技術資料

一方向強化 CFRP 積層板における振動減衰能の
周波数、温度特性の評価

足立 廣正*, 長谷川照夫*

(1998 年 5 月 26 日受付)

Evaluation of Frequency and Temperature Characteristics on the Vibration
Damping Properties of Unidirectional CFRP Materials

Hiromasa ADACHI* and Teruo HASEGAWA*

(Received May 26, 1998)

1. 緒 言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、軽量・高剛性・高強度の優れた特性により、宇宙・航空分野をはじめ、自動車、スポーツ用品、レジャー用品など一般産業用の構造材として幅広く用いられるようになってきた。さらに、最近における構造物の軽量化への要求は、CFRP の使用範囲を拡大し、多くなされている剛性・強度のデータの他に、振動減衰能に関するデータを必要とし、最近では CFRP 材の振動減衰能に関する研究¹⁻⁵⁾が見られるようになった。一方、材料自身が振動エネルギーを熱エネルギーに変換し、振動を減衰させる機能を持つ材料である制振材は、環境公害としての騒音振動が社会的に問題となって以来、研究が重ねられ、特に自動車分野において、拘束型、非拘束型制振鋼板といわれる粘弾性高分子材を鋼板に貼り付けたものの高減衰化のための材料開発、減衰能予測のためのシミュレーションソフトの開発など、かなりの実用的な研究が進められている⁶⁾。

振動減衰特性を評価するパラメータとして、金属・セラミック材では内部摩擦、拘束型および非拘束型制振鋼板では損失係数、プラスチック・ゴム材では損失正接 $\tan \delta$ を使用しており、それぞれ異なる計測方法を用いている。複合材は、材料の異方性、界面特性、分散相の分布状態、空孔率などの影響によって振動減衰能が変化

するが、振動減衰特性を評価するパラメータとして、海外の文献では減衰能が用いられている例⁷⁾があるが、特定のパラメータが用いられていない⁸⁾。本研究において、一方向強化 CFRP 材、平織 CFRP 材について、測定方法、試料の固定方法による振動減衰特性の違いを明らかにするために、CFRP 材の振動減衰能について複素弾性係数測定装置および粘弾性測定器により測定し、検討した⁹⁾。

また、CFRP 材のような異方性の強い材料は曲げ振動における測定データだけでなく、伸縮振動による測定データを明らかにする必要がある。現在振動減衰特性の多くは曲げ振動における測定データを得て、評価しているのが現状であり、伸縮振動による測定データは少ない。そこで、現在測定データの少ない伸縮振動減衰特性を明らかにするために、曲げモードおよび引張モードにおける CFRP 材の振動減衰能の周波数、温度特性について粘弾性測定器により測定し、検討した^{10,11)}。

2. 試料と測定方法

試料は、東レ製の厚みが 0.1 から 0.2 mm のプリプレグと呼ばれる薄いシート状のものを何枚か積み重ねて、硬化条件を 140°C×2 h でオートクレーブ成形し、一つの板としたものである。このプリプレグは炭素繊維にエポキシ樹脂を含浸させたものであり、高強度タイプ炭素繊維“トレカ” T300 と、エポキシ樹脂 2500 からなる。Table 1 に試料の物性値を示す。また、炭素繊維における繊維の直角方向の引張弾性率は文献¹²⁾によれば繊維方向の 0.03~0.08 と推定される。Fig. 1 に示すように、一方向強化 CFRP 材、平織 CFRP 材について、複素弾性係

* 名古屋市工業研究所 (456-0058 名古屋市熱田区六番 3-4-41)

Nagoya Municipal Industrial Research Institute,
3-4-41, Rokuban, Atsuta-ku, Nagoya 456-0058,
Japan

Table 1 Physical properties of samples.

Carbon fiber	
Tensile strength (MPa)	3,530
Tensile Young's modulus (GPa)	230
Elongation-to-failure (%)	1.5
Density (g/cm ³)	1.76
Epoxy resin	
Tensile strength (MPa)	82.4
Tensile Young's modulus (GPa)	2.65
Elongation-to-failure (%)	4.4
Bending strength (MPa)	107
Specific gravity	1.23-1.28
Glass transition temperature (°C)	130

Fig. 1 Dimensions and fiber direction of test specimens in the modulus of complex elasticity measuring machine.

