「材料」(Journal of the Society of Materials Science, Japan), Vol. 55, No. 3, pp. 329-334, Mar. 2006
論　　文

形状記憶ポリマー／CFRPハイブリッド積層板の曲げおよび振動特性の評価†

張　　春生*　倪　　慶清**
倉　鋪　　憲***　岩本正治***

Bending and Vibration Properties of SMP/CFRP Hybrid Laminates

by

Chun-Sheng ZHANG*, Qing-Qing NI**, Ken KURASHIKI*** and Masaharu IWAMOTO***

Although fiber reinforced plastics (FRP) are often used for structural components and functional materials, the vibration reduction for FRP materials is still difficult. The hybrid construction of FRP is well known as more effective for the improvement of this property. In this paper, in order to improve damping characteristics of FRP materials, carbon fabric reinforced shape memory polymer (SMP/CFRP) hybrid laminates are developed. The bending and damping property is investigated by the three-point bending test and mechanical impedance method. The influence of lamination position and contents of SMP in hybrid laminates on mechanical property is discussed. The theoretical formula for bending modulus and bending strength was proposed, and the validity was confirmed by experiment. The results show that the developed hybrid laminates has high bending modulus and excellent damping properties.

Key words : Shape memory polymer, Carbon fabric, Hybrid laminate, Bending property, Damping property, Loss factor

1　緒　　言

近年，快適な環境を作り出すため，建築，自動車，車両など様々な分野において，従来の高剛性，高強度，衝撃，疲労といった動的特性の改善に加え，振動の低減，すなわち減衰特性の改善が重要な課題となっている．FRP (Fiber Reinforced Plastics) は剛性，強度といった力学的特性に重点を置き，開発されてきた材料であり，単一のFRPによって，構造部材に要求される複数の特性を併せ持たせることは困難な場合が多い．そのため，FRPと異種材料を組み合わせることによるハイブリッド複合材料の力学的特性の研究が注目される.[1)~6)]また，積層板の中に粘弾性材を挟んだサンドイッチ構造板は減衰能が高く，制振性や安定性，衝撃抵抗などを有する構造材として実用化が進められている.[7)~13)]しかしながら，これらの研究は強化材のハイブリッド化，すなわち繊維強化プラスチックと異種繊維強化プラスチックのハイブリッド化に関する報告が多数を占めており，母材に着目したハイブリッド化に関する報告例はほとんど見られない．本研究では，母材として形状記憶ポリマー (Shape Memory Polymer, SMP) をハイブリッド化したSMP/CFRP積層板を開発した．

SMPのガラス転移温度 (Tg) 上下の温度における弾性率の変化を利用する用途の一つとして，SMPとCFRPとのハイブリッド化による制振材料（ダンピング材）を開発する．戸伏壽昭らは，ポリウレタン系形状記憶ポリマーの基本特性を測定した.[14)]SMPのTg近傍では$\tan\delta$が0.65で大きく，したがって散逸ひずみエネルギーが大きい．$\tan\delta$は変形時の発熱，防振，吸振特性に大きく関係するものである．それは通常の防振ゴムの$\tan\delta$と比較しても大きいものであり，SMP材は防振性と吸振性に優れ，顕著な熱弾性効果を有している材料であることが分かる．そこで，形状記憶ポリマーのこの特徴を利用し，FRP積層板の減衰特性を改善するために，炭素繊維織物を用い，SMP/CFRPハイブリッド積層板を開発した．SMP/CFRPハイブリッド積層板におけるSMPの積層位置や厚さの異なる4種類の試験片を作製した．作製した試験片に対して，静的および動的力学特性の両面から材料評価を行った．3点曲げによる静的曲げ試験を行い，SMPハイブリッド化による静的力学的特性の影響を検討した．特にダンピング特性については，中央加振法を用いて，SMP/CFRPハイブリッド積層板の損失係数を測定し，制振特性に対するSMPハイブリッド化による影響を調べた．また，開発した材料を加熱して中央加振法による試験を行い，SMP/CFRPハイブリッド積層板の制振特性に及ぼす温度による影響も明らかにした．

†　原稿受理　平成17年8月30日　Received Aug. 30, 2005
*　京都工芸繊維大学大学院先端ファイブロ科学専攻　〒606-8585　京都市左京区松ヶ崎御所海道町，Division of Advanced Fibro Sci., Kyoto Inst. of Tech., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585
**　正会員　信州大学大学院機能機械学専攻　〒386-8576　上田市常田，Dept. of Functional Machinery and Mechanics, Shinshu Univ., Tokida, Ueda, 386-8576
***　正会員　京都工芸繊維大学大学院先端ファイブロ科学専攻　〒606-8585　京都市左京区松ヶ崎御所海道町，Division of Advanced Fibro Sci., Kyoto Inst. of Tech., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585

