

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：42686

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06689

研究課題名（和文）軽量小型かつ堅牢なセンサーによる吸音率の現場測定の実現

研究課題名（英文）Development of small and robust implementation for acoustic impedance in situ measurement

研究代表者

星 和磨（HOSHI, Kazuma）

日本大学短期大学部・その他部局等・准教授

研究者番号：50373171

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、市販されているカーディオイドマイクロホンを用いた、比音響インピーダンスを測定する新しいセンサーの可能性を探ることである。提案するセンサーを用いる方法と、既存の他のセンサーを比較するために、吸音率の現場測定を実施した。その結果、提案するセンサーは、他のセンサーと同等に測定できる可能性があることがわかった。そこで、さらに単純な音場である一次元音場を実現する音響管を作成し、提案するセンサーを用いて垂直入射吸音率の測定を試みた。その結果、カーディオイドマイクロホンが持つ音圧と粒子速度の比率を補正することで、既存の方法と同等に吸音率を測定できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

技術の進歩に伴い、大空間かつ、高気密・高断熱な空間が増えてきた。これに伴い、音エネルギーが空間に留まってしまい「響き過ぎて何を言っているか分からない」「音が大きくうるさい」といった空間も増加していった。内装材の吸音不足が原因である。しかし現在、現場の内装材の吸音率を測る手法は確立されていない。本研究は、あらゆる現場に対応できる扱いが容易なセンサーを開発することである。本研究で、既存のセンサーと同じように基本的な測定ができることを確認した。また、その測定メカニズムの大枠がわかった。このセンサーが実用化されれば、より容易に音のエネルギーの流れを把握できることに相当するため、応用範囲は広い。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to explore the potential of new proposed sensor which has a pair of cardioid microphones for in situ acoustic impedance measurement. At first, the comparison experiments with existing sensors (Pressure-Velocity sensor and Two-Pressures sensor) and proposed sensor were conducted. As a result, it was clarified that the proposed sensor can be measured several acoustic materials in the 200 Hz to 4 kHz range. Secondly, in order to reveal the mechanism of impedance measurement using proposed sensor, normal incidence impedance was measured in an acoustic impedance tube with the proposed sensor. The results showed us that the proper detective ratio of sound pressure and particle velocity in a cardioid microphone affect the measurement. Additionally, it was confirmed when the ratio was corrected evenly, we could measure it as if the technique based on ISO10534-2.

研究分野：建築音響

キーワード：カーディオイドマイクロホン 吸音率 現場測定 音響管 音圧 粒子速度

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

建築性能向上から、大空間かつ高気密な室内空間が増えてきた。それに伴い、このような空間で生じる音が「大きい」「響きすぎてうるさい」といった苦情が増えている。

音響材料の吸音率に関する測定方法は、JIS および ISO に規定されている。しかしこれら規格はいずれも現場で測定する方法ではない。音響に関する問題は、竣工後、利用している中で苦情が挙げられることが非常に多い。そのため、現場施工された材料の吸音率を測定する方法の確立が望まれている。既にいくつか提案されている測定方法のなかで、騒音下でも安定的に測定ができる EA (Ensemble Average) 法が脚光を浴びている。EA 法をはじめとする吸音率の測定には、材料近傍の音の物理量である音圧 (p) と粒子速度 (u) から、比音響インピーダンス ($Z = P/U$) を推定する必要がある。その音響物理量を測定するセンサーは現在、以下の 2 種類が主流である。

- P-P センサー：2本の音圧 (p) 型マイクロホンをお互いに一定距離を離し、時間差から粒子速度を推定する。
- P-U センサー：1本の音圧型マイクロホンと粒子速度 (u) センサーを用いる。音圧と粒子速度を直接計測できる。吸音率の測定デバイスも開発されているが広く普及するに至っていない。

これらセンサーは、計測の煩雑さや、精密かつ頻繁な校正が必要な繊細さから、いずれも現場向きではなく、計測の容易さと堅牢さを兼ね備えたセンサーが望まれている。

2. 研究の目的

これまでのセンサーとは異なるアルゴリズムで、音圧 (p) と粒子速度 (u) を安定的に測定できるセンサーを開発することを目的とする。具体的には、密閉型 (音圧型) と、解放型 (粒子速度型) の両方を兼ね備えている、単一指向性をもつマイクロホン (カーディオイドマイクロホン) を複数利用し、信号処理から音圧 (p) と粒子速度 (u) を抽出する。このセンサーを C-C センサーと呼んでいる。このセンサーを利用して現場における吸音率の測定に応用する。

