## 〈技術レポート〉

# Biot理論(弾性多孔質振動伝播理論) を用いた 軽量防音カバーの開発と そのトランスミッションへの適用事例

自動車部品事業本部 技術開発部

#### 1. はじめに

自動車業界では、車内静粛性向上の顧客ニーズへの対応策として、車両全体を対象とした騒音対策に取り組んでいる。また、全世界的な環境意識の高まりを発端とする環境規制強化により、低燃費化の要求も高く、部品のさらなる軽量化も求められている。このような環境動向のなか、当社は自動車向けとして、超軽量防音カバーTOMBO™ No.6690-B「エアトーン®」(以下「エアトーン®」)を開発し上市している。

「エアトーン®」は、軟質遮音層と弾性多孔質材との組合せにより、高い遮音性、軽量(従来品の1/2~1/3程度)、複雑な表面形状部品への取り付けが可能な特長を兼ね備えた製品である。このような特長からトヨタ自動車株式会社製金属ベルト式無段変速機(以下CVT)ケースの防音部材などとして採用されている(図1)。

今般,「エアトーン®」をCVTの防音材として採用いただいたことを契機に、2016年4月、米国デトロイトで開催されたSAE2016 World Congressにおいて、「Biot理論(弾性多孔質振動伝播理論)



図1 トヨタ自動車株式会社製CVTケース用「エアトーン®」

を用いた軽量防音カバーの開発とそのトランス ミッションへの適用事例」と題し、同社と共著 という形で「エアトーン®」の技術発表を実施した。

本稿ではSAE2016 World Congressの概要と発表内容について報告する。

## 2. SAE World Congress について

SAEとは、Society of Automotive Engineers の 頭文字を取ったもので、米国で1905年に自動車 の技術者団体として発祥し、1916年にあらゆる 乗り物の標準化を推進する団体へと変遷した。 その後、年を追うごとにSAE の年次総会は大規 模な展示会と講習会を同時に開催するイベント となり、現在ではその年次総会をSAE World Congressという名称で呼ぶようになった。

今回のSAE2016 World Congress は、発表件数 1,500件以上、来場者数 10,000人以上(いずれも 3日間)という大規模なもので、「エアトーン<sup>®</sup>」の発表にも多数の聴講者が訪れた。

## 3. SAE2016 World Congress での発表

以下に「エアトーン®」の概要とトランスミッションへの適用事例について、SAE2016 World Congressで発表した内容を述べる。

#### 3.1 「エアトーン®」の構造

「エアトーン®」は、図2に示すように制振機能を付与した粘弾性フィルムと弾性多孔質吸音層で構成され、その構造は図3に示すように2つのバネを直列にしたような2自由度バネーマス系として模式化され、その防音特性はBiot理論により説明できる。

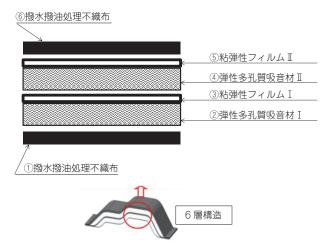


図2 「エアトーン®」の構造 (SAE Internationalの許可を得て転載)

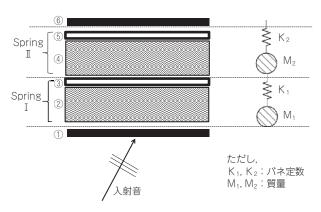


図3 「エアトーン®」構造体の模式図 (SAE Internationalの許可を得て転載)

#### 3.2 Biot 理論について

Biot (ビオ:仏) は、圧縮性粘性流体の詰まった弾性多孔媒質中の地震波伝達の研究で、弾性 多孔質 (土壌) – 圧縮性粘性流体 (水) 間の相 互作用によるエネルギ減衰の概念を導入した弾 性波伝播理論を提唱した<sup>1)</sup>。

この理論は、物理的性格の異なる複数相が複雑に入り混じったマトリックス中の振動伝播を取り扱う際の基礎モデルとして、地震波解析、土木工学、人体模型、および音響振動学など幅広い分野で活用されている。本モデルによる弾性多孔質材の解析には、直接測定するのが困難なパラメータが必要となるため、Allard(アラード:英)らは本理論の波動方程式と、準静的仮説に基づいて、これらのパラメータを測定可能な物理量として表す式を導いた。これはJohnson-Champoux-Allardモデル(1993)<sup>2)</sup>として知られ、今日、音響振