2 試料および実験方法

2・1 試料

試料として，CFRP には繊維体積含有率 63% の T700S/#2500 プリプレグ（東レ㈱製 トレカプリプレグ P3051F-12）を用いた．SMP は，ポリエステルポリオール系ポリウレタン（ディアプレックス㈱製 ダイアリィ MS4510）を乾式成膜して得られた SMP フィルムを用いた．SMP フィルムの成形条件は 70℃で 1 時間，100℃で 1 時間および 110℃で 2 時間である．SMP のガラス転移温度は約 45℃である．平織り炭素繊維織物（東レ㈱製トレカクロス CO6343）（以下 CF 織物）を用い，SMP フィルムの成形と同じ，乾式成膜による CF 織物／ SMP フィルムを得た．

2・2 成形方法および試験片

積層板の成形方法は繊維配向角がそれぞれ 0° および 90° のプリプレグを揃えて積層させた後，100t の圧縮成形機（神藤金属工業所㈱）を用い，真空バグ法により，SMP/CFRP ハイブリッド積層板を成形した．

Table 1 は SMP/CFRP ハイブリッド積層板の各層板の構成と SMP の全板厚に対する割合を示す．試験片全体の厚さ 1 に対して，真ん中に SMP 層の厚さが 0.4 のもの，真ん中に SMP 層の厚さが 0.6 のもの，表面と真ん中にそれぞれ SMP 層の厚さが 0.6 のものおよびプリプレグのみの 4 種類であり（それぞれ SHy-1，SHy-2，SHy-3，CFRP と記す），積層板の厚さは 2mm である．SMP 層内の CF 織物の Warp 方向は，試験片の長手方向である．それぞれハイブリッド化した試験片において繊維配向角 90° プリプレグは繊維配向角 0° より積層板の外側に配置した．

2・3 実験方法

2・3・1 静的曲げ試験 開発した SMP/CFRP ハイブリッド積層板の静的力学特性を検討するため，三点曲げ試験を行った．試験装置には小型卓上試験機（JT トーシ㈱製リトルセンスター LSC シリーズ）を用いた．試験速度 5mm/min の変位制御で，恒温恒湿室中（20 ± 2℃，60 ± 5%R.H.）で行った．試験中の荷重と変位は A/D コンバータを介してパーソナルコンピュータにより，サンプリング周波数 10Hz で計測した．

試験片形状は JIS K 7074“炭素繊維強化プラスチックスの曲げ試験方法”の 3 点曲げ試験片に準じ，幅 10mm の試験片であり，支点間距離は 65mm とした．

2・3・2 中央加振法による振動試験 振動試験は，材料のダンピング特性を評価する基本的試験である．本研究では，中央支持加振法により行った．Fig. 1 に中央加振法による減衰測定装置の模式図を示す．試験片は幅 15mm，長さ 250mm の短冊状であり，中央に瞬間接着剤でナットと接着し，それを介して，インピーダンスヘッドと固定した．試験片は小型加振器の上に取り付けられ，ランダム加振される.[15)~17)] 伝達関数の周波数応答曲線を求め，一次モードに着目した固有振動数および損失係数の算出を行い，半値幅法で損失係数を求めた．共振周波数 f_0 と，伝達関数の絶対値が最大値より 3dB 下がった点での周波数 f_1 および f_2 を読み取り，式 (1)によって損失係数 η を計算した．

$$\eta = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \tag{1}$$

計算誤差を少なくするため，半値幅法のほかに周波数応答関数のピーク曲線による ndB 幅法も採用した．この場合の損失係数 η を式 (2)によって計算した．

$$\eta = K \times \frac{f_2 - f_1}{f_0} \tag{2}$$

ここで，補正値 K は式 (3)により与えられる．

$$K = \frac{1}{\sqrt{\left(10^{n/10}\right) - 1}} \tag{3}$$

また，SMP は強い温度依存性があるため，本研究では，恒温槽を用意した．サーモグラフィを用い，試験片の粘弾性層の表面温度を計測し，それぞれ 25℃，45℃と 65℃の試験温度で，開発した SMP/CFRP ハイブリッド積層板の振動減衰特性の温度依存性測定を行った．

Table 1 Stacking sequence of laminate specimens.

