

首里城炎上⑬ 見えてきた火災原因（Ⅱ） －明らかにになった発火源；最初のショート地点は！－

技術士（衛生工学・建設・環境）・甲種危険物取扱者等
環境計画センター 会長代行 鍵谷 司

はじめに

首里城火災の原因について、那覇市消防局は、監視カメラに分電盤室で発火前に微光やフラッシュ光が記録されているにもかかわらず、焼け跡から回収したコード類の溶融痕がショートによるものか、火災時の高温によるものかを確実に判定できない等として「原因不明」と結論した。これに対して前号（『環境施設』第171号；2023.3発行）では、下記の状況証拠等に基づいて生じた溶融痕は、ショートによることを合理的に明らかにした。すなわち、

- ①発火源の分電盤室には、電気以外の火源がないこと
- ②外部からの放火やたばこの不始末は否定されていること
- ③監視カメラに記録された発光現象は、電気の短絡以外に存在しないこと
- ④発光は2,000℃以上の超高温で生じるが、短絡以外に高温火源は存在しないこと
- ⑤焼け跡から通電していたコードからは多数の溶融痕が確認されたが、近傍にあった通電していなかった送風機コードには溶融痕はなかったこと
- ⑥火災時を想定した燃焼実験では、コード類を銅の融点以上の高温で加熱しているが、火災時には、コード（銅）は溶けていないこと

正殿1階で唯一露出していたコード類がショートしたことは明白であるが、いったい、どの部分がショートしたのであろうか？ また、室内監視カメラが微かな光を捉えたわずか13分後に外部監視カメラが発光を、直後にフラッシュ光を捉え、大小を繰り返しながら南側へ移動し、最終的に中央

階段付近でフラッシュオーバーが記録されている。

また、火災報知器等の防災設備が鳴動した時点ですでに大量の煙が発生していたことが明らかにされている。コードがショートしたにも拘わらず、分電盤のブレーカーが落ちなかったこと、および焼け跡から多数の溶融痕が見つかったことは大きな謎であり、逆にこの特異な現象は原因究明に重要なヒントを与える。

これらは、火災発生の前兆であるにも拘わらず、那覇市消防局および首里城火災に係る再発防止検討委員会のいずれもほとんど考察、検討が行われていない。誰もが疑問に思っているこれらの現象の解明を試み、そのメカニズムについて重要な知見が得られたので紹介する。なお、首里城火災に係る住民訴訟において裁判資料になることを想定し、公表された公文書の関係箇所を抜粋して記すようにした。以下、次のように略記する。

- ①首里城火災に関する再発防止策等報告書；首里城火災に係る再発防止検討委員会（令和3年3月）；以下、検討委員会報告書
- ②那覇市消防局 火災原因判定書 令和2年12月28日；以下、火災原因判定書
- ③那覇市商消防局 実況見分調書（正殿・第1回から18回）；以下、実況見分調書

1. 最初のショートは、どこで起こったか？

写真1は、火災後の正殿1階北東角の発火元となった分電盤室付近とウナーを挟んで約40m離れた監視人が常駐する奉神門の位置関係を示した。火災の原因を究明するためには、発火源、着火物および燃焼した可燃物（延焼物）を明らかにする

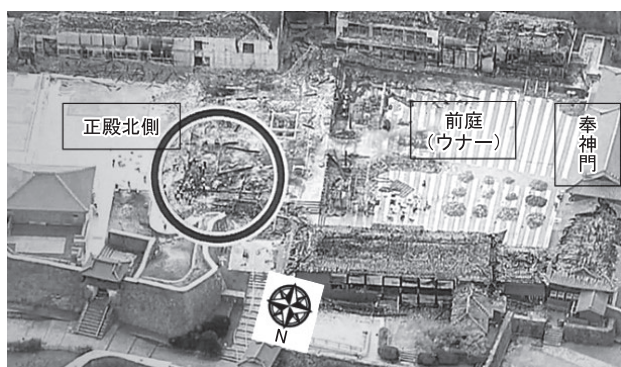


写真1 正殿1階北東角の現場と奉神門の位置関係

ことが肝要である。これまでに実況見分調書および火災原因判定書より焼け跡における物的証拠および状況証拠から発火元は正殿1階の北東角の分電盤室における電氣的なトラブルであることが確認されているが、発火源が「ショート」であることを確定できないとしている。

最初に起こったショート地点を確定することは、その後に起こる着火物および延焼物を検討する上で必須であり、火災の進行に重要な意味を持つ。

1. 1 最初のショート地点は、LED照明灯コード付近！

火災発生までの経緯、ショートの可能性のある地点、および溶融痕の分布状況から初めにショートした地点について検討した。このような電氣的な溶融痕の位置から出火場所を推定する方法にアークマッピング法があり、その活用方法を参考にした¹⁾。

