研究論文

一方向 CFRP の面外引張強度に及ぼす試験片形状の影響

原 栄一^{*1}, 横関 智弘^{*2}, 八田 博志^{*3}, 石川 隆司^{*4}

(2008 年 2 月 22 日受付)

Effects of Specimen Geometry on Out-of-Plane Tensile Strength of Unidirectional CFRP Laminates

Eiichi HARA,^{*1} Tomohiro YOKOZEKI,^{*2} Hiroshi HATTA^{*3} and Takashi ISHIKAWA^{*4}

(Received February 22, 2008)

Reliable out-of-plane tensile test methods for adequate measurement of out-of-plane mechanical properties (e.g. strength) of laminated composites remain to be established. The present study focuses on the flatwise tension test using cylindrical column and spool column specimens for the measurement of out-of-plane tensile strength. Finite element analyses and experiments of unidirectional CFRP laminates were carried out in order to investigate the effect of specimen configuration on the out-of-plane tensile strength. A suitable guideline for evaluation of the out-of-plane strength was suggested based on the experimental and analytical results.

1. 緒 言

炭素繊維強化プラスチック (carbon fiber reinforced plastic: CFRP) は面内強度・剛性に優れるが³, 一般に強い異方性を示す。この異方性特性を評価するため, 各種の試験規格が定められており, 構造設計には標準化された試験方法を用いたデータが活用されている。これまで, 面外の引張特性は, 一方向強化材の面内 90° 方向と同等であると仮定して評価されてきたが, 繊維配列や層間樹脂層などの影響で両者は異なることが明らかになってきた。一方, 近年の CFRP の適用分野及び使用量の大幅な拡大に伴い, 板厚部材への適用も広がり, 板厚方向の材料特性を正確に取得することも強く求められるようになってきた。このような状況を背景に, 面外の引張特性の試験方法が ASTM (American Society for Testing and Materials) により最近規格化された¹⁾。しかし, こ

の規格は自由度が大きく, 試験をしてみると規格に合致する試験方法を採用しても得られる結果に大きな違いを生じると推定される。本研究では, CFRP の面外方向 (板厚方向) の引張強度を取得するための試験方法を数値解析と実験結果を基に検討した。

面外引張強度試験法は, 直接負荷法と間接負荷法の 2 種類に大別され^{2,3)}, いずれも ASTM により規格化されている^{1,4)}。

間接法は, 曲がり梁を供試体とする。この方法には,
1) 供試体の製造コストが高い
2) 適用部材から切り出した試験片では評価できない
3) 曲がり梁特有の残留応力が発生し, この影響を評価する必要がある

等問題点が多く, 本研究では検討対象外とした。

直接負荷試験法についてもいくつかの研究例がある⁵⁻⁸⁾。Abot ら⁵⁾ は, 板厚が 25 mm 以上の織物複合材に対して試験を実施した。また, Daniel ら⁶⁾ は 27 mm の織物複合材に対して試験を実施した。実用上はより薄い供試体での試験が求められる上に, 厚さが異なる場合には力学特性が変化する可能性もあり, Abot らや Daniel らの方法を標準試験法として採用するのは困難である。また, Mespoulet らは, 直方体供試体 (板厚 6 mm と 12 mm) と, 四角断面供試体の断面積を板厚中心部で減少させたドッグボーン供試体 (板厚 16 mm) を使用した面外

^{*1} 財団法人 航空宇宙技術振興財団 (981-3133 宮城県仙台市泉区泉中央 1-16-6)

^{*2} 東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻 (113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

^{*3} 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 宇宙構造材料工学研究系 (229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1)

^{*4} 宇宙航空研究開発機構航空プログラムグループ (182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1)

引張強度試験結果を報告している⁷⁾。ドッグボーン供試体では、接着部での応力集中が回避されているものの、提示された 1 種類の試験結果だけでは最適試験片形状は明らかではない。そのほか Lodeiro らも同様の試験を実施、報告している⁸⁾。

