

# 導電性と耐応力緩和特性に優れた車載電子機器向け大電流用固溶強化型銅合金「MSP<sup>®</sup>8」の開発

松永裕隆<sup>1)</sup> 牧一誠<sup>1)\*</sup> 有澤周平<sup>2)\*\*</sup>  
秋坂佳輝<sup>2)\*</sup> 西村透<sup>1)</sup> 森広行<sup>2)</sup>

## 1. 緒言

近年、ハイブリッド車や電気自動車等の環境車の需要増大から、車載部材では大電流化のニーズが増大しており、用いられる銅合金にも、より優れた導電性、耐応力緩和特性(熱によるばねのへたり難さ)、強度が求められている。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る。黄銅、りん青銅に代表される固溶強化型銅合金は、固溶元素を加えることから導電率が低いものが多い。さらに、固溶強化型は耐応力緩和特性も低い傾向にあるが、複雑な熱処理が不要なため、工程負荷が小さく、製品にした際の特性ばらつきも小さい。一方、析出強化型銅合金は、導電性に優れるものが多いが、溶体化や時効熱処理が必要なため製造工程は煩雑となり、熱処理に起因する特性ばらつきも大きい傾向にある。上記の理由で、70% IACS(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)を超えるような高導電性銅合金には、Cu-Fe-P 系、Cu-Zr 系、Cu-Cr-Zr 系に代表される析出強化型が多用されており、固溶強化型として、大電流用車載電子機器に対応できる導電性と耐応力緩和特性を両立する銅合金は存在しなかった。著者らは合金設計手法として添加元素に Mg を用いた固溶強化型(Cu-Mg 系)に着目しており<sup>(1)(2)</sup>、今回、組成としては純銅に近い Mg 希薄固溶においても、優れた耐応力緩和特性を示すことを発見した。これを活用することにより 80% IACS を超える高い導電率と優れた耐応力緩和特性を合わせ持つ Cu-Mg 希薄固溶合金を開発したので報告する。

## 2. 高導電性銅合金に適する固溶元素(Mg)

我々は高導電性銅合金に適する固溶元素を選定するにあたり、LSF(Linear Size Factor)<sup>(3)</sup>と抵抗増加<sup>(4)</sup>のバランスに着目した。LSF 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 LSF と 1 at% 添加時の導電率を示す。Ag, Au, Cd, Mg(点線枠)は、70% IACS 以上、かつ LSF 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 が高導電性固溶強化型銅合金の固溶元素として最も有望であると判断し、新合金の開発に着手した。

次に Mg の添加量を決定するため、Mg : 0.01~1.8 at% で、特性調査を行った。また、他の固溶強化型銅合金と比較するため、Sn : 0.025~0.4 at%、Ni : 0.025~1.0 at%、Zn : 0.025~4.0 at% も同時に作製した。なお、本試験では、機械的特性に対する固溶元素の効果以外の因子を極力減らすため、各試料の結晶粒径を統一、仕上圧延率を 90% とし厚さ 0.25 mm の薄板を作製した。

図 2 (a) に 0.2% 耐力と導電率の関係を示す。いずれの合金系でも固溶元素の増加による耐力の向上と導電率の低下がみられるが、Cu-Mg 系は他の既存銅合金と比べ、高い耐力-導電率バランスを示すことが確認された。85% IACS を示

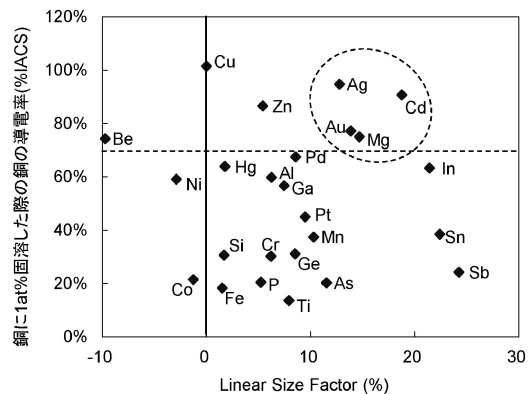


図 1 種々の固溶元素の LSF と 1 at% 添加した際の導電率。

\* 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 若松製作所 技術部：  
1) 副部長 2) 主任

Development of MSP8, a Solid-solution Copper Alloy with High Electrical Conductivity and Superior Stress Relaxation Property for High Current Use in Automobile Electronics; Hiroataka Matsunaga\*, Kazunari Maki\*\*, Shuhei Arisawa\*\*, Yoshiteru Akisaka\*\*, Toru Nishimura\* and Hiroyuki Mori\* (\*Mitsubishi Materials Corporation, Central Research Institute. \*\*Mitsubishi Shindoh Co., Ltd.)

