

技術資料

銅めっき鋼板を用いたFe/Cu積層材の諸特性

田頭 聡* 甲谷 昇一** 諫山 知明***

Characteristics of Steel and Copper Laminates Made with Copper Plated Steel Sheet

Satoshi Tagashira, Syouichi Koutani, Tomoaki Isayama

Synopsis:

The unique properties of steel and copper laminates, created in copper plating steel, are investigated. The Laminates are found to exhibit extremely high charpy impact value in the vertical direction to lamination planes. In addition, this laminates showed very low ductile-brittle transition temperature, and insensitivity of notch sharpness of the specimen. Further, increasing the volume fraction of Cu, It exhibit good electrical conductivity in the parallel direction to lamination planes. As a result, steel and copper laminates shows excellent balance of strength and electric conductivity comparable to beryllium copper.

1. 緒言

当社表面処理製品の中で、電気銅めっき鋼板である月星カップタイト、カップソフトンは、幅400mm以上のコイル材の銅めっき鋼板としては国内では唯一、世界的にも希少な製品である。カップタイトの用途は、銅の特徴である導電性、熱伝導性、意匠性を利用したものとして、電気接点材、食器などがある。また、銅めっき層の自己ろう付性を利用した用途として二重巻パイプ（自動車ブレーキパイプ、給油パイプ等）、メタル軸受の銅合金焼結用基盤等がある。

本報で紹介する鋼板と銅の積層材（以下、Fe/Cu積層材）は、この銅めっき鋼板を素材として実験的に試作した金属系複合材料である。その作製方法は、銅めっき鋼板を積重ね、ろう付法または拡散接合法によって銅めっき層同士を融着または接着させるというものである。シンプルな工程で容易に作製できる積層構造材であるが、その性質は非常に特徴的なものを有している。代表的なものは、極めて高い衝撃吸収エネルギーと優れた強度-導電性バランスである。ここでは、Fe/Cu積層材の特徴的な幾つかの性質について述べる。

2. 実験方法

2.1 供試材

実験に使用した銅めっき鋼板は、JIS規格のS55C(mass%で0.55%C-0.2%Si-0.7%Mn)およびSCM415(mass%で0.15%C-0.2%Si-0.7%Mn-1.0%Cr-0.2%Mo)の実機製造した冷延板に、電気銅めっき設備で片面あたり10 μ m厚の銅めっきを両面に施しためっき鋼板である。これらの銅めっき鋼板は、めっき層を含めた板厚がそれぞれ0.27mm、1.0mmである。

2.2 積層化方法

表1に、Fe/Cu積層材を作製するために使用した素材と接合方法を示す。銅めっき鋼板を任意の形状に裁断し、これを重ね合せて接合することにより、Fe/Cu積層材を作製した。接合方法としてはろう付法と拡散接合法を用いた。以後、積層材の種類は表1の表記記号で示す。

ろう付法は、積重ねた銅めっき鋼板に、0.004MPaまたは0.2MPaの面圧に相当する荷重を負荷させながら、Arガス雰囲気中または真空中において1150 $^{\circ}$ Cで30min

*技術研究所 鋼材研究部 鋼材第二研究チーム チームリーダー

**技術研究所 鋼材研究部 鋼材第二研究チーム

***技術研究所 鋼材研究部 部長

表1 実験に使用したFe/Cu積層材の明細

Table 1 Specifications of Fe/Cu laminated plates used

表記	銅めっき鋼板			挿入した銅箔厚さ	接合条件		
	鋼種	めっき厚	板厚		接合方法	温度・時間	接合面圧
55B	S55C	10 μm	0.27mm	—	ろう付	1150℃-30min	0.004MPa
15B	SCM415	10 μm	1.0mm	—	ろう付	1150℃-30min	0.2MPa
15D	SCM415	10 μm	1.0mm	—	拡散接合	900℃-2h	2MPa
55D-20	S55C	10 μm	0.27mm	—	拡散接合	900℃-2h	2MPa
55D-100	S55C	10 μm	0.27mm	80 μm	拡散接合	900℃-2h	2MPa
55D-270	S55C	10 μm	0.27mm	250 μm	拡散接合	900℃-2h	2MPa

