

音響を利用したシートの枚数検出法*

坂本 秀一*¹, 一宮 亮一*¹, 太田 雄三*²

Detecting Method of Number of Sheets by Using Sound

Shuichi SAKAMOTO, Ryoichi ICHIMIYA and Yuuzo OHTA

This paper deals with the development of a new detecting method of a number of sheets without contact. For example, in a cash dispenser paper sheets are transferred one by one and counted synchronously. So it is necessary to detect one or a plural number of sheets to avoid mistransferring. Hitherto, the contact measuring method has been used for detecting the transference of sheets. This noncontact sensor utilizes the variations of frequency response of the whole acoustic system of the sensor with sheets which are set near the sensor. The impedance of sheets varies with its number. The number of sheets has shown good correspondence with the resonant frequency and frequency response of the acoustic system. An electrical analogy is adopted for theoretical analysis of the acoustic system. The results of the calculation and experiments coincide significantly. It is possible to detect the number of sheets within a very short time period by means of variations of the frequency response.

Key Words: Sound, Sensor, Measurement, Number of Sheets, Noncontact, Frequency Response

1. 緒 言

現在、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が多い。従来このような場合は1枚ずつ送りながら計数する方法が多く採られている。この方法は搬送する際に計測できるが複数枚を1枚として送ってしまう場合があり、この複数枚の誤送をいかにして検出するかが課題となっている。従来の検出法は主に接触式であるため接触子の摩擦対策や接触圧力の吟味が必要であり、場合によってはシートを損傷する恐れもある。そのためシート材を扱う産業では非接触式で、簡単かつ信頼性の高い測定方法が求められている。このような背景を基に、本研究は音響を利用してシートの枚数検出を行う方法を開発しようとするものである。

本研究における枚数検出とは以下のものである。

センサ管端の検出面からすき間を隔てたシートの枚数により、センサ管端の音響インピーダンスは変化し、それに伴いセンサの音響系の周波数応答も変化する。こうしてシートの枚数は周波数応答に変換され非接触

で検出できる。上述の測定を非常に短時間で行うためスピーカからセンサ内に正弦波信号を放射し、マイクが拾った電圧値により枚数を検出する方法を考察した。

以上の方法について、実験装置を試作し、基礎的実験を行った結果と理論解析の結果について報告する。

2. 枚数検出の原理とセンサの詳細

2・1 枚数検出の原理 図1の上部がセンサ部分の概略である。シートはローラにより支持され、検出面と一定のすき間を保つためシート長手方向の両端で若干の張力がかけられる。センサ内の音波はすき間のほかにシートを透過して放射するため、センサ管端の検出部における音響インピーダンスはシートの枚数によって変化する。したがってシートを含むセンサ内音響系の周波数応答も変化する。このように、周波数応答が枚数に対応することによりシートの枚数検出が可能となる。

2・2 センサの詳細 図2はセンサの音響系の断面図である。センサは軟鋼製で検出部外半径 a_f は 36 mm、空気柱内半径 a_{ac} は 10 mm、その長さ l_{ac} は 10 mm とした。マイクとスピーカのセンサへの音響的な接続はシリコンチューブにより行われ、振動絶縁をも

* 原稿受付 平成4年7月31日。

*¹ 正員, 新潟大学工学部 (〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。*² 学生員, 新潟大学大学院。

兼ねている。センサ本体は精密 Z ステージ(精度 1/100 mm) に取付けられ、シートとセンサの間のすき間 d_s を正確に 2.0 mm と設定してある。シートを支持するローラの外径は 10 mm であり、中心間距離は 110 mm である。

本装置の音源は 3 kHz 前後における周波数特性が比較的平坦なホーン型ツイータを用いた。またマイクはリオン製 1/4" コンデンサマイクロホンを用いた。

なお、シートの大きさは 76 mm (現行の一万円、千円紙幣と同じ幅) × 200 mm とし、両端から 15 mm の部分で張力をかけた。シートの面密度は、シートの重量を電子天秤で測定し面積で除して算出している。

