

〈寄稿〉

Biotパラメータの音響特性に対する感度解析

日本大学生産工学部 数理情報工学科 教授 見坐地 一人

1. はじめに

自動車開発においては、低燃費化を目的とする車体重量の軽量化が大変重要である。一方、車室内の静粛化には防音材を多用する必要がある。車体の軽量化と車室内の静粛化は相反する。これらを高い次元で両立するには、開発初期段階に防音仕様の音響特性を精度良く予測し、軽量かつ高性能な防音材仕様の提案しなければならない。それらの防音性能はBiot理論によって説明することができるが、目的とする性能を付与するためには防音材の音響特性に対する各Biotパラメータの感度を把握する必要がある。そこで本論では、Biotパラメータの防音材の吸音特性や遮音特性、固体伝播音特性のそれぞれに対する感度を、Biotモデルと解析SEAモデル、FEM/SEAハイブリッドモデルを用いて解析（シミュレーション）することにより把握し考察する。

2. Biotモデル^{1, 2, 3)}

自動車の防音材として用いられる多孔質材料の音響特性をBiotモデルを用いて予測する。

図1にBiotモデルの模式図を示す。

Biotモデルとは入射音波が多孔質材料中の空隙部分を通して伝わる空気伝播音と多孔質材料中の骨格部の振動によって伝わる固体伝播音、およびその間の相互作用を考慮した防音材の音響特性モデルのことである。

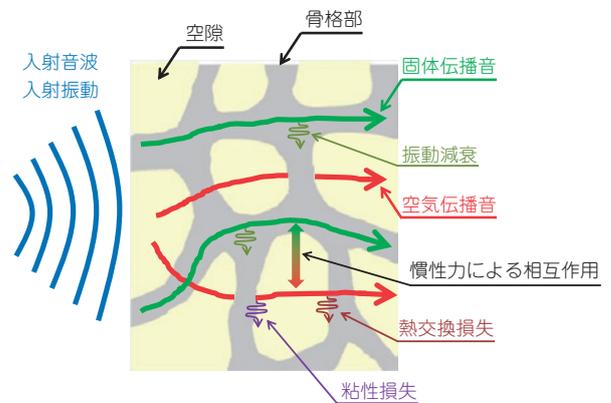


図1 Biotモデル

固体伝播音および空気伝播音の波動方程式は固体伝播音と空気伝播音の相互作用を考慮した骨格部の変位 \vec{u}^s と、流体の変位 \vec{u}^f を用いて、それぞれ式(1)、式(2)になる。

$$\left. \begin{aligned} & ((1-\phi)\rho_s + \rho_a) \frac{\partial^2 \vec{u}^s}{\partial t^2} - \rho_a \frac{\partial^2 \vec{u}^f}{\partial t^2} \\ & = (P-N)\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}^s) + Q\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}^f) + N\vec{\nabla}^2 \vec{u}^s - \sigma\phi^2 G(\omega) \frac{\partial}{\partial t}(\vec{u}^s - \vec{u}^f) \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} & (\phi\rho_f + \rho_a) \frac{\partial^2 \vec{u}^f}{\partial t^2} - \rho_a \frac{\partial^2 \vec{u}^s}{\partial t^2} \\ & = R\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}^f) + Q\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}^s) + \sigma\phi^2 G(\omega) \frac{\partial}{\partial t}(\vec{u}^s - \vec{u}^f) \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

ここで、 t は時間、 ρ_s は骨格部の密度、 ρ_f は流体（本論では空気）の密度である。 ρ_a は骨格部と流体の相互作用における粘性減衰を考慮した流体の等価密度を示しており、式(3)で表される。

ここで、 μ は動粘性係数と呼ばれるパラメータである。

$$\left. \begin{aligned} \rho_a &= \alpha_\infty \rho_f \left(1 + \frac{\phi \sigma}{j \omega \rho_f \alpha_\infty} G(\omega) \right) \\ G(\omega) &= \left(1 + \frac{4 j \mu \omega \alpha_\infty^2 \rho_f}{\Lambda^2 \sigma^2 \phi^2} \right)^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

