

音響を利用した樹脂袋内粉体の粒径・種類の非接触判別*

坂本 秀一*¹, 高 嶋 昌 志*², 柳 本 憲 作*³
渡 部 誠 二*³, 一 宮 亮 一*⁴Non-Contact Discrimination Method of the Form of Powder
Materials in Plastic Bag by SoundShuichi SAKAMOTO*⁵, Masashi TAKABATAKE, Kensaku YANAGIMOTO,
Seiji WATANABE and Ryoichi ICHIMIYA⁵ 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 determination of powder form materials in plastic bag by sound. It is useful to determine the kind of powder form materials in the opaque plastic bag without open or contact. This detector utilizes the variation of the amplitude of the frequency response within entire acoustic system. The incident impedance of powder form materials varies with the diameter of particles and so on. For contactless determination, small distance gap between face of detector and plastic bag is adopted. Characteristic acoustic impedance and complex wave number are measured by the transfer function method. These measured parameters of powder form materials are introduced into theoretical analysis. The trends of the experiments and theory show good coincidence.

Key Words: Sound, Sensor, Measurement, Transfer Function Method, Incident Impedance

1. 結 言

包装技術の発展において、樹脂フィルムによる柔軟包装は重要な位置にあり、多くの製品・素材の包装に採り入れられている。

本研究は、樹脂フィルム製袋の内容物として想定した粉体の粒径ならびに種類を、音響を利用して非接触で判別する事を目的としている。

音響を利用した非接触判別¹⁾の利点は、次のことが挙げられる。保存等の理由で光を通さない袋が用いられ目視ができない場合に開封する必要がない。内容物が食品・薬品・劇物・汚染物質などの場合に、開封や接触を避けられる。これにより内容物の汚染、内容物の漏洩による問題、開封による商品性の低下、などを避けられる。

本論文では、はじめに、粉体・粒状体について基礎的な実験を行った結果について述べる。次に、検出部

の音響系を電氣的等価回路と伝達マトリックスにより表し、一次元の波動方程式により理論解析を行った結果を示す。さらに、伝達関数法²⁾により得られた粉体・粒状体の特性音響インピーダンスと複素波定数を用いて理論値を求め、実測値との比較を行った結果を述べる。

2. 実験装置と判別の原理

図1に実験装置を示す。実験に使用した検出部空気柱

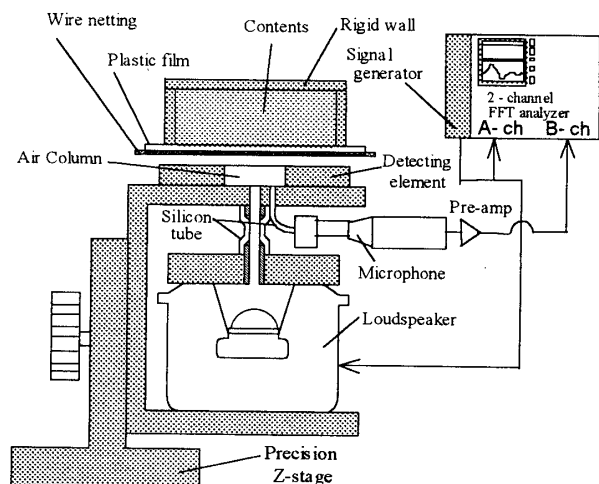


Fig.1 Experimental setup

* 原稿受付 2002年3月28日。

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

*² 学生員, 新潟大学大学院自然科学研究科。

*³ 正員, 鶴岡工業高等専門学校(☎997-8511 鶴岡市井岡字沢田104)。

*⁴ 正員, 福山大学工学部(☎729-0292 福山市学園町1三蔵)。

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

は外径 72mm, 内径 20mm, 高さ 10mm のドーナツ形状であり軟鋼製である。マイクロホンとスピーカは振動絶縁のためシリコンチューブを用いて検出部に繋がれる。共振を避けるため、チューブの長さは実験に用いる最大周波数における半波長より短くした。

