

MEMSスピーカを用いたデジタル直接駆動システムにおける2値の線形駆動と3値ISIシェーパの検証

高木, 玲爾 / TAKAKI, Reiji

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

65

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

7

(発行年 / Year)

2024-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030708>

MEMS スピーカを用いた デジタル直接駆動システムにおける 2 値の線形駆動と 3 値 ISI シェーパの検証

digital direct-drive speaker system
using mems speakers with 3value ISI shaper

高木 玲爾

Reiji TAKAKI

指導教員 安田彰

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

We propose a system using digital direct drive, *ternary* ISI shapers, and MEMS speakers. The system is intended to be a highly efficient and low distortion audio system. In particular, the driver circuit was used a regenerative circuit that utilizes the characteristics of MEMS speakers. It was verified the efficiency and distortion rate by actual measurement.

Key Words : $\Delta\Sigma$ modulator, NSDEM, ISI shaper, *ternary* drive, MEMS speaker

1. はじめに

音楽を再生するには、スピーカが必要である。一般に用いられるのは、ダイナミックスピーカやバランストアーマチュアなどがある。近年、Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) という技術で開発された MEMS スピーカがある。このスピーカは、ダイナミックスピーカと比較すると、サイズが小さく、消費電力が小さい。しかし、容量性のインピーダンスを持つ。ダイナミックスピーカと同じドライバ回路を MEMS スピーカへ使用すると、容量に充電した電荷はグラウンドへ放電される。放電した電荷は、そのまま消費電力となってしまう。この電荷を回収することで、消費電力の低減、Bluetooth の音声機器や携帯電話の長時間再生が可能となる。

MEMS スピーカをデジタル直接駆動システムで高い周波数で駆動すると問題が生じる。スピーカ内の振動板は、スイッチングアンプの低周波成分の出力に応じてゆっくり動く。これが非線形性となり、音として再現される。ここで、スイッチング信号の 2 値対応する位置に、振動板が速やかに移動できれば、2 値駆動となる。2 値駆動では、原理的に歪が生じないため、非線形性による歪をキャンセルできる。

さらに、電荷の回収に問題がある。回収すなわち充放電を行うが、充電、放電に時間を要する。デジタル直接駆動システムのデジタル信号の遷移にスルーレートの制限やリングングが現れる。この影響を低減するために Inter Symbol Interference (ISI, 符号間干渉) シェーパを利用する。

以上から、本研究では、MEMS スピーカとデジタル直接駆動スピーカを組み合わせ、駆動で発生する歪を低減することを目的とする。そのために、ISI シェーパを用いた構造の提案する。

2. デジタル直接駆動システム

(1) デジタル直接駆動システム

一般的なオーディオシステムでは、PC や CD のデジタル信号から DAC によりアナログ信号へ変換、アンプやフィルタで増幅、カットし、スピーカを駆動する。デジタル直接駆動システムでは、アナログ信号への変換、アナログ回路の使用がないため、低ノイズ、低消費電力、回路規模の削減を実現できる。図 1 にシステムの構成を示す[1]。

また、各ブロックにおける出力を図 2 に示す。

デジタルデータを入力信号としていて、正弦波を例にしている。 $\Delta\Sigma$ 変調器により、Pulse-density modulation (PDM・パルス密度変調)が行われる。これにより PDM 信号になる。PDM 信号を温度計コードに変換し、bit 毎の重み付をなくす。その後、Noise Shaping Dynamic Element Matching (NSDEM) に入力する。NSDEM では、各スピーカの使用頻度が一定になるように、温度計コードの出力

