電気接触部の信頼性と表面汚染

玉 井 輝 雄*

1. は じ め に

接触部品の接触特性や接触信頼性を評価する一つの重要な因子に接触抵抗がある。この接触抵抗は接触面の状態、特に表面の汚染等によって大きく影響を受けて増加し、接触信頼性を著しく損なう。接触抵抗は必ずしもオーム性の抵抗ではなく、非線形成分を持ったり整流性であったりもする。

接触抵抗は不確定な要素が多く存在する表面同士の接触によって複合的に生ずるので、その定量化は必ずしも容易とはいえない。しかし、種々の要因を明確にすることによって、接触抵抗に関係する現象やメカニズムを明かにすることが可能となる。ここでは接触抵抗に関わる真の接触面の大きさや皮膜の厚さ等の測定例をその方法とともに示し、さらに接触抵抗特有の非線形性や接触部の破壊を伴う非可逆的特性のメカニズム等の現象を中心にして、筆者の研究結果に基づいてできるだけ系統的にまとめた。

2. 接 触 抵 抗

表面には粗さがあり、たとえ平坦に加工したとしてもうねり等が残る。したがって、表面どうしを接触させると、見かけの表面全体で接触が生ずることはなく、限られた凸部どうして接触が生じ、真の接触部は非常に小さいところで生ずる。そのため導体部を流れてきた電流は接触境界部で絞られ、外部回路に対して抵抗となって現れる。この抵抗が集中抵抗と呼ばれている。

また、金属の表面はその内部の状態とは非常に異なり、そのうえ大気中の酸素や種々の排出気体と反応して汚染皮膜で覆われているのが普通であ

る。したがって、接触境界部にはこれらの異物が介在することになり、電気抵抗となって現れる。これが皮膜抵抗あるいは境界抵抗と呼ばれている。これらの様子を図1に示す。一つの真の接触部に着目すると接触抵抗 R_k は熱中抵抗 R_t と皮膜抵抗 R_f との直列抵抗として次式のように表される。

$$R_k = R_t + R_f \quad (1)$$

$$= \rho / (2a) + \sigma / (\pi a^2) \quad (2)$$

ここで σ は接触部金属の抵抗率、 a は真の接触部を単一の円としたときの半径、 σ は皮膜の面積当たりの抵抗率である。 $\sigma = \rho_f \cdot d$ と表すことができる。この場合、 ρ_f は皮膜の抵抗率で、 d は皮膜の厚さである。

このような接触抵抗の考え方は R. Holm の業績によるものであるが、集中抵抗に対しては1800年代の後半に J. C. Maxwell によって示されている。しかし、それより半世紀以前に G. S. Ohm は Ohm の法則を見いだした彼の実験装置(1826

* 兵庫教育大学(〒673-14 兵庫県加東郡社町下久米942-1)電子工学教室教授。工博(東京大学)。昭和39年、工学院大学電子工学科卒業。昭和40年、上智大学理工学部助手、講師、昭和58年、兵庫県教育大学助教授を経て、昭和62年から教授となる。専門は、電気接触現象および表面科学。電気学会正員、電子情報通信学会正員、アメリカ電気学会(IEEE)上級会員。
<趣味>鉱物採集と分析

図1 皮膜を介した接触部での電流の集中

年)に、明かに接触抵抗を除去するために Hg を介した接触部が認められる。驚くべきことに、その時まだ抵抗の概念が確立されていない。ただ測定値の再現性のためである。

3. 真の接触面の大きさの評価について

接触境界部は外部より観察することができないので、真の接触面がどのようなになっているかわからない。そこで圧痕の状態やラジオアイソトープによる転移の状態等と弾性や塑性変形の理論によって推定されていた。

ここでは、接触部に超伝導材を用いて接触部を作り、超伝導状態で接触部に流れる電流の自己磁界で超伝導が破壊して、常伝導となるとき磁界の大きさから、真の接触面の大きさが測定できることを示す。

