

(解説)

電子電気部品用銅合金の熱的性質 2

野村幸矢*¹ (博士(工学))

Thermal Characteristics of Copper Alloys for Electronic Components Part 2

Dr. Koya NOMURA

要旨

電子電気部品用銅合金の熱的な性質を説明するために、導電率と熱伝導率が比例することを示したヴィーデマン・フランツの法則を詳細に説明するとともに、この法則の適用範囲と銅合金の組織変化による注意点を示した。熱伝導の観点から、はんだ付け性、溶接性、端子の接触抵抗と導電率の関係を解説し、浸漬はんだ付け性と抵抗溶接性は導電率の低い銅合金を用いるほど良好であることを示した。端子・コネクタの接触抵抗と接点発熱温度の関係について、その基本的な考え方を詳細に解説し、ジュール発熱を抑制する銅合金、すなわち導電性のより高い銅合金を用いるほど、接触信頼性は良好になることを示した。

Abstract

In order to explain the thermal characteristics of copper alloys for electronic components, the Wiedemann-Franz law, which shows that the electrical conductivity and thermal conductivity are proportional, has been explained in detail, and the scope of this law has been shown with notes associated with the microstructural changes of copper alloys. The relationships among the solderability, weldability, contact resistance of terminals and electrical conductivity have been explained from the aspect of thermal conductance. It has been shown that the lower the electrical conductivity of copper alloy, the higher the immersion solderability and resistance weldability become. The basic idea of the relationship between contact resistance and exothermic temperature at the contact of a terminal or a connector has been explained in detail, and it has been shown that the contact reliability improves when a copper alloy that suppresses Joule heating, that is, a copper alloy with a higher conductivity, is used.

検索用キーワード

銅合金, 端子, コネクタ, 導電率, 熱伝導率, 接触抵抗, 熱抵抗, 熱拡散, はんだ付け, 抵抗溶接

まえがき = 銅と銅合金は現代社会に欠かせない金属素材である。優れた導電性を生かして電線や導体などの通電用部材や半導体リードフレーム、導電性に加えてばねとしての優れた性質を生かして端子、コネクタ、リレー、スイッチなどの接点部品、よく熱を伝える性質からラジエーター、ヒートパイプ、半導体素子や電子機器の放熱板などに使用されている。

これらのさまざまなニーズに応えるために、20種類以上の銅合金板条が各伸銅品メーカーから販売されている。これらの銅合金の中から用途に見合った銅合金を選定する際、発熱や熱移動など熱にかかわる現象の観点から最適な銅合金を選ぶ方法について解説している文献は少ない。熱にかかわる現象はさまざまな要素が影響しあうため、最適な銅合金を選択するためにはその熱的性質をよく理解しておくことが重要である。本稿では、前報¹⁾に続き銅合金の熱的性質を解説する。

1. 目的と対象

本稿の目的は、熱や温度の観点からどのような銅合金を選択すればよいか、そのガイドラインを示すことにある。銅合金板条が多用される電子電気機器類の分野では、熱伝導、対流、放射の三つの観点から熱を取り扱うことが多い。アルミニウムや銅でも酸化被膜を表面に形

成すれば酸化物からの熱放射は増えるが²⁾、放射率が小さい金属表面を熱放射に利用する例はあまりない。対流は最も効率よく熱を運ぶ現象であるが、熱を運ぶ流体の性質が支配的であり、銅合金特性の影響は小さいと考えられる。銅と銅合金で利用されることが多いのは熱伝導である。本稿では、銅合金の性能指標の一つである導電率を目安にして、銅合金の熱的な性能、とくに熱伝導についておおよその指標を示す。なお、本稿では直感的な分かりやすさを優先するために、図表中の温度はケルビン単位 (K) ではなくセルシウス度単位 (°C) に統一して表示する。本文中においても、物理式の計算を除いて温度は°Cで表示する。

2. 銅合金の基本的な位置付けと導電率

銅合金の特性マップを図1に示す。図1では、横軸に塑性変形に対する抵抗力である0.2%耐力、縦軸に導電性の性能指標である導電率を取っている。また、銅合金では引張強さ、耐力ともビッカース硬さHVに比例するため³⁾、図1の上部に硬さHVと引張強さの概算値を用いた補助目盛を設置している。各銅合金については、当社ホームページ⁴⁾により詳しい技術データを記載しているので参照いただきたい。図1中の楕円は、各位置で主に使用される強化機構の分類を示している。ドットで

*¹ 素形材事業部門 銅板ユニット 銅板工場

ハッチングした楕円は導電率を向上させるために熱処理を行い、冷間圧延で強化した合金群を示している。濃いハッチングは熱処理で強化した合金群である。薄いハッチングは冷間圧延で強化した合金群である。斜線ハッチングの領域は導電率向上と強化に熱処理を用い、さらに圧延を併用した⁵⁾合金群である。銅合金は強化のために純銅にわずかな鉛などの元素を添加しているため、一般的に高強度銅合金ほど導電率は低く、ほとんどの銅合金は図1において右下がりの直線の左側に位置する。新合金の開発課題の一つは導電率と強度の両立である。図1中には当社の代表的銅合金の位置を白抜き丸で示している。また、JISで規定されている代表的な銅と銅合金である無酸素銅 (C10110)、黄銅 (C26000)、りん青銅 (C52100) も併せて示している。

ここで導電率について説明する。導電性は、物理的には比抵抗 ρ (単位: $\Omega \cdot m$) あるいは比抵抗の逆数である電気伝導度 $1/\rho$ で表される。比抵抗を体積抵抗率とい

