

ねじ締めによる導体接続部の発熱に関する研究（第2報）

新宮 博康・高橋 司・鷺見 哲雄

Heat Generation on Screwed Electric Contacts (II)

Hiroyasu SHINGU, Tsukasa TAKAHASHI and Tetsuo SUMI

The growth of "hot zone" is considered to be the most important phenomena related to the heat generation on screwed electric contacts as reported in the previous paper. We studied these phenomena theoretically and experimentally. The results of this study are as follows: The critical power which triggers the growth of hot zone is less than 10 watts, and the maximum power consumption on the hot zone reaches a quarter of the initial power consumption on the load.

まえがき

ねじ締めにより導体を接続する方法は各種電気機器、配電盤など産業部門で使われるものから、家電製品、屋内配線器具など家庭内で身近かに存在するものまで広範囲に用いられている。そして、これらの導体接続部が通電により発熱することがあり、多くの人がこれを体験している。さらに、この発熱が原因で火災に至った事例もある^{1),2)}。

そこで、我々は大気中に置かれた、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に至るまでのプロセスを仮定し、その各段階での現象の解明と火災につながる原因の排除策をねらった。火災に至るプロセスにしたがって、一通りの現象把握をした段階で、主たる問題は導体接続部に亜酸化銅が発生したとき、通電により亜酸化銅が赤熱を伴って増殖する現象にあることがわかった³⁾。この現象がひとたび起これば、一定の条件を満たして、通電されているかぎり、赤熱部は長時間にわたって成長しながら持続する。もし、赤熱部の付近に可燃物が存在し、発火の条件が満たされれば火災要因となりうる。

この赤熱部（ホットゾーンと名付けた）の挙動について仮説をたて、その仮説についての裏付け実験を行ったのでその結果を報告する。

2. ホットゾーンの発生および消滅に関する仮説

導体接続部に発熱や腐食などの原因で酸化物が発生することがある。接続部が銅系金属の場合、生成物質は主に亜酸化銅 (Cu₂O) である。この亜酸化銅が、ある条件下で通電路となれば、亜酸化銅は赤熱、熔融を伴って増

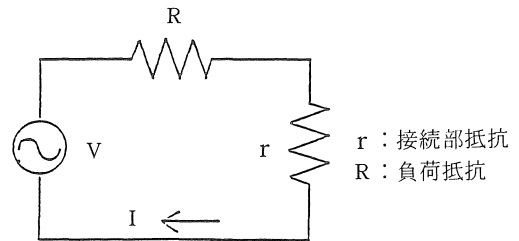


図1 等価回路

殖を開始する。すなわち、ホットゾーンが発生する。

ホットゾーンが発生する条件は、熱的、化学的、電気的條件が複雑に作用していると考えられるが、発生する熱の主要部分はジュール熱であることから以下の仮説をたてた。

図1に接続部をもつ回路の等価回路を示す。負荷抵抗をR、接続部（ホットゾーン）抵抗をr、電源電圧をV、電流をIとすれば、接続部で消費される電力、すなわち、発熱、赤熱に寄与する電力Wは次の式で表わされる。

$$W = rI^2 = r \left(\frac{V}{R+r} \right)^2 = \frac{V^2}{R} \cdot \frac{r/R}{(1+r/R)^2} \quad (1)$$

この式における V^2/R は、接続部の抵抗rが零のときの負荷の電力である。Wはr/Rの関数として表される。(1)式の関係を図2に示す。図2において、 $r/R = 1$ 、すなわち、aで曲線の勾配が正から負に変わるので電力の帰還関係もaで反転する。例えば、接続部の材質が亜酸化銅の場合、抵抗の温度係数は後述のように負であることから、 $r/R < 1$ の領域において、接続部の抵抗rが大きくなると電力Wは増加して温度上昇が起る。この温度上昇に

