

首里城炎上！③ 無炎燃焼で発生した煙の流れ！

－監視カメラが捉えた火災画像の解析－

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 専任理事 鍵谷 司

はじめに

前号の「環境施設」第160号（2020.6）では、正殿を撮影した4台の監視カメラの映像が公開されたので、時系列で大火災に至った経緯を詳細に検討した¹⁾。その経緯は、大量の煙が発生していたにも関わらず人感センサーによる警報が発令（2：34）し、ついで熱センサー警報が発令（2：40）。その6分後に正殿1階で炎が捉えられ（2：46）、警備員が確認して消火器噴射（2：52）したときは火炎が大きく、消火できなかった。つまり、警報から初期消火まで18分を要し、小さな炎から数分で炎上し、消防隊が放水を始めた時点（3：09）では正殿正面は炎に包まれ、短時間で延焼拡大し、全焼に至った。

火災初期の状況を検討すると、密閉された室内（分電盤室）で電気的な理由で可燃物が無炎燃焼し、大量の可燃性ガスが発生したことが伺われる。煙センサーが設置されていなかったことが初期消火に失敗した要因であるが、大火災を引き起こした大きな原因は、無炎燃焼による可燃性ガスが室内及び外部軒下に溜まり、これに着火したため短時間で一気に燃え広がり、すべてが灰塵に帰したことを紹介した。

那覇市消防局や沖縄県警が現状見分など原因究明を実施したが、結論だけで詳細は公表されていない。また、激しく焼損したので物的証拠もほとんどなく、公開された監視カメラの映像が唯一の現場証拠である。また、北殿軒下に設置された監視カメラが、正殿北口のシャッターを開けた時に映る内部の建造物の画像がないので、解析にはほとんど役に立たなかった。防犯カメラ映像の公開

といえば情報公開の透明性が確保されているように聞こえるが、昼間の映像が公開されていないことは極めて不親切である。

今回は、防犯・消火設備に関する資料²⁾を入手したので、警備員の消火活動の行動及び映像に映った火炎などから煙の流れを解析したので、紹介する。なお、1階軒下を這うように正殿を取り囲んだ謎の「白い煙」については次回に紹介したい。

1. 首里城正殿の防犯設備及び消火設備について

夜間勤務中の警備員が、奉神殿に届いた警報を「侵入者」と思い込んだことから初動ミスが始まる。奉神殿には3名の警備員が勤務しており、2人が仮眠中で、1人が勤務中とあった。勤務中の警備員が防災警報をモニター室で確認し、1人で正殿に行き、煙を確認し、奉神殿に戻った。消火器を持参して再び正殿北口に行ったが、煙に覆われて発火源が発見できず、正殿裏側など探し回り、正殿正面の火炎に気づいて噴射したのは警報後18分を経っていた。なお、警報時にSECOMにも連絡したが「火災とは連絡していない」と思われる。

ところが、防犯設備や消火設備をマスコミ情報から調べてみると、警備員のミスとは言い難い設備上の問題点が浮かび上がる。

（1）防犯設備の配置と消火活動

これまでの経緯やマスコミの取材で明らかにされている、警備員の証言などに基づく、勤務中の警備員1人は、警報発令が防犯センサーであり、「侵入者」と思ってウナを通り、正殿北出口のシャッターを開けて階段を上ったあたりで煙が充

満していたので、火災と判断して警備員室のある奉神殿へ戻り、消火器を持参して消火活動を行っている。まだ燃っている状態で、炎を確認できないため正殿裏側等を探し、正殿正面で発火した時点ですぐに発火元を確認でき、消火器を30秒ほど噴射した。

正殿1階には、図1に示したように監視カメラ3台、防犯センサー（赤外線センサー？）が10カ所、空気管式熱感知器が4カ所設置されていた。裏側奥中央部の監視カメラの映像は公開されたが、正面の2台の監視カメラは焼失したと考えられる。正殿は全焼したはずなのに正殿1階内部（奥の階段）のカメラ映像が焼け残っていたことは不思議な気がする。リモートによる記録・保存方式ならば、他の室内カメラの映像も存在するはずである。