うこともある。銅合金の分野では、導電性は比抵抗 ρ よりも直感的に理解しやすい導電率 E_c (単位: %IACS) で表すことが多い。 E_c は焼鈍標準軟銅 (比抵抗: $\rho_0 = 1.7241 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$) の導電率を 100%IACS と規定し、これを基準にして電気伝導度を百分率で示す方法⁶⁾ である。すなわち、導電率 E_c は式 (1) で表される。

$$E_c = \frac{\rho_0}{\rho} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

後述するように、導電率は熱伝導率に比例するため、熱的な指標としても非常に重要である。電気抵抗 R は比抵抗 $\rho \times$ 長さ / 断面積で示すことができる。そこで、金属の導電率の大小を視覚的に表現するために、同じ厚さで断面が正方形の金属板を想定する。また、同じ断面積で断面が円の金属棒を考える。この様子を図2および図3に示す。図2は銅の持つ導電率 100%IACS を基準として導電率 105, 80, 60, 40, 27, 15, 7%IACS が銅と同じ電気抵抗値になるために必要な面積を示している。同様

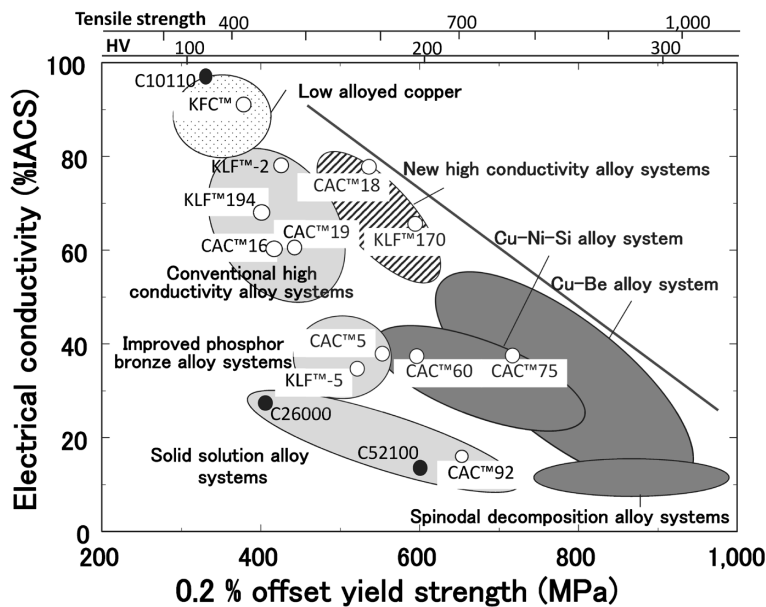


図1 合金系の位置付け
Fig.1 Position of various copper alloy systems in conductivity-strength map

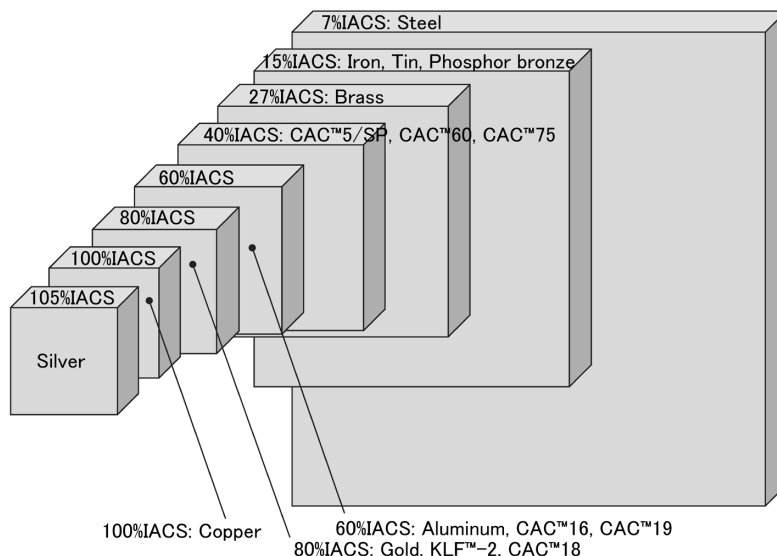


図2 銅と同等の電気抵抗値となるために必要な断面積
Fig.2 Required material cross sectional areas for equivalent conductivity of copper

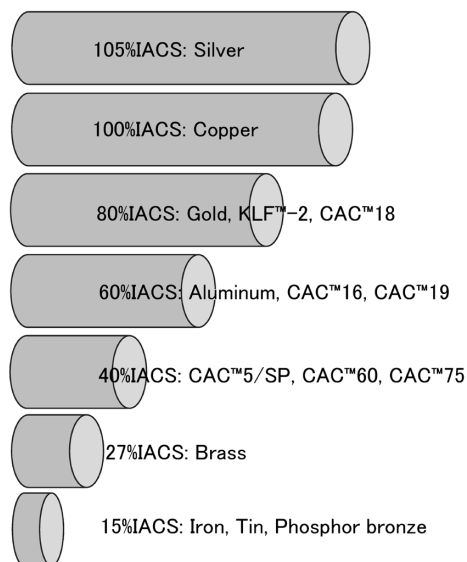


図3 銅と同等の電気抵抗値となるために必要な長さ
Fig.3 Required material lengths for equivalent conductivity of copper

に、図3は銅の持つ導電率100%IACSと同じ電気抵抗値になるために必要な長さを示している。図2および図3に示した導電率を持つ金属素材あるいは銅合金は、105%IACS：銀、80%IACS：金、KLF™-2、CAC™18、60%IACS：アルミニウム、CAC™16、CAC™19、40%IACS：CAC™6、CAC™5/SP、27%IACS：黄銅、15%IACS：純鉄、すず、りん青銅、7%IACS：鋼鉄である。純銅よりも低い導電率の合金素材に対して、純銅と同じ電気抵抗にするために必要な断面積と長さ（厚み）が視覚的に分かる。

