

M2052 合金の制振機構

(有)BB マテリア 川原浩司 *

独立行政法人 物質・材料研究機構 殷福星 †

1 M2052 合金にある銅の富化したゾーンの分散

M2052 合金は樹枝状晶が著しく発達する合金である。通常、このような組織は均質化処理が望まれる。溶体化焼鈍によってそれを消失できるが、この合金では制振性能に対する均質化処理の影響はほとんどない。铸造状態とそれを 900 °C で 24 時間焼鈍したそれぞれの銅元素の EPMA による分布解析を図 1 と図 2 に示す [1]。

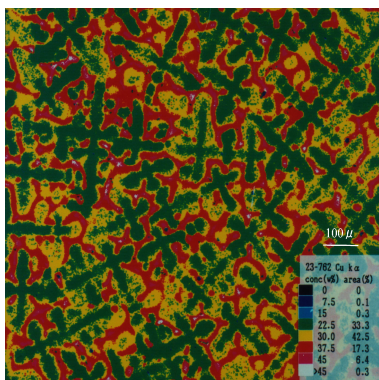


図 1: EPMA による铸造状態の銅分布

铸造状態においては、樹枝状晶の幹中にはマンガンが最も高く、銅濃度は 22.5% にとどまっている。残液に当たる樹枝間の部分では銅が一層高濃度を示している。900 °C 24 時間の焼鈍後には、図 2 にあるように、樹枝状晶は消失し、銅が 22.5% からなる領域が大部分を占めている。以前の樹枝状晶の境界に高濃度銅の凝集が点在しているが、体積率は小さい。このように、組織に大きな差があるにもかかわらず

* 独立行政法人 物質・材料研究機構 客員研究員:
(株)セイシン (03-5282-1551) 技術担当取締役
† 材料研究所 主任研究員

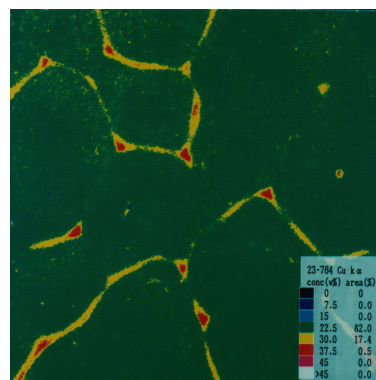


図 2: EPMA による焼鈍後の銅分布

制振性には影響が少ない。これは、光学組織の大きさよりも小さいマイクロなサイズの問題が関係していることを示唆している。

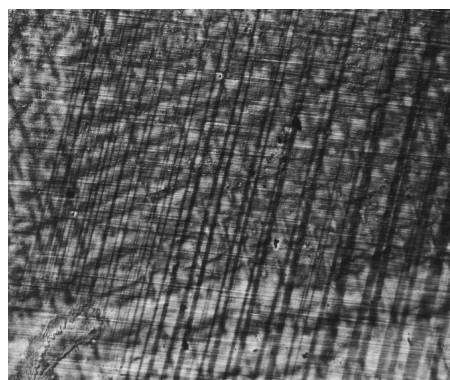


図 3: 铸造状態の無付加で見られる双晶

図 3 は、単結晶作成用に準備された巨大結晶粒からなる铸造材の引張り試験片の光学顕微鏡組織である。無荷重の状態であるが、すでに大きな双晶が平行に並んでいる。図 4 は、その試験片を弾性限内で