数測定装置による場合は、長さ 200.0 mm、幅 15.0 mm、厚み 1.35 mm あるいは 2.0 mm の形状に試料を切断し、粘弾性測定器による場合は、長さ 10.0~40.0 mm、幅 2.5~5.0 mm、厚み 1.35 mm あるいは 2.0 mm の形状に試料を切断した。一方向強化CFRP材については、繊維の長手方向に対して、0°、22.5°、45°、67.5°、90°の繊維方向の試料を作成した。

Fig. 2 に複素弾性係数測定装置による損失係数の測定方法を示す。片持法、自由支持法の二通りの方法で行い、試料の固定方法の影響を調べた。片持法では、Fig. 2 上

Fig. 2 Measuring methods in the modulus of complex elasticity measuring system. Upper figure : cantilever method ; Lower figure : free support method.

Fig. 3 Devices of tensile mode and bending mode in the rheological measuring machine.

に示すように短冊状試料を片持で固定し、発振器からでる正弦波で加振させ、振動をピックアップで取り出す。そして、加振力を取り去ったときの減衰振動より、減衰能を評価するパラメータである損失係数をアンプで増幅させた後、レベルレコーダに出力させて、共振周波数、減衰度から求める。自由支持法では、Fig. 2 下に示すように一次の振動モードの節になるところを糸で吊るして、同様に損失係数を求める。両端固定法では、片持で固定

した短冊状試料のもう一方の端も固定する。

損失係数は次式より求まる¹³⁾。

$$\eta = \frac{D}{27.3f}$$

η : 損失係数, D : 減衰度 (dB/s), f : 共振周波数

使用した粘弾性測定器はレオロジ製 DVE-V4 である。Fig. 3 に示すように、治具は伸縮振動は引張モード、曲げ振動は曲げモードの治具を使用した。試料の中央のところで加振する。引張モードの場合は自動的に張力をかけ、曲げモードの場合は手動で初期荷重を 0 に設定した。ディスプレイ上において力と変位の正弦波を確認して測定を開始した。振動振幅は引張モードで $1.0 \mu\text{m}$ 、曲げモードで $20 \mu\text{m}$ とした。

3. 解析方法

通常において、金属材料では内部摩擦 Q^{-1} 、拘束型、非拘束型制振鋼板では損失係数 η 、プラスチック材料では損失正接 $\tan \delta$ が用いられているが、それらの振動減衰を表すパラメータの関係は次のようになる¹⁴⁾。

$$\eta = \frac{\phi}{2\pi} = Q^{-1} = \tan \delta$$

η : 損失係数, Q^{-1} : 内部摩擦, $\tan \delta$: 損失正接, ϕ : 減衰能

Adams ら^{15,16)} は、繊維座標系で応力 σ_x , σ_y , σ_{xy} に関して、それぞれの方向の減衰能を ϕ_x , ϕ_y , ϕ_{xy} とし、それらの和 ϕ を積層理論¹⁷⁾を用いて求めた。

$$\phi = \phi_x + \phi_y + \phi_{xy}$$

$$\phi_x = \frac{8\phi_L}{C_{11}p^3} \sum_{k=1}^{p/2} m^2 (Q_{11}^k C_{11} + Q_{12}^k C_{12} + Q_{16}^k C_{16}) \times (m^2 C_{11} + mn C_{16}) W_k$$

$$\phi_y = \frac{8\phi_T}{C_{11}p^3} \sum_{k=1}^{p/2} n^2 (Q_{11}^k C_{11} + Q_{12}^k C_{12} + Q_{16}^k C_{16}) \times (n^2 C_{11} - mn C_{16}) W_k$$

$$\phi_{xy} = \frac{8\phi_{LT}}{C_{11}p^3} \sum_{k=1}^{p/2} mn (Q_{11}^k C_{11} + Q_{12}^k C_{12} + Q_{16}^k C_{16}) \times [2mn C_{11} - (m^2 - n^2) C_{16}] W_k$$

