

連立共鳴器による低音域用吸音構造：薄型化に関する検討

川口, 卓郎
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻：修士課程

藤本, 一壽
九州大学人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/1560199>

出版情報：都市・建築学研究. 27, pp.51-57, 2015-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン：
権利関係：

連立共鳴器による低音域用吸音構造 – 薄型化に関する検討 –

Absorptive structure in low frequencies by applying series-coupled resonators – Examination on making the thickness of the structure thin –

川口卓郎*, 藤本一壽**

Takuro Kawaguchi and kazutoshi Fujimoto

It is well known that a large air space is needed for absorbing sound in low frequencies by using porous material. Therefore, porous material is neither realistic nor practical for use of absorbing walls or ceilings in a small room such as a living room in a house. With these points as background, the authors have examined the absorbing structure in low frequencies by applying resonator absorbers and presented that the combination of three types of resonators makes good absorptions at three resonance frequencies and closing the opening of resonator with porous material of small flow resistance broadens the band width of absorbing frequencies. These results imply that resonator absorbers might realize good sound absorptions in low frequencies. In this paper, for making the thickness of the structure thin, the effects of the shape of resonators and the place of porous material in the resonators on the absorbing characteristics are examined by a numerical simulation based on FDTD. Base on the results of the examinations, real panels are practically made, and the random incidence absorption coefficient of the panels is measured. Lastly apparent absorption coefficient of the panels is measured in an actual small meeting room.

Keywords : *Helmholtz resonator, Series-coupled resonators, Sound absorption, FDTD*

ヘルムホルツ共鳴器, 連立共鳴器, 吸音, 時間領域差分法

1. はじめに

近年, 一般家庭にもシアタールームやリスニングルームが普及しつつある. このような小空間では低音域の音がブンブンと不快に響くブーミングなどの音響障害が発生しやすい. それを防止するためには低音域における十分な吸音が必要となる. しかし, 一般的に用いられるグラスウールなどの多孔質吸音材によって低音域を吸音するには大きな背後空気層を設ける必要があり, 小空間では空間を圧迫するという問題がある. そこで, 当研究室ではヘルムホルツ共鳴器に着目し, 低音を広帯域で吸音できる薄型共鳴器について検討している.

これまで, 共鳴器の頸部を胴部内に延長することで薄さを保ったまま低音域を吸音できること, 頸部を胴部内に

延長した共鳴器を複数組み合わせることで吸音域を広帯域化できることを示し, このような結果に基づいて, 厚さ 22 mm で 8 つの共鳴器を複合した吸音構造によって 125 ~ 300 Hz の帯域において優れた吸音性能を持たせることが可能であることを提示した¹⁾. しかし, 共鳴周波数以外の周波数域の吸音率が小さく, また吸音域においても周波数によっては落ち込みのある不均一な吸音特性となってしまうという課題が残った. そこで, 前報²⁾では共鳴器を連立させるというアイデアのもとに, 3 段の連立共鳴器によって 3 つの共鳴周波数で鋭く吸音させ, さらに, 共鳴器の開孔部を適切な流れ抵抗の多孔質材で塞ぐことで共鳴周波数の山を広げて低音域で滑らかな吸音特性を有する共鳴器が実現できることを示した. しかし, これらの共鳴器は厚さが 154 mm となり, 本研究が目指している小空間の使用には適さない.

以上を踏まえて, 本研究では, 低音域で滑らかな吸音特

* 空間システム専攻 修士課程

** 都市・建築学部門

性を有しながら薄い形状の吸音構造とすることを目的に、共鳴器の形状や多孔質材の設置方法について検討した。

2. 解析手法と共鳴器の基本形状

2.1 解析手法

解析には時間領域差分法 (以下 FDTD と表記) ³⁾ を用いた。図 1 に示すような音響管を模した音場を想定し、“Sound Source” の位置で平面波を初期音圧として与え、“Recieve Point”(16 点) におけるインパルス応答を、左端に共鳴器を設置する場合としない場合それぞれについて求め、そのエネルギー比から垂直入射吸音率 α_0 を求めた。計算条件は解析周波数を考慮し、空間離散幅 2mm、時間離散幅 0.001 ms とし、無反射端には Adaptive PML ⁴⁾ を設定した。また、多孔質材を設置する場合の吸音モデルは Rayleigh モデル ⁵⁾ を採用した。

