

# 振動子特性に着目したパラメトリックスピーカの駆動

## Drive of Parametric Loudspeaker Focusing on the Characteristics of Transducer

1W130535-2 南 翔汰 指導教員 及川 靖広 教授

MINAMI Shota

Prof. OIKAWA Yasuhiro

概要：パラメトリックスピーカは鋭い指向性を持ったスピーカであり、音のスポットライトの形成を可能にするため、幅広い用途での利用が期待されるが、実際の駆動においては高調波歪みの発生によって音質に課題を残す。これを解決する変調方式として提案された Modified Double-Sideband (MDSB) 変調も、振動子の周波数特性によって理論と異なり高調波歪みが生じる。そこで振動子の周波数特性を測定し、測定データのうちアドミタンス特性に着目し、その特性を補正するフィルタを設計し、評価を行った。変調度が大きい場合での高調波歪みの低減が認められた。さらに、振動子の個体差がアレイ配置した際に及ぼす影響も考察を行った。個体ごとの共振周波数の偏差が大きいほど復調可聴音の周波数特性がより平坦になりやすいことを確認した。

キーワード：非線形音響、高調波歪み、MDSB 変調、相互放射インピーダンス

Keywords: Nonlinear acoustics, Harmonics distortion, MDSB modulation, Mutual radiation impedance

### 1. ま え が き

パラメトリックスピーカは超音波を用いたスピーカであり、鋭い指向性を持つことから、目的の場所のみに音を届けることが可能となる。しかし、パラメトリックスピーカは目的音に対して高調波歪みが生じる。理論的に高調波歪みのない Modified Double-Sideband (MDSB) 変調 [1] などが提案されてきたが、超音波振動子の周波数特性によって実際には高調波歪みを生じる。本研究では、高調波歪みの低減を目的とし、振動子の周波数応答特性に応じて補正し、評価を行った。さらに、振動子の周波数特性の個体差がアレイ配置へ及ぼす影響も実験・考察を行った。

### 2. パラメトリックスピーカ

#### 2.1 原 理

媒質の非線形性を無視できないほどに振幅が大きい音波を有限振幅音波と呼ぶ。周波数が接近した2つの有限振幅音波を放射すると、媒質の非線形性によって2波の和音、差音やそれぞれの高調波が2次的に発生する。この2次波は1次波である有限振幅音波の伝搬に伴い振幅を増し、伝搬方向では同位相になり振幅が加算されるが、伝搬方向から逸れると位相が揃わず加算されない。これにより2次波は鋭い指向性を持つ [2]。この性質により、超音波を可聴音で変調したものを1次波として放射すると、空気中の非線形性により、変調に用いた可聴音が2次波として生成され、復調されるような挙動を示す。ここで、2次波音圧  $p(t)$  は、1次波音圧  $E(t)$  に対して十分遠い距離  $z$  において、

$$p(t) = \frac{\beta p_0^2 S}{16\pi\rho_0 c_0^4 \alpha z} \frac{\partial^2}{\partial t^2} E^2(t) \propto \frac{\partial^2}{\partial t^2} E^2(t) \quad (1)$$

で表されることが知られている [3]。ここで、 $\alpha$  は吸収係数、 $\beta$  は非線形パラメータ、 $S$  はスピーカ面積、 $p_0$ 、 $\rho_0$ 、 $c_0$

はそれぞれ1次波音圧、空気密度、音速である。すなわち可聴音圧は、 $E(t)$  の2乗の2階微分に比例し、これが高調波歪みの要因となっている。

#### 2.2 MDSB 変調

理論的に高調波歪みを生じない変調方式として MDSB 変調が挙げられる。変調度  $m$ 、搬送波周波数  $f_c$  とすると変調信号を

$$E_{\text{MDSB}}(t) = \sqrt{1 + m} s(t) \sin(\omega_c t) \quad (2)$$

とする方式である ( $\omega_c = 2\pi f_c$ )。1次波を  $E(t)$  とすれば式 (1) より、信号音の2乗の2階微分に比例するため、先に平方根をとることで2次波に高調波が含まれないものになっている。

