

論文の内容の要旨

論文題目 パラメトリックスピーカを用いた材料の吸音特性の測定法に関する研究

氏名 菅原 彬子

本研究は、高音圧な超音波の非線形性を利用し鋭い指向性をもって可聴音を再生すると
のできるパラメトリックスピーカを音源とした材料の吸音特性の測定法を提案するもので
ある。以下に本論文の構成を示す。

第1章 序論

研究背景 室の目的に応じた適切な音環境を形成する上で、室内の音をいかに吸音するか
という問題は、静穏さ、音の響き、音声の聞き取りやすさ、といったことに密接に関与す
る。そのため、室の吸音性能に大きく影響する建築材料の吸音特性を正確に把握し、適切
に配置することは快適な室内音環境を形成するために非常に重要である。垂直・斜入射吸
音特性は材料の音響特性を表す基本的かつ重要な物理量であり、そのデータの整備のため
にも簡便かつ汎用性の高い測定法が望まれている。材料の吸音特性は理論的には無限幅の
入射波が無限大の試料に入射することを仮定して求められるが、実際の計測では空間的な
制約上、有限サイズの試料を用いて、有限サイズの室で計測しなければならない。そのた
め材料端部の回折や周壁からの反射といった不要な音波との干渉が起こり、計測誤差の要
因となる。これまで多くの研究者らが無響室・現場での測定法を提案してきたが、従来の
測定法ではこの影響をできるだけ低減するため、測定対象とする周波数に応じて音源と試
料・受音点との幾何学的関係に制約が必要であった。特に斜入射吸音特性の計測は不要な音
波の影響を回避することが非常に困難であり、一般的な測定法も確立されていないことか
らデータがほとんどない。

研究目的 以上の背景より、本論文では不要な音波の影響を低減し、無響室及び現場での

計測双方に用いることのできる簡便かつ汎用性の高い材料の吸音特性の測定法を提案することを最終目的とする。そのアプローチとして音源に着目し、超指向性をもつパラメトリックスピーカの材料計測への応用可能性を探る。パラメトリックスピーカでは高音圧な超音波を音源信号として放射し、伝搬途上の非線形現象により鋭い指向性をもって可聴音を再生する。これを音源として用いれば材料に局所的に音波を入射できるため不要な回折や反射の影響を低減した計測が可能になると期待される。しかしパラメトリックスピーカが材料の計測に応用された例はほとんどない。そこで、本論文では以下の 2 つを主目的とする。第一に非線形的な音源特性を理論的に把握し、計測に用いる上で解決すべき課題や適用範囲を明確にすることである。第二の目的は無響室・現場実験を通して材料の吸音特性の計測へのパラメトリックスピーカの応用可能性を探ることである。

第 2 章 既往研究

本論文では音源として超指向性を有するパラメトリックスピーカを用いるが、ベースとなる測定原理は従来法に従う。そこで、第 2 章では本論文に関連する垂直・斜入射吸音特性の測定法について既往研究をまとめる。また、音源として用いるパラメトリックスピーカや、第 3 章での理論的検討に用いる非線形波動方程式に関する基本事項及び既往研究についても整理する。

第 3 章 パラメトリックスピーカの音源特性に関する検討

まず、パラメトリックスピーカの再生原理及び本論文で用いたパラメトリックスピーカの駆動方式について述べる。次に、これを材料の吸音特性の計測に用いる前の予備検討として、その基本性能を把握するため数値解析を用いた理論的な検討を行った結果を基に、非線形性に起因する注意点や適用条件を整理する。また、パラメトリックスピーカを計測に用いる上で大きな課題となる”擬音”について述べる。擬音とは、音源信号として用いる高音圧な超音波が物体に入射する際に生じる局所歪のことであり、マイクロホンに入射する際にはこれが振動面を揺らし、計測誤差の要因となる。擬音が計測に及ぼす影響を検討するための実験的検討を行った結果より、擬音に起因する計測誤差が可聴帯域(特に低周波数帯域)で生じることを確認している。また、結果からはパラメトリックスピーカを材料の計測に応用するためには擬音に起因する計測誤差を回避しなければならないとことが示されている。

第 4 章 擬音の低減手法に関する実験的検討

第 4 章では、擬音の影響を低減する手法を 2 つ示し、その効果を調べるため実験的検討を行っている。1 つめの手法はフォノンニック結晶と呼ばれる物理的なバンドギャップフィルタであり、バンドギャップの中心周波数をパラメトリックスピーカの超音波音源信号の周波数と同じになるよう設計すれば、理論上、可聴音場に影響を与えず擬音の原因となる超音波だけを低減することができる。2 つめの手法は音源信号の位相反転駆動であり、スピー