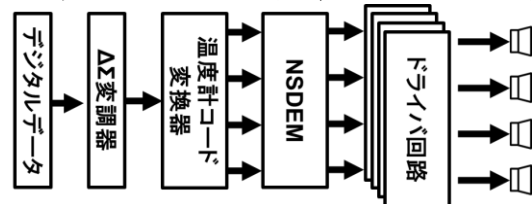


図 1 スピーカのデジタル直接駆動システムの構成

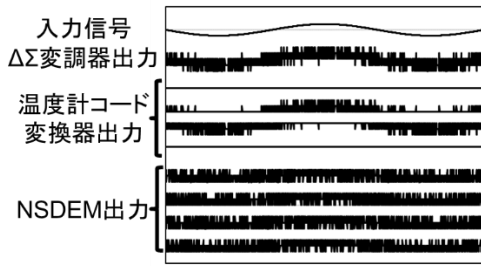


図 2 各ブロックにおける出力

と同じ量の出力をするように、スピーカを選択する。これにより、スピーカ間の誤差である mismatches の影響を低減する。

(2) ΔΣ変調器

図 3 に ΔΣ 変調器を示す。加算器、積分器、量子化器で構成される。

z 領域において、解析を行う。入力 $X(z)$ 、出力 $Y(z)$ 、積分器 $H(z)$ 、量子化器で追加されるノイズ $Q(z)$ とすると、

$$Y(z) = STF(z) X(z) + NTF(z) Q(z) \quad (2.1)$$

$$STF(z) = \frac{H(z)}{1+H(z)} = z^{-1} \quad (2.2)$$

$$NTF(z) = \frac{1}{1+H(z)} = 1 - z^{-1} \quad (2.3)$$

となる。ここで、 $STF(z)$ は Signal Transfer Function すなわち信号伝達関数で、 $NTF(z)$ は、Noise Transfer Function すなわち雑音伝達関数である。入力は遅延 1 回行われることがわかる。量子化ノイズは、ハイパス特性を得られ、これをノイズシェーピングと呼ぶ。

積分器の数に ΔΣ 変調器の次数が比例する。次数により、ノイズシェーピングの傾きが変化する。n 次の ΔΣ 変調器は、20n [dB/oct] の傾きを得られる。増やせば増やすほど、安定性は落ちていく。1bit では 3 次以降不安定な出力を見せる。マルチビットでは安定化しやすいため、3 次の ΔΣ 変調器を構成することは可能である。

(3) 温度計コード変換器

マルチビットの ΔΣ 変調器では、ビット毎に信号を伝える必要がある。重み付の無いコードである、温度計コードで伝達する。温度計コードでは、重み付がないため、スピ

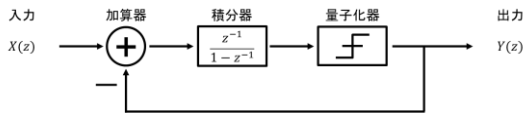


図 3 ΔΣ変調器

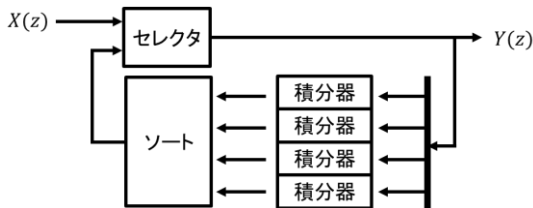


図 4 2 値 NSDEM のシステム図

一カの数だけビットを使う。また、0, 1 を扱う 2 値とは異なり、-1, 0, 1 を扱う 3 値では、その倍のビット数を使用する。

(4) NSDEM

図 4 に 2 値 NSDEM のシステム図を示す。NSDEM では、スピーカ自体の誤差・ばらつきの影響を小さくする。積分器で使った回数を積分し、使用回数の少ない順にセレクタで選択する。ばらつきが原因となるノイズが低減する。これを mismatches シェーピングと呼ぶ。

(5) ドライバ回路

初めに、ハーフブリッジ回路を図 5 に示す。3 値では使用できないが、2 値で使用可能となる。片側は常に接地している。扱うのが低電圧または低周波信号であれば、ハイサイドは PMOS、ローサイドは NMOS と異なる MOS トランジスタを配置することが可能。しかし、高電圧や高周波信号の場合、どちらも NMOS にする必要がある。前者は、信号を高電圧で扱うことがないため。後者は、ゲート容量の差などにより、オン時間に差が生まれる。この差によりどちらもオン状態なり、貫通電流の原因となる。これには、ハイサイドの入力には、ブートストラップ回路で電圧を上げる必要がある。

次にフルブリッジ回路を図 6 に示す。負荷周りの形状から H ブリッジ回路とも呼ぶ。ハーフブリッジ回路を 2 つ使い、片方を反転させて配置している。2 値でも 3 値でも駆動が可能である。2 値の場合は、入力を反転させて反対に入力させる。ハーフブリッジと比べて、出力を倍にできる。フルブリッジの 2 値と比べて 3 値の方が、「0」の駆動が存在するため、消費電力の低減にもつながる。

