



技術解説

防振合金の減衰能とその応用

佐 治 重 興*

1. はじめに

近年、激しい騒音や振動は勿論のこと、超低周波音や工具による振動障害などに対しても人々の関心は高まり、騒音と振動に対する規制が年々厳しさを増す傾向にある。また、低騒音化による商品価値の向上が期待されるとともに、音響や精密機器の分野では極微な振動やノイズをも除去することによって原音に忠実な音の再生や高級なフィーリングの現出あるいは測定精度の向上などが追求されている。

防振・防音対策としては、従来、振動や騒音の発生源となる機器の剛体化、共振の回避、制振系の取付けあるいは遮断や遮へいなど、主として設計上の配慮によってある程度の効果をあげてきた。しかし、上述の対策が適用できない場合や不十分な場合がしばしばある。そこで、振動や騒音を発生する機器を構成する部材に振動を減衰させる能力（減衰能）の高い材料を用いる対策が必要となる。

一般に、金属材料はゴム、合成樹脂などに比べ、減衰能は低いが強靱性、耐熱性、耐摩耗性など数々の優れた特性をもっている。特に高い減衰能を有する合金については1950年代後半から米国や英国でいくつかの High Damping Alloys (Hidamets) が開発された。例えば、タービン翼材としての優れた耐熱性ととも高い減衰能に起因する優れた疲労強度を合わせもつ Co-Ni 系合金、軽くて減衰能が高いためにミサイル内の精密機器のハウジング材に使用された Mg-Zr 系合金、ノイズ低減に効果があるため、潜水艦のスクルー材として使用されたとされる Mn-Cu 系合金、高い減衰能とともに耐食性にも優れる NiTi 合金などである。

わが国では1970年代はじめに上述の合金が「防振合金」として紹介され、その後防振合金の研究と開発が盛んになった。最近では各方面、とくに音響分野での実用化が進んでいる。

本稿では防振合金を利用する際に大切と思われる基礎的な事柄を中心に、最近の研究・開発の成果、応用や実用化の状況などを解説したい。

2. 減衰能の定義と表示法

減衰能に対する表示法が多様であるため混乱を招きやすい。減衰能は振動する物体内で振動エネルギーが熱エネルギーとなって失われる割合であり、1サイクル当たりの振動エネルギーの損失率として定義されている。厳密には固有減衰能 (Specific Damping Capacity; S. D. C. と略記) と呼ばれる。S. D. C. は次のように表わされる。

$$S.D.C.(%) = \frac{\Delta w}{w} \times 100 \\ = \frac{A_n^2 - A_{n+1}^2}{A_n^2} \times 100 \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 W は振動エネルギー、 ΔW は1サイクル中に失われる振動エネルギー、 A_n および A_{n+1} は図1に示した自由減衰振動における n

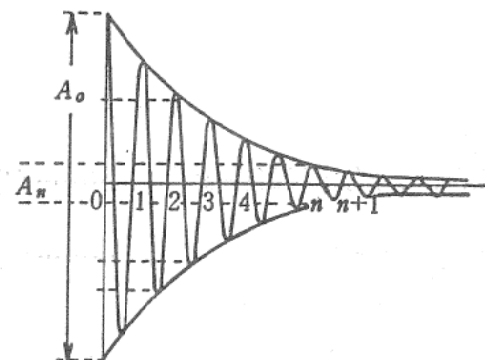


図1 自由振動の減衰

*佐治重興 (Shigeoki SAJI), 大阪大学工学部, 金属材料工学科, 助教授, 工学博士, 金属材料工学

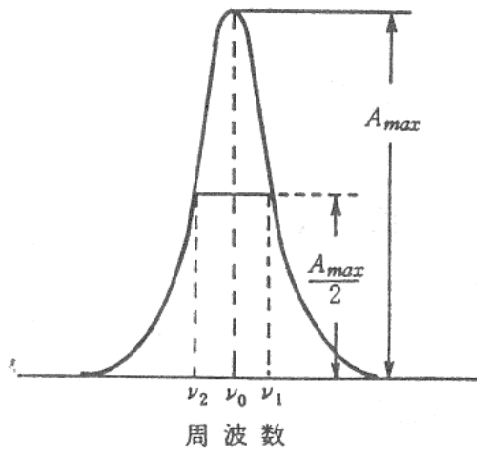


図2 強制振動における共鳴曲線

番目と (n + 1) 番目の振幅である。自由振動は指数函数的に減衰するので、次式にしたがって、対数減衰率 δ として減衰能が求められている場合が多い。

すなわち

$$\delta = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) = \frac{1}{f_0 \cdot f_m} \cdot L_n(m) \dots\dots(2)$$

