■ シリーズ企画

首里城炎上⑭　見えてきた火災原因（Ⅲ）
－ショート地点における着火物と延焼要因について！－

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の理由で「原因不明」と結論した。これに対してこれまでに以下の事柄を明らかにした。

①『環境施設』第171号（2023.3）では、監視カメラの映像や溶融痕の分布状況等に基づいて生じた溶融痕は、ショートによることを明らかにした。

②『環境施設』第172号（2023.6）では、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照明灯スイッチ付近のコードである。また、送風機の銅線が溶けていないことから、火災時の温度は、銅の融点（1,085℃）以下であり、溶融物には火災温度では溶融しないニッケルや鉄が検出されており、超高温を呈するショートによると結論した。

その発火地点は、高床通路に束ねられてはみ出していた照明灯コードがジュール熱の蓄熱により被覆の絶縁破壊、あるいは見学者等による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と推測した。この照明灯コードは定格電流の小さな細いコードであり、ショートしても微光であり、かつ分電盤のブレーカも落ちなかったと推測した。これが分電盤から給電する太い延長コードに絡まっていたことから、これがショートした時点で小さな発光から激しいフラッシュ光を引き起こしたと解釈した。

ところで、発火（ショート）から火災に至るメカニズムの解明にあたっては、発火地点と発火原因を明らかにするとともに着火物と延焼メカニズムを合理的に説明する必要がある。実況見分調書、火災原因判定書及び検討委員会では、十分に検証することなく、「原因不明」と結論したために着火物や延焼メカニズムについても合理的な検討が行われていない。単に、火災警報器の発報や遅れ、発火原因も発火地点も延焼メカニズムについても定性的に説明しただけである。なお、火災後の現場調査は、丁寧に「物的証拠」を徹底的に探索しているが、肝心の発火原因、着火物や延焼メカニズムを究明するには不十分な点が多い。とくに、祭り準備品の保管についての調査記載がない。

那覇市消防局及び首里城火災に係る再発防止検討委員会は、定性的な考察、検討で済ませており、真実を追求する専門家としての姿勢に欠けている。これでは、再び同じような原因で火災が発生しかねないと懸念される。「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した。

①首里城火災に係る再発防止検討委員会　首里城火災に関する再発防止策等報告書（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那覇市消防局　実況見分調書（正殿・第１回～第18回）；以下、実況見分調書

1. 最初のショート地点の着火物はなにか？

1．1　発火元の分電盤室の概要と推移

実況見分調書等から発火元と判断されている分電盤室の位置、構造等について再掲するとともに、着火物について考察した。

（1）正殿北東部の分電盤室の概要

分電盤室は、図１に示した正殿北東部角に位置し、長さが南北方向に約9.8m、幅が東西方向に約4.6mの約45m^{2}の長方形の小部屋である。また、中央階段を挟んで南側には分電盤室よりもひと回り小さな約36m^{2}の長方形の小部屋があり、倉庫として使用されていたと言われている。写真１及び写真２に示したように、内部は中央部に支柱が３本と休憩用ベンチ２台が設置され、手前の奥の廊下から北側階段及び中央階段への通路になっていた。分電盤室は、北側の突き当りに外壁、東側（裏庭）の外壁は腰壁とその上部に明かり窓、奥の廊下とは分厚い壁板で仕切られ、親子扉から入室すると高床通路が西側の北側階段（引き戸）へと続く。西壁に沿って２ヵ所のLED照明灯が設置されており、分電盤底部から受電する延長コード、それに繋がる照明用コードが確認できる。なお、正殿の建築物の特性は、外壁、内壁、床・天井も木造なので、分電盤室も同様の建材であろう。カラー写真から柱、板壁、格子戸などは漆と桐油で赤褐色（弁柄）に塗装されている。

