〈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[®]」 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。

ニチアス技術時報 2016 No. 4

⑥撥水撥油処理不織布



(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¹⁾。

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)²⁾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³⁾, Bai ら⁴⁾ 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[®]」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。

層(材質)	未知数	マトリックス サイズ
空気中 (流体)	V_3^{f} , σ_{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)
弹性多孔質体 (固体+流体)	$V_{3}^{f}, V_{1}^{s}, V_{3}^{s}, \sigma_{33}^{f}, \sigma_{13}^{s}, \sigma_{33}^{s}$	(6×6)

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)

変数の上付添え字 (f, s) は伝播部, 流体/固 体を表し, 応力 (σ) 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(図3: Spring I / Spring II)は,弾性多孔質材(6×6)と粘弾性フィルム(4×4)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(V₁^o, V₃^o, σ₃₃^o, σ₁₃^o)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

放射

入射

硬質カバー

及音材

「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。

従来品

エネルギ減衰メカニズム

反射(硬質)

·空気粘性抵抗

(壁面摩擦)

空隙音伝播

(空気相/圧縮波)

「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2③の粘弾性





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-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。





(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。