

新金属材料『防震合金』について

大阪大学産業科学研究所 助教授 杉 本 孝 一

1. まえがき

機械や構造体の振動と騒音をなくすために、通常つぎの三つの点、すなわち(1)質量を増し、剛性を高める、(2)共振を避ける、(3)振動を減衰させることなどを重点に設計が行なわれる。このうち、(3)はもっとも実際的な方法であるが、従来これはおもにオイルダンパーなどを用いたシステムダンピングによる方法と、ゴムやプラスチックなどのような減衰の大きい材料と金属材料とを組み合わせる方法とによって実施され、防震設計の基本的手段と考えられていた。

近年、誘導ミサイル、宇宙ロケットあるいは原子力潜水艦などが発達するにつれて、従来の方法ではとても除去できないようなはげしい振動を生じる場合や、あるいはごくわずかな振動や騒音さえも完全に除去しなければ十分な性能が発揮できない場合が現われた。このような場合には一般に重量とスペースの制限などから上記システムダンピングによる方法はもちろんのこと、ゴムやプラスチックなどと金属材料とを組み合わせる方法さえも採用できない場合が多い。そこで考え出されたのが、金属材料そのものに非常に大きい固有減衰能を付与するという方法である²⁾。結論的にいえば、現在この方法は一応実施可能な状況にあり、各種のすぐれた防震合金がすでに開発され、一部で実用に供されている現状である^{1),3),4)}。以下この防震合金について簡単にその学問的基礎と応用例に触れてみよう。

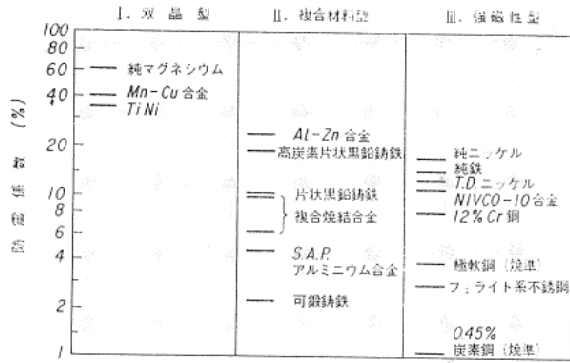
金属材料は元来そのすぐれた強度のゆえに広く工業的に利用されるわけであるが、その反面ゴムやプラスチックなどのような材料にくらべ

ると減衰能がずっと小さく、振動や騒音をはるかに発生し易いものと一般に考えられている。キーンという騒音を『金属音』と呼ぶことからこのことは明白であろう。もちろん、金属材料のうちにも例外はある。たとえば、鉛は軟らかい金属であり、減衰能が極端に大きい、強度から見ると金属材料の特徴を持っているとはいえ、弱くて実用にはならない。また、昔からよく知られている材料として片状黒鉛鋳鉄がある。これは工作機械の台枠などに用いられ、ある程度の防震効果が認められている材料である。けれども、これも強度の点で充分とはいえ、また塑性加工が不可能という致命的な欠点を持っている。

ここに紹介する Mn-Cu 双晶型防震合金は強度、加工性などの点では申し分のない優秀な材料であるばかりでなく、その固有減衰能の大きさは従来の金属材料の常識をはるかにこえた値であり、ナイロンの減衰能と同程度のものである。金属材料とは強いが、よく鳴るものという従来の常識を破るこの種の新型防震合金の出現は、まさに驚威的であり、将来さまざまな利用の可能性が考えられる。この意味で新金属材料の一派をなすものといえよう。

2. 防震合金の分類

第1図は現在知られている各種防震合金を筆者がそれぞれの防震機構によって三つの型に分類を試みたものである²⁾。各合金の防震係数をそれぞれパーセントで示している。防震係数⁴⁾とは合金の持つ防震効果の大きさを表わすための数値で、つぎのように定義される。すなわち、材料の0.2%永久歪に相当する引張り耐力を σ_0 とし、 $\sigma_0/10$ のせん断応力振巾を用いて



