

木材のトラッキングによる発火現象

小山工業高等専門学校 電気工学科

助教授 小 林 義 和

秋田大学 鉱山学部 電気工学科

教 授 吉 村 昇

1. はじめに

石油化学工業の目覚ましい発達により、プラスチックや合成ゴムなど各種の高分子材料が次々と開発され、その諸特性が優れていることから、各方面にその用途を拡大してきた。電気絶縁材料としても例外ではなく、ごく限られた種類の無機材料を除けば、高分子材料に置き換えられてきている。また、これらの絶縁材料が使用される電氣的条件も次第に高度化し、その使用環境も多様化してきている。通常の大気中はもちろん、屋外の全天候下、海岸等の塩害地区、化学薬品、じんあい等で汚損された雰囲気、あるいは水中、放射線下等の特殊環境など多岐にわたっている。このような環境下で使用される高分子絶縁材料には、無機絶縁材料には見られない特有な絶縁破壊現象が存在する。その代表的なものの一つがトラッキング破壊である。

筆者らも有機絶縁材料のトラッキング破壊を明らかにすることを目的として実験、検討を進めている。その実験の中で紙基材フェノール樹脂積層板に特異な現象が見い出され⁽¹⁾、その原因の追求から紙の原料である木材のトラッキング破壊をも検討することとなった⁽²⁾。木材は、その主成分であるセルロー

スが長い鎖状の高分子材料で、トラッキングによる炭化の発生、その進展過程や発火現象の観察が容易であり、高分子材料の一つのモデルとして興味ある情報の提供が期待できる。

一方、わが国の一般住宅は木造建築が多く、建物には有機絶縁材料を用いた電化製品が多数使用されている。それら製品の絶縁劣化などにより発生する発火現象が原因と見られる火災事例が散発する傾向にある。また、以前より木造建築物において、電気工事の欠陥や絶縁電線および配線器具の劣化などによって、木材を媒介としてもれ電流が流れ、そのジュール熱やスパークによる熱などにより木材が炭化して火災に至る。この木材を媒介とする漏電出火の機構は金原現象⁽³⁾として知られている。木材が湿潤・汚損され、その表面をもれ電流が流れた場合、何らかの形でトラッキングが関与し、トラッキング破壊により発火に至る場合が多い。しかしながら、木材のトラッキングによる発火現象に関する研究資料は少なく、まだ明確でないのが現状である。

本稿では有機絶縁材料のトラッキング破壊現象と主な試験法について概説し、電気工学

の立場からの実験室的な電氣的発火現象ではあるが、IEC112試験法を参考にして行った、木材のトラッキングによる発火に至る過程の現象を紹介する。

2. トラッキング破壊現象と試験法

トラッキング破壊とは、絶縁物表面上の電位差のある部分に、炭化生成物による導電路（トラック）が形成され、表面絶縁破壊を起こす現象と定義することができる⁽⁴⁾。トラッキング破壊を引き起こす原因には種々のものが考えられるが、一般には絶縁物表面に湿気や汚染物が付着することである。この状態で電圧が加わると絶縁物表面にはもれ電流が流れ、その際ジュール熱が発生する。この熱のため水分が蒸発し、絶縁物表面が局部的に乾燥し、乾燥帯（ドライバンド）ができる。この部分が高電界となり微小発光放電（シンチレーション）を発生し、その熱のため絶縁物の一部が分解され、炭化物を生成する。炭化生成物は導電率が大きいため、そこに電界が集中してシンチレーションを生じ、さらにその周辺に炭化物を生成する。これが導電路となって電極間に伸びて行き、ついには短絡して全路破壊に至る。トラッキング破壊の直接原因となるのはシンチレーションによる熱であるが、それをもたらす湿潤や汚損には、水分のほか塩分、繊維質および無機質のちり、化学薬品の雰囲気など多種多様である。その上材料表面のぬれ性、電極の材質および形状、印加電圧の高低、もれ電流の大小などによって放電の様相は異なってくるので、トラッキング破壊は原因、現象とも極めて複雑な破壊形式といえる。