検出部から被測定物までの距離を設定するため、この実験では、樹脂フィルムを載せるための金網（開口率：約 75%）を設置した。検出部は精密 Z ステージに取り付けられ、管端の検出面と樹脂フィルム間の距離を設定できる。樹脂袋に粉体が入った状態を想定して、樹脂フィルムの上に粉体を載せる。本論文においては検出面と樹脂フィルム間の距離は 3.0 mm とした結果を示す。この距離は式(3)における隙間のインピーダンスと関係している。

検出部管端は、閉口端と開口端の中間の状態になる。換言すると、検出部管端は、「隙間のインピーダンス」と「樹脂フィルムを通して粉体側を見た入射インピーダンス」の並列インピーダンスで終端される。このとき、粉体の粒径などにより「樹脂フィルムから粉体側を見た入射インピーダンス」は変化することに伴い、音響系の特性も変化する。このことを利用して、非接触で粉体の判別を行う。

3. 検出部に関する周波数応答の測定

3.1 実験に用いた粉体および諸条件 測定対象となる粉体には、基礎的なデータを得るためにガラスビーズを用い、応用例としては食品を用いた。

ガラスビーズは密度や表面性状が安定している剛体粒子として採用した。また様々な粒径を選択できる利点がある。この実験では粒径が 0.05mm~4mm まで 8 種類のガラスビーズを用いた。

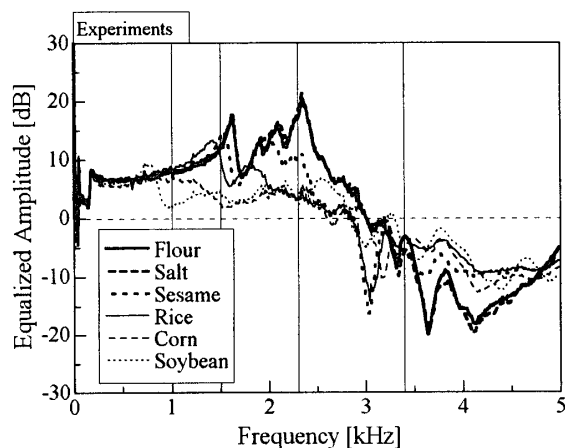


Fig.2 Difference of frequency response characteristic between kinds of powder

また、実際に樹脂袋に包装されることの多い粉体・粒状体の例として、小麦粉、塩、ごま、米、コーン、大豆の 6 種類を用いた。

樹脂フィルムには樹脂袋として最も広く使用されているポリエチレンフィルムを用いた。本論文では、面密度 0.197 kg/m², 厚さ 0.213 mm のポリエチレンフィルムを用いた結果について示す。

粉体を保持するために、内径 147mm の中空円筒の枠を樹脂フィルム上に置き、この中に粉体を詰めて粉体上部を平らにした。枠の内径は枠の管壁としての影響を考慮して、検出部空気柱の内径 20mm より十分大きくするために 147mm とした。この枠の高さ（すなわち粉体厚さ h ）は 10, 20, 50, 100, 200mm のものを使用

