木材の漏れ電流による炭化現象と発火機構

正員 菊地 光一 (秋田高専)

正員 吉村 昇 (秋田大)

正員 能登 文敏 (秋田大)

1. ま え が き

木造建築においては、 F ケーブルの布設時のサドル打込み作業の不良や、絶縁電線および配線器具の劣化などにより、メタルラスやトタン板などを媒介として木材を漏れ電流が流れ、そのジュール熱やスパークによる熱などによって木材を炭化して、火災となることは既に知られている^{(1)~(5)}。木材を媒介とする漏電発火の機構については、金原氏は「木材が炭化し、それが黒鉛化して導体となり、この黒鉛を通しての電流によるジュール熱によって木材が炎をあげる」⁽⁵⁾⁽⁶⁾と報告している。木材がスパークなどにより黒鉛化して導体となり、電流を通ずるようになる現象は、金原-岩崎現象(あるいは金原現象)と言われ^{(7)~(9)}、電気火災原因立証の一つのポイントになることがある⁽⁹⁾。

木材に漏れ電流が流れた場合の電気伝導は、一般にイオンによって行なわれる⁽¹⁰⁾と考えられているが、漏れ電流による木材の炭化および発火の機構など、細部にわたっては資料が乏しく、明確でないのが現状である。

供試料に用いた杉材は、秋田県の主要林産品であり、その主成分セルローズは長い鎖状の高分子⁽¹¹⁾で、内部を割って炭化形成過程や炭化物の結晶構造などの解明が容易であり、高分子材料の一つのモデルと考えることもできる。

本研究では、供試料に交流 50 Hz、実効値 1,000 V、1,500 V、2,000 V を課電し、それぞれの含水率による炭化の形成過程、炭化物の結晶構造、発火のモードなどについて検討した。その結果、含水率によって電

気発火のモードは異なり、含水率 30% 前後の木材は他の含水率の木材に比べて発火発生率が高いという興味ある結果が得られ、炭化部は黒鉛化せずとも発火に至ることが明らかとなったので、それらの結果について報告する。

2. 供試料・実験装置および方法

〈2・1〉 供試料 供試料は 60×60×20 mm の杉材を用いた。供試料の切断モデルを図 1 に示す。図 2 は杉材細胞構造のモデルを示す⁽¹²⁾。これら細胞のうち、仮道管や軸方向柔細胞は軸方向に並び、木口の方向に口を開き、放射細胞は半径方向に並び、板目に開口する⁽¹²⁾。杉のような針葉樹材を構成する細胞は、幹方向要素として木口仮道管と軸方向柔細胞があり、放射方向には木口放射仮道管と放射柔細胞がある⁽¹²⁾。木

図 1 杉材切断モデル

Fig. 1. Model of cross section of cryptomeria.

図 2 杉材細胞構造モデル

Fig. 2. Model of cellular tissue of cryptomeria.

Carbonization and Electric Fire of Wood due to Leakage Current. By Koichi Kikuchi, Member (Department of Electrical Engineering, Akita Technical College), Noboru Yoshimura, Member & Fumitoshi Noto, Member (Department of Electrical Engineering, Mining College, Akita University).

菊地光一: 正員, 秋田工業高等専門学校電気工学科

吉村 昇: 正員, 秋田大学鉱山学部電気工学科

能登文敏: 正員, 秋田大学鉱山学部電気工学科

SL: スライダック, VG: 電圧発生装置, V: 電圧計, A: 電流計,
S: 供試料, RE: 記録計, OS: メモリスコープ

図 3 実験装置の配置

Fig. 3. Experimental setup.

材の生育中、仮道管は通水作用と樹体の機械的保持の作用があり、柔細胞は栄養物の貯蔵の作用がある⁽¹²⁾。

日本産出要針葉樹材構成要素比率⁽¹³⁾によれば、杉の仮道管は重量構成比率で 97.2% であるから構成要素の大部分を占めている。杉材の木部繊維は仮道管のことを言い、木化を完了した仮道管は中空細胞群で、両端が閉じた細長い紡錘形の繊維状細胞である。木材工業ハンドブック⁽¹⁴⁾によれば、杉の仮道管の長さは平均 3.0 mm (最小 1.0 mm, 最大 6.0 mm), 直径は放射方向で早材 (生長部の前半に形成される) は 30~50 μm, 晩材 (生長期の後半に形成されるもので、早材に比して密度が高く、細胞が小さい) は 10~20 μm, 接線方向では 30~45 μm である。