（2）火災発生初期の推移　～微光から火炎まで～

監視カメラによる分電盤室における微光の記録

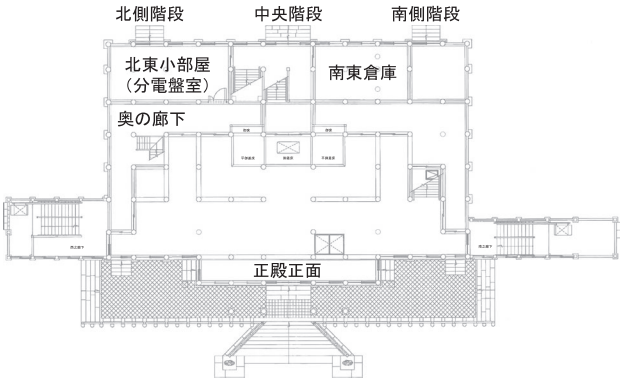

図１　正殿１階の配置図

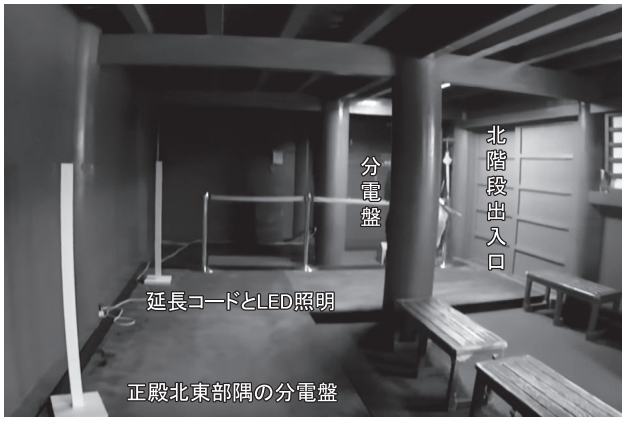

写真１　分電盤室の北東側を撮影[1)]

写真２　奥の廊下から分電盤室入口から撮影[1)]

から警備員による煙の確認までの火災初期の現象を時系列で以下に示す。なお、監視カメラの時刻に差異があるので、分表示の時刻は補正時刻、カッコ内は正殿裏側のヨコホリデン監視カメラ表示の時刻を示す[2)]。

〈時系列〉

- ２：30（２：31：12）　分電盤室内で一瞬小さな発光を捉える
- ２：34　人感センサー発報（動くものを感知）
- ２：37（２：39：41）　正殿１階の室内監視カメラの電源が切れる
- ２：37（２：39：41）　警備員Ａが西之廊下（北出入口）のシャッターを開放し、室内へ進入
  ※小階段付近に黒煙が充満し、消火設備が設置されている奥へは進入できず
- ２：40（２：42：50）　火災報知器の発報（温度上昇を感知）
  （シャッター開放の３分９秒後に鳴動）
- ２：42（２：44：47）　警備員Ｂは、北入口の煙が激しく進入できず。

（警備員が裏側の木戸から噴出する黒煙を確認）
- ２：43（２：45：27）　分電盤室付近で繰り返しフラッシュ光
- ２：43（２：45：45）　正殿正面のウナーは、暗いので分かりにくいが、煙は確認できない
- ２：46（２：48：54）　正殿正面室内で炎を確認。消滅を繰り返す
- ２：46（２：48：57）　ウナーが黒煙で覆われる。シャッター開放の９分後位
- ２：51（２：53：16）　正殿正面の小さな炎が大きな火炎に。警備員が消火器噴射
- ２：56（２：58：44）：警備員がシャッターを閉めて退出。下から約60cm開いた状態
- ３：01（３：03：22）　火炎は中央部へと移動。２本の大きな炎となり、南へと移動

1．２　発火地点の着火物について！

発火地点は、**写真３**に示した手前のLED照明灯の束ねたコード付近と想定されたので、この付近の可燃物について精査した。可燃物としては次の建具等が想定されるが、とくに、発火元の照明灯コードと接触している可燃物に注目した。

