

令和元年6月19日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06613

研究課題名(和文)音場の非拡散性を考慮した実用的音響設計手法の開発

研究課題名(英文)Development of practical acoustic design method for non-diffuse sound field

研究代表者

富来 礼次(Tomiku, Reiji)

大分大学・理工学部・准教授

研究者番号：20420648

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、吸音材が偏在し非拡散音場となる室の残響時間について、室境界面へ入射する音のエネルギーのバランスに着目した。比較的小規模な室を対象に、FEMによる数値シミュレーションを実施し、室の全境界面へ入射する音のエネルギーに対する吸音材へ入射する音のエネルギーの割合 $r(t)$ を算出した。加えて、それぞれの音場のシミュレーション結果から、残響時間を算出し、拡散音場を仮定した残響時間予測値を含めた3者の関係を明らかにした。その結果、一般的な残響式により500Hz程度の周波数域で誤差が生じるメカニズムは明確となった。さらに、偏在する吸音材の吸音率と室寸法による $r(t)$ の予測や、模型実験による検証も実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、学校の教室や企業の会議室、一般家庭のリビング等、コンサートホールや講演会会場といったこれまで建築音響設計の対象としてきた空間に比べ、比較的小規模な室に対しても、児童への学習効果向上やプライバシー、生活の質(QOL)改善を目的に音環境の設計が実施されることが増えてきている。しかし、これらの空間では、本格的なシミュレーションの実施はコスト的に困難であるのが実状である。本研究では、このような室内音環境の設計において、一般的な残響式を用いて算出された残響時間が、実際の室の残響時間と乖離する現象について、数値シミュレーションを用いて明らかにし、補正手法についても検討した。

研究成果の概要(英文)：In this study, to evaluate a sound field in a room for the measurement, the ratio of incident sound energy to a part of boundary in those to all boundary of a sound field in a room is calculated from results of the time domain finite element analysis. At first, the calculation method of the ratio is described. Next, the ratios are calculated in sound fields and are compared with ideal values of diffuse sound field in each room. In addition, the reverberation times are calculated from the results of TDFE analysis and from Sabine's formula and differences between both the reverberation times are calculated in the rooms. It is shown that the larger the difference of reverberation time, the larger the difference between the ratio and the ideal value regardless of room size, absorption coefficient of absorbing surface. Finally, it is tried to predict the ratio from room size and absorption coefficient of absorbing surface without the results of TDFE analysis.

研究分野：建築/環境音響学

キーワード：室内音響設計 残響時間 非定常波動音響シミュレーション 拡散音場 有限要素法 吸音率 解析精度 模型実験

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、学校の教室や企業の会議室、一般家庭のリビング等、コンサートホールや講演会会場といったこれまで建築音響設計の対象としてきた空間に比べ、比較的小規模な室に対しても、児童への学習効果向上やプライバシー、生活の質（QOL）改善を目的に音環境の設計が実施されることが増えてきている。このような室内音環境の設計において、室内外の遮音性能とともに最も基本的な性能として室の残響時間が対象とされるが、天井、床、壁の吸音率から求めた平均吸音率より一般的な残響式を用いて算出された残響時間は、しばしば実際の室の残響時間と乖離する。この大きな要因の一つは、前述の残響式では室内が拡散音場であることを仮定しているが、音の波長に対し部屋の寸法が小さい場合や天井や床、壁の吸音に偏りがある場合、この仮定が満たされないためである。しかし、これらの空間では、コンサートホール等の音環境の計画・設計段階で頻繁に実施される模型実験（物理シミュレーション）や数値シミュレーションが実施されることはほとんどなく、音響設計者や現場施工者の「経験と勘」に依存しているのが実状である。これは、建築・音響設計の非効率を招くのみならず、不快な室や空間の増大へもつながる。

一方、申請者は、これまで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ってきた。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。前述の残響時間を含め建築音響に関する測定手法は、室内の音エネルギーの「分布が均一」で「方向特性がランダム」な音場での測定を前提としており、理想状態(完全拡散音場)からの差異の程度(音場の拡散性)が、測定結果に大きく影響をおよぼす。これに対し、申請者らは、室内数万点の複素音圧が得られる上記シミュレーションを利用し、実験的検討では難しい詳細な室内音場の評価を行う研究を実施している。これらの中で、申請者らが開発した室内音場シミュレーションによる予測結果が実際の室内音場と良く一致すること、すなわち、数値シミュレーションが実際の音場の模擬として十分な役割を果たすことを確認し、残響室法吸音率の測定（JIS A 1409）に使用する試験室内音場の拡散性の評価へ利用できることも示した。

