

ウレタンフォーム材料の振動特性の予測モデル構築

篠	原	悠 ^{*1}
内	田	人 ^{*1}
山	本	也 ^{*2}
工	藤	樹 ^{*2}
木	戸	貴 ^{*2}
小	柳	平 ^{*2}

Prediction Model for Vibration Properties of Polyurethane Foam

Haru SHINOHARA
 Masahito UCHIDA
 Junya YAMAMOTO
 Daiki KUDO
 Kazuki KIDO
 Teppei OYANAGI

We propose a new physical model that can broadly explain the vibration properties of urethane foam materials. In recent years, the functions required of urethane foam materials have been diversifying, and one of such functions is vibration suppression in foam materials for automobile seat cushions. Attempts have been made to relate elastic modulus and air permeance, which are typical properties of urethane foams, to vibration characteristics using a physical model. However, the low air permeance urethane foam we have fabricated in this study exhibits vibration characteristics different from those predicted by conventional physical models. This may be because the conventional models do not take into account the pressure generated when the internal ventilation does not keep up with the deformation of the foam. In this study, the process of relaxation of internal pressure due to air permeation under a step strain was calculated and the equation of motion under displacement excitation was solved to obtain the expression for the analytical solution of the vibration characteristics of the system with pressure relaxation due to air permeation. As a result, we succeeded in reproducing a peak in the high-frequency region that could not be predicted by conventional models, and showed that this was due to resonance with the air inside the foam. The use of this model, which describes the relationship between easily controllable physical properties such as elastic modulus and air permeance and vibration characteristics, is expected to accelerate the development of functional polyurethane foams.

* 1 MI センター MI2 グループ

* 2 石化・高分子研究センター ウレタン研究所
 機能性フォーム第1グループ

ウレタンフォーム材料の振動特性を広く説明できる新たな物理モデルを提案する。近年ウレタンフォーム材料に求められる機能は多様化しており、そうした機能の一つに自動車用シートクッション向けフォーム材料における振動の抑制がある。ウレタンフォームを特徴づける代表的な物性値である弾性率と通気度を、物理モデルによって振動特性に結び付けようという試みは以前から行われてきた。しかし、今回我々が作製した低通気度のウレタンフォームは従来の物理モデルによる予測とは異なる振動特性を示した。これはフォームの変形に対して内部の通気が追い付かない時に発生する圧力を、従来のモデルが考慮していないからと考えられる。本研究では、ステップひずみ下における通気による内部圧力の緩和過程を計算し、変位加振下での運動方程式を解くことで、通気による圧力緩和がある系における振動特性の解析解を得た。その結果、従来モデルでは予測できなかった高周波領域のピークを再現することに成功し、これがフォーム内部の空気との共振によるものであることを示した。弾性率、通気度などの制御しやすい物性値と振動特性の関係を記述する本モデルの活用により、機能性ウレタンフォーム開発の加速が期待される。

1. 背景

近年ウレタンフォーム材料に求められる機能は多様化しており、材料開発の現場ではより精密なマクロ構造や物性の制御が求められている。多官能イソシアネートとポリオール、さらに水などの発泡剤を混合することで、ポリウレタン樹脂中に微細な気孔を含んだスポンジ状のウレタンフォームが作られる (Fig.1)。ここで、ポリウレタンからなる樹脂部分の物性と、気孔のサイズや連続性を調整することで、ウレタンフォームにおける多様な機能、特性を発現させることができる。こうした機能・特性の自由度の高さから、ウレタンフォームは断熱材、吸音材からマットレス、スポンジなどの日用品まで様々な用途で用いられており、主要な用途の一つである自動車シートクッションにも、自動車業界の環境変化に応じて様々な機能が要求されている。特に、低燃費化に向けてフォームの薄肉化が進む中、乗り心地向上のためにフォームの振動特性を制御する技術の向上が求められている。

振動特性は運転中の振動による不快感を低減するための重要な因子であり、振動特性を制御した自動車シートクッション用ウレタンフォームの開発が求められている。自動車が走行する際、地面からの振動は座席のシートクッションを通して人体に伝わるが、この際の、地面からの振動の大きさと人体の感じる振動の大きさの比を振動伝達率と呼ぶ (Fig.2 (a))。伝わる振動の不快感は周波数によって異なるため、振動伝達率の周波数依存性である振動特性を制御することが、走行時の振動による不快感を減らすために重要である (Fig.2 (b))。

