

—総説—

有機絶縁物のトラッキング現象と火災

木下勝博

科学警察研究所

〒277-0882 千葉県柏市柏の葉 6-3-1

Tracking Phenomenon and Fire of Organic Insulating Materials

Katsuhiro Kinoshita

*National Research Institute of Police Science
6-3-1 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-0882, JAPAN*

(Received 8 March 2001; accepted 21 December 2001)

Tracking phenomenon, to put it plainly, is the phenomenon to form the carbonized electrical track and lose insulation in the part with potential difference on the surface of insulating materials. Tracking resistance means the difficulty occurring the tracking phenomenon of the organic insulation materials. Studies on the tracking phenomenon and the method of evaluating tracking resistance has been often reported on so far. But, there are only a few comprehensive researches and commentaries which include tracking phenomenon and the fire which occurs by the tracking phenomenon. Hence, I decided to explain tracking phenomenon of the organic insulating materials and the phenomenon that developed concerning the fire which develops and is called, tracking fire. Tracking phenomenon is discussed first. Next, cases of tracking fire in electric wiring and the wiring utensil and the studies on the cause of tracking fire are explained. Furthermore, prevention of tracking fire and future problems are also discussed.

Key words: Tracking phenomenon, Tracking fire, Carbonized electrical track, Tracking resistance

1. はじめに

ポリ塩化ビニルや合成ゴムのような有機絶縁材料には、軽くて弾性があり、しかも絶縁性が高いといったような沢山の長所があり、電気絶縁材料として、なくてはならない存在となっている。一方、有機絶縁材料には、他の材料に比べて耐熱性が劣り、熱分解し易く、使用を誤ればトラッキング現象を起

こして火災の危険性を生じるといふ短所も併せ持っている。

このトラッキング現象というのは、有機絶縁材料の劣化要因である熱劣化、電氣的劣化および放射線劣化のうちの電氣的劣化に該当する現象である。トラッキング現象とは、簡単に言うと絶縁物表面上の電位差のある部分に炭化導電路を形成し、絶縁性を失うことである。トラッキング現象は、第一次世界

大戦後のイギリス海軍の艦船の電気設備に使用されたベークライトに焼損痕跡が形成されたことから発見されたと言われている¹⁾。また、当時の艦船内の電気器具類の設置状況を想像すると、炭塵、油煙、媒煙、塩分などのほか湿気や水分などの影響を最も受け易い場所であったと考えられることから、この問題が注目されたのは無理のないことと言われている²⁾。その後、有機絶縁材料の長所を生かし短所を抑えた、新しい材料の開発や様々な改良が行われてきている。また、それを評価するための様々な試験法も開発されてきている。しかし、トラッキング現象は依然として発生している。また、これによる火災、すなわちトラッキング火災も後を絶たないのが現状である^{3,4)}。

有機絶縁材料のトラッキング現象の起こりにくさは耐トラッキング性と呼ばれており、トラッキング現象および耐トラッキング性の評価法などについての研究や解説はこれまでに数多く報告されている^{1,5-18)}。しかし、トラッキング現象が更に進展して生じる発火現象も含めた総合的な研究や解説は比較的少ない^{2,19-24)}。そこで、有機絶縁材料のトラッキング現象および、この現象が更に進展して発生するトラッキング火災についての解説を試みることにした。

本稿では、まずトラッキング現象について述べる。次に電気配線や配線器具類におけるトラッキング火災の事例および原因究明について述べる。さらに、トラッキング火災の事故防止および将来の課題について述べる。

2. トラッキング現象

2.1 メカニズム

有機絶縁物の表面が湿気などで汚損された状態で電圧が印加されてその表面に電位差が生じると、電位差のある部分で電流が流れてジュール熱が発生する。そしてその熱のため、絶縁物表面が部分的に乾燥し、液脈の導電路が分断されて表面絶縁抵抗が高くなる。その結果、電界が不整となり、シンチレーション（局所的な微小発光放電）を生じ、その熱によって、絶縁物の一部が分解され、炭化物が生成する。この炭化生成物の導電率が大きいため、その先

端に電界が集中し、更にその周辺に炭化物を生じてこれが電極間に伸び、最後に全路破壊に至るとというのが一般的な絶縁破壊の進行形態である^{1,2,6)}。したがって、トラッキング現象を引き起こす直接的原因となるのは放電熱であり、それをもたらす絶縁物表面の湿気や汚染は間接的原因となっている。

このようにシンチレーションによって有機絶縁材料表面に炭化導電路が形成されるような現象をトラッキング現象と呼んでいる。また、この場合に形成された炭化導電路をトラックと呼んでいる。トラック (track) というのは電気の通った跡というような意味である。すなわち絶縁材料の表面には電流の通った跡が観察されることからトラッキング (tracking) という用語が生まれたのである。炭化導電路 (トラック) の様相は、直線状あるいは樹枝状などいろいろあるが、それらは材料の種類、トラックの形成過程における多くの因子の影響を受けて異なる^{1,2,6,9,17)}。

一般にトラッキング現象は、これまでに述べたように電気工学的観点から絶縁破壊までの現象に視点を置いた用語として使われている。一方、火災科学的観点から燃焼までも含めた現象に視点を置き、トラッキング現象によって生じた炭化導電路に短絡電流が流れるなどして絶縁物が着火する現象を、グラフィト化現象または金原現象と呼ぶ場合がある^{19,22-26)}。また、木材においてもトラッキング現象が起こる可能性があり、これによって木材が燃焼する現象をグラフィト化現象または金原現象と呼ぶ場合もある^{22,23,26-31)}。さらに、電圧が印加された有機絶縁材料の表面に何らかの原因で発生するシンチレーションによって炭化導電路が生成すればトラッキング現象、有機絶縁材料が電気火花に曝されてその表面に微少な炭化導電路が生成すればグラフィト化現象と呼ぶこともある^{19,22-23)}。しかし、いずれの場合も発生過程が異なっているものの、絶縁材料表面での放電によりその材料中の炭素がグラフィト化して炭化導電路を形成する点では共通しており、トラッキング現象に含まれる。

2.2 各種要因

トラッキング現象を起こす要因としては種々のものが考えられるが、一般には湿気や汚染物（塩分、

無機質および繊維質のちり、化学薬品類)が挙げられる。そして、これらが絶縁物表面に付着することにより、シンチレーションが生じて絶縁破壊に至ることが多い。トラッキング現象の起こし易さは、基本的には材料自身の特性により決まるものである。しかし、絶縁破壊に至る過程は、各種の要因、たとえば材料表面の湿潤条件、汚染物の種類、材料と接する金属の種類、この金属に加わる電圧、放電発生時の放電の形態とそのエネルギー、炭化生成物などが相互に関連し合っており、極めて複雑な様相を示す^{1,2,6,9)}。

我国のように高温・多湿となり易い環境条件においては、有機絶縁材料表面の湿気の影響は特に重要である。そこで、霧による有機絶縁材料表面の濡れとそれが放電開始に及ぼす影響についての検討が行われた。そして、接触角の大きな試料ほど濡れにくく放電開始時間が長くなることが明らかにされた³²⁾。また、絶縁材料の湿潤については、材料固有の濡れ易さと電極間での汚損液の挙動が問題となる。そこで、材料表面で放電が発生するまでの時間の測定や各種材料の接触角の測定が行われた。その結果、材料により放電の発生時間は異なり、濡れ易い材料ほど放電が発生し易いことが明らかにされた³³⁾。さらに、汚損液の種類も同様にトラッキング破壊の生じ易さを変化させる。界面活性剤を含む汚損液を用いると材料表面は濡れ易くなり、このため放電が生じ易く、トラッキング破壊に至り易くなる。このように材料の耐トラッキング性を検討する場合、材料の濡れ易さおよび汚損液の種類を十分考慮する必要のあることが指摘されている⁹⁾。

絶縁材料表面の汚損液中を電流が流れるとジュール熱が発生して水分が蒸発する。蒸発が進むと水の膜に切れ目が生じるが、これを乾燥帯と呼んでいる。この乾燥帯が生じて電流が遮断される瞬間に、その箇所にシンチレーションが発生する。一方、有機絶縁材料は銅や黄銅などの金属導体を電氣的に絶縁するために用いられるものであり、電圧印加時において絶縁材料が湿潤あるいは汚損されると、汚損液と金属間で電気化学反応により金属が溶出される。一般に導体として使用される金属は銅または黄銅であり、これらの金属は汚損液との電気化学反応

を生じ易い。溶出金属としては、電極の成分に関係しその塩化物、水酸化物の形で析出する。溶出金属は、乾燥帯の幅を狭くするために、放電が生じ易くなるものと考えられている^{14,34-37)}。

一般家屋に電力会社から供給される電気は、50 Hz または60 Hz の低圧交流である。一方、自動車ではバッテリーが電源として用いられており、これは低圧直流である。そこで、直流と交流による耐トラッキング性の比較検討が行われた。その結果、電極材質による耐トラッキング性の評価の序列は、直流と交流とで逆転すること、直流の場合のトラックは面状に形成されるのに対して、交流の場合のトラックは線状に形成されることが明らかにされた^{7,36,38)}。

以上、トラッキング現象を起こす要因の幾つかについて述べたが、これらは相互に絡み合っており、極めて複雑である。

2.3 試験方法

耐トラッキング性の優れた絶縁材料の必要条件としては、①撥水性に優れ、濡れにくいこと、②熱分解しにくいこと、③熱分解してもガス化し易く残留物を残しにくいこと、④主鎖にベンゼン核を有しないこと、などが挙げられる^{8,12,17,18)}。これらの条件を備えるために、材料自体、充填剤および硬化剤などの研究が行われている^{13,14,39)}。特に、エポキシ樹脂は他の有機絶縁材料に比べて、充填剤、硬化剤などの添加、その方法および、硬化温度などの製造条件の違いにより特性の異なるものが得られるという独特な性質を持っており、耐トラッキング性向上のための活発な研究が行われてきた⁴⁰⁻⁴³⁾。また、これと並行して、耐トラッキング性を客観的に評価するための耐トラッキング性試験が行われてきた⁶⁾。