ここで、 A_0 は初めの振幅、 A_n は n 番目の振幅、 f_0 は共振周波数、 t_m は振幅が $1/m$ に減衰するに要する時間であり、 f_0 と t_m を測定することによって求められる。また、現在では減衰振動の隣接する二つの振幅を精密に測定することが可能となり、(1)式から直接求めることもできる。

減衰能は強制振動における共鳴曲線 (図2) の半価幅 ($\nu_1 - \nu_2$) から求められ、記号 Q^{-1} を用いて(3)式で表わされる。

$$Q^{-1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\nu_1 - \nu_2}{\nu_0} \dots\dots(3)$$

振動工学の分野では損失係数 (Loss Factor) η が用いられている。

S. D. C., δ , Q^{-1} および η の間の相関関係は次のようになる。

$$S.D.C.(%) = 100(1 - e^{-2\delta}) \dots\dots(4)$$

$$\delta = \pi Q^{-1} = \pi \eta \dots\dots(5)$$

さらに、音響工学の分野ではしばしば音圧レベル (dB) や振動レベル (dB) の比較によって減衰能の評価が行われる。なお、減衰能は物

理学や金属材料工学の分野では内部摩擦 (Internal Friction) と呼ばれている。

3. 防振合金の種類と減衰機構

防振合金の種類は減衰能の原因あるいは機構によって分類されるのが適切である。従来、防振合金は表1の複合型、強磁性型、転位型および双晶型の4種類に分類されている¹⁾。しかし

表1 防振合金の種類

名称	減衰能の原因 あるいは機構	金属または 合金系 (例)	実用合金 (例)
複合型	母相と第2相との間の界面での粘性流動 (または塑性流動など)	Fe-C-Si Fe-C-Si Zn-Al	片状黒鉛鋳鉄 圧延鋳鉄 (F. F. C) Cosmal-Z
強磁性型	磁区壁の非可逆移動にともなう磁気・機械的静履歴	Fe, Ni Fe-Cr Fe-Cr-Al Fe-Co, Fe-Mo Co-Ni	12% Cr 鋼 サイレントロイ トランカロイ ジェントロイ NIVCO-10
転位型	転位が不純物原子による固着点から離脱するために生じる静履歴	Mg, Zn Mg-Zr Mg-Si Mg-Mn Mg-Mg ₂ Ni	KIXI-F SI-F MI-F
双晶型	熱弾性型マルテンサイトにおける変態双晶境界、または母相とマルテンサイト相との境界の移動に関連する静履歴または応力緩和	Mn-Cu-Al-Ni Mn-Cu-Al NiTi Cu-Al-Ni Cu-Zn-Al	ソノストン {インクラミ ユート I インクラミ ユート II ニチノール PROTEUS合金
その他	粒界腐食層 特殊圧延による空隙 (摩擦) 燃結による気孔	Fe-18Cr-8Ni Fe-C Fe-C-Si	V. C. Matal ラスク

最近、後述のように従来からあるステンレス鋼、炭素鋼あるいは鋳鉄に特殊な処理、加工を施して減衰能を高めた新タイプの防振合金が開発されている。現在、その機構は解明されておらず、表1ではその他として加えた。

3. 1 強磁性型合金

この型に属する合金の減衰能は、強磁性体が交番応力を受けた時、磁区壁が非可逆的に移動し、磁気・機械的静履歴を示すことに因るエネ

ルギー損失が主な機構である。この機構による減衰能の大きさは、歪振幅が大きくない時、(6)式²⁾で表わされる。

$$Q_{\text{mag}}^{-1} = 3.0 \times 10^{15} \cdot \frac{\nu |\lambda_m|^3 E^2 \epsilon}{\pi I_s^3} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 ν は磁気レーリー定数、 λ_m は多結晶の平均飽和磁歪、 E はヤング率、 I_s は飽和磁化の大きさ、 ϵ は歪振幅の大きさである。

