

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 17 日現在

機関番号：27101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18172

研究課題名(和文) 内装材の現場施工状態の吸音特性を反映した音響リノベーション手法の開発

研究課題名(英文) Development of the acoustic renovation method reflected in-situ measurement absorption characteristic of interior materials

研究代表者

岡本 則子 (Okamoto, Noriko)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：00452912

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、内装材の現場施工状態の吸音特性を反映した音響リノベーション手法の開発に向けた検討を行った。まず、内装材の吸音特性測定法として適用するEA法に関し、測定の普遍性および一般的な内装材の吸音特性測定への有効性を明らかにした。続いて、縮尺模型を対象に音場予測に用いる時間領域有限要素法の解析精度を確認した。最後に、吸音材の設置前後の予測に提案手法を適用し、音響リノベーションへの適用可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the room acoustic renovation method that utilizes both the in-situ measurement sound absorption characteristics obtained by the EA-method and sound field analysis by finite element method is proposed, and basic investigations are conducted to show effectiveness of the method. First, the universality of the EA method and the effectiveness as a measurement method of absorption characteristics for interior materials are clarified. Next, impulse responses in sound fields for a scale model are calculated by time domain finite element sound field analysis, and the accuracy of the method is confirmed by comparison to measurements. Finally, the proposed method is applied to sound field prediction before and after the installation of the sound absorbing material, and its applicability for room acoustic renovation is shown.

研究分野：工学

キーワード：建築音響 リノベーション 建築材料 吸音特性 現場測定 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

近年、環境負荷低減に向けた取り組みがなされる中、従来のスクラップ&ビルドから、価値のあるものを造り長く大切に使用するストック型社会への移行が求められている。建築分野においても、これまで日本の住宅は約30年のサイクルで建て替えられていたが、近年、老朽化した建築物を建築当初の性能に戻すリフォームが活発に行われるようになった。さらには、用途や機能を変更して建築当初より性能を向上させその価値を高めるリノベーションへの関心が高まっている。

ところで、建築物の性能に対して、省エネルギーや快適性への配慮として、光や熱といった建築環境への取り組みが重視されつつある。しかし、建築環境の一要素である室内の音環境については、他の環境要素に比べ位置付けが低く、おざなりとされている状況は否定できない。その結果、意匠性の観点からの打放しコンクリートやガラスといった吸音が見込めない建築材料の利用などにより残響過多な建築空間が多く生み出され、コミュニケーション活動に支障が生じている。

一方、音響設計を行う上で、設計段階で用いられる音環境予測手法の研究も活発に行われている。従来、室の響きの量を予測するために、Sabine や Eyring の残響式の利用や縮尺模型による実験が行われていたが、近年の計算機技術の発展に伴い、コンピュータによる数値シミュレーションも活用されている。いかなる予測手法にしても、パラメータとして、室内空間を構成する建築材料の吸音特性を事前に把握する必要があり、高精度の予測手法を用いる場合は、それに見合った高精度の値を用いるべきである。

しかし、材料の吸音特性として一般的に使用される残響室法吸音率は、その測定に大型設備である残響室および 10m² 程度の試料が必要である上、測定機関や測定の設定等で測定値が数十%ばらつく[1]とされ、室内音響設計や騒音制御の現場で非効率・資源の浪費が生じる原因となっている。加え、実験室を使用するため、実際の建築空間で施工されるような内装材の吸音特性の把握は困難である。

この状況の克服のため、申請者らは、環境騒音を利用した建築材料の吸音特性測定法(EA法)の開発を行ってきた[2,3]。同手法は、材周辺に存在する環境騒音、受音センサ、周波数分析器のみで測定が行えるため、測定場所に依存せず、材料の吸音特性を得られる特徴を持つ。また、主に多孔質材料を対象に持ち回り試験を行い、基本的な普遍性・再現性が得られることを確認している。

一方で、申請者らは有限要素法(FEM)による室内音場予測手法に関する研究を行ってきた[4]。FEMは他の波動音響シミュレーション手法に比べ適用範囲は広いが、計算コストが高い点が指摘されてきた。これに対し、反復解法の適用で、従来困難とされた実スケールの建築室内の音場のシミュレートも可

