(19)日本国特許庁(JP)　(12)公開特許公報(A)　(11)公開番号
特開2024-55100
(P2024-55100A)
(43)公開日　令和6年4月18日(2024.4.18)

(51)国際特許分類		FI			テーマコード（参考）
Ｇ１０Ｋ	*11/162 (2006.01)*	Ｇ１０Ｋ	11/162		２Ｇ０４７
Ｇ０１Ｈ	*17/00 (2006.01)*	Ｇ０１Ｈ	17/00	Ｃ	２Ｇ０６４
Ｇ０１Ｎ	*29/12 (2006.01)*	Ｇ０１Ｎ	29/12		５Ｄ０６１

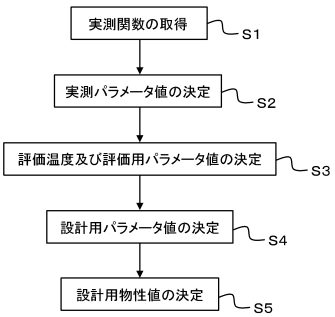
審査請求　未請求　請求項の数　6　ＯＬ　（全40頁）

(21)出願番号　特願2022-161733(P2022-161733)
(22)出願日　令和4年10月6日(2022.10.6)
特許法第３０条第２項適用申請有り 令和３年１０月８日 ｈｔｔｐｓ：／／ｗｗｗ．ｊｓａｅ．ｏｒ．ｊｐ／２０２１ａｋｉ／ａｔｔｅｎｄ．ｈｔｍｌ ｈｔｔｐｓ：／／ｇａｋｋａｉ－ｗｅｂ．ｎｅｔ／ｐ／ｊｓａｅ／ａ／ｒｏｎｂｕｎ／ｍｏｄ２．ｐｈｐ 令和３年１０月１１日 ｈｔｔｐｓ：／／ｗｗｗ．ｊｓａｅ．ｏｒ．ｊｐ／２０２１ａｋｉ／ 令和３年１０月１３日 公益社団法人自動車技術会 ２０２１年秋季大会学術講演会 令和４年３月９日 ｈｔｔｐｓ：／／ｗｗｗ．ｊｓａｅ．ｎｅｔ／ｋａｎｔｏ＿ｍｏｒｅ／ｉｃａｔｙｅ／ 令和４年３月１０日 公益社団法人自動車技術会関東支部 ２０２１年度学術研究講演会 令和４年５月２６日 公益社団法人自動車技術会 ２０２２年春季大会 第３回学生ポスターセッション 令
最終頁に続く

(71)出願人　899000057
学校法人日本大学
東京都千代田区九段南四丁目８番２４号
(71)出願人　000110804
ニチアス株式会社
東京都中央区八丁堀一丁目６番１号
(74)代理人　110000154
弁理士法人はるか国際特許事務所
(72)発明者　見坐地 一人
東京都千代田区九段南四丁目８番２４号
学校法人日本大学内
(72)発明者　三木 達郎
東京都中央区八丁堀一丁目６番１号 ニチアス株式会社内
(72)発明者　小野寺 正剛
最終頁に続く

(54)【発明の名称】　防音材の設計方法、製造方法、設計装置及び設計用プログラム

(57)【要約】　（修正有）
【課題】高温で使用される防音材を効果的に設計し製造する。
【解決手段】方法は、所定の高温以上の測定温度で多孔質体の試料に音波を放射し、実測関数と、第一パラメータを得る。多孔質体モデル関数を用いて実測関数と多孔質体モデル関数との差が予め定められた範囲内に低減される第一パラメータの値を実測パラメータ値として決定し、実測パラメータ値に基づき所定の高温以上の温度である評価温度における評価用パラメータ値を決定し、第一パラメータと多孔質体の他の特性を示す第二パラメータと防音材の音響特性との関係を示す防音材モデル関数を用いて評価温度について第一パラメータの値として評価用パラメータ値が代入された防音材モデル関数により得られる防音材の音響特性が予め定められた範囲内に到達する第二パラメータの値を設計用パラメータ値として決定し、設計用パラメータ値に基づいて多孔質体の設計用物性値を決定する。
【選択図】図１



【特許請求の範囲】
【請求項１】
多孔質体を含む防音材の設計方法であって、
所定の高温以上の測定温度で前記多孔質体の試料に音波を放射して前記多孔質体の音響特性を測定することにより得られた前記多孔質体の前記音響特性と音波特性との関係を示す実測関数と、前記多孔質体の特性を示す第一パラメータを含み前記多孔質体の前記音響特性と前記音波特性との関係を示す多孔質体モデル関数とを用いて、前記測定温度について、前記実測関数と前記多孔質体モデル関数との差が予め定められた範囲内に低減される前記第一パラメータの値を実測パラメータ値として決定する実測パラメータ値決定工程と、
前記実測パラメータ値に基づき、所定の高温以上の温度である評価温度における評価用パラメータ値を決定する評価条件決定工程と、
前記第一パラメータと、前記多孔質体の他の特性を示す第二パラメータと、前記多孔質体を含む前記防音材の音響特性との関係を示す防音材モデル関数を用いて、前記評価温度について、前記第一パラメータの値として前記評価用パラメータ値が代入された前記防音材モデル関数により得られる前記防音材の前記音響特性が予め定められた範囲内に到達する前記第二パラメータの値を設計用パラメータ値として決定する評価工程と、
前記設計用パラメータ値に基づいて、前記多孔質体の設計用物性値を決定する物性値決定工程と、
を含む、
防音材の設計方法。
【請求項２】
前記実測パラメータ値決定工程において、所定の高温以上の前記測定温度を含む複数の測定温度の各々で前記多孔質体の前記音響特性を測定することにより得られた前記実測関数を用い、前記複数の測定温度の各々について前記実測パラメータ値を決定することにより、前記実測パラメータ値と前記測定温度との関係を示す実測パラメータ値の温度依存関数を得ること、及び、
前記評価条件決定工程において、前記実測パラメータ値の温度依存関数に基づいて、前記複数の測定温度とは異なる所定の高温以上の温度である前記評価温度における前記評価用パラメータ値を決定すること、
を含む、
請求項１に記載の防音材の設計方法。
【請求項３】
多孔質体を含む防音材の製造方法であって、
所定の高温以上の測定温度で前記多孔質体の試料に音波を放射して前記多孔質体の音響特性を測定することにより得られた前記多孔質体の前記音響特性と音波特性との関係を示す実測関数と、前記多孔質体の特性を示す第一パラメータを含み前記多孔質体の前記音響特性と前記音波特性との関係を示す多孔質体モデル関数とを用いて、前記所定の高温以上の測定温度について、前記実測関数と前記多孔質体モデル関数との差が予め定められた範囲内に低減される前記第一パラメータの値を実測パラメータ値として決定する実測パラメータ値決定工程と、
前記実測パラメータ値に基づき、所定の高温以上の温度である評価温度における評価用パラメータ値を決定する評価条件決定工程と、
前記第一パラメータと、前記多孔質体の他の特性を示す第二パラメータと、前記多孔質体を含む前記防音材の音響特性との関係を示す防音材モデル関数を用いて、前記評価温度について、前記第一パラメータの値として前記評価用パラメータ値が代入された前記防音材モデル関数により得られる前記防音材の前記音響特性が予め定められた範囲内に到達する前記第二パラメータの値を設計用パラメータ値として決定する評価工程と、
前記設計用パラメータ値に基づいて、前記多孔質体の設計用物性値を決定する物性値決定工程と、

前記設計用物性値を有する前記多孔質体を含む防音材を製造する防音材製造工程と、
を含む、
防音材の製造方法。
【請求項４】
前記実測パラメータ値決定工程において、所定の高温以上の前記測定温度を含む複数の測定温度の各々で前記多孔質体の前記音響特性を測定することにより得られた前記実測関数を用い、前記複数の測定温度の各々について前記実測パラメータ値を決定することにより、前記実測パラメータ値と前記測定温度との関係を示す実測パラメータ値の温度依存関数を得ること、及び、
前記評価条件決定工程において、前記実測パラメータ値の温度依存関数に基づいて、前記複数の測定温度とは異なる所定の高温以上の温度である前記評価温度における前記評価用パラメータ値を決定すること、
を含む、
請求項３に記載の防音材の製造方法。
【請求項５】
多孔質体を含む防音材の設計装置であって、
所定の高温以上の測定温度で前記多孔質体の試料に音波を放射して前記多孔質体の音響特性を測定することにより得られた前記多孔質体の前記音響特性と音波特性との関係を示す実測関数と、前記多孔質体の特性を示す第一パラメータを含み前記多孔質体の前記音響特性と前記音波特性との関係を示す多孔質体モデル関数とを用いて、前記測定温度について、前記実測関数と前記多孔質体モデル関数との差が予め定められた範囲内に低減される前記第一パラメータの値を実測パラメータ値として決定する実測パラメータ値決定部と、
前記実測パラメータ値に基づき、所定の高温以上の温度である評価温度における評価用パラメータ値を決定する評価条件決定部と、
前記第一パラメータと、前記多孔質体の他の特性を示す第二パラメータと、前記多孔質体を含む前記防音材の音響特性との関係を示す防音材モデル関数を用いて、前記評価温度について、前記第一パラメータの値として前記評価用パラメータ値が代入された前記防音材モデル関数により得られる前記防音材の前記音響特性が予め定められた範囲内に到達する前記第二パラメータの値を設計用パラメータ値として決定する評価部と、
前記設計用パラメータ値に基づいて、前記多孔質体の設計用物性値を決定する物性値決定部と、
を含む、
防音材の設計装置。
【請求項６】
多孔質体を含む防音材の設計用プログラムであって、
所定の高温以上の測定温度で前記多孔質体の試料に音波を放射して前記多孔質体の音響特性を測定することにより得られた前記多孔質体の前記音響特性と音波特性との関係を示す実測関数と、前記多孔質体の特性を示す第一パラメータを含み前記多孔質体の前記音響特性と前記音波特性との関係を示す多孔質体モデル関数とを用いて、前記測定温度について、前記実測関数と前記多孔質体モデル関数との差が予め定められた範囲内に低減される前記第一パラメータの値を実測パラメータ値として決定する実測パラメータ値決定手段、
前記実測パラメータ値に基づき、所定の高温以上の温度である評価温度における評価用パラメータ値を決定する評価条件決定手段、
前記第一パラメータと、前記多孔質体の他の特性を示す第二パラメータと、前記多孔質体を含む前記防音材の音響特性との関係を示す防音材モデル関数を用いて、前記評価温度について、前記第一パラメータの値として前記評価用パラメータ値が代入された前記防音材モデル関数により得られる前記防音材の前記音響特性が予め定められた範囲内に到達する前記第二パラメータの値を設計用パラメータ値として決定する評価手段、及び
前記設計用パラメータ値に基づいて、前記多孔質体の設計用物性値を決定する物性値決定手段、

としてコンピュータを機能させるための防音材の設計用プログラム。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、防音材の設計方法、製造方法、設計装置及び設計用プログラムに関する。
【背景技術】
【０００２】
特許文献１には、音響材料を数学的に表現する数理モデルに基づいて、前記音響材料を特徴付ける複数の材料パラメータのうちの１種類につき予め指定した数値範囲にある複数の値のそれぞれに対して、前記音響材料の音響性能を算出する音響性能算出手段と、前記１種類の材料パラメータの値と周波数とを２軸として、前記音響性能算出手段により算出された音響性能を等高線で表した等高線図を、前記音響性能の値に応じて色を分けて描画するとともに、前記等高線図の周波数軸に平行な直線状のカーソルと前記カーソルが示す前記１種類の材料パラメータの値の表示とを前記等高線図上に描画する等高線図描画手段と、前記数値範囲内の１つの値における、前記周波数と前記音響性能との関係を表す性能曲線をプロット図に描画するプロット図描画手段とを備えており、前記等高線図描画手段が、ユーザの入力に応じて前記等高線図における前記カーソルの表示位置と前記１種類の材料パラメータの値の表示とを変更し、前記プロット図描画手段が、変更された前記１種類の材料パラメータの値の表示に対応する性能曲線を前記プロット図に描画するものである、音響性能計算装置が記載されている。
【０００３】
特許文献２には、発泡樹脂製吸音材の内部構造を設計する方法であって、前記発泡樹脂製吸音材の内部構造と等価な構造であって、周期的かつ均質な構造の微視構造モデルを設定する工程と、前記発泡樹脂製吸音材の設計を行う範囲内でサンプリングした、複数の前記微視構造モデルのそれぞれについて、均質化法を用いて、音響特性を算出する工程と、前記発泡樹脂製吸音材のＢｉｏｔパラメータと前記微視構造モデルとの関係式を、算出した前記音響特性に基づいて、同定する工程と、前記発泡樹脂製吸音材の設計目標である、目標音響特性を設定する工程と、Ｂｉｏｔモデル法を用いて、設定した前記目標音響特性を実現するＢｉｏｔパラメータを同定する工程と、前記関係式を用いて、同定したＢｉｏｔパラメータに対応する微視構造モデルを同定する工程と、を備えている設計方法が記載されている。
【先行技術文献】
【特許文献】
【０００４】
【特許文献１】再表２０１３－０８０９９３号公報
【特許文献２】特開２０２２－０５４８４２号公報
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００５】
しかしながら従来、多孔質体を含む防音材の設計においては、当該多孔質体の常温におけるパラメータを用いていたため、高温で使用される防音材については、試作品を実際に高温の環境下において音響特性を評価し、その評価結果に基づき再設計するという作業を繰り返す必要があった。
【０００６】
本発明は、上記課題に鑑みて為されたものであり、高温で使用される防音材の効果的な設計及び製造を実現する、防音材の設計方法、製造方法、設計装置及び設計用プログラムを提供することをその目的の一つとする。
【課題を解決するための手段】
【０００７】
上記課題を解決するための本発明の一実施形態に係る防音材の設計方法は、多孔質体を

含む防音材の設計方法であって、所定の高温以上の測定温度で前記多孔質体の試料に音波を放射して前記多孔質体の音響特性を測定することにより得られた前記多孔質体の前記音響特性と音波特性との関係を示す実測関数と、前記多孔質体の特性を示す第一パラメータを含み前記多孔質体の前記音響特性と前記音波特性との関係を示す多孔質体モデル関数とを用いて、前記測定温度について、前記実測関数と前記多孔質体モデル関数との差が予め定められた範囲内に低減される前記第一パラメータの値を実測パラメータ値として決定する実測パラメータ値決定工程と、前記実測パラメータ値に基づき、所定の高温以上の温度である評価温度における評価用パラメータ値を決定する評価条件決定工程と、前記第一パラメータと、前記多孔質体の他の特性を示す第二パラメータと、前記多孔質体を含む前記防音材の音響特性との関係を示す防音材モデル関数を用いて、前記評価温度について、前記第一パラメータの値として前記評価用パラメータ値が代入された前記防音材モデル関数により得られる前記防音材の前記音響特性が予め定められた範囲内に到達する前記第二パラメータの値を設計用パラメータ値として決定する評価工程と、前記設計用パラメータ値に基づいて、前記多孔質体の設計用物性値を決定する物性値決定工程と、を含む。本発明によれば、高温で使用される防音材の効果的な設計方法が提供される。

