

配線短絡痕の解析手法

Analysis Techniques for Shorted Arc Beads of Electric Wiring

セイコーエプソン
楠本化成

荻原 慎吾¹⁾
廣岡 知之³⁾

熊谷 克也²⁾
井原 惇行⁴⁾

Electrical-fire probe is very difficult because most of the material evidences are burned out. At present, effective technique for fire probe is gathering the shorted arc beads that were left in the fire spot and examining crystal condition of the internal section by a metallographic microscope or a SEM (Scanning Electron Microscope). Although this technique enables us to identify whether the shorted arc bead is primary or secondary arc bead, the judgment is difficult, and the improvement of the identification accuracy has been required.

In this paper, we report on our approach for improving identification precision for shorted arc beads, using FIB (Focused Ion Beam) and X-ray CT (Computed Tomography).

1. はじめに

電化製品の発火によると思われる火災の原因究明は製品及び周辺部が焼失してしまう場合が多く、非常に難しい。原因究明の際、重要な手がかりとなるのが配線等に残された溶融痕である。通常溶融痕は一次痕と二次痕に分類される。一次痕は、火災の直接原因となった短絡痕である。一方二次痕は火災熱で二次的に発生した短絡痕で火災を引き起こしたものではない。配線に残った複数の短絡痕の中から、直接発火の原因となった溶融痕(一次痕)を特定できれば、発火原因を解明する大きな手がかりとなる。

筆者等は、実験的に作成した溶融痕を、FIB装置及びX線CT装置を用いて詳細解析を行った。その結果、一・二次痕の識別精度向上に有効な新たな画像データを収集できることが明らかになったので、その解析手法について報告する。

2. 短絡痕の識別法

一次痕、二次痕の識別手法としては、独立行政法人製品評価技術基盤機構(NITE)が開発したDAS (Dendrite Arm Spacing) 法とCS

(Cell Size) 法がある。^{[1][2]}

DAS法は、短絡痕断面にデンドライト組織が観察された場合に用いられ、隣接する二次枝間の距離(DAS)と酸素濃度の概算値とを求め、レファレンスデータと比較することにより、短絡痕生成時の雰囲気温度を推定する手法である。なおデンドライトには、銅デンドライトと亜酸化銅デンドライトの2種類があり、酸素濃度算出式、雰囲気温度推定式はそれぞれ異なるが、手法の流れは同じである。

一方CS法はデンドライトが観察されない場合に用いられ、短絡痕体積と結晶粒の大きさ(CS)とを求め、レファレンスデータと比較することにより、短絡痕生成時の雰囲気温度を推定する手法である。

これら2法によって推定された短絡時の雰囲気温度と、コード被覆の引火・発火温度、火災状況・焼損状態などを勘案して、一・二次痕の判断が行われる。

また一・二次痕の一般的な特徴が、東京消防庁監修の火災調査教本^[3]に記載されている。それによると形状・光沢・空隙発生状態・異物巻き込み、などの観点で、一・二次痕にそれぞれの傾向があり、特に今回注目した空隙に関しては、以下の特長があることが記されている。

1,2) セイコーエプソン(株) 経営戦略室 CS品質保証推進部
TEL:0263-54-6961

〒399-0785 長野県塩尻市広丘原新田 80
Email: ogihara.shingo@exc.epson.co.jp

3,4) 楠本化成株式会社 エタック事業部
TEL:048-935-6511

〒340-0004 埼玉県草加市弁天 4-18-6
Email: hirooka@etac.kusumoto.co.jp

【キーワード：電気火災、溶融痕、一次痕、二次痕、DAS法、CS法、FIB、X線CT】

一次痕：おおむねボイドが細かく全体に広がり、ブローホールも多く見られる。

二次痕：雰囲気温度が高いため冷却が緩慢で、中心部のボイドが大きくなる傾向がある。

ここで溶融痕内部に生じた空隙について、外気とつながったものをブローホール、つながっていない部分をボイドと呼び分けている。

3．試料の作成

今回の実験の試料として直径 0.18mm、長さ 80mm の裸銅線を用い、交流電子負荷装置を用いて電流値を 10A, 8A, 6A に制御し、商用電源 AC100V (50Hz) に接続して溶断させた。また周囲温度を変化させるため、図 1 に示す高温観察装置の試料台に取り付け、常温、100～700 まで 100 ステップで実験を行った。作成した溶融痕を樹脂に埋め込み、断面研磨を行った。