防振係数

1%以下のもの

オーステナイト系不銹鋼, 共析鋼(焼準), 快削黄銅(鉛入り), アルミニウム合金

0.2%以下のもの

チタン合金, 黄銅, 青銅, その他上記以外の鉄系および非鉄系合金の大部分

図1 防防震合金と各種金属材料の防振係数

振り振動法により求めた固有減衰能の大きさをいう。ここで、固有減衰能 (Specific Damping Capacity, 略して S.D.C. と記す) とは

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

として求められる量である。ただし、 W は振動体の持つ弾性エネルギー、 ΔW は1サイクル当りのエネルギー損失量、 A_n および A_{n+1} はそれぞれ n 番目と $n+1$ 番目の振巾の大きさである。

S.D.C.の値が10%以上あるものはいずれも防振効果が顕著である。この図で双晶型の分類に加えられている純マグネシウム、Mn-Cu合金およびTiNi合金は防振係数が40%あるいはそれ以上もあって、非常に顕著な防振効果のあることが解っている。これに反して、複合材料型、あるいは強磁性型の合金の持つ防振効果は一般に双晶型のものよりも劣っている。さらに、図の下欄に示したようにその他の一般金属材料はそのほとんどが防振係数1%以下、または0.2%以下という非常に小さなものばかりである。そこで、このような防振係数の小さい材料を上記の双晶型防防震合金で置き換えることによって、顕著な振動あるいは騒音防止の効果が上がるわけである。

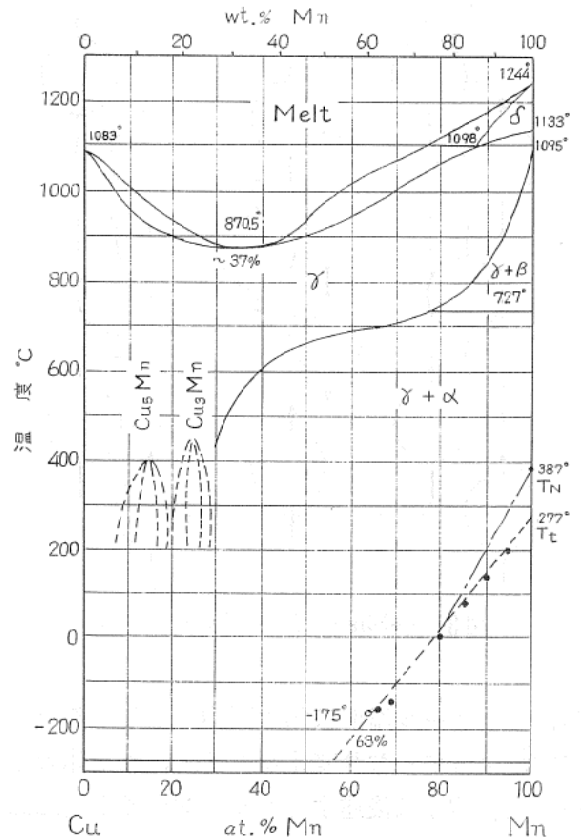


図2 Mn-Cu系平衡状態図。鎖線は合金のネール温度 T_N を、また破線はマルテンサイト変態温度 T_t を表わす。

3. Mn-Cu合金の防振機構

第2図はこの合金系の平衡状態図である。一般に60~90wt.% Mnを含む合金が防振効果を持つ。ここでは主として合金が防振効果を持つ理由を基礎的に解説しよう。

上記組成の γ -固溶体は面心立方格子構造を持つ。これを高温から急冷すれば容易に室温まで過冷される。このような過冷 γ -固溶体は冷却に際して図中の鎖線で示されたネール温度 T_N を過ぎるとき、常磁性から反強磁性へと磁気変態する。第3図は γ -Mnの反強磁性スピン構造を示したものである。立方体の底面に平行な一つの面内にあるMn原子のスピンの向きは底面に垂直な一つの方向に揃っており、かつ、一層ごとにその向きが逆となる構造である。 γ -固溶体はMn原子の一部がCu原子により置換された構造のものであるが、第3図のものと似たスピン構造を取ることが知られている。ただ

