

3次元音場再現システムにおける室内音響物理指標による物理的評価値と主観的印象の関係性について*

◎高以良光 (九大・芸工, JST/CREST), 濱村 真理子 (東京工科大, JST/CREST), 尾本章 (九大・芸工, JST/CREST)

1 背景

近年, 臨場感の高い再生を目的とした立体音響技術の研究が行われている。その立体音響技術の中でも, 音場の物理量の再現を目的としたものを特に物理的モデルと呼ぶ。この物理的モデルはさらに, トランスオーラルシステム [1] に代表される, 制御点における物理量の再現を目指したものと, 境界音場制御 [2] や波面合成法 [3] などの, ある領域全体における物理量の再現を目指したものとに分けられる。領域の制御を目的とした制御システムでは, 制御点における再現精度は単に離散点での制御性能を表しているに過ぎず, 領域内の空間の再現精度を表しているという保証はない。

そこで著者らはこれまで, 3次元音場再現システムにおける基礎的な空間性再現性能を, 代表的な室内音響物理指標を用いて評価する手法を提案してきた [4, 5]。提案した評価手法は使用する逆フィルタの安定化による誤差を反映できている。本報告では, 提案手法の有効性を確認するため, 人間の主観的要素と提案指標との関係性を探ることを目的とした主観評価実験を行った。

2 境界音場制御とその評価手法

著者らのこれまでの検討および本報告では, 境界音場制御の原理に基づいた再生システムを用いて実験を行っている。以下に, 境界音場制御の原理に基づいた音場再生の概要を述べる。

境界音場制御とは, キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式を元にした波動理論と逆システムの理論を組み合わせた音場再生手法であり, 伊勢により提案された [2]。原音場における領域の表面音圧を保存し, それらに再生音場の特性をキャンセルする逆フィルタを畳み込み再生を行うことで, 領域内部の音場全体の再現を行う手法である。

境界音場制御に基づく再生システムでは, 畳み込みに用いる逆フィルタにより再現精度が大きく左右される。逆フィルタの安定性と制御点での波形再現精

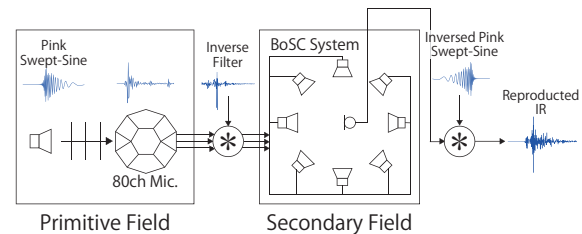


Fig. 1 Block diagram of proposed examination method

度はトレードオフの関係にあり, 完全な再現を行うことは困難である。そのため, 小さな特異値を打ち切る手法などを用いて, 制御点での波形再現精度をいくらか犠牲にして逆フィルタの安定化を行うことがある。しかし, 制御点における波形再現度の低下の度合いと, 領域内の音場再現精度との関係性は明らかにならず, 予測が難しい。

また, マイクロホンアレイの素子間隔による空間エイリアシングの影響も考えられる。半波長が領域表面の最小離散化幅以下になる周波数帯では, 空間エイリアシングが発生するために, 離散点における時間波形の制御ができていたとしても, 領域内の音場の再現度は低くなる。

以上の点を考えると, 制御点における波形再現度により評価を行う方法よりも, 直接的に領域内の音場の評価を行う手法の方がシステムの性能をより良く表していると言える。

2.1 提案手法: 室内音響物理指標による評価

筆者らはこれまで, 室内音響物理指標を用いた空間性再現性能の評価方法を提案してきた [4, 5]。提案手法の詳細を以下に述べる。また, 提案手法のブロックダイアグラムを Fig. 1 に示す。

本手法は, 任意の音場で測定した測定用音源を音場再生システムで再生した際の物理指標値と, 原音場で得られる物理指標値を比較することで, システムの性能の評価を行うものである。

まず, 評価の前段階として, 任意の音場において, 音場収録用のマイクロホンアレイを用いて Swept-Sine

*Relationship between values of physical evaluations for room acoustics and subjective impressions for three dimensional sound field reproduction system. by TAKAIRA, Hikari (Kyushu University, JST/CREST), HAMAMURA, Mariko (Tokyo University of Technology, JST/CREST), OMOTO, Akira (Kyushu University, JST/CREST)

