

大電流点接触子の熔着現象について

On the Welding Phenomena of Point Contacts for Heavy Current

吉岡芳夫*
Yoshio Yoshioka

内 容 梗 概

静止接触子に大電流を流すといわゆる接触抵抗のジュール発熱のために、接触点付近が加熱され、それが融点を越すと接触子は熔着現象を起こす。

従来は小接触力、小電流の場合について実験結果や理論的検討が報告されていたが、本論文は遮断器、断路器などの大接触力(30~300 kgの範囲)の大電流用接触子について熔着現象を調べたものである。実験の結果は、熔着電流は接触力の平方根に比例すること、銅よりも銀のほうが大きいこと、表面状態の影響をあまり受けないことなどが明らかになり、熔着現象には電流を流すことによって変化していく接触抵抗が重要な役割をはたしていることがわかった。また、実験結果を従来の小接触力の接触子の結果を延長したものと比較すると筆者の結果がかなり大きな値を示すが、それが点接触子の形状(曲率半径の大小)によっていることを確かめた。

1. 緒 言

最近電力の需要が急速にのび、電力会社の各発電所には単機容量の大きな発電機や変圧器が設置されているが、これらの機器に必要な保護開閉器類も当然大容量のものが要求される。この大容量の遮断器などで主として問題となるのは、遮断容量とともに増大する遮断電流(短時間電流)であって、これが接触子の構造、接触力などできまるある値より大きくなると遮断器が開離する以前に接触子の損傷、熔着を起すおそれがある。

このような静止接触子の熔着という問題は従来は小接触力の接触子について研究が行なわれてきたが⁽¹⁻⁵⁾、その結果を大接触力の大電流接触子に適用できる保証はなかった。本論文は主として点接触子を取上げて、接触力の大きい場合(30~300 kg)の大電流による熔着現象を、接触抵抗の変化から追求したもので一部はすでに発表したものである⁽⁶⁾⁽¹¹⁾。

2. 実験装置および実験回路

実験に例用したモデル接触子は、銅、銅-銀メッキ、銀(厚さ3 mm)でつくった曲率半径100 mmの球面と平面よりなる点接触子であって、第1図の実験装置が示すように、絶縁板をバネで押すことによって接触力を与えた。接触子の形状を第2図に示す。

第3図は短絡発電機と重電流変圧器を使用した実験回路を示すもので、実験条件は10 c/sの対称電流を1~1.5~通電した。10 c/sの電流を流したのは、接触子端子間電圧(以下端子電圧と呼ぶ)の測定を正確にし、接触抵抗の変化に関するデータを得るため、熔着現象にとっては周波数の高い場合より過酷な実験条件となる。

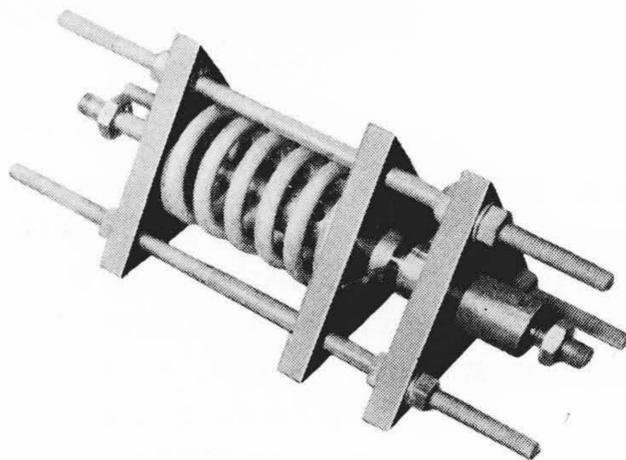
接触子試料の大きさ、特に接触点背後の質量大きさが熔着現象に影響すると考えられやすいが第4章検討の項で述べるように短時間電流に関しては約10 mm以上背後の質量の大きさはほとんど影響しない。点接触子の電流集中による反発力は検討の結果、接触力を幾分減ずるが、銅、銀などの場合にはそれほど問題ではない。

3. 実験結果

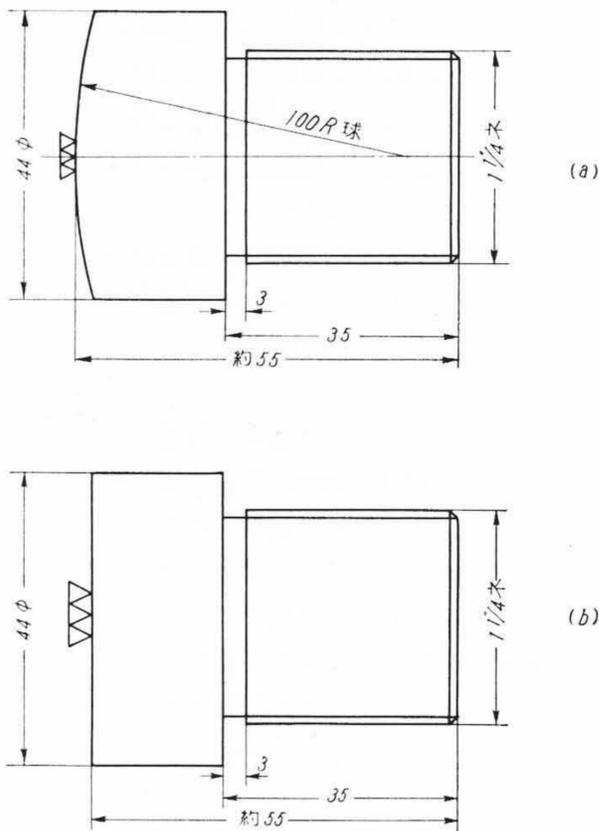
3.1 接 触 抵 抗

接触抵抗は集中抵抗と境界抵抗の二つに分けて考えることができるが、この接触抵抗は電流を通電するときジュール発熱を起して接触部の温度上昇を起し、熔着現象を起させる。したがって、この接触抵抗を詳しく検討することは熔着現象研究の第1段階である。と

