

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：17501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760469

研究課題名(和文) 非定常波動音響シミュレーションを利用した残響室法吸音率の補正

研究課題名(英文) Wave-based unsteady acoustic simulation for correction of absorption coefficient in reverberation room

研究代表者

富来 礼次(TOMIKU, REIJI)

大分大学・工学部・准教授

研究者番号：20420648

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、建築材料の吸音性能を評価する最重要の指標の一つである残響室法吸音率について、近年急速に発展している波動音響に基づく非定常音場シミュレーションを駆使し、残響室法吸音率測定値の変動要因と測定誤差の関係の明確化、および残響室法吸音率補正手法の開発と適用範囲の検証を行った。

室形状、周波数、測定試料の吸音率・面積の異なる72種の測定音場を対象に有限要素法による非定常音場シミュレーションを実施し、全壁面へ入射する音のエネルギーに対する試料へ入射する音のエネルギーの割合($r(t)$)を用いて補正した残響室法吸音率が、補正しない残響室法吸音率と比較し、理想値をより捉えることを示した。

研究成果の概要(英文)：The absorption coefficient in reverberation room is used in the practice of room acoustics and noise controls. However it is well known that measurement results of the coefficient vary according to a room shape of the measurement and area of the measurement material.

In this study, sound fields for the measurement are analyzed by time domain finite element method. This study shows effectiveness of the analysis for investigation on causes of variation in the measurement results and improvement methods of the measurement. To evaluate an actual sound field for the measurement, the ratio of incident sound energy to the test material in those to all boundary of the measurement sound field is calculated from results of the analysis. The ratios are compared with the absorption coefficients in reverberation room obtained by the analyses, and are utilized to correct decay curves of the measurement.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：残響室法吸音率 有限要素法 波動音響数値シミュレーション 拡散音場 面積効果

1. 研究開始当初の背景

建築室内を代表とする内部空間の音響性能の設計を行う際、境界条件となる材の吸音性能は必須のデータである。建築室内では、材に対し様々な方向から音が入射(乱入射)する場合の吸音特性として、JIS A 1409で測定された残響室法吸音率を用いることが多い。しかし、測定機関や測定の設定等で測定値が数十%ばらつくため、以前より実験的・統計的に多くの研究が行われている。近年でも川上が試料面積で測定値が異なる「面積効果」を回避する壁を試料の周囲に設置し、電気音響設備を用いて理想的な音場を生成する手法を提案している。これは有効な手法であるが、新たな電気音響設備が必要となる上に、過去の測定値との比較が困難なため、それを補う研究が必要であろう。

一方、計算機技術の発展にともない数値シミュレーションも利用されており、音線法を用いた研究も行われている。しかし、音の波動性を無視する手法のため例えば前述の「面積効果」の影響は考慮できない。Kawaiらは音の波動性を考慮した境界要素法で理想的な音場における「面積効果」を算出し、測定値を補正する手法を提案しているが、測定での理想的な音場の実現に課題が残る。

これらの結果、現在日本には十以上の残響室があるにもかかわらず、最終的な比較のための測定値は多くの測定実績のあるいくつかの試験機関で測定し、さらに測定値の利用にはベテラン技術者・実務者の経験と勘が必要といった問題が生じている。これは、建築・音響設計の非効率を招くとともに、新たな材料開発の妨げになっていることは想像に難くない。

2. 研究の目的

残響室法吸音率の変動する要因は、測定試料の設置手法や残響時間の読み取り誤差等も考えられる。この研究では、数値シミュレーションを用いることで、室内音場の拡散性に関わる要因、すなわち周波数・室の形状・容積および測定試料の寸法・吸音率のみに着目する。これらを変化させた音場を、定量的な音場の評価指標で評価し、測定に影響を与える範囲を明らかにする。この結果をふまえ、残響室法吸音率の補正手法を提案する。提案した補正手法について、数値シミュレーションを利用し、周波数、室容積、吸音率等の適用範囲についても検証を行う。

3. 研究の方法

残響室法吸音率の目標値、前述の乱入射する場合の吸音率(乱入射吸音率)は、斜め入射吸音率から計算で求める手法も提案されている。しかし、斜め入射吸音率を高精度で測定する手法は確立しておらず、残響室法吸音率測定方法に関する実験的研究では、明確な目標値がない、すなわち誤差を明確にできないため「補正」が困難、という問題点がある。これに対し、数値シミュレーションを用いた検討では、材をモデル化する際に使用する材料定数より乱入射吸音率が得られるため、誤差を明確にできる。さら

