

(解説)

電子電気部品用銅合金の熱的特性

Thermal Characteristics of Copper Alloys for Electronic Components



橋本大輔*¹
Daisuke HASHIMOTO



野村幸矢*¹ (博士(工学))
Koya NOMURA

There is a need to evaluate stress relaxation resistance, electrical contact reliability, thermal softening resistance and heat dissipation of copper alloys and their plated surfaces that are used for electrical terminals and IC lead frames. A study was conducted to determine how to suppress heat generation and temperature rise at separable contact interfaces of terminals and connectors using copper alloys. The study reviews electrical conductivities, electrical heating and self-heating at the contact points of various metals, taking into account the effects of both the mechanical properties and contact reliability. Previously, the heat dissipation and temperature rise of IC packages and lead frames, which have no contact surface, have been described solely by the electrical conductivities of copper alloys. This paper describes the future prospects of copper alloys used for the next-generation semiconductors, which are more likely to be exposed, during the manufacturing and use of the ICs, to a temperature that is higher than the temperature reached during the processing of the alloys.

ま え が き = 現代社会の基盤を支え、快適で安全な生活を維持向上するためのポイントは半導体化、情報化、電動化である。半導体化においては、抵抗発熱を光源とする白熱電球から発光ダイオードへの置換に代表されるのはじめ、情報化では高速通信技術と情報処理プロセッサの活用に、また電動化では、電気エネルギーを蓄積する電池技術、モータ技術およびSiC半導体電力変換技術などの革新にそれぞれ代表される。

これらの技術を支える重要な要素が熱の制御である。たとえば発光ダイオードでは、自己発熱で発光効率の低下や寿命短縮を招くことがある¹⁾。スマートフォンでは発熱による充電停止や機能制限が報告されており、充電しながらの使用を避けるよう推奨されている機種もある²⁾。また、ハイブリッド車やハードディスクの駆動部に使用されている強力なネオジム磁石は100℃付近でも磁気性能の劣化が始まる³⁾。これらの例以外にも電子電気機器では、用いられている部材の性能劣化や寿命短縮を招くため、温度上昇を招く発熱は速やかに放散されなければならない。またこれらの機器は、はんだ付けのように温度上昇を利用して製造されることが多く、ベースとなる部材は耐熱性をも兼備しておく必要もある。本稿では電子電気機器用の通電部材、放熱部材として多用されている銅合金の熱的性能について解説する。

1. 熱伝導と電気伝導の関係

金属中では、電気伝導も熱伝導も自由電子がそれらの担い手である。金属の熱伝導率 κ (W/(m・K)) と電気伝導率 σ ($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$) には、式(1)で示される関係がある。

$$\kappa/\sigma = LT \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 T は温度(K)、 L はローレンツ数とよばれる比例定数である。したがって、両者は比例する。これをWiedemann-Franzの法則とよぶ⁴⁾。熱伝導率 κ は電気伝導率 σ に比べてその測定が難しい⁵⁾ が、熱伝導率を電気伝導率から算出できるため実用性が高い法則である。重要な点は電気抵抗が決まれば、それに応じて熱伝導率が決まることである。

金属材料の組成や内部構造、強化機構、熱処理条件などによらずWiedemann-Franzの法則が成り立つことが実験的に確認されている⁶⁾。熱と電気のアナロジーから電気抵抗に対応して熱抵抗 θ が定義される。熱伝導率 κ 、面積 S 、厚さ d の物質の熱抵抗 θ は $1/\kappa \cdot d/S$ と定義される⁷⁾。ある物質の両面の温度差は熱抵抗が小さいほど、つまり、熱伝導率が大きく、面積は広く、厚さが薄いほど小さくなる。

銅合金の分野では体積抵抗率 ρ よりも直感的に理解しやすい導電率 E_c (=Electrical conductivity) で表す。これは焼鈍標準軟銅(体積抵抗率: $\rho_0 = 1.7241 \times 10^{-2} \mu\Omega m$) の導電率を100%IACSとして規定し、これに対して何割の電気伝導度を持つかで示す方法⁸⁾ である。つまり

$$E_c = \rho_0/\rho \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

と表される。したがってWiedemann-Franzの法則により熱伝導率は導電率 E_c に比例する。各種金属材料の室温での導電率を表1に示す。通電部材の相互接続に使用するはんだやめっきなどで表面被覆に用いるSnやNiの導電率が低い(熱抵抗が大きい)ことに注意すべきである。

様々な金属材料について導電率と熱伝導率の関係を図1に示す。室温でのこれら実験値のプロットから E_c

*¹ アルミ・銅事業部門 長府製造所 銅板工場

表 1 各種金属の導電率
Table 1 Electrical conductivity of various metals

Metals	Electrical conductivity (%IACS)
Cu (6N)	102
Copper alloys	10 - 90
Au	81
Ag	108
Al	64
Fe	17
Mg	39
Ni	25
Sn	17
Sn-3.5Ag-0.5Cu solder	12

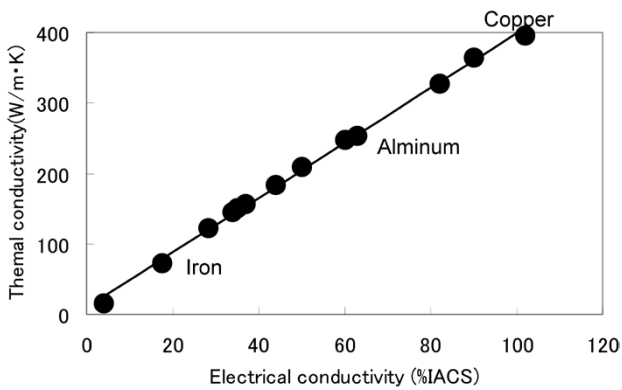


図 1 各種金属材料の導電率と熱伝導率の関係
Fig. 1 Relationship between electrical conductivities and thermal conductivities of various metals

= 4κ という近似式が得られる。

2. 実用金属材料の電子電気機器類への応用

この分野での金属材料の用途は支持体、構造体、通電部材、放熱部材などである。支持体は半導体リードフレームなど、構造体は筐体（きょうたい）など、通電部材は端子、コネクタ、電線、バスバーなどに用いられる。放熱部材はヒートスプレッダやヒートスラグなどである。

一つの部材で複数の用途を兼ねる場合もある。図 2 に銅合金板条の主な用途である半導体リードフレームと端子の模式図を示す。このときのリードフレームは、支持体、通電部材および放熱部材を兼ねる。端子は発熱などにより機械的特性が変化すると機能が損なわれるため、熱は電線を通して放散される。本章では、電子電気機器分野での主要な金属材料の使用状況を概説する。

2.1 鉄鋼材料

入手が容易で強度・曲げ性に優れ、さらに近年、熱放散性向上の塗装技術^{9)~11)}が発展したため、電子機器類の筐体に多用されている。HDDや情報家電の分野で外装を塗装された金属製筐体はほとんどこの材料で作製されている。導電率が17%IACSと低いため通電部材として使用されることはあまりないが、表面に銅めっきを施した通電ばね用材料も提案されている¹²⁾。