動学ではこの関係式を用いてエネルギ伝播を算 出することが一般的となっている。

図4にBiotモデルでの弾性多孔質材中のエネルギ伝播の模式図を示す。

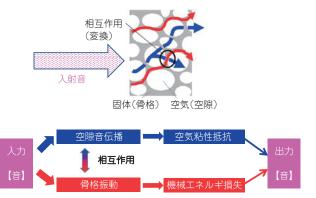


図4 Biotモデルにおけるエネルギ伝播の模式図 (SAE Internationalの許可を得て転載)

Brouard ら<sup>3)</sup>, Bai ら<sup>4)</sup> は弾性多孔質材(6×6) を含む積層防音構造全体の性能をトランスファ・マトリックス・メソッドを用いてシミュレーションするために,各層の定式化(図3,4) と境界面連続性の観点からインターフェイス・マトリックスという演算子を介して,近接層を掛け合わせる手法を示した。

「エアトーン<sup>®</sup>」は**表1**に示すように各層ごとにトランスファ・ファンクションのパラメータ数・サイズが異なる。

表1 各層の変数とマトリックスサイズ (SAE Internationalの許可を得て転載)

層 (材質)	未知数	マトリックス サイズ
空気中 (流体)	$V_3^f$ , $\sigma_{33}^f$	(2×2)
粘弾性フィルム (固体)	$V_1^s, V_3^s, \sigma_{13}^s, \sigma_{33}^s$	(4×4)
弾性多孔質体 (固体+流体)	$V_3^f, V_1^s, V_3^s, \sigma_{33}^f, \sigma_{13}^s, \sigma_{33}^s$	(6×6)

変数の上付添え字 (f, s) は伝播部,流体/固体を表し,応力  $(\sigma)$  が働く,もしくは速度 (V) が生じる部分を表している。下添え字 (1, 3) は方向、1 は横波、3 は縦波を表す。

「エアトーン®」のバネ構造(23: Spring I / Spring II ) は、 弾性多孔質材  $(6 \times 6)$  と粘弾性フィルム  $(4 \times 4)$  をインターフェイス・マトリック

スを介して掛け合わせることで、伝達関数とし て求められる。

弾性多孔質 (吸音材) 中を伝播する入射音のエネルギは、従来理論での空隙音伝播の粘性抵抗に起因する減衰に加えて、弾性多孔質骨格 (固体部) 振動の機械エネルギ損失\*に起因する大きな減衰も考慮することができ、後述する「エアトーン®」の質量則を超える遮音性能を説明することができる。 ※: 固体部のエネルギ伝播を表す速度・応カベクトル  $(V_1^a, V_3^a, \sigma_{33}^a, \sigma_{13}^a)$  の影響が大きい。

固体部の振動伝播は、縦波/横波に分配され(ポアソン比)、(粘) 弾性材料ではそれぞれ基材を振動変形させることでエネルギ減衰する(損失係数)。構造全体の機械エネルギ損失量は伝達マトリックスから計算される。厚み10mm(エアダンパ5mm)の「エアトーン\*」では、このバネ構造により500~800Hz付近に振動低減に起因する遮音ピークが生じる(図5)。

#### 3.3 「エアトーン®」の特長

「エアトーン®」は以下に示すように従来の防 音材にない特長を有する。

(1) 高い遮音性能と周波数特性最適化

図6,7に従来の防音カバーと「エアトーン®」 の構造およびエネルギ伝播の比較を示す。

従来の防音カバーは、樹脂を成形した硬質カバーと多孔質の吸音材からなり、その遮音性能は硬質カバーの質量に比例する。これは一般に質量則と呼ばれており、質量の大きいものほどエネルギの減衰が大きくなるため遮音性能が高くなる。

「エアトーン®」は、前述のBiot理論に基づき、制振機能を付与した粘弾性フィルムと弾性多孔質吸音層の組み合わせにより、各層内でエネルギの減衰がおき、質量に依存しない機構で高い遮音性能を持つ。そのため「エアトーン®」は約3倍の質量をもつ硬質カバーよりも高い吸・遮音性能を発揮し、防音材の軽量化が可能である。