* 日立製作所日立研究所



第1図 接触子実験装置



(a) 球面接触子 (b) 平面接触子
第2図 接触子の形状

ころが接触抵抗は通電電流によって異なった値を示すものでまず小電流において測定した接触抵抗について述べる。

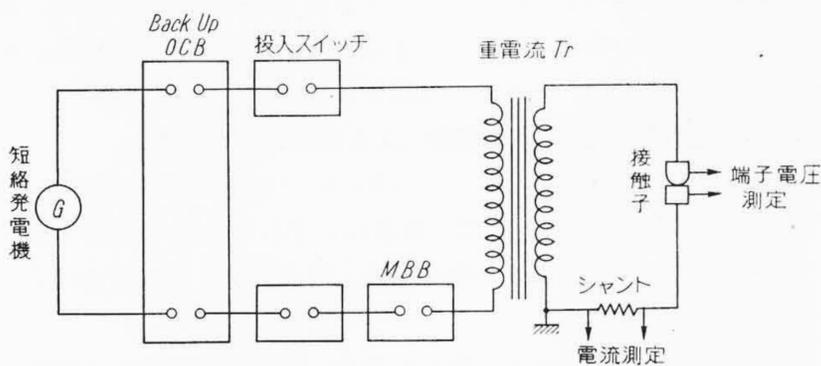
3.1.1 小電流(10~20 A)で測定した接触抵抗

第4図はいろいろな接触子の接触抵抗の接触力による変化を調べたもので接触力のほぼ1/2乗に逆比例して抵抗が減少してい

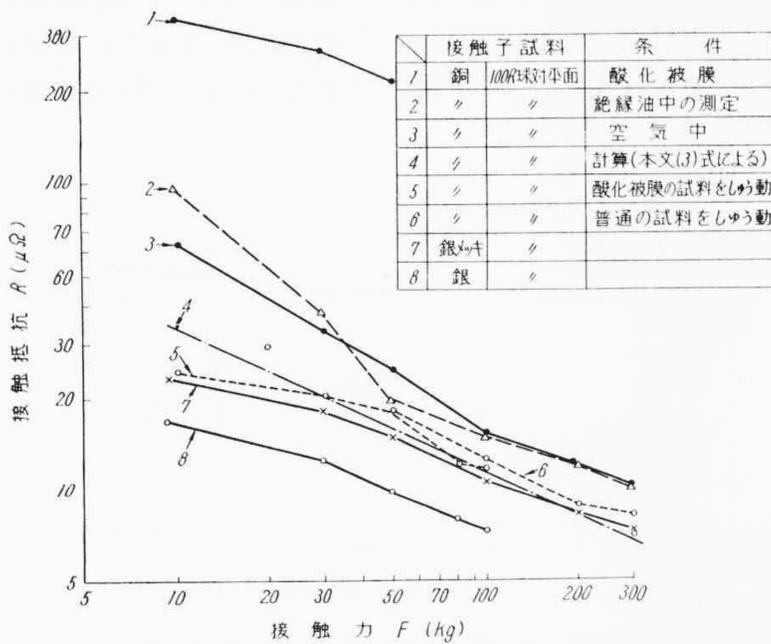
る。銅接触子は空気中でその表面に薄い酸化膜をつくり、これがわずかな境界抵抗を示すので空気中で測定した時としゅう動作用を行なって測定した時では③と⑤、⑥で示されるような差があらわれる。酸化膜が厚くなると①のように相当大的な接触抵抗を示すが、しゅう動作用で⑤に示すように減少させることができる。しかし単なる衝撃的な突合せだけでは小さくならない。銅に銀メッキをほどこすと接触抵抗は⑦のように小さくなる。わずか数10ミクロンの銀メッキで相当小さくなるが、これは検討の項で述べるように表面に酸化膜ができにくいことが関係しているものと考えられる。銀板を張った接触子では⑧に示すように接触抵抗はさらに小さくなる。これは固有抵抗が小さいことよりも、接触半径が大きくなるからである。

さて、接触子の熔着現象はこの小電流で測定した接触抵抗に支配されるのではなくて大電流を流したとき、刻々変化する接触抵抗を調べておかないと意味のないことがわかった。

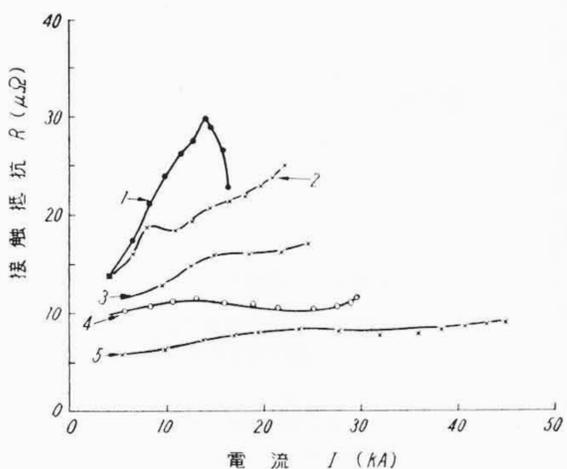
3.1.2 大電流通電による接触抵抗の変化



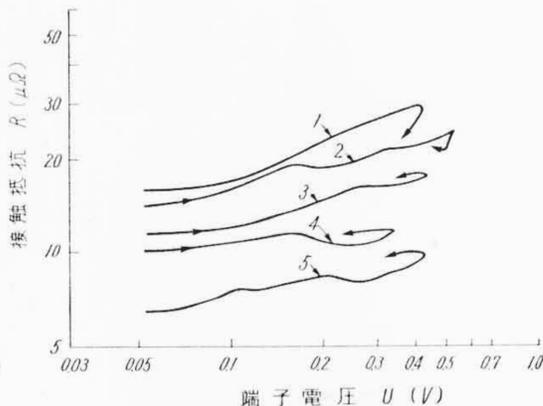
第3図 実験回路



第4図 接触抵抗の接触力による変化



(曲線の番号は第5図と同じ)
第6図 接触抵抗の電流による変化



(曲線の番号は第5図と同じ)
第7図 接触抵抗と端子電圧との関係

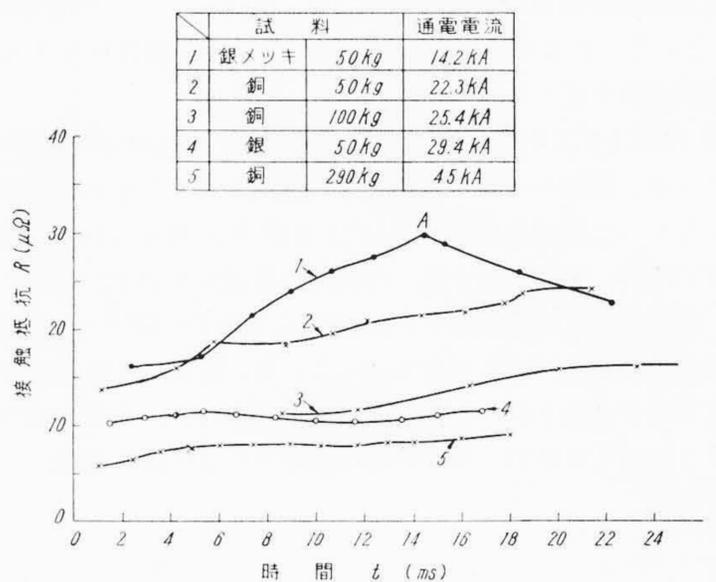
第5図は銅の点接触子の場合、通電試験のオシログラムから電流通電開始後の接触抵抗の変化を調べたものである。電流は約25 ms 後に最大値に達しているが、接触抵抗は電流の変化につれて時間的にも大幅に変化している。接触抵抗が急に減少している部分(図のA点)はあとに述べるように明瞭な熔着現象が起ったことを示す。第6図は横軸に通電電流瞬時値をとって接触抵抗の変化を描いたものである。電流が大きくなるにつれて接触点付近の温度が上昇し、接触抵抗は大きくなる傾向にあることがわかる。

接触抵抗の変化は、端子電圧を横軸にとって整理すると最も明瞭なものになる。第7図はこれを表わしたもので、端子電圧とともに右上りのよく似た曲線が得られている。端子電圧は温度とともに高くなり、定常状態では温度と一対一の関係にあるので横軸は温度が高くなると考えてよい。したがって温度の上昇とともに接触抵抗が増加し、途中とところどころ減少しているのは急に接触面の拡大が起っていることを示している。以上に述べたように接触抵抗そのものは、大電流通電によって大きく変化するものであるから、常温における接触抵抗の大小関係から熔着現象をうんぬんすることはできない。このことについては検討の項で詳述する。

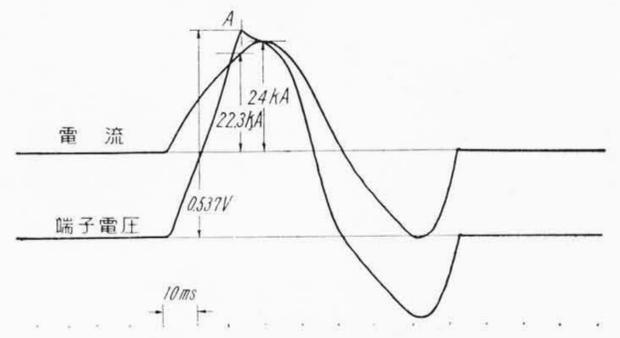
3.2 熔着電流

3.2.1 判定基準と接触子の熔着試料

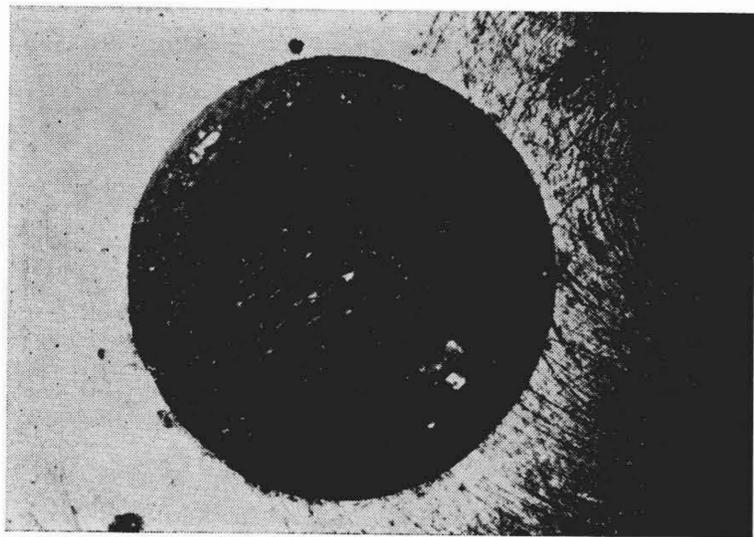
点接触子に大電流を通電して熔着が起った瞬間を知るには端子電圧波形が手がかりとなる。すなわち、接触子に何か変化が起ると端子電圧に変化があらわれることを利用するもので、第8図は典型的なオシログラムの例である。この図のA点は端子電圧の鋭いくびれであって、この瞬間の接触子の熔着が起ったことを多くの実験の結果確かめている。以下に述べる熔着電流とはこのくびれの起った瞬時の電流値をとっている。図のようなオシログラムが得られた場合の接触子は第9図に示すように、周辺部で熔着したあとが明らかにみられる。