3.1 自己磁界による超伝導の破壊と真の接触面の大きさ

超伝導破壊時の臨界磁界は温度依存性があり、図2に示すような特性をもっている。この臨界磁界の温度依存性は次式で与えられる。

$$H_c = H_0 \{1 - (T/T_c)^2\} \quad (3)$$

ここで、 H_c は臨界磁界、 H_0 は 0(K) における臨界磁界、 T_c は常伝導から超伝導に移る臨界温度、 T は任意の温度である。したがって、0(K) における臨界磁界 H_0 と $H=0$ での超伝導開始温度 T_c を知ることで、超伝導下における任意の温度 T での臨界磁界 H_c を知ることができる。

超伝導が生じて集中抵抗が消滅した状態を保持しながら、接触部に電流を流し、増大すると、ある電流値で電流による磁界のために超伝導状態が破壊されて集中抵抗が再現する。

この接触部を流れる電流によって生ずる磁界は

図2 超伝導材料の臨界磁界と温度の関係

図3 真の接触面内を流れる電流による自己磁界

次のようにして求めることができる。すなわち、真の接触境界部を微小な円筒と考えると、この円筒内の磁界を求めればよい。いま、図3に示すように半径 a の円筒の接触境界部内の軸方向に電流が流れ、半径 r の閉路 c に沿って磁界 H が生ずることを考えると、次式が成立する。

$$\oint (H \cdot ds) = \oint H \cdot ds = 2\pi r H \quad (4)$$

閉路 c の円内を流れる電流は、閉路の円の面積に比例し、全電流 I の r^2/a^2 倍であるので、磁界 H は(5)式より(6)式で与えられる。

$$2\pi r H = I(r^2/a^2) \quad (5)$$

$$H = (I/2\pi) \cdot (r/a^2) \quad (\text{AT/m}), \quad (r < a) \quad (6)$$

また、接触境界部の外部に生ずる磁界は、(7)式より(8)式で与えられる。

$$2\pi r H = I \quad (7)$$

$$H = (I/2\pi r) \quad (8)$$

つまり、接触境界内部では、磁界は半径 r に比例

図4 磁界に対する接触面の半径方向の距離と電流の関係

し、外部では距離に反比例する。この様子を図4に示す。また、(6)式より真の接触面内の磁界 H と電流 I との関係は同図に示すようになる。真の接触面の周辺部が最も磁界が強く、電流が大きくなると、周辺部の磁界が臨界磁界 H_c に達し、超伝導が破壊し常伝導となる。ついで電流の増加と共に常伝導部は接触面の周辺部より中心部へ向かう。最終的に中心部を残して全面が常伝導状態になることがわかる。

このことは、超伝導状態の接触部に電流を流し、その値を増加すると、特定の電流値で急激に常伝導状態となり集中抵抗が現れるのではなく、その電流値以後、電流の増加とともに集中抵抗が増大し、最終的に一定値に達することを意味している。

ここで、(6)式において、 $r=a$ とすると次式のように、電流 I と磁界 H に臨界磁界 H_c を与えることで、そのときの電流 I に対応した円に等価な常伝導部の半径 a が求まる。

$$a = (1/2\pi H) \cdot I \quad (9)$$

そこで、超伝導状態が真の接触面の周囲より破壊し始めた時点、つまり、集中抵抗が現れた時点での電流 I_s を(9)式に適用することにより、真の接触面の大きさを求めることができる。

3.2 真の接触面の評価

集中抵抗が零の状態(超伝導状態)で、接触部を流れる電流を次第に大きくした場合の集中抵抗の発生状況を示す典型例を図5に示す。この特性は1.3 mm ϕ のNb線材を10~40 gの接触荷重で直交