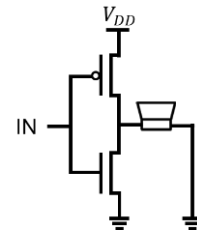


図 5 ハーフブリッジ回路

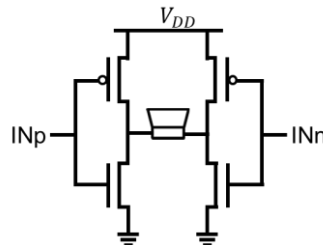


図 6 フルブリッジ回路

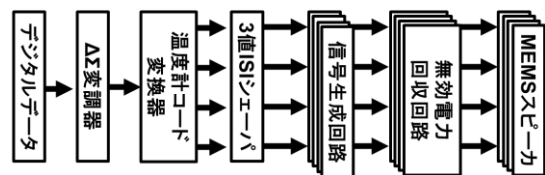


図 7 提案するシステム

3. 提案手法

(1) システムの全体

図 7 に提案するシステムを示す。デジタル直接駆動システムと比べ、温度計コード変換器の次から異なる構成となっている。

出力側から説明する。MEMS スピーカをスピーカに使用する。このスピーカは Micro Electro Mechanical System という微小電気機械システムという技術によって作られた。マイクや圧力センサなどにも使用されている。MEMS スピーカは、従来のダイナミックスピーカと比べ、小さく、消費電力が小さい。デジタル直接駆動システムでは、スピーカを複数使用できると、量子化ノイズを小さくできる。また、 $\Delta\Sigma$ 変調器の高次化における安定性にもつながる。このため、MEMS スピーカとデジタル直接駆動システムを組み合わせることにより、低消費電力、低雑音スピーカシステムを実現することが可能となると考えられる。

NSDEM であったブロックは、3 値 Inter-Symbol Interference (ISI)シェーパーに置き換える。これは、NSDEM と似ていて、NSDEM では、スピーカの誤差のみを取り扱っていた。すなわち、出力はデジタル信号の様にスルーレートが無限大で、値が 0 から 1 など変化するまたはしないときの電圧の影響をみていない。ISI シェーパーでは、その信号の変化による影響を低減する。

(2) MEMS スピーカ

MEMS スピーカとダイナミックスピーカではインピーダンス特性が異なる。ダイナミックスピーカは一般的にインダクタンスと抵抗で等価される。しかし、MEMS スピーカは、容量性を持つ。表 1 に測定したインピーダンスを示す。また、図 8 に周波数特性を示す。特に、可聴域である 20~20kHz においては容量性インピーダンスの影響が強いと考えられる。

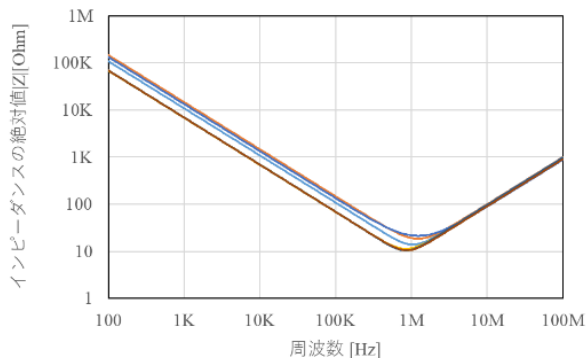


図 8 MEMS スピーカのインピーダンス

表 1 MEMS スピーカの各パラメータの平均値と中央値

	R[Ohm]	L[uH]	C[nF]
平均値	13.4	9.47	120
中央値	11.0	9.51	144

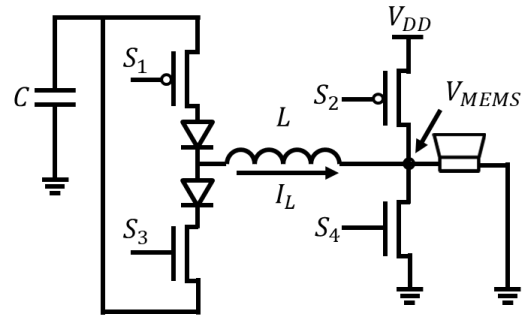


図 9 無効電力回収回路

(3) 無効電力回収回路と信号生成回路

前項で MEMS スピーカが容量性であることを述べた。容量性のため、図 5 や図 6 のようなドライブ回路の使用に問題が発生する。簡単のために、図 5 のハーフブリッジ回路で考える。スピーカ部分をコンデンサとして考える。入力が Low のとき、充電される。また、入力が High とき、放電される。この充放電により無効電力が発生する。これを回収する回路を図 9 に示す[2]。

この回路は、ハーフブリッジ回路に追加で、インダクタ、ダイオード、PMOS、NMOS、コンデンサを使用している。

図 10 に、入力を IN 、入りに遅延を入れた信号を IN_{delay} 、として、各状態でのスイッチ信号と電圧 V_{MEMS} とインダクタ L に流れる電流のイメージを示す。S1 と S2 は、PMOS への入力になるため、最後に反転して入力する。状態 1 では、充電を行う。状態 2 では電源電圧へのクリップを行う。状態 3 は放電を行う。状態 4 では GND へのクリップを行う。 IN と V_{MEMS} を比較するとスルーレートに制限をかけた波形となる。この充放電は、 L と C の発振を利用して、行っている。