ところで、検討委員会報告書第4章p.84では、「予備ブレーカーにつながる分電盤横の二口コンセントは、通常、LED照明スタンドおよび送風機の電源として使われていた。LED照明スタンドは平成30年12月に設置され、平成31年2月から使用された。監視員が操作することになっており、閉館後は電源スイッチを切るが、プラグを抜かない運用であった。送風機は、正殿1階北東側出入口の蒸し暑さを軽減するために適宜使用するものであり、清掃員が操作することになっており、使用しないときにはプラグを抜く運用であった。なお、首里城火災当日は、清掃員がLED照明スタンドの

電源スイッチを切り、送風機のコンセント（プラグ）を抜いた」と証言している。

火災発生原因を解明するための重要な基本事項を以下に示す（写真2、図1）²⁾。

- ①数多くのフラッシュは、火災前に起こっており、火災により配線がショートしたのではない。なお、ここで記載する火災とは、有炎燃焼を想定しており、消防局の定義とは異なる。
- ②露出コードには、分電盤下部のコンセントから受電した延長コードとLED照明灯コードがあり、その他の配線はほとんど金属管に納められている。
- ③発火源は、分電盤下コンセント、高床通路にはみ出した延長コードとテーブルタップ、LED照明灯コードおよびLED照明灯の点灯・消灯を操

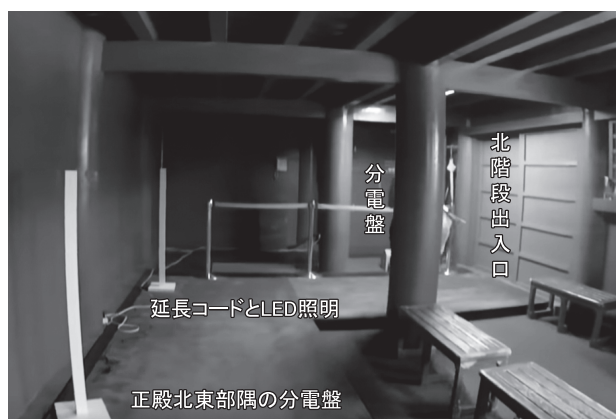


写真2 分電盤室のLED照明灯、コード配置等²⁾

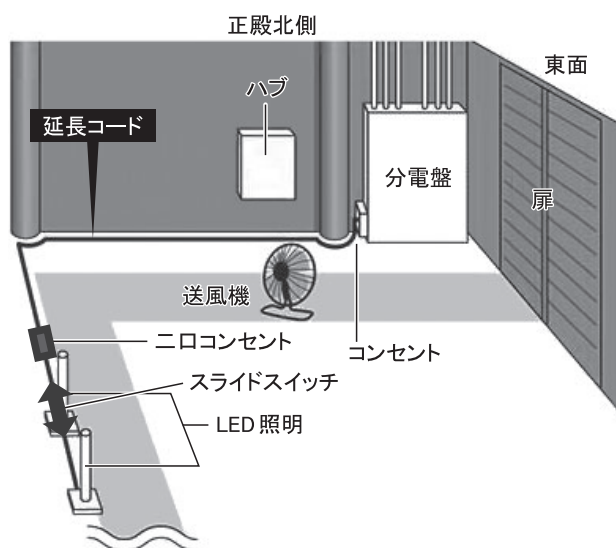


図1 分電盤室の電気系統の概略

作するスライドスイッチおよびLED照明灯がある。なお、LED照明灯は2基配置されているが、ここでは、平成31年2月に設置された後付けLED照明灯を指す。

また、焼け跡からコード類の溶融痕が多数回収されており、その特徴を以下に示す。

- ①溶融痕の分布は、北側（奥側）から西壁側（左側）のほぼ露出コードの配置に沿って確認されている。
- ②溶融痕は、電源から最も離れたLED照明灯付近（第5区画；図2、写真2、写真3、写真6）で確認されている。
- ③火災当日に通電中のコードは、分電盤コンセントからLED照明灯のスライドスイッチ（入口）である。なお、LED照明灯は消灯されていた。

以上の事実に基づいて最初にショートした地点を考察した。

電気火災の原因調査の基本は、「電源から最も離れた地点に着目すること」である。ここでは、最も遠い地点は、LED照明灯スライドスイッチ入口であり、その間にはLED照明灯用コード、テールプルタップ、延長コードおよび分電盤底部に取り付けられたコンセントに発火の可能性がある。しかし、仮に途中でショートした場合には、ここで断線するので、その先のLED照明灯コードやスイッチまでは通電しないので、ショート痕は発生

