

2. 音響メタマテリアルを用いた吸音技術

2.4 オフィス空間に実装された音響メタマテリアルの効果とその予測手法

*Evaluation and Prediction of Acoustic Metamaterials
Performance in Office Environments*

平良 優大 (Yudai Taira)

五味 蔵酒 (Masaki Gomi)

長谷 芳樹 (Yoshiki Nagatani)

ピクシーダストテクノロジーズ株式会社
(Pixie Dust Technologies, Inc.)

1. はじめに

メタマテリアルとは波長以下の微細構造を周期的に並べて作製する人工構造物である¹⁾。音響メタマテリアルを含むメタマテリアルの特性は、材料物性ではなくその構造に依存して決まり、材料選択の自由度が高い。したがって特に波長の長い音響分野におけるメタマテリアルは3Dプリンタ等を用いた試作との相性がよく、3Dプリンタで試作、評価された報告事例は多い²⁾。一方でオフィスなどの実空間へ導入を検討するとき、音響メタマテリアルの大面積化が課題となる。本稿では、量産性に優れた射出成形で製造した音響メタマテリアルの評価(第2章)と、実空間であるブース(第3章)と会議室(第4章)における音響メタマテリアルの導入事例、およびその効果と予測手法について説明する。

2. 音響メタマテリアル吸音材とその物性評価

2.1 音響メタマテリアル吸音材について

本稿で用いる音響メタマテリアルは穿孔板と背後空気層からなる共鳴器を複数並べたもので構成される。各共鳴器は異なる共鳴周波数をもつように設計されており、複数の共鳴器を組み合わせることで広帯域を吸音できる。1つの共鳴器の共鳴周波数は穿孔板の穴径、穴数、穴の深さ、背後空気層の厚みで決定する³⁾。図1に示す音響メタマテリアル(AMM-CB, Pixie Dust Technologies 試作機)は背後空気層が迷路上に組み合わさっている。これにより全体の厚みを薄く保ったまま背後空気層の長さにバリエーションを持たせ、吸音帯域の広帯域化を実現している。

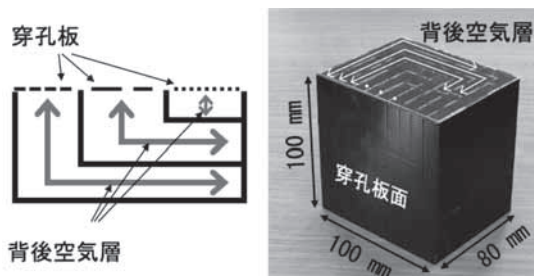


図1 迷路状の背後空気層をもつ音響メタマテリアル(AMM-CB)

また図2に示す音響メタマテリアル(iwasemi HX-a, Pixie Dust Technologies, 以後AMM-HX)は孔を全面に配置するのではなく、共鳴器の一端に偏らせて分布させている。これによりさらに薄い外形厚みで背後空気層の長さにバリエーションをもたせることができる。さらにこの構造では正面から見たときに壁が幾重にも連ならない。したがって、例えば透明な樹脂を用いて製造すれば高い透明度をもった吸音パネルを作製することができるなど、自由度が高い。

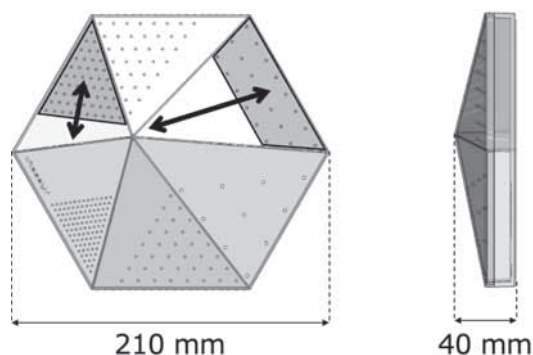


図2 透明樹脂で作製された音響メタマテリアル(AMM-HX)

