

氏名（本籍）	本近 俊裕（岡山県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第634号
学位授与日付	令和4年9月30日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	熱可塑性テキスタイルコンポジット成形用繊維状中間材料の開発および応用 (Development and application of fibrous intermediate materials for molding of textile reinforced thermoplastic composites)
学位論文審査委員	(主査) 准教授 新川 真人 (副査) 教授 武野 明義 教授 仲井 朝美

論文内容の要旨

繊維強化複合材料の中でも強化繊維に連続性繊維を用いた連続繊維強化複合材料（c-FRP, continuous Fiber Reinforced Plastic）は、強化繊維自身が有する力学的特性を最大限に発現させることができるため、FRPの中でも特に高い軽量化効果を得ることができる。c-FRPは繊維配向によって異方性を制御することが可能であり、繊維配向設計のために、強化形態としてテキスタイル構造が使用されることも多い。テキスタイル構造を強化形態としたc-FRPはテキスタイルコンポジットとも呼ばれ、要求性能に応じた繊維配向の最適化や、ニアネットシェイプ形状を実現可能である。c-FRPの中でも、母材樹脂に熱可塑性樹脂を用いた（c-FRTP, continuous Fiber Reinforced Thermoplastic）が近年注目を集めている。c-FRTPは熱可塑性樹脂の性質から加熱による再溶融が可能であり、冷却によって固化する可逆的な性質を有している。この状態変化を利用した成形には、熱硬化性樹脂とは異なり化学反応を伴わないため、成形サイクルの向上に期待が持たれている。また可逆的な性質によって曲げ加工や溶着・溶接といった二次加工も可能となる。しかし、c-FRTPの成形においては、繊維集合体である連続繊維束中に溶融粘度の高い熱可塑性樹脂を含浸させる必要があることから、成形時の樹脂含浸が難しいという課題が存在する。この課題解決策の一つとして、あらかじめ強化繊維近傍に母材樹脂を配置した中間材料を成形時に使用するのが一般的である。中間材料の中でもトウやヤーン形状のものは繊維状中間材料と呼ばれ、これを用いてテキスタイル構造を作製することでc-FRTPの成形に適した強化形態となる。含浸テープのようなテープ状中間材料は含浸特性に優れるが、強化繊維と母材樹脂が複合化しており剛直であることからテキスタイル加工性に乏しい。一方で混織糸のような繊維状中間材料は柔軟性に富みテキスタイル加工性に優れるが、含浸テープより含浸距離が長く含浸特性に劣る。つまり、一般的にはテキスタイル加工性と含浸特性はトレードオフの関係にある。テキスタイル技術を用いたc-FRTP用強化形態の作製にあたっては、テキスタイル加工性と含浸特性をより高いレベルで兼ね備えた中間材料が望ましい。

そこで本論文では、まず、テキスタイル加工性と含浸特性に優れた繊維状中間材料の開発を目的とし、開織混織糸の製造条件の最適化をおこなうとともに、生産性を向上させる指針を構築した。次に、混織糸特有の課題である母材樹脂繊維が成形時に熱収縮する問題を半含浸化の手法で抑制し、かつ開織混織糸のテキスタイル加工性を保持しながら含浸特性を向上させる繊維状中間材料であるPCY（Partially-impregnated Commingled Yarn）の製造手法を確立した。さらに、本研究で開発した繊維状中間材料を用いて、高速で中空形状の成形品を連続的に得るための成形技術を構築した。

1章ではまず本研究の着想にいたった経緯など研究の学術的背景に関して述べている。本研究に関する国内・国外の研究動向についてまとめた後、本論文の目的および構成について記述した。

2章では振動子を用いた開織混織法によって高含浸性の開織混織糸を高速で製造するための指針を得ることを目的とした。開織混織法において作製速度条件を変化させた開織混織糸を作製し、混織糸の分散状態および繊維損傷、混織糸を用いた成形品の含浸状態の違いについて検討をおこなった。さらに成形品の力学的特性への影響についても検討をおこない、これらの結果を振動子の振動数を製造速度で除したパラメータで整理することで、優れた混織糸を製造するための指針を得ることができた。

3章ではテキスタイル加工性、含浸性に加えて、上記で述べた中間材料の熱収縮の問題を解決した中間材料の開発を目的とし、c-FRTP用中間材料の開織混織糸を部分的に加熱することで母材樹脂を部分含浸させた中間材料であるPCYを作製した。PCYの作製時における加工温度や速度条件の違いがテキスタイル加工性、含浸特性、熱収縮性および一方向材の力学的特性におよぼす影響を明らかにし、テキスタイル構造を用いた成形方法へPCYを適用するための設計指針を確立することを目指した。作製条件の異なるPCYにおいて変形抵抗試験および熱収縮試験を実施し、テキスタイル加工性および成形時における熱収縮率を評価した。また、PCYを用いてプレス

成形により一方向材を作製し、一方向材の断面観察および引張試験を実施し、PCYの含浸特性、およびPCYを中間材料とした一方向材の力学的特性を評価した。これらの試験結果から、中間材料の形態の違いが各種の材料特性に及ぼす影響について検討をおこない、PCYのテキスタイル加工性と含浸性の両特性を向上させる手法を構築した。

