

## 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1章 序論

## 1.1 本研究の背景

W.C.Sabine が統計音響理論を提唱してからおよそ 100 年という長い年月の間に、人類は室内の音響制御に関する研究や技術を飛躍的に発展させてきた。W.C.Sabine は、室内の吸音力と残響時間との関係を記述する定式化に成功し、この理論はしばしば「Sabine の残響理論」と呼ばれる。これを発端とした統計音響理論は、複雑な室内の音場を拡散音場という理想的なモデルで記述し、室内にある音源からの音響エネルギーの放射と、吸音性の壁面などによる音響エネルギーの吸収との平衡を統計的に表したものである。したがって、音源からの放射と音響エネルギーの吸収である吸音という現象について、多大なる関心が集まることは当然の帰結であり、これらに関して古くから非常に多くの研究がなされ、また、様々な構造のスピーカに代表される音響放射体、および吸音体が考案されてきた。

その吸音体の構造に注目すると、大きく分けて多孔質吸音構造、板振動型吸音構造、共鳴器型吸音構造の三種類に分類することができる。このうち、多孔質吸音構造の吸音特性は、低周波数域での吸音性能は悪いが、周波数が高くなるにつれその性能は向上し、中周波数域以上の帯域では概ね 80~90%以上の吸音性能を持つ。このように比較的広範な吸音性能を持つことから、多孔質吸音構造は現在最も多く用いられている吸音構造である。これに対して、板振動型および共鳴器型吸音構造は共振周波数が存在する。これを利用して、共振周波数を低域に設計することにより低域の吸音性能を向上させることができる。しかし、どちらの吸音構造も共振周波数以外の帯域ではほとんど吸音しないため、単独で用いられることは少なく、多孔質材料と併用するのが一般的である。

これらの吸音構造を用いて室内の音響制御を行うわけだが、その際的设计指針としては先に挙げた統計音響理論に基づくのが一般的である。近年のコンピュータの発達に伴い、波動音響理論に基づく境界要素法などによって高速道路遮音壁の回折計算を行ったり、幾何音響理論に基づく音線法などの数値計算によって音楽専用ホール内の音響設計を行うことも徐々に増えてきている。しかし、これらの数値計算は、それにかかる労力や時間が膨大になる可能性があるため、経済的規模の大きな場合や音響設計に高い精度を要求される場合に限られることが多い。また、近年スーパーコンピュータを用いて数値計算を試みる動きもあるが、まだ実用段階ではない。いずれにせよ、吸音構造の吸音性能を何らかの手段で定量的に評価し、その評価量を用いて音響設計しなければならない。様々な評価量がある中での代表的なものとしては、統計音響理論では吸音率、幾何音響理論ではエネルギー反射率、波動音響理論では音響インピーダンスなどが挙げられる。この

中でも特に吸音率は、統計音響理論による音響設計が一般的であることと相まって、吸音構造の吸音性能を評価する量として広く普及している。

この吸音率は、その材料への音波の入射条件によって次の4種類に分類される。

- 垂直入射 (normal incident) 吸音率:  
音波が材料表面に対して垂直に入射する場合の吸音率
- 斜入射 (oblique incident) 吸音率:  
音波が材料表面に対してある角度で入射する場合の吸音率
- 統計入射 (statistical incident) 吸音率:  
音波があらゆる角度から等確率に入射すると仮定した場合の吸音率
- 残響室法吸音率:  
残響室において測定された吸音率

この吸音率に対する詳しい議論は第3章に譲るとして、垂直入射吸音率は定在波比法 [1, 2] や伝達関数法 [3] によるいわゆる管内法で比較的簡単に測定でき、測定装置も安価ですむ特徴を持つ。しかし、垂直入射吸音率を統計音響理論的な設計に用いることはほとんどなく、音響設計に用いるよりはむしろ、新たな吸音構造の開発や、製造過程での品質管理における吸音性能評価に利用されることが多い。斜入射吸音率は、近年設置されることが多くなった高架道路裏面の吸音板の性能評価 [4] や、初期反射音の制御等に用いられるようになってきたが、測定自体に困難を伴うこともあり、頻繁に用いられるものではない。統計入射吸音率は、上述のように完全拡散音場における統計入射を仮定した場合のいわば数学モデルである。これは実験で得られる値ではないことから、拡散音場を模擬するための残響室において測定された吸音率が残響室法吸音率である [5, 6]。先に触れたように、統計音響理論は拡散音場を前提としているため、音響設計時に用いる吸音構造の吸音率には、この残響室法吸音率を用いる。また、統計音響理論による音響設計が一般的であるため、吸音構造の吸音性能評価にもこの残響室法吸音率を利用することが圧倒的に多い。

