研究論文

ジュート単繊維の疲労強度に及ぼす繰返し周波数と時間依存型破壊の影響

加藤木秀章^{*1}, 植松 和徳^{*2}, 島村 佳伸^{*3}, 東郷敬一郎^{*4}, 藤井 朋之^{*5}, 竹村 兼一^{*6}

(2014年6月6日受付)

Effect of Cyclic Frequency and Time-Dependent Fracture on Fatigue Strength of Jute Monofilament

Hideaki KATO^{*1}, Kazunori UEMATSU^{*2}, Yoshinobu SHIMAMURA^{*3},
Keiichiro TOHGO^{*4}, Tomoyuki FUJII^{*5} and Kenichi TAKEMURA^{*6}

(Received June 6, 2014)

Abstract: Natural fibers used for reinforcement in green composites fail due to cyclic loading, but the effects of various factors on fatigue strength of natural fibers have not been clarified. In this study, the effects of cyclic frequency and time-dependent fracture on fatigue strength of jute monofilament were investigated. Fatigue tests were conducted at a cyclic frequency of 1 Hz and 10 Hz. The results indicated that there is no significant difference between fatigue strengths of both frequencies. Then, constant loading tests of jute monofilaments were conducted, and the results revealed that a jute monofilament fails after a period of constant loading. Life predictions based on a linear cumulative damage rule results implies that the time-dependent fracture mode has much less effect on the fatigue life of jute monofilament than the cyclic-dependent fracture mode.

Key words: Jute monofilament, Fatigue strength, Cyclic frequency, Time-dependent fracture

1. 緒 言

植物由来材料を強化材と母材に用いた複合材料であるグリーンコンポジットは、従来の石油由来樹脂を用いた繊維強化プラスチックと異なり、強化材、母材のいずれも再生可能資源であるため、資源枯渇の恐れがほとんど無い構造材料として期待されている¹⁻⁴⁾。現在、グリーンコンポジットを用いた製品の多くは射出成形品である

が、強化繊維である植物繊維の優れた機械的特性を複合材料の巨視的特性に反映させるために、紡績糸や植物繊維自体を一方向配向させた繊維基材を用いたグリーンコンポジットの成形やその力学的特性に関する研究⁵⁻⁹⁾が進められている。天然繊維強化プラスチックの密度は1.0 g/cm³前後であり極めて軽量であるうえ、一方向強化材の場合、強化方向の弾性率として20~40 GPa、引張強度として150~250 MPaが得られており、その比剛性、比強度はアルミニウム合金やガラス繊維強化プラスチック(GFRP)を代替可能なレベルにある。しかし、グリーンコンポジットを耐荷重部材に用いるためには、その長期耐久性の検討が必要である。そこで著者は、グリーンコンポジットの繰返し荷重下における強度特性に着目し、ジュート紡績糸で一方向強化した生分解性プラスチックの繰返し荷重下での強度特性について検討し、10⁶回疲労強度が静的強度の55%程度であることを明らかにしている^{10,11)}。またKobayashi¹²⁾はジュート組ひも強化ポリ乳酸の10⁶回疲労強度が静的強度の40%程度であることを報告している。

以上の結果は、グリーンコンポジットの疲労の度合い

^{*1,*6} 神奈川大学工学部機械工学科(221-8686 神奈川県横浜市神奈川区六角橋3-27-1)

Department of Mechanical Engineering, Kanagawa University

^{*1} 特別助手 Research Associate, ^{*6} 教授 Professor

^{*2} 東芝テック株式会社 (141-0032 東京都品川区大崎1-11-1 ゲートシティ大崎ウエストタワー 9F)

Toshiba Tec Corporation

^{*3~*5} 静岡大学大学院工学研究科機械工学専攻 (432-8561 静岡県浜松市中区城北3-5-1)

Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

^{*3} 准教授 Associate Professor, ^{*4} 教授 Professor,

^{*5} 助教 Assistant Professor

はGFRPと比べ同程度であり、耐荷重部材として使用できる可能性を示しているが、グリーンコンポジットの疲労強度低下の要因については十分に明らかにされていない。一方向強化材の場合、負荷の大部分を強化繊維が負担しているが、グリーンコンポジットの強化材である天然繊維の疲労特性についてはほとんど知られていないのが現状である。そこで著者らはジュート単繊維の繰返し荷重試験を実施し、その疲労特性とその疲労損傷過程について検討を行った¹³⁾。その結果、ジュート単繊維の疲労強度は繰返し数の増加に伴い低下することを明らかにしたが、ジュート単繊維の疲労強度に及ぼす諸因子の影響についてはほとんど知見がない。