次に弾性係数 P , Q , R は式 (4) に示すように近似的に表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} P &\approx \frac{4}{3} N + K_b + \frac{(1-\phi)^2}{\phi} K_f \\ Q &\approx (1-\phi) K_f \\ R &\approx \phi K_f \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、骨格部のせん断弾性率 N と骨格部の体積弾性率 (真空時) K_b を式 (5) に示す。

$$\left. \begin{aligned} N &= \frac{E(1+j\eta)}{2(1+\nu)} \\ K_b &= \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)} N \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

式 (4) 中の K_f は骨格部と流体の相互作用における熱性減衰を考慮した流体の等価体積弾性率 (周波数依存) で、式 (6) から求められる。

$$\left. \begin{aligned} K_f &= \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 + \frac{8\xi}{j\omega \Lambda^{1/2}} H(\omega) \right]^{-1}} \\ H(\omega) &= \left(1 + \frac{j\omega \Lambda^{1/2}}{16\xi} \right)^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 γ は比熱比、 P_0 は平衡状態の圧力、 ξ は温度拡散率である。骨格部と流体の波動方程式 (1), (2) と ρ_a を示す式 (3), K_f を示す式 (6) に含まれる関数 $G(\omega)$ と $H(\omega)$ は、空気の流路が円形である場合の理論解に近くなるように定義した経験的な関数である。

表1に5種類の音響系Biotパラメータ (Acoustical Biot Parameters) と4種類の構造系Biotパラメータ (Structural Biot Parameters) を示し、以下に各Biotパラメータの概要を説明する。なお、以下の括弧内の英訳の次に略称を示している。

表1 Biotパラメータ

Acoustical Biot Parameters	Flow resistivity	FR	σ
	Porosity	Por	ϕ
	Tortuosity	Tor	α_∞
	Viscous characteristics length	Vcl	Λ
	Thermal characteristics length	Tcl	Λ'
Structural Biot Parameters	Density	Den	ρ
	Loss Factor	LF	η
	Young's modulus	Ym	E
	Poisson's ratio	Poi	ν

- ・流れ抵抗 (Flow Resistivity : FR) とは多孔質材料中を通過する空気の流れにくさを表すパラメータである。流れ抵抗が大きいと空気が通りにくくなる。
- ・多孔度 (Porosity : Por) とは多孔質材料中の空気の含有量の割合である。
- ・迷路度 (Tortuosity : Tor) とは、多孔質材料の厚さに対する、多孔質材料内部を流れる流体 (本論では空気) の経路の長さの割合を表現するパラメータである。
- ・粘性特性長 (Viscous characteristics length : Vcl) とは気泡入口付近での粘性抵抗による音響エネルギー損失に関連した (形状に依存する) パラメータである。
- ・熱性特性長 (Thermal characteristics length : Tcl) とは気泡表面での音響エネルギーの熱変換量に関連した (形状に依存する) パラメータである。
ここまでの、音響系Biotパラメータである。
- ・密度 (Density : Den) とは単位体積当たりの質量を表現するパラメータである。
- ・損失係数 (Loss Factor : LF) とは多孔質材料の制振特性の評価指標の1つである。振動エネルギーの熱変換量に関連したパラメータである。
- ・ヤング率 (Young's modulus : Ym) とは多孔質材料の変形のしにくさを表現するパラメータである。また、応力と歪の間の比例定数の総称である。
- ・ポアソン比 (Poisson's ratio : Poi) とは多孔質材料を引っ張り、あるいは圧縮させた時の縦歪と横歪の比率のことである。
ここまでの構造系Biotパラメータであり、全9種類のパラメータで構成される。

3. 音響特性評価

多孔質材料の音響特性として、吸音特性、遮音特性、固体伝播音特性のそれぞれに対するBiotパラメータの感度を解析する。次にそれぞれの音響特性の評価手法について説明する。