図5 超伝導の破壊と電流に対する電圧と集中抵抗の関係

させて得られたものである。

電流と集中抵抗の関係が示すように、超伝導状態が破壊すると、集中抵抗は定常状態の値に飛躍せず、ゼロの状態から増加し始め、定常値に漸次近づく。これは上記のように、常伝導が同心的に中心部へ向かって広がることを意味している。また、Nbは第2種の超伝導体であるので、超伝導と常伝導とが混在した中間状態が生ずるためでもある。ここで、(9)式によって真の接触面の大きさ(半径)を求めると次のようになる。図5の電流と集中抵抗の関係から、集中抵抗が生じた時の電流値を読み取ると $I_s=0.025$ (A)である。また、Nbでは $H_c(0\text{ K})=1950$ (Oe)で、 $T_c=9.2$ (K)である。また、図5の特性の測定時の温度は $T=9.15$ (K)なので、 $T=9.15$ (K)における $H_c(9.15\text{ K})$ は(3)式から、次の値となる。

$$H_c(9.15\text{ K})=21.14\text{ (Oe)}$$

これらの値を(9)式に代入すると、真の接触面の半径は次の値となる。

$$a=2.37 \times 10^{-3}\text{ (mm)}$$

次に、この値を塑性変形時の接触面の大きさを与える次式によって比べてみる。

$$a = (W/\pi H \xi)^{1/2} \quad (10)$$

ここで、 W は接触荷重、 H は硬さである。 ξ は接触面に圧力が均一にかからないことを補正する係数で、 $1/3 < \xi < 1$ である。(10)式に測定条件、 $W=10$ (g)、 $\xi=1$ 、 $H=160$ kg/mm²を代入する。この場合、 H はマイクロビッカースで測定したが、ブリネル硬さやマイヤー硬さに換算してもほとんど変わらないので、この値をもってNbの硬さとした。その結果、つぎの値を得た。

$$a=4.46 \times 10^{-3}\text{ (mm)}$$

S : He-Ne laser, C : chopper, L₁ : lens,
P : polarizer, Q : compensator, A : analyzer,
L₂ : lens, D : photomultiplier, L₃, L₄ : lens

図6 エリプソメータの光路図

これは常温に於ける値である。極低温では、真の接触面が熱的に収縮する。Holm氏はこのような極低温では金属の硬さが常温での2倍程度になることを測定している。これも熱収縮に基因している。そこで、Nbの9.15(K)における硬さの値を常温の値の2倍、つまり320(kg/mm²)とすると、真の接触面の半径はつきのようになる。

$$a = 3.15 \times 10^{-3} (\text{mm})$$

この結果は、先の超伝導の破壊開始点の磁界から求めた真の接触面の半径と非常によく一致しているといえる。

4. 汚染皮膜の評価

接触表面にはその金属と雰囲気中の気体との反応等によって汚染皮膜が生ずる。このため接触抵抗の内の皮膜抵抗が生ずる。接触抵抗に対する皮膜の影響を評価する場合、皮膜の厚さが重要な因子となる。この膜厚を評価するには、接触部の重量増加を秤量する方法、接触面を電解還元して還元電流を積算する方法、ESCA等を併用して表面の成分を分析しながらスパッタリングする方法、皮膜を化学的に溶解して求める方法、および反射光の入射光に対する偏光状態のいずれを検出する方法等が挙げられる。

4.1 エリプソメトリ

ここで偏光状態のずれを検出するエリプソメトリ(Ellipsometry)について述べる。この方法によると非接触で試料を傷つけることなく皮膜の厚さやその光学定数が測定できる。すなわち、直線偏

光を試料表面に入射すると反射光は楕円偏光となる。この楕円の傾き Ψ と楕円率 Δ を測定する。これらの値は次式のように皮膜や金属の光学定数等の関数で与えられる。

$$\tan \Psi \cdot \exp(i\Delta) = f(n_1, N_2, N_3, d, \phi, \lambda) \quad (11)$$

