

# 博士学位論文要旨

摂動法とベイズ的機械学習に基づく確率的マルチスケール  
解析による多孔質型吸音材の不確実性評価手法

A perturbation method and Bayesian machine learning  
based stochastic multiscale simulation for evaluating  
uncertainty of porous sound absorbing materials

工学院大学大学院

工学研究科 機械工学専攻 博士後期課程

学籍番号 AD20001

氏名 小松 洋輔

指導教員 山本 崇史 教授

自動車で発生する騒音の抑制は、ユーザーの快適性や搭乗体験を向上させ、都市環境における騒音公害を低減するため、自動車開発における重要な課題の一つとして挙げられる。不織布や発泡ウレタン材などの多孔質材料は安価に製造され成形も容易であり、高周波数の広い周波数域の騒音を効率的に低減できるため、吸音材として自動車の騒音抑制に広く用いられている。一方、地球環境の保全の観点では、多孔質型吸音材を構成する高分子材料の製造時に温室効果ガスが放出されるため、使用量が増加することで環境への悪影響が懸念される。また、自動車などの輸送機器で多用されることで重量が増加し、燃料効率の悪化が懸念される。このような課題を解決するため、軽量でリサイクル性が良く、様々な環境下で使用でき、かつ高い吸音性能を示す多孔質型吸音材の開発が求められている。

本論文では、多孔質型吸音材の高機能化を目標として、多孔質型吸音材の音響特性を予測する数値計算手法を構築する。多孔質型吸音材の数値計算手法は先行研究で提案されており、代表的な数値計算モデルとしては Biot のモデルがある。Biot のモデルでは実験的なパラメータの同定が必要であるため、音響特性を数値計算で予測するには供試体と実験設備が必要となる。本論文では、漸近展開法にもとづく均質化法を多孔質材料に適用し、多孔質材料の微視構造から直接的に吸音率を計算するマルチスケール解析を採用した。マルチスケール解析を用いることで、従来の数値計算モデルでは困難であった微視構造レベルでの検討が可能となる。しかし、多孔質型吸音材の微視構造の不確実性が吸音率に影響することが知られているが、均質化法にもとづくマルチスケール解析では周期的な微視構造を仮定しているため、これらの微視的な不確実性を考慮することが困難である。多孔質材料の微視構造の不確実性は製造工程に由来しており、これらの影響を考慮した数値計算モデルを構築することで、数値計算の予測精度の向上、製造工程の改善、製品品質の向上および吸音特性のロバスト性の改善に貢献できると考えられる。以上より、本論文では確率論とマルチスケール解析による吸音特性の不確実性の定量化手法について論じ、その結果を7つの章にまとめた。以下に各章の要約を示す。

第1章は序論として、研究の背景と目的について記述する。騒音の抑制は快適性や騒音公害で重要である一方、地球環境の保全の観点では、材料削減や軽量化によるエネルギー効率の向上が要求されており、騒音抑制の性能と環境保護を両立する吸音材料の開発が求められている点を研究の背景として挙げている。これらに貢献する多孔質型吸音材の数値計算手法の構築を本研究の目的として記述している。先行研究として、多孔質型吸音材の数値計算モデルの概要と課題を示している。本論文で採用したマルチスケール解析は、多孔質材料の微視構造から直接的に音響特性を求めるボトムアップ型のアプローチであり、計算機上ですべての解析が完結するため、多孔質型吸音材の開発で実用的な解析方法となることを記述した。一方、本研究で採用した漸近展開法にもとづく均質化法では、多孔質材料の微視構造が周期的であると仮定しているため、現実の材料で生じる微視構造の不確実性を考慮することが困難であり、実測結果と乖離が生じる可能性を説明している。このような不確実性は製品の品質やロバスト性に影響を与え、製品開発のリスクとなる可能性

について記述した。以上より、本論文では多孔質型吸音材の不確実性を定量評価する確率的マルチスケール解析手法を構築することで、高機能な多孔質型吸音材の開発に貢献することを目的としている。

第2章では、多孔質型吸音材の音響特性を予測するマルチスケール解析について記述している。多孔質型吸音材の数値解析手法の先行研究を説明した後、本研究で採用した漸近展開法にもとづく均質化法によるマルチスケール解析について定式化している。また、多孔質型吸音材の数値解析で広く用いられる Biot のモデルとマルチスケール解析を比較している。微小な流路と固体相からなる多孔質体について、Biot のモデルではパラメータを実験的に同定する必要があることを記述している。これらのパラメータはマクロなスケールで定義されているため、多孔質体の微視構造と直接関連付けることができず、微視構造にもとづいた吸音材の設計が困難であることを説明している。一方、均質化法にもとづくマルチスケール解析では、ミクロスケールでの支配方程式からマクロ特性を計算するため、微視構造から直接的に吸音率を計算できる。固体相と流体相が混在する多孔質体についての構成方程式と運動方程式についてまとめ、音波の伝播に重要な空気の粘性および弾性体で構成される固体相との連成を考慮して、ミクロスケールの支配方程式に漸近展開法にもとづく均質化法を適用して導出した多孔質吸音材モデルを記述している。このとき、実験的なパラメータの同定が不要であるため、吸音材の開発において実用的な解析手法となることを述べている。

