UDC 621.3.014.31:537.52:621.3.066'6.064.4

論文

61-A26

Pd, Pt 接点のアーク継続時間に及ぼす 熱的要因の検討

正員 石田 広幸 (東北大)
正員 曾根 秀昭 (東北大)
正員 越後 宏 (東北大)
正員 高木 相 (東北大)

1. ま え が き

開閉接点のアーク放電は、接点の寿命や信頼性に大きな影響を及ぼし、接点性能の劣化を招く大きな原因の一つであることから⁽¹⁾、接点のアーク放電に関する研究は古くから行なわれてきた^{(2)~(6)}。最近でも放電機構を明らかにする目的で種々の角度から研究されている^{(7)~(11)}。しかし、特に制御用電磁継電器接点のような比較的低電流接点では、アーク放電に及ぼす電極温度の影響については、まだ十分に解明されていないのが現状である。

著者らは接点开離時のアーク継続時間の自動計測装置の開発を行ない⁽¹²⁾、これを用いた種々の条件下での計測から放電現象の把握を試みてきた^{(13)~(14)}。その中のアーク継続時間の開離速度依存性の実験で、銀 (Ag) や銅 (Cu) 接点では Holm 氏の指摘⁽²⁾と相田氏らの実験⁽⁶⁾と同様にアーク継続時間と開離速度は反比例した。しかし、パラジウム (Pd) と白金 (Pt) 接点は、低速度で接点を開離するとアーク継続時間は開離速度に反比例せず頭打ちになる。すなわち、アークが切断する接点ギャップは小さくなった^{(15)~(16)}。

著者らは、この原因を探る目的で接点の熱的要因を考慮に入れて若干の実験と熱に関する計算を行なった。その結果、Pd, Pt 接点のアーク継続時間についての前述の現象について一応の解釈ができた。以、下こ

れについて述べることにする。

2. アーク継続時間の開離速度依存性の実験^{(15)~(16)}

まず始めに、著者らの従来の実験結果を要約して示す。図1に接点开離時のアーク継続時間の開離速度依存性の測定結果を短絡電流をパラメータにして示す。図1(a), (b)に示すように、Ag と Cu 接点では破線の Holm 氏らの値^{(2)~(6)}と同様に両対数グラフで傾きが-1の直線になり、アーク継続時間と開離速度は反比例する。一方、図1(c)に示すように図中の条件下においては、Pd 接点では開離速度が小さくなるとアーク継続時間が頭打ちになる⁽¹⁵⁾。これについて確認のための実験を行なった結果も同様であった⁽²²⁾。また、図1(d)に示すように Pt 接点についても同様であった⁽¹⁶⁾。

Pd や Pt 接点の上述の現象は、図2の(c)および(d)に示すように低速度で接点を開離すると、アークは短いギャップで切断するということであり、従来知られていなかった。図2の点はアーク継続時間と開離速度の積をアーク切断時のギャップ長と定義して、図1から計算した値をプロットしたものである。図2の(a)と(b)の Ag と Cu 接点ではアーク切断時のギャップは開離速度によらず一定である。

3. 熱効果の推論と実験

〈3・1〉 材料特性 図2のようなアーク切断時のギャップの開離速度依存性について、その原因がわからず多くの専門家に意見を聞いたが、その中で笹木氏が熱伝導率に大きな相違があることが関係しているのではないかという指摘をした⁽¹⁷⁾。表1に示すよう

A Study of Thermal Effect on Arc Duration in Pd and Pt Contacts. By Hiroyuki Ishida, Member, Hideaki Sone, Member Hiroshi Echigo, Member & Tasuku Takagi, Member (Faculty of Engineering, Tohoku University).

石田広幸：正員，東北大学工学部通信工学科
曾根秀昭：正員，東北大学工学部通信工学科
越後 宏：正員，東北大学工学部通信工学科
高木 相：正員，東北大学工学部通信工学科

図 1 アーク継続時間の開離速度依存性
Fig. 1. Arc duration vs. opening speed.

