

SiC-CFRP-制振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 SiC-CFRP-damping metal layers

HORIGUCHI Katsumi, MORIYAMA Minoru, TADA Akira and MATSUMINE Takurou

This study reports the manufacturing process and the mechanical properties for laminated composites consisting of 3 or 5 layers with ceramic, CFRP (carbon fiber reinforced plastic) and damping-metal plates. To compensate the brittleness in ceramics, CFRP and damping-metals were laminated on ceramic plate by both autoclave and hand-painting methods.

It was found that the specific 3 point flexural strength and the specific Charpy impact absorption energy increased to reach $0.145\text{MPa}/(\text{kg}/\text{m}^3)$ in case of 3 layers and $25.0(\text{J}/\text{m}^2)/(\text{kg}/\text{m}^3)$ in case of 5 layers by both autoclave methods, which were 1.58 and 27.6 times higher than those of monolithic SiC, respectively. Laminated composites have a high strength and impact strength.

キーワード : SiC, CFRP, Damping metal, Flexural strength, Impact strength

1. 緒 言

セラミックス材料^{1),2)}は、高耐熱性、高硬度、高化学的安定性などの優れた特性を有し、工業分野などで広く用いられているが、脆性破壊するため、構造材料として用いる場合は、この弱点の改善が課題となっている。

CFRP (炭素繊維強化プラスチック) 複合材料^{3),4)}は、軽量、高強度、高剛性を有することを特徴とし、一般産業用構造材をはじめとして、航空宇宙分野、エネルギー分野など幅広い分野で構造材料として用いられている。

金属材料^{5),6)}は、高破壊靱性、高塑性変形性、柔軟性といった特徴を示し、様々な分野において使用されている。特に、最近、衝撃に対して減衰性能が大きい双晶型の振動吸収メカニズムを持つ制振金属板「スターサイレント D2052」⁷⁾が開発され、特殊機能を持つ

構造材料として注目されている。

上記で取り上げた材料は、それぞれ長所と短所があり、これらの材料を簡単に貼り合わせて複合する、すなわち、積層することで各々の弱点を補填した有用な材料を作製することを試みた。

本研究においては、特にセラミックス材料の弱点である耐衝撃性を改善するため、SiC セラミックス板の両側に CFRP、さらにその両外側に制振金属板を積層して貼りあわせ、セラミックスの脆性破壊の改善を図ることを考案した。すなわち、これら個々の材料を積層複合材料として一体化させることにより、セラミックスの高耐熱性、高化学的安定性などの優れた特性を生かしつつ、セラミックスの脆さを CFRP や金属で補填し、さらに金属及び CFRP の優れた特性を反映させた、各素材単独では得られない良好な機械的特性を示す積層複合材料の作製を行った。また、金属と CFRP をセラミックス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ものと考えた。セラミックス単独よりも高い耐衝撃性を持つ積層複合材料が開発できると予測され、積層材料全体としてどのような機械的特性を示すか調査した。

*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

積層材料に関する研究は、テープキャスト法による $\text{Al}_2\text{O}_3/5\%\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ⁸⁾, $\text{B}_4\text{C}/\text{BN}$ ⁹⁾, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ ¹⁰⁾, $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Ni})/\text{Ni}$ ¹¹⁾, $30\text{vol}\%\text{SiC-ZrB}_2/20\text{vol}\%\text{-ZrB}_2$ ¹²⁾, $20\%\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3/20\%\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ¹³⁾, $\text{Ti}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ¹⁴⁾ 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、主に熱膨張率の差により圧縮応力層を形成し、曲げ強度や破壊靱性の向上を図った例が多く報告されている。オートクレーブ法(以下 AC 法と略す)については Al/CFRP ¹⁵⁾, $\text{carbon}/\text{glass}$ ¹⁶⁾, $\text{carbon}/\text{aramid}$ ¹⁶⁾ 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。以上、セラミックス、CFRP、金属のうち2種類の組み合わせの研究例はあるが、3種類を組み合わせた報告例は見当たらない。なお、本研究のねらいは、層間破壊靱性に注目してその向上を目的としたものではなく、3種類の材料を AC 法や手塗法で積層した場合、積層材料全体として、曲げ強度や衝撃吸収エネルギーがどこまで向上できるか調査したものである。