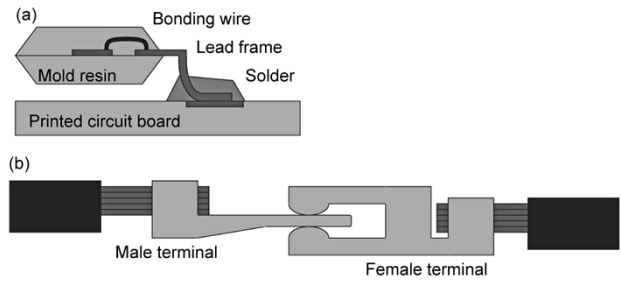


図 2 銅合金使用例 (a) ICパッケージ断面図 (b) 端子断面図
Fig. 2 Usage examples of copper alloys
(a) IC package cross section, (b) connector terminals cross section

2.2 アルミ材料

安価で比重が小さく軽いうえに導電率も50~60%IACSと比較的高いため、ヒートスプレッダのような熱放散部材に使用されることが多い。さらには自動車の軽量化のために、ワイヤハーネスのワイヤも銅線からアルミ線へ置き換えが進んでいる^{13), 14)}。これまでは銅合金が用いられていた通電部材も一部アルミ合金への置き換えが行われている¹⁵⁾。アルミ材料は、融点が660℃と低いことに対応して弾性率、軟化温度（耐熱性）が低く熱膨張率が大きいことが欠点である。

2.3 マグネシウム材料

導電率が39%IACSと中程度であり、高剛性かつ低比重を実現できることから発熱量が増加傾向にある携帯型情報端末の筐体として利用される¹⁶⁾ことが多い。鉄鋼材料と同様に、通電部材として利用されることはあまりない。

2.4 銅および銅合金

通電部材の主流である。導電率は10~109%IACSをカバーし、板条や棒あるいは電線の形態で多用されている。最大の特徴は、通電部材として求められるほとんどの特性をバランスよく有していることである。すなわち、強度、弾性、耐熱性、接合性、表面処理性を兼ね備えていることである。これらの特性を発現させるため、銅に様々な元素を添加することによって組織制御や強度特性の最適化が行われている。導電率が10~109%IACSという広い範囲に分布しているのはこのためである。顧客のニーズに最適な銅合金をマッチングさせるためには、広範な材料知識に加えて銅合金の特性を知り尽くした技術サービスが必要となる。

3. 通電部材の熱的性質と発熱要素

通電部材に使われる金属材料の熱的な性質と発熱の関係は非常に複雑である。とくに端子やコネクタ、電線の発熱は通電部材の機械的性質や形状、表面状態も関与してくることから簡単には表現できない。そこで、まずは発熱要素を列挙し、慎重に考慮する必要がある。図 3 には、様々な発熱要素について、その静的な特性に絞って相互関係を示した。

通電部材バルクの温度上昇は通電発熱によってもたらされ、それが接点の発熱をもたらし、さらにまたその発熱が通電部材のバルクの温度上昇をもたらしというフィードバックループを描く。また、発熱によって部材の機

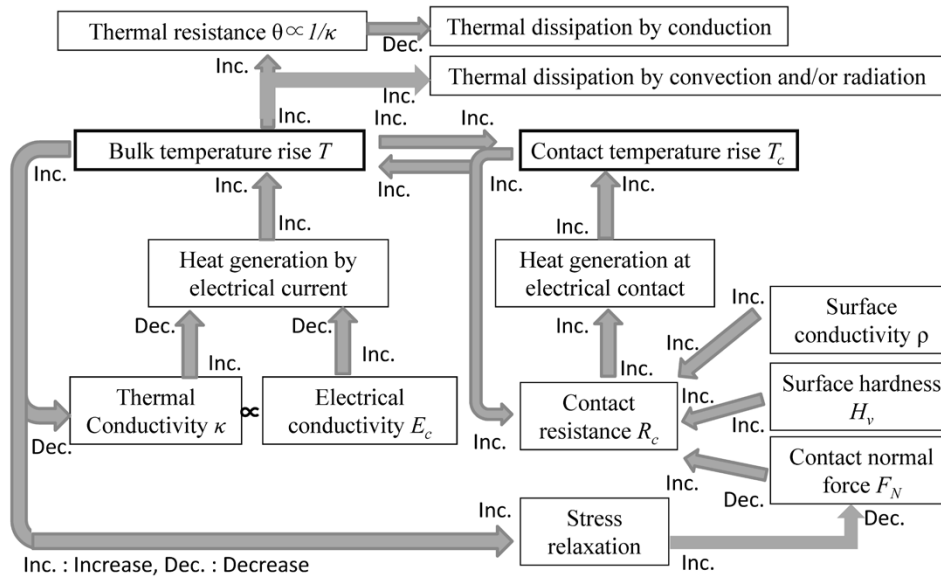


図3 電気的性質と熱的性質の静的な相互作用
Fig. 3 Static interaction among electrical and thermal properties

械的特性が変化し、それが接触抵抗の増大につながって接点と部材の温度上昇をもたらす構図となる。熱移動の検討には熱伝導、対流、輻射が重要な役割を果たすが、温度上昇とともに熱伝導率が減少するために、熱抵抗も増大する。本章では主に、銅合金の材質に由来する発熱要素について解説する。

3.1 通電発熱

断面積 S (mm^2)、長さ L (mm)、体積抵抗率 ρ 、熱伝導率 κ の棒状通電部材を考える。その両端の温度を T_0 (K)に保ち、電流 I (A)を流したときの中央の発熱温度は、以下の三つの仮定を行うことによって簡単に計算することができる。

- ①棒の中央が最高到達温度(T)に達して定常状態になる
- ②発熱が棒の両端に向かって拡散していだけで熱輻射や対流は生じないとする。ここで、棒の両端は電流を供給しつつ発熱を奪い去っていく端子をイメージしている。
- ③熱膨張や物性値変化は考慮しない

中央で発熱した熱は、熱伝導によって二方向に移動していくため(全発熱量) $\times 1/2/S = -\kappa \times$ (棒の温度勾配)の関係が成り立つ。この式を棒の長さによって積分すると、

$$\text{全発熱量} = I^2(\rho L/S)L$$

であるから

$$T - T_0 = (I^2 L^2 \rho) / (2 S^2 \kappa)$$

となる。すなわち棒の中央部の発熱温度 ΔT は

$$\Delta T = (I^2 L^2 \rho) / (2 S^2 \kappa) \dots \dots \dots (3)$$

である。 ρ と κ は導電率 E_c に置き換えることができる。

式(3)から、電流値が大きいほど、棒が長く細いほど、導電率が低いほど発熱しやすいということになり、経験則とよく合う。しかしながら、実際の棒状銅合金に通電した実験結果とは乖離(かいり)が大きい。断面積 3mm^2 、長さ 65mm の銅合金板に大気下で通電した場合の板の発熱温度を測定した例がある¹⁷⁾。この測定値と式

表2 銅合金の通電発熱の実測値および計算値の比較
Table 2 Comparison of experimental and calculated values of temperature rising by Joule heat generation of various copper alloys

E.C.(%IACS)	Current(A)		30		40		50	
	E.V. ¹⁷⁾	A.V.	E.V. ¹⁷⁾	A.V.	E.V. ¹⁷⁾	A.V.	E.V. ¹⁷⁾	A.V.
27	58	116	82	205	113	321		
61	45	24	58	43	78	67		
76	43	16	56	28	71	43		
103	42	9	55	15	68	24		

specimen: $1.0\text{mm} \times 3\text{mm} \times 65\text{mm}^1$ E.V.: Experimental value
A.V.: Analytic value

