

亜酸化銅増殖発熱現象の火災調査方法

神戸市民防災総合センター

研究担当 澤田 邦彦

キーワード：亜酸化銅増殖発熱現象，研磨，内部観察

1. はじめに

通電状態の銅製品がスパークなどの高温加熱を受けた時に、銅の一部が酸化して亜酸化銅となり、その部分が異常に発熱しながら徐々に拡大して火災の原因になる。この現象は「亜酸化銅増殖発熱現象」と呼ばれている¹⁾。電気が通電している状態でなければ発熱することはないが、2 A 程度の小さな電流値であっても、周囲の可燃物を着火させることができるため危険な現象である。

銅合金の接続部など、接触不良を起こす箇所であれば、どんな場所でも発生する可能性があるため、決して珍しい火災原因ではない。

亜酸化銅の鑑識方法については、専門的な知識や装置を要することが多く、亜酸化銅の増殖発熱現象が起きたことを科学的・客観的に証明していくことは、決して容易なことではない。また、亜酸化銅の増殖発熱現象に関する研究は、数多く報告されているが、亜酸化銅の鑑識方法について詳しく書かれている文献²⁾は少なく、火災原因の調査を難しくしている。

そこで、より簡便な方法により亜酸化銅増殖発熱現象が起きたことを証明できないか、実際に火災原因となった物品を用いて検証を行った。

2. 亜酸化銅の確認

亜酸化銅の存在を確認するには、主に下記のような方法がある。これらの方法が実際の火災現場から発見された物品に適用できるか検証を行った。

- 研磨による内部観察
- 抵抗値の測定
- 光学顕微鏡による観察
- エネルギー分散型X線分析装置付電子顕微鏡による観察（以下単にX線分析装置付電子顕

微鏡と記す。）

2.1 研磨による内部観察

亜酸化銅増殖発熱現象を立証していくには、ただ亜酸化銅を見つければ良いというものではない。なぜならば、火災発生後の試料は、著しく表面が腐食している場合が多く、経年劣化や火災による腐食によって発生した亜酸化銅である可能性も考えられるためである。より線の銅線の場合は、素線と素線の間にも腐食などの理由により亜酸化銅が発生してしまう。また、銅は淡水中においても、腐食によって亜酸化銅被膜を生成し赤褐色を呈することが知られている³⁾。

従って、亜酸化銅が増殖発熱現象によって生成したことを確かめるためには、表面腐食の影響を受けていない内部の状況を確認する必要がある。

観察方法については、**写真1**のように、試料を樹脂の中に埋め込み、水で濡らした耐水研磨紙を使って、表面を削っていく。一度削り取ってしまった部分は、元に戻すことができないので、削り取るごとに断面の写真を撮影する。粒度の異なる3, 4種類の研磨紙（#220～1500程度）を使い分けると研磨しやすい。

内部状況を確認すると、表面は著しく腐食をしている銅合金であっても、内部までは腐食しておらず金属光沢が認められることが多い。金属光沢を呈している部分は亜酸化銅ではないので、金属光沢を呈していない部分に着目して観察する。

写真1は亜酸化銅が発生したプラグ差し刃の表面を研磨した状況であるが、黄金色をした黄銅の一部に、暗赤色の亜酸化銅の塊が認められる。

このように、試料を少しずつ削り取りながら、その断面に亜酸化銅が存在するかを確認することによって、亜酸化銅の位置と大きさを把握するこ

とができる。これは、亜酸化銅が発生した原因を追究していく上で重要なことである。亜酸化銅が発生した詳しい位置が分かれば、亜酸化銅発生の原因究明に役立つことができるからである。

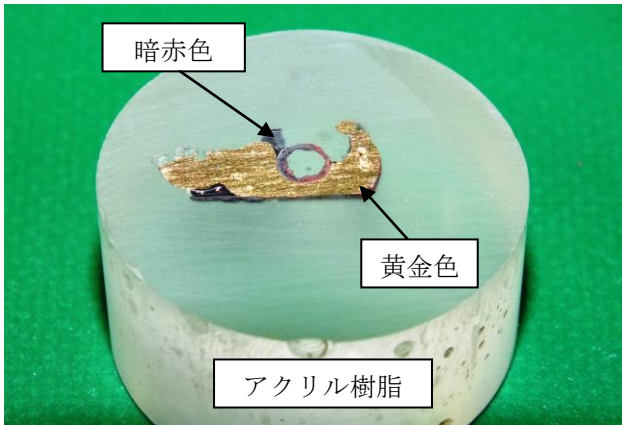


写真1 樹脂に埋め込んだプラグ差し刃

(1) 長所

表面腐食の影響を受けにくい、内部の状況を確認することができる。また、研磨した断面を詳細に写真撮影することによって、内部に増殖した亜酸化銅の位置や大きさを正確に知ることができる。