に、JIS 試験室に対し非正常波動音響シミュレーションを適用すれば、実際の測定音場で生じる誤差や、測定が実施された設定が明らかな場合既存の測定値に含まれる誤差の予測も可能である。ただし、材料定数の取得・設定方法に問題が残る。そこで、まず、残響室法吸音率に変動をおよぼす要因(変動要因)に対し、測定室内音場の拡散性と測定値の誤差の変化を明らかにする。

続いて、JIS A 1409 測定音場を評価する指標として、測定室壁面へ入射する音のエネルギーのバランスに着目した。測定原理では、全ての境界へ均一に音のエネルギーが入射する、すなわち測定試料とその他の壁面への音の入射エネルギーが等しいと仮定されているが、音場の拡散性が悪いとこの仮定は成立しない。そこで、室形状、周波数、測定試料の吸音率・面積の異なる72種の音場に対し、FEMによる非正常音場シミュレーションを実施し、上記エネルギーのバランスおよび減衰曲線を算出する。続いて、それぞれの音場の減衰曲線に上記エネルギーのバランスによる補正を施す。この際、試料以外の境界の吸音特性についても検討を行う。最後に、上記エネルギーのバランスにより補正された減衰曲線を用いた残響室法吸音率を算出し、補正しない残響室法吸音率と比較する。

4. 研究成果

4. 1. シミュレーションの対象

対象は、室形状、体積、表面積の異なる不整形7面体残響室(以下、OIR;体積168 m³、表面積180 m²)、矩形残響室(以下、TRR;体積220 m³、表面積227 m²)および、不整形6面体残響室(以下、KIR;体積187 m³、表面積204 m²)とする。それぞれの室の有限要素分割例および、音源設置位置をFig. 1に示す。室毎に垂直入射吸音率 $\alpha_n=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の試料を2.0 m²もしくは12.0 m²設置する。試料も含め、全ての境界条件には局所作用を仮定する。

シミュレーションの音源にはIIRフィルタ(バターワース型のバンドパスフィルタ)を施したインパルス(中心周波数 $f_m=125, 250, 500$ Hz)を用い、音源点を室隅に設置した。受音点はJIS A 1409に基づき、室の表面から1 mおよび音源から2 m以上離れた全FEM節点とした。500 Hzの上限周波数で、音波長 λ と最長節点間距離 d の比が4.8以上となるように設定した。

4. 2. 残響室法吸音率の測定値と誤差

上記対象とする音場毎にFEMによる非正常音場シミュレーションを実施し、残響室法吸音率を算出する。また、それぞれのシミュレーションで試料に与えたパラメータより統計入射吸音率を算出する。今回は試料に局所作用を仮定したため、統計入射吸音率を残響室法吸音率の理想値とし、両者の差($\Delta\alpha$)を誤差とした。

試料の面積 s 、吸音率 α_n 、周波数 f_m 毎の $\Delta\alpha$ を、室形状毎にFig. 2(a)~(c)にそれぞれ示す。OIRでは、試料面積、吸音率、周波数に関わらず $\Delta\alpha$ は0.2未満である。特に試料面積2.0 m²

