

〔研究ノート〕

## 音響素材の反射特性と透過特性計測に関する一検討

沖田 和久\*, 近藤 善隆\*<sup>2</sup>, 福島 学\*<sup>3</sup>, 窪田 泰也\*<sup>4</sup>

\*日本文理大学大学院環境情報学専攻

\*<sup>2</sup>株式会社ジェイテック\*<sup>3</sup>日本文理大学工学部情報メディア学科\*<sup>4</sup>A-Lab

### An Investigation on Measurement of Reflection and Transparency Characteristics of Acoustic Materials

Kazuhisa OKITA\*, Yoshitaka KONDO\*<sup>2</sup>, Manabu FUKUSHIMA\*<sup>3</sup>,  
and Yasuya KUBOTA\*<sup>4</sup>\*Department of Environmental Engineering and Applied Information Science,  
Graduate School of Engineering, Nippon Bunri University\*<sup>2</sup>J-TEC Co.Ltd.\*<sup>3</sup>Department of Media Technologies, School of Engineering, Nippon Bunri University\*<sup>4</sup>A-Lab

#### 1. はじめに

住空間における環境には、温度や湿度、明るさ等の様々な要因で構成される。住居建設において、パースや部屋の印象に関する視覚情報が多く提供され、システムキッチンにおいて蛇口の高さや使い勝手を確かめるためのVRシステム<sup>(1)</sup>も提案されている。しかし、建物引き渡しまたはその後発生するトラブルには音にまつわるものもある。例えば吹き抜けの広々とした多目的スペースが、授賞式で目の前の相手であっても発言が聞き取れず、改修を余儀なくされる場合がある。近年の遠隔授業においては、拡声器内蔵マイクにより拡声すると、モードの節と腹を移動しながら拡声するためかえって聞取りに伴う疲労感を増加させる場合がある<sup>(2)(3)</sup>。

建築構造物ではこのようなトラブル解消のため、講堂等においては建築音響物理指標が定められ、施工業者は音響特性計測を行い基準値以内となっていることを示す

ことが引き渡しの条件になっている。しかし、住環境では住人が室内装飾を変更するため、騒音問題等の音環境疲労さらにはそれらに基づく住民トラブルを生じている。

このため、音を吸収する吸音材や音の伝わりを防ぐ防音材/遮音材が発売されており<sup>(4-7)</sup>、一般の人が量販店等で容易に入手可能となっている。適切にこれらの素材を使うには素材の特性<sup>(8)(9)</sup>を知らなければならないが、素材メーカーは建築基準で定められている音響特性計測データを開示しても、一般の人が利用したらどのように音が変わるかを確かめるのに必要なデータにはなっていない。

そこで、本研究では一般に使われているパソコンで素材の音響特性を計測できるアプリを開発し、誰でも音響素材の特性計測と評価ができるようにすることを目的としている。本稿ではそのための準備として、音響計測の基本について述べ、次いで反射特性計測について述べ、透過特性計測について述べる。

## 2. 音響計測

ここで説明する音響計測は、再現性および制御が容易な線形特性を前提とした線形音響計測とする。

音に限らず状態を伝搬するメディアに物理現象を生じさせ、その現象の時間とともにどう変化するかを計測し、計測データからそのメディアにおける現象の推移規則を推定する。この推移特性が明らかになれば、未知の現象が発生してもその現象がどのように伝搬するかを計算で求めることが出来るようになる。これをシミュレートという。具体的には図1に示すように、メディアを「系/System」と呼び、現象発生を「この系への入力/Driving Signalを入力」と表現する。この系の計測を「系からの出力/Measurement Signal」と表現する。系はここで扱う音響メディア(時間経過に伴う大きさ変化)、映像メディア(時間経過に伴うピクセルの値変化)、だけでなく、電気、力学等の物理、さらにはAIによる識別も同様の枠組みで議論できる。

最もデータの次元が低い2次元データで扱うとすると、入力/Driving Signal  $x(t)$ と出力/Measurement Signal  $y(t)$ とし、系/System  $h(t)$ とすると、

$$y(t) = \int x(t-\tau)h(\tau)d\tau \quad (1)$$

が成立し、系/Systemの特性がわかっているならば任意の $x(t)$ において $y(t)$ を導出することが可能であることがわかる。次元が3次元となる映像でも同様の条件が成立する。これを利用したのがテレビの画質調整やオーディオの音色調整である。