図 1 高温観察装置外観

注：上述した溶融痕の作成法から明らかな通り、今回作成した溶融痕は短絡痕ではなく、半断線・半短絡による過電流痕という分類になる。NITE の識別法において過電流痕は、雰囲気温度を反映しない可能性を鑑みて除外されているため、今回の試料は DAS や CS の値そのものを議論するには不相当であるが、識別精度を向上させる一手段として FIB や X 線 CT 装置が有用であるという事の実証には耐えると判断した。

4．FIB 装置による断面加工・観察

これまでは金属顕微鏡を用いて研磨面の観察・写真撮影を行った画像を基に、デンドライト、結晶粒などのサイズを計測し解析を行っていた。FIB 装置を用いると、断面出しを施したサンプルの、任意の局所箇所に穴あけ後、表面と断面部を観察 (SIM 像) することにより立体構造を捉えることが可能となる。また、SIM 像の特徴として、結晶状態が鮮明に確認できることが挙げられる。これらの特徴を生かして作成した溶融痕を、FIB 装置を用いて加工・観察したところ、図 2～9 のようになった。

図 2,3 は亜酸化銅デンドライトが観察されたサンプルについて FIB 加工を行った事例である。断面出しの段階では主軸が観察されず、結晶が並んでいるだけだが(図 2)、FIB による穴あけ加工を施すと、デンドライトの主軸と二次枝の様子がはっきりと確認できる(図 3)。

図 4,5 はデンドライトが観察されず、銅の凝固組織が観察されたサンプルについて FIB 加工を行った事例である。結晶 (セル) の様子が鮮明に観察できるという SIM 像の特徴が見取れるが、反面、観察領域が狭すぎるためにセルの全体像をつかむことはできない。

