研究論文

マイクロドロップレット試験を用いた カーボン繊維強化耐熱高分子基複合材料の界面強度評価

佐藤 光桜^{*1}, 今井えりな^{*1}, 小 柳 潤^{*2}, 石田 雄一^{*3}, 小笠原俊夫^{*4}

(2016年7月13日受付)

Evaluation of Interfacial Strength of Carbon Fiber Reinforced Temperature Resistant Polymer Composites by Micro-Droplet Test

Mio SATO,^{*1} Erina IMAI,^{*1} Jun KOYANAGI,^{*2} Yuichi ISHIDA^{*3} and
Toshio OGASAWARA^{*4}

(Received July 13, 2016)

Abstract: This paper presents an evaluation method for the fiber/matrix interfacial strength. The interfacial strength is determined by comparing experimental data with numerical simulations. The micro-droplet test is conducted, and the fiber axial stress at the point of interface debonding is obtained. A numerical simulation is performed with ABAQUS using an axisymmetric finite element model. In the numerical simulation, an accurate value of the thermal residual stress based on the thermo-viscoelasticity and the damage to the resin around the blade-contacting point are considered to simulate the experimental phenomena ideally. In the thermal residual stress analysis, the actual thermal residual stress is calculated by considering the relaxation modulus and the time-temperature superposition principle for the resin. Damage initiation criteria for both dilatational and shear cases, based on continuum damage mechanics, is considered for the resin. Interfacial debonding is simulated by using a cohesive zone model, and the interfacial strength is determined as strength of the cohesive zone element when the fiber maximum stress by simulation corresponds to the experiments.

Key words: Interfacial strength, Continuum damage mechanics, Micro-droplet test, FEM, Cohesive zone model

1. 緒 言

ターボファンエンジンのインナーフレーム構造などの従来のチタン材料部分に耐熱高分子基複合材料を適用するべく、ポリイミド TriA-X を用いた耐熱複合材料が近年開発された^{1,2)}。複合材料の機械特性の一つである繊維/樹脂界面の機械的特性は複合材料の静的強度にはもちろんのこと^{3,4)}、その長期耐久性にも関係する⁵⁻⁷⁾ため、

この正確な評価は必要不可欠である。著者らのこれまでの取り組みを含め⁸⁻¹⁰⁾、様々な界面強度評価法が存在する。単繊維引き抜き試験¹¹⁻¹⁴⁾、単繊維押し込み試験¹⁵⁻¹⁸⁾、単繊維押し出し試験¹⁹⁻²¹⁾、フラグメンテーション試験^{14,22,23)}、マイクロドロップレット試験^{12,14,24-27)}、cruciform 試験^{28,29)}などが挙げられる。中でもマイクロドロップレット試験と単繊維引き抜き試験は、界面が周りの樹脂より強い場合でも界面破壊を発生させることがあ

^{*1} 東京理科大学大学院基礎工学研究科材料工学専攻 (125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1)

Graduate School of Tokyo University of Science

^{*2} 東京理科大学基礎工学部材料工学科

Department of Materials Science and Technology, Tokyo University of Science

^{*3} 宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

^{*4} 東京農工大学工学部機械システム工学科

Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

り、相対的に強い界面の強度測定にも適用できる場合がある。このことは次報にて詳しく述べることにし、ここでは詳細は割愛する。本研究はマイクロドロップレット試験^{30~35)}を適用する。マイクロドロップレット試験に関してはNishikawaら³⁰⁾が近年では最も本質的な成果を発表しており、特筆に値する。ブレード接触付近の樹脂破壊を初めて組み込んだ丁寧なモデリングがなされている。

界面強度を正確に評価するためには、まず界面を破壊する実験を行い、その結果を境界条件とした数値解析を行い、界面に生じている応力を評価する手順が望ましい。本研究では、新しく以下の点において発展させた数値解析を実施し、実験事実を忠実にシミュレートすることで界面強度を評価した。本解析ではまず任意の場所での樹脂の損傷を考慮し、例えば界面強度が極端に高い場合、樹脂損傷だけが進展して界面は破壊しないというシミュレーションを可能にした。次に、熱粘弾性を考慮した正確な熱応力を取り入れた。このことは本研究で用いるような耐熱高分子には必須事項であり、すなわち成形温度が高い場合、冷却途中で熱応力の一部は粘弾性応力緩和により減少していることを考慮している。本解析では線形粘弾性構成則とアレニウス型の温度-時間換算則を用いた。近年界面破壊の数値解析では主流となりつつある、混合モード破壊条件を考慮したcohesive zone modeling(CZM)を用いて界面破壊をシミュレートした。

