

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：17501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820248

研究課題名(和文)音響設計における音場の非拡散性を考慮した実用的吸音特性設定手法の開発

研究課題名(英文)Development of practical absorption characteristics setting method for non-diffuse sound field in acoustic design of a 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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：建築室内の音響設計・予測には境界の吸音性状に関する情報が不可欠である。本研究では、この吸音性状として最も一般的に用いられる残響室法吸音率について、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、音場の非拡散性を評価する指標として境界への音の入射エネルギーの偏りに着目し、測定室や測定者による測定値のばらつきを抑える補正手法を提案するとともにその有効性を検証した。また、吸音材が偏在する一般の室について、上記シミュレーションにより、拡散音場を仮定して得られる残響時間と実際の室の残響時間との差異と相関の高い要因を明らかにし、実用的な吸音特性設定手法を開発できる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, sound fields for the measurement of sound absorption coefficient by reverberation room method 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.

Next, fifteen kinds of rooms with different absorption surface are also analyzed by the method, and the ratio mentioned above is calculated in these sound fields. The results show effectiveness of the analysis for investigation on measurement mechanism of the reverberation time of sound field in rooms where the assumption of diffuse sound field is not satisfied.

研究分野：建築音響

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 室内音響設計

1. 研究開始当初の背景

申請者は、音の波動性を考慮した有限要素法(FEM)による室内音場シミュレーションの精度および計算コストの削減に関する研究を行い、世界最大規模の非定常波動音響シミュレーションも実施している。しかし、実測値との比較の中で、シミュレーション精度に見合う室境界の吸音特性データの質・量両面の不足、を痛感した。

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。例えば、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。

ところで、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 試験室に対し非定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。

申請者は、JIS A 1409 測定音場を評価する指標として、まず、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、上記変動要因を変化させた音場で、FEM による非定常音場シミュレーションによる上記エネルギーのバランスおよび測定値の誤差算出とともに、補正を行ったところ、試料に与えた材料定数が

ら算出した乱入射吸音率との相関係数が補正前 0.6 以下であったのに対し、補正後は 0.9 以上に改善した。

2. 研究の目的

本研究では、申請者らが提案した JIS A 1409 の測定に対する補正手法の確立と適用範囲の検証、および、実際の音響設計における測定された吸音率測定値の利用手法開発、を目的とする。本報告書では、紙面の都合上、主として後者の成果を示す。

3. 研究の方法

JIS A 1409 の測定に対する補正手法の確立と適用範囲の検証：残響室法吸音率が変動する要因は、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・吸音率のみに着目し、残響室法吸音率の補正手法を提案した。具体的には、測定室全壁面へ入射する音のエネルギーに対する測定試料へ入射する音のエネルギーの割合について、1次元および3次元音場で時間領域有限要素法を用いた算出手法の妥当性を検証した後、室形状、周波数、測定試料の寸法および吸音率の異なる72の音場で算出を試みた。

実際の音響設計における測定された吸音率測定値の利用手法開発：一般の室として扉や窓までモデル化した約50立方メートルの矩形室を対象に、周波数、天井の吸音率の異なる45の音場で、時間領域有限要素法を用いた解析を実施し、拡散音場を仮定して予測される残響時間と解析により得られる残響時間の差を整理する。また、前述の音のエネルギーの割合について各音場で求め、この差との関係を検討する。

4. 研究成果

4.1 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。

$$r(t) = \frac{\int_{\Gamma_A} \int_t^{\infty} p_0^2(t) dt d\Gamma}{\int_{\Gamma_{ALL}} \int_t^{\infty} p_0^2(t) dt d\Gamma} \quad (1)$$

ただし、 $p(\)$ は時刻 t における入射音圧の二乗振幅、 Γ_{ALL} は全壁面、 Γ_A 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、