能となり、残響室内定常音場における実測値との良好な一致も確認している。

2. 研究の目的

本研究では、EA法により現場施工状態の内装材の吸音特性を正確に把握し、その結果をFEMによる室内音場予測手法に適用することで、現状の音響性能の把握から、吸音材の設置計画についてその適性を定量的に予測する、内装材の現場施工状態の吸音特性を反映した音響リノベーション手法の開発を目的とする。本研究課題では、その端緒として、内装材の吸音特性測定法としてのEA法の適用可能性と、精密な実測との比較によりFEM室内音場予測精度を明らかにすることを目標とする。

3. 研究の方法

本研究で使用するEA法とFEMによる室内音場解析手法について示す。

EA法の測定系のブロックダイアグラムを図1に示す。EA法では、材料への音波の入射条件として乱入射を想定し、材料表面近傍に設置した2本のマイクロフォンもしくは音圧粒子速度センサで測定される伝達関数からアンサンブル平均ノーマルインピーダンス $Z_{n,EA}$ 、吸音率 $\alpha_{n,EA}$ といった吸音特性を求める。なお、乱入射音源として、測定対象の周辺に存在する環境騒音を使用するが、不足する場合は、ピンクノイズを出力するスピーカ等の補助音源を使用して測定を行う。

室内音場の予測には、計算効率を考え、時間領域の有限要素法(TDFEM)を適用する。

TDFEMでは、以下に示す離散化運動方程式の時間方向の離散化にNewmark β 法を用いて、時間ステップごとの音圧 p を算定する。

$$M\ddot{p} + c_0^2 Kp + c_0 C\dot{p} = \rho v_n c_0^2 W \quad (1)$$

K , M , C は要素係数行列 K_e , M_e , C_e を重ね合わせて構成されるそれぞれの全体行列、 ρ , c_0 , v_n , W はそれぞれ空気密度、音速、法線方向粒子速度、分配ベクトルである。

これらの手法を音響リノベーションへ適用していくために、本研究課題では、まず、一般室を対象とした持ち回り試験および一般に使用される内装材を想定した種々の試料に対して吸音特性の測定を行い、測定の普遍性および測定可能な内装材を明らかにすることによって、現場施工状態の内装材の吸音特性測定法としてのEA法の適用可能性を示す。続いて、縮尺模型を対象とした高精度な実測値との比較によってTDFEMの解析精度を明らかにする。最後に、EA法の吸音特性をTDFE解析に試行的に適用する。

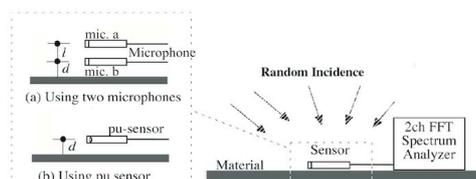


図1 EA法の測定系のブロックダイアグラム

4. 研究成果

(1) EA 法による測定の普遍性の関する検討

既往の研究で、反射性材・多孔質材を対象に容積の異なる種々の空間において 4000 Hz までの周波数を対象に持ち回り試験を実施した。什器が多く床面がカーペット敷の室の床に試料を設置して測定を行った場合、250 Hz 付近で吸音率の差異が認められた。これに関し、試料の設置位置を同室の机に変更したところ、室による測定値のばらつきが減少したため、試料周辺の什器によるモードの影響であると推察した。しかし、机上と床上では試料背後の材料が異なるため、必ずしもモードの影響であるとはいえない。そこで、EA 法の適用範囲拡大に向け、持ち回り試験における測定値の周波数領域を 8000 Hz まで拡大した検討を行うとともに、250 Hz 付近の測定値の差異の原因を明らかにした。

測定場所として、既往の研究と同様の、表 1 に示す室容積および内装材の異なる 3 室（ゼミ室、教室、視聴覚室）に、モードの影響が少ないとされる屋外を参考として加えた 4 つの音場を設定した。測定試料は、表 2 に示す天井材や壁材として一般的に使用される 5 種とし、室内の床上に試料を設置した。試料の寸法は既往の研究を参考に、600 mm × 600 mm とした。なお、試料の背後条件を同一にするため、各試料の背後にアクリル板を設置し、グラスウールについては、周辺端部もアクリル板で覆い、測定を行った。