(2) 短所

硬化性樹脂と研磨紙が必要となる。研磨機があれば作業が早いですが、回転式の研磨機がない場合は、研磨に労力を要する。

(3) 問題点

研磨によって試料が失われてしまうため、観察後に試料を保存することができない。

2.2 抵抗値の測定

一般的に導体部の銅及び銅合金は、温度が上昇すると、抵抗値も大きくなる性質を持っている。それに対し、亜酸化銅は温度が上昇すると抵抗値が著しく小さくなる性質を持っているため、温度による抵抗値の変化を測定することによって、亜酸化銅の存在を確認することができる。抵抗値の温度変化を測定する際は、常温において数 $k\Omega$ から数 $M\Omega$ を示す場所を測定するとよい。

図1 はプラグの差し刃に発生した亜酸化銅の抵抗値を測定した結果である。たった数十 $^{\circ}C$ の温度変化においても、顕著に抵抗値が負の温度依存性を示すことが分かる。

測定方法については写真2のように、プラグの差し刃をワニグチクリップで挟み、距離1cmの抵抗値をテスターにより測定した。

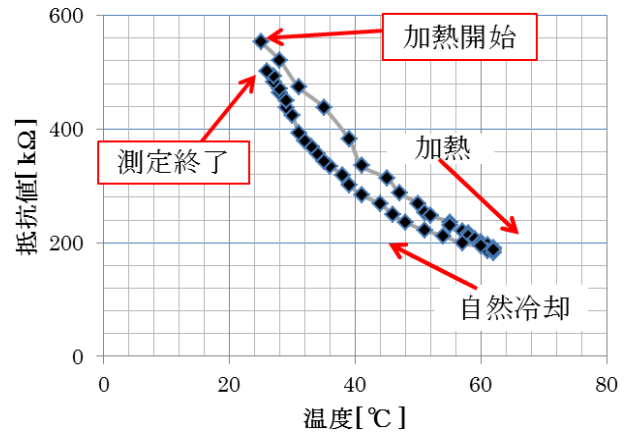


図1 温度による抵抗値の変化



写真2 抵抗値の測定状況

(1) 長所

テスターや半田ごてなどの簡単な資機材を用いて、調べることができるので、研究室に持ち帰ることなく、現地にて測定することも可能である。

(2) 短所

火災発生後の試料は表面が腐食している場合が多く、テスターで抵抗値を測定する場合、押さえる手の力加減で抵抗値が変化してしまう。ゆえに、亜酸化銅の塊がワニグチクリップ等で固定をできる程の大きさを有していなければ、抵抗値が安定しないため測定が難しい。

(3) 問題点

火災発生後の試料は、著しく表面が腐食している場合が多く、経年劣化や火災による腐食によって発生した亜酸化銅である可能性も考えられるため、注意が必要である。

2.3 光学顕微鏡による観察

亜酸化銅を細かく砕き、その微粒子を顕微鏡で確認すると、ルビーのように赤く見えるのが特徴である。亜酸化銅はガラス質であるので、ペンチ等では簡単に砕くことができる³⁾。接触不良によって発熱した配線表面を顕微鏡で観察すると、接触不良を起こしていた部分に多数のルビー色をした亜酸化銅が認められることがよくある。

(1) 長所

直接目視により観察することができるため、亜酸化銅の発生している位置を正確に確認できる。

(2) 短所

純粋な亜酸化銅は赤いルビー色を呈しているが、増殖発熱現象を起こした後の亜酸化銅を顕微鏡で観察すると、黒または黒味を帯びた赤褐色を呈していることが多く、顕微鏡観察だけでは亜酸化銅であるか否かの判別は難しい。ただし、金属顕微鏡により偏光観察をすると、赤いルビー色をより際立たせることができる。

(3) 問題点

写真3は焼損した浴室換気乾燥機内から発見された感温ペレット型温度ヒューズである。亜酸化銅増殖発熱現象が起きたと推定される温度ヒューズの表面を数ミリ削り取り、内部の状況を観察すると、黒色を呈している。