表1 境界の乱入射吸音率

Freq. [Hz]	Ceiling															Floor	Wall	Door	Glass
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15				
125	0.10	0.12	0.20	0.05	0.14	0.22	0.40	0.30	0.02	0.50	0.45	0.60	0.70	0.80	0.90	0.16	0.03	0.20	0.15
250	0.36	0.32	0.60	0.10	0.22	0.55	0.90	0.11	0.05	0.70	0.15	0.40	0.50	0.80	0.85	0.14	0.03	0.15	0.06
500	0.72	0.65	0.90	0.23	0.55	0.78	0.70	0.08	0.40	0.50	0.05	0.15	0.30	0.60	0.80	0.12	0.03	0.10	0.04

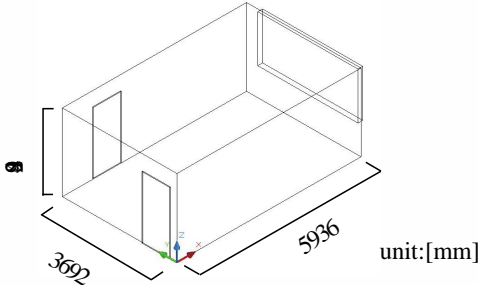


図1 対象室

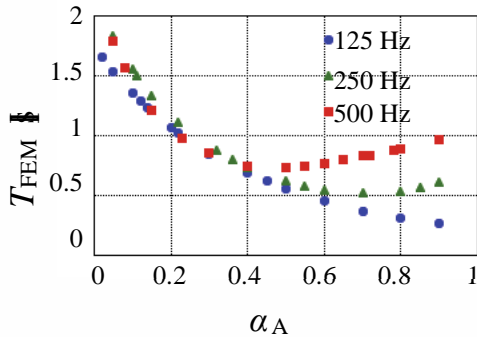


図2 天井の吸音率と残響時間の関係

$r(t)$ は時刻によらず A_A の面積と A_{ALL} の面積の比 r_{ideal} となる。ここで、 $r(t)$ および r_{ideal} を r_{ideal} で除した $r_n(t)$ および $r_{n,ideal}$ を以降の検討で用いる。

4.2 対象および設定

図1に示す天井、床、壁、扉、窓を とした室形状モデル (体積: 55.6 m^3 , 表面積: 93.7 m^2) を解析対象とする。表1に室形状モデルの に設定した乱入射吸音率を示す。また、 A_A を天井とし乱入射吸音率を15種変化させる。解析周波数は、中心周波数 $f_m = 125, 250, 500 \text{ Hz}$ のオクターブバンドとする。要素分割は、上限周波数の音波長 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。音源は $(x, y, z) = (1015, 620, 1500)$ の点に、受音点は高さ 1200 mm 、室の表面から 1000 mm および音源から 1500 mm 以上離れたFEM節点で周波数に応じて $59 \sim 663$ 点を仮定する。

4.3 残響時間と吸音面へ入射する音のエネルギーの割合の関係

まず、図2に A_A の吸音率 (以下、 A_A) と時間領域有限要素法による解析結果より各音場で算出した残響時間 (以下、 T_{FEM}) の関係を示す。 $f_m = 125 \text{ Hz}$ では A_A の増加に伴い、 T_{FEM} は短くなった。しかし、 $f_m = 250 \text{ Hz}$ の $A_A = 0.7$ 、 $f_m = 500 \text{ Hz}$ の $A_A = 0.5$ では A_A

の増加に伴い T_{FEM} が長くなった。すなわち、室の吸音力が増加したにもかかわらず、残響時間が長くなっている。

続いて、図3に、 $A_A = 0.2$ 、 $A_A = 0.80$ の場合の、全解析周波数の $r_n(t)$ と $r_{n,ideal}$ を A_A ごとにそれぞれ示す。なお、横軸は、時刻 t を T_{FEM} で除した t/T_{FEM} で表している。図2で周波数ごとの残響時間の差異が小さい $A_A = 0.2$ の場合、 $r_n(t)$ の平均値は、周波数に関わらず $0.9 \sim 1.1$ の範囲 ($r_{n,ideal}$ との差の絶対値が 0.1 以下) に収まる。一方、図2で周波数ごとの残響時間の差異が大きい $A_A = 0.8$ の場合、 $f_m = 125 \text{ Hz}$ では常に $r_n(t) > r_{n,ideal}$ で、平均値は 1.31 、 $f_m = 250, 500 \text{ Hz}$ では、 $t/T_{FEM} = 0.1$ において $r_n(t) < r_{n,ideal}$ で、平均値は $f_m = 250 \text{ Hz}$ で 0.75 、 $f_m = 500 \text{ Hz}$ で 0.31 と、 $r_{n,ideal}$ との差異、周波数による差異ともに $A_A = 0.2$ の場合に比べ大きくなった。

