大電流点接触子の溶着現象(第2報)

--特に接触子形状による効果について---

Welding Phenomena of Point Contacts for Heavy Current
—Especially on the Effect of the Contact Shape—

吉 岡 芳 夫*
Yoshio Yoshioka

内 容 梗 概

静止接触子に大電流が流れると接触抵抗による発熱のため接触子は溶着を起こすが、本論文はモデルの点接触子によって溶着現象を調べた結果を述べている。

簡単な点接触子においても、球面の曲率半径によって溶着電流が相違する。これは大電流通電時の接触抵抗の変化によって説明でき、特に端子電圧が大きいところ、たとえば $0.3\,\mathrm{V}$ のときの接触抵抗は溶着電流とほぼ反比例の関係にあること、溶着時の真の接触面積Sの実測によって前報の溶着電流計算式を検討した結果、Sの小さいところで実験と良く一致すること、溶着時の電磁反発力は接触力を 2 割程度減じているにすぎず、溶着は接触抵抗によるジュール発熱によって起こることなどについて述べている。

1. 緒 言

電力需要が増し電力会社の各発電所に、単機容量の大きい発電機が設置されるにつれ、遮断器、開閉器類は短時間電流容量の非常に大きなものが要求されてきている。日立製作所ではすでに短時間電流 200 kAp を越す空気遮断器を製作してきたが、今後さらに大きい容量のものを開発するためには接触子の溶着現象を詳しく究明しておく必要がある。本論文は接触力の大きいところで曲率半径 100mmの球面対平面の点接触子について調べた前報⁽¹⁾に引き続き形状の異なる点接触子に関する実験を行ない、接触抵抗、真の接触面積、および形状と溶着電流の関係を調べ、計算式と比較し、最後に電磁反発力について検討した結果を述べたものであって、その一部はすでに発表されている⁽²⁾⁽³⁾。

2. 実験装置と実験方法

2.1 実 験 装 置

第1図は点接触子の溶着現象を調べるための実験装置を示すものである。これは一方の端子にコーペル銅板で接続された球面接触子と,他方の端子板にボルト締めされた平板とが一点で接触する点接触構造で,荷重をかけないときは球面接触子はコーペル銅板の弾性によって軽く上方に開離した状態に保たれる。接触力は球面接触子の上部のシリンダ中の3種の圧縮バネを荷重ボルトで圧縮することによって、10~300 kg まで与えることができる。実験時の端子電圧の測定は,球面接触子の前面につけた測定端子と平板の締付ボルトの間で行ない,通電電流測定には分流器を使用した。

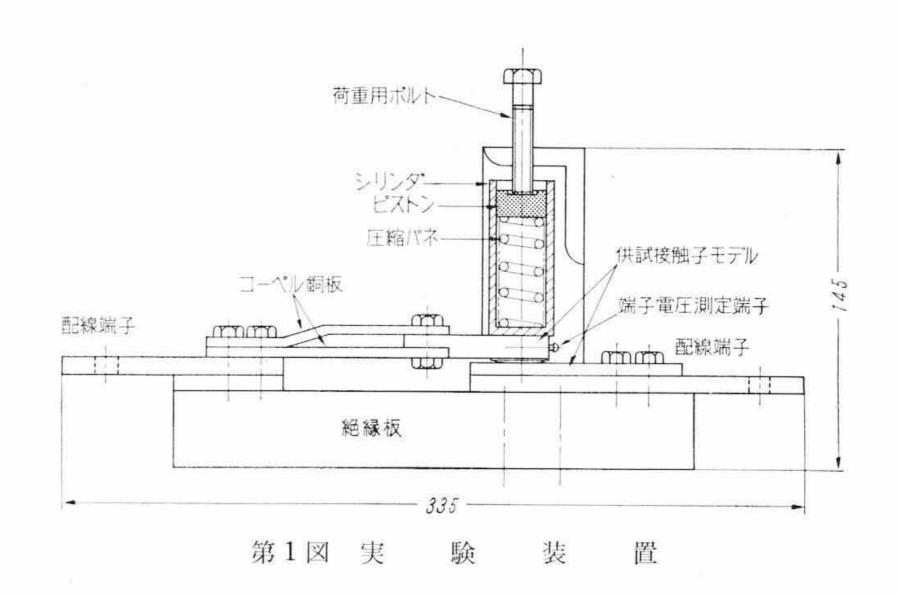
2.2 試 料

実験に供した試料は第2図(a)(b)に寸法図を示すように曲率半径が3,10,30,100 および300 mm の球面をもつ接触子(以下3R球,10R球,……と略称する)と(c)に示す平板の接触子よりなる点接触構造であり、表面仕上げは細かいペーパ仕上げで、材料はすべて銅(99.5% Cu)である。本試料は前報の実験のときの試料に比べ熱容量は小さいが、100 ms 以下のように短時間で起こる溶着に対しては背後の熱容量はほとんど影響しない(1)ので直接実験結果の比較が可能である。