音源には、移動音源として 4 個のポータブルスピーカを用い、手で移動させた。2 本のマイクロフォンを試料の中央に設置し、試料ごとに 3 回ずつ測定を行った。3 回の測定値の平均値を求め、さらに、1/3 オクターブバンドに含まれる各周波数を算術平均した値を検討に用いた。

図 2 に、各試料について、各測定場所で測定した吸音率の比較を材ごとに示す。視聴覚室における 250 Hz 付近の結果を除き、試料および測定場所によらず吸音率のアウトラインは概ね一致している。しかし、反射性材である石膏ボードは、他の試料と比べ 4000 Hz 以上の高周波数域での測定値のばらつきが大きくなった。また、屋外における測定値は他の室の測定値に比べ、250 Hz 以下で高くなっている。これは、測定時の風の影響によるものと考えられる。ここで、屋外を除く室における測定結果から標準偏差を算出した結果を図 3 に示す。これより、視聴覚室における 250 Hz の測定値の差異を除き、4000 Hz 以下の周波数域で 0.04 以下となった。なお、反射性材である石膏ボードの結果を除くと、6300 Hz 以下で 0.04 となる。

続いて、250 Hz の周波数域で見られる吸音率のばらつきについて検討した。持ち回り試験では、試料の背後状態を統一するため、剛壁としてアクリル板を設置したが、視聴覚室のように床が柔軟なカーペットの場合、用いる板によっては板振動、すなわち接地共振

表 1 測定室の容積と内装材

室名	容積[m ³]	内装材
ゼミ室	63	天井：岩綿吸音板 壁：石膏ボード 床：ビニールシート
教室	244	天井：岩綿吸音板 壁：石膏ボード 床：ビニールシート
視聴覚室	690	天井：岩綿吸音板 壁：有孔板 床：ビニールシート
屋外	-	天井：- 壁：- 床：タイル

表 2 測定試料

記号	試料
GW50	グラスウール(50 mm 厚)
GW25	グラスウール(25 mm 厚)
RW9	岩綿吸音板 (9 mm 厚)
RW12	岩綿吸音板 (12 mm 厚)
PB	化粧石膏ボード (9.5 mm 厚)

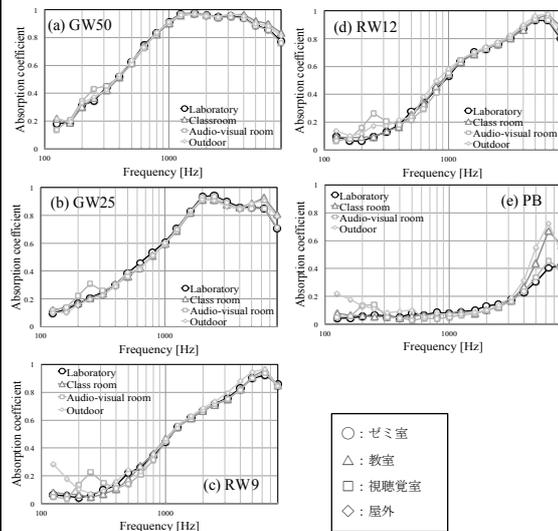


図 2 各音場における各材料の吸音率の結果

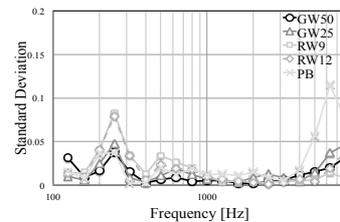


図 3 各音場における測定値の材料ごとの標準偏差

を生じる可能性がある。そこで、什器によるモードおよび接地共振の 2 点に着目した検討を行った。まず、什器によるモードの影響の有無の確認のため、床上で試料を設置しない状態、すなわちカーペットの測定を行った。その結果、図 4 に示すように 250 Hz 付近で吸音率のピークは生じていない。続いて、カーペットの上にアクリル板を設置し、その上に GW25 を設置した場合とカーペット上に直接 GW25 を設置した場合の吸音率を図 4 に併せて示す。GW25 の背後にアクリル板を設置しない状態では、250 Hz 付近でピークは生じておらず、測定値のばらつきの原因としてアクリル板の設置による接地共振の影響が示唆される。そこで、視聴覚室の床面にアクリル板のみを設置した状態で、アクリル板中央の振動加速度レベルの測定を行った。その結果

