

特集：サステイナブル “Zoom-Zoom”

4

発泡成形技術を用いたドアモジュール基材の開発 Development of Door Module Carrier Using Foam Molding Technology

小川 淳一^{*1} 梶山 智宏^{*2} 山田 勝久^{*3}
Junichi Ogawa Tomohiro Kajiyama Katsuhisa Yamada
栃岡 孝宏^{*4} 金子 満晴^{*5} 中島 之典^{*6}
Takahiro Tochioka Mitsuharu Kaneko Yukinori Nakajima

要約

近年のCO₂排出量削減や原材料費の高騰不安などといった背景から、プラスチック部品においても大幅な軽量化と材料費低減が強く求められている。これを達成する手段として、高強度・高剛性な材料による薄肉化とともに、発泡技術による材料使用量削減が注目されている。しかしながら、発泡に伴う機械物性の低下が著しく、大幅な材料削減が困難であり適用部位も限られていた。

我々は、超臨界流体を活用し、コアバック法と組み合わせた射出発泡成形技術を開発した。この技術によって、微細な気泡構造を有し機械物性を保持した表層と、高発泡化で軽量な中心層を持つサンドイッチ気泡構造が得られ、機械物性の保持と大幅な材料削減の両立が可能となった。ドアモジュール基材の成形にこの技術を適用することにより、22%以上の軽量化ポテンシャルがあることを確認した。

Summary

Recent imperative to cut CO₂ emissions and growing concern about higher prices of raw materials have brought great needs for drastic weight reduction and material cost saving for automotive plastic parts. Under such circumstances, a reduction of material usage by foaming technology draws attention as a new approach to meet these requirements, in addition to the conventional thickness reduction technique that uses high-strength and high-stiffness materials. The current foaming technology, however, only allows limited application because of a significant decrease in mechanical properties.

We have developed an injection foam molding technology that uses super critical fluid as a foaming agent in combination with the core-back process. Through this technology, a multi-layer cell structure, which consists of a micro-cell surface layer that retains mechanical properties and a highly-foamed light-weight core layer, is formed, enabling it to both maintain mechanical properties and reduce materials significantly. A door module carrier molded by the use of this technology has the potential for more than 22 % weight reduction.

1. はじめに

自動車部品の軽量化及びコスト削減を達成する手段として、周辺部品の機能統合や一体化によってVE（バリューエンジニアリング）を図る機能統合型モジュール化が進んでいる。また同時に、モジュール基材を従来の金属から樹脂に材料置換することによる軽量化が取り組まれている。マツダではガラス長繊維強化ポリプロピレンの高い強度と射出成形の形状自由度を両立する新たな射出成形技術を開発し、2002年よりフロントエンドモジュール及びドアモジ

ュールの基材として実用化した。軽量高強度な樹脂材料への置換と、高い成形自由度を生かしたクリップ類やブラケット類などの一体化、防水機能の統合などによって重量低減及びコスト削減を達成している⁽¹⁾。

しかしながら、近年のCO₂排出量削減や原材料費の高騰不安などといった背景から、モジュール基材やその他の硬質プラスチック部品のより一層の軽量化及び材料費低減が強く求められている。これを達成するアプローチとして、素材の高強度・高剛性化による薄肉化とともに、発泡成形技術による低比重化が注目されている。

*1, 4~6 技術研究所
Technical Research Center

*2, 3 ボデー開発部
Body Development Dept.

我々は、超臨界流体 (supercritical fluid, 以下SCFと略す) を発泡剤とし、コアバック法と組み合わせて気泡構造をコントロールする独自の射出発泡成形技術を開発した。本技術によって高発泡倍率で低密度な中心層と、微細発泡によって機械物性を保持した表層を有するサンドイッチ気泡構造が形成され、Fig.1に示すドアモジュール基材において20%以上の材料削減と実用性を満足する性能を両立した。