に、Ag や Cu と比べ Pd や Pt の熱伝導率は一けた小さい。

材料の熱伝導率のアーク放電に及ぼす影響は次のように考えることができるのではないかと考えられる。すなわち、Ag や Cu よりも熱伝導率の小さい Pd や Pt 接点では低速度開離時、すなわち接点ギャップの開き方が遅いときは熱は Ag や Cu などと比して逃げ難く、アークに伴って生ずる熱は接点ギャップ近傍に蓄積され、電極は高温になる。これがアーク放電の維持に影響するのではないかと考える。このような考えのもとに、以下に述べる実験と計算を行った。

(3.2) 電極を加熱する実験

(1) 測定方法 図3に示すように電極を基台から加熱して電極温度にオフセットを与え、接点の熱状態を外から変化させる。この方法でアーク継続時間に

表 1 材料の諸定数

Table 1. Constants of materials.

材 料	熱伝導率 (W/mK)	融 点 (°C)	沸 点 (°C)	比 熱 (J/kgK)	密 度 (kg/m³)
Ag	428	961.93	2,184	233	10,500
Cu	403	1,084.4	2,580	380	8,930
Pd	72	1,554	3,167	250	12,160
Pt	72	1,772	3,827	136	21,370

及ぼす電極温度の影響を調べる。本装置では固定側電極の加熱器で片方の電極温度を高くできる。電極基台の定常的な温度を熱電対で測定し、これを電極基台温度とする。アーク継続時間の測定は著者らの開発したアーク継続時間自動計測装置を用いた⁽¹²⁾。

(2) 測定結果 図4と図5の黒点は接点が開離する各動作ごとのアーク継続時間の測定値のプロットであり、電極基台温度をとともに示す。

図2 アーク切断時のギャップ長

Fig. 2. Gap length when arc ceases.

図3 電極加熱系の構成

Fig. 3. Composition of electrode heating system.

図4に陰極を加熱したときの測定例を示す。Ag接点では、陰極加熱によりアーク継続時間は若干長くなる。陰極加熱を解除するとアーク継続時間は加熱前に

戻る。再加熱しても前回と同様になる。一方、PdとPt接点では陰極加熱によりアーク継続時間は短くなる。陰極加熱を解除するとアーク継続時間は加熱前に戻る。再加熱によっても前回と同様にアーク継続時間は短くなる。

図5は陽極を加熱したときの測定例である。Ag接点では、陽極を加熱すると陰極加熱の場合とは若干様相が異なるものの、平均的には若干長くなる傾向にある。全般的には陽極を加熱し続けるとアーク継続時間は再び短くなり安定せず、加熱を解除してもアーク継続時間はばらつく。再加熱すると前回とは異なり、アーク継続時間は短くなってから突然長くなるなど不安定である。一方、PdとPt接点では陽極を加熱して

図4 陰極を加熱する実験のアーク継続時間の測定例と電極基台温度 (Ag, Pd, Pt)

Fig. 4. A typical example of measurement of arc duration and of electrode temperature when cathode is heated (Ag, Pd, Pt).

も陰極加熱と同様にアーク継続時間は短くなる。

以上、電極温度がアーク継続時間に影響を及ぼすことが実験的に明らかになった。Ag 接点の陰極加熱と陽極加熱によるアーク継続時間の変化は複雑であるが、Pd や Pt 接点では電極温度が高くなるとアーク継続時間は極端に短くなった。

電極温度が絶縁破壊に及ぼす影響については既に研究されており、1,200 K ぐらいから影響が生じ、また極性による差も生じることが示されている⁽²³⁾。電気接点の開離時のアークについても、かなり影響があることが今回の実験で明らかになった。しかし、なぜこのようになるのかは不明で、今後の研究に待たなければ

図5 陽極を加熱する実験の電極基台温度とアーク継続時間の測定例 (Ag, Pd, Pt)

Fig. 5. A typical example of measurement of arc duration and of electrode temperature when anode is heated (Ag, Pd, Pt).

ばならない。

4. アーク放電に伴う電極温度の計算

接点間のアーク放電に伴う温度上昇を直接計測することは極めて困難であることから、従来より計算によって推論がなされている⁽¹⁸⁾⁻⁽²⁰⁾。著者らもアーク放電に伴う熱の電極への伝導に着目して、計算によって電極温度を推定することを試みた。

〈4・1〉 計算モデル 図6に示すように、円柱接点の先端の斜線を施した円に、アークによる熱エネルギー Q が一定の時間入射するとし、接点と電極基台の熱定数ならびに電極長などの構造を定める。このモ

図 6 電極温度計算モデル

Fig. 6. A calculation model of electrode temperature.

