粉体層の音響特性に及ぼす粒径の影響

—吸音特性と音速—

奥 平 有 三*, 安 藤 秀 行*
佐 藤 宗 武**, 宮 南 啓**

The Effect of Particle Diameter on the Acoustic Properties of a Powder Bed —Sound Absorption Characteristic and Sound Velocity—

by

Yuzo OKUDAIRA[†], Hideyuki ANDO[†],
Munetake SATOH^{††} and Kei MIYANAMI^{††}

The sound absorption coefficients and sound velocity of various powder beds were measured in the frequency range of 200 Hz to 2 kHz. The powder beds were comprised of classified powders having mean particle diameters from 53 to 300 μm . For the powder beds consisting of smaller particles, the sound absorption coefficients showed distinct peaks due to the excitation of normal vibration modes of the powder bed. In the frequency range in which sound absorption peaks appear, the sound velocity has almost on frequency dependency, and sound energy is dissipated mainly by the interaction of vibrated particles. As particles with larger diameters were used, these peaks decreased in amplitude, but the level of sound absorption increased in the high frequency range. In this frequency range, sound velocity increases according to frequency, and sound energy is dissipated mostly by the viscosity of the air in the pores.

Key Words : Powder Property, Sound Absorption, Sound Velocity, Vibration, Frequency Characteristic

1. 緒 言

音波の伝搬特性や分散あるいは吸収特性を利用し、粉体層の基礎的性質であるヤング率、空隙率などの計測が可能である^{1,2)}。また、音響エネルギーは粉体層の流動性の改善、乾燥、凝集などへの適用が検討されている^{3,4)}。粉体層の内部を音波が伝搬する場合、空隙中

の空気の粘性により音響エネルギーの減衰が生じる。また、音波による加振によって粉体層の共振モードが励起された場合、音響エネルギーの一部が粉体層の振動エネルギーに変換され、振動粒子間の相互作用により減衰される⁵⁾。このような粉体による音波の吸収特性を利用して、低周波吸音材を開発しようという試みも見られる⁶⁾。

しかしながら、粉体層の力学的特性や境界条件、および粉体層を構成する粒子の特性などと粉体層の吸音特性との関係については、まだ明らかでない点が多い。また、基本的な物性である粉体中の音速についても、理論面での研究はなされているものの⁷⁾、簡便でかつ周波数特性まで含めた計測法はいまだ確立されていない⁸⁾。

1994年 10月 28日受付

* 松下電工(株)中央研究所(〒571 大阪府門真市門真 1048)
TEL. 06-909-7383

** 大阪府立大学工学部化学工学科(〒593 大阪府堺市学園町 1-1)TEL. 0722-52-1161 内線 2327

† Central Res. Lab., Matsushita Electric Works, Ltd.
(1048 Kadoma, Kadoma City, Osaka 571)

†† Dept. of Chem. Eng., Univ. of Osaka Pref.
(1-1 Gakuen-cho, Sakai City, Osaka 593)

本報告では、ふるいにより分級された種々の粒度からなる粉体層への垂直入射吸音率を、音響管を利用した吸音率測定装置を用いて、200Hzから2kHzの周波数範囲で計測し、粒径によるそれらの吸音特性の変化を詳しく調べた。さらに、粉体層表面での音波の反射特性の計測結果から各種粉体層の音速を求め、それらの周波数特性を分析することにより、粉体層内部での音波の吸収メカニズムについて考察を加えた。

2. 粉体層の音響特性計測装置

Fig. 1に、粉体層の垂直入射吸音率の計測装置の概略を示した。内径88mmの鉄製音響管の上部に設置したスピーカから放射された広帯域の音波は、管内を平面波として伝搬し、音響管下部の試料容器に充填された粉体層(層厚 h)に垂直に入射する。入射した音波のエネルギーの一部は粉体層内部で吸収され、残りは粉体層と試料容器の境界面で反射され音響管内を上方に向かって進行する。音響管を下方に伝搬する音波 P_+ と、上方に伝搬する音波 P_- により、管内に形成された定在波の音圧を、管壁に設置した2本のマイクロフォンで検知する。この2系統の信号をFFT(高速フーリエ変換器)を用いてフーリエ変換などの信号処理(後述)を行うことにより、粉体層の垂直入射吸音率が求められる。

