

京都大学	博士 (工学)	氏名	轟 羽 琢 元
------	---------	----	---------

論文題目	非線形弾性をもつ微小粒子状材料の吸音特性への影響因子に関する研究
------	----------------------------------

(論文内容の要旨)

本論文は、粒子状材料における吸音特性の決定要素と、微小粒子で構成され非線形弾性をもつ粒子状材料の吸音特性に影響を与える因子について論じた結果をまとめたものであって、8章からなっている。

第1章は序論であり、建築における空間の音響品質を設計する際に吸音材に期待する役割、および一般的に用いられる吸音材の特徴と課題を概説した。その上で、粒子状材料の吸音に関する既往研究をまとめ、厚みを抑えた吸音材として粒子状材料の活用可能性と課題について述べている。また、本論文の目的と構成を示している。

第2章では、粒子状材料を特徴づける粒子径とかさ密度の異なる粒子状材料について、垂直入射吸音率を実験的に調査した結果を示している。試験体としてガラスビーズを始めとする粒子状材料を用いており、その粒子径およびかさ密度は、それぞれ  $1.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-3}$  m および  $80 \sim 1500$  kg/m<sup>3</sup> の範囲にある。厚みが一定の条件において、粒子径とかさ密度がともに特定の値を下回る粒子状材料は中音域でピークをもつ吸音率を示し、粒子径とかさ密度がともに特定の値を上回る粒子状材料は高音域でピークをもつ吸音率を示すことが確認された。

第3章では、粒子の間隙気体および固体粒子集合体（以下、骨格）における音響エネルギー吸収を考慮した、粒子状材料の吸音特性の計算手法を構築した。吸音特性の計算に、弾性骨格を持つ多孔質材料中の音響伝搬を記述する Biot モデルを用いた。Biot モデルにおける間隙気体の物性に関する変数に、単一粒子径を仮定した理論値を適用し、骨格の物性に関する変数に、自重に比例する圧縮応力への依存性を考慮した。計算と実験から得た吸音率を比較することで、第2章で得られた吸音特性の決定要素を同定した。その結果、吸音率における中音域のピークは骨格に、高音域におけるピークは間隙気体に、それぞれ由来することが明らかになった。

続いて、低周波数の吸音に、より厚みを抑えて優位と考えられる材料として、骨格が吸音特性の主たる決定要素となる微小粒子状材料を対象に、吸音特性に影響を与える因子を調査した。

第4章では、粒子状材料を容器に充填する厚みおよび容器径による吸音率の変化に関する観測を通じて、容器へ充填することによる骨格の側方拘束が吸音率へ与える影響を明らかにした。側方拘束を受ける骨格の物性として、骨格と容器側面の間に働く摩擦を考慮した骨格の実効的な弾性率とかさ密度を提案し、それを用いて計算した吸音率は実験結果とよい対応を示すことが確認された。容器により骨格が拘束されることで、粒子状材料の吸音率における最も低周波側の第1ピークがより高周波側に移動することが示された。

第5章では、入射する音波により誘発される骨格の非線形性が吸音特性に与える影響について調査した。その結果、吸音率は入射音の振幅に依存することが明らかになった。実験において入射音の振幅が特定の大きさを超えると、吸音率の第1ピークは低周波側へ移行したことから、入射音によって骨格の弾性率は低下したと考えられた。計算と実験による厚み方向の骨格の速度の観測を通じて、吸音率の第1ピークが現れ

京都大学	博士 (工学)	氏名	轟 羽 琢 元
<p>る周波数において、入射音の振幅増加による弾性率の低下率は表面近傍で最大となることが示された。</p> <p>第 6 章では、非可聴域にある低周波の鉛直振動により誘発される骨格の非線形性が吸音特性に与える影響について検討した結果を示している。特定の変位振幅を超える低周波の鉛直振動を粒子状材料に下方から与えた場合、上方からの入射音に対する吸音率のピークは低下し、ピークの低周波側の吸音率は増加した。粒子状材料が静止状態の基準位置より鉛直方向に上（正）および下（負）に位置する時間区間に分けて吸音率を分析した結果、正の振動変位における吸音率は振動の変位振幅に依存して変化し、負の振動変位における吸音率は振動の変位振幅に依存しないことが確認された。このことから、鉛直振動を与えることによる吸音率の変化は、振動変位が正となり粒子間の圧縮力が小さくなる時間区間に由来していることが明らかになった。</p> <p>第 7 章では、音波の入射方向が粒子状材料の上面・側面・下面と変化した場合の吸音率の違いを実験により示した。音波の入射方向に応じて、鉛直方向に勾配のある弾性率をもつ粒子状材料の表面インピーダンスは異なり、結果として吸音特性は異なることが計算を通じて明らかになった。</p> <p>第 8 章は結論であり、本論文で得られた成果を要約するとともに、総括として骨格が主な吸音要素となる粒子状材料の吸音特性の制御方法について論じている。また、今後の課題および展望について述べている。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、粒子状材料における吸音特性の決定要素を同定する手法の構築と、微小粒子で構成され非線形弾性をもつ粒子状材料の吸音特性に影響を与える因子を明らかにすることを目的に研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 粒子径とかさ密度が異なる粒子状材料の垂直入射吸音率の測定を通じて、粒子径とかさ密度に応じて定性的に異なる2種類の吸音特性が得られることを確認した。
2. 粒子の間隙気体および固体粒子集合体（以下、骨格）における音響エネルギー吸収を考慮した、粒子状材料の吸音特性の計算手法を構築した。吸音率に関する計算値と実験値の比較を通じて、粒子状材料における吸音特性の決定要素を同定した結果、間隙気体と骨格がそれぞれ主たる吸音要素となることで2種類の吸音特性が得られると推定できることを明らかにした。低周波の吸音に優位であると考えられる材料として、骨格が主たる吸音特性を決定する粒子状材料に対し、吸音特性への影響因子に関する検討を行い、以下の成果を得た。
3. 粒子状材料を容器に充填する厚みおよび容器径による吸音特性の変化を調査することで、容器による粒子状材料の側方拘束が吸音率へ与える影響を明らかにした。側方拘束を受ける骨格の物性として、骨格と容器側面の間に働く摩擦を考慮した骨格の実効的な弾性率とかさ密度を計算するモデルを示した。
4. 特定の振幅を超える音波が粒子状材料に入射する場合、骨格の非線形弾性が誘発され、吸音特性が変化することを明らかにした。吸音率において最初のピークが現れる周波数について、音波を受けた粒子状材料の速度は表面で最大となり、入射音波の振幅増加による弾性率の低下率も表面で最大となることを示した。
5. 非可聴域にある低周波の鉛直振動を粒子状材料に与えた場合、その吸音特性は変化することを示した。静止状態の基準位置から振動の変位が正および負となる時間区間に分けて吸音率を分析することで、振動を与えることによる吸音率の変化は、粒子が上側に変位し粒子間の圧縮力が小さくなる時間区間に由来していることを明らかにした。
6. 音波の入射方向が粒子状材料の上面・側面・下面と変化した場合の吸音率の違いを示した。音波の入射方向に応じて、鉛直方向に勾配のある弾性率をもつ粒子状材料の表面インピーダンスは異なり、結果として異なる吸音特性が得られることを実験と計算を通じて明らかにした。

本論文は、建築で使用される一般的な吸音材と比較して低周波数での吸音率が高い微小粒子状材料について、吸音特性の決定要素の同定と影響因子の解明を行ったものであり、学術上、実務上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年2月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。