2.2 共鳴器の基本形状

検討に用いた共鳴器の基本形状を図 2 に示す。大きさは全体で 304 mm × 304 mm、枠材を 12 mm とし、厚さは全体で 26 mm、表面材と裏材を 2 mm とした。また、FDTD による解析でヘルムホルツ共鳴器の内部に特定周波数の音が留まることが確認できており、実際には留まった音のエネルギーが空気摩擦などによって消費されていると思われるが、FDTD ではそれを考慮できないためいずれ共鳴器の外部に音が出て行ってしまふ。そこで、留まった音のエネルギーを消費するための減衰項として、共鳴器内部には単位面積流れ抵抗が 56,960 N·s/m⁴ の多孔質材 (密度 96 kg/m³ のグラスウールに相当、図中では省略) を設置し、疑似的にヘルムホルツ共鳴器の吸音を再現した。

3. 薄型単一共鳴器

3.1 薄型単一共鳴器の吸音特性

厚さ 26 mm の薄い形状でも共鳴器としての吸音特性が現れるか確認するため、図 3 に示すような開孔部が 20 mm × 20 mm の薄型単一共鳴器の吸音特性を調べた。薄型単一共鳴器において開孔部を多孔質材で塞いだ場合に共鳴周波数の山が広がるか確認するため、開孔部に多孔質材を設置しない場合 (Case 1)、単位面積流れ抵抗が 6,093 N·s/m⁴ の多孔質材 (密度 16 kg/m³ のグラスウールに相当、以下 GW16K と表記) 2 mm で塞いだ場合 (Case 2) の 2 ケースについて検討し、吸音特性を比較した。

結果を図 4 に示す。Case 1 では共鳴周波数で鋭く吸音する共鳴器の吸音特性が現れ、Case 2 では吸音率は共鳴周波数付近では少し小さくなるが、周辺では大きく上昇している。以上から、厚さ 26 mm の薄型単一共鳴器でも共鳴器としての吸音特性が現れること、開孔部を多孔質材で