【０００８】

前記防音材の設計方法は、前記実測パラメータ値決定工程において、所定の高温以上の前記測定温度を含む複数の測定温度の各々で前記多孔質体の前記音響特性を測定することにより得られた前記実測関数を用い、前記複数の測定温度の各々について前記実測パラメータ値を決定することにより、前記実測パラメータ値と前記測定温度との関係を示す実測パラメータ値の温度依存関数を得ること、及び、前記評価条件決定工程において、前記実測パラメータ値の温度依存関数に基づいて、前記複数の測定温度とは異なる所定の高温以上の温度である前記評価温度における前記評価用パラメータ値を決定すること、を含むこととしてもよい。

【０００９】

上記課題を解決するための本発明の一実施形態に係る防音材の製造方法は、多孔質体を含む防音材の製造方法であって、所定の高温以上の測定温度で前記多孔質体の試料に音波を放射して前記多孔質体の音響特性を測定することにより得られた前記多孔質体の前記音響特性と音波特性との関係を示す実測関数と、前記多孔質体の特性を示す第一パラメータを含み前記多孔質体の前記音響特性と前記音波特性との関係を示す多孔質体モデル関数とを用いて、前記所定の高温以上の測定温度について、前記実測関数と前記多孔質体モデル関数との差が予め定められた範囲内に低減される前記第一パラメータの値を実測パラメータ値として決定する実測パラメータ値決定工程と、前記実測パラメータ値に基づき、所定の高温以上の温度である評価温度における評価用パラメータ値を決定する評価条件決定工程と、前記第一パラメータと、前記多孔質体の他の特性を示す第二パラメータと、前記多孔質体を含む前記防音材の音響特性との関係を示す防音材モデル関数を用いて、前記評価温度について、前記第一パラメータの値として前記評価用パラメータ値が代入された前記防音材モデル関数により得られる前記防音材の前記音響特性が予め定められた範囲内に到達する前記第二パラメータの値を設計用パラメータ値として決定する評価工程と、前記設計用パラメータ値に基づいて、前記多孔質体の設計用物性値を決定する物性値決定工程と、前記設計用物性値を有する前記多孔質体を含む防音材を製造する防音材製造工程と、を含む。本発明によれば、高温で使用される防音材の効果的な製造方法が提供される。

【００１０】

前記実測パラメータ値決定工程において、所定の高温以上の前記測定温度を含む複数の測定温度の各々で前記多孔質体の前記音響特性を測定することにより得られた前記実測関数を用い、前記複数の測定温度の各々について前記実測パラメータ値を決定することにより、前記実測パラメータ値と前記測定温度との関係を示す実測パラメータ値の温度依存関数を得ること、及び、前記評価条件決定工程において、前記実測パラメータ値の温度依存関数に基づいて、前記複数の測定温度とは異なる所定の高温以上の温度である前記評価温度における前記評価用パラメータ値を決定すること、を含むこととしてもよい。

【００１１】
上記課題を解決するための本発明の一実施形態に係る防音材の設計装置は、多孔質体を含む防音材の設計装置であって、所定の高温以上の測定温度で前記多孔質体の試料に音波を放射して前記多孔質体の音響特性を測定することにより得られた前記多孔質体の前記音響特性と音波特性との関係を示す実測関数と、前記多孔質体の特性を示す第一パラメータを含み前記多孔質体の前記音響特性と前記音波特性との関係を示す多孔質体モデル関数とを用いて、前記測定温度について、前記実測関数と前記多孔質体モデル関数との差が予め定められた範囲内に低減される前記第一パラメータの値を実測パラメータ値として決定する実測パラメータ値決定部と、前記実測パラメータ値に基づき、所定の高温以上の温度である評価温度における評価用パラメータ値を決定する評価条件決定部と、前記第一パラメータと、前記多孔質体の他の特性を示す第二パラメータと、前記多孔質体を含む前記防音材の音響特性との関係を示す防音材モデル関数を用いて、前記評価温度について、前記第一パラメータの値として前記評価用パラメータ値が代入された前記防音材モデル関数により得られる前記防音材の前記音響特性が予め定められた範囲内に到達する前記第二パラメータの値を設計用パラメータ値として決定する評価部と、前記設計用パラメータ値に基づいて、前記多孔質体の設計用物性値を決定する物性値決定部と、を含む。本発明によれば、高温で使用される防音材の効果的な設計装置が提供される。
【００１２】
上記課題を解決するための本発明の一実施形態に係る防音材の設計用プログラムは、多孔質体を含む防音材の設計用プログラムであって、所定の高温以上の測定温度で前記多孔質体の試料に音波を放射して前記多孔質体の音響特性を測定することにより得られた前記多孔質体の前記音響特性と音波特性との関係を示す実測関数と、前記多孔質体の特性を示す第一パラメータを含み前記多孔質体の前記音響特性と前記音波特性との関係を示す多孔質体モデル関数とを用いて、前記測定温度について、前記実測関数と前記多孔質体モデル関数との差が予め定められた範囲内に低減される前記第一パラメータの値を実測パラメータ値として決定する実測パラメータ値決定手段、前記実測パラメータ値に基づき、所定の高温以上の温度である評価温度における評価用パラメータ値を決定する評価条件決定手段、前記第一パラメータと、前記多孔質体の他の特性を示す第二パラメータと、前記多孔質体を含む前記防音材の音響特性との関係を示す防音材モデル関数を用いて、前記評価温度について、前記第一パラメータの値として前記評価用パラメータ値が代入された前記防音材モデル関数により得られる前記防音材の前記音響特性が予め定められた範囲内に到達する前記第二パラメータの値を設計用パラメータ値として決定する評価手段、及び前記設計用パラメータ値に基づいて、前記多孔質体の設計用物性値を決定する物性値決定手段、としてコンピュータを機能させるための防音材の設計用プログラムである。本発明によれば、高温で使用される防音材の効果的な設計用プログラムが提供される。
【発明の効果】
【００１３】
本発明によれば、高温で使用される防音材の効果的な設計及び製造を実現する、防音材の設計方法、製造方法、設計装置及び設計用プログラムが提供される。
【図面の簡単な説明】
【００１４】
【図１】本発明の一実施形態に係る方法に含まれる主な工程を示す説明図である。
【図２Ａ】本発明の一実施形態に係る実施例で得られた、２０℃における多孔質体の吸音率と周波数との関係を示す実測関数の一例を示す説明図である。
【図２Ｂ】本発明の一実施形態に係る実施例で得られた、１００℃における多孔質体の吸音率と周波数との関係を示す実測関数の一例を示す説明図である。
【図２Ｃ】本発明の一実施形態に係る実施例で得られた、２００℃における多孔質体の吸音率と周波数との関係を示す実測関数の一例を示す説明図である。
【図２Ｄ】本発明の一実施形態に係る実施例で得られた、３００℃における多孔質体の吸音率と周波数との関係を示す実測関数の一例を示す説明図である。

【図３Ａ】本発明の一実施形態に係る実施例で得られた、２０℃における多孔質体の吸音率と周波数との関係を示す実測関数の他の例を示す説明図である。
【図３Ｂ】本発明の一実施形態に係る実施例で得られた、１００℃における多孔質体の吸音率と周波数との関係を示す実測関数の他の例を示す説明図である。
【図３Ｃ】本発明の一実施形態に係る実施例で得られた、２００℃における多孔質体の吸音率と周波数との関係を示す実測関数の他の例を示す説明図である。
【図３Ｄ】本発明の一実施形態に係る実施例で得られた、３００℃における多孔質体の吸音率と周波数との関係を示す実測関数の他の例を示す説明図である。
【図４Ａ】本発明の一実施形態に係る実施例で得られた、多孔質体の流れ抵抗と温度との関係を示す説明図である。
【図４Ｂ】本発明の一実施形態に係る実施例で得られた、多孔質体の縦弾性率と温度との関係を示す説明図である。
【図５Ａ】本発明の一実施形態に係る実施例で用いた、吸音率を評価するための防音材モデルを示す説明図である。
【図５Ｂ】本発明の一実施形態に係る実施例で用いた、透過損失を評価するための防音材モデルを示す説明図である。
【図５Ｃ】本発明の一実施形態に係る実施例で用いた、挿入損失を評価するための防音材モデルを示す説明図である。
【図６Ａ】本発明の一実施形態に係る実施例で得られた、防音材の吸音率を最大にする多孔質体の繊維径の値を示す説明図である。
【図６Ｂ】本発明の一実施形態に係る実施例で得られた、防音材の透過損失を最大にする多孔質体の繊維径の値を示す説明図である。
【図６Ｃ】本発明の一実施形態に係る実施例で得られた、防音材の挿入損失を最大にする多孔質体の繊維径の値を示す説明図である。
【図６Ｄ】本発明の一実施形態に係る実施例で得られた、防音材の吸音率と透過損失と挿入損失との合計を最大にする多孔質体の繊維径の値を示す説明図である。
【発明を実施するための形態】
【００１５】
以下に、本発明の一実施形態について説明する。なお、本発明は本実施形態に限られるものではない。
【００１６】
図１には、本実施形態に係る方法（以下、「本方法」という。）に含まれる主な工程を示す。本方法は、その一側面として、多孔質体を含む防音材の設計方法であって、所定の高温以上の測定温度で当該多孔質体の試料に音波を放射して当該多孔質体の音響特性を測定することにより得られた当該多孔質体の当該音響特性と音波特性との関係を示す実測関数と、当該多孔質体の特性を示す第一パラメータを含み当該多孔質体の当該音響特性と当該音波特性との関係を示す多孔質体モデル関数とを用いて、当該測定温度について、当該実測関数と当該多孔質体モデル関数との差が予め定められた範囲内に低減される当該第一パラメータの値を実測パラメータ値として決定する実測パラメータ値決定工程Ｓ２と、当該実測パラメータ値に基づき、所定の高温以上の温度である評価温度における評価用パラメータ値を決定する評価条件決定工程Ｓ３と、当該第一パラメータと、当該多孔質体の他の特性を示す第二パラメータと、当該多孔質体を含む当該防音材の音響特性との関係を示す防音材モデル関数を用いて、当該評価温度について、当該第一パラメータの値として当該評価用パラメータ値が代入された当該防音材モデル関数により得られる当該防音材の当該音響特性が予め定められた範囲内に到達する当該第二パラメータの値を設計用パラメータ値として決定する評価工程Ｓ４と、当該設計用パラメータ値に基づいて、当該多孔質体の設計用物性値を決定する物性値決定工程Ｓ５と、を含む。
【００１７】
また、本方法は、他の側面として、多孔質体を含む防音材の製造方法であって、所定の高温以上の測定温度で当該多孔質体の試料に音波を放射して当該多孔質体の音響特性を測

定することにより得られた当該多孔質体の当該音響特性と音波特性との関係を示す実測関数と、当該多孔質体の特性を示す第一パラメータを含み当該多孔質体の当該音響特性と当該音波特性との関係を示す多孔質体モデル関数とを用いて、当該測定温度について、当該実測関数と当該多孔質体モデル関数との差が予め定められた範囲内に低減される当該第一パラメータの値を実測パラメータ値として決定する実測パラメータ値決定工程Ｓ２と、当該実測パラメータ値に基づき、所定の高温以上の温度である評価温度における評価用パラメータ値を決定する評価条件決定工程Ｓ３と、当該第一パラメータと、当該多孔質体の他の特性を示す第二パラメータと、当該多孔質体を含む当該防音材の音響特性との関係を示す防音材モデル関数を用いて、当該評価温度について、当該第一パラメータの値として当該評価用パラメータ値が代入された当該防音材モデル関数により得られる当該防音材の当該音響特性が予め定められた範囲内に到達する当該第二パラメータの値を設計用パラメータ値として決定する評価工程Ｓ４と、当該設計用パラメータ値に基づいて、当該多孔質体の設計用物性値を決定する物性値決定工程Ｓ５と、当該設計用物性値を有する当該多孔質体を含む防音材を製造する防音材製造工程（不図示）と、を含む。

【００１８】

なお、本方法は、図１に示すように、実測工程Ｓ１をさらに含んでもよい。この場合、本方法は、上述した工程に加えて、所定の高温以上の測定温度で多孔質体の試料に音波を放射して当該多孔質体の音響特性を測定し、当該測定温度における当該多孔質体の当該音響特性と音波特性との関係を示す実測関数を得る実測工程Ｓ１をさらに含む。

【００１９】

本実施形態において設計及び製造の対象となる防音材は、多孔質体を含む。多孔質体は、骨格部分と空隙部分とを含む多孔質構造を有する部材であれば特に限られないが、所望の吸音性を有する部材（吸音材）であることが好ましい。具体的に、多孔質体は、例えば、繊維体又は発泡成形体であることが好ましい。

【００２０】

繊維体は、無機繊維及び／又は有機繊維から構成される。無機繊維は、例えば、グラスウール、ロックウール、シリカ繊維、アルミナ繊維、シリカ－アルミナ繊維、アラミド繊維、岩綿長繊維及びウィスカー（ＳｉＣ等）からなる群より選択される１種以上である。有機繊維は、例えば、ポリエチレンテレフタレート等のポリエステル繊維、ポリアミド繊維、ポリエチレン繊維やポリプロピレン等のポリオレフィン繊維、及びアクリル繊維等の樹脂繊維、綿、羊毛、木毛、クズ繊維及びケナフからなる群より選択される１種以上である。繊維体は、織布であってもよいし、不織布であってもよい。不織布は、例えば、繊維集成体であってもよい。繊維集成体は、例えば、フェルト又はブランケットであってもよい。

【００２１】

発泡成形体は、連通気泡を有することが好ましく、例えば、連通気泡を有する樹脂発泡成形体であってもよい。発泡成形体を構成する樹脂は特に限られないが、例えば、ポリウレタン、ポリエチレン及びポリプロピレン等のポリオレフィン、ポリスチレン、フェノール樹脂、メラミン樹脂、ニトリルブタジエンゴム、クロロプレンゴム、スチレンゴム、シリコーンゴム、ウレタンゴム、ＥＰＤＭ及びエチレン－酢酸ビニル共重合体からなる群より選択される１種以上であってもよい。

【００２２】

多孔質体を含む防音材は、当該多孔質体のみから構成されてもよいし、当該多孔質体と他の部材とを含んでもよい。防音材に含まれてもよい多孔質体以外の部材は、設計の対象となる多孔質体以外の部材であれば特に限られないが、当該防音材は、例えば、当該多孔質体と非多孔質体とを含んでもよい。

【００２３】

防音材に含まれる非多孔質体は、防音材の一部として使用されるものであれば特に限られないが、所望の遮音性を有する部材（遮音材）であることが好ましい。非多孔質体は、非通気性を有することが好ましい。具体的に、非多孔質体は、例えば、ＪＩＳ　Ｌ１０１

８－１９９９に準拠した方法で測定される通気率が、１０ｃｃ／ｃｍ^2・ｓｅｃ以下であってもよく、０．００１ｃｃ／ｃｍ^2・ｓｅｃ以上、１０ｃｃ／ｃｍ^2・ｓｅｃ以下であることが好ましく、０．０１／ｃｍ^2・ｓｅｃ以上、１ｃｃ／ｃｍ^2・ｓｅｃ以下であることが特に好ましい。

【００２４】

非多孔質体の形状は特に限られないが、当該非多孔質体は、例えば、非多孔質フィルムであることが好ましい。非多孔質体を構成する材料は特に限られないが、例えば、樹脂であることが好ましい。すなわち、非多孔質体は、非多孔質樹脂成形体であることが好ましく、非多孔質樹脂フィルムであることが特に好ましい。非多孔質体を構成する樹脂は、本発明の効果が得られれば特に限られないが、例えば、エラストマーを含むことが好ましい。