また質量則に従う従来のカバーと比較して、 ほぼ全周波数域で優れた遮音性能を示すことも 特長である。「エアトーン®」は、**図2**③の粘弾性

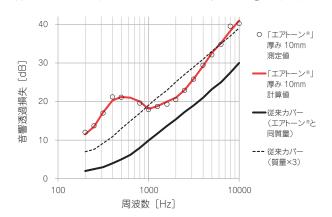


図5 「エアトーン<sup>®</sup>」の防音特性 (SAE International の許可を得て転載)

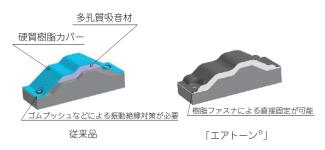


図6 従来の防音カバーとの構造比較 (SAE Internationalの許可を得て転載)

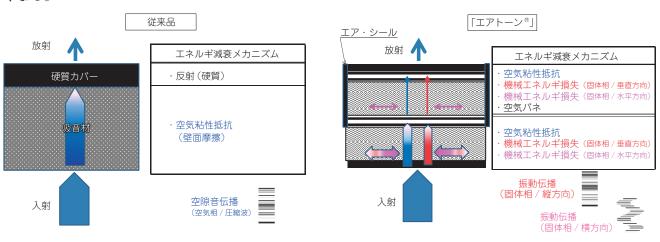


図7 従来の防音カバーとのエネルギ伝播の比較 (SAE International の許可を得て転載)

フィルムIで分割される、『弾性多孔質 (Biotモデル)』と、『空気バネ層』\*\*を連成した2自由度バネーマス系共振現象による減衰に起因する特徴的な遮音ピークを持つ。これより各層の厚さなどのパラメータを最適化することで、対策音源に合わせて周波数特性を変化させた最適構造を設計することが可能である(図8)。

※※:成形形状の安定、および端部の液浸透防止のために、外周を圧着することで、図2の③/④/⑤で成形される閉空間(空気バネ)の作用で振動絶縁効果が加算され、裏面側に伝播、放射される透過音のエネルギはさらに低減される。

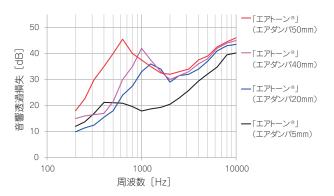


図8 遮音ピーク周波数の設計例 (SAE Internationalの許可を得て転載)

#### (2) 高い設計自由度

「エアトーン®」は、任意の立体形状に一体成形が可能なため、複雑な表面形状部品への取り付けが可能である。また、成形カバー表面が柔軟性(制振性)を有することで硬質カバーによく見られる振動入力に伴うビビリ音(2次放射音)が無く、その対策として用いられていた取り付けボルト部のフローティングが不要である。また、防音カバー全体が柔軟性を有することから、エンジン、トランスミッションなどの振動を伴う騒音源に悪影響無く密着させて使用することにより、限られたスペースを有効に活用でき、コンパクト化に対応した使用が可能である。さらにカバー内面の音反射による騒音悪化も抑制できる特長を有する。

#### 3.4 CVT への適用事例

自動車のトランスミッションとして用いられる CVTは、機構に由来する特有のメカノイズ(ギヤうなり音、ベルトノイズ)が発生する。ここでは、ギヤうなり音低減を目的としてトヨタ自動車株式会社製 CVTに「エアトーン®」を防音材

として適用した事例を紹介する。

図9に「エアトーン®」のCVTへの搭載例を示す。CVTの複雑な形状に合わせて「エアトーン®」が成形されていることが分かる。CVTとの固定には「エアトーン®」の軽量という特長を活かし、図10に示すような樹脂クリップを採用した。従来の防音カバーでは重量が重いため、固定方法にはボルトを使用していたが(図11)、軽量な「エアトーン®」の組み付けは、図10に示すように樹脂製クリップをボルト穴に差し込むだけとなり、生産性向上にも寄与している。