ところで、防犯センサーは赤外線センサーとの報道もある。たぶん赤外線を物体が遮ると検知する方式ではないかと推測されるので、侵入者でなく、黒煙で遮られても反応しそうである。仮に黒煙（煤）で赤外線が遮られたと仮定すると、作動する濃度になるまでかなりの時間経過があったのではないかと推測される。10カ所も設置されているが、感知したセンサーの地点は明らかにされていない。が、発火元と推測されている正殿北東の分電盤室の防犯センサーの可能性が高い。

他方、空気管式熱感知器は、1階には4カ所設置され、発火源と疑われている北東隅の分電盤室にも設置されているので、最初に検知したと推測される。この空気管方式は、室内温度が上昇した

際に空気が膨張するのでこれを検知する方式とある。つまり室内温度が所定温度になるまで感知しないことになり、作動温度、設置場所や高さなどが影響しそうである。

【コメント】

正殿北東部隅の部屋は分電盤室とあるが、分電盤の設置場所や部屋の仕切りや扉などのレイアウトを把握できていない。分電盤は配電盤のある奉神殿あるいは北口階段下で受電していると考えられるので、部屋の奥部に設置（写真1）されていると推測される。しかし、センサー類はいずれも反対側の出口付近に設置されており、空気管式により室内温度の上昇を検知するには不適当であろう。煙センサーであれば、速やかに検知できたと考えられる。火源となりうる分電盤付近、お香やローソクなど火を使う部屋に設置することは常識であろう。

