

(技術資料)

耐応力緩和特性に優れた高導電率銅合金CAC[®]18

High Electrical Conductivity and High Heat Resistance Copper Alloy, CAC[®]18



隅野裕也^{*1} (博士(工学))
Dr. Yuya SUMINO

Dedicated high-voltage circuits mounted in hybrid cars and electrical vehicles energize 150 to 200A of current. Hence, wires are fastened to their harnesses by bolts in order to secure contact reliability, while a mating type that ensures spring contact is being required to facilitate installation management, secure work space and improve dismantlability. Although we have a lineup of copper alloys for energizing high current, including KFC[®], Super KFC[®] and CAC[®]16, they lack stress-relaxation resistance required to maintain the spring contact for an extended period of time and are also deficient in conductivity and strength. Against this backdrop, a copper alloy has been developed on the basis of Cu-Cr-Ti-Si system, in which Cr and Ti are added to improve stress-relaxation resistance. The optimization of the additive amount of Cr, Ti and Si has led to the development of a Cu-Cr-Ti-Si system alloy, CAC18, having both high conductivity and excellent stress-relaxation resistance. This paper explains the characteristics of CAC18.

ま え が き = 地球温暖化防止のため、乗用車の炭酸ガス排出量低減や燃費向上は必要不可欠となっている。近年、モータとエンジンを組み合わせて走るハイブリット自動車（以下、HEVという）やモータのみで走る電気自動車（以下、EVという）が市場に投入されており、今後も需要が増大すると予想される。

HEVやEVには、電池・パワーコントロールユニット・モータを接続するための高圧回路が搭載されている。電気部品とハーネスの接続方法としては、高い接触力や振動などの車両環境に強く、かつ簡素な構造の接続構造を得ることができることからボルト締結式が多用されている。しかし、取り付け時の管理や工数増加、また作業スペースの確保や解体性の向上を背景に、ばね接続をする嵌合（かんごう）型が要求されている¹⁾。

ワイヤハーネスは通電電流が150~200Aと高く、接続端子にはジュール熱が発生する。この熱を低減するため、優れた電気伝導性すなわち導電率が求められる。ここで、導電率とは、焼鈍された純銅について20℃における固有抵抗が1.7241μΩcmであるとき、これを100%IACS（International Annealed Copper Standard, 以下IACSという）としたときの比率をいう。20℃付近では、導電率は熱伝導率に比例する²⁾。さらに、良好な接点を保つために、エンジンルームや室内など搭載部位を取り巻くいかなる温度環境でも強度やばね性を維持する耐応力緩和特性が求められる。そうした要求を満足すべく、当社は高電流用ワイヤハーネス向け銅合金製端子材の開発を続けてきた。

大電流を通電する部材向け銅合金として当社は、

KFC^{®注1)3)}やSuperKFC^{®注2)4)}を開発している。しかし、これらの合金は耐応力緩和特性が低く、例えばばね接続を利用した嵌合型の端子ではばね性を長期に維持できない。いっぽう、耐応力緩和特性と強度を兼備したCAC^{®注3)}16もラインナップしているが、導電率が高くない。

これらの問題に対し、耐応力緩和特性に優れた高導電率と強度を兼備したCAC[®]18を開発した。そこで本稿では、CAC18の材料特性を紹介する。

1. 化学組成および物理的特性

CAC18の代表的化学組成を表1に示す。表には比較としてCDA18070⁵⁾も併記した。CAC18は、欧州および米国での入手性を考慮してCDA18070の組成範囲で実用化した銅合金である。銅母相に主成分としてCr, Ti, Siを含有し、加工熱処理後の導電率が80%IACSとなる

表1 CAC[®]18の代表的化学組成
Table 1 Typical chemical compositions of CAC[®]18

Alloy	Chemical compositions (mass%)			
	Cu	Cr	Ti	Si
CAC [®] 18	Bal.	0.3	0.05	0.02
CDA18070	≥99.0	0.15~0.40	0.01~0.40	0.02~0.07

脚注1) KFCは米国および日本（第1738660号）における当社の登録商標である。

脚注2) SuperKFCは米国および日本（第5548762号）における当社の登録商標である。

脚注3) CACは米国および日本（第4003113号）における当社の登録商標である。

*1 アルミ・銅事業門 長府製造所 銅板工場

表2 高導電率銅合金の物理的特性

Table 2 Physical properties of copper alloys with high electrical conductivity

Alloy	Specific gravity (g/cm ³)	Coefficient of thermal expansion 293~573K (μ/K)	Electrical conductivity (%IACS)	Modulus elasticity (GPa)
CAC [®] 18	8.9	17.1	80	138
KFC [®]	8.9	17.5	90	125
SuperKFC [®]	8.9	17.5	78	122
CAC [®] 16	8.9	17.6	61	118
Fe-Cr-Ni alloy SUS316	8.0	--	2.3	193
Al-Mg-Si alloy 6061-T4	2.7	24.4	40	69