フォームの通気性を表す指標である通気度はウレタンフォームの構造を特徴づける重要なパラメータの一つで、振動特性との関係も盛んに研究されている^[1-4]。空気は微細な気泡間の気孔を通してウレタンフォーム中を移動することができるが、気泡や気孔の構造によりフォームの空気の通しやすさは異なるため、その指標として通気度が用いられる。通気度はウレタンフォームの片側から一定の圧力をかけた際にもう片側

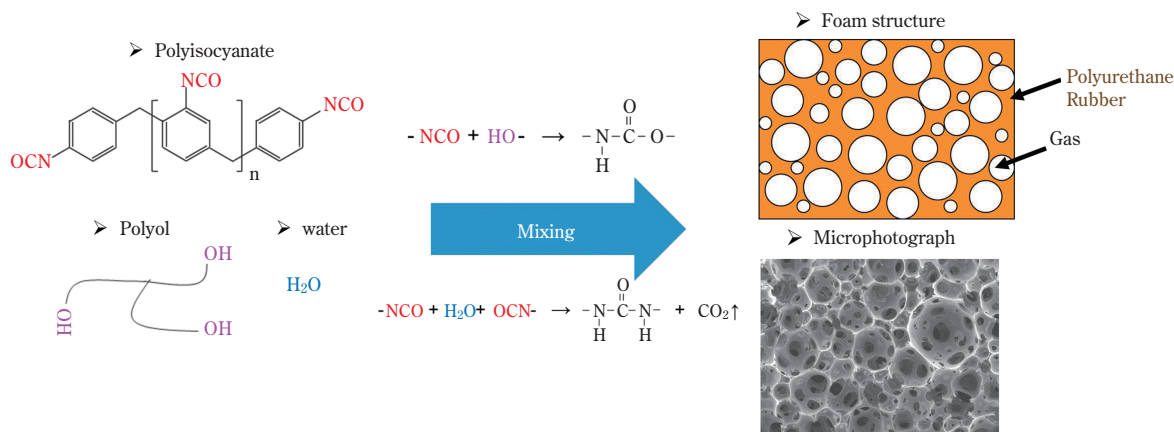


Fig. 1 Fabrication method of polyurethane foam

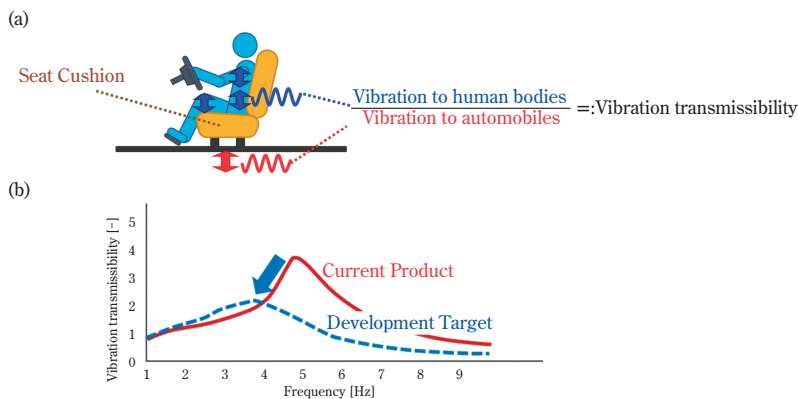


Fig. 2 (a) Vibration transmissibility and (b) Vibration characteristics

から出てくる空気の流量で定義される (Fig.3)。通気度が高いフォームは空気を通しやすく、通気度が低いフォームは空気を通しにくい。過去には物理モデルを用いて通気度と振動特性を関連づける試みも行われており^[1, 2]、通気度は振動特性を制御する因子となりうるものと考えられる。

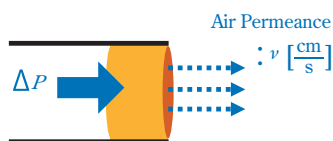


Fig. 3 Air permeance

当社において通気度を幅広い値に変化させたウレタンフォームを作製し、振動特性を計測したところ、低通気度のフォームにてこれまで見られなかったタイプの振動特性が見られた。幅広い通気度のフォームの振動特性をプロットしたものが Fig.4(a) である。緑色のプロットは従来の通気度の高いフォームの振動特性で、4Hz 付近に振動特性のピークがある。これに対し

て、青色のプロットで示された低通気度のフォームでは、振動特性のピークが 8Hz 付近に移動している。これは従来開発してきたフォームでは見られなかった傾向であり、この傾向を説明できるような物理モデルが必要となる。