第3章では、多孔質型吸音材の吸音率と微視構造の不確実性を、実験的に取得した結果を記述している。実験の供試体として、繊維系多孔質型吸音材と発泡ウレタン材料を選択し、音響管による垂直入射吸音率の測定結果とそのばらつきを示している。複数の供試体の吸音率を測定すると、吸音率は明確に変動することが示されており、微視構造の不確実性の影響であることが示唆されている。吸音率の確率分布を確認した結果、周波数域で確率分布が変化することを確認している。また、それぞれの多孔質材料の微視構造を走査電子顕微鏡により観察し、繊維系、繊維間距離および発泡材のセルサイズなどの微視構造のパラメータの不確実性を評価した結果を記述している。これらの微視構造のパラメータの確率分布を評価し、第5章の数値計算結果との比較に用いている。

第4章では、吸音率の不確実性の評価手法について記述している。不確実性に関する先行研究と評価手法について論じ、多孔質型吸音材の吸音率に適用する方法を説明している。先行研究として、発泡ウレタン材料の微視構造の不確実性に関する研究を挙げ、多孔質型吸音材の吸音率が微視構造の不確実性の影響を受けることを示し、微視構造の不確実性を考慮する必要性を記述している。このとき、先行研究では発泡構造など特定の微視構造にのみ適用できる手法を報告しているが、任意の微視構造に適用できる研究例は報告されていないことを示した。また、破壊力学など不確実性の定量化手法が広く適用されている分野の先行研究を説明し、不確実性の定量化手法の概論を述べている。本章では、マルチスケール解析とモンテカルロ法により、多孔質型吸音材の吸音率の確率分布を推定する手法

を記述している。モンテカルロ法の計算精度は試行 1 回に必要な計算時間に制限されることを示し、その収束性について記述している。モンテカルロ法の収束性を改善することを目的として、Low-Discrepancy 列を用いた準モンテカルロ法による計算結果を記述し、その収束性を比較している。また、設計空間におけるサンプリング方法について記述し、ラテン超方格法と k 最近傍法を用いてサロゲートモデルを構築することで、試行に必要な計算時間を削減しモンテカルロ法の計算精度を向上させた結果を記述した。

第 5 章では、吸音率の不確実性の評価で必要となる計算資源の削減を目的として、摂動法による確率分布の近似計算手法について記述している。マルチスケール解析で表される応答関数をテイラー展開することで、一次と二次の統計モーメントである期待値と分散の近似を定式化している。微分係数を中央差分法で求めることにより、モンテカルロ法と比較し 1/100 程度の計算資源で吸音率の確率分布を近似した結果を示している。一方、確率変数の確率分布や応答関数によっては中央差分法で微分係数を十分に近似できないケースが示されており、摂動法の適用限界について記述している。また、第 3 章で求めた実験結果にもとづきマルチスケール解析の微視構造モデルを構築し、吸音率の実測値と比較した結果を示している。走査電子顕微鏡で取得した微視構造のパラメータ、流れ抵抗および吸音率の平均値にもとづいて微視構造モデルを作成し、微視構造のパラメータが確率変数と仮定して摂動法で吸音率の確率分布を求めた結果を示している。実験結果と解析結果では平均的な吸音率に差異は生じたものの、分散は類似の値を示しており、解析で仮定した確率変数により実験で見られた吸音率のばらつきが説明できることを示している。

第 6 章では、摂動法で吸音率の不確実性の評価が困難な問題を対象として、ベイズ的機械学習による吸音率の評価手法について記述している。摂動法では応答関数を局所的な導関数にもとづいて近似していることが原因で、近似精度が大きく悪化する問題が存在することを述べている。本章の手法では、機械学習による応答関数のモデル化と、適応的なサンプリング手法により、効率的に吸音率の確率分布を近似する手法を記述している。応答関数のモデル化手法としてガウス過程回帰を採用しており、確率変数の確率密度関数を正規分布と仮定して、Gauss-Hermite 求積法によりその積分値の確率分布を求める方法を説明している。ガウス過程回帰に与えるデータセットを適応的に取得するため、得られた積分値の分散を獲得関数として、ベイズ最適化により追加のサンプリング点を求めている。このような操作を繰り返すことで、ガウス過程回帰の近似精度を向上させ、精度良く吸音率の確率分布を求めることができることを示している。吸音率の近似結果はモンテカルロ法と摂動法で得られた結果と比較され、摂動法では近似が困難な問題においても、吸音率の確率分布が予測できることが示されている。

最後に、第 7 章は結言として、本研究の総括および今後の展望についてまとめている。