

## 科学研究費補助金研究成果

研究種目： 特別研究員奨励費  
研究期間： 2008～2009  
課題番号： 20・08058  
研究課題名（和文） ナノ粒子高分子基複合材料の力学的挙動  
研究課題名（英文） Study on mechanical properties of nano-particulate reinforced polymeric composites  
研究代表者  
東郷 敬一郎（TOHGO KEIICHIRO）  
静岡大学・工学部・教授  
研究者番号： 10155492  
外国人特別研究員  
Yunpeng Jiang（ID No.： P 05058）  
国籍： 中華人民共和国  
受入研究機関： 静岡大学・工学部 受入研究者： 東郷 敬一郎

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： ナノ粒子分散複合材料、マイクロメカニクス、増分形損傷理論、粒子マトリックス界面層、機械的特性

研究成果の概要（和文）：

本研究は、カーボンナノチューブやナノクレイなどのナノサイズの強化材を分散させたナノ粒子分散高分子基複合材料の微視構造と微視損傷を考慮した損傷力学モデルを構築し、機械的マクロ特性発現に及ぼすナノ粒子の影響を解明することを目的として行われ、以下の結果が得られた。

- (1) 微視力学に基づいて、粒子分散複合材料における損傷過程に加えて、粒子近傍のマトリックスの変形特性のひずみ勾配効果および粒子マトリックス界面相を考慮した力学モデルを開発し、機械的特性に及ぼす粒子寸法効果（ナノ粒子の効果）はマトリックスのひずみ勾配効果と界面相効果により説明できることを示した。
- (2) 分子鎖ネットワークモデルに基づいて、粒子分散高分子基複合材料の力学モデルを開発し、粒子が分子鎖の交点を形成しやすいことから、高分子基複合材料における粒子寸法効果のもう一つの可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, a damage models of nano-particulate reinforced polymeric composites taking account of microstructure, particle-size and damage are developed, and the influence of particles size on overall mechanical properties of the composites is made clear. The obtained results are as follows:

- (1) A mechanical model of particulate reinforced composites is developed taking account of strain gradient effect in matrix around particles and interphase between particles and matrix in addition to damage process, and it is shown that the influence of particle size (nano-particle effect) on mechanical properties of the composites is explained by strain gradient plasticity and creation of interphase.
- (2) A mechanical model of particulate reinforced polymeric composites is developed based on a molecular chain model, and it is suggested that another possibility to explain the particle-size effect in polymeric composites due to the hindrance effect of rigid particles to polymer molecules.

## 1. 研究背景:

微粒子を高分子中に分散させることにより、優れた電氣的・光学的および機械的特性を発現する工学的に有用な複合材料を作成することが期待されている。この複合材料の優れた特性は、特異な微視構造に関係していると考えられる。近年、微細な添加物と高分子の優れた特性を併せ持った材料を作成するための設計基準に関する研究が行われている。その中で、複合材料の特性と粒子寸法の間を関係理解することが最も重要である。しかしながら、現在のところ、これらの複合材料の特性に関する知見は限られており、特に機械的特性に関して不明な点があるため、複合材料の広範囲にわたる適用がなされていない。よって分散した微粒子の形態と複数の階層にわたる巨視的特性を明らかにする必要がある。軟質な高分子の分子鎖と硬質な粒子の相互関係を解明することにより、これらの関係を確立することが可能となると考えられる。

## 2. 研究方法:

既存の力学モデルを基礎として、いくつかの重要な微視構造の特性や影響を考慮することにより、高分子複合材料の特有の機械的挙動を説明する。さらに、複合材料の作成条件を種々に変化させ系統的に実験を行い、提案した解析モデルの検討や、粒子分散複合材料の強化機構の解明を行う。

## 3. 研究遂行と結果:

本研究において、次の3点について注目して検討を行った。

- (1) 粒子寸法効果を、粒子と母相の間の中間層の役割に基づいて説明する。
- (2) 粒子寸法効果を、粒子と高分子の分子鎖との相互作用から解釈する。
- (3) 粒子寸法効果を、系統的な実験により証明する。

上述の研究内容を通じて得られた重要な研究結果と結論を以下に示す。

- (1) 高分子複合材料において、中間層は機械的特性に大きな影響を及ぼし、結果として粒子寸法効果を示すことを解明した。この関係を解析するために、本研究では微視力学モデルを構築した。
- (2) 硬質な粒子の高分子に対する遮蔽効果に基づいて、小さい粒子の数が大きい粒子の数よりもはるかに多く、小さい粒子により誘起される拘束が大きい粒子よりも大きいことを明らかにした。さらに、寸法効果を予測するため、分子鎖モデルを提案した。
- (3) SiO<sub>2</sub>/エポキシ系複合材料における実験を行い、界面特性が粒子寸法効果に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。また、ガラス質の高分子とその複合材料の破壊メカニズムは、金属や一般のエポキシ樹脂材料の破壊メカニズムとは異なっていることを解明した。

## 4. 主な研究業績

[雑誌論文] (計7件)

- (1) [Y. Jiang, K. Tohgo, Y. Shimamura, Ultrasonic dispersion of SiO<sub>2</sub> particles in glassy epoxy resin](#), Journal of Composite Materials, Vol.46, No.10, 2012, pp. 1159-1168.
- (2) [H. Yang, P. Chen, Y. Jiang, K. Tohgo, Incremental damage theory of particulate-reinforced composites with a ductile interphase](#), Composite Structures, Vol.93, 2011, pp.2655-2662.

- (3) [Y. Jiang, H. Yang, K. Tohgo, Three-phase incremental damage theory of particulate-reinforced composites with a brittle interphase](#), Composite Structures, Vol.93, 2011, pp.1136–1142.
- (4) [Y. Jiang, K. Tohgo, H. Yang, Study of the effect of particle size on the effective modulus of polymeric composites on the basis of the molecular chain network microstructure](#), Computational Material Science, Vol.49, 2010, pp.439–443.
- (5) [Y. Jiang, K. Tohgo, Y. Shimamura, Quantitative dependence of the effective modulus of particle reinforced composites on the partially-debonding damage](#), Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.4, No.7, 2010, pp.1083-1093.
- (6) [Y. Jiang, K. Tohgo, Y. Shimamura, An analytical model to study the effective stiffness of the composites with periodically distributed sphere particles](#), Composite Structures, Vol.92, 2010, pp.216-222.
- (7) [Y. Jiang, K. Tohgo, Y. Shimamura, A micro-mechanics model for composites reinforced by regularly distributed particles with an inhomogeneous interphase](#), Computational Material Science, Vol.46, 2009, pp.507-515.