3. 伝達関数測定

3.1 測定方法 音響系の特性を端的に示すため、

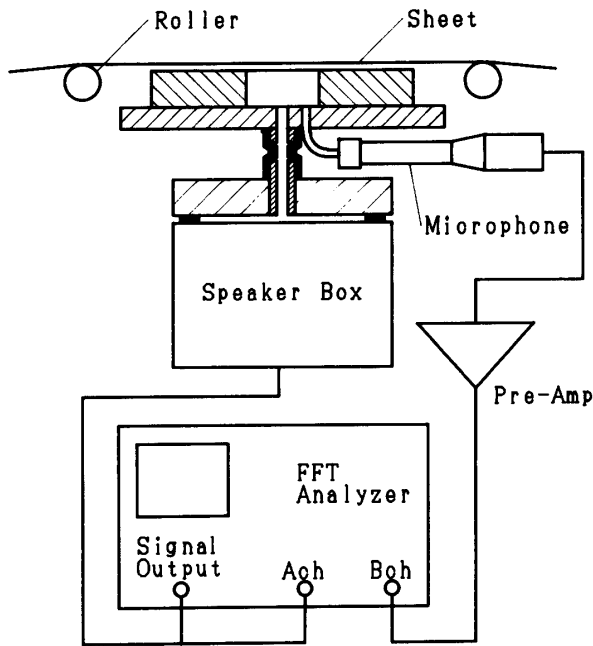


図 1 装置の概略および伝達関数測定時のブロック図

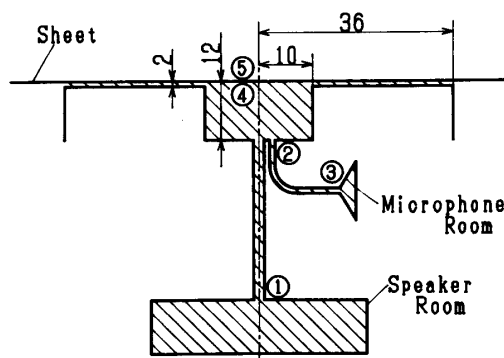


図 2 センサ内の音響系

さまざまな面密度のシートについて伝達関数の周波数応答を測定する。ここでは広範囲の面密度を選択でき、均質で紙に密度に近い材料としてポリエチレンシートを用いた。また、ポリエチレンは物性が明らかであるので解析にも適する。

伝達関数は図 1 に示すような構成で測定した。FFT アナライザに内蔵されている関数発生器により 0~5 kHz の正弦波スイープ信号をスピーカからセンサ内に放射し、それと同じ信号を A チャンネルに入力し、マイクがセンサ内の空気柱管端より拾った信号を B チャンネルに入力してフーリエ解析を行う。

3.2 測定結果 図 3 は、さまざまな面密度のポリエチレンシートをセンサに取付け、シート長手方向の引張り応力を 1.77×10^5 Pa (18 gf/mm²) としたときの伝達関数の周波数応答を測定したもので、縦軸にはレベル、横軸には周波数をとっている。ここで実線はシートが 1 枚の場合であり、破線は面密度が同じシート同士を 2 枚、点線は 3 枚重ねたときの結果を示す。各曲線の 0 dB の位置および面密度は右側のスケールに同時に示した。つまり各曲線の 0 dB の位置は面密度の値によってシフトして描かれる。ここで 2 枚および 3 枚の場合、面密度は重ねたシートの合計のものを示す。いずれの枚数においても面密度の変化に伴って周波数応答が変化している。

さて、図 3 の周波数応答のピークから共振周波数を図的に求め縦軸が周波数、横軸が面密度のグラフにプロットしたものが図 4 である。ここでも複数枚重ねた場合はシートの合計の面密度、すなわち 2 枚のときには 2 倍、3 枚のときには 3 倍の面密度としてプロットした。複数枚シートを重ねた場合、シート同士には若

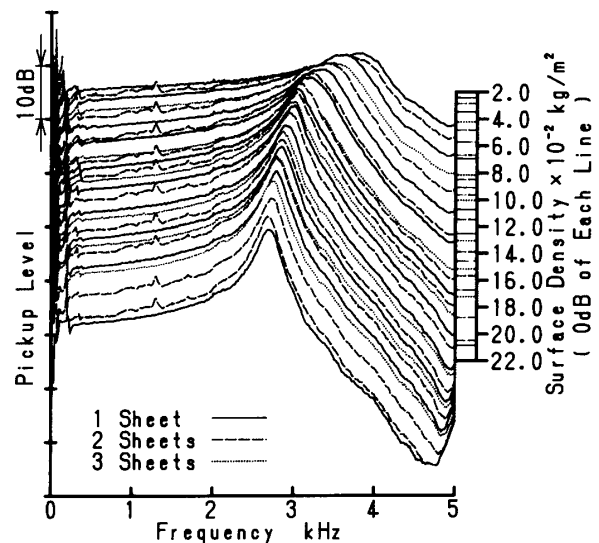


図 3 音響系の伝達関数測定結果

干のすき間ができるであろうにも関わらず、共振周波数は重ねたシートの合計の面密度により決まることがわかる。

以上のことから、シートの厚み方向への縦波の透過がセンサ内空気柱の管端のインピーダンスに影響を与えて音響系の共振周波数を変化させていることがわかる。また、シートにかかる張力を変化させたが共振周波数にはほとんど影響がなかった。このことから上述のことが理解できる。しかしある程度の張力はセンサとシートのすき間を正確に設定するために必要であった。こうして共振周波数に代表される周波数応答はシートの枚数（すなわちシートの合計の面密度）に対応することがわかった。図4に示した計算結果は上述の考えに基づいた1次元の解析により計算した。解析については次章で述べる。