植物繊維の微視構造は、強化材であるマイクロフィブリルセルロースと、母材であるリグニンやヘミセルロースからなる繊維強化複合材料の積層円筒であり、かつ繊維配向は円筒主軸に対して傾いている(2.1節にて詳述)。このため、従来の繊維強化プラスチックの斜交積層板の引張試験や疲労試験の場合と同様に、単繊維に引張荷重や繰返し荷重を作用させた場合には母材の影響を大きく受けると考えられる。たとえば、植物繊維の引張荷重に対する引張強度のひずみ速度依存性は従来から知られている¹⁴⁾。しかし、植物単繊維の疲労強度の繰返し速度依存性に関する知見は著者らが知る限りない。また大きな平均応力が作用する場合には、時間依存型破壊であるクリープ破壊の寄与も懸念されるが、植物単繊維の定荷重下での破壊に関する知見もほとんどない。

そこで本研究では、まずジュート単繊維の疲労特性に及ぼす繰返し速度の影響を検討するために、異なる繰返し周波数(1 Hzと10 Hz)でジュート単繊維の疲労試験を実施した。さらに、ジュート単繊維の定荷重引張試験を実施し、その結果と累積損傷則を用いて疲労強度に及ぼす時間依存型破壊の影響について検討したのでここに報告する。

2. 供試材料と試験片

2.1 供試材料

安価で入手が容易な麻繊維は、グリーンコンポジットの強化材として広く用いられている。そこで、供試材料として、麻繊維の一種であるジュート繊維(あさのひも、BMS(株))を用いた。ジュート単繊維の繊維長は約50 mm、単繊維径は約50 μm である。

ジュート単繊維の断面をFig. 1に示す。ジュート単繊維は、素繊維と呼ばれる微小繊維が束となった構造である。Fig. 2に素繊維の構造の概略図を示す。素繊維はルー

Fig. 1 Cross section of a jute monofilament.

Fig. 2 Microstructure of an elementary fiber.

メンと呼ばれる空孔のまわりを植物細胞壁が取り囲んだ構造であり、この植物細胞壁は、セルロースの束であるマイクロフィブリルを強化材、ヘミセルロースやリグニンなどを母材とした繊維強化複合材料である¹⁵⁾。さらに、この植物細胞壁は積層構造をなしており、素繊維の外層は1次壁、内層は2次壁と呼ばれている。2次壁は1次壁に比して厚いことに加え、強化材であるセルロースの含有量が多く、さらに素繊維長手方向に対するマイクロフィブリルの配向角が小さいことから、素繊維に作用する荷重の相当部分を2次壁が負担すると考えられている。また素繊維間にはペクチンやリグニン、ヘミセルロースで接着されており、その接着層は細胞間層と呼ばれている。

2.2 試験片

グリーンコンポジットの繊維/樹脂界面の接着強度を改善するために、繊維の表面処理を行うことが一般的である¹⁶⁾。なかでもアルカリ処理は天然繊維をアルカリ水溶液に浸漬後、水洗、乾燥させるだけの簡便な表面処理方法であり、広く行われている。そこで本研究では、アルカリ処理を施したジュート繊維を準備した。具体的には、ジュート紡績糸を室温の水酸化ナトリウム水溶液(濃

度 1 wt%) 中に 30 分間浸漬後、十分に水洗したのちに、40°C で 3 時間の乾燥を実施した（乾燥中のジュート紡績糸の重量測定を実施し、上述の乾燥条件で十分に乾燥することは確認した）。試験片となるジュート単繊維は、この乾燥させたジュート紡績糸から抜き出した。

引張試験ならびに疲労試験に用いる試験片として、JIS L 1069 を参考に仮止め用のコの字型台紙の上にジュート単繊維を張りつけたものを用意した (Fig. 3 (a) 参照)。試験時にはチャック後に台紙の中央を切断してから負荷を作用させた。定荷重試験片はコの字型の台紙を用いた試験片 (Fig. 3 (b) 参照) とし、試験片の端部に錘を吊すことで定荷重を作用させた。逐次損傷観察用試験片は、引張試験、疲労試験用の試験片の標点間距離を 2 mm に変更したものを用いた (Fig. 3 (c) 参照)。なお、すべての試験片は試験直前までデシケーター中で保管した。

2.3 断面積測定

ジュート単繊維の断面形状は真円でないため、田辺ら¹⁷⁾の断面積測定手法を参考に、試験片の直交二方向の

Fig. 3 Specimens.

