

音響を利用したシートの枚数検出法*

(第3報, 伝達関数の位相による紙および布の検出)

坂本 秀一^{*1}, 一宮 亮一^{*1}
太田 雄三^{*2}, 宮本 賢一^{*3}

Method of Detecting Number of Sheets Using Sound

(3rd Report, Detection of Paper and Cloth by Phase of Transfer Function)

Shuichi SAKAMOTO, Ryoichi ICHIMIYA,
Yuzo OHTA and Ken'ichi MIYAMOTO

A new method of detecting the number of moving sheets without contact has been investigated. This paper deals with the development of a method of detecting the number of sheets of paper and cloth. This detecting method utilizes the variations of the phase of the transfer function of the entire acoustic system including the sheets. The impedance of sheets varies with their number. Thus the number of sheets shows good correspondence with the phase of the transfer function of the acoustic system. The experimental result shows that the number of moving paper sheets can be detected without contact, and also the number of sheets of cloth which are sufficiently clumped between the end face of the pipe and a rigid wall can be detected.

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

1. 緒 言

紙幣の自動支払機に代表されるように, シート状物体の搬送時に正確に速く枚数を計測する方法の需要は多い. このように紙を1枚ずつ送りながら計数する場合, 複数枚誤送の検出が課題となっている. 白石らは超音波センサを用いて複数枚の検出を試みている.⁽¹⁾

また, 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, 縫製時のハンドリング等の際に布が確実に1枚であるか否かを判別する事は重要である. 小野らは歪ゲージをロボットハンドに組み込む事で検出を試みており,⁽²⁾ そのほか各種の基礎実験を行っている.⁽³⁾

このように, シート状の物体を搬送したり, ハンドリングする場合, 確実に1枚であるかのチェックが課題になっている.

著者らは近年, 紙に代表される様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を行っている. 空気柱管端に近接させたシートの枚数を音響系の伝達関数の振幅に変換し, 非接触で検出する

方法は既報⁽⁴⁾⁽⁵⁾により発表した.

本論文においては, 以下の実験結果について記述した. 紙については, 1枚と複数枚での伝達関数の位相差を利用して, 搬送時の枚数を非接触で測定する実験を行った.⁽⁶⁾ 布については, 両端閉口管の一端の剛壁と管の間に布をはさみ, 1枚と複数枚での系の共振周波数付近における位相特性に着目し, 様々な種類の布に対して実験を行った.

2. 紙の枚数検出法⁽⁶⁾

2-1 実験装置の概要とその基礎的特性 図1に実験装置の概略を示す. 空気柱の内径は20mm, 長さは10mmである. スピーカから放射された音波は空気柱端面とシートの隙間の他にシートを透過して放射されるため, 空気柱端面から外側を見た音響インピーダンスが枚数により変化する. これにより, シートを含む音響系の伝達関数もシートの枚数により変化する. このように, シートの枚数を伝達関数の変化に変換することにより枚数を検出する.

伝達関数を測定した際の装置の構成を図1に示す. FFTアナライザ内蔵の信号発生器による0~5kHzの正弦波スイープ信号をスピーカから空気柱内に放射し, それを基準信号としてFFTのAチャンネルに入力し, マイクが空気柱管端より拾った信号をBチャンネル

* 原稿受付 平成6年6月3日.

*1 正員, 新潟大学工学部 (〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050).

*2 准員, ミネベア(株) (〒389-02 長野県北佐久郡御代田町大字御代田4106-73).

*3 学生員, 新潟大学大学院.

