

研究論文の概要

論文題目： Increasing strength and conductivity of Cu alloy through abnormal plastic deformation of an intermetallic compound (金属間化合物の常識を超えた塑性変形による銅合金の強度と導電性の向上)

著者： Seung Zeon Han, Sung Hwan Lim, Sangshik Kim, Jehyun Lee,
Masahiro Goto, Hyung Giun Kim, Byungchan Han & Kwang Ho Kim

概要：

コネクタ、リードフレーム、回路内の導電性バネ、リレーなど電気電子部品の素材となる銅合金は、強靱性と共に十分な電気伝導性が要求されます。Cu-Ni-Si 系合金は、強度と導電性の組合せ特性が良好であり、最近の機械・電気電子部品の小型軽量化、高集積化の要求から、現在も活発に研究・開発が進められています。

ところで、図 1 に示すように、銅合金は強度が増加するにつれて導電性は減少 (IACS 値 (注 1) と引張強さの間には経験的に図中の赤色の曲線で示す [%IACS × MPa = 36,000] の関係が成立) します。すなわち、強度と導電性は二律背反的であり一方を改善すれば他方が低下するジレンマに陥っています。

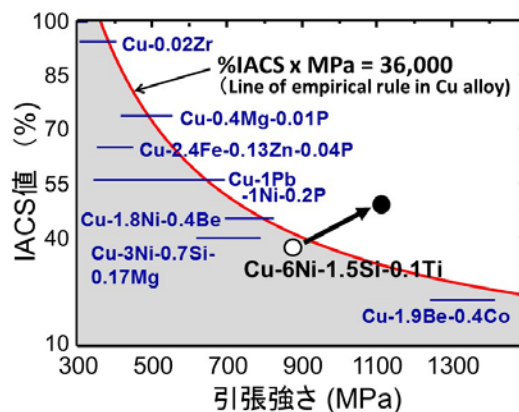


図 1 銅合金の導電性(IACS)と引張強さの関係

Cu-Ni-Si 系合金の強化は時効処理 (注 2) により、銅母相中 (図 2a) にナノオーダーの金属間化合物 (注 3) である Ni_2Si 粒子を析出させることで達成され、最高の強度を得るために最適の時効処理を行う必要があります。図 2b に、本材の Ni_2Si 析出物 (直径数ナノメートルの円板状) の HR-TEM 画像を示します。一般に時効時間の増加と共に析出物の密度

が増し強度が増加しますが、ある時点からは析出物が粗大化するためその密度が低下し、さらに図 2c に示すファイバー状 Ni_2Si と銅母相のラメラ状組織である不連続析出相 (DP) (注 4) の生成が始まり強度は著しく低下します。そのため、粗大化や DP の生成が生じる前に時効処理を停止することが通則になっています。

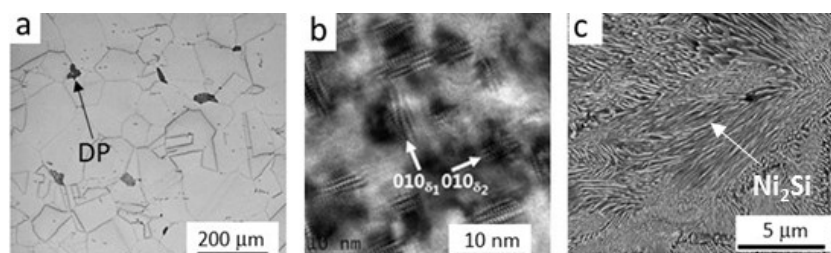


図 2 Cu-6Ni-1.5Si 合金の組織解析：a 金属顕微鏡観察による組織写真，
b 銅母相の Ni_2Si 析出物 (HR-TEM)，c 不連続析出物 (DP) の SEM 写真