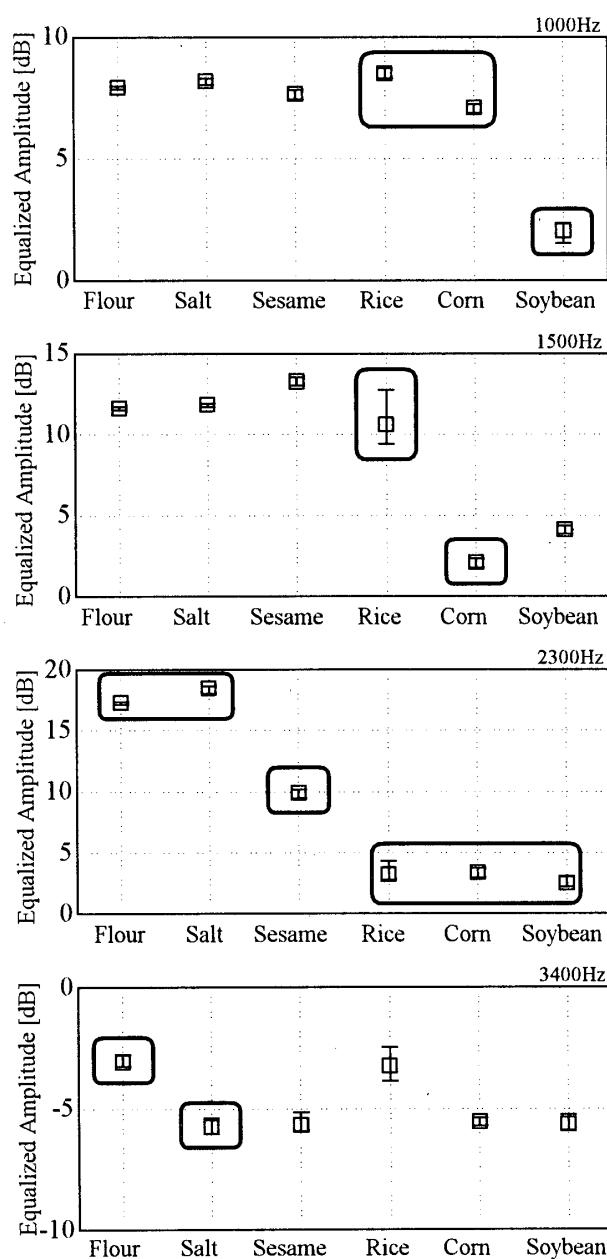


Fig.3 Discrimination of powder materials

した。

粉体の種類を、音響系の特性変化として捉えるため、検出部音響系の振幅に関する周波数応答を用いた。測定方法は以下の通りである。信号発生器による 12.5Hz ~ 5 kHz の正弦波スイープ信号をスピーカ (FOSTEX 社 FT17H ホーンツイータ) に入力する。この信号は基準信号として FFT アナライザの A チャンネルにも入力する。スピーカから空気柱内に音波が放射され、マイクロホンが拾った信号は FFT アナライザの B チャンネルに入力される。これにより音響系の伝達関数を求める。

3.2 伝達関数の測定結果 粉体の厚さ h は 100mm とし、粉体の上面に剛壁を被せた場合、食品における振幅の周波数応答の測定例を図 2 に示す。これにより粉体の種類により異なった応答を持っていることが判る。一般に粉体の音響特性には、粒径のみで