数値シミュレーションでは、物理シミュレーションに比べ境界の吸音特性が明確であり、これを利用すれば、境界へ入射する音のエネルギーも算出可能で、さらに、その時間変化も把握できる。天井、床、壁へ入射する音のエネルギーがわかれば、そこで消費される音のエネルギーも把握され、境界の吸音特性と室内音場の減衰特性、すなわち室の残響時間との関係がこれまで無比飛躍的に明確になる。

2. 研究の目的

本研究では、前述の残響式による予測値と実際の室の残響時間が異なる要員として、室境界面へ入射する音のエネルギーのバランスに着目する。前述の拡散音場の仮定では、全ての境界へ均一に音のエネルギーが入射する、すなわち吸音境界とその他の境界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バランスが偏る。一般的な室内音場での音の減衰は、境界へ入射した音のエネルギーが、境界で吸音されて生じるとされている。すなわち、上記バランスが崩れる割合が、残響時間の予測値と実際の室の値の差異に対応すると考えた。

そこで、本研究では前述の比較的小規模な室を対象に、FEMによる数値シミュレーションを実施し、室の全境界へ入射する音のエネルギーに対する吸音材へ入射する音のエネルギーの割合を算出する。加えて、それぞれの室のシミュレーション結果から、残響時間を算出（これを実際の室の残響時間とする）し、拡散音場を仮定した残響時間予測値を含めた3者の関係を明らかにする。さらに、このエネルギーの割合を考慮した残響時間予測手法の開発を試みる。

3. 研究の方法

まず、一般的な室形状を持つ、周波数・吸音材の寸法・吸音力・設置位置の異なる30種以上の音場に対し、非定常波動音響シミュレーションを実施する。この際、世界最大規模の非定常波動音響シミュレーションが可能なオリジナルコードを使用する。このため、幾何音響シミュレーションでは考慮されない干渉・回折等の波動現象を考慮し、実験的検討では困難な測定の変動要因と誤差の関係が明確な検討を、実際の測定音場を対象に行える。

続いて、それぞれの音場で拡散音場を仮定してえられる残響時間とシミュレーション結果から算出される残響時間との差を整理する。さらに、同じくシミュレーション結果を利用して、全壁面へ入射する音のエネルギーに対する吸音材へ入射する音のエネルギーの割合を算出し、前述の差との対応を明らかにする。これらの結果をもとに、音場の非拡散性を考慮した残響時間予測手法を開発し、模型および実在の建築室内で実施する実験でその効果を検証する。

4. 研究成果

(1) 全壁面へ入射する音のエネルギーに対する吸音材へ入射する音のエネルギーの算出複素音圧反射係数 R の境界へ入射角 θ で平面波が入射する場合、下式で表される。

$$R = \frac{z_n \cos \theta - 1}{z_n \cos \theta + 1}$$

ここで z_n は境界の音響インピーダンス比である。この際、点 (x,y) の音圧振幅 $|p(x,y)|$ は入射音と反射音の和として下式となる。

$$|p(x,y)| = \hat{p}_0 [1 + |R| + 2|R|\cos(2kx\cos\theta + \chi)]^{\frac{1}{2}} \exp(-iky\sin\theta)$$

ここで \hat{p}_0 は平面波の入射音の振幅、 k と χ はそれぞれ波数と R の位相である。これより、境界上 $(x,y) = (0,0)$ の点の音圧振幅の二乗は下式で表される。

$$|p(0,0)|^2 = \hat{p}_0^2 (1 + |R|^2 + 2|R|\cos\chi)$$

拡散音場が仮定される場合、複素音圧振幅 R である境界 $(x,y) = (0,0)$ への入射音圧振幅の二乗は下式で与えられる。

$$\hat{p}_0^2 = \frac{|p(0,0)|^2}{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\frac{\pi}{2}} |1 + |R|^2 + 2|R|\cos\chi| \sin\theta d\theta}$$