一般にある使用目的のために様々な種類の有機絶縁材料の中からある特定の材料を選択する場合、具体的なデータに基づいて合理的に選択する必要がある。そこで、各種有機絶縁材料の耐トラッキング性試験が行われるようになった。しかし、実際に起こるトラッキング現象は、様々な要因が複雑に絡み合っているため、耐トラッキング性試験による評価を、それぞれの有機絶縁材料の特性だけに基いて行うことができないという問題が生じた。このよう

なことから、実際の現象を考慮した、DIN法、BS法、ダストフォッグ試験などといった特徴のある数多くの耐トラッキング性試験法が提案されてきた。そして、それぞれの試験法について1952年からIECにおいて国際的に検討を重ねた結果、IEC Publication 112として、推奨試験法の形で発表された⁶⁾。その後、わが国でも電気学会が中心となってトラッキング現象に関する様々な問題についての共同的検討が始まった。以後、関連する専門分野の技術者などの関心を集めながら現在に及んでいる。また、IEC Publication 112は、その後数回の改訂を経て1979年にPublication 112 (第3版)となり^{9,10)}、この第3版が、1997年からIEC 60112 (1979-01)と呼称を変更されて現在に至っている。

以下、代表的な耐トラッキング性試験である、IEC 60112 (1979-01)の試験方法について紹介する。

Fig. 1に電極形状とその配置を示す。同図において、試料面上に幅5mm、厚さ2mm、試料面と接する部分が直線状となるように先端角度を 30° とした白金電極を試料面と 60° の傾斜をなすようにし、4mm間隔で相対向するように配置する。試験溶液には、溶液A、Bの2種類がある。溶液Aは、塩化アンモニウム $0.1 \pm 0.002\%$ 水溶液（抵抗率： 23°C で $395 \pm 5 \Omega \cdot \text{cm}$ ）である。溶液Bは、塩化アンモニウム $0.1 \pm 0.002\%$ 、アルキルナフタレンスルホン酸ナトリウム $0.5 \pm 0.002\%$ の混合水溶液（抵抗率： 23°C で $170 \pm 5 \Omega \cdot \text{cm}$ ）である。溶液AまたはBのいずれかの電解液を30秒に1滴 20 mm^3 ずつ電極間の試料面上に滴下させ、試験電圧は連続印加しながら試験を行う。Fig. 2に耐トラッキング性試験回路を示す。試験回路条件としては、電極7を短絡したとき各試験電圧において短絡電流が1Aとなるように可変抵抗器4によって調整する。電源には商用周波数の単相交流を用い、変圧器2,3により600Vまで任意に調整できるようになっている。この試験において、0.5A以上の電流が2秒以上流れた場合をトラッキング破壊と判定し、電源が遮断されるように過電流継電器1を設定する。試験は電解液滴下数101滴まで継続して行い、それまでにトラッキング破壊が起こらない場合は侵食として取り扱う。

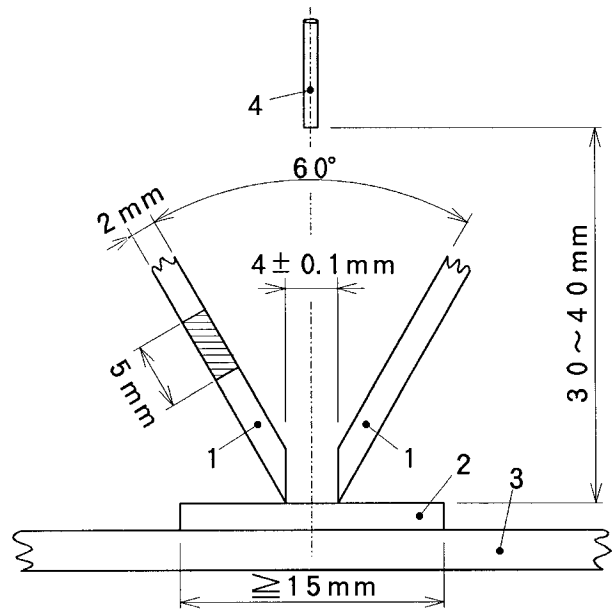


Fig. 1 Dimensions and relative arrangement of electrodes and specimen.

1: Electrode, 2: specimen, 3: support, 4: tip of dropping device.

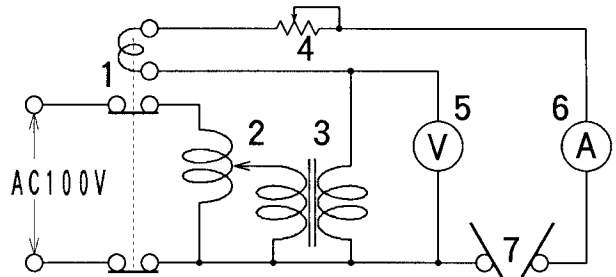


Fig. 2 Testing circuit for tracking resistance.

1: Delay overcurrent relay, 2: variable voltage transformer, 3: transformer, 4: variable resistor, 5: voltmeter, 6: ammeter, 7: electrodes.

耐トラッキング性の評価法として、IEC 60112 (1979-01)では次のように、CTI (comparative tracking index; 比較トラッキング指数)とPTI (proof tracking index; 保証トラッキング指数)の2種類を提案している。

(1) CTI: 100~600Vの範囲内で、25V間隔で電圧を印加し、電解液の滴下数が50滴で、5個の試験点すべてがトラッキング破壊に至らない最大の電圧を意味する。たとえばこの電圧が400Vの場合に

は“CTI 400”（A液の場合），“CTI 400M”（B液の場合）のように表示する。

(2) PTI : 175 V, 250 V, 300 V, 375 Vあるいは500 Vの試験電圧を推奨している。上記5種類の試験電圧のうちの一つに定めてトラッキング試験を行い、その結果を“PTI 175で合格”あるいは“PTI 175Mで不合格”のように表示する。

なお、実際に用いる導体のほとんどすべてが銅や黄銅であるにもかかわらず、電極材質に白金を用いるのは、銅や黄銅の電極の場合に比べて試験時における電極の溶出による影響および測定値のばらつきを少なくするためである^{9,34)}。また、この場合の試験結果がトラッキングに至らず侵食になる材料は耐トラッキング性が高いと評価することになるが、実際の使用状態ではトラッキング破壊を起こすものがあり、注意を要することが指摘されている^{6,9)}。

3. トラッキング火災

一般の低圧電気器具にはネジ止めなどの接続部があるのが普通である。これらの接続部は、使っているうちに緩みを生じることがある。この原因としては、機械的な振動の他に通電電流の断続によるネジ部の膨張収縮が挙げられる。もし接続部が緩むと、その部分の電気抵抗の増加による発熱量の増加となり、温度上昇をまねくことになる。また、コードの付け根などでは、屈曲の繰り返しによって絶縁被覆内の心線の一部が断線することがあり、このような状態を半断線と呼んでいるが、この場合も、半断線の部分での電気抵抗の増加による発熱あるいは電気火花の発生をまねくことになる場合がある。さらに、心線に損傷を与えた場合なども類似の現象が生ずる恐れがある。これらはいずれも絶縁被覆の熱劣化をまねくことになる。一方、近頃の機密性の高い住宅では、室内の空気中の水蒸気が冷たい壁に触れて水滴となる現象、すなわち結露が起こり易くなっている。そのため、このような条件が絶縁被覆の熱劣化に重畳してトラッキング現象、さらにはトラッキング火災へと進展し易くなっている。

3.1 事例研究

火災が発生すると、直ちに原因究明の調査活動が開始される。しかし、火災現場における火災鎮火後

の原因調査の時点においては、ほとんどの場合、電気製品や電気配線類などの物的証拠資料の一部または全部が焼失している。その上、焼け残った証拠資料も、避難、消火、人命救助などの様々な活動の段階において、移動したり破壊していることが多い。そして、火災現場におけるこのような困難な条件の基で、残焼物などの物的証拠資料の採取、位置関係の測定および写真撮影などが行われる。また、火災進行状況の目撃証言などの人的証拠の収集が行われる⁴⁴⁾。このようにして、ある程度証拠資料が揃った時点で、これらの資料を基に総合的に判断して出火原因の仮説が立てられる。この時、仮説を1本に絞り込めれば能率のよい火災鑑定ができることになる。しかし、もし収集した資料の検査・分析結果などから仮説が否定された場合、新たな仮説を立ててこれに必要な証拠資料を得ようとしても、既に火災現場が破壊されて必要とするものの形や寸法などが分からなくなっているといったような取り返しのつかないことが起こる恐れがある。そこで、このようなことを防ぐため、幾つかの仮説を立て、これらの仮説の検証に必要な証拠資料の収集を行うことが必要とされる。ところが、火災鑑定においては、証拠となるものが、変性したり焼失したりするため、仮説の検証に必要な物的証拠資料の収集には限界がある。しかも火災の現象は、着火源、可燃物、両者の位置関係、周囲条件などの僅かな違いが燃焼状況に大きく影響する極めて複雑な挙動を示す。そのため、幾つも挙げたそれぞれの仮説を積極的に立証することが困難であり、可能性の低い仮説を除いて行く消去法が火災鑑定における一般的な手法となっている。このようにして、火災鑑定において出火原因が特定され、貴重な事例として警察や消防に数多く保存されている。そこで、火災の発生原因や再発防止を考える際、一般の火災の場合は勿論のこと、トラッキング火災の場合においても、過去に起こった類似の事例が公表されておれば、これらを参考資料として活用することにより、効率的な火災鑑定を行うことが出来るものと考えられる。また、そのためには、貴重な事例を活用し易いように分類整理しておく必要があると考えられる。以下、火災事例の概要について述べる。

