

油中接触子の通電特性劣化について

永野泰男*・田原徳夫**・加藤之敏***

(昭和47年3月18日受理)

1. ま え が き

近年、電力需要の著しい増加につれて電力機器の大容量化の傾向が進み、これに伴い従来では生じなかった新たな問題が各所で起っている。

電力用変圧器の無電圧タップ切替用接触子のように絶縁油中の電気接触子に長時間大電流を通電する場合、接触子面にスラッジが発生し、このため接触抵抗が増加する場合がある。このようなときには接触子は加熱熔融され、通電特性が著しく劣化する現象がみられる。特に最近の大容量変圧器においては従来のもものと比較して上記のような接触不良事故の発生頻度が高く、その原因究明および対策が電力機器の分野において重要な課題となっている。

絶縁油の劣化によるスラッジの発生については山田¹⁾、水島²⁾、岡本³⁾⁴⁾らの諸氏によって従来から種々の原因について研究されており、さらに絶縁油中に含有する硫黄およびその化合物による銅電極の腐食について報告されているが、これらの実験結果によるスラッジの発生時期と系統機器に発生する通電特性劣化時期とは必ずしも一致せず、したがってこのような化学変化で生成したスラッジが油中接触子の通電特性を劣化させる主原因であるとは考えにくい。

一方、電気接点において、真実接触面積はみかけの面積に比較して極めて小さく、通電状態では接触面の電流密度は大きい。したがって微視的にみると、ジュール熱によって加熱された接触面の温度は容易に母材の軟化点や沸騰点に達する。また絶縁油中の接触子において真実接触面の近傍の温度が絶縁油の炭化温度以上になると、周囲の絶縁油を加熱分解して炭化物を生成する。電流密度の大きい大電流接点においては従来接触子に比較して真実接触面が高温加熱される機会が多くなっている。さらに最近の機器の大容量化に伴ない、この種の通電特性劣化現象が問題になってきたことを考えると、油中接触子における通電特性劣化現象は上述のような原因で生成された炭化物が接触面に蓄積して次第に電極を押し上げることによって発生すると考えた方が妥当である。

本研究はこの考えに基づいて、通電特性劣化の主原因である初期のスラッジ発生の機構を解析するために都合のよいように種々の工夫をほどこした特殊な構造をもつモデル接触子を開発し、これを用いて再現した通電特性劣化現象について電気的な計測と通電中の顕

* 電気工学教室 教授

** 電気工学教室 助手

*** 大学院修士課程

微鏡下の観測，撮影等による測定を併用して微視的な観点から検討したものである。

この結果，電力用油中接触子における通電特性劣化現象の主原因であるスラッジの初期の発生機構が明らかになった。

2. モデル接触子と接点理論

本章では問題を解析するために必要なモデル接触子の特性を従来の接点理論を用いて説明し，接触部の温度を知るために必要な $\varphi - \theta$ 理論について述べる．さらに Hertz 氏により与えられる荷重と接触面積の関係より接触抵抗を計算し，実験値と比較して接触抵抗と荷重の関係を知る．

2・1 モデル接触子

前述の初期スラッジ発生機構を解明するために下記のような2種類のモデル接触子を用いる．

モデル接触子 No. 1

一般に，大容量変圧器の無電圧タップ切換用接触子には数千アンペアの大電流が流れており，接触荷重も大きく設計されている．本モデル接触子においては，つき合わせ電極の境界面に微小な銅粒を挿入して点接触となるような構造にすることにより，接触面における電流密度並びに単位面積当りの荷重を大きくしてその状態を模擬している．このような構造にすると，小電流，小荷重の下でも局部的に制限された接触面における電氣的，機械的な条件が実用接触子と同じ条件を満足するようにできる．また接触面を光学的に観測する際にも観測面を狭い領域に限定できるので観測能率を向上させることができる．

一方，変圧器の巻線間に働く電磁機械力によって変圧器内部の無電圧タップ切換用接触子は常時振動状態にあり，これを模擬してモデル接触子の電極に電磁力により上下方向の微振動を与えると両接触子の境界面に浸透している絶縁油のくさび効果により接触面積が減少し，極めて安定な，しかも短時間に初期スラッジの発生を再現することが可能である．

図1は上記条件を満足するような構造をもつモデル接触子である．電極は直径5mmの銅材料を使用し，その接触面はエメリ紙により

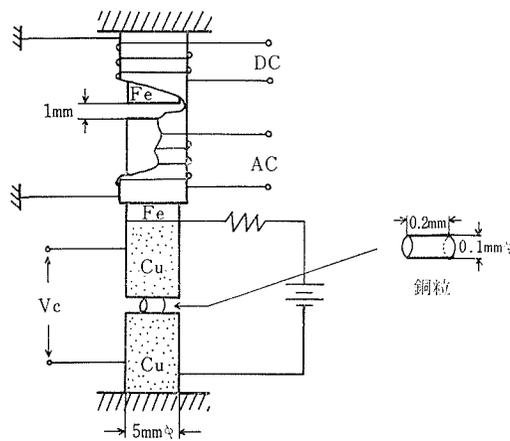


図1 モデル接触子

鏡面に仕上げる．電極間に挿入する銅粒は直径0.1mm，長さ0.2mm程度の円筒形に切り揃えたものを使用し，その表面処理は重クロム酸カリを硫酸に溶かした液で酸化物を除去した後，水洗を行い，更にエメリ紙によって研磨し，ベンジン，メチルアルコールによ

