

研究論文

薄層化 CFRP 積層板の衝撃損傷挙動と CAI 強度に及ぼす ハイブリッド積層および金属箔挿入の影響

山田 耕平^{*1}, 西川 雅章^{*2}, Benedikt Kötter^{*3}, 松田 直樹^{*4},
川邊 和正^{*5}, Bodo Fiedler^{*6}, 北條 正樹^{*7}

(2019 年 10 月 18 日受付)

Effect of Ply-level Hybridization and Insertion of Metal Layers on Impact Damage Modes and Compression Strength after Impact of Thin-ply Composite Laminates

Kohei YAMADA,^{*1} Masaaki NISHIKAWA,^{*2} Benedikt KÖTTER,^{*3} Naoki MATSUDA,^{*4}
Kazumasa KAWABE,^{*5} Bodo FIEDLER^{*6} and Masaki HOJO^{*7}

(Received October 18, 2019)

Abstract: In this study, impact and compressive after impact (CAI) tests using varying impact energies were conducted using ply-level hybrid laminates composed of thin and standard ply clusters. In addition, fiber metal laminates (FMLs), which consisted of thin-ply prepregs and stainless layers with a thickness of 0.04 mm, were made in order to suppress the fiber breakage that caused a decrease in CAI strength. Next, impact and CAI tests were conducted on FMLs in order to investigate the effect of the inserting location in the thickness direction and the number of metal layers in failure mode, as well as CAI strength. The results confirmed that CAI strength was improved by both ply-level hybridization and the insertion of metal layers. In ply-level hybrid laminates, the incidence of fiber breakage and delamination was reduced by changing the ratio of thin-ply prepregs and their through the thickness location. In addition, plastic deformation of metal layers in FMLs led to a larger dissipated energy; thus, the failure occurred in a limited location, such as fiber breakage at the non-impacted laminate face.

Key words: Thin-ply prepreg, Ply-level hybridization, Fiber metal laminates (FMLs), Impact test, Compressive after impact (CAI) strength

1. 緒 言

航空機, 自動車分野において, CFRP (carbon fiber reinforced plastics 炭素繊維強化複合材料) の構造材料

^{*1,*5} 福井県工業技術センター

Industrial Technology Center of Fukui Prefecture

^{*1} 研究員 Researcher, ^{*5} 総括研究員 Senior Researcher

^{*2,*4,*7} 京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻

Department of Mechanical Engineering and Science, Kyoto University

^{*2} 准教授 Associate Professor, ^{*4} 助教 Assistant Professor, ^{*7} 教授 Professor

^{*3,*6} Hamburg University of Technology, Institute of Polymer and Composites

^{*3} PhD Student, ^{*6} Professor

等への適用研究が推進されている中, 近年, 繊維目付が極めて低い, 厚さが 0.1 mm 以下の薄層プリプレグが注目されている。特に航空機分野においては, CFRP を構成する層を薄くすることで, 翼や胴体等の主要な構造部材をより薄く軽量化できるだけでなく, 従来のプリプレグと比較してより多くの層を設けることができるため, 構造部材の設計の自由度を高めることが期待されている。これらのメリットに加え, 薄層プリプレグを用いることで, 静的な面内荷重試験, 疲労試験において強度が向上することを示すことが知られている¹⁻³⁾。この効果は, マトリクスクラックの抑制と, クラックの先端で発生する層間剥離の抑制によるもので, 薄層化による損傷抑制効果として知られている。例えば, Amacher ら³⁾ は,

繊維目付が30, 100, 300 g/m²のプリプレグを用いて層厚さの異なる積層板を作製し、引張試験と衝撃試験を行い、薄層化により初期損傷が抑制されることを実験的に示した。また、積層板理論を用いて引張試験の結果を考察し、層厚さが薄くなると、隣接する層の拘束効果により初期損傷発生箇所におけるその場強度が向上することを定量的に示した。

しかしながら、薄層化による損傷抑制効果が発現することにより、局所的な応力集中や突如として繊維破断が発生することで薄層化していない積層板よりも低い強度を示す報告がなされている。例えば、Furtado ら⁴⁾は、繊維目付が30, 100 g/m²の薄層プリプレグ、繊維目付が160, 240 g/m²の織物(1層あたりの繊維目付:80, 120 g/m²)、繊維目付が120 g/m²のNCF(non-crimp fabrics, 1層あたりの繊維目付:60 g/m²)基材を用いて層厚さの異なる積層板を作製し、画像相関法を組み合わせた有孔引張試験を行い、層厚さが孔周辺の変形挙動および有孔引張強度に及ぼす影響を調べた。その結果、層厚さが薄くなると、孔周辺でのトランスバースクラックおよび層間剝離の発生が抑制されることにより、孔近傍に局所的な応力集中が生じ、これを起点として脆性的な破壊形態をとることにより有孔引張強度が低下することを実験的に示した。また、山田ら⁵⁾は、厚さ0.02 mmの薄層プリプレグを用いて、層厚さが0.02, 0.12, 0.24 mmの3種類の擬似等方性積層板を作製し、衝撃エネルギーをかねて衝撃試験を行い、CAI(compression after impact)強度および衝撃負荷による損傷形態の比較を行った。その結果、層厚さが薄くなると、衝撃エネルギーが5 J/mm以下の場合にはCAI強度が高くなる傾向が見られたが、衝撃エネルギーが高くなると繊維破断の累積の割合が大きくなることにより、CAI強度の低下の割合が大きくなることを実験的に示した。

これらの力学的特性の中でも、衝撃負荷による損傷は目視で確認できない場合でも大きな強度低下を引き起こすことから、特に航空機分野においては、CAI強度は重要な指標となっており、薄層化によるCAI強度低下を抑制するための検討が数多くなされている⁵⁻¹⁹⁾。例えば、マトリクス樹脂を高じん化する方法^{10,16)}、層間に樹脂層を配置する方法^{10, 11)}、積層板の積層する角度を板厚方向で変化させたり^{12, 13)}、特定の層を他の層と比べて厚くする方法¹³⁻¹⁵⁾が検討されている。

この他に、層厚さの異なるプリプレグを用いて、板厚方向に薄層および厚層で構成される部分を配置したハイブリッド積層板を作製し、CAI強度を改善する試みもな

されている¹⁶⁻¹⁹⁾。Sasikumar ら¹⁵⁾は、繊維目付が75, 134, 268 g/m²のプリプレグを用いて、層厚さが異なる積層板および薄層プリプレグ積層板を構成する層のうち0°層に134, 268 g/m²のプリプレグをそれぞれ配置した2種類のハイブリッド積層板を作製して、衝撃試験を実施し、層厚さおよびハイブリッド化が損傷形態およびCAI強度に及ぼす影響を調べた。その結果、薄層プリプレグ積層板では繊維破断の発生により、CAI強度の低下が見られたのに対して、ハイブリッド積層板では繊維破断の発生およびCAI強度の低下が抑制されることを示した。これらの結果は、積層板を構成する各層の層厚さを変化させることにより、支配的な損傷形態を変化させ、それによりCAI強度を向上できることを示している。

