



放熱する吸音材 ～MIF®～

Noise Absorbing Material with Thermal Conductance “MIF®”

富山 幸治*
Koji Tomiyama

吉田 真司
Shinji Yoshida

片山 直樹
Naoki Katayama

鈴木 康雄
Yasuo Suzuki

井門 康司
Yasushi Ido

近年の自動車分野において、静粛性の高いEV/HEVへのシフトが進む中、モータやインバータ等のカーエレクトロニクス製品に対しても静音化ニーズが高まっている。ポリウレタンフォームは軽量で柔軟な吸音・遮音材料として自動車、建材など幅広い分野で用いられるが、多孔質構造に由来した高い断熱性を有するため、モータ等のジュール熱を伴う発熱部品に対しては熱的な弊害があり、防音材としての適用は困難であった。それに対し本件では、マトリックス内に充填した熱伝導粒子を磁場により配向・構造化し、ポリウレタンフォームの熱伝導率を高める技術を開発した。さらに当社独自の高耐熱ポリウレタン材料、およびモールド成型による形状自由度との組み合わせにより、熱対策と騒音対策を両立できる制遮音製品を実現した。

With the advanced development of environment-friendly cars such as electric and hybrid vehicles, automotive electronic products are required to have lower acoustic noise performance to create quiet vehicles. Polyurethane foam is widely used as a sound proof material; however, it cannot be used for electronic products like motors with fever due to Joule heat. Because it has high heat insulating property. This paper reports on our new polyurethane foaming technology that significantly enhances the thermal conductivity. We also succeeded in the creation of sound proof products that have high sound insulation property and thermal conductivity by using the technology in combination with our original heat resistance polyurethane material and molding technology.

キーワード：騒音低減、放熱、磁気誘導発泡成形法、ポリウレタンフォーム、モータ

1. 緒 言

近年の自動車分野では、安全運転支援システム、テレマティクスなど、高度な制御・電装化が進み、多くのエレクトロニクス製品が自動車に使用されるようになった。一方で、車両は低燃費・クリーンエネルギーへの潮流から、静粛性の高いEV/HEVへのシフトが進んでいる。そのため、これまでエンジン音にマスキングされてきた小型モータやインバータなどのカーエレクトロニクス製品の音に対しても静音化ニーズが高まっている。

当社では1997年から独自の高耐熱・難燃性ポリウレタンフォームを開発し、主に自動車用の制遮音製品として量産してきた。ポリウレタンフォームは、セルとよばれる気泡部分と、ポリマー構造を有する骨格部分からなる多孔質材料であり、軽量で柔軟な吸音・遮音材料として様々な分野で広く用いられる。しかし、その多孔質構造由来の高い断熱性のため、通電によるジュール熱を伴うエレクトロニクス製品に対しては熱的弊害となり、防音材としての適用が困難であった。図1にポリウレタンフォーム断面のSEM画像およびモデル図を示す。

ポリウレタンフォームの物性向上に際しては、整泡剤の選択を主とした配合設計の最適化など、化学的な処方によるものが一般的である⁽¹⁾。そのため特性変化は限られた範囲でしか得ることができず、熱的物性も同様であった。それに対し筆者らは、磁場を用いた新しいポリウレタンフォーム成形法

として、磁気誘導発泡成形法（Magnetic Induction Foaming；以下MIFと称す）*1を考案した^{(2),(3)}。これにより、これまで化学的処方では困難であった領域まで特性を変化させることが可能となった。MIFでは、セル構造の制御による機械的物性の制御⁽⁴⁾や、IMC法との併用による吸音特性の向上⁽⁵⁾など様々な応用が可能となるが、本開発は、断熱材であるポリウレタンフォームに放熱性能を付与することを目的とした。具体的には、マトリックス内に充填した磁性熱伝導粒子を、磁場配向・連接構造とすることによりヒートブリッジを形成し、放熱可能なポリウレタンフォーム防音材の実用化に成功したので、以下報告する。