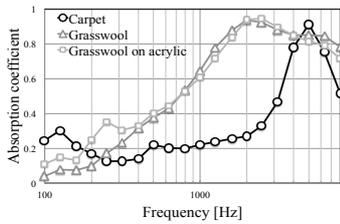


図 4 背後にアクリル板がある場合と無い場合の GW25 の吸音率の比較

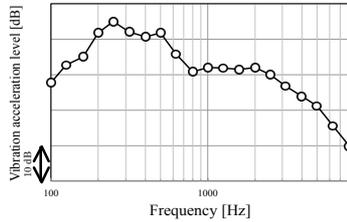


図 5 アクリル板の振動加速度レベル

を図 5 に示す。250 Hz 近傍の測定値にピークが生じている。以上のことから、柔軟なカーペット上へのアクリル板の設置によって板振動が生じ、視聴覚室における 250 Hz 付近の吸音率が高くなったと考える。

以上より、試料の背後条件が同一の場合、4000 Hz 以下の周波数域では、室による測定値のばらつきは小さいと考える。

(2) EA 法の適用可能な内装材の調査

実際に使用される内装材を想定して背後構造および表面仕上げの異なる材料の測定を EA 法により行いその吸音、吸音特性の差異を捉えられるか適用可能性を検討した。なお、測定場所は前述のゼミ室とし、(1)の検討を踏まえ 4000 Hz までを対象に実験を行った。

まず、背後構造の異なる材料として、表面材料の背後の同一の空気層内に異なる厚さの裏打ち材を設置した状態の吸音特性の測定を実施した。

測定試料の断面図を図 6 に示す。表面材料の背後に 100 mm の空気層を設け、裏打ち材の厚さを 4 段階で変化させ、室の床面に設置した。有孔板 5 mm 厚 (600 mm×900 mm, 孔径 6 mm, 開孔率 3.1% : 以下, PP) を表面材料とし、裏打ち材としてグラスウールを用いた。図 7 に測定結果を示す。試料背後の空気層内に設置された裏打ち材が厚いほど、吸音率が上昇する。また、裏打ち材が薄い場合、低周波数域での裏打ち材の効果は大幅に減少する。

続いて、同一の試料に異なる表面仕上げを施した場合の測定を行い、表面仕上げの違いで吸音率に差異が見られるか確認した。

まず、クロスの違いについて検討した。測定試料は、GW25 および GW50 とする。表面仕上げ材に、通気性の材料として織組織の粗さの異なる 2 種のガラスクロス、通気性の低い材料として塩化ビニール製の壁紙をそれぞれ用いた。なお、試料表面と表面仕上げ材を密接させるために、試料表面を仕上げ材で覆った後に、アクリル板を試料の四方に設置して仕上げ材を固定した。表面仕上げを施さない場合と比較した結果を図 8 に示す。ガラ

