

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：32643

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05873

研究課題名(和文)自動車の軽量化と車内音予測技術に関する研究

研究課題名(英文) Research on weight reduction of automobile and prediction technique of interior noise

研究代表者

黒沢 良夫 (KUROSAWA, Yoshio)

帝京大学・理工学部・准教授

研究者番号：60631885

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：高周波(500Hz～)の自動車車内音低減と低減アイテムの軽量化のため、直径1～4μm程度の極細繊維の吸音率予測手法の開発と、積層防音材の遮音性能向上・軽量化のための形状(構造)検討を実施した。

は従来手法で予測精度が悪かった、繊維径・繊維密度・サンプル厚み・サンプル密度から吸音率を予測可能とした。さらに、他の繊維材等を積層した積層構造の吸音率も予測可能とした。では、ウレタンフォームにワッフル形状をつけることで、遮音性能の周波数特性の調整や、同性能で材料の低減を可能にした。

研究成果の概要(英文)：In order to reduce the interior noise by car in the high frequency (500 Hz-) and to reduce the weight of the reduced item, to develop a method for predicting the sound absorption coefficient of ultrafine fibers with a diameter of about 1 to 4 μm, to improve the sound insulation performance of the laminated sound insulation material and to reduce weight (Structure) examination was carried out.

was able to predict the sound absorption coefficient from the fiber diameter, fiber density, sample thickness, sample density, the prediction accuracy was poor with the conventional method. Furthermore, the sound absorption coefficient of the laminated structure obtained by laminating other fiber materials etc. was made predictable. In , by attaching a waffle shape to urethane foam, it was possible to adjust the frequency characteristics of the sound insulation performance and to reduce the material with the same performance.

研究分野：工学

キーワード：音響 CAE FEM Biot理論 吸音率 透過損失 極細繊維

1. 研究開始当初の背景

近年、自動車の性能として車内快適性が重視され、さらなる車内の静粛性が求められている。また、CO₂ 排出削減のため、ハイブリッド自動車の販売台数・車種が増加している。従来ハイブリッド自動車は専用の車体であったが、ここ数年はガソリン車と同じ車体を用いる車種（ハイブリッドシステムをオプションとして追加）も増えてきた。ハイブリッド自動車はアイドル時・低速時にはエンジンが停止しているため車内の静粛性能は良いが、ハイブリッド自動車特有の騒音（発進時のモーター音、停止時のモーター回生音、インバーター等の高周波音）があり、これらの低減には多くの防音材（吸音材）が必要である。しかし、ガソリン車では前記の吸音材の防音効果は小さく、むしろ従来から対策しているロードノイズやエンジン音の遮音対策が重要であり、すべての現象について効率よく静粛化する技術が必要である。これら高周波車内音は予測技術が不十分で、どの自動車メーカーも試作車完成後に実験により対策を検討しているのが現状で、開発の前倒し（性能の机上検討）がうまく機能していなかった。

2. 研究の目的

自動車の高周波（500～500Hz）の車内騒音を低減する防音アイテムの軽量化&低コスト化、ハイブリッド自動車でもガソリン車と同じ車体を用いた場合にどちらの仕様でも成り立つ（或いは最低限の仕様分けで成り立つ）効率的な防音パッケージの開発、それらに必要な予測技術・解析手法の研究開発を行う。

3. 研究の方法

(1) エンジンルームと車室を隔てているパネル（以下トーボード）は、エンジン騒音を防ぐため防音対策が厳重になされている。トーボードは鋼板を所要の形状にプレス成形して作られ、その上には、従来フェルト・ウレタン等からなる吸音材（多孔体）と、樹脂シートからなる表皮（粘弾性体）が積層されており、2重壁構造による遮音性能を実現していた。しかし、トーボードにはステアリングやハーネスやダクト等の貫通部品やエアコンやヒーターユニット等設置部品も多く、穴や吸音材が十分スペースを取れない部分もあり、軽量化も考慮して吸音性能を重視した密度の小さい多孔体に密度の高い多孔体を配置した積層吸遮音材も用いられるようになってきた。このタイプの吸遮音材は多孔体と多孔体の間に樹脂シートやフィルム（オレフィンシート）を挟んだタイプも多いが、多孔体とフィルムの接着の有無で遮音性能が大きく変化することがわかってきた。著者らはまず、多孔体の内部空気のみをモデル化した有限要素法を用いて解析を行ったが、接着の有無による遮音性能の変化は再現でき