したがって、対象とする音場が拡散音場であると仮定して、何らかの吸音構造を使って音響設計を行う場合には、その吸音構造の統計入射吸音率もしくは残響室法吸音率を予め知っていることが必要となる。ところが、残響室法吸音率は残響室によって異なる値を示すことが知られており、どの残響室で測定したデータを設計に用いるかが問題となる。また、斜入射吸音率などもそうであるが、吸音構造体のサイズが有限で、その吸音構造体周辺の材料とインピーダンスが不連続であることから生じる面積効果を伴う場合では、吸音率が1を超え、さらに同じ吸音構造でも設置状況や吸音面積が異なる場合に吸音率が変化することが知られている。これでは、設計する状況にあわせてその都度残響室法吸音率を測定せねばならないため、非常に非効率的であるし、その測定にかかる労力やコストが膨大なものになると予想される。

これに対して、対象とする音場が拡散音場を仮定できない場合も数多くある。例えば、大型の設備機械が多数設置されているような工場内の機械室内や、屋外に設置される設備機器類の騒音

対策のために、それを防音壁で囲い吸音パネルを設置するような場合である。このような場合、吸音構造体へある方向からのみ音波が入射するのか、統計入射ではないにしても様々な方向から音波が入射するのか、その入射条件を把握しなければ吸音率を特定することができない。したがって、入射条件の把握までも含んだ測定が必要になってくるが、現時点では、測定法が確立していないなどの理由から困難が伴うため、現実的ではないといえる。また、実際の現場では経済的な理由から限界設計を求められることもしばしばであるが、それを達成するための測定にかかるコストも負担になることが多く、実際に残響室法吸音率などの測定をすることはその非効率さからも滅多にない。つまり、設計者自身の経験上の勘に頼らざるを得ないというのが実情である。

また、残響室法吸音率の測定は、一般的に 125Hz~4kHz の周波数範囲で行われる [5, 6] が、近年、低域における騒音対策が求められるようになってきたため、63Hz までを設計対象とする場合が増えてきている。ところが、現在ある残響室の多くは、従来までの測定周波数範囲のみに対応しているため、125Hz 以下の低域においては、拡散音場が実現されていない可能性が高い。ゆえに、低域での騒音対策も含めた音響設計にある吸音構造体を用いると考えると、その低域における残響室法吸音率を測定するための残響室が必要となる。この 63Hz などの低域に対応した残響室は非常に少なく、新たにそのような残響室を新設することはほとんどあり得ないため、通常は非拡散状態のまま測定を行っている。しかし、このようにして得られた吸音率は、拡散状態における残響室法吸音率ではなく、測定に用いた残響室でのみ再現される、特定の入射条件に対する吸音率となってしまう。したがって、どのような入射条件のもとに得られた吸音率なのかを知るために、入射条件を把握するか、または拡散入射における吸音率の予測が必要となる。

そこで、吸音率を簡便に予測する手法が求められており、またそれに関する研究が多く行われている。しかし、斜入射吸音率や残響室法吸音率では面積効果等も含まれるため、いまだその予測法は確立していない。また、非拡散音場においては、現象の難しさも相まって研究例が非常に少なく、予測法に関しては手付かずの状態である。

## 1.2 既往の研究

吸音率の予測に関する研究は古くから盛んに行われてきている。Paris は、局所作用を仮定できるような無限大面積の材料に対して、材料表面のノーマル音響インピーダンスを用いて斜入射吸音率および統計入射吸音率の定義式を提案し、London はそれを元にした別式を提案している [7]。これらは、簡便に統計入射吸音率を求めることができるため、多くの教科書に記載されているばかりか、簡単な予測式として定着している観がある。藤原らは、有限面積の平板状多孔質材料に対して、その材料固有のエネルギー反射率およびエネルギー吸収率からエネルギー的手法によって残響室法吸音率を予測することを試みている [8, 9]。また、Takahashi らはスリット型吸音構造のような周期構造に注目し、モード展開法を用いた予測を行っており、残響室法吸音率と良好な整合を得ている [10]。Fujimoto らはこの方法を発展させ、境界要素法と結合することにより、一周期内の構造が任意であるような周期構造の吸音構造体の吸音率予測を可能にし [11]、小口らはその手