4. 理論解析

4.1 音響系と等価回路 本章においてはセンサの音響系を等価回路に置き換えることにより解析を行う。図2に示したセンサの音響系に対応する等価回路は図5に示される。ここで、図2および5の①～⑤点はそれぞれ音響系と等価回路で対応する。

4.2 空気柱の部分 図2, 5における、①～②点、②～③点、②～④点の空気柱にあたる部分は減衰を考

慮した伝達マトリックス (図5の N) で表す。

いま、管入口の音圧と体積速度を p_a, Q_a 、出口については p_b, Q_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。

$$\begin{bmatrix} p_a \\ Q_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_b \\ Q_b \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

次に、四端子定数 $A \sim D$ は次式⁽¹⁾ 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、これらの値を適宜換えることによりさまざまな管に適用できる。ここで j は複素定数、 ρ は空気密度を示す。

$$\begin{aligned} A &= \cosh \delta l \cdot \cos kl + j \sinh \delta l \cdot \sin kl \\ B &= \frac{\rho c}{S} \{ \sinh \delta l \cdot \cos kl + j \cosh \delta l \cdot \sin kl \} \\ C &= \frac{S}{\rho c} \{ \sinh \delta l \cdot \cos kl + j \cosh \delta l \cdot \sin kl \} \\ D &= A \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

δ は減衰定数であり、次の回帰式⁽²⁾ で表される。ここで a は空気柱の半径、 ν は空気動粘度、 ω は角周波数である。

$$\delta = 2.11 \times 10^4 (2\pi c / \omega)^{-0.5} (2ca / \nu)^{-1} \dots\dots\dots (3)$$

また、 k は位相定数であり、次の式で示される。

$$k = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} + \delta^2} \dots\dots\dots (4)$$

4.3 すきまのインピーダンス シートとセンサのすき間においてすき間入口から見たインピーダンス Z_c は次式⁽³⁾ によって表せる。ここで $a_f - a_{ac}$ はすき間の重なりを長さ、 S_c はすき間の空間を内外に振り分ける平均半径における断面積をそれぞれ示す。

$$Z_c = \Gamma \frac{\tanh k_c (a_f - a_{ac})}{k_c S_c} \dots\dots\dots (5)$$

$$S_c \equiv 2\pi \{ (a_{ac}^2 + a_f^2) / 2 \}^{1/2} \cdot d_s$$

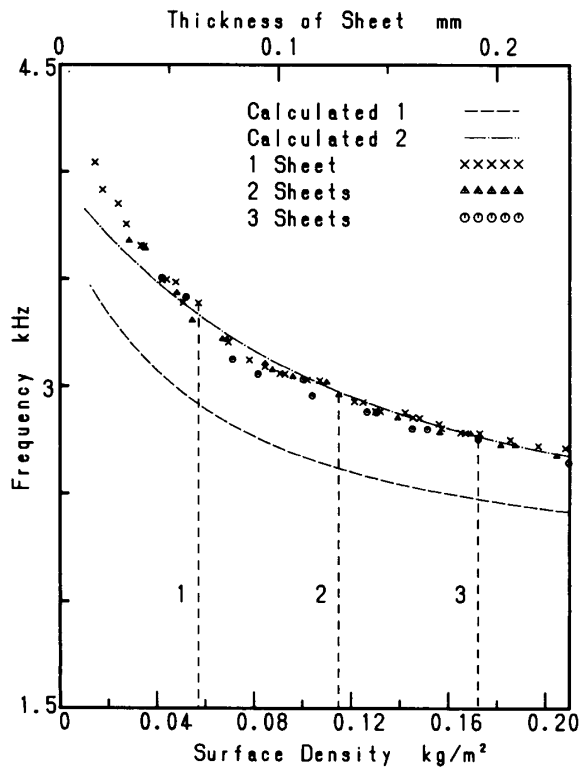


図4 面密度と共振周波数との関係

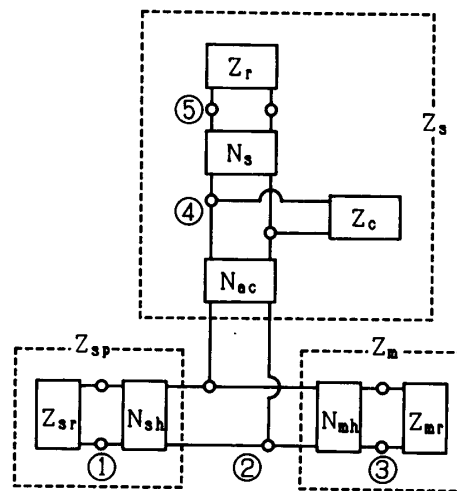


図5 センサの音響系の等価回路

このとき Γ は次式で表される。ここで d_s はシートとセンサのすき間の距離、 μ は空気の粘度である。

$$\Gamma = \left\{ \sum_{q=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(\frac{q^4 \pi^4 \mu}{8d_s^2} + j \frac{q^2 \pi^2 \rho \omega}{8} \right)^{-1} \right\}^{-1} \quad \dots\dots (6)$$