4.4 室内音場と拡散音場の差異の定量化
 拡散音場の残響時間の算出には、Sabineの残響式を用いる。室の境界 への拡散入射を仮定し、Table 1に示す乱入射吸音率を用い、平均吸音率を求め、Sabineの残響式により残響時間 (以下、 $T_{saibine}$) を算出する。続いて、 $T_{saibine}$ と TDFEM で解析したそれぞれの音場の残響時間 T_{FEM} との差の割合 (以下、 $dT_{dif.}$) を算出し、以降の検討で用いる。

図4に A_A と $dT_{dif.}$ の関係を示す。 $A_A < 0.4$ では $f_m = 125, 250 \text{ Hz}$ に比べ $f_m = 500 \text{ Hz}$ の $dT_{dif.}$ が小さい。一方、 $A_A > 0.5$ では、 $f_m = 500 \text{ Hz}$ の $dT_{dif.}$ が3周波数で最も大きくなる。また、 $f_m = 125 \text{ Hz}$ では、 $A_A = 0.6$ で $dT_{dif.}$ が負となった。

ここで、音の指向性に着目し、全ての境界へ拡散入射していると仮定した場合の室内音場の $r(t)$ を $r_{n,dif.}(t)$ と表す。 $r_{n,dif.}(t)$ と拡散音場の $r_{n,ideal}$ との差を T_{FEM} の範囲で時間平均した $dr_{dif.}$ を算出する。 $dr_{dif.} = 0$ の音場では、音源から音が発生してから T_{FEM} までの間に、全壁面へ入射するエネルギーに対する吸音面へ入射するエネルギーの割合がその面積比に等しい。

図5に $dr_{dif.}$ と $dT_{dif.}$ の関係を示す。周波数に関わらず $dr_{dif.}$ と $dT_{dif.}$ の間には相関が認められ、全音場の相関係数は -0.94 であった。ここで、 $dr_{dif.} = 0$ の音場は、図2より比較的 A_A が低い音場であり、 $f_m = 500 \text{ Hz}$ では $dT_{dif.}$ が低い音場である。しかし、 $f_m = 125, 250 \text{ Hz}$ では、 $dr_{dif.} = 0$ の音場にも関わらず、 $dT_{dif.} = 30\%$ となる。これは境界 へ音が拡散入射がしていないためと推測し次節では境界への音の入射角度を検討する。

図5に $dr_{dif.}$ と $dT_{dif.}$ の関係を示す。周波数に関わらず $dr_{dif.}$ と $dT_{dif.}$ の間には相関が認められ、全音場の相関係数は -0.94 であった。ここで、 $dr_{dif.} = 0$ の音場は、図2より比較的 A_A が低い音場であり、 $f_m = 500 \text{ Hz}$ では $dT_{dif.}$ が低い音場である。しかし、 $f_m = 125, 250 \text{ Hz}$ では、 $dr_{dif.} = 0$ の音場にも関わらず、 $dT_{dif.} = 30\%$ となる。これは境界 へ音が拡散入射がしていないためと推測し次節では境界への音の入射角度を検討する。

