



車のデジタル化・電動化に対応した銅材料の開発

三菱マテリアル株式会社
高機能製品カンパニー
銅加工事業部技術開発部
牧 一誠

1. はじめに

銅は、電気伝導性や熱伝導性、加工性といった優れた特性を有し、かつ経済性にも優れた材料である。日本の伸銅産業は、電子・電気機器の導電部材や放熱部材など、さまざまな用途に良質な銅材料を安定的に供給し、日本の高品質なものづくりを支えてきた。特に車載用途の銅材料においては、高い性能と品質が求められるが、日本の伸銅産業は高い開発力と優れた生産技術により、これらのニーズに応えてきた。

近年、車載用電子・電気機器の銅材料に対して以下の大きなニーズが存在する。

- (1) 自動運転やコネクテッドカーに代表される自動車のエレクトロニクス技術の高度化およびデジタル化に伴い、車載端子の小型化に対応するために、成型性を損なわずに、より高い強度、導電率を持つ銅材料が求められている。
- (2) 電気自動車の普及に伴い、電気機器には大電流と高い放熱性が求められ、銅材料の中でも最も高い導電率と熱伝導率を特長とする無酸素銅が採用されている。しかし、無酸素銅は、強度と耐熱性が銅材料の中で最も低いため、用途には制限がある。無酸素銅の高い導電率を維持しつつ、高強度と高耐熱性を有する銅材料が望まれている。

本稿では、これらの市場ニーズに応えるために、当社がどのように銅材料の開発に取り組んだかを紹介する。

2. 銅合金の強化機構と開発コンセプト

一般的な銅合金においては、固溶強化による強度向上を主とした固溶強化型銅合金と、析出強化による強度向上を主とした析出強化型銅合金に大別され、どちらも車載用の銅材料として採用されている。黄銅やりん青銅に代表される固溶強化型銅合金は、固溶元素を加えるため導電率が低いものが多いが、複雑な熱処理が不要なため、工程負荷が小さく、製品の特性ばらつきも小さい。一方、Cu-Ni-Si系(コルソン銅)やCu-Cr-Zr系に代表される析出強化型銅合金は、導電性に優れたものが多いが、溶体化や時効熱処理が必要なため製造工程が煩雑で、熱処理に起因する特性ばらつきも大きい傾向にある。すなわち、析出強化型銅合金と固溶強化型銅合金は、性能と生産性においてトレードオフの関係にある。

そこで、性能と生産性を同時に満たす高性能な固溶強化型銅合金を開発することを試みた。添加元素を選

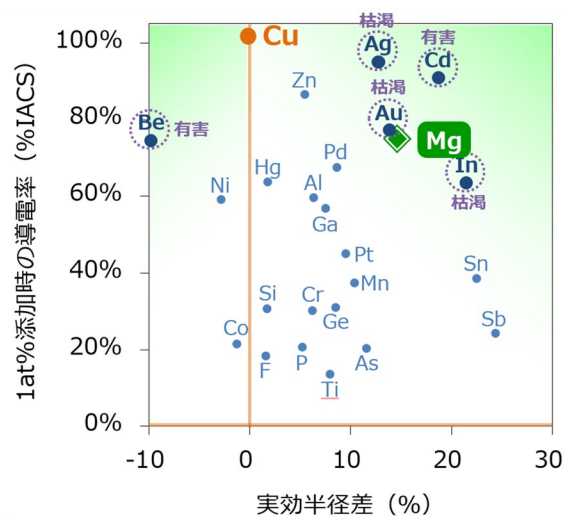


図1 銅中での各元素の実効原子半径差と導電率

定するにあたり、実効原子半径と抵抗増加のバランスに着目した。実効原子半径の大きい元素では、より大きな固溶強化が見込まれ、また銅の抵抗増加が小さい元素を用いることで強度、導電率をバランス良く向上させることが可能となる。図1に銅に対しての実効原子半径差と1at%添加時の導電率を示す。Ag, Au, Cd, Mgは、70%IACS以上、かつ実効原子半径差が10%を超えており良好な特性バランスを有するが、さらに金属価格や環境負荷を考慮すると、Mgが固溶強化型銅合金の添加元素として最も有望であると判断した。Mgは実効原子半径が大きく、抵抗増加が小さいだけでなく、再結晶温度の増加が大きい、原子量が小さい、豊富な埋蔵資源であるという特徴を有することも、添加元素としてMgを選択する理由となった。

3. 強度と導電性に優れた固溶強化型銅合金「MSP5」

車載端子の小型化に向けた強度と導電性に優れた銅合金を開発するにあたり、Mgを単純に添加するのではなく、過飽和に固溶させて加工硬化を施すという設計手法を用いることによって、固溶型銅合金の特徴であるシンプルな製造工程と優れた成型性を維持しながら、高強度、高導電性、優れた耐熱性、低比重を有し、環境負荷の高いまたは高価な元素を使用せずに優れた特性を発揮する、Mg濃度が世界最高水準の固溶強化型合金「MSP5」¹⁾の開発に成功した。