また、 k_c はすき間における位相定数であり次式で表される。また、 χ は空気の体積弾性率である。

$$k_c = \sqrt{\frac{j\omega\Gamma}{\chi}} \quad \dots\dots (7)$$

4.4 シートからの放射インピーダンス さて、シートから外部への放射インピーダンス Z_r はバツフルなしのピストンからの放射に等価と見なすと、バツフルありの式⁽⁴⁾を1/2倍し $E \cdot a_r = (8a_r/3\pi)/2$ とすることにより次式で表される。放射半径 a_r については後述する。

$$Z_r = \frac{\rho\omega^2}{4\pi c} + j \frac{\rho\omega}{\pi a_r^2} E \cdot a_r \quad \dots\dots (8)$$

ここで E は Benade の端補正の式⁽⁵⁾ から求められる。

$$E = 0.821 - 0.13 \{0.42 + (a_f - a_r)/a_r\}^{-0.54} \quad \dots\dots (9)$$

4.5 ②点から上側を見たインピーダンス ②点より上側の音圧と体積速度を p_2, Q_2 、⑤点についても p_5, Q_5 とすると、②～⑤点の伝達マトリックスは次式となる。

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ac} & B_{ac} \\ C_{ac} & D_{ac} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Z_c^{-1} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_s & B_s \\ C_s & D_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_5 \\ Q_5 \end{bmatrix} \quad \dots\dots (10)$$

ここで、四端子定数 $A_{ac} \sim D_{ac}$ は式(2)において管長さ l_{ac} 、内半径 a_{ac} を用いて得られる。

また、四端子定数 $A_s \sim D_s$ は式(2)においてシート厚さ t_s 、シート上の音の透過(放射)半径 a_r を用いて得るが、この場合 c にはポリエチレン内の縦波の音速 c_p を、 ρ にはポリエチレンの密度 ρ_p を用い、減衰は無視した。

$$\text{さて } Z_s = p_2/Q_2$$

また $Z_r = p_5/Q_5$ より上式は次式のように変形できる。

$$\begin{aligned} Z_s = & \{ (A_{ac} + B_{ac}/Z_c) A_s + B_{ac} C_s \} Z_r \\ & + (A_{ac} + B_{ac}/Z_c) B_s + B_{ac} D_s \\ & / \{ (C_{ac} + D_{ac}/Z_c) A_s + D_{ac} C_s \} Z_r \\ & + (C_{ac} + D_{ac}/Z_c) B_s + D_{ac} D_s \} \quad \dots\dots (11) \end{aligned}$$

以上、②点から上側を見たインピーダンス Z_s を得る。

4.6 スピーカ前室とそのくび部 スピーカ前室の空洞部は、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_{sr} として扱う。したがってスピーカ前室のインピーダンス Z_{sr} は次式となる。 V_{sr} はスピーカ前室の空洞部体積である。

$$Z_{sr} = \frac{1}{j\omega C_{sr}} = -j \frac{\rho c^2}{V_{sr} \omega} \quad \dots\dots (12)$$

スピーカ前室くび部②～①点について、②点におけるくび部側の音圧と体積速度を p_2, Q_2 、①点におけるくび部側の音圧と体積速度を p_1, Q_1 とすると、 N_{mh} にあたる②～①点の伝達マトリックスは次式となる。

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{sh} & B_{sh} \\ C_{sh} & D_{sh} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ Q_1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots (13)$$

四端子定数 $A_{sh} \sim D_{sh}$ は式(2)においてくび部長さ l_{sh} 、くび部半径 a_{sh} を用いて得られる。

$$\text{さて } Z_{sp} = p_2/Q_2$$

$Z_{sr} = p_1/Q_1$ より上式は次式のように変形できる。

$$Z_{sp} = \frac{A_{sh} Z_{sr} + B_{sh}}{C_{sh} Z_{sr} + D_{sh}} \quad \dots\dots (14)$$

破線で囲んだ Z_{sp} は、このようにして求まる。

4.7 マイク前室とそのくび部 マイク前室のインピーダンス Z_{mr} はスピーカ前室の場合と同様に次式のようになる。 V_{mr} はマイク前室の空洞部体積である。

$$Z_{mr} = \frac{1}{j\omega C_{mr}} = -j \frac{\rho c^2}{V_{mr} \omega} \quad \dots\dots (15)$$

