

音響を利用した容器内粉体レベルの測定*

(ガラスビーズを用いた基礎的実験と理論解析)

坂本秀一^{*1}, 高井光太郎^{*2}, 深井雄史^{*3}
柳本憲作^{*4}, 渡部誠二^{*4}, 一宮亮一^{*5}

Measurement of the Height for Granular Material Level in a Cylinder Using Sound (Fundamental Experiments for Glass Beads and Theoretical Analysis)

Shuichi SAKAMOTO^{*6}, Kotaro TAKAI, Yuji FUKAI,
Kensaku YANAGIMOTO, Seiji WATANABE and Ryoichi ICHIMIYA

*6 Department of Mechanical and Production Engineering, Niigata University,
2-8050 Ikarashi, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

This paper deals with the development of a new method for measurement of the height for granular material in a cylinder. For monitoring of automated filling processes of cartridges in a series production a new measurement method was developed which allows to detect rapidly incorrect products and to improve the process capability by the use of this method. The aim of this research work is to measure the level of granular material in a cartridge without contacting the material. The material is the mixture of the solid particles and air. The material is assumed as the porous media from the viewpoint of acoustics. As that, the inside of the cartridge, which is filled with granular material, is the acoustic system including porous media. The measuring method used the relationship between amount of granular material in the cartridge and the characteristics of the transfer function of the acoustic system is developed. The acoustic characteristic of the granular material, which is used for the theoretical analysis was also measured.

Key Words: Sound, Sensor, Measurement, Powder, Granular Material, Non-Contact, Level

1. 緒 言

生産において粉体を容器に詰める行程は数多く見られる。本研究は、容器内の粉体レベルを音響によって粉体に非接触で測定することを目的としている。粉体が入った容器は、多孔質を含んだ音響系となる。本測定法は、このような音響系の応答と粉体レベルを対応させるものである。著者らは、狭い範囲において重量にしてミリグラムオーダの測定の可能性を既に示した⁽¹⁾。本論文の内容は、容器の広いレベル範囲において本測定法の適用を行ったものである⁽²⁾。基礎的な実験として、粒径の異なる粉体と、大きさの異なる容器を用いて測定を行った。また、粉体の音響特性の実測値を用いた理論解析を行い、実験結果との比較を行った。以下にその結果を報告する。

2. 実験装置と測定の原理

図1に実験装置ならびに伝達関数測定に使用する測

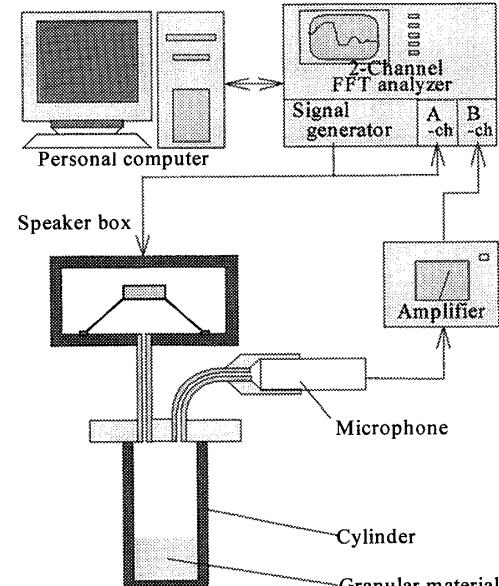


Fig.1 Outline of experimental apparatus

* 原稿受付 2003年4月23日。

*1 正員、新潟大学工学部(☎ 950-2181 新潟市五十嵐2の町 8050)。

*2 准員、(株)遠藤製作所(☎ 959-1244 燕市中央通5-3)。

*3 パール楽器製造(株)(☎ 276-0034 八千代市八千代台西10-2-1)。

*4 正員、鶴岡工業高等専門学校制御情報工学科(☎ 997-8511 鶴岡市井岡字沢田104)。

*5 正員、福山大学工学部(☎ 729-0251 福山市学園町1三蔵)。

E-mail: sakamoto@eng.niigata-u.ac.jp

定器の接続を示す。マイクロホンとスピーカは共にシリコンチューブを介して装置に取り付けることにより、マイクロホンとスピーカの振動絶縁を図っている。シリコンチューブの内径は容器内の音響系への影響を避ける理由から、容器内部との断面積比を大きく取るため 1mm とした。粉体が入った容器の上方はチューブが繋がれた蓋で閉じられ、容器内部に音響系が構成される。

容器に粉体が入っている状態は、音響的には、上の空間が空気であり、下の空間が粉体すなわち多孔質となり、粉体表面のレベルを境に 2 種類の音響媒質で満たされることになる。ここで重要なのは、粉体表面から見た入射インピーダンスは入射方向に垂直な粉体の厚さ（高さ）によって変化することである。そして、一般に粉体（多孔質）の入射インピーダンスは虚数部を持つ周波数の関数である。これらのことを利用してれば、粉体への入射インピーダンスの変化は、粉体を封入した容器内部音響系の音響特性の変化として捉えることが出来る。以上が本測定法の原理である。