直径をあらかじめ光学顕微鏡により測定し、ジュート単繊維の断面形状を楕円と仮定して断面積を算出することとした。さらにジュート単繊維のヤング率を計算する場合は、標点間の 7 点平均 (1.25 mm 間隔) の断面積を用い、引張強度を計算する場合は、繊維破断部に対応する位置の初期断面積を用いた。

3. 試験方法

3.1 引張試験

精密万能試験機 (AGS-5kNG, (株)島津製作所) を用い、引張試験を実施し、弾性率、引張強度と破断ひずみを求めた。ひずみは標点間の伸びをビデオ式伸び計で計測した結果から計算した。また機械的特性に及ぼすひずみ速度の影響を確認するため、クロスヘッドスピードは 0.05, 1, 20 mm/min の 3 通りとした。また、試験本数は 30 本とした。

3.2 疲労試験

疲労試験には耐久疲労試験機 (FRS05, (株)旭製作所) を用いた。試験は、繰返し周波数 1 Hz と 10 Hz の 2 通りとし、いずれも応力比 0.1 の正弦波で最大応力 $0.25\sigma_B$ ~ $1.0\sigma_B$ の条件で試験を行った。ここで、 σ_B はクロスヘッドスピード 1 mm/min の場合の引張強度である。試験環境は室温、相対湿度 20~30% である。なお、打ち切り回数は 10^6 回とした。

3.3 定荷重試験

定荷重試験には自作した試験機を用いた。試験機の写真を Fig. 4 に示す。試験片をフックに掛け、試験片端部に錘を吊すことで定荷重負荷を行った。また LED センサーにより試験片の破断を検知し、破断寿命を計測した。試験条件として、負荷応力は $0.6\sigma_B$ ~ $1.0\sigma_B$ 、試験環境は室温、相対湿度 20~30% とした。なお、打ち切り時間は 10^6 秒とした。

3.4 繊維表面の逐次損傷観察

ジュート単繊維表面の損傷状態を観察するため、最大

Fig. 4 Constant loading tester.

応力 $0.75\sigma_B$ と $0.5\sigma_B$ の2通りの負荷の場合について、繰返し荷重試験のときには繰返し数 10^n 回 ($n=1\sim6$) に到達する度に負荷を中断し、定荷重試験の場合には 10^n 秒 ($n=1\sim6$) に到達する度に負荷を中断し、標点間の片側表面全域を走査型電子顕微鏡で観察した。負荷条件と試験環境は3.2節、3.3節と基本的には同一としたが、繰返し荷重に関しては、1回目の負荷は負荷速度 1 mm/min の三角波とし、 10^2 回までは負荷周波数 1 Hz の正弦波、 10^2 回以降は 10 Hz の正弦波とした。

4. 結 果

4.1 引張試験

ジュート単繊維の代表的な応力-ひずみ線図を Fig. 5 に、引張試験結果を整理したものを Table 1 に示す。表中の誤差は標準偏差を表す。また、Fig. 6 に引張強度、ヤング率とひずみ速度の関係を示す。なお、引張強度の平均値と標準偏差は、引張強度が2母数ワイブル分布に従うとして近似した結果から評価した値である。

Fig. 6 より、ひずみ速度の増加に伴い、ジュート単繊維の引張強度とヤング率は増加することがわかった。一般に引張強度と疲労強度の間には相関があることが知られている。疲労試験の条件である繰返し周波数 1 Hz と 10 Hz の最大ひずみ速度はそれぞれ約 $3\times 10^{-3}/\text{s}$ と約 $30\times 10^{-3}/\text{s}$ であり、後者のひずみ速度での引張強度は前者の

Fig. 5 Typical stress and strain curves.

それに比べて10%程度高いことを考慮すると、繰返し周波数は疲労強度に影響する可能性があると考えられる。

4.2 疲労試験

ジュート単繊維のS-N曲線を Fig. 7 に示す。縦軸は応力振幅、横軸は破断繰返し数である。図中 10^0 回における中実点は平均引張強度、誤差線は引張強度の標準偏差であり、矢印は繰返し数 10^0 回に達しても破断しなかった結果を表している。また図中の直線は実験結果の最小2乗近似直線を示している。

ジュート単繊維の疲労強度は繰返し数増加に伴い低下

Fig. 6 Dependence of tensile properties on strain rate.