ハイブリッド積層は、高じん化した樹脂のように特別なマトリクス樹脂を使用したり、層間に樹脂層を配置することなく、CAI強度を向上できることが期待できる。また、薄層プリプレグの使用量を少なくできるため、積層数を減らすことができ、構造材料の生産性を向上することできる。しかしながら、薄層プリプレグを配置する位置とその量が、衝撃負荷による損傷形態およびCAI強度に及ぼす影響について系統的に調べた例はない。また、前述した山田ら⁵⁾の実験結果が示すように、薄層プリプレグ積層板は、低衝撃エネルギー域では高い損傷抑制効果を示す一方で、高衝撃エネルギー域では繊維破断が板厚方向に累積し、CAI強度が著しく低下する。このような薄層化のデメリットを解消するため、薄層化CFRP積層板の低衝撃エネルギー域での優位性を維持し、かつ高エネルギー域において繊維破断の発生を抑制することを目的に、薄層プリプレグを板厚方向に部分的に配置することを検討した研究例はない。

そこで、本研究では厚さ0.02 mmの薄層CF/epoxyプリプレグを用い、積層板を構成する各層の層厚さが異なるハイブリッド擬似等方性積層板を作製し、衝撃エネルギーをかねて衝撃試験およびCAI試験を行った。層厚さが0.12 mmの積層板に対して0.02 mmの層を積層した薄層部分を挿入し、挿入する板厚方向の位置および挿入する層数が、損傷形態およびCAI強度に及ぼす影響を調べた。この比較により、薄層化が低衝撃エネルギー域のCAI強度向上や高衝撃エネルギー域の繊維破断発生に及ぼす影響を明らかにした。

一方、CFRPの力学的特性の向上、特に衝撃負荷による強度低下を抑制する目的で、AI/GFRP、Ti/CFRPなど繊維強化プラスチックと金属のハイブリッド積層板(fiber metal laminates, FML)がこれまで数多く検討さ

Table 1 Configuration of the ply-level hybrid laminates.

Code	Ply thickness [mm]	Ratio of thin layers [%]	Configuration
S-25	0.02, 0.12	25	$[(45/0/-45/90)_6/(45_6/0_6/-45_6/90_6)_3]_s$
M-25	0.02, 0.12	25	$[(45_6/0_6/-45_6/90_6)_3/(45/0/-45/90)_6]_s$
M-50	0.02, 0.12	50	$[(45_6/0_6/-45_6/90_6)_2/(45/0/-45/90)_{12}]_s$
M-75	0.02, 0.12	75	$[(45_6/0_6/-45_6/90_6)/(45/0/-45/90)_{18}]_s$

れている^{20, 21)}。FML は、塑性変形をおこす金属と FRP を組み合わせることで、エネルギー吸収を大きくすることができ、衝撃負荷による損傷形態を改善できることが知られている。しかしながら、薄層プリプレグと金属箔のハイブリッド積層板の衝撃試験を行った研究例はない。そこで、本研究では薄層プリプレグ積層板において CAI 強度低下を引き起こす繊維破断を抑制する目的で、厚さ 0.04 mm の CF/epoxy プリプレグおよび金属箔を用いたハイブリッド積層板を作製した。使用する金属箔には、実用時の低コスト化も考慮し、金属箔と CFRP の層間部分での層間剥離の発生を抑える目的で比較的降伏強度が高い SUS304 を選定した。金属箔ハイブリッド積層板についても衝撃試験と CAI 試験を行い、金属箔を配置する板厚方向の位置と数が衝撃負荷後の損傷挙動および力学的特性に及ぼす影響を調べた。特に、高衝撃エネルギー域での繊維破断の抑制や層間剥離発生への影響に着目して検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材料

2.1.1 薄層・標準厚ハイブリッド積層板

炭素繊維とエポキシ樹脂からなる薄層プリプレグを用いた擬似等方性積層板を試験片として用いた。薄層プリプレグは熱硬化性エポキシ樹脂 jER828 および jER1001 (三菱ケミカル製) を質量比 4 : 6 で混合した樹脂を、炭素繊維 TR50S15L (三菱ケミカル製、フィラメント数 15,000) で強化したもので、厚さは約 0.02 mm である。ハイブリッド積層板は 4 種類作製した。作製した積層板の厚さから計算式 (1) により算出した各積層板の繊維体積含有率 V_f は 44.8–48.4% の範囲の値を示した。

$$V_f = \frac{1}{t} \frac{nw_f}{\rho_f} \times 100 \quad (1)$$

t は積層板の厚さ、 n は積層数、 w_f は各層の繊維目付量、 ρ_f は炭素繊維の密度である。作製したハイブリッド積層板の積層構成およびそれを模式化した図をそれぞれ Table 1, Fig. 1 に示す。積層板の層厚さは薄層プリプレグを同方向に繰り返して積層することで変化させており、

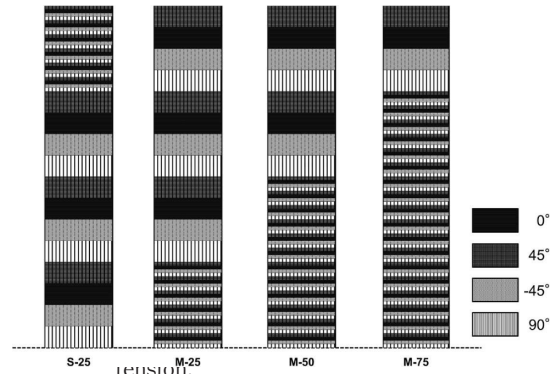


Fig. 1 Schematic drawings of ply-level hybrid laminates.

薄層部で 0.02 mm、標準厚部で 0.12 mm となっている。薄層を板厚の 25% 分の表裏両表層に配置したのが S-25 積層板で、薄層をそれぞれ板厚の 25, 50, 75% 分を中央層付近に配置したのが M-25, M-50, M-75 積層板となっている。積層板は、薄層プリプレグをハンドレイアップした後、オートクレーブ (130°C, 0.5 MPa, 120 min) にて成形した。

2.1.2 金属箔を用いたハイブリッド積層板

厚さが 0.04 mm、繊維体積含有率が 53.9% の薄層プリプレグおよび厚さが 0.04 mm のステンレス箔 (SUS304) を用いたハイブリッド擬似等方性積層板を試験片として用いた。薄層プリプレグおよびステンレス箔の厚さを 0.04 mm としたのは、特に金属箔の前処理および積層時のハンドリング性を考慮したためである。0.04 mm より薄いステンレス箔では特に表面処理が困難となるため、薄層プリプレグとも厚さを 0.04 mm に統一した。川邊ら²²⁾ は、厚さ 0.02 mm の薄層プリプレグを用いて層厚さが異なる擬似等方性積層板を作製し、引張試験を行い層厚さが引張強度および初期損傷発生に及ぼす影響を調べている。これによると、層厚さが 0.02, 0.04, 0.12 mm の積層板の引張強度はそれぞれ 1,027, 938, 909 MPa、破断ひずみは 2.03, 1.89, 1.83% となり、薄層化するほど強度は向上する一方、応力-ひずみ関係は層厚さが 0.02 mm と 0.04 mm の場合でほぼ一致しており、薄層化による損

Table 2 Configuration of the FML.

