金属系複合材料の振動減衰機構と制振特性*

塩田一路**

Damping Mechanism and Properties of Metal Matrix Composites / Ichiro SHIOTA

Key words: damping capacity, MMC (metal matrix composite(s)), interface, FRM (fibre reinforced metal(s)), composite damping steel sheet, high-damping alloy(s), visco-elasticity

1. はじめに

従来、振動抑制を目的として種々の機構が開発され、実用化されている。これらは、主として除振装置を設けたり、部材形態に工夫を加えるなど、構造的な面からのアプローチがなされて一応の成果を収めている。

一方、近年の超精密機器の発展にともない、部材の振動を抑制することが重要な問題となってきた。たとえば半導体工業では、高密度化に伴うパターンの精細化などによりサブミクロンの制御が要求される。加工機械ではジグの振動が位置決めを困難にする。これらの超精密分野では、上述のような機構的、構造的な手法のみでは不十分であり、材料自身に振動減衰能を持つものが要求されるようになってきた。

機器を構成する材料には金属のように弾性率、強度などの力学的特性が高いことが要求されるが、一般にこれらの大きい材料ほど振動減衰能は小さい。

このような問題に対して、複合材料は解決の道を与える可能性がある。

2. 振動減衰機構

振動減衰能については、物理的、工学的など研究する立場によって種々の記述がされるが、ここでは工学的な立場から Q^{-1} を用いる。均一材料における Q^{-1} は次式で定義される。

$$Q^{-1} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{E''}{E'} \quad (1)$$

ここに、 ΔW は1サイクルの間に失われたエネルギーであり、 W はそのサイクルの最大ひずみエネルギーである。これらは複素弾性率 $E (= E' + iE'')$ で表される。この E' , E'' は次式で表される。

$$E' = \frac{\rho l^4 S}{a_i^4 I} \left\{ \omega_r^2 + \frac{1}{8} (\Delta \omega_r)^2 \right\}$$

$$E'' = \frac{\rho l^4 S}{a_i^4 I} \omega_r \Delta \omega_r$$

ここに、 E' : 複素弾性率の実部、 E'' : 複素弾性率の虚部、 ρ : 試料密度、 l : 試料長、 S : 試料断面積、 a_i : 振動モードによる定数 (例: $a_0 = 1.875$, $a_1 = 4.694$, $a_2 = 7.855$ 等)、 I : 断面二次モーメント、 ω_r : 共振周波数、 $\Delta \omega_r$: ω_r の振幅より 3 dB 小さい振幅を持つ 2 つの周波数の差。

図1に金属材料の強度と防振係数の関係を示す¹⁾。図中○は非鉄合金材料、●は鉄鋼材料を示す。防振係数とは、材料の0.2%永久ひずみに相当する引張応力を σ_y とし、 $\sigma_y/10$ の表面最大せん断ひずみを生じようねじり振動法によって測定された固有減衰能の値と定義される。この図には防振係数と強度との積 α がそれぞれ 10, 100, 1000 となる関係が直線で示されている。すなわち強度の優れた材料ほど振動減衰能は小さい。これを改良した防振合金と呼ばれる材料が開発されており、同図中●で示されている。これらは強度が高いにもかかわらず防振係数が大きい。

これらの合金の防振機構は、(1) 複合型、(2) 強磁性型、(3) 転位型、(4) 双晶型に分類される。これらのうち複合型に属する材料には、2相混合組織を持つ金属、例えば片状黒鉛鋳鉄や Al-Zn (>40%) の共析 β 相などがある。この型の減衰能機構は必ずしも

* 原稿受付 平成元年 10 月 6 日

** 金属材料技術研究所 (東京都目黒区中目黒 2-3-12)

図1 金属材料の強度と防振係数¹⁾ 図2 GFRPにおける繊維含有率 V_f に対する Q^{-1} の関係³⁾

明らかではないが、一応母相と第2相の界面における粘性流動あるいは塑性流動が考えられている。

一方、複合材料は物理的、化学的に分離した2種類以上の比較的小さい素材で構成され、元の素材の長所を助長し、短所を補う材料と定義される。従って構成素材の減衰特性に加えて、界面という別の要素が加わり、それによる減衰が期待できる。