って油脂分を十分に拭き取る。可動電極の上部は軟鋼を使用し、その周囲に励磁用コイルを巻き、60 Hz の交流励磁を行い、更にその上部に設けた軟鋼には常時直流励磁をかけて可動電極に微振動を与える。振動荷重のピーク値は可動電極と上部の軟鋼との間隙、及び交流励磁電流を調節して自由に変化させることができる。したがって適当な大きさの励磁をかけることによって接触面のエージングを行い、均一な面を作ることもできる。

モデル接触子 No. 2

一般に、電気接触子の接触面の状況は観測できないが、R. F. Snowball⁵⁾等によって銅対ガラス接触子を用いた接触面の観測が試みられている。しかしながらこのような接触子では通電中の接触面の状況をしることはできない。本モデル接触子は上記モデル接触子の片側の電極を透明電極とし顕微鏡を用いて裏面からスラッジ発生初期の状況を通電中に観測および撮影できるように工夫したものである。ここで用いる透明電極は次のような方法で作製する。

ガラス板を 450°C~500°C で加熱しておき、純水 50 cc、塩酸 10 cc、塩化第二錫 100 g 三塩化アンチモン 1.5 g の混合溶液を 2~3 秒間霧状にして吹付け、徐冷する。徐冷後ガラスの表面には透明で導電性のある金属酸化膜が付着する。

2.2 荷重—接触抵抗特性

一般に、接触抵抗は電流が微小面積に集中するために現われる集中抵抗と、接触面に介在する絶縁皮膜の皮膜抵抗との和であるといわれているが、本モデル接触子においては<2.1>で述べた方法で表面処理を行っているから前者の集中抵抗によるものとして取扱う。

接触荷重に対する接触面積の関係を計算する際、電極の境界面に挿入した銅粒を便宜上半径 r なる球と仮定する。Hertz によると接触面の電極材料が弾性領域にある場合、球対平面の接触面は

$$a = 1.1 \sqrt[3]{Pr/E} \quad (1)$$

なる半径の円で接触するといわれている。ここで P は接触荷重、 E は電極材料のヤング率である。また接触面が塑性変形している場合、その半径は電極材料の硬さを H とすると次式で与えられる。

$$a = \sqrt{P/\pi H} \quad (2)$$

一方、両接触子が半径 a の円状接触している場合、R. Holm⁶⁾ によると接触抵抗 R_c は

$$R_c = \rho/2a \quad (3)$$

で与えられる。

図 2 における A および B 曲線はそれぞれ (3) 式に (1) 又は (2) 式を代入して得られた接触抵抗の値であり、 C はモデル接触子 No. 1 を用いて求めた実験値である。荷重が大きくなると接触面は弾性変形している部分と塑性変形している部分とが混在しているような傾向がみられる。

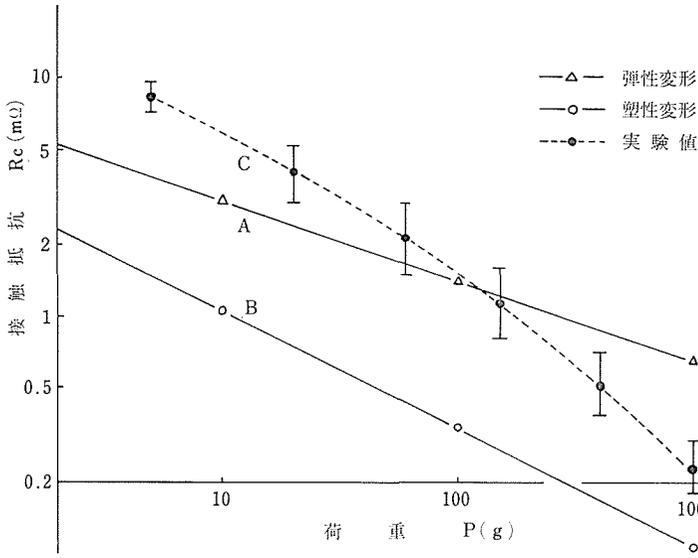


図2 荷重—接触抵抗特性

2.3 φ—θ理論

通電特性の劣化は接触面の温度が上昇しその部分に絶縁油の分解したスラッジが蓄積されることにより引き起こされると考えられるが、これらの現象を解明するためには接触部の温度上昇を測定する必要がある。しかしながら真実接触部は非常に小さく、そのため直接熱電対等の温度測定用素子を用いて接触面の温度測定を行うのは不可能である。

