成形温度における CF/PA6 の引張特性評価[†]

田中 和人* 曾根 真純** 片山 傳生*

Evaluation of Tensile Property of CF/PA6 at Molding Temperature

by

Kazuto TANAKA*, Masumi SONE** and Tsutao KATAYAMA*

Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics (CFRTP), which have high specific strength and specific rigidity, superior productivity and recyclability, have been expected to reduce the weight of cars. Since the thermoplastics resin has higher viscosity than thermosetting resin during molding process, the deformation characteristic of CFRTP in the molten state depends on the material properties of the resin. It is necessary to clarify the mechanical properties of CFRTP under high temperature that is higher than melting point of the matrix resin. While bias-extension test using temperature controlled chamber has been applied for the evaluation of mechanical properties of CFRTP under high temperature, strain measurement is one of the important issues to be overcome. In this study, tensile test of CFRTP under high temperature over melting point of the matrix resin by using far infrared ray heaters to heat only the gauge of specimen has been developed. This method allows us to observe the specimen surface and to measure strain of the specimen. Mechanical properties of CF/PA6 have been evaluated under high temperature by this method. The tensile strength and tensile modulus of CF/PA6 decreased as the temperature increased, and even under the high temperature, which is higher than the melting point of the matrix resin, the effect of the viscosity of the matrix resin should be taken into account. Under the relatively higher temperature condition (e. g. 280°C), smaller shear deformation occurred and larger shear locking angle of CF/PA6 was obtained due to lower viscosity of matrix resin. On the other hand, under the relatively lower temperature condition (e. g. 240°C) shear locking angle of CF/PA6 became smaller, i. e. larger shear deformation after the stretching between fiber bundles occurred due to higher viscosity of the matrix resin.

Key words:

CFRTP, CF/PA6, Tensile property, Molding temperature, High temperature, Shear locking angle, Deformation characteristic

1 緒 言

近年、地球規模での環境問題の深刻化に伴い、CO₂の削減が求められており、CO₂排出量の多くを占める自動車¹⁾の燃費改善のため、車両の軽量化が必要とされている²⁾。熱可塑性樹脂をマトリックスに用いた CFRTP (Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics) は高比強度、高比剛性を有し、生産性、リサイクル性に優れるため、自動車の軽量化に貢献できるとして、その利用が期待されている³⁾。

熱可塑性樹脂は、熱硬化性樹脂と比べて成形時の粘度が高いため、樹脂熔融状態での CFRTP の変形特性は樹脂の材料特性に大きく依存すると考えられる。そのため、CFRTP の成形解析には、成形温度における CFRTP の材料定数が必要となる。樹脂を含浸させた CFRTP シートの高温環境下における材料特性評価には、Bias-extension 試験が行われており、その多くに恒温槽が用いられている⁴⁾。恒温槽を用いた Bias-extension 試験の場合、樹脂が熔融す

る温度以上である成形温度付近の高温下では、試験片表面にひずみゲージを貼り付けひずみ測定を行うことは難しく、試験片評点間のひずみ測定が困難である⁵⁾。

これまでは、繊維束の交点をピンジョイントとし、繊維束間にはすべりがなく、繊維束の引張方向の変形は無いものと仮定し、試験機のクロスヘッド変位から変形領域と非変形領域のひずみと繊維束のせん断角度を算出することで、CFRTP のせん断応力とせん断ひずみの関係、せん断応力とせん断角度の関係を求める方法が用いられている⁶⁾。しかし、繊維束すべりが生じるため bias-extension 試験ではせん断ロッキング以降は、正確なせん断特性が計測できないことがあると報告されている⁷⁾。そのため、せん断ロッキング以降も含めて試験片のひずみ測定が可能な高温環境下での Bias-extension 試験方法の開発が必要とされてきた。また、織物繊維基材を用いた CFRTP では、せん断変形が拘束されるせん断ロッキ

[†] 原稿受理 平成29年4月2日 Received Apr. 2, 2017 ©2018 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 同志社大学 生命医科学部医工学科 〒610-0394 京田辺市多々羅都谷

Department of Biomedical Engineering, Doshisha University, Tataramiyakodani, Kyotanabe, 610-0394.

** 学生会員 同志社大学大学院 〒610-0394 京田辺市多々羅都谷

Department of Biomedical Engineering, Doshisha University, Tataramiyakodani, Kyotanabe, 610-0394.