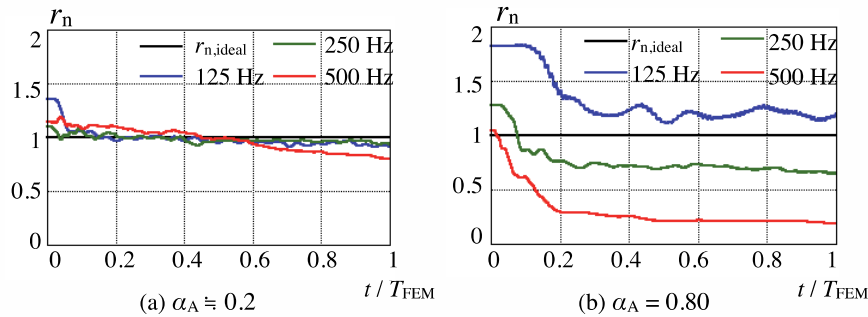


図3 $r_n(t)$ および $r_{n,ideal}$ の時間変動

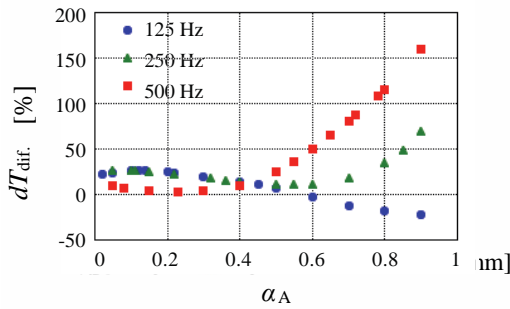


図4 α_A と dT_{dif} の関係

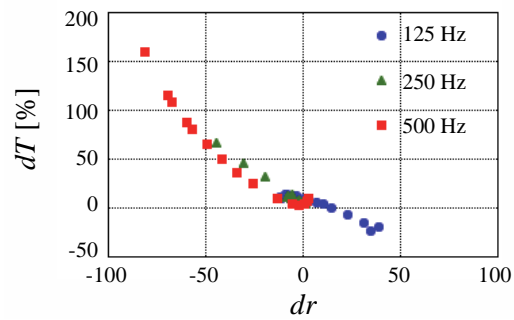


図6 dr と dT の関係

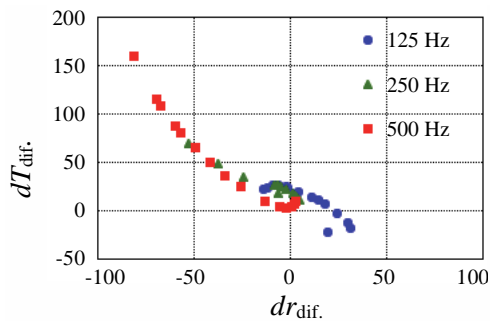


図5 dr_{dif} と dT_{dif} の関係

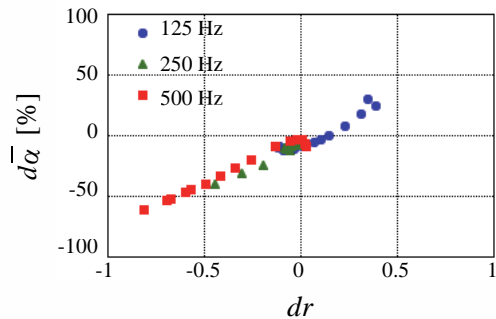


図7 dr と d の関係

(125, 250 Hz : dr_{field} , 500 Hz : dr_{dif})

4.5 壁面への音の入射角度に関する検討

125, 250 Hz の音場の dT_{dif} および dr_{dif} に対し、 $0^\circ \sim 78^\circ$ の音場入射の適用を試みる(以下、それぞれ dT_{field} および dr_{field})。まず、TDFEM 解析で z_n に対し、Paris の式における積分範囲を $0 \sim 78^\circ$ として音場入射吸音率(以下、 α_{field})を算出する。 α_{field} を用い、Sabine の残響式により残響時間(以下、 T_{saibin_field})を算出し、残響時間 T_{FEM} との差の割合 dT_{field} を求める。

続いて、入射音圧の二乗振幅を求める際に、音の入射範囲を $0 \sim 78^\circ$ と仮定し、 $r_{n_field}(t)$ を求め、 $r_{n_dif}(t)$ の場合と同じく、 r_{n_ideal} との差を T_{FEM} の範囲で時間平均した dr_{field} を算出する。また、室の平均吸音率を $f_m = 125, 250$ Hz では α_{field} 、 $f_m = 500$ Hz では乱入射吸音率から算出し、 T_{FEM} から Sabine の残響式を用いて算出した平均吸音率と差の割合を d とする。

