

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 14 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14072

研究課題名(和文) 薄型チャンバー内のモード解析に基づく斜入射吸音率測定法の開発

研究課題名(英文) Development of a measurement method for oblique-incidence absorption coefficient based on modal analysis in a thin chamber

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：音響材料の吸音率測定法としてはランダム入射吸音率の残響室法と垂直入射吸音率の音響管法が規格化されているが、本研究では薄型チャンバー内の多点計測とモード解析を応用した斜入射吸音率測定法を新規に提案し、試作した測定システムにより測定法の妥当性・実用性を検証した。密度・厚さ・背後空気層の異なるグラスウールを試料として斜入射吸音率の測定値と理論値を比較した結果、両者で概ね対応する周波数・入射角依存性が確認された。ただし、特定の周波数と入射角の組み合わせにおいて外れ値が出現し、音源スピーカの位置と固有モードの関係によって生じることが確認され、システム設計における改良点が明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Regarding absorption coefficient measurement for acoustic materials, the reverberation room method for random incidence and the acoustic tube method for normal incidence have been standardized. In this study, a new measurement method for oblique-incidence absorption coefficient was proposed based on multi-point measurement and mode analysis. A prototype system was developed and test measurements were done for a variety of glass wool with different density, thickness and back air layer. The measured results were in good accordance with theoretical estimates, where the frequency- and incidence-angle-dependence of absorption coefficient were confirmed. However, it was found that abnormal values appear at specific combinations of frequency and incidence angle, which results from geometrical relationship of the loudspeaker position and normal modes. For avoiding the defect, an improvement point in the system was clarified.

研究分野：建築音響学

キーワード：建築音響 吸音率 音響測定 音響材料

1. 研究開始当初の背景

建築材料の吸音率データは、半世紀にわたり JIS A 1409 および ISO 35 で規定される残響室法により蓄積されてきた。この手法は、拡散音場の仮定に基づき、ランダム入射吸音率を計測するものであり、試料面積は 10m² 程度と比較的大きい試験体が必要となる。さらに、特殊施設である残響室の保有は特定の試験機関や研究所に限定されている。

一方、小面積材料用の測定法として、音響管法は FFT 分析の登場以来の古典的手法であり、管内の2つのマイクロホンにより入射波と反射波を分離し、垂直入射吸音率の計測が可能である。現在、JIS A 1405 および ISO 10534 で規定される音響管は製品化され、主に機械・材料分野で普及している。

一般に、吸音率は入射角依存性を有するため、垂直入射の値から斜入射やランダム入射の値は一意に定まらない。基礎研究レベルでは、斜入射吸音率の測定法として、無響室内の試料にパルス音源を入射して反射波を計測する方法が提案されているが、測定の難易度と精度の問題や大規模な測定装置が必要なため、実用的な普及は難しい。

そこで、あくまで残響室や無響室を要しない小規模装置を前提として、新たな測定法の可能性を模索した。その模索の中で、1次元音場を励起する音響管法の拡張として、2次元音場を励起する薄型チャンバーにおいて、マイクロホンアレイによる多点計測とモード解析の応用により、多数の斜方向の入射波と反射波を一度に分離し、斜入射吸音率の測定が可能であることを理論的に着想した。

2. 研究の目的

上記の背景から、新しい斜入射吸音率測定法の原理に基づき、薄型チャンバー内の多点計測とモード解析を応用した測定システムのプロトタイプを試作し、測定原理の妥当性と実用性を検証する。

具体的には、測定システム的设计にあたり、

薄型チャンバーの形状寸法、音源スピーカとマイクロホンアレイの設置、計測信号の分析手法を検討した上で、実測の試行および測定システムの数値シミュレーションを通して、吸音率の測定精度と測定可能な周波数範囲を検証する。さらに、典型的な吸音材料として各種多孔質材の測定データを収集するとともに、無限大面積試料の吸音率の理論値との比較から試料の切り出し方法や固定方法の影響を検証する。

3. 研究の方法

斜入射吸音率測定システムの構築に向けては、

- 1) 測定法の理論構築と測定システム的设计・試作
- 2) 数値解析による測定システムの妥当性検証
- 3) 測定条件の影響検証
- 4) 試料設置の影響検証

以上の4段階を順次進める。

4. 研究成果

(1) 測定法の理論構築と測定システム的设计・試作

薄型の直方体チャンバー内の二次元音場を想定すると、Helmholtz 方程式の平面波一般解に剛境界条件を仮定することにより、音場は斜入射モードの重ね合わせとして表現される。各モードの入射波と反射波の振幅比が求まれば、対応する入射角の斜入射吸音率が定まる。そこで、各モードの入射波と反射波の振幅が、試料面に沿った2本の測線上の音圧分布に対して測線方向のモードの固有関数を乗じて積分することにより抽出可能であることを定式化した。

