

オートクレーブ法による Al_2O_3 -CFRP-金属 積層複合材料の作製と機械的特性評価

堀口勝三*1・森山実*2・多田晃*3・松峯拓郎*4

Manufacture and mechanical properties of laminated composites
consisting of Al_2O_3 -CFRP-metal layers by autoclave method

HORIGUCHI Katsumi, MORIYAMA Minoru, TADA Akira and MATSUMINE Takurou

In order to improve toughness of Al_2O_3 ceramic, CFRP and metal were laminated on Al_2O_3 ceramic plate by the autoclave technique. The metal used in this study included Al, Ti, D2052 (damping alloy: Mn-Cu-Ni-Fe) and SUS304 plates, and perforated SUS304 plates with various hole diameters. The laminated composites were characterized by bulk density measurement, 3-point flexural and Charpy impact tests. As a result of flexural and impact tests, the specific flexural strength of Ti-CFRP- Al_2O_3 -CFRP-Ti and the specific Charpy impact strength of Al-CFRP- Al_2O_3 -CFRP-Al reached $0.133 \text{ MPa}/(\text{kg}/\text{m}^3)$ and $26.3(\text{J}/\text{m}^2)/(\text{kg}/\text{m}^3)$, which were 1.40 and 22.1 times higher than those of monolithic Al_2O_3 , respectively.

キーワード : Al_2O_3 , CFRP, Metal, Laminated composites, Flexural strength

1. 緒 言

セラミックスは、一般に、曲げ強度、硬度、耐熱性、化学的安定性(耐食性)は高いが、耐衝撃性(靱性、粘性)が低く、このことが実用上ネックとなり、用途が限られることが多い。

耐衝撃性の向上には、セラミックスそのものの靱性を向上することが第一であるが、セラミックスは本来脆性材料であり、靱性を大きく改善することは容易ではない¹⁾。このため、入手が容易で軽く強度が大きい炭素繊維強化プラスチック(CFRP)²⁾や靱性が大きい金属³⁾をセラミックス板の周囲に貼り付け、サンドイッチ型の構造壁(積層型構造)とすることで、室温における強度や靱性の向上を図ることを試みた。

これまでの研究で、筆者らは、セラミックス層として厚さ 2mm の SiC 板 1 枚、CFRP 層として 0.3mm

厚のエポキシ樹脂含有クロスプリプレグ 2 枚(厚さ 2 枚重ねで約 0.6mm)、金属層として 0.5mm 厚の大同特殊鋼製「スターサイレント D2052」制振合金板⁴⁾(以下、DM と略す)1 枚を用いてオートクレーブ法(以下、AC 法と略す)により貼りあわせた場合、SiC 単板の場合と比較して、CFRP-SiC-CFRP の 3 層構造のときに比曲げ強度(曲げ強度/嵩密度)比で 1.58 倍、DM-CFRP-SiC-CFRP-DM 5 層構造のときに比衝撃強度(シャルピー衝撃吸収エネルギー/嵩密度)比で 27.6 倍に向上できることを明らかにした⁵⁾。

上記の研究では、セラミックス層として SiC 板、CFRP 層としてクロスプリプレグ 2 枚重ね、金属層として DM 板を用いたが、今回の研究では、セラミックス層として汎用性のある Al_2O_3 板、FRP 層として UD プリプレグ 2 枚とクロスプリプレグ 1 枚の合計 3 枚重ね、金属層としてアルミニウム合金、純チタン、DM、SUS-304 ステンレス、および、孔径の異なる SUS304 パンチングメタル(PM)等を用い、金属板の材質やパンチングメタルの孔径に基づく影響を調査した。また、先の研究⁵⁾で、AC 法と手塗り法を比較した場合、機械的特性は AC 法の場合に大きく向上することが分か

*1 工学科機械ロボティクス系教授

*2 長野工業高等専門学校名誉教授

*3 株式会社羽生田鉄工所 研究開発室部長

*4 株式会社羽生田鉄工所 研究開発室

原稿受付 2022 年 5 月 20 日

ったので、本研究では AC 法に統一して試料作製を行った。

積層材料に関する研究は、テープキャスト法による $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ ⁶⁾, $\text{Ti}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ⁷⁾ などがあり、比較的薄い層 (100~1000 μm) を重ねて成形後ホットプレス焼結し、曲げ強度や破壊靱性の向上を図った例が報告されている。オートクレーブ法については Al/CFRP ⁸⁾, $\text{carbon}/\text{glass}$ ⁹⁾, $\text{carbon}/\text{aramid}$ ⁹⁾ の研究等が報告され、層間破壊靱性の向上や引張強度特性の評価が行われている。セラミックス, CFRP および金属, 以上 3 種類を貼り合わせた報告例は見当たらない。