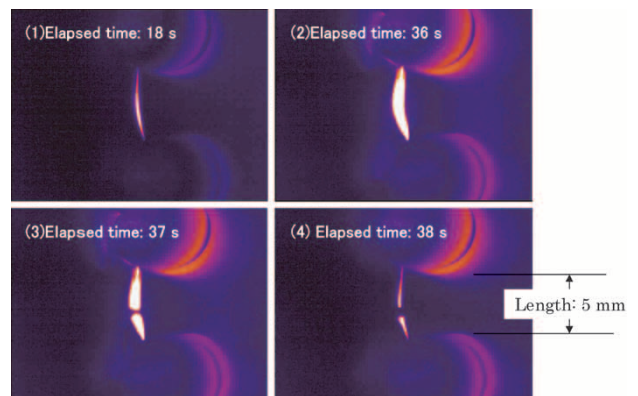


図4 通電発熱した銅ワイヤの熱可視化画像
Fig. 4 Thermographic images of $\phi 0.2\text{mm}$ copper wire heated by electrical current

(3)の計算値の比較を表2に示す。導電率が高く通電電流が小さいときは計算値と実測値の乖離が大きい。式(3)の仮定では、発熱は抵抗なく両端に吸収されていくと仮定しているが、実際は取り付ける電線の熱容量や接触熱抵抗の影響を受けて熱放散が滞ることが推定される。実測値では導電率 $60\sim 100\%$ IACSで発熱温度に大差はなく、これは対流や輻射による熱移動が優勢になるためと考えられる。図4に、 $\phi 0.2\text{mm}$ 、長さ 5mm の純銅ワイヤに 42V の電圧で 50A の電流を流したときの赤外線画像を示す。この条件では、上記の発熱式を利用する

と銅の融点 (1,083°C) を優に突破するが、実際は中央付近が溶け落ちるまで40秒弱もの時間を要している。通電発熱は輻射と対流ですぐに放散されてしまい、なかなか融点に到達しない。このような状態は通電部材に別の側面をもたらす。

たとえば、端子やプリント基板の鉛フリーはんだで発生することが懸念されている微細な繊維状金属 (すずウイスカ) は、直径数 μm 程度であるが10mAの電流でも溶解することなく短絡状態が継続し続ける。10mA以上の電流でも間欠的な短絡を引き起こす¹⁸⁾。すずの融点は約230°Cで導電率も低いが、発熱は速やかに大気中に放散され、なかなか融点に達しないためにこのような短絡が起こる。これと同様に、溶断しにくい電線は自身と周囲を長時間高温にさらすため危険である。ブレーカやヒューズの箇所ですべて遮断されるように電気抵抗の最適配分設計が必要になる。このとき、大きく影響を及ぼしてくるのが接触抵抗である。

3.2 接触抵抗

実際の通電部材での異常発熱¹⁹⁾ や火災²⁰⁾ などの事故は、実は通電部材そのものよりも接点部で発生することが多い。板ばね形状のコネクタやボルト締結式の電気接点とはくに発熱が起こりやすい。部材の弾性的接触で通電を確保しているためである。時間の経過とともに弾性的接触力 (以下、接圧という) が徐々に低下するか、もしくは接点部の電気抵抗 (以下、接触抵抗という) が増加して発熱に至る。接点の発熱温度 T_c は、接点での電圧降下 V_c と Kohlraush の関係式

$$T_c^2 - T_0^2 = V_c^2 / 4L \dots\dots\dots (4)$$

で結びついている^{21)~23)}。ここで、 L はローレンツ数で $L = 2.45 \times 10^{-8} (V^2/K^2)$ 、 T_0 は接点から十分離れた部分の温度あるいは通電部材の温度である。この接点での電圧降下は接触抵抗 R_c と通電電流 I を使って

$$V_c = R_c \cdot I \dots\dots\dots (5)$$

と表現される。また、接触抵抗 R_c は簡便に

$$R_c \approx \rho \sqrt{H_V / F_N} \dots\dots\dots (6)$$

のように表現される²⁴⁾。ここで ρ は表面構成物質の体積抵抗率、 F_N は接点を押し付ける垂直抗力、 H_V は表面の硬さである。つまり、接点の電気的信頼性を向上させて温度上昇を抑制するためには、通電発熱しにくい高導電性の通電部材を用いて周囲温度 T_0 を下げ、表面を軟質で導電性に優れた物質で被覆し、高い弾性力で長時間接圧を維持し続けることが重要である。

ところが接圧は、後述する応力緩和現象によって時間とともに低下していく。また表面は酸化や汚染、拡散の進行とともに導電性が低下していく。銅合金通電部材では、電気接点部あるいは通電部全面に接触抵抗を下げるめっきを施す。とくに高い信頼性を求める接点には金めっきが用いられる²⁵⁾。これは主に、通電を阻害する酸化被膜の生成を避けるためである。一般的にははずめっきが用いられる。これは、はずめっき被膜の硬さがHV10~50程度と非常に柔らかいことを利用して接触信頼性を確保するためである。その反面、表面が酸化しやすく銅合金母材との相互拡散が進行しやすいため特別な対策が

必要である。これについては実際の材料を用いて説明する。

安全な接触抵抗上限値として10m Ω から50m Ω の値が提唱されている²³⁾。表3にこの程度の抵抗値が銅またはアルミの電線に換算してどれほどの長さまたは直径に相当するか示した。10m Ω は ϕ 1mmでは銅線の場合で長さ46cm、アルミ線の場合で29cmに相当する。長さ1mでは銅線で ϕ 1.5mm、アルミ線で ϕ 1.8mmに相当する。車載ワイヤハーネスではこれらの値よりも細くて長い電線が使用される場合があり、接点の接触抵抗の存在がいかに大きく、その値を増大させないように工夫しなければならないかが分かる。

3.3 端子用材料の耐応力緩和特性

接触抵抗には接圧という機械的特性が関与してくる。この接圧は材料の弾性によってもたらされる。したがって、端子用材料には高い弾性限界が求められる。とくに、ばね部のサイズが小さくなる小型端子の場合、大きな接圧を得るにはばね部を大きくたわませる必要があり、弾性限界は重要である。

銅やアルミの場合、0.2%の残留ひずみが生じたときの応力 (0.2%耐力) を弾性限界の指標として使用する。また、自己発熱や接点部発熱、接触抵抗の増大を抑制する観点からは高い導電率も必要である。一方で、材料の塑性変形の根源である転位は弾性変形の範囲内であっても活発に移動²⁶⁾して微小な塑性変形を引き起こし、時間経過とともに弾性力の低下をもたらす。

これを模式的に示すと図5のようになる。変位 d でたわませて接点での接触力 F_0 を得ている端子では、時間の

表3 接触抵抗値に相当する電線の長さや直径
Table 3 Lengths and diameters of electric wires corresponding to contact resistance

Resistance (m Ω)	Cu wire (100% IACS)		Al wire (65% IACS)	
	ϕ 1mm Length (mm)	Length:1 m Diameter (mm)	ϕ 1mm Length (mm)	Length:1 m Diameter (mm)
1	46	4.7	29	5.9
10	460	1.5	290	1.9
100	4,600	0.47	2,920	0.59