λ_m 、 E 、 I_s は応力の影響をほとんど受けない物質定数であるが、 ν は加工や焼鈍状態によって大きく変る。そこで、減衰能を高めるためには λ_m と E が大きく、 I_s の小さな合金を選び ν を大きくするために十分な焼鈍を行うことである³⁾。

3.2 転位型合金

普通の金属材料の中には転位 (dislocation) と呼ばれる線状の格子欠陥が存在する。その密度は十分に焼鈍された材料中では約 10^6cm^{-2} であるが、塑性加工によってその数は増し、互に

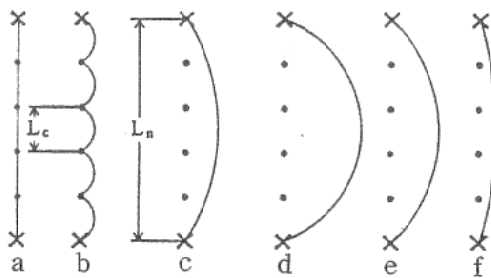


図3 応力の増減による転位のわん曲離脱過程
 ・不純原子
 ×転位網の節点

からみ合って転位網などを形成する。交番応力下では転位は弦のように振動すると考えられ、図3のモデル⁴⁾によってエネルギーの消失が説明される。すなわち、転位線はaのように不純物原子(・)によって間隔 L_c でもって弱く固着され、さらに転位網の節(×)によってより大きい間隔 L_n でより強く固着されている。外部応力が小さいうちはbのように間隔 L_c の間で小さくわん曲するが、応力がある大きさを越えるとc~fのように、不純物からの離脱が起こり、間隔 L_n で固着されたより大きい振幅の振動を行う。そして、応力の増加および減少の過程における応力-歪曲線は図4のようにな

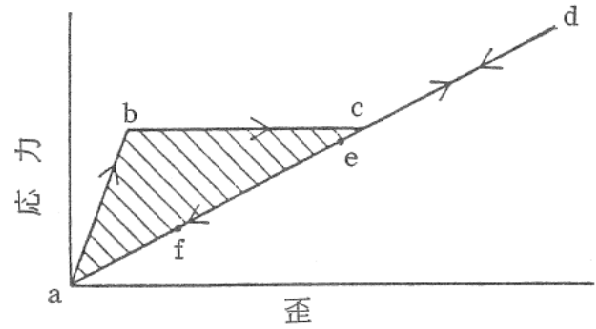


図4 転位の振動モデル(図3)にもとづく応力-歪曲線

り、斜線で示された部分の面積に相当する静履歴現象が現われ、エネルギーが消失する。上記のモデルによる減衰能の大きさは次式で表わされている⁴⁾。

$$Q^{-1} = \frac{\Omega}{\pi} \frac{AL_n^3}{L_c} \cdot \frac{K\eta A}{L_c} \cdot \frac{1}{\epsilon_0} \exp\left(-\frac{K\eta a}{L_0} \cdot \frac{1}{\epsilon_0}\right) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 Ω は方向係数、 A は転位密度、 K は転位の離脱応力に関する係数、 η はミスフィットパラメーター、 ϵ_0 は最大歪振幅、 a は格子定数で、多結晶金属では $\Omega \approx 1/2$ 、 $K \approx 1/10$ が妥当とされている。 Mg や Zn などの転位型防振合金の大きい減衰能は稠密六方結晶構造の底面における転位の振動と不純物原子との相互作用に起因すると報告されている⁵⁾。

3.3 双晶型合金

熱弾性型マルテンサイト中にはマルテンサイト変態に伴って発生した多数の変態双晶がみられ、これらの双晶境界が外力によって容易に動き得ることが実証されている⁶⁾。交番応力下での双晶境界の移動に伴う静履歴または応力緩和がこの型の主な減衰機構である。