火災発生後に残存している亜酸化銅は、腐食していることや、周囲の物質を取り込んでいることが多く、赤褐色をしていないからといって、亜酸化銅ではないという訳ではない。

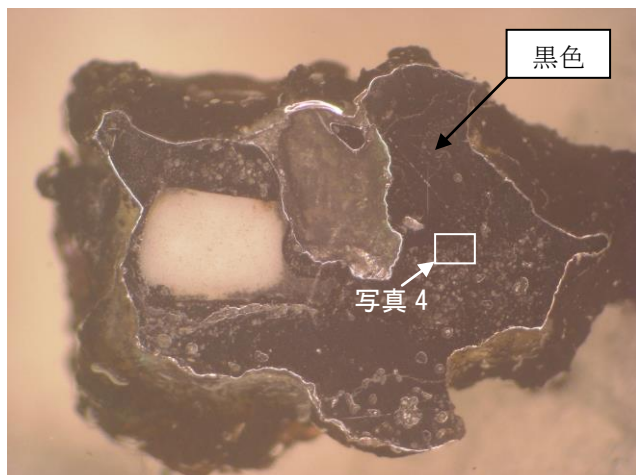


写真3 温度ヒューズの光学顕微鏡写真

2.4 X線分析装置付電子顕微鏡による分析

材質が不明な試料であっても、X線分析装置付電子顕微鏡を用いると、試料に含まれる金属元素の種類や分布状況を調べることができる。

電子顕微鏡により、写真3の白枠内を撮影したものを写真4に示す。試料中には銅以外の元素も多数含まれているため、銅以外の金属元素が少ない領域を意図的に選び、写真4の白枠内を分析領域に設定し、X線分析装置により分析を行った結果を図2に示す。図2の縦軸はX線強度で、最も高いスペクトルの高さは11255 Countsである。

X線分析装置付電子顕微鏡を用いて、写真3の温度ヒューズを調べると、黒色を呈しているところの大部分は銅の酸化物であることが分かる。また、その他では鉄などが多く含まれている箇所もあり、周囲のステンレス材も溶融している。

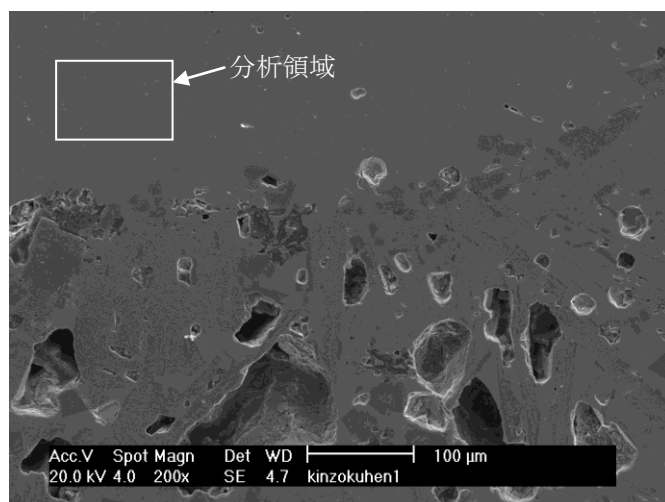


写真4 温度ヒューズの電子顕微鏡写真

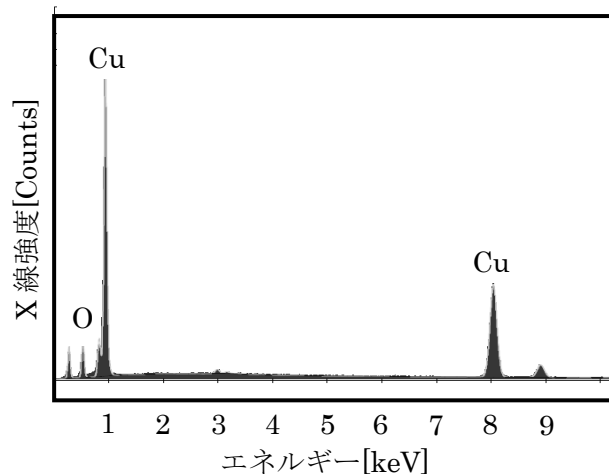


図2 X線分析装置の解析結果

(1) 長所

試料の材質が全く不明な場合であっても、その試料を破損することなく、金属元素の種類を調べることができる。

(2) 短所

専門的な知識と装置を必要とするほか、装置や試料によっては、特殊な前処理を必要とする。写真4は試料表面にカーボンを蒸着した後に、電子顕微鏡による撮影を行っている。

(3) 問題点

X線分析装置により亜酸化銅が確認できたとしても、腐食や火災時に発生した亜酸化銅かどうかは識別できないので、X線分析装置の結果のみから増殖発熱現象が起きたことを証明することはできない。

