研究論文

多方向強化複合材料積層板の圧縮特性に関する層厚さの影響

川邊 和正^{*1}, 笹山 秀樹^{*2}, 影山 和郎^{*3}, 小形 信男^{*4}

(2007年6月11日受付)

Effect of Ply Thickness on Compressive Properties in Multidirectionally Laminated Composites

Kazumasa KAWABE,^{*1} Hideki SASAYAMA,^{*2} Kazuro KAGEYAMA^{*3}
and Nobuo OGATA^{*4}

(Received June 11, 2007)

A new fiber spreading technology (FUKUI method) to obtain the continuously wide and thin reinforcing fiber tow was developed. Thin prepreg sheet less than 0.05 mm in thickness can be prepared by using this method. In the previous study, the tensile tests were conducted on the Carbon/Epoxy quasi-isotropic laminates which were composed of stacking these prepreg sheets. As a result, the thin-ply effect was found, that is, the initial failure stress increases with decreasing ply thickness. This effect was previously predicted by Kageyama et al. In this work, the thin-ply effects on the compressive properties have been studied. As a result, the thin-ply effect was found not only in tensile tests but also in compression tests. This result implies that the design strength of composites can be improved by the use of thin prepreg sheets. In other words, this result means that the weight saving and reliability can be achieved using thin prepreg sheets as a composite materials.

1. 緒 言

近年, 地球の規模で二酸化炭素の排出量の削減が求められているが, その効果的な方策の一つとして, 輸送用

機器の軽量化による排出エネルギーの削減が有効であると言われている。特に航空機関連については, 炭素繊維強化複合材料 (CFRP: carbon fiber reinforced plastics) による軽量化が強力に推進されており, この流れは自動車等の構造部材用途にも派生してきている。今や CFRP は, これらの構造部材等には欠かせないものであり, 今後も急速に需要が拡大するものと見込まれている。しかし, 実際には, コスト面では, 原材料である炭素繊維や成形性など, 性能面では, 現行の CFRP において炭素繊維の力学特性が十分に活かされておらず, 繊維の強度発現率が低いなどの問題があり, 低コストと高信頼性の両立が重要な課題となっている。

これを解決する一つ的手段として, 川邊らは, 強化繊維束の開繊技術¹⁻³⁾を開発し, 12K, 24K といった比較的太繊維かつ低コストの炭素繊維束を連続的に幅広く薄く開繊することで, 樹脂の含浸性が良好でかつ, 厚さが 0.05 mm 以下の極めて薄い一方向プリプレグシートが加工性良く得られるようになった。これを用いた Carbon/Epoxy 擬似等方性薄層積層板は, 引張り試験の結果, 初期破損応力が極めて高く, CFRP 積層板で問題となっている層間はく離が発生しにくいことがわかっている⁴⁾。

^{*1,*2} 福井県工業技術センター創造研究部(910-0102 福井市川合鷺塚町 61 字北稲田 10)

Department of Create and Advanced Research, Industrial Technology Center of Fukui Prefecture, 61-10 Kawaiwashizuka, Fukui, 910-0102, Japan

^{*1} 主任研究員 Chief Researcher, ^{*2} 研究員 Researcher

^{*3} 東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻教授 (113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

Professor, Department of Environmental and Ocean Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

^{*4} 福井大学大学院工学系研究科材料開発工学専攻教授 (910-8507 福井市文京 3-9-1)

Professor, Department of Material Science and Engineering, Graduate School of Engineering, University of Fukui, 3-9-1 Bunkyo, Fukui, 910-8507, Japan

これは、多方向強化複合材料積層板の初期破損（層内樹脂割れ、トランスバースクラック等の発生）について、層厚さを薄くすると、ある層厚さ以下では、破壊がエネルギー破壊条件のみで律則されるようになり、層厚さの減少とともに初期破損応力が大きくなるという、影山らの理論的な予測⁵⁾や、層間はく離の発生が、層厚さを薄くすると層厚さに依存して層間はく離を伴うひずみエネルギーの解放率が向上するという T.K. O'Brien の研究⁶⁾とも一致している。これらの結果は、積層板を構成する層を薄くすることで設計許容値を高く設定することが可能となり、構造部材の軽量化と信頼性の向上の両方が実現できることを示唆している。