3.4 複合型合金

複合型に分類される代表的合金は Zn - (20~60) % Al 合金と鋳鉄であり、前者の減衰能は Al の α 相と Zn の β 相との界面でのすべりに基づく緩和過程によるとする機構が支持されている⁷⁾。一方、鋳鉄の場合フェライトあるいはパーライトの母相中に存在する片状黒鉛が高い減衰能の原因であるが、機構については、(1)母相と黒鉛との界面でのすべり、(2)柔かい黒鉛

中での塑性変形，(3)局部的に応力集中を受けた母相での塑性変形など諸説⁹⁾がある。

3.5 新タイプの防振合金

表1でその他の型に分類した合金の特徴は従来からある素材に特殊な防振処理が施された防振合金であり，前述の4つの型とは異なる新タイプの防振合金である．例えば，(1)防振処理層を有する18-8ステンレス鋼：18-8ステンレス鋼(SUS 304)を高温から急冷した後，400～800℃に長時間保持するとCrの炭化物が粒界に析出し，結晶粒界が優先的に腐食されやすい状態(鋭敏化)になる．このことを応用してSUS 304の板，棒，パイプ，型材などの表面を硫酸-硫酸銅水溶液で腐食し，粒界に多数の鋭いクラックのある層(防振処理層)を付けた防振合金，Vibration Cut Metal (V. C. Metal)が生れた．その減衰機構は結晶粒間の摩擦とぶつかり合いに因ると報告⁹⁾されているが十分に解明されていない．(2)圧延防振鋼板：これは普通鋼(SS 41)の板材に溝加工と圧延加工を施して図5⁹⁾に示すような逆Y字形の薄い空隙を

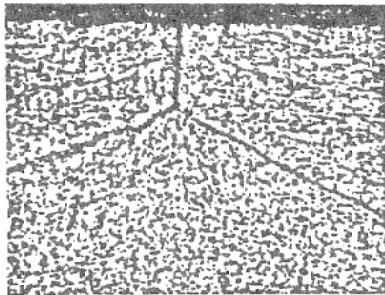


図5 圧延防振鋼板にみられる逆Y字形の圧着界面⁹⁾

形成し，高い減衰能を付与したものである．減衰能の原因については，空隙をはさんだ両側材料の摩擦に因る可能性が指摘されている．(3)多孔質鑄鉄：共晶あるいは過共晶組成域にある片状黒鉛鑄鉄を適切なサイズに削った粉体(6～35mesh)を加圧成形し，焼結した鑄鉄板であるが，気孔が単孔でなく，連続した形状で存在する．この焼結鑄鉄の減衰能はもとの鑄鉄(FC 25)の減衰能の2.5倍に向上すると報告されている¹⁰⁾．この場合，片状黒鉛鑄鉄がもつ比較的高い減衰能に多孔質化による減衰能向上の

効果が加わったものと考えられる．

4. 防振合金の減衰能特性

一般に，減衰能は振動振幅あるいは応力，振動周波数，振動の繰返し数，外部磁場，静的荷重，合金が受けた熱処理や塑性加工など種々の条件によって変る．防振合金を効果的に利用するためには，その減衰能特性を十分に知っておく必要がある．減衰能特性は厳密には個々の防振合金によって異なるが，同一機構に属する合金はその機構に特有な減衰能特性を示す．以下に各型に属する合金の主な減衰能特性について述べる．

4.1 強磁性型の特性

強磁性型合金の減衰能は，(1)振動振幅(応力)の増大とともに増大し，一つのピークを示して減少する．図6¹¹⁾参照，(2)静的荷重 σ が大

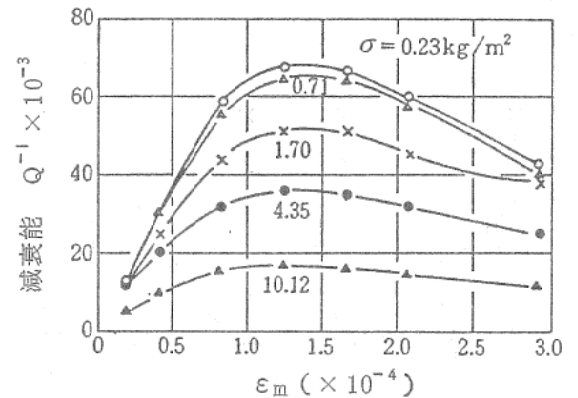


図6 焼鈍したFe-25%Co合金の内部摩擦におよぼす最大剪断歪振幅， ϵ_m および引張荷重， σ の影響¹¹⁾

きくなるほど低下する．図6参照，(3)振動周波数にはほとんど依存しない．(4)外部磁場の強さが約30～40 Oeを越えると急激に低下する．(5)温度がキュリー点に近づくと急激に低下する．(6)塑性加工を施すと減衰能は低下し，十分に焼鈍された内部応力のない状態で高い減衰能が得られる．