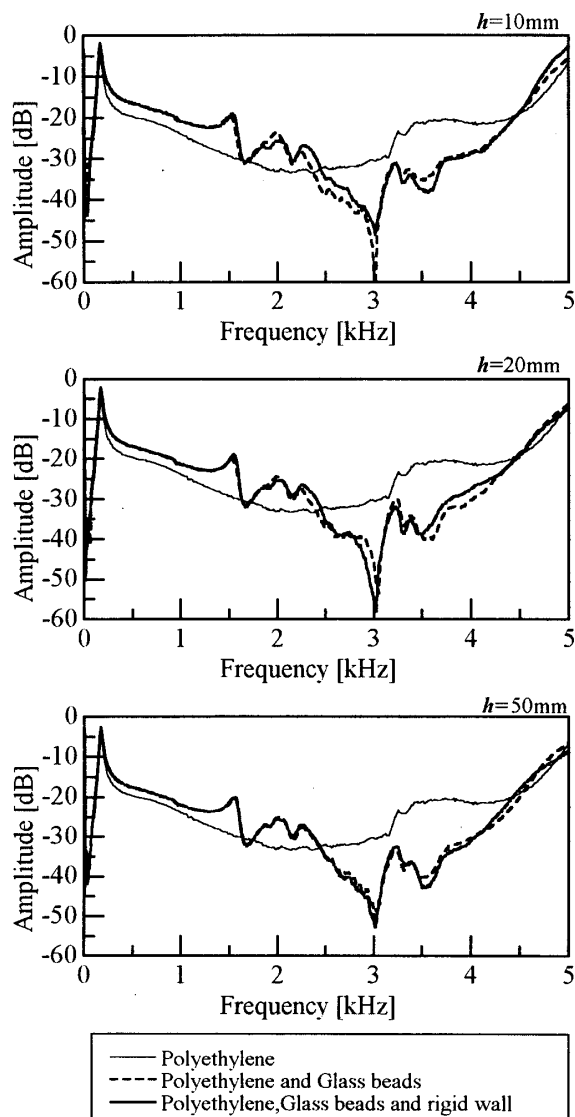


Fig.4 Influence of thickness of powder

なく、粒子の密度・粒の形状・摩擦係数も含めた表面性状などが関係すると考えられる。ガラスビーズについても食品と同様な傾向であったため、粒径が主要なパラメータであると考えられる。

3.3 純音を用いた粉体の判別例 6種類の食品における判別例を図 3 に示す。判別には 4 つの周波数の純音 (図 2 においても示した) を用いた。はじめに粒径の影響が振幅差に表れている 2300Hz を用いた。さらに粒径に近いもの同士については個々の周波数特性の違いを利用して判別を試みた。

振幅はフィルム上に粉体がない場合を基準 (0dB) として表した。粉体の厚さ h は 100mm とした。

まず、2300Hz における振幅の応答を用いると、「小麦粉・塩」、「ゴマ」、「米・コーン・大豆」の、3つのグループに分類することができる。この周波数では、ゴマの判別が可能となる。

2300Hz において判別ができなかった「小麦粉・塩」については、3400Hz において明確な振幅差が見られ、「小麦粉」と「塩」の判別が可能となる。

また、2300Hz において判別ができなかった「米・コーン・大豆」については、1000Hz において「米・コーン」と「大豆」の間に明確な振幅差が見られ「大豆」の判別が可能となる。さらに、1500Hz において「米」と「コーン」の間に明確な振幅差が見られ判別が可能となる。

このように複数の純音を用いることにより、粉体の種類が判別可能となる。また基準値 0dB と比較する事により粉体の有無も判定できる。

3.4 粉体の厚さの影響 粉体の厚さが周波数応答に及ぼす影響を調べた実験結果を図 4 に示す。ここでは粒径 2mm のガラスビーズ層の厚さ h を 10mm, 20mm, 50mm と変化させた場合について、粉体上方に何も無く開放した場合と、粉体に剛壁を被せて上方を閉じた場合との比較を行った。上記の「開放」と「剛壁による閉止」は、音響的に両極端の境界条件である。そのため、両者の結果が一致する粉体厚さでは、厚さの影響が飽和していると考えられる。厚さの増加に伴い、剛壁の有無の影響は少なくなり、粒径 2mm のガラスビーズにおいては厚さが 50mm に達すると両者はほぼ一致している。小さな粒径の場合ほどより小さな粉体厚さにおいて両者は一致する傾向が見られた。

実用上、袋に入った粉体の厚さの影響を受けずに判別ができればより望ましい。本装置では、ある程度の粉体厚さがあれば、粉体厚さによる影響が小さくなり、粉体厚さが異なっても、粒径の大きく異なる粉体同志の判別は可能である。しかし、粒径に近い粉体同

士を判別するには厚さを同じにする必要がある。

4. 理論解析

4.1 検出部の音響系と電気的等価回路 図5に示した検出部の音響系は、図6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（弾性要素）の働きを考慮して音響ステイフネス⁽²⁾⁽³⁾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_{sr} は空洞部体積である。

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

- 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、空洞部体積を V_{mr} 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5,6における空気柱、すなわち②～③点、③～④、③～⑤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。

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

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。⁽²⁾ また、①～②点についても同様な伝達マトリックスを用いるが、音速と比重には樹脂フィルムのパラメータを用いる。

4.5 隙間のインピーダンス 樹脂フィルムと検出部間の隙間に相当するインピーダンス Z_g は次式⁽⁴⁾で表される。

$$Z_g = \Gamma \frac{\tanh k_g (d_f - d_a)}{k_g S_g} \dots\dots\dots(3)$$

$$S_g = 2\pi \left\{ (d_a^2 + d_f^2) / 2 \right\}^{1/2} \cdot l_s \dots\dots\dots(4)$$