の加熱を行なった。

拡散接合法は、積重ねた銅めっき鋼板に面圧2MPaに相当する荷重を負荷させながら、真空中において900℃で120minの加熱を行なった。均一な面圧を負荷するために、高温強度の高い厚さ10mmの黒鉛板で供試材の上下を挟んで荷重負荷を行った。また、一部は銅めっき鋼板の間に任意の厚さの純銅箔を挟んで拡散接合を行うことにより、積層材に占めるCu層の体積比を変えた積層材を作製した。

以上のように、ろう付法または拡散接合法で作製したFe/Cu積層材の層数は、約10mm厚のプレートの場合、55Bや55D-20で約40層、15Bや15Dで約10層である。

2.3 熱処理方法

銅めっき鋼板の芯材であるS55CとSCM415は、焼入焼戻しやオーステンパーのような熱処理を施して強化することが可能である。これらの鋼種の標準的なオーステナイト化温度は800～900℃程度であるから、Fe/Cu積層材を熱処理してもCu層は溶融しないので、積層構造が保持されることが期待される。そこで、作製したFe/Cu積層材に鋼材と同様の熱処理を施した。

前項の方法で作製した積層材は、ワイヤー放電加工で各種試験片を採取した後に、S55Cは810℃で20min加熱しオーステナイト化し、直ちに310℃に冷却して30min保持するオーステンパー処理を施して、芯材鋼板の硬さを約500HVに調質した。SCM415は850℃で20min加熱して油焼入れし、400℃で30minの焼戻しを行って芯材鋼板の硬さを約300HVに調質した。以上の熱処理において、均熱保持には全てソルトバス炉を用いた。

2.4 熱処理後の硬さ評価

積層材の熱処理後の硬さを評価するために、次に示す(1)式により、相当硬さを算出した。ここでは、積層材の断面におけるFe層とCu層のビッカース硬さを個別

に測定し、(1)式に代入した。なお、熱処理によってCu層の硬さは変化しないので、簡便のため熱処理後のCuめっき層の硬さは熱処理前と同じ80HVを用いた。また、Fe層とCu層の体積率も熱処理前後で変化しないものと見なし、熱処理前後の鋼板と銅層の厚さの比は同一とした。

$$H^* = H_{Fe} \times VF_{Fe} + H_{Cu} \times VF_{Cu} \dots\dots\dots (1)$$

H^* : 相当硬さ(HV)

H_{Fe} : Fe層の断面硬さ(HV)

H_{Cu} : Cu層の断面硬さ(HV)

VF_{Fe} : Fe層の体積率

VF_{Cu} : Cu層の体積率

2.5 衝撃特性

衝撃試験は、幅5mmのサブサイズシャルピー衝撃試験片を用い、300J衝撃試験機を用いて行なった。試験片のノッチ形状はJIS Z2242の3号試験片(ノッチ深さ2mm, ノッチ底半径1mm, 以下Uノッチ)または4号試験片(ノッチ深さ2mm, ノッチ底半径0.25mm, 以下Vノッチ)を主に使用したが、一部の試験ではノッチ深さ2mmでノッチ底半径を最大50mmまで変化させた試験片を使用した。試験片の採取方向は、図1に示す通り、打撃方向が積層材の積層界面に垂直な「フラットワイズ方向

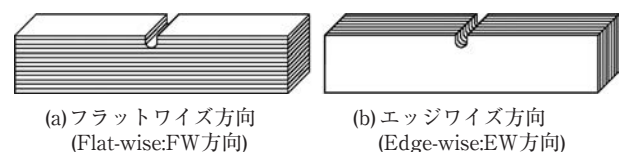


図1 衝撃試験片の採取方向
Fig.1 Direction of impact specimen.

(Flat-wise, 以下FW)」と、打撃方向と試験片長手方向が積層界面に平行な「エッジワイズ方向 (Edge-wise, 以下EW)」の二種類とした。

2.6 導電性

導電率の測定は、厚さ5mm、幅20mm、長さ180mmの短冊状の試験片を用いた。試験片採取方向は、図2に示す通り、試験片長手方向がFe/Cu積層界面に対して平行な場合をP (Parallel) 方向、垂直な方向をV (Vertical) 方向とし、JIS H0505に準拠した四端子法で測定した。なお、導電率の単位として用いた%IACSは、IACS (International Annealed Copper Standard, 国際焼きなまし銅線標準) の導電率を100%とした場合の試験片の導電率の割合を

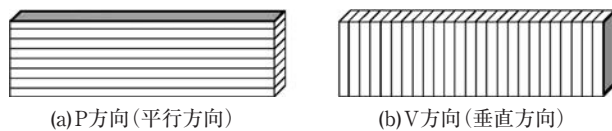


図2 導電性試験片の採取方向
Fig. 2 Direction of conductivity specimen.

