

学術論文

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

Development of new In Mold Coating Method by applying Magnetic Induction Foaming Method

富山 幸治^{*1,*2}(学生員), 井門 康司^{*1}(正員)

Koji TOMIYAMA (Stu.Mem.), Yasushi IDO (Mem.)

Characteristics of polyurethane foam such as sound absorption depend on its inner porous structure. The porous structure is composed of both a lot of bubbles (cell) and skeleton. Double layered porous absorbing material from combination of different cell structure has wide band performance of sound absorption. In our paper, new foaming technology for polyurethane foam was reported. It is named "Magnetic Induction Foaming (MIF)". MIF is the method of cell control using magnetic induction effect. It enable to make open cell structure along magnetic field direction. On the other hand, "In Mold Coating (IMC)" is one of the methods of casting. In this method, surface treatment materials are applied to the mold cavity in advance. Surface treatment is done simultaneously with molding because of transcribing surface treatment material into the surface of molded object. In this paper, new method of making double layered materials by using MIF and IMC in combination is developed. It is found that the polyurethane foam sample made by using this MIF-IMC method has wide band performance of sound absorption experimentally.

Keywords: polyurethane foam, cell, sound absorption, MR fluid, magnetic induction foaming, in mold coating.

1 緒言

発泡性の高分子材料は汎用性に優れた代表的な工業材料である。ポリウレタンフォームはその一つであり、軽量かつ安価で、クッション性、吸音性、などに良好な特性を有するため、家電、建築、自動車など種々の分野で利用が盛んである。

ところで、ポリウレタンフォームのもつ性能はその特徴的な内部多孔質構造に起因する。吸音性能も例外ではなく、空気伝播された音波がフォームの内部構造を通り抜ける際に熱エネルギーに変換されることで音のエネルギーが吸収される。例えば角倉ら[1]はポリウレタンフォームにおける内部構造と吸音率の関係について調べ、近似的には通気抵抗を用いてその関係を記述できることを報告している。また、そうした吸音効果は入射音波の周波数によって制限されるため、吸音材を複層構造とすることによって広帯域に吸音効果を確保するための開発も数多く行われている。例えば早坂ら[2]は、小孔を開けた高熱可塑性樹脂フィルムで2枚の吸音層を熱溶着することで、接着層による通気抵抗の悪化を低減した複層構造の吸音材製作法を考案している。また古川ら[3]は、ポリウレタンフォーム成型

金型の型温度の調整によって表層に発泡密度の高い高密度層を設けることで、自動車用のダッシュサイレンサーなどに適した複層吸音材を提案している。

しかしながらこうした複層構造による吸音性能の広帯域化の取り組みは、接着工程が増えることによるコストデメリットや、層同士の界面が存在することにより、十分な吸音性能が得られない可能性がある。また、使用される吸音層自身は発泡倍率の変更によりセル径を制御するなどして性能を変えているが、このような既存の方法においては適当なポリマー、添加剤の選定などの配合的処方[4]、および金型温度の変更や離型剤の調整などにより表面改質を促進するなどの化学的で静的な方法しかなく、セル構造を大幅に変化させるのは困難であった。

これに対し著者ら[5]は、磁場を用いた新しいポリウレタンフォームの内部構造制御法として磁気誘導発泡成形法 (Magnetic Induction Foaming, 以下 MIF と略す) を考案し開発を行っている。原理的にはポリウレタンフォーム原料へ磁性体を分散させ、磁場中で発泡成形を行うものであり、これを用いればポリウレタンフォームのセル構造を物理的に制御することが可能となる。また MIF によって製作された材料は劇的にセル構造が変化し特異な内部構造をとるため、構造部材として有用な機能を発現することが確認されている。

連絡先: 井門 康司, 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町, 名古屋工業大学大学院工学研究科ながれ領域,
e-mail: ido.yasushi@nitech.ac.jp