2. 積層複合材料の作製と実験方法

2-1 複合材料の構造と素材

Fig. 1 に、作製した積層複合材料の構造の 5 層積層構造の例を示す。基本構造は、中央にセラミックス層として Al_2O_3 板 (Al_2O_3 と略記) 1 枚, その両側に CFRP 層 (CFRP と略記), さらにその両外側に金属層として材質の異なる幾種類かの金属板 (Metal と略記) 各 1 枚を配置した。CFRP 層と金属層をセラミックス層の外側に配置する事で、加わる衝撃力は、セラミックスに直接加わる場合よりも緩和できる構造にできると考えた。CFRP 層は、内部がさらに 3 層の構造をしており、 Al_2O_3 板に接する内側から Metal 板に接する外側に向かって UD プリプレグ X 方向 (X 軸方向に繊維配列), UD プリプレグ Y 方向 (Y 軸方向に繊維配列), 綾織クロスプリプレグ (繊維方向は X および Y 方向) 各 1 枚を重ねた構造とした。Metal には、アルミ合金板 (Al), 純チタン板 (Ti), スターサイレント制振合金 (DM), SUS304 ステンレス板 (SUS) を選定した。ステンレス板は、通常の平板の他に、孔径の異なるパンチングメタル (SUSPM) 平板も用意した。3 層構造の場合は、5 層構造において外側にある Metal 層を取り除いた CFRP- Al_2O_3 -CFRP から構成される 3 層構造体とした。

Table 1 および Table 2 に、積層複合材を構成する個別材料の品名と詳細特性を示す。詳細特性は、それぞれのメーカーのカタログ値を示した。 Al_2O_3 と Metal はそれぞれ厚さ 2.0, 0.5mm の単板で統一したが、素材入手の都合上、Table 2 に示す SUSPM0.35 のみ例外として 0.2mm の厚さとした。CFRP 層は厚さ 0.144 mm の UD プリプレグを X 方向および Y 方向にそれぞれ 1 枚, 厚さ 0.20mm の綾織クロスプリプレグを 1 枚, 以上 3 枚重ねて AC 処理時に複合体を作製した。3 枚重ねた CFRP 層の厚みは 0.5mm である。

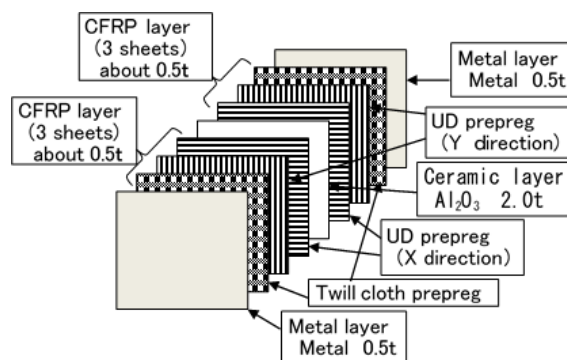


Fig. 1 Schematic structure of laminated composites. Ceramic layer: Al_2O_3 ceramic plate in center position. CFRP (carbon fiber reinforced plastic) layer: UD \times 2 and cloth \times 1 prepreg sheets in both side position. Metal layer: one plate made of Al, Ti, DM (Damping metal, D2052), SUS (SUS304) or SUSPM (SUS304 perforated metal) in outer both side position. Thickness of each layer is also shown.

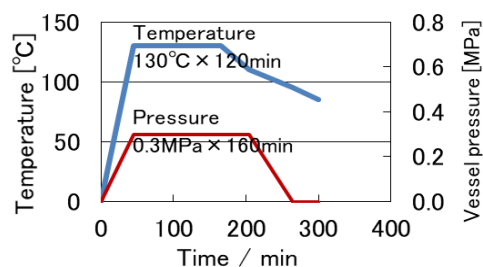


Fig. 2 Time process chart for temperature and gauge pressure in autoclave (AC) fabrication.

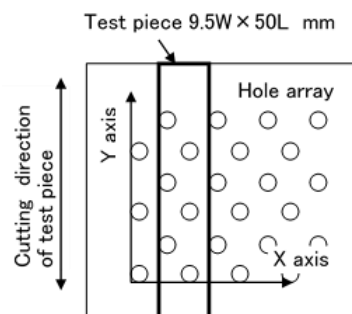


Fig. 3 Positional relations of X, Y axis and hole array (60deg. staggerd) pattern in perforated metal. Hole pitch interval in Y axis is longer than that in X axis. Cutting direction of test piece is parallel to Y axis.

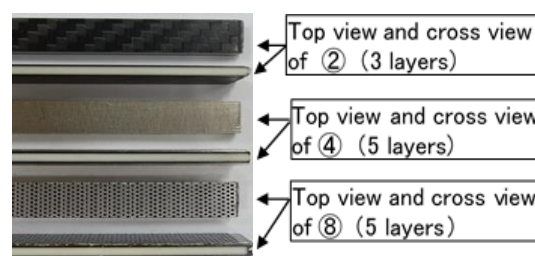


Fig. 4 Top view and cross sectional view of test piece for specimen ②, ④ and ⑧ in Table 3, respectively. Test piece size is approximately 9.5mm in width, 50mm in length.

Table 1 Properties of elements used for laminated composites.

