銀，銅およびアルミ点接触子の 直流300A通電時における接触抵抗特性

正 員 愛知 久史 (大同工大)

正 員 松村 年郎 (名古屋大学)

名誉員 宮地 巖 (愛知工大)

Characteristics of Contact Resistance for Ag, Cu and
Al Spot Contact under DC Current Flow of 300A

Hisashi Aichi, Member (Daido Institute of Technology)

Toshiro Matsumura, Member (Nagoya University)

Iwao Miyachi, Honorary Member (Aichi Institute of Technology)

The temperature rise of the contact spot by Joule's heat under high current flow may result in the softening or welding of the contact materials. Contact resistances of Ag, Cu and Al spot contacts have been observed under the current flow of up to 300A DC. The contact resistances of Ag and Cu with clean surfaces were revealed to be kept constant independent of the magnitude of the applied current flow. On the other hand, contact resistances of Al and Cu with oxidized surfaces were greatly reduced with the increasing current flow.

キーワード：接触抵抗，点接触，大電流通電，軟化，溶着
(contact resistance, spot contact, high current flow, softening, welding)

1. まえがき

開閉機器の接触子や電線の接続部分など金属導体が互いに機械的な加圧によって接触している場合，通電路を形成する接触部分は導体の大きさに比して非常に小さく，電流は接触部分に集中して流れる。したがって接触部分近傍の導体内部では，この電流集中に起因する集中抵抗と称される接触抵抗が生じる。また，酸化膜，硫化膜など導体表面に皮膜が形成している場合には，皮膜抵抗なる接触抵抗も発生する。特に，ジュール熱の発生によって接触子の温度上昇が生ずるような大電流通電時には大気中に置かれた接触子は導体表面の酸化を早めるとともに導体の抵抗率が上がる。その結果，接触抵抗はより高くなり発熱も加速され，接触部分の溶融に伴う溶着現象などの接触障害を誘発する危険性がある。したがって，接触子に発生する接触抵抗を低く抑えることは重要な課題である。

筆者らは，これまでに数アンペアから所有設備限度である最大300Aの直流電流の通電状態における銀，銅およびアルミの導電材料を用いた点接触子の接触抵抗現象について実測を試みた^{(1) - (3)}。本論文はこれらの実測結果から数百アンペアの通電状態における接触部分の接触抵抗の挙動について考察したものである。

2. 接触抵抗の測定装置および供試接触子

図1に実験装置の外観を示す。通電状態にある接触子の接触部分において発熱がある場合については接触電圧 ψ と接触点温度 θ との関係がHohlmanの $\psi - \theta$ 理論⁽⁴⁾によって示されている。本実験装置はこの理論を考慮して接触子全体の温度上昇の抑制ならびに電源線からの熱流入による接触子における温度の影響を防ぐために以下の条件を具備して製作したものである⁽⁵⁾。

①接触子の接触部分での発生熱を速やかに拡散させ，接

図1 実験装置
Fig.1. Experimental apparatus.

触子全体の温度上昇を抑制する。

- ②接触子の保持部分および母線などの発熱源から接触子への熱流入を防止する。

具体的には接触子を保持する可動台および固定台に内径3mmφ、肉厚0.5mmの銅管を3重に巻き付ける。このふたつの銅管に常温の水道水をそれぞれ1.5ℓ/分程度通水する。これによって、接触部分での発生熱を速やかに拡散させるとともに接触子の保持部ならびに電線からの発生熱が接触子に流入することを防止している。その結果、通電状態における接触子保持部の温度上昇は無く常温に保たれている。

接触子には直流電源(開放電圧5V)によって最大300Aまでの直流電流を通電する。なお、通電電流は通電回路に挿入された電子負荷装置ならびに炭素抵抗器によって調整する。

直径10mm、長さ40~50mmの各種円柱導体2本の各先端をそれぞれ平面および曲率半径5mmの球面に加工し、鏡面仕上げ($H_{\max}=1.5\text{S}$ 以下)を行う。銀および銅導体表面はアルコールにて洗浄した後、実験直前に化学研磨あるいは金めっきの表面処理を行い実験に供する。他方、大気中にさらされたアルミ導体の表面は強固な絶縁性皮膜が生成されており、一般に皮膜のない清浄な金属表面を得ることは困難である。そこで本実験では試料の加工、研磨工程にお

