

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 15 日現在

機関番号：82645
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2014～2016
課題番号：26820002
研究課題名(和文) ポリマー系繊維強化複合材料の一貫セルフモニタリング機能解明と信頼性・耐久性向上

研究課題名(英文) Characterization of Self-monitoring Capability of Polymer-matrix
Fiber-reinforced Composite Materials and their Reliability and Durability
Enhancements

研究代表者
竹田 智 (TAKEDA, Tomo)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究開発員

研究者番号：70451531

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、カーボンナノチューブ(CNT)分散熱硬化性ポリマー接着層を有する繊維強化複合材料のセルフモニタリング機能を理論・実験両面から解明し、先進複合材料・構造の信頼性・耐久性向上を図ることを目的としている。具体的には、多層CNT分散エポキシ樹脂により接着した炭素繊維強化プラスチック(CFRP)積層材料の破壊・疲労試験および電気抵抗測定を行い、電気抵抗とき裂挙動との関係や破壊・疲労特性に及ぼすCNT添加の影響を明らかにした。また、き裂進展に伴う電気抵抗変化の予測手法を開発し、予測結果を実験結果と比較して、本手法の妥当性を確認した。本研究より、高性能複合材料・構造の開発に資する有益な結果を得た。

研究成果の概要(英文)：The self-monitoring capability of fiber-reinforced composite materials with carbon nanotube (CNT)-based thermosetting polymer adhesive layer was investigated both theoretically and experimentally, in order to improve their reliability and durability. Fracture and fatigue tests were conducted on carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composite laminates bonded using multi-walled nanotube/epoxy adhesives. Electrical resistance measurements were also performed during the tests, and the electrical resistance-crack behavior relationship and the effect of CNT addition on the fracture and fatigue properties of the composites were examined. In addition, an analytical model was developed to describe the electrical resistance change due to crack propagation and was validated by comparing the prediction results with the experimental data. The beneficial results for the development of high performance composite materials and structures were obtained through this study.

研究分野：工学

キーワード：複合材料力学 スマート複合材料 カーボンナノチューブ 高分子材料 破壊 損傷 電気伝導 モニタリング

1. 研究開始当初の背景

近年、輸送機器（航空機・自動車等）の軽量化を目指し、高比強度・比剛性を有するポリマー系繊維強化複合材料（炭素繊維強化プラスチック（CFRP）等）の応用が急速に進められている。また、輸送機器の軽量化により、燃費向上・温室効果ガス排出量削減が可能となることから、ポリマー系繊維強化複合材料は環境材料として位置づけられている。

ポリマー系繊維強化複合材料の接合には熱硬化性接着剤が広く用いられているが、外的負荷により接着剤および接着剤/複合材料界面において損傷が発生する。また、複合材料を接着接合する場合、不均一温度分布等に起因して接着剤である熱硬化性ポリマー樹脂の欠陥が発生する可能性もある。これら損傷・欠陥は、複合材料構造物の強度・機能低下や破損の原因となることから、損傷発生・進展等の高度モニタリング技術が要望されている。

一方、カーボンナノチューブ（CNT）は、ポリマー材料およびポリマー系繊維強化複合材料の多機能ナノフィラーとして注目され、繊維強化複合材料層間への CNT 分散による層間強度特性向上等が報告されている（引用文献①）。また、CNT 分散ポリマーは、損傷に伴う電気抵抗変化の利用により構造ヘルスマニタリングへの応用も検討されている（引用文献②、③）。従って、CNT 分散熱硬化性ポリマーを繊維強化複合材料の接合における接着剤（接着層）として用いることにより、損傷セルフモニタリング機能を有する高強度複合材料構造の実現や電気的特性を利用した接着接合部品質保証が期待される。また、繊維強化複合材料の損傷修復へ CNT 分散熱硬化性ポリマーを応用することにより、損傷修復部分における強度・機能の回復・向上の他、修復後運用時の損傷セルフモニタリング等も可能となり、複合材料・構造の信頼性・耐久性が向上すると考えられる。

<引用文献>

- ① H. Qian, E. S. Greenhalgh, M. S. P. Shaffer, A. Bismarck, J. Mater. Chem., Vol. 20, 2010, 4751-4762.
- ② J. M. Wernik, S. A. Meguid, Appl. Mech. Rev., Vol. 63, 2010, 050801.
- ③ 竹田 智, まてりあ, Vol. 52, 2013, 14-16.

2. 研究の目的

本研究は、CNT 分散熱硬化性ポリマー接着

層を有する繊維強化複合材料のセルフモニタリング機能を理論・実験両面から解明し、先進複合材料・構造の信頼性・耐久性向上を図ることを目的としている。

3. 研究の方法

- (1) CFRP 積層材料をエポキシ樹脂および多層 CNT (MWNT) 分散エポキシ樹脂 (図 1) により接着し、接着層 CNT 含有量および接着層厚さの異なる双片持ちはり (DCB) 試験片を作製した。また、試験片上下両面に電極を作製した。DCB 試験片を用いて破壊・疲労試験 (図 2) を行い、接着層が多層 CNT 分散エポキシ樹脂の場合、DCB 試験片電気抵抗も測定して、電気抵抗とき裂挙動との関係や破壊・疲労特性に及ぼす CNT 添加の影響を検討した。
- (2) き裂進展に伴う CNT 分散ポリマー内部における CNT 電気伝導ネットワーク遮断メカニズムをモデル化した電気抵抗変化予測手法を開発し、破壊・疲労試験中の DCB 試験片電気抵抗変化を予測した。また、予測結果を実験結果と比較し、電気抵抗変化予測手法の妥当性を検証した。