^{*1}名古屋工業大学 ^{*2}東海ゴム工業株式会社

今回、著者らは MIF により製作される材料を吸音材として用いることを目的とし、インモールドコーティング法 (In Mold Coating, 以降 IMC と略称する) と MIF を併用することによってセル構造の異なる 2 層の構造を一工程で成形する方法を考案した (以降、MIF-IMC 法と略称する)。本報告では、この MIF-IMC 法による複層構造化の成形実験、および製作したサンプルの吸音性能について各種評価を行い、高性能な吸音材開発手法としての応用を検討する。

2 MIF の原理と得られる材料

まず MIF の原理とプロセスの概略を述べる。Fig. 1 に概念図を示すが、ここでは (A)～(F) の順に成形過程が進行する。ポリウレタンフォームの反応機構は多くの化学反応が同時に進行する非常に複雑なものであるが、大別すると以下の 2 つの反応からなる。一つは主にポリイソシアネートとポリオールとの重付加反応によるポリマー構造部分でこれがフォームの骨格部分をなす。もう一つはポリイソシアネートと水との反応による炭酸ガスによる発泡反応であり、これによって発生する気泡に対し、整泡剤とよばれる種類の界面活性剤を配合してその泡膜を保持することにより、セルとよばれる気泡部分が形成される。

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磁性体を混合する (Fig. 1 (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ることができるが、セルの構造制御には消泡作用を持つ母液に磁性体粒子を良く分散させた懸濁液を用いる必要がある。これはそのような母液が、セル形成の根幹をなす発泡時の泡膜部へ集中的に磁性体を運ぶ“キャリア”の役割を果たすメカニズムに由来する[5]。一方、磁場中における磁性体粒子は磁気双極子を持ち、一様磁場中では巨視的な磁場勾配が存在しないため、磁性体粒子は磁気双極子相互作用力のみを受け磁力線に沿った鎖状クラスター構造を形成する[6-7]。MIF においては、こうした磁性体の挙動を介して、磁場による物理的制御効果を発泡成形体の内部構造へ伝達する。

このようにして得られた成形体は印加磁場方向へ配向および連通した特異なセル構造をなす。つまり弾性的特性を保持した骨格部が筋肉のようにしなやかな繊維状の支持構造をなすことによってエネルギー吸収性などの顕著な特性を備える材料となる。Fig. 2

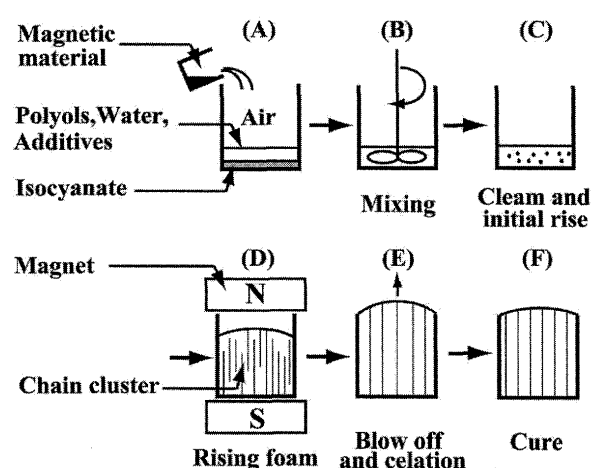


Fig. 1 Schematic diagram of MIF process.

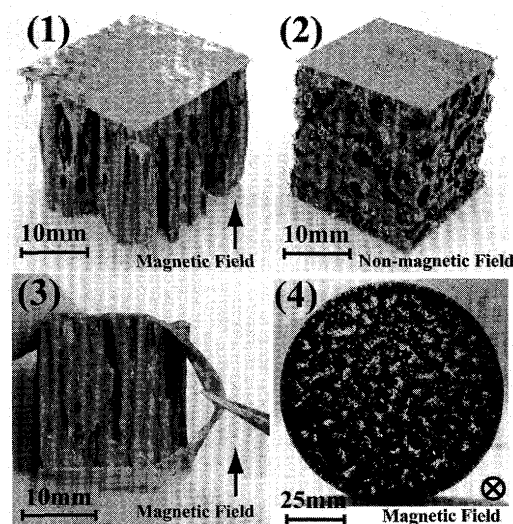


Fig. 2 Photographs of foams. (1) MIF sample, (2) sample that mixed MR fluid and foamed in non-magnetic field, (3) Side view of MIF sample (the appearance of elastic fiber structure), and (4) View from magnetic field direction.