ここでCZMに関して一点注記したい。CZMを界面破壊の数値シミュレーションに採用する際に、現実離れた極端な仮定が含まれていることがまれにある。例えば結合力要素(cohesive element)の力-分離則において、分離定義の相対変位が炭素繊維半径の10倍である等、物理的に合理的とみなせない値が設定されていることがある。例えばDCB試験のようにファイバブリッジングを再現している等のケースと異なり、界面のはく離の再現に「体積はないが繊維半径の10倍の距離まで結合力が作用する界面要素を設定する」というのは、著者らは受け入れがたい。また一方では、損傷以前における結合力の相対変位に対する勾配が非常に小さく、随分柔らかい界面相が存在してそれが極端に変形しているケース等もある。これらはすなわち実験と解析のある特定の物理量を整合させるべく、CZMの定数の一部を都合よく扱っていることが多い。本解析では、実際の想定を逸脱しすぎないよう考慮したいわゆる現実的な値を設定して界面強度の評価解析を行った。

Fig. 1 Tensile testing machine.

2. 実験

2.1 方法

炭素繊維(三菱レイヨンMR-50R)1本に溶媒を含むポリイミドTriA-X樹脂(JAXA)を塗布し、電気炉にて硬化させた。室温から50°Cまで2.5°C/minで上昇、このまま30分保持、その後は5°C/minで50°C上昇させその温度で30分保持する、という操作を300°Cまで繰り返して行い、続けて300°Cから370°Cまで7°C/minで上昇、370°Cで60分保持し完全に硬化させ、しかる後60分かけて常温に冷却し、供試体とした。

引張試験機((株)白崎製作所)を用いて引張試験および観察を行った。引張試験機をFig.1に示す。Cylinderの先にコの字の試験片を取り付け、樹脂玉を両側からブレードで挟み、Fig.1の矢印の方向に荷重を荷重速度6 mm/sで与えた。このとき、ブレードは炭素繊維から $2 \pm 1 \mu\text{m}$ 離れていた。樹脂玉が剥がれた際の界面にかかる荷重をload cellで測定した。また、樹脂玉が繊維から剥がれる様子は光学顕微鏡下で観察し、樹脂玉の寸法は光学顕微鏡のスケールを用いて測定した。

2.2 実験結果

Fig.2にマイクロドロップレット試験前後の供試体の光学顕微鏡写真(a~c)および荷重-時間図(d)を示す。試験で対象とした樹脂玉は丸で囲ったものである。樹脂玉の寸法は長径が $43 \mu\text{m}$ 、短径が $25 \mu\text{m}$ であった。Fig.2(a), (b)の丸で囲った樹脂玉に着目すると、試験前と試験後では炭素繊維に付着していた樹脂玉の位置が異なっており、試験が狙い通り行われていることが確認できる。また、(c)の写真に着目すると、樹脂玉がわずかに損傷していることがわかる。Fig.2(d)に示されるピークが炭素

Fig. 2 Optical microscope image of micro-droplet experiment and the result. (a) Before experiment. (b) After experiment. (c) Magnified view of (b). (d) Relationship between load and time during test.

繊維から樹脂玉が剥がれた瞬間を示しており、その荷重は 0.056 N であった。ピーク後も荷重が残っているのは次の障害物に当たって樹脂玉の移動が妨げられたことによるものである。この実験で得られたピーク時の繊維荷重を数値解析の境界条件とし、実験と解析を比較することで繊維/樹脂間の界面強度を求める。

3. 解析

3.1 解析モデル概要

Fig. 2 の写真を基に、以下の Fig. 3 に示す軸対称モデルを作成した。繊維半径は $3\mu\text{m}$ 、樹脂玉長径は $43\mu\text{m}$ 、短径は $25\mu\text{m}$ とした。本数値解析には汎用有限要素解析ソフト ABAQUS 6.14 を使用する。六節点軸対称二次要素を用い、節点数は約 3,200、要素数は約 1,500 である。モデルの繊維、樹脂、ブレードに設定した材料特性を以下の Table 1 に示す。ここで、計算コスト削減のためブレードは実寸より小さいモデルを用いたため、実際より高い弾性率を設定してブレードの変形量を少なくした。樹脂と繊維の間には結合力要素を導入した。ブレードは本来軸対称ではないが、軸対称モデルと三次元モデルで界面に作用する最大応力の値は大きく異なること³³⁾を注記しておく。また、実験上のブレードの先端形状は、

Fig. 3 Axisymmetric model.