ング以降にせん断剛性が急激に上昇することが報告されており、このせん断ロッキングによるせん断剛性の増加は成形時の課題でもあるしわの発生につながるため、その挙動の把握が重要である⁸⁾。

そこで本研究では、遠赤外線セラミックヒータを用いて、試験片ゲージ部のみを局所的に加熱することで、成形温度に相当する高温環境下において直接試験片を観察しながら変形特性評価を行うことが可能なFRTP高温環境下引張試験システムを開発した。さらにこの手法を用いて、高温環境下におけるBias-extension引張試験を行い、成形温度付近も含めた高温下でのCF/PA6の引張特性を明らかにした。

2 供試材および実験方法

2・1 供試材

強化材には炭素繊維平織物ドライファブリック（パイロフィル織物 クロス，目付 200 g/m²，積層構成[+45°/-45°]，三菱レイヨン）を用いた。マトリックスには，ポリアミド6樹脂（PA6，1013B，融点 228.8℃，宇都興産）を目付 50 g/m²の不織布（クラレ，試作品）に加工したものをを用いた。

2・2 炭素繊維平織物ドライファブリック Bias-extension 試験

強化材に用いた炭素繊維平織物ドライファブリックを長さ 110 mm × 幅 20 mm に切り出したものを 9 枚積層（後述する積層板の成形品と同枚数）し，長手方向両端の 50 mm に不飽和ポリエステル樹脂を含浸・硬化させ，ドライファブリック試験片を作製した。ドライファブリックの Bias-extension 試験には小型卓上試験機（EZgraph，島津製作所）を用い，引張変位速度を 8.3×10^{-5} m/s（5 mm/min）として試験を行った。試験の様子を Fig. 1 に示す。引張試験中の試験片の表面はデジタルマイクロスコープ（VHX-5000，キーエンス）を用いて観察し，評価間ののびと Fig. 2 に示すせん断角度 θ を測定した。

2・3 PA6 熔融粘度測定

マトリックスに用いた PA6 の熔融粘度を明らかにするため，定試験力押出形細管式レオメータ フローテスタ（CFT-500EX，島津製作所）を用い，240℃，260℃，280℃の条件で，熔融粘度を測定した。

2・4 CF/PA6 積層板成形方法

CF/PA6 積層板は，繊維体積含有量が V_f: 50%，積層板構成が，[+45°/-45°]_{4.5s}，試験片厚が 2mm となるように炭素繊維平織物ドライファブリックとポリアミド 6 樹脂不織布を交互に積層し，成形温度を 280℃，成形圧力を 2 MPa，保持時間を 6 分として，ハイブリッド成形機（佐藤鉄工）を用いてプレス成形により作製した。試験片内部は高分解能 3DX 線頭微鏡（Nano3DX，リガク）を用いて観察したところ，ボイドは観察されず，良好な含浸状態を示していた。なお，試験片は長さ 210 mm × 幅 20 mm となるように積層板から切り出し，試験片の両端表裏に長さ 50 mm × 幅 20 mm × 厚さ 1 mm のアルミニウム製の

タブを，エポキシ系接着剤により接着し，引張試験に供した。

2・5 FRTP 高温環境下引張試験システム

本研究で開発した成形温度下での FRTP の引張試験システム（FRTP 高温環境下引張試験システムと称する）の外観図を Fig. 3 に示す。万能精密試験機（オートグラフ AG-100 kN，島津製作所）に取り付けられた試験片の前後に，Fig. 4（正面からの模式図と試験片長手方向から見た模式図）に示すように，試験中の試験片表面を正面から観察可能なように，45°ずれた位置に遠赤外線セラミックヒータ（長さ 120 mm × 幅 60 mm，INFRACERAM，日本ガイシ（株））を設置した。なお，試験片表面は，2.2 節と同様に正面に設置したデジタルマイクロスコープにより観察した。遠赤外線セラミックヒータと試験片との距離は 100 mm であり，厚み 1 mm のステンレス製の覆いを

Fig. 1 Overview of tensile test for carbon fiber dry fabric.

Fig. 2 Schematic drawing of deformation of plain fabric.

Fig. 3 Overview of the tensile test setup at molding temperature.

