

## Arc Beads from Fires: Can ‘Cause’ Beads Be Distinguished from ‘Victim’ Beads by Physical or Chemical Testing?

### 火災現場の電氣的溶融痕：物理的あるいは化学的試験によって一次痕と二次痕を識別可能か？

VYTENIS BABRAUSKAS\*

*Fire Science and Technology Inc., 9000 – 300th Place SE, Issaquah, WA 98027, USA*

**ABSTRACT:** A wide variety of physical or chemical testing methods have been proposed for differentiating between an electric arc bead that caused a fire, versus one that was caused by the fire itself. The methods all implicitly assume that there is some categorical difference between these two types of arc beads. A consideration of the room fire process leads to the conclusion that the thermal or chemical histories in these two cases cannot be claimed to be categorically different. Furthermore, most of the proposed methods only entail subjective, qualitative criteria for distinguishing between beads that did or did not start a fire. Finally, all of the methods have been based on studies where only a small number of specimens were tested; none of the methods have been successfully reproduced in laboratories other than the proponent’s, while several have been shown explicitly not to be reproducible. Thus, despite the help to fire investigations that would be possible if a reliable method could be produced, it must be concluded that none of the proposed methods are promising.

**概要:** 火災の原因となった一次的溶融痕と火災の結果として生じた二次的溶融痕を識別するため、様々な物理的あるいは化学的手法が提案されてきた。これらの手法では、両者溶融痕には何らかの絶対的な差異があるということが暗黙の仮定であった。室内火災の拡大過程の考察からは、両者溶融痕の熱的あるいは化学的履歴に絶対的な差異が生じるとは必ずしも言えない。さらに言う、提案されてきた手法のほとんどは、火災の原因になった溶融痕とそうでない溶融痕の主観的で質的な識別基準を示したにすぎない。結局、どの手法も数少ないサンプルについての研究成果に基づいたものである。手法提案者のほかには誰も、その手法の再現性を実験的に確認できていない。中には再現困難であることが明確に示された手法さえある。かくして、信頼できる手法が開発されれば火災調査に役立つのであるが、これまでに提案された手法の中には期待できるものがないと結論しなければならない。

**KEY WORDS:** arc beads, Auger electron spectroscopy, electric arcs, fire investigation, forensic science, microscopy, Raman spectroscopy.

#### BACKGROUND

##### 背景

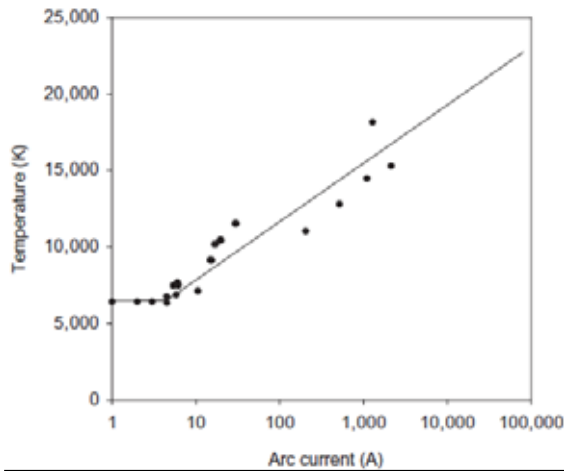
**A**N ELECTRIC ARC between two current-carrying conductors produces some extremely high temperatures. Figure 1 shows that arcs exhibit temperatures of at least 6000 K, with substantially higher temperatures being found as the arc current increases [1]. If an arc occurs and suitably ignitable fuels are present, a fire may ensue. Since the temperature of an electric arc is greatly in excess of the melting temperature of copper (1085°C) or aluminum (660°C), portions of the conductor may melt in such an event. Upon cooling, the molten material often assumes a roughly-spherical shape (Figures 2, 3) and consequently this resolidified zone is termed an ‘arc bead.’ The shape, however, does not necessarily have to be spherical (Figure 4). In the investigation of fires, arc beads are frequently encountered because electricity is available in most buildings undergoing a fire and if a fire is sizable, it is likely to burn wiring to the extent that short circuits occur. A single fire may generate a large number of arc beads in this manner, and such beads can

be called ‘victim’ beads. Conversely, if a fire originated because an electric fault produced arcing, the beads from such an event can be called ‘cause’ beads because they actually correspond to the cause of the fire. It must be pointed out that the definition of a short circuit is [2]: “An abnormal connection (including an arc) of relatively low impedance, whether made accidentally or intentionally, between two points of different potential.” Thus, the term in general would include arc tracking without direct metallic contact; however, in the present paper “short-circuiting” is used exclusively to refer to events where metal-to-metal contact is made and, consequently, an arc bead can be created.

アーク放電は非常に高温である。図1から、アーク放電では最低でも6000K、アーク電流が大きくなると温度はさらに高くなることがわかる[1]。もしアーク放電が発生し、そこに可燃物があれば、火災になるだろう。アーク放電の温度は銅の融点(1085°C)やアルミの融点(660°C)よりはるかに高いため、導体の一部が溶融するだろう。溶融した金属が冷却す

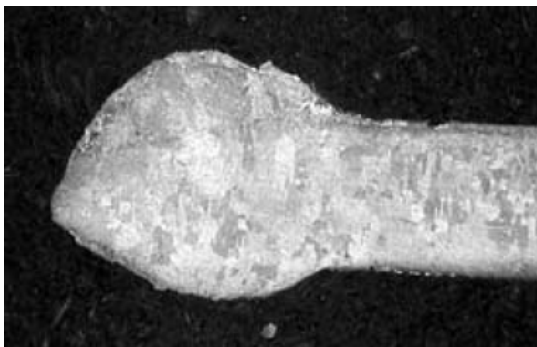
\*E-mail: Vytob@doctorfire.com

る過程で球状になる(図2, 3)。この部分はアーク放電による溶融痕(arc beads, 訳者注:以下「電氣的溶融痕」と称することにする)と称される。しかし、その形は必ずしも球状であるとは限らない(図4)。火災調査の際、電氣的溶融痕が発見されることは多い。それは、ほとんどの場合、出火後も建物内が通電状態にあるからである。そして、火災の規模が大きければ、電線が焼けて短絡が起こるだろう。そのため、1件の火災で数多くの電氣的溶融痕ができるだろう。このような溶融痕は、二次痕(‘victim’ beads)と称される。これに対して、電氣的故障が原因でアーク放電が生じて火災になった場合には、その過程でできた溶融痕は、出火原因に相当することから、一次痕(‘cause’ beads)と称される。短絡の定義[2]は、「事故であるか故意であるかにかかわらず、電位の異なる2点間で起こる比較的低いインピーダンスによる(アーク放電を含む)異常な接続状態」である。したがって、一般には、短絡という語に金属同士が直接接触しないアークトラッキングも含まれる。しかし、この論文では、短絡(“short-circuiting”)を、金属同士が接触し、電氣的溶融痕ができる現象を指す語として用いている。



**Figure 1.** Temperature of an electric arc, as a function of the arc current (points: experimental data [47–49]; solid line: correlation).

図1 アーク電流の関数として表わしたアーク放電の温度(点: 実験データ[47-49], 実線: 相関関係)



**Figure 2.** Bead created by experimental arcing – cross-section view (Courtesy Yasuaki Hagimoto).

図2 実験的に作成したアーク放電による溶融痕の断面(萩本安昭提供)



**Figure 3.** ‘Victim’ bead from a real fire (Courtesy Yasuaki Hagimoto).

図3 実際の火災でできた二次痕(萩本安昭提供)



**Figure 4.** Arc beads with an irregular shape (obtained in laboratory testing by making direct contact between uninsulated conductors carrying 240 VAC) (Courtesy David Reiter).

図4 不規則な形状をしたアーク放電による溶融痕(印加電圧240Vの裸線同士を接触短絡させたもの)(David Reiter氏提供)

The crystal structure of copper changes with heating. Unless heated to beyond about 300°C, copper wire shows fine longitudinal striations caused by the wire-drawing process [3]. When heated to higher temperatures, fine-grain recrystallization appears, followed by the formation of some large-grain structures as temperatures over about 800°C are attained. Arc beads can be distinguished from fire-melted material by visual or microscopic examination. Fire-melted marks are sometimes called ‘globules,’ as distinguished from ‘beads.’ Visually, arc beads generally possess a sharp demarcation between a roughly-spherical bead and the cylindrical portion of the wire, while fire-melted wires (Figure 5) do not show a sharp transition between molten/resolidified and virgin material [4]. Shaw [5] proposed that, when examined under a microscope, arc beads exhibit a much finer, smoother grain structure than do the wires melting due to heating from fire alone. But he was rebutted by Levinson [6], who pointed out that copper melted in the presence of oxygen shows a pattern of pure copper grains interspersed with oxygen-containing material, irrespective of what was the cause of the melting. Singh [7] proposed that, if arcing was involved, there will be a pronounced CuO or Cu<sub>2</sub>O grain structure near the end, progressively diminishing away from the end. On the other hand, if the wire was simply fire-exposed without arcing, there will be diverse grain patterns along the length, without a systematic gradient. Takaki [3] conducted more detailed experiments and concluded that arc beads commonly show

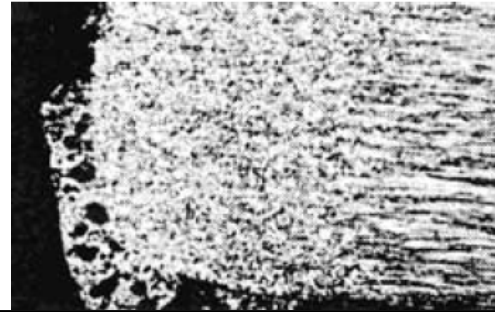
three regions: (1) a surface layer containing numerous voids, (2) an intermediate layer that did not melt, but did recrystallize, and (3) a deep layer where the material neither melted nor recrystallized (Figure 6). By contrast, fire-melted beads tend to be uniformly recrystallized. Ettling [8] cautioned that no simple rule is likely to cover all cases, but also described a number of other qualitative differences that can help distinguish arcing from simple melting.

銅の結晶構造は加熱されることによって変化する。300度以下の加熱では、銅の伸線工程で生じる明瞭な縦方向の線条組織が残っている[3]。それ以上に加熱されると、再結晶による細かな結晶粒子がみられるようになり、約800℃以上の加熱では大きな結晶が形成されるようになる。電氣的溶融痕(arc beads)は、肉眼または顕微鏡観察により、火災熱による溶融痕と識別することができる。火災熱による溶融痕は、しばしば電氣的溶融痕(‘beads’)と区別して、小球(‘globules’)と称されることがある。外観的には、一般に電氣的溶融では、球状の溶融部分と円筒状をした電線の非溶融部分の境界が明瞭である。これに対して、火災熱による溶融痕(図5)では、溶融／再結晶した部分とそうでない部分の境界が不明瞭である[4]。Shaw[5]の提唱によると、顕微鏡で観察したとき、電氣的溶融痕は、火災熱だけで溶融した電線よりもはるかに細かく滑らかな結晶構造である。しかし、Levinson[6]は、これに反論した。彼は、溶融した原因に関わりなく、酸素の存在下で溶融した銅は純銅の結晶粒子の間に酸素を含む物質が点在することを示した。Singh[7]が提唱したことは、アーク放電が起きた場合、CuOまたはCu<sub>2</sub>Oの明瞭な結晶構造が端部付近に生じ、端から離れるほど減少するということである。一方で、もし電線が火災熱だけに曝された場合は、様々な結晶構造が系統的に勾配なしに長さ方向に生じるだろう。高木[3]は詳細な実験を行ない、(1)多数のボイドがある表面層、(2)溶融しなかったが再結晶した中間層、(3)溶融も再結晶もしなかった深層(図6)。これに対して、火災熱による溶融痕は均一に再結晶する傾向がある。Ettling[8]は、全ての場合が説明できる単純な規則はないことを警告している。しかし、彼は同時に、様々な質的違いは溶融痕が電氣的なものか火災熱によるものかを識別する際の助けになると述べている。



**Figure 5.** Examples of melted copper wire beads caused by exposure to fire without arcing (Courtesy Yasuaki Hagimoto).