3. 複合材料における振動減衰能

3.1 一次元強化材複合材料の振動減衰能

一次元の強化材とは、繊維のことである。繊維強化型複合材料には、FRP, FRR, FRM, FRCなどがある。この型の複合材料の弾性率、強度などの力学特性は周知の複合則で表される。上述のように振動減衰能は複素弾性率で表されることから、これに複合則を適用した手法が行われる。すなわち式(1)の E' と E'' に独立に複合則を適用すると、複合材料の振動減衰能は次式で表される。

$$Q^{-1} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{E_c''}{E_c'} \\ = \frac{1}{2\pi} \times \frac{E_f'' V_f + E_m'' (1 - V_f)}{E_f' V_f + E_m' (1 - V_f)} \quad (2)$$

ここに、 V_f は繊維含有率、添字 c は複合材料、f は繊維、m はマトリクスを表す。

繊維強化型複合材料の振動減衰能については、Hashin の式²⁾がある。彼の方法は、強化繊維の振動

減衰が非常に小さいとして E_f'' の値を無視し、式(4)の分母および分子を $E_m' (1 - V_f)$ で割り、複合材料の軸方向応力に対する振動減衰能を次式で表す。

$$Q^{-1} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{Q_m^{-1}}{1 + \frac{E_f' V_f}{E_m' (1 - V_f)}} \quad (3)$$

この式は繊維とマトリクスの特性のみが用いられており、界面の効果は考慮されていない。この式によると、振動減衰能はマトリクスから繊維にかけて単調減少することになる。事実、FRP では界面における接合強度が高いゆえ Hashin の記述と同様図2に示すように単調減少する³⁾と考えられる。一方、この結果における絶対値が高い理由を界面の影響に求めると、繊維の表面積と界面接合強度が問題となる。すなわち界面の影響とすると、界面接合性が等しい場合には V_f に伴って振動減衰能が大きくなるはずである。ところがいずれの V_f でも、 Q^{-1} の増加の程度が同じであり、この考えのみでは無理である。また界面接合強度が V_f に比例して低下するというのは考えにくい。この場合、繊維の振動減衰能を無視したことにより一因があると考えられる。

一方、FRM の振動減衰能の結果を図3³⁾に示す。このFRMは、炭化ほう素を被覆したほう素繊維を強化材とし、6061 Al 合金をマトリクスとしたものである。このFRMは6061 Al 合金の融点854 K直下の838 Kで30 MPaの圧力で製造したものである。as

図3 B₄C被覆B繊維強化アルミニウム合金(6061)の繊維含有量 V_f に対する Q^{-1} の関係³⁾

fabricated の試料の振動減衰能を○で示す。この結果は、図2の結果と異なり、20~30 V_f 近辺でマトリクスより振動減衰能が高くなっている。強化繊維を炭化けい素繊維とした場合もほとんど同様の結果が得られている³⁾。

このような Q^{-1} のピークは繊維とマトリクスの界面に依存すると考えられる。同試料を熱処理し、界面接合強度を増加した場合、●で示すように振動減衰能が低下する。すなわち熱処理により界面の接合強度が増加し、振動時の界面でのせん断に伴うエネルギー損失が起こらなくなったゆえと考えられる。この Q^{-1} を、 E'_c と E''_c に分けた結果を図4と図5に示す³⁾。この結果にみられるように、 E'_c の方は熱処理によってほとんど変化していないが、 E''_c の方は明らかに低下している。

すなわち、FRM では界面接合強度の制御により、部材としての剛性に関する E'_c の方は低下させずに、振動減衰能を高めることができる。

3.2 二次元強化型複合材料

二次元強化型複合材料とは、薄い板を積層した型の複合材料である。この型の著名な複合材料にはベニヤ板や包装紙があり、また金属系ではクラッドがあるが、これらは、振動減衰能を意識しているわけではない。