マイク前室くび部②～③点についても同様に、②点におけるくび部側の音圧と体積速度を p_2, Q_2 、③点については p_3, Q_3 とすると、 N_{mh} にあたる②～③点の伝達マトリックスは次式となる。

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{mh} & B_{mh} \\ C_{mh} & D_{mh} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_3 \\ Q_3 \end{bmatrix} \quad \dots\dots (16)$$

四端子定数 $A_{mh} \sim D_{mh}$ も同様に式(2)においてくび部長さ l_{mh} 、くび部半径 a_{mh} を用いて得られる。

$$\text{また } Z_m = p_2/Q_2$$

$Z_{mr} = p_3/Q_3$ より上式は次式になる。

$$Z_m = \frac{A_{mh} Z_{mr} + B_{mh}}{C_{mh} Z_{mr} + D_{mh}} \quad \dots\dots (17)$$

こうして破線で囲んだ Z_m も求まった。

4.8 ②点から見た並列インピーダンス 等価回路において、マイクは②点に接続された電圧計にたとえることができる。

②点から見たインピーダンス Z_2 は Z_s, Z_{sp}, Z_m の並列インピーダンスとなるので次式で表される。

$$Z_2 = \frac{1}{Z_s^{-1} + Z_{sp}^{-1} + Z_m^{-1}} \quad \dots\dots (18)$$

こうして、②点から見た並列インピーダンスは求まる。

音響系の共振周波数においてはマイクが拾う音圧は極大になる。こうした音響系の共振点における状況を電氣的等価回路においては、②点から見たインピーダンスの絶対値が極大となる周波数を共振周波数と置き

換えることで算出する。

4・9 並列インピーダンス Z_2 のシミュレーション
 さて、全体のインピーダンスが求められたところで、シートの面密度の変化による Z_2 の値を計算機でシミュレーションする。計算の際用いたパラメータを表1に示す。なお、マイクおよびスピーカ孔両端、すき間の両端には、半径、またはすき間の1/2に対し $8/3\pi$ 倍の付加質量を考慮した。

図6は解析を基に計算したインピーダンスの絶対値の周波数応答である。計算は $2.0\sim 20\times 10^{-2} \text{ kg/m}^2$ のポリエチレンシートを想定して行った。2.0~20の目盛りは各曲線の0 dBの位置をも同時に示している。これにより各曲線の0 dBの位置は面密度の値によってシフトして描かれる。計算された周波数応答のカーブの形は、先の図3に示した伝達関数の周波数応答の測定結果と良く一致している。

4・10 理論値と実験値の比較
 さて、図6の曲線において各面密度について共振周波数を求めていくと、図4に計算値として示した面密度と共振周波数の関係が求められる。図4における計算値1(破線)はシート面の半径10 mmの部分を音が透過していると仮定した場合 ($a_r=10 \text{ mm}$) であり、計算値2(一点鎖

表1 計算に用いたパラメータ

$a_{cc}:10.0 \text{ mm}$	$a_{mn}:0.5 \text{ mm}$	$a_r:36.0 \text{ mm}$	$a_{sh}:1.25 \text{ mm}$
$d_s:2.00 \text{ mm}$	$l_{cc}:10.0 \text{ mm}$	$l_{mn}:20 \text{ mm}$	$l_{sh}:30 \text{ mm}$
$V_{nr}:26 \text{ mm}^3$	$V_{sr}:1.45\times 10^4 \text{ mm}^3$		
$c:343.7 \text{ m/s}$	$c_p:1.95\times 10^3 \text{ m/s}$	$\mu:1.822\times 10^{-6} \text{ pa/s}$	
$\rho:1.213 \text{ kg/m}^3$	$\rho_p:9.0\times 10^2 \text{ kg/m}^3$		

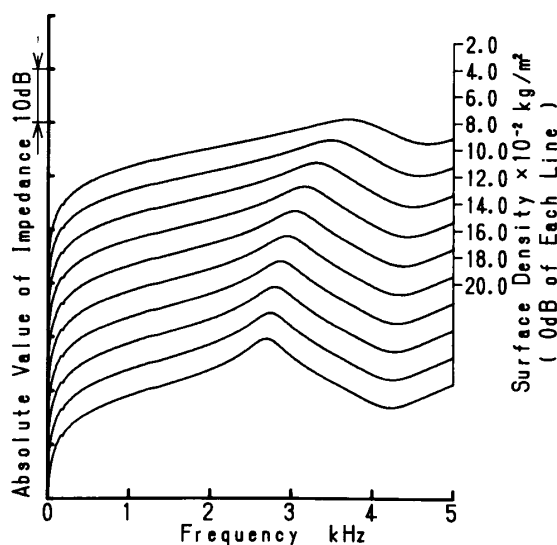


図6 解析を基に計算したインピーダンスの周波数応答

線)はシート面の半径14 mmの部分を音が透過していると仮定した場合である。グラフから計算値と実験値の傾向はほぼ一致しているのがわかる。シート中で縦波が透過する領域は明確に定めることが困難であるため実際にこの値を決めることはできないが現象はおおむね計算値2に近い状態で起こっていると考えられる。

