



# 弾性板の音響反射特性に関する研究

阪上, 公博

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1993-09-24

(Date of Publication)

2008-04-09

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙1760

(JaLCDOI)

<https://doi.org/10.11501/3078464>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2001760>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・（本籍） 阪上公博 （大阪府）

博士の専攻分野の名称 博士（工学）

学位記番号 博ろ第82号

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学位授与の日付 平成5年9月24日

学位論文題目 弾性板の音響反射特性に関する研究

審査委員 主査 教授 松本 衛  
教授 北村 泰 寿 教授 日下部 馨  
教授 岩 壺 卓 三 助教授 森 本 政 之

### 論文内容の要旨

本論文は、音場のより正確な解析および予測のため、特に建築音響におけるオーディトリウム音響反射板の設計に関する基礎的知見を得ることを目標として、弾性板の音響反射特性の理論的研究を行なったものである。

音場の解析および予測は、音響工学の応用において最も基本的な問題のひとつである。その中でも、境界面の音響反射特性を明らかにすることは特に重要である。音響反射問題は、原理的には波動方程式の境界値問題として扱われるが、現実の問題では境界値を知ることができない場合が多い。そのため、従来の研究では境界面を、入射音波によって振動しない剛体と仮定した解析が、広く一般に行なわれてきた。しかし、現実の物体のほとんどは剛体ではなく入射音波によって振動し、それによって生じる放射音のため音場が変化する。したがって、正確に反射音場を解析するためには、境界面の振動を考慮し、音響振動連成問題として取り扱うことが必要である。

境界面の振動との連成を考慮した反射問題の取り扱い、これまでも水中音響の分野において若干見られるが、建築音響の分野においては全く見られない。建築音響の分野における音響反射問題としては、オーディトリウム等における音響反射板（壁、天井、床等の内装面を含む）の設計が主要なものであるが、既往の研究ではいずれも境界面を剛として取り扱っており、反射板の寸法、形状、配列等に関する検討だけが行なわれている。実際のオーディトリウム等では、反射板の材質や構造の違いによる反射音の音色の差異が経験されるが、現状では材質や構造の設計指針となる知見は得られていない。したがって、反射板の材質や構造の影響を考慮した反射特性の解析、すなわち弾性板の音響反射問題に関する研究が必要である。水中音響の分野におけるこの種の研究は、弾性板の背後が真空であると仮定したものが多いため、十分な知見とはならない。また、板の有する形態としても、建築空間において一般に見られるような複雑なものは、これまでには取り扱われていない。

本論文では以上の問題点を踏まえ、主として建築音響への応用の立場から、室内における反射面の各種形態を考慮し、弾性板の音響反射特性の理論的研究を行なった。板が無限大の場合は、解析的に厳密解が得られることが多いため、基礎的な考察を行なう上で非常に有利であるとともに、面積の大

きい境界面に対してはある程度定量的な知見となり得る。一方、有限な板の場合には、ごく限られた単純な条件を除いて解析解が得られないため、数値解析が中心となる。このような問題の取り扱いにおける差異および現象としての特性を考慮して、板が無限大の場合と有限な場合とに分け、各々第1部（第1章～第6章）および第2部（第7章～第10章）において考察した。

第1章では、第1部序論として本論文第1部の研究について位置付けを行ない、第2章では本論文で一貫して用いる基礎関係式を示した。

第3章では、単一の無限大弾性板の音響反射特性を理論的に解析し、陽な形で解析的厳密解を示した。解析には、従来の研究とは異なり、放射・反射・透過を一貫して扱える境界積分方程式による定式化を用いた。計算結果から、単一板の反射特性はコインシデンス周波数付近に著しいディップを生じ、低周波数域の反射率が低下することが分かった。また、板の諸定数、入射角および板表面の吸音特性が及ぼす影響を明らかにした。

第4章では、無限大弾性板の反射特性に及ぼす背後空気層の影響を明らかにするため、第3章と同様の定式化により、陽な表示で厳密な解析解を得た。まず、本理論のひとつの応用として、理論的解析手法が確立されていない、板振動型吸音率の予測を試み、実測値と比較を行なった。その結果、背後層厚が小さく板が比較的薄い場合は、良好な予測値が得られることが分かった。また、これにより本理論の妥当性が確認された。次に、従来は明確にされていない、板振動型吸音のメカニズムについて考察した結果、板振動型吸音は板の内部損失のみでは説明できず、背後層内の吸音力に大きく依存することが明らかになった。さらに、斜入射反射率の結果から、各パラメタの影響を明らかにし、薄く軽い板の場合、背後層の影響により低周波数域に著しいディップが生じることを示した。

