

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04359

研究課題名（和文）軽量で微細な粉体による革新的な吸音機構の解明

研究課題名（英文）Elucidation of innovative sound absorption mechanism with lightweight and fine powder

研究代表者

坂本 秀一（Sakamoto, Shuichi）

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：40211932

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：軽量な粉体に着眼した騒音制御を提案した。具体的には、気体分子のように縦振動で音波が伝搬する軽量な粉体を用いた吸音について、粉体の振動による吸音、粒子間隙による吸音、の効果がどのように重畳しているのかを理論的に解明した。このような特殊な吸音効果が現れる粉体の条件を探索した。音波の波長より小さい粒状体やフレーク状のバイオマス材料の吸音に関する数理モデルを示した。規則的に配列した粒状体の吸音特性を数理モデル化した。ランダムな配列や不規則形状の粒状体については、マイクロCTスキャンで測定した幾何学データを基に理論的な計算が行われた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

吸音材料は同じ性能であれば、軽く薄く安価である事が求められる。粉体は一般に生産性・輸送性が良く、形状が自在に変わるため異形部分への設置が容易という工学的利点がある。提案する粉体による吸音方法では、軽量な粉体であり気体より重い程度の粉体が音響媒質となるため、縦波速度が劇的に遅くなり、吸音材料の厚さを遙かに薄くできる。現状を開拓するため、今まで用いられてこなかったこのような原理による吸音方法を実験的・理論的に示すことが本研究の目的である。

研究成果の概要（英文）：We proposed a noise control method focusing on lightweight powders. Specifically, we theoretically clarified how the effects of sound absorption by lightweight powders, which propagate sound waves by longitudinal vibration like gas molecules, are superimposed on those of sound absorption by vibration of the powder and sound absorption by gaps between particles. We searched for the conditions for powders in which this special sound absorption effect appears. A mathematical model for the sound absorption of granular and flaky biomass materials, which are smaller than the wavelength of sound waves, was presented. A mathematical model was developed for the sound absorption characteristics of regularly arranged granular materials. Theoretical calculations for randomly arranged and irregularly shaped granular materials were performed based on geometric data measured by micro CT scans.

研究分野：機械音響工学

キーワード：軽量な粉体 微細な粉体 粒状体 吸音率

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 一般に粒径  $50\ \mu\text{m}$  程度の通常の粉体では、粉体間の隙間が境界層厚さと同程度になるため、境界層の粘性により音波が進入し難く、大きな吸音率が得られない。粉体が音圧により振動した場合でも、吸音カーブにスパイクが現れる程度で、吸音特性の向上に寄与しない。

(2) 本研究で扱う軽量の粉体はあたかも気体の分子のように振動して縦波を伝える。これにより、一般の粉体や粒状体と比較して、大幅な音速の低下と、減衰比の増大により低い周波数で大きな吸音率が得られる。このような「気体粒子のように振る舞う粉体」を用いた、新しい原理による吸音機構の解明が、本研究における最も重要な学術的「問い」である。

### 2. 研究の目的

(1) 提案する粉体による吸音方法では、軽量の粉体を用いるため当然軽い。そして、「気体よりは重い粉体」が音響媒質となるため、縦波速度が劇的に遅くなる。それにより「音波の  $1/4$  波長」すなわち「吸音材料の厚さ」を遙かに薄くできる。また、粉体は一般に生産性・輸送性が良く、形状が自在に変わるため異形部分への設置が容易という工学的利点もある。

(2) 吸音材料は同じ性能であれば、軽く薄く安価である事が求められる。現状を打開するには、従来の消音方法の小改良だけでなく、今まで用いられてこなかった原理による吸音方法を提案する必要がある。このように優れた吸音方法を実験的・理論的に示すことが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究では軽量の粉体に着眼した騒音制御を提案している。具体的には、気体分子のように振舞う軽量の粉体を用いた吸音について、粉体の振動による吸音、粒子間の隙間による吸音、の効果がどのように重畳しているのかを理論的に解明した。