Symbol	Constitution	SMP layer thickness / Specimen thickness
SHy-1	$[C90_3/C0_3/SMP_1/CF\ fabric]_S$	0.4
SHy-2	$[C90_2/C0_2/SMP_2/CF\ fabric]_S$	0.6
SHy-3	$[SMP_1/C90_2/C0_2/SMP_1/CF\ fabric]_S$	0.6
CFRP	$[C90_5/C0_5]_S$	0

3 実験結果および考察

3・1 静的曲げ特性

3・1・1 曲げ試験結果 曲げ試験より得られた各試験片の代表的な曲げ応力ーたわみ線図を Fig. 2 に，破断様相写真を Fig. 3 に示す．いずれの試験片においても応力ーたわみ線図の初期では応力は線形的に増加するが，破断寸前には線形領域から離れ，材料は非線形挙動を示した．各 SMP/CFRP ハイブリッド積層板では最大応力直後，急激な曲げ応力の低下が確認された．SHy-2 と SHy-3 では引張側で破壊しはじめ，その後横方向のき裂が層間界面に沿って急速に広がることに対して，SHy-1 では 2，3 のクラックが生じた後破壊し，き裂は横方向

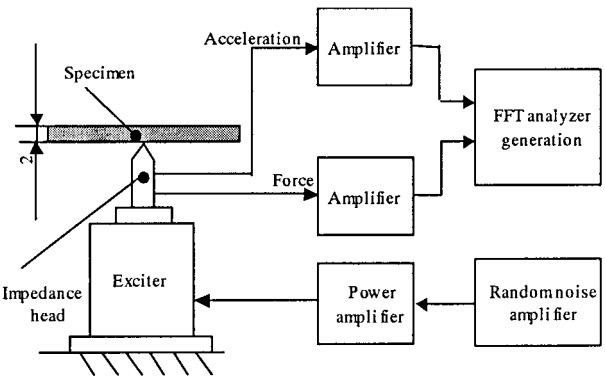


Fig. 1 Typical experiment setup for mechanical impedance method.

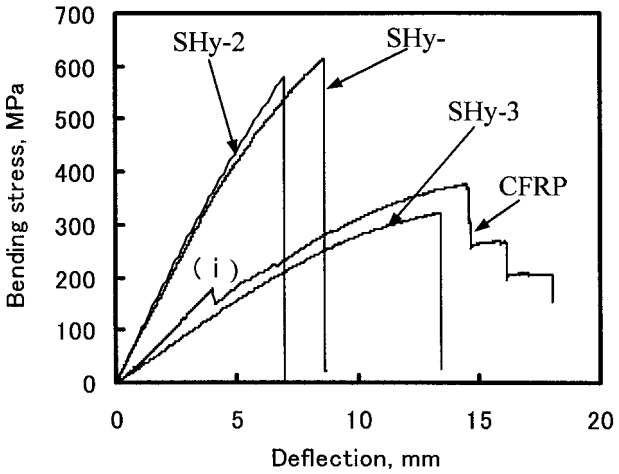
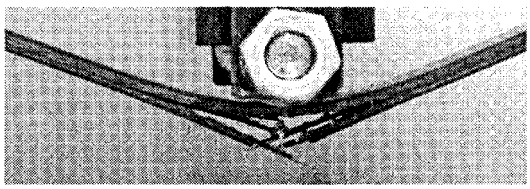
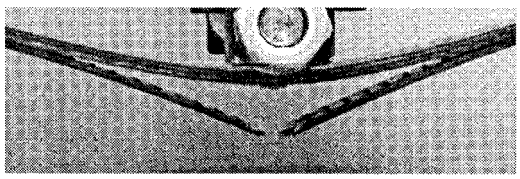


Fig. 2　Bending stress-deflection curves of laminate specimens.

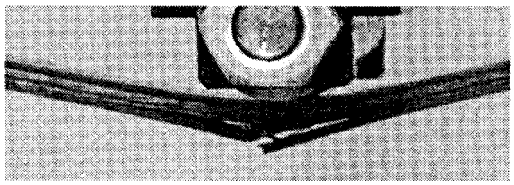
に不連続である．CFRP 材では，Fig. 3 に示した段階状に変化し，(i) の箇所では引張側の繊維配向角 90° プリプレグの 5 層が破断したことにより急激な応力低下が生じた．その後，応力は非線形的な挙動を示し，最大応力直後，曲げ応力の低下が数回確認された．最外層の横方向に連続して破壊が生じ，最終的に繊維の引張破壊で試料が破断に至った．



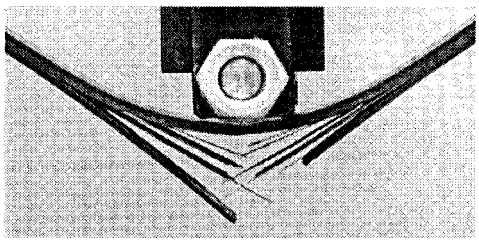
SHy-1



SHy-2



SHy-3



CFRP

Fig. 3　Modes of bending fracture of laminate specimens.