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一例(5層構造の例)を示す。サンドイッチ構造とし、基本構造は、中央に SiC セラミックス層(以下 SiC と略記)、その両側に CFRP 層(CFRP と略記)、一番外側(外表面)に制振金属 D2052 層(DM と略記)を配置した5層構造を基本とした。

Table 1 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。SiC 層と DM 層はそれぞれ厚さ 2.0, 0.5mm の単板である。SiC セラミックス板は、焼成後特に表面加工を施していないため、表面粗さ(平均粗さ)は 3.2 μm である。CFRP 層は厚さ 0.24~0.3mm の綾織クロス(twill cloth)または平織クロス(plain cloth)プリプレグをクロス(炭素繊維)の方向を揃えて2枚重ねし、層の厚みを約 0.5~0.6mm とした。詳細は後述するが、CFRP 層のクロスは、AC 法るとき綾織クロスプリプレグ(試料②, ③)、手塗法るとき平織クロスプリプレグ(試料④, ⑤)を用い、Fig.2 に示すように、試験片長手方向がクロスプリプレグの繊維方向と平行となるように配置した。

なお、DM 層は、20at%Cu-5.0at%Ni-2.0at%Fe-73at%Mn 組成の制振合金板であり、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。

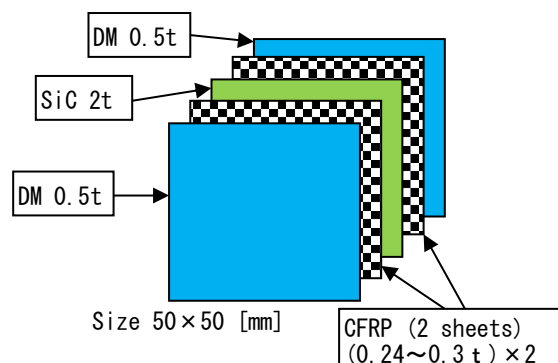
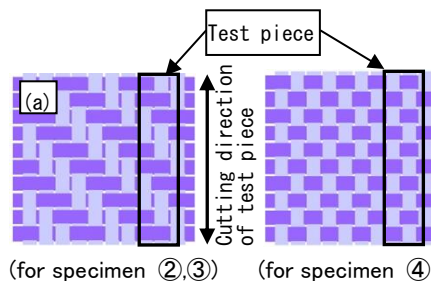


Fig.1 Schematic structure of laminated composites consisting of five layers. Thickness of each layer is also shown. DM: damping metal layer, CFRP: carbon fiber reinforced plastic layer, SiC: SiC ceramic layer.



(for specimen ②,③) (for specimen ④,⑤)
Fig.2 Positional relations of carbon fiber cloth prepreg and cutting direction of test piece. (a) Twill cloth prepreg in case of specimens for ② and ③. (b) Plain cloth prepreg in case of specimens for ④ and ⑤.



Fig.3 Autoclave (AC) apparatus used in this study

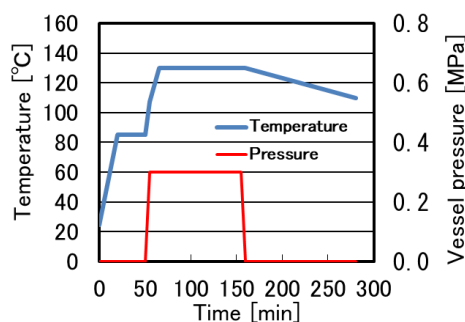


Fig.4 Time process for temperature and gauge pressure in the autoclave (AC) fabrication