4.2 転位型の特性

転位型合金の減衰能は表2¹²⁾の例にもみられるように，(1)振動振幅(応力)の増大とともに増大する．(2)振動周波数にほとんど依存しない．(3)温度上昇とともに増大する傾向にある．

表2 マグネシウム合金の化学成分および固有減衰能の振動応力依存性¹³⁾

記号	化学成分 %	S.D.C. (%)					
		振動応力 kg/mm ²					
		0.35	0.70	1.05	1.40	1.75	2.45
KI-F	0.6 Zr	49	61	65	67	69	72
KIXI-F	〃	56	67	71	72	73	75
SI-F	0.7 Si	44	55	61	66	70	75
SI	1.4 Si	34	43	49	58	62	67
MI-F	0.9 Mn	43	63	80	87	89	91
MI	1.4 Mn	46	85	—	—	—	—
AM 100	9.8 Al, 0.2 Mn	0.044	0.099	1.5	8.0	16	34
Mg	99.9 (鑄造の まま)	73	89	—	—	—	—

(4) 圧延, 押出し, 機械加工などによって低下する.

4.3 双晶型の特性

双晶型合金の減衰能は, (1)各合金の熱弾性マルテンサイトの変態温度域に対応した温度域で幅の狭いピークを示す. ピーク温度は合金系および組成によって異なるが, 高々 100°C 程度である. 図7¹³⁾はマルテンサイト相を有する Cu-26% Zn-4% Al 合金製のコイルばねの下端におもりを取り付け, 上端に衝撃力を与えた時のばねの減衰振動から高速フーリエ変換アナライザーを用いて測定された減衰能の温度依存性を示す. (2)振動振幅の増大とともに増大する. (3)熱処理によって減衰能のピーク高さおよびピーク温度は変る. (4)塑性加工によって減衰能は低下する.

4.4 複合型の特性

複合型防振合金を代表する Zn-Al 系合金の減衰能は, 図8¹⁴⁾にみるように, (1)温度依存性は顕著であって約 200°C でピークを示し, 共析温度を越えた約 300°C で急激に減少する. 振動周波数 f_1 および f_2 で測定したピーク温度 T_1 および T_2 の間にはつぎの関係式が成立つ.

$$L_n\left(\frac{f_2}{f_1}\right) = \frac{H}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで, Hは緩和現象の活性化エネルギー, Rは気体定数, Tは絶対温度, (2)振動振幅には

