トラクタキャビン用吸音内装天井の開発* (PET不織布圧縮ボードの吸音内装天井への適用)

石田 栄一^{*1}, 篠原 誠^{*2}

Development of Sound-Absorbing Inner-Roof for Tractor Cabin (Application of PET Fiber Board to Sound-Absorbing Inner-Roof)

Eiichi ISHIDA^{*3} and Makoto SHINOHARA

^{*3} KUBOTA Corp., Machinery R & D Dept.,
64 Ishizu-kitamachi, Sakai-shi, Osaka, 590-0823 Japan

Sound-absorbing inner-roof which is made of PET (Poly Ethylene Terephthalate) fiber has been developed by the authors. Sound-absorbing inner-roof is polyester fiber board, so it is harmless and recyclable. First of all, we explain tractor cabin structure and double roof ceiling. Secondly, we investigate the Sound-absorbing characteristics of the polyester fiber board with backward air layer, because the ceiling of tractor cabin consists of double roofs in which the air conditioning parts are installed and space is exists. As a result, the calculation of Sound-absorbing characteristics coincide with measurement result, and it becomes clear that the sound-absorbing characteristics of the polyester fiber board is better than that of polyurethane foam. Finally, we adapt the polyester fiber board to the inner-roof of the tractor cabin. Then we confirmed that the polyester fiber board reduces the sound level 2.4 dB, especially, 6 dB at 1/3 octave band of 500 Hz.

Key Words: Sound-Absorbing Inner-Roof, Tractor Cabin, PET Fiber, Recycle

1. 緒 言

トラクタキャビンは、作業機械としての視認性重視のためガラス面積が自動車に比べ大きく、内装材の占める割合は少ない。よって吸音処理を十分に施し難い。またウレタン吸音材等を内装材に貼ることは、キャビン内装の高級感を損い、吸音材厚さも許容し難い。

そこで、筆者らは天井が重要な吸音処理対象部であることをSEA(統計的エネルギー解析)法により特定した⁽¹⁾。そして、トラクタキャビン特有の二重天井構造(自動車と異なり内装天井と外装天井が分離して空間がある)を考慮して、PET(ポリエチレン・テレフタレート)不織布を加熱圧縮した薄い繊維ボード状の一体成形吸音内装天井を開発・製品化した。これは異臭や刺激が無く、単一素材で高リサイクル性を備え、同時期、同様に開発された自動車用内装天井⁽²⁾に比べ、低～中周波吸音性能を大幅に向上させている。

本報告では、まずトラクタキャビン構造と内装天井について説明する。次に、PET不織布圧縮ボードの構成と種々の条件での吸音特性を示す。最後に、PET不織布圧縮ボードを吸音内装天井としてトラクタキャビンに適用した効果について述べる。

2. トラクタキャビン

2.1. トラクタキャビン構造と内装天井 トラクタキャビンの構造を図1に示す。角材フレーム、フロア、フェンダーとステップ板金以外は5mm厚ガラスである。天井部はPP樹脂の外装天井(アウトールーフ)と内装天井(インナールーフ)からなり、この間にエアコンエバポレータとルーフファンを収納する。

Fig.1 Double roofs of tractor cabin

* 原稿受付 2001年7月19日。

^{*1} 正員, (株)クボタ機械研究本部(〒590-0823 大阪府堺市石津北町64)。

^{*2} (株)クボタ機械研究本部。

E-mail: e-ishida@kubota.co.jp

さらに内装天井は図2のようにエアコン部品に沿った凹凸を持つため、この2つのルーフの間隙は不均一で100~190mmと変化する。

内装天井の寸法は1100×1450mm、厚さ3mm(従来品)で、周辺をボルト固定する。

Fig.2 Inner-roof

2.2. キャビンの音響特性 トラクタキャビン内空間の概略寸法は高さ1500mm、横幅1300mm、長さ1600mmである。空間共鳴周波数は110Hzと200Hz付近にあり大きなこもり音を形成する。計算したキャビティモードを図3に示す。

Fig.3 Acoustic mode of tractor cabin

3. 吸音内装材料の特性

3.1. 材料の構成 図4のように材料はPETウール(比率15%, 線径6デニール: $24.8\mu\text{m}$)に低融点PETウール(比率30%, 線径13デニール: $36.5\mu\text{m}$ と比率10%, 線径4デニール: $20.3\mu\text{m}$ の2種類)と高融点PETウール(比率45%, 線径4デニール: $20.3\mu\text{m}$)の4種類を混合させた綿状の基材20mm(目付重量 $1.3\text{kg}/\text{m}^2$)と片面をフッ素表面コート処理($0.007\text{kg}/\text{m}^2$)し、もう一面に $50\mu\text{m}$ 接着フィルムを貼付したPETウール表皮材(線径3デニール: $17.5\mu\text{m}$, 目付重量 $0.2\text{kg}/\text{m}^2$)のポリエステル繊維不織布で構成される。

