新しいタイプの振動吸収材料，M2052制振合金

川原 浩司^{*1}・殷 福星^{*2}

(受理1998年5月11日，掲載決定1998年9月12日)

A New Type of Damping Materials, M2052 Alloys

Kohji KAWAHARA and Fuxing YIN

^{*1}(BB Materia Co., Ltd., 7-26-18 Asumigaoka, Midori-ku, Chiba)

^{*2}(National Research Institute for Metals)

(Received May 11, 1998, Accepted September 12, 1998)

1. はじめに

振動は有害なことが多い事象である。騒音の発生源であったり，精密部品の加工精度の劣化あるいは高精度な物理測定に困難などをもたらし，また，共鳴振動による不測の事態を招くなど，様々な分野で深刻な問題を誘発する場合がある。諸産業部門の発展に伴い，振動や騒音を低減する必要性は益々高まり，その対策として発生源となりうる機器の剛体化，発生源そのものの遮蔽など，主として設計上の配慮によってある程度の成果をあげている。しかし，これらは自ずと限度があり，制振材料の併用は必至である。

振動を吸収する材料として，ゴム・鉛・樹脂などが広く用いられているが，構造部材としての要求から，振動を吸収する合金，すなわち制振合金も古くから研究され，マグネシウム合金，銅とマンガンからなる合金（ソノストン，インクラミュート），強磁性タイプの合金（サイレントロイ，セレナ），その他，アルミブロンズ，ジュエントロイ，ニチノールなどが市販されている。これら一体型に対し近年になって制振鋼板で代表されるように，金属板を貼り合わせたタイプの材料が脚光を浴び一定の業績を残している。しかし，こうした開発のいかにもなく制振合金は思ったほど普及していないのが実状であ

る。それぞれ固有の問題を抱え，応用するにあたって使用上の制約が厳しいからと推察される。

ここに紹介するM2052合金はマンガンをベースとした制振合金である¹⁻³⁾。これは従来に無かった優れた制振性能はもとより，成形加工性も高く，鋳物としても使え，その他にユニークな面も有しているところから，新しい境地を拓くと予想される。本稿は，振動・騒音等の対策に何らかのお役に立てればと願い，この合金を紹介する。

2. M2052合金の振動減衰性能

振動を吸収する機構や材料構成（貼り合わせか，一体型か）の違いがあるため振動減衰能を比較・評価することは難しく，統一された方法は今のところ無い。この合金のような振幅依存性の高い材料に対しては，振幅の大きさに制約をもつ共振法で測定した場合は小さな値しか出ないという問題もあり，また，ゴムと合金を同じ方法で計測することも単純には行かない。従って，制振材料を比べる場合は注意が必要である。

図1は，一体型に限った代表的な金属材料の減衰能^{*3}と，主要な性能の一つである強さを対比させた例である。減衰能と強度は相反する傾向が一般的であり，ともに高い値を切望することは時代の要請ではあるが，それ

^{*1} 有限会社BBマテリア 代表取締役（〒267-0066 千葉市緑区あすみが丘7-26-18），金属材料技術研究所客員研究官

^{*2} 科学技術庁金属材料技術研究所，科学技術特別研究官（〒305-0047 つくば市千現1-2-1）

^{*3} 図中の減衰能は対数減衰率で示してある。これはn番目とn+1番目の振幅の比を自然対数でとった値で，これが大きいほど良いと評価される。なお，図中の対数減衰率0.7は 2×10^{-4} の最大歪振幅条件下のもとに，片持梁法で測定して得られた値である。