よう添加量を決定した。

物理的特性および導電率を表2に示す。表には比較として当社開発合金であるKFC, SuperKFCおよびCAC16, また一般材としてSUS316⁶⁾とアルミ合金6061-T4⁷⁾も参考として併記した。ばね接続を用いる端子の接触力はフックの法則に従う。このため、弾性係数が高い方がより高い接圧が得られ接触力は強くなる。CAC18の弾性係数はこれまでの当社開発材よりも約1.1~1.2倍大きいため、従来材よりもばね材として優れると考えられる。

2. 機械的特性と曲げ性

代表的な機械的特性を表3に示す。KFC, SuperKFC, CAC16, SUS316およびアルミ合金を比較として併記した。引張試験は、圧延方向に対して平行に採取したJIS 5号引張試験片を用い、初期ひずみ速度 $3.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ で行った。

CAC18の0.2%耐力は、KFCと比較して約150MPa、CAC16と比較して約100MPa高い。導電率が同等のSuperKFCと比較してもCAC18は高強度である。

金属の強化機構には、固溶強化、加工強化、析出強化および結晶粒微細強化がある⁸⁾。Cu-Cr-Ti系合金の強化

機構は、Cr系析出物の析出強化と銅母相中に固溶したTiの固溶強化などの強度加算則が成り立つとの報告がある⁹⁾。CAC18は、添加しているCr, Ti, Siが全て銅母相中に固溶した状態では導電率が40%IACS程度であるが、加工熱処理によってCr化合物を析出させて導電率を80%IACSまで向上させている。すなわち、CAC18についても、上述した強化メカニズムと同様にCr系析出物による強化と固溶強化によって強度が増加していると考えられる。

いっぽう、強度と相反するのが成形加工性、とくに曲げ加工性である。曲げ加工性を評価するため、板厚0.64mmの材料から圧延方向に対して平行 (Good Way, 以下G.W.という) および直角 (Bad Way, 以下B.W.という) に試験片を切り出し、曲げ半径 r が板厚 t の半分となる条件 ($r=0.3\text{mm}$, $r/t \approx 0.5$) にてW曲げ試験を行った。W曲げ試験は、W字形の上型と下型の間に試験片を置き、上型を当てて荷重を加えて規定の形に曲げる試験方法であり、日本伸銅協会JCBA T307:2007に準拠した。W曲げ後の試験片に対し、頂点部について曲げ表面外観観察と曲げ軸に垂直断面の観察を行った。CAC18とCAC16のW曲げ試験の結果を図1に示す。い

表3 高導電率銅合金の機械的特性

Table 3 Mechanical properties of copper alloys with high electrical conductivity

Alloy	Temper	Tensile strength (MPa)	0.2% yield strength (MPa)	Elongation (%)	Spring (MPa)
CAC [®] 18	H	580	550	12	450
KFC [®]	H	435	390	7	--
SuperKFC [®]	ESH	540	530	11	--
CAC [®] 16	H	480	430	10	400
Fe-Cr-Ni alloy SUS316	--	≥520	≥205	≥40	--
Al-Mg-Si alloy 6061-T4	T4	240	145	22	--

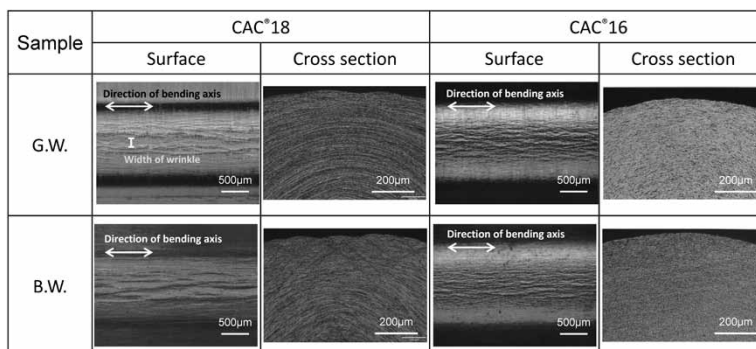


図1 W曲げ後の曲げ表面と曲げ部断面の観察

Fig. 1 Images of surface and cross-section after W bending tests (Test conditions: sample thickness $t=0.64\text{mm}$, bending radius $r=0.3\text{mm}$)