5. 単一周波数による枚数検出

5・1 単一周波数による枚数検出の原理
 さて、ここでシートの搬送時を考えてみるとシートがセンサ上を通過する時間は限られているのでリアルタイムで共振周波数を検出することは難しいといえる。そこで、先の周波数応答の違いを利用する。ある周波数の正弦波信号をスピーカからセンサ内に放射すると、周波数応答曲線の違いによりマイクの拾う音圧の値は枚数に

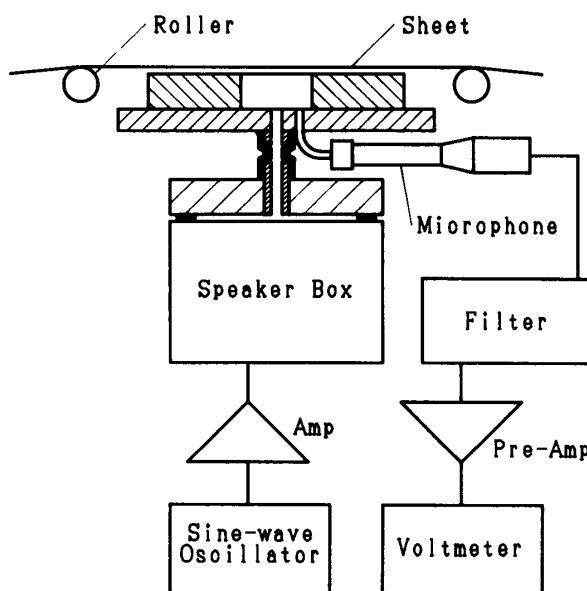


図7 単一周波数による枚数検出時のブロック図

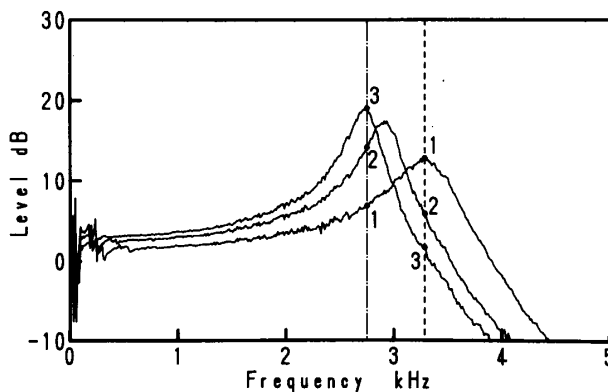


図8 各枚数の周波数応答 (ポリエチレン)

よって異なる。これにより瞬時に枚数が検出できる。図7に装置の構成を示す。発振器からの正弦波はアンプを介して1.0 Volt (RMS) でスピーカからセンサ内に入射する。そしてセンサ内の音圧はマイクで測定されアンプで増幅した後電圧が測定される。

先の図4において同じ面密度のシートを重ねた場合の例としてシートが1枚のときは破線と共に“1”，2枚のときは“2”，3枚のときは“3”とマークしている。この共振周波数を求める際に用いた周波数応答の測定結果を図8に示す。いま仮に1枚のときの共振周波数(以後 f_1 と呼ぶ。ここでは図8の破線の周波数)の正弦波信号をスピーカからセンサ内に放射したとする。このときシートが1枚であればマイクの出力電圧は図8の破線と1枚時の周波数応答曲線との交点“1”の値にほぼ対応するはずである。シートが2枚および3枚のときも同様に交点“2”，“3”に対応する。

また、図8の一点鎖線はシートが3枚の時の共振周波数(以後 f_3 と呼ぶ)を示している。この周波数を用いた場合も同様にマイクの出力電圧はそれぞれ交点“1”，“2”，“3”の値に対応するが、この場合は枚数が増加するにつれて次第に電圧が高くなる。

5.2 単一周波数による枚数検出法の測定結果

この方法を用いてシートを1枚から3枚まで変化させた時のマイクからの出力電圧を示したのが図9である。左から f_1 および f_3 を使用した結果である。シートの取付け状態の再現性を確認するため測定の都度シー

