

補助事業番号 2023M-350

補助事業名 2023年度 伸長流動下におけるナノ粒子の分散メカニズムの解明 補助事業

補助事業者名 福岡大学 工学部 機械工学科 機械設計・工作研究室 松本紘宜

1 研究の概要

高粘度樹脂へのナノ粒子の直接分散は非常に困難を極め、従来法における「せん断流動」を用いた物理的な溶融混練法では均一分散は達成できていない。そこで、本研究ではナノ粒子を直接引っ張る流れである「伸長流動」と呼ばれる変形様式に着目し、ナノ粒子の均一分散を目指す。

本研究では、伸長流動におけるナノ粒子の分散は伸長変形時のひずみ速度やひずみ量に依存すると仮説を立てた。そこで、この仮説を証明するために、伸長変形時のひずみ速度が流れ方向に一定となるように、流れ方向に一定割合で流速が増加するような双曲線形状の流路に着目した。双曲線形状を採用することにより、流量または双曲線形状の穴径の比率や流路長さからひずみ量やひずみ速度を変更できる。本研究では射出成形機のノズル内部に双曲線穴形状を設けて、ひずみ速度やひずみ量という定量的なパラメータと分散状態との関係性、さらには機械的物性との関係について定量的に議論し、本質的な伸長流動分散のメカニズムの解明に取り組んだ。

2 研究の目的と背景

ナノ粒子は大きな比表面積を有することから、樹脂へ少量添加することで様々な機能性の付与が可能となる。しかしながら、ナノ粒子の凝集が問題となり、その諸特性は十分に発現できずにいる。分散プロセスは化学的プロセスと物理的プロセスに大別される。化学的プロセスは良好な分散性が得られる一方でその工程は煩雑となり溶媒により樹脂へのダメージが生じるという問題が生じる。物理的プロセスは単純である一方、従来法のせん断作用による混練ではナノ粒子の分散は困難であることが知られており、革新的な物理的分散プロセスの開発が求められる。

そのような背景の中で、物理的な分散手法として伸長流動を用いた分散技術に注目が集まっている。せん断流動では回転を伴って引延ばされるが、伸長流動は直接引っ張ることができる。これまでに、伸長流動を発生させることができる装置等を用いて定性的にポリマーブレンドやナノフィラーの分散が改善される旨の研究報告は行われてきたが、伸長流動による分散メカニズムについてはいまだ明らかになっていない。また、我々のこれまでの研究成果により細管(キャピラリー)を用いて伸長流動を発生させ、伸長変形に起因する圧力損失(応力)とポリプロピレン中のナノ粒子の分散状態に相関関係があることまで明らかにできているが、伸長変形時にどのような因子が分散に寄与できているのか明らかになっていない。以上の背景により、本研究では以下の研究目的を設定し、伸長流動による分散メカニズムの解明に取り組んだ。

- (1) ひずみ速度およびひずみ量を変化させることが可能な射出成形機用ノズルの設計・試作
- (2) 伸長変形下におけるひずみ速度およびひずみ量とナノ粒子の分散状態の相関関係の考察
- (3) 伸長流動によって得られた分散状態と機械的物性との相関性に関する考察

3 研究内容

(1) 伸長流動におけるひずみ速度, ひずみ量がCNTの分散状態に与える影響に関する研究

(http://www.mech.kyutech.ac.jp/pel/7-5_op5_koho-doc_2023M-350.pdf)

本研究では, 図1に示す双曲線穴形状を有するダイを用いることによって, 流動方向に一軸伸長変形させることを考えた. 高速押出が可能な射出成形機のノズル部(図2)にダイを取り付けることで, 幅広い範囲での伸長速度(ひずみ速度)を与えることを可能にした. また, ノズル内部には双曲線穴形状のダイを最大4個まで取り付けられるように設計し, ダイの穴個数を増やすことによって, ひずみ量を増加させられるように工夫をした. 本研究で作製したノズルは伸長速度とひずみ量を独立で変化させることができるため, それぞれ伸長速度とひずみ量がポリプロピレン(PP)中のカーボンナノチューブ(CNT)の分散状態に与える影響を調査できるようにした.