2.2 音響メタマテリアルの吸音性能評価

音響メタマテリアルの吸音性能は一般的な吸音材と同様に音響管による垂直入射吸音率⁴⁾、残響室を用いたランダム入射の吸音率⁵⁾で評価される。音響管を用いた吸音性能の評価は小さな面積でサンプルの評価が可能のため、射出成形金型を起こす前の設計評価や金型を微調整する際の目安にする評価として適している。市販の音響管ではサイズが合わなかったため、本稿では自作の音響管を使用した結果を紹介している。自作音響管の概略図と各寸法は図3に掲載している。

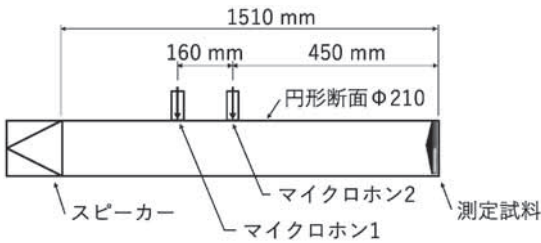


図3 自作音響管の概略図

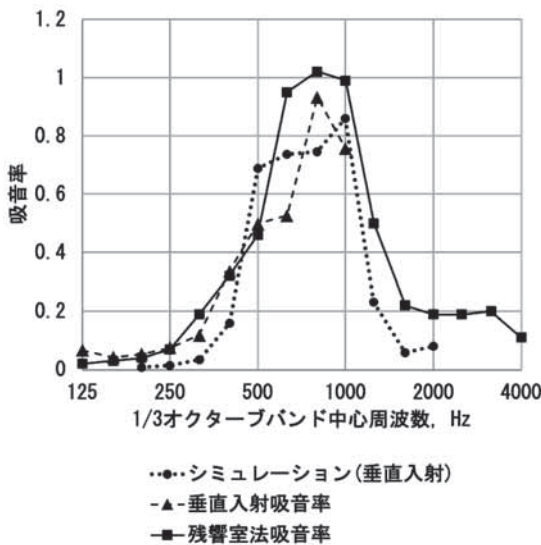


図4 AMM-HXの吸音性能

残響室法吸音率は評価するサンプルが小さいと測定結果が安定しない課題があるため、量産が可能な状態になった後に測定を行った。図4はAMM-HXの垂直入射シミュレーション結果(FEM)、音響管での測定結果、および残響室法吸音率の測定結果を示している。吸音設計帯域である500～1000 Hzにおいて高い吸音率を示すことが確認できる⁶⁾。

3. 音響メタマテリアルブースの音漏れ評価

ところで、個別の作業空間として利用されるブースやパーティションは天井や壁の一部が開放されていることで、消防法の要求を満たしながらオフィス空間に設置できることが魅力である。しかしその反面、ブース内から周囲への音漏れが課題となる。そこで、ブースの壁面に音響メタマテリアルを設置することで、従来ブースと比較して周囲への音漏れを低減できる可能性があると考え、ブースを試作して評価をおこなった。

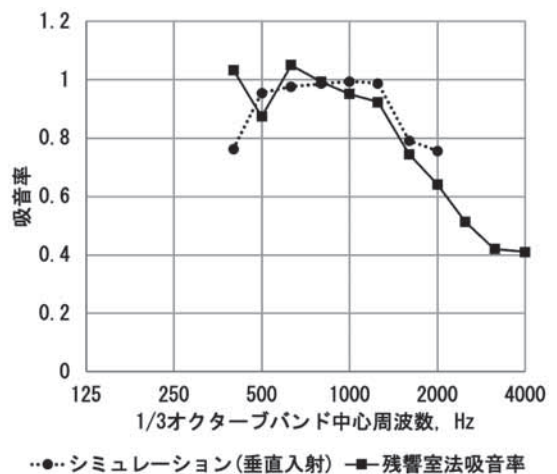

写真1 AMM-CBが設置されたブース内
ブース内壁の黒いブロック状のものがAMM-CB


図5 AMM-CBの吸音性能

試作したブースは後に既存ブースと性能比較することを想定し、音響メタマテリアルを内壁に設置したとき、ブース内壁が既存ブースとおおよそ等しくなるように設計した(ブース内寸法1054(W)×1054(D)×1892(H))。ここではブース内壁にAMM-CBを設置し(写真1)、ブースからの音漏れについて調査した結果について説明する。ここで用いるAMM-CBは10個の共鳴器から構成されており、AMM-HXと比較して吸音帯域の広帯域化に有利である。図5はAMM-CBの垂直入射吸音率のシミュレーション結果と残響室法吸音率を示している。400～2000 Hzの帯域における平均吸音率はシミュレーション、残響室法吸音率ともに0.9を示す。