基材部を 250°C に加熱し、表皮材を重ねて圧縮成形する。この際、低融点PETウールが溶け基材部のボンドとして作用し、基材部をボード化するとともに、PETウール表皮材と基材部とが $50\mu\text{m}$ 接着フィルムにより接着される。その結果、強度を持つ3~9mm厚の繊維ボードとなる。

Fig.4 Polyester fiber board

3.2. 材料の吸音特性 PET吸音材の吸音特性を諸条件下で調査した。

3.2.1 PET吸音材の特性 剛壁密着と背面空気層30mmを設定した条件での、吸音材厚さの吸音率への影響を図5と図6に示す。

剛壁密着の場合、吸音材厚さが主要因として吸音特性を左右するが、背面空気層を設定した場合、各厚さ部材とも吸音特性が向上し、且つ、近接してくる。これより背面空気層の重要性が確認できる。

Fig.5 Sound-absorbing characteristic of polyester fiber board (Air Layer 0mm)

Fig.6 Sound-absorbing characteristics of the polyester fiber board (Air Layer 30mm)

3.2.2 表皮接着材の影響 表皮接着に関してフィルム状(50 μ m) 接着材と網状接着材を使用した特性の違いを図7に示す。なお背面空気層は 30mm である。網状接着材では吸音率 0.5 以上の領域を 400Hz ~ 4 kHz の広範囲で確保していることがわかる。

Fig.7 Effect of two adhesive types against Sound-absorbing characteristics

3.2.3 PET 圧縮ボードの吸音特性 意匠面の凹凸を付けるために表皮と基材の接着性が重要となり、フィルム状接着材を使用する。9mm 以内に圧縮したボードに、種々の背面空気層を設定して吸音特性を測定すると共に、吸音率計算を行った。

まず、吸音率計算について述べる。図8に示す背面空気層を有するモデルにおいて、2つの境界面での音圧と速度が等しいことと、剛壁にて全反射する条件等より一般的な以下の関係式を得る。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ -1 & -m_1 & m_1 & 0 \\ 0 & e^{-n l_1} & e^{n l_1} & -(1+e^{-2j k l_2}) \\ 0 & m_2 e^{-n l_1} & -m_2 e^{n l_1} & -(1-e^{-2j k l_2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{r1} \\ p_{r2} \\ p_{r2} \\ p_{r3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p_{r1} \\ -p_{r1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

これより、 Pi_1 / Pr_1 を求めると吸音率 α は次のよう

になる。

$$\alpha = 1 - |Pi_1 / Pr_1|^2 \quad (2)$$

$$m_1 = z_1 / z_0, \quad m_2 = z_2 / z_1$$

z_1, r は吸音材料の特性インピーダンスと複素伝播常数であり

$$z_1 = R + jX \quad (3)$$

$$R = \rho c \left(1 + 0.0571 \left(\rho f / R_1 \right)^{-0.754} \right) \quad (4)$$

$$X = \rho c \left(-0.0870 \left(\rho f / R_1 \right)^{-0.732} \right) \quad (5)$$

$$r = a + jb \quad (6)$$

$$a = k \left(0.189 \left(\rho f / R_1 \right)^{-0.595} \right) \quad (7)$$

$$b = k \left(1 + 0.0978 \left(\rho f / R_1 \right)^{-0.700} \right) \quad (8)$$

と与える。 f は周波数、 k は空気中の音波の波数、 ρ, c は空気密度、音速、そして R_1 は吸音材料の流れ抵抗 (MKS rayls/m) である。(3)(4)

$$k = \omega / c \quad (9)$$

$\rho = 1.205, c = 340, R_1 = 50000$ を使用する。

Fig.8 Sound-absorbing diagram

図9、及び、図10に背面空気層を設けたPET吸音材の吸音率とインピーダンスについて、計算結果と実験結果を比較して示す。

計算結果と実験結果はかなり近い傾向を示す。吸音率カーブの1次ピーク位置が実験の方が2割程度低周波側にある傾向があるが、これは表皮接着材としての50 μ m フィルム(圧着成形時に部分的に破損)が影響しているためである。更に、背面空気層が160mm以上においては、ピーク領域の低周波数化のため吸音率カーブの1次ピークが減少し始め、背面空気層の増加とともに低下する。