に入力しフーリエ解析を行う。

図2に上質紙(面密度 0.0671kg/m^2 , 厚さ 0.078mm)を用いた伝達関数の測定結果をボード線図で示す。枚数が増加するにしたがい、共振周波数が左にシフトしており⁽⁴⁾, それにともなって位相の周波数応答も左側にシフトしている。

図3に伝達関数の測定結果から、検出面となる空気柱端面上にシートがない場合を基準とした周波数-位相線図を示す。ここで、音響系の伝達関数において特定の周波数における位相変化と枚数の関係に着目する。シートが1枚時の系の共振周波数 $f_1=3250\text{Hz}$ を破線、3枚時の共振周波数 $f_3=2750\text{Hz}$ を一点鎖線で示す。また、各周波数と1枚時の曲線の交点には"1", 2枚時は"2", 3枚時は"3"とマークしている。

図3から、各枚数の共振点周辺で位相の変化が大きくなるのがわかる。ここで、 f_1 あるいは f_3 の正弦波音波をスピーカから空気柱内に放射したとする。このときシートが1枚であれば図3の破線あるいは一点鎖線と、1枚時の位相特性曲線の交点"1"に対応した位相差が生じる。シートが2枚および3枚のときも同様に交点"2","3"に対応した位相差が生じることになる。

2.2 シートの位置による位相の周波数応答の変化
1枚ずつ搬送しながら計数を行う場合への適用を考えると、シートの移動中の枚数検出が必要となる。そこで、検出面上でのシートの位置による、伝達関数の位相の周波数応答を測定した。

シートを移動させる装置の概略は既に図1に示した。

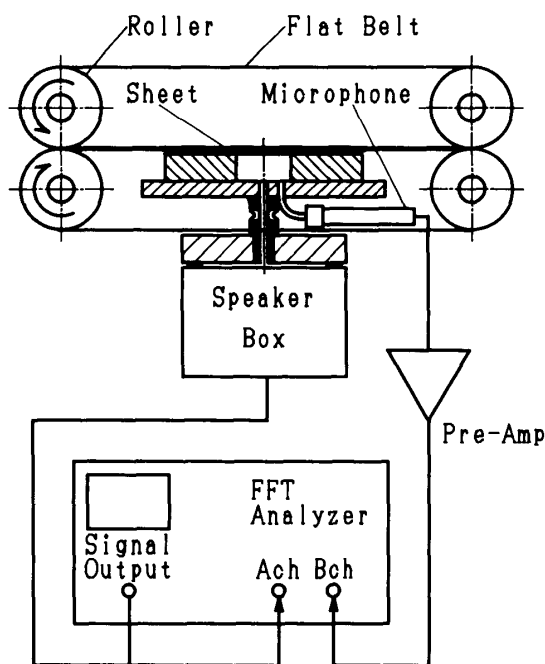


図1 紙を移動させる装置の概略

シートは検出面の上下および両脇の平ベルトに挟まれながら水平に移動する。シートと検出面のすき間はベルトが張られた高さによって 3.0mm に設定した。

図4は検出面を上から見たものである。A~Kの記号は移動するシートの前縁の位置を示す。

図5(a)に先の上質紙1枚を静止させた状態で、検出面との相対位置を変化させ、シートが検出面上にない場合を基準とした位相差を示す。A~Kの記号は図4で示した位置に対応する。

シートが検出面上を移動していく過程の位相差の変化は、はじめ高い周波数の帯域で位相差が生じ、次第に位相差も大きくなりながら位相差の生じる周波数帯域も広がっていく。また図5(b),(c)に示すようにシ