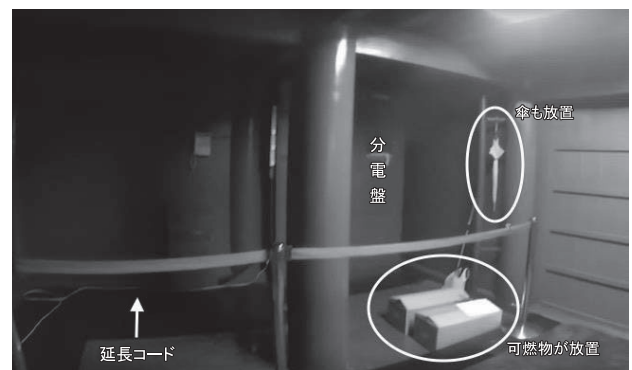


写真1 分電盤室の様子

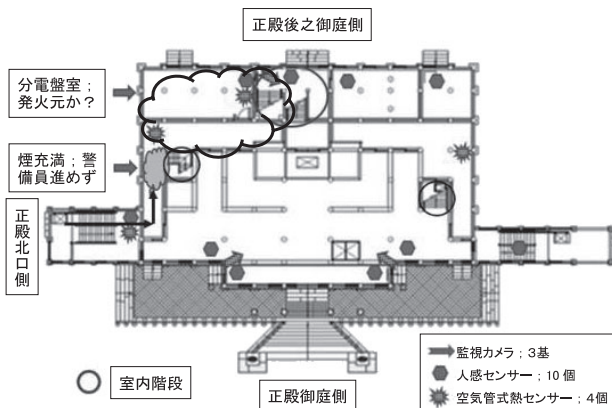


図1 正殿1階に設置された防犯設備と配置

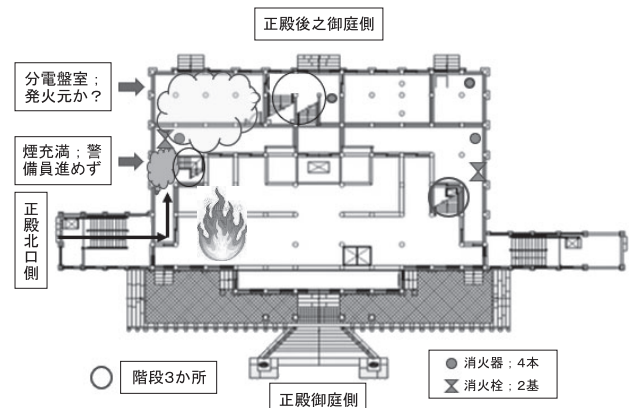


図2 正殿1階に設置された消火設備と配置（発火初期）

(2) 消火設備の配置と消火活動

図2に消火器4本と室内消火栓2基の配置を示した。警備員が正殿北口側のシャッターを開けて階段を上ったところで煙が充満し前が見えなかったため、すぐに消火器を取りに奉神殿へ戻ったとある。これを図示すると北出口階段を上った廊下あたりがすでに黒煙に覆われており、当然、発火元と推測されている北東部の突き当りの通路や部屋は煙に包まれていたと推測できる。首里城の内装は、輝くような朱色で漆や桐油が大量に使用されており、熱分解しやすい成分で燃えやすいと考えられる。また、通路などは格子戸も多く、室外に漏出した煙は速やかに拡散したと考えられる(写真2)。

室内において無炎燃焼で発生した煙は、温度が高くなると膨張するので強い圧力が生じ、わずかな隙間から漏出すると考えられる。また、上昇して天井部を這うように移流し、しだいに部屋全体に拡散すると考えられる。当然、正殿1階は煙が充満するが、分電盤室に隣接する大きな階段(以下、中央階段)があり、警備員が進入した北口通路にも小さな階段(以下、北口階段)がある(図2の○で囲んだ部分)。階段は、いわば煙突と同じく上部の気圧が若干低いので、煙を吸引して排気する。

この大きな階段があったため、1階南側(表面側)への拡散が阻害されたと考えられる。もし3階までつながっていれば、3階の通気口などから



写真2 塗装を施した格子戸

3階軒下に流れると考えられる。一方、北側階段は小さいので、吸引力は弱く北側通路あたりに黒煙が滞留したと推測される。正殿正面の発火は北側であったことから煙は北側から正殿正面へと移流したものと考えられる。なお、中央階段は3階まで続く大きなもので、北口階段は小さな専用階段であり、吸引力は弱いと思われる。正殿の平面図と立面図が入手できていないので仮定ではあるが！

【コメント】

正殿北出口に消火器と消火栓を備えていれば、火災の状況は変わったのではないかと思います。さらに、最も重要な正座のある御差床(うさすか)付近には消火設備も熱感知センサーも設置されていない。防犯カメラは2台設置されていたが、焼失してしまえば何の役にも立たない。

ところで、火災画像を解析すると、正殿御庭側の監視カメラは、2:39には正殿全体がほぼ鮮明に映っていたが、しだいに煙で覆われ、7分後の2:46には照明が当てられていた唐破風も全く見えなくなり、2:47には正殿1階中央北側に赤い炎が視認でき、しだいに風船が膨らむように大きくなり、2:52には大きな炎となって燃え上がった。これでは消火器では到底消火できない。監視カメラの画像から発火地点は、正殿1階の北側であることがわかっており、煙の流れは北側から正殿正面(西側)に移流し、南側へと延焼したことを示している。

このことは分電盤室からの煙の漏出は北側から起こったと推測される。仮に中央階段側へ漏出したならば大量の煙が強く吸引されるので、北口方面への移流は少なかったと想定される。

2. 火災発見を遅らせた「無炎燃焼」について

上記で述べたように電気関係が原因で可燃物が焦り、しだいに拡大して大量の煙が発生したと考えられる。以前にボーリング場を改装して廃PET等からポリエステル製カーペットを製造するリサイクル工場の火災保険金請求事件(高裁)に関与

した経験がある。プラ溶融物が無炎燃焼して可燃性ガスが発生し、大量に天井に溜まり全焼した事例であった。消防隊が到着した時点では、工場内は黒い煙が充満し、炎を探すのに苦労していたが、シャッターを開けて空気が供給された後は短時間で全焼した事例であった。この事例でも煙検知器が設置されていなかった。プラ溶融物が自然発熱により大量の黒煙を発生させた（無炎燃焼）メカニズムを実験で証明し、逆転勝訴に導いた。

今回の事例でも、無炎燃焼で発生した大量の煙を感知できず、室内に拡散したことが大火災を引き起こした大きな要因であったことを紹介する。なお、物的証拠や図面等がほとんどないので、監視カメラの映像が唯一の現場証拠であり、他はマスコミ等の情報による。