(2) 特殊な吸音効果が現れる粉体の条件を探索した。具体的には、多種の粉体について系統的に実験を行うことにより、「かさ密度」と「粒径」を用いたパラメータである「粒子 1 層当たりの面密度」が関係することを示した。

(3) 音波の波長より小さい粒状体やフレーク状のバイオマス材料の吸音に関する数理モデルを明らかにした。規則的に配列した粒状体の吸音特性を数理モデルにより明らかにし、検証するための実験を行った。ランダムな配列や不規則形状の粒状体については、マイクロ CT スキャン装置で測定した幾何学データを基に理論的な計算が行われた。

### 4. 研究成果

(1) 粒径が数十ミクロン程度の粉体材料から成る粉体層の吸音率導出を行った研究において、従前は粒子間の空隙に生じる空気の境界層粘性における影響を無視していたため、特定の粒径や密度において十分な精度を持たなかった。そこで、粉体層の吸音率をより正確に求めるために、粉体層の縦振動モードに加えて、境界層粘性による比音響インピーダンスを用い、エネルギーの減衰を伝達マトリクス法から算出し、吸音率を導出した。その結果、縦振動モードのみを考慮した理論値に比べ、縦振動モードと境界層粘性の双方を考慮した場合の理論値が実験値と近い傾向を示した。これらの結果を集約し学術雑誌に論文として 1 編を発表した。また、学会にて 1 件の口頭発表を行った。

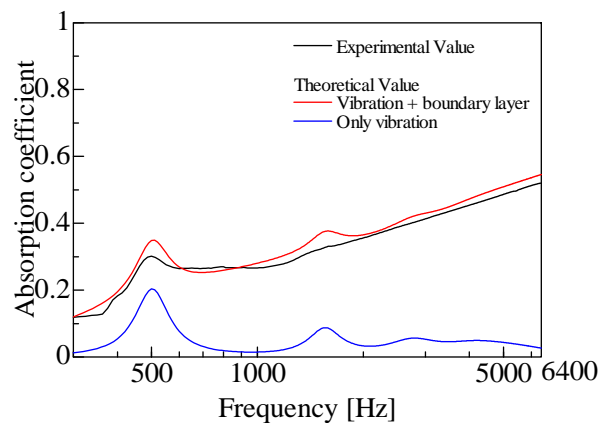


図 1 粉体の振動のみ考慮した理論値(青線)よりも、新たに境界層粘性を考慮した理論値(赤線)は実験結果(黒線)とよく一致する

(2) 粒状体を充填した構造により生じる隙間について、単純立方格子と六方格子の充填モデルを仮定し、理論解析を行った。音波の進行方向に対し垂直に要素分割を行い、各要素を平行な二平面間の隙間に近似することにより、隙間における伝搬定数と特性インピーダンスを求め、1 次元の伝達マトリクス法として扱った。そして、伝達マトリクス法により吸音率を算出した。実験においては、2 マイクロホンインピーダンス管を用いて、製作した試料について吸音率の測定を行った。そして、理論解析により求めた理論値と測定により得られた実験値の比較を行った。この結果について、学会にて 1 件の口頭発表を行った。

(3) 単純立方格子と六方格子の 2 つのモデルを扱い、粒径数 mm の粒状材料を充填した構造の吸音率を測定した。さらに、多数のパラメータを必要としない 1 次元伝達行列法を用いた簡便

かつ正確な理論解析を行った。単純立方格子と比較して、六角格子は隙間の容積が小さいため、隙間内の境界層の割合が大きく、それによる粘性摩擦の影響が大きくなり、吸音率のピークが高くなった。また、提案した解析手法で得られた理論値は、実験値と概ね一致した。これらの結果を集約し学術雑誌に論文として1編を発表した。