3. 研究の方法

(1) 基本アルゴリズムの検証

マイクロホンを 2 本用いることによる物理的制約、マイクロホン感度差、設置精度が測定結果に及ぼす影響を明らかにすることを目的として数値実験を実施する。

(2) 吸音率の現場測定による既存センサーと提案センサーの比較

P-P センサーと P-U センサーを用い、提案している C-C センサーとの比較をすることで、提案センサーが現場測定として有望なものであるか判定する。

(3) 提案センサーを用いた音響管による垂直入射吸音率の測定

垂直入射吸音率の測定方法は ISO10534-2 に規定されている。この方法を応用し、提案するセンサーを用いて垂直入射吸音率を測定する。測定結果から、このセンサーが捉えているのものは何か、また改善すべき点は何か、を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 基本アルゴリズム検証

測定の際に考えられるエラーを、図 1 に示すような (a) 材料と試料の距離、(b) マイクロホンの水平位置のずれ、(c) マイクロホンの鉛直位置のずれ、(d) マイクロホン系の回転、(e) マイクロホン 2 本の開き角、(f) マイクロホンの感度差、の 6 点と想定し、数値実験を実施した。図 2 に示すように、無限平面に広がる試料に対し、2 本のマイクロホンで音源からの直接音と試料からの反射音を捉える。材料の特性は、Delany-Bazley Model を用い、流れ抵抗 $80000 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 、厚さ 50 mm の多孔質材を想定した。音源位置をランダムに動かす、EA を模擬した数値実験である。

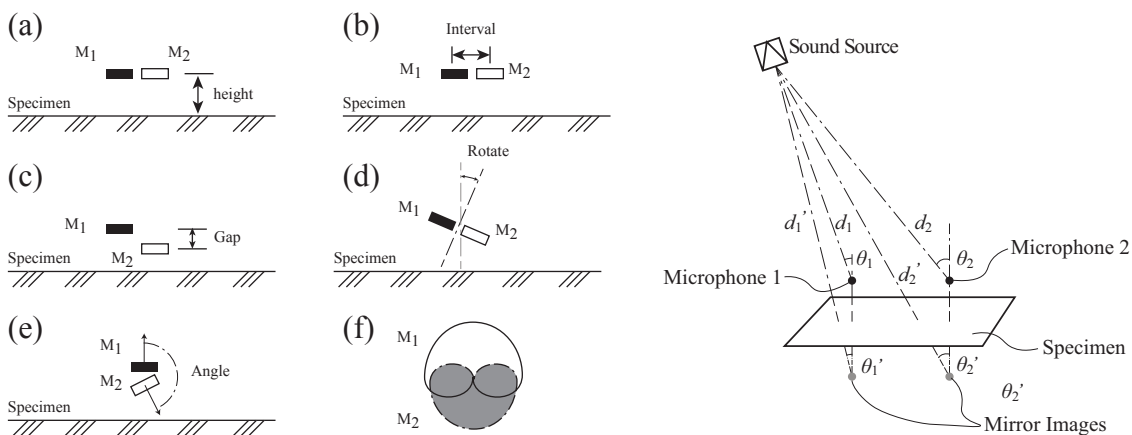


図 1 検討のパターン

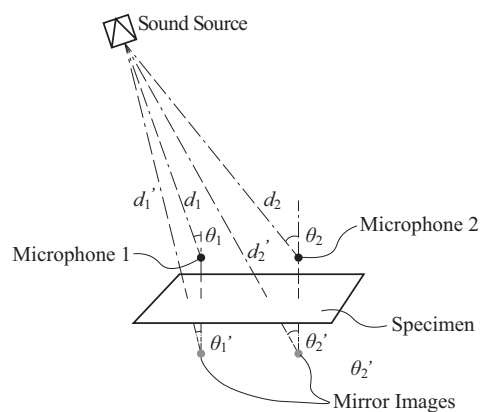


図 2 計算モデル

数値実験の結果を図3に示す。この結果から、(f) 2本のマイクロホンの感度差が結果に一番大きく影響することがわかった。感度差の補正は必須といえよう。また、マイクロホンは材に近い方がよいが2 cm程度離れていても実用上は問題ないこと、マイクロホンの水平間隔は結果に影響しないことがわかった。このことから、上記の範囲内を満足する小型のC-Cセンサーであれば、高い精度で吸音率を計測できることが示唆された。