また，応力ーたわみ曲線から得られた各 SMP/CFRP ハイブリッド積層板の曲げ弾性率 E_{SHy} と曲げ強度 σ_b を Table 2 示す．CFRP 材に関しては最外層破壊時の曲げ強度とした．Table 2 から，表面および真ん中に SMP 層を積層した SHy-3 材と真ん中に SMP 層を積層した SHy-2 材を比べると，SMP の積層厚さが同じでも，SMP 層の積層位置が異なるため，後者の曲げ弾性率が前者より 1.9 倍大きく，曲げ強度も約 1.7 倍大きく増大した．SMP の配置は SMP/CFRP ハイブリッド積層板の曲げ特性に大きい影響を及ぼすことがわかる．さらに，曲げ弾性率は，SHy-3，CFRP，SHy-1，SHy-2 の順に大きくなる．これは，繊維配向角 0° プリプレグの SMP/CFRP ハイブリッド積層板での積層位置の影響によるものであると考えられる．積層の際に，繊維配向角 0° プリプレグを外側に配置することで曲げ弾性率が大きくなる．

3・1・2　曲げ特性の解析と実験値との比較

(1)　SMP/CFRP ハイブリッド積層板の曲げ弾性率

SHy-3 積層板の各層の板厚寸法を Fig. 4 のように表示する．SMP/CFRP ハイブリッド積層板曲げ剛性 $(EI)_{SHy}$ を次式に与える．

$$(EI)_{SHy} = (EI)_{CF} + E_S I_{S1} + E_0 I_0 + E_{90} I_{90} + E_S I_{S2} \quad (4)$$

ここで，$(EI)_{CF}$ は CF 織物／ SMP フィルムの曲げ剛性であり，E_S，E_0，E_{90} はそれぞれ SMP，0° プリプレグと 90° プリプレグのヤング率．I_{S1}，I_0，I_{90}，I_{S2} はそれぞれの内側の SMP，0° プリプレグ，90° プリプレグおよび外側の SMP の断面二次モーメントである．SMP/CFRP ハイブリッド積層板の断面二次モーメント I は $I = bt^3/12$ と与えられ，各層の断面二次モーメントは次のように示される．

Table 2　Bending properties of laminate specimens.

Type	Bending modulus E_{SHy} (GPa)	Bending strength σ_b (MPa)
SHy-1	32.97	743.96
SHy-2	33.35	607.18
SHy-3	17.31	360.21
CFRP	19.70	218.79

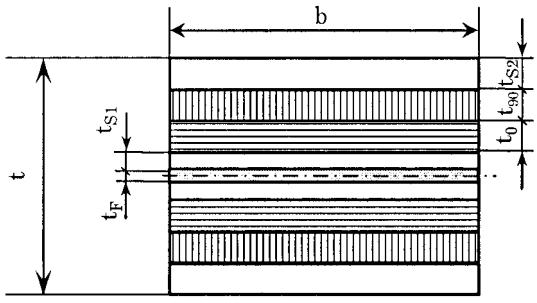


Fig. 4　Thickness of SMP/CFRP hybrid.

$$I_{S1}=\frac{b}{12}\left[(2t_{S1}+t_F)^3-t_F{}^3\right]$$
$$I_0=\frac{b}{12}\left[(2t_0+2t_{S1}+t_F)^3-(2t_{S1}+t_F)^3\right]$$
$$I_{90}=\frac{b}{12}\left[(2t_{90}+2t_0+2t_{S1}+t_F)^3-(2t_0+2t_{S1}+t_F)^3\right]$$
$$I_{S2}=\frac{b}{12}\left[(2t_{S2}+2t_{90}+2t_0+2t_{S1}+t_F)^3-(2t_{90}+2t_0+2t_{S1}+t_F)^3\right]$$

ここで，t, b は試験片の厚さと幅であり，t_F，t_{S1}，t_0，t_{90}，t_{S2} はそれぞれ CF 織物／SMP フィルム，内側の SMP，0° プリプレグ，90° プリプレグおよび外側の SMP 層の厚さである．

