

非線形パラメトリック作用のスピーカへの応用

米 山 正 秀 ・ 河 面 悠  
藤 本 潤一郎 ・ 佐々部 昭一  
(日本コロムビア)

1982年1月28日

社 団 電 子 通 信 学 会  
法 人

## 非線形パラメトリック作用のスピーカへの応用

## APPLICATION OF NONLINEAR PARAMETRIC INTERACTION TO LOUDSPEAKER

米山正秀, 河面悠, 藤本潤一郎, 佐々部昭一  
Masahide YONEYAMA, Yukawamo, Jun'ichiroh FUJIMOTO, Shoichi SASABE

日本コロムビア(株)  
Nippon Columbia Co. Ltd.

## 〔1〕まえがき

現在、世界で使われているスピーカの99%以上は、動電形の変換機構により振動板を機械的に駆動して音波を発生させる方式である。この方式には直接放射形とホーンロード形のタイプがあるが、振動板の機械的振動によって空气中に疎密波を放射するという点では同じである。動電形スピーカは歴史が古く、最近では音質的にもほとんど問題ないようであるが、本質的欠点を有している。つまり、振動板のような種の機械構造物は、必ず固有振動数を持っており、そのためある周波数ではレスポンスがよく、ある周波数ではレスポンスが悪いという特性を有しており、その結果、平坦で広い周波数特性が得にくい宿命を持っている。

このような動電形スピーカの本質的欠点を取り除くためには、振動板からの音響放射ではなく新しい音波の発生機構を用いることが必要である。

筆者らは、超音波の非線形パラメトリック作用に注目し、この現象をスピーカに応用することを試み、基本的検討と実験を行った。この方式のスピーカでは、空気中の音波の非線形相互作用によって音波を発生する機構であるので、共振峰のない滑らかな周波数特性を有するスピーカが期待される。

現在、研究の初期段階であり、十分な結果は得られていない。しかし、トランスデューサの改良等によって今後の性能向上が予想される。今回は基本的原理と実験結果を示し、明らかに

びった問題点と今後の見通しを報告する。

## 〔2〕音波の非線形パラメトリック作用

周波数の異なる二つの有限振幅音波同士が媒質中において、お互いに干渉し、媒質の非線形特性により二つの音波の和と差の周波数に相当する周波数を持つ新しい音波(2次音波, Secondary wave)が発生する現象は、Nonlinear Interaction of Sound Waves, または Scattering of Sound by Sound として知られている。<sup>1)</sup>

この現象によって新たに発生する音波の音圧  $P_2$  は、Westervelt によって次の波動方程式を満たすことが明らかにされている。<sup>2)</sup>

$$\left\{ \begin{aligned} \nabla^2 P_2 - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P_2}{\partial t^2} &= -\rho_0 \frac{\partial q}{\partial t} & (1) \\ q &= \frac{\beta}{\rho_0 c_0} \cdot \frac{\partial}{\partial t} P_1^2 & (2) \end{aligned} \right.$$

式(1)、(2)において

$$\left\{ \begin{aligned} c_0 &: \text{無限小振幅時の音速,} \\ \rho_0 &: \text{媒質の密度,} \\ q &: \text{2次波の仮想音源密度,} \\ \beta &: \text{媒質の非線形パラメータ} \\ P_1 &: \text{1次波 (Primary Wave) の音圧} \end{aligned} \right.$$

式(1)右辺の  $q$  は2次音波の音源を表わしているが、これは実際には存在せず、1次波同士の干渉によって生ずるので仮想音源になる。

式(1)の inhomogeneous な波動方程式の解は仮想音源と Green 関数の重ね合せ積分によって表わされる。

$$p_s = \frac{\rho_0}{4\pi} \iiint_V \frac{1}{|r-r'|} \frac{\partial}{\partial t} q(r', t - \frac{|r-r'|}{c_0}) dr' \quad (3)$$

ただし、

$r$  : 観測点の位置ベクトル。

$r'$  : 音源の存在する位置ベクトル。

$V$  : 1次波の存在する全空間

1次波が二つの連続正弦波のとき、トランスデューサから十分コリネートされた波として放射されている場合については、式(3)の積分は初期の段階で解析がなされており、<sup>2)3)</sup> 円形ピストン板から固有の指向性をもって放射される場合については、Muir 等による積分式が報告されている。<sup>4)</sup>