しかし、実際に CFRP を航空機等の構造部材に適用する場合、引張り特性よりも圧縮特性の方が劣るという炭素繊維自体の特性から、CFRP に関しても安全設計上、圧縮特性の方が重要視されることが多い。

J. Lee⁷⁾らは、従来厚さ 0.125 mm のプリプレグシートを用いた擬似等方性積層板の圧縮特性における層厚

さの影響について研究しており、 $[45_n/0_n/-45_n/90_n]_s$ ($n=2, 3, 4, 6, 8$) の圧縮強度は n (みかけ層厚さ) の増加に伴って低下する、つまり、圧縮強度は層厚さに依存し、層厚さを薄くする方が圧縮特性を向上させることができるとしている。また、影山ら⁸⁾も、ハニカムサンドイッチ型圧縮試験片を用いた弾性は理論解析による近似計算を行っており、圧縮荷重下において、層間はく離を有する一方向炭素繊維強化複合材料積層板の局所屈曲変形を伴うはく離き裂進展応力は、積層板を構成する層厚さに依存するという式を導いている。

そこで、本研究では、従来厚さの約 1/3 となる厚さ 0.045 mm の極めて薄い薄層一方向プリプレグシートを用いて、みかけ層厚さを表すプライ厚さが異なる種々の擬似等方性積層板を作製し、その積層板について圧縮試験を行うことで、層厚さが圧縮特性に与える影響を調べ、圧縮特性においても、層厚さを薄くすると初期破損強度が向上するという薄層効果があるか検証を行った。試験は、圧縮応力-ひずみの測定、圧縮時のアコースティックエミッション (AE) 測定、および高速度カメラ撮影を行った。また、擬似等方性積層板の圧縮破壊の起点は、最も応力分担が大きい 0° 層に起因していると考えられることから、擬似等方性積層板の切り出し方向を、 $+45^\circ$ 、

Table 1 Lay-up of the quasi-isotropic laminates.
 $[(45_n/0_n/-45_n/90_n)_r]_s$, $[(45_n/-45_n/0_n/90_n)_r]_s$

Stacking sequence	n	r	Ply thickness [mm]
$[45_6/0_6/-45_6/90_6]_s$	6	1	0.2718
$[(45_3/0_3/-45_3/90_3)_2]_s$	3	2	0.1359
$[(45_2/0_2/-45_2/90_2)_3]_s$	2	3	0.0906
$[(45/0/-45/90)_6]_s$	1	6	0.0453
$[45_6/-45_6/0_6/90_6]_s$	6	1	0.2718
$[(45_3/-45_3/0_3/90_3)_2]_s$	3	2	0.1359
$[(45_2/-45_2/0_2/90_2)_3]_s$	2	3	0.0906
$[(45/-45/0/90)_6]_s$	1	6	0.0453

n : ply-level scaling factor, r : sub-laminate scaling factor.

Fig. 1 Cross section of the quasi-isotropic laminates.

Fig. 2 Cutting image of the quasi-isotropic laminate in various ply angles.

Table 2 Ply angle and stacking sequence for the quasi-isotropic laminates.

Ply angle [deg]	Generalized stacking sequence
0	$[(45_n/0_n/-45_n/90_n)_r]_s$
45	$[(90_n/45_n/0_n/-45_n)_r]_s$
90	$[(-45_n/90_n/45_n/0_n)_r]_s$
135 (-45)	$[(0_n/-45_n/90_n/45_n)_r]_s$
0	$[(45_n/-45_n/0_n/90_n)_r]_s$
45	$[(90_n/0_n/45_n/-45_n)_r]_s$
90	$[(-45_n/45_n/90_n/0_n)_r]_s$
135 (-45)	$[(0_n/90_n/-45_n/45_n)_r]_s$

Fig. 3 Schematic of compression test fixture.

$+90^\circ$, $+135^\circ$ (-45°) と変化させることで、圧縮軸方向と繊維方向が同方向となる 0° 層の配置を変化させた試験も合わせて行った。