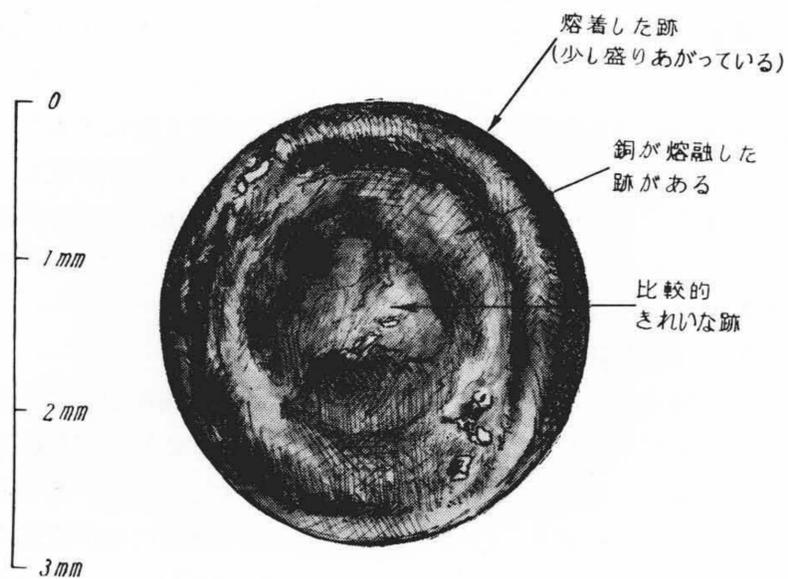
第5図 接触抵抗の時間変化



試料: 曲率半径100mm 球面対平面 銅点接触
接触力: 50 kg A点にて熔着が起っている
第8図 接触子通電試験時のオシログラム



(a) 第 8 図の実験後の試料の顕微鏡写真



(b) a 図の説明

第 9 図 接触点の顕微鏡写真

3.2.2 接触力と熔着電流の関係

熔着電流についてはこれまで数多くの文献がみられるが、いずれも比較的接触力の小さな場合であった⁽¹⁻⁵⁾。ここでは 30~300 kg というこれまでの実験より一けた大きい接触力を与えた場合の実験結果を述べる。

第 10 図 (a)(b)(c) それぞれ曲率半径 100 mm 対平面の銅、銀メッキ、銀板の三つの試料の熔着電流を調べたもので○印は熔着しなかった電流波高値、●はほぼ限界と考えられる電流値、×印は明らかな熔着を起した瞬間の電流値を示す。これによれば、熔着電流 I の接触力 F との関係はほぼ $I = CF^{0.5}$ で、小接触力の場合の結果と同様な傾向を示している。材質による相違では、銅よりも銀のほうがかなり熔着電流が大きいが、検討の項で述べるようにおもな原因は熱の伝導の良さと小さな接触抵抗、大きな

第 1 表 表面状態による熔着電流の相違

表面状態	熔着電流の比	備考
バフ仕上げ	1	差はみとめられない
サンドペーパー仕上げ	1	
ヒタゾール塗布*	1	コヒーラ現象が起って差はほとんどみとめられない
酸化被膜 (銅 100°C で 18 時間加熱)	1~0.95	
絶縁油にひたした場合	1~0.95	
水	1~0.95	

* 導電性の潤滑油で、油と細かい炭素粒を混合したもの。日立化工株式会社の製品の商品名である。

接触面積拡大率による。

3.2.3 表面状態による熔着電流の相違

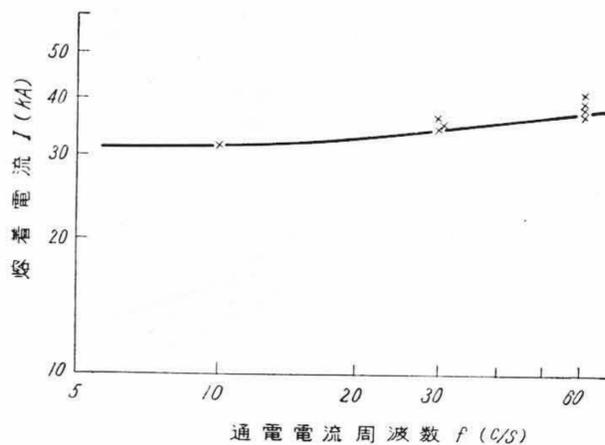
3.2.2 の実験結果は、表面をきれいにバフ仕上げしたものであったが、実際の遮断器や断路器などではいろいろな表面状態にあると考えられる。これらの表面状態を人工的につくって通電試験を行なった。第 1 表は、いろいろな表面状態に対する熔着電流の比をまとめたものであまり差のないことがわかるであろう。しかしこれらの接触子の接触抵抗 (常温小電流による測定結果) は一部第 4 図に示したようにきわめて大きな差があったのだから、途中の接触抵抗の変化がいかにか大きな影響をもつかが知られる。検討の項では、このことについて詳述する。

3.2.4 通電時間と電源周波数による熔着電流の相違

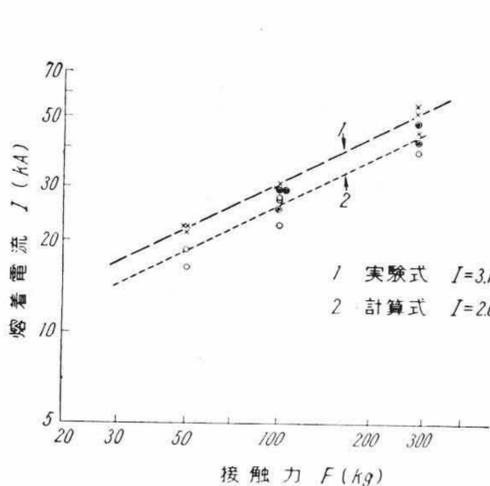
これまでの実験結果はすべて 10 c/s の対称電流を半波~1.5 cycle 通電した場合のもので、熔着はいずれも最初の半波で起っている。完全に対称電流の場合には、第 2, 第 3 波で熔着することはなかった。

次に、同じ電流波高値を流した場合、周波数が異なると熔着電流が異なるのではないかと疑問が生ずる。

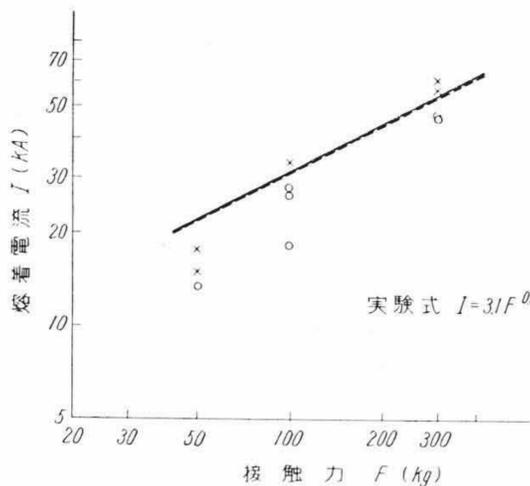
第 11 図は銅、100R 球対表面の点接触子について 10, 30, 60 c/s の通電試験を行なった結果を示すもので、10 c/s よりも 60 c/s のほうが熔着電流が大きくなることを示している。10 c/s と 60 c/s



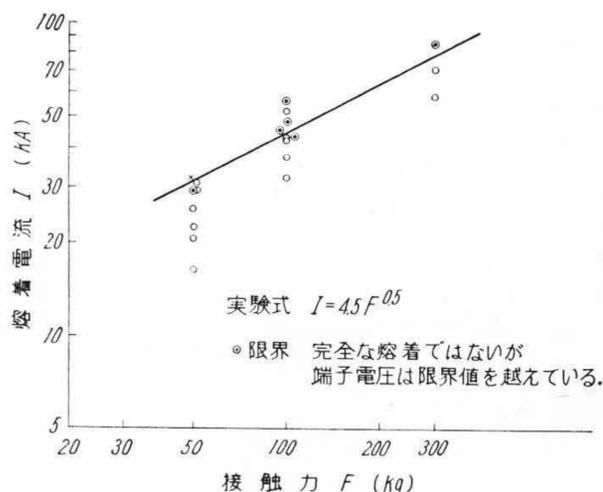
第 11 図 熔着電流の周波数特性
試料: 100R 球対平面の銅点接触 接触力: 100 kg



