

# ねじ締めによる導体接続部の発熱に関する研究（第1報）

新宮 博康・高橋 司・鷺見 哲雄

## Heat Generation on Screwed Electric Contacts (I)

Hiroyasu SHINGU, Tsukasa TAKAHASHI and Tetsuo SUMI

Heat generation on screwed electric contacts is considered to have a possibility to cause a fire. In relation to the heat generation, there are lots of phenomena such as loosening of screw, oxidation on contacts and growth of a hot zone in the junction composed of cuprous oxide. This paper gives basic data obtained through experiments related to mentioned phenomena and also gives consideration on a future study to find out preventive measures against a fire.

### 1 まえがき

ねじ締めにより導体を接続する方法は、電気のあるところどこにも見受けられるといつてよいほど広く用いられている。家庭内においても電源プラグ、コンセント、屋内配線器具、積算電力計など、身近なものの中にねじ締めによる導体接続部が存在する。そして、これらの接続部が通電中に、ときには熱をもつことがあり、日常、多くの人々がこれを経験している。また、導体接続部の発熱から火災に至る事例も報告されている<sup>1)</sup>。

導体接続部の発熱は、従来、電気接点の領域の問題として扱われてきた。そして、電気接点に関しては古くから広範囲にわたって多くの研究が行われてきた。しかし、上述のような発熱あるいは火災が現在も存在するという事実から、従来の研究はねじ締めによる導体接続部に関して、未だ、本質的に解明し尽くすところまで至っていないと判断し、この問題を新しい研究課題として取り上げた。そこで、研究対象を空气中に置かれたねじ締めによる導体接続部に限定し、ねじ締め直後から火災に至るまでの一連のプロセスの各段階での現象の解明と火災に連がる原因の排除策確立を狙った。

研究の順序として全プロセスの概略を把握することから始めたが、モデル接触子を使ってその主要な現象を一通り観察することができたので、現段階での結果をまとめて報告する。

### 2 火災に至るプロセス

ねじ締めによる導体接続部において、ねじ締め直後、すなわち、初期状態から、火災発生に至るプロセスを文献および経験を基に図1のように仮定し、このレールに沿って研究を進めることとした。

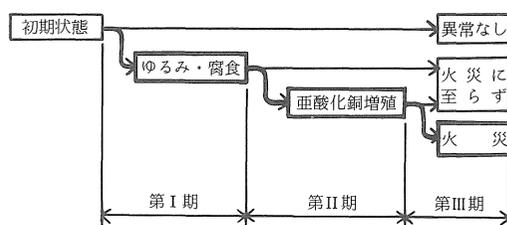


図1 火災に至るプロセス

ねじ締めによる導体接続部の大部分は初期状態とほとんど変わらない状態が維持され、異常なく使われる。一部に、ねじのゆるみあるいは腐食の発生で接触抵抗が増加し発熱するものが現われる。この段階でねじの締め直しあるいは部品交換などの対策がとられることが多いので、たいていは大事に至らない。発熱状態が放置されると、何らかのきっかけで亜酸化銅が発生し、それが増殖状態となれば周囲を加熱する。この状態になっても周囲に可燃物がなければ火災には至らないが、可燃物が存在し発火の条件が満たされれば火災発生に連がる。

以上のような仮定のもとにプロセスを便宜上、図示のように第I期、第II期および第III期と分け、第I期を接触抵抗の増加と接続部の発熱の過程、第II期を亜酸化銅の増殖過程、第III期を火災への進展過程とした。

### 3 実験方法

実験は図1の太線で示した部分の流れに従い、ねじ締め直後の初期状態から火災までを一貫して行った。図の第I期および第II期に対しては、それぞれモデル接触子を主体としてデータをとったが、現実との遊離を避けるため、実際のねじおよび家庭用電気器具に用いられる電源プラグについての実験も行って関連づけた。図1の第

表1 試料

	試料
第I期	8mmφ 銅, 7-3黄銅 平形コード用プラグ (松下WH 4415)
第II期	2mmφ 銅, 黄銅, 鉄, アルミ
第III期	2mmφ 銅 木くず(ラワン), 綿花, ビニール ナイロン, 砂糖