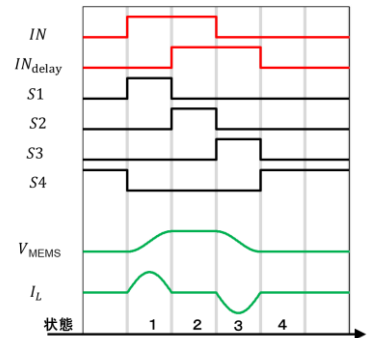


図 10 各状態におけるスイッチ信号と電圧、電流

(4) ISI シェーパー

ISI シェーパーは、NSDEM をもとに作成された。デジタル直接駆動では、デジタル波形のようにスルーレートが無限大で、リングングやオーバーシュートなどが無い状態を理想として考えられている。実際に、ダイナミックスピーカを接続したドライブ回路の電圧波形には、スルーレート、リングング、オーバーシュートを含んでいる。これを符号間干渉・ISI と呼んでいる。この影響のデジタル信号処理での低減を ISI シェーパーでは実現している。

図 11 に 2 値の立ち上がりのシェーピンググループを示す。図 12 に 2 値の ISI シェーパーを示す[3]。図 11 の立ち

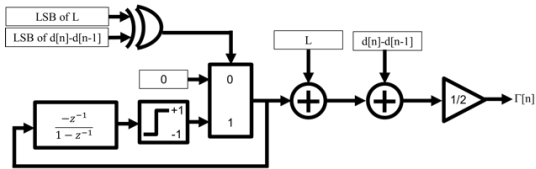


図 11 2 値の立ち上がりのシェーピンググループ

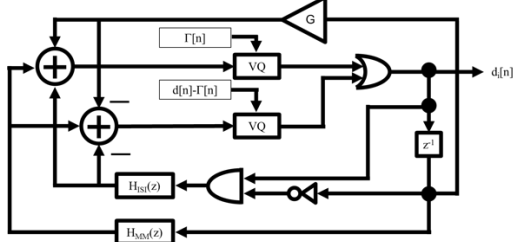


図 12 2 値の ISI シェーパ

上がりのシェーピンググループでは、任意の定数 L の -1 , ± 0 , 1 の 3 パターンを決定し出力する. 図 12 では, ミスマッチのシェーピンググループと ISI のシェーピンググループが存在する. 図 11 の出力をもとに, 立ち上がりを使用する素子と ON の状態を保持する素子をセレクトである VQ でそれぞれ選択する.

図 13 に 3 値の ISI シェーパを示す. 2 値では, $0, +1$ の 2 種を 2 クロック分だけ見たときの 4 パターンだった. しかし, 3 値では, $-1, 0, +1$ の 2 クロック分で 9 パターンを考える必要がある. そのため, 複雑化している. 特に, ベクトル量子化器 (VQ) は, それぞれで優先順位の決め方が異なる. その決め方については省略する.

(5) $\Delta\Sigma$ 変調器を下げることによる低歪化

前項で述べた通り, デジタル直接駆動システムは, 出力が矩形であることを理想としている. ここで, スピーカ内部の振動板について着目する. 図 14 に振動板のイメージを示す. もし, スピーカに印加された電圧が 2 値のように離散的だったとき, (a) の様に, 振動板の動きも離散的に動くだろうか. 入力された信号の周波数と振動板が動く速度を比較して, 入力信号の周波数が速い場合, (b) の様に連続的な位置を取りつつ収束すると考えられる. このように, MEMS スピーカの入力電圧と振動板の位置の関係が非線形性であるため, 歪が発生する. この対策として, 駆動周期を長くすなわち駆動クロックを低くする. これにより連続的に動く時間が駆動クロックに対して短くなるため, 影響を小さくできる [4].

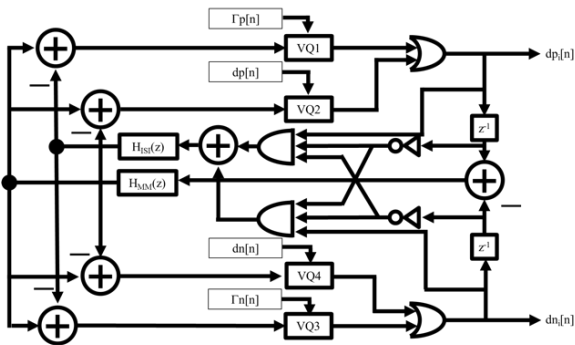


図 13 3 値の ISI シェーパ

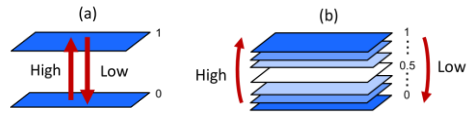


図 14 (a) 線形な振動板の動きのイメージ
(b) 連続的な振動板のイメージ

4. シミュレーション結果

(1) 無効電力回収回路

図 9 のシミュレーションに使用した素子やパラメータを表 2 に示す. また, 図 15 に図 9 の回路のシミュレーション結果を示す. 負荷は, MEMS スピーカのインピーダンスを利用した. インダクタに流れている電流と電圧波形から充放電が行われていることがわかる. しかし, 電源電圧までは充電しきれておらず, GND までの放電も行われていない. これは, ダイオードや MOS, インダクタの寄生抵抗に起因している. また, 髭のような瞬間的なオーバーシュートやリングングが存在している. これは寄生容量によるものである.