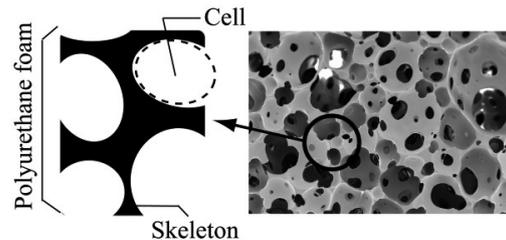


図1 ポリウレタンフォーム多孔質構造のモデル図およびSEM画像

2. MIFの原理

2-1 磁場中における磁性粒子の挙動

磁性粒子を磁場中に置くと、磁気誘導により磁性粒子に磁極が生じる。磁性粒子が磁場により受ける磁気体積力 F^M は

$$F^M = \mu \cdot \nabla H \quad \dots\dots\dots (1)$$

と表せる。磁場中の磁性粒子は磁気双極子を生じ、その磁気モーメントを μ と定義する。 H は粒子が受ける磁場である。ここで ∇H は磁場勾配を意味するが、磁場勾配は外部から印加される磁場によって発生する巨視的な磁場勾配と、近傍の磁性粒子からの誘起磁場によってつくられる微視的な磁場勾配の双方からなり、後者による力は特に磁気双極子相互作用力とよばれる。

一方、磁場分布という観点でみると、印加される磁場の状態は非一様磁場、一様磁場の2つに大別できる。前者の非一様磁場においては、磁性体がクラスターを形成しながら磁極に近い領域へと移動し、巨視的な磁場勾配に応じて偏った分布をとる。他方、後者の一様磁場においては、巨視的な磁場勾配が存在しないため、磁性粒子は磁気双極子相互作用力のみを受け、磁力線に沿って互いに接続した、“鎖状クラスター構造”を形成する^{(6),(7)}。

これに対し筆者らは、可視粒径領域における簡素なモデル実験を通じて、このような現象に対する数値計算との比較検証を行った。表1に主な実験条件を、図2に一様磁場中、図3に非一様磁場中における磁性粒子の定常状態の様子を示す。

ここで実施した数値計算には、粒子一個一個の動きを追跡できる粒子法 (discrete particle method) を採用した。式(1)で示される磁気体積力、磁気双極子相互作用力の他、重力、粒子の接触による反力などを外力項として導入し、粒子のバラつきも考慮したオリジナルの計算モデルおよびソースコード^{*2(8)}を用いており、定性的にモデル実験の結果とよく一致している。

この結果からも、上述の通り磁場状態により磁性粒子の挙動が異なること、および一様磁場中においては磁性粒子が磁力線に沿って鎖状クラスター構造を形成することが確認された。

表1 検証実験における一般実験条件

| Experiment | Fig.2 | Fig.3 |
|-----------------------|--|----------------|
| Solvent | Water | |
| Magnetic flux density | Max 70mT (Non-uniform) | 70mT (Uniform) |
| Particle | Sr-ferrite (size 100 μm ~ 500 μm) | |
| Vessel | Polystyrene : cubic / inside edge 13mm | |
| Dispersion ratio | 1.0%:vol | |
| Simulation | Discrete particle method | |