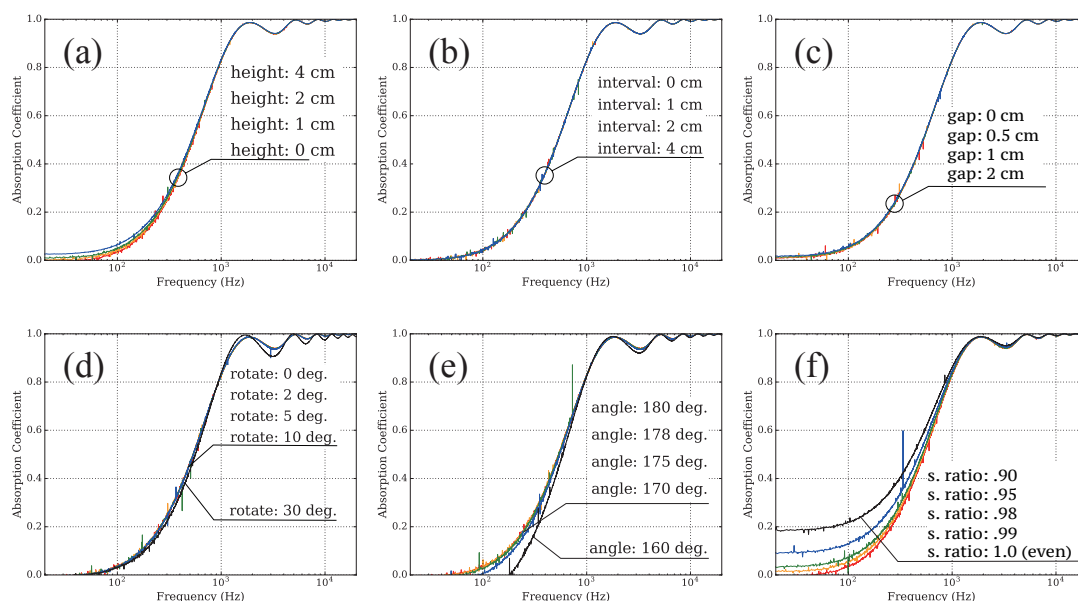


図3 EA法とC-Cセンサーによる数値実験の結果

(2) 吸音率の現場測定による既存センサーと提案センサーの比較

(1)の数値実験から、提案するC-Cセンサーによって材料の吸音率が測定できる可能性が示された。そこで実際に、既存センサー(P-Pセンサー, P-Uセンサー)と同様に吸音率を得ることができるか、EA法による現場測定を実施した。図4は用いた3種類のセンサーである。実験に用いた4種類の材料を表1に示す。



(a) P-P センサー (b) P-U センサー (c) C-C (提案) センサー

図4 比較する3種類のセンサー

表1 比較実験に用いる4種類の材料

Material	density (g/m ³)	thick (mm)	width (mm)	depth (mm)
GW50mm_32k Glass-wool	32k	50	910	1820
GW100mm_32k Glass-wool	32k	100	910	1820
PW50mm_32k Polyester non-woven	32k	50	910	1820
NF10mm Needle Felt	-	10	450	450

グラスウール 50 mm (GW50mm_32k)を測定した結果を図5に示す。これを見ると、C-Cセンサーのインピーダンスは、他の2つのセンサーよりも、実部虚部ともに小さい。そのため、吸音率を示す右肩上がりのカーブの傾きが若干緩い。このことから、カーディオイドマイクロホンが捉える音圧(p)と粒子速度(u)の比率が均等でないと推察した。そこで、ここでは簡易的に音圧と粒子速度の比を2/3として、その比率を補正した。補正を施した上で、吸音率を求めた結果を図6に示す。この結果を見ると、全ての材料において、P-Uセンサーと提案するC-Cセ