- d_f : 検出部の半径
- d_a : 空気柱の内半径

- $d_f - d_a$: 隙間の重なり部分の長さ
- S_g : 隙間の空間を内外に振り分ける平均半径における断面積
- l_s : 樹脂フィルムから検出部までの距離
- k_g : 隙間における位相定数

このとき Γ と k_g は次式で表される。ここで、 μ は空気の粘度、 κ は空気の体積弾性率である。

$$\Gamma = \left\{ \sum_{q=1,3,5,\Delta}^{\infty} \left(\frac{q^4 \pi^4 \mu}{8l_s^2} + j \frac{q^2 \pi^2 \rho \omega}{8} \right)^{-1} \right\}^{-1} \dots\dots(5)$$

- π : 円周率
- $k_g = \sqrt{\frac{j\omega\Gamma}{\kappa}} \dots\dots\dots(6)$

4.6 音響系の等価回路 図6の等価回路に示したように、スピーカとマイクロホン前室の空洞部は、内部でインピーダンスが並列に接続された四端子回路

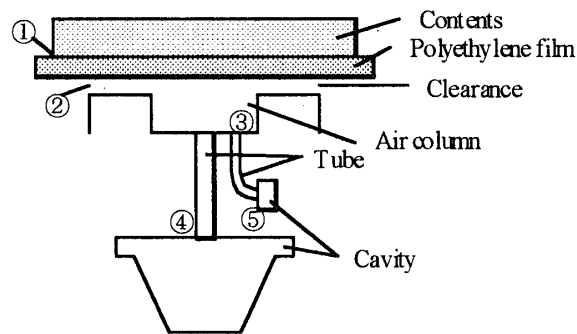


Fig.5 Elements of acoustic system

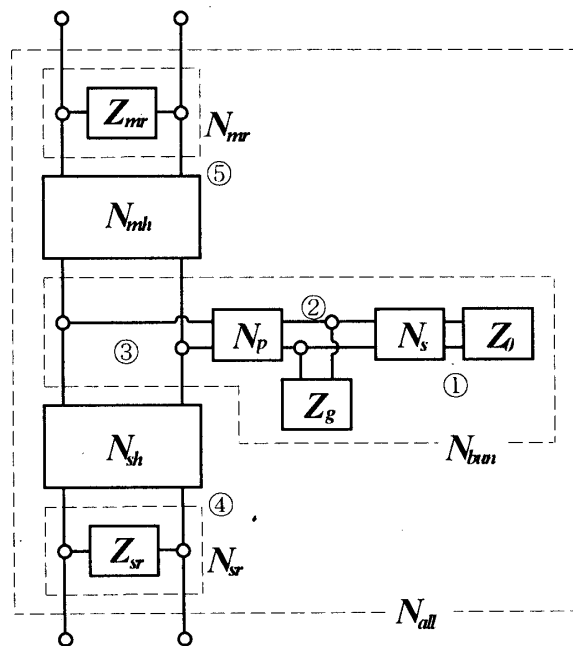


Fig.6 Equivalent circuit of analogy for acoustic system of detector

として扱う。

図6における③点に並列に接続されたインピーダンス Z_{bun} は、空気柱、隙間、シート、粉体に相当する部分である。いま、③点の音圧と体積速度を p_{bun} , U_{bun} 、①点については p_1 , U_1 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。ここで、 $A_p \sim D_p$ および $A_s \sim D_s$ は、それぞれ図6における伝達マトリックス N_p および N_s についての四端子定数である。

$$\begin{pmatrix} p_{bun} \\ U_{bun} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_p & B_p \\ C_p & D_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ Z_g^{-1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_s & B_s \\ C_s & D_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ U_1 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(7)$$