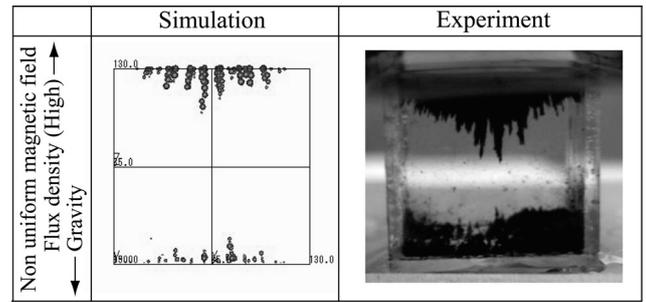


図2 非一様磁場条件におけるシミュレーション結果と実験結果の比較

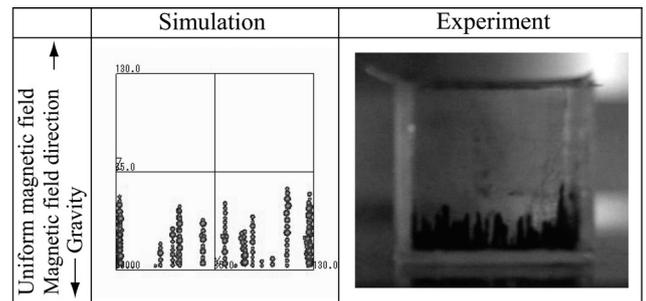


図3 一様磁場条件におけるシミュレーション結果と実験結果の比較

2-2 MIFの成形プロセス

MIFの原理を述べるにあたり、まずはポリウレタンフォームの発泡原理を説明する必要がある。その過程は原料混合から発泡完了まで化学的・物理的に動的な現象であり、実際には各過程が重なり合いながら反応が進行する。ここでは、Turnerらが示したフォーム生成の総括モデル⁽⁹⁾を基に、ポリウレタンフォームの成形プロセスを述べる。

ポリウレタンフォームではポリイソシアネートとポリオールとの2つの液状原料を化学反応させることで、ポリウレタンポリマーを生成すると同時に、ポリイソシアネートと水の反応により尿素結合を有するポリマーの生成と、炭酸ガスの生成による発泡現象が進行する。二液を混合すると初期状態では液状であり(図4(1)、(2))、炭酸ガスの発生により気泡核が形成され混合液はクリーム状となりながら、膨張が開始される(図4(3))。反応液は膨張を続けると同時に高分子量化が進み粘度が上昇する(図4(4))。やがて気体発生(及び温度上昇)による体積膨張とポリマーの気泡膜の強さとの均衡により発泡現象が完了する。連続気泡フォームでは発泡反応末期の時点で気泡膜が破壊されて、気泡内ガスが放出、空気と置換される(図4(5))。膨張完了後も高分子量化反応は継続するため、骨格部の強度は暫く増大し続ける。なお、ここではカップでの発泡状態を模擬して説明したが、実際のモールドフォームにおいては、金型内へこの原料を注型し

成形を行う。そのため、成形後のフォーム形状は、必然的に金型のキャビティー形状が転写される。

これに対しMIFにおいては、磁場による物理的制御をもたらすために、初期の段階で原料へ第三成分として磁性体を混合する(図4(A))。このとき磁性体の形態は粒子状でも、あらかじめベース液へ粒子を分散させた懸濁液状でも良く、目的に応じて使い分けができる。今回の目的においては、粒子状のものをを用いる。粒子の挙動は磁場により決定されるが、2項で示した結果から、少なくとも磁場方向に対し均質な構造を持つ成形体を得るためには、一様磁場を作用させる必要がある。なお、ここでは一様磁場を印加した際概念図となっているが、必要に応じて非一様磁場を用いて成形を行うこともある。

このような制御が可能となる要因の一つとしては、基本的にフォームの体積膨張速度に比べて粘度上昇速度の方が遅いため、発泡中に磁性粒子が移動可能な期間が存在することが挙げられる。つまり必然的に、磁場印加のタイミングは図4(C)～(E)の期間が好適となる。また、フォームの樹脂化に伴い磁性粒子のつくる構造はその後崩れることなく保持されるため、上記期間以降に磁場を印加し続けたとしても得られる結果は同様である。

3. 熱伝導率の向上

3-1 フィラーの分散状態と熱伝導率

一般的に、エラストマー、樹脂等に対しては、熱伝導率の高い粒子(フィラー)を高充填することで、熱伝導率を高める方法が知られている。ただし、同じ熱伝導率のフィ

ラーを用いても、マトリックス中のフィラーの分散状態により実際の熱伝導率は大きく異なる。

MIFの簡易モデルとして、熱伝導材料を熱伝導方向と平行に樹脂と複合したモデルをModel-Aとする。また比較として、熱伝導材料を粒子として樹脂へ単純分散したモデルをModel-Bとする。

Model-A複合体の熱伝導率は理想的には複合則で計算できるので、

$$\lambda_c = (1-\phi)\lambda_m + \phi\lambda_f \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 λ_c は複合体の熱伝導率、 λ_m は樹脂(マトリックス)の熱伝導率、 λ_f はフィラーの熱伝導率を示す。 ϕ はフィラーの体積分率である。