図1 制振合金と一般的な合金の減衰性能

は苦難である。

青銅，黄銅，チタン合金の対数減衰率は0.001であり，叩けば金属特有の音が響く。フェライト系ステンレス鋼は0.01強を指しているとはいえ，この程度ではまだ制振材ではない。片状黒鉛鋳鉄と鉛は，制振材としてよく引き合いに出されるが，減衰率は0.05である。機械類のベッドに採用されている高炭素片状黒鉛鋳鉄は0.1近くもあり，減衰率は高い位置にある。マグネシウム合金やブロンズ系は0.1を超え，更に優れた合金である。ところが，M2052合金の対数減衰率は0.72を現出する場合がある。一体型合金においてはこのような高い値はいままでに報告されたことはなく，いかに高性能合金であるかが理解されよう。強度の点では普通の炭素鋼には及ばないが，軟鋼程度を維持し，マグネシウム合金，鋳鉄，鉛などよりも強く，しかも後述の諸特徴を備えている点から，制振材普及の鍵である「構造部材」としての要件を満たしており，応用の門戸は広いと思われる。

3. 一般制振材料との対比

制振鋼板は，構造が貼り合わせであるから当然ながら溶接性・成形加工性は難問である。成形後のスプリングバックによる戻り変形のため時間とともに製品の不良率は

増加し，歩留まりを下げやすい。その樹脂は高温で溶融しやすく，逆に低温で硬化の傾向を呈し，使用中に剥離の心配がある。構造から推して，高荷重を支える機能には適さず，複雑な形状・大型製品・精密部品は作れない。主に，蓋いか容器には卓越した効力を示す。それ以外では応用し難い。

鋳鉄は脆さの克服が課題である。減衰能の向上には炭素を増す必要があり，必然的にボイドの数量は増加するため切欠き効果が助長される結果，脆化に過敏となる。切削加工は容易であっても成形加工は至難である。それに真空中では黒鉛の存在に関連したガス吸着の問題を伴い，超高真空の到達を望めない。

ゴムは，防振・緩衝・防音の機能を同時に持つため，いたるところに使われている。しかし，弱点も目に付く。作業環境に支配されやすく，熱，酸素，オゾン，油脂，化学薬品，日光，放射線などの照射や接触によって劣化が促進する。強度は金属に比べ桁違いに低く，へたりの大きい。その他，クリープ値や疲労強度の信頼性に欠ける。高周波の減衰に優れるが低周波除去は有能ではない。精密機器の除振において首振りやシーソ運動が生まれやすく，使い方は一考を要する。

鉛は，重く，強度不足である。扉や壁の中に板として使われている。質量を増すことで制振効果が発揮できる個所に役立っている。

樹脂は，安価であるが，強度と使用温度の点で用途に限界がある。冷凍温度においては硬化が進み，減衰能は劣化する。反対に，高温になるほど軟化が促され強度は消失する。

強磁性型の制振合金は条件付で高性能材料といえる。サイレントロイ，セレナの対数減衰率は0.2も出るが，このタイプに共通した，磁壁の運動様式に起因した致命的な欠点がある。すなわち，制振性能が発揮される振幅（これは歪みや応力としても換算できる）は狭い範囲に留まり，その有効範囲から食み出した振幅では制振効果は著しく減少し，もはや制振材でなくなる。すなわち，外部からの振動信号は限られた許容範囲内でしか受け止められない不都合があり，応用分野は絞られる。

マグネシウム合金は鋳物制振合金として優れている。軽量化のこの時代にあっては魅力的な材料であるが，強度が低く，成形加工性も乏しいところに課題がある。アルミブロンズ，ニチノールもやはり加工性が問題で，制振合金としては普及していない。マンガンと銅からなるソノストンやインクラミュートは銅を40～60%も含有しているため切削加工のみは可能であっても成形加工に難があるから鋳物製品にしか向かず，船舶のスクリューなどに利用されているように，大型鋳物用である。

図2 M2052合金で作った製品例

これらに比べ、M2052合金は多様な要求に対応できる。鋳物として使用でき、精密鋳造も可能であり、複雑な構造を持つ製品が造れる。一体型構造であるから、溶接（TIG、電子ビーム、スポット、レーザービーム等の溶接、ロウ付けは確認済み）は容易であり、成形や切削加工も自由に行え、旋盤加工や穴あけは問題がない。熱間加工も冷間加工も困難はなく、厚板・薄板の供給は一般的であり、ミクロン単位の細線や箔、センチやメートル単位の板・棒としても利用できる。図2に、若干の具体的な製品例を示す。パイプ、ボルト・ナット、台座、ワッシャーならびに1mm径（0.2mmの実績あり）のワイヤーなどが見られる。今のところ50kのインゴットまでは何の問題もなく鍛造・圧延され、サイズと形状は自由に選択できる体勢にある。

