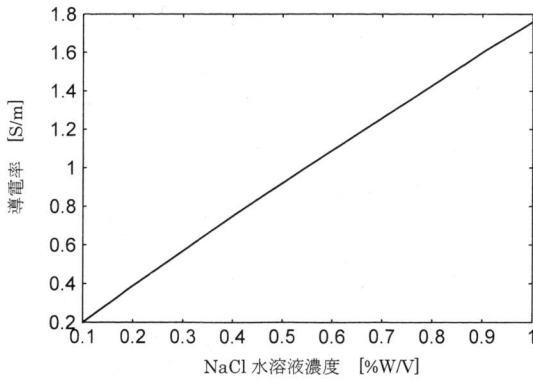


図-6 NaCl 水溶液の濃度と導電率

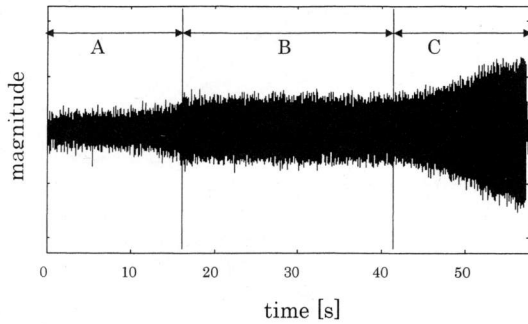


図-7 出力波形

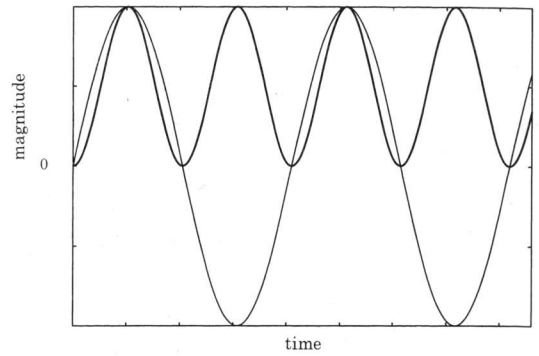


図-8 2乗波形との比較

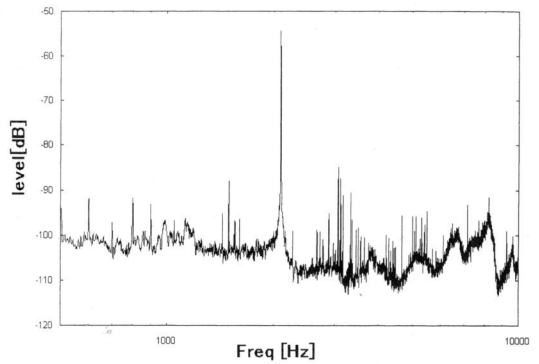


図-9 直流成分非印加時の出力信号スペクトル

と導電率を図-6に示す。実験を行った範囲内では導電率はほぼ濃度に比例する。実験においては0.1%W/V水溶液を用いた。

図-4の電極を用いて室温の媒質に一定振幅の正弦波を入力する実験を行った。音の発生から蒸発により電極面間に媒質がなくなるまでの出力波形を図-7に示す。図-7より振幅が3段階に変動しているのが分かる。区間Aで示された部分は媒質が室温から沸点まで温度が上昇する期間であると考えられる。区間Bにおいては安定した出力が得られており、媒質が蒸発しなくなる直前である区間Cにおいて急激に出力が上がっている。これは蒸発が進み媒質が残り少なくなると気化する際の媒質そのものによる圧力が低くなり気化体積が大きくなっているものと考えられる。本稿で述べられる測定ではすべて区間Bと思われる箇所のみを用いて解析した。

電流観測による媒質の抵抗値は電圧印加した瞬間は図-6に近い値をとるが時間経過と共に降下が確認された。これは媒質中に大量の気泡が発生したことにより経路が狭められたことに起因すると思われる。また、抵抗値が下がるにもかかわらず音響出力自体は上がり続けるのは温度及び圧力変動によるものであると考えられる。