2016年11月30日受理[doi:10.2320/materia.56.88]

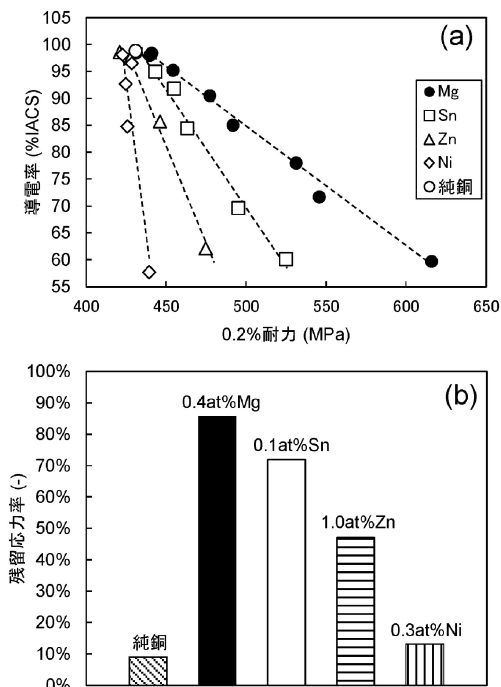


図2 純銅と固溶強化型銅合金(Cu-Mg, Cu-Sn, Cu-Zn, Cu-Ni).  
 (a) 耐力(LD)と導電率  
 (b) 純銅と85%IACSの銅合金の残留応力率(LD, 180°C, 24h)

す各合金系の試料を比較しても、Cu-Mg系が最も高い耐力を有することも分かる。

純銅と85%IACSを示す各合金系の試料の残留応力率を図2(b)に示す。残留応力率とは、試験片に弾性範囲内の負荷(LD(Longitudinal Direction: 圧延方向に平行)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り、この値が100%に近いほど耐力緩和特性が優れる。純銅の残留応力率はわずか9%であり、耐力緩和特性は非常に低い。過去に1.8~6at%の高濃度域のMgの固溶で耐力緩和特性が向上することは報告されていたが<sup>(2)(5)</sup>、今回0.4at%(0.15mass%)のMgの希薄固溶が、組成としては純銅(99.9mass%)に近いにも関わらず、86%という高い残留応力率を示し、耐力緩和特性の大幅な向上をもたらすことを発見した。加えて、このCu-Mg希薄固溶合金は、85%IACSを示す固溶型銅合金のなかで、耐力緩和特性において卓越していることも分かった。

### 3. 本合金の開発コンセプト

開発した大電流用Cu-Mg希薄固溶合金「MSP\*8」の組成と諸特性を、高濃度Mgを固溶した従来のMSP1とMSP5とともに、表1に示す。なお、TD(Transverse Direction)は圧延方向に対して直角方向を意味する。MSP8は前述の結果を元にMg添加量の調整と極微量元素による組成の最適化を行っているが、大電流用途に適した高い導電率を得るため、Mg濃度をMSP1と比べ約1/3、MSP5と比

表1 MSP8の組成、特性一覧ならびに他合金との特性比較。

	組成 Mg (mass%)	質別	方向	導電率 (%IACS)	0.2% 耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	残留応力率 (%)
MSP8	0.25	H	LD	82	401	423	83
			TD				
MSP1	0.7	H	LD	62	515	529	82
			TD				
MSP5	1.6	H	LD	43	543	593	83
			TD				