そこで、より広い領域を観察するためには、クロスセクションポリッシャー等を用いる方法が有効と考えられる。

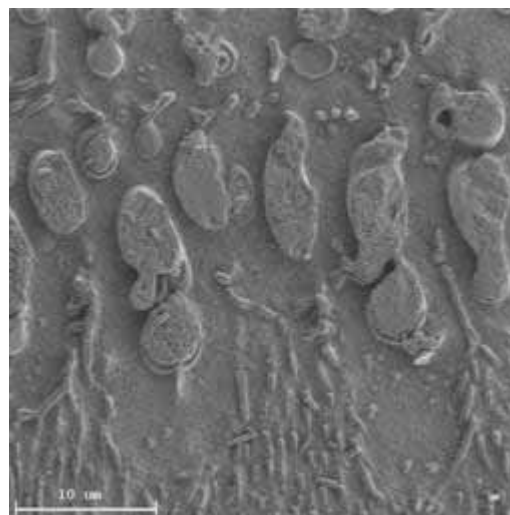


図 2 亜酸化銅デンドライトが観られる研磨面

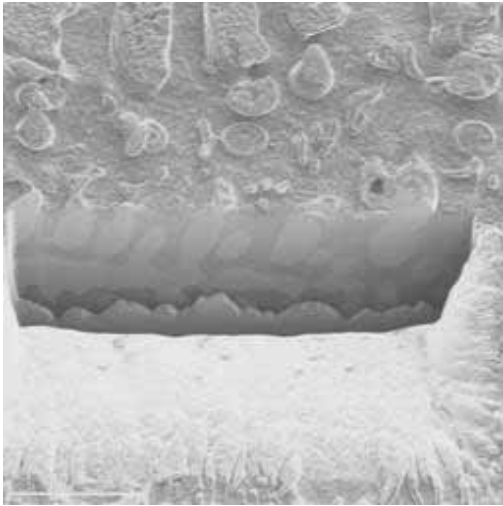


図3 図2にFIB穴あけ加工を施した様子

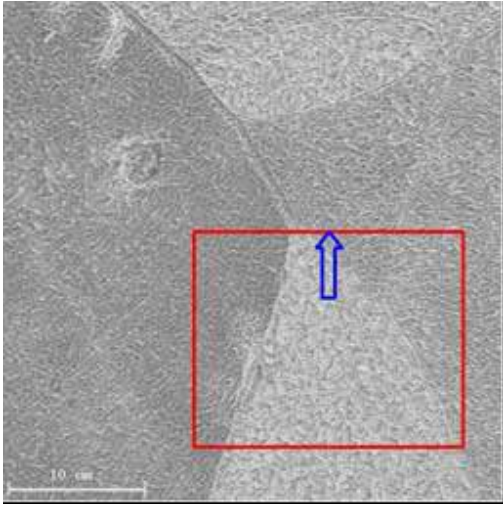


図4 銅凝固組織が観られる研磨面

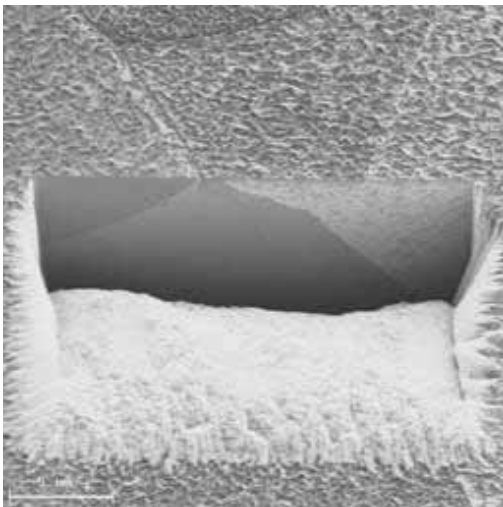


図5 図4にFIBによる穴あけ加工

デンドライトが観察された短絡痕について、同様にFIB加工を行った事例を図6~8に示す。銅のデンドライトの場合、金属顕微鏡では共晶・凝固部分との色彩の差が小さく、エッチングを施しても鮮明に観察できない場合もあるが、SIM像で観察することで、デンドライトの枝の様子や、その間隔がはっきりと見て取れる。図9にFIB断面からDASを測定した事例を示す。

以上のことから、デンドライトが観察されるタイプの短絡痕に関しては、特に次のような場合についてFIB装置を用いることで、DASの測定精度を向上させることが可能となる。

- ・研磨面にデンドライトの二次枝が現れておらず、主軸と二次枝の構造が不鮮明な場合
- ・銅のデンドライトがエッチングしてもコントラストがつかずに不鮮明であった場合



図6 銅デンドライトが観られる研磨面

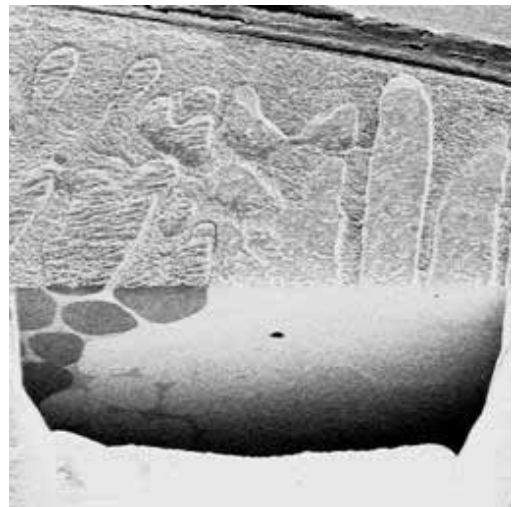


図7 図6にFIBによる穴あけ加工

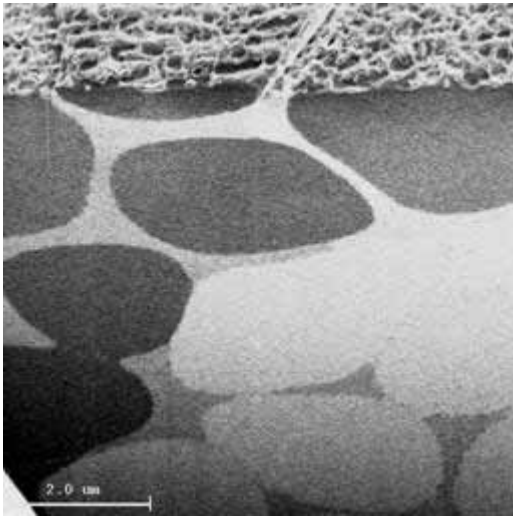


図8 図7の拡大図

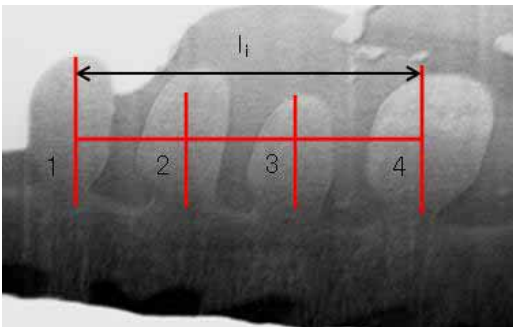


図9 D A S法の計測事例

表1 図9のD A S計測結果

| | |
|-------------|-------|
| 測定二次アーム数(本) | 4 |
| 測長(μm) | 6.64 |
| D A S(μm) | 2.213 |