発火源のコードは、高さ十数cm（？）の高床通路の表面にはみ出していた。この通路の構造や材質は明らかでないが、**写真１**から木造で防炎カーペットが敷設されていると読み取れる。

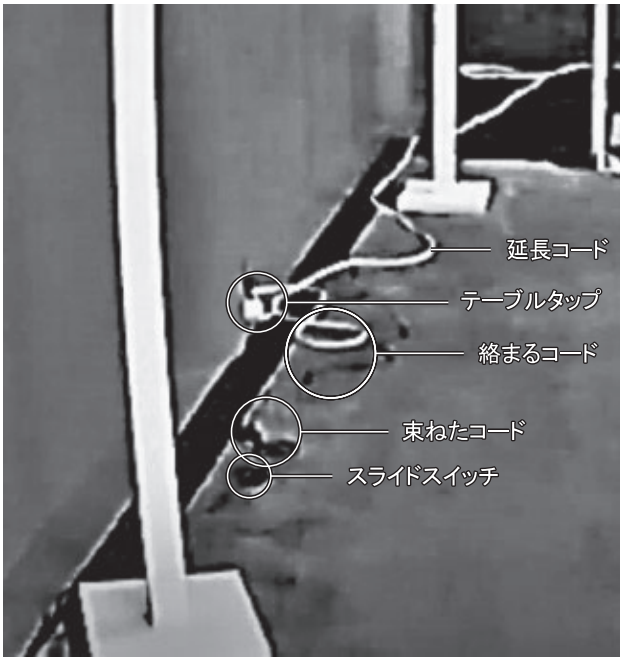

写真３　発火地点【束ねたコード】の拡大図

※火災原因判定書　p.13；ク　延長コード及びLEDランプについて　（キ）実況見分調書（正殿・第９回）の記載によると、「正殿の床には、数種類のマットが敷かれており、それぞれ防炎であるとのこと。」

【解説　防炎とは；消防庁[3)]】

（１）防炎とは

防炎とは、「燃えにくい」性質のことであり、繊維などの燃えやすい性質を改良して防炎の性能を与えると、小さな火源（マッチやライターなど）に接しても炎が当たった部分が焦げるだけで容易には着火せず、着火しても自己消火性（小規模燃焼において（有炎、無炎を含む）燃焼が継続しない性質）により燃え広がらなくなる性質のことである。

（２）防炎に係る用語の意味

①防炎対象物品；火災が発生した際、被害が大きくなることが予想される高層建築物、地下街又はホテル、病院、百貨店、劇場等において使用されるカーテン、布製ブラインド、暗幕、じゅうたん等の床敷物、展示用合板、どん帳、工事用シート等、消防法で定める基準以上の防炎性能を有するものでなければならないとされている物品

②防炎物品；防炎対象物品またはその材料で、防炎性能を有するもの。

③防炎規制の対象となる防火対象；カーテン、じゅうたん等の防炎対象物品について、消防法で定める基準以上の防炎性能を有するものの使用が義務づけられている防火対象物（以下省略）

（３）防炎と難燃

「防炎」と同じような意味で「難燃」という言葉があり、一般的にはほとんど同義語として用いられることもあるが、防炎はその性能及び試験方法が消防法で規定されており、当該試験方法により得られた数値が一定の範囲内にあるものをいう。難燃については、省略する。

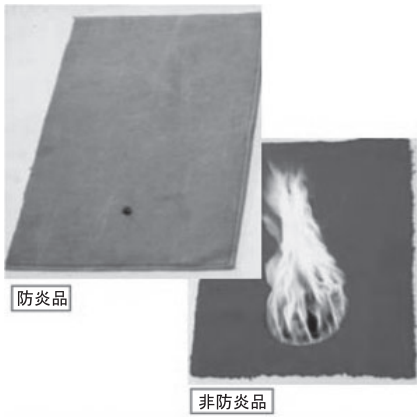

写真４　じゅうたん；着火30分経過後[3)]