示す指標である。

3. 結果と考察

3.1 積層材の断面組織

図3にFe/Cu積層材の断面組織の一例を示す。まず、ろう付材の場合、(a)に示す55BではFe/Cu界面は概ね平滑であり、Cu層厚は約 $12\mu\text{m}$ である。(b)に示す15Bの場合、55Bより面圧が高いため溶融Cuが流出しCu層厚が約 $3\mu\text{m}$ まで薄くなっている。このように、ろう付法の場合には溶融Cu流出による減損があるものの、マクロ的には規則的なFe/Cu積層構造が形成されている。

拡散接合の場合、(c)に示す55D-20ではFe/Cu界面は直線的であり、マクロ的にも規則的で顕著な欠陥のない健全な積層構造が形成されている。ろう付の場合と異なり、Cu層が溶融することがないので、接合前のCu層厚さ(すなわちめっき厚とCu箔厚さの合計)と接合後のCu層厚さは等しい。また、Cu箔を挟んで拡散接合した

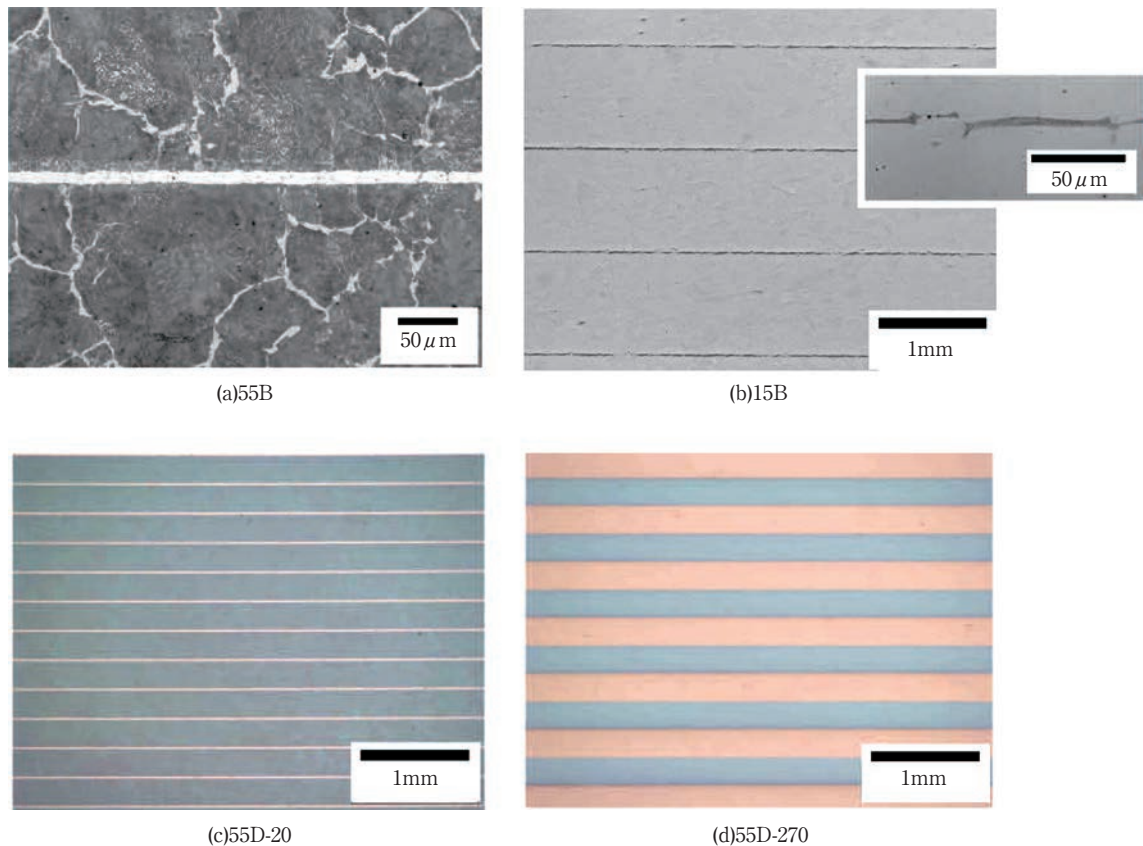


図3 積層材の断面 (a)55B, (b)15B, (c)55D-20, (d)55D-270
Fig. 3 Cross section of Fe/Cu laminates. (a)55B, (b)15B, (c)55D-20, (d)55D-270

