

## 論文の内容の要旨

論文題目：音響振動連成数値解析による積層型音響材料の部材性能予測に関する研究

(Study on prediction of the performances of multi-layered acoustic elements based on the vibro-acoustic numerical analysis)

氏名：井上 尚久

### **第1章 序論**

**研究背景** 騒音振動伝搬の制御, 室内の残響音の制御などの従来の音響設計に加え, スピーチプライバシー確保や拡声放送などの情報伝達の明瞭化, 知的生産性の向上など様々な観点から音環境に対する社会的要求が高まっている。個人レベルにおいても, より高い QOL を支える要因の一つとして, 居室や自動車内などのプライベートな空間においても音環境が重要視されている。このような幅広い音環境設計の実現においては音響材料の軽量化, 薄型化, 高性能化, 低コスト化が必要不可欠である。

新規材料の開発サイクルは性能予測, 試料製作, 性能試験の三段階に大別される。現在, 積層型音響材料の性能予測については理論解析を用いることでその部材性能予測が行われていが, 解析における前提として無限大面積試料, 各層内で一様な物性値, 平面状の積層などの仮定を行うため, 実際の条件との乖離が生じ, 設計への適用については大まかな傾向の把握に留まらざるを得ないと言える。一方, 近年では数値解析による音響材料の部材性能予測に関する研究が見られるようになってきたが, その多くが単層材料を対象としていたり, 形状や振動特性に制限を設けたりするものがほとんどであり, 複雑な構成, 形状の音響材料を対象とした予測手法は未整備の段階である。

**研究目的** 以上の背景から本論文では積層材料の開発サイクルの合理化を念頭に大きく二つの目的を設定する。第一の目的はより高い条件設定の任意性, 適用範囲をもった部材性能予測手法を構築することで, 性能予測における材料のモデル化の過程で生じる現実との乖離を小さくし, 性能予測精度の向上を図ることである。第二の目的は構築した手法の妥当性検証のケーススタディを通して積層材料の振動メカニズム・音響指標の挙動を把握するものであり, 材料の性能測定における誤差要因に関する知見の取得を行い, 性能測定精度の向上を図ることである。

### **第2章 数値解析の基礎理論**

本論文で用いる音場解析手法である境界要素法, 及び音場, 振動場解析手法である有限要素法に関する基礎理論の定式化を詳述し, それぞれの場の連成方法について具体的に示した。また, 材料の積層条件の一つとして非接着条件を定式化し数値解析への導入法を述べた。

### **第3章 音響管問題による吸遮音特性解析**

**解析プログラムの妥当性検証** 音響管問題を取り上げ、本論文において構築した解析プログラムの妥当性の検証を行った。特に本論文で導入した非接着条件についてその妥当性を示すとともに、適用限界についても言及した。

**音響管計測における材料支持条件に関する検討** 材料開発の初期段階に用いられる音響管計測は一般に試料支持条件により計測値が大きく変化することが知られている。ここでは単層多孔質材、膜付多孔質材について、試料が側壁で固定支持される場合、試料と側壁の間に隙間がある場合の解析を行い、管内での現象、及び測定値の挙動に関する理解を深めた。

#### **第4章 剛平面上の凹み内部に設置した音響材料の吸音率解析**

**解析モデルに関する考察** 本論文の中核となる部材性能良即手法について数値解析論的な考察を行った後に本論文において採用する解析モデル(Figure 1)の構築を行った。以下その要点を列挙する。**1)** 剛バフル中の凹み・開口に材料を設置, **2)** 凹み・開口内部では任意の材料構成, 形状を取る事が可能, **3)** バフル外部の音場に境界要素法, 内部の音場・振動場に有限要素法を適用, **4)** 入射角 ( $\theta, \varphi$ ) での平面波入射 **5)** 斜入射吸音率・透過損失は幾何学的入射パワー, ネット吸音パワー・ネット透過パワーより算出, **6)** Paris の式により統計平均値を算出

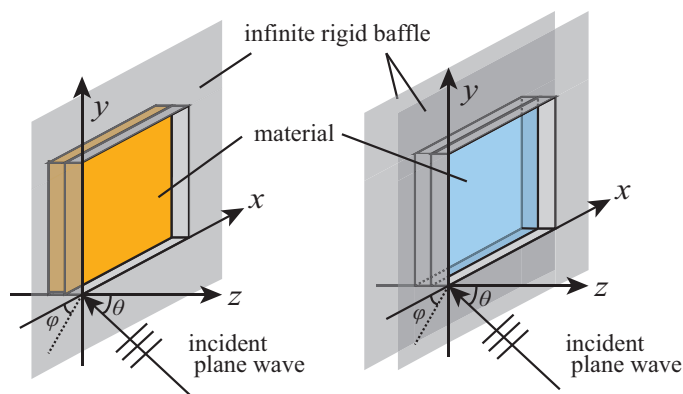


Figure 1. Three-dimensional schematics of the proposed absorption/insulation performance analysis.