図5 火災熱による溶融痕の例 (萩本提供)



**Figure 6.** Arc bead showing the three metallographic zones (surface, intermediate, deep layers) (Courtesy Akira Takaki).

図6 アーク放電による溶融痕の断面にみられる3種類の金属組織(表面、中央、深層部)(高木晃氏提供)

This paper will focus solely on arc beads in copper conductors used in branch-circuit wiring. Arc beads in aluminum wiring commonly do not survive the temperatures of a room fire, while there has been no significant research on arc beads in large-diameter wires, such as used in the building service entrance. Wires that are tinned or solder-coated [6] behave differently from solid-copper wires and will also not be considered.

この論文では、分岐回路の配線に使われる銅線の電氣的溶融痕にのみ焦点を合わせることにする。アルミ線の溶融痕は通常、室内火災の温度で溶けてなくなってしまう。また、ビルの受電設備に使われるような太い電線の溶融痕についての特筆すべき研究はない。錫メッキあるいはハンダ被覆した電線は、銅線とは挙動が異なるものであり[6]、ここでは検討しないことにする。

## PROPOSED METHODS OF DISTINGUISHING ‘CAUSE’ FROM ‘VICTIM’ BEADS

これまでに提案された一次痕と二次痕の識別手法

If the melt feature on a conductor is due to arcing and not simply due to melting in a fire, investigators and forensic scientists have explored the notion that the two types of arc beads—‘cause’ and ‘victim’ beads—might be distinguished after the fire by some means of physical or chemical testing. If a particular bead could be demonstrated to have been the residue of an arc that caused the fire, this might enable the cause of a fire to be pinpointed which would otherwise be undetermined. Simple visual observation is not sufficient for this purpose, since two Japanese studies [9,10] showed that the following features do not discriminate between ‘cause’ and ‘victim’ beads, even when the former were not subjected to the ensuing fire:

- glossiness of the bead
- color of the bead
- shape of the bead
- surface smoothness or roughness
- size of the bead (although the very smallest beads of less than 1mm tended to be ‘cause’ beads, while the largest ones of over 3mm tended to be ‘victim’ beads).

Consequently, a number of instrumental analysis techniques have been proposed, and these fall into three categories:

- (i) microscopy
- (ii) Raman spectroscopy and X-ray microanalysis
- (iii) Auger electron spectroscopy (AES) and secondary ion mass spectrometry (SIMS).

In addition, testing for metal hardness was explored by Takaki [3], but he definitively demonstrated that all copper wires exposed to temperatures over about 250°C showed greatly reduced hardness and this was independent of any details of arcing.

導体上の熔融痕が単に火災熱だけに起因するのではなく、アーク放電に起因するものであった場合、火災調査員や法科学者は、その電氣的熔融痕には2種類あり、一次痕(cause beads)と二次痕(victim beads)を何らかの物理的あるいは化学的手法で識別できるのではないかという考えを探求しつづけてきた。もし、ある熔融痕が火災原因となったアーク放電の結果としてできたものであることが証明できれば、原因不明になったかもしれない火災の出火原因を特定することができる。この識別には、簡単な外観観察だけでは不十分である。その理由は、たとえ一次痕がその後の火災熱を受けなかった場合であっても、次の特徴から一次痕と二次痕を識別できないということが日本における2つの研究[9,10]によって示されているからである。

- 熔融痕の光沢
- 熔融痕の色
- 熔融痕の形状
- 表面の滑らかさまたは粗さ(1mm以下の小さな熔融痕は一次痕, 3mm以上の大きなものは二次痕という傾向はあるが)

そのため、数多くの機器による分析手法が提唱されてきた。これらは3種類に分けることができる。

- (i)顕微鏡
- (ii)ラマン分光分析, X線マイクロアナリシス
- (iii)オージェ電子分光分析(AES), 二次イオン質量分光分析(SIMS)

このほか、金属の硬度による試験法が高木[3]によって検討された。彼は、約250°C以上で加熱された銅線はすべて硬度が著しく減少し、しかもこれはアーク放電の状態とは無関係であるということを実証した。

## MICROSCOPY METHODS

### 顕微鏡による手法

The simplest proposed methods claim that examination of a bead under a microscope (after preliminary preparation which may include cleaning or etching surfaces, and other techniques for preparing cross-sections) will suffice to make the distinction. The methods that have been suggested for differentiation are:

- (1) 'cause' beads have square or rectangular pock marks, while 'victim' beads lack these structures;
- (2) 'victim' beads show small surface-deposited particles, while 'cause' beads do not have these;
- (3) 'cause' beads have small voids, while 'victim' beads have large ones;
- (4) the number of voids or their total cross-sectional area is different in 'cause' beads than in 'victim' beads;
- (5) 'cause' beads have a small dendrite-arm spacing, while 'victim' beads have a large spacing;

- (6) based on examining long segments of wire and not just beads, if long segments are uniformly recrystallized, the wire suffered gross electrical overheating; this does not directly establish cause/victim status, but may be of help in assessing the sequence of events that transpired.

提唱された手法の中で最も簡単なものは、熔融痕(洗浄, 表面エッチング, その他, 断面観察に必要な処理をしたもの)を顕微鏡で観察すれば識別できるというものがある。提案されてきた識別手法には次のようなものがある:

- (1) 一次痕には、正方形や長方形のあばた痕が見られるが、二次痕には見られない。
- (2) 二次痕には、表面に付着した小さな粒子が見られるが、一次痕には見られない。
- (3) 一次痕のポイドは小さいが、二次痕では大きい。
- (4) ポイドの数あるいはポイドの総断面が、一次痕と二次痕とで異なる。
- (5) 一次痕のデンドライトアームスペーシング(樹枝状結晶構造の枝間隔)は小さく、二次痕では大きい。
- (6) 熔融痕ではなく、電線の長さ方向について検査した場合、もしある程度の長さが均一に再結晶しておれば、全体的に電気過熱されたもの(訳者注:過電流)である。このことから一次痕/二次痕の識別はできないが、何が起きたのか推定する際の参考になる。

Method #1 was proposed by Gray et al. [11] in 1983. They presented results from one accidental fire and conducted some (but evidently only a few) experiments in the laboratory on flexible, PVC-insulated cords by passing excessive current through the cord until it shorted out and ignited (producing 'cause' beads) and by heating a cord carrying normal current in a fire until ignition (producing 'victim' beads). They then examined slices cut through the beads under a scanning electron microscope (SEM) and, on the basis of observed features, proposed that 'cause' beads show numerous square or rectangular pock marks, while 'victim' beads show few or none. It was not clear whether the pock marks observed represented impurity inclusions or merely regions of crystallization. No other investigators have reported finding these features, so presumably they were due to some rare combination of circumstances, rather than being a normal characteristic of 'cause' beads.

手法#1は、Gray[11]らが1983年に提案したものである。彼らは、1件の事故による出火事例の結果を示し、さらに塩ビ被覆コードを用いて、短絡、着火するまで過電流を流す(一次痕ができる)実験と、通常の電流を流した状態で着火するまで火災中で加熱する(二次痕ができる)実験を数回(明らかにごく少ない回数)行なった。そして、走査型電子顕微鏡(SEM)で熔融痕の断面を観察し、一次痕には、正方形や長方形のあばた痕が多数見られるが、二次痕にはほとんどあるいはまったく見られないことを示した。このあばた痕が不純物によるものなのかそれとも単に再結晶でできたものなのかは明らかにされていない。この特徴について報告した他の研究者は誰もいない。したがって、おそらく一次痕の一般の特徴ではなく、むしろ何らかの偶然の実験条件によってできたものと思われる。

Method #2 was explored by Erlandsson and Strand [12]. In one set of experiments, they created shorts between copper conductors, then exposed the wires to a fire fueled by wood and PVC, the latter intended to simulate

burning wire insulation. In another set of experiments, they created the short circuit within the fire environment. The 'victim' beads, when examined with SEM, showed a nearly uniform dispersion of small particles of about 2 mm size on the surface of the beads. Supplementary studies showed that particles of this type could also be created when arcing took place in an atmosphere containing pure HCl vapors, generated by evaporating liquid HCl and not by burning PVC. Small surface particles, by contrast, were absent in beads created by arcing of bare conductors prior to exposure to a wood/PVC fueled fire. Unfortunately, the latter test condition does not correspond to creation of 'cause' beads. When the authors created true 'cause' beads by shorting together insulated wires (by scraping away only small bits of insulation), they found that the bead surfaces contained small particles indistinguishable from those on the 'victim' beads.

手法#2は、ErlandssonとStrand[12]が研究したものである。彼らは電線を短絡させた後、木材あるいはPVC(ポリ塩化ビニル)の燃焼火炎中で加熱した。後者は、電線の絶縁被覆材を模擬するために用いたものである。彼らは、火災条件下で短絡させる実験も行なった。SEMで観察すると、二次痕表面には、ほぼ均一に分散した約2mmの大きさの小さな粒子が見られた。補足実験において、この種の粒子は、PVCの燃焼ではなく液体HClの蒸発によって発生させた純粋なHCl蒸気を含む大気中でアーク放電が起きたときにも形成された。しかし、裸銅線のアーク放電を起こした後で木材やPVCの燃焼火炎中に曝した熔融痕には、表面の小さな粒子は観察されなかった。残念ながら、後者の実験条件は、一次痕の形成条件に相当していない。彼らは、(絶縁被覆の一部を削り取って)絶縁電線を短絡させることにより、真の意味の一次痕を作成し、その熔融痕表面に二次痕のものとは異なる小さな粒子が見られることを発見した。

A number of investigators explored voids in the bead as an indicator. Erlandsson and Strand [12] studied the cross-sections of beads created in several different ways. They found that in an air atmosphere, arc beads showed copious voids but beads formed by melting the copper by an overcurrent were without voids. In a reducing atmosphere (within a gas flame), they found that a smaller number, but larger, voids were present, irrespective of whether the bead was created by arcing or simple melting. They also noted that an 'oxide wedge' could be found between the melted and the unmelted material when tests were run in air, but not in a reducing atmosphere. Tokyo Fire Department [13] conducted experiments which showed that, contrary to the findings of Erlandsson and Strand, voids can be created when copper beads are formed in an air atmosphere by an overcurrent melting process. They made beads by fusing wires with overcurrent in air and in atmospheres of N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>. The experiments were conducted in a tube furnace and the ambient temperature was also controlled. Voids were almost always present when beads were formed in air at 1000°C, but almost never when in N<sub>2</sub> or CO<sub>2</sub> at the same temperature.

