

制振合金 M2052 の各分野における実用例^{注1}

Ver.5.0

BB Materia 技術資料

^{注1}川原浩司 (BBMateria、物質・材料研究機構客員研究員) による日刊工業新聞社刊、工業材料(2004年2月から9月まで) に連載した記事に若干加筆したものである。 Ver. 5.0(2005年9月改訂)

概要

・歴代の制振合金にはない高性能

この合金は Mn73,Cu20,Ni5,Fe2(原子%) からなる Mn ベースの合金です。振動負荷を受けた際、合金内に双晶活動(発生・消失・移動) が起こりますが、この双晶は今までの合金にはみられなかったユニークな働きをすることが高い制振性を生むと見られています。

金属でありながら**最高値はゴム並みの損失係数**が現れます(図 1)。ゴムに比べ、弾性率は桁違いに高く(表 2)、**軟鋼程度の強さ**があり、ゴムのような軟弱性につき物の「ぐらつき」は起こりません。軽金属合金や鉛は強度に不安がありますが、この合金は**構造材料としても機能し**、軽薄短小のこの時代では有益な合金の**はず**です。

・優れた成型加工性のため、自由な形状の製品が可能

成型加工性が極めて優れているため、形状・大きさは任意です。今までの合金にはなかった特徴の一つです。しかも、溶接・ロウ付け・半田も簡単で、異種金属との接合(例えば、18-8 ステンレス)も可能で、精密鋳造も行えます。薄板や箔、極細線も用意されています(図 14, 図 15)。0.1 mm 程度の箔は、鋏で小片に切り出しデバイスや機器類に貼り付けることで制振成果が得られたという報告もあります(図 36, 図 37)。

・0.01Hz から超音波にまたがる高い制振性

0.01Hz から超音波域の 8MHz の幅広い周波数帯にまたがって高い制振性が現れます(図 8, 図 10)。超音波域での制振性はゴム並みであるといわれています(文献 [18])。ゴムは高周波を効率よく吸収しますが、低周波を除去できません。この合金は高周波の除去能力も高いだけにとどまらず、少し工夫を施せば、**ゴムには不可能な低周波の低減**ができます。振幅の大きい低周波はとかく合金を塑性変形に導きやすく、格子欠陥と歪みをもたらすため、双晶活動は抑制され、制振性は劣化します。それをかわす工夫としてパーツにかかる応力を「曲げ・ねじり・せん断」などに転化しうる構造にして、弾性範囲内で振動を受け止めるように立案すれば制振性を損なうことはありません(図 17-図 21)。

・極低温での高い制振性と高延性

ヘリウム温度という極寒の状態でも制振性は十分な値を示します。しかも**延性に富み**低温脆性は生じません(図 9, 文献 [66])。鉛でも、高分子でも低温になるほど制振性は失われ、材質も脆化しますが、この合金は違います。

・強磁性体でないので精密機器に適用が容易

常磁性体か反強磁性体ですから強磁場環境下での応用に有利です。

・使い方が簡単

弾性変形を超えない使い方であれば、応力が高いほど(すなわち、振幅が大きいほど)制振性能は高い値を示します(図 9, 図 10)。これは使い方が容易であることを示します。強磁性型の制振合金では、振動を吸収する有効振幅は狭い範囲に限られるため実施条件に強い制約が要求されます。しかし、この合金は**パーツに敷くか、挟むかするだけでも**制振効果を引き出せます。さらに、ある程度荷重をかけた条件下では更に制振性の高い状態が用意されます。使い方が簡単のため、制振効果の**評価も即座に検証**できます。この合金の波及は音響界からであったのは、理屈も無く高価な測定機器も使うことなく、優れた聴覚だけで即座に効果の良し悪しを判別できたからです。

・いくつかの実用例

当初は音響分野に普及しました。最初はスピーカーのインシュレーター、ついで、ワッシャー・ネジなどの締結具として好評です(図 23-図 37)。大手家電メーカーの高級機種の中にはこの締結具がふんだんに使用しているものもあります。ハードディスクの設置箇所にワッシャーを 2 枚挟み込んだだけで騒音と性能の改善が現れた例もあります(図 52, 図 53)。

今では各産業界に波及し、工作機械・精密機器関係ではいろいろなアイデアに沿って利用される例が多くなってきました。工具にこの合金の薄板を挟み込むことで「びびり現象の排除」(図 41)や「ヘール切削研磨面の超仕上げ」(図 38-図 40)が叶えられています。

複数の自動車メーカーもこの合金の搭載を検討しています。すでに日産の「シーマ」にはインジェクターの着座音対策にリングとして使われています(図 54, 図 55)。バイク、模型飛行機、薬品散布ヘリコプターなどにも多様な形態で使うことが予定されています。

平面研削盤の低周波側の共振を除去する目的でその機械に設置するマウントの材質の効果を検討した結果、**M2052 合金製のマウントを敷くことによって共振周波数 25Hz を著しく低減された例が報告されています(図 43, 図 44)**。これはバネ定数を下げる工夫によって低周波を除去できた証です。また、M2052 合金の厚さ 1mm のシートを **U 字型に曲げ**、大きな変位が得られるようにしてゴムの代替的な使い方を試験したところ、優れた結果が得られています(図 64, 図 65)。

国家プロジェクトである TAMA300(重力波検出計画予備試験)においては、レーザー光線を超高真空・極低温の条件下で計測する必要があり、資材は低温での制振性能が高いことはもちろんですが、材料から出るガス放出は極度に嫌われるため、ゴム・高分子・鋳鉄は使用できません。そこでこの合金が注目され、その詳細な報告がなされています(文献 [15, 16]、図 56-図 62)。

CD メカへの応用のように、この合金を使っただけで構造自体がシンプルになり、制振性能の改善もあったことは(図 26)、**新型の製品の創成**にほかなりません。性能の改善に加え、工程の削減や、製品の軽量化・小型化も可能です。

この二つの例は、この合金の特徴を上手に使えば新鮮な応用・製品が可能であることを示唆しています。

・問題点と課題

まだこの合金の製造体制は量産的でないためコスト高の懸念は拭えません。量産化されればステンレス並みになると思われます。

主体成分の Mn はアクティブな元素であるため、場合によっては表面被覆が必要です。FA コートやニッケルめっきはすでに用いられています。その他、黒染め、銅・金・銀などの**メッキ製品**はすでに市場されています。

・新しい提案で製品の創成を

最近の注目すべき成果は、ボルト・ナットの**緩み止めに画期的な効果**が認められたことです。S45C、鉄系制振合金(Fe-Mn-Cr)、M2052 合金のそれぞれの緩み止め効果を評価・比較したところ、鉄系制振合金のボルト・ナットがベストでしたが、M2052 合金の場合はボルト・ナットに使わず**厚さ 1 mm のワッシャー 1 枚**だけで、鉄系制振合金に近い緩み止め効果が確認されています(図 63, 表 4, 文献 [67, 68])。これは、保守と安全性の観点から画期的なデータです。この応用は広がると確信できます。

単純に従来の制振材を代替するだけの使い方ではなく、このまったくユニークな制振合金を**新たな見地から創造的に利用**いただけるはずで

35	レコードのカートリッジへの制振合金の 応用	16
36	レコードと CD 用のスタビライザーへの 応用	17
37	MD のクランプ・フレートへの応用	17
38	ヘール加工工具ホルダーと制振合金 . . .	17
39	ヘール加工工具ホルダーでの成果	17
40	6 軸制御によるヘール加工曲面仕上げ成績	17
41	バイト用のスペーサ使用効果	18
42	軸受けでの使用効果例 1	18
43	M2052 合金製マウント	18
44	M2052 製マウントの制振効果	19
45	γ 線検出器に搭載	19
46	γ 線検出器の精度向上	19
47	0.1 mm 厚板のエッチング法による抜き例	20
48	CRT 中の金属簾状スクリーン	20
49	軸受けでの使用効果例 2	20
50	表面研磨の精度の改善	21
51	ボーリング・アームの振動対策	21
52	ハードディスクのシーク時間短縮効果 . .	21
53	ハードディスクの転送速度改善	22
54	直噴式エンジンに使われた制振リング . .	22
55	自動車における 1kHz 近くの騒音減少 . .	22
56	懸架装置のフレームに用いた例	22
57	フレームの材料の違いの制振効果	23
58	望遠鏡に試用された M2052 合金	23
59	望遠鏡のダンパー部の拡大図	23
60	望遠鏡における M2052 合金の成果	23
61	ステンレス製コイルの減衰	24
62	M2052 製コイルの減衰	24
63	ボルト・ナットに及ぼす制振合金の効果	24
64	U 字プレートでゴムを代替した例	25
65	ゴムを U 字形の M2052 で代替した効果 .	26

表の目次

1	代表的な制振合金	2
2	M2052 合金の主要物性・機械的性質 . .	7
3	代表的弾性体とその比較	11
4	各種組み合わせによる緩み止め効果 . . .	25
6	高分子材料と金属の強度の違い	26
5	ゴムの損失係数と M2052 合金	26

1 制振合金の現状と問題点

1.1 制振合金の現状

科学技術の高度な発達に伴い振動問題が以前に増して急浮上している。騒音はもとより、精密機器部門においてはナノメータの振幅雑音が問題視される時代に入ってきた。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低減効果をあげているとはいえ、それらは自ずと限度があり、制振材料の併用は欠かせない。従来から振動吸収には、ゴム・鉛・樹脂・鋳鉄などが広く利用されてきたが、いま切望されている材料は、構造部材として機能する制振合金なのである。

ゴム・ゲルなどの高分子は振動をよく吸収し、一般的に合金より減衰性能は大きい。しかし、合金に比べて強さは桁違いに低いいため、単独には構造部材としては使えず、高分子系材料は制振対策上では添え物でしかない[1]。出来れば構造体を兼ねる制振材料が求められている。軽薄短小を追及するこの時代にこそそれは避けられない。それに対する応えは制振合金のより一層の開発にかかっている。

これまで開発された制振合金はいくつか報じられている。表 1 に最近の代表的な制振合金を示す。制振機構の観点から 4 つに分類され、それぞれに優れた特徴を備えた制振合金が開発され、最近では制振鋼板^{注1}のような複合技術の製品も市場されている。古くから知られているソノストーンは軍事関係の船舶に今でも健在であるが、その他の制振合金は思ったほど普及していないのである^{注2}。多くの制振合金には制振性能面以外に应用にあたっての制約が多過ぎるからである。

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、振動吸収性能を比較・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。図 1 は、一体型に限った代表的な金属材料の減衰性能と強さとの対比図である。

日頃からなじみのある真鍮、炭素鋼、ステンレス鋼、アルミ合金、チタン合金などは図の下方に集まっており、制振性は小さく、制振材料に該当しない。振動を吸収することで知られている鉛や鋳鉄は制振材料に属するが、対数減衰率は 0.05 程度で決して高くはない。

Mg 合金、サイレンタロイ、ニチノール、ジェンタロイ、Mn-Cu、Al-Zn 合金などは同等の制振レベルに並び、最も高い状態を示している。これから紹介する M2052

^{注1}これは厳密には制振合金ではなく、金属板と樹脂からなる制振手段である。

^{注2}製造を中止した例が多い。

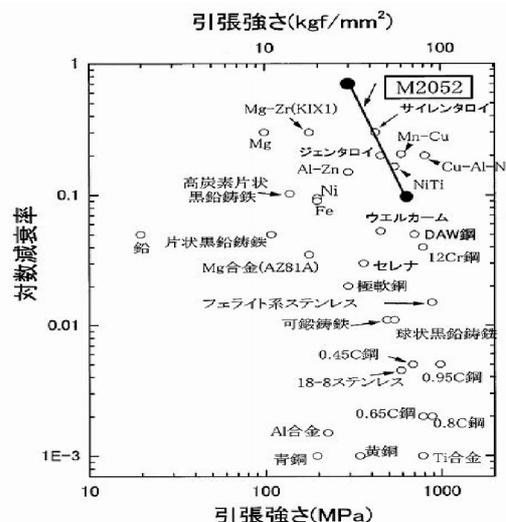


図 1: 主な制振合金の減衰性能と強さ

合金^{注3}は、黒丸の 2 点間を結ぶ直線上の制振性能を示し、通常は 0.3 である。結晶粒のサイズ調整、原料・炉壁からのコンタミ排除、適切な工程管理などの諸条件が合致すれば対数減衰率にして 0.72 が得られ、この値は損失係数で示せば 0.23 にもなり、ゴムに近い値である。通常の製造工程においても対数減衰率にして 0.2~0.4(平均して 0.3) の性能は確保されており、この値であっても図の上位に伍している。

最近、制振性能は抑え目にし、経済性を配慮した合金が注目を集めている。セレナ、ウエルカームなどがそれで、応用の選択肢にゆとりが出ている。しかしそれらにも問題はあ

1.2 いままでの制振合金の問題点

制振性をもつ構造部材として古くから知られているのは鋳鉄であり、いまでも工作機械の母体・土台として活躍している。しかし、鋳鉄には多量の炭素が含有されており、それに起因した切欠き効果による脆化問題が無視できない。切削加工は容易であっても成形加工は至難である。マグネシウム合金は軽量であり、魅力的な材料である。実情は強度が低い上に成形加工はまず出来ない。アルミブロンズ、ニチノールもやはり加工性に問題があり制振合金としては一般的とはいえない。Mn-Cu 系のソノストーンやインクラミュート合金は以前から知られており、主に鋳物として大型部品に活路を見出している。

^{注3}原子%で、Mn73、Cu20、Ni5、Fe2 からなり、マンガンの M に続けて各残り成分元素の割合である 20,5,2 の数値を付け M2052 と呼称している。合金の詳細は文献を参照のこと [2],[3],[4]。

表 1: 代表的な制振合金

分類	合金系	実用合金	備考
複合型	Fe-C-Si	片状黒鉛鑄鉄	FC15,FC20,FC25 (一般構造用材料)
	Al-Zn	Cosmal-Z	ダイカスト合金
強磁性型	Ni	TD ニッケル	耐熱合金
	Fe-Cr	13%クロム鋼	
	Fe-Cr	Fe-8Al	大阪市立工業試験所
	Fe-Cr-Al	サイレンタロイ (Fe-12Cr-3Al)	東芝
	Fe-Cr-Al-Mn	トランカロイ (Fe-12Cr-1.36Al-0.59Mn)	NKK
	Fe-Al-Si	セレナ (Fe-2.4Al-0.54Si)	NKK
	Fe-Cr-Si-Al	ウエルカーム (Fe-3Cr-2Si-2Al)	新日鉄
	Fe-Cr-Mo	ジェンタロイ (Fe-12Cr-2Al-3Mo)	電気磁気材料研究所
転位型	Co-Ni	NIVCO10(Co-22Ni-2Ti-1Zr)	Westinghouse 社
	Mg,Mg-Zr	K1X1 合金 (Mg-0.6Zr)	Dow Chemical 社
	Mg		
	Mg ₂ Ni		
	Mg-Cu-Mn	MCM(Mg-4Cu-2Mn)	理科大 (ダイカスト合金)
	Fe-Ni-Mn	DAW 鋼 (Fe-15Mn-5Ni)	法政大、三井造船
双晶型	Fe-Mn-Cr	Fe-22Mn-12Cr	理科大、名大
	Mn-Cu	ソノストーン (Mn-37Cu-4.25Al-3Fe-1.5Ni)	Manganese Marine 社
	Cu-Mn-Al	インクラミュート I (Cu-40Mn-2Al)	INCRA
	Cu-Mn-Al-Sn	インクラミュート II (Cu-40Mn-2Al-2Sn)	INCRA
	Cu-Al-Ni	(Cu-14Al-4Ni)	
	Cu-Zn-Al	プロテウス (Cu-26Zn-5Al)	
	Ni-Ti	ニチノール	米国
Mn-Cu-Ni-Fe	M2052 合金 (Mn-20Cu-5Ni-2Fe)	金属材料技術研究所	