付け, 試験片ゲージ部近傍を局所的に加熱した. さらに, 試験機のチャック部はアルミニウム製の遮熱材で覆い, 試験片チャック部の温度上昇を抑制した.

2・6 試験片の温度分布測定

アルミニウム遮熱材が試験片チャック部の温度上昇に及ぼす影響を明らかにするために, 遮熱材を設置せずに

Fig. 4 Schematic drawing of tensile test setup of heaters and specimen.

Fig. 5 Temperature measured point by thermocouples.

加熱を行った際と, アルミ遮熱材を設置し加熱した際の試験片チャック部の温度履歴を測定した. ここでは, Fig. 5 に示すようにチャック部の端から 1 mm の位置の温度を試験片の両端および表裏の 4 箇所において, 測定した. 温度測定には K 型熱電対およびポータブルマルチログガー (ZR-RX40, OMRON) を用い, 試験片評点間内の温度を本研究で用いる最高試験温度である 280 °C (ヒータ設定温度 800 °C) に設定し, 試験片を加熱してから 25 分間の CF/PA6 積層板表面の温度履歴を測定した.

成形温度下における試験片表面の温度分布を明らかにするために, 試験片評点間内の温度が本研究で用いる最高試験温度である 280 °C とした時の試験片表面温度を赤外線サーモグラフィ (TVS-500EX, 日本アビオニクス (株)) により測定した. 測定は 5 回行い, 評点間内の最高温度と最低温度の平均を算出した.

2・7 CF/PA6 積層板の引張試験

F RTP 高温環境下引張試験システムを用いて, 200 °C, 220 °C, 240 °C, 260 °C, 280 °C において, CF/PA6 の Bias-extension 試験を行った. ひずみ, せん断角度は 2・2 節と同様にデジタルマイクロ스코プの観察画像から評点間ののびとせん断角度を測定した. 試験後の破面は, 走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope, JSM-6390LT, 日本電子) を用いて観察した.

3 実験結果および考察

3・1 炭素繊維平織物ドライファブリック Bias-extension 試験

炭素繊維平織物ドライファブリックの Bias-extension 試験によって得られた応力-ひずみ線図を Fig. 6 に示す. 図中矢印で示した位置において, 応力-ひずみ曲線の傾きが減少した後, 増加するという現象が見られた. 炭素繊維平織物ドライファブリックの Bias-extension 試験では面内のせん断に対して繊維束同士の回転による変形から, ある角度に達すると炭素繊維束同士がぶつかり合うロッキングが起き, せん断剛性が増加することが報告されている⁹⁾. 本試験で見られた傾きの増加も炭素繊維束同士のロッキングによるものと考えられる.

Fig. 6 Stress-Strain curve of dry fabric.

(a) Specimen of dry fabric at the strain of 0.26

(b) Schematic drawing of deformation of dry fabric
Fig. 7 Specimen of dry fabric at the strain of 0.26 and schematic drawing of deformation of dry fabric.

Fig. 8 Temperature of specimen in the chucking area shown in Fig. 5.

本試験において、最大引張応力を示した後は、Fig. 7(a)で見られるように局所的な繊維束のすべりが見られた後、繊維の引き抜けが生じた。Fig. 7(b)に炭素繊維平織物ドライファブリックの変形の様子を模式図で示す。この繊維束のすべりは、繊維の端が固定されている試験片の両端の三角形の範囲(濃い灰色部)と、試験ゲージ中央部のロックしている繊維束(白色の部分)の境界で生じたものであり、その後は、試験片は荷重を伝達できず、引張応力は非常に低い値を示すため、本研究においては最大引張応力を示した時点破断と定義する。

3・2 試験片温度分布測定

Fig. 5に示した測定箇所4箇所のうち、チャック部にアルミニウム遮熱材を設置しない時に一番高い温度を示し

Fig. 9 Temperature distribution of CF/PA6 specimen at 280 °C.

Fig. 10 Maximum and minimum temperature of the surface of the specimen (N = 5, mean $\pm$ S. D.).