〈2・2〉 実験回路および主要実験装置 図 3 に実験回路を示す。高電圧発生用変圧器の容量は 5 kVA で、二次側の最大発生電圧は交流実効値で 6 kV である。実験に際しては、二次側の電流が 1A になると供給電圧をしゃ断するようリレー回路を設定した。木材の含水率の測定は乾量基準含水率を用い、木材炭化部の結晶構造を検討するためには、日立-明石の MSM 4C 走査形電子顕微鏡と理学電機製の X 線回折装置を用いた。なお、X 線回折装置の X 線管陽極は Cu, K α である。

〈2・3〉 実験方法 供試料は 2 枚の銅板電極をバネ圧で密着した。電極は厚さ 2 mm, 直径 48 mm の円板である。供試料杉材は軸方向、半径方向などで電流の通りやすさに異方性があるので、本実験では軸方向に電極を対向させて行なった。

図 4 に供試料と電極の配置を示す。木材の含水率は乾量基準含水率 (以下、含水率と記す) を用い次式より計算した。

$$\text{含水率 } w = \frac{W_w - W_0}{W_0} \times 100 (\%) \dots (1)$$

W_w : 測定時の木材の重さ (g), W_0 : 全乾時の木材の重さ (g)

木材の全乾重さとは、試料を 100~105°C で加熱乾燥

図 4 電極, 供試料の配置

Fig. 4. Arrangement of electrodes and specimens.

し、恒量に達すると乾燥剤を入れたデシケータ内で冷却して手早く電子式秤量計で秤量した値である。

本実験に用いた杉材は気乾状態 (大気相対湿度と平衡する含水率を気乾含水率と言い、測定期間中の気乾含水率の平均値は 15% であった) のもので、これに水道水を含水させて供試料とした。水道水の導電率は 25°C 平均値で約 131.6 μS/cm である。

試験電圧には 50 Hz, 交流実効値 1,000 V, 1,500 V, 2,000 V を用い、炭化の形成過程の調査は適時供試料を割って行なった。また試験中の電圧、電流波形の観測には 100 MHz, 2 現象ストレージオシロスコープを用いた。

3. 実験結果とその検討

〈3・1〉 含水率の相違による漏れ電流の時間的変化

図 5 に試験電圧 2 kV, 含水率 28% の場合と、試験電圧 1.5 kV, 含水率 35% の場合のペンレコーダによる漏れ電流値の時間的変化を示す。漏れ電流値が最小になる付近で発火し、発火の進展に伴って電流は急激

(a) 試験電圧 2 kV, 含水率 28% の場合の漏れ電流

(b) 試験電圧 1.5 kV, 含水率 35% の場合の漏れ電流

図 5 漏れ電流の挙動

Fig. 5. Leakage current behavior.

図 6 含水率の相違による漏れ電流の時間変化
Fig. 6. Changes of leakage current with time, as to the wood with different moisture content.

に増加し、炭化導電路が完成する。2 kV を課電した場合の含水率の相違による漏れ電流の時間的变化を図 6 に示す。同図中、含水率 25% は未発火の例である。また、含水率約 26% の場合は発火の場合と未発火の場合の代表例をそれぞれ示した。試験初期の漏れ電流の値は含水率の高いほど高く、発火に至る場合は漏れ電流の変化が V 特性を示し、漏れ電流の値が最小になる付近で発火する傾向を示す。炭化導電路が電極間を橋絡した後は、漏れ電流の値はほぼ一定となる。

含水率が大になるに従って漏れ電流は大となり、繊維飽和点以上の含水率では仮道管に水分が存在する。仮道管に水分が存在する状態では局部的乾燥部ができにくい。約 30% の含水率は繊維飽和点の含水率で、他の含水率よりも短時間に局部的乾燥部が発生し、炭化の芽が生じやすく、発火に至る時間も短い。

図 7 に、含水率約 30% の場合の試験電圧の相違による漏れ電流の時間的变化を示す。試験電圧の高いほど発火に至る時間は短い傾向を示している。

〈3・2〉 発火までの漏れ電流積分値と発火までの時間 図 8 は試験電圧に対応する発火までの漏れ電流積分値と、発火までの時間との関係を示す代表的例である。漏れ電流積分値とは、図 9 に示すように時刻零

図 7 試験電圧の相違による漏れ電流の時間変化
Fig. 7. Changes of leakage current with time by the different voltages.

