音響伝播特性を利用したシート状材料の力学特性の計測

繊維高分子材料研究所 新 海 克 彦
 " 渋 谷 淳 夫
 " 相 坂 登 (会員)

Measurement for Mechanical Property of Sheets by Acoustic Transmission

Katsuhiko Shinkai, Atsuo Shibuya and Noboru Aisaka

Research Institute for Polymers and Textiles, Tsukuba, Ibaraki

Abstract

A way of measurement of sheets such as fabrics or films for quality control in manufacturing processes was investigated. This way of measurement should be nondestructive, because of the constraint that the measurement has to be done within the process. Fundamental knowledge of this way of measurement by acoustic transmission was acquired to establish an method of measurement in the processing line.

It was investigated by experiments on what the velocity of sound in sheets depends and does not depend.

(1) In case of fabrics, the velocity of sound depends on the structure and the state of tension, and not on the length of fiber.

(2) In case of films, the velocity of sound depends on the crystallinity, and not on the quantity of filler nor the thickness of films.

(Received May 31, 1989)

摘 要

目的 布やフィルム等のシート状の材料の、加工処理工程での品質管理を行うための計測法について検討する。

インラインでの計測という制約があるため、非破壊計測法の1つである音響伝播特性を用いた、インライン計測法を確立するための基礎的な知見を得ることを目的とする。

成果 シート状の物体の音響伝播特性の中で音速に注目し、音速が何に依存し何に依存しないかを実験により明らかにした。以下にその主な成果を示す。

(1) 布の場合、音響伝播速度は織組織、張力状態に依存し、短繊維系と長繊維系の布では差は認められない。

(2) フィルムの場合、音速は結晶化度に依存し、充填剤の量、フィルムの厚さには依存しない。

1. はじめに

材料の力学的特性を評価するためには、引っ張り試験機などを用いて、主として破壊試験に用いる方法を用いているが、最近ではX線技術、レーザ技術、超音波技術などの発展により、非破壊試験、非破壊検査、さらにより高度な非破壊評価(予測)技術への展開が予想される。非破壊試験の特徴は単に材料の試験片を非破壊で計測するばかりでなく、イ

ンラインでの評価。即ち、機器や設備の構成要素として組み込まれている被測定対象物を、単独に取り出すことなく稼働中に計測、診断、評価できる点にあるといえる。フィルム、ゴム、ホームラバー、布などのようなシート状材料の中を通過する音の速度や吸収の程度が材料の物性と関係があり、粘弾性を測定する手段としてすでに知られている。

音響特性を利用した計測には、超音波顕微鏡を始めとするギガヘルツオーダーのミクロ的な材料物性

の研究^{1,2)}, メガヘルツオーダーの固体材料, 生体組織の探傷法や物性の研究^{3,4,5)}, 数キロヘルツから1メガヘルツ程度の比較的柔らかい材料の研究^{6,7)}が広く進められている。

一般に, 材料の中を通過する音響伝播特性や減衰特性はその周波数に依存する。従って, 布やフィルムなどの柔らかい材料を測定対象にした場合, 比較的低い周波数が選ばれる。

本報告では, 比較的低周波の音響振動を用いて, 布やフィルムなどのシート状材料の加工処理工程での品質管理をインラインでの制約下で, しかも非破壊で行うための計測法について検討するため, 非破壊計測手段として音響伝播特性を用い, 異なった素材を用いた布及び結晶化度, 充填剤の充填率, 厚さを変えたポリエチレンフィルムを用いてシート状材料の中を通過する音響伝播速度から力学的特性を計測する方法について検討した。

2. 試料及び実験方法

2.1 試料

実験に使用した布の試料は, 異なった素材を用いた平織の布地6種類(綿織物, 麻織物, 毛織物, 絹織物, ナイロン織物, ポリエステル織物)及びよこ糸はポリエステルスパン糸100%で, たて糸に9種類(綿糸, ナイロンフィラメント糸, ビニロン紡績糸, アセテートフィラメント糸, 梳毛糸, レーヨンフィラメント糸, アクリル紡績糸, 生糸, ポリエステル紡績糸)の異なった素材を用いた綾織の布地を用いた。それぞれの試料の諸元を表1, 表2に示す。又, フィルムの試料は, ポリエチレンフィルムを用い, 厚さを0.03 mm~0.036 mm とほぼ一定にし, 結晶化度を35.3%~64.3%と変化させたフィルムをAグループとし, 厚さ, 結晶化度を一定にし, 充

