



技術解説

微細射出発泡成形(MuCell)と その応用展開

秋元技術士事務所

秋元英郎

微細射出発泡成形 (MuCell) とその応用展開

秋元技術士事務所

秋元英郎

博士 (工学)、技術士 (化学部門)

1. はじめに

微細発泡 (マイクロセルラー) は、発泡セル径がおよそ $100 \mu\text{m}$ 以下で、気泡密度が 10^8 個/cm³ である発泡体であり、それを得る成形方法が微細発泡成形である。一方、その成形方法は超臨界流体を発泡剤として用いることが多いため、超臨界発泡成形と同義語のように使われることが多い。

微細発泡成形技術は MIT 産学協同高分子成形加工プログラム (1973 年発足) から生まれた技術である。このプログラムの中で、材料の物性を維持し、部品形状を変えることなく材料を節約する技術を開発したいという動機からスタートしている。

1980 年代に MIT で基本技術 (基礎研究と応用開発研究) が確立し、1993 年からライセンス事業として TREXEL 社に引き継がれ、MuCell という名称で技術ライセンスされている (図 1)。開発当初は大幅な軽量化が可能というたい文句であったが、近年では軽量化よりも寸法安定性、ソリ・ヒケ防止が主な目的として広く採用されている。最近になって、製品設計から見直すことで 25% 以上の軽量化の例も見られている。

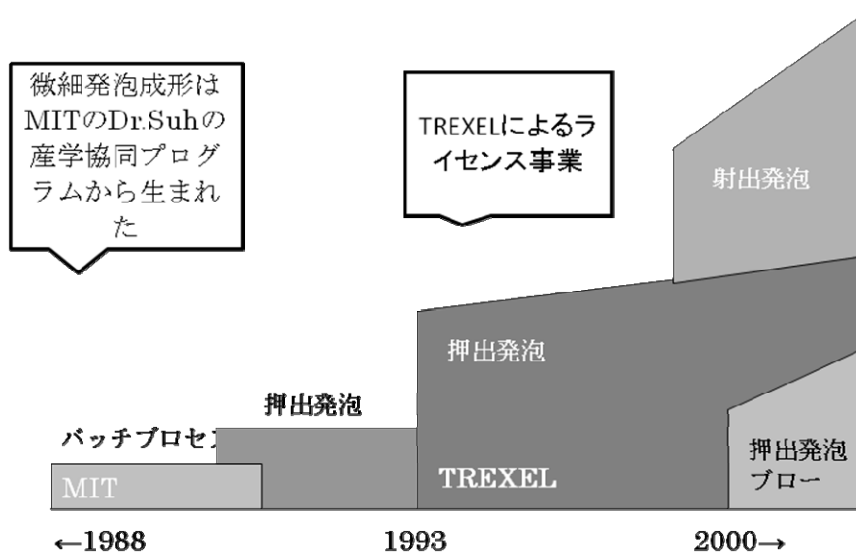


図1 微細発泡成形MuCellの歩み

2. 微細射出発泡成形の原理と超臨界流体

微細発泡成形の原理をごく簡単に言うと、溶融した樹脂に高圧下で発泡剤である窒素や二酸化炭素を大量に溶解 (必ずしも飽和でなくて良い) させ、急減圧させることによって多数の微細な気泡を発生させる方法である。

ここで、発泡剤は超臨界状態で供給される。図 2 に示すように、超臨界流体とはある温度と圧力 (それぞれ臨界温度、臨界圧力) 以上において気体と液体の両方の性質を有する流体である。気体は分子運動が激しく、分子間距離は長い。液体の分子運動はそれほど激しくなく、分子間距離は近い。ここで、気体の圧力を高めて分子

間距離を近づけること、液体を圧縮しながら加熱することを行うと、両者は結局同じところにたどりつく。この状態が超臨界流体である。二酸化炭素は31.1°C、7.38MPa、窒素は-147°C、3.40MPa、水は374°C、22.12MPaが臨界点である。

微細発泡成形で超臨界流体を用いる理由は2つある。1つ目は大量の発泡剤を樹脂に溶解させるためには高压が必要であり、結果として超臨界状態になっていること。2つ目は、一定の量をきちんと計量して樹脂に添加するには気体よりも液体の方が正確であることである。

人によっては、超臨界流体は拡散速度が速いため、樹脂に溶解させた時に速やかに均一な濃度に到達すると説明しているが、間違いである。ひとたび樹脂に溶解したら超臨界ではない。したがって、混合工程が必要になる。