2.3 実 験 方 法

溶着実験に先だって接触抵抗の測定を行なった。ここでは10~ 20 A の直流電流を流し、接点間の電位降下を電位差計で測定して求

* 日立製作所日立研究所



めた。溶着実験の方法は前報と同じく150 MVA の短絡発電機と125 MVA または10 MVA の変圧器を用いて特に10 c/s の低周波大電流を約1 サイクル通電した。低周波では最初の電流波高値に達するまでの時間が商用周波に比べて長いので,若干過酷な実験条件となっている。溶着限界の判定は実験ごとの試料の点検と前報^①で述べたように電流通電時の端子電圧波形のくびれの有無から判定した。すなわち点検の結果,接触子が完全に溶着していた場合および端子電圧波形に明らかなくびれがあった場合を溶着,端子電圧波形の異常は少ないが,その値が0.43 V を越え,拡大して跡を観察した結果,明らかに接触子材料に溶けたあとのあるものを限界とした。

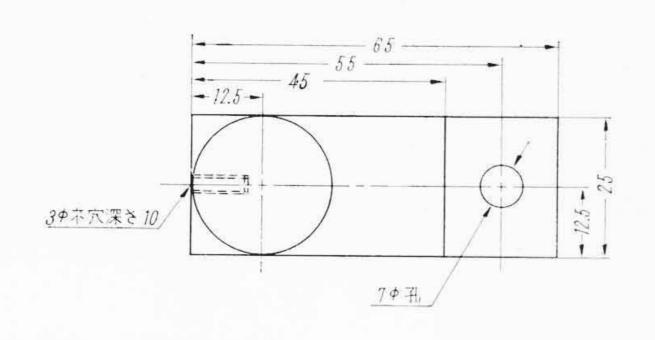
3. 実験結果と検討

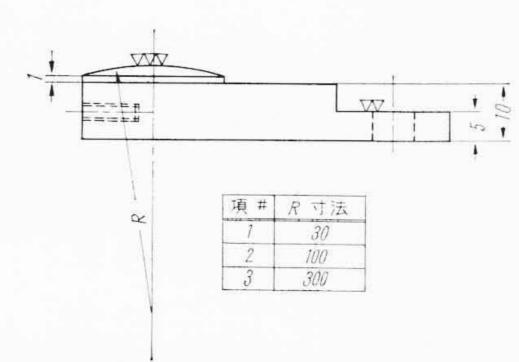
3.1 直流 20 A で測定した接触抵抗と形状との関係

第3図は各形状の点接触子の接触抵抗を空気中で直流 20 A 通電による電位降下法によって求めた結果である。一般に接触抵抗は測定するたびに異なった値を示すので第3図の結果が絶対的に正しいものではないが一応形状による相違をあたってみることはできる。図からは、はっきりした形状による相違は見いだせないが、曲率半径rが 100, 300 mm のものは、rの小さなものより多少、小さな接触抵抗を示すことがわかる。

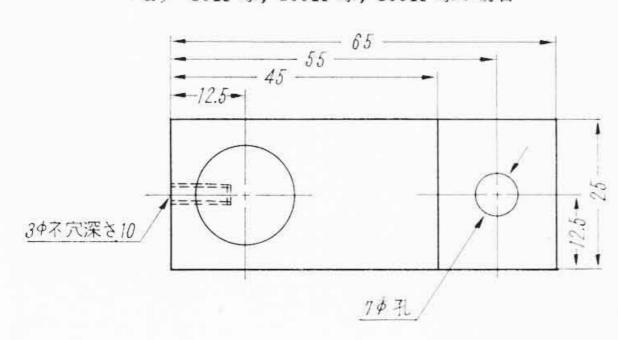
さて、点接触子の接触抵抗 R_c は集中抵抗と境界抵抗からなり、理論的に次の(1)式で表わされる⁽⁵⁾。

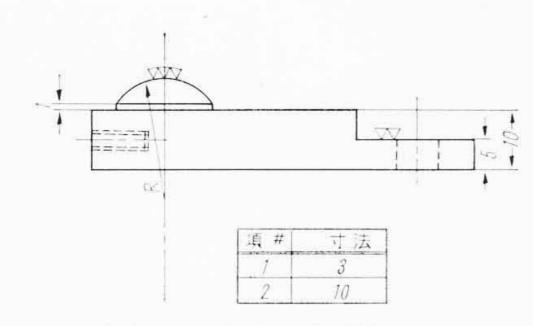
$$R_c = \frac{\rho}{2a} + \frac{\rho'\delta}{\pi a^2} \dots (1)$$