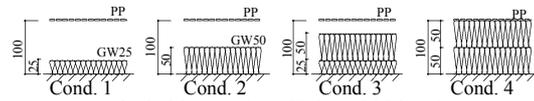


図 6 裏打ち材の厚さが異なる材料の断面図

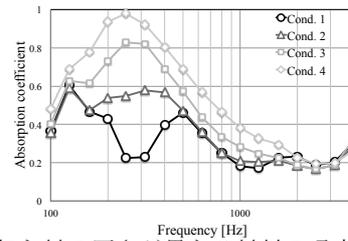


図 7 裏打ち材の厚さが異なる材料の吸音率の比較

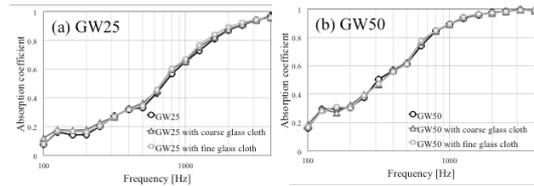


図 8 試料表面にガラスクロスが貼られた材料の吸音率の比較

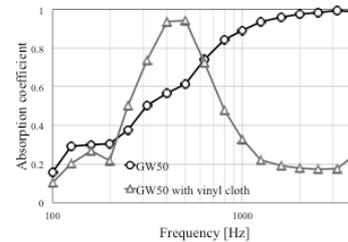


図 9 試料表面に壁紙が貼られた GW50 の吸音率の比較

スクロスで表面仕上げを行った場合、試料によらず、グラスウールのみの場合とほぼ一致する。また、本研究で用いたガラスクロスでは、織組織の粗さの違いによる測定値の差異も見られず、ガラスクロスによる試料表面の処理は測定値に影響がないことが示唆される。続いて、図 9 に、GW50 の表面仕上げとして、壁紙を用いた場合の測定値を、仕上げが施されていない状態での測定値と併せて示す。壁紙を設置した場合、通気性が低いことから壁紙表面で音波が反射されて GW50 の吸音効果が発揮されず、GW50 特有の吸音特性が得られていない。また、500 Hz 付近でピークが生じており、壁紙の膜振動の影響が吸音率に現れていると考えられる。

最後に、表面仕上げとして、天井の改修時にペンキ塗装による仕上げがされる場合がある。そこで、ペンキ塗装による試料表面の皮膜の影響を捉えられるかを検討する。

測定試料は 300 mm×600 mm の RW9 とし、水性・油性塗料を塗装する。2 つの岩綿吸音板に対し、一方は水性塗料のみを 2 度塗りする。他方は、油性塗料を塗装後、その上に水性塗料を重ねて塗装する。両条件とも、工程毎に吸音率を測定する。使用した塗料はそれぞれ、水性はアクリル樹脂、油性はシリコンアクリル樹脂である。図 10 に、水性塗料のみを使用した場合の結果を示す。塗り重ねにつれ、吸音率が減少している。次に、油性塗料も併せて使用した材料の各工程での測定結果を図 11 に示す油性塗料のみを塗装し

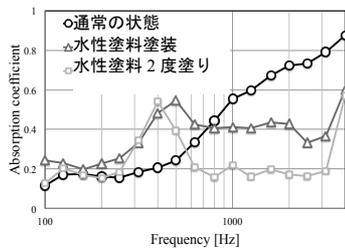


図 10 水性塗料が塗装された材料の吸音率

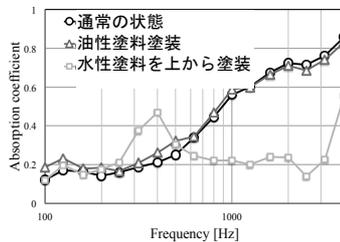


図 11 水性・油性塗料が塗装された材料の吸音率
 た場合、吸音率の減少が見られない。しかし、その上に水性塗料を重ねて塗装した状態での吸音率は、水性塗料のみを使用した場合の測定値と同様に測定値が減少した。これより、吸音率の減少は水性塗料の試料内部への浸透によるものと考えられる。なお、両結果の水性塗料を塗装した場合に見られる 400 Hz 付近の吸音率のピークは、水性塗料の浸透により試料の反り返りが生じたことで試料の設置状態が変化し、板振動を生じやすくなったためと考える。

以上より、試料の背後構造および表面仕上げの異なる材料に対して、EA 法を適用可能であることを明らかにした。

(3) TDFEM の精度検証

これまでにも、FE 解析値と実測値の差異について検討を実施してきたが、既存の室を対象とし、人的・時間的なコストの問題もあるため、音源や測定機器、測定者も含め十分な実験精度を確保したとは言い難い。また、既存の室は境界条件が複雑なため、実測値と解析値に差異が生じた場合の要因の解明が困難である。そこで、本研究課題では、精度検証に用いる実測の高精度化に向け、境界条件を変更可能な縮尺模型を対象とした検討を行った。解析値を高い精度で測定された実測値と比較することで、差異の生じる要因解明を目指した。

調査対象は、図 12 に示す一部の壁が傾斜した室の縮尺模型とする。

まず、実測を行うため、内法が図 12 と同一となるアクリル製模型を製作した。音源にはドライバーを用い、固定を容易にするため、アクリル製の直方体に埋め込んでユニット化し、スタンドを付けて自立させた。音源ユニットと模型室を防振ゴム付きの治具を介して接続し、模型壁面上の直径 25 mm の円形の開口部から室内に音が放射するようにした。受音に関しては、設置位置の正確な設定のためにマイクホルダを製作し、天井面から吊り下げる形で固定した。実測のブロックダイアグラムを図 13 に示す。無響室に模型を設置し、TSP 法によりインパルス応答の測定

