

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760083

研究課題名(和文)次世代熱アクティブ複合材料の破壊・疲労挙動解明と高性能・長寿命化

研究課題名(英文)Characterization of Fracture and Fatigue Behaviors of Next Generation Thermally Active Composite Materials and their Performance and Lifetime Enhancements

研究代表者

竹田 智 (TAKEDA, Tomo)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70451531

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、次世代熱アクティブ複合材料を取り上げ、破壊・疲労挙動を解明・制御して、高性能・長寿命化を図ることを目的としている。具体的には、曲げを受ける熱アクティブ複合材料の破壊・変形・疲労挙動を理論・実験両面から明らかにした。また、ポリマー材料の破壊・疲労挙動に及ぼすカーボンナノチューブ(CNT)添加の影響やCNT分散ポリマー複合材料の変形・損傷検知機能について検討を加え、高性能・長寿命複合材料開発に資する有益な結果を得た。

研究成果の概要(英文)：We investigated the fracture and fatigue behaviors of next generation thermally active composite materials in order to improve their performance and lifetime. We characterized both theoretically and experimentally the fracture, deformation and fatigue behaviors of thermally active composites under flexural loading. Also, we examined the effect of carbon nanotube (CNT) addition on the fracture and fatigue behaviors of polymeric materials and the deformation/damage sensing ability of CNT-based polymer composites, and obtained the beneficial results for the development of high performance and long life composite materials.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 機械材料・材料力学

キーワード：複合材料力学 数値シミュレーション 材料試験 熱アクティブ複合材料 カーボンナノチューブ 高分子材料 破壊・変形・疲労 インテリジェント構造材料システム

1. 研究開始当初の背景

近年、輸送機器（航空機・自動車等）の軽量化による燃費向上・温室効果ガス排出量削減を目指し、ポリマー材料及びポリマー系繊維強化複合材料の応用が急速に進められている。ポリマー材料の中で、熱硬化性樹脂は、繊維強化複合材料の母材として広く用いられている。これに対し、熱可塑性樹脂は、熱硬化性樹脂と比較して、成形サイクルが短く、靱性に優れており、低コスト・高性能な構造・機能材料として注目を集めている。また、熱可塑性樹脂は、加熱による軟化と冷却による硬化を繰り返すことができることから、溶接性や再成型性・リサイクル性も有し、幅広い産業分野での利用が期待されている。

最近、機器・構造物の応答制御を可能とするインテリジェント構造材料システムが注目を集めているが、これまでのインテリジェント構造材料システムは、圧電材料や形状記憶合金等の組み込みにより制御機能を発現させているため、機器・構造物の重量増加やシステム複雑化による設計自由度低下等多くの問題点を残している。この問題点を解消するため、構造材料自身の物理特性に基づく制御機能発現メカニズムが検討され、熱による構成材料特性変化や変形を利用して駆動する熱アクティブ複合材料が提案されている。

熱アクティブ複合材料に関し、基本的な性能試験が行われているが、破壊・疲労挙動に関する検討は全く行われていないようである。また、熱アクティブ複合材料の高性能・長寿命化を図るためには、カーボンナノチューブ (CNT)・カーボンナノファイバ (CNF) 等の分散による力学・物理特性の向上や損傷等の検知機能付与が望まれる。

2. 研究の目的

本研究は、次世代熱アクティブ複合材料を取り上げ、破壊・疲労挙動を理論・実験両面から解明するものである。また、熱アクティブ複合材料設計・評価のための数値シミュレーション・試験法を開発・応用し、破壊・疲労挙動を制御して、高性能・長寿命化を図ることを目的としている。

3. 研究の方法

- (1) 熱アクティブ複合材料をモデル化し、数値シミュレーションを行って、破壊・疲労挙動を解明する。また、CNT による破壊・疲労の検知・抑制機能付与についても検討を加える。
- (2) 熱アクティブ複合材料の破壊・疲労試験を行い、数値シミュレーション結果と比較して、解析モデルの妥当性・合理性を検証する。これにより、熱アクティブ複合材料の破壊・疲労挙動に関する数値シミュレーション・試験法を開発し、強度・機能評価に応用して、材料・構造の