Material	Properties
Ceramic layer Al ₂ O ₃	<ul style="list-style-type: none"> •Type P-AR2001 Al₂O₃ plate made in Asuzac Co., Ltd. •Size: about 100×100×2.0t mm [Specifications for P-AR2001] Composition:99.6%Al ₂ O ₃ , Bulk density: 3940kg/m ³ , Flexural strength: 370 MPa, Hv: 14.7 GPa, Young's Modulus: 390GPa, Fracture toughness: 4.0MPa·m ^{1/2} , Roughness: Ra1.6μm.
CFRP layer (Carbon fiber reinforced plastic)	○Laminating component of CFRP layer <ul style="list-style-type: none"> •UD prepreg with X fiber direction: 1 sheet •UD prepreg with Y fiber direction: 1 sheet •Twill Cloth prepreg with X and Y fiber direction: 1 sheet •Total thickness: 0.144+0.144+0.200=0.488 mm
UD prepreg	○UD (Uni-directional) prepreg type Pyrofil TR350G150S made in Mitsubishi Rayon Co., Ltd. <ul style="list-style-type: none"> •Prepreg sheet size: 100×100×0.144t mm. [Specifications for TR350G150S] UD prepreg. Fiber tow: type TR50S15L (PAN based fiber, Filament diameter: 7μm, Filament count: 15000, Tensile strength: 4.9GPa, Young's modulus: 240GPa, FAW(Fiber Areal Weight): 150 g/m ² , Epoxy(resin) content: 33wt%, Ply thickness: 0.144 mm.
Cloth prepreg	○Cloth prepreg type Pyrofil TR3523 381GMX made in Mitsubishi Rayon Co., Ltd. <ul style="list-style-type: none"> •Prepreg sheet size: 100×100×0.2t mm. [Specifications for TR3523 381GMX] Twill cloth. Fiber tow: type TR30S3L (PAN based fiber, Filament diameter: 7μm, Filament count: 3000, Tensile strength: 4.12GPa, Young's modulus: 234GPa), FAW: 200g/m ² , Epoxy(resin) content: 40wt%, Ply thickness: 0.2 mm.
Metal layer Al	○Aluminum plate A5052-H112 (Al-Mg alloy) <ul style="list-style-type: none"> •Size:100×100×0.5t Composition: 2.5%Mg-0.25%Cr-Al, Bulk density: 2680kg/m³, Tensile strength: 225MPa, Proof stress(0.2%): 125MPa, Maximum strain: 18%.
Ti	○Pure Titanium plate TP-340H made in Eiwa Metal Co., Ltd. <ul style="list-style-type: none"> •Size:100×100×0.5t Bulk density: 4510kg/m³, Tensile strength: 340~510MPa, Proof stress(0.2%): 215MPa, Maximum strain: 23%.
DM (Dumping metal)	○Alloy "Star silent" type D2052 made in Daido Steel Co., Ltd. <ul style="list-style-type: none"> •Size: 100×100×0.5t mm Bulk density: 7250kg/m³, Tensile strength: 530MPa, Proof stress (0.2%): 265MPa, Maximum strain: 40%, Young's modulus: 80GPa.
SUS304	○Stainless steel SUS-304 <ul style="list-style-type: none"> •Size: 100×100×0.5t mm Bulk density: 7930kg/m³, Tensile strength: 520MPa, Proof stress (0.2%): 205MPa, Maximum strain: 40%.

Table 2 Specifications of perforated (punching) metal made of SUS304.

Material	Properties
Metal layer SUSPM0.35	○SUS304 perforated metal D0.35 made in Okutani Wire Netting Mfg. Co., Ltd. <ul style="list-style-type: none"> •Size:100×100×0.2t mm Hole diameter: 0.35mm, Pitch: 1.05mm 60deg.staggered, Open area ratio: 10.1%.
SUSPM0.55	○SUS304 perforated metal D0.55 made in Okutani Wire Netting Mfg. Co., Ltd. <ul style="list-style-type: none"> •Size:100×100×0.5t mm Hole diameter: 0.55mm, Pitch:1.09mm 60deg.staggered, Open area ratio: 23.1%.
SUSPM1.0	○SUS304 perforated metal D1.0 made in Okutani Wire Netting Mfg. Co., Ltd. <ul style="list-style-type: none"> •Size:100×100×0.5t mm Hole diameter: 1.0mm, Pitch:2.0mm 60deg.staggered, Open area ratio: 22.6%.

Table 3 Specimen of laminated composites manufactured by Autoclave.

Specimen No.	Structure(Order of layer)*1	SUSPM*2 Hole dia.[mm]
①	Al ₂ O ₃ (1 layer)	
②	CFRP-Al ₂ O ₃ -CFRP(3 layers)	
③	Al-CFRP-Al ₂ O ₃ -CFRP-Al(5 layers)	
④	Ti-CFRP-Al ₂ O ₃ -CFRP-Ti(5 layers)	
⑤	DM-CFRP-Al ₂ O ₃ -CFRP-DM(5 layers)	
⑥	SUS-CFRP-Al ₂ O ₃ -CFRP-SUS(5 layers)	0
⑦	SUSPM0.35-CFRP-Al ₂ O ₃ -CFRP-SUSPM0.35 (5 layers)	0.35
⑧	SUSPM0.55-CFRP-Al ₂ O ₃ -CFRP-SUSPM0.55 (5 layers)	0.55
⑨	SUSPM1.0-CFRP-Al ₂ O ₃ -CFRP-SUSPM1.0 (5 layers)	1.0

*1 Al: Al plate(A5052-H112), Ti: Ti plate(TP-340H), DM: Dumping metal plate(D2052), SUS: SUS-304 plate.

*2 Perforated metal made of SUS304 with hole diameter of 0.35, 0.55 or 1.0 mm.