3. 実験方法と結果

3.1 基礎実験の方法 基礎実験は以下のように行った。図 1 に示すように、スピーカから基準となる信号がチューブを介して容器内に放射され、容器内の音圧はチューブを介してマイクロホンで拾われる。

Table.1 Detail of glass beads

| Nominal size (mm) | Variation (mm) |
|-------------------|-----------------|
| φ 0.05 | φ 0.037~φ 0.063 |
| φ 0.1 | φ 0.105~φ 0.125 |
| φ 0.2 | φ 0.177~φ 0.250 |
| φ 0.4 | φ 0.350~φ 0.500 |
| φ 0.8 | φ 0.710~φ 0.990 |
| φ 2.0 | φ 1.500~φ 2.500 |

Table.2 Inner size of cylinders

| Diameter × height (mm) |
|---------------------------|
| φ 5×20 |
| φ 5×40 |
| φ 5×80 |
| φ 10×20 |
| φ 10×40 |
| φ 10×80 |
| φ 20×20 |
| φ 20×40 |
| φ 20×80 |

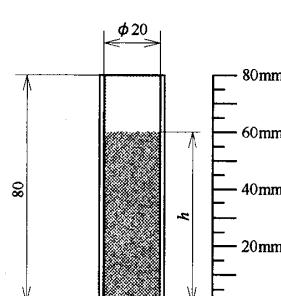


Fig.2 Outline of cylinder
(φ 20 × 80)

このスピーカ入力、マイクロホン出力間における伝達関数を FFT アナライザ（アドバンテスト社製 R9211C）のサーボモードにおけるマルチサイン波により測定する。

測定対象とした粉体と容器の仕様を表 1、表 2 にそれぞれ示す。粉体には粒径の異なる 6 種類のガラスビーズを用い、容器については内径と高さの異なるものを 9 種類用いた。実験の準備として、粉体のかさ密度と体積の関係により、容器内における粉体表面の高さ h （図 2 参照）が 5mm ずつ変化する事に相当する粉体重量を設定した。実験においては粉体を容器に入れ替えるごとに規定の微振動を与えて、粉体表面を平滑に整え、かさ密度を収束させた。

3.2 基礎実験の結果 伝達関数の振幅と位相についての周波数応答と、粉体レベル変化との関係を調べた結果、振幅と粉体レベル変化との間に有意な傾向が見られたため、以後は振幅について述べる。

粉体 $\phi 0.4\text{mm}$ （以後この呼び径で指す）、容器 $\phi 10\text{mm} \times 40\text{mm}$ における振幅を図 3 に示す。

容器が両端閉口管として作用する共鳴は容器が空（すなわち $h=0\text{mm}$ ）のときが最も尖鋭になる。したがって、粉体が入っている場合の振幅の周波数応答は共鳴周波数において相対的に小さくなる事が予想される。図 3 においても、容器の高さ 40mm の共鳴 1 次モード（4.25kHz）および 2, 3, 4 次モードにおいて予想通り振幅が小さくなっている。

3.3 レベル検出に関する実験 前節の実験により、共鳴 1 次モードより低い周波数帯、特に 2kHz 以下の範囲において、粉体レベルの順に伝達関数の振幅が変化している事が判った。図 4 に 2kHz までの測定結果を示す。図 3 における測定結果は低い周波数帯域でスペイク状の乱れがあり、図 3 と図 4 の同じ周波数における振幅は異なっている。図 4 では、300~1600Hz 付近にわたり、粉体レベルの順に伝達関数の

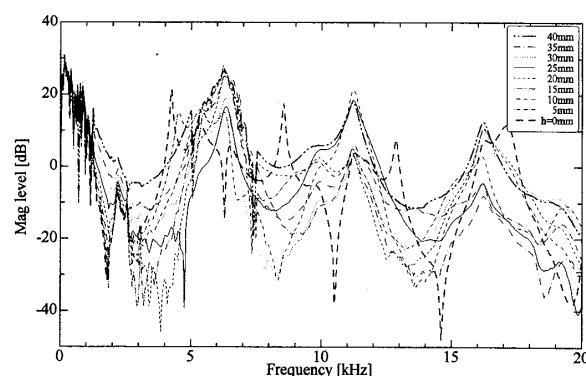


Fig.3 Magnitude of transfer function
(Experiments, φ 0.4mm, φ 10 × 40mm)

振幅曲線が並んでいることが判る。

ここで、図4における特定の周波数（ここでは1450Hz）における振幅値を縦軸に、粉体レベルを横軸にとると、粉体レベルと振幅の関係は、図5に示すようの一対一対応になる。このように、実用においては、

