

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	CFRPのクローズドループリサイクル実現を目指したリサイクル炭素繊維の品質評価と応用
Title(English)	
著者(和文)	酒井明日香
Author(English)	Asuka Sakai
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12734号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:青木 才子,大塚 英幸,松本 秀行,森 伸介,久保内 昌敏
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12734号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

CFRP のクローズドループリサイクル実現を目指したリサイクル炭素繊維の品質評価と応用

東京工業大学
物質理工学院 応用化学系
酒井 明日香

近年、カーボンニュートラルな社会実現のため、自動車産業では車両の電動化が急務であり、車両の電動化実現のために軽量かつ高強度な材料として炭素繊維とエポキシ樹脂との複合材料（CFRP）が着目されている。しかしその優れた材料特性が故にリサイクルは困難であり、現状その廃棄品の多くは埋め立て処分あるいは焼却処理されている。今後 CFRP の市場拡大が予想される事から、リサイクル技術の確立が求められる。本研究では、CFRP のクローズドループリサイクル実現を目指し、炭素繊維と樹脂の双方のリサイクルを可能とする硝酸を用いたケミカルリサイクル技術に着目した。まず、エポキシ樹脂が完全硬化した CFRP 廃部品からのリサイクルを検討した。回収されたリサイクル炭素繊維の物性評価の結果、リサイクル過程でバージン繊維よりも繊維強度や樹脂との密着性が向上する事を見出し、そのメカニズムを考察し、最適ナリサイクル条件の検討を行った。加えて、リサイクル時間の短縮を可能とする新たな環境負荷の低いリサイクル方法を提案した。更には、リサイクル材から CFRP を成型し、その機械的特性を評価した。そしてバージン材同等以上の機械的特性を発現する最適ナリサイクル材の使用方法を提案し、クローズドループリサイクル実現の可能性を示した。

本論文は、以下の 5 章から構成される。

第 1 章「緒論」では、研究の背景としてまずは CFRP を構成するエポキシ樹脂のリサイクルにおける課題を概観した。更には CFRP のリサイクルにおける課題および低環境負荷なリサイクル技術の確立が求められる社会的な意義を述べた。併せてリサイクル炭素繊維の製品適用およびクローズドループリサイクル実現に向けた取り組み課題について述べた。

第 2 章「硝酸分解法により回収されたリサイクル炭素繊維の物性評価および物性向上メカニズムの考察」では、自動車用部品として成型された CFRP 部品の試作廃棄品を用い、エポキシ樹脂が完全硬化した CFRP 廃部品からのリサイクルを検討した。硝酸分解法での CFRP 廃部品の樹脂分解率の時間変化を確認し、経過時間毎に回収されたリサイクル炭素繊維の品質評価を行った。その結果、リサイクル炭素繊維はバージン炭素繊維よりも繊維と樹脂との密着性だけでなく、繊維強度が向上する事が確認された。まず、繊維と樹脂との密着性向上のメカニズムを考察するため、XPS を用いて炭素繊維表面の元素分析をした結果、リサイクル過程で硝酸由来の官能基が炭素繊維表面に付与される事でリサイクル炭素繊維表面の官能基存在量が増加し、これら 2 つの因子の相関関係を明らかにした。更には、繊維強度向上のメカニズムを考察するため、TEM を用いて炭素繊維の断面を観察した結果、繊維表層に製造過程で生じたボイドが確認され、リサイクル炭素繊維ではそのボイドの存在量が減少する事で繊維強度向上に寄与する事が示唆された。これらの分析結果および考察から、最適ナリサイクル条件の検討を行った。

第 3 章「短時間かつ低環境負荷な CFRP リサイクルスキームの検討」では、第 2 章で述べたように高品質なリサイクル炭素繊維が得られる硝酸分解法において、リサイクル技術の実用化をするためには、24 時間と比較的長いリサイクル時間の短縮が求められた。そこで、リサイクル時間の短縮検討のため、硝酸に加えてアルカリを併用した方法を検討した。アルカリの中でも安全に

取り扱いができる炭酸水素ナトリウムを使用した反応系を検討し、同じ弱アルカリに調整した水酸化ナトリウムと比較しても、炭酸水素ナトリウムが酸との反応で炭酸ガスを発泡する効果により、より短時間で樹脂溶解が可能であり、低環境負荷な条件でリサイクル時間の短縮を可能とする方法である事を見出した。

第4章「CFRPのクローズドループリサイクル実現を可能とする最適ナリサイクル材使用方法の提案」では、コストと品質面で最適な不織布を中間基材として選定し、リサイクル炭素繊維を不織布状に加工した。リサイクル不織布を用いてCFRPを成型し、その機械的特性を評価し、バージン不織布から成型したCFRP成型品と比較した。その結果、第2章で述べたように高品質なリサイクル炭素繊維から成型したリサイクルCFRPは、バージンCFRPよりも優れた機械的特性を持つ事を示した。加えて、クローズドループリサイクル実現の可能性を検討するため、連続繊維シートから成型されるCFRP部品に対して、リサイクル不織布を連続繊維シートでサンドイッチ成型する事で、連続繊維シートからの成型品同等同等以上の機械的特性を有する事を明らかにした。これによりクローズドループリサイクル実現を可能とする最適ナリサイクル材の使用方法を提案した。

第5章「結論」では、本研究を総括して、本研究における成果と今後の展望を述べた。