第5章では、背後層内に吸音層が挿入された場合を想定し、任意媒質の3層からなる背後層を有する場合について、陽な形で解析的厳密解を得た。第4章と同様に、背後層内に吸音層を有する場合の板振動型吸音率の予測を試み、実測値と比較を行なった。その結果、板が薄い場合には良好な予測値が得られ、理論の妥当性が示された。次に、背後層内における吸音層の位置、厚さ、背後層内に占める割合および流れ抵抗が、板振動型吸音率に及ぼす影響を考察した。その結果、吸音層は弾性板のすぐ背後に配置する方が吸音率が高く、厚さおよび背後層内での割合が大きいほど、吸音率が大きくピーク周波数が低くなることが分かった。流れ抵抗については、一定の値までは増加とともにピーク値の上昇および周波数の低下が起こるが、それを超えると逆にピーク値の減少が見られた。さらに、斜入射反射率の結果から、吸音層の影響によって低周波数域のディップがさらに低域側へ移るとともに、広く、深くなり、低周波数域における反射性が著しく悪化することが示された。

第6章では、建築室内壁面の最も一般的な形態として、従来は全く取り扱われていない、周期的なリブおよび任意媒質の背後層を有する場合について、陽な形の解析的厳密解を示した。計算結果から、リブおよび背後層を有する板の一般的特徴として、次のことが明らかになった。まず、背後層の影響による低周波数域のディップは、リブの効果によって浅くなり、若干高域側へ移動する。また、リブによる剛性の増加のため、低周波数域のディップよりさらに低い周波数範囲において、反射率が一様に高くなり、その程度は、板のヤング率、厚さおよびリブの間隔によって変化する。さらに、中高域では、リブの影響のため鋭いディップが多数生じ、その深さや周波数間隔には、板のパラメタの他、背後層に関するパラメタおよびリブの間隔が関与する。次に、板がリブによってピン支持される場合と、完全固定される場合を比較した結果、両者の差はコインシデンス周波数付近に著しく現れる他、ディップの周波数、深さにも若干見られた。リブの材質の影響については、ヤング率の影響が最も顕著であるが、 $10^8 \text{ N/m}^2$ を超えるとほとんど変化しないことを示した。

第7章では、第2部序論として、本論文第2部の研究の位置付けを行なった。

第8章では、有限な弾性板の反射特性について基礎的な知見を得るため、解析的取り扱いが比較的容易な、剛パフル中の無限超 strip による反射音場の近似的解析解と厳密解を示した。近似解による考察から、有限な弾性板の反射特性は、主に共振点近傍のピークによって特徴づけられ、他の周波数では板の面密度によって変化するピストン成分により、若干の影響を受けることを示した。厳密解からは、近似解では考察できない近傍音場の特徴を考察した。その結果、放射成分の影響は板の近傍において顕著であるが、遠方では少なくなることを示した。

第9章では、コンサートホールにおける“浮き雲”のような、自由空間中の弾性板への応用を目的として、有限要素法・境界要素法を用いた数値解析法について考察し、矩形弾性板の周囲の音場を解析した。音響負荷を無視した計算例から、共振の影響によってピーク、ディップが生じ、その現れ方が受音点の位置によって異なる様子が見られた。また、音響負荷の簡便な評価法として、2つの方法を導入した。ひとつは、板の放射インピーダンスを一様に空気特性インピーダンスと等しいとする  $\rho c$  近似であり、もうひとつは、音響負荷を無視した場合の放射音圧を、音響負荷の第1近似とした振動方程式への代入を繰り返す逐次代入法である。これらの方法に対し、若干の検討を加えた。

第10章では、第9章で導入した音響負荷の評価法の精度および適用範囲について検討した。剛パフル中の無限長 strip に対する両方法による数値計算結果を、第8章で得た厳密解と比較することにより、各々の適用範囲に関して以下の知見を得た。 $\rho c$  近似は、面密度が大きい板に対しては、共振・非共振いずれの周波数でもかなり良好であるが、面密度が小さい板では、非共振周波数でも精度が非常に悪化する場合がある。一方、逐次代入法は、面密度が大きい板でも損失係数が小さい場合には、共振周波数では発散するため適用できない。また、面密度が小さい板では、非共振周波数でも収束しない場合がある。以上から、 $\rho c$  近似の方が適用範囲が広く、簡便である点から有用であると結論できるが、面密度が小さい板に対しては近似的に取り扱うことは困難であり、厳密な取り扱いが必要となるといえる。

総括では、本研究によって得られた知見をまとめ、今後の課題について述べた。

なお、巻末の付録では、本研究に関連の深い下記の事項について述べた。

- A. 音響反射板の材質選択の指標“cut-off 周波数”の提案およびディップの鋭さ“Q”。
- B. 背後空間内の吸音層を、局所作用的にアドミタンスで近似した場合の計算例。
- C. 矩形弾性板のまわりの過渡音場の計算例。
- D. 無限大膜の音響反射特性。

## 論文審査の結果の要旨

室内外音場の解析、予測は、建築音響学における最も基本的な問題の1つであり、近年、コンピュータの発展にも支えられ、急速な発展を示している。その場合、これに見合った壁面、反射板など音空間境界面の反射特性の十分な精度での把握の重要性が示されている。特に近年のオーディトリウムなど室空間の大規模化にともなって、反射板等の積極的利用の必要性が認められ、その性情の十分な精度での把握の必要性が広く認められている。一方、建築壁体や音響反射板等の境界面は、一般に音響的に剛ではなく弾性体として挙動するが、問題の複雑さのため室内音場解析において、これまでこの振動を考慮した壁体の反射特性の解析は、殆ど行われていない。