測定原理に基づき、測定システムを設計・試作した(図1)。特筆すべき点として、マイクロホン設置位置の正確さを期するため、4本1セットのマイクロホンユニットとダミーの蓋を順次入れ替えながら計測する構

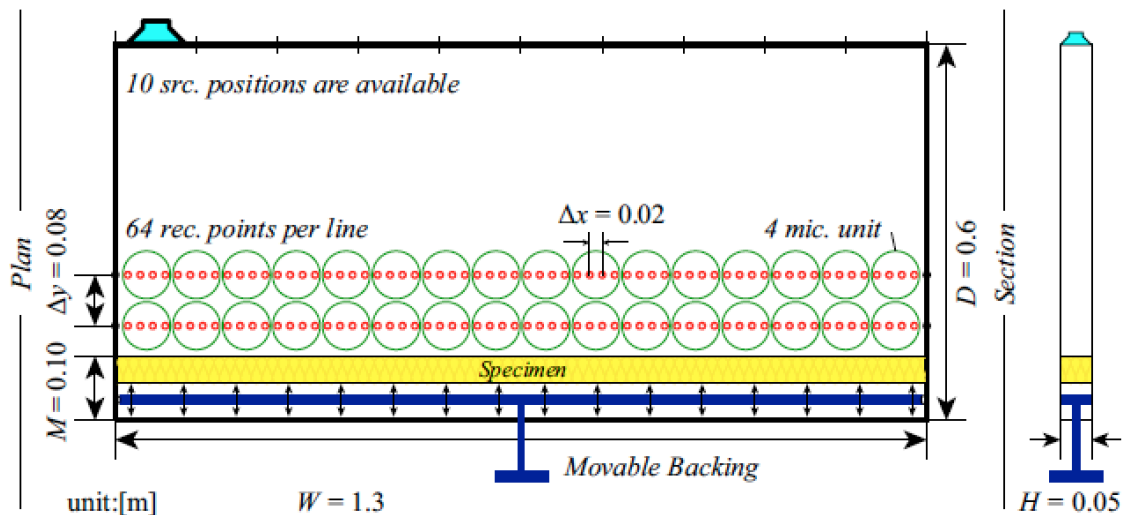


図1：薄型チャンバーの製作図

造とした。また、材料後壁は可動式とし、総厚 100mm 程度まで計測可能とした。

原理的には、チャンパー（試料）の幅と周波数に依存する特定の入射角において斜入射吸音率が算出され、0 次モードに対応する垂直入射吸音率は全周波数において算出される。特に、斜入射吸音率の計測可能な周波数範囲として、1 次モードが励起されない低音域側では垂直入射吸音率のみが測定され、チャンパーの厚さが半波長となる周波数以上の高音域側では吸音率は測定不能となる（図 2）。加えて、2 本の測線の間隔が半波長となる周波数（図中の×印）においても入射波と反射波の分離が不能となり、吸音率が不定となる性質がある。

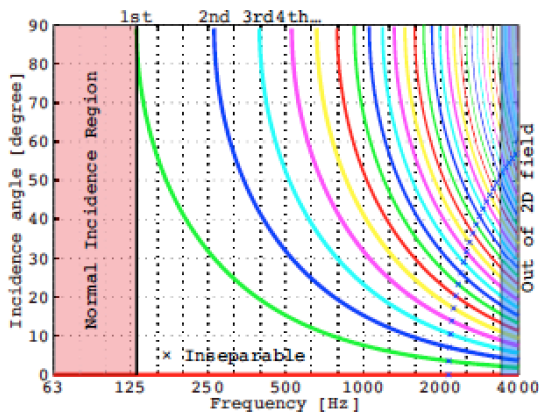


図 2：計測可能な周波数と入射角の関係

(2) 数値解析による測定システムの妥当性検証

測定システムの妥当性を確認するため、グラスウール 32K の 25mm と 50mm 厚、96K の 25mm 厚の 3 種類の材料について吸音率を測定し、数値シミュレーションによる値との比較を行った。

垂直入射吸音率については、計測値に低音域で暴れが見られ、測線間隔が小さいため、位相差が正確に測定できなかったものと推察される。中音域以上では概ね解析値と対応するが、96K の場合に骨格振動の影響による若干の乖離が見られる。また、理論通り 2kHz 付近の測定不能周波数で吸音率のディップが出現している。

