

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18165

研究課題名(和文)建築物壁面の形状設計法の確立に向けた先進的音響拡散性評価システム及び拡散壁の開発

研究課題名(英文) Development of an advanced evaluation system for acoustic diffuseness and diffuse walls

研究代表者

李 孝振 (Lee, Hyojin)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・客員共同研究員

研究者番号：70747641

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、音響設計の際の目安となる拡散性指標を導入し、汎用的な壁面の拡散性能定量化システムの構築、拡散メカニズムの把握を通して拡散壁の高性能化方法の検討を、模型実験・数値解析を通して行うことにより、最適拡散壁の開発を実現することを目的とした。既往の乱反射率の解析プログラムを計算機資源や計算時間の観点から計算効率を向上させると共に、新たな指向拡散度の計算アルゴリズムを計算パラメータ及び試料の適用条件に関する検討を通して構築した。さらに、ペンローズタイル平面を三次元に拡張した非周期構造を設計し、入射角依存性の抑制や反射指向特性の均一性を向上させた新たな拡散壁を測定・解析システムを用いて開発した。

研究成果の概要(英文)：In this research, an advanced evaluation system for acoustic diffuseness (scattering and diffusion coefficients) and diffuse walls were developed in order to establish shape design methodology of architectural walls. An analysis program for scattering coefficients was improved in terms of computational efficiency, and new calculation algorithm for diffusion coefficients was constructed by examining the influence of calculation parameters and sample arrangements. Furthermore, based on the plane of Penrose tiling, aperiodic structures, which suppress incident angle dependency and improve uniformity of reflection directivity characteristics, were developed by expanding in three dimensions.

研究分野：建築音響学

キーワード：建築音響 音響拡散 拡散壁 乱反射率 数値解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 壁面の拡散性を考慮した音場予測

室内音響設計や騒音防止計画において計画の物理ベースとなる音場の予測は非常に重要な課題であり、様々な音響シミュレーション技術が採用されている。その中で「幾何音響シミュレーション」は、エネルギーの伝搬行程を幾何学的に取り扱うため厳密性に欠ける反面、多くの計算機資源を必要とせず、計算時間も非常に短いという大きな利点があり、実務設計において不可欠なツールとして頻繁に用いられている。従来の幾何音響シミュレーション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、近年では鏡面反射と乱反射を区別して後者エネルギー割合を「乱反射率」(図1)と定義し、その数値を導入させることにより壁面拡散性の影響も検討可能となっている。従って、基本計画段階における検討や初期反射音構造、各種音響指標(RT、EDT、C80、D50、LF等)の予測計算にとどまらず、インパルス応答の可聴化までもが容易に実行可能となる汎用ソフトウェアが開発されている。

一方、乱反射率測定法の規格化が進んだ現時点で、各種壁面の測定事例が増えつつあるが、未だ乱反射率のデータは乏しく、与えるべき数値が不明な場合が殆どである。また、乱反射率は鏡面反射成分のみに着目した指標であり、音場の拡散性とは必ずしも直接的に結びつかないことから、音場の拡散性と共通し、壁面拡散性能の相対比較が可能な指標(指向拡散度)の評価手法の確立が望まれている。

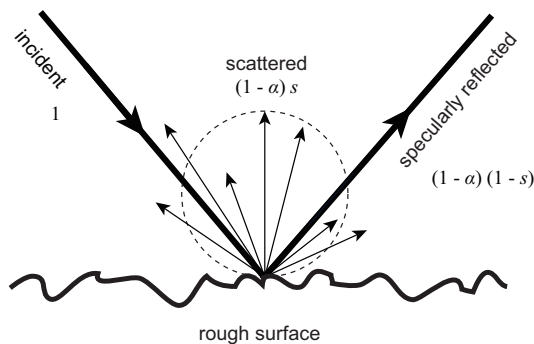


図1：乱反射率の概念図

(2) 壁面の音響拡散性能の定量化手法

壁面反射の拡散性に関する代表的な指標として、乱反射率及び指向拡散度が提案されている。前者は非鏡面反射成分の割合を、後者は反射指向特性の均一性を表す指標である。

研究代表者はこれまでに、乱反射率の定量化手法の確立に向け、模型実験による測定法及び波動音響解析による数値予測に関する研究を進めてきた。乱反射率測定システムを縮尺模型で構成し、不明確であった測定法の測定精度や適用範囲の検証を行った。また、