3. 亜酸化銅増殖発熱現象の再現

亜酸化銅を発見すれば、次にその亜酸化銅が増殖発熱現象を起こすか否かを確認しなければならない。たとえ亜酸化銅が認められたとしても、それが亜酸化銅増殖発熱現象によって生成したとは言えない。増殖発熱現象を確認する最も簡単な方法は、実際に電流を流してみることである。

亜酸化銅の増殖発熱現象は、2 A 程度の電流を流すと、赤く光っている部分が、あたかも小さなイモムシが地面をはうように忙しく動きながら、増殖発熱現象を起こすことが知られており、大きな特徴のひとつである⁴⁾。

火災時に実際に流れていた電流を流し、異常な発光が認められることを再確認することは、重要なことである。亜酸化銅増殖発熱現象を再現することによって、増殖発熱現象を起こす亜酸化銅であることを立証することができる。

図3のような装置を用いて、100 W の電球を1つ又は2つ並列につなぎ、1~2 A 程度の電流を、亜酸化銅と思われる部分に通電させる。

亜酸化銅の塊が非常に小さい場合は、2 A の電流であっても、亜酸化銅が火花とともににはじけ飛んでしまうことがあるので、低い電流値から始めなくてはならない。

増殖発熱現象が起きた後の亜酸化銅が残存していれば、電流を流すと数秒以内に赤く光ることが大半であるが、抵抗値が大きい場合は、通電後1分以上経過して、赤く光ることもある。

ただし、銅線接触時において、通電に伴い発生するスパークによって、本来亜酸化銅が存在しない箇所にも、亜酸化銅が生成する可能性があるため、亜酸化銅と思われる部分と銅線を通電前に接触させておき、電流の通電と遮断はブレーカーなどその他の接点で行う。試料の形状により可能であれば、銅線と試料をワニグチクリップ等で固定した上で、通電させても良い。

また、接触させる銅線の先端は、実験毎に切断し、先端に亜酸化銅が付着していないようにする。

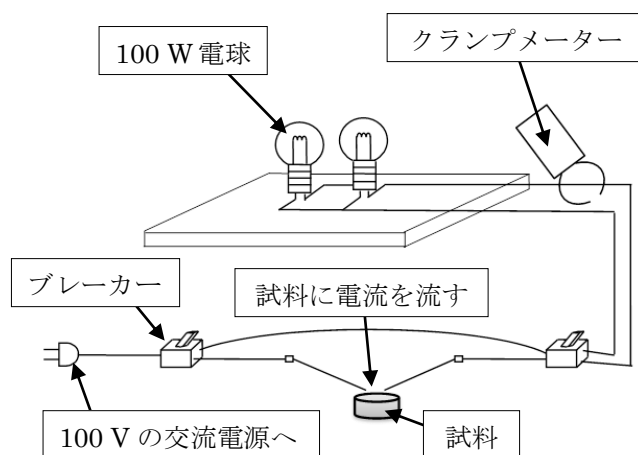


図3 亜酸化銅の増殖発熱現象を確認する装置

写真5は、図3のような装置を使って火災原因となった3口タップの導体部に約2 A の電流を流した時の状況である。可動式差し刃のワッシャの一部が赤く光っているのがよく分かる。

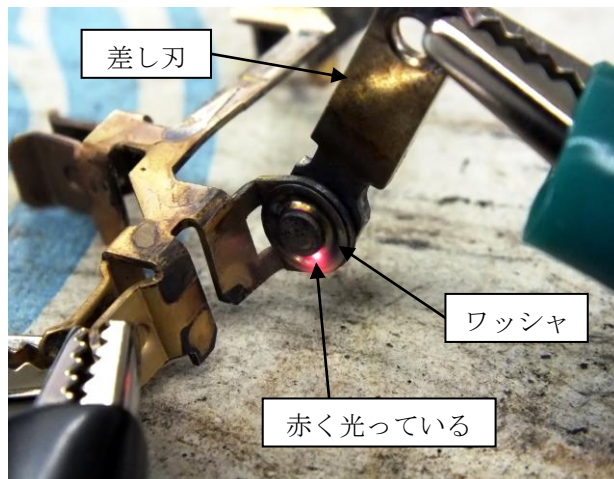


写真5 赤く光る3口タップの一部

また、100 W 電球を使った装置が手に入らない場合は、100 W 電球を 100～200 W 程度の電化製品で代用することもできる。ドライヤーの冷風モードを利用すると、風量の強弱によって、簡単に電流値を変化させることができるので、使い勝手が良い。