先に述べた DP は強度の低下をもたらしますが、導電性は良好です。

本研究では、この点に着目して、これまで利用されなかった DP を用いて銅合金の強度と導電性の組合せ特性の改良に取り組みました。まず、時効時間の短縮のため、DP を均一かつ効率的に生成する手法を考案しました。次に DP の強度向上に繊維強化の概念を取り入れることを着想しました。そして、塑性加工にてファイバー状 Ni_2Si の方向性を揃えと共にラメラ間隔を減少させることに取り組みました。金属間化合物である Ni_2Si は硬く塑性変形が困難と考えられますが、**断裂や銅母相との剥離も無く塑性変形することに成功し、(図 3)、結果として図 1 に示すように導電性と強度の組合せ特性の大幅な向上を達成しました** (図 1 の白丸が黒丸へ向上し、これまでのトレードオフ関係を打ち破ることに成功)。

本手法は特別な設備・装置は必要とせず従来の熱加工処理技術の範疇にあること、また銅合金以外の析出硬化型合金であるアルミニウム合金、ニッケル合金などの強化にも応用できると考えられることから、学術・工学上の更なる発展が予想されます。

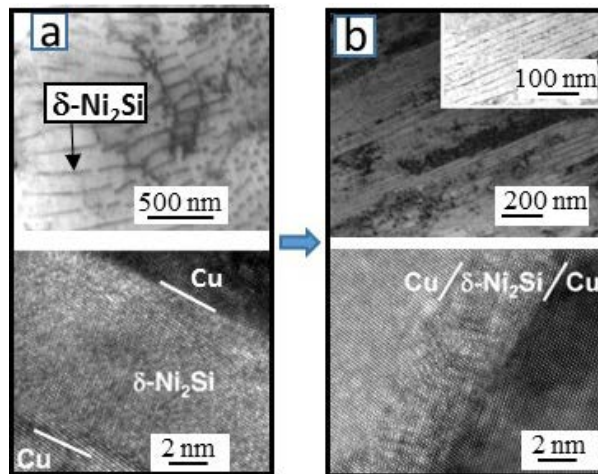


図3 塑性変形による組織変化：a 塑性加工前の組織（上）とCu/Ni₂Si界面（下），
b 塑性加工後の組織（上）とCu/Ni₂Si界面（下）

用語の説明

注1) **IACS 値**：標準焼なまし銅の電気伝導度を100としたときの伝導度。銅は銀に次いで導電率が高いが、強度向上のため合金化すると銅母相中の溶質原子（他原子）が電子の移動を妨げるため、導電性は低下する。

注2) **時効処理**：時間の経過に伴って金属材料の性質が変化することを時効といい、そのような熱処理を時効処理とよぶ。材料を強化する1つの方法として、溶体化処理（材料を高温から急冷却し、母相中に低温での溶解限度以上の溶質原子を溶け込ませる処理）後、適当な温度に保持し過飽和の溶質原子を微細な金属間化合物として析出させる処理がある。このように適当な温度で保持する熱処理を時効処理という。時効は常温でも生じるが、銅の場合400～550℃、アルミの場合は100～200℃程度で数時間～20時間程度保持することが多い。時効処理により、金属は時間と共に硬化するが、最大値を過ぎた後は硬さが低下して行く。

注3) **金属間化合物**：2種類の金属からなる化合物で合金の一種。通常の合金は元の金属のどちらかの構造を保持しながら、他方の金属原子が置換・侵入しており（固溶体と呼ぶ）、その組成はある幅の中で可変である。金属間化合物は、元の金属とは全く違う構造をもつ「化合物」であり、整数比の組成を有する。

注4) **不連続析出物**：時効により微細なナノオーダーの金属間化合物Ni₂Si（連続析出, CP）が生成し時間と共にその数（密度）が増加し強度が向上していくが、その後CP粒子の粗大化が生じ粒子密度が低下するため強度は減少していく。さらに、結晶粒界から全く異なるメカニズムで別の析出相が粒界の移動を伴って成長する。これを不連続析出（DP）という（DP

は粒界反応の一種である)。DP はファイバー状の金属間化合物 Ni_2Si と銅母相の層状の組織であり、ファイバー状 Ni_2Si 同士の間隔はナノオーダーの Ni_2Si 粒子同士の間隔よりはるかに大きく、これが強度の大きな低下に繋がる。