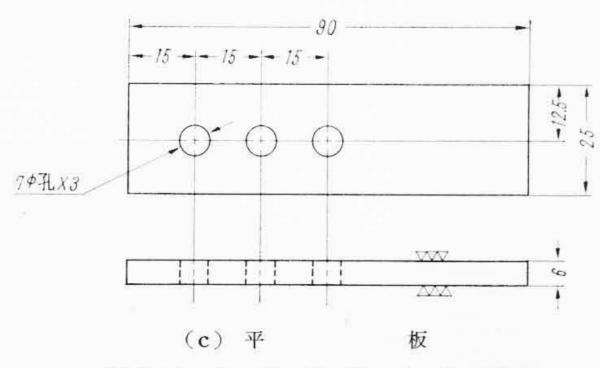


(a) 30R 球, 100R 球, 300R 球の場合





(b) 3 R 球, 10 R 球の場合



第2図 供 試 試 料 寸 法 図

ここに a:接触半径

ρ: 接触子材料の固有抵抗

ρ': 被膜の固有抵抗

δ:被膜の厚さ

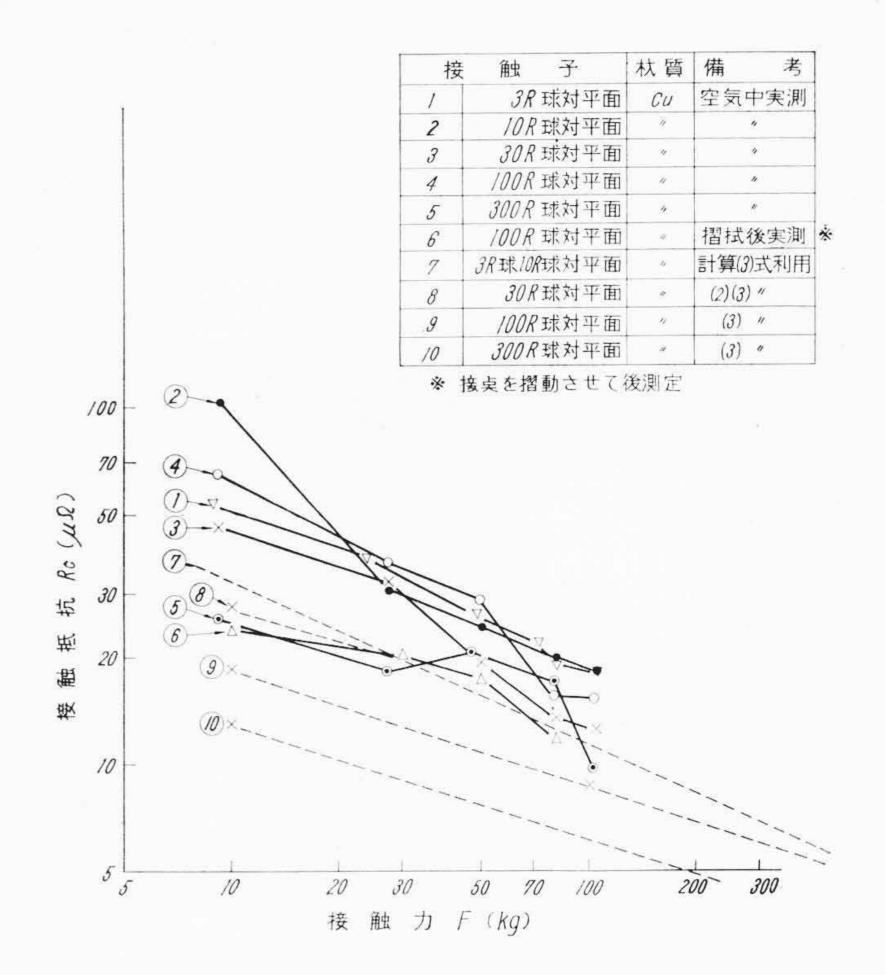
一方接触半径 a は弾性接触の範囲では接触子の形状によって異なり。

ここに F: 接 触 力

r: 球面接触子の曲率半径

E: ヤ ン グ 率

また、接触力の大きい塑性変形の範囲では r によらず常に一定値



第3図 直流20A で測定した接触抵抗

第1表 境界の接触力 F。

R	境界の接触力 F_c (kg)			
	<i>H</i> =5 t/cm² のとき	<i>H</i> =4 t/cm² のとき		
3 R 球	0.369	0.189		
10 R 球	4.1	2.1		
30 R 球	36.9	18.8		
100 R 球	410	210		
300 R 球	3,690	1,890		