しないことになる。実際に、焼け跡で回収された金属溶融物は、手前LED照明灯の設置付近にも多数確認されている（写真4～6）。すなわち、最初に発生したショートは、この電源から最も離れたスライドスイッチ付近であることを示す有力な証拠である。

【火災原因判定書 令和2年12月28日；p.13】

「(ア) 実況見分調書（正殿・第4回）に記載の通り、第1区画と第5区画で熔融痕のある断線した電気配線や銅粒、その他金属の溶融物が複数見分でき、それらは区画の西側に集中しており、第1区画の北側からLED照明の土台発掘位置付近まで点在しながら見分できる事実」

1. 2 分電盤室における金属溶融物の分布状況

焼け跡の掘削調査は、正殿を南北に2等分し、北側半分をさらに12分割して、重点的に行われた。図2は、正殿の北東角に位置する分電盤室の位置と区画を、写真3は、正殿の北側をロープで12分轄して撮影した。対象区画は、正殿1階の北東角の北側が第1区画（写真4の右奥側）と南側が第5区画（写真4の左奥側）になる。

【金属溶融物の分布について】

○全体の分布（写真4）；正殿北東角の分電盤室の北側の第1区画を東側から撮影し、発掘した収

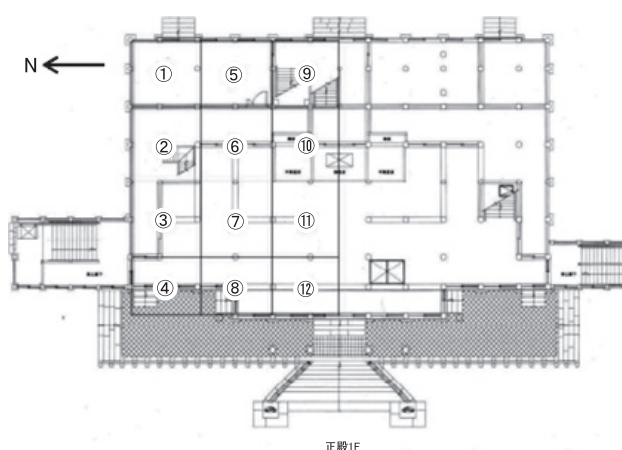


図2 分電盤室の位置と区画
(実況見分調書（正殿・第1回）3-1-2)

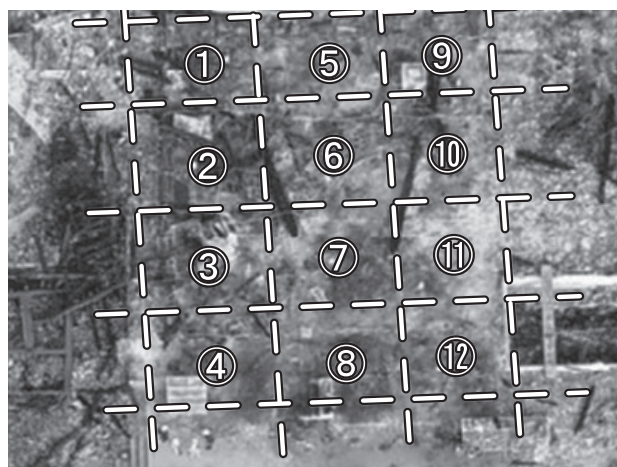


写真3 火災後の正殿北側の区画割り
(分電盤室の北側が①、南側が⑤)

去物を復元したものである。収去物は、主に焼損した配線、融解塊や溶融痕ある。これらの分布状況は、西側に沿って多く分布しており、露出していた電源コードの配置と類似していた。また、数は少ないが第5区画のLED照明灯付近にも金属溶融物等が回収された。

- 第1区画における分布（写真5）；1番から35番までの金属溶融物等の状況であり、延長コードの配置および分電盤付近に続いて分布していた。延長コードの定格電流は大きく、電気容量が大きいことおよびコードが長い（7.5m）ことから多数の金属溶融物が生成したと考えられる。
- 第5区画における分布（写真6）；1番から8番までの金属溶融物の分布状況であり、分電盤室の中央西側に位置するLED照明灯付近と見受けられる。LED照明灯コードは細いので、その定

格電流は小さいことおよびコードが短い（約1.5m）ことから、金属溶融物の発生は少ない、かつショートしても分電盤のブレーカーは落ちなかったと考えられる。

なお、通電していなかった送風機が近傍で見つかったが、火災原因判定書p.10において「(ウ)送風機」について次のように記載されている。

「(ア) 実況見分調書（正殿・第6回）に記載の通り、分電盤の南方から発掘された金属製の枠と、その周囲から発掘された金属部品について（写真7）」、「これら一式を送風機として検分すると、電気配線は短く断線しているが、断線部分に溶融痕は認められないこと」、また、「モーターのステーターコイルは全体的に焼損しているが、部分的な欠損や溶融痕が認められない事実」

