

音響を利用したシートの枚数検出法*

(第4報, 布の音響特性を導入した音響系の解析)

坂本 秀一*¹, 一宮 亮一*¹, 玉橋 知之*²

Method of Detecting Number of Sheets Using Sound

(4th Report, Theoretical Analysis Including Acoustic Characteristics of Cloth)

Shuichi SAKAMOTO, Ryoichi ICHIMIYA and Tomoyuki TAMAHASHI

This paper deals with the development of a new method for detecting the number of cloth. It is necessary to detect one or plural number of sheets to avoid mishandling. This detecting sensor utilizes the variation of the phase of transfer function within entire acoustic system. The impedance of sheets varies with the number of sheets. Characteristic acoustic impedance and complex wave number define the material peculiar and the most fundamental characteristic. It is useful for the detection of the number of cloth to know characteristic impedance of cloth. So that, we tried to measure characteristic impedance and wave number. The measured impedance of sheets by transfer function method was introduced into theoretical analysis. The results of experiments and theoretical analysis show fairly good coincidence.

Key Words: Sound, Sensor, Measurement, Number of Sheets, Cloth, Transfer Function Method, Phase

1. 緒 言

布は他の素材には見られないような予想外かつ大幅な変形をするため、縫製等で自動化を進めるにあたってはハンドリング等で困難を伴う。このような状況で布が確実に1枚であるか否かを判別することは重要な課題である。小野らは歪みゲージをロボットハンドに組みこむことで検出を試みており、⁽¹⁾そのほか各種の基礎実験を行っている。⁽²⁾当研究室では紙のような比較的薄いシートの搬送時の複数枚誤送を検出する方法を考案し研究成果の一部は既報⁽³⁾⁽⁴⁾にて発表した。

現在、両端閉口管の一端の剛壁と管の間に布を挟み、1枚と複数枚での、系の共振周波数付近における位相変化を利用して布の枚数検出を行う方法を考案し研究を行っている。この枚数検出法は、布が薄い多孔質材料であるという観点から、布表面の入力インピーダンスに着目し、布の厚さが音響系の伝達関数の位相の周波数応答に及ぼす効果を利用するもので、その研究成果の一部は既報⁽⁵⁾により発表した。

この布の枚数検出法を改良し、最適な設計をするにあたり、布の特性音響インピーダンスおよび複素波定数

を把握することは不可欠である。そこで、本論文では、伝達関数法⁽⁶⁾により布の音響特性の測定および算出を行い、その測定結果と音響特性から求めた布の特性インピーダンスと複素波定数を、音響系の解析の計算にあたり導入した結果について報告する。

2. 検出部の概要とその基礎的特性⁽⁶⁾

図1に検出部の概略を示す。空気柱の管端に布を密着させ、その上から剛体壁で挟むことにより管端を終端する。このとき、布の枚数により管端の音響インピーダンスは変化し、これにともない、音響系の伝達関数も変化する。このように、布の枚数を伝達関数の情報に変換することにより枚数を検出する。

検出部の伝達関数を測定する際の装置の構成は図1に示した。信号発生器より0~10kHzの正弦波スイープ信号をスピーカから管内に放射する。それを基準信号としてAチャンネルに入力し、マイクロホンが空気柱管端より拾った信号をBチャンネルに入力しフーリエ解析を行う。

検出部の音響管はアルミニウム製で外径20mm、内部の空気柱の内径は18mm、その長さは23mmである。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空気柱管端に取り付け、マイクロホンとスピーカの振動絶縁を図っている。マイクロホン側のチューブの内径

* 原稿受付 1997年4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。

は1mm, 長さは20mmである. スピーカ側のチューブの内径は2.5mm, 長さは30mmである. 管端を終端するための剛体壁は透明なアクリル材を使用し, 布に密着させたときに布の状態を確認できる. また音源は, 音響系の共振周波数付近の周波数特性が比較的平坦なホーン型ツイータスピーカを使用し, マイクロホンにはリオン社製 1/4 インチのものを使用した.

両端が剛壁で終端された空気柱の共振周波数は式(1)により約7470Hz (20°C)である. ここで c は音速, l は空気柱長さ, n は共振モードである.

$$f = \frac{nc}{2l} \dots\dots\dots (1)$$

剛体壁と空気柱の端面との間に布が1枚挟まった場合の共振周波数の値は, 布の種類によりわずかに変化するが, ここでは布が1枚挟まった場合の代表値として7375Hzを用い, これを f_1 と呼ぶ.