2. 開発の狙い

2.1 従来技術の課題

従来の発泡技術では、主として発泡剤に化学発泡剤が用いられ、コアバック法と組み合わせることで材料使用量を削減し、製品重量の軽減を可能としている。コアバック法とは、金型のキャビティ内に発泡剤を含んだ熔融樹脂を射出充填した後にキャビティ厚みを拡大して発泡させる方法である。厚みが増すため曲げ剛性が向上する反面、強度や耐衝撃性が材料削減率以上に低下するため、適用範囲は限られたものであった。

この問題を解決する手段の一つとして、超臨界状態の窒素や二酸化炭素を発泡剤とし、減圧や温度変化によって樹脂中に微細 (十~数十 μm) な気泡を形成するSCF発泡成形が知られている。気泡サイズを微細化することで破壊の起点となることが抑制され、機械物性を保持できる⁽²⁾。また、物性面でのメリットに加えて、ヒケ、反りが低減され寸法精度が向上する、発泡剤が一般的な不活性ガスであるため安価であり環境負荷も小さい、樹脂中に発泡剤の分解残渣が残らないためマテリアルリサイクル性に優れるな



Fig.1 Door Module

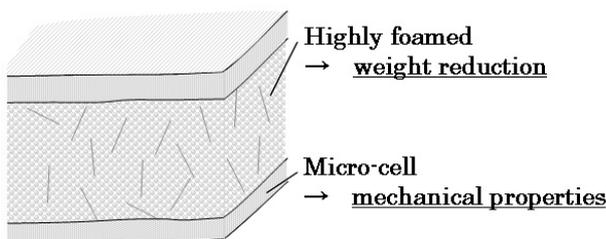


Fig.2 Concept of Multi Layer Cell Structure

どの利点が挙げられる。

SCF発泡における気泡構造は使用される樹脂の物性や成形条件によって大きく変化することが知られており⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾、これによって機械物性も影響を受ける。特にコアバック法を用いると気泡サイズが増大し、物性が低下するため一般的にはキャビティ容積に対して樹脂の射出量を減じて発泡させるショートショット法が用いられる。しかしながらショートショット法では流動末端において気泡サイズの増大や充填不良を生じやすく、材料削減率は10~15%程度と大幅な材料削減は困難であった。

2.2 開発コンセプト

我々は、SCF発泡による機械物性の保持と、コアバック法による大幅な材料削減を両立するため、Fig.2に示すように成形品の表層と中心層で気泡構造の異なるサンドイッチ気泡構造を着想した。強度や耐衝撃性は微細な気泡を有する表層で、軽量化は高発泡化した中心層で機能分担することをコンセプトとし、これを実現する射出発泡成形技術の開発に取り組んだ。

3. 射出発泡成形技術の開発

3.1 開発技術の概要

開発した射出発泡成形工程の概要をFig.3に示す。成形工程は大きく以下の三つのステップに分けられる。

- ① 可塑化工程：通常の射出成形と同様に樹脂を可塑化溶解する工程において、SCFをシリンダ内に注入して樹脂と均一に混合溶解させる。
- ② 射出工程：SCFを含んだ熔融樹脂を金型キャビティ内に射出充填するとともに、樹脂内部に微小な気泡 (気泡核) を生成する。
- ③ コアバック工程：金型を所定量開く (コアバック) ことによって厚み方向に拘束を開放し、高発泡化する。

以上の工程によって気泡生成と成長をコントロールし、微細な気泡を有する表層と高発泡化された中心層のサンドイッチ気泡構造を一つの工程内で形成する。

我々は、SCF注入量や樹脂温度、コアバック速度などの各プロセスパラメータが表層及び中心層の気泡構造に及ぼす影響を成形実験を通じて明らかにし、発泡に伴う機械物性の低下が抑制されたサンドイッチ気泡構造を実現する成形技術を確立した。