サイレンタロイで代表される強磁性型合金は高い性能を顕示(最高で0.3)するが、このタイプに共通した致命的な欠点を払拭できない。すなわち、制振性能が現れる有効振幅(有効歪)の領域は狭く、その範囲を逸脱した振幅環境では制振効果は著しく減少し、もはや制振材とは言えなくなる。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生じ、設計が複雑となり応用が窮屈である。

転位型に属する鉄系制振合金はもともと高強度であるため、振動吸収には高い応力が作用しない限り機能することは無く、用途は著しく制限される。すなわち、車輪・歯車・レールなどのように高荷重下でなければ制振性能は現れないから一般的ではない。それに制振性能もさほど高くは無い。

制振鋼板に代表される複合材は、その構造に因んだ問

題があり、溶接性・成形加工性は期待できない。また、高荷重を支える構造は不向きであり、複雑形状・大型製品・精密部品・緻密品などは作れず、主に板として利用される。軽度の成形加工を施した蓋い・容器には適うが、それ以外での応用は限られる。それに、稼働中の剥離も厄介である。しかし、低廉である点は注目していい。

M2052 合金は精密鑄造も可能であり、複雑な構造を要する製品にはうってつけである。それに振幅依存性は線形であり、制振性能は振幅に比例するから、塑性変形が生じない限界内であれば高振幅で使える。制振性能が応力に対して険しいピークを示す合金とは違って平坦であるから、使い方の難しさは無い。

2 M2052 合金の新規性

M2052 は、最初は音響界のマニアの間で評判を得た程度であったが、最近は精密機器、工作機械、自動車、船舶、宇宙技術へと波及している。その理由は以下の特性と関係する^{注4}。

1. 制振特性は幅広い応力・周波数・温度に対応している。弾性領域であれば高振幅であるほど制振性は高い。周波数は $< 0.01\text{Hz} \sim 5\text{MHz}$ にまたがって振動を吸収できる。利用温度は、 4.2K から 200°C と広い。
2. 強度は軟鋼程度であり、構造部材として機能する。
3. 成型加工性が優れ、製品の形状・サイズは自由に選択でき、箔・薄板や細線・ワイヤーとしても供給できる。通常のサイズの板材や棒材は提供に問題は無い。
4. 切削、穴あけ、転造加工はステンレス鋼並みである。
5. 鋳造も可能であり、複雑な形状の精密製品の量産に有効である。
6. 溶接 (TIG、レーザー、電子ビーム、18-8 ステンレス鋼との異種間)・ロウ付けは容易、塗装性も良好である。
7. 銅・ニッケル・金・黒染などの硬質と軟質鍍金は可能で、他に FA 処理も行える。
8. 制振性は対数減衰率で 0.3 が安定供給され、最適条件では 0.72 が得られる。
9. ヘリウム液化温度でも制振性は維持され、延性も失わない。
10. バネ定数を小さくする形状の工夫によって、衝撃緩和とは別に、低周波・高振幅振動の振動を吸収する機能が生まれる。

このような多面的な特徴を同時に備えた総合力に長けた合金は今までには存在していなかったのである。

本稿はこれまで公開された実用例^{注5}を紹介し、新規プロジェクトの創製や課題のブレイクスルーの参考に供したい。

^{注4}M2052 合金の解説はすでに別誌で一部が記述されている [5],[6],[7],[8]

^{注5}秘守義務契約締結のためまだ公開できない例が多々ある。

3 M2052 合金の概略

3.1 M2052 合金の振動吸収機構

振動吸収機構は他の詳しい解説にゆずる [9],[10],[11],[12]。合金においては 4 つの制振機構が論じられ、M2052 合金はその中の双晶型に属する。双晶は光学顕微鏡によれば 図 2 のようなバンド組織として観察される場合が多い。母相とバンドの界面を境にして左右が双子のように対照的な結晶構造の関係が認められるところからそのように呼ばれている (図 3 の (6) を参照)。

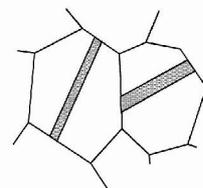


図 2: 双晶組織の簡易図

図 3 は、外部からの振動を双晶がどのようにして吸収するかの機構を説明している。(1)のように、結晶に外力がかかると弾性変形し(2)にいたる。さらに外力が増すとそれに抗しきれず、(3)のように双晶が発生する。それ以上の負荷は(4)(5)のように、双晶の成長・拡張あるいは他の個所に新たな双晶が発生する。外力を除けば双晶は縮小あるいは消失する。外力はこのような双晶の運動によって受け止めるられ、そこでエネルギーが消費され、振動を低減すると考えられている。

光学ならびに電子顕微鏡観察によれば、わずかに数十ナノメートルという非常に小さな双晶から [12]、一方向凝固試片においては長さ数センチのものまで、製造工程に依存してさまざまな大きさの双晶が生成、あるいは存在する。

この合金の電子顕微鏡写真の一例を 図 4 に示す。双晶が並行または直交している状況がみられる。普通の合金の双晶に比べ、大きさははるかに小さく、双晶の質も異なり、次の特徴を備えている。

- 双晶は外力によって容易に発生する
- 発生した双晶ならびに既存している双晶のそれぞれの界面は、外力によって容易に移動し、外力の除去によって双晶は縮小あるいは消失し、形状は初期状態に回復する。

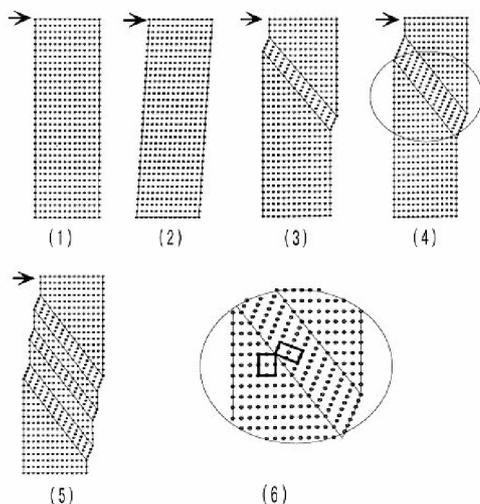


図 3: 外力による双晶の運動

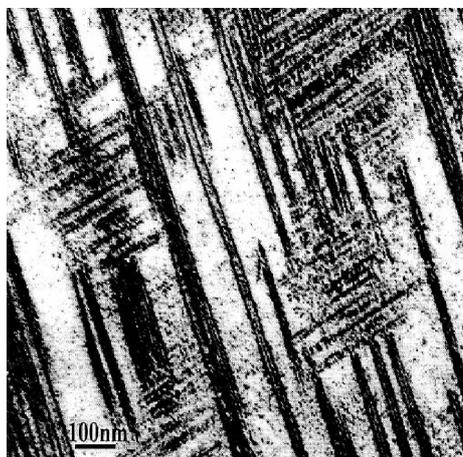


図 4: 電子顕微鏡下での双晶組織

大きさの異なる多数の双晶が外力の大きさに応じ、小さな振幅の高周波振動は小さな双晶が、大きな振幅の低周波振動は大きな双晶が担うことで減衰に寄与するものと考えられる。したがって、振幅の小さな振動の除去は容易であるが、大きな振幅は、次号で言及するように、一工夫を必要とする。

4 M2052 合金の主な性質

4.1 機械的性質と加工性

この合金は成形加工や切削加工が容易であり、旋盤・穴あけ加工、熱間・冷間加工に問題はない。板の供給は厚・薄板だけではなく、ミクロン単位の細線や箔にも対

応できる。現に、0.1mm 径の細線や 0.05mm の箔は提供されている。このような薄板を用いて油圧法あるいは溶接法でペローズが作られ、その効果は計測済みである。

硬さは工程履歴に依存し、焼鈍後では Hv100~130 の範囲に入る。加工硬化率は小さいので、幅が 50mm の板においては 5mm 厚から 0.5mm まで中間焼鈍なしに冷間圧延が可能である。線引きは、加工硬化が小さいことがわざわいし、くびれ現象が起こりやすく、その回避に中間焼鈍が欠かせない。切削・穿孔における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属するが、バイトとの相性や冷却の適正条件さえ把握すれば切削加工に何の困難もない。

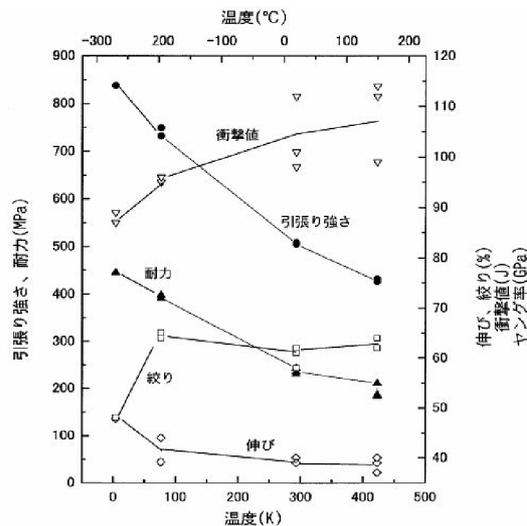


図 5: M2052 の主な機械的性質

図 5 はヘリウム液化温度から 150℃までの機械的試験の成績である。常温における引張り強さは軟鋼程度である。低温になるほど強さは増加し、延性が減じている点は一般的な合金と同じである。

注目点は、極低温での性質である。すなわち、ヘリウム液化温度においても十分延性に富み、破面にはディンプルだけが観察され、靱性の高い合金であることを説明している。しかもそのような温度でも制振性能は持続している。このような特徴は極低温分野での応用に期待をいただける。ゴム、鉛、樹脂はもちろん、普通の材料のほとんどは -70℃以下で振動吸収能は低減するか、ほとんど失われ、鉛でさえ叩くと金属音を発する。これに対し、この合金は例外的な振る舞いを呈し、極低温に曝されても打音は木片に近い音を返す。

制振性能は双晶の運動に支配されるから、その運動を妨げる因子を極力避ける配慮が必要である。加工作業や

焼鈍温度からの急冷操作は合金に歪みを与える場合が多く、そのままでは減衰性能は著しく低い。しかし、加工後に 900 °C 近辺で再度焼鈍し、その温度から徐冷処理を施せば、どんなに厳しい加工を経た場合でも減衰性能はほとんど回復する。

加工と熱処理の組み合わせによって、結晶粒径の調整がある程度可能であるから、減衰性能と強度の相関関係を確立できる。図 1 にみられる M2052 の指す直線がそれであり、強さと減衰率は反比例の関係が成立し、引張り強さが 600MPa と 200MPa ではそれぞれの対数減衰率は 0.1 と 0.7 であった。減衰率 0.1 を選択すれば強力な制振性構造部材としてあてがうことができ、0.3 であっても構造部材として十分な資格がある。

歪みの残存や、析出物・分散粒子の存在は、結局のところ結晶粒を小さくし、双晶の運動距離を短縮するから振動吸収性能の低減につながる。従って、可能な限り、高い振動減衰性能を要求するには細かい気配りが欠かせず、製造工程の難しさが付きまとう。実際には性能よりも強度が主となるケースも多い。通常の工程においては、対数減衰率 0.2~0.4 が得られ、この値であっても画期的であるといえる。

4.2 温度依存性

減衰性能の温度依存性は合金のタイプで大きな違いがある。強磁性タイプは比較的高温まで性能を維持し、制振鋼板類は樹脂の流動温度で決まる。双晶はマルテンサイト変態の生成温度に支配されるため、高温型としては対応できず、200 °C が限界と考えられる。

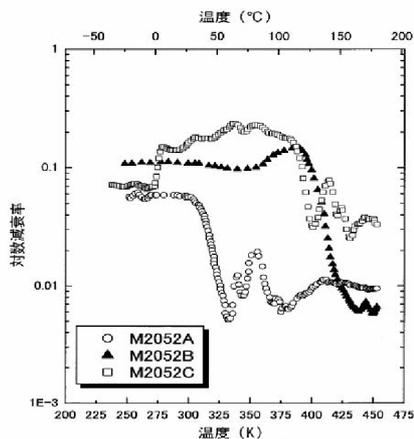


図 6: 合金組成のシフトによる遷移温度の変化

図 6^{注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、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を示す。合金 A は標準組成の合金である。制振性が急に劣化する、いわゆる遷移温度は 50 °C 前後である。合金 B の場合、遷移温度は上昇し 120 °C 位まで劣化はない。合金 C は 150 °C 程度まで制振性が維持されている。また、組成を一定にした場合であっても、工程と熱処理の組み合わせ次第で 180 °C 近くまでの高温対応型が得られている。図 7 は、同一ロットの試験片を用い、工程を変えた場合に現れた制振性能への影響例である。工程 B は、既存の工程に従った性能であるに対し、工程 A は加工率と焼鈍の組み合わせを工夫して高温性能が改善した実績を示している [13]。180 °C 近傍で改善が見られ、 $Tan \delta$ 値は、通常の 0.02^{注7}を上回り 0.045 が確保された。M2052 合金の基本組成をシフトさせなくとも、工程を調整するだけで所望の高温性能に呼応することが可能である。組成のシフトと熱処理・工程の複合的処理によって 200 °C 近くまでは実現可能と確信できよう。

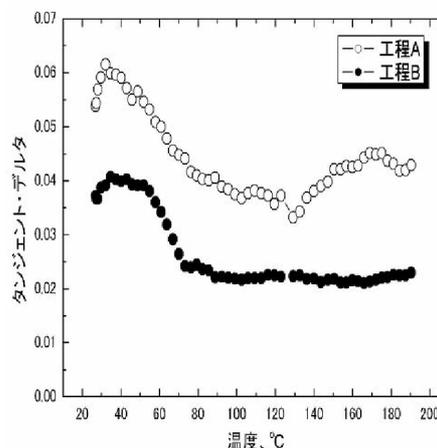


図 7: 工程による性能変化

この合金は低温域での制振性が特異的である。図 8 は、標準組成の M2052 合金であり、-50 °C 付近に山があり、裾野は広い [14]。山の頂上は険しいピークでないことに使いやすさが秘められている。測定した周波数は 0.1 ~ 10 Hz であるが、歪振幅が大きいほど制振性も高い。また、300K から 4.2K までの測定によれば、図 9 のように、230K のピークから徐々に温度が下がるにしたがって制振性は減少し 150K では著しく減少し、再度上昇し 70K で小さいとはいえ再び山が現れている [15]。こ

