廃棄ポリエステルコードを素材とする吸音材の成形と吸音特性

倉 橋 直 也*・木 村 照 夫*

Sound Absorbing Property of Porous Material by Using Polyester Fiber Waste

Kurahashi, Naoya*/Kimura, Teruo*

Polyester waste generated from a water jet loom in the weaving process is one of the typical industrial fiber wastes. The development of a recycling system for such fiber wastes has been strongly expected so far. In this study, the recyclability of polyester wastes as a sound absorption material was discussed. As a result, it was cleared that the sound absorption material can be obtained by heated compression molding combined with a PLA binder and fiber wastes, and higher sound absorption properties are obtainable if the defiberization of the waste is increased.

Key words : Recycle/Polyester fiber waste/Porous sound absorbent/Sound absorbing property

1. 緒 言

近年、廃棄物からの資源回収は循環型社会の構築に必要不可欠であり、種々の廃棄物について再資源化に関する技術開発が進められている¹⁾。しかし、廃棄繊維製品についての再資源化技術の開発は停滞しており、年間約 200 万 t 排出される繊維廃材に対してのリサイクル率は 10% 程度に留まっている²⁾。

一方で、近年になり騒音が社会的な問題として認識され、その対策としての防音材の開発が広く行われている³⁾。特に、多孔質型吸音材は軽量性と防音性を兼備していることから広い用途に利用されている。一般には、グラスウールやロックウールに代表される無機繊維が、その不燃性を生かして建材として多用されているが、資源循環型社会構築の必要性から、より環境負荷を低減し得る他素材への転換が模索されている。種々の素材の中で、ポリエステル (PET) 繊維については化学的な手法による再生が高収率で可能であり、繰り返しリサイクル性に富む材料として注目されている⁴⁾。

以上の背景から、本研究では PET 繊維廃材の一例として、PET 織布の製造工程中に大量に排出される工程屑 (捨て耳) のリサイクル用途開発と環境調和型の吸音材の開発

を目的に、PET 捨て耳の多孔質吸音材の素材としてのリサイクル性に着目した。

捨て耳は工程屑であり、後述のように特殊な形状を持つことから、これを繊維多孔質材の安定した形状の素材として利用する為に反毛化を行い、さらには成形品形状の保持を目的として熱可塑性繊維をバインダーとして用いた。ここで、反毛 (開織) とは織布や繊維束等の状態にある繊維材料を交綿機 (Carding machine) を用いて繊維同士が均一かつ緩やかに交絡した棉 (ウェブ) にする事を意味する。本報では、特に捨て耳の反毛化 (開織状態) が成形品の吸音特性に及ぼす影響を調べ、吸音材としての最適な開織状態を考察した。

2. 試料の作製

2.1 使用材料

成形素材として用いる捨て耳は、Fig.1(a)に示すウォータージェット織機で PET 繊維織物を生産する際に生じ、これは連続した PET 製のキャッチャー糸に、長さ数 cm の切断された緯糸が絡まった工程屑である。その構造の模式図を Fig.1(b)に示す。捨て耳の状態は、織物の種類により異なることから、本報では種々の捨て耳に対応するために Fig.2 に示すような密度の異なる 3 種類の捨て耳を実験対象とした。すなわち、平均直径が 3 mm (Cord A)、5 mm (Cord B) 及び 8 mm (Cord C) の 3 種類の捨て耳を用いた。ただし、これらの捨て耳を構成する PET 繊維は、いずれも繊維径が 26 μm の同一のものである。ここで、捨て耳が円筒形状であると仮定すると、Cord A, B, C の捨て耳密度は、それぞれ 56.8 kg/m³、39.5 kg/m³ 及び

* 京都工芸繊維大学工芸科学研究科先端ファイブ科学専攻
Kyoto Institute of Technology Division of Advanced Fibro Science
京都市左京区松ヶ崎御所海道町 (〒606-8585)
Goshokaicho-cho, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto, Japan
2009. 6. 5 受理

(a) Aspect of water jet loom and generation of polyester fiber waste

(b) Schematic model of polyester fiber waste

Fig.1 Information of polyester fiber waste (Cord)

23.4 kg/m³となる。キャッチャー糸に対して緯糸が密に絡まっている場合には捨て耳密度は大きくなり、緩やかに絡まっている場合には小さくなる。

吸音材としての多孔質形状を保持する為のバインダーとしては、平均繊維長 65 mm, 平均繊維直径 23 μm, 融点 163.5℃ の PLA (Poly lactic acid) 繊維 (ユニチカファイバー製, テラマック) を用いた。