本論文でも前報⁽⁶⁾と同じく, 面密度, 厚さ, 材質等がそれぞれ異なる11種類の布A~Kを用いた. その種類を表1に示す.

図2に布H, 布Iについて1枚時の位相を基準とした2枚時の位相 $\Delta\theta$ を示す. 破線が布H, 実線が布Iの位相 $\Delta\theta$ を表す. 位相の差であるので共振周波数 f_1 近傍以外では, ばらつきが大きくなっている. しかし, f_1 近傍で位相差 $\Delta\theta$ が安定して見られる. 最も $\Delta\theta$ が大きくなる周波数は共振周波数と同様, 布の種類によってわずかに異なるが検出に支障をきたすほどではなかった. この現象を利用し, 共振周波数の正弦波を放射した際の入出力の時間差を測定することで簡単な装置により枚数の検出が可能となる. これが本測定法の原理である.

3. 伝達関数法による布の入カインピーダンス及び音響特性の導出

布の枚数による伝達関数の位相変化は, 布の前面から見た音響インピーダンス, すなわち, 入力インピーダンスが布の枚数により変化するためである. この布の枚数による入力インピーダンスが明らかになれば, これを利用することで音響系の理論解析が可能になり, 検出部の

Table 1 Cloths under the test

| Standard Adjacent Fabrics for Staining of Color Fastness Test JIS L 0803 | | |
|--|-------------------------|---------------|
| Code of Cloth | Material of Fiber | Code No (JIS) |
| A | Silk | 2-2 |
| B | Cotton | 3 |
| C | Rayon | 5 |
| D | Cellulose Acetate Rayon | 7 |
| E | Nylon | 8 |
| F | Polyester | 10 |
| G | Acryl | 11 |

| General Fabrics | | | |
|-----------------|-------------------|-------------------------------|--|
| Code of Cloth | Material of Fiber | Thickness $\times 10^{-2}$ cm | Density $\times 10^{-2}$ g/cm ² |
| H | Cotton | 5.65 | 1.47 |
| I | Wool | 8.72 | 2.63 |
| J | Wool | 4.60 | 1.58 |
| K | Polyester | 2.10 | 0.898 |

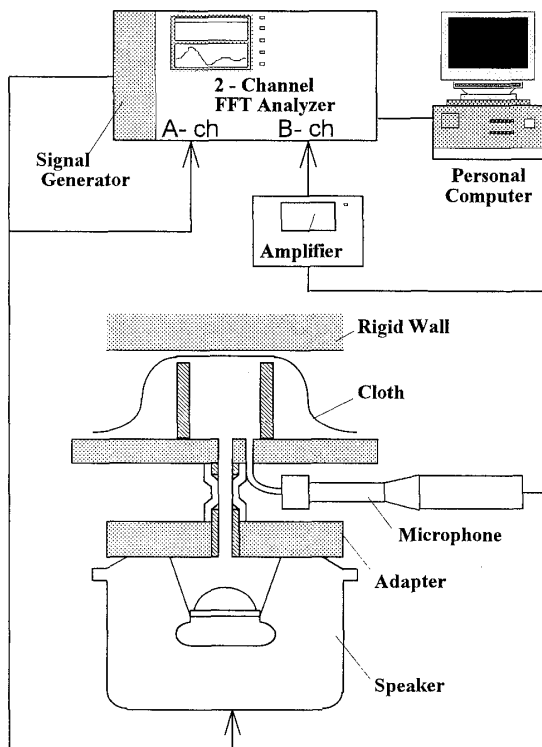


Fig.1 Detector and measuring instruments of transfer function method

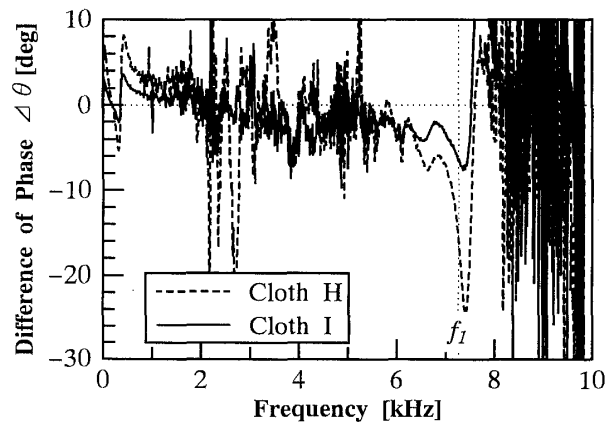


Fig.2 Difference of phase between 1 piece and 2 pieces (Measured)