55D-270でも、同様に欠陥のない健全な積層材が形成されている。

3.2 Fe/Cu積層材の衝撃試験結果

3.2.1 衝撃値におよぼす試験片採取方向の影響

図4に積層材55Bの室温での衝撃試験により得られた硬さと衝撃値の関係を示す。55Bの相当硬さは470HV、試験片はVノッチである。衝撃値は、FW方向で $340\text{J}/\text{cm}^2$ 、EW方向で $20\text{J}/\text{cm}^2$ であり、FW方向の衝撃値はEW方向の14倍であった。図4中には、炭素量0.2mass%から0.55mass%までの機械構造用炭素鋼バルク材の焼入焼戻し材のデータを記載してある。積層材のFW方向の衝撃

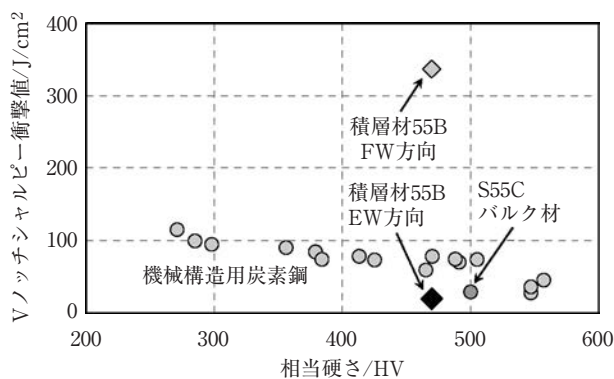


図4 積層材55Bの衝撃値と硬さの関係
Fig. 4 Relationships between impact value and hardness.

値は同じ硬さレベルのバルク材の約5倍に達し、極めて高い数値であることが分かる。

図5には、積層材55BのFW方向のVノッチ衝撃試験

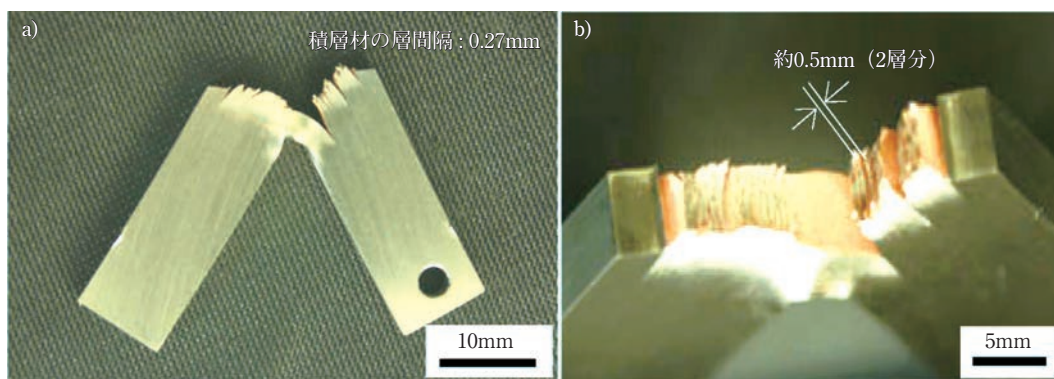


図5 積層材55Bの衝撃試験片の外観写真
Fig. 5 Appearance in impact specimen of laminates.

片の外観写真を示す。a)の試験片側面写真では、ノッチ底から進展した主き裂が、Fe/Cu界面に平行な方向に枝分れしていることが分かる。b)の破面外観写真では銅の色が目立ち、Fe/Cu界面またはCu層中が開口した部分が多いことを示している。このように、積層材のFW試験片の破面はデラミネーション（層状剥離現象）¹⁾の形態を呈していることが分かる。

3.2.2 衝撃試験による延性脆性遷移温度

図6に、積層材15BのFW方向の衝撃値におよぼす試験温度の影響を示す。衝撃試験片はUノッチである。室温での衝撃値は $440\text{J}/\text{cm}^2$ であり、55BのFW方向と同様、極めて高い衝撃値を示していることが分かる。