注: $E=12.9\times10^{11}$ dyne/cm² として計算

$$a = \sqrt{\frac{F}{\pi H}} \dots (3)$$

ここに H: 硬 度

でそれぞれ与えられる $^{(5)^{\sim}(7)}$ 。この二つの領域の境界は材料の硬度Hとヤング率Eと球面接触子の曲率半径rによって次式で決まる。

$$F_c = (\pi H)^3 \times \left(\frac{r}{E}\right)^2 \times 1.11^6 \dots (4)$$

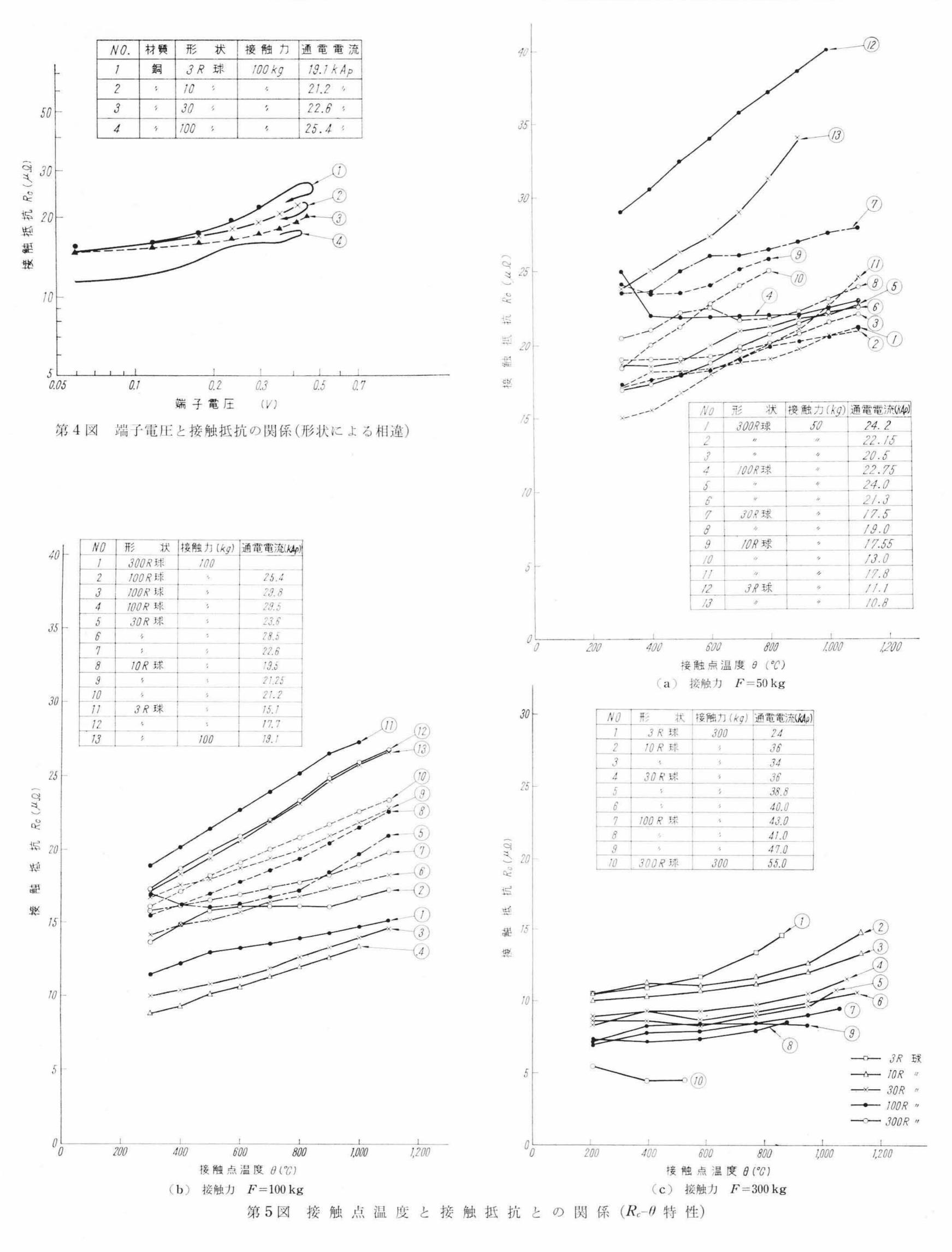
ここに F_c : 二つの領域の境界となる接触力

第1表は硬度 5 t/cm^2 および 4 t/cm^2 に対する境界の接触力を計算したもので、 $H=5 \text{ t/cm}^2$ としたときは、F>10 kg では 3 R 球と 10 R 球が塑性変形、 $H=4 \text{ t/cm}^2$ (良く焼鈍された場合の値)とすれば、Fが 20 kg 以上で、3、10 および <math>30 R 球が塑性変形に至る。したがって 30 R 球以下の点接触子は第 3 図の実験範囲では接触半径に本質的な差がなく、接触抵抗の相違がないと考えられる。これに対し 100 R 球および 300 R 球は F<300 kg では弾性領域となり接触抵抗に差が生ずる。また接触力依存性も $R_e \propto F^{-\frac{1}{3}}$ となり曲線は横に寝た傾向になる。第 3 図の鎖線⑦~⑩は、 $H=5 \text{ t/cm}^2$ として計算した(1)式の第 1 項の集中抵抗を示すものである。図では実験値のほうが全般的に高い値を示しているが理由は銅の表面に生ずるごく薄い酸化被膜による境界抵抗が加わっているからである。このように小電流の測定では常に不安定なこの境界抵抗が加わるので接触抵抗の測定結果はばらつき、形状による相違が明らかに現われないと考えられる。

3.2 大電流通電時の接触抵抗の変化と真の接触面積

前節で述べた小電流通電時の接触抵抗には、特にアの小さい場合

Ħ



に形状による相違がなかったが、大電流を通電した場合の接触抵抗 では形状による相違が明らかとなる。

第4図は各形状の点接触子について、接触子の端子電圧Uと接触抵抗 R_c の関係を描いたものである。曲線①~③はそれぞれ 3, 10 および 30 R 球の点接触子の結果であるが、小さな電流が流れる微小端

子電圧のときはほとんど差が見いだせないにもかかわらず、端子電圧Uの大きいところでは、明らかに曲率半径の小さいものが大さい接触抵抗を示してくることが知られる。他方、曲線④は 100~R 球の場合で、電流の小さいところでも差が明らかである。さらに端子電圧は接触点の温度と一定の関係 $\left(U=\sqrt{8~\rho_0\lambda\theta}\left(1+\frac{1}{2}~\alpha\theta\right)\right)$ にあ