また、Model-B複合体のようなフィラー単純分散での熱伝導率はBruggemanの式が良く知られており、

$$(1-\phi) = \frac{\lambda_c - \lambda_f}{\lambda_m - \lambda_f} \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_f} \right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (3)$$

となる。

本件において、マトリックスはポリウレタンフォームとなるが、その熱伝導率は非常に低く、熱伝導率の高いフィラーを単純分散しても大きな熱伝導率向上は難しい。一例として図5に、 $\lambda_m=0.03\text{W/mK}$ 、 $\lambda_f=50\text{W/mK}$ とした場合の、フィラー体積分率に対するそれぞれの複合体の熱伝導率計算値を示す。

この結果からも、熱伝導粒子の単純分散では熱伝導率向

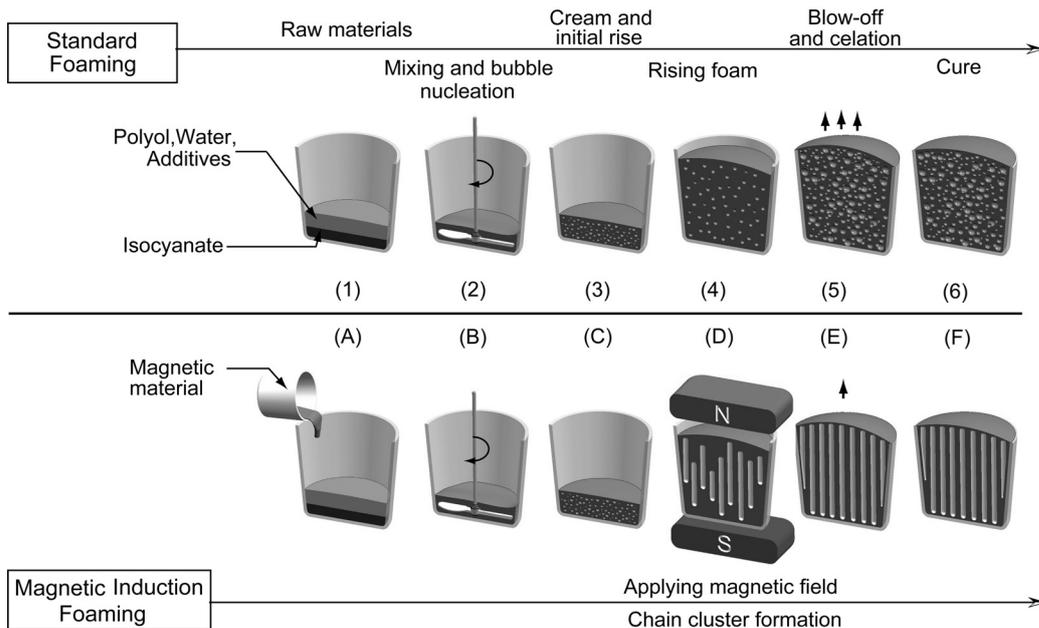


図4 通常のポリウレタンフォーム発泡工程とMIF発泡工程との比較

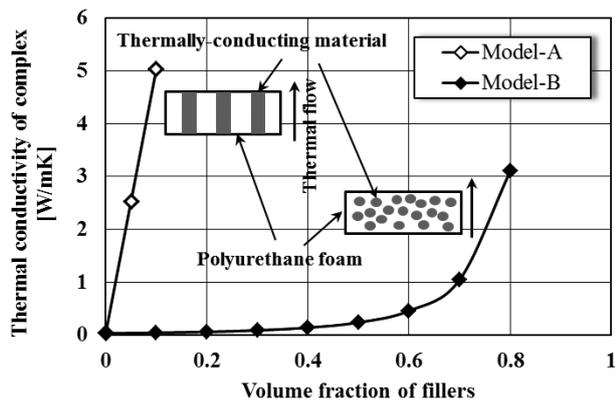


図5 熱伝導率のモデル計算結果

上は難しいと言える。一方で、Model-Aの結果から、MIFのコンセプト通り、熱伝導粒子を熱流方向に沿って配向・接続することで、低充填率でも熱伝導率の向上が見込める。

3-2 MIFによる熱伝導率の向上

MIFにより成形したポリウレタンフォームの熱伝導率について図6に示す。通常のポリウレタンフォームが0.03W/mKであるのに対しMIF®では、最大で1.2W/mKとなり、熱伝導率を40倍にまで向上させることができた。

