

平成21年5月23日現在

研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2007～2008
課題番号：19560356
研究課題名（和文） 積層分割構造電気-音響変換器を用いたデジタル直接駆動スピーカの高性能化
研究課題名（英文） Developing an electro-acoustic transducer using a multilayer structure
研究代表者 安田 彰（YASUDA AKIRA） 法政大学 理工学部・教授 研究者番号：30339501

研究成果の概要：

本研究では、デジタル直接駆動スピーカの高性能化を図るため、マルチコイル型ダイナミックスピーカユニット、積層型圧電スピーカユニットおよび駆動系デジタル信号処理系に関する研究を行った。マルチコイル型では、サブユニット間の mismatches が低減され高精度化を図り、積層型では音圧の向上・実装面積の小型化が実現された。また、デジタル信号処理系での mismatches シェーパの性能向上により雑音特性の改善を実現した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：電子回路

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス、電子機器

キーワード：デジタルスピーカ、電子デバイス・機器、高音質、高効率、高精度、デジタル駆動、省エネルギー

1. 研究開始当初の背景

現在電気-音響信号変換デバイスとしては、コーン紙を用いたダイナミックスピーカがもっとも広く用いられているが、ボイスコイルに電流を流すことで生じる磁界によりコーン紙を駆動する構造上、薄型化には限界がある。一方、コーン紙の代わりにガラス板などを振動させる方法も提案されているが、振動板は薄型に出来るがボイスコイルを含めた駆動系の薄型化には限界がある。また、

いずれの方法も駆動信号はアナログ信号であり、このために大型で効率の低いアナログパワーアンプが必要となる。デジタル信号で直接駆動できるスピーカが実現されれば、電力効率も大幅に改善され、持続可能な地球環境実現にも貢献することが可能となる。

近年では、デジタル家電をはじめ多くの機器のデジタル化が進み、音響信号は内部ではデジタル信号として処理されている。このため、スピーカを駆動し音響信号を音波に変換

するためには、必ずデジタル-アナログ変換装置 (DAC) が必要となる。デジタル信号を直接音波に変換できるスピーカが実用化されれば、DAC を不要にすることが可能となり、高精度化、低コスト化の実現を進めることができる。また上述のデジタル家電機器などでは、小型化、薄型化への要求も強い。たとえば、液晶ディスプレイなどは厚さ数mm程度までの薄型化は可能であろう。しかしながら、スピーカに関しては従来からあるコーン紙を使ったものが主流で、将来ペーパー状ディスプレイが実現された場合、発音デバイスの小型化、薄型化は大変重要な課題となる。

これを解決する方法として、我々はデジタル直接駆動スピーカに関する研究を行ってきた (「デジタル信号直接駆動型スピーカの解析と高性能化」(科学研究費補助金 (基盤研究等) 2004~2006 年))。この研究の結果、入力デジタル信号をマルチビット $\Delta \Sigma$ 変調器で複数の 1 ビット (2 値) 信号に分割し、この信号を我々が提案したノイズシェーピング・ダイナミック・エレメント・マッチング法 (NSDEM) を用いて圧電素子を駆動することにより、デジタル信号で直接駆動する薄型スピーカを実現することが可能となった。この方法では、通常の使用において十分な性能が実現されたが、駆動デジタル回路規模や音質、可聴帯域外雑音の輻射などにおいては改善の余地が残された。

2. 研究の目的

アクティブ消音や音環境改善、特定の場所のみ音響信号を伝えるなど、音楽や音声を聞く目的以外等にスピーカが用いられる応用が近年現れてきている。これらの応用では、複数のスピーカを空間に配置し、適切に各スピーカをデジタル制御することが求められている。複数のスピーカを用いる関係上、各スピーカには小型かつ薄型であることが求められる。我々が提案したデジタル信号直接駆動型スピーカは、これらを実現する方法に適している。しかし、多くのスピーカを用いるためには、デジタル信号直接駆動型スピーカの駆動回路さらなる小型化が重要となる。

本研究は、これまでの研究成果を踏まえ、デジタル信号直接駆動型スピーカの駆動系および電気-音響変換器を含めたデジタル化、小型化、高性能化、低可聴帯域外雑音化を実現する際の問題点の解明し、小型・薄型・高音質なデジタル信号駆動型スピーカの実現およびこれを用いた音響システムの高性能化の実現を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、デジタル直接駆動スピーカの高性能化を図るため、デジタル信号処理、駆