主な耐トラッキング性試験方法（絶縁材料

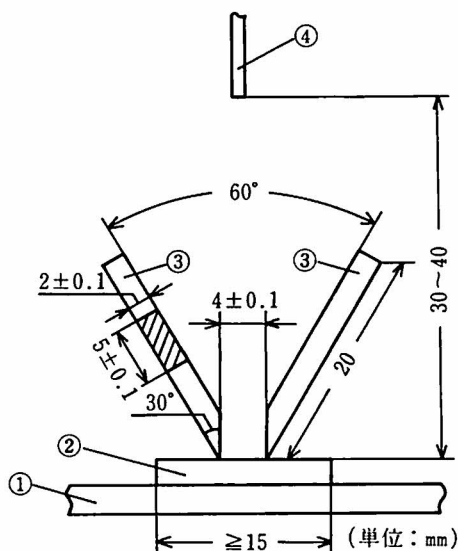
のトラッキングに対する抵抗性を耐トラッキング性という）としては、①IEC112法⁽⁵⁾、②ダスト・フォグ法（ASTM D2132—62T）⁽⁶⁾、③毛細管法（ASTM D2302—64T）⁽⁷⁾、④DIN法⁽⁸⁾、⑤ディップ・トラック法⁽⁹⁾、⑥メリー・ゴーランド法⁽¹⁰⁾、⑦IEC587法（汚損液傾斜平面法）⁽¹¹⁾が挙げられる。ここでは国際的な標準試験法であるIEC112法の概要を述べる。

3. IEC112試験法

この試験法は1952年から1958年までIEC（International Electrotechnical Commission）で審議され、IEC Publication 112として推

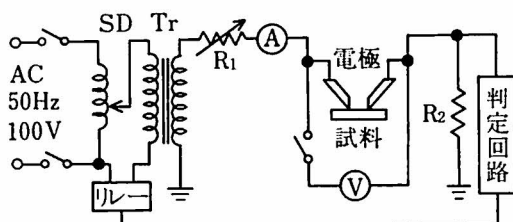
表1 IEC Publ 112の試験規格

項 目	試 験 規 格
電 極 の 材 質	白金
電 極 の 圧 着 荷 重	$1 \pm 0.05 \text{ N}$
試 料 の 大 き さ	$> 15 \times 15 \text{ mm}^2$
試 料 の 厚 さ	3 mm
試 料 の 設 置	金属板あるいはガラス板上に水平に設置
試験液の種類：A液	$0.1 \pm 0.002\% \text{ NH}_4\text{Cl}$ (重量%)
	$395 \pm 5 \Omega \cdot \text{cm}$ ($23 \pm 1^\circ \text{C}$)
：B液	$0.1 \pm 0.002\% \text{ NH}_4\text{Cl}$ (重量%) + $0.5 \pm 0.002\%$ アルキル—ナフタレンスルホン酸ソーダ (重量%)
	$170 \pm 5 \Omega \cdot \text{cm}$ ($23 \pm 1^\circ \text{C}$)
試験液の滴下量	$20 \pm \frac{3}{0} \text{ mm}^3$
試験液の滴下間隔	$30 \pm 5 \text{ 秒}$
滴下口の高さ	30—40mm
試験電圧：CTIの場合	100—600Vで25V間隔
PTIの場合	175V, 250V, 300V, 375V, 500Vのうち一種類の電圧
電 源 の 容 量	$> 0.5 \text{ kVA}$
周 波 数	48—60Hz
判 定 方 法	過電流リレーにて0.5A, 2秒でトリップしたとき



①：支持物 ②：供試料 ③：白金電極 ④：試験液滴下口

図1 IEC Publ 112試験法の電極形状と試料との配置



SD：スライダック Tr：100V/600V(2KVA) V：AC電圧計
A：AC電流計 R₁：スベリ抵抗(0～2KΩ) R₂：10Ω

図2 電源回路

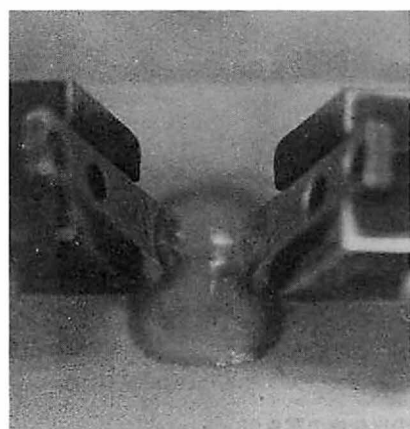
奨試験法の形で発表(1959年)⁽¹²⁾された。その後数回の改訂を経て現在の Publication 112(第3版)(1979年)⁽⁵⁾に至っている。その試験規格を表1、電極形状と試料との配置を図1にそれぞれ示す。図1の配置にして、交流100～600Vの範囲内の電圧を印加して、電極間に1滴 $20 \pm 0.3 \text{ mm}^3$ の試験液を 30 ± 5 秒ごとに1滴ずつ滴下し、破壊に至るまでの滴下数を求める。耐トラッキング性の評価法としては、CTI(Comparative Tracking Index)とPTI(Proof Tracking Index)の2種類が