つまり、溶融痕は、通電状態の露出した延長コー



写真4 正殿第1区画を東側から撮影（奥の西側壁に沿って分布する溶融痕）



写真6 写真4の第5区画の拡大写真（手前のLED照明灯付近の溶融痕分布）



写真5 写真4の第1区画の拡大写真（延長コードの配置に類似した溶融痕分布）



写真7 分電盤跡の前に送風機が見分できる

ドとLED照明灯コードの配置に沿って分布し、通電していなかった送風機のコードやコイルには見分できなかったことは、火災時における高温ではなく、電気的なショートにより発生したことを強く示唆する。

1. 3 溶融物の組成・融点から火災時の温度の推測

本来、溶融痕を鑑定するにあたり火災現場の温度および発光やフラッシュ光の温度を検討し、燃焼（加熱）実験に反映させることが基本であろう。那覇市消防局では、焼け跡から回収した溶融物の組成分析を行っているが、結果の考察や検討結果は見当たらない。

ここでは、分電盤室で回収され溶融物の組成分析結果が公表されているので、その融点から火災時の温度について考察した。

金属等の物質は、高温に曝されると、融点を超えると溶け、沸点を超えると気化する。消防研究センターで行われた燃焼試験（加熱試験）では、根拠を示すことなく、銅の融点近傍の1,090℃（データロガー読み取り）で行われている。一方、電気的なショートが起った場合には、溶融痕の金属類の沸点（表1）を超える約3,000℃以上であることを示す。しかも瞬時に気化する。これは、銅の分子量が29であり、密度が8.94なので、気化時には、体積が約9,000倍程度に急膨張するため、激しく飛び散ると予想される（膨張計算は最終ページの「追記」参照）。

以下にそれぞれの特徴を熟考した。

※気化とは、液体や固体から気体に変化する現象をいい、蒸発とは、液体の表面から気体に、沸騰とは、液体の内部から気体に変化する現象をいう。

【溶融物から火災時の温度を推測】

実況見分調書（正殿・第7回：7-7-1-1および7-7-2-1）では、焼け跡から回収した金属類の組成分析を行い、数種類の金属を同定している。当然、配線には銅線が使用されているので銅が、またプラグ類に使用されている真鍮（銅と亜鉛の

表1 溶融物から検出された重金属の融点と沸点

重金属	記号	融点（℃）	沸点（℃）
銅	Cu	1,085	2,682
亜鉛	Zn	420	907
ニッケル	Ni	1,455	2,890
マンガン	Mn	1,246	2,062
鉄	Fe	1,536	2,863

合金）の成分である亜鉛が検出されている。検出された重金属類の融点と沸点を表1に示した。なお、露出以外の配線は、ステンレス製金属管内に収められており、金属管は溶融していないことが見分されている。

溶融痕の金属成分を分析しているが、注目すべきは、ステンレス製金属管の溶融物が見分できないことである。ステンレス鋼は、鉄とクロム等との合金であるが、その融点は、鉄よりも低い1,400～1,500℃程度と言われている。組成分析では、ほとんどの溶融物に銅が検出されている。しかし、通電していなかった送風機コードやコイルにはそもそも溶融物が見分されていない。つまり、火災では、銅の融点（1,085℃）を超えていないのである。なお、火災温度の検討地点は、1階床面付近であり、火災に包まれる天井等の上階でないことに留意すべきである。

ところで、溶融物には、融点が1,100℃以上のニッケル（融点1,455℃）や鉄（融点1,536℃）が検出されている。これらは火災の熱では溶けないので、超高温になる電気的なショートで生じたことを実証している。

すなわち、火災時には銅線は溶融しないが、これを超える融点を持つニッケルや鉄が検出されたことは、電気的なショートで起った有力な証拠である。また、近傍の通電していなかった送風機コードやコイルには、溶融物が確認されていない。このことは、銅の融点を超えて行った燃焼実験は、火災現場の温度状況を再現していないことを示し、この実験結果から導いた結論は、「誤りである」と断言できる。

【溶融物の違い；火災とショートによる生成】

那覇市消防局は、回収した溶融痕が、ショートによるものか、火災時の高温によるものかを確定できないとして「原因不明」と結論した。その証拠に燃焼実験（加熱実験）で故意にショートで溶融痕を作成し、加熱で溶けることを検証している。加熱していないコードおよびショートで作成した銅溶融物も融点を超えると溶融するのであり、むしろ区別できないことを実証しただけである。これをもって「原因不明」と結論を導くことは、科学的ではないし、論理的に誤りである。