4章では中間材料の形態の違いが成形品の強度発現に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。未含浸領域や繊維配向の乱れだけでなく、中間材料の繊維損傷が成形品の強度発現に及ぼす影響を評価すべく、引張試験によって得られた引張特性と、繊維束の破壊を考慮した理論式より得られた理論値との比較をおこなった。さらに成形品断面内の繊維の分散状態を評価することで強度発現メカニズムを明らかとした。

5章では前章までに開発した開織混織糸およびPCYの特長を発現させる成形技術の開発および成形条件の最適化を試みた。具体的には開織混織糸およびPCYからなる組物強化基材を用いて、汎用構造部材であるパイプ形状の成形品を、連続成形法の一つである引抜成形法を用いて高速成形するための指針を得ることを目的とした。そのために中間材料や成形条件の違いが成形品の含浸状態および力学的特性に及ぼす影響について検討をおこなった。これらの結果に基づき、熱伝導計算による引抜成形時における組物強化形態の温度履歴解析をおこなった結果、高速で優れた成形品を得るための引抜成形条件に関する指針を構築することができた。

論文審査結果の要旨

本論文では、テキスタイル加工性と含浸特性に優れた繊維状中間材料の開発することを目的とし、開織混織糸の製造条件の最適化をおこなうとともに、生産性を向上させる指針を構築した。次に、混織糸特有の課題である母材樹脂繊維が成形時に熱収縮する問題を半含浸化の手法で抑制し、かつ開織混織糸のテキスタイル加工性を保持しながら含浸特性を向上させる繊維状中間材料であるPCY (Partially-impregnated Commingled Yarn) の製造手法を確立した。さらに、本研究で開発した繊維状中間材料を用いて、高速で中空形状の成形品を連続的に得るための成形技術を構築した。

2章では振動子を用いた開織混織法において、振動子と巻取速度の関係を幾何学的に解析し、振動子と炭素繊維が接触した状態で、強化繊維への単位長さあたりの振動数を増加させることで含浸特性に優れた開織混織糸が作製可能であることを明らかにした。この結果に基づき、高含浸性の開織混織糸を高速で製造するための指針を構築したことは、工業的な意義を有する。3章ではテキスタイル加工性、含浸性の向上に加えて、混織糸の成形時の熱収縮の問題を解決した中間材料を開発すべく、2章で開発した開織混織糸を部分的に加熱することで、母材樹脂を部分含浸させた中間材料であるPCYの製造手法の構築をおこない、熱分析の結果に基づき、部分含浸をおこなう際の温度、加熱時間を制御することで、含浸特性およびテキスタイル加工性に優れ、成形時の熱収縮が抑制されたPCYを作製可能であることを明らかにした。これらの知見は、汎用プラスチックやスーパーエンブラを含む他の熱可塑性樹脂に対しても適用可能な知見であり、工学的な重要性が大きい。4章では中間材料の違いが成形品の強度発現に及ぼす影響の検討をおこない、同等の未含浸率を有する成形品においても強化繊維の分散状態に起因して強度発現率が異なることを明らかにした。このように、製造過程の異なる中間材料に起因する強度発現機構を明らかにしたことは、独創的な結果として評価できる。5章では開織混織糸およびPCYの特長を発現させる成形技術の開発および成形条件の最適化をおこなうべく、これらの中間材料からなる組物強化円筒の引抜成形に応用展開した。中間材料にPCYを使用した場合、開織混織糸を使用した場合と比較して、成形速度を増加した場合において、力学的特性の減少が少なく、PCYは高速な連続成形法である引抜成形法により適した中間材料であることを明らかにした。これらの知見は、連続繊維強化熱可塑性樹脂複合材料の他の成形技術に対しても適用可能な知見であり、工業的な重要性が大きい。

以上のように、本論文は新たに独創的な知見を見出すとともに、連続繊維強化熱可塑性樹脂複合材料の利用拡大や成形技術の発展に寄与する結果を示し、材料開発および成形技術の両観点から工業的に優れた有用性を持つ点でも評価できることから、学位審査委員会は、この論文を学位論文に値するものと判断した。

最終試験結果の要旨

第2章および第3章を査読付き学術論文誌に投稿し、掲載が決定している。また、令和4年8月29日に公聴会を開催し、活発な質疑応答が行われた。審査委員会は、上記のように本論文が学位論文として十分な内容と価値ある知見を含むこと、申請者が専門の分野で学位授与にふさわしい専門知識と語学力を有することを確認し、最終試験に合格と判定した。

発表論文 (論文名、著者、掲載誌名、巻号、ページ)

1. 成形用中間材料としての開織混織糸の作製条件が混織糸の性能に及ぼす影響. 本近俊裕, 大石正樹, 大谷章夫, 仲井朝美. Journal of Textile Engineering (Accepted 13 May 2022)
2. 熱可塑性 CFRP 向け半含浸状混織糸の製造条件が中間材料のテキスタイル加工性および成形品の力学的特性に及ぼす影響. 本近俊裕, 森栄賢弥, 大石正樹, 松本信彦, 大谷章夫, 仲井朝美. Journal of Fiber Science and Technology (Accepted 14 June 2022)