2. 実験方法

2.1 供試材料

本研究では、まず、炭素繊維 (TR50S, 三菱レイヨン (株) 製) とエポキシ樹脂 (#350, 三菱レイヨン (株) 製) による薄層一方向プリプレグシート (V_f : 60%, 厚さ 0.0453 mm (計算値)) を用い、種々の擬似等方性積層板を作製した。すべての積層板の板厚を約 2 mm に揃えるため、積層板の総積層数を 48 と固定し、その中で同方向に重ねる積層数をそれぞれ 1, 2, 3, 6 とすることで、みかけの層厚さを示すプライ厚さを変化させた。積層構成の詳細を Table 1 に示す。なお、表中の n は同方向に重ね合わせた薄層一方向プリプレグシートの積層数、 r は積層パターンの繰り返し数を示している。また、積層板は、薄層一方向プリプレグシートをハンドレイアップした後、 130°C でオートクレープ成形した。成形した積層板断面のマイクロスコブ写真の例を Fig. 1 に示す。成形した積層板は、すべてボイドが見られず、かつ、各層の厚さムラがないことを確認している。

また、擬似等方性積層板の切り出し方向を変化させた試験片については、Fig. 2 で示される方向にそれぞれ切り出して作製した。その積層構成を Table 2 に示す。なお、試験片の切り出しはダイヤモンドブレードで行った。

2.2 圧縮試験

CFRP の圧縮試験法については、shear-load 方式の celanese 法や IITRI 法、end-load 方式の SACMA SRM1-94, ASTM D 695 などの試験規格があり、現在も

(a) $[(45_n/0_n/-45_n/90_n)_s]$ laminates (b) $[(45_n/-45_n/0_n/90_n)_r]_s$ laminates

Fig. 4 Compressive stress-strain curves for quasi-isotropic laminates in various ply thickness.

Ply thickness 0.2718mm (n=6) Ply thickness 0.0453mm (n=1)
Fig. 5 AE signals of the $[(45_n/0_n/-45_n/90_n)_r]_s$ laminates for the compression test.

様々な検討がなされている⁹⁾。本研究においては、試験片が擬似等方性積層板であることから、他の試験法と比較して、試験片の幅が大きくでき、かつゲージ長を大きくしても破壊前座屈が発生しづらい JIS K 7018 の方法 3 に準じた end-load 方式の圧縮試験法を用いた (Fig. 3)。

Fig. 6 Photos of the quasi-isotropic laminates at fracture due to the compression test.

この方法は、試験片の全長を比較的短く設定することができ、補強タブも不要なので、非常に効率的な方法であると言える。試験片寸法は、幅 20 mm、長さ 55 mm、厚さ約 2.2 mm の短冊形とした。また、ゲージ長さは、オイルの座屈荷重限界を考慮し 15 mm とした。

圧縮試験には、精密万能試験機オートグラフ AG-IS-100kN (島津製作所製) を用いた。圧縮ひずみの測定は、試験片のゲージ中央部の表裏に、小型のひずみゲージを貼り付け、その平均ひずみを測定することで行った。圧縮速度は、クロスヘッド速度を 0.5 mm/min とし、試験片本数は各 5 本とした。また、圧縮破壊の初期破損を検出するため、ゲージ中央部の片面に小型の AE センサ (日本フィジカルアコースティクス社製 Pico Sensor) を、もう片面に小型のひずみゲージを貼付した試験も行った。さらに、破壊の瞬間映像を捉えるため、高速度カメラ撮影を行った。高速度カメラは、ハイスピードデジタルイメージングカメラ Phantom V7.1 (ビジョンリサーチ社製) を用いて行い、撮影コマ数は 41,000 コマ/秒とした。

3. 実験結果および考察

3.1 層厚さを変化させたときの圧縮試験結果

圧縮応力-ひずみ曲線を Fig. 4, AE 測定の代表的な結果例を Fig. 5, 最終破壊の高速度カメラ写真を Fig. 6 に示す。いずれの試験においても破壊はゲージ間で発生し、ジグのつかみ部内での破壊や端部破壊は生じなかった。また、AE 測定の結果、どの積層構成、層厚さにおいても Fig. 5 の代表的な結果例と同様、AE エネルギーの解放は最終破壊と同時に発生し、それまでに層間はく離等による AE エネルギーの解放は見られなかった。引張り試験では、積層板を構成する層厚さが大きい場合、初期破損応力は破壊応力より著しく低く、破壊はトランスバースクラック (層内樹脂割れ) が起点となって、層間はく離、繊維破断と段階的に進行するが、圧縮試験では、どの積層構成、層厚さにおいても、初期破損は最終破壊付近で発生し、その後、瞬間的に破壊が進展することがわかった。このことは、高速度カメラ撮影においても視覚的に確認できた。