火災時およびショート時の温度と熱伝達の速さを考慮すると次の特徴を挙げることができる。

- ①火災時には約1,000℃程度の高温に曝されるが、ショートと比べるとかなり緩やかに加熱される。金属は、融点を超えると溶けて断線し、その表面は、表面張力により丸みを帯びた塊が生成する。つまり、単に高温により銅線等が先端部で溶けただけで、激しく飛び散ったりはしない。
- ②電気的なショートでは、約3,000℃以上の超高温に曝されるので、一瞬で金属が気化（蒸発）するので、溶融物が飛び散り、断線する。この溶融物を短絡痕、ショート痕あるいは溶融痕と呼ぶが、金属は一瞬で気化するので、粒状などさまざまな形状で飛散すると考えられる。

これには「一次痕」と「二次痕」がある。火災の直接の出火原因となったものを一次痕と呼び、関連して生じたショートによる電気痕を二次痕と呼ぶ。なお、火災時には、様々な不純物が混ざったり、圧縮や引っ張り、曲げなどの物理的な荷重がかかるので、千切れたり、飛び散りもあるため、生成した溶融物の原因を見分けることは難しい場合が多い。

これらについて火災とショートによる溶融痕の生成状況を燃焼実験で確認すれば、説明は容易である。那覇市消防局は、燃焼実験と呼んでいるが、これは加熱実験であり、最も重要な条件は、加熱温度である。銅の溶融温度以上で加熱（1,085℃以上）した場合と、それ以下で加熱した場合では、結論が変わることは言うまでもない。

2. LED照明灯スイッチ付近の発火原因は？ 踏み付けか！

発火原因は、分電盤室における露出コードのショートであり、その地点は、電源から最も離れたLED照明灯付近であることが分かった。その発火源としてLED照明灯コードとスライドスイッチが疑われる。なお、LED照明灯は消灯されていたことが確認されている。

2. 1 LED照明灯スイッチ付近の発火原因について

発火源としてLED照明灯コードとスライドスイッチが疑われるので、配置状態を詳細に検討した。なお、分電盤室の写真2を元に、手前のLED照明灯部分を拡大して写真8に示す。不鮮明ではあるが、配線状況等を読み取ることができる。とくに、電源となる延長コードは太くて白いが、LED照明灯コードは黒くて細い。これは定格電流が違うことを意味する。なお、燃焼実験で用いた延長コードとLED照明灯コードを写真9に示す。