3.1 ブース内から外への伝達関数の計測

まず、ブース内からの音漏れを評価するため、伝達関数を計測した。図6に音漏れ評価時のセットアップ

2.4 オフィス空間に実装された音響メタマテリアルの効果とその予測手法

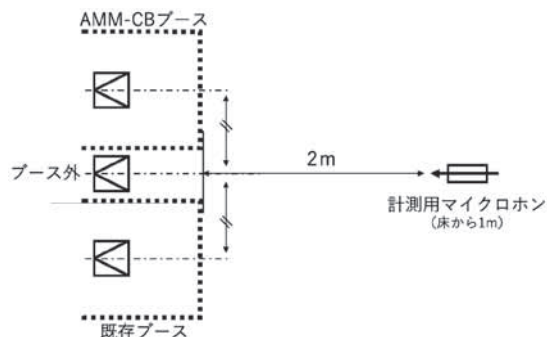


図6 音漏れ評価時のセットアップ

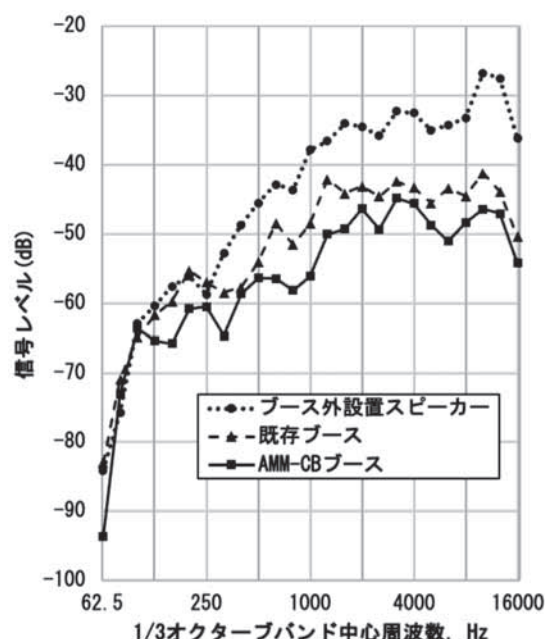


図7 受信信号の周波数特性

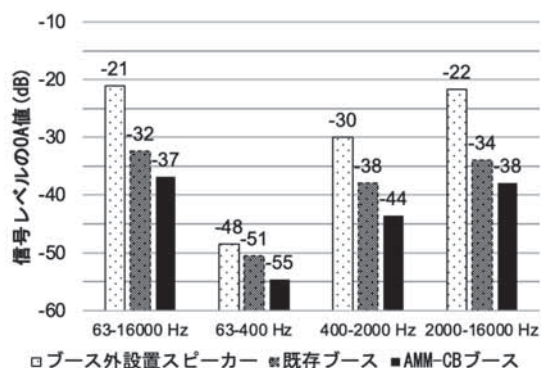


図8 受信信号の各周波数バンドでのOA値

を掲載している。音響性能を比較するため、AMM-CBブースと既存ブースを用意した。ブース内にはそれぞれ話者の位置を想定してスピーカーを設置し、また2つのブースの間に単体のスピーカーを設置した。各スピーカーからLog-TSP信号を再生し、ブースの壁から2 m先に設置したマイクロホンで録音した。

図7, 8はマイクロホンで録音した信号の周波数特性とAMM-CBの吸音帯域とその前後で区切ったバンドでOverall値(OA値)を計算した結果を掲載している。AMM-CBで構成されたブースは既存ブースと比較してどのバンドにおいても音漏れ量が少ない。特にAMM-CBの吸音率が高い帯域(図5)である400 ~ 2000Hzにおいては、漏れ伝わる信号レベルの差が最も大きく、6 dB程度小さい。