ここで、 n_1 は大気屈折率、 N_2, N_3 はそれぞれ皮膜および金属の光学定数、 d は皮膜の厚さ、 ϕ は入射角、 λ は光の波長である。エリプソメータの代表的な光学系の一例を図6に示す。光源にHe-Neレーザー($\lambda = 6328\text{\AA}$)が使用し、中心部のポライザ(偏光子)とアナライザ(検光子)はグラントムソンプリズム(Glan-Tomson Prism)から構成される。このようなエリプソメータで Δ と Ψ を測定する方法はいくつかあるが、次のArcher氏の方法が広く用いられている。これは1/4波長板の主軸方向を入射面に対して平行な成分から $+45^\circ$ または -45° にそれぞれ設定し、アナライザおよびポライザの回転によって生ずる反射光の消光点を光電子倍增管によって検出し、そのときのアナライザとポライザのそれぞれの方位角 Δ および Ψ 読み取る方法である。これの特徴は、他の方法に比べて、1/4波長板での操作誤差の測定値への影響が少ないことである。

4.2 鏡面仕上げ面とその光学定数

接触面を注意深くポリッシュすると、表面は鏡面となり、一定の状態に達したかのように見える。しかし、ポリッシュを継続しながらその表面をエリプソメータによって光学定数の立場からみると、

図7 ポリッによるAg表面の光学定数の変化

連続した変化のあることが認められる。この様子をAg表面について図7に示す。ポリッの程度は荷重やその継続時間に関係するが、この図ではポリッの時間に対応させている。図示のようにポリッを続けると、屈折率 n は増加し、吸収率 k は減少している。

このような光学定数の変化は、表面を形成する結晶の微細化や表面流動等によるものである。このことは、工業的に用いられる金属の表面は同一種類であっても一義的に同一ではないということである。

4.3 Cu 接触面の酸化

Cu 接触面が大気中で高温に曝されて酸化する場合を取り上げる。酸化温度 300°C で加熱した場合の加熱時間による皮膜の成長と Δ - Ψ の関係を図8に示す。また、清浄表面と酸化皮膜面の光学定数も併せて示す。○印で示すように、酸化皮膜の成長はB.P.点(清浄面: 光学定数 $N_2 = 0.365 - 2.929i$)から出発し、皮膜の成長と共にM点まで理論曲線: 実線(皮膜の光学定数 $N_2 = 2.950 - 0.210i$)上を矢印のように変化する。M点を過ぎると理論曲線からはずれる。これは、最初に設定した皮膜と異なる組成に変化したためである。この皮膜の組成は、電子線回折等によって、CuOとCu₂Oから成ることがわかる。M点を過ぎると表面はCuOが支配的となる。

このようにして測定された酸化皮膜の成長は、

図8 Cu 接触面に成長する酸化皮膜に対する Δ と Ψ の関係

酸化時間と皮膜の厚さの関係において図9に示すようになる。参考までに 300°C の場合について、電解還元法による皮膜の厚さを同図中に示す。この図に示されているように、酸化速度が酸化の初期、中期、および後期で異なることがわかる。ここで、皮膜の成長機構として、Arrheniusの関係を用いると、次式が成立する。

$$d'' = At \exp(-Q/RT) \quad (12)$$

ここで、 d は皮膜の厚さ($\text{\AA}$)、 n と A とは定数、 Q は活性化エネルギー(cal/mol)、 R は気体定数で $R = 1.98719 (\text{cal/deg} \cdot \text{mol})$ 、 T は温度(K)である。

図9の測定結果を用いて、上式によって酸化に関する定数、 n 、 A 、 Q を求めると表1に示す値が得られる。

次に、接触抵抗に対する皮膜の厚さの影響を図10に示す。皮膜の厚さが数 $100\text{\AA}$ あたりから増加し始め、 $1000\text{\AA}$ 付近から急上昇している。

4.4 Ag 接触面の硫化

Ag 接触面が濃度3 ppmの H_2S ガスによって Ag_2S 皮膜で汚染する場合の解析例を示す。皮膜の成長に対する Δ と Ψ の関係の一例を図11に示す。硫化皮膜の成長はB.P.から始まって、膜厚が $750\text{\AA}$ 程度までは、皮膜の光学定数に $N_2 = 2.607 - 0.910i$ を与えた理論曲線と実測値とが一致している。皮膜が厚くなると、 $N_2 = 2.530 - 0.750i$ と変化する。つまり、 $750\text{\AA}$ 当りを境にして皮膜の組成に変化が生じている。この結果から腐食時間に対する Ag_2S 皮膜の成長は図12に示

