

氏名	たかい ゆか <b>高井 由佳</b>
学位(専攻分野)	博 士 ( 学術 )
学位記番号	博甲第 607 号
学位授与の日付	平成 23 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 先端ファイブロ科学専攻
学位論文題目	<b>炭素繊維組物複合材料の高機能化設計に関する研究</b>
審査委員	(主査)教授 濱田泰以 教授 西村寛之 教授 喜多泰夫 准教授 仲井朝美 村田機械株式会社主任部員 魚住忠司

### 論文内容の要旨

繊維加工品の一つである組物を繊維強化複合材料の強化形態として使用した組物複合材料は、全ての繊維束が連続して配向しているため、優れた力学的特性を有する。さらに、組物を構成する繊維束と組物長手方向との角度である組角度を任意に変更すること、組物繊維束中へ中央糸と呼ばれる繊維束を長手方向に沿って挿入すること、全ての繊維束に種類の異なる繊維を使用することが可能であり、幅広い要求性能に応じた力学的特性を有する複合材料の実現が期待される。組物複合材料の中でも、基材を炭素繊維で作製した炭素繊維組物複合材料は、金属と比較し高比弾性率・高比強度であるため、地球温暖化ガス排出量削減など環境問題に対応する材料として注目を集めている。今後、炭素繊維組物複合材料をより広い分野で使用するためには、高機能化により力学的特性だけでなく使用条件などから生じる新たな要求性能にも応じることが必要である。ここで高機能化とは、力学的特性を維持したまま新たな機能を付与した材料を創成することである。本論文では、組物複合材料の特長を活かした高機能化設計手法を提案することを目的とし、高機能組物複合材料の力学的特性を解明し、設計手法および設計指針の確立を行っている。

第 2 章では、組物の有する繊維の連続性の有無が炭素繊維組物複合材料の破壊メカニズムに及ぼす影響を明らかにするため、通常の組物複合材料と組物幅方向の両端を切断し繊維の連続性を無くした複合材料について、引張試験により引張特性および面内せん断特性を評価し、試験中のその場観察、超伝導量子干渉素子を用いた非破壊損傷検査により、炭素繊維組物複合材料の破壊メカニズムを明らかにしている。その結果、繊維の連続性を有する場合、最終破壊が繊維束破断であるのに対し、繊維の連続性を無くしたことにより、繊維束間のはく離が発生・進展し、最終破壊が繊維束間の破壊へと変化することを明らかにしている。第 3 章では、はく離の制御を目的とした高機能化として、炭素繊維組物とエポキシ樹脂、カーボンナノチューブ (CNT) から成る CNT 分散炭素繊維組物複合材料を提案している。組物複合材料の繊維の連続性の有無および層間の有無、CNT の添加量が引張特性および面内せん断特性に与える影響を評価し、超伝導量子干渉素子およびパルスサーモグラフィを用いた非破壊損傷検査により、破壊メカニズムを明らかにしている。CNT の分散は、全ての組物複合材料の高強度化に直結するわけではなく、繊維の不連続性が生じる強化形態に有用であることを示している。第 4 章では、単一材料では実現し得ない設

