

波動理論に基づく任意多孔質型吸音構造の吸音率推定に関する研究

広沢, 邦一

<https://doi.org/10.15017/458908>

出版情報 : Kyushu University, 2004, 博士 (芸術工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

第9章 総括

9.1 研究成果のまとめ

本研究では、波動論的な数値解析手法として3次元の境界要素法を用いて、多孔質材料による任意の吸音構造の吸音率を推定することを目的に、数値解析モデルおよびその計算値に対する検討と評価を行った。

第1章では、本研究の背景として、各種吸音構造体および吸音率の分類とその測定方法について簡単に述べた。また音響設計の現状についても簡単に触れ、そのときの吸音率の適用と吸音率の測定に関する問題点について指摘した。そして、これらに関する既往の研究例について概観し、吸音率の推定にまつわる研究の現状と本研究にいたるまでの流れについて述べた。

第2章では、本論文の数値解析法として用いる3次元の境界要素法について概説した。まず、開空間および閉空間音場における Helmholtz-Huygens 積分方程式を導出し、どちらの空間においても同等に扱えることを確認した。次に、全境界面において局所作用を仮定できるとして、境界条件にノーマル比音響インピーダンス比を与える単一領域に対する境界要素法 (BEM) の定式化を行った。続いてそのような局所作用を仮定できない、または境界面のノーマル比音響インピーダンス比が未知であるような場合に適用する複数領域を連成する領域結合型境界要素法 (DC-BEM) の定式化を行った。これらは、音場内の速度ポテンシャルまたは音圧の解析に用いられるが、音場内の任意の点における粒子速度を解析することはできないため、Helmholtz-Huygens 積分方程式の方向微分形を導出し、粒子速度の解析を可能にする定式化を行った。最後に、矩形室内音場における音圧レベル分布およびリアクティブインテンシティ分布を厳密解と比較することによって、境界要素解析の妥当性について検証した。これによって、本章において行った定式化による境界要素解析の妥当性を示した。

第3章では、まず本論文で用いる吸音率を定義した。一般に、垂直入射吸音率、斜入射吸音率および統計入射吸音率は、無限大吸音面に平面波が入射するときの入射の仕方によってそれぞれ定義され、吸音面が無限大であるため面積効果が生じず、その吸音率は1を越えることがない。ところが、現実には吸音面は有限であり、そのために面積効果によって吸音率が1を超えることがある。そこで、本論文では斜入射吸音率および統計入射吸音率に対して、吸音面が有限面積である場合についても同じ用語を用いるよう拡張することとした。その定義は、幾何学的な入射パワーに対する、吸音面上の法線方向アクティブインテンシティの面積積分である吸音パワーの比とした。次に、本論文においてはグラスウールを等方均質性の媒質として取り扱うことの説明を

し、そのグラスウールの音響特性を表す特性インピーダンスと伝搬定数のモデルを設定した。これは、2-thickness methodによる測定と Miki によるモデルからそれらを折衷するようなものとした。

第4章では、厚さ50mmのグラスウール（密度 32kg/m^3 ）が剛壁に密着して設置されている状態について、斜入射吸音率および統計入射吸音率の予測を試みた。まず、BEMとDC-BEMに対する解析モデルの設定と定式化を行った後、両手法による斜入射吸音率の推定を行った。その結果、入射角 $\theta = 30^\circ$ までは両手法の予測値に違いはほとんどないが、それ以上の入射角ではBEMとDC-BEMのそれに差異が認められた。しかし、斜入射吸音率に関して、定性的にはどちらも同様の傾向を示し、また、面積効果についても面積が小さいほど斜入射吸音率が增大する傾向を明確に捉えられることを示した。次に、実測による残響室法吸音率とBEMおよびDC-BEMによる統計入射吸音率の比較を行った。この結果、両者による統計入射吸音率はほぼ同じような傾向を見ることができ、比較的薄い多孔質材料が剛壁密着状態で設置されている場合に対して、境界要素法による吸音率の推定の妥当性を確認した。また、統計入射吸音率においても面積効果の影響を明確に把握できることを確認した。