上部棚における衝撃値が1/2に低下する温度を延性脆性遷移温度（DBTT）とすると、バルク材のDBTTは約 10°C 、15BのFW方向のDBTTは約 -70°C であり、積層材のDBTTの方が約 80°C 低い。

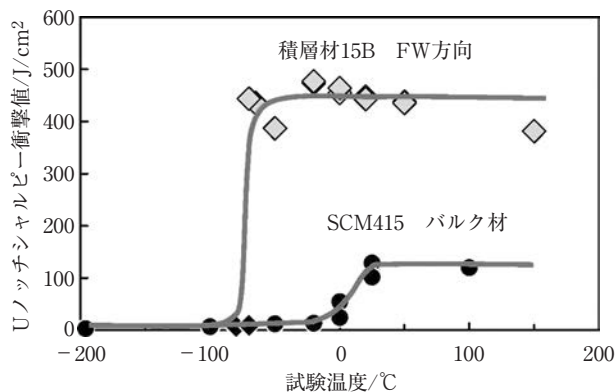


図6 積層材15BとSCM415バルク材の延性脆性遷移曲線
Fig. 6 Ductile-brittle transition curves of 15B laminated plate and SCM415 steel.

3.2.3 衝撃値におよぼす試験片のノッチ形状の影響

図7に積層材15BのFW方向の衝撃値におよぼす試験

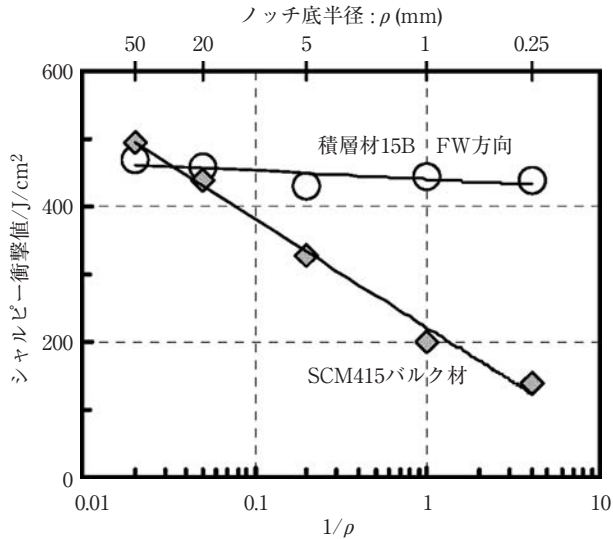


図7 積層材15BとSCM415バルク材の衝撃値におよぼすノッチ底半径(ρ)の影響

Fig. 7 Influence of notch tip radius (ρ) on impact value of 15B laminates and SCM415 steel.

片のノッチ部先端半径の影響を、図8には試験後の試験片外観を示す。衝撃試験片のノッチ先端半径は0.25mmRから50mmRである。応力集中の小さい先端半径50mmRの場合、積層材もバルク材も試験片は破断せず、衝撃値は約450J/cm²であるが、バルク材の場合、ノッチ先端半径が小さくなるほど衝撃値は低下し、5mmR以下では試験片が破断する。0.25mmRの衝撃値は50mmRと比較して約1/3に低下している。しかし、積層材15Bの場合、ノッチ先端半径を小さくしても衝撃値はほとんど低下せず高いレベルを保っている。また、試験片の形態もノッチ先端半径に関わらずほぼ同様のデラミネーション形態を呈している。このように、積層材はノッチ先端半径を小さくして応力集中度を高めた場合にも、衝撃値がほとんど低下しないことが分かった。

3.2.4 Fe/Cu積層材の衝撃特性まとめ

以上の結果により、Fe/Cu積層材が下記に示す特徴的な衝撃特性を示すことが分かった。いずれもバルク材の鉄鋼材料とは異なる、極めて特異な性質である。

- (1) Fe/Cu積層材はFW方向において、同レベルの硬度のバルク材と比較して極めて高い衝撃特性を示した。その破面形態はデラミネーション形態であった。
- (2) 試験片のノッチ先端半径（応力集中の大きさ）には影響を受けなかった。