ここで, $C_{11} = (M_{22}M_{66} - M_{26}^2)/\Delta$

$$C_{12} = (M_{16}M_{26} - M_{12}M_{66})/\Delta$$

$$C_{16} = (M_{12}M_{26} - M_{22}M_{16})/\Delta$$

$$m = \cos \theta_k, \quad n = \sin \theta_k, \quad W_k = k^3 - (k-1)^3$$

ϕ_L : 繊維方向の減衰能, ϕ_T : 繊維に直角方向の減衰能, ϕ_{LT} : セン断方向の減衰能, p : 積層数, Q_{ij} : 積層板の剛性行列成分, Δ : M_{ij} の行列式, C_{ij} : 積層板の曲げコンプライアンス行列成分, θ_k : 中央層から第 k 層の繊維配向角, M_{ij} : 積層板の曲げ剛性行列成分

Fig. 4 Comparison of the loss factor and the loss tangent by the difference of measurement methods. ○: Loss factor by the free support method in the modulus of complex elasticity measuring system; ●: Loss factor by the cantilever method in the modulus of complex elasticity measuring system; ▲: Loss tangent in the rheological measuring machine; ×: Loss factor calculated by the theory of Adams and others.

4. 固定方法の比較

繊維方向の減衰能 ϕ_L は、複合則により次式で与えられる。

$$\phi_L = 2\pi \cdot \frac{E_f'' V_f + E_m'' V_m}{E_f' V_f + E_m' V_m}$$

ここで、 E' は貯蔵弾性率、 E'' は損失弾性率、 V は体積含有率である。添字 f は繊維を、m はマトリクス樹脂をそれぞれ表す。繊維に直角方向の減衰能 ϕ_T は、Adams らの¹⁶⁾ 実験値を参考にし、マトリクスの $\tan \delta_m$ の半値から次式より与えられる。

$$\phi_T = 2\pi \cdot \tan \delta_m / 2$$

これらの式より ϕ_L 、 ϕ_T を算出した。

せん断方向の減衰能 ϕ_{LT} は、Hashin の式により、次式で与えられる⁴⁾。

$$\phi_{LT} = 2\pi \cdot \frac{\tan \delta_m (1 - V_f) [(G+1)^2 + V_f (G-1)^2]}{[G(1+V_f) + 1 - V_f][G(1-V_f) + 1 + V_f]}$$

ここで、 G は繊維のせん断貯蔵弾性率 G_f' とマトリクスのせん断貯蔵弾性率 G_m' との比である。Adams らの実験¹⁶⁾ により、 $G=10$ を用いて ϕ_{LT} を算出した。

計算に用いた弾性係数、減衰特性は次のとおりである。

$$E_L = 130 \text{ GPa}, E_T = 10 \text{ GPa}, G_{LT} = 2.5 \text{ GPa}$$

$$\phi_L = 1.03\%, \phi_T = 6.28\%, \phi_{LT} = 9.28\%$$

$$\tan \delta_m = 0.02$$

測定方法、支持方法における一方向強化CFRPの繊維方向による損失係数の変化を Fig. 4 左に、損失係数測定時の周波数を Fig. 4 右に示す。複素弾性係数測定装置による片持法、自由支持法の二通りの方法および粘弾性測定器による曲げモードを用いた方法で、試料の固定方法の影響を調べた。損失係数は周波数に依存するので、Fig. 4 右図に複素弾性係数測定装置で損失係数の測定時の共振周波数を示した。また、粘弾性測定器による測定値は複素弾性係数測定装置による測定値と比較しやすいするため、繊維方向 0° で 300 Hz、繊維方向 22.5° で 200 Hz、繊維方向 45° 以上で 100 Hz の損失正接 $\tan \delta$ の測定値を示した。これより、損失係数は繊維方向 0° において、片持法が自由支持法よりかなり大きいのが、繊維方向 22.5° では差は小さく、 45° 以上で逆に自由支持法の方が大きくなる。粘弾性測定器による測定値は曲げモードで 300 Hz まで測定したが、周波数による差はほとんどない。粘弾性測定器による損失正接の測定値と片持法による損失係数の測定値は、同じような値である。共振周波数は繊維方向の角度が大きくなるほど低くなり、 0° から