また、 $Z_{bun} = p_{bun}/U_{bun}$, $Z_g = p_1/U_1$ であるから、上式により Z_{bun} が求められる。

最終的に、スピーカとマイクロホン間関係は次式のような5つの伝達マトリックスで表される。ここで、 $A_{sh} \sim D_{sh}$ および $A_{mh} \sim D_{mh}$ は、それぞれ図6における伝達マトリックス N_{sh} および N_{mh} についての四端子定数である。

$$\begin{pmatrix} P_{sp} \\ U_{sp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ Z_{sr}^{-1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{sh} & B_{sh} \\ C_{sh} & D_{sh} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ Z_{bun}^{-1} & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} A_{mh} & B_{mh} \\ C_{mh} & D_{mh} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ Z_{mr}^{-1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{mic} \\ U_{mic} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(8)$$

これら5つのマトリックスの合成により、スピーカとマイクロホンの関係は、次式のような1つのマトリックス N_{all} に置き換えることができる。

$$\begin{pmatrix} P_{sp} \\ U_{sp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{all} & B_{all} \\ C_{all} & D_{all} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{mic} \\ U_{mic} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 $U_{mic} = 0$ とおくと、スピーカとマイクロホンの音圧比は次式となり、周波数応答の理論値を求めることができる。

$$\frac{P_{mic}}{P_{sp}} = \frac{1}{A_{all}} \quad \dots\dots\dots(10)$$

4.7 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伝達関数法⁽¹⁾⁽²⁾により測定および計算を行って求めた。

図7にガラスビーズについて求めた特性音響インピーダンスおよび複素波定数を示す。特性音響インピー

ダンスは空気の固有音響インピーダンスにより正規化している。粒径が小さいほど特性音響インピーダンスの実数部は大きくなり、粒径が大きいほど空気の値である1に近いことが判る。1に近いということは、物体が空気以外に存在しない状態に近い。ガラスビーズは球形であるから粒径によらず空孔率が同じであるが、粒径により個々の隙間の大きさは異なる。これにより、空気の粘性が関係して、いわゆる「音の抜け易さ」が異なるものと考えられる。

また、複素波定数の虚数部、すなわち減衰定数の絶対値は粒径が小さいほど大きくなっている。この事は、粒子の隙間が小さいほど空気の粘性による減衰が大きくなっているためと考えられる。複素波定数の実数部、すなわち位相定数は周波数に比例していないことから、粉体内の隙間を伝搬する音速は空気中と異なることが判る。