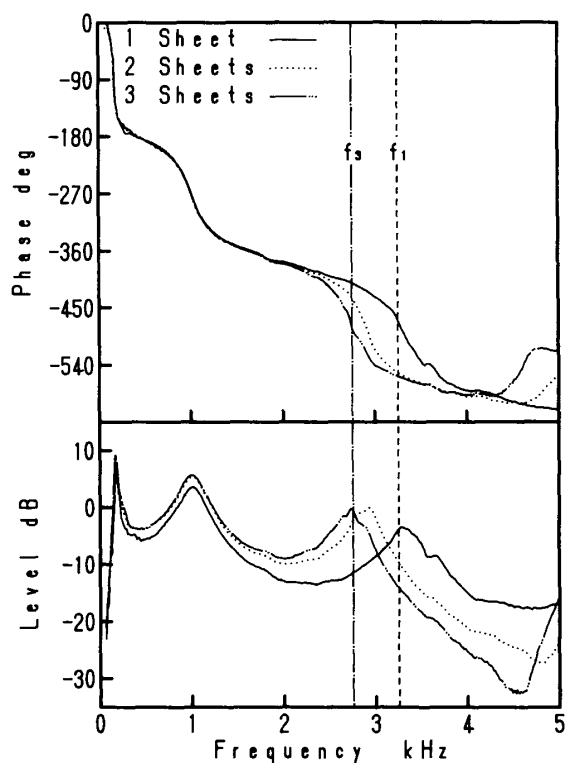


図2 音響系の伝達関数のボード線図

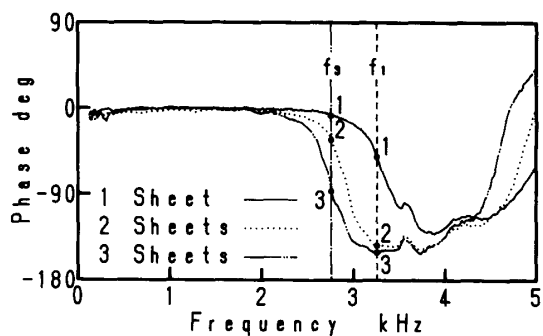


図3 枚数による位相の変化

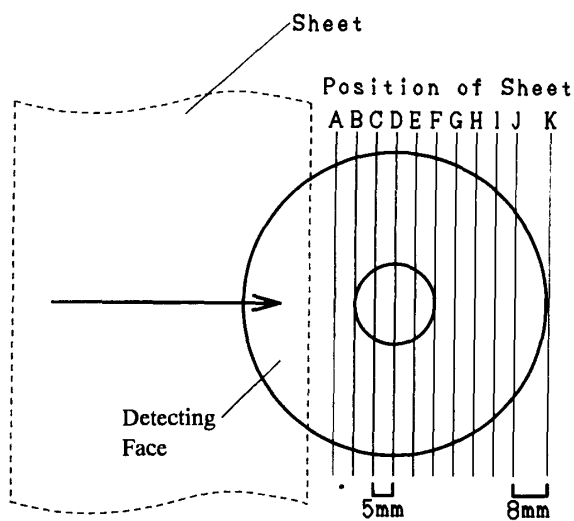
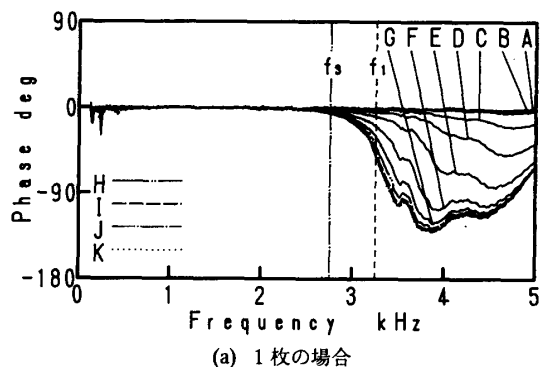
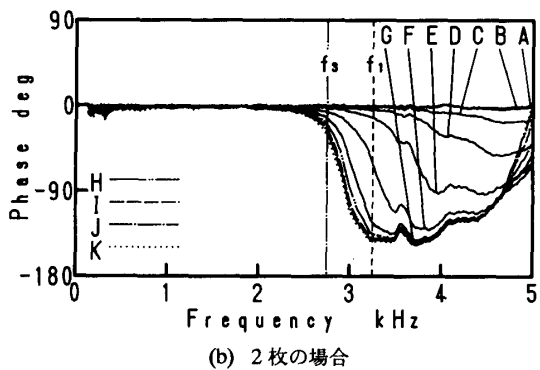