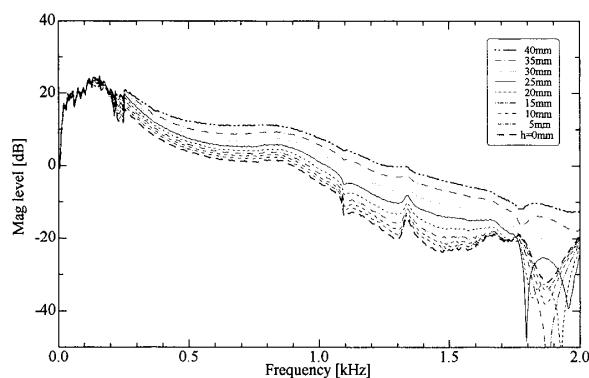


Fig.4 Magnitude of transfer function
(Experiments, $\phi 0.4\text{mm}$, $\phi 10 \times 40\text{mm}$)

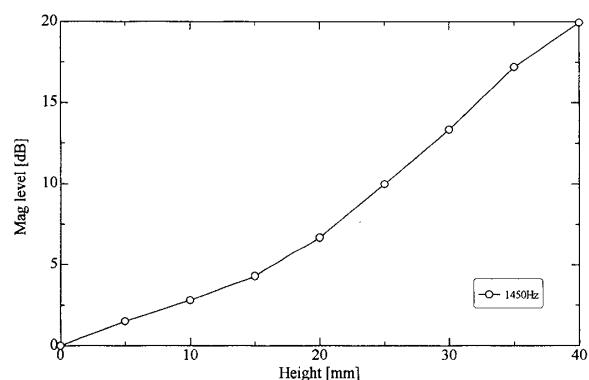


Fig.5 Relationship between height and magnitude of transfer function (1450Hz, $\phi 0.4\text{mm}$, $\phi 10 \times 40\text{mm}$)

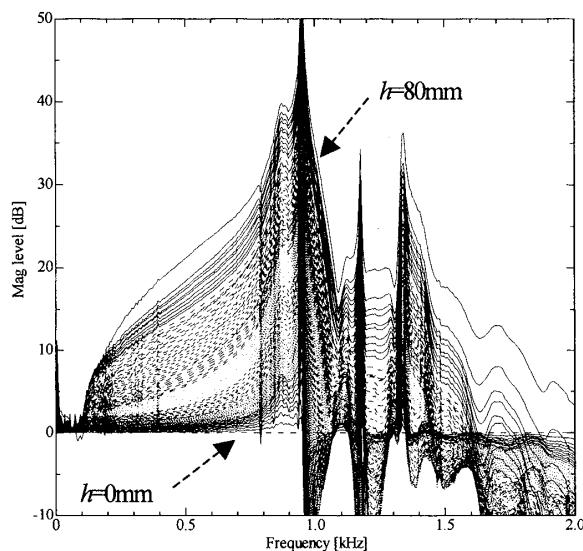


Fig.6 Magnitude of transfer function
(Experiments by 1mm step height, $\phi 0.4\text{mm}$, $\phi 20 \times 80\text{mm}$)

測定に適した周波数の正弦波をスピーカより放射し、マイクロホンの出力電圧により粉体レベルを判定すれば、測定器を簡素化する事が出来る。

3.4 測定の分解能 粉体 $\phi 0.4\text{mm}$, $\phi 20 \times 80\text{mm}$ の容器において粉体高さ h が 1mm 単位で変化するように粉体重量を変化させ、伝達関数を測定した結果を図6に示す。これより粉体レベル全域において、少なくとも 80 の分解能を持っていることが判る。

3.5 純音を用いた測定と再現性 図7に測定器を簡素化した実験装置を示す。信号発生器により特定の周波数の正弦波をスピーカに入力し、マイクロホンが拾った信号の電圧を測定する。マイクロホンが拾った信号に含まれるノイズの影響を比較するため、電圧計の前段にバンドパスフィルターを挿入した場合と省略した場合について実験を行った。

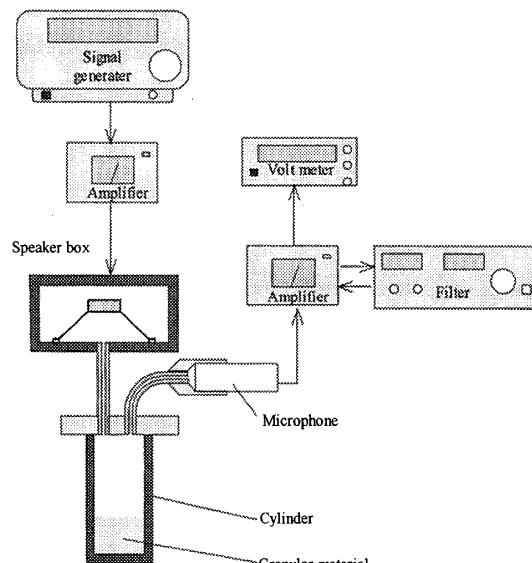


Fig.7 Experimental setup for pure tone wave

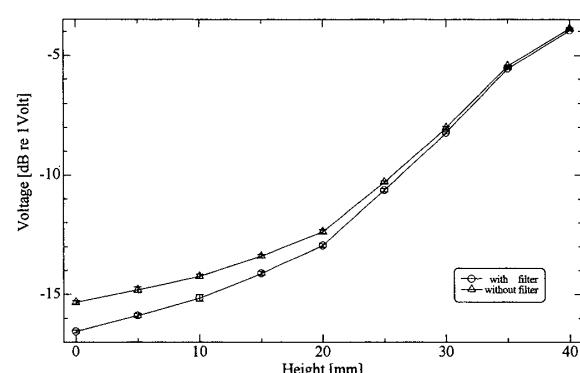


Fig.8 Relationship between height and voltage
(Experiments, pure tone 1200Hz, $\phi 0.4\text{mm}$, $\phi 10 \times 40\text{mm}$)