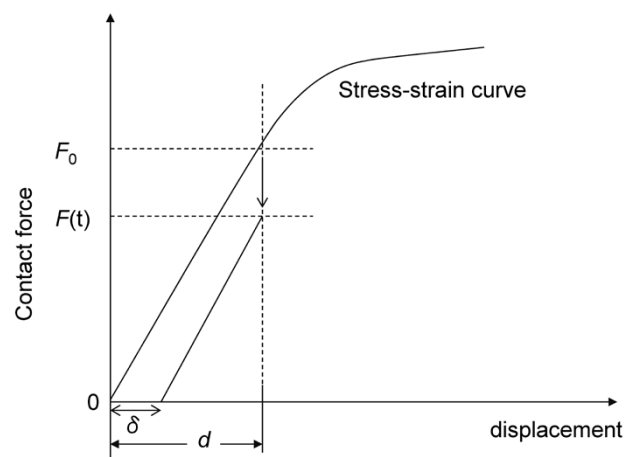


図5 コネクタにおける応力緩和現象の模式図
Fig. 5 Schematic diagram of stress relaxation for connector

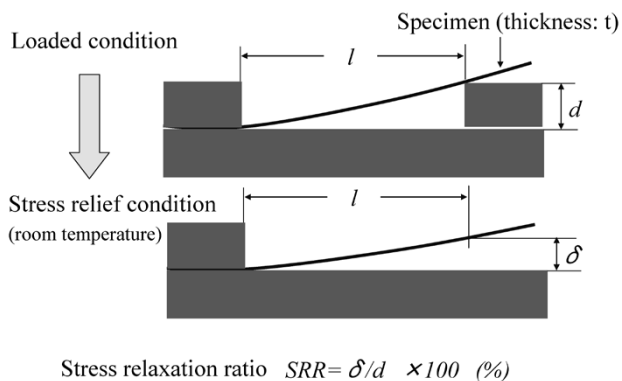


図6 片持ちばり式耐力緩和特性試験

Fig. 6 Schematic of cantilever stress relaxation test

経過とともに接触力が $F(t)$ まで低下する。これを応力緩和現象とよぶ。図5の例では、接点を分離して接触力を0に戻した場合、最初に与えた変位 d も δ だけ減少している。この $\delta/d \times 100(\%)$ を応力緩和率とよび、 δ が増加しにくい性能を耐力緩和特性とよぶ。この特性は図6に示した試験によって知ることができる。高さ d のブロックを用いて測定対象となる通電部材に曲げ変形を与えて固定し、所定時間・温度で加熱する。室温まで冷却後ブロックを取り外し、残留する変形量 δ を測定する。試験条件の例として、発熱量の多いパソコンなどのCPUソケットでは、 85°C の温度上昇のもとで10年間使用し続けることを模擬して 115°C 、442時間が使用されている²⁷⁾。

自動車用ワイヤハーネスに使用されている端子でも耐力緩和特性は重要な特性である。試験方法が国際的に統一されていないため、そのまま比較値とすることはできないが、米国の例では3,000時間加熱が15万マイル(約24万キロ)走行に相当する²⁸⁾とされており、 $150^{\circ}\text{C} \cdot 3,000$ 時間加熱で応力緩和率20%以内であれば高信頼性を有しているとみなされる²⁹⁾。ただしこれは米国規格の試験³⁰⁾であり、日本で規定された試験方法³¹⁾とは試験片形状が異なりやや応力緩和しにくい傾向にある。国内試験法では 150°C 、1,000時間で応力緩和率30%以下であれば高信頼性を有するとみなされることが多い。実際に自動車に使用されている端子(材料:黄銅C2600)の応力緩和率を測定した例³²⁾では $120^{\circ}\text{C} \cdot 300$ 時間加熱で約50%となっており、これは図6の方式で黄銅板の応力緩和率を測定した結果とほぼ一致している。

耐力、導電率、耐力緩和特性の兼備がこの分野で使用される銅合金開発のポイントである。

3.4 熱抵抗

第1章で述べたように熱抵抗は熱伝導率の逆数に比例する。熱伝導率は導電率に比例する。したがって、熱抵抗を低減するためには高導電性の通電部材を使用すればよいと思われる。しかしながら、半導体チップと銅合金製リードフレーム間の熱抵抗をシミュレーションで求めた例³³⁾では、導電率がおおむね40%IACS以上で熱抵抗値はほぼ一定値になることが示されており、導電率と必要とする機械的特性のバランスを考慮すべきとの提言がなされている。

一方で、金属の導電率は温度上昇とともに低下する。図7に代表的な三種類の銅合金CAC60, KLF170, KLF194の高温での導電率を示す。これらの銅合金は重量比95%以上が銅であることから、合金系や強化機構によらずほぼ同じ傾向で導電率が低下していく。重要なポイントは第1章で述べたWiedemann-Franzの法則は室温から銅の融点付近まで成立していることである⁶⁾。つまり、高温でも熱伝導率は導電率に比例し、熱抵抗は導電率に反比例する。たとえば、 200°C での導電率は室温のときと比べて30~40%ほど低下するため、熱伝導率や熱抵抗も同じ比率で変化する。そのため、温度上昇が激しいデバイスを接続するための通電部材には温度による物性値の変化についても注意を払う必要がある。

その一例がプリント基板にはんだ付けで接続されたピン型端子である。プリント基板の銅箔と端子の間にはんだが介在し、さらにそのはんだ内部には銅とすずの相互拡散で生じたCu-Sn金属間化合物が存在している。これらの金属間化合物は、室温での導電率が10%IACS程度で温度上昇とともにさらに低下³⁴⁾し、熱抵抗が増大する。一見、金属部材同士で接続されているように見えて、実は発熱が大きな熱抵抗に阻まれて拡散していかないおそれがある。この問題を解消するために採用され始めたのがプレスフィット端子である³⁵⁾。

図8にスルーホール挿入型ピン端子およびプレスフィットピン端子の模式図を示す。プリント基板挿入時の弾性接触力でプリント基板の銅箔とピン部分を密着させる技術であり、はんだが介在しないため熱抵抗の減少に役立つ。実際は、ピン部分を裸材のまま使用するのは難しく、表面保護用にめっきが施されている。しかしなが

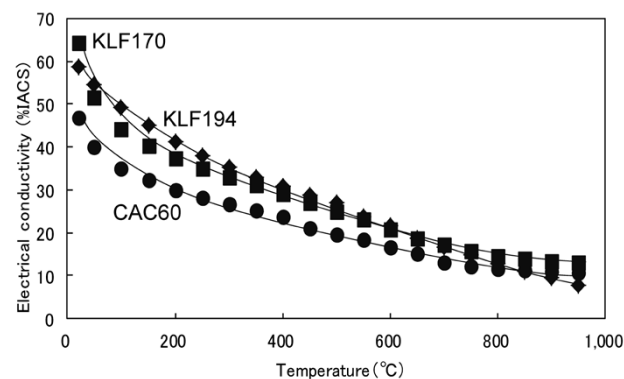


図7 温度上昇に伴う銅合金の導電率減少傾向
Fig. 7 Relationship between temperature and electrical conductivity of typical copper alloys