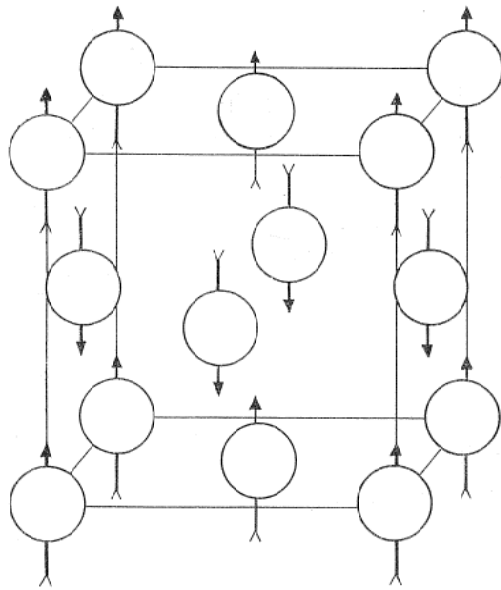


図3 γ -Mn の反強磁性スピン構造

し、そのネール温度は第1図中に示したごとく組成によってかなり変化がある。 γ -固溶体のネール温度 T_N は後述するマルテンサイト変態温度 T_i と密接に関係するので、合金の防震機構を理解するうえで重要である。

さて、温度がさらに下ると、合金はマルテンサイト変態温度 T_i で面心立方格子構造から面心正方格子構造へと変態し、同時に結晶内に、 $\{101\}$ 変態双晶をともなって固有減衰能が非常に高いものとなる。その模様は第4図によって示されている。すなわち、第3図のスピン構造は面心立方格子の各原子間の距離を変化させ、第4図の $A'E'C'D'$ のように面心正方格子に結晶を歪ませる。その結果発生する歪エネルギーの上昇を軽減するように、結晶は $A'C'$ 面を双晶面とする双晶変形を起こす。双晶の形成は原子の協力的な運動によってなされ、図中の白丸で示した各原子が黒丸で示した原子の位置まで矢印で示した距離だけ移動すればよい。このような変態とそれともなう双晶の形成は原子の拡散をとまわず、マルテンサイト的に起こる。そこでこの合金の面心立方晶から面心正方晶への変態は一種のマルテンサイト変態とみなされ、その温度 T_i をマルテンサイト変態温度と呼ぶ。

マルテンサイト変態の結果生じた $\{101\}$ 双晶

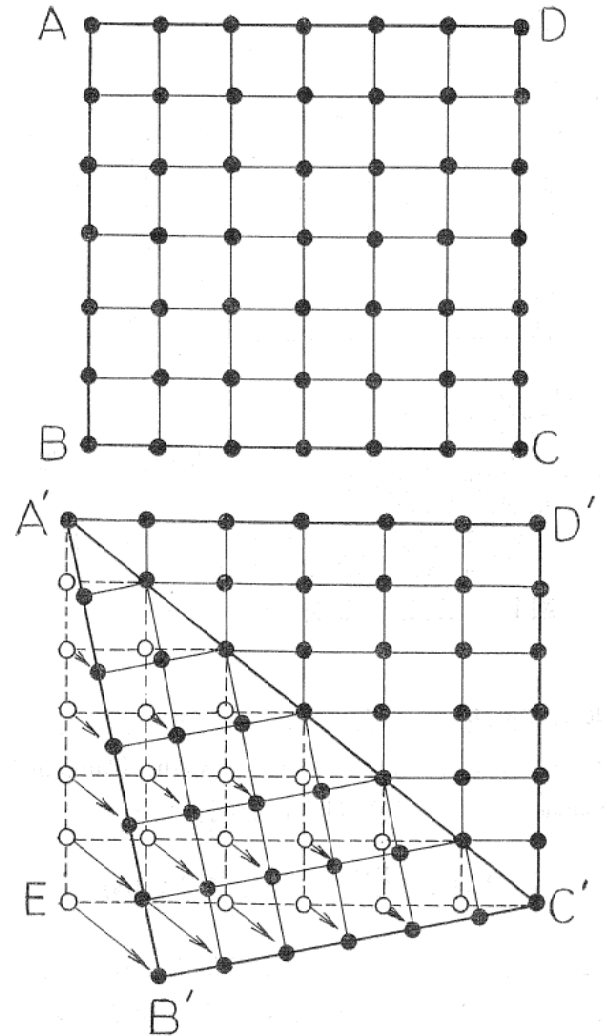


図4 面心立方晶 (ABCD) から面心正方晶 ($A'E'C'D'$) への変態とそれともなう $\{101\}$ 変態双晶の形成。 $A'C'$ は変態双晶の境界である。(図の都合で面心位置にある各原子は省略した)。