一方、1次音波が過渡的に変動している場合、つまり1次音波のエンベロープが  $f(t)$  によって時間的に変化している場合には、トランスデューサから距離  $X$  なる点での音圧は平面波ビームを仮定すると次式のごとくなる。

$$p_1 = p_0 e^{-\alpha x} f(t - \frac{x}{c_0}) \sin \omega_0 (t - \frac{x}{c_0}) \quad (4)$$

ただし、 $\alpha$  は角周波数  $\omega_0$  での媒質の吸収係数。

式(2),(4)を用いてエンベロープ信号に関する仮想音源  $q$  を求めて式(3)の積分を実行すると、非線形相互作用によりトランスデューサの軸上  $r$  の点にて得られる  $f(t)$  に関する音圧  $p_s$  としてすでに次式が得られている。<sup>2)5)6)</sup>

$$p_s = \frac{\rho p_0^2 a^2}{16 \rho_0 c_0 \alpha r} \frac{\partial^2}{\partial t^2} f^2(t - \frac{r}{c_0}) \quad (5)$$

ただし、 $a$  は1次音波のビームの半径。

以上のような音波の非線形相互作用(または非線形パラメトリック作用)は、はじめ水中での音波が対象となったが、その後、空気中での実験も報告されている。<sup>7)8)9)</sup>

### [3] 有限振幅AM波による音響再生理論

#### 3-1 空気の非線形による振幅被変調波の自己検波作用

正弦波音波同士の非線形相互作用と周波数ス

ペクトル領域で考えると、図1-(a)に示すごとなる。つまり、角周波数  $\omega_1, \omega_2$  の二つの正弦波が非線形干渉することにより、角周波数 ( $\omega_1 \pm \omega_2$ ) の新しい音波を生ずることを示している。

一方、式(4)で示されるような時間的に変化するエンベロープを有する音波は平衡変調波であり、その周波数スペクトルは図1-(b)のようになる。同図からわかるように、キャリアが抑圧されている。したがって、この波の非線形作用としてはサイドバンド同士の干渉となるため、検波されて低周波数領域に現われるスペクトル

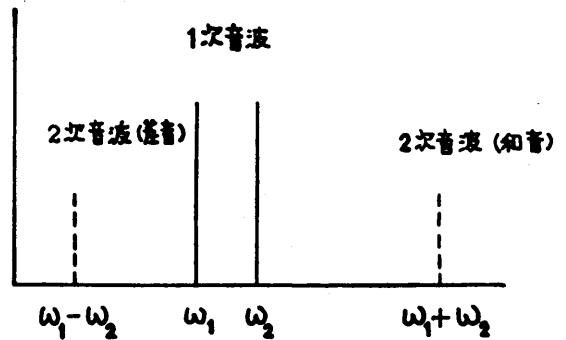


図1-(a) 正弦波による非線形相互作用の周波数域表示

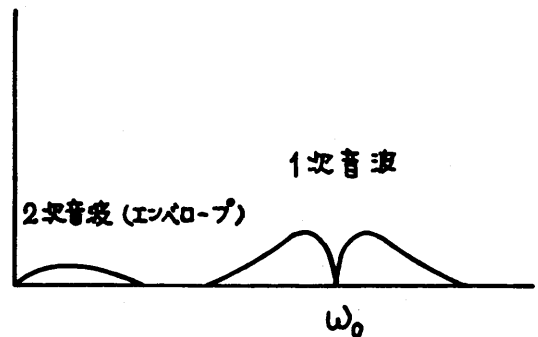


図1-(b) 平衡変調波による非線形相互作用

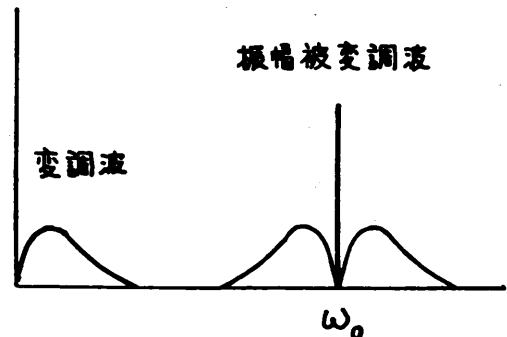


図1-(c) 振幅変調波による非線形相互作用

分布は、エンベロープのスペクトル分布と異なったものになる。式(5)で示される2次音波の音圧がエンベロープ波形の要素に関連していることがこれに相当する。

これに対し、図1-(c)は振幅被変調波の周波数スペクトル分布を示したものであり、この波が非線形作用を受けの場合、キャリアと下側帯波およびキャリアと上側帯波がそれぞれ干渉し、その結果変調信号に相当する2次音波が得られることが期待できる。