45° までの低下度は大きい。これから、曲げ弾性率は、繊維方向の角度が、 0° から 45° まで大きくなると著しく低下することが窺われる。Adams らの計算式より求めた値は自由支持法による計測値に近い値である。繊維方向 0° における片持法、粘弾性測定器による測定値が計算値に比べて大きいのは、試料の保持部における減衰が、測定値へ誤差として大きく現れるためであると考えられる。炭素繊維を強化材として用いた複合材料の曲げ振動における減衰特性は、樹脂の特性が大きく作用しているが、繊維方向 0° においては、減衰能の低い炭素繊維の特性が大きく作用している。

5. $\tan \delta$ による振動減衰能の評価

Fig. 5 は温度が 25°C 、 100°C の時の繊維方向 0° 、 90° の試料の場合における $\tan \delta$ と周波数との関係である。上図において、繊維方向 0° の試料の場合で曲げモードの $\tan \delta$ はほとんど変化しないが、引張モードの $\tan \delta$ は周波数が高くなるにしたがい、大きくなる。繊維方向 90°

Fig. 5 Relations between the loss tangent and the frequency at 25°C and 100°C . — 0° C specimen; ---- 90° C specimen.

Fig. 6 Comparison of the loss tangent at tensile mode and that at bending mode in 25°C, 60°C, 80°C, and 100°C of 100 Hz. — Tension mode; ---- Bending mode.

の試料の場合で、傾向は繊維方向 0° の試料の場合と同じようであるが、その差は小さい。下図において、繊維方向 0° の試料の場合で曲げモードの $\tan \delta$ は周波数が高くなるにしたがい、小さくなるが、引張モードの $\tan \delta$ は 10 Hz 近傍で極小となり、その後周波数が高くなるにしたがい、大きくなる。繊維方向 90° の試料の場合は、曲げモードが引張モードより少し $\tan \delta$ が大きい。

Fig. 6 は、周波数が 100 Hz での温度 25°C, 60°C, 80°C, 100°C における $\tan \delta$ と繊維方向との関係であるが、特定の繊維方向の $\tan \delta$ が大きいということはいえ

ないが、100°C における引張モードと曲げモードの $\tan \delta$ の傾向が似かよっている。これからも引張モードと曲げモードの $\tan \delta$ の相違が層間にあることが窺われ、100°C において曲げモードにおけるマトリクスと炭素繊維との弾性率差が大きくなるため、 $\tan \delta$ が大きくなると考える。

Fig. 7 は引張モードにおける繊維方向 0°, 90°, 平織の場合の $\tan \delta$ の温度特性である。繊維方向 0°, 平織の場合は、減衰能の小さい炭素繊維の効果が大きいため、高温域の $\tan \delta$ は上がらない。繊維方向 90° の場合は、マト

Fig. 7 Temperature characteristics of loss tangent at tension mode. — 1 Hz ; ---- 10 Hz ; - - - - 100 Hz.

リクスであるエポキシ樹脂と同じような傾向を示し、粘弾性体のガラス転移点を示すピークはエポキシ樹脂のガラス転移点に近い値である。CFRP 0°のピークが繊維方向 90°の場合より温度の高い方へずれるのは、炭素繊維自体の減衰能がかなり影響を与えていると考える。繊維方向 90°の場合は、マトリクスであるエポキシ樹脂と同じように周波数が大きくなるほど、ピークは温度の高い方へ移動し、ピークの $\text{tan } \delta$ は同じである。繊維方向 0°の場合は、周波数が大きくなるほど、ピークは温度の高いほうへ移動するが、ピーク近傍の $\text{tan } \delta$ が周波数により少し変化する。平織の場合は、周波数が変わってもピークの移動は見あたらず、ピークの近傍の $\text{tan } \delta$ が 10 Hz において少し変化する。平織の場合は繊維の交わる近傍の内部応力が一方向 CFRP と比較して大きいと考え、低温におけるプリプレグの各層の間の大きな内部応力が、温度が高くなるとマトリクスが軟化してこの内部応力が小さくなるため、繊維方向 0°、平織の場合はピーク近傍の $\text{tan } \delta$ が上がらないと考える。