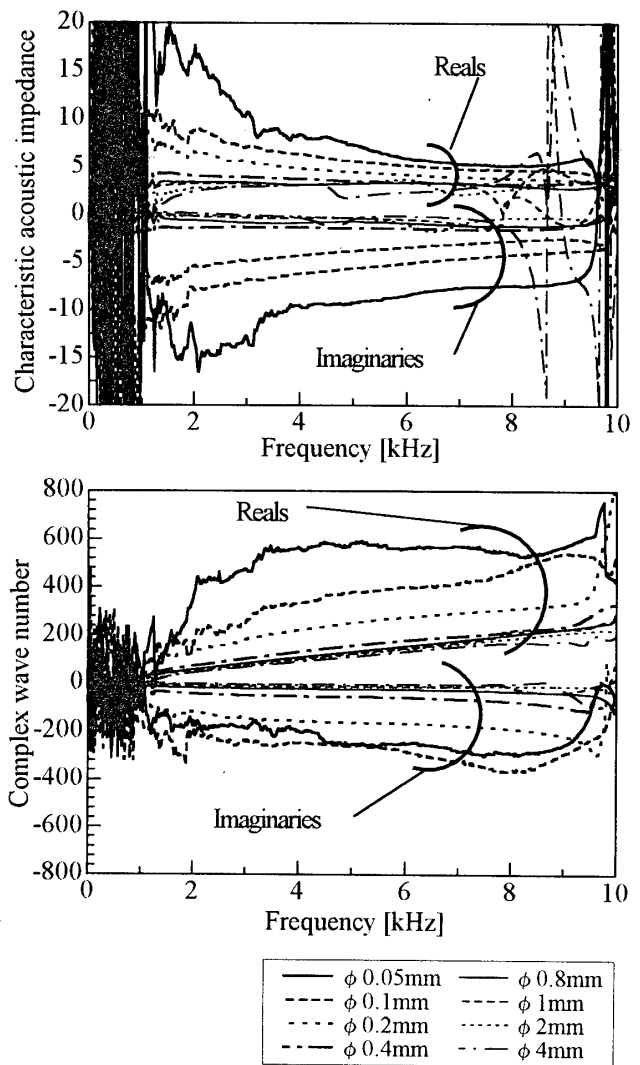


Fig.7 Characteristic acoustic impedance and complex wave number for glass beads

4.8 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。

$$Z_0 = \frac{z_c \cdot \exp(\gamma d) + \exp(-\gamma d)}{S_c \cdot \exp(\gamma d) - \exp(-\gamma d)} \dots\dots\dots(11)$$

- 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 ($=k_a \times j$)
- d : 粉体の厚さ
- S_c : 粉体の断面積

5. 実測値と理論値の比較

実測値・理論値の比較の一例として、粒径 0.2mm のガラスビーズにおいて、粉体厚さ 50mm とした場合を図 8 に示す。両者ともレベルが 2~4kHz にかけて低下し、4kHz 付近から上昇に転ずる傾向となっている。また、実験値の 180Hz 付近に見られるピークと、1kHz までのレベルが高くなる傾向は、主にスピーカ室空洞部の周波数特性が原因である。

上記の周波数特性を相殺するため、実測値・理論値に対するイコライズを行った。実験値については「粉体が無く樹脂フィルムのみで測定した周波数特性」を差し引くことによりイコライズを行った。理論値についても音響系の周波数特性を相殺するため「粉体が無く樹脂フィルムのみを想定した周波数特性の理論値」を差し引くことによりイコライズを行った。イコライズ後の実測値・理論値の比較を図 9 および図 10 に示す。

ガラスビーズについてみると、理論値においては粒径 1mm 以上において粒径が大きいグループに属し、実験値においては粒径 2mm 以上において粒径が大きいグループに属している事が判る。

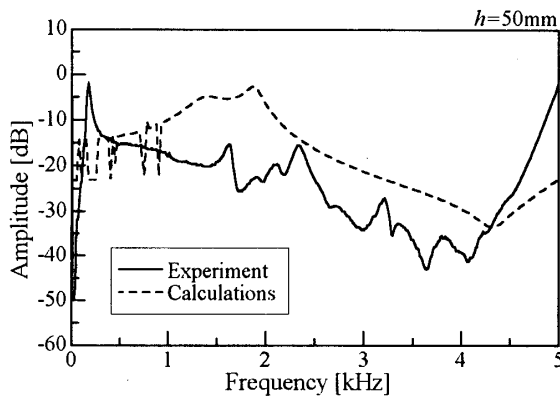


Fig.8 Comparison between experiment and calculation (0.2mm glass beads)