以上のような結果を集約し、ASTM では 2007 年に直接面外試験法 ASTM D 7291¹⁾ が規格化された。D 7291 は長繊維強化複合材料を供試材料とし、円柱またはスプール（くびれた円柱）を供試体形状としている。供試体は直径 20～28 mm（推奨直径 25 mm）板厚 2.5 mm 以上で、弾性率算出のための歪みゲージを接着する場合は厚さを 6 mm 以上と規定している。このような供試体を負荷治具（end tab）に接着し、面外方向に 0.1 mm/min の速度で引張負荷を与えて破断強度や弾性率を取得する。CFRP 積層板は、通常強い異方性を示し、直方体供試体を採用すると、試験片切断面と材料主軸の関係を考慮する必要がある。軸対称の円断面供試体を採用したことはこのような複雑化を避けるためである。この面外試験法は規格としての妥当性を有しながらも、幾つかの問題点が予想される。その一つとして、面外特性が同じ材料でも供試体形状（直径と板厚）が異なると取得される強度・弾性率が異なることが挙げられる。供試体の直径と板厚の割合が異なると、取得される強度の変化に影響することが想定される。

そこで本研究では、直接負荷方式の面外強度試験に関して、供試体形状が面外強度に与える影響を検討した。基本的な特性を取得するために、異方性の強い一方向強化材を対象とし、上記文献と比べて薄い 16 mm 以下の板厚の供試体を中心に解析・強度試験を実施し、比較検討を行った。面外強度を測定する場合、1) CFRP 部分で破断が起こる、2) CFRP 内では 1 軸応力状態に近い、3) 試験片内の応力の偏りを少なくすることが要求され、これらの条件を満足する試験法の探索を行った。

2. 実験方法

供試体は、東邦テナックス製 IM600/#133 のプリプレグから作製した繊維含有量 55% の一方向強化 CFRP である。マトリックスは 180℃ 硬化タイプの高靱性エポキシ樹脂で、1 ply のノミナル板厚は 0.145 mm である。試験片厚さの影響を確認するために、80 ply 積層した板（厚さ約 12 mm）と 120 ply 積層した板（厚さ約 17 mm）の 2 種類の供試体母板を製作した。

円柱及びスプールの 2 種類の供試体は直径 25 mm を共通とした。円柱供試体は厚さを 1, 2, 3, 4, 5, 8, 12

Fig. 1 Geometry of the spool specimen including its notations.

Table 1 Number of tested spool specimens.

	d (mm)					
	2	3	6.25	12.5	18.75	25
80 ply	6	6	5	5	5	6
120 ply	0	5	3	5	4	4

Fig. 2 Illustration of test setup.

及び 16 mm の 8 種類に変化させた 8 種類の供試体を 80 ply 板と 120 ply 板から製作した。各形状の試験片本数は 4～9 本とした。

Fig. 1 に断面を示すスプール供試体は、厚さを 8 mm くびれ部曲率 r を 3 mm に固定し、くびれ直径 d を、Table 1 に示すように 2, 3, 6.25, 12.5 及び 18.75 mm の 5 種類に変化させた供試体を 80 ply 板と 120 ply 板の板厚中央部から切り出し製作した。機械加工に使用した砥石の粒度は #150 で統一した。

ASTM D 7291 に準拠した面外引張試験を実施した。供試体と治具構成を Fig. 2 に示す。供試体を 3M 社製フィルム接着材 AF163-2K を用いて鋼製の end tab に接着

した後、負荷軸を合わせるための pivoting joint を介して end plate に接合した。この end plate をネジ負荷方式の引張試験機 (INSTRON 8500) のチャックで把持し、変位制御 0.1 mm/min で引張負荷を加え、ノミナル面外強度 σ_{zu} を取得した。ノミナル面外強度 σ_{zu} は破断荷重を断面積で除した値である。スプール形状供試体の断面積は最小断面直径から計算した。負荷状態確認のために、一部の円柱形状供試体には側面 8 カ所の円周 (360°) を 8 等分した 45° ごとに位置に歪みゲージ (ゲージ長 2 mm) を貼付し、厚さ方向の歪み分布を測定した。なお、歪みゲージの板厚方向の位置は供試体の中心とした。

3. 解析方法

線形弾性の有限要素解析を解析ソフト ABAQUS6 を用いて実施した。解析モデルは 3 次元ソリッド要素で構成し、解析対象は供試体と接着層とした。Fig. 3 に示す供試体の板厚中心面 (mid-plane) を鏡面とした面外方向の対称性から、解析モデルは板厚の半分のみとした。試験治具は剛体と仮定し、接着層の治具接着面側に面外方向の強制変位を与え、面内方向の強制変位量は 0 とした。