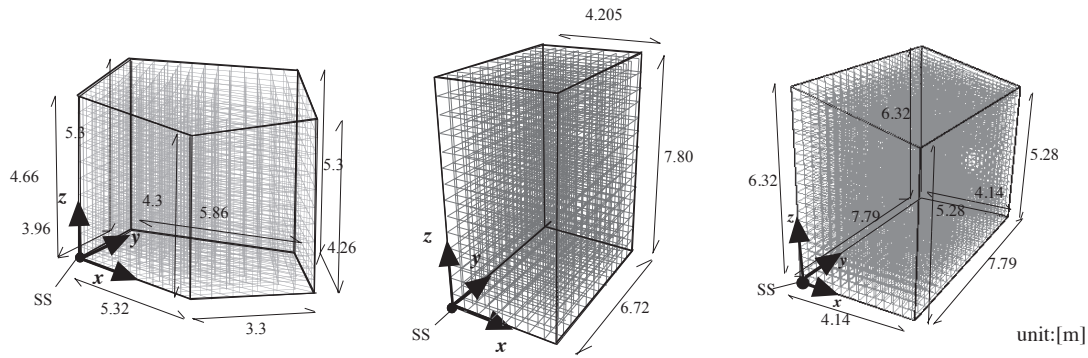


Fig. 1 シミュレーション対象の有限要素分割図 : (a) OIR, (b) TRR, (c) KIR

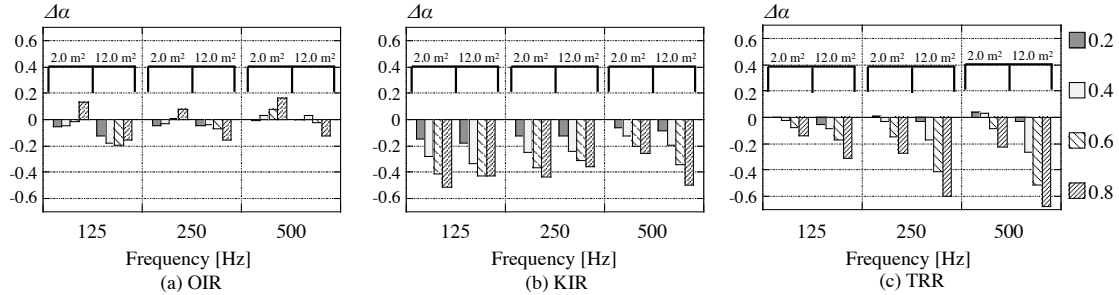


Fig. 2 試料の吸音率, 面積, 周波数毎の誤差 : (a) OIR, (b) KIR, (c) TRR

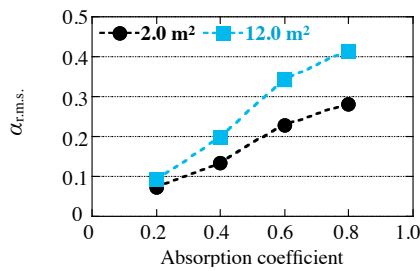


Fig. 3 $\Delta\alpha$ と試料の吸音率の関係

の吸音率 0.2、0.4、0.6 の場合、 $\Delta\alpha$ は 0.1 未満であり、拡散板を設置しない状態であっても良好な拡散性が確保されていると考える。KIR では誤差が大きく、 $\Delta\alpha$ が 0.2 未満の音場は 37.5% と少ない。TRR では、試料の吸音率による $\Delta\alpha$ の変化が大きく、 $\Delta\alpha$ が 0.2 未満の音場が 66.7% と多いものの、最大で 0.67 の誤差がある。また、KIR、TRR において、ほぼ全ての音場で $\Delta\alpha$ は負を示しており、この 2 室においては $\alpha_{r,FEM}$ が低く見積もられる傾向にある。

続いて、 $\Delta\alpha$ の二乗平均平方根 ($\alpha_{r,m.s.}$) を算出する。Fig. 3 に s および α_n が同じ音場の $\alpha_{r,m.s.}$ ($N = \text{室形状} \times \text{周波数} = 9$) を示す。吸音率が高くなるほど、また、 s が大きくなるほど $\alpha_{r,m.s.}$ は大きい。ただし、 $s = 2.0 \text{ m}^2$ の $\alpha_n = 0.4, 0.6, 0.8$ (吸音力: 0.8, 1.2, 1.6 m^2) に比べ $s = 12.0 \text{ m}^2$ の $\alpha_n = 0.2$ (吸音力: 2.4 m^2) における $\alpha_{r,m.s.}$ が大きい。つまり、 $\alpha_{r,m.s.}$ は吸音力に比べ吸音率の影響が大きいと考える。他方、室形状や周波数に関してはこのような様な傾向は見られなかった。

4. 3. 試料への音の入射エネルギーの割合の算出

境界の複素音圧反射率 R が既知で、平面波が拡散入射すると仮定した場合、入射音圧の振幅は壁面上の音圧から求められる。まず、FEM による非定常シミュレーション結果より得られた壁面上の音圧より、各時間ステップの壁面へ入射する音波の音圧の二乗を算出する。続いて、壁面へ入射する音波の音圧の二乗と入射エネルギーが比例すると仮定し、時刻 t に全壁面へ入射する音のエネルギーに対する試料へ入射する音のエネルギーの割合 $r(t)$ を、次式で算出する。

$$r(t) = \frac{\int_{\Gamma_{abs}} \int_0^{\infty} p_0^2(\tau) d\tau d\Gamma}{\int_{\Gamma_{all}} \int_0^{\infty} p_0^2(\tau) d\tau d\Gamma} \quad (1)$$