塞ぐことで共鳴周波数の山が広がることが分かった。

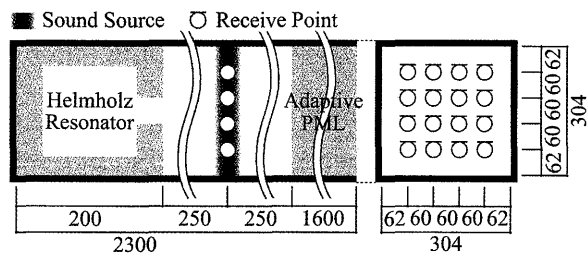


図 1 解析音場

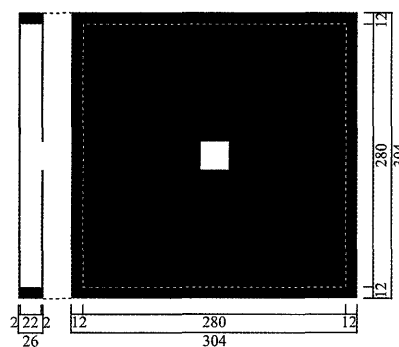


図 2 共鳴器の基本形状

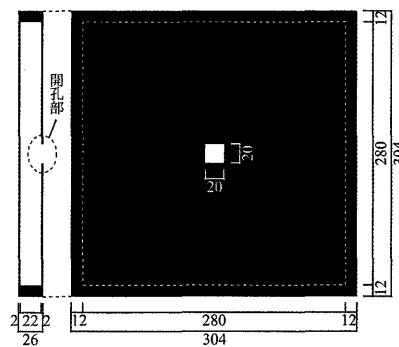


図 3 薄型単一共鳴器

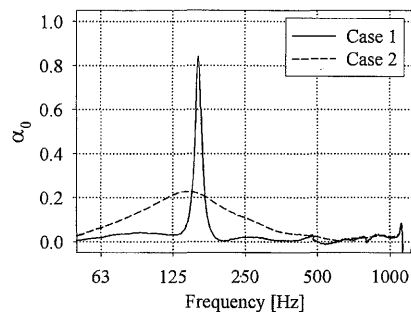


図 4 薄型単一共鳴器の吸音特性

3.2 FDTDによる解析の有効性検証

FDTDによる薄型単一共鳴器の吸音特性解析の有効性を確認するため、数値解析による垂直入射吸音率 α_0 を音響管 (B&K Type 4206) を用いた測定結果と比較した。共鳴器は図5に示すような頸部長さ4 mm、胴部厚さ22 mmの薄型単一共鳴器とし、多孔質材を設置しない場合 (Case 3)、開孔部始端を単位面積流れ抵抗が $7,680 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^4$ の多孔質材 (密度 $24 \text{ kg}/\text{m}^3$ のグラスウールに相当) 2 mm で塞いだ場合 (Case 4) の2ケースの吸音特性を求めた。実測に用いた共鳴器は、図6に示すように剛壁部分を天然ゴムとアクリル板、開孔部をアルミ角管によって製作し、多孔質材には密度 $24 \text{ kg}/\text{m}^3$ のグラスウールを使用した。

結果を図7に示す。Case 3では、計算値、測定値ともに共鳴周波数において鋭く吸音する共鳴器の吸音特性が現れている。Case 4では、計算値、測定値ともに共鳴周波数周辺で吸音率が大きく上昇している。また、どちらの場合も計算値と測定値の共鳴周波数は概ね一致している。なお、測定値の300 Hz付近に現れている吸音率0.2程度の小さな山は、ゴム板の板振動による吸音であると推察される。

以上から、測定においても、薄型単一共鳴器が共鳴器としての吸音特性を有すること、開孔部を多孔質材で塞ぐことで共鳴周波数の山が広がることが確認でき、FDTDの有効性が示された。

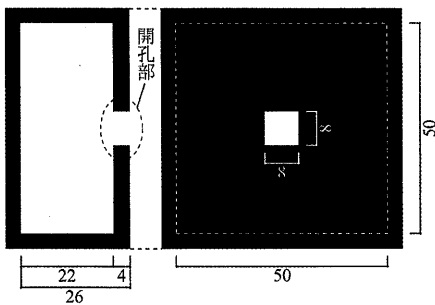


図5 検証に用いた共鳴器

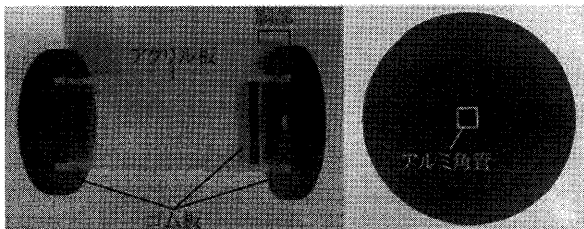
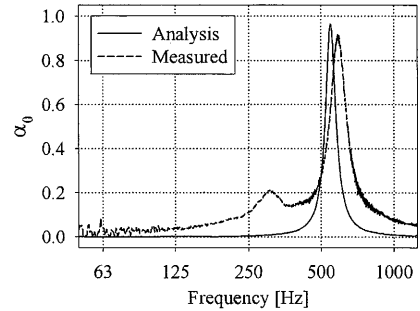
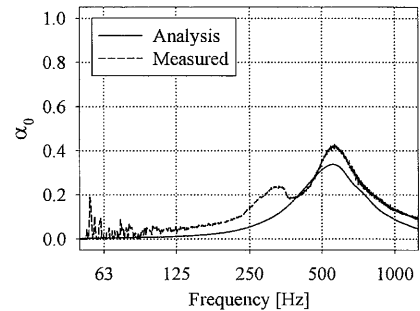


図6 測定に用いた薄型単一共鳴器



Case 3



Case 4

図7 計算値と測定値の比較

4. 薄型連立共鳴器

4.1 2段連立共鳴器

厚さ26 mmの薄い2段連立共鳴器で2つの共鳴周波数を有するか確認するため、図8に示すような2段薄型連立共鳴器の吸音特性を調べた。2段薄型連立共鳴器において開孔部を多孔質材で塞いだ場合の吸音特性への影響を見るため、多孔質材を設置しない場合 (Case 5)、厚さ2 mmのGW16Kで第1共鳴器の開孔部を塞いだ場合 (Case 6)、第2共鳴器の開孔部始端を塞いだ場合 (Case 7)、すべての開孔部を塞いだ場合 (Case 8) の4ケースについて検討し、吸音特性を比較した。

結果を図9に示す。Case 5では、2つの共鳴周波数で鋭く吸音していることが分かる。また、Case 6, 7, 8の吸音率は、いずれも共鳴周波数付近では設置しない場合より小さくなり、共鳴周波数周辺では上昇している。しかし、Case 7, 8では低域側の共鳴周波数付近の吸音率が0.1程度まで小さくなっている。それに対し、Case 6では2つの共鳴周波数付近の吸音率がそれぞれ0.4程度となっている。