フィラーは当社独自の複合磁性粒子を用いており、配合設計上の体積分率はそれぞれ数%~十数%volである。実際とは条件の異なるモデル計算のため、厳密な比較はできないが、改めて図5の結果をみても、単純分散では発現し難い向上幅であることは明白である。

ここで、Sample No.3相当の試料、および同じ配合にて磁場印加せずに成形した試料について、X線CTにより内部構造の観察を行った。図7に撮像を示す。この結果から、MIF®においては、狙い通りフィラーが配向・接続することにより高い熱伝導率を発現していると考えられる。

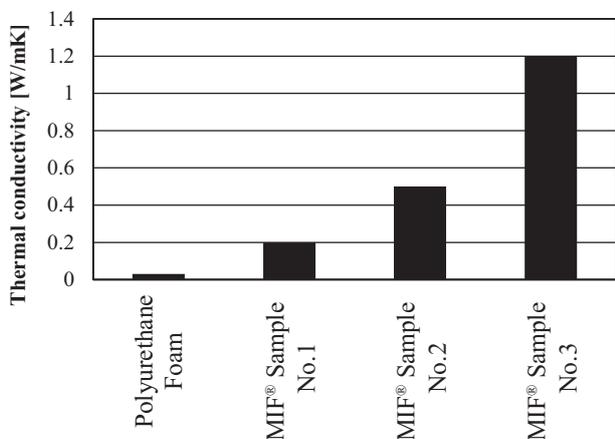


図6 各サンプルの熱伝導率 (実測値)

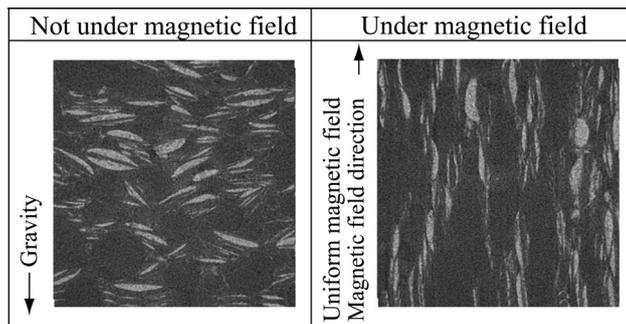


図7 各サンプル内部のX線CT画像

4. MIF®の音響性能

4-1 吸音性能の特徴

ポリウレタンフォームは多孔質構造、および面密度に由来する吸音・遮音性能を有するが、MIF®においては、充填されるフィラー、および配向構造によりその性能が変化する。

図8にSample No.1 (0.2W/mk) 相当のMIF®シートサンプルt20mmでの垂直入射吸音率を示す。比較として、同じ配合にて磁場印加せずに成形したもの、およびフィラーを充填しないベースのポリウレタンフォームの吸音率も示す。

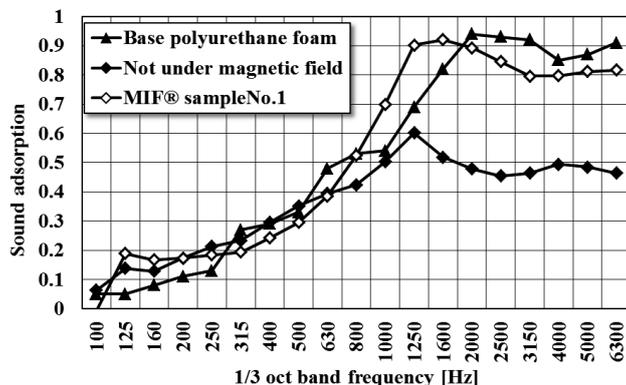


図8 各サンプルの垂直入射吸音率

この結果から、単純にフィラーを分散した状態では、ベースのポリウレタンフォームに比べ高周波での吸音率が悪化する傾向がみられる。これはフォームの吸音性能と相関の高い、流れ抵抗 (AFR) の変化が主な要因と考えられる。フィラーがランダムに充填されることで、音の入射方向に対する流れ抵抗が大きくなることが挙げられる。一方、MIF®においては、フィラーは音波の入射方向に対し平行なため、流れ抵抗の悪化が少ないと考えられる。その結果、吸音率はベースウレタンにほぼ近い性能を発現している。