3.2 漏れ出し音の音声明瞭度評価

次に聴衆者を募り漏れ出し音の明瞭度評価を行った。聴衆者は横並びに設置されたブースの正面、距離2 mの位置に着座し、漏れ出し音を聞き取った。ブース内のスピーカーからは音声コーパス(NTT・東北大、親密度別単語理解度試験用音声データセット(FW03))⁷⁾に含まれる単音節音声⁸⁾をランダムに選択し、5パターンの再生レベル(等価騒音レベル54 dBから6 dB刻みで最大78 dB)で再生した。また図9に示すようにブース外に設置したスピーカーからは、評価中のノイズレベルを一定に保つために模擬雑踏音を再生した。雑踏音の音量は50 dBで再生した。それぞれの音声の再生レベルは無響室内でスピーカー正面1 mの位置で調整したレベルを用いた。

図10は聴衆者3人の正答率を明瞭度として音声再生レベル毎にプロットしている。音響メタマテリアルで構成されるブースはすべての再生レベルで正答率が既

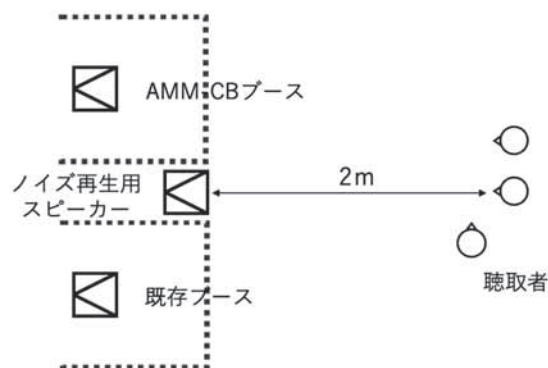


図9 音漏れの明瞭度評価時セットアップ

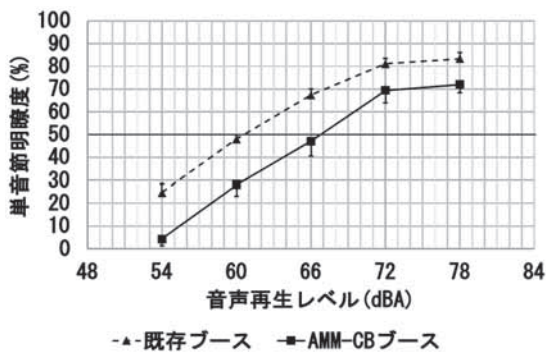


図10 ブース漏れ出し音の明瞭度

存ブースを下回っていることがわかる。これは音響メタマテリアルブース内での会話が外部で相対的に聞き取りづらい状態になっていることを示唆している。また同じ正答率を示すために必要な音声提示レベルと比較し、秘話性の視点で考察する。正解率50%を満たすためには音響メタマテリアルブースで約66 dBのレベルで音声を再生する必要がある。既存ブースで約60 dBに対し、6 dB程度再生レベルを大きくする必要がある。つまり音響メタマテリアルブース内にいる人は既存ブース内にいるときより6 dBだけ大きく発声をして漏れ出る情報量は変わらないことを意味する。他方、この6 dBの再生レベル差は、全帯域、または400 ~ 2000 Hz帯域における信号レベル差に相当する(図8)。これらのことから、音響メタマテリアルによる音圧レベルの低減が明瞭度低下に寄与した可能性が示されたと言えよう。

4. 会議室に設置された音響メタマテリアルの評価

ガラス張りの壁やコンクリート打ちっばなしのスケルトン天井などの素材は抜け感や硬質な意匠表現を重視した会議室をデザインする際に多く用いられる。一方、多孔質材やファブリックなどの吸音材は、こうした意匠を損ねる懸念から利用が控えられることがあり、室内の吸音力の不足から、音響環境の悪化が課題となっている。このような状況において、素材の選択自由度が高い音響メタマテリアルは有効な選択肢である可能性がある。ここでは実際の会議室へ音響メタマテリアル吸音パネルの導入、評価した結果について説明する。

4.1 会議室への施工と測定のセットアップ

写真2は実際の会議室に施工されたAMM-HXの施



写真2 ガラス張りの会議室Aに施工されたAMM-HX

工写真である⁹⁾。本会議室はガラスで囲われており、会議室外から室内を通して見ることがができるため開放感のある会議室である。AMM-HXはガラス面に施工されているが、ガラスの透明感や開放感を損なわないよう設置された。