動方式、電気-音響変換器に関し、理論的考察を行い、新しい構造、方式の提案を行う。この提案に基づき、信号処理系、駆動回路、電気-音響変換器となるアクチュエータの設計、試作、評価を行う。

デジタル直接駆動スピーカに残された課題として、(a)高音質化、(b)高出力化、(c)低可聴帯域雑音化、(d)駆動回路の小型化がある。これに対し、積層型圧電スピーカおよび複数のボイスコイルを有するダイナミック型スピーカを提案し、これを用いることで (a)、(b)の解決を目指す。また、マルチビット $\Delta \Sigma$ 変調器の出力信号をシフトレジスタに入力し、このタップ信号で圧電素子を駆動することにより、FIR フィルタ特性を持った電気-音響信号変換器を構成し、(c)の問題解決にあたる。さらに、複数の $\Delta \Sigma$ 変調器を従属接続させたカスコード型 $\Delta \Sigma$ 変調器を用いることで、(d)の解決を図る。

① 複数のボイスコイルを有するデジタル駆動ダイナミック型スピーカの基本特性の測定・評価・モデル化

ダイナミック型スピーカでは、ボイスコイルによって電気信号が磁束に変換されるが、ボイスコイルを複数用いることにより、電気信号を磁束として加算することが可能となる。複数のボイスコイルを有するデジタル駆動ダイナミック型スピーカを使うことで加算された信号を直接音響信号に変換することが可能となり、高音質な音響信号を得ることが可能となる。この複数のボイスコイルを有するデジタル駆動ダイナミック型スピーカの基本構造を検討し、その基本特性、非線形特性、特性バラツキ等の測定、評価、解析を行う。

●ボイスコイルの複数巻く方法の検討・試作: ボイスコイルの複数巻く場合の分巻き方法、電気端子の取り出し方法等を検討し、これに基づき試作を行う。

●試作した複数のボイスコイルを有するデジタル駆動ダイナミック型スピーカの測定・評価: 電気的インピーダンスおよび印可電圧、電流と変位を測定する。

●試作した複数のボイスコイルを有するデジタル駆動ダイナミック型スピーカの電気-音響特性の測定・評価: スピーカを精密信号発生器により駆動し、その出力の時間応答、周波数応答、歪特性、出力音圧、ダイナミックレンジ等の電気-音響特性を測定する。

② 積層型圧電スピーカの基本特性の測定・評価・モデル化

各圧電素子によって電気信号が機械

変位に変換されるが、これを積層化することで、機械変位の加算を行うことが可能となる。従来方式では、音響空間で分割された信号の加算を行っていたが、積層型圧電素子を使うことで加算された信号を直接音響信号に変換することが可能となり、高音質な音響信号を得ることが可能となることが予想される。この積層型圧電素子の基本構造を検討し、その基本特性、非線形特性、特性バラツキ等の測定、評価、解析を行う。

●圧電素子の積層方法の検討・試作：圧電素子を積層構造にする場合の各層の接着方法、電気端子の取り出し方法等を検討し、これに基づき試作を行う。

●試作した積層型圧電素子の電気的特性の測定・評価

●試作した積層型圧電素子の電気-音響特性の測定・評価：圧電素子を精密信号発生器により駆動し、その出力の時間応答、周波数応答、歪特性、出力音圧、ダイナミックレンジ等の電気-音響特性を測定する。

4. 研究成果

今回の研究により次の成果が得られた。

- (1) 複数のボイスコイルを用いるデジタル直接駆動スピーカでは、外形 8cm の小型スピーカにおいても、高音質の再生を可能とした。また、このシステムでは、電源電圧が低い場合でも高い音圧 (87dBspl 以上) を得ることができ、電池駆動などのモバイル応用分野への利用が期待される。