【００２５】

防音材が多孔質体と非多孔質体とを含む場合、当該防音材は、積層された当該多孔質体及び非多孔質体を含むことが好ましい。この場合、防音材は、多孔質体及び非多孔質体の一方に他方を積層した構造を含む。すなわち、防音材は、積層された多孔質体と非多孔質体との組み合わせを１以上含み、当該組み合わせを複数含んでもよい。

【００２６】

防音材の形状及びサイズは特に限られないが、例えば、その厚さ（防音材が複数の層（例えば、多孔質体の層及び非多孔質体の層）を含む場合は、当該複数の層の厚さの合計）が５０ｍｍ以下であってもよく、３０ｍｍ以下であることが好ましく、２０ｍｍ以下であることがより好ましく、１５ｍｍ以下であることがより一層好ましく、１０ｍｍ以下であることが特に好ましい。防音材の厚さは、例えば、０．１ｍｍ以上であってもよく、１ｍｍ以上であってもよい。防音材の厚さは、上述した下限値のいずれかと、上述した上限値のいずれかとを任意に組み合わせて特定されてもよい。

【００２７】

また、本実施形態において設計及び製造の対象となる防音材は、所定の高温以上の温度で使用され得る防音材である。具体的に、防音材の使用温度は、例えば、１１０℃以上であってもよく、１２０℃以上であってもよく、１３０℃以上であってもよく、１４０℃以上であってもよく、１５０℃以上であってもよく、１６０℃以上であってもよく、１８０℃以上であってもよく、２００℃以上であってもよく、２２０℃以上であってもよく、２５０℃以上であってもよく、２８０℃以上であってもよく、３００℃以上であってもよい。また、防音材の使用温度は、例えば、５００℃以下であってもよく、４００℃以下であってもよい。防音材の使用温度は、上述した下限値のいずれかと、上述した上限値のいずれかとを任意に組み合わせて特定されてもよい。

【００２８】

本方法が実測工程を含む場合、当該実測工程においては、まず所定の高温以上の測定温度で多孔質体の試料に音波を放射して、当該多孔質体の音響特性を測定する。所定の高温以上の測定温度は、例えば、１１０℃以上であってもよく、１２０℃以上であってもよく、１３０℃以上であってもよく、１４０℃以上であってもよく、１５０℃以上であってもよく、１６０℃以上であってもよく、１８０℃以上であってもよく、２００℃以上であってもよく、２２０℃以上であってもよく、２５０℃以上であってもよく、２８０℃以上であってもよく、３００℃以上であってもよい。また、測定温度は、例えば、５００℃以下であってもよく、４００℃以下であってもよい。実測関数を得るための測定温度は、上述した下限値のいずれかと、上述した上限値のいずれかとを任意に組み合わせて特定されてもよい。

【００２９】

実測工程においては、所定の高温以上の測定温度を含む複数の測定温度で多孔質体の音響特性を測定してもよい。すなわち、実測工程においては、多孔質体の音響特性を２以上の測定温度で測定してもよいし、３以上の測定温度で測定してもよいし、４以上の測定温度で測定してもよい

【００３０】
複数の測定温度は、所定の高温以上である１以上の測定温度を含めば特に限られないが、例えば、所定の高温以上である２以上の測定温度を含んでもよいし、所定の高温以上である１以上の測定温度と所定の高温未満である１以上の測定温度とを含んでもよいし、所定の高温以上である１以上の測定温度と所定の高温未満である２以上の測定温度とを含んでもよいし、所定の高温以上である２以上の測定温度と所定の高温未満である２以上の測定温度とを含んでもよい。
【００３１】
複数の測定温度が所定の高温未満の測定温度を含む場合、当該所定の高温未満の測定温度は、当該所定の高温以上の上記測定温度より低い温度であれば特に限られないが、例えば、１２０℃以下であってもよいし、１００℃以下であってもよいし、８０℃以下であってもよいし、６０℃以下であってもよいし、５０℃以下であってもよいし、４５℃以下であってもよいし、４０℃以下であってもよいし、３５℃以下であってもよいし、３０℃以下であってもよい。また、複数の測定温度に含まれる所定の高温未満の測定温度は、例えば、０℃超であってもよいし、５℃以上であってもよい。複数の測定温度に含まれる所定の高温未満の測定温度は、上述した下限値のいずれかと、上述した上限値のいずれかとを任意に組み合わせて特定されてもよい。
【００３２】
音響特性の測定に用いられる多孔質体の試料は、防音材に含まれる多孔質体と同一の材料特性を有し、当該測定に適したものであれば特に限られない。例えば、後述の実測パラメータ値決定工程において複数の第一パラメータを用いる場合には、形状やサイズ等の試料としての条件は、当該第一パラメータによって異ならせてもよい。具体的に、例えば、第一パラメータとして縦弾性率を用いる場合には、多孔質体の表面のうち、音波が入射する表面（すなわち音源側の表面）を非通気性材料で覆った試料を用いることが、当該試料をいわゆるバネマス系のモデルとして扱うことができるため好ましい。一方、例えば、第一パラメータとして流れ抵抗及び／又は嵩密度を用いる場合には、非通気性材料で覆われていない多孔質体から構成される試料を用いることが好ましい。
【００３３】
多孔質体の試料に対して放射する音波は、本発明の効果が得られれば特に限られず、例えば、周波数が１０Ｈｚ以上、２００００Ｈｚ以下の範囲内の音波であってもよく、周波数が１００Ｈｚ以上、１００００Ｈｚ以下の範囲内の音波であることが好ましい。音波は、スピーカー等の音源を用いて放射される。
【００３４】
実測工程において測定される多孔質体の音響特性は特に限られないが、例えば、吸音特性及び／又は遮音特性であることが好ましい。より具体的に、多孔質体の音響特性としては、例えば、吸音率（例えば、垂直入射吸音率）、透過損失（例えば、垂直入射透過損失）、及び挿入損失（例えば、垂直入射挿入損失）からなる群より選択される１以上を測定する。
【００３５】
本方法の実測工程においては、高温で多孔質体の音響特性を測定するため、当該高温での測定に適した装置を用いる必要がある。具体的に、例えば、国際公開第２０２０／０２６４１５号に記載されているような高温での音響特性の測定に適した音響特性測定装置が好ましく用いられる。
【００３６】
そして、実測工程においては、所定の高温以上の測定温度で多孔質体の音響特性を測定することにより、当該測定温度における多孔質体の音響特性と音波特性との関係を示す実測関数を得る。実測関数において音響特性と関連付けられる音波特性は、本発明の効果が得られれば特に限られないが、例えば、周波数、角振動数、波長又は波数である。実測工程において、所定の高温以上の測定温度を含む複数の測定温度で多孔質体の音響特性を測定する場合、当該複数の測定温度の各々における実測関数が得られる。

【００３７】
本方法の実測パラメータ値決定工程においては、まず、多孔質体の特性を示す第一パラメータを含み当該多孔質体の音響特性と音波特性との関係を示す多孔質体モデル関数を用意する。
【００３８】
多孔質体モデル関数は、上記実測関数に対応する、多孔質体の音響特性と音波特性との関係を示す関数であって、当該多孔質体の特性を示す第一パラメータを変数として含むものであれば特に限られないが、当該多孔質体の数理モデルに基づくものであることが好ましい。
【００３９】
多孔質体の数理モデルは、本発明の効果が得られれば特に限られないが、例えば、Ｂｉｏｔ理論に基づく数理モデル（Ｂｉｏｔモデル）が好ましく用いられる。より具体的に、例えば、ＪＣＡ（Johnson-Champoux-Allard）モデル又はＪＣＡＬ（Johnson-Champoux-Allard-Lafage）モデルが好ましく用いられる。ＪＣＡモデル及びＪＣＡＬモデルは、それぞれequivalent fluidモデルの一つであり、音響特性の解析に好ましく用いられる（J. F. Allard and N. Atalla、 Propagation of Sound in Porous Media、 John Wiley & Sons、 Inc.(2009)）。また、例えば、Ｋａｔｏモデルを用いることもできる（特開２００７－１９９２７０号公報、日本音響学会誌６４巻６号（２００８）、ｐｐ．３３９－３４７）。
【００４０】
多孔質体モデル関数に含まれる第一パラメータは、多孔質体の特性を示し、当該多孔質体の音響特性と関連付けられるパラメータであれば特に限られないが、温度依存性を有し得るパラメータであることが好ましく、実際に温度依存性を有するパラメータであることが特に好ましい。
【００４１】
すなわち、第一パラメータは、温度の変化に伴い、その値が変化し得るパラメータであることが好ましい。具体的に、第一パラメータは、例えば、温度が５０℃以上、６０℃以上、７０℃以上、８０℃以上、９０℃以上、又は１００℃以上変化した場合に、その値が変化し得る又は実際に変化するパラメータであってもよい。また、第一パラメータは、例えば、５０℃以下、４０℃以下又は３０℃以下の温度における値と、所定の高温以上の温度（例えば、上述の測定温度）における値とが異なり得る又は実際に異なるパラメータであってもよい。
【００４２】
第一パラメータは、例えば、Ｂｉｏｔ理論に基づくパラメータ（Ｂｉｏｔパラメータ）であってもよい。すなわち、第一パラメータは、例えば、流れ抵抗（多孔質体における空気の流れにくさを示すパラメータ）、弾性率（例えば、縦弾性率）（多孔質体の硬さを示すパラメータ）、嵩密度、多孔度（気孔率又は空隙率ともいう。）（多孔質体における空孔の割合を示すパラメータ）、ポアソン比（応力がかかった多孔質体における垂直方向の歪みと水平方向の歪みとの比として算出される、多孔質体の歪みやすさを示すパラメータ）、損失係数（多孔質体における振動の減衰のしやすさを示すパラメータ）、迷路度（多孔質体における音の通過経路の長さを示すパラメータ）、粘性特性長（多孔質体において空気が通過できる空間の長さを示すパラメータ）、及び熱的特性長（多孔質体において空気が固体と接する長さを示すパラメータ）からなる群より選択される１以上であってもよく、当該群より選択される１以上であって温度依存性を有し得るパラメータであることが好ましく、当該群より選択される１以上であって温度依存性を有するパラメータであることが特に好ましい。より具体的に、第一パラメータは、例えば、流れ抵抗、弾性率及び嵩密度からなる群より選択される１以上であることが好ましく、当該群より選択される１以上であって温度依存性を有し得るパラメータであることがより好ましく、当該群より選択される１以上であって温度依存性を有するパラメータであることが特に好ましい。
【００４３】

実測パラメータ値決定工程においては、第一パラメータを１つのみ用いてもよいが、複数の第一パラメータを用いることが好ましい。具体的に、第一パラメータは、例えば、流れ抵抗、弾性率（例えば、縦弾性率）、嵩密度、多孔度、ポアソン比、損失係数、迷路度、粘性特性長、及び熱的特性長からなる群より選択される２以上であってもよく、当該群より選択される２以上であって温度依存性を有し得るパラメータであることが好ましく、当該群より選択される２以上であって温度依存性を有するパラメータであることが特に好ましい。より具体的に、第一パラメータは、例えば、流れ抵抗、弾性率及び嵩密度からなる群より選択される２以上であることが好ましく、当該群より選択される２以上であって温度依存性を有し得るパラメータであることがより好ましく、当該群より選択される２以上であって温度依存性を有するパラメータであることが特に好ましい。

【００４４】

そして、実測パラメータ値決定工程においては、上述した実測関数と多孔質体モデル関数とを用いて、当該実測関数を得るために多孔質体の音響特性を測定した測定温度について、当該実測関数と当該多孔質体モデル関数との差が予め定められた範囲内に低減される第一パラメータの値を実測パラメータ値として決定する。より具体的に、例えば、実測関数と多孔質体モデル関数との差が予め定められた範囲内に低減される第一パラメータの値を、当該多孔質体の当該測定温度における実測パラメータ値として決定してもよい。

【００４５】

すなわち、例えば、多孔質体モデル関数に含まれる第一パラメータの値を変化させながら、当該実測関数と当該多孔質体モデル関数との差が予め定められた範囲内まで低減される当該第一パラメータの値を探し、当該差分が当該範囲内に収まる第一パラメータの値を、実測パラメータ値として決定する。

【００４６】

実測関数と多孔質体モデル関数との差は、例えば、特定範囲内の周波数において、実測関数により得られる音響特性値と、多孔質体モデル関数により得られる当該音響特性値との差分であることが好ましい。

【００４７】

より具体的に、実測関数と多孔質体モデル関数との差は、例えば、当該実測関数に含まれる周波数範囲の全部又は一部について、各周波数における実測関数の音響特性値と多孔質体モデル関数の音響特性値との差分であってもよく、当該各周波数における差分の、当該周波数範囲の全部又は一部についての合計であってもよい。

【００４８】

実測関数と多孔質体モデル関数との差が収まるかどうかの判断に用いられる予め定められた範囲は、当該多孔質体モデルが当該実測関数に十分近づいたと評価できる範囲であれば特に限られず、例えば、特定の数値範囲であってもよいし、特定の値であってもよいし、最小値等の特定の条件を満たす範囲であってもよい。

【００４９】

具体的に、例えば、実測関数により得られる音響特性値と多孔質体モデル関数により得られる音響特性値との差分が最小値となる第一パラメータの値を実測パラメータ値として決定してもよい。この場合、差分の最小値を最小二乗法により決定してもよい。

【００５０】

また、実測工程において、複数の測定温度の各々について実測関数が得られている場合、実測パラメータ値決定工程においては、当該複数の測定温度の各々について、実測パラメータ値を決定してもよい。

【００５１】

複数の測定温度の各々について、実測パラメータ値を決定する場合、実測パラメータ値決定工程においては、当該実測パラメータ値と当該測定温度との関係を示す、実測パラメータ値の温度依存関数が得られる。この点、実測工程において、３以上の測定温度について実測関数が得られている場合、信頼性が比較的高い、実測パラメータ値の温度依存関数が得られる。

【００５２】
　また、複数の第一パラメータを用いる場合、当該複数の第一パラメータの各々について、実測パラメータ値を決定してもよい。すなわち、複数の第一パラメータに対応する複数の実測パラメータ値を決定してもよい。
【００５３】
　複数の測定温度の各々について、複数の第一パラメータの各々に対応する複数の実測パラメータ値を決定することにより、当該複数の実測パラメータ値の各々について、温度依存関数が得られる。
【００５４】
　本方法の評価条件決定工程においては、実測パラメータ値決定工程で決定された実測パラメータ値に基づき、所定の高温以上の温度である評価温度における評価用パラメータ値を決定する。
【００５５】
　すなわち、評価条件決定工程においては、例えば、実測パラメータ値決定工程で決定された実測パラメータ値をそのまま評価用パラメータ値として決定してもよい。
【００５６】
　また、評価条件決定工程においては、例えば、実測関数が得られた測定温度、及び実測パラメータ値決定工程で決定された実測パラメータ値に基づき、所定の高温以上の温度を評価温度として決定するとともに、当該評価温度における第一パラメータの値を評価用パラメータ値として決定してもよい。
【００５７】
　この場合、評価条件決定工程においては、例えば、実測関数を得た測定温度をそのまま評価温度として決定するとともに、実測パラメータ値決定工程で決定された実測パラメータ値をそのまま評価用パラメータ値として決定してもよい。
【００５８】
　また、上述のとおり、実測パラメータ値決定工程において、実測パラメータ値の温度依存関数が得られた場合、評価条件決定工程においては、当該温度依存関数に基づいて、実測関数が得られた複数の測定温度とは異なる所定の高温以上の温度を評価温度として決定するとともに、当該評価温度における評価用パラメータ値を決定してもよい。
【００５９】
　すなわち、例えば、複数の測定温度のうち最も低い測定温度より高く、最も高い測定温度より低く、当該複数の測定温度のいずれとも異なる温度を評価温度として決定してもよい。また、例えば、複数の測定温度のうち最も高い測定温度より高く、且つ当該最も高い測定温度との差が２００℃以下、１５０℃以下、１００℃以下、８０℃以下又は５０℃以下である温度を評価温度として決定してもよい。また、例えば、複数の測定温度のうち最も低い測定温度より低く、所定の高温以上であり、且つ当該最も低い測定温度との差が２００℃以下、１５０℃以下、１００℃以下、８０℃以下又は５０℃以下である温度を評価温度として決定してもよい。
【００６０】
　なお、評価条件決定工程において、複数の評価温度を決定する場合、複数の測定温度とは異なる所定の高温以上の温度と、当該複数の測定温度のうち１以上とを当該評価温度として決定してもよい。すなわち、複数の評価温度は、複数の測定温度とは異なる所定の高温以上の評価温度と、当該複数の測定温度のいずれかと一致する評価温度とを含んでもよい。
【００６１】
　測定温度と異なる温度を評価温度として決定する場合、実測パラメータ値の温度依存関数を用いて、例えば、温度の値として当該評価温度が代入された当該温度依存関数により得られる実測パラメータ値を評価用パラメータ値として決定してもよいし、温度の値として当該評価温度が代入された当該温度依存関数により得られる実測パラメータ値との差が当該実測パラメータ値の３０％以内、２０％以内、１５％以内、１０％以内、又は５％以