は光学顕微鏡、あるいは電子顕微鏡を用いて観察することができる。

第5図は筆者が阪大産研の清水謙一教授、ならびに岡宗雄助教授の御協力をえて 60 wt. % Mn-Cu 合金の時効処理材についてえた双晶の電子顕微鏡写真である。黒い平行なすじは (101) および $(10\bar{1})$ 面に平行に並んだ双晶の境界によるコントラストであり、その平均間隔は約 60\AA で、たがいにほぼ直交しているのがわかる。なお、この合金の面心正方格子構造は軸比 $c/a=0.98\sim 0.99$ であり、軸比が1に近いので双晶による回折斑点はえられなかった。第4図では便宜上 $c/a=0.82$ として正方歪を誇張し

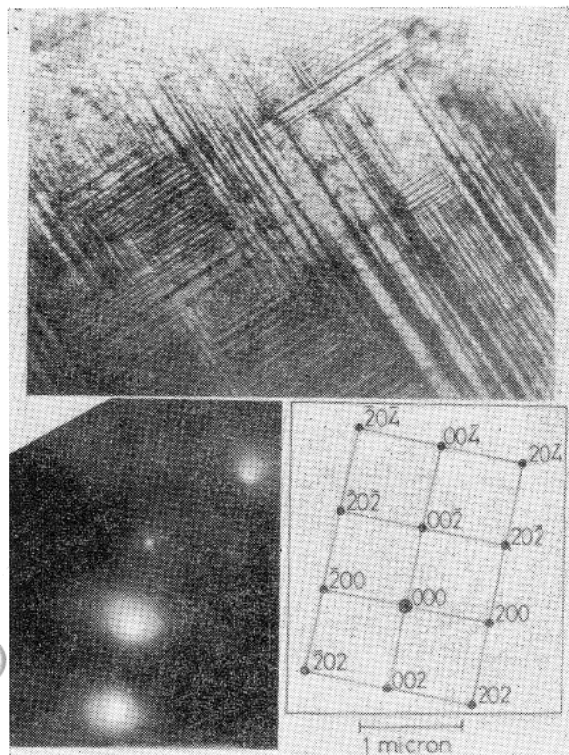


図5 60wt.% Mn-40wt.% Cu 合金の面心正方晶相の中に見られる変態双晶。熱処理：850°C×2hr → 水焼入れ、つづいて 40°C×6hr → 水焼入れ。

て図を描いてある。

さて、以上でこの合金中にマルテンサイト変態双晶が存在する理由のあらましを述べたわけであるが、つぎにこのような双晶の境界が外力の作用のもとで容易に動き、その結果材料の応力-歪関係をいわゆるフックの法則からはずれさせて特異な関係を持つものとするにつき述べてみる。双晶型防震合金なる名称はこのように変態双晶が防震機構にたずさわっているためにつけたものである。

変態双晶が合金の固有減衰能を異常に高める原因としてつぎの二点があげられる⁵⁾。すなわち、(1)面心正方晶のマルテンサイト中に含まれる変態双晶の境界は外力の作用のもとで容易に動く。その際、格子中を双晶境界が横切って移動するために、ある種の摩擦力が働らき、これが大きな固有減衰能の原因の一つとなる。つぎに、(2)変態双晶境界の近傍における Mn 原子のスピンの配列状況は強磁性金属の 90° 磁区壁におけるスピンの配列と似ており、境界の両側にある拡がりを持ってスピン向きがほぼ 90° 連続