境界要素法による数値予測により、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(図2)。しかし、その数値プログラムの効率化に関しては、未だ課題として残されている。

一方、指向拡散度の測定法が近年規格化されたが、反射指向特性の多点計測が必要となる等、大変な労力を要し、実測への適用が簡単ではない。しかし、定式化は明確であり、数値解析では容易に算出できる一方、汎用的な算出プログラムは構築されていない状況である。

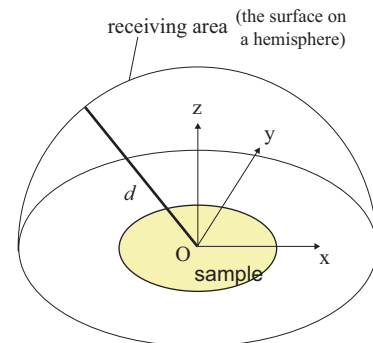


図2：乱反射率及び指向拡散度の数値解析システム

2. 研究の目的

本研究では、音響設計の際の目安となる拡散性指標を導入し、汎用的な壁面の拡散性能定量化システムの構築、拡散メカニズムの把握を通して拡散壁の高性能化方法の検討を、模型実験・数値解析を通して行うことにより、最適拡散壁の開発を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

上記の研究目的に対して、模型実験・数値解析により研究を遂行する。

具体的には、

- 1) 乱反射率の解析プログラムの改善
- 2) 指向拡散度の解析プログラムの構築
- 3) 壁面の音響拡散性能の最適化

以上の3段階を順次進める。

4. 研究成果

(1) 乱反射率の解析プログラムの改善

研究代表者が構築した乱反射率の数値解析プログラムをベースに、計算機資源や計算時間の観点から計算効率を向上させるプログラムを構築した。既往の行列を修正することにより、計算時間を4時間以下に短縮させた。改善させたプログラムの妥当性を測定結果との比較を通して検討し、実用的な予測手法として確立した。