一方、接触部の温度と接触電圧との間にはφ—θ理論として良く知られた関係があり、⁷⁾⁸⁾

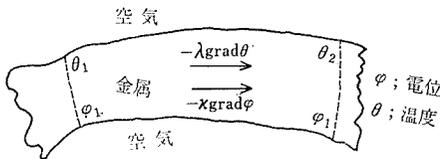


図3 導体内の電気と熱の流れ

接触電圧を測定することにより容易に接点温度を知ることができ、接点現象の解析に極めて有効である。以下φ—θ理論について説明する。

図3に示すように等温面と等電位面が一致するような導体を考える。電位と温度の間で熱電効果が無視できると

仮定し、*i*をベクトル電流密度、*E*を電界、φを電位、κを電気伝導率、λを熱伝導率とすると、

$$E = - \text{grad } \varphi \tag{4}$$

$$i = - \kappa \text{ grad } \varphi \tag{5}$$

単位面積当りのエネルギーベクトルの流れは

$$q = \varphi \cdot i - \lambda \cdot \text{grad } \theta \tag{6}$$

保存の方程式は

$$\operatorname{div} \mathbf{i} = 0 \quad (7)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{q} = 0 \quad (8)$$

(8) 式は (4) 式, (5) 式から次のように書くことができる.

$$\operatorname{div}(-\kappa\varphi \operatorname{grad} \varphi - \lambda \operatorname{grad} \theta) = 0 \quad (9)$$

(8) 式は (9) 式のカッコの中が常に零なら満足する.

$$\lambda/\kappa \operatorname{grad} \theta + \varphi \operatorname{grad} \varphi = 0 \quad (10)$$

導体中において温度 θ が最大値 θ_m をとる点における電位 φ を零とする. θ_m の点においては $\operatorname{grad} \theta$ は零であり, (10) 式を満足している. (10) 式の左辺を θ_m の点から他の点 (温度 θ , 電位 φ) まで任意の径路で積分する.

$$-\int_{\theta_m}^{\theta} \frac{\lambda}{\kappa} d\theta = \frac{1}{2} \varphi^2$$

すなわち

$$\varphi^2 = 2 \int_{\theta}^{\theta_m} \frac{\lambda}{\kappa} d\theta \quad (11)$$

この式は電位 φ を最大温度 θ_m に関係づける定理の簡単化された形であり, エネルギーベクトル \mathbf{q} の流れがどの点においても零という状態を保っているような定常状態において成立する定理である. このことは特に導体側面から流れ出るエネルギーがないときの状態を意味している. また側面から流れ出る電流はないので, 正確にはこの定理において側面から流出する熱流もないという条件も必要である.

この積分は λ と κ が適切な温度範囲において θ の関数として正確に知られていないので求めることができない. 一方, 熱伝導率 λ と電気伝導率 κ の比 λ/κ は Wiedemann-Frantz の法則

$$\frac{\lambda}{\kappa} = L\theta \quad (12)$$

に従っていて, 絶対温度に比例する. この法則は近似的なものである. 但し L はローレンツ定数で $L = 2.45 \times 10^{-8} \text{ watt} \cdot \text{ohm} / ^\circ\text{k}^2$ である.

もし Wiedemann-Frantz の法則が固体または液体の状態にある接点金属において成立すると仮定するなら (11) 式は容易に積分できて

$$\varphi^2 = -2 \int_{\theta_m}^{\theta} L \cdot \theta d\theta = L(\theta_m^2 - \theta_0^2) \quad (13)$$

ただし θ_m は導体の最高温度, θ_0 は導体の無限遠点の温度である. ここで 2φ は接触電

位差 V_c であるので、すべての接点において

$$\theta_m^2 - \theta_0^2 = \frac{V_c^2}{4L} \quad (14)$$

また θ_0 が θ_m に比べて無視できるとき

$$\theta_m = V_c / 2\sqrt{L} = 3200V_c (\text{°k}) \quad (15)$$

の関係が成立し、これが $\varphi - \theta$ 理論である。(14) 式は次の条件のもとで成立する。

- (i) 加熱された集中部分の表面からの熱の損失が無視できる。
- (ii) 係数 λ と κ が温度のみの関数で Wiedemann-Frantz の法則に従っている。
- (iii) 定常状態に非常にはやく到達する。

しかしながら、接点現象を過渡的に解析する場合 (iii) の条件をどの程度まで満足するかが問題になるが、200~300 μ sec 程度の現象については十分 (14) 式が成立することを銅電極について実験的に確かめられている⁹⁾。

3. モデル接触子による初期スラッジ発生機構の解明

油中接触子における通電特性劣化の主原因であるスラッジの発生は短絡電流が流れたときに接触子間に働く電磁反発力や境界面に介在する絶縁油膜の内部圧力増加等の原因による一時的な接触面積の減少で接触部の温度が上昇し、その近傍の絶縁油を熱分解して炭化物が発生することに起因するものと考えられる。この考えに基づいて前述のような特性をもつモデル接触子を用いてスラッジ発生機構を解明した¹⁰⁾。さらに透明電極を用いて接触面に発生する気泡の挙動を観測し、スラッジが発生する前後の接触抵抗に与える影響を検討した。

3.1 油中におけるモデル接触子の接触抵抗変化

接触子が油中において振動状態にある場合、両接触子の境界面に介在する絶縁油には流体軸受におけるくさび状油膜に類似した内部圧力が発生し、接触荷重は真実接触面とこの

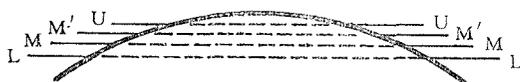


図 4

くさび状油膜にかかり真実接触面にかかる実効的な荷重が減少する。したがって同一荷重がかかっても気中における場合に比較して油中における真実接触面積は減少し、接触抵抗は高くなる。もしこ