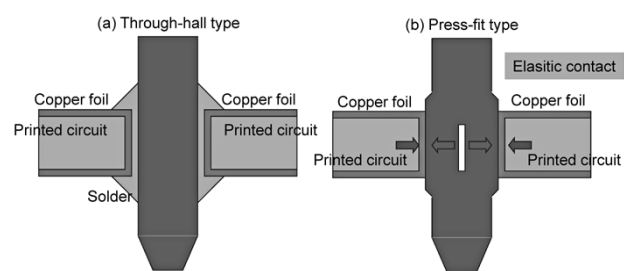


図8 (a)挿入型ピン端子と(b)プレスフィットピン端子の断面模式図
Fig. 8 Schematic models of (a) through-hole type and (b) press-fit type pin terminals

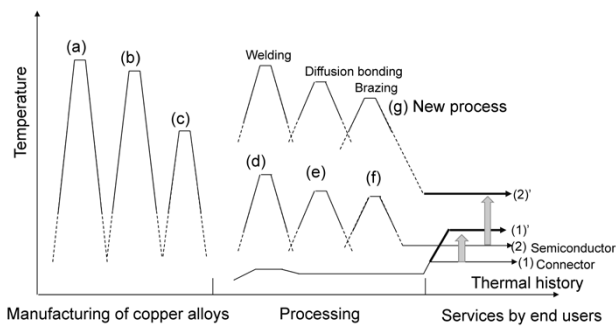


図9 銅合金が受ける熱履歴
Fig. 9 Thermal history of copper alloys

ら、めっきの典型的な厚さ数 μm に比べてはんだ層は数十倍の厚さを持っている。さらに、はんだ付け時のCu-Sn合金層成長からも解放されるため、今後は高発熱部材の接続に採用が増えていくものと予想される。

3.5 熱履歴

銅合金部材の熱履歴は、図3の特性要因図には記載していないが、考慮すべき重要な問題である。図9に通電部材用の銅合金板条が受ける熱履歴の模式図を示す。高温側のみ示し、低温側は割愛する。銅合金製造中は温度の高い順に溶解鑄造(図中の(a), casting), 熱間圧延(同(b), Hot rolling), および焼鈍などの熱処理(同(c), heat treatment)の工程を経て顧客のもとへ出荷される。

顧客において受ける熱履歴は二つに大別される。一つは、端子やコネクタのような主に通電部材の弾性力で電気接点を構成する場合(図中の線(1))と、半導体リードフレームや放熱部材のようにはんだなどで接合される場合(同線(2))である。図中の線(1)の場合はプレス打ち抜きで通電部材が製造されることが多く、製造組み立て中の銅合金板条の温度上昇は材料全体から見ればごくわずかである。プレス破面などは局所的に見ればもっと高温になっている可能性がある³⁶⁾が、材料全体の特性が変化するほどの影響はない。しかしながら、エンドユーザでの使用期間中は、たとえば自動車やパワー半導体周辺、CPU周辺などの過酷環境では自己発熱も含めてピーク温度 150°C 程度の環境に何度もさらされる。

したがって、この程度の温度に長時間さらされ続けても電気接点の信頼性が低下しにくい特性を銅合金に作り込んでおく必要がある。このような特性の代表例が耐力緩和特性や接触信頼性である。一方、図中の線(2)の場合は、半導体などの微細化に応じてリードフレーム寸法形状安定性が μm 単位で求められることから、組み立て加工(プレス打ち抜きなど)時のひずみを除去する短時間の高温加熱(図中の(d))が適用されることが多い³⁷⁾。さらに、ワイヤボンディングやダイボンディング工程中の熱履歴(図中の(e))を経た後、はんだ付け温度(図中の(f))にさらされる。これらの用途に使用される銅合金板条は、これらの熱履歴を経た後も強度特性が低下しない耐熱性が必要となる。具体的には、はんだ付け終了まで硬さが低下しない特性が必要である。機器に組み込まれた後ははんだで固定されており、端子材料のような応力緩和特性は必要ない。その一方で、半

導体素子の放熱を受け持つため、熱放散特性が重要となる。

注目すべき今後の動向としては次の三点が挙げられる。一点目は、SiC, GaNなどの電力変換用半導体の動作温度である(図中の線(2)')。これらの半導体に期待されていることの一つは、自動車エンジンルームのような高温環境下でも、冷却機能のある程度省いて小型化・軽量化を図ることのできる高温動作安定性³⁾である。現行の技術の延長では動作温度はおおむね 250°C が予想されている。これは、現行のはんだ付け接合温度と同じレベルであり、従来のようなはんだ接合では接合部で再溶融や相互拡散による脆弱な金属間化合物成長が促進されることを意味している。このため、高温はんだやろう付け、拡散接合の使用へシフトしていくことが想定される。さらには、従来のプリント基板などを組み合わせた電力変換回路から低融点部材を取り除いた、いわゆるパワーモジュールへの転換が進むと予想される。半導体リードと通電部材との接合ははんだ付けからろう付け、溶接、拡散接合などへ移行することになり、機器組み立て中に銅合金板が受ける熱履歴は図中の(g)のような高温プロセスになる可能性がある。

二点目は、端子分野でもハイブリッド車など大電流を通電する端子の進展により、電線との接続は溶接が想定されていることである。超音波溶接を除けば溶融して結合する方法が増える可能性がある。この場合も、一部とはいえ接合部付近は融点近くまたはそれ以上に加熱される可能性があり、耐熱性向上について新たな取り組みが必要になることが予想される。

三点目は、自動車エンジン直上のようにより温度の高い場所に端子・コネクタなどの接続部品を設置する傾向が強まることである。図中の線(1)'のように使用温度がさらに上昇する可能性がある。端子材についてはさらに優れた耐力緩和特性と接触抵抗増大抑制技術が求められる可能性がある。

4. 通電部材用銅合金の熱的性質

本章では、端子用材料の応力緩和特性と接触信頼性、半導体用材料の耐熱性および放熱性について詳述する。

4.1 耐力緩和特性

図10に端子用銅合金の耐力と導電率の関係を示す。

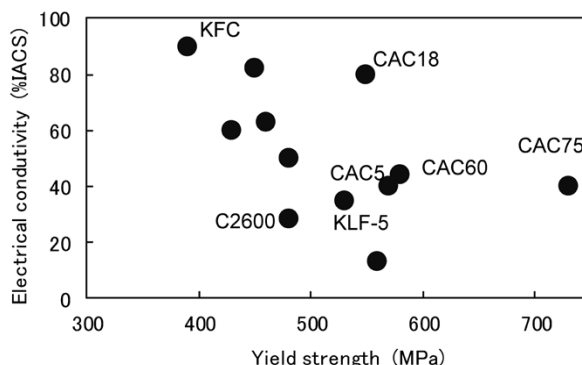


図10 コネクタ用銅合金の強度—導電率の関係
Fig.10 Relationship between yield strength and electrical conductivity of various copper alloys for connector