(2) 指向拡散度の解析プログラムの構築

乱反射率の数値解析プログラムを土台に、新たな指向拡散度の数値計算アルゴリズムを構築した。計算パラメータ及び試料の適用

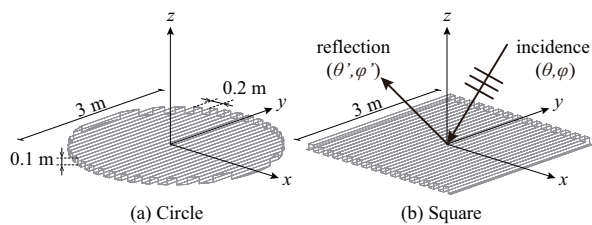


図 3 : 解析対象

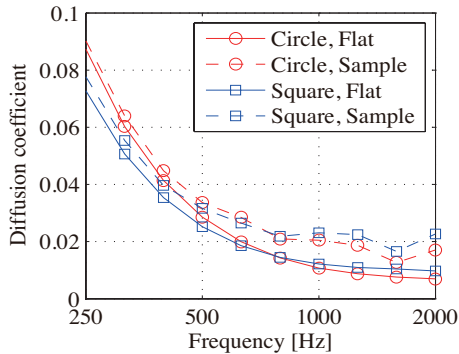


図 4 : 基準平板と試料のランダム入射指向拡散度の解析値

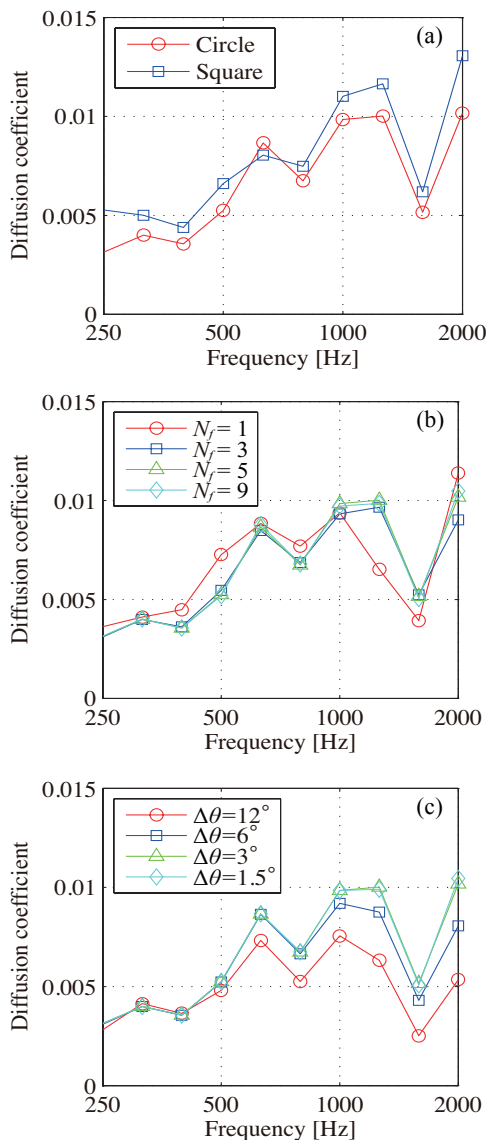


図 5 : 規準化指向拡散度の解析値

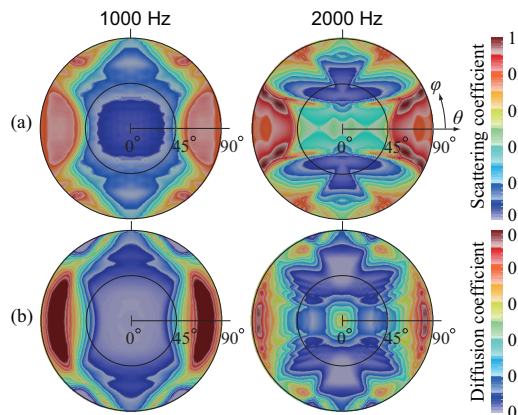


図 6 : 入射方向別の乱反射率及び指向拡散度の解析値

条件が計算結果に与える影響をケーススタディにより検討し、適切な設定条件を導いて予測手法を確立した。

試料外形による影響 外形を円形と正方形にした場合 (図 3) における基準平板と試料のランダム入射指向拡散度の解析結果 (図 4) を見ると、基準平板と試料に共通して、低音域では端部散乱の影響により大きい値を示し、正方形の方が円形より面積が大きいため、鏡面反射エネルギーが増大し、指向拡散度が小さくなっている。ただし、高音域では指向拡散度に逆転が生じ、円形の方が若干大きい値を示している。図 4 より算出したランダム入射規準化指向拡散度 (図 5 (a)) では、円形に比べ正方形の場合は全帯域で大きい値となっており、試料寸法の影響は無視できない程度と考えられる。今後、試料の面積や形状について詳細な検証を要する。

計算パラメータによる影響 周波数離散化幅 ( $N_f$ ) を変化した場合におけるランダム入射規準化指向拡散度 (図 5 (b)) を見ると、 $N_f=1$  では、他に比べ全帯域で値が大きく異なっているが、 $N_f=5$  以上では一定値に収束する傾向が見られる。1/3 Oct. band 値の算出には単一周波数での解析は不十分であることがわかった。また、入・反射角の離散化に関する解析結果 (図 5 (c)) を見ると、周波数が高いほど離散角度による値の差異が大きくなり、また離散角度が小さくなるにつれて、特に 500 Hz では 12 度、1 kHz では 6 度、2 kHz では 3 度以下で差が殆どなくなっている。従って、解析周波数の上限に応じて、離散角度を設定する必要がある。壁面の指向拡散度の 2 kHz までの数値解析では、周波数離散化幅を 1/12 Oct. band 毎、入・反射角を 3 度以下に設定すると予測精度が確保されることが検証された。