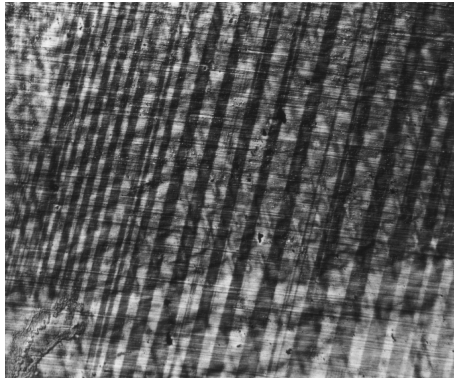


図 4: 樹枝状晶に無関係に成長する双晶

引張り変形させた場合の同一視野内での双晶変化例である。そこには双晶の拡幅が見られる。外力の付加によって双晶は幅を広げ、無付加に戻すことによって双晶は図 3 の状態に戻る。注目すべき点は、双晶の運動は背景に見えている D で指した樹枝状晶とは無関係に現れることである。双晶は、長距離応力場の生成によって形成された気配を読み取れる。

原子プローブの分析結果は興味深い事実を呈している [2]。線材を 100nm の極細線に加工し、それを更に、 $2 \times 9 \times 80\text{nm}$ の針状試験片に仕上げ、Ga 原子プローブをその線の先端に照射し各元素の分布を立体的に描写したものである。その結果を図 5 に示す。

各点が各原子からの信号である。銅の富化した場所は数箇所ある。そこにはマンガンは枯渇している。鉄はマンガンが多い領域に含有の傾向があり、ニッケルは全面的に均質に分布していると見られる。

銅のピークの中で 2 つは 40% と高く、マンガンは 60% 程度にまで減少している。このゾーンの大きさは約 10nm である。マンガんに富み、銅が少ない領域では、銅含有量は 20% を下回り、10% 程度の場所もある。このようなマンガンと銅の濃度差は試料が徐冷される際に 2 相分離が生じたか、その種のクラスターが存在する証と考えられる。

プローブ解析した領域の電子顕微鏡組織に注目したい。図 6 は [001] 方向からの透過像であり、FCC 単相である。しかし、その視野内には 10nm 位の間隔で多数のコンシラストが観察されている。これは単相でありながら歪みを起こしている原因が存在していると考えられる。図 7 は、同じ部分を拡大した格子像であり、番号のある 3 箇所をさらに拡大した格子像を下段に示すが、これは結晶構造は同一であり局所的な歪みによる場によるコントラストを明ら

かにしたものである。加えて、銅が富化した 10nm 位の球状のゾーンが均質に分散していることが明らかである。

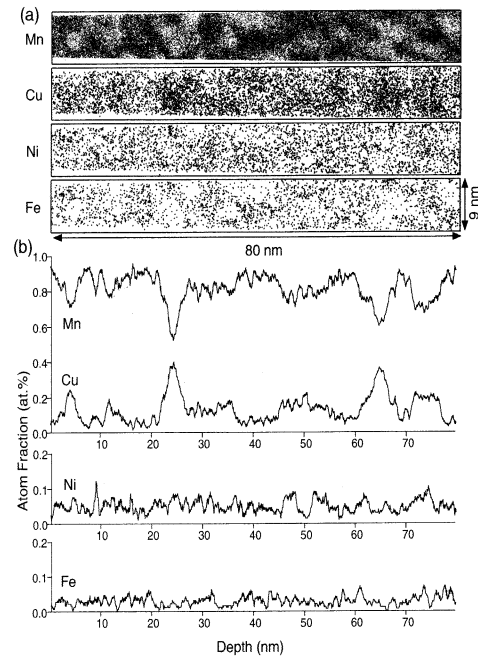


図 5: 原子プローブによる元素分布

Mn-Cu 系合金においては以前から 2 相分離、または、銅のクラスターの存在が報告されており [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]、このプローブの結果と符合している。

2 クラスターの変態への効果

高分子材料を除き、結晶格子からなる固体に応力が付加された場合、結晶は弾性領域内であれば格子が一時的に変形するだけで何の変化も生じないと解釈される。しかし、実際には、ある一定値以上の応力を超えると局所的には他の全体領域とは異なる変化が発生することがある。剛体であり、連続的な立場からは看過されがちな変化をできないのである。

結晶体には不均質要素が多く存在する。粒界、表面、小傾角界面、双晶界面はもとより、析出物、溶質原子の集合体、不純物、介在物、原子空孔などがあれば、それらの境界も対象となる。不均質要素で問題にすべきことは、その属性、例えば、総量、分