2. 1 「無炎燃焼」とその特徴について

監視カメラの映像は、首里城火災の引き金は、微小発光に始まり、これが繰り返され、しばしばフラッシュ状の大きな発光を伴いながら発火（赤い炎発生）に至る画像が収録されている。ショートのような微小火源により床板の燻り（無炎燃焼；燻焼ともいう）に始まり、煙が検知されることなく、長時間にわたって燻り続け、その煙の流れを警備員の証言や監視カメラの映像を解析して予測した。

以下に首里城正殿が木造建築物であったので、固体可燃物の無炎燃焼の特性と熱伝搬等の火災に関連する基本的な考え方を解説する。

（1）「無炎燃焼」（燻焼ともいう）とは？³⁾⁴⁾

首里城火災でも放火や延焼による有炎燃焼が想定されており、煙だけが発生する無炎燃焼は想定されていなかったことがわかる。つまり、1階には煙センサーは1個も設置されていないのである。なお、2階及び3階におけるセンサー類の設置状況は把握できていない。

以下に首里城が大火災になり、全焼した原因は「無炎燃焼」にあると考えられるので解説する。

【固体の燃焼について】

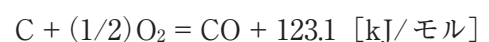
固体の燃焼は、一般に熱分解などにより発生した可燃性ガスが空気中の酸素と反応して発熱し、炎燃焼を起こす。炎の熱が残りの可燃性固体を加熱して熱分解を起こすと、可燃性ガスが連続して供給されるので燃焼が継続し、炎が伝搬する。このような燃焼形態を有炎燃焼といい、いわば、延焼拡大のメカニズムである。

他方、煙草や蚊取り線香のような微小火源では、燃焼部分からの熱供給が少ないので、熱分解で発生する可燃性ガスの発生速度が小さいので、空気中では火炎を維持することができなく、炎を出さずに燃焼する場合がある。これを無炎燃焼というが、燻焼、いぶし燃焼ともいう。この場合は、火炎が見られず、大量の煙を出しながらゆっくり燃焼が進行する。炎を出して燃える有炎燃焼と比較すると現象面では次の特徴がある。

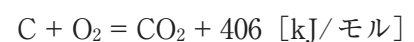
- ①微小な熱（加熱）でも発生しやすい。
- ②不完全燃焼なので、酸化反応による発熱速度が小さいので、最高温度も低く、伝搬速度も遅い。
- ③低い酸素濃度の雰囲気でも、燃焼が継続することがある。
- ④無炎燃焼が伝搬、拡大すると発生する熱も大きくなり、有炎燃焼に移行することもある。
- ⑤単位重量あたりの煙、可燃性ガスの発生量が多い。

無煙燃焼は、いわば不完全燃焼であり、一酸化炭素等が大量に発生するが、酸化反応熱が小さいので、燻り続けて大量の黒煙を発生する。酸素が十分であれば、完全燃焼が起こって二酸化炭素（CO₂）が発生し、発熱量が大きいので勢いよく燃える。なお、完全延焼とはいえ局所的には酸素不足で不完全燃焼が起こり、大量の煤が発生する。

・炭素の不完全燃焼…



・炭素の完全燃焼…



つまり、不完全燃焼で発生する熱量は、完全燃焼時の1/3程度であり、周辺の固体可燃物を熱分

解するほど熱は発生しない。が、微小熱源ではあるが、温度は数百℃以上に維持されている。

【燃焼とは！】

燃焼とは、「熱と光の発生を伴う酸化反応」と定義されているが、光の発生を伴わない無炎燃焼も広義的に燃焼の範疇に入る。これらは酸化反応なので、酸化される物質（木材などの可燃物）、酸素の供給（ここでは空気中の酸素）、反応を起こすためのエネルギー（熱源）が必要になる。つまり、燃焼の3要素が揃わない限り、燃焼は継続しないのである。