なお、制振合金板 DM⁴は、20at%Cu-5.0at%Ni-2.0at%Fe-73at%Mn 組成の合金であり、外部から振動エネルギーが加わると結晶構造転移により双晶を発生し、さらに双晶と双晶の間に摩擦が生じて熱エネルギーに変換し、これを放熱する事によって振動を吸収する特殊な合金である。

2-2 試料作製方法

本研究での複合材料の作製は、羽生田鉄工所製オートクレーブ (AC) 成形装置を用いて行った。AC 処理は、耐圧容器を用い、容器内部を加熱および加圧する処理であるが、CFRP プリプレグに含まれるレジン成分(エポキシ樹脂)が溶けて Al₂O₃、CFRP、Metal 各層が隣接層間で接着し、積層複合材料が作製可能となる。

以下に AC 成形法による複合材料の作製方法を示す。

まず、各素材をエタノールで超音波洗浄し、さらに、Al₂O₃ と Metal についてはアセトンで超音波洗浄し、脱脂処理した。次に、Fig. 1 に示す構造に積層し、均一な圧力を加わるように、さらにその両外側から、離型剤を塗布したステンレス製の押し板(厚さ 1mm)で挟んだ。これをブリザークロスに包み、さらにバギングフィルムで包み、気密シールを用いて密閉後、真空引きした。真空引きしたバッグを AC 装置の耐圧容器に収納し、3°C/min の昇温速度で室温から徐々に加熱後、温度 130°C、圧力 0.3MPa で 120 分間加熱・加圧処理し、110°C まで 2°C/min で冷却後、室温まで自然放冷した。Fig.2 に、AC 処理の時間に対する温度および圧力制御の詳細を示す。試料は、室温に到達後、取り出した。

2-3 試料名と試験片

Table 3 に、作製した積層試料の番号、積層構成に関する一覧を示す。Fig.1 の基本構造を持つ試料①～⑨までの 9 種類を作製した。

試料①は Al₂O₃ 単体であるが、この特性を基準とし、試料①、②、③を比較することで積層構造の違いによる特性の差異を調べた。また、試料③、④、⑤、⑥を比較することで 5 層構造における Metal 基板の材質による特性の差異を調べた。さらに、試料⑥、⑦、⑧、⑨を比較することにより同じ材質(SUS304)におけるパンチングメタル PM の孔径(あるいは開孔率)などによる特性の影響を調べた。

試料①～⑨の各種類について約 100mm 角サイズの積層複合材の試料を作製後、Fig.3 に示すように、ダイヤモンドカッターにより、幅約 9.5mm、長さ約 50mm の矩形試験片を、試験片長手方向が Y 軸方向となるように 8 本切り出した。密度測定を行った後、4 本を曲げ試験、4 本を衝撃試験に使用した。

Fig.4 に、試料②、④、⑧について、作製試験片の平面(上面)と断面を示す写真を代表例として示す。

2-4 特性評価

嵩密度は、ダイヤモンドカッターにより切り出した矩形積層試験片の質量を体積で除することにより求めた。

曲げ強度(抗折強度) σ_{B3} は、島津製オートグラフ AG-50kNE 型を用い、セラミックスの曲げ強度測定法(JIS R 1601)に基づき、クロスヘッド速度を 0.5mm/min として 3 点曲げ強度を(1)式より算出した。サンプル数は 4 本である。

$$\sigma_{B3} = \frac{3PL}{2wh^2} \quad [\text{Pa}]$$

(1)

ただし、 P は荷重[N]、 L は下部スパン長(0.0298m)、 w は試料の幅[m](約 9.5mm)、 h は積層材料の高さ(積層した全体の厚み)[m]である。曲げ試験時、試験片中央の荷重点の下端面にゲージ長 1mm の歪ゲージを貼り付け、ひずみ計測も行った。荷重とひずみ信号をサンプリングタイム 0.5 s で A/D 変換により同時にサンプリングしてパソコン上に記録し、実験後、データ処理により応力-ひずみ特性を求めた。

衝撃試験は、島津製低容量(4J)型シャルピー衝撃試験機を用いて測定した。シャルピー衝撃試験は、ハンマーを高速で振り降ろし、試験片に衝撃を与えて破壊し、破壊に要した吸収エネルギーを評価する試験方法である。(2)式に示すように単位断面積当たりの吸収エネルギーを算出した。なお、試験片には、U 形または V 形ノッチは加工されていない。サンプル数は 4 本である。

$$\frac{E}{A} = \frac{9.8WR(\cos\beta - \cos\alpha)}{wh} \quad [\text{J/m}^2] \quad (2)$$

ただし、 W はハンマー重量(1.120kg)、 R はアーム長(0.230m)、 α は振り子の持上げ角(150deg)、試料保持治具スパン長は一定(0.04095m)、 A : 試料の断面積[m²]、 β は振り上がり角[deg]、 w と h は(1)式と同じである。なお、計算で用いた断面積は、試料の厚み全体(積層した厚み全体)の断面積 wh とした。

3. 結 果

3-1 嵩密度

Fig. 5 に、積層試験片の嵩密度の測定結果を示す。嵩密度は、約 3033~4341kg/m³ の範囲にあり、Al 系 5 層積層試料③が最も小さく(3033kg/m³)、次いで 3 層積層の試料②(3181 kg/m³)であった。最も高かったのは、SUS 系 5 層積層試料⑥(4341 kg/m³)であった。全

体として、比較的軽量な材料の高密度といえる。

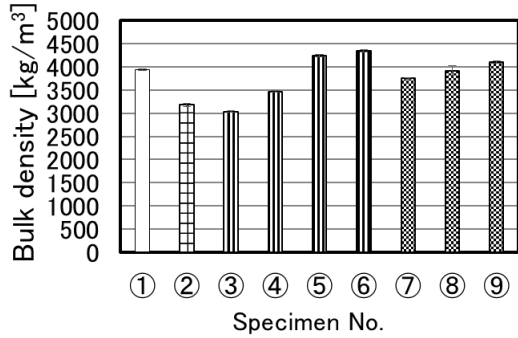


Fig. 5 Bulk density of laminated composites.