最適設計に役立つものと考えられる。しかし入力インピーダンスは、同じ布であっても、布の厚さ、枚数等により変化する。ここで、布の特性音響インピーダンス Z_c は材料固有の特性であり、材料の音響特性の最も基本的なものである。特性音響インピーダンス Z_c が既知ならば、枚数が変化しても、直ちに音響特性を算出することができ、1つの材料についてあらかじめ1回測定を行うだけで、条件が変化してもその後は計算で入力インピーダンス等が得られるという大きな利点がある。以上から、布の特性音響インピーダンス Z_c の実測は布の枚数検出部の音響系の理論解析および改良に有用であると考え、特性音響インピーダンス Z_c 、および複素波定数 k_a の導出を試みた。

図3に特性音響インピーダンスおよび複素波定数の測定に用いる実験装置の概略を示す。管端にスピーカを接続しておき、管壁には2本の1/4インチマイクロホンが管の内面と同一面に設置されている。そして、管内に測定対象となる布を封入し、その後方を剛体で閉止する。これにより管は閉じた状態となる。スピーカから0~10kHzの正弦波を放射すると、管内に定在波分布が生じる。このとき管壁に設置した2本のマイクロホンが拾う信号を2チャンネルのFFTアナライザ(アドバンテス製R9211C)に入力し、このマイクロホン間の伝達関数の測定を行う。

ここで得られたマイク間の伝達関数より、材料前面(基準面)から右側を見た入力インピーダンス Z_0 が得られる⁽⁷⁾。次にマイク1と材料前面までの距離 l 、マイクロホンの間隔 s 、および材料の厚さ d により、布の特性音響インピーダンスを導出する。これが2マイクロホ

ン法、或いは伝達関数法と呼ばれる手法である。

音響特性の導出には「2厚さ法」を用いた。これは、材料の厚さを2通りに変化させ、それぞれの伝達関数を測定し、各々の場合の入力インピーダンス Z_0 、 Z_0' を得て、それを利用して材料の音響特性を算出する方法である。2厚さ法の特徴として、材料の後方が剛体壁となるため境界条件が作りやすく、布のようなシート状の材料に適用する場合、材料が取付やすく、また、厚さをその枚数の合計により決定できる、といった利点がある。

測定できる上限周波数は管の内径及びマイクロホンの間隔によって決定されるもので、その条件式を次に示す。

$$D \leq \frac{0.586c}{f_c} \dots\dots\dots (2)$$

$$s \leq \frac{c}{2f_c} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 D は管の内径、 c は音波の伝搬速度、 f_c は測定周波数の上限、 s はマイクロホンの間隔である。

式(2)は平面波成立の条件であり、式(3)はマイク間距離 s が波長の半分以下が望ましいことを示す。これが満たされないと式(2)が満たされていても測定不能な周波数が現れる。

上述の条件に基づき、測定可能周波数は10kHzまでとし、内径20mm、マイク間隔 s は17mmとした。被測定材料である布は管の内径と等しい内径を持つアルミニウムパイプの中に詰め、その後方を剛体壁により終端する構造とした。2厚さ法での測定を行う場合にテストピースの厚さが d の場合と $2d$ の場合の伝達関数を測定することにした。これは重ねる布の枚数を2倍にすることでその厚さを作り出すことができる。

この実験に使用した布は、枚数検出の実験に用いた布と同じもの(11種類)⁽⁶⁾である。

入力インピーダンス Z_0 (材料の厚さ d の場合)、 Z_0' (材料の厚さ d' の場合)、特性音響インピーダンス Z_c 、および複素波定数 k_a は式(4)、(5)、(6)で表される。

$$Z_0(Z_0') = jZ_{air} \frac{H_{12} \sin kl - \sin\{k(l-s)\}}{-H_{12} \cos kl - \cos\{k(l-s)\}} \dots (4)$$