表1 会議室の部屋サイズと音響メタマテリアルの導入数

	部屋寸法	導入数
会議室A	3.3×2.8×3.0 (H)	128
会議室B	2.9×5.8×2.8 (H)	135
会議室C	2.9×2.9×2.8 (H)	120

同様の部屋を3部屋用意し、AMM-HXを施工した。部屋の寸法は表1に示す通りでいずれの部屋も直方体形状の部屋である。設置する音響メタマテリアルの数は部屋のサイズとデザイン性を考慮して決定した。室内の残響時間を測定するため、スピーカーとマイクロホン、FFTアナライザを用いた。測定は吸音パネルの施工前と後で実施した。再生音源はピンクノイズとし、残響時間を計測した。計測した結果を図11に示す。3部屋すべて共通して、AMM-HXの吸音設計周波数である500 ~ 1000 Hz(図4)において、残響時間が大きく低減していることがわかる。会話帯域における残響が低減されていることから、会話のしやすさが向上していることが期待される¹⁰⁾。

4.2. 残響時間の予測方法について

吸音パネルは設置する枚数に応じて室内の吸音力が向上し、それが残響時間の低減に寄与する。意匠性と音響性能の両立を図りながら吸音パネルの設置を検討する際、設置する吸音パネルの枚数は重要なパラメータになる。ここで説明する予測手法では、設置予定の吸音パネルの枚数から設置後の残響時間を推定する¹¹⁾。これにより、適切な吸音パネルの導入枚数を明確にし、

2.4 オフィス空間に実装された音響メタマテリアルの効果とその予測手法

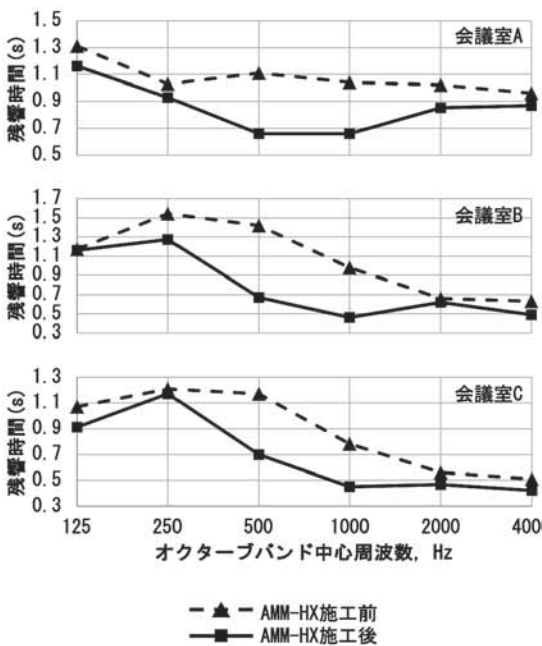


図11 AMM-HX施工前後の残響時間の比較

顧客に対して具体的な判断基準を提供することができる。図12は予測手法の手順を示している。この予測手法では設置を検討している室の情報として、設置前の残響時間と室寸法から導く室容積、室内表面積のみが必要であり、複雑なモデリングなどを必要としない。Sabineの式(1)¹²⁾によると、残響時間スペクトル T は室内の等価吸音面積を $S\bar{a}(f)$ と次の関係式で示される。ここで V は部屋の容積、 S は部屋の表面積である。式を $\bar{a}(f)S$ について解くと残響時間から室内の平均吸音率が求められる(式(2))。

$$T(f) = \frac{0.161V}{\bar{a}(f)S} \quad (1)$$

$$\bar{a}(f)S = \frac{0.161V}{T(f)} \quad (2)$$

音響メタマテリアルを設置することにより、室内の平均吸音率が設置する音響メタマテリアルの面積分だけ置き換わる。したがって設置後の室内の平均吸音率は音響メタマテリアルの残響室法吸音率 $\bar{a}_M$ を用いて次のように示される(式(3))。