ずれの合金も、曲げ軸方向に伸びたしわ状の肌あれが曲げ表面に認められる。しわの状態は、CAC18の方が幅が広くまた長さが長い。しかし、曲げ頂点部の断面に割れは認められない。曲げ加工性は、強度が高くなると一般的に低下し、また表面しわの状態は均一伸びや結晶粒組織に影響される。CAC18はCAC16よりも強度が高いため曲げ性は劣る傾向である。そもそもCu-Cr系合金は、同程度の伸びを有する他合金系のりん青銅(C5191)や黄銅(C2600)よりも曲げ性が劣ると報告されている¹⁰⁾。CAC18は、他の当社開発合金と比較して表面のしわが多いものの、割れは無いため、実用上問題ない。

3. 耐力緩和特性

ばね接続する嵌合型端子は、長期に安定した接圧が要求される。端子の接点は、ばね部に応力が負荷された状態において通電によるジュール熱と雰囲気温度にさらされる。また、突発的に過電流が流れた場合にはさらに高い温度にさらされる。接点圧力が低下して接触抵抗が増加すると接点部の温度が上昇し、端子材料自体の温度も上昇する。温度上昇により材料の機械的性質が変化し、接点接触力低下につながって温度上昇を助長する。そのため端子の接点は、いかなる状況においても安定な接圧を維持し接触抵抗を常に低くする性能が求められる。

良好な接続を維持するためには、熱環境に対応できる耐力緩和特性が必要である¹¹⁾。耐力緩和特性は、接触部同士がボルト締結されるバスバーにも要求される¹²⁾。

図2にCAC18を180℃で加熱保持した場合の耐力緩和率の変化を示す。従来の回路では、例えばエンジンルームに搭載された場合でも雰囲気温度と通電発熱で150℃の耐力緩和特性が要求されていたが、大電流回路では瞬間的な過電流で接点部が180℃程度まで温度が上昇する。このため本試験では、180℃で耐力緩和試験を行った。比較としてCAC16とSuperKFCも示す。試験条件は日本伸銅協会JCBA T309:2004に準拠し、片持ち梁式にて実施した。試験片は板厚0.64mmの板材から圧延方向に対して直角方向に切り出し、片持ち梁の自由端を10mm持ち上げたときに固定端部に生じる応力が0.2%耐力

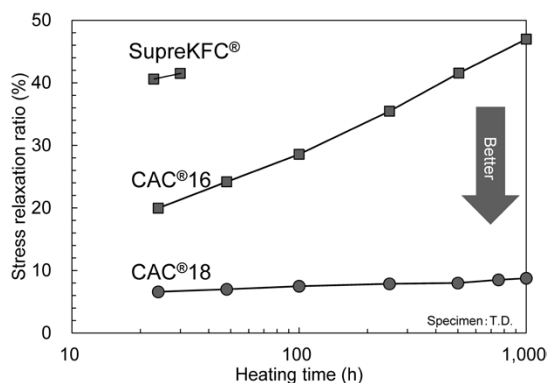


図2 180℃加熱における耐力緩和率の変化
Fig. 2 Change of stress relaxation ratio at 180℃
 (Test conditions: sample thickness 0.64mm, initial load 0.2%Yield strength×80%)

力の80%となるよう標点距離を調整した治具にセットした。応力を負荷したまま180℃の恒温槽で加熱した後負荷を除去し、変形量をレーザー変位計で測定した。CAC18の1,000時間加熱後における耐力緩和率は約10%であり、CAC16と比較すると約1/5である。24時間加熱後と1,000時間加熱後の耐力緩和率の変化量についても、CAC18が約3%に対しCAC16は25%とCAC18が著しく小さい。SuperKFCは24時間後の耐力緩和率がすでに大きく、導電率と強度はCAC18と同等であるが耐力緩和特性は劣る。CAC18の耐力緩和特性は、従来の当社開発合金よりも圧倒的に優れる。

耐力緩和は転位の熱活性化過程により転位が移動する現象で、加熱時間とともに緩和率は増加する。CAC18はこの変化が著しく小さい。

4. すずめっき特性

自動車に搭載される端子は、電気伝導性に優れた銅合金が一般的に用いられる。銅合金の表面は硬い酸化被膜に覆われており、その状態で端子を嵌合させた場合、接点は酸化物を介して形成される。通電電流が低い場合は接触抵抗が増大し、接点部の温度を上昇させる原因となる¹³⁾。そこで、端子挿入時に酸化被膜を除去して金属新生面での接触を確保する目的から、端子材料には酸化被膜の強度が低いすずめっきが施される。自動車向け端子は近年、エンジンルームへの搭載が多くなることに加え、電子機器の高機能化により通電電流が増加している。このため、150~180℃の温度環境にさらされることが予想される。前述したように、端子接点はすずめっきを介して形成されるため、加熱によってすずめっきが剥離(はくり)した場合、電気的信頼性の低下につながる可能性がある。