(4) 粒径や高密度が小さく、粉体粒子の縦振動により低周波で特異な吸音特性を示す「軽量・微細粉体」について、これまでの知見を図書の一つの節にまとめて公表した。

(5) 粒径や高密度がどのような値であれば、特異な吸音特性が得られるかは、これまで不明であった。そこで、粉体諸元と吸音特性の関係を明らかにし、蓄積されたデータをもとに、実験式から粉体層の吸音率を予測できるようになった。得られた実験式を用いることで、各粉体の特性のみから吸音率を推定する方法を示すことができた。この結果について、学会にて1件の口頭発表を行った。

(6) 粒状材料を充填した構造物に関して、六方最密充填構造および面心立方格子と、ランダム充填構造の吸音特性を理論解析により評価した。規則充填構造については、粒状体の表面積と空隙の体積の正確な値を用いて理論解析を行い、ランダム充填構造については、CTスキャンによる断面画像を用いて理論解析を行った。推定精度を向上させるため、超音波センサーを用いて迷路度を測定し、理論解析に考慮した。この結果について、学会にて1件の口頭発表を行った。

(7) 軽量の粉体の縦振動による低周波数域の吸音に関して、数理モデルによる吸音率の理論的な算出の際に粉体ごとの実験値が必要となる問題を、実験式を導出することにより改善する試みを行った。この結果について、国際学会にて1件の口頭発表を行った。

(8) 軽い粉体において縦振動による吸音が起こる際に、粉体に求められる条件について、様々なパラメータを用いて判定する試みを行った。この結果について、学会にて1件の口頭発表を行った。

(9) 粒状体の充填構造における吸音率に関する数理モデルと実験に関しては、六方最密充填および面心立方格子について、迷路度の測定結果を導入しながら明らかにした。また、粒径数 mm 程度の硬い粒状体では超音波法による迷路度の測定が難しいが、これについても装置を構築し測定を行うことができた。これらの結果を集約し学術雑誌に論文として1編を発表した。

(10) ランダム充填された粒状体の吸音率の理論的推定を行った。これについては、幾何学的な数理モデルに代えて、マイクロ CT スキャンデータに基づいた幾何学情報を計算に導入して解決した。これらの結果を集約し学術雑誌に論文として1編を発表した。

(11) 上述の推定法を、ランダム充填されたフレーク状のバイオマス材料へ展開した研究を行った。具体的には、もみ殻とそば殻の吸音特性に関して、マイクロ CT スキャンデータに基づく理論的推定と実験が行われた。この結果について、学会にて1件の口頭発表を行った。

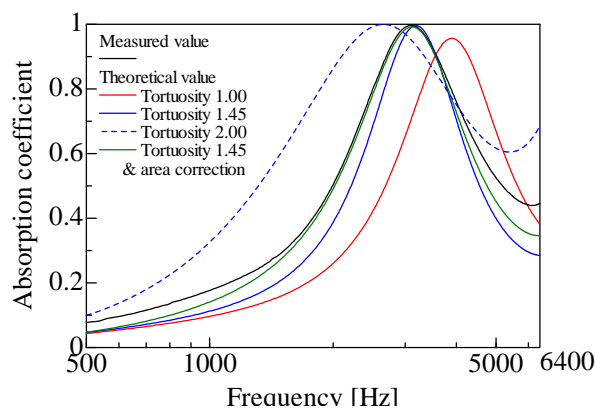


図 2 ランダム充填された粒状体について、マイクロ CT スキャンのデータを導入した計算結果を実験値と比較検証し一致を見た

#### <引用文献>

坂本秀一, 佐久間陽介, 柳本憲作, 渡部誠二, 粒状材料の音響特性に関する基礎的研究(粒径の異なる層が重なる場合の垂直入射吸音率), 日本機械学会論文集 C 編 74 巻 745 号 (2008), 2240-2245 頁.

Shuichi SAKAMOTO, Kohei YAMAGUCHI, Kohei II, Rikuya TAKAKURA, Yuya NAKAMURA, Ryusuke SUZUKI, Theoretical and Experiment Analysis on the Sound Absorption Characteristics of a Layer of Fine Lightweight Powder, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 146, No. 4, pp. 2253-2262 (2019).