以上から、厚さ26 mmの2段薄型連立共鳴器でも2つの共鳴周波数を有すること、第1共鳴器の開孔部を多孔質材で塞ぐことで、共鳴周波数の山を広げながらも2つの共鳴周波数の吸音率が0.4程度の吸音特性にできることが示された。

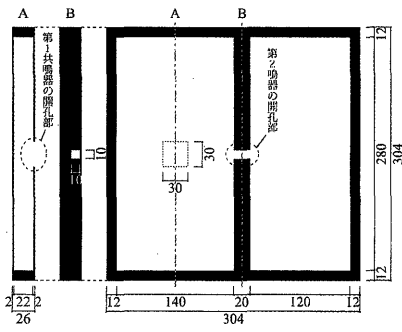


図 8 2 段薄型連立共鳴器

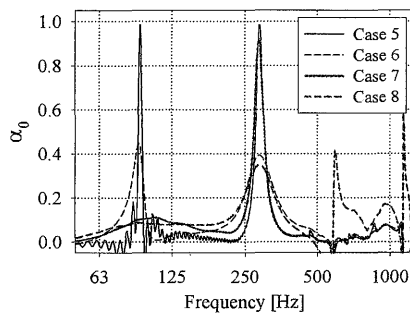


図 9 2 段薄型連立共鳴器の吸音特性

4.2 2つの第2共鳴器を有する2段連立共鳴器

2段薄型連立共鳴器の有効性と開孔部を多孔質材で塞いだ場合の効果を確認できた。そこで、共鳴周波数を増加させ吸音域を広域化するために、図10に示すような2段薄型連立共鳴器の第2共鳴器を2つに増加させた場合の吸音特性を調べた。なお、4.1の結果を考慮し、第1共鳴器の開孔部を厚さ2mmのGW16Kで塞いだ。

結果を図11に示す。3つの共鳴周波数を有し、それぞれの共鳴周波数付近の吸音率が0.4程度となっている。

このことから、2段薄型連立共鳴器の第2共鳴器を2つに増加させることで、共鳴周波数を3つとし、吸音域の広域化に繋がること示唆された。

4.3 4つの第2共鳴器を有する2段連立共鳴器

2つの複合2段薄型連立共鳴器の有効性が確認できたので、次に、さらに共鳴周波数を増加させ吸音域をより広域化するために、図12に示すような2段薄型連立共鳴器の第2共鳴器を4つに増加させた場合の吸音特性を調べた。第2共鳴器の頸部長さ、胴部体積が異なる場合 (Case 9)、胴部体積だけが異なる場合 (Case 10) の2ケースについて検討した。なお、4.1の結果を考慮し、第1共鳴器の開孔部を厚さ2mmのGW16Kで塞いだ。

