

電気接触現象の複雑さ

Intricacies of Electric Contact Phenomena

エルコンテックコンサルティング（非）*玉井 輝雄

Terutaka Tamai*

*Elcontech Consulting, Ltd.

1. はじめに

一对の表面を接触させて、その界面を通して電流を流すのが電気接触部である。電気接点は電気接触部を部品としたものである。電気接触部での現象は電流の流れることを除けば広い意味でトライボロジーそのものである。電流が流れることによって真の接触面の様相が大きく変わる。例えば、発熱とそれによる接触部分の性質の軟化変形すること等である。さらに、電流が流れることになって、接触抵抗、ショットキー効果やトンネル効果、放電現象、等々特有の現象が発生する。ここでは、電気接触部についてその特殊な現象を、接触抵抗を中心とした静止接触での現象を取り上げて説明する。

2. トライボロジーの中での電気接触

トライボロジーの歴史は有史以前にさかのぼるが、電気接触現象は、電気が身近となった 1700 年代からである。すなわち、ボローニア大学の外科の教授ガルバニー（L.A.Galvani）が電気現象に気が付き、ボルタ（A.A.Volta）が電池を発明し、人類が容易に電気を扱えるようになった。その電気現象の解明の中で、ドイツ人のゲオルグ・ジーモン・オーム（G.S.Ohm）が電気抵抗と電圧（力）と電流（作用）の関係を解明する中で電気接触問題の存在を見出し、そのことを記載した。その後、種々の機械での電気の利用が拡大する中で、電気接触の問題の重要性が認識されて来た。すなわち、すべての電気機器において、電気接点に代表される電気接触部は基本の電気部品として使われるからである。特に、以前の電話システムにおける交換機は電気接点のかたまりであり、電話交換の性能は接触部の性能向上にかかっていた。電気機械の発展拡大にともない、接触部もリレー、スイッチ、コネクタを担い、今日に及んでいる。また、自動車も EV 化し、接触部が重要となっている。ここで、いつの時代でも重要なのが接触抵抗特性である。大きな電流を切ったり接続したりするには遮断器があり、放電特性が重要であるが、すべての電気接触部は接触部の変形、摩耗、凝着等トライボロジーそのもので、そこへ電流が流れるが流れるので現象はたいへん複雑となる。ここでは、電気接触部特有の問題に着目し、中でも低電気条件での接触抵抗を中心にしてトライボロジーとは異なるその特殊性を取り上げてみた。

3. 接触抵抗特性の特異性

接触抵抗は通常の固定電気抵抗は異なり非線形の非可逆性を持っている。その例をいくつかここでは示す。接触抵抗は接触境界面の微小な真の接触部で流れる電流が狭められることによって生ずる電気抵抗である。すなわち、式(1)で与えられ、母材の抵抗率 ρ を真の接触面の直径 $2a$ で割ったものである。

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

ラプラスの方程式の境界値問題としての計算過程から求められる。これは一個の真の接触部についてであるが、表面はうねりや粗さがあるので、より実際的には複数の真の接触面が存在する。この種の問題に対して、電流は接触面に対して均一的に流れるのではなく、周辺部に集中して流れることが理論的にも実験的にも検証されている。すなわち、接触境界部を pn 接合の発光ダイオードと見立てることによって真の接触部の周辺が輝くことが見出された。また、三角や四角のように接触面が角を持つ場合では、電流は角に集中することが分かっている。つぎに、通常の接触面は吸着気体の皮膜や酸化皮膜等で覆われている。接触境界部にはこれらが介在する。この場合、皮膜による電気抵抗が直列に集中抵抗につながる。これはホルム（R.Holm）の極低温における超電導現象で金属の抵抗率と皮膜の抵抗率を分離した研究による。つぎに、接触荷重が著しく低く、接触面の先端の単一の原子、または数個原子のみが接触するようになり、いわゆるナノコンタクトが形成されると、抵抗率の概念が変わり、式(2)となる。

$$R = \frac{4\rho_s l}{3\pi a^2} = \frac{4mv_F}{3\pi n e^2 a^2} \quad (2)$$

これが Sharvin の抵抗である。ここで $\rho_s = (mv_F)/(ne^2 l)$ 、 l は電子の平均自由行程、 v_F は Fermi 速度、 n は電子密度、 e は電子の電気量、 $a \leq l$ で上式が成り立ち 100 倍以上に増加する。