円柱供試体に関しては、試験を実施した 8 種類の板厚

に加えて 25 mm と 50 mm のものを加えた 10 種類のモデルに関して計算を行い、スプール供試体に関しては試験を実施した 5 種類の解析を実施した。円柱の解析モデルは 8 節点、6 面体の 3 次元ソリッド要素で構成し、要素寸法は厚さ 0.145 mm、面内の一辺は約 0.3 mm とした。また、スプール供試体のモデルは 4 節点、4 面体の 3 次元ソリッド要素 (厚さ 0.145 mm、面内三角形の一辺は約 0.3 mm) で構成した。接着層の厚さは 0.10 mm とした。

解析を行うために初期弾性率、ポアソン比を取得した。試験結果、適用した試験法、供試体数を Table 2 に示す。なお、表中の面内せん断弾性率 (G_{xy}) は JAXA 先進複合材料力学特性データベース⁹⁾ から引用し、面外弾性率 E_z は E_y と等しいと仮定した。接着層の材料特性には、接着材 AF163-2K の引張試験実測値 (初期弾性率 2.75 GPa, ポアソン比 $\nu=0.33$ (等方性)) を使用した。

検討の都合上、有限要素解析から以下の 4 組の応力を出力した。以下ではこれらの応力や歪みを議論するが、これらを表示する時に必要な座標軸や言葉の説明を Fig. 3 に示す。x と y 軸を中立面 (mid-plane) 上に取り、x 軸を繊維方向の対称軸と一致させ、原点は試験片の中立面の中心に取ることにする。

(1) ノミナル面外応力 ($\sigma_{z-max-cal}$) : 平均負荷応力

(2) 最大面外応力 ($\sigma_{z-max-cal}$) : 全要素の積分点面外応力値の最大値

(3) 最大面外応力 ($\sigma_{z-max-cal}$) を示した要素の各応力 (σ_{x-cal} , σ_{y-cal} , τ_{xy-cal} , τ_{yz-cal} , τ_{zx-cal}) を $\sigma_{z-max-cal}$ で除した値 (応力状態の多軸性を評価)

(4) 応力比 R_i : $\sigma_{z-max-cal}/\sigma_{z-mean-cal}$ (応力分布の均一性を評価)

4. 試験結果

4.1 円柱形状供試体

板厚 12 mm の円柱供試体に対して、ノミナル応力

Fig. 3 Relation of coordinate system and fiber direction and definition of a mid-plane.

Table 2 Properties of CFRP.

Property	IM600/# 133	Test method	Specimens
E_x (GPa)	152	SACMA SRM 4R	7
E_y (GPa)	8.21	SACMA SRM 4R	6
G_{xy} (GPa)	4.36	SACMA SRM 7R	5
ν_{xy}	0.334	SACMA SRM 4R	7
E_z (GPa)	8.21	assumption: $E_z = E_y$	—
G_{xz} (GPa)	3.993	ASTM D 5379	10
G_{yz} (GPa)	2.516	ASTM D 5379	10
ν_{xz}	0.346	SACMA SRM 4R	7
ν_{yz}	0.536	SACMA SRM 4R	6

Fig. 4 Distributions of tensile strain ε_{zz} of a cylindrical specimen with a thickness of 12 mm along the periphery on the mid-plane under the indicated uniform loads. The dashed lines represent calculated results using a finite element method.

$\sigma_{z, \text{mean}}$ が 5 MPa, 15 MPa 及び 30 MPa の時の円柱側面中央の歪み測定結果を有限要素解析結果と比較して Fig. 4 に示す。なお、有限要素解析は線形弾性であるこ

Fig. 5 Nominal strength of cylindrical specimens as a function of specimen thickness including comparison between specimens made from 120 ply and 80 ply plates.

Fig. 6 A fracture surface of the cylindrical specimen with a thickness of 2 mm. (a) Specimen bonded to end tab, (b) Fracture surface of specimen, (c) Interfacial fracture between the specimen and end tab, (d) A surface fractured in the CFRP specimen.

Fig. 7 Typical fracture pattern of a spool specimen with $d=3$ mm occurring at around the mid-plane.