III期に対しては可燃物として比較的現実に近い模擬試料を用いた。表1に実験に用いた試料を示す。

モデル接触子を用いる実験では接続部に流れる電流とそこに発生する電圧の関係、すなわち電流-電圧特性を主体とし、試料の保持状態を変えて実験を行った。同時に、その電流波形および電圧波形を観測した。さらに、これらの結果から推定される表面変化を光学顕微鏡により観測した。実験は現実と一致させる意味ですべて60Hzの交流で行った。以下、実験に用いた主な装置について述べる。

### 3.1 試料保持装置

第I期の実験ではモデル接触子の接触荷重を広い範囲で調整する必要があり、同時に接触部の位置ずれが起こらぬようにすることが重要である。このため1kg~1000kgの範囲の重荷重用としては図2(a)に示す堅牢な試料保持装置を自作した。この装置での荷重測定にはロードセル(東洋ボルドウィン製CMX-2形)を用いた。1g~1000gの範囲の軽荷重用としては図2(b)に示す天秤を利用した装置を自作した。

第II期では接続部は突き合わせの形態をとった。その突き合わせ部の寸法的微調整を必要とすることから図2(c)に示すようなマイクロメータで微調可能な装置を自作した。

### 3.2 電流-電圧特性測定装置

接続部に流れる電流とその両端電圧の関係、すなわち電流-電圧特性を測定する装置として以下のものを開発した。電源には60Hzの交流電源を用いて最大500Aまで調整可能とし、電流と電圧の関係をX-Yレコーダで記録できるようにした。その回路を図3に示す。電流信号としては分流器の発生電圧を、電圧信号としては接続部の両端電圧をとり、それぞれ交流増幅をした後、整流してX-Yレコーダに入力する。この装置は電流を上げ、下げたときの途中の経過を記録することができる。すなわち、複雑な電流-電圧特性の動特性まで測定できるこ

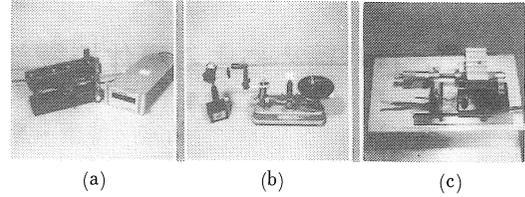


図2 試料保持装置

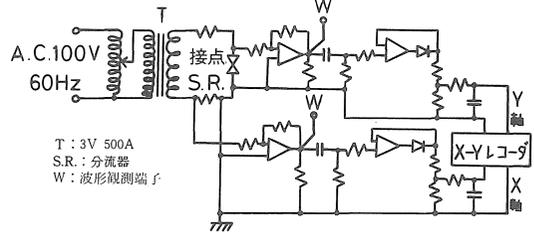


図3 電流-電圧特性測定装置

とができる。また、図3に示す波形観測端子から電圧および電流の波形の観測ができる。

なお、この装置は交流方式の抵抗測定装置としても利用でき、 $1\mu\Omega$ の分解能をもつ。

### 3.3 その他

波形観測にはデジタルメモリスコープ(日立製 $\bar{V}\bar{C}$ -6015形)を用いた。顕微鏡には(オリンパス製SZ-Tr, BH2, PM-6, EEM-7)を用いた。X-Yレコーダには(ワタナベ製WX-形, 日立製057形)を用いた。

## 4 実験結果

### 4.1 第I期関連の実験結果

最初にねじ締めによる導体接続部の初期状態を推定するデータを測定した。まず、ねじの締め付けトルクと、締め付けの結果発生する接触荷重の関係を、実際に使われている寸法のねじについて測定した。このときの荷重測定には前述のロードセルを使用した。その結果を図4に示す。つぎに、モデル接触子を用いて接触荷重と接触抵抗の関係を図2(a), (b)に示した試料保持装置を使って測定した。この測定に当たって電流は後述の軟化のような表面変化を起こさない低電流の範囲に制限した。その結果を図5に示す。図4および図5のデータからねじ締めトルクがわかればそのときの接触抵抗を推定することができる。