4. M2052合金の振動吸収機構

合金における振動エネルギーの吸収機構は現在のところ4つ考えられている⁴⁾。複合型、強磁性型、転位型、双晶型である。合金によっては機構が2つ以上重なる場合もある。

M2052合金はMn-Cu合金に見られるような双晶型である^{5,6)}。この双晶はマルテンサイトの変態によって生まれ、生成した双晶の運動の容易さによって制振作用が決まるので、双晶の量と大きさが問題になる。マンガンに添加する銅の量は、双晶の量や加工性を支配する。銅が多いほど双晶は増加し減衰能は向上するが、他面、加工性を減少させる。銅を減らして加工性を高め、減衰能改善のために双晶の質を向上させる方策から得られたのがこの合金である。マンガンならびに銅に対する固溶量が大きく、しかもそれらと反応しない元素、すなわちニッケルか鉄、あるいはニッケルと鉄の同時添加が有益で

図3 M2052合金に見られる微細双晶の電子顕微鏡組織

ある知見に基づき、Mn-20Cu-5Ni-2Fe-X系を一つの帰結とした。Mnをベースとして、原子%で銅が20、ニッケルが5、鉄が2の組成から、M2052と呼称している。

この合金には種々の大きさの双晶が現れる。電子顕微鏡で観察した例を図3にあげた⁷⁾。わずかな数十ナノメートルという非常に小さな双晶が見える。このような小さなものから、肉眼で識別できる数センチのものまで、さまざまな大きさの双晶が混在して現れる。M2052合金の双晶は、既に観察されている他の合金の双晶とは異なり次の特徴を備え、これが制振性に大きく寄与していると考えられる。

- ① 外力によって容易に双晶が発生する、
- ② 発生した双晶、ならびに、既に存在している双晶それぞれの界面は外力によって容易に移動できる。

図4は双晶運動の模式図である。剛体(a)に、弾性波が外力として作用すると(b)のように変形する。外力が解放されれば、(b)は(a)に戻る。ある程度外力を大きくすると(c)のように、剛体内部に双晶が発生し、その双晶は外力解放によって消失し、剛体の形状は元に戻る。さらなる外力の増加にともない既存の双晶は幅を増すか(d, e)、別な個所に双晶を生み出す(f)。結局、双晶が運動することによって外部からの振動を受け止め、その際に熱エネルギー変換が生じ、振動が低減されるという機構である。振幅の小さな高周波外力は小さな双晶で、振幅の大きな低周波は大きな双晶で担い、振動を吸収するものと考えられる。

外力が弾性限内であれば負荷の除去によって形状は復元するから、減衰能は減少せずに持続できる。外力が塑性変形を起こすに足る値を超えると合金内に歪が導入され、それによって双晶の運動が停滞を来し、制振機能は

図4 双晶の発生と成長

低減する。運動が容易なこのような双晶は Mn-Cu の二元系からだけでは得られなかったのである。ニッケルと鉄の複合的共存がその効果を高めたと考えられる。

5. M2052合金のデータ

5.1 機械的性質と加工性

この合金は成形加工が容易である。焼鈍した試料は、その温度から水冷した場合が最も軟化する。1 mm 厚程度の板であっても布団のように180度にまで折りたためる（写真の中央の板）ほど加工は容易である。冷却速度が小さくなると硬くなるが、成形加工の障害になるほどのことはない。硬さは工程履歴に依存して Hv80~170 の幅を示す。組成をシフトさせれば、Hv230にまでの硬化も可能である。