3-2 曲げ試験における応力-ひずみ特性

Fig.6~Fig.8に、各試料の3点曲げ試験において、荷重計と試験片の下端面中央に貼り付けた歪ゲージにより計測した応力-ひずみ特性の代表的特性例を示す。CFRP層とMetal層間の剥離、また、Al₂O₃層とCFRP層間の剥離はほとんどの試料で生じたが、Metalについては、折れ曲がるのみで、破断した試料は一つもなかった。このため、曲げ試験は、ひずみゲージを取り付けた試験の下面が3点曲げ治具面に接する寸前のところで試験を打ち切ったが、実際にはMetal層は折れ曲がっただけなので、荷重を加えればさらにひずみが大きくなることに注意を要する。

Fig. 6に、試料①、②、③に対応した積層構造の違いによる特性の比較を示す。試料①のAl₂O₃単体の板は直線状の特性を示し脆性的に破断したが、それ以外の積層試料は、荷重とひずみ関係が階段状に変化する非常に複雑な特性を示した。一般の繊維強化複合材の引張強度試験における応力-ひずみ特性は、最高強度は1段階目に達することが多いが³⁾、本曲げ試験の場合、2段階目、3段階目においても、応力、ひずみ両方共にさらに向上し、最終的に3段階目がピークに達することが比較的多く見られた。試料①に対して、試料②と③の曲げ強度は大きく変化しなかったが、最大ひずみは大きく向上したことがわかる。

Fig.7に、試料③~⑥に対応した5層構造試料において、Metalの材質による特性比較を示す。Metalは、③がAl合金(Al-Mg系A5052合金)、④が純Ti(TP-340H)、⑤がDM(D2052制振合金)、⑥がSUS304の場合の一例である。板厚は0.5mm共通とした。強度および最大ひずみが最も大きかったのは、Ti系5層構造の試料④の場合であり、この例では曲げ強度449MPa、最大ひずみ1.78%に達した。次いで、Al系5層構造の試料③の場合であった。SUS系5層構造の試料⑥は、曲げ強度、最大ひずみとも、大

きな特性の向上は見られなかった。

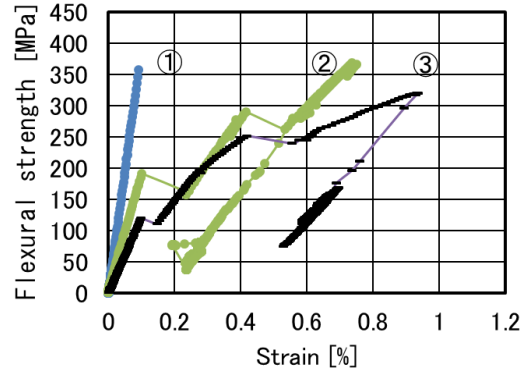


Fig. 6 Stress-strain curves of specimen ①, ② and ③ by AC method in flexural test. Specimens are consisted of single plate of Al₂O₃ ceramics (①), 3 layers of CFRP-Al₂O₃-CFRP (②) and 5 layers of Al-CFRP-Al₂O₃-CFRP-Al (③). The curves showed stepped changes as strength increased in second or third stairs for laminated composites.

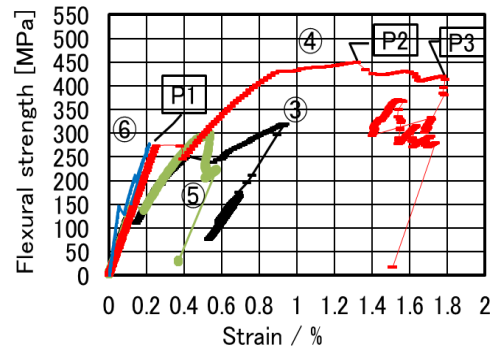


Fig. 7 Stress-strain curves of specimen ③, ④, ⑤ and ⑥ by AC method. Specimens are consisted of 5 layers of Metal-CFRP-Al₂O₃-CFRP-Metal. Metal is Al (③), Ti (④), DM (⑤), SUS304 (⑥) plate, respectively. P1, P2, P3 points on the curve of specimen No.④, for example, shows representatives of proportional limit (P1), maximum flexural strength (P2) and maximum strain (P3), respectively.

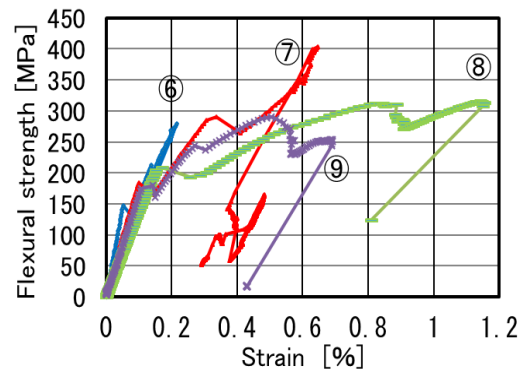


Fig. 8 Stress-strain curves of specimen ⑥, ⑦, ⑧ and ⑨ by AC method. Specimens are consisted of 5 layers of Metal-CFRP-Al₂O₃-CFRP-Metal. Metal is SUS304 perforated plate with hole diameter D=zero (⑥), D=0.35

(⑦), $D=0.55$ (⑧), $D=1.0$ (⑨) mm, respectively.