特に、式(1)をフーリエ変換すると、出力/Measurement Signalである $y(t)$ の周波数表現 $Y(f)$ が、

$$Y(f) = FT(\int x(t-\tau)h(\tau)d\tau) = X(f)H(f) \quad (2)$$

となり、式(1)の積和が積のみの計算となり計算量が軽減されることと積算回路のみで実現できることから多くのオーディオ用工業製品に搭載されており、現在はスマホ等でも用いられている。



図1 現象の発生と計測のモデル

例えば図1の入力と出力が等しい、すなわち系/Systemが「何もしない」場合、信号源としてランダム信号とすると、観測信号は信号源そのものとなり、系/Systemの特性は図2・3段目に示すインパルスとなる。図は1段目に入力/Driving Signal, 2段目に出力/Measurement Signal, 3段目に系/Systemの特性の時間表

現であるインパルス応答, を示している。図は横軸が時間, 縦軸に信号の振幅(符号付きの大きさ)を示している。

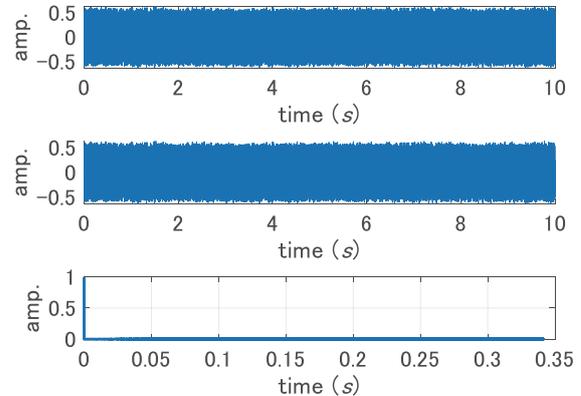


図2 入力と出力が等しい場合の系/Systemの特性

図2の3段目に示すように、時間的に1時刻にしか値がなく、変化に伴う変動(以下、過渡応答)が無い図2の3段目に示す信号をインパルスという。数学的に定義されているインパルスは $\delta(t)$ であるが、離散値では振幅1かつ離散時刻1以外の振幅が0となる信号を持って離散インパルスと呼ぶ。インパルスは、連続値でも離散値でもフーリエ変換した際に周波数によらず振幅が等しくなる特性を持っている。実際にはこのような信号は大きな空間ではエネルギーが小さいため系を駆動しきれない。図2の1段目に示したランダム信号系列は白色雑音/White Noiseと言われ、一定区間でフーリエ変換したものの振幅特性を平均化することでインパルスを持つ周波数に依存しない振幅特性を持っている。このため、計測において信号源としてインパルスの代わりに利用されることがある。図3に10秒の白色雑音の平均周波数振幅特性を、図4に300秒での例を示す。ここで解析区間のサンプル数 $N$ は16384(214)サンプル、両図ともに横軸に周波数, 縦軸に振幅をdBで示す。

図3ではまだ周波数によって周波数振幅が平坦とは言いが、図4は計測時間が長いすなわち平均回数が増加することで周波数に依存せず振幅値が一定になるという条件を満たすことを示している。

ここで、白色雑音を机上のスピーカから放射し、同じく机上のマイクで録音した場合の系/Systemの特性計測例を図5に示す。図は平均周波数振幅特性を示しており、軸は図3および図4と同じである。

