

## 審査の結果の要旨

氏名 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 $\mu\text{m}$  オーダーの微細な気泡を多数形成させることができる。このため軽量化が求められる自動車・家電分野、安全性や生体適合性が要求される食品・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。この成形品の発泡構造は、表層の無発泡層に発泡層が挟まれたサンドイッチ構造を呈するが、中間の発泡層には気泡径の異なる層が成形条件により複雑に積層する。その発泡構造の発現機構には未解明な部分が多く残されており、発泡構造形成過程を予測・制御する上で困難を伴っていた。製品化の推進にも大きな障害となっている。本論文は、こうした課題を解決するために、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を、X線CTによる高解像度観察と併せて、ガラスインサート可視化金型に基づく動的な可視化手法を適用して解析したものである。

まず耐衝撃性ポリスチレン (HIPS) を用いて、発泡成形品断面の気泡分布状態を、気泡径の違いにより層構造として整理し、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、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 ( $d > 100 \mu\text{m}$ )、以上の3種類が、コア層内で内層部に向かって存在し、最高樹脂圧力の増加により[コア層 I と II の複合層]から[コア層 II と III の複合層]へ、さらにコア層 III の単層へと遷移することを明らかにしている。つぎに可視化金型を用いて、樹脂圧力変動にともない発現する発泡層の形成過程を直接観察した。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および気泡の流動、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再生成・成長と冷却固化、以上から構成されることを確認している。また圧縮工程完了時に樹脂圧力が上昇すると、充填工程での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した。以上より下記の発泡構造発現モデルを提示している。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。その際、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の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。

一方、材料種類が発泡構造形成過程に及ぼす影響を検討するため、X線CTを用いて非晶性樹脂 (HIPS) と結晶性樹脂 (PP) の発泡構造の差異を調査・比較している。最高樹脂圧力が高い場合に、PPにおいて無発泡層の境界から内層側

に向かって断面径を広げた特異な“つらら状の気泡層”の生成を見出している。このつらら状の気泡について、以下のような形成過程のモデル化を行っている。気泡の溶解・再生成・成長過程で、結晶化により結晶領域からガスが排出され、非晶領域のガス濃度を上昇させる。さらに厚さ方向の温度勾配を背景に、気泡がその断面を広げつつ板厚方向へと成長し、つらら状を形成する。

つぎに、流れにともなって発現する扁平化した大きな気泡層（コア層 I）を取り上げ、その形成過程の検討を行っている。可視化金型を用いて、コア層 I が形成されるキャビティ壁面近傍領域で、せん断ひずみ速度および流動する気泡径の分布を計測し、併せて気泡挙動を観察した。これにより、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を確認した。これにより、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、というモデルを提示している。複雑な流動が生じる障害ピン後方では、大小の気泡群が複雑に入り組んだ発泡構造の形成が知られている。こうした発泡構造形成過程についても、さらに検討を行っている。まず X 線 CT による観察では、障害ピン後方のウェルドライン両側に、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の形成を確認した。可視化金型による観察では、扁平化した大きな気泡が障害ピン周りからピン後方に移動する挙動ならびに樹脂の滞留状況を明らかにしている。すなわち、障害ピンからの冷却により、ピン後方滞留領域（ $\Delta$ 領域）の高粘度化が進み、ピン周りの流線が、 $\Delta$ 領域側面の外側に分布する微細気泡の移動領域内へと遷移する。これにより、コア層 I が微細な気泡群の領域を、あたかも横断して分布するかのような特異な構造が形成されることを明らかにした。

以上のように、本論文では、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、X 線 CT に基づく詳細な 3 次元構造解析手法、可視化金型による動的可視化解析手法、以上の適用が極めて有効であることを実証的に明らかにしている。特に可視化金型を中核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圧縮過程での昇圧にともなう発泡構造の形成過程と、②流動履歴にともなう発泡構造の形成過程を、それぞれ具体的に明らかにしてモデル化を行っている。これらの結果は、発泡構造の予測・制御技術の発展、さらには微細発泡成形品の製品化の推進に大きく貢献するもので、工学的にも工業的にも多くの重要な知見を見出した先導的な研究である。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。