図12に「エアトーン®」のギヤうなり音に対する効果を示す。音響ホログラフィによるノイズ解析でギヤうなり音の音源部位を特定し(図上段左の黄色い部分),効果的な形状を設計した結果、「エアトーン®」を装着しない場合に対して約4dB音圧レベルが低下する効果が確認された。

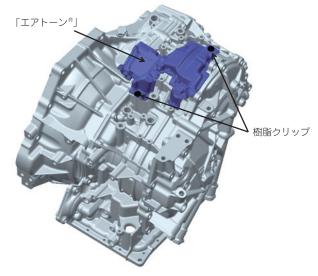


図9 「エアトーン®」のCVTへの搭載例 (SAE Internationalの許可を得て転載)

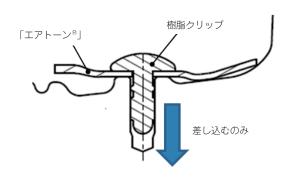


図 10 樹脂クリップによる「エアトーン®」の固定方法 (SAE International の許可を得て転載)

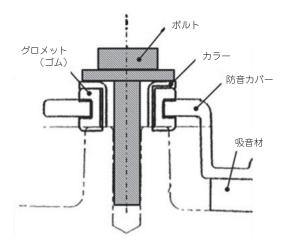


図11 ボルトによる従来型防音カバーの固定方法 (SAE Internationalの許可を得て転載)

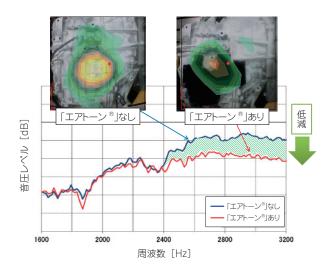


図12 「エアトーン®」のギヤうなり音に対する効果 (SAE International の許可を得て転載)

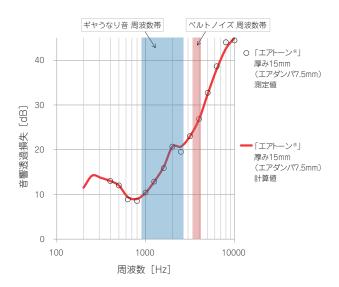


図13 ノイズ周波数帯と「エアトーン®」の防音特性 (SAE International の許可を得て転載)

「エアトーン®」は**図13**に示すように、高い周波数ほど防音性能が高くなる傾向があるため、ギヤうなり音より高周波側にあるベルトノイズに対してさらに高い防音効果を発揮できるものと考えられる。

#### 4. おわりに

SAE2016 World Congress に お け る, 「 エ ア トーン\* 」の技術発表について紹介した。

今後も車内の静粛性向上要求,および低燃費 化要求の高まりによる車両の軽量化・コンパク ト化の背反として発生する異音対策要求がます ます厳しくなると予測される。また同時に,そ れらの対策アイテムに求められる要求も今以上 に厳しくなると考えられる。今回発表した「エ アトーン\*」のように,これからも常に「音」に 注目し続けることで,お客さまのニーズに即し た製品開発を実践していく所存である。

## 参考文献

- M. A. Biot "Theory of Propagation of Elastic Waves is a Fluid-Saturated Porous Solid." Journal of the Acoustical Society of America, Vol.28. No.2 PP168-178, March, 1956
- J. F. Allard "Propagation of Sound in Porous Media."
  Elsevier Applied Science, England (1993)
- B. Brouard, D. Lafarge and J. F. Allard "A General method of modeling sound propagation in layered media." J. Sound Vib, 183,7-12 (2004)
- Guofeng Bai, Pei Zhan, Fusheng Sui, Jun Yang "Research on sound insulation of multiple-layer structure with porous material and air-layer." Inter-noise2014 (2014)

\*本稿は以下の論文をSAE Internationalの許可を得て転載したものである。

Kimura, K., Habuchi, R., Kono, T., Mori, T. et al., "Development of a Lightweight Soundproof Cover Using the Biot Theory (Vibration Propagation in Elastic Porous Materials), and an Example Application to a Transmission," SAE Technical Paper 2016-01-0517, 2016, doi:10.4271/2016-01-0517.

- \*「TOMBO」はニチアス(株)の登録商標または商標です。
- \*「エアトーン」はニチアス(株)の登録商標です。
- \*本稿の測定値は参考値であり保証値ではありません。