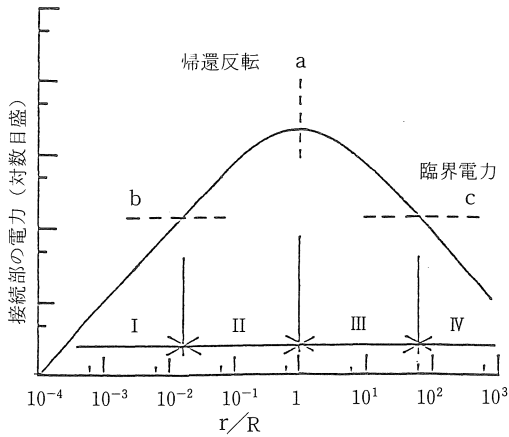


図2 接統部における抵抗と電力の関係

より r は減少する。すなわち、抵抗と電力の間に負帰還がかかる。 $r/R > 1$ の領域においては r が大きくなると W は減少して、温度下降が起り、 r はさらに大きくなる。すなわち、抵抗と電力の間に正帰還がかかる。一方、銅の場合のように抵抗の温度係数が正の場合には $r/R < 1$ の領域では正帰還がかかり、 $r/R > 1$ の領域では負帰還がかかる。

接統部にホットゾーンが発生するためには、温度がある限度を越えることが必要で、そのための最少電力が存在するはずである。これを b 、 c として臨界電力と名づけた。図2における曲線は以上の b 、 a 、 c により4つの領域 I、II、III、IV に分割される。この4領域のうちでホットゾーンが安定に存在し、成長しうるのは負帰還の領域であり、さらに臨界電力より大きいところと仮定した。すなわち、ホットゾーンはIIの領域で発生し、成長するものと仮定した。

ホットゾーンの発生と消滅のしかたを表1のように分類して考えた。発生モード1におけるホットゾーンの発生の順は次のように考えられる。領域Iで接統部のねじのゆるみが発生し接触荷重が極度に低下した場合、接触抵抗が増加し発熱する。この領域では銅の抵抗の温度係数が正のため正帰還がかかり、さらに抵抗の増加と温度上昇が加わる。そして、臨界電力 b 近傍で亜酸化銅が発生すれば領域IIに移りホットゾーンが発生する。

発生モード2は領域Iから領域IIに近づいたとき亜酸化銅が発生して領域IVに移る場合である。この領域IVで自己発熱あるいは外部から加熱されれば抵抗の減少が起り正帰還がかかる。電力が増加して、臨界電力 c を越えれば、いっきに領域IIIを通過して a を乗り越えて領域IIに移りホットゾーンが発生する。

表1 ホットゾーンの発生と消滅モード

発生モード 1	I → II
発生モード 2	I → IV → III → II
消滅モード 1	II → I
消滅モード 2	II → III → IV

消滅モード1におけるホットゾーンの消滅の順は次のように考えられる。ホットゾーンの亜酸化銅が何らかのきっかけで還元され、銅の電流路ができると、抵抗の減少によって臨界電力 b 以下となり、領域Iに移ってホットゾーンは消滅する。

消滅モード2はホットゾーンの成長あるいは冷却などにより抵抗が増加して、 a を乗り越えIIIの領域に移る場合である。領域IIIでは正帰還のためいっきに臨界電力 c 以下となり領域IVに移ってホットゾーンは消滅する。

3. 実験方法および装置

実験はモデル接触子を用い表1の仮説を追跡した。

発生モード2については端部を尖鋭にした2本の銅線の突合せで接統部を構成して、発熱部をできるだけ局所的なものとした。また、水滴を表面にたらすなどして亜酸化銅の発生を促した。

消滅モード2については二つの方法を用いた。すなわち、ホットゾーンの成長を観察し続け、ホットゾーンの自然消滅を持つ方法と成長途上のホットゾーンに水をかけるなどにより温度を低下させて抵抗を増加させる方法をとった。以上、それぞれのモードについて接統部電圧と電流を測定することにより仮説の理論曲線と比較した。なお、発生モード1は存在することは予測できるが、実験による確認は行わなかった。

実験回路は図1に示した等価回路のもので負荷抵抗 50Ω 、電源 $100V$ 、 $60Hz$ とした。モデル接触子として $2.6 \text{ mm } \phi$ 、銅線を使用した。

試料の接触方法は実際のねじ締め状態とは異なるが実験および観察の容易さから、試料を突合せ状にした。

試料保持装置はホットゾーンの発生のため微少な距離調整を必要とする。そのためマイクロメータにより試料の微動が可能なものとした。また、試料保持部はホットゾーンの発熱により高温となるので、トランジスタ用ヒートシンクを用い放熱効果を高めた。