信号を録音する。また、マイクロホンアレイで囲んだ空間、つまり再現対象となる領域の中心でも Swept-Sine 信号を録音し、測定信号をもとに原音場の室内音響物理指標値を算出する。次に、原音場でマイクロホンアレイを用いて測定した Swept-Sine 信号に、再生音場における伝達関数を元にして設計した逆フィルタを畳み込み、再生用信号を生成する。その後、再生音場において畳み込み後の信号を再生し、制御領域中心において録音を行い、再生音場の室内音響物理指標値を算出する。システムの再現誤差を、再生音場、原音場のそれぞれで得られた指標値の差として定義し、その値によりシステムの空間性再現性能の評価を行う。

本手法のメリットとして、まず、室内音響物理指標は人間の主観的な印象との相関が認められているということが挙げられる。室内音響物理指標に関する研究は広く行われており、明瞭性、空間印象などの、主観的印象との関係性や弁別域値などが明らかになっている [6, 9]。よって、これらの指標値を用いることで、人間の主観的印象を考慮した、効率的かつ効果的な評価が可能となる。

また、室内音響物理指標値は空間的なばらつきが少なく、1箇所測定した物理指標値で空間のおおまかな特徴を表すこともできる。測定位置のずれによる誤差の影響や、複数の制御点を制御するために必要となる膨大な測定時間などの問題は、本手法を用いることにより解決できる。

提案手法は文献 [5] でも述べるように、逆フィルタの安定化の際の誤差を評価することができており、物理的評価に関して有用性があることが確認できている。そこで、本報告では、複数の逆フィルタを音源に畳み込んだ際の主観評価値と提案法での物理的評価値との関係を探ることを目的として、主観評価実験を行った。

3 主観評価実験

複数のフィルタを用いた際の主観的要素と、室内音響物理指標値を用いて評価を行う提案法との関連性について探るため、室内音響物理指標値の再現度の異なるフィルタを音源に畳み込んで作成した刺激を用いて、SD 法による主観評価実験を行った。

3.1 用いた音源と聴取レベル

用いた音源の種類は、「女性の歌声を録音したもの」「竹やぶの音を録音したもの」「バイクの周回音を録音したもの」の3種類である。

女性の歌声に関しては、室内において電氣的に拡声された、ライブ音源を録音したものである。バイクの周回音に関しては、マイクロホンの周りをバイク

Table 1 Listening level of each sound source

音源の種類	聴取音圧 [dB]
女性の歌声	61.3
バイクの周回音	52.9
竹やぶの音	46.1

が走り回る様子を録音したものである。竹やぶの音に関しては、葉ずれの音や鳥の声が収録されている。

上記の3種類のそれぞれの音源に対し、以下の5種類の逆フィルタを畳み込んだ。

- フィルタ 1: 打ち切りを行わなかったフィルタ (最小ノルム解)
- フィルタ 2: 伊勢の方法 [12] により安定化を行ったフィルタ
- フィルタ 3: 特異値ソートによる方法 [5] において $T = 50000$ として設計したフィルタ
- フィルタ 4: 特異値ソートによる方法において $T = 170000$ として設計したフィルタ
- フィルタ 5: 文献 [13] の方法を用いて設計したフィルタ ($\Delta L = 30$ dB)

フィルタ 1 は、打ち切りを行わない最小ノルム解を採用した。フィルタ 2 は、制御点における波形再現度である SNR が最も大きくなるパラメータを採用した方法で作成した。フィルタ 3 及び 4 は、全周波数の特異値の中で小さいものから順に T 個を打ち切る方法で作成した。フィルタ 5 は、用いる伝達関数の周波数特性の平均値を元に特異値打ち切りの閾値を決定する方法で作成した。

これらの5種類のフィルタを3種類の音源に畳み込んだ、計 15 種類の刺激をランダムな順序で被験者に呈示した。これらの音源は、96ch の再生システムである「音響樽 (Sound Cask)」[14] を用いて、境界音場制御の原理に基づき呈示を行った。

刺激の呈示音圧レベルは、予備実験で本実験とは異なる被験者が調整法により決定した各刺激の最適聴取レベルと等価騒音レベルが等しくなるよう、本実験の聴取点において調整した。調整法により得られた聴取音圧を Table 1 に示す。ただし、フィルタ 1 を畳み込んだ音源に関しては、聴取音圧まで増幅すると音が歪ってしまったため、実験者が歪みを感じなくなる程度までレベルを抑えて呈示した。