Table 1 Properties of elements used for laminated composites

Material	Properties
SiC (SiC ceramic plate)	<ul style="list-style-type: none"> •Type P-SiC002 SiC plate made in Asuzac Inc. •Size: about 50×50×2.0t mm •[Specifications of P-SiC002] Composition: 99.6%SiC, Bulk density:3140kg/m³, Flexural strength: 410MPa, Young's modulus: 430GPa, Hardness(Hv): 28GPa, Fracture toughness: 2.5MPa·m^{1/2}, Surface roughness: about 3.2μm
CFRP (Carbon fiber cloth prepreg)	<ul style="list-style-type: none"> ○Elements in case of autoclave (AC) method (Applied specimens for ② and ③) •Pyrofil cloth prepreg type TR3523 331KMP made in Mitsubishi Rayon Co., Ltd. •Prepreg contained two sheets (about 0.6mm thick) with a sheet size of about 50×50×0.3t mm. •[Specifications of TR3523 331KMP] Twill cloth. Fiber tow: type TR30S3L (PAN based fiber, Filament diameter: 7μm, Filament count: 3000, Tensile strength: 4.12GPa, Young's modulus: 234GPa, Bulk density: 1790kg/m³), FAW(Fiber Areal Weight): 200g/m², Fiber content: 50wt%, Epoxy(resin) content: 50wt%, Bulk density: 1770kg/m³
	<ul style="list-style-type: none"> ○Elements in case of hand-painting method (Applied specimens for ④ and ⑤) •Torayca cloth prepreg type F6463B-05P made by Toray Industries, Inc. •Prepreg contained two sheets (about 0.5mm thick) with a sheet size of about 50×50×0.24t mm. •[Specifications of F6463B-05P] Plain cloth, Fiber type: T300 (PAN based fiber, Filament diameter: 7μm, Filament count: 3000, Tensile strength: 3.53GPa, Young's modulus: 230GPa, Maximum strain: 1.5%, Bulk density: 1760 kg/m³), FAW: 198g/m², Fiber content: 56wt%, Epoxy(resin) content: 44wt%, Bulk density: 1760kg/m³
	<ul style="list-style-type: none"> ○Adhesives •Reactive acrylic resin adhesive: "Metal Rock" type AY-123 made in Cemedine Co., Ltd. (Applied specimen ④) •Epoxy based adhesive, "Bestone" type PM-4 made in Tohto Chemical Industry Co., Ltd. (Applied specimen ⑤)
DM (Damping metal)	<ul style="list-style-type: none"> •Alloy "Star silent" type D2052 made in Daido Steel Co., Ltd. •One plate with a size of about 50×50×0.5t mm •[Specifications of D2052 alloy] Bulk density: 7250kg/m³, Hardness(Hv): 1.18~1.37GPa, Young's modulus: 80GPa, Poisson's ratio: 0.301, Proof stress(0.2%): 265MPa, Tensile strength: 530MPa, Maximum strain: 40%

Table 2 Specimens of laminated composites manufactured in this study

No. of Spec.	Structure (Order of layers)	Manufacturing method
①	SiC (1 layer)	-
②	CFRP-SiC-CFRP (3 layers)	Autoclave
③	DM-CFRP-SiC-CFRP-DM (5 layers)	Autoclave
④	DM-CFRP-SiC-CFRP-DM (5 layers)	Hand-painting with Metal-rock*1
⑤	DM-CFRP-SiC-CFRP-DM (5 layers)	Hand-painting with Bestone*2

*1: Reactive acrylic based adhesive

*2: Epoxy based adhesive

2-2 積層方法

今回は複合材料の成形 (作製)方法として AC 法と手塗法の 2 種類を実施した。

2-2-1 AC 法による複合材料の作製

Fig.3 に、本実験で用いた AC 成形装置(羽生田鉄工製)を示す。AC 成形法は、耐圧容器を用い、容器内部をエアで加熱・加圧処理し、複合材料を作製する方法であり、本試作装置の仕様は、最高温度 400℃、最高圧力 1.6MPa、有効サイズ φ1000×2200Lmm である。今回は、この AC 法により Fig.1 に示す 5 層構造の積層複合材料(試料③)のほか、特性比較のため、SiC 板 1 層のみのもの(試料①)、SiC 層と CFRP 層で構成した 3 層構造のもの(試料②)も作製した。

以下に AC 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、SiC と DM については、アセトンで超音波洗浄し、脱脂処理した。CFRP 層は、綾織クロスプリプレグを 2 枚重ねた。次に、Fig.1 に示す構造に積層し、均一な圧力が加わるように、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、温度 130℃、圧力 0.3MPa で 90 分間、加熱・加圧処理して成形し、加圧容器内で室温まで自然放冷後取り出した。本処理により、CFRP クロスプリプレグ

中に含まれているエポキシ樹脂成分が溶け出し、その両側にある SiC と DM 板を接着させて積層材を得た。Fig.4 に、AC 装置内の温度と圧力(ゲージ圧)の時間変化を示す。