の荷重が増加、減少を周期的に繰返すならば荷重の減少時に絶縁油の浸透する量と増加時に押し出される量との差が平衡するまで接触抵抗は増加する。図 4 はこの状態を示したもので、振動のない平衡位置を MM としたとき、接触面の金属は完全に弾性変形しているとすると、荷重が減少すると接触面の間に絶縁油が浸透し、いままで金属接触していた部分が油膜に覆われ、UU の位置まで上昇する。次に荷重が増加したときは浸透した絶縁油を外に押し出し LL の位置まで下降するが、表面張力によって拡散した絶縁油を 100% 外へ

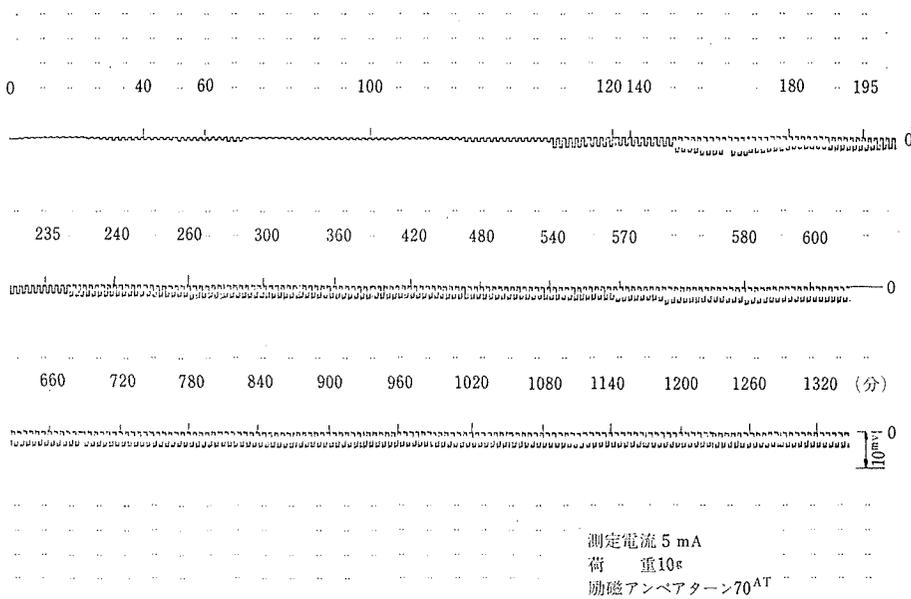


図5 接触抵抗の経時変化

押し出すためには相当大きな圧力が必要とされ、微小振動している荷重の増加の程度では浸透した分を全部押し出すことができず、 $M'M'$ の位置で平衡し、接触面積は初めの大きさに比較して小さくなる。この油膜の圧力効果については、金属同志の接触面における圧力とくさび状油膜の内部圧力との和で接触荷重を支えているいわゆる境界潤滑と同じ条件にあるから、一般に解析は困難であるといわれている。

図5は電磁力によって上下振動を加えたモデル接触子を用いてその傾向を接触子の経時変化として示している。この実験では測定電流の影響を取り除くためにその値をできるだけ小さくとり(5 mA)、測定間隔を引き延して(30秒に1回、DC 5 mAを1秒間通電して記録)ジュール熱による温度上昇を極力押えるようにした。

3・2 a-スポットにおける温度上昇

前述のように上下振動する接触子の接触面積は絶縁油の浸透により減少するから、もしこの接触子に一定の回路電流が通電されていると、接触面における電流密度は極めて高くなり、わずかな回路電流でもジュール熱によりa-スポットが周囲絶縁油の沸騰温度、さらには炭化温度に達することが考えられる。

いま簡単にa-スポットの温度を求めめるために、絶縁油の浸透により接触面積が減少して1つの円(半径： a)で接触していると仮定する。室温 θ_0 で、温度 θ_m における集中抵抗は集中部分の温度係数を α_1 とすると

$$R_{om} = \rho_0 \{1 + \alpha_1(\theta_m - \theta_0)\} / 2a \quad (16)$$

で与えられる。この集中部分の平均温度は $\theta_m - \theta_0$ より低く、 α_1 は近似的に固有抵抗に対

する温度係数 α の $2/3$ で与えられている¹¹⁾。したがってこのときの接触電圧は

$$V_c = I \cdot \rho_0 [1 + \alpha_1(\theta_m - \theta_0)] / 2a \quad (17)$$

である。一方、 $\varphi - \theta$ 理論の式

$$\theta_m^2 - \theta_0^2 = V_c^2 / 4L \quad (18)$$

より次の関係が得られる。

$$\theta_m^2 - \theta_0^2 = \frac{\rho_0^2}{4L} [1 + \alpha_1(\theta_m - \theta_0)]^2 \left(\frac{I}{a}\right)^2 \quad (19)$$

(19) 式により、電極材料が銅の場合について θ_0 が 300 °k のとき求めた温度曲線が図 6 である。ただし、 $\rho_0 = 1.73 \times 10^{-8} (\Omega\text{m})$ 、 $\alpha = 0.00262 / ^\circ\text{C}$ である。