図6に $f_m = 125, 250$ Hz における dr_{field} と dT_{field} の関係、および $f_m = 500$ Hz における

dr_{dif} と dT_{dif} の関係を合わせて示す。全音場の相関係数は -0.95 であり、周波数に関わらず $dr = 0$ の音場では $0 < dT_{dif} < 15\%$ 、 $0 < dT_{field} < 15\%$ となった。

図7に $f_m = 125, 250$ Hz における dr_{field} と d および $f_m = 500$ Hz における dr_{dif} と d の関係を示す。周波数に関わらず、両者の間には強い相関が認められ、全音場の相関係数は 0.98 であった。

以上、吸音材が偏在する一般の室において、吸音材へ入射するエネルギーの拡散音場からの偏りと、その室の残響時間と拡散音場の残響時間の差異、との間に非常に強い相関があることを示した。図5~7の結果より、室の残響時間を予測する際には、高周波数域では吸音材へ入射する音のエネルギーの偏りを考慮して室の平均吸音率を算出、低周波数域では上記入射エネルギーの偏りと境界への音の入射角度を考慮した平均吸音率を算出することで、拡散音場を仮定した残響式か

ら得られる残響時間を補正できる可能性がある。今後は、上記入射エネルギーの簡易予測手法の開発、高周波数と低周波数の境界と室寸法の関係、境界への音の入射角度の予測について研究を実施する予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

Reiji TOMIKU, Toru OTSURU, Noriko OKAMOTO, Takeshi OKUZONO, Yoshiki AZECHI, Tsuyoshi YOSHIDA, Finite element sound field analysis for correction of absorption coefficient in reverberation room, Proc. of Internoise 2014, 査読有, 6 pages, 2014

[学会発表](計7件)

吉田剛, 大鶴徹, 富来礼次, 上本舜, 時間領域有限要素法を用いた残響時間予測精度改善に関する研究-吸音面が偏在する矩形室における音の入射エネルギーの偏りの予測, 日本建築学会九州支部研究発表会, 2016年3月6日, 琉球大学(沖縄県中部西原町)

Reiji TOMIKU, Toru OTSURU, Noriko OKAMOTO, Tsuyoshi YOSHIDA, Numerical study on measurement mechanism of reverberation time by finite element sound field analysis in rooms, WESPAC 2015, 2015年12月7日, Grand Copthorne Waterfront Hotel (Singapore)

吉田剛, 大鶴徹, 富来礼次, 時間領域有限要素法による残響時間の測定メカニズムの解明-吸音面が偏在する矩形室を対象とした基礎的検討-, 日本音響学会秋季研究発表会, 2015年9月18日, 会津大学(福島県会津若松市)

上本舜, 大鶴徹, 富来礼次, 吉田剛, 時間領域有限要素法による残響時間の測定メカニズムに関する数値解析的研究-その1 吸音面へ入射する音の割合の算出と減衰曲線との比較, 日本建築学会大会学術講演会, 2015年9月5日, 東海大学(神奈川県平塚市)

吉田剛, 大鶴徹, 富来礼次, 上本舜, 時間領域有限要素法による残響時間の測定メカニズムに関する数値解析的研究-その2 吸音面へ入射する音の割合の定量化と残響時間の比較, 日本建築学会大会学術講演会, 2015年9月5日, 東海大学(神奈川県平塚市)

畔地良樹, 大鶴徹, 富来礼次, 奥園健, 吉田剛, 残響室法吸音率の測定に関する数値解析的研究-残響時間のばらつきに関する検討-, 日本建築学会九州支部研究発表会, 2015年3月1日, 熊本県立大学(熊本県熊本市)

吉田剛, 大鶴徹, 富来礼次, 奥園健, 畔地良樹, 室内音響指標予測精度改善に関する数値解析的研究, 日本建築学会九州支部

研究発表会, 2015年3月1日, 熊本県立大学(熊本県熊本市)

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