図5は、普段会話している際には周波数によって音が大きくなったり小さくなったと感じることの無い場所であっても実際には変化していることを示している。これ

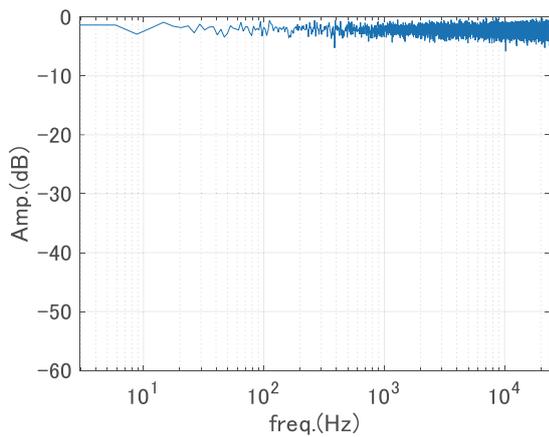


図3 10秒の白色雑音の平均周波数振幅特性例  
平均回数：14489, N=16384サンプル

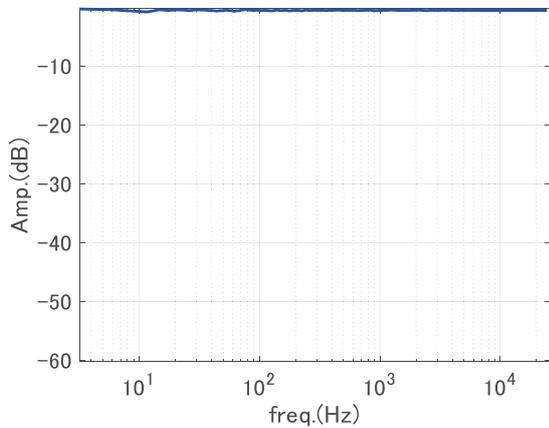


図4 300秒の白色雑音の平均周波数振幅特性例  
平均回数：449489, N=16384サンプル

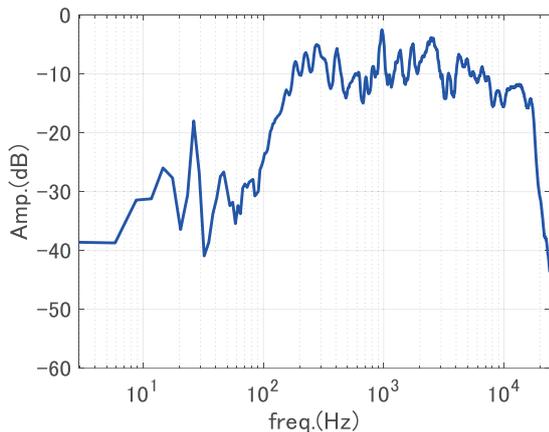


図5 机上設置スピーカから音を「音を伝える空間メディア」に入力し机上設置マイクで「空間メディア」からの出力を計測し系/Systemの平均周波数振幅特性

は本稿冒頭で述べた「音響素材」が普及していることの裏付けであり、また明示的に音環境の影響を認識出来ないことを示しており、音響メディア処理がQoL

(Quality of Life：生活の質)に関わり、建築分野と情報メディアの関係性を示しているものと考え。

ここで、図5を導出するのに使われた入力、出力、系の特性を図2の形式で示したものが図6である。

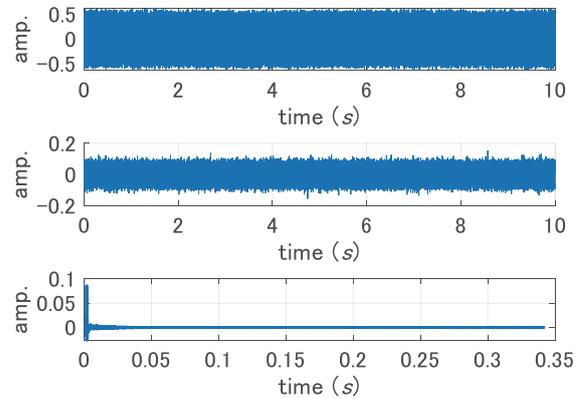


図6 図5導出に使用した入力・出力・系の特性  
N=16384サンプル

図6の3段目を見ると、図5に示した周波数特性で周波数記述能力/周波数分解能 $\Delta f$ がサンプリング周波数 $f_s$ とし、分析次数 $N$ とした時に

$$\Delta f = f_s / N \quad (3)$$

となることから、細かい周波数変化を見るためには $N$ を大きく、すなわち図6の3段目のように過渡応答が短くても長い区間を解析対象としなければならない。しかし、過渡応答が短いにも関わらず解析区間が長いと外来雑音の影響を受ける等の問題がある。

試しに過渡応答に合わせて分析区間長を短く( $N=512$ ( $2^9$ )サンプル)した例を図7に示す。図7は図6と同様とし、その平均周波数振幅特性を図8に示す。図8は図5の軸と同じである。