^{注6}このデータは実験の都合上、低い制振性を示しているが標準処理に従えばその値は上がる。

^{注7}この値でも制振合金の機能は維持している。

のような極限温度付近における制振性の存在は重要でありかつ期待でき、極限環境下における振動対策で応用すべく研究が進行している [16]。

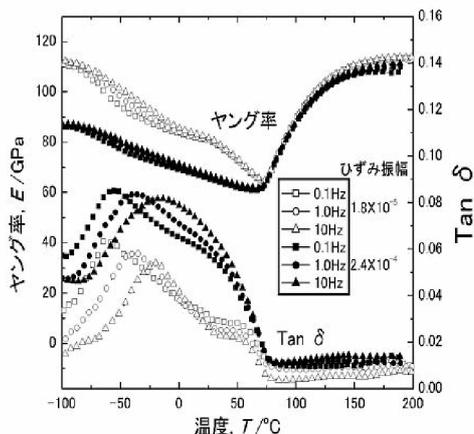


図 8: 超低周波における制振性

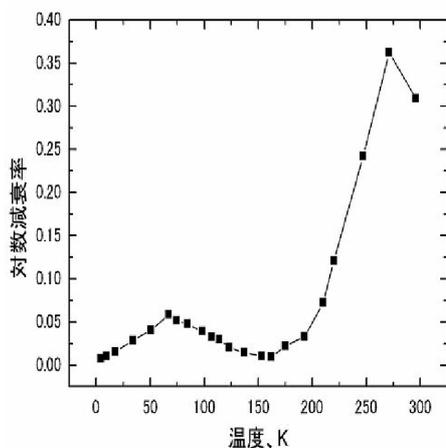


図 9: 4.2K 近くでの制振性

4.3 周波数と振幅依存性

この合金の減衰は、低周波の $< 0.01\text{Hz}$ から超音波の MHz という広域にわたって起こることが認められる。

図 10 は、 $75\text{Hz} \sim 4.3\text{kHz}$ の領域で行った周波数掃引法に基づく測定結果である [17]。減衰率は振幅に比例して増加するのに対し、周波数には反比例している。9 次の共振周波数である 4.3kHz は最も低い減衰率となってお

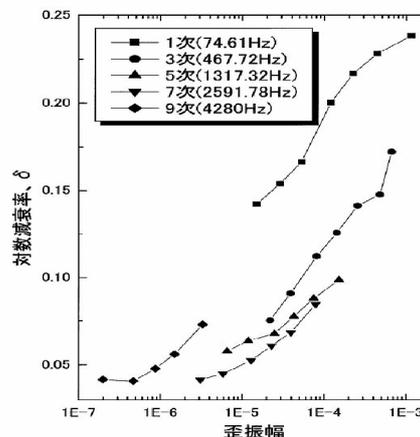


図 10: M2052 の振幅と周波数依存の例

り、このデータからでは、この合金は高周波・低振幅の振動に対して無能であると誤解されかねない。しかし、音響界での実用例によれば、そのような振動は間違いなく除去されることを立証している。加えて、超音波域の $3 \sim 5\text{MHz}$ という高周波域^{注8}においても 0.7 以上の対数減衰率が得られ、ゴム並であったという結果もある [18]。したがって、図 10 にみられるような、振幅が小さくなるにしたがい減衰性能は低下するデータは必ずしも正しいとはいえない。測定法に問題が潜んでいるのかもしれない。この合金は、制振性にかかわる要因が複雑で多岐にわたるため各周波数における減衰性能の詳細はまだ明らかではない。

^{注8} この場合の周波数はいっそう高く、かつ、振幅も非常に小さい。

4.4 その他の物性

主な物性値を表 2 に示す。

表 2: M2052 合金の主要物性・機械的性質

項目	条件	データ
許容応力	引張り強度 圧縮	540MPa
縦弾性率	3 点曲げ	67.7GPa
	圧縮	35.1GPa
	引張り	47.8GPa
	超音波	104GPa
横弾性率 注 a	引張り 超音波	17.8GPa 46GPa
ポアソン比	引張り	0.338
弾性限	引張り	300MPa
耐力 (0.2%)	引張り	205MPa
疲労限 (曲げ)	応力 歪、 μ	160MPa 5×10^5
硬さ	Hv	100~130
線膨張係数 注 b	300K	$22.4 \times 10^{-6}/\text{deg}$
比熱 注 c	300K	512.7J/Kg · K
熱伝導率 注 d	300K	10W/m · K
磁性		常磁性/反強磁性
密度 注 e		7.25gr/cm ³
固体内音速	縦波 (5MHz)	7000m/s
	横波 (5MHz)	4310m/s

注 a:ポアソン比から算出

注 b:Al,Mg,Pb,Sn と同等

注 c:Fe,Ni,Ti と同等 注 d:Bi,Sb,Ti と同等

注 e:Cr,Fe,In,Sn,Zn と同等

磁性は、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る。従って、磁性を嫌う精密機器類には利用価値が高いと思われる。

ヤング率は、組成によって敏感に変化する。組成は変態点を変動させるからである。この変態点は広い幅を有するため、組成が一定であっても使用温度で違いが生じ一義的には決まらない。その様子は図 8 からも容易に理解される。ヤング率の極小値は 70℃であるが、他の温度では値が変化している。低温になるに従い増加し一定値に収斂する傾向はある。図には常温で 70GPa を示しているが、組成と工程・熱処理によっては 30~70GPa と幅がある。概略的にはアルミニウム、銀などに近いが、それを超える。

熱伝導率と比熱はチタンに近く、金属の中では熱が伝

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。比重は Fe に近く、7.25 である。(つづく)

5 振動伝達率と高減衰比の問題

振動源からの振動が隣接する部位に伝達する大きさは、振動論でよく知られているように、次式で表される。

$$T_R = \frac{\sqrt{1 + (2\zeta(\omega/\omega_n))^2}}{\sqrt{(1 - (\omega/\omega_n)^2)^2 + (2\zeta(\omega/\omega_n))^2}} \quad (1)$$

ここに、 T_R は伝達率、 ζ は減衰比、 ω は強制角振動数、 ω_n は固有角振動数である。伝達経路の境目に減衰機能のある機構や材料、たとえば、コイルバネ・ダッシュポット・ゴムなどを介在させ ζ を調整する。 ζ をいくつか与えた場合の T_R と ω/ω_n の関係を図 11 に示す。

これからわかることは、

1. 振動絶縁効果は $\sqrt{2} > \omega/\omega_n$ において現れる。したがって、固有振動数 ω_n が小さいほど効果が大きい。
2. $\sqrt{2} > \omega/\omega_n$ の領域では減衰比が大きいほど振動絶縁は劣化する傾向がある。制振の側から見れば、減衰比が大きくなるとともに $\sqrt{2} > \omega/\omega_n$ では効果が薄れる。したがって、妥協策として普通は $0.1 < \zeta < 0.15$ 程度になるように設計している。

結局、 $\sqrt{2} > \omega/\omega_n$ の範囲では振動絶縁器のバネ定数を極力小さくしてダンパーを除去すればよいことになるが、バネ定数が小さくなるにしたがい機械は不安定になる。このパラドックスは、コイルバネ自体には減衰能がほとんどないことに起因しているからである。もし、コイルに減衰能があれば事情は一変する。

M2052 製コイルは通常の鋼製コイルよりも格段低いバネ定数を求めることが出来るが、コイルの形状ではなくバネ定数の高い形状、たとえば、マウントの形状でも使うことが出来るから、このようなマウントで振動絶縁するのであれば上述したパラドックスから脱皮できる。すなわち、コイル状よりも強固で制振性も高い除振具が成立し、「安定な支持と高い振動絶縁効果」の併せ持つ除振器具の創出が考えられる。

ゴムの場合は、金属バネやダッシュポットの場合とは異なり、損失係数 η を用いて次の式が妥当と考えられている [19]–[22]。

$$T_r = \sqrt{\frac{1 + \eta^2}{(1 - (\omega/\omega_n)^2)^2 + \eta^2}} \quad (2)$$

これによれば、減衰比が大きくなるにつれて ω/ω_n の高いサイトで起こる伝達率の不利な面は生じない。防振ゴ

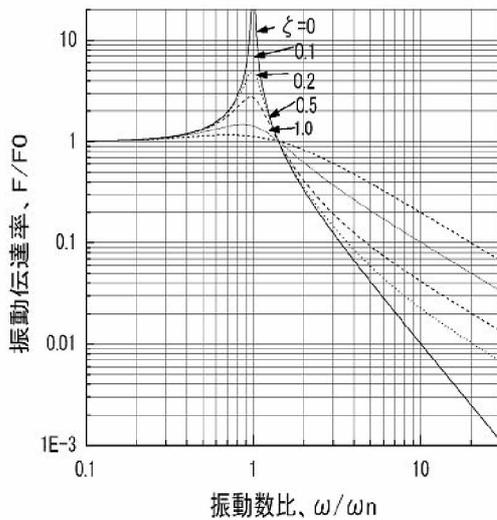


図 11: バネとダッシュポットを介する伝達率

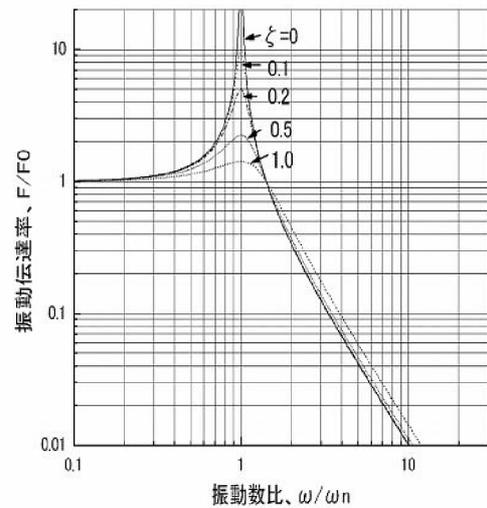


図 12: ゴムを介する伝達率

ムを使用した場合には、**図 12**のように、 $\sqrt{2} > \omega/\omega_n$ の範囲においても、損失係数が大きくなるとともに現れる振動絶縁効果の悪化はみられない。これがあるゆえに、防振ゴムは多用される側面もある。

M2052 合金もゴムと同様な利点を擁しており、金属でありながらゴムの長所が使える。すなわち、高減衰能の大きさを気遣うことはなく、その属性を有効に機能させられる。次の点はゴムに優る M2052 合金の特異点である。

1. 一般の金属製コイルバネ自体は制振性がほとんどないがこの合金は大きな減衰値を持っている。
2. ゴムは強度が非常に低く、「ぐらつき」や「おどり」の危惧を伴う。
3. 空気バネは設置に要する空間が巨大である。

M2052 合金はこれらの問題をクリアしている。後述の表 1 にあるように、この合金をコイルバネとして用いた場合の際立った利点がみられる。

6 M2052 合金の使い方

この合金は以下のような使い方ができる。決定的な違いはあるが、一見してゴムと共通した使用法が多い。M2052 合金は、多種の形状で素材を供給でき、板・棒はもとより、パイプ、線材、細線、箔、粉末とあり、切削

加工性・塑性成形加工性・铸造性も良好であり、エッチングによる微細加工も掌握しているから応用は広範にまたがる。

- 振動経路に挿入する
- 振動源に貼り付ける
- 振動源に粉末を塗布する
- 振動源を囲う
- 振動源同士を繋げる

概念図にすれば、**図 13**となる。(A) 挟む・挿入する、(B) 支える、(C) 結ぶ、(D) 貼り付ける、(E) 集める、(F) 囲う、である。後述されるよう、これらは実例で効果が証明される。

6.1 多彩な素材から自由な形状で使える

成形加工が容易なことから多彩な形状の素材が取得でき思うままの製品が可能である。実際の素材例を**図 14**、**図 15**、**図 16**に挙げる。**図 14**の左上にあるネジ類は、金・銅・ニッケル・黒染の各種のメッキ処理を施したネジである。電気部品には導通の要請があり、金・銅のメッキにも対応できている。左端の長めの丸棒は 1mm 径の内ネジが貫通した特殊ボルトで、精密機器のパーツに応用された。メッキが可能なのは、ネジに限らず、この合金の耐食性・耐磨耗性を大幅に改善できることを示唆

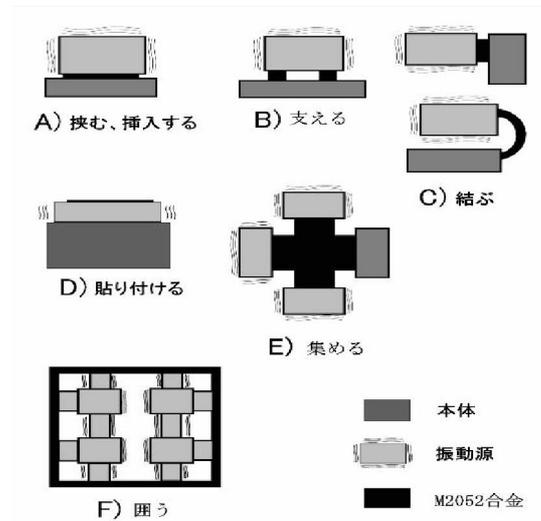


図 13: 代表的な使い方例

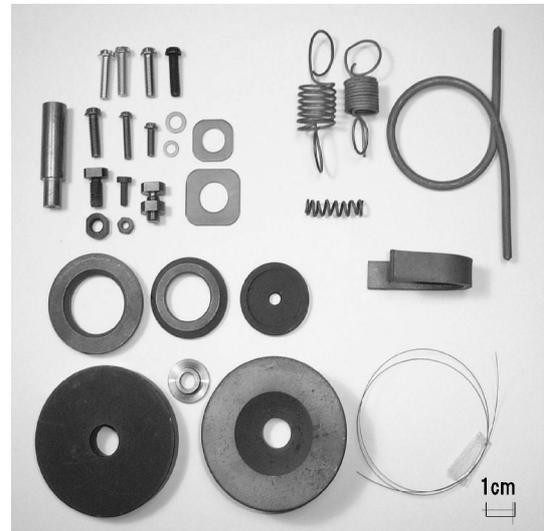


図 14: ネジ・ワッシャー・バネ・台座・細線等の製品

している。表示されていないが、0.1 mmの箔も製造されている。これは自由な形状に家庭用のはさみで切り取ることができ、貼り物や巻き物として使われている。

スピーカーのインシュレータ、台座、ワッシャーもある。他に引張りと圧縮用のコイルバネと曲げ板タイプのバネがある。径が0.1mmの線材も示されている。図15は、パイプ類で、左が切削加工で、右が溶接で作製した製品である。図16は最近話題の音響関連製品である。a)は、アナログレコード用のカートリッジのシェル、b)はそのカートリッジの下に敷くスペーサーである。c)とd)は対をなすもので、電源ボックス・タップである。雑音は電源から絶対対策を講じなければ音質改善に限界があることはもはや常識化しており、その一環のパーツとして発売されている。e)とf)はディスク・スピライザーである。ディスクの上に置くだけで雑音を吸い取るグッズである。g)はターンテーブル用のスタビライザーである。h)はボリューム・スイッチのつまみであり、シャフトを通して除振する働きで効果が上がるという。i)はブレーカーのスタビライザーである。j)は厚手のインシュレータである。k)は機器やケースあるいはラックのフットとして使うパーツである。このように音響分野においては活用が矢つぎばやに進化を遂げている。

パーツを溶接などによって結合することが可能であるから複雑な製品も創製できる。ペローズ、異型フォーミングの実績もある。

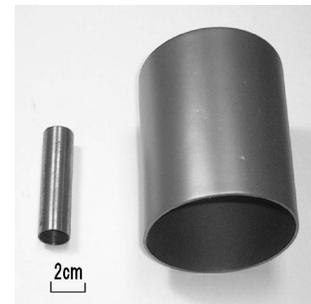


図 15: パイプ製品

6.2 バネ定数を下げる形状工夫による新機能—ゴムでは不可能な低周波除去

この合金に見られる制振性能は、吸収可能な周波数が0.01Hz以下から10MHzという領域をカバーできる稀有な制振合金である。ゴムで経験するように、高分子材料は高周波を手軽に除去できる反面、低周波を除去する能力は小さい。したがって、精密機器分野では高価な除振台・装置をふんだんに使用しているが低周波を取り除けないため、有効に除振の機能を引き出せない問題を抱えている。超高圧電子顕微鏡においてもこの低周波に苦心している。変電所のトランスから発する超低周波公害の問題もある。これまで、材料自身が低周波を吸収するのは無かったのである。M2052合金はこの従来からの課題を解決する糸口となりうる。