微視的に観察すると鋭利なものではないため、解析モデルでは先端を丸めた形状に設計した。本解析では樹脂において、正確な熱応力の評価には粘弾性を、界面はく離シミュレーション時には弾塑性と連続体損傷力学を考慮する。これらの詳細については後述することとし、Table 1 にはその弾性成分のみ記す。

ここでは結合力要素について述べる。用いる結合力要素は混合モードを考慮した 2 直線の力-分離則が定義さ

Table 1 Mechanical properties.³⁰⁾

Fiber axial modulus	E_2	294 GPa
Fiber transverse modulus	E_1, E_3	14 GPa
Fiber axial Poisson's ratio	N_{12}	0.02
Fiber transverse Poisson's ratio	N_{13}	0.3
Fiber transverse Poisson's ratio	N_{23}	0.35
Fiber axial shear modulus	G_{12}, G_{23}	18 GPa
Fiber transverse shear modulus	G_{13}	5 GPa
Fiber axial thermal expansion coefficient	α_{22}	$1 \times 10^{-6} (\text{K}^{-1})$
Fiber transverse thermal expansion coefficient	α_{11}, α_{33}	$1 \times 10^{-5} (\text{K}^{-1})$
Matrix modulus	—	3 GPa
Matrix Poisson's ratio	—	0.34
Matrix thermal expansion coefficient	—	$2.5 \times 10^{-5} (\text{K}^{-1})$
The blade modulus	—	$1 \times 10^6 \text{ GPa}$

Fig. 4 Numerical results for S12 stress distribution.

れている¹⁰⁾。ただし本研究では純粋せん断強度と純粋引っ張り強度、ならびにそれらの破壊じん性値はそれぞれ同一とした。つまりモード I とモード II で強度・じん性を同じ値とした。本研究では接点力が消失するときの接点の相対変位（すなわち完全分離を定義する変位）を $0.3 \mu\text{m}$ で固定した⁸⁾。従って、結合力要素の最大応力を変化させると、これに伴ってじん性も線形に変化する。結合力要素の最大応力を変化させて、界面はく離時の繊維応力が実験と整合することを狙って解析を繰り返し実施する。

3.2 熱応力解析

本試験片は 370°C で硬化させるため、常温との温度差は大きく、これに付随して発生する熱応力は無視できない値であると考えられる。一方で、線膨張係数差と温度差からなる線形弾性 FEM による熱応力は値が大きすぎ、場合によっては熱応力で界面が破壊するという結果にもなりかねない。しかし実際には樹脂の粘弾性特性により界面の熱応力は時間とともに緩和し、これは特に温

度が高いときは緩和速度も速いため、線形弾性 FEM で得られる値よりは熱応力は小さくなっているはずである。本研究では、樹脂のみのクーボン試験片を用いて応力緩和試験を行い、下式に示される緩和弾性率を求めた³⁶⁾。

$$E(t) = \frac{E_0}{\left(1 + \left(\frac{t}{\tau_c}\right)^n\right)} \quad (1)$$

ここで、 E_0 は初期弾性率、 τ_c は緩和時間、 n はべき乗則である。応力緩和試験より得られた各定数はそれぞれ、 $\tau_c = 1.0 \times 10^7 \text{ s}$ 、 $n = 0.34$ であった。試験とパラメータフィッティングの詳細は本論文では割愛する。

次に温度が高いと緩和時間が短くなる（応力緩和が速くなる）ことを記述するために、本研究では下記のアレニウス型の温度時間換算則を適用する³⁶⁾。

$$\log \alpha = \frac{\Delta H}{2.303R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad (2)$$

Fig. 5 The constitutive law for resin and the damage initiation criteria. (a) Constitutive law at uniaxial loading. (b) Hydrostatic pressure damage initiation criterion. (c) Shear damage initiation criterion.