た箇所の、アルミニウム遮熱材を設置した場合と遮熱材を設置しない場合の温度履歴測定結果をFig. 8に示す。遮熱材を設置した場合遮熱材を設置しない場合のいずれも時間と共に温度が上昇し、1500秒後(25分後)にはチャック部に何も設置せずに加熱を行った際の試験片チャック部の最高温度は82.5°C、アルミ遮熱材を設置し加熱した際の試験片チャック部の最高温度は45.5°Cに達した。この間、試験片表面温度は600秒後(10分後)に最高温度である280°Cに達した後、ほぼ一定の値を示している。なお、本研究での実際の高温環境下での引張試験では、準備から試験終了まで最長でも1200秒間(20分間)で終了することから、これ以上の温度にはならない。アルミ遮熱材を用いることにより、PA6の荷重たわみ温度(1.8 MPa)である60°Cを下回ったため、チャック部での試験片の変形やチャック部でのすべりは発生しないと考えられる。

サーモグラフィにより測定した試験片表面の温度分布図をFig. 9に示す。評点間30mmの範囲における最高温度と最低温度の測定結果をFig. 10に示す。これより、本試験では280°Cという目標温度に対して $+7.1 \pm 0.7$ °C(平均 $\pm$ 標準偏差、以下も同様)、 -5.2 ± 1.6 °C以内でのBias-extension試験が可能である。

3・3 CF/PA6 積層板の引張試験

CF/PA6 積層板試験片の200°Cと220°CにおけるBias-extension試験により得られた応力-ひずみ線図をFig. 11に、引張強度と弾性率をFigs. 12, 13に示す。さら

に, 240 °C, 260 °C, 280 °C での Bias-extension 試験により得られた応力-ひずみ線図を Fig. 14 に, 引張強度と弾性率を Figs. 15, 16 に示す. なお, ここには Fig. 6 に示した炭素繊維平織物ドライファブリック Bias-extension 試験の結果もあわせて示している. 220 °C 以下に比べ, 240 °C 以上の引張強度, 弾性率は極端に低い値を示した. PA6 の融点は 228.8 °C であり, 融点以上において, PA6 樹脂が熔融状態となり, 変形抵抗が大幅に低下したものと考えられる. 炭素繊維平織物ドライファブリック Bias-extension 試験で見られたロッキング現象と同様に, 240 °C, 260 °C, 280 °C における CF/PA6 積層板の応力-ひずみ関係においても, それぞれ矢印で示す位置で応

力増加が観察された. Fig. 11 に示した 200 °C, 220 °C における CF/PA6 積層板の Bias-extension 試験においては, ロッキングによる明らかな応力増加が見られなかったことから, PA6 の融点を超える 240 °C 以上では樹脂が熔融状態となり, 繊維を拘束する力が小さくなり, 炭素繊維平織物ドライファブリックの変形と同様のロッキングが起こり, その後変形抵抗が大きくなったと考えられる.

280 °C の Bias-extension 試験により得られた応力-ひずみ線図と, 変形前, ロッキング時, 破断時の試験片表面

Fig. 11 Stress-Strain curve of CF/PA6 at 200 °C and 220 °C.

Fig. 12 Tensile strength of CF/PA6 at 200 °C and 220 °C (N = 5, mean $\pm$ S. D.).

Fig. 13 Tensile modulus of CF/PA6 at 200 °C and 220 °C (N = 5, mean $\pm$ S. D.).

Fig. 14 Stress-Strain curve of CF/PA6 at 240 °C, 260 °C and 280 °C, and dry fabric.

Fig. 15 Tensile strength of CF/PA6 at 240 °C, 260 °C and, 280 °C, and dry fabric (N = 5, mean $\pm$ S. D.).

Fig. 16 Tensile modulus of CF/PA6 at 240 °C, 260 °C, and 280 °C, and dry fabric (N = 5, mean $\pm$ S. D.).

の様子を Fig. 17 に示す。試験開始から破断に至るまで、変形とともにせん断角度が小さくなっていくことがわかる。

試験片温度条件が 200 °C と 260 °C の Bias-extension 試験後の試験片マクロ観察結果を Fig. 18 に示す。PA6 の融点以下である 200 °C においては試験片ゲージ部で破断が生じ、220 °C の条件でも同様の破壊形態を示した。一方、融点以上である 260 °C においては Fig. 18 (b) に示す試験片のように、Fig. 7 に示したようなドライファブリック Bias-extension 試験と同様の試験片端部での局所的な繊維束のすべりが見られた後、繊維の引き抜けが生じた。なお、240 °C と 280 °C においても同様の破壊形態を示した。

試験片温度条件が 200 °C、260 °C における試験片の破面の SEM 観察結果を Fig. 19 に示す。200 °C においては破壊が生じたと見られる樹脂が炭素繊維に付着していることから、マトリックス樹脂や繊維樹脂界面で破壊が生じたものと考えられる。一方、260 °C の条件下では、熔融した樹脂が繊維表面を覆っているような破面であり、破断した樹脂は見られず、融解した樹脂が繊維とともに流動し、試験後冷却により固化したと考えられる。

Fig. 17 Surface of the specimen in each stage at 280°C.