Code	Ply thickness [mm]	Configuration
Reference	0.04	[45/90/-45/0] _{12s}
FML 6.25%	0.04	[(45/M/-45/0) ₃ /(45/90/-45/0) ₉] _s
FML 12.5%	0.04	[(45/M/-45/0) ₆ /(45/90/-45/0) ₆] _s
FML 25%	0.04	[45/M/-45/0] _{12s}

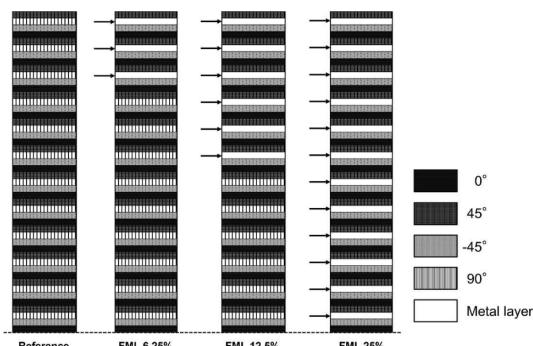


Fig. 2 Schematic drawings of FML. Arrows show the position of metal layers.

傷抑制効果の差は小さいと考えられた。厚さが 0.04 mm の薄層プリプレグ作製に用いた炭素繊維，エポキシ樹脂は薄層・標準厚ハイブリッド積層板に用いたものと同じである。ステンレス箔は，前処理として 600 番のサンドペーパーで表面を研磨した後，Sol-Gel プロセスによる表面処理（スリーエム社製 AC-130-2，30 秒間浸漬した後，室温にて 60 分間乾燥した）を施した。積層板はステンレス箔を含まない Reference も含めて 4 種類作製した。作製した積層板の積層構成およびそれを模式化した図を Table 2, Fig. 2 に示す。ハイブリッド積層板の金属箔は，挿入により積層板の厚さが変化しないようにする目的で，積層板を構成する 4 方向の層のうち最も耐荷能の小さい 90° 層と置き換える形で挿入した。金属箔は全層の 6.25, 12.5, 25% にあたる割合で，表・裏両表層から金属箔の割合が多くなるように挿入した。積層板は，薄層プリプレグおよびステンレス箔をハンドレイアップした後，オートクレープ（130°C，0.5 MPa，120 min）にて成形した。

2.2 衝撃試験

各積層板から積層板内の 0° 層に対して平行な方向を長手方向として長さ 150 mm，幅 100 mm の寸法で試験片を切り出した。CAI 試験に用いる試験片の枚数はそれぞれの衝撃エネルギーに対して 1 枚とした。各試験片に

対して ASTM D 7136M に準じて衝撃試験を実施した。薄層・標準厚ハイブリッド積層板に対しては，落錘型衝撃試験機（IMATEK 社製 IMIC-15 型）を用い，圧子の高さを調整することで衝撃エネルギーをかえて（3, 5, 7 J/mm）衝撃試験を行った。一方，金属箔ハイブリッド積層板に対しては，5 J/mm のみの 1 水準の衝撃エネルギーにて衝撃試験を行った。衝撃エネルギーの負荷は，1 度の圧子の衝突のみによるものとなるように 2 度打ち防止機構を使用した。衝撃圧子先端は半球状で（直径 16 mm），圧子質量は 5 kg であり，試験片の中心に衝撃エネルギーを与えた。衝撃試験時の荷重は衝撃圧子に付随するロードセルにより測定した。衝撃エネルギーは，光学センサーにより測定した衝撃圧子の衝突速度から算出した。また，吸収エネルギーについては，荷重-変位曲線における負荷開始点から最大変位にいたるまでの曲線および最大変位以降の除荷過程を示す曲線と変位軸より囲まれる領域の面積をそれぞれ算出し，前者から後者を差し引いて求めた。

衝撃試験後の試験片に対して，超音波探傷装置（インサイト社製 FlexScan System，5 MHz，275 V，1,500 × 1,000 pixel）を用いた損傷観察を行った。また，試験片の衝撃面中心に発生したデントの深さをデプスゲージ（テック社製 DMD-210S，指示誤差：±0.02 mm）にて 0.01 mm 単位で測定した。CAI 試験は，ASTM D 7137M に準拠して行った。

3. 実験結果および考察

3.1 薄層・標準厚ハイブリッド積層板の損傷形態

各試験片の衝撃試験における最大変位量，最大荷重，吸収エネルギー，層間剝離損傷の投影面積，デント深さおよび CAI 強度を Table 3 に示す。また，衝撃試験後の試験片の画像および超音波探傷の画像を Fig. 3-6 に示す。Fig. 3 は S-25 試験片，Fig. 4 は M-25 試験片，Fig. 5 は M-50 試験片，Fig. 6 は M-75 試験片に対応しており，以下ではこの順に詳細を説明する。比較のため，Fig. 7, 8, Table 4 に先行研究⁵⁾の 0.02 mm，0.12 mm の積層板（以後，薄層試験片および標準厚試験片と表記する）のデータを引用する。これらの積層板は厚さ 0.02 mm の薄層プリプレグを用いて作製した積層板で積層構成はそれぞれ [45/0/-45/90]_{24s}，[45₆/0₆/-45₆/90₆]_{4s} である。各図において，上段は試験片の衝撃を与えた面と反対の面（以後，裏面と表記，また衝撃を与えた面を表面と表記）の写真，下段は表面からの超音波によるエコー画像である。超音波エコー画像の右側，下側の画像は幅方向，長

Table 3 Results of impact tests and CAI tests of ply-level hybrid laminates.