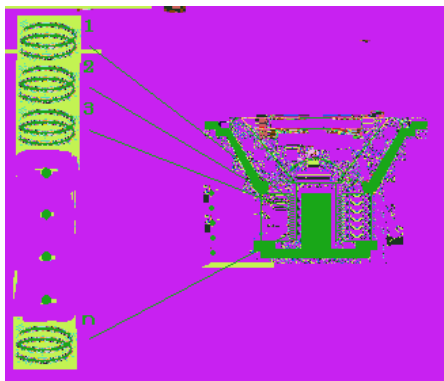


図1 複数のボイスコイルを用いるデジタル直接駆動スピーカユニット

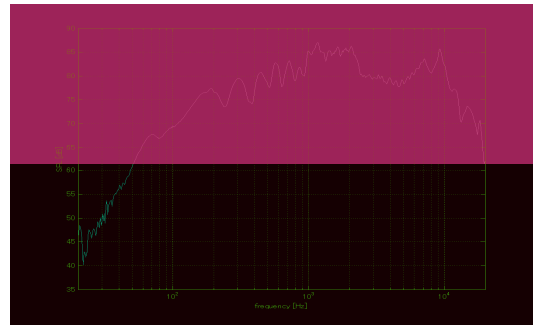


図2 周波数特性

- (2) 積層型圧電素子を用いたデジタル直接駆動スピーカでは、基本的なコンセプトの確認が図れた。試作した 2 層型圧電スピーカでは、デジタル信号に応じて電気信号を音響信号に変換できることが確認され、これを用いたデジタル直接駆動スピーカでは、小型かつ薄型形状を実現できた。

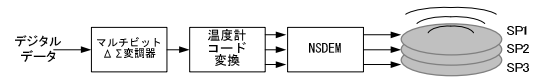


図3 積層型デジタル直接駆動スピーカ

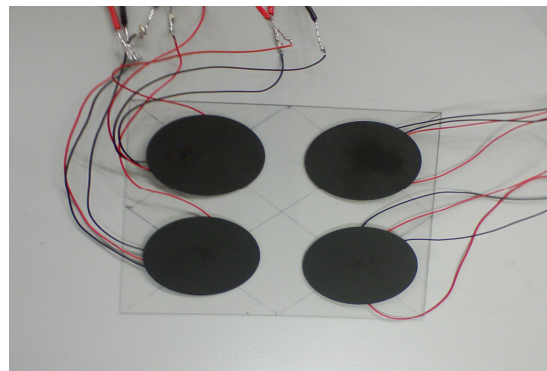


図4 積層型圧電スピーカユニットを用いたデジタル直接駆動スピーカ

より詳細には以下の通りである。

- ① 複数のボイスコイルを有するデジタル駆動ダイナミック型スピーカの基本構造を検討し、プロトタイプ的设计を行い (図5), その基本特性、非線形特性、特性バラツキ等の測定、評価を行った。また、このプロトタイプのスピーカユニットを、我々が提案しているデジタル直接駆動型スピーカドライブ回路を用い

て駆動し、歪み率1%の特性が実現されていることが測定により確認された。

- ② マルチビット $\Delta\Sigma$ 変調器で数ビット化された出力信号をシフトレジスタに入力し、このタップ信号で圧電素子を駆動することにより有限インパルスレスポンス・フィルタ特性を持った電気-音響フィルタおよび電気-音響信号変換器を検討した。この電気-音響フィルタおよび電気-音響信号変換器の構成法および設計法の検討し、可聴帯域雑音を低減できることを確認した。
- ③ 複数の $\Delta\Sigma$ 変調器を従属接続させたカスコード型 $\Delta\Sigma$ 変調器を構成し、これを用いてデジタル直接駆動スピーカを構成する。カスコード型 $\Delta\Sigma$ 変調器の2段目の出力には、 $(1-z^{-1})$ の伝達関数がかかる。これを利用した(圧電)素子のばらつきの影響低減できるデジタル直接駆動型スピーカの構成方法を検討し、その特性をシミュレーションにより確認した。
- ④ 各圧電素子によって電気信号が機械変位に変換されるが、これを積層化することで、機械変位の加算を行うことが可能となる。圧電素子を積層構造にする場合の各層の接着方法、電気端子の取り出し方法等を検討し、これに基づき試作を行った(図6)。
- ⑤ 2層型圧電スピーカユニットの試作を行い評価した。試作した2層型圧電スピーカで、1層駆動に比べ2層駆動により出力音圧が約6dB上昇することを確認した。2層以上の構造を実現することは、電極構造および絶縁セパレータを導入する必要があり、圧電の焼結に耐える素材の開発が必要である。今後は、焼結に対応できる絶縁セパレータの素材の検討、焼結後に絶縁セパレータを挿入する方法の確立が必要と考えられる。
- ⑥ 提案するマルチビット $\Delta\Sigma$ 変調器を用いた積層型圧電スピーカ
2層積層型スピーカを複数個用いたデジタル直接駆動スピーカを試作し、評価を行った。2層積層スピーカを4つ用いた9レベル型スピーカ(図4)では、2層積層型単独に比べ雑音特性、音圧特性を改善が改善された。この方法により、2層積層型スピーカそのものの音圧が低い問題点を解決できることを確認した。今後はさらなる多層化を実現し、音圧の向上をはかる必要がある。
- ⑦ 提案するミスマッチシェーピング機能の高性能化
提案したデジタル直接駆動スピーカでは、各サブユニット間のミスマッチの影響をミスマッチシェーパを用いて低