(2) ISI シェーパ

ISI として, 2 値信号にオーバーシュート, リンギング, 不安定な電源を再現した波形を図 16 に示す. また, 図 7 のシステムにおいて, $\Delta\Sigma$ 変調器の出力, ISI シェーパの出力, 比較用に ISI シェーパを NSDEM に置き換えた 3 つの出力を比較する. システムの出力は, サンプリング時間毎に 0 または 1 である. 2 周期の出力を見て, $0 \rightarrow 1$ と変化した際には, 図 16 の立ち上がりから安定までのデータに置き換える. 他の $0 \rightarrow 0, 1 \rightarrow 0, 1 \rightarrow 1$ も同様に図 16 の ISI を適応させた. 適応させた出力に 5% のミスマッチをかけた波形と入力信号である正弦波を FFT 解析した結果を図 17 に示す. $\Delta\Sigma$ 変調器と NSDEM の出力は, ノイズフロアが増加している. 対して, ISI シェーパの出力は, 低域までノイズシェーピングが続いていることがわかる. 図 16 の ISI の影響を小さくできた.

表 2 使用素子とパラメータ

Diode	RB168VYM-60
NMOS	rsf014n03
PMOS	rzf013p01
コンデンサC	1uF
インダクタL	100uH

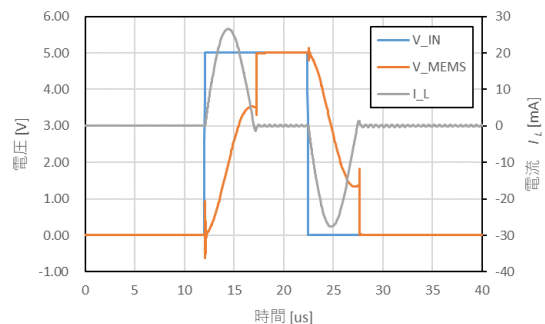


図 15 入力電圧, 出力電圧とインダクタの電流

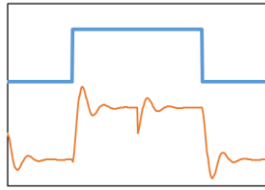


図 16 2 値のシミュレーション用の ISI 波形

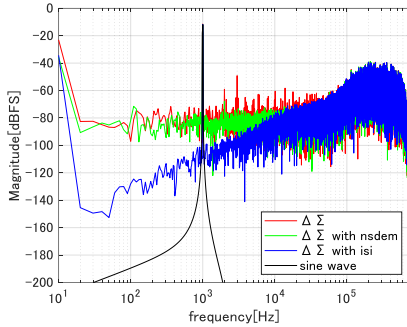


図 17 2 値の FFT 解析結果の比較

2 値同様、3 値のシミュレーション用の ISI 波形を図 17 に示す。スルーレート、オーバーシュート、リングングを考慮している。この場合の図 7 のシステムの出力を FFT 解析した結果を図 18 に示す。2 値の時ほど、明確な差があるわけではない。しかし、2 次高調波に着目すると、ISI シェーパの出力がもっとも小さい。また、歪率を計算した結果を表 3 に示す。歪率としても、ISI シェーパの出力が最も低く、NSDEM の半分未満の値であった。