最適化を図る。

- (3) 高性能・長寿命な先進機器・構造用熱アクティブ複合材料提案に資する。

4. 研究成果

- (1) 形状記憶ポリマー (SMP) 層の上下両面に織物炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 層を積層した織物 CFRP / SMP 積層片持ちはりを取り上げ、先端集中荷重による曲げ試験及び三次元有限要素解析を行い、曲げ挙動の温度依存性を解明した。曲げ試験は、織物 CFRP 層の通電加熱により織物 CFRP・SMP 層の温度を制御して行い、曲げ剛性を評価した。また、SMP の物性値温度依存性を考慮して三次元有限要素解析を行い、織物 CFRP / SMP 積層はりの曲げ剛性及び内部ひずみを求めて、曲げ剛性制御機能について考察を加えた。

織物 CFRP 層の通電加熱により織物 CFRP・SMP 層の温度制御に成功し、温度の上昇に伴い織物 CFRP / SMP 積層はりの曲げ剛性は大きく減少した。また、SMP 層の厚さが大きい場合、温度上昇に伴う曲げ剛性変化は大きく、これは、SMP 層の軟化による変形増大に起因している。

織物 CFRP / SMP 積層はりの曲げ破壊挙動を理論・実験両面から解明した。織物 CFRP / SMP 積層はりの曲げ剛性及び破壊荷重は、3 点曲げ試験より評価した。また、試験片表面観察を行い、破壊形態について考察した。さらに、三次元有限要素解析 (SMP の物性値温度依存性考慮) により実験結果に理論的検討を加え、曲げ剛性・破壊荷重・破壊形態の温度依存性等を明らかにした。

織物 CFRP / SMP 積層はりの 3 点曲げ疲労試験を行い、繰返し荷重 - 変位曲線及び破壊繰返し数を測定し、曲げ疲労挙動を明らかにした。また、繰返し荷重負荷後、織物 CFRP / SMP 積層はりの曲げ剛性を評価し、曲げ剛性に及ぼす繰返し荷重の影響について考察を加えた。さらに、三次元有限要素解析を行い、実験結果に理論的検討を加えた。

- (2) CNT 分散ポリマー複合材料の電気伝導特性を理論・実験両面から解明した。導電率測定は、平板試験片を用いて行い、導電率の CNT 体積含有率依存性を明らかにした。また、CNT 分散ポリマー複合材料の CNT 間トンネル効果を考慮した電気伝導に関する理論モデルを提案・応用して導電率を求め、実験結果と比較・検討して、理論モデルの妥当性を検証した。さらに、導電率に及ぼす CNT 幾何学的形状の影響について考察を加えた。導電率と CNT 体積含有率との関係に関

する解析結果は、実験結果と良く一致し、本理論モデルは、CNT 分散ポリマー複合材料の電気伝導特性を評価する上で有用である。また、CNT 分散ポリマー複合材料の導電率は、CNT うねりの減少や CNT 長さの増大に伴い増大した。

引張を受ける CNT 分散ポリマー複合材料の電気抵抗挙動を解明した。引張試験・電気抵抗測定は、短冊型試験片を用いて行い、変形と電気抵抗との関係を明らかにした。また、電気伝導に関する理論モデルを拡張し、変形に伴う電気抵抗変化を求めて、変形検知機能を考察した。CNT 分散ポリマー複合材料の電気抵抗は、変形の増大に伴い増大し、CNT 体積含有率が小さい場合、変形による電気抵抗変化が顕著であるが、これは、トンネル効果が生じる CNT 間母材領域の厚さや複合材料内部における支配的な CNT 接触形態が CNT 体積含有率に依存して変化するためである。

CNT 分散ポリマー複合材料の引張 - 引張疲労試験及び電気抵抗測定を行い、疲労挙動の CNT 含有量依存性や電気抵抗変化による疲労損傷検知機能を解明・考察した。また、走査型電子顕微鏡 (SEM) による破面観察を行い、破壊形態について検討を加えた。

CNT 分散ポリマー複合材料の電気抵抗は、繰返し応力の増大 (減少) に伴い増大 (減少) した。また、破断繰返し数近傍において電気抵抗は急激に増大し、電気抵抗変化による CNT 分散ポリマー複合材料の疲労損傷検知可能性が示された。

き裂を有する CNT 分散ポリマー複合材料の静的混合モード I/II・高速モード I 破壊試験及び電気抵抗測定を行い、き裂進展と電気抵抗との関係を解明した。また、弾塑性有限要素解析やき裂進展による CNT 電気伝導ネットワーク遮断メカニズムを考慮した電気抵抗モデル計算を行い、破壊挙動・き裂検知機能に関する実験結果に理論的検討を加えた。さらに、SEM による破面観察を行い、破壊形態について考察した。

