

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月31日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360275

研究課題名（和文）拡散性制御に基づく先進的空間音響設計スキームの構築

研究課題名（英文）Development of an advanced room acoustics design scheme based on diffuseness control

研究代表者

佐久間 哲哉（SAKUMA TETSUYA）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：80282995

研究成果の概要（和文）：室内音響設計の方法論として、残響時間や室形に関する全体レベルの設計指針は確立しているものの、壁面形状や内装材配置といった部位レベルの詳細設計に関しては曖昧な経験判断に依るところが大きく、効果的な設計が行われているとは言い難かった。本研究では、壁面の部位音響性能として音響反射の拡散性指標となる乱反射率を導入し、2種類の測定法を構築するとともに、各種壁面構造の乱反射率データベースを整備した。さらに、壁面の拡散性を考慮した矩形室の新たな残響理論を考案し、理論解析・数値解析・模型実験を通して非拡散音場の残響過程を解明するとともに、可聴化システムを用いて聴感印象への影響を検証した。

研究成果の概要（英文）：In room acoustics design, a general methodology regarding reverberation time and room shape has been established, however, details of wall surface and interior finish have been empirically designed. In this research, an index of diffusivity of wall surface, “scattering coefficient” was introduced, developing two measurement methods, and providing a database for a variety of wall structures. Furthermore, a new reverberation theory for rectangular rooms was developed incorporating surface diffusivity, and energy decay in non-diffuse sound field was clarified by the theory, numerical simulation and scale model experiment. Additionally, auditory effect of installing diffuse surface was examined by using an auralization system.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2009年度 | 7,600,000 | 2,280,000 | 9,880,000 |
| 2010年度 | 4,700,000 | 1,410,000 | 6,110,000 |
| 2011年度 | 2,200,000 | 660,000 | 2,860,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 14,500,000 | 4,350,000 | 18,850,000 |

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：建築音響、室内音場、残響、吸音、音響拡散

1. 研究開始当初の背景

(1) 室内音響学の今日的課題

室内音響学の歴史は 19 世紀末に W. C. Sabine が見出した残響理論に始まり、その後学術と実務の大いなる展開を経て、特にホール音響設計に関しては多岐にわたる知識の総体を「コンサートホール音響学」と称するまでに至っている。その中で、室内音響に関する多面的な聴感印象（明瞭性、音量感、拡がり感等）を評価するため、多数の音響指標（C80、G、LF 等）が提唱され、測定法の整備とともに実務現場への普及も進んでいる。しかしながら、それらの各種音響指標と部位音響性能との関連性が整理されていないことから、竣工後の測定では室内音響の質的評価は可能ながらも設計時の予測が困難な状況にある。

一方近年、室内音響設計の新たな手掛かりとして、壁面の拡散性と呼ばれる部位音響性能に世界的な注目が集まり、ここ数年国内でも関連研究発表が急増している。従来の設計では壁面の音響特性として吸音率のみを設計パラメータとしていたが、鏡面反射と乱反射を区別して後者のエネルギーの割合を「乱反射率」（図 1）と定義し、その数値を幾何音響シミュレーションに反映させることにより壁面の拡散性の影響を検討可能とした。幾何音響シミュレーションは設計実務において不可欠なツールであり、大半の商用プログラムでは乱反射率の入力を採用するようになったが、その一方で乱反射率の測定データは乏しく、与えるべき数値が不明な場合が殆どである。