一方、デンドライトが観察されないタイプの短絡痕に関しては、CS法を適用することになるが、CS法においては溶融痕全体の体積と、平均的なセルサイズを測定しなくてはならないため、加工・観察範囲の狭いFIB装置を精度向上に利用することは困難と思われる。

5. X線CTによるボイドの解析

溶融痕の内部には大小様々なボイドやブローホールが生成される。東京消防庁監修の火災調査教本によると、一・二次痕におけるボイ

ド・ブローホールの一般的な傾向として、一次痕では細かいボイドやブローホールが全体に広がっていること、二次痕では中央部に大きなボイドができやすいことが挙げられている。この点についてX線CT装置を用いて評価できないか試みたところ、一定の成果が得られた。

溶融痕の銅の部分と、ボイド部の空気とではX線の透過率が異なるため、X線CT装置を利用することにより、非破壊で内部のボイドの様子を確認できる。更に透過率の違いから、溶融痕部分の体積、ボイドの数とその体積、ボイド率などを算出することが可能である。

室温で作成した溶融痕と、700の雰囲気温度下で作成した溶融痕について各1つ、金属顕微鏡写真を図10, 11に、X線CT像を図12, 13に示す。また、透過率をもとに算出したそれぞれの溶融痕の体積、ボイド数、ボイド率、最大のボイドの体積について、表1に記す。

X線CTで計測したボイドに関する計測結果を利用して、一次痕・二次痕の判定を行おうとする場合、ボイド数が一次痕の方が多く、個々のボイド体積が二次痕の方が大きい、などの判断基準が考えられる。ボイド率に関しては、ボイド数の多い一次痕の方が大きくなるのか、個々のボイドの体積が大きい二次痕の方が大きくなるのか、又は傾向が無いのかは、現時点では不明である。

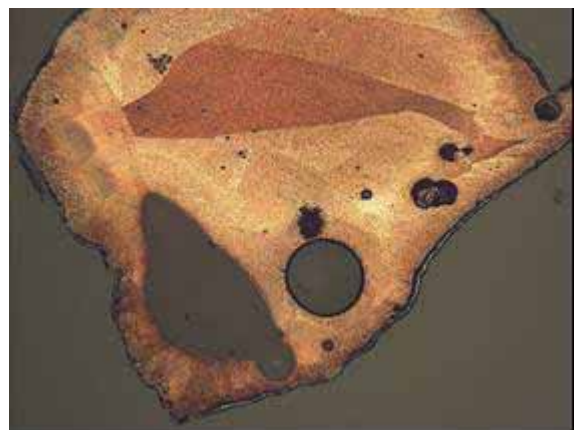


図10 室温で作成した溶融痕の顕微鏡画像



図 11 700 で作成した溶融痕の顕微鏡画像

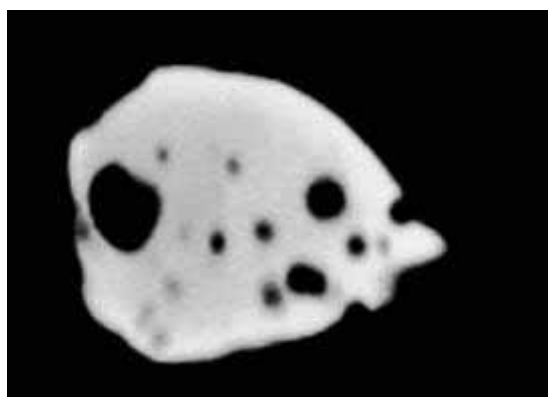


図 12 室温で作成した溶融痕の X 線 CT 像

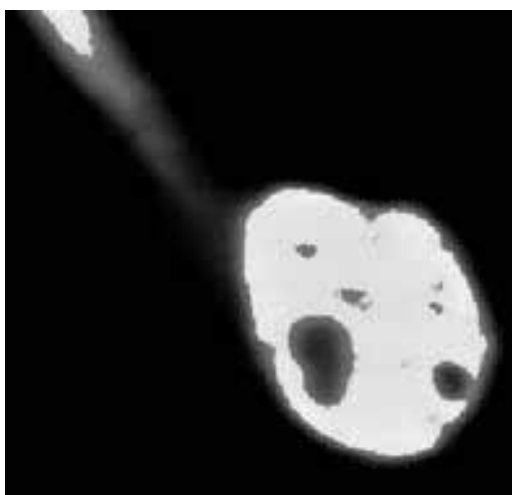


図 13 700 で作成した溶融痕の X 線 CT 像

表 2 溶融痕内部ボイドの計測結果

| | 室温 | 700 |
|----------------------------|-------|-------|
| 溶融痕サイズ(mm ³) | 0.020 | 0.007 |
| 計測ボイド数 (個) | 18 | 6 |
| ボイド率 (%) | 0.85 | 4.19 |
| 最大ボイドサイズ(μm ³) | 62 | 200 |