熔融痕の中のボイドによる識別手法を検討してきた研究は多い。ErlandssonとStrand[12]は、いくつかの異なる方法で作成した熔融痕の断面を観察し、大気中での短絡による熔融痕には多数のボイドがあるが、過電流によって熔融した銅にはボイドがないことを見出した。還元性の雰囲気(ガス火炎中)では、電気的か火災熱によるかに関わらず、

ボイドの数は少なくなり、ただしより大きくなった。彼らは、大気中での実験では、熔融部と非熔融部の間に酸化物の楔('oxide wedge')が見出されるが、還元性雰囲気中では見出されないことを示した。東京消防庁[13]は、ErlandssonとStrandの実験結果とは逆で、大気中での過電流による熔融過程でボイドができることを実験的に示した。彼らは、大気中、窒素中、及び二酸化炭素中で過電流により電線を溶断させて熔融痕を作成した。この実験は環状炉の中で行なわれ、周囲温度がコントロールされた。大気中で1000°Cの条件でもボイドはできた。しかし、窒素中または二酸化炭素中で同じ温度条件のときはボイドはできなかった。

Method #3 was briefly explored by the Tokyo Fire Department [13]. On the basis of limited testing, they noted that voids in 'cause' beads are smaller than in 'victim' beads. They concluded that the voids in 'cause' beads are also more likely to be near the surface, while those in 'victim' beads deeper inside. They consider that the reason is because 'cause' beads tend to solidify more rapidly and oxygen has a lesser possibility of diffusing further inside while 'victim' beads solidify more slowly and voids near the surface tend to migrate inwards and aggregate into larger voids inside, where the temperature is still high. Their testing was not extensive enough to draw statistical conclusions.

手法#3は、東京消防[13]が若干検討を行なっている。限られた実験回数範囲であるが、彼らは、一次痕のボイドは二次痕のそれより小さいと述べている。彼らは、一次痕ではボイドが表面近くにできやすく、二次痕は深部にできやすいと結論している。その理由については、一次痕では急速に冷却固化し、酸素が深部へ拡散しにくい、二次痕では徐々に固化するのでボイドが内部へ移動しやすく、温度がまだ高い深部で集合して大きくなりやすいと推定している。彼らの実験は統計的な結論を導けるほど十分な回数行なわれたものではない。

Method #4 was investigated by Ishibashi and Kishida [10], who examined 15 beads from fires where it was known whether the bead was the cause or the victim. They concluded that presence of voids is generally more plentiful in 'cause' beads than in 'victim' beads. Presumably this is because 'cause' beads are more likely to be formed in an oxidizing atmosphere and 'victim' beads in a reducing atmosphere, but differences did not support a firm distinction between the two types of beads. Mitsuhashi [14] created 'cause' beads by making current-limited shorts with a stranded-conductor cord and then placing the beads obtained in an oven heated to 400–1000°C. The 'victim' beads were created by first exposing bare conductors to the oven-heating treatment, then covering them with PVC insulation and producing a current-limited short. Mitsuhashi counted microvoids (0.5–1.0 mm) for each bead in three small areas near the center and found about double the number of voids in 'victim' beads than in 'cause' beads. But he also counted voids in 'cause' beads that were not exposed to any further heating after creation of the bead. In that case, the number of voids was roughly similar to the 'victim' beads. For forensic purposes, the method did not seem promising since, while the average number of voids was different for 'cause' versus 'victim' beads, the distributions were overlapping and a particular concentration of voids could be encountered for either case. Method #4 was also explored by Oba [15] who created 'cause' and 'victim' beads in the laboratory and, in

each case, subjected them to various ovenheating regimes afterwards. Typically, 30–45% of the cross-section area comprised voids and this depended on the temperature of heating that was used after formation of the arc bead, but the distributions overlapped greatly and he concluded that void-area percent cannot be used as a tool for discrimination.

手法4は、石橋と岸田[10]が研究したものである。彼らは、火災現場から採取した一次痕か二次痕かがあらかじめ分かっている15個の溶融痕について検討した。彼らは、一般に一次痕の方が二次痕よりもボイドが多いと結論している。おそらく、その理由は、一次痕は酸化性雰囲気中で形成され、二次痕は還元性雰囲気中で形成される傾向が強いためと考えられる。三橋[14]は、撚り線を使って電流を制限した短絡を起こして一次痕を作成し、これを電気炉で400～1000℃に加熱した。また、彼は、裸銅線を電気炉で加熱処理した後、塩ビ被覆で覆ってから電流を制限した短絡を起こして二次痕を作成した。彼は、溶融痕中心付近3箇所まで微小ボイド(0.5～1mm)の数を数え、二次痕のボイド数が一次痕の約2倍であることを見出した。しかし、短絡後に加熱処理をしていない一次痕のボイド数も数えたところ、そのボイド数は二次痕とほぼ同程度であった。法科学的には、この方法は将来性があるとは思えない。なぜなら、一次痕と二次痕のボイド数の平均値に差異はあるものの、分布は重なっており、いずれの痕もボイド密度が特に高い場合があったからである。手法#4は、大場[15]も研究している。彼は、実験的に一次痕と二次痕を作成し、その後、様々なオープン加熱処理をしている。溶融痕断面積の30～45%程度がボイドであり、その割合は短絡後の加熱処理温度に依存していた。しかし、分布の重なりが大きいので、ボイドの面積割合は識別手法として使えないと結論している。

Both Methods #3 and #4 were studied by Miyoshi [16,17], who counted large voids and found that they were much more plentiful in ‘victim’ beads than in ‘cause’ beads. In his study, the ‘victim’ beads were created by burning a power cord in a burner flame until shorting occurred. But the ‘cause’ beads were created by shorting a wire together which was not subsequently placed in a fire; thus, his protocol did not attempt to simulate room-fire effects. Under these conditions, the maximum diameter of the voids in the ‘victim’ beads was typically 2–3 times larger than in the ‘cause’ beads. Similarly, the fraction of the total void area occupied by voids of 132  $\mu$ m or larger diameter was 14% in the ‘cause’ beads and 72% in the ‘victim’ beads. Again, however, the actual distributions showed overlap and a particular void distribution could show up in either a ‘cause’ or a ‘victim’ bead, albeit with a higher probability in the one than in the other.

手法#3と#4は、三好[16,17]の研究もある。彼は大きなボイドを数え、二次痕よりも一次痕の方がはるかに多いことを見出している。彼は、電源コードを短絡するまでバーナー火炎であぶって二次痕を作成した。しかし、彼は電線を短絡させた後一次痕を作成した後、火炎であぶっていない。よって、彼の手順は室内火炎の影響を模擬しようとしたものではない。結果は、二次痕のボイドの最大直径は、一次痕の場合の2～3倍大きかった。直径132  $\mu$ m以上のボイドが占める面積の割合は、一次痕が14%、二次痕が72%であった。しかし、可能性の大小は言えるものの、実際の分布は重なっており、一次痕、二次痕のいずれの場合も特殊なボイド分布が出現した。

Seki et al. [9] focused on the presence of a dendritic crystal structure (Figure 7) in arc beads. They showed that the general presence or absence of dendrites in an arc bead cannot be used as a means of identification (Table 1), since it simply reflects the oxygen concentration in the bead. Near-zero O<sub>2</sub> concentration leads to no crystals, as does the eutectic concentration of 0.39 mass%. O<sub>2</sub> concentrations smaller than this produce primary crystals of Cu, while larger concentrations produce primary crystals of Cu<sub>2</sub>O. But Seki et al. together with Lee et al. [18], proposed method #5, observing that, if a dendritic crystal structure is created, the spacing between the dendrite arms reflects the ambient temperature at which the bead solidified. In their view, a ‘cause’ bead will solidify at a near-ambient temperature (<400°C) and therefore have a small dendrite-arm spacing while a ‘victim’ bead will solidify at a fire-gas temperature (>400°C) and show a large spacing (unless it remelts in the fire). On the other hand, the rate of cooling and the temperature of the environment prior to the formation of the bead were found not to affect the spacing. In support of their thesis, the authors produced experimental curves showing the spacing as a function of ambient temperature at solidification and of oxygen concentration, separately for Cu and Cu<sub>2</sub>O dendrites. Based on their photographs, however, assigning a characteristic dendrite arm spacing to a particular bead appears to be a highly subjective determination. The authors performed extensive testing, but the description of their results does not make it clear if categorical classification of results as ‘cause’ or ‘victim’ was successful. In any case, the tests were primarily exposures in a small electric furnace and creating ‘cause’ beads which would then be subjected to a room fire was not undertaken. The method cannot be applied at all if the bead does not exhibit dendritic crystal structures and, as shown in Table 1, most beads do not. The rarity of dendritic structures was recently confirmed by Lewis [19]. Of 29 ‘victim’ beads created in the laboratory, only 3 showed a dendritic structure; of 10 ‘cause’ beads, only 1 did. Furthermore, even the beads that contained dendritic structures exhibited them only over a very small area of the bead, typically about 5%.

関ら[9]は、電気的溶融痕の樹枝状結晶構造(図7)に着目した。彼らは、樹枝状構造(デンドライト)は単に酸素濃度を反映しているだけであるから、その有無は一次痕か二次痕かの識別手段には使えないことを示した(表1)。酸素濃度がほとんど0の場合、樹枝状構造は形成されない。このときの共晶濃度を重量比で表わすと0.39%である。これより酸素濃度が低いと、銅の初晶が形成されるが、それ以上ではCu<sub>2</sub>Oの初晶が形成される。関らはLeeら[18]と共に、手法#5を提案した。この手法は、樹枝状構造が形成されている場合、その樹枝間隔(デンドライト・アームの間隔)が溶融痕が固化したときの周囲温度を反映している様子を観察するものである。彼らの見解では、一次痕は室温に近い温度(<400°C)で固化するため樹枝間隔が小さいが、二次痕は火災温度(>400°C)で固化するため、樹枝間隔が大きくなる(ただし、火災熱で溶融しない場合)。なお、彼らは、冷却速度や短絡前の周囲温度は樹枝間隔に影響しないことを見出した。彼らは、この結果をもとに、固化時の周囲温度及び酸素濃度と樹枝間隔の関係を表す実験曲線をCuとCu<sub>2</sub>Oそれぞれについて作成した。しかし、彼らの報告の写真からみて、特徴的な樹枝間隔を特定の溶融痕に当てはめる方法は極めて主観的判定であると思われる。彼らは広範囲の

実験を行なっている。しかし、この方法で一次痕と二次痕をうまく分類別けできるのかどうか、結果の記述中で明確にされていない。いずれの場合も、試験は本質的に小さな電気炉での加熱である。一次痕を作成して室内火災に暴露することは行なわれていない。この手法は熔融痕に樹枝状構造がないと適用できない。表1に示すように、大部分の熔融痕には樹枝状構造が見られない。樹枝状構造が滅多に見られないことは、最近Lewis[19]によって確認されている。実験的に作成した29個の二次痕のうち樹枝状構造がみられたのはわずか3個であり、10個の一次痕のうちではわずか1個であった。さらに、樹枝状構造が見られた熔融痕の場合も、この構造が見られたのは5%程度の非常に狭い範囲であった。

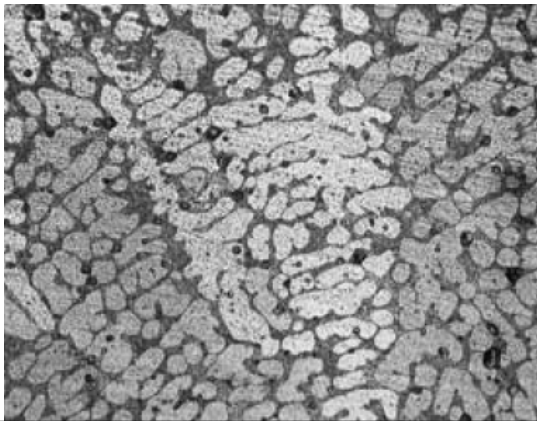


Figure 7. A copper wire bead showing a dendritic crystal structure (Courtesy Yasuaki Hagimoto).

図7 銅線熔融痕に見られる樹枝状結晶構造 (萩本提供)

Table 1. Dendritic crystal structure observed by Seki et al. in test arc beads.