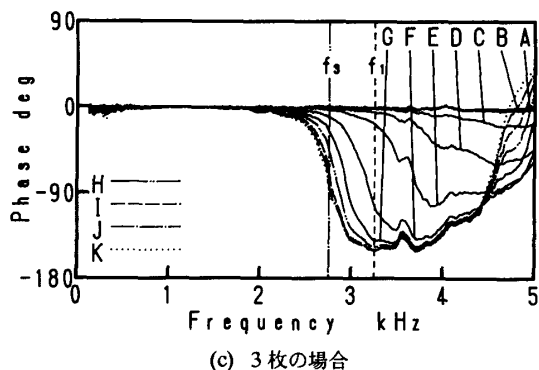
図4 検出面上のシートの位置



(a) 1枚の場合



(b) 2枚の場合



(c) 3枚の場合

図5 シートの位置による伝達関数の位相の変化

ートの枚数が増えるのにしたが位相差の生じる周波数の下限も低くなっている。

2.3 遅延時間による枚数検出 周波数が固定されている場合、位相差はスピーカに入力する信号に対するマイクへの入力信号の遅延時間の変化として測定できるので、この遅延時間を測定することでシートの枚数検出が可能になる。

そこで、Time Interval 測定モードを備えた周波数カウンタを利用してこの2信号間の遅延時間を測定した。なおこのときの測定器の構成は後の図9と同様である。発振器からスピーカへ出力する信号の周波数は f_1 と f_3 の2種類とし、基礎実験として、シートを静止させた状態で位置 A ~ K での遅延時間の測定を行い、次にシートを実際に搬送させた状態で枚数の検出を試みた。シートの大きさは 76mm (現行の一万円、千円紙幣と同一幅) × 200mm とし、シートの搬送速度は 1.03m/s とした。

2.4 シート静止時の枚数検出例 f_1 を用いた場合、紙が1枚~3枚時の音響系の入出力間の遅延時間は、シートがないときの値を基準とすると図6のようになる。2枚、3枚の場合は、遅延時間に大きな差はないが、これは図5(b),(c)において f_1 では両者間の位相差がほとんどなかったことから理解できる。