S-25

Impact energy [J/mm]	Displacement [mm]	Peak force [kN]	Dissipated energy [J/mm]	Projected damage area [mm ²]	Dent depth [mm]	CAI strength [MPa]
3	3.3	8.3	1.9	1795	0.11	238
5	4.6	8.8	2.7	3124	0.16	202
7	5.8	10.4	5.5	5012	0.55	150
M-25						
3	3.1	8.3	1.9	1210	0.13	303
5	4.4	9.5	3.3	2266	0.22	205
7	5.5	10.2	5.0	3068	0.37	180
M-50						
3	3.3	8.5	1.7	644	0.16	258
5	4.4	9.1	2.9	2987	0.18	221
7	5.5	9.3	5.0	3214	0.35	185
M-75						
3	3.0	9.2	1.1	43	0.15	363
5	4.6	9.9	3.6	2769	0.24	247
7	6.1	9.3	5.6	2991	0.46	177

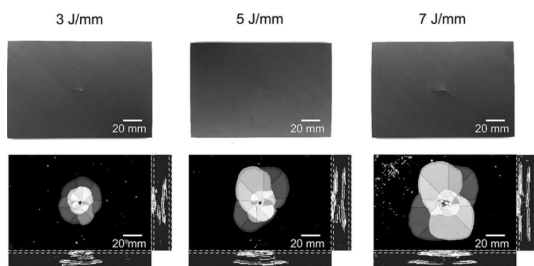


Fig. 3 Pictures and ultrasonic inspection images of S-25 laminates. In lower images, the area surrounded by chain line shows laminates which consist of thin-ply preregs.

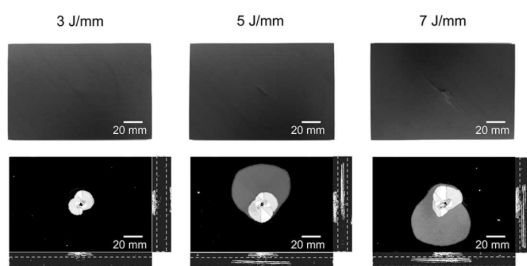


Fig. 5 Pictures and ultrasonic inspection images of M-50 laminates. In lower images, the area surrounded by chain line shows laminates which consist of thin-ply preregs.

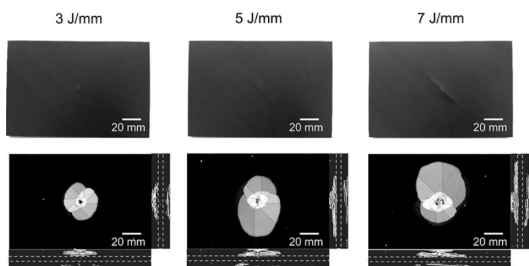


Fig. 4 Pictures and ultrasonic inspection images of M-25 laminates. In lower images, the area surrounded by chain line shows laminates which consist of thin-ply preregs.

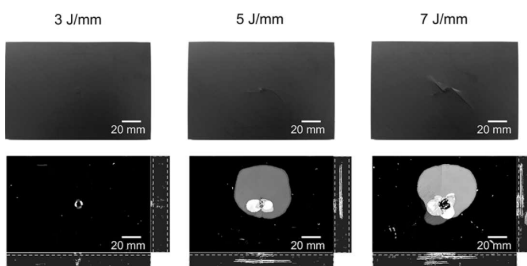


Fig. 6 Pictures and ultrasonic inspection images of M-75 laminates. In lower images, the area surrounded by chain line shows laminates which consist of thin-ply preregs.

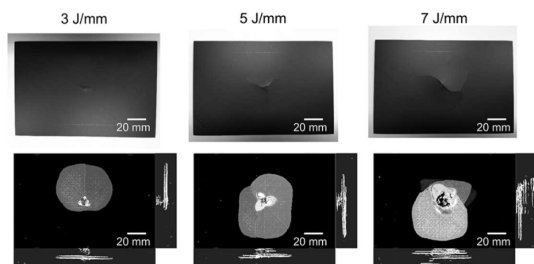
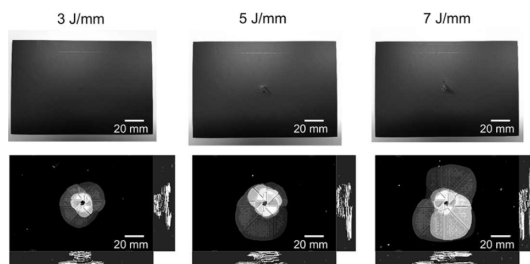
Fig. 7 Pictures and ultrasonic inspection images of thin laminates.⁵⁾Fig. 8 Pictures and ultrasonic inspection images of standard ply laminates.⁵⁾

Table 4 Results of impact tests and CAI tests shown in Ref. 5).

Thin ply (Ply thickness: 0.02 mm)

Impact energy [J/mm]	Displacement [mm]	Peak force [kN]	Dissipated energy [J/mm]	Projected damage area [mm ²]	Dent depth [mm]	CAI strength [MPa]
3	3.1	8.0	1.6	2449	0.11	283
5	4.8	8.3	3.5	3178	0.23	217
7	7.0	8.4	4.5	3495	0.80	155

Standard ply (Ply thickness: 0.12 mm)

3	3.2	7.8	1.4	1510	0.08	271
5	4.6	9.0	2.5	2719	0.12	211
7	5.2	11.5	3.5	3750	0.14	183

手方向側面から損傷を投影した画像である。

(1) S-25 試験片

Fig. 3 より, S-25 試験片では, 薄層試験片⁵⁾(Fig. 7)と同様に, 裏面に試験片中央から数本の繊維破断を伴うき裂が発生しており, 与えるエネルギーが大きくなるにつれ, き裂の長さが長くなっていた。超音波エコー画像より, 裏面側の薄層で構成される部分を除く板厚方向の広い範囲で均等に層間剝離が発生していることがわかる。衝撃エネルギーが大きくなるにつれて, 表層付近と中央層付近で発生する剝離が大きくなる傾向が見られた。平面のエコー画像で各層間での層間剝離の形状に着目すると, 標準厚試験片⁵⁾(Fig. 8)と同様に剝離が長く伸びている方向が各層における繊維方向と一致しており, 各層で発生したマトリクスクラックを起点として剝離が発生していると考えられた。山田ら⁵⁾は, 層厚さが異なる積層板を用いて衝撃試験を行い, 衝撃試験後の試験片を X 線 CT を用いて詳細に観察し, 層厚さが試験片内部の損傷形態に及ぼす影響を調べた。その結果, 層厚さが 0.12, 0.24 mm の積層板では隣接する層で発生したマトリクスクラックを連結するようにして層間剝離が発生し, らせん階段状に損傷が進展することを示しており^{6, 7, 9, 13)}, 同

様の形態が S-25 試験片の標準厚部で発生しているものと考えられた。

(2) M-25 試験片

Fig. 4 より, M-25 試験片では裏面に試験片中心を通る繊維方向に沿ったき裂が 1 本発生しており, エネルギーが大きくなるにつれて, き裂の長さが長くなっていた。超音波エコー画像から, 中央層付近の薄層で構成される部分を除く板厚方向の広い範囲で層間剝離が発生していることがわかる。また, 衝撃エネルギーが大きくなるにつれて, 表面付近の剝離が大きくなる傾向が見られた。層間剝離の発生形態については, 剝離の 1 辺が各層における繊維方向と一致していることから, S-25 試験片と同様にマトリクスクラックを起点として発生していることが確認できる。