乱反射率との比較 入射方向別指向拡散度の値 (図 6) は非常に小さいものの、入射方向によって生じる特殊な模様は乱反射率の結果と比較的類似している。ただし、必ずしも乱反射率から指向拡散度が推定できないことがわかった。

### (3) 壁面の音響拡散性能の最適化

円柱やリブ周期構造壁などの典型的な拡散壁にとどまらず、意匠的にも特色を持つ新たな拡散壁を構築した測定・解析システムを用いて開発した。物理学者のロジャー・ペンローズが考案したペンローズタイルを応用したデザインパターンを用い、その二次元平面を三次元に拡張した非周期拡散壁(図7、8)を設計した。それは、黄金分割比を基調とする二種類の菱形により作られた平面充填形で、5回軸対称性をもちつつも非周期的である特性を持っている。さらに、散乱性能の広帯域化と製作性・設置性を考慮した拡散体ユニットの開発も進めた。

**形状による影響** 平面充填形状を菱形と三角形にした場合のランダム入射乱反射率の数値解析結果、両方の差は僅かで、平面形状による影響は比較的小さいことを確認した。また三角形非周期構造において、断面形状を薄板型・角柱型・角錐型に変化させた場合のランダム入射乱反射率(図9(a))をみると、低音側では薄板型が僅かに高い値をとるが、中高音域では角柱型が非常に高い値を示し、1次元周期構造の角柱型を上回っている。一方、角錐型は他と比べて値が小さいが、周波数とともに単調増加する穏やかな特性を示している。

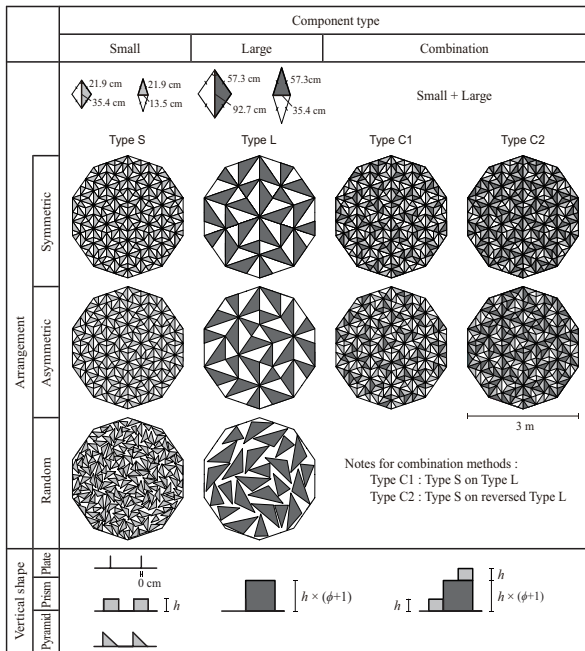


図7: ペンローズタイル型拡散壁

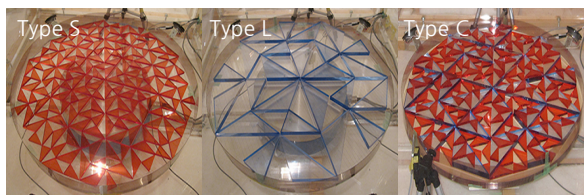


図8: 縮尺模型による乱反射率測定システム

**高さによる影響** 三角平面の最低長さ(13.5cm)の10、20、30%(1.35、2.71、4cm)に高さ( $h$ )を変化させた場合の解析値を図9(b)に示す。高さの変化に応じて、値が大きく変化することがわかる。試料の高さが高くなるほど、低周波数帯域で高い値を持つが、試料の高さが半波長に相当する周波数で急落することを確認した。全体的に、高さ2.71 cmの場合は、全帯域で比較的大きな値を示し、単純な増加傾向を見せる。