第2表 接触点温度と端子電圧

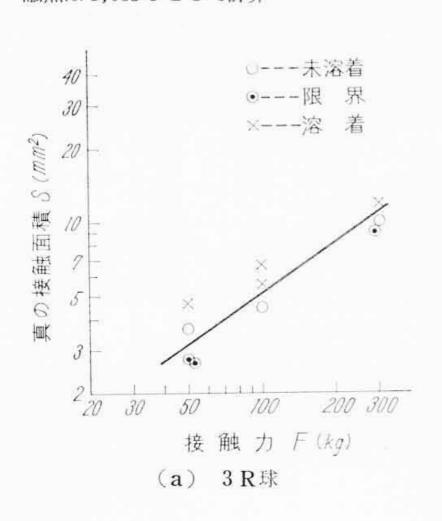
接触点温度 (℃)	端子電圧 (V)	接触点温度 (℃)	端子電圧 (V)	
200	0.123	800	0.335	
300	0.161	900	0.369	
400	0.197	1,000	0.402	
500 0.233		1,100	0.437	
600	0.267	融点*	0.430	
700	0.301			

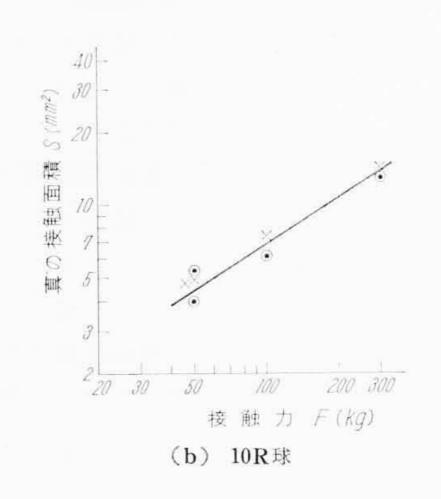
* 融点は1,083℃として計算

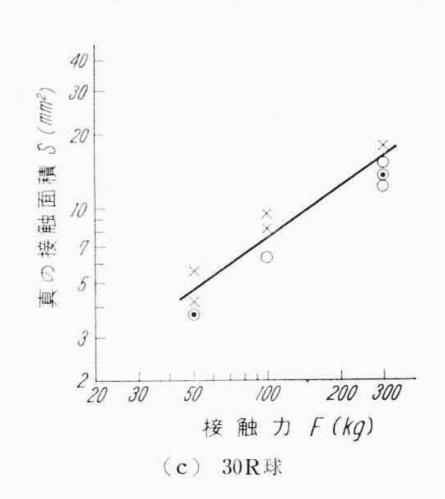
第3表 接触子形状と材質によるK(接触面積拡大率)の変化

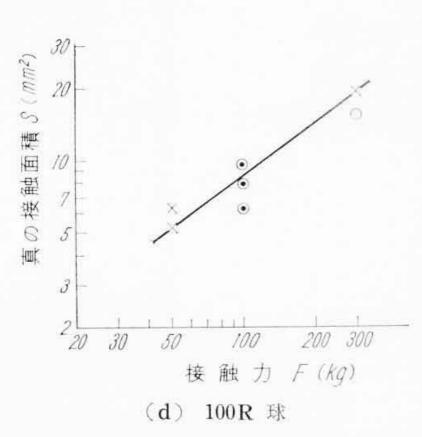
F	50 kg			100 kg			300 kg		
r	$S_0 \pmod{2}$	$S (mm^2)$	K	S_0 (mm ²)	$S \pmod{mm^2}$	K	$S_0 \pmod{2}$	$\frac{S}{(\text{mm}^2)}$	K
3R球	1.08	3.0	2.78	2.0	4.9	2.45	6.16	10.5	1.70
10R球	1.08	4.4	4.08	2.0	6.8	3.40	6.16	13.8	2.24
30R球	1.08	4.6	4.25	2.0	7.4	3.70	6.16	16.1	2.62
100R球	2.30	5.3	2.30	3.26	8.8	2.70	6.88	19.0	2.76

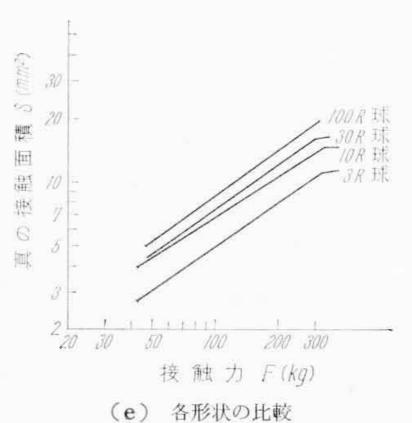
注: S_0 は本文(2)式または(3)式よりaを求め、 $S_0=\pi a^2$ で計算したもの











第6図 大電流通電時の真の接触面積

るので $^{(1)}$ (5),この関係により端子電圧を温度に換算し,接触点温度と接触抵抗との関係 $(R_c-\theta$ 特性)を示すグラフを描くことができる。 第 5 図は数多くの実験結果から第 2 表の換算値を用いて $R_c-\theta$ 特性を表わしたものである。 (a) 図の F=50 kg の場合はばらつきが大きいが F=100 kg の(b) 図の場合には温度の高いところでr の小さいものほど大きい接触抵抗を示すのがよく表われている。