Z_{air} : 空気の固有音響抵抗 (= 密度× c),
 H_{12} : マイク1-2間の伝達関数,
 k : 波数(= $2\pi f/c$), l : マイク1から基準面までの長さ

$$Z_c = \pm \sqrt{2Z_0 Z_0' - Z_0^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$k_a = \frac{1}{2jd} \ln \left(\frac{Z_0 + Z_c}{Z_0' - Z_c} \right) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 Z_0 は材料の厚さ d を用いて伝達関数を測定し求めたもの、 Z_0' は $d'=2d$ を用いて求めたものである。

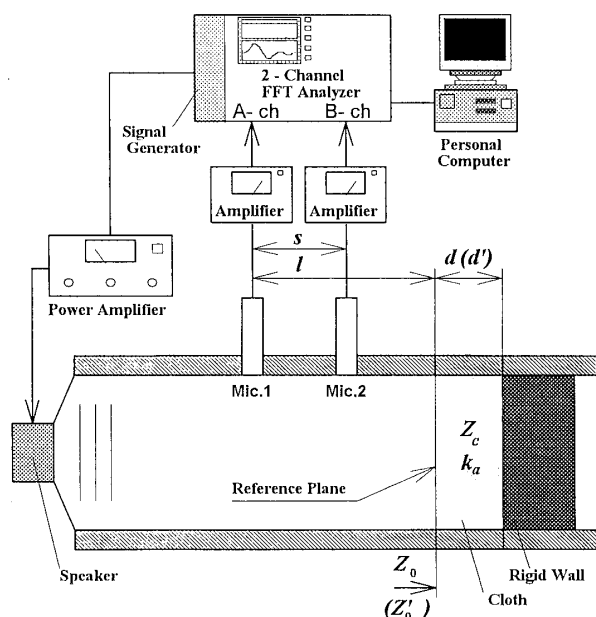


Fig.3 Setup of transfer function method

4. 計算結果

図4に、先の布Iについて枚数が1, 2枚で伝達関数の測定を行い、 Z_0 および Z_0' を式(4)により求めた結果を示す。

これにより「後方を剛壁で閉止された管内に封入された布の入力インピーダンス」は、布の枚数変化にともなって変化することが確認できた。

また、図5(a),(b)に、上記の Z_0 および Z_0' の結果を用いて、式(5), (6)により計算を行った結果を示す。図5(a)が特性音響インピーダンス Z_c 、図5(b)が複素波定数 k_a を示す。図5(a)は空気と比較するために空気の固有音響抵抗で正規化したものである。この正規化された特性音響インピーダンスは複素数値であり、実数部は材料の音響抵抗、虚数部は音響リアクタンスを示す。また、複素波定数の実数部は位相定数、虚数部は減衰定数を表す。太線が実数部、細線が虚数部を表す。図5(a)において、音響抵抗の値が高い周波数では1.5前後を示している。

これは音響抵抗が空気の約1.5倍ということを示し、この布では、グラスウールなどの吸音材に近い値を示していることが判る。4, 8枚程度の組み合わせで安定した結果が見られ、11種類の布⁽⁵⁾の中でも比較的厚い布(H, I, J)については、薄い布に比べてより少ない枚数で良好な結果が得られた。したがって、ある程度材料の合計の厚さ、枚数がある方が測定データの質が安定すると思われる。計算結果のばらつきの原因としては、布が薄いために、表面のゆがみ等のセッティングの誤差が生じやすかったものと思われる。また、スピーカに入力する電圧を変化させたところ、4.0Vまでは電圧が高いほど安定した計算結果が得られた。これは、S/N比が向上するため伝達関数のデータの質が向上するためと思われる。

5. 音響特性による入力インピーダンスの導出

後方を剛壁で閉止された管内に封入された布の入力インピーダンスを1次元の波動方程式(7)で示す。これは

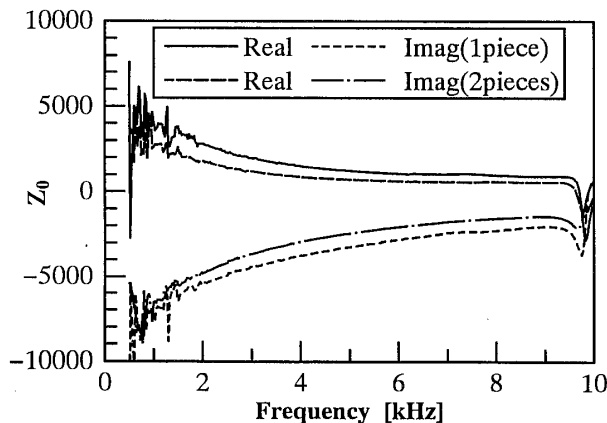


Fig.4 Input impedance of cloths backed by rigid wall

一端閉口他端開口管の開口側から見た入力インピーダンスの式と同じものである

$$Z_0 = Z_c \frac{\exp(\gamma d) + \exp(-\gamma d)}{\exp(\gamma d) - \exp(-\gamma d)} \dots\dots\dots (7)$$