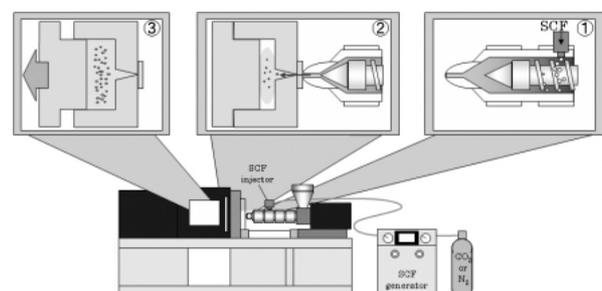


Fig.3 Outline of the Developed Injection Foam Molding

3.2 成形技術の開発

成形実験にはTREXEL社のMuCellシステムを搭載した日本製鋼所製電動射出成形機を使用した。材料はモジュールキャリアの基材として開発されたガラス長繊維強化ポリプロピレン (GFPP) を用いた。金型は1点ダイレクトゲートの平板型 (600×300mm, 厚みは可変) を使用し、成形品から切り出したテストピースを用いて気泡構造の観察及び機械物性の測定を行った。

サンドイッチ気泡構造を形成するためには、表層において気泡成長を抑制し、気泡サイズを微細化する一方で、中心層では逆に気泡を成長させて高発泡化させる必要がある。そこで、表層においては射出工程において気泡核を多数生成させ、これらが成長して気泡サイズが増大する前に冷却固化させることを狙いとしてプロセスパラメータの検討を行った。その結果、射出速度やSCF濃度などの影響が大きいことが分かった。SCF濃度による表層の平均気泡径への影響をFig.4に示す。高い射出速度、高SCF濃度とすることによって、Fig.5に示す直径約20μmの微細な気泡構造が得られた。

一方、中心層においてはコアバック動作条件によって気泡構造が特に大きく影響されることが分かった。Fig.6(a)-1~3に示すように、動作が速すぎても遅すぎても粗大な気泡構造となり、適切な条件範囲においてのみ緻密な気泡構造が得られた。また、SCF注入量は表層の気泡構造のみならず、

中心層の気泡形成にも影響を与え、Fig.6(b)-1~3に示すように高濃度であるほど緻密な気泡構造が得られることが分かった。また、Fig.6(a)-2のように粗大な気泡形成のないサンプルでは、気泡壁が厚み方向に配向した様子が観察され、Fig.7に示した厚み方向と直交するようにカットした断面では、直径 $100 \pm 50 \mu\text{m}$ の気泡が観察された。以上のことから、気泡はコアバックによって厚み方向に延伸される形で成長したことが示唆され、粗大な気泡は気泡壁を形成する樹脂が限界以上に延伸され破断に至った結果であると考えられる。したがって、コアバック条件を樹脂の延伸特性に応じて適切に設定することが重要である。またSCF濃度が高い場合、気泡核生成速度が高くなることが知られており、コアバック前の気泡数は増加する。コアバックによってこれら多数の微細な気泡が均一に成長することで気泡壁の局所的な延伸が抑制され、破断による粗大化が起こり難くなったと考えられる。

3.3 開発した発泡成形品の基本性能

各種機械物性の測定値は発泡/非発泡の比を取り、相対評価を行った。Fig.8に曲げ強度の評価結果を示す。いずれの相対密度においても、相対曲げ強度は相対密度の値を上回っており、サンドイッチ気泡構造によって発泡に伴う強度低下が抑制されていることを確認した。

相対密度0.375の発泡成形品の機械物性平均値をTable 1に示す。曲げ弾性率及び落錘衝撃試験におけるエネルギー吸収量についても同様に発泡による強度低下が抑制されてい

