

放熱性吸音材 (MIF) の車載向け性能向上

Improvement of Noise Absorbing Thermal Conductance “MIF” for In-Vehicle Use

富山 幸治*
Koji Tomiyama

吉川 慧
Kei Yoshikawa

熊谷 信志
Shinji Kumagai

大脇 潤己
Junki Owaki

牧村 敏史
Satoshi Makimura

宮永 貴志
Takashi Miyanaga

現在、自動車分野は大きな変革期を迎えている。この構造変革は「CASE」(Connected、Autonomous、Shared、Electric) と呼ばれ、EV化や自動運転をはじめとした車両のエレクトロニクス化、デジタル化が急速に進みつつある。これに対し当社では、磁場配向による吸音ポリウレタンフォームの高熱伝導率化技術 (MIF) を開発し、こうした車載エレクトロニクス製品の熱対策と騒音対策を両立できる防音製品の量産化を成功させた。最近では、車載小型製品以外にも、EV駆動用モータ等の大型製品向けの放熱、静粛性ニーズが高まっている。今回、MIFの伝熱構造に着目し、放熱性を従来の2.5倍 (通常ウレタンの最大100倍) まで向上させた。これを応用し、モーターケースを覆うことで防音効果に加え、空冷性能をより高める防音冷却デバイスとしての可能性を見出した。

The automotive sector is currently undergoing a major transformation. This structural change is called "CASE" (connected, autonomous, shared, electric), and the electrification and digitization of vehicles are advancing rapidly. Under these circumstances, we have developed a magnetic induction foaming (MIF) technique for improving the thermal conductivity of sound absorbing polyurethane foam through magnetic field orientation, and succeeded in mass production of soundproofing products capable of achieving both thermal and noise countermeasures for in-vehicle electronics products. Recently, there has been an increasing need for heat dissipation and noise reduction for large products such as electric vehicle drive motors, in addition to in-vehicle small products. This time, focusing on the heat transfer structure of MIF, the heat dissipation property was improved by 2.5 times (up to 100 times of common urethane). Applying this method, this paper finds the possibility of MIF as a soundproofing cooling device that further enhances the air-cooling performance in addition to the soundproofing effect by covering the motor case.

キーワード：防音、放熱、ポリウレタンフォーム、EV、モータ

1. 緒 言

今の自動車分野は、100年に一度といわれる大きな変革期を迎えている。これらは、「CASE」(Connected、Autonomous、Shared、Electric) と呼ばれるが、なかでもEV、自動運転は大きな潮流となっている。

自動運転化に向かって車載エレクトロニクス製品の搭載数が増える中、静粛性の高い環境対応車においては、これまでエンジン音にかき消されていた車載製品に対する作動音対策ニーズが高まっている。またそのような環境対応車の普及に伴って、ユーザーの静粛性に対するレベル自体も一層高くなっており、最近では駆動用モータ等の電動パワートレイン*1に対しても静粛性ニーズが高まりつつある。

今後、電動パワートレインは小型化、高出力化が進むことから発熱密度が高くなるため、より高い放熱技術も必要となってくる。

当社は吸音ポリウレタンフォームの新しい成形技術・および高熱伝導化技術として、磁気誘導発泡成形法 (Magnetic Induction Foaming ; 以下MIF) を開発^{(1)~(4)}、ジュール熱を伴う車載小型モータ用途向けに、放熱と防音を両立できる防音カバーの量産化に成功している。

今回、MIFの伝熱構造に着目し、MIFの熱伝導率をさら

に向上させ、軽量化も可能となる技術を開発した。

また実際の製品を想定し、金属板との複合構造設計とすることで、防音効果のみならず、空冷性能をより高める防音冷却カバーとしての新たな価値・可能性を見出したので、以下報告する。

2. MIFの原理と概要

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り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。

磁場勾配をもたない“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配向・接続した、“鎖状クラスター構造”を形成する^{(5), (6)}。

MIFでは、この物理現象を応用して、ポリウレタンフォームの内部に磁性粒子によるヒートブリッジを構築し、厚み方向の熱伝導率を飛躍的に高める^{(7), (8)}。

図1にMIF発泡成型プロセスの概念図を示す。発泡反応プロセスとしては、体積膨張速度に比べて粘度上昇速度の方が遅いため、磁気体積力による制御が可能な低粘度領域で一様磁場を印加する(図1(D))。その後、樹脂化反応の進行に伴い、磁性粒子のつくる構造が固定化され、特有の内部構造を有したポリウレタンフォームが成型される(図1(F))。