また、表面が酸化物や硫化物で覆われていると、薄い皮膜が介在する場合、電流はショットキー効果やトンネル

効果で流れ、金属とショットキー障壁の接触となり、ダイオードの働きをする場合がある。さらに、真の接触部の温度は電子が熱と電気を運ぶため、Wiedemann-Franz-Lorenz の法則から、 $(\lambda/\kappa) = L\theta$ となり、 L が Lorenz 定数である。これから $L(\theta_m^2 - \theta_0^2) = V^2/4$ 、で接触部間の電圧降下 V から直ちに温度が求められる。つぎに、汚染皮膜は機械的に、電気的に破壊され、結果として低接触抵抗が回復する。この回復は、電気条件、通電波形、通電の大きさ、等々の電気条件に強く依存する。この汚染皮膜を防ぐために Au(金)を用いたとしても、機器部品の構成材料から放出される種々の気体 (NH_4 、 SO_2 、水膜) 等の反応によって水酸化アンモニウム (NH_4OH) 等で代表される種々の生成物が生じ接触不良に至ることが確認されている。

同様な問題にシリコン (silicone) 汚染がある。トライボロジーでは潤滑の問題である。シリコン (Silicone) 系潤滑剤やシリコンゴム等のシリコン化合物はその優れた性能から多用されているが、そこから蒸発する低分子シリコンが表面に容易に吸着する。この低分子シリコンは加熱によってたやすく分解し、最終的に SiO_2 となる。これはシリコン化合物が天然の石英 (二酸化ケイ素: SiO_2) から作られるためである。つまり、分解によって接触部間に板ガラス状や粉末状の石英が生じるので、直ちに接触不良となる。特に放電を伴うような接触部では重要となる。シリコンの分解には高温で完全に分解して SiO_2 を発生させる過程と、中温領域での酸化反応でシリコンの組成が分解重合化する過程が明らかにされている。

つぎに、表面汚染の問題から重要なコネクタ等の接触部では厚い Au がめっき用いられる場合がある。しかし、表面が清浄であればあるほど容易に凝着が生じ、stick が生じる。つまり、表面の顕著な摩耗や接触部の衝撃による開離による瞬断が生ずる。これにはやはり、適度な潤滑は必要で凝着の発生を防止する必要がある。接触部における潤滑剤の適用は重要で、AFM 等による鎖状分子の表面に対する配向を直接観測することが可能で、過熱によって配向が乱れることが判明している。現在ではコネクタ等の接触部は Au めっき等によって Sn めっきが広く用いられている。Sn めっき層では下地に対して垂直方向に対して成長するので、接触境界部において相手面より押し下げられると、めっき層は真の接触面の外周部へ向かって押し出され、うろこ状にはがれる。結果として接触不良が始まる。また、Sn めっき面には圧力がかかるとウイスキー (針状結晶) が生じて、回路を短絡させる不良が生じる。コネクタの場合は摺動接触と静止接触から構成されるので、摺動時の摩耗を減らすことが重要である。このために、下地に非常に硬い金属を用いその上に耐食性のある Au を薄くめっきすることにより、静止接触時の変形をなくして、摺動時の摩耗を低減させることがおこなわれている。この場合、潤滑剤の適応が重要である。

4. まとめ

電気接触部は接触境界部のトライボロジーの現象に電気的作用が加わり、複雑化する。ここでは、接触境界部の現象として接触抵抗を中心にしてその主だった性質を取り上げてみた。電気接触部も広い意味でトライボロジーそのものである。

文献

- 1) 玉井：電気接触現象とその表面・界面 (接触機構デバイスの基礎と応用)、コロナ社, (2019).
- 2) R. Holm: Electrical Contacts Handbook, Springer-Verlag, (1958).
- 3) P. Slade: Electrical Contacts, CRC Press, (2014).
- 4) M. Braunovic, et al., CRC Press, (2007).