内である値を評価用パラメータ値として決定してもよい。

【００６２】

評価条件決定工程において、複数の測定温度とは異なる所定の高温以上の温度を評価温度として決定することにより、実測関数を得るための音響特性を測定していない所定の高温以上の温度について、防音材を効果的に設計することができる。

【００６３】

評価条件決定工程においては、複数の評価温度と、複数の評価用パラメータ値とを決定してもよい。すなわち、評価温度と評価用パラメータ値との組み合わせを複数決定してもよい。この場合、複数の評価温度は、所定の高温以上である２以上の評価温度を含んでもよいし、所定の高温以上である1以上の評価温度と所定の高温未満である１以上の評価温度とを含んでもよいし、所定の高温以上である1以上の評価温度と所定の高温未満である２以上の評価温度とを含んでもよいし、所定の高温以上である２以上の評価温度と所定の高温未満である２以上の評価温度とを含んでもよい。

【００６４】

また、複数の評価温度は、複数の測定温度と同一の評価温度のみであってもよいし、測定温度と異なる評価温度のみであってもよいし、測定温度と同一の評価温度及び測定温度と異なる評価温度の両方を含んでもよい。

【００６５】

本方法の評価工程においては、まず、多孔質体の特性を示す上記第一パラメータと、当該多孔質体の他の特性を示す第二パラメータと、当該多孔質体を含む防音材の音響特性との関係を示す防音材モデル関数を用意する。

【００６６】

防音材モデル関数は、設計の対象となる防音材の音響特性と、当該防音材に含まれる多孔質体の特性を示す第一パラメータ及び第二パラメータとの関係を示す関数であれば特に限られないが、当該防音材の数理モデルに基づくものであることが好ましい。

【００６７】

防音材の数理モデルは、本発明の効果が得られれば特に限られないが、例えば、Ｂｉｏｔモデルが好ましく用いられる。より具体的に、例えば、ＪＣＡモデル又はＪＣＡＬモデルが好ましく用いられる。また、例えば、Ｋａｔｏモデルを用いることもできる。

【００６８】

評価工程で用いる防音材の数理モデルは、実測パラメータ値決定工程で用いる多孔質体の数理モデルと同一であってもよいし、異なっていてもよい。また、評価工程で用いる防音材モデル関数は、実測パラメータ値決定工程で用いる多孔質体モデル関数と同一であってもよいし、異なっていてもよい。すなわち、例えば、防音材が多孔質体のみから構成される場合（すなわち、例えば、多孔質体をそのまま防音材として用いる場合）には、防音材モデル関数として、多孔質体モデル関数と同一の関数を用いてもよい。一方、例えば、防音材が多孔質体と非多孔質体とを含む場合（例えば、防音材が、多孔質体と非多孔質体とを含む積層体である場合）には、防音材モデル関数として、多孔質体モデル関数とは異なるモデル関数を用いる。なお、多孔質体モデル関数と異なる防音材モデル関数は、当該多孔質モデル関数に含まれる関数の一部又は全部を含んでもよい。

【００６９】

防音材モデル関数に含まれる第二パラメータは、第一パラメータに対応する特性とは異なる多孔質体の特性を示し、当該多孔質体の音響特性と関連付けられるパラメータであれば特に限られないが、例えば、当該第一パラメータよりも温度依存性が小さいパラメータであってもよい。

【００７０】

すなわち、第二パラメータは、例えば、温度の変化に伴う値の変化量が第一パラメータより小さいパラメータであってもよい。また、第二パラメータは、例えば、温度が５０℃以上、６０℃以上、７０℃以上、８０℃以上、９０℃以上、又は１００℃以上変化した場合における値の変化量が第一パラメータのそれより小さいパラメータであってもよい。ま

た、第二パラメータは、例えば、５０℃以下、４０℃以下又は３０℃以下の温度における値と、所定の高温以上の温度（例えば、上述の測定温度）における値との差分が第一パラメータのそれより小さいパラメータであってもよい。

【００７１】

また、第二パラメータは、後述の物性値決定工程において決定される多孔質体の設計用物性値と関連付けられるパラメータであることが好ましい。すなわち、第二パラメータは、その値を決定することで、多孔質体の設計用物性値を算出できるパラメータであることが好ましい。具体的に、第二パラメータは、例えば、当該第二パラメータと多孔質体の設計用物性との関係を示す関数を用いることができるパラメータであってもよい。

【００７２】

具体的に、第二パラメータは、例えば、第一パラメータ以外のＢｉｏｔパラメータであってもよい。すなわち、第二パラメータは、例えば、流れ抵抗、弾性率（例えば、縦弾性率）、嵩密度、多孔度、ポアソン比、損失係数、迷路度、粘性特性長、及び熱的特性長からなる群より選択される１以上であって第一パラメータではないものであってもよく、流れ抵抗、弾性率及び嵩密度からなる群より選択される１以上であって第一パラメータではないものであることが好ましい。評価工程においては、第二パラメータを１つのみ用いてもよいし、複数の第二パラメータを用いてもよい。

【００７３】

そして、評価工程においては、上述した防音材モデル関数と、評価条件決定工程で決定された評価温度及び評価用パラメータとを用いて、当該評価温度について、第一パラメータの値として当該評価用パラメータ値が代入された当該防音材モデル関数により得られる防音材の音響特性が予め定められた範囲内に到達する第二パラメータの値を設計用パラメータ値として決定する。より具体的に、例えば、第一パラメータの値として当該評価用パラメータ値が代入された当該防音材モデル関数により得られる防音材の音響特性が予め定められた範囲内に到達する第二パラメータの値を、当該防音材に含まれる多孔質体の当該評価温度における設計用パラメータ値として決定してもよい。

【００７４】

すなわち、第一パラメータの値として評価用パラメータ値が入力された防音材モデル関数において、第二パラメータの値を変化させながら、防音材の音響特性値が予め定められた範囲内に到達する当該第二パラメータの値を探し、当該音響特性値が当該範囲内に収まる第二パラメータの値を、設計用パラメータ値として決定する。

【００７５】

なお、防音材モデル関数において第一パラメータ及び第二パラメータと関連付けられる音響特性は、実測工程及び実測パラメータ値決定工程で対象とされた音響特性と同一であってもよいし、異なっていてもよい。

【００７６】

防音材の音響特性が到達するかどうかの判断に用いられる予め定められた範囲は、当該音響特性が、所望のレベルに到達したと評価できる範囲であれば特に限られず、例えば、特定の数値範囲であってもよいし、特定の値であってもよいし、最大値等の特定の条件を満たす範囲であってもよい。具体的に、例えば、防音材モデル関数において、防音材の音響特性が最大値となる第二パラメータの値を設計用パラメータ値として決定してもよい。

【００７７】

また、防音材の複数の音響特性を評価する場合、例えば、当該複数の音響特性の値の合計が予め定められた範囲内に到達する第二パラメータの値を設計用パラメータ値として決定してもよい。

【００７８】

防音材の音響特性が予め定められた範囲内に到達する第二パラメータの値を決定するための演算処理の方法は特に限られないが、例えば、遺伝的アルゴリズム（より具体的には、例えば、パレートランキング法による多目的関数最適化）、勾配降下法、確率的勾配降下法、ミニバッチ勾配降下法、及びモーメンタム法からなる群より選択される１以上が好

ましく用いられる。

【００７９】

また、設計条件決定工程において、複数の評価温度の各々について評価用パラメータ値が決定されている場合、評価工程においては、当該複数の評価温度の各々について、設計用パラメータ値を決定してもよい。

【００８０】

また、複数の第二パラメータを用いる場合、当該複数の第二パラメータの各々について、設計用パラメータ値を決定してもよい。すなわち、複数の第二パラメータに対応する複数の設計用パラメータ値を決定してもよい。

【００８１】

本方法の物性値決定工程においては、上述の評価工程で決定された設計用パラメータ値に基づいて、多孔質体の設計用物性値を決定する。多孔質体の設計用パラメータ値を用いて、当該多孔質体の設計用物性値を決定する方法は特に限られないが、例えば、当該設計用物性値が当該多孔質体の第二パラメータと関連性を有するものであれば、当該関連性に基づいて、当該第二パラメータが当該設計用パラメータ値である場合の物性値を、設計用物性値として決定する。

【００８２】

すなわち、第二パラメータが、その値を決定することで、多孔質体の設計用物性値を算出できるパラメータである場合には、当該第二パラメータの値として設計用パラメータ値を用いることにより、当該設計用物性値を算出する。具体的に、例えば、第二パラメータと設計用物性との関係を示す物性関数を用いて、当該第二パラメータの値として設計用パラメータ値が代入された当該物性関数により得られる当該設計用物性の値を、設計用物性値として決定することとしてもよい。

【００８３】

また、第二パラメータに対応する多孔質体の特性が、設計用物性である場合（すなわち、第二パラメータが、多孔質体の設計用物性を示すパラメータである場合）には、例えば、当該設計用物性の温度依存性を示す物性関数を用いることとしてもよい。すなわち、評価工程で決定された設計用パラメータ値は、所定の高温以上の評価温度について得られた第二パラメータの値であるところ、実際の防音材の設計は当該評価温度より低い温度で行う場合には、設計用物性の温度依存性を示す物性関数に基づいて、当該設計用パラメータ値から、当該評価温度より低い設計温度における設計用物性の値を設計用物性値として決定することができる。

【００８４】

このように、物性値決定工程においては、測定温度及び評価温度より低い設計温度における設計用物性の値を設計用物性値として決定することとしてもよい。この場合、設計温度は、例えば、１００℃以下であってもよいし、８０℃以下であってもよいし、６０℃以下であってもよいし、５０℃以下であってもよいし、４５℃以下であってもよいし、４０℃以下であってもよいし、３５℃以下であってもよいし、３０℃以下であってもよい。また、設計温度は、例えば、０℃超であってもよいし、５℃以上であってもよい。設計温度は、上述した下限値のいずれかと、上述した上限値のいずれかとを任意に組み合わせて特定されてもよい。

【００８５】

本方法に含まれる防音材製造工程においては、上述の物性値決定工程で決定された設計用物性値を有する多孔質体を含む防音材を製造する。すなわち、まず設計用物性値を有する多孔質体を作製し、当該多孔質体を用いて防音材を製造する。具体的に、例えば、防音材が、積層された多孔質体と非多孔質体とを含む場合、設計用物性値を有する当該多孔質体と、非多孔質体とを積層して、当該防音材を製造する。

【００８６】

本方法によれば、高温で実際に多孔質体の音響特性を測定して得られた実測関数と、多孔質体モデル関数とを用いて決定された、当該多孔質体の当該高温における実測パラメー

タ値を用いて設計を行うため、当該高温で所望の音響特性を示す防音材を効果的に設計し、製造することができる。

【００８７】

本方法は、本方法に含まれる工程の一部又は全部を実行する装置を用いることにより、好ましく実施することができる。この点、本実施形態に係る装置（以下、「本装置」という。）は、多孔質体を含む防音材の設計装置であって、所定の高温以上の測定温度で当該多孔質体の試料に音波を放射して当該多孔質体の音響特性を測定することにより得られた当該多孔質体の当該音響特性と音波特性との関係を示す実測関数と、当該多孔質体の特性を示す第一パラメータを含み当該多孔質体の当該音響特性と当該音波特性との関係を示す多孔質体モデル関数とを用いて、当該測定温度について、当該実測関数と当該多孔質体モデル関数との差が予め定められた範囲内に低減される当該第一パラメータの値を実測パラメータ値として決定する実測パラメータ値決定部と、当該実測パラメータ値に基づき、所定の高温以上の温度である評価温度における評価用パラメータ値を決定する評価条件決定部と、当該第一パラメータと、当該多孔質体の他の特性を示す第二パラメータと、当該多孔質体を含む当該防音材の音響特性との関係を示す防音材モデル関数を用いて、当該評価温度について、当該第一パラメータの値として当該評価用パラメータ値が代入された当該防音材モデル関数により得られる当該防音材の当該音響特性が予め定められた範囲内に到達する当該第二パラメータの値を設計用パラメータ値として決定する評価部と、当該設計用パラメータ値に基づいて、当該多孔質体の設計用物性値を決定する物性値決定部と、を含む。

【００８８】

本装置は、例えば、そのハードウェア構成として、バスや接続ケーブル等により接続された、制御部、記憶部、入力部、出力部、及び通信部を含んで好ましく実現される。本装置の制御部は、１又は複数の電子回路により実現され、例えば、中央処理装置（ＣＰＵ）により実現される。制御部は、記憶部に格納されたプログラムに従って演算処理等の情報処理を行う。

【００８９】

本装置の記憶部は、記憶装置により実現され、例えば、ランダムアクセスメモリ（ＲＡＭ）等の揮発性半導体メモリ、フラッシュメモリ等の不揮発性半導体メモリ、ハードディスクドライブ等の磁気メモリ、及び光ディスク等の光メモリからなる群より選択される１以上により実現される。記憶部は、制御部による情報処理に用いられるプログラムを格納する。プログラムは、例えば、通信部を介して、又はコンピュータ読み取り可能な記憶媒体からインストールされ、記憶部に格納される。記憶部は、制御部による情報処理に関連するデータを格納する。記憶部は、制御部のワークメモリとしても動作する。

【００９０】

本装置の出力部は、出力装置により実現される。出力部は、制御部の指示に従って出力処理を実行する。具体的に、例えば、出力部が液晶ディスプレイや有機ＥＬディスプレイ等の表示装置により実現される場合、当該出力部は、制御部の指示に従って、演算処理の結果等の画像を表示する。

【００９１】

本装置の入力部は、入力装置により実現され、例えば、タッチパネル、キーボード、マウス、ボタン、又はスティックにより実現される。入力部は、本装置のユーザからの入力を受け入れる。

【００９２】

本装置の通信部は、通信装置により実現され、例えば、有線ＬＡＮや無線ＬＡＮなどの通信モジュールを含む。通信部は、インターネット等のネットワークを介して通信を行う。通信部による通信は、有線により行われてもよいし、無線により行われてもよい。

