

学位審査報告書

新制

工

1447

(ふりがな) 氏名	やまもと たかし 山本 崇史
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	論工博 第 4002 号
学位授与の日付	平成20年11月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
(学位論文題目) 音圧応答低減を目的とした多孔質材料を含む 吸遮音構造物の最適化	
論文調査委員	主査 教授 吉村 允孝 副査 教授 吉田 英生 副査 教授 松久 寛

(論文内容の要旨)

自動車の車室内における静粛性向上のために使用されている吸遮音構造物は、本来の吸遮音性能だけでなく燃費向上のための軽量化も同時に考慮して設計しなければならない。従来なされてきた吸遮音構造物単体での設計では十分ではなく、使用される車体構造や車室音響空間の特性をも考慮した吸遮音構造物の最適設計法の必要性が高まってきている。本論文は、こうした課題を解決するため、吸音材などの多孔質体を含む吸遮音構造物を対象に、音圧応答レベルの低減を目的とした新しい最適化手法について論じた結果をまとめたものであり、7章からなっている。

第1章は序論であり、研究の背景と目的について述べている。自動車に乗車中の人の快適性を向上させる一要素である静粛性と、環境保護の観点から燃費改善に寄与が大きい車両重量の軽量化を両立させるために、吸遮音構造物の性能を抜本的に改善できる最適設計手法が必要とされていることを実用上の背景にあげている。次に、吸遮音構造物の重要な構成要素である多孔質体のモデル化について過去に提案されてきた種々の方法を紹介し、また性能を抜本的に改善できる可能性があるトポロジー最適化について、音圧応答レベルの低減を目的とした手法の発展の歴史を概観して学術上の背景としている。こうした背景にもとづき、音圧応答低減を目的とした多孔質体材料を含む吸遮音構造物の最適設計手法の構築を本研究の目的に掲げている。

第2章では、吸音材のような多孔質体のモデルとして、本研究で用いている Biot のモデルについて概略をまとめている。ここでは、まず多孔質体の基本構成要素として微小円管を想定し、管内を伝播する音波において重要となる空気の粘性、および圧縮・膨張に伴い発生する熱の管壁への散逸の考慮の仕方について理論的な側面から記述している。次に、多孔質体のような固体相と流体相が混在する二相材料の構成式および運動方程式についてまとめている。流体相の運動方程式については、変位で表現したものと、近年広く適用されており本研究でも適用している圧力で表現したものについて述べている。

第3章では、第2章で述べた多孔質体の支配方程式の数値解法とその検証について述べている。まず、汎用的な手法である有限要素法による解法とそれに付随して多孔質体における散逸エネルギーの表現式を導出している。次に、多孔質体のヘルムホルツ方程式の基本解を適用して導出した吸遮音構造物の伝達マトリックスを用い、計算の精度と時間をバランスさせた新しい近似計算手法を提案している。この手法では、構造と音場の境界面に配置させた多孔質体を含む積層型の吸遮音構造物に対象を限定し、平板状の形状で厚さが平面的な寸法に比して小さく、厚さ方向の一次元的な波動伝播が支配的であると仮定している。構造と音場は有限要素で表現しており、吸遮音構造物が構造と音場の非連続固有モード形状に大きな影響は及ぼさない場合はモード修正法が適用可能で、計算時間を大幅に短縮できることを示している。

注) 論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は一頁35字×40行で作成し、合わせて3000字を標準とすること。

また、吸音材料については Biot のモデルの精度を実験的に検証した例は少ないため、Biot のモデルを適用した場合の計算結果と実験値を比較することでモデル精度の検証をしている。なお、計算は詳細な形状および境界条件が表現可能な有限要素法により行っている。その結果、Biot のモデルにより定量的に十分な精度で表現可能であることを示している。続いて、有限要素法による計算結果と、本章で提案した伝達マトリックスを併用した近似計算手法の結果を比較している。提案手法の有効性と適用可能な範囲について検討した結果、自動車における実際の使用条件下では、計算精度の低下を抑えながら計算時間を約 $1/40$ に短縮できることを示し、その有効性を実証している。

第 4 章では、構造最適化手法の類別とその特徴について概説した後、本論文で用いているトポロジー最適化の基本的な考え方とその方法について説明している。トポロジー最適化はあらかじめ設定した設計領域内において、最適な材料分布を求める手法であるが、設計領域内の至るところで材料分布に不連続が生じる可能性があり、数値解を得るためには設計空間の緩和が必要とされる。ここでは、トポロジー最適化における設計空間の緩和手法である均質化法と密度法について特徴を対比しながら記述している。また、薄板構造物において静的なコンプライアンスを最小にする最適な補強構造は、無限小幅のリブを無数に設けたものであり、数値的な解が存在するためには、設計空間を緩和する必要がある。これはトポロジー最適化における設計空間の緩和と同じ考え方が適用できること、また密度法で設計空間を緩和した場合にペナルティ係数を 1 に設定すれば、板厚分布の最適化になることを述べている。