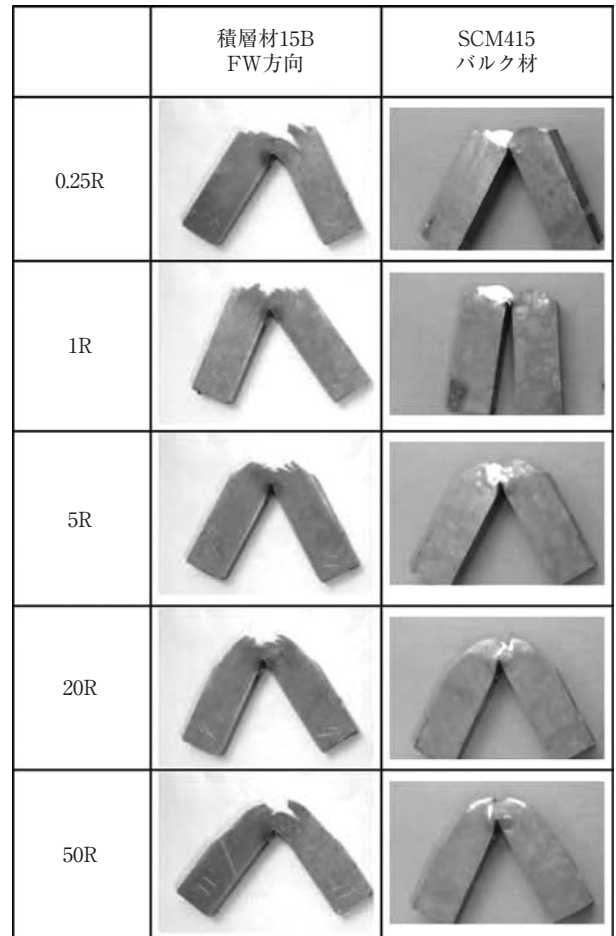


図8 ノッチ先端半径(ρ)を変えた試験片の外観

Fig. 8 Impact fracture morphology of specimens with different notch tip radius (ρ).

ところで、このように積層材がFW方向で極めて優れた衝撃特性を示すことに関する報告例は下に示すわずかな例しかない。複合材料の一形態である積層材が、積層面に垂直な方向へのき裂伝播を抑制することで優れた強靭性を示すことは良く知られている。しかし、鉄鋼材料の場合、日本刀が折返し鍛錬により多層構造になっていることが知られていたり、装飾的要素の大きい積層鋼が包丁などに用いられているものの、強靭化を指向した積層材が工業的に実用化された事例はあまりないようである。

Sherbyら²⁾は、超高炭素鋼と軟鋼の薄板をクラッド圧延によって積層化し、衝撃試験を行なっている。それによると、超高炭素鋼と軟鋼の積層材で、300J/cm²以上の高い衝撃値を示すことが報告されている。この値は、本報のFe/Cu積層材の衝撃値とはほぼ同等である。本報のFe/Cu積層材やSherbyの積層材の衝撃特性が優れているのは、積層化による効果であると考えられる。木村³⁾は、

0.4%C-2%Si-1%Cr-1%Mo鋼 (mass%) を用いて加工熱処理を行なうことで作製した超微細繊維状結晶粒組織が極めて高い衝撃吸収エネルギーを示すことを報告し、これは主き裂伝播方向に対して直角な面でデラミネーションが起った結果であるとしている。その他には、硬さの異なる鋼板の積層材の機械的性質の報告例として、小関ら⁴⁾の一連の報告がある。

本報告のFe/Cu積層材がFW方向で高い衝撃値を示すのは、木村が示す通り、デラミネーションの効果と考えられる³⁾。図9に、Fe/Cu積層材の衝撃破壊形態の模式図を示す。A (ノッチ底) で発生した主き裂は、第1層目のFe層を伝播する。B (Fe/Cu界面) に到達したき裂は、Fe/Cu界面またはCu層中へ分岐したのち、再びBから第2層目のFe層内部へと主き裂が発生し伝播する。以後はFe層中での伝播とFe/Cu界面での分岐/き裂再発生を繰り返して破壊が進行する。Bにおけるき裂の分岐は、図5の破面形態に見られるFe/Cu界面またはCu層中のき裂開口に裏付けられている。衝撃特性に対するノッチ先端半径、すなわち応力集中の大きさに鈍感な理由は、Bにおいてき裂が一旦分岐し、Fe層の中へ再発生しているためであり、応力集中がFe/Cu層間剥離によって軽減されることが主因と考えられる。

3.3 Fe/Cu積層材の導電性

本報で用いたFe/Cu積層材では、Cu層は電析した純銅であり、鋼材より格段に導電率が高い。このため、積層材の断面に占めるCu層体積比が大きいほど導電性が向上する。また、熱処理によってFe層の強度を高めることができる点と、Cu層体積比を高めることで導電性

