

パラメトリックスピーカ実用化への検討*

鎌倉友男**

(名古屋大学工学部)

米山正秀***

((株)リコー技術本部)

池谷和夫****

(名古屋大学工学部)

(昭和 59 年 10 月 15 日受理)

Parametric loudspeaker uses the self-demodulation effect of a finite amplitude ultrasound being amplitude modulated by audio signal, and the consequent special feature of this loudspeaker is very sharp directivity. In the present paper, a new amplitude modulation for primary wave is proposed to reduce the harmonic distortions of demodulated audio sound. The input signal has the form of square root of envelope function. If ultrasonic transducers that construct parametric loudspeaker have wide and uniform frequency response, the demodulated audio sound does not contain any harmonic distortions as far as quasilinear approach for nonlinear acoustic process is valid. Experimental verifications were done for reduction of harmonic distortion using this modified double-sideband (MDSB) excitation, and it has been made clear that MDSB excitation suppresses 2nd harmonic generation by about 10dB less than the commonly used DSB excitation. In order to attenuate the large amplitude ultrasound which is dangerous to auditory sense of human being even in farfield region of parametric array, the authors discuss the acoustic filtering of primary and secondary waves.

1. ま え が き

空気の非線形性を利用したパラメトリックスピーカはその指向性の鋭さに一つの特長をもつ¹⁾。これは数十 kHz の搬送波を可聴音である音声や楽音の信号波で振幅変調し有限振幅音波として送波するもので、搬送音波と側波帯音波との非線形相互作用によって信号波に関連した仮想音源が伝搬領域内に縦型アレーとして分布する。この結果、信号波は復調され、そのビームは鋭くなり、サイドローブも小さくなる。従来のスピーカを用いてパラメトリックスピーカと同程度の指向性を得ようとしたら、スピーカの口径がパラメトリックスピーカより

十倍程度大きくなってしまふのが普通である。特に信号波の周波数が低いときには口径の大小関係がより顕著になる。

しかし、パラメトリックスピーカを実用化するには幾つかの問題点が残されている。それを列挙すると、第 1 に電気音響変換効率が悪いことである。すなわち、大きな振幅の音波を放射しても小さな可聴音しか得られないことである。現在使われている動電形スピーカの電気音響変換効率は数 % であるが、パラメトリックスピーカの場合、たとえ 100% の効率で電気パワーが 1 次波音響パワーに変換できても 1 次波から 2 次波への変換効率、すなわちパラメトリック利得はせいぜい 1% 前後であること、また音響パワーがすべて 1 次波に変わることはありえないことを考えると電気音響変換効率は動電形に比べて 1 桁、場合により 2 桁以上悪いのが一般である。

第 2 の問題は高調波歪の発生である。これは空気の非線形性に本質的な原因があり、従来の振幅変調方式による 1 次波放射においては高調波歪が数十 % を優に越す

* Studies for the realization of parametric loudspeaker.

** Tomoo Kamakura (Department of Electrical Engineering, Nagoya University, Nagoya, 464)

*** Masahide Yoneyama (Technology Division, Ricoh Co., Ltd., Tokyo, 112)

**** Kazuo Ikegaya (Department of Electrical Engineering, Nagoya University, Nagoya, 464)

ため、現在のところ高忠実度再生を目的とした Hi-Fi スピーカとしては向かない。

第3の問題は1次波の振幅が大きいことから聴覚への悪影響が考えられることである。無論、パラメトリックスピーカから十分遠方の、1次波が聴覚に影響を与えない程度減衰した領域で使用すれば問題はないが、このような領域になると可聴音がより一層小さくなるのみならずそのビーム幅も広がってしまう。スピーカに比較的近い領域を使用対象とする場合この問題が生ずる。

以上のように動電形スピーカには存在しない幾つかの問題があるものの指向性に大きな特長をもつパラメトリックスピーカの開発を積極的に進める用意がある。

そこで本研究では上述した三つの問題点について詳細に述べると共にその対策を検討する。特に、第2と第3の問題については対策の有効性を具体的な実験結果を踏まえて説明する。そしてパラメトリックスピーカを最も効率よく設計するための基礎資料を与える。

2. 問題点と対策

章1で述べたように問題の第1は電気音響変換効率が低い、パラメトリック利得が小さいということである。これはもともと現象として小さな空気非線形性を利用していることで避けられない欠点である。無論、1次波の周波数や音圧によって利得は大きく変化する。はたしてどのような物理量でどう変わるか、スピーカの最適設計の観点から重要である。ここで理論計算を試み、最適設計の資料は章4で与える。

2次波の音圧やビーム特性を厳密に求めることは困難である。特に1次波の回折効果や非線形吸収を考慮しなければならないようなときは不可能に近い。このような場合、音場を解析しやすいように何らかモデル化すると便利である。本研究ではMoffettとMellenのモデル²⁾を利用し、利得の検討を試みる。