Bead	No Dendritic Crystals (%)	Dendritic Cu Crystals (%)	Dendritic Cu <sub>2</sub> O Crystals (%)
Cause	57	38	5
Victim	92	8	0

表1 関らの熔融痕の樹枝状構造観察結果

	樹枝状構造のないもの(%)	Cuの樹枝状構造があるもの(%)	Cu <sub>2</sub> Oの樹枝状構造があるもの(%)
一次痕	57	38	5
二次痕	92	8	0

Method #6 was proposed by Levinson [6], who noted that if a substantial length of wire exhibits uniform recrystallization, this is most likely due to electrical overcurrent, rather than thermal heating from a fire, since the latter would be unlikely to heat a wire uniformly. Levinson carefully avoided claiming this distinction can be used as a proof of the origin of a fire, however, since the fire itself may have created conditions leading to an overcurrent.

手法#6は、Levinson[6]が提案した。彼が指摘したことは、電線がかなりの長さわたって均一に再結晶している場合には、火災熱でできたものではなく、過電流によってできた可能性が高いということである。それは、火災熱では電線が均一に加熱されることが難しいからである。しかし、

Levinsonは、この手法が出火原因の証拠として使えると主張することは注意深く避けている。それは、火災自身によって過電流状態が二次的に生じる可能性もあるからである。

## RAMAN SPECTROSCOPY AND X-RAY MICROANALYSIS METHODS ラマン分光分析とX線微量分析による手法

On the basis of a very small number of tests, Tokyo Fire Department [13] noted that carbonaceous material is likely to be found inside ‘victim’ beads, but not inside ‘cause’ beads. Masui [20] used X-ray microanalysis to examine for the presence of carbon in arc beads that he created by (a) causing a series-arc failure in a cord; or (b) by first charring the wire insulation with a burner flame, then causing a series-arc. His results were only exploratory, but they did show a negligible amount of carbon in the first type of bead, which would correspond to a ‘cause’ bead. The analysis showed the second bead to have nearly as high a local concentration of carbon as a pure carbon control sample. The second bead type, however, only partially represents a ‘victim’ bead in that insulation was charred prior to arcing, but the bead was not subsequently exposed to a fire.

1A series arc involving a pair of conductors is an arc which is in series with the load; it is distinguished from a parallel arc, which takes place in parallel to the load.

実験回数が非常に少ないが、東京消防庁[13]は、二次痕内部には炭化物が見つかりやすいが、一次痕はそうではないと指摘している。梶井[20]は、X線マイクロアナライザを使って電氣的熔融痕の中の炭素の有無について調べた。彼は、(a)電気コードに直列アークを起こす方法、あるいは(b)バーナー火炎で電線被覆を炭化させた後に直列アークを起こす方法で熔融痕を作成した。彼の実験結果は予備調査的なものであるが、一次痕に相当する前者の熔融痕に含まれる炭素量は無視できる程度であることを示した。また、後者の熔融痕の分析結果は、局所的には対象試料の炭素と同程度の濃度であることを示すものであった。ただし、後者の熔融痕はアーク放電が起こる前に炭化しているという点ではある程度二次痕を表すものであるが、その後の火災熱には暴露されていない。

1直列アークとは負荷と直列に起こるアークであり、負荷と並列に起こる並列アークと区別される

Lee et al. [21,22] carried this idea further by examining the constitution of carbonaceous inclusions. They did not collect any data on what fraction of beads contains carbonaceous inclusions, but rather studied beads that did have these inclusions with Raman spectroscopy to distinguish between amorphous and graphitic carbon. This can be done on the basis of Raman spectra since amorphous carbon shows a broad peak at 1350–1360 cm<sup>-1</sup>, while graphitic carbon has a sharp peak at 1580 cm<sup>-1</sup>. The authors created ‘cause’ and ‘victim’ beads in the laboratory and found that 100% of the ‘cause’ beads always contained amorphous carbon but 27% of 60 samples also contained graphitic carbon. In all of 20 ‘victim’ beads tested, amorphous carbon was detected; in none of them was graphitic carbon detected. The authors then examined 8 beads from actual fires where the status of the bead was established by other means. They were able to find graphitic carbon in 3 of the 5 ‘cause’ beads. The authors hypothesized that the effect occurs because PVC is bodily conveyed into the interior of an arc bead. In their view,

graphitic carbon is created inside the bead only if the sequence of creating the 'cause' bead is such that PVC insulation is slowly charred due to an electrical fault before final failure leading to arcing occurs. In a 'victim' bead or in a 'cause' bead where the fault rapidly leads to ignition, time required to form graphitic carbon is not available. 'Cause' beads of the latter type will occur when a large, rapid overcurrent melts the insulation and quickly creates a short circuit. It is not clear how the authors envision that carbon migrates into the copper, since they state that temperatures are only 110–250°C when PVC is being charred. In any case, the method has a rather low probability of identifying a 'cause' bead of only 27–60%.

Leeら[21,22]は、この考え方により、含有される炭素の組成についてさらに実験を行った。彼らは、炭素を含む溶融痕の割合については調べていない。彼らは、溶融痕に含有される炭素がアモルファスであるかグラファイトであるかを識別する目的で、ラマン分光分析装置を用いて研究を行った。アモルファスの炭素ではラマンスペクトルのピークが $1350\sim 1360\text{cm}^{-1}$ にあり、グラファイトでは $1580\text{cm}^{-1}$ に鋭いピークがあることから識別が可能である。彼らは、実験的に一次痕と二次痕を作成し、100%の一次痕がアモルファスな炭素を含有するが、試料60個のうちの27%はグラファイトも含有することを見出した。試験した20個の二次痕すべてでアモルファスな炭素が検出され、グラファイトはいずれにも検出されなかった。さらに、彼らは別の方法であらかじめ成因が判明している実際の火災現場の溶融痕8個についても検査した。そのうちの一次痕5個のうち3個について、グラファイトが見つかった。彼らは、PVCが溶融痕の中に巻き込まれたことが原因であると考えた。彼らの考えによると、一次痕の形成過程において、アーク放電が発生するより前の電気PVC絶縁被覆が徐々に炭化した場合にのみ、グラファイトが溶融痕の中に形成される。二次痕や、あるいは短絡後直ちに火災になった一次痕では、グラファイトが形成している時間がない。後者の一次痕は、例えば過大電流が急に流れて絶縁被覆が溶融し、短絡が起きたような場合に形成される。炭素がどのようにして銅内部へ移動するのか、著者らの考えは不明である。というのは、PVCが炭化する時温度はわずか $110\sim 250^\circ\text{C}$ であると、彼らが述べているからである。ともかく、この手法で27~60%しかない一次痕を識別できる可能性はかなり低い。

#### AES, SIMS, AND ESCA METHODS

オージェ電子分光分析法 (AES),  
二次イオン質量分光分析法 (SIMS),  
及びX線光電子分光分析法 (ESCA)

A number of techniques exist that allow the concentrations of certain elements in a metallic sample to be determined. These include Auger electron spectroscopy (AES), electron spectroscopy for chemical analysis (ESCA), and secondary ion mass spectrometry (SIMS). With any of these, a depth versus concentration profile can be made by progressively etching away portions of the surface and examining a lower layer. Erlandsson and Strand used AES in connection with their experiments discussed above to quantify the chlorine present in the surface particles attached to the bead, but, as mentioned above, the presence of chlorine was found not to be uniquely associated with 'victim' beads and was equally well found in 'cause' beads, if the 'cause'

arcs were created by shorting together insulated, rather than bare, wires.

金属試料中の特定元素濃度を測定する方法は数多い。その中には、オージェ電子分光分析法 (AES), 電子分光分析法 (ESCA), 二次イオン質量分光分析法 (SIMS) などがある。どの方法を用いても、表面を徐々にエッチングして取り除き、さらに深い部分を分析してゆくことにより、深さ方向の濃度分布を測定することができる。ErlandssonとStrandは、前述した彼らの研究にAESを用いて、表面付着粒子中の塩素の量を定量した。しかし、先に述べたように、塩素の存在は二次痕に特有のものではなく、塩ビ被覆電線を短絡させて作った一次痕でも同じように検出された。

In 1980, MacCleary and Thaman postulated [23,24] that an arc bead formed without a pre-existing fire ('cause' bead) would be formed in an oxidizing atmosphere, while one that occurred after a fire was already ongoing ('victim' bead) would be formed in a reducing atmosphere. Consequently, they believed that profiles of the oxygen concentration, as a function of depth below the surface of the bead, would enable identification to be made (Figure 8). Their patent [24] envisions that AES, ESCA, or SIMS can be used for this purpose, but their own work used only AES. Because of the limited sensitivity of their technique, they took the derivative of the signal data as the analysis variable and only sought relative magnitudes, not an absolute calibration of oxygen concentration. Figure 8 shows three samples they analyzed. The 'cause' bead was created by short-circuiting two conductors after preheating them for 15 s. The 'victim' bead was created by a small fire which short-circuited an NM cable. The 'overload' bead was created by producing a current-limited overload which heated the cable for some time (unspecified) before the conductor fused and arced. The authors also showed results from four beads taken from real fires where the fire cause was known. Their proposed scheme for identifying beads was to discard the first 5 nm of the surface (since it would likely reflect ambient oxidation of the copper) and to evaluate the remaining portion:

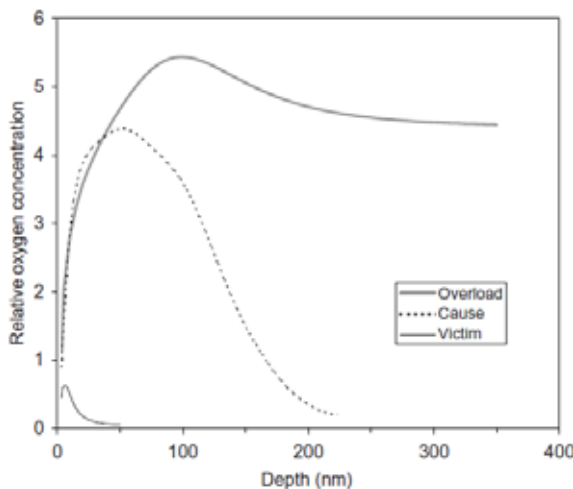
- if the concentration is generally low, the peak is found at 20 nm or less inside the surface, and concentrations beyond the peak become quite small, then this is a 'victim' bead;
- if the concentration is generally high, the peak is found at a depth of 20–200 nm, and the concentration decays slowly at greater depths, then this is a 'cause' bead;
- if the concentration is very high, and oxygen is detected to 2000–4000 nm, then this is a 'cause' bead where arcing was preceded by prolonged overheat.

1980年、MacClearyとThaman[23,24]は、次のように考えた。短絡前に火災熱を受けない電氣的溶融痕(一次痕)は、酸化性雰囲気中で形成されるが、火災がすでに進行しているときに短絡した溶融痕(二次痕)は、還元性の雰囲気中で形成される。その結果として、溶融痕表面からの深さ方向の酸素濃度分布から識別が可能であるに違いないと彼らは考えた(図8)。彼らの特許[24]は、この目的にAES, ESCAあるいはSIMSが使えるというものであった。しかし、彼ら自身の研究には、AESが使われただけであった。彼らの手法の検出感度には限界があったため、彼らは得られた信号データを分析変数として考え、酸素濃度の絶対的校正で



はなく、相対的比較として追求しただけであった。図8は、彼らが分析した3つの試料を示している。一次痕は、15秒間加熱した後短絡させて作成したものである。二次痕は、小さな火でNMケーブルを短絡させたものである。溶断痕(‘overload’ bead)は、電流を制限した過電流状態によってケーブルが溶断してアーク放電が発生するまでの間加熱して作成したものである。彼らは、出火原因が不明な実際の火災現場で採取した4個の溶断痕についても分析結果を示している。彼らが提案した溶断痕の識別手法は、まず表面の厚さ5nmを取り除き(銅の自然酸化の影響があると考えられるため)、残った部分を次のように評価するというものである。

- 酸素濃度が概して低く、ピークが表面からの深さ20nmかそれ以内にあり、さらにピークを過ぎたあとの酸素濃度が非常に小さい場合には、それは二次痕である。
- 酸素濃度が概して高く、ピークが深さ20~200nmにあり、さらに深さ方向の酸素濃度の減少が緩慢である場合には、それは一次痕である。
- 酸素濃度が非常に高く、さらに酸素が深さ2000~4000nmで検出された場合には、それは長時間過熱したあとで短絡した一次痕である。



**Figure 8.** Oxygen concentration profiles shown in the patent by MacCleary and Thaman.

図8 MacClearyとThamanの特許の中で示されている酸素濃度分布

The authors also pointed out that the method cannot be used if a remelt occurred. To detect the latter, they proposed that a bead be cut in half and an AES scan be made across the diameter. If four, rather than two, peaks are found across the diameter, then a remelt is indicated. Robertsson et al. [25] attempted to validate the MacCleary/Thaman method, but found that the oxygen profiles could not reliably distinguish ‘cause’ from ‘victim’ beads.