このグラフは横軸に I/a を取っているので、任意の回路電流に対して接触面の半径、すなわち接触抵抗がわかりさえすれば簡単に a -スポットにおける温度上昇を予知することができる。

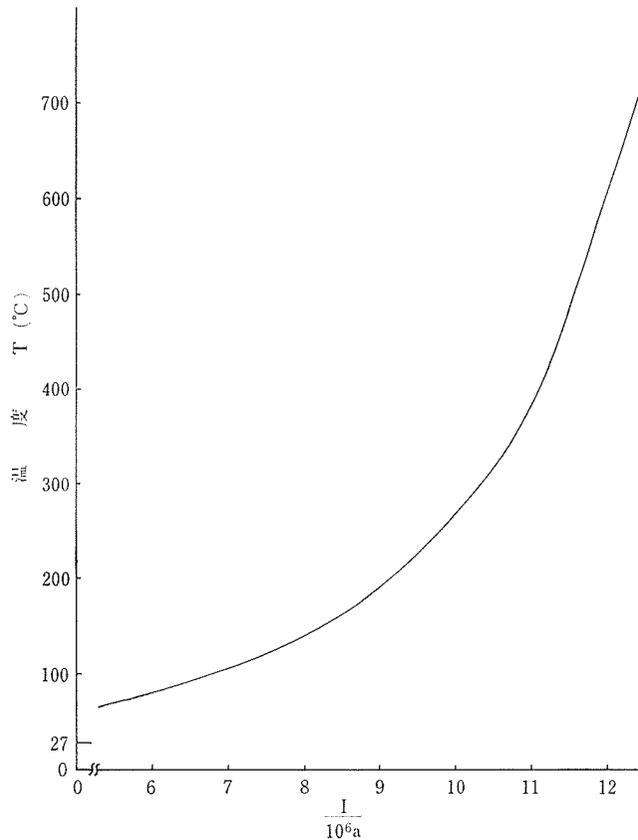


図 6 温度—電流，接触半径特性

3・3 a -スポット近傍の絶縁油の沸騰および炭化

接触抵抗の上昇に伴いジュール熱によって加熱される a -スポット部分は次第に温度上昇し、その温度が絶縁油の沸騰点以上になるとその周囲の絶縁油を沸騰させ、その部分に気泡の発生が起こる。木本氏¹²⁾、橋口氏等¹³⁾によると、液体絶縁物中で発生した気泡は膨張、収縮の過程で非常に大きな衝撃力を発生するといわれている。このことから電流密度の非常に高い a -スポットの周囲で絶縁油が熱分解して発生した気泡は、その膨張、収縮の過程で電極面に非常に大きな衝撃力を与え、電極を上下方向に押しやり、接触抵抗を不安定にさせると予想される。この衝撃力が電極面に与える作用は気泡の大きさとその圧力に比例し、しかも内部圧力は成長中の気泡へ供給される気化絶縁物の割合に比例するといわれている。また発生した炭化水素系の気体はさらに加熱され、炭化してスラッジに変化し、 a -スポットの周囲に付着、蓄積されていくものと考えられる。気泡の接触抵抗に与える影響については3・5節において実験により説明する。

ここで重要なのは絶縁油が沸騰する温度ならびに炭化する温度である。供試絶縁油は赤馬絶縁油2号であるが、沸騰温度、炭化温度については示されていないので次のように実験的に求めた。すなわち白金を油中に入れ、通電を行って加熱させ、その周囲に気泡が発生する温度を沸騰温度、さらに加熱させて白金線の表面が黒色化するときの温度を炭化温度とした。おのおのの温度は次のような値である。

沸騰温度 200 °C 炭化温度 250~300 °C

3・4 通電電流と初期スラッジの関係

任意の回路電流 I に対して絶縁油の沸騰する温度200 °C に達している a -スポットの大きさは図6より $I/a_1 \times 10^{-6} = 9.15$ すなわち $a_1 = I/9.15 \times 10^{-6}(\text{m})$ となり、さらに炭化温度に達している部分はその温度を300 °C とすると $a_2 = I/10.3 \times 10^{-6}(\text{m})$ となりおのおの a_1 , a_2 を半径とする小円となる。一方 a -スポットの集中抵抗は $R_c = \rho_0\{1 + \alpha_1(T - T_0)\}/2a$ で与えられているから、接触抵抗が上式におのおの a_1 , a_2 を代入して得られる値以上になると沸騰し、さらに炭化温度に達してスラッジが発生することになる。この半径が初期スラッジの大きさを示すものと考えられるが、その形状は図7に示すように a -スポットを中心にスラッジが環状になっているものと予測される。