(1) 長所

実際に亜酸化銅増殖発熱現象を再現することができれば、発生部位を直接目視で確認することができ、写真撮影も可能である。

(2) 短所

火災原因を調査していく上で重要な試料が、電流を流すことによって変質する。

(3) 問題点

写真 5 のように金属板に覆われている内部で赤く光っている場合は、光の動きを観察しにくい。

また、写真 6 のように、試料表面の腐食が著しい場合は、1～2 A の電流を流すと、火災の原因とは無関係に、赤い発光が認められる場合があるので注意が必要である。特に、鉄製品の表面が赤く錆びているような箇所は、1～2 A の電流を流すことで、高い確率で赤い発光が認められる。



写真 6 腐食したネジ表面の赤い発光

4. 亜酸化銅増殖発熱現象の鑑識方法

顕微鏡やX線分析装置付電子顕微鏡といった研究機関の所有する最新の機器を用いながら、科学的に火災原因調査を進めていくことは、大変重要なことである。しかし、すべての試料をそのように調べることは困難である。亜酸化銅による火災を見逃さないためには、消防機関による最初の調査段階で、亜酸化銅増殖発熱現象が起きた可能性

を、認識することが重要になってくる。

そこで、特別な装置や知識を用いなくても可能な亜酸化銅増殖発熱現象の鑑識方法について紹介する

4.1 現場鑑識

火災で焼けた数多くの物品の中から、小さな亜酸化銅を見つけ出していくためには、電気の流れる導体部に、局所的な発熱により、溶融・変形・変色をした箇所がないかを見つけることである。特に、接続部などの接触不良が起きやすい場所に発生しやすいが、温度ヒューズの内部といった意外なところにも、接触不良が起きる可能性がある。また、火災熱を受けた銅線は、表面が一様に赤く変色していることがあるが、これは火災による受熱や放水による冷却によって生成されたものである可能性が高いため、注意が必要である。

4.2 総合的な鑑識方法の提案

前述したように、亜酸化銅の存在を確かめる方法は数多く存在するが、亜酸化銅増殖発熱現象の発熱により火災が発生したことを立証するためには、その亜酸化銅が腐食や火災によって発生したものではないことを確認する作業が必要となる。

従って、試料表面に生成している亜酸化銅は、腐食や火災熱による発生の可能性を拭えないため、内部の状況を確認していくことが必須となる。

亜酸化銅の疑いがある試料は、表面を詳細に観察及び記録した後、表面に付着している煤や汚れをブラシで丁寧に落とし、温度の違いによる抵抗値の変化を測定する。試料の大きさが小さすぎる場合や、腐食によりもろくなっている等の理由により、抵抗値を測定できない場合は実施しない。

写真 5 のように、表面が腐食しておらず亜酸化銅が発生したと思われる部分が接続された状態であり、電流を流すことによって、火災発生時の状況を再現できるような場合は、1～2 A の電流を流し、亜酸化銅増殖発熱現象を確認する。