計要求に応じた複合材料の作製を目的とした高機能化として、組糸と中央糸に異なる弾性率の炭素繊維を使用した炭素繊維ハイブリッド組物複合材料を提案している。中央糸の弾性率が組物複合材料の力学的特性に与える影響を引張試験にて評価し、中央糸の弾性率の増加に伴い、複合材料の弾性率も増加することを示している。また、有限要素法解析を用いて繊維束に発生する応力分布を明らかにし、中央糸の弾性率を変化させることで、中央糸と組糸の応力分布の割合を変化させることができ、複合材料の弾性率や破壊箇所を制御できることを示している。第5章では、組物複合材料の内部構造を考慮した有限要素法解析により、第3章で提案したCNT分散組物複合材料および第4章で提案した炭素繊維ハイブリッド組物複合材料の新たな設計手法を確立し、設計指針を示している。解析結果より、CNT分散組物複合材料では、繊維の連続性の無い場合にはCNTの添加により繊維束間のせん断破壊が抑制されることを明らかにしている。炭素繊維ハイブリッド組物複合材料では、組糸の弾性率と中央糸の弾性率との間に、高強度複合材料を作製できる最適値が存在することを明らかにしている。第6章では、耐熱性の向上を目的とした高機能化として、組物C/C複合材料を提案している。組物端部での繊維の連続性の有無、組角度、炭化回数が組物C/C複合材料の引張特性と面内せん断特性に及ぼす影響を検討している。組物C/C複合材料は繊維の連続性により、少ない炭化回数で、織物積層C/C複合材料よりも面内せん断特性が上回り、延性的な破壊挙動を示すことを明らかにしている。第7章では、本研究で得られた知見をまとめ、今後の展望について述べている。

## 論文審査の結果の要旨

本論文では、炭素繊維組物複合材料の高機能化手法として、カーボンナノチューブの分散、炭素繊維ハイブリッドなど、これまでの組物複合材料には見られない材料の提案を行っている点に特長がある。カーボンナノチューブを分散した場合には、はく離の進展を抑制できる。また、炭素繊維のハイブリッド化を行った場合には、単一材料では実現し得ない設計要求に応じた複合材料の作製が可能となる。さらに、組物を強化形態としたC/C複合材料は、耐熱性の向上を実現できる。このような炭素繊維組物複合材料の高機能化は本論文において初めて実現された。

高機能化組物複合材料の力学的特性を明らかにするだけではなく、非破壊損傷検査を用いて内部損傷を明らかにし、破壊メカニズムを明らかにしている。さらに、有限要素法解析を行い、設計指針を確立している。これらの知見により、高機能化組物複合材料の設計を容易に行う事を可能にし、用途拡大の一助になったことは、工業的に意義深い。

本論文の内容は次の6報に報告されている。

1. Mohamed S. Aly-Hassan, Yuka Kobayashi, Asami Nakai, Hiroyuki Hamada, Toshio Ogasawara and Hiroshi Hatta, "Enhancement of Mechanical Properties of Carbon/Carbon Composites by Flat Braided Reinforcement", Proceedings of Japan International SAMPE Symposium & Exhibition, MCCHA-4-5, pp.1-10 (2007)
2. Yuki Sasaki, Yuka Kobayashi, Mohamed S. Aly-Hassan, Akio Ohtani, Asami Nakai "Mechanical Properties of Hybrid Flat Braided Composites", Proceedings of Japan International SAMPE Symposium & Exhibition, PMC-3-3, pp.1-6 (2007)
3. Mohamed S. Aly-Hassan, Yuka Kobayashi, Asami Nakai, Hiroyuki Hamada, Hiroshi Hatta, "Mechanical Properties and Fracture Mechanism of CF Flat Braided Composites with Dispersed

Carbon Nanofibers in the Matrix", Proceedings of International Conference on Manufacturing Science & Engineering, MSEC2008-ICMP 2008-72017, pp1-10 (2008)

4. Yuka Kobayashi, Yuki Sasaki, Akio Ohtani, Mohamed S. Aly-Hassan, Asami Nakai, "Mechanical Properties and Analysis of CF Hybrid Flat Braided Composites", Proceedings of SAMPE '08 Long Beach, pp.1-8 (2008)
5. M. S. Aly-Hassan, Y. Takai, A. Nakai, H. Hamada, Y. Shinyama, Y. Hatsukade, S. Tanaka, "SQUID Technique for Evaluation the Damage Mechanism of Flat Braided CFRP Composites under Shear Loading", Composites Part A (投稿中)
6. 高井由佳, Mohamed S. Aly-Hassan, 仲井朝美, 濱田泰以, 八田博志, "組物C/C複合材料の引張特性に関する組角度と炭化回数の影響", 材料学会誌 (投稿中)

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