3. 実験

3.1 粉体試料

実験には粉体材料としてシリカ造粒品および焼成ヒル石を用いたが、その粉体物性を**Table 1**に示した。

Fig. 1 Acoustic tube for measuring the normal incident sound absorption coefficient of the powder bed

Table 1 Materials used in the experiments

Original materials and their physical properties	Particle size (μm)		Bulk density (kg/m^3)		Key
	range	mean D_p	naturally packed	tapped	
Granulated silica $D_{50}=152.3\mu\text{m}$ Bulk density= $276\text{kg}/\text{m}^3$ True density= $2100\text{kg}/\text{m}^3$	45~63	53	241	280	S1
	63~90	75	252	281	S2
	90~125	106	269	281	S3
	125~180	150	281	289	S4
	180~250	212	282	285	S5
	250~355	300	283	283	S6
Vermiculite $D_{50}=93.1\mu\text{m}$ Bulk density= $144\text{kg}/\text{m}^3$ True density= $2600\text{kg}/\text{m}^3$	45~63	53	125	171	V1
	63~90	75	137	172	V2
	90~125	106	166	173	V3
	125~180	150	156	172	V4

(a) Granulated silica

(b) Vermiculite

Fig. 2 Microphotographs of powder materials

Fig. 2に粒子の顕微鏡写真を示したが、シリカ造粒品の粒子形状はほぼ球形、焼成ヒル石は不定形である。これらの粉体試料を7種類の標準ふるい(公称目開き45から355 μm)、およびロータップ型ふるい振盪機を使用しJIS Z 8801に準拠して分級した。分級された粉体の代表粒子径 D_p は、上下の二つのふるいの目開きの幾何平均値を採用した。シリカ造粒品については粒子径 D_p が53から300 μm の6種類(記号はS1~S6)、焼成ヒル石については粒子径 D_p が53から150 μm の4種類(記号はV1~V4)に分級した。これらの試料を、Fig.

1に示した試料容器(内径84mm)に軽くタッピングしながら充填した。粒子径の小さい粉体ほどタッピングの回数を多くし、試料容器充填後のかさ密度は粒度によらずほぼ一定値にした。容器充填後のかさ密度はシリカ造粒品の分級試料で約280kg/m³、焼成ヒル石で約170kg/m³である。なお、試料容器はアクリル製であるが、その容器内部の表面の平滑性が吸音特性にほとんど影響しないことは確認した。

3.2 垂直入射吸音率計測手順^{5,9)}

Fig. 1の下方伝搬音波 P_+ と上方伝搬音波 P_- のフーリエ変換をそれぞれ $P_+(f)$ 、 $P_-(f)$ とすると、2本のマイクロホン間の伝達関数 $H(f)$ はEq. (1)により表される。

$$H(f) = \frac{P_b(f)}{P_a(f)} = \frac{P_+(f) + P_-(f)}{P_+(f)e^{-jks} + P_-(f)e^{jks}} \quad (1)$$

ここで、 $P_a(f)$ 、 $P_b(f)$ は各々マイクロホン“A”、“B”で検知した音圧信号のフーリエ変換、 f は周波数、 k ($=2\pi f/c_0$: c_0 は空気中の音速)は波数定数、 s は2本のマイクロホン間の距離、 $j = \sqrt{-1}$ である。Eq. (1)より粉体層の音圧反射係数 R は伝達関数 $H(f)$ を用いて次式で計算される。

$$R = \frac{P_-(f)}{P_+(f)} = \frac{H(f)e^{-jks} - 1}{1 - H(f)e^{jks}} \quad (2)$$