図8のデータは回路電流500 mA で連続通電実験を行ったものであるが、上述のことから半径 a_1 は

$$a_1 = 0.5/9.15 \times 10^{-6} = 0.0545 (\mu\text{m})$$

したがって

$$R_c = \rho_0\{1 + \alpha_1(T - T_0)\}/2a$$

より R_c を求めると

$$R_c = 230 (\text{m}\Omega)$$

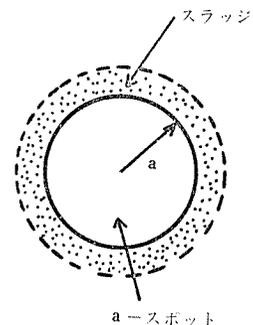


図7

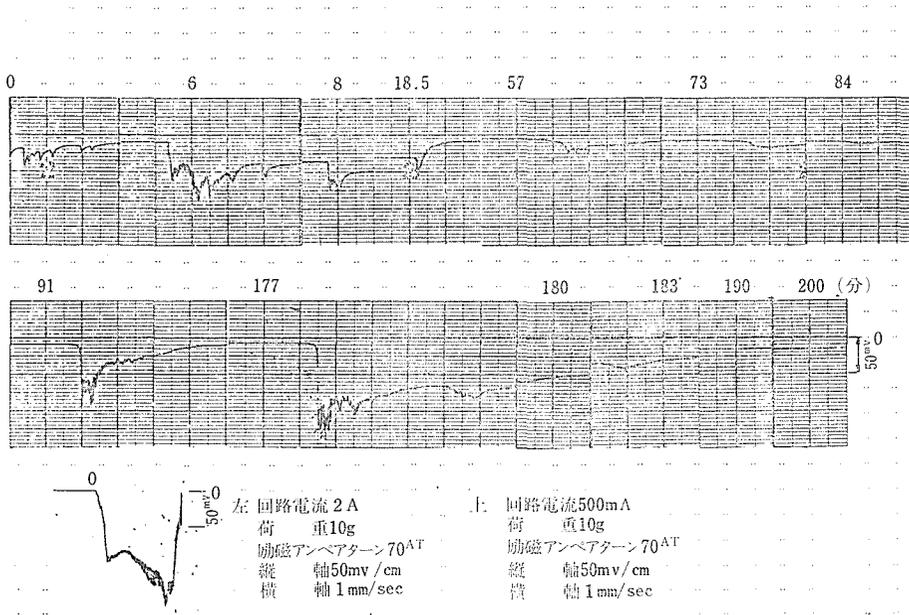


図8 通電時における接触抵抗の経時変化

このとき a -スポットは 200°C になる。

また接触電圧で表わすと

$$V_c = R_c \cdot I = 115 \text{ (mV)}$$

となり、 a -スポットの周囲の絶縁油は沸騰する。同様に約 150 mV 以上になると 300°C 以上になり絶縁油を炭化する温度となって a -スポット周囲の接触面にスラッジが付着し

始める。そのときの a -スポットの大きさの程度は直径が $1/10 \sim 1/100 (\mu\text{m})$ と予測される。

図8において6分後、91分後、117分後の付近で接触電圧が高くなって速い周期で振動しており、これをシンクロスコープで観測すると、その周期に重畳する形で記録計が追従できないような速い周期で絶縁油が炭化する温度以上の高い電圧が発生している。図9はこの実験の終了後に接触面に生成したスラッジである。

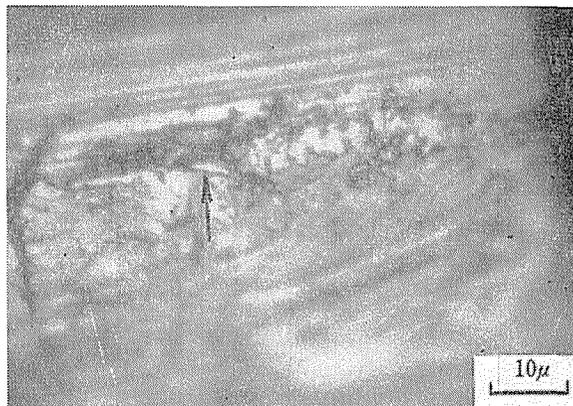


図9

図10は2 A通電後、ほとんど同時に接触電圧が165 mVになった場合で、図8の左下のデータに対応しているが、接触面積が減少して一点にしぼられた接触部に電流が流れて加熱されると、その部分を中心に環状の縞が観測されるのでa-スポットを容易に判別することが可能であり、その周囲に生成されたスラッジを観測することができる。このときのa-スポットの大きさを求めると $a_2 = 2/10 \cdot 3 \times 10^{-6} \approx 0.2 \mu$ となり図10のa-スポットとにほぼ近い値となっている。図11は5 Aを通電した場合で、相当長時間300 °C以上の温度にさらされた後のスラッジである。