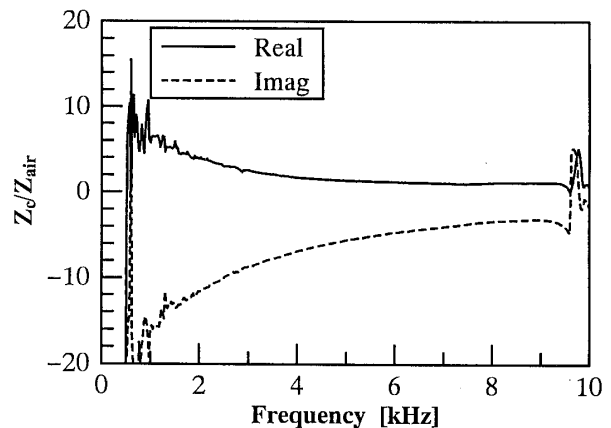
Z_c : 布の特性インピーダンス,
 γ : 複素波定数に j を乗じたもの ($=k_a \times j$)
 d : 材料の厚さ

これにより、前章で求めた布の音響特性 Z_c, k_a と任意の布の厚さ d を上式に代入することにより任意の布の厚さについての Z_0 を直ちに算出することが出来る。後の理論解析において1枚時や2枚時など任意の枚数についての Z_0 を算出するのに用いる。

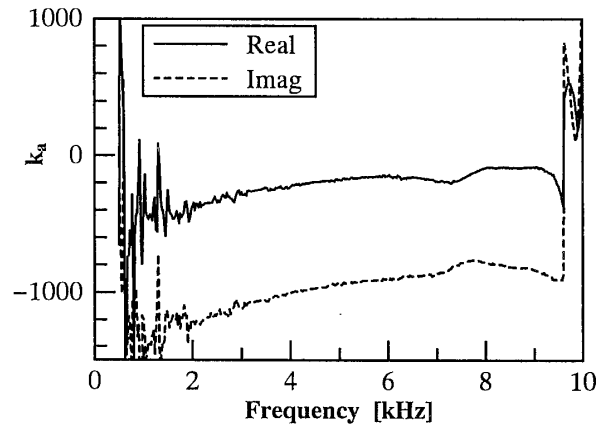
ここで、布の扱い方が式(7)で適正かどうかを確認するため、式(5), (6)により得られた図5(a),(b)のデータを式(7)に代入し「 Z_c, k_a から求めた Z_0 」を求めた。その結果は、式(4)により求めた「実測値ともいえる Z_0 」である図4と完全に一致した。

6. 理論解析

6.1 検出部の音響系と等価回路 本章においては、



(a) Characteristic impedance normalized by air



(b) Complex wave number

Fig.5 Acoustic characteristic (2-thickness-method)

図6に示した検出部の音響系を電氣的等価回路に置き換えることにより解析を行う. 図7は検出部の音響系に対応する等価回路である.

6.2 空気中の部分 図6, 7における空気柱, つまり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 (図7の N) 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.

$$\begin{pmatrix} P_a \\ U_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_b \\ U_b \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (8)$$

四端子定数 $A \sim D$ は一次元の波動方程式から次式のようになる. ここで, l は空気柱の長さを, S はその断面積を示し, これらの値を適宜替えることにより様々な管に適用できる. また, j は複素定数, ρ は空気密度を示す.

$$\begin{aligned} A &= \cosh \delta l \cdot \cos Kl + j \sinh \delta l \cdot \sin Kl \\ B &= \frac{\rho c}{S} \{ \sinh \delta l \cdot \cos Kl + j \cosh \delta l \cdot \sin Kl \} \\ C &= \frac{S}{\rho c} \{ \sinh \delta l \cdot \cos Kl + j \cosh \delta l \cdot \sin Kl \} \\ D &= \cosh \delta l \cdot \cos Kl + j \sinh \delta l \cdot \sin Kl \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで, δ は管内平面波の減衰定数であり, 位相定数 K と共に次式で与えられる. また σ は摩擦係数である.