(3) M-50, 75 試験片

Fig. 5, 6 より, M-50, 75 試験片では, 裏面において繊維方向に沿ったき裂と繊維破断の両方が発生していた。き裂の長さには差はあるものの, 同様の傾向が標準厚試験片⁵⁾(Fig. 8)においても確認できる。両試験片を比較すると, 薄層の割合が大きくなる M-75 試験片の方が繊維破断の発生度合いが大きくなっていることがわかる。

超音波エコー画像よりエネルギーが5 J/mm 以上になると中央層付近で大きな剝離が発生する傾向が見られた。この中央層付近で大きな層間剝離が発生する傾向は、薄層試験片⁵⁾ (Fig. 7) においても確認できるように、Saito ら⁶⁾ を含め多数報告されており、薄層化 CFRP 積層板の衝撃負荷による典型的な損傷形態と言える。このことから、薄層の割合が多くなるにつれて、薄層の損傷形態に移行していることを示している。薄層の割合が小さい M-25 試験片では、中央層付近で大きな層間剝離が発生する傾向は確認できず、標準厚部においてらせん階段状の破壊形態が見られたことから、薄層、標準厚で構成される部分でそれぞれに特徴的な損傷形態を示していることがわかる。

以上の結果から薄層の割合、薄層の板厚方向の位置が、層間剝離の板厚方向の発生状況、裏面での繊維破断の有無等の損傷形態に大きな影響を及ぼすことが確認できた。裏面の繊維破断の発生状況に着目すると、表層に薄層がある場合、または中央層に薄層がある場合でも、薄層の割合が大きくなると繊維破断が発生しやすくなる傾向が見られた。Yokozeki ら²³⁾ は、準静的押し込み試験 (quasi-static indentation test, QSI) において、積層板の層厚さが薄くなると、薄層化による損傷抑制効果が発現し、マトリクスクラックおよび層間剝離の発生が抑制されることにより、裏面付近で繊維破断が発生しやすくなることを示しており、本研究の結果とよく一致している。また、板厚方向の剝離の発生状況に着目すると、薄層の割合が小さい場合は、標準厚部でのみ層間剝離が発生する傾向が見られたのに対して、薄層の割合が増えると中央層付近で大きな剝離が発生する傾向が確認できた。このことから、層間剝離や繊維破断の抑制には、最適な薄層の積層数や配置が存在する可能性が示唆された。

(4) デント深さと最大荷重

Table 3 および Table 4 において、M-25, M-50, M-75 試験片 (Table 3) および薄層試験片⁵⁾ (Table 4) の 7 J/mm のときの変位に着目すると、薄層の割合が大きくなるにつれて、変位が大きくなっていることがわかる。さらに最大荷重について比較すると、薄層の割合が大きくなると小さくなる傾向が見られることから、薄層の割合の増加に伴って繊維破断の累積の度合いが大きくなり、積層板全体の剛性低下の度合いが大きくなるためと考えられた。Garcia-Rodriguez ら⁹⁾ は、厚さの異なる NCF を用いて層厚さの異なる擬似等方積層板を作製して衝撃試験を行い、薄層化により板厚方向の繊維破断の累積が大きくなることにより、積層板全体の剛性が低下し、最大

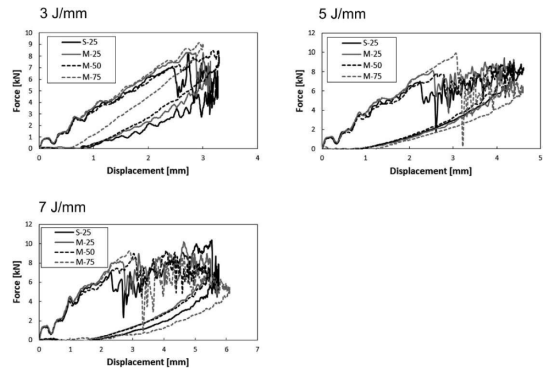


Fig. 9 Force-displacement curves of impact tests using ply-level hybrid laminates.

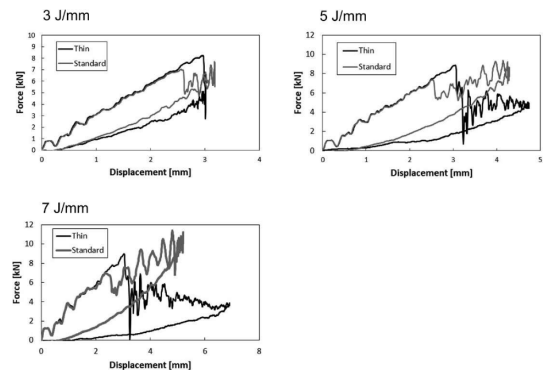


Fig. 10 Force-displacement curves of impact tests shown in Ref. 5).

荷重が小さくなることを示しており、本研究の結果とよく一致している。また、7 J/mm のときのデント深さについて、M-25, M-50, M-75 試験片 (Table 3) および薄層試験片⁵⁾ (Table 4) で比較すると、薄層の割合が大きくなると深くなっており、裏面だけでなく表面の打痕付近においても繊維破断が発生しやすくなる傾向を示した。

3.2 薄層・標準厚ハイブリッド積層板を用いた衝撃試験の荷重-変位曲線および CAI 強度

(1) 薄層の配置による比較

Fig. 9 に薄層・標準厚ハイブリッド積層板の衝撃試験の荷重-変位曲線を示す。比較のため、Fig. 10 には薄層試験片および標準厚試験片のデータ⁵⁾ を示す。先行研究⁵⁾ では、Fig. 10 に示すように、標準厚試験片⁵⁾ では変位の増加に伴い荷重が増加し大きな荷重低下は見られないのに対し、薄層試験片⁵⁾ では繊維破断の発生により最大変位量に達するまでに大きな荷重低下が発生する傾向が示されている。S-25, M-25 試験片の曲線の荷重低下挙