第5章では、寸法 $1\text{m} \times 1\text{m}$ で厚さ50mmのグラスウール（密度 32kg/m^3 ）が半自由空間の反射面に、グラスウール下端から反射面までの距離 $h[\text{m}]$ を高さとして、平行に浮いている状態について、斜入射吸音率および統計入射吸音率の予測をDC-BEMによって試みた。まず、DC-BEMの解析モデルの設定と定式化を行い、実測による残響室法吸音率とDC-BEMによる統計入射吸音率の比較を行った。この結果、全体的には概ね良好な一致が見られ、DC-BEMによる吸音率推定は妥当であることを明らかにした。次に、統計入射吸音率および残響室法吸音率を h の関数とした距離特性に関しても両者を比較した。この結果、残響室内の拡散性が悪く考えられる低域を除く250Hz以上において良好な整合性を確認した。さらに、DC-BEMによって斜入射吸音率の推定を行ったところ、 h によって斜入射吸音率のピーク周波数がシフトすること、反射面からグラスウール下端までの背後空気層内における定在波の波長が $1/4$ となる場所に多孔質材料が位置する場合に斜入射吸音率がピークを迎えることを確認した。また、その現象は背後空気層内が入射波と反射波どちらもグラスウールを透過し、それらの干渉場を形成する入射角に限られること、そうとはならない深い入射角の場合では、その音場は非常に複雑であるため斜入射吸音率の傾向も複雑に変化すること、この傾向を示す入射角は h によって変化することを示した。

この第4章、第5章の検討から、グラスウールの厚さが50mm程度の比較的薄い場合には、残響室法吸音率とのよい整合から、境界要素解析による吸音率の推定が妥当であることを明らかにした。この境界要素解析における統計入射吸音率の推定の際には理想的な統計入射を前提としているのに対して、実測に用いた残響室ではおおよそ200Hz以下の低域で拡散性が悪く非拡散音場となっていることが予想されるにもかかわらず、両者の吸音率は一致する傾向にあった。これは、薄いグラスウールの低域における吸音性能が低いことから、その周波数帯域では入射条件に左右

されなかったためであると推測された。

第6章では、寸法 $1\text{m} \times 1\text{m}$ で厚さ 150mm および 350mm のグラスウール（密度 $32\text{kg}/\text{m}^3$ ）が半自由空間の剛である反射面に密着して設置されている状態について、斜入射吸音率および統計入射吸音率の予測を試みた。まず、このような断面積の比較的大きな散乱体を含む開空間音場を境界要素解析する場合に生じる解の非一意性について議論し、ここでは石塚によって提案された回避方法を採用することとした。この方法はBEMのみに対するものであるため、ここで新たにDC-BEMに適用できるよう拡張し、その妥当性を明らかにした。この方法を用いてBEMとDC-BEMに対する解析モデルの設定と定式化を行った後、これらによって斜入射吸音率を推定した。この結果、特に入射角が深いときに、BEMはDC-BEMよりも大きな値を示す傾向にあることが示されたが、全体的な傾向に関しては概ね一致するものであることから、寸法 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 程度の有限面積の吸音構造体の吸音率推定に関しては、吸音面に対して局所作用を仮定してもその妥当性が損なわれるものではないことを明らかにした。さらに、グラスウールの音響特性を表す伝搬定数と特性インピーダンスに修正モデルとMikiのモデルを用い、斜入射吸音率を比較した。この比較から、グラスウールが厚くなると、両モデルによる斜入射吸音率の値が異なり、この傾向は入射角が深くなるほど強くなることを示した。次に、境界要素法の両手法による統計入射吸音率と実測した残響室法吸音率の比較を行った。この結果、BEMとDC-BEMによる統計入射吸音率の値に大きな差は認められなかったが、残響室法吸音率との整合性は示されなかった。この原因を追究するため、まずグラスウールの音響特性モデルとして本論文で採用した修正モデルとMikiのモデルを用いて統計入射吸音率を求め比較したところ、Mikiのモデルによる統計入射吸音率の方が残響室法吸音率との整合が悪いという結果から、修正モデルの妥当性が疑われるものではないことが示された。したがって、グラスウールの音響特性モデルが統計入射吸音率と残響室法吸音率との不一致を生ぜしめる主たる原因ではないと考えられるため、有限面積の吸音構造体への入射条件に焦点を当て、一例として音場入射を仮定した音場入射吸音率をDC-BEMを用いて計算し、残響室法吸音率と比較した。この結果では、音場入射を仮定しても残響室法吸音率との整合性の向上は見られなかった。ゆえに、本章で求めた統計入射吸音率は、実測で用いた残響室における残響室法吸音率を表すものではないといえ、残響室法吸音率を予測するという観点においては、実測での残響室内における吸音構造体設置位置周辺への入射条件を把握することの必要性が指摘された。