図 8 発火までの漏れ電流、積分値と試験電圧との関係

Fig. 8. Relation between integrating value of leakage current and test voltage.

より t_i までの漏れ電流の積分値を意味し、零から t_i までを横軸に垂直な線で適当に区分し、区分した $a, b, c, \dots$ の面積を求め、それを合計して発火までの漏

れ電流積分値とした。

表 1 より、含水率 27% 以下の場合は発火発生率が非常に低いので、含水率 27% 以下を除けば含水率 28~32% は発火までの時間は短く、発火までの電流積分値は小さい。それ以上の含水率では、仮道管中に水分の存在する状態で、後述の繊維飽和点（含水率約 30%）付近で放電が発生するまでは、供給される電力は仮道管中の水分の蒸発に寄与し、含水率が大きほど試験開始時の電流値は大となり、なお発火までの時間

は長くなるので電流積分値は大となる。また含水率が 30%、40% 程度の場合、試験電圧が低くなくても電流積分値はほぼ等しい。それは試験電圧が低くなるに従って漏れ電流の値は低くなるが、発火までの時間が逆に長くなり、電流積分値に大きな相違を生じないためである。試験電圧 1 kV、1.5 kV で含水率 26.0% 前後では全く発火に至らなかった。また含水率が同じ程度であれば試験電圧の高いほど発火までの時間は短い。供試料の数とそれぞれの含水率に対応する発火発生率を表 1 に示す。発火発生率は試験電圧の高いほど高くなり、含水率 28~32% で最も高い。後述の繊維飽和点は発火発生率および発火に至る時間と大きなかわりがある。

〈3・3〉炭化形成過程 炭化の芽は供試料の内部にできる場合と外面にできる場合があるが、内部にできる場合、発火に至ることが多い。外面に炭化の芽ができる場合は、乾燥部が急激に広がることが多く、炭化部分は成長しにくい。なお、外面の炭化現象については別途報告する予定である。

炭化導電路の生成過程の代表的モデルの例を図 10 に示す。同図の a, b, c, d は供試料の軸方向中央部に複数の炭化の芽が発生し、漸次トリート状に進展し、ついにその一つが炭化導電路を完成する場合の進展モデルで、放電による炭化のこん路が連続し、導電路を完成する。また a', b', c', d' は供試料の軸方向の端部に炭化の芽が発生し、それが漸次線状に進展していく場合を示している。炭化の芽の発生後、炭化部

図 9 漏れ電流の時間変化のモデル曲線

Fig. 9. Model curve of leakage current with elapse.

表 1 含水率の相違による発火発生率

Table 1. Combustion rate of electric fire in wood with different moisture content.

試験電圧 (kV)	含水率 (%)	発火発生率 (%)	供試料数
2.0	47~52	50	40
	37~42	55	40
	28~32	60	40
	25~27	5	20
	25未満	0	20
1.5	47~52	25	40
	37~42	30	40
	28~32	30	40
	25~27	0	20
	25未満	0	20
1.0	47~52	0	20
	37~42	0	20
	28~32	5	20
	25~27	0	20
	25未満	0	20

a, a': 初期, b, b': 初期進展, c, c': 後期進展, d, d': 炭化導電路完成

図 10 炭火導電路形成過程の代表的モデル

Fig. 10. Schematic typical model of carbonizing process.

図 11 炭化部の写真例（軸方向に沿って内部切断）

Fig. 11. Photograph of carbonized parts (specimens along axis direction)

図 12 表面炭化部の外観

Fig. 12. View of carbonized surface parts.