当社では、すずと銅の金属間化合物層(IMC, intermetallic compound)とすず層の2層で構成される一般的なリフローすずめっきに加え、ニッケル層、すずと銅の金属間化合物層、すずと金属間化合物の混合層の3層で構成される新リフローめっきを開発し量産している。これらすずめっき付銅合金の断面構造の概略を図3に示す。

めっき性能を評価するため、Niめっき、銅めっき、すずめっきの順に電気めっきを行い、その後リフロー処理を施した新リフローめっき付CAC18の接触抵抗を調査した。なおリフローとは、電着させたすずめっきを加熱して再溶解させる処理である。160℃の恒温槽で加熱後、



図3 すずめっき付銅合金の断面構造の概略
Fig. 3 Schematic image of cross-section of tin plated copper alloy
 (A) Reflowed tin plating, (B) New-reflowed 3 layer tin plating with Ni undercoat
 *IMC: intermetallic compound layer of Cu and Sn

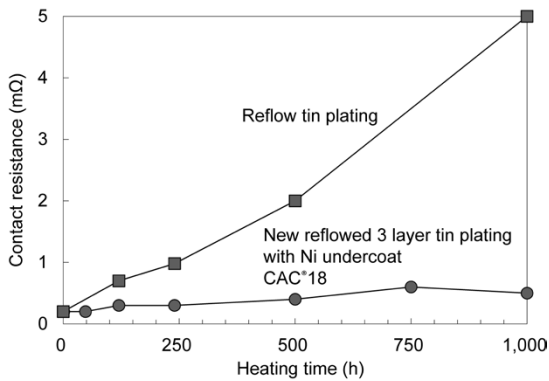


図4 160℃加熱における接触抵抗の変化
Fig. 4 Change of contact resistance at 160℃

印加電流10mA、接触荷重3Nの条件により(株)山崎精機研究所製電気接点シミュレータ(接触電気抵抗測定装置)CRS-1を用いて測定した。その結果を図4に示す。リフローすずめっきの接触抵抗は加熱時間とともに増加しており、250時間後には1mΩを超える。これに対して新リフローすずめっき付きCAC18は、1,000時間経過後も接触抵抗1mΩ以下を維持している。

高温環境下にさらされると母材成分である銅がすずめっき中に拡散し、CuとSnの金属間合金物が形成される。この金属間合金物が成長して材料表面に到達すると酸化銅が表面に形成され、接触抵抗が増大すると考えられている¹⁴⁾。当社の新リフローめっきは、ニッケル下地めっき層によってすずめっき層への銅の拡散を抑制し、金属間化合物の成長を遅延させる技術である。ニッケル下地めっき層による銅の拡散抑制効果はCAC18においても効果的であると考えられる。

加熱後のSnめっき剥離や端子嵌合時に問題となる微

摺動(しゅうどう)特性については今後引き続き調査を進める。

むすび=HEVおよびEV専用回路をはじめとする大電流ワイヤハーネス用の接続端子向けに、耐応力緩和特性に優れ高導電率と強度を兼備した銅合金CAC18を開発した。自動車のさらなる高機能化を背景に、耐熱性や導電率の要求はさらに強まることが予想される。接点の電気接触を良好に維持するには、素材だけでなく表面処理技術の組み合わせが必要になる。このため当社は、これら両面からの研究開発を継続していく所存である。

参考文献

- 1) 宮崎 正ほか. SEI テクニカルレビュー 2008年7月. 第173号, p.65.
- 2) 日本伸銅協. 銅および銅合金の基礎と工業技術. 1988, 645p.
- 3) 宮藤元久. 伸銅技術研究開始. 1982, Vol.21, p.80.
- 4) 有賀康博ほか. まてりあ. 2008, Vol.47, No.1, p.33-35.
- 5) Copper Development Association Inc., Properties of Wrought and Cast Copper Alloys, <https://www.copper.org/resources/properties/db/basic-search.php>, (参照 2016-5-18).
- 6) ステンレス協会. ステンレスの初歩 2015. p.55.
- 7) 日本アルミニウム協会. アルミニウムハンドブック 第7版, 2007, p.32.
- 8) 高木節雄. 塑性と加工. 2013-10, 第54巻, 第633号, p.2.
- 9) P. Zhang et al. J. Mater. Res. 2015, Vol.30, p.2073.
- 10) 富岡靖夫ほか. 伸銅技術研究会誌. 1994, Vol.33, p.232.
- 11) 野村幸矢. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.53.
- 12) 川窪裕己ほか. 第121回軽金属学会秋季大会講演概要. 2012, p.213.
- 13) 「コネクタ最新技術'99」編集委員会. コネクタ最新技術'99. 日本アドバンステクノロジー, 1999, 399p.
- 14) 鶴 将嘉ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.59.