

論文の要旨

題目 Development of Innovative Thermal-Insulating and Sound-Absorbing Porous Materials by Materials Model-Based Research (MBR)

(材料 MBR 技術を活用した革新的断熱吸音多孔質部材の開発)

氏名 桂 大詞

本論文では、自動車業界の最も重要な課題のひとつである、カーボンニュートラルの実現と安全・快適性向上の高いレベルでの両立に向けて、高い断熱性と高い吸音性の両方の特性を有する革新的な多孔質材料を開発した。

第1章では、本研究の背景、関連する先行研究、目的について述べた。断熱材料の性能を示す重要な指標は熱伝導率、吸音材料の性能を示す重要な指標は吸音率であり、多くの場合は多孔質材料が用いられる。吸音率も熱伝導率も多孔質材料内部の μm スケールの微細な構造に依存することが知られている。一般に、高性能な多孔質断熱材料は、気体の熱伝導を抑制するために、流体相の空間を微細にする、あるいは、閉空間にする必要がある。一方で、多孔質吸音材料は材料内部を音波が透過する際に、音のエネルギーを熱に変換することで吸音しているため、流体相の空間が微細あるいは閉空間である場合は音波が透過せず、吸音材料としては機能しない。そのため、従来の考え方や開発方法では、同一材料で高い断熱性と高い吸音性を両立させることは困難であった。先行研究では、高い断熱性と高い吸音性を両立した例として、熱伝導率として $0.050\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、約 1000 Hz での吸音率として 0.5 を達成した熱可塑性ポリウレタン/ポリスチレンエレクトロスピンニングナノファイバーや、熱伝導率として静止空気同等、約 1000 Hz での吸音率として 0.4 を達成したエアロゲル含浸ガラス繊維ブランケットが存在する。本研究では、更に背反を打開した多孔質材料として、静止空気同等の熱伝導率 ($0.026\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) と約 1000 Hz での吸音率 0.5 を両立した目標性能を有する新しい有機無機複合多孔質材料の実現を目指した。そこで、音波が多孔質材料を透過する必要がなく、音波が多孔質材に衝突するだけで吸音する構造を考案した。また、多孔質材料の内部の空間を、音波が透過できない空間と音波が透過できる空間に分けて、音波が透過できない空間で断熱性を生じさせ、音波が透過できる空間の経路を複雑にすることで吸音性を生じさせる構造を考案した。考案した構造の効果を効率的に設計・実証するため、材料モデルベースリサーチ基盤技術として、従来困難であった材料内部の低比重で微細な3次元構造を分析して構造の特徴を定量的に解析する技術と、材料内部の3次元構造に基づいて多孔質材料の吸音率と熱伝導率を予測計算する技術を構築した。そして、その基盤技術を活用して、高い目標性能を実現した断熱吸音多孔質材料を効率的に開発した。

第2章では、多孔質材料の3次元構造分析解析技術として、有機高分子材料のX線CT画像のコントラストを向上させる新しい方法について述べた。まず、2-ブロモエチルメタクリレート、2-クロロエチルメタクリレート、または4-ブロモスチレンを含むジクロロメタン中でポリ(エチレンテレフタレート)(PET)繊維にガンマ線を照射すると、PET繊維にハロゲンを含むオリゴマー鎖がグラフト化することを実証した。次に、集束イオンビーム走査型電子顕微鏡(FIB-SEM)および飛行時間型二次イオン質量分析(TOF-SIMS)分析により、2-ブロモエチルメタクリレートで修飾されたPET繊維の表面だけでなく、繊維内部にも臭素原

子が均一に分布していることを明らかにした。この均一な組込みにより、X 線 CT 画像のコントラストが未加工の繊維に比べて大幅に改善された。最後に、ポリプロピレンペレットにも同様の処理を施すことで、X 線 CT 画像のコントラストが向上することを確認した。これは、X 線 CT 画像のコントラストを向上させる新たな簡便かつ効果的な方法であり、高分子複合材料や多孔性高分子材料など、さまざまな高分子材料に適用できる可能性がある。