とから、有限要素解析結果を用いて任意のノミナル応力と対応する歪み量が算出できる。歪み量は測定位置によって異なった。この現象の主な原因は供試体と鋼製 end tab の弾性率・ポアソン比の不一致であると考えられる。歪み量は測定位置によって異なるが、測定位置が 180° 異なる 2 点の歪み量は一致することが直交異方性材料であることから容易に考えられる。結果が合理的な対称性を示し、計算値とも一致していることから、本研究の試験方法では、供試体に妥当な負荷が与えられたことが確認できる。

Fig. 5 は、破壊時のノミナル応力 $\sigma_{z\text{-mean}}$ をノミナル面外強度 σ_{zu} として定義し、板厚 t の関数として示したものである。いずれの供試体とも破壊は瞬時に進展した。この時の典型的な破断位置と破断面を Fig. 6 に示す。破断位置は、破断面が全て CFRP 内にある場合 (b) と、(c) のように破断面が CFRP 内部と CFRP と接着層の界面に混在する場合の 2 種類が存在した。有限要素解析によれば最大応力 $\sigma_{z\text{-max-cal}}$ は 90° 方向近傍に発生する (Fig. 4 参照)。この位置では (b), (c) いずれの試験片でも CFRP 内で破壊が起こっており、接着領域が破壊の起点にはなっておらず供試体の破壊試験には成功したと判断した。CFRP 破断面と接着層界面の面積割合は一定ではなかったが、強度は Fig. 5 に示すように面積割合にはよらなかった。これは、供試体の破断起点が 90° 方向近傍で

Fig. 8 The out-of-plane nominal strength σ_{zu} and corrected strength on the effect of stress concentrations $\sigma_{z\text{-max-exp}}$ as a function of the minimum diameter d .

あることの傍証であると考えられる。また、CFRP の破断面は (d) に示すように目視で灰色の破断面と黒色の破断面が混在した。これらの灰色部と黒色部の破断面をそれぞれ顕微鏡で観察した結果、(e) で示すように白色部は樹脂の引きちぎれが多く、(f) で示すように黒色部は繊維束での破断面が確認された。これは CFRP プリプレグ 1 層中にも樹脂リッチ層/繊維束の層/樹脂リッチ層という体積繊維含有率の増減が板厚方向に存在し、これらを跨ぐように破断面が発生していることによると考えられる。

4.2 スプール形状供試体

試験後の破断状況を Fig. 7 に示す。図示のように、スプール供試体では板厚中心の最小断面部で全て破断した。ノミナル強度 σ_{zu} と最小断面部直径 d との関係を Fig. 8 に示す。 σ_{zu} は d の減少とともに増加した。また、80 ply 母板を使った供試体と 120 ply 母板の供試体の試験結果はほぼ一致しており、今回行った試験の範囲では母板の板厚の影響はないと判断した。

5. 有限要素解析結果

5.1 円柱供試体

円柱供試体の面外応力 $\sigma_{z\text{-cal}}$ の分布を Fig. 9 に示す。供試体の最大面外応力 $\sigma_{z\text{-max-cal}}$ は面内 90° 方向の接着層近傍の位置 (合計 4 カ所) に現れた。なお、本図は円柱供試体であるにもかかわらず側面がくびれて表示されているが、これは変形を強調して図示しているためである。Fig. 10 は応力比 $R_t(\sigma_{z\text{-max-cal}}/\sigma_{z\text{-mean-cal}})$ を板厚 t の関数として示したものである。応力比は板厚 t の減少に伴い 1 に近づき、薄い試験片を用いれば応力集中効果が軽減

Table 3 Multi-axial stress state of cylindrical specimen.

Thickness (mm)	Stress ratio (σ or $\tau/\sigma_{z\text{-max-cal}}$) (%)				
	$\sigma_{x\text{-cal}}/\sigma_{z\text{-max-cal}}$	$\sigma_{y\text{-cal}}/\sigma_{z\text{-max-cal}}$	$\tau_{xy\text{-cal}}/\sigma_{z\text{-max-cal}}$	$\tau_{xz\text{-cal}}/\sigma_{z\text{-max-cal}}$	$\tau_{yz\text{-cal}}/\sigma_{z\text{-max-cal}}$
1	49.8	54.5	0.0	0.0	0
2	38.7	54.2	0.0	0.0	0
3	25.9	53.5	0.0	0.0	0
4	32.3	8.7	-2.1	-1.9	17.4
5	33.5	8.5	-0.3	-0.3	17.3
8	34.2	8.1	-0.3	-0.3	16.7
12	33.7	7.9	-0.3	-0.3	16.1
16	33.3	7.8	-0.3	-0.3	15.8
25	32.8	7.7	-0.3	-0.3	15.5
50	32.6	7.7	0.3	0.3	15.5

Fig. 9 Stress contours of out-of-plane stress ($\sigma_{z\text{-cal}}$) of cylindrical specimen with a thickness of 8 mm generated under load, in which higher stress regions are represented by lighter tone.