圧縮応力-ひずみ曲線 (Fig. 4) から、 $[(45_n/0_n/-45_n/90_n)_r]_s$ 、 $[(45_n/-45_n/0_n/90_n)_r]_s$ の積層構成とも、層厚さが薄くなるとともに、圧縮強度、圧縮ひずみとも向上した。特に、層厚さが最も薄い 0.0453 mm では、圧縮強度が 640~680 MPa を示した。この値は、一方向積層板の圧縮試験データが 1,570 MPa¹⁰⁾であることを考慮すると、極めて高いと言える。

Table 3 に各力学特性の平均値、変動係数と層厚さの関係を示す。層厚さが薄くなると強度、ひずみについては、バラツキが小さくなる傾向を示した。一般的には、積層板を構成する総積層数が増加すると、バラツキが大きくなると考えられているが、本研究の実験結果では、総積層数 (みかけの総積層数) の増加に伴い、バラツキは小さくなっている。なお、剛性は、変動係数が強度、ひずみと比較して 1 % 台と小さいことから、バラツキは少なく、層厚さには依存していないと考えられる。

次に、高速度カメラ撮影の結果、圧縮破壊は最終破壊で瞬間的に発生し、初期破損は、どの積層構成、層厚さにおいても、最も外側に配置されている 0° 層の繊維破断、または、その最外 0° 層と隣接層との間の層間はく離と見られる。その後、破壊は直ちに大きな層間はく離を伴って進展するとともに試験片全体が座屈し、各層間のはく離および各層の繊維破断を生じて最終破壊に至ることが確認された。つまり、積層板内に繊維破断または層間はく離が生じると、積層板の対称性が失われるとともに、それまでに負荷された圧縮力によって蓄えられたエネルギーが瞬間的に解放され、試験片を座屈、破壊させているものと考えられる。層厚さが最も厚い 0.2718 mm の初期破損は 0° 層の繊維破断であり、層厚さが薄くなるに伴い、最外 0° 層の破壊に加え、その隣接層との間の層間はく離が見られた。また、初期破損の発生箇所は、ほとんどの試験片でゲージ端部となるジグのつかみ部近傍と

Table 3 Compression test measurements for quasi-isotropic laminates in various ply thickness.

(a) $[(45/0_n/-45_n/90_n)_r]_s$ laminates

Ply thickness [mm]	Strength		Strain		Modulus	
	Mean [MPa]	Cv [%]	Mean [%]	Cv [%]	Mean [GPa]	Cv [%]
0.2718	453	6.6	1.10	9.0	47.3	1.0
0.1359	529	4.5	1.35	7.6	48.4	1.6
0.0906	590	5.3	1.56	5.4	48.2	1.2
0.0453	679	2.2	1.84	1.9	49.6	1.9

(b) $[(45_n/-45_n/0_n/90_n)_r]_s$ laminates

Ply thickness [mm]	Strength		Strain		Modulus	
	Mean [MPa]	Cv [%]	Mean [%]	Cv [%]	Mean [GPa]	Cv [%]
0.2718	543	6.8	1.40	8.0	48.7	1.1
0.1359	601	2.2	1.58	2.8	48.7	1.1
0.0906	631	4.9	1.71	5.6	47.6	1.3
0.0453	640	4.0	1.74	5.4	48.5	1.8

Ply angle: +135[deg] (-45[deg]), [(0n/-45n/90n/45n)r]s

Ply angle: +135[deg] (-45[deg]), [(0n/90n/-45n/45n)r]s

Ply angle: 0[deg], [(45n/0n/-45n/90n)r]s

Ply angle: +45[deg], [(90n/0n/45n/-45n)r]s

Ply angle: +45[deg], [(90n/45n/0n/-45n)r]s

Ply angle: 0[deg], [(45n/-45n/0n/90n)r]s

Ply angle: +90[deg], [(-45n/90n/45n/0n)r]s

Ply angle: +90[deg], [(-45n/45n/90n/0n)r]s

(a) [(45n/0n/-45n/90n)r]s laminates

(b) [(45n/-45n/0n/90n)r]s laminates

Fig. 7 Compressive stress-strain curves for the compression test in various ply angles.

Fig. 8 Photos of the quasi-isotropic laminates at fracture due to the compression test in various ply angles by high speed camera. (Ply angle: $+135[deg]$)

Fig. 9 Photos of the quasi-isotropic laminates at fracture due to the compression test in various ply angles by high speed camera. (Ply angle: $+90[deg]$)

(a) $[(45_n/0_n/-45_n/90_n)]_s$ laminates (b) $[(45_n/-45_n/0_n/90_n)]_s$ laminates

Fig. 10 Compressive strength as a function of ply thickness for quasi-isotropic laminates in various ply angles.