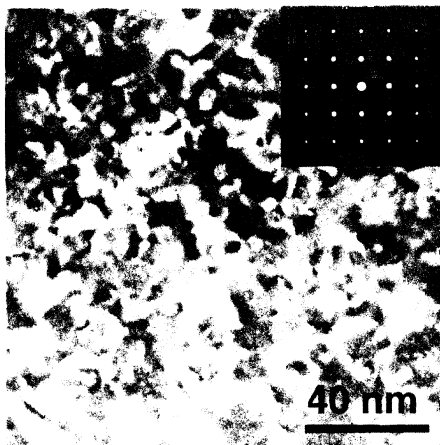


図 6: M2052 合金の単一結晶粒内での TEM

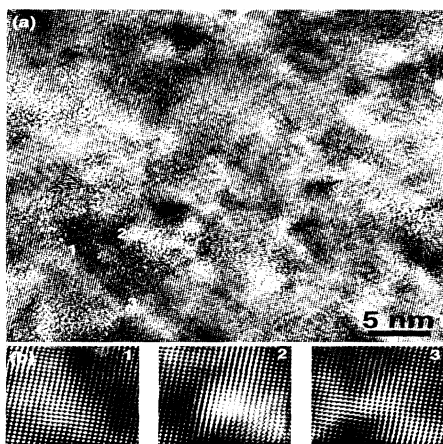


図 7: M2052 合金の単一結晶粒内での格子像

布状態、物性、も考慮すべきであるが、その界面に存在する歪によって起こっている場が大きな問題になる。

外部から応力がかかった場合、通常であれば弾性変形を被るだけであるが、歪を有する界面が局部的に存在すれば外からの歪と相互作用し新たな効果が発生する。前節で述べたように、この合金には単相であっても歪み場が高密度で分布していることが確認され、それは銅ならびにマンガンの富化したゾーンの存在に関連していることが判明した。この歪み場は、溶媒と溶質の格子常数のミスフィットの大きさが最も重要な要因とみられる。

図 8 は、母相と結晶構造が等しい 4 原子クラスターが存在している場合のミスフィットによる歪み場の様子を示す。このような歪み場は個々のクラスターに付随しているから、外からの応力によってその歪

み場は刺激され、コオパレイティブに相互作用し、マルテンサイト変態を誘起することが考えられる。特に、Mn-Cu 系の母相とマルテンサイト相の格子常数の差は小さく []、それ以上に M2052 合金のそれは小さいから []、マルテンサイト変態、すなわち双晶は非常に発生しやすい状況にあるといえる。