#### 2.3 超音波振動子の周波数特性

実際は、振動子の周波数特性により、振動子への入力とその出力が異なってしまうため、理論とは異なり、MDSB 変調波を入力しても実際には高調波歪みを生じる。

図-1 に、代表的な超音波振動子の周波数特性を示す。なお、アドミタンスはインピーダンスの逆数であり、その実部がコンダクタンス、虚部がサセプタンスである。ここで、用いた素子は SPL(Hong Kong) Limited 製の UT1007-Z325R である。共振周波数が 40 kHz と 60 kHz 周辺に存在している。前者は音波の伝搬方向の振動モードであり、その共振周波数を搬送波に使用する。

また、図-1 に示したような超音波振動子を複数個用意し、その中で 40 kHz 近辺に持つ共振周波数の値の偏差が小さいもの (以下アレイ N と記す) と大きいもの (以下アレイ F と記す) を 20 個ずつ収集しアレイ状に配置し並列に接続したものの放射音圧の測定も行った。その結果を図-2 に示す。アレイ N は共振周波数での音圧を得られ一方、平坦な特性を持たず、アレイ F は音圧を得にくい分、共振周波数近辺で比較的広い帯域で平坦な周波数特性を実現している。

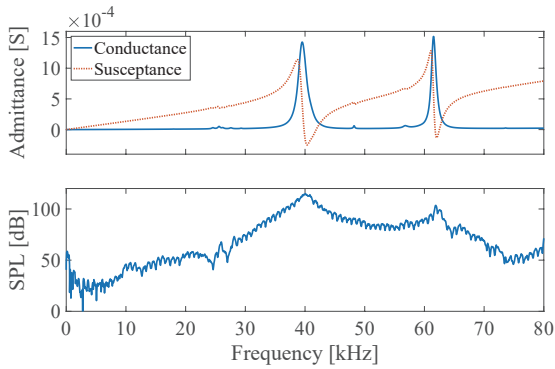


図-1 一般的な超音波振動子のアドミタンス特性 (上) と放射音圧特性 (下)

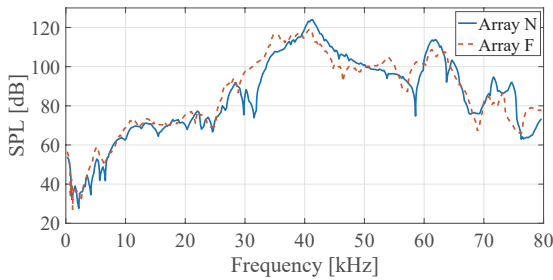


図-2 各アレイの放射音圧の周波数特性

### 3. 振動子周波数特性と復調可聴音の周波数特性

図-1 に示されるアドミタンス特性を持った振動子に MDSB 変調信号を入力し、レーザドプラ振動計 (LDV) とマイクロホンを用いて振動子の振動と可聴音を測定した。ここで測定に用いたオーディオ信号は 0~16 kHz チャープ信号で、搬送波周波数は 39.6 kHz、駆動電圧は 10 Vrms とした。