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2}} - 1 \right)} \\ K &= \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} + \delta^2} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (10)$$

6.3 マイク前室とその頸部 また, マイク前室の空洞部は, その形状から容量性のみを考慮し音響キャパシタンス C_{mr} として扱う. したがって, マイク前室のインピーダンス Z_{mr} は次式となる. V_{mr} は空洞部体積である.

$$Z_{mr} = \frac{1}{j\omega C_{mr}} = -j \frac{\rho c^2}{V_{mr} \omega} \quad \dots\dots\dots (11)$$

マイク接続部は空気柱と同様に, ②点と④点の間の伝達マトリックスを利用する.

入口を②点, 出口を④点として, ②点での音圧と体積速度を P_2, U_2 , ④点についても同様に P_4, U_4 とすると, N_{mh} にあたる②~④点の伝達マトリックスは次式となる.

$$\begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{mh} & B_{mh} \\ C_{mh} & D_{mh} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_4 \\ U_4 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (12)$$

四端子定数 $A_{mh} \sim D_{mh}$ は式(9)において頸部長さ l_{mh} ,

頸部断面積 S_{mh} を代入して得られる.

$$\begin{aligned} \text{また, } Z_m &\equiv P_2/U_2 \\ Z_{mr} &\equiv P_4/U_4 \end{aligned}$$

以上より, 上式は次のように変形できる.

$$Z_m = \frac{A_{mh} Z_{mr} + B_{mh}}{C_{mh} Z_{mr} + D_{mh}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

6.4 スピーカ前室とその頸部 スピーカの空洞部のインピーダンス Z_{sr} は, マイク前室と同様に次式で与えられる.

$$Z_{sr} = \frac{1}{j\omega C_{sr}} = -j \frac{\rho c^2}{V_{sr} \omega} \quad \dots\dots\dots (14)$$

C_{sr} は音響キャパシタンス (電気容量に相当) で空洞部の体積 V_{sr} から次式で表される.

$$C_{sr} = \frac{V_{sr}}{j\rho c^2} \quad \dots\dots\dots (15)$$

スピーカ接続部でも空気柱と同様に, ②点と③点の間

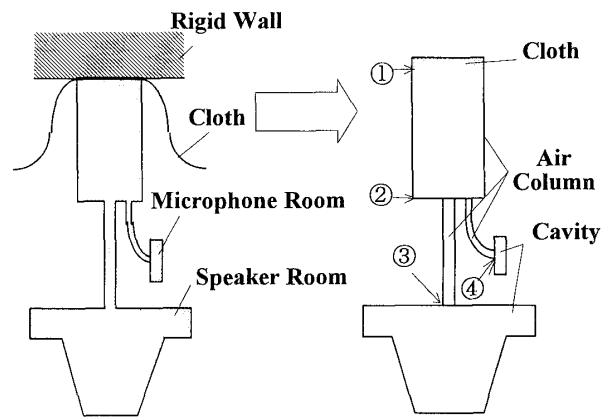


Fig.6 Elements of acoustic system

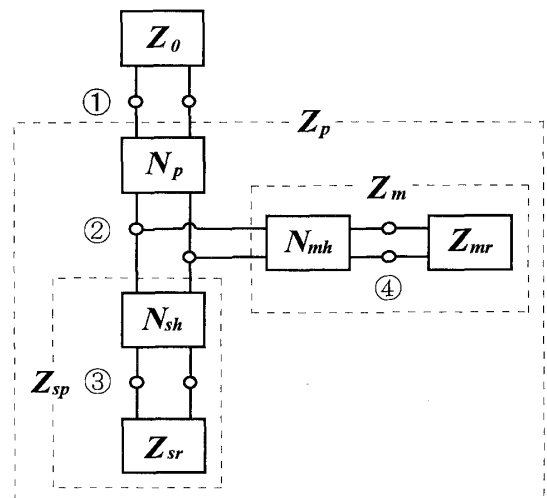


Fig.7 Equivalent circuit of analogy for acoustic system of detector

の伝達マトリックスを利用する.