彼らは1次波音源の開口面(送波面)が半径 a の円形であり、音源より Rayleigh 長 $R_0 (= \pi a^2 / \lambda_0, \lambda_0 = c_0 / f_0, f_0$ は1次波の中心周波数, c_0 は微小振幅音波の音速) までの領域では1次波は平面波、それ以遠では音軸より $\sqrt{\lambda_0 / \pi R_0}$ の角度をもって球面拡散すると想定し、理論解析した。実際の音場とこのモデルとに違いはあるが、Moffett らによると水中で計算値と実験値が比較的良好に合うことから空中においてもこのモデルは使えるであろう。

さて、今、1次波として平衡変調波

$$p_i = p_0 \left[\cos 2\pi \left(f_0 - \frac{1}{2} f \right) t - \cos 2\pi \left(f_0 + \frac{1}{2} f \right) t \right] \quad (1)$$

を、音源としてのスピーカより放射しているとする。ただし、ここで p_0 は1次波の音源音圧(ピーク値)、 f は

可聴音となる2次波の周波数、である。Moffett らはパラメトリック利得 g を

$$g = r p(r, 0) / R_0 p_0 \equiv |g| e^{j\tau} \quad (2)$$

と定義し、数値計算に便利な次式を導いた。

$$g = \frac{\chi}{2} \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \int_0^\infty T^2(r') \left(1 + j \frac{f r'}{f_0 R_0} \right)^{-1} \frac{dr'}{R_0} \quad (3)$$

ここで r, r' はそれぞれスピーカから受音点、仮想音源までの距離、 p は2次音圧であり、また $\chi, T^2(r')$ はそれぞれ

$$\chi = 2\pi \beta p_0 R_0 f_0 / \rho_0 c_0^3 \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} T^2(r') &= \frac{2}{K^2} \left(\frac{1+K}{\sqrt{1+2K}} - 1 \right) e^{-2\alpha r'} \\ K &= 3(\sigma/2\pi)^2 \\ \sigma &= 2\chi \sinh^{-1}(r'/R_0) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

である。 β は空気非線形パラメータで、1.2、 ρ_0 は空気密度、 α は周波数 f_0 の音波の吸収係数、である。式(3)より g は1次波の情報を含む χ に依存することが分かるが、ここで計算上便利な新しい変数

$$L_0^* = L_0 [\text{dB re } 20 \mu\text{Pa-m}] + 20 \log f_0 [\text{kHz}] \quad (6)$$

を導入し、 g を求めることにする。なお、 L_0 は実効ソースレベルと呼ばれ

$$L_0 = 20 \log (p_0 R_0 / \sqrt{2}) \quad (7)$$

である。

以上の式に従って計算した結果を以下に示す。Fig. 1 は DSR (周波数低減比) を 10 ととり、 $\bar{\alpha} R_0$ をパラメータとしたときの例である。 $\bar{\alpha}$ は単位長当たりの1次波減衰量を dB 表示したものである。また、 $G = 20 \log |g|$ である。この図より $\bar{\alpha} R_0$ の値によって利得が大きく変化する、ソースレベルが上がれば利得も一般に大きくなるが、あるレベル以上では飽和もしくは減少の傾向にあることが分かる。しかし、はたしてどのような物理量をどう決めたら大きな2次音圧が得られるかこの結果からは分かりにくい。そこで今、決定すべき重要な物理量、 p_0 と f_0 は変数とし、残りの物理量を固定する。す

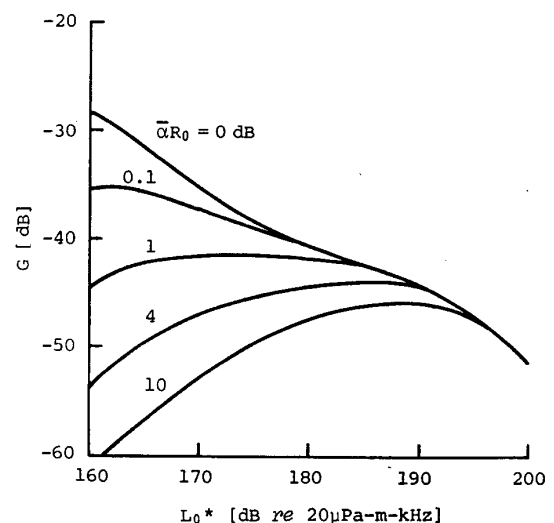


Fig. 1 Parametric gain curves for DSR=10 in air.

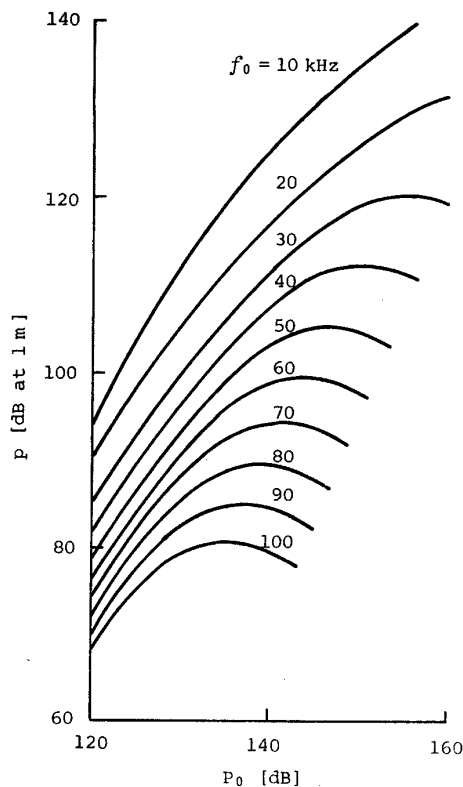


Fig. 2 Variation of secondary wave sound pressure with primary wave sound pressure. $a=15$ cm, $f=3$ kHz.