Fig. 18 Observation of the specimen after tensile test at 200 °C, 260 °C.

本試験での引張変位速度は 8.3×10^{-5} m/s (5 mm/min) であり、積層板内の PA6 樹脂も同様の速度で変形が生じているものと仮定して、熔融粘度測定結果から、測定した各温度の押し出し速度 8.3×10^{-5} m/s (5 mm/min) における PA6 の熔融粘度を抽出して Fig. 20 に示す。温度の上昇とともに、熔融粘度が大きく低下した。Figs. 15, 16 に示したように、積層板においては高温になるにつれ引張強度と弾性率は低い値をとった。Fig. 20 に示したように 240 °C から 280 °C までの PA6 の成形温度において、PA6 の熔融粘度が大きく低下するためにこのようになったものと考えられる。一方、ドライファブリック Bias-extension 試験の結果と比較すると、融点を大きく超えた 280 °C においても弾性率は大きい値を示した。したがって、CF/PA6 の積層板においては、樹脂を含浸させる前の織物繊維基材の変形特性だけでなく、樹脂の材料特性の考慮が必要であるため、積層板として高温環境下で

Fig. 19 SEM observations of the fracture surface at 200 °C, 260 °C.

Fig. 20 Melt viscosity of PA6.

の材料特性を評価する必要があるといえる。

3・4 Bias-extension 試験におけるロッキング角度

240 °C, 260 °C, 280 °C における CF/PA6 積層板の Bias-extension 試験, ドライファブリックの Bias-extension 試験により得られた応力-せん断角度線図を Fig. 21 に示す。線図の傾きが一度小さくなり, 再び大きくなった時である変曲点を, 応力が増加しはじめる点, すなわち, せん断ロッキング角度と定義し, 算出した結果を Fig. 22 に示す。ドライファブリックが最も大きいせん断ロッキング角度を示し, 280 °C, 260 °C, 240 °C の順にせん断ロッキング角度は小さい値を示した。つまり, 240 °C, 260 °C, 280 °C, ドライファブリックの順にせん断変形が小さい, すなわち, ドライファブリックが一番せん断変形をおこしづらく, 温度が高いほどせん断ロッキング角度が大きい, つまり, せん断変形が小さくなるという結果になった。

成形温度における CFRTP の Bias-extension 試験においては引張荷重軸方向への繊維束のすべりが生じると考えられており⁹⁾, 本研究での温度が高いほどせん断変形が小さくなるという現象は Fig. 23 に示すように説明できる。Fig. 23 (a) に示すように 280 °C などの高温下では, Fig. 20 に示したように PA6 樹脂の熔融粘度が低く, 繊維束は面内方向へ回転し, せん断ロッキングに達する。ドライファブリック Bias-extension 試験においては繊維間に樹脂が存在していないため, 繊維束が樹脂から受ける面内方向への回転への抵抗が無く, 回転がすぐに生じるため大きなせん断変形を伴わずせん断ロッキング角度は大きくなったと考えられる。一方, Fig. 23 (b) に示すように, 240 °C などの温度が低い条件では, PA6 樹脂の熔融粘度が高いため, 繊維束が樹脂から受ける面内方向への回転への抵抗が大きく, 繊維の面内方向への回転がしにくい。そこで, 引張荷重軸方向への繊維束のすべりが生じ, これにより発生した繊維束間の隙間のため, 繊維の面内方向への回転が起こりやすくなる。そのため, 熔融粘度が低い場合に比べ, 大きなせん断変形が生じた後にロッキングに至るため, せん断ロッキング角度が小さくなると考えられる。