図3にはMITの特許に記載されている図を載せた。

超臨界流体を溶融した樹脂に混ぜる。混合が進むと完全な溶解に到達(単一相溶解物)する。ここで高压を維持していると単一相は維持されるが、急に減圧すると、発泡剤は過飽和となり、気泡を生じる。樹脂を冷却固化させると気泡の成長は停止する。重要なことは、単一相溶解物を形成することと、急激な減圧を行うことである。

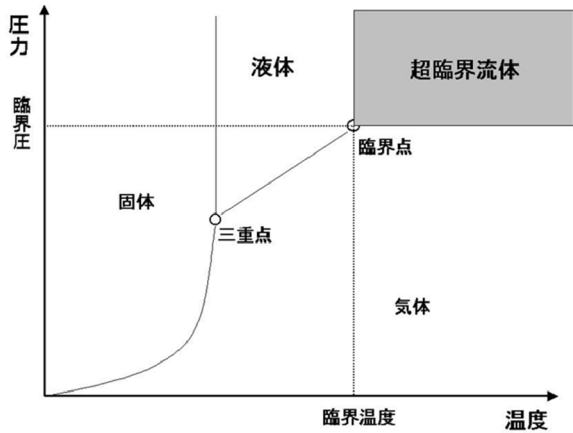


図2 超臨界流体

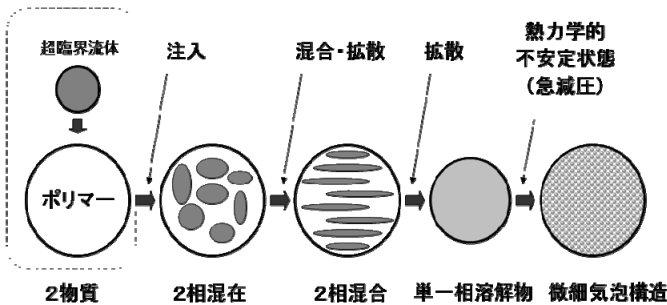


図3 MIT特許(米国特許公報 5866C53)に記載された、熱可塑性樹脂の成形工程における微細発泡の概念図

- (1)発泡剤である超臨界流体の注入
- (2)2相混合状態
- (3)拡散が進行している状態
- (4)発泡剤が溶解して単一相溶解物を形成した状態
- (5)熱力学的に不安定な状態を経て微細気泡が形成した状態

も窒素の方が低い溶解度を示す事が理解できる。例えばポリプロピレンに対して 200°C、15MPa の条件では二酸化炭素が約 10%、窒素が約 2%と約 5 倍の開きがある。実際に現実的な添加量として窒素を 1%添加した場合には 7.5MPa で飽和に達するが、二酸化炭素を 2%添加した場合には 3MPa で飽和に達する。一般に減圧速度は圧力が高い点の方が高いので、窒素の方がより急激な減圧状態で気泡が発生するため、気泡数が多く、微細な気泡になる。もちろん

微細射出発泡成形では発泡剤として窒素が好んで用いられる。図4には佐藤らによる窒素、二酸化炭素、HCFC、HFC の樹脂に対する溶解度のデータを示した。この図から、二酸化炭素より

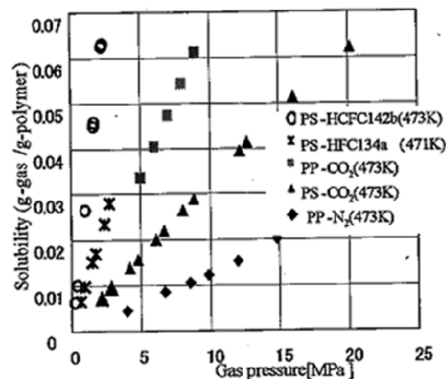


図4 N₂, CO₂, HCFC, HFCの樹脂への溶解度

200°C近傍のポリエチレン (PP) およびポリスチレン (PS) へ二酸化炭素, N₂, HCFC142b, HFC134a がどのくらい溶けるかを CO₂のそれと比較

Sato Y. et al "Solubilities and diffusion coefficients of carbon dioxide and nitrogen in polypropylene, high-density polyethylene, and polystyrene under high pressures and temperatures," Fluid Phase Equilibria, 162 (1-2): 261-276 (1999)