【延長コードからLED照明灯までの配線状況】

- ①分電盤の側底部のコンセントから延長コード（約7.5m）を西壁沿いに配置し、二口テーブルタップからLED照明灯コード（約1.5m）を繋いでい

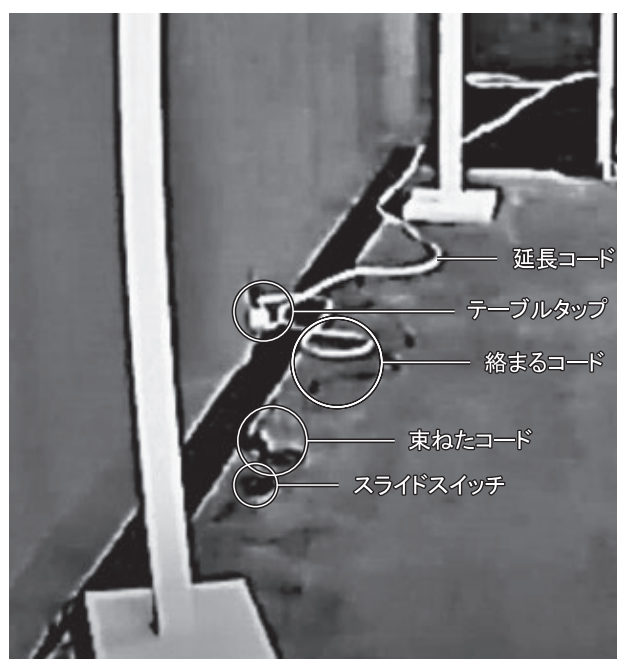


写真8 手前LED照明灯付近の拡大

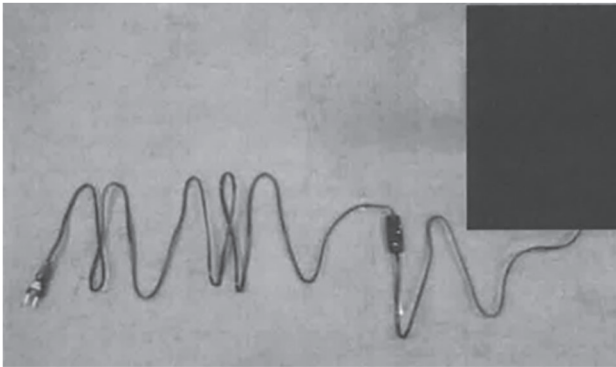
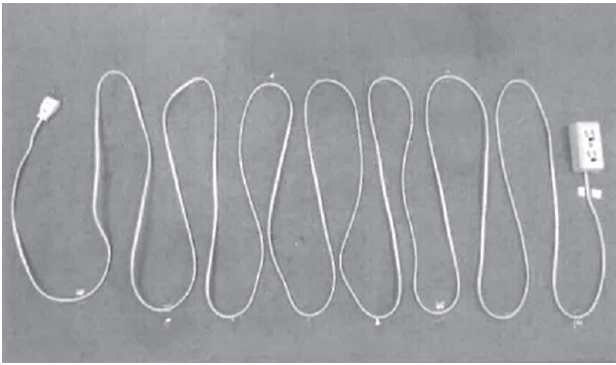


写真9 延長コード（上）とLED照明灯コード・スイッチ（下）⁴⁾

る。なお、延長コードは太い撚り線、LED照明灯コードは細い撚り線である。写真9は、燃焼実験で用いた各コードであり、太さの違いが分かる。これは、定格電流の違いでもある。

- ②いずれのコードも高床通路上にはみ出し、見学者や作業員による踏み付けや引っ掛けによるコードの破損が想定される。なお、後付けLED照明灯の前には休憩用ベンチがある（写真2）。
- ③高床通路にはみ出した延長コードにはLED照明灯コードが絡み合っている（写真8）。
- ④発火地点は、電源から最も遠い地点が疑われるので、LED照明灯用スイッチからテーブルタップまでの配線、特に、長さ調整したコードを束ねている様子が確認できる（写真8）。

2. 2 発火源は束ねられたLED照明灯コード！

LED照明灯用のスイッチについての見分結果は見当たらない。また、その付近の発火源としては、テーブルタップを電源とするLED照明灯コードが考えられる。写真8のLED照明灯付近の拡大写真には、黒い配線と塊が2個見分できる。一見、ご

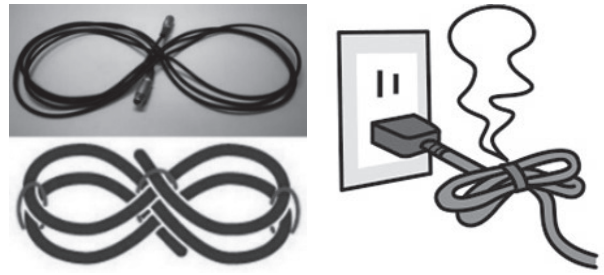


図3 束ねた電線と発火のイラスト（ネットより）



写真10 家庭用コードの素線（鍵谷）

みに見えるが、毎日、清掃員が清掃しているのでありえない。これは、黒いコードの塊と黒いスライドスイッチであると読み取れる。

【LED照明灯コードの配線状況】

テーブルタップからスイッチまでのLED照明灯コードを詳細に見分すると次の事実がわかる。

- ①手前のLED照明灯からテーブルタップまでに黒いコードが繋がっており、LED照明灯付近に2個の塊が確認できる。手前の小さな塊はスイッチであり、すぐ傍に束ねたコードが見分できる。
- ②束ねた黒いコードは、細長く、真ん中付近がややくびれた八の字形である。このような束ね方は、コードにひずみが掛かるほか、配線同士が重なるので通電時に発生するジュール熱を放熱し難い。その結果、熱が溜まりやすく、劣化が

進みやすい（図3）。

- ③配線を束ねると、配線同士が重なるので凹凸が生じ、わずかな踏みつけにより被覆や素線（写真10）が傷つきやすく、かつ凹部には埃が溜まりやすい。

【結論；束ねた配線が発火源！】

カーペットを敷いた高床通路に配線を束ねて配置した場合の発熱および発火の可能性について検討した。微光発生からフラッシュ光発生までの経緯を監視カメラ映像から読み取って表2に示す。なお、監視カメラの時刻には2～3分程度のズレがあるので補正値を、（ ）内は外部監視カメラ（ヨコホリデン）の時刻を記載した。

〈発火メカニズム〉

発火が夜間に起こったことは、発火原因となった要因が、ゆっくりと進行したことを示唆する。しかも、入室の有無は明らかでないが、祭りの準備で多くの作業員が活動していた。また、分電盤近くに布製残渣が確認されていることから、イベント準備品が保管されていたことを意味する。しかし、実況見分調書や委員会報告書では、材料保管については、まったく触れていない。最初に何