3.1 吸音特性

吸音特性とは図2に示すように入射波に対し、反射せず、多孔質材料中で吸収あるいは透過する特性のことである。本論では、吸音特性を吸音率で評価する。図2に吸音について示す。

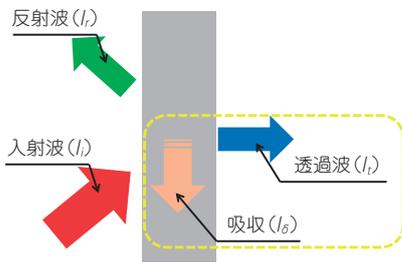


図2 吸音

図2から得られる釣り合い式を式 (7) に示す。

$$I_i = I_r + I_a + I_t \quad \dots\dots\dots (7)$$

次に、吸音率 α の算出式を式 (8) に示す。

$$\alpha = \frac{I_i - I_r}{I_i} = \frac{I_a + I_t}{I_i} \quad \dots\dots\dots (8)$$

3.2 遮音特性

遮音特性とは、前節の吸音とは異なり、入射波に対し透過せず、多孔質材料中で吸収あるいは反射する特性のことである。本論では、遮音特性を音響透過損失で評価する。図3に遮音について示す。

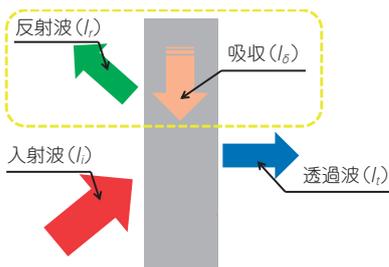


図3 遮音

図3から得られる釣り合い式は前節にも述べた式 (7) となる。

透過率 τ の算出式を式 (9) に示す。

$$\tau = \frac{I_r + I_a}{I_i} = \frac{I_t}{I_i} \quad \dots\dots\dots (9)$$

次に、式 (9) の透過率 τ を用いて音響透過損失 (Transmission Loss : TL) を算出する。算出式を式 (10) に示す。

$$TL = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} \quad [dB] \quad \dots\dots\dots (10)$$

3.3 固体伝播音特性

固体伝播音とは、図1から多孔質材料中の骨格部の振動を起源とした音のことである。本論では固体伝播音特性を音響放射効率で評価する。

音響放射効率とは振動の音へのなりやすさを表す比率のことであり、式 (11) から求められる。

$$\sigma = \frac{W}{\rho c A \tilde{v}^2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式 (11) 中の σ は音響放射効率、 W は音響放射パワー、 ρ は流体の密度、 c は流体の速度、 A は多孔質材料と媒質 (本論では空気) の境界面の表面積、 \tilde{v}^2 は時間-空間平均速度の2乗である。

4. 解析モデル

Biotパラメータの感度解析を2種類の解析モデルを用いて実施した。音から音への影響が著しい高周波領域では解析SEAモデル (音や振動において高周波領域は位相の影響を無視でき、拡散場と考えられることから統計的エネルギー解析手法を用いてモデル化) を、振動から音になりやすい中周波領域ではFEM/SEAハイブリッドモデル (構造における中周波領域の振動は位相が無視できず、かつ拡散場と仮定できないことから鉄板部のモデル化には有限要素法を用い、その他は統計的エネルギー解析手法を用いてモデル化) を用いる。以下に各モデルの説明をする。なお、双方のモデル解析にはESI社のVA-Oneを用いた。

4.1 解析 SEA モデル

解析SEAモデルでは図4に示すように、受音場 (Cavity)、鉄板 (Plate)、加振音場 (Cavity) の3要素で構成されるモデルである。共通寸法としてはX軸とY軸はそれぞれ1.0m, 1.2mとする。受音場と加振音場のZ軸は1.0mとする。鉄板の厚みを1mm, その上に厚さ20mmに単層の多孔質材料の防音材を搭載したモデルである。加振条件として加振音場から1Wの音響パワーで加振した。解析周波数範囲は100~5000Hzであるが、SEA解析においては100~500Hzの低・中周波領域の解析精度は低い。このモデルで評価する特性は吸音特性、遮音特性である。