を高めることができる点を併せることで、強度と導電性を自由に制御した高強度導電材が設計できる可能性がある。また、積層構造による特性の異方性もあり、多くの特徴的な性質が見られる。

図10に積層材55Dの導電率におよぼすCu層体積比の影響を示す。P方向の導電率はCu体積比に比例しているが、V方向の導電率はCu体積比0.5の時にP方向の約1/3程度であり、顕著な異方性を示している。なお、図中には二層複合材料における混合則 (式(2)、(3)) による導

《積層材の導電率の混合則による計算》

Fe層の体積率: V_{Fe} Cu層の体積率: V_{Cu}
Fe層の導電率: C_{Fe} Cu層の導電率: C_{Cu} 積層材の導電率: C_L

$$P \text{ 方向 (並列)} : C_L = V_{Fe} \times C_{Fe} + V_{Cu} \times C_{Cu} \quad (2)$$

$$V \text{ 方向 (直列)} : C_L^{-1} = V_{Fe} \times C_{Fe}^{-1} + V_{Cu} \times C_{Cu}^{-1} \quad (3)$$

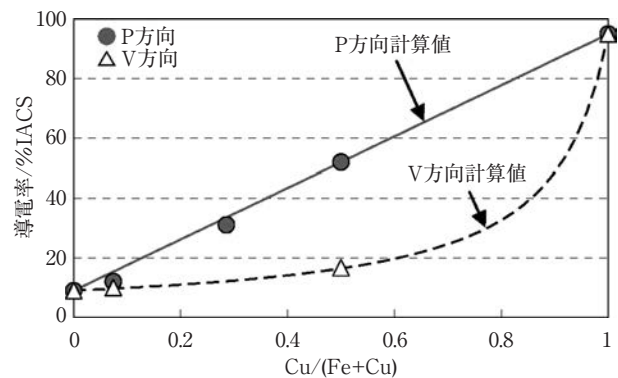


図10 積層材55Dの導電率におよぼすCu層体積比の影響

Fig.10 Effect of volume fraction of Cu on electrical conductivity.

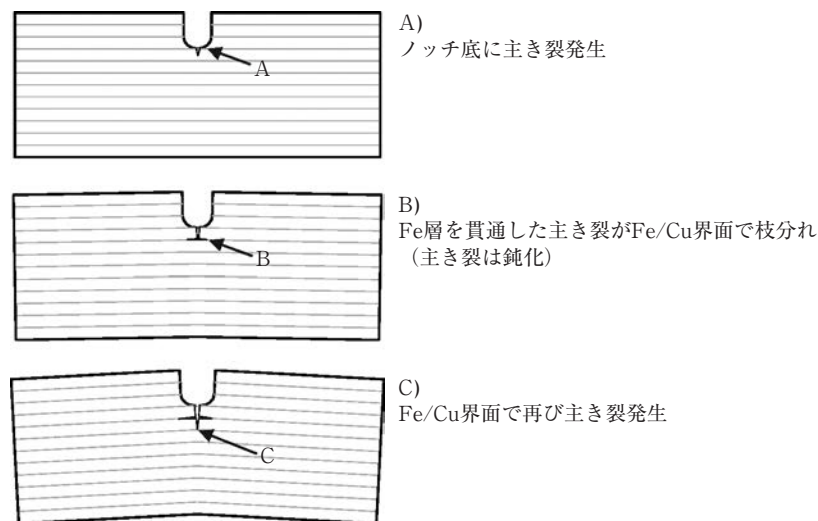


図9 FW方向積層材の衝撃破壊におけるき裂伝播と分岐の模式図

Fig.9 Schematic diagram on branching and propagation of cracks in impact specimen.