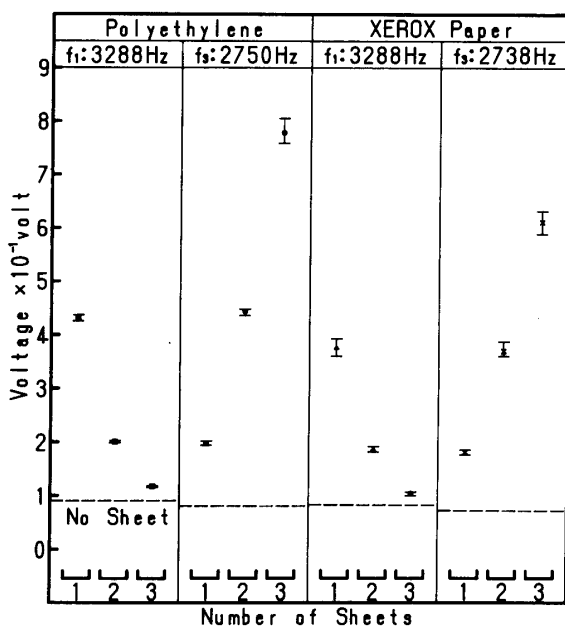


図9 f_1 , f_3 による各枚数時の電圧
(ポリエチレン, 上質紙)

トの脱着を行い、各枚数につき10回ずつ測定した。図からわかるようにこれらの電圧の間には枚数によって相当な隔たりがあるので1枚時と2枚時の電圧の間にしきい値を設ければ複数枚の誤送を検出できる。

f_1 を用いた場合は、電圧差は大きくとれるが万一同一周波数のノイズが入った場合、複数枚を1枚と判断する可能性がある。また、複数枚か零枚かを判別できないので、シートの通過に関する情報が必要である。

f_3 を用いた場合は、万一ノイズが入っても1枚を複数枚と判断する安全側に誤動作する利点があり、零枚か1枚か、あるいは複数枚なのかの検出も容易である。

上述の測定方法を他の材質のシートに適用するにあたり、一般に搬送される例の多い紙について実験を行った。図9の右側は f_1 および f_3 を用いてコピー機用上質紙について実験を行った結果をそれぞれ示す。ポリエチレンシートの場合と同様な結果が得られているのがわかる。なお、上質紙の大きさはポリエチレンシートの場合と同一である。またシートにかける張力は実際の場合を想定して枚数によらず2.138 N一定とした。

また、トレーシングペーパー、新聞紙などについても実験を行ったがいずれも同様な傾向を示した。また f_1 , f_3 はシートの面密度により異なるので、面密度が大きく異なるシートに適用する際にはしきい値の電圧と共に見直す必要がある。

なお、4枚以上についての実験結果は、誤送されることが現実的に考えにくいのでここでは割愛した。

次にセンサにとって最も過酷な測定対象として紙幣について実験した結果を示す。現金自動支払機などの紙幣を自動計数する機械では新しい紙幣と流通した紙幣とが混合した状態で使用され特に流通した紙幣におけるしわや折り目などが枚数の検出に悪影響を及ぼす

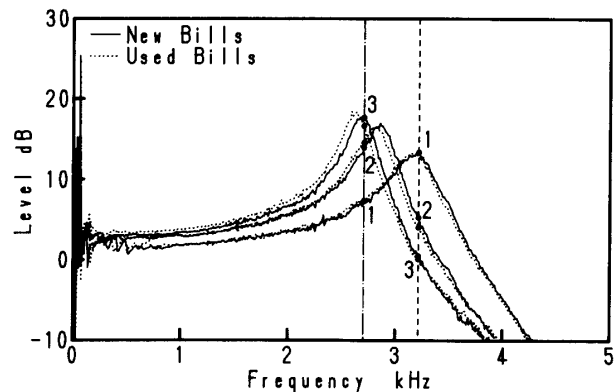
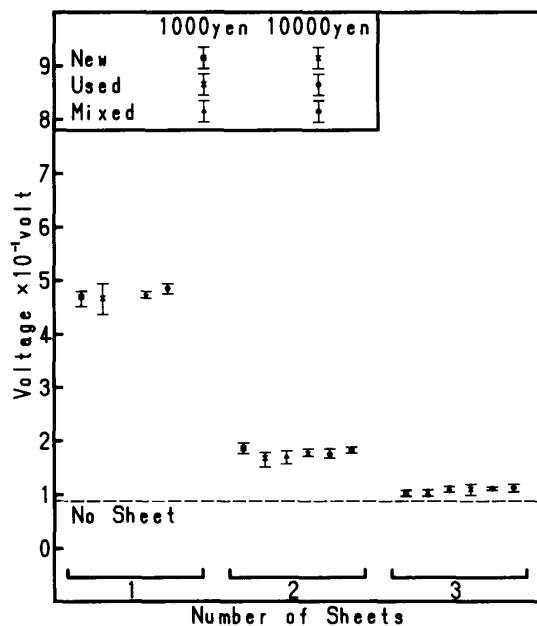
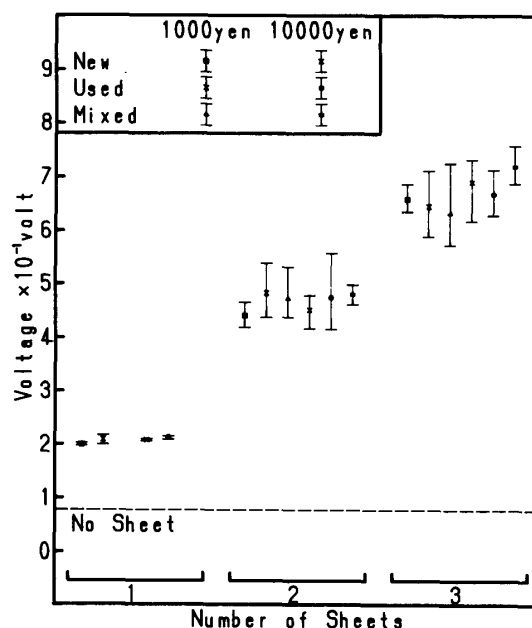


