

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17940

研究課題名(和文) 甲虫上翅構造に学ぶ高性能複合材料の開発

研究課題名(英文) Development of high performance composite materials based on the structure of beetle upper wing

研究代表者

向山 和孝 (mukoyama, kazutaka)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：80743400

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)：本研究の目的は、甲虫上翅構造に基づく強度/剛性および軽量性を両立させた複合材料の設計指針の構築および高性能複合材料の開発を目指すことである。ヘラクレスオオカブトムシ上翅を対象に断面構造観察および一軸引張試験を実施したところ、上翅構造は3層構造で、採取角度の異なる上翅の荷重-変位特性は異方性を示すことが示唆された。カブトムシ上翅を模擬した数値解析モデルを作成し、損傷進展解析によりその有効性を示した。高性能複合材料の開発を目指し、セルロースナノファイバー(CNF)強化複合材料の作製および一軸引張試験を実施し、荷重-変位線図が非線形挙動を示すこと、弾性率がCNF添加量依存性を有することを見出した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of study is to construct design guidelines for composite materials with compatibility of strength / rigidity and light weight based on the structure of beetle upper wing, and develop high performance composite materials. The cross section structure observation and the uniaxial tensile test were carried out on the Heracles beetle upper wing, and it was found that the upper wing structure has a three-layer structure, suggesting that the load-displacement characteristics of the upper wing with different collection angles has anisotropy. Numerical analysis model simulating the structure of upper wing was prepared and its effectiveness was demonstrated by damage evolution analysis. Cellulose nanofiber (CNF) -reinforced composite materials was prepared, and uniaxial tensile test was carried out. It was revealed that the load-displacement diagram showed nonlinear behavior and the modulus of CNF-reinforced composites had the dependence on CNF additive amount.

研究分野：信頼性工学, 複合材料工学

キーワード：甲虫上翅構造 複合材料 一軸引張特性 有限要素法 数値モデリング セルロースナノファイバー

### 1. 研究開始当初の背景

環境・エネルギー問題の深刻化を受け、車輪や航空分野では高強度、軽量性に優れる繊維強化複合材を構造部材として積極的に用途展開を図ることが期待されている。特に強化繊維を3次元織構造とした織物複合材料が注目されているが、強度を支配する因子が膨大であることや力学特性が複雑であるため、試行錯誤的な設計と試作になっているのが現状である。一方、自然界に存在する生物は、その進化の過程で目的に応じた最適な構造を実現してきた。とりわけ、甲虫の上翅は外敵から身を守る強度と飛行時における翼となり得る剛性、軽量性を両立させている。南米原産のヘラクレスオオカブトムシ (Dynastes Hercules Hercules, DHH) の上翅の表面層直下には $\pm 90^\circ$ に積層されたキチン質の繊維層が見られ、その破面は繊維強化複合材料 (Fiber Reinforced Plastics, FRP) の破面の様相と類似している。近年、甲虫をはじめとする生物を模倣した技術開発はバイオミメクリーとして注目され、研究が進められている。

### 2. 研究の目的

織物複合材料は非常に多くの設計パラメータを有することから最適な構造を探索することは非常に困難であり、経験に基づく知識利用が未だに重要であることは否めない。そのため、繊維強化複合材料の材料設計に対する最適化手法や指針の構築は、材料設計期間の短縮化や機械・構造物の軽量化を図る上で非常に重要であると考えられる。一方、自然界に存在する生物は、その進化の過程で取捨選択を繰り返し、力学的にも非常に優れた機能を発現している。そこで、本研究では生態としての機能を頭部、胸部、腹部に統合し、徹底した機能分化を実現した昆虫であるDHHをはじめとする甲虫の上翅構造の観察や特性評価を行い、数値解析手法を援用しながら、強度と軽量性を両立させたFRPの設計指針の構築および高性能FRPの開発を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 甲虫上翅の観察と機械的特性の評価

上翅の積層構造とその機械的特性を明らかにすることを目的に、南米原産DHHの上翅の断面構造の観察を光学顕微鏡により行い、一軸引張試験を正中線に対して0度、45度で切り出した短冊試験片にて行う。併せて光学顕微鏡による損傷進展挙動のその場観察を行う。なお、DHHは適切な温度管理下では羽化時期が季節に依存せず、年間を通じて入手が容易であり、大型甲虫であることから組織の採取および観察も比較的容易である。