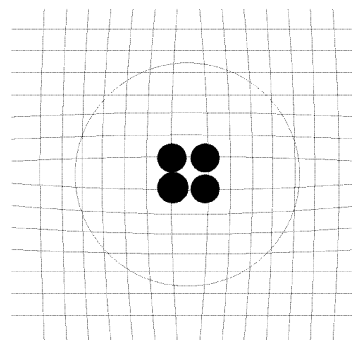


図 8: クラスターと歪み場

Mn-Cu 系の状態図に基づき、冷却時の変態の挙動を考察する。図 9 は Mn-Cu 系と Mn-Cu-Ni-Fe 系系

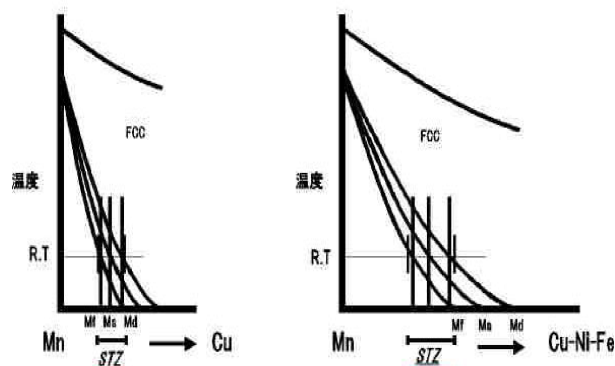


図 9: Mn-Cu 系の変態点のシフト

である。銅が 20% であれば室温で変態が起こる。しかし、銅の組成は平均値が 20% ということであって、個々の箇所においては変態の遅延と早期化がある。左の 2 元系とは異なり、この合金のような多元系においては右のような変態点の組成に対するシフトは拡張すると見てよい。すなわち、変態を起こしやすい過敏な組成域 (stress-induced twinning zones, STZ) に嗟峨るとかんがえられる。

原子プローブによれば銅に富化した球状のゾーンの銅組成は中心が 30 ~ 40% に達し、外周では 20% 以下で、場所によっては 10% 未満であった。このゾー

ンに注目すれば、冷却過程において変態は一挙に生ずるのではなく、ゾーンの外周部を占める一種の殻(シェル)から始まると見られる。

銅が富化した一つのゾーンを詳細に見てみよう。それを図 10 に示す。室温付近でマルテンサイト変態を生成する領域は黒色の殻を構成していると見られる。中心には銅が富んでいるため双晶は起こりにくい領域である。外周ほど ST ゾーン域が増す。

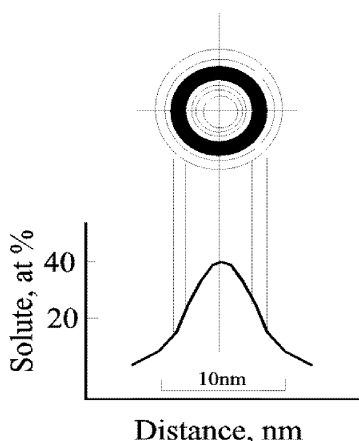


図 10: 銅富化ゾーンと変態の可能性

M2052 合金のように、結晶系が同一で互いに化合物を生成しなければ、図 9 の右図のように殻の大きさは拡張することが予想でき、外力に対して過敏なゾーンは一層拡張していると考えられる。変態は温度以外にも、Md 点として知られているように、応力によっても発生するから、予想以上に ST ゾーンは大きいと見られる。この機構が M2052 合金の高度な制振性を示すと見られる。

3 デバイスとして機能する物体

振動を扱う場合、材料自体をデバイスとして機能する側面を意識的に考慮することはない。従って、振動の主要な要因は質量と剛性に着目するから、薄く・軽い箔の貼り付き効果を理解するには容易ではない。しかし、M2052 合金のように、マルテンサイト変態がきわめて容易に誘起されやすいゾーンが高密度で均質に分布している状況にある物体は、外部からの振動は内部において変態という仕事に転換され振動を吸収する、いわゆる、デバイスとしての機能が働くという重要な作用が関係しているとみなせる。ST ゾーンの感度が高いほど質量の項は不要に

なるから、条件次第では箔や細線の設置が振動低減に効果をもたらす。

4 制振機構から見たパーツの形状について

4.1 制振機構

この合金の優れた振動吸収性能は、温度や外力によってもたらされる結晶格子の変態と関係するが、変態によって現れる格子がそれ以前の格子と構造・大きさにほとんど差異がないところに鍵がある。この合金の変態生成物は双晶と呼ばれている、方向性のある板の形状をしており、構造も大きさもあまり差がない生成物である。光学顕微鏡での観察は難しく、特殊な付属装置をつけなければ確認できないほど周りの母相と差がない。この双晶は今までの合金には存在しなかったほど容易に生起し双晶界面の拡張・成長の運動も発生する。温度の降下、ならびに弾性歪みの授受によって双晶が発生し、しかも、弾性限界内の応力であれば双晶の発生と消失は可逆的である。すなわち、振動などの外力はそれによる双晶の発生・消失の際にエネルギーを消費し振動が抑制されるという機構が考えられる。