図8に、粉体 $\phi 0.4\text{mm}$, $\phi 10 \times 40$ の容器、周波数1200Hzにおける実験結果を例示する。横軸は粉体レベル、縦軸は電圧レベルである。実験においては各粉体レベルについて、装置と容器の付け外しを20回行い、その都度測定を行った。エラーバーは標準偏差の±3倍の値である。その結果、測定には十分な再現性が見られた。しかし、図4の1200Hzにおける振幅差は約17dBであり、図8においても同程度の振幅差となる事が予想されたが、約12.5dBとなっている。また、バンドパスフィルターを使用した場合の方が測定値のばらつきが小さくなる場合が多い事から、使用した純音以外の周波数成分の影響が考えられる。フィルターの有無による電圧差は図8のデータより20mV程度であり、これがフィルターによって除去されたノイズ成分と考えられる。

4. 理論解析

4.1 検出部の音響系と電気的等価回路 図1に示した検出部の音響系は、図9の電気的等価回路に対応している。このとき、電圧・電流は、それぞれ音圧・体積速度に対応する。各音響素子について、多くは1次元の波動方程式を用いて解析を行った。

4.2 スピーカ前室の空洞部 スピーカ前室の空洞部は空気ばね（弹性要素）の働きを考慮して音響スティフェネス⁽³⁾⁽⁴⁾として扱う。したがって、スピーカ前室空洞部のインピーダンス Z_{sr} は次式となる。 V_s は空洞部体積である。

$$Z_{sr} = -j \frac{\rho c^2}{\omega V_s} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ρ : 空気の密度
 c : 空気中の音速
 ω : 角周波数
 j : 複素定数

4.3 マイクロホン前室の空洞部 マイクロホン前室空洞部のインピーダンス Z_{mr} は、式(1)における V_s を、マイクロホン前室空洞部体積 V_m と置き換えることにより、前節と同様に与えられる。

4.4 空気柱の部分 図9における空気柱、すなわち①～②点、②～③点、②～④点にあたる部分は減衰を考慮した伝達マトリックスで表す。いま、管入口の音圧と体積速度を p_a , U_a 、出口については p_b , U_b とすると、音圧と体積速度に関する伝達マトリックスは次式で表される。

$$\begin{pmatrix} p_a \\ U_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_b \\ U_b \end{pmatrix} \quad \dots \dots \dots (2)$$

四端子定数 $A \sim D$ は、一次元の波動方程式から求められる⁽⁵⁾。

4.5 粉体の特性音響インピーダンスおよび複素波定数 任意厚さの粉体への入射インピーダンス Z_0 を求めるためには、粉体の特性音響インピーダンスおよび複素波定数が必要である。これらの複素パラメータはISO 10534-2に準拠した伝達関数法により測定および計算を行って求めた⁽⁶⁾。

4.6 粉体面への入射インピーダンス 前節で求めた粉体の特性音響インピーダンスおよび複素波定数を用いて、粉体への入射インピーダンス Z_0 が次式により求められる。これは、一端閉口他端開口管の開口端からの入力インピーダンスを一次元波動方程式により導出したものである。

$$Z_0 = \frac{z_c \cdot \exp(jh) + \exp(-jh)}{S_c \cdot \exp(jh) - \exp(-jh)} \quad \dots \dots \dots (3)$$

z_c : 粉体の特性音響インピーダンス

γ : 粉体の複素波定数に j を乗じたもの ($=k_a \times j$)

h : 粉体の高さ

S_c : 粉体容器の断面積

4.7 音響系の合成インピーダンス 図9における③点の音圧と体積速度を p_3 , U_3 、②点については p_2 , U_2 とすると、音圧と体積速度に関する伝達マトリックスは式(2)と同様に表される。ここで、 $A_{sh} \sim D_{sh}$ は、それぞれ図9において頸部長さ l_{sh} 、頸部半径 r_{sh} を用いて得られる四端子定数である⁽³⁾。

$$\begin{pmatrix} p_2 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{sh} & B_{sh} \\ C_{sh} & D_{sh} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_3 \\ U_3 \end{pmatrix} \quad \dots \dots \dots (4)$$