3.1.1 配線類からのトラッキング火災事例

600 V ビニル絶縁平形ビニル外装ケーブル、略称 F ケーブルは、これを用いた配線の施工が比較的簡単で作業能率がよく、経済的である等の理由から屋内用配線ケーブルとして多用されている。そのため、他の屋内用電線に比べて F ケーブルの出火も比較的多く、これの出火事例が報告された⁴⁵⁻⁴⁸⁾。このうちの和服問屋の倉庫火災の報告⁴⁵⁾では、火災現場の調査結果を基に F ケーブルの絶縁被覆の損傷程度、漏電電流の大きさおよび漏電したトタン板の種類を変えて再現実験を行い、F ケーブル絶縁被覆の損傷による出火のメカニズムが調べられた。また、この実験方法を改良して行った報告⁴⁹⁾によると、2 心の F ケーブルの絶縁被覆に特定の損傷を与え、その損傷部に波形のトタン板が断続的に接触し、AC100 V を課電してその接触部に地絡電流が流れる場合に限定して、その発火の形態と発火に至る過程などが実験により検討された。さらに、ある木造モルタル 2 階建店舗において、三相 200 V を印加されたルームクーラー用の三相 F ケーブルのトラッキング破壊が火災の発生原因と判定された事例が報告された²⁾。この場合の発火部は、F ケーブルが建物外壁を構成する波形トタン板の合わせ目から建物内に入った部分であり、F ケーブルの心線に電気火花による溶融痕跡が認められた。また、この溶融痕跡と全く同じ位置で波形トタン板にも電気火花による溶融穴が認められた。さらに、当日の気象状況から波形トタン板の合わせ目、およびトタン板に人為的にあけた穴などから、F ケーブルや IV 線を伝わるなどして、雨水が屋内に侵入したと考えられることから、これらの条件を設定し、ケーブルの心線とトタン板が、汚損液を介して不完全接触を繰り返す場合についての再現実験が試みられた。その結果、トラッキング現象が起こって絶縁被覆が着火燃焼することが確認された。なお、以前から一般に雨水は蒸溜水であるため電気の不導体、すなわち絶縁物として取扱われていた。しかしながら、雨滴は上空においてイオンを有する場合のあること、大気中の汚染の影響を受けることなどが知られており、特に建造物や電線などを伝わってきた雨水は、種々の汚染物質を含んでいると考えられるから、常に電気

的な絶縁性を有するとは限らないことが指摘された。また、体積抵抗率の実測により、雨水が常に不導体であるとする考え方や取扱いは不十分なことが指摘された²⁾。

一方、木造モルタル 2 階建ての住宅の玄関上部の内壁から出火した事例が報告された⁴⁶⁾。この住宅は比較的新しく、出火当日、玄関のシャンデリアを点灯したが、暫くしてシャンデリアの電球が点滅し始めたのでスイッチを切った。その約 10 分後に、家人が「パチパチ」という物音を聞きつけ、玄関上部の内壁が燃えているのに気付いたものである。焼損した単相三線式配線の F ケーブルはステップルで柱に固定されており、ケーブルの心線の状況については、赤相と中性線が 2 mm に亘って荒れた凹部分が生じ、その部分が細くなっていた。被災ケーブルと同じ仕様のケーブルを用い、100 W の電球負荷を接続して AC100 V を印加した状態で再現実験が行われた。人為的に損傷させた絶縁被覆の部分に 0.5% 食塩水を滴下して実験を行った後に、損傷部分の絶縁被覆を取り除いて心線の状況を顕微鏡により観察したところ、被災した心線と同様に凹部分に荒れた面が見られた。このことから、絶縁被覆の損傷により露出した心線間が湿潤し、この部分の漏洩電流のジュール熱やシンチレーションにより被覆が熱劣化して充填剤の無機塩が分離析出し、これが吸湿してイオンに解離し、心線間で電気分解が起き水分が蒸発して通電が途切れることが明らかになった。そして、時間の経過と共に無機塩が雰囲気中の水分を吸収して電気分解が起き、この繰り返しによって心線が電解侵食されることが確認された。この心線間で無機塩の水分が蒸発する度に発生するシンチレーションにより、被覆が次第にグラファイト化し発火したものと考えられた。

防火造作業所の天井付近から出火した事例が報告された⁴⁷⁾。この作業所においては、作業所壁体に動力用と電灯用の F ケーブルを梁にステップルで固定していたが、このステップルが F ケーブルの心線を損傷していたため、経年劣化により発熱し、線間短絡を起こして出火したと判定された。ステップルによる F ケーブル心線の損傷が原因と判断した同様な出火事例も報告された²⁾。また、ネズミによ



Fig. 3 Evidence of a small fire.

Chloroprene rubber code which was used for an electric heater 100 V 400 W was ignited at the root of an attachment plug.

るFケーブルや平形ビニルコードの絶縁被覆の損傷が原因と判断した出火事例が報告された^{48,50,51}。

電気ストーブ用電源コードの差込プラグ付け根部分が、無理な曲げ力を頻繁に受けたために半断線となって発熱し、トラッキング現象を起こしてポヤ火災を生じた事例を Fig. 3 に示す。

3.1.2 配線器具類からのトラッキング火災事例

テーブルタップにおけるトラッキング破壊が火災発生の原因となったと判定した事例が報告された²⁶。これは、ある会社の事務室の机の上から出火した事例で、この机の上には800 Wのコピー機が1台置いてあり、この電源は机上のテーブルタップから取っていた。現場調査の際、テーブルタップに入っているはずのコピー機の差込プラグは、両刃とも根元の位置で完全に溶断して横に転がっていた。また、差込プラグの先の部分はテーブルタップの刃受に融着していた。さらに、差込プラグと接するテーブルタップの受口部分のフェノール樹脂が炭化しており、この部分の抵抗値が数オーム程度になっていたことが確認された。また、木製台上の6Vバッテリーの充電器による充電中の出火事例が報告された²⁷。充電の際に、バッテリーの希硫酸液が木製台上に一面にこぼれ、しかもバッテリー充電配線の端子接続部が裸になっているのをそのまま使用していたもので、裸の端子接続部→希硫酸液が浸潤された木材→排水経路で漏電回路を形成し、木材が発

火することが再現実験により確認された。また、低圧屋内配線のジョイントボックス内で、分岐接続部が緩んで過熱し出火した事例が報告された⁴⁷。さらに、差込プラグの多数の出火事例が報告されると共に、使用上、規格・構造上、保護協調上および保守上の問題点が指摘された⁵²。

一方、一般住宅においてもダウンライトが使われるようになり、これからの出火事例が報告された^{53,54}。ダウンライトというのは天井に埋め込むタイプの照明器具で、天井から吊り下げるタイプの照明器具に比べて放熱が悪くなり易い構造となっている。その上、最近の建物には冷暖房の効率向上のために断熱材を使用することが多く、断熱材の誤使用によるダウンライトの過熱事故の危険性が指摘された。

屋外用映写装置のプリント基板の電源コネクタ部分から出火した事例が報告された⁵⁵。この映写装置は沢山のディスプレイユニットで構成されており、ディスプレイユニット間の防水措置が十分ではなかった。そのため、隙間から雨水が浸入し、背面プリント基板の電源コネクタ部分でトラッキング現象を起こして出火したものと判定された。また、電気冷蔵庫の始動リレーに雨水が浸入したため、コードの接続端子部でトラッキング現象を起こし、ポヤ火災となった事例を Fig. 4 に示す。

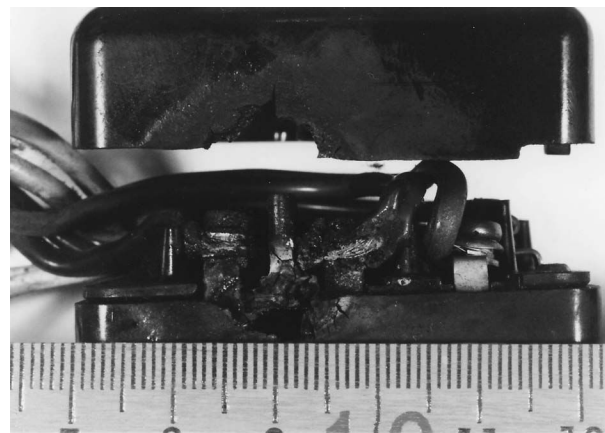


Fig. 4 Evidence of a small fire.

Phenol resin, starting relay case of an electric refrigerator, was ignited at the point of code's connecting terminal.

スイッチ類の可動接点部分では、開閉の際に電気火花が発生する。一般にこの電気火花は局部的に数千度の高温状態となり、接点部分の有機絶縁材料が電気火花に曝されて熱劣化を起こす危険性がある。これに関連した写真現像室の照明用タンブラースイッチからの出火事例が報告された²⁵⁾。これは、ある研究所の写真現像室の鉛張りの流しの前面に取り付けられた埋込型タンブラースイッチからの出火で、発見が早かったためにボヤ火災で済んだものである。このスイッチは約6年半前に設置され、現像作業中はかなり頻繁に使用されていた。真鍮性のカバープレートはレバーに接する箇所が一部溶融しており、カバープレートを外してみたところ、スイッチのフェノール樹脂絶縁材が炭化し、この部分の抵抗値が数オーム程度になっていることが確認された。また、このスイッチのレバーがONの位置でしかも片側だけが極端に炭化していたことから、タンブラースイッチの端子→フェノール樹脂の炭化導電路→カバープレート→鉛製流し→水道管の経路で漏電回路を形成し、フェノール樹脂の炭化導電路の部分が発熱点となっていたことが明らかにされた。さらに、ネオンサイン用プルスイッチからの出火事例が報告された²⁶⁾。これは、あるキャバレーで発生したもので、閉店後に支配人がネオンサインの電源をプルスイッチで切り、そこを立ち去るとまもなくそのプルスイッチが燃えだしたが、支配人が気づき注水消火したものである。そして、このスイッチの炭化したフェノール樹脂絶縁材の抵抗値が数オーム程度となっていることが分かった。このプルスイッチを切るときに発生する火花でその部分の絶縁物が炭化して出火することが再現実験により確認された。