なかった。そのため、多孔体を内部空気と骨格の両方の波動の伝播を考慮する弾性多孔体とした伝達マトリックス法を用いた数値計算を行い、接着の有無による遮音性能の変化は再現できてきた。しかし、どのようなメカニズムで接着の有無により遮音性能の変化が起こっているかは解明できていなかった。Boltonらは多孔体の骨格の変位と内部空気の粒子変位を未知数とする有限要素法による離散化方程式を導いている。Atallaらは骨格の変位と内部空気の圧力を未知数とする有限要素法による離散化方程式を導いている。本論文では、著者の一部らが作成した多孔体の内部空気と骨格の両方の波動が伝播できる有限要素を用いた数値解析手法を用いて計算を行った。本手法の特徴は、弾性体や粘弾性体と多孔体が接続される場合に共通のパラメータ（変位）のみで記述できるので、境界条件のモデル化が容易にできることである。また、このような連成問題の変位応答分布を直接計算・表示できることである。しかし、Atallaらの定式化と比較すると、圧力は1次元に対し粒子変位は3次元になり計算自由度が多く計算時間がかかる欠点もある。

(2) 人間の耳に敏感な1～2kHz前後の騒音は自動車車内音では高周波騒音として分類され、加速走行時のエンジン・トランスミッションから発生する騒音、タイヤパターンノイズや高速走行時での風切り音等が音源である。これらの騒音は音源側の対策も進んでいるが限界もあり、コスト・重量の効率も考慮すると車体側での対策（遮音・吸音）が重要である。また、今後益々厳しくなる燃費規制に対応するため車両の軽量化は必然であり、アッパーバックやドアトリム等の内装材が従来は通気性の無いポリプロピレン等の樹脂であったが、通気性のある素材（固いフェルトやウレタンフォーム等）が用いられ始めた。これらの内装材は重量（樹脂に比べて軽量であるかどうか）や強度・剛性の評価はされているが、吸音・遮音性能は十分に評価されていない。従来の研究では、無限平板を仮定した一次元モデルによる音響性能予測手法（伝達マトリックス法による予測計算）⁽¹⁾があるが、複雑な形状の構造物は、計算精度が不十分である。また、この手法では吸音率と遮音性能（透過損失）が別々に計算されるため、Totalとしての音響性能の評価が困難である。自動車の室内やセダントタイプのトランクルーム等は閉空間をなし、走行中に定在波が生じる。音響モードの影響が大きい周波数域ではSEA（統計的エネルギー解析）は予測精度が悪く、また、閉空間で音の透過を含む解析はBEM（境界要素法）では不向きである。空間中に吸音材（減衰要素）が配置された場合の音場の特性を明らかにするためには、有限要素法を用いた数値計算が有効である。

(3)自動車の高周波車内音低減に用いる吸音材料として、繊維径が数 μm ~1/数 μm のナノ繊維が検討され始めている。一般的に繊維径が細いほど吸音性能が良いと考えられているが、吸音率には周波数特性があるため狙いの周波数域で狙いの吸音性能を持つ製品を製作するのは困難である。また、繊維が細すぎると弾力が小さくなり潰れてしまい、製品として用いるためには骨格(バインダー)となる別の繊維が必要になるが、その配合割合により吸音性能も変化してしまう。周波数ごとの最適な繊維径・配合割合を実験計測的に求めようとする膨大なサンプル作製や計測数になってしまうため、計算により吸音率の周波数特性を求めることを目標とした。従来、繊維材の吸音性能は、垂直入射吸音率(以下、吸音率はすべて垂直入射吸音率を示す)は音響管を用いた複素の特性インピーダンスと伝搬定数の計測結果から求められていた。加藤は、音響管の計測を必要としない、繊維径・繊維密度・サンプル厚さ・サンプル密度から吸音率を計算する手法(Katoモデル)を提案した。論文の中では等価繊維径15.7 μm まで検証されているが、本手法がナノ繊維でも適用可能か検証を行った。検証に用いたのはPP(ポリプロピレン)平均繊維径:1.0572 μm 、目付け:300g/m²、厚さ:20mm、PP平均繊維径:4.2458 μm 、目付け:300g/m²、厚さ:10mmの2種類である。検証結果、上記のナノ繊維では予測精度が悪く、繊維径が1 μm ~4 μm のナノ繊維では適用できないことが確認された。

4. 研究成果

(1) 本手法を使って、自動車の高周波域(500~500Hz)の車内騒音で寄与の高いフロアまわりを想定し、半無響室に設置された簡易的な遮音性能計測装置(残響箱)を用いて、パネルにフェルトとフィルムとフェルトが積層された吸遮音材の遮音性能を計測した。フィルムが上下フェルトと接着された場合と接着されていない場合で遮音性能が大きく変化することを確認した。音圧加振時の表層フェルトの振動をレーザー Doppler 振動計で計測し、非接着時と接着時で振動レベルが大きく変化している事を確認した。本現象を解明するため、Biot理論を用いた弾性多孔質体の有限要素法を用いて積層吸遮音材の振動計算を行った。計算結果は計測結果をほぼ再現しており、設置薬事には弾性多孔質体の内部空気と骨格が同様の振動をするのに対し、非接着時は大きく異なる振動をしており、これにより遮音性能の変化が起こることが分かった。