にポリアルファオレフィンベースの MR (Magnetorheological) 流体をポリウレタンフォームへ混合し、200mT の一様磁場を印加有り/無し条件下でそれぞれ成形した切り出しサンプルの写真と、磁場有りの条件下で成形した成形体を磁場方向から撮影した写真を示す。通常の発泡体では、一個のセルサイズは概ね約 0.2mm 程度であるが、Fig. 2 に示す成形品においては、MR 流体の破泡作用[5]により約 1.0～数 mm 程度まで大きくなっている。

3 インモールドコーティング法 (IMC) の概要

前章で述べた通り、MIF により得られた成形体は印

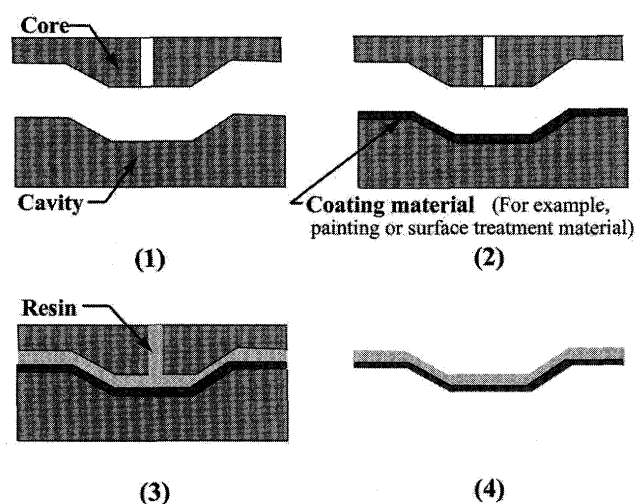


Fig. 3 Schematic diagrams of general IMC process.
(1) initial state, (2) coating, (3) cast molding, and
(4) Demolded process.

加磁場方向へ配向および連通した特異なセル構造をなす。この原理に基づきセル構造を変化させたもの（磁場方向へ連通，開口している様子から以降これをオープンセルと称す），および通常のセル構造とを複層構造で，しかも連続的に有する材料を製作するためには，MIFによるコントロールを成形体に対して部分的に作用させる必要がある。そこで我々はIMCとMIFを併用することによって連続的にセル構造が変化した材料を成形する方法を考案した。

IMCとは金型内に塗料やプライマーなどをあらかじめ塗布し，成形と同時に塗膜を成形体に転写する手法であり，実際に射出成形やプレス成形へ応用されている。IMCには大きく分けると2つの種類があり，上述のような方法の他にも，プラスチック基材を成形した後，同一金型内に無溶剤型のIMC剤を注入し，成形品表面に塗膜を形成する方法がある。一方，前者のようにあらかじめ金型に溶剤型塗料や粉体塗料を塗布し，塗膜を形成した後成形する方法は「プリモールドコート法」ともよばれる。定義を明確化するため，本研究においてIMCとはこちらのプリモールドコート法を指すことにする。Fig. 3に一般的なIMCの概念図を示す。

4 複層化検討および成形実験

4.1 実験条件

ここではMIFにおいて使用する磁性体（MR流体）を金型の底面のみに塗布し，その上から混合攪拌した

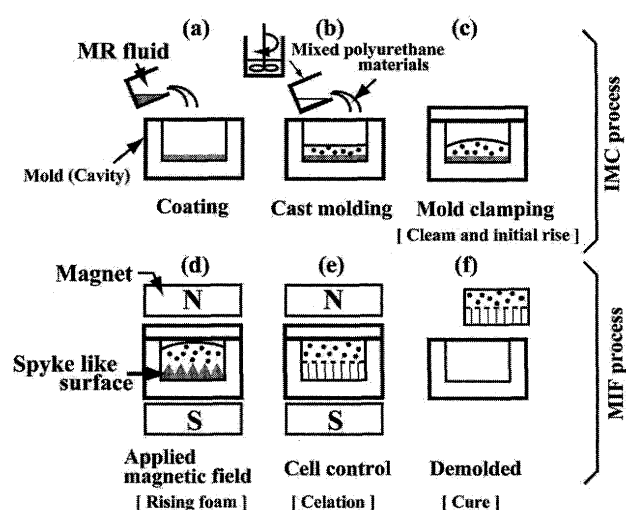


Fig. 4 Schematic diagram of MIF-IMC process.

