

強度と導電性に優れた車載端子用 固溶型銅合金「MSP[®]5」の開発

伊藤優樹¹⁾ 牧一誠²⁾ 小林敬成³⁾* 小池慎也⁴⁾**

1. 緒言

近年、自動車のエレクトロニクス技術の高度化に伴う、車載用電子・電気機器の多機能化、高性能化の進展により、コネクタにもより一層の小型化、薄型化、多極化、軽量化が求められている。そのため、コネクタに使われる車載端子も小型化、軽量化の要求が大きくなり、車載端子用銅合金板には更なる薄肉化のための高強度、高導電性のニーズが高まっている。さらに、高温環境下でも確実に電気信号を送るために、オス型端子とメス型端子間の嵌合接合力を保つ高い信頼性が必要であり、その指標である耐力緩和特性に優れた銅合金が求められている。また、小型端子を作製する際に、厳しく複雑な曲げ加工を施すため、銅合金板の曲げ加工性も重要となる。すなわち、車載端子の小型化、軽量化に伴い、高強度、高導電性でありながら、耐力緩和特性と曲げ加工性に優れた銅合金の開発が望まれている。

2. 車載端子用銅合金の開発課題

従来、車載用小型端子の材料には、強度、導電性、耐力緩和特性に優れた Cu-Ni-Si 系合金(コルソン合金)に代表される析出強化型銅合金が採用されてきた。しかしながら、析出強化型銅合金は、端子への成形(特に箱形成形)時に割れが生じやすいなど曲げ加工性に課題がある。さらに、微細析出物を生成させるために、高価あるいは環境負荷の高い元素(Be, Ni, Co等)を用いて、多工程からなる複雑な加工熱処理を施す必要があり、コスト面、環境面での問題も抱えている。一方、端子用材料としては、曲げ加工性に優れているりん青銅や黄銅といった固溶強化型銅合金もあるが、従来の固溶強化型銅合金では、固溶元素の添加により機械的強度が向

上する一方、導電率の大幅な低下は避けられず、強度と導電性の両立という要求に対応できていなかった⁽¹⁾。さらに、従来の固溶強化型銅合金は、耐力緩和特性が低い傾向にあるため、特に車載用小型端子での利用は限定的であった。すなわち、固溶強化型銅合金では高強度と高導電性の両立および耐力緩和特性の大幅な向上は難しいとされ、車載端子の小型化、軽量化に適した新規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事はほとんどなかった。

3. 本合金の開発コンセプト

我々は、合金設計手法として過飽和固溶現象を利用した固溶強化に着目し、その合金元素として有効原子半径が大きい⁽²⁾、抵抗増加が小さい⁽³⁾、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 Mg の活用を図った⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。その結果、Mg を過飽和に固溶させ加工硬化させた銅合金が、高強度⁽⁴⁾⁽⁶⁾、高導電性⁽⁴⁾⁽⁶⁾、優れた耐力緩和特性と曲げ加工性⁽⁵⁾、低比重⁽⁴⁾を有している事を見出し、特殊な製造工程や環境負荷の高いまたは高価な合金元素を用いることなく優れた特性を発揮する、軽量の Cu-高濃度 Mg 固溶強化型合金「MSP[®]5」の開発に成功した。MSP5 の組成と諸特性を表 1 に示す。MSP5 は固溶強化型銅合金でありながら、強度、導電性、耐力緩和特性において、コルソン合金等の析出強化型銅合金と比べても全く遜色がない。その上、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。以下にその特徴を記述する。

表 1 MSP5 の組成と諸特性ならびに他合金との特性比較。

	組成	質別	特 性			
			0.2%耐力 (MPa)	引張強度 (MPa)	導電率 (%IACS)	密度 (g/cm ³)
MSP5	1.6	EH	660	709	42	8.54
		SH	734	775		
りん青銅(C52100)	—	—	680	771	12	8.95
コルソン合金	—	—	686	735	40	8.87