また、 $Z_{sp} = p_2/U_2$, $Z_s = p_3/U_3$ であるから、式(4)により②点からスピーカ側を見たインピーダンス Z_{sp} が求められる。

$$Z_{sp} = \frac{A_{sh} Z_{sr} + B_{sh}}{C_{sh} Z_{sr} + D_{sh}} \quad \dots \dots \dots (5)$$

また、②点からマイクロホン側を見たインピーダンスである Z_m も、④点の音圧と体積速度を p_4 , U_4 とすれば式(4)と同様に四端子定数 $A_{mh} \sim D_{mh}$ が得られ、

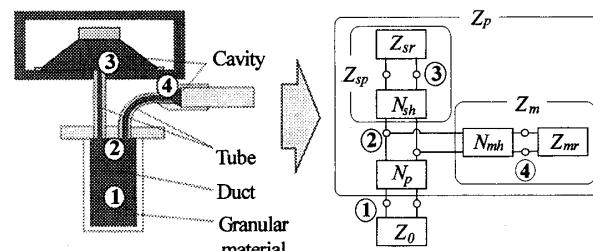


Fig.9 Acoustic system and electric equivalent circuit

これらと Z_m を用いて、式(5)と同様に表すことができる。

また、 Z_p は図 9 における囲みの部分であり、次式で表される。

$$Z_p = \frac{A_p (Z_m^{-1} + Z_s^{-1})^{-1} + B_p}{C_p (Z_m^{-1} + Z_s^{-1})^{-1} + D_p} \quad \dots \dots \dots (6)$$

ただし、 $A_p \sim D_p$ は②～①点の伝達マトリックスの四端子定数である。

ここで、図 9 の①点から見た音響系の合成インピーダンス Z_1 は次式で表される。

$$Z_1 = \frac{1}{Z_0^{-1} + Z_p} \quad \dots \dots \dots (7)$$

以下、 Z_1 の絶対値を理論解析値として、伝達関数の振幅についての測定値と比較する。理論解析値ではマイクロホン部における音圧などを算出できれば理想的であったが、ここでは粉体表面における合成インピーダンスの絶対値をもって、実験値との比較を行った。

5. 実験値と解析結果の比較

実験値と理論解析の比較において、スピーカ、マイ

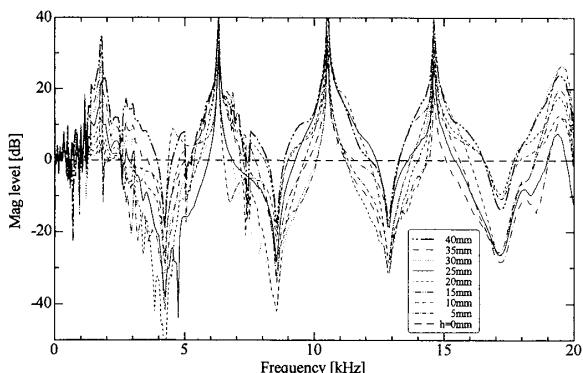


Fig.10 Magnitude of transfer function
(Experiments, $\phi 0.4\text{mm}$, $\phi 10 \times 40\text{mm}$)

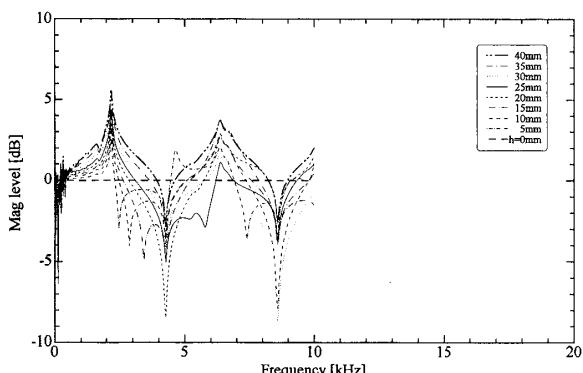


Fig.11 Magnitude of impedance
(Calculations, $\phi 0.4\text{mm}$, $\phi 10 \times 40\text{mm}$)

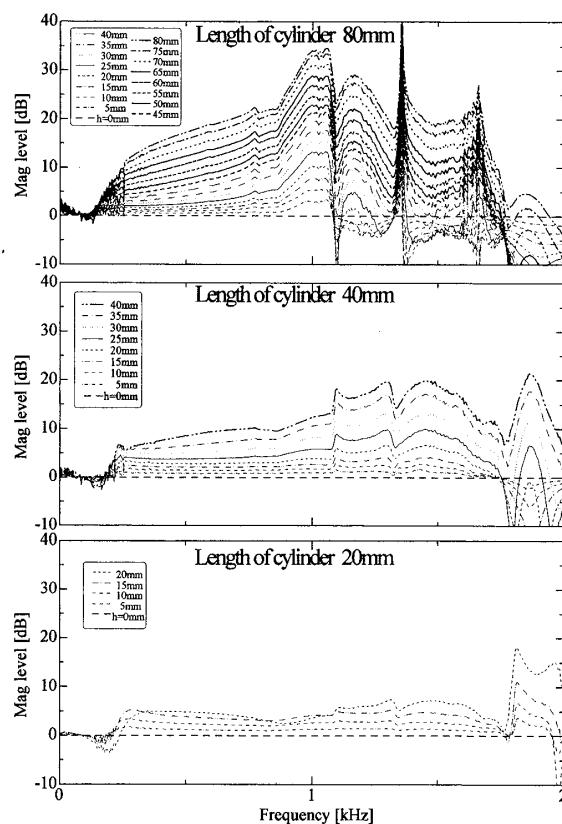


Fig.12 Magnitude of transfer function
(Experiments, $\phi 0.4\text{mm}$, $\phi 10 \times 20, 40, 80\text{mm}$)