本研究は、建築音場の十分な精度の解析、予測を目的として、特にオーディトリウムの音響反射板

の設計のための基礎的知見を得ることを目的として、弾性版の音響反射特性の理論的研究を行ったものであり、その特性を明らかにするとともに解析、予測の方法、さらに連成問題としての室内音場解析の方法を提案したものである。本論文は以下の2部10章から構成されている。第1部第1-6章では、板が無限大の場合について、第2部第7-10では有限寸法の場合について述べている。

第1章では、板の反射特性とその解析法に関する既往関連研究の現状と問題を明らかにし、本論文の目的と研究の位置付けを行っている。

第2章では、本論文で用いる基礎関係式を示し、解析の基礎的な考え方を提示している。

第3章では、線形の波動および板の振動方程式を用い、弾性反射板との空間の連成問題として境界積分方程式表現による定式化を行い、これを用いて、平面波入力に対する無限大弾性板の反射特性を解析し、陽な厳密解を導いている。この解から、反射特性はコインシデンス周波数近傍で反射率が著しく低下すること、また入射角、板の諸定数、板表面の吸音特性の影響を明らかにしている。

第4章では、反射板背後に剛体に接する空気層がある場合について、前章と同様の方法により解析を行い、実験値と比較を行っている。無限大板と近似できる空気層厚さの範囲内では、両者はよい一致を示しており、板振動型吸音率の予測が可能なこと、この場合の吸音のメカニズムは、板の内部損失のみでは説明できず、板背後層内での吸音力に大きく依存することを明らかにしている。また軽量の板では、可聴低周波領域に反射率の著しいディップの生じることを明らかにしている。

第5章では、板背後空気層内にガラス繊維等の多孔体吸音材が多層に挿入された場合について、同様の解析法を用いて板の反射特性を示す解を求め、前章同様陽な厳密解を導いている。前章と同様この解を用いて板の吸音率の予測を行い、予測値が実験値とよい一致を示すことを示した。また空気層内吸音層の位置、厚さ、流れ抵抗の影響について定量的に示している。

第6章では、板背後の空気層、吸音層に周期的にリブが挿入された場合について、前節同様の方法で解析し、陽な厳密解を導出している。リブ支持は、完全固定およびピン支持の場合について行っている。これを用いて板の反射特性を調べ、以下の結論を得ている。背後層の影響による低周波域の反射率のディップは、リブの効果により少なくなりまた高域側に若干移動する事、低周波域においては、板の剛性増加により反射率はかなり増加することを定量的に明らかとした。また中広域では、鋭いディップが多く生じること、これらの性状と板の各種物性値、厚さ、リブ間隔との関係を詳細に明らかにしている。リブの支持の相違による影響は、コインシデンス周波数付近で最も著しい事を明らかにしている。

第7章では、以下に示す第2部、有限な弾性版の音響反射特性の研究の位置付け、関連研究の現状と問題点について述べている。

第8章では、有限弾性版の反射性状の基礎的な知見を得るために、剛バツフル中の無限長 strip について、厳密および近似解析解を導出している。近似解より反射特性は、共振点近傍のピーク値によって特徴付けられること、他の周波数域では、板の面密度によるピストン成分により影響を受けることを示した。また厳密解を用いて板近傍音場の性状を解析し、放射成分の影響は近傍音場において顕著であり、板から離れるほどその影響は少なくなることを明らかにしている。

第9章では、コンサートホール等で近年よく用いられる自由空間中に置かれた反射板を対象に、有限板の周囲音場の解析を有限要素法、境界要素法を用いた数値解析法で解析を行っている。十分高周波数域まで解析するには、状態点数に関して、現状ではなお数値計算上の困難があるが、ここでは、境界要素法（空間側）と有限要素法（板側）を逐次代入する方法および空間側を空気の特性インピーダンスとして近似する近似解法を用いて解析する方法を示し、これを用いて数値解析を行っている。

第10章では、第9章の数値解法について検討を行っている。すなわち、第8章において厳密解を得た剛バツフル中の無限長 strip について、前章の方法で数値解析を行い、近似法の適応範囲について検討を行っている。特性インピーダンス近似の方法では、板の面密度が大きい場合、十分な精度の近似解が得られることが明らかとされている。逐次代入法では、十分な精度の解が得られるが、面密度が大きくても板の損失係数が小さい場合には、共振周波数近傍で収束した解が得られないこと、面密度の小さい板では、非共振周波数においても収束した解が得られないことがあることが示された。面密度の小さい板については、近似的な取り扱いは一般に困難であり、今後の検討課題としている。

総括では、本論文で得られた研究結果の要約を行っている。

以上の研究は、建築音響における音場解析、設計の高精度化を目的として、音響反射板の振動を考慮した反射性状の解析の方法およびその特性の解析に関する研究を行ったものであり、建築空間の音場設計および音場の予測の方法について重要な知見を得たものとして価値ある集積と認める。

よって、申請者 阪上公博は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。