2-2-2 手塗法による複合材料の作製

手塗法では、接着剤を用いて各材料を貼り合わせ、複合材料を作製した。この方法は、AC 処理できない場合や現場での成形法として有効な製造技術と思われる。今回は、接着剤として反応形アクリル系接着剤のメタルロック(セメダイン製)、並びに、エポキシ系接着剤のベストン(東都化学工業製)の 2 種類を使用した。特性評価において接着剤の違いによる比較も行った。

以下に手塗法による複合材料の作製方法を示す。

AC 成形法と同様に、エタノール及びアセトンで超音波洗浄した。CFRP 層は、平織クロスプリプレグを 2 枚重ねた。各素材表面に接着剤を手塗りし、位置合わせしながら積層し、さらに、離型テープを貼ったステンレス板で積層した材料を挟み込み、両側から手で押して気泡を抜きながら接着剤を硬化させた。反応形アクリル系接着剤のメタルロックの場合は常温でそのまま硬化させた。エポキシ系接着剤のベストンの場合は、恒温器を用いて 60°C に 8 時間加熱保持し、硬化させた。

2-3 作製試料と試験片

Table 2 に、作製した積層試料の番号、構成要素とその配列順、作製法に関する一覧を示す。

試料①は SiC 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した構成要素の違いによる特性の相違を調べ、また、試料③、④、⑤を比較することで作製方法(接着法)の違いによる特性の相違を調べた。

試料①～⑤の各種類について約 50mm 角サイズの積層複合材の試料をそれぞれ 2 枚作製後、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 8 本切り出し、このうち 4 本を曲げ試験、4 本を衝撃試験に使用した。

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。

3 点曲げ強度 σ_{B3} は、島津製オートグラフ AG-50 k NE 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(1)式より求めた。サンプル数は 4 本である。

$$\sigma_{B3} = \frac{3PL}{2wh^2} \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

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。なお、曲げ試験においては、試験片下端面の中央位置に歪ゲージを貼り付け、荷重とひずみ信号をサンプリングタイム 0.5 s で同時に A/D 変換してパソコン上に記録し、後でデータ処理した。

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おろし、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)式に示す単位断面積当たりの吸収エネルギーを算出した。ただし、試験片には、U 形または V 形ノッチは加工を施していない。サンプル数は 4 本である。

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

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)、 A : 試料の断面積[m²]、 β は振り上がり角[deg]である。なお、試料保持治具スパン長は一定(0.04058m)とし、断面積 A は積層した厚み全体の断面積である。 w と h は、(1)式と同じく、試料の幅と積層材料の高さ(全体の厚み)である。

3. 結果と考察

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 2670~3840kg/m³ の範囲にあり、3 層を積層した試料②が最も小さく(2671kg/m³)、AC 法で DM 板を含む 5 層を積層した試料③が最も高くなった(3840kg/m³)。試料③～⑤は同じ 5 層の構造であるが、手塗り法の試料④と⑤の嵩密度は AC 法の③の場合より約 20% 小さく、これは、各層の界面に気泡が残留している影響のためと予想される。全体として、アルミニウム(2700 kg/m³)からチタン(4500 kg/m³)程度の軽金属に相当する嵩密度であった。

3-2 曲げ試験における応力-ひずみ特性

Fig.6 および Fig.7 に、3 点曲げ試験において、荷重計と試験片の下端面に貼り付けた歪ゲージより求めた応力-ひずみ特性を示す。Fig.6 は、試料①、②および③の場合を示し、作製法は AC 法(試料①を除く)で、積層構造(1, 3, 5 層構造)の違いによる特性の差異を示した。試料①の単独の SiC 板の場合は脆性的に破断したが、②、③の積層試料の場合は段階状に変化する非常に複雑な特性を示した。曲げ強度よりは最大ひずみが大きく向上する特性を示した。Fig.7 は試料③、④、⑤の場合を示し、積層構造(5 層)は同じで、作製法による