それぞれの音場で時間領域 FEM(TDFEM)により得られた時間ステップ毎の結果と上式により境界上の入射音圧振幅を算出する。

境界への入射エネルギーと入射音圧振幅の二乗が比例すると仮定すると、それぞれの音場の全壁面へ入射する音のエネルギーに対する吸音材へ入射する音のエネルギーの割合は、次式で計算される。

$$r(t) = \frac{\int_{\Gamma_{abs}} \int_t^{\infty} \hat{p}_0^2(\tau) d\tau d\Gamma}{\int_{\Gamma_{all}} \int_t^{\infty} \hat{p}_0^2(\tau) d\tau d\Gamma}$$

ここでは時間 τ の平面波入射音圧振幅、 Γ_{abs} は吸音材、 Γ_{all} は全境界面をそれぞれ表す。対象とする音場が十分に拡散している場合、 $r(t)$ は全境界の表面積 S に対する吸音材の面積 s の割合 (s/S) となる。

(2) 拡散音場と実際の室の差の定量化手法

ここでは紙面の都合上、数値シミュレーションの結果のみを示す。図1にシミュレーションモデルの例を示す。本研究では、天井のみに吸音材が偏在している音場を対象とし、4種の残響室法吸音率 ($\alpha_{ceiling} = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$) を用いた。天井以外の境界は全て残響室法吸音率 0.2 以下とし、用いた値を表1に示す。音源はそれぞれの音場で高さ 1.5 m の1点に設置し、中心周波数 $f_m = 125, 250, 500$ Hz の3帯域をそれぞれ出力した。受音点は高さ 1.2 m 平面上の壁面から 1.0 m 以上、音源から 1.5 m 以上離れた点に設置した。

各音場の残響時間は JIS A 1409 を参考に、数値シミュレーションよりえられた結果から減衰曲線を算出し、残響時間を計算した。各音場で、一般的な残響式を用いて算出された残響時間 (T_{Sabine}) と数値シミュレーションによりえられた残響時間 ($T_{30, FEM}$) の相対差を下式で計算する。

$$dT_{30} = \frac{T_{30, FEM} - T_{Sabine}}{T_{Sabine}} \times 100 [\%]$$

一方、同じく数値シミュレーションからえられる音場の全壁面へ入射する音のエネルギーに対する吸音材へ入射する音のエネルギーの割合 $r(t)$ と理想値 ($r_{ideal} = s/S$) との相対差を $T_{30, FEM}$ で正規化し、それぞれの音場の評価に用いる。

$$dr_{FEM} = \frac{1}{T_{30, FEM}} \int_0^{T_{30, FEM}} \frac{r(t) - r_{ideal}}{r_{ideal}} dt$$

(3) 結果

図2(a), (b), (c)に $\alpha_{ceiling}$ と dT_{30} の関係を周波数毎にそれぞれ示す。両者の関係は周波数により大きく異なっており、125 Hz では $\alpha_{ceiling}$ が高くなるにつれて dT_{30} は小さくなっている一方、500 Hz では $\alpha_{ceiling}$ が高くなるにつれて dT_{30} は大きくなっている。特に、500 Hz では $\alpha_{ceiling}$ が 0.6 以上の場合、 T_{Sabine} に比べ実際の室の値 $T_{30, FEM}$ が 30% 以上長くなっている。

続いて、図3(a), (b), (c)に $\alpha_{ceiling}$ と dr_{FEM} の関係を周波数毎にそれぞれ示す。125 Hz では $\alpha_{ceiling}$ が同じであっても、 dr_{FEM} は室寸法により異なっている。一方、500 Hz では $\alpha_{ceiling}$ が高くなるにつれて dr_{FEM} は小さくなっている。すなわち、500 Hz では吸音材の吸音率が高くなるにつれて、吸音材への音の入射が少なくなっていることが確認された。