Table 1 Fabric details (Plain)

Sample	Mixture ratio (%)	Weave	Yarn counts (tex)		Density (threads/cm)		Weight (g/cm ²)	Thickness (cm)
			Warp	Weft	Warp	Weft		
1. Cotton(S)	Warp, Weft 100	Plain	20.0	16.0	28.2	27.0	1.00×10 ⁻²	2.65×10 ⁻²
2. Ramie(S)			20.6	20.6	31.0	28.0	1.17	2.27
3. Wool(S)			20.4	15.2	29.0	27.0	1.02	2.93
4. Silk(F)			5.5	6.7	60.0	41.0	0.62	1.36
5. Nylon(F)			7.8	7.8	42.8	30.0	0.59	0.83
6. Polyester(F)			8.3	8.3	42.0	38.2	0.65	0.76

Note S : Spun
F : Filament

Table 2 Fabric details (Twill)

Sample	Mixture ratio (%)	Weave	Yarn counts (tex)		Density (threads/cm)	Weight (g/cm ²)	Thickness (cm)
1. Cotton yarn	Warp 100	2/2Twill	15×2		46.0	1.95×10 ⁻²	5.30×10 ⁻²
2. Nylon filament yarn			12×2		48.0	1.95	3.55
3. Vinyon spun yarn			15×2		45.0	2.09	5.12
4. Acetate filament yarn			13×2		46.0	1.96	4.20
5. Wool yarn			17×2		46.0	2.24	6.17
6. Rayon filament yarn			13×2		46.0	2.02	4.18
7. Acryl spun yarn			15×2		45.0	2.12	5.32
8. Raw silk			2.3×6×2		46.0	1.70	4.07
9. Polyester spun yarn			15×2		45.0	2.06	5.05
Polyester spun yarn	Weft 100		15×2		19.0		

Table 3 Film details

Group	Sample (No.)	Crystallinity (%)	Filler (parts)	Weight (g/cm ²)	Thickness (mm)	Apparent density (g/cm ³)
A	1	35.3		2.90×10^{-3}	30×10^{-3}	0.966
	2	41.9		2.93	35	0.837
	3	47.3		3.06	36	0.842
	4	55.1		3.08	35	0.880
	5	64.3		2.90	32	0.906
B			CaCO ₃ TiO ₂			
	0F	43.4	0.00 2.80	2.81	30	0.936
	1F	41.4	1.25	2.93	32	0.916
	2F	43.0	2.50	3.06	33	0.927
	3F	40.4	5.00	3.04	32	0.938
	4F	40.4	7.50	3.02	33	0.915
C	1'	42.7		1.73	23	0.752
	2'			3.09	35	0.883
	3'			3.81	42	0.907
	4'			4.32	49	0.882

充填剤の量を1.25部～7.50部（部とは充填剤の重量を樹脂の重量を100とした時の割合）と変化させたフィルムをBグループとし、さらに厚さを23μ～49μと変化させたフィルムをCグループとした。それぞれの試料の諸元を表3に示す。

2.2 実験の方法

材料の横断面を通過する音波パルス速度はその材料のモジュラスの平方根に比例することを利用して材料の動的弾性率を非破壊で求めるため、2点間を通過するのに要する時間を計測し材料の中を通過する音響伝播速度を求めた。音響伝播速度から動的弾性の計算は次式で与えられる。

$$E_d = \rho C^2$$

但し、 C = 音速 (Km/sec.)

$$E_d = \text{動的弾性率}$$

$$\rho = \text{密度又は比重 (g/cm}^3\text{)}$$

又、布やフィルムなどの場合、密度又は比重の測定は非常に難しく真の値は求めにくいので、この実験では、試料の厚さ、試料の重さから密度を求め動的弾性率を計算した。

これらの計算結果と対比するために、引っ張り試験機を用いて静的弾性率 E_s を求めた。

又、2軸引っ張り試験機を用いて布が張力下でどのように音響伝播速度が変わるかを求めた。

それぞれの測定に用いた機器及び測定方法は次のとおりである。

2.2.1 音響伝播速度の測定

音響伝播速度の測定は、図1に示すように、試料置台の上にある試料上に送受信の2個のトランスジューサーを接触させ、送信用トランスジューサーから連続してパルスを送り出し、トランスジューサー間の発信信号と受信信号の時間差から試料の中を伝播する音響速度を求めた。又、音響伝播速度の精度を上げるとともに、試料の中を通過する伝播速度の均一性を調べるためにトランスジューサー間の距離を変化させて、距離の変化と到達時間の変化も求めた。トランスジューサーは圧電性セラミックス水