デルでアークに伴う電極温度をシミュレートする。温度の計算は熱抵抗と熱容量の概念から得られる前進差分式による近似解法によって行なう（付録参照⁽²¹⁾）。計算は熱エネルギーが円柱の中心軸に沿って入射するとしたため、熱は軸方向と半径方向にのみ流れるので二次元で行なうことができる。微小体積要素への分割幅は軸方向 ($\Delta z = 100 \mu\text{m}$) と半径方向 ($\Delta r = 20 \mu\text{m}$) にそれぞれ等分割とする。また計算の都合上、熱伝導率、比熱、密度は一定とし、これらの設定値は計算結果の図中に示してある。またアークの熱源の半径は、Pd 接点の 48 V, 4 A, 10 mm/s での放電こん跡の顕微鏡観測から推定して $40 \mu\text{m}$ に設定し、入射電力は 30 W とした。

〈4・2〉 計算結果 図 7 に熱伝導率が大きい材料 (Ag 接点に相当) と小さい材料 (Pd 接点に相当) について、熱エネルギーが等しいときの電極温度の計算例を等温線で示す。熱入射時間 (アーク継続時間) 1.5 ms では (a) 図の Ag では熱は広く拡散し電極基台にまで達しているが、一方、(b) 図の Pd では熱は接点ギャップ近傍の電極内部に集中している。

図 8 に接点の熱伝導率をパラメータにしたときの接点ギャップ近傍の電極温度の時間変化を熱源 ON と OFF 時について示す。ここで、接点ギャップ近傍の電極温度とは熱源に隣接し、中心に最も近い微小体積要素の計算による温度である。この計算によると、Pd や Pt などの熱伝導率が小さい接点 (熱伝導率約 70 W/mK) では、Ag や Cu などの熱伝導率が大きい接点 (熱伝導率約 420 W/mK) よりも接点ギャップ近傍の電極温度の上昇が急であり、また、その温度は高温になる。

この計算は熱源からの深さ $50 \mu\text{m}$ のところの計算で、Ag の場合 (熱伝導率 420 W/mK) では約 200°C で飽和している。松村氏の計算によると⁽¹⁹⁾、Ag で 15 V, 3 A の場合、 $3 \mu\text{m}$ の深さでは 200 ns で $1,000^\circ\text{C}$ に達してほぼ飽和している。

(a) Ag

(b) Pd

図 7 電極温度の計算例

Fig. 7. Examples of electrode temperature calculation.

5. 電極温度とアーク継続時間の開離速度依存性の関連

第 3 章の電極を加熱する実験結果と第 4 章のアーク放電に伴う電極温度の計算結果から、第 2 章のアーク継続時間の開離速度依存性の実験結果を接点ギャップ間の熱の蓄積効果で一応説明できるように考えられる。

実験では

- (1) 電極を加熱すると、図 4 と図 5 に示すように Ag 接点の陰極加熱と陽極加熱の実験ではアーク継続時間の変化の仕方に相違があったが、アーク継続時間は長くなる傾向になった。一方、Pd と Pt 接点では陰極加熱と陽極加熱のいずれの場合もアーク継続時間が短くなり、電極加熱の効果は Ag 接点に比べて大きかった。このことはアークによる発熱によっても同様な結果、つまり電極加熱と同様にアーク継続時間が短くなるものと考えられるが、直接電極の温度の計測が困難であること

図 8 熱伝導率に対する接点ギャップ近傍の電極温度の経時変化の計算

Fig. 8. Calculated time response of electrode temperature near contact gap with respect to thermal conductance.