なった。これは、ジグのつかみ部内では、試験片にかかるジグからの拘束力が大きく、つかみ部近傍のゲージ部が最も大きな変形を生じることになるので、この箇所から初期破損が生じるのではないかと考えられる。最も層厚さが薄い 0.0453 mm の破壊は、最外 0° 層の繊維破断やその隣接層との層間はく離による初期破損が発生した後、瞬間的に面外方向への繊維破断が発生している。これは、層厚さが薄くなると、圧縮応力-ひずみ曲線の面積で示されるように、最終破壊時点における積層板内の破壊エネルギーが大きくなり、破壊時には、それを瞬間的に解放しようとするので、破壊に大きなエネルギーを必要とする各層の繊維破断が発生するのではないかと考えられる。

また、層厚さが厚いと、荷重軸方向と同方向である 0° 層内には、蛇行している単繊維の存在が多くなるものと考えられ、その部分に応力が集中し、0° 層内の繊維破断が発生するのではないかと考えられる。しかし、層厚さが最も薄い 0.0453 mm の場合、層厚さが単繊維の約 7 本分となることから、0° 層内の単繊維は、隣接する各角度層によって 0° 層を拘束する効果が大きくなるとも

に、積層板の成形時の樹脂の硬化収縮による影響を抑制して繊維の真直性を維持するようになるので、圧縮力負荷時の単繊維の変形および 0° 層内の単繊維の微小座屈が生じにくくなり、積層板全体の圧縮強度が向上するのではないかと考えられる。よって、0° 層内の繊維破断が生じにくくなるのに伴い、積層板の破壊に 0° 層とその隣接層との層間はく離が見られるようになるのではないかと考えられる。

J. Lee 等の研究⁷⁾によると、層厚さ 0.5 mm に対して 0.25 mm の擬似等方性積層板にすると、圧縮強度が約 3.4% 向上しているが、本研究では、積層構成によって違いはあるものの、層厚さ 0.2718 mm に対して 0.0453 mm にすると、約 18~50% 圧縮強度が向上した。これは、層厚さを薄くすることで 0° 層がその隣接層によって互いに拘束されるようになり、層内の単繊維と樹脂の界面はく離による単繊維の座屈や、層間はく離が抑制されるからではないかと考えられる。つまり、圧縮荷重下において、層内の単繊維と樹脂の界面はく離や、層間はく離を伴う圧縮強度は、層厚さに依存するということになる。この結果は、前述の、圧縮荷重下において、層間はく離を有する一方向炭素繊維強化複合材料積層板の局所座屈変形を伴うはく離進展応力が、積層板を構成する層厚さに依存して大きくなるという影山らの研究⁸⁾とも矛盾していないものと考えられる。

3.2 切り出し方向を変化させたときの圧縮試験の結果

次に、各切り出し角度における圧縮応力-ひずみ曲線を Fig. 7 に示す。どの積層構成、切り出し角度についても、層厚さが薄くなると圧縮応力、圧縮ひずみとも大きくなる傾向が見られた。0° 層が最外層に配置される $[(0_n/-45_n/90_n/45_n)_r]_s$, $[(0_n/90_n/-45_n/45_n)_r]_s$ の切り出し角度 +135° (-45°) では、その傾向が顕著に現れ、かつその差が大きく広がる傾向にあり、0° 層が中心軸に配置される $[(45_n/90_n/45_n/0_n)_r]_s$, $[(45_n/45_n/90_n/0_n)_r]_s$ となる切り出し角度 +90° では、その差が小さくなった。

Fig. 8, 9 の高速度カメラ写真から、初期破損は、最外 0° 層の繊維破断となることがわかった。これは、試験片に圧縮力が加わると、試験片はポアソン効果によって面外方向に変形するため、最外 0° 層は、中心軸に配置される 0° 層と比較して変形量が大きくなり、ゲージ端部においてジグのつかみ部からの拘束力の影響を受けてしまうからではないかと考えられる。0° 層が中心軸に配置される切り出し角度 +90° では、破壊の起点が試験片のゲージ