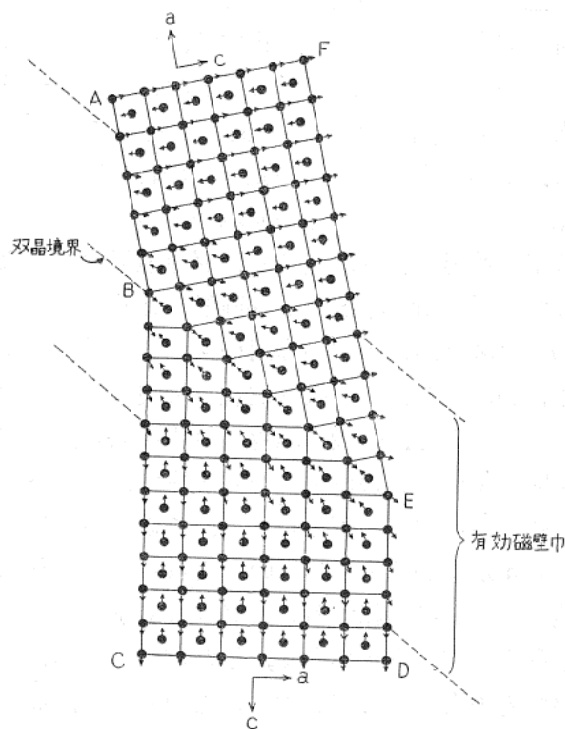


図6 面心正方晶中の {101} 変態双晶境界近傍における Mn 原子のスピン配列。矢印はスピンの方向を表わす。

的に変化している。したがって、このような境界が移動するためにはそれに相当した量だけスピンの回転が起こることが必要である。スピンの回転にともなう渦電流損失もまた、この合金の大きな減衰能の原因の一つである。以下これらの二点につきさらに詳細に説明する。

まず、上述の(1)であげたように双晶境界が外力の作用のもとで容易に動きうることを説明しよう。これは第6図の結晶について簡単につぎのように説明できる。第6図では双晶境界 BE を境として結晶が上下のそれぞれ半分づつに分けられているが、このうち上半分の ABEF においては C 軸が AF に平行であり、また下半分 BCDE においては C 軸が BC に平行である。この合金の正方晶は前述したとおり $c/a < 1$ なるゆえ、いま、この結晶に対して AC に平行に外部から張力を働かせた場合を考えると、双晶境界 BE が図の下方に向かって移動しつつ、結晶の上半分が下半分の領域を喰って成長することで、結晶は AC の方向に伸びることができる。つぎに外力を除去すると双晶境界は図

の上方に向かって移動し、はじめの位置に近い場所までもどってそこに静止する。つづいて、今度は同じ AC に平行に圧縮応力を働かせると、双晶境界 BE は図の上方に向かって移動する。このときも、さきの張力の場合と同様に、結晶の下半分が上半分の領域を喰って進むという形で境界の移動が起こる。双晶境界のこのような外力による移動は、強磁性金属において 90° 磁区壁が、外力の作用のもとで移動する現象、いわゆる磁気・機械的結合の現象と類似するものである。一般に境界は外力を取り除いても完全にはじめの位置までもどらず、応力-歪曲線に履歴現象が認められる。この合金では軸比 c/a がきわめて 1 に近い値を取るから、双晶境界の移動を誘起するのに必要な原子のせん断移動距離が非常に小さく、したがって移動に必要な外力もきわめてわずかなものでよい。これが、双晶境界が外力の作用のもとで容易に動くことのできる理由であり、それにともなうエネルギー損失が高い減衰能の一因となっている。

つぎに(2)で述べたスピンの回転にともなうエネルギー損失につき説明する。第6図の各原子につけた矢印の向きはそれぞれスピンの向きを表わしている。双晶境界の両側のある巾(有効磁壁巾)にわたってスピンの向きは徐々に変化している。境界の両側で最終的にはほぼ 90° の向きの変化が起こっているわけである。(1)のような機構で双晶境界の移動が起こるとすれば、それはとりもなおさずスピンの回転が起こることを意味し、したがってそれにともなう渦電流損失などのエネルギー損失があるはずである。これが、合金の高い減衰能の原因として第二番目にあげられるものである。

第7図は変態双晶が一つの結晶中に多数均一に分布している場合に起こる境界移動の様相を巨視的に書き表わした模式図である。外力がない場合 ($\sigma=0$) の双晶境界の位置が、外力の働いた場合 ($\sigma>0$, または $\sigma<0$) に変わっている様子がわかる。この場合も、さきに第6図で述べたように一つの双晶が隣接する他の双晶の領域を喰って成長する形で境界の移動が起こる。実際の合金は多結晶であり、このような簡