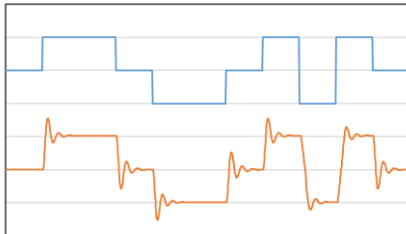


図 18 3 値のシミュレーション用の ISI

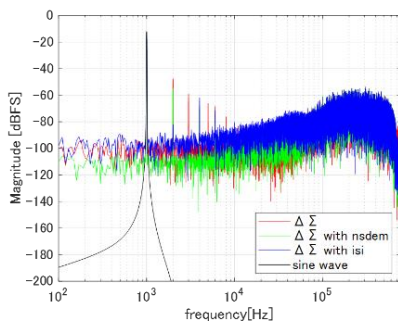


図 19 3 値の FFT 解析結果の比較

表 3 図 18 の歪率の比較

構成	歪率[%]
ΔΣ 変調器	1.83
ΔΣ 変調器 with NSDEM	0.79
ΔΣ 変調器 with ISI shaper	0.36

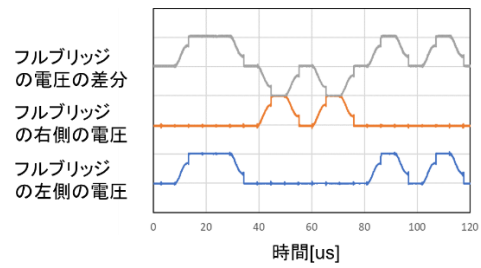


図 20 測定した電圧波形

5. 実験結果

(1) 無効電力回収回路の電圧波形

図 9 の回路を基板に実装して測定を行った。なお、信号生成については、同一基板に実装した論理ゲートを使用している。入力する信号とその信号に遅延を入れた信号をもとに生成している。自作した基板において、MEMS スピーカを接続し、信号を入力。MEMS スピーカの両端の電圧を測定した。図 19 に測定した電圧波形を示す。フルブリッジであるため、両端の電圧の差分も描写している。図 14 に類似した波形になっていることがわかる。図 15 程ではないが、0→0 や 1→1 の遷移において、図 20 の下の波形で 20us 前後や 40~80us 間など電圧のわずかな変化が確認できる。電源電圧が不安定であることが考えられる。

(2) 無効電力回収回路の消費電流

図 9 の回路における消費電流量の確認を行った。インダクタ L をそのまま入れた場合と、開放した場合を測定した。また、図 7 のシステムでの、ISI シェーパを使用した際と NSDEM を使用した際の立ち上がりや充放電の頻度に影響するため、双方の測定を行った。表 4 には入力信号の周波数が 1kHz の時の測定結果を、表 5 には 10kHz の測定結果を示す。二つの表をグラフ化したものを図 21,22 に示す。インダクタ L を開放せずにいる方が低消費電流だった。また、入力が 1kHz のとき、ISI シェーパを使用すると消費電流が低く、入力振幅を増加させると消費電流が小さくなった。しかし、10kHz となると、NSDEM を使用した方が低消費電流であった。

表 4 消費電流の比較 (入力周波数: 1kHz)

Shuffling	消費電流[mA]			
	ISIシェーパ		NSDEM	
入力振幅[dBFS]	L有り	L開放	L有り	L開放
-18	8.0	18.5	14.3	34.0
-24	9.2	21.3	16.5	39.0
-30	12.9	29.7	23.2	56.3

表 5 消費電流の比較 (入力周波数: 10kHz)

Shuffling	消費電流[mA]			
	ISIシェーパ		NSDEM	
入力振幅[dBFS]	L有り	L開放	L有り	L開放
-18	13.2	31.3	10.2	25.1
-24	10.6	25.9	5.3	12.7
-30	13.2	31.4	3.0	5.5

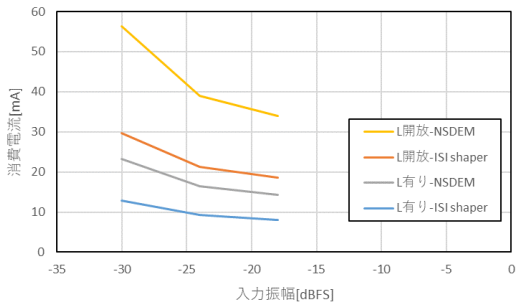


図 21 入力振幅に対する消費電流
(入力周波数: 1kHz)

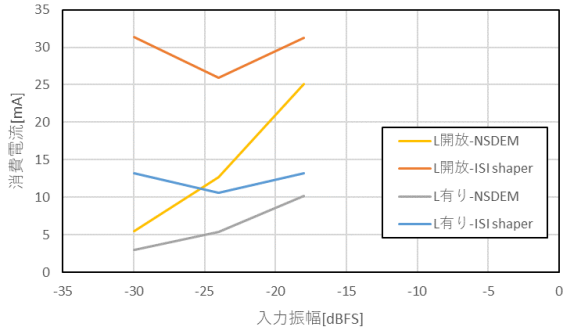


図 22 入力振幅に対する消費電流
(入力周波数: 10kHz)

(3) 音圧と歪率の測定

まず、音圧および歪率の測定系を図 23 に示す。音圧の測定結果を図 24 に示す。NSDEM, ISI シェーパの信号成分である 1kHz の音圧は同程度だった。歪について、ISI シェーパで 2 次高調波が減少, 3 次高調波が確認できないくらいの減少をした。

入力周波数や振幅以外にも、DS 変調器の周波数や、信号生成に用いる遅延器の周波数、ドライブ回路のインダクタを変化させた。各条件に対する歪率を図 25, 図 26 に示す。ほとんどの場合、ISI シェーパの方が歪率が低いこ