3.2 実験方法及び条件

本実験の被験者は19歳から24歳までの九州大学の学生18名(男性9名,女性9名)である。全員が日常生活に問題のない聴力を有していた。

SD法に用いる評価語は、臨場感、感動、印象の3つの主観的要素に関する語を用意した。音場再生システムの官能評価は、臨場感の観点から行われることが多かったが、生起される感動もシステムの再現制度に依存する可能性がある。また、本研究で採用している室内音響物理指標は、空間の印象との関わりが強いと考えられるため、印象評価のための評価語を含める必要がある。そのため、臨場感、感動、印象のそれぞれに関する語を用意し、それぞれの観点からシステムの評価を行うこととした。

このうち、臨場感や感動に関する評価語は、先行研究[7, 8]における再生システムを用いた主観評価実験で用いられたものを採用した。印象に関しては、音場再生システムにおける印象の評価を行った先行研究がないため、以下の予備実験により抽出した。

予備実験の被験者は、本実験とは異なる被験者17名(男性8名,女性9名)である。先行研究[10, 11]から抽出した107個の評価語に関して、記述選択法により、各評価語が音源の評価に適するかどうかを、「適する」「適さない」の2択で選択させた。評価に用いた音源の種類及び呈示音圧は、ホールでのパイプオルガン演奏(69 dB)、旅客機の頭上通過音(57 dB)、バイクの周回音(54 dB)、ホールでのオーケストラ演奏(62 dB)、竹やぶの音(50 dB)とした。呈示音圧の値は、事前に実験者4名が「ちょうどよい」と感じる大きさとして調整した音圧レベルをもとに設定した等価騒音レベル L_{Aeq} の値である。

その結果に対してクラスタ分析(グループ間平均連結法)を用い、評価語のクラスタリングを行った。相関係数2.5以上のものをクラスタとすることで、107個の評価語が15のクラスタに分類された。それらのクラスタから、各クラスタにおいて「標準偏差が最も高く、選択率50%以上」もしくは「標準偏差が2番目に高く、選択率50%以上」という条件に当てはまる評価語を抽出した。これらの条件に当てはまらないクラスタからは抽出を行わなかった。結果として、10の評価語が抽出された。

本実験では、先行研究[7, 8]により抽出された臨場感の評価語12個、感動の評価語12個に、印象を表す評価語として予備実験で抽出した10個を加えた、計34個の評価語を用いて実験を行った。15種類の刺激に対して、それぞれ34個の評価語について「1:非常に当てはまらない」「2:かなり当てはまらない」「3:やや当てはまらない」「4:どちらでもない」「5:や

や当てはまる」「6:かなり当てはまる」「7:非常に当てはまる」までの7段階で評価させた。

本実験に用いた評価語をTable 2に示す。

3.3 実験結果

得られた臨場感、感動、印象の評価値に対して、因子分析(主因子法+プロマックス回転)を行った。その結果、各主観的要素について、それぞれ3つの因子が抽出できた。

臨場感の第1因子は、「音に包まれている」「自分がその場にいるように感じる」などの、包囲感や自己存在感に関する評価語の因子負荷量が高いことから、「包囲感因子」として解釈した。第2因子は、「音に動きを感じる」「音に方向感を感じる」などの、音の定位に関する評価語の因子負荷量が高いことから、「音源定位因子」として解釈した。第3因子は、「人の存在を感じる」という評価語の因子負荷量が高いことから、「他者存在感因子」として解釈した。

感動の第1因子は、「心にしみる」「胸がいっぱいになる」などの、感情の充足感を表した評価語の因子負荷量が高いことから、「充溢(じゅういつ)因子」として解釈した。第2因子は、「興奮する」「目が覚める」などの、感情・感覚の喚起に関する評価語の因子負荷量が高いことから、「覚醒因子」として解釈した。第3因子は、「やりきれない」という評価語の因子負荷量が高いことから、「悲痛因子」として解釈した。

印象の第1因子は、「きれいな」「響きの豊かな」などの、音質の豊かさを表した評価語の因子負荷量が高いことから、「豊富因子」として解釈した。第2因子は、「音響空間の横幅が広い」「距離感がつかめる」などの、音場の空間性に関する評価語の因子負荷量が高いことから、「音響空間性因子」として解釈した。第3因子は、「人の注意をひく」「はっきりした」という評価語の因子負荷量が高いことから、「明瞭性因子」として解釈した。

これらの因子の因子得点と、ISO 3382[6]に記載の室内音響物理指標値である残響時間RT、明瞭性指標のC値及びD値、時間重心Ts、初期側方反射音エネルギー比LFのそれぞれの指標値の再現誤差との相関係数を求めた。