斜入射吸音率については、概ね理論値と対応する周波数・入射角依存性が確認でき、計測及びデータ処理の妥当性が示された。ただし、一部の計測値で著しく理論値から外れる値が見られるが、これらはモードが十分に励起されておらず、S/N が低下したものと考えられる。この原因として、スピーカの設置位置との関係が考えられ、次節で詳細に検討することとした。また、96K の場合に理論値と計測値の差が比較的大きく、垂直入射の場合と同様に骨格振動によるものと考えられ、流れ抵抗の大きい材料は支持条件が計測値に大きく影響するものと推察される。

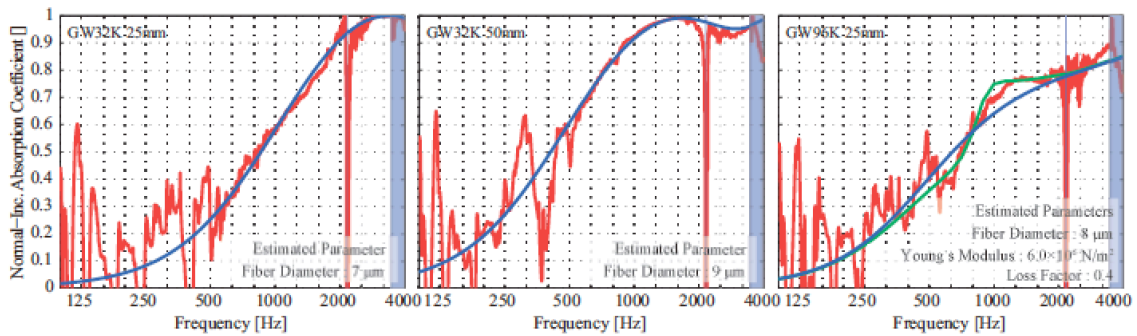


図 3：垂直入射吸音率の測定値（3 種類の吸音材）

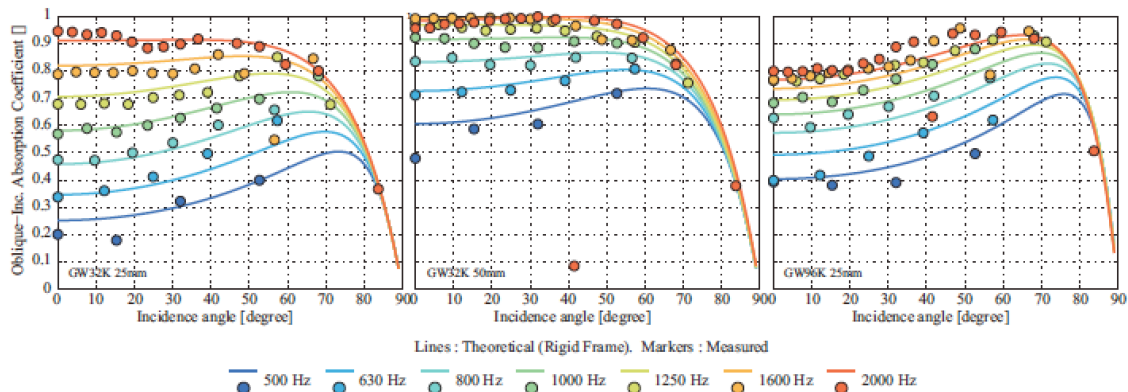


図 4：斜入射吸音率の測定値（3 種類の吸音材）

(3) 測定条件の影響検証

前述の試行測定において発生した問題点として、垂直入射吸音率の低音域の暴れおよび特定モード非励起による外れ値について、より詳細な検討を行った。

前者に関しては、測定信号とチャンバー振動の影響が考えられたため、伝達関数計測に用いる log-swept-sine 信号の信号長および同期加算回数を変化させて測定を行った。その結果、計測値への影響は極めて小さく、データの暴れに再現性が見られた。そこで、チャンバーを構成するアルミニウム板 15mm 厚の振動系を模擬し、内部音場との連成解析により吸音率を算出した (図 5)。その結果、低音域においてチャンバー自体の振動の影響により値にばらつきが生じることが明らかとなった。実測値ではより多くのピーク・ディップが見られ、チャンバー自体の他にチャンバーを設置した台などの振動にも影響を受けている可能性が示唆された。