Eq. (2)により求めた音圧反射係数 R をEq. (3)に代入することにより粉体層の垂直入射吸音率 α が得られる。

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (3)$$

$H(f)$ を求める際のFFTのサンプリング周波数は5.12kHz、サンプリング数は1024点に設定した。すなわち1回のデータ収録時間は約0.2秒である。計測精度を高めるため64個のデータを平均化した。音源には100Hzから2kHzまでの周波数範囲でエネルギー密度が一定の疑似ホワイトノイズを用いた。粉体層へ入射する音波の音圧レベルは99dB(音圧=1.8Pa)であり、粉体層表面(表面積= 5.54×10^{-3} m²)には約 1.0×10^{-2} Nの音波加振力が作用する。なお、測定時における粉体層の変形や充填状態の変化の程度を確かめるため、Tabel 1の試料を30mmの粉体層高でセットし、同装置を正弦波(音圧レベル99dB)でスイープ加振した時の状態を観察した。粉体層表面近傍の振動変位を小型加速度計⁵⁾により測定した結果、最大でも数 μ mと非常に小さい変位であることがわかった。

3.3 粉体層の音速測定法

粉体層を伝搬する音波の音速の周波数特性を測定することは、粉体層内部での音波エネルギーの吸収メカニズムを知るうえで重要である。そこで次に示す方法により粉体層の音速を求めた¹⁰⁾。

Fig. 3に示すような単相材料を x 方向に平面音波が伝搬するとき、 $x=0$ での音響インピーダンス Z_1 と、 $x=l$ での音響インピーダンス Z_2 との関係は、材料の伝搬定数 γ ($=\alpha + j\beta = \alpha + j2\pi f/c$: α は減衰定数、 β は位相定数、 c は材料中の音速)、特性インピーダンス Z (材料中の音圧と音波の振動速度の比)を用いてEq. (4)により表される。

$$Z_1 = Z \frac{Z_2 \cosh \gamma l + Z \sinh \gamma l}{Z_2 \sinh \gamma l + Z \cosh \gamma l} \quad (4)$$

材料を剛壁に密着した場合は $Z_2 = \infty$ であるから、Eq. (5)が成立する。

$$Z_1 = Z \coth \gamma l \quad (5)$$

Fig. 1に示した計測装置については、試料粉体層を伝搬する波動は平面音波、あるいは粉体層の縦方向の弾性振動波であるので、粉体試料の伝搬定数を γ_p 、特性インピーダンスを Z_p とすると、粉体層表面での音響インピーダンス Z_s はEq. (6)により表される。

$$Z_s = Z_p \coth \gamma_p h \quad (6)$$

一方、垂直入射吸音率を計測する過程で求めた音圧反射係数 R (Eq. (2))により、粉体層表面での音響インピーダンス Z_s が次式で表される。

$$Z_s = Z_0 \frac{1+R}{1-R} \quad (7)$$

ここで、 Z_0 は空気の音響インピーダンス(414kg/(s・m²))である。そこで粉体層の厚さ h を二通り(h_1 と h_2)に変えて、音圧反射係数 R を計測し、Eq. (7)により

Fig. 3 Acoustic impedance of a layer comprised of single-phase material

各々の粉体層表面での音響インピーダンス Z_{s1} , Z_{s2} を求める。Eq.(6)より, Z_{s1} , Z_{s2} について, Eqs.(8), (9)の関係が成立する。

$$Z_{s1} = Z_p \coth \gamma_p h_1 \quad (8)$$

$$Z_{s2} = Z_p \coth \gamma_p h_2 \quad (9)$$

Eqs.(8), (9)の連立方程式を解くことにより, 試料粉体層の転搬定数 γ_p が求められるが, 特に $h_1=2h_2$ のときはEq.(10)に示す簡単な式により, γ_p を計算することができる。

$$\gamma_p = \frac{1}{h_2} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z_1}{Z_2} - 1} \quad (10)$$

以上の手順で求めた伝搬定数 γ_p の虚部 β_p から, Eq.(11)により粉体層中での音速 c_p が求められる。

$$c_p = \frac{2\pi f}{\beta_p} \quad (11)$$

予備検討として, h_1 と h_2 が, 20と10mm, 30と15mm, 40と20mmの3つの組み合わせについて音速を求め比較したところ, 大部分の周波数領域で3者の値はほぼ一致した。以下の実験では, h_1 と h_2 が30と15mmの組み合わせについて行った。

