

境界音場制御の原理に基づく音場収録・再生システムの現状と課題

○伊勢史郎（東京電機大／JST, CREST）

1 はじめに

近年、数十を超えるチャンネル数を有する音響入出力システムを比較的 low コストで入手することが可能となった。それに伴って音場を空間的に制御あるいは再現する可能性が増している。多チャンネル音響入出力システムを用いる音場再現の原理に関しては高次アンビソニクス[1]や WFS[2]がよく知られているが、我々は境界音場制御の原理に基づいてシステム（以降 BoSC システムと呼ぶ）を開発してきた[3]。BoSC システムは WFS とは異なり点音源による音場再生を前提としないが、音場の逆システムを設計できることを前提としている。音場の逆システムは点音源を開発することよりも実現可能性は高いが、どのような再生音場でも逆システムを設計できるわけではない。しかし、逆システムが設計できればリアリティの高い音場が再現できるようになるため、その存在価値は高い。現在、我々が進めるプロジェクト（JST, CREST）では水平断面が九角形の樽型の音場再生室（以降音響樽と呼ぶ）を開発しており、従来の BoSC システムに比較して高い精度で逆システムを設計できるようになったため没入型聴覚ディスプレイ装置としての完成度もより高いと言える。本稿では現在の BoSC システムの開発状況と課題点について述べる。

2 BoSC システムの構成

2.1 音響入出力インターフェース

境界音場制御の原理に基づけば、ある領域を囲む閉じた境界面上のすべての点において音圧信号を收音、再生することができれば、その領域内の音場を完全に再現することが可能となるが現実にはできない。そこで收音系、



図1 BoSC マイクロホン

再生系共に現実的、工学的な解を見つけることが必要となる。まず收音系に関しては現在のところ一人の頭部を取り囲む大きさ（直径 45cm 程度）を想定し、マイクロホンアレイを構成することを考えた。またマイクロホンアレイを堅固な力学的な構造で支えるフレームが必要と考え、C80 フラーレン分子構造を採用し、80 個の小型無指向性マイクロホン（DPA4060）を取り付けたマイクロホンアレイを開発した（図1）。マイクロホンの校正は B&K 社 4231 に 1/4 インチマイク用アダプタを取り付けて行う。

次に再生系に関しては閉じた境界面に高い精度で音圧波面を生成する必要があるため、できるだけ多くの方向から波面を供給可能な音響出力装置の構成が望まれる。したがって多数のスピーカが再生音場を取り囲むように配置できるようなスピーカチャンネル数が必要となる。また境界音場制御の原理では逆システムの実現が前提となるため、多チャネル

* The present status and task of the sound field recording/reproduction system based on the boundary surface control principle”, ISE, Shiro (Tokyo Denki University/ CREST, JST).

ルスピーカとマイクロホンアレイ間のMIMO逆システムがFIRとして設計できるような音響条件が必要となる。さらにリアルタイム信号処理をPCのソフトウェアにより駆動することを考えると、一台のPCで制御可能なチャンネル数が現実的である。そこで機材のコスト面なども考慮しながら、すなわち市販の音響入出力装置で使用可能な範囲を考慮して、マイクロホンアレイのチャンネル数80よりも大きいスピーカのチャンネル数96を設定した。スピーカを取り付けるためフレームとして、より堅固な力学的構造が安全面からも重要となる。そのためには建築物に取り付けるのが容易であるが、多くの人に音場を体験してもらうために分解、運搬、組立が可能なスピーカフレームが望ましい。また精度の高い逆システムを設計するためには壁面やスピーカのエンクロージャなどによる音響的な境界条件の影響が懸念される。すなわちモードが小さく、かつ偏りが少ない境界条件をもつ音場再生室が必要となる。このように多数のスピーカを支える堅固な力学構造、分解、運搬、組立の容易さ、壁面のモードの偏り、さらに内部で小型楽器を演奏できることなどを考慮して、平面の断面が9角形となる樽型形状（内寸直径1950mm、高さ2150mm）の音場再生室を開発した（図2）。またスピーカ単体についても逆システム設計のしやすさを考慮して、できるだけ平坦な周波数特性を有するフルレンジスピーカ（FOSTEX FX120, 8Ω, $f_0=65\text{Hz}$, エンクロージャ230×150×120）を選定し、床面を除く全方向96か所に取り付け、またスピーカ以外の壁面をポリウール（6mm厚×2）で覆った。