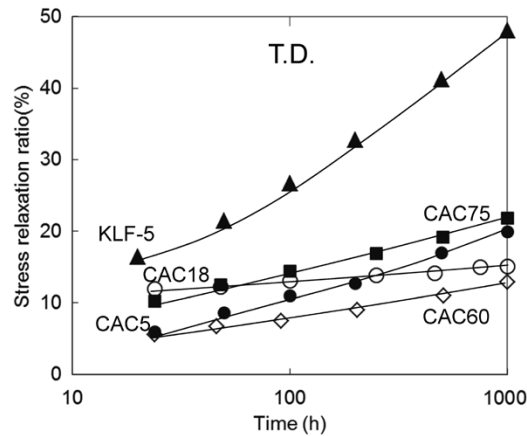
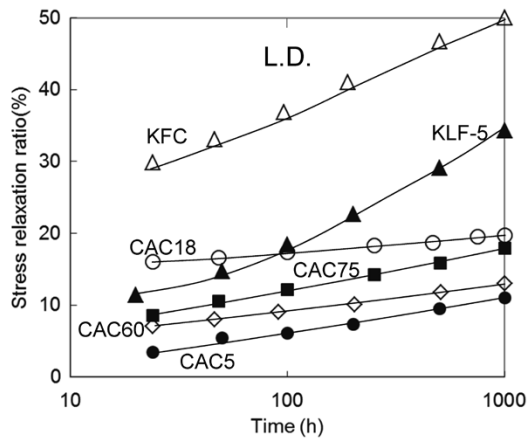


図11 コネクタ用銅合金の応力緩和率

Fig.11 Stress relaxation ratio of copper alloys for connector

強度特性を高めるために様々な元素を添加しているが、強度と導電率は一般的にトレードオフの関係にある。最近では添加が困難だった活性元素を活用し、導電性と強度のバランス点を図中右上に引き上げたCAC18のような合金も登場している。これらの合金の応力緩和特性を図11に示す。銅合金板条の機械的特性には、圧延方向(L.D.: Longitudinal Direction)とその直交方向(T.D.: Transverse Direction)とで異方性が存在するため、両方向の特性を示した。KFCのように導電率を重視した合金では応力緩和率は大きい。とくに圧延直角方向では50%以上応力緩和する。

当社の代表的銅合金であるKLF-5は導電率よりも強度を重視した合金で、KFCをベースに数%のすずを添加している。耐応力緩和特性は、すずを添加した分だけKFCよりも向上している。このKLF-5の後継合金がCAC5である。CAC5はKLF-5よりもすず添加量を減らし、弾性範囲で動き回る転位を固着するよう複数の添加元素を組み合わせた合金である。このため、応力緩和率はKLF-5に比べて1/3以下に低減している。この合金は、固溶元素の転位固着作用をフルに発揮させた合金である³⁸⁾。そのため、工程も非常にシンプルであり製造しやすい合金である。これに対してCAC60, CAC75は、析出現象を利用して強度、導電率、耐応力緩和特性をバランスさせた合金である³⁹⁾。最終工程が時効焼鈍であるため、曲げ加工性も良好であり、圧延で仕上げるKLF-5やCAC5よりも強度/曲げ加工性限界バランスが高い。そのため、熱処理工程がKLF-5やCAC5よりも複雑になるが、

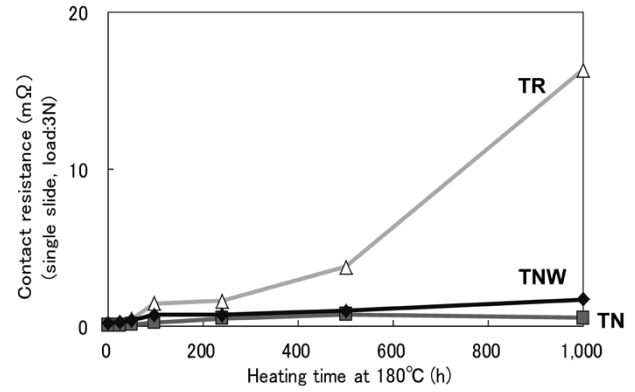


図12 各種すずめっき銅板の接触抵抗変化

Fig.12 Contact resistance changes of various tin plated copper sheets in storage at 180°C

より強度を求める場合には最適の合金である。

次世代合金CAC18は、強化機構としてはCAC60, CAC75と同様であるが、析出硬化を生み出すための元素が微量のCr, Tiなどであり、添加量、析出量ともCAC60, CAC75よりも少ない。このため、強度の割に導電率が高く、応力緩和の増加率はこれら合金中でもっとも小さくなる特徴を持つ。これらの発熱に関わる特性以外にも考慮すべき特性は多く、それぞれの合金に一長一短がある。

4.2 接触信頼性

図12にすずめっきの加熱時間に対する接触抵抗の変化を示す。すずめっきの方法には電着および高温浸漬法(Hot dipping)などがある²¹⁾が、ここでは当社の代表的なリフローすずめっきの接触抵抗変化を示す。なお、リフローとは再溶融の意味で、電着めっき後、加熱して電着すずを再溶融させためっきのことを示す。表面平滑性に優れ、電着めっきで取り込まれためっき添加材などを除去する効果がある。さらに、再溶融の際に銅母材とすず層の間に相互拡散による薄い合金層が形成される。この層が使用中の相互拡散バリアとして作用するため、表面硬化や拡散銅の酸化による接触抵抗増大を防ぐ作用がある。

接触抵抗の測定は、曲率半径1mmのU字型金線をめっき板材に垂直に3Nで押し付け、開放電圧10mVの電源で金線とめっき板材の電気抵抗を測定し、そこから接触抵抗分の値を得る。金線とめっき板材の電圧降下はごく微小である。これは、表面の状態を微小なアーク放電などで破壊しないようにするための措置である。また、応力緩和などの影響を排除して純粋に表面の電気抵抗だけを測定するよう、接触荷重も時間によらず一定となるよう設定してある。

試験に供したのは従来型のリフローすずめっき(図12ではTRと表記)、従来型のリフローすずめっきを施す前にニッケルの下地めっきを打ったニッケル下地付きのリフローすずめっき(図12ではTNと表記)およびNi下地めっき付きの新型リフローすずめっき(図12ではTNWと表記)である。TNWとTRの違いは、銅合金母相とすずの間に生成される金属間化合物の形状制御の有無である。電着めっきの成分自体には差がなく、めっき前の母

材の表面状態を調整することによって制御を行っている。TNはさらに、あらかじめニッケルの下地めっきを施してから電着すずめっきをリフローする構成になっている。ニッケル下地めっきの役割は銅合金母相とすずめっき間の拡散バリアである。バリア効果は銅とすずの金属間化合物よりも強い。

図12でTRの接触抵抗が180℃加熱の時間経過とともに増大していくのは主に、拡散してきた銅の酸化による表面の電気伝導度低下と金属間化合物成長による表面硬化が影響している。式(6)では ρ の増加と H_V の増加に相当する。TRの接触抵抗が250時間から急増するのは、銅の拡散がすずめっき表面まで到達し、そこから銅の酸化が始まったことを意味している。一方、拡散バリアを有するTNWとTNはほとんど接触抵抗が増大しない。180℃、1,000時間加熱後も、拡散バリアを持つTNで接触抵抗値は1 mΩ、拡散バリアを持つ合金層の形態制御を行ったTNWでも2 mΩである。表3に示したように、この抵抗値レベルはφ1mmの銅線で46cm、アルミ線で29cmの長さにしかな相当しておらず、たとえばこれよりも長い細線を使用する自動車用ワイヤハーネスでは電線が電気抵抗の大部分を占めることになり、電気信号劣化や局所発熱の防止に役立つ。なお、TNWで合金層の形態制御を行っているのは、後述の挿入時のハンドリングを楽にし、挿入フィーリングを軽快にするためである。

ここでは、実際の端子に使用されるめっき材の接触抵抗のみを取り上げたが、端子材に要求される特性としては耐摩耗性や端子嵌合(かんごう)時のフィーリングの向上、挿入力低減などがある。さらに、接圧を確保・維持するためには銅合金母材の強度特性や耐応力特性なども必要である。