Fig. 1 Block diagram of the measuring instrument

晶で固有振動数 5 KHz, 発信周波数は 1 / 50 Hz である。

a) 試料の大きさ (布)

試料の大きさは長さ 30 cm × 幅 15 cm とし、それぞれのトランスジューサーを試料の幅の中央に置いて測定した。トランスジューサー間の初期間隔をそれぞれ 25 cm, 20 cm, 15 cm, 10 cm, 5 cm とし、1 cm ずつトランスジューサーの間隔を狭くして 8 点の到達時間から布の中を通過する音響伝播速度を求めた。但し、トランスジューサーの間隔は 2 cm 以下にセットできないので、初期設定が 5 cm の場合だけ 4 点のデータから音響伝播速度を計算した。

b) 試料の大きさ (フィルム)

試料の大きさは長さ 15 cm × 幅 2 cm とし、トランスジューサー間の初期間隔は 3 cm とし、受信用トランスジューサーを 1 cm ずつ移動させて測定し、最大間隔 10 cm までの 8 か所の傾斜から音響伝播速度を求めた。

2.2.2 厚さの測定

柔軟なシート状材料は表面にかかる荷重の状態で厚さが変わるので真の測定は難しい。この実験では試料の厚さの測定を圧縮試験機 KES-FB 3 を用い、加圧面積 2 cm² で、布の場合の厚さは、荷重 50 gf/cm² のときの厚さを用い、フィルムの場合の厚さは、荷重 10 gf/cm² の時の厚さを用いた。従って、試料の密度は、試料の厚さと単位重量から求めた。

2.2.3 引っ張り試験機による静的弾性率の測定

静的弾性率 E_s は定速伸長形引っ張り試験機を用いて、応力・伸びヒステリシス曲線から求めた。布の場合、長さ 10 cm × 幅 1 cm, 最大伸長率 4 % で行い、フィルムの場合、長さ 10 cm × 幅 2 cm, 最大伸長率 2 % で行った。伸長速度は両試料とも 10 mm/min である。

2.2.4 布の伸長下の音響伝播速度の測定方法

この測定は布の試料を対象に実験した。2 軸引っ張り試験機 KES-G 2 を用いて、試料に 1 軸方向に伸長を与え、その張力下で布の中を通過する伝播速度がどのように変わるかを求めた。

1 軸方向に伸長を与えた実験では、試料の大きさは、軸方向の有効長は 11.5 cm, 幅方向は 13.5 cm である。伸長の程度は 0 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm の 5 段階とした。

又、布の場合、伸長を与えると幅方向が収縮するので、幅側にチャックを取り付け、幅方向の長さを 13.5 cm に固定した場合の比較実験も行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 音響伝播速度の測定条件の検討

布の特性が音響伝播の減衰特性にどのように影響するかを調べるため、音響伝播速度が測定できるトランスジューサー間の最大間隔を測定した。

試料は綿織物、毛織物、ナイロン織物の平織を用い、たて糸方向では綿織物が 25 cm, ナイロン織物が 20 cm, 毛織物が 15 cm であった。又、よこ糸方向ではナイロン織物が 20 cm, 綿織物及び毛織物が 10 cm であった。さらに、バイヤス方向では綿織物で 5 cm であったが、毛織物では測定できなかった。最大到達距離は送信信号のエネルギーの大きさ及び音響伝播過程における波形の減衰特性に左右される。従って、送信源のエネルギーが同じならば、最大到達距離は生地のも力学特性にも左右されることになり、実験結果でもそのことを示している。

試料の中を通過する音響伝播速度の計算は 2 点間の距離とその間を通過するのに要する時間から計算できるが、より正確に測定するために 2 点間の距離を変化させ、到達時間の変化をグラフ化し、その勾配から音響伝播速度を計算する。図 2 は平織の綿織物、毛織物、ナイロン織物を用いた時の 2 点間の距離と通過するのに要する時間の関係を表したものである。図 3 は A グループのポリエチレンフィルムについて、2 点間の距離と通過するのに要する時間の関係を表したものである。布、フィルムとも非常によく直線上に乗っていることが分かる。このことから、布やフィルムなどの同一方向に対し均一な媒