ホットゾーンの発生から消滅まで目視観察と同時に顕微鏡観察を行ない、実体顕微鏡(ニコン SMZ-6, オリンパス SZ-Tr), 顕微鏡写真装置(オリンパス BH2, PM-6, EEM-7), 顕微鏡カラーテレビ装置(島津製)などを用いた。

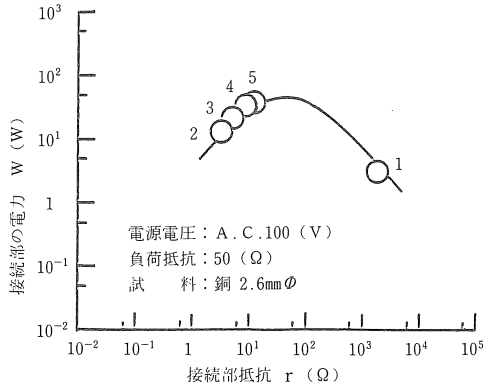


図3 ホットゾーンの発生と成長（発生モード2）

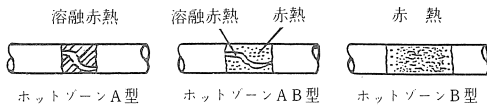


図4 ホットゾーンの三形態

4. 実験結果

4.1 発生モード2について

ホットゾーン発生前と成長の過程で順を追って、接続部の電圧と電流を測定した。測定結果より求めた接続部の抵抗と電力の関係を図3に示す。図中の番号は現象の推移を示す。また、曲線は図2で示した理論曲線を示している。

モデル接触子の断続をくりかえしていると開閉アークの熱などの発熱により亜酸化銅が発生することを観察した。常温に近い亜酸化銅は抵抗が大きいので電流はほとんど流れない。この状態で発生した亜酸化銅に少量の水滴をたらすと水に流れる電流により加熱され抵抗が減少する。このときの状態が図3の1である。引続き水滴をたらすとさらに加熱され、領域IIの2に移った。そして、ホットゾーンが発生した。このときの電力はおよそ10Wであった。発生直後のホットゾーンは非常に小さく亜酸化銅全体が熔融赤熱している。そのホットゾーンを写真1(a)に示す。

この状態を放置しておくともホットゾーンは成長しながら、抵抗および電力は図3の番号の順に移動した。3におけるホットゾーンを写真1(b)に示す。黒色を呈する亜酸化銅内に一条の熔融赤熱部がうごめいているのが観察された。4に推移したところでは3における黒色部も赤熱し、その中に熔融部がうごめくのが認められた。この状態を写真1(c)に示す。5に推移したところでは熔融赤熱部はなくなり、亜酸化銅全体が赤熱状態となった。こ