写真４は、防炎処理と未処理じゅうたんの燃焼状況を示す。微小火源や小規模火災では火炎は生じないことの事例である。なお、規模の大きな火災では燃焼は避けられない。

1．３　高床通路上の着火物とは？

見学や荷物の搬出入にも使用されていた高床通路の簡略図を図２に示す。この表面にはみ出していた照明灯用コードが小さくショートし、微光が発生したと考えられる。いわば、微小火源であるが、火源に接した可燃物が着火することはありうる。可燃性のこのカーペットが着火の可能性が最も高い。しかしながら、このカーペットは防炎マットであり、微小火源や小規模火災では、自己消火特性があり、燃焼が継続することは考えにくい。一方、床、柱は分厚いことや漆や桐油で塗装されていても火源のコードと離れているので、着火は難しい。なお、桐油は、硬化すると木材よりも燃え難いことは熱解析で明らかにされている[4)]。

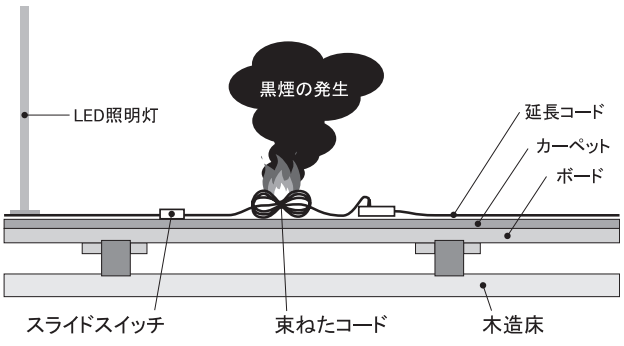

図２　高床通路上における発火モデル（鍵谷）

以上の考察より、最初に燃焼した可燃物は、発火源と接触しているマット（カーペット）であると考えられる。ところが、材質に防炎（自己消火性）処理が施されているので、燻るだけで発炎しない特性がある。このような燻るだけの無炎燃焼は、発熱量が低いため、温度の上昇は遅いので、室内に煙が溜まった可能性が高い。

このことは、中央階段への出口の窓側天井部に設置された人感センサーが最初に発報したが、これは赤外線センサーであり、人体程度の温度で、赤外線が遮られると発報する。つまり、温度の低い黒煙を感知したと考えられる。さらに、無炎燃焼が進行するとともに温度も次第に高くなり、煙が上昇して天井に到達し、ここに設置された空気管式熱センサー（火災報知器）が数分間遅れて発報したと考えられる。火災に至ることなく、煙の発生及び警報設備の発報状況を合理的に説明できる。

しかしながら、発火地点におけるわずかな着火は説明できるが、延焼するような可燃物は写真には見当たらない。

2．新たに見つかった炭化物（布製）の意味すること！

ところで、正殿裏側の北東角の分電盤室及び中央階段を挟んで設置されている小部屋は、倉庫として使用されていた。しかも、首里城祭の前日は、写真５に示したような翌日の本番に備えて多くの関係者が夜中まで準備作業を行っていた。

2．１　首里城祭の準備用品はどこに保管していたか？

写真５は、首里城祭の様子であり、正殿前庭（ウナー）に設けられた舞台、仕切テープや天幕などが大量に使用されていた。祭り前日であるので多くの祭り用品は近くに保管されていたと考えられる。常識的には、正殿内の裏側の空き室である北東角の分電盤室と中央階段を挟んだ南側小部屋が考えられる。イベント用品は、おもに嵩張る可燃物であるので、着火物としては最も疑われる用品である。これらが分電盤室に保管されていたとし

写真５　首里城祭の様子（華やかな舞台等）

ても10時間以上にわたって全焼した正殿内では、痕跡は残るはずもない。なお、那覇市消防局及び委員会報告書では、祭り用品の保管についてはまったく調べることもなく、触れてもいない。