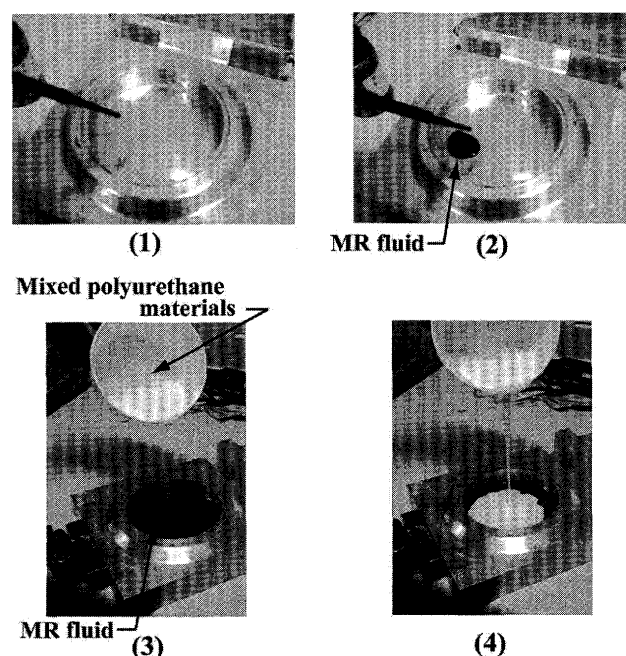


Fig. 5 Photographs of the process from the coating MR fluid to casting polyurethane material in MIF-IMC method.
(1) initial state, (2) the state of starting to coat MR fluid,
(3) the state of starting to cast mixed polyurethane materials,
and (4) the state a few minutes later from previous state.

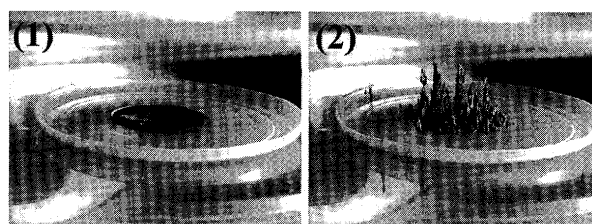


Fig. 6 Photographs of MR fluid. (1) Non magnetic field,
and (2) Under uniform magnetic field.

ポリウレタンフォーム原料を金型へ流し込んで MIF を行う成形実験を実施した。このプロセスを Fig. 4 に図示する。Fig. 4 (a)~(c) が IMC プロセスに相当し、残る Fig. 4 (d)~(f) が MIF プロセスに相当する。前述した通り MIF 法と MIF-IMC 法との最大の違いは、IMC プロセスにより、ポリウレタンフォーム原料と MR 流体とは直接混合攪拌されないという点にある。Fig. 5 に MIF-IMC 法における磁性体塗布～原料注型までのプロセスの写真を示す。これらは Fig. 4 (a),(b)に相当する。このようにすることで、MR 流体は最初ポリウレタンフォーム原料とは分離した状態で存在するため、磁場印加初期には MR 流体全体がバルクな変形を起こす。ここで磁場下において MR 流体はスパイク状に無数の突起形状をなすことが知られており、スパイク状に広がった部分のみが MIF による制御を受けて磁場方向にオープンなセルを形成する (Fig. 4 (d)~(e))。MR 流体に一樣磁場を印加した際の様子を Fig. 6 に示す。スパイク形状は先端へいくにしたがって細くなり、底面から厚み方向へオープンセルが次第に減少していくため、成形体全体としてはオープンセルから通常のセルへと連続的に変化する構造となる。主な実験条件を Table 1 に、実験装置の概観写真と概略図を Fig. 7 に示す。ベースとした軟質ポリウレタンフォームは一般的な水発泡のもので、発泡倍率は約 10 倍程度になるよう調査を行っている。