4. 実験結果と考察

4.1 粒子径による粉体層の吸音特性の変化

Table 1に示したシリカ造粒品の6種類の分級試料(記号S1~S6)からなる粉体層の垂直入射吸音率をFig. 4に示した。粉体層厚は30mmである。S1(粒子径 $D_p=53\mu\text{m}$), S2($D_p=75\mu\text{m}$), S3($D_p=106\mu\text{m}$), S4($D_p=150\mu\text{m}$)の各試料とも, 250Hzから300Hzの周波数帯域に1次, 700Hzから800Hzの間に2次の吸音ピークが現れている。粒子径の小さいS1, S2については, 更に1000Hz以上の高周波数帯域で3次, 4次の吸音ピークが見られる。これらの吸音ピークは, 粒径が大きくなるに従い次第に小さくなり, 粒子径が最も大きい試料S6($D_p=300\mu\text{m}$)については吸音のピークが全く無くなる。Fig. 5には同じ試料(S1~S6)からなる層厚15mmの粉体層の垂直入射吸音率を示したが, 吸音ピークが高周波数側にずれるものの, 層厚30mmの場合と同様の傾向が見られる。Figs. 4, 5の吸音ピークは垂直入射音波により粉体層の縦振動モードが励起されたことによると考えられる。吸音ピークの周波数比がほぼ1:3:5であること, また吸音ピーク周波

Fig. 4 Normal incident sound absorption coefficients of the powder beds comprised of classified granulated silicas (bed thickness : $h=30\text{mm}$)

Fig. 5 Normal incident sound absorption coefficients of the powder beds comprised of classified granulated silicas (bed thickness : $h=15\text{mm}$)

数が層厚に反比例していることから判断し, 粉体層の1次, および2次の縦振動モードはFig. 6に示す形状

Fig. 6 Mode shape of the powder bed excited by the sound wave incidence

であると推察できる。1次モードではすべての粒子が同位相で縦方向に振動し、粉体層表面に近づくほど粒子の変位は大きくなる。また2次モードでは粉体層表面から層厚の3分の1のところに振動の節が生じ、その近傍では粒子はほとんど振動せず、その上下で粒子は逆位相で振動する。このような振動モードが励起されると、振動粒子間の相互作用によりエネルギーが消散される。その結果、粒子の振動が最も大きいと考えられる共振周波数を中心に吸音率のピークが現れる。

粒子の振動によるエネルギーの消散過程は複雑であるが、消散されるエネルギーの大きさは粉体層内の接触点の数、および粒子間の相対的な振動変位の大きさに比例すると考えられる¹¹⁾。Figs. 4, および5から各吸音ピークの最大値を読みとり、**Fig. 7**に粒子径 D_p に対してプロットした。すべての吸音ピークについて、粒子径 D_p が大きくなるにつれ、その最大値は小さくなる。これは粒子径の増加により層内の接触点の総数が減少したことと、粒子の重量の増加により粒子の振動変位の振幅が小さくなったことが原因と考えられる。また2次の吸音ピーク値は、1次と比べて小さい。これは、**Fig. 6**に示したように、1次モードは層内の粒

Fig. 7 Variation of peak values of sound absorption coefficients with particle diameter D_p

子全体が振動するが、2次モードについては振動の節付近の粒子はほとんど振動しないこと、吸音ピーク周波数が高周波数側に移るため粒子の振動変位が小さくなることなどが理由として挙げられる。層厚15mmの粉体層に関しては、その吸音ピークの値は層厚30mmの粉体層の吸音ピークの値と比較して低めである。これは接触点の総数が少なく(約1/2)、かつピーク周波数が高周波数側に移るため粒子の振動変位が小さくなるためであろう。

試料S5, S6のように、粒子径が大きくなると高周波数帯域で吸音率が大きくなるが(Figs. 4, 5), この現象は、グラスウール、発砲ウレタンフォームなどの多孔質吸音材料と同様、粒子間の空隙を音波が伝搬する際、空気粘性により音波エネルギーが消散したためと考えられる¹²⁾。