#### (2) 数値解析モデルの構築と損傷進展解析

甲虫上翅の強度発現機構の解明および設計指針の構築のための構造最適化手法を確立することを目的に、甲虫の上翅構造を模擬

した数値解析モデルの作成およびそれを用いた連続体損傷力学に基づく損傷進展解析を実施する。

#### (3) セルローズナノファイバー強化複合材料の作製と機械的特性の評価

強度、剛性、軽量性を両立させた高機能性FRPの開発を念頭に、DHH上翅を構成するキチン質に類似した物性を有すると予測されるセルローズナノファイバー (CNF) を用いた複合材料を作製し、SEMによるCNF分散状態観察および一軸引張試験を実施する。

### 4. 研究成果

#### (1) 甲虫上翅の観察と機械的特性の評価

DHH上翅構造の断面観察を光学顕微鏡により行った。Fig.1にその観察画像を示す。この観察画像より上翅の断面構造は3層構成であり、画像上部から外表面層 (厚層)、キチン質の繊維層、内表面層 (薄層) で構成されていることがわかる。

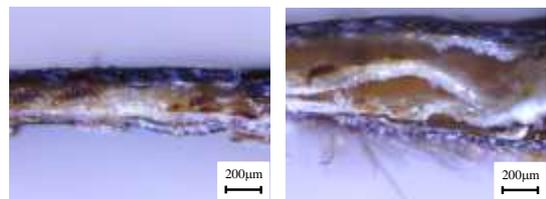


Fig.1 CCD image of a cross-section for DHH wings

次に、DHH上翅の正中線に対して0度、45度で切り出した短冊試験片を用いて一軸引張試験および負荷中に損傷進展挙動のその場観察を行った。なお、引張試験機には今田製作所製引張圧縮試験機を用い、変位速度は1.0mm/minとした。試験片寸法は長さ約35mm、幅は約10mm、厚みは約0.48mmである。損傷進展観察では、光源を試験片に対して斜め45度から照射しながらCCDマイクروسコープにより撮影を行った。Fig.2に各切り出し角度の試験片で得られた荷重-変位線図を、Fig.3に破断後の試験片画像をそれぞれ示す。

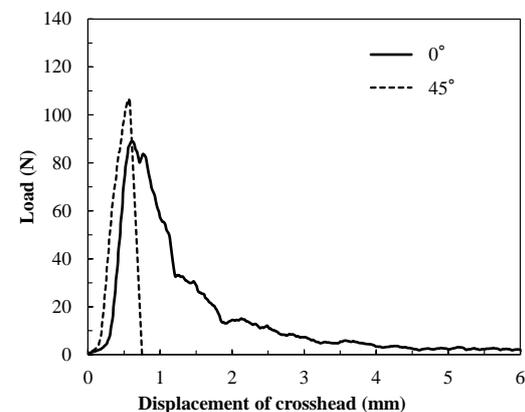


Fig.2 Load-displacement diagram of DHH wings.

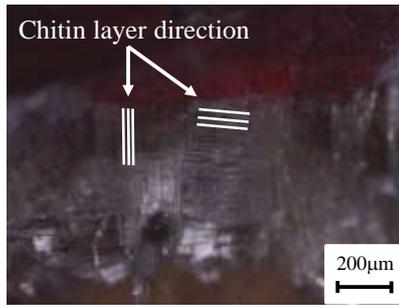


Fig.3 CCD image of fracture surface for DHH wings.

Fig.2の結果より、切出し方向において最大強度および破断伸びが異なり、異方性を示すことがわかる。45度切出し試験片の損傷進展観察では、内表面層において試験片端部からき裂が発生し、試験片中心軸に対して左下方向にそのき裂が進展した。さらに、Fig.3より上翅破面の様相は繊維強化複合材料の破面の様相と酷似しており、キチン質層の引抜けが観察されたことに併せて、キチン質層は複数の角度に配向、積層していることがわかる。

(2) 数値解析モデルの構築と損傷進展解析

上翅構造を模擬した数値解析モデルの作成およびその数値解析モデルを用いた損傷力学に基づく損傷進展解析を実施した。数値解析モデルとして、既往研究におけるカブトムシ上翅構造の試験片採取角度0度、45度、90度、135度の積層構成に基づき4種類の数値解析モデルを作成した。一例として、Fig.4に採取角度0度の有限要素モデルを示す。なお、材料物性値には、カブトムシ上翅の材料物性値が不明のため、ガラス繊維およびエポキシ樹脂から求めた一方向材の等価物性値を使用した。さらに、Fig.4の下段に併せて示すように、損傷モデルには材料座標系L-T-Zに基づいた一方向材の繊維破断および3種類のマトリックスき裂を定義し、均質直交異方性材料の破壊の局所問題として各有限要素に適用した。負荷形態は一軸引張とし、有限要素モデル端部にx軸方向に強制変位を付与した。