(a) 銅点接触の場合



(b) 銀メッキした試料の場合



(c) 銀板(厚さ 3mm)を張った試料の場合

第 10 図 熔着電流と接触力との関係

では半波の電流を流したとき、発生するエネルギーは10c/sのほうかはるかに大きい。したがって接触点から熱が逃げないと仮定すると周波数の1/2乗に比例して熔着電流が大きくなるはずだが、実際にはするどい温度こう配のため、逃げる熱量が相当多く、それほど周波数の影響は受けないことがわかる。

4. 検 討

4.1 接触抵抗に関する検討

4.1.1 小電流による測定結果

点接触における接触抵抗は、表面がきれいな場合には集中抵抗といわれる電流集中に起因する抵抗であって、接触している半径(以下接触半径と呼ぶ)を a とすると

$$R_c = \frac{\rho}{2a} \dots\dots\dots(1)$$

で表わされる。

ここに ρ : 固有抵抗

接触半径は材料の硬度 H と接触力 F によって決まり、ほぼ次の関係が成立つといわれている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

$$a = \sqrt{\frac{F}{\pi H}} \dots\dots\dots(2)$$

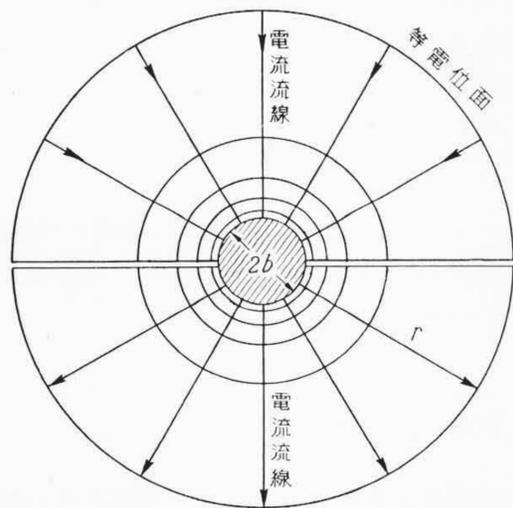
したがって

$$R_c = \frac{\rho\sqrt{\pi H}}{2\sqrt{F}} \dots\dots\dots(3)$$

となり、接触力 F の1/2乗に逆比例して減少する。銅の硬度 H は測定者によって異なるようであるが、R. Holm の文献⁽⁷⁾による $H=5\text{ton/cm}^2$ を採用すると第4図における一点鎖線のようにしてしゅう動作用を行なった銅の場合の実験結果とよく一致する。

次に、表面に厚さ d の銀メッキを施した場合の接触抵抗は、よく知られた接触子モデル(第12図参照)を使って計算すると、

$$R_c = \frac{1}{2a} \left\{ \rho_{Ag} + (\rho_{Cu} - \rho_{Ag}) \frac{1}{1 + \frac{\pi}{2a}d} \right\} \dots\dots\dots(4)$$



(中心に半径 b 、熱伝導率 K が無限大の導体を仮定し、真の接触半径 a との間に $\pi b=2a$ の関係をもたせる。連続した2つの等電位面間の抵抗は全集中抵抗の1/12である。)

第12図 点接触子モデル

第2表 接触子材料の諸物理量と熔融時端子電圧

接触子材料	固定抵抗 ρ ($\mu\Omega/\text{cm}$)	温度係数 α ($^\circ\text{C}$)	融点 θ_s ($^\circ\text{C}$)	$1 + \frac{1}{2}\alpha\theta_s$	硬度 H (ton/cm^2)	比熱 C ($\text{W}^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^3$)	熱伝導度 λ ($\text{W/cm}^\circ\text{C}$)	熔融時端子電圧 U (V)
銅	1.78	4.0×10^{-3}	1,083	3.166	5	3.4	3.8	0.43
銀	1.65	4×10^{-3}	960	2.92	2.6	2.4	4.18	0.35
アルミニウム	2.7	4.3×10^{-3}	658	2.42	1.5~8	2.4	2.1	0.268
黄銅	8.5	1.5×10^{-3}	900	1.675	10	3.2	0.9	0.304
タングステン	5.3	4.9×10^{-3}	3,400	9.35	12.5~37	2.6	1.64	1.48

となる。銀メッキが薄いときには接触面積はほとんど銅の硬度で決まるから $H=5\text{ton/cm}^2$ とし、第2表の諸定数を使って計算すると、 $F=100\text{kg}$ のとき、 $d=0.08\text{mm}$ の厚さで $R_c=11.7\mu\Omega$ となる。これは同じ接触力の銅の場合の95%に当り接触抵抗はほとんど小さくならないことを示す。しかし実験の結果は空气中で測定した銅の値に比べてかなり小さい。この原因としては表面に酸化被膜ができにくいことがあげられる。

次に銀板を銅の上に張った場合について考えるとき、接触抵抗 R_c は(4)式で d を銀板の厚さととればよい。接触半径 a は銀の硬度で決まると考えられるので第1表より $H=2.6\text{ton/cm}^2$ とし、 $d=3\text{mm}$ として $F=100\text{kg}$ の場合を計算すると $R_c=7.6\mu\Omega$ となり全部が銀の接触子に比べてわずか1.6%大きい値を示すにすぎない。この値は第4図の実験の結果とほぼ一致している。

銀メッキや銀の接触子では表面の酸化膜の影響は少ないが、銅の場合にはかなり影響している。酸化膜の厚さを t 、接触半径を a とすると境界抵抗 R_b は

$$R_b = \frac{\rho_s t}{\pi a^2} \dots\dots\dots(5)$$

ここに ρ_s : 被膜の固有抵抗

となる。銅の場合 100°C 以下の温度でできるのは亜酸化銅被膜であるといわれ⁽⁹⁾、固有抵抗を酸素過剰の場合を考えて $10^2\Omega\text{cm}^{(7)}$ 、 t を 30\AA とすれば $R_b=1.82\text{m}\Omega$ となる。第4図の場合は一けたほど小さい値になっているが、理由は亜酸化銅膜が一様に形成されていないためか、接触子の塑性変形によって被膜がさけ、金属接触の部分ができるためであろう。

次に絶縁油を表面に塗った場合は、 1cm^2 当り 5ton という大きな圧力のために皮膜が破壊されることによって、もしくは数 \AA の皮膜が残っても、いわゆるトンネル効果によって10数 $\mu\Omega$ の境界抵抗を示すにすぎない⁽⁷⁾。

4.1.2 大電流通電時の接触抵抗の変化

大電流を接触子に流す場合は、接触抵抗によるジュール発熱によって温度上昇をきたす。この温度上昇は二つのちがったかたちで接触抵抗を変化させる。第1は固有抵抗の増大で接触抵抗を増加させ、第2は硬度の減少による接触面積の拡大で接触抵抗を小さくする。硬度減少は銅の場合 190°C くらいからはじまるので第2の接触抵抗減少がまず起りさらに温度上昇が進むと接触抵抗の増加が目立ってくる。3.1.2で述べた端子電圧と接触抵抗の関係を示す第7図はこの様子をよく表わしている。すなわち端子電圧の増加(これは後で述べるように温度の上昇を意味する)とともに接触抵抗は増加しているし、ところどころ接触抵抗のさがっているところは、接触半径の拡大による第2の効果を示すものである。接触抵抗の温度変化を考慮した式はR. Holm⁽⁷⁾によれば

$$R_c = R_{c0} \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \theta \right) = \frac{\rho_0}{2a'} \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \theta \right) \dots\dots\dots(6)$$

ここに α : 固有抵抗の温度係数

a' : 高温のときの接触半径

で与えられる。抵抗の温度係数は普通 $\rho = \rho_0(1 + \alpha\theta)$ で表わされるが(6)式の $\frac{2}{3}\alpha$ という係数は接触部の後方に鋭い温度こう配があるためである。よく利用される第12図のようなモデルによって定常状態の温度分布を計算すると⁽²⁾⁽⁸⁾ 接触子背後の温度 θ_r は