Fig.8に、試料⑥~⑨に対応した SUS304 を用いた 5 層構造におけるパンチングメタル(SUSPM)の孔径 D による影響の一例を示す。試料⑥は孔なし($D=0$), ⑦は $D=0.35$, ⑧は $D=0.55$, ⑨は $D=1.0$ mm の場合である。板厚は基本 0.5 mm(ただし⑦のみ 0.2 mm)である。曲げ強度は、試料⑦の $D=0.35$ の場合に最も高い値が得られ、一方、最大ひずみは、試料⑧の $D=0.55$ mm の場合に得られた。

以上、求めた応力-ひずみ曲線全体を眺めると、3 層および 5 層の積層材料の曲げ強度は、一般に 3 段階に変化し、一旦は強度低下を起こしても階段毎に強度が増し、一般的に 3 段目(一部 2 段目)で最高強度と最高ひずみに達する傾向が見られた。特に、Ti 板を用いた 5 層構造が強度、ひずみ両方とも大きく向上できることが分かった。

3-3 シャルピー衝撃試験

Fig.9に、シャルピー衝撃試験による衝撃強度(単位断面積当たりの吸収エネルギー)の結果を示す。 Al_2O_3 単体の試料①のエネルギー 4.68 kJ/m^2 を基準にすると、積層した試料の衝撃強度は、すべて大きく向上した。特に、SUSPM0.55系5層積層構造の試料⑧は 84.8 kJ/m^2 で 18.1 倍、Al系5層積層構造の試料③は 79.9 kJ/m^2 で 17.1 倍、Ti系5層積層構造の試料④は 76.9 kJ/m^2 で 16.4 倍に向上した。これらは、いずれも曲げ応力-ひずみ曲線で、大きくひずみが向上した試料である。3層構造(試料②)にするだけでも 43.8 kJ/m^2 となり 9.4 倍に向上できることが分かった。

4. 考 察

4-1 曲げ応力とひずみ特性

Fig.10に、試料①~⑨について、応力-ひずみ曲線の代表的な点である P1(黒い○印)、P2(青い■印)、P3(赤い×印)点の平均値をまとめた結果を示す。P1は、応力とひずみが正比例する比例限度を示す点、P2は、最高曲げ強度とそのひずみを示す点、P3は、最高ひずみとそのときの曲げ応力を示す点(破断点に相当する点)であり、それぞれの点の応力-ひずみ曲線上の具体的な位置を、Fig.7内に示す試料④の例について記した。なお、Fig.6に示す試料①については脆性破壊を示したので、P1, P2, P3点は重なることになる。P2点の大きなものは、Ti系5層構造の試料④の 459 MPa と SUSPM0.35系5層構造の試料⑦の 387 MPa であった。P3点の大きなものは、Ti系5層構造の試料④の 1.71% 、SUSPM0.55系5層構造の試料⑧の 1.42% で

あった。試料①の Al_2O_3 単体の曲げ強度と最大ひずみの平均値は 372 MPa , 0.0915% であるから、これを基

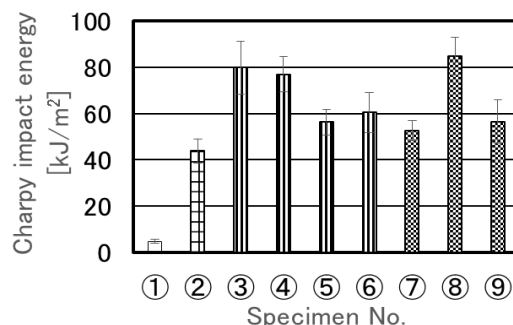


Fig. 9 Charpy impact strength (absorption energy).

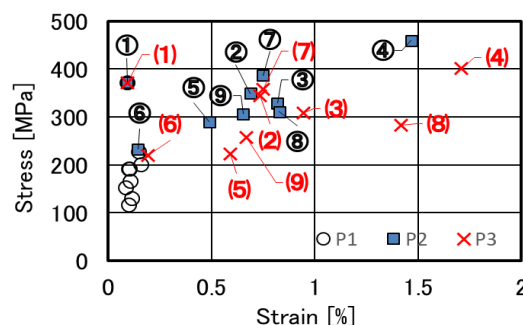


Fig. 10 Average stress and strain plots of P1(black ○), P2(blue ■) and P3(red ×) points derived from each stress-strain curves of the specimen. P1: Proportional limit, P2: Maximum flexural strength and its strain, P3: Maximum strain and its stress (close to breaking point).