ところが、発火元と判断されている分電盤室で布製の炭化物が見分されたのである。

2. 2　分電盤室の布製残渣は何を意味する！

実況見分調書（正殿・第16回）によると、正殿１階には、裏側に北東角の分電盤室があり、中央階段を挟んだ南側に倉庫がある（図１）。南側倉庫の焼け跡から電気コードリール、変形した金属製の建材、炭化した木材が確認された。証拠写真は、いずれも半分が黒塗りで隠されており、ほとんどわからない。見られたくない何かが写っていたのであろうか？

一方、実況見分調書（正殿・第７回）によると、分電盤室北側の第１区画の中央付近で、布製の残渣が発掘されている（写真６～９）。発火から10時間以上も燃え続け、しかも、発火源である分電盤室に保管された炭化物（布製）が残っていることは奇跡に近い。イベント準備には、布製のロープ、旗や幕などかなりたくさん使用されていただろう。当然、予備品を含めると、大量に保管されていたものと推測できる。

写真６の分電盤室の様子は、火災の数ヵ月前に撮影されたもので、当日のものではない。当日は首里城祭を翌日に控えて多くの準備品があったはずである。が、すべて灰塵に期しており、当日に入室した作業員や警備員にしか真実はわからない。

下記の炭化物の写真は、３-９-２　第７回　写真１分電盤設置場所付近で発掘した電気機器等を立会人の説明に合わせて復元したものである。

- 写真６：発火地点と炭化物（布製）の位置の推定
- 写真７：南側から撮影（奥が北側で中央右側に分電盤があった）
- 写真８：北側から撮影（手前左に分電盤があり、番号３が照明灯基礎、コ付近に布製残渣）
- 写真９：北側から撮影（手前左に分電盤があり、番号３が照明灯基礎、コ付近に布製残渣が確認できる）

残渣の近くを縦断する線は、延長コードであり、炭化物から数十cm程度より離れていないことがわかる。炭化物の燃焼前には、折り畳まれた幕などのシートが想定されるが、当然、嵩張ったままの備品も多数保管されていたと推定される。これらが延長コードと近接あるいは接触していること