ん計算上では二酸化炭素を 5%添加すれば 7.5MPa で飽和に達するが、現実的ではない。

3. MuCell 微細射出発泡成形におけるプロセス制御

MuCell 微細射出発泡成形プロセスは前述した微細発泡成形を射出成形のプロセスの中で実現する方法である(図 5)。キーになる装置技術はいくつかある。超臨界流体発生装置は発泡剤であるガスを加圧して超臨界流体にするとともに、一定の流量で送り出す。送り出された流体は成形機のパレル内圧力に応じた圧力に調整され、決められた時間だけ成形機に注入される。専用に設計されたパレルとスクリューは、超臨界流体を細かい液滴として溶融樹脂内に分散させ、その後の混合で単一相溶解物を形成する。ここで、計量時および計量後の背圧は常に維持され、単一相からガスが分離しないように制御される。そのため、シャットオフノズルは必須となっている。

射出された単一相溶解物は成形機のノズルあるいは金型のバルブゲートを通過する際、急激な圧力低下によって多数の気泡が発生・成長する。気泡は金型内の樹脂圧力が高まると成長を止め、あるいは樹脂が冷却固化することで成長を止める。

金型内の樹脂流動は成形機から

押される力+気泡が拡大する力による。したがって、気泡が拡大する方向に流す必要があり、厚みが薄い方から厚い方に向かって流すのが MuCell にとって一般的である。

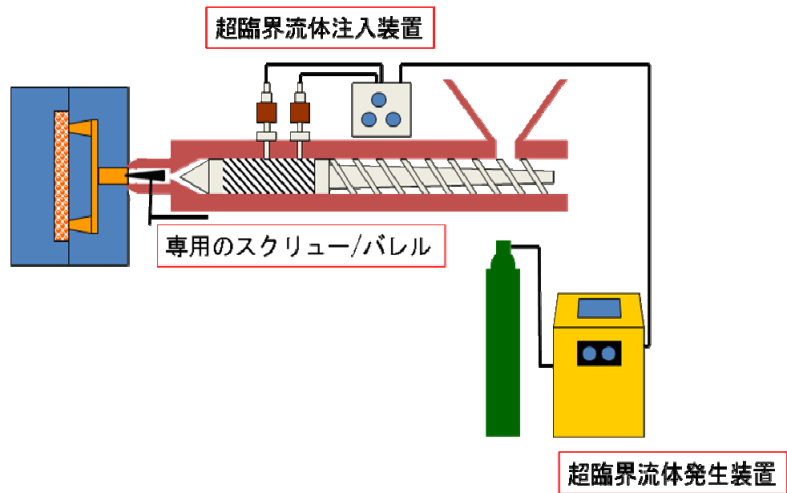


図5 微細射出発泡成形の設備概要

4. MuCell 微細射出発泡成形における気泡制御

MuCell 成形において微細気泡を得るためには次の 3 点を考慮する必要がある。第一に気泡核の数を多く生成させること、第二に気泡サイズの拡大を抑制しながら成形すること、第三に一度拡大した気泡を十分収縮させることである。

気泡核を多数発生させるためには十分な量の発泡剤(超臨界流体)を供給することと、金型に充填された単一相溶解物に十分に速い圧力降下を与えることが必要となる。ホットランナーの径が細過ぎる場合はホットランナーでの圧力損失が大きく、ゲートを出る段階で既に圧力が低くなっていることが起こりうる。成形に用いる材料に気泡核発生を促進させる核剤(例えば無機フィラー)が含まれていると多数の核が生成し、微細な発泡体を得られやすい。

ゲートから金型キャビティに流入した単一相溶解物から発生した気泡は、流動の進行とともにサイズが拡大する。その気泡サイズの拡大を抑制するには、金型キャビティ内を加圧ガスで満たす方法(カウンタープレッシャー)、流動長を短くする(ゲート点数を増やす、ゲートを製品の中央に配置する)方法、流動時間を短くする(すな

わち高速充填する)方法が有効である。

充填が進むことで型内圧が高まると、一度拡大した気泡が縮小する。したがって、充填量すなわち計量値が多いほど気泡径は小さくなる。ただし、軽量化率を 5%以下にした場合、キャビティ内圧力によって気泡内のガスが再溶解することがある。この場合には冷却固化とともに緩やかに減圧されるため、粗大気泡を生じるから注意が必要である。

5. MuCell 微細射出発泡成形の利点

MuCell プロセスの利点は次の2つから派生する。1 つ目は樹脂に超臨界流体が溶解することによる可塑化効果、すなわち樹脂の粘度が下がることである。2 つ目は気泡の拡大が充填を助けることである。