* 三菱マテリアル株式会社 中央研究所 金属材料研究部：
1) 研究員 2) 主任研究員

** 三菱伸銅株式会社 技術部：3) 副主任 4) 主任
Development of MSP5, a High Strength and High Electrical Conductive Solid-solution Copper alloy for Automotive Terminal; Yuki Ito, Kazunari Maki, Takanori Kobayashi and Shinya Koike (*Mitsubishi Materials Corporation, Central Research Institute. **Mitsubishi Shindoh Co., Ltd.)
2015年10月30日受理[doi:10.2320/materia.55.67]

4. 本合金の特徴

(1) 耐力と導電率

車載端子においてどれだけ高い接触圧力が得られるかを示す性能指標としては、圧延方向と直角をなす方向(Transverse Direction, TD)の0.2%耐力(以下、耐力)が用いられる。図1に、各銅合金の耐力と導電率の関係を示す。図1から分かるように、Cu-Zn合金やりん青銅に代表される従来の固溶強化型銅合金には、耐力600 MPa以上、導電率30%IACS以上のものはなかった。従来、この高強度・高導電率の特性域が必要な場合、コルソン合金や低ベリリウム銅に代表される析出強化型銅合金が用いられてきた。ここで特筆すべきは、固溶強化型のMSP5が、析出強化型銅合金のみが有していた高強度・高導電率の特性を発現している事である。MSP5は、耐力が同等のりん青銅のC52100と比較して、3.4倍の導電率を有している。Cu-Zn合金のC26800と比較して、耐力は200-280 MPa高く、導電率は1.6倍である。

(2) 耐力緩和特性

図2に、各銅合金の150°Cにおける残留応力率の測定結果を示した。残留応力率とは、試験片に弾性範囲内の負荷(TDの耐力に対し80%の負荷)をかけて所定時間保持した時の、残存ばね保持力の初期ばね保持力に対する割合である。この値が100%に近いほど耐力緩和特性が優れており、車載端子用銅合金では、150°C、1000時間後に80%以上を求められる事が多い。図2に示される通り、固溶強化型銅合金であるりん青銅やCu-Zn合金は残留応力率が短時間で低下するため、車載端子での利用は限定的であった。一方、MSP5は、従来の固溶強化型銅合金には見られなかった、非常に優れた耐力緩和特性を発現している。50時間後に、りん青銅のC52100は82%、Cu-Zn合金のC26800は45%まで劣化するのに対し、MSP5は94%とほとんど低下していない。1000時間後では、C52100は51%、C26800は26%まで劣化しているが、MSP5は85%と十分な耐力を維持できている。耐力緩和特性の高さを特長とするコルソン合金や低ベリリウム銅といった析出強化型銅合金と比較して

も、MSP5は同等以上の非常に優れた耐力緩和特性を発揮している。溶質原子と母相原子との半径比および溶質濃度が高いほど、コトレル雰囲気による転位の易動度が低下し、耐力緩和特性が向上する⁽⁷⁾。これから、MSP5は、有効原子半径が銅の約1.15倍⁽²⁾と大きいMgを過飽和に固溶しているため、優れた耐力緩和特性を有していると言える。

車載端子は高温環境下で用いられる場合が多く、初期の接触圧力よりも、高温保持後の接触圧力の方が重視される。初期耐力に、150°Cで1000時間後の残留応力率を掛けた値を残留耐力と定義し、高温保持後にどれだけ高い接触圧力が得られるかを示す性能指標とした。その残留耐力と導電率の関係を図3に示す。

図1の初期耐力と導電率の関係と図3を比較すると、従来の固溶強化型銅合金と析出強化型銅合金の特性バランスの差異はさらに大きくなっている。MSP5は、優れた耐力-導電率バランスと耐力緩和特性の両方を有しており、固溶強化型銅合金でありながら析出強化型銅合金に比べても全く遜色がない残留耐力-導電率バランスを示している事は注目に値する。また、MSP5と従来の固溶強化型銅合金の残留耐力-導電率バランスを比較すると、MSP5は、りん青銅のC52100に対し残留耐力が210-240 MPa高く、3.4倍の導電率を有し、Cu-Zn合金のC26800に対しては残留耐力が440-470 MPa高く、導電率は1.6倍である。これから、MSP5