Table 1 Tensile properties of jute monofilament.

Crosshead speed [mm/min]	Strain rate [$10^{-3}/\text{s}$]	Tensile strength [MPa]	Young's modulus [GPa]	Strain at break [%]
20	33	673 (± 116)	33.7 (± 6.5)	1.6 (± 0.2)
1	1.6	609 (± 99)	26.3 (± 3.0)	1.7 (± 0.3)
0.05	0.083	438 (± 71)	16.4 (± 3.4)	2.2 (± 0.7)

Fig. 7 S-N diagram.

し、 10^6 回での疲労強度は引張強度の 50%程度であった。ジュート単繊維の疲労強度のばらつきの度合いは引張強度のばらつきと同程度であった。多くの材料で疲労強度と引張強度の間には強い相関があるため、本研究でみられた疲労強度のばらつきも主に引張強度のばらつきと関係があると思われるが、この原因については今後のさらなる検討が必要である。また、周波数 1 Hz と 10 Hz の疲労強度を比較すると、両者に明確な差はみられなかった。

一般的に引張強度が高くなると、疲労強度も高くなる場合が多い。しかし、1 Hz と 10 Hz の疲労強度に大きな差がみられなかった。これは、本研究では繰返し負荷に正弦波を用いていることから、最大負荷近傍のひずみ速度は繰返し周波数によらず遅いため、結果として疲労強度に大きな差異がみられなかったと考えられる。

4.3 定荷重試験

定荷重試験の結果を Fig. 8 に示す。縦軸は負荷応力、横軸は破断までの時間を示す。図中の 10^0 s における中実点は引張強度、誤差線は引張強度の標準偏差を表す。矢印は 10^6 s で破断しなかった試験の結果を表す。また図中の実線は最小 2 乗近似直線である。

ジュート単繊維の破断応力は、ばらつきは大きいものの負荷時間の増加に伴い低下する傾向を示し、 10^6 s での破断応力は引張強度の 40%程度であった。以上の結果は、室温であってもジュート単繊維は時間依存型の破壊を生じることを示している。この破壊の原因については 5 章で考察する。またジュート単繊維の破断応力のばらつきは、ジュート単繊維の静的引張強度のばらつきに由来すると考えられる。

4.4 ジュート単繊維の逐次損傷観察結果

損傷状態の観察のため、繊維表面の逐次損傷観察と破面観察を実施した。まず、繰返し負荷を作用させたジ

Fig. 8 Time to failure under constant loading.

Fig. 9 Damage observation under cyclic loading ($\sigma_{\max} = 0.5\sigma_B$).

ート単繊維の表面の逐次観察の結果を Fig. 9 に示す。ここでは代表例として最大応力 $0.5\sigma_B$ の場合の結果を示す。ジュート単繊維の表面には、1 回目の荷重を負荷した時点で、負荷方向に対して直交方向のき裂が素繊維表面に複数発生し、その後、繰返し数の増加に伴い既存のき裂の進展や新たなき裂の発生がみられた。

定荷重試験の場合の繊維表面の逐次観察の結果を

Fig. 10 Damage observation under constant loading ($\sigma_{\max}=0.5\sigma_B$).

Fig. 10 に示す。負荷応力は疲労試験の場合と同じ $0.5\sigma_B$ の結果を示す。疲労試験の場合と同様にジュート単繊維表面には、負荷開始直後 (10 s) ですでに、負荷方向に対して直交方向のき裂が素繊維表面に複数発生し、その後、負荷時間の増加に伴い、既存のき裂の進展や新たなき裂の発生がみられた。

上記の結果から、ジュート単繊維の表面に複数のき裂が生じることがわかった。そこで、最大応力が $0.75\sigma_B$ と $0.5\sigma_B$ の場合について、繊維表面に生じた繊維軸方向に直交するき裂数を計数し、繰返し数ないしは負荷時間と

Fig. 11 Number of cracks under cyclic loading.

Fig. 12 Number of cracks under constant loading.