#### 4. 高次歪の軽減

電極間に印加される電圧の方向にかかわらず媒質は加熱され、その結果電力の絶対値が熱量と比例する。式(3)から受音点での音圧は点音源の強さつまり本方式では水蒸気の発生量に比例する。また、 $W = V^2/R$ の関係から入力信号を電圧で制御すると出力信号が入力信号の2乗に比例する関係となり出力音が歪んでしまう。図-8に正弦波の波形(細線)及びその2乗波の波形(太線)を示す。2乗歪に加え負の信号が反転し結果倍の周期を持っているのが分かる。直流成分を印加しない1kHzの正弦波に対する出力信号の実測スペクトルを図-9に示す。入力信号の倍の周波数にスペクトルのピークがある。

図-10に正弦波に直流成分を加えた入力に対する出力音のスペクトルを示す。十分な大きさの直流成分を加えることにより一方向のみ電圧がかかる。1kHzの周波数成分が含まれているものの前述の高次歪が確認される。この歪を除去すべく図-11のように1kHz正弦波信号の平方根をとり直流を加えたプリディストーション信号を入力した出力音のスペクトルを図-12に示す。高次歪が軽減されているのが分かる。

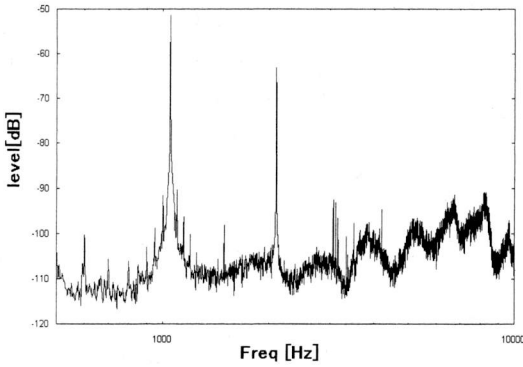


図-10 直流成分印加時の出力信号スペクトル

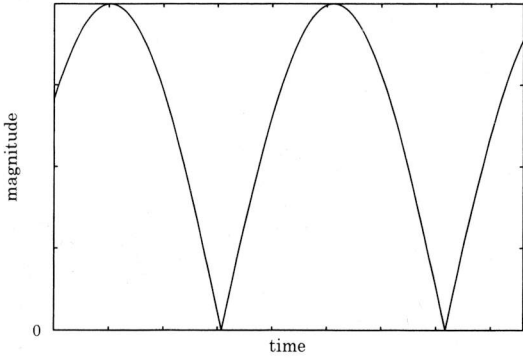


図-11 プリディストーションを施した波形

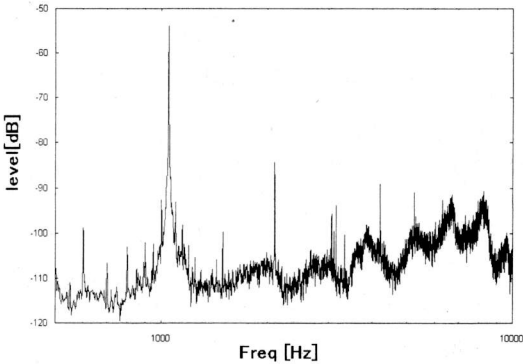


図-12 プリディストーションを施した出力信号スペクトル

各種実験はこれらプリディストーションを施した信号を使用して行った。

### 5. 測定

#### 5.1 抵抗値による出力音の変化

3.2 節式 (5) より通電経路の体積及び媒質の導電率により電極間の抵抗が決まる。そこで NaCl 水溶液の濃度及び使用する電極の面積を変えて音響出力の変化を測定した。また、水の表面張力に対し微小な電極面を扱うことから図-5 の電極を用いた。また、音響出力は受け皿の縁やスピーカ部を浮かせている影響はない

