

強度，耐熱性およびせん断加工性に優れた 無酸素銅「MOFC®-HR(Heat Resistance)」の開発

飯原 智美¹⁾ 森川 健二^{1)*} 福岡 航世¹⁾ 伊藤 優樹²⁾
末廣健一郎²⁾ 船木 真一^{2)*} 牧 一誠³⁾

1. 緒 言

近年，電気自動車の普及や再生可能エネルギーの導入に伴い，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に注目が集まっている．無酸素銅は高い導電率を有する反面，強度と耐熱性は銅材料の中で最も低いことから用途には制限がある．また，無酸素銅はプレス機械を用いたせん断加工にも課題がある⁽¹⁾．無酸素銅は強度が低いため，せん断加工を施す際に変形しやすく，大きなだれやかえりが発生して寸法精度が低い傾向にある．従来，強度，耐熱性，せん断加工性のいずれかが重要視される場合には，導電率は犠牲になるものの，強度，耐熱性またはせん断加工性に優れた銅合金が多用されてきた．今後の電気自動車のさらなる普及や再生可能エネルギーの導入拡大のためには，無酸素銅の高い導電率と熱伝導率を保持したまま，強度，耐熱性およびせん断加工性を高めた新たな銅材料の開発が望まれている．

2. 新規無酸素銅の開発コンセプト

導電性，強度，耐熱性，せん断加工性を兼ね備えた銅材料を設計するにあたり，我々は極微量の添加元素による無酸素銅への耐熱性の付与に着目した．これによって，既存の無酸

素銅で発生する加工発熱による軟化を抑制できることから，無酸素銅の加工硬化による高強度化が見込まれ，この高強度化が優れたせん断加工性をもたらすと推察したからである．この極微量の添加元素として Mg の活用を図った．Mg は有効原子半径が大きい⁽²⁾，比抵抗増加が小さい⁽³⁾，豊富な埋蔵資源という特徴を有し，0.4～6 at% (0.15～2.4 mass%) の高濃度の固溶で強度や耐熱性を大幅に向上させる優れた添加元素として報告されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾．さらに，金属価格や環境負荷を考慮すると，Mg が高耐熱性の無酸素銅を実現するための極微量元素として有望であると判断し，新規無酸素銅の開発に着手した．

図 1 に極微量の添加元素が無酸素銅の導電率(比抵抗 1.7241 $\mu\Omega\text{cm}$ の焼鈍標準純銅を 100% IACS とした導電率)に与える影響を示す．本試験では，500 atppm 以下の極微量の種々の元素を無酸素銅に添加し，結晶粒径を統一し，仕上げ圧延率を 75% として，厚さ 0.5 mm の薄板を作製し，評価している．図 1 から Mg と Ag は，Sn, P および Ti と比べ，添加に伴う導電率の低下が非常に小さいことが分かる．この導電率の低下傾向は，過去の報告⁽³⁾⁽⁶⁾から計算される導電率の低下傾向とほぼ一致している．次に，極微量の添加元素が半軟化温度に及ぼす影響を図 2 に示す．半軟化温度は，耐熱性の指標であり，各温度で 1 時間の熱処理をした後に

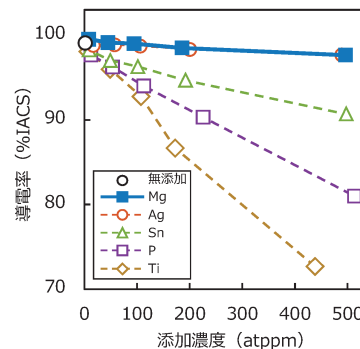


図 1 極微量の添加元素が導電率に与える影響．

* 三菱マテリアル株式会社 イノベーションセンター 金属材料領域

1) 研究員 2) 専任研究員 3) 上席研究員

** 三菱マテリアル株式会社 若松製作所 開発部

1) 係員 2) 部長

Development of MOFC-HR: High Strength, High Heat-Resistance Oxygen-Free Copper with Superior Shearing Quality; Tomomi Iihara, Kosei Fukuoka, Yuki Ito, Kenichiro Suehiro, and Kazunari Maki (*Mitsubishi Materials Corporation, Innovation Center)

Kenji Morikawa and Shinichi Funaki (**Mitsubishi Materials Corporation, Wakamatsu Plant)

2022年11月 1 日受理[doi:10.2320/materia.62.125]

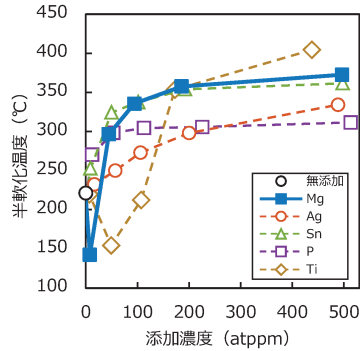


図2 極微量の添加元素が半酸化温度に与える影響.

