

氏名	ま やん MA YAN
学位(専攻分野)	博士(学術)
学位記番号	博甲第854号
学位授与の日付	平成29年9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	Mechanical Characterization and Fracture Behavior of Thermosetting and Thermoplastic Polymer Based Carbon Fiber Reinforced Composites (炭素強化複合材料の力学的特性と破壊挙動に関する研究)
審査委員	(主査)教授 濱田泰以 教授 横山敦士 教授 佐久間淳 日本大学工学部機械工学科 准教授 上田政人 東京大学大学院工学系研究科 准教授 横関智弘

## 論文内容の要旨

本研究では、炭素繊維強化複合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP) の破壊挙動と力学的特性に関する研究を行った。一方向 (UD) 炭素繊維強化ナイロン6樹脂 (PA6) 積層材 (CF / PA6) とエポキシ樹脂積層材 (CF / エポキシ) を材料として用いた。

第2章では、それらの破壊挙動および力学的特性を、成形品における繊維の分散性、樹脂の含浸状態および界面せん断強度 (IFSS) に基づいて調べた。修正された Global Load Sharing (GLS) モデルを使用して引張強さを予測し、これを実験結果と比較した。破壊様相は CF / エポキシ積層材では階段状の破壊モードを示したが、CF / PA6 積層材では階段状およびほうき状の破壊モードの両方を示した。不均一な繊維分布を有する CF / PA6 積層材では、最終的な破壊の前に樹脂の破壊および繊維破損が観察された。対照的に、均一な繊維分布を有する CF / エポキシ積層材については、最終的な破損時までにはき裂または繊維破損は観察されなかった。

第3章では、曲げ特性と破壊挙動を調べた。樹脂と繊維の間に存在する界面特性はプッシュアウト試験および繊維直交方向引張試験によって評価した。積層材の破壊じん性は、コンパクト試験片を用いた引張試験によって測定した。成形品の繊維体積含有率、空隙率およびそれらの相互効果が曲げ特性に及ぼす影響を調べた。その結果、繊維が密集する領域では空隙が生じて界面特性が低下するため、積層板の力学特性に影響を及ぼすことを示した。

第4章では、UD 積層板の破壊挙動に及ぼす界面特性とマトリックス特性の影響を明らかにした。有限要素法に基づくモンテカルロシミュレーション手法を開発し、界面特性と樹脂とが UD 積層板の破壊挙動に及ぼす影響について解析を行った。弱い界面特性を有する UD 積層材はほうき状の破壊モードを示す傾向があり、強い界面特性を有する UD 積層材は階段状の破壊モードを示すことを解析によって明らかにした。

第5章では、45° 積層材の疲労試験後の力学特性に着目して、一定および増分荷重方法による低サイクル疲労試験を行った。様々な荷重および試験サイクル数での疲労負荷後の残留強度、弾性率および最終ひずみを測定した。疲労負荷中に発生した微小損傷を特定するために、疲労試験

前および疲労試験後の 45° 積層材の断面を観察した。その結果、マトリックスの軟化と、疲労試験後の繊維/マトリックス界面のはく離が、弾性率の減少およびひずみを増加させる原因であることを示した。一方で、疲労負荷により樹脂および繊維/マトリックス界面に損傷が生じて、45° 積層材の強度には影響しないことが明らかとなった。

第 6 章では、平織炭素繊維強化熱可塑性樹脂複合材（CF /ナイロン）の表面処理方法と力学的特性との関係について調べた。表面処理には 2 種類のポリウレタン分散処理（PUD）を用いた。その結果、表面処理後の CF /ナイロン積層板が、表面処理を施していない CF /ナイロン積層板よりも良好なマトリックスの含浸およびより強い界面特性を有することを示した。表面処理後の CF /ナイロン積層板の静的力学特性は、表面処理を施していない CF /ナイロン積層板と比較して顕著な改善を示した。

第 7 章では、本研究の成果がまとめて述べられている。

### 論文審査の結果の要旨

本研究は炭素繊維強化熱硬化性樹脂複合材料、熱可塑性樹脂複合材料の機械的特性、破壊挙動に及ぼす、繊維の構造、成形の影響について検討したものである。多量の試験片を用いて信頼性の高いデータをまず取得し、様々な分析により研究を進めていることに意義がある。さらに界面特性も考慮したシミュレーションにより界面と破壊挙動の関係を明確にしている。それらを総合的に判断し、繊維が多く密集する部分での空隙が大きく影響を及ぼすことを明らかにしており、これは今後の成形方法の改良方針に大いなる示唆を与えるものであり、複合材料工学に寄与している。同様の研究を曲げ負荷に対しても行なっていること、疲労試験を実施し、疲労限度に対して言及していることは工学的に有意義である。さらにポリウレタン樹脂を用いて繊維の表面処理を行い、樹脂の含浸性を向上させ、ひいては高い機械的特性の複合材料を創成することに成功したことは工業上意義が深い。

本論文の内容は次の 4 報に掲載されている。

1. 著者名 : **Yan Ma**, Masahito Ueda, Tomohiro Yokozeki, Toshi Sugahara, Yuqiu Yang, Hiroyuki Hamada  
題名 : A comparative study of the mechanical properties and failure behavior of carbon fiber/epoxy and carbon fiber/polyamide 6 unidirectional composites  
Composite Structures, Volume 160, 15 January 2017, Pages89-99
2. 著者名 : **Yan Ma**, Yuqiu Yang, Toshi Sugahara, Hiroyuki Hamada  
題名 : A study on the failure behavior and mechanical properties of unidirectional fiber reinforced thermosetting and thermoplastic composites  
Composites Part B: Engineering, Volume 99, 15 August 2016, Pages 162-172
3. 著者名 : **Yan Ma**, Yiyi Zhang, Toshihide Sugahara, Shanshan Jin, Yuqiu Yang, Hiroyuki Hamada  
題名 : Off-axis tensile fatigue assessment based on residual strength for the

unidirectional 45° carbon fiber-reinforced composite at room temperature  
Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 90,  
November 2016, Pages 711-723

4. 著者名 : Yuqiu Yang, Zhiyuan Zhang, **Yan Ma**, Masahito Ueda, Tomohiro Yokozeki,  
Toshi Sugahara, Hiroyuki Hamada  
題名 : Effect of polyurethane dispersion treatment on the performance improvement of  
carbon woven fabric-reinforced composites  
Journal of Thermoplastic Composite Materials, [doi: 10.1177/0892705717704487](https://doi.org/10.1177/0892705717704487)

以上の結果より、本論文の内容は十分な新規性と独創性があり、博士論文として優秀であると  
審査員全員が認めた。