加工硬化率は比較的小さいから、幅が50 mm の板であれば5 mm 厚から0.5 mm 厚まで、中間焼鈍を施すことなく一挙に冷間圧延が可能である。線引きは、この加工硬化が小さいことが禍いして、くびれ現象を起こしやすく、それを回避するのに中間焼鈍が不可欠となる。この作業を繰り返すことによってミクロン単位の細線も不可能ではない。切削・穿孔の加工性はオーステナイト系ステンレス鋼に近く、ねばい合金の部類に入る。パイットの材質と切削条件の適正な合致があれば加工性に問題はない。

ヘリウム液化温度から150℃までの機械的試験の結果を図5に示した。常温における引張り強さは軟鋼程度であり、低温になるほど強さは増加している。ヤング率は低温において30 GPa 位である。

図5 M2052合金の主な機械的性質

ヘリウム温度においても延性に富み、試片の破面観察においてはディンプル破断だけが認められ、靱性の高い合金であった。一般の合金では、双晶の関与は脆性を引き起こす作用が高いとされているが、この合金における双晶は容易に運動するため双晶同志の交差によって生ずるその場での割れは起こらず、極低温においても延性は保持され、減衰能も優っているのである。このような極低温においても延性が高く、しかも制振性があることから、この分野での応用は興味深い。ゴム、鉛、樹脂はもちろん、普通の材料のほとんどは低温になるほど減衰能は落ち、まして液化素温度以下では著しく低下するのが普通である。この合金は例外的なふるまいを呈し、この温度で叩くと金属音ではなく木材の音となる。

この合金の減衰能は双晶の運動に支配されるから、高性能を獲得するには双晶の運動を妨げる因子を極力避ける必要がある。歪み、析出物、分散粒子、格子間原子、結晶界面などの存在は、双晶の運動を阻害するか、双晶運動の距離を短縮する働きをもたらし、減衰能の低減につながる。焼鈍温度からの徐冷作業、塑性歪みの導入阻止、原料からの不純物や介在物の混入抑制、つぼからの汚れ防止、結晶粒の非微細化対策などの注意が肝要である。このような作業は容易ではないから、対数減衰率0.72のような高い値は簡単には得られない。一般的な作業行程において、対数減衰率0.1~0.3の達成はさほど難しくはない。

加工作業は合金に歪みを与えるから、そのままでは制

図6 合金組成のシフトによる遷移温度の変化

振能は無いに等しい。加工後に900℃近辺で焼鈍し、その温度から徐冷する必要がある。どんなに厳しい加工を経ても焼鈍と徐冷処理によって減衰能は回復できる。また、加工と熱処理を組み合わせることによって、結晶粒径の調整が可能であるから、減衰能と強度の相関関係が確立できる。強さと減衰率は反比例の関係があり、引張り強さが600 MPaで対数減衰率は0.1、200 MPaでは0.7が得られた。したがって、この相関関係から任意の強度を調整できる。実際には減衰能を犠牲にしても、さらに高い強度を要求する場合があります、それに呼応する合金を調達できる。

5.2 温度依存性

減衰能の温度依存性はその材料の振動吸収機構によって支配されている。強磁性体タイプは比較的高温まで性能を維持する。制振鋼板類は樹脂の流動温度で決まり、一般的には温度に対し凸の傾向が現れる。双晶タイプはマルテンサイト相の生成温度に支配されるため、高温型としては対応できない。この合金も200℃が限界と考えられる。図6は、基本組成はM2052とさほどかわらないが、遷移温度を高温側へシフトさせるために各合金元素量をわずかに変化させた3種の合金の温度依存性の例である。組成と熱処理の組み合わせによって150℃程度まで制振性能を維持できることが示唆される。

5.3 周波数依存性

制振鋼板類は、用いられている樹脂の流動温度によっ

図7 M2052合金の周波数依存性

て周波数依存性が異なる。図7に、この合金の周波数依存性を示す。-30℃ではほとんど依存性は見られない。0℃以上の場合、350 Hz 近くに若干の依存性がみられ、大まかに言えばこの合金は周波数依存は少ないといえる。