低周波除去で問題なのは、大きな振幅をいかに克服するかにある。この振幅の大きさに対応するためには部位の形状を工夫し、バネ定数を調整することによってそれ

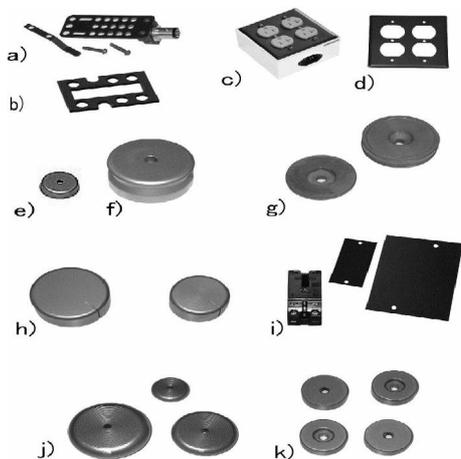


図 16: 音響界の新製品例

が可能である。振幅が小さい高周波の除去には、振動経路にこれを挿入するだけで有効となる。音響界でのほとんどの応用はこの部類であった。しかし、低周波であっても振幅が大きい振動に対しては、合金の内部で双晶を運動しやすくさせなければならない。それには振動外力を曲げ・捻り・せん断応力などに転換させる工夫が必要である。

図 17 は、剛性的なままで使う典型例である。振幅が小さい振動はこの図のような単純な形状で目的を達成できる。a) はインシュレータやワッシャー、b) はガスケット・パッキング・リングである。c) は大型精密穿孔機用のスペーサーで、径が 100 mm・厚さが 5 mm もある。d) は回転体用のフランジにしたもので、右は、フランジ自体は鋼製であるがその片側に M2052 製の板を押し当てて利用する例である。e) から h) はベアリング用のスリーブ類で、ホルダー・インナー・アウターの利用例である。これらの応用例は振幅が小さい場合の活用であり、点や線接点に荷重が集中して M2052 が局部的に塑性変形しないような使い方をすれば制限は無い。

図 18 は、装置・機器の土台にマウントとして使う例である。機器本体の大きな揺れ振動を制振性のあるマウントを用いて不要な振動を吸収しようとするものである。a) から c) までは振動を圧縮ならびに曲げ荷重に転換しうる形状である。本体から伝達してきた低周波を吸収、あるいは、その入力振動をマウントの低周波振動と干渉させ、低周波の低減を可能にする。d) は、本体の荷重によってあらかじめ引張りのプレ・ストレインをかけ、双晶の発生を容易ならしめるため意図的に準備された状態を持つマウントである。いずれにしても、このような形状ではバネ定数は低く、吸収できる振動の周波数と振幅

はその形状から一義的に決定される。定性的には、バネ定数が低いほど低周波・高振幅を除去できると考えられる。後述のマウントの実用例のように、25Hz 付近の低周波を著しく低減した。

図 19 は、コイル形状の応用である。バネ定数を手軽に小さくし、しかも高い信頼性を得るには金属製のコイルである。普通のバネは強度の高い合金が使われており、合金自体は振動吸収能力はほとんどないから、高周波はそのコイルを自由に往來し、時にはサージング現象を発生し、低周波もあまり低減できない。しかし、M2052 合金で作られたコイルはバネではなく、まったく新しい機能をもたらす。

表 3 は、代表的なバネ機能を示す構造と制振性コイルの特異性の対比である。特徴的なことのひとつは、前回で示してのように、M2052 合金製であれば絶対温度近くでも制振性は失われないことである。固有振動数も構造しだいでバネ弾性体としては最も低い値を創り出すことが可能である。コイル同士、すなわち、コイルバネと M2052 コイルを比べれば、性能に歴然とした差が出る。通常、金属コイルバネは高周波絶縁性が小さいから、後述のように、ステンレス製と M2052 製のコイルバネとの比較にその差異が顕著に現れている。両者を同じ振幅で振動させ、静止するに要した時間を比較した場合、ステンレス・コイルでは 40 秒後でさえ振動はまだかなり残存していたが、M2052 合金製コイルの場合はその 1/20 の 2 秒で停止した。図 19 にもあるように、コイルの断面形状・面積のバリエーションによってバネ定数ばかりでなく固有振動数も変えることが出来る。また、c) のように、コイルを集合させる使い方も出来る。d) や e) は、コイルとは異なった形状によってバネ定数を変化させる例である。成型加工性が優れているから、アイデア次第で思いのままの作品を創作できる。

図 20 は、今までの図よりも簡単な構造で成果が期待できる応用例である。a) 板を U 字形に曲げたもの、b) 椅子のように凝った形、c) 線あるいはパイプを輪にしてオーリング的な応用に使う、d) と e) はパイプの利用である。このような撓ませる使い方をすれば通過する高周波の吸収に加え、低周波はその構造に依存したバネ定数との干渉によって除去の可能性が生まれる。U 字板の成果は後述する。

図 21 は、a) ベロー、b) ダンパー線、c) から f) は高周波・低振幅を発生している電子回路に、バネ定数の小さな端子を貼り付けて振動を制するパーツである。M2052 製のレゾネータである。

表 3: 代表的弾性体とその比較

項目	コイルばね	重ね板ばね	空気ばね	防振ゴム	M2052 コイル
①振動系として通常実用しうる固有振動数 (Hz)	1~10	1~10	0.7~3.5	4~15	<1 ~10
②減衰性能	なし	あり	使用法による	あり	あり
③高周波振動絶縁性	D	D	A	B	A
④耐へたり	A	A	B	B	A
⑤常用温度範囲 (°C)	-40~150	-40~150	-20~80	-20~120	-270°C ~ 150°C
⑥耐油性、耐老化性	A	A	B	B	A
⑦制振均一性	A	B	B	B	A
⑧構造の簡潔性	A	B	C	A	A
⑨必要空間	B	B	B	A	B
⑩その他の特徴	荷重特性の直線性が良い	車両の場合、ばね装置と車軸の案内装置の両作用を兼ねる	ばね高さの調整は容易、耐荷力とばね定数とは互いに独立に調整可能	ばねの重量は他に比べ軽くできる	極低温でも低温脆化の心配はない

(注1) A:優、B:良、C:可、D:劣る (注2)M2052 合金の超音波の吸収能はゴム並である。

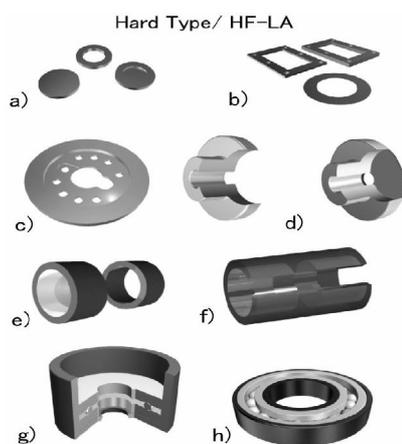


図 17: 高周波・低振幅の応用

7 応用例

7.1 音響関係

7.1.1 インシュレーター

音響分野で最初に応用されたのはスピーカーのインシュレーターであった。スピーカの下にただ敷くだけで、

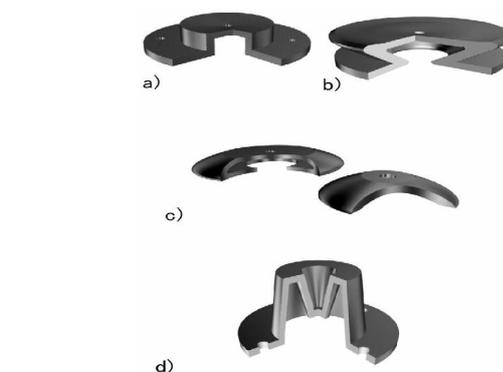


図 18: 準高周波・低振幅の応用

耳という超高感度機器でその効果を簡単に検証できたからである。図 22 は、スピーカに使った一例である。スピーカボックスとベースの間に挟み込んだだけで大変な効果が出たという [23]。スピーカが軽量であったり、設置床がソフトな場合には注意が要る。インシュレーターにかかる重量が高いほど効力は現れ、床が軟らかいときには合金内部の双晶を働かす機会が生まれなため十分な減衰効果は発揮できない。

その後、この種のインシュレータは、形状・厚さの品

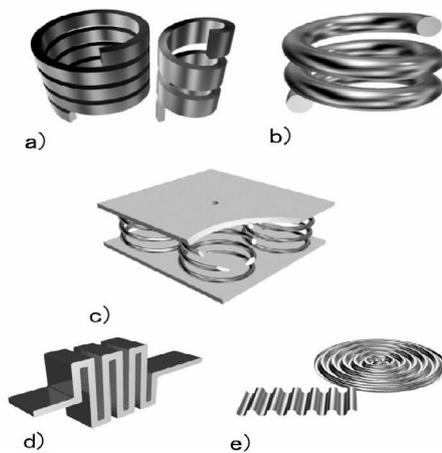


図 19: コイル形による低周波・高振幅の応用

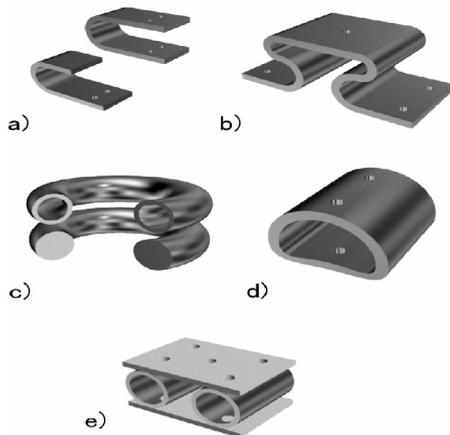


図 20: 低周波・高振幅の応用

種が増え順調な売れ筋の一品となっている。

7.1.2 振動を吸収するネジ・ワッシャー

制振合金をネジ・ワッシャーの所謂締結具に応用された例はなかったが、M2052 合金はそれを果たした。

アブソーバー・スクリュウとしてネジ・ボルト・ナット・ワッシャーが評判である [24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33]。大手の一部のオーディオ・メーカーにすでに採用され、音質改善に貢献している。

制振ネジの効果に関する実験データがある。それを図 23 に示す [34]。長さ 300、幅 40、厚さ 3mm の鉄板を叩き、マイクロフォンで 2 秒間の計測記録を比べている。左は無垢の鉄板、右はその鉄板の 5 箇所 4mm のタップを切り、そこに 4mm の制振ネジを取り付けた試験片である。それぞれの波形は同じ条件で叩いた音響で

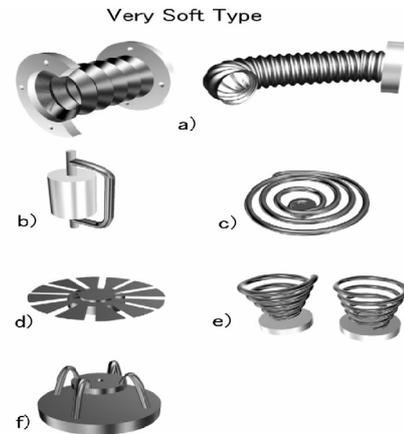


図 21: 高周波・低振幅を低周波高振幅変換の応用

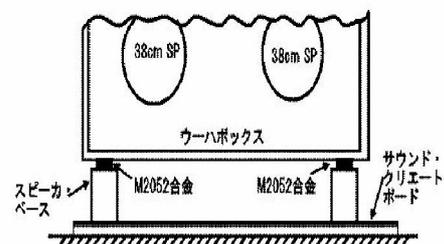


図 22: スピーカのインシュレータ

ある。明らかにネジの効果は決定的に大きいことが確認できる。

電気製品・機器類の内部には多数のネジ類が使われている。ネジ止めされている個所の従来のネジをことごとく制振ネジ・ワッシャーと交換したところ、音質が格段上位の機種に変身したという例が報告されている。ネジ止めの具体例を図 24 に示す [35]。これはプリアンプ・アンプの例で、M3 の 6mm と M4 の 15mm のネジ・ワッシャーがそれぞれ 11 箇所に取り付けられている。このようなところに制振具を用いただけで格別な音質改善が得られる。図??は、CD プレーヤであり、4 箇所にある白色の止具があり、そのゴムを除去し、メカの上に M6 のワッシャーを挿入してから上部を固定した。簡単な作業であっても改質は著しいという。

シャーシと IC 回路基盤を取り付けているネジの交換にも効果があり、デジタル信号におけるこのような効果の事実について論議を呼び起こしている。未だそのメカ

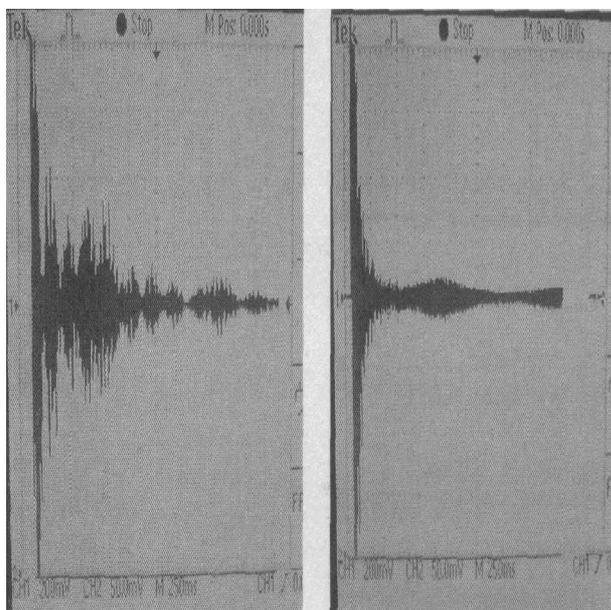


図 23: 鉄板を叩いた時の制振ネジの効果

ニズムは解明されていない。ネジ止め実験の詳細な検討結果はいずれもよしとして報告されている [32, 33]。どのネジを交換することが最善かはいまのところ試行錯誤以外に無いが、ファンは急増している。

7.1.3 CD プレーヤ

CD プレーヤーのメカベースに工夫を加えて音質改善試験をしたところ画期的な成果が得られた [36]。その具体的な例を図 26 に示す。この改良はネジを使ったことではなく、ワッシャーと支柱に用いた点にある。左側の従来タイプは、ゴムとスプリングを採用していたが、右の新型はそれらを撤廃し、構造が単純化したにもかかわらず音質は驚異的に向上したといわれる。ここでの注目点は、ゴムの駆逐が行われたことである。ゴムはストロークが大きいため、場合によっては 2 次の外乱振動を誘発しかねないのである。ワッシャーの制振効果から類推して、ガスケットやパッキングにも有用と考えられる。

オープン CD の場合、コーリアン (制振性のある樹脂) のスタンドに M2052 合金の円盤 (10mm 厚、50mm 径) を嵌め込み、それに CD のピックアップメカを据付けたところ、雑音は消失し再生音が画期的に向上した例がある [37, 38]。図 27 は、その実例である。上が全体の概観で、下図は黒色の M2052 製円盤にピックアップを据付けた状態を写している。ピックアップに接続したパーツから出る雑音信号が制振性円盤によって吸収され、音質が改善されたと考えられている。