4. 2 粒径による粉体層内の音速の変化

シリカ造粒品の分級試料について、3. 3項で述べた方法により粉体層の音速を求め、結果を**Fig. 8**に示した。S1(粒子径 $D_p=53\mu\text{m}$), S2($D_p=75\mu\text{m}$), S3($D_p=106\mu\text{m}$), S4($D_p=150\mu\text{m}$)の試料については、広い周波数範囲($\sim 1.3\text{kHz}$)ではほぼ一定の値をとる。**Fig. 4**の吸音特性からみて、この特性は粒子の接触点を通して粉体層を伝わる弾性波の特性であると考えられる。すなわち、試料S1からS4の1.3kHz以下の周波数領域での吸音現象は、主に粉体粒子の振動に起因するものであるといえる。また、音速の値は各試料とも約30 m/sと空気中の音速や、固体中を伝わる弾性波の速度と比べて非常に小さい¹³⁾。

吸音ピークが明瞭に現れる場合はその周波数において、**Fig. 6**に示した振動モードの形状から粉体層の弾性波の速度 c_p がEq. (12)を用いて計算できる⁵⁾。

$$c_p = 4h f_{p1} \quad (12)$$

Fig. 8 Frequency characteristics for the sound velocity of the powder beds comprised of classified granulated silicas (S1~S4)

Table 2 Sound velocity of the powder bed c_p calculated from the primary absorption peak frequency f_{p1}

Powder materials	f_{p1} (Hz)	c_p (m/s)
Granulated silica		
(S1)	260	31.2
(S2)	250	30.0
(S3)	270	32.4
(S4)	275	33.0

ここで f_{p1} は1次の吸音ピーク周波数である。シリカ試料S1～S4について、Fig. 4の1次の吸音ピーク周波数 f_{p1} からEq. (12)を用いて計算した粉体層内の音速をTable 2に示したが、Fig. 8の結果とよく一致する。このことから、本報告の粉体層の音速測定法の妥当性が検証できた。

粉体層の弾性波の速度はEq. (13)に示すように粉体層の縦弾性係数 K (Pa)によって定まる。

$$c_p = \sqrt{\frac{K}{\rho_b}} \quad (13)$$

ここで、 ρ_b は粉体層のかき密度 (kg/m^3) である。実験に使用した試料は自然充填状態に近く、その縦弾性係数の接触点の弾性率に大きく依存すると考えられる。計測時の粉体層表面近傍の振動変位の大きさから判断して、粒子の接触点での相対振動変位はサブマイクロオーダーと推測できる。このような微小変形に対して、Fig. 8に示した音速の特性とEq. (13)の関係から、粒子接触点の弾性率が非常に小さく、また周波数によらずほぼ一定であると推論できる¹⁴⁾。

Fig. 9にはシリカ造粒品の分級試料のうち、粒径の大きい試料S5(粒子径 $D_p=212\mu\text{m}$)、およびS6($300\mu\text{m}$)の音速を示した。試料S5は約700Hz、試料S6は約500Hzまでは音速はほぼ一定であり、粉体層の縦振動が励起されていると思われる。高周波数領域では周波数が高くなるに従い音速は大きくなる。この領域は、空隙での空気粘性による吸音が粒子の振動による吸音よりも優勢であると考えられる。これを確認する意味で次に示すシミュレーションを実施した。

連続気孔を伝搬する音波の伝搬定数 γ については、Eq. (14)で定式化され、グラスウール、ロックウールなど多孔質吸音材に関しては実験とよく一致することが確かめられている^{12,15)}。

$$\gamma = j\omega \sqrt{\frac{\rho_0 S P}{K_a}} \sqrt{1 - j \frac{R}{\rho_0 S \omega}} \quad (14)$$

Fig. 9 Frequency characteristics of the sound velocity of the powder beds comprised of classified granulated silicas (S5, S6) and the simulation results by Eq. (14)

ここで、 ρ_0 は空気密度 ($1.21\text{kg}/\text{m}^3$)、 P は材料の空隙率、 K_a は空気の体積弾性率 (Pa)、 r は材料の流れ抵抗 ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^4$)、 S は構造定数(多孔質材料の気孔構造が単に音波入射面に垂直な毛細管でないことを考慮して導入された定数)、 $\omega (=2\pi f)$ は角速度である。