ただし、 $p(\tau)$ は時刻 τ における入射音圧の二乗振幅、 Γ_{all} は全壁面、 Γ_{abs} は試料を表す。音場が十分に拡散していると仮定した場合、 $r(t)$ は時刻によらず試料面積 s と全表面積 S の比 s/S となる。

一例として、Fig. 4(a)-(c) に、 $f_m = 500 \text{ Hz}$ 、 $\alpha_n = 0.2$ 、 $s = 12.0 \text{ m}^2$ の場合の $r(t)$ を室毎にそれぞれ示す。比較のため、それぞれの室の理想値 (s/S) で正規化して示している。試験室に関わらず、減衰の初期では試料への入射が多いが時間の経過につれて減少している。しかし、OIR では理想値からの乖離が $\pm 20\%$ 以内に収まるのに対し、KIR および TRR では -50% 以下になるなど、周波数および試料の吸音率・面積が同様であっても、室により $r(t)$ の時間特性が異なっている。

4. 4. 試料への音の入射エネルギーの割合に関する補正手法の検討

続いて、残響室法吸音率の測定手法に基づき、FEM による非定常シミュレーションから得られる減衰曲線に対する $r(t)$ の補正について検討

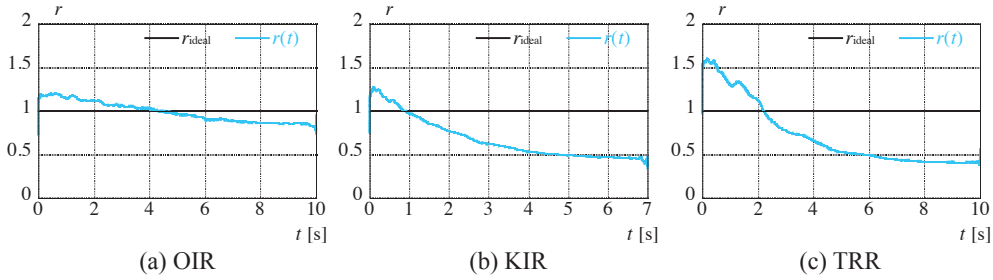


Fig. 4 $r(t)$ の算出例: $f_n = 500$ Hz, $\alpha_n = 0.2$, $s = 12.0$ m²

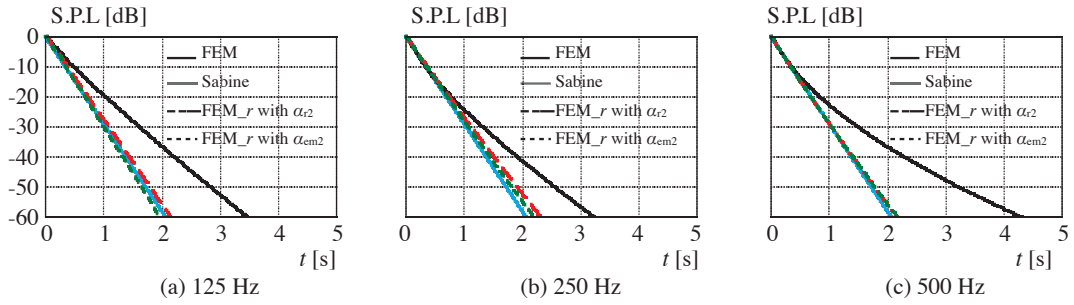


Fig. 5 補正された減衰曲線と拡散音場の減衰曲線の比較: KIR, $\alpha_n = 0.4$, $s = 2.0$ m²

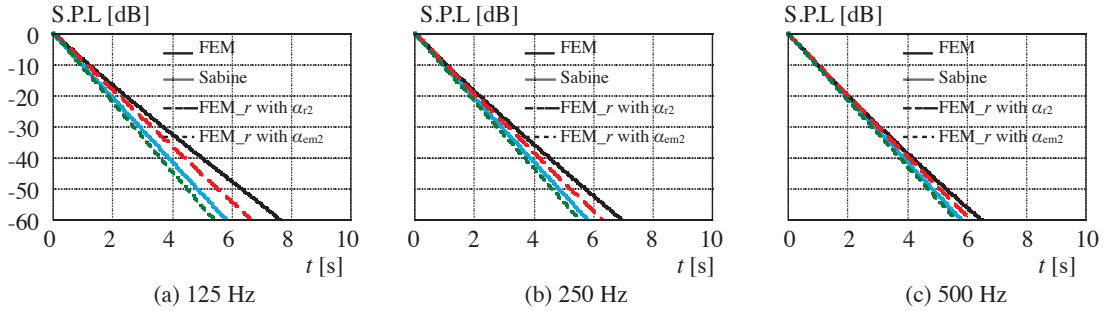


Fig. 6 補正された減衰曲線と拡散音場の減衰曲線の比較: OIR, $\alpha_n = 0.2$, $s = 2.0$ m²

する。音場が十分に拡散しておらず、各境界に面積に応じた割合でエネルギーが入射しない場合、即ち $r(t)$ が面積比 s/S とならない場合、境界 Γ_{abs} 、それ以外の境界へ入射するエネルギーがそれぞれ、 $cESr(t)/4$, $cES(1-r(t))/4$ で近似できると仮定する。この場合、実際のエネルギー減衰に対する拡散音場のエネルギー減衰の割合は、 $E_0 e^{-(cA/4)t} / E_0 e^{-(cA'(t)/4)t}$ となり、測定音場の減衰曲線 $L_{\text{FEM}}(t)$ は下式で補正される。

$$L_{\text{FEM}}(t) = 10 \log_{10} \left[e^{\frac{c}{4V}(A'(t)-A)t} \int_{\Omega} \int_t^{\infty} p_{\text{FEM}}^2(\tau) d\tau d\Omega \right] \quad (2)$$

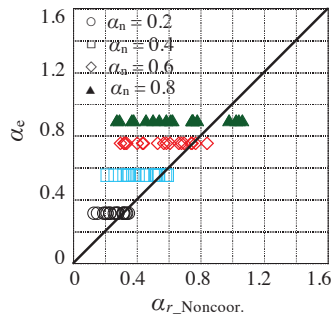