いて生成されたパールビー層(非晶質層)や表面に付着した研磨材等の異物を除去する目的で水酸化ナトリウム水溶液にて洗浄処理を施している。平面および球面接触子を実験装置の固定台および可動台に保持し、これらを接触させて点接触を構成する。接触抵抗は接触子間の接触電圧を高感度電子電圧計にて測定し、電圧電流計法によって算出する。

3. 各種金属導体を用いた点接触の接触抵抗と接触荷重との関係

本実験で用いた点接触の構成では、加圧接触している接触子の接触部分は接触点と称される微細な円形の接触面をひとつ形成する。この接触面は接触荷重の増加とともに接触点近傍において導体の弾性あるいは塑性変形を伴って拡大する。したがって、接触抵抗は接触荷重の増加によって低下する様相を示す。

図2は接触子に流れる電流によって生ずる接触部分の発熱が小さく、接触状態の変化が少ないと予測される直流1

図2 各種金属導体を用いた接触子の接触抵抗と接触荷重との関係

Fig.2. Relation between contact resistance and contact load for various metal contacts.

Aを通電した状態において接触抵抗を測定したものである。具体的には接触荷重を2.45Nから最大98Nまで可変させ、その増減過程において11ポイントの加圧状態において接触抵抗を実測する。なお、本実験に使用した銅接触子は硫酸と硝酸を主成分とした混酸による化学研磨あるいは金めっき（膜厚 $0.1\mu\text{m}$ 程度）処理を施したものである。また、銀接触子については希硝酸溶液にて化学研磨を行った。他方、アルミ導体を用いた接触子は水酸化ナトリウム水溶液によって表面の洗浄処理を行ったものである。また、各電流値における接触電圧は電流設定初期には低下する傾向にある。したがって、図中に示す接触抵抗値は接触電圧が安定した電圧値から接触抵抗を算出したものである。

図中に○、●印で示すアルミ導体を用いた接触子の接触抵抗は加圧初期2.45Nの接触荷重において約 $60\text{m}\Omega$ と高い抵抗値にある。その後、接触荷重の増加とともに抵抗値は接触荷重にほぼ反比例し、98Nの最大加圧時には $1.5\text{m}\Omega$ 程度まで低下している。このように加圧時の接触抵抗Rが接触荷重Pに反比例する挙動は接触子表面に皮膜が生成された場合の接触抵抗の特徴であり、大気にさらされたアルミ導体の表面には強固な皮膜が生成されていることを反映している。

他方、銅および銀接触子では、加圧初期2.45Nの低い接触荷重においても接触抵抗は $0.1\sim 0.25\text{m}\Omega$ 程度で、アルミ導体を用いた接触子の接触抵抗に対して $1/100$ 以下にある。また、接触荷重に対する抵抗値の変化もアルミ導体に比べて小さく、荷重の約 $1/2$ 乗に反比例した傾向となっている。これらの接触抵抗特性はアルミ導体での接触抵抗現象とは異なり、接触点近傍の導体内部に発生する電流集中によって生ずる集中抵抗に起因した挙動と判断されるものである。

本実験に使用したアルミ導体および銀導体の抵抗率はそれぞれ $3.19\times 10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$ 、 $1.65\times 10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$ （室温での実測値）にあり、各導体のヤング率、硬さなどの機械的性質はほぼ同じである。これらのことからアルミ接触子において皮膜を介在しない清浄な金属接触が得られるとすれば、その接触抵抗は銀接触子の2倍程度の抵抗値と算定される。しかし本実測ではアルミ接触子を接触させた場合の接触抵抗は銀接触子に比べて50～500倍程度高い状況にある。これは大気にさらされたアルミ導体の表面は絶縁性の強固な皮膜が生成されており、この皮膜抵抗に起因する接触抵抗の現れといえる。