α は時間の加速率, ΔH は活性化エネルギー, R は気体定数, T_R は参照温度, T は現在の温度である. 動的粘弾性 (DMA) 試験を樹脂のクーポン試験片に対して実施し, マスターカーブを作成し, 続いて上式に従ってアレニウスプロットを作成し, その傾きから活性化エネルギー $\Delta H = 160 \text{ kJ/mol} \cdot \text{K}$ を得た. 時間の加速率 α は次式にて換算され, これを (4) 式の履歴を考慮した応力ひずみ関係式に代入することで, 温度履歴を考慮した試験片の熱残留応力を求めることができる. ここで, $\xi(t)$ は換算時間, T は温度, $\tau(t)$ はせん断応力, E は緩和弾性率で式 (1) を示し, $\dot{\gamma}$ はひずみの時間微分である.

$$\xi(t) = \int_0^t \frac{ds}{\alpha(T(s))} \quad (3)$$

$$\tau(t) = \int_0^t E(\xi(t) - \xi(s)) \dot{\gamma}(s) ds \quad (4)$$

本研究では, 370°C に熱した試験片を室温 (30°C) まで 3,600 s で冷却したと仮定し, 上記の熱粘弾性を考慮した熱応力解析を行った. Fig. 4 に樹脂に熱粘弾性を考慮した場合と弾性を仮定した場合の S12 の応力分布を示す. 熱粘弾性を考慮することで熱応力が約 50 MPa (約 4 割) 緩和されて減少しており, 樹脂の熱粘弾性を考慮することが重要であることがわかる. この樹脂の熱応力がその付近の界面の熱応力と等価であることを注記しておく.

3.3 損傷解析³⁷⁾

界面強度が相対的に高い場合, ブレードが樹脂に当たったときに樹脂が局所的に損傷するか, もしくは界面がはく離せず樹脂のみが破壊することが想定される. 本研究では樹脂の損傷を考慮することで, より現実的なモデリングを狙う. 樹脂は弾塑性体と考えて Fig. 5(a) のような応力-ひずみ関係を設定した. 樹脂のみのクーポン試験片を用いて引っ張り試験を行い, これを参考にして応力ひずみ関係を図のように設定した. 損傷の発生は相

当塑性ひずみの値を用いて定義する. 本研究では 2 種類の損傷を考慮する. 一つは静水圧応力によるボイド発生に起因するもの (Fig. 5(b)), もう一つはせん断応力による損傷の発生 (Fig. 5(c)) である. 静水圧応力による損傷発生基準は応力三軸度 ((5) 式) の関数として, せん断損傷発生基準はせん断応力パラメータ ((6) 式) の関数として定義する.

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \quad (5)$$

$$\theta = \frac{\sigma_{eq}}{\tau_{max}} \quad (6)$$

ここで, (5) 式の σ_m は静水圧応力, σ_{eq} は相当応力, (6) 式の τ_{max} は最大せん断応力である.

損傷発生基準を満たすと, 損傷はその変数を d とし式 (7) に従って発展する. ここで, $\bar{\epsilon}_f^I$ は $d=1$ まで発展したときの相当塑性ひずみである. 損傷は $(1-d)$ を応力に積することで表現される. 損傷の完了 (すなわち $d=1$) は式 (8) に従って, エネルギー基準 (材料の破壊エネルギーに相当する) で最終破壊時の相当ひずみ $\bar{\epsilon}_f$ が定義される.

$$\dot{d} = \frac{\dot{\bar{\epsilon}}_f^I}{\bar{\epsilon}_f^I} \quad (7)$$

$$G_f = \frac{(\bar{\epsilon}_f - \bar{\epsilon}_{ini}) \sigma_{y0}}{2} \quad (8)$$

ここで, $\bar{\epsilon}_{ini}$, σ_{y0} はそれぞれ破壊基準に達したときの相当ひずみ, 相当応力である. 本研究では, 破壊エネルギー G_f を 1 N/mm^2 として解析を行った.

3.4 結果と考察

解析経過を以下の Fig. 6 に示す. コンターは S12 の応力分布を示す.

ブレードが樹脂に当たり (a), 樹脂の損傷が界面に向かうように進展し (b), 界面に挿入した結合力要素が破

Fig. 6 Numerical results for S12 stress distribution. (a) The resin damage occurs around edge-contacting point with shear mode. (b) The crack grows toward the interface. (c) After progressive debonding. (d) Magnified view of (b).