つぎに、モデル接触子による電流-電圧特性を観測した。モデル接触子として表1に示した直径8mmの丸棒状試料をクロスロッド法<sup>2)</sup>で使用した。接触荷重をパラメータにとり電流を増加させた後、再び元にもどしたときのX-Yレコーダの記録を図6に示す。荷重が小さくな

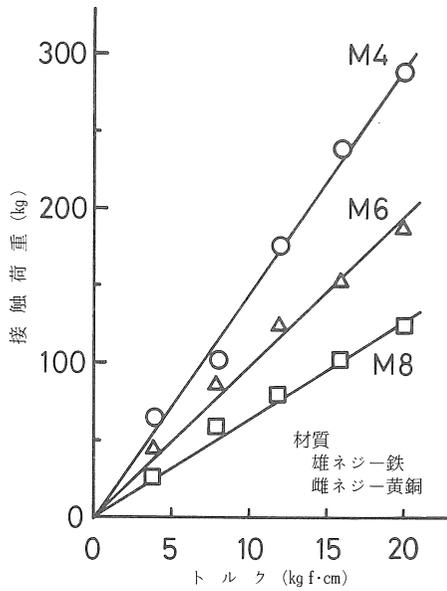


図4 ネジ締めトルクと接触荷重の関係

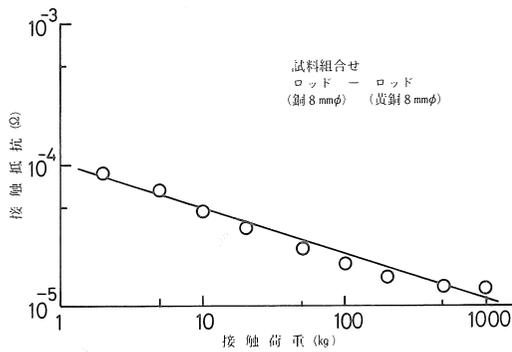


図5 接触荷重と接触抵抗の関係

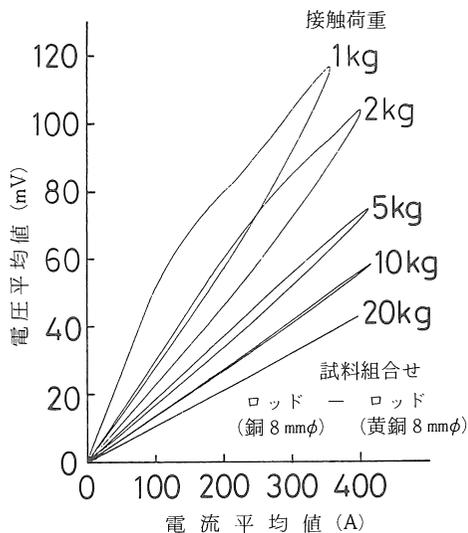


図6 接続部における電流—電圧の関係

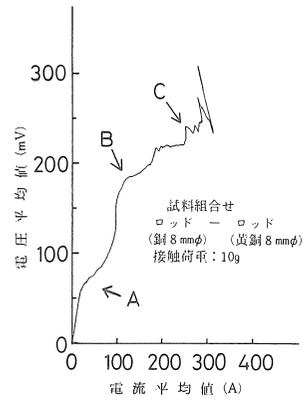


図7 接続部における電流—電圧の関係（低荷重時）

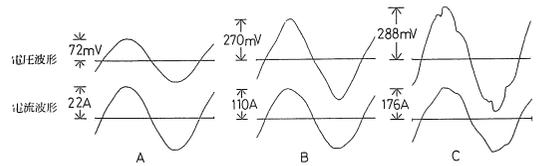


図8 図7のA. B. Cにおける電圧および電流波形(60Hz)