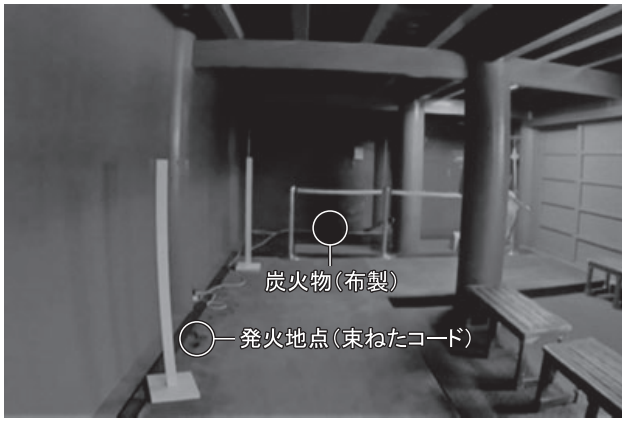

写真６　発火地点と炭化物の推定地点

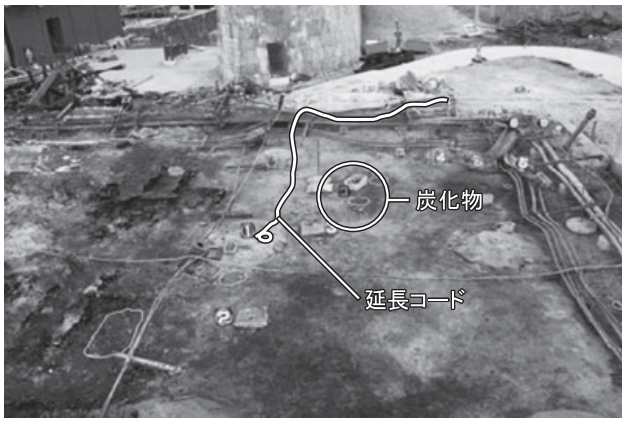

写真７　南側から撮影（奥が北側で中央右側に分電盤）

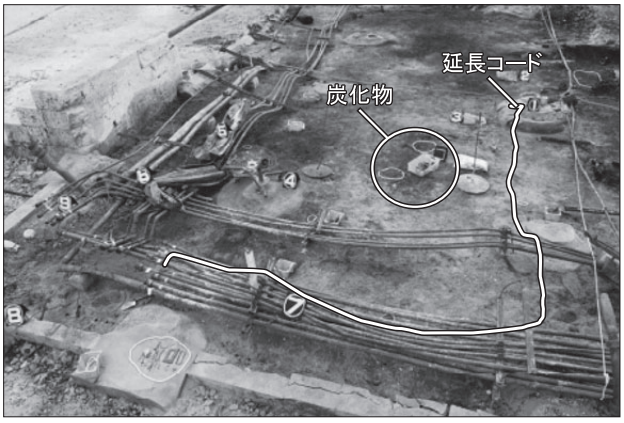

写真８　北側から撮影（手前左に分電盤設置）

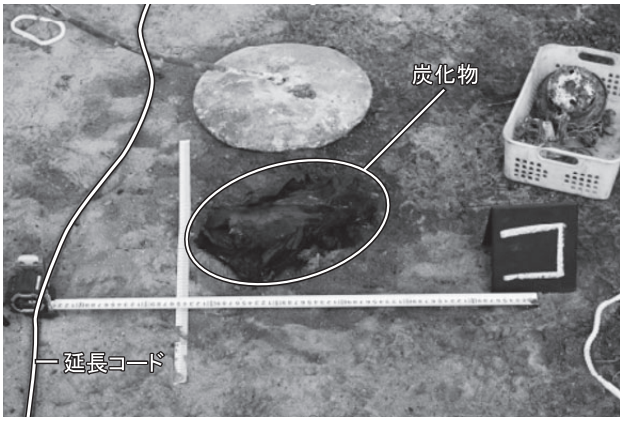

写真９　直径40cm程度の黒い布製残渣（番号３照明灯基礎、コ付近に布製残渣）

は十分に有りうるので、この太い延長コードがショートした場合には、着火は容易であったと考えられる。

現に火災動画には、ウナー前の消火活動状況が記録されており、中央部に設置された舞台設備等には骨組みのみであり、飾りなどは撤去されている（写真10）。翌日に首里城祭を控えていたことから、最も近い正殿内の倉庫に、全てではないとしても用品等が保管されていたと考えることは合理的である。なお、消火活動の障害になるので、舞台等は破壊、撤去されたが、舞台下に用品等が保管されたとの記載はない。

いずれにしても、ここには、可燃性の布製備品が搬入されていたのであり、保管場所は分電盤と見学通路の間の西寄りで、延長コードの近傍に位置する。当然、ほとんどが燃え尽きたと考えられるが、布が防炎仕様であっても、高床通路にまで

写真10　ウナー前における消火活動と舞台（右側）[2)]

はみ出していたなら、最初のショートから発火に至る着火物や延焼を解明する上で、有力な根拠となりうる。

2. 3　布製残渣が残ったメカニズムについて

火災時の1,000℃以上の高温下で長時間にわたって曝されていたにもかかわらず、可燃物である布類が燃えずに残渣が残ったことは、「謎めいている」が、科学的には次のように説明できる。つまり、残渣は炭化物であり、可燃物（布類）が、空気（酸素）不足の状態で高温下で加熱され、蒸し焼き（熱分解）にされたことを示唆する。いわば、「炭焼き」と同じ原理で、空気（酸素）が遮断された状態で高温に曝されたため、炭素のみが残存したと考えられる。これを火災現場で起こった現象に当てはめると次のメカニズムが見えてくる。

【着火メカニズムの想定】

①発火元の分電盤室は、外壁と内壁及び明かり窓から成る小部屋（密室）で、出入口は３ヵ所であるが、奥の廊下との親子扉が少し開いていても、空気の流出入はほとんどなかった。