ただし、 $A'(t) = Sr(t)\alpha_{r1} + S(1-r(t))\alpha_{r2}$ 、試料の乱入射吸音率を α_{r1} 、試料以外の境界の乱入射吸音率を α_{r2} とする。

一般に、残響室法吸音率の測定では、試料以外の境界の吸音特性の推定に空室時の残響時間を利用する。そこで、試料設置時の減衰曲線の補正へ空室時の TDFE 解析で得られる減衰曲線から算出される吸音率 (以後、 α_{em2} とする) を用いる検討として、(2) 式の $A'(t)$ を計算する際、 α_{em2} を用いる場合と、 α_{r2} を用いた場合の減衰曲線を比較する。Fig. 5(a)-(c) に、 $\alpha_n = 0.4$, $s = 2.0$ m² の試料を設置した KIR において、非

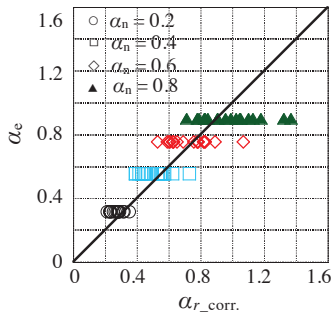
定常シミュレーションにより得られた $L_{\text{FEM}}(t)$ 、(2) 式の $A'(t) \rightarrow \alpha_{r2}$ を用いた $L_{\text{FEM}_r}(t)$ 、(2) 式の $A'(t) \rightarrow \alpha_{\text{em2}}$ を用いた $L_{\text{FEM}_f}(t)$ 、完全拡散音場の減衰曲線 $L_{\text{Sabine}}(t)$ を周波数毎に比較してそれぞれ示す。また、Fig. 6(a)-(c) に、 $\alpha_n = 0.2$, $s = 2.0$ m² の試料を設置した OIR における同様の比較をそれぞれ示す。試料の吸音力が小さな場合、周波数が低くなるほど α_{r2} を用いた $L_{\text{FEM}_r}(t)$ と α_{em2} を用いた $L_{\text{FEM}_f}(t)$ の間に差が生じており、 α_{em2} を用いた $L_{\text{FEM}_r}(t)$ が α_{r2} を用いた $L_{\text{FEM}_r}(t)$ に比べ $L_{\text{Sabine}}(t)$ を良く捉えている。よって、試料を設置した場合の試料以外の境界の吸音特性として、 α_{em2} を用いることとした。

最後に、残響室法吸音率の測定に対する $r(t)$ による補正の効果を検証する。それぞれの室、周波数で空室時の $L_{\text{FEM}}(t)$ から算出した残響時間と、試料設置時の α_{em2} を用いた $L_{\text{FEM}_f}(t)$ から算出した残響時間より残響室法吸音率を求め、 $r(t)$ による補正を施した $\alpha_{r,\text{corr}}$ とする。比較のため、空室時、試料設置時ともに $L_{\text{FEM}}(t)$ から算出した残響時間より求めた残響室法吸音率を $\alpha_{r,\text{Noncorr}}$ とする。なお、4. 2 節同様、試料に局所作用を仮定したため、統計入射吸音率を残響室法吸音率の理想値と仮定できる。

Fig. 7(a), (b) に、全音場における $\alpha_{r,\text{Noncorr}}$



(a) Noncorr.