3. 熱伝導率の温度依存性

前報¹⁾では、室温での熱伝導率と導電率の関係について解説した。本稿では、任意の温度における熱伝導率と導電率の関係について解説する。金属中では電気伝導も熱伝導も自由電子が担い手になるため、比抵抗 ρ と熱伝導率 κ の間にはヴィーデマン・フランツの法則（Wiedemann-Franz's law、以下W-F法則という）と呼ばれる経験式が存在する⁷⁾。この法則では式(2)のような関係が成り立つとしている。式(2)は本来、経験式であるが、金属自由電子論による検討から理論的にも成り立つことが明らかになっている。

$$\kappa = L_0 \times T \times \left(\frac{1}{\rho} \right) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $T(K)$ は温度、 L_0 はローレンツ数と呼ばれ、 L_0 の理論値は式(3)で表される。

$$L_0 = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k_b}{e} \right)^2 = 2.44 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega \cdot \text{K}^{-2}$$

$$\text{(または単位 } \text{V}^2 \cdot \text{K}^{-2} \text{)} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 k_b はボルツマン定数、 e は電子の電荷である。このローレンツ数は実験でも求められており、銅では固体から熔融して液体に至るまでの範囲で $2.3 \sim 2.4 \times 10^{-8}$ の値、銅合金では $2.1 \sim 3.1 \times 10^{-8}$ の値が得られている⁸⁾。熱伝導率 κ は、導電率 E_C あるいは比抵抗 ρ に比べてその測定が難しいが⁹⁾、W-F法則を使えば熱伝導率を導電

率から簡単に算出できるため実用性が高い法則である。逆に、金属薄膜の熱伝導率をレーザーフラッシュ法などにより測定すれば、薄膜の比抵抗あるいは導電率を概算することができる。W-F法則の理論的導出については、固体電子論の文献を参照していただきたい。室温の熱伝導率 κ は、式(1)と式(2)から式(4)で表される。

$$\kappa = (2.44 \times 10^{-8}) \times T \times \frac{E_C}{100 \times 1.72 \times 10^{-8}} \approx 4E_C \dots\dots (4)$$

式(4)では、 T がケルビン温度であるため、室温(23℃)では $T \approx 300 \text{ K}$ となる。導電率100%IACSのいわゆる純銅では、その熱伝導率は $100 \text{ W} \cdot \text{m}/\text{K}$ を4倍にした約 $400 \text{ W} \cdot \text{m}/\text{K}$ と算出できる。代表的な金属や銅合金の室温における導電率と熱伝導率の関係を図4¹⁾に再掲した。導電率と熱伝導率はほぼ比例関係にあり、導電率の数字を4倍すれば金属材料の室温での熱伝導率を求めることができる。式(2)では温度 T が変数になっており、任意の温度における熱伝導率と導電率の比例係数を算出することができる。前述したように、熱も電流もその担い手は金属中の自由電子であるが、熱の伝え方において自由電子はスケールの大きな気体に近いふるまいをするのに対して、電気の伝え方において自由電子はよりスケールの小さい構造の影響（格子振動による散乱）を受ける。そのため導電率は温度上昇とともに低下するが、導電率と熱伝導率の比例係数 $L_0 T$ は T が高くなるため、熱伝導率は温度変化に対して単調に変化しない場合がある。無酸素銅の比抵抗と熱伝導率の温度依存性を測定した例を図5に示す¹⁰⁾。文献データは比抵抗で表示されているが、本稿では導電率に換算している。また、各温度で計算した比例係数 $L_0 T$ に導電率を乗じて算出した熱伝導率（計算値）も併せて白抜き丸シンボルでプロットしている。無酸素銅の導電率は温度上昇にともなって急速に低下するが、熱伝導率は温度 T の上昇と導電率の低下が相殺するため大きく変化しない。熱伝導率の測定値と導電率から計算した値はよく一致し、電子電気部品用銅合金が使用される温度範囲において熱伝導率は導電率から計算できると考えられる。図5では室温付近において熱伝導率の実測値と計算値が大きく乖離しているが、これは一方の端を水冷した試験片の両端の温度差から熱伝導率を算出しているためであり、温度差が小さくなると測定誤差が大きくなるのが原因と考えられる。

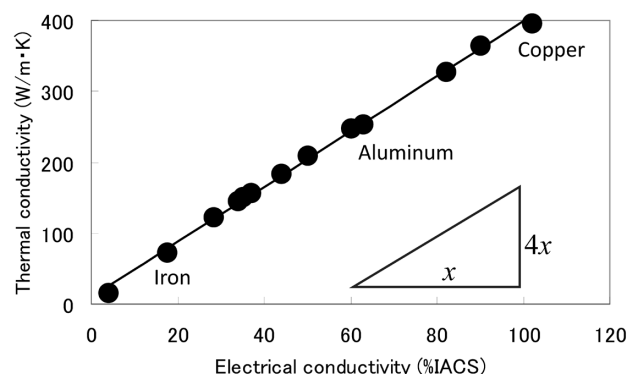


図4 各種金属材料の導電率と熱伝導率の関係¹⁾
Fig.4 Relationship between electrical conductivity and thermal conductivity of various metals¹⁾