4.3 耐熱性

銅合金の主要な用途先には半導体分野がある。この分野では、4.1節および4.2節で述べたような端子用途とは異なり、半導体素子を固定して熱を放散させることに主眼が置かれる。このため、半導体組み立て熱プロセス後の耐熱性が重要視される。したがって耐熱性の評価においては、半導体チップの台座としての所要強度を有し、かつ組み立て中の加熱後もハンドリングに必要な強度を有しているかが指標となる。

半導体用リードフレーム加工後は引張試験ができないため、通常は硬さが測定される。銅材の場合、硬さの1/3が降伏応力の近似値として使用できることが知られている⁴⁰⁾。明瞭な降伏点がない銅合金の場合も同様に、硬さの1/3を引張強さとみなす。銅合金板を400℃程度にまで加熱して室温に戻したときの硬さを測定し、出荷時の硬さとの変化(大きな低下)の有無によって評価する。耐熱性とは銅合金板の回復または再結晶の起こりにくさを示しており、それゆえ添加元素を多く添加し様々な強化機構を活用して強度と耐熱性向上を図るが、これらの特性も導電率とトレードオフの関係にある。また回復が起こりにくいということはプレスなどで打ち抜き加工したときに導入されたひずみが除去しにくくなっていることを意味し、図9で示したようなひずみ取り焼

鈍の温度はますます高くなっている。

一方で、強度特性を重視しすぎると導電率が低くなり、熱伝導率の低下と熱抵抗の増大を招く。図13にリードフレーム用銅合金の硬さと導電率の関係を示す。リードフレーム用合金の強度ベンチマークは42alloy (Fe-42%Ni合金)である。熱膨張係数がSiチップに近いので、チップサイズが大きいDRAMなどに使われている合金である。この42alloyの導電率不足を補うために考案されたのがKLF170合金である。強化機構として析出現象を利用している。導電率のベンチマークはKFC合金である。Fe-P化合物粒子の分散によりパワートランジスタ用途向け程度の耐熱性を有している。銅以外の添加元素の量は最小限に抑えられており、導電率90%IACSを発揮する。

一方、導電率と耐熱性の両立のベンチマークがC194合金である。鉄粒子の粒子分散を利用して回復・再結晶を遅延させる。リードフレーム用途向け銅合金の65%がこのタイプの合金であるといわれている⁴¹⁾。当社でもC19400組成でより耐熱性を高めたKLF194を製造・販売している。さらに、粒子分散強化を向上させて耐熱性を高めた合金がSuperKFCである。これはKFCの後継合金で、C19400の欠点とされてきた粗大な鉄粒子の発生⁴²⁾を抑制した合金である。これら合金の耐熱性を図14に示す。C19400に比べてKLF194は若干の耐熱性向上が見られるが、最近の高温ひずみ取り条件である500℃加熱では軟化が始まっている。それに対しKLF170、SuperKFC

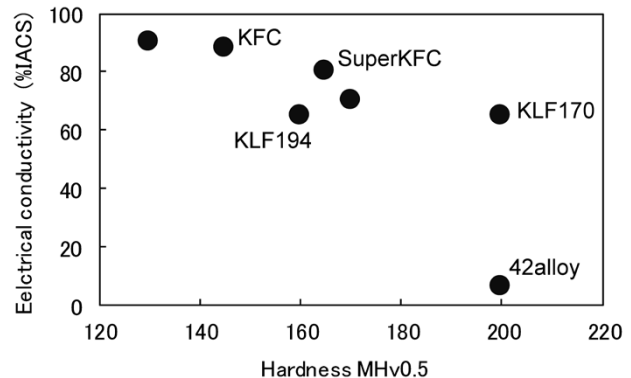


図13 リードフレーム用銅合金の硬さ—導電率の関係

Fig.13 Relationship between hardness and electrical conductivity of various copper alloys for lead frame

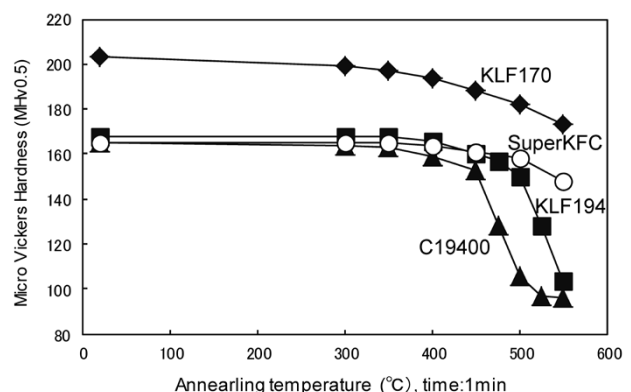


図14 リードフレーム用銅合金の耐熱性

Fig.14 Softening resistance of various copper alloys for lead frame

では軟化は起こっていない。これらの合金は粒子分散制御によりかつてないほど耐熱性が高まっている⁴³⁾。

4.4 放熱性

半導体用途では放熱性も重要な要素である。ただし、熱伝導以外に対流や輻射が影響してくるため、銅合金の物性値として評価するのは難しい。たとえばLED用基板向け銅合金では、水平に配置した銅合金厚板の側面部分が熱放散の大部分を請け負っていることがシミュレーションで示されている⁴⁴⁾。これは、水平方向の二点間にわずかも温度差があれば、すぐに垂直方向の対流が発生する⁴⁵⁾ ことに対応した現象と推定される。一方、熱源を中央に置いた平板を水平に置いた場合は、板の温度分布は板の熱伝導度にあまり影響を受けないことも分かっている⁴⁶⁾。これも、発熱源から大気に向けて対流によって熱が放散されるためと推測される。

そこで、板の熱伝導度の影響を明確に確認するための実験を行った。厚さ0.2mm、幅58mm、長さ110mmの板状供試材の中央に10mm×20mm角の発熱源（セラミックヒータ）をサーマルグリースで貼り付け、板の長手方向が鉛直方向になるように垂直に立てた。これは、対流を上方に向けて積極的に起こすためである。この状態で発熱源に通電して発熱させた。供給電力は1Wで気温23℃に保った室内に静置した。熱源中央およびそこから下方向に9、18、27、36mmの箇所に熱電対を取り付け、発熱が定常状態になった後、各箇所の温度を測定した。供試材には導電率1%IACSのステンレス板と65%IACSの銅合金KLF170を用いた。その結果を図15に示す。

導電率の効果は歴然としており、放熱板にKLF170を用いた場合はセラミックヒータ自体もほとんど発熱しない。これに対し、SUS304を用いた場合はセラミックヒータ自体が約60℃まで温度上昇している。発熱源から10mm以上離れるとKLF170板の温度はほぼ一定となる。一方SUS304板は、発熱源から離れるほど温度測定時の室温に近づいていく。これは、発熱源の熱がほとんど伝播してきていないことを示す。KLF170板は全体が放熱板として機能している。図15の点線は、ABAQUS/implicitによる解析結果である。発熱源から離れた箇所では温度変化の傾向が比較的よく再現されている。一方で、SUS304の熱源近傍での解析結果は大きな乖離（かいら）が生じている。これは、熱源の高温化によりサー

