

博士論文（要約）

超臨界流体を利用した
微細発泡射出成形における
発泡構造発現過程の可視化解析

山田 岳大

窒素や二酸化炭素の超臨界流体を利用した微細発泡射出成形は、発泡成形品に残渣を残さず、比強度及び耐衝撃性に有利なマイクロオーダーの微細な気泡を多数形成させることができる。このため、循環型社会に対応し、軽量化が求められる自動車、家電分野や、安全性や生体適合性が要求される食品や医療衛生分野などの成長市場に本成形技術の展開が期待されている。

得られた発泡成形品断面の発泡構造は、表層の無発泡層に発泡層が挟まれたサンドウィッチ構造を呈している。この発泡構造は、射出成形の加工工程における流れや、樹脂圧力の変動などの複雑な現象の影響を受けて、形成される。このため、発泡構造の形成過程を理解することが困難で、発泡構造の形成過程を予測、制御することができず、均質かつ微細な気泡が多数形成される発泡成形品を安定的に生産することが難しい。このことが、製品化の障害となり問題となっている。このため、製品化の障害の根源となっている未解明な発泡構造の形成過程を明らかにすることは重要な研究課題である。本論文では、動的な可視化手法を用いて、未解明な発泡構造の形成過程を明らかにする。

本論文は、序論と総括を含めて 7 章で構成されている。序論では、発泡構造の形成過程を明らかにするために行われてきた解析方法及び解析事例を整理し、発泡構造の未解明な形成過程と、解明すべき課題を抽出し、本研究の目的を明らかにした。

第 2 章では、耐衝撃性ポリスチレン (HIPS) の発泡成形品の断面に形成される気泡の分布状態を、気泡径の違いにより層構造として整理し、成形条件とこれら層構造の関係を示した。また、成形時に計測したキャビティ内の樹脂圧力と層構造の関係を調査した。その結果、発泡層では、気泡径 d により分類されたコア層 I ($d > 150\mu\text{m}$)、コア層 II ($d < 50\mu\text{m}$)、コア層 III ($d > 100\mu\text{m}$) の 3 種類の層が確認された。キャビティ内の最高樹脂圧力の増加により、発泡層の構成がコア層 I とコア層 II の複合層からコア層 II とコア層 III の複合層、コア層 III の単層へと変化した。

第 3 章と第 4 章では、今まで十分に考慮されていなかったキャビティ内の樹脂圧力変動にともない発現する発泡層の形成過程を明らかにした。

第 3 章では、動的な可視化手法を用いて、キャビティ内の形成過程を観察した。その結果、発泡構造の形成過程は、充填工程におけるメルトフロントでの破泡と気泡を含む樹脂の流動と、圧縮工程完了時における気泡の縮小または消失、冷却工程における気泡の生成・成長と冷却固化から構成されることが確認された。また、射出容量の増加にともなって、圧縮工程完了時の樹脂圧力が上昇すると、充填工程で生成した微細な気泡が消失し、冷却工程で新たに数少ない気泡が大きく成長することが確認された。この結果から、圧縮工程完了時における高い圧縮作用によって、気泡が樹脂中に完全に溶解し、続く冷却工程で新たに再生成、成長した気泡によりコア層 III が形成されるモデルを提示した。また、圧縮工程完了時における中程度の圧縮作用では、温度の高い中心領域における気泡のみが樹脂中に溶解するため、中心領域のみにコア層 III が形成されるモデルを提示した。

第 4 章では、材料種類が、樹脂圧力の変動にともなって発現する発泡構造の形成過程にどのような影響を及ぼすかについて検討するため、X 線 CT を用いた発泡成形品の比較解析により、非晶性樹脂 (HIPS) と結晶性樹脂 (ポリプロピレン (PP)) の発泡構造の差異を具体的に示し

た。その結果、最高樹脂圧力の変化においては、両樹脂の発泡構造の推移はほぼ同様であったが、コア層Ⅲの単層が形成される高い最高樹脂圧力の場合では、無発泡層の境界から内層側に向かって断面径を広げた“つらら状の気泡層”がPPにおいて確認された。第3章で提示した、気泡の溶解・再生成、成長モデルに、結晶化による結晶領域からのガスの排出現象を付加し、断面を広げつつ板厚方向に成長するつらら状の気泡層の形成モデルを提示した。

第5章と第6章では、流れにともない発現した扁平化した大きな気泡層（コア層Ⅰ）の形成過程を明らかにした。

第5章では、動的な可視化手法を用いて、コア層Ⅰが形成されるキャビティ壁面近傍領域において、せん断ひずみ速度と気泡径の分布を計測し、気泡挙動を観察した。その結果、せん断ひずみ速度が高い領域で、気泡同士の合一が生じ、大きな気泡が順次移動することが確認された。この結果から、充填工程における高せん断ひずみ領域で気泡同士が頻繁に接触して合一することで気泡径が急激に拡大し、その後、拡大した気泡は速度分布を反映して変形し、分裂してコア層Ⅰが形成されるモデルを提示した。

第6章では、せん断流動に加えて、さらに複雑な流動が生じる障害ピン後方における大きな気泡群の形成過程を解析した。X線CTを用いた発泡成形品の観察から、障害ピン後方ウェルドラインの両側に、微細発泡層と大きな気泡群が複雑に絡み合った発泡構造が確認された。動的な可視化手法により、障害ピン周りから障害ピン後方における扁平化した大きな気泡の移動挙動と、樹脂の滞留状況を観察した。以上の結果から、障害ピンからの冷却により、障害ピン後方の滞留領域（ Δ 領域）が次第に高粘度化されるため、障害ピン周りから Δ 領域への流線が、微細な気泡が移動していた Δ 領域側面外側への流線に変わる。これによりコア層Ⅰが微細な気泡群の領域を横断して分布する特異な構造が形成されるモデルを提示した。

第7章の総括では、本論文で得られた結果を要約した。また、発泡構造形成過程の系統的な解析を進める上で、気泡径の層別分離に基づく評価方法や、X線CTに基づく詳細な3次元構造解析手法、動的な可視化解析手法を適用することの優位性を示した。特に動的な可視化手法を主としたこれらの解析手法により、これまで未解明となっていた①圧縮過程における昇圧にともなう発泡構造の形成過程や、②流動履歴にともなう発泡構造の形成過程を明らかにした。これらの結果は、発泡構造の予測技術や制御技術、さらには微細発泡成形品の製品化を推進する上で学術的ならびに工業的に大きく貢献するものと期待された。