②高床通路上の照明灯コードがショートし、床面に敷かれたカーペットに着火したが、これは防炎処理が施されていたので、炎は生じることはなく、燻り続けて大量の黒煙が室内に溜まり続けた。

警報作動後に現場に駆け付けた警備員が、奥の廊下にはすでに煙が溜まり、裏庭では出入口

から黒煙が噴き出していたと証言している。

③照明灯コードのショートでは、ブレーカが落ちなかったため、分電盤室の電源に向かって次々と移動し、絡みついた太い延長コードのショートを誘引した。外部監視カメラで記録されたフラッシュ光は、定格電流の大きな延長コードのショートに伴って発生したと考えられる。

④延長コードの近傍あるいはその上に布類が保管されていれば、当然、着火する。ショートの熱エネルギーが大きいので、無炎燃焼が拡大し、大量の黒煙が室内に充満し、唯一、開いていた親子扉から奥の廊下へと流れた。熱分解による可燃性ガスが次々と発生するので、密閉された室内では、煙が流出するだけで、空気の流入はない。

なお、分電盤室と高床通路との間にシートや幕などが保管されていた可能性が高い。大きなものは折り畳んで、小さな用品はそのまま保管されたと考えられる。つまり、最初の小さなショートでも床面のカーペットのみでなく、祭り用品に着火した可能性がある。その理由は、ショートによる微光発生から人感センサーの作動及び警備員が大量の黒煙を確認するまでの時間経緯が短いことがある。細いコードのショートでは火源が小さいこと、防炎加工したカーペットの反応速度が小さいことなどから、わずか数分で部屋に黒煙が充満することには疑念がある。

【炭化物の生成メカニズム】

布類の材質は明らかでないが、イベントに使用する飾りや幕などであり、軽くて丈夫な樹脂製（プラスチック製）であろう。樹脂には、熱硬化性樹脂と熱軟化性樹脂があり、前者は加熱すると直接熱分解し、後者は溶けた後に熱分解する性質がある。イベントで良く使用される樹脂類には、塩化ビニル樹脂、ポリエチレンやポリプロピレン、ナイロンなどの熱軟化性樹脂がある。

①炭化物の現場状況から用品は折り畳まれて床面に保管されていたと考えられる。

※折り畳むと、隙間がないので空気が進入し難いため燃え難い。また、樹脂の表面が溶けるので、溶融物が上からの熱の伝達や空気の内部への進入を遮る。つまり、酸素不足の状態で外部から高温で加熱されることになる。まさに「炭焼き」と同じ現象が起こっていると考えられる。

②布類は防炎加工されていたとあるので、着火しても炎は発生せず、蒸し焼き状態が続き、大量の黒煙が発生した。小部屋の分電盤室で可燃物がガス化して次々と煙が供給されるので、煙は隙間から噴出したり、わずかに開いていた親子扉から奥の廊下へ流出するが、空気の流入はなかったと考えられる。

③防炎加工された材料は、自己消火特性があることや、室内は空気の流入がないので、可燃物の熱分解は進むが、無炎燃焼であり、発熱量が低いので、ゆっくりと拡大する。

④残存した残渣の炭化物は、空気不足の状態で拡大した無炎燃焼で加熱され、炭化したものと考えられる。炭化物は、溶けることはなく、ガス化（昇華）するが、その温度は3,550℃である。火災時の温度は1,100℃程度なので、酸素の供給がなければ、そのまま残存することになる。つまり、酸素がなければ燃えないのである。

【まとめ】

これまでに発火原因は、束ねられた照明灯コードが高床通路にはみ出し、コードの蓄熱や踏み付けによりショートして微光を生じた。さらに電源から引いた延長コードが絡まっていたので、ショートの移動により大きなショートが起こり、フラッシュが頻発したと考えられた。

