

氏名	はまなか せんじ <b>濱中 仙治</b>
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博甲第1005号
学位授与の日付	令和3年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 先端ファイブ科学専攻
学位論文題目	<b>短繊維強化複合樹脂を用いた射出成形品における繊維配向層形成を考慮した繊維配向予測手法に関する研究</b>
審査委員	(主査)教授 横山敦士 教授 鋤柄佐千子 教授 佐久間淳

## 論文内容の要旨

本論文は、短繊維強化複合材料を用いた射出成形品を対象として、射出成形の充填過程における繊維配向状態を観察することで成形品内部に構成される繊維配向層の発生さらには遷移メカニズムを明らかにすることで繊維強化複合材料射出成形品の設計指針を得ることを目的としている。射出成形品内部の繊維配向状況を、X線CTを用いて三次元的に観察することで繊維配向層の形成に影響を与える流動状況の解明を検討しており、そのメカニズムの解明に成功している。次に、上記知見を元にして繊維配向層形成メカニズムを考慮した射出成形品内の繊維配向予測手法の提案を行っている。従来から用いられている繊維配向予測手法では層構造を形成する成形品ではその予測手法が適用できないことを指摘し、新たに層構造の形成過程を表現できる構成式を導入することで精度良く繊維配向を予測できることを確認している。さらに、繊維配向層形成を前提とした異方性弾性論に基づいた簡便な力学物性の予測手法の提案を行い、その有効性の確認も行っている。本論文は以上の研究成果をまとめたものである。

本論文は4章および緒論と結論から構成され、以下に各章の概要を示す。

第1章では、短繊維強化複合樹脂を用いた射出成形品の製品設計において、射出成形品に求められる要求品質を満足するために、成形品内部における繊維配向の考慮が重要であることについて述べ、繊維配向、繊維配向予測、および力学特性に関する従来研究の課題について整理することで繊維配向層の遷移メカニズム解明と、遷移メカニズムの知見から得られる繊維配向予測と力学物性予測との構築について、その重要性を述べている。

第2章では、射出成形の充填過程における繊維配向層の遷移メカニズムについて検討を行っている。X線CTにより、成形品内部の繊維配向分布を数値化し、充填過程における繊維配向層を定量的に評価している。他方数値解析によって、射出成形の充填過程における流動場の予測を行っている。流動場の予測について実験的検証を行い、数値解析の妥当性について検討した後、繊維配向層の評価結果と、数値解析の結果とを比較・考察し、繊維配向層の形成・遷移メカニズムの解明を行っている。

第3章では、繊維配向層の遷移における熱物性と繊維相互干渉の影響について検討を行っている。繊維含有量が異なる短繊維強化複合樹脂を用いて射出成形を行い、繊維配向層の遷移におけ

る繊維含有量の影響について実験的に評価し、繊維含有量の増加による熱物性と粘性との変化を定量的に評価している。評価した材料物性を、射出成形シミュレーションに適用し、充填過程における速度場と温度場との予測結果を、繊維配向層に関する評価結果と比較・考察し、繊維配向層の遷移において、繊維相互干渉が重要な因子であることを明らかにした。

第4章では、前章までに明らかとなった繊維配向層に関する知見をもとに、繊維配向分布予測手法について検討を行っている。繊維相互干渉による面内ひずみ速度の緩和を考慮した緩和関数を検討し、繊維配向層の厚み分布予測を試みている。さらに、RSCモデルにおけるひずみ速度項における現象論的係数を、前述した緩和関数で定式化し、RSCモデルの修正を行っている。いずれも手法においても良好に繊維配向層を予測できることが確認され、新たな繊維配向予測手法を提案している。

第5章では、繊維配向層形成を考慮した力学物性の予測手法について検討を行っている。積層板理論に繊維配向テンソルの概念を適用した簡便な物性予測モデルを構築している。物性予測モデルから得られた予測結果と実験値とを比較し、良好に成形品の力学物性を予測できることが明らかとなり、新たな力学物性の予測手法を提案している。

第6章では、本研究で行った実験結果と数値解析の結果とを総括している。本技術の応用により、短繊維強化複合樹脂を用いた製品設計において、より高精度な繊維配向層の予測が期待できる。また、計算負荷の観点から、これまで予測が困難であった成形品全体の繊維配向層の考慮も可能であると指摘し、本論文における結びとしている。

## 論文審査の結果の要旨

近年、環境保全の観点から、二酸化炭素（以下、CO<sub>2</sub>）排出量低減への活動が活発化している。CO<sub>2</sub>排出量低減に向けた活動は、自動車分野において顕著であり、ガソリン車における排ガス抑制や電気自動車における燃費向上のため、樹脂化による金属代替が増加傾向にある。金属代替においては、高い要求品質が求められる一方で、マスコダクトを前提としたより安価な製品コストが必要となる。これらを満足する材料として、射出成形材料である短繊維強化複合樹脂が広く用いられている。

短繊維強化複合樹脂を用いた射出成形品では、成形品内部の繊維配向により、力学特性において異方性が発現し、成形後のソリ変形や製品強度に影響を及ぼす。このため、短繊維強化複合樹脂を用いた射出成形品の製品設計においては、繊維配向の影響を考慮することが重要となる。特に、薄肉形状をベースとした射出成形品では、充填過程において、配向方向の異なる繊維配向層が形成される。この結果、最終成形品において繊維配向層に分布が生じる。繊維配向層の分布が、成形品の力学特性に及ぼす影響は大きく、製品設計において、充填過程における繊維配向層の遷移を考慮することが極めて重要である。

本論文では、射出成形の充填過程における繊維配向層の遷移メカニズムを明らかにすることを目的とし、得られた知見から繊維配向予測手法の提案を行っている。さらには、繊維配向層形成を考慮した簡便な力学物性の予測手法についても提案している。これらの予測手法が十分な精度での予測が可能であることを確認している。

本論文で得られた繊維強化複合材料の射出成形品における繊維配向層遷移メカニズムの解明な

らびにその予測手法等の設計指針の構築は、本成形品が自動車部品のみならず多様な工業部材として使用されていく上での重要な設計指針を与えるものとして工学的な価値が高く評価された。

本研究をまとめるに当たり基礎となったレフェリー制のある雑誌に掲載された3報の論文を下記に示す。

- (1) Senji Hamanaka, Chisato Nonomura, Atsushi Yokoyama, The layer-structure transition of glass-fiber reinforced composite materials, Journal of Polymer Engineering, Vol.40(1), pp.30-pp.37, 2020
- (2) Senji Hamanaka, Chisato Nonomura, Thanh Binh Nguyen Thi, Atsushi Yokoyama, Effect of fiber content on the layer structure formation of fibers inside injection-molded products using short glass fiber-reinforced materials, Journal of Polymer Engineering, Accepted
- (3) Senji Hamanaka, Chisato Nonomura, Thanh Binh Nguyen Thi, Atsushi Yokoyama, Correlation between fiber orientation distribution and mechanical anisotropy in glass-fiber-reinforced composite materials, Journal of Polymer Engineering, Vol.39(7), pp.653-pp.660, 2019

上記3編は申請者が筆頭著者である。また、いずれの論文においても、既発表の論文との重複をチェックし、二重投稿等の研究者倫理に反する行為がないことを確認した。

以上の結果より、本論文の内容には十分な新規性と独創性ならびに高い学術的な価値があることを全審査員が認めた。