**配列による影響** 試料の中心に対し配列を変化させた場合の測定値(図9(c))を見ると、対称と非対称の値が異なっている。ISOの測定法は試料回転によるものであり、試料を対称に配置すると、鏡面反射成分が過大評価され、乱反射率が小さくなったためと考えられる。ISOの測定法では試料を非対称にする必要があると思われる。また、非対称配置の測定値は、対称配置の解析値とほぼ同様である。数値解析は自由音場法に基づいており、試料配置の影響を受けないためと考えられる。一方、ペンローズタイルの乱反射率特性は、ランダム配列による値と類似し、非周期的な拡散特性を有することが確認された。

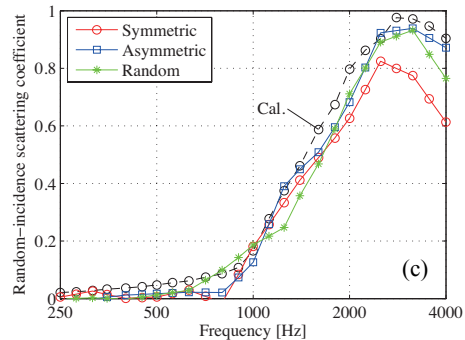
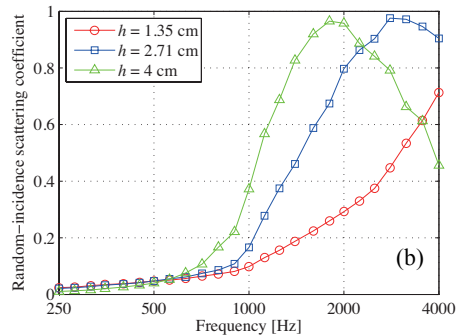
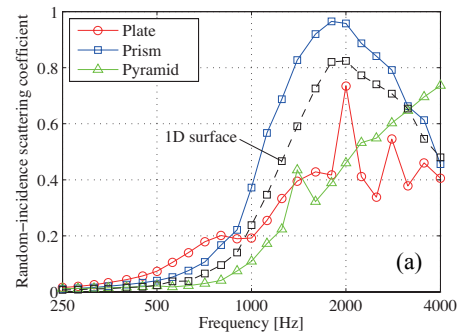


図9: ペンローズタイル型拡散壁 (Type S) の乱反射率 (形状・高さ・配列の影響)