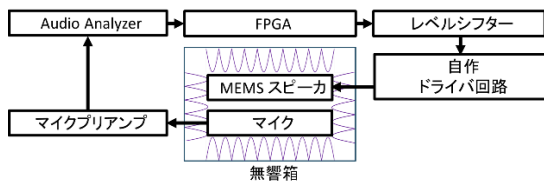


図 23 スピーカの音圧および歪率測定系

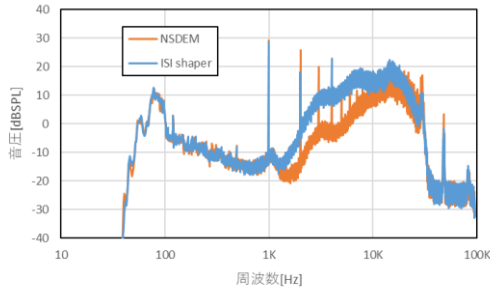


図 24 音圧の測定結果
入力周波数 1kHz, 振幅-24dBFS
 $\Delta\Sigma$ 変調器 96kHz, 遅延周波数 192kHz

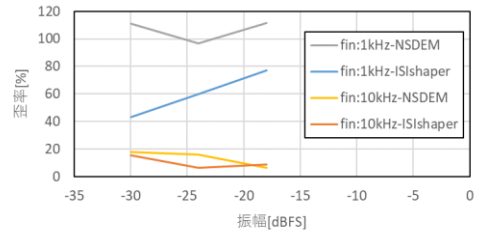


図 25 振幅に対する歪率
 $\Delta\Sigma$ 変調器 96kHz, 遅延周波数 192kHz
インダクタ 100uH

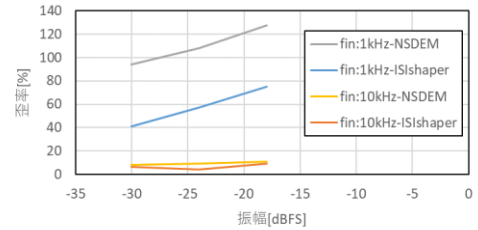


図 26 振幅に対する歪率
 $\Delta\Sigma$ 変調器 768kHz, 遅延周波数 1536kHz
インダクタ 1.5uH

とがわかる。 $\Delta\Sigma$ 変調器の周波数が低いとき、歪率が高くなっている。

(4) 電圧に対する音圧と歪率の検証

続いて、電源電圧を変化させた。表 6 に測定結果を示す。さらに、グラフ化したものを図 27 に示す。消費電流については、電圧の 2 乗に比例したグラフとなっている。音圧と歪率については、電圧に比例したグラフとなっている。電源電圧に対する非線形性は見えなかった。

表 6 電源電圧に対する消費電流, 音圧, 歪率

	消費電流 [mA]	音圧 [dB SPL]	歪率 [dB]	歪率 [%]
5	10.6	27.5	-0.37	95.85
6	11.4	28.2	1.05	112.9
7	13.8	29.8	2.77	137.6
8	16.2	32.3	4.78	173.4
9	21.4	33.5	5.62	191.0
10	24.5	34.6	6.98	223.2
11	27.9	35.6	8.25	258.5
12	31.9	36.5	9.31	292.0
13	36.3	37.2	10.3	326.6
14	40.2	38.2	11.3	366.1
15	48.0	39.4	11.5	374.1

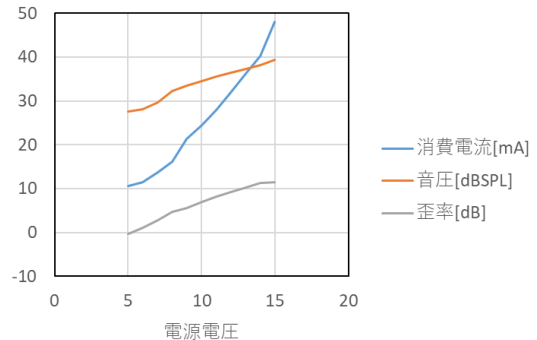


図 27 電源電圧に対する消費電流, 音圧, 歪率

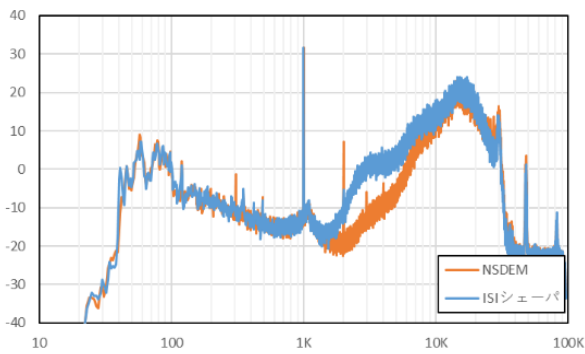


図 28 ハーフブリッジにおける音圧測定結果
 入力周波数 1kHz, 振幅-6dBFS
 $\Delta\Sigma$ 変調器 96kHz, 遅延周波数 192kHz