また、2.5~4 kHz の吸音率ピークも0.03程度低下している。

Fig.9 Comparison of polyester fiber board's Sound-absorbing characteristics between calculation and experiment (Backward-Air-Layer0~ 200mm)

Fig.10 Comparison of polyester fiber board's acoustic impedance characteristics between calculation and experiment (Backward-Air-Layer 200mm)

3.3 PET圧縮ボードと他吸音材との比較

図 11 はPET吸音材と一般的なウレタン吸音材(20mm 厚)を同一条件で比較したものある。剛壁密着では厚さの大なるウレタン吸音材の方が吸音率は良い。しかし、背面空気層設定ではPET圧縮ボードの吸音性能が大きく向上しウレタン吸音材に優る。PET吸音材は繊維のため吸音率が高く、且つ幅広いことが判る。

Fig.11 Comparison of Sound-absorbing characteristics between polyester fiber board and polyurethane foam

4. トラクタキャビンへの適用結果

PET製の吸音内装天井をトラクタキャビンに装着して効果を確認した。

4.1. 外観, 及び触感 PET内装天井はPP従来品と比べ見栄え, 及び, 触感とも優れている。

Fig.12 Figure of inner-roof (x5 zoom)

4.2. 内装天井強度 内装天井は乗員が手で押した際の強度確保が要求される。表 1 のようにPET内装天井は従来品PP内装天井の2倍以上の強度(中央部荷重)を実現している。

Table.1 Comparison of strength between PET inner-roof and PP inner-roof

	Strength (N/mm)
PET inner-roof	22.4
PP inner-roof	10.8

4.3. 内装天井打撃音 内装材は打撃音が質感を左右する。重低音が高級感を形成する。図 13 に、PETと既存PP内装天井打撃時のキャビン内騒音比較を示す。

Fig.13 Comparison of hammering noise level between PET inner-roof and PP inner-roof

PET内装天井は従来品より 12dB 以上低減し、160Hz 付近にピークを持つ低音主体の重厚な音である。

4.4. キャビン内騒音比較 図 14 に無負荷エンジン最高回転におけるキャビン内オペレータ耳元騒音の 1/3 オクターブバンド分析結果を示す。

Fig.14 Reduction of sound level in tractor cabin by using PET inner-roof

この結果より、効果は全周波数にわたり、騒音レベルで 2~2.4dB(A)の低減効果を示す。これは 500Hz バンドにて効果が最も大きく 5~6dB あり、騒音の高い領域と一致し最大効果を発揮しているためである。200Hz と 1600Hz バンドでも 2~4 dB の効果を得る。単体垂直入射吸音率測定結果と比較して背面空気層は 120mm に相当することが判る。実際には背面空気層(100~190mm)はエアコン部品に半分占められており最大 100mm であるが、ランダム入射吸音により、更に効果を得ていると考える。一方 80Hz と 160Hz バンドでは悪化しているが、これはキャビンマウントゴムからの振動入力を経時変化により増加したためである。

5. 結 言

PET不織布を圧縮繊維ボード化したトラクタキャビン用吸音内装天井の開発を行い、その特性調査を行うことにより、以下のことが明らかとなった。

- (1) PET繊維ボードは従来のPP製内装天井と比較して、2倍以上の強度向上を図れた。且つ、打撃時のキャビン内騒音のピークは 200Hz 以下の低周波となり音質を改善した。
- (2) 背面空気層設定状態においてPET繊維ボードは他の吸音材(ウレタン)に比較して、吸音率が高く、広範囲にわたり、より優れた吸音性能を示した。
- (3) 背面空気層を活用するPET繊維ボードはこれまでのウレタン貼付吸音処理では難しい低周波領域にて効果が得られることを確認した。
- (4) 背面空気層設定PET繊維ボードは表皮材と基材部との接着フィルム(一体成型時部分破損)の影響により、吸音率カーブの最大ピーク位置を低周波側にシフトすることができる。

本論文中でも述べているように、表皮接着材等の改善によりさらに性能向上の余地があり、今後更なる改善を目指す。最後に、本開発にあたりご協力いただきました河西工業(株)の関係各位に深く謝意を表す。

文 献

- (1) 小泉ほか、トラクタキャビンへのSEA法適用、自動車技術会論文集 Vol 28 No 2, 1997, pp.85-90
- (2) 永島ほか、ポリエステル制内装部品による車室内静粛性向上研究、自動車技術会学術講演会前刷集 No.66-99, 1999, pp.5-7
- (3) 小幡ほか、吸収形吸音器の消音特性、日本機械学会論文集, Vol 42, No363, 1976, p.3500
- (4) 白木万博監修、騒音防止設計とシミュレーション 応用技術出版, 1991