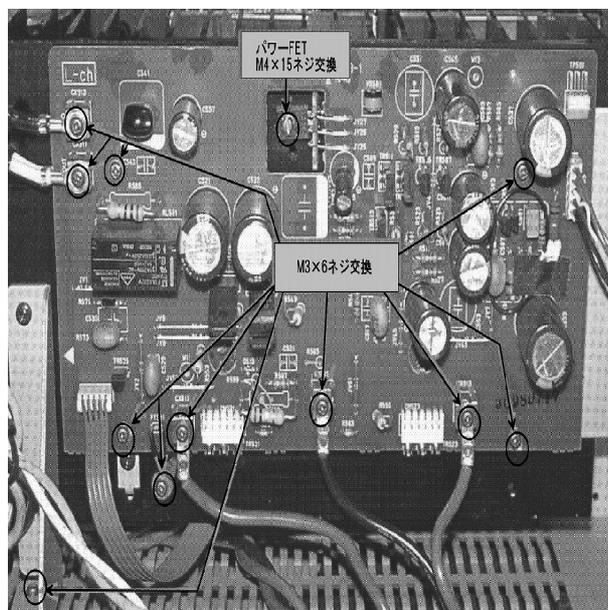


図 24: プリメイン・アンプ基盤にけるネジ止

同じ CD プレーヤでも、自動車に搭載された CD は過酷な条件に遭遇する。CD には車道からの振動が伝達されるため高質な音響の要求は難題であった。パイオニアは、車室内で究極の音質を創製するシステムとしてカロツエリア・RS-D7X を開発し、この問題を克服した。その要因はいくつかあるが、最大の成因は M2052 の創造的な採用である [39]。CD プレーヤにはディスクのセットとその回転を捕うためにクランパーが使われている。図 28 はクランパーの構造と M2052 製のリングが示されている。

クランパーにセットされた CD は、それ自身の回転によって 700Hz 付近で共振 (12cm の場合) が生じ、音質を損ねることがわかってきた。ところが上部クランパーのディスクと接する側に 0.1mm 厚のドーナツ状の M2052 シートを 1 枚だけ貼り付けることでディスクの雑振動は見事に吸収された。図 29 には、新・旧型クランパーの計測データを示す。実線が新型のデータである。旧型に現れていた 700Hz 近くのピーク振動は 10 数 dB 余りの低減に成功したのである。図 30 は、路面からの振動を模して故意に外乱させ、それに伴う CD のスピンドルのフォーカス・サーボのエラー信号の変化を示している。図の下方の大きな振幅波形が外乱信号で、上の左右の波形がサーボによる制止効果である。右が制振シートを用いた結果であり、シートを用いない左側の場合と比べ、外乱による CD の乱れは著しく制されていることが読み取れ、音質への乱れによる影響は少ないことが立証された。0.1mm という箔を貼っただけでこのような振動対

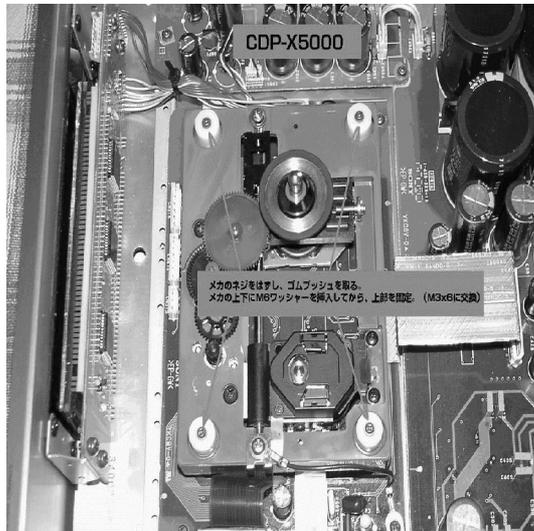


図 25: CD プレーヤのメカの止ネジ

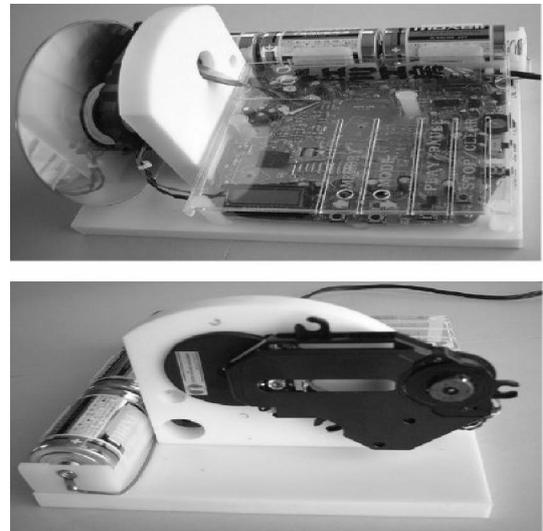


図 27: オープン CD

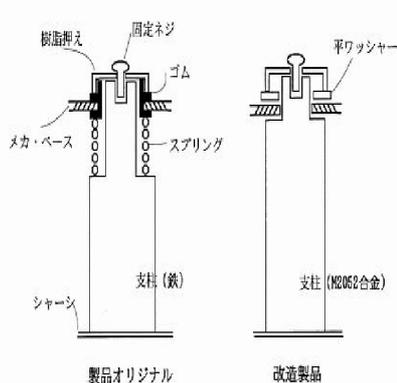


図 26: CD メカの改善

策に大きな効果が得られたことは、振動問題に長じた専門家は理解に難色を示している。

7.1.4 アナログ・レコード関係

アナログ・レコード用のストレート・アームとカートリッジへの採用試験 [40, 41]、配線コードの設置具 [42] などにも好成績が報じられている。ほかに、ワッシャーを打ち抜いた残材(パンチングベルトと呼ばれている)も有効利用の対象となっている [43, 44, 45]。特筆すべき例は、そのベルトをレコードのアームに採用した驚くべき効果である [46, 47]。図 31 はその実験装置である。ベルトの強度を高めるためにそれを捻ってあるが、左端にカートリッジ、右端にベルトを接続するためのスタンド

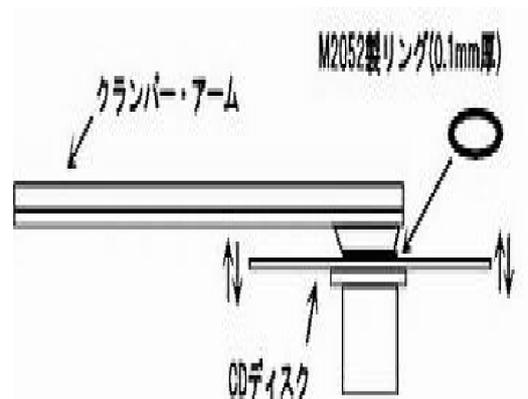


図 28: CD のクランパーに M2052 リングを貼り付ける

という簡単な構造である。「スクラッチ・ノイズは消失したかのように小さく、従来からトーンアームに知られている共振もなく、さらに、ハウリング現象もほとんど消え、おおげさな振動防止対策パーツは要らない」と絶賛している [46, 47]。

レコード・マニアの間では SME 社製のトーンアームは音質がよいことでよく知られている。それを M2052 合金を使って音質をさらに追求し、レコードの音を見直すほどの改善があったという [48, 49]。そのアームを図 32 に示す。SME アームはプラスチック製のエッジでアームをバランスよく支えることで高音質を維持しているのが特徴である。改善したパーツは、写真の右下のナイフ・エッジと、左下のスペーサー(ターンテーブルにアームを取り付けるための板)を M2052 合金製にした試みである。その結果、「何十年、いろいろなプレーヤーで聴

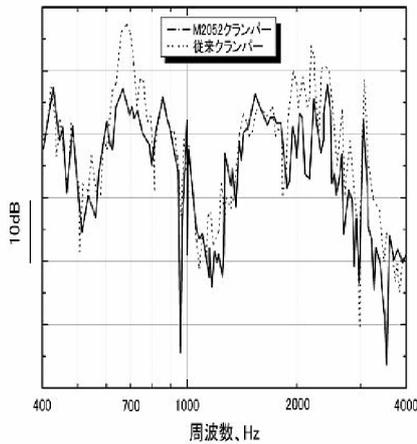


図 29: クランパーの除振に有効な M2052 合金

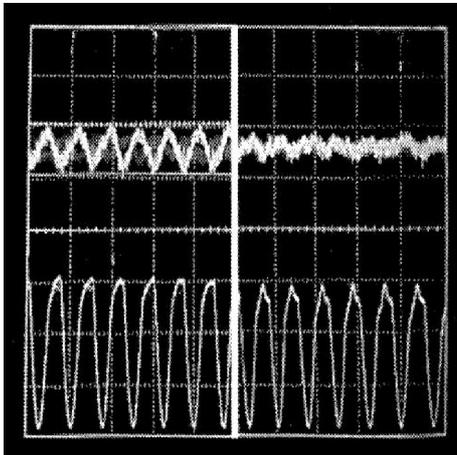


図 30: 外乱をかけても効果は維持

いてきたレコードがプレスしたばかりのように新鮮に聞こえ」と評されている [48]。LP レコードの中からいくつかを演奏し、比較的差異が感知できた「Take Five」を選曲し、その最初の部分を CD-R に録音し、その波形を検討した。全体の波形を図 33 に示す。すぐに気づく点は、高周波域の音圧の差である。オリジナルのアームは全般に上に位置し、音圧の上下差も少ない。M2052 製アームでは全域にわたって音圧の上下幅が激しく変化している。周波数が低い 1kHz 以下を比較するとその違いがはっきりする。図 34 がそれである。200Hz 付近を注視すると、M2052 製は音圧の上下に富んでいるに対し、オリジナルは変化に乏しいことが読み取れる。すなわち、M2052 合金製のほうが音量が低めであるにもかかわらず、メリハリのある繊細な変化を呈していることが音質



図 31: アナログレコード・アームでの静音効果

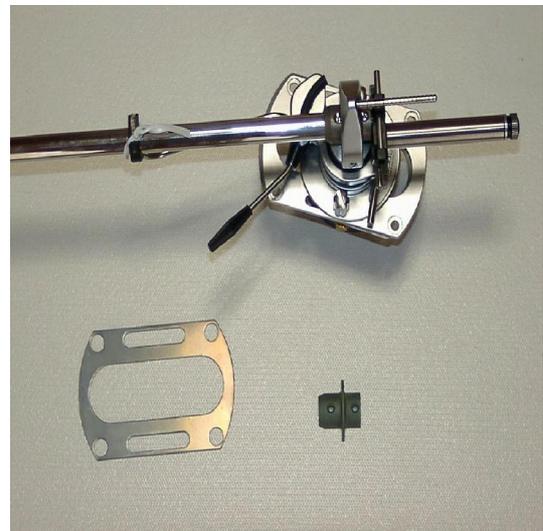


図 32: SME 社製トーンアームと改善パーツ

改善をもたらしていると解釈できる。おそらく、今のところ未踏であるが、Al 製のパイプ状アームを M2052 合金製に置き換えれば劇的な音質改善が予測できよう。

また、箔の応用例として、0.1mm 厚の箔を小片に切り出し、カートリッジの各所とレコードなどのスタビライザーに貼り付けたときの絶大な効果も発表されている。図 35 は、カートリッジにワッシャーと箔を要所にセットした状況を示す。いずれも効果は大であった [50, 51]。

このシートは薄く、鉄で容易に切り分けが利くため、形状と大きさはユーザーによって自由に加工でき、適所に貼り付けることでユニークな成果報告が多数報告されている^{注9}。図 36 は、レコード用と CD 用のスタビライ

^{注9}「A&V ヴィレッジ」誌に毎回のように掲載されている。

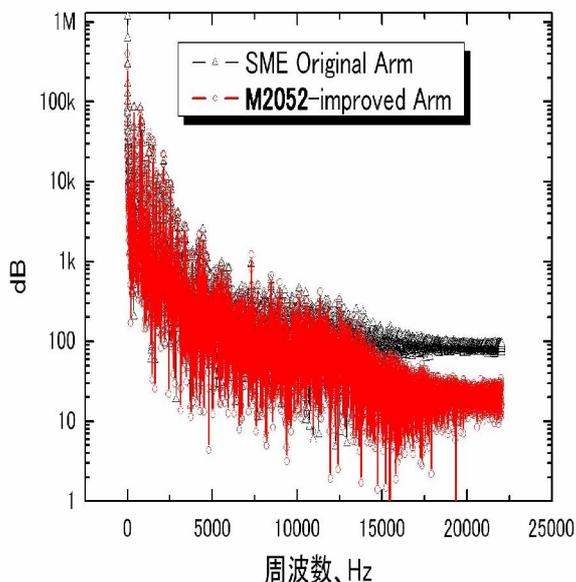


図 33: 全周波数域での音圧変化に見られる改善効果

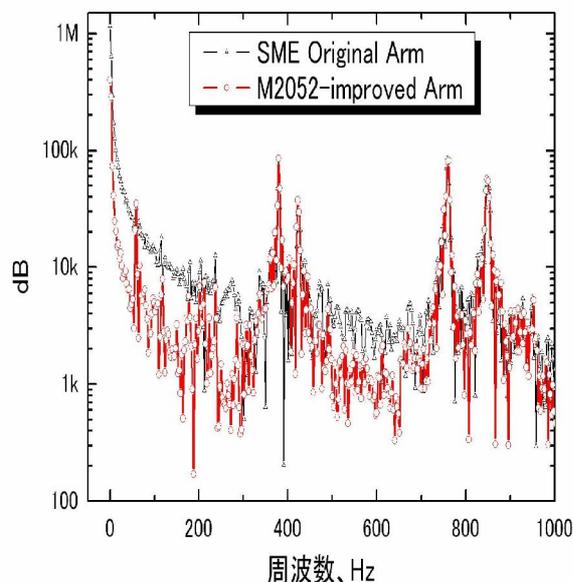


図 34: 1kHz 以下に見られる音圧改善効果

ザーを裏側からみた写真である。ディスクと接触する側に制振シートを 3 箇所貼り付けただけの作業でも音質改善に有効といわれる [50, 51]。

スピーカーのコア・ケースにこの合金の円盤をネジ止めただけで効果が現れ [52]、また、MD の中央に位置するクラッピング・プレートへ 0.1mm の制振シートを貼り付けた場合も予想外の効果が認められている [50, 51]。図 37 は、その MD である。左は従来品で、真中にあるような薄い円盤をエポキシ系接着剤で貼り付けた完成品が右である。このような単純な対策が^{注10}驚嘆する音質を生み出すという。

貼り付けの効果は「糊」の効果であり M2052 合金のそれではないと非難されるが、「糊」でも貼り物が何であれ音質は変化するのは事実であるが、問題は変化ではなく改質である。M2052 合金は改質を生むのである。

最近では微粉末の製造も可能となり、新たな用途が生まれつつある。樹脂にその粉末を溶かし、小さく軽量な部位に塗布して雑振動の除去に成果が現れている [53]。

^{注10} 両面テープで簡単にテストできる。

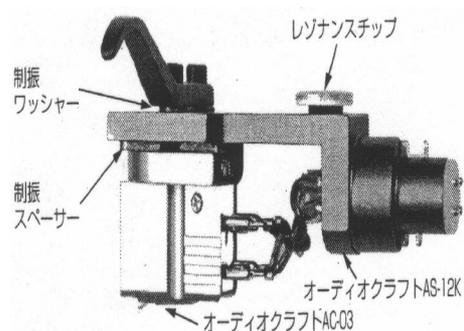


図 35: レコードのカートリッジへの制振合金の応用

7.2 機械加工関係

7.2.1 バイトのホルダー

加工精度の要求は年々厳しくなり、仕上げ面の高質化や、中繰りバイト切削における精度向上は深刻である。対策はいろいろ講じられ、超硬合金で作られた高価なホルダーが効果的とされている。一方、M2052 製も効力は高く、工具用のスペーサー、中繰りバイトのホルダーとしてすでに市販されている [54]。超硬合金をはじめとする工具に多用されている合金のほとんどは、重量と剛性の観点から制振対策を打ち出しているが、その工具内を伝播する振動はほとんど吸収されないから、別の振動源から渡来した振動と干渉し思わぬ弊害を助長すること