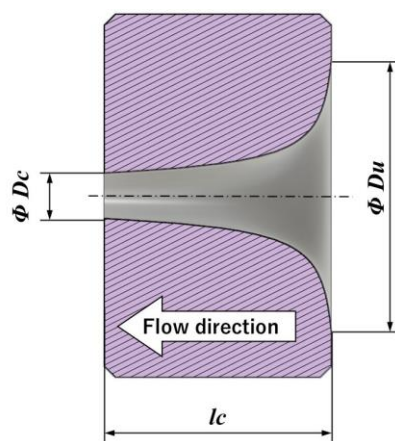


図1 双曲線形状穴を有するダイ

図2 双曲線穴形状を有するダイを挿入した射出ノズル

伸長速度とひずみ量を変化させてCNT添加PPを引張試験片に射出成形し, 射出成形品の中央部分を流れ方向にマイクロームを用いて厚み約 $10\mu\text{m}$ の薄片に切り出し, 分散状態の観察を行った(図3). 低ひずみ量の場合, ひずみ速度を上げればCNTは微細化することが分かった. 一方で, 低ひずみ速度でもひずみ量を増やせば分散が改善されることもわかり, ひずみ量とひずみ速度を増加させると, CNTは流れ方向に高度に引延ばされることが分かった.

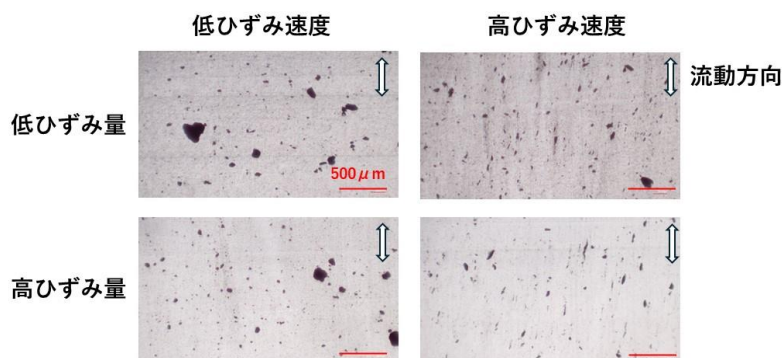


図3 異なるひずみ速度・ひずみ量の条件におけるCNTの分散状態

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究で開発した伸長流動を発生させることができるノズルは汎用の射出成形機に取り付けることができるために、本技術を容易に工業プロセスへ展開させることができる。本技術の適応により、低ひずみ速度および高ひずみ量を与えるプロセスであれば、配向を抑えながら分散させることができ、高ひずみ速度および高ひずみ量を与えるプロセスであれば分散をさせながら配向させることができる。CNTがランダム配向していれば導電性を向上させることができ、CNTを高配向させることができれば機械的特性の向上が可能になり、目的に応じたナノコンポジットの作成が可能になる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

二軸押出の混練における伸長流動を用いたナノコンポジットの分散技術に関する研究にて博士(工学)を取得し、Int. Polym. Process., Vol.36 (4) pp.379-387 (2021) やPolym. Eng. Sci., Vol.62(4), pp.1223-1238 (2022) に査読付き論文発表を行っている。一軸伸長流動場において、急縮小流れを用いてCNTを分散させることに着目し、単純流動場において伸長流動由来の圧力損失とCNTの分散との関係を明らかにし、その技術をベースに二軸押出機の混練セグメントの開発を行ってきた。二軸押出機でCNTで分散させても、最終的には射出成形等の最終成形プロセスによって分散状態やCNTの配向は大きく変化する問題点があった。また、圧力損失はひずみ量やひずみ速度によって変化するが、それらが分散状態に与える影響についての議論が行えていなかった。よって、本研究は伸長流動を新たに射出成形技術に展開するものであり、ひずみ速度とひずみ量を独立で変化させて、伸長流動によるCNTの分散メカニズムを明らかにするものである。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

なし

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 九州工業大学 (キュウシュウコウギョウダイガク)

※旧 福岡大学 工学部 機械工学科

住 所: 〒804-8550

福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1

担 当 者: 准教授 松本紘宜(マツモトコウキ)

担 当 部 署: 機械知能工学研究系(キカイチノウコウガクケンキュウケイ)

E - m a i l: matsumoto.koki231@mail.kyutech.jp

U R L: <http://www.mech.kyutech.ac.jp/labo/seisan.html>

謝辞

本研究は、競輪の補助を受けて実施しました。また、研究の遂行にあたり同志社大学 田中達也教授および神奈川大学 竹村兼一教授のご協力を得ました。ここに感謝申し上げます。