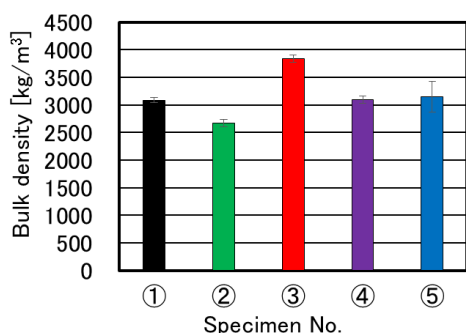


Fig. 5 Bulk density of laminated composites

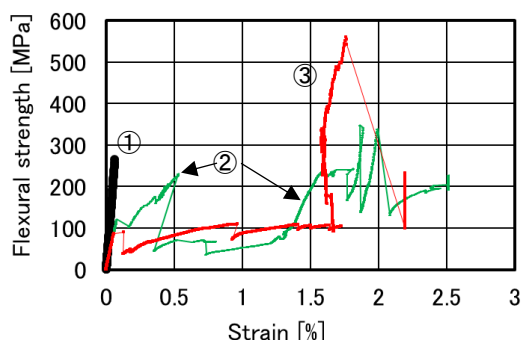


Fig. 6 Stress-strain curves of specimens ①, ② and ③ with 1, 3 and 5 layers, respectively. ①: Single layer of SiC ceramic plate, ②: 3 layers of CFRP-SiC-CFRP by autoclave (AC) method, ③: 5 layers of DM-CFRP-SiC-CFRP-DM by AC method.

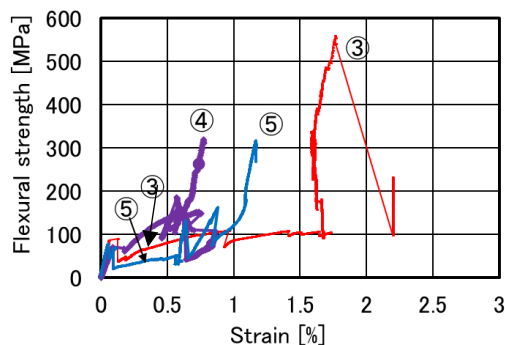


Fig. 7 Stress-strain curves of specimens ③, ④ and ⑤ with 5 layers consist of DM-CFRP-SiC-CFRP-DM by AC method (③), by hand-painting using reactive acrylic based adhesive “metal-rock” (④), by hand-painting using epoxy based adhesive “Bestone” (⑤).



Fig. 8 Flexural test. Damping-metal deformed, and was not broken.

特性の差異を比較した。すなわち、③は AC 法、④は変性アクリル樹脂系のメタルロック接着剤を用いた手塗法、⑤はエポキシ系のベストン接着剤を用いた手塗法の場合を示す。この積層構造の場合も階段状に変化する複雑な特性を示したが、③の AC 法の場合と比較して、手塗法の場合は、両方とも曲げ強度の低下、最大ひずみ量の低下が見られた。ベストンは、メタルロックの場合よりも最大ひずみは大きかった。AC 法による特性が最も良好であった。

なお、SiC セラミックス層の割れ、CFRP 層と DM 層間の剥離、また、SiC 層と CFRP 層間の剥離はほとんどの試料で生じたが、DM については、Fig.8 に示すように荷重をかけ続けても折れ曲がるのみで、破断することは無かった。このため、ひずみゲージを取り付けた試料の下面が 3 点曲げ治具面に接する寸前のところで曲げ試験を打ち切った。最大ひずみは、計測したひずみの範囲内で、荷重が比較的大きくかつ急激に荷重が低下した点の最大ひずみ値を計測した。応力-ひずみ曲線において、初期の段階での急激な応力低下が生じているところでは SiC の破壊が起きたが、その後破壊は何段かに分かれており一旦応力が低下しても再び上昇する特性を示すことが多かった。

なお、曲げ試験で強度が大きく向上した AC 法による試料②および③と、大きな向上が見られなかった手塗法による試料④および⑤を試験後に比較したところ、前者は、CFRP 層内の炭素繊維クロスの破断と各層間の剥離が発生していたが、後者は、炭素繊維クロス破断が見当たらず、各層間の剥離のみが生じていた。このことから、本研究の場合、CFRP 層内の炭素繊維クロスに働いた引張強度の大きさが曲げ強度に大きく影響を及ぼしていると推定される。前者は、AC 法により各層間の接着力が大きく、曲げ試験において、炭素繊維クロス破断させるほどの大きな張力が働いたと考えられるが、後者は、気泡などが界面に存在していると推定されるため接着力が比較的低く、炭素繊維クロス破断に至る前に各層間の剥離が生じて層間の滑りを起こしたため、大きな強度向上に結びつかなかったと考えられる。このことから、層間の接着強度は、曲げ強度に大きな影響を及ぼすと予想される。