第7章では、半自由空間の剛である反射面に、寸法 $1\text{m} \times 1\text{m}$ で厚さ 50mm のグラスウール（密度 $32\text{kg}/\text{m}^3$ ）が高さ 100mm および 300mm の閉じた背後空気層を伴って設置されている状態について、斜入射吸音率および統計入射吸音率の予測を試みた。まず、BEMとDC-BEMの解析モデルの設定および定式化を行ったが、この吸音構造の場合も境界要素解析における解の非一意性の問題が生じるため、それぞれに適した回避方法について提案した。これによって定式化されたBEMとDC-BEMから斜入射吸音率の推定を行った。この結果、背後空気層が高くなるにした

がってBEMとDC-BEMによる斜入射吸音率の値が異なる傾向を示すことが判明した。このことから、背後空気層を伴うような吸音構造の場合は、吸音面に対する局所作用の仮定は妥当でないこと、そしてDC-BEMで解析する必要があることを確認した。また、DC-BEMによる斜入射吸音率の推定において、グラスウールの音響特性を修正モデルとMikiのモデルについてそれぞれ計算し比較を行ったところ、ここでの吸音構造のようにグラスウールが比較的薄い場合は、その音響特性モデルの違いが斜入射吸音率へ与える影響は小さいことが明らかとなった。次に、実測した残響室法吸音率とBEMおよびDC-BEMによる統計入射吸音率を比較した。その結果、BEMとDC-BEMによる斜入射吸音率の比較と同様に、それぞれの手法による値は背後空気層が高くなるにつれて異なる傾向を示し、残響室法吸音率と一致しないという見地からも、背後空気層を伴う吸音構造に対する局所作用の仮定はできないことを確認した。しかし、DC-BEMによる統計入射吸音率も残響室法吸音率と一致せず、この原因究明のため、音場入射を仮定して音場入射吸音率をDC-BEMによって求め残響室法吸音率と比較したが、音場入射を仮定することによる残響室法吸音率との整合性の向上は得られなかった。

この第6章、第7章の検討から、グラスウールの音響特性モデルが境界要素法による斜入射吸音率および統計入射吸音率の推定値へ与える影響は、そのグラスウールの厚さに依存することが明らかとなった。また、境界要素法による統計入射吸音率は、比較対象とした、実測に用いた残響室における残響室法吸音率を表すものではないといえる。なぜならば、数値解析において前提としている統計入射は、実測に用いた残響室内では成立しておらず、これがために統計入射吸音率と残響室法吸音率が一致しないと考えられるからである。このことから、本論文における実測に用いた残響室に代表されるように、ある設置状態での吸音構造体の吸音率を予測する場合には、その吸音構造体が設置される周辺での入射条件を正確に把握し、それを元に推定する必要があることが明らかとなった。これは、第4章、第5章における低域での吸音性能が比較的低い場合に対して、第6章、第7章での吸音構造体におけるグラスウールが厚かったり、伴う背後空気層の高さが高いときなど、吸音性能が低周波数域から高いときにより特徴的に現れるため、注意が必要である。