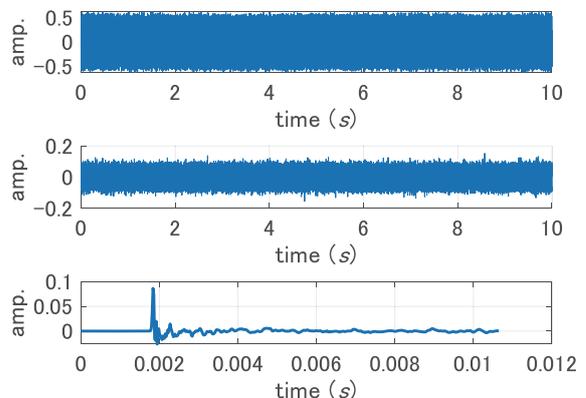


図7 分析区間長を短くした例 N=512サンプル

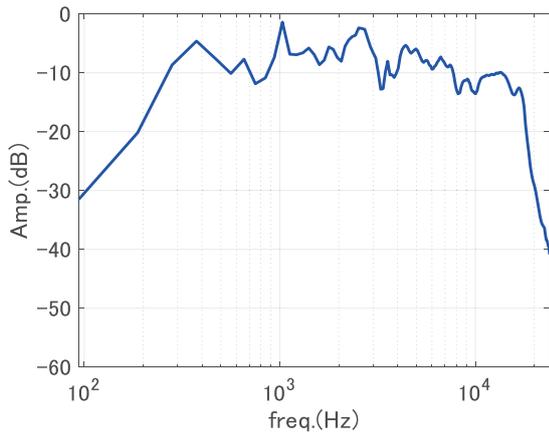


図8 分析区間長を短く (N=512サンプル) した場合の平均周波数振幅特性

図7は系の特性が図6の3段目に比べ時間経過に伴う振幅変化を目視で確認できることを示している。しかし、図8は図5の100Hz以下の周波数において周波数記述能力低下により平均操作でどのような値に収束するかがわからなくなったことを示している。

ここで生じている推定値の振幅歪と時間・周波数記述能力の問題を解決する1つの方法がDLR法<sup>(10-12)</sup>である。DLR法を利用することで、図8で見えなくなった100Hz以下の周波数が、図9に示すように、平均操作で収束するものであることが確認でき、かつ図10に示すように時間経過に伴う周波数の変化を見ることが可能となる。図9の軸は図8と同じである。図10の横軸は時間、縦軸は周波数、色で信号強度/信号の大きさを示している。

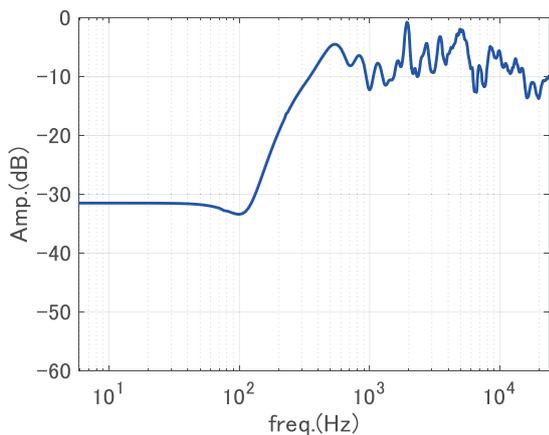


図9 DLR法による短時間周波数推定で求めた平均周波数振幅特性

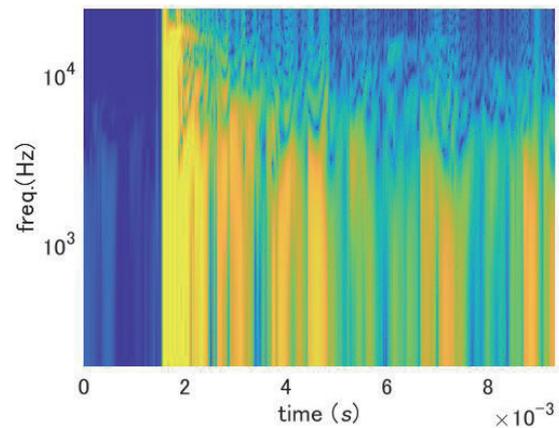


図10 DLR法による短時間周波数推定結果をソノグラム形式で示した例

### 3. 実計測による検証

従来音響素材の計測は、無響室や残響室という特殊音響計測設備や広い空間を必要としている。しかし、先述の短時間高精度計測が可能であれば、特殊環境が無くても音響特性を測ることが出来、使用スピーカやマイクの特性を補正できれば汎用機器で実験を行うことが可能となる。そこで図11に示す環境で実測計測を行い、先述の有用性を確認する。図中、MXはマイクを示す。

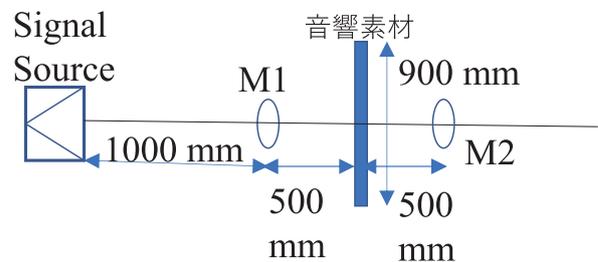


図11 実測環境

計測例を図12に示す。ここでは白色雑音300秒を小型スピーカで再生し、マイクで計測する。図12はM1にマイクを置いた際の計測例である。スピーカから放射された音はまずM1で観測され、その後音響素材で反射して再度M1に到来する。このため、スピーカから直接届く音に比べて、音響素材で反射した音は遅れて観測される。図12の3段目に示す系の特性において、横軸が時間を示し、「時間的遅れ」は時間軸の数字が大きい場所、すなわち「何秒遅れ」として示される。