から、Ag と Pd 接点についてアーク放電に伴う電極温度を計算した。

すなわち、

(2) Pd に比べて Ag は熱伝導率が約 6 倍大きく、Pt は Pd とほぼ等しい熱伝導率をもつ。このことを考慮して他の条件を一定にして計算した結果、Ag 接点では図 7 (a) に示したように熱が広く拡散し、一方、Pd 接点では図 7 (b) に示したように熱は電極の内部の熱源付近に集中し、Ag に比して高い温度になる。

という結果を得た。

図 8 に示したように、熱伝導率が小さいとアーク放電の接点ギャップ近傍の微小体積要素の計算温度は高くなり、このとき Pd 接点は Ag 接点よりも約 4 倍も高温になるという結果であった。

上記(1)項と(2)項とを総合すると、Pd や Pt 接点のアーク継続時間の開離速度依存性はアークによる発熱に伴う接点ギャップ近傍の温度が関連していることを示すものと考えられる。

6. あとがき

以上、本論文では Pd や Pt 接点のアーク継続時間は Holm 氏の理論に従わないという実験結果を接点

ギャップ近傍の電極温度から、その傾向を説明することを試みた。すなわち、電極を加熱する実験とアークによる接点ギャップ近傍の温度上昇の計算から、電極の熱伝導率は温度上昇に大きく影響することが推論され、これが Pd や Pt 接点のアーク継続時間の開離速度依存性に深い関係があるものと推察された。熱伝導率の小さい Pd や Pt 接点では開離速度を小さくするとアーク放電による発熱により、電極の温度が Ag などの熱伝導率の大きい材料の場合に比べて高くなり、アーク放電が維持できなくなるのではないかと考えられる。

なぜこのような傾向があるのかはいまだ明らかではない。本論文は全く巨視的に、また単に現象論的に一つの説明を試みたもので、将来の研究に待つところが多い。

最後に御討論、御援助いただいた日本電気(株)の関係各位に深謝する次第である。また、この計算は東北大学大型計算機センターの高速フォートランプロセッサを使用した。(昭和 60 年 8 月 30 日受付)

文 献

- (1) 真野、他：接触部品の信頼性 (昭 51) 工学図書
- (2) R. Holm : Electric Contacts, 4th. ed (1967) Springer-Verlag, New York
- (3) F. LLEWELLYN JONES : THE PHYSICS OF ELECTRICAL CONTACTS (1957) OXFORD AT THE CLARENDON PRESS
- (4) L. H. Germer : "Physical Process in Contact Erosion", *J. Appl. Phys.*, **29**, 1067 (1958)
- (5) 鳳：電気接点と開閉素子 (昭 22) 金原出版
- (6) 相田：「空気中における接点開離時のアーク時間の一般式 (Au, Ag, Cu, W)」, 電学誌, **90**, 2209 (昭 45-11)
- (7) 窪野・真野：「コンタクト開離時の微小アーク放電による転移」, 信学論 C, **59-C**, 165 (昭 48-3)
- (8) 窪野・生原：「スイッチングアークの継続時間とエネルギーとの同時測定装置と一実験例」, 信学論 C, **J61-C**, 504 (昭 53-8)
- (9) 沢・野田・村越・宮地：「FW 接点开離時のメタリッ相アークについて」, 同上, **J66-C**, 361 (昭 58-5)
- (10) 高橋・吉田・宮地：「コンタクト開離時アークのメタリッ相からガス相への移行境界」, 同上, **J66-C**, 813 (昭 58-11)
- (11) 糸山：「Ag-n% CdO 接点のアーク温度の統計的推定」, 同上, **56-C**, 157 (昭 48-3)
- (12) 曾根・前島・高木：「マイクロコンピュータで制御するコンタクトアーク継続時間の自動計測装置」, 第 21 回 SICE 学術講演会, 1406, p.117 (昭 57-7)
- (13) T. Takagi & H. Inoue : "Distribution of Arc Duration and Material Wear Due to Arc for Ag, Cu, and Pd Contacts", *IEEE Trans. Comp. Hybrids, Manufact. Tech.*, **CHMT-2**, No. 1, 20 (1979)
- (14) T. Takagi : "ELECTRODE TEMPERATURE DEPENDENCY OF ARC DURATION IN CONTACT BREAK-EXPERIMENTS ON A FEW CONTACT MATERIALS", *Proc. 11th International Conf. Electr. Contact Phenomena*, p. 251 (1982)
- (15) 小原・井上・高木：「コンタクトのアーク継続時間の開離速度依存性に関する一実験」, 信学技報, **EMC 79-19** (昭 54-9)
- (16) 石田・曾根・越後・高木：「白金コンタクトのアーク継続時間の測定」, 信学通信全大, 1-22 (昭 57-8)