Num. of layer : 9  
Laminated constitution: [23.6/66.3/0.7/71.2/8.5/64.3/14.7/63/21]

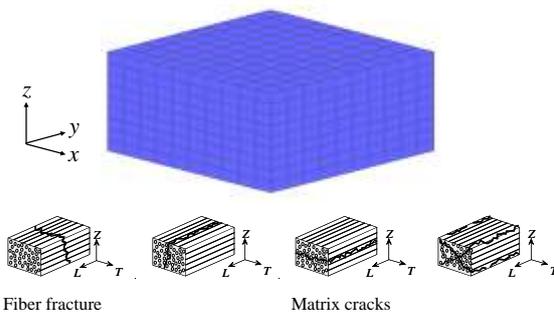


Fig.4 Finite element model of a cutting angle 0° and failure mode of element for damage development analysis.

Fig.5に損傷進展解析により得られた正規化引張強度を、既往研究におけるカブトムシ上翅の引張試験における正規化引張強度と比較した結果を示す。その結果、解析結果では試験片採取角度0度から50度に対しては大きく引張強度が低下するものの、50度以降の引張強度の低下は顕著には見られない傾向が、試験結果および解析結果で概ね一致している。したがって、作成した数値解析モデルは、HDDをはじめとする甲虫の上翅構造およびその挙動を模擬する数値解析モデルとして適用可能であると考えられる。

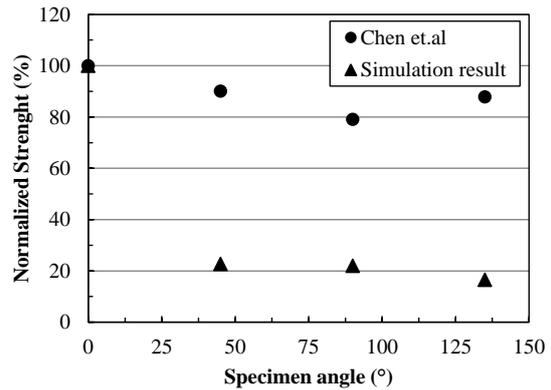


Fig.5 Normalized strength versus specimen angle plots for experimental results and simulation results.

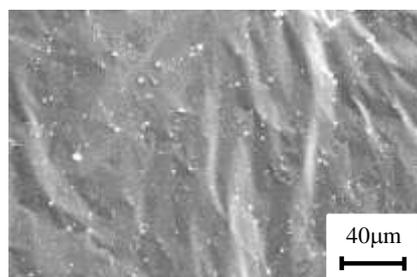
(3) セルローズナノファイバー強化複合材料の作製と機械的特性の評価

CNFを用いた複合材料を作製し、一軸引張試験を実施した。なお、作製したCNF強化複合材料のCNFの分散状態を確認するために、株式会社キーエンス製リアルサーフェスビュー顕微鏡VE-7800を用いてSEM観察を行った。引張試験機には今田製作所製引張圧縮試験機を用い、変位速度は0.15mm/sとした。本試験ではPETシートを基板として用い、その両面にCNF水分散液(株式会社スギノマシン製BiNF-i-s Ima-10005)を一液型塗装用水性エポキシエステル樹脂に分散させたCNF強化複合樹脂を厚さ500µmを目安に塗布し、恒温乾燥機にて40°C環境で48時間乾燥させ試験片を作製した。PET基板寸法は長さ50mm、幅10mm、厚さ0.13mmである。また、CNF添加量を変化(2.5~30wt.%)させた試験片を作製し、得られる荷重-変位線図弾性挙動領域において式(1)に示す複合則を用いてCNF強化複合材料のヤング率の評価を試みた。

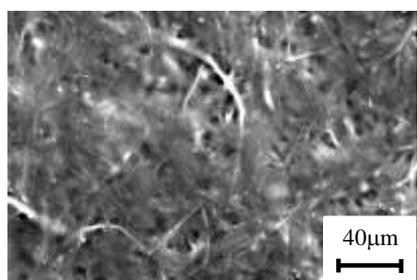
$$F = \left( \frac{wt_0}{L} E_0 + \frac{wt_i}{L} E_i \right) x \quad (1)$$

ここで、Fは荷重、xは変位量であり、wは試験片幅、t<sub>0</sub>はPET基板の板厚、t<sub>i</sub>はCNF強化複合材料の膜厚、Lは標点距離、E<sub>0</sub>およびE<sub>i</sub>はそれぞれPET基板とCNF強化複合材料のヤング率を示している。