Fig.9 に、各試料の試験片の最大応力、最大ひずみの平均値をまとめたグラフを示す。試料①の SiC 単体の特性(曲げ強度 282MPa, 最大ひずみ 0.0672%)を基準とすると、積層した複合材料はいずれも曲げ強度及び最大ひずみの両特性が向上した。最高値は、曲げ強度が AC 法で作製した 5 層積層試料③のとき 524MPa(1.86 倍)、最大ひずみは AC 法で作製した 3 層積層試料②のとき 2.36%(35.1 倍)であった。

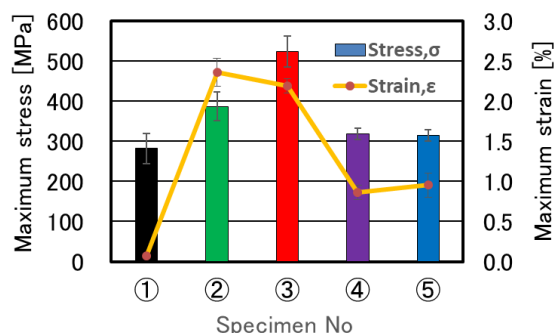


Fig. 9 Averages of maximum stress and maximum strain in the flexural test

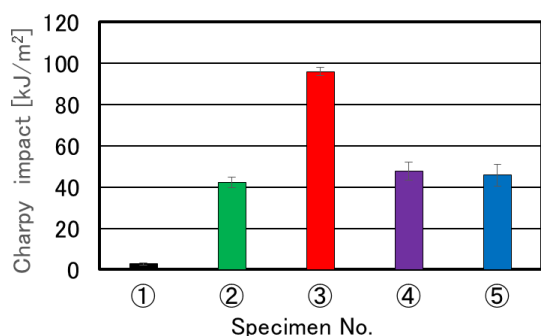


Fig. 10 Charpy impact absorption energy

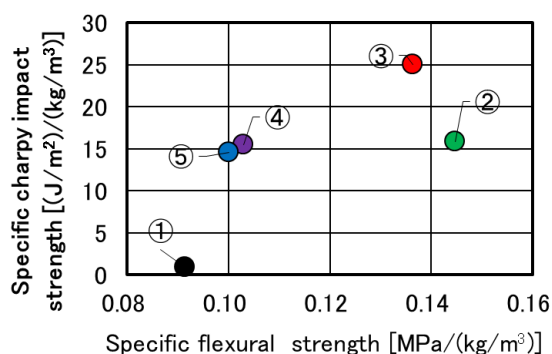


Fig.11 Specific impact strength vs. specific flexural strength of laminated composites

3-3 衝撃強度

Fig.10 に、シャルピー衝撃試験による単位断面積当りの衝撃吸収エネルギーの結果を示す。SiC 単体試料①の値 2.8 kJ/m^2 を基準とすると、積層した試料は衝撃吸収エネルギーがすべて大きく向上した。なかでも AC 法による 5 層試料③が 96.0 kJ/m^2 (34.3 倍) を示し、最も大きく向上できた。また、同じ構成の手塗法による試料④および⑤は、それぞれ 47.8 、 45.8 kJ/m^2 であり、約 17.1、16.4 倍であった。このように、作製法の違いによる特性の差が認められた。試料③、④、⑤について試験後比較したところ、試料③では、炭素繊維クロスが折れて 2 つの片に分離破

断していたが、試料④および⑤では、折れ曲がってはいたが破断まで至っていないケースが多かった。この要因も、曲げ強度の項でも述べたように、手塗法は、接着界面には気泡が残り接着強度が低下しているため、層間の拘束が弱く、炭素繊維の破断に至る荷重がかかる前に層間の剥離やすべりが生じたためと推定される。AC 法による 3 層試料②の衝撃強度については、試料④および⑤と同程度の値を示し、制振金属板を積層しなくても大きく向上できることが分かった。