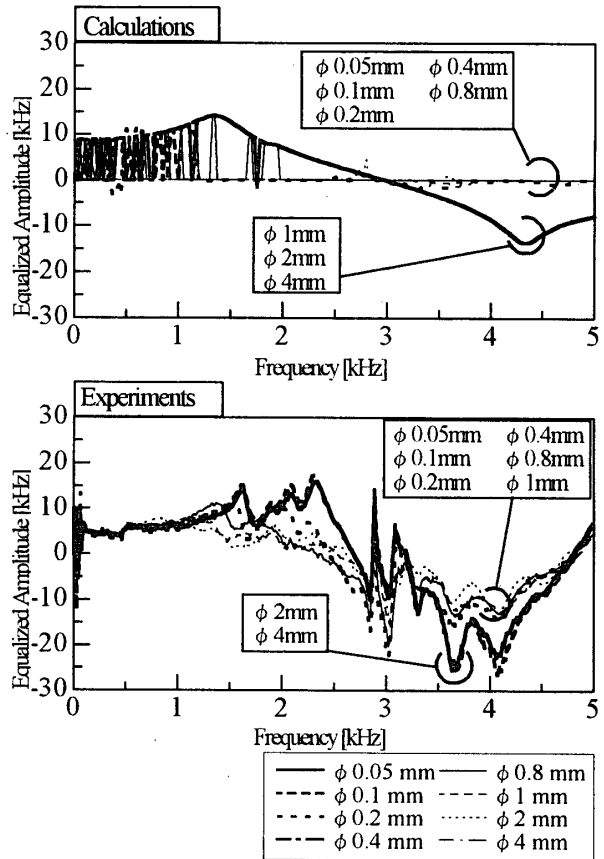


Fig.9 Comparison between experiments and calculations (Glass beads, $h=200\text{mm}$)

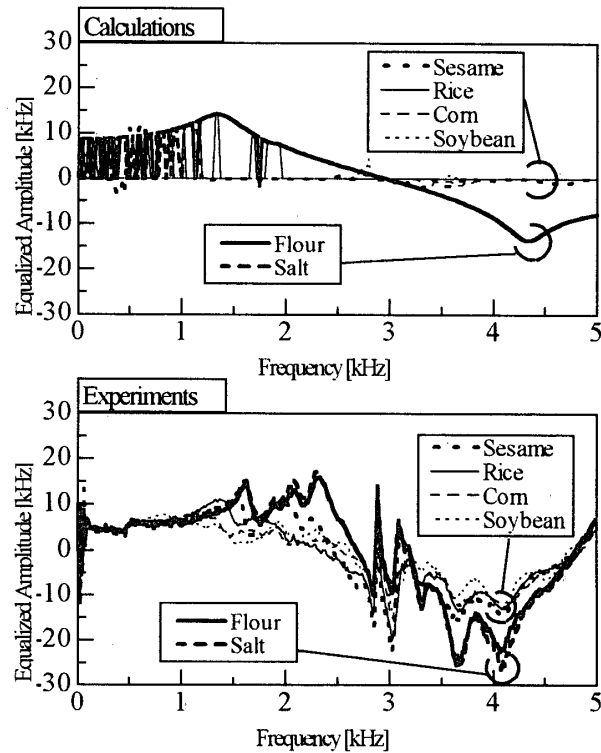


Fig.10 Comparison between experiments and calculations (Food materials, $h=200\text{mm}$)

また、食品についてみると、理論値・実験値ともにゴマより粒径の大きなものが粒径が大きいグループに属している事が判る。

また、粒径の大きい粉体において、理論値は平坦なレスポンスとなっている。実験値においても、理論値ほどではないが比較的平坦なレスポンスとなっている。

粒径の小さな粉体については実測値・理論値ともに、2kHz～4kHzに亘りレベルが低下し、それより高い周波数域ではレベルが上昇する傾向など、同様な傾向を示している。

6. 結 論

音響を利用した粉体の判別に関する基礎的な研究を行い、次の結果を得た。

(1) 袋に密封されていても、袋の周囲・粉体の周囲・樹脂フィルムは音響媒質であり、音響は容易に入り込むことができる。このとき、粉体の種類により入射インピーダンスが変化するために、図1に示したよ

うな装置における音響系の周波数応答と粉体の種類には対応が見られる。この事を利用した非接触粉体判別法の可能性を示した。

(2) 粉体・粒状体について、伝達関数法を用いて特性音響インピーダンスおよび複素波定数を測定できることを示した。そして、主に粉体の粒径が特性音響インピーダンスと複素波定数に関係することを明らかにした。

(3) 音響系の周波数応答について、理論値と実験値には類似した傾向が見られた。

文 献

- (1) 坂本・一宮・石橋・佐藤, 機論, 67-657, C(2001), 1276-1281.
- (2) 坂本・一宮・玉橋, 機論, 64-619, C(1998), 986-991.
- (3) 伊藤, 「音響工学原論(下巻)」, (1978), 343, コロナ社.
- (4) 早川・吉川, 「音響振動論」, (1974), 700, 丸善.