4-2 遮音性能の特徴

遮音性能については、一般的に質量則に基づく面密度の

影響が支配的であるが、これについてもフィラーの配向構造による特徴がみられる。図9にMIF® sample No.2 (0.5W/mk) 相当、サイズt6mm×300mm角のサンプルにおける音響透過損失の測定結果を示す。

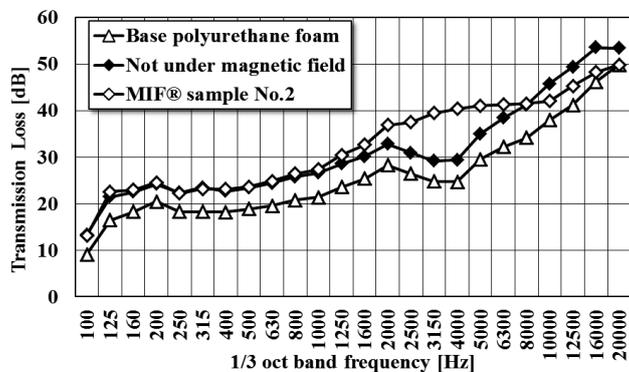


図9 各サンプルの音響透過損失

本結果から、フィラー充填のないベースのポリウレタンフォームに対し、単純にフィラーを分散だけでも、面密度がUPするため遮音性能が向上する。一方、MIF®においては、磁場印加のないフィラー単純分散のサンプルに比べ、同じ面密度にも関わらず、1~8kHzの範囲で最大10dB程度の遮音性能向上が確認された。これは、フィラーの配向構造により試料のヤング率が変化し、この周波数域でのコインシデンス効果^{※3}の影響が小さくなったためと考えられる。なお、このMIF® sample No.2 (0.5W/mk) 相当t6mmの遮音性能はt1mmの鉄板に匹敵する高い遮音性能である。

5. モーターカバーでの効果確認

次に、実際の製品での効果を検証するため、小型の汎用DCモーターを用いた実証実験を行った。モーターは16V定電圧駆動で、φ36mm程度の単純な円筒形状である。それに対しMIF® sample No.2 (0.5W/mk) 相当材をモールド発泡にて成型し、防音カバーとした。防音カバーの外観写真は本稿の文頭口絵に示している。なお、このときの配向方向はカバー上下に設けたフィン形状の方向とした。図10に近接100mmの位置でのモーター騒音レベルの測定結果を示す。