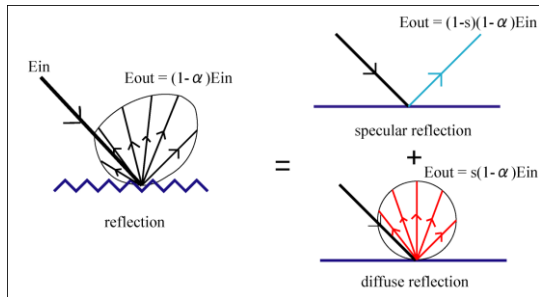


図 1：乱反射率の概念図

(2) 乱反射率の測定と数値解析

上記の状況を踏まえ、研究代表者らは乱反射率の模型実験による測定法ならびに波動音響解析による数値予測法の研究を進めてきた。H.16-17 年度科学研究費若手研究 (B) 「建築物壁面の音響拡散性能の評価及び予測に関する研究」では境界要素法による数値予測法を構築し、壁面の凹凸形状データを元に乱反射率の予測を全周波数帯域で実現可能とした。さらに、H.18-20 年度二国間交流事業「先進的空間音響設計のための壁面拡散係数の同定および応用」では韓国・漢陽大と

の共同研究を実施し、日本初の乱反射率測定システム（図 2）を縮尺模型で構成し、測定精度や適用範囲の検証を行った。以上の研究成果は国内外で先駆的であり、先述した幾何音響シミュレーションに有用な乱反射率データを提供可能なものとしたが、次なる重要課題として音響設計においてその乱反射率データをいかに有効活用するかが問われている。

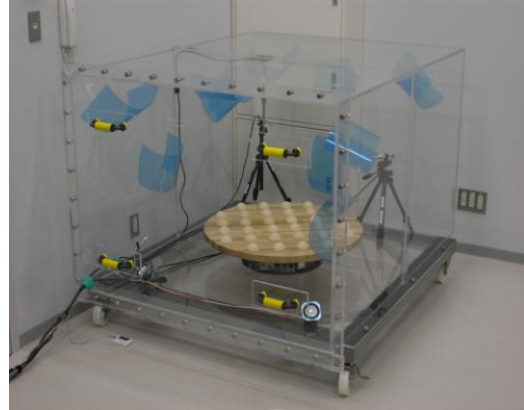


図 2：縮尺模型による乱反射率測定システム

2. 研究の目的

室内音響設計の方法論としては、残響時間や室形に関する全体レベルの設計指針は確立しているものの、壁面形状や内装材配置といった部位レベルの詳細設計に関しては曖昧な経験判断に依るところが大きく、効果的な設計が行われているとは言い難い。そこで本研究では、壁面の部位音響性能として従来の残響設計で用いられる吸音率に加えて、新たに音響反射の拡散性指標を導入し、部位レベルの拡散性を制御する方法論とさらにはそれに基づく空間全体の音響設計スキームの構築を目指す。具体的には、

- ランダム入射乱反射率測定法の確立
 - 垂直入射乱反射率測定法の開発
 - 拡散性指標に基づく壁面形状設計のためのデータベース整備
 - 壁面の拡散性を考慮した非拡散音場の残響理論の構築
 - 室内音場における拡散壁の物理的效果（残響への影響）の解明
 - 室内音場における拡散壁の心理的效果（聴感への影響）の解明
- を目的とする。

3. 研究の方法

上記の研究目的に対して、模型実験・数値解析・聴感実験の 3 つのアプローチにより研究を遂行する。研究組織としては、東大・熊本大・新潟大の 3 カ所に研究ユニットを配置し、東大ユニットを核として熊本大ユニットは聴感実験、新潟大ユニットは数値解析を一

部分担し、ユニット間で緊密に連絡を取りながら研究を実施する。各課題の具体的な研究方法を以下に示す。

(1) ランダム入射乱反射率測定法の確立

現在国際規格 ISO 17497-1 で規定されているランダム入射乱反射率測定法に関して、測定条件に幾つか不明な点があるため、既に構築済みの縮尺模型測定システムにより、妥当な測定条件を解明する。加えて、新規に実大測定システムを構築し、縮尺模型測定との比較検証を行う。

(2) 垂直入射乱反射率測定法の開発

上記測定法とは全く異なる発想から、垂直入射乱反射率の測定法を新たに提案し、縮尺模型測定システムを構築する。試行的に測定を実施し、数値解析結果との比較により妥当性を検証する。