(2) 本研究では実際の自動車に良く用いられているフェルトを使って、自動車車室内を模して作成した簡易モデル(テストピース)の減音量の計測を行なった。また、音響管を

用いた Improved two-cavity 法により求めた材料パラメータ(複素密度、複素堆積弾性率)を同定し、これらの値を用いて有限要素モデルでの解析精度検証を行なった。次に、使用した有限要素モデルでフェルトの最適位置を計算した。音響解析の精度向上のため、自動車のアッパーバックまわりを模擬したテストピースを作成し、通気性のあるトリム(フェルト)を音源側の小さい空間に貼りつけて減音量を計測した。使用したフェルトを音響管で材料パラメータ同定した後、それらの値を用いて簡易モデルを模した有限要素モデルの解析精度検証を行い、十分な解析精度であることを確認した。有限要素モデルの仕切りを開けた状態(30mm、100mm、190mm)で、フェルトを30%、50%減らしたときの最適配置の計算を行った。フェルトを全面に配置したときとフェルトの最適配置したときの減音量の変化は、仕切り間隔が狭い方が小さい。これは、仕切りの間隔を狭くすることで空気の影響が小さくなりフェルトの最適配置ができたためと考えられる。

(3) 本研究ではナノ繊維でも吸音率が予測可能な計算手法を検討した。その結果、繊維径が1 μm ~4 μm のナノ繊維について、繊維径・繊維密度・サンプル厚さ・サンプル密度から吸音率を予測する手法を開発した。流れ抵抗と熱的特性長について計測結果から実験関係式を導き、Limp frame モデルに適用することで、音響管を用いた吸音率計測結果と比較しておおむね良い一致を示した。これにより、サンプル作成前に吸音率の予測が可能になり、狙いの吸音率の製品の作成も可能となった。

(4) 自動車の高周波域(500~500Hz)の車内騒音で寄与率の大きいフロアまわりの構造(パネルにフロアカーペットが積層された状態をモデル化)をターゲットに研究を実施。パネルにフェルト(多孔質体)とオレフィンシートが積層された吸遮音材で、オレフィンシートが上下フェルトと接着の有無により遮音性能が大きくことなる現象について、Biot理論を適用した弾性多孔質体をモデル化した有限要素法を用いて音響計算を行った。積層防音材と実験計測に用いた簡易遮音性能計測装置を有限要素モデル化し、半球状の空間の境界条件が無反射となるよう設定して遮音性能を計算した。計算結果は、接着の有無による性能差を再現できた。

(5) 繊維径の細い繊維は吸音性能が高いことを確認し、繊維径が1 μm ~4 μm のナノ繊維に不織布やPET材を積層させた吸音材の吸音率を予測できる手法を開発した。2x2の伝達マトリックス法を用いて実験結果から流れ抵抗や粘性特性長・熱的特性長と、繊維径・繊維密度・サンプル厚さ・サンプル密度の関係式を導き、Limp frame モデルに適用した。

音響管を用いた吸音率計測結果と本手法による予測結果を比較して、おおむね良い一致を示した。これにより、サンプル製作前に積層吸音材の吸音率の予測が可能となり、ナノ繊維を含むさまざまな積層パターンの吸音材を試作前に性能検討可能とした。

(6)自動車の高周波(500Hz~5000Hz付近)の車内騒音低減のため防音材の性能向上が求められている。ウレタンにゴムシートを積層したタイプの防音材で、遮音性能を向上するためウレタン表面にワッフル形状を施し、音響性能の変化について検討した。

簡易的な遮音性能計測装置を用いて実験を行い、有限要素モデルを用いた振動音響解析結果と比較を行った。ウレタンは内部空気と骨格振動をモデル化した Biot モデルを用い、計算では別途計測・同定した Biot パラメータを用いた。音響入力と振動入力の場合について、ワッフル形状の違い(リップ幅・リップ間隔)による遮音性能の変化を計算した。その結果、実験と計算は同様の傾向を示し、ある周波数域においては、従来の平坦な形状より遮音性能が向上することが確認できた。