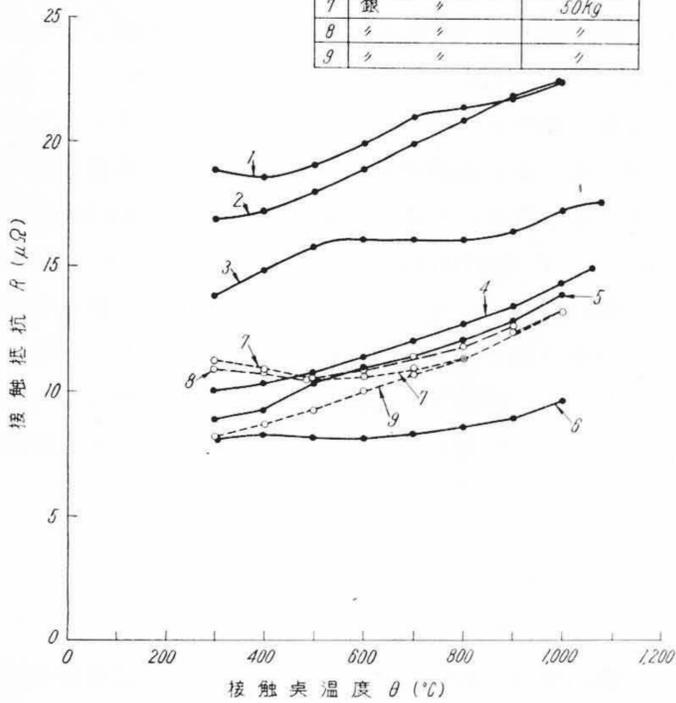
$$\theta_r = \frac{\theta_s b (2r - b)}{r^2} \dots\dots\dots(7)$$

ここに θ_s : 接触部の温度

b : 接触半径に相当し $2a/\pi$ に等しい

r : 接触点からの距離

試料	接触力
1 銅 100R 球対平面	50kg
2 " " "	"
3 " " "	100kg
4 " " "	"
5 " " "	"
6 " " "	290kg
7 銀 " "	50kg
8 " " "	"
9 " " "	"



第 13 図 接触点温度と接触抵抗との関係

となる。この温度分布を使って集中抵抗を計算すると (6) 式と同じものが得られる。すなわち、

$$R_c = \int_b^\infty \frac{\rho_0(1+\alpha\theta_r)}{\pi r^2} dr = \frac{\rho_0}{\pi b} \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \theta_s\right) = \frac{\rho_0}{2a'} \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \theta_s\right) \dots\dots\dots (8)$$

以上の計算で定常状態では温度係数が $\frac{2}{3}\alpha$ となることが知られたが、周波数の影響がわずかに存在するような過渡現象の場合には温度こう配はさらに鋭く、接触抵抗の温度係数は $\frac{2}{3}\alpha$ よりさらに小さくなるものと考えられる。

さて第 13 図は次節で述べる端子電圧と温度の関係 ((12) 式参照) から θ を計算し、これを横軸にとって接触抵抗の変化を描いたもので、温度とともに増加する傾向が第 7 図よりもいっそうはっきり認められる。この図から接触抵抗の温度係数を調べてみると (0.1~0.2) α という値をとり $\frac{2}{3}\alpha$ よりかなり小さいが、これは接触半径が徐々に大きくなっているためと考えることができる。一方、通電後の接触子の跡から接触半径を測定すると銅の場合、 $F=100\text{ kg}$ のとき平均 1.75 mm で接触抵抗の平均約 $17\ \mu\Omega$ をとって計算すると温度係数は、約 $\frac{1.75}{3}\alpha$ となつてほしい値を示す。

以上の検討により接触抵抗の温度係数は $\frac{2}{3}\alpha$ より少し小さい値をとることが確かめられたが、次に通電による接触半径の拡大と硬度の減少について検討する。

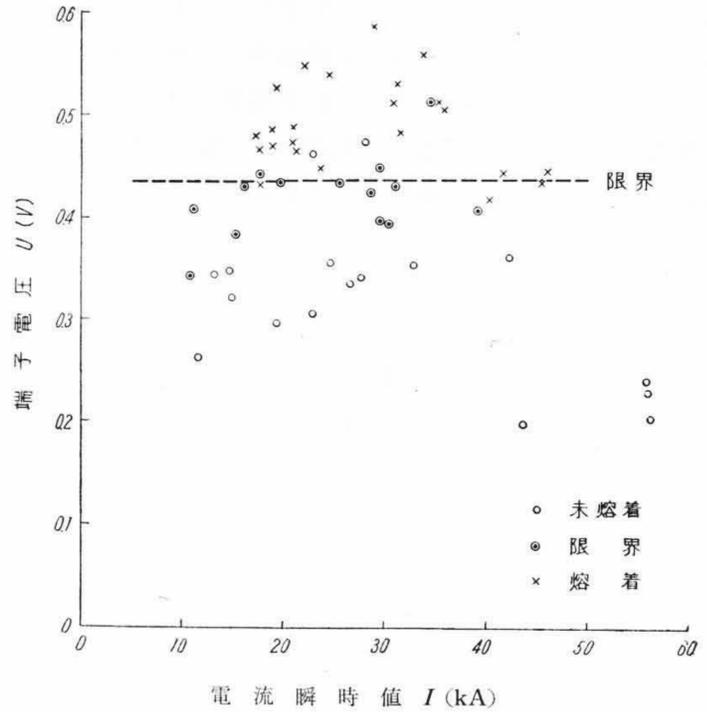
熔着直前において平均の硬度 H' が減少し

$$H' = \frac{1}{K} H \dots\dots\dots (9)$$

となつたと仮定すると接触半径 a' は

$$a' \doteq \sqrt{\frac{KF}{\pi H}} = \sqrt{K} \times a \dots\dots\dots (10)$$

で与えられる。熔着限界の銅の試料の跡から測定した接触半径は前述のように 100 kg の接触力のとき 1.75 mm なので、定数を入れて計算すると、 $K=4.7$ となる。接触半径はこのとき定温の場合の約 2.2 倍大きくなったことになる。この接触半径拡大は熔着現



第 14 図 端子電圧と熔着との関係

象を起りにくくするもので接触子形状はこの拡大率の大きいもののほうが良い。点接触子ならば、曲率半径によって当然異なってくると考えられるが、実験の結果はたとえば曲率半径 10 mm のとき、 $K=3.1$ 、接触半径の拡大は約 1.76 倍となった。これは同じ点接触子でも、曲率半径の大きい球面との接触のほうがはるかに有利なことを示している。

4.2 熔着電流に関する検討

4.2.1 熔着電流の決定と端子電圧について

前章では熔着が起こると必ずオンログラムに変化が表われることを述べた。これは接触点近傍のある体積を占める部分が金属の融点に達したため急激に押しつぶされたことを示すものである。さきに示した第 8, 9 図はオンログラムとそのオンログラムが得られたときの接触子のあとを示す顕微鏡写真の一例で、端子電圧にくびれの生じたものは明白な熔着となっていることがわかる。

さて、端子電圧 U は古典的な解析によって接触部分の温度 θ と一定の関係があることが知られている⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾。この関係は熱伝導度を λ とすれば

$$\int_0^\theta \rho \lambda d\theta = \frac{1}{8} U^2 \dots\dots\dots (11)$$

で与えられる。この式で ρ, λ はそれぞれ温度 θ の関数であるが、 λ の温度依存性は小さいので ρ のみについて考えると、

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\theta)$$

したがって、

$$U = \sqrt{8 \rho_0 \lambda \theta \left(1 + \frac{1}{2} \alpha \theta\right)} \dots\dots\dots (12)$$

を得る。この式で θ を接触子材料の融点温度とすれば接触点が熔けはじめた時の端子電圧を与えることになる。また端子電圧 U と接触点の温度 θ の間に一対一の対応がみられることになる。第 2 表は接触子材料について諸物理量と接触点が融点に達する時の端子電圧とをまとめたものである。

第 14 図は種々の曲率半径の銅の接触子について、通電試験の際の端子電圧を測定したものでかなり広い電流範囲にわたって熔着の限界が約 0.44 V 付近であることを示している。明らかな熔着となるのは 0.43 V より少し大きい 0.48~0.55 V 付近である。このことは接触点が融点に達しただけでは明白な熔着とはならず、接触点付近にある領域が融点に達したときにはじめて明瞭な熔着現象が起ることを暗示している。