Fig.6にCNF添加量0wt.%と20wt.%におけるSEM観察画像をそれぞれ示す。Fig.6(a)においてCNF添加量0wt.%（母材のみ）の試料表面は平坦である。一方、Fig.6(b)においてCNF添加量20wt.%の試料表面には、表面に露出したCNFが観察され、観察範囲の各部分においてCNFがネットワーク状に分散している箇所や凝集箇所を確認した。この凝集したCNFの直径は約0.5~5μmであった。



(a) CNF wt. content: 0wt.%



(b) CNF wt. content: 20wt.%

Fig.6 Surficial SEM photograph of CNF reinforced waterborne epoxy ester. CNF wt. content: 0, 20 wt. %

次に、Fig.7に一軸引張試験で得られたCNF添加量20wt.%における荷重-変位線図の一例を示す。この荷重-変位線図において、弾性挙動（赤線領域）を示した後、屈曲部（緑線領域以降）が現れ、非線形挙動を示すことがわかる。

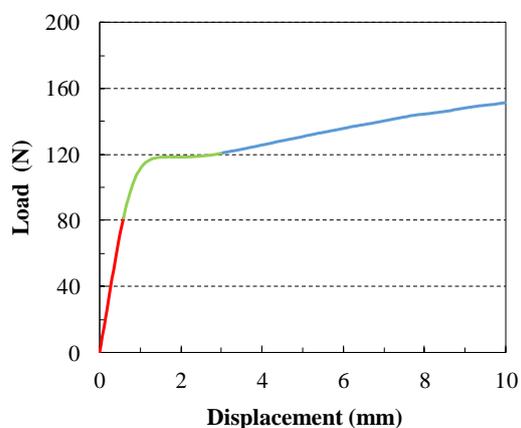


Fig.7 Example of load-displacement diagram under tensile loading for 20 wt. % CNF reinforced waterborne epoxy ester.

Fig.8にCNF添加量（2.5~30wt.%）に対するヤング率の変化の結果を示す。CNF添加量が増加するとともにヤング率も増加した。また、CNF添加量が20wt.%以下である場合、ヤング率は穏やかに増加する。一方で、CNF添加量30wt.%ではヤング率が急激に増加する傾向が確認された。これは、CNFで構成された3次元ネットワーク構造の増加や変化によるものと考えられる。

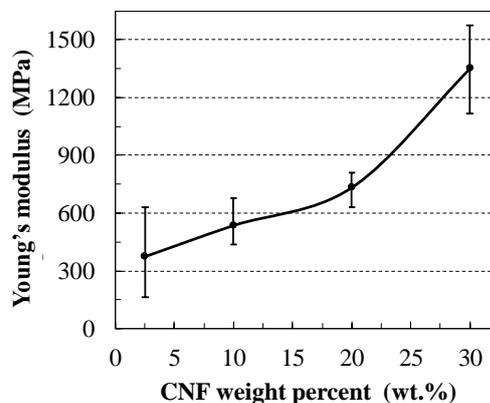


Fig.8 Relationship between Young's modulus and CNF additive amount.

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計3件）

- ① 向山和孝, 花木宏修, 倉敷哲生, バイオミメティクスと工学の融合-高性能複合材料の開発を目指して-, 昆虫と自然, 査読無, 51巻, 2016, 41-43
- ② 向山和孝, 花木宏修, 倉敷哲生, 甲虫上翅構造に学ぶ高機能複合材料の開発, 昆虫と自然, 査読無, 50巻, 2015, 39-41

〔学会発表〕（計3件）

- ① K. Mukoyama, K. Hanaki, T. Kurashiki, Fatigue Damage Analysis under Tensile Loading for Textile Composites, 5th Textile Research Symposium, 2017, Kyoto Institute of Technology
- ② X. Wang, K. Hanaki, T. Kurashiki, K. Mukoyoma, X. Li, Mechanical Properties and Microstructure of Cellulose Nanofiber (CNF) Reinforced Epoxy, 21th International Conference on Composite Materials, 2017, Xi'an, China
- ③ 王旭東, 花木宏修, 向山和孝, 李興盛, 倉敷哲生, CNF強化複合樹脂の引張・せん断特性に及ぼすCNF添加量の影響, 日本機械学会 第30回計算力学講演会, 2017, 近畿大学

〔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]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

向山 和孝 (MUKOYAMA Kazutaka)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：80743400

(2) 研究協力者

倉敷 哲生 (KURASHIKI Tetsusei)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30294028

花木 宏修 (HANAKI Koushu)

大阪大学・大学院工学研究科・招聘准教授

研究者番号：20336829

李 興盛 (LI Xingsheng)

大阪大学・大学院工学研究科・特任研究員

研究者番号：00747587