図9 エリブソメトリによる酸化時間と酸化皮膜の関係

表1 Cuの酸化における走化定数

パラメータ	初期	中期	後期
n	1.00	2.00	3.00
A	1.43×10^5	1.12×10^1	4.84×10^{-4}
Q	1.05×10^4	1.31×10^4	1.39×10^4

すようになる。皮膜の成長速度は図示のように4つの領域に分けることができる。ここで、温度と湿度を一定とすれば、皮膜の厚さは硫化時間 $t(\text{sec})$ と H_2S ガス濃度に直接関係するが、 H_2S ガス濃度が3 ppmで一定なので、皮膜の厚さは硫化時間の関数として次のように示される。

$$d^n = k \cdot t \quad (13)$$

ここで、 d は皮膜の厚さ、 k は定数である。この式の硫化に関するパラメータ n と k は図12に示されている4領域に対応して表2に示す値となる。この硫化皮膜の接触抵抗に対する影響を図13に示す。膜厚が50Å以下であると、ほとんど抵抗に影響がなく、また、皮膜が機械的に弱いことなどがわかる。

5. 皮膜の介在する接触部の導電機構

接触抵抗は上述のように、集中抵抗 R_c と皮膜抵抗 R_f との和で与えられる。皮膜の抵抗率 ρ_f は集中抵抗に関する金属の抵抗率 R_c に比べて非常に大きい。従って、(1)式で $R_f > R_c$ となり、接触

図10 酸化皮膜の厚さに対する接触抵抗の関係

抵抗は皮膜抵抗が支配的となる。従って、いかに表面汚染が接触抵抗特性を劣化させるかがわかる。しかし、接触部に皮膜が介在しても接触抵抗が増大する場合はばかりではない。皮膜の厚さが数100Å程度に薄いと、たとえ皮膜が絶縁性であっても、トンネル導電、ショットキー導電、不純物導電等の導電機構で電流は流れる。

5.1 薄膜が介在する接触部の導電機構

皮膜が非常に薄い(数10Å程度以下)場合はトンネル導電が支配的となる。この場合、接触部に生

図11 Ag_2S 皮膜の成長に伴う Δ と ψ の関係

表2 Agの硫化に関する定数

Parameter	第1段階 (0-450Å)	第2段階 (450-750Å)	第3段階 (750-1000Å)	第4段階 (1000Å-)
n	1.25	1.89	3.33	7.69
k	0.48	4.73	43.18	256.22

じている電位障壁の厚さが重要で、この厚さは印加電圧の増加と共に薄くなるので、その分だけ電流は大きくなる。つまり、皮膜の抵抗率 ρ_f は皮膜の厚さや印加電圧で変化する。

また、導電電子は熱エネルギーを受けて電位障壁を乗り越えることも可能である。これがショットキー電流である。電位障壁はその高さも印加電圧で減少する。そのうえ、温度が上がるほど、熱電子は増加する。障壁高さの減少と温度の上昇とは電流を増加させ、抵抗率 ρ_f を減少させることになる。ショットキー電流に対するこの電圧と温度の関係は次式で示される。

$$I_s = AT^2 \beta \exp(-\phi/kT) \cdot \exp\{(e^3/\epsilon d)^{1/2} V^{1/2}/kT\} \quad (14)$$

ここで、 I_s はショットキー電流、 A は $120(\text{A}/\text{cm}^2/\text{deg})$ 、 e は電子の電荷量、 β は接触面積、 ϵ は皮膜の誘電率、 k は Boltzmann 定数である。

普通の接触部では、その温度は室温以上であり、電流が流れるとジュール熱でさらに高温となる。また、接触不良となり始める数 10Ω を与える皮膜の厚さは数 $100\text{\AA}$ 程度であって、ショットキー導電が支配的である。このような状況下での