減している。サブユニットのミスマッチが大きい場合、従来のものでは十分にミスマッチによる雑音を低減出来ない場合があったが、3次のミスマッチシェーパを提案し、この方法を用いることで、ミスマッチの影響に60dB/decadeのシェーピングをかけることを可能とした(図7)。これにより、雑音が低減され、特に無音時の雑音の影響を低減することが可能となった。

- ⑧ 複数のサブユニットを有するダイナミック型、圧電型スピーカを駆動するデジタル直接駆動スピーカ構成による指向特性制御の実現

複数のスピーカユニットを用いた提案するデジタル直接駆動スピーカを試作し(図8)、評価を行った。この方法では、雑音特性の向上に加え、各サブユニット間の遅延時間を制御することにより指向性制御を実現した。これにより、正面以外の方向への音圧を10dB以上向上させることが可能となった。

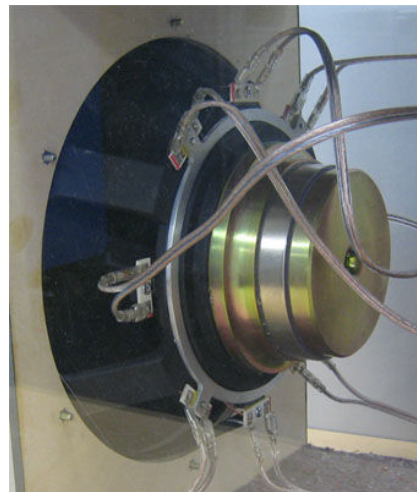


図5 試作したマルチコイル型スピーカユニット

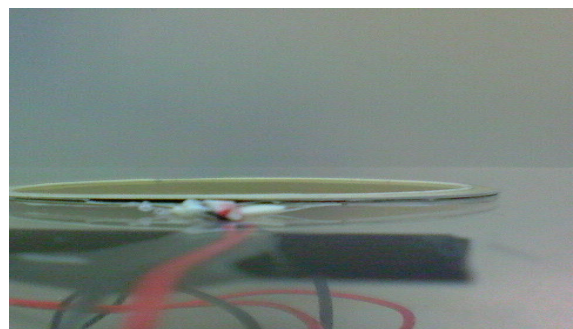


図6 試作した2層積層圧電スピーカユニット

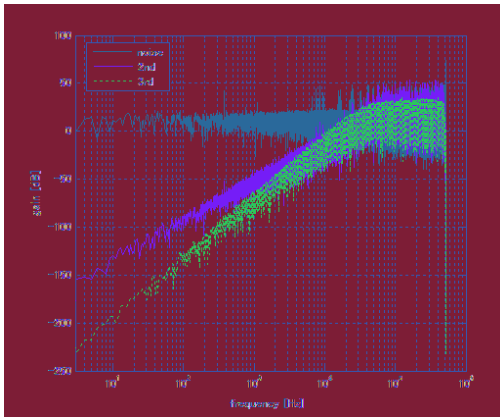


図7 高性能ミスマッチシェーパー特性
 緑：ミスマッチシェーパー無，青：2次シェーパー，赤：3次高性能ミスマッチシェーパー

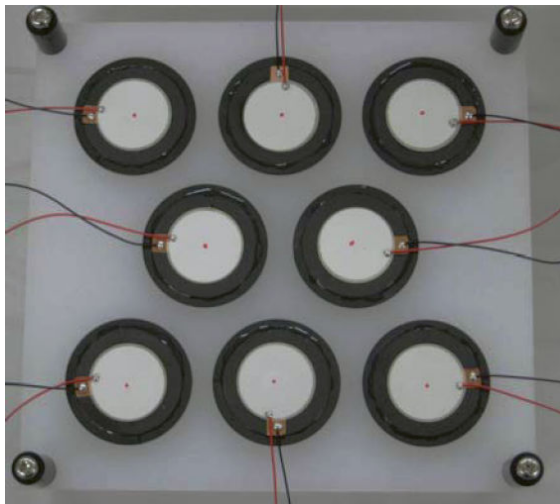


図8 マルチユニット平面圧電スピーカ（指向性制御）

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計6件）

- ① Kuroki, Kazushige, Saito, Ryota, Shinkawa, Naoto, Tsuchiya, Tomohiro; Yasuda, Akira, A Digitally Direct Driven Dynamic-Type Loudspeaker, Audio Engineering Society Convention Paper, No. 7333, pp.1–pp.6, 2008, 査読有.
- ② Akira Yasuda, Daisuke Iijima, Takuya Tsunemi, Katsuaki Sakurai, and Yuichi Futaoka, Jitter shaping circuit for a high-precision sample and hold circuit, Proceedings of the 2008 IEEJ Analog VLSI Workshop, No. 1,

pp.1–pp.6, 2008, 査読有.