(3) 拡散壁の乱反射率データベースの整備

室内音響設計において典型的な拡散壁である各種リブ・ブロック構造について、模型実験および数値解析により乱反射率データを収集し整理する。模型実験では吸音材を組み合わせた壁面構造についても測定を行い、数値解析では周期構造壁面の断面形状に関するパラメトリックスタディを行い、拡散性の最も優れた形状を解明する。

(4) 壁面の拡散性を考慮した残響理論構築

拡散音場を仮定した古典的な残響理論に対して、矩形室内の非拡散音場の残響理論を鏡像法により純理論的に導出し、さらに乱反射率を導入することで壁面の拡散性を考慮する。新たな残響理論に基づき、矩形室のアスペクト比、吸音面の分布および壁面の乱反射率が残響に及ぼす影響を概算する。

(5) 拡散壁の室内残響への影響解明

室内残響に拡散壁が及ぼす物理的効果を検証するため、特に非拡散音場を想定して、第一に周辺開放の平行壁間、第二に吸音面が偏在した矩形室に関して、模型実験と数値解析を行う。それらの結果から、新たな残響理論の妥当性、近似精度、適用限界を検証する。

(6) 拡散壁の聴感印象への影響解明

室内音響の聴感印象に拡散壁が及ぼす心理的効果を検証するため、幾何音響シミュレーションと6チャンネル音場再生システムを連結した可聴化システムを用いて、被験者実験を行う。その際、聴感印象に関連する室内音響指標への影響についてもあわせて確認し、相関関係を検証する。

4. 研究成果

(1) ランダム入射乱反射率測定法の確立

壁面のランダム入射乱反射率の測定法として、残響室において試料を回転させながら測定した多数のインパルス応答を同期加算することにより鏡面反射成分を抽出する残響室法が ISO 17497-1 にて規格化されている。その中で同期加算方法として、連続的に試料を回転しながら行う方法（連続法）と各々の回転角度で停止して静止状態で測定する方法（ステップ法）が規定されているが、それらの設定条件は曖昧であった。

そこでまずは、既に構築済みの 1/4 縮尺模型測定システム（図 2）において、試料回転速度・信号種類・信号長・同期加算回数を変化させて測定を行った結果、M 系列信号では信号長とは無関係に回転速度に上限が見いだされた。一方、TSP 信号では同期加算回数に下限があり、それに伴い回転速度の上限が定まることが判明した。これらの知見は今後 ISO 17497-1 の改訂に有用となる。

次に、新規に構築した実大測定システム（図 3）において、縮尺模型測定との比較を行った結果、測定値の一致が確認された。試料回転条件についても、同様の傾向が確認された（図 4）。ただし、高音域において縮尺模型測定では空気吸収、実大測定では時変性が誤差要因となることが示された。