センサーは、4 kHz までの範囲でほぼ等しい吸音率を得ることができた。

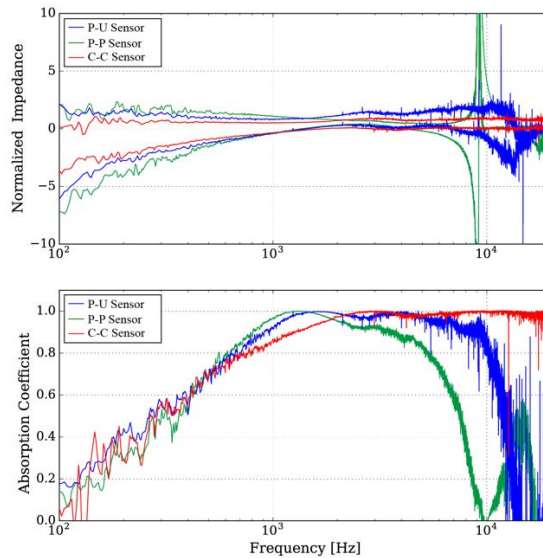


図5 グラスウール 50mm (32kg/m³) の測定結果

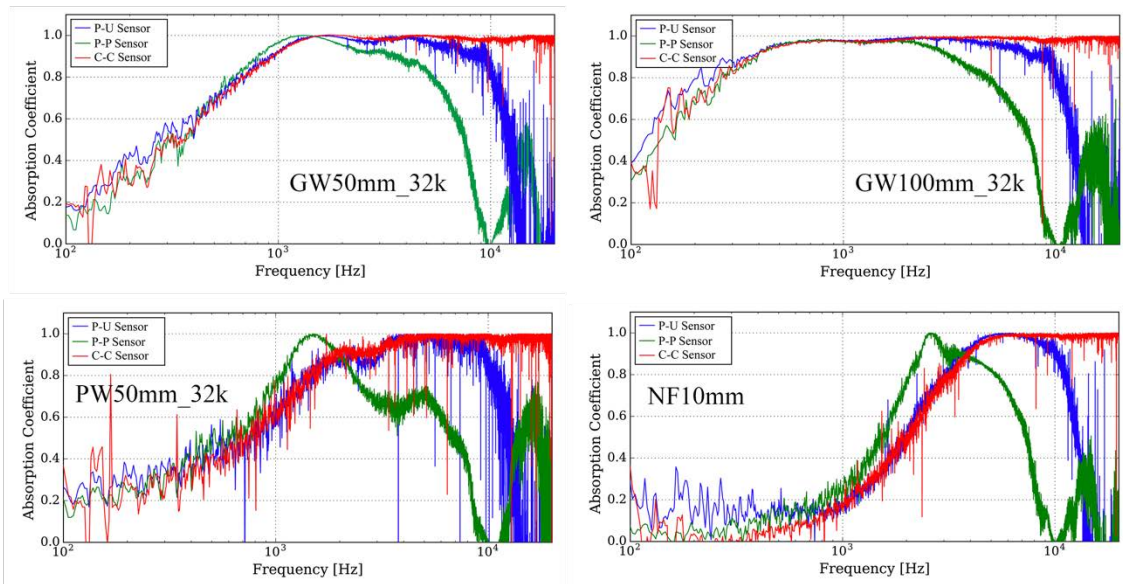


図6 カーディオイドマイクロホンの音圧と粒子速度の比率を補正して測定した結果

(3) 提案センサーを用いた音響管による垂直入射吸音率の測定

ISO10534-2には音響管を用いた垂直入射吸音率の測定法が規定されている。用いられるセンサーは音圧型マイクロホン2本であり、算出にはこれらから得られる信号の伝達関数を用いる。そこで本研究では、この音圧型マイクロホンを提案するセンサーに置き換えて、材料の表面インピーダンスを得ることを試みた。実験に先立ち10mm厚のMDF板を用いて音響管を作成した。実験に用いたカーディオイドマイクロホンは、Countryman社のマイクロホン2本とDPA社のマイクロホン1本である。図7に示すように、カーディオイドマイクロホンの指向性をスピーカ側と、材料側とに向け2回測定する。得られた信号から測定点での特性インピーダンスを求め、さらに材表面のインピーダンスおよび吸音率を推定する。

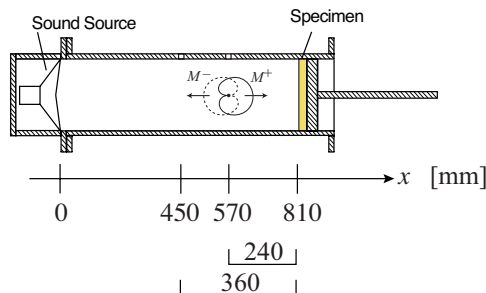


図7 測定に用いた音響管とマイクロホンの向き

また吸音率の測定に先立ち、吸音材を設置しない状態の音響管を用いて、3本のカーディオイドマイクロホンそれぞれの音圧と粒子速度の比率を複素数で得た。

材から 24 cm 離れた点で測定した結果を図 8 に示す。これを見ると、補正を施していない (a) は、大まかな傾向は得られているものの、吸音率が周期的に変化していることがわかる。これに対し補正を施した (b) は周期的な変化が修正され、表面インピーダンス、吸音率ともに、ISO10534-2 の方法 (P-P) とほぼ一致する結果が得られた。ただし、この測定は、補正係数を得る測定と吸音率の測定と同じ音響管を用いていることから、補正係数には音響管の影響を含んでいる可能性がある。補正係数の測定にはさらなる研究が必要である。