図12 腐食時間に対する Ag_2S 皮膜の成長

図13 腐食時間と接触抵抗の関係

接触部の電圧電流特性の代表例を図14に示す。非線形抵抗を示している。そこで、ショットキー導電に着目すると、電圧 V と電流 I_s の関係は(14)式から次式のように与えられる。

$$\log I_s = mV^{1/2} + n \quad (15)$$

ここに、 m, n は定数である。図14の関係を(15)式の $\log I_s$ と $V^{1/2}$ の関係に変換すると、図15に示す

図14 皮膜を介した接触部の電圧電流特性

図15 $\log I - V^{1/2}$ プロット

直線関係となる。種々の接触部について同様の交換を行うとやはり図16に示すような直線関係が得られる。これは電圧と電流の関係の側面からみてショットキー導電が支配的であることを示している。

そこで、ショットキー電流の温度依存性に着目すると、(14)式は次式のように示される。

$$\log(I_s/T^2) = b(1/T) + c \quad (16)$$

ここに、 b, c は定数で、 T は温度である。そこで、汚染皮膜の介在する接触部の温度を室温から約80 Kまで下げながら、各温度でその電圧電流特性を測定すると、図17に示すように強い温度依存性が認められる。この関係を(16)式での $\log(I_s/T^2)$ と $(1/T)$ との関係に変換したのが図18に示す関係で直線となる。すなわち、温度と電流の関係の側面からもショットキー導電であることがわかる。

次に、ショットキー電流を与える(14)式において、 $d(\log I)/d(V^{1/2})$ と $(1/T)$ との関係は一定の傾きを持つ直線となる。そこで、定数を y とすると次式が成立する。

$$d(\log I)/d(V^{1/2}) = Y(1/T) \quad (17)$$

先の電圧電流特性の温度依存性を上式によって表すと図19に示す関係がえられる。すなわち、一定の勾配を持つ直線部がショットキー導電の領域を

図16 種々の接触部に対する $\log I - V^{1/2}$ プロット

示している。

ここで、図18の直線の傾きは(14)式より次式で与えられる。

$$f = (e^3/\epsilon d)^{1/2} V^{1/2}/k - (\phi/k) \quad (18)$$

したがって、電位障壁の高さ ϕ は図18の直線の傾きと上式とから求まる。この結果を表3に示

図17 電圧-電流特性の温度依存性

す。印加電圧で障壁が変化し、接触抵抗が減少する。その目安は次のようになる。

1. 電圧が非常に低い場合 ($V=0$)
2. 障壁の高さより電圧が適当に低い場合 ($V < \phi/e$)
3. 障壁の高さより電圧が高い場合 ($V > \phi/e$)
4. フェルミレベルと障壁の高さの和より高い電圧の場合 ($V > (\phi + eF)/e$)

5.2 厚膜が介在する接触部の導電機構

数百から数千Åと介在皮膜が厚くなると、上記の薄膜の導電機構は消滅する。しかし金属と汚染膜との境界部に、それぞれの仕事関数の大きさや、皮膜の性質(半導体であれば n 形か p 形)によ

図18 $\log I_s / T^2 = 1/T$ 特性 図19 $d(\log I) / d(V^2) - 1/T$ 特性

表3 種々の接触部に対する障壁の高さ

接触部	Pb PbO Pb	Sn SnO Sn	Ag Ag ₂ S Ag	Cu O or S Cu	Ti TiO ₂ Ti	Ni NiO Ni	Mo MoO ₃ Mo	W WO ₂ W
障壁の高さ (eV)	0.38	0.25	0.36	0.45 0.34	0.18	0.19	0.19	0.22

図20 接触抵抗に対する電流の影響

ってやはり電位の障壁ができる。この代表的なものがショットキー障壁である。このためダイオードに等価な特性が現れる。もし接触部の金属が同種で、表面の汚染も同じようであれば、2個のダイオードを逆向きの対象形に直列接続したのと等価となる。異種金属の接触部であれば、一方の接触部が整流性、他方が非線形抵抗となる可能性がある。とにかく、接触抵抗は非線形を帯びる。