はトリー状または線状に成長する。試験電圧 1.0 kV, 1.5 kV の場合はトリー状または線状に成長し、試験電圧 2.0 kV の場合は線状に成長する場合が多い。いずれの電界でも、トリー状または繊維に沿って成長する場合との複合現象を示す場合がある。

炭化導電路完成前のものおよび炭化導電路完成後の供試料について、炭化導電路の方向（軸方向）に沿ってまき面に切断したものの写真の例を図 11 に示す。また、軸方向表面の炭化の写真例を図 12 に示す。供試料と電極接触部に局部放電が発生し、断続的な発火を伴って、その炭化部が成長する事例もある。その場合、電極近傍で激しい放電または断続的な発火が発生すれば局部的に炭化部組織が収縮し、電極との間に微小のすき間を生じ、すき間に局部放電がつき、炭化導電路完成後も断続的な放電が発生する。

供試料をまき目面と木口面に切断した未炭化部と炭化部の一部を走査形電子顕微鏡写真に撮った事例を図 13 に示す。炭化部は放電によって多数の放電孔を生ずると共に、細胞壁が炭化していることがわかる。トリー状に進展する場合は細胞壁をつき破って成長するが、一般的には炭化部は細胞壁に沿って成長すること

図 13 未炭化部、炭化部の走査形電子顕微鏡写真例

Fig. 13. Scanning electron micrographs of carbonized and uncarbonized specimens.

が多い。

〈3・4〉 発火のモードおよび発火機構 木材に流れる漏れ電流は、木材表面および木材内部に存在する水分の影響を受ける。渡辺氏⁽¹⁵⁾によれば、木材内に存在する水分は収着水（液相）と水蒸気（気相）で、収着水は表面結合水、二次結合水、自由水である。

細胞壁内の微細毛管が結合水で飽和され、細胞内腔などの粗大空げきに自由水の存在しない状態を飽湿状態と言い、この状態の木材含水率は繊維飽和点における含水率と呼ばれる⁽¹⁶⁾。供試料の 20℃ における繊維飽和点の含水率は約 30% である⁽¹⁷⁾。繊維飽和点以上で粗大空げき内に吸収される水が自由水であって、これらの水分中のイオンが木材の電気伝導と大きなかわりを持つ。供試料中仮道管中に自由水が存在している場合は放電は発生せず⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾、自由水が蒸発して仮道管の一部に微小乾燥部が発生すれば、その微小乾燥部に放電が発生し、炭化の芽となる。含水率約 28～32% の場合、他の含水率の場合より炭化の芽が発生しやすい。次に炭化部の周辺が放電により乾燥し、その乾燥局部に放電がついて炭化部が成長し、発火する場合はこの炭化部が急成長する場合が多い。炭化の芽が供試料の表面にできる場合は、放電による木材の熱劣

図 14 発火中の外観

Fig. 14. View of igniting specimens.

化により、発生する可燃性ガスは大気中に放散し、また反応熱も大気中に逃げやすいので、発火に至る場合が少ない。

炭化の芽が内部にできる場合は、放電の成長につれ木材の熱劣化により発生した可燃性ガスと放電による熱、および木材の反応熱は供試料内部に蓄積し、蓄積した可燃性ガスに引火すれば勢い良く火勢が外部に噴出し、外部では酸素の供給が十分となり、継続的に燃焼する。

図 14 は発火中の供試料を示す。発火のモードを類型化したものが図 15 である。(A)のモードは供試料内部に炭化の芽が発生し、それが成長し発火に至る場合と、炭化の芽の成長が途中で停止して、発火に至らない場合がある。(B)のモードは表面の炭化の芽ができる場合で、(A)のモードに比して発火に至る場合が少ない。(C)のモードは(A)と(B)の複合モードである。(D)のモードは漸進的・均一的に乾燥が進み、局部的乾燥部未発生の場合で発火には至らない。

〈3・5〉炭化生成物の結晶構造 炭化生成物の結晶構造は黒鉛化しているかどうかを判定するのに有効なので、電子顕微鏡と X 線回折の結果を中心に検討した。

供試料の炭化導電路が完成した後、その炭化部を削り取ったものの走査形電子顕微鏡写真の一例を 図 16

図 15 発火のモード

Fig. 15. Mode of electric fire.

図 16 炭化物の走査形電子顕微鏡写真

Fig. 16. Scanning electron micrographs of carbonization product.