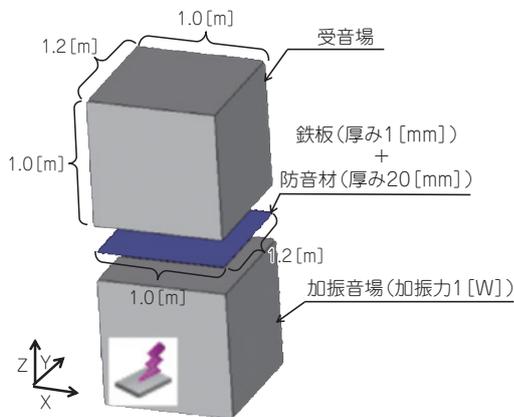


図4 解析SEAモデル

4.2 FEM/SEA ハイブリッドモデル⁴⁾

FEM/SEAハイブリッドモデルは上記で述べた解析SEAとは異なり、図5に示すように鉄板 (Plate) と受音場 (Cavity) の2要素で構成されるモデルとなる。

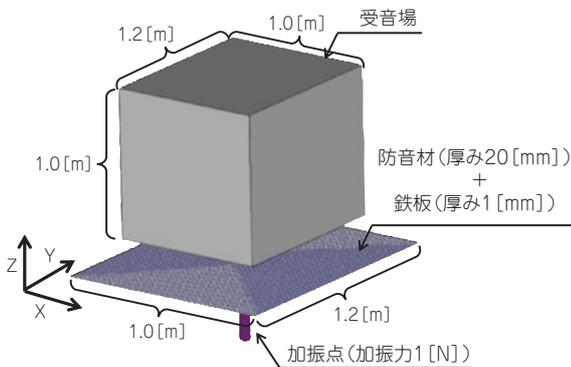


図5 FEM/SEAハイブリッドモデル

基本寸法は解析SEAモデルと同様である。相違点として本モデルでは鉄板をFEMで定義する。その他防音材を含めた受音場はSEAで定義する。加振条件はモード節を避けるため、鉄板の中央からわずかにずらし、1Nでポイント構造加振する。また、解析周波数範囲は200~1000Hzの中・高周波領域を解析する。本モデルで評価する特性は固体伝播音特性である。

5. Biot パラメータ感度

前章で説明した解析モデルを用いて各Biotパラメータの比率を変更し、各音響特性に対する感度を解析する。ここでは、3種類の防音材データを用いて、0.5倍~2.0倍の0.25倍刻みで各Biotパラメータの比率を変更し解析した。本論では一例としてChip Urethane Softの比率を基準諸量の0.5倍と2.0倍にしたときの吸音特性、遮音特性、固体伝播特性の解析結果を図6~8に示す。図中、基準諸量での解析結果 (Standard : Std) を黒の点線で示す。なお、多孔度と迷路度、ポアソン比は一定の数値内で定義する必要があるため、比率を変更した際に上下限值を超えた時の解析は行っていない。また、解析結果のグラフには表1のBiotパラメーター一覧の略称を適用する。

吸音特性は、図6の吸音率より、0.5倍時では多孔度の感度が高く全周波数帯で悪化した。流れ抵抗に関しては1600~2500Hzで向上したが、それ以外の周波数帯では全体的に悪化した。2.0倍時では流れ抵抗に関して800~5000Hzで悪化した。また、迷路度に関しては800~1600Hzで向上したが、1600~5000Hzでは悪化した。