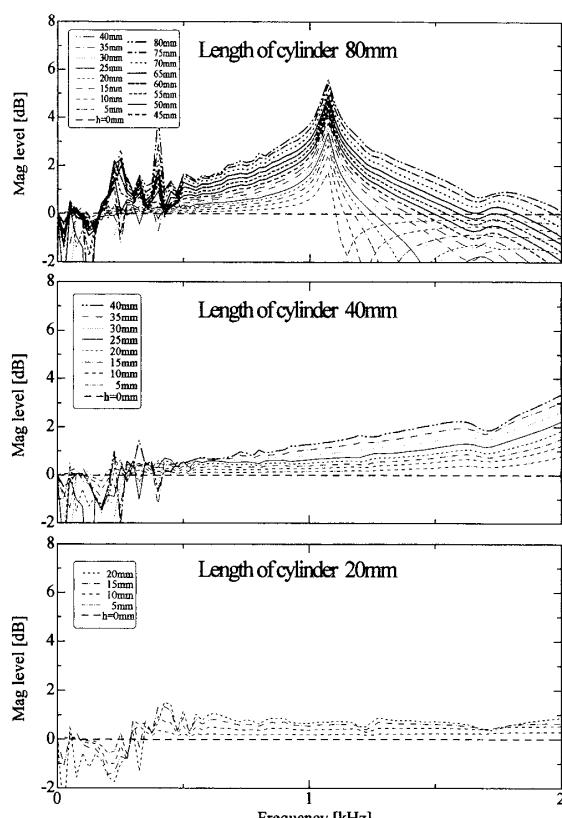


Fig.13 Magnitude of impedance
(Calculations, $\phi 0.4\text{mm}$, $\phi 10 \times 20, 40, 80\text{mm}$)

クロホン、測定機器が持つ周波数特性の影響を受けずに比較するため、双方を $h=0\text{mm}$ を基準 (0dB) にしてそれぞれ振幅差、絶対値の差、として表した。粉体 $\phi 0.4\text{mm}$ 、容器 $\phi 10\text{mm} \times 40\text{mm}$ における実験結果を図10に、理論解析結果を図11に示す。図10の実験値との比較のため、図11のグラフの横軸は 20kHz までとしてあるが、理論解析値は、10kHz までとなってい

る。これは4.5節に述べた特性音響インピーダンスを測定する装置における周波数の上限に起因する。図10と図11を比較すると、図11においても、32節で述べた容器の共振による影響が見られ、両者は同様な傾向を示している。