(b) Corr.

Fig. 7 残響室法吸音率と統計入射吸音率の関係：(a)補正前，(b)補正後

と統計入射吸音率、 α_{r_corr} と統計入射吸音率との関係をそれぞれ示す。相関係数は、 $\alpha_{r_Noncorr}$ で 0.66 であったのに対し、 α_{r_corr} では、0.90 へ上昇し、 $r(t)$ による補正の効果が認められた。

続いて、4. 2 節の結果をふまえ、統計入射吸音率に対する $\alpha_{r_Noncorr}$ および α_{r_corr} の測定精度に着目する。統計入射吸音率が同一の音場における、統計入射吸音率と残響室法吸音率との差の二乗平均平方根 α_{rms} を算出する。Fig. 8 に、統計入射吸音率と α_{rms} との関係を示す。試料の統計入射吸音率が大きい程、 $\alpha_{r_Noncorr}$ 、 α_{r_corr} ともに α_{rms} は大きくなった。また、統計入射吸音率に関わらず、 $\alpha_{r_Noncorr}$ の α_{rms} に比べ α_{r_corr} の α_{rms} は小さく、補正の効果が確認された。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 7 件)

- ① 畔地良樹, 富来礼次, 大鶴徹, 岡本則子, 奥園健, 足立大輔, バイオ・アコースティクスを利用した木造建築物の長寿命化に関する基礎的研究, 日本建築学会九州支部研究発表会, 2014 年 3 月 2 日, 佐賀大学
- ② 足立大輔, 富来礼次, 大鶴徹, 岡本則子, 奥園健, 畔地良樹, 時間領域有限要素法により残響室法吸音率の測定精度改善に関する研究-試料への音の入射エネルギーの割合に関する検討と実測への適用-, 日本建築学会九州支部研究発表会, 2014 年 3 月 2 日, 佐賀大学
- ③ 富来礼次, 大鶴徹, 岡本則子, 奥園健, 足立大輔, 残響室法吸音率の測定に関する有限要素解析-減衰曲線に着目した検討-, 日本音響

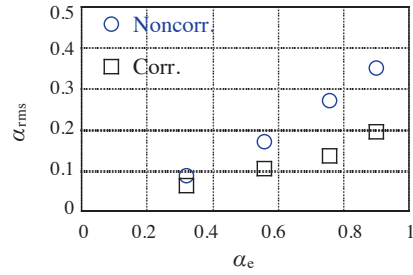


Fig. 8 統計入射吸音率毎と残響室法吸音率の平均値の関係

学会建築音響研究会, 2013 年 12 月 18 日, ホルトホール大分, 大分市

- ④ 畔地良樹, 富来礼次, 大鶴徹, 岡本則子, 奥園健, 足立大輔, 時間領域有限要素法による残響室法吸音率の測定に関する数値解析的研究-その 1 減衰曲線の補正に関する検討-, 日本建築学会大会学術講演会, 2013 年 8 月 30 日, 北海道大学
- ⑤ 足立大輔, 富来礼次, 大鶴徹, 岡本則子, 奥園健, 畔地良樹, 時間領域有限要素法による残響室法吸音率の測定に関する数値解析的研究-その 2 補正した減衰曲線による残響室法吸音率の算出-, 日本建築学会大会学術講演会, 2013 年 8 月 30 日, 北海道大学
- ⑥ 足立大輔, 富来礼次, 大鶴徹, 岡本則子, 奥園健, 有限要素解析による残響室法吸音率の測定に関する研究-減衰曲線の補正に関する検討-, 日本建築学会九州支部研究発表会, 2013 年 3 月 3 日, 大分大学
- ⑦ 足立大輔, 富来礼次, 大鶴徹, 岡本則子, 奥園健, 残響室法吸音率の測定精度改善に関する研究-音線法と時間領域有限要素法の結果との比較-, 日本建築学会大会学術講演会, 2012 年 9 月 12 日, 名古屋大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富来 礼次 (TOMIKU REIJI)

大分大学・工学部・准教授

研究者番号：20420648