入口を②点, 出口を③点として, ②点での音圧と体積速度を P_2, U_2 , ③点についても同様に P_3, U_3 とすると, N_{sh} にあたる②~③点の伝達マトリックスは次式となる.

$$\begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{sh} & B_{sh} \\ C_{sh} & D_{sh} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_3 \\ U_3 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (16)$$

四端子定数 $A_{sh} \sim D_{sh}$ は式(7)において頸部長さ l_{sh} , 頸部断面積 S_{sh} を代入して得られる.

$$Z_{sp} \equiv P_2/U_2$$

$$Z_{sr} \equiv P_3/U_3$$

以上より, 上式は次のように変形できる.

$$Z_{sp} = \frac{A_{sh}Z_{sr} + B_{sh}}{C_{sh}Z_{sr} + D_{sh}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

6.5 ①点から見た並列インピーダンス 布と空気

柱の境界面から見た回路全体の音響インピーダンスを考える. 布の入力インピーダンスは一般に理論的に予測できないので, 式(5), (6)により得られた音響特性 Z_0, k_a を用い, 式(7)により計算によって求められた Z_0 を用いる. Z_0 は図7における Z_0 に対応する. 図6, 7の①点から見た回路全体の音響インピーダンス Z_1 は次式で表される.

$$Z_1 = \frac{1}{Z_0^{-1} + Z_p^{-1}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここで Z_p は図7における破線の囲みで, 次式で表さ

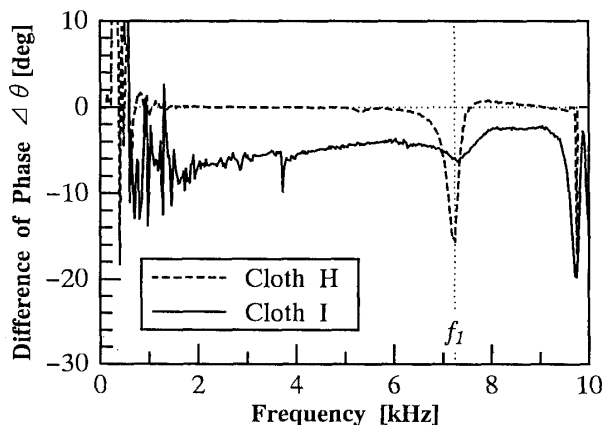


Fig.8 Difference of phase between 1 piece and 2 pieces (Calculations)

れる.

$$Z_p = \frac{A_p(Z_m^{-1} + Z_{sp}^{-1}) + B_p}{C_p(Z_m^{-1} + Z_{sp}^{-1}) + D_p} \quad \dots\dots\dots (19)$$

以上のようにして, 布 H, 布 I において 1 枚時, 2 枚時のインピーダンス Z_l の位相の周波数応答の差は図8のようになった. ここでも図2と同様に破線が布 H, 実線が布 I を表す. これは図2の実験結果を計算により求めたものに相当する. 位相の差であるので図2と図8は共振周波数 f_1 近傍以外では, ばらつきが大きくなっている. 共振周波数付近の位相特性は「音響系の伝達関数の測定から得られた図2」と, 「布の特性音響インピーダンスおよび複素波定数を理論解析に導入し計算により得られた図8」とで同様な傾向が見られるのが分かる.

7. 結 言

布の枚数による位相変化を利用した枚数検出法の研究において, 次の結果を得た.

- (1) 「後方を剛壁で閉止された管内に封入された布の入力インピーダンス」は, 布の枚数変化にともなって変化することが確認できた.
- (2) 伝達関数法により求めた布の音響特性を検出部の音響系の理論解析の計算に導入した結果, 共振周波数近傍における位相差は実験値, 計算値との間で等しい傾向を示した.
- (3) 検出部の音響系の理論解析の計算に布の音響特性を導入することにより, 様々な形状の検出部について特性の予測が可能となる. このことは, 検出部の最適設計, ならびに枚数検出法の改良に有用であると思われる.

文 献

- (1) 小野・一條, 機構論集, 920-78, E(1992), 452.
- (2) 岡部・小野・赤見・佐々木, 織高研研究報告, 147(1985), 2.
- (3) 坂本・一宮・太田, 機論, 59-559, C(1993), 819-826.
- (4) 坂本・一宮・太田, 機論, 60-571, C(1994), 994-999.
- (5) 坂本・一宮・太田・宮本, 機論, 61-584, C(1995), 1516-1521.
- (6) 坂本・一宮・坂井, 機構論集, 957-1(1995), 241-243.
- (7) J. Y. Chung and D. A. Blaser, J. Acoust. Soc. Am. 68 (3), (1980), 907-921.