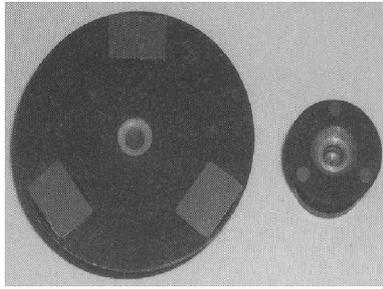


図 36: レコードと CD 用のスタビライザーへの応用

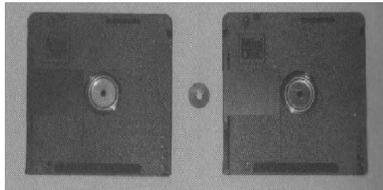


図 37: MD のクランピング・フレートへの応用

がありうることを念頭に置くべきである。

木材をカンナで切削するような加工法をへール加工というが、その際、バイトの支持に用いるホルダーの材質は SCM435 が一般的である。それが高剛性材質であるため、雑振動がはびこり、そのために仕上げ面に不満があった。しかし、そのホルダーに M2052 を採用した結果は見事な成果を挙げた [55]。図 38 は、用いたホルダーである。市販品の切り欠きの有るもの (左)、それが無



図 38: へール加工工具ホルダーと制振合金

いもの (中央)、ならびに、切り欠きの無い M2052 製の 3 種のホルダーを試験したところ、この合金の成績は絶

大であった。

図 39 は、市販の SCM435 製へール工具ホルダーと M2052 製を試験し、得られた表面粗さの評価である。切り込み深さが浅いときは両者の差は少ないが、それが大きいほど効果は瞭然であり、M2052 製が優っている。振動振幅は著しく減少し表面荒さは、アルミ加工の場合には、0.1 ミクロンにまで加工だけで鏡面仕上げが獲得できたという。図 40 は、6 軸制御で自動車のサンルーフ曲面 (Al 製品) をへール加工して得た鏡面仕上げ例である。左側の 2 列が M2052 製ホルダーの結果である。右側の 2 例のボール・エンドミル仕上げよりも明らかに反射像は鮮明である。ラッピング仕上げを必要とせずに高級な仕上げが可能となった [55]。

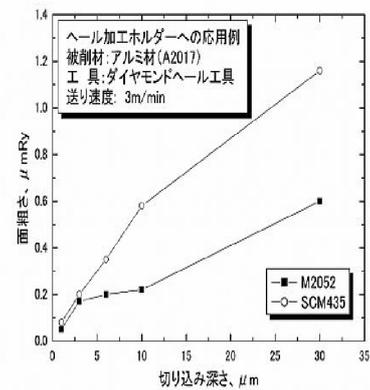


図 39: へール工具ホルダーでの成果

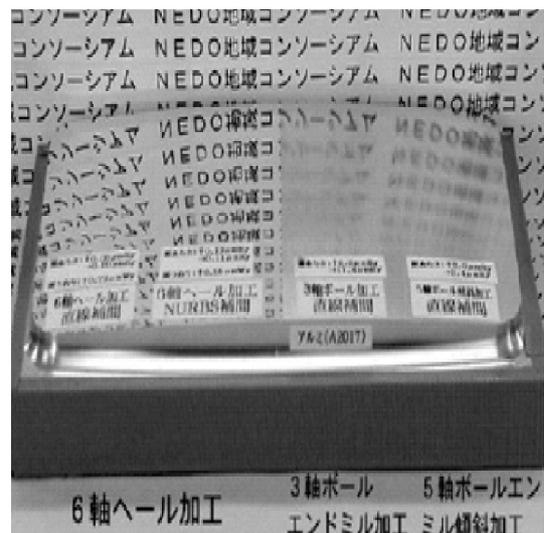


図 40: 6 軸制御によるへール加工曲面仕上げ成績

7.2.2 バイトの下敷き用スペーサ

図 41 は、旋盤加工においてバイトの下に M2052 製のスペーサを敷いた例である [56]。これは、SS6 角材をハイス材バイトで切削した実験結果である^{注11}。マーク □■ は一般的な軟鋼製スペーサで、○● は M2052 製のデータである。マークの中が埋まっているデータは、その切削条件で「びびり」が発生したことを意味している。軟鋼スペーサではワーク回転数に無関係に突き出し量が 35mm を超えると「びびり」が発生した。しかし、M2052 スペーサを用いればこの実験内でもっとも過酷な条件、すなわち、突き出し量が 50mm でワーク回転数が 1900rpm の場合にのみ「びびり」が現れただけで、他の条件では観察されなかった。わずか 1mm 厚のスペーサをバイトの下に敷くだけで寸法精度と仕上げ面が改善されるのである。同様に、中繰り切削用のスリーブに使った「びびり」対策の成果 [57]、同じく、単結晶の中繰り加工における、バイト径が 5mm で突き出しが 150mm であっても多少の「びびり」が検出されたとはいえ仕上げ精度以内に収まったという例も知られている [58]。

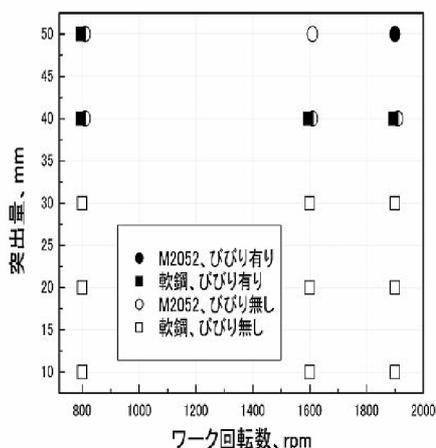


図 41: バイト用のスペーサ使用効果

図 42 は、別の精密機器メーカーの測定例である。これはスリーブ状のスペーサとして用いた場合である。薄板で作ったインナーとアウターをベアリング周りに挿入した時の振動の強さに対する影響を見ている。5000Hz 付近の強い振動は抑制されていることは明らかである。

上の例のように、薄物の板やパイプで「びびり」が激減した事実は、制振材料の王者であるゴムでは達成が困難である。ゴムは強度が極端に低いため、バイトの下敷

^{注11} 送り速度は 0.15mm/rev、切削油は使わない条件で行った。

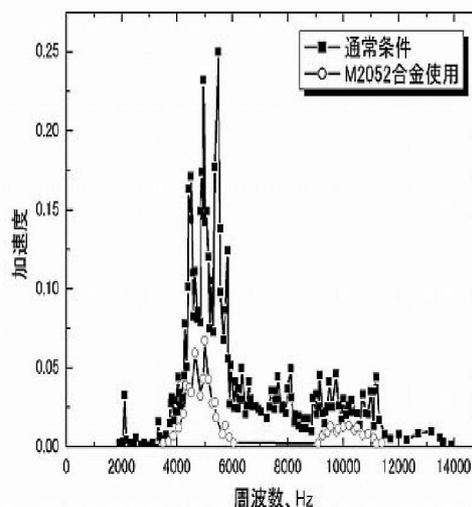


図 42: 軸受けでの使用効果例 1

きに用いたときには「びびり」パルス信号を制する強さが不足し、「びびり」に抗し切れない。特に板厚が増すほど制止力は減少する。ゴムではこのような負荷の高い用途には不向きである。M2052 合金においても厚さの増加は低周波の吸収には有効ではあるが、その弾性変形による「びびり」制御力は減少する可能性があることに注意が必要である。微振動には薄物が適している。

7.2.3 工作機械のマウント

機械や機器の支持具に各種のマウントが使われている。その使用目的の一つに除振があり、鋳鉄や、高分子を挿入したタイプが一般的である。低周波域の制振性を有効に具現させるためには、M2052 合金の場合、撓みが生ずる程度の弾性変形を引き出す環境が必要である。この推察はマウントのモデル実験によって実証された [59]。図 43 に示した形状のマウントを用い、総重量 1 トンの試

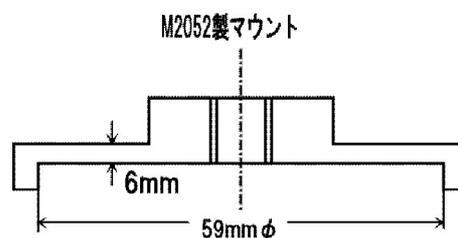


図 43: M2052 合金製マウント

験用平面研削盤の下にそれを4箇所据付け、それぞれに均等な荷重がかかるようにトルクレンチで調整して設置した。加振は主軸ヘッドのコラム後部をインパルス・ハンマで叩き、砥石を想定したワーク・テーブル上のアルミ・フランジに渦電流変位計を固定し、砥石とテーブル間のクロスリセプタンスを検出して評価した。その結果が図44である。マウントと据付けボルトの材質を組み合わせ、4種の試験を行い、興味深い事実が得られた。25Hz付近に共振ピークが見えるが、マウントとボルトの両方が鉄の場合、25Hz付近に最大値変位0.244を示し、ボルトだけを変えても0.221にしか減少しないが、マウントにM2052を使うと変位は17%にまで劇的に衰退している。この結果は注目に値すると思われる。重要

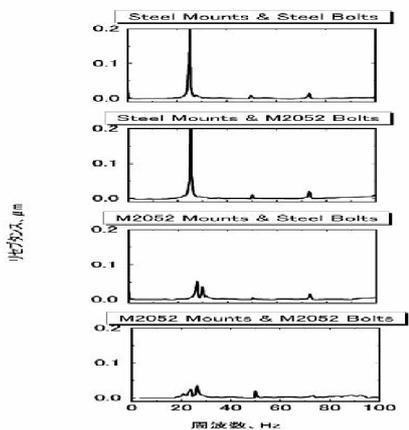


図 44: M2052 製マウントの制振効果

なことは、合金のような剛体であっても制振性能の高い材料であればバネ定数を小さくすることによって低周波を低減できることを示した事例である。

(つづく)

振動源からの振動を他の部位に伝わる割合を伝達率といわれ、その振動の振動数(ω)と、その系の固有振動数(ω_n)との比(ω/ω_n)が1のときに共振し、それが $\sqrt{2}$ 以上の条件で伝達率は < 1 と小さくなるから、その系にもろもろの工夫を凝らし(ω/ω_n)を大きくすることで制振策を講じている。それにはこの ω_n を大きくするか、伝達箇所、コイルバネ、空気バネ、ダッシュ・ポット、オリフィスなどを付加して減衰効果に期待をかける。実際には、減衰比が高い場合は(ω/ω_n)の高いところで伝達率は不利になるため減衰比は0.1 ~ 0.15程度が推奨され、必ずしも高減衰条件をよしとしていない。ゴムの場合はこの種の減衰比問題は無い。M2052合金もそれが無いから、使い方に難しさは無い。他の減衰材と比べ、

8 精密機器関係

8.1 γ 線検出器

放射線測定に γ 線検出器がしばしば使われている。その機器のパーツにこのM2052製のスリーブが採用された。図45はその詳細図で、黒色のスリーブがそれである。右側のコンプレッサーの振動が、左端にある γ 線の入射ウインドウを攪乱させる結果、検出感度を著しく下げている。図46は、その振動伝播を制振合金によって低減させ、10%の精度が増したデータであり、この検出器は市場された[60, 61]。

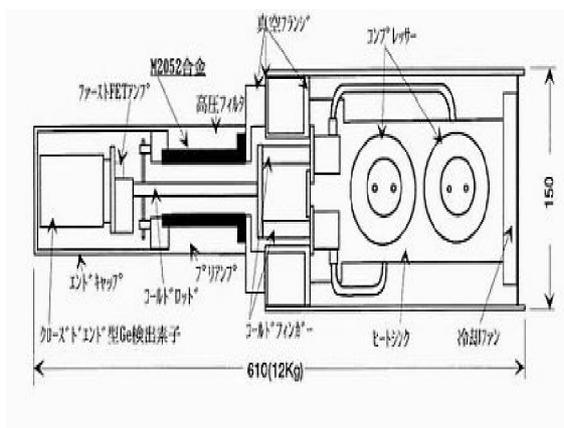


図 45: γ 線検出器に搭載

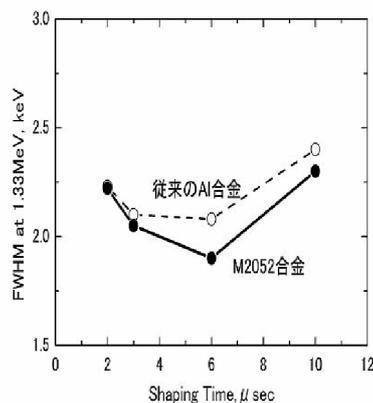


図 46: γ 線検出器の精度向上

この種のスリーブは構造部材としての機能も果たしており、ゴムではこのようなことは不可能に近い例である。

8.2 エッチング法による細密加工部品

この合金は成形加工に長けているからミクロン単位の箔が得られる。したがって、フォト・エッチングに類似した手法によって精緻な加工を施すことができ、この合金ならではの特殊な部位が取得できる。図 47 にエッチングで抜いたある製品例を示す。

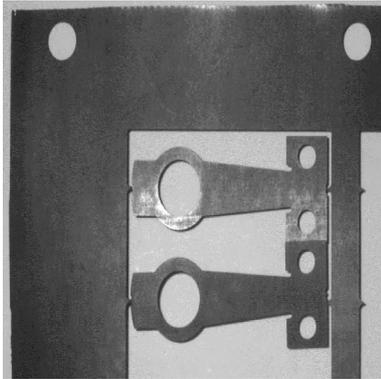


図 47: 0.1 mm厚板のエッチング法による抜き例

この方法を使えば、たとえば、真空環境下で用いる金属箔からなる簾の製作も可能である。図 48 は、CRT に封入されているスクリーンであり、これが真空中で作動するため常に振動しており、時として大きな振動が発生すると数分間も継続するという。この対策に、図にもあるが、揺れやすい簾を上下二本のタングステン線を溶接して留めている。画面が白色になったときにその線(ダンパー線という)が確認され、この線は機能的にはまったくナンセンスであって、できれば使いたくないことから、対策の検討を受けたことがあった。

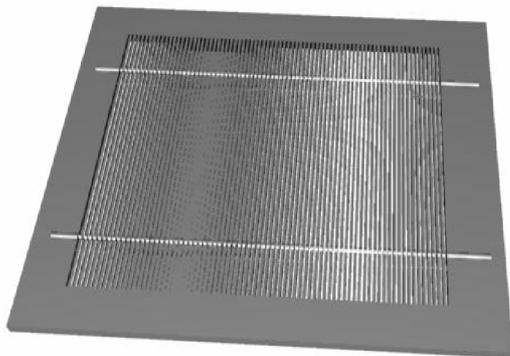


図 48: CRT 中の金属簾状スクリーン

そのスクリーンの寸法は、板の厚さ・溝の間隔・格子の幅のどれも 0.1mm からなる数十本の格子を持つもの

であった。当時はまだ、黒色メッキや、平滑度の厳しい箔の製作、ならびにその熱処理は経験したことがなく、応じきれなかった。今は応諾しようところに来ている。簾タイプの CRT に限らず、シャドーマスクタイプにおいても振動問題があると思われる。