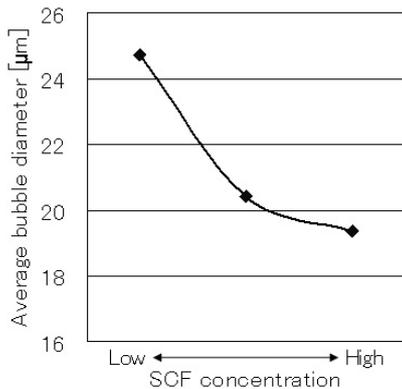


Fig.4 Relationship between SCF Concentration and Average Bubble Diameter

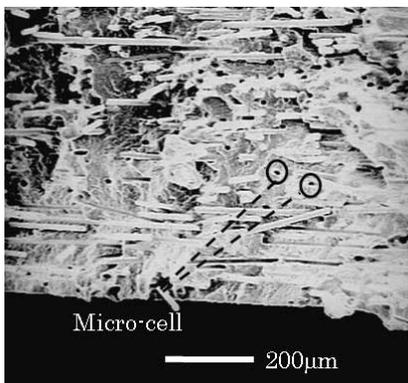


Fig.5 SEM Image of the Surface Layer

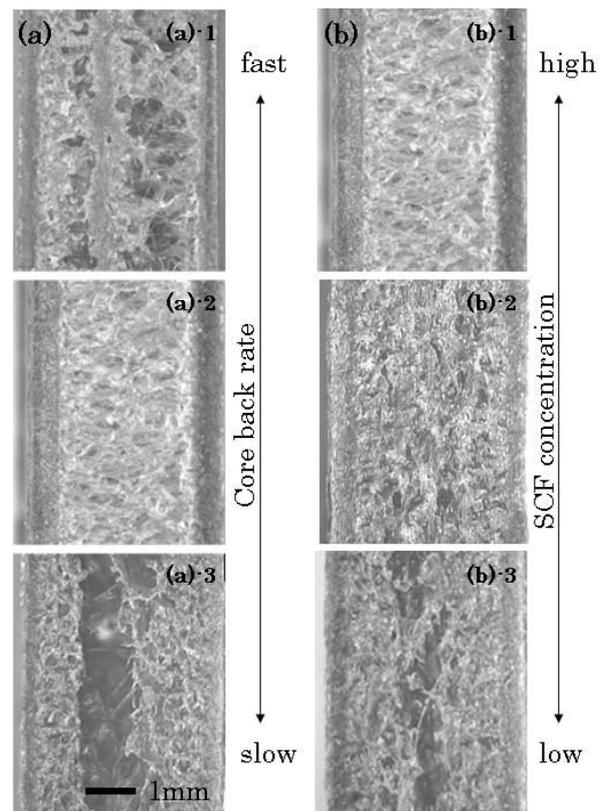


Fig.6 Cross Sections of the Foamed Sample ; (a) Effect of Core Back Rate, (b) Effect of SCF Concentration

る。特に落錘衝撃試験では、Fig.9の荷重 - 変位曲線が示すように最大荷重及び破壊変位とも非発泡のものを上回り、エネルギー吸収性に優れることが分かった。これはサンドイッチ構造による強度及び剛性の向上に加え、非発泡では荷重値がピークに達した後、クラックが瞬時に伝ばして破断に至るのに対し、低密度な発泡層が存在することでクラックの伝ば速度が低下したためと考えられる。

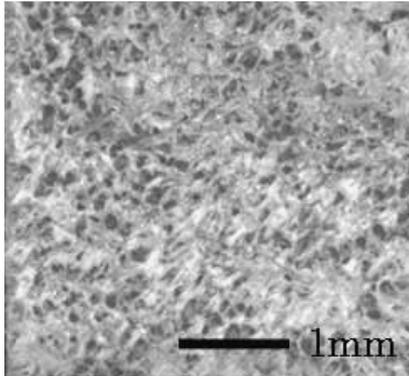


Fig.7 Horizontal Section of the Foamed Sample

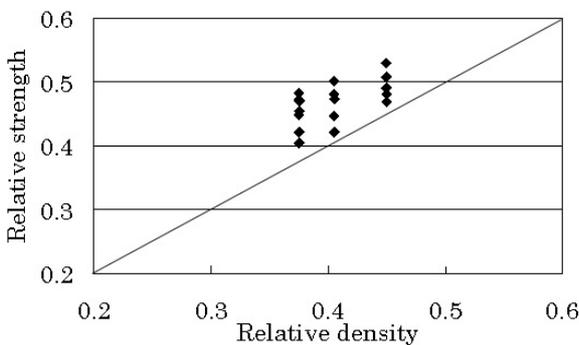


Fig.8 Relationship between Relative Density and Relative Flexural Strength

Table 1 Mechanical Properties of Foamed Sample

Relative density	0.375
Relative flexural strength	0.458
Relative flexural modulus	0.397
Relative energy absorption	2.186