MuCell プロセスの代表的な産業上の利点は、①軽量化、②薄肉化、③ソリ・ヒケ解消、④寸法精度向上、⑤型締力低減、⑥成形サイクル短縮等である。

5-1 軽量化

MuCell プロセスでは樹脂中に気泡を生成させる。図 6 に微細射出発泡成形品の断面写真を示す。成形品は気泡を実質的に含まないソリッドスキン層(あるいは単にスキン層)と気泡を含むコア層から成るサンドイッチ構造をとっている。そのため、気泡が占める体積分だけ比重が下がる。現実的な比重低下は 8~15%程度であるが、ゲートからの流動長や金型内圧力に依存する。厚みに対する流動長(L/t)が長いほど密度低下の効果は小さくなる。また、金型内圧力が高いほど密度低下は小さくなる。

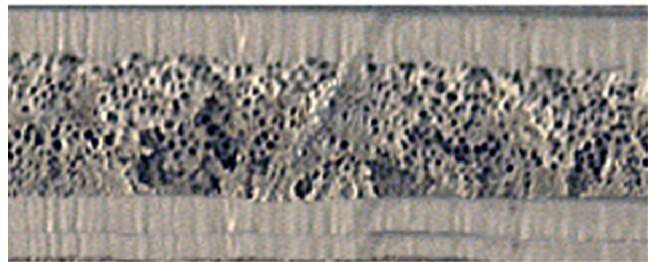


図6 典型的な微細射出発泡成形品の断面

5-2 薄肉化

MuCell プロセスでは「充填するための肉厚」から解放される。製品厚みは、その製品の特性上必要な厚みにすれば良い。実際の製品では厚み 0.3mm まで実績がある。

5-3 ソリ・ヒケ解消

通常の射出成形では金型内で固化収縮する分を保圧によって補う。しかしながら、この保圧工程が金型内の樹脂圧力に分布を生じさせ、不均等な収縮を起こさせる。これがソリの原因となる。MuCell プロセスでは、樹脂の固化収縮分を気泡の拡大で補うため、金型内の圧力が均等に掛り、ソリを抑制することができる。

通常の射出成形では、厚肉部分・ボス・リブ部分にヒケが生じる。ヒケは冷却が遅れる部分に生じる。この現象は、冷却が遅れる部分の周囲が先に固化することで保圧の圧力が伝わらず、遅れて起きる固化収縮を補うこと

ができないために発生する。MuCell プロセスでは固化収縮を気泡の拡大で補うので、ヒケが起こらない。図 7 には裏にリブを持つ成形品のヒケを観察した写真を示した。材料はポリプロピレンである。ソリッド成形品では矢印で示した部分でヒケが見えるが、MuCell 成形品では殆どヒケが生じていない。



図7 ポリプロピレン成形品のヒケの様子
 左：微細射出発泡成形 (MuCell)、右：通常射出成形
 東芝機械(株)技術資料

5-4 寸法精度向上

微細射出発泡成形ではソリッド成形に較べて収縮率がやや大きくなるが、製品内での収縮は均等になる。MuCell プロセスでは通常のソリッド成形に較べると重量ばらつきはやや大きくなるが、寸法のばらつきは小さくなる。図 8 にはポリアセタールで 30 個成形した際の重量、寸法のばらつき(標準偏差)をソリッド成形品と MuCell 成形品(軽量化 5.2%, 9.2%)の比較を示した。重量はソリッド成形品より MuCell 成形品のばらつきが大きく、

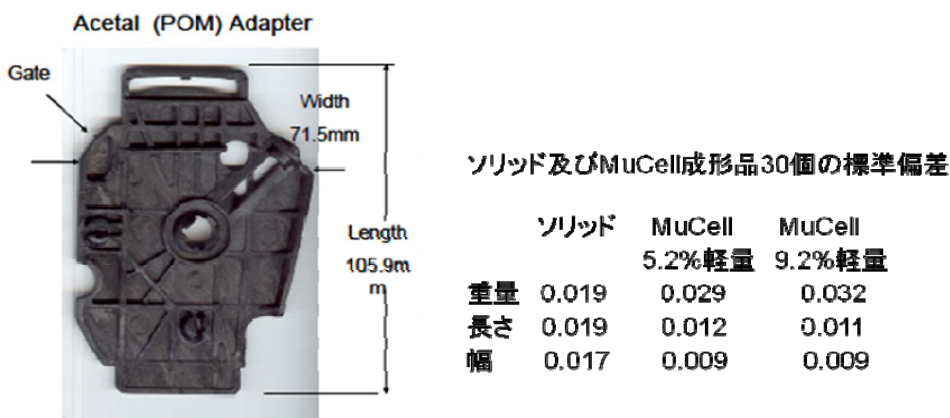


図8 ソリッド及びMuCell成形における寸法と重量のばらつき
 長さ105.9mm, 幅71.5mm 材料POM
 TREXEL社ホームページに掲載の技術資料より引用