Fig. 8 は、引張モードと曲げモードにおける $\text{tan } \delta$ の温度特性である。CFRP 45°, 67.5°, 90° においては、曲げモードの場合に、高い温度域ではマトリクス部分のエポキシ樹脂がガラス転移温度を越えると、軟化し、正確な測定ができなくなる。低い温度域において、引張モードの $\text{tan } \delta$ は曲げモードより大きい値を示すが、CFRP 67.5° においてはほぼ同じ値を示す。CFRP 22.5° はピークが少しずれるが、引張モードと曲げモードは同じような曲線を示す。CFRP 45°, 67.5°, 90° の引張モードは CFRP 22.5° と同じような傾向を示す。CFRP 0° はピーク部分において曲げモードの $\text{tan } \delta$ はプラスチックと同じような傾向を示すが、引張モードの $\text{tan } \delta$ は曲げモードより小さい値を示す。平織の場合は CFRP 0° に似た傾向を示すが、 $\text{tan } \delta$ のピークが CFRP 0° より温度の低い方に存在する。減衰能を繊維方向の減衰能、繊維と直角方向の減衰能、せん断による減衰能と分けて計算した Adams らの理論値においては、繊維方向 67.5° 近傍にピークがある。このピークは、せん断による減衰効果が大い。したがって、曲げモードでは繊維方向 67.5° の $\text{tan } \delta$ が他の繊維方向の $\text{tan } \delta$ より大きい。

低い温度域において、引張モードの $\text{tan } \delta$ が曲げモードより大きいのは、炭素繊維の方向性に原因の一つがあると考え。引張モードの場合は、繊維方向の引張弾性率とマトリクスの引張弾性率との差が大きく、界面近傍における内部応力が大きいのでエネルギーの損失が大きくなり、 $\text{tan } \delta$ も大きくなる。曲げモードの場合は、繊維と直角方向の引張弾性率とマトリクスの引張弾性率との差が小さく、界面近傍における内部応力が引張モードほどではないので、引張モードの $\text{tan } \delta$ より小さい。今一つの原因はプリプレグの各層の間に、引張モードの場合は大きな内部応力が発生するためと考える。曲げモードの $\text{tan } \delta$ は 100°C 以上あたりから大きくなるが、これは曲げモードでは温度が大きくなるほど、マトリクスのエポキシ樹脂が温度の上昇に伴い、軟化するので、繊維と直角方向の引張弾性率とマトリクスの引張弾性率との差が大きくなるのが原因であると考え。

Fig. 9 は、曲げモードにおける周波数が $\text{tan } \delta$ の温度特性へ及ぼす影響である。引張モードの場合と違い、マトリクスであるエポキシ樹脂と同じように周波数が大きくなるほど、ピークは温度の高い方へ移動する。平織の場合、150°C 以上の高温域の $\text{tan } \delta$ は低温域の $\text{tan } \delta$ より大きい。高温域において、曲げモードにおけるマトリクスと炭素繊維との弾性率差が大きくなるため、 $\text{tan } \delta$ が大きくなり、平織の場合は繊維の交わる近傍の内部応力

Fig. 8 Comparison of the loss tangent in tensile mode and that in bending mode over the high temperature area. — Tension mode ; ---- Bending mode.

Fig. 9 An influence that frequency has on the temperature of the loss tangent at bending mode. — 1 Hz ; ---- 10 Hz ; - · - · - 100 Hz.