この結果から、特にモーター騒音特有の高周波騒音に対してオーバーオール値で約10dB程度の効果騒音低減効果が確認できた。

一方、モーターのジュール熱による発熱に対してMIF®の放熱効果を確認するため、モーター表面温度の測温実験を実施した。図11に測定結果を示す。

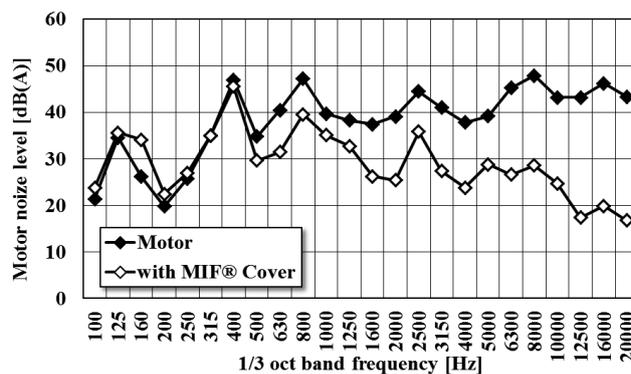


図10 モーター近接騒音レベル

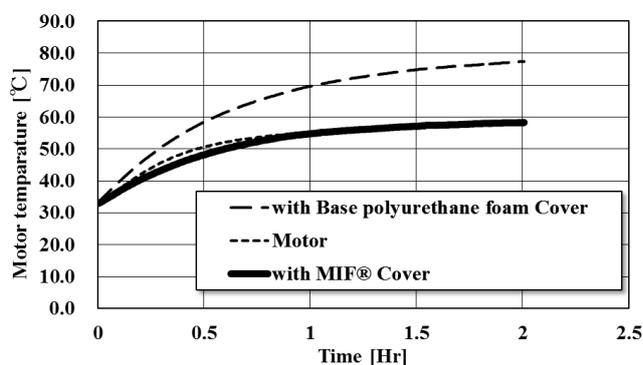


図11 モーター表面温度

通常のポリウレタンフォームによるカバーでは、断熱効果によりモーターの表面温度が単体駆動時に比べ20°C程度上昇した。一方、MIF®を用いたカバーでは、2時間連続駆動でも、ほぼ単体駆動時と同等の昇温カーブが得られた。

以上の結果から、MIF®とモールド成型を組み合わせ、放熱と防音を両立する防音カバーを製作可能であることが示された。

6. 結 言

磁気誘導発泡成形法 (MIF) により、ポリウレタンフォームの熱伝導率を大きく向上させ、放熱する吸音材 (MIF®) を開発し、実用化した。また、MIFによりポリウレタンフォームの音響特性においても幾つかの良好な特性が確認された。

今後、自動車を始め多くの分野で電装化が進んでいくことが予想され、エレクトロニクス部品への静音化要求も高まると考えられる。MIF®は熱対策と騒音対策を同時に対策できるアイテムとして、モーター用防音材をはじめとした幅広い用途での活用が期待できる。

用語集

※1 磁気誘導発泡成形法 (MIF)

MIFは東海ゴム工業(株)の登録商標であり、磁気誘導発泡成形法 (MIF) を用いた防音材等の商品全般を指す。本稿において、技術名称としてのMIFには商標マークを付けず、両者を区別している。

※2 オリジナルの計算モデルおよびソースコード

元となるソースコードは名古屋工業大学 井門研究室によるもの。拡張計算モデルは同研究室と東海ゴム工業(株)との共同研究による。

※3 コインシデンス効果

遮音材に音波を入射すると、音響加振された板の屈曲振動と、音波の斜め方向成分の波長との一致により一種の共振状態となり、特定の周波数帯域以降で急激に遮音性能が低下する。その周波数はコインシデンス限界周波数とよばれ、試料のヤング率や面密度等により決まる。

参考文献

- (1) 最新ポリウレタンの設計・改質と高機能化技術全集、技術情報協会 (2007)
- (2) 富山幸治、井門康司、「磁気誘導発泡成形法を用いた機能性材料の開発」、日本AEM学会誌、Vol.16,No.2, pp.70-75 (2008)
- (3) 富山幸治、井門康司、特許4906527、吸音体及び吸音構造体 (2007)
- (4) 富山幸治、井門康司、「非一様磁場を用いた発泡性樹脂の多孔質構造制御」、実験力学、第8巻、第4号、pp.366-370 (2008)
- (5) 富山幸治、井門康司、「磁気誘導発泡成形法を用いた新しいインモールドコーティング成形法の開発」、日本AEM学会誌、Vol.18、No.4、pp.359-364 (2010)
- (6) G. L. Gulley and R. Tao, Structures of a magnetorheological fluid, International Journal of Modern Physics B, Vol.15, Nos. 6&7, pp851-858 (2001)
- (7) 日本機械学会編、機能性流体・知能性流体、コロナ社 (2000)
- (8) Koji Tomiyama and Yasushi Ido, "Behavior of Magnetic Particles in a Liquid under Non-uniform Magnetic Field and Gravity" Magnetohydrodynamics, Vol.44, No.4 (2008)
- (9) ポリウレタンの基礎と応用、シーエムシー出版 (2000)

執筆者

富山 幸治* : 東海ゴム工業(株) ウレタン事業部
博士 (工学) 技術士 (機械部門)



吉田 真司 : 東海ゴム工業(株) ウレタン事業部
課長



片山 直樹 : 東海ゴム工業(株) 材料技術研究所
担当課長



鈴木 康雄 : 東海ゴム工業(株) 材料技術研究所



井門 康司 : 名古屋工業大学 大学院
工学研究科 教授
工学博士



*主執筆者