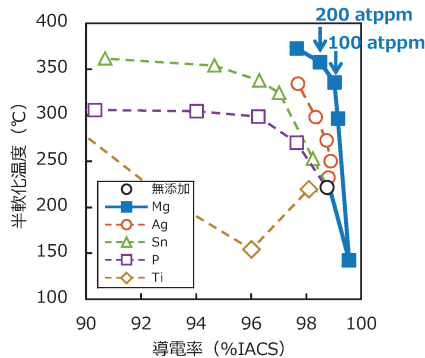


図3 各組成における導電率と半酸化温度の関係.

硬度を測定し、硬度が熱処理前の値とフルアニール状態の値との中間値になる熱処理温度を指している。Mgは100 atppmという極微量の添加で半酸化温度が約340℃まで上昇し、無添加材より100℃以上も高くなることから分かる。Mgを200 atppm添加すれば半酸化温度は350℃を超え、SnやTiに匹敵している。図3に各組成における導電率と半酸化温度の関係を示す。ここで特筆すべきは、Mgが他の添加元素に比べて、良好な導電率と半酸化温度の特性バランスを示している事である。特に、Mgが100～200 atppm (40～80 mass 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半酸化温度が高い傾向にあるため、他の元素を大きく上回る高い水準で導電率-半酸化温度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、耐熱性、せん断加工性を兼ね備えた無酸素銅「MOFC®-HR(Heat Resistance)」を開発した。MOFC-HRの組成と特性を無酸素銅やタフピッチ銅とともに表1に示す。MOFC-HRは無酸素銅、タフピッチ銅と並び銅材料の中で最も高い導電率101%IACS、熱伝導率391 W/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。高導電性と高強度を併せ持つ材料であることから、導電率に劣る銅合金を代替して、大電流化や高放熱化が可能である。さらに、高い耐熱性を有するため、熱処理を伴う電気機器の製造工程に対応できるほか、大電流を流した場合の温度上昇や、熱負荷の高い使用環境下においても特性の劣化が少なく、幅広い用途での使用が可能となる。これら

表1 MOFC-HRの組成、特性一覧ならびに無酸素銅、タフピッチ銅との特性比較.

組成 (mass ppm)	導電率 (%IACS)	熱伝導率 (W/m・K)	水素脆性	質別	引張強度 (MPa)	半酸化温度 (°C)
MOFC-HR Mg: 70	101	391	なし	1/2H	252	433
				H	317	371
				EH	370	361
				SH	386	353
無酸素銅	-	101	なし	1/2H	252	335
				H	298	275
				1/2H	246	311
タフピッチ銅 O: 250	101	391	あり	H	302	238

の優れた材料特性に加えて、MOFC-HRは酸素濃度が非常に低いことから水素脆化が生じず、溶接やろう付けにも適している。

3. 新規無酸素銅の特徴

(1) 引張強度

Mgの極微量添加により半酸化温度が大幅に上昇しており、製造中の加工発熱による軟化を抑制でき、従来よりも大きな加工硬化を実現する事ができるため、既存の無酸素銅では達成できない水準にまで強度を高めている。図4にMOFC-HRと無酸素銅の強度比較を示す。既存の無酸素銅の強度は250～300 MPa程度にとどまっているが、MOFC-HRは約400 MPaまでの強度に対応しており、既存の無酸素銅から100 MPa程度の高強度化を実現している。

(2) 耐熱性

図5にMOFC-HRと無酸素銅を各温度で1時間熱処理した後の硬度を示す。この等時焼鈍軟化曲線から、無酸素銅の半酸化温度は275℃であるが、MOFC-HRでは質別1/2Hで433℃、質別H, EH, SHではそれぞれ371℃, 361℃, 353℃であり、全ての質別で半酸化温度が350℃を超えている。同等の強度を有する質別Hで比較した場合、MOFC-HRは無酸素銅に比べて半酸化温度が約100℃も高い。

(3) せん断加工性

通電・放熱部材にはせん断加工による切断成形が多用されるが、所望の寸法や形状を得るために、だれやかえりが小さ

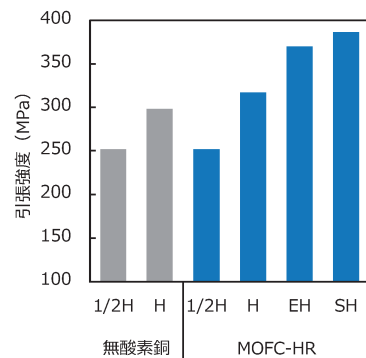


図4 MOFC-HRと無酸素銅の引張強度比較.