2.2 小型デジタルアンプ

96chのスピーカから音を出すために2ch程度での使用を想定した市販のスピーカアンプは装置規模が大きい。また、96ch分のアナログ信号を伝送するためのケーブルを音響樽の外部から引き込むことは非効率的である。すなわち96chのデジタル信号を光ケーブル



図2 音響樽

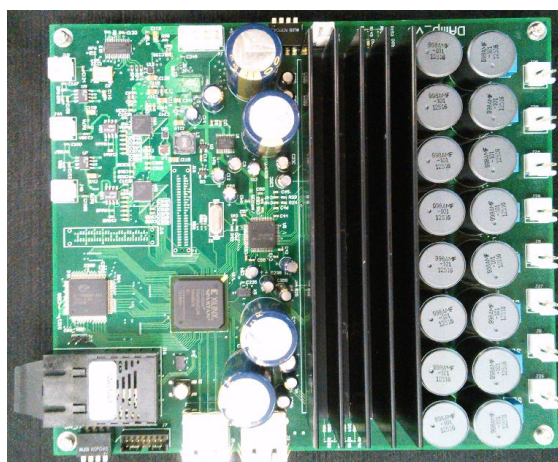


図3 開発した8ch D級アンプ

などで伝送し、音響樽内部でデジタル信号を分割し、スピーカを駆動するアンプへ供給する方法が望ましい。そこで音響樽の床下に収まる程度のハードウェア規模で実現可能なMADI入出力インターフェースをもつ小型デジタルアンプ（8ch D級アンプ×12台）を開発した（図3）。8ch D級アンプはPCからMADI信号（64ch）を受け取り、その中から該当する8chのデータをPWM信号へ変換後に増幅して出力（76 W at 10% THD+N 8Ω）し、受け取ったMADI信号は再度光信号に変換して隣のデジタルアンプへ伝送する。8ch D級アンプは仕様に従って1次LPFが含まれているが96ch出力において暗騒音が生じたため、3次チェビシェフ型LPF（パッシブLCR

型, カットオフ周波数 20kHz) を付け加えた。図 4 からわかるとおりコイルの容積が大きい
ため, 外付け LPF は床下の半分近くを占める。
使用した電源は 36V 6.7A (安定化電源) 4 台,
12V 13A 1 台, 5V 15A 1 台である。また 8ch
D 級アンプ基板上には楽音の收音用に 2ch
18bit AD 変換器も載せており, スピーカ出力
に使用した 8ch の最初の 2ch の部分に AD 変
換信号を乗せて伝送する。したがって, 図 5
のように 12 台のデジタルアンプは光ケー
ブルによってディジーチェーン接続し, 96ch
を音響出力すると同時に 24ch AD 変換データ
を PC に伝送する。

2.3 収録システム

80ch のマイクロホン出力信号を収録するた
めのシステムとして 80ch マイクロホンプリア
ンプおよび AD 変換器が必要となる。AC 電
源を用いることが可能である場合, デスク
トップ PC により安定した収録が可能であ
るが可搬性には劣る。また 8ch フィールド
レコーダを 10 台用いた収録システムはバ
ッテリー駆動による収録が可能であり, 可
搬性に優れる。複数台数の精密な同期が
当初の仕様には無かったため, メーカー
にファームウェアアップデートを依頼し,
実現した。AC 電源を使用する場合の収
録システムを図 6 に, フィールドレコー
ダを用いたバッテリー駆動型の収録シ
ステムを図 7 に示す。

3 問題点

3.1 BoSC マイクロホンおよび収録システム

マイクロホンアンプの感度調整はすべての
チャンネルに対して集中管理が必要となる
が, 一般にそのようなシステムは高額かつ
規模が大きくなる。また現在 80ch の XLR
ケーブルは 24ch マルチケーブル 3 本と
8ch マルチケーブル 1 本に変換している
が, それらのマルチケーブルは取り回し
が難しく, リールを一人で運ぶことは
難しい。多くのコンテンツを作成するた
めには, 軽量で可搬性の高い (一人で
運べるような) 収録システムの開発が必
要である。そのためにはマイクロホン出
力を

直接全チャンネルの感度調整の管理が可
能なプリアンプに接続後, AD 変換し, 80ch
デジタルデータを光 MADI ケーブルなど
で伝送可能なシステム構成が望ましい。

また現在, BoSC マイクロホンアレイは
受聴者 1 名の頭部が入ることを想定して
直径約 45cm の C80 フラワーレン分子構
造型のフレームの節に 80 個のマイクロ
ホンを取り付けて



