

2023年2月17日

博士学位請求論文 審査要旨

主査 機械工学専攻 山本 崇史

論文題目：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

学位申請者：小松 洋輔 氏（工学研究科 機械工学専攻 博士後期課程 AD20001）

[審査要旨]

自動車の騒音は乗員の快適性に大きな影響を与え、車室内の騒音レベルが高い場合、快適な搭乗体験が損なわれ顧客満足度が低下する可能性がある。自動車の車室外へ放射される騒音は、特に都市部では騒音公害の主な原因となっている。過度な騒音レベルは、高速道路や交通量の多い道路の近くに住む人々の生活の質に悪影響を及ぼし、睡眠障害、聴覚障害、ストレスなどの健康問題が引き起こされる恐れがある。また、自動車の騒音対策として用いられる吸音材を多量に使用することでエネルギー効率が低下し、環境への悪影響が懸念される。

これらの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、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、多孔質型吸音材の音響特性を予測する数値計算手法の構築を目的として、多孔質型吸音材の微視構造の不確実性の影響を定量的に評価する手法に着目し調査がなされた。

第1章は序論であり、自動車における騒音抑制の重要性や多孔質型吸音材の数値計算に関する先行研究が示され、本論文の位置づけや研究目的について記述されている。

第2章では、多孔質型吸音材の吸音率の数値計算手法として、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を定式化している。また、マルチスケール解析を Biot のモデルと比較し、任意の微視構造の不確実性を定量的に評価するため、ボトムアップ型アプローチのマルチスケール解析が適していることを記述している。

第3章では、多孔質型吸音材の不確実性を実験的に評価した結果を記述している。自動車で広く用いられている繊維型吸音材と発泡ポリウレタン材を実験対象として、それらの微視構造を走査型電子顕微鏡で観察し、微視構造のパラメータの分布を取得している。また、垂直入射吸音率を測定することで、多孔質型吸音材の吸音率が確率的な分布を示すことを明らかとなった。

第4章では、多孔質型吸音材の吸音率の不確実性を数値計算でモデル化する方法について記述し、モンテカルロ法および代理モデルにより吸音率の確率分布を予測した結果が示

された。微視構造のパラメータを確率変数としたとき、その確率密度関数と応答関数より吸音率の確率分布を推定できることを示し、単純な例における吸音率の確率密度関数の解析解が示された。また、吸音率の確率密度関数の推定が困難である場合、モーメントによる確率分布の推定方法を示し、それらの近似手法について説明されている。本章では、モンテカルロ法により吸音率のモーメントを近似する際の収束性を検証し、モンテカルロ法の計算精度がマルチスケール解析の 1 回の試行に必要な計算資源によって制限されることを示した。また、モンテカルロ法の収束性を改善するため、Low-discrepancy 列を用いた準モンテカルロ法の収束性を検証し、モンテカルロ法より速い速度でモーメントが収束することを示した。また、設計空間のサンプリング方法について記述し、ラテン超方格法により取得したサンプリング点で k 最近傍法によるサロゲートモデルを構築することで、MC の計算を高速化できることを示した。

第 5 章では、吸音率のモーメントを効率的に近似するため、摂動法による近似手法が提案された。摂動法によるモーメントの近似方法を定式化し、求められたモーメントの結果をモンテカルロ法と比較することで、手法の妥当性と制限を示した。確率変数の変動が小さい、もしくは応答関数の非線形性が弱いと仮定できる場合には、摂動法により精度良くモーメントが近似される。一方、確率変数の変動が大きい場合では、応答関数の導関数を精度良く近似できず、モンテカルロ法の結果と乖離することが明らかとなった。しかし、モンテカルロ法と比較して、近似に必要な計算が大きく減少するため、迅速に吸音率の確率分布を推定する手法として、実用上重要な手法であることを示した。

第 6 章では、機械学習による吸音率のモーメントの近似手法を提案した。摂動法では精度良く近似することができなかつた問題に対し、適応的にサンプリング点を追加することで近似モデルを更新する手法を提案した。これはベイズの定理に基づいているため、本論文ではベイズ的機械学習手法と記述されている。マルチスケール解析で取得した確率変数と吸音率をデータセットとして、ガウス過程回帰で回帰モデルを構築し、回帰モデルと確率密度関数の積分を Bayes 求積法により求めている。このとき、求められた積分値は確率分布を示し、この分布の分散を獲得関数として新たに定義することを提案している。新たに定義した獲得関数を用いてベイズ最適化を実行することで回帰モデルを更新し、吸音率のモーメントの近似精度を向上させることができることを示した。

第 7 章は結論であり、マルチスケール解析と摂動法およびベイズ的機械学習手法を用いることで、多孔質型吸音材の微視構造の不確実性の影響を定量的に評価できると結論付けられている。

本論文で得られた知見は、多孔質型吸音材を用いる騒音制御において有用であることから、機械工学および自動車工学の発展に寄与するものと考えられる。

以上より、本論文は博士（工学）の学位授与に値するものと認められる。