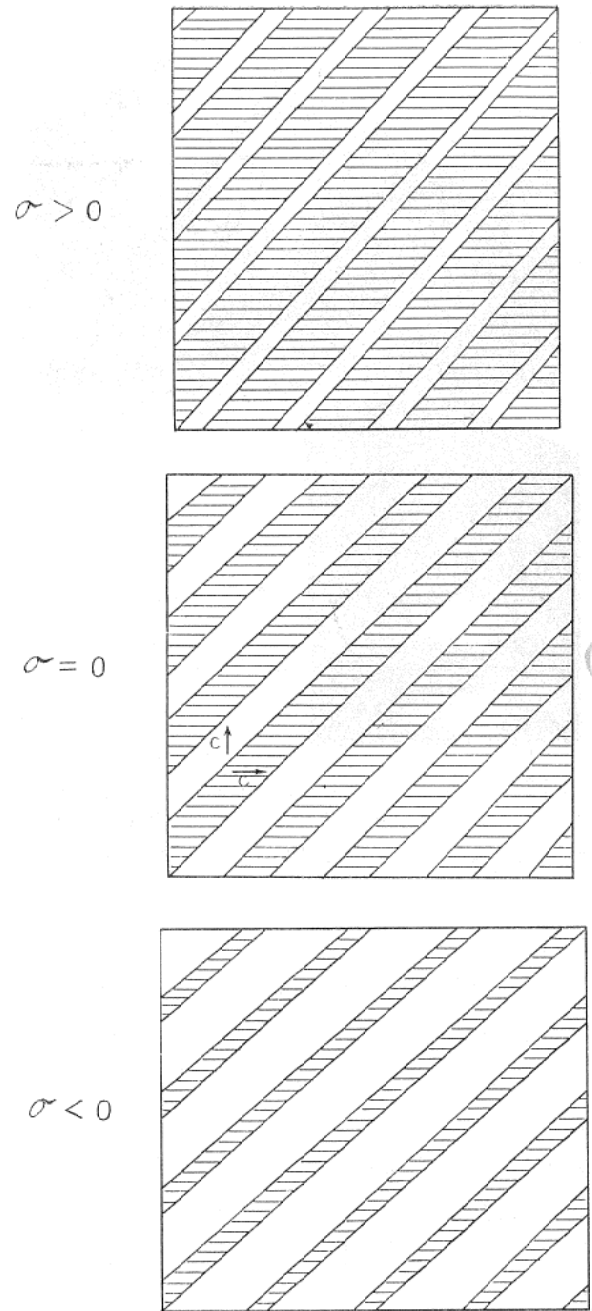


図7 単結晶における {101} 双晶境界の移動にともなう非弾性歪発生の様式図。

単なものではないことはもちろんであるが、一つの結晶粒内には非常に多くの双晶領域が含まれている。ちなみに、筆者が 60 wt. % Mn-Cu 合金について電子顕微鏡により調べたところによると、合金の 1 cm³ 当り、平均して約 30m² の双晶境界面が含まれていることがわかっている。このような高密度の境界面がそれぞれ上記(1)および(2)の機構でエネルギー損失を惹き起こし、結局全体として非常に高い減衰能を示すこ

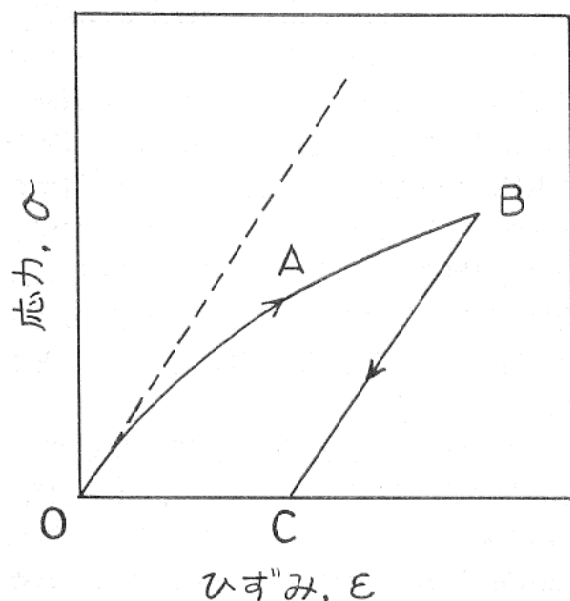


図8 ferroelasticity を示す材料の応力—歪曲線。破線は弾性歪を表わす。非弾性歪のために曲線 OAB に沿って変形が起こる。OC は残留歪である。

とになる。

第7図のような機構で生じる歪は、いわゆる弾性歪とは異なる。これは、ちょうど強磁性体に認められる磁歪に相当するもの、あるいは強誘電体に認められる電歪に相当するものである。ここでは、これを双晶境界移動による非弾性歪と呼ぶことにする。このように、弾性歪とは異なる別の歪によって生じる特異な弾性を ferroelasticity と呼んでいる。一般に ferroelasticity を示す物質の応力—歪曲線は第8図のように履歴曲線を描く。そして、このような履歴曲線の囲む面積に相当するだけのエネルギーが消費されて熱となり試料を伝わって周囲へ散乱してゆくのである。これがこの合金の異常に高い減衰能の原因である。