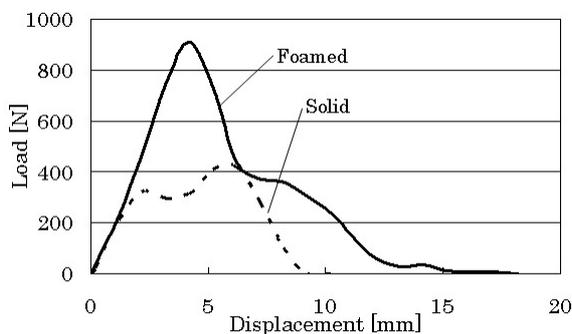


Fig.9 Load-Displacement Curves in Weight Drop Impact Test

3.4 ドアモジュール基材への適用

開発した射出発泡成形技術を実際の部品へ適用した際の効果を検証するため、ドアモジュール基材の試作評価を行った。成形には日本製鋼所製650t電動射出成形機を用いた。製品形状では、凹凸や開口部などが存在するため、流動速度やフローフロント圧力の変動、ゲート部と流動末端の圧力差、金型部位による温度分布など、発泡条件がばらつくことで一定の気泡構造が得られないことが懸念された。そこで流動解析や冷却解析を活用しながら冷却配管やゲート配置、ガスベント等に留意して金型を設計した。その結果、Fig.10及びFig.11に示すように一部に気泡の粗大化も見られるが、各部位において狙いとする気泡構造と機械物性を得ることができた。また、製品板厚についてもFig.12に示すようにばらつきは抑えられている。

コアバック法による発泡成形では、射出時のキャビティ厚みを薄くして材料削減を図っている。薄肉部に高速で樹脂を注入するため、通常であれば型内圧が増加し、成形機に求められる型締力が増し、より大型の成形機が必要となる。これに対して本技術では、二酸化炭素や窒素が溶解すると樹脂の粘度が低下するという性質を生かし、高流動に設計されたGFPPの流動性を更に高めることによって、薄肉高速充填でありながら、従来よりも約30%低い型内圧を達成した。従来の非発泡成形と開発技術の型内圧の比較をFig.13に示す。低压化により製品サイズによっては従来よりも1ランク小型の成形機を使用できる可能性がある。

従来の非発泡タイプのドアモジュール基材に対し、約22%軽量化した発泡試作品について部品性能試験を実施し、安

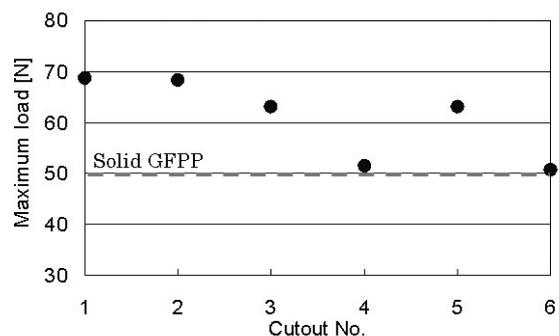


Fig.10 Relative Strength of Cutout Specimens from the Foamed Door Module Carrier

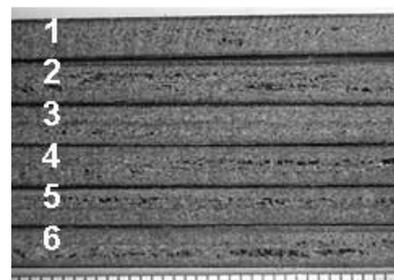


Fig.11 Cross Section of Cutout Specimens from the Foamed Door Module Carrier

全性・商品性のスペックを満足することを確認した。Fig.14に静荷重試験結果を、Fig.15に衝突荷重試験結果を示す。剛性、強度ともに従来品同等以上の性能を実現した。