動の違いに着目すると、表層に薄層が配置されている方が、大きな荷重低下を示しており、裏面の繊維破断の発生度合いの違いを示していることがわかる。Sasikumarら¹⁵⁾は、層厚さが異なるNCFを用いて層厚さの異なる擬似等方積層板を作製して、衝撃試験およびQSI試験を実施し、薄層化された積層板の衝撃試験の荷重-変位曲線に見られる急激な荷重低下は繊維破断の発生を示していることを明らかにしている。このことと裏面画像の繊維破断の発生状況を合わせると、本研究の考察においてもこの急激な荷重低下は繊維破断とみなすことが妥当であると言える。この結果は裏面付近で損傷抑制効果が発現することで、繊維破断が発生しやすくなることを示したYokozekiら²³⁾の結果ともよく一致していると考えられた。Sasikumarら¹⁹⁾は、厚さ0.067, 0.134 mmのNCFを用いて、厚さ0.134 mmの層を裏面に配置した非対称の薄層・標準厚ハイブリッド積層板と全層にわたって薄層化した積層板を作製し、CAI試験を実施した。その結果、ハイブリッド積層板では、裏面の繊維破断の発生が抑制され、CAI強度が向上することを示している。CAI強度は層間剝離と繊維破断の両方に影響を受けると考えられるが、薄層の配置を変えることで特に繊維破断の発生およびそれに伴うCAI強度の低下を抑制できる可能性が考えられた。

(2) 薄層の割合による比較

Fig. 9に示すように、衝撃エネルギーが3 J/mmのときは、曲線の傾き、最大荷重には違いはあるものの、荷重低下挙動に差は見られなかった。一方、衝撃エネルギーが5 J/mmまたは7 J/mmのときのグラフにおいて薄層の割合に応じて荷重低下挙動に違いが見られた。いずれの積層板においても、薄層試験片⁵⁾(Fig. 10)と同様に変位が3 mm程度に達するまでは荷重低下挙動に差がないのに対して、変位が3 mm程度に達した時点で大きな荷重低下が発生しており、荷重低下後の挙動に積層構成による差が見られた。M-25, M-50, M-75試験片において荷重低下の度合いに着目すると、薄層の割合が大きくなると、低下の度合いが大きくなる傾向が見られた。また、大きな荷重低下の後の曲線の傾きも薄層の割合が大きくなると、小さくなる傾向が見られた。これらの結果は、薄層が表層付近に配置されていない場合においても、薄層の割合が高くなると、繊維破断の発生の度合いが増加することを示している。

これに加えて、中央層付近に薄層を配置することで薄層化による損傷抑制効果が発現することにより、中央層付近での大きな剝離の発生しやすくなる傾向が見られた

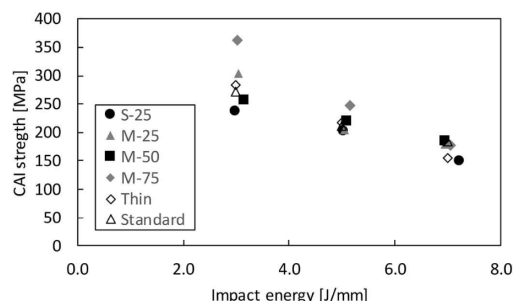


Fig. 11 CAI strength of hybrid laminates presented against the impact energy. Data shown in Ref. 5) are also plotted in this graph.

ことから、薄層を中央層付近に固めて配置することは、繊維破断や層間剝離の発生をかえって多くしてしまう可能性が考えられた。

Sebaeyら¹⁷⁾は、繊維目付量が80, 320 g/m²の2種類の織物を用いて、薄層を中央層付近に配置したものと、薄層を板厚方向に均等に配置した2種類の薄層・厚層ハイブリッド積層板を作製し、衝撃試験を実施した。その結果、両積層板を比較すると薄層を均等に配置した積層板の方がCAI強度が高くなることを示している。この結果と合わせて考えると、薄層をブロック化して配置することにより、積層板の力学的特性が低下する可能性が考えられた。

(3) 薄層・標準厚ハイブリッド積層板のCAI強度

Fig. 11に各試験片のCAI強度を実測した圧子の速度から計算した衝撃エネルギーに対してプロットしたグラフを示す。比較のために先行研究⁵⁾の薄層試験片および標準厚試験片のデータも同グラフ上にプロットした。衝撃エネルギーが7 J/mmの場合、いずれの試験片においても、繊維破断の影響によりCAI強度は低いことから、薄層や標準厚、そのハイブリッド積層の効果はあまり見られなかった。一方、低エネルギー域においては、薄層の板厚方向の位置や量により繊維破断や層間剝離の抑制が可能であり、薄層を板厚方向の適切な位置に配置することにより、CAI強度低下を抑制することが可能であると考えられた。横関ら¹⁶⁾は、繊維目付量が75, 145 g/m²のプリプレグを用いて、薄層、標準厚、ハイブリッド積層板を作製して、CAI試験を行い、層厚さおよびハイブリッド積層が損傷形態およびCAI強度に及ぼす影響を調べている。本研究とは層厚さ、使用した炭素繊維、マトリクス樹脂の高じん化の有無、積層構成、 V_f 等の違

Table 5 Results of impact tests and CAI tests of FML.

Specimen	Displacement [mm]	Peak force [kN]	Dissipated energy [J/mm]	Dent depth [mm]	CAI strength [MPa]
Reference	4.5	7.5	2.9	0.23	235
FML 6.25%	4.1	8.3	2.8	0.31	245
FML 12.5%	4.0	8.1	2.8	0.19	206
FML 25%	4.1	7.8	3.2	0.30	244

いがあり、直接の比較はできないが、表層と中央層に全板厚の50%にあたる部分にそれぞれ薄層を配置した2種類のハイブリッド積層板と薄層、標準厚積層板とで衝撃負荷(衝撃エネルギー:6.67 J/m)による損傷挙動およびCAI強度の比較を行った。その結果、中央層に薄層を配置した積層板は薄層積層板と、表層に薄層を配置した積層板は標準厚積層板と衝撃試験時の荷重変動挙動、最大荷重、CAI強度において同じ傾向を示すことを明らかにしている。高じん化したCFRP積層板においては、薄層化によりCAI強度が向上している点が本研究の結果と異なるものの、ハイブリッド積層により、薄層と標準厚の損傷挙動やCAI強度の特徴を板厚方向に任意に配置することが可能であることを示しており、本研究で得られた結果と一致している。これらの結果から、ハイブリッド積層とマトリクス樹脂の高じん化を組み合わせることでCAI強度向上における相乗効果が期待できると考えられた。

3.3 金属箔ハイブリッド積層板の損傷形態とCAI強度

(1) 金属箔ハイブリッド積層板の損傷形態

各試験片の衝撃試験における最大変位量、最大荷重、吸収エネルギー、層間剝離損傷の投影面積、デント深さおよびCAI強度をTable 5に示す。また、衝撃試験後の試験片の裏面の画像および試験片中央を通る試験片長手方向の断面画像をFig. 12, Fig. 13に示す。なお、金属箔を含まない全層にわたり層厚さが0.04 mmの薄層試験片であるReferenceのデータについては、本研究にて新たに試験を行い、取得したものとなっている。