提案されている。CTIは100～600Vの範囲内で25V間隔に電圧を印加し、試験液の滴下数が50滴でトラッキング破壊に至らない最大の電圧を意味する。例えばこの電圧が300Vの場合には“CTI 300”(A液の場合)、“CTI 300M”(B液の場合)のように表示する。PTIは試験を簡単化するために設定されたもので、175V、250V、300V、375Vあるいは500Vの試験電圧が推奨されている。前記5種類の試験電圧のうち一つを定めてトラッキング試験を行う。例えば175Vで行い、50滴までに破壊しない場合には“Pass at PTI 175”と、50滴以下で破壊する場合には“Fail at 175M”と表示する方法である。

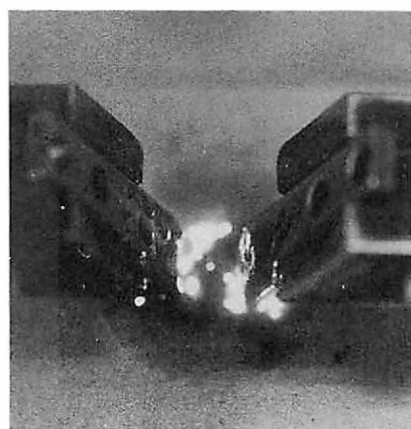
4. 木材のトラッキングによる発火現象⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

4.1 供試料および実験方法

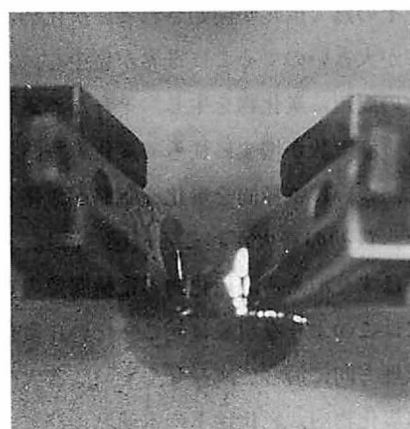
供試料は建築材料として良く使用されている気乾状態(含水率約10%)の杉材である。大きさは $30 \times 30 \times 10 \text{ mm}$ の板目板で、木質により心材と辺材とに分けて用いた。心材とは樹幹の横断面において髄よりの中心部を、辺材とは樹皮よりの外周部をいう。辺材は樹木るとき組織細胞が生理学的に生きている部分で、心材は生理学的に死んだ部分である。心材化は生命の失われた材を菌や虫などから保護するために行われ、種々の有機物質が集積している。辺材とは明らかに性質が異なる。