Fig. 2に、竹やぶの音を音源とした場合の、印象の第2因子である「音響空間性因子」の因子得点を横軸にとり、C値の再現誤差を縦軸にとったものを示す。

Fig. 2より、因子得点とC値の再現誤差との間に、正の非常に強い有意な相関が認められることが分かる。図中左下のフィルタ1の値が突出してはいるが、他の値の近い要素群の中でも有意な正の相関が認められた。また、他の指標値に関しても同様に相関係数を計算したところ、D値に正、Ts及びLFに負の非

Table 2 Extracted assessment words

臨場感	楽しめる	音に包まれている	情景が分かる	聞き慣れた音である
	色々な音が聞こえる	緊張感のある音である	音に動きを感じる	音に方向感を感じる
	人の存在を感じる	リアクションしたくなる	自分がその場にいるように感じる	
感動	心にしみる	心が温まる	胸を打つ	歓喜する
	心が躍る	心を奪われる	背筋がゾッとする	やりきれない
	興奮する	胸がいっぱいになる	心をわしづかみにする	
印象	きれいな	さわやかな	新鮮な	厚みのある
	距離感がつかめる	はっきりした	音響空間に奥行きを感じる	
	人の注意をひく	音が横から聞こえる	音響空間の横幅が広い	

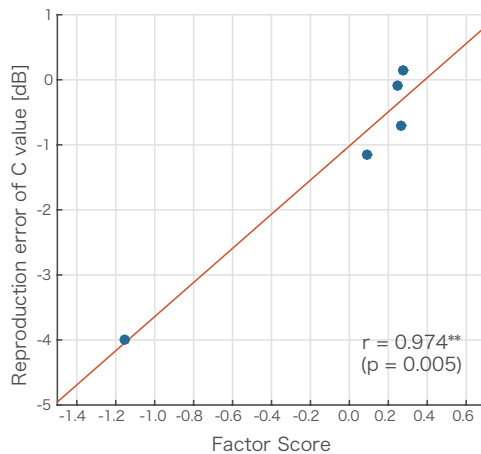


Fig. 2 Correlation coefficient between factor of “Acoustic space” and physical parameter

常に強い有意な相関が認められ、RTには相関が見られなかった。

これらの関係性は、臨場感、感動、印象における全ての因子に関して認められた。なお、感動の第3因子である悲痛因子は、マイナスのイメージを持つ言葉であるため、相関の方向が逆になった。また、全ての音源で同じ相関関係が認められ、音源による違いは見られなかった。

この結果より、因子と物理指標で1対1の相関関係を見いだすことはできないが、室内音響物理指標値の再現度が全体的な主観的印象と相関を持っていることがわかる。これは、室内音響物理指標の再現誤差を小さくすることで、原音場で聴いた際に生ずる主観評価値を再生音場でも再現し得ることを表している。物理的な指標を通して主観評価値の再現度を測ることができるという点で、提案手法は効果的かつ効率的な音場評価手法であると言える。

4 結論

室内音響物理指標を用いた音場再現システムの評価手法について、主観的印象との関係性を探るために、SD法による主観評価実験を行った。得られた主観評価値に対して因子分析を行い、抽出した因子に対する各刺激の因子得点と、室内音響物理指標値の再現誤差との相関を求めたところ、C値及びD値の再現誤差には正、Ts及びLFの再現誤差には負の、非常に強い相関が認められた。つまり、提案法を用いることにより物理指標値を介して主観量の再現性能の評価もできることを意味しており、提案法の有効性及び効率性が示されたと言える。

参考文献

- [1] 浜田, 日本音響学会誌, 48(4), 250-257, 1992.
- [2] 伊勢, 日本音響学会誌, 53(9), 706-713, 1997.
- [3] A. J. Berkhout, Journal of the Audio Engineering Society, 36(12), 977-995, 1988.
- [4] 高以良 他, 音講論集 (春), 1195-1196, 2014.
- [5] 浅井 他, 音講論集 (秋), 711-712, 2014.
- [6] ISO 3382-1 : 2009 : Part1, 2009.
- [7] 小林 他, 日本バーチャルリアリティ学会, 19(1), 37-45, 2014.
- [8] 大出 他, 情報処理学会論文誌, 50(3), 1111-1121, 2009.
- [9] T. J. Cox, Acustica, 79(1), 27-41, 1993.
- [10] 難波 他, “音の評価のための心理学的測定法”, コロナ社, 1998.
- [11] 安倍 他, 日本音響学会誌, 54(5), 343-350, 1998.
- [12] 伊勢, 音講論集 (秋), 591-594, 2014.
- [13] 高以良 他, 音講論集 (春), 861-864, 2015.
- [14] A. Omoto *et al.*, Acoust. Sci. Tech., 36(1), 1-11, 2015.