カ表面に多数並べられた超音波振動子を左右のグループに分け、それぞれから逆位相の音源信号を放射する。すると、音軸上(零点)で超音波がキャンセルされるため、受音点を零点に設置すれば擬音の影響を受けずに可聴音の計測ができる。これら 2 つの手法について原理を述べ、実験的検討により擬音の低減効果を確認している。さらにこれらの手法を用いた上でのパラメトリックスピーカの基本特性を計測したところ、パラメトリックスピーカは従来のスピーカに比べ非常に鋭い指向性をもつことが示され、材料計測への応用が有効である可能性が示唆されている。また、これらの実験的検討から第 5 章、6 章で行う材料の吸音特性の計測への応用における注意点を整理している。

ここまでの基礎検討をふまえ、第 5 章では垂直入射、第 6 章では斜入射時の多孔質材料の吸音特性を自由音場及び現場で計測し、材料の吸音特性の計測へのパラメトリックスピーカの応用可能性を検討している。

第 5 章 多孔質材料の垂直入射吸音特性の計測

無響室での実験 計測で得られたインパルス応答、表面インピーダンス、吸音率の結果を同じ実験配置で計測した従来法の結果と比較することで、パラメトリックスピーカの狭指向性により回折や周囲からの反射といった不要な音波を低減できることを確認している。また、パラメトリックスピーカを音源とし上記の 2 つの手法により擬音を低減した場合の結果を、回折の影響を受けないよう大試料を用いて計測した従来法の結果(リファレンス)と比較することで、計測結果の妥当性も確認している。ただし、パラメトリックスピーカは鋭い指向性をもって可聴音を再生することができるが、そのビーム幅は周波数によって異なる。本章の結果からは必要な試料サイズが測定周波数帯域によるため、測定周波数と試料サイズの関係について今後更に検討を重ね、整理する必要があることが示唆されている。

現場実験 同じ実験配置で行った従来法による計測に比べ、提案手法はパラメトリックスピーカの狭指向性により不要な反射の影響を低減した計測ができることが示されている。また、差音のビーム幅は遠距離でもある程度保たれるため音源・試料間の距離を離れた条件でも不要な反射の影響を受けずに計測することができることを確認している。これにより分析の際主応答と不要な反射を分離する手間を軽減することができ、実用上の利点となることもまた示唆された。提案手法の妥当性もリファレンスとの比較により検証されている。

第 6 章 多孔質材料の斜入射吸音特性の計測

音源信号を位相反転駆動する際、超音波が低減される零点の幅は理論上 0 となる非常に狭い領域である。本論文で用いる 2 マイクロホン法と呼ばれる測定法では 2 つの受音点を試料に垂直に設置するが、斜入射吸音特性の計測では、両方の受音点を零点の領域内に設置することは困難であり、特に入射角が大きい場合には擬音の影響を低減しきれず計測誤

差が生じることが予想された。そこで、零点を拡張することを目的に、左右のグループに分けた超音波振動子群から、それぞれ音源信号を少し外側に向け放射する手法を用いることにした。第 6 章ではまずこの手法について述べ、第 4 章と同様の検討によりその擬音の低減効果を確認している。

無響室での実験 フォノニック結晶を用いた場合は、領域的に擬音を低減できるため入射角によらず擬音の影響を低減し、精度よく計測ができることがリファレンスとの比較により示されている。一方、通常通りビームを平行にして位相反転駆動した場合、入射角が大きいと擬音に起因する計測誤差が生じている。しかし零点を拡張する手法を用いた場合では入射角度によらず精度よく計測ができており、放射角度の調整による零点の拡張が斜入射吸音特性の計測に有効である可能性が示唆されている。

現場実験 斜入射吸音特性を現場計測した結果、従来法では周壁からの反射等の影響が大きく、主応答と不要な応答とを分離するのが困難であり計測誤差が生じた。一方でパラメトリックスピーカに擬音の低減手法を組み合わせた場合、その狭指向性により不要な音波と擬音の影響をともに低減し、従来法で測定が困難であった入射角が大きい場合や音源・試料間の距離が遠い場合でも精度よく計測ができることが示されている。

第 7 章 総括

第 7 章では、本研究で得られた成果を総括し、今後の課題について述べている。本論文で、パラメトリックスピーカの非線形性に起因する注意点や適用条件について整理し、不要な音波の影響を低減することにより従来法で困難であった条件でも材料の計測ができる可能性が示唆されたことは、重量な知見であるといえる。また、擬音に着目して材料の計測を行った例はこれまでになく、フォノニック結晶、音源信号の位相反転駆動といった手法により擬音の影響を低減し、計測精度を向上できる可能性が示されたこともまた重要な知見といえる。今後は、提案手法の適用範囲について更なる検討を進める予定である。