(<http://www.trexel.com/download/Repeatable-Processing%20and%20Controls%20.pdf>)

MuCell 成形品では軽量化が大きい方でのばらつきが大きい。一方で寸法のばらつきはソリッド成形品に較べて

MuCell 成形品では小さくなっており、軽量化の度合いの影響を殆ど受けない。

5-5 型締力低減

MuCell 成形は基本的に低圧成形である。通常の射出成形は熔融樹脂の圧力を高めて流し込むため、キャビティ内圧力が高くなる。MuCell プロセスでは気泡の拡大が充填を助けることと、キャビティの充填量が少なくなることによりキャビティ内圧力が低くなる。その結果、型締力は 40～70%に下げることが可能になる。図 9 の写真は MuCell が採用されたエアバッグカバーである。ここで、ソリ低減や寸法精度向上とともに成形機のサイズを 40%小さくすることが可能になった。



5-6 成形サイクル短縮

MuCell プロセスでは保圧の代わりに気泡の拡大で固化収縮を補うため、成形機の条件設定上、保圧時間は実質的にゼロである。その分ソリッド成形よりも成形サ

イクルが短縮される可能性がある。また、MuCell 成形品の断面は図 6 に示したサンドイッチ構造になっているため、金型内において製品が持っている熱量の多くはスキン層に偏在すると考えられる。ソリッド成形品の場合では金型から製品を取出した後で表面温度が上昇することがある。この現象は板厚中央部に持った熱が表面に伝わるからである。MuCell 成形品は効率よく冷却されるので冷却時間も短縮できる可能性がある。ただし、厚みが 3mm を超えると内部まで冷却するために必要とされる冷却時間が長くなり、冷却が不十分であると後述する後膨れが発生する。

図9 成形機の型締力低減に成功した例

製品:エアバッグカバー

ソリッドの場合の成形機サイズ:500t

MuCellの場合の成形機サイズ:300t

TREXEL社ホームページ掲載の実用例より引用

(<http://www.trexel.com/injection-molding-solutions/pdfs/TRWAirbagCover.pdf>)

6. トララブルシューティング

6-1 ブリスター

製品のごく表層に発生する膨れと、内部に発生する膨れがある。内部に発生するものは大きく、1cm 位になることもある。いずれも膨れの内部は平滑であり、大きな気泡と考えてよい。これは発泡剤である超臨界流体が分離している場合に起こりやすい。表面近くにできるブリスターは通常 1mm 以下の小さいものである。ゲート部での剪断が大きすぎる場合に起こりやすく、射出速度を落とすことが有効である。

6-2 後膨れ

図10に後膨れの写真を示す。製品を十分に冷却しないうちに取り出すと、板厚中央部や冷却が足りない部分で十分に固化していない場合があるが、このような部分が気泡内のガス圧で膨らみ、破泡が進行することがある。ブリスターとの違いは切り出した内部がざらざらしている点である。ガス圧によって内部の気泡が破れ、引き裂かれ、外見的には膨れが起こる。発泡剤の量を減らし、冷却を十分行うことで解消できることが多い。本来は製品設計時、金型設計時に厚肉部を避けたり、ホットスポットが生じないような冷却配管の配置を検討しておくべきである。