また、いずれの接触子においても接触荷重を98Nから再び減少させた場合の接触抵抗は荷重増加時よりも抵抗値は全体的に低い。これは加圧時において接触部分に塑性変形が生じた場合に現れる接触抵抗の特徴であり、加圧力の減少によって接触部分における弾性変形部の復帰に伴う接触点の縮小による接触抵抗の増加現象である。したがって、加圧減少における接触抵抗はいずれの接触子においても接触部分の弾性変形の特性である接触荷重の $1/3$ 乗に反比例する傾向に近い様相となっている。

4. 各種金属導体を用いた点接触の接触抵抗と通電電流との関係

＜4.1＞ アルミ接触子 前述のようにアルミ導体を用いた接触子では、接触子表面に生成された皮膜によって接触抵抗は比較的高い状況にある。図3はアルミ接触子を1.96、9.8、49Nの各接触荷重にて一定の状態に加圧し、接触子に $1\sim 300\text{A}$ の直流電流を通電した場合の接触抵抗と通電電流との関係を示したものである。なお、本実験装置の特徴から接触抵抗を測定する各電流値における接触電圧は電流設定の直後から安定した状況にある。

図3 アルミ接触子の接触抵抗と通電電流との関係

Fig.3. Relation between contact resistance and current flow for Al conactact.

接触荷重を1.96Nに設定した場合、接触抵抗は通電初期1Aの通電状態では $50\text{m}\Omega$ と高く、電流の増大とともに徐々に低下する傾向にある。10A以上の電流域での接触抵抗は通電電流にほぼ反比例して低下している。また、接触荷重を9.8Nに増加して加圧させた場合の接触抵抗は通電初期1～10A程度の電流域では $10\text{m}\Omega$ 前後でほぼ一定であるが、10A以上の電流域においては電流の増大とともに低下する様相にある。さらに接触荷重を49Nに設定した場合には、30A程度までの電流増大時における接触抵抗は約 $5\text{m}\Omega$ の抵抗値で推移し、その後抵抗値が低下している。また、最大300Aの通電状態から電流を減少させた場合の接触抵

抗はほぼ一定の状態で推移しているとともに、接触荷重の異なるいずれの加圧状態においても同じ抵抗値を示す様相が特徴的である。

$\psi - \theta$ 理論⁽⁴⁾，から接触部分の接触点温度 θ_m と接触電圧 V_c との関係は (1) 式で与えられている。

$$\theta_m^2 - \theta_0^2 = \frac{V_c^2}{4L}$$

$$= 0.104 \times 10^8 V_c^2 [K^2] \quad \dots (1)$$

ここで L は Lorenz 定数で、 $L = 2.4 \times 10^{-8} [(V/K)^2]$ なる値にある。また、 θ_0 は接触部分から十分離れた接触子導体の温度である。なお、この (1) 式は金属導体内部における等温線と等電位線が一致する条件下において成立している。

表 1. 軟化温度⁽⁶⁾ から算定した接触電圧

Table 1. Contact voltage calculated from softening temperature.

θ_0 (常温)	θ_m (軟化温度)		V_c
K	℃	K	mV
300	Ag: 180		106
"	Cu: 190	463	110
"	Al: 150	423	93

表 2. 融点⁽⁷⁾ から算定した接触電圧

Table 2. Contact voltage calculated from melting temperature.

θ_0 (常温)	θ_m (融点)		V_c
K	℃	K	mV
300	Ag: 962	1235	371
"	Cu: 1085	1358	411
"	Al: 660	933	274

具体的な数値例として、銀、銅およびアルミ導体の軟化温度および融点を用いて (1) 式から算出した接触点の接触電圧をそれぞれ表 1 および 2 に示す。アルミ導体が $\theta_m = 423K$ の軟化温度に達する接触点の接触電圧 V_c は 93mV となる。図 3 に一点鎖線で示す直線は各通電電流において接触点が軟化する接触電圧 V_c に達する接触抵抗の推移を示したものである。さらに、接触点が融点に達し、接触部分が溶融状態となる接触電圧に対する接触抵抗の推移を破線で示す。