金型のキャビティーへ一樣磁場を印加できるよう磁気回路を備えた電磁石を用意した。これにより、比較的磁極間のギャップが大きい場合においても磁力線の漏洩を抑制し、一樣性の高い磁場状態を構築することができた。各方向における磁場分布を測定した結果、キャビティーエリア内(磁極間 50mm の中央 ϕ 100mm、厚み 20mm) の z 方向の磁束密度の差が $\pm 5\%$ 以内であ

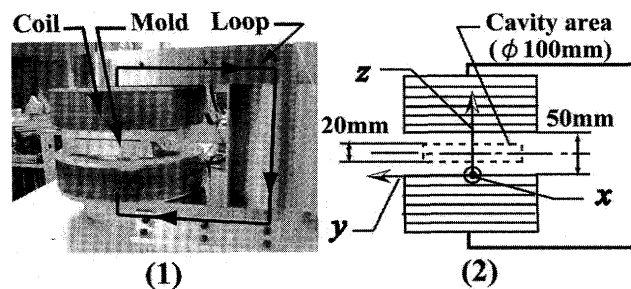


Fig.7 Photographs and Schematic diagram of experimental setup. (1) electro magnet, and (2) coordinate condition.

Table 1 Conditions of experiment.

Polyole (%wt)	S-0248 (Sumika Bayer Urethane Co., Ltd.) etc... 78.5
Isocyanate (%wt)	MDI :NE-1320B (BASF INOAC Polyurethane Co., Ltd.) 21.5
Magnetic material	Polyalphaolefin base MR fluid :E-600 (SIGMA HI-CHEMICAL INC.)
Magnetic flux density	200mT

ることを確認した。

前述の原理やプロセスからも分かる通り、今回の実験においては発泡成形を行う時間全てにおいて磁場を印加する必要は無く、比較的発泡初期段階で磁場を印加すればよい。よって本実験では、原料を注型後、最初の約 2 分間は磁場を印加し、続く約 5 分間は磁場を印加せず発泡成形を行った。

4.2 結果および検討

本実験により得られた成形品の各観察結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 (3) が成形品の断面視であるが、この写真より MR 流体の灰色部分がスパイク状に底面から上面へ傾斜分散していることがわかる。また、キャビティー上面側 Fig. 8 (1)は通常のセル、底面側は Fig. 8 (2)ではオープンセル構造となっていることを目視にて確認できた。またここでは通常のセルのセル写真 (Fig. 8(1-a)) と、オープンセル構造のセル写真 (Fig. 8(2-a), (2-b)) も示す。a, b はそれぞれの外観図 (Fig. 8(1),(2)) に破線丸で示した箇所と対応している。通常セルでは、ほとんどのセル径が 1mm に満たない。オープンセルでは、成形サンプル全体に対し中心付近(a)で概ね 2mm 程度、端部(b)で 1mm 程度と分布をもっていることが分かる。これは、MR 流体の界面変形が底面全体において均一でないことに起因すると考えられる。なおオープンセルでは共に通常セルより大きなセル径となっている。

次に、得られた成形品の吸音率を評価するため、垂直入射吸音率を測定した。吸音率とは、入射音波のエネルギーに対し、材料内部で吸収されたエネルギーの割合であり、次式(1)で表される。

$$\alpha = \frac{I_i - I_r}{I_i} \quad (1)$$

ここで、 α は周波数 f [Hz]における吸音率、 I_i は試料に入射した f [Hz]における音のエネルギー[W/m²]、 I_r

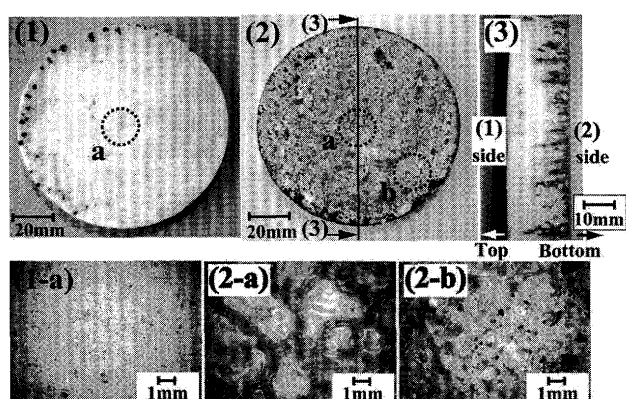


Fig. 8 Photographs of MIF-IMC sample. (1) View from top side of the sample (standard cell layer), (2) view from bottom side of the sample (open cell layer), (3) cross section view of the sample, (1-a) cells of point-a in the (1), (2-a) cells of point-a in the (2), (2-b) cells of point-b in the (2).