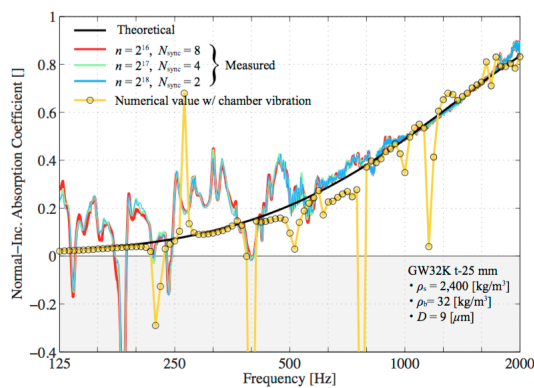


図 5：垂直入射吸音率の測定値（異なる信号条件）とチャンバー振動を考慮した計算値

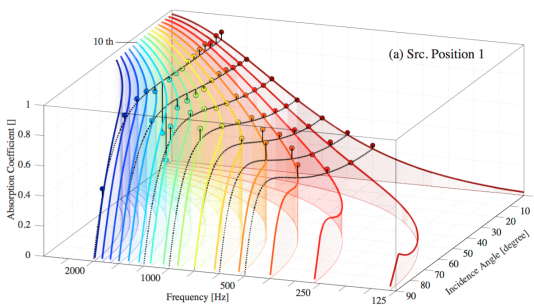


図 6：斜入射吸音率の測定値（点）と理論値（線）（音源位置 1）

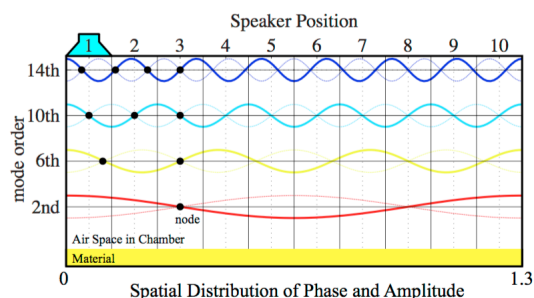


図 7：固有モードの節とスピーカ位置の関係

次に、特定モード非励起による外れ値に関して、吸音率の測定値と理論値の対応をモード毎に確認した。スピーカの位置がチャンバーの幅を 10 分割した端部（音源位置 1）の場合、10 次モードの計測値が外れ値となっていた (図 6)。一方、端部から 3 番目（音源位置 3）に設置した場合、2, 6, 10, 14 次モードが励振されず、外れ値の個数が多くなる (図 7)。スピーカの設置位置については、チャンバーの厚さが半波長となる測定上限周波数以下で外れ値が生じないためには、チャンバー端部から厚さと同じ距離以内にスピーカを設置すればよいといえる。

(4) 試料設置の影響検証

試作した測定システムでは、チャンバー内寸に相当する長さ 1,300mm、高さ 50mm の試料を設置する必要があるが、従来の音響管法で知られる通り、試料の周辺支持条件が吸音率の計測値に影響を及ぼすことが予想される。そこで、グラスウール 32K および 96K を高さ 49, 50, 51mm に切り出した試料を設置し、計測を行った。垂直入射吸音率の測定では、32K の場合に影響は非常に小さいのに対して、96K の場合に高さ 49mm（隙間 1mm）で吸音率の上昇が明確に現れた (図 8)。この傾向は斜入射吸音率でも見られたことから、試料寸法は少なくともチャンバー内寸と同寸法とする必要が示唆された。

次に、試作システムでは試料背後の後壁を可動式とし、背後空気層を有する場合の斜入射吸音率測定も可能としている。そこで、多孔質材の背後空気層が斜入射吸音率に及ぼす影響を実測により確認し、理論解析の結果と比較検証することとした。試料は上記(2)の検討と同様にグラスウール 32K の 25mm と 50mm 厚、96K の 25mm 厚の 3 種類の材料を用い、背後空気層 20, 40 mm の 2 条件、計 6 条件で計測を行った (図 9)。32K については、概ね測定値と理論値の対応は良好であり、特に入射角 0~30° 付近において背後空気層の増加に伴い、吸音率の中音域で上昇、高音域で減少する傾向が捉えられている。一方、96K については、中音域において全体的に測定値が理論値より大きくなっているが、背後空気層の増加に伴い、吸音率の測定が若干上昇する傾向が見られる。これらの結果から、試作システムにおける背後空気層を設けた測定の妥当性が確認された。