$$\bar{a}(f)S = \bar{a}(f)(S - S_M) + \bar{a}_M(f)S_M \quad (3)$$

たとえばAMM-HXを配置した際は、 $\bar{a}_M$ には図4で計測された残響室法吸音率を代入する。またここで、

ガラスやコンクリートは吸音率が十分小さく、設置する音響メタマテリアルはすべての周波数でそれを上回っていることから、それらの面に音響メタマテリアルを設置する場合、室内の平均吸音率は音響メタマテリアルの設置面積分増加すると考えられ、設置後の室内の平均吸音率を次のように示される(式(4))。

$$\bar{a}(f)S = \bar{a}(f)S + \bar{a}_M(f)S_M \quad (4)$$

式(4)により算出した平均吸音率をSabineの式(式(1))に代入することで、設置後の残響時間を推定することができる。本予測手法で推定した設置後の残響時間と実際に測定した設置後の残響時間の比較を図13に示す。測定した3つの部屋全てにおいて、実測値を高

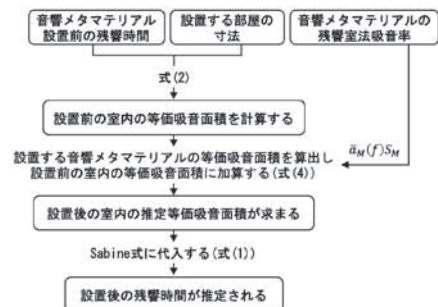


図12 音響メタマテリアル設置後の残響時間予測方法

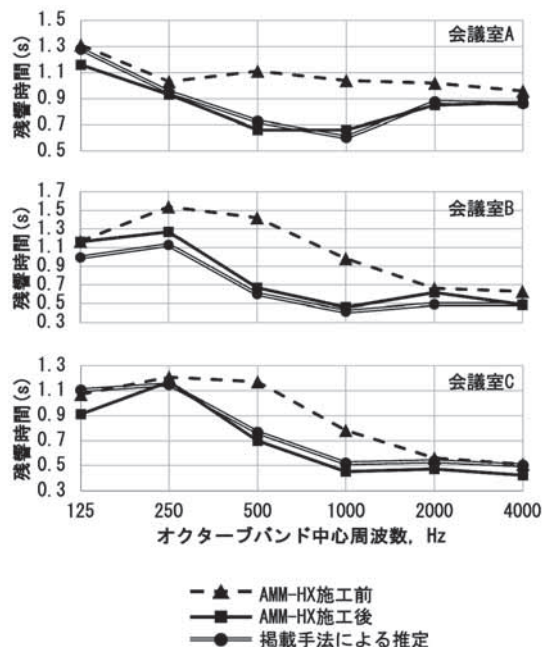


図13 残響時間の推定値と実測値の比較

い精度で予測できていることがわかる。

さらに、別の会議室(5.0 m × 3.7 m × 2.7 m(H))において、施工する音響メタマテリアルの数を水準として、残響時間の推移を測定した。会議室は直方体形状で、壁はスチールパーティションで構成されている。吸音パネルの着脱を容易にするためマグネットで壁に接合可能な音響メタマテリアル(iwasemi SQ- α , Pixie Dust Technologies, 以後AMM-SQ)を用いた(図14)。

AMM-SQはAMM-HX同様、人の声を吸音することを狙い、500 ~ 1000 Hzで高い吸音率を示すように設計している(図15)。写真3はAMM-SQを各水準通りに施工した様子である。測定信号や残響時間の算出方法は4.1と同一である。各水準における残響時間を図