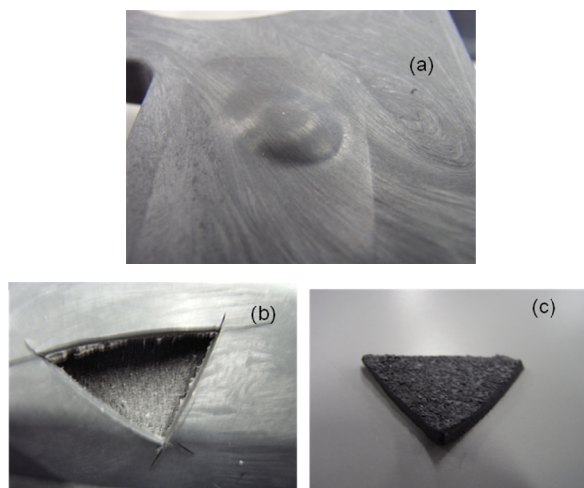
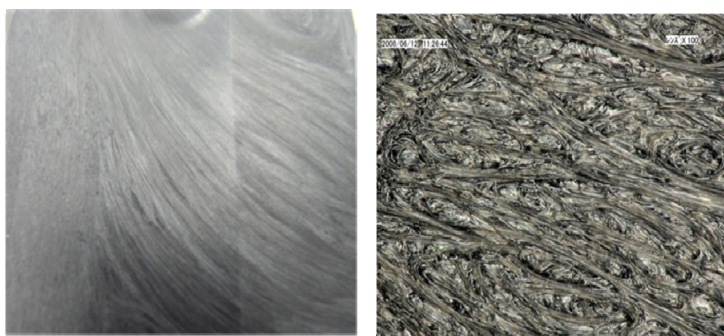


図10 MuCell微細射出発泡成形品の後膨れ
表面(a)と切り出した内部(b,c)

6-3 スワールマーク

射出発泡の成形品表面には図11に代表されるような筋状あるいは渦巻き状の凹凸を伴った模様が現れることが多い。



(顕微鏡写真)

図11 代表的なスワールマークの表面写真

これは図12で模式的に示したように流動末端で発生した気泡が成形品表面で引き伸ばされ、破裂してできた痕である。気泡が引き伸ばされている様子は図11の顕微鏡写真からよくわかる。これをスワールマークあるいはシルバーストリークと呼んでいる。通常の射出成形で原料の乾燥が不十分な時に発生するシルバーストリーク(銀状痕)と同じメカニズムで起こるが、成形品前面に広がることが多い。

従来のストラクチャルフォームではスワールマークは仕方ないものとして、半ばあきら

められて使われていたが、ニーズが自動車内装等の外観部品に広がってくるにしたがって、スワールマークが重大な外観不良として解決すべき課題として認識されるようになってきた。

スワールマークを解消する技術手法は大きく4通りある。

①高速充填: 気泡の寿命より速く充填し、意匠面を形成する方法である。このためできるだけ低分子量で高流動の材料を用いる必要がある。また、流動過程で肉厚が増す等の流速が低下しないように製品を設計すると良い。

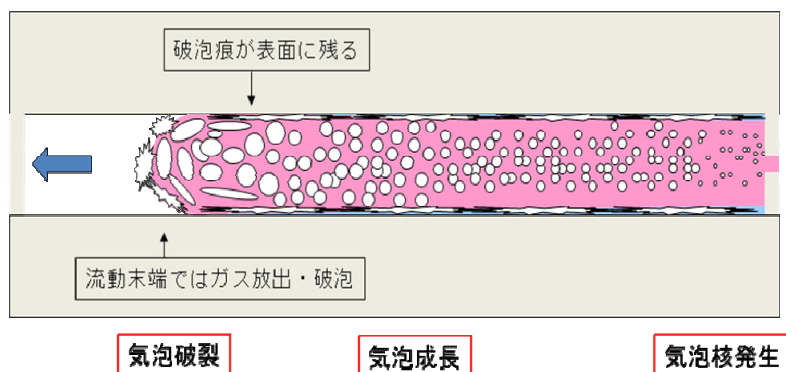


図12 微細射出発泡成形における充填途中の気泡の様子

②発泡用材料: 気泡の寿命を長くするため、分子量が大きく高粘度の材料を用いる方法である。MuCell 成形品の表面にスワールマークが目立ちにくい材料が開発されている。図 13 には Rhodia 製のテクニール XCell を使用した例を示す。

③型内加圧: 流動末端における気泡拡大を抑制するために金型内の気圧を高める方法である。

④金型加熱冷却: 成形の過程で生じたスワールマークを金型面に押し付けて転写させる方法である。例えば小野産業の RHCM(高速ヒートサイクル成形)との併用で有効性が確認されている(図 14)。

図13 一般ナイロンとMuCell専用銘柄の表面状態の比較
製品: ラジエータータンク
TREXEL社ホームページ掲載の実用例より引用
(<http://www.trexel.com/injection-molding-solutions/pdfs/QSCRadiatorEndTank.pdf>)



図13 一般ナイロンとMuCell専用銘柄の表面状態の比較
製品: ラジエータータンク
TREXEL社ホームページ掲載の実用例より引用
(<http://www.trexel.com/injection-molding-solutions/pdfs/QSCRadiatorEndTank.pdf>)