図 1 多層 CNT 分散エポキシ樹脂

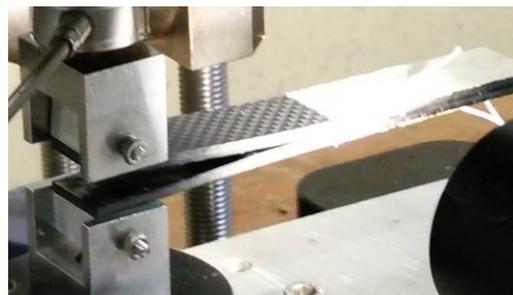


図 2 破壊・疲労試験

4. 研究成果

- (1) ①破壊試験中のき裂は接着層内（凝集破壊，図 3）および接着層/CFRP 積層材料界面（界面破壊，図 4）を進展した。また，DCB 試験片電気抵抗は，き裂進展経路に依存して異なる挙動を示した。

②破壊試験中の DCB 試験片電気抵抗変化は CNT 含有量および接着層厚さに依存しなかった。また，電気抵抗変化予測手法による予測結果は実験結果と良く一致し，本手法の妥当性を確認した（図 5）。

③破壊靱性は，接着層に少量の多層 CNT を添加することにより増大した。また，破壊靱性の接着層厚さ依存性はほとんど認められなかった。

- (2) ①疲労試験（変位制御）中の最大荷重は，疲労き裂進展やき裂先端近傍における疲労損傷に起因して繰返し数の増大に伴い低下した。

②DCB 試験片電気抵抗は繰返し数の増大に伴い増大した。また，疲労試験中の最大荷重低下に対応する有効き裂進展量に基づき予測した電気抵抗変化は実験結果と概ね一致し，電気抵抗変化予測手法の妥当性を確認した。

③疲労特性（き裂進展開始繰返し数とエネルギー解放率との関係）に及ぼす CNT 添加の影響は小さいことを確認した。



図 3 凝集破壊（接着層：多層 CNT 分散エポキシ樹脂）

- (3) 理論的・実験的結果より，CNT 分散熱硬化性ポリマーを CFRP の接合における接着剤として応用することで，破壊・損傷のセルフモニタリングが可能であることが示された。



図 4 界面破壊（接着層：多層 CNT 分散エポキシ樹脂）

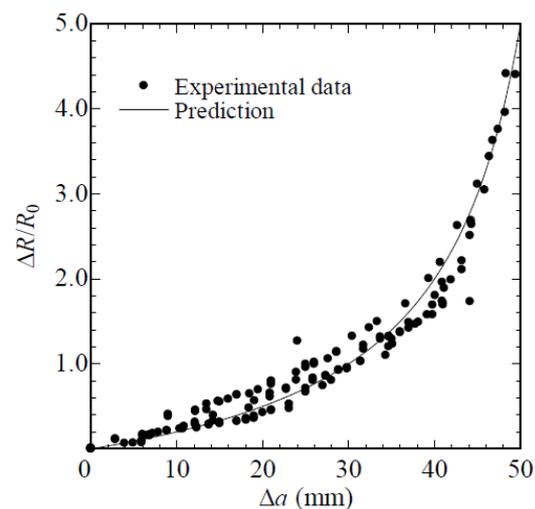


図 5 電気抵抗変化 $\Delta R/R_0$ とき裂進展量 Δa との関係（ $\Delta R = R - R_0$ ， R ：DCB 試験片電気抵抗， R_0 ：DCB 試験片初期電気抵抗）

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Tomo Takeda, Fumio Narita, Fracture Behavior and Crack Sensing Capability of Bonded Carbon Fiber Composite Joints with Carbon Nanotube-based Polymer Adhesive Layer under Mode I Loading, Composites Science and Technology, 査読有, Vol. 146, 2017, 26-33.
DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.04.014

[学会発表] (計3件)

- ① 竹田 智, 成田 史生, 接着層内CNTネットワークによるCFRP継手のモードI疲労破壊・損傷検知, 日本機械学会M&M2016 材料力学カンファレンス, 2016年10月8日-10日, 神戸大学六甲台キャンパス(兵庫県).
- ② Tomo Takeda, Fumio Narita, Crack Self-sensing of CNT-based Epoxy Bonded CFRP Joints under Mode I Loading, FEOFS 2016 The 10th International Conference on Fracture and Strength of Solids, 2016年8月28日-9月1日, Tokyo University of Science, Tokyo, Japan.
- ③ 竹田 智, 成田 史生, 鹿内 公詞, CNT分散ポリマー接着層を有するCFRP継手のモードI破壊・電気抵抗挙動, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス, 2015年11月21日-23日, 慶應義塾大学矢上キャンパス(神奈川県).

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

該当無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹田 智 (TAKEDA, Tomo)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究開発員

研究者番号: 70451531