したがって，SMP/CFRP ハイブリッド積層板の見かけの曲げ弾性率 E_{SHy} は

$$E_{SHy}=\frac{(EI)_{SHy}}{I}=\frac{12}{bt^3}\left[(EI)_{CF}+E_SI_{S1}+E_0I_0+E_{90}I_{90}+E_SI_{S2}\right] \tag{5}$$

となる．SMP/CFRP ハイブリッド積層板の曲げ弾性率は各層のヤング率と厚さを用いて求めることができる．

(2) SMP/CFRP ハイブリッド積層板の曲げ強度

SHy-1 と SHy-2 ハイブリッド積層板について，曲げ応力と垂直ひずみの分布を Fig. 5 に示す．曲げモーメント M と各層中心での応力との関係は次のように与えられる．

$$\frac{M}{b}=\sigma_{90}t_{90}t_{M90}+\sigma_0t_0t_{M0}+\sigma_{S1}t_{S1}t_{MS1} \tag{6}$$

ここで，t_{M90}，t_{M0}，t_{MS1} は 90° プリプレグ，0° プリプレグ，SMP 各層中心間距離である．σ_{90}，σ_0，σ_{S1} は 90° プリプレグ，0° プリプレグ，SMP 各層中心での応力である．

各層中心での応力とひずみとのつりあいは

$$\sigma_{90}=E_{90}\varepsilon_{90}\quad \sigma_0=E_0\varepsilon_0\quad \sigma_{S1}=E_S\varepsilon_{S1} \tag{7}$$

となる．また，各層中心でのひずみおよび破断ひずみ ε_b と各層中心間距離は線形関係であるので，次式が成り立つ．

$$\frac{\varepsilon_b}{t}=\frac{\varepsilon_{90}}{t_{M90}}=\frac{\varepsilon_0}{t_{M0}}=\frac{\varepsilon_{S1}}{t_{MS1}} \tag{8}$$

そこで破断ひずみ ε_b と最大たわみ δ_b は

$$\varepsilon_b=\frac{6t\delta_b}{l^2} \tag{9}$$

で表すことができる．ここで，l は支点間距離．

SHy-1 と SHy-2 材の曲げ応力 σ_b は

$$\sigma_b=\frac{M}{I}\frac{t}{2}=\frac{6M}{bt^2} \tag{10}$$

となる．式 (6)，(7)，(8) と (9) を式 (10) に代入すれば，

$$\sigma_b=\frac{36\delta_b\alpha}{l^2t^2} \tag{11}$$

となり，ここで，α は

$$\alpha=E_{90}t_{90}t_{M90}^2+E_0t_0t_{M0}^2+E_St_{S1}t_{MS1}^2$$

である．各層のヤング率と寸法より SHy-1 と SHy-2 材の曲げ強度 σ_b を求めることができる．

SHy-3 ハイブリッド積層板に対して，表面は軟らかい SMP を配合し，曲げモーメント M による表面層の SMP のせん断応力 τ_{S2} が生じる．[18] せん断応力 τ_{S2} によるたわみ δ_{S2} はせん断応力が厚さ方向に均等に分布すると仮定すれば，その変形は Fig. 6 のように純せん断応力状態となり，SMP のせん断弾性率を G_S とすると，せん断ひずみ γ_{S2} は

$$\gamma_{S2}=\frac{\tau_{S2}}{G_S}=\frac{P}{2G_S2t_{S2}b}=\frac{P}{4G_St_{S2}b} \tag{12}$$

となる．せん断ひずみの定義に従い $\gamma_{S2}=d\delta_{S2}/dx$ を式 (12) に代入して，せん断変形によるたわみ δ_{S2} は

$$\delta_{S2}=\int_0^{l/2}\gamma_{S2}dx=\frac{P}{4bt_{S2}G_S}\int_0^{l/2}dx=\frac{Pl}{8bt_{S2}G_S} \tag{13}$$

となる．

式 (11) から曲げ変形によるたわみ δ_{bS} は

$$\delta_{bS}=\frac{\sigma_{bS}l^2t^2}{36\alpha} \tag{14}$$

であり，曲げ応力 σ_{bS} は次の式を与える．

$$\sigma_{bS}=\frac{3Pl}{2bt^2} \tag{15}$$

式 (14) と (15) から，

$$\delta_{bS}=\frac{Pl^3}{24b\alpha} \tag{16}$$

となる．中央集中荷重を受ける SHy-3 ハイブリッド積層板のたわみ δ は，試験片の曲げ変形によるたわみ δ_{bS} とせん断変形によるたわみ δ_{S2} との和として

$$\delta=\frac{Pl^3}{24b\alpha}+\frac{Pl}{8bt_{S2}G_S} \tag{17}$$

となる．式 (15) と (17) により，SHy-3 の曲げ強度 σ_{bS} を求めることができる．

$$\sigma_{bS}=\frac{36t_{S2}G_S\alpha\delta}{t^2\left(t_{S2}G_Sl^2+3\alpha\right)} \tag{18}$$