さて、大電流を通電した場合の接触抵抗は、前報に詳述したよう に

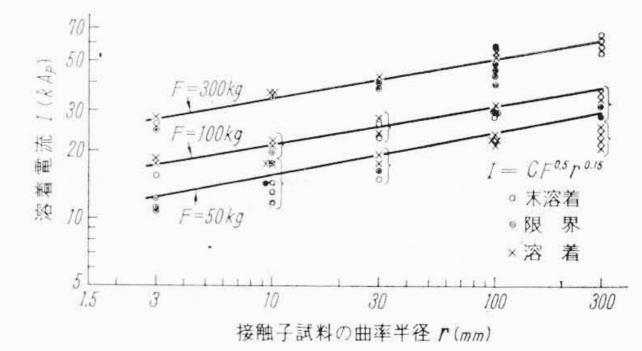
ρ₀: 0℃ における固有抵抗

α: 温 度 係 数

θ:接触点温度 ℃

a': 高温のときの接触半径

で与えられる。大電流通電時に R_c がrによって異なるのはa'の相異にもとづくものである。すなわち,接触温度が急激に上昇するにつれて,高温にさらされる領域(接触点のきわめて近傍)の硬度は著しく低下するので,形状のいかんにかかわらず接触点ではほとんど塑性変形となり,かつa'が刻々増大する。しかしこの増大の仕方が曲率半径rの大きいほど容易となるために形状による相違が現われてくるのである。これは次に示す真の接触面積の測定結果からも裏付けられる。すなわち第6図(a)~(d)は大電流通電後の試料に残った接触点のあとの拡大写真から真に接触し電流が流れていたと考えられる面積(真の接触面積S)を測定した結果を示し,(e)図は,各形状の結果をまとめて比較したものである。一般にこの面積Sは流れた電流とともに大きくなる傾向にあるので,図ではO印で



(50 kg, 100 kg の 300 R 球の試料は、接触状態が良くなかった) 第7図 曲率半径による溶着電流の相違

示した未溶着の試料よりも、 \odot 印、 \times 印で示した限界ないしは溶着の試料のほうがSは大きくなっている。これらの図によって、同一接触力に対する真の接触面積Sは曲率半径rとともに増加することがわかり、したがって大電流通電時には接触抵抗の変化が現われることが理解できる。

次に第3表は試料に残ったあとの面積 S と、前節の(2)および(3)式を利用して求められる室温における接触面積 S_0 を比較し、接触面積の拡大率 $K=(S/S_0)$ を求めたものである。この表によれば実験後の接触面積拡大率はF が小さく、曲率半径が大きいほど大きく、最大値は 30~R 球対平面接触のF=50~kg のときで、4.25~E 倍にも達していることがわかる。

3.3 溶 着 電 流

第7図は各形状の点接触子に関する溶着電流を調べた実験結果である。図からわかるように、溶着電流は曲率半径 r によって相違し、実験式は

日

ここに C: 定 数

となる。この結果は実験結果を従来の結果と比較して得られた前報 の予想ときわめて良く一致している。

さて, 前報(1)で詳述したように溶着電流は, 近似的に

$$I = \beta \times 5.65 \sqrt{S} \sqrt{\frac{\lambda \theta_s}{\rho_0}} \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{2} \alpha \theta_s}}{1 + \frac{2}{3} \alpha \theta_s} \dots (7)$$

ここに θs: 接触子材料の融点

λ: 接触子材料の熱伝導度

α: 接触子材料の固有抵抗の温度係数

 β : 係数=1 (限界のとき)

=1.16 (溶着のとき) ごがって、前節で述べたように

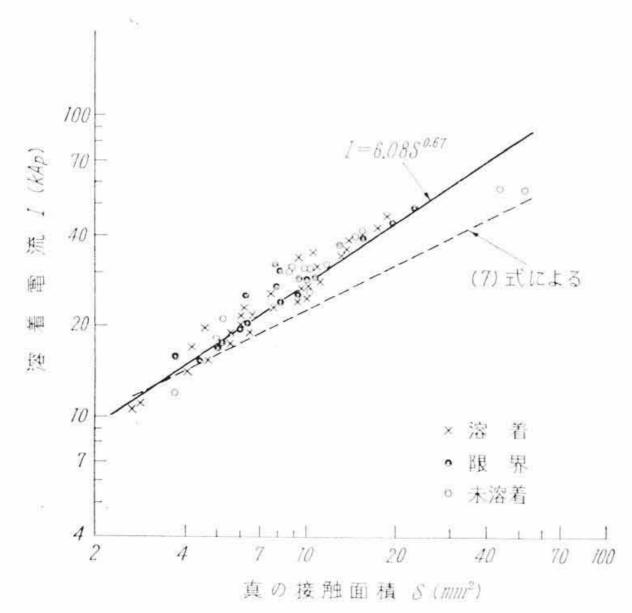
で表わされる。したがって、前節で述べたように、同一接触力に対して形状により真の接触面積が異なれば、同一接触力に対してIが異なるのは当然であろう。

しかし、真の接触面積は電流通電により刻々と変化するものであるから(7)式のSとして、試料の跡に残った面積をとることは必ずしも正確ではない。そこで一応、電流の最大値で真の接触面積が最大となると考えて、測定したSと試料に流れた電流値の関係を調べた。 第8図 がその結果で、比較のために(7)式による計算結果(α =4.0×10⁻³/ \mathbb{C} 、 λ =3.8 W/cm \mathbb{C} の δ =1,083 \mathbb{C} の δ =1.78 δ 0 の数値を入れて計算した値)を鎖線で示した。得られた実験データは δ =4 mm² 付近で理論値と良く一致するが特に δ 0 の大きいところで計算値を上回っている。この不一致の原因は(7)式を導いたときのモデルが比較的曲率半径の小さい場合で今回のように曲率半径が大きく接触面積の大きい場合には誤差を生ずると考えられる。 第8 図によれば、ある短時間電流に耐えるために必要な最小の接触面積が求められる。