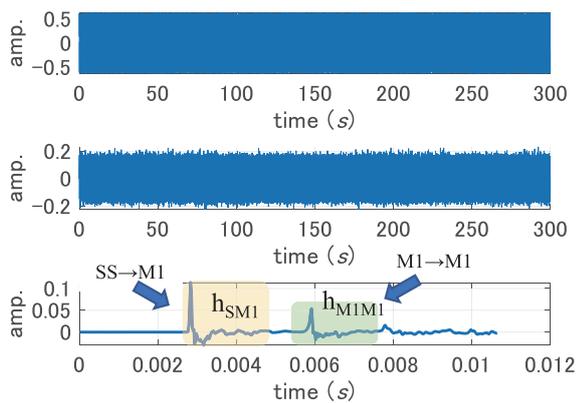


図12 音響素材の計測例

図12の3段目に示した特性全体から平均周波数振幅特性を求めた結果が図13である。

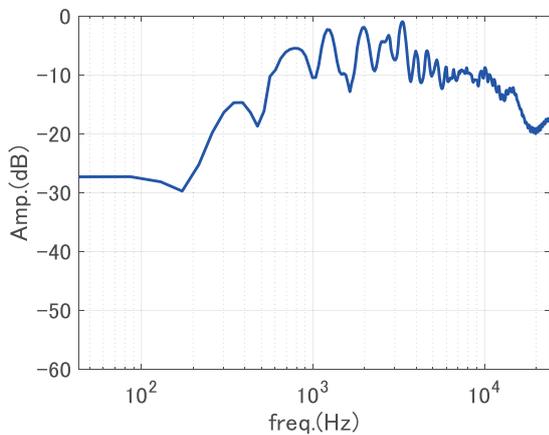


図13 系特性全体の平均周波数振幅スペクトル

しかし、図14に示すソノグラムを見ると、スピーカから音が届いた時と、音響素材からの反射が届いたときに特性が分離できることがわかる。

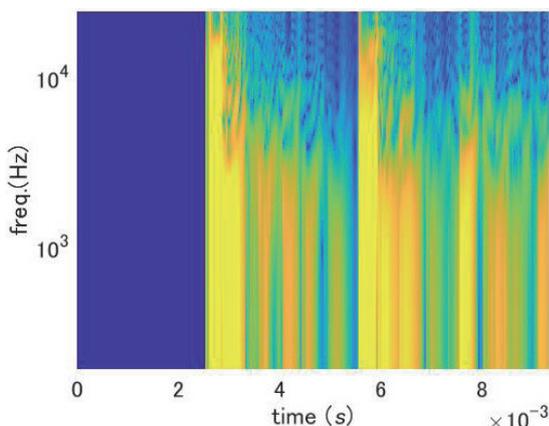
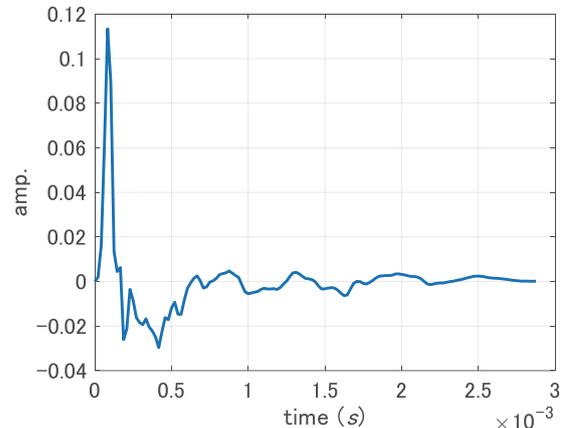
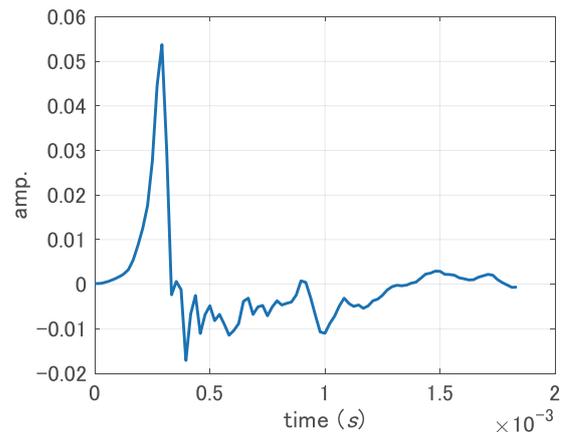
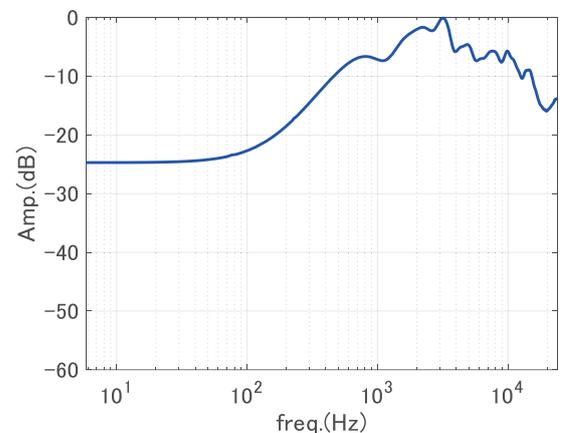