図2に磁場印加有/無での成型品写真を示す。この結果からも、ポリウレタンフォーム内部に磁性粒子によるヒ-

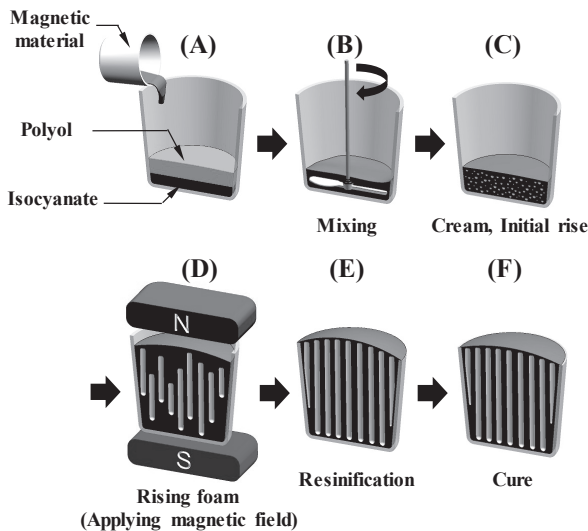


図1 MIFの発泡成型プロセス

Sample View	Not under magnetic field	MIF Under magnetic field
Top View		
Side View (Section)		

図2 磁場印加有無での発泡成型品写真

ートブリッジが形成されていることがわかる。

3. MIFの熱伝導率向上

3-1 フィラーの分散状態と熱伝導率

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ある。ただし、同じ熱伝導率のフィラーを用いても、樹脂(マトリックス)中のフィラーの分散状態により熱伝導率は大きく異なる。

フィラー単純分散での熱伝導率はBruggemanの式から、

$$(1-\phi) = \frac{\lambda_c - \lambda_f}{\lambda_m - \lambda_f} \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_f} \right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで、 λ_c は複合体の熱伝導率、 λ_m は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。

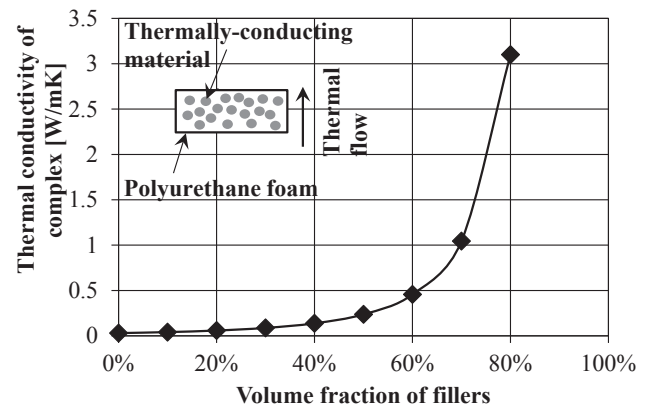


図3 フィラー単純分散における複合体の熱伝導率

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は得られにくい。一例として図3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複合体の熱伝導率の計算値を示す。複合体の熱伝導率はフィラーの充填量が40vol%程度まではほとんど増加せず、充填量が60vol%以上になると指数関数的に熱伝導率が増加する。これはフィラーを単純分散しても、低充填ではフィラー同士が接触せず、熱経路のネットワークが形成されないためである。

こうしたマトリックス中の伝熱経路に関して、上利らは熱伝導性フィラーと一緒に低融点合金を添加する方法を提案している。溶融した低融点金属により、フィラーが連続構造を形成することで、格段に高い熱伝導率を得られると

報告している⁽⁹⁾。

MIFでは、当社独自の磁性粒子（以下、メインフィラー）を磁場配向することで伝熱方向に沿った直線状の経路を形成し、単純分散では困難な低充填率領域での高熱伝導化を実現できる。

今回この伝熱経路に着目し、磁性を有したメインフィラーとともに、非磁性粒子を“サブフィラー”として充填する新たな方法を考案した。メインフィラーが磁場配向することで形成した熱経路の間を、磁性をもたないサブフィラーで橋渡し（ブリッジ）し、新たな伝熱ネットワークを形成することで、より効率の良い熱伝導が期待できる。図4に概念図を示す。