法を用いて目隠し板付きの穴あき板吸音構造の吸音率予測を行っている [12]。

これらの研究は、無限大面積に対する吸音率予測であることが多いが、現実利用される吸音構造は有限面積であり、波長よりも辺長が短いパネル状のものも少なくない。したがって、このような場合に面積効果が生じるが、上記の予測法は無限周期構造しか扱えないため、それらを観察することができず、残響室法吸音率と一致しない可能性がある。また、エネルギー的手法は、吸音構造体の大きさよりも波長が短くなる中周波数域以上では有効な手法であるが、面積効果等の波動的な現象が顕著になる低域では、やはり残響室法吸音率を予測することが困難になる。

このように、面積効果もしくはエッジ効果と呼ばれる現象は、吸音率の測定や予測に必ず伴うもので、その現象の解明は物理学的な興味だけでなく、その必要性からも非常に多くの研究がなされてきた。面積効果は波動的な現象であるため、解析解や波動論的な数値計算を用いて解析されることが多い。その代表的なものとして、まず、NorthwoodらやDe Bruijn, Guickingらは、2次元的な短冊状のstripに対して、エッジ効果を含んだ吸音構造体の吸音特性を解析的に観察している [13-16]。栗屋らは、異なる反射率を持つ半無限平板が接している状況において、そのエッジ近傍で生じる反射波および回折波を解析的に導出し考察している [17, 18]。また、Thomassonは半自由音場において、変分法を用いて局所作用を仮定できるような有限面積の吸音面上の音響インピーダンスおよび放射インピーダンスを求め、それらから吸音率を算出する手法を提案している [19]。Mechel, Lauriksらはその手法を数値解析的に用いて吸音面周辺の音場や面積効果について考察しており [20-22]、Holmbergらは面積効果や統計入射吸音率について議論している [23]。この変分法を用いる方法は手法が繁雑になることが多いため、Kawaiらは、境界値を解くことによって吸音面上の値を直接求める境界要素法を用いて、面積効果を含めた統計入射吸音率を算出し考察している [24, 25]。

この面積効果を含めた統計入射吸音率または残響室法吸音率に関する一連の研究は、解析的に取り扱うため、吸音面に対して局所作用を仮定することが非常に多い。背後空気層等を扱う例もあるが、その場合でも背後空気層にハニカム構造のような管を敷き詰めた状況を想定して局所作用を仮定できるようにした例 [26] もある。また、数値解析を用いた手法においても局所作用を仮定することが多く、現実的な構造を対象にすることは少ないといえる。宇津野らは多層多孔質吸音材に対して局所作用を仮定しない連成問題として境界要素法による数値解析を行っているが、垂直入射吸音率に限っている [27]。

さて、残響室によって残響室法吸音率が異なる値を示すのは、その一端としてこれまで述べてきた面積効果に起因すると考えられているが、それだけでは残響室によって値が変わることの全ての説明にはならないと考えられる。このため、全く同じ吸音材料を用いて、幾つかの残響室で残響室法吸音率を測定する Round Robin Test が、これまで幾例も行われてきた [28, 29]。また、測定状況による残響室法吸音率の値の変化に関する研究も行われている [30, 31]。残響室が異なるたびに残響室法吸音率の値が変わるということは、残響室内の音場が拡散音場を満たしておらず、それぞれの残響室内において音場が変化していると考えられる。残響室内の音場について富来ら

は音圧分布に注目し、有限要素法を用いて考察している [32]。また、Ebeling らや Jacobsen はインテンシティを用いた検討も行っている [33, 34]。これらの研究は、残響室内音場の拡散性の評価に対する検討といえるが、その音場の違いが吸音率の変化を招く原因については言及されていない。この点に関して、Toyoda らは幾何音響理論的な音線法を用いて検討しており、残響室内壁面に設定される吸音面の有無によってそれへの音線の入射状態が変化することを示している [35]。しかし、音線法によるシミュレーションのため、波動的な現象である面積効果を含めることはできない。