つまり、振幅変調された音波は、非線形パラメトリック作用によって空気中で自己検波されることが考えられる。この場合、変調波がそのまゝ2次音波として空間に再現されるので、変調波をオーディオ信号に変じ、キャリアを超音波領域に設定すれば、空中での非線形パラメトリック作用を応用して新しいタイプのスピーカが実現できることになる。

いまオーディオ信号を $g(t)$ とすると、 $g(t)$ によって振幅変調された有限振幅の超音波ビームをトランスデューサから空気中に放射すると、空気の非線形パラメトリック作用により空気中に変調波の仮想音源が生ずる。

トランスデューサから $X$ なる距離の点での1次音波(振幅被変調波)の音圧 $P_1$ は、

$$P_1 = P_0 \left\{ 1 + mg \left( t - \frac{X}{C_0} \right) \right\} e^{-\alpha X} \sin \omega_0 \left( t - \frac{X}{C_0} \right) \quad (6)$$

ただし、 $m$ は変調の深さを表わすパラメータであり、 $P_0$ は初期音圧である。

式(2)と式(6)を用いて $g(t)$ に関する仮想音源 $q$ を求めると、

$$q = \frac{\beta P_0^2}{\rho_0^2 C_0^2} e^{-2\alpha X} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ mg \left( t - \frac{X}{C_0} \right) + \frac{1}{2} m^2 g^2 \left( t - \frac{X}{C_0} \right) \right\} \quad (7)$$

ここにおいて、上式の右辺の第2項はひずみ成分を表わす項であるが、いま $m \ll 1$ が成立するような浅い変調を考えると、式(7)の右辺第2項は第1項に比べて十分に小さく無視できる。この場合、近似的に

$$q \approx \frac{\beta m P_0^2}{\rho_0^2 C_0^2} e^{-2\alpha X} \frac{\partial}{\partial t} g \left( t - \frac{X}{C_0} \right) \quad (8)$$

が成り立つ。

いまトランスデューサからは半径 $a$ の円形ビ

ームが放射されているものと仮定し、式(8)を用いて式(3)の積分をおこない、軸上 $r$ の距離の点での $g(t)$ に関する2次音圧を求めると次式を得る。

$$P_s = \frac{\beta P_0^2 a^2 m}{8 \rho_0 C_0 \alpha r} \frac{\partial^2}{\partial t^2} g \left( t - \frac{r}{C_0} \right) \quad (9)$$

一方ひずみ成分の音圧は

$$P_d = \frac{\beta P_0^2 a^2 m^2}{16 \rho_0 C_0 \alpha r} \frac{\partial^2}{\partial t^2} g^2 \left( t - \frac{r}{C_0} \right) \quad (10)$$

したがって、空気の非線形による自己検波作用により振幅被変調波が空間で復調され、式(9)に示すようにオーディオの変調信号の音圧が得られることになる。

式(9)をFourier変換すると次式を得る。

$$P(\omega) = -\frac{\beta P_0^2 a^2 m}{8 \rho_0 C_0 \alpha r} \omega^2 e^{-\frac{r}{C_0} \omega} G(\omega) \quad (11)$$

ただし、

$$\begin{cases} P(\omega) : P_s(t) \text{のFourier変換} \\ G(\omega) : g(t) \text{のFourier変換} \end{cases}$$

式(11)が示すように $P(\omega)$ は $G(\omega)$ の $\omega^2$ 倍に比例するので、再生音の周波数特性は12dB/octのカーブになる。

### 3-2 コンピュータシミュレーションによる2次表音圧の計算

式(9)は1次波のビームが十分コリネートされている場合のみ成立する式であるが、実際のトランスデューサの場合には観測点の位置が違くなるにつれて、2階微分が1階微分に推移し、非整数階微分領域が生じる。<sup>6)</sup> したがって、実際のトランスデューサと同条件でどの程度の復調音圧が得られるか、コンピュータシミュレーションをおこなった。その結果を図2～図5に示す。

コンピュータシミュレーションは、Muirの積分式<sup>4)</sup>に基づいておこなった。この時利用した各パラメータの値は次のとおりである。

$$\begin{aligned} \beta &= 1.2 \\ \rho_0 &= 1.2 \text{ Kg/m}^3 \\ C_0 &= 340 \text{ m/s} \\ \alpha &= 0.19 \text{ Neper/m} \end{aligned}$$