結果を図13に示す。Case 9, 10ともに吸音率に差はあるものの、5つの共鳴周波数を有していることが分かる。

このことから、2段薄型連立共鳴器の第2共鳴器を4つに増加させることで、共鳴周波数を5つとし、吸音域の広域化に繋がること示唆された。

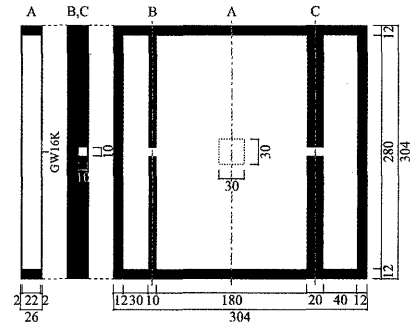


図 10 2つの第2共鳴器を有する2段連立共鳴器

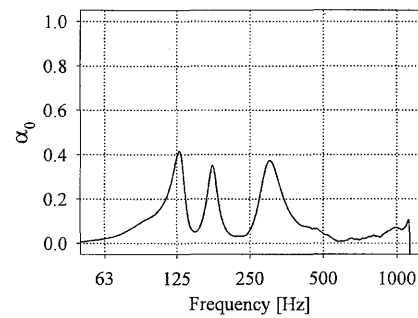
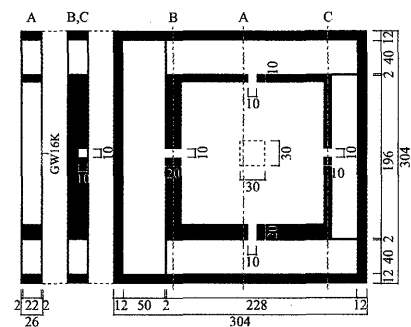
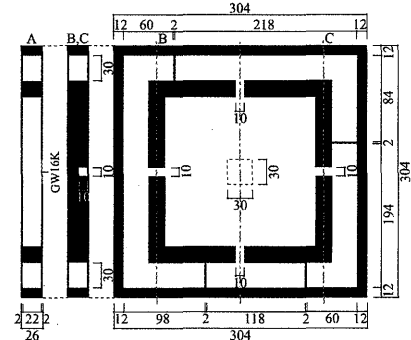


図 11 2つの第2共鳴器を有する連立共鳴器の吸音特性

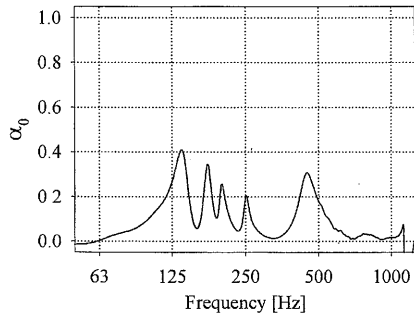


Case 9

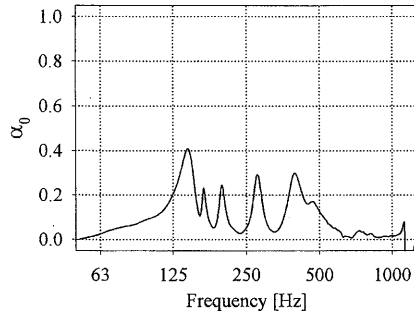


Case 10

図 12 4つの第2共鳴器を有する2段連立共鳴器



Case 9



Case 10

図 13 4 つの第 2 共鳴器を有する連立共鳴器の吸音特性

5. 連立共鳴器による薄型吸音パネル

5.1 薄型吸音パネルの製作

4. までの結果を基に薄型吸音パネルを設計した。パネル 1 枚の寸法は、図 14 に示すように、大きさを 921 mm × 627 mm、厚さを 27 mm とした。パネルの内部は、125 ~ 500 Hz の吸音を目標として、形状が異なる Type A, B, C の連立共鳴器 (第 2 共鳴器を 4 つ有する) 各 2 個を隣合わないよう配置した合計 6 つの連立共鳴器から構成した。また各共鳴器の開孔部は単位面積流れ抵抗が 8,000 N·s/m⁴ 程度の多孔質材 (ポリエステル製フェルト、流れ抵抗は実測値) で塞いだ。製作した薄型吸音パネルの外観を図 15 に示す。パネルは、共鳴器内部に多孔質材を設置しない場合 (Panel 1) と第 1 共鳴器内部に胴部体積の半分程度の多孔質材 (ポリウール⁶⁾) を設置した場合 (Panel 2) の計 2 種類を製作した。

5.2 残響室法吸音率

九州大学残響室⁷⁾において、薄型吸音パネル (Panel 1, 2) の残響室法吸音率を JIS A1409 に基づいて測定した。結果を図 16 に示す。Panel 1, 2 ともに目標の 250 ~ 500 Hz において 0.4 程度の吸音率となり、Panel 2 の方が 250 Hz において吸音率が 0.07 程度大きくなった。なお、125 Hz の吸音率の測定結果は、測定に用いた残響室の容積が JIS を満たしていないことから参考値とする。