裏面の画像を比較すると、Reference(薄層試験片)では大きな繊維破断が発生しているのに対して、FML試験片では繊維破断は発生しているが、その発生度合いが抑制されていることが確認できる。断面画像を比較すると、ReferenceとFML 25%試験片では裏面から数層にわたって繊維破断が、FML 25%試験片では金属層の破断が板厚方向に累積していることが確認できるのに対して、FML 6.25, 12.5%試験片では、裏面において繊維破断の累積は確認できない。FML 6.25, 12.5%試験片では、

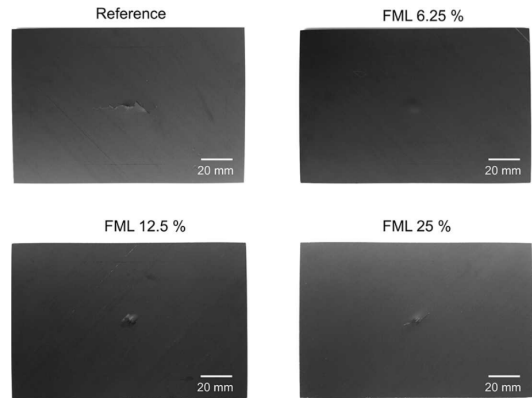


Fig. 12 Pictures of back faces of the FML after impact.

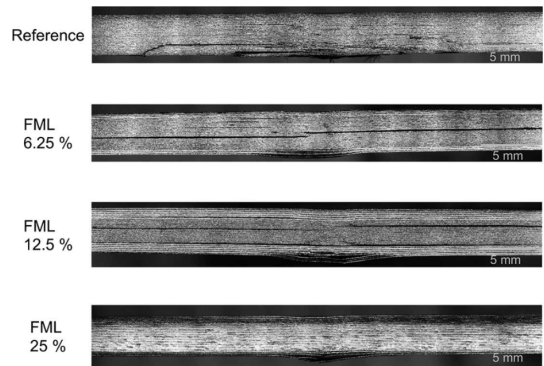


Fig. 13 Cross-sectional images of the FML after impact.

金属箔の塑性変形により、薄層化による損傷抑制効果によりCFRP積層板に見られる脆性的な破壊形態が抑制されていると考えられた。ただし、FML 12.5%試験片では、金属箔が挿入された領域のすぐ内側のCFRP層で繊維破断が発生していた。FML 12.5%試験片では、金属箔の数が多くなっており、これにより金属箔が挿入された領域の剛性が高くなり、CFRP層と金属箔が剝離により分離した結果、最も外側のCFRP層で繊維破断が発生したと考えられた。一方、ReferenceとFML 25%積層板

では、金属箔の有無にかかわらず、板厚方向全体にわたって、薄層化による損傷抑制効果が発現することで裏面付近に繊維破断が発生したと考えられた。

断面画像より層間剝離について着目すると、Reference, FML 25%試験片では裏面付近で多く層間剝離が発生しているのに対して、FML 6.25%, 12.5%試験片では中央層付近の大きな剝離と金属箔が挿入されている層に複数の層間剝離が発生していることがわかる。FML 6.25%, 12.5%試験片において、金属箔が挿入されている層で複数の層間剝離が発生したのは、金属箔とCFRPでの変形量の違いによるものと考えられた。特に、金属箔の数が多いFML 12.5%試験片においては、CFRP層と金属箔の層間でも大きな剝離が発生した。一方、FML 6.25%, 12.5%試験片では中央層付近で大きな剝離も発生している。これは裏面付近の層間剝離および金属箔の塑性変形により衝撃エネルギーが消費されているものの、その一部は吸収されずに中央付近の大きな層間剝離の発生に消費されたためと考えられた。これに対して、FML 25%試験片では、裏面の繊維破断と金属箔の塑性変形および破断によりすべての衝撃エネルギーが吸収されたため、中央層付近での大きな層間剝離の発生が抑制されたと考えられた。金属箔とCFRP層とも厚さは同じ0.04 mmであるため、金属箔が挿入された場合でも板厚方向の均質性が高くなっており、CFRP、金属の違いにかかわらず隣接する層の拘束による損傷抑制効果に加えて、金属の塑性変形によるエネルギー吸収効果が発現したと考えられた。

(2) 金属箔ハイブリッド積層板の衝撃試験の荷重-変位曲線およびCAI強度

衝撃試験の荷重-変位曲線およびCAI試験の結果をまとめたグラフをFig. 14, Fig. 15に示す。まず、Fig. 14において、金属箔ハイブリッド積層板とReferenceで荷重-変位曲線における荷重低下に違いが見られた。繊維破断を伴う破壊形態を示すReferenceでは著しい荷重低下の後、平坦な領域が続いていた。一方、金属箔ハイブリッド積層板では、Referenceに見られたような大きな荷重低下は見られず、最大変位量に達するまで小さい荷重低下を伴うものの全体として荷重の増加傾向が見られた。この曲線の違いからも、金属箔の塑性変形により、繊維破断の発生および板厚方向の累積が抑制されることが確認できる。この結果、積層板全体の剛性が低下せず、最大荷重は金属箔ハイブリッド積層板の方がReferenceより高い値を示したと考えられた。3種類の金属箔ハイブリッド積層板で最大荷重、最大変位量に大きな

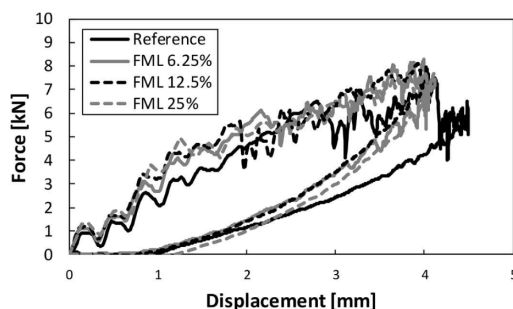


Fig. 14 Force-displacement curves of impact tests using FML.

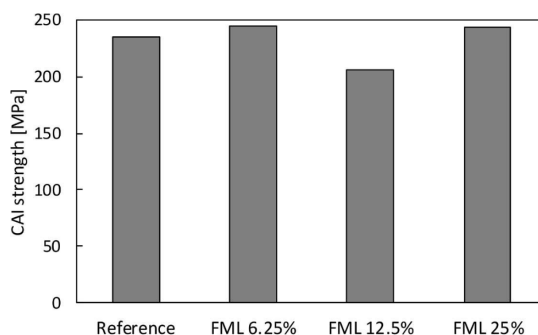


Fig. 15 Results of CAI strength of FML.