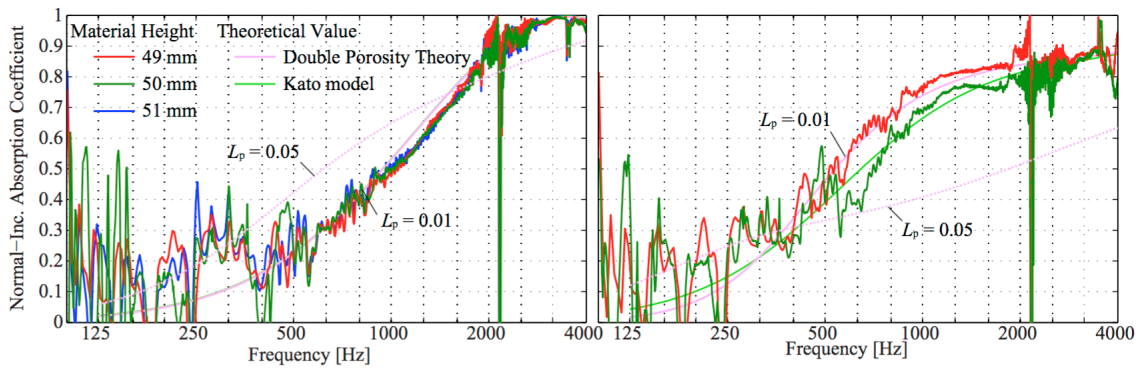


図8：垂直入射吸音率の測定値（試料高さの影響、左：GW32K、右：GW96K）

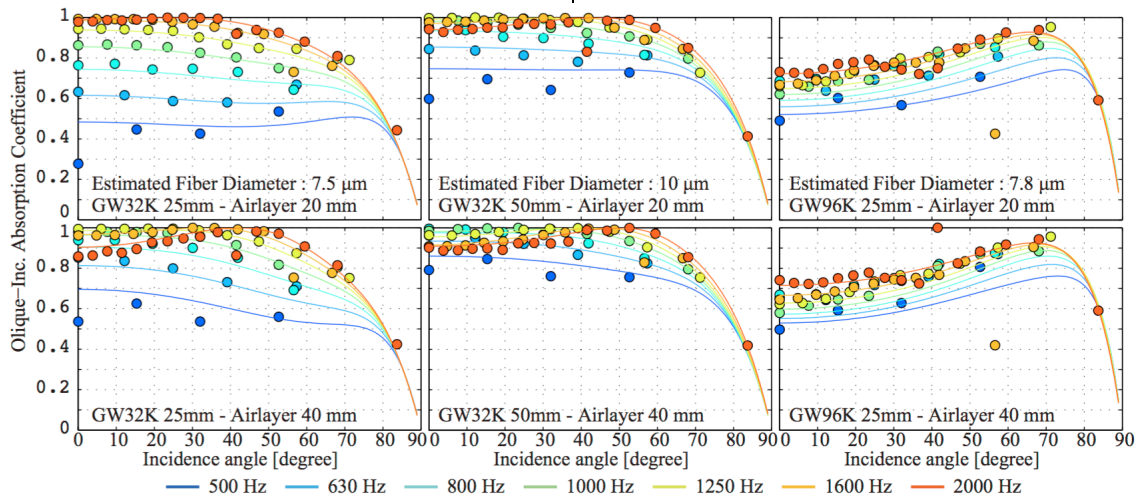


図9：垂直入射吸音率の測定値（試料高さの影響、左：GW32K、右：GW96K）

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕（計5件）

- ① 井上尚久、薄型チャンバーを用いた斜入射吸音率測定法の開発 その4 -試料設置に関する考察-, 日本音響学会秋季研究発表会、2016年9月14日、富山大学（富山市）
- ② N. Inoue, Development of a measurement method for oblique-incidence absorption coefficient using a thin chamber, Proc. 22nd Int'l Cong. Acoust. 2016年9月5日、プエノスアイレス（アルゼンチン）
- ③ 井上尚久、薄型チャンバーを用いた斜入射吸音率測定法の開発 その3 -測定条件に関する考察-, 日本音響学会秋季研究発表会、2016年3月14日、桐蔭横浜大学（横浜市）
- ④ 井上尚久、薄型チャンバーを用いた斜入射吸音率測定法の開発 その2 -数値解析及び実測による検証-, 日本音響学会秋季研究発表会、2015年9月16日、会津大学（会津市）
- ⑤ 佐久間哲哉、薄型チャンバーを用いた斜入射吸音率測定法の開発 その1 -測定原理と試作システム-, 日本音響学会秋季研究発表会、2015年9月16日、会津大学（会津市）

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) 研究協力者

井上 尚久 (INOUE, Naohisa)
 東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任研究員
 研究者番号：00755803