第8章では、吸音構造体の設置例として残響室を想定し、その設置状況に対する入射条件の把握を境界要素法を用いたインテンシティ解析によって試みた。まず、拡散板が無いとした簡単な残響室内解析モデルに対して音圧レベル分布とアクティブインテンシティ分布を求めたところ、吸音面を設置しないときには明確なモードが認められ、またアクティブインテンシティも流れを形成しており、拡散音場が実現されていないことを示した。次に、瞬時インテンシティを用いた検討を行ったところ、拡散板が無いときの残響室内における吸音構造体が設置される位置周辺では、瞬時インテンシティが楕円軌道を描くのに対し、半自由空間ではほぼ直線的な軌道でリアクティブインテンシティの寄与が非常に小さくなることを明らかにした。この検討から、境界要素法による吸音率推定の際に用いる入射条件にはアクティブインテンシティによる解析を採用すること

とし、さらにそれを統計入射時におけるアクティブインテンシティで基準化する評価法を提案した。この評価法によって得られる基準化アクティブインテンシティを入射条件の重みとして境界要素法に反映し、拡散板が無いときの残響室法吸音率を推定して実測値と比較したところ、それらは一致しないことが分かった。しかし、拡散板を取り外すことによって実測に用いた残響室の拡散性が悪化すると、そこで得られた残響室法吸音率の値が上昇するという傾向は、定性的に捉えることができるということを示した。このことから、ここで示したアクティブインテンシティによる入射条件の把握法における有効性の一端を示すことができたといえる。ゆえに、波動論的な数値解析による吸音率推定の際に、入射条件の設定にインテンシティを用いた詳細な検討を行うことによって、より精度の高い予測が可能になるものと期待できる。

以上、本論文では、面積効果の影響が強く、残響室などに代表される音場の拡散性が問題となる、低周波数域から中周波数域にわたる 63Hz~1kHz において、有限面積の多孔質材料を用いた吸音構造に対して、3次元の境界要素法を用いた吸音率の推定を行った。この検討から、半自由空間において、点音源による入射条件を適切に設定することによって、良い精度で吸音率の推定が可能であることが明らかとなった。特に、厚さ 50mm 程度の比較的薄い多孔質材料が剛壁密着状態で設置されているとき、それが床面から浮いているとき、また高さの低い背後空気層を伴うときなど、吸音性能が比較的低い吸音構造に対しては、入射条件に統計入射を設定することで残響室法吸音率を推定できることが明らかとなった。それに対して、厚い多孔質材料や高さの高い背後空気層を伴うときなど、吸音性能が比較的高い吸音構造に対する理想的な統計入射を仮定した吸音率は、残響室法吸音率には見られない 250Hz 以下の低周波数域に 1 を超えるピークを持ち、そのピークを過ぎた 500Hz 以上の周波数域では、概ね残響室法吸音率の傾向に一致することが明らかとなった。したがって、250Hz 以下の低周波数域における残響室法吸音率を推定する場合は、測定に用いる残響室内における入射条件を的確に把握し、統計入射ではなくその入射条件を設定しなければならないことが明らかとなった。以上の検討より、有限面積の多孔質材料を用いた吸音構造に対して、3次元の境界要素法を用いた吸音率の推定は妥当性を有するといえる。

9.2 今後の課題と将来への展望

本文中にも度々触れたが、吸音構造体が設置される位置周辺での入射条件の把握方法について、より詳細に検討し解明する必要がある。本論文では、半自由空間での瞬時インテンシティはリアクティブインテンシティの寄与が非常に小さいことからアクティブインテンシティのみによって把握を試みたが、これだけとつても、受音点の位置や得られたアクティブインテンシティの数値解析への反映方法についてさらに検討する必要があると考えられる。また、残響室法吸音率に代表されるような閉空間における吸音構造体の吸音率を推定することを考えると、数値計算での吸音率推定における半自由空間ではリアクティブインテンシティの寄与が小さいが、閉空間でのリアクティブインテンシティはその寄与が大きいため、瞬時インテンシティでの入射条件の検討も必要であると考えられる。この半自由空間ではリアクティブインテンシティが非常に小さく、逆に閉空間ではそれに対して大きいということは、リアクティブインテンシティの寄与が対象とする音場を特徴付けるといっても過言ではなく、今後リアクティブインテンシティの取り扱いが重要であると思われる。さらに、入射条件をアクティブインテンシティで観察するのか、瞬時インテンシティで観察するのかは、その音場を時間平均的に観察することと、時々刻々と時系列的に観察することに対応し、これらは全く異なった立場である。したがって、本論文のように定常状態において吸音率を予測する場合に、これらをどのように適用するのかは、非常に困難ではあるが重要な問題であり、今後必要な検討である。