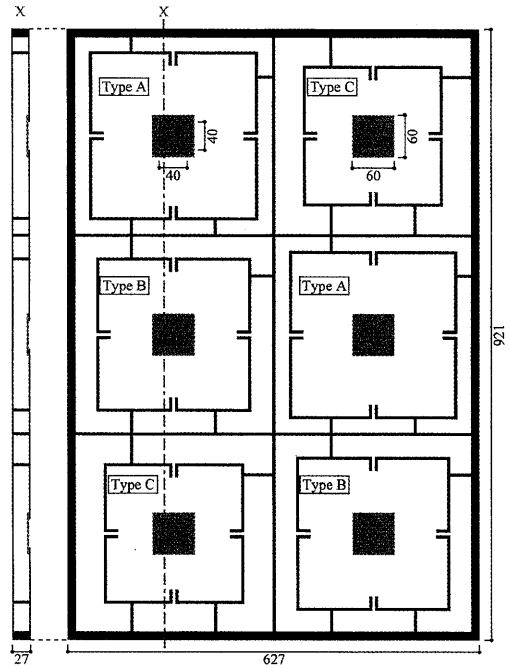


図 14 薄型吸音パネルの形状

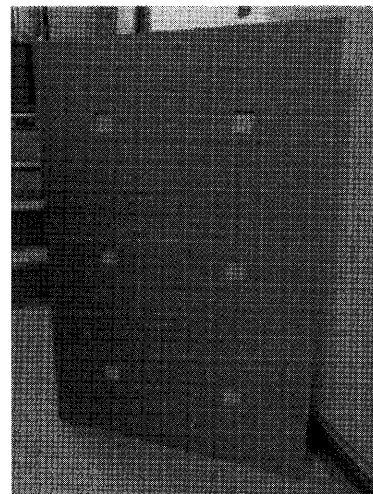


図 15 薄型吸音パネル

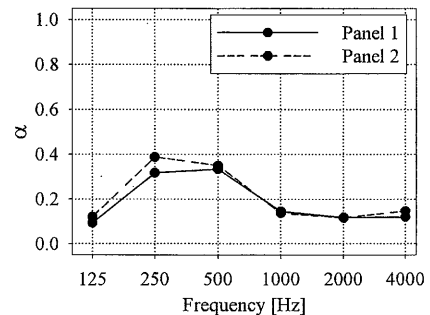


図 16 薄型吸音パネルの残響室法吸音率

6. 薄型吸音パネルの小空間への適用

製作した薄型吸音パネルを小空間に適用した場合の効果を確認するため、九州大学箱崎キャンパス内「GP 棟会議室」にパネルを設置して残響時間を測定し、設置しない場合（現状）と比較した。

6.1 検討に用いた小空間

GP 棟会議室の諸元を表 1、平面図を図 17 に示す。この会議室はほぼ直方体で、室内はほとんど反射性の材料でできており、使用時も“音が響く”と感じられる空間である。

表 1 GP 棟会議室の諸元

床面積	48.4 m ²
表面積	220.6 m ²
室容積	117.6 m ³

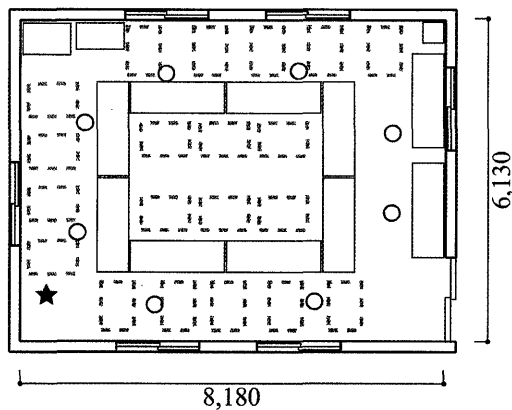
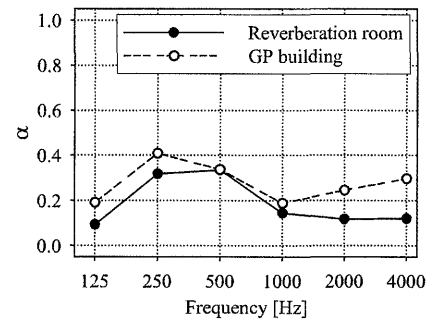


図 17 GP 棟会議室の平面図

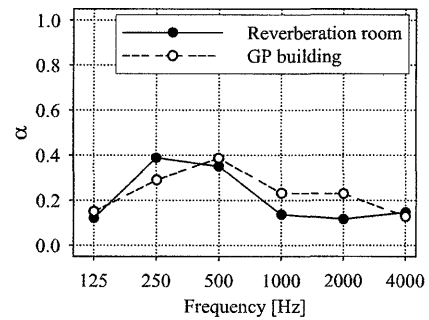
6.2 薄型吸音パネルの吸音効果

薄型吸音パネル 20 枚を図 17 の点線の位置（床の上）に設置し、★に設置した無指向性 12 面体スピーカよりスイープパルス音源を発生させ、○の受音点（8 点）に設置した無指向性マイクロフォンを用いてインパルス応答を測定した。測定は、パネルを設置しない場合、Panel 1 を設置した場合、Panel 2 を設置した場合の 3 ケースについて行い、得られたインパルス応答から室の残響時間を求め、残響時間の値から薄型吸音パネルの“みかけの吸音率”を算出した。結果を図 18 に示す。Panel 1, 2 とも残響室法吸音率よりわずかに大きめの値であった。