6. 接触抵抗に対する通電電流の影響

6.1 ジュール熱の発生

接触抵抗に電流が流れると、ジュール発熱による接触部への影響が現れる。この影響は接触抵抗の変化となって現れる。ジュール熱による温度上昇は次式で与えられる。

$$\theta - \theta_0 = I^2 R_c / 8ak_c \quad (19)$$

ここで、 θ は真の接触部の温度、 θ_0 は基準温度、 k_c は真の接触部の熱伝導度である。上式の R_c に抵抗温度係数 α を考慮することにより、集中抵抗の電流依存性と温度との関係が次のように示される。

$$R_c = [\sqrt{3k_c \rho_0 \{ (4/3)\alpha(\theta - \theta_0) + 1 \}^2 - 1} / 2\alpha] I^{-1} \quad (20)$$

すなわち、集中抵抗は I^{-1} に比例する。この様子をよく表した例を硫化されたAg接触部について図20に示す。電流が増加し、ある値を超えると、

低電流ではほぼ一定であった接触抵抗は I^{-1} 特性に乗って低下し始める。 R_c の電流依存性は I^{-1} であるので、図20に示されている I^{-1} の領域では、硫化皮膜が破壊して金属接触が生じていると考えられる。そこで、 R_c と α の関係式に(20)式を適用すると真の接触面に対する電流の影響が次のように与えられる。

$$\alpha = \frac{\rho_0 \{ 1 + (2/3)\alpha(\theta - \theta_0) \}}{2\sqrt{3k_c \rho_0 \{ (4/3)\alpha(\theta - \theta_0) + 1 \}^2 - 1} / 2\alpha} I \quad (21)$$

この関係から、真の接触面の半径 a は温度を介して電流 I に比例することがわかる。

6.2 接触境界部の観測

一方の接触部に耐熱性ガラスに透明導電膜を塗布した導電性透明電極を用い、他方の接触部に金属試料を用い、その接触境界部を光学顕微鏡で観察できる装置を製作し、接触部に電流を通電した時の接触面の変化を観測した。その結果を図21に示す。同図には(21)式による理論値も合わせて示す。これからわかるように、真の接触部がジュール熱によって影響を受けるまでは、接触荷重と接触部の硬さで決まる接触面の半径を与えているが、熱の影響がでると電流 I に比例して増加し始める。この場合、(21)式において温度 θ は軟化温度 θ_s の2倍である。

酸化皮膜の介在するCu接触部で皮膜破壊後の電流と接触抵抗の関係を測定すると図22に示すように I^{-1} の関係が得られる。この関係は接触部温度が2倍の軟化温度($2\theta_s$)あるいは熔融温度の0.62倍($0.62\theta_m$)で成り立つ。

以上のことから、接触抵抗の電流依存性は、接触部の温度が溶融点の62%もしくは軟化点の200%になると、接触面は軟化が進み、荷重が加わるので接触面積が増加し、結果として接触抵抗は I^{-1} 特性を示すことになる。なお、この場合、硬度は I^{-2} 特性で減少する。

6.3 通電波形の影響

前節の結果から接触部の破壊は印加電圧による皮膜抵抗の減少と、それに続く接触部の熱的軟化変形に基因する。この場合、通電波形によって温度上昇の状況が異なる。いま、電流が時間に対して一定の傾斜で上昇する場合(ramp電流)に着目すると、接触部の温度上昇は次式で示される。

$$\theta - \theta_0 = (I_0^2 R_k / K) \{ t^2 - 2(Q/K)t + 2(Q/K)^2 (1 - e^{-(K/Q)t}) \} \quad (22)$$