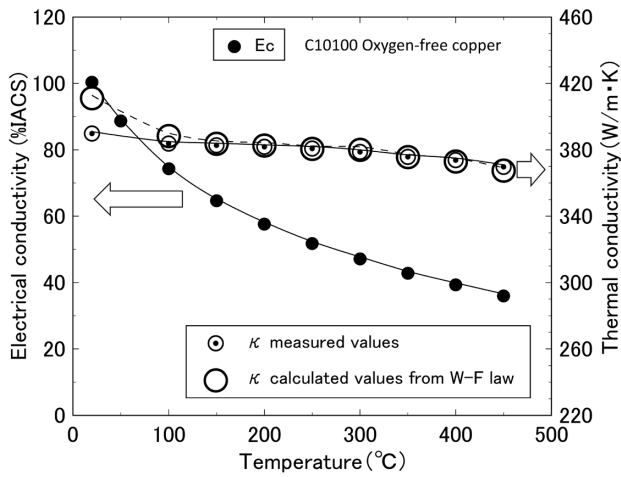


図5 無酸素銅の導電率と熱伝導率の温度変化

Fig.5 Temperature dependence of electrical and thermal conductivity for OFC

前述したように、高温で銅が溶融して液相になってもW-F則が成り立つことは確認されているため⁸⁾、溶融温度近くまでの概算も可能と考えられる。各温度でのW-F法則の比例係数 L_0T を図6に示す。また、当社の端子コネクタ用銅合金であるCACTM19 (Cu-1.9%Fe-0.03%Si-0.1%Mg-0.1%Sn-0.15%Zn合金)を高温に保持したときの導電率を図7に示す。この合金は高温での導電率変化が大きいため、分かりやすい例として取り上げた。高温に保持したときの金属の比抵抗は専用測定装置¹¹⁾で測定した。図7右側の第二縦軸はW-F法則から算出した熱伝導率である。銅合金CACTM19の導電率は温度の上昇とともに低下していくが、W-F法則の比例係数は温度上昇とともに増加していく。このため、熱伝導率は500°C付近でピークを持つ。これは合金の内部構造の変化と関連があり、比抵抗の温度変化と対照するとわかりやすい。CACTM19合金の温度に対する比抵抗 ρ の変化を図8に示す。縦軸の右側はこの比抵抗から算出した導電率 E_c を示す。比抵抗は約500°Cまでは温度に対してほぼ直線的に変化する。熱伝導率の増加はこの部分に対応している。これは500°Cまで加熱して再度室温まで冷却しても加熱前の比抵抗(導電率)に戻ることを意味しており、熱伝導率も加熱前の値に戻る。いっぽう、500°Cを超える温度で加熱すると体積抵抗率は非線形に変化して急増する。これは500°Cを超える温度に加熱すると、室温まで冷却しても比抵抗は元の値に戻らない(増加する)ことを意味する。すなわち、導電率は加熱前よりも減少する。具体的には、室温での導電率が60%IACSであるCACTM19合金を750°Cの溶融塩に20s浸漬した後、水中急冷して室温での導電率測定を再度行うと導電率は27%IACSに低下する。導電率の低下にもなって熱伝導率も低下しており、CACTM19のように熱処理を利用して特性(ここでは導電率)を向上させている合金を所定温度以上に加熱する場合は注意が必要である。具体的には、拡散接合、溶接、ろう付けなどで接合した場合は、銅合金の種類によっては接合部の熱伝導率が大きく低下する可能性があることに注意する必要がある。これはCACTM19合金が、鉄の微粒子を熱処理によって分散(析

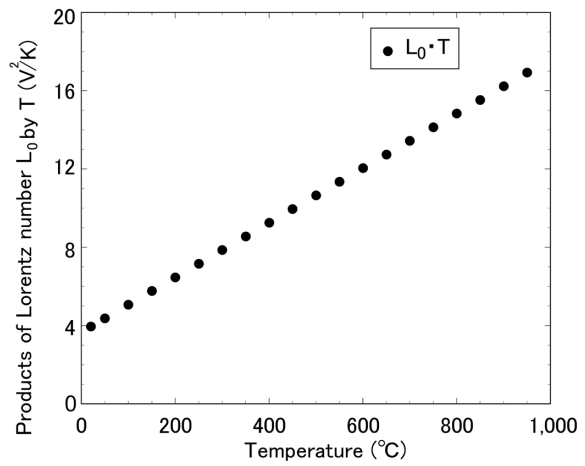


図6 ローレンツ数と温度の積の温度変化

Fig.6 Temperature dependence of products of Lorentz number by temperature

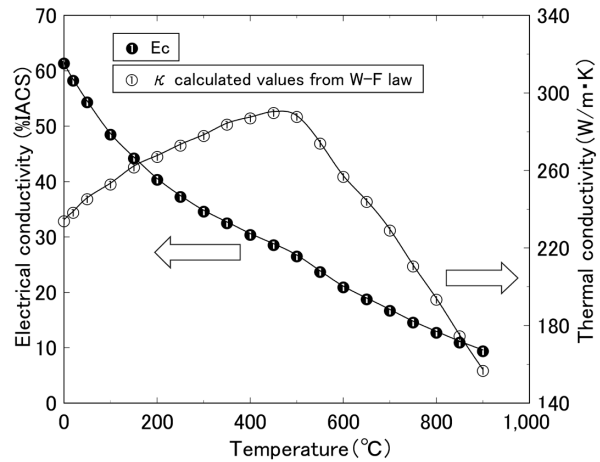


図7 CACTM19合金の導電率と熱伝導率の温度変化

Fig.7 Temperature dependence of electrical and thermal conductivity for CACTM19

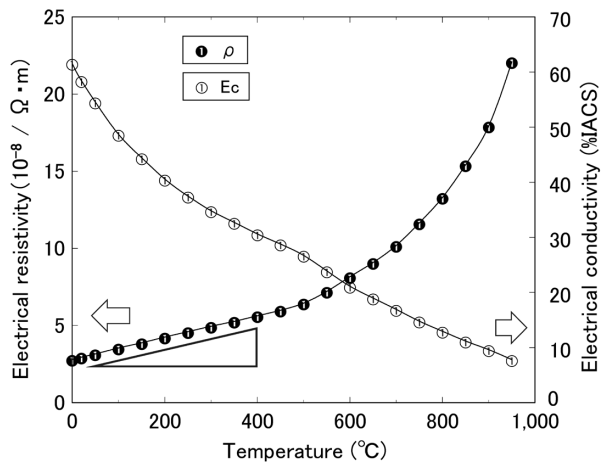


図8 CACTM19合金の比抵抗の温度変化

Fig.8 Temperature dependence of electrical resistivity for CACTM19

出)させて導電率60%IACSを確保しているために起こる現象である。透過型電子顕微鏡で撮影したCACTM19の微細構造を図9に示す。図9中の黒い粒子が鉄の粒子である。500°C以上に加熱、あるいはレーザー溶接で溶融、あるいは融点に近い温度で拡散接合すると、分散させた鉄粒子が原子レベルで銅母相に溶解込み、導電率が低下してしまう。これにより熱伝導率も急減する。図1