Satoh et al. [26] used AES and SIMS to obtain O, C, and Cl profiles on four specimens: a ‘cause’ and a ‘victim’ bead from actual fires and a ‘cause’ and a ‘victim’ bead produced in the laboratory. The ‘cause’ bead was created by short-circuiting a stranded-conductor cord, then exposing it in a burner flame, while the ‘victim’ bead was produced by placing the cord into a burner flame until it shorted. Depth profiles were obtained by etching the surface down with a cesium ion beam (for the SIMS) or an argon ion beam (for

the AES). They plotted both the AES and the SIMS data in a way as to normalize the remaining elements to Cu, which was taken to have a constant depth profile. From these preliminary plots, they concluded that the primary feature of a ‘cause’ bead is an oxygen profile that rises to a peak at about 1000nm beneath the surface, and only then proceeds to fall. By contrast, ‘victim’ beads showed O, C, and Cl concentrations that were all similarly-shaped decay curves, without any appreciable rising portion. By comparing AES and SIMS results, they observed that AES is much less sensitive and incapable of good resolution deeper than about 1000 nm; thus they concluded that SIMS is the preferred technique. In a later study [27], they used only SIMS to examine 10 beads recovered from fires where the cause/victim identity of the beads was known (Figure 9). The fires however were all small and none had reached the fully-involved room stage. One of the beads was so heavily surface-damaged that it was considered not appropriate for analysis. Of the remaining 9 beads, all were correctly classified by adopting the following rule:

- if the (absolute) oxygen concentration at the 3000 nm depth is  $<10^{17}$  atoms/mm<sup>3</sup>, then it is a ‘cause’ bead;
- if the concentration is  $>10^{17}$  atoms/mm<sup>3</sup>, then it is a ‘victim’ bead.

この手法は再溶融が起きた場合には適用できないとも彼らは述べている。これを調べる方法として、溶断痕を半分に分けてAESで直径方向へスキャンすることを提案している。そして、2個というよりはむしろ4個のピークがあった場合には、再溶融した可能性があるとしている。Robertssonら[25]は、MacCleary/Thaman法の評価を試みた。しかし、酸素濃度分布による一次痕と二次痕の信頼できる識別はできなかった。

佐藤ら[26]は、AESとSIMSを用いて、4個の溶断痕のO, C, Clの分布を測定し。これらは、実際の火災現場で採取した一次痕と二次痕及び実験的に作成した一次痕と二次痕である。一次痕は、内部導体が撚り線のコードを短絡させた後、バーナー火炎中に曝したものである。一方、二次痕は、短絡が起こるまでコードをバーナー火炎中に曝したものである。深さ方向の濃度分布は、セシウムイオンビーム(SIMSの場合)あるいはアルゴンイオンビーム(AESの場合)によって表面をエッチングしてゆくことによって得られた。彼らは、深さ方向に一定の濃度分布を持たせた銅で残存元素を正規化するという方法を用いて、AESとSIMSの両方のデータをプロットした(?…原文: They plotted both the AES and the SIMS data in a way as to normalize the remaining elements to Cu, which was taken to have a constant depth profile.)。これらのプロットに基づいて、彼らは次のように結論した。一次痕の主な特徴は、酸素濃度分布が表面から約1000nmの深さにピークを持ち、それ以上では単調減少するということである。これに対して、二次痕では、O, C, Clの濃度がいずれも同じような減衰カーブを描き、増加する部分は見られない。AESとSIMSの結果を比較したところ、AESは約1000nm以上の深さでは感度が低く、良い分解能が得られないという結果であった。そのため、SIMSを用いた方が好ましいと結論している。その後の研究[27]で、彼らはSIMSのみ使用して、火災現場から採取した一次痕か二次痕かが分かっている10個の溶断痕を分析した(図9)。ただし、その火災はいずれも小火であり、全室火災の段階には至っていない。溶断痕のうちの1個は表面の損傷が著しく分析に適さないと考えられた。残りの9個については、次の

基準を適用することにより、すべて正しく識別された。

- 深さ3000nmにおける(絶対)酸素濃度が $< 10^{17}$  atoms/mm<sup>3</sup>であれば一次痕である。
- この酸素濃度が $> 10^{17}$  atoms/mm<sup>3</sup>であれば二次痕である。

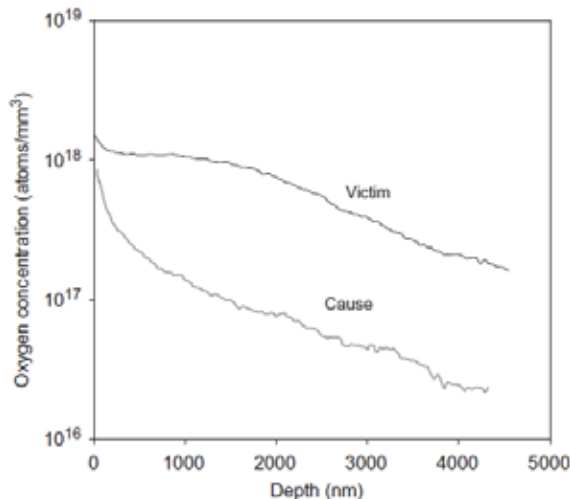


Figure 9. Oxygen concentration profiles, as measured by Satoh et al.

図9 佐藤らが測定した酸素濃度分布

They cautioned, however, that the results must only be viewed as preliminary. They hypothesized that the distinction arises because the environment temperature is high when a 'victim' bead is formed and this allows a greater amount of oxygen to diffuse into a piece of copper that has been preheated. It must be noted that this is the exact opposite of the MacCleary/Thaman classification, where low—not high—oxygen concentration denote a 'victim' bead, although Satoh et al. analyzed concentrations at much greater depths into the bead, while the MacCleary/Thaman technique had sufficient sensitivity to characterize only a shallower region. Satoh et al. [28] continued the research with 65 additional samples from real fires and then found that there was only a 39% agreement between their proposed technique and the conclusion from that particular fire investigation.

しかし、彼らは、結果を予備試験的なものとみるだけにとどめるべきだと警告している。彼らの仮説によると、二次痕が形成されるとき周囲温度は高いので、より多くの酸素が銅(短絡したときすでに加熱されて高温になっている)の内部へ拡散し、そのために一次痕と二次痕の違いが生じるというものである。これは、MacClearyとThamanの分類とは全く逆であるということに注意すべきである。MacClearyとThamanの分類では、低い(高くない)酸素濃度は二次痕を意味している。ただし、佐藤らが深い部分まで分析したのに対し、彼らが十分な感度で分析したのは浅い領域に限られていた。佐藤ら[28]は、さらに実際の火災現場の熔融痕65個について分析した。その結果、この手法で得られた結果と現場調査の結果が一致したものはわずか39%であった。

MacCleary and Thaman did not pursue further the ideas of their patent, but since 1989, a method has been promoted by Anderson [29] that is an extension of the MacCleary/Thaman idea. Anderson noted that ambient air

contains significant amounts only of oxygen and nitrogen. If an arc occurs between two wires in ambient air, then only oxygen can dissolve into the bead while the bead is in its molten state (nitrogen does not dissolve into copper). However, if the arc occurs in an atmosphere where there is an ongoing fire, then a number of other atoms will be found in the atmosphere; these will also dissolve in the bead. Apart from oxygen, Anderson used carbon, chlorine, sulfur, calcium, zinc, iron, phosphorus, and chromium atom profiles. He did not propose any quantitative criteria for distinguishing between 'cause' and 'victim' beads, relying instead on a subjective evaluation, with apparently some emphasis placed on the carbon profile. Thus, a sizable concentration of carbon would indicate a 'victim' bead, while a lack thereof would suggest a 'cause' bead. Figure 10 shows a bead presented by Anderson [36] as a 'cause' bead, while Figure 11 shows a 'victim' bead.

MacClearyとThamanは、彼らの特許のアイデアに関してそれ以上追求しなかった。しかし、1989年以降、MacClearyとThamanのアイデアを拡張した手法をAnderson[29]が提唱している。彼の指摘によると、周囲の空気には多量の酸素と窒素のみが含まれている。そのため、もし大気中の電線間でアーク放電が起こると、熔融状態にある熔融痕の中に酸素だけが溶け込む(窒素は銅の中には溶け込まない)。しかし、火災中でアーク放電が起きた場合には、大気中には様々な原子が存在し、これらも熔融痕の中に溶け込むであろう。Andersonは、酸素のほか、炭素、塩素、イオウ、カルシウム、亜鉛、鉄、リン、クロムの濃度分布も指標として用いた。彼は、一次痕と二次痕を識別するための量的な基準は何ら提案していない。その代わりに、炭素の濃度分布の特徴を明らかに重視するという主観的な評価に依存している。かくして、大きな炭素濃度は二次痕を示し、炭素不足は一次痕を示すという。図10はAnderson[36]が示した一次痕、図11は二次痕である。

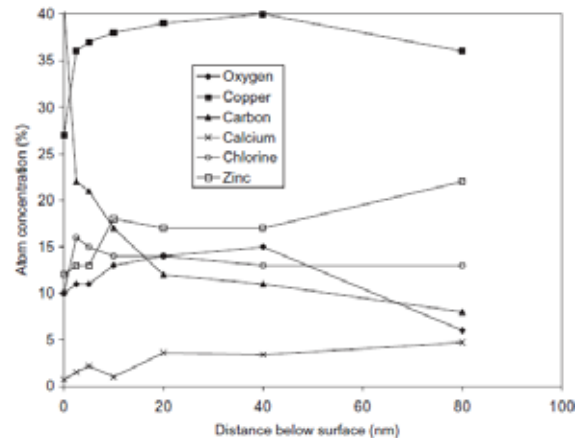


Figure 10. A 'cause' bead, Anderson's case 1 (plots of data originally presented by Anderson in tabular form).

図10

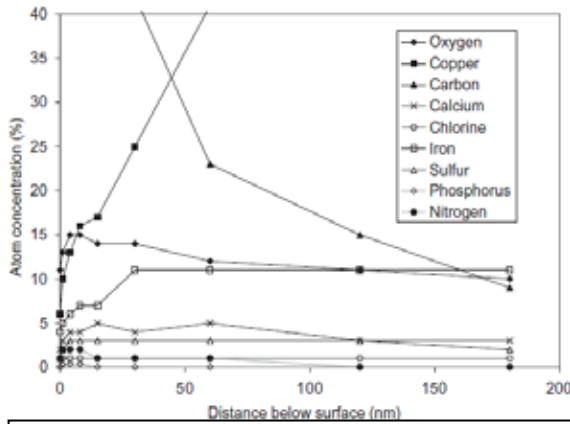


Figure 11. A 'victim' bead, Anderson's case 3 (plots of data originally presented by Anderson in tabular form).