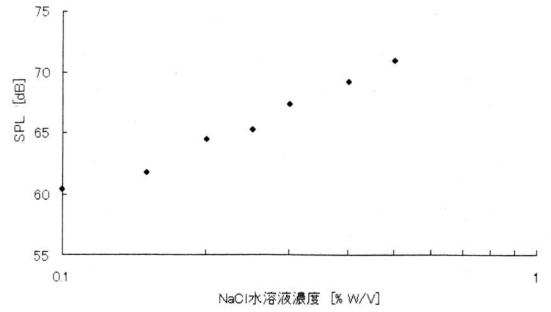


図-13 濃度-出力特性

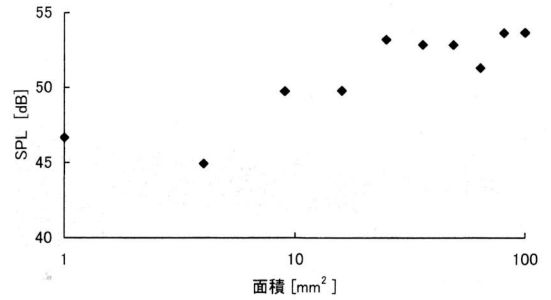


図-14 電極板面積-出力特性

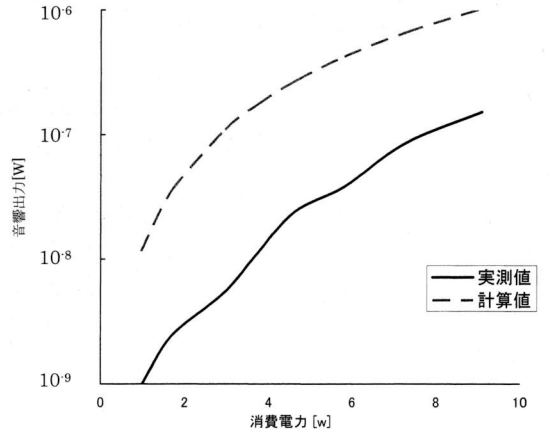


図-15 電力-音響出力特性

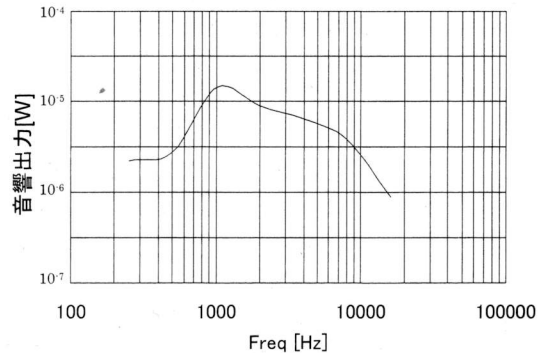
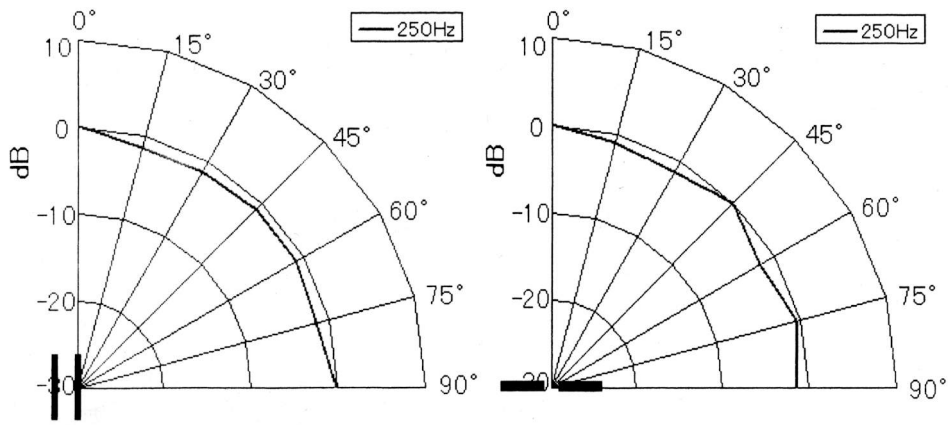
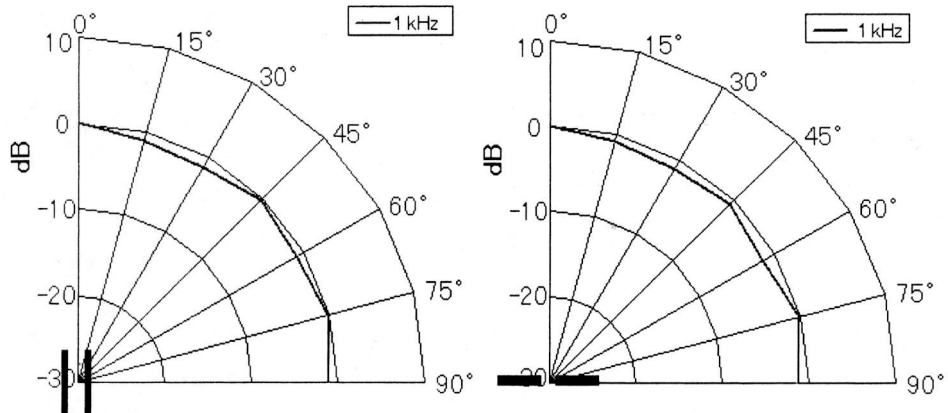