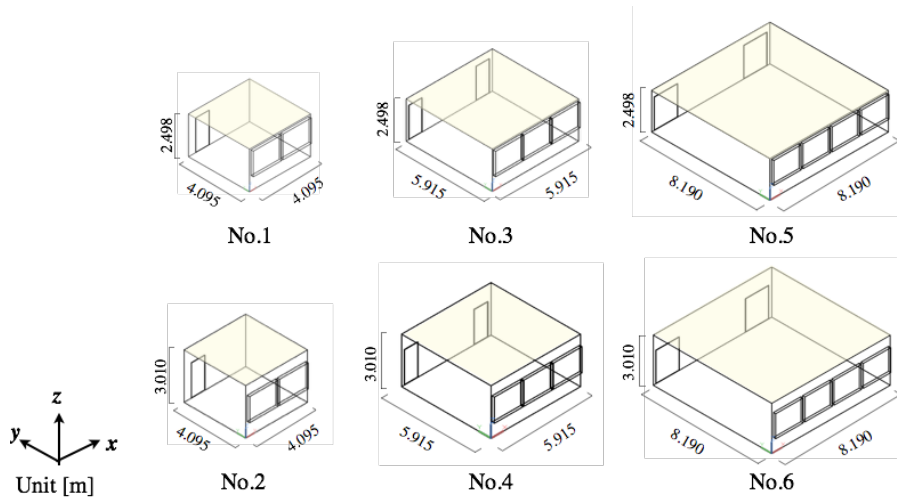


図 1 TDFEM により解析された室形状の例

表 1 シミュレーションに用いた床、壁、戸、窓の残響室法吸音率

Frequency [Hz]	Floor	Wall	Door	Glass
125	0.16	0.03	0.20	0.15
250	0.14	0.03	0.15	0.06
500	0.12	0.03	0.10	0.04

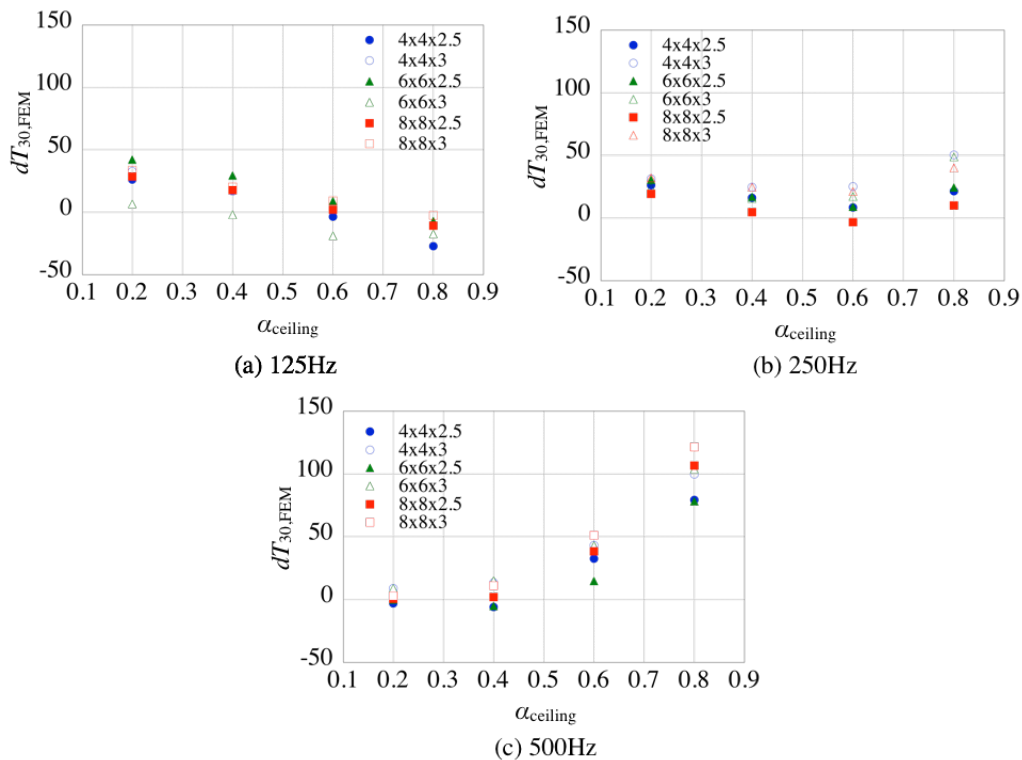


図 2 α_{ceiling} と dT_{30} の関係; (a) $f_m = 125$ Hz, (b) $f_m = 250$ Hz, (c) $f_m = 500$ Hz.