【００９３】

本装置は、上述のとおり、本装置に含まれる工程の一部又は全部を実行するためのプログラムに従って動作することとしてもよい。この点、本実施形態に係るプログラム（以下

、「本プログラム」という。）は、所定の高温以上の測定温度で当該多孔質体の試料に音波を放射して当該多孔質体の音響特性を測定することにより得られた当該多孔質体の当該音響特性と音波特性との関係を示す実測関数と、当該多孔質体の特性を示す第一パラメータを含み当該多孔質体の当該音響特性と当該音波特性との関係を示す多孔質体モデル関数とを用いて、当該測定温度について、当該実測関数と当該多孔質体モデル関数との差が予め定められた範囲内に低減される当該第一パラメータの値を実測パラメータ値として決定する実測パラメータ値決定手段、当該実測パラメータ値に基づき、所定の高温以上の温度である評価温度における評価用パラメータ値を決定する評価条件決定手段、当該第一パラメータと、当該多孔質体の他の特性を示す第二パラメータと、当該多孔質体を含む当該防音材の音響特性との関係を示す防音材モデル関数を用いて、当該評価温度について、当該第一パラメータの値として当該評価用パラメータ値が代入された当該防音材モデル関数により得られる当該防音材の当該音響特性が予め定められた範囲内に到達する当該第二パラメータの値を設計用パラメータ値として決定する評価手段、及び、当該設計用パラメータ値に基づいて、当該多孔質体の設計用物性値を決定する物性値決定手段、としてコンピュータを機能させるための防音材の設計用プログラムである。

【００９４】

本プログラムは、本方法の実施、及び本装置の実現に好ましく用いられる。本プログラムは、コンピュータ読み取り可能な記録媒体に記録されていてもよい。コンピュータ読み取り可能な記録媒体は、プログラムを記録可能であって、コンピュータによって当該プログラムを読み取ることが可能な媒体であれば特に限られないが、例えば、磁気ディスク（例えば、ハードディスク）、半導体メモリ（例えば、フラッシュメモリ等の不揮発性半導体メモリ）、及び光ディスク（例えば、ＤＶＤやＣＤ）からなる群より選択される１以上が好ましく用いられる。

【実施例】

【００９５】

次に、本実施形態に係る具体的な実施例について説明する。本実施例においては、多孔質材として繊維体、より具体的には無機繊維体を含む防音材を設計及び製造する場合を例として説明する。本実施例においては、多孔質体の繊維径を設計用物性とし、当該多孔質体の特性を示すパラメータとしては、Ｂｉｏｔパラメータのうち、当該多孔質体の流れ抵抗及び縦弾性率を第一パラメータとして用い、当該多孔質体の嵩密度を第二パラメータとして用いた。

【００９６】

［実測工程］

実測工程においては、２０℃、１００℃、２００℃及び３００℃の測定温度で多孔質体の試料に音波を放射して当該多孔質体の吸音率を測定し、当該多孔質体の当該吸音率と周波数との関係を示す実測関数を得た。

【００９７】

多孔質体の試料としては、第一パラメータである流れ抵抗及び縦弾性率（ヤング率）のそれぞれに適した２種類の試料を用いた。すなわち、次の実測パラメータ値決定工程において流れ抵抗の実測パラメータ値の決定に用いる実測関数を得るための試料としては、直径が４２ｍｍ、厚さ（高さ）が２５ｍｍ、常温における嵩密度が１００ｋｇ／ｍ^{3}である無機繊維（ファインフレックスＢＩＯ（登録商標）、ニチアス株式会社製）製の円柱体を用いた。また、実測パラメータ値決定工程において縦弾性率の実測パラメータ値の決定に用いる実測関数を得るための試料としては、上述した流れ抵抗用の試料である円柱体の音源側の円形表面をアルミ箔で覆ったものを用いた。

【００９８】

高温での音響特性を測定するための装置としては、国際公開第２０２０／０２６４１５号にも記載されている、一方の端部に音源が配置され、管内に測定試料が配置される管本体と、当該管本体の管壁のうち当該音源と当該測定試料との間の第一の位置に配置された第一のプローブを有する第一の音圧センサと、当該管本体の当該管壁のうち当該音源と当

該測定試料との間であって当該第一の位置より当該測定試料に近い第二の位置に配置された第二のプローブを有する第二の音圧センサと、当該第一のプローブの温度を測定する第一の温度センサと、当該第二のプローブの温度を測定する第二の温度センサと、当該第一の温度センサによる当該第一のプローブの測定温度及び当該第二の温度センサによる当該第二のプローブの測定温度に基づいて、当該第一のプローブの温度分布と当該第二のプローブの温度分布とが近づくように、当該第一のプローブ及び当該第二のプローブの一方又は両方を加熱又は冷却する温度調整部と、を含む垂直入射音響特性測定装置を用いた。なお、上記装置の音響管内においては、円柱体である測定試料を、その音源と反対側の円形表面が剛体壁に接しているとみなせるよう配置した。

【００９９】

そして、ヒーターで１００℃、２００℃又は３００℃に加熱した音響管の管本体内で、当該管本体の管内に配置された試料に対して、１００Ｈｚ～５０００Ｈｚの範囲の音波を放射し、第一の音圧センサ及び第二の音圧センサにより測定された音圧に基づいて、第一の位置と第二の位置との間の伝達関数を算出し、当該伝達関数に基づいて、当該試料（多孔質体）の垂直入射吸音率を算出した。また、ヒーターによる音響管の加熱を行わないこと以外は同様にして、２０℃（室温）における垂直入射吸音率を算出した。

【０１００】

具体的に、まず音圧を測定することにより、下記式（１－１）に示す伝達関数H_{12}を得た。

【数１】

$$H_{12} = P_2/P_1 \cdots (1\text{-}1)$$

【０１０１】

式（１－１）において、P_1は、第一の位置で測定された音圧（単位：Ｐａ）であり、P_2は、第二の位置で測定された音圧（単位：Ｐａ）であり、H_{12}は、当該P_1に対する当該P_2の比で表される当該第一の位置と当該第二の位置との間の伝達関数である。

【０１０２】

次いで、伝達関数H_{12}を用いて、下記式（１－２）により、垂直入射音圧反射率ｒ（ｆ）を得た。

【数２】

$$r(f) = \frac{H_{12} - \exp(-jks)}{\exp(jks) - H_{12}} \exp(2jkt) \cdots (1\text{-}2)$$

【０１０３】

上記式（１－２）において、ｔは、試料の音源側の表面と第一の位置との距離（単位：ｍ）であり、ｓは、第一の位置と第二の位置との距離（単位：ｍ）であり、ｋは下記式（１－３）で表される波数（単位：１／ｍ）であり、ｊは虚数単位である。

【数３】

$$k = \frac{\omega}{c} \cdots (1\text{-}3)$$

【０１０４】

上記式（１－３）において、ωは角振動数（単位：１／ｓ）であり、周波数ｆとは「ω＝２πｆ」の関係がある。また、ｃは音速（単位：ｍ／ｓ）であり、下記式（１－４）で表される。

【数４】

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \cdots (1\text{-}4)$$

【０１０５】
上記式（１－４）において、γは比熱比（単位：なし）、Ｒは気体定数（単位：ｍ^{2}ｋｇ／ｓ^2／Ｋ／ｍｏｌ）、Ｔは気体温度（単位：Ｋ）、Ｍは平均分子量（単位：ｋｇ／ｍｏｌ）である。
【０１０６】
そして、垂直入射音圧反射率ｒを用いて、下記式（１－５）により、垂直入射吸音率α（ｆ）を得た。
【数５】

$$\alpha(f) = 1 - |r(f)|^2 \cdots (1\text{-}5)$$

【０１０７】
図２Ａ、図２Ｂ、図２Ｃ及び図２Ｄには、流れ抵抗用の試料を用いて、それぞれ２０℃、１００℃、２００℃及び３００℃で測定された垂直入射吸音率を破線で示す。図２Ａ～図２Ｄに破線で示すように、２０℃、１００℃、２００℃及び３００℃のそれぞれの測定温度における多孔質体の垂直入射吸音率（－）と音波の周波数（Ｈｚ）との関係を示す実測関数が得られた。
【０１０８】
同様に、図３Ａ、図３Ｂ、図３Ｃ及び図３Ｄには、縦弾性率用の試料を用いて、それぞれ２０℃、１００℃、２００℃及び３００℃で測定された垂直入射吸音率を破線で示す。図２Ａ～図２Ｄにおいて破線で示すように、２０℃、１００℃、２００℃及び３００℃のそれぞれの測定温度における多孔質体の垂直入射吸音率（－）と音波の周波数（Ｈｚ）との関係を示す実測関数が得られた。
【０１０９】
［実測パラメータ決定工程］
実測パラメータ値決定工程においては、まず、多孔質体の特性を示す第一パラメータとして流れ抵抗及び縦弾性率を含み、当該多孔質体の音響特性としての吸音率と音波特性としての周波数との関係を示す多孔質モデル関数を用意した。
【０１１０】
ここで、多孔質体の数理モデルについて説明する。本実施形態では、多孔質体の数理モデルとして、ＪＣＡモデルを用いた。ＪＣＡモデルは、多孔質体中の空隙部を通る空気伝播音と骨格部を伝わる固体伝播音、そしてその間の相互作用を考慮した音響特性モデルである。
【０１１１】
固体伝播音及び空気伝播音の波動方程式は、骨格部の変位Ｕ^s、流体の変位Ｕ^{f}を用いてそれぞれ下記式（２－１）及び式（２－２）となる。
【数６】

$$\rho_{11}\frac{\partial^2 u^s}{\partial t^2}+\rho_{12}\frac{\partial^2 u^f}{\partial t^2}=(P-N)\nabla(\nabla\cdot u^s)+N\nabla^2 u^s+Q\nabla\left(\nabla\cdot u^f\right) \quad \cdots(2\text{–}1)$$

$$\rho_{22}\frac{\partial^2 u^f}{\partial t^2}+\rho_{12}\frac{\partial^2 u^s}{\partial t^2}=R\nabla\left(\nabla\cdot u^f\right)+Q\nabla(\nabla\cdot u^s) \quad \cdots(2\text{–}2)$$

【０１１２】

上記式（２－１）及び式（２－２）において、tは時間、ρ_{22}は骨格部と流体の相互作用における粘性減衰を考慮した流体の等価密度、ρ_{11}は相互作用を考慮した骨格の等価密度、ρ_{12}は相互作用項の密度である。流体の等価密度等の各密度は下記式（２－３）で表される。

【数７】

$$\left.\begin{aligned}\rho_{22}&=\phi\alpha_\infty\rho_f\left\{1+\frac{\phi\sigma}{j\omega\rho_f\alpha_\infty}G(\omega)\right\}\\ \rho_{11}&=(1-\phi)\rho_s-\rho_{12}\\ \rho_{12}&=\phi\rho_f-\rho_{22}\\ G(\omega)&=\left(1+\frac{4j\mu\omega}{\Lambda^2}\frac{\alpha_\infty^2\rho_f}{\sigma^2\phi^2}\right)^{\frac{1}{2}}\end{aligned}\right\}\cdots(2\text{–}3)$$

【０１１３】

上記式（２－３）において、ρ_sは骨格部の密度（単位：ｋｇ／ｍ^3）、ρ_fは流体の密度（単位：ｋｇ／ｍ^3）、φは下記式（２－４）で表される多孔度（単位：なし）、μは流体の動粘性係数（単位：ｍ^2／ｓ）、σは流れ抵抗（単位：Ｎｓ／ｍ^4）、ωは角振動数（単位：１／ｓ）、α_∞は迷路度（単位：なし）、Λは粘性特性長（単位：ｍ）、Λ´は熱的特性長（単位：ｍ）である。

【数８】

$$\phi=\frac{\rho}{\rho_t} \quad \cdots(2\text{–}4)$$

【０１１４】

上記式（２－４）において、ρは嵩密度（単位：ｋｇ／ｍ^3）、ρ_tは真密度（単位：ｋｇ／ｍ^3）である。また、上記式（２－１）及び式（２－２）に含まれる弾性係数Ｐ、Ｑ、Ｒは下記の式（２－５）に示すように近似的に表すことができる。

【数９】

$$\left.\begin{aligned} P &\approx \frac{4}{3}N + K_b + \frac{(1-\phi)^2}{\phi}K_f \\ Q &\approx (1-\phi)K_f \\ R &\approx \phi K_f \end{aligned}\right\} \cdots (2\text{–}5)$$

【０１１５】
上記式（２－５）に含まれる骨格部のせん断弾性率Ｎ（単位：Ｐａ）及び骨格部の体積弾性率（真空時）Ｋｂ（単位：Ｐａ）は、下記の式（２－６）で表される。
【数１０】

$$\left.\begin{aligned} N &= \frac{E(1+j\eta)}{2(1+v)} \\ K_b &= \frac{2(1+v)}{3(1-2v)}N \end{aligned}\right\} \cdots (2\text{–}6)$$

【０１１６】
上記式（２－６）において、ηは損失係数（単位：なし）、ｖはポアソン比（単位：なし）であり、Ｅは骨格部の縦弾性率（ヤング率）（単位：Ｐａ）である。また、上記式（２－５）中のＫｆは、骨格部と流体の相互作用における熱性減衰を考慮した流体の等価体積弾性率（周波数依存）（単位：Ｐａ）であり、下記式（２－７）から求められる。
【数１１】

$$\left.\begin{aligned} K_f &= \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma-1)\left[1 + \frac{8\zeta}{j\omega\Lambda'^2}H(\omega)\right]^{-1}} \\ H(\omega) &= \left(1 + \frac{j\omega\Lambda'^2}{16\zeta}\right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned}\right\} \cdots (2\text{–}7)$$

【０１１７】
上記式（２－７）において、γは比熱比（単位：なし）、Ｐ０は平衡状態の圧力（単位：Ｐａ）、ζは温度拡散率（単位：ｍ２／ｓ）、Λ´は熱的特性長（単位：ｍ）である。
【０１１８】
上述した骨格部と流体の波動方程式である上記式（２－１）及び式（２－２）と、嵩密度ρ（単位：ｋｇ／ｍ３）を示す上記式（２－３）、Ｋｆを示す上記式（２－７）に含まれる関数Ｇ（ω）とＨ（ω）は、空気の流路が円形である場合の理論解に近くなるように定義した経験的な関数である。また、粘性特性長Λ、及び熱的特性長Λ´は、多孔質体の

空隙形状に依存するパラメータがおおむね１とみなせる場合に、それぞれ下記式（２－８）及び式（２－９）で表される。

【数１２】

$$\Lambda = \sqrt{\frac{8\mu\alpha_\infty}{\sigma\phi}} \quad \cdots(2\text{–}8)$$

【数１３】

$$\Lambda' = 2\frac{\phi V}{(1-\phi)S} \quad \cdots(2\text{–}9)$$

【０１１９】

上記式（２－９）において、Sは試料の表面積（単位：ｍ^2）、Vは試料のかさ密度（単位：ｋｇ／ｍ^3）である。

【０１２０】

次に、吸音率αと周波数ｆとの理論的な関係について説明する。吸音率αは下記式（３－１）で表される。

【数１４】

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad \cdots(3\text{–}1)$$

【０１２１】

上記式（３－１）において、ｒは振幅反射率（単位：なし）であり、下記式（３－２）で表される。

【数１５】

$$r = \frac{\rho c - Z}{\rho c + Z} \quad \cdots(3\text{–}2)$$

【０１２２】

上記式（３－２）において、ρは空気の密度（単位：ｋｇ／ｍ^3）、cは音速（単位：ｍ／ｓ）である．音速ｃは上述した式（１－４）により算出された値を用いた。また、空気の密度ρ等の温度に応じた空気の物性値としては、文献（新編　熱物性ハンドブック、日本熱物性学会編、養賢堂（２００８））に記載の値を用いた。