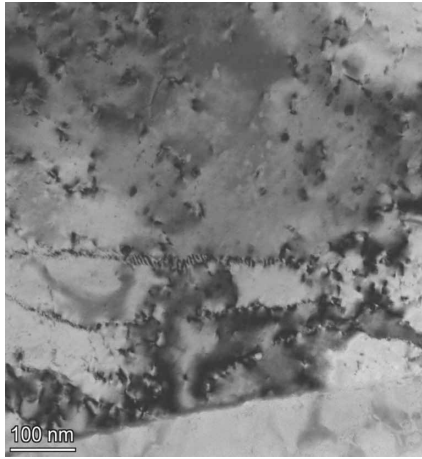


図9 CAC™19合金の透過電子写真
Fig.9 TEM image of CAC™19 copper alloy

に示すいくつかの銅合金はこのように硬質粒子の分散（析出硬化現象）を利用して強度と導電率の両立を図っているため、溶接などを行った場合は、その部位の熱伝導率も低下することをあらかじめ考慮しておかなければならない。これらの銅合金を熱伝導用部材として用いる場合には注意が必要である。

4. 導電率の観点から見た熱にかかわる問題

ここでは熱にかかわる諸問題について、とくに導電率の観点から解説する。

4.1 はんだ付け性

電気電子部品でははんだ付けが欠かせない。はんだ付けには、はんだ付け接合部に必要な量のはんだをあらかじめ供給しておき、その後多数のはんだ付け部を一括して加熱して接合する「リフローはんだ付け法」と、はんだ付け部を溶融はんだに浸漬させる「浸漬はんだ付け法」の二つの方法が主流である。リフローはんだ付けは多数の電子部品を一括してはんだ付けできる利点があるが、電子部品や基板などすべての構成部材が加熱されるため部品に耐熱性が必要になる。このような電子部品のリードフレームや端子に使われる銅合金は速やかにはんだ付け温度まで加熱される性質が必要である。すなわち、熱伝導率、熱拡散率、導電率が高い銅合金の方が有利となる。実際には、加熱される部品や金属部分の熱容量などさまざまな要素を考慮する必要があるが、やはり導電率が高い銅合金が有利である。いっぽう、浸漬はんだ付けはリフローはんだ付け温度に耐えられない部品、例えば砲弾型LED¹²⁾、電解コンデンサ、スイッチ、樹脂製ハウジングを持つリレーやコネクタなどに適用される。また、浸漬はんだ付けは部品のリードを基板のスルーホールに挿入してはんだ付けを行うため、力学的耐久性が高く、使用中に力がかかるコネクタやスイッチなどをプリント基板にはんだ付けで実装する場合には欠かせないはんだ付け方法である。このようなはんだ付けの場合は、溶融はんだ槽に浸漬されるリードの熱抵抗が高い銅合金の方がはんだ付け性は容易になる。熱抵抗は熱伝導率と熱が通過する部分の断面積に反比例し、熱が通過する部分の長さにも比例する。電気抵抗に相当する値として熱抵

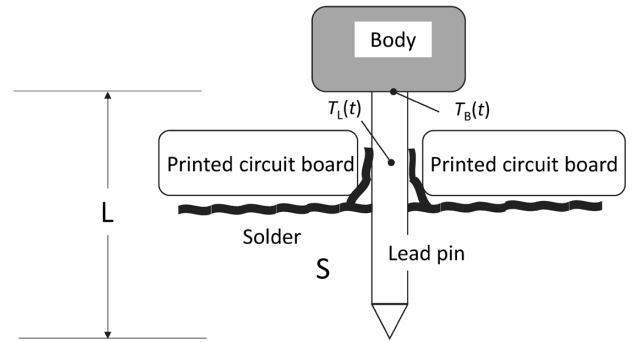


図10 浸漬はんだ付けの模式図
Fig.10 Schematic illustration of immersion soldering

抗 θ が定義される。前述したように、熱伝導率は導電率に比例するため、熱抵抗は導電率が増すほど低下する。浸漬はんだ付けのモデル図を図10に示す。図10中のBodyははんだ付けする素子やコネクタのハウジング、Lはリード線長さ、Sははんだ槽を示す。このときリード線の時間 t に対する表面温度 $T_L(t)$ は式(5)で表される。