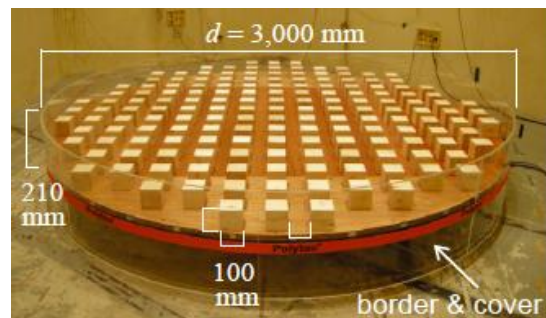


図 3：実大の乱反射率測定システム

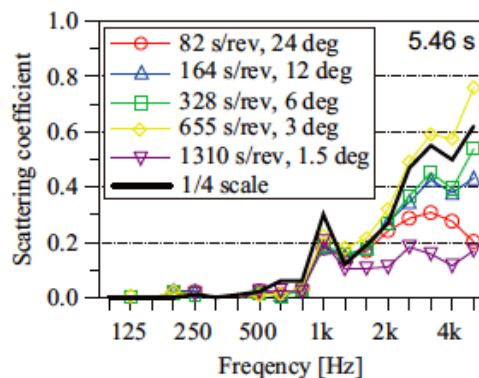


図 4：ランダム入射乱反射率の測定例（試料回転速度の影響）

(2) 垂直入射乱反射率測定法の開発

壁面の拡散性指標として、上述したランダム入射乱反射率の残響室測定法が普及しつつあるが、室内音響設計においてフラッターエコー対策として拡散壁を検討する場合、垂直入射条件に対する乱反射率が性能指標として必要となる。そこで、矩形室の四周を完全吸音面として、反射性平行壁間に1次元音場の卓越する条件を設定し、試料設置による残響時間の変化から垂直入射乱反射率を測定する方法を考案した。

アクリル製模型室にウレタンフォーム製吸音面を配置し、床面に試料を設置する1/4縮尺模型測定システム(図5)を構築した。数値解析により垂直入射乱反射率が得られているリブ構造を試料として測定を試行し、比較検討を行った結果、概ね両者の対応が確認された。ただし、室内のエネルギー減衰過程において非拡散音場に起因する減衰曲線の折れ曲がりが生じるため、残響時間同定に関しては同定区間の設定に関して未解明の部分が残され、今後の課題とされた。

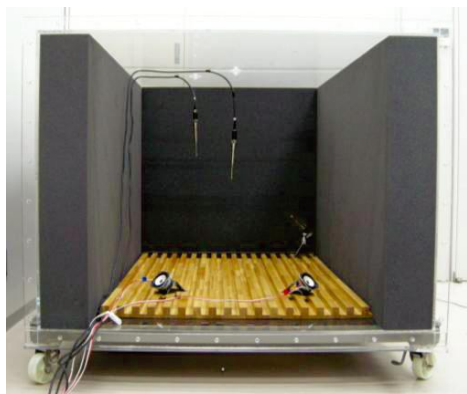


図5：垂直入射乱反射率測定システム

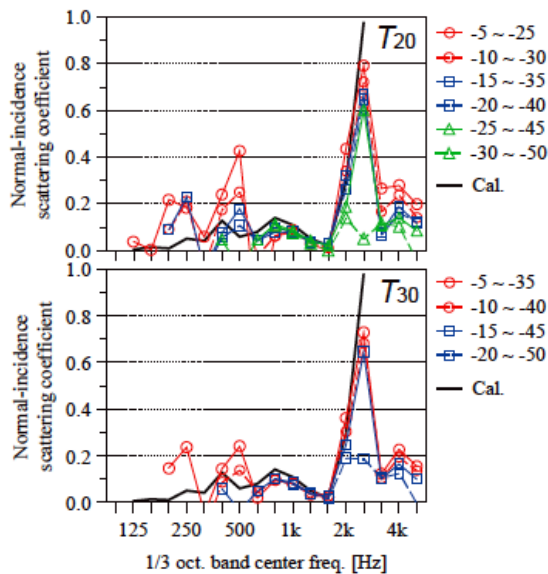


図6：垂直入射乱反射率の測定例
(残響時間同定区間の影響)

(3) 拡散壁の乱反射率データベースの整備

室内音響設計のための乱反射率データベース整備に向けて、上記の縮尺模型測定システムを用いて、リブ構造16種類・ブロック構造4種類のランダム入射乱反射率データを収集した。拡散壁の設計指針として、リブ構造に関しては、リブの形状・角柱・間隔、背後空気層、吸音仕上げの影響を整理した。また、ブロック構造に関しては、被覆率と配列の影響を整理した。