なわち、従来のスピーカと同程度の大きさとして、 $a=15$ cm、音声帯域の上限值として $f=3$ kHz、また α を決定する温度と相対湿度をそれぞれ 20°C 、 50% と選ぶ。

Fig. 2 はこのような条件下で計算した結果である。まず、気づくことは音源音圧 p_0 (以後特別に断わらない限り図中や文章中の音圧数値はすべて実効値表示とする) が一定であっても f_0 が低いほど大きな 2 次音圧が得られることである。例えば、 $p_0=140$ dB のとき、 $f_0=10$ kHz では 126 dB//1 m であるものの $f_0=100$ kHz では 80 dB//1 m に減ってしまう。40 dB 以上の音圧減少の主な原因はアレー長の相異によるものである。すなわち、2 次波が生成される領域及びその音圧レベルはほぼアレー長で決まり、このアレー長は $f_0=10$ kHz の場合が 100 kHz のときと比べて長いことによるものである。次に気づくことは p_0 を大きくすれば p も増加するがある値以上の p_0 においては飽和もしくは減少することである。テーパー関数 T^2 の形式によって 2 次音圧の飽和レベルは多少異なってくるものの、いずれにしても飽和レベルとなる p_0 以上音源音圧を上げてても大きな 2 次音圧を得ようとする観点から無意味のみならず、音軸上での非線形吸収が音軸以外の方向でのそれより顕著となり、よって 2 次波のビームは広がってしまう。

これまでの議論からすると f_0 が低いほどまた p_0 を大きくするほど大きな 2 次音圧が得られることになる。しかしあまり f_0 を低くすることは 1 次波の回折効果による 2 次波のビームの広がりやスピーカ製造上の問題も

あろう。物理量の最適値決定は本文章 4 に譲るとしてここでは以上の結果に止めておく。

パラメトリックスピーカ実用化に際する次の問題は高調波歪の発生である。場合によって歪が非常に大きくなり、歪の低減化が重要な課題となる。今、1 次波を式 (1) の平衡変調の代わりに通常使用している両側波帯 (DSB) 振幅変調

$$p_i = p_0 \{1 + ms(t)\} \sin 2\pi f_0 t \quad (8)$$

で送波したとき、準線形理論が成立するような 1 次音圧の場合、2 次音圧は音波の自己復調現象を定式化することでスピーカより十分遠方の音軸上にて

$$p_{\infty} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{1 + ms(\tau)\}^2 = \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{2ms(\tau) + m^2 s^2(\tau)\} \quad (9)$$

となる³⁾。ここで $s(t)$ は可聴音となる信号、 m は変調度、 $\tau = t - r/c_0$ 、である。式 (9) から本来望むべき信号 s のほかに高調波歪の原因となる s^2 が生成していることが分かる。 m が 1 に比べて十分小さい限りにおいては歪は無視できるが、2 次音圧は m に直接比例することから大きな可聴音を得るために m を大きくすると歪が顕著となる。例えば、 $m=1$ 、 $s(t) = \sin 2\pi f_0 t$ のとき、第 2 高調波成分対基本波成分は 1、つまり歪率は 100% になってしまう。このような高調波歪を減らすには、歪発生の原因が二つの側波帯の相互作用によるものであることから、一方の側波帯を取り除いた 1 次波変調、つまり単側波帯 (SSB) 変調方式にするか、逆に幾つもの側波帯を適切な大きさや位相をもって搬送波に与え、これらの周波数成分の相互作用によって生ずる多くの歪成分が都合よく打ち消し合うようにするか、が考えられる。後者の方法とは今回は

$$p_i = p_0 \sqrt{1 + ms(t)} \sin 2\pi f_0 t \quad (10)$$

に相当する。明らかに

$$p_{\infty} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{ms(\tau)\} \quad (11)$$

と歪が生じなくなる。この変調を以後、変形両側波帯 (MDSB) 振幅変調と言う。Table 1 に 3 方式の特性比較をあげる。信号波としては正弦波、 $m=1$ と想定した結果である。信号が正弦波でなく音声や楽音の場合、SSB 方式でも側波帯自身の非線形相互作用で歪が生ずるが MDSB 方式では生じない。MDSB 方式は DSB、SSB 方式に比較して周波数帯域が広がり、よってその帯域をカバーできる送波素子が必要となるが、歪が理論上なくなることや、1 次波から 2 次波への変換効率が SSB 方式よりよいことから有用な方式と言える。