$$T_L(t) = T_S \frac{R_S}{R_S + R_L} \{T_S - T_B(t)\} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $T_B(t)$ は素子やコネクタハウジングの温度変化、 T_S ははんだの温度、 R_S ははんだとリードの界面熱抵抗、 R_L はリードの熱抵抗である。式(5)で重要な点は、いかに $T_B(t)$ の上昇を抑制しつつ、速やかに $T_L(t)$ を T_S に漸近させるかということにある。式(5)右辺の $\{\}$ 内の詳細は分からなくても、その $\{\}$ にかかる熱抵抗の項をできるだけ小さくしてやればよいことは分かる。はんだとリードの界面熱抵抗 R_S は複雑な要素を含むため容易には求められないが、リード自体の熱抵抗 R_L はリード長さに比例し、断面積と熱伝導率に反比例する。また、熱伝導率は導電率に比例するため、できる限り導電率が低い銅合金や金属のリードを用いると熱抵抗が小さくなり、リードの温度は速やかにはんだの温度に接近し、はんだ付けが素早く行えるとともに素子側の温度上昇を抑制することができる。低い導電率には、熱の移動を抑制し温度差が小さくなるのを抑制する効果がある。温度上昇に敏感な砲弾型LEDは透明樹脂でレンズを形成できる利点があり、信号機や屋外での大型映像表示装置や照明などにも使われているが、リードを通じてはんだの熱が伝わり樹脂の変形や変質を引き起こす。樹脂製ハウジングを持つコネクタも耐熱性に制約があり、導電率の低い銅合金（例えば、りん青銅や当社銅合金CAC™92など）やLEDの場合には鉄が使われる理由の一つになっている。「導電率15%IACSの鉄」と「導電率100%IACSの銅」を金属リードに持つ電解コンデンサに対して、浸漬はんだ付けした際のリードと電解コンデンサ本体の温度が測定されている¹³⁾。その数値をプロットして図11に示す。導電率15%IACSのリードは速やかにはんだの温度に到達するため良好な濡れが期待でき、さらに素子本体の温度上昇も抑制していることが分かる。

4.2 溶接性

はんだ付けでは接続信頼性や耐久性が確保できない高温アプリケーション、例えば自動車エンジンルーム内に

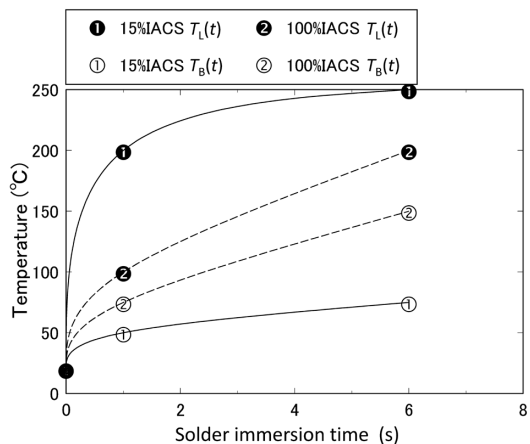


図11 浸漬はんだ付けの温度変化と導電率の関係

Fig.11 Electrical conductivity dependence of temperature for lead and body of device

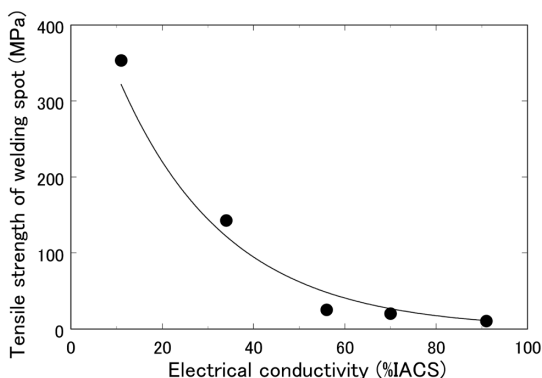


図12 スポット溶接部の強度と導電率の関係

Fig.12 Electrical conductivity dependence of tensile strength of welding spots

配置されるような電子・電気機器類では、溶接により通電部材を接続する場合がある¹⁴⁾。そのような用途で多く使われている抵抗溶接の接合強度と導電率の関係を図12に示す。図12は、同種の銅合金板二枚を重ね合わせ溶接したときの二枚の板の引き剥がし強度と導電率の関係を示している¹⁵⁾。溶接に用いた銅合金板は $0.4\text{ mm}^1 \times 5\text{ mm}^w \times 50\text{ mm}^l$ の矩形であり、表面処理などは施していない。同種の銅合金板を二枚準備し、一端の長さ10 mm部分同士を重ね合わせて上下から電極で挟み、充電エネルギー $100\text{ W}\cdot\text{s}$ を蓄えたコンデンサ式溶接電源から5.8 msの出力パルスを発生させて抵抗溶接を行った。電極による締め付け加圧力は39 Nである。各銅合金とも、導電率が低いほど溶接部の接合強度は高い。これは導電率が低いほど溶接に用いるジュール発熱が起りやすく、また熱拡散率も小さいため、溶接電極で締め付けた部分で局所的に銅合金の溶融が起り一体化して溶接が完了するためである。溶接に関しては導電率が低い方が有利である。ただし、導電率が高い銅合金でも低導電率のニッケルめっきなどを施すことにより、接合信頼性は確保できる。

以上、はんだ付けと溶接の事例を通して、導電率が低い銅合金にも重要な役割が存在していることを示した。

4.3 接触抵抗と導電率の関係

接触抵抗とは、コネクタのように分離可能な電気接点部の界面に発生する電気抵抗である。接触抵抗を R_c と

表す。コネクタに求められる性能は長期間にわたって接触抵抗を低く維持することであり、コネクタの電気接点部ばね板に多用されている銅合金板の性能に依るところが大きい。接触抵抗は接点を押し付ける力、表面の材質、表面形態、表面清浄度、通電電流の値などにより変化するため、電気接点の信頼性を確保する上で極めて重要な特性である。通電する前にすでに接触抵抗が高くと、導通不良を引き起こしたり、接点部の急激な発熱により回復不可能な焼損を生じる。通電後に接触抵抗が高くなったとしても、同様の故障に至る。この接触抵抗も導電率と関係がある。