【０１２３】

また、上記式（３－２）において、Ｚは、剛壁と接している多孔質材料に、空気層から垂直に音が入射する際の、厚さＬにおける表面インピーダンスＺ（単位：Ｎｓ／ｍ^3）であり、下記式（３－３）で表される

【数１６】

$$Z = -j\frac{\left(Z_1^s Z_2^f \mu_2 - Z_2^s Z_1^f \mu_1\right)}{Y} \quad \cdots(3\text{–}3)$$

【０１２４】

上記式（３－３）中のＹは下記式（３－４）で表される。

【数１７】

$$Y = \left(1-\phi+\phi\mu_2\left[Z_1^s-(1-\phi)Z_1^f\mu_1\right]\tan(\delta_2 L)\right)+\left(1-\phi+\phi\mu_1\left[Z_2^s\mu_2(1-\phi)-Z_2^f\mu_1\right]\tan(\delta_1 L)\right)\cdots(3\text{–}4)$$

【０１２５】

上記式（３－４）において、Ｚｉｆは流体の特性インピーダンス（単位：Ｎｓ／ｍ３）、Ｚｉｓは構造体の特性インピーダンス（単位：Ｎｓ／ｍ３）である。ｉは層の種類を表し、ｉ＝１が空気層、ｉ＝２が多孔質層を表す。これら流体の特性インピーダンスＺｉｆ及び構造体の特性インピーダンスＺｉｓは、それぞれ下記式（３－５）及び式（３－６）で表される（ｉ＝１、２）。

【数１８】

$$Z_i^f = \left(R+\frac{Q}{\mu_i}\right)\frac{\delta_i}{\omega\phi} \quad \cdots(3\text{–}5)$$

【数１９】

$$Z_i^s = (P+Q\mu_i)\frac{\delta_i}{\omega} \quad \cdots(3\text{–}6)$$

【０１２６】

上記式（３－５）及び式（３－６）において、ωは角振動数（単位：１／ｓ）であり、周波数ｆとω＝２πｆの関係がある。また、μｉは速度比（単位：なし）、δｉは波動方程式の固有値（単位：なし）であり、それぞれ下記式（３－７）、式（３－８）及び式（３－９）で表される（ｉ＝１、２）。

【数２０】

$$\mu_i = \frac{P\delta_i^2-\omega^2\rho_{11}}{\omega^2\rho_{12}-Q\delta_i^2} = \frac{Q\delta_i^2-\omega^2\rho_{12}}{\omega^2\rho_{22}-R\delta_i^2} \quad \cdots(3\text{–}7)$$

【数２１】

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{\omega^2}{2(PR-Q^2)}\left[P\rho_{22}+R\rho_{11}-2Q\rho_{12}-\sqrt{\Delta}\right]} \quad \cdots(3\text{–}8)$$

【数２２】

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{\omega^2}{2(PR-Q^2)}\left[P\rho_{22}+R\rho_{11}-2Q\rho_{12}+\sqrt{\Delta}\right]} \quad \cdots(3\text{–}9)$$

【０１２７】

上記式（３－８）及び式（３－９）において、Δは下記式（３－１０）で表される。

【数２３】

$$\Delta = [P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12}]^2 - 4(PR - Q^2)(\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2) \cdots (3\text{-}10)$$

【０１２８】
実測パラメータ値決定工程においては、次に、実測工程で多孔質体の音響特性の測定が行われた各測定温度について、実測関数と多孔質体モデル関数との差が最小となる第一パラメータの値を、当該多孔質体の当該測定温度における実測パラメータ値として決定した。

【０１２９】
すなわち、まずは２つの第一パラメータのうちの一方である「流れ抵抗」のみを変動させて（すなわち、当該「流れ抵抗」以外の第一パラメータである「縦弾性率」の値は定数で固定して）、実測関数と多孔質体モデル関数との差が最小となる当該「流れ抵抗」の値を実測パラメータ値（実測流れ抵抗値）として算出した。なお、縦弾性率としては、試料として用いた多孔質体について常温で共振法にて測定して得られた値（１４０００Ｐａ）を用いた。

【０１３０】
具体的に、上記式（３－８）及び式（３－９）のとおり、吸音率αと関連付けられる、波動方程式の固有値であるδ_1及びδ_2は、骨格部と流体の相互作用における粘性減衰を考慮した流体の等価密度ρ_{22}と関連付けられ、当該ρ_{22}は、上記式（２－３）のとおり流れ抵抗σと関連付けられていることから、当該流れ抵抗σは、当該吸音率αと関連付けられる。

【０１３１】
よって、ＪＣＡモデルにおいて、特定の周波数ｆにおける吸音率αの値が、実測関数の当該特定の周波数ｆにおける実測吸音率の値に近づくよう、流れ抵抗σを変動させることができる。

【０１３２】
より具体的には、流れ抵抗以外のパラメータを定数として固定したうえで、当該流れ抵抗の値のみを変動させて、市販の表計算ソフトウェアをインストールしたコンピュータを用いた最小二乗法による演算処理を実施することにより、各周波数における「実測値」と「理論値」との差を全周波数で合計した差分（誤差）が最小となる「流れ抵抗」の値を「実測流れ抵抗値」として決定した。

【０１３３】
なお、「流れ抵抗」以外のＢｉｏｔパラメータは、かさ密度、縦弾性率及び迷路度については常温の値で固定した。具体的に、試料として用いた多孔質体について常温で測定して得られた嵩密度値１００ｋｇ／ｍ^3、縦弾性率値１４０００Ｐａ、及び迷路度値１．０５を用いた。また、粘性特性長、熱的特性長は、上記式（２－７）及び（２－８）から算出した。

【０１３４】
図２Ａ、図２Ｂ、図２Ｃ及び図２Ｄには、それぞれ２０℃、１００℃、２００℃及び３００℃について、実測関数との差分が最小となる流れ抵抗値を実測パラメータ値として用いた多孔質体モデル関数を実線で示す。

【０１３５】
図２Ａ～図２Ｄにおいて実線で示すように、２０℃、１００℃、２００℃及び３００℃のそれぞれの測定温度について、流れ抵抗の値が、実測関数と多孔質体モデル関数との差分が最小となる場合における繊維体の垂直入射吸音率（－）と音波の周波数（Ｈｚ）との関係を示す関数が得られた。

【０１３６】
図４Ａには、２０℃、１００℃、２００℃及び３００℃の各測定温度について得られた

、実測パラメータ値としての実測流れ抵抗値（Ｎｓ／ｍ^4）を示す。図４Ａに示す４つの実測流れ抵抗値を最小二乗法を用いて直線近似すると、下記式（４－１）が得られた。

【数２４】

$$\sigma = 105.13T + 7218 \quad \cdots(4\text{-}1)$$

【０１３７】

上記式（４－１）において、Ｔは温度（単位：℃）であり、σは流れ抵抗（単位：Ｎｓ／ｍ^4）である。このように、複数の測定温度の各々について実測パラメータ値を決定することにより、図４Ａ及び上記式（４－１）に示すような、実測パラメータ値（実測流れ抵抗値）の温度依存性を示す関数が得られた。

【０１３８】

次に、２つの第一パラメータのうちの他方である「縦弾性率」のみを変動させて（すなわち、当該「縦弾性率」以外の第一パラメータである「流れ抵抗」の値は定数で固定して）、実測関数と多孔質体モデル関数との差が最小となる当該「縦弾性率」の値を実測パラメータ値（実測縦弾性率値）として算出した。なお、流れ抵抗としては、試料として用いた多孔質体について常温で測定して得られた値（７７５７０Ｎｓ／ｍ^4）を用いた。

【０１３９】

具体的に、上記式（３－８）及び式（３－９）のとおり、吸音率αと関連付けられる、波動方程式の固有値であるδ_1及びδ_2は、弾性係数Ｐと関連付けられ、当該弾性係数Ｐは、上記式（２－４）のとおり、せん断弾性率Ｎと関連付けられ、当該せん断弾性率Ｎは、上記式（２－５）のとおり、縦弾性率Ｅと関連付けられることから、当該縦弾性率Ｅは、当該吸音率αと関連付けられる。

【０１４０】

よって、ＪＣＡモデルにおいて、特定の周波数ｆにおける吸音率αの値が、実測関数の当該特定の周波数ｆにおける実測吸音率の値に近づくよう、縦弾性率を変動させることができる。

【０１４１】

より具体的には、縦弾性率以外のパラメータを定数として固定したうえで、当該縦弾性率の値のみを変動させて、市販の音響特性予測ソフトウェア（Strati-Artz 3.0、日本音響エンジニアリング株式会社製）をインストールしたコンピュータを用いた演算処理を実施することにより、各周波数における「実測値」と「理論値」との差を全周波数で合計した差分（誤差）が最小となる「縦弾性率」の値を「実測縦弾性率値」として決定した。

【０１４２】

なお、「縦弾性率」以外のＢｉｏｔパラメータは、嵩密度、流れ抵抗、迷路度については常温の値で固定した。具体的に、試料として用いた多孔質体について常温で測定して得られた嵩密度値１００ｋｇ／ｍ^3、流れ抵抗値７７５７０Ｎｓ／ｍ^4、及び迷路度値１．０５を用いた。また、粘性特性長、熱的特性長は、上記式（２－７）及び（２－８）から算出した。

【０１４３】

図３Ａ、図３Ｂ、図３Ｃ及び図３Ｄには、それぞれ２０℃、１００℃、２００℃及び３００℃について、実測関数との差分が最小となる縦弾性率値を実測パラメータ値として用いた多孔質体モデル関数を実線で示す。図３Ａ～図３Ｄにおいて実線で示すように、２０℃、１００℃、２００℃及び３００℃のそれぞれの測定温度について、縦弾性率の値が、実測関数と多孔質体モデル関数との差分が最小となる場合における繊維体の垂直入射吸音率（－）と音波の周波数（Ｈｚ）との関係を示す関数が得られた。

【０１４４】

図４Ｂには、２０℃、１００℃、２００℃及び３００℃の各測定温度について得られた、実測パラメータ値としての実測縦弾性率値（Ｐａ）を示す。図４Ｂに示す４つの実測縦

弾性率値を最小二乗法を用いて直線近似すると、下記式（４－２）が得られた。
【数２５】

$$E = 13.63T + 24353 \quad \cdots(4\text{–}2)$$

【０１４５】
上記式（４－２）において、Ｔは温度（単位：℃）であり、Ｅは縦弾性率（単位：Ｐａ）である。このように、複数の測定温度の各々について実測パラメータ値を決定することにより、図４Ｂ及び上記式（４－２）に示すような、実測パラメータ値（実測縦弾性率値）の温度依存性を示す関数が得られた。
【０１４６】
［評価条件決定工程］
評価条件決定工程においては、実測工程における測定温度（２０℃、１００℃、２００℃及び３００℃）を、そのまま評価温度として決定するとともに、当該各評価温度における実測パラメータ値（実測流れ抵抗値及び実測縦弾性率値）を、そのまま評価用パラメータ値として決定した。
【０１４７】
［評価工程］
本実施形態の評価工程では、伝達関数法による防音材モデル関数と、遺伝的アルゴリズムとを用い、各評価温度について、当該防音材モデル関数に含まれる第一パラメータの項に評価用パラメータ値を代入し、多孔質体を含む防音材の音響特性（すなわち、第一パラメータの値として評価用パラメータ値が代入された防音材モデル関数により算出される当該防音材の音響特性）が予め定められた範囲内となる第二パラメータ（当該多孔質体である繊維体の嵩密度）の値を、当該多孔質体の当該評価温度における設計用パラメータ値として決定した。
【０１４８】
すなわち、まず多孔質材料をＢｉｏｔモデルで考える場合、空気伝搬音の縦波（疎密波）に加え、固体伝播音の特性としての縦波と横波の２波を考慮でき、合計で３波を同時に扱うことができる。多孔質体表面の特性は、下記式（５－１）に示す行列で表すことができる。
【数２６】

$$V^p(M) = \left[u_x^s、\ u_y^s、\ u_y^f、\ p_y^s、\ p_x^s、\ p_y^f\right]^T \quad \cdots(5\text{–}1)$$

【０１４９】
上記式（５－１）において、$u_x{}^s$、$u_y{}^s$は多孔質体の骨格部分のｘ、ｙ方向における移動速度を示し、$u_y{}^f$は当該多孔質体の空隙部分における空気を構成する分子の粒子速度を示し、$p_x{}^s$、$p_y{}^s$は当該多孔質体の当該骨格部分の当該ｘ、ｙ方向に生じる応力を示し、$p_y{}^f$は当該多孔質体における音圧を示す。ここで、伝達マトリックスを［T_p］とすると下記式（５－２）を得る。
【数２７】

$$[V^p(M)] = [T_p][V^p(M+1)] \quad \cdots(5\text{–}2)$$

【０１５０】
上記式（５－２）において、［T_p］は６×６（６行、６列）の行列であり、下記式（５－３）で表される。
【数２８】

$$[T_p] = \begin{bmatrix} T_{11} & \cdots & T_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{61} & \cdots & T_{66} \end{bmatrix} \quad \cdots (5\text{–}3)$$

【０１５１】
上記式（５－３）において、Ｔｍｎはｍ行ｎ列の要素であり、ｍ＝１、２、３、４、５又は６であり、ｎ＝１、２、３、４、５又は６である。なお、各要素の詳細については、文献「Ｊ．Ｆ．Ａｌｌａｒｄ ａｎｄ Ｎ．Ａｔａｌａ、 Ｐｒｏｐａｇａｔｉｏｎ ｏｆ Ｓｏｕｎｄ ｉｎ Ｐｏｒｏｕｓ Ｍｅｄｉａ、 Ｊｏｈｎ Ｗｉｌｅｙ ＆ Ｓｏｎｓ、 Ｉｎｃ.(２００９)．ｐ２７７-２８０」に記載されている。
【０１５２】
ここで、垂直入射音の場合の例を挙げると、例えば、Ｔ１１及びＴ２３は、それぞれ下記式（５－４）及び式（５－５）で表される。
【数２９】

$$T_{11} = \cos\left(\omega\sqrt{\frac{2\rho_s(1+\nu)}{E}}\,l\right) \quad \cdots (5\text{–}4)$$

【数３０】

$$T_{23} = \frac{\omega}{\mu_1 - \mu_2}\left(\sqrt{\frac{2\rho_s(1+\nu)}{E}} - \sqrt{\frac{2\rho_s(1+\nu)(1-2\nu)}{E}}\right) \quad \cdots (5\text{–}5)$$

【０１５３】
上記式（５－４）及び式（５－５）において、ωは角周波数であり、ρｓは骨格部の密度（単位：ｋｇ／ｍ３）であり、ｌ（エル）は試料の厚さ（単位：ｍ）であり、νはポアソン比（単位：なし）であり、Ｅは縦弾性係数（単位：Ｐａ）である。また、μｉは速度比、δｉは波動方程式の固有値であり、それぞれ上述した下記式（３－７）、式（３－８）及び式（３－９）で表される（ｉ＝１が空気層、ｉ＝２が多孔質層）。
【数３１】

$$\mu_i = \frac{P\delta_i^2 - \omega^2\rho_{11}}{\omega^2\rho_{12} - Q\delta_i^2} = \frac{Q\delta_i^2 - \omega^2\rho_{12}}{\omega^2\rho_{22} - R\delta_i^2} \quad \cdots (3\text{–}7)$$