以下、各条件における実験値と理論解析値を比較するために、2kHzまでの結果を示す。

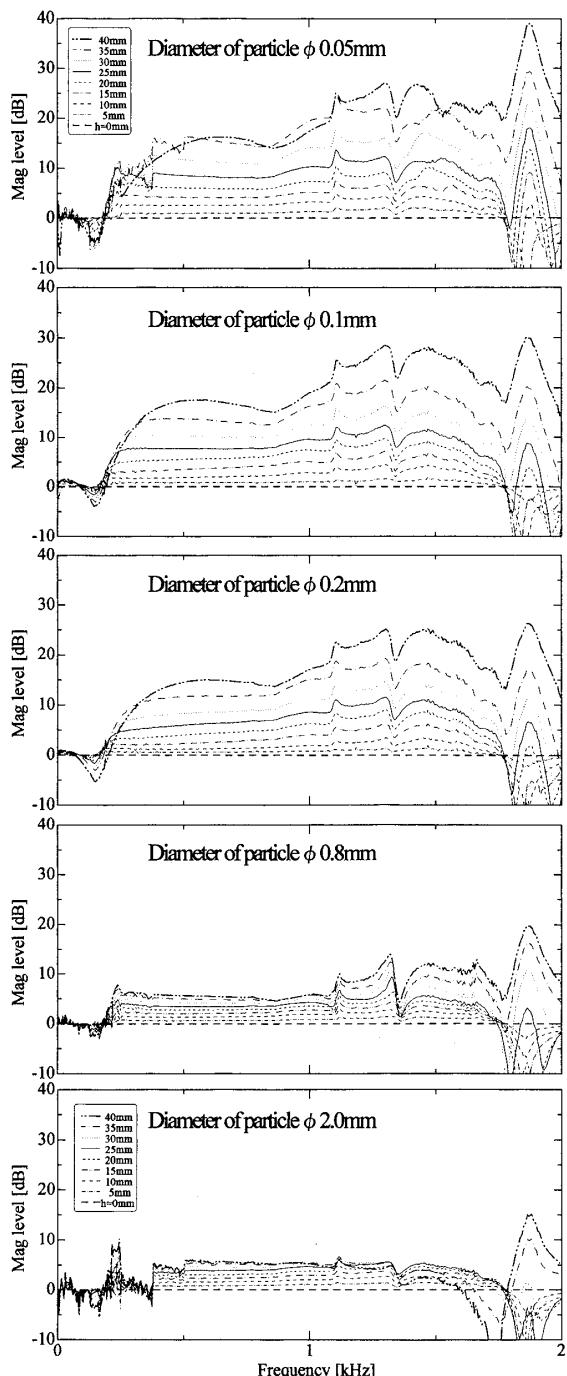


Fig.14 Magnitude of transfer function (Experiments, $\phi 0.05, 0.1, 0.2, 0.8, 2.0\text{mm}$, $\phi 10 \times 40\text{mm}$)

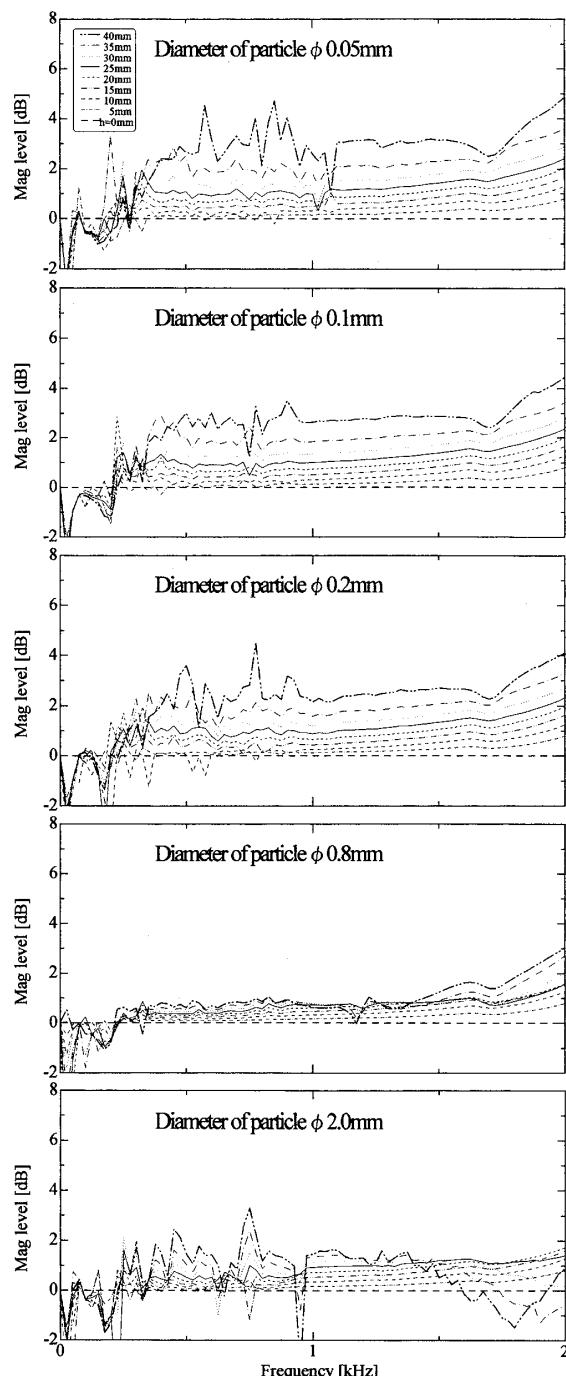


Fig.15 Magnitude of impedance (Calculations, $\phi 0.05, 0.1, 0.2, 0.8, 2.0\text{mm}$, $\phi 10 \times 40\text{mm}$)

図12（実験値）と図13（理論解析値）には、粉体 $\phi 0.4\text{mm}$, $\phi 10$ の容器において、容器の長さを20, 40, 80mmと、変化させた場合の結果について示す。図12の実験値において、容器が長いほど振幅差のダイナミックレンジが大きくなっている。また図13の絶対値の差においても同様な傾向が見られる。この原因として、容器が長くなるほど、粉体レベルの変化によって、入射インピーダンスの変化と、上部の空気柱の長さ変化とが大きくなる事が考えられる。

図14（実験値）と図15（理論解析値）には、 $\phi 10\text{mm} \times 40\text{mm}$ の容器において、粉体が $\phi 0.05$, $\phi 0.1$, $\phi 0.2$, $\phi 0.8$, $\phi 2.0\text{mm}$ と、異なる場合について示す。