接点部の模式図を図13に示す。はじめは分離している二つの通電部材No.1とNo.2を垂直押し付け力 F_N で押し付けあって導通を確保した場合、その界面には接触抵抗 R_c が発生する。図13(a)の接点部を誇張・拡大して描いたのが図13(b)である。さらに、図13(b)を理想化して描いたのが図13(c)である。実際の接点を拡大して観察すると多数の真実接点から成り立っているが¹⁶⁾、ここでは簡単のため、真実接点の一つの接点に集約していると考ええる。理想化された接点(c)では接触抵抗 R_c を持つ長さ l 、断面積 S の円柱により電気的接続が確保されている。この円柱部分の比抵抗を ρ とすると、 $R_c = \rho \frac{l}{S}$ である。接点には電圧 V_c が印加され、電流 I が流れている。接触部分を挟んだ電位差 V_c は $V_c = R_c \cdot I$ である。接点下側も上側も温度 T_B であり、この円柱の熱伝導率を κ とする。円柱はジュール発熱するが、円柱は非常に小さいため、発熱はすべて上下の接点に流出し、対流や熱輻射による周辺への熱放散は起こらないと仮定する。また、円柱部分の温度勾配によるトムソン効果(温度勾配を持つ金属に通電したときに発生する熱の吸収・発生)の影響¹⁷⁾は非常に小さいと考えられるため考慮しない。図13(c)において、接続部の円柱の長さ方向に沿って y 軸を取り、中間点を原点($y=0$)として上方向に $y=l/2$ 、下方向に $y=-l/2$ とする。この円柱には電流 I が流れているため、中央部がジュール発熱で温度 T_c になっているとする。 $y=0$ でのジュール発熱の1/2が y 方向へ流出し、残り1/2が $-y$ 方向へ流出する。この熱の移動で発生する熱流束 q/S は温度勾配 $\frac{dT}{dy}$ と熱伝導率 κ を変数にして式(6)のように関係づけられる。

$$\frac{q}{S} = -\kappa \frac{dT}{dy} \dots\dots\dots (6)$$

マイナス符号は距離 y が増えるほど温度が下がることを示すために付けている。ここで、W-F法則を示す式(2)に着目すると、熱伝導率 κ はローレンツ数 $L_0 \times$ 温度 $T \times$ 電気伝導度 $(1/\rho)$ の積であることから、式(6)は式(7)に書き換えられる。

$$\frac{q}{S} = -L_0 \left(\frac{1}{\rho} \right) T \frac{dT}{dy} \dots\dots\dots (7)$$

電気伝導度 $1/\rho$ も温度 T に依存するため、式(7)を計算する際は右辺の T と ρ を分離できないが、図8中の三

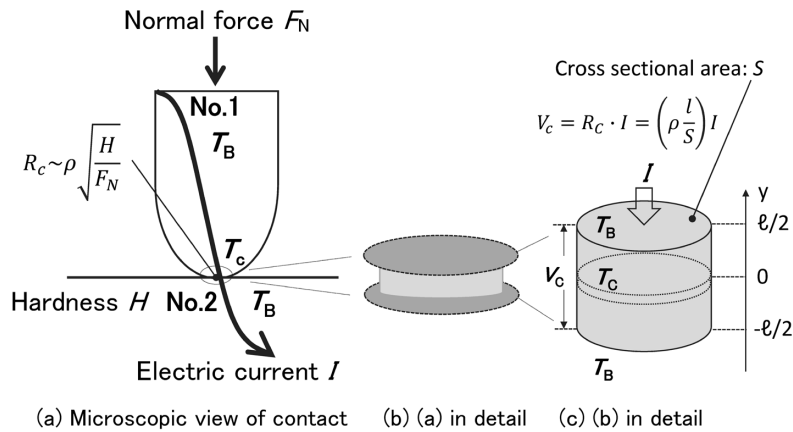


図13 接点の模式図

Fig.13 Schematic illustration of ideal electrical contact

角形で示すような範囲では、 ρ が温度に比例するため、温度の微小変化に対する $1/\rho$ を定数として扱うことができ、式 (7) を式 (8) に変形することができる。

$$\frac{q}{S} \rho dy = -L_0 \cdot TdT \quad \dots\dots\dots (8)$$

式 (8) を $y=0$ での温度 $T=T_c$ から $y=\ell/2$ での温度 $T=T_B$ まで積分すると式 (9) が得られる。

$$\frac{q}{S} \rho \int_{y=0}^{y=\frac{1}{2}\ell} dy = -L_0 \int_{T=T_c}^{T=T_B} TdT \quad \dots\dots\dots (9)$$

この積分式 (9) を解くと式 (10) が得られる。

$$q \times \frac{1}{2} \times \left(\rho \frac{\ell}{S} \right) = \frac{L_0}{2} (T_c^2 - T_B^2) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$R_c = \rho \frac{\ell}{S}$ から式 (10) は式 (11) に書き換えられる。

$$qR_c = L_0 (T_c^2 - T_B^2) \quad \dots\dots\dots (11)$$

定常的なジュール発熱は (電圧)²/ R_c となるため、式 (11) 左辺から R_c を消去できる。図13 (c) では、円柱の中央から上半分を考えているため、電圧は線形的に変化すると考えられ、式 (11) 左辺は $(V_c/2)^2$ となる。これらを整理すると、式 (12) となる (温度 T はケルビン単位)。

$$V_c^2 = 4L_0 (T_c^2 - T_B^2)$$

または $T_c = \left(\frac{V_c^2}{4L_0} + T_B^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (12)$

式 (12) は接点間の電位差 $V_c = R_c \cdot I$ から接点の発熱温度を推測する便利な式であり¹⁸⁾、実験的にも成立することが確認されている¹⁹⁾。接点間の電圧降下 V_c を測定すれば、そのときの接点温度を知ることができる。また、接点が軟化や溶融を起こさないために必要な接触抵抗 R_c を決定することもできる。ただし、アーク放電発生時や過渡状態での電圧変化による接点発熱には対応できない。しかし、単純な式で接触抵抗と接点発熱を推測できるため、式 (12) は有用である。重要な点は、式 (12) には接点周辺の温度 T_B が関与していることである。 T_B が高ければ、同じ電流値、同じ接触抵抗でも接点の発熱温度 T_c はより高くなることを意味している。また、 T_c を一定に保つためには、接触抵抗 R_c をより小さくしなければならないことを意味している。接点間電圧 V_c と温