図 4 床下に設置した主要な機材

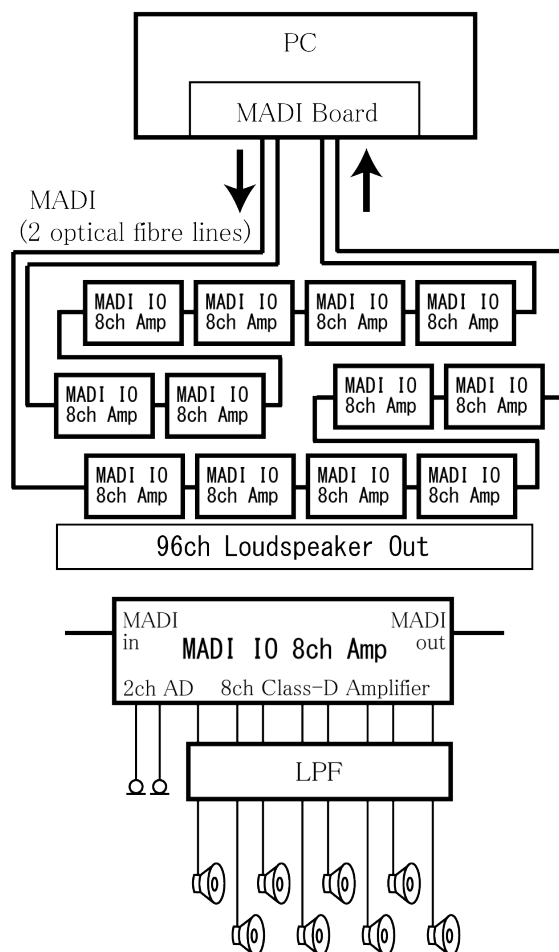


図 5 8ch アンプ 12 台のディジーチェーン
接続による 96ch アンプの実現

いるが、2名、3名と受聴者を増やした時にも対応できるようなマイクロホンアレイが望ましい。すなわち現在のフレーム構造を拡張し、マイクロホンを追加できるような仕組みが望まれる。ただし、チャンネル数が増えれば収録のためのレコーダやケーブルなどの機材も増えるため、それらの可搬性を考慮することが不可欠となる。

3.2 再生システム

スピーカアンプにおいてD級増幅方式はA級、B級など従来のリニア系の増幅方式に比較すれば発熱は小さいが、ヒートシンクなどによる放熱処理は行う必要がある。しかし、音響樽の床下において熱を排出する仕組みがないため、デモを長時間続けると再生室の内部の温度は上昇する。現在はデモの合間に扇風機を用いて室内の空気の入れ替えを行うことにより手作業の排熱を行っているが、本来は床下に設置したアンプの熱がヒートシンクから外部へ排出できるような仕組みが必要である。

再生室内でボリューム調整やイコライザーなどによる周波数特性の微調整を行いたい場合がある。8ch D級アンプのPWM制御IC(TI社製 TAS5518)にはそれらのコントロール機能はあるため、再生室内から直接基板にコントロール信号を送ることが可能なハードウェアの開発が望まれる。

音響樽は内部での楽器演奏を前提として設計したため、楽器を室内に持ち込まずに音を聴くという用途に限定すれば小型化が可能である。その場合には単なるオーディオシステムとして位置付けることができるが、密閉された室内で聴く方式にするか、外部空間との連続性を保てるようにするかなどの検討の余地が残されている。

4 まとめ

多チャンネル収録・再生装置を用いた音場再現システムを実現する場合、多チャンネル信号は一本の光ケーブルで伝送する方法が望



図6 PCを用いた収録システム



図7 8ch フィールドレコーダを用いた収録システム

ましい。今のところその規格としては MADI (125Mbps) が最も優れているが、最新のデジタル伝送技術(10Gbps)を用いればさらに多くのチャンネル数を伝送することが可能となる。しかし、実際には音響入出力に関するアナログ技術やスピーカやマイクロホンを設置するための力学的な構造、ユーザーインターフェースを考慮した空間的なデザインなどにおいて、考慮すべきことが多くある。

参考文献

- [1] 伊勢. 音学誌, 53(9), 706-713, 1997.
- [2] 岩谷他, 音学誌, 67(11), 544-549, 2011.
- [3] A. J. Berkout et al., J. Acoust. Soc. Am., 93(5), 2764-2778, 1993.