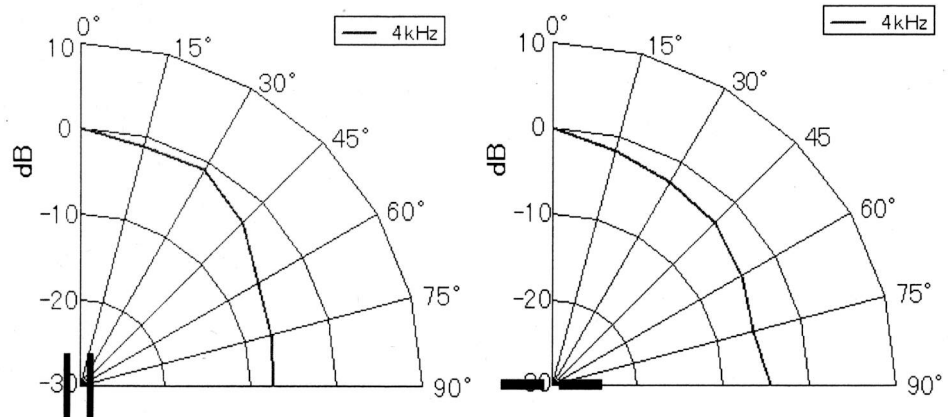
図-16 周波数特性



(a) 250 Hz



(b) 1 kHz



(c) 4 kHz

図-17 平行板及び針電極による指向特性

ものとして半自由空間の点音源として導出した。

0.1%~0.5%W/Vの水溶液の濃度による出力の変化の測定結果を図-13に示す。水溶液の濃度に比例した出力が得られているのが分かる。

同様に式(5)より通電する電極板の面積に媒質の抵抗は反比例し、その結果面積に比例した出力が得られ

る。陽極の面積を1辺が1~10mmの正方形としそれぞれの出力を測定した。図-14に測定結果を示す。ばらつきはあるもののほぼ面積に比例した出力が得られているのが分かる。

## 5.2 出力特性・周波数特性

図-4の装置を用い出力特性及び周波数特性を測定し



た。式 (5) より平板電極間の抵抗値は  $160\Omega$  である。

2~18 W 入力時の電力-音響出力特性を図-15 に示す。音響出力は音源が半自由空間にあるものとして導いた。実測値が計算値の 10 分の 1 程度という結果が得られた。本質的な効率を考える目的から消費電力に直流電力は加えていない。

式 (3) に基づく変換式は液相から気相への相変化のみが起こることを仮定して計算されたものである。実際には室温と水の沸点とは大きな差があり、蒸発後すぐに液相へと戻ってしまう水も少なくない。結果として膨張後すぐに縮小し周囲に放熱するので発生する音場や変換効率に少なからず影響を与えていることが考えられる。また、本実験における変換効率自体は  $10^{-9}$  程度と非常に低いものであったが、これらはほとんどが水の加熱に際して熱に変わってしまった結果と考えられる。今回は熱エネルギーの循環に関して何ら考慮しておらず、熱エネルギーの循環・有効利用などは今後の重要な課題である。