CFRP 試験片について，最外層の破壊として曲げ強度 σ_{bC} を解析する．解析方法は SHy-1 と SHy-2 ハイブリッド積層板と同様，曲げ強度 σ_{bC} 次のように与えられた．

$$\sigma_{bC}=\frac{36\delta_b}{l^2t^2}\left[E_{90}t_{90}t_{M90}^2+E_0t_0t_{M0}^2\right] \tag{19}$$

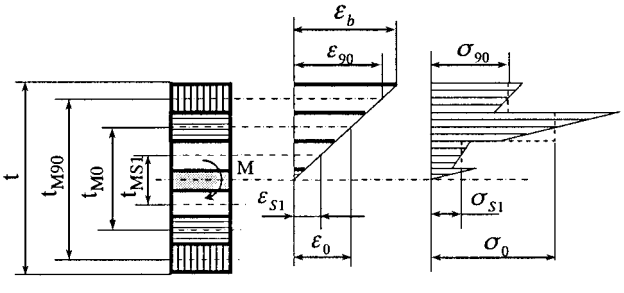


Fig. 5 Stress and strain distribution of SHy-1 and SHy-2.

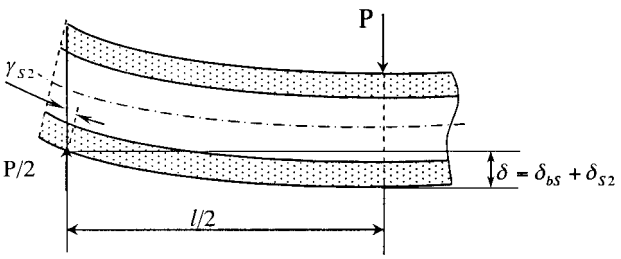


Fig. 6 Shear deformation of forward SMP.

(3)　SMP/CFRP ハイブリッド積層板の曲げ特性

SMP ハイブリッド積層板の各層の板厚は Table 3 に示す．用いた供試材の材料定数は，0° と 90° のプリプレグのヤング率がそれぞれ $E_0 = 114$GPa と $E_{90} = 7.39$GPa であり，SMP のヤング率とせん断弾性率がそれぞれ $E_S = 1.41$GPa と $G_S = 78.6$MPa である．CF 織物／ SMP フィルムの曲げ剛性 $(EI)_{CF}$ は 1.03×10^{-4}N・m^2 とした．SHy-1，SHy-2，SHy-3 と CFRP 破壊たわみはそれぞれ 8.66mm，6.71mm，12.67mm と 4.75mm として，式 (11)，(18)と (19)により曲げ強度は求められる．

Table 4 は SMP/CFRP ハイブリッド積層板と CFRP 材の曲げ弾性率と曲げ強度の計算値と実験値の比較データである．表から，曲げ弾性率は実験値に比べ計算値の方が大きく，その誤差は 6% 〜 17% である．また，曲げ強度は実験値と比較し，SHy-1 と SHy-2 の計算値が大きくなっている．これは，曲げ負荷のとき，SMP 層のせん断変形が原因であると考えられる．SHy-3 材の場合，表面 SMP 層のせん断変形を純せん断応力状態と仮定し，強度計算した結果計算値は実験値より小さく，誤差は約 9% である．CFRP 材では実験値とよい一致であることがわかる．

3・2　振動特性の温度依存性

試料全体を加熱条件として温度 25℃，45℃，65℃における中央加振法振動試験から得られた，開発した SMP/CFRP ハイブリッド積層板および CFRP 材の一次モード固有振動数を Fig. 7 に，一次モード損失係数を Fig. 8 に示す．

Fig. 7 から，ランダム周波数で測定した一次モード固有振動数は温度の上昇に伴い，減少することがわかる．この結果から材料温度は一次モード固有振動数に影響を及ぼすことが明らかとなる．しかしながら，CFRP 材の一次モード固有振動数は温度依存性のないことも分かる．

また，温度の影響においては，一次モード固有振動数は SHy-2 が一番高い．65℃での SHy-2 は 25℃の SHy-1 の値より高い値を示した．この結果から，SMP 層を真ん中に配置した場合，厚さが大きくなると，一次モード固有振動数も大きくなることが明らかとなった．いずれの温度でも，一次モード固有振動数は静的曲げ試験で得られた曲げ弾性率の結果と同様，SHy-3，CFRP，SHy-1，SHy-2 の順に大きくなる．