ところで、1 次波はその周波数が高く距離減衰が大きくても、もともと大きな振幅であることから 10 m 近辺の受音点においては十分小さな値になっていない。例えば、 $f_0=40$ kHz では $\alpha=0.14$ 程度であるから 10 m の距離にて 1 次波はスピーカ近傍より 12 dB 減衰するの

Table 1 Comparison of characteristics for DSB, SSB and MDSB excitations.

| Characteristic | Excitation | | |
|---|---|------|----------|
| | DSB | SSB | MDSB |
| 2nd harmonic distortion [%] | 100 | 0 | 0 |
| Secondary wave sound pressure [dB]* (amplitude limited) | 0 | -1.0 | 0 |
| Secondary wave sound pressure [dB]* (power limited) | 0 | -4.4 | -2.5 |
| Bandwidth of primary wave | $f_0 - f \sim f_0 - f \sim f_0$ or $f_0 + f \sim f_0 + f$ | | wideband |

The symbol * denotes SPL of secondary wave relative to the level obtained by DSB excitation.

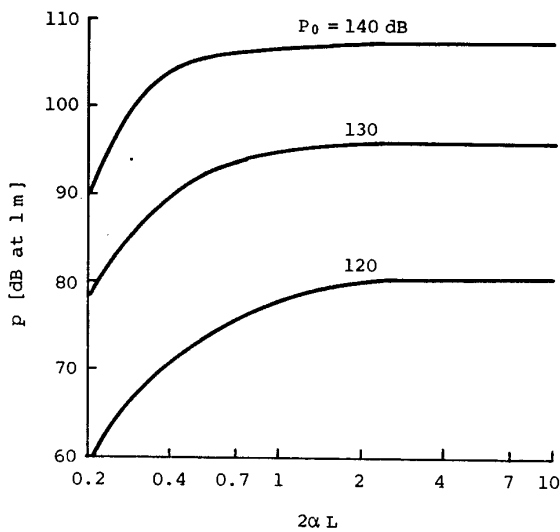


Fig. 3 Truncated parametric array. $f_0=40$ kHz, $f=3$ kHz, $a=15$ cm. L denotes the distance between sound source and an acoustic filter.

みである。無論実際は球面拡散や非線形吸収により1次波の減衰はその値より大きくなる。いずれにしても強力超音波を使用することになり、これがヒトの聴覚に与える影響が問題となる。1次周波数が低ければ低いほど α は小さくなりこの問題は深刻になる。1次波が聴覚の機能に与える影響については論じない。ここではむしろ1次波ができる限り小さくなるよう何等かの手段を講ずることを考える。最も簡易な方法は1次波のしゃ音、すなわち2次波は通し1次波は通さないような音響フィルタを1次波伝搬経路に設けることである。そこでFig. 3にそのような理想的な低減フィルタをスピーカから L の距離に置いたときの2次音圧の計算結果を示す。ただし、 $f_0=40$ kHz, $f=3$ kHz, $a=15$ cmとした。この数値結果をみると1次波の振幅が小さいとき定義されるアレー長 $1/2\alpha$ の距離で2次波はほぼ出来上がっており、これ以遠では1次波は2次波の生成に何等役に立っていない。

3. 実験

章2で述べたように1次周波数の決定は変換効率の観点から重要な問題であるが、今回はとりあえず市販の超音波振動子を利用することで f_0 を40 kHzとした。この振動子581個を平面状に並べ、振動子の入力端子をすべて並列接続した。スピーカ開口面の大きさは横39 cm, 縦36 cmの長方形で全形をFig. 4に示す。

ところで2次波の特性に対する理論と実験の対比を行おうとするならばスピーカの開口面を長方形にしたことで式(3)~(5)で与えた理論式を修正しなければならない。しかし、アスペクト比が1近傍においては開口面積の等しい円形なパラメトリックスピーカと特性をそれほど異にしない⁴⁾。事実、今回試作したスピーカを $a=\sqrt{39 \times 36/\pi} \approx 21$ cmの円形とみたとき、 $p_0=130$ dB, $f=2$ kHz, 音軸上 $r=10$ mにて p の理論値は73 dB, 実験値は71 dB, ほぼ一致が認められた。よって、MoffettとMellenに基づく計算結果はパラメトリックスピーカ