大型トラックのバッテリースイッチからの出火事例が報告された⁵⁶⁾。瀬戸内海を航行中のフェリーボートで火災が発生し、海水による注水消火が行われた。その後の調査により、甲板上の大型トラックのバッテリースイッチのフェノール樹脂絶縁材の炭化焼損およびその端子の溶融が明らかになったことから、この部分がトラッキング現象を起こして出火原因となったとする意見と、出火原因は別にあったと主張する意見とが対立した。後者の意見は、海水

による冠水の再現実験によりかなり短時間でも絶縁破壊が起こることが確認されたことから、バッテリースイッチからの出火は二次的に起こったというものである。これに関連した研究として、車両火災の注水消火後、バッテリーが接続状態で放置した場合の実験が行われており、再燃焼の危険性が指摘された⁵⁷⁾。

3.2 原因究明

火災の発生原因調査の時点において、出火原因がトラッキング現象によると思われる場合、現場における調査および採取した資料の検査・分析などによる出火原因の究明には大きな困難を伴うことが予想される。なぜなら、トラッキング現象を起こすのは有機絶縁材料であり、これらは全て可燃物であるため、証拠となるものが焼失してしまっている可能性を否定できないからである。幸いにして焼失を免れて資料が採取された場合でも、その資料から直接的に出火原因を解明することは非常に困難なのが現状と言える。したがって、出火原因の究明に当たっては、火災時の目撃証言などを参考にして出火現場における柱などの残焼物の焼損形態の綿密な調査結果および出火現場から採取した資料の検査・分析結果など、あらゆる角度から収集した資料の分析結果などを基に総合的に判断して出火原因の判定を行うのが定石となっている。この場合、まず行う必要があるのは、その資料が出火原因となったもの、すなわち一次的原因資料かあるいは他の原因によって発生した火災により二次的に生成された資料かを判断することである。これについては、①資料の遊離炭素に着目した識別⁵⁸⁾、②資料の溶融痕への炭素の巻き込みに着目した識別⁵⁹⁻⁶¹⁾、③資料の溶融痕内の気孔の形態に着目した識別⁶²⁾、④資料の酸化組織の酸素濃度とDAS（樹枝状結晶の二次枝間隔、*dendrite arm spacing*）に着目した識別⁶³⁾が報告された。①については、有機絶縁材料のトラッキング現象により生成される導電性の遊離炭素に着目した。そして、これが絶縁破壊の主体と考え、かつ、火災熱によっても導電性を有する場合には遊離炭素の生成が介在していると考えた。この遊離炭素については、X線回折装置により、各条件下における生成物の回折パターンを測定して比較検討を行った。その結

果、生成の際の加熱条件による変化をよく示し、トラッキング生成物と火災熱による生成物との識別が可能なことを明らかにした。②については、ビニルコードの銅線の熔融痕への炭素の巻き込みの有無をX線マイクロアナライザを用いて分析を行うことにより、一次痕・二次痕の識別が可能な場合のあることが報告された⁵⁹⁾。また、ビニルコードの銅線の熔融痕への炭素の巻き込みの有無を金属顕微鏡および走査型電子顕微鏡などを用いて調べると共に、巻き込まれた炭化残渣中の炭素の結晶構造を顕微ラマン分光分析装置を用いて分析を行うことにより、一次痕・二次痕の識別が可能な場合のあることが報告された^{60,61)}。③については、電線の短絡時にガスの巻き込み現象が起って資料内に気孔ができるが、一次痕と二次痕では気孔の形成過程が異なるために気孔の形態に違いが生じることに着目した。これまでに数多くの研究が行われてきており、一次痕・二次痕の識別が可能な場合のあることが報告された。

④については、ビニルコードへの熔融痕の生成時の雰囲気温度を推定することにより、一次痕か二次痕かの判定が可能なことに着目した。そして、酸化組織のDASと酸素濃度の測定を行った。その結果、熔融痕生成時の雰囲気温度が推定でき、それによって一次痕か二次痕かの判定が可能な場合のあることを明らかにした。

一方、トラッキング火災の原因究明には、①現象(過程)の解明と、②資料の検査・分析手法の開発が必要である。①現象(過程)の解明は、電気器具などにおけるトラッキング現象のメカニズムを解明することであり、これは火災現場における調査の進め方に寄与する。②資料の検査・分析手法の開発は、火災現場から採取される物的証拠資料を検査・分析することにより、出火原因を明らかにする手法を開発するものである。これは理想的には、先ずある一つの結果Aが、ある一つの原因aによってのみ起こるような因果関係を発見することである。次にこの関係を応用して、火災現場から結果Aを得ることにより、その出火原因aを特定する手法を開発することである。しかし、実際には、ある一つの結果が、複数の原因によって起こったり、あるいは複数の結果に対して複数の原因が複雑に対応してい

るのが通常である。したがって、時間的な前後関係も考慮しながら、複数の結果を基にある一つの原因を絞り込むことが必要となる。そして、このような手法の開発は、出火原因の判定に寄与することになる。

これまでに、加熱による絶縁劣化などを調べるため、木材やポリ塩化ビニルなどの炭化温度と電気抵抗の関係などについて研究が行われているが、試料を高温度に加熱した状態で測定が行われているので、火災が鎮火したあとで採取された炭化状態の資料の特性をそれらから推定することができなかった。そこで、実火災を模擬する加熱特性を持った電気炉を用いて有機絶縁材料を加熱炭化させ、炭化物の電気的特性に及ぼす形成温度の影響についての検討を行った⁶⁴⁾。さらに、火災現場で採取した電線や配線器具類には、トラッキングなどの現象が起こったことを示す痕跡が残っていることがあり、これらの痕跡の生成原因が判明すれば、出火原因を究明・立証する上での重要な手掛かりとなることが考えられた。一般に、有機物を加熱すると、最終的にはFig. 5に示すようなグラファイトという名の六方晶形の結晶となり、このようなグラファイトと無定形炭素との間は連続的であって、各段階の炭素が存在する⁶⁵⁾。そして、グラファイト化の程度は、X線回折装置によって結晶の(002)面の面間隔を測定することにより知ることができると考えられた。そこで、様々な温度で加熱生成した有機絶縁材料炭化物に対して、X線回折装置によってグラファイト化の程度を明らかにするため結晶構造の解析を行った。この一例をFig. 6に示す。また、走査型電子顕微鏡により、Fig. 7に示すような形態観察を行った。そして、これらの結果を基に、炭化物の結晶構造の変化に及ぼす形成温度の影響についての検討を行った。その結果、有機絶縁材料の炭化生成物の形成温度の究明には、抵抗率の測定が有効なことが明らかとなった。また、X線回折装置によって有機絶縁材料の炭化生成物の結晶構造の解析を行うことにより、トラッキング現象が存在したことの立証が可能な場合があり、出火原因の判定に役立つことが明らかとなった⁶⁶⁾。

従来から耐トラッキング性試験が行われて、沢山

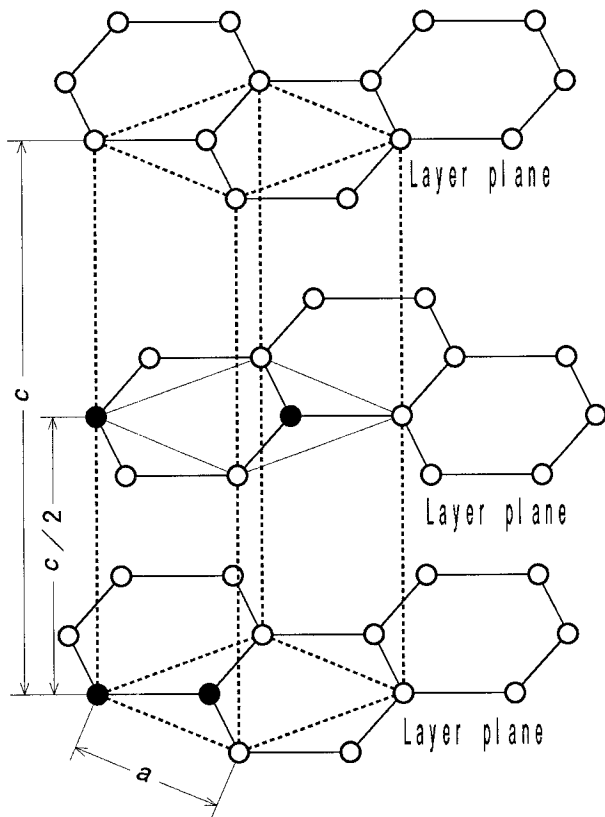


Fig. 5 Hexagonal crystal lattice of graphite⁶⁵⁾. The dashed lines indicate a unit cell. a , c : Lattice constant ($a=2.461\text{\AA}$, $c=6.708\text{\AA}$), $c/2$: distance between the layer planes ($d=c/2=3.354\text{\AA}$).

の試験データが報告されている。しかし、耐トラッキング性と着火危険性との関係については明確にされておらず、両者の関係の解明が必要とされていた。そこで、耐トラッキング性の試験データを火災原因調査に有効に活用できるようにするため、各種材料を用いて、耐トラッキング性試験の結果と火災危険性との関係の解明が行われた。また、耐トラッキング性試験結果との相関関係ができるだけ簡単になるような火災危険性の評価試験法の検討が行われた^{67,68)}。

なお、日本では電氣的な着火のメカニズムの解明が多くの研究機関や大学において取り上げられ、長期間に亘って研究が行われてきているが、米国ではほとんど取り上げられていないことが指摘されている⁶⁹⁾。また、電気配線類からの出火のメカニズムの解明に関する論文が米国の研究機関や大学からほと

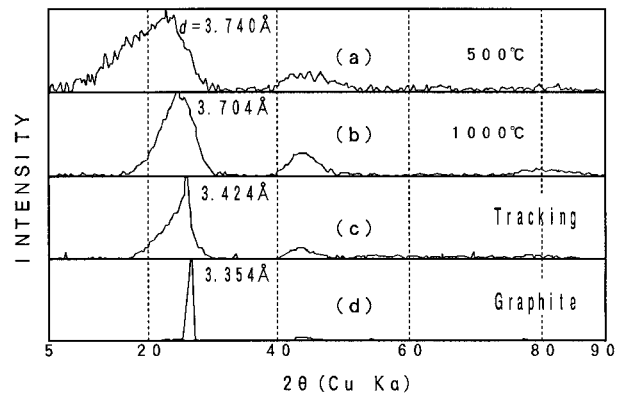


Fig. 6 Profiles of (002) diffraction for carbonized phenol resin.