#### 3.1 振動測定

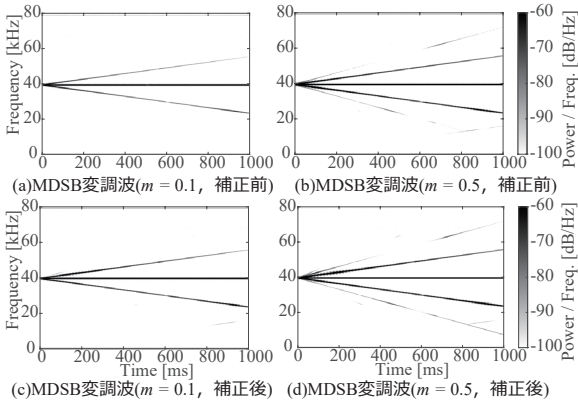


図-3 測定した振動速度のスペクトログラム

測定結果を図-3 に示す。LDV を用いて測定した補正前の振動速度のスペクトログラムを図-3(a), (b) に示す。変調度が低い場合、搬送波周波数に対して側波帯のエネルギーが小さい。しかし、変調度が大きくなると、搬送波周波数を中心に必要側波帯が増えることが分かる。次に、補正を行った後の振動子の振動を図-3(c), (d) に示す。m が 0.1 の場合、元々搬送波に対して信号波のエネルギーが非常に小さいため、補正前後、すなわち図-3(a) と (c) の間で明確な差はみられていない。m が 0.5 の場

合、すなわち図-3(b), (d) を比べると、搬送波の下側の 2 本目の側波帯がより大きく出るようになったが、側波帯を等レベルに保てていない。アドミタンス特性のみの補正では十分でないことが分かる。

#### 3.2 可聴音測定

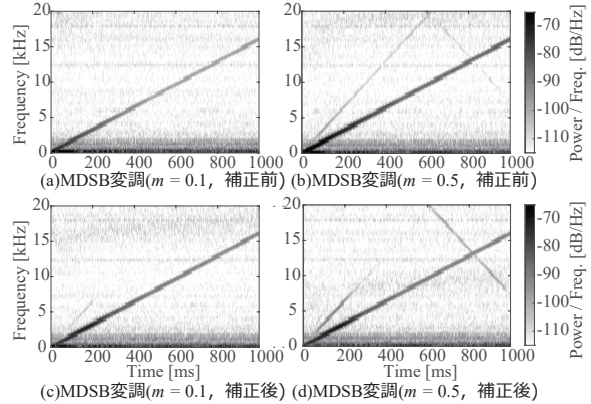


図-4 測定した可聴音のスペクトログラム

振動子から直進方向 0.15 m の地点で可聴音の測定を行った。補正前の信号を図-4(a), (b) に、補正後のものを図-4(c), (d) に示す。変調度が 0.5 の場合、図-4(b) と (d) を比較すると、可聴帯の中でも 10~20 kHz の部分においては補正による高調波の低減が確認できた。しかし、変調度が大きいことにより、搬送波周波数の下側の側波帯を広く要するため、両図の右側部分から分かるように、変調信号自体が可聴帯にまで入り込んでしまっている。高調波は低減されるが、変調度の大きい場合では高周波数の再生には向かないことが分かる。また、図-4(a), (c) より、変調度が低い場合は、補正後にわずかな高調波が発生してしまっている。

### 4. むすび

本研究ではパラメトリックスピーカの駆動において、高調波歪みを取り除くべく、振動子の周波数特性を補正するフィルタを適用し、評価を行った。振動子が搬送波周波数に対し対称な特性を持つ場合の高調波の低減を確認したが、アドミタンスのみの補正では高調波歪みの低減は難しいことが結論付けられた。また、振動子の個体差がアレイ配置の際にその周波数特性に及ぼす影響についても考察を行い、共振周波数の偏差が大きい振動子でアレイを作ることにより周波数特性が共振周波数近辺でより平坦に設計でき、高調波歪みの少ない駆動ができる可能性を示した。今後は、補正後の特性に関して位相や 1 次波音圧の考察を進めていくと共に、アレイ配置の際の相互放射インピーダンスの影響を考慮していく。

#### 参考文献

- [1] 鎌倉友男, 米山正秀, 池谷和夫, “パラメトリック・スピーカの変調方式の検討,” 昭和 58 年電気学会関西支部連合大会, 第 3 回研究懇談会, 1983.
- [2] P. J. Westervelt, “Parametric acoustic array,” J. Acoust. Soc. Am., Vol.35, No.4, pp.535-537, 1963.
- [3] M. Yoneyama, J. Fujimoto, Y. Kawamo and S. Sasabe, “The audio spotlight: an application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design,” J. Acoust. Soc. Am., Vol.73, No.5, pp.1532-1536, 1983.