Fig. 7 Relationship between load and time during analysis.

壊されると界面のはく離が進展した(c). (d)は(b)の拡大図で、損傷が45°方向に進展していることを示している。この損傷が進展し、界面に至り、しかる後結合力要素の破壊に遷移して界面のはく離がシミュレートされている。

解析上の繊維応力を実験値と比較し、繊維応力が実験値と近い値となるように結合力要素の強度を5 MPaごとに変化させ、最も近い値となったときの結合力要素の強度を界面強度とした。その結果を以下のFig. 7に示す。Fig. 7の解析値は結合力要素の強度を130 MPaと設定したときの荷重-時間図である。これより、Fig. 2(d)と比較すると繊維荷重のピークは実験値と解析値で良い一致を示し、Fig. 1で着目した樹脂玉の界面強度は130 MPaであることがわかった。なお、極端に強い界面強度設定して解析を実施する場合、界面のはく離せず樹脂内の破壊が伝播して、樹脂玉が破壊し、繊維荷重はなくなる。これは界面強度が高い場合はマイクロドロップ試験では界面をはく離させることができないことを意味しており、現実的なシミュレーションが実施できていると考えられる。

また、参考として見かけの界面強度（繊維荷重をはく

離面積で除した値：式(9)）と比較する。

$$\tau_{app} = \frac{F_{max}}{\pi d_f L_{em}} \quad (9)$$

ここで、 τ_{app} は見かけの界面強度、 F_{max} はピーク荷重、 d_f は繊維直径、 L_{em} は樹脂玉長径である。式(9)を用いて算出された見かけの界面強度は69 MPaであった。これより、解析で得られた界面強度は式(9)で得られる値より高いことがわかる。実際はブレード付近の界面応力が高く、そこからはく離が発生・進展するが、このときの界面全体のせん断応力の平均値が69 MPaということを示し、式(9)で得られる値を盲信することの危険性を示している。さらに述べれば実際は熱応力の考慮もすべきであるし、場合によっては本研究のように樹脂の損傷も考慮すべきである。

4. 結 論

本研究では、繊維/樹脂間の界面強度を正確に評価するために、界面を破壊する実験およびその結果を境界条件とした数値解析を行った。実験はマイクロドロップ試験を適用し、繊維/樹脂間の界面のはく離した際の繊維荷重を取得した。数値解析では、樹脂の熱粘弾性を考慮した正確な熱応力、任意の場所での樹脂の損傷を取り入れた。界面破壊は混合モード破壊条件を考慮したCZMを用いてシミュレートした。解析上の繊維応力と実験値を比較し、それらが一致したときの結合力要素の強度を界面強度とした。本研究で着目した繊維/樹脂間の界面強度は数値解析の結果より、130 MPaであることがわかった。