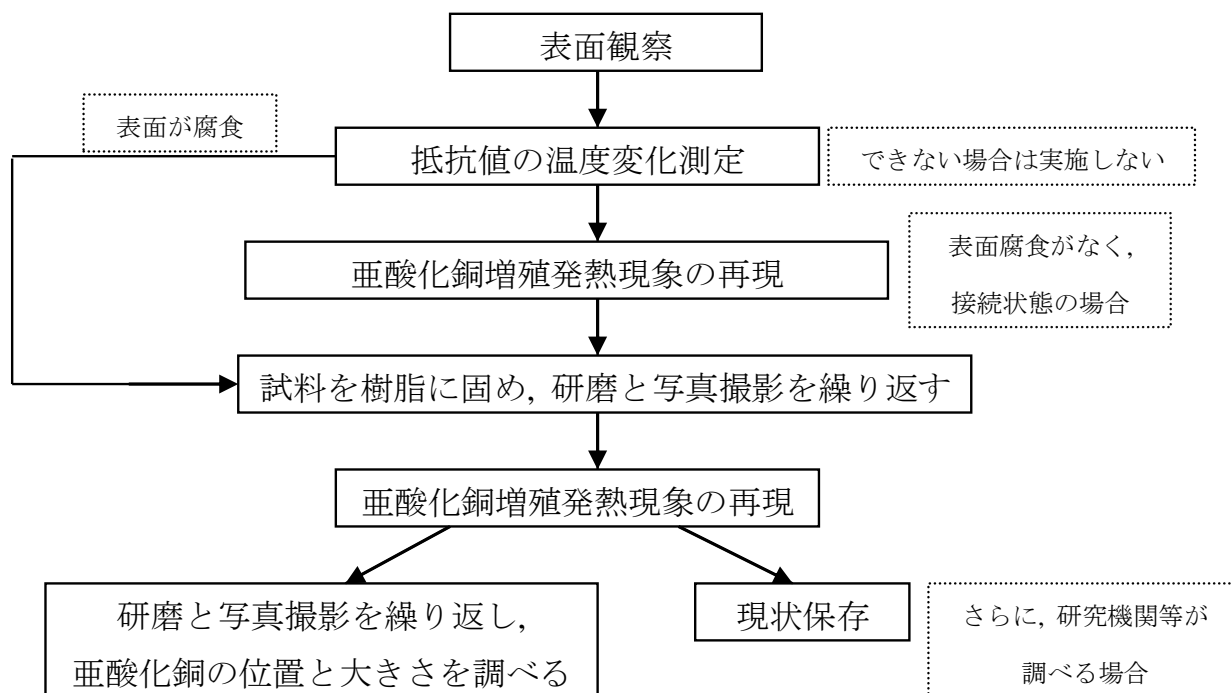


図4 鑑識方法のフローチャート

次に、試料を樹脂の中に固め、研磨をしながら断面の写真を撮影する。そして、金属光沢を示さない黒色や赤褐色に近い色を呈する塊があれば、1～2 A 程度の電流を流し、亜酸化銅増殖発熱現象が再現できるかを確認する。発光を確認できれば、発光を起こした塊の位置と大きさを記録しながら研磨する。また、X線分析装置付電子顕微鏡などを用いて、さらに専門的な機関が調べる場合は、試料が錆びないように、乾燥させた状態で保存する。

これらの鑑識工程を分かりやすくするために、図4にフローチャート形式で示す。

5. 鑑定事例

ここで、亜酸化銅に関する鑑定事例について紹介する。

5.1 断線した3ロタップ

鑑定物品は3ロタップ（1検体）である。ここで、写真7のように、3ロタップの断線したコードを「3ロタップのコード」、3ロタップに差し込まれているプラグを「プラグ」とする。



写真7 鑑定物品の状況

ここで、3口のタップのうち2口の受け刃がある面を表面とする。さらに、3ロタップを表面から見てプラグ側を東側に置いた時の状態を基準にして、写真8のように「北側」及び「南側」と定めて見分を行う。

3ロタップ表面を見分すると、プラグが差し込まれている面から約3 cm までは黒く変色し、約3 cm から約6 cm の間は黒く炭化している。約6 cm 以上の範囲においては、北側が黒く炭化しているのに対し、南側の大部分は残存していない（写真8参照）。

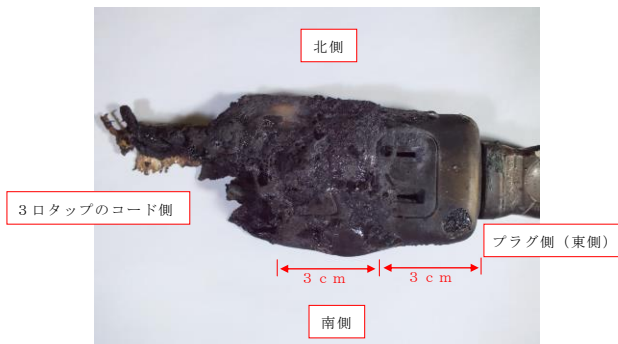


写真 8 3 ロタップ表面の状況

3 ロタップ裏面を見分すると、プラグが差し込まれている面から約 3 cm までに変色は認められず、約 3 cm から約 6 cm の間は淡い褐色に変色している。約 6 cm 以上の範囲においては、北側が黒く炭化しているのに対し、南側の大部分は残存していない（写真 9 参照）。