このような運動が容易な双晶は、不純物・残留歪み・結晶粒径の影響を強く受ける。高純度原料を用い、コンタミを防いだ製法に従い、大きな結晶粒径からなる工程にのっとり、十分に焼鈍した条件が望まして。しかし、コストの観点から妥協は避けられないのが現状である。

4.2 周波数・振幅などとパーツの形状の関係

振動は常に周波数と振幅と一緒に考慮しなければならない緊密な関係を維持している。普段の振動現象は、周波数と振幅の積がほぼ一定幅内に収まっている。すなわち、低周波であれば高振幅、高周波であれば低振幅で釣り合いが取れた場合が多い。高周波であり、しかも高振幅というケースはエネルギーの観点からまれな事態である。

従って、高周波・低振幅の場合では、この合金に接触してさえすれば振動を低減する機会があり、部材の間に挿入するか、貼り付けるか、下に敷くかすれば効果が得られ、薄板や箔で十分な成果が得られ

ている。しかし、高振幅に対しては工夫が要求される。高振幅の場合には、その変位によって塑性変形を起こす可能性が問題となる。塑性変形によって結晶格子は大きく歪み、歪み場の分散状態が発生し、そのため双晶の発生・運動に支障をきたし、振動吸収性能は劣化するからである。塑性変形を回避するには振動伝達方向の断面積を大きくするか、形状などの工夫を施す必要がある。厚さを増すことは重量増となり得策ではないから、部位の形状を、ねじり・曲げなどに転換しやすいうようにすればよい。例えば、コイルバネ状にする、板や棒であればねじれるようにする、パイプ状にしてたわみを使う、のようにいろいろと考えられる。コイル状の使い方は、その形からバネとしての機能を連想するが、振動を効率よく吸収させるための形状であって、バネ常数を低くする目的ではない。幸いなことに、コイルバネとしても使え、その場合にはそのコイルをパスする高周波成分は著しく吸収され、低周波成分の吸収も伴い、バネ常数の低い、振動減衰率の高いデバイスとなり、サージングのないコイルバネとしても働く [16]。

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 [17]。これは弾性限界内での曲げ変形させることによって 25 Hz 付近の振動が著しく低減した例である。

参考文献

- [1] 川原浩司:未発表
- [2] Y.Q.Wu,F.X.Yin,K.Hono
:Scripta Materialia,2002
- [3] J.A.Hedley:Metall. Sci.,2(1968),129
- [4] 杉本孝一, 水谷啓嗣:日本金属学会誌,39(1975),503
- [5] E.P.Butler,P.M.Kelly:Trans.Metall. Soc.AIME,242(1968),2099
- [6] J.M.Vitek,H.Warlimont
:Metall. Sci.,(1976),7
- [7] Ye.Z.Vintaykin,D.F.Litvin,V.A.Udovenko
:Phys.metall.metallov.,37(1974),92
- [8] E.P.Butler,P.M.Kelly
:Trans.Metall.Soc.AIME,242(1968),2107
- [9] D.Birchon,D.E.Bromley,D.Healey
:Metall. Sci.,2(1968),41
- [10] J.H.Smith,E.R.Vance:
J.Appl.Phys.:40(1969),4853
- [11] A.E.Schwaneke, J.W.Jensen
:J.Appl.Phys.,33(1962),1350
- [12] Ye.Vintaikin,V.B.Dmitriyev,V.A.Udovenko
:Phys.metall.metallov.,44(1977),107
- [13] Ye.Z.Vintaikin,V.A.Udovenko,D.F.Litvin,
V.G.Serebrnyakov
:Phys.metall.metallov,49(1980),182
- [14] S.Spooner,H.R.Child,F.H.Hsu,E.R.Vance,
J.H.Smith:phys.stat.sol,a63(1981),31
- [15] O.Nittono,T.Satoh,Y.Koyama
:Trans.J.Inst.Metals,22(1981),225
- [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] 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