Fig. 2 Relation between distance and time of transmission of fabrics

Fig. 3 Relation between distance and time of transmission of a film

体の中を通過する音響振動波形は等速で伝播していくことが分かる。

3.2 布の中を通過する音響伝播速度及び動的弾性率

音響伝播速度及び密度から表1に示した6種類の平織の試料の動的弾性率を求めた。その結果を表4に示す。布の中を通過する音響伝達速度は、この実験では750 m/sec～270 m/secの範囲であった。綿織物、麻織物、毛織物などの短繊維系と絹織物、ナイロン織物、ポリエステル織物などの長繊維系との基本的な差は認められなかった。表2に示した綾織の9種類の試料の場合の布の中を通過する音響伝播速度との動的弾性率の結果を表5に示す。この結果では380 m/sec～160 m/secの範囲の音響伝播速度であった。これは、密度の違いはあるものの平織に比し音響伝播速度はより遅い傾向にある。

動的弾性率では、見かけ上の密度からの計算なので絶対的な値にはならないが、平織に比べ綾織の方がより動的弾性率が小さいことが分かる。

表3に示した14種類のポリエチレンフィルムの試料の場合のフィルムの中を通過する音響伝播速度と動的弾性率の結果を表6に示す。この結果では、1,380 m/sec～550 m/secの範囲の音響伝播速度であった。Aグループにおける結晶化度と音響伝播速

Table 4 Results of measurements (Plain)

Sample	Sound velocity (km/sec)	Dynamic modulus of elasticity (dynes/cm ²)	Apparent Young's modulus (dynes/cm ²)
1. Cotton(S)	0.75	2.132×10 ⁹	0.064×10 ⁹
2. Ramie(S)	0.36	0.670	0.046
3. Wool(S)	0.32	0.355	0.011
4. Silk(F)	0.27	0.333	0.024
5. Nylon(F)	0.75	3.998	0.367
6. Polyester(F)	0.80	5.474	1.103

Table 5 Results of measurements (Twill)

Sample	Sound velocity (km/sec)	Dynamic modulus of elasticity (dynes/cm ²)	Apparent Young's modulus (dynes/cm ²)
1. Cotton yarn	0.34	0.426×10 ⁹	0.168×10 ⁹
2. Nylon filament yarn	0.38	0.794	0.380
3. Vinyon spun yarn	0.31	0.392	0.123
4. Acetate filament yarn	0.20	0.187	0.064
5. Wool yarn	0.16	0.093	0.022
6. Rayon filament yarn	0.19	0.174	0.046
7. Acryl spun yarn	0.22	0.193	0.051
8. Raw silk	0.26	0.282	0.122
9. Polyester spun yarn	0.24	0.235	0.076

Table 6 Results of measurements (Film)

Group	Sample (No.)	Sound velocity (km/sec)	Dynamic modulus of elasticity (dynes/cm ²)	Apparent Young's modulus (dynes/cm ²)
A	1	0.55	2.922×10 ⁹	0.901×10 ⁹
	2	0.77	4.962	2.884
	3	0.89	6.669	3.076
	4	1.06	9.887	5.576
	5	1.37	17.005	14.491
B	0F	0.81	6.141	2.237
	1F	0.83	6.310	2.262
	2F	0.84	6.541	2.338
	3F	0.83	6.462	2.018
	4F	0.82	6.152	2.239
C	1'	0.78	4.576	
	2'	0.77	5.235	
	3'	0.78	5.518	
	4'	0.79	5.505	

度では図4に示すように、結晶化度が高くなるとほぼ直線的に音響伝播速度も速くなる。又、Aグループは密度を同一にしてあるので、図5に示す様に結晶化度が高くなるに従って動的弾性率も高くなることが分かる。Bグループでの充填剤の含有量の変化に対しては音響伝播速度は変わらなかった。フィルムの厚さを変えたCグループでは、図6に示す様に音響伝播速度には影響しないことが分かる。

又、必ずしも対応関係はないが、インラインでの静的弾性率の計測の可能性を検討するために、定速

伸長形引っ張り試験機を用いて静的弾性率の相関性を検討した。図7は素材の異なった平織の試料の静的弾性率と動的弾性率の関係、図8は綾織の試料の静的弾性率と動的弾性率の関係、図9にポリエチレン試料の静的弾性率と動的弾性率の関係を図示したものである。それぞれの図において相関係数が0.9、0.99、0.98であり、実験結果から音響伝播速度の計測により、ある程度の確度で静的弾性率も推定できる。布の動的弾性率と静的弾性率の関係は、音響