写真 9 3 ロタップ裏面の状況

X線透過装置を用いて 3 ロタップ内部の状況を見分すると、3 ロタップとコードの接続部付近において断線し、断線部付近には飛散した電気痕が多数確認できる（写真 10 参照）。

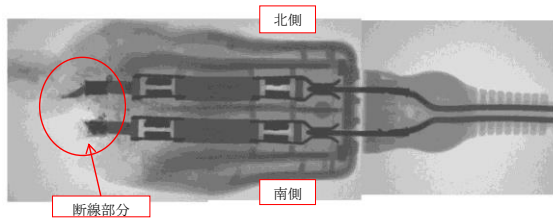


写真 10 3 ロタップの X 線画像

3 ロタップに差し込まれているプラグを抜き去り、3 ロタップのカバーを切断し内部の状況を見分すると、プラグ及び受け刃の金属部品に熔融痕はなく、断線部以外に電気痕は認められない。また、受け刃の金属部品と 3 ロタップカバーの樹脂

が接している面を見分すると、南側は接している全面が黒く炭化しているのに対し、北側は大部分が黒く炭化しているものの一部樹脂の原色（青色）が残存している（写真 11 参照）。



写真 11 3 ロタップ内部の状況

3 ロタップ受け刃の金属部品のみを取り出して見分する。受け刃金属部品の断線部付近に付着している付着物をブラシで取り除き裏面より見分すると、北側は圧着部より 3 mm から 5 mm にかけて断線しているのに対し、南側は圧着部先端において断線している。また、南側圧着部の一部が熔融しているのに対し、北側圧着部に熔融は認められない（写真 12 参照）。

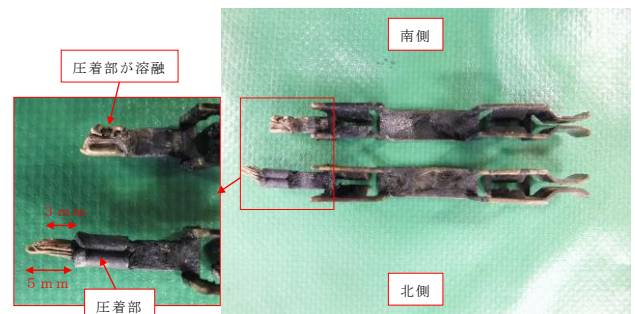


写真 12 裏面から見た受け刃の状況

北側受け刃に圧着されているより線の断線部を顕微鏡により見分すると、より線一本一本の先端部の大部分に球状の電気痕が確認できる（写真 13 参照）。

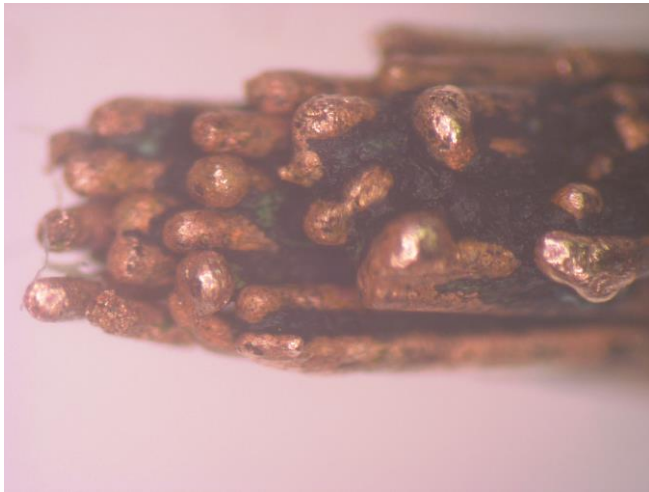


写真 13 北側断線部の顕微鏡写真

南側受け刃に圧着されているより線の断線部を顕微鏡により見分すると、断線部のより線は溶融し、断線部断面に赤いルビー色をした亜酸化銅が確認できる（写真 14 参照）

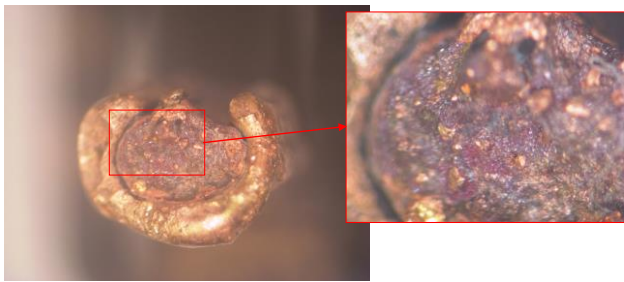


写真 14 南側断線部の顕微鏡写真

また、南側断線部断面に約 2 A（通電時約 100 V・約 2 A の交流電流）の電流を流したところ、直ちに亜酸化銅増殖発熱現象の継続が確認された（写真 15 参照）。