に示す。一部に削り取るときの取扱いが原因と思われる欠落箇所があるが、おおむね繊維の方向が保存された形で炭化されており、固相での炭素化反応は供試料の微細構造がそのまま引き継がれたものとなる。このことは、生成される炭素の構造が供試料の構造骨格の影響を受け、広い範囲での配向の自由度を欠くことになるので、黒鉛化性の炭素となりにくい。また、本実験の試料配置で炭化部は電界の方向に成長しやすく、電界の方向は仮道管の繊維方向と同一方向なので、電

図 17 標準黒鉛の X 線回折強度

Fig. 17. The intensity of X-ray diffraction of standard graphite.

図 18 供試料炭化部の X 線回折強度

Fig. 18. The intensity of X-ray diffraction of carbonized specimens.

流は木材繊維炭化部の方向に流れることになる。

X線管陽極に Cu, $K\alpha$ を用いた場合の X 線回折の結果を図 17 および図 18 に示す。図 17 は棒状の標準黒鉛を粉末にしたものの回折強度を示す。また、図 18 は杉材の発火直後の炭化部を削り取り粉末にしたものの回折強度を示す（発火直前の炭化部も同じ回折強度の傾向を示す）。供試料炭化部は図 18 に示すとおり、炭素の積層構造が成長し、三次元規則性の増加する黒鉛構造⁽¹⁹⁾ までは至らず、無定形炭素の段階である。従って、金原氏の言う黒鉛化現象は起こらずとも、漏電火災の危険性はある、無定形炭素の状態でも発火に至ることを留意すべきである。

〈3・6〉 電流、電圧波形 試験電圧、実効値 1.0 kV、含水率 35% の場合、炭化導電路が完成しない場合の例を図 19 に示す。電流は漸次減少し、供試料表面に (c)、(d) 図に示すような局部放電が発生するが、すぐ消え、炭化導電路は完成せず、やがて電流は流れなくなって発火には至らない。含水率約 30% 以上で発火に至らない場合は、図 19 のような電流、電圧波形の傾向を示す。図 20 に試験電圧（実効値）1.0 kV、含水率 31.5% の場合、炭化導電路が完成した場合の例を示す。電流は試験直後若干上昇し、試験後約 30 秒後より漸次減少し、約 100 秒経過ごろより放電の芽が発生する。約 120 秒後 (d) 図に示すとおり電流は最小となり、電流最小付近で局部放電が激しくなり、電流波高値の高い部分に放電パルスが重畳する。

図 19 電圧、電流波形の例（炭化導電路が完成しない場合）

Fig. 19. Examples of voltage and discharge current waveform (in the case of incomplete carbonized path).

図 20 電圧、電流波形の例（炭化導電路が完成した場合の例）

Fig. 20. Examples of voltage and discharge current waveform (in the case of carbonized path completed between electrodes).

その後、電流は急増し、電流、電圧波形のひずみは大となり、約 125 秒後で炭化導電路が完成し、供試料は燃え続ける。発火に至らない場合は、漏れ電流が試験直後若干上昇後漸次減少してついに流れなくなり、電圧波形のひずみはほとんどない。発火に至る場合は、その電流値は V 特性を示し、電流が最低値付近で放電が急成長して、電流、電圧波形のひずみは大となり、炭化導電路完成後は図 20 (f) に示すように電圧波形はゆがんだ台形を示すのが特徴である。

電流、電圧波形の拡大写真で放電パルスの重畳している例を図 21 に示す。同図 a は電流の波高値の高い

図 21 漏れ電流波形の例 (放電パルスが重畳した場合)

Fig. 21. Examples of discharge current waveform (in the case of discharge pulses superimposed on the fundamental waveform).

部分に重畳するパルスの拡大写真の例を示し、同図 b は極性の切り変わる付近に発生するパルスの拡大写真を示す。

発生する放電パルスの波高値、パルス間隔は実験ごとに相違する。しかし、炭化導電路完成前の放電パルスは主に正、負の半波の波高値の高い部分に現われ、炭化導電路完成後に発生する放電パルスは主に極性の切り変わる部分に発生する。また、極性の切り変わる部分に発生する放電パルスは、正の半波では正方向に、負の半波では負の方向に現われ、反対にはほとんど現われない。