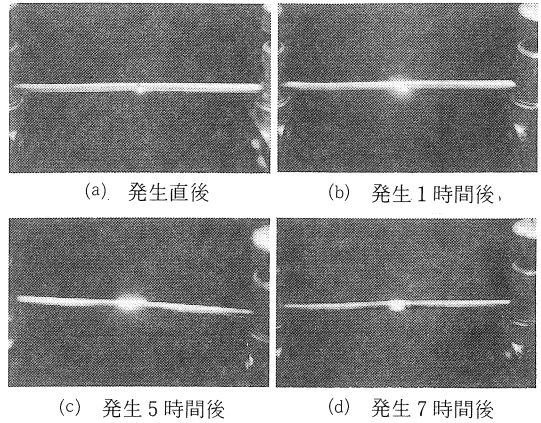


写真1 ホットゾーンの成長

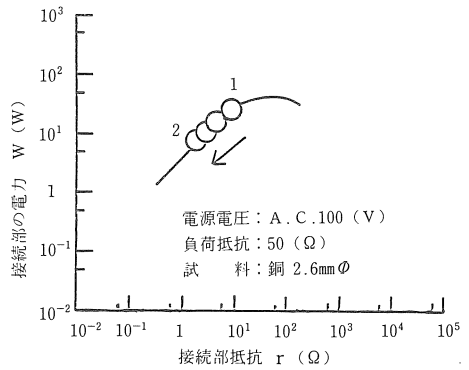


図5 ホットゾーンの消滅（消滅モード1）

の状態を写真1(d)に示す。この付近ではホットゾーンの成長は遅くなり、山形の理論曲線の頂上付近でホットゾーンの成長は停止した。

以上の結果、ホットゾーンには図4に示す三形態があることがわかったので、熔融赤熱部のみものをA形のホットゾーン、全体赤熱のみものをB形のホットゾーン、A形、B形混成のものをAB形のホットゾーンと名付けた。写真1(a)(b)はA形、写真(c)はA B形、写真(d)はB形に相当する。

4.2 消滅モード1について

ホットゾーンの成長途上、ホットゾーンをバーナの還元炎の中に入れて、接続部の電圧および電流を測定した。その結果からホットゾーンの抵抗と電力の関係で示したのが図5である。曲線は理論曲線を示し、番号は状態の推移を示す。還元炎にさらされた亜酸化銅は銅に還元され、これが電流路となり、図4の1から2に移りホットゾーンは消滅した。

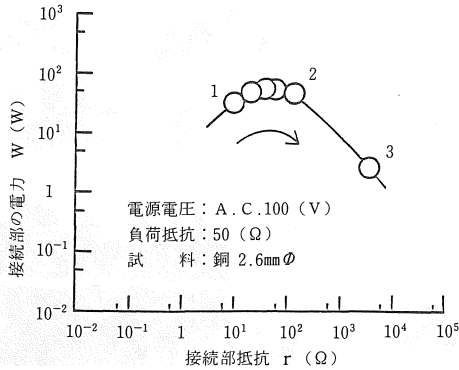


図6 ホットゾーンの消滅（消滅モード2）

4.3 消滅モード2について

ホットゾーンの成長途上、水をかけて冷却したときの接統部の電圧と電流を測定した。その結果からホットゾーンの抵抗と電力の関係を示したのが図6である。水で冷却されると亜酸化銅の抵抗が増加するため、図5の1から理論曲線の頂上を越えて2に移り、急速に3に推移してホットゾーンは消滅した。

5. 考察

(1) 2で述べた、接統部の挙動に関する仮説が正しいことを実験的に立証できた。その結果、導体接統部の発熱現象について定量的予測が可能となった。

(2) 実験結果よりホットゾーン発生のための最小電力、すなわち、臨界電力は10W以下と推定されること、また、ホットゾーンの電力の最大値はホットゾーン発生前の負荷で消費していた電力の1/4に達することが確認された。例えば、100Wの負荷に対してホットゾーンの電力は25Wに達するので、火災要因となりうる。

(3) ホットゾーンの成長には三つの形態があることが確認された。このことによりホットゾーン現象の解明がこれまでとは別の角度からも開かれるものと考えられる。

6. あとがき

以上、述べた実験によりねじ締めによる導体接統部の発熱現象の核心であるホットゾーンについて現象の解明が進み、火災につながる原因の排除策確立という究極の目的に向けて研究を進める展望が開けてきた。今後、ホットゾーンの発生、成長のメカニズムについては材質の組合せ、負荷および電圧等の条件を変えてさらに検討を進めたい。

最後に、付録に述べるホットゾーン生成物の確認のた

めの成分分析に当り、多大の労をわずらわした本学土木工学科、森野圭二助教授に深く感謝の意を表わします。

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 ES-83-1~3, 1983
- 2) 真野国夫: 接触部の信頼性, 総合電子出版, 1977
- 3) 新宮, 高橋, 鷲見: ねじ締めによる導体接統部の発熱に関する研究, 愛知工業大学“研究報告” No.19, 1984
- 4) 高橋, 新宮, 鷲見: ねじ締めによる導体接統部の発熱に関する研究, 昭和58年度電気関係学会東海支部連合大会263, 1983
- 5) 高橋, 新宮, 鷲見: ねじ締めによる導体接統部の発熱に関する研究—発熱時の表面変化, 昭和59年度電気学会全国大会201, 1984
- 6) 新宮, 高橋, 鷲見: ねじ締めによる導体接統部の発熱に関する研究—亜酸化銅内の赤熱部について, 昭和59年度電気学会全国大会202, 1984
- 7) 高橋, 新宮, 鷲見: ねじ締めによる導体接統部の発熱に関する研究—赤熱部の発生, 成長および消滅, 昭和59年度電気関係学会東海支部連合大会213, 1984
- 8) 新宮, 高橋, 鷲見: ねじ締めによる導体接統部の発熱に関する研究—赤熱部の挙動観察, 昭和59年度電気関係学会東海支部連合大会214, 1984
- 9) 新宮, 高橋, 鷲見: ねじ締めによる導体接統部の発熱に関する研究, 電子通信学会, R84-58, 1985