4. 防震合金の応用

防震合金の応用はつぎの四つに大別される。すなわち、(1)疲労破壊の防止、(2)騒音の防止、(3)振動の防止、(4)振動解析への応用である。

(1) 疲労破壊の防止

一定の大きさの外力のもとで共鳴振動している物体の振動振幅は、物体の固有減衰能が大きいほど小さくなる。一方、物体が疲労破壊を起こすまでに加えられた繰り返し応力の回数、つ

まり物体の疲労寿命は物体に働らく応力振幅が小さいほど長くなる。そこで、防震合金を使用して振動振幅を小さくすることは、とりもなおさず物体の疲労寿命を延長することにほかならない。これが防震合金の工業的利用の重要な一面である。

この実例としてタービンブレード用合金 NIVCO-10²⁾ や flapper valve 用材としての Mn-Cu 合金の利用⁴⁾ などがある。

(2) 騒音の防止

これに関してはこれまでに非常に多くの報告がある。たとえば、航空機の機内騒音を軽減するために pre-stress を加えた防震合金の薄片を利用したり、建築用防音壁材として Al-21 at. % Zn 合金を従来の鉛板のかわりに使用すると軽くて経済的なうえに防音効果がすぐれていることなどが報告されている。後者は数少ない Al-基防震合金の一種で、cellular precipitate を含むような熱処理をほどこしたのち使用する。

潜水艦や魚雷のように騒音が敵艦の sonar にとらえられることを極度にきらう場合には、Mn-Cu 合金のほかに TiNi 合金 (Ti-50 at. % Ni) の利用が効果的であるとされている³⁾。TiNi 合金は形状記憶能力を持つ特異な合金として知られている記憶現象にたずさわるマルテンサイト変態双晶が防震効果をも有しており、すぐれた耐食性とともにより貴重な船用材料である。

Mn-Cu 合金の利用でとくに効果のあがるものとして、削岩機への応用がある。これは削岩機のバイトと本体との間に Mn-Cu 合金を挿入するもので、騒音レベルを 8 db 低下させることが出来たとの報告³⁾ がある。Mn-Cu 合金はまたトランスミッション・ギヤ用材料としても応用されて、静かな運転音の実現を可能ならしめている。

つぎに、わが国における Mn-Cu 合金の利用の現状を述べる。結論的にいえば、目下わが国ではこの合金の実用化試験の最中である。すなわち、本年1月頃より各所で試験が実施されはじめ、筆者のもとへのこの点に関する問い合わせも非常に多数にのぼっている現状である。

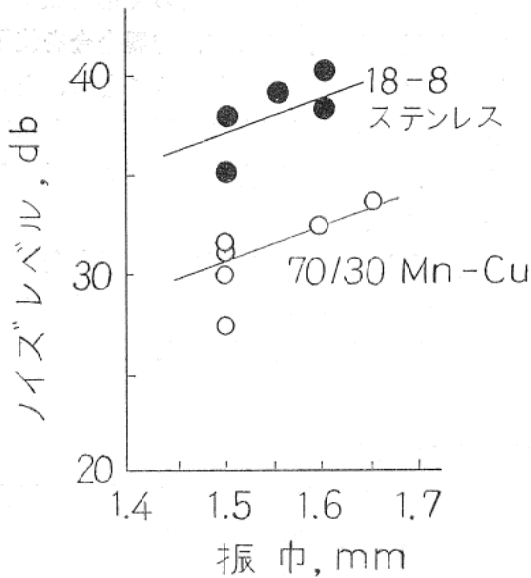


図9 音叉時計のノイズレベルにおよぼす、音叉の支柱材料の影響

現在までに報告された結果としては、音叉時計の騒音レベル低下への応用を試みた今井・竹原・常山らの報告例を見るのみであるが、近い将来この合金がわが国でも防震合金としての用途に利用され、偉力を発揮することは疑いもないと思われる。