MSP5は固溶強化型銅合金でありながら、強度、導電性において、図2に示されるように析出強化型銅合金であるコルソン銅と比べても全く遜色がない。その上、図3から分かるように、端子への成形性に優れており、箱形への曲げ加工で割れや破断が生じにくく、特に車載用小型端子の材料に適している。一方、析出強化型銅合金のコルソン銅は、耐力が同等の固溶強化型銅合金であるMSP5と比較して曲げ加工性が劣る。これは、固溶強化型銅合金にはクラックの起点となる硬質な第二相粒子が母相中に存在せず、均質性の高い単相組織であることが要因の一つとして挙げられる。

MSP5の特徴の一つに低比重(軽量)が挙げられる。図4に銅合金の密度を示す。原子量が小さく(銅の約0.38倍)、有効原子半径が大きい(銅の約1.15倍)Mgを過飽和に固溶していることから、MSP5は、強度が同等のコルソン銅と比べ、端子を約5%も軽量化できる。加えて、コルソン銅に対し、MSP5は同重量で体積が約5%増加しているため、それだけ多くの端子を製造でき、銅の使用量削減や端子コストの低減にも大きく貢献する。

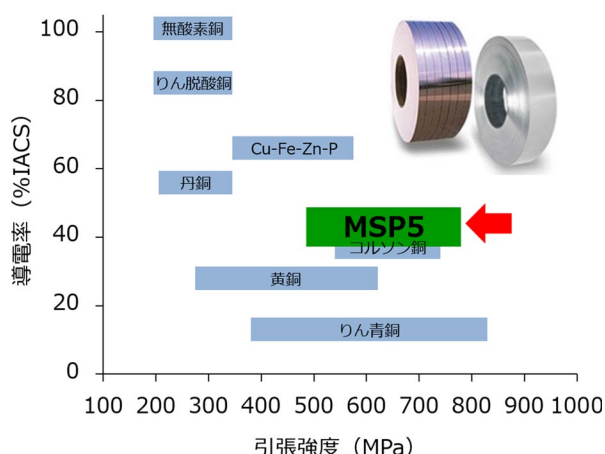


図2 銅材料の強度と導電率の関係

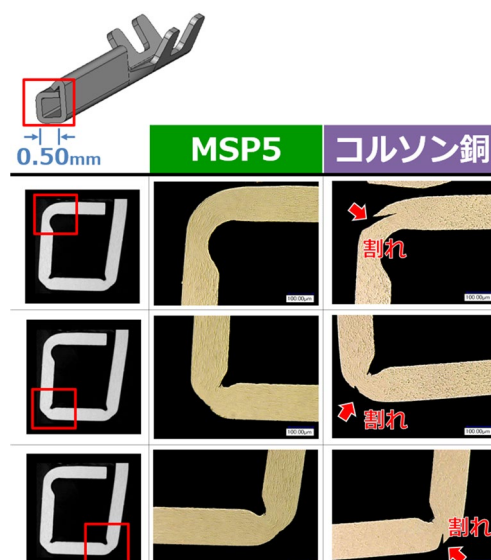


図3 試作端子の箱曲げ部分の顕微鏡写真

多くのお客様に MSP5 の高い性能と信頼性を評価いただき、MSP5 は車載用小型端子およびプレスフィット端子用途を中心に本格生産に至っている。本成果は、車載端子の小型化、高性能化、高精度化に大きく貢献し、自動車の高機能化の促進、製造時の温室効果ガスの排出量削減、銅使用重量の削減、材料コストの低減に寄与しているとして、「革新的な合金設計手法を用いた車載端子用高性能銅合金の開発」にて令和6年度科学技術分野の文部科学大臣表彰における科学技術賞（開発部門）を受賞している²⁾。

4. 強度と耐熱性に優れた無酸素銅「MOFC-HR」

無酸素銅の高い導電率を維持しつつ、高強度・高耐熱性を有する銅材料を設計するにあたり、無酸素銅への極微量の添加元素による耐熱性の付与に着目した。これにより、既存の無酸素銅で発生していた加工発熱による軟化を抑制し、加工硬化による高強度化が可能になると推察したからである。

この極微量の添加元素として、比抵抗増加が小さく、耐熱性を大幅に向上させる Mg の活用を図った。検討の結果、Mg が 40~80mass ppm という極めて希薄な状態において、高い導電率を維持しつつ耐熱性の指標である半軟化温度が高い傾向にあることが分かり、他の添加元素を大きく上回る高い水準で導電率と耐熱性のバランスを実現できることが見出された。この発見を活用して、強度と耐熱性を世界最高水準に高めた無酸素銅「MOFC-HR(Heat Resistance)」³⁾の開発に成功した。

MOFC-HR の特性を既存の無酸素銅とともに図5に示す。MOFC-HR は無酸素銅と並び、銅材料の中で最も高い導電率 101% IACS、熱伝導率 391W/m・K を有しつつ、Mg の極微量添加により既存の無酸素銅では実現できなかった強度と耐熱性の大幅な向上を実現している。