図21 真の接触面に対する電流の影響

図22 皮膜破壊後の接触抵抗に対する電流の影響

ここで、 K は真の接触部の熱コンダクタンス、 Q は熱容量、 I_0 は電流の勾配である。そこで、上式の接触部温度に破壊時の温度として軟化温度を用い、電流勾配 I_0 に対する破壊時間 t_B の関係を求めて、 $V_b = I_0 R t_B$ から皮膜破壊電圧 V_b と電流勾配 I_0 の関係を求めると図23に示すようになる。同図には実測値も示す。また、いくつかの通電波形に対する破壊電圧のちがいを図24に示す。波形のいかにかわらず、立ち上がり勾配が大きくなるほど、破壊電圧が高くなる。これは、立ち上がり勾配が急になる程、温度上昇が電圧より遅れるためである。いま、接触部の熱容量 Q と熱コンダクタンス K とから、熱時定数 Q/K を清浄面と汚

染色とについて求めると、表4に示すような値が得られる。つまり、 $10^{-5} \sim 10^{-8} \text{ sec}$ より速い通電に対しては温度上昇より通電の方が速く進み、接触部が熱の影響を受ける以前の電圧が現れるためである。

7. おわりに

不確定要素の多い雰囲気中で、不確定因子の付きまとう表面どうしが接触して生ずる接触抵抗は、それだけ未知の要因を含んでいる。しかし、

図23 電流の立ち上がり勾配と破壊電圧の関係

表 4 接触部の熱伝導に関する諸量

試料	清浄面接触			酸化汚染面接触	
	K (W/deg)	Q (J/deg)	Q/K (s)	K (W/deg)	Q/K (s)
Sn	6.53×10^{-3}	7.36×10^{-5}	1.13×10^{-5}	4.57×10^{-3}	1.61×10^{-5}
Pb	2.44×10^{-3}	1.09×10^{-7}	4.45×10^{-5}	2.19×10^{-3}	4.97×10^{-5}
Cu	8.73×10^{-3}	2.15×10^{-9}	2.47×10^{-7}	8.09×10^{-4}	2.66×10^{-6}
Ni	1.39×10^{-3}	1.62×10^{-6}	1.16×10^{-6}	9.65×10^{-4}	1.68×10^{-5}
Ti	1.14×10^{-3}	7.33×10^{-10}	6.44×10^{-7}	3.64×10^{-4}	2.01×10^{-6}
Mo	8.93×10^{-4}	4.99×10^{-11}	5.59×10^{-8}	2.18×10^{-4}	2.29×10^{-7}
W	1.82×10^{-3}	2.20×10^{-10}	1.21×10^{-7}	5.18×10^{-4}	4.25×10^{-7}

図24 電流波形と破壊電圧の関係

主要と思われる因子を抽出して観察することにより、接触抵抗の持つ特殊な性質を明にすることができると思われる。

参 考 文 献

1) Tamai, T.: Trans. IECE Japan, Vol. E69, No. 4, p.

458 (1986)
2) Tamai, T.: Komonami, M.: Trans. IEICE Japan, Vol. E70, No. 4, p. 343 (1987)
3) Tamai, T.: IEEE Trans. CHMT, Vol. 12, No. 1, p. 43 (1989)
4) 玉井：電子情報通信学会論文誌, Vol. J71-C, No. 10, p. 1349
5) 玉井，他：電気学会論文誌, Vol. 94-A, No. 9, p. 373 (1974)
6) Tamai, T.: "Surface Contamination", Edited by K. L. Mittal, p. 967-981 (1979) Plenum
7) Tamai, T. et al.: IEEE Trans. CHMT, Vol. CHMT-1, No. 1, pp. 54-58 (1978)
8) Tamai, T.: IEEE Trans. CHMT, Vol. CHMT-2, No. 1, p. 76 (1979)
9) Tamai, T.: IECE Japan, Vol. E68, No. 4, p. 241 (1985)
10) Tamai, T.: Trans. IEE Japan, Vol. 108, No. 9/10, p. 147
11) 玉井，他：電気学会論文誌, Vol. 94-A, No. 9, p. 373 (1974)