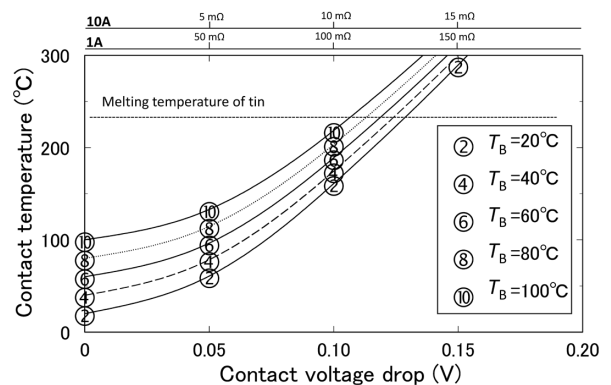


図14 接点温度の接点での電圧降下と接点温度の関係

Fig.14 Contact voltage drop dependence of contact temperature

度 T_B において接点温度 T_c がどのように変化するかを図14に示す。図14の上には通電電流 $I=1$ A と $I=10$ A のときの接触抵抗 R_c の目盛も付けている。端子などでよく使われるすずめっきの溶融温度を点線で示している。図14より、静的な状態でさえ接点損傷を防止できる範囲は狭いことが分かる。ここで、温度 T_B とは周囲温度と端子の自己発熱による温度上昇の総和である。端子の自己発熱は導電率の二乗に反比例する。したがって、端子の接触信頼性、すなわち接触抵抗には使用されている銅合金の導電率が直接影響する。この影響は、とくに大電流 (数十 A から数百 A の電流レベル) で強く現れる。文献 (20) および (21) には、100 A 通電時の接点温度と接触抵抗値が銅合金の導電率によりどのように変化するかが記載されている^{20), 21)}。導電率がより高い銅合金では、より低い接点発熱温度と接触抵抗が得られる。自動車用大電流の分野ではさらに解析が進んでおり、単に導電率が高いだけでなく、接点での端子材料の変形による実質的な真実接点数の増加による接触抵抗の低減と接点発熱抑制のバランスを取る必要から、銅合金の加工硬化指数の重要性が指摘されている。そのため、大電流端子用途に最適な合金は純銅ではなく C19210 合金 (欧州での当社ライセンス合金 K80TM、当社呼称 KFCTM) であるとの評価結果が発表されている²²⁾。このような高導電性銅合金は、自動車電動化など大電流分野において、今後活用が進むものと考えられる。

むすび=電気電子部品用銅合金の熱的な性質について、実例を交えて解説した。市販されている銅合金は多数あり、お客様のニーズに応えた最適材料を推奨するためには、双方が同じ知識レベルに立って意見を交わすことが必要と考え、熱的な観点から銅合金の使い分けについて紹介した。当社にもまだ欠けている知見があり、とくに熱物性値の実測データなどが不足していることから、これらのデータを加味した上で改めて解説を行いたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 橋本大輔ほか. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No.2, p.33-41.
- 2) 山本純也. 低温工学. 1981, Vol.16, No.3, p.137-143.
- 3) S. C. Krishna et al. Journal of Materials. 2013, Article352578.
- 4) 神戸製鋼所ホームページ. 技術・製品情報.銅板条. <https://www.kobelco.co.jp/products/copperplate/index.html>, (参照2022-02-04).
- 5) 隅野裕也. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.103-106.
- 6) 日本規格協会. JISハンドブック. 3巻 非鉄. 2013, p.351-352.
- 7) 志賀正幸. 材料科学者のための固体電子論入門. 第1版, 内田老鶴圃, 2009, p.96.
- 8) 山根壽巳ほか. Journal of the JRICu. 2007, Vol.46, No.1, p.177-180.
- 9) 日本熱物性学会. 熱物性ハンドブック. 第2版, 養賢堂, 2000, p.547-551.
- 10) M. C. I. Siu et al. Thermal Conductivity and Electrical Resistivity of Six Copper-Base Alloys. NBSIR 76-100, Institute for Applied Technology National Bureau of Standards, 1976.
- 11) コベルコ科研ホームページ. 事業概要. 物性試験電気抵抗測定装置. <https://www.kobelcokaken.co.jp/business/item/physicality/377.html>, (参照2022-02-04).
- 12) 下野信治ほか. 豊田合成技報. 2015, Vol.57, p.6-13.
- 13) R. J. K. Wassink. ソルダリング・イン・エレクトロニクス. 第1版, 日刊工業新聞社, 1986, p.70-72.
- 14) 漆崎 守. デンソーテクニカルレビュー. 2006, Vol.11, No.2, p.81-86.
- 15) 小倉哲造ほか. 4th Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electoronics. 1998-01-29/30, 溶接学会, 1998, p.109-112.
- 16) 玉井輝雄. 表面技術. 2004, Vol.55, No.12, p.852-857.
- 17) 天谷康孝ほか. Netsu Sokutei. 2019, Vol.46, No.3, p.128-134.
- 18) 山下主税ほか. トライボロジスト. 2017, Vol.62, No.2, p.129-136.
- 19) 土屋金弥ほか. 電気学会雑誌. 1969, Vol.89, No.966, p.499-508.
- 20) European Copper Institute et al. COPPER ALLOYS KNOWLEDGE BASE. CuFe1P UNS: C19200, C19210. <http://conductivity-app.org/alloy-sheet/22>, (参照2022-02-04).
- 21) A. Beloufa. International Journal of mechanics. 2010, Vol.4, Issue4, p.94-104.
- 22) R. El Abdi et al. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2008, Vol.222, Issue8, p.1375-1383.