5.4 諸物性

磁性は、双晶が現れない室温付近あるいはそれ以上では常磁性であり、双晶が現出する温度以下では反強磁性であった。従って、磁性を嫌う機器類には利用価値がある。

その他の主な物性値は表1に示す。ヤング率は概略的にはアルミニウム、銀などに匹敵している。熱伝導率と比熱はチタンに近く、金属の中で比較すれば熱は伝わり難い部類に属する。熱膨張はアルミニウムと同程度とみなせる。密度は鉄に近い。

6. 可能な応用例

以上の諸性質から見て、この合金は使い方の工夫次第で広範囲にわたって応用できると見られる。以下に、実績例と可能な例を述べる。

●台座・支持台

重量の大小を問わず、構造物の下に敷き、構造物の上下方向からの振動伝播を阻む。精密機器類の基盤、構造物の柱、除振台の搭載盤、定盤に採用できる。精密機器用の除振装置は著しく高価であるが、この合金を工夫して使えば簡便かつ低廉な代替品としても機能することも

表1 M2052合金の主な物性値

物 性	値	単 位	近い元素
ヤング率	30	GPa (<79 K)	Al, Ag, Cd
熱 伝 導	10	W/m.K (300 K)	Ti, Sb, Pb, Bi
比 熱	512.7	J/kg.K (300 K)	Ti, Fe, Cr
熱膨張率	22.4	$\times 10^{-6}/\text{deg}$ (300 K)	Al, Ag, Sn, Cu
密 度	7.25	Mg/m ³ (gr/cm ³)	Fe, Mn

あり得る。また、プレス、鍛造機、ハンマーの土台や衝撃部品にも効果的と思われる。落下物受の衝撃、ハンマリングのような打撃の場合にも適用され得る。

●中間挿入材，締結部品

振動伝播経路の途中に挿入して使用法がある。ワッシャー、ガスケットなどはその一例に過ぎない。音響関連では、ステレオコンポの各デッキ間に挿入する。スピーカーやアンプなどの台座、CD-ROMの支持棒、スピーカーのフレーム、レコードプレーヤーのアームなどにも利用できる。スピーカーのインシュレーターとして優れた業績が認められている⁸⁾。モーターをシャシーに接続する場合のように、振動源と基底部との間に挿入することによって振動遮断部品としての役割もあり得る。

部品間の締結にビス・ネジ・ボルト・ナット類が使われているが、それらの材質は減衰能が小さいから、とかく振動までも連結することが多い。しかし、この合金の採用は、締結機能に合わせて振動伝達の低減機能も加わるので有望視できる。一本のネジと一枚のワッシャーで振動問題が解決されることもありうる。

ポータブル電気冷却式放射線検出器において、振動源と検出窓との間にこの合金で作ったフランジ付きパイプを挿入した結果、顕著な振動低減効果の確認が報告されている⁹⁾。

諸機械類のシャフト、落下物からの衝撃緩衝部品としても使える。スキー、楽器、スケートなど、スポーツ、レジャー用品においてもこうした応用は多々あると見られる。

●低バネ定数材

ゴムでは達成できない、より低いバネ定数を得るための一つとしてコイルバネが用いられる。バネ材は強く硬い合金で、それ自体の減衰能は非常に小さいことが多い。従って、高周波成分は材料内を通過し、他の振動波と干渉し、いわゆるサージング現象が生じ、その抑制に苦慮する場合が少なくない。この合金を用いる限り、その抑止力は強く、実験によれば高周波の伝播は低減さ

れサージングは発生しなかったことが明らかにされている¹⁰⁾。強度の観点からみればバネ材としての機能は必ずしも優位ではないが、形態としてバネと同様な使い方は新たな付加価値をもたらす。このような高い減衰能を持つバネ定数の小さいコイルバネの要望は、時代とともに進む軽薄短小にあっては、必然的であると予想できる。