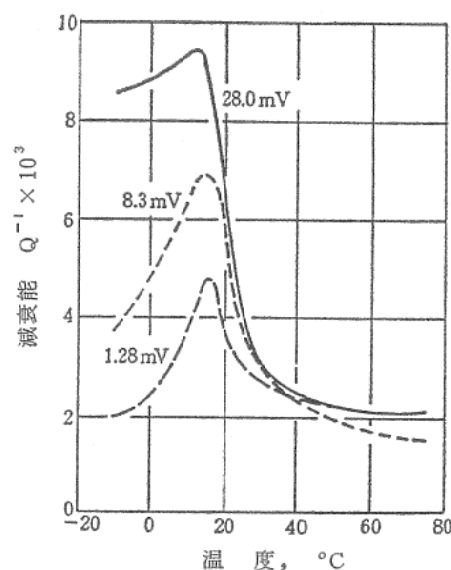


図7 Cu-26% Zn-4% Al 合金製コイルばねのマルテンサイト変態に関連する減衰能の温度依存性および衝撃応力レベル (mV) の影響¹³⁾

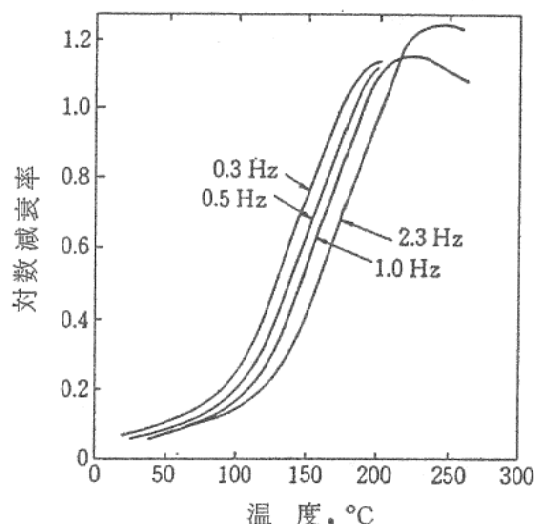


図8 Zn-22% Al 合金における減衰能の温度および周波数依存性¹⁴⁾

ほとんど依存しない. (3)共析温度 (275°C) を越える温度から急冷した焼入れ材では約 1~2 μm の微細な α相と β相の混在する組織が得られ, 高い減衰能を示す. (4)約 200~300°C の温度域で長時間保持すると α相および β相の粒成長によって減衰能は低下する.

一方, 鑄鉄の減衰能は, (1)温度依存性がほとんどなく, (2)振動周波数 (1.5~3 Hz) によって減衰能はわずかに変化する. (3)振動振幅の増大とともに大きくなる. 図9¹⁵⁾参照, (4)黒鉛が