Fig. 8 から，各試験片の一次モード損失係数は，試験温度が上昇するにともない，いずれも大きくなる．特に，65℃ではその変化が大きい．しかし，CFRP 材の一次損失係数は温度変化してもその変化が小さい．また，SHy-2 の一次損失係数はほかの試験片より高い値を示し，曲げ変形に対して良いダンピング材料であることが言える．

また，SMP/CFRP ハイブリッド積層板の SMP 積層厚さと積層順位が一次モード固有振動数と損失係数に及ぼす影響については，SHy-2 材と SHy-1 を 65℃で比較した場合，SMP 層の積層厚さが大きくなると，一次モード固有振動数と損失係数が増加することが分かる．表面および真ん中に SMP 層を積層した SHy-3 材と真ん中に SMP 層を積層した SHy-2 を比べると，SMP の積層厚さが同じでも，SMP 層の積層位置が異なるため，SHy-2 の一次モード固有振動数だけではなく，一次モード損失係数も増加し得ることが確認された．

Table 3　Geometrical parameters of each layer.

(Unit: mm)

Type	t_F	t_{S1}	t_0	t_{90}	t_{S2}
SHy-1	0.450	0.155	0.285	0.285	0
SHy-2	0.450	0.345	0.190	0.190	0
SHy-3	0.450	0.155	0.190	0.190	0.190
CFRP	0	0	0.475	0.475	0

Table 4　Comparison between the calculated and experimental values.

Type	$(E_{SHy})_c$ GPa	$\frac{(E_{SHy})_c}{(E_{SHy})_e}$	$(\sigma_b)_c$ MPa	$\frac{(\sigma_b)_c}{(\sigma_b)_e}$
SHy-1	36.75	1.11	839.31	1.13
SHy-2	37.65	1.13	677.22	1.11
SHy-3	20.37	1.17	328.45	0.91
CFRP	20.84	1.06	216.89	0.99

Suffix c: calculated values, e: experimental values

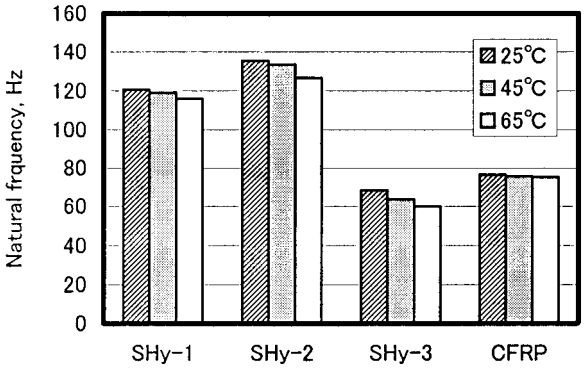


Fig. 7　Natural frequency to 1st mode of vibration with heating.

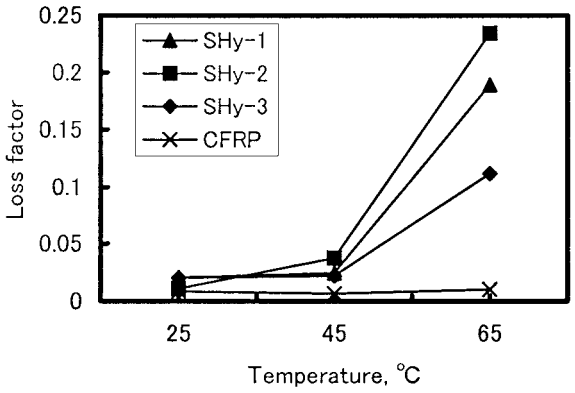


Fig. 8　Loss factor to 1st mode of vibration with heating.

4 結　　言

本研究では，ポリウレタン系形状記憶ポリマーの複合化による新しい応用を展開し，ダンピング材としてSMP複合材料を提案した．ダンピング材に必要な特性として振動特性を検討するために一般的な繊維強化プラスチックであるCFRP積層板にSMP層をハイブリッド化したSMP/CFRPハイブリッド積層板を作製し，その静的力学特性および動的力学特性を検討した．以下に得られた知見を示す．

(1)　三点曲げ試験から，開発した真ん中にSMP層のSMP/CFRPハイブリッド積層板はCFRP材と比べ，曲げ強度と曲げ弾性率ともに大きいことがわかった．また，多層積層構造板材の曲げ弾性率と曲げ強度に関する予測理論を提案し，実験結果とよい一致が得られた．

(2)　中央加振法による振動試験から，SHy-2は一次モード固有振動数と損失係数は他の試験片より大きい．温度が高くなると，一次モード固有振動数が減少し，一次モード損失係数は大幅に増加することがわかった．

(3)　SMP/CFRPハイブリッド積層板の曲げ特性および減衰特性はSMP積層厚さおよび積層順序の変化に依存していることより，今後の応用展開が大いに期待される．

参　考　文　献

1) M. Uemura and H. Hukuda, “Hybrid composite materials”, pp.3-8 (1986) CMC.