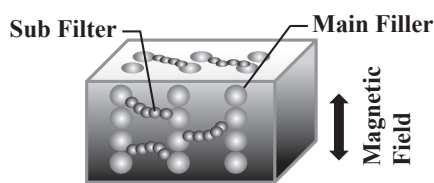


図4 フィラーによる伝熱ネットワーク概念図

3-2 伝熱ネットワークによる熱伝導率の向上

上記の検討を基に、メインフィラー+サブフィラー充填によるMIFウレタンフォームサンプルを発泡成型した。X線CTによるサンプルの断面画像を図5に示す。

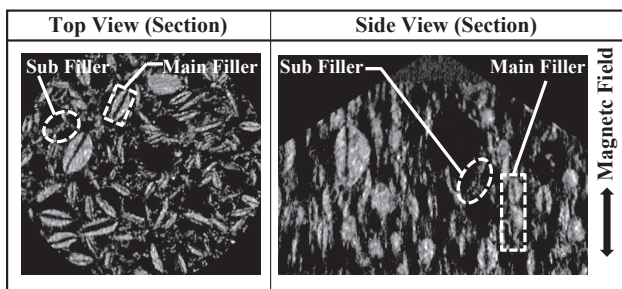


図5 開発材の断面X線CT画像

白く映っているのがフィラーである。狙い通りメインフィラー間をサブフィラーがブリッジし、ネットワーク構造を形成していることがわかる（以降、これを開発材と称す）。

次に、従来材と開発材のMIFポリウレタンフォームサンプルの熱伝導率を図6に示す。開発材は最大で3W/mKまで熱伝導率が向上した。これは、従来材での最大値の約2.5

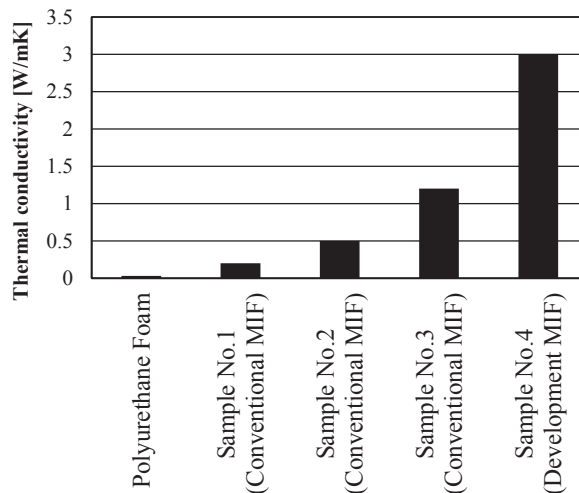


図6 MIFサンプルの熱伝導率（従来材・開発材）

倍、通常のポリウレタンフォームの約100倍という高い熱伝導率である。

4. アプリケーションへの応用

4-1 MIFの軽量化と熱伝導率向上

以上の検討から、今回開発したメインフィラー+サブフィラーの組み合わせによりMIFの熱伝導率向上が可能となった。次に、本開発材のアプリケーションへの応用を検討した。

前報⁽⁷⁾の通り、MIFはウレタンフォームの多孔質構造に由来する吸音性能、およびフィラー充填・配向に由来する遮音性能を有し、放熱も可能なため、モータ等の高周波騒音対策として有効である。

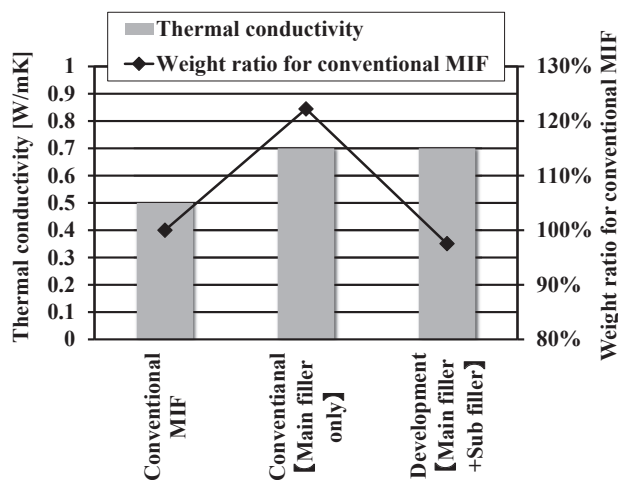


図7 各配合の熱伝導率と従来材に対する重量比

一方、電動パワートレイン向け等の大型製品へ適用を考えた場合、小型製品に比べ発熱量と製品サイズが極端に大きくなるため、従来のMIFに対して放熱能力の向上と軽量化を両立させる必要がある。

それに対し、今回の開発材は、磁性を有するメインフィルラーに比べ、非磁性材であるサブフィルラーの比重が小さいという点に着目、メインフィルラーを減らして軽量化を図りつつ、熱伝導率の向上を試みた。図7に従来材との開発材の性能比較を示す。ここでは、図6のSample2に相当する0.5W/mKの従来材をベースとした。

メインフィルラーのみで構成した同等熱伝導率材に比べ、重量は20%低減した。熱伝導率の低い従来材よりも3%軽量となる。一方で熱伝導率は従来材の1.4倍まで向上した。