また、 f_3 を用いた場合の遅延時間は図7のように

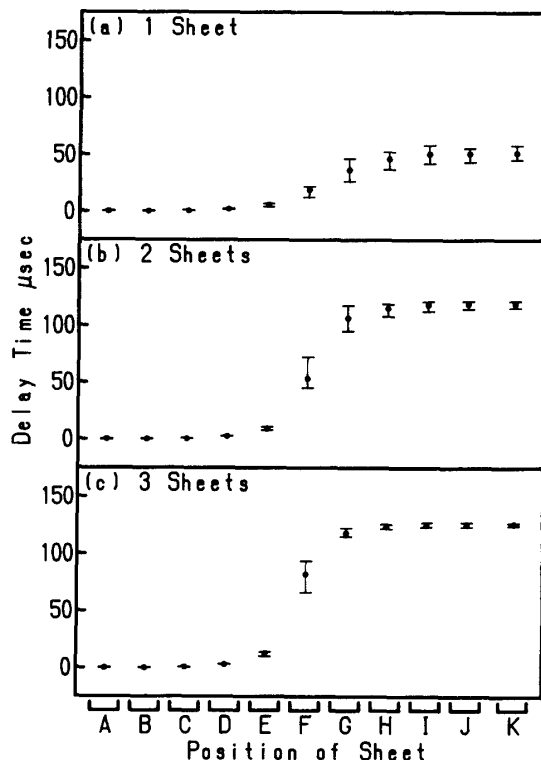


図6 シートの位置による f_1 の遅延時間

なる。この場合は、1枚時にほとんど遅延時間の変化が見られず、2枚時、3枚時になってはじめて遅延時

間に変化する。よって、2枚時の最低値未満をしきい値に設定しておけば複数枚誤送の検出が可能である。

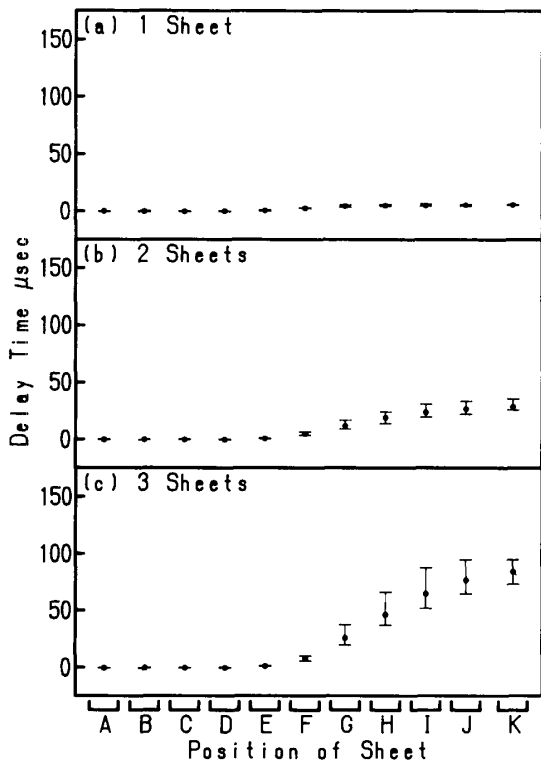


図7 シートの位置による f_3 の遅延時間

2.5 紙の搬送時の枚数検出例 紙を 1.03m/s の速度で搬送した場合の枚数による遅延時間の変化を図8に示す。インターフェイスの関係上、コンピュータによるデータのサンプリング間隔が 20msec 程度と長い

が、2,3枚時の遅延時間が1枚時より十分に大きくなる時間は図4,8およびシートの移動速度から 50msec 程度あり、遅延時間のしきい値を上回るデータは最低でも2点以上サンプリングできる。したがって搬送時でも枚数の検出が可能である。

3. 布の枚数検出法

3.1 実験装置の概要とその基礎的特性 図9に実験装置の概略を示す。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が変化し、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に変換することにより枚数を検出する。なお図9では、測定器の構成は2.3節および3.2節において用いるものを示した。

図10に本検出法の適用例を示す。左の例は、ロボットハンドが布を挟むことにより空気柱管端が布と剛体壁で終端される。右の例は、テーブルにおかれた布に空気柱の管端を押し当てるという例である。この他