【数３２】

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{\omega^2}{2(PR - Q^2)}\left[P\rho_{22} + R\rho_{11} - 2Q\rho_{12} - \sqrt{\Delta}\right]} \quad \cdots (3\text{–}8)$$

【数３３】

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{\omega^2}{2(PR-Q^2)}\left[P\rho_{22}+R\rho_{11}-2Q\rho_{12}+\sqrt{\Delta}\right]} \quad \cdots(3\text{–}9)$$

【０１５４】
上記式（３－８）及び式（３－９）において、Δは上述した下記式（３－１０）で表される。
【数３４】

$$\Delta = [P\rho_{22}+R\rho_{11}-2Q\rho_{12}]^2 - 4(PR-Q^2)(\rho_{11}\rho_{22}-\rho_{12}^2) \cdots(3\text{–}10)$$

【０１５５】
次に、空気伝搬音の伝達マトリックスから吸音率αを求める方法について説明する。本実施例においては、交互に積層された多孔質体と非多孔質体とを含む４層構造を有する防音材を解析対象とした。
【０１５６】
図５Ａには、防音材の音響特性として吸音率αを評価する場合に用いた防音材モデルを示す。図５Ａに示すように、防音材は、第一の非多孔質体であるフィルム層１（Film 1）と、当該フィルム層１に積層された第一の多孔質体であるフェルト層２（Felt 2）と、当該フェルト層２に積層された第二の非多孔質体であるフィルム層３（Film 3）と、当該フィルム層３に積層された第二の多孔質体であるフェルト層４（Felt 4）とから構成される。フェルト層４の、フィルム層３と反対側には剛体壁（Rigid wall）が配置される。すなわち、防音材は、剛体壁上に設置される。
【０１５７】
なお、フェルト層２及びフェルト層４は上述の繊維体から構成され、フィルム層１及びフィルム層３は、ＪＩＳ　Ｌ１０１８に準拠した方法で測定される通気率が１０ｃｃ／ｃｍ^2・ｓｅｃ以下である遮音性軟質樹脂フィルムから構成される。
【０１５８】
図５Ａにおいて、P_{in}は入射音であり、P_rは反射音である。すなわち、フィルム１の剛体壁と反対側の表面に対して音波が入射する。図５Ａに示す防音材モデルにおいて、フィルム層１とフェルト層２との境界面の音圧P_1、P_2と、粒子速度u_1、u_2との間に下記式（６－１）に示す関係が成り立つ。下記式（６－１）において、m_aはフィルム層１の面密度（単位：ｋｇ／ｍ^2）である。
【数３５】

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ u_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j\omega m_a \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_2 \\ u_2 \end{Bmatrix} = [M] \begin{Bmatrix} P_2 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad \cdots(6\text{–}1)$$

【０１５９】
同様に、フェルト層２とフィルム層３との境界面の音圧P_2、P_3と粒子速度u_2、u_3との間に下記式（６－２）に示す関係が成り立つ。
【数３６】

$$\begin{Bmatrix} P_2 \\ u_2 \end{Bmatrix} = -[H]^{-1}[J]\left[T_{p2}\right][V^p(2)] \quad \cdots(6\text{–}2)$$

【０１６０】
さらに、フィルム層３とフェルト層４との境界面の音圧Ｐ$_3$、Ｐ$_4$と粒子速度ｕ$_3$、ｕ$_4$との間に下記式（６－３）に示す関係が成り立つ。
【数３７】

$$\begin{Bmatrix} P_3 \\ u_3 \end{Bmatrix} = [M] \begin{Bmatrix} P_4 \\ u_4 \end{Bmatrix} \cdots (6\text{–}3)$$

【０１６１】
最後に、フェルト層４と剛体壁との境界面の音圧Ｐ$_4$、Ｐ$_5$と粒子速度ｕ$_4$、ｕ$_5$との間に下記式（６－４）に示す関係が成り立つ。
【数３８】

$$\begin{Bmatrix} P_4 \\ u_4 \end{Bmatrix} = -[H]^{-1}[J]\left[T_{p4}\right][V^p(4)] \quad \cdots (6\text{–}4)$$

【０１６２】
ここで、上記式（６－２）及び式（６－４）における［Ｈ］及び［Ｊ］は、それぞれ下記式（６－５）及び式（６－６）で表される。
【数３９】

$$[H] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \cdots (6\text{–}5)$$

【数４０】

$$[J] = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & -1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdots (6\text{–}6)$$

【０１６３】
上記式（６－１）から式（６－４）をまとめると下記式（６－７）になる。
【数４１】

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ u_1 \end{Bmatrix} = [M][H]^{-1}[J]\left[T_{p2}\right][V^p(2)][M][H]^{-1}[J]\left[T_{p4}\right][V^p(4)] \begin{Bmatrix} P_5 \\ u_5 \end{Bmatrix} \cdots (6\text{–}7)$$

【０１６４】
また、フェルト層４の下の最終面が剛体壁であることから下記式（６－８）の条件が成り立つ。
【数４２】

$$u_5 = 0 \quad \cdots(6\text{–}8)$$

【０１６５】
そして、上記式（６－７）からP_1及びu_1が得られ、下記式（６－９）により、当該P_1及びu_1から、特性インピーダンスZ_1が算出される。
【数４３】

$$Z_{(1)} = \frac{P_1}{u_1} \quad \cdots(6\text{–}9)$$

【０１６６】
そして、得られた$Z_{(1)}$と、空気の特性音響インピーダンスZ_0（単位：Ｎｓ／ｍ^3）とを用いて、下記式（６－１０）から振幅反射率ｒが求められる。
【数４４】

$$r = \frac{Z_{(1)} + Z_0}{Z_{(1)} - Z_0} \quad \cdots(6\text{–}10)$$

【０１６７】
さらに、振幅反射率ｒを用いて、下記式（３－１）より、吸音率αが求められる。
【数４５】

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad \cdots(3\text{–}1)$$

【０１６８】
すなわち、上記のような防音材モデル関数を用いることにより、例えば、流れ抵抗σの値として「実測流れ抵抗値」を代入し、縦弾性率Ｅの値として「実測弾性率値」を代入した当該防音材モデル関数において、「空隙率φ（＝嵩密度ρ÷真密度ρ_t）」をどのように変動させると、「吸音率α」がどのように変化するかを検討することができる。
【０１６９】
具体的に、上記式（３－８）及び式（３－９）のとおり、吸音率αと関連付けられる、波動方程式の固有値であるδ_1及びδ_2は、骨格部と流体の相互作用における粘性減衰を考慮した流体の等価密度ρ_{22}及び弾性係数Ｐと関連付けられ、当該ρ_{22}は、上記式（２－３）のとおり流れ抵抗σ及び多孔度φと関連付けられ、当該多孔度φは、上記式（２－４）のとおり嵩密度ρと関連付けられ、当該弾性係数Ｐは、上記式（２－４）のとおり、せん断弾性率Ｎと関連付けられ、当該せん断弾性率Ｎは、上記式（２－５）のとおり、縦弾性率Ｅと関連付けられることから、当該流れ抵抗σ、縦弾性率Ｅ、及び嵩密度ρは、当該吸音率αと関連付けられる。
【０１７０】
したがって、例えば、流れ抵抗σの値として「実測流れ抵抗値」を代入し、縦弾性率の値として「実測弾性率」を代入した防音材モデル関数において、「嵩密度ρ」を変化させることにより「空隙率φ」を変化させて、「吸音率α」が最大となる「嵩密度ρ」の値を決定することができる。
【０１７１】
具体的には、フェルト層２の嵩密度と、フェルト層４の嵩密度とを同時に変化させながら、「吸音率α」が最大となる、フェルト層２の「嵩密度ρ」の値とフェルト層４の「嵩密度ρ」の値との組み合わせを決定した。

【０１７２】
図５Ｂには、防音材の音響特性として透過損失を評価する場合に用いた防音材モデルを示す。図５Ｂに示すモデルにおいては、防音材に対して、フェルト層４側から音波が入射され、フィルム層１から音波が放射される。ここで、入射音圧を$P_{(A)}$、終端音圧を$P_{(B)}$とすると、透過損失ＴＬは下記式（６－１１）で表される。
【数４６】

$$TL = 10\log_{10}\left|\frac{1}{(1+r)\dfrac{P_{(B)}}{P_{(A)}}}\right|^2 \quad \cdots(6\text{–}11)$$

【０１７３】
すなわち、上記のような防音材モデル関数を用いることにより、例えば、流れ抵抗σの値として「実測流れ抵抗値」を代入し、縦弾性率Ｅの値として「実測弾性率」を代入した当該防音材モデル関数において、「空隙率φ（＝嵩密度ρ÷真密度ρ_t）」をどのように変動させると、「透過損失ＴＬ」がどのように変化するかを検討することができる。
【０１７４】
具体的に、上記式（６－１１）のとおり透過損失ＴＬと関連で受けられる振幅反射率ｒは、上記式（６－１０）のとおり$Z_{(1)}$と関連付けられ、当該$Z_{(1)}$は上記式（６－９）のとおりP_1及びu_1と関連付けられ、当該P_1及びu_1は上記式（６－７）のとおりT_pと関連付けられ、当該T_pは上記式（５－４）及び式（５－５）のとおり縦弾性率Ｅ及びμ_iと関連付けられ、当該μ_iは上記式（３－７）、式（３－８）及び式（３－９）のとおりδ_1及びδ_2と関連付けられ、当該δ_1及びδ_2は等価密度ρ_{22}及び弾性係数Ｐと関連付けられ、当該ρ_{22}は上記式（２－３）のとおり流れ抵抗σ及び多孔度φと関連付けられ、当該多孔度φは上記式（２－４）のとおり嵩密度ρと関連付けられることから、当該流れ抵抗σ、縦弾性率Ｅ、及び嵩密度ρは、当該透過損失ＴＬと関連付けられる。
【０１７５】
したがって、例えば、流れ抵抗σの値として「実測流れ抵抗値」を代入し、縦弾性率の値として「実測弾性率」を代入した防音材モデル関数において、「嵩密度ρ」を変化させることにより「空隙率φ」を変化させて、「透過損失ＴＬ」が最大となる「嵩密度ρ」の値を決定することができる。
【０１７６】
具体的には、フェルト層２の嵩密度と、フェルト層４の嵩密度とを同時に変化させながら、「透過損失ＴＬ」が最大となる、フェルト層２の「嵩密度ρ」の値とフェルト層４の「嵩密度ρ」の値との組み合わせを決定した。
【０１７７】
図５Ｃには、防音材の音響特性として挿入損失を評価する場合に用いた防音材モデルを示す。図５Ｃに示すモデルにおいては、防音材に対して、フェルト層４側から振動加振が与えられ、フィルム層１から音波が放射される。挿入損失ＩＬは、試料がない場合の音圧P_{air}と、試料がある場合の音圧（上記式（６－７）から算出されるP_1）とを用いて下記式（６－１２）から求めた。
【数４７】

$$\mathrm{IL} = 20\log\frac{P_1}{P_{air}} \quad \cdots(6\text{–}12)$$

【０１７８】
すなわち、上記のような防音材モデル関数を用いることにより、例えば、流れ抵抗σの値として「実測流れ抵抗値」を代入し、縦弾性率Ｅの値として「実測弾性率」を代入した当該防音材モデル関数において、「空隙率φ（＝嵩密度ρ÷真密度ρ_t）」をどのように変動させると、「挿入損失ＩＬ」がどのように変化するかを検討することができる。
【０１７９】
具体的に、上記式（６－１２）のとおり挿入損失ＩＬと関連で受けられるP_1は、上記式（６－７）のとおりT_pと関連付けられ、当該T_pは上記式（５－４）及び式（５－５）のとおり縦弾性率Ｅ及びμ_iと関連付けられ、当該μ_iは上記式（３－７）、式（３－８）及び式（３－９）のとおりδ_1及びδ_2と関連付けられ、当該δ_1及びδ_2は等価密度ρ_{22}及び弾性係数Ｐと関連付けられ、当該ρ_{22}は上記式（２－３）のとおり流れ抵抗σ及び多孔度φと関連付けられ、当該多孔度φは上記式（２－４）のとおり嵩密度ρと関連付けられることから、当該流れ抵抗σ、縦弾性率Ｅ、及び嵩密度ρは、当該挿入損失ＩＬと関連付けられる。
【０１８０】
したがって、例えば、流れ抵抗σの値として「実測流れ抵抗値」を代入し、縦弾性率の値として「実測弾性率」を代入した防音材モデル関数において、「嵩密度ρ」を変化させることにより「空隙率φ」を変化させて、「挿入損失ＩＬ」が最大となる「嵩密度ρ」の値を決定することができる。
【０１８１】
具体的には、フェルト層２の嵩密度と、フェルト層４の嵩密度とを同時に変化させながら、「挿入損失ＩＬ」が最大となる、フェルト層２の「嵩密度ρ」の値とフェルト層４の「嵩密度ρ」の値との組み合わせを決定した。
【０１８２】
設計用パラメータ値を決定するための演算処理は、コンピュータにインストールした市販の音響解析ソフトウェア（Actran、エムエスシーソフトウェア株式会社製）を用いて、防音材モデル関数において、嵩密度を変えながら防音材の音響特性（具体的には、吸音率、透過損失及び挿入損失）を計算し、当該吸音率、透過損失及び挿入損失からなる群より選択される１以上が予め定められた好ましい範囲内になる嵩密度値を算出した。なお、Actranを用いるにあたっては、加振面を１３０ｍｍ角、測定点の位置を加振面中央の直上５００ｍｍ、当該加振面の振幅を加振面直上方向±１ｍに設定して、試料ありの場合には当該加振面に当該試料を配置した条件にて演算処理を実施し、試料なしの場合には当該加振面のみの加振とする条件にて演算処理を実施した。
【０１８３】
吸音率の解析対象周波数範囲は、２０００Ｈｚ～５０００Ｈｚ（１０Ｈｚ刻み）とし、透過損失の解析対象周波数範囲は、８００Ｈｚ～２５００Ｈｚ１０Ｈｚ刻み）とし、挿入損失の解析対象周波数範囲は、３００Ｈｚ～８００Ｈｚ１０Ｈｚ刻み）とした。
【０１８４】
２以上の音響特性、すなわち、吸音率、透過損失及び挿入損失からなる群より選択される２以上が予め定められた好ましい範囲内になる嵩密度値の算出においては、遺伝的アルゴリズムを用い、パレートランキング法により、当該２以上の音響特性の値の合計が最大になるパレート解を求め、当該パレート最適解が得られる嵩密度の値を設計用嵩密度値（設計用パラメータ値）として算出した。
【０１８５】
具体的に、遺伝的アルゴリズムにおいては、各音響特性の最小値が０、最大値が１となるよう正規化した。また、各評価温度について、個体数は２００、世代数は１０とした。また、吸音率α、透過損失ＴＬ、挿入損失ＩＬを総合的に評価する多目的最適化に用いるパラメータとして下記式（６－１３）に示すｆａｌｌを用意した。
【数４８】

$$f_{all} = \omega_{\alpha} \times \alpha + \omega_{TL} \times TL + \omega_{IL} \times IL \quad \cdots(6\text{–}13)$$