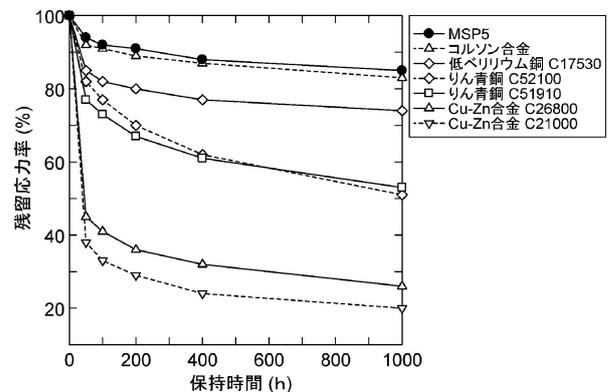


図2 各銅合金の残留応力率の時間依存性(150°C, TD, 厚さ: 0.15 mm).

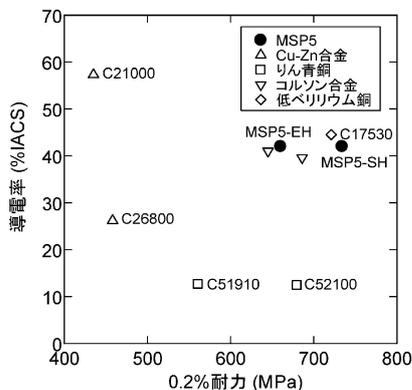


図1 各銅合金の耐力(TD)と導電率の関係(厚さ: 0.15 mm).

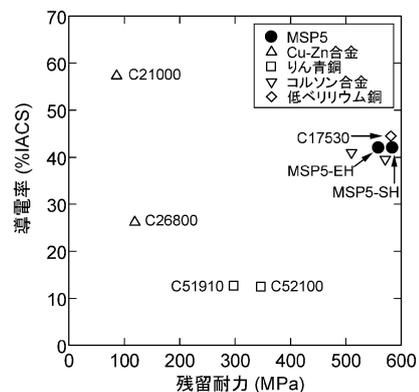


図3 各銅合金の残留耐力(TD)と導電率の関係(厚さ: 0.15 mm).

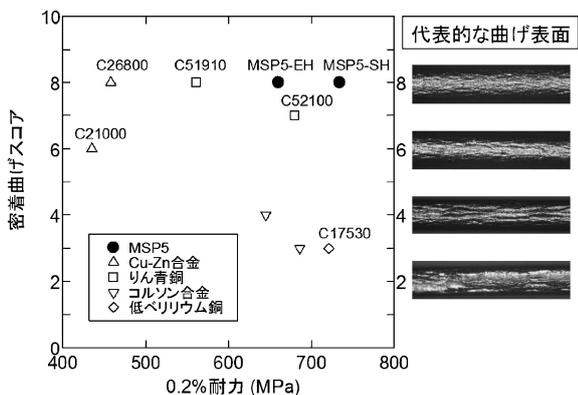


図4 密着曲げスコアと密着曲げ表面の関係, 各銅合金の耐力(TD)と密着曲げスコアの関係(厚さ: 0.15 mm).

は, 従来の固溶強化型銅合金と比較し, 卓越した残留耐力・導電率バランスを発現していると言える。

(3) 曲げ加工性

図4に各銅合金の密着曲げスコアと耐力の関係を示す。密着曲げスコアとは曲げ軸が圧延方向に垂直となる様に密着曲げを行った際の曲げ部表面の状態を1~10(1:劣, 10:優)で類別した値であり, 5以下の場合に明瞭なクラックが観察される。図4から分かるように, 固溶強化型銅合金であるりん青銅やCu-Zn合金は, 曲げ加工性が非常に優れている。MSP5も同様に優れた曲げ加工性を示しており, 図5に示したMSP5の密着曲げ観察結果からもこれは確認できる。一方, 析出強化型銅合金は, 耐力が同等の固溶強化型銅合金であるMSP5やりん青銅と比較し, 曲げ加工性は劣る。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事が要因の一つとして挙げられる⁽⁴⁾⁽⁸⁾。