### 1.3 本研究の目的と本論文の構成

これまで述べたように、吸音構造体の吸音率推定に関する手法は確立しておらず、吸音構造体やその設置状態、または入射条件に合わせて、その都度それぞれに適した方法によって吸音率を測定せねばならない。したがって、それにかかる労力やコストを削減し、音響設計における設計精度の向上に貢献するためにも、実測をせずに吸音率を予測する手法の確立は重要であるといえる。このような背景を踏まえ、本研究は、有限面積の任意の吸音構造に対する吸音率を推定することを目標とする。特に本論文では、多孔質材料で構成された吸音構造体を解析対象とする。この吸音率の推定に加えて、波動的な現象である面積効果なども観察するため、本論文では波動論的な数値解析法である 3 次元の境界要素法を用いることとする。1.2 節でも見たように、数値解析を用いた吸音率の推定に関しては、対象とする多孔質材料内部や背後空気層などを連成させることによる、より現実的で様々な吸音構造に対する解析が少ないため、本論文ではそれらの領域までを解析対象とする。そして、この 3 次元境界要素法の領域結合解法に対する定式化について考察し、それに必要な条件について議論する。

また、吸音率を推定する際には、入射条件を特定することが重要な要因となる。1.1 節でも述べたように、吸音率には垂直入射、斜入射および統計入射に対するものしか定義されていないが、現実にはこれらに当てはまらない入射条件となることも存在し得る。ところが、吸音構造体の吸音性能の評価としては、残響室法吸音率を用いることが非常に多い。また、残響室で測定するということは、入射条件という観点において、統計入射を模擬するという他に他ならず、測定時の入射条件について議論しやすいと考えられる。そこで本論文では、様々な入射条件が考えられる中、数値解析によって斜入射吸音率および統計入射吸音率を推定し、実測による残響室法吸音率と比較検討を行う。これによって、数値解析による吸音率の推定、その際の入射条件の設定に関する妥当性を検証するとともに、現実の残響室内における入射条件と数値解析における理想的な統計入射の違い、およびそれが吸音率へ及ぼす影響を明らかにすることを本論文の目的とする。

ここで、1.1 節で述べたように、残響室法吸音率は 125Hz から測定するのが一般的であるが、それより低い周波数域における吸音率が必要になることもある。また、125Hz 以下の周波数域では、残響室が対応していないと考えられることから、拡散入射とならない周波数域での残響室法吸音率と、数値計算による統計入射吸音率の入射条件の差異に関する観察には意味があると考え

る。ゆえに、本論文では、1/3 オクターブバンド中心周波数の 63Hz 以上の周波数域で解析を行う。逆に、高域では、残響室内では拡散音場が成立しているであろうこと、面積効果に代表される波動的な現象による影響が小さくなるであろうこと、が予想できる。さらに、その波動的な現象を捉えるための、3次元境界要素法による数値解析に必要なコンピュータのメモリ容量から、対象とする周波数は1/3 オクターブバンド中心周波数の 1kHz までとする。以上より、本論文では、1/3 オクターブバンド中心周波数の 63Hz~1kHz の周波数域において検討を行う。

第2章では、本論文において波動論的な数値解析手法として一貫して採用する3次元の境界要素法について概説し、任意の受音点における音圧やインテンシティの算出方法について述べ、それらの妥当性を検証する。

第3章では、まず本論文において用いる「吸音率」という用語を定義し、斜入射吸音率や統計入射吸音率の算出方法について述べる。その後、本論文における多孔質材料の取り扱いと、多孔質材料内部の境界要素解析に用いる伝搬定数と特性インピーダンスについて説明する。

第4章では、厚さ 50mm のグラスウール（密度  $32\text{kg/m}^3$ ）が剛壁密着状態で設置されているときの斜入射吸音率と統計入射吸音率の推定を試みる。このとき、それぞれの面積効果の観察と実測の残響室法吸音率との比較検討も行う。

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  $32\text{kg/m}^3$ ）が半自由空間の反射面に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試みる。まず、実測した残響室法吸音率と境界要素解析によって得られた統計入射吸音率との比較検討を行った後、斜入射吸音率について考察する。

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  $32\text{kg/m}^3$ ）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る。まず、境界要素法を適用するときを生じる解の非一意性の問題について議論し、それを回避する解析モデルおよび定式化を提案し、それによって得られる斜入射吸音率について考察する。その後、実測の残響室法吸音率と境界要素解析による統計入射吸音率との比較検討を行う。

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  $32\text{kg/m}^3$ ）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る。この吸音構造に対しても、解の非一意性を回避する定式化を行い、それによる斜入射吸音率について考察する。その後、実測の残響室法吸音率と境界要素解析による統計入射吸音率との比較検討を行う。

第8章では、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を境界要素法によるインテンシティ解析によって試みる。このインテンシティ解析による入射条件を数値解析に適用した場合に、それによって得られる残響室法吸音率の推定値と実測の残響室法吸音率との比較検討を行う。

第9章では、本論文の研究成果のまとめと今後の課題および将来への展望を述べる。