4.2.2 熔着電流に関する検討

熔着電流については小接触力の点接触子について種々の実験結果と理論が発表されている⁽¹⁻³⁾。これらの理論式ではいずれも定常状態の理想的なモデルで行なった計算であり、今回の実験結果を説明できない。しかし、G. Hilgarth⁽⁴⁾ は熔着時の端子電圧が材料によってきまるほほ一定の値を示すことから、熔着電流 I を次の式できめている。

$$I = \frac{U}{R} \dots\dots\dots (13)$$

ここに R : 熔着する直前の接触抵抗
 U と R は (6) 式および (12) 式を代入すれば良く、

$$I = 5.65 a' \sqrt{\frac{\lambda \theta_s}{\rho_0}} \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{2} \alpha \theta_s}}{1 + \frac{2}{3} \alpha \theta_s} \dots\dots\dots (14)$$

が得られる。4.2.1 で述べたように明白な熔着となるのは端子電圧 U が理論値より大きい 0.5 V 付近であるから、係数 β を掛けると次式が得られる。

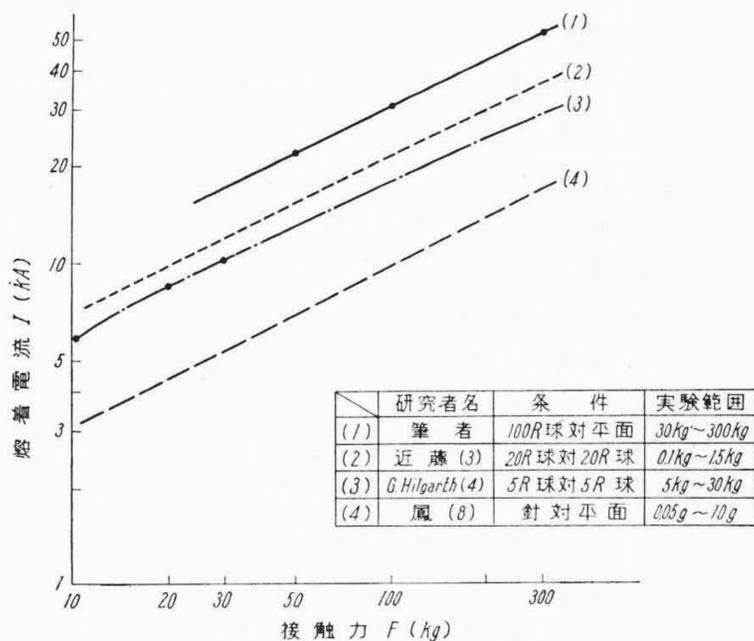
$$I = \beta \times 5.65 a' \sqrt{\frac{\lambda \theta_s}{\rho_0}} \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{2} \alpha \theta_s}}{1 + \frac{2}{3} \alpha \theta_s} \dots\dots\dots (15)$$

接触力 F と熔着電流 I の関係は a' と F の関係を決める (10) 式を使って得られる。

$$I = \beta \times 5.65 \sqrt{\frac{\lambda \theta_s}{\rho_0}} \cdot \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{2} \alpha \theta_s}}{1 + \frac{2}{3} \alpha \theta_s} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi H}} \cdot \sqrt{K} \cdot \sqrt{F} \dots\dots\dots (16)$$

(16) 式は I が F の平方根に比例することを示している。第 10 図の点線は $\beta=1.16$ として計算した結果で実験値より少し低目になっているが、これは接触抵抗を表わす (6) 式の温度係数が $\frac{2}{3} \alpha$ より少し小さいためであろう。

さて、今回の実験結果を従来の研究者のデータと比較してみると第 15 図が得られる。試験条件がそれぞれ異なっているので他の研究者のデータは接触力を 30~300 kg の範囲で比較できるように実験式を延長して求めた。筆者の実験結果とはかなりの差がみられるが一番大きな原因は点接触子の曲率半径 R が異なる点であって、 R が大きいほど熔着電流も大きくなっていることに気がつく。第 16 図は R を横軸にとって第 15 図のグラフを書き直した



第 15 図 他の研究者との熔着電流の比較

もので、 R の約 0.15 乗に比例して熔着電流 I が大きくなっているのがよくわかる。これは、電流通電による接触半径の拡大率 (K の大小に相当する) が異なるためであって、 R の異なる試料 (3 mm, 10 mm, 30 mm, 300 mm) によって実験した結果は、やはり明瞭な R 依存性を認めることができた。この点については、稿を改めて報告する予定である。

以上は銅の接触子に関する検討であったが、銀メッキや銀の試料についても同様な議論が成立つはずである。銀メッキした試料は接触半径がほとんど銅の硬度で決まること、接触抵抗の温度変化が背後の銅の温度分布で決まることを考えると熔着電流は銅とほとんど差がないと考えることができ、実際に第 10 図 (b) の実験結果は銅とほとんど等しい。銀メッキした時の利点は、酸化被膜ができにくいために接触抵抗が小さく、したがって heat run に関して銅よりすぐれていることである。

銀板を張った試料は第 10 図 (c) のように銅よりかなり大きい熔着電流を示しているが、これは主として接触半径 a' が大きいためである。(14) 式で a' を 2 mm とすれば、銅は 24.8 kA, 銀は 26.8 kA となつてわずかに銀のほうが大きくなるが、同じ接触力でも接触半径が約 1.4 倍ほど大きくなるので熔着電流は約 1.5 倍ほど大きくなっている。なお、銀板の試料の接触点の跡は銅に比べて不明瞭で正確な接触面積を測定することはできなかった。

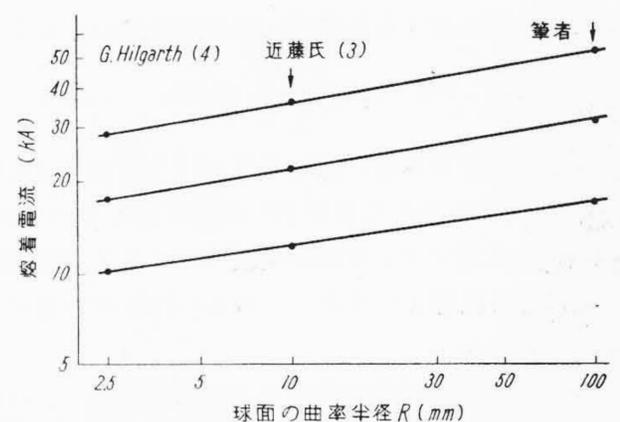
4.3 表面状態の影響についての検討

3章では人工的につくった種々の表面状態に対して熔着電流 I が最初の高い接触抵抗にかかわらずそれほど小さくならないことを述べた。ここではその原因について考察する。

表面の汚損状態が I に影響を及ぼすとすればそれは絶縁性被膜による接触抵抗の増大である。前述したように小電流ではたしかに大きな接触抵抗を示すので表面状態は微妙に影響をうけている。しかるに大電流を通電するこの接触抵抗が急激に減少することがわかった。

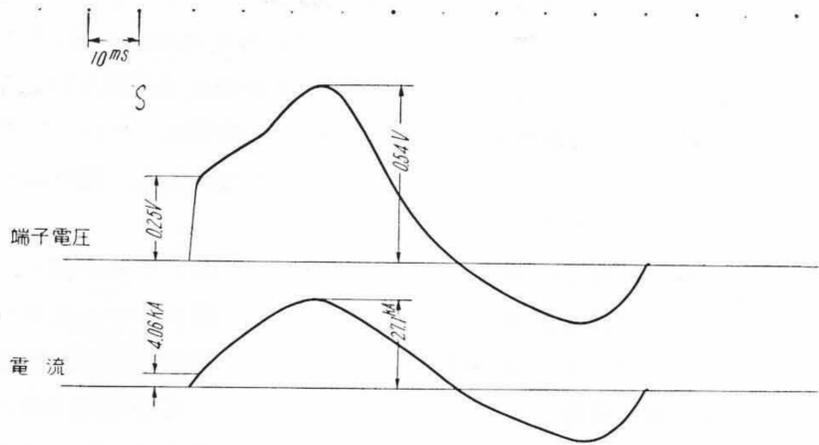
第 17 図はこのような接触抵抗急減の現象があらわれたオシログラムの例で酸化膜を形成させた銅の点接触子の実験によって得られたものである。酸化膜をつくった試料その他表面状態のよごれた試料の場合、必ずこのような端子電圧波形を示すオシログラムが得られ、この端子電圧はよごれや酸化膜が大きいほど高いことがわかった。これらのオシログラムから接触抵抗の変化を U を横軸にとってプロットすると第 18 図のようなある端子電圧で急激な接触抵抗の減少を示すグラフが得られる。これは小接触力の接点で良く知られているコヒーラ現象といわれるものと非常に良く似た現象である。今回の例では、酸化の度合いが少なく表面に亜酸化銅 Cu_2O の被膜ができていると考えられるので、被膜の厚さ s は、R. Holm の著書⁽⁷⁾ に紹介されている式