- (17) 笹本 猛氏(日電)の私信 (昭 55-12)
 (18) 窪野:「定常アーク放電中の陰極表面の電流密度に関する理論的検討」, 電学論 A, 95, 55 (昭 51-2)
 (19) 松村:「アノードアークにおける陽極の温度上昇について」, 信学技報, EMC 80-56 (昭 56-3)
 (20) H. A. Nied & CA. Schlansker: "THE THERMO STRUCTURAL ANALYSIS OF ELECTRICAL CONTACTS USING A FINITE ELEMENT MODEL", Proc. 29th Meet Holm Conf. Electr. Contacts, p. 147 (1983)
 (21) J. P. Holman (平田監訳): 伝熱工学(上) (昭 51) プレイン図書出版
 (22) 石田・小原・井上・高木:「コンタクトアーク継続時間の開離速度依存性の実験」, 信学技報, EMC 80-32 (昭 55-12)
 (23) 室間・K. R. Hearne:「絶縁破壊電圧に及ぼす電極温度の影響」, 電学論 A, 92, 423 (昭 47-9)

付 録

電極温度の計算方法⁽²¹⁾ 熱伝導方程式は(付1)式で与えられる。

$$\nabla^2 T + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad \text{..... (付 1)}$$

ここで, T : 温度, k : 熱伝導率, q : 単位体積あたりの発熱量, α : 物質の温度伝達率 (ρ を物質の密度, c を物質の比熱とすると, $\alpha = k/\rho c$)

図6のモデルで(1)式を解析的に解くのは困難なので, 計算機による数値計算法で解く。集中熱容量法によると付図1に示すように熱容量 C_i の微小体積要素 i とその回りの微小体積要素 j が R_{ij} の熱抵抗で熱的に結合されていると考える。

定常状態では節点に流入する正味のエネルギーは0であるが, 非定常問題では節点に流入する正味のエネルギーは要素の内部エネルギーの増加に等しい。それぞれの体積要素は小さな集中熱容量系と考えることができ, すべての要素間の相互作用によって非定常状態での物体の温度履歴が決定される。

(付2)式のような一つの節点におけるエネルギーバランスに対する一般的な形の抵抗-熱容量の関係が得られる。

$$\begin{aligned} q_i + \sum_j \frac{T_j(p) - T_i(p)}{R_{ij}} \\ = C_i \frac{T_i(p+1) - T_i(p)}{\Delta \tau} \quad \text{..... (付 2)} \end{aligned}$$

付図1 集中熱容量系

app. Fig. 1. Lumped-heat-capacity system.

ここで, $T_i(p)$ と $T_j(p)$ はそれぞれ時間 p における微小体積要素 i とその回りの微小体積要素 j の温度である。 q_i は単位時間あたりに発生する熱量である。 C_i は微小体積要素 i の熱容量であり, ρ_i を密度, c_i を比熱, ΔV_i を体積とすると, $C_i = \rho_i \times c_i \times \Delta V_i$ と定義される。 $\Delta \tau$ は時間分割幅である。 R_{ij} の値を求める式は文献(21)の p. 74 表 3-7 を引用する。(付2)式は $T_i(p+1)$ に対する陽的な関係を使うことによって前進差分の考えを導入することができる。

初期条件はすべての微小体積要素の温度を室温 T_0 として与える。電極表面と空気との境界条件は対流による熱伝達を適用し, ニュートンの冷却の法則によれば熱損失 q は(付3)式によって与えられる。

$$q = h A (T - T_\infty) \quad \text{..... (付 3)}$$

ここで, h は対流による熱伝達率であり, 文献(21)の p. 13 表 1-2 の値を引用し $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ とする。 A は壁面の面積, T は空気にさらされる微小体積要素の温度, T_∞ は空気の温度とする。

陽的方法の安定性から時間分割幅 $\Delta \tau$ には, (付4)式の制限がつく。

$$\Delta \tau \leq \left(\frac{C_{ij}}{\sum_j 1/R_{ij}} \right) \quad \text{..... (付 4)}$$