が燃えたかについてもまったく検討もしていない。

- ①延長コードのテーブルタップとLED照明灯スイッチ間には、配線を束ねて長さを調整している。配線を束ねると、配線同士が重なるので放熱し難いことや配線同士の発熱による干渉発熱が起こりやすいので、被覆の劣化が進行しやすい。また、通路上にはみ出していたので、重なった配線をわずかに踏み付けただけで容易に損傷する。とくに、素線は、細い撚り線なので、素線の一部が断線する可能性が大きい。

- ②通電中には、ジュール熱が発生するので、放熱し難い束ねた部分が発熱する。プラスチック製の被覆は数十℃で軟化し、180℃程度で熔融し、絶縁破壊が起こる。このような状態のコードが通路にはみ出していたので、見学者あるいは祭り準備作業員が踏みつけにより被覆の損傷が進み、絶縁破壊を引き起こすことは十分にありうる。

つまり、束ねたコードが、通電による発熱で劣化していた上に、これを見学者あるいは作業員が踏み付けたことにより絶縁が破壊し、発火に至ったとするメカニズムが想定される。確認されている火災までの前兆を科学的に矛盾なく、合理的に説明できるので理にかなっている。

〈微光発生のメカニズム〉

火災の前兆は、隣の中央階段に設置された室内監視カメラに微光が捉えられたことから始まるが、その4分後に人感センサーが作動し、7分後に内部監視カメラの映像は消え、13分後に突然、外部監視カメラにフラッシュ光が捉えられる。大小繰り返しながら頻繁に発生し、最終的に中央階段付近に移動し、フラッシュオーバーが記録されている。

なお、フラッシュ光が移動する様子を捉えた映像は、3分ほど編集でカットされている。

- ①微光が発生した原因は！；絶縁破壊に伴って、細い撚り線の一部がアークあるいは素線同士の部分接触によりショートし、微かに発光した。とくに、LED照明灯用コードは細く、定格電流

表2 捉えられた発光の経緯（裏側外部監視カメラ；表示時刻）

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">・2：30（02：31：12） 室内カメラ；正殿内東側出口付近の室内で何かが一瞬小さく発光・2：34 人感センサー鳴動・2：37（02：39：41） 正殿1階室内カメラ映像が落ちる・2：40（02：42：50） 火災報知器鳴動・2：42（02：45：01） 裏側木戸から黒煙噴出（警備員確認）・2：43（2：45：23） 正殿裏側の東面1階で小さな発光を捉える・2：43（02：45：27） フラッシュ光、頻繁に繰り返す（2：43～2：46の3分08秒が編集でカットされている）・2：46（2：48：52） 裏側屋外監視カメラ；中央階段付近に中程度の発光が繰り返す（3：09（03：11：23）～3：23（03：25：29）の13分43秒が編集でカットされている）・3：23（03：25：29） 中央階段付近で大炎上 |
|--|

が小さいので、発光も小さく、「微光」として室内監視カメラに捉えられた。最初に発生した微光は、金属製ポールに反射して感知したと考えられている⁵⁾。なお、ショートによりこの部分で断線するので、その先のスライドスイッチへは通電しないことになる。

②ショートにより断線するが、通電された状態なので、その付近の被覆や導線は損傷し、発熱するので、被覆が軟化・溶融して絶縁破壊が拡大し、電源が切れるまでショートが繰り返される。しかし、発光は一度感知されただけで、その後は監視カメラに捉えられていない。表2に示したように、分電盤室の人感センサーが鳴動し、温度を感知する火災報知器が発報した。とくに、人感センサーは、赤外線方式であり、光を遮る黒い煙を検知したと考えられること、および監視人が到着した時点ではすでに室内は煙が充満し、黒煙が外部へ噴き出していた。微光感知からわずか数分後のことである。

③配線の燻りだけでは説明ができないので、通路に敷かれたカーペットに着火したと考えられる。カーペットは、防災処理されていたので、煙は発生しても発火しないで、燻り続けることになる。燻りが拡大、進行し、室内が黒煙で覆われたため、その後に発生した光は黒煙に遮られて感知できなかったと考えられる。なお、監視カメラは、豆電球程度の明るさがないと感知できないとの記述がある。

④分電盤のブレーカーは落ちなかったので、束ねたコードには通電されており、束ねた部分でショートが反復して起こり、発光が起こったと考えられる。しかし、室内では黒煙が引戸から噴き出すほど発生していたので、光は遮られ、室内および外部監視カメラには捉えられなかったと考えられる。