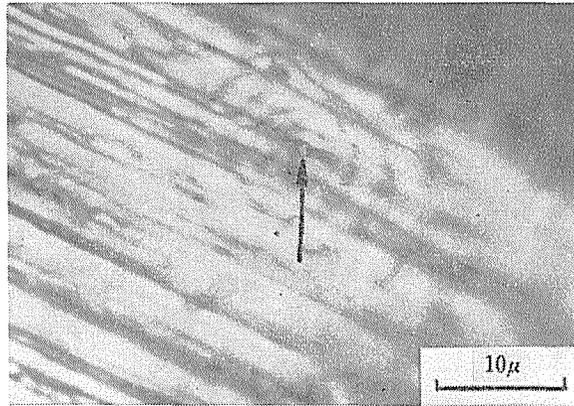


図10

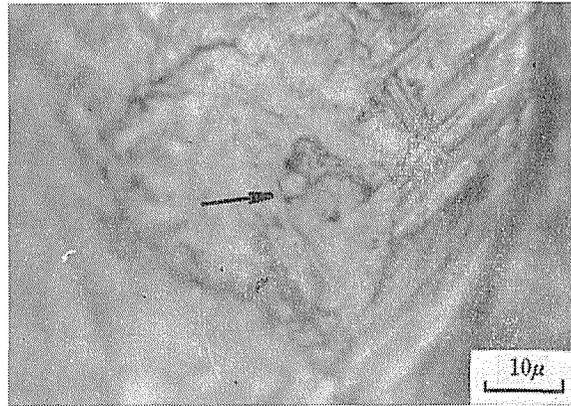


図11

3・5 スラッジ発生機構に与える気泡の影響

3・3節において局部的に加

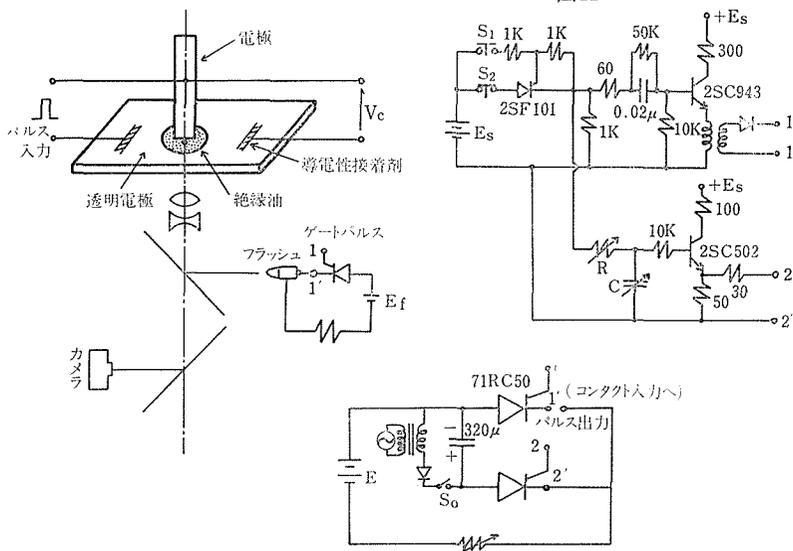


図12 実験装置と回路図

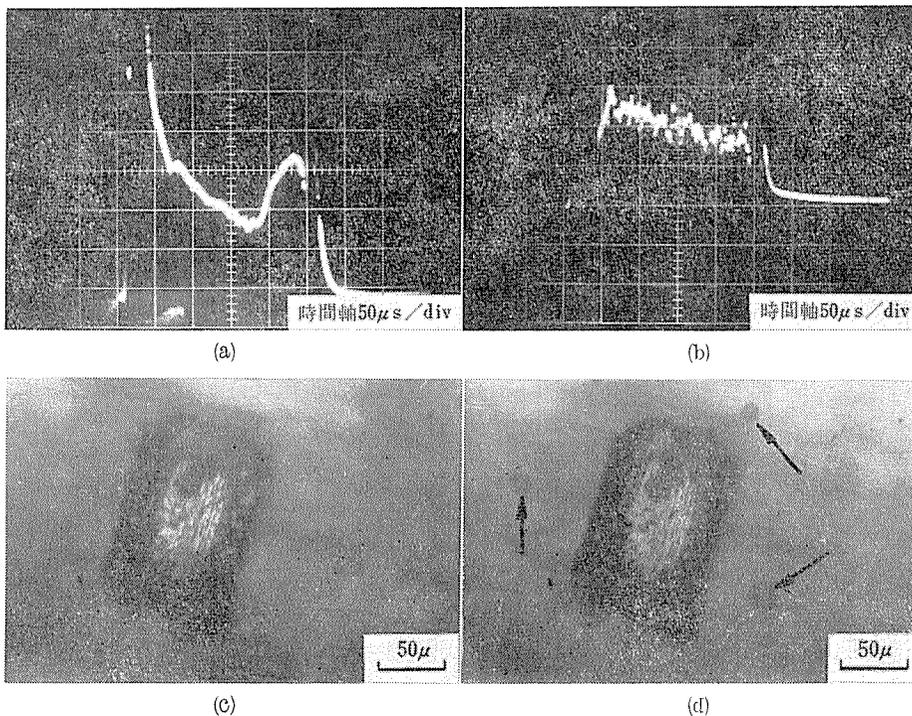


図13 気泡の影響

熱された接触面では絶縁油が気化されて気泡が発生し、初期のスラッジの発生に大きな影響を与えていると述べたが、この節では気泡のスラッジ発生機構に与える影響を検討するためにモデル接触子 No. 2 を用い、透明電極を通して顕微鏡による接触面の観測と接触電圧の変化とを同時に観測した。図12に実験装置ならびに回路図の概要を示す。透明電極側を金属顕微鏡上に装着し、接触面を下方向から通電状態で観測し、そのときの接触電圧の測定を行った。入力気泡の発生と接触電圧の測定とを同期できるように単一パルス電流を用い、写真撮影用フラッシュも電流パルスに同期させてある。このとき用いたパルス電流はピーク値 100 mA、幅 250 μsec である。

