

○山口道征  
(エム・ワイ・アコーステック)

中川博  
(日東紡音響エンジニアリング)

加藤大輔  
(豊和繊維工業)

Study by the Biot model about the acoustic properties of the flexible polyurethane foam

Yamaguchi Michiyuki  
(M.Y. Acoustech)

Nakagawa Hiroshi  
(Nittobo Acoustic Engineering)

Kato Daisuke  
(Howa Textile Industry)

内容概要 多孔質弾性材料は広く吸音材料として用いられており、その内部での音響吸収機構は空気伝搬路における空気伝搬音の粘性や熱交換による減衰および骨格構造体中の固体減衰に大別でき、その内部は空気伝搬音と固体伝搬音が混在し複雑な連成場を形成している。そこで本稿では、多孔質弾性材料中の音響吸収機構をモデル化した Biot 理論を用いて、軟質ポリウレタンフォーム(FPUF)の音響吸収機構について検討するものである。

Key words:軟質ポリウレタンフォーム、Biot モデル、空気伝搬音、固体伝搬音

1. はじめに

Biot モデル[1]では多孔質弾性体中を3つの音波が伝搬するとし、2つの縦波(速い縦波・Fast wave および遅い縦波・Slow wave)、および、1つのせん断波・Shear wave、が伝搬するとして定式化がなされているが、ここでは、2つの縦波の伝搬のみを扱うことにする。

2. Biot および Rigid モデル

2.1. Biot モデルの定式化  
伝搬定数

$$\text{速い縦波の波長定数 } \delta_1: \delta_1^2 = \frac{\omega^2}{2(PR - Q^2)} [P\bar{\rho}_{22} + R\bar{\rho}_{11} - 2Q\bar{\rho}_{12} - \sqrt{\Delta}] \quad (1)$$

$$\text{遅い縦波の波長定数 } \delta_2: \delta_2^2 = \frac{\omega^2}{2(PR - Q^2)} [P\bar{\rho}_{22} + R\bar{\rho}_{11} - 2Q\bar{\rho}_{12} + \sqrt{\Delta}] \quad (2)$$

$$\Delta = (P\bar{\rho}_{22} + R\bar{\rho}_{11} - 2Q\bar{\rho}_{12})^2 - 4(PR - Q^2)(\bar{\rho}_{11}\bar{\rho}_{22} - \bar{\rho}_{12}^2)$$

ただし、 $\delta_1, \delta_2$ の値は正の実数を選ぶ

特性インピーダンス

$$\text{速い縦波に対する空気伝搬音成分の特性インピーダンス: } Z_1^a = (R + Q/\mu_1) \frac{\delta_1}{\phi\omega} \quad (3)$$

$$\text{遅い縦波に対する空気伝搬音成分の特性インピーダンス: } Z_2^a = (R + Q/\mu_2) \frac{\delta_2}{\phi\omega} \quad (4)$$

$$\text{速い縦波に対する固体伝搬音成分の特性インピーダンス: } Z_1^s = (P + Q\mu_1) \frac{\delta_1}{\omega} \quad (5)$$

$$\text{遅い縦波に対する固体伝搬音成分の特性インピーダンス: } Z_2^s = (P + Q\mu_2) \frac{\delta_2}{\omega} \quad (6)$$

$$\text{弾性係数 } P: P = \frac{(1-\phi) \left[ 1 - \phi - \frac{K_b}{K_s} \right] K_s + \phi \frac{K_s}{K_f} K_b}{1 - \phi - K_b/K_s + \phi K_s/K_f} + \frac{4}{3}N \quad (7)$$

$$\text{弾性係数 } Q: Q = \frac{[1 - \phi - K_b/K_s] \phi K_s}{1 - \phi - K_b/K_s + \phi K_s/K_f} \quad (8)$$

$$\text{弾性係数 } R: R = \frac{\phi^2 K_s}{1 - \phi - K_b/K_s + \phi K_s/K_f} \quad (9)$$

N: 多孔質弾性体のせん断弾性率

$K_b$ : 骨格構造の体積弾性率  $K_s$ : 空気の体積弾性率  $K_f$ : 素材の体積弾性率

通常多孔質弾性体においては  $K_s$  は (7) (8)

(9) 式の  $K_b, K_f$  に比し十分大きな値を持つので、弾性係数は以下の近似式からも算出できる。

$$P = \frac{4}{3}N + K_b + \frac{(1-\phi)^2}{\phi} K_f \quad (7)'$$

$$Q = R(1-\phi)/\phi \quad (8)'$$

$$R = \phi K_f \quad (9)'$$

$$\text{速い縦波および遅い縦波の音速比: } \varphi_i^s / \varphi_i^a = \mu_i = \frac{P\delta_i^2 - \omega^2\bar{\rho}_{11}}{\omega^2\bar{\rho}_{12} - Q\delta_i^2} \quad (10)$$

$$\text{固体成分の密度の平均値: } \bar{\rho}_{11} \quad (11)$$

$$\text{固体と空気の相互作用の成分の密度の平均値: } \bar{\rho}_{12} \quad (12)$$

$$\text{空気成分の密度の平均値: } \bar{\rho}_{22} \quad (13)$$

$\rho_1$ : 多孔質材料の嵩密度

$\rho$ : 多孔質材料中の空気の実効密度