2.2 試料の成形

捨て耳の反毛化には布を棉化する時に一般的に用いられているローラー型シリンドーカード機 (大和工機製) を用いた。ここで、用いたカード機は6つのシリンドーロールと1つのマスターロールから構成される。各ロール表面には微小な刃が付いており、回転ロール間を開織対象とする材料が通過する事で、繊維組織が分解され開織を行う事が出来る。その外観を Fig.3 に示す。捨て耳は連続的なコード状であることから、直接カード機に投入するとシリンドーロールへの巻き付きが生じ、目付けの安定したウェブを得ることが困難であった。そこで、捨て耳を予めキャッチャー糸長手方向に 50~60 mm 程度の長さに裁断した。この裁断物と先述のバインダー繊維を仮混ぜした後にローラー型カードマシンに投入し、捨て耳とバインダー繊維が混合したウェブを作成した。Fig.4 に得られたウェブの様子を示す。このウェブを所定枚数積層することで予備成形体とした。ここで、開織状態が成形品の吸音特性に及ぼす影響を明確にする為に、カーディング回数 (Carding time, 以降 CT と称する) を 1 回 (CT 1), 3 回 (CT 3) 及び 5 回 (CT 5) とする予備成形体を作成した。バインダー含有量は、全ての予備成形体について総重量に対して 30 wt % で一定とした。形状を固定化させる為には、予備成形体をホットプレス機内に設置し、上下面の加熱盤の温度を

Fig.2 Aspect of polyester fiber waste used

Fig.3 Carding machine

Fig.4 Aspect of web carded

165℃ として加熱圧縮成形を行った。ここで、試料内に設置した熱電対による測定温度が一定となった後、直ちにヒーターの電源を切り、圧力を保持したまま 60℃ 以下になるまで自然放冷した。成形品の厚みはアルミスペーサーを用いて 50 mm となるように調整した。Fig.5 は成形品の成形手順を整理したものである。実験に用いた成形品の

Fig. 5 Molding process

Table 1 Sample specifications

Sample	Material	Carding time	Thickness (mm)	Density (kg/m ³)
A 1	Cord A	1	50	32.1
A 3		3	50	32.2
A 5		5	50	32.4
B 1	Cord B	1	50	32.0
B 3		3	50	31.8
B 5		5	50	32.4
C 1	Cord C	1	50	31.8
C 3		3	50	32.1
C 5		5	50	32.3

一覧を Table 1 に示す。本報で対象とする成形品密度はいずれも $32 \pm 0.4 \text{ kg/m}^3$ に揃えてある。以降は各成形品の呼称に表中の Sample 記号を用いる。

3. 実験及び評価方法

3.1 開繊状態の観察

多孔質体の内部構造は、音波の伝播経路や流体通過時の流路を構成することから、吸音特性及び通気特性に対して本質的な影響を及ぼす事が知られている⁵⁾。本報での予備成形体（ウェブ）の作成時に、捨て耳密度及び CT 数により捨て耳の開繊状態が大きく異なる様子が観察された。成形品は、ウェブを積層して成形する為に、ウェブ作成時の開繊状態が成形品の内部構造に直接反映される。後述のように本報では、音波は成形品の厚み方向に伝播する事から、ウェブ内の捨て耳の開繊状態が成形品の吸音特性に大きく影響を及ぼすものと考えられる。

そこで、捨て耳密度と CT 数が開繊状態に及ぼす影響を明確にする為に蛍光染色マッピング法を用いてウェブの表面観察を行った。すなわち、予め捨て耳及びバインダー織

維を蛍光性染料及び黒色染料でそれぞれ染色し、種々の CT 数のウェブを作成し、暗室内で紫外線を照射する事によって表面観察を行った。

3.2 通気抵抗測定

多孔質型の吸音材料は、微視的には材料中に小さな穴が連続的に存在している。多孔質材の吸音効果は、音圧により媒質に与えられた運動エネルギーが、粒子と穴の壁面との摩擦によって減衰される事で生じる。同様に、多孔質材における通気抵抗は、材料を通過する流体と壁面との摩擦により発生する。このことから、多孔質材料の吸音特性と材料の通気抵抗には相関性があることが Delany⁶⁾や Miki⁷⁾により明らかにされている。また、通気抵抗の測定は簡便であることから、多孔質吸音材料の品質指標としても適しており、JIS A 6303 ではグラスウール吸音材の品質を示すパラメータとして規定している。このことから、本報の成形品についても通気抵抗値と吸音特性の相関性を検討するためにカトーテック社製の KES-F 8-AP 1 を用いて通気抵抗値 σ の測定を行った。通気抵抗値は (1) 式により表される。

$$\sigma = \Delta P / V \quad (1)$$

すなわち、多孔質材の通気抵抗は、材料の表面に対して垂直方向に流入する空気の流れ V と、材料の両端面における圧力の差 ΔP を用いる事で導出出来る。今回の実験では、流入空気流速は 4 cm/s 一定とし ΔP を測定した。被測定物は、後述する吸音特性の測定に用いた試料と同一の試料を用いた。