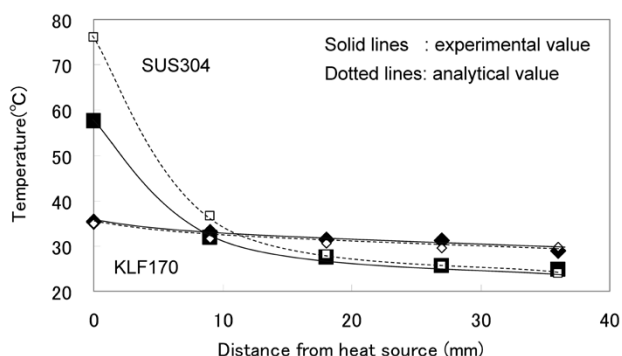


図15 1W熱源からの距離と銅合金板の温度の関係

Fig.15 Relationship between distance from heat source and various points temperature on copper alloy sheets

マルグリースのなじみがよくなり、熱抵抗がさがって発熱源の熱がSUS304板に流入しやすくなったためと推測している。このなじみが解析にはまだうまく取り込めていない。熱に関わる解析はわずかな条件の違いで結果が実体と解離する可能性がある。

その一方で、熱の諸量や発熱温度を測定する実験も様々な要因の影響を受けやすく、正確に実施するにはかなりの準備と技量が必要になってくる。高導電性の材料はもちろん熱抵抗が低いのが、放熱用部材も端子用途やリードフレーム用途と同様に導電性以外の特性をバランスさせる必要が出てくる。この部材の熱放散性についてはより正確な解析手法を構築し、顧客のニーズに応じた導電率をその他に必要なとされる特性とバランスさせて提案できるよう実験と解析両方の精度を高めていく予定である。

むすび = 電子・電気部品用銅合金の熱的な性質について簡単な解説を行った。顧客のニーズにベストマッチする合金の選定をいかに早く確実に行うかがポイントである。また今回は主に静的な特性に絞って解説したが、実際は振動や雰囲気などの動的特性や化学的影響度も考慮に入れる必要がある。これらの特性についてはまた改めて解説を行いたい。

参考文献

- 1) 細田雄二ほか. Panasonic Technical Journal. 2010, Vol.56, p.64-65.
- 2) 独立行政法人国民生活センター. スマートフォンの充電端子の焼損や本体の発熱に注意. http://www.kokusen.go.jp/pdf/n-20140220_1.pdf, (参照2015-03-18).
- 3) 日経エレクトロニクス. 2013, No.1099, p.53-60.
- 4) 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.
- 5) 日本熱物性学会編. 熱物性ハンドブック. 第2版, 養賢堂, 2000, p.547-551.
- 6) 山根壽巳ほか. Journal of the JRICu. 2007, Vol.46, No.1, p.177-180.
- 7) 大塚寛治ほか. 半導体パッケージング工学. 第1版, 日経BP社, 1997, p.320.
- 8) 日本規格協会. JISハンドブック, 3巻 非鉄, 2013, p.351-352.
- 9) 平野康雄ほか. R&D神戸製鋼技報. 2004, Vol.54, No.1, p.58-61.
- 10) 平野康雄ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.2, p.42-45.
- 11) 平野康雄ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.80-82.
- 12) 中原敬之ほか. 日新製鋼技報. 2010, No.91, p.10-15.
- 13) 山野能章ほか. SEIテクニカルレビュー. 2011, No.179, p.81-88.
- 14) 大庭清嗣. フジクラ技報. 2012, Vol.2, No.123, p.78-82.
- 15) 神鋼リードミックス株式会社. 世界初! アルミリードフレーム製品. <http://www.shinko-leadmikk.co.jp/contents/newproduct-01.html>, (参照2015-03-18).
- 16) 富士通研究所. ノートパソコン用ボディ(筐体きょうたい)～マグネシウム合金～. <http://jp.fujitsu.com/group/labs/techinfo/techguide/list/magnesium-housing.html>, (参照2015-03-18).
- 17) H Yamaguchi et al. Copper'90 Refining, Fabrication, Markets. The Institute of Metals, 1990, p.517-525.
- 18) Center for Advanced Life Cycle Engineering, University of Maryland. <http://www.calce.umd.edu/lead-free/STMAKeyNote.pdf>, (参照2015-03-18).
- 19) C Andersson et al. Copper'90 Refining, Fabrication, Markets. The Institute of Metals, 1990, p.526-534.
- 20) JR北海道. 7月15日発生 特急スーパーおおぞら3号の配電盤から出火したトラブルの原因と対策について. 2013.

- <http://www.jrhokkaido.co.jp/press/2013/130809-1.pdf>, (参照 2015-03-18).
- 21) A. Kamf et al. 31st Annual Connector and Interconnection Symposium and Trade Show. International Institute of Connector and Interconnection Technology, Inc., 1998, p.105-117.
 - 22) P. Béquin et al. Granular Matter. 2010, Vol.12, p.375-385.
 - 23) R. D. Malucci. IEEE Transaction on components and packaging technologies, 2006, Vol.29, No.2, p.326-332.
 - 24) 河野彰夫ほか. 電気・電子材料のトライボロジー. 株式会社リアライズ社. 1999, p.105-106.
 - 25) 榎本英彦ほか. 電子部品のめっき技術. 第1版, 日刊工業新聞社, 2002, p.118.
 - 26) 美浦康宏ほか. 伸銅技術研究会誌. 1974, Vol.13, No.1, p.60-64.
 - 27) K.-C. Liao et al. Materials and Design. 2009, Vol.30, 252-255.
 - 28) P. W. Robinson. et al. 32st Annual Connector and Interconnection Symposium and Trade Show. International Institute of Connector and Interconnection Technology, Inc., 1999, p.157-167.
 - 29) 長瀬直明. 日本電子材料技術協会報. 1994, Vol.26, p. 8 -12.
 - 30) ASTM International. ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS. Vol.03.01., 2014,442-456.
 - 31) 日本伸銅協会技術標準. JCBA T309, 2004
 - 32) Y. Sugiyama et al. SEI TECHNICAL REVIEW. 1999, No.48, p.87-92.
 - 33) 二塚錬成. 電子技術. 2002, 7月号, p.55-59.
 - 34) 大澤 直. はんだ付けの基礎と応用. 第1版, (株)工業調査会, 2000, p.128-130.
 - 35) 小松康佑ほか. 富士電機技報. 2012, Vol.85, No.6, p.426-429.
 - 36) 柳原直人. 塑性と加工. 1982, Vol.23, No.252, p.71-78
 - 37) 平井崇夫ほか. 古河電工時報. 2001, No.107, p.63-66.
 - 38) 野村幸矢. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.53-58.
 - 39) 小倉哲造. R&D神戸製鋼技報. 1998, Vol.48, No.48, 13-16.
 - 40) 堀内良ほか共訳. 材料工学入門. 第3版, 内田老鶴圃, 2004, p.125.
 - 41) Li Hua-qing et al. Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2007, Vol.17, p.1081-1084.
 - 42) SU Juanhua et al. J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed. 2006, Vol.21, No.3, p.18-20.
 - 43) 三輪洋介. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.1, p.128-132.
 - 44) 外木達也. 月刊ディスプレイ. 2006, 31月号, p.52-56.
 - 45) ピエール・ベルジェほか. カオスの中の秩序. 産業図書, 1992, p.78-79.
 - 46) 横堀 勉ほか. 注目分野における放熱技術の動向. 株式会社ジャパンマーケティングサーベイ. 2015, p.37-38.