の関係を整理した。その結果をそれぞれ Fig. 11 と Fig. 12 に示す。ここで、観察範囲は試験片チャック部近傍を除く標点間 2 mm の片側全域とした。繰返し負荷の場合には、1 回目の負荷で最終観察時の約半数のき裂が発生し、その後、繰返し数の増加にともない、き裂数は増加した。また、最大応力 $0.75\sigma_B$ の場合には $0.5\sigma_B$ の場合よりも多くのき裂が発生した。定荷重の場合も負荷時間の増加にともないき裂数は増加する傾向を示したが、負荷応力によるき裂数の差は小さかった。

次にジュート単繊維の疲労破面と定荷重負荷による破面の代表例をそれぞれ Fig. 13 に示す。疲労破面には凹凸がみられたのに対し、定荷重負荷による破面は比較的平滑であり、明らかな差異がみられた。

繰返し荷重下と定荷重下でのき裂数増加傾向と破面の違いは、それぞれの負荷形態での破壊機構が異なることを示唆している。そこで 5 章では、定荷重での破壊機構が疲労強度に及ぼす影響について破断寿命の観点から考察していくこととする。

(a) Fatigue fracture surface ($0.5\sigma_B$). (b) Fracture surface under constant loading ($0.5\sigma_B$).

Fig. 13 Fracture surfaces.

5. 考 察

5.1 定荷重試験における時間依存型の破壊に関する検討

定荷重試験結果から、ジュート単繊維には時間依存型の破壊機構が存在することがわかった。ジュート単繊維の微視構造をふまえると、時間依存型破壊の機構としてクリープ破壊が考えられる。そこで、ジュート単繊維の定荷重下での破断がクリープ破壊であると仮定し、Zhurkov により提案された高分子のクリープ破壊の予測式¹⁸⁾との比較検討を行った。Zhurkov の式とは、一定荷重下での分子間結合の切断が熱活性化過程に支配されているというモデルに基づいた式であり、多くの高分子の実験結果に対して良い一致がみられることが知られている。Zhurkov の式は次式で示される。

$$t_f = t_0 \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{KT} \right] \quad (1)$$

ここで t_f は破断時間、 t_0 は物質を構成する分子の振動

Table 2 Parameters for Zhurkov's equation.

Boltzmann's constant k [kcal/mol·K]	1.98×10^{-3}
Absolute temperature T [K]	293
Natural oscillation frequency of atoms in solids ν [1/s]	10^{13} ¹⁸⁾

Fig. 14 Regression result according to Zhurkov's equation.

数 ν の逆数、 K はボルツマン係数、 T は絶対温度、 U_0 は結合エネルギー、 γ は材料定数、 σ は負荷応力である。未知パラメータである γ と U_0 は実験結果を回帰すると得られ、本研究では、 $U_0 = 34$ kcal/mol、 $\gamma = 2.7 \times 10^{-11}$ kg s⁻³ m² であった。なお回帰にあたり K 、 T 、 ν はそれぞれ Table 2 に示す値を用いた。Fig. 14 は、得られた回帰直線を実験結果の応力-破断時間線図上にプロットした結果を示す。回帰の結果は実験結果の傾向をよく表すと考えられる。また、回帰によって得られた結合エネルギー $U_0 = 34$ kcal/mol は、ポリスチレンの 54 kcal/mol、ポリプロピレンの 56 kcal/mol など¹⁸⁾ と近い値を示した。以上の結果は、本実験の破断強度が Zhurkov の式から予測可能なことを意味しており、言いかえると、ジュート単繊維の定荷重下での主な破壊機構はクリープ破壊であることを示唆している。

5.2 時間依存型破壊が疲労強度に及ぼす影響に関する検討

ジュート単繊維の繰返し荷重による破壊に上述の時間依存型の破壊機構が影響を与えている可能性がある。そこで、応力-破断時間線図から線形累積損傷則を用いて S-N 線図を予測し、繰返し荷重試験の実験結果との比較を行うことで、時間依存型の破壊機構の影響について検討した。S-N 線図の予測のために、以下の仮定を置いた。仮定 1. ジュート単繊維の破壊機構は時間依存型破壊だ

Fig. 15 Estimation of the number of cycles to failure.

けであり、繰返しの影響は無いものとする。

仮定 2. 定荷重下での応力-破断時間線図は Zhurkov の式で表される。

仮定 3. 変動荷重が作用する場合のジュート単繊維の破断時間 T_f は次式で示される線形累積則で予測できる。

$$\int_0^{T_f} \frac{dt}{t_f(\sigma(t))} = 1 \quad (2)$$

本研究での負荷応力 $\sigma(t)$ は、次式で表される。

$$\sigma(t) = \sigma_{\max} \left\{ \frac{1+R}{2} + \left(\frac{1-R}{2} \right) \sin(2\pi f t) \right\} = \sigma_{\max} \cdot g(t) \quad (3)$$