を行った。得られた応答に、オクターブのバンドパスフィルタリングを施し、解析と比較する。同期加算回数は 10 回とした。

TDFE 解析については、図 12 の模型室内音場に対し、帯域制限されたインパルス応答を求める。検討の初段として、音源は点音源とし、IIR フィルタ(バターワース型のオクターブバンドパスフィルタ)のインパルス応答を出力した。中心周波数は 500, 1000 Hz の 2 種とした。境界面の吸音設定として、局所作用を仮定し、各材料の実数の比音響インピーダンス比 z_r 与える。アクリルの z_r は、模型室で実測した 6 点の残響時間 T_{30} から Sabine の式により平均吸音率を算出し、ランダム入射を想定した London 式に代入して算出した。音響要素には 27 節点スプライン要素を適用し、解析上限周波数の音波長に対する節点間距離が 4.8 以上となるように要素分割を行った。総自由度数は 500 Hz の解析で 2717, 1000 Hz で 7803 である。解析時間長は 2.97 s とし、時間ステップは 0.06 ms とした。

図 14 に TDFEM による解析値を実測値と比較した結果の一例を示す。0.015 s までは両者の対応は良好であるが、時間の経過につれ、位相・振幅ともに差が大きくなっている。その様子は、図 15 の減衰曲線にも現れている。なお、図中には、前述の平均吸音率から垂直入射を想定して算出したインピーダンスを壁面に与えた結果 (z_n) も併せて示している。同じ平均吸音率に基づいても、境界面への入射条件の想定の違いにより FE 解析間で減衰が大きく異なり、境界の吸音特性設定の難し

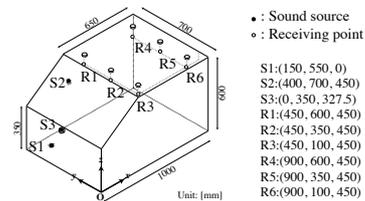


図 12 対象室

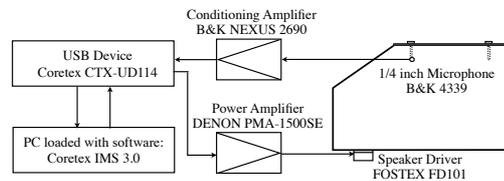


図 13 測定系のブロックダイアグラム

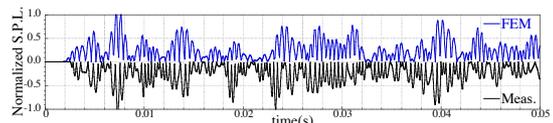


図 14 FE 解析と実測による帯域制限されたインパルス応答の比較 (1000 Hz)

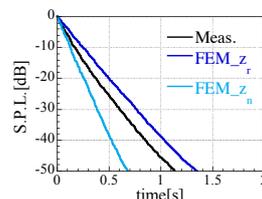


図 15 FE 解析と実測による減衰曲線の比較 (1000 Hz)

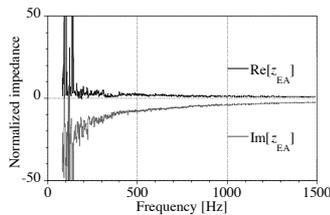


図 16 EA 法によるタイルカーペットの吸音特性

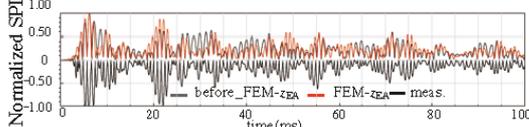


図 17 EA 法の測定値を適用した FE 解析と実測による帯域制限インパルス応答の比較 (500 Hz)