図11

The basic notion, however, that nonoxygen atoms will become available for incorporation only into 'victim' beads lacks foundation. In most practical cases, wires are insulated by a polymeric material, typically PVC. The polymer is in contact with the conductor and may be vaporized regardless of whether the arc bead was the first event of the fire, or if it occurred much later in the fire. Thus, it is not clear why a more copious presence of carbon or chlorine atoms would suggest a 'victim' bead. Similarly calcium carbonate is a common filler for plastics used in electrical wiring, so calcium may also be anticipated from either destruction of wire insulation as part of the initial arcing or from events much later in the fire.

しかし、酸素以外の元素が二次痕だけの内部に入り込むという基本概念は、根拠を欠いている。実際の火災ではほとんどの場合、電線はPVCに代表される高分子材料で被覆されている。電線の導体と接触している部分の高分子材料は、溶融痕の形成が出火の前であるか後であるかには関係なく蒸発するだろう。したがって、なぜ炭素や塩素の多いことが二次痕を意味するのか明確ではない。同様に考えれば、炭酸カルシウムが電気配線で樹脂の増量剤 (filler) として一般に使われているので、カルシウムも、火災前あるいは出火後いずれかのアーク放電に関わることが予想されるだろう。

One of the pivotal assumptions of the MacCleary/Thaman/Anderson theory is that the elemental profiles are frozen into the bead once the bead has cooled. Consequently, it is considered that once the arcing has stopped, further exposure to the fire atmosphere will not affect distribution of elements to be found within the bead (except possibly at the very surface, which is to be removed and discarded in their testing procedure). The principle is that the solubility of gases is much greater in liquid copper than in solid copper and, thus, the gases will be trapped after the bead solidifies and this distribution will be frozen in place and available for later study. Howitt [30] argued against this, but the basic concept that a substantial amount of oxygen can be dissolved in molten copper is correct [31,32]. Some gases can enter into copper while it is hot but not molten, however. This is the reason that stranded copper wires recovered from fire scenes often crumble to bits in the process of examination—the material has turned into copper oxide and no longer has mechanical strength. Howitt also conducted

tests [33], but using energy-dispersive X-ray spectrometry (EDS), instead of AES. He was criticized by a laboratory offering AES services [34] for using a technique that is much less sensitive, but this does not seem germane, since his results showed adequate sensitivity. More problematic is the fact that a depth profile was not established, only a concentration within a relatively thick subsurface layer. Howitt analyzed 13 samples obtained under various combustion and no-combustion conditions and noted that no systematic differences in C or O concentrations could be found that would be attributed to the presence of a pre-arc fire.

MacCleary, ThamanあるいはAndersonの説における重要な仮定の1つは、溶融痕が冷却した後は元素の濃度分布が変化しないということである。そのため、一旦アーク放電が停止した後は、その後の火災雰囲気は溶融痕内の元素分布に影響しないと考えられる(ただし、彼らの手法では除去されるごく表面は別だろう)。これは、固体よりも液体の銅中の方が、ガスの溶解度ははるかに大きく、そのため溶融痕が固化した後はガスが閉じ込められ、その後も分布が変化しないため、後で分析が可能になるという原理である。Howitt[30]は、これに反論している。ただし、かなりの量の酸素が溶融した銅に溶け込み得るという基本概念は正しい[31,32]。ところが、ある種のガスは、銅が溶けているときよりも高温のときの方が内部へ入り込み易い。火災現場で採取した撚り線が検査中に砕け易いのはそのためである。酸化銅に変化し、機械的強度を失っているからである。Howittも実験を行っているが、彼が使用したのはAESではなく、エネルギー分散型X線分光分析(EDS)である。彼は、感度ははるかに低い手法を用いたことに対して、AES提供業務を行っている研究所から批判された[34]。しかし、彼の実験結果が感度的に十分であったことから、この批判は適切なものとは思えない。問題はむしろ、深さ方向の分布が測定していないことである。彼が測定したのは、比較的厚い表面層内での濃度のみである。Howittは、燃焼なしの場合を含め、様々な燃焼条件で作成した溶融痕13個を分析し、出火前のアーク放電に起因したと考えられるCやOの濃度の系統的な差異が認められないことを示した。

The use of Anderson's method for forensic purposes would require a quantitative protocol for analysis, specifically, concerning how the depth profile should be considered. Argon-ion sputtering is used in the Anderson method to remove the outer layer ("environmental cap" in his terminology). In his scheme, the cap comprises all the layers until a region is reached which has at least 60% copper. Consequently, the disregarded environmental cap is stated in his reports as having widely-varying thicknesses: 2.5 nm [38], 5 nm [35], 5–10 nm [36], or 5–20nm [37]. But once the "environmental cap" has been removed, Anderson relies solely on a qualitative judgment that a 'victim' bead shows a profile where C, Cl, and Ca atoms are abundant to a greater subsurface distance than in a 'cause' bead [38]; he does not appear to have been able to establish any quantitative criteria for making this distinction.

Andersonの手法を法科学の目的で使う場合には、量的な解析手順が必要である。特に深さ方向の濃度分布をどのように測定するかという手順が必要である。Andersonの手法では、表面層(彼は環境皮膜"environmental cap"と称している)を除去するためにアルゴンイオンスパッタ

リングを使用する。彼の考えでは、この環境皮膜がすべての層を覆っているため、その領域の銅は少なくとも60%になっている。そのため、無視されるべき環境皮膜の厚さは、2.5nm[38]、5nm[35]、5～10nm[36]、あるいは5～20nm[37]であると彼は報告している。しかし、一旦環境皮膜を除去した後は、彼は「二次痕は一次痕よりも深いところでC、Cl、及びCaの量が多い分布特性を示す」という単なる質的判断のみ依存している。彼が識別の量的基準を確立したようには思えない。

Be' land [39] pointed out that there is a significant statistical problem with the method even in a single laboratory: tests conducted on different portions of the same bead give substantially different results. An AES spectrometer can be operated in a raster-scan mode to characterize surface areas; however, no statistical technique has been demonstrated for obtaining characteristic averages in this way. He also pointed out [40] that Anderson's published work did not include even elementary descriptions of the tests performed, such as the exposure times for the specimens. Anderson claimed [37] that, in a fire litigation case, he was able to correctly distinguish 'cause' from 'victim' beads but Be' land [40] argued that this was not done 'blind.'

Beland[39]は、たとえ同じ研究所で行った同じ溶融痕の異なる箇所の検査が実質的に異なる結果になったとしても、この手法には統計的に重大な問題があると指摘している。AES分光分析装置は、表面の特性を分析する際にラスタースキャンモードで運転される。しかし、このモードで表面特性の平均を得る統計的技法は明らかにされていない。さらに彼[40]は、Andersonが発表した研究には試料の暴露時間のような基本的事項も記述されていないことも指摘している。Anderson[37]は、自分の担当する火災訴訟の中で一次痕と二次痕を正しく判定できたと主張しているが、Belandは、それはブラインドで行われたものではないと反論している。

Ettling [41] examined Anderson's data [29] and found numerous problems and inconsistencies. In his view, the basic problem is that in real fires—as opposed to Anderson's laboratory tests—a bead will most likely remain in a fire environment for an extended time, regardless of whether it is a 'cause' or a 'victim' bead. Thus, laboratory studies where a bead is created and then quickly removed from a fire environment do not present relevant information. Ettling also noted that in Anderson's study, the oxygen content of a bead formed in air was higher than for a bead formed in oxygen. No explanation was given by Anderson in his paper [29] for this (nor did Anderson provide any description in his paper of specimen preparation or exposure procedures). Another questionable result was a bead from a 'victim' arc occurring near a gypsum wallboard which showed high amounts of sulfur. Electric arcs in branch circuit wiring do not normally vaporize gypsum wallboard, and there is negligible calcium sulfate liberated even as hydration water is lost during a postflashover stage of fire. Thus, Ettling concluded that presence of sulfur is likely to indicate contamination to a hot bead, rather than being a useful tool for unraveling the early history of the fire.

Ettling[41]は、Andersonのデータ[29]を吟味し、数多くの問題点と矛盾点を見つけた。彼によると、基本的な

問題は、実際の火災 (Andersonの実験室に対するものとして) では、溶融痕は、それが一次痕であるか二次痕であるかに関わらず、火災の環境の中にもっと長い時間とどまっていると思われる。したがって、溶融痕を作成した後、速やかに火災環境から取り出した実験室での研究結果は適切な情報を与えていない。Ettlingは、Andersonの研究では空気中で作成された溶融痕の酸素濃度が酸素中で作成された溶融痕よりも高いということについても指摘している。Andersonの論文[29]では、この点についての説明が全くない(あるいは、Andersonは、彼の論文で、試料の作成や火災環境への暴露方法について詳細を全く述べていない)。ほかにも疑わしい結果がある。石膏ボードの壁面の傍で発生した二次的アーク放電による溶融痕が高い硫黄濃度を示したということである。通常、分岐回路配線で起きるアーク放電が石膏ボードの壁を蒸発させることはない。ポストフラッシュオーバー段階の間に水と水が失われるということはあるが、硫酸カルシウムの解放はごく僅かである。Ettlingは、硫黄の存在は、火災の初期段階を解明する有用なツールではなく、むしろ高温の溶融痕に生じた汚染物質と考えられると結論している。

Ettling also analyzed Anderson's later paper [36] where he presented AES results on beads recovered from three fires. In one case (Figure 10), the very deepest layer tested, 80 nm, showed zinc to be about 2/3 as plentiful as copper. Ettling points out that, at high temperatures, zinc oxidizes in air so readily that only zinc oxide should be available in the air, and the latter is unlikely to migrate into the bead. Thus, he concluded that this large amount of zinc came from a gross surface contamination of the bead. In another of Anderson's example cases (Figure 11), a power cord bead was examined from a failed electrical cooking pot. For layers below the "environmental cap," copper was the most abundant element, with iron being next. Anderson claims the iron came from the failed element, but this would require that both the cord and the element be arcing at the same time, and that a huge fraction of the iron end up in the bead. Equally problematic is that if the iron came from the heating element, no chromium or nickel (from the resistance wire itself) was recovered.

Ettlingは、3件の火災現場から採取した溶融痕のAES分析に関するAndersonのその後の論文[36]についても検証している。1つのケース(図10)では、測定した中で一番深い80nmで亜鉛が銅の約2/3であった。Ettlingは、高温では、亜鉛が空気中で非常に酸化しやすいので、空気中には酸化亜鉛だけが存在し、これが溶融痕内へ移動するとは考えられないと指摘している。よって、彼は、この多量の亜鉛は表面汚染物に由来すると結論している。Andersonの他の例(図11)は、故障した料理用電気鍋の電源コードの溶融痕である。“environmental cap”より下層では、銅が最も多く、次いで鉄である。Andersonは、鉄は故障した器具に由来すると主張している。しかし、その場合は、コードと器具の両方が同時にアークを生じ、さらに大きな鉄片が溶融痕の中に入らなければならない。また、もし鉄が加熱器具に由来するのであれば、(発熱線自体からの)クロムやニッケルが検出されていないことも同様に疑問である。

Henderson et al. [42] attempted a direct validation of Anderson's theory by preparing specimens under two conditions. The 'cause' beads were prepared by

shorting together 18 AWG stranded copper wire in air; the ‘victim’ beads by placing the insulated, energized wire in a fire and waiting until an arc occurred. They found that the carbon profiles overlapped, and that there was no way to unambiguously differentiate between the two sets of results. Be’ land ran a similar set of experiments [39] and obtained the same conclusion in comparing the chlorine profiles of ‘cause’ and ‘victim’ beads.