**単層材料の解析** 構築した手法の妥当性検証のケーススタディの中で、残響室法吸音率における測定誤差要因として知られる面積効果、およびその一抑制方法である Deep-well 法をとりあげ、単層多孔質材料の解析を行った。試料面積や、試料を設置する凹みの深さを変化させた場合の計算結果を Figure 2 に示す。面積効果は音波の回折のしやすさ、及び試料の吸音率に依存し、一般に単層多孔質材料においては中音域で最もその影響が大きく、試料面積を  $9 \text{ m}^2$  程度としても依然として吸音率の上昇が見られた。また、Deep-well 法については well を深くするに従い、高音域から無限大面積試料に漸近し、低音域における効果は小さいことを示した。

**積層材料の解析** 多孔質材、膜、多孔質材の3層材料について積層条件を変化させ解析を行っ

た結果を Figure 3 に示す。積層条件により材料が示す振動メカニズムが変化し、吸音率の周波数特性にも大きな影響を及ぼしていることがわかる。ここではこれらのメカニズムを整理した上で、解析値と実測値の比較を行った。その結果、材料間の連続条件は実際の材料では接着・非接着の中間的な状態にあると推察さて、これらのモデル化が課題として残った。最後に、実際の積層材の利用時に性能への影響が大きいと考えられる試料端部の隙間の影響について数値解析と実測の比較を行った。その結果、両者は概ね良く対応し、本論文で構築した吸音率解析手法の有効性の一端を示した。

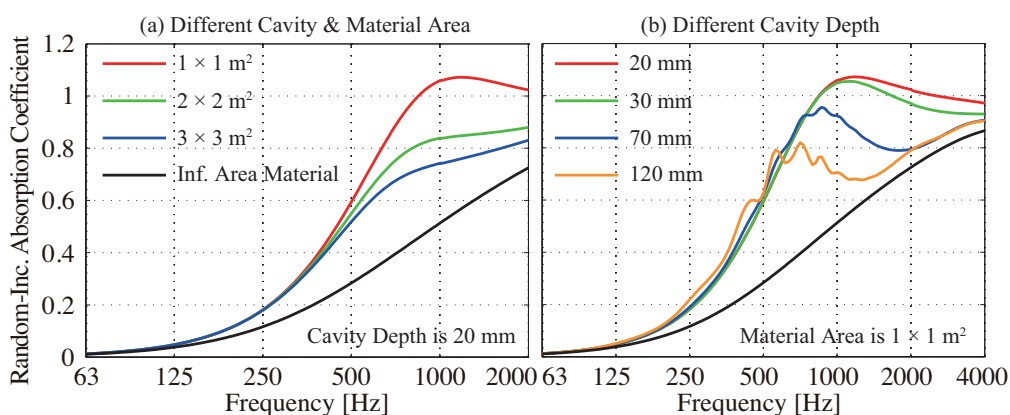


Figure 2. Random incidence absorption coefficient calculated for hair felt with 20 mm thickness set in the different conditions.