べ約1/6と、大幅に低減させている。それにより、MSP8は80%IACS超の高い導電率を有し、高濃度のMgを含むMSP1やMSP5では適用できなかった大電流用途への適用が可能となっている。一方、MSP8はMg濃度が希薄にも関わらず、従来のMSP1やMSP5と同等以上の優れた耐力緩和特性を確保している。その結果、MSP8は既存の固溶強化型銅合金には存在しなかった高導電率と高耐力緩和特性の両方の特性を有している。さらに材料特性の異方性も小さいため、バスバー等のLD, TDともに高い特性が必要となる用途にも適している。これらの優れた材料特性に加え、豊富な埋蔵資源であるMgの活用や、固溶強化型銅合金であることによるシンプルな製造工程、小さな特性ばらつきという特長も有している。以下にその詳細を記述する。

## 4. 本合金の特徴

### (1) 耐力と導電率

車載用銅合金の薄板化による小型化やコストダウンには、より高い耐力と導電率が必要となる。図3に、各銅合金の耐力と導電率の関係を示す。一般的に銅合金の耐力と導電率はトレードオフの関係にあるが、MSP8はC52100やC51910(りん青銅)、C21000やC26800(Cu-Zn系)といった従来の固溶強化型合金、さらには析出強化型銅合金であるC15100(Cu-Zr系)やC19400(Cu-Fe-P系)と比較しても同等以上の優れた耐力-導電率バランスを示すことがわかる。また、MSP8の導電率は80%IACSを超え、従来の固溶強化型より高く、析出強化型に匹敵している。

### (2) 耐力緩和特性

高温環境で使用される車載端子用銅合金では、150°C、1000時間後に80%以上の残留応力率を求められる事が多い。図4に各銅合金の残留応力率を示す。MSP8は150°C、1000時間の高温保持後も80%以上の残留応力率を保持しており、析出強化型のC15100と同等、既存の固溶強化型銅合金(C26800, C51910)に大きく勝る耐力緩和特性を示す。車載端子の使用を考慮した場合、初期の接触圧力そのものよりも、高温保持後の接触圧力の方が信頼性の点から重視される。そのため、初期耐力に、150°C、1000時間後の残留応力率を掛けた値を残留耐力と定義し、高温保持後の接触圧力を示す性能指標とした。図5に残留耐力と導電率の関係を示す

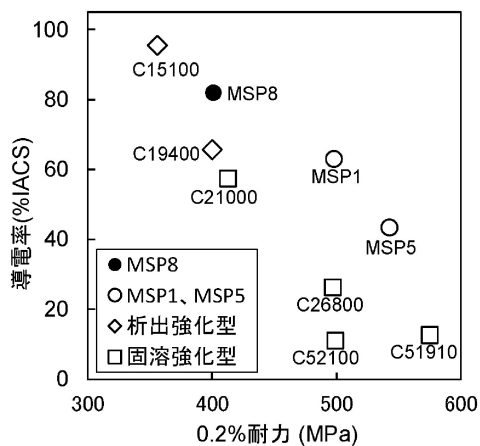


図3 MSP8 と各銅合金の耐力(LD), 導電率の比較.

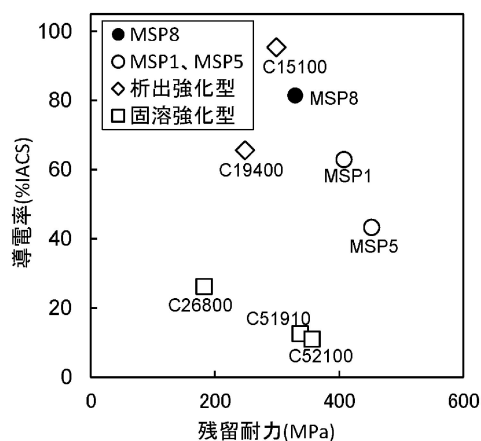


図5 MSP8 と各銅合金の残留耐力(LD), 導電率の比較.

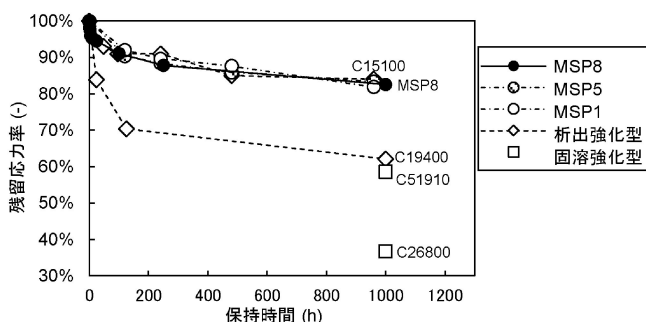


図4 MSP8 と各銅合金の残留応力率(LD, 150°C).