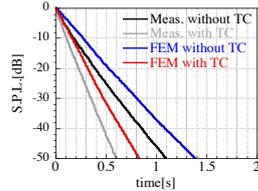


図 18 吸音材を設置した場合としない場合の FEM と実測の減衰曲線の比較

さが確認された。以上、室形状は単純であることから、実測との差異の要因として、吸音のモデル化の影響が大きいと示唆される。

(4) TDFEM への EA 法による測定値の適用

最後に、TDFEM へ EA 法で測定した吸音特性測定値を試行的に適用し、実測値と比較した。

(3) で用いた縮尺模型の床面に、吸音材としてタイルカーペット (TC) を敷設した音場を対象とし、TDFE 解析および実測を行った。

まず、EA 法により TC の吸音特性を測定した。測定された TC の比音響インピーダンス比を図 16 に示す。それらを 1/12 オクターブバンドで平均した値を FE 解析に用いた。また、アクリルについては、反射性材のため (3) と同様の値を用いた。その他の解析および実測の設定は、(3) と同様とした。EA 法による吸音特性を適用した TDFE 解析値を実測値と比較した結果を図 17 に示す。図中には、実測のスピーカの周波数特性を配慮する前後の TDFE 解析値を示している。スピーカの特性を配慮した場合の解析値は、実測値との対応がより良好である。しかし、(3) の結果と同様に、時間の経過に伴い、位相にずれが認められる。残響時間を算出したところ、実測と解析の間で差異が生じたが、初期応答の対応は良好であることと、図 18 に示すように、吸音材を敷設することによる音の減衰効果は実測と同程度であることから、解析間での吸音材の効果の把握といった相対的な用途としては、リノベーションに適用できると考える。今後は、実測値との差異の要因解明を進め、提案手法の高精度化を図るとともに、実務の現場で要求される精度の調査及びそれに見合う簡易的予測手法の開発を行い、実用化へ向けた検討を進める予定である。

<引用文献>

[1] 牧田他, 残響室法吸音率の測定精度に関する研究(I) 第3 回協同比較試験と音場拡散条件の検

討, 日本音響学会誌, 24(6), 381-392, 1968

[2] Takahashi, et al., In situ measurements of surface impedance and absorption coefficients of porous materials using two microphones and ambient noise, Appl. Acoust., 66, 845-865, 2005

[3] N.B.C. Din, et al., Reproducibility and applicability of ensemble averaged surface normal impedance of materials using an in-situ technique, Acoust. Australia, 41(3), 207-212, 2013

[4] 岡本他, 有限要素音場解析への Krylov 部分空間法の適用-反復解法を利用した大規模音場数値解析 その 2-, 日本建築学会環境系論文集, 610, 11-18, 2006

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 岡本則子, 大鶴徹, 富来礼次, 建築材料の吸音特性の現場測定法による施工状態管理システム開発に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 第 23 巻, 第 54 号, 2017 年, 517-520

[学会発表] (計 5 件)

- ① 大蔵翔平, 大鶴徹, 富来礼次, 岡本則子, アンサンブル平均を用いた材料の吸音特性の in-situ 測定法の簡易化に関する境界要素解析-音の入射範囲の広帯域化及び音源数の低減に関する検討-, 日本建築学会, 2017 年 8 月 31 日~2017 年 9 月 3 日, 広島工業大学 (広島県広島市)
- ② 坂本浩平, 大鶴徹, 富来礼次, 岡本則子, アンサンブル平均を用いた材料の吸音特性の in-situ 測定法-受音及び音源の設定に関する数値解析的検討-, 第 56 回日本建築学会九州支部研究報告会, 2017 年 3 月 5 日, 長崎大学 (長崎県長崎市)
- ③ 岡本則子, 富来礼次, 大鶴徹, 西郷さくら, 藤城謙太郎, 有限要素法による室内音場解析の境界条件に関する研究-模型実験との比較による検討-, 日本音響学会 2016 年秋季研究発表会, 2016 年 9 月 16 日, 富山大学 (富山県富山市)
- ④ 國丸慶太郎, 岡本則子, 大鶴徹, 富来礼次, 建築材料の吸音特性測定法による施工状態管理システム開発に関する研究: 背後構造および表面仕上げの異なる材料の測定, 第 55 回日本建築学会九州支部研究報告会, 2016 年 3 月 6 日, 琉球大学 (沖縄県沖縄県中頭郡西原町)
- ⑤ 國丸慶太郎, 岡本則子, 大鶴徹, 富来礼次, アンサンブル平均を用いた材料の吸音特性の in-situ 測定法-持ち回り試験による測定値の普遍性に関する検討-, 日本音響学会九州支部, 2015 年 11 月 28 日, 九州工業大学 (福岡県北九州市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 則子 (Okamoto, Noriko)

北九州市立大学・建築デザイン学科・准教授

研究者番号: 00452912