が一方向CFRPと比較して大きい。特に $\tan \delta$ が大きくなると考える。

6. 結 論

一方向強化CFRP材について、測定方法、試料の固定方法による振動減衰特性の違いを調べるために、複素弾性係数測定装置および粘弾性測定器により測定し、検討した。複素弾性係数測定装置を用いて自由支持法により測定した繊維方向0°の $\tan \delta$ は、片持法による値に比べて極端に近い値を示す。自由支持法による測定値はAdamsらによる計算値に近く、一方、片持法による測定値は粘弾性測定器を用いた場合の測定値に近い値である。これは、炭素繊維の効果が大きい繊維方向0°において、試料の固定部分が減衰能へ大きく影響するため誤差となると考えられる。

一方向強化CFRP材のような方向性の著しい材料について、伸縮振動と曲げ振動を与えた場合の振動減衰特性についてそれぞれ引張モードと曲げモードの治具を用い、粘弾性測定器により繊維の方向を考慮して高温域の

$\tan \delta$ を測定したところ、次のことがわかった。低い温度域における $\tan \delta$ では、繊維方向 67.5° の場合を除き、引張モードが曲げモードより大きい。これは、炭素繊維の方向性による繊維とマトリクスとの弾性率差が起因すると考える。高温域においては、引張モードの繊維方向 0° 、平織の場合は減衰能の低い炭素繊維の影響が大きく、ピーク近傍の $\tan \delta$ が低い値を示し、繊維方向 0° のピーク近傍の温度は他より大きい値を示す。

参 考 文 献

- 1) 白鳥英亮, 池上皓三, 服部敏雄: 材料, **22**, 240 (1973), 850-857.
- 2) 後藤彰彦, 松田全央, 濱田泰以, 前川善一郎, 松尾達樹, 北洞俊明: 日本機械学会論文集 (C), **59**, 566 (1993), 536-541.
- 3) 蘇我部雄次, 都築正之, 岸田敬三: 材料, **42**, 476 (1993), 536-541.
- 4) 藤本 淳, 田村徹也, 金原 勲, 谷本敏夫: 日本複合材料学会誌, **20**, 4 (1994), 144-153.
- 5) 藤本 淳, 田村徹也, 金原 勲, 谷本敏夫: 日本複合材料学会誌, **20**, 4 (1994) 154-161.
- 6) 小特集 社会から要求される振動・騒音の低減技術, 自動車技術, **49**, 6 (1995); 特集 信頼性, 安全性を高める最近の制振・衝撃吸収材料とその活用例, 工業材料, **43**, 11 (1995).
- 7) R.D. Adams, M.A.O. Fox, R.J.L. Flood, R.J. Friend & R.L. Hewitt: *J. Comp. Mat.*, **3** (1969), 594-603.
- 8) 特集: 材料を打診する<内部摩擦の測定>, 超音波 TECHNO, 6月号 (1993).
- 9) 足立廣正, 長谷川照夫: 一方向強化 CFRP 積層板の損失係数について, 第23回中部化学関係学協会支部連合秋季大会 (1991).
- 10) 足立廣正, 長谷川照夫: 一方向強化 CFRP 積層板の伸縮および曲げ振動減衰特性について, 第26回中部化学関係学協会支部連合秋季大会 (1995).
- 11) 足立廣正, 長谷川照夫: 一方向強化 CFRP 材の粘弾性測定における $\tan \delta$, 第27回中部化学関係学協会支部連合秋季大会 (1996).
- 12) 植松益次, 山田直樹: 材料, **24**, 257 (1975), 156-163.
- 13) 長松昭男: 日本音響学会誌, **51**, 2 (1995), 133-138; 植村振作: 日本ゴム協会誌, **65**, 11 (1992), 664-669.
- 14) 日本複合材料学会編: 複合材料ハンドブック, 廣済堂, 東京 (1989), pp. 89-93.
- 15) R.G. Ni & R.D. Adams: *J. Comp. Mat.*, **18** (1984), 104-121.
- 16) R.D. Adams & D.G.C. Bacon: *J. Comp. Mat.*, **7** (1973), 402-428.
- 17) 藤井太一, 座古 勝: 複合材料の破壊と力学, 実教出版, 東京 (1978), pp. 10-56.