●ベローズ，パイプ

機械類においては振動伝達経路にベローズが往々用いられている。ステンレス鋼のような一般的に使われている材料の減衰能は小さいため、サージングに類した現象は拭えない。この合金は薄板も製造できるからベローズの製造も可能であり、その危惧を除ける。また、機械に配置されているパイプは往々にして長いため振動の発生源になったりする。このような場合にも効果が予想される。

その他、多数の部品から構成される機器類には、振動伝播が結集し、再度そこから分散する構造部がある。複雑な構造の部品が製造できるこの合金は、このような個所に充当すれば満足な減衰効果が期待できる。例えば、ハウジングとしての用途も考えられる。

●ゴムの代替え材

ゴムは耐油性、耐へたり性、耐極低温性に乏しいが、この合金にはそのような問題はないから、オイル内に入れて役立てることもできる。ゴムより剛性的であるから、首振り運動を忌避する超精密機器に利用価値が期待できる¹¹⁾。

●極低温用材

気体の液化温度、殊にヘリウムの液化温度では大方の物質は硬化するため振動阻止力が劣る。しかし、この合金はこの過酷な条件においても振動減衰能を保持し、依然として靱性・延性も維持されるから特殊な用途が考えられる。

●振動源材料の置換

振動体自体をこの合金で置換して解決することもあり得る。例えば、CRTスクリーン（アパーチャグリル、シャドウマスク）の振動やカーテンレールの騒音対策に提案できる。

7. ま と め

以上に見たように、この合金は未だに無かった高減衰能が取り出せ、鋳物としても使え、成形・切削加工は容易であり、溶接などの接合も難しくなく、対象物のサイズと形状も任意に指定できる合金であり、新しいタイプ

¹¹⁾ ミクロン単位の振動除去対策に関し、某大手精密機器メーカーは試作品を検討している。

の合金といえる。開発されて間がないため、まだ定かでない側面も山積している。耐食性、耐摩耗性、塗装性などは即刻解くべき課題である。その他、幅広薄板の焼鈍時のフラットネス維持技術も確立しなければならない。

この合金の特色を創造的に活用することによって、現状の課題の解決はもちろん、時には新しい設計に助勢で、機械、精密機械、自動車、音響機器、家電、建設、建築の各分野、あるいは、新分野に寄与しうるものと考えられる。加えて、この合金だけを熟知しさえすれば、要所要所に異種の制振材を使い分ける煩わしさから解放されることも無視できない利点である。従来の制振材は、「構造部材としては何の役割もない、質量が大きい、などにより、少ないに越したことはない」¹⁾との批評があるが、この合金は構造部材として使うことこそ活用の道があると見られる。

〔文 献〕

- 1) 川原浩司, 佐久間信夫, 西崎 泰: 日本金属学会誌, **57** (1993), 1089.
- 2) 川原浩司, 佐久間信夫, 西崎 泰: 日本金属学会誌, **57** (1993), 1097.
- 3) 川原浩司: 公開特許公報, 平 7-242977 (特許第 2849698)。
- 4) 杉本孝一: 鉄と鋼, **60** (1974), 2203.
- 5) 三浦憲司: 制振材料, (田中良平), 日本規格協会, 1992年, p 33.
- 6) J. A. Hedley: Metal Sci. J., **2** (1968), 129.
- 7) F. Yin, Y. Ohsawa, A. Satoh and K. Kawahara: Z. Metallkd. **89** (1998), 481.
- 8) 吉田伊織: オーディオ・アクセサリ, 音元出版社, (1998), 8・9号, 326.
真島彰徳: A & V Village, コスモヴィレッジ社, (1998), 9月号, 115.
持田悦宏: A & V Village, (1998), 9月号, 72.
江川三郎: オーディオ・アクセサリ, 音元出版社, (1989), 11・12号, 315.
- 9) 高橋幸嗣, 松浦 貢, 岡崎慎吾, 森田満一: 日本アイソトープ協会, 第34回理工学における同位元素研究発表会 (1997).
- 10) 明立精機株式会社技術報告書, 70Z0102T (1997).
- 11) 長松昭男: 工業材料, **45** (1997), No 12, 18.