Fig. 10 The stress ratio R_i ($=\sigma_{z\text{-max-cal}}/\sigma_{z\text{-mean-cal}}$) of the cylindrical specimens as a function of specimen thickness t .

できることが分かる。しかしながら、Fig. 5 に示すように、薄くなっても実験で得られたノミナル強度は上昇しなかった。この理由を考察するために、応力状態の多軸性を評価した。Table 3 は、 $\sigma_{z\text{-max-cal}}$ を示した要素に出力されたその他の各応力値を $\sigma_{z\text{-max-cal}}$ で割った値を示したものである。面内繊維方向の破断強度は面内トランスバース方向の破断強度よりも充分高いことから、 $\sigma_{y\text{-cal}}$ に注目する。表より板厚減少にしたがって $\sigma_{y\text{-cal}}/\sigma_{z\text{-max-cal}}$ の割合が増加し、板厚を薄くすることで多軸応力状態が顕著になることが分かる。面外方向への一方向負荷条件下でも供試体中にはポアソン効果により面内変形が発生する。一方接着ジグは剛体でポアソン比 0 と仮定しており、面内変形を拘束する。この両者のミスマッチ変形により σ_z 以外の応力が発生し、多軸応力状態にいたる。このため実験で測定される円柱供試体のノミナル強度 σ_{zu} は、応力比と多軸応力状態の二つの因子に影響されると考えられる。

5.2 スプール形状供試体

スプール形状供試体では最小断面部で最大面外応力が発生し、この断面部での破断が推定された。応力の多軸性を評価するために、最大面外応力を示した要素で出力されたその他の各応力値の最大面外応力に対する割合を Table 4 に示す。また、応力比 R_i ($\sigma_{z\text{-max-cal}}/\sigma_{z\text{-mean-cal}}$) により整理した結果を Fig. 11 に示す。これらの結果から、 d の減少と共に一軸応力状態に近づき、多軸応力状態も緩和されることが分かる。したがって、 d の小さい試験片が面外引張強度測定に有用であることが推定される。

次に最少断面部 (mid-plane) に発生する面外応力を詳細に検討する。スプール供試体中央部面内 0° (繊維配向) 方向の対称線上における $\sigma_{z\text{-cal}}$ の分布を Fig. 12 に示す。本図より、最小直径が小さくなると自由縁と中心部での応力差が小さくなっており、一様応力状態に近づくことが分かる。なお、90° 方向でも同様の傾向の分布が得られた。

Table 4 Multi-axial stress state of spool specimen.

Diameter of center (mm)	Stress ratio (σ or $\tau/\sigma_{z\text{-max-cal}}$) (%)				
	$\sigma_{x\text{-cal}}/\sigma_{z\text{-max-cal}}$	$\sigma_{y\text{-cal}}/\sigma_{z\text{-max-cal}}$	$\tau_{xy\text{-cal}}/\sigma_{z\text{-max-cal}}$	$\tau_{xz\text{-cal}}/\sigma_{z\text{-max-cal}}$	$\tau_{yz\text{-cal}}/\sigma_{z\text{-max-cal}}$
2	9.6	12.6	3.6	0.0	2.0
3.125	16.0	13.1	4.4	-1.7	2.2
6.25	12.0	25.5	5.9	-1.9	1.1
12.5	9.9	33.0	-0.1	-3.2	0.9
18.75	9.6	38.5	0.0	-3.1	-0.2

Fig. 11 The stress ratio R_i of the spool specimens as a function of the minimum diameter of specimen d . Fig. 12 Distributions of out-of-plane stress $\sigma_{z\text{-cal}}$ of spool specimens along the 0° line on the specimen mid-plane under loading of a uniform displacement between the adhesive and end tab.