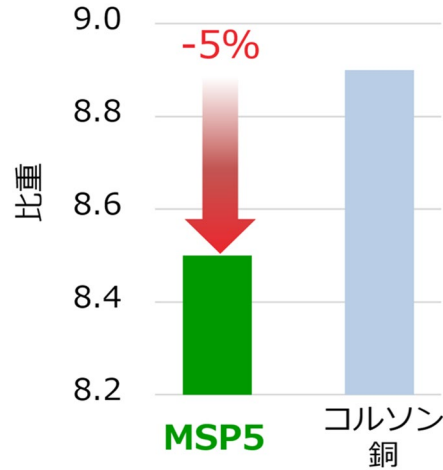


図4 MSP5 とコルソン銅の比重

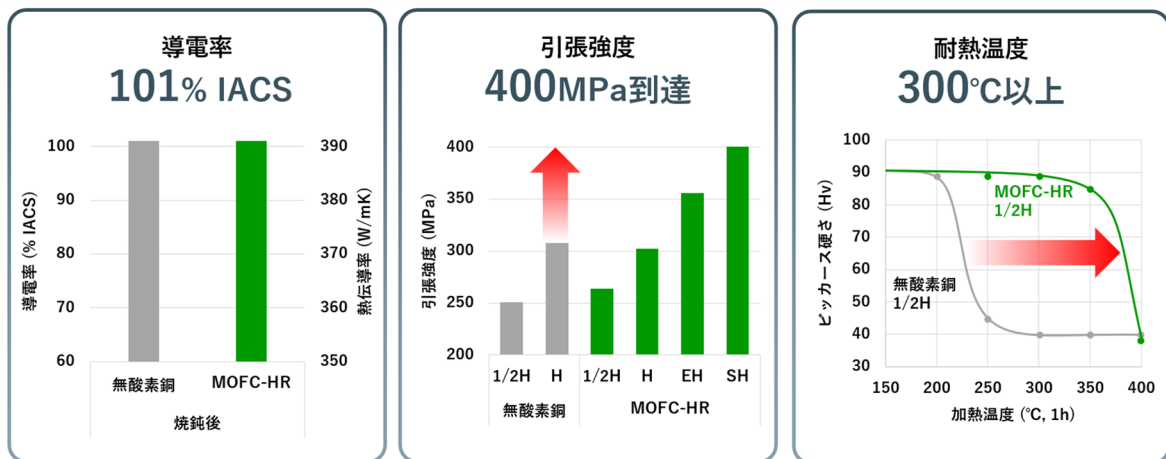


図5 MOFC-HR と無酸素銅の導電率、引張強度、耐熱性

この優れた諸特性により、MOFC-HR は導電性と放熱性に加えて、強度、耐熱性が重要視されるリードフレーム、端子、バスバー、タブリード、ヒューズなど多種多様な車載用の電気機器・部品の材料として最適であり、無酸素銅の用途範囲を大きく広げることが可能である。さらに強度や耐熱性に劣る既存の無酸素銅と置き換えることにより電気機器の信頼性を向上させることや、導電率が低い銅合金との代替によって電気機器を高性能化することも可能であることから、次世代の無酸素銅として大いに注目を集めており、高い信頼性が要求される導電・放熱部材のスタンダードとなることが期待される。

5. 終わりに

近年、高強度・高導電性銅合金に代表される高性能銅材料の設計手法は析出強化が主流であったが、多工程からなる複雑な加工熱処理が必要であるため、煩雑な製造工程や特性ばらつきの課題があった。一方、固溶強化型銅合金では、固溶元素の添加により導電率の大幅な低下は避けられず、高強度と高導電性の両立は難しいとされ、高強度・高導電性銅合金を開発する際に固溶強化という合金設計手法に関心が払われたことはほとんどなかった。

当社は、添加元素として優れた特徴を有するMgを活用した固溶強化に着目し、性能と生産性を同時に満たす合金設計に取り組んだ。その一例として、Mg濃度が世界最高水準の固溶強化型銅合金「MSP5」、強度と耐熱性を世界最高水準に高めた無酸素銅「MOFC-HR」の開発について概説した。

当社グループは、「人と社会と地球のために、循環をデザインし、持続可能な社会を実現する」ことを「私たちの目指す姿」と定めている。今後も本研究成果を応用した新たな銅材料の実現ほか、目指す姿の実現に向け、資源循環の拡大、高機能素材・製品供給の強化を進めていく。

〈参考文献〉

- 1) 伊藤, 牧, 小林, 小池: materiah, **55**(2016), 67.
- 2) 三菱マテリアル プレスリリース
<https://www.mmc.co.jp/corporate/ja/news/press/2024/24-0418.html>
- 3) 飯原, 森川, 福岡, 伊藤, 末廣, 船木, 牧: materiah, **62**(2023), 125.

(大阪大学 材料物性 1993 年卒、材料開発 1995 年前期、材料物性 2004 年後期)