実測から得られた接触抵抗の急減域の傾向は一点鎖線と破線との中間的な傾向で推移している。また、実験後の接触子表面には接触点が溶融したと思われる痕跡が観測された。これらのことから、接触部分は軟化、溶融によって接触面の増大とともに接触子表面に生成された皮膜の破壊に

よって通電部が拡大して接触抵抗が急減したと判断される。

このように接触部が発熱を伴うような通電状態においては図 2 に示した通電電流が小さい場合の接触抵抗特性とは様相が異なっていることがわかる。

<4.2> 銀および銅接触子 他方、金属導体の表面処理を行うことによって皮膜の影響が少ない銀および銅接触子を用いて実測した接触抵抗と通電電流との関係を図 4 に示す。ここで銀接触子は実験直前に希硝酸にて化学研磨を行い、銅接触子は混酸を用いた化学研磨処理を施したものである。

銅接触子における通電初期の接触抵抗の値は 0.15mΩ 程度で、前述図 2 で示した混酸化学研磨処理を行った銅接触子における加圧初期の抵抗値よりも低く、金めっき処理を行った接触子に近い値となっている。これは、化学研磨処理においてはわずかな処理時間の差によって接触子の表面状態が変化し易く、そのバラツキが現れたものと判断される。なお、本実測においても各測定ポイントでの電流値における接触電圧は電流の設定直後から安定した状況にあった。

いずれの接触子においても接触抵抗はアルミ接触子に比べて 1/100 以下と低く、通電電流の増減においてほぼ一定の抵抗値で推移している。これは銀や銅導体の接触子表面を化学研磨による表面処理を行った直後に接触させた場合の接触部分は酸化膜などの汚染皮膜の影響がほとんどないためと考えられる。したがって、電流集中に起因した接触抵抗のみとなり、その抵抗値は低い状態にある。その結果、接触部に発生するジュール熱はほとんどなく、数アンペアから 200~300 アンペアの通電電流域では安定した接触状態が持続していると判断される。

<4.3> 洗浄処理を施した銅接触子 銅導体を用いた接触子において、接触子の加工後化学研磨等の表面処理を施さず、超音波アルコール洗浄処理によって加工および研磨時に付着した研磨剤等の異物を除去した状態での接触子

図 4 銅および銀接触子の接触抵抗と通電電流との関係
Fig.4. Relation between contact resistance and current flow for Cu and Ag contacts.

図5 超音波アルコール洗浄を施した銅接触子の接触抵抗と通電電流との関係

Fig.5. Relation between contact resistance and current flow for Cu contact processed by super sonic wave cleaning.

を用いて直流電流1～300Aまでの電流増減時における接触抵抗の実測を行った結果を図5に示す。これは、銅接触子が大気中において開放状態で放置された後に閉成された接触状態を想定したものである。実験は同一の加工処理を行った3組の接触子について実測した。図中に[A]、[B]、[C]で示すように通電初期1Aの通電時の接触抵抗は各接触子によって大きな差が現れている。これは接触子表面が清浄でない場合には、表面に生成されている皮膜などの表面状態のわずかな違いが接触抵抗に大きく影響することを示唆している。○印で示す[A]の場合には、通電初期の接触抵抗は50mΩと高い。3A以上の電流域では電流の増大とともに接触抵抗は通電電流に反比例する傾向で低下している。この傾向は[B]、[C]で示す特性においてもみられ、それぞれ10Aおよび150A程度から低下している。また、いずれの場合も接触抵抗の低下傾向はほぼ一致しており、最大300Aを通電したときの接触抵抗は0.3mΩ程度であり、[A]の特性においては通電初期の1/100以下となっている。その後、電流減少時の接触抵抗はほとんど一定の抵抗値で推移している。なお、本実測においてもアルミ接触子での実測と同様に各測定ポイントでの電流設定直後から接触電圧は安定した状況にあった。