Fig. 4 Relation between crystallinity and sound velocity of films

Fig. 5 Relation between crystallinity and dynamic modulus of elasticity of films

Fig. 6 Relation between thickness and sound velocity of films

Fig. 7 Relation between dynamic modules of elasticity and apparent Young's modulus (Plain fabrics)

伝播速度ではなく、メカニカルな正弦波振動実験 (50 Hz) により調べられており、同様の結果が得られている⁸⁾。

3.3 張力下での音響伝播速度の変化

2軸引っ張り試験機を用いた布に張力を与えた場合の音響伝播速度の測定では、布の幅方向を固定しないでフリーにした場合、即ち、引っ張られるにつれて幅方向が縮まっていく場合の伸びと音響伝播速度の関係を図10に示し、幅方向をチャックで13.5 cmに固定した場合の実験結果を図11に示す。

本実験では、いままでの実験方法と異なって、布を試料台の上に置くことをせず空中で支持させた状態で計測を行った。従って図10における伸長距離ゼ

Fig. 8 Relation between dynamic modules of elasticity and apparent Young's modulus (Twill fabrics)

Fig. 9 Relation between dynamic modulus of elasticity and apparent Young's modulus of films

ロの状態でも表4の結果より一様に音響伝播速度が速くなっている。図10、図11ともに伸長距離を長くすると(張力を大きくすると)音響伝播速度が速くなるのが分かる。1軸張力下と2軸張力下での差異はあまり認められなかった。ただ細かく見ると、ナイロン織物を除く他の4つの布について、2軸張力下の方が速度が遅くなっている。音響伝播時間は、距離や張力に依存し、布はたて糸、よこ糸が波状に交錯した構造体であるため、そのメカニズムは複雑である。音響伝播メカニズムについては今後の課題としたい。

Fig. 10 Relation between elongation and sound velocity of fabrics (uniaxial extension)

Fig. 11 Relation between elongation and sound velocity of fabrics (biaxial extension)

4. 結 言

本報告は、布の一時硬化などの加工工程で布の品質をどのように管理するか、又、フィルム製造工程などにおけるフィルムの品質をどのように計測し管理するか、インライン中での計測・評価を行うための非破壊計測の1つである音響伝播特性の中で音響伝播速度に注目し、シート状材料の中を通過する音

響伝播速度が材料特性の何に依存しているかを実験的に明らかにした。従って、目的が品質の区別であり、物理量としと厳密さは追及していない。定性的知見として以下のものが得られた。

- 1) 送信源のエネルギーが一定の場合、最大到達距離は生地依存する。又、音響振動波形は同一方向では等速で伝播する。
- 2) 布の場合、音響伝播速度は織組織、張力状態に依存し、短繊維系と長繊維系の布で差は認められない。
- 3) 動的弾性率と静的弾性率の間にはかなりの相関があり、インラインでの静的弾性率の推定がある程度可能である。
- 4) 1軸張力と2軸張力の状態ではほぼ同じ音響伝播速度となり、音響伝播方向と垂直な張力の影響は少ない。
- 5) フィルムの場合、音響伝播速度は結晶化度に依存し、充填剤の量、厚さには依存しない。
なお、フィルムの場合、音響伝播速度は分子配向度にも依存している。

これらの事実から、インライン中での品質を管理する1方法として音響伝播速度の利用が可能と思われる。但し、試料台の上にある時か、把持状態でどれだけの張力がかかっているかによって音響伝播速度が変化することが分かったので、品質の変化を見極めるには、これらのことに注意が必要である。

参考文献

- 1) 小島誠治; 固体物理, **21**, 73 (1986)
- 2) 中鉢憲賢, 樫引淳一; 応用物理, **55**, 51 (1986)
- 3) C. L. Choy and W. P. Leung; J. Polym. Sci. Polym. Phys. Ed., **23**, 1975 (1985)
- 4) 八田一郎, 田村陽次郎, 松田隆; 生物物理, **22**, 126 (1982)
- 5) 内田邦治, 古村一朗, 柏谷英夫; 東芝レビュー, **37**, 600 (1982)
- 6) V. Subramaniam; Indian Text. J., **94**, 12, 43 (1984)
- 7) 長谷川澄子, 中野詔彦, 近田淳雄; 織高研究報告, **154**, 43 (1987)
- 8) 小林茂雄; 織機誌, **24**, 7 (1971)