Hendersonら[42]は、2種類の条件の試料を準備し、Andersonの理論を直接検証することを試みた。一次痕は18AWG(断面積0.823mm<sup>2</sup>)の撚り線間を大気中で短絡させて作成し、二次痕は絶縁電線を火災中に短絡するまで暴露して作成した。その結果、炭素の濃度分布がオーバーラップしていること、また両者を明確に識別できないことが判明した。Belandは同じような実験[39]を行い、一次痕と二次痕の塩素の濃度分布を比較して、同じ結論を得ている。

Reese [43] pointed out that in dwellings, when a fire originates in branch circuit wiring and a bead is found, the event commonly involves arcing-through-char, not a simple metal-to-metal short. The latter would be likely to cause rapid tripping of the circuit breaker and would only rarely start a fire. Thus, while wire beads can be created readily in the laboratory by simply shorting two bare conductors against each other, this type of event is not common in accidental fires. If a fire originates from an electrical fault where charring occurred first, followed by shorting, then the AES test result will presumably be a false negative, since it will be formed in an environment containing reaction products from the charring of wire insulation. Fitz [44] pointed out a more fundamental logical concern with the AES scheme. In addition to arcing-through-char, a short circuit can happen due to radiant heat flux falling onto a thermoplastic cable or cord from an ongoing fire. When the insulation softens sufficiently for the conductors to make contact and produce a short circuit, there will not be any combustion or combustion products in the vicinity of this arc. This effect particularly may occur inside appliances, in engine compartments, or in wall cavities subjected to external heating. Thus, a positive AES result (“this bead was the cause of the fire”) will be reported, despite the fact that the bead was the victim and not the cause.

Reese[43]は、住宅火災では分岐回路から出火して短絡痕ができる場合、通常は炭化物を介したアーク放電となり、金属導体間が直接短絡することはないと指摘している。導体間が直接短絡した場合には、瞬時にブレーカーが遮断し、火災になることは滅多にないだろう。それゆえ、実験室で2本の裸電線を接触短絡させて熔融痕を作成することはできるが、これは実際の火災で一般的な現象とは言えない。絶縁材が炭化した後で短絡した箇所から出火した場合には、AES分析はおそらく誤った否定的結果(つまり一次痕ではないという結果)を示すだろう。というのは、電線絶縁被覆の炭化過程の反応生成物を含む環境下で短絡痕が形成されるからである。Fitz[44]は、さらに基本的で論理にかなったAES手法の懸念を指摘している。炭化物の介在したアーク放電のほかにも、熱可塑性樹脂絶縁のケーブルや電線が火災からの熱放射によって短絡することがある。絶縁被覆が軟化して短絡が起きた時点では、アーク放電の近傍に燃焼も燃焼生成物も存在しない。このような短絡は、特に外部からの熱に曝された器具内、エンジン区画内、あるいは壁内

内で起こりやすい。したがって、熔融痕が一次痕ではなく二次痕であるにもかかわらず、AES分析は肯定的結果(「この熔融痕は一次痕である」)になるだろう。

For a laboratory technique that has been offered for forensic purposes, it is also a serious concern that the basic details of the phenomenon being utilized have not been studied scientifically. The elements identified in an AES spectrum must originally start out as atoms or molecules somewhere else. Through processes of transport and reaction, they end up embedded in the bead, but the chemical history that takes them there has not even been conjectured. Likewise, after they have entered the bead, no theory has been offered to provide a quantitative understanding of the depth profiles and of the lateral concentration variations in the bead.

Only one published study could be found supportive of Anderson’s claims. Metson and Hobbis [45] performed an AES analysis on a single bead removed from the wall cavity of a fire scene, but suggested that reference to Anderson’s work suffices to establish validity of results.

法科学目的で提唱されてきた実験室技術としてみた場合、識別根拠として利用されている現象の基本的なことが科学的に研究されていないということも重大な懸念である。AESスペクトルで検出される元素は、はじめはどこか他の場所で原子や分子として放出されなければならない。そして、移動と反応の過程を経て、最終的に熔融痕の中に入り込む。ただし、そこに至る化学的過程については、憶測すら行われていない。同様に、熔融痕の中に入った後の深さ方向の濃度分布と横方向の濃度変化を定量的に理解するための理論も全く提唱されていない。

Andersonの主張を支持する研究が1つだけある。MetsonとHobbis[45]は、火災現場の壁の穴から採取した1つの熔融痕のAES分析を行ったが、Andersonの研究成果を引用することで分析結果の妥当性が十分立証できた。

## DISCUSSION

Most of the proposed methods have been pure empiricisms, without any theoretical basis. Obviously, these could only be validated by a preponderance of empirical data. But some others refer to a theoretical principle, even though an actual quantitative theory has not been offered by any researcher. The relevant principles must necessarily be based on some hypothesis that the chemical or the thermal histories of ‘cause’ and ‘victim’ beads form nooverlapping populations. Concerning chemical histories, there have been only two hypotheses: (1) ‘Cause’ and ‘victim’ beads are uniquely associated with oxidizing and reduction atmospheres, respectively. In turn, the oxygen content of the bead will uniquely reflect this. But as Robertsson et al. [25] observed: “The oxygen content in the surface layer of a melt bead does not only depend on the type of damage but also on the thermal pre- and post-history of the electrical damage.” In other words, once a bead is created—either a ‘cause’ or a ‘victim’ bead—it may remain for a long time in atmospheres that range from oxidizing (good supply of oxygen), to reducing (buried in oxygen-depleted, glowing or smoldering rubble). (2) The atmosphere surrounding a ‘victim’ bead will contain material that originated from decomposing solids nearby, while that around a ‘cause’ bead will not. Adequate amounts of this material (carbon, etc.) will then be found in

the bead. This hypothesis is refuted, however, when it is considered that 'cause' arcs can and do occur in environments where the insulation already has been substantially degraded. Conversely, a short-circuit can occur during a fire due to molten wire insulation in a protected environment where there are no local combustion products and a minimum of pyrolysis products.

提案されてきた手法の大部分は、理論的根拠のない全くの経験論である。確かに、これらの手法は多くの実験的事実のみに基づいている。実際的かつ定量的理論を誰も提唱していないにもかかわらず、架空の原理に基づいているものもある。関連する原理はいずれも、一次痕と二次痕の化学的あるいは熱的履歴の集団はオーバーラップしないという仮説に基づいたものでなければならない。化学的履歴に関しては、次の2つの仮説しかない。(1)一次痕と二次痕は、それぞれ一意的に酸化性雰囲気と還元性雰囲気に関連している。言い換えると、熔融痕内の酸素含有量が一意的にこのことを反映しているということである。しかし、Robertssonら[25]は、「熔融痕表面層の酸素濃度は、短絡がどうであったかということだけでなく、短絡前後の熱履歴にも依存する。」ということを示している。言い換えると、一旦熔融痕となった後は、…一次痕であろうと二次痕であろうと…酸化性(酸素が十分)から還元性(酸素が欠乏した赤熱あるいは燻焼している残渣中に埋没した状態)に及ぶ広範囲の雰囲気中に長時間とどまることになるだろう。(2)二次痕の周囲の雰囲気には付近の固体が分解してできる物質が含まれ、一方で一次痕ではそのようなことがない。そうすると、見合った量のこれら物質(炭素など)が熔融痕内で検出されることになる。しかし、この仮説は誤りである。一次痕のアーク放電は絶縁被覆がすでにかかり劣化した環境下で起こることであることを考えてみればわかることである。反対に、火災中で絶縁被覆が熔融して起こる短絡は、付近の燃焼生成物から隔離され、熱分解生成物がごく僅かしかない環境下で起こるだろう。

Thermal histories of arc beads can be diverse, but it is hard to envision any aspects that innately separate 'cause' from 'victim' beads. The temperature of an arc itself is vastly higher than the temperature of flames, but this is no help in making a distinction, since both arc temperatures and flame temperatures will have been attained at some time for beads of both types. Any bead can be expected to remain in a fire for a long time after it was formed—or a short time. An extended period of very high conductor temperatures, due to gross overload, may also precede the formation of an arc, irrespective of whether it is a 'cause' or a 'victim' arc. Remelting of an arc bead, of course, is universally agreed to eliminate any chance of deducing its prior history. One research group proposed that 'cause' beads, once formed, are likely to solidify at fairly low temperatures, while 'victim' beads will solidify at high temperatures. This presumes that fire heating will not be rapid, once a 'cause' bead initiates a fire. The hypothesis is questionable and, in any case, has not been experimentally examined apart from the authors' work.

熔融痕の熱履歴は多様である。しかし、一次痕と二次痕を本質的に分ける特徴を想像することは困難である。アーク放電の温度は火災温度よりもはるかに高いが、そのことは熔融痕識別の役にはたさない。なぜなら、一次痕・二次痕共に、いずれの温度も短時間しか実現されないからである。いかなる熔融痕も、火災中で長時間…または短時間…

残存していると考えられる。また、一次痕・二次痕にかかわらず、アーク放電が起こるより前に、過負荷によって導体温度が非常に高くなる期間もあるだろう。もちろん、電氣的熔融痕が再熔融した場合には、それ以前の履歴を推論できる可能性がなくなることは誰もが認めることである。一次痕はかなり低い温度で固化するが、二次痕はかなり高い温度で固化すると考えた研究報告がある。その報告では、一旦一次痕によって火災が起きたあとは、火災による加熱は急速ではないと仮定している。この仮説には疑問がある。とにかく、この報告以外では、誰もこの仮説を実験的に検証していない。

Most of the techniques described in the literature have clearly been identified by their authors as being exploratory, initial investigations and not as finalized, validated methods. The one exception is Anderson's method, which he has claimed is sufficiently developed to be suitable for forensic purposes [29]. But evidence does not support the idea that this method is indeed ready for such usage. The main problems with the method are: (1) apart from the knowledge that oxygen and some other elements can dissolve into molten copper, there has been no chemical or metallurgical study that examines the details of the process and establishes a theoretical basis for concentration distributions to be expected in the solidified bead; (2) no quantitative criteria for distinguishing 'cause' from 'victim' beads have been developed; (3) even if postfire contamination does not occur, subsequent and repeated heating in the fire environment makes interpretation of results uncertain; (4) the method is intrinsically subject to producing false positive and false negative results. False positives would indeed appear to be a problem, judging from Anderson's report [46] that he determined 1/3 of all the arc beads that he examined to be 'cause' beads. In the normal course of events, 'victim' beads should outnumber 'cause' beads by a huge fraction, since many fires cause extensive arcing, while generally there will only be one arc—at most—responsible for starting a fire.