4-2 放熱性能試験（金属との複合化検討）

次に、実際の製品を想定した放熱効果を検証するため、熱板試験による放熱性能の確認を行った。図8に実験の模式図を示す。熱源としてはアルミ製のモーターケースを想定し、アルミ板とラバーヒーターの接着品を用いた。

冷却条件は自然空冷と強制空冷の2条件にて実施。強制空冷は外部からファンで風を送るが、サンプル表面付近で風速1.4m/s程度になるよう調整している。

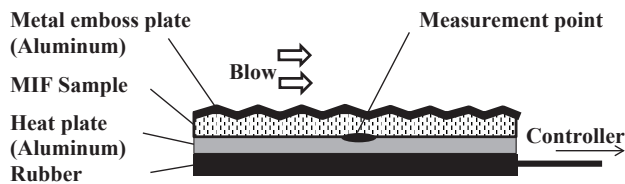


図8 熱板試験の模式図

開発材のシートサンプルを作成し、熱板のみの場合とサンプルを取付けた場合での熱板温度を記録、ほぼ平衡に達する3600sec（1Hr）後の温度を比較した。また、より高い放熱効果を得るため、金属板（アルミエンボスシート：黒アルマイト処理品）を外気側面に一体発泡したサンプルについても評価を実施した。サンプルサイズは両者とも130mm×130mm×t5mm（一体品は総厚t5mm）であり、厚み以外は熱板と同じサイズである。

試験結果を図9、図10に示す。自然空冷では、熱板のみの場合と比較し、MIF単体で $\Delta T = -15^{\circ}\text{C}$ の温度低減効果が得られた。アルミエンボスシート一体品でも同様、 $\Delta T = -17^{\circ}\text{C}$ の温度低減効果が確認された。これは、MIFの熱伝導率を高めたことで熱抵抗が小さくなり熱板からの伝熱量が増えたこと、また自然空冷では熱放射^{*2}による放熱が支配的であり、アルミ板に対してMIFおよび、アルミエンボスシートの黒アルマイト処理面の放射率が高いことが大き

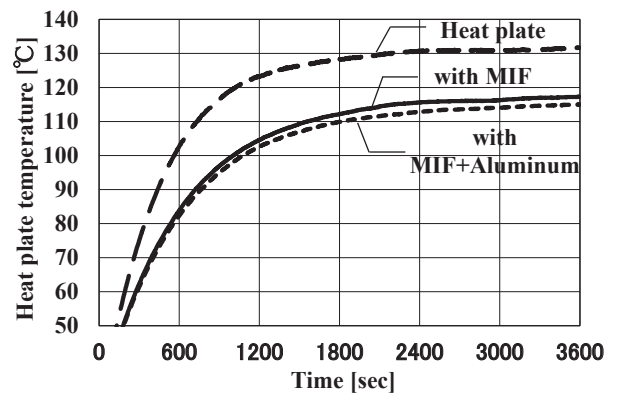


図9 熱板試験の結果【自然空冷】

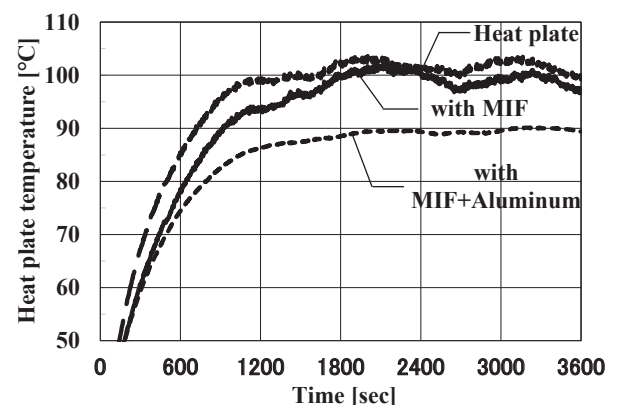


図10 熱板試験の結果【強制空冷】

な要因と考えられる。

また、強制空冷では、MIF単体で $\Delta T = -2.5^{\circ}\text{C}$ と自然空冷時よりも温度低減効果代が小さくなった。一方で、アルミエンボスシート一体品では $\Delta T = -10^{\circ}\text{C}$ と自然空冷に近い効果が得られた。強制空冷では対流熱伝達^{*3}による放熱の寄与率が高くなるため、表面気泡を有するMIFはやや不利となるが、アルミエンボスシートと一体化することで、表面の熱伝達率を高め、放熱面積も大きくなることで、空気との熱交換効率を高めているものと考えられる。