き裂は、負荷速度が小さい場合安定に進展したのに対し、負荷速度が大きい場合は、不安定に進展した。また、CNT 分散ポリマー複合材料の電気抵抗は、き裂進展に伴い増大し、安定き裂進展の場合、電気抵抗変化の予測結果は実験結果と良く一致した。さらに、CNT 添加により負荷速度が小さい場合の破壊特性は向上した。

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3件)

- Tomo Takeda, Yasuhide Shindo, Fumio Narita, Flexural Stiffness Variations of Woven Carbon Fiber Composite/Shape Memory Polymer Hybrid Layered Beams, Journal of Composite Materials, 査読有, 2014, in press.
DOI: 10.1177/0021998313515458

[学会発表](計11件)

竹田 智, 進藤 裕英, 成田 史生, 高速引張を受けるき裂を有するカーボンナノチューブ - ポリマー複合材料の破壊・電気抵抗挙動, 日本機械学会東北支部第 49 期秋季講演会, 2013 年 9 月 20 日, 岩手大学工学部 (岩手県)。

Yasuhide Shindo, Tomo Takeda, Fumitsugu Naraoka, Yu Kuronuma, Fumio Narita, Mixed-mode I/II Crack and Electrical Resistance Behaviors of Carbon Nanotube/Polymer Composites, SES 50th Annual Technical Meeting and ASME-AMD Annual Summer Meeting, 2013 年 7 月 28 日 - 31 日, Providence, Rhode Island, U.S.A.

Yasuhide Shindo, Tomo Takeda, Zhijuan Wei, Yu Kuronuma, Fumio Narita, Tension-tension Fatigue and Electrical Resistance of Carbon Nanotube/Polymer Composites at Cryogenic Temperatures, 13th International Conference on Fracture (ICF13), 2013 年 6 月 16 日 - 21 日, Beijing, China.

Tomo Takeda, Yu Kuronuma, Yasuhide Shindo, Fumio Narita, Loading Rate Dependence of Crack and Electrical Resistance Behaviors for Carbon Nanotube-based Polymer Composites Subjected to Tensile Loading, FEOFS 2013 The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids, 2013 年 6 月 9 日 - 13 日, Jeju, Korea.

竹田 智, 黒沼 遊, 進藤 裕英, 成田 史生, 魏 志娟, 引張を受ける CNT 分散ポリマー複合材料のひずみ検知機能評価, 第 62 回理論応用力学講演会, 2013 年 3 月 6 日 - 8 日, 東京工業大学大岡山キャンパス (東京都)。

Yu Kuronuma, Tomo Takeda, Yasuhide Shindo, Fumio Narita, Zhijuan Wei, Modeling and Characterization of Strain Sensing in CNT-based Polymer Composites under Tensile Loading, ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2012),

2012年11月9日 - 15日, Houston, Texas, U.S.A.

竹田 智, 黒沼 遊, 進藤 裕英, 成田 史生, Zhijuan Wei, 引張を受けるカーボンナノチューブ分散ポリマーコンポジットの電気抵抗変化によるひずみ検知, 日本金属学会 2012 年秋期講演大会(第 151 回), 2012 年 9 月 17 日 - 19 日, 愛媛大学城北キャンパス(愛媛県).

竹田 智, 進藤 裕英, 黒沼 遊, 成田 史生, カーボンナノチューブ分散ポリマーコンポジットの力学的・物理的挙動に関するマルチスケール評価, 第 61 回理論応用力学講演会 2012 年 3 月 7 日 - 9 日, 東京大学生産技術研究所(東京都).
[基調講演]

竹田 智, 進藤 裕英, 黒沼 遊, 成田 史生, カーボンナノチューブ分散ポリマーコンポジットの電気伝導特性に及ぼすマイクロ・ナノ構造の影響, 日本金属学会 2011 年秋期講演(第 149 回)大会, 2011 年 11 月 7 日 - 9 日, 沖縄コンベンションセンターおよびカルチャーリゾートフェストーネ(沖縄県).

竹田 智, 進藤 裕英, 成田 史生, 構造・機能デバイス用先進高分子基複合材料の力学・物理特性, 平成 23 年度化学系学協会東北大会, 2011 年 9 月 17 日 - 18 日, 東北大学川内北キャンパス(宮城県).
[招待講演]

黒沼 遊, 竹田 智, 進藤 裕英, 成田 史生, カーボンナノチューブ分散ポリマーコンポジットの導電率, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011 年 9 月 11 日 - 14 日, 東京工業大学大岡山キャンパス(東京都).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹田 智 (TAKEDA, Tomo)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 7 0 4 5 1 5 3 1