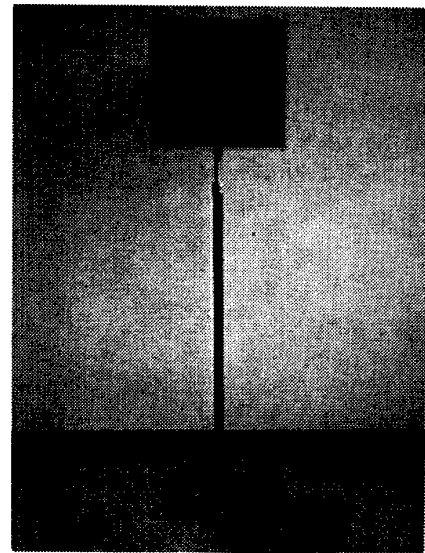


Fig. 4 View of parametric loudspeaker

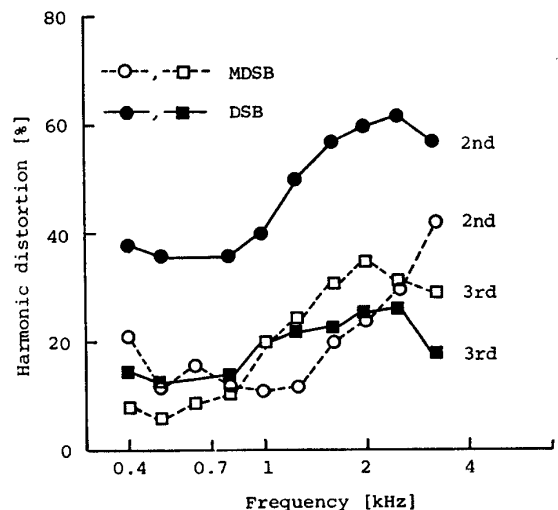


Fig. 5 Harmonic distortions for DSB and MDSB excitations.

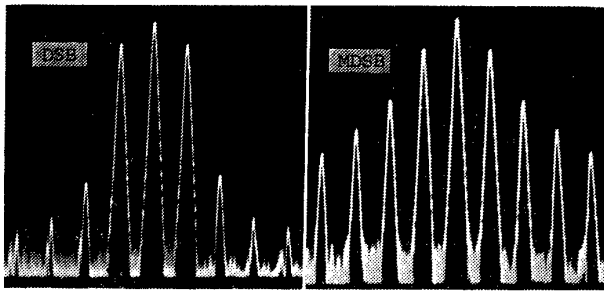


Fig. 6 Amplitude spectra of DSB and MDSB excitations. $f_0=40$ kHz, $f=1$ kHz. $H: 1$ kHz/div., $V: 10$ dB/div.

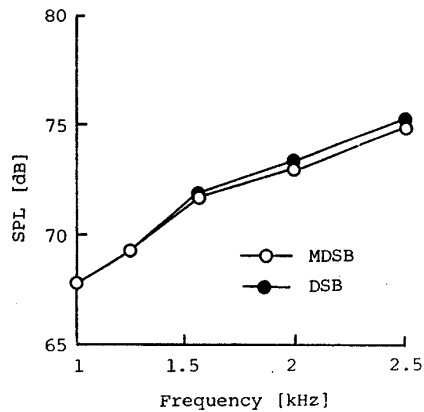


Fig. 7 SPL of secondary wave for DSB and MDSB excitations under the condition that peak supplied voltages for both excitations are equal. Receiving point=9.5 m.

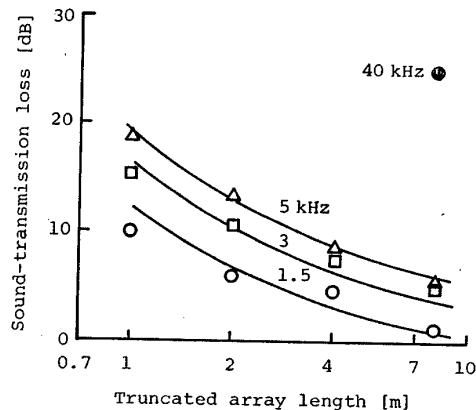


Fig. 8 Sound-transmission losses of secondary and primary waves by inserting air-pad material. Receiving point=9 m.

の特性予測に使用できると言える。

次に高調波歪を低減するための1次波変調方式についてDSBとMDSB方式をもって検討する。今回はSSB方式によるデータはあげていない。Fig. 5は第2, 第3高調波歪の周波数特性を2方式で比較したものである。周波数によって違いはあるものの全体的にMDSB方式においてはDSB方式より歪が小さい。特に第2高調波成分はおよそ1/3に減少している。理論的には存在しないはずの高調波成分が20%近くもあるということはFig. 6に示すようにMDSB方式の広い周波数帯域の電気信号が忠実に音響信号に変換されないとも考えられ

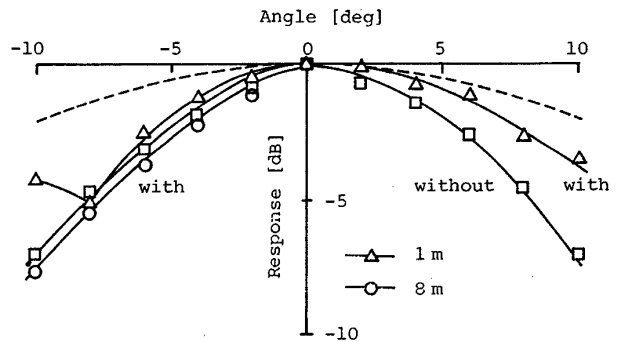


Fig. 9 Beam patterns for parametric loudspeaker with and without an acoustic filter. Broken line denotes the beam pattern of piston source of $a=21$ cm. $f=2$ kHz. Receiving point=9 m.