$a = 0.1 \text{ m}$   
 $\omega_0/2\pi = 40 \text{ kHz}$

図2は距離 $r$ の値をパラメータにしたときの2次音圧の周波数特性であり、ほぼ $\omega^2$ に比例していることがわかる。

図3は $f$ をパラメータにしたときの $m$ の値と2次音圧の関係を示すカーブである。

図4は初期音圧と2次音圧の関係を示す図である。

図5は変調度と2次音圧の信号成分および第2高調波成分との関係を示す。

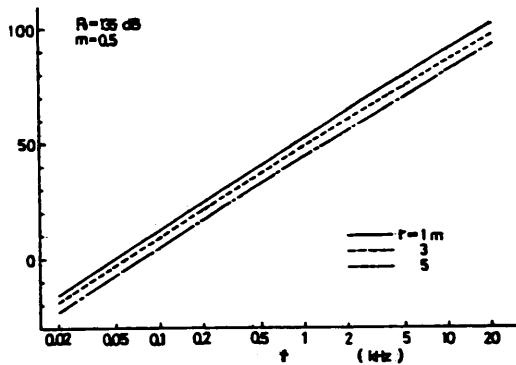


図2 2次波音圧の周波数特性 (コンピュータ・シミュレーション)

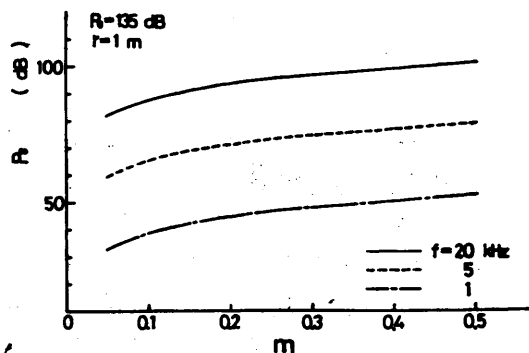


図3  $m$ に対する2次波音圧の関係 (コンピュータ・シミュレーション)

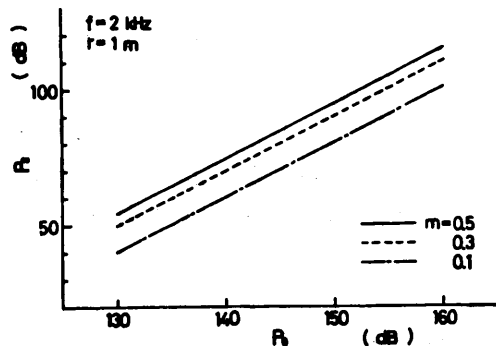


図4 初期音圧に対する2次音圧の関係 (コンピュータ・シミュレーション)

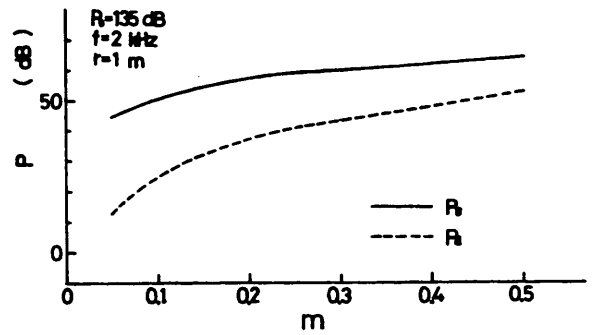


図5 変調度に対する2次波音圧の信号成分および第2高調波成分の関係 (コンピュータ・シミュレーション)

### 3-3 超音波トランスデューサのシステム周波数特性の影響

変調度を一般のオーディオ信号と考えると、振幅被変調波の周波数スペクトルはキャリア周波数 $\omega_0/2\pi$ を中心に $\pm 15 \text{ kHz}$ に渡って分布すると考えられる。