今井・竹原・常山らは音叉時計の音叉の発する騒音が情緒の安定を妨げ、安眠を妨害する欠点のあることに着目して、その除去対策を検討した結果、音叉の振動がその支柱を伝わって外部へ伝播し、これが騒音の主要原因であることをつきとめた。そこで音叉の支柱に 70 wt. % Mn-30 wt. % Cu 合金を使用して騒音レベルを低下させる方法を考案し、その性能を調べた結果を発表している⁹⁾。それによれば、第9図に示すごとく 150 Hz の音叉の支柱に従来の 18-8 ステンレス鋼にかわって 70 wt. % Mn-30 wt. % Cu 合金を使用した場合、騒音レベルが約 5 ~ 7 db 低下して上記の欠点を除去することができる⁹⁾と報告されている。

(3) 振動の防止

これは主としてロケット、誘導ミサイル、航空機などのように小型・軽量化などのために本格的なシステムダンピングの方法が使用できな

いような場合に防震合金がその偉力を発揮するたとえば、誘導ミサイルの計器盤やジャイロ取付棒などの材料には発射時の衝撃的な振動による計器の破損を防ぐために Mg-0.6% Zr 合金 KIXI が使用されている。この合金は純マグネシウムとともに新らしい防震合金として将来の利用が期待されるものであるが、その防震機構は双晶に関係するという点のほか詳細はまったく報告されておらず、今後の研究にまつところが多い。

防震合金は各種精密計測用機器の構成材料としても重要な役割りを演じている。たとえば、移動用無線機のバリコンの電極板用材料に Mn-Cu 合金を使用すると、従来のアルミニウム板を使用したものにくらべてずっとノイズの少ない優れた通信機を作ることができると報告されている。また、Mn-Cu 合金を用いてバネを製作すると、いわゆる self-damped spring が出来る。これはダンパーを使用せずに振動が合金自身の高減衰能によって減衰するもので、将来いろいろと面白い利用が考えられると思われる。

このほか、変わった応用としてドリルの柄や工具のシャンク材料などに防震合金を使用するとよいとの報告もある。たとえば、切削用バイトのシャンク用材として Cu を含む焼結鉄合金を使用すると、シャンクの振動が抑制されるために、仕上精度の向上、切削速度の増大、バイトの寿命延長など数多くの利点のあることが報告されている^{3),4)}。

(4) 振動解析への応用

Mn-Cu 合金は熱処理を変えることによっていろいろな大きさの固有減衰能を持つものが容易にえられる。これを利用して繊維機械の振動解析を行ない、運転騒音の低下に成功した実例³⁾を報告した例を紹介する。

Mn-Cu 合金を適当に熱処理して S.D.C. が 1% 以下から 40% までの各値を持つ材料を多数用意し、これを加工して実際の機械の部品に仕上げ、機械に取りつけてその運転騒音を測定する。その際、機械のどの部分にどの程度の大きさの S.D.C. を持つ材料を使用するのが振動と

騒音の除去にもっとも有効であるかをつきとめるまで、材料と部品を交換しつつ何も度測定を繰り返し行なう。そして、その結果をもとに、もっとも有効な部品とその持つべきS.D.C.の値を決定し、適当な防震合金をその部品に使用して最終的な設計を完成するというものである。この方法は英国で繊維機械の運転騒音防止のために実際に採用され、騒音低下に有効な設計の方法を見出すのに役立てられたと報告されている。

5. あとがき

以上 Mn-Cu 合金を中心に最近の防震合金の原理と応用につき概説したつもりであるが、筆者の知識だけではとうていすべてを書きつくすことは不可能であり、その点読者諸賢に不備の御指摘、御叱咤を御願ひする次第である。紙面

の都合で Mn-Cu 合金の溶解方法や熱処理方法の詳細について書くことができなかったのは残念である。最後にこのささやかな執筆が将来わが国においてもますます深刻となるであろう騒音公害・振動公害の問題解決にいささかでもお役に立つことができれば筆者のよろこびとするところである。

引用文献

- 1) 杉本孝一：日本金属学会会報, **10** (1971) 44.
- 2) 茨木正雄, 杉本孝一：本誌 **18** (1966) No. 3, 2.
- 3) D. Birchon : Engineer. Materi. & Design, (1968) Sept., 606, Oct., 692.
- 4) D. W. James: Material Sci. & Engineer., **4** (1969) 1.
- 5) J. A. Hedley : Metal Sci. J. : **2** (1968) 129.
- 6) 今井・竹原・常山；日本時計学会誌, No. 56 (1971) 38.