6. 考 察

6.1 面外引張強度の推定

スプール形状の場合、一様かつ一軸に近い応力状態が得られたため、応力比 R_i により応力集中効果を考察することが容易である。即ち、試験ノミナル強度 σ_{zu} に応力比 R_i ($\sigma_{z\text{-max-cal}}/\sigma_{z\text{-mean}}$) の逆数を乗じた値は、応力集中効果をキャンセルした破断開始位置の最大面外応力 $\sigma_{z\text{-max-exp}}$ である。Fig. 8 には $\sigma_{z\text{-max-exp}}$ を併せて示した。80 ply 母板から製作した供試体の $\sigma_{z\text{-max-exp}}$ は 71~76 MPa (平均 74.7 MPa: 図中実線) であった。一方、120 ply 母板から製作した供試体の $\sigma_{z\text{-max-exp}}$ は 71~75 MPa (平均 71.9 MPa: 破線) で最小断面直径 d に依存しないほぼ一定値を示した。以上の推定強度 $\sigma_{z\text{-max-exp}}$ (71~76 MPa) は、別途測定した同一材料の一方向強化材の面内 90° 方向引張強度 (63.7 MPa) よりも高い。これは以下の二要因によると推定される。

1) 面内トランスバース方向と面外方向では、繊維配列が異なり、層間樹脂層が存在するなどの理由で特性が異なる。

2) 評定部の体積効果：面内供試体の評定部はスプール形状供試体のそれ（最小断面部）に比べて体積が大き

く、統計理論からすると、大体積試験片の強度は小体積試験片の強度より低い。

6.2 円柱形状とスプール形状供試体の試験結果の比較

円柱形状とスプール形状供試体から得られたノミナル面外強度 σ_{zu} を比較すると、円柱形状供試体は約 40 MPa であり、スプール形状供試体の最高値は 61 MPa であった。この結果から d が小さいスプール形状供試体が理想と想定されるが、 d が減少すると供試体の破断荷重も減少し、試験時における供試体ハンドリングが困難になる。 $d=3$ mm 以下の供試体は厳密な強度測定が求められる場合のみに実施し、著者らとしては $d=6$ mm 程度で試験することを推奨したい。ドッグボーン形状の引張試験でも、チャック部近傍の R 部にはスプール試験片と同程度の応力集中や多軸応力が現れているはずであり、 $d=6$ mm 程度であれば、応力集中や多軸応力効果が現実にも多用されている引張試験と同等であることが推奨する根拠である。

7. 結 言

本研究では、円柱形状供試体及びスプール形状供試体を用いた直接負荷方式の面外引張強度取得試験法について、試験片形状の影響を解析と実験両面から検討した。有限要素解析では、試験片形状が多軸応力状態と試験片内の応力の偏りに及ぼす影響を明らかにし、得られるノミナル面外強度に関する考察を行った。スプール形状供試体の解析と試験結果を併用することにより、供試体に発生する応力分布の偏りをキャンセルした面外引張強度を取得できることを示した。円柱形状供試体では、接着面近傍での応力集中が解析により予測され、破断面も解析の傾向と一致した。ノミナル強度もスプール形状供試体より低い強度となり、安全側の数値を示すことが確認された。板厚を薄くすることで、応力比 R_t は 1 に近づくものの、多軸応力状態も顕著になり、薄い円柱形状供試体試験にもさらなる検討が必要であることも明らかにした。

参 考 文 献

- 1) American Society for Testing and Materials : ASTM D 7291.
- 2) MIL-HDBK-17, vol. 1, 6.8.3.2, pp. 6-97-6-102.
- 3) 武田展雄, 高坂達郎 : 日本複合材料学会誌, **24** (1998), 163-168.
- 4) American Society for Testing and Materials : ASTM D 6415.
- 5) J.L. Abot & I.M. Daniel : *J. Compos. Mater.*, **38**, 7 (2004), 543-553.
- 6) I.M. Daniel, J.-J. Luo & P.M. Schubel : *Composites Part B*, **39** (2008), 13-19.
- 7) S. Mespoulet, J.M. Hodgkinson, F.L. Matthews, D. Hitchings & P. Robinson : *Plastics, Rubber and Composites*, **29**, 9 (2000), 496-502.
- 8) M. Lodeiro, G. Sims & B. Broughton : ECCM CTS4 (1998).
- 9) Advanced Composites Database System : JAXA-ACDB; Ver. 06-1, <http://www.jaxa-acdb.com/>