初期のショートは、細い照明灯コードであり、熱エネルギーが小さいので、接触していた高床通路のカーペットに着火したが、これは防炎マットで、自己消火性があり、燻りはするが、発火はしなかった。通電状態なのでショートが継続し、無炎燃焼が維持されるので、室内は黒煙で覆われ、隙間や開いていた扉から流出した。しかし、室内は、熱分解ガスで充満しても空気の流入はない、つまり、火炎は発生しないのである。

ところで、分電盤と高床通路の狭い空間で炭化物が確認された。炭化物は、布製とあるので、イベント用に準備された幕やシートなどであり、熱軟化性樹脂であると考えられる。これらは嵩張るので、折り畳んで体積を小さくして保管していたと考えられる。これだけが保管されていたとは考えにくく、シート状以外のイベント用品も部屋一杯に保管されたと考えられる。嵩張ったイベント用品は燃えやすいので、火災ですべて燃焼したと考えられる。

しかしながら、折り畳んだ樹脂製用品は、この状態で加熱されると溶融するが、熱分解してガス化するまで、熱は伝導しにくい。しかも、空気の無い状態で高温に曝されると、いわゆる「炭焼き」と同じ原理で炭化する。炭化物は、溶けることなく、3,500℃程度で気化する。火災時の温度が1,100℃程度なので、炭化物として残存したものと考えられる。

炭化物は、布製の準備品が分電盤と高床通路の間に保管されていたことを示しており、折り畳んだ用品は炭化し、嵩張る状態で保管した用品はすべて燃え尽きたと考えられる。

つまり、折り畳んだ用品や嵩張ったままの備品が保管されていたことは容易に想定され、延長コードの近傍あるいは接触していたことから着火したものと推測できる。

このように、ほぼ密閉された小部屋で無炎燃焼が起こり、接触していたカーペットに着火したが、防炎処理が施されていたので、自己消火するが、ブレーカが落ちないので、コードのショートは電源に向かって進み、絡まっていた太い延長コードがショートした時点で、フラッシュが発生した。近くには、折り畳んだ樹脂製用品や嵩張ったイベント用品が保管されていたので、これに着火したと考えた。なお、着火しても空気がないので、黒煙が発生し、火炎発生には至らなかったと結論した。

おわりに

照明灯コードにショートが始まったが、マット（カーペット）は防炎処理が施されていたので、自己消火により発炎しなかったが、くすぶり続け、大量の黒煙が発生していた。黒煙が大量に生成して室内から流出するが、空気の流入がないので、有炎燃焼には至らなかった。火災の時系列から、火炎は黒煙が流出した正殿正面の北側で確認された。次回は、煙の流れと火炎発生のメカニズムについて考察する。

【追記】

那覇消防本部の火災原因判定書では、原因不明と結論したため、その後に検討すべき着火地点、着火物、延焼メカニズムの重要事項の検討ができず、中途半端な報告になっている。また、検討委員会も単に原因判定書を追認しただけに過ぎない。専門家で構成した第三機関であれば視点を変えて原因究明のための措置に踏み込むべきであろう。

とくに、溶融したコード類については、那覇市消防局では、燃焼実験を行っているが、火災現場における温度を検討することもなく、銅線が溶融する温度以上の高温下で実験し、ショートでも火災時の高温でもコードは溶融するとし、火災現場で得られた溶融痕の原因は、明確に区別できないとして原因不明と結論している。銅の溶融温度（1,085℃）を超えれば、加熱実験しなくても溶融することはわかっているのであり、しかも「原因不明」の根拠としているのである。この実験は、「原因不明」の根拠を作り出すための不当な実験ではないかと疑念が湧く。

〈引用・参考資料〉
1）首里城新エリア散策　2019.5.3；YouTube（URL；https://youtu.be/KLC 1 woBLuvk）
2）内閣府沖縄総合事務局；監視カメラ動画
3）防災の知識と実際　防炎普及用資料；消防庁
4）鍵谷　司；首里城炎上③「無炎延焼で発生した煙の流れ！」；環境施設、No.161、pp.34-42（2020.9）