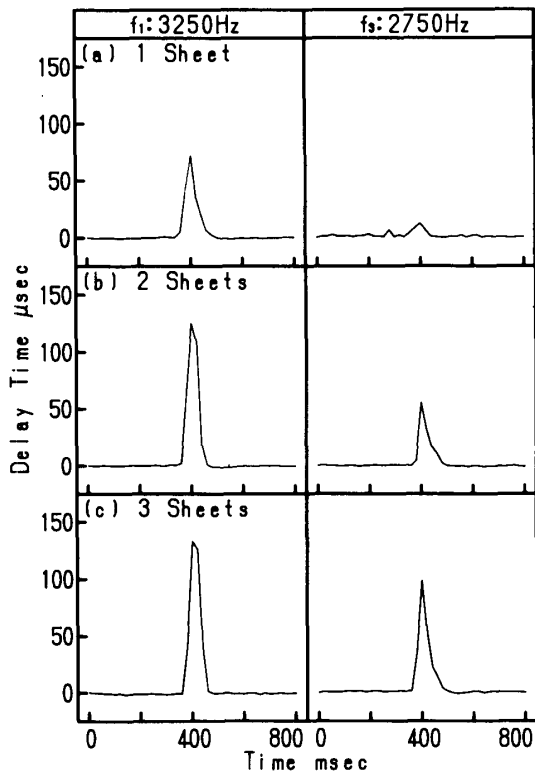


図8 シート移動時の検出例

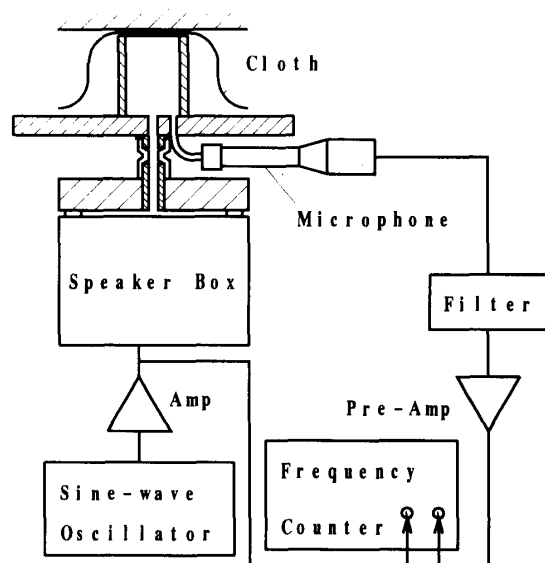


図9 実験装置の概略

にも応用が考えられるであろう。

本実験でも、音響系の伝達関数において特定の周波数における位相変化と枚数の関係に着目する。まず、位相の周波数応答を求めるため伝達関数を測定した。前章と同様、FFTアナライザ内蔵の信号発生器による0~10kHzの正弦波スイープ信号をスピーカから空気柱内に放射し、それを基準信号としてAチャンネルに入力し、マイク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。

実験には面密度、厚さ、材質等がそれぞれ異なる11種類の布を用いた。その種類を表1に示す。うちA~Gの7種類の布はJIS L 0803 染色堅ろう度試験用添付白布の中から用いた。

図11に布Kを用いた場合の、1枚、2枚時の伝達関数の位相の測定結果を示す。このときの測定器の構成は図1と同様にした。

ここで用いた空気柱は内径18mm、長さ23mmで

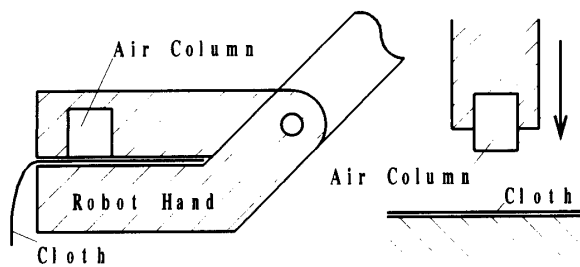


図10 本検出法の適用例

表1 実験に使用した布

Standard Adjacent Fabrics for Staining of Colour Fastness Test JIS L 0803			
Code	Kind 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	Kind of Fiber	Thickness $\times 10^{-1}$ cm	Density $\times 10^{-1}$ kg/m 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

ある。両端が剛壁で終端された空気柱の共振周波数は式(1)によれば、約7470Hz(20℃)である。ここで、 c は音速、 l は空気柱長さ、 n は共振モードを示す。