図13(a)は気中における接触電圧波形、(b)は接触面に絶縁油が介在し、気泡の発生した場合である。(a)、(b)両図を比較すると、図(b)においては非常に速い周期で接触電圧が振動しており、明らかに気泡の影響を受けているものと考えられる。図(c)は透明電極を通して見た接触面であり、図(d)はこの場合発生した気泡の写真である。

4. 結 言

モデル接触子により電氣的測定ならびに光学顕微鏡観測を併用して下記の事が明らかになった。すなわち油のくさび作用により接触面が減少し、接触抵抗が上昇するので、ジュール熱により接触面が加熱される。この結果 α-スポット周囲の絶縁油は炭化水素系の気

体に分解し、気泡が発生する。発生した気泡の膨張、収縮の過程で発生する衝撃力のため電極が押し上げられ接触抵抗がさらに増加し、炭化水素系の気体は加熱されて炭素性スラッジに変化して a -スポットの周囲に付着、蓄積されていく。以上の結果から電力用変圧器の無電圧タップ切換用接触子における通電特性劣化現象の主原因であるスラッジ発生機構は接触抵抗の上昇に伴って発生するジュール熱により絶縁油が加熱分触されることによるものであることがわかった。今後、次の諸点についてさらに検討する必要がある。

(i) 発生したスラッジは銅の硫化物であるともいわれており、また絶縁油中に含まれている硫黄は銅電極を腐食し¹⁴⁾、化学反応物は接触面へ侵入して機械的接触面積を変えずに電気的接触面を絶縁性被膜で覆い、接触不良を生ずるといわれている⁵⁾。これらの現象と通電特性劣化現象との関係を明らかにすること。

(ii) 電極や油の物理的性質が異なると接触面への浸透圧もかわるので、材質が導電面積の減少、スポットの温度上昇、炭素の生成に及ぼす影響を明らかにすること。

(iii) 初期のスラッジ発生に影響を与える絶縁油の気泡の膨張、収縮の運動を検討し、電極面に与える衝撃力を求めること。

文 献

- 1) 山田：電気試験所彙報，第3巻，第6号，P.366 (昭14)。
- 2) 水島，佐藤：電気試験所彙報，第2巻，第7号，P.443 (昭13)。
- 3) 岡本，山田：電気試験所彙報，第2巻，第2号，P.94 (昭13)。
- 4) 岡本：電気試験所彙報，第6巻，第7号，P.283 (昭17)。
- 5) R. F. Snowball : Proc, 3rd, Intern, Res, Symp, Elec, Contact Phenomena. P.377 (1966)。
- 6) R. Holm : Electric Contact, Springer-Verlag. P.11 (1967)。
- 7) F.L. Jones : The physics of electrical contact, Oxford. P.17 (1967)。
- 8) R. Holm : Electrical Contact, Springer-Verlag. P.60 (1967)。
- 9) 永野，田原，加藤：昭45，電気四学会東海支部連大。
- 10) 永野，田原，加藤：昭46，電気四学会東海支部連大。
- 11) R. Holm : Electrical Contact, Springer-Verlag. P.71 (1967)。
- 12) 木本：電学誌，Vol.81，No.878，P.139 (昭36)。
- 13) 橋口：電学誌，Vol.88，No.960，P.107 (昭43)。
- 14) 今村，横山，石橋，白井：三菱技報，Vol.44，No.5，P.618 (1970)。

Summary

On Worsening of Electrical Characteristic of Contact in Insulating Oil

Yasuo NAGANO, Norio TAHARA and Kunitoshi KATO
(Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering)

When the contact in the insulating oil carries the high current for many hours, there is a case where the contact resistance increases considerably. In this case, sludge occurs at the contact surface. The origin of occurrence of the sludge has not been determined yet.

In this study, this phenomenon is made to appear again with model contacts, and the mechanism of occurrence of the sludge, which is the first cause to worsen the electrical characteristic of the contact, is analyzed with measurements of electrical and microscopical techniques.

The model contact which has the following constructions was employed in the experiment.

Model Contact No.1 : In order to obtain the high current density and the pressure at the area of real contact, the conducting area is made a point contact by putting a grain of copper between both electrodes. And to stabilize the static load, one of the electrodes is vibrated slightly by the constant frequency (60Hz).

Model Contact No.2 : The construction is the same as the No.1 contact but one electrode is transparent, so that it is possible to observe the phenomenon at the contacting surface directly while the current passes through there.

The following became clear from these experimental results.

Generally, in electrical contact, the area of real contact must be much less than the apparent area, and it can be considered that the conducting area consists of several circular contacts the radius of which is very small. (Usually, that contacting spot is called a-spot.) Therefore, the contact resistance appears owing to the constriction of the current at the microscopic area of the contact. If the high current passes through the contact, the temperature at the point of the constriction, where the current density is extremely high, can be raised sufficiently not only to soften but to melt the metal.

On the other hand, in the case of the contact in the insulating oil, the magnitude of the conducting area and the number of the spots decrease owing to the oil wedge between the surfaces of both electrodes. So the contact resistance

becomes high as compared with the contact exposed to air. Consequently, there are many possibilities that an a-spot is overheated by the joule heat. So that, the oil around the a-spots is decomposed by heating and carbides grow on the contact surface.

From above results, the following conclusion is reached. The electrical characteristic of the contact in the insulating oil becomes worse owing to the accumulation of the carbides on the contact surfaces.