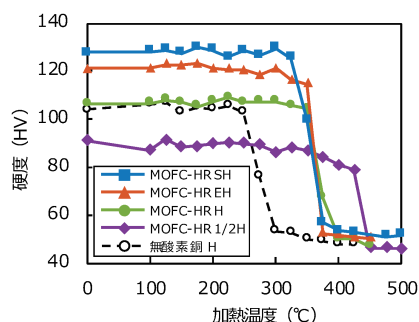
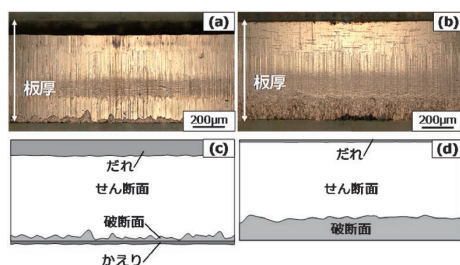


図5 MOFC-HRと無酸素銅の等時焼鈍軟化特性。

図6 MOFC-HRと無酸素銅のせん断加工による切口面。
無酸素銅(質別 1/2H) : (a)光学顕微鏡写真, (c)模式図
MOFC-HR(質別 SH) : (b)光学顕微鏡写真, (d)模式図。

いことが望まれる。図6にMOFC-HRと無酸素銅を同一条件でせん断加工を行った際の切口面を示す。無酸素銅は、せん断面と破断面における破断面の比率が非常に低く、大きなだれとかえりが発生している。このかえりとだれは寸法精度の低下をもたらし、かえりは安全面でも問題となりやすい。一方で、強度が高いMOFC-HRは、破断面の比率が高く、だれとかえりが小さいことから、複雑な形状を高精度に切断する際に適している。一般に、銅材料は加工硬化による強度上昇に伴って、破断面比率が増加し、だれとかえりが小さくなる傾向があり、この傾向に本結果は整合している。

4. 新規無酸素銅の将来性と発展性

今回我々は、Mgが40～80 mass ppmという極めて希薄な状態において、高い導電率を保持しながら半軟化温度の大幅な上昇をもたらすことを発見した。さらに、これを活用して、導電率と熱伝導率を損なうことなく、既存の無酸素銅では実現できなかった強度、耐熱性およびせん断加工性を兼ね備えた新規無酸素銅「MOFC®-HR(Heat Resistance)」を開

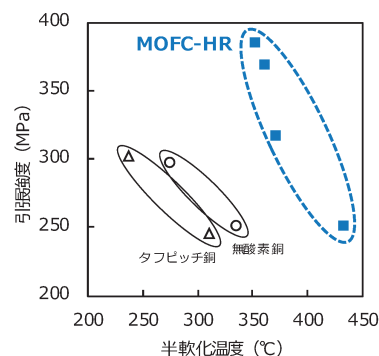


図7 MOFC-HR、無酸素銅およびタブピッチ銅の引張強度と半軟化温度。

発した。図7にMOFC-HR、無酸素銅およびタブピッチ銅の強度と半軟化温度を示す。MOFC-HRは無酸素銅、タブピッチ銅と比較して、卓越した強度-半軟化温度バランスを示すことは注目に値する。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、耐熱性またはせん断加工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、電動化社会での通電・放熱部材のスタンダードとなることが期待される。関連特許は、国内や海外で10件以上出願され、例えば日本国特許第7078070号として権利化されている。また、MOFC-HRは銅開発協会(CDA)にC10850として登録され、無酸素銅やタブピッチ銅と並ぶ最高水準の導電率を有する銅材料として認められている。

文 献

- (1) 宅野直毅, 山道哲雄, 小島 陽, 鎌土重晴, 伊藤裕一, 上野輝生: 伸銅技術研究会誌, **37**(1998), 44-50.
- (2) H. W. King: J. Mater. Sci., **1**(1966), 79-90.
- (3) J. O. Linde: Helv. Phys. Acta, **41**(1968) 1007-1015.
- (4) K. Maki, Y. Ito, H. Matsunaga and H. Mori: Scr. Mater., **68**(2013), 777-780.
- (5) 松永裕隆, 牧 一誠, 有澤周平, 秋坂佳輝, 西村 透, 森広行: まてりあ, **56**(2017), 88-90.
- (6) 小松伸也: 銅と銅合金, **41**(2002), 1-9.