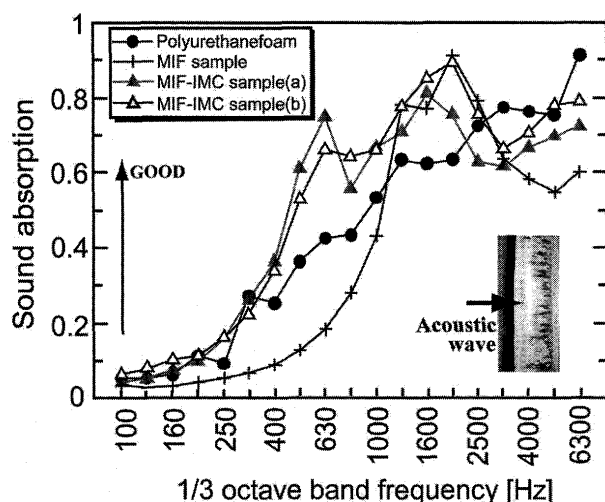


Fig. 9 Sound absorption.

は試料で反射した f [Hz]における音のエネルギー $[W/m^2]$ を示す。吸音率 α は1に近いほど良好である。

測定は JIS A 1405 垂直入射吸音率法に準拠して行った。Fig. 9 に測定結果を示す。ここでは比較のため、ベースのポリウレタンフォームおよび MIF 単層の吸音率も測定した。MIF-IMC サンプルについては、セルの分布を考慮し Fig. 8(2)a, b の箇所を $\phi 20mm$ で打ち抜いてそれぞれの吸音率を測定した。なお MIF-IMC サンプルについては通常セル層側から音波を入射している。

この結果について、周波数帯域を以下3つに分けて考察を述べる。1kHz までを低周波、1kHz~2.5kHz を

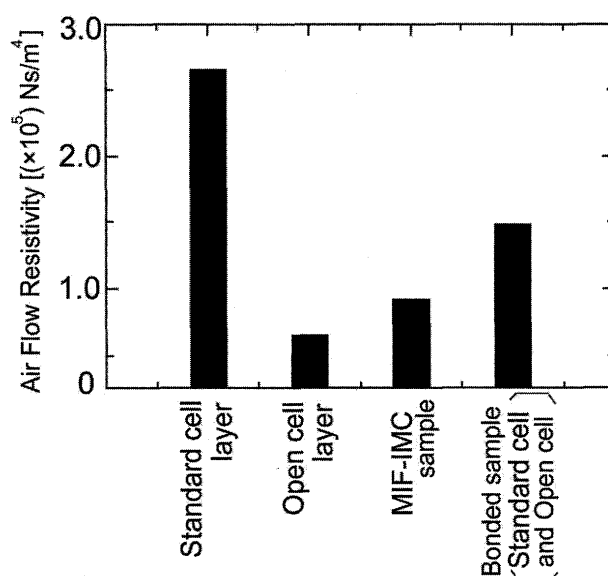


Fig. 10 Air flow resistivity. “Standard cell layer” in this figure means Fig.8 (1) side layer, and “Open cell layer” means Fig.8 (2) side layer.