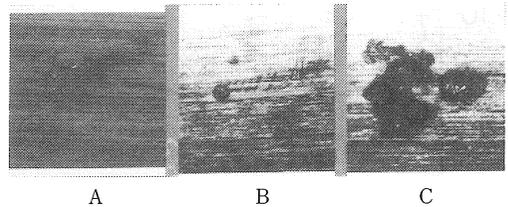


図9 表面変化写真

るとループ状の記録となるのでこの関係をさらにくわしく調べるため荷重を10gまで小さくした場合について測定した。その記録の一例を図7に示す。この場合は電流はゆっくりと増加させただけである。図7中のA点、B点、C点附近に対応する接続部の電圧波形および電流波形を図8に示す。さらに、図7の結果を基に、A点、B点、C点のそれぞれの状態まで電流を増加させた後の試料の表面変化を顕微鏡で観察した。その写真を図9に示す。図9においてA点では軟化が認められ、B点附近では溶融が認められ、C点では溶融がさらに顕著になった。B点、C点いずれにおいても酸化物が生じたものと推定される変色が認められた。

実際の接続部ではゆるみ等で荷重が徐々に減少するものと推定される。このことと図7、図8および図9の結果と関連づけるため荷重を加えた後その荷重を徐々に下げたときの接続部の電圧変化を測定した。その結果を図10に示す。荷重が10g近傍まで低下すると電圧は急増し、やがて不安定となった。

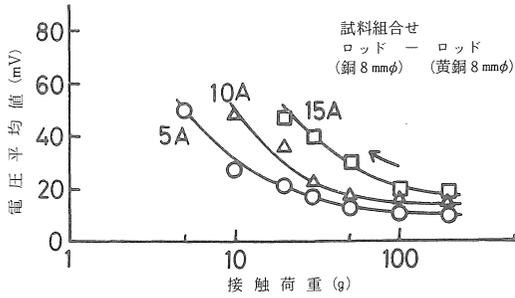


図10 接触荷重減少時の接続部における電圧

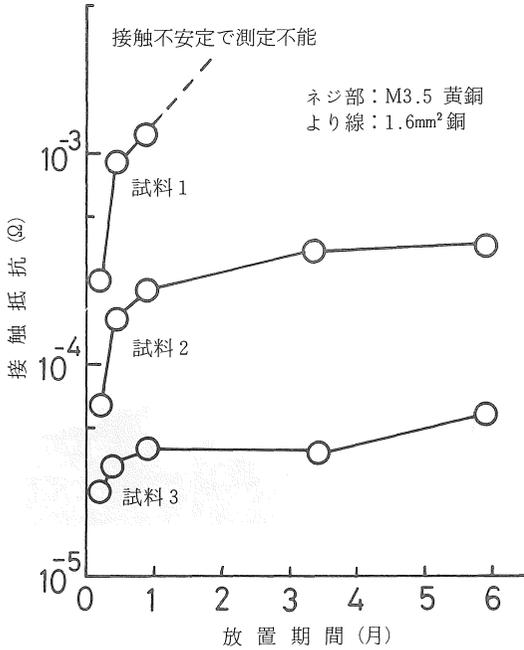
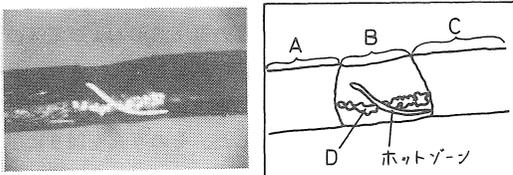


図11 接触抵抗の経時変化例  
(プラグ内のねじ締め接続部)



A, C: 試料 B: 亜酸化銅 D: 照明の反射

図12 ホットゾーン成長時の写真

以上と並行して現実との対応のために、さらにつぎの実験を行った。ランダムに抽出した50人によって電源プラグに平行ビニール電線をねじ締めによる取付けを行なわせた。その接続部の接触抵抗の経時変化を測定した。その結果を図11に示す。50の試料の結果はおよそ3グループに分かれたので図11では、その代表例を試料1、試