3.3 吸音性能測定

現在、材料の吸音性能の評価には一般的には吸音率が用いられている。吸音率の定量的な評価方法は、垂直入射吸音率測定及び残響室法吸音率測定が一般的であり、本報では垂直入射吸音率測定法を採用した。この測定法には、定在波比法と伝達関数法があるが、近年では、吸音率だけではなくより簡便に材料の固有の特性値である特性インピーダンスと伝播定数も求めることができる伝達関数法が主流となっている。

そこで、本報では伝達関数法⁸⁾を用いて吸音率 α を導出し、この値を対象に吸音性能の評価を行った。試料の背面が剛体に密着している条件下では吸音率 α と特性インピーダンス Z_c 及び伝播定数 γ の間には (2)、(3) 式の関係がある。

$$Z = Z_c \cdot \text{Coth}(\gamma \cdot l) \quad (2)$$

$$\alpha = 1 - R^2 = 1 - \left| \frac{Z \cdot \rho c^{-1} - 1}{Z \cdot \rho c^{-1} + 1} \right|^2 \quad (3)$$

ここで、 Z は音の入射面における比音響インピーダンス、 l は試料厚さ、 R は反射係数、 ρ は空気密度、 c は空気中の音速を表している。すなわち、伝達関数法における測定では、反射係数 R を測定することにより吸音率 α を得ることが出来る。

吸音率の測定は JIS 1405-2（伝達関数法による垂直入射

吸音率測定法)に基づいて行った。測定機材にはB&K社製 Type 4206 のインピーダンス管を、音響特性の解析には松下テクノレーディング社製の解析ソフト MS 1201 を用いた。性能評価は1/3 オクターヴ中心周波数において行い、測定条件は試料背面に設置された剛壁面で音波が完全反射すると考える剛壁密着とした。

4. 結果と考察

4.1 開繊状態

各 CT 数におけるウェブの開繊状態を蛍光染色マッピング法によって観察した結果を Fig.6 に示す。ここで、図中の鮮明な白色部が捨て耳、鮮明な黒色部がバインダー繊維を表している。図より、程度の差は見られるものの、CT 数が1回の場合 (A1, B1, C1) では、いずれの Cord を用いた場合でも、鮮明な白色の塊がウェブ内に点在している様子が見られ、これは捨て耳の開繊不足を示している。しかし、CT 数が増加する事によりいずれのウェブにおいても明らかな開繊不足部が減少している。但し、捨て耳密度の小さな Cord C については、CT 1 の場合においても比較的良好な開繊状態が得られている。Fig.7(a), (b)は、それぞれ開繊不足部と開繊が進んだ部分の詳細な様子を示している。図より明らかなように、開繊不足の場合には、キャッチャー糸から緯糸が分離されているものの、キャッチャー糸は依然として繊維束状に残っている事が分かる。このような状態では、繊維が局所的に密に集合している為に繊維束を構成する繊維の多くは、音波もしくは流体の通過経路としての空隙部に露出しておらず、従って吸音率や通気性に大きく影響すると考えられる繊維表面積は、成形品に含まれる PET 繊維全量に対して小さくなっているものと考えられる。一方で、捨て耳の開繊が良好な場合には、キャッチャー糸も単繊維状に解されており、捨て耳を構成する PET 繊維とバインダー繊維が均一に交絡したネットワーク状となり、このような場合には、成形品内部の空隙部に接触する繊維が増加し、成形品に含まれる PET 繊維全量に対する繊維表面積は大きくなっているものと考えられる。

4.2 通気抵抗値

CT 数と成形品の通気抵抗値との関係を Fig.8 に示す。図より明らかなように、CT 数が増加する事で、いずれの捨て耳密度による成形品についても通気抵抗値が増加することが分かる。また、CT 数が少ないと通気抵抗値は捨て耳密度の大きな Cord C で大きく密度の小さな Cord A で小さくなるが、CT 数の増加と共にその差は小さくなり、CT 5 において各 Cord の通気抵抗値はほぼ一定値となる事が分かる。多孔質体の通気特性は、成形品内部を通過する流体と繊維間の接触面積に大きく依存する。従って、先述のように、CT 数の増加により捨て耳の開繊が進み、通過する流体に接触する繊維表面積が増加することによって通気抵抗値も大きくなったものと考えられる。また、捨て耳密度が小さい場合には、前節における観察からも CT 数が1回であっても捨て耳の開繊が進み繊維表面積が大きくなり通気抵抗値は比較的大きく、一方、密度が大きい場合には CT 数が1回では捨て耳の開繊が不足する為に繊維表面積が小さくなり、通気抵抗値が小さくなったものと考え