図 4 に今回対象とした、室形状、天井の吸音率、周波数の異なる 72 音場における dT_{30} と $d r_{\text{FEM}}$ の関係を、周波数毎の回帰直線と合わせて示す。周波数に関わらず、両者は負の相関があり、相関係数は全体で-0.83、125 Hz のみで-0.52、250 Hz のみで-0.66、500 Hz のみでは-0.98 となった。

そこで、 $r(t)$ による T_{Sabine} の補正を試みた。前述のように拡散音場を仮定すると、吸音材の面積に応じて音が入射し、吸音される。そこで、 $r(t)$ に応じて吸音を補正 ($\alpha_{\text{corr., ceiling}}$) すれば、実

際の室の減衰に近づくと考えた。図 5 に、 $f_m = 500$ Hz の場合の、数値シミュレーションでえられた実際の室の残響時間 $T_{30, FEM}$ と一般的な残響式を用いて算出された残響時間 T_{Sabine} との相対差、および $T_{30, FEM}$ と $\alpha_{corr_ceiling}$ で補正された T_{Sabine} との相対差を示す。 $\alpha_{corr_ceiling}$ による補正で明らかに $T_{30, FEM}$ との差が小さくなっており、一般的な残響式によりこの周波数域で誤差が生じるメカニズムは明確となった。

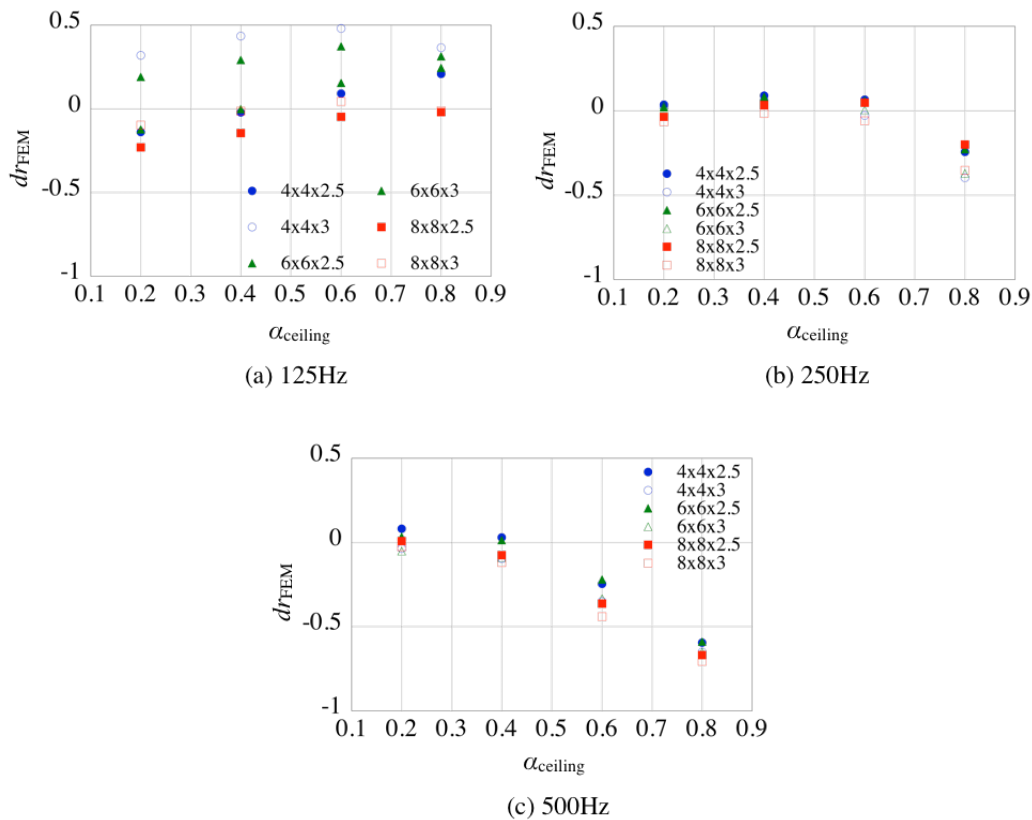


図 3 $\alpha_{ceiling}$ と dr_{FEM} の関係; (a) $f_m = 125$ Hz, (b) $f_m = 250$ Hz, (c) $f_m = 500$ Hz.