4 結 言

本研究では, 遠赤外線セラミックヒータを用いて, 試験片ゲージ部のみを局所的に加熱することで, 成形温度に相当する高温環境下において直接試験片を観察しながら変形特性評価を行うことが可能な FRTP 高温環境下引張試験システムを開発した。さらにこの手法を用いて, 高温環境下における Bias-extension 引張試験を行い, 成形温度付近も含めた高温下での CF/PA6 の引張特性を明らかにした。以下に得られた知見を示す。

- CFRTP の試験片ゲージ部を遠赤外線セラミックヒータにより, 局所的に加熱する手法により, 目標温度 280 °C に対して, 目標温度 $+7.1 \pm 0.7$ °C, -5.2 ± 1.6 °C 以内の範囲の高温下で引張試験が実

Fig. 21 Stress-Shear angle curve of CF/PA6 at 240 °C, 260 °C and 280 °C, and dry fabric.

Fig. 22 Shear locking angle of CF/PA6 at 240 °C, 260 °C and 280 °C, and dry fabric (N = 5, mean ± S. D.).

Fig. 23 Deformation types of bias-extension test at high temperature around melting point of the matrix resin.

- 現可能な FRTP 高温環境下引張試験システムを開発した。
2. PA6 樹脂の融点温度付近である 240 °C 以上の温度では CF/PA6 の引張強度，弾性率は 220 °C に比べ極端に低い値をとる。
 3. 280 °C における CF/PA6 の弾性率はドライファブリックに比べ，大きい値を示し，樹脂を含浸させる前の織物繊維基材の変形特性だけでなく，樹脂の材料特性の考慮が必要であるため，積層板として高温環境下での材料特性を評価する必要がある。
 4. せん断ロッキング角度は，240 °C，260 °C，280 °C，ドライファブリックの順に大きい値，つまり 240 °C，260 °C，280 °C，ドライファブリックの順にせん断変形が小さくなった。比較的溫度が低く PA6 樹脂の熔融粘度がある程度高い条件下では，繊維の面内への回転がしにくくなるために引張荷重軸方向へ繊維束がすべり，隙間が生じるため，その後繊維の面内方向への回転が起りやすくなる。そのため，熔融粘度が低い場合に比べ，大きなせん断変形が生じた後にロッキングに至るため，せん断ロッキング角度は小さくなると考えられる。
 - 8) J. Launay, G. Hivet, A. V. Duong and P. Boisse. "Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composite reinforcements", Composites science and technology, Vol.68, pp.506-515 (2008).
 - 9) P. Harrison, M. J. Clifford, and A. C. Long. "Shear characterisation of viscous woven textile composites: a comparison between picture frame and bias extension experiments", Composites Science and Technology, Vol.64, pp.1453-1465 (2004).

参 考 文 献

- 1) International Energy Agency, "CO₂ emissions from fuel combustion highlights 2014", pp.7-12 (2014).
- 2) J. Duflou, J. Moor, I. Verpoest and W. Dewulf, "Environmental impact analysis of composite use in car manufacturing", CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol.58, pp.9-12 (2009).
- 3) A. Jacob, "Car makers increase their use of composites", REINFORCED Plastics, Vol.48, No.2, pp.26-32 (2004).
- 4) Q. Chen, P. Boisse, C. H. Park, A. Saouab and J. Breard. "Intra/inter-ply shear behaviors of continuous fiber reinforced thermoplastic composites in thermoforming processes", Composite Structures Vol.93, No.7, pp.1692-1703 (2011).
- 5) H. Matsunaga, H. Nishida, S. Ikeda, I. Shimohara, T. Fujii, A. Matsuba and Y. Kouno. "Development of low-cost molding processing technology of CFRTP (1st Report)", Bulletin of the western Hiroshima prefecture industrial research institute, Vol.54, pp.1-4 (2011).
- 6) P. Wang, N. Hamila, P. Boisse, P. Chaudet and D. Lesueur. "Thermo - mechanical behavior of stretch - broken carbon fiber and thermoplastic resin composites during manufacturing", Polymer Composites, Vol.36, pp.694-703 (2015).
- 7) M. Nishi, T. Kaburagi, M. Kurose, T. Hirashima and T. Kurashiki. "Forming simulation of thermoplastic pre-impregnated textile reinforcement by finite element method", Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.80, No.820, pp.1-14 (2014).