一方、図2のシミュレーション結果より明らかになると、2次波の音圧の周波数特性は $\omega^2$ にほぼ比例することが確認された。したがって超音波トランスデューサの周波数特性が、振幅被変調波を送送するのに必要な帯域幅 $30 \text{ kHz}$ 内において平坦な特性を持つものと仮定すると、やはり2次波は $12 \text{ dB/oct}$ の周波数特性を有する。これを補正して平坦な周波数特性を得るためには、 $1/\omega^2$ の特性を有するイコライザを用いて変調信号を予め補正した後、AM変調器に加えるようにしなければならぬ。イコライザを通加すると変調の深さを表わすパラメータ $m$ の値は周波数依存性を示し、

$$m = \frac{m_0}{\omega^2}, \quad m_0 = \text{一定} \quad (12)$$

となる。このとき、 $m_0$ の値は再生すべき可聴音の下限周波数によって決められる。

システム全体の構成は図6に示すようになる。トランスデューサの周波数特性が必要帯域内で平坦でなく、キャリア周波数を中心に左右対称的に減衰している場合には、イコライザ特性は異なったものが要求される。

いま、トランスデューサの振幅周波数特性を $A(\omega)$ とすると、対称特性では $A(\omega_0 + \omega) = A(\omega_0 - \omega)$ 。また、 $A(\omega_0) = 1$ とすると、この場合のイコライザの特性は $1/A(\omega_0 + \omega)\omega^2$

となる。したがって図7に示すようにトランスデューサの振幅周波数特性の等価低域特性が12dB/octで減衰している場合には、イコライザ-なしで平坦な周波数特性と一定の高調波ひずみ率が得られる。しかし、この場合、実用的な2次波の音圧を得るためには、中心周波数 $\omega_0$ において非常に高い音圧がトランスデューサに対して要求されることになる。

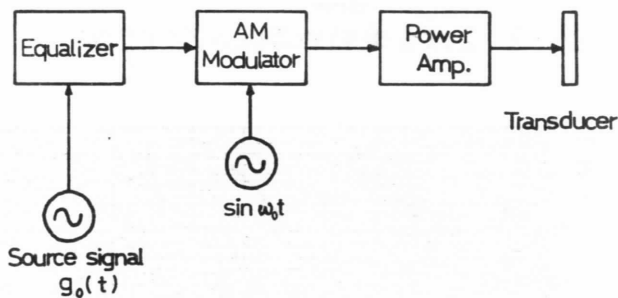


図6 平坦な周波数特性を得るためのシステム構成

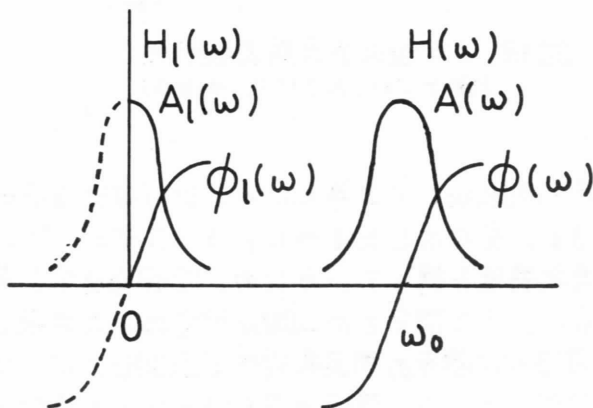


図7 イコライザ-なしで平坦な特性を得るための素子のシステム関数

## [4] 実験結果

### 4-1 トランスデューサについて

スピーカとして使用するためのトランスデューサは、高音圧が発生でき、しかも共振点付近での周波数特性が滑らかなものが望ましい。しかもオーディオ信号による振幅変調を、可聴帯域外で放射せねばならないことから、共振の中心周波数は少なくとも35kHz以上が必要である。しかしながら、空中でこれらの条件全てを満足するトランスデューサが少ないのが現状である。したがって、とりあえず今回の実験では他の目的のために開発されているトランス

デューサの中から、比較的使用に耐えると思われるものを転用した。実験に用いたトランスデューサの共振の中心周波数は40kHzで、放射音圧は軸上1mの点で約100dBである。したがって実験にはこの素子を127個アレー状に並べて用いることにした。アレー状にすることにより、軸上1mの点における音圧として135dBを得た。

実験に用いたトランスデューサアレーの外観を図8に示す。

図9~11にこのトランスデューサアレーの諸特性を示す。図9は音圧周波数特性、図10は指向特性、図11はトランスデューサアレーの入出力特性である。図9に示されるように本実験に用いたトランスデューサアレーの音圧周波数特性は、共振周波数を軸として対称な特性ではない。その上50kHz近傍には2次共振がある。このトランスデューサを使用する場合、これらは2次音波の周波数特性を乱す要因となる。