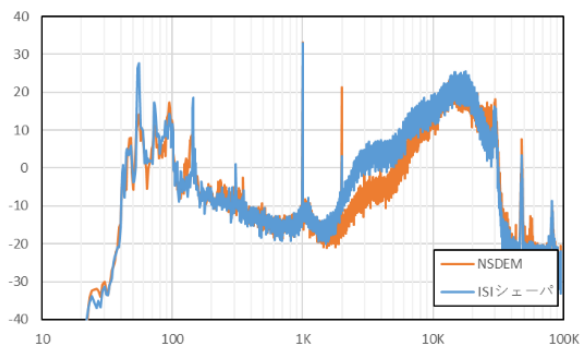


図 29 フルブリッジにおける音圧測定結果
 入力周波数 1kHz, 振幅-6dBFS
 $\Delta\Sigma$ 変調器 96kHz, 遅延周波数 192kHz

(5) 2 値の音圧・歪率の測定

2 値駆動には、2.(5)で述べたようにハーフブリッジ回路とフルブリッジ回路の接続方法がある。図 28 にハーフブリッジの音圧測定結果を示す。また、図 29 にフルブリッジにおける音圧測定結果を示す。高調波歪みは、ISI シェーパの出力での低下をどちらにも確認できる。音圧は、NSDEM と ISI シェーパで同等であった。フルブリッジの方がハーフブリッジに比べ 1.5 dB 大きいという結果になった。各歪率と消費電流を表 7 に示す。歪率で見ると、ハーフブリッジの方が低い。消費電流は、フルブリッジがハーフブリッジの約 4 倍となっている。これはかかる電圧が倍になり、その 2 乗の 4 倍の消費電流になっているためだろう。

表 7 駆動回路における歪率と消費電流
 入力周波数 1kHz, 振幅-6dBFS
 $\Delta\Sigma$ 変調器 96kHz, 遅延周波数 192kHz

	ISIシェーパ		NSDEM	
	歪率 [%]	消費電流 [mA]	歪率 [%]	消費電流 [mA]
ハーフブリッジ	1.43	7.94	6.43	10.3
フルブリッジ	3.22	39.2	27.2	50.4

6. まとめ

本論文では、スピーカのデジタル直接駆動システム、MEMS スピーカ、3 値駆動の ISI シェーパを組み合わせ、検証を行った。

ドライブ回路では、駆動時の消費電力の低減を狙った回生回路を利用した。実測できた波形については、シミュレーションと遜色なかった。また、ISI シェーパを使用し NSDEM を使用で消費電力に差が生まれた。

システムとして、シミュレーションおよび実測では、ISI シェーパの歪率の改善を確認した。さらに、駆動周波数を下げるにより線形な駆動に近づけようとした。しかし、歪率は下がるどころか上がってしまった。電圧に起因するものだと予想し、電源電圧を変化させて測定を行った。測定結果から違うと考えられる。2 値駆動では、0 か 1 かの 2 点で線形性を得やすい。しかし、3 値駆動では、-1, 0, 1 の 3 点になるため、線形性を取るのが難しい。非線形性が原因の歪が発生したと考える。

2 値駆動のみの比較では、フルブリッジは消費電流が高いが音圧が僅かに高く、ハーフブリッジは低消費電力、低歪であった。フルブリッジにしたときの消費電流の増加を考えるとハーフブリッジのメリットが大きいと考える。

本稿では、振動板の位置の測定を行っていないため、電圧に対してどのような動きをしているかが確認できていない。線形な動きをする範囲がわかれば、本稿のシステムを改善することができるだろう。また、実測において ISI シェーパを 16 スピーカ分の信号の 8 スピーカ分を取り出すという方法を行っている。これにより、ISI シェーパの性能を生かすことを十分できていない。さらなる高性能化としてスピーカを増やすといいだろう。

謝辞: 本論文を作成するにあたって、御協力、御指導を頂きました安田彰教授、および安田研究室の皆様にも多大なる感謝をこの場をお借りして申し上げます。

参考文献

- 1) 安田彰, "第 4 章フル・デジタル・スピーカ駆動 IC Dnote7U"ランジスタ技術 2013 年 12 月号
- 2) Larry F. Weber, Kevin W. Warren, Mark B. Wood, " Power efficient sustain drivers and address drivers for plasma panel " US5081400A Sep. 1989 United States Patent.
- 3) S. Okage and A. Yasuda, "A Study on Digitally Direct Driven Speaker System Using ISI Shaper," ECT-21-089 Dec. 2021 IEEJ.
- 4) T. Tazawa and A. Yasuda, "Realization of low distortion by digital direct-driven speaker" ETC-20-100 pp. 2-4 Dec. 2020 IEEJ.