残響時間の測定値から GP 棟会議室の平均吸音率 $\bar{\alpha}$ を求めた（図 19）。パネルの設置によって平均吸音率はわずかに上昇しているが、パネルの吸音率が大きい 250 ~ 500 Hz においても 0.015 程度の上昇に過ぎず、また Panel 1, 2



Panel 1



Panel 2

図 18 薄型吸音パネルのみかけの吸音率

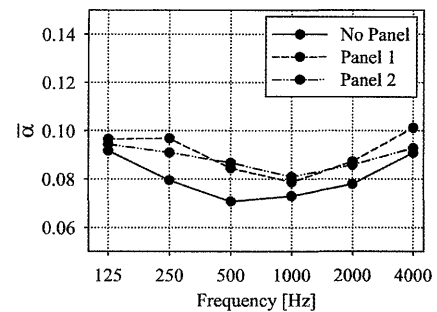


図 19 会議室の平均吸音率

の差もそれほど現れていない。一般に会議室の平均吸音率は 0.2 ~ 0.25 程度が望ましいとされているので、今回の薄型吸音パネルを 20 枚設置しても GP 棟会議室の吸音はまだ不足している。すなわち、GP 棟会議室を今回製作した薄型吸音パネル 20 枚程度によって吸音し適切な室内音響とするには、パネルの吸音性能をさらに向上させなければならない。

7. まとめ

小空間に適用する薄型低音域用吸音構造の開発を目指して、低音域を滑らかに吸音する連立共鳴器による吸音構造の薄型化について検討し、2 段薄型連立共鳴器の第 2 共鳴器を 4 つとすることで共鳴周波数の山が 5 つとなることを数値解析によって示した。そして、その結果を基に

125～500Hzの吸音を目標として、厚さ27mmで第2共鳴器を4つ有する2段薄型連立共鳴器を3種類組み合わせた薄型吸音パネルを作成した。試作した吸音パネルの残響室法吸音率は、250～500Hzにおいて0.4程度の吸音率となった。さらに、試作したパネルを室容積117m³の会議室に設置して吸音効果を調べた。実際の室で得られたパネルの“見かけの吸音率”は、残響室法吸音率にほぼ等しい値となったが、検討対象の会議室の平均吸音率を望ましい値とするには吸音性能が足りないという結果であった。

今後は共鳴器の形状をさらに検討し、吸音率の向上を図りたい。

謝辞

残響室法吸音率の測定、GP棟会議室の残響時間の測定には大庭ゆかり氏(九州大学大学院修士課程)と堀智貴氏(九州大学4年)の協力を得た。記して感謝します。

参考文献

- 1) 金子芳人, 川上徹晃, 川口卓郎, 藤本一壽: ヘルムホルツ共鳴器の頸部延長による低音域用薄型吸音構造, 九州大学大学院人間環境学研究院紀要 第24号, pp.73-77, 2013年7月
- 2) 川上徹晃, 川口卓郎, 藤本一壽: 共鳴器の多段化と共鳴器内部への多孔質材の設置, 九州大学大学院人間環境学研究院紀要 第26号, pp.55-63, 2014年7月
- 3) 坂本慎一, 橋秀樹: 差分法による2次元音場の過渡応答の数値計算, 日本建築学会講演梗概集(環境工学), pp.1757-1758, 1994年9月
- 4) 坂本慎一: 音波の進行方向に適応したPML無反射境界, 日本音響学会研究発表会講演論文集(秋), pp.909-910, 2005年9月
- 5) John William Strutt, Baron Rayleigh: Theory of Sound, Vol.II, The Macmillan Company, 1929
- 6) 藤本一壽, 穴井謙, 古賀新一: ポリエステル不織布を用いた吸音材の開発, 九州大学大学院人間環境学研究院紀要 第9号, pp.67-74, 2006年1月
- 7) 加来哲彦, 藤本一壽, 坂田展甫: 吊り下げ板による残響室の拡散性能改善に関する検討, 日本建築学会中国・九州支部研究報告 第5号, pp.93-96, 1981年3月

(受理: 平成26年11月13日)