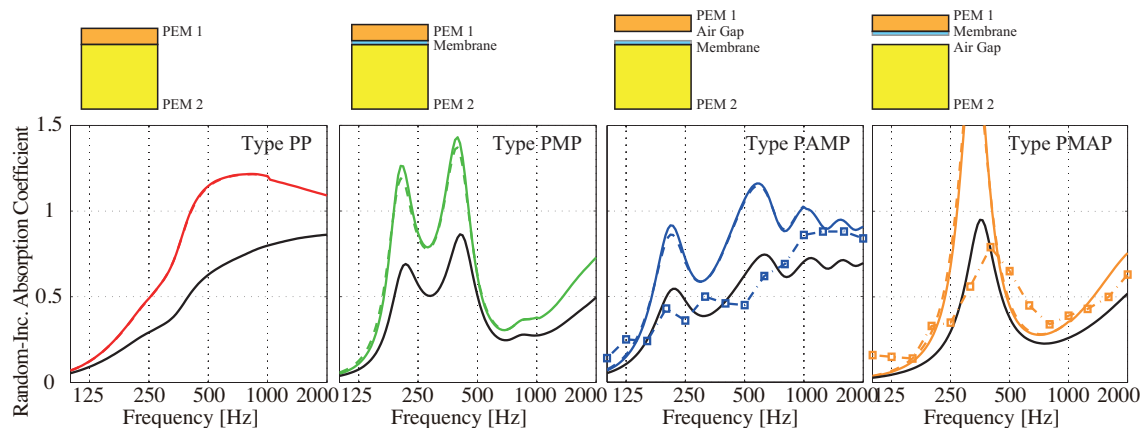


Figure 3. Random incidence absorption coefficient calculated for layered materials with different layering conditions.

## 第5章 剛バフル中の開口内部に設置した音響材料の音響透過損失解析

**単層材料の解析** 構築した手法の妥当性検証のケーススタディの中で音響透過損失計測において誤差要因となる試料設置、試料支持を取り上げ、単層板材料の解析を行った。試料設置条件についてはニッシュ効果として知られる開口深さと試料厚さの差により生じる段差の影響に関する検討を行った。その結果、ニッシュ効果により低音域、板の非共振周波数において透過

損失が低下する傾向がみられることがわかった。また、JISにおいて推奨される試料設置位置はニッシュ効果の設置位置に関する変化率が大きく、施工精度により測定値の変化が大きくなる可能性が示唆された。

支持条件としては従来用いられている集中バネ支持モデルに基づく手法と支持部材を三次元弾性体により詳細にモデル化する手法を定式化し、比較検討をおこなった。集中バネ支持モデルは支持部を簡略化したモデルであるものの概ね、三次元弾性体による詳細モデルと同様の結果が得られた。ただし、支持材の支持幅が大きい場合には両支持モデルの乖離が大きくなり、集中バネ支持モデルの適用性が低下する結果が得られた。

**積層材料の解析** 板、多孔質材、膜により構成される積層材料の解析を行い、本論文で提案する解析モデルの妥当性の検証を行った。Figure 4に3層材料の解析結果を示す。板材料のような比較的強い共振系に多孔質材が接着される場合には制振効果があるものと予想されるが、むしろ非接着とした方が、制振効果が大きいことが例示された。最後に試料端部に隙間を有する場合の解析を行い、実測値との比較を行った。これらの隙間の影響は妥当に評価できているものと見なせ、本論文で構築した透過損失解析手法の有効性の一端が示された。

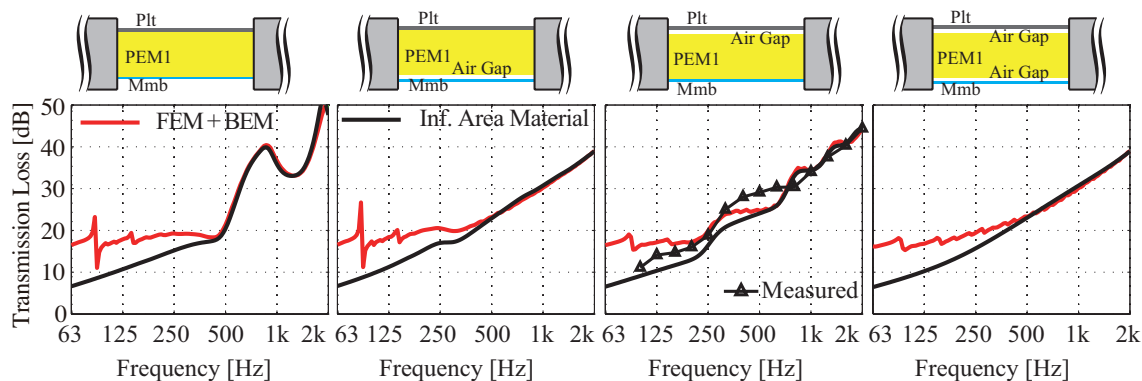


Figure 4. Random incidence transmission losses calculated for triple layer material with different layering conditions.

## 第6章 総括

材料開発の合理化を念頭に、任意の材料構成、形状、音波入射角度での音響指標算出が可能な手法を構築し、単層材料及び積層材料への適用を試みた。今後の課題として材料自体のモデル化精度の向上、および音響指標値の算出法に関する検討の必要性があげられる。また、構築したプログラムについてユーザインターフェースの拡充などを通し、材料開発の現場利用への敷居を下げるのが重要である。