(7)自動車では、軽量化のためフェルト等を圧縮した通気性のあるトリム(内装材)が用いられ始めた。本研究では、外壁であるパネルが加振され、通気性のあるトリムが配置された閉空間である車室内に騒音が発生することを想定して簡易モデルを作成し、実験と計算を行った。直径 100mm、長さ 150mm のアクリルパイプに穴のあいた仕切り板を配置し、底面に配置した鉄板をハンマーで加振し、鉄板と反対側に設置したマイクで音圧レベルを計測した。同様の FE モデルを作成し、計算を行った。また、仕切り板の穴部分にトリムを想定したフェルトを配置した。フェルトは Miki モデル(フェルト内部の流れ抵抗をモデル化)を用いた。実験結果と計算結果は良い一致を示した。さらに、フェルトの流れ抵抗を変更した場合の音圧レベルの変化について計算結果を実施し、伝達マトリックス法による計算結果と比較した。その結果、閉空間では有限要素法によるモデル化が必要なことが確認できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

黒沢 良夫、山口 誉夫、中泉 直之、高橋 学、積層吸音材の接着による遮音性能への影響、日本機械学会論文集、査読有、Vol.82、No.837、2016、DOI:10.1299/transjsme.15-00664

黒沢 良夫、極細繊維材の吸音率予測手法の開発、日本機械学会論文集、査読有、Vol.82、

No.837、2016、DOI:10.1299/transjsme.15-00665

黒沢 良夫、山口 誉夫、Development of Prediction Tool for Sound Absorption、International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering、査読有、Vol:9、No:9、2015、pp.1386-1390

〔学会発表〕(計15件)

黒沢 良夫、八木澤 和稀、山下 剛、尾崎 哲也、村上 昌之、高橋 学、中泉 直之、ゴム・ウレタンからなる自動車用防音材の遮音性能解析、Design and Dynamics Conference 2017(日本機械学会)No.408、2017

黒沢 良夫、野澤 新、笹島 学、パネル加振による吸音材が配置された閉空間の振動音響解析、Design and Dynamics Conference 2017(日本機械学会)No.411、2017

黒沢 良夫、山口 誉夫、中泉 直之、高橋 学、フェルト・オレフィンシート・フェルトの3層構造の防音材の遮音性能解析、2016 技術交流会資料集 SDT14006(制振工学研究会)、2016

八木澤 和稀、黒沢 良夫、野澤 新、積層防音材の形状変更による遮音性能解析、2016 技術交流会資料集 SDT16009(制振工学研究会)、2016

黒沢 良夫、Transmission Loss Analysis for Panels Laminated with Felt and Film、18th International Conference on Robotics and Mechatronics、2016

黒沢 良夫、山口 誉夫、中泉 直之、高橋 学、自動車用積層吸音材の遮音性能解析、Design and Dynamics Conference 2016(日本機械学会)No.536、2016

黒沢 良夫、尾崎 哲也、武藤 幸一、山下 剛、積層タイプの極細繊維材の吸音率予測手法の開発、Design and Dynamics Conference 2016(日本機械学会)No.537、2016

黒沢 良夫、尾崎 哲也、武藤 幸一、山下 剛、極細吸音材の性能予測手法について、建築音響研究会5月度、2016

黒沢 良夫、Predicting Automotive Interior Noise Including Wind Noise by Statistical Energy Analysis、18th International Conference on Mechanical Engineering and Applied Mechanics、2016

黒沢 良夫、尾崎 哲也、武藤 幸一、山下 剛、極細吸音材の性能予測技術の開発、日本

音響学会 2016 年春季研究発表会 1-8-11、2015

黒沢 良夫、山口 誉夫、中泉 直之、高橋 学、フェルト・オレフィンシート・フェルトの 3 層構造の積層防音材の接着の影響、2015 技術交流会資料集 SDT14015 (制振工学研究会) 2015

池崎 修平、黒沢 良夫、山口 誉夫、自動車車室内を模した簡易モデルの吸音材最適配置、2015 技術交流会資料集 SDT15014(制振工学研究会) 2015

黒沢 良夫、山口 誉夫、中泉 直之、高橋 学、積層防音材の接着の影響、Design and Dynamics Conference 2015 (日本機械学会) No.536、2015

黒沢 良夫、極細繊維材の吸音率予測手法の開発、Design and Dynamics Conference 2015 (日本機械学会) No.539、2015

池崎 修平、黒沢 良夫、山口 誉夫、多種の多孔体を配置したときの自動車車室内の減衰音響解析、Design and Dynamics Conference 2015 (日本機械学会) No.537、2015

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

黒沢 良夫 (KUROSAWA Yoshio)
帝京大学・理工学部・准教授
研究者番号：6 0 6 3 1 8 8 5

(2) 研究分担者 ()

研究者番号：

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：

(4) 研究協力者 ()