図14 DLR法で系特性をソノグラム表示した結果

図14に基づき、スピーカからM1までの特性  $h_{SM1}$  と音響素材の反射特性  $h_{M1M1}$  に分離した結果を図15が  $h_{SM1}$ 、図16が  $h_{M1M1}$  (応答特性の時間表現であるインパルス応答)、図17が  $|H_{SM1}|$ 、図18が  $|H_{M1M1}|$  (周波数表現である伝達関数の振幅特性)、を示している。

図15 スピーカからM1までの特性  $h_{SM1}$  (応答特性の時間表現であるインパルス応答)図16 M1から反射してM1までの特性  $h_{M1M1}$  (応答特性の時間表現であるインパルス応答)図17 スピーカから反射してM1までの特性  $|H_{SM1}|$  (周波数表現である伝達関数の振幅特性)

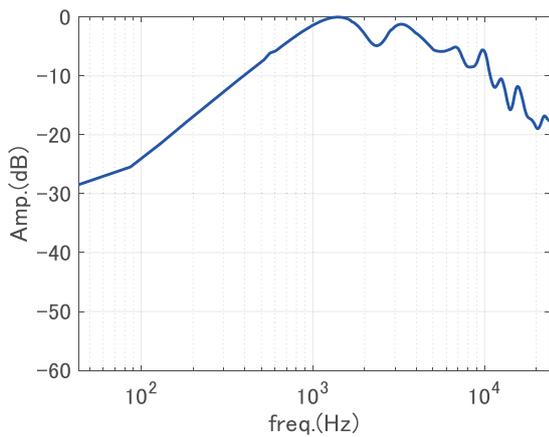


図18 M1 から反射して M1 までの特性  $|H_{M1M1}|$  (周波数表現である伝達関数の振幅特性)

図16と図18は、使用したスピーカ等の特性が入った信号である。スピーカの特性は図15と図17が距離減衰したものであり、反射等が無ければ単純減衰で近似できる。そこで、音響素材の特性のみを取り出すために、図18に示した特性から図17に示した特性をキャンセルし音響素材の反射特性を抽出する。その結果を図19に示す。図の軸は図18と同じである。

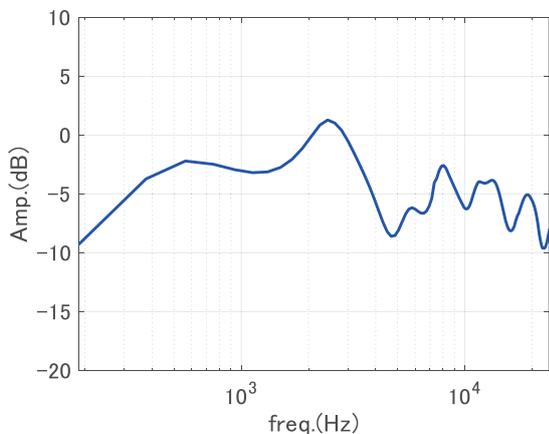


図19 音響素材の反射特性のみを分離抽出した例

図19は、事前に特殊音響計測用室で計測した値と一致したことから、ここで提案する手法により、特殊な部屋や機材でなくても同等の計測が可能であることが確認された。これは汎用機器を搭載している機器でのアプリ化が可能であることを示している。

そこで念のため兼ねて特殊室でないと計測が難しいとされている透過特性の計測を行う。ここでは、M2の計測データから音響素材を透過した信号を計測し、そこまでの特性を計測するものである。図20にM1で計測したインパルス応答、図21にM2で計測したインパル