文献に示された識別手法の大部分は、著者らによって、予備的で初期調査用であることは明確に確認されているが、最終的で有効な手法であるかどうかまでは確認されていない。そうではない1つの例外はAndersonの手法である。彼の主張によると、この方法は、法科学目的[29]で用いるために開発されたものである。しかし、この手法が本当にそのような用途に使えるということを裏付ける証拠はない。この手法の主な問題点は次のとおりである。(1)酸素や他の元素が熔融した銅の中へ溶け込み得るということについての知識はあるものの、その過程を詳しく調べ、固化した熔融痕の内部に元素の濃度分布が生じ得るという理論的基礎を確立した化学的あるいは冶金学的研究が、まだない。(2)一次痕と二次痕を識別するための量的基準が明らかにされていない。(3)フラッシュオーバー後の汚染が起こらなくても、その後の火災環境下で熱を受けるため、結果の解釈は不明確なものとなる。(4)本質的に、この手法は、擬陽性と偽陰性の結果を前提としたものである。検査した熔融痕の1/3が一次痕と判定されたというAndersonの報告[46]から判断すると、擬陽性の結果は実に問題であると思われる。通常の出火過程では、ほとんどの場合、出火原因になるアーク放電が1箇所だけであるのに対し、二次的なアーク放電は多数発生する。そのため、二次痕は一次痕よりも圧倒的に数

が多くなければならないからである。

## CONCLUSIONS

After a comprehensive examination of the published studies, the author cannot find much promise with any of the methods that have been proposed for distinguishing between 'cause' and 'victim' beads. The reasons are the following:

- (1) Many methods have been offered without any supporting theory. But the few theories that have been offered are inconsistent with the knowledge of the variety of behaviors that are found in room fires.
- (2) With a few exceptions, all of the methods have been put forth as qualitative and subjective, without means of quantification.
- (3) The methods typically have been based on studies using an extremely small number of experiments. In the few studies where sufficient samples were used to enable statistical conclusions to be drawn, the 'cause' and 'victim' bead populations showed sufficient overlap that only trends, not categorical distinctions, could be drawn. In the only study where comparison was made to a fairly large number of real-fire beads of known identity, the results were unacceptable (39% success).
- (4) Almost all of the fire exposures in the laboratory-created beads have been very different from real room fires.
- (5) None of the methods has been independently validated, although several validation attempts have been made and led to conclusions of irreproducibility.
- (6) Most researchers proposing the various methods have suggested them in the spirit of ideas meriting further research, but Anderson has argued [29] that his method is robust enough that it already should be accepted for forensic purposes. However, his method does not appear to be more promising than any of the other methods.

In addition, it is not evident that any method could be developed in the future which is robust and reliable. This could only be possible if chemical or thermal exposure conditions were invariably different during the formation of 'cause' versus 'victim' arc beads. But distinctions of this kind have not yet been discovered.

公表されている研究を総合的に検証した結果、一次痕と二次痕を識別するために提案された手法はいずれもあまり期待できるものではないことが判明した。その理由は、次のとおりである。

- (1) 多くの手法は、理論的根拠なしに提案されている。いくつかの理論は提示されているが、室内火災挙動の多様性に関する知識とは整合性のとれないものである。
- (2) 若干の例外はあるが、いずれの手法も、定量化する手段のない定性的で主観的なものとして提案されている。
- (3) これらの手法は、概して非常に少ない実験回数の研究に基づいている。十分な数の試料を用いて統計的に結論を導いているごく少数の研究では、一次痕と二次痕の集団が十分にオーバーラップしており、そのため明確な区別ではなく携行が分かるだけである。実際の火災現場から採取され、結果があらかじめ分かっているかなり多数の溶融痕について比較した唯一の研究では、その結果は許容できないもの(正解率39%)であった。
- (4) 実験室で作成された溶融痕の火災暴露条件のほとんどは実際の室内火災とは非常に異なるものである。
- (5) 単独で評価された手法は1つもない。ただし、試みられ

た手法の評価はいくつかあり、再現性がないという結論に達している。

- (6) 様々な手法を提案した研究者の大部分は、さらなる研究が必要であるという考えに立って彼らの手法を提示している。しかし、Anderson[29]は異なり、彼の手法は十分に堅固であるから法科学目的で受け入れられるべきであると主張している。

さらに言うと、将来的に堅固で信頼できるものに発展し得るかどうかが明確である手法はない。一次痕と二次痕の形成過程における化学的あるいは熱的暴露条件が常に異なる場合にのみ、それが可能になると考えられる。しかし、そのような違いはまだ発見されるに至っていない。

## ACKNOWLEDGMENTS

The assistance of Yasuaki Hagimoto in the preparation of this paper and the review of the manuscript by Bruce Ettling, Michael Fitz, Dale Mann, David Reiter, B. Don Russell, and Ronald N. Thaman is gratefully acknowledged.

## REFERENCES

1. Babrauskas, V., "Ignition Handbook," Fire Science Publishers/Society of Fire Protection Engineers, Issaquah WA, 2003.
2. "Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms," IEEE, New York, 1998.
3. Takaki, A., "On the Effect of Thermal Histories upon the Metallographic Structure of Electric Wires, Reports of the National Research Institute of Police Science, Vol. 24, No. 2, pp. 48-56, 84-92, June 1971.
4. "Guide for Fire and Explosion Investigations (NFPA 921)," Natl. Fire Protection Assn., Quincy MA, 2001.
5. Shaw, C.E., "Fire Marshals on Duty," NFPA J., Vol. 59, July 1965, pp. 26-27, Nov. 1965, pp. 96-97.
6. Levinson, D.W., "Copper Metallurgy as a Diagnostic Tool for Analysis of the Origin of Building Fires," Fire Technology, Vol. 13, 1977, pp. 211-222.
7. Singh, R.P., "Scanning Electron Microscopy of Burnt Electric Wires," Scanning Microscopy, Vol. 1, No. 4, 1987, pp. 1539-1544.
8. Ettling, B.V., "Electrical Wiring in Building Fires," Fire Technology, Vol. 14, 1978, pp. 317-325.
9. Seki, T., Hasegawa, H., Imada, S. and Isao, Y., "Determination between Primary and Secondary Molten Marks on Electric Wires by DAS," National Institute of Testing and Evaluation, Kiryu, Gunma, Japan, 2000.
10. Ishibashi, Y. and Kishida, J., "Research on First and Second Fused Mark Discrimination of Electric Wires," in 1990 Annual Mtg. Japan Assn. for Fire Science and Engrg., 1990, pp. 83-90.
11. Gray, D.A., Drysdale, D.D. and Lewis, F.A.S., "Identification of Electrical Sources of Ignition in Fires," Fire Safety J., Vol. 6, 1983, pp. 147-150.
12. Erlandsson, R. and Strand, G., "An Investigation of Physical Characteristics Indicating Primary or Secondary Electrical Damage," Fire Safety J., Vol. 8, 1984/85, pp. 97-103.
13. Tokyo Fire Department, Investigation Section, "Research on First and Second Fused Mark Discrimination of Electric Wires," J. Japan Assn. for Fire Science and Engrg., Vol. 42, No. 2, 1992, pp. 15-20.
14. Mitsuhashi, N., "Discrimination between Primary and Secondary Arc Marks on Electric Wires by Micro-void Distribution," Reports of the National Research Institute of Police Science, Vol. 48, No.1, 1995, pp. 20-26.
15. Oba, K., "Identification of Melting Marks of Electric Wires" (unpublished report), Yamagata Prefecture Police Headquarters, Criminal Scientific Laboratory, Japan, 1980.
16. Miyoshi, S., "Internal Cavity Analysis of Electrical Arc Beads," presented at 15th Mtg. Intl. Assn. of Forensic Sciences, Los Angeles, 1999.
17. Miyoshi, S., "Internal Cavity Analysis of Electrical Arc Beads," in Proc. 4th Asia-Oceania Symp. on Fire Science & Technology, Asia-Oceania Assn. for Fire Science & Technology/ Japan Assn. for Fire Science & Engineering, Tokyo, 2000, pp. 653, 656.
18. Lee, E-P., et al., "Discrimination between Primary and Secondary Molten Marks on Electric Wires by DAS," J. Applied Fire Science, Vol. 9, 1999/2000, pp. 361-379.
19. Lewis, K.H., Schaefer Engineering Corp., Private Communication, 2003.
20. Masui, M., "Possibility of Carbon Inclusion in the Molten Mark of Polyvinyl Chloride Insulated Cords due to a Fire," Trans. IEE Japan, Vol. 112A, No. 1, 1992, pp. 78-79.
21. Lee, E., Ohtani, H., Matsubara, Y., Seki, T., Hasegawa, H. and Imada, S.,

- “Study on Primary and Secondary Molten Marks,” in Proc. 1st Conf. Assn. Korean-Japanese Safety Engineering Society, Korean Institute for Industrial Safety, 1999, pp. 209–212.
22. Lee, E.-P., Ohtani, H., Matsubara, Y., Seki, T., Hasegawa, H., Imada, S. and Yashiro, I., “Study on Discrimination between Primary and Secondary Molten Marks Using Carbonized Residue,” *Fire Safety J.* Vol. 37, 2002, pp. 353–368.
  23. “Did the Short Cause the Fire or Did the Fire Cause the Short?,” *Fire & Arson Investigator*, Vol. 30, No. 1, Jul./Sep. 1979, pp. 57–58.
  24. MacCleary, R.C. and Thaman, R.N., “Method for Use in Fire Investigation,” US Patent 4,182,959, 1980.
  25. Robertsson, A., Karlsson, S.E., Strand, G. and Nilsson, G., “Sma” Itskador pa” elektriska ledare” [Melt Damages on Electric Wires] (Rapport 20), Centrum fo” r Forensisk Vetenskap, Linko” ping, Sweden, 1988.
  26. Satoh, K., Sugisaki, M., Kakizaki, S., Itoh, C., Saitoh, K. and Iwaki, M., “Secondary Ion Mass Spectroscopy (SIMS) and Auger Electron Spectroscopy (AES) Applied to the Fire Investigation for Short Circuit,” in Proc. 1996 Annual Mtg. of Japan Assn. for Fire Science and Engrg., 1996, pp. 282–285.
  27. Satoh, K., Fukusima, H., Sigeru, S. and Iwaki, M., “Verification SIMS Applied to the Fire Investigation for Short Circuit,” in Proc. 1998 Annual Mtg. of Japan Assn. for Fire Science and Engrg., 1998, pp. 336–336.
  28. Kitamura, Y., and Satoh, K., “Progress of the Study on Electrical Beads (No. 2),” *Japanese J. Science and Technology for Identification*, Vol. 6, Suppl., 105, Oct. 2001.
  29. Anderson, R.N., “Surface Analysis of Electrical Arc Residues in Fire Investigation,” *J. Forensic Sciences*, Vol. 34, 1989, pp. 633–637.
  30. Howitt, D.G., “The Surface Analysis of Copper Arc Beads—A Critical Review,” *J. Forensic Science*, Vol. 42, 1997, pp. 608–609.
  31. Massalski, T.B., ed., “Binary Alloy Phase Diagrams,” 2nd ed., ASM International, Materials Park OH, 1990.
  32. Kattner, U.R., NIST, Private Communication, 2001.
  33. Howitt, D.G., “The Chemical Composition of Copper Arc Beads—A Red Herring for the Fire Investigator,” *Fire and Arson Investigator* Vol. 48, No. 3, March 1998, pp. 34–39.
  34. Hirt, D., “Letter to the Editor: At Best ‘Junk Science’ and at Worst Deliberately Misleading,” *Fire and Arson Investigator*, Vol. 48, July 1998, pp. 4, 5, 63.
  35. Anderson, R.N., Brosz, H.G., Posey, E. and Schefelbein, B., “Recent Advances in Auger Analysis of Electrical Arc Residues,” in 13th Meeting, Intl. Assn. of Forensic Sciences, 1993, pp. 162–166.
  36. Anderson, R.N., “Which Came First . . . The Arcing or the Fire? Review of Auger Analysis of Electrical Arc Residues,” *Fire and Arson Investigator*, Vol. 46, No. 3, Mar. 1996, pp. 38–40.
  37. Anderson, R.N., “Letter to the Editor,” *Fire and Arson Investigator*, Vol. 45, No. 2, Dec. 1994, pp. 44–45.
  38. Anderson, R.N., “Scientific Examination of Electrical Arc Residues to Determine Fire Cause,” *Fire and Arson Investigator*, Vol. 42, No. 3, Mar. 1992, pp. 58–59.
  39. Be’ land, B., “Examination of Arc Beads,” *Fire and Arson Investigator*, Vol. 44, No. 4, June 1994, pp. 20–22.
  40. Be’ land, B., “Further Comments on Arc Bead Examination,” *The Fire Place* [Washington State IAAI Chapter newsletter], Apr./May 1997, pp. 24–28.