(4) 密度

MSP5の特徴の一つに低比重(軽量)が挙げられる。図6に各銅合金の密度と耐力の関係を示す。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, 耐力が同等の銅合金やりん青銅と比べ, 端子を約5%も軽量化できる。加えて, これらの銅合金に対し, 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, 端子コストの低減にも大きく貢献する。

5. 本合金の将来性と発展性

従来, 高強度・高導電性銅合金の設計手法は析出強化が主流であったが, 過飽和固溶現象を利用した固溶強化に着目し, その合金元素にMgを活用した事が, 開発合金「MSP®5」の他にはない特徴を生み出している。MSP5は, 高強度, 高導電性, 優れた耐応力緩和特性と曲げ加工性, 軽量と

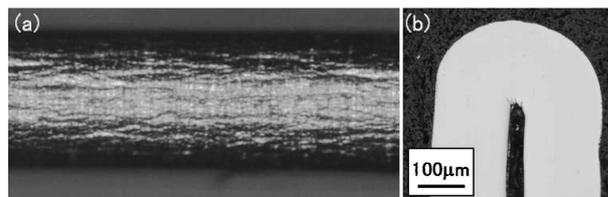


図5 MSP5の密着曲げ写真(幅: 10 mm, 厚さ: 0.15 mm). (a)密着曲げ部, (b)断面観察写真

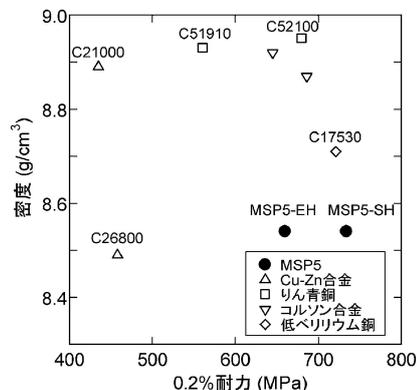


図6 各銅合金の耐力(TD)と密度の関係(厚さ: 0.15 mm).

いう性能面だけではなく, 環境負荷の高いまたは高価な合金元素(Be, Ni, Co, Sn等)を用いず, 天然資源である銅の消費も抑制できるという環境面, さらには複雑な加工熱処理を必要とせず既存の単純な製造工程で作製できるという生産性にも優れていることから, 小型化, 軽量化, 環境負荷低減, 低コスト化が望まれている多種多様な電子および電気機器用の導体材料として幅広い展開が期待される。特に, 車載用小型端子においては, 従来材である銅合金と比べ, 端子への成形性に優れていることから, 次世代の車載端子用高性能銅合金として大いに注目を集めている。本合金の関連特許は, 国内で20件以上出願され, 例えば日本国特許第5045783号として権利化されている。特許出願は世界各国でもなされ, 権利化が進んでいる。また, MSP5は銅開発協会(CDA)にて合金番号C18670として登録されている。

文 献

- (1) R. Davis (Ed.): ASM Specialty Handbook Copper and Copper Alloys, ASM International, Materials Park, OH, (2001), 3.
- (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) 伊藤優樹, 松永裕隆, 森 広行, 牧 一誠: 銅と銅合金, **53**(2014), 198-202.
- (6) Y. Ito, H. Matsunaga, H. Mori and K. Maki: Mater. Trans., **55**(2014), 1738-1741.
- (7) 野村幸矢, 三輪洋介, 島田祐介, 渡邊千尋, 門前亮一: 日本金属学会誌, **74**(2010), 325-330.
- (8) 山崎一正, 水山弥一郎, 岡 賢, 徳永良邦: 塑性と加工, **36**(1995), 973-978.