(a)
試験液の蒸発



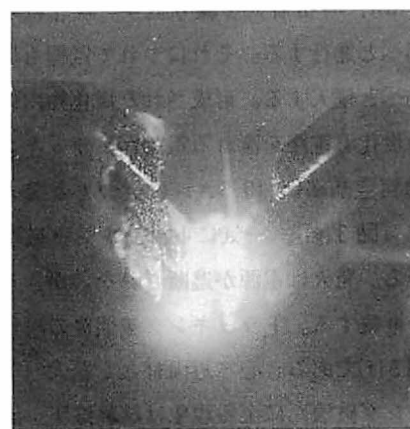
(d)
着火後のシンチレーション



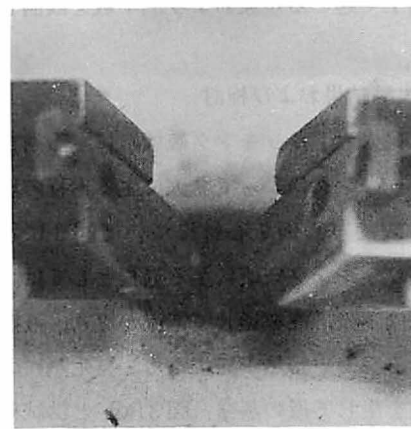
(b)
シンチレーション



(e)
発火（トラッキング破壊）



(c)
最初の着火



(f)
炭化痕

図3 トラッキングによる発火に至る過程の写真例

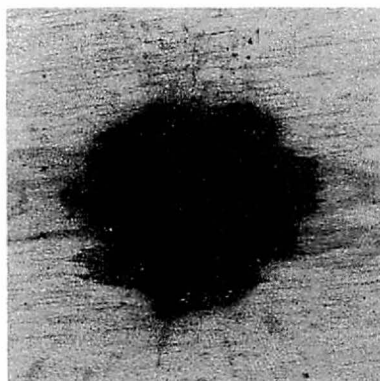
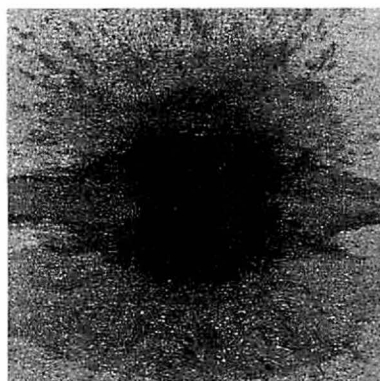


図4 発火（トラッキング破壊）後の炭化痕の写真例

肉眼で材面を見た場合、構成細胞の配列様式、方向の状態を表現するのに木理という語を用いる。

実験方法は前記の I E C 112 試験法を参考にして行った。実験に用いた電源回路を図2に示す。電極には黄銅刃形電極を用い、供試料の板目面木理方向に対向させた。試験液は0.1重量% NH_4Cl 水溶液（試験規格のA液）であり、抵抗率は25℃で $385\ \Omega \cdot \text{cm}$ である。滴下量は供試料中への吸水を考慮し、1滴当り $30 \pm \text{mm}^3$ とし、供試料表面上35mmの高さより電極間に30秒ごとに1滴ずつ滴下して、供試料表面上で起こる現象および滴下数を観測した。

4.2 実験結果および検討

(1) 発火（トラッキング破壊）に至る過程

トラッキングによって発火に至る過程の現象の代表的写真例を心材について図3に示す。トラッキング破壊に至る過程としては、試験液滴下後、液を通して電流が流れ、液抵抗によるジュール熱が発生する。発生熱により気泡を生じて液の蒸発〔図3(a)〕と供試料中への吸水により電極近傍の液脈の導電路が分断され、供試料表面にドライバンドができる。この部分に電界が集中してシンチレー

ションが発生する〔図3(b)〕。放電発生と同時に、その熱で炭化が開始される。炭化物は導電率が大きいためそこに電界が集中し、さらにその周辺に炭化物を生じ、それが導電路となる。滴下数が増すに従って炭化導電路は成長し、ついに電極間を炭化導電路が短絡したとき、最初の着火が起こる〔図3(c)〕。着火の炎はすぐ消える。炭化物の電極間での短絡前にはこのような現象は起こらない。炭化路は木理方向に沿って成長しやすい。着火後は短絡炭化物内、炭化物下の木部および電極後方でシンチレーションがランダムに発生し〔図3(d)〕、時折着火を繰り返す。炭化は木材内部へと進行する。それにつれて電極も炭化物内へと侵入する。形成された炭化物内における炭化導電路を流れる電流がトラッキング破壊判定基準値（0.5A）に近づくと発火を生じ〔図3(e)〕、一気にトラッキング破壊へと至る。発火は電源が遮断されないかぎり燃焼を継続する。トラッキング破壊後の炭化痕は図3(f)である。心・辺両材とも発火（トラッキング破壊）に至る現象は試験電圧、滴下数の差はあるが、ほぼ上記と同じ過程を辿る。