ここで $\sigma_{\max}$ は繰返し荷重の最大応力、 R は応力比、 f は繰返し周波数である。破断繰返し数が N_f のとき、 $T_f = N_f / f$ であることを考慮し、さらに式(2)に式(1)、(3)を代入すると、次式が得られる。

$$N_f = \frac{1}{\int_0^{1/f} t_0^{-1} \exp \left[\frac{\gamma \cdot \sigma_{\max} g(t) - U_0}{KT} \right] dt} \quad (4)$$

式(4)の結果を S-N 線図にプロットしたものを Fig. 15 に示す。図中の実線は 10 Hz の場合の予測結果、破線は 1 Hz の場合の予測結果を示す。予測した破断繰返し数と比較すると、周波数 10 Hz の実験結果は、疲労強度で約 70 MPa、疲労寿命で約 4 桁小さく、周波数 1 Hz の実験結果は、疲労強度で約 50 MPa、疲労寿命で約 2 桁小さかった。以上の結果は、負荷時間依存型の破壊機構が疲労強度に及ぼす影響は十分に小さく、繰返し数依存型の破壊機構の影響が大きいことを示唆している。

6. 結 言

本研究では、ジュート単繊維の繰返し荷重試験および

定荷重試験を実施し、ジュート単繊維の疲労強度に及ぼす繰返し速度の影響について検討するとともに、繰返し荷重下での破壊に及ぼす時間依存破壊の影響について検討し、以下の結言を得た。

1. ジュート単繊維の疲労強度は、1 Hz と 10 Hz の場合には、優位な差はみられなかった。
2. ジュート単繊維は定荷重下で破断が生じるものの、線形累積損傷則を用いた寿命予測の結果は、時間依存型の破壊機構（クリープ破壊と考えられる）が疲労寿命に及ぼす影響は小さく、繰返し数依存型の破壊機構の影響が大きいことを示唆している。

本研究は JSPS 科研費 22760072 の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) 大窪和也, 高木 均, 合田公一: 材料, **55**, 4 (2006), 438-444.
- 2) K. Goda & Y. Cao: *J. Solid Mech. Mater. Eng.*, **1**, 9 (2007), 1073-1084.
- 3) H. Ku, H. Wang, N. Pattarachaiyakop & M. Trada: *Composites Part B*, **42** (2011), 856-873.
- 4) F.P. La Manita & M. Morreale: *Composites Part A*, **42** (2011), 579-588.
- 5) 越智真治, 高木 均: 材料, **53**, 6 (2004), 673-677.
- 6) 仲井朝美, 大谷章夫, L.Y. Wei, 鹿本直志: 日本複合材料学会誌, **35**, 2 (2009), 49-55.
- 7) 邊 吾一, 松田 匠, 上野雄太: 日本複合材料学会誌, **36**, 2 (2010), 41-47.
- 8) R. Nakamura, K. Goda, J. Noda & A. Netravilai: *J. Solid Mech. Mater. Eng.*, **4**, 11 (2010), 1605-1614.
- 9) B. Ren, K. Goda & J. Noda: *Compos. Struct.*, **94**, 12 (2012), 3457-3464.
- 10) 加藤木秀章, 島村佳伸, 東郷敬一郎, 藤井朋之: 日本複合材料学会誌, **37**, 6 (2011), 203-208.
- 11) 加藤木秀章, 島村佳伸, 東郷敬一郎, 藤井朋之, 竹村兼一: 日本複合材料学会誌, **39**, 1 (2012), 24-36.
- 12) S. Kobayashi: *J. Solid Mech. Mater. Eng.*, **7**, 2 (2013), 317-323.
- 13) 加藤木秀章, 植松和徳, 島村佳伸, 東郷敬一郎, 藤井朋之, 竹村兼一: 日本複合材料学会誌, **41**, 1 (2015), 25-32.
- 14) 田村友也, 野田淳二, 合田公一: 第 38 回複合材料シンポジウム講演要旨集 (2013), pp. 77-78.
- 15) M.A. Meyers, P. Chen, A.Y. Lin & Y. Seki: *Prog. Mater. Sci.*, **53**, 1 (2008), 1-206.
- 16) X. Li, L.G. Tabil & S. Panigrahi: *J. Polym. Environ.*, **15**, 1 (2007), 25-33.
- 17) 田辺克典, 松尾貴則, A. Gomes, 合田公一, 大木順司: 材料, **57**, 5 (2008), 454-460.
- 18) S.N. Zhurkov: *Int. J. Fract. Mech.*, **1**, 4 (1965), 311-323.