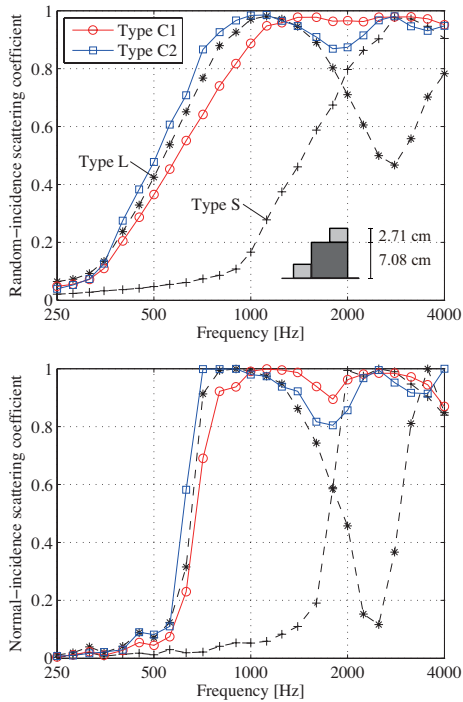


図 10 : フラクタル拡張による解析値

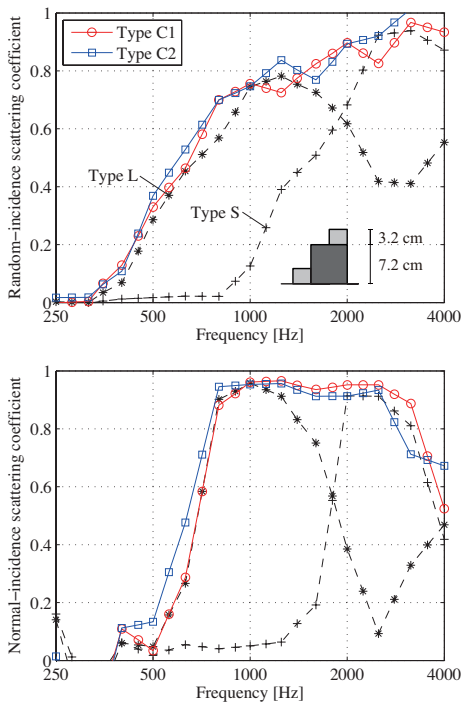


図 11 : フラクタル拡張による測定値

フラクタル拡張による影響 広帯域設計のために、Type Sを1+黄金比(約2.618)倍に拡大させたType Lを設計し、その二つを組み合わせたType Cを設計した。Type C1は、Type LにType Sを上げて構成したものであり、Type C2は、中心軸を基準に反転させたType LにType Sを適用させたものである。解析値(図10)を見ると、Type Lは、Type Sと同様の周波数特性を持ち、タイル寸法に反比例して低周波数帯域に平行移動している。Type C1とC2は、Type SとType Rを重ね合わせた通りの特性となっており、特にType C2は、Type C1に比べて小さいタイルを含ん

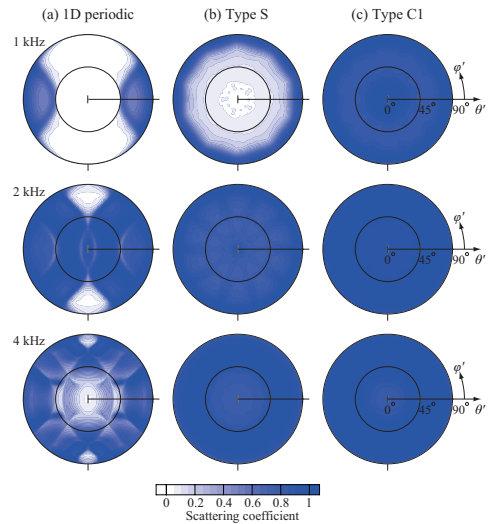


図 12 : 入射方向別乱反射率の解析値

だため、高音域で落下する特性を示す。測定値(図11)もタイル寸法が少し異なるにも関わらず、解析結果と同様である。結果として、フラクタル拡張により500Hz以上の広帯域で0.4以上の高い拡散特性を示した。非周期性による影響 ペンローズタイルの非周期構造により、入射角依存性が抑制され、反射指向特性の均一性が向上することが確認された(図12)。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2件)

- ① T. Sakuma, H. Lee, N. Inoue, A laboratory method for measuring normal-incidence scattering coefficients of architectural surfaces, Acoust. Sci. Tech. Vol.37, pp.277-285, 2016. 査読有
- ② H. Lee, T. Seike, T. Sakuma, A laboratory method for measuring out-of-plane scattering coefficients of wall surfaces in two-dimensional sound field, Acoust. Sci. Tech. Vol.37, pp.42-45, 2016. 査読有

[学会発表] (計 2件)

- ① 土屋裕造、李孝振、佐久間哲哉、ペンローズタイル型拡散体の開発 その2 -縮尺模型実験による音響散乱特性の検証-、日本音響学会秋季研究発表会、2016年9月16日、富山大学(富山市)
- ② 李孝振、佐久間哲哉、壁面の指向拡散度の数値予測 -試料・計算パラメータの適用条件について-、日本音響学会秋季研究発表会、2015年9月18日、会津大学(会津若松市)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

李 孝振 (LEE, Hyojin)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・客員共同研究員

研究者番号：70747641