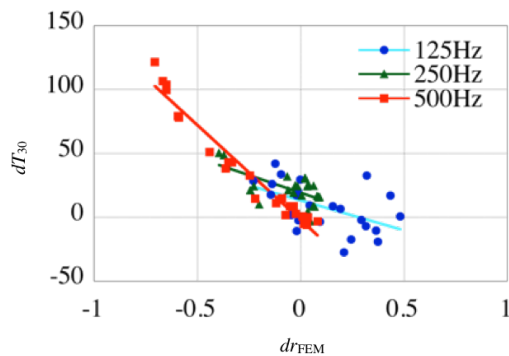


図 4 dT_{30} と dr_{FEM} の関係

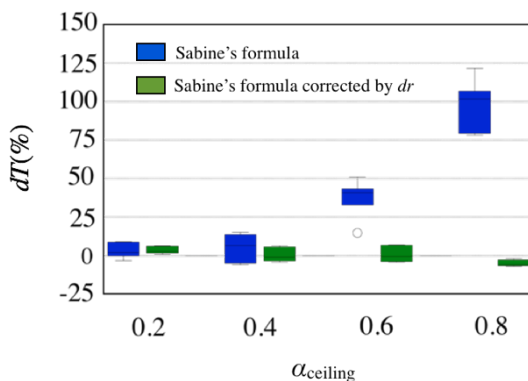


図 5 $T_{30, FEM}$ と T_{Sabine} の相対差および $T_{30, FEM}$ と $\alpha_{corr_ceiling}$ で補正された T_{Sabine} の相対差 ($f_m = 500$ Hz)

ただし、残響時間の予測を考えた場合、今回用いた数値シミュレーションは計算コストが高すぎる。そこで、偏在する吸音材の吸音率と室寸法により dr_{FEM} を予測する試行的研究を行い、後述の発表論文(1)で発表した。また、模型実験による検証結果を発表論文(2)および(3)で発表した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

(1) Reiji TOMIKU, Toru OTSURU, Noriko OKAMOTO, Takuya TAHARA, Prediction of sound energy incident on boundaries in no-diffuse sound field with unevenly-distributed sound absorbing surfaces by finite element method, Proc. of WESPAC 2018, 査読有, 6 pages, 2018

(2) 竹永尚輝, 大鶴徹, 富来礼次, 田原卓弥, 吸音面が偏在する矩形模型室内音場の残響時間に関する数値解析的検討-その1 実測値と有限要素解析値の比較-, 日本建築学会 2018 年度大会(東北) 学術講演梗概集, 査読無, 387-388, 2018

(3) 田原卓弥, 大鶴徹, 富来礼次, 吸音面が偏在する矩形模型室内音場の残響時間に関する数値解析的検討-その1 境界への音の入射エネルギーの偏りによる補正の効果-, 日本建築学会 2018 年度大会(東北) 学術講演梗概集, 査読無, 389-390, 2018

(4) Reiji TOMIKU, Toru OTSURU, Noriko OKAMOTO, Ryo ICHIKAWA, Computational investigation on measurement of reverberation time for the sound absorption coefficient in a reverberation room, Proc. of 25th International Congress on Sound and Vibration 2018, 査読有, 6 pages, 2018

(5) Reiji TOMIKU, Toru OTSURU, Noriko OKAMOTO, Yotaro KIMURA, Finite element sound field analysis for reverberation time in non-diffuse sound field with unevenly-distributed sound absorbing surfaces, INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 査読有, 7 pages, 2017

[学会発表] (計 1 1 件)

(1) 木村鷹太郎, 大鶴徹, 富来礼次, 吸音面が偏在する矩形室における境界面への音の入射エネルギーの偏りの予測に関する研究-模型実験と有限要素解析の比較-, 日本建築学会九州支部研究発表会, 2018 年 3 月

(2) 木村鷹太郎, 大鶴徹, 富来礼次, 吸音面が偏在する矩形室における境界面への音の入射エネルギーの偏りの予測に関する研究-時間領域有限要素法による室内音場解析を用いた検討-, 日本音響学会秋季研究発表会, 2017 年 9 月

(3) Reiji Tomiku, Toru Otsuru, Noriko Okamoto, Takeshi Okuzono, Youtarou Kimura, Finite element sound field analysis for investigation on measurement mechanism of reverberation time in non-diffuse sound field, 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, 2016 年 12 月

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：大鶴 徹

ローマ字氏名：OTSURU, Toru

所属研究機関名：大分大学

部局名：理工学部

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：3 0 1 5 2 1 9 3

研究分担者氏名：岡本 則子

ローマ字氏名：OKAMOTO, Noriko

所属研究機関名：北九州市立大学

部局名：国際環境学部

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：0 0 4 5 2 9 1 2