They show the results of analyzing the crystal structure for carbonized phenol resin by X-ray diffraction. d : Surface distance corresponding to 002-surface for the sample, layer plane distance, $d=\lambda/(2\sin\theta)$; λ : wave length of X-ray, θ : diffraction angle. (a) 500°C, (b) 1000°C, (c) tracking, (d) graphite.

んど出ていないことが指摘されている。

3.2.1 配線類

クロロプレングムコードは耐熱性がよく、ヘアードライヤーや電熱器などのコードとしてよく用いられている。また、このゴムもFケーブルの絶縁被覆に使われるポリ塩化ビニルと同様に塩素を含んでいるため自燃性がないのを特徴としている。そして、これの絶縁破壊による発火について報告された¹⁹⁾。まず、クロロプレングムコードが半断線状態などにより異常過熱が起こった場合を想定し、加熱温度と時間を変えて加熱したクロロプレングムに対して、加熱による抵抗率および重量の変化が調べられた。また、示差熱分析装置により分解熱の変化が調べられた。そして、温度による抵抗率変化は4段階に分かれていることが明らかにされた。さらに、X線回折および電子線回折により絶縁体からグラファイトになる過程が詳しく調べられ、クロロプレングムコードの発火危険性の検討が行われた。そして、コードが480°C以上の温度であらかじめ異常過熱される場合に発火危険性のあることが明らかにされた。

ポリ塩化ビニルはFケーブルの絶縁被覆材とし

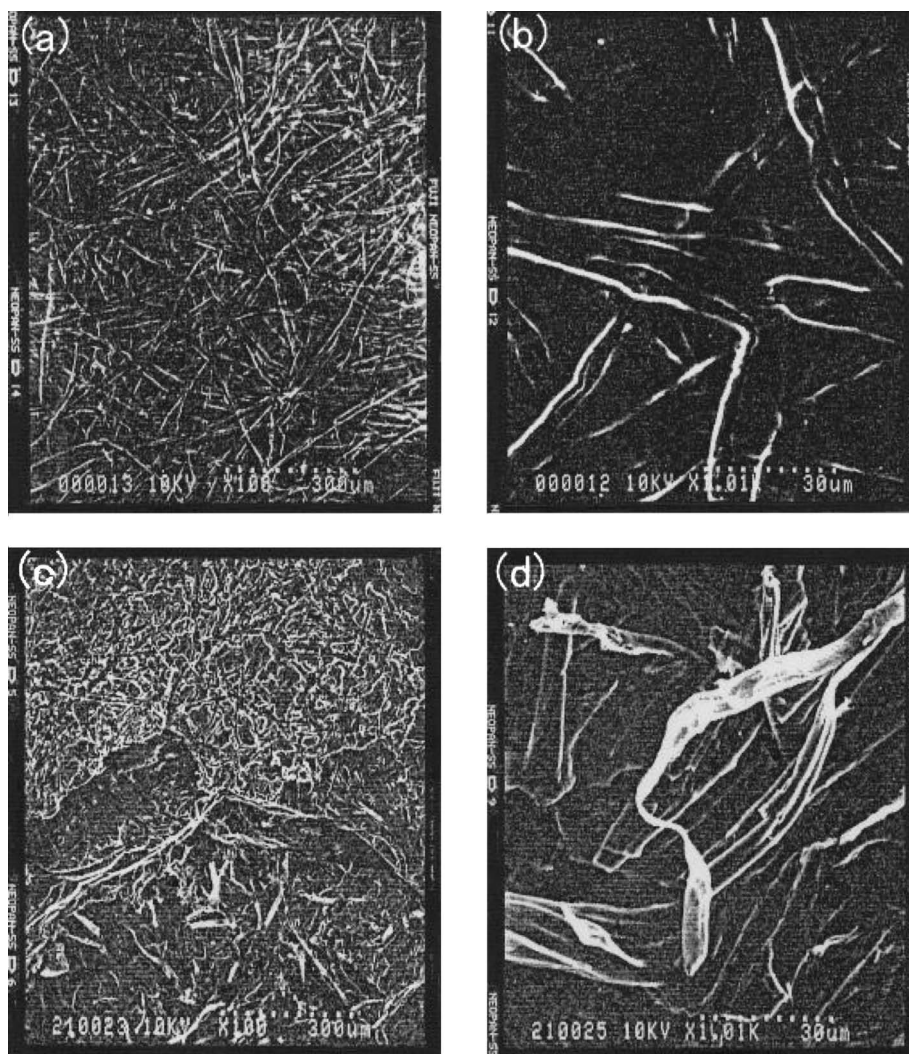


Fig. 7 Electron microphotography for carbonized phenol resin.

(a) 600°C, ×100; (b) 600°C, ×1000; (c) 1000°C, ×100; (d) 1000°C, ×1000.

て広く使用されている。Fケーブルの絶縁層およびシース層のポリ塩化ビニルとしては純粋なプラスチックが使用されることはまれで、塩化ビニルモノマーの他に可塑剤、安定化剤、難燃化剤の他に各種の充填剤が配合されている。このようなFケーブルを屋外で使用した場合、これの接続部付近では雨水で生じた水膜を通して漏洩電流が流れ、トラッキング現象を生じることがある^{2,45)}。そこで、Fケーブル中に配合されている各種の混和剤の耐トラッキング性に及ぼす影響と着火機構の究明の研究が行われた^{20,21)}。先ず、Fケーブルを試料とし、IEC耐トラッキング性試験法に準じた装置により実験が行わ

れた。その結果、アークが発生した時だけ電流が半波の整流波形となることが明らかにされた。そして、このアークの発生原因は、絶縁層部分に形成した遊離炭素と心線との間に形成される乾燥帯の幅が狭くなり、両者間の電界が局部的に強くなることによるものと考えられた。このアークが数回繰り返し発生して最終的にシース層が着火しており、トラッキング破壊だけとなる場合は着火源となるアークが発生していなかった。アークが発生しない理由は、Fケーブル端末から心線方向へ進行した炭化残渣中に電解液が残留し、乾燥帯が形成されないためと考えられた。次に、Fケーブルと同じ種類および類似

配合量の混和剤を配合したシート状試料について、試験電圧とアークの発生との関係および試験電圧と着火との関係が調べられた。そして、各種混和剤のアークの発生と着火に及ぼす影響について検討が行われた。

車両火災の初期消火には水を用いることが多いが、鎮火後に再燃することが問題となっていたことから、これについての実験が行われた⁵⁷⁾。この実験では、車両のエンジンルーム内を水で消火しても、しばらくシンチレーションを繰り返した後に有炎燃焼に移行し、再燃することが確認された。また、再燃した部位の配線には溶融痕が認められたことから、火災調査時において、発火原因の重要な手掛かりの一つである溶融痕について、再燃により二次的に生じる溶融痕と一次痕との識別法の開発の重要性が指摘された。

Fケーブルの絶縁被覆の損傷箇所への雨水などの浸入による絶縁劣化が問題となっていたことから、損傷部に電解液を滴下して実験を行い、絶縁劣化の進行状況が調べられた^{20,21,45,46,70)}。このうちFケーブルの発火機構については、絶縁被覆がグラファイト化して発火する過程が報告された⁴⁵⁾。また、発火部の心線の放電痕跡および絶縁被覆材の炭化生成物の分析結果から、Fケーブルの発火現象と放電痕跡との関連性などについて報告された⁷⁰⁾。さらに、通常の使用状態であっても、表面が電解性物質で汚染された場合、微小放電を生じてポリ塩化ビニルが熱劣化を起し、塩化カルシウムが生成されることが明らかにされた。そして、この塩化カルシウムが、空気中の水分を吸収し、イオンに解離して再び電流が流れ微小放電を生じて炭化が進行し、これらの繰り返しによってトラッキング破壊に至ることが報告された⁷¹⁾。

電線の素線の断線状態としては様々な状態が想定される。そこで、最も過酷な1本の素線以外は全て断線した状態での実験が行われた^{72,73)}。また、器具用ビニルコードが高温のもとでしかも屈曲や引張り力を繰り返し受ける状態で使用する場合、発火焼損することがあり、これの発火原因としては、ビニルコードの素線断線の結果、残存素線の異常発熱に基づくものの他に、ビニル被覆の高温劣化が発端

で、印加電圧によって熱暴走を起し発火に至ると考えられた。これは素線断線に伴う発熱や火花放電あるいはアーク放電等によってビニル被覆の表面や内部が局部的に異常発熱すると共に絶縁体が半導体化して電流が流れ、さらに自己発熱が加わって発火に進展するというものである。ビニルコードを実際に使用するとき、この有機半導体化が短時間に、かつ容易に進行することは考えられないが、比較的高温のもとで長時間使用される場合には、ビニル被覆の有機半導体化に伴う発火現象の可能性が予期しうる。そこで、これについての実験が行われた^{19,74)}。