13 W 入力時の周波数特性図を図-16 に示す。1 kHz 近傍を中心とした山なりの特性となっており端子間距離や媒質の粘性などとの関係も今後考察が必要である。

### 5.3 指向特性

図-4 の電極及び 2 mm 間隔に向かい合わせた直径 0.5 mm の鉄線を電極として水平方向の指向特性の測定を行った。指向特性、及び使用した電極の方向を図-17 に示す。15 度ごとに 7 方向での測定を行った。

いずれの方式に関しても、低域ではほぼ点音源と言え、高域では 0 度方向への指向性が確認された。

本来本方式のスピーカは媒質中の電気経路すべての点音源の集合と見なすことができ、平行面を向かい合わせた電極を用いると  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  の直方体の音源となり水平面で考えると 90 度方向への指向性を示すと思われるが実際には平板間に気泡が挟まれる形となり開放された方向へ気泡が押し出されることから 0 度方向への指向性を示す結果になったと思われる。針電極はほぼ点から点への経路と考えると等価的に線音源と考えることができ、測定結果も 0 度方向へ指向性を持つものとなった。

## 6. む す び

高効率な電気音響変換器を目的にこれまで注目され

ることの少なかった相変化を利用したスピーカを提案し基礎実験を行った。

NaCl 水溶液を通電加熱し液相から気相への変化の制御を行いスピーカとしての測定を行い抵抗による出力の違いや各種特性を確かめた。また、原理上発生する高次歪に関してプリディストーションによる軽減を試みある程度の成果を得た。

現状のシステムでは熱をすべて空気中に逃がしており高効率なシステムとは言えない。蒸気機関に始まる相変化を利用したエネルギー変換システムは単純に加熱・冷却に始まり、その後の熱エネルギーの制御、有効利用により今日では約 80% の効率を得るに至っている。熱エネルギー制御は今後の重要な課題である。

今回は媒質として NaCl 水溶液を採用した。水は一般に気化熱が高くこのような使い方として最もふさわしいかは疑問も残る。NaCl 水溶液に気化熱の低いエタノールを混合して測定も行ったが、混ぜるほどに出力が低下する結果となった。これはエタノールの導電率の低さが原因として考えられる。気化熱、膨張率、抵抗率などによる媒質の選定も行っていきたい。

音楽など一般の音響信号に関しても再生を試みた。気泡の破裂音が若干観測されたものの違和感無く聴くことができた。ただし数 cm 角の通電体積では一般的な音楽鑑賞としては再生音が小さく多点通電など検討していきたい。また、安定した出力を得るには媒質の条件を一定に保つ必要があり、蒸発による濃度の変化などの対策も今後行っていく所存である。

## 文 献

- [1] 山崎芳男, 中島平太郎, “超伝導のピン止め効果を利用したエッジダンパレスピーカの試作,” 音講論集, pp. 517-518 (2001.3).
- [2] 岡崎正倫, 及川靖広, 山崎芳男, “コンデンサスピーカを用いた遠隔講義・会議システム,” 音講論集, pp. 571-572 (2003.10).
- [3] 滝澤俊和, 斎藤直毅, 小西 雅, 山崎芳男, “振動板のないレーザードップラーマイクロホンによる大空間の收音,” 音講論集, pp. 595-596 (2003.3).
- [4] 柳 允善, 岡崎正倫, 及川靖広, 鴫田泰弘, 山崎芳男, “音響エネルギーを駆動源とした熱音響システム,” 音講論集, pp. 569-570 (2003.10).
- [5] 柴田隼吾, 武岡成人, 岡崎正倫, 山崎芳男, “相変化を利用したスピーカ,” 信学技報, pp. 7-12 (2004).
- [6] 伊藤 毅, 音響工学原論 上巻 (コロナ社, 東京, 1955).
- [7] W. Gebhardt and U. Krey, 好村滋洋 (訳), 相転移と臨界現象 (吉岡書店, 京都, 1992).