Shuichi SAKAMOTO, Rikuya TAKAKURA, Ryusuke SUZUKI, Ibuki KATAYAMA, Ren SAITO, Kyosuke SUZUKI, Theoretical and Experimental Analyses of Acoustic Characteristics of Fine-grain Powder Considering Longitudinal Vibration and Boundary Layer Viscosity, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 149, No. 2, pp. 1030-1040 (2021).

DOI: 10.1121/10.0003436

鈴木 隆介, 坂本 秀一, 齋藤 蓮, 神代 啓介, 背後空気層を設けた微細な粉体層における吸音特性の測定と推定, 日本機械学会北陸信越支部 第 58 期総会・講演会講演論文集, No. 217-1, Paper No. C012 (2021. 3. 6), 信州大(リモート), 5 pages.

片山 伊吹, 坂本 秀一, 鈴木 恭佑, 戸田 健太郎, 粒状体の規則的充填構造における吸音特性の推定と実験(曲面の面積および空隙部の体積を考慮した解析), 日本機械学会北陸信越支部 第 58 期総会・講演会講演論文集, No. 217-1, Paper No. C014 (2021. 3. 6), 信州大(リモート), 5 pages.

Shuichi SAKAMOTO, Kohei II, Ibuki KATAYAMA, Kyosuke SUZUKI, Measurement and Theoretical Analysis of Sound Absorption of Simple Cubic and Hexagonal Lattice Granules, Noise Control Engineering Journal, Vol. 69, No. 5, pp. 401-410 (2021). DOI: 10.3397/1/376937

山本崇史, 松村修二, 倉片憲治, 坂本秀一ほか 63 名, 「自動車室内の静粛性向上と、防音・防振技術、材料の開発」, 2.4 節「軽量の粉体の特異な縦振動を利用した低周波数向けの薄い吸音材料」pp. 54-63 を執筆, 技術情報協会, 2021 年 9 月 30 日, 全 645 頁. ISBN: 978-4-86104-858-6

齋藤蓮, 坂本秀一, 神代啓介, 池田光希, 軽く微細な粉体による低周波数域における吸音(吸音率改善に必要な粉体の物性の条件), 日本機械学会北陸信越支部 2022 年合同講演会講演論文集, No. 227-1, Paper No. C031 (2022. 3. 5), 金沢工大, 5 pages.

鈴木恭佑, 坂本秀一, 戸田健太郎, 清野匠太郎, 超音波を用いた粒状体の充填構造の迷路度の測定(六方最密構造, 面心立方格子, ランダム充填の吸音率の実験と推定), 日本機械学会北陸信越支部 2022 年合同講演会講演論文集, No. 227-1, Paper No. C033 (2022. 3. 5), 金沢工大, 5 pages.

Shuichi Sakamoto, Ren Saito, Ryusuke Suzuki, Keisuke Jindai, Koki Ikeda, Characteristics of powders that cause sound absorption in the low frequency range due to longitudinal vibration in lightweight and fine powders, INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, InterNoise22, Glasgow, Scotland, Pages 3999-5001, pp. 4876-4881, 21-24 August 2022. DOI: 10.3397/IN\_2022\_0704

神代啓介, 坂本秀一, 池田光希, 川上勇弥, 軽い粉体において縦振動による吸音が起こる条件(面密度の小さい領域における吸音率の変化), 日本機械学会北陸信越支部 2023 年合同講演会講演論文集講演論文集, No. 237-1, Paper No. E018 (2023. 3. 4), 福井大, 4 pages.