本研究は戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)革新的構造材料の助成を受けて遂行された。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) M. Miyauchi, Y. Ishida, T. Ogasawara & R. Yokota : *Polymer Journal*, **44** (2012), 959-965.
- 2) M. Miyauchi, Y. Ishida, T. Ogasawara & R. Yokota : *Polymer Journal*, **45** (2013), 594-600.
- 3) J. Koyanagi, M. Kotani, H. Hatta & H. Kawada : *J. Compos. Mater.*, **43** (2009), 1901-1914.
- 4) J. Koyanagi, Y. Sato, T. Sasayama, T. Okabe & S. Yoneyama : *Composites Part A*, **56** (2014), 136-142.
- 5) J. Koyanagi, S. Yoneyama, K. Eri & P.D. Shah : *Compos. Struct.*, **92** (2010), 150-154.
- 6) J. Koyanagi, F. Ogawa, H. Kawada & H. Hatta : *J. Compos. Mater.*, **41** (2007), 3007-3026.
- 7) J. Koyanagi, G. Kiyota, T. Kamiya & H. Kawada : *Adv. Compos. Mater.*, **13**, 3-4 (2004), 199-213.
- 8) J. Koyanagi, S. Ogihara, H. Nakatani, T. Okabe & S. Yoneyama : *Adv. Compos. Mater.*, **23** (2014), 551-570.
- 9) J. Koyanagi, H. Nakatani & S. Ogihara : *Composites Part A*, **43** (2012), 1819-1827.
- 10) J. Koyanagi, P.D. Shah, S. Kimura, S.K. Ha & H. Kawada : *J. Solid Mech. Mater. Eng.*, **3** (2009), 796-806.
- 11) L.J. Broutman : *Interfaces in Composites*, ASTM STP 452 (1969), pp. 27-41.
- 12) L. Yang & J.L. Thomason : *Composites Part A*, **41** (2010), 1077-1083.
- 13) T. Tsuda, T. Ogasawara, F. Deng & N. Takeda : *Compos. Sci. Technol.*, **71** (2011), 1295-1300.
- 14) N. Graupner, J. Grossler, G. Ziegmann & J. Mussig : *Composites Part A*, **63** (2014), 133-148.
- 15) J.F. Mandell, J.H. Chen & F.J. McGarry : *Int. J. Adhes. Adhes.*, **1** (1980), 40-44.
- 16) D.B. Marshall & W.C. Oliver : *J. Am. Ceram. Soc.*, **70**, 8 (1987), 542-548.
- 17) M. Rodriguez, J. Molina-Aldareguía, C. González & J. LLorca : *Compos. Sci. Technol.*, **72**, 15 (2012), 1924-1932.
- 18) C. Medina, J. Molina-Aldareguía, C. González, M. Melendrez, P. Flores & J. LLorca : *J. Compos. Mater.*, **50**, 12 (2016), 1651-1659.
- 19) D.K. Shetty : *J. Am. Ceram. Soc.*, **71**, 2 (1988), 107-109.
- 20) M. Rollin, S. Jouannigot, J. Lamon & R. Pailler : *Compos. Sci. Technol.*, **69** (2009), 1442-1446.
- 21) A. Godara, L. Gorbatikh, G. Kalinka, A. Warrier, O. Rochez, L. Mezzo, F. Luizi, A.W. van Vuure, S. V. Lomov & I. Verpoest : *Compos. Sci. Technol.*, **70** (2010), 1346-1352.
- 22) A. Kelly & W.R. Tyson : *J. Mech. Phys. Solids*, **13** (1965), 329-350.
- 23) A. Awal, G. Cescutti, S.B. Ghosh & J. Müssig : *Composites Part A*, **42**, 1 (2011), 50-56.
- 24) B. Miller, P. Muri & L. Rebenfeld : *Compos. Sci. Technol.*, **28**, 1 (1987), 17-32.
- 25) X. Gao, R. Jensen, W. Li, J. Deitzel, S.H. McKnight & J. Gillespie : *J. Compos. Mater.*, **42**, 5 (2008), 513-534.
- 26) X. Gao, R.E. Jensen, S.H. McKnight & J.W. Gillespie Jr. : *Composites Part A*, **42**, 11 (2011), 1738-1747.
- 27) L. Yang, J.L. Thomason & W.Z. Zhu : *Composites Part A*, **42**, 10 (2011), 1293-1300.
- 28) S. Ogihara & J. Koyanagi : *Compos. Sci. Technol.*, **70** (2010), 143-150.
- 29) S. Ogihara, Y. Sakamoto & J. Koyanagi : *J. Solid Mech. Mater. Eng.*, **3** (2009), 1071-1080.
- 30) M. Nishikawa, T. Okabe, K. Hemmi & N. Takeda : *Int. J. Solids Struct.*, **45**, 14-15 (2008), 4098-4113.
- 31) S. Kang, D. Lee & N. Choi : *Compos. Sci. Technol.*, **69**, 2 (2009), 245-251.
- 32) Z. Liu, X. Yuan, A.J. Beck & F.R. Jones : *Compos. Sci. Technol.*, **71**, 13 (2011), 1529-1534.
- 33) G. Pandey, C.H. Kareliya & R.P. Singh : *J. Compos. Mater.*, **46**, 3 (2012), 275-284.
- 34) M.A. Minnicino & M.H. Santare : *Compos. Sci. Technol.*, **72**, 16 (2012), 2024-2031.
- 35) S. Sockalingam, M. Dey, J.W. Gillespie & M. Keefe : *Composites Part A*, **56** (2014), 239-247.
- 36) J. Koyanagi, S. Yoneyama, A. Nemoto & J.D.D. Melo : *Compos. Sci. Technol.*, **70** (2010), 1395-1400.
- 37) Abaqus Analysis User's Manual.