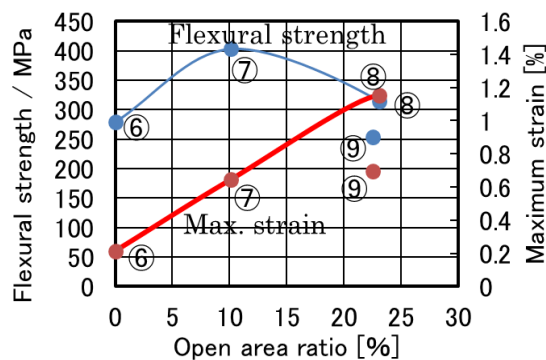


Fig. 11 Dependence by the open area ratio of the flexural strength and maximum strain in 5 layers of SUSPM-CFRP- Al_2O_3 -CFRP-SUSPM. Maximum strain was proportional to open area ratio of SUSPM (SUS304 perforated metal plate) in the range below 20%. Hole diameter ranges were zero (⑥) to 1.0 (⑨) mm, respectively.

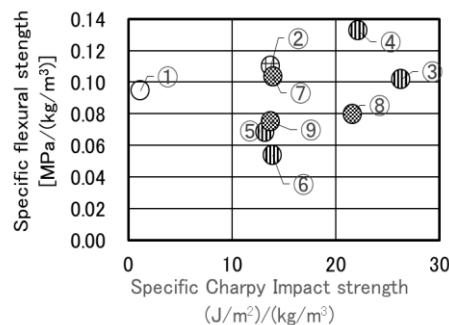


Fig. 12 Relations of specific flexural strength and specific impact strength for each specimen in Table 3.

準にすると、上記の点は、それぞれ曲げ強度比で 1.23 倍(試料④)、1.04 倍(試料⑦)、最大ひずみの比で 18.7 倍(試料④)、15.5 倍(試料⑧)となった。

全体として、特に、最大ひずみが大きく向上したことが分かる。なお、P1 点については、試料①の曲げ強度が最も大きく、他の積層試料の曲げ強度はこれより小さくなった。これは、CFRP や Metal の曲げに対する剛性が小さいので、Al₂O₃ 板に集中して荷重がかかったためであると推定される。すなわち、P1 点の荷重が同じと仮定した場合、積層試料の場合は厚みが増しているため、その応力は、試料①の場合より小さく求まることになる。

4-2 曲げ試験における破壊過程の観察

曲げ試験後の試料を観察したところ、以下のことが分かった。(1)いずれの試料も、CFRP 層と Metal 層は破断に至っていない。(2)層間の剥離は、SUSPM の場合を除いた③～⑥の試料では、CFRP 層と Metal 層の間で多く生じ、Al₂O₃-CFRP 層間の剥離は比較的少ない。(3)SUSPM を用いた試料⑦と⑧の場合、CFRP 層と Metal 層間の接着強度が改善され、層間の剥離は、多くは Al₂O₃ 層と CFRP 層間で生じている。試料⑦の場合は曲げ強度が向上し、試料⑧の場合は破断時の最大ひずみが 2 番目に大きかった。パンチングメタル (PM) は、強化やひずみの向上に有効と推定される。試料⑨の孔径 1.0mm の SUSPM の場合は、曲げ強度および最大ひずみ共に減少したことから、PM による特性向上には、最適な孔径、ピッチおよび板厚が存在すると推定される。

曲げ試験においては、強度特性が 3 段階に変化したが、撮影した試料横断面のビデオ映像と対応させて調査したところ、P1 点に対応する最初のステップは、中央の Al₂O₃ に微細クラックが発生するときに生じることが分かった。P2 点に対応する第 2 のステップは、映像上の明確な変化が認め難かったが、Al₂O₃ と CFRP 間で一部分に微小な剥離が生じ、このときのタイミングで発生すると推測される。P3 点に対応する第 3 のステップは、PM 以外の場合は CFRP 層と Metal 層間で、PM の場合は Al₂O₃ 層と CFRP 層間で試験片の中央位置から端部に向かって大きく剥離が進行するとき発生していた。第 3 のステップ後も CFRP 層および Metal 層は破断していないため変形の増加は生じるが、層間剥離のかなり進んだ状態となるため、第 3 のステップの曲げ強度値をその後に越えることはなかった。

層間の接着強度を高めれば、CFRP 層の破断に至るまで曲げ強度を高めることが可能となり、さらに一段と高い曲げ強度が得られる可能性がある。

4-3 曲げ強度と SUS-PM 開孔率の関係

Fig.11 に、試料⑥～⑨における SUS-PM の開孔率に対する曲げ強度と最大ひずみ(いずれも平均値)の依存性を示す。SUSPM の場合、孔径、孔ピッチ、穿孔形状などにより特性値は影響を受けると予想されるが、その一つの要素として開孔率をパラメータとして依存性を調べた結果について示した。曲げ強度は、開孔率が 10% 付近で最大を示しているが、開孔率に対する依存性は比較的小さかった。一方、最大ひずみは、開口率が小さい範囲内(20%以下)では、基本的に開孔率に比例する傾向があると推定される。

4-4 総合評価

単位密度当たりの強度を比較するため、曲げ強度の平均値を嵩密度で除した比曲げ強度、衝撃強度の平均値を嵩密度で除した比衝撃強度を求め、それぞれ縦軸、横軸に表して両特性をまとめた結果を Fig.12 に示す。Al₂O₃ 単体の場合の試料①の比曲げ強度 0.0946 MPa/(kg/m³)、比衝撃強度 1.19(J/m²)/(kg/m³) を基準として比較すると、比曲げ強度は、Ti 系 5 層構造の試料④が 0.133MPa/(kg/m³) で 1.40 倍、試料②の 3 層構造が 0.110 MPa/(kg/m³) で 1.16 倍に向上した。一方、比衝撃強度は、Al 系 5 層積層構造の試料③が 26.3(J/m²)/(kg/m³) で 22.1 倍に大きく向上し、この他、Ti 系 5 層積層構造の試料④の場合が 18.6 倍、SUSPM0.55 系の 5 層積層構造の試料⑧の場合が 18.2 倍に向上できた。本研究の場合、衝撃強度の向上は、最大ひずみの向上と密接に関係していると推定され、脆性破壊の防止に結びついている。