4. ま と め

本論文の結果を要約すると次のようになる。

(1) 炭化、発火のモード

① 炭化の芽のできる場所による炭化、発火のモード
炭化、発火のモードは含水率、試験電圧などによって異なるが、発火に至る場合は、(i) 供試料内部に炭化の芽が発生成長する場合、(ii) 供試料表面に炭化の芽が成長する場合、(iii) 両者の複合した場合とあるが、(i) と (iii) の場合は (ii) の場合に比して発火発生率は高い。

② 含水率による炭化、発火のモード
含水率が 30% 前後 (繊維飽和点における含水率) の場合、他の含水率に比して発火発生率が高く、発火に至る時間は短い。また含水率 25% 以下では、漏れ電流は漸減し発火には至らない。含水率が 30% を超える場合は、含水率の高いほど発火までの時間は長い。

③ 試験電圧の大小による炭化、発火のモード
試験電圧の高いほど発火発生率は高く、1.0 kV 以下では局部的放電の発生することがあるが、発火に至ることはまれである。

(2) 炭化部の結晶構造
電子顕微鏡、X線回折による供試料炭化部の結晶構造の調査の結果、黒鉛化性の炭素は発見できず、供試料炭化部は黒鉛には至らないが発火し、火災の危険性がある。

(3) 電流、電圧波形
電流、電圧波形は、炭化の芽の発生、その進展、炭化導電路の完成などの炭化のプロセスに対応して変化するので、波形の観測によって炭化の進展状況を判別できる。なお、炭化の芽の発生、炭化部の成長に寄与する放電パルスは、漏れ電流の波高値の高い部分に重畳され、炭化導電路完成後の放電パルスは漏れ電流の切り変わる部分に重畳される。

最後に、X線回折の実験にあたり援助をいただいた秋田大学鉱山学部電気工学科 河村鴻允助教授に厚く謝意を表す。

(昭和 58 年 10 月 24 日受付, 同 59 年 2 月 23 日再受付)

文 献

- (1) 三山:「漏電による火災について」, 日本火災学会誌, 2, 5 (昭 27-1)
- (2) 塚本・我妻:「漏電による出火の実例」, 同上, 2, 13 (昭 27-1)
- (3) 末:「高電圧漏電火災について」, 同上, 2, 13 (昭 27-1)
- (4) 塚本・富樫:「漏電による出火の研究」, 日本火災学会論文誌, 6, 30 (昭 31-1)
- (5) 金原・末:「高電圧漏電による出火現象について」, 日本火災学会誌, 2, 39 (昭 27-1)
- (6) 金原・岩崎:「漏電出火の機構について」, 日本火災学会論文誌, 6, 5 (昭 31-1)
- (7) 一倉:「電気器具からの発火—金原現象による発火」, 日本火災学会誌, 11, 5 (昭 36-3)
- (8) 木村・萩原:「電気器具に現われた金原現象 2 例」, 同上, 11, 10 (昭 36-3)
- (9) 東京消防庁:「電気火災原因の立証—グラフアイト化による通電」, 電気火災, p. 23 (昭 48)
- (10) 伊藤:「木材の電気伝導」, 木材学会誌, 6, 109 (昭 35-3)
- (11) 渡辺:「木材の成分」, 木材理学総論, p. 70 (昭 53) 農林出版
- (12) 石田・米沢・近藤:「細胞要素」, 木材化学 (上), p. 7 (昭 43) 共立出版
- (13) 木材工業ハンドブック編集委員会:「細胞構造」, 木材工業ハンドブック, p. 65 (昭 57) 丸善
- (14) 木材工業ハンドブック編集委員会: 同上 p. 66 (昭 57) 丸善
- (15) 渡辺:「木材と水分」, 木材理学総論, p. 224 (昭 53) 農林出版
- (16) 渡辺: 同上, p. 227 (昭 53) 農林出版
- (17) 渡辺: 同上, p. 230 (昭 53) 農林出版
- (18) 菊地・小松・佐藤:「木材の漏電による発火について」, 昭 57 電気学会東北支部連大, 2D-7
- (19) 菊地:「木材のもれ電流による炭化形成過程と発火機構」, 第 16 回電気絶縁材料シンポジウム予稿集, p. 95 (昭 58)
- (20) 木材工業ハンドブック編集委員会:「木材の物理的性質」, 木材工業ハンドブック, p. 112 (昭 57) 丸善