が, MSP8 は前述の通り, 優れた残留応力率を示すため, 図3の耐力-導電率と比較し, さらに卓越した特性バランスを示す. 従来, 固溶強化型として, 大電流用車載電子機器に対応できる高導電性と高耐力緩和特性を両立する銅合金は存在しなかったが, MSP8 は析出強化型銅合金と同等以上の導電性と耐力緩和特性を示すため, 十分適用できる.

### (3) 曲げ加工性

図6に180°密着曲げ試験結果を示す. 本試験では大電流用途への適用を考慮して, 材料板厚が0.64 mmと厚い試験片を用いている. 一般的に, 板厚が厚くなると曲げ加工性は劣化する傾向にあるが, 最も厳しい曲げ条件である180°密着曲げでも, MSP8に割れは確認されなかった. また曲げ加工性の異方性も無く, LD, TDともに優れた曲げ加工性を確保しているため, バスバー用途にも適している. これはMSP8の組成が純銅に近いこと, 黄銅型圧延集合組織の代表的な結晶方位で, 方向TDの曲げ加工性を劣化させるBrass方位{110}<112><sup>(6)</sup>への配向が弱いことが要因であると考えられる.

## 5. 本合金の将来性と発展性

Mgは高導電性銅合金として相応しい耐力-導電率バランスを発揮する優れた固溶元素であり, さらに環境負荷も小さい. 今回我々は, 組成としては純銅に近いMg希薄固溶においても, Mgは耐力緩和特性の大幅な向上をもたらすこ

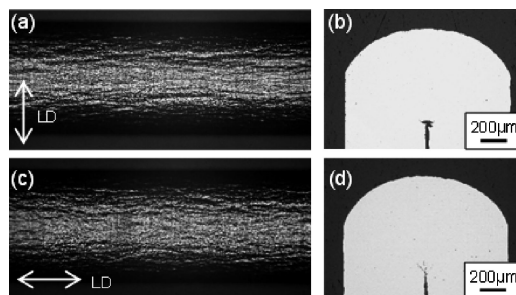


図6 MSP8の密着曲げ写真(幅: 10 mm, 厚さ: 0.64 mm).

方向LD: (a) 密着曲げ部, (b) 断面観察写真  
方向TD: (c) 密着曲げ部, (d) 断面観察写真

とを発見した. さらに, これを活用することで, 従来には存在しなかった高導電性と高耐力緩和特性を合せ持つ固溶強化型合金「MSP<sup>®</sup>8」を開発した. Cu-Mg希薄固溶合金であるMSP8は, 80%IACSを超える高い導電率と, 150°Cの高温保持(1000時間)後も80%以上の残留応力率を保持する耐力緩和特性を有していることから, 高い特性と安定的な品質が望まれる多種多様な大電流用導体材料として幅広い展開が可能である. また, 幅広く使用されているMSP<sup>®</sup>1や, 小型端子に採用されている高強度銅合金MSP<sup>®</sup>5と同じMSPシリーズとして新たにラインナップされ, 特にその高い導電率と耐力緩和特性から, 車載電子機器の大電流用途のスタンダード合金となることが期待される. 本合金の関連特許は, 国内や海外で10件以上出願され, 例えば日本国特許第5910790号として登録され, 権利化が進んでいる.

## 文 献

- (1) K. Maki, Y. Ito, H. Matsunaga and H. Mori: Scr. Master., **68** (2013), 777-780.
- (2) 伊藤優樹, 松永裕隆, 森 広行, 牧 一誠: 銅と銅合金, **53** (2014), 198-202.
- (3) H. W. King: J. Mater. Sci., **1**(1966), 79-90.
- (4) J. O. Linde: Helv. Phys. Acta, **41**(1968), 1007-1015.
- (5) 鈴木竹四, 熊谷誠司, 桑原萬平, 本間 繁: 日本金属学会会報, **30**(1991), 292-294.
- (6) M. Kuroda and V. Tvergaard: International Journal of Plasticity, **23**(2007), 244-272.