これから推して、薄くて精緻な構造に除振を兼ねたシーリング(パッキングやガスケット)として応用できる考えられる。大半はゴムか銅の薄板で目的をかなえようとしているが、この合金を使った除振を兼ねたシーリングも独特な需要があると考えられる。

8.3 ベアリング関係

ベアリングからの振動は精度向上に深刻な問題をもたらすことが多々ある。その対策として、軸受けのインナー・アウターやスタンドに使用した例がある。図 49 は、玉軸受けのアウターの計測例である。標準の振動と比べ、M2052 合金の 2 例はいずれも高回転であるほど振動を吸収する効果が現れている。

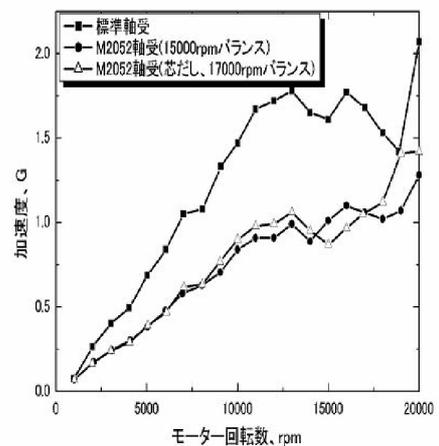


図 49: 軸受けでの使用効果例 2

アウターよりもインナーとして用いるほうが有効である。注意すべき点は、この合金の降伏強度を超えないような設計に留意すべきことである。板厚は、厚いほど振動吸収には有効であるが、厚すぎは低周波吸収には効果的であるとはいえ弾性変位が増すからこれを忌避するには薄いほうが推奨できる。高周波だけを対象とする場合は薄くてすむ。

荷重による弾性的変位はゴムを用いる場合は致命的な問題であるが、強度がそれよりも桁違いに高い制振合金

ではさほど深刻ではないことが多い。

8.4 表面研磨機

表面研削の仕上げ精度を厳しく要求する場合、回転軸のわずかな振れが問題になる。レンズやシリコン・ウェハの研磨はその典型例である。図 50 は、回転体のプレを M2052 合金の薄いリングで解決した例である。同様なことは、図 51 のような、ボーリングバイトのブレ対策に、既存のホルダーと主軸の間に M2052 の薄板のリング (大型ワッシャー) で解決した例もある。薄板が肝心で、厚板になると振動吸収能力は増大するが板そのものの弾性変形量も増加するから、別な影響が発生する。要は、弾性変形の悪影響が及ぼさない範囲の板厚にとどめる必要がある。

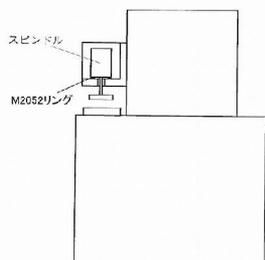


図 50: 表面研磨の精度の改善

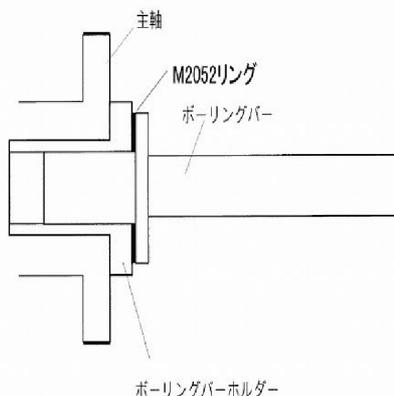


図 51: ボーリング・アームの振動対策

8.5 コンピュータ

コンピュータはますます高速化が競われ、それにともなってミクロンの微小な振動が無視できなくなっている。なかでもハード・ディスクの除振対策は熾烈を極めていいる。ハード・ディスクをケースに取り付ける際、この合金製のワッシャーを併用するだけで画期的な改善が確認され [62]、このワッシャーの使用が強く推奨されている [63]。ディスクの振動は、ディスクのアクセスにおいて雑振動が強いほどヘッドのシークに悪影響を与える。すなわち、ヘッドはシークして目的とするトラックに到達する時間が長引き、加えて、読み違いの確率を高める。図 52 と図 53 はその効果例である。図 52 は、ワッシャーを 2 枚だけ挟み込んだだけで半分の時間で済むことを示し、図 53 では、ワッシャーの効果としていずれもファイルの転送速度が増加している。効果は僅かと考えがちであるがディスクと CPU のさらなる高速化によって重大な差をもたらすと見られる。最近ではディスク回転の高速化にともない、構造が複雑な油圧系機構が台頭してきた。場合によっては M2052 合金のワッシャーで容易に対応できることもありうる。

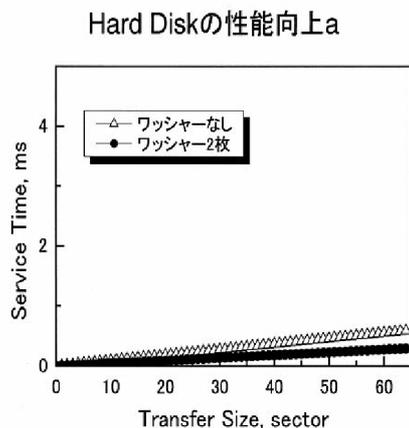


図 52: ハードディスクのシーク時間短縮効果

M2052 の活路はハードディスクにとどまることなく、DVD や CD あるいは電源やファン周り、あるいはケーシングの足にも有効である。

9 自動車

9.1 エンジンへの応用

日産自動車は、図 54 の概略図のように、直噴式エンジンの静粛化の一環にインジェクターの着座音改善策とし

Hard Diskの性能向上b

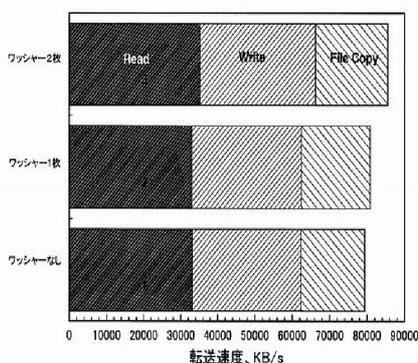


図 53: ハードディスクの転送速度改善

て M2052 製ワッシャーを採用し、すでに高級車（シーマ）に搭載され好評である [64]。図 55 のように、1kHz 近くの耳障りなこもり音が 5dB も低減することが実現したからである [65]。その他のパーツへの応用も検討されている。

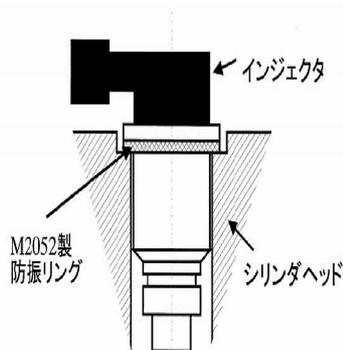


図 54: 直噴式エンジンに使われた制振リング

他の大手カー・メーカーもこの合金の諸性能を検討し、近い日に採用することを示唆している。

自動車業界では防振ゴムが多用されているが、ゴムでは問題のパーツもある。低周波であるほど、かつ、微小振動であるほどゴムの弱点が露呈するから、マウント、トーションバー、サスペンション、ブッシュ、ダンパーなどに一部として利用の余地は考えられなくはない。

10 超高真空機器

超高真空中で使う材料に対する要件の一つに、材料から放出されるガスの問題がある。そのような環境下で使

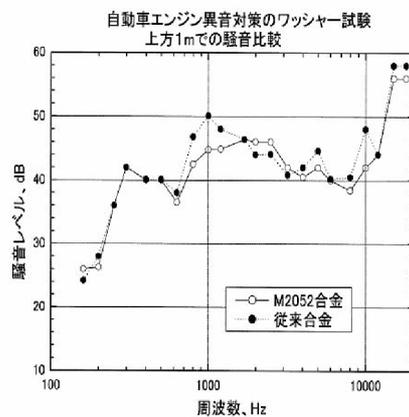


図 55: 自動車における 1kHz 近くの騒音減少

える制振材料の候補は乏しい。TAMA300 プロジェクト（重力波検証用超高真空機器制振部材の研究）に M2052 がひとつの対象合金となり基礎データの取得や可能性が検討され、報告されている [16, 66]。

10.1 フレーム構造での比較

TAMA300 プロジェクトの構造物として M2052 合金を使うには光学素子を吊るすフレームがまず考えられ、図 56 に示したフレームをステンレス鋼と M2052 合金で作成しその効果を検討した。フレームは天板、底板、4本の支柱からなる。フレームを加振台に取り付けて試験した結果を図 57 に示す。明らかな違いは、共振の高さに見られ、M2052 合金の方が共振ピークが低く、制振効果は優れている。

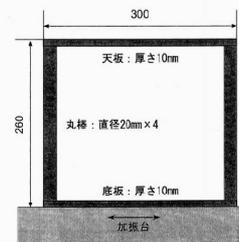


図 56: 懸架装置のフレームに用いた例

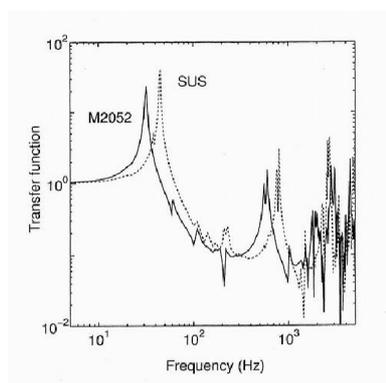


図 57: フレームの材料の違いの制振効果

10.2 超真空中でのガス

真空度の高い環境下では材料の持つ真空特性が重要である。M2052 合金の昇温脱離法による表面からのガス放出を調査した。その結果、18-8 ステンレス鋼に比べ、ガス放出速度は約 10 倍大きい、適当な表面処理やベーキングによって超高真空に対しても十分適合する素材であると判断されている [16]。

10.3 懸架装置のダンピング

TAMA300 プロジェクトでは、各種の振源から渡来する振動を避けるために多数の装置が懸架されている。その中のひとつである、モードマッチング用の望遠鏡の装置に M2052 合金を試用した。その概略図を図 58 に示

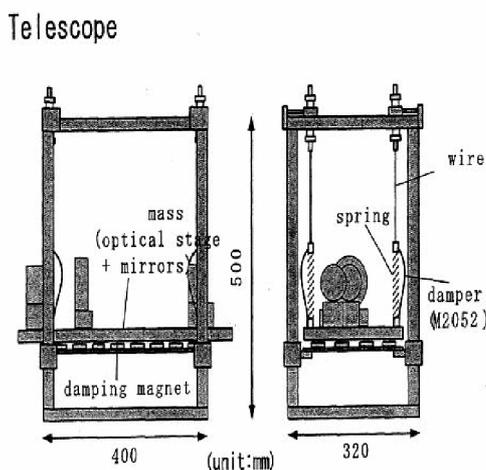


図 58: テレスコープに試用された M2052 合金

付随する鏡、および機械調整機構である。これらの光学素子はすべて、1 枚のアルミ板の上に組み立てられ、そのアルミ板は、それを支持する枠から懸架されている。懸架には、従来はステンレス製のスプリングとタングステン製ワイヤーが用いられていた。今回は、タングステンを M2052 合金で置き換えた試験である。その部分を拡大した図が図 59 である。従来は、ワイヤーの横揺れがあり、それが励起され、振動の低減に長時間を要し観測時に問題であった。新規装着の測定結果を図 60 に示

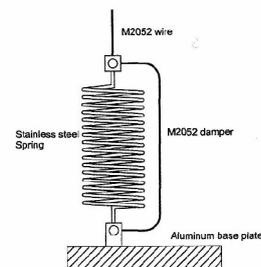


図 59: テレスコープのダンパー部の拡大図

す。タングステンのワイヤーだけ、M2052 合金のワイヤーだけ、ワイヤーとダンパーの両方を M2052 合金にした場合、の 3 例について試験した。図 60 の下図にみられるように、M2052 合金の効果は明白であり、今までに比べ 10 倍以上も速く減衰することが判明した。この方式は実用可能と判断され、TAMA300 に組み込まれ順調に稼動している。また、スプリングのデータを図 61

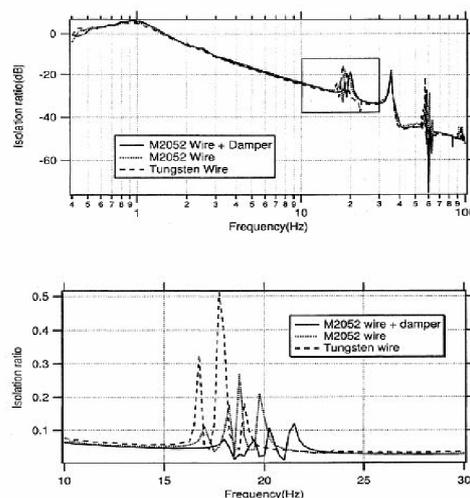


図 60: テレスコープにおける M2052 合金の成果

す。主要な光学素子は、2 枚の軸外し放物面鏡とそれと図 62 に掲載した。図 61 はステンレス製、図 62 は

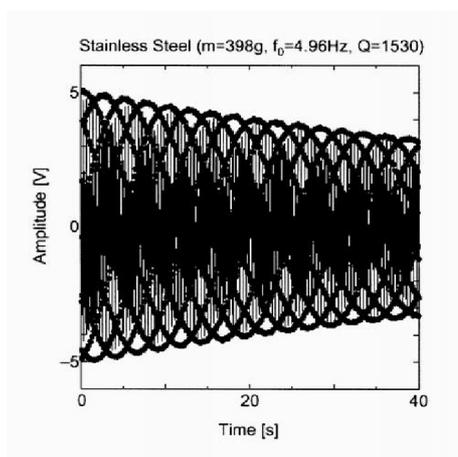


図 61: ステンレス製コイルの減衰

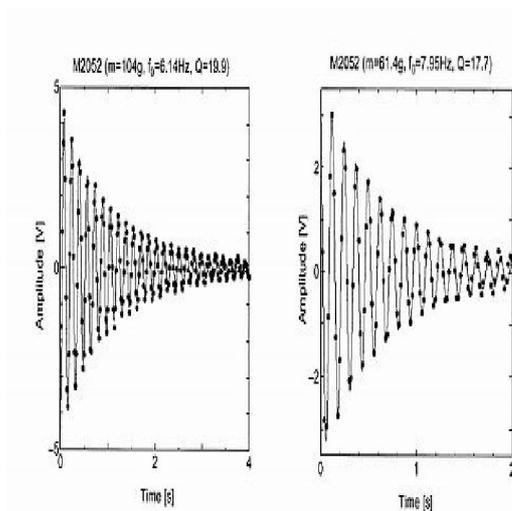


図 62: M2052 製コイルの減衰

M2052 製のコイルばねの制振性能である。コイル径と線径をほぼ等しくした場合の比較であり、制振合金が圧倒的な速さで減衰している。ステンレス鋼の場合は 40 秒経過しても依然として強い振動の残存を呈しているが、M2052 合金は 2 秒程度で停止した。一般的な金属コイルばねはそれ自体にほとんど制振性がないから当然な結果である。制振合金をコイルの形状として使うことによりユニークな応用が可能であるといえる。

11 共通した対策効果

11.1 ワッシャーによるボルトの緩み止め効果

強度の高い合金からなるボルト・ナットは使用中に締結力が減少する、いわゆる「緩み」が懸念される。振動を吸収する合金を用いればその心配は軽減されると予想される。その正否が明らかにされた [67, 68]。その結果を図 63 と表 4 に示す。材質の異なる M10 × 60 のボルトとナット・ワッシャーを組み合わせで締結し、それに衝撃加重を繰り返し加え、所定の位置に貼られたひずみゲージの値から緩みを検出した。