3.2.2 配線器具類

電気器具には電気を供給するためのコンセントや差込プラグが不可欠で、多数使用されている。しかも、これらの接続部は使っているうちに緩みなどを生じて熱劣化をまねき易く、トラッキング現象も他の部分に比べて起こし易い。その結果、コンセントや差込プラグからの出火が配線器具の中で最も多くなっている³⁾。ところで、これまでに述べたように、絶縁材料単体や電線被覆に対する耐トラッキング性試験や絶縁破壊機構などについての報告は多い。しかし、コンセントや差込プラグなどといった成形品に対する発火機構などの検討を行ったような、出火原因の究明に役立つ報告は比較的少ない^{52,58,75-84)}。このうちの報告⁷⁶⁾によると、差込プラグ両刃間のトラッキングが火災の発生原因と判定した火災現場から採取した資料の分析およびトラッキング火災の再現実験が行われた。そして、差込刃の間の絶縁物上に導電性溶液または塵埃を含む水分などが存在したとき、差込刃が電極となってトラッキング現象のメカニズムの項で述べたような経過をたどり、差込刃の間の絶縁物上に炭化導電路を形成することが明らかにされた。また、この過程において、アークで発生した熱により、差込刃間の絶縁物が加熱され、絶縁物の成分が気化して発火することが明らかにされた。さらに、目視による差込刃の付け根部分における溶融痕の確認、差込刃間の絶縁物表面抵抗の測定、絶縁物表面上から採取したサンプルの成分分析による銅または亜鉛の存在の確認および使用環境からの裏付けにより、トラッキング火災の判定が可

能な場合のあることが明らかにされた。また、市販品のポリ塩化ビニル成形品の差込プラグを試料とし、これの熱劣化と吸湿による発火のメカニズムの解明が行われた⁷⁸⁻⁸⁰⁾。そして、汚損や湿潤のない使用環境においても熱劣化させると、ポリ塩化ビニルの熱分解時の反応で吸湿性の強い塩化カルシウムが生成され、通電停止後にこの差込プラグを自然放置あるいは自然放置と再通電を繰り返した場合には、生成された塩化カルシウムの吸湿により絶縁抵抗が低下することが明らかにされた。また、このような熱劣化と吸湿により試料の表面または内部で放電が発生し、炭化導電路を形成して発火することが明らかにされた。さらに、差込プラグとコンセントとの接続部における接触不良による熱劣化と発火に至るメカニズムの解明が行われた⁸¹⁻⁸³⁾。この実験には、市販品のポリ塩化ビニル成形品の差込プラグと尿素樹脂成形品のコンセントを用い、コンセント刃受の保持力を変えてプラグの温度と接触抵抗の測定が行われた。そして、通電電流がある大きさを超えると、プラグとコンセントの接触不良による出火危険性が急激に高まることが分かり、火災現場での調査の際に、プラグとコンセントの接続部からの出火と思われる場合には、これへの負荷の接続状態および使用状況の判明の重要性が指摘された。

4. トラッキング火災防止対策

ここでは電線やケーブルにおける、トラッキング火災の発生を防止するための対策について述べる。このような防止対策としては、①絶縁材料の特性を改良すること、②適正な絶縁材料を使用すること、③施工方法の改善により延焼防止策を講じること、④有機絶縁材料を難燃材で保護すること、⑤トラッキング現象の発生を検知して電源を遮断する装置を設置すること、などが挙げられる。

①については、直接的な対策と間接的な対策がある。直接的な対策としては、耐トラッキング性の優れた全く新しい材料の開発および既存の材料への各種添加剤の配合により特性を改善することが挙げられる⁸⁴⁾。一般に不活性無機物質を材料に配合すると、乾いた状態での耐アーク性が向上し、耐トラッキング性も向上することが多い⁶⁾。しかし、湿った

状態での耐トラッキング性は充填剤の種類、粒度、配合量によって異なり、特にシリカ配合の場合は、ある配合条件下ではかえって耐トラッキング性が低下する場合のあることが指摘された⁴³⁾。一方、間接的なものとしては、代表例として鼠対策が挙げられる。従来から配線の絶縁被覆材が鼠にかじられる被害が問題となっており、防止対策がいろいろと試みられている⁵¹⁾。

②については、トラッキング現象を起こしにくく、しかも燃焼しにくい絶縁材料を使用することであり、無機絶縁材料の使用が最も効果的である。しかし、無機絶縁材料は有機絶縁材料に比べて、加工性、柔軟性が著しく劣るため、高温雰囲気中での使用などの特殊な場合を除いて、電線類には有機絶縁材料を使用せざるを得ない状況である。有機絶縁材料の特性向上のための研究は絶えず行われており、使用目的に応じて適正に使用する必要がある^{85,86)}。

③については、特にグループケーブルの場合に重要であり、燃焼性状の評価試験と並行して各種施工方法の改善が行われている⁸⁶⁻⁸⁸⁾。

④については、特にグループケーブルの敷設工事の際に、ケーブルを被覆している有機絶縁材料を保護するため、無機不燃性繊維などの吹き付け塗布などの対策がとられている⁸⁷⁾。

⑤については、Fケーブルを用いた配線が多用されていることから、Fケーブルのトラッキングの発生原因の究明と事故防止装置の開発が行われている。この装置はFケーブルにおいて、トラッキング現象の進行に伴って、絶縁材料の表面に形成した炭化導電路を流れる電流の波形の幅と波高値が増大すると共に、最終的には半波整流波形および歪んだ交流波形を示すアーク放電電流が発生することを検知して電源を遮断する仕組みとなっている^{89,90)}。また、従来の保護ブレーカに高速高限流機能（高速で開極して接点を開くと共に、消弧室でのアーク分割により事故電流を制限する機能）を持たせた改良が行われ、実用化されている⁹¹⁻⁹³⁾。さらに、一般家屋などにおいて、トラッキング現象の発生をコンセントの表面に流れる5 mA程度の微弱電流により検知して、電源を遮断する機能を持たせた特殊なコンセントが開発されている⁹⁴⁾。また、ビルなどのケーブ

ル線路において、異常な温度上昇を検知して電源を遮断するための感知器が開発されている。これにはデジタル型とアナログ型があり、デジタル型には感知線型とチューブ型がある⁹⁵⁾。

材料の特性や施工方法の改善とそれを評価するための評価試験法とは車の両輪のような関係にあり、両者の研究開発はユーザーとメーカーが協力しつつ並行して行う必要がある。そして、そのためにはメーカー側のデータの公表が望まれる。また、ユーザーの側も、使用材料選定の際にこれらのデータを十分に活用することが望まれる。

5. 将来の課題

これまでに公表されているトラッキング火災事例を取り上げて紹介したが、このような事例は、火災という代償を払って得られた貴重な知的財産とも言えるものである。そして、それらの収集事例が少ない場合は書類の形で分類整理しても余り問題ないが、収集事例が数百数千ともなると、必要とする事例を抜き出して活用するには多大な労力を費やすことになる。そこで、これらの火災事例の合理的な活用法として、火災事例データベースとしてコンピュータに登録しておくことが考えられる。そして、必要に応じてキーワードにより火災事例データベースを検索して活用できるような体制の整備が切望される。現在のところ、一部でしかも不十分ではあるが、コンピュータによる火災事例データベースの活用が試みられている⁹⁶⁻⁹⁹⁾。

トラッキング火災の原因究明には、現象の解明と資料の検査・分析手法の開発が必要であり、配線類および配線器具類でのトラッキング現象（過程）の解明および、火災現場から採取される物的証拠資料の検査・分析による、出火原因の解明手法を取り上げて紹介した。そして、電気器具などにおけるトラッキング現象のメカニズムについては、除々に解明されて来ていることを明らかにした。また、X線回折装置によって有機絶縁材料の炭化生成物の結晶構造の解析を行うことにより、トラッキング現象が存在したことの立証が可能な場合のあることを明らかにした。さらに、目視による差込プラグの差刃の付け根部分における溶融痕の確認、差刃間の絶縁物

表面抵抗の測定、絶縁物表面上から採取したサンプルの成分分析による銅または亜鉛の存在の確認および使用環境からの裏付けにより、トラッキング火災の判定が可能な場合のあることなどを明らかにした。今後は、火災現場から採取される資料から出火原因へと結びつける検査・分析手法の開発が切望される。すなわち、資料の検査・分析によって得られる複数の結果をもとにある一つの原因を絞り込む手法の開発が切望される。さらに、ある一つの結果がある一つの原因によってのみ起こるような因果関係を発見し、この関係を応用して、出火原因を特定する手法の開発が切望される。

トラッキング火災の判定手法などを取り上げて紹介したが、これらの研究には、示差熱分析装置、顕微ラマン分光分析装置、走査型電子顕微鏡、X線回折装置およびX線マイクロアナライザなどの高性能な装置が使用されている。また、火災現場からの採取資料についても、これらの装置を活用して鑑定および検査が行われている。しかし、その資料を収集する火災現場調査の段階において使われる、科学的な装置や器材はほとんどないのが現状である¹⁰⁰⁾。

この主な原因として、①携帯性、②環境条件、③費用対効果が挙げられる。①の携帯性については、現場で使うためには装置や器材を小型、軽量で、振動や衝撃にも強くする必要があり、特注品となる。②の環境条件についても、装置や器材を厳しい温度、湿度、塵埃および汚れに耐えるようにする必要があり、特注品となる。③の費用対効果については、装置や器材の使用頻度、現場における原因究明の重要度およびその使用による原因判明の可能性とそれに要する費用（導入費、維持管理費）との関係が検討対象となる。また、これは火災以外の事故や事件の原因究明の費用対効果と比較される相対的なものであり、火災の場合には、分析結果が原因判明の手掛かりを得るだけに留まることが多く、他の分野に比べて費用対効果が低くなりがちとなる。また、火災現場で使うためには装置や器材が特注品となり、市販の高性能な装置をそのまま導入して使える場合と異なり、費用対効果をさらに低くしてしまいがちとなる。しかし、社会公共に及ぼす影響が大

きく、貴重な財産を焼失させ、尊い生命をも奪ってしまう火災の原因究明を、迅速的確に行うことは極めて重要である。

現場調査の段階でこれらの高性能な装置や器材を使用できれば、その場で分析結果が得られ、それを直ぐに調査方針にフィードバックすることができ、迅速的確な火災原因の究明に大きく寄与することになる。そのためには、資料を収集する火災現場調査の段階においても使用できる、科学的な装置や器材の開発および導入が切望される。このような装置としては、携帯型と移動型とが考えられる。前者については、小型軽量にするため開発に大きな困難が予想されるが、後者については、現在実験室などで使われているものを耐震性などを改善して専用の車に搭載することで可能となり、前者に比べて開発が容易と考えられる。