4. おわりに

SCFを活用し、コアバック法と組み合わせて気泡構造を

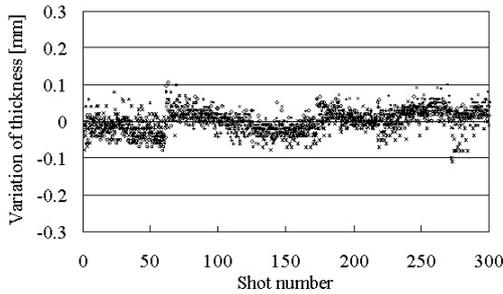


Fig.12 Thickness Variation

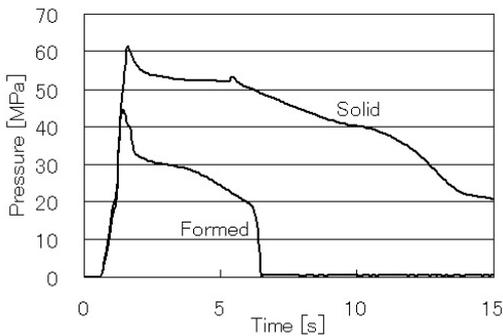


Fig.13 Die Internal Pressure During the Door Module Carrier Molding

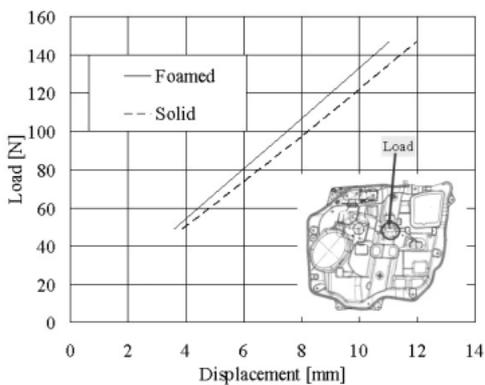


Fig.14 Results of Stiffness Test

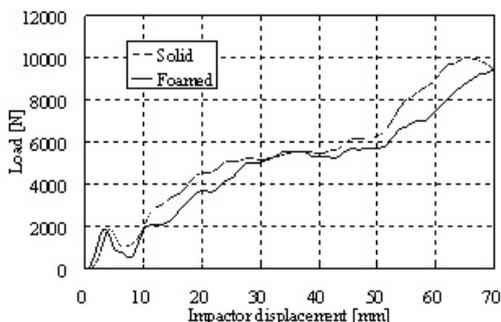


Fig.15 Results of Impact Test

コントロールする独自の射出発泡成形技術を開発した。

- ① 本技術によって高発泡倍率で低密度な中心層と、微細発泡によって機械物性を保持した表層を有するサンドイッチ気泡構造を形成し、発泡成形の課題であった機械物性の低下を抑制した。
- ② ドアモジュール基材の成形における本技術の適用性を検証し、材料削減による23%の軽量化と要求機能を満足することを確認した。

我々は、この技術をドアモジュール基材以外の樹脂部品にも広く応用展開することによって、化石資源を原料とする樹脂の使用量削減と部品の軽量化を進め、持続可能な自動車作りに貢献していく。

最後に、この開発にあたり、多大なご指導とご協力を頂いたダイキョーニシカワ(株)、(株)日本製鋼所の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 吉田ほか：ドアモジュールの開発，マツダ技報No.20，p.5-8（2002）
- (2) 新保ほか：マイクロセルラープラスチックの機械的・粘弾的物性に及ぼすセルサイズの影響，成形加工，6，12，p.863-868（1994）
- (3) 川東ほか：マイクロセルラー発泡射出成形の発泡構造制御因子と物性，成形加工 02年次大会予稿集，p.115-116（2002）
- (4) M. Yamaguchi：Melt Elasticity of Polyolefins；Impact of Elastic Properties on Foam Processing, Polymeric Foam, p.19-73（2004）
- (5) 瀧ほか：高分子発泡成形における分子量の気泡生成・成長への影響，成形加工 03年次大会予稿集，p.91-94（2003）

著者



小川淳一



梶山智宏



山田勝久



栃岡孝宏



金子満晴



中島之典