第 5 章では、第 3 章で提案した多孔質体を含む積層型の吸音構造物に適用可能な近似計算手法に対し、トポロジー最適化の考え方を適用し、音圧応答レベル低減を目的とした多孔質体の最適な板厚分布を求める新たな手法を構築している。多孔質体層の板厚を設計変数にとるが、第 4 章で述べたように板厚分布に無数の不連続が生じる可能性があることから、トポロジー最適化における密度法の考え方のもと、設計空間を緩和し連続な設計変数を用いて多孔質体層の板厚を表している。また、最大板厚と最小板厚の中間の板厚も許容できることからペナルティ係数を 1 に設定している。さらに、「チェッカーボード」と呼ばれる数値的に不安定な現象を回避するために、連続的な材料分布を仮定した設計空間の離散化手法を用い、設計変数を離散化要素の節点に配置し、要素内では簡単な連続関数で内挿している。設計変数の更新に必要な設計感度は、設計変数の数が多い場合でも効率良く求めることができる随伴変数法による手法を適用している。この中で実数である設計感度を求めるためには、多孔質体のように未知変数が複素数の場合、共役複素数からなる項が必要であることを示している。最後に、簡単な数値例により提案手法の有効性を実証している。

第6章では、従来の吸遮音構造物の前提であった積層型構造という制約を取り除き、性能の改善と軽量化の要求を同時に満たす構造を創出することを目的に、音圧応答レベルの低減を目的とした多孔質体を含む吸遮音構造物のトポロジー最適化手法を構築している。音を問題の対象に含む場合は、構造物の周囲に存在する空気を考慮する必要がある。吸遮音構造物と空気で異なった支配方程式を用いると材料間の境界を明確に決める必要があるが、緩和された設計空間においては難しい。そこで本手法では仮想的な特性値を設定し、空気を多孔質体と同じ支配方程式を用いて表現している。また、吸遮音構造物の構成要素として弾性体がいられることが多いため、弾性体についても仮想的な特性値を設定し、多孔質体と同じ支配方程式で表現している。そして、吸遮音構造物のトポロジー最適化を、多孔質体材料の最適配置問題として定式化している。本手法で用いているトポロジー最適化における密度法は、設計変数のべき乗からなる密度関数を用いて材料特性を補間し、設計空間を緩和すると同時に最適化計算の収束時には設計領域内のほとんどの点で設計変数が0または1をとるようにするものである。弾性体構造物のトポロジー最適化問題では、一般に弾性テンソルを補間するが、多孔質体を含む吸遮音構造物のトポロジー最適化においてはそれに加えて、流体相の体積弾性率、各相の等価密度および流体相の体積割合であるポロシティを補間することを新たに提案している。そして、吸遮音構造物の多孔質体みの配置を最適化した数値例や、多孔質体と弾性体の配置を同時に最適化した数値例により、提案手法の有効性を実証している。

第7章は結論であり、本研究で得られた成果と今後の展開および研究課題についてまとめている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、自動車の車室内における静粛性向上のために使用されている、吸音材料などの多孔質体を含む吸遮音構造物を対象に、音圧応答レベルの低減を目的にした新しい構造最適化手法についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1) 静粛性の確保のため弾性体構造物と音響空間の連成面に配置される、多孔質体を含む積層型の吸遮音構造物について、連成面法線方向の伝達特性を伝達マトリックスにより近似的にモデル化した。そして、その伝達マトリックスを連成面における境界条件として考慮し、連成系の動的応答を求める新たな計算手法を提案した。また、弾性体構造物、音響空間および吸遮音構造物から成る簡易模型を用いた実験結果も踏まえ、その計算精度と適用可能な範囲を明らかにした。

2) 1) で提案した計算手法を適用し、トポロジー最適化における密度法の考え方のもと、積層型の吸遮音構造物における多孔質体層の厚さ分布を最適化する新しい計算手法を構築した。数値例による検証の結果、本手法は体積制約条件下で、対象周波数範囲の平均音圧応答レベルを低減できることを示した。

3) 従来、線形弾性体に適用されてきたトポロジー最適化を拡張し、多孔質体にも適用可能な手法として提案した。本手法では、空気と線形弾性体とともに多孔質体と同じ支配方程式の上で近似的に表現し、多孔質体と線形弾性体の最適な材料配置を同時に求めることが可能である。また、数値例による検証の結果、本提案手法は、体積制約条件下で従来構造よりも高性能な吸遮音構造物を設計できる有効な手法であることを示した。

以上のように本研究で構築された最適設計法を適用することで、従来の設計法では達成が困難であった吸遮音構造物の高性能化あるいは軽量化が実現可能であることが示され、多孔質体を含む吸遮音構造物のモデル化および最適設計法に寄与するところが少くない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年9月10日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

注) 論文審査の結果の要旨の結句には、学位論文の審査についての認定を明記すること。

更に、試問の結果の要旨(例えば「平成 年 月 日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認めた。」)を付け加えること。