

## 論文の内容の要旨

氏名：染宮 聖人

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：数値材料試験による繊維強化熱可塑性樹脂の非線形材料挙動の予測

強化繊維と熱硬化性樹脂を組み合わせた繊維強化熱硬化性樹脂（以下、FRP）は優れた比強度・比弾性率を有することから、軽量化が要求されている航空機や人工衛星などの構造部材に使用されている。また、自動車分野においてもパワートレーンの電動化と車体の軽量化が大きな課題であり、主要構造部材へのFRPの適用が進められている。その一方で、FRPのマトリックスである熱硬化性樹脂は硬化後に三次元架橋構造をとるため、加熱しても再溶解することがない。そのため、FRPの廃棄方法は埋め立て処理かサーマルリサイクルが一般的であり、FRPの環境負荷が高いことが自動車分野への用途拡大に大きな課題となっている。

近年ではこの課題を解決するために、硬化後の分子構造が直鎖状で三次元架橋構造をとらない熱可塑性樹脂をマトリックスとする繊維強化熱可塑性樹脂（以下、FRTP）の研究開発が活発に進められている。熱可塑性樹脂は分子鎖が直鎖状に結合しているため、加熱により再溶解ができ、二次賦型が容易なことや強化繊維とマトリックスである熱可塑性樹脂を分離できるため、リサイクルやリユースが可能である。しかしながらその一方で、熱可塑性樹脂は常温でも時間やひずみ速度に依存した非線形な材料応答を示し、その傾向は温度が高くなるほど顕著になる。そのため、マトリックスに熱可塑性樹脂を用いたFRTPは、時間、温度やひずみ速度に依存した異方性の非線形材料挙動を示す。特に、繊維が一方方向に引き揃えられた一方方向炭素繊維強化熱可塑性樹脂（以下、UD-CFRTP）に対して、繊維軸方向から偏る方向へ荷重が作用する場合には非常に大きな非線形材料挙動を示すため、UD-CFRTPを適用した製品の構造設計の設計初期では、UD-CFRTPの時間、温度やひずみ速度に依存した異方性の非線形材料挙動を精度よく予測することが重要である。

そこで本研究では、FRTPの時間、温度やひずみ速度に依存した異方性の非線形材料挙動を予測するための異方性非線形材料構成則とその材料定数の同定手法を提案する。本提案手法では、はじめに代表的な熱可塑性樹脂を対象として、粘弾性・粘塑性・損傷複合構成則の定式化を行う。次に、熱可塑性樹脂の動的粘弾性試験と複数の温度・ひずみ速度下での単軸繰返し負荷-除荷試験をそれぞれ独立に行い、この2種類の材料試験結果から粘弾性・粘塑性・損傷複合構成則の材料定数を同定する。そして、同定した熱可塑性樹脂の非線形材料定数をUD-CFRTPのマイクロ構造をモデル化した有限要素モデル（以下、ユニットセル）に適用して数値解析による材料試験（以下、数値材料試験）を行い、ユニットセルのマクロな応力とひずみの応答を計算する。最終的には、このマクロな応力とひずみの応答から異方性の非線形材料挙動を表現するマクロな材料構成則の材料定数を最適化手法により同定し、UD-CFRTPの斜め方向引張試験（以下、off-axis試験）の単軸繰返し負荷-除荷試験結果と比較することで、本提案の予測手法の精度を評価した。本研究の目的は、今後の構造部材に適用が期待されるFRTPの時間、温度やひずみ速度に依存した異方性の非線形材料挙動を精度良く予測するためのマクロ材料構成則の定式化と、そのマクロ材料構成則の材料物性値の同定手法を構築することである。

本論文は全5章で構成されており、各章の内容を以下に示す。

第1章では、本研究の背景および目的について述べ、その後、本研究に関連する先行研究、現時点で得られている研究成果と残されている課題について述べる。

第2章では、本研究で使用する分離型マルチスケール解析法による数値材料試験の理論について述べ、FRTPの異方性非線形材料挙動のマイクロとマクロ構造の数値計算法について解説を行った。

第3章では、FRTPのマトリックスとして適用が期待される3種類の代表的な熱可塑性樹脂を対象とし、

動的粘弾性試験と複数の温度とひずみ速度下での単軸繰り返し負荷-除荷試験から粘弾性・粘塑性・損傷複合構成則の材料定数を同定する混合型同定手法について述べる。そして、これらの代表的な熱可塑性樹脂について、混合型同定手法で求めた非線形材料定数の同定結果を実験結果と比較することにより、その同定精度を検証し提案手法の有用性について調査した。

第4章では、UD-CFRTPの主軸・非主軸方向の非線形材料挙動を予測するために、マイクロ構造に対して、6方向の材料主軸方向の変形パターンと材料主軸から45°方向に傾けた方向の引張変形パターンを加えた計7方向の数値材料試験を実施し、得られた7つの非線形材料挙動からマクロな異方性粘弾性・粘塑性・損傷複合構成則の材料定数を同定した。そして、同定した材料定数から計算した非主軸方向の材料挙動と実試験の結果と比較することで提案した手法の予測精度を評価した。さらに、様々な温度下での数値材料試験を実施し、同定したマクロな異方性粘弾性・粘塑性・損傷複合構成則の材料定数を用いてUD-CFRTPの各温度下における異方性の非線形材料挙動を予測できるか調査した。

第5章では、全体のまとめと今後の課題について述べる。

以上、本研究では、今後の航空機や自動車などの構造部材に適用が期待されているFRTPにおいて、従来の研究では検討されていない複数の温度とひずみ速度下における熱可塑性樹脂とFRTPの非線形材料挙動を予測するために、数値材料試験で使用する材料構成則の定式化とその材料定数を同定する手法を提案した。そして、得られた非線形材料定数から熱可塑性樹脂とFRTPの主軸・非主軸方向の非線形材料挙動を予測し、実材料試験の結果と比較することで、定式化した材料構成則の有用性と同定手法の予測精度を示した。

本研究で提示した数値材料試験によるFRTPの非線形材料挙動の予測手法では、マトリックスである熱可塑性樹脂の動的粘弾性試験と複数の温度・ひずみ速度下での単軸繰り返し負荷-除荷試験をそれぞれ独立に行うだけで、最終的に様々な温度下におけるFRTPの異方性の非線形材料挙動を予測することができる。そのため、軽量でリサイクル性に優れた環境負荷の小さいFRTPを航空機や自動車部材に適用する際に、非線形性を考慮した予測精度の高い構造解析や材料設計が短時間で実現でき、持続可能な社会の実現に貢献できると期待される。