制振を目的としたものとしては、ゴムやプラスチックなどの粘弾性体高分子材料を構造主体である鋼板などに接着したものがある。この型の複合材料は非拘束型と呼ばれ、ある程度の制振性能が得られる。しか

図4 B₄C被覆B繊維強化、およびSiC繊維強化アルミニウム合金(6061)の加熱処理前後における繊維含有量 V_f に対する複素弾性率実部 E'_c の関係³⁾

図5 B₄C被覆B繊維強化およびSiC繊維強化アルミニウム合金(6061)の加熱処理前後における繊維含有量 V_f に対する複素弾性率虚部 E''_c の関係³⁾

しこの方法では高分子材料を鋼板の数倍程度以上に厚くしなければ十分な効果が得られない。

これに対し、2枚の鋼板の間に粘弾性体高分子材料を挟み、サンドイッチ構造としたものが複合型制振鋼板として開発されている。この材料は拘束型と呼ばれ、高分子層の厚さが20~100 μm 程度と非常に薄くても制振性能は極めて大きい。これらの差は、非拘束型では高分子層が曲げに対して伸縮変形を行うのに対し、拘束型ではせん断変形が起きるゆえである。こ

図6 複合型制振鋼板の損失係数と温度の関係⁴⁾

の振動減衰には高分子材料の粘弾性が寄与していることは明らかであるが、機構についてはまだ不明な点が多い。

この型の複合材料では、材料を用いる部位の温度によって高分子材料の種類を選ぶ必要がある。図6⁴⁾は、複合型制振鋼板の損失係数と温度の関係を示したものであるが、常温用は通常の室温で使用するものであり、中温用は自動車のエンジン周囲の使用を目的としている。ここで損失係数とは、 $\eta = \Delta E / 2\pi E$ である。

また周波数の依存性は、図7⁴⁾に示すように損失係数がピーク温度に近づくとともに減少する。したがって広い周波数帯域にわたり大きな振動減衰能を得るには、温度変化の小さい高分子材料を用いる必要がある。

この型の複合材料を実用化する場合、機械的特性が問題となる。まず面内の引張強度であるが、高分子層の厚さが小さいこともあり、通常の冷延鋼板と比較して遜色はない。しかし、中間にある高分子層の力学的特性が問題となる曲げ、ねじれ、座屈などは弱い。

このような複合材料を加工する方法についても検討する必要がある。プレス加工について一部の研究はされているが、接合などについては今後の問題である。

4. おわりに

以上、代表的な金属系複合材料の振動減衰特性につ

図7 複合型制振鋼板の損失係数と周波数の関係⁴⁾ (常温用制振鋼板)

いて述べてきたが、これは最近になって問題となってきた分野である。したがって、まだ端緒についたばかりであり、データも理論もまだこれから検討すべき問題が多い。たとえば、界面の問題1つをとっても、どの程度の接合強度が必要なのか、あるいはどの程度の界面の厚さが適当なのかなど、全く手探りの状態である。

しかし上述のように複合化によって力学的特性は高くなる。それにもかかわらず、界面などを制御することにより振動減衰が大きくなり、またその効果が相当大きいことは明らかである。これは従来の材料とは大きく異なる点である。この特徴を生かすことができれば超精密機器分野などにおける材料としては極めて有望であり、今後の発展が期待される。

参考文献

- 1) 杉本孝一：極限に挑む金属材料（田中良平編：防振合金），工業調査会（1979）275。
- 2) Zvi Hashin：Complex Modulus of Viscoelastic Composites - II, Fiber Reinforced Materials, Int. J. Solid Structure, 6, (1970) 797.
- 3) I. Shiota and O. Watanabe：Damping Capacity of FRM, Composites '86, Recent Advances in Japan and the United States, Proc. Compos. Japan-US, (1986) 545.
- 4) 佐々木雄貞，遠藤 紘：複合型制振鋼板について，日本複合材料学会誌，4，3（1978）99。