差は見られなかった。このことから、金属箔ハイブリッド積層板においては衝撃荷重に対しては裏面付近の金属箔の塑性変形が衝撃エネルギーの吸収により大きく影響していることが考えられた。

次に、Fig. 15に示したCAI強度に着目すると、FML 6.25%試験片ではReferenceと比べてCAI強度の改善が見られた。FML 6.25%試験片では表層近くの金属箔の塑性変形により衝撃エネルギーの大部分が吸収され、金属箔とCFRP積層板の層間で剝離が発生したことから荷重を負荷できる健全部分が多く残ったことが考えられた。これとは対照的にFML 12.5%試験片ではFML 6.25%試験片とは異なり、CFRP層と金属箔の層間で大きな剝離が発生しており、この剝離により積層板全体の対称性が損なわれたため、CAI強度がReferenceの値を下回ったと考えられた。また、CFRP層と金属箔の層間で大きな剝離の内側で繊維破断が発生しており、荷重を負荷できる健全なCFRPの割合が小さくなったことも影響したと考えられた。一方、FML 25%試験片についてもReferenceと比較して、CAI強度の改善が見られた。FML 25%試験片では損傷箇所は裏面の繊維破断および金属箔の破断にとどまり、中央層付近の損傷への影響が

抑制されており、荷重を負担できる健全箇所が多く残ったため高いCAI強度を示したものと考えられた。つまり、金属箔の塑性変形により繊維破断の発生を抑制すること、吸収エネルギーを大きくすることで層間剥離の発生を抑制することがCAI強度向上に有効であることがわかった。

4. 結 言

本研究では薄層CF/epoxy プリプレグを用い、積層板を構成する各層の層厚さが異なるハイブリッド擬似等方性積層板を作製した。また、薄層プリプレグ積層板においてCAI強度低下を引き起こす繊維破断を抑制する目的で、薄層CF/epoxy プリプレグおよび金属箔を用いたハイブリッド積層板を作製した。作製した積層板について衝撃試験およびCAI試験を行い、薄層・標準厚のハイブリッド積層および金属箔を配置する板厚方向の位置と数が衝撃負荷による損傷挙動および力学的特性に及ぼす影響を調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 薄層・標準厚ハイブリッド積層および金属箔の挿入によりCAI強度が改善する効果が確認された。特に、金属箔ハイブリッド積層板ではその挿入位置によって差があるものの、約4%の改善が見られた。

(2) 薄層の割合、位置を調整することで繊維破断の発生や層間剥離の発生を抑制できることがわかった。これにより、低衝撃エネルギー域でのCAI強度が変化することがわかった。一方、表層付近に薄層を配置すると裏面での繊維破断の発生が大きくなる傾向が見られた。これは、高衝撃エネルギー域でのCAI強度低下に影響している。

(3) 金属箔を表層に配置することで、裏面での繊維破断の発生を抑制できることがわかった。また、金属箔の塑性変形および破断により吸収エネルギーを大きくすることができ、損傷発生箇所を限定できることがわかった。この2つの効果が大きいとき、CAI強度は向上していた。

参 考 文 献

- 1) S. Sihn, R.Y. Kim, K. Kawabe & S.W. Tsai : *Compos. Sci. Technol.*, **67** (2007), 996-1008.
- 2) 川邊和正, 笹山秀樹, 影山和郎, 小形信男 : 日本複合材料学会誌, **34**, 5 (2008), 173-181.
- 3) R. Amacher, J. Cugnoni, J. Botsis, L. Sorensen, W. Smith & C. Dransfeld : *Compos. Sci. Technol.*, **101** (2014), 121-132.
- 4) C. Furtado, A. Arteiro, G. Catalanotti, J. Xavier & P.P. Camanho : *Compos. Struct.*, **145** (2016), 1-14.
- 5) 山田耕平, 山本 慧, 金崎真人, 西川雅章, 松田直樹, 川邊和正, 北條正樹 : 日本複合材料学会誌, **46**, 1 (2020), 21-30.
- 6) H. Saito, M. Morita, K. Kawabe, M. Kanesaki, H. Takeuchi, M. Tanaka & I. Kimpara : *J. Reinf. Plast. Compos.*, **30**, 13 (2011), 1097-1106.
- 7) 金崎真人, 齊藤博嗣, 田中基嗣, 北條正樹, 金原 勲 : 日本複合材料学会誌, **39**, 3 (2013), 89-98.
- 8) A. Soto, E.V. Gonzalez, P. Maimi, F. Martin de la Escalera, J.R. Sainz de Aja & E. Alvarez : *Composites Part A*, **109** (2018), 413-427.
- 9) S.M. Garcia-Rodriguez, J. Costa, A. Bardera, V. Singery & D. Trias : *Composites Part A*, **113** (2018), 53-65.
- 10) J. Cugnoni, R. Amacher, S. Kohler, J. Brunner, E. Kramer, C. Dransfeld, W. Smith, K. Scobbie, L. Sorensen & J. Botsis : *Compos. Sci. Technol.*, **168** (2018), 467-477.
- 11) S.M. Garcia-Rodriguez, J. Costa, V. Singery, I. Boada & J.A. Mayugo : *Composites Part A*, **107** (2018), 409-420.
- 12) T.A. Sebaey, E.V. Gonzalez, C.S. Lopes, N. Blanco, P. Maimi & J. Costa : *Compos. Struct.*, **101** (2013), 255-264.
- 13) A. Wagih, P. Maimi, N. Blanco, S.M. Garcia-Rodriguez, G. Guilamet, R.P. Issac, A. Turon & J. Costa : *Composites Part A*, **117** (2019), 76-91.
- 14) T.A. Sebaey, E.V. Gonzalez, C.S. Lopes, N. Blanco & J. Costa : *Compos. Struct.*, **106** (2013), 96-103.
- 15) A. Sasikumar, D. Trias, J. Costa, N. Blanco, J. Orr & P. Linde : *Composites Part A*, **121** (2019), 232-243.
- 16) 横関智弘, 青木雄一郎, 小笠原俊夫 : 日本航空宇宙学会論文集, **55**, 643 (2007), 388-395.
- 17) T.A. Sebaey & E. Mahdi : *Composites Part A*, **86** (2016), 31-38.
- 18) A. Sasikumar, D. Trias, J. Costa, N. Blanco, J. Orr & P. Linde : *Compos. Struct.*, **215** (2019), 432-445.
- 19) A. Sasikumar, D. Trias, J. Costa, V. Singery & P. Linde : *Compos. Struct.*, **220** (2019), 93-104.
- 20) M. Sadighi, R.C. Alderliesten & R. Benedictus : *Int. J. Impact Eng.*, **49** (2012), 77-90.
- 21) G.B. Chai & P. Manikandan : *Compos. Struct.*, **117** (2014), 363-381.
- 22) 川邊和正, 笹山秀樹, 山田耕平, 近藤慶一, 伊與寛史 : 日本複合材料学会誌, **42**, 3 (2016), 119-122.
- 23) T. Yokozeki, A. Kuroda, A. Yoshimura, T. Ogawara & T. Aoki : *Compos. Struct.*, **93** (2010), 49-57.