る。予備実験によればMDSB方式において基本波成分の大きさは変えずに歪を数%以内に抑えるためには少なくとも振動子の帯域が $f_0 \pm 2f$ 必要とされている⁵⁾。なお、 $m=1$ にしたにもかかわらずDSB方式で第2高調波の歪率が100%にならないのは振動子の周波数特性によるものである。

ところでスピーカへの印加電圧のピーク値を一定とする制限を課したときMDSB方式とDSB方式による2次音圧は等しいことをTable 1で示した。Fig. 7はこれを裏付ける実験結果である。予想どおり両方式による音圧は1 dB以内の差異で一致している。

最後の問題として1次波のしゃ音について議論する。しゃ音材としては梱包の際に利用している空気緩衝材(空気粒径10 mm, 空気粒高2.5 mm, 材質ポリエチレン)を用いた。その大きさは横120 cm, 縦150 cm, である。マイクロホンスピーカから音軸上9 mの地点に設置し, まず1次音圧, 2次音圧を測り, 次にしゃ音材をスピーカから1, 2, 4, 8 mに順次置くことで得る音圧をもって材料による透過損失を求めた。結果をFig. 8に示す。これを見るとしゃ音材がスピーカから遠ざかると共にアレー長が長くなり2次音圧が大きくなる, Fig. 3の数値の結果をよく反映している。1次音圧は8 mの地点にしゃ音材を置いた場合25 dB減衰する。115 dB程度あった1次音圧が90 dBまで小さくなったことから空気緩衝材は音響フィルタとして使用できる。

以上のようにしゃ音材を置くことで1次波の音圧レベルを低下させることはできるものの, 2次波の音圧も多少低くしてしまうのみならずそのビーム特性を変える懸念がある。もしビームが広がるのであればパラメトリックスピーカの存在価値は薄れる。Fig. 9はしゃ音材の挿入ではたしてどの程度ビーム特性が変わるか, 実験結果の一例を示すものである。8 mの地点にしゃ音材を置いたときはマイナス方向のみしか比較できないものの, しゃ音材がないときと比べてビーム特性はほとんど変わ

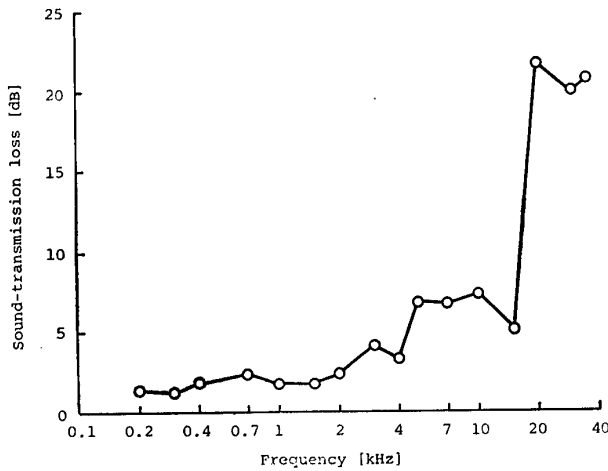


Fig. 10 Sound-transmission losses for an air-pad material used here.

らない。しかし、1 m の地点にしゅ音材を置くとアレー長が短くなるためビームは多少広がる。いずれにしても、2次波に対する透過損失が少ないしゅ音材を2次波が出来上がった領域に置けばパラメトリックスピーカの指向性は何等変化なかろう。なお、参考までにしゅ音材がないときの -3 dB 指向角を求めると 12° となり、これは Westervelt の指向角 $4\sin^{-1}\sqrt{\alpha/k}$ ($k=2\pi f/c_0$) の 14° にほぼ一致する。また、図中に $f=2$ kHz, $a=21$ cm の円形ピストン音源の指向性を破線で示したが、パラメトリックスピーカの方がより鋭いことが分かる。

Fig. 10 に今回使用した空気緩衝材による透過損失の周波数特性をあげた。損失量は 40 kHz で 20 dB 以上、5 kHz 以下では数 dB であって、この特性は Fig. 8 の 8 m における測定結果によく対応している。よって、このことからスピーカから遠く隔てた点に音響フィルタが存在する場合、線形理論に従ってそのフィルタによる1次波、2次波の減衰量を予測することは可能である。

4. 物理量の最適値決定問題

パラメトリック利得は音源音圧 p_0 、1次周波数 f_0 、媒質の特微量、特に非線形パラメータ β に依存することはすでに述べた。 p_0 が大きいほど非線形相互作用はより顕著に起こり、 f_0 が低いほどアレー長が長くなり、また β が大きいほど (β そのものよりも ρ_0, c_0 との関係式 $\beta/\rho_0 c_0^3$ が大きいほどという方が妥当かもしれない) 非線形効果がより増すことから利得は上昇する。もっとも第3番目の変数 $\beta/\rho_0 c_0^3$ は空気を対象とし、特別な媒質を1次波の相互領域内に用いない限り一定値とみられることから残り二つの物理量の最適値決定となる。