2) T. Onita, T. Nishiwaki, Z. Maekawa and H. Hamada, “Mechanial property of marix hybrid laminates”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.50, No.10, pp.1146-1151 (2001).

3) H. Miyairi, M. Wakabayashi and M. Tanaka, “Hybrid effect and impact properties of CF/GF composite material”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.32, No.361, pp.1089-1095 (1983).

4) H. Miyairi, M. Nagai and A. Muramatsu, “Fatigue strength and interlaminer stress of FRP hybrid construction”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.25, No.272, pp.450-456 (1991).

5) H. Miyairi, M. Nagai and A. Muramatsu, “Mechanial effectiveness of hybrid construction”, The Official Journal of the Japan Society for Composite Materials, Japan, Vol.2, No.2, pp.88-92 (1976).

6) M. Nagai, H. Miyairi and A. Muramatsu, “Flexural properties of CRP/GRP Laminated Plate of the Canape Construction”, The Official Journal of the Japan Society for Composite Materials, Japan, Vol.3, No.3, pp.104-108 (1977).

7) J. Fujimoto, T. Tamura, I. Kimpara and T. Tanimoto, “Damping properties under Flexural Vibration for CFRP/Damping materials Laminate”, The Official Journal of the Japan Society for Composite Materials, Japan, Vol.20, No.4, pp.144-153 (1994).

8) J. Fujimoto, T. Tamura, I. Kimpara and T. Tanimoto, “Damping properties under Longitudinal Vibration for CFRP/Damping materials Laminate”, The Official Journal of the Japan Society for Composite Materials, Japan, Vol.20, No.4, pp.154-161 (1994).

9) Z. Maekawa, H. Hamada and A. Goto, “Material Design of High-Damping and High-Strength Composite”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (C), Japan, Vol.60, No.571, pp.831-836 (1994).

10) A. Goto and T. Nishiwaki, “Design Concept of GF/PP Foam Laminates”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (A), Japan, Vol.67, No.663, pp.1847-1853 (2001).

11) K. Sekine, O. Ichinomiya and K. Maruyama, “Damping Properties of Flexural Vibration for Composite Rectangular Sandwich Plate with Viscoelastic Core”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (C), Japan, Vol.63, No.613, pp.3016-3022 (1997).

12) J. H. Yim, S. Y. Cho, Y. J. Seo and B. Z. Jang, “A Study on Material Damping of 0° Laminated Composite Sandwich Cantilever Beams with a Viscoelastic Layer”, Composite Structures, Vol.60, No.4, pp.367-374 (2003).

13) F. Cheng, Q.-Q. Ni and M. Iwamoto, “DMA Behaviors of CFRP/SDR Sandwich Laminates with Damping Rubber Sheet”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.54, No.5, pp.487-493 (2005).

14) H. Tobishi, S. Hayashi, A. Ikai and H. Hara, “Basic Deformation Properties of Polyurethane-Series Shape Memory Polymer Film”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (A), Japan, Vol.62, No.594, pp.576-582 (1996).

15) H. Utsuno, A. Sugimoto, Y. Kimura and T. Tanaka, “Study of Damping Behavior of Viscoelastic Sandwich materials (1st Report, Prediction of Frequency Response Function for Sandwich Beam by Using RKU Model)”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (C), Japan, Vol.57, No.540, pp.56-61 (1981).

16) S. Takada and K. Suzuki, “Expressions of the Loss Factor and the Vibration Transmissibility for the Anti-Resonances of Center-Damped Beams Based on the Analysis of the Effective Mass”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (C), Japan, Vol.67, No.659, pp.2113-2120 (2001).

17) F. Cheng, Q.-Q. Ni and M. Iwamoto, “Development of Glass Fabric Reinforced SDR Damping material and Its mechanical Behavior”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.54, No.5, pp.481-486 (2005).

18) H. Miyairi, “Base of sandwich construction”, pp.159-250 (1999) The Nikkan Kogyo Shimbun, LTD.