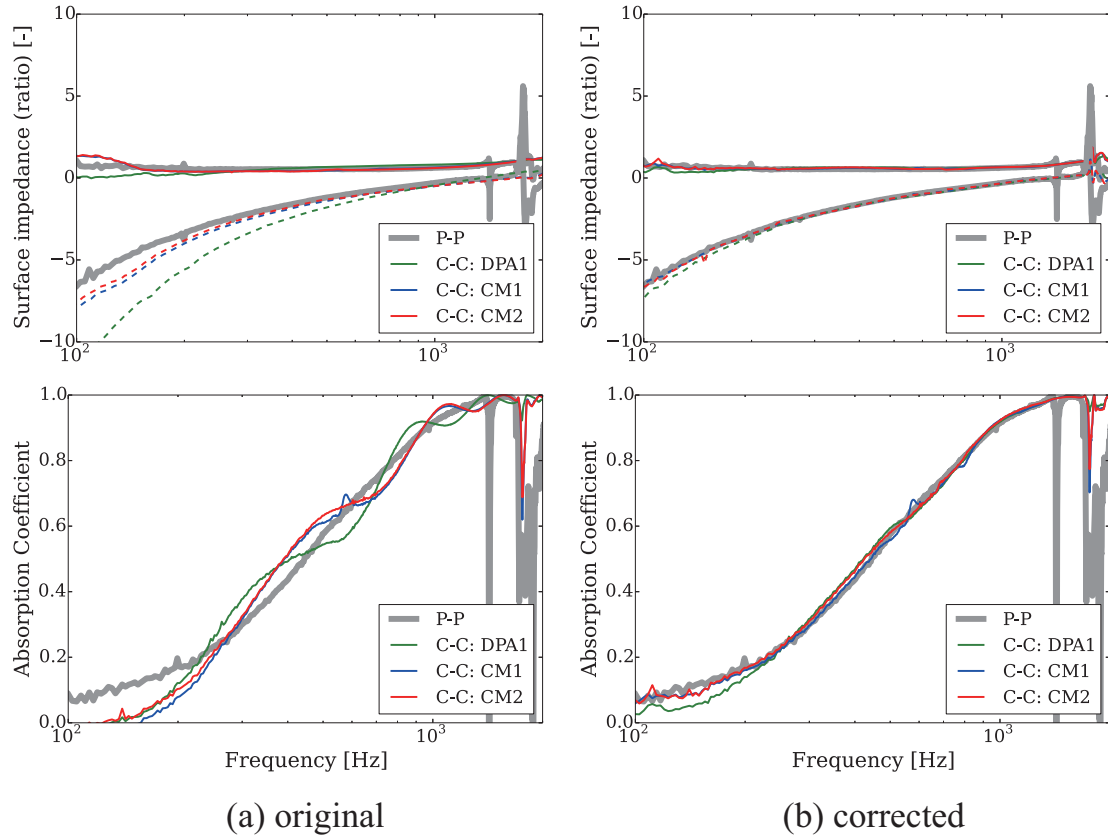


図 8 材表面から 24 cm 離れた点で測定した結果 (太線 P-P は ISO10534-2 による測定結果)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kazuma Hoshi, Toshiki Hanyu
2. 発表標題 Comparison with Acoustic Impedance Measurement Results of Cardioid Microphones and Other Probes
3. 学会等名 the 47th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Inter-noise 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 星和磨, 羽入敏樹
2. 発表標題 C-C法による吸音率の現場測定法に関する検討 -EA法を用いたPUセンサーによる測定結果との比較-
3. 学会等名 日本音響学会2019年春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 星和磨, 羽入敏樹
2. 発表標題 C-C法による吸音率の現場測定に関する検討 - 数値解析による理論および精度の検証 -
3. 学会等名 日本音響学会2017年秋季研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazuma Hoshi, Toshiki Hanyu
2. 発表標題 Elucidation of the mechanism of acoustic impedance technique using two cardioid microphones
3. 学会等名 Proceedings of the 46th international congress and exposition on noise control engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazuma Hoshi, Toshiki Hanyu
2. 発表標題 A Measurement Technique of Sound Absorption Coefficient and Impedance Using an Impedance Tube and Two Cardioid Microphones
3. 学会等名 Proceedings of International Congress on Acoustics ICA2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 星和磨, 羽入敏樹
2. 発表標題 二本のカーディオイドマイクロホンと音響管による吸音率の測定に関する検討
3. 学会等名 日本音響学会建築音響研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 星和磨, 羽入敏樹
2. 発表標題 カーディオイドマイクロホンと音響管を用いた垂直入射吸音率の測定方法に関する検討
3. 学会等名 日本音響学会2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----