遮音特性は、図7の音響透過損失より、0.5倍時では迷路度に関して1000~5000Hzで向上した。迷路度とは多孔質材料中の経路の複雑さを示すパラメータであるため、本来悪化する傾向を示すと推測したが、向上する結果となった。また、密度、多孔度、流れ抵抗それぞれに関しては800~5000Hzで悪化した。2.0倍時では流れ抵抗に関して1600~5000Hzで向上した。密度に関しても800~2000Hzで向上した。

多孔度、ヤング率、熱特性長それぞれに関しては800~5000Hzで悪化した。

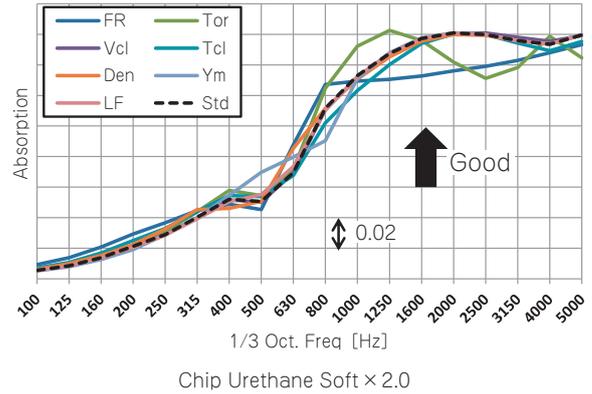
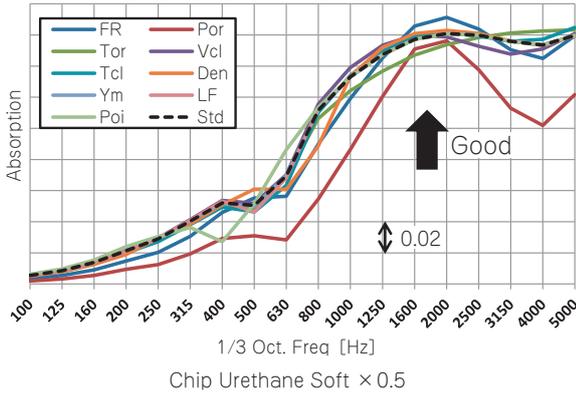


図6 吸音特性の変化

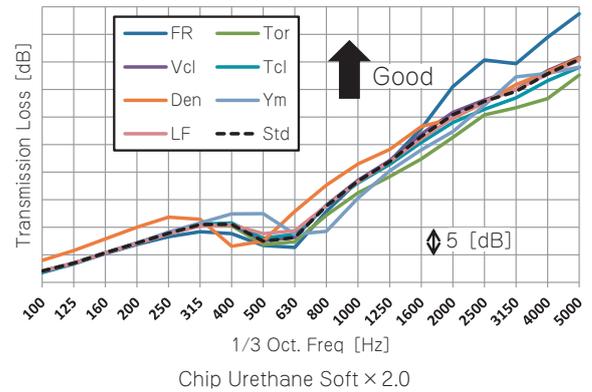
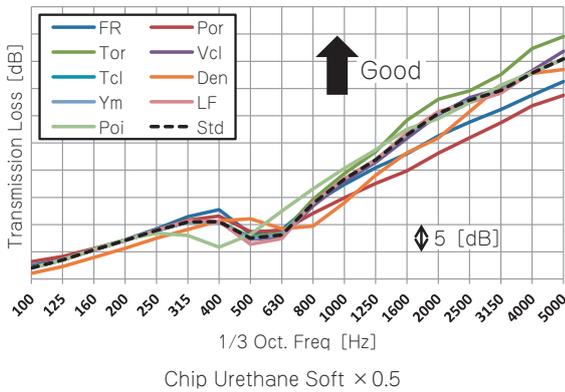