Eq. (14)をシリカ試料造粒品の分級試料S5, S6に適用し、得られた伝搬定数の虚部から空隙を伝搬する音波の速度を計算した。 $K_a=1.4 \times 10^5 \text{Pa}$ ¹⁶⁾、 $S=2^{12)}$ 、 $P=0.87$ (Table 1参照)の値を用い、流れ抵抗 r を種々変化させて計算した結果を、Fig. 9に実線で示した。1kHz以上の周波数領域において、流れ抵抗 r の値が 1.0×10^5 から $3.0 \times 10^5 \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^4$ の範囲でシミュレーションの結果は、試料S5, S6の音速の値とよく一致を見た。この流れ抵抗 r の値は、同密度の繊維系の多孔質材の流れ抵抗とほぼ同程度の値である¹²⁾。以上のことから、試料S5, S6の高周波数帯域での吸音は粒子間の空隙を伝搬する音波が伝搬途中で空気粘性により減衰した結果と推察できる。

4.3 焼成ヒル石分級品の吸音率と音速

Table 1に示した焼成ヒル石の分級試料(V1～V4)からなる粉体層(層厚30mm)の垂直入射吸音率をFig. 10に示した。V1(粒子径 $D_p=53\mu\text{m}$)、V2($D_p=75\mu\text{m}$)、V3($D_p=106\mu\text{m}$)、V4($D_p=105\mu\text{m}$)の各試料とも、300Hz付近に1次の吸音ピークが現れている。Fig. 4のシリカ造粒品(S1～S4)と比べて吸音ピークは全体的に低く、また幅は広い。これは焼成ヒル石からなる粉体層の縦振動モードの励起が弱いことを示している。一般に構造体の共振について、それを構成する材料の減衰が大きいほど、共振ピークが低くなり、逆に幅は広くなることはよく知られている。このことから推論

Fig. 10 Normal incident sound absorption coefficients of the powder beds comprised of classified vermiculites (bed thickness : $h=30\text{mm}$)

すれば、焼成ヒル石はその粒子形状、粒子の材料物性などの影響によりシリカ造粒品と比べて接触点での粘性減衰が大きいものと考えられる。

Fig. 11に、焼成ヒル石試料(V1~V4)の音速の計算値を示した。粒子径 D_p が小さい試料V1, V2については2kHzまで音速がほぼ一定であるが、粒子径 D_p が大きい試料V3では600Hz付近、V4では500Hzまでは音速のほぼ一定であるが、それ以上の周波数領域では縦振動モードが励起されず、空気伝搬音の影響により音速が周波数に応じて大きくなる。同じ粒子径のシリカ造粒品試料の音速と比較して(Fig. 8の試料S3, S4は1.3kHz付近から音速が増加)、音速が増加し始める周波数が低い。音速の結果も、シリカ造粒品試料に比べて焼成ヒル石からなる粉体層の振動モードが励起されにくいことを示している。

5. 結 言

ふるいにより分級した粉体試料(平均粒子径が最小

Fig. 11 Frequency characteristics of the sound velocity of the powder beds comprised of classified vermiculites (V1~V4)

で53μm、最大で300μm)からなる粉体層の吸音率と音速を測定することにより、粉体層内部での音波の吸収メカニズムを明らかにした。粒子径が小さい場合は、音波の入射により粉体層の振動モードが励起され、その結果、ピーク性の吸音特性が生じる。この場合、振動粒子の接触点においてエネルギーの消散が起こる。粒径が大きくなると、粒子振動による吸音ピークはなくなり、代わりに粒子間の空隙の空気の粘性による吸音が起こる。この場合は、周波数に比例して吸音率は単調に増加する。