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

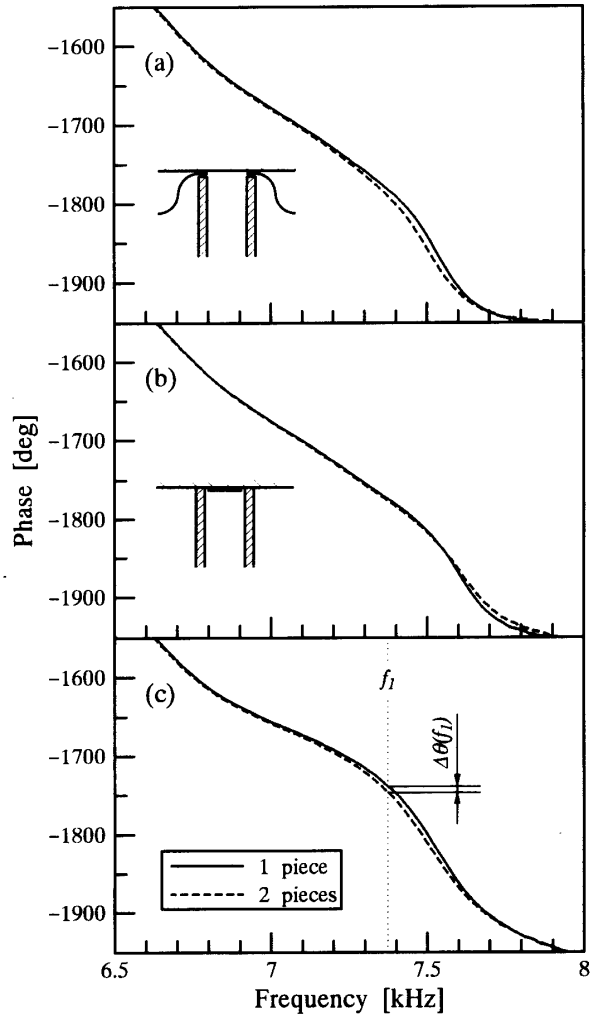


図11 音響系の伝達関数の測定結果

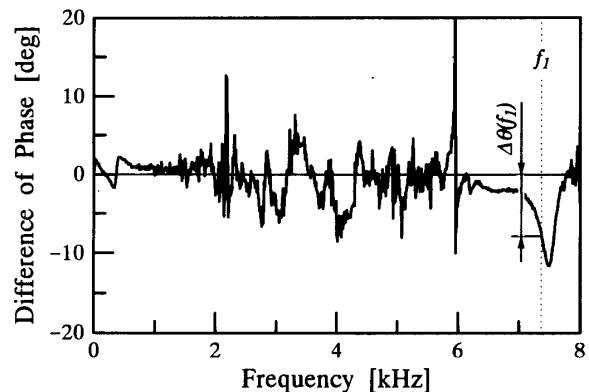


図12 1枚時と2枚時の位相差

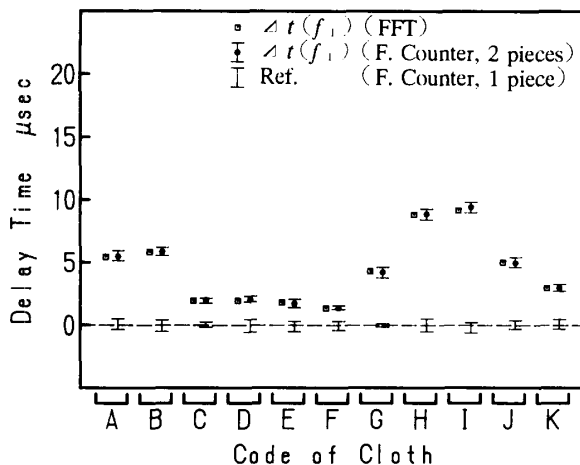
図 13 周波数 f_1 における 1 枚時と 2 枚時の時間差

図 11(c) のような枚数による位相曲線の変化は図 11(a) および (b) により説明される。

管の内径と同径の穴をあけた布を使用して測定を行った結果が図 11(a) である。この場合、音響系の長さは布の厚さ分だけ長くなるが管端は剛壁のままである。よって、図 11(a) からは、周波数応答曲線が系が長くなった分だけ左にシフトする効果を確認できる。

また、管の内径と同径の円に切った布を剛壁に貼り、測定を行った結果が図 11(b) である。この場合、布の厚さは管の中に入ってしまうため、系の長さは変化しない。よって、図 11(b) からは、系の共振の先鋭度が管端の布で弱められる効果を確認できる。このとき位相曲線は共振周波数を境にして低周波数側は位相遅れが大きくなり、高周波数側は位相遅れが小さくなる。