$$s^2 - 30^2 = 900 te^{0.026 \theta} \dots\dots\dots (17)$$



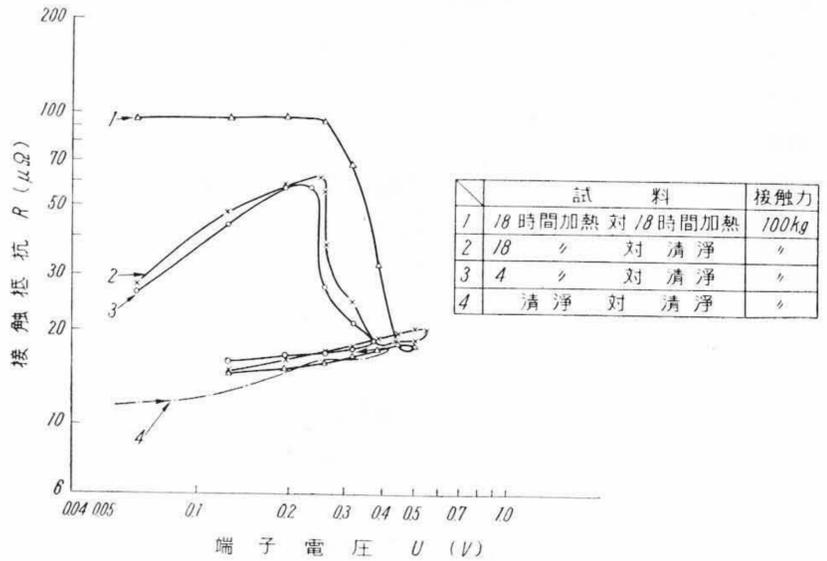
(G. Hilgarth, 近藤氏の場合は、球面対球面の点接触なので、球面对平面上に換算するとき球面の曲率半径を半分にした。)

第 16 図 他の研究者との熔着電流の比較



試料：18時間加熱銅対清浄な銅 接触力：100kg

第 17 図 コヒーラ現象を起こしたときのオシログラムの例



第 18 図 コヒーラ現象による接触抵抗の減少

を用いて計算できる。第 18 図の③の場合、 $t=4$ 時間、 $\theta=100^\circ\text{C}$ だから被膜の厚さ s は 85 \AA となる。この時の全接触抵抗は約 $60 \mu\Omega$ であって、そのうち境界低抗が約 8 割を占めている。したがって大きな電流が流れ端子電圧が 0.25 V に達したとき、被膜の両端には $0.8 \times 0.25 \text{ V}$ 、すなわち 0.2 V の電圧がかかることになる。被膜の厚さは約 85 \AA であるから、この間の電位傾度は約 $0.24 \times 10^6 \text{ (V/cm)}$ 弱に達する。この電位傾度は亜酸化銅の絶縁破壊電圧として測定されている $0.4 \times 10^6 \text{ (V/cm)}$ に匹敵し、 $2\sim 4 \text{ kA}$ の電流が流れていることを考慮すると、当然被膜の絶縁破壊が起ると考えることができる。これは正しくコヒーラ現象である。接触子の跡を観察すると別段金属の熔けた跡もなく、もちろん熔着にもなっていない。また、接触抵抗減少を起しはじめる端子電圧は、接触抵抗(正確には境界抵抗)が大きいくほど高くなり、試料加熱時間が長いほど高くなっていることも、コヒーラ現象であることを示す有力な証拠である。

以上は主として亜酸化銅の被膜を形成した試料の場合についての検討であるが、絶縁油を塗布した場合、表面がよごれている場合も当然同様な現象が起っていて(これらの場合、端子電圧は 0.1 V の付近に、くびれがみられる)、表面状態が溶着現象に大きな影響を及ぼさないといえる。

4.4 通電時間および電源周波数の影響についての検討

第 3 章では熔着電流 I は通電時間にほとんど無関係なことを述べた。これは接触子背後の温度こう配が非常に大きいため発生した熱量が急速に背後に伝達されるためである。

4.1.2 で述べた定常状態の温度分布を示す (7) 式を用いて接触点の後方における熱の逃げを計算する。接触子の背後で接触半径の 2 倍程度の距離にある球面、(第 12 図のモデルで $r=3b$ の球面) について考えてみると、その部分の温度こう配は (7) 式を r で微分して、 $r=3b$ とおくと

$$\frac{\alpha\theta r}{\alpha r} \Big|_{r=3b} = -\frac{4}{27b}\theta_s \dots\dots\dots (18)$$

したがって単位時間に逃げる熱量 Q_{es} は次式で表わされる。

$$Q_{es} = \frac{4\theta_s}{27b} \lambda \cdot 2\pi(3b)^2 = \frac{8}{3}\pi b K \theta_s \dots\dots\dots (19)$$

たとえば $F=100 \text{ kg}$ の場合、接触半径 a は 1.75 mm (したがって $\pi b=2a=3.5 \text{ mm}$) であるから接触点が融点に達しているときには、 $Q_{es} \div 4 \times 10^3 \text{ Watt}$ に達する。今回の実験では 4.1.2 で詳述したように温度こう配は定常状態より大きいと考えられるので逃げる熱量はさらに大きいであろう。

一方、この $r=3b$ より内側で発生する熱量 Q_g は、この部分の接触抵抗が全集中抵抗の 80% を占めているので、

$$Q_g = \frac{\rho_0}{2a'} \left(1 + \frac{2}{3}\alpha\theta_s\right) I^2 \times 0.8 \times \frac{1}{2} \dots\dots\dots (20)$$

I を $F=100 \text{ kg}$ のときの限界付近の電流 30 kA とすると、 Q_g は $6.8 \times 10^3 \text{ Watt}$ となる。(20) 式では接触抵抗の温度係数を $\frac{2}{3}\alpha$ としているが実験の結果は前述したように $\frac{2}{3}\alpha$ より小さいので Q_g はもっと小さくなるであろう。

以上のことを考慮すると接触点の背後約 $3.3 \text{ mm} (=3b)$ のところでは、発生する熱量と逃げる熱量がほぼ同じ程度であることがわかる。(19)、(20) 式をそのまま信用しても $I=23 \text{ kA}$ 以下ならば逃げる熱量が多くなり接触近傍の温度は電流の位相と一致するであろう。したがって周波数の影響、通電時間の影響もないことになる。

第 3 章に述べた実験ではわずかに周波数の影響が認められるから完全に定常状態には達していない。もし熱の逃げが全然ないと仮定すれば、発生する熱量は通電時間 t に比例し、周波数の影響は、 $I \propto f^{\frac{1}{2}}$ という傾向を示すはずである。

最後に接触点からかなり離れた部分の質量(熱容量)の影響は、この質量が小さすぎると接触子全体の温度上昇をきたし、熔着に関しては接触材料の融点を下げることに相当する。しかし銅の場合融点 θ_s は $1,083^\circ\text{C}$ であるから全体にたとえば 50°C の温度上昇があっても θ_s はわずか 5% 弱しか下がったことにならず、熔着電流としては 2.3% ほど小さくなるにすぎない。この条件は通電時間が 100 ms ならば $I=30 \text{ kAp}$ (21.2 kA r.m.s) のとき背後の質量が 5 cm^3 あれば十分満足される。したがって数十 ms 以内に起る熔着現象について考えるときは接触点から約 10 mm 以上はなれた背後の質量の大きさはほとんど無視できる。