また、図11から明らかのように、入力電圧が10V付近までは出力音圧は入力電圧に対し比例関係を保っている。これより、以後の実験においては必要なものを除き10V以下で取り扱っ

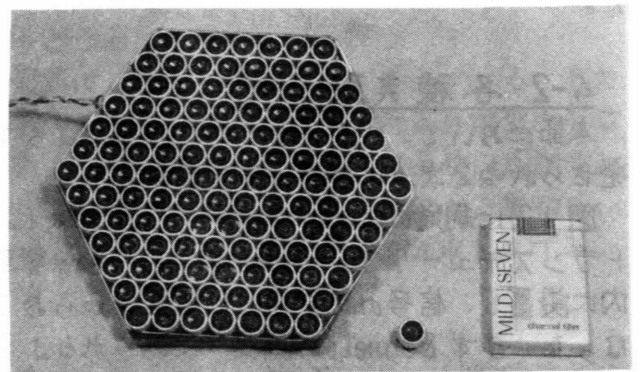


図8 トランスデューサアレーの外観

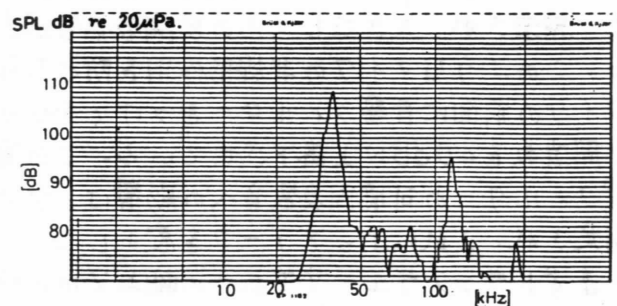


図9 トランスデューサアレーの音圧周波数特性 (軸上1m, 入力0.5V)

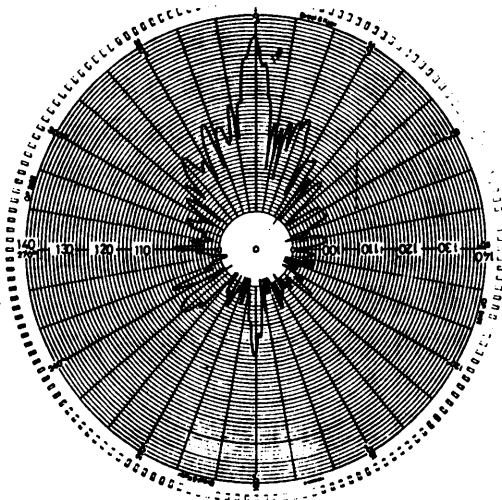


図10 トランスデューサ・アレーの指向特性  
(軸上1m, 入力10V, 40kHz)

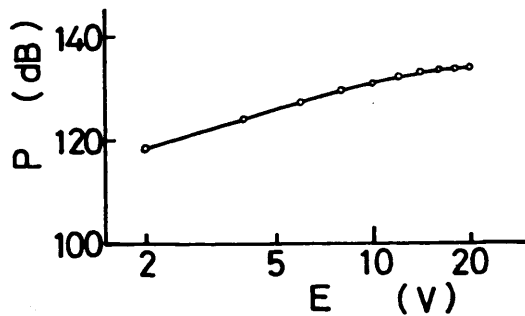


図11 トランスデューサ・アレーの入出力特性  
(軸上1m, 40kHz)

た。

#### 4-2 各種実験データ

本節において、パラメトリック作用によって発生される2次波に関する測定結果を示す。

図12に測定のためのダイアグラムを示す。トランスデューサ・アレーおよびマイクを無響室内に設置し、信号の送受信は無響室外からおこなう。まず Bennett の論文<sup>8)</sup>にみられるような intermodulation の影響を確認した。マイクに高い音圧の振幅変調超音波が入射した場合、マイクあるいはマイクアンプ内での非線形性により検波され、大きなレベルの変調波信号が出る。このようなマイクの非線形作用を防ぐため、マイクの前面に音響フィルターをつけてキャリア周波数を40dB以上低下させている。この音響フィルターの可聴周波数音への影響は、予め測定され、これによってデータを校正した。

まずトランスデューサ・アレーの軸上2mの点で測定した2次波の周波数特性を図13に示す。これは変調指数  $m=0.5$  とし、入力電圧を10Vとしたものである。特性曲線は2.5kHzまでは