Fig.6 Observation of carding condition

(a) Discarded part

(b) Well carded part

Fig.7 Microscopic observation of web

られる。しかし、CT 数が増加する事によって捨て耳密度に関わらず開繊状態が一樣な状態となる為に、繊維表面積の差異が小さくなり CT 数が5回となった時には捨て耳密度に関わらず通気抵抗値がほぼ同一の値を示したものと考

Fig.8 Relation between flow resistivity and carding time

えられる。

これらのことから、ウェブの通気抵抗値を増大させるには開繊工程を十分に行う必要があり、特に密度の大きな捨て耳に対しては開繊工程を繰り返す必要のある事が明らかである。

4.3 吸音性能

Fig. 9～11 は、成形品の吸音率と周波数との関係を CT 数をパラメータとして各 Cord 毎に示している。図より明らかなように、いずれの Cord を用いた場合においても吸音率は周波数の増加に伴って単調に増加しており、捨て耳を素材とする吸音材は多孔質型吸音材の典型的な特性を有する事が明らかである。

Fig. 12～14 は吸音率に及ぼす CT 数の影響をそれぞれ周波数が 800 Hz、1250 Hz 及び 1600 Hz の場合を例に示している。図より明らかなように、いずれの周波数においても吸音率は CT 数の増加に伴って増加し、その増加割合は捨て耳密度が高い程小さくなる。また、いずれの周波数においても CT 数の増加に伴って吸音率が一定値に収束する事が分かる。これらの傾向は前述の通気抵抗値における傾向と良く一致している。

そこで、Fig 15 に吸音率と通気抵抗値の関係を周波数が 800 Hz、1250 Hz 及び 1600 Hz の場合を例に表している。同時に、各通気抵抗値での MIKI モデル及び Delany-Bazley モデルによる予測吸音率も併せて示してある。

ここで、MIKI モデル及び Delany-Bazley モデルは様々な繊維多孔質材料の吸音に関する特性値と通気抵抗値との相関図から回帰的にフィット関数を導きだしたモデルであり、通気抵抗値をパラメータとして簡便に繊維多孔質材料の吸音率を定性的に予測する事が出来ると言われている⁹⁾。本報では、吸音率の予測に際し、パラメータとなる通気抵抗値は前節での測定によって得られた結果を用いた。MIKI モデル及び Delany-Bazley モデルは、(4)～(9)式に示す共通した形の線形方程式により表されるが、それぞれ試験条件の違いや回帰フィットの方式が違う為に(6)～(9)式内の係数及び乗数 (δ , ϕ , η , ε , p , q , r , s) が異なっている。両モデルの係数及び乗数を整理したものを Table 2 に示す。それぞれのモデルから得られた特性インピーダ

Fig.9 Sound absorption coefficient at various carding time (cord A)

Fig.10 Sound absorption coefficient at various carding time (cord B)

Fig.11 Sound absorption coefficient at various carding time (cord C)

Fig. 12 Relation between sound absorption coefficient and carding time (800 Hz)

Fig. 13 Relation between sound absorption coefficient and carding time (1250 Hz)

Fig. 14 Relation between sound absorption coefficient and carding time (1600 Hz)

Table 2 Parameters in MIKI and Delany prediction model

	δ	ϕ	η	ε	p	q	r	s
MIKI	0.0699	-0.632	0.107	-0.632	0.160	-0.618	0.109	-0.618
Delany	0.0497	-0.754	0.0758	-0.732	0.169	-0.595	0.0858	-0.700

ンス Z_c 及び伝播定数 γ を(2)式に代入することで比音響インピーダンス Z を得ることが出来、(3)式にこれを代入することで垂直入射吸音率 α を導出することが出来る。

$$Z_c = \rho c \{X(f) + jY(f)\} \quad (4)$$

$$\gamma = A(f) + jB(f) \quad (5)$$

$$X(f) = 1 + \delta \left(\frac{f}{\sigma} \right)^\eta \quad (6)$$

$$Y(f) = -\eta \left(\frac{f}{\sigma} \right)^\varepsilon \quad (7)$$

$$A(f) = \left(\frac{\omega}{c} \right) \left[p \left(\frac{f}{\sigma} \right)^q \right] \quad (8)$$

$$B(f) = \left(\frac{\omega}{c} \right) \left[1 + r \left(\frac{f}{\sigma} \right)^s \right] \quad (9)$$