【０１８６】
上記式（６－１３）において、ωα、ωTL及びωILは、それぞれ吸音率，透過損失，挿入損失の重みづけ係数（単位：なし）である。上記式（６－１３）で表されるｆａｌｌを最大化することは、吸音率、透過損失、固体伝搬音特性をバランスよく最大化することを意味する。本実施例では便宜上ωα、ωTL、ωILをそれぞれ１／３とした。
【０１８７】
その結果、２０℃、１００℃及び３００℃において防音材の３つの音響特性（吸音率、透過損失及び挿入損失）の各々について、当該音響特性を最大にする、２つの繊維体（フェルト層２及びフェルト層４）の各々の嵩密度（設計用嵩密度値）を、設計用パラメータ値として得た。
【０１８８】
また、２０℃、１００℃及び３００℃において防音材の３つの音響特性（吸音率、透過損失及び挿入損失）の値の合計を最大にする、２つの繊維体（フェルト層２及びフェルト層４）の各々の嵩密度（設計用嵩密度値）を、設計用パラメータ値として得た。
【０１８９】
［設計用物性値決定工程］
本実施例の設計用物性値決定工程では、第二パラメータ（嵩密度）と、設計用物性（繊維径）とを関連付ける物性関数を用いて、当該第二パラメータの値として最適嵩密度値が代入された当該物性関数により得られる当該設計用物性の値を、設計用物性値として決定した。
【０１９０】
具体的に、物性関数としては、実験的に得られた下記式（７－１）（見坐地一人他、繊維体吸音材料のＢｉｏｔパラメータの推定、自動車技術会論文集、４９巻４号、ｐ．７８７－７９２（２０１８））を用いた。
【数４９】

$$\sigma = 8.89 \times 10^5 \times \mu(1-\phi)^{1.40} D^{-1.12} \quad \cdots(7\text{–}1)$$

【０１９１】
上記式（７－１）において、σは流れ抵抗（単位：Ｎｓ／ｍ^4）であり、μは空気の粘度（単位：ｍ^2／ｓ）であり、Ｄは繊維径（単位：ｍ）であり、多孔度φは上述した下記式（２－４）で表される。下記式（２－４）において、ρは嵩密度、ρtは真密度である。
【数５０】

$$\phi = \frac{\rho}{\rho_t} \quad \cdots(2\text{–}4)$$

【０１９２】
図６Ａには、上述のようにして得られた、２０℃、１００℃及び３００℃において防音材の吸音率を最大にする、２つの繊維体（フェルト層２及びフェルト層４）の各々の繊維径の値（設計用物性値）を示す。
【０１９３】
例えば、フェルト層２の繊維径及びフェルト層４の繊維径として、それぞれ図５Ａに示

される温度３００℃における値を有する第一の繊維体及び第二の繊維体を、４層構造の防音材を製造するための繊維体として採用することにより、当該温度３００℃において高い吸音率を示す防音材を設計し、製造することができる。

【０１９４】

図６Ｂには、上述のようにして得られた、２０℃、１００℃及び３００℃において防音材の透過損失を最大にする、２つの繊維体（フェルト層２及びフェルト層４）の各々の繊維径の値（設計用物性値）を示す。

【０１９５】

例えば、フェルト層２の繊維径及びフェルト層４の繊維径として、それぞれ図５Ｂに示される温度３００℃における値を有する第一の繊維体及び第二の繊維体を、４層構造の防音材を製造するための繊維体として採用することにより、当該温度３００℃において高い透過損失を示す防音材を設計し、製造することができる。

【０１９６】

図６Ｃには、上述のようにして得られた、２０℃、１００℃及び３００℃において防音材の挿入損失を最大にする、２つの繊維体（フェルト層２及びフェルト層４）の各々の繊維径の値（設計用物性値）を示す。

【０１９７】

例えば、フェルト層２の繊維径及びフェルト層４の繊維径として、それぞれ図５Ｃに示される温度３００℃における値を有する第一の繊維体及び第二の繊維体を、４層構造の防音材を製造するための繊維体として採用することにより、当該温度３００℃において高い挿入損失を示す防音材を設計し、製造することができる。

【０１９８】

図６Ｄには、上述のようにして得られた、２０℃、１００℃及び３００℃において防音材の吸音率、透過損失及び挿入損失の合計を最大にする、２つの繊維体（フェルト層２及びフェルト層４）の各々の繊維径の値（設計用物性値）を示す。

【０１９９】

例えば、フェルト層２の繊維径及びフェルト層４の繊維径として、それぞれ図５Ｄに示される温度３００℃における値を有する第一の繊維体及び第二の繊維体を、４層構造の防音材を製造するための繊維体として採用することにより、当該温度３００℃において、バランスよく高い吸音率、透過損失及び挿入損失を示す防音材を設計し、製造することができる。

【０２００】

図６Ａ～図６Ｄに示すように、３００℃における実測パラメータ値を用いて、設計用パラメータ値を決定し、当該設計用パラメータ値から設計用物性値としての繊維径値を算出することにより、２０℃及び１００℃の場合とは大きく異なる、設計用繊維径値が得られた。すなわち、３００℃という高温における正確な実測パラメータ値を用いることにより、当該高温において所望の音響特性を達成するうえで適した、当該高温に特有の設計用物性値を得ることができた。

【０２０１】

このように本発明によれば、高温において所望の音響特性を達成するための多孔質体の設計用物性値を効果的に得ることができ、当該高温用途の防音材を効率よく設計及び製造することができる。

【０２０２】

上述の実施例においては、繊維体である多孔質体の繊維径を設計用物性とし、当該多孔質体の特性を示すパラメータとしては、Ｂｉｏｔ理論に基づく９つのパラメータ（いわゆるＢｉｏｔパラメータ）のうち、流れ抵抗及び縦弾性率を第一パラメータとして用い、嵩密度を第二パラメータとして用いる態様について説明したが、本発明はこれに限られない。

【０２０３】

すなわち、第一パラメータとしては、例えば、９つのＢｉｏｔパラメータからなる群よ

り選択される１以上であって温度依存性を有し得るものであれば、流れ抵抗及び縦弾性率に限らず、好ましく用いることができる。一方、第二パラメータとしては、例えば、９つのＢｉｏｔパラメータからなる群より選択される１以上であって、第一パラメータとは異なるものであれば、温度依存性の有無にかかわらず、用いることができる。

【０２０４】

また、上述の実施例において、無機繊維体の縦弾性率は実質的に温度依存性を示さなかったが、例えば、多孔質体として、有機繊維体又は樹脂発泡成形体を用いた場合には、その縦弾性率及び／又は嵩密度も温度依存性を有し得る。

【０２０５】

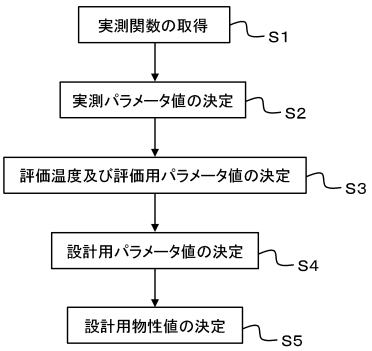
また、上述の実施例では、設計用物性値決定工程において、第二パラメータと設計用物性とを関連付ける物性関数を用いて設計用物性値を決定したが、これに限られず、例えば、当該第二パラメータの温度依存性（例えば、第二パラメータの値と温度とを関連付ける物性関数）を用いて、所定の高温以上の評価温度について決定された第二パラメータの値（設計用パラメータ値）から、設計温度（例えば、常温）における第二パラメータの値を決定してもよい。

【０２０６】

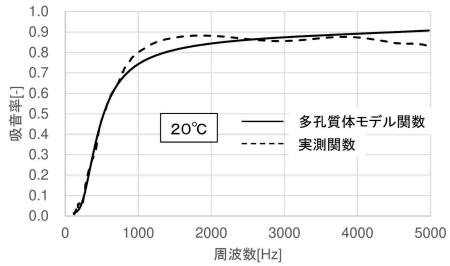
また、上述の実施例では、評価条件決定工程において、測定温度及び実測パラメータ値を、そのまま評価温度及び設計用パラメータ値としてそれぞれ決定したが、これに限られず、例えば、測定温度と異なる所定の高温以上の温度を評価温度として決定するとともに、第一パラメータの温度依存性を示す関数（例えば、図４Ａ及び図４Ｂのように第一パラメータの値と温度とを関連付ける関数）を用いて、当該評価温度における当該第一パラメータの値を評価用パラメータ値として決定してもよい。

【図面】

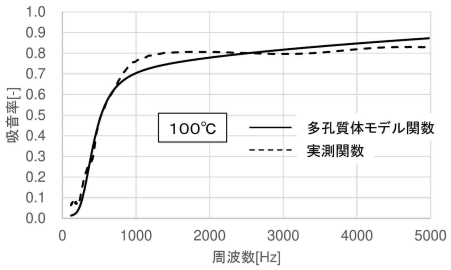
【図１】



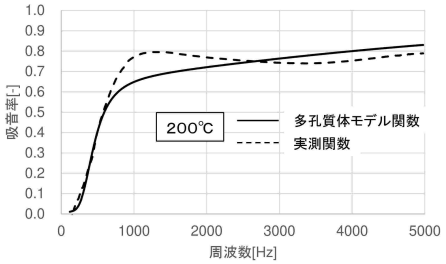
【図２Ａ】



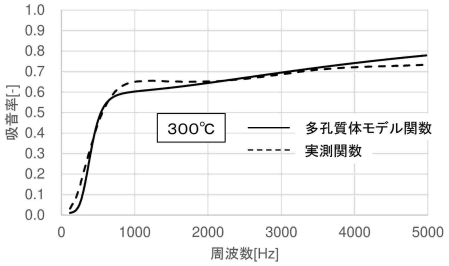
【図２Ｂ】



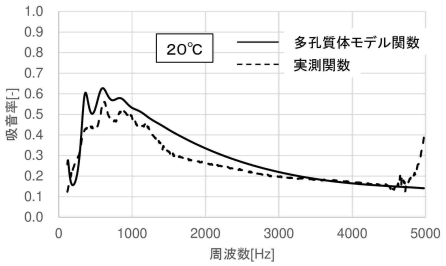
【図２Ｃ】



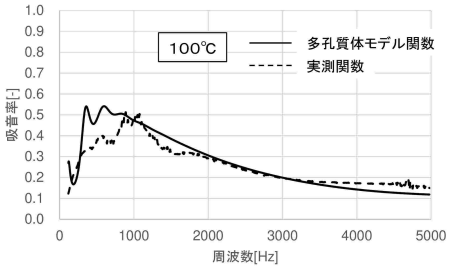
【図２Ｄ】



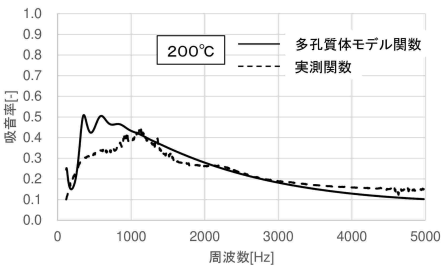
【図３Ａ】



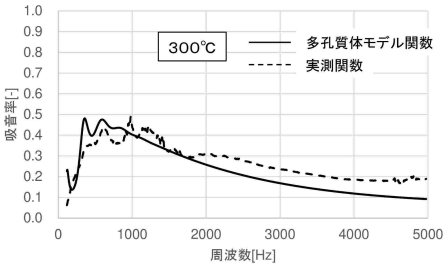
【図３Ｂ】



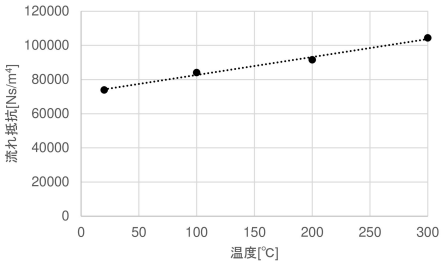
【図３Ｃ】



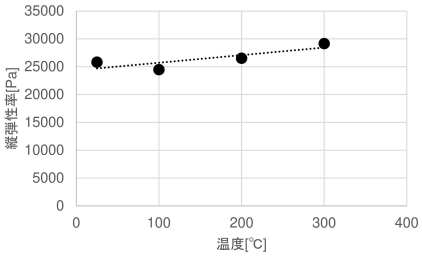
【図３Ｄ】



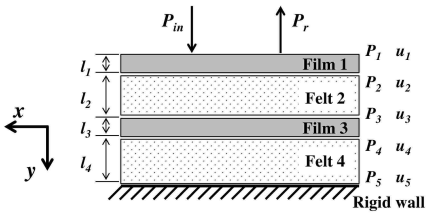
【図４Ａ】



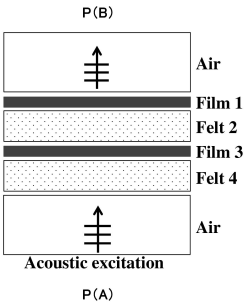
【図４Ｂ】



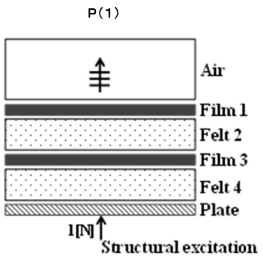
【図５Ａ】



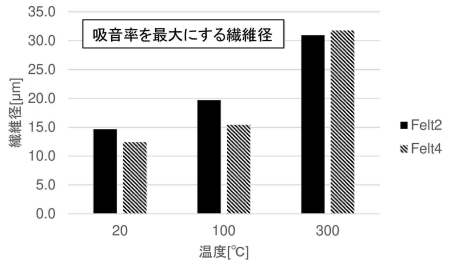
【図５Ｂ】



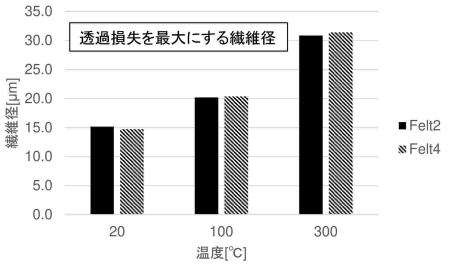
【図５Ｃ】



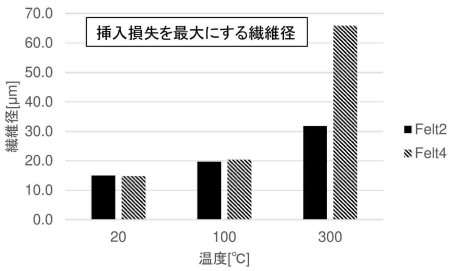
【図６Ａ】



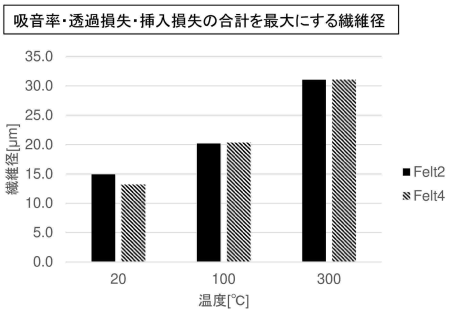
【図６Ｂ】



【図６Ｃ】



【図６Ｄ】



フロントページの続き

和４年５月２６日 公益社団法人自動車技術会 ２０２２年春季大会 第３回学生ポスターセッション パシフィコ横浜 令和４年７月１５日 公益社団法人自動車技術会 振動騒音部門委員会

東京都中央区八丁堀一丁目６番１号 ニチアス株式会社内

Ｆターム（参考） 2G047 AA05 BA01 BC03 BC04 GG32 GG43
2G064 AB16 BA02 BD02 CC41 DD02
5D061 AA01 AA25