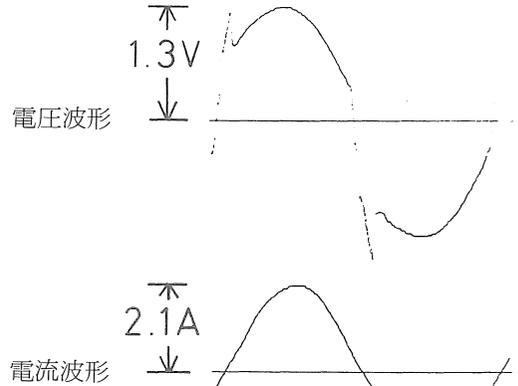


図13 ホットゾーンの電圧および電流波形

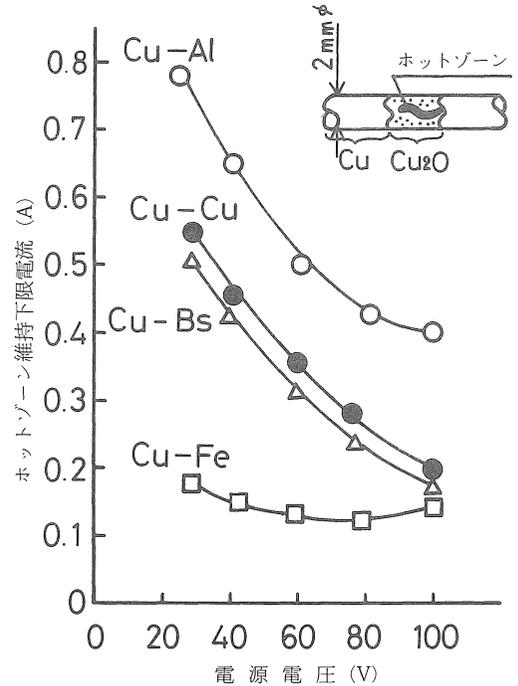


図14 ホットゾーン維持下限電流

料2、試料3で示した。試料1では途中で接触不良を起し以後の測定が不可能となった。

4.2 第II期関連の実験結果

亜酸化銅発生と増殖の実験ではAC200Vまで可変の電源を使用し、2A程度の電流が流れる負荷条件(実際の負荷としては白熱電球と摺動抵抗器を使用)で表面に酸化物の生じた接触子をμmオーダーの距離間隔で微動させた。接触子としては表1に示した直径2mmの電線用銅線などを使用した。接触子をくりかえし断続してい

表2 可燃物発火実験の結果

	木くず (ラワン)	紙	砂糖	ビニール 線被ふく	ナイ ロン
実験結果	発火	発火	発火	発火せず	発火
発火点(℃)	230~260	230	350	450	500
電源条件	電源電圧 100 V 電 流 1 A 接続部電圧 15V				

るとやがて微少なオレンジ色に輝く赤熱部が発生することを観察した。この赤熱部の発生した状態で電流を流しつづけると赤熱部は拡大成長し亜酸化銅と推定される物質を形成する。そして、この物質の表面、内部と、ところまわらず動きまわる局部的赤熱部を観察した。この局部的赤熱部を、以下、ホットゾーンと呼ぶことにする。このホットゾーンの持続により自身の寸法が成長することが認められた。電源電圧 AC100V 電流 1.5A のとき直径 2 mm の銅-銅の接触部を用いて10時間で40mmの成長結果を得た。これらの様子を示す写真を図12に、そのときのホットゾーン両端部の電圧波形と電流波形を図13に示す。

一度発生したホットゾーンは電流を下げた場合どこまで維持できるかについても調べた。銅と各種材料との組み合わせについて電源電圧とホットゾーン維持下限電流の関係を測定した。結果を図14に示す。

#### 4.3 第III期関連の実験結果

直径 2 mm の銅-銅の組み合わせによる接触部を用い長さ 2 mm までホットゾーンを成長させた状態で(電源電圧 AC100V, 電流 1 A の時)表1に示す試料の可燃物を触れさせた場合の発火の可否を調べた。その結果を表2に示す。