ここで、 σ は通気抵抗値、 f は周波数、 ω は角周波数である。 ρ 及び c の値には、20℃ における空気密度 (1.2 kg/m³) 及び音速 (346 m/s) を用いた。

Fig. 15 より明らかなように、本報で成形した材料に関する各プロット点は各周波数において CT 数に関わらず一つの曲線で近似する事が出来る。また、実測値と二つのモデルによる予測値の近似曲線を比較すると、これらの示す傾向は通気抵抗値の増加と共に吸音率が増加する点ではほぼ一致している事が分かる。すなわち、本報の捨て耳を素材とする成形品は、一般的な繊維多孔質吸音材において成り立つ通気抵抗値と吸音性能の関係が、同様に成り立つ材料であることが明らかである。尚、予測値と実測値には定量的な相違が見られるが、これは先述のように、これらの予測モデルは、種々の通気抵抗値及び吸音率の実測の結果から回帰的に構築されたモデルであり、予測対象とする材料の通気抵抗値以外のパラメータが考慮されていない為である。

最後に、本研究において捨て耳を素材として成形を行った多孔質吸音材の吸音性能の位置付けを明確にする為に、実験範囲内で最も高い吸音率を示した C5 材と、Table 3 に示す現在広く用いられている各種 (GW: グラスウール, EPDM: エチレンプロピレンゴム, PU: ポリウレタン) の吸音構造体との吸音率を比較した結果を Fig. 16 に示す。なお、ここで各種の吸音構造体は繊維径や材料構造、さらには密度がそれぞれに異なっており、それぞれのパラメータが複雑に吸音率に影響している為に直接的な比較は出来な

Fig. 15 Relation between sound absorption coefficient and flow resistivity (comparison of measured value and predicted value)

Fig. 16 Comparison of sound absorbing level

Table 3 Specifications of sound absorber generally used

Sample	Structure Type	Density (kg/m³)	Fiber Diameter (μm)
GW	Fiber	32	10
EPDM	Foam	48	-
PU	Sheet	128	-

いが、本報で成形した吸音材のレベルを知ることが出来る。

図より明らかなように、本報で成形した材料の吸音性能は従来品の吸音性能に対して大きな優位性を持つとは言えないものの、廃材利用及び易リサイクル性の観点から、本成形品は環境に優しい汎用的な吸音材としての利用価値を有するものと考えられる。

5. 結 言

本報ではポリエステル (PET) 織物の製造時に発生する捨て耳の多孔質吸音材素材としてのリサイクル性について検討した結果、以下に示す知見を得た。

- 1) 捨て耳とバインダー繊維の混合ウェブを加熱圧縮成形することによって多孔質型吸音材の成形が可能である。
- 2) 成形品の吸音特性は、捨て耳の開繊状態と大きな関連性が在り、捨て耳の開繊を進める事により成形品の吸音性能も向上する。

- 3) 捨て耳を素材とする成形品の吸音特性は、通気抵抗値と大きな相関があり、典型的な多孔質型吸音材としての特性を示す。
- 4) 現在用いられている繊維多孔質型、発泡型及び膜材料型の一般的な吸音材に対して、本成形品は同等レベルの吸音性能を示し、環境調和型多孔質吸音材として十分に利用価値を有する。

本研究は、財団法人日本科学協会の平成 20 年度笹川科学研究助成 (20-240) による研究の一環として遂行された。ここに記して深謝する。

参 考 文 献

- 1) 木村照夫：成形加工，**19**(7)，417，2007
- 2) 木村照夫：成形加工，**17**(10)，715，2005
- 3) 前川純一，森本政之，坂上公博：建築環境音響学第 2 版 (南篠光章)，**72**(2004)，共立出版
- 4) 渡辺恭一：自動車技術，**51**(7)，60，1997
- 5) 木下陸肥路：日本音響学会誌，**23**(6)，415，1967
- 6) Delany, M. E. and Bazley, E. N.: *Applied Acoustics*, **3**, 105, 1970
- 7) Miki, Y.: *J. Acoustic Soc Jpn*, **11**, 19, 1990
- 8) 日本規格協会：JIS Hand Book No.9 (日本規格協会)，1520(2008)，日本規格協会
- 9) Komatsu, Takeshi: *Acoustic Science and Technology*, **29**(2)，121，(2008)