粗大な片状で炭素当量が約4.5~5.0 (C. E 値%) のとき最大となる。(5) 鑄ばなし材を焼なますと減衰能は低下する。

上記の Al-Zn 系合金と 鑄鉄は同じ複合型に

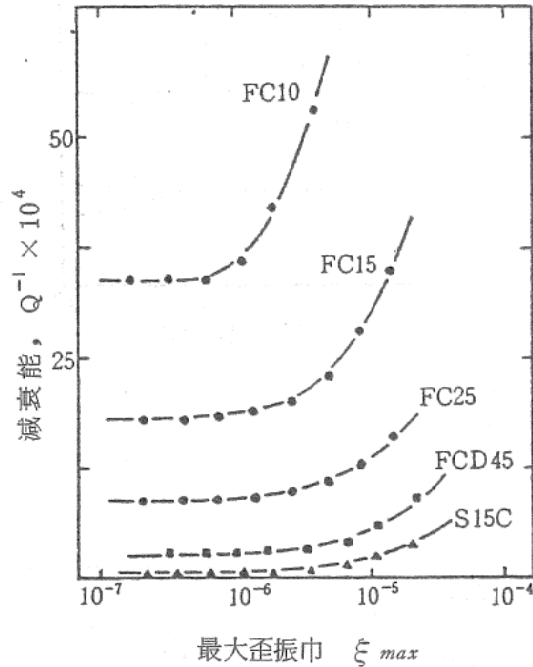


図9 各種鑄鉄における減衰能の振動振幅依存性
FC10, 15および25: 片状黒鉛鑄鉄
FCD45: 球状黒鉛鑄鉄
S15C: 低炭素鋼¹⁵⁾

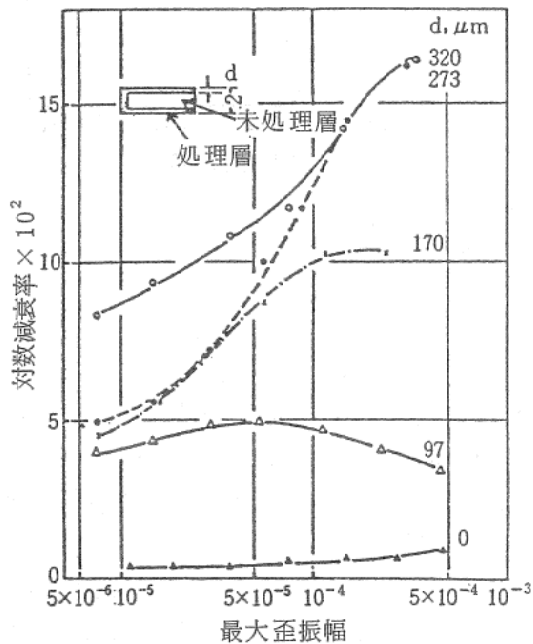


図10 対数減衰率に対する処理層深さと歪振幅の影響⁹⁾

分類されているが、両系合金の減衰能特性については温度依存性、振動振幅依存性が大きく異なる。したがって、異相界面が原因となっても機構は異なると考えられる。

4.5 新タイプの防振合金の特性

この種の防振合金の減衰特性についてはデータが少ないが、つぎのような特性が報告されている。

防振処理層を有する 18-8 ステンレス鋼の減衰能は図10⁹⁾ に示されたように、(1) 処理層の深さの増加とともに増大する。(2) 振動振幅の増大とともに増大し、ピークを描く傾向にある。(3) 温度の上昇とともに低下する。図11¹⁶⁾ 参照、圧延防振鋼板の減衰能は溝ピッチによって変るが、(1) 振動振幅歪 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ の間でピークを示す。また、(2) 温度依存性は図11にみるように、高温になってもほとんど変わらない。

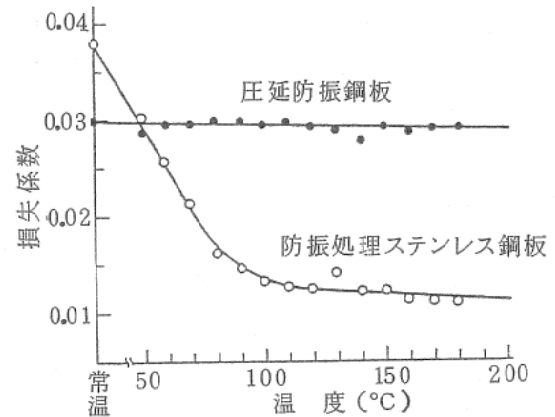


図11 粒界腐食による防振処理ステンレス鋼板 (SUS 304) および溝加工一圧延による圧延防振鋼板の減衰能の温度依存性¹⁶⁾

5. 防振合金の用途

防振合金には防振、防音、雑音低減、振動・騒音の発生源探知や振動解析、疲労寿命の改善などの用途が期待され、これまでも種々の応用結果や実用例について報告されている¹⁾。最近では音響分野での使用が増えている。表3は防振合金を適用して大きな効果があったと報告されている例であり、これらの半数以上は最終製品として実用されている。現在、わが国で実用化が進んでいるのは主に鑄鉄、Al-Zn 系合金、Fe-Cr-Al 系合金および新タイプの合金であ

表3 防振合金の適用例

分野	機器および部品名	効果	実用合金名 (合金系)
音響	プレーヤー・トーンアーム	音質向上	サイレンタロイ (e-Cr-Al)
	“ (パイプ状)	“	V. C. Metal (防振処理 SUS 304)
	プレーヤー・タンチーブル	“	“
	ステレオアンプシャーシ	フィーリング向上	Cosmal Z (Zn-Al)
	カセットメカシャーシ	“	“
	スピーカーフレーム	“	“
	ステレオセットインシュレーター リスニングルーム, 演奏会場などの衝立て	“	ラスク (多孔質鉄)
精密機器	X線診断装置のX線管支持部	分解能向上	サイレンタロイ (Fe-Cr-Al)
	測定器用歯車	測定精度向上	“
	カメラオートワインダー	騒音防止	“
	音さ時計支柱	“	Mn-Cu
自動車・船舶	キャブレター	騒音防止	Cosmal Z (Zn-Al)
	エンジンオイルパン	“	サイレンタロイ (Fe-Cr-Al)
	カムシャフトギア	“	Mn-Cu
	潜水艦用スクリュー	雑音低減	ソノストン (Mn-Cu-Al)
設備	ミサイル内精密計器用ハウジング	衝撃損傷防止	K1X1-F
	組立ラインチェーンコンベアー台	騒音防止	サイレンタロイ (Fe-Cr-Al)
	大型送風機枠組および羽根	“	“
	タービン翼	疲労寿命向上	NIVCO-10
建設	鉄道路線用砕石整正装置スタンプ	騒音防止	サイレンタロイ (Fe-Cr-Al)
その他	食器類 (フォーク, スプーン, 皿など) 郵便袋区分札	騒音防止 “	サイレンタロイ (Fe-Cr-Al) “