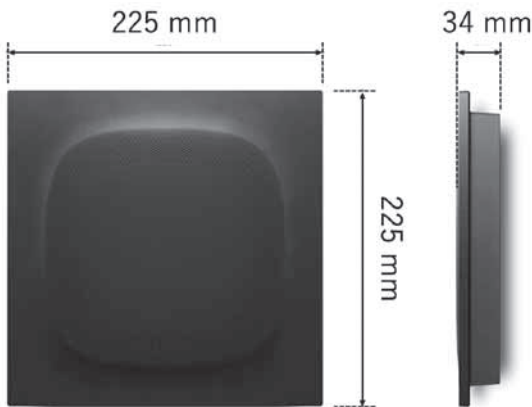


図14 AMM-SQのイメージ図

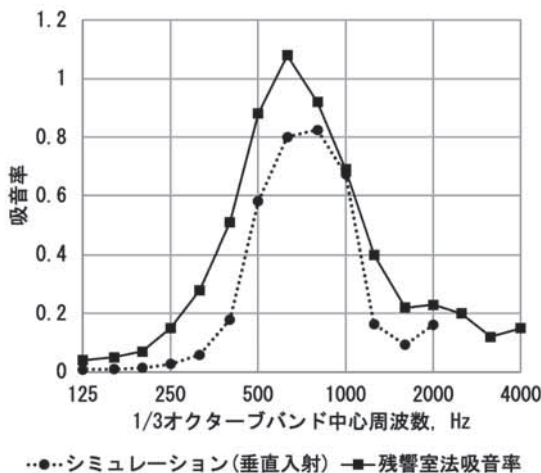


図15 AMM-SQの吸音性能

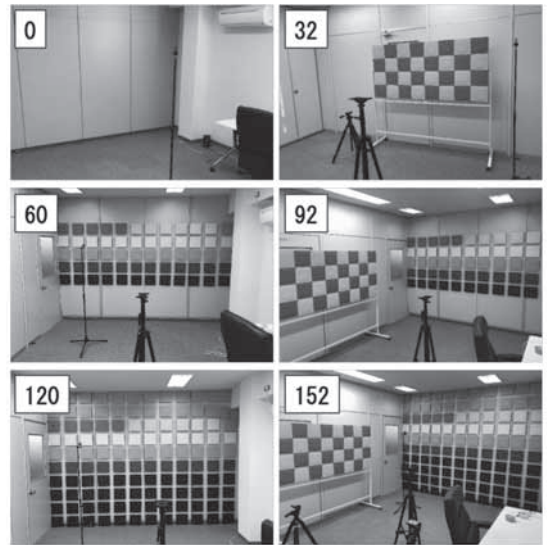


写真3 各水準に沿って設置されたAMM-SQ

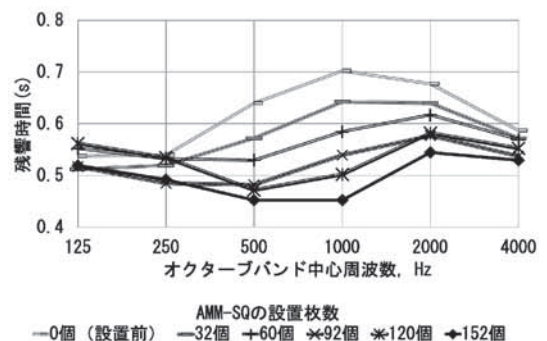


図16 各水準設置時の残響時間推移

16に示す。設置する音響メタマテリアルの数に応じて残響時間が変化しているおり、特に吸音率の高い500 ~ 1000 Hzにおける残響時間はパネルの枚数増加に対して単調減少していることが見て取れる。

次に、同会議室に音響メタマテリアルを設置する前の残響時間からAMM-SQを水準通り設置したときの残響時間を推定した。AMM-SQを設置したスチールパネルは十分吸音率が低いと考えられるため、式(4)を用いて設置後の等価吸音面積を見積もった。図17はAMM-SQをそれぞれ32個、152個設置したとき推定された残響時間と実際の残響時間を比較している。いずれの水準においても設置後の残響時間の推定値と実測値が近い傾向になっていることがわかる。