図14 センターパネルテスト型による成形サンプルの外観
左: 微細射出発泡成形 (MuCell)
右: 微細射出発泡成形と金型加熱冷却の組み合わせ (MuCell Gloss)

6-4 ショートショット

MuCell 成形における樹脂流動のドライビングフォースの一つは溶解させた発泡剤(ガス)の圧力による気泡拡大である。MuCell 成形では樹脂に溶解させた発泡剤(ガス)がフローフロントから金型キャビティ内に放出されるため、通常の射出成形に比べてガスが溜まりやすい。そのため、ベントが不十分な場合にはショートショットが生じやすい。また、過剰な重量低減はショートショットにつながる。

代表的なショートショット対策は充填量増加とベントの強化である。

7. 微細射出発泡成形 MuCell のための金型技術

前述のように MuCell 成形では樹脂流動のドライビングフォースの一つは気泡の拡大である。そのため、厚みが厚い方から薄い方には流しにくい。したがって、ゲートは薄肉部分に設ける方が樹脂を流しやすい。ウェルド部等のガスが溜まりやすい部分にはベントを設けることは言うまでもないが、通常の射出成形に較べてベントのサイズを大きくする必要がある。製品厚みが 3mm を超えると内部まで冷却しにくくなる。冷却ムラが生じないような冷却回路配置が必要になる。

8. 一步進んだ微細射出発泡成形

MuCell 成形では約 10%(L/t に依存する)の比重低下によって重量低減がえられるが、製品設計から見直すことで更なる軽量化が可能である。3 つの例を示して説明する。

8-1 ファンシュラウドの例

図 15 の左に示す形状はソリッド成形による製品設計である。材料はガラス強化 PA6 であり、ソリッド成形では 1 点ゲートであった。充填のために厚み 2mm が必要であった。この製品ではモーター取り付け部の 4 本の足の強度、周囲の取り付け部の強度と寸法が重要であった。MuCell では強度に影響しない部分(図中で青い点線で囲んだ領域)の厚みを 1mm にするとともに、肉厚 1mm の部分にゲート(▽)を追加した。その結果、製品重量は 0.4kg 軽量化できた。

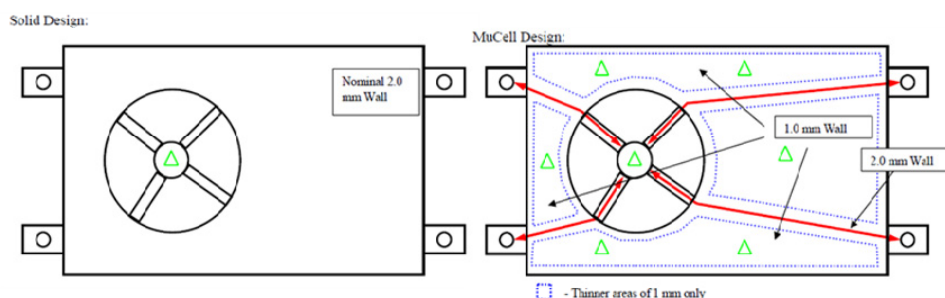


図15 MuCell成形用に製品形状を変更して軽量化した例

左は通常成形で一般肉厚が2mmであった

右はMuCell成形で、強度に影響しない部分の厚みを1mmにしてゲートを追加した

TREXEL社ホームページに掲載の技術資料より引用

http://www.trexel.com/injection-molding-solutions/pdfs/RAPRA_May_2009_Advanced_Microcellular_Applications.pdf

8-2 ドアトリムアッパーの例

図 16 に示すのは PVC 表皮つきドアトリムアッパーである。材料はタルク入り PP である。この製品は衝撃吸収特性が必要であるため、厚さ 2.2mm にリブが裏面に配置されていたが、表面にヒケが生じるために一般肉厚を 4.4mm にしていた。更に、衝撃吸収のための後付け部品も取り付けられていた。この製品を MuCell 成形用に設計し直した結果、リブ厚みを 2.4mm に増しながら、一般肉厚を 2.2mm に減らすことができた。この形状変更により、十分な衝撃吸収特性が得られたため、後付け部品が不要になった。結果として 40%の軽量化を達成した(形状

変更で 20%, 比重低下で 6%, 後付け部品削減で 14%)。



図16 MuCell成形(PVC表皮つき)によるドアトリムアップパー
TREXEL社ホームページに掲載の技術資料より引用

http://www.trexel.com/injection-molding-solutions/pdfs/RAPRA_May_2009_Advanced_Microcellular_Applications.pdf