ところで Fig. 2 の計算によると、2次音圧として従来のスピーカと同程度の音圧レベル 110~120 dB//1 m を望むならば f_0 は 30 kHz 以下にすべきである。しかし、 f_0 を低くしすぎるとアレー長が長くなりすぎて1次波のしゅ音問題や受音点の適切な範囲、1次波の初期

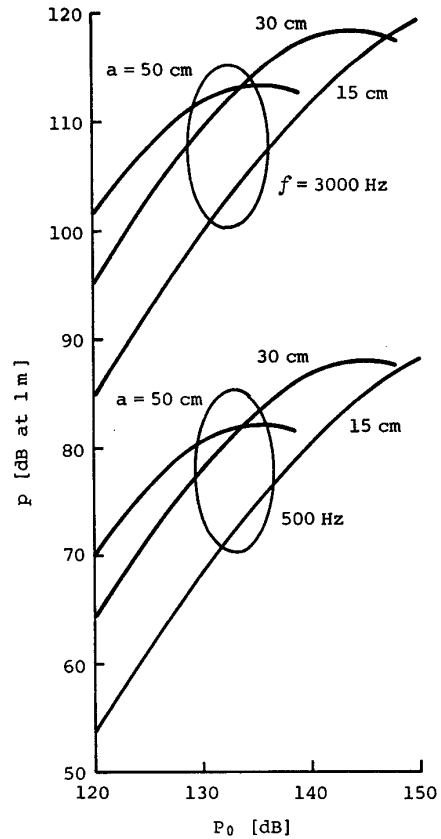


Fig. 11 Change of secondary wave sound pressure with primary wave sound pressure. $f_0=30$ kHz.

位相の2次音圧レベルに与える影響⁶⁾を考えなければならなくなる。アレー長は $f_0=10$ kHz で 34 m, $f_0=30$ kHz で 7 m 近くなることからスピーカから 10 m 程度離れた地点で音のスポットライトを行おうとするならば、1次周波数としては 30 kHz 付近が妥当である。

そこで、1次周波数は 30 kHz に固定し、スピーカの開口半径 a をパラメータとした音源音圧と2次音圧の関係を計算した。Fig. 11 はこの結果で、同じ大きさの2次音圧を得るにも a が大きいほど小さな p_0 の値で済むことがわかる。例えば、 $f=3$ kHz, $p=110$ dB の2次波を得るには $a=15$ cm では $p_0=139$ dB, $a=30$ cm では 131 dB, $a=50$ cm だと 128 dB と小さな値で済み、超音波振動子の製作上、また、1次波のしゅ音対策に有利となる。ただ、2次波の飽和レベルは a が小さいほど高くなる。この傾向は $f=500$ Hz でもみられる。

さて、今までパラメトリックスピーカの特長とするところの指向性については何等触れなかった。スピーカの開口面の大きさや音源音圧によってどのように指向性が変化するか極めて重要な問題である。そこで、Moffett と Mellen の理論式に基づきこの点について検討してみる。彼らはパラメトリック音源の指向関数 $D(\theta)$ を次式

$$D(\theta) \approx \cos \gamma D_{ap}(\theta) \left(1 + j \frac{4\rho_0 c_0^2 f_0}{\beta p_0 f} |g| \cos \gamma \times \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)^{-1} + j \sin \gamma |D_0(\theta)|^2 \quad (12)$$

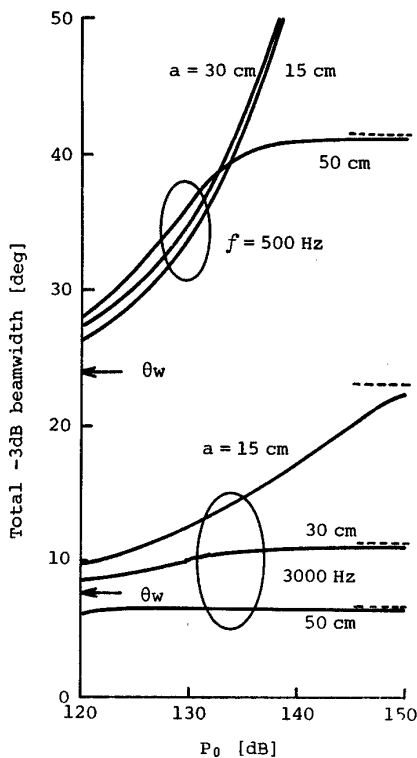


Fig. 12 Beamwidths for $a=15, 30$ and 50 cm parametric loudspeakers. $f_0=30$ kHz. Broken line and θ_w denote the beamwidth of piston source and Westervelt's beamwidth, respectively.