低通気度のフォームで新たに見られた振動特性ピークの高周波側へのシフトは、従来の物理モデルでは再現することができない。Fig.4 (b) では従来の通気度から振動特性を予測する物理モデル^[2] で予測したフォームの振動特性を示している。緑色で示した高通気度のフォームと青色で示した低通気度のフォームが共に、4Hz 付近にピークを持っており、実験で見られた低通気度のフォームの 8Hz 付近のピークを予測できていないことが分かる。低通気度のフォームで見られるピークの高周波側へのシフトを予測するには、この通気度の低下に伴ったピークの移動がどのようにして発生しているか明らかにする必要がある。

本課題では、MI (マテリアルズ・インフォマティクス) による振動特性の予測を行うにあたり、適切な物理モデルの構築を行うことを試みた。一般に MI による材料開発では、組成から物性を予測する機械学習

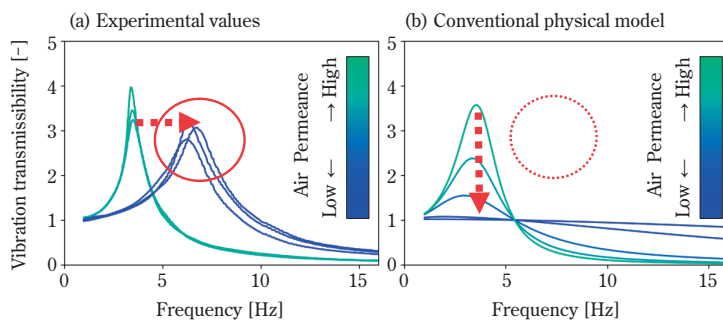


Fig. 4 Vibration characteristics of foam with different degrees of air permeability (a) Experimental values (b) Conventional physical model

モデルの作成が試みられる。しかし、今回の取り組みでは、弾性率、通気度といった物性値から最終的な目標物性である振動特性を予測する物理モデルの構築を行った。弾性率や通気度といった因子と振動特性はともにマクロな物性であるため、機械学習を用いなくとも物理的な考察により関係性を見出せるものと目される。弾性率、通気度などの物性値は組成との相関が高く、開発担当者の知見も生かしやすいため、弾性率や通気度と振動特性を繋ぐ物理モデルの構築により、振動特性の制御が容易になることが期待される。

なお、本研究は振動特性の制御技術の向上によりフォームの薄肉化、自動車の低燃費化に貢献し、「SDG 7: エネルギーをみんなにそしてクリーンに」の達成に寄与するものである。

2. 手法

従来の物理モデルが低通気度のフォームの振動特性を説明できない理由としては、通気速度に対して変形速度が十分に遅いという前提が考えられる。ウレタンフォームの振動特性を求めるには、変形時に発生する応力を知る必要があるが、この応力は弾性率 E とフォーム内外の圧力差 ΔP の和であり、圧力差 ΔP はフォームの通気度 ν によって決まることが予想される。また、通気度 ν はダルシーの法則 (式1) を通して圧力差 ΔP と結びついている (Fig.5)。

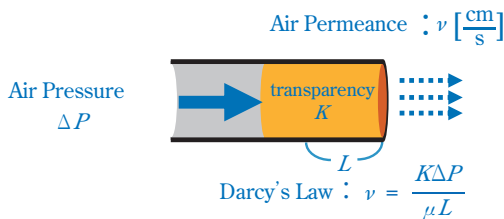


Fig. 5 Darcy's law

$$\nu = \frac{K\Delta P}{\mu L} \quad (1)$$

ここで、 K はフォームの透過係数、 μ は空気粘度、 L は通気する長さであり、この法則はかけた圧力 ΔP と通気度 ν が比例することを示している。通気度と振動特性を結びつける先行研究 [1, 2] はともに、変形時の体積変化に相当する量の空気がフォーム外に通気し、その通気量を満たすような圧力が発生するとしている。この前提では、変形速度に比例して内部圧力が

際限なく上昇することになる。しかし、実際には通気の駆動力は変形によって発生した圧力であるため、現実にはそれ以上の圧力は発生しない。そのため高速変形下での圧力や振動特性を知るには、内部の空気が変形により圧縮され、発生した圧力により通気し、圧力が低下していく過程を表現する必要がある (Fig.6)。