付録

I. ホットゾーンで生成される物質

ホットゾーン生成物は、常温にもどったとき、黒色光沢から灰色光沢をもつ酸化物である。これを割って、断面を光学顕微鏡で観察すると、ガラス状の赤色ルビー色様の結晶や赤褐色の部分が見られる。この生成物の成分分析をX線分析により行った。標準試料として、酸化銅（米山薬品工業製）と亜酸化銅（米山薬品工業製）を用いた。その結果、ホットゾーン生成物には酸化銅が微量ながら認められるが、生成物のほとんどが亜酸化銅であることが確認できた。分析結果を図7に示す。

II. 亜酸化銅の抵抗—温度特性

ホットゾーン生成物の抵抗—温度特性を調べるに当たっては、生成されたそのままの状態での測定することが重要と考えた。そのため、特別に測定用小形電気炉を自作して、温度の測定はアルメル—クロメル熱電対により、抵抗は電位降下法により測定した。試料は10種類について測定した。その結果の一例を図8に示す。横軸に温度を、

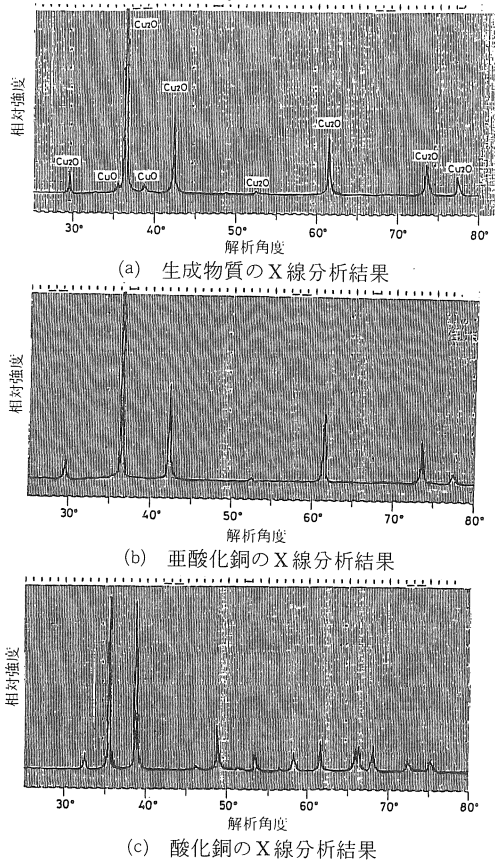


図7 X線分析の結果

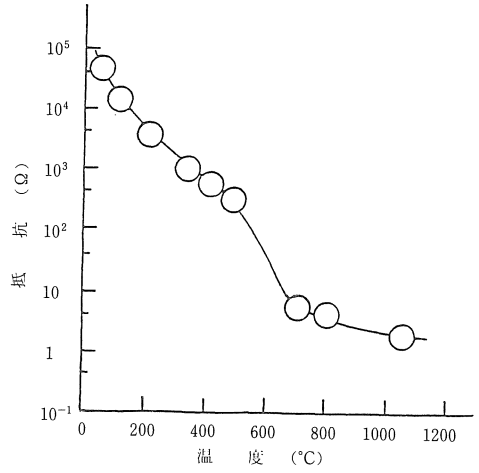


図8 生成物質の抵抗-温度特性の一例

縦軸に抵抗を対数で示したものである。その結果、抵抗の温度係数は負であること、500℃～700℃の間に急激な抵抗の変化をもつことがわかった。なお、今回の測定では一様加熱ということから高温域ではホットゾーンのB形の状態といえる。

(受理 昭和60年1月30日)