2.4 オフィス空間に実装された音響メタ材料の効果とその予測手法

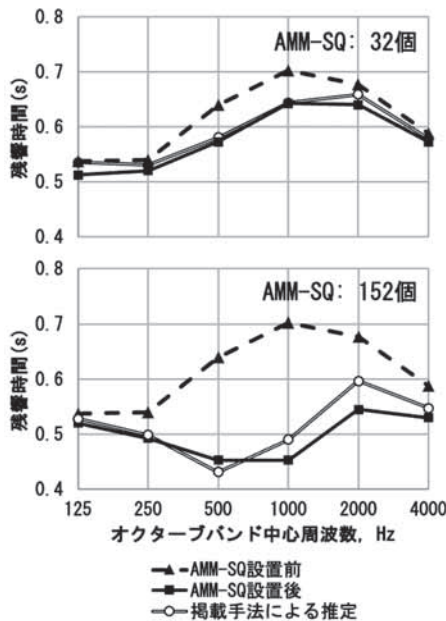
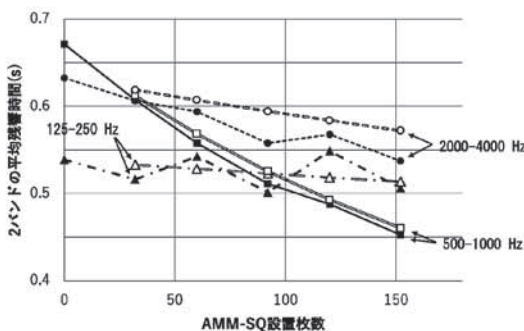


図17 AMM-SQ設置時の残響時間の推定値と実測値



実測値	▲ 125-250 Hz	■ 500-1000 Hz	● 2000-4000 Hz
推定値	△ 125-250 Hz	□ 500-1000 Hz	○ 2000-4000 Hz

図18 推定残響時間と測定した残響時間の推移比較

最後に、音響メタ材料の吸音率が高い500～1000 Hzの帯域とその前後の帯域(125～250 Hz, 2000～4000 Hz)でそれぞれ残響時間を平均し、水準に対する残響時間の推移をプロットした結果を図18に示す。図より、どの帯域においても、各水準に対する残響時

間の推移はよく予測できていることがわかる。

5. おわりに

本稿では音響メタ材料の設計、導入事例とともに、音響メタ材料を実空間に導入したときの効果について説明した。主たる内容について以下にまとめる。

- (1)音響メタ材料を用いたブースは従来ブースと比べ音漏れが小さく、秘話性が向上する。音響メタ材料による吸音が秘話性の向上に寄与している可能性が示されている(3章)。
- (2)透明な樹脂で作られた音響メタ材料は、ガラスがもつ開放感を損なわず、室内の残響時間を低減できる。また本稿の予測方法を用いれば音響メタ材料導入後の残響時間を精度よく予測することができる(4章)。

[参考文献]

- 1)Walser, R.M.: Metamaterials: An introduction, Introduction to ComplexMedia for Optics and Electromagnetics, (1), pp.295-316
- 2)Sibo Huang, et al.: Compact broadband acoustic sink with coherently coupled weak resonances, Science Bulletin 65, (5), pp. 373-379, 2020
- 3)D.-Y. Maa.: Potential of microperforated panel absorber, the Journal of the Acoustical Society of America, 104, (5), pp. 2861-2866, 1998
- 4)日本工業規格 JIS A 1405-2: 2007, 音響管による吸音率及びインピーダンスの測定-第2部: 伝達関数法
- 5)日本工業規格 JIS A 1409: 1998, 残響室法吸音率の測定方法
- 6)五味蔵酒: 音響メタ材料技術に応用した吸音材「iwaseemi」を用いてガラスに貼り付け可能な六角形型透明硬質吸音材, 日本音響学会講演論文集 pp. 1065-1066, 2023. 3
- 7)Shigeaki Amano, et al.: Development of familiarity-controlled word lists 2003 (FW03) to assess spoken-word intelligibility in Japanese, Speech Communication, 51, pp. 76-82, 2009
- 8)長谷 芳樹, 他: 親密度別単語了解度試験用音声データセット(FW03) 単語音声のラウドネス校正, 日本音響学会誌 64, 647-649, 2008
- 9)長谷 芳樹: 透明な音響メタ材料吸音材を貼り付けたガラス張り会議室の音響特性と音声明瞭の評価, 日本音響学会講演論文集 pp. 1067-1068, 2023. 3
- 10)佐藤 逸人, 他: 住宅の居室における残響音が会話に与える影響, 日本音響学会誌, 66, (11), pp. 541-551, 2010
- 11)Yudai Taira, et al.: The reduction of the reverberation using the sound-absorbing metamaterial in the conference rooms. Internoise, 2023
- 12)W.C. SABINE: Collected Papers on Acoustics, University Press Harvard, 1922; Reprinted by Dover, New York 1964