端部であるジグのつかみ部の近傍になっておらず、ジグのつかみ部近傍から離れたゲージ間における 0° 層の繊維破断または 0° 層とその隣接層との間の層間はく離となっている。これは、 0° 層がより中心軸に近く配置されるため、ジグのつかみ部近傍におけるジグの拘束力の影響が緩和されるからではないかと考えられる。

各積層構成、切り出し角度における圧縮強度と層厚さの関係を図10に示す。圧縮強度は、どの積層構成、切り出し角度においても、層厚さが薄くなるに伴って向上するとともに、層厚さが厚いと圧縮強度の差が大きくなり、層厚さが薄くなる 0° 層がより外側に配置されてゲージ端部におけるジグのつかみ部からの拘束力の影響を受けるのにもかかわらず圧縮強度の差が小さくなった。これは、擬似等方性積層板であっても、層厚さが厚いと xy 面内強度は、切り出し方向によって異方性が見られるが、その強度の異方性は、層厚さが薄くなるにつれて減少し、いわゆる等方性材料に近づいていくことを示している。

4. 結 言

本研究では、厚さが 0.0453 mm の極めて薄い薄層プリプレグシートを用いて、みかけ層厚さを表すプライ厚さが異なる種々の擬似等方性積層板を作製し、その圧縮試験を行うことで、層厚さが圧縮特性に与える影響を調べ、圧縮特性においても、ある層厚さ以下で初期破損強度が向上するという薄層効果があるか実験的に検証を行った。これにより、以下のことが明らかになった。

(1) 擬似等方性積層板について、積層板を構成する層厚さを薄くすると、圧縮試験において、積層構成に関わらず初期破損応力、初期破損ひずみとも向上する薄層効果が見られた。これは、層厚さを薄くして薄層積層板とすることにより、 0° 層内の繊維真直性が向上して炭素繊維本来の強度が発現する効果、および各 0° 層内の単繊維がその隣接層によって拘束され座屈しにくくなる効果によるものではないかと考えられる。

(2) 圧縮試験における初期破損は、最終破壊の直前に発生し、最も外側に配置されている 0° 層の繊維破断、または 0° 層とその隣接層との間の層間はく離となることがわかった。

(3) 0° 層の外側に $\pm 45^\circ$ 層および 90° 層が数多く配置される積層構成、切り出し角度では、層厚さにかかわらず初期破損強度が向上した。これは、 0° 層の外側に $\pm 45^\circ$ 層および 90° 層を数多く配置することで、ジグのつかみ部近傍におけるジグからの拘束力による試験片の不自然な変形が緩和され、試験片のゲージ端部での破壊が生じにくくなるからではないかと考えられる。

(4) 擬似等方性積層板を構成する層厚さを薄くすると、どの積層構成、切り出し角度においても圧縮強度の差が小さくなった。これは、層厚さが厚いと、擬似等方性積層板であっても、 xy 面内強度は切り出し方向によって異方性が見られるが、その強度の異方性は、層厚さが薄くなるにつれて減少し、いわゆる等方性材料に近づいていくことを示している。

本研究において、東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻の大澤勇助教には、圧縮試験法についてのご教授を頂きました。感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) WO97/41285 (1997).
- 2) 川邊和正, 友田 茂, 松尾達樹: 繊維機械学会, **50** (1997), T68.
- 3) 川邊和正, 松尾達樹, 前川善一郎: 材料, **47** (1998), 727.
- 4) 笹山秀樹, 川邊和正, 友田 茂, 大澤 勇, 影山和郎, 小形信男: 日本複合材料学会誌, **30**, 4 (2004), 142-148.
- 5) 影山和郎, 加藤哲二, 阿部 聡: 日本複合材料学会誌, **28**, 1 (2002), 11-20.
- 6) T.K. O'Brien: *Damage in Composite Materials*, ASTM STP 775 (1982), pp. 140-167.
- 7) J. Lee & C. Soutis: *Composites Part A*, **36** (2005), 213-227.
- 8) 影山和郎, 金原 勲, 鈴木敏夫, 大沢 勇, 国分和也, 大宮慎一: 日本造船学会論文集, **170** (1991), 737-744.
- 9) 邊 吾一, 石川隆司編著: 先進複合材料工学 CD-ROM 版, 培風館 (2005), pp. 116-118.
- 10) MITSUBISHI RAYON CO., LTD: PYROFIL™ #350 Product Data Sheet.