発火（トラッキング破壊）後の供試料表面

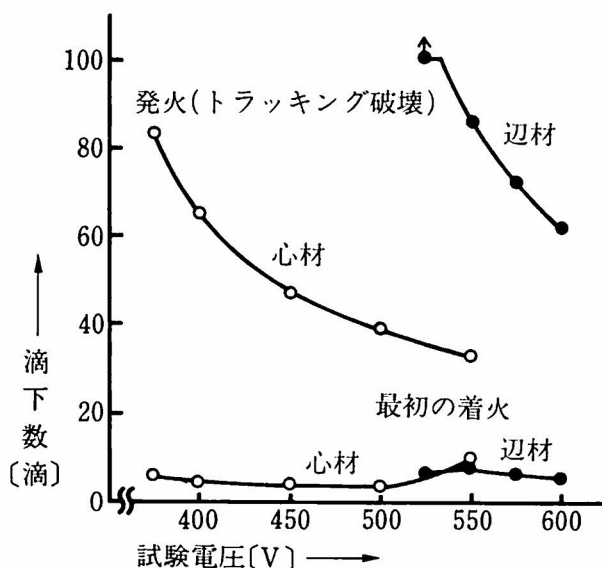


図5 試験電圧と最初の着火、発火（トラッキング破壊）に至る滴下数との関係

の炭化痕の写真例を図4に示す。トラッキングを形成した炭化物のほかに、電極から溶出した溶出金属と試験液との反応によると考えられる着色の後が観察される。顕著に表われている色は濃青色と茶かっ色である。電極から金属が溶出していることは、実験を継続中の供試料表面の着色の広がり、および実験終了後の黄銅電極の刃形面が赤かっ色に変色していることから確認できる。用いた電極は銅60%、亜鉛40%の黄銅であることから溶出金属は銅と亜鉛と考えられる。溶出金属と試験液との電気化学反応物としては水酸化銅（淡青色）、塩化銅（茶かっ色）、酸化銅（黒色）、水酸化亜鉛（白味がかった無色）、塩化亜鉛（白色）等が考えられ、これらの反応物が供試料表面を着色するものと考えられる。また、溶出金属は発火（トラッキング破壊）に至る過程に重要な役割を果たしているものと推察される。

(2) 試験電圧と最初の着火、発火（トラッキング破壊）に至る滴下数との関係

試験電圧と最初の着火、発火（トラッキング破壊）に至る滴下数（以下、滴下数と記す）との関係を図5に示す。最初の着火の場合には500V以上になると心・辺両材ともアーク放電が発生し、炭化が起こり着火となる。着火後は前記と同じ過程で発火（トラッキング破壊）に至る。供試料表面に沿ったシンチレーションの方が炭化を起こしやすく、炭化は木理方向に

沿って成長しやすいため滴下数の少ない段階で着火に至る。発火（トラッキング破壊）の場合は両材とも電圧の上昇とともに滴下数は減少する。いわゆる電圧加速が認められる。心・辺両材による耐トラッキング性は辺材＞心材となり、木質の相違によって顕著な差が表われている。この差はシンチレーションの発生回数が着火前、着火後とも心材の方が多いことによる。発生回数の違いは心・辺両材の吸水率の差で辺材の方が多く吸水される。試験液の吸水量が多くなれば、供試料表面の試験液の残留量は少なくなる。

このことは発生ジュール熱を少なくする。また、吸水試験液の蒸発に発生熱が奪われ、シンチレーションの発生回数は少なくなる。その結果として炭化物の形成は遅れる。したがって、辺材の方が発火（トラッキング破壊）に至る滴下数を増し、電圧を高くするものと推測される。

5. おわりに

杉の心材と辺材を供試料として、IEC 112試験法を参考にして、木材のトラッキングによる発火現象について検討した。得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) トラッキング破壊に至る過程においては、シンチレーションによる炭化は木理方向に沿って成長しやすい。炭化路が電極間を短絡したとき最初の着火が起こる。トラッキング破壊時には発火を伴う。
- (2) 心材と辺材の木質の違いによって発火（トラッキング破壊）に顕著な差違が表われ

る。この差違は心・辺材の吸水率の違いを考慮する必要がある。

- (3) 電極から金属の溶出があり、溶出金属は最初の着火、発火（トラッキング破壊）に至る過程に重要な役割を果たしているものと考えられる。

着火、特に発火は電源が遮断されないかぎり燃焼は継続するので火災の原因と成り得るものと考えられる。

最後に杉材を提供して頂いた秋田県工業技術センターにお礼申し上げる。

—— 参 考 文 献 ——

- (1) 小林，他：電気学会論文誌A，107，270（昭62—5）
- (2) 小林，他：電気学会論文誌A，107，446（昭62—9）
- (3) 金原，他：日本火災学会論文誌6，5（昭31—1）
- (4) 電気学会技術報告（I）No.86（1968）
- (5) IEC. Publication 112, Third Edition (1979)
- (6) AIEE. Trans. Pt III, Vol. PAS-79, 969 (1960)
- (7) AIEE. Trans. Vol. PAS-81, 291 (1962)
- (8) DIN 53480 (July, 1964)
- (9) IEEE. Trans. EI, Vol. EI-2, No3, 139 (1967)
- (10) CIGRE Report, 15-76, WG-06 (1976)
- (11) IEC. Publication 587, First Edition (1977)
- (12) IEC. Publication 112 (1959)
- (13) 小林，他：日本火災学会研究発表会概要集69（昭63—5）
- (14) 小林，他：日本火災学会研究発表会概要集19（平成元—5）