図10 各枚数の周波数応答(千円紙幣)

図 11 f_1 による各枚数時の電圧 (千円, 一万円紙幣)図 12 f_3 による各枚数時の電圧 (千円, 一万円紙幣)

と考えられる。新しい紙幣と流通した紙幣を比較すると汚れや手の脂などにより流通した紙幣のほうが若干重く、新しい紙幣の平均値より面密度で $0.002 \sim 0.008 \text{ kg/m}^2$ 程度大きかった。このような不確定要素の多い中での枚数検出は本センサの実用化を考える上で興味ある問題である。

図 10 は新しい千円紙幣および流通した千円紙幣について 1 枚から 3 枚重ねた状態の伝達関数の周波数応答の測定結果である。新しい紙幣 (実線) の場合の共振周波数は f_1 が 3212.5 Hz であり、 f_3 が 2700 Hz であった。紙幣の面密度は新しい紙幣の場合約 0.084 kg/m^2 であり、流通した紙幣の場合約 0.088 kg/m^2 である。

単一周波数を用いた場合のスペクトルは省略するが用いた周波数以外にも若干のピークが励起された。実際の検出時これらの影響はフィルタにより帯域外の雑音と共に排除される。実験ではマイクが拾う音圧レベルは 80 dB 前後であった。スピーカの入力はまだ余裕があるが、使用する周波数における暗騒音レベルは一般に高いため実機では何らかの対策が必要となろう。また、周波数応答曲線は音速に依存し 1°C 当たり 0.18% の割合で周波数軸方向にシフトする。 $\pm 10^\circ\text{C}$ 程度の温度変化によるシフトは数十 Hz 程度であり図 10 からわかるように検出には問題ない。しかし実機では $\pm 30^\circ\text{C}$ の条件を要求されることもしばしばあるのでそのような場合には環境温度に連動させて f_1 あるいは f_3 をシフトさせる (何段階かのステップ状で十分

である) 必要がある。

図 11 は新しい千円紙幣の f_1 を、図 12 は新しい千円紙幣の f_3 を用いて千円および一万円紙幣について枚数検出を行った結果をそれぞれ示す。一万円紙幣と千円紙幣とは紙質は異なるが面密度はほとんど等しいため両者の共振周波数はほぼ等しく、検出の際用いる周波数も同一とした。流通した紙幣の場合および新しい紙幣と流通した紙幣が重なった場合についても、用いる周波数は同一とした。図 11, 12 いずれの場合についても紙幣が 1 枚のときには電圧は安定しており、新しい紙幣と流通した紙幣が混合した状態でも問題なく複数枚誤送の検出が可能である。

6. 結 言

シートの枚数を周波数応答に対応させた非接触枚数検出法を考案し、装置を試作し、基礎的実験および理論解析を行い、次の結果を得た。

- (1) 音響系の周波数応答はシートの枚数に関わらずシートの合計の面密度に依存する。
- (2) シートの枚数の変化による音響系の周波数応答の違いを利用してリアルタイムで枚数の検出ができる見通しを得た。この方法では、信号源は簡単な発振器で済み、出力は電圧で取出すことができる。
- (3) この方法によると、検出部を非接触にできる。

今後は、シートが移動している場合について実験を行う予定である。

本研究を進めるにあたり、株式会社日立製作所中条
工場のご援助を賜った。ここに感謝の意を表す。

文 献

- (1) 坂本・一宮, 機論, 57-535, C (1991), 780.
 - (2) 須山・平田, 音響誌, 35 (1979), 152.
 - (3) 早坂・吉川, 音響振動論, (1974), 700, 丸善.
 - (4) 文献(3)の627ページ.
 - (5) Benade, A. H., *J. Acoust. Soc. Am.*, 41 (1967), 1609.
-