電率の計算値を示している。P方向は並列配置の場合、V方向は直列配置の場合の計算値に一致しており、Cu体積比と導電率の間に混合則が成立していることが分かる。

図11にFe/Cu積層材および各種金属材料の硬さ（相当硬さ）と導電率の関係を示す。Fe/Cu積層材と比較するのは、鋼材、銅系材料、アルミ系材料である。

前述したとおり、Fe/Cu積層材は、Cu層体積比やFe層の硬さ制御することで、硬さと導電率の関係を幅広く設計することができる。ここでは積層材55Dを用い、硬さと導電率を変化させた結果を示している。図中に記載した他の金属材料と比較すると、主として高強度な導電材料として知られるリン青銅、ベリリウム銅といった銅系材料と比較して、Fe/Cu積層材の硬さ-導電性バランスはリン青銅を凌駕しており、ベリリウム銅に匹敵する優れた特性を得ることが可能である。

4. 結言

- (1) 銅めっき鋼板を積重ねて、ろう付法または拡散接合法によって銅めっき層同士を融着または接合させることで、Fe層とCu層からなるFe/Cu積層材が作製できる。
- (2) Fe/Cu積層材の衝撃特性は、積層界面に垂直な方向にき裂が伝播するFW方向では、積層材に特有

のデラミネーション型の破面を呈し、極めて高い衝撃値を示す。ほぼ同等の硬さを有するバルク鋼材と比較すると、その衝撃値は約5倍である。

- (3) 一方、EW方向の衝撃値はバルク材と同等以下のレベルである。
- (4) FW方向では、バルク材よりも延性脆性遷移温度が低い。また、衝撃試験片のノッチ先端半径の影響を受けず、鋭い応力集中を有する試験片でも高い衝撃吸収エネルギーを示す。
- (5) Fe/Cu積層材は、P方向の導電率がCu体積比に比例する。熱処理によるFe層の強化と、Cu体積比を高めることにより、ベリリウム銅に匹敵する強度と導電率のバランスを得ることができる。

参考文献

- 1) K.T.Venkateswara Rao, W.Yu and R.O.Ritchie : Metall. Trans. A, 20 (1989), 485.
- 2) O.D.Sherby, T.Oyama, D.W.Kum, B.Walser and J.Wadsworth : JOM, 6 (1985), 50.
- 3) 木村勇次 : ふえらむ, 15 (2009), 154.
- 4) 小関敏彦, 井上純哉 : 金属, 79 (2009), 908.

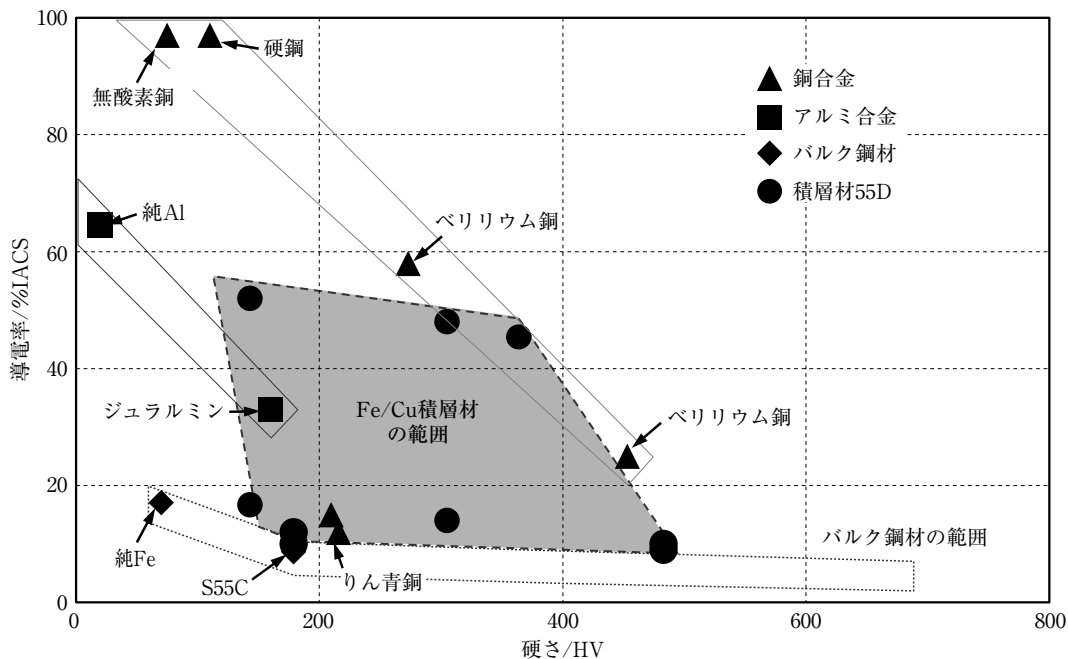


図11 Fe/Cu積層材と各種金属材料の導電率と硬さの関係
Fig.11 Relationships between hardness and electrical conductivity.