次に、正弦波型・三角波型・矩形波型の周期構造壁面について、数値解析による断面形状のパラメトリックスタディを行った。その結果、ランダム入射と垂直入射乱反射率では拡散性を最大化する形状が異なり、ランダム入射の場合、凹凸高さの対周期比が正弦波型30%・三角波型40%・矩形波型20%、垂直入射の場合、正弦波型20%・三角波型25%・矩形波型15%で最適となることが判明した。また、矩形波型では、凹部と凸部の割合が半々の場合に乱反射率を最大化することも判明した。

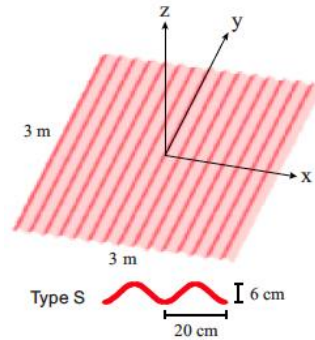


図7：数値解析モデルの例(正弦波型構造)

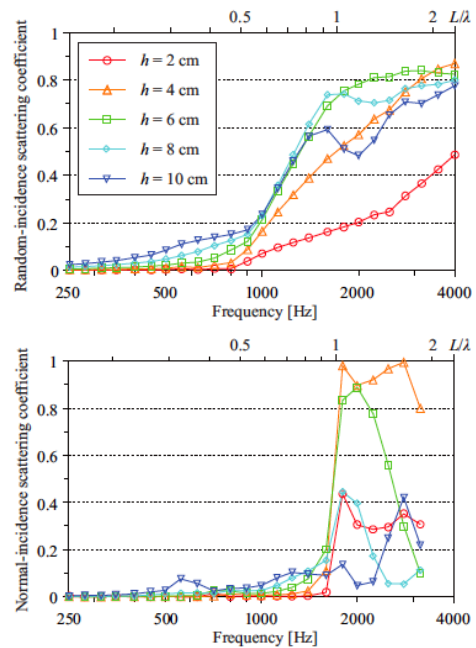


図8：ランダム入射・垂直入射乱反射率の解析例(正弦波型構造：高さの影響)

(4) 壁面の拡散性を考慮した残響理論構築

吸音面の分布と壁面の拡散性を考慮した非拡散音場の残響理論の導出にあたり、室形を矩形室に限定して鏡像音源を想定し、さらに音場を1次元・2次元・3次元鏡面反射成分と拡散反射成分に分けて各々のエネルギー減衰を近似的に定式化した。その際、吸音面分布は各々の鏡面反射成分に反映され、壁面の乱反射率は鏡面反射成分から拡散反射成分への遷移に反映される(図9)。

新たな残響理論に基づき、矩形室のアスペクト比、吸音面分布および壁面の乱反射率が残響に及ぼす影響に関してパラメトリックスタディを行った。概して室アスペクト比の増大と吸音面の偏在に伴って音場の拡散性が低下し、エネルギー減衰曲線の折れ曲がりが増加したが、乱反射率の増加によりその折れ曲がりの緩和が確認された(図10)。

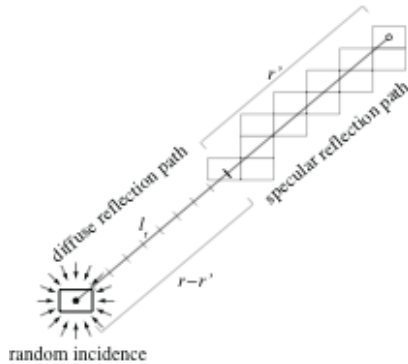


図9：鏡面反射から拡散反射への遷移モデル

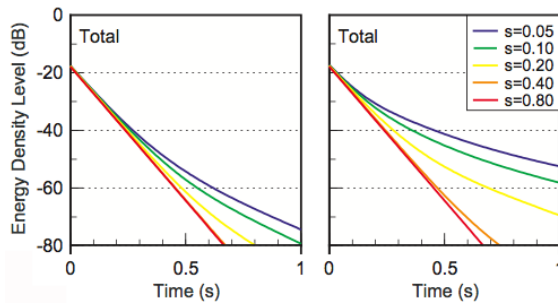


図10：乱反射率による残響曲線の変化
(左：吸音一様、右：吸音偏在)