5. 総括

Al₂O₃セラミックスの曲げ強度や衝撃強度(吸収エネルギー)の向上を図るため、オートクレーブ(AC)法を用いて Al₂O₃ 単体板に CFRP や各種金属板(Metal)を 3 層または 5 層構造に貼りあわせて CFRP-Al₂O₃-CFRP 3 層積層複合体および Metal-CFRP-Al₂O₃-CFRP-Metal 5 層積層複合体を作製した。機械的特性を評価した結果、次のことが分かった。

- (1) 積層複合体の嵩密度は、約 3033~4341kg/m³ の範囲にあり、全体として、軽量な材料が得られた。
- (2) 曲げ応力-ひずみ曲線は、Al₂O₃ 単体の場合は、直線状の脆性特性を示したが、3 層および 5 層の積層複合体の場合は、3 段階程度の階段状特性を示すことが多かった。一旦は強度低下を起こして

も破断に至らず、階段毎に強度が増し、一般的に3段目(一部2段目)で最高強度と最高ひずみに達する傾向が見られた。

- (3) 曲げ応力-ひずみ曲線において、 Al_2O_3 セラミックス単体(Table 3 中の試料①)の場合の曲げ強度372MPaおよび最大ひずみ0.0915%を基準にすると、積層複合体の曲げ強度は、0.62~1.23倍を示し、強度変化は比較的少なかった。一方、最大ひずみは2.1~18.7倍と、材質によっては大きく向上することができた。曲げ強度を向上できた複合体は、MetalにTi板を用いたTi系5層構造積層体(試料④)の1.23倍等であり、最大ひずみを大きく向上できた複合体は、Ti系5層構造積層体(試料④)の18.7倍、ステンレスパンチングメタル孔径0.55mm板を用いたSUSPM0.55系の5層積層体(試料⑧)の15.5倍等であった。また、3層積層体(試料②)は、曲げ強度が0.94倍となるが、最大ひずみは8.0倍に向上できた。
- (4) 比曲げ強度(曲げ強度平均値/嵩密度)は、 Al_2O_3 単体(試料①)の場合の0.0946 MPa/(kg/m³)を基準として比較すると、Ti系5層積層体(試料④)の場合が0.133MPa/(kg/m³)で1.40倍、3層積層体(試料②)の場合が0.110 MPa/(kg/m³)で1.16倍に向上した。比曲げ強度の向上は、比較的小幅であった。
- (5) 比衝撃強度(衝撃吸収エネルギー/嵩密度)は、 Al_2O_3 単体(試料①)の場合の1.19 (J/m²)/(kg/m³)を基準として比較すると、Al系5層積層体(試料③)の場合が26.3(J/m²)/(kg/m³)で22.1倍に大きく向上し、以下、Ti系5層積層体(試料④)の場合が18.6倍、SUSPM0.55系5層積層体(試料⑧)の場合が18.2倍に向上できた。比衝撃強度は、大幅に向上できた。
- (6) セラミックス板をCFRPや金属板で積層化することで、特に最大ひずみと衝撃強度を大きく向上させることができた。

参 考 文 献

- 1) 日本セラミックス協会編集委員会講座小委員会編:「セラミックスの機械的性質(第3版)」, pp.13-153, 日本セラミックス協会(1979.1)
- 2) D.ハル, T.W.クライン:「複合材料入門(改訂版)」, pp.8-88, 培風館(2003.5)
- 3) 野口徹, 中村孝:「機械材料工学(改訂版)」, pp.20-227, 工学図書(2001.8)
- 4) 川原浩司, 殷副星:制振合金 M2052 の各分野における実用例 v.4.2. (榊セイシン技術資料, pp.1-22 (2003.4))
- 5) 堀口勝三, 森山実, 多田晃, 松峯拓郎: SiC-CFRP-制振金属積層複合材料の作製と機械的特性評価. 長野工業高等専門学校紀要, 第56号, 1-2(2022.6).
- 6) K.H. Zuo, D.L. Jiang, Q.L. Lin: "Mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ laminated composites", Mater. Lett., Vol.60, pp.1265-1268(2006)
- 7) Chao Wu, Zhi Wang, Qinggang Li, Guopu Shi: "Mechanical properties and crack propagation behaviors of laminated Ti/ Al_2O_3 composite", Journal of Asian Ceramic Societies, Vol.2, pp.322-325(2014.12)
- 8) Huiming Ning, Yuan Li, Ning Hu, Masahiro Arai, Naoya Takizawa, Yaolu Liu, Liangke Wu, Jinhua Li, Fuhao Mo: "Experimental and numerical study on the improvement of interlaminar mechanical properties of Al/CFRP laminates", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 216, pp.79-88(2015.2)
- 9) Jun Hee Song: "Pairing effect and tensile properties of laminated high-performance hybrid composites prepared using carbon/glass and carbon/aramid fibers", Composites Part B, Vol.79, pp. 61-66(2015)