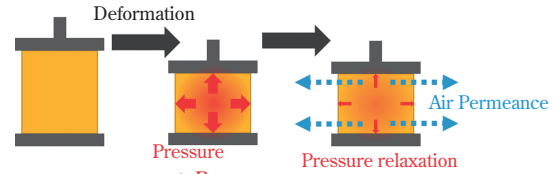


Fig. 6 Schematic illustration of pressure relaxation by air permeation

以下に示すように、高速変形下で発生した圧力が通気により低下していく過程について検討し、フォームの緩和弾性率の表式を得た。まずは微小なステップ変形を加えた際の圧力変化に注目する。フォーム内の空気の体積を V_0 、変形によって発生した圧力と外気圧 P_0 の差を ΔP とし、フォームから流出していく空気の体積流量を u とする。フォームの内部と外部で理想気体の状態方程式が成り立つと仮定した際、フォーム内部の圧力 $P_0 + \Delta P$ について以下の式 (2) が成り立つ。

$$\frac{d(P_0 + \Delta P)}{dt} = -\frac{P_0 u}{V_0} \quad (2)$$

また、フォームの形状から決定する変形時の空気の通気経路に対し、代表長さ L_{rep} 、代表断面積 S_{rep} を置くと、ダルシーの法則から体積流量 u は以下の式 (3) のようにも表される。

$$u/S_{rep} = \Delta P(K/\mu)/L_{rep} \quad (3)$$

式 (2)、式 (3) から、フォーム内部と外部の圧力差の時間変化 $d\Delta P/dt$ について以下の式 (4) が求められる。

$$\frac{d\Delta P}{dt} = -\frac{P_0 \Delta P (K/\mu) S_{rep}}{V_0 L_{rep}} \quad (4)$$

これを ΔP について解くと、

$$\Delta P(t) = \Delta P(0) \exp\left(-t/\left(\frac{V_0 L_{rep}}{P_0 (K/\mu) S_{rep}}\right)\right) \quad (5)$$

となり、通気によって圧力差 ΔP は緩和時間 $V_0 L_{rep} \mu / P_0 K S$ で緩和していくことが分かる。ここで、微小なステップ変形 Δh を加えた直後の圧力差 $\Delta P(0)$ は、

空気の比熱比 γ とフォームの高さ h_0 を用いて

$$\Delta P(0) = P_0 \gamma (\Delta h / h_0) \quad (6)$$

と表される。以上から、変形時に発生する内部の空気の圧力が通気によって緩和していく時の、フォームの緩和弾性率 $G(t)$ は以下の式 (7) で表される。

$$G(t) = E + P_0 \gamma \exp(-t / (\frac{V_0 L_{rep}}{P_0 (K/\mu) S_{rep}})) \quad (7)$$

K/μ は通気度 u から求めることができるため、この式を用いることで、フォームの緩和弾性率を弾性率 E と通気度 u のみから求めることができる。

次に、先の議論から得た圧力の時間変化の表式を用いて、振動特性の解析解を計算する。振動特性試験では、人体に相当する質量 m の負荷子をフォームの上に載せ、下から $X_0(t)$ の振動を加えた際の負荷子の振動 $X_2(t)$ を測定する (Fig.7)。

前項で示した、変形で発生した圧力とその通気緩和過程に加成性が成立する範囲では、振動特性試験中の負荷子の運動方程式は、フォームの緩和弾性率 $G(t)$ 、フォームの断面積 S を用いて以下の式 (8) のとおりである。

$$m \frac{d^2 X_2(t)}{dt^2} = - \int_{-\infty}^t G(t-t') \frac{S}{h_0} X_1(t') dt' - mg \quad (8)$$

これを解いて、 X_2 と X_0 の最大振幅の比 x_2/x_0 を取ると、

周波数 ω に対する振動伝達率 $A(\omega)$ が式 (9) のように得られる。

$$A(\omega) = \sqrt{\frac{\omega^2 \tau^2 (k_{air} + k_0)^2 + k_0^2}{(k_0 - m \omega^2)^2 + \omega^2 \tau^2 (k_{air} + k_0 - m \omega^2)^2}} \quad (9)$$

$$k_0 = \frac{ES}{h_0}$$

$$k_{air} = \frac{P_0 \gamma S}{h_0}$$

$$\tau = \frac{V_0 L_{rep}}{P_0 (K/\mu) S_{rep}}$$

3. 結果、考察

こうして得られた本モデルにおける振動特性の表式は、実験で見られたピークを再現し、その物理的な解釈も説明可能である。Fig.8 では、ウレタンフォームの振動特性の実験値、本モデルによる予測、従来モデルによる予測を比較している。本モデルでは、従来モデルでは再現できなかった、低通気度ウレタンフォームの 8Hz 付近のピークを再現している。

本モデルでは、緩和時間 τ を 0 に近づけた極限において、ピークトップの周波数である共振周波数は $\sqrt{k_0/m}$ となる。これは質量 m 、ばね定数 k_0 の系の固有振動数に相当し、高通気度の領域ではフォームの弾性と共振していることを示している。一方で、低通気度のフォームに相当する緩和時間が無限大の極限では共