図 63 と表 4 から明らかなように、鉄系制振合金 (Fe-Mn-Cr 系) の効果は絶大であり、S45C だけでは 10kN 以上の締め付けが必要であるが、その制振合金を用いた場合はわずか 4kN で足りることが判明した。M2052 合金の実験ではボルトとナットは S45C 鋼であり、使用したのはわずか 1mm 厚の M2052 製ワッシャー 1 枚だけの効果であり、それにもかかわらず締め付け力は 6kN で十分という結果が得られた。試験に使った制振合金の体積で比較すれば、1mm の M2052 合金の成果は鉄系を凌駕していることは確かである。1mm を 2 枚、あるいはそれ以上の厚板のワッシャーであれば更なる効果は間違いないものと推察できる。ボルト・ナットのすべてに M2052 合金を採用すれば最も期待できるが、強度が軟鋼程度であるから高強度で締め付ける用途には断面積で補う必要があり、それが許されない用途には不向きである。緩み止めのみを意図するのであれば 1 枚の M2052 ワッシャーで十分期待に応えられる。

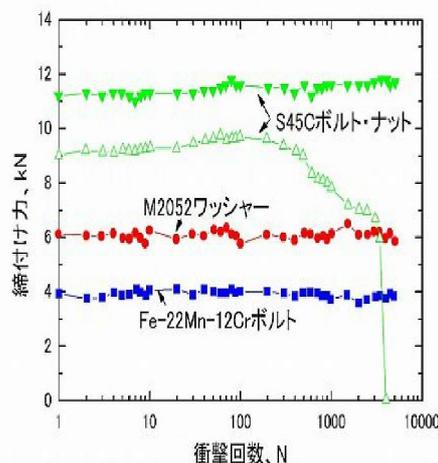


図 63: ボルト・ナットに及ぼす制振合金の効果

表 4: 各種組み合わせによる緩み止め効果

ボルト材	ナット材	S45C 座金	M2052 座金	限界応力 (kN)
S45C	S45C	—	—	10
S45C	Fe-Mn-Cr	—	—	9
Fe-Mn-Cr	S45C	—	—	4
Fe-Mn-Cr	Fe-Mn-Cr	—	—	4
S45C	S45C	使用	—	8
S45C	S45C	—	使用	6

ボルト・ナットの緩み止め効果が高いことは、保守の簡素化や安全性の確保に直結することであり重要な事例である。M2052 合金であればたった 1 枚の 1mm のワッシャーだけでそれが適えられるのである。

11.2 U 字プレート—低周波を吸収

ちょっとした振動対策にゴムが安易に使われる傾向がある。成功する場合もあるが、条件が食い違くと「ゴムの踊り」が生じ、すさまじい共振によって、パーツを破壊することがある。図 64 は、強力な低周波振動の振動源からなるボックスを抱えた装置で、その振動を周辺の各機材・部材に伝達させない対策に苦慮していた例を見てみよう。対策をまったく講じない場合、図 65 の上のグラフのように加速度は 3G を中心にわずかに右上がり呈し、全般に低く抑えられ問題は無いように見えた。しかし、70Hz,130Hz,200Hz と小刻みに小さなピークが現れ、この振動が他の振動と作用して問題を起こすという。そこで主要箇所にはゴムを設置して運転していたが、同図の中央のデータにあるように、25Hz に 18G という強い共振が発生し、この共振波がさまざまな問題を誘発した。この対策として M2052 のバネ定数を下げる試みを実施した。図 64 の黒色の箇所にゴムを用いていたが、そこにこの合金の U 字型に曲げた板をあてがった試験を施した。結果は図 65 の下のデータであり、共振加速度はゴムの場合のほぼ半分にまで低下し、それ以外の高周波成分はほとんどなくなっている。この試験は手持ちの板をただ曲げただけの結果に過ぎないが、板厚・板幅・曲率半径・長さなどを変えることで最適な条件に合致すれば画期的な成果が確実に生まれると推察できる。

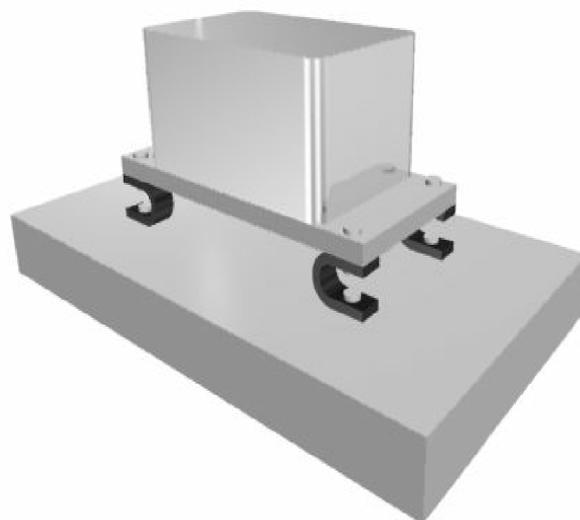


図 64: U 字プレートでゴムを代替した例

12 まとめ

高分子、なかでも、ゴムを振動対策に慣れ親しんでいる場合、制振合金を念頭におくことは普通はない。ゴムに比べ制振性能は比ではなく、その上、コストが高く、使用法が込み入っているからである。しかし、M2052 合金は非常識な合金であって、表 5 にあるように、製造工程と原料選択が最適な場合には対数減衰率で 0.73 が得られた。損失係数に換算すればこれは 0.23 に相当する。これはゴム並みであることが理解されよう。準量産体制下での今日この頃で、平均して 0.11 の損失係数が提供されている。ゴムの最大性能には届かないまでも、ゴムに近い性能といっても必ずしも過言ではない。加えて、表 6 にあるように、強度がゴムよりも桁違いに高いから、ゴムの短所をこの合金で補うこともできる。

ゴムは振動対策において次の点が問題になる場合が

表 6: 高分子材料と金属の強度の違い

材料	比重	引張強さ、MPa	引張り弾性率、MPa
天然ゴム	0.92~1.04	24.2~31.7	3.3~5.86
ブチルゴム	0.92	>13.8	0.34~3.45
ポリウレタン	0.56~0.64	17.2~20.1	758.4~1103.2
ポリ塩化ビニル (RIGID)	1.20~1.58	41.4~55.2	2413.2~6894.8
M2052 合金	7.25	400	~50,000
軟鋼	7.87	400	~200,000

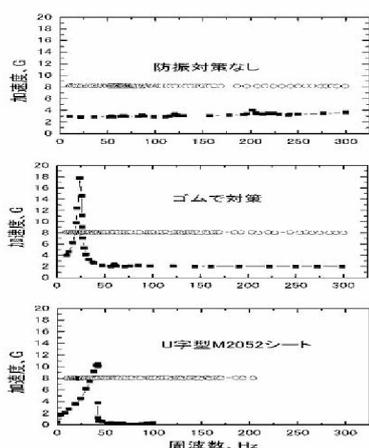


図 65: ギョを U 字形の M2052 で代替した効果

ある。

1. 周波数が低いほど吸収されにくくなる
2. 振幅が小さいほど吸収されにくくなる
3. 高性能が現出する温度範囲は比較的狭い
4. 強度が金属に比べて桁違いに小さい
5. 環境に合致したギョを選択する必要がある
6. 「へたり」、「おどり」、品質劣化の危惧が付きまとう

M2052 合金は損失係数で劣るとはいえ、ギョのその問題点をことごとくクリアできる。

1. 周波数は 0.01Hz から超音波域の MHz という広域にわたって振動を吸収できる
2. 振幅は小は nm から、大は、形状を工夫しさえすれば、mm~cm の大振幅変位を吸収可能と考えられる

表 5: ギョの損失係数と M2052 合金

ギョの種類	損失係数
天然ギョ	0.05~0.15
クロロプレン	0.15~0.3
ニトリルギョ	0.25~0.4
SBR	0.15~0.3
ブチルギョ	0.25~0.4
(M2052 合金)	(0.23) 注 ¹

注¹ 最高値の場合。普通は 0.06 から 0.16。

3. 温度上限の 200℃から、下限はヘリウム液化温度までという広域にわたって振動吸収能がある
4. 弾性率の比は、ブチルギョよりも M2052 合金は 12500 倍も高く、明らかに機能は構造部材である
5. 裸の表面では弱酸に敏感であるが、表面被覆によって耐食性は改善可能であり、ニッケル・金・銅・黒染・FA・亜鉛・各種塗装処理が可能である
6. 「へたり」、「おどり」、品質劣化は可能性が薄い

この合金は、従来の制振合金にみられない特徴を備え、かつ、未だに制振合金関係では報じられたことがない高性能が取り出せ、鋳物あるいは成形加工の工程を問うことなく使え、溶接などによる接合製品も可能である。したがって、対象物のサイズと形状を選ばず、選択肢は多彩であり、制振用構造部材に適った合金として採用できる。

この特色を活用することによって、現状の課題の解決はもちろん、時には新しい設計を助成でき、既存産業界の各分野、あるいは、新分野に何らかの貢献をするものと考えられる。

参考文献

- [1] 長松昭男:工業材料,45(1997),No.12,18
- [2] 川原浩司、佐久間信夫、西崎泰:日本金属学会誌、57(1993),1089
- [3] 川原浩司、佐久間信夫、西崎泰:日本金属学会誌、57(1993),1097
- [4] 川原浩司:特許第 2849698 号、平成 11 年(1999)
- [5] 川原浩司、殷福星:真空、42(1999),11
- [6] 川原浩司:金属プレス、32(2001),17
- [7] 川原浩司、殷福星:日本学術振興会未来開拓学術研究高減衰能材料研究プロジェクト,2000 年,9 月,37
- [8] 川原浩司、殷福星:制振工学研究会会報,13(2001),87
- [9] 杉本孝一:鉄と鋼、60(1974),2203
- [10] 三浦憲司:制振材料、(田中良平)、日本規格協会、(1992),33
- [11] J.A.Hedley: Metal Sci.J.,2(1968),129
- [12] F.Yin,Y.Ohsawa,A.Satoh and K.Kawahara: Materials Trans. JIM,39(1998),841
- [13] 渡部健司、殷福星、川原浩司:未発表
- [14] 殷福星、高森晋、大沢嘉昭、佐藤彰、川原浩司:日本金属学会誌、65(2001)、101
- [15] T.Tanji,S.Moriwaki,N.Mio,T.Tomaru, T.Suzuki,T.Shintomi :J.Alloys and Compounds, 355(2003)207-210
- [16] 三尾典克:高性能制振材料による極限防振技術の開発、平成 11・12 年度科学研究費補助金基盤研究(B)(2) 研究成果報告書、平成 13 年 11 月、東京大学大学院新領域創成科学研究科 および、三尾典克 <ftp://gogyo.t.u.-tokyo.ac.jp/pub/mio/m2052-report.pdf>
- [17] F.Yin,S.Takamori,Y.Ohsawa,A.Satoh and K.Kawahara:Proc.on Noise Cont. Eng. p995,2001,Aug.,Netherland
- [18] 福原幹夫、殷福星、川原浩司 : physica status solidi(a) に掲載決定
- [19] A.L.Klosterman:On the experimental determination and use of modal representation of dynamic characteristics, Ph.D.dissertation,U.of Cincinnati,1971.
- [20] D.Brown et al.:Parameter estimation techniques for modal analysis,SAE,1979
- [21] 防振ゴム研究会編、新版防振ゴム、現代工学社、平成 10 年
- [22] 高橋康英編、実用振動解析入門、日刊工業新聞社、昭和 59 年
- [23] 持田悦宏 : A& V ヴィレッジ、33 号 (1998 年)、72
- [24] 神崎一雄、太田一穂、村瀬孝矢、吉田伊織、村井裕弥、長谷川教通、塩原正明、高橋和正、井上良治、江川三郎、島田貴光、麻倉怜士、飯田明、河村正行、入江順一郎 : A&V ヴィレッジ、41 号 (2000 年)、46
- [25] 飯田明 : A& V ヴィレッジ、42 号 (2000 年)、155
- [26] 犬山志郎 : A& V ヴィレッジ、43 号 (2000 年)、48
- [27] 持田悦宏、小沢隆久、鈴木浩一、今井明、万木雅一、大連和雄:A& V ヴィレッジ、43 号 (2000 年)、50
- [28] 西野正和 : A& V ヴィレッジ、44 号 (2000 年)、140
- [29] 村井裕弥 : A& V ヴィレッジ、44 号 (2000 年)、144
- [30] 神崎一雄 : A& V ヴィレッジ、45 号 (2000 年)、162
- [31] 万木雅一:A& V ヴィレッジ、49 号 (2001 年)、68
- [32] 松浦和孝:A& V ヴィレッジ、49 号 (2001 年)、64
- [33] 万木雅一 : A& V ヴィレッジ、46 号 (2000 年)、166
- [34] 太田一穂:A& V ヴィレッジ、42 号 (2000 年)、106
- [35] ㈱セイシン、資料集
- [36] 真島彰徳 : A& V ヴィレッジ、33 号 (1998 年)、115

- [37] 江川三郎：A&V ヴィレッジ、34号（1998年）、116
- [38] 江川三郎：A&V ヴィレッジ、38号（1999年）、120
- [39] 飯田明:A&V ヴィレッジ、49号（2001年）、142
- [40] 高橋和正：A&V ヴィレッジ、38号（1999年）、124
- [41] 高橋和正：A&V ヴィレッジ、41号（2000年）、126
- [42] 江川三郎：A&V ヴィレッジ、39号（1999年）、130
- [43] 江川三郎：A&V ヴィレッジ、44号（2000年）、106
- [44] 江川三郎：A&V ヴィレッジ、46号（2000年）、122
- [45] 高橋和正：A&V ヴィレッジ、44号（2000年）、150
- [46] 江川三郎：A&V ヴィレッジ、55号（2002年）、162
- [47] 江川三郎:Audio Accessory,27(2002),383
- [48] 相島彰徳：A&V ヴィレッジ、61号（2003年）、181
- [49] 高橋和正:ラジオ技術,56(2002),138
- [50] 柴崎功：A&V ヴィレッジ、44号（2000年）、94
- [51] 柴崎功:無線と実験、2000年、5月号、165
- [52] 江川三郎：A&V ヴィレッジ、35号（1999年）、110
- [53] 江川三郎：AudioAccessory, 28(2003)259
- [54] 日刊工業新聞、1999年9月7日
- [55] 神谷昌秀、鈴木裕、藤田康宏、伊藤哲史、丸山博康:精密工学会 2001年度春季講演大会講演論文集、2001、3月、11頁
- [56] 北村製作所、技術資料
- [57] 森精機、技術資料
- [58] 東芝機械、技術資料
- [59] 中山健司、浜嘉夫、中村竜也浦野義匡、吉田喜一:機械学会北陸支部研究会,2001年,4月および、吉田喜一:金属、アグネ出版、2002年3月
- [60] 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）
- [61] Takahashi Koji (Chiba, JP); Morita Mitsukazu (Chiba, JP); Saito Masaki (Chiba, JP)、US6169775、2001年
- [62] DOS/V誌(Power Report)、2000年、10月号、163
- [63] 松田勇治:日経 WinPC,7(2001),No.7,206
- [64] 星島浩:モータファン別冊、276号、(2001)
- [65] 日産自動車から提供
- [66] N.Mio,T.Tanji,S.Moriwaki:Class.Quantum Grav.,19(2002)1647-1654
- [67] 古賀、磯野宏秋：機会学会論文集、46(1980),196
- [68] 小泉賢祐、磯野宏秋、井形直弘：「高減衰能材料の開発と応用」シンポジウム、2003年、理科大野田校舎