これらの傾向は枚数の増加により強まる。

上述の 2 つの効果を重ね合わせると布が 1 枚のときの共振周波数の前後にわたって、 $\Delta\theta$ が安定して得られる。 $\Delta\theta$ の大きさには布の見かけの特性音響インピーダンスが関係すると思われる。

また、1 枚時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、ここでは剛壁と空気柱の端面との間に布が 1 枚挟まった場合の代表値として 7375Hz を用い、これを f_1 と呼ぶことにする。

図 12 に 1 枚時の位相を基準として表した 2 枚時の位相 $\Delta\theta$ (1, 2 枚時の位相差) を示す。点線で示した周波数 f_1 の周辺で位相差 $\Delta\theta$ が大きくなる。最も位相差が大きくなる周波数は共振周波数と同様、布の種類によりわずかに異なり、この布 K においても代表値の 7375Hz からずれているが検出に支障をきたす程の差異はいずれの布についても見られなかった。

図 12 により周波数 f_1 における位相差 $\Delta\theta(f_1)$ を求め、 $\Delta\theta(f_1)$ を時間差 $\Delta t(f_1)$ に換算した結果を図

13 の FFT に対応するシンボル \square で各布について示す。

3.2 布の枚数検出例 $\Delta t(f_1)$ は、FFT アナライザを用いずとも、周波数 f_1 の正弦波をスピーカから空気柱内に放射したときの、音響系の入出力信号の遅延時間の枚数による差、として測定できる。そこで、スピーカに周波数 f_1 の正弦波信号を入力し、前章の周波数カウンタを利用して 1 枚、2 枚時の遅延時間を測定し両者の差 $\Delta t(f_1)$ を求めた。

上述の方法で測定された $\Delta t(f_1)$ を図 13 に示す。なお、各布の場合について、グラフの縦軸の基準 $0 \mu\text{sec}$ を 1 枚時の遅延時間の平均値に合わせ、エラーバーも共に示した。また、 $\Delta t(f_1)$ の平均値もエラーバーと共に示した。

いずれの布についても $\Delta t(f_1)$ は、先の FFT で測定した $\Delta t(f_1)$ とよく対応しており、当初の原理に従った測定が行われていることが分かる。布によっては $\Delta t(f_1)$ が小さいものもあるが測定値のばらつきは小さい。いずれの布についても 1 枚、2 枚時の遅延時間の値には検出のための十分な隔りがあるとと言える。

4. 結 言

シートの枚数を伝達関数の位相変化に変換する枚数検出法について、基礎的実験を行い、次の結果を得た。

(1) 紙、布いずれについても枚数変化により伝達関数の位相の周波数応答は変化し、これを利用することでシートの枚数の検出が可能である。

(2) 紙の場合、シートを実用的な速度で搬送した場合でも、シートの枚数の検出は十分可能であり、非接触でこれを行うことが出来る。

(3) 布の場合、厚さや織り方、繊維の種類などによって遅延時間が小さいものもあるが、枚数の検出は十分可能である。

(4) 実際の測定にあたっては、高価な測定器は不要であり、システムは安価である。

本研究を進めるにあたり、(株)日立製作所中条工場のご援助を賜った。また、物質工学工業技術研究所の小野栄一氏ならびに新潟県工業技術センターの高橋靖氏よりサンプルの提供を頂いた。ここに感謝の意を表す。

文 献

- (1) Shiraishi, Fujinuma, Ishikawa, Ishige, Doki, *ASME, J. Eng. for Ind.*, **114**(1992),489.
- (2) 小野・一條, 機講論, No.920-78,E (1992-10),452.
- (3) 岡部・小野・赤見・佐々木, 織高研研究報告, **147**(1985),2.
- (4) 坂本・一宮・太田, 機論, **59**-559,C (1993),819.
- (5) 坂本・一宮・太田, 機論, **60**-571,C (1994),994.
- (6) 坂本・一宮・太田, 機講論, No.947-01(1994-3),77.