る。新タイプの防振合金の場合、ステンレスパイプの内壁のみが防振処理を施されて、プレーヤーのトーン・アームとして、また、防振処理を施されたステンレス円盤がプレーヤーのターンテーブルに使用されている。一方、多孔質鉄は吸音性にも優れ、250Hz以下の低周波域での音響透過損失が20dB程度である¹⁰⁾。ステレオセットのインシュレーターあるいはリスニングルーム、音楽教室、スタジオ等のパーティション (衝立て) として実用されている。

防振・防音の面で効果があっても実用化が進

まない合金は素材の製造工程に難点があり、コスト高となる場合あるいは減衰能以外の重要な材料特性が劣る場合などである。例えば、マグネシウム合金は溶製や加工性に難点があり、コスト高で耐食性も劣る。また、双晶型の合金は早くから開発されているが、共通した欠点は減衰能の高い温度域が狭く、その温度も高々100℃程度である。また、減衰能を高めるためには高温からの焼入れ処理が必要であり、そのとき薄肉材では反りが出る。溶接も難しい。この型に属するNiTi合金は耐食性や耐摩性に優れる

ものの組成的に高価である。一方、比較的安価な Cu-Ni-Al 合金は粒界で割れやすく、耐食性や疲労強さも劣る。これらの合金の実用化が進むためには上記の問題点が克服されねばならない。

6. おわりに

生活の向上を背景にして、防振・防音材料への需要は増しつつある。本稿では高い減衰能を有する金属材料に限って述べてきたが、最近、普通鋼板の表面にゴム、アスファルト、プラスチック等を主成分とする粘弾性高分子材料を塗布した2層構造あるいは2枚の鋼板の間に粘弾性高分子材料の薄い層をはさんだ3層構造をもつ減衰能の高い複合材が開発され、その実用化が進んでいる¹⁷⁾。

防振合金の有効利用にあたっては、振動や騒音の発生源および伝搬経路における振動特性や音響特性の調査、防振合金の接合技術、設計上の工夫など難しい問題が多い。そのため、防振合金の利用技術の確立には各方面の専門家の協力を必要としている。

この拙文が振動や騒音の低減に役立つならば幸甚である。最後に、本誌への寄稿をお勧め下さった大阪大学工学部冶金工学科、近江宗一教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) 杉本孝一：鉄と鋼, 60 (1974), 2203
- 2) M. kornetzki: Z. phys., 121 (1943), 560
- 3) 佐治重興, 中田裕省, 堀 茂徳: 日本金属学会講演概要, (1982・10), 332
- 4) A. Granato, and K. Lücke: J. Appl. Phys., 27 (1956), 789
- 5) K. Sugimoto, K. Matsui, T. Okamoto and K. Kishitake: Trans. Japan Inst. Met., 16 (1975), 647
- 6) K. Otsuka: Japan J. Appl. Phys., 10 (1971), 571
- 7) 伊藤邦夫, 藤本一之: 日本一属学会誌, 43 (1979), 1109
- 8) 植田照一, 小野修二, 松本 晃: 材料科学, 15 (1978), 245
- 9) 中江秀雄, 尾崎敏範, 島口 崇, 田中喜八郎, 森本庄吾: 日本金属学会講演概要, (1979,), 89
- 10) 津田昌利: 金属, 50 (1980), 65
- 11) H. Masumoto, S. Sawaya, and M. Hinai: Trans JIM., 19 (1978), 312
- 12) The Magnesium Association ed: Magnesium Looks ahead 14th, (1958. ot), 320
- 13) K. Sugimoto, Y. Nakamura, and L. Delaey: Proc. ICIFUAS-7, Lausanne, (1981. Jnly), 941
- 14) A.S. Nowick: J. Appl. Phys., 22 (1951), 925
- 15) 松井 啓, 松野 亮, 木津文生, 高橋 睦, 菅野秀雄: 日本金属学会誌, 40 (1976), 1062
- 16) 平田東助, 中江秀雄: 日本機械学会講演論文集, No. 790-8 (1979), 13
- 17) 佐治重興: 科学と工業, 57 (1983), 218