Shuichi Sakamoto, Kyosuke Suzuki, Kentaro Toda, Shotaro Seino, Mathematical Models and Experiments on the Acoustic Properties of Granular Packing Structures (Measurement of tortuosity in hexagonal close-packed and face-centered cubic lattices), Materials, 2022, 15, 7393, 14 pages. DOI: 10.3390/ma15207393

Shuichi Sakamoto, Kyosuke Suzuki, Kentaro Toda, Shotaro Seino, Estimation of the Acoustic Properties of the Random Packing Structures of Granular Materials: Estimation of the Sound Absorption Coefficient Based on Micro-CT Scan Data, Materials, 2023, 16, 337, 13 pages. DOI: 10.3390/ma16010337

戸田健太郎, 坂本秀一, 清野匠太郎, 星山巧汰, もみ殻とそば殻の音響特性に関する推定と実験(マイクロ CT スキャンデータに基づく吸音率の推定), 日本機械学会北陸信越支部 2023 年合同講演会講演論文集, No. 237-1, Paper No. E016 (2023. 3. 4), 福井大, 4 pages.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shuichi Sakamoto, Kyosuke Suzuki, Kentaro Toda, Shotaro Seino	4. 巻 16
2. 論文標題 Estimation of the Acoustic Properties of the Random Packing Structures of Granular Materials: Estimation of the Sound Absorption Coefficient Based on Micro-CT Scan Data	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/ma16010337	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shuichi Sakamoto, Kyosuke Suzuki, Kentaro Toda, Shotaro Seino	4. 巻 15
2. 論文標題 Mathematical Models and Experiments on the Acoustic Properties of Granular Packing Structures (Measurement of tortuosity in hexagonal close-packed and face-centered cubic lattices)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/ma15207393	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shuichi SAKAMOTO, Kohei II, Ibuki KATAYAMA, Kyosuke SUZUKI	4. 巻 69, 5
2. 論文標題 Measurement and Theoretical Analysis of Sound Absorption of Simple Cubic and Hexagonal Lattice Granules	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Noise Control Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 401, 410
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3397/1/376937	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shuichi SAKAMOTO, Rikuya TAKAKURA, Ryusuke SUZUKI, Ibuki KATAYAMA, Ren SAITO, Kyosuke SUZUKI	4. 巻 149-2
2. 論文標題 Theoretical and Experimental Analyses of Acoustic Characteristics of Fine-grain Powder Considering Longitudinal Vibration and Boundary Layer Viscosity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 1030, 1040
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1121/10.0003436	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 戸田健太郎, 坂本秀一, 清野匠太郎, 星山巧汰
2. 発表標題 もみ殻とそば殻の音響特性に関する推定と実験（マイクロCTスキャンデータに基づく吸音率の推定）
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2023年合同講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 神代啓介, 坂本秀一, 池田光希, 川上勇弥
2. 発表標題 軽い粉体において縦振動による吸音が起こる条件(面密度の小さい領域における吸音率の変化)
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2023年合同講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shuichi Sakamoto, Ren Saito, Ryusuke Suzuki, Keisuke Jindai, Koki Ikeda
2. 発表標題 Characteristics of powders that cause sound absorption in the low frequency range due to longitudinal vibration in lightweight and fine powders
3. 学会等名 INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 斎藤蓮, 坂本秀一, 神代啓介, 池田光希
2. 発表標題 軽く微細な粉体による低周波数域における吸音（吸音率改善に必要な粉体の物性の条件）
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木恭佑, 坂本秀一, 戸田健太郎, 清野匠太郎
2. 発表標題 超音波を用いた粒状体の充填構造の迷路度の測定 (六方最密構造, 面心立方格子, ランダム充填の吸音率の実験と推定)
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 隆介, 坂本 秀一, 斎藤 蓮, 神代 啓介
2. 発表標題 背後空気層を設けた微細な粉体層における吸音特性の測定と推定
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 第58期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 片山 伊吹, 坂本 秀一, 鈴木 恭佑, 戸田 健太郎
2. 発表標題 粒状体の規則的充填構造における吸音特性の推定と実験 (曲面の面積および空隙部の体積を考慮した解析)
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 第58期総会・講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 山本崇史, 松村修二, 倉片憲治, 坂本秀一ほか63名	4. 発行年 2021年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 645
3. 書名 自動車室内の静粛性向上と、防音・防振技術、材料の開発	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------