さらに、現場での調査を能率的かつ的確に行うため、ウェアラブルコンピュータ^{101,102)}を装備することが考えられる。これは、服やカバン、腕時計のように身につけて (wear) 利用するコンピュータで、操作は主に音声によって行うようになっている。透過型ヘッドマウントディスプレイを表示装置にしたポケットサイズの超小型パソコンなど、様々な技術が研究されている。ヘッドマウントディスプレイ付きの小型パソコンや、デジタルカメラを組み込んだ腕時計、携帯情報端末の機能を持った腕時計などは既に製品化されている。この技術は、航空機の整備の際に、整備現場と整備マニュアルなどの保管場所との間を整備士が頻繁に行き来していることにヒントを得て開発されたと言われている。これにより、整備士が整備現場を離れることなく、必要な情報を得ることができるようになることを目指している。火災現場調査においても、出火原因の究明を行う者がこれを装備することにより、調査を行いながら火災事例データベースを活用することも可能になると考えられる。そのためにも、火災事例データベースをさらに充実させる必要がある。また、調査を行う者は、音声による操作のおかげで両手が自由に使えるようになり、焼損状況の記録、写真撮影記録、寸法計測記録および必要データの検索・取り出しなどを自由に行うことが可能になると考えられる。この

ように、ウェアラブルコンピュータの装備は、迅速的確な火災原因の究明に大きく寄与することになるものと期待される。

6. おわりに

火災の原因究明においては、火災現場の証拠物件だけから出火原因を判定するのは危険である。綿密な現場における調査データ、物的証拠資料および人的証拠資料に基づいて始めて的確な原因判定が可能となる。したがって、出火原因の究明は事例の積み重ねが重要視される分野でもあり、厳しい制約の基ではあるが、これまでにトラッキング火災事例が公表され、火災鑑定や再発防止などに活用されている。しかし、それはほんの一部で、そのほとんどが活用されていないように思われる。これらの貴重な鑑定事例は、火災原因調査に有用なことは勿論、メーカーの安全対策などにも大いに活用できるものと考えられる。日本鑑識科学技術学会発足準備の段階において、部会のような形で事例発表の場を設ける構想もあったが、まだ実現していない。本学会により、眠っている貴重な鑑定事例を掘り起こし、火災事例データベースとして整備されるようになることを切望する。

また、火災現場からの採取資料に対して、分析などのために様々な高性能な装置を使用して鑑定・検査が行われている。しかし、その資料を収集する火災現場調査の段階において使われる、科学的な装置や器材はほとんどないのが現状である。現場調査の段階でこれらの高性能な装置や器材を使用できれば、迅速的確な火災原因の究明に大きく寄与することになる。そのためには、資料を収集する火災現場調査の段階においても使用できる、科学的な装置や器材の開発および導入が切望される。さらに、火災事例データベースなどの必要な情報の検索・取り出しなどを、火災現場において自由に行うことが可能になると考えられ、迅速的確な火災原因の究明に大きく寄与することが期待される。ウェアラブルコンピュータが装備されることを切望する。

文 献

- 1) 吉村 昇, 西田 眞, 能登文敏: 有機絶縁材

- 料の耐トラッキング性. 静電気学会誌, **6**, 72-79 (1982).
- 2) 青池 晃: トラッキング現象とその問題点について. 火災, **30**(3), 15-26 (1980).
 - 3) 東京消防庁予防部予防課: 平成11年中に発生した電気火災の概要. 電設技術(12), 123-129 (2000).
 - 4) <http://www.fdma.go.jp>.
 - 5) 能登文敏: コンデンサの間欠放電による耐トラッキング性試験について. 電学誌, **82**, 559-566 (1962).
 - 6) 能登文敏: 最近の絶縁材料試験法. 電学誌, **88**, 802-811 (1968).
 - 7) 池尻忠夫: 内部にも多量の水分を含む湿潤絶縁物面上のトラッキングの特異性とその機構. 電学誌, **88**, 1869-1878 (1968).
 - 8) 斎藤省吾: 高分子の電気的物性とその応用. pp. 206-222, 丸善, 東京 (1972).
 - 9) 絶縁材料耐トラッキング性試験法特別専門委員会: 電気学会技術報告(Ⅱ部)第115号 IEC-Publication 112による絶縁材料の耐トラッキング性試験方法, pp. 1-51, 電気学会 (1981).
 - 10) IEC 112, Third edition (1979), "Method for determining the comparative and the proof tracking indices of solid insulating materials under moist conditions".
 - 11) 宮下隆雄: 絶縁材料の耐アーク性. 静電気学会誌, **6**, 80-86 (1982).
 - 12) 三宅 彰, 瀬川 渡: 高分子の電気的性質. pp. 153-155, 培風館, 東京 (1982).
 - 13) 中村修平, 川井二郎, 家田正之, 沢 五郎: 臭素系難燃剤によるポリエチレンの難燃化と耐トラッキング性. 電学論 A, **103**, 103-110 (1983).
 - 14) 河村鴻允, 谷口敏幸, 能登文敏: 防食効果を考慮したプリント基板のトラッキング劣化保護塗料に関する研究. 電学論 A, **106**, 131-138 (1986).
 - 15) 電気学会: 電気工学ハンドブック. pp. 277-278, 電気学会, 東京 (1988).
 - 16) 田中祀捷: V. 絶縁材料. 電学論 A, **110**, 44-48 (1990).
 - 17) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編: 放電ハンドブック. pp. 459-472, オーム社, 東京 (1995).
 - 18) 平井平八郎, 豊田 実, 桜井良文, 犬石嘉雄: 現代電気・電子材料. pp. 15-18, オーム社, 東京 (1996).
 - 19) 金原寿郎: 加熱によるコード被覆の絶縁劣化. 火災, **28**(6), 10-15 (1978).
 - 20) 河村鴻允, 佐藤忠雄, 能登文敏: 湿潤汚損下における塩化ビニール樹脂のトラッキングと着火現象. 日本火災学会大会学術講演梗概集, 13-16 (1978).
 - 21) 河村鴻允, 能登文敏: 湿潤汚染下における塩化ビニール樹脂の耐トラッキング性と着火現象. 電学論 A, **98**, 579-585 (1978).
 - 22) 名古屋市消防局消防研究室: 電気火災調査要領. pp. 15-17, 全国加除法令出版, 東京 (1986).
 - 23) 東京消防庁予防部調査課: 火災調査技術教本第3巻. pp. 5-55, 東京防災指導協会, 東京 (1987).
 - 24) 東京消防庁: 新火災調査教本第3巻電気火災編. pp. 18-64, 東京防災指導協会, 東京 (1999).
 - 25) 木村金造, 萩原隆一: 電気器具に現れた金原現象2例. 火災, **11**(3), 250-253 (1961).
 - 26) 一倉伊作: 電気器具からの発火について一金原現象による発火一. 火災, **11**(3), 245-249 (1961).
 - 27) 細井三郎, 前田賢二, 大西一雄: 金原現象の応用について. 科警研報告, **14**, 122-125 (1961).
 - 28) 菊池光一, 吉村 昇, 能登文敏: 木材の漏れ電流による炭化現象と発火機構. 電学論 A, **104**, 517-524 (1984).
 - 29) 菊池光一, 吉村 昇, 能登文敏: 木材の交流トラッキングによる発火現象. 電学論 A, **105**, 573-580 (1985).
 - 30) 小林義和, 吉村 昇, 西田 眞, 能登文敏, 菊池光一: 木材の表面における電気的発火現