で与えた²⁾。ここで、 $D_{ap}(\theta)$ は開口修正因子 (aperture correction factor) $D_0(\theta)$ は 1 次波に対する音源の指向関数、である。この式(12)を用いて $f_0=30$ kHz とし、 f 及び a をパラメータにしたときの p_0 と -3 dB 指向角を求めたのが Fig. 12 である。音源音圧が増すと非線形吸収のため指向性は悪くなる。特に $a=15$ cm では顕著である。しかし、 $f=3$ kHz のとき $a=30$ cm や 50 cm では目立つ指向性の悪化は見られない。これは開口の寸法が 2 次波の波長より大きくなり、縦型アレーとしての本来のビーム特性よりも仮想音源の音軸垂直方向の配列、すなわち横型アレーとしての、式(12)でいう $D_{ap}(\theta)$ の効果を強く受けることによるものである。よって指向性に関する限り 2 次周波数が高いときにはパラメトリックスピーカの有用性は薄れることになる。一方、2 次周波数が 500 Hz と低いとき、パラメトリックアレーの特徴が指向性によく現れている。しかし、3 kHz のときと同様、音源音圧の増加は指向性を悪化させる。なお、Fig. 12 の中で破線は $D_{ap}(\theta)$ の -3 dB 指向角 $2\sin^{-1}(1.6/ka)$ 、また θ_w は Westervelt の指向角を示す。

以上の数値結果から音声帯域で 110 dB // 1 m 程度の音圧を条件としたパラメトリックスピーカの設計資料が得られる。まず、アレー長を決定し、パラメトリック利得に大いに関与する 1 次周波数は 30 kHz 前後、次にスピーカの指向性、2 次音圧レベルの観点からスピーカの大きさは半径 30 cm、音源音圧は 130 dB 付近が適当で

ある。無論、設計基準、すなわち求める 2 次音圧レベル、周波数帯域、指向性の条件によって最適値は変化する。

なお、パラメトリック利得の計算においては 1 次波は平衡変調とした。しかし、パラメトリック音源をスピーカとして使用する際には 1 次波を振幅変調する。1 次波の変調をこのように変えることで利得が上昇することに注意しなければならない。

5. あとがき

二つの有限振幅音波の非線形相互作用による差音の発生はもともと空中で確認され、これが引き金となり Westervelt によるパラメトリックアレーの理論解析と発展してきた。その後、パラメトリックアレーはもっぱらパラメトリックソーナで代表されるように水中で計測用装置の一部として実用化され、空中でのそれは敬遠されてきた。これには幾つかの理由があるが、最も大きな理由は電気音響変換効率の低さに加えてパラメトリックアレーの応用が明確にされていなかったことにある。しかし、筆者の一人は先にビームに特長をもつパラメトリックアレーが超指向性空中スピーカとして使用できることを示したのである¹⁾。

本文では、パラメトリックアレーの大きな欠点として以前より指摘されてきた低い変換効率が 1 次周波数や音源音圧などの音響物理量により大きく変化することに着目し、大きな 2 次音圧を得るための物理量の最適値決定を中心に議論した。そして、音声帯域のスピーカを目的としたとき、80~110 dB // 1 m の音圧は可能であることを数値計算より指摘した。なお、2 次音圧を単に上げたいならば幾つものパラメトリックスピーカを用いればよい。例えば、2 台のスピーカでは 6 dB 音圧が増す。これについては予備実験で確認している。

パラメトリックスピーカをどのような方面に利用するかは今後の課題にしても、指向性や音圧レベル、また高調波歪に満足できるスピーカを得るには周波数帯域や再生音圧レベルに問題のない 1 次波音源、すなわち超音波振動子の開発が望まれる。

謝 辞

本研究を進めるに当たり熱心に議論して下さい大阪大学の中村昭先生、電気通信大学の熊本芳朗先生、非線形音響研究会の会員に感謝します。また、スピーカの試作については台湾工業技術学院の周英敏先生のお世話になった。ここに感謝します。なお、パラメトリック利得の計算には電気通信大学の竹内俱佳先生が作られたプログラムを参考にさせていただいたことを付記する。

文 献

1) M. Yoneyama, J. Fujimoto, Y. Kawamo and S. Sasa-

- be, "The audio spotlight; An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design," *J. Acoust. Soc. Am.* **73**, 1532-1536 (1983).
- 2) M. B. Moffett and R. H. Mellen, "Model for parametric acoustic sources," *J. Acoust. Soc. Am.* **61**, 325-337 (1977).
 - 3) H. O. Berkta, "Possible exploitation of nonlinear acoustics in underwater transmitting applications," *J. Sound and Vib.* **2**, 435-461, (1965).
 - 4) M. B. Moffett, R. H. Mellen and W. L. Konrad, "Parametric acoustic sources of rectangular aperture," *J. Acoust. Soc. Am.* **63**, 1326-1331 (1978).
 - 5) 青木茂明, 鎌倉友男, 池谷和夫, "平面波の自己復調—広帯域信号伝送のための1次波変調方式の検討," *音響学会誌* **40**, 349-356 (1984).
 - 6) T. Kamakura, K. Ikegaya and I. M. Chou, "Nonlinear interactions of finite amplitude and weak subharmonic plane waves—Phase-dependent parametric amplification," *J. Acoust. Soc. Jpn (E)* (to be published)
 - 7) A. I. Eller, "Application of the USRD type E8 transducer as an acoustic parametric source," *J. Acoust. Soc. Am.* **56**, 1735-1739 (1974).
-