例に挙げた 2 サンプルは、ボイド数、個々のボイドのサイズから見て、一般的な一次痕、二次痕の特徴が現れている。しかし、今回作成した合計 24 個のサンプル全体で見ると、一般的な特徴に当てはまらないサンプルも 3 割弱程度存在した。今回の実験の中で、人為的な誤差を生む要因としては、作成した溶融痕が直径 0.18mm の裸銅線 1 本を使った過電流痕であったため、燃り線がショートして生じる短絡痕に比べて、溶融痕のサイズが小さかったこと、計測されたのが内部ボイドのみで、ブローホールは周囲の空気と同じ扱いになってしまい、計測から漏れてしまったこと、などが考えられる。

今後は上記の結果を踏まえ、サンプルに短絡痕を用い、ブローホールも計測の対象に含ませるように短絡痕全体を樹脂でコーティングするなどの工夫を施して同様の計測を行い、サンプル数を増やしてデータを蓄積することで、一般に言われる一・二次痕の特徴が、統計的にどの程度信頼できるのかを探っていきたい。

X 線 CT を用いた溶融痕部分およびボイド部分の体積の計測は、CS 法における短絡痕体積の算出にも利用できる。CS 法における短絡痕体積の算出で比重法^[4]が適用できない場合には、概算法が用いられているが、その際ボイド部分の体積を差し引かなくてはならない。通常の断面研磨観察のみでは、断面に現れているボイドのみしか計算できないが、X 線 CT を使った計測では内部のボイド全てを計算することが可能なため、差し引くボイド体積に X 線 CT で計測した数値を用いることで、精度を向上させることができると思われる。また、比重法を用いた場合と比較して十分な精度を出すことが確認できれば、短絡痕体積そのものの値も、X 線 CT で計測した値をそのまま利用することが可能である。CS 法を適用するサンプルにおいては、樹脂埋めして断面研磨した後に、ボイドが大きすぎて解析不能であると発覚する事態もありうるため、あらかじめボイドの状態を確認しておく事で、作業の無駄を防ぐという効果もある。このような、CS 法と絡めた効果についても、今後確認していきたいと思う。

6 . まとめ

FIB 装置の加工・観察を、デンドライトが観察されるタイプの短絡痕の DAS 測定精度向上のために活用できる可能性があることが示された。また X 線 CT 装置を用いることで、短絡痕およびボイドのサイズを計測でき、一次痕・二次痕のボイドについて、統計的な傾向が調べられること、また CS 法の体積測定精度を向上させられる可能性があること、をそれぞれ示すことができた。また、これらの実現のためには、更なるデータの蓄積が必要であることもわかった。

7 . 結び

以上、溶融痕の新しい解析法について述べた。これまでの金属顕微鏡による溶融痕の断面観察に F I B 装置及び X 線 C T 装置を用いた解析法を加えることにより、デンドライト結晶粒、ボイド等の形状観察や計測精度を大幅に向上させる見通しが得られた。今後これらの解析手法による実験を積み重ね、その有効性について検証を行っていきたい。

終わりに本解析手法の検討にあたり技術的指導、ご助言をいただいた N I T E 北関東支所の長谷川 秀夫課長、今田 修二研究員、サンプル作成にご協力いただいた山陽精工(株)平本 清常務、ならびにご協力いただいたセイコーエブソン(株)、楠本化成(株)の関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 独立行政法人製品評価技術基盤機構：「家電製品の発火事故原因究明マニュアル」,平成 17 年 8 月
- [2] 独立行政法人製品評価技術基盤機構：「電源コード・二次痕識別のための短絡痕斎整温度推定手法(改訂版)」,平成 18 年 9 月
- [3] 東京消防庁監修：「新火災調査教本(第 3 巻 電気火災編)」,平成 17 年 7 月
- [4] 渡邊他：「電気火災における電源コードの一・二次痕識別法」,松下電工技報, Vol. 53 No4 ,