ス応答を示す。

この2つの計測データから先ほどと同様に必要な部分を分離抽出することで、音響素材の反射率 (M1 観測信号) と透過率 (M2 観測信号) を求めた結果を図22に示す。

計測結果が、事前に計測した計測用特殊環境および専用機材の結果と同様の数値であったことから、この手法で同等の計測が可能であることが分かった。専用施設および機材を使用した場合に比べ、JIS 基準までの精度は得られないが、一般家庭における音環境を知ることや量販店で入手可能な音響素材の特性と評価を簡易的に知るためのアプリ開発が可能であることが分かった。

#### 4. おわりに

住環境の中でも特に音環境を調えることは、無用な脳疲労を軽減<sup>(5)(6)</sup>し生活の質 (QoL: Quality of Life) の向上に有用である<sup>(7)</sup>。音環境を調えるには音を伝搬する空間という音響メディアを適切に処理することに他ならない。いかに素晴らしい音楽であっても、収録の際の整音が適切でなければならず<sup>(13)</sup>、たとえ適切に収録されても、それを再生する空間が適切に調音されていなければ、その素晴らしさは聴き手に届かない。

収録コンテンツは聴き手が介入することができなかったが、遠隔講義だけでなく、様々な動画コンテンツを個人で発信できるようになった現在では、調音材の適切な使用による、収録時の整音と再生時の調音に関するスキルの重要性が高くなっている。

本研究では収録時の整音および再生時の調音で用いられる音響素材の音響特性を容易に計測および評価が行えるアプリ開発を目的としている。本稿はそのための基礎となる音響素材の基本性能である反射率と透過率計測の