接触子の端子電圧は溶着の限界のときはほぼ一定値0.43 VになることがR. Holm氏らの理論で明らかにされており、筆者らの実験でも前報に述べたようにほぼ一定値を示すことがわかった。したがって

$$U=I \cdot R_c$$
.....(8)

の関係が成立し、溶着電流は直前の接触抵抗に逆比例するとみられる。さらに第4図からわかるように接触抵抗の形状による相違は端子電圧 0.2 V 以上で明白となり、以後はほぼなめらかに増加していること、および接触子表面のよごれによる境界抵抗はコヒーラ現象(4)により端子電圧 0.3 V 以下でほとんどなくなり、接触子は固有の集中抵抗のみを示すようになることを考慮すると、端子電圧が0.43 V よりかなり小さな 0.3 V 付近の接触抵抗でも溶着電流と反比



第8図 真の接触面積と溶着電流の関係(銅の場合)

例関係があると期待される。第9図は各形状の接触子の $0.3 \, \mathrm{V}$ のときの接触抵抗を実験のオシログラムの第1波目から計算し、その試料に流れた電流値を溶着 $(\times \mathrm{P})$ 、限界 $(\odot \mathrm{P})$ および未溶着 $(\odot \mathrm{P})$ と区別してプロットしたものである。図は多少のばらつきはあるが、全体としてほぼ反比例関係が存在することを示している。端子電圧の小さいところで調べれば、データのばらつきはもっとひどくなるはずである。第9図の関係はその後接触力のさらに小さい接触子 $(\mathrm{接触抵抗}\,50{\sim}70\,\mu\Omega\,\mathrm{ff})$ および大容量の空気遮断器用の接触子 $(\mathrm{接触抵抗}\,1{\sim}3\,\mu\Omega\,\mathrm{ff})$ でもかなり良く成立することがわかった。この結果は比較的小電流による接触抵抗値から溶着電流の推定を可能ならしめるものである。この点については稿を改めて報告する予定である。

3.4 電磁反発力について

点接触子では接触点に電流が集中することによって反発力が生ずる。これはあらかじめ加えていた接触力を打ち消すように働くため、一応検討しておかなければならない。

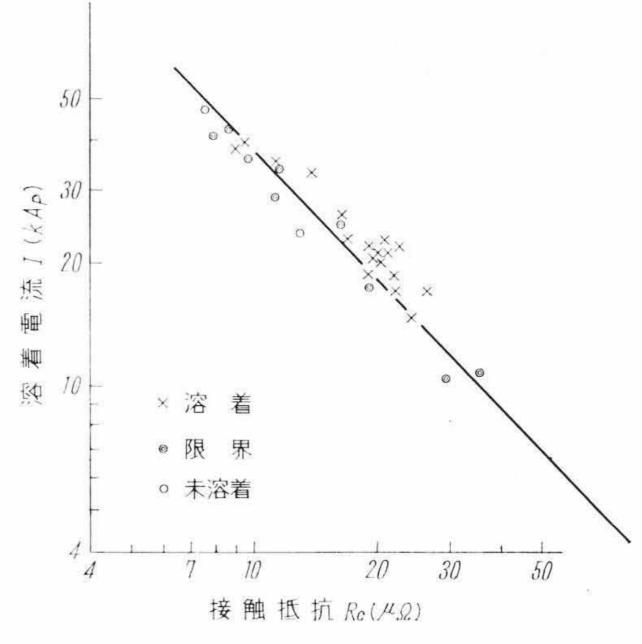
電磁反発力 F_e の計算は R. Holm 氏⁽⁵⁾や A. C. Snowdon 氏⁽⁸⁾が行なったように 第 10 図 のようなモデルについて計算すると

$$F_e = \frac{\mu I^2}{4\pi} \log_e \frac{A}{\sigma} \dots (9)$$

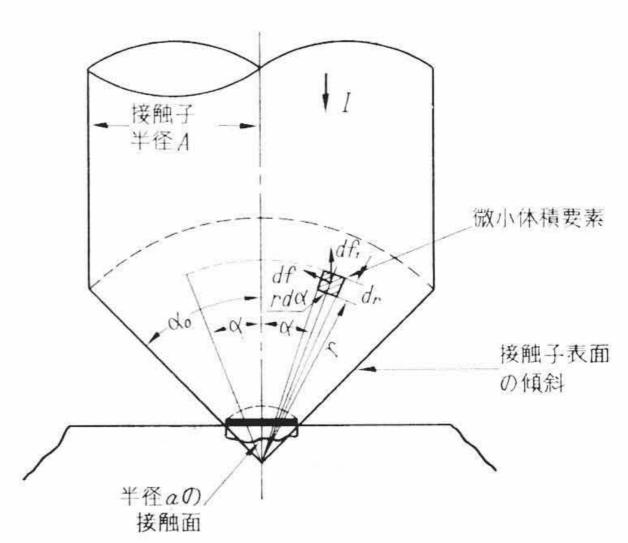
ここに A: 導体円柱の半径

a:接触半径

μ: 接触子材料の透磁率



(端子電圧 0.3V のときの接触抵抗と溶着電流の関係) 第 9 図 大電流通電時の接触抵抗と溶着電流の関係



微小体積に働く反発力 df_1 を接触子の全体にわたって積分することにより、全反発力を計算する。結果は角度 α_0 によらず本文(9)式となる。

第10図 電磁反発力を計算するためのモデル(8)