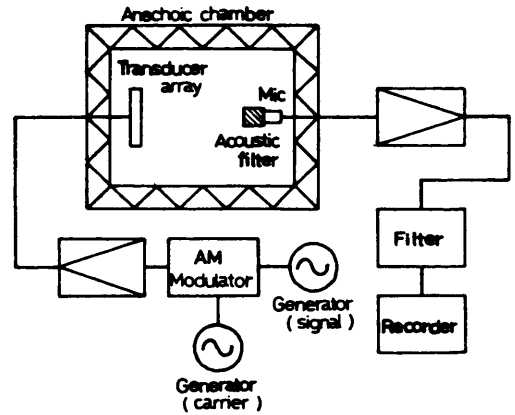


図12 2次音圧特性測定のためのダイアグラム

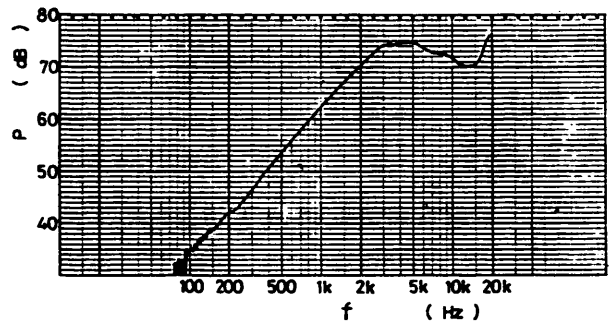


図13 2次波の音圧周波数特性  
(軸上2m, 入力10V,  $m=0.5$ )

8~10dB/oct で上昇し、そこからほぼ平坦となる。先に示したようにトランスデューサが周波数特性を持っているため、12dB/octで上昇しない。また図9での60kHz付近の2次共振は、図13の可聴音の周波数特性で20kHzのピークを形成している。図13の2.5kHz以上の特性の乱れもトランスデューサの周波数特性によるもので、トランスデューサの特性が改善されれば平坦な特性を得ることが期待できる。

図14-(a),(b)に2次波の指向特性を示す。(a)は変調波が1kHz、(b)は5kHzのものであり、どちらも変調指数  $m=0.5$  で、トランスデューサ・アレーの軸上2mで測定したものである。1kHzの場合、音圧が-6dBとなるのは軸から7°であり鋭い指向性を示す。5kHzでは更に指向性は鋭く、約4°で音圧は-6dBとなっている。このように指向特性は変調周波数が高くなるほど尖鋭化する。

図15は変調指数  $m$  の変化に対する2次波の音圧の変化を示している。図中二つの曲線は、それぞれ2kHzと5kHzの場合でどちらもトランスデューサ・アレーへの入力電圧は6Vである。