- 象. 電学論 A, **107**, 446 (1987).
- 31) 小林義和, 吉村 昇: 木材の電氣的発火現象に及ぼす環境の影響. 日本火災学会研究発表会概要集, **91-92** (1990).
- 32) 吉村 昇, 西田 真, 能登文敏: 霧による有機絶縁材料表面のぬれとその放電開始に及ぼす影響. 応用物理, **47**, 538-546 (1978).
- 33) 西田 真, 吉村 昇, 能登文敏: 霧でぬれた有機絶縁材料表面のトラッキング破壊. 電学論 A, **99**, 121-127 (1979).
- 34) 河村鴻允, 能登文敏: 紙基材フェノール樹脂のトラッキングにおける溶出金属の影響. 電学論 A, **98**, 439-445 (1978).
- 35) 河村鴻允, 坂本三郎: 電解液—紙基材フェノール樹脂積層板界面における溶出金属の挙動とトラッキング現象. 電学論 A, **101**, 633-640 (1981).
- 36) 河村鴻允, 谷口敏幸, 坂本三郎: 電食による銅金属化合物の増殖現象と絶縁物の劣化. 日本火災学会論文集, **32**, 9-18 (1982).
- 37) 河村鴻允, 能登文敏: 紙基材フェノール樹脂のトラッキングにおける溶出金属の影響. 電学論 A, **98**, 439-445 (1978).
- 38) 河村鴻允, 能登文敏, 菊池光一: 直流による紙基材フェノール樹脂積層板のトラッキング現象. 電学論 A, **100**, 415-422 (1980).
- 39) 中村修平, 川井二郎, 沢 五郎, 家田正之: ポリエチレンの塩素化と耐トラッキング性. 電学論 A, **102**, 287-294 (1982).
- 40) 能登文敏: エポキシ樹脂の耐トラッキング性. 電学誌, **81**, 1625-1632 (1961).
- 41) 能登文敏: エポキシ樹脂の耐トラッキング性におよぼす硬化剤と充填剤の影響. 電学誌, **82**, 209-218 (1962).
- 42) 鴨沢勅郎, 吉村 昇, 西田 真, 能登文敏, 舛井正義: エポキシ樹脂のトラッキング劣化に及ぼす紫外線の影響. 電学論 A, **108**, 397-404 (1988).
- 43) 熊谷誠治, 王 新生, 吉村 昇: 屋外用エポキシの耐トラッキング性に及ぼす熱老化と吸水およびそれらの重畳効果. 電学論 A, **118**, 1255-1263 (1998).
- 44) 柏谷一弥編: 法科学シリーズ(2)捜査のための法科学. pp. 48-66, 令文社, 東京 (1983).
- 45) 木下勝博, 萩原隆一, 金原寿郎: 漏電による F ケーブルの発火危険性. 火災, **28**(3), 30-37 (1978).
- 46) 横浜市消防局計画課: 火災発生事例. 火災, **40**(1), 60-61 (1990).
- 47) 東京消防庁予防部調査課: 屋内配線における電気火災. 火災, **46**(2), 6-12 (1996).
- 48) 海蔵寺明治, 西嶋靖治, 福島 直: 低電圧ケーブルからの火災事例とその問題点. 安全工学研究発表会講演予稿集, 147-150 (1999).
- 49) 菊池光一, 河村鴻允, 能登文敏: 地絡電流による F ケーブルの発火モードの検討. 火災, **31**(3), 34-42 (1981).
- 50) 保坂光貞: 絶縁電線に対する「ねずみ」の嗜咬性とそれによる発火危険性. 日本火災学会大会学術講演梗概集, 97-98 (1984).
- 51) 室田城治: 電気設備の防鼠対策. 電設工業 (4), 102-110 (1990).
- 52) 土方忠道: 配線器具類からの出火事例, 特徴および問題点と対策. 火災, **46**(2), 13-17 (1996).
- 53) 東京消防庁調査課: 火災発生事例—ダウンライトの火災—. 火災, **40**(4), 56-58 (1990).
- 54) 水本光浩, 井畑 康, 山口敏彦: 白熱灯ダウンライトの過熱事故. 火災, **44**(1), 35-39 (1994).
- 55) 東京消防庁予防部調査課: 広告用大型映写装置から出火した火災. 火災, **49**(2), 57-60 (1999).
- 56) 松浦正博: 直流低電圧によるフェノール樹脂絶縁物の絶縁劣化とそれに伴う発火の現象. 火災, **28**(3), 17-23 (1978).
- 57) 田村陽介, 鈴木仁治: 車両火災における水消火後のトラッキングによる発火. 日本火災学会研究発表会概要集, 280-281 (1996).
- 58) 上山 勝: 有機絶縁物の絶縁破壊 (トラッキング) による炭化生成物の結晶性について. 科警研報告, **28**, 102-105 (1975).

- 59) 舛井正義：火災によるビニルコードの溶融痕への炭素の巻き込みの可能性．電学論 A, **112**, 78-79 (1992).
- 60) 諸田正規：ビニルコードの半断線箇所が生じる溶融痕について．日本鑑識科学技術学会講演要旨集, 123 (1997).
- 61) 李 義平, 大谷英雄, 松原美之, 関 勉, 長谷川秀夫, 今田修二, 矢代 勲：巻き込み炭素残渣中の炭素結晶構造分析による1次・2次溶融痕の判別に関する研究．日本火災学会論文集, **50**, 71-80 (2000).
- 62) Miyoshi, M: Internal Cavity analysis of Electrical Arc Beads. Proceed. the 4th Asia-Oceania Symposium on Fire Sci. and Tech., pp. 653-654, Asia-Oceania Association for Fire Sci. and Tech., Tokyo (2000).
- 63) 李 義平, 大谷英雄, 関 勉, 長谷川秀夫, 今田修二, 矢代 勲：DASによる1次・2次溶融痕の判別に関する研究．日本火災学会論文集, **50**, 1-12 (2000).
- 64) 木下勝博, 萩本安昭, 渡邊憲道：有機絶縁材料炭化物の電気的特性に及ぼす形成温度の検討．日本火災学会論文集, **45**, 27-29 (1996).
- 65) 水島三知, 岡田 純：炭素材料．pp. 79-88, 共立出版, 東京 (1970).
- 66) 木下勝博, 渡邊憲道：有機絶縁材料炭化物の結晶の変化に及ぼす形成温度の検討．日本火災学会論文集, **46**, 27-31 (1997).
- 67) 木下勝博, 萩本安昭, 渡邊憲道, 岡本勝弘, 村崎憲雄：有機絶縁材料の耐トラッキング性と着火危険性との関係の検討．日本鑑識科学技術学会講演要旨集, 97 (1999).
- 68) 木下勝博, 村崎憲雄：加熱劣化ポリスチレンの耐トラッキング性と着火危険性の関係．日本鑑識科学技術学会講演要旨集, 106 (2000).
- 69) Babrauskas, V.: How do Electrical Wiring Faults Lead to Structure Ignitions? Fire and Materials 2001, 7th International Conference, pp. 39-51, Inter Science Communications, London (2001).
- 70) 萩原隆一, 萩本安昭：F形ビニルケーブルの絶縁劣化による発火現象．火災, **37**(5), 46-50 (1987).
- 71) 戸田芳徳：有機絶縁材料の劣化現象について—PVCケーブルの熱劣化時における充填剤の挙動．火災, **24**(3), 168-171 (1974).
- 72) 三橋信雄, 桜井良秀, 長田正義, 井坂勝生：絶縁被覆電線の劣化履歴と火災危険について．火災, **31**(1), 11-19 (1981).
- 73) 長田正義：素線切れビニルコードの着火電流と流入エネルギー．日本火災学会論文集, **33**, 1-7 (1983).
- 74) 長田正義, 横井良秀：ビニルコードの高温劣化と発火特性．日本火災学会論文集, **33**, 25-29 (1983).
- 75) 土方忠道, 小河原明人, 原 實：配線器具にみられるトラッキング痕跡．火災, **41**(6), 34-37 (1991).
- 76) 東京消防庁予防部調査課：差し込みプラグ両刃間のトラッキング現象の研究．火災, **44**(6), 32-37 (1994).
- 77) 中野弘伸：電気配線からの発火原因に関する考察, 火災, **46**(2), 1-5 (1996).
- 78) 芦澤清美, 小俣 桂：差し込みプラグの熱劣化による発火メカニズムについて．日本火災学会研究発表会概要集, 386-389 (1997).
- 79) 芦澤清美, 土方忠道：差し込みプラグに加わる荷重とコンセントの性能劣化について．日本鑑識科学技術学会講演要旨集, 96 (1999).
- 80) 芦澤清美：差し込みプラグの熱劣化による発火機構．日本火災学会論文集, **50**, 63-70 (2000).
- 81) 岡本勝弘, 渡邊憲道, 萩本安昭, 木下勝博：電源接続箇所の接触抵抗の変化によるプラグ絶縁材料の熱劣化．日本火災学会研究発表会概要集, 178-181 (1998).
- 82) 岡本勝弘, 渡邊憲道, 萩本安昭, 木下勝博：電気絶縁材料の熱劣化による耐トラッキング性の低下について．日本火災学会研究発表会概要集, 6-9 (1999).
- 83) 岡本勝弘, 渡邊憲道, 萩本安昭, 木下勝博：プラグーコンセント接続部におけるプラグ絶縁材料の熱劣化による火災危険性．日本火災学会

- 研究概要集, 248-251 (2000).
- 84) 河村健太郎, 大谷英雄, 金城康人: PVC プラグの熱劣化に関する基礎的研究. 安全工学研究発表会講演予稿集, 151-154 (1999).
- 85) 小田英輔, 林 敏安: ケーブルの延焼性とその防止方法(4)難燃ケーブルについて. 火災, **29**(2), 45-55 (1979).
- 86) 青木健治: ケーブル火災と延焼防止方法. 火災, **46**(2), 23-27 (1996).
- 87) 室田城治, 矢島一男: ケーブルの延焼性とその防止方法(3)延焼防止対策とその効果. 火災, **29**(1), 39-47 (1979).
- 88) 室田城治: 電線・ケーブルの防災対策. 電設技術(5), 44-56 (2000).
- 89) 河村鴻允: 屋内配電線路におけるトラッキング事故の検知・防止装置の開発. 電学論 A, **101**, 559-566 (1981).
- 90) 河村鴻允, 能登文敏, 坂本三郎: 配電用ケーブルのトラッキング劣化による電気着火現象と電気火災防止装置の開発. 日本火災学会論文集, **31**, 23-30 (1981).
- 91) 早川 進, 渡邊憲道: 電気火災原因と保護ブレーカの働き. 火災, **46**(2), 18-22 (1996).
- 92) Gregory, G. D.: Using Arc-Fault Circuit Interrupters to Reduce Residential Fires. *EC & M*, Nov., 60-84 (1997).
- 93) Douglas, A. L., Andrew, M. T., William, H. K. Jr.: New Technology for Preventing Residential Electrical Fires: Arc-Fault Circuit Interrupters (AFCIs). *Fire Technology*, **36**, 145-162 (2000).
- 94) 溝口達夫, 山本忠之: トラッキング火災防止対策コンセントの開発. 日本火災学会研究発表会概要集, 406-409 (1997).
- 95) 羽根良成, 松葉博則, 鈴木 洋, 深沢俊郎: ケーブルの延焼性とその防止方法(2)リニア温度センサーについて. 火災, **28**(6), 16-22 (1978).
- 96) <http://www.jaish.gr.jp>.
- 97) <http://www.nrips.go.jp/section/second/fire/jirei.html>.
- 98) http://www.isad.or.jp/magzin/60_kyoto.htm.
- 99) http://www.aist.go.jp/RIODB/cgi-pub019/DB019_top_jpn.cgi.
- 100) 竹内繁樹: 火災の科学的原因調査の推進と安全工学へのフィードバック. 火災, **50**(5), 22 (2000).
- 101) 板生 清: 21世紀のマイクロテクノロジー. 電学誌, **121**, 56-60 (2001).
- 102) <http://www.wearables.co.jp>.