第3章では、音波が多孔質材を透過する必要がなく、音波が多孔質材に衝突するだけで吸音する新しい多孔質材料について述べた。まず、材料内部の3次元構造に基づいて多孔質材料の吸音率と熱伝導率を予測計算する技術を構築した。本計算技術を多孔質材料へ適用し、音波の透過が困難である微細な空隙で構成された多孔質材料の内部の固体相の構造を、棒状のリガメント部とリガメント部同士が接合しているジョイント部に分け、それぞれが別の物質であるジオメトリとしてモデル化した。計算結果、ジョイント部の物性として損失係数を高めるよりもヤング率を下げるほうが吸音率向上への寄与は高いことを示した。これは、音波の入射によりリガメント（固体相）を激しく振動させることで、静止している流体相と固体相との境界での相対速度を生じさせて、粘性減衰を誘起し吸音したことを示している。明らかにしたこの新しいメカニズムを活用することで、音波を透過させない吸音メカニズムの実現可能性を確認することができた。次に、計算モデルの微細構造と物質構成に似せて、疎水性 CNF 分散液、酢酸水溶液、尿素、*n*-ヘキサデシルアンモニウムブロミド (CTAB)、ジメチルジメトキシシラン (DMDMS)、メチルトリメトキシシラン (MTMS) からゾルゲル法で疎水性セルロースナノファイバー (CNF) -ポリ (メチルシロキサン) (PMS) キセロゲル複合体を作製した。最後に、この多孔質材料は、1000 Hz 以上の周波数帯での高い吸音性 (吸音率は 0.44 以上) と、静止空気 (0.026 W/(m · K)) 同等の高い断熱性の両方を有していることを確認した。この多孔質材料は、自動車の内装部品の内部などの未露出部分に使用でき、優れた吸音性と断熱性を示す。さらに、PMS 骨格と CNF の相互作用や相互分散を改善することで、材料を強化できることが見込まれる。この多孔質材料強靱を強化できた場合は、将来、自動車の原動機や駆動部など、過酷な条件にさらされる部品に使用することができる。

第4章では、多孔質材内部の空間を音波が透過できない空間と透過できる空間に分けて、音波が透過できない空間で断熱性を生じさせ、音波が透過できる空間の経路を複雑にすることで吸音性を生じさせる新しい多孔質材料について述べた。まず、第3章同様に、構築した計算技術を多孔質材料へ適用し、多孔質材料内部の固体相の構造を、PET 繊維を模したリガメント部とナノ多孔性を有する粒子を模した粒子部に分け、それぞれが別の物質であるジオメトリとしてモデル化した。計算結果、PET 繊維と粒子の配合率、粒子の体積を固定したまま、粒子形状を扁平化するだけで吸音率が向上することを確認した。次に、エアロゲル粒子を扁平化しつつ薄い不織布に散布する装置を試作することで、計算モデルの微細構造に似せた、ナノ多孔性を有する扁平楕円体粒子を複合した PET 不織布を作製した。この多孔質材料は、1000Hz 以上の周波数帯での高い吸音性 (吸音率は 0.35 以上) と、静止空気 (0.026W/(m · K)) 同等の高い断熱性の両方を有していることを確認した。また、Biot 理論に基づく音響特性パラメータの実測から、この多孔質材材料は、流れ抵抗や固体での粘弾性損失が向上したからではなく、迷路度 (音波が透過する経路の複雑さ) が向上したことが主要因で高い吸音性を示すことを確認した。このことから、粒子を扁平形状にして複合することで、音波が透過できる空間の経路が複雑に延長され吸音性が向上するメカニズムが生じている可能性を確

認することができた。最後に、高通気抵抗の表皮材を積層することで吸音性が向上することを検証した。高通気抵抗の表皮材を積層したこの多孔質材料は、1000Hz以上の周波数帯での高い吸音性（吸音率は0.5以上）と、静止空気（0.026 W/(m・K)）同等の高い断熱性の両方を有しており、目標性能を達成することを確認した。第3章で述べた微細多孔質で柔らかい部位を持つ多孔質材料は、優れた断熱性と吸音性を示すが、もろく破損しやすいという欠点があった。そのため、自動車への適用は衝撃や振動などの物理的ストレスにさらされない場所に限られていた。この多孔質材料は、数十マイクロンから数百マイクロンの長辺を持つナノポーラス楕円体粒子を、同等の大きさの空隙（繊維間の隙間）を持つ不織布に複合したものである。この構成により、衝撃や振動に対する耐性が強化される。更に、高通気抵抗の表皮材を積層することで不織布からの粒子の脱落を低減できるため、自動車の内外装部・原動機・駆動部など過酷な条件にさらされる部品への適用ができる。

以上から、構築した基盤技術を活用して、目標性能を有する高性能な断熱吸音多孔質部材を効率的に開発した。これらの多孔質部材を自動車の内装部品全体に適用した場合、吸音材と断熱材の総重量は増加する可能性があるが、騒音は約40%低減し、空調の消費エネルギーが約30%削減されるため、燃費は約4%向上すると予想される。今後、これらの多孔質材料を量産するための技術を確立することで、自動車業界での適用拡大が見込まれる。また、自動車業界だけでなく、その他の移動体（鉄道、航空機等）、住空間、家電、医療など様々な業界で、カーボンニュートラル実現と安全・快適性向上との高次元両立に取り組まれており、断熱省エネと騒音問題解決は現代社会で重要課題の一つになっている。開発したこれらの多孔質材は、これらの業界でも問題解決を支援できる可能性があり、今後の適用拡大が見込まれる。最後に、開発した基盤技術は、特殊な計算環境やスキルが不要で活用できることから、中小の部品製造メーカーの開発現場でも実用できる、汎用性の高い技術である。既に、デジタルものづくり教育研究センターを通じて、本基盤技術の地域企業への教育活動を実施している。今後、これらの企業での技術活用が進み、これらの企業から継続的にカーボンニュートラルを実現するための革新技术が創出されることを期待する。