次に、グラスウールの音響特性モデルが吸音率推定に及ぼす影響が大きいため、その決定には細心の注意を払う必要があるということを挙げるができる。本文中では、修正モデルと Miki によるモデルを比較検討したが、グラスウールの厚さが 350mm と比較的厚い場合の DC-BEM による統計入射吸音率は、両モデルの間で最大 1 程度の差が生じてしまっている。このことから、グラスウールの音響特性を記述するモデルに流れ抵抗をパラメータとしたモデルを用いる場合、どのモデルを用いてグラスウールの音響特性を記述するかによって、境界要素解析で推定される吸音率にある程度大きな差を生ぜしめると予想される。また、2-thickness method による測定から得られる伝搬定数や特性インピーダンスを用いる場合でも、その測定を正確に行うことが非常に困難であるという問題がある。というのは、2-thickness method に用いる試料表面のノーマル比音響インピーダンスの伝達関数法による測定において、スピーカからの音圧による試料の振動などが測定値に大きく影響し、これがために伝搬定数や特性インピーダンスが不自然な曲線を描くと考えられるからで、これらの測定に関して詳細な検討が必要である。従来、上述した流れ抵抗をパラメータとしたモデルや 2-thickness method から得られるグラスウールの音響特性モデルは、垂直入射吸音率によってのみ評価されることがほとんどであった。ゆえに、それらのモデル間の差異や試料の振動が測定値に影響を及ぼすことが周知の事実であったとしても、垂直入射吸音率に発生する差が小さいことが多いため、重大な問題として捉えられることは少なかったと考えられる。しかし、本論文のように斜入射吸音率や統計入射吸音率を DC-BEM で推定するときには、非常に大きな差となって影響が現れるため、グラスウールの音響特性モデルに関してさら

なる検討が必要である。

次に、これに関連して、本論文で用いたグラスウールの音響特性モデルは、全て垂直入射に対するモデルまたは測定値であり、斜入射に対応するものではない。現在までのところ、斜入射に対する材料表面のノーマル比音響インピーダンスについては、その測定方法や実験などによる考察が存在する [77, 78] が、斜入射に対する伝搬定数や特性インピーダンスに関しては、研究例が非常に少ない。また、本論文でも考察したが、グラスウールのような多孔質材料の場合は、等方均質性の媒質として取り扱っても差し支えないと言われているが、実際にはグラスウールの断面と仕上げ面のノーマル比音響インピーダンスは異なる。この違いが伝搬定数や特性インピーダンスに影響するかどうかは、現在判明していない問題である。したがって、本文中の数値解析による予測値のうち、深い入射角に対する斜入射吸音率が非常に大きな値になるのは、その入射角に対応した音響特性モデルを用いていないことが原因であると少なからず予測される。これは、統計入射吸音率を予測する際にも密接に関連する事柄であるため、重要な問題であるといえる。ゆえに、今後斜入射に対する伝搬定数や特性インピーダンスに関する検討も必要である。

さて、これらの諸問題が解明され、実測の残響室法吸音率とよい整合が得られるようになるということは、必ずしも拡散性がよい部屋でのみ吸音率が予測可能になるということに限らず、全ての音場に対して適用が可能になるといってよい。なぜならば、吸音構造体が設置される位置周辺の音場が適切に解析されるということに他ならず、これは閉空間や開空間のどちらかに限られることではないからである。また、このような解析が可能になることによって、その部屋の拡散性や入射条件がどのように吸音率に影響するのかが判明すると予想でき、このことによって室形状や拡散板の位置等によって残響室法吸音率が変化することの原因が解明されると期待できる。さらに、これらの技術を音響設計の現場に応用することも可能であると考えられる。そして、既存の空間の音場調整などのような建築音響における設計精度が向上し、それにかかるコストが削減され、最終的には人間にとって快適な音響空間の設計に還元されることを期待する。