図7 遮音特性の変化

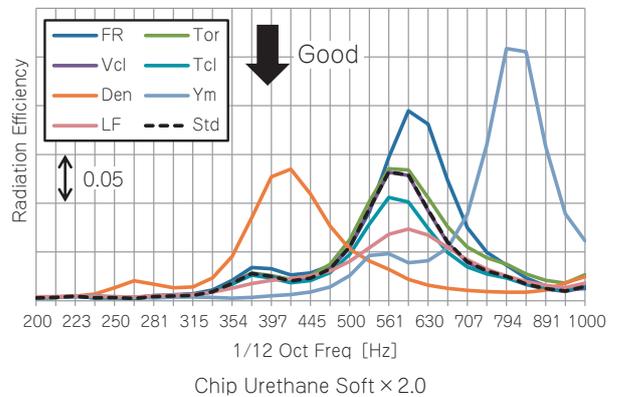
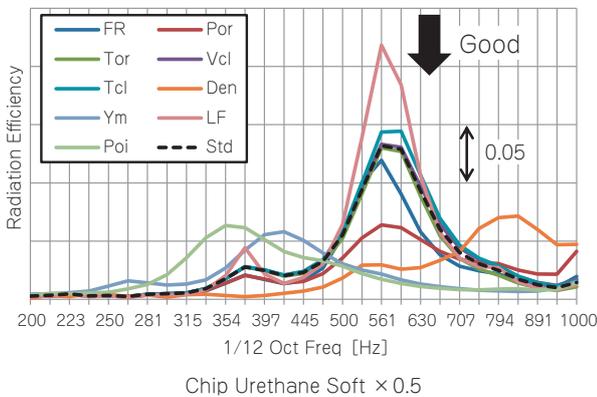


図8 固体伝播特性の変化

固体伝播特性は図8の音響放射効率より、0.5倍時では損失係数、熱性特性長それぞれは561～630Hzのピーク時に悪化した。損失係数では354～397Hzで悪化する。その他のパラメータは561～630Hzのピークは抑えられるが、他の周波数では基準値の時よりも悪化する結果となった。2.0倍時で悪化が見られたパラメータは周波数毎で異なるが、流れ抵抗、密度、ヤング率、迷路度となった。

6. 結論

- 1) Biotパラメータの比率を変更させ、音響特性に対する各パラメータの感度を定量的に確認することができた。
- 2) 今回のような単純な比率変更では、全周波数帯において一定の向上、あるいは悪化が見られるわけではなく、周波数毎で悪化あるいは向上が変わることがわかった。

- 3) 高周波領域の空気伝播音と、中周波領域の固体伝播対策ではBiotパラメータの感度が異なることを考慮し防音材仕様を検討する必要があることがわかった。

以上の結果から自動車の開発初期段階に多孔質材料系の防音材仕様を検討する上で本論の解析手法および解析結果は価値があると考えられる。これらの応用により吸音材を構成する材料の特性も含めた新たな防音システムの提案も可能と考えられる。

今後は本研究の解析結果を実験結果と比較し検証したい。同時に今回用いた音響解析モデルとBiotモデルを用いて最適化による仕様検討も行っていきたい。

参考文献

- 1) 見坐地一人, 井出史彦, 多田寛子: 空気伝播音と固体伝播音低減フロアカーペットの開発, 自動車技術会シンポジウム, No.08-09, 20094780, P40-44
- 2) VA One 2011 Foam Module User's Guide, Theory & QA (released: Dec-11)
- 3) 山本崇史, 丸山新一, 泉井一浩, 西脇眞二, 寺田賢二郎: 均質化法による多孔質吸音材の等価特性の導入, 日本機械学会論文集 (C編), No.10-0134, P75-88
- 4) P.J. Shorter, R. S. Langley: On the reciprocity relationship between direct field radiation and diffuse reverberant loading, J. Acoust. Soc. Am. Volume 117, Issue 1, pp. 85-95 (2005).

筆者紹介



見坐地 一人

日本大学生産工学部
数理情報工学科 教授
日本合成樹脂技術協会
(公社)自動車技術会
博士(工学), 自動車技術会フェロー
主として音響解析 数理モデル化 シミュレーション工学 人体数理モデルに関する研究に従事