なお、人感センサー（赤外線方式）および火災報知器（空気管式差動分布方式）の感知温度は数十度と言われており、室内では、炎が発生していなかったことを示唆する。

〈フラッシュ光発生メカニズム〉

①束ねられたコードは、隣り合った撚り線同士が次々と短絡するが、配線が密着する部分と離れた部分があるので、短絡に強弱が生じ、発光自体も強弱を示すと考えられる。

②ブレーカーが落ちないので通電が継続し、被覆の絶縁破壊が電源方向に向かって進行し、細いコードが絡まった太い延長コードの被覆の軟化・溶融を引き起こす（写真8）。このコードは電気容量が大きいので、大きな短絡が起こり、室内に溜まった煙に散乱あるいは反射して大きなフラッシュが感知されたと考えられる。なお、フラッシュ光が途絶えた時点で断線が起こったと考えられる。

※干渉発熱現象：コードを束ねて使用すると、コードに流れる電流で生じるジュール熱が互いに干渉し合い、絶縁被覆から外気への放熱が低下することにより高温を生じ、絶縁材料の許容温度を超えて絶縁劣化すること。

まとめ

「電気火災の基本は、最も電源の遠い地点」とするアークマッピング法を適用し、溶融物の分布状況から発火地点は電源から最も離れたLED照明灯のスイッチ付近であることを究明した。近傍から回収された送風機コードやコイルに溶融が確認されなかったことから、火災時の温度は、銅線が溶けない温度（1,085℃）以下であると結論した。さらに、溶融物の分析では、銅の融点を超えるニッケルや鉄が検出されていることから火災よりも遥かに高温を呈するショートによることを補完した。

なお、火災を再現した燃焼実験は、銅の融点を超える1,090℃で加熱しているが、火災現場はそれよりも低いことが示されており、これから導かれた結論は誤りであることを指摘した。

さて、発火地点は、電源から最も離れた地点に注目すると、LED照明灯コードとスライドスイッチ付近になる。とくに、LED照明灯コードが束ねられて高床通路にはみ出して配置されていた。コードを束ねると、通電中のジュール熱を十分に放熱

できないため蓄熱して劣化が進む。また、踏み付けによる被覆や素線の破損によりショートが起こった可能性が高いと推測した。

以上の見分ならびに理論的な考察により、発火源は、束ねて通路に配置されたLED照明灯コードであり、しかも、細いので定格電流も小さい。つまり、ショートしても微光であり、かつ分電盤のブレーカーも落ちなかったと推測した。この細いコードは、太い延長コードに絡まっており、ショートが伝搬した時点で大きなショートにより激しいフラッシュ光を発したと解釈した。

送風機のコード等に熔融痕が見分できないことから、火災時の高温では、銅線は溶けなかったものであり、熔融痕は、ショートで発生したこと、その発火源はLED照明灯コードであり、これが高床通路にはみ出して束ねて配置されていたことが原因であると考え、発光から火災発生までの状況を合理的に説明できる。

[追記] 銅(固体)が気化(蒸発)した際の膨張計算

- 条件：銅の分子量29、密度8.94
- 1 g のモル数： $1/29 = 0.0345\text{mol}$ → $22.4\ell/$

mol より 773ml

- 1 g の体積： $1\text{g}/8.94 = 0.112\text{ml}$
- ∴ = 固体が気化した場合の膨張： $773\text{ml}/0.112\text{ml}$
≒ 6,900 倍

さらに、温度上昇に伴う膨張（ 273.2°C で 2 倍）を考慮すると、 $3,000^{\circ}\text{C}$ では約 2,000 倍に温度膨張するので、瞬時に約 9,000 倍程度に膨張する。

おわりに

『環境施設』第171号では、通電していない送風機コードに熔融痕が無かったこと等から熔融痕はショートで発生したことを確定し、第172号では、発火源となった最初のショート地点を、アークマッピング法を参考に、電源から最も遠いLED照明灯コードであることを明らかにした。その原因は、コードは束ねて通路上に配置されていたことであると結論した。

大火災の重要な要因は、ブレーカーが落ちないため通電が継続したことであり、黒煙が大量に発生したにもかかわらず、発火しなかったことである。次号で延焼要因として検討したい。

〈引用・参考資料〉

- 1) 岩下友安；火災調査のための電氣的熔融痕形成機序に関する研究；公立諏訪東京理科大学、学位授与番号 甲第6号、学位授与年月日 2017-03-23
- 2) 首里城新エリア散策 2019.5.3；YouTube（URL：<https://youtu.be/KLC1woBLuvk>）
- 3) 内閣府沖縄総合事務局；監視カメラ動画
- 4) 那覇市消防局、消防試験研究センター；燃焼試験
- 5) 那覇市消防局；実況見分調書（防犯カメラ映像・第1回）；添付資料3-23-3；延焼状況（正殿内33カメラ）