粉体層内の音速が周波数によらず一定のときは、粒子振動による吸音が、また周波数に比例して増加するときは空気の粘性による吸音が支配的であるということがわかった。

Nomenclature

α	: normal incident sound absorption coefficient of a powder bed	(-)	K	: longitudinal elastic coefficient of the powder bed	(Pa)
c	: sound velocity of material	(m/s)	K_a	: volume elastic coefficient	(Pa)
c_0	: sound velocity in the air	(m/s)	k	: wave number of the air	(m^{-1})
c_p	: sound velocity of a powder bed	(m/s)	l	: thickness of a layer	(m)
D_{50}	: particle diameter by cumulative percent volume (50%)	(μm)	P_+	: sound pressure of the downward sound in the acoustic tube	(Pa)
D_p	: particle diameter of a classified powder	(μm)	P_-	: sound pressure of the upward sound in the acoustic tube	(Pa)
f	: frequency	(s^{-1})	$P_a(f)$	: Fourier transform of sound pressure at microphone "A"	
f_{p1}	: primary absorption peak frequency	(s^{-1})	$P_b(f)$	: Fourier transform of sound pressure at microphone "B"	
$H(f)$	: transfer function of sound pressure for the two microphones		$P_+(f)$	: Fourier transform of P_+	
h, h_1, h_2	: thickness of powder beds	(m)	$P_-(f)$	: Fourier transform of P_-	
j	: ($=\sqrt{-1}$)				

R	: reflection factor of sound pressure of a powder bed	Z_{s1}, Z_{s2}	: acoustic impedance on the surface of powder beds ($\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$)
r	: flow resistance ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^4$)	α	: attenuation constant of material (m^{-1})
S	: structure factor of a porous material	α_p	: attenuation constant of a powder bed (m^{-1})
s	: spacing between two microphones (m)	β	: phase constant of material (m^{-1})
Z	: characteristic impedance of material ($\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$)	β_p	: phase constant of a powder bed (m^{-1})
Z_p	: characteristic impedance of a powder bed ($\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$)	γ	: propagation constant of material (s^{-1})
Z_0	: characteristic impedance of the air ($\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$)	γ_p	: propagation constant of a powder bed (s^{-1})
Z_1, Z_2	: acoustic impedance on the surface of a layer ($\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$)	ρ_0	: density of the air (kg/m^3)
		ρ_b	: bulk density of a powder bed (kg/m^3)
		ω	: angular velocity (rad/s)

References

- 1) Meister, D. : *Bergbauwissenschaften*, 15, 323(1968)
- 2) Grek, F. Z. and V. N. Keselnikov : *Int. Chem. Eng.*, 4, 263(1964)
- 3) Morse, R. D. : *Ind. Eng. Chem.*, 47, 1170(1955)
- 4) Medcraft, S. G. : *Chem. Proc. Eng.*, 52, 59(1971)
- 5) Okudaira, Y., Y. Kurihara, H. Ando, M. Satoh and K. Miyanami : *Powder Technol.*, 77, 39(1993)
- 6) Ando, H., Y. Okudaira, M. Satoh and K. Miyanami : *Proceedings Inter-Noise '94*, p.1527 (1994)
- 7) Schubert, H., W. Herrmann and H. Rumpf : *Powder Technol.*, 11, 121(1974)
- 8) Hidaka, J. : *J. Soc. Powder Technol.*, Japan 26, 797(1989)
- 9) Chung, J. Y. and D. A. Blaser : *J. Acoust. Soc. Am.*, 68, 907(1980)
- 10) Maekawa, J. : "Kenchiku Kankyo-Onkyo Gaku", p.207, Kyouritu Shuppan(1978)
- 11) Tanaka, K. and S. Saegusa : "Shindou Model to Simulation", p.130, Ouyou Gijutu Shuppan(1983)
- 12) Beranek, L. L. : "Noise Reduction", p.246, McGraw-Hill Book(1960)
- 13) Nihon Onkyo Zairyo Kyokai(ed.) : "Souon Shindou Taisaku Handbook", p.334, Gihoudou Shuppan(1982)
- 14) Okudaira, Y., H. Ando, M. Satoh and K. Miyanami : *Powder Technol.*, 81, 139(1994)
- 15) Zwicker, C. and C. W. Kosten : "Sound Absorbing Materials", p.107, Elsevier Pub.(1949)
- 16) Denki Tushin Gakkai(ed.) : "Denki Onkyo Shindou Gaku", p.30 Korona-sha(1982)