中周波、2.5kHz 以上を高周波として分類する。低周波では、MIF-IMC サンプルが最も良好な吸音率を示し、630kHz 付近でピークを持つ。この傾向はサンプル a もサンプル b も同一であった。また、中周波では MIF 単体と MIF-IMC サンプル b が最も良好な結果となった。MIF-IMC サンプル a は 2.5kHz で通常のウレタンより若干吸音率が低くなったものの、それ以外の領域では通常のウレタンフォームより良好な吸音率を示した。一方、高周波領域では通常のウレタンフォームが最も吸音率が高く、次いで MIF-IMC サンプル、MIF 単体が最も落ち込みが著しい結果であった。

以上を総括すると、MIF-IMC サンプルは複層化により MIF 単体時のピーキーな特性が改善され、通常のポリウレタンフォームに比べ低周波～中周波帯域において優れた吸音効果を発現できることを確認した。また、オープンセル状態の分布により吸音率にばらつきがあるものの、概ね特徴は同じであった。

結果をより詳しく考察するため、各サンプルについて通気抵抗 (Air Flow Resistivity, AFR) を測定した。測定は ISO9053 (Direct method:直接法) に準拠して行った。ここでは、MIF-IMC サンプルを厚み中心で2等分にスライスした各々の層、通常セル層 (Fig. 8 (1)側半分の層)、オープンセル層 (Fig. 8 (2)側半分の層)、およびそれを市販のスプレーのりで再接着したサンプルに対しても AFR を測定した。単位厚みあたりの AFR の比較結果を Fig. 10 に示す。この結果から、通常セル層

に比べオープンセル層の方が AFR が小さくなっていることが分かる。また、MIF-IMC サンプルの AFR 値はそれらの間となった。ところで、背後空気層を持つ多孔質吸音材はより低周波へも吸音効果を発揮することが知られている[8]。このことから、MIF-IMC サンプルにおいては、通気性の高い（より空気層に近い）オープンセル層が背後空気層に類似した役割を果たすことで、このような特性が発現したものと考えられる。一方、接着品は MIF-IMC サンプルに比べ AFR が大きくなっており、接着層が通気性を悪化させることを裏付ける結果となった。この結果から複層構造をもつ吸音材の吸音効果を高めるには、2 層間において連続的に変化するような内部構造を構築することが有効である。

5 結言

複層型吸音材の製作方法として磁気誘導発泡成形法とインモールドコーティングを併用する新たな方法を考案した。この方法により一工程でセル構造の異なる複層構造が連続的に傾斜した材料を製作することができた。また得られた材料の音響特性評価を行い、従来の MIF 単体材料に比べ吸音性能が広帯域化していることを確認した。この材料は 2.5kHz 以下の領域で通常のポリウレタンフォームよりも優れた吸音特性を示した。今後この方法を用いて、高性能な吸音材の開発や各種傾斜機能材料開発への応用が期待できる。

一方、現時点では MR 流体の界面変形の不均一性により厳密には均一なセル制御が行われていないと考えられる。今回実施した範囲においては、セル状態の異なるサンプル同士で吸音特性の傾向は概ね一致したものの、実用化を考えた場合には特性のバラつきについて N 増し評価を行い、本研究で得られた結果について気孔率との相関など統計的な裏付け調査を実施していく必要がある。これについては今後の課題としたい。

謝辞

本研究の実験遂行にあたって多大な協力を頂きました東海ゴム工業株式会社関係者各位へ深謝致します。
(2008 年 11 月 27 日受付, 2009 年 12 月 23 日再受付,
2010 年 6 月 14 日再々受付)

参考文献

- [1] 角倉敏彦, 森秀夫, 三宅隆雄, 高分子発泡体における吸音特性の通気抵抗依存性, 高分子論文集, 34(5), 334-339, 1965.
- [2] 早坂伸也, 伏木忍, 見座田修一, 車両用吸音材, 特開 2006-137160, 2006.
- [3] 古川直, ダッシュパネル用防音部材, 特開 2001-138771, 2001.
- [4] 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.
- [5] 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, 第 16 回 MAGDA コンファレンス, 講演論文集, p.57, 2007.
- [6] 日本機械学会編, 機能性流体・知能性流体, コロナ社, 2000.
- [7] G.L.Gulley and R.Tao, Structures of magnetorheological fluid, *International Journal of Modern Physics, B*, Vol.15, pp.851-858, 2001.
- [8] 低騒音化技術, 技術書院, 1993.
- [1] 角倉敏彦, 森秀夫, 三宅隆雄, 高分子発泡体における吸音特性の通気抵抗依存性, 高分子論文集, 34(5), 334-339,