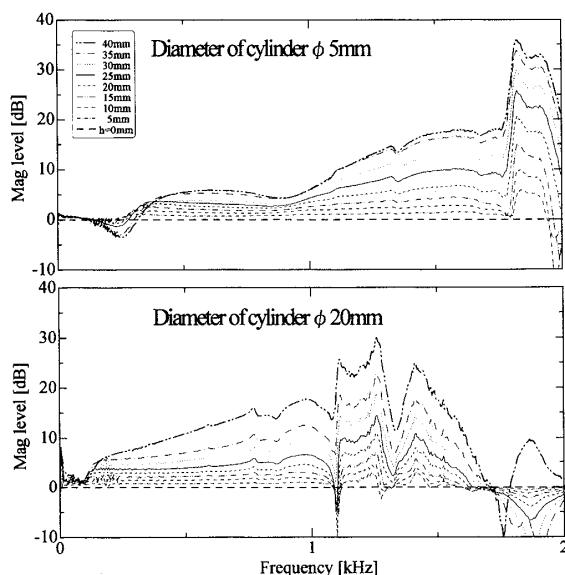


Fig.16 Magnitude of transfer function

(Experiments, $\phi 0.4\text{mm}$, $\phi 5 \times 40$, $\phi 20 \times 40\text{mm}$)

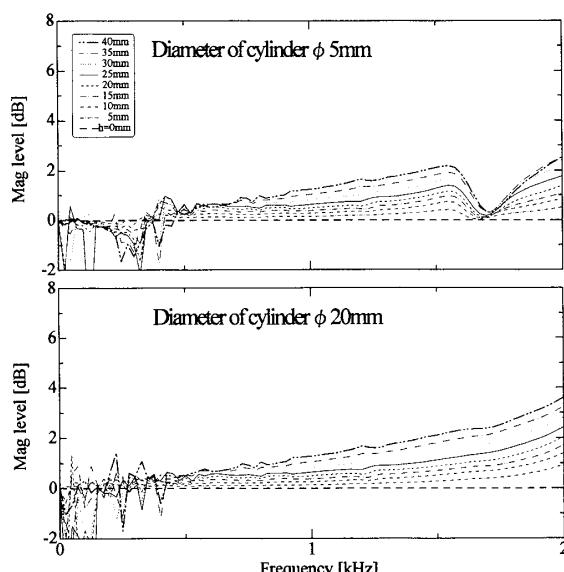


Fig.17 Magnitude of impedance

(Calculations, $\phi 0.4\text{mm}$, $\phi 5 \times 40$, $\phi 20 \times 40\text{mm}$)

（粉体 $\phi 0.4\text{mm}$ の結果については、既に図12と図13に示した。）図14の実験値において、粒径が大きいものほど振幅差のダイナミックレンジが大きい。また図15の絶対値の差においても同様な傾向である。この理由として、一般に粒径が大きいほど特性音響インピーダンスが空気に近く、粉体表面から内部に音波が入射し易く、粉体内における音波の減衰も小さい事が挙げられる。このため、粒径が大きい程、粉体のレベル変化の影響が、伝達関数の振幅に反映されにくいためと考えられる。

図16（実験値）と図17（理論解析値）には、粉体 $\phi 0.4\text{mm}$ 、長さが40mmの容器において、容器の内径が $\phi 5$, 20mmの結果について示す。（容器の内径が $\phi 10\text{mm}$ の結果については、既に図12と図13に示した。）容器の内径については、有意な傾向が見られなかった。

実験結果全般において、特定の周波数に着目した場合、粉体レベルと振幅の関係が一対一対応となる周波数領域が、伝達関数の1次ピークより低い周波数帯域において得られていることが判る。

また、理論解析値全般において、実験値と比較して変化幅が小さいものの、粉体レベルと共にインピーダンスの絶対値が増大する傾向はいずれの条件の実験値とも一致している。

また、理論解析値において、得られた曲線が乱高下する部分が見られるが、粉体への入射インピーダンス Z_0 は実測された粉体の音響特性 z_c および $\gamma(k_a)$ を用いて求められるためである。

6. 結 論

容器内の粉体レベルの変化に伴い、粉体表面の入射インピーダンスが変化し、これにより音響系の伝達関数の周波数応答は変化する。このことにより、粉体に非接触でレベル検出が可能である。本測定法に関する実験、理論解析を行い、次の結論を得た。

(1) 特定の周波数に着目した場合、粉体レベルと伝達関数の振幅が、一対一対応となる周波数領域が、伝達関数の1次ピークより低い周波数帯域において得られた。

(2) 実験値と理論解析値を比較した結果、同様な傾向が見られ、実験装置は理論通り動作していると考えられる。

文 献

- (1) 坂本・深井・一宮、機構論、No.017-1(2000.3), 299-300.
- (2) 坂本・高井・一宮、機構論、No.027-1(2002.3), 287-288.

686

音響を利用した容器内粉体レベルの測定

- (3) 坂本・一宮・玉橋, 機論, 64-619, C(1998), 986-991.
(4) 伊藤, 「音響工学原論(下巻)」, (1978), 343, コロナ
社.
(5) 坂本・一宮・石橋・佐藤, 機論, 67-657, C(2001), 1276-
1281.
-