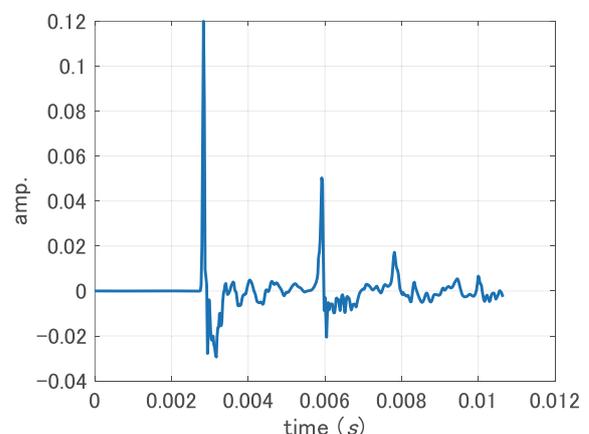


図20 M1 で計測したインパルス応答

計測において、特殊音響計測環境でなくとも、短時間かつ高精度計測により、適切な区間抽出により簡易処理のみで同等の成果が得られることを明らかとした。

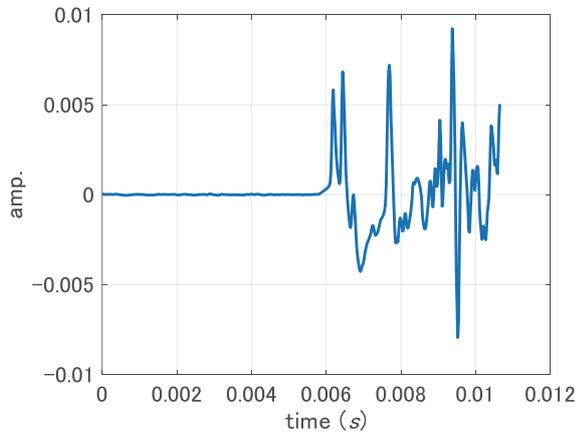


図21 M2で計測したインパルス応答

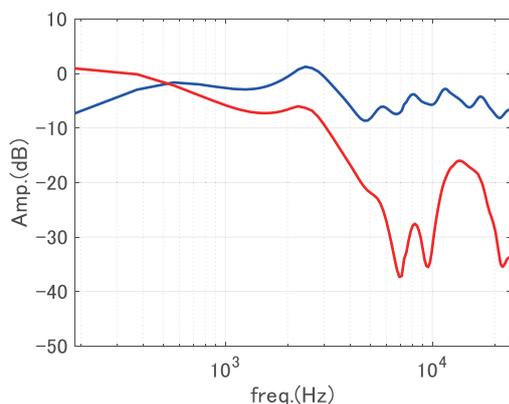


図22 音響素材の反射特性(青)と透過特性(赤)例

#### 参考文献

- (1) 野村淳二, “人工現実感によるシステムキッチン体験システム”, 精密工学会誌, p. 1352-1355, 57巻, 8号, 1991
- (2) 福島学, 沖田和久, 温水啓介, 山下涼介, 大里一矢, 大霜康晃, 加藤弘士郎, 石川直生, 上原正志, 河納隼一, 近藤善隆, 宇治川大吾, 窪田泰也, 柳川博文, “オンライン会議ツールの簡易脳波計測による評価の試み”, 日本音響学会, 日本音響学会2021年春季研究発表会講演論文集, 2-1 P-3, 2021
- (3) 福島学, 山下涼介, 大里一矢, 大霜康晃, 加藤弘士郎, 石川直生, 上原正志, 宮崎翔也, 河納隼一, 近藤善隆, 宇治川大吾, 松本光雄, 風間道子, 窪田泰也, 大川茂樹, 柳川博文, “オンライン会議ツールのDLR法を用いた短時間IR計測による音響的一考察”, 日本音響学会, 日本音響学会2020年秋季研究発表会講演論文集, 2-R2-14, 2020
- (4) 福島学, 長瀬翔斗, 鶴飼拓也, 舟橋宏樹, 河合修平, 上原正志, 近藤善隆, 松本光雄, 窪田泰也, 柳川博文, “調音材(オーラルソニック)の脳波計測による評価の一検討”, 日本音響学会, 日本音響学会2017年春季研究発表会講演論文集, 1-P-17, 2017
- (5) 福島学, 鶴飼拓也, 鎌田悠平, 鳥袋倫, 米川修平, 丸尾梨沙, 河納隼一, 近藤善隆, 窪田泰也, 松本光雄, 柳川博文, “音響刺激に対する脳活動と調音材の関係調査”, 電子情報通信学会応用音響研究会, vol. 115, no. 521, EA2015-80, pp. 81-86, 2016
- (6) 福島学, 鶴飼拓也, 鎌田悠平, 鳥袋倫, 米川修平, 丸尾梨紗, 河納隼一, 近藤善隆, 窪田泰也, “ワイヤレス脳波計測機を用いた音響刺激に対する脳活動と調音材の関係調査”, 日本文理大学, 第44巻, 第1号, pp. 35-42, 2016
- (7) 福島学, 鶴飼拓也, 舟橋宏樹, 河納隼一, 近藤善隆, 窪田泰也, 松本光雄, 柳川博文, “調音材の聴こえに対する効果調査に関する一検討”, 日本音響学会2016年春季研究発表会講演論文集, 1-P-11, 2016
- (8) 福島学, 鶴飼拓也, 篠原幸平, 河納隼一, 近藤善隆, 窪田泰也, 柳川博文, “時間追従による過渡的伝搬特性計測の一検討”, 日本音響学会2015年秋季研究発表会講演論文集, 1-P-12, 2015
- (9) 福島学, 鶴飼拓也, 篠原康平, 河納隼一, 近藤善隆, 窪田泰也, “短時間事象の時間周波数分析手法の一検討”, 日本文理大学紀要, 第43巻, 第2号, pp. 77-84, 2015
- (10) 福島学, 近藤善隆, 伊田匠, 野田裕, 阿部宏樹, 岩上知広, 末廣一美, 柳川博文, 黒岩和治, “観測信号のみによる距離推定における誤推定抑制のためのDLR-CS法の活用の一検討”, 日本音響学会2010年春季研究発表会講演論文集, 2-P-11, 2010
- (11) 近藤善隆, 伊田匠, 野田裕, 阿部宏樹, 岩上知広, 末廣一美, 福島学, 柳川博文, 黒岩和治, “移動体までの距離推定へのDLR-CS法適用の一検討”, 日本音響学会2010年春季研究発表会講演論文集, 2-P-12, 2010

- (12) Manabu Fukushima, Hiroto Inoue, Ken'itiro Kamura, Hirofumi Yanagawa, Ken'iti Kido, "A method for the determination of noise factor in estimated transfer function - cross spectral technique by use of 1-0 and 1-000 windows-", Proc. of The 18th International Congress on Acoustics, pp. 166-169, vol. 25, no. 2, 2004
- (13) 沢口真生, 深田晃, 高橋幸夫, "最近のマルチチャンネルサラウンド録音制作手法 ~音楽ドラマ制作にみる3-2サラウンド手法~", 情報処理学会研究報告音楽情報科学 (MUS), pp. 39-47, 16 (1998-MUS-029), 1999

---

(2022年12月21日受理)