8-3 ジャウンスバンパーの例

ジャウンスバンパーは元々ゴムで成形されていたが、20 年ほど前から熱硬化型ウレタン樹脂に替っていた。このプロセスは成形サイクルが 10~15 分掛り、材料のリサイクルができない点が問題であった。

図 17 は MuCell とコアバック技術の組合せによって成形されたジャウンスバンパーの写真である。図 18 にコアバックのプロセス図を示した。コアバックは金型内のコアを後退させる方法と、成形機の型盤を移動させて金型を開く方法があるが、この場合は金型内のコアを後退させている。コアバック発泡技術は、ストラクチャルフォームの成形法として古くから用いられており、新しいところではドアトリムの成形方法として実用化されている。しかしながら、これらは化学発泡によるものであり、高発泡倍率は達成されていない。ジャウンスバンパーの場合、化学発泡剤では発泡倍率は 2~2.5 倍で最終厚みが 3.2~4.0mm が限界であったが、MuCell を用いると発泡倍率 3.5 倍で最終厚みは 5.6mm まで膨らんだ。



図17 MuCellプロセス+コアバックで成形されたジャウンスバンパー
TREXEL社ホームページに掲載の技術資料より引用

http://www.trexel.com/injection-molding-solutions/pdfs/RAPRA_May_2009_Advanced_Microcellular_Applications.pdf

発泡体の剛性を表現するパラメーターに曲げ弾性勾配(N/cm)がある。これは、50mm × 150mm の板を切り出し、100mm 間隔の 2 本の線で支え、中央に荷重を掛け、1cm 変形したときの荷重(N) である。発泡体の曲げ弾性勾配はソリッド材の弾性率、厚みの 3 乗に比例し、発泡倍率に反比例する(式1)。式1において、弾性率は MPa、厚みは mm で入力する。分母の係数 400 は経験値である。この式から厚み 2mm のソリッドを 4mm(2 倍)に発泡させると曲げ弾性勾配は 4 倍になる。逆に厚み 1.4mm から 2.5mm に膨らませると 1.8 倍発泡となり、2mm 厚のソリッドと同等の剛性になるが重量は 30%少なくなる。

$$\text{曲げ弾性勾配} = \frac{\text{ソリッドの弾性率} \times (\text{厚み})^3}{400 \times \text{発泡倍率}} \quad (\text{式1})$$

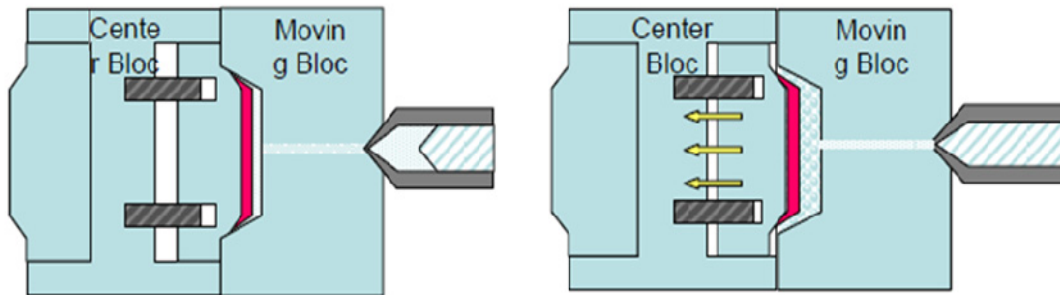


図18 ジャウンスバンパー成形に用いたコアバック成形の金型動作図
 TREXEL社ホームページに掲載の技術資料より引用

http://www.trexel.com/injection-molding-solutions/pdfs/RAPRA_May_2009_Advanced_Microcellular_Applications.pdf

9. 終わりに

微細射出発泡成形 (MuCell) は、流動性向上と保圧不要によるメリットが享受できる。また、ヒケが見えないことから、製品設計を根本から見直す事ができ、大きなメリットが得られる。さらに、コアバック発泡と併用することにより剛性を維持して軽量化することが可能になる。

このように MuCell のメリットは大きく広がっている。

10. 参考文献

発泡成形【材料・設計・成形・評価・製品応用・微細化】(2008年10月発行 情報機構)

自動車部材への応用を中心とした樹脂発泡成形技術と適用事例 (2009年10月発行 技術情報協会)

秋元英郎, "コアバック発泡とコアバック用成形機", 成形加工, 21(11), 654-659 (2009)