

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 工 学 )	氏名	内藤 章弘
論文題目	低圧物理発泡射出成形装置の開発と装置内での物理発泡剤の溶解機構の解明		
<p>プラスチック使用量の削減技術の一つに、窒素 (N<sub>2</sub>) や二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) などの不活性ガスを物理発泡剤として用いて、プラスチックを発泡成形する微細発泡射出成形法がある。この発泡射出成形法では溶融ポリマーに溶解する物理発泡剤濃度が発泡挙動および製品発泡体の機能を左右する。そのため、ポリマー中に溶解する物理発泡剤の濃度管理が必要である。近年、申請者らは、スクリュウ設計を工夫し、スクリュウ溝内の溶融ポリマーが流れる流路中に意図的にポリマーが欠乏する樹脂非充填領域を形成することにより、物理発泡剤をポンベ圧以上に昇圧することなく成形機に導入し、ポリマーを発泡させることのできる低圧式発泡射出成形機を国産技術として開発した。本論文は、その開発した低圧物理発泡射出成形機において、装置内の溶融ポリマーへの物理発泡剤の溶解挙動と、その溶解濃度と成形条件との因果関係を、近赤外分光法を用いた濃度測定の実験と数式モデルを使った計算機シミュレーションにより解明しようとするものである。その内容を、緒論・結論を含めて以下のように6章からまとめている。</p> <p>第1章は緒論であり、プラスチック発泡成形の原理や、関連する発泡射出成形法の研究・開発の先行研究と、現状の課題について述べている。その流れのなかで、新規開発した装置の工業的価値と実装価値について述べ、本論文で行った研究の位置付けを示している。</p> <p>第2章では、物理発泡剤をポンベ圧以上に昇圧することなく成形機に導入し、ポリマーを発泡させることのできる低圧発泡射出成形機の開発経緯を述べるとともに、流路中にポリマーが欠乏する樹脂非充填領域を形成することが、不活性ガスを供給ポンベの圧力より上げずに、せん断力により従来では 20MPa という高い圧力下にある溶融ポリマーに物理発泡剤を溶解させることを可能とした重要な技術要素であることを述べている。また、開発した射出成形機を使用した成形実験を実施することにより、窒素・二酸化炭素のみならずアルゴン・空気などを物理発泡剤として、マイクロメータサイズの孔径を持つプラスチック微細発泡体を製造できることを実証している。</p> <p>第3章では、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) を物理発泡剤としてポリプロピレン (PP) を発泡させる低圧発泡射出成形法において、近赤外分光 (NIR) 法を用いて装置内の溶融ポリマーに溶解する物理発泡剤 (CO<sub>2</sub>) 濃度をインライン測定し、各種成形条件がポリマー中に溶け込む CO<sub>2</sub> の濃度に与える影響を実験的に解明している。結果、スクリュウ流路の非充填領域の溶融ポリマーと物理発泡剤との接触比表面積と非充填領域の長さ、ならびにスクリュウの充填領域における溶融ポリマーの圧力勾配が CO<sub>2</sub> 濃度を決定する重要な因子であることを明らかにしている。</p> <p>第4章では、スクリュウ流路中の非充填領域において、物理発泡剤が溶融ポリマーに溶解する挙動を数式モデル化し、そのモデルを使った計算機シミュレーション手法を開発している。そのモデルの妥当性を第3章の実験結果と比較評価した結果、非充填領域の長さおよび待機時間が一定の成形条件下では、圧力勾配と比表面積との積の計算値を用いて物理発泡剤濃度を精度よく推定できることを明らかにしている。</p> <p>第5章では、スケールアップ則を用いて第4章のモデルを拡張して、スクリュウサイズや形状が物理発泡剤の溶解に与える影響を検討している。その結果、フライト高さ・フライトピッチなどのスクリュウ形状は物理発泡剤の溶解濃度には、ほとんど影響を与えないこと、フライト条数・材料供給速度の調整により、非充填領域での溶融ポリマーの占有割合と非充填領域の流路長さを変えることでのみ、発泡剤の濃度を変化できることを明らかにした。</p> <p>第6章は総論であり、これまで得られた研究成果の総括及び今後の技術的展望について述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、窒素 (N<sub>2</sub>) や二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) などの不活性ガスを物理発泡剤として用いて、プラスチックを発泡成形する微細発泡射出成形装置のモデリングと実験に関する論文である。申請者らは、スクリー溝内の溶融ポリマーが流れる流路中に意図的に、ポリマーが欠乏する樹脂非充填領域を形成することにより、物理発泡剤をポンペ圧以上に昇圧することなく成形機に導入し、ポリマーを発泡させることを可能にしている。その発泡射出成形機において、装置内の溶融ポリマーへの物理発泡剤の溶解挙動をモデル化し、近赤外分光法を用いた濃度測定の実験結果と数式モデルを使った計算機シミュレーションとを併用することにより、溶解濃度と各種成形条件ならびにスクリー形状との因果関係を解明しようとしたものである。その主な結果は次のとおりである。

1. 物理発泡剤をポンペ圧以上に昇圧することなく成形機に導入し、ポリマーを発泡させることを可能にした肝となる技術要素は、流路中にポリマーが欠乏する樹脂非充填領域を形成したことであることを明らかにした。
2. 近赤外分光 (NIR) 法を用いて、開発した発泡射出成形機において樹脂中に溶解する物理発泡剤 (CO<sub>2</sub>) 濃度を実測し、射出樹脂中に溶解する CO<sub>2</sub> の濃度はスクリー回転数と冷却時間に比例し、材料供給速度、バレル温度、背圧に反比例すること。また、その影響度は、実験条件の範囲内では、背圧 > 冷却時間 > 材料供給速度 > バレル温度 > スクリュー回転数の順となることを明らかにした。
3. 樹脂非充填領域で物理発泡剤が樹脂に溶解する挙動を、スクリー回転中 (計量工程) と待機中 (保圧・冷却工程) の二つに分け、浸透・拡散説に基づいてモデル化し、非充填領域の長さおよび待機時間が一定の成形条件下では、物理発泡剤濃度を実験値との相対誤差が 10 % 程度でスクリー回転中の物理発泡剤濃度を推算可能とした。さらに、圧力勾配と溶融ポリマーと樹脂の接触比表面積の計算値を用いて樹脂非充填領域の長さを補正することにより、誤差は格段に改善されることを示した。
4. スクリュー形状が物理発泡剤の溶解に与える影響をスケールアップ則を用いて検討し、フライト条数・材料供給速度の調整により、非充填領域での溶融ポリマーの占有割合と非充填領域の流路長さを変えることで発泡剤の濃度を調整できることを明らかにした。

以上のように、本論文は、新規開発した微細発泡射出成形装置において、製品発泡体の機能を左右する重要な要因である、ポリマー中に溶解する物理発泡剤の濃度への成形装置・操作条件の影響を、実験と、化学工学的な物質移動モデルを使った計算シミュレーションをともに実施することにより、明確にしたもので、学術上、実際上も寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 6 年 5 月 27 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。