- ③ Yuichi Futaoka, Naoto Shinkawa, Tomohiro Tsuchiya, Katsuaki Sakurai, Hiroyuki Akaba, and Akira Yasuda, A novel driver circuit for digital speaker system reducing nonideality of an output transistor, Proceedings of the 2008 IEEJ Analog VLSI Workshop, No.1, pp.1–pp.6, 2007, 査読有.
- ④ Kuroki, Kazushige, Saito, Ryota, Shinkawa, Naoto, Tsuchiya, Tomohiro; Yasuda, Akira, A Digitally Direct Driven Small Loud Speaker, Audio Engineering Society 13th Regional Convention, Audio Engineering Society Convention Paper, No.1, pp.1–pp.6, 2007, 査読有.

〔学会発表〕（計6件）

- ① 勝見俊介, 飯島大輔, 安田 彰, 積分器の非線形性による歪みの影響を抑えた連続時間 $\Delta\Sigma$ ADCの提案, 電気学会電子回路研究会, 沖縄県石垣島, 2009年1月22日.
- ② 宮崎 勝毅, 二岡 祐一, 安田 彰, ミスマッチシェーパーを用いた自己補正型パイプラインADC, 電気学会電子回路研究会, 沖縄県石垣島, 2009年1月21日.
- ③ 勝見 峻介, 安田 彰, 2次ミスマッチシェーピング $\Delta\Sigma$ 型DAC, 電子情報通信学会 ソサエティ大会, 鳥取大学, 2007年9月12日.

〔図書〕（計1件）

和保孝夫, 安田 彰, $\Delta\Sigma$ 型アナログ/デジタル変換器入門, 丸善出版, (2007). 全327頁監修

〔その他〕

- ① 解説記事：安田 彰, デジタルスピーカの原理と応用, ラジオ技術 5月号, pp.54-62, (2009)
- ② 新聞記事：神奈川新聞, 世界初！フルデジタルスピーカ, 2008年7月13日.
- ③ 新聞記事：産経新聞, フルデジタルのスピーカ, 2008年5月14日.
- ④ 新聞記事：日刊工業新聞, デジタルスピーカ試作, 2008年5月9日.
- ⑤ Web記事：フジサンケイ・ビジネスアイ, フルデジタルのスピーカ, 2008年5月14日.

- ⑥ web 記事：日経 Tech-on, 法政大, デジタル・オーディオ信号を直接入力して駆動するスピーカーを開発, オーディオ再生回路を簡略化, 2008 年 5 月 9 日.
- ⑦ ホームページ：www.hosei.ac.jp

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安田 彰 (YASUDA AKIRA)

法政大学 理工学部・教授

研究者番号：30339501