以上から、今回開発したフィルラーネットワーク構造によりMIFの放熱性を高めつつ、外側カバーを利用したヒートシンク効果を合わせることで、MIFを取付けた方がより熱源温度を下げられる“防音冷却デバイス”としての可能性を示す結果となった。

5. 結 言

本開発により、以下の結果を得た。

- ①メインフィルラーとサブフィルラーを組み合わせ、伝熱ネットワーク構造を構築することで、MIFの熱伝導

率を向上させた。

- ②EV駆動用モータ等の大型製品への適用を想定し、メインフィルラーとサブフィルラーの比重差に着目して、より軽量で熱伝導率の高いMIF材を開発した。
- ③金属板と複合構造とすることにより、カバー外側への伝熱性能を高め、防音性能に加え、空冷性能をより高める防音冷却デバイスとしての新たな可能性を見出した。

今後のEV化、自動運転化に向けて、電動パワートレインも含め様々なエレクトロニクス製品の作動音と発熱は避けて通れない問題である。各ユニットの小型化、高出力化が進む中、この傾向は益々厳しくなると予想される。これに対し、今回のMIF性能向上によって、温度上昇抑制という観点だけでなく、積極的にユニットを冷却する熱マネージメント製品としての新たな応用が期待できる。

用語集

※1 パワートレイン

エンジン、モータなどの動力発生装置と、それを駆動系へ伝達するトランスミッション・減速機などの伝達装置の総称のこと。EVでは、電動パワートレインと呼ばれ、例えばモータ、インバータ、減速機などが主要ユニットとして該当する。

※2 熱放射

伝熱現象の一つで、熱が電磁波として運ばれる現象のこと。熱輻射ともよばれる。熱放射による伝熱量 Q は、高温側温度 T_1 、低温側温度 T_2 とすると、

$$Q = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \{ (T_1 + 273.15)^4 - (T_2 + 273.15)^4 \}$$

で表される。ここで、 A は伝熱面積、 ε は放射率、 σ はステファン・ボルツマン定数であり、放射率 ε が高い程伝熱量が大きくなる。

※3 対流熱伝達

空気や冷却水などの流体を介して伝熱する現象を対流対熱伝達という。伝熱量 Q は、

$$Q = A \cdot h \cdot (T_1 - T_2)$$

で表される。 h は熱伝達率であり、 h が高い程伝熱量が大きくなる。熱伝達率は固有値ではなく、熱源表面上の流体の種類や流れの状態、物体形状や表面粗さなどによって変化する。

参考文献

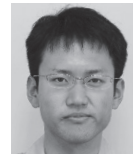
- (1) 富山幸治、井門康司、特許4906527、吸音体及び吸音構造体 (2007)
- (2) 富山幸治、井門康司、「磁気誘導発泡成形法を用いた機能性材料の開発」、日本AEM学会誌、Vol.16、No.2、pp.70-75 (2008)
- (3) 富山幸治、井門康司、「非一様磁場を用いた発泡性樹脂の多孔質構造制御」、実験力学、第8巻、第4号、pp.366-370 (2008)
- (4) 富山幸治、井門康司、「磁気誘導発泡成形法を用いた新しいインモールドコーティング成形法の開発」、日本AEM学会誌、Vol.18、No.4、pp.359-364 (2010)
- (5) G. L. Gulley and R. Tao, Structures of a magnetorheological fluid, International Journal of Modern Physics B, Vol.15, Nos. 6&7, pp851-858 (2001)
- (6) 日本機械学会編、機能性流体・知能性流体、コロナ社 (2000)
- (7) 富山幸治、吉田真司、片山直樹、鈴木康雄、井門康司、「放熱する吸音材～MIF～」、SEIテクニカルレビュー第185号、pp.46-51 (2014.7)
- (8) Koji Tomiyama, Shinji Yoshida, Naoki Katayama, Yasuo Suzuki, Yuji Kawai and Yasushi Ido, "Heat Radiation Polyurethane Foam," Polyurethanes Magazine International, Vol.13, No.4, pp.250-255 (2016)
- (9) 上利泰幸、「高熱伝導性複合高分子材料の開発」、日本接着学会誌 Vol.43、No.8、pp.325-330 (2007)

執筆者

富山 幸治* : 住友理工(株) 担当課長
博士 (工学)
技術士 (機械部門)



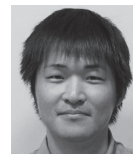
吉川 慧 : 住友理工(株)



熊谷 信志 : 住友理工(株)



大脇 潤己 : 住友理工(株)



牧村 敏史 : 住友理工(株)



宮永 貴志 : 東海化成工業(株)



*主執筆者