（写真 15 参照）。

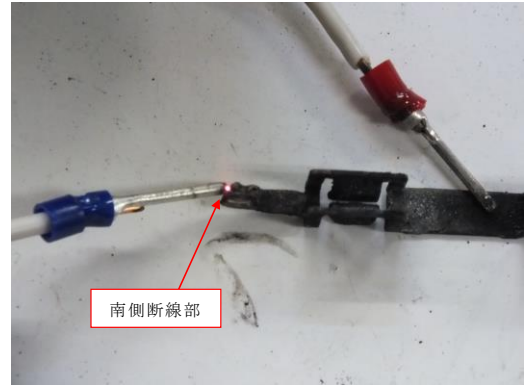


写真 15 亜酸化銅が発熱している状況

次に、3 ロタップのコードを見分すると、一箇所に断線が認められ、断線部周囲の被覆は炭化している（写真 16 参照）。



写真 16 3 ロタップのコードの状況

また、断線部を X 線透過装置により見分すると、断線部先端に短絡痕が確認できる（写真 17 参照）。



写真 17 3 ロタップコードの断線部の X 線写真

5.2 鑑定結果からの考察

この3口タップからは、半断線の特徴である「素線の先端にできた複数の溶融痕」、亜酸化銅増殖発熱現象の特徴である「ルビー色をした亜酸化銅」、及びコードがショートした際にできる「短絡痕」が認められる。このように、電気火災は様々な要因が複雑に進行し発生している場合が多い。

出火原因については、3口タップの見分結果のみからは、これ以上のことは分からない。従って、「半断線」や「短絡」が起きた原因については、この3口タップが使用されていた状況などを総合的に判断していくことが非常に重要となってくる。

総合的な判断によってはじめて、火災の原因を究明し、火災予防に役立てていくことができるのである。

6. まとめ

亜酸化銅増殖発熱現象に関する鑑識方法の認知度は高くなく、火災現場での原因調査において、亜酸化銅を見逃してしまう危険性をはらんでいる。

亜酸化銅増殖発熱現象による火災を立証するためには、その他の火災原因調査と同様に、周囲の焼けた状況を客観的に調べることにより、出火した箇所を特定していくことが必要である。金属の溶融や樹脂の炭化度合などから、亜酸化銅が局部的に発熱していたかどうかを見極める。

そして、亜酸化銅の表面及び内部の状況を観察し、亜酸化銅の塊が増殖発熱現象によって発生したものであるか確かめる。従って、少し労力を要するが、研磨による内部観察が必須となる。内部の亜酸化銅の大きさや位置を詳細に調べることで、亜酸化銅増殖発熱現象が発生した原因を追究していくことができる。

ただし、たとえ亜酸化銅が認められたとしても、その亜酸化銅が発生した原因が、「ネジの緩みによる接触不良」なのか、或いは「半断線によって生じる微小なスパーク」なのか、「雨水による腐食によって生じた」のかを突き止めることができれば、再発防止のための処置方法を指導することは難しい。

亜酸化銅による火災の原因を調査していくには、

亜酸化銅の塊のみから出火の可能性を議論することはできず、亜酸化銅とその周囲の状況から総合的に判断していくことが重要である。

その上で、亜酸化銅増殖発熱現象について、前述の鑑識方法が少しでも火災の原因究明に役立てば幸いである。

7. 参考文献

- 1) 東京防災指導協会:新火災調査教本 第3巻 電気火災編, p.6, 東京法令出版, 1999.
- 2) 西脇高志:「亜酸化銅増殖発熱現象」と「ポットティング材からの炎」について、『平成23年度製品安全センター 製品安全業務報告会』資料, 2011.
- 3) 藤井哲雄:目で見てわかる 金属材料の腐食対策, 日刊工業新聞社, p.117, 2013.
- 4) 名古屋市消防局消防研究室:写真で見る 電気火災調査要領, p.36, 1986.
- 5) 堀田悦博:亜酸化銅増殖発熱現象について, 火災, Vol.24, No.1, pp.52-58, 1974.