第4表 電 磁 反 発 力

接触子材質	接 触 力 (kg)	接触面積* (mm²)	溶着電流 (kA)	電磁反発力** (kg)	電磁反発力 (%)接触力
	30	4.5	17.0	6.80	22.7
銅	100	8.8	31.0	19.50	19.5
	300	19.1	53.0	45.30	15.1

- * 接触面積は、接触子跡から測定したもの ** 電磁反発力は、溶着電流が流れたときの値
- なる関係式が得られる。筆者らの実験では接触子形状が第2図に示したように単純な円柱状のものではないから(9)式をそのまま使うには問題があるが、Aの値は計算結果にそれほど影響しないので便宜上接触子試料の幅の半分1.25 cmをとることにする。一方接触半径 a は室温における値ではなくて大電流通電時の値をとるべきであるから第3表の真の接触面積の測定結果から逆算して求めたものを使用した。第4表は100 R 球の試料について溶着電流が流れた場合の電磁反発力を計算してまとめたもので、接触力が大きいほど電磁力の影響は少なく、接触力の1/5以下で大きな問題ではないことがわかる。溶着が電磁反発力による接点の開離によるものではないことがわかる。溶着が電磁反発力による接点の開離によるものではないことも明らかである。

4. 結 言

形状の異なる点接触子について溶着現象を調べた結果次の点が明 らかになった。

(1) 小電流通電時の接触抵抗は接触力20kg以上のとき3,10 および30R球については本質的に差がなく,100R球以上では曲 率半径rとともに減少する傾向がある。実測値は銅表面の酸化被 膜による境界抵抗のために計算値よりかなり大きい値を示す。

- (2) 大電流を通電すると温度上昇による固有抵抗の増加と接触 面積の拡大により接触抵抗が変化するが、形状によって接触面積 拡大の様子が異なるため 30 R 球以下の接触子においても差が表 われてくる。
- (3) 接触面積の拡大は一般に曲率半径rが大きいものほど、また接触力が小さいほど大きく、 $30 \, \mathrm{R}$ 球でFが $50 \, \mathrm{kg}$ の場合 4.25 倍に達するものがある。
- (4) 溶着電流は曲率半径によって異なり、実験式は $I=CF^{0.5}$ $r^{0.15}$ となる。rによる理由は真の接触面積Sの相違による。
- (5) 溶着電流の理論式はS が4 mm² の付近で実験値と一致するがS が大きいところでは実験値より小さい。
- (6) 大電流通電時の接触抵抗 (たとえば端子電圧 0.3 V のときの値) は溶着電流とほぼ反比例関係にある。
- (7) 接触点における電磁反発力は大きい場合でも接触力の 1/4 以下となり、溶着は明らかに接触抵抗による発熱によって起る。

参考文献

- (1) 吉岡: 日立評論, 44, 318 (昭 37-2)
- (2) 吉岡, 高砂: 電気四学会連大, No. 660 (1961)
- (3) 吉岡, 高砂: 電気四学会連大, No. 517 (1962)
- (4) 吉岡, 高砂: 電気学会東京支大, No. 175 (1961)
- (5) R. Holm: Electric Contaets 1~187 (Hugo Gebers Förlag, Stockholm 1946)
- (6) 保科: 応用物理, 30, 221 (1961)
- (7) 保科: 応用物理, 30, 227 (1961)
- (8) A. C. Snowdon: AIEE, 80, 24 (1961)

Vol. 44 日 立 評 論 No. 11

目

- 次
- ・プラズマジェットの分光学的温度測定
- ・シリコン整流素子の損失の評価について
- セ メ ン ト 工 場 の 計 測 制 領
- ・薄板パーマロイ圧延板における異常うず電流損失
- ・油中しゆう動に適する接触子材料
- •日 立 UHY 形 高 速 度 モ ー 継 電 器
- 本社-日立間 2,500 Mc SSB-FM マイクロ波通信回線
- ・トランジスタ化イメージオルションカメラ
- ・熱陰極水銀整流管のゲッターに関する二、三の実験・トランジスタラジオのアンテナ回路の設計
- 近 鉄 奈 良 線 900 形 電 車 用 電 気 品
- 静岡新聞社納両面4色ドライリリーフオフセット新聞輪 転機

- 耐熱ハイボンエナメル線の接着性
 Cu-Zn-Mn-Al-Fe系鋳造用銅合金の組織と機械的性質
 絶縁材料特集
- ・不飽和ポリエステル樹脂の誘電的性質
- エポキシ樹脂硬化剤MHACの諸特性
- 新しい二, 三のA, Bクラスコイル含浸用ワニスについて
- 最近のプラスチックフィルムの特性
- ・ジアリルフタレート成形材料の配合と諸特性
- ・ガラス布基材ジアリルフタレート樹脂積層板の特性 ・エポキシ樹脂成形材料 C E 62B の特性
- ・熱硬化性樹脂積層成形品の二,三の特性

発 行 所 日 立 評 論 社 取 次 店 株式会社 オーム社 書 店 東京都千代田区丸の内1丁目4番地振 替 ロ 座 東 京 71824番 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地 振 替 ロ 座 東 京 20018番