### 5 考察

#### 5.1 第I期について

(1) 図1で示した初期状態、すなわち、ねじ締めの直後には、図4、図5および図11の結果より推定すれば、ほとんどの場合、接触抵抗は数百  $\mu\Omega$  以下となる。したがって、この状態が維持されていれば何ら異常はおきない。

(2) ねじのゆるみ等で接触荷重が減少した場合、図6、図7および図10で示した関係から接触部に表面変化が起るものと推定される。これは発熱により表面の軟化や溶融が進行し、やがて酸化物の生成へと進むことであり、図8および図9の結果がそれを裏付けている。すなわち、接触荷重の減少で第II期へ移行する可能性が生じる。

なお、腐食が進行した場合、電路の狭小化で上記ゆる

みの場合と類似の現象を示すものと推定されるが、今回は腐食については検討しなかった。ゆるみ現象そのものについても今回は触れなかった。

(3) 図8Bに示す電圧波形の歪は電流ピーク時の温度上昇による抵抗増加が原因と推定される。したがって、この電圧波形の歪から発熱部に触れることなく直接その部位の温度を測定できる可能性も考えられる。

図7C点付近では複雑な特性を示し、図8Cに示す波形からも溶融と酸化の複雑な現象が起きているものと推定できる。

(4) Holm によれば接続部の電圧は軟化や溶融と密接な関係をもつ。今回、我々が行った実験では Holm が示した Softening Voltage および Melting Voltage の値<sup>9)</sup>より低い電圧を測定した。これは Holm の測定した当時と現在の計測技術の差ではないかと考えられる。

#### 5.2 第II期について

(1) ホットゾーンが発生すると一定の条件のもとではそれ自身が成長し亜酸化銅と推定される物質を増殖させることがわかった。図12に示すホットゾーンは、その色温度から1000℃以上と推定できる。このホットゾーンは図14で示したように電流が 1 A 以下のような低電流でも維持されるので火災の火元となることは十分考えられる。

ホットゾーン成長時の電流波形および電圧波形の関係は図13で示したように単純ではない。しかし、火災発生での主役になりうるのでホットゾーンの挙動について、今後、重点的に検討する必要がある。

(2) ホットゾーンの発生については酸化物が大きく寄与していること、接続部に水滴をたらすことにより容易に発生することが経験的にわかった。しかし、この発生条件については十分な検討ができなかったのでこれについても今後の課題としたい。

#### 5.3 第III期について

今回の実験ではホットゾーンに可燃物を直接触れさせることにより発火の可否を調べたがこの場合には表2に示したように大部分が発火している。現実的にはさまざまな状態が考えられるので、ホットゾーン周辺部の温度分布などの定量的なデータが必要となる。

### 6 あとがき

以上、述べた実験により、われわれの身辺いたるところに見受けられる「ねじ締めによる導体接続部」について、ねじ締め直後から火災発生に至るまでの一連のプロセス内の主要な現象を一通り把握することができた。その結果、冒頭で述べた、火災に連がる原因の排除策確立という究極の目標に向っての詳細な研究を進める足掛り

をつかむことができた。今回の結果より、第Ⅰ期から第Ⅱ期への移行と、亜酸化銅内の赤熱部、すなわち、ホットゾーンの挙動の解明が研究の核心になるものと推定されるので、今後、この点について重点的に検討を進める予定である。

最後に、本研究のきっかけをつくっていただいた、中部電力榎戸田五郎氏、フルエング榎神戸政治氏および平野博史氏、多くの情報を提供していただいた本学関係者に深く感謝の意を表します。

## 7 参考文献

- 1) 堀田, 北西: 電流による亜酸化銅の増殖発熱現象, 電気学会資料, ES83-1~3, 1983.
- 2) R. Holm: Electric Contacts, 4th Ed, 1967.
- 3) 高橋, 新宮, 鷺見: ねじ締めによる導体接続部の発熱に関する研究, 昭和58年電気関係学会東海支部連合大会論文集, 263.

(受理 昭和59年1月17日)