以上の実測結果より、接触子の加工後において表面洗浄のみを施して接触させた場合には、通電初期数Aの通電状態における接触抵抗はバラツキが大きい状況にあることが

わかる。特に、通電初期に接触抵抗が高い場合には通電電流の増大とともに抵抗値は大きく低下する傾向にある。これは、洗浄処理のみ施した接触子表面は接触子の加工時に生成されたパールビー層（非晶質層）や酸化皮膜の生成によって、前述のアルミ接触子の特性と近似した様相になったと考えられる。したがって接触点に発生するジュール熱は大きく、接触点が軟化あるいは溶融状態に達することが予測される。そこで、前述（1）式から算出した銅導体の軟化あるいは溶融を伴う場合の接触抵抗の推移を図中に一点鎖線および破線で図中に示す。実測から得られた接触抵抗の急減域における傾向はこの一点鎖線で示す直線によく一致している。これらのことから本特性は温度上昇に伴う接触点の軟化によって接触部分の拡大および皮膜破壊によって通電部分が增大し、接触抵抗が急減したと推測される。

5. まとめ

本論文では、銀、銅およびアルミ導体の接触子を用いた点接触において最大300Aの直流電流を通電させた場合の接触抵抗の実測結果よりその挙動を定量的に検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

（1）化学研磨などの表面処理を施した銀および銅接触子の接触抵抗は低く、300Aの通電時においても安定した接触状態が得られる。

（2）アルミ導体を用いた接触子においては、数Aの通電時の接触抵抗は銀導体の接触子に比して50～500倍と高く、通電電流の増大とともに抵抗値が急減する様相にある。

（3）化学研磨などの表面処理を行わない銅接触子を用いた場合の接触抵抗はアルミ接触子に類似した傾向にある。

一般に、開閉機器の接触子が酸化皮膜などの汚染皮膜の影響によって閉成直後の接触抵抗が高い場合には、通電に伴う接触部の発熱によって接触部の軟化、溶融が起こる。その結果、通電路の拡大によって接触抵抗は急減する。

（平成9年7月24日受付、同10年1月19日再受付）

文 献

- （1）愛知他：「大電流通電時における点接触子の接触抵抗－荷重特性」平成7年度電気関係学会東海支部連大，No.345(1995.9)
- （2）愛知他：「銅点接触子の大電流通電時における接触抵抗特性」，1996年度電気関係学会東海支部連大，No.156
- （3）愛知他：「銀およびアルミ点接触子を用いた直流300A通電時の接触抵抗特性」，電気学会開閉保護研資，SP-96-20，pp.33-40(1996.6)
- （4）R.Holm: "Electric Contacts", 4th.Edit., pp.60-71, Springer, New York (1967)
- （5）愛知他：「大電流通電接触子における接触抵抗測定に関する考察」平成8年電気学会全国大会，No.273 (1996.3)
- （6）R.Holm: "Electric Contacts", 4th.Edit., p.436, Springer, New York (1967)
- （7）国立天文台編：「理科年表」，平成9年，p.467, (1997)

・愛知 久史 (正員) 昭和21年6月15日生。44年3月大同工業大学電気工学科卒業。同年4月大同工業大学技手, 45年同大学助手, 60年講師, 現在に至る。主として, 電力用開閉機器の接触機構に関する研究に従事。電子情報通信学会会員。

松村 年郎 (正員) 昭和26年5月1日生。54年3月名古屋大学大学院博士課程満了。同年4月同大学助手, 平成7年同教授, 現在に至る。工学博士, 大電流遮断・電気エネルギーの有効利用に関する研究に従事。IEEE会員。

宮地 巖 (名誉員) 大正5年9月27日生。昭和15年3月東京大学工学部電気工学科卒業。同年4月名古屋大学講師, 21年11月同助教授, 32年4月同教授, 55年4月同名誉教授, 愛知工業大学教授, 同客員教授, 現在に至る。電力系統の開閉異常電圧, 発電機器の運用・設計基準, 電力アーク, UHV送変電機器, 雷放電, 電力気象などの研究に従事。工学博士。43年電気学会電力賞, 47年同論文賞, 55年同功績賞受賞。46年電気学会東海支部長, 48, 49年同副会長, 52年同会長, 61年同名誉員。46~49年名古屋日仏文化協会会長, 50年仏国パルムアカデミック・オフィシェ勲章受章。電気協同研究会顧問。フランス電気電子学会SEE会員。CIGRE特別会員。