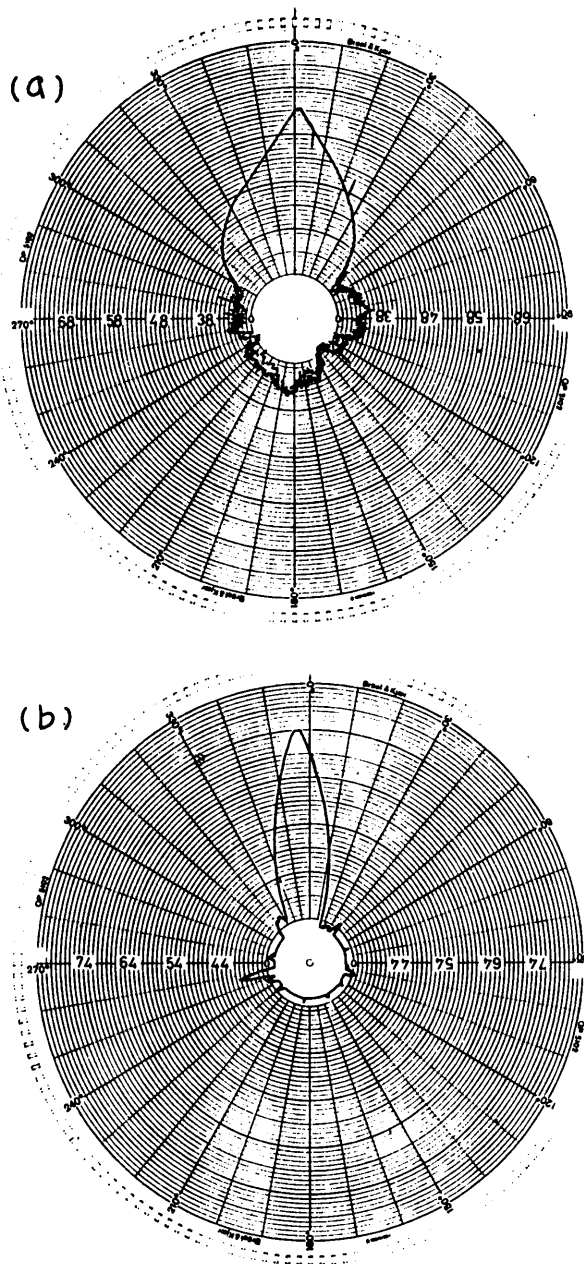


図14 2次波の指向特性 (a) 1kHz, (b) 5kHz.  
(軸上 2m, 入力 10V)

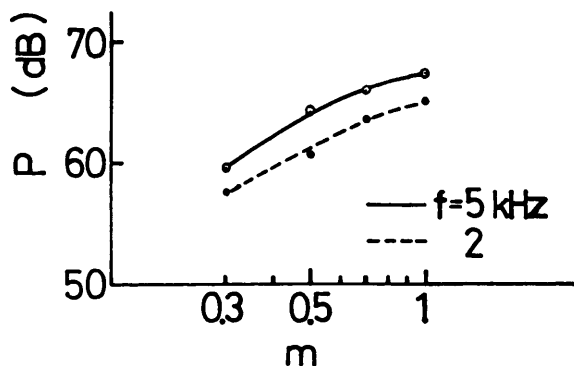


図15 mの変化に対する2次音の音圧変化  
(軸上 2m, 入力 6V)

## [5] まとめ

空気中での超音波の非線形相互作用を利用したスピーカについての基礎検討および実験をおこなった。

このスピーカは、オーディオ信号で振盪変調された超音波周波数領域の被変調信号を、超音波トランスデューサから有限振幅音波として空气中に放射し、空気の非線形特性による被変調波の自己検波作用により、変調波である可聴音を空間より発生させるものである。

この方式のスピーカの再生音圧は周波数の自乗に比例するので、平坦な周波数特性を持たせるにはイコライザが必要である。しかし、一般に低音の再生はひずみの点で困難である。

高い音圧を得るためには、高い初期音圧が必要なので、高い音圧を発生し得る超音波トランスデューサが望まれる。発生する第2高調波ひずみ率の点からは、浅い変調が望ましい。

この方式のスピーカの特徴として、指向特性が鋭いことがあげられる。この鋭い指向性を積極的に生かした利用法が期待される。

いずれにしても、実用的レベルに到達するためには超音波トランスデューサの今後の開発に負うところが大きい。

最後に、日頃ご指導をいただいている、名大池谷、阪大中村(昭)、電通大熊本の諸先生をはじめとして非線形音響懇談会の各位に感謝する。特に名大鎌倉氏には多くのご助言とご援助をいただいたことを付記し、深くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) R.T. Beyer: "Nonlinear Acoustics", Naval Ship Systems Command (1974)
- 2) P.J. Westervelt: "Parametric Acoustic Array", J. Acoust. Soc. Am., 35, 4, 535 (1963)
- 3) H.O. Berklay: "Possible Exploitation of Nonlinear Acoustics in Underwater Transmitting Applications", J. Sound & Vibr., 2, 4, 435 (1965)
- 4) T.G. Muir and J.G. Willette: "Parametric Acoustic Transmitting Arrays", J. Acoust. Soc. Am., 52, 5, 1481 (1972)



- 5) M.B.Moffett, P.J.Westervelt and R.T.Beyer: "Large Amplitude Pulse Propagation — A Transient Effect", J.Acoust. Soc. Am., 47, 5, 1473 (1970)
- 6) 鎌倉友男, 青木茂明, 中島桂秀, 池谷和夫: "有限振幅音波の過渡現象", 日本音響学会講演論文集, 3-6-7 (昭56年10月)
- 7) M.B. Bennett and D.T.Blackstock: "Parametric Array in Air", J. Acoust. Soc. Am., 57, 3, 562 (1975)
- 8) M.B. Bennett: "An Experimental Investigation of the Parametric Array in Air", ART-TR-73-3, Applied Research Laboratories, The Univ. of Texas, Austin (1973)
- 9) 例えば 阪上弘文, 青木茂明, 鎌倉友男, 池谷和夫: "空気中における平面音波のパラメトリック増幅", 電子通信学会技術委員会資料, US80-57