(5) 拡散壁の室内残響への影響解明

拡散壁の室内残響への影響に関する基礎的検討として、周辺開放の平行壁間を想定した模型実験と数値解析によりインパルス応答を計測・算出した結果、上記の残響理論と対応が確認された。また、数値解析では時間領域有限差分法を用いて空間内のエネルギー分布を詳細に観察し、拡散壁の散乱効果を確認した。なお、模型実験では低音域において乖離が見られたが、理論・数値解析では想定していない壁端部からの回折波の影響と判明した。

次に、吸音面が偏在した矩形室を対象として数値解析を行い、室アスペクト比、吸音面分布および壁面の乱反射率が残響に及ぼす影響を検証した(図11)。全体的な影響傾向は残響理論の結果と対応するものの、室アスペクト比および吸音率偏差が増大するにつれて、特に低音域で乖離が大きくなること示された(図12)。原因として壁端部の散乱が考えられ、これらの影響を考慮した修正モデルの構築が今後の課題となった。

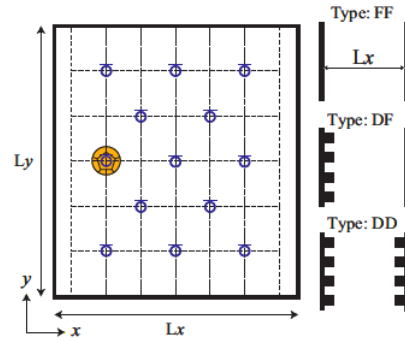


図11：矩形室の数値解析モデル(壁面3条件)

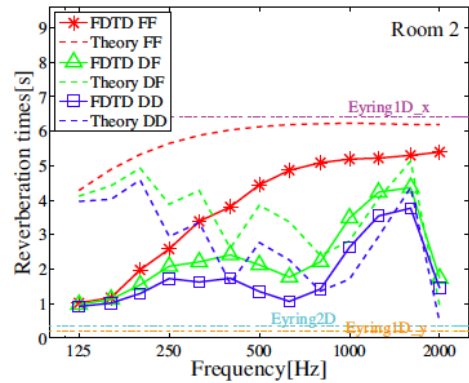


図12：残響時間の解析値・理論値

(6) 拡散壁の聴感印象への影響解明

シューボックス型ホールを想定した幾何音響シミュレーションを実施し、側壁・天井の乱反射率を変化させてインパルス応答を計算し、各種の室内音響指標を算出した。その結果、吸音面が床面・後壁に偏在した条件では、乱反射率が低い値の範囲で拡散壁により残響時間と初期反射音構造が変化し、それに伴い音量・明瞭度指標も変化することが確認された。

無響室内の6チャンネル音場再生システムを用いて被験者実験を行った結果、上記物理指標の変化が弁別域を超える場合には、概ね対応して聴感印象に変化が生じることが確認された。今後、実空間における聴感実験により更なる検証が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 33 件)

- ① T. Sakuma, Theory of reverberation in rectangular rooms with surface scattering, Proc. Forum Acusticum 2011, pp.1959-1964, 2011. 概要査読有
- ② H. Lee, T. Sakuma, Basic study on a laboratory measurement method of the normal-incidence scattering coefficient, Proc. Forum Acusticum 2011, pp.1841-1846, 2011. 概要査読有
- ③ K. Eda, Y. Yasuda, T. Sakuma, Acoustical effects of columns, beams and furniture on sound fields in small enclosures, Proc. 20th Int'l Cong. Acoust., P813, 6p., 2010. 概要査読有
- ④ H. Lee, Y. Tsuchiya, T. Sakuma, Issues on the reverberation room method for measuring the scattering coefficients - Border setting and revolution of test sample, Proc. Inter-Noise 2010, No.0663, 10p., 2010. 概要査読有
- ⑤ T. Sakuma, Y. Kosaka, L. de Geetere, M. Vorländer, Relationship between the scattering coefficients determined with coherent averaging and with directivity correlation, Acustica/acta acustica, Vol.95, pp.669-677, 2009. 査読有