5. 結 言

接触子のモデルを使って大接触力 ($30\sim 300 \text{ kg}$) における熔着現象を調べ検討した結果、次のようなことが明らかになった。

- (1) 点接触子の小電流で測定した接触抵抗は、集中抵抗の理論式とよく一致するが、表面状態の影響はかなり大きい。
- (2) 大電流を通電すると、接触部分の温度上昇による接触抵抗増加と材料の硬度減少による接触抵抗減少があらわれるが、全体としては小電流の時より大きな値を示す。この変化は接触子形状(曲率半径の大小)や接触子材料によって異なるが、曲率半径は大きいほど、また材料では銅よりも銀のほうが接触抵抗増加の割合が少ない。
- (3) 大電流通電によれば、酸化被膜や絶縁油などの被膜はコヒーラ現象によって破れ、接触抵抗は表面のきれいな接触子のそれに近づく。コヒーラ電圧は約 $0.2\sim 0.3 \text{ V}$ である。
- (4) 接触抵抗の温度係数は、 $\frac{2}{3}\alpha$ より小さい。
- (5) 接触子の熔着を決めるのは小電流で測定した接触抵抗ではなくて、熔着を起す程度の大電流を流したときに示す接触抵抗

である。したがって大電流を流したときに示す接触抵抗の変化が重要である。

- (6) 接触子が熔着を起こすとき、端子電圧 U はほぼ一定となり、銅の場合は約0.44Vで理論値に近い。
- (7) 熔着電流は大接触力の範囲でも接触力 F の平方根に比例して増加し、球面の曲率半径の大きい接触子の点接触ほど大きい。接触子材料では銅よりも銀のほうが大きい熔着電流を示す。
- (8) 従来の研究者の実験結果を延長して比較すると、筆者らの実験結果のほうが大きい、曲率半径を補正するとほぼ一致する。
- (9) 表面状態はコヒーラ現象を起すため、熔着電流をほとんど減少させない。
- (10) 熔着電流は電流の周波数によって少しかわり、10c/sよりも60c/sのほうが大きい(第11図)。熔着電流は通電時間の影響を受けにくい。

参 考 文 献

- (1) J. Slepian: A. I. E. E. 45, 930 (1926)
- (2) A. Avramescu: Arch. Electro. 33, 261 (1939)
- (3) 近藤: オーム, 637 (昭16)
- (4) G. Hilgarth: E. T. Z-A, 78, 211 (1957)
- (5) G. Hilgarth: E. T. Z-A, 79, 464 (1958)
- (6) 吉岡, 高砂: 電気学会連大, No. 660 (1961)
- (7) R. Holm: Electric Contacts 1~187 (Hugo Gebers Förlag, Stockholm 1946)
- (8) 鳳: 電気接点と開閉接触子 (昭31, 金原出版株式会社)
- (9) 梶山: 金属材料の加熱と酸化 (昭30, 誠文堂新光社)
- (10) F. L. Jones: The Physics of Electric Contacts 17 (OXFORD PRESS 1957)
- (11) 吉岡, 高砂: 電気学会東京支大, No. 175 (1961)



特 許 と 新 案



最近登録された日立製作所の実用新案(その2)

(第27頁よりつづく)

登録番号	名 称	氏 名	登録年月日	登録番号	名 称	氏 名	登録年月日
533374	アルマイト処理用電源装置	森田 和夫	36. 3. 31	533403	スキップ積込用計量ホッパの移動ゲート	氏田 原中 良男 男雄	36. 3. 31
533388	母線選択保護継電装置	藤根 瑞夫	"			若井 森上 春俊 啓史	"
533423	断路器の圧縮空気操作装置	三田 勝茂	"	533408	二又計量ホッパ自動切換装置	野村 昌茂	"
533424	接 着 模 擬 母 線	坊 坂 明	"	533409	水中モータポンプ	野中 栄吉	"
533426	高 圧 コ ン デ ン サ	長谷川 林	"	533410	電動二又計量ホッパ装置	野村 茂樹	"
533430	極性転換器用開閉装置	斎藤 亮二	"	533417	かき出し装置をそなえたバンコンベヤ	亀富 井田 茂樹 男	"
533431	空 気 遮 断 器	山 中 敬	"	533425	ケーブルクレーン用コンクリートバケット	富松 崎直 忠	"
533436	大 容 量 空 気 遮 断 器	沢 幡 寅 治	"	533427	鋼塊クレーンのフックの振れ止め装置	宮本 能一 隆志	"
533368	鉄道車両の駆動装置	能 林 哲 彦 郎	"	533435	トルクコンバータの制御装置	米 橋 部 富	"
533346	鉄道車両用軸箱守装置	小 野 善 一 朝	"	533340	印刷機におけるローラ圧力調整装置	大 野 光 寿	"
533401	車両遠隔操作装置	油 井 兄 朝 治	"	533348	旋盤用チャックにおける溝および締付ボルト	問 島 定 岩	"
533405	ホッパーゲート鎖錠確認装置	持 永 永 治 男	"	533349	遠心力開閉器作動装置	鳴 山 幸 夫	"
533411	ホッパーゲート開閉装置	高 持 永 治 男	"	533380	気 化 器	秋 山 幸 夫	"
533361	電 磁 弁	高 橋 健 造	"	533383	立形電動機の給油装置	御代 藤 満 雄	"
533364	電動車用動力台車	高 油 井 兄 朝	"	533404	基 台 の 脚 部	大 増 田 倉 輝	"
533387	接 触 器 用 接 触 子	湯 口 邦 彦 郎	"	533407	扇 風 機 翼 車	四 倉 輝 夫	"
533392	抵抗器の過熱保護装置	高 古 橋 健 造	"	533414	気 化 器 絞 弁 制 御 装 置	鈴 木 彦 夫	"
533396	防 振 ゴ ム	山 名 順 圭	"	533416	吊 扇 風 機	四 倉 輝 夫	"
533356	ギヤカップリング	関 野 陽	"	533428	切 換 ス イ ッ チ	益 子 三 郎	"
533365	軸梁式軸箱支持装置	高 井 昭 幸	"	533355	コンデンサターイマ	大 井 田 浩	"
533335	炭車の緩衝停止装置	斎 田 信 男	"	533382	タ ッ プ 切 換 装 置	松 村 和 男	"
533338	ク ラ ッ ッ チ	坂 井 裕 春 雄	"	533415	電気ボットの把手取付装置	益 山 口 三 夫	"
533339	燃料汲上栓	田 中 山 義 信	"	533419	電気コーヒャボット	益 山 田 貞 三	"
533341	鉄鋼中のガス分析用試料採取器	秋 船 木 喜 三 郎	"	533429	制 御 箱 内 枠	居 石 川 恒 雄	"
533342	トラクターの下部転輪におけるシール装置	武 藤 利 勝	"	533347	冷 蔵 庫	石 熊 丸 山 恒 己	"
533350	ピン形フレキシブルカップリング	久 保 沢 稔 郎	"	533332	テレビ受像用室内アンテナ	須 本 片 柳 一 登	"
533351	ピン形フレキシブルカップリング	重 松 八 郎	"	533378	棒 状 体 取 付 装 置	古 谷 勝 美	"
533352	ピン形フレキシブルカップリング	小 林 三 千 夫	"	533343	部 品 ケ ー ス の 取 付 装 置	古 大 三 勝 美	"
533353	ピン形フレキシブルカップリング	中 氏 原 良 男	"	533418	クリスタル・セレクタを用いた開閉装置	三 森 露 木 美 勝	"
533354	ピン形フレキシブルカップリング	氏 原 良 男	"	533422	可 変 蓄 電 器	橋 本 光 志	"
533358	かみ合いクラッチのかん脱表示装置	氏 原 良 男	"	533432	熱 陰 極 整 流 管	山 小 島 秀 雄	"
533362	車両における駆動装置	保 木 誠 清	"	533359	半 導 電 体 装 置	中 田 敏 夫	"
533376	バンコンベヤ置のたるみとり装置	保 木 誠 清	"	533333	ラ ン プ ス ケ ー ル	二 木 久 夫	"
533377	バ ン コ ン ベ ヤ	亀 井 茂 樹	"	533328	セルシン式水位計の受信指示計	井 沢 尊 生	"
533379	カ ッ プ リ ン グ	富 田 輝 男	"	533329	周 波 数 記 録 計	小 沢 重 樹	"
533386	駆動ベルトを使用したベルトコンベヤ	清 水 正 次 郎	"	533330	増幅器付計測器の電源装置	阿 部 善 右 衛 門	"
533398	トラクタ用ローラにおけるグリースの給排装置	氏 原 良 男	"	533331	指 示 調 節 計 の 指 示 装 置	藤 岡 健 夫	"
		橋 本 久 男	"			鷺 沢 重 樹	"

(第47頁につづく)