3-4 総合評価

Fig.11 に、曲げ強度を嵩密度で除した比曲げ強度を横軸に、衝撃吸収エネルギーを嵩密度で除した比衝撃吸収エネルギーを縦軸に表して、両特性をまとめた結果を示す。試料①の SiC 単体を基準として比較すると、比曲げ強度は試料②の AC 法による CFRP-SiC-CFRP 3 層構造が約 1.58 倍、試料③の AC 法による DM-CFRP-SiC-CFRP-DM 5 層構造が 1.49 倍に向上した。一方、比衝撃強度は、試料③の AC 法による 5 層構造が約 27.6 倍に大きく向上し、試料②の AC 法による 3 層構造や試料④、⑤の手塗法による 5 層構造は 16.0~17.5 倍程度に向上できた。AC 法と手塗法では強度に差が生じるが、材料の使用目的や用途、必要とする強度などに応じて複合材料の作製方法や構成要素を選択することで、最適強度特性を持つ積層複合材料を設計できると思われる。

4. 総括

SiC セラミックスの曲げ強度や衝撃強度の強化を図るため、SiC 単体に炭素繊維クロス(CFRP)や制振金属(DM)を 3 層または 5 層構造にオートクレーブ(AC)法や手塗法で貼りあわせて積層複合体を作製し、特性評価したところ、次のことが分かった。

- (1)本研究で作製した積層複合材料は、曲げ強度、衝撃吸収エネルギーの両方とも SiC 単体と比較して改善することができた。
- (2)SiC 単体(試料①)を基準にすると、比曲げ強度は AC 法による CFRP-SiC-CFRP 3 層積層構造(試料②)が約 1.58 倍程度に向上し、比衝撃吸収エネルギーは AC 法により作製した DM-CFRP-SiC-CFRP-DM 5 層積層構造(試料③)が約 27.6 倍程度に大きく向上できた。
- (3)曲げ強度や衝撃強度特性は、手塗り法よりも AC 法で作製した試料の特性が総合的に良好であった。

参考文献

- 1) 岡田明：「セラミックスの破壊学」, pp.27-136, 内

- 田老鶴圃(1998.2)
- 2) 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」, pp.13-153, 日本セラミックス協会(1979.1)
 - 3) 山田恵彦：「カーボンファイバの科学」, pp.55-89, 内田老鶴圃(1995.5)
 - 4) D.ハル, T.W.クライン：「複合材料入門」, pp.8-88, 培風館(2003.5)
 - 5) 野口徹, 中村孝：「機械材料工学」, pp.20-227, 工学図書(2001.8)
 - 6) 宮川大海, 吉葉正行：「よくわかる材料学」, pp.13-130, 森北出版(1993.5)
 - 7) 川原浩司：制振合金 M2052 の各分野における実用例 v.5.0. 大同特殊鋼技術資料, pp.1-28 (2005.9)
 - 8) T. Chartier, D. Merle, J.L. Besson: “Laminar ceramic composites”, J. Eur. Ceram. Soc., Vol.15, pp.101-107(1995)
 - 9) S. Tariolle, F. Thévenot, T. Chartier, J.L. Besson: “Properties of reinforced boron carbide laminar composites”, J. Eur. Ceram. Soc., Vol.25, pp.3639-3647(2005)
 - 10) K.H. Zuo, D.L. Jiang, Q.L. Lin: “Mechanical properties of Al_2O_3/Ni laminated composites”, J. Mater. Lett., Vol.60, pp.1265-1268(2006)
 - 11) K.H. Zuo, D.L. Jiang, Q.L. Lin, Y.P. Zeng: “Improving the mechanical properties of Al_2O_3/Ni laminated composites by adding Ni particles in Al_2O_3 layers”, J. Mater. Sci. Eng. A Vol.443, pp.296-300 (2007)
 - 12) P. Zhou, P. Hu, X.H. Zhang, W.B. Han: “Laminated ZrB_2-SiC ceramic with improved strength and toughness”, Scripta Materialia, Vol.64, pp.276-279(2011)
 - 13) G.F. Wang, Z. Lu, C.W. Wang, Q.W. Ren, K.F. Zhang: “Fabrication and mechanical properties of $Al_2O_3-Si_3N_4/ZrO_2-Al_2O_3$ laminated composites”, Powder Technol., Vol.214, pp.188-193(2011)
 - 14) Chao Wu, Zhi Wang, Qinggang Li, Guopu Shi: “Mechanical properties and crack propagation behaviors of laminated Ti/Al_2O_3 composite”, J. Asian Ceram. Soc., Vol.2, pp.322-325(2014)
 - 15) 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”, J. Mater. Process. Technol., Vol.216, pp.79-88(2015)
 - 16) 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)