[学会発表] (計 31 件)

- ① T. Sakuma, Error factors in the measurement of the scattering coefficient in small and full scale, 162nd Meet. Acoust. Soc. Am., 2011 年 11 月 1 日、サンディエゴ (アメリカ)
- ② 李孝振、実大残響室におけるランダム入射乱反射率の測定 - 測定条件に関する検討 -、日本音響学会秋季研究発表会、2011 年 9 月 20 日、島根大学 (松江市)
- ③ 楠井尚貴、非拡散音場の室内音響特性に関する研究 その 5 - 平行壁間残響の数値解析 -、日本音響学会秋季研究発表会、2011 年 9 月 20 日、島根大学 (松江市)
- ④ 佐久間哲哉、非拡散音場の室内音響特性に関する研究 その 4 - 矩形室残響の理論解析 -、日本音響学会秋季研究発表会、2011 年 9 月 20 日、島根大学 (松江市)
- ⑤ 土屋裕造、平行壁間の残響特性に関する研究 その 1 - 縮尺模型実験による基礎的検討 -、日本建築学会大会、2011 年 8 月 23 日、早稲田大学 (東京都)
- ⑥ 杉原慎一郎、壁面の拡散性を考慮した幾何音響解析 - 乱反射率の入射角依存性の反映 -、日本音響学会春季研究発表会、2011 年 3 月 9 日、早稲田大学 (東京都)
- ⑦ 李孝振、垂直入射乱反射率の実験室測定法に関する基礎的検討、日本音響学会春季研

究発表会、2011 年 3 月 9 日、早稲田大学 (東京都)

- ⑧ 安田洋介、非拡散音場の室内音響特性に関する研究 その 2 - 吸音面が偏在した室の残響計算 -、日本音響学会春季研究発表会、2011 年 3 月 9 日、早稲田大学 (東京都)
- ⑨ 佐久間哲哉、非拡散音場の室内音響特性に関する研究 その 1 - 壁面拡散を考慮した残響理論 -、日本音響学会春季研究発表会、2011 年 3 月 9 日、早稲田大学 (東京都)
- ⑩ 李孝振、模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定法、日本音響学会建築音響研究会、2010 年 11 月 22 日、東京大学 (東京都)
- ⑪ 江田和司、小型ピアノ練習室において室仕様が音場に及ぼす影響 - 音響測定及び波動数値解析による検討 -、日本建築学会大会、2010 年 9 月 9 日、富山大学 (富山市)
- ⑫ 土屋裕造、周期構造壁面のランダム入射乱反射率の測定、日本音響学会建築音響研究会、2010 年 6 月 4 日、アステールプラザ (広島市)
- ⑬ 江田和司、柱・梁・家具が小空間音場に及ぼす影響、日本音響学会建築音響研究会、2010 年 3 月 31 日、ヤマハ (浜松市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐久間 哲哉 (SAKUMA TETSUYA)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：80282995

(2) 研究分担者

川井 敬二 (KAWAI KEIJI)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号：90284744

大嶋 拓也 (OSHIMA TAKUYA)

新潟大学・大学院自然科学系・助教
研究者番号：40332647

安田 洋介 (YASUDA YOSUKE)

神奈川大学・工学部・准教授
研究者番号：90456187

(3) 研究協力者

土屋 裕造 (TSUCHIYA YUZO)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・博士課程

李 孝振 (LEE HYOJIN)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・博士課程

江田 和司 (EDA KAZUSHI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・博士課程