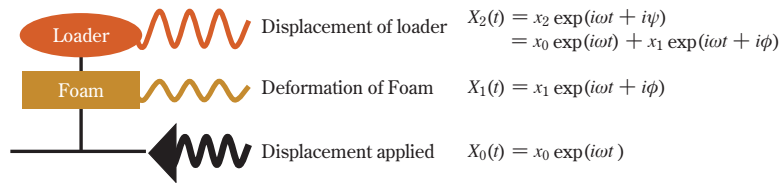


Fig. 7 Vibration characteristic test

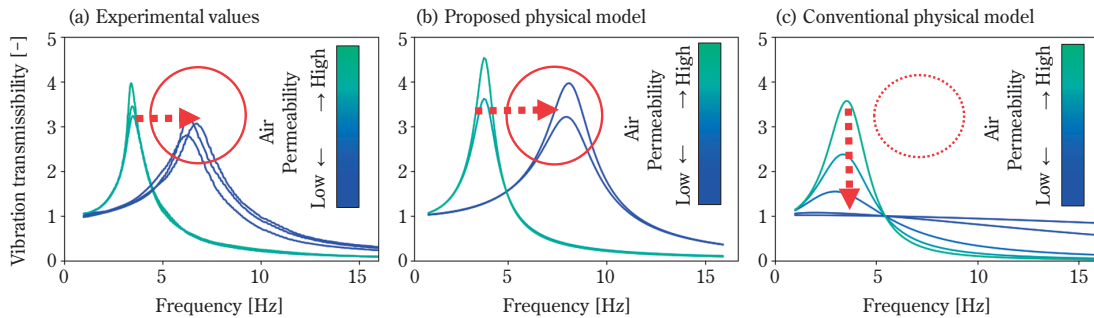


Fig. 8 Vibration characteristics of foam with different air permeance
(a) Experimental values (b) Proposed physical model (c) Conventional physical model

振周波数は $\sqrt{(k_0 + k_{air})/m}$ となり、通気できずに内部に残った空気の弾性と共振することがわかる。8Hz 付近の共振現象は、周波数が $\sqrt{(k_0 + k_{air})/m}$ と一致することから、この空気との共振現象に由来すると考えられる。変形速度に応じて内部の空気が完全に通気するとして従来モデルでは空気との共振現象は捉えられず、本報で提案したモデルを用いることで初めて考慮することができる。

本モデルは、振動特性のピーク位置を制御するために従来とは異なるアプローチが必要となることを示唆している。従来モデルでは、ピーク位置を低下させるためには通気度を下げればよいということが予測されるが、本報の実験結果および計算結果を見ると、いたずらに通気度を下げると、むしろ 8Hz 付近に大きなピークを生じてしまうことが判った。また、ピークの周波数に関しては、従来モデルによる予測では $\sqrt{k_0/m}$ 付近とされていたが、通気度の調整により $\sqrt{k_0/m}$ から $\sqrt{(k_0 + k_{air})/m}$ の範囲で変化することが分かった。こうしたピークトップのふるまいの解析は、本モデルを用いることで初めて可能となる。

4. まとめ

本報では、ウレタンフォームの振動特性を説明する新たな物理モデルを提案した。変形により内部の空気が圧縮され圧力が生じ、その圧力により空気が外部に通気していくことで圧力が低下していく。この過程をモデル化し、振動特性の解析解を求めた。この方法により、従来モデルでは説明できなかった低通気度ウレタンフォームの 8Hz 付近の振動特性ピークを予測することができ、これが空気の弾性率との共振現象であることを明らかにした。本モデルにより、所望の振動特性を満たすために必要な、弾性率、通気度などの物性値の逆算が可能となる。今後、本モデルを活用することで、より高性能な機能性ウレタンフォーム開発の加速が期待される。

5. 参考文献

- [1] A.N. Gent and K.C. Rusch, *Journal of Cellular Plastics*, **46** (2), 1966
- [2] Q. Zhang a, X. Yu a, F. Scarpa a, D. Barton, Y. Zhu, Z. Q. Lang, and D. Zhang, *MSSP*, **179**, 109375 (2022)
- [3] W. N. Patten S. Sha, and C.Mo, *Journal of Sound and Vibration*, **217** (1), 145 (1998)

- [4] M. Bianchi and F. Scarpa, *Smart Mater. Struct.*, **22**, 084010 (2013)