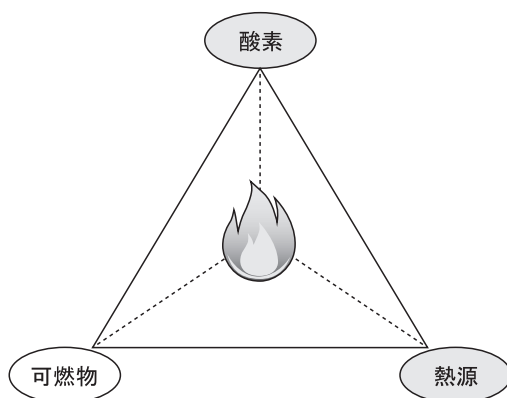
①可燃性物質（燃えるもの）

②酸素の供給（酸素、酸化性物質など）

③熱源（点火に必要な熱エネルギー）；ショート、静電気や衝撃による火花など

首里城火災では、分電盤室のコンセントから引いた延長コードがLED照明の電源として通電されていたとされており、これがショート（短絡）して火源となったと疑われている。通常、家庭用コードならショートで発生する温度は2,000～3,000℃といわれているが、一瞬であり、材木などの可燃物を熱分解して着火させるだけのエネルギーを有しないが、炎のない無炎燃焼は起こりうる。

例えば、煙草や線香のような微小火源による火災は、初めから炎が立ち上がるのではなく、布団や紙くず等の可燃物が無炎燃焼を続け、ある程度拡大した時点で、空気の供給等の燃焼の3条件（図



燃焼は、3つ揃った時にのみ起きる現象

図3 燃焼の3条件

3) が整うと発火して一気に燃え上がる。

（2）可燃性ガスの発生と煙の挙動

【木材の燃焼メカニズムについて】

木材の燃焼メカニズムを温度による状況を調べると次のような解説があった⁵⁾。

- 木材は火炎にさらされても直ちに着火、燃焼することはない。
- ～100℃；木材中の水分が蒸発し、その後150℃くらいで材表面が褐色に変色する。
- ～200℃くらいで木材の成分が熱分解されてガスが発生する。ガスは二酸化炭素と水蒸気の不燃性のものと、一酸化炭素、メタン、エタン、水素、アルデヒド、ケトン類、有機酸などの可燃性のガスが発生する。このとき、材表面は炭化状になる。
- 250℃を超えると、熱分解が急速に進み可燃性ガスが増大して引火し、煙が発生する。
- 300℃に達すると割れを生じ、可燃性ガスが噴出し、材内部が炭化し始める。
- 500℃くらいで煙の出ない赤熱燃焼し、炭が消失する。

【可燃性ガス発生メカニズムは？】

ここでは、木造建築物の火災が分電盤室における延長コードのショートが原因と疑われており、床や仕切りや扉が木造として木材（固体）の分解燃焼が起こったと考えられる。木材、紙などの固体可燃物は、セルロースや木材の主成分は多糖類であるセルロース、ミクロフィブリルやヘミセルロース、リグニン等であるが、これらが熱分解すると分子を構成する炭素、水素、窒素、酸素などに分解し、再結合して水分や可燃分（一酸化炭素、メタン、エタン、水素、アルデヒドなど）を生成し、このガスに着火して炎を上げて拡散燃焼する。

しかしながら、可燃性ガスの濃度が燃焼濃度の範囲外であったり、酸化反応に必要な酸素濃度が不十分であればいつまでも燻り続けて可燃性ガスが発生する。なお、可燃性ガスの発生が不安定であれば、消えたり、発火したりを繰り返すと考え

られる。

【熱の伝導と煙の拡散】

無炎燃焼であっても火源は数百℃に達するので、簡単に発火しそうであるが、無炎燃焼は、熱エネルギー自体は小さいので、周りの可燃物を広く加熱分解して可燃性ガスを発生するだけのエネルギーはない。たとえこのガスに着火しても可燃性ガスが安定して供給されなければ、炎を維持することはできない。

ところで、このように発生した煙（可燃性ガス等）は、加熱されているので温度は高くなる。気体（煙）は、温度が高くなると膨張して軽くなるので上昇する。つまり、天井部に溜まりやすく、階段などの吹抜けがあるとその部分から周囲の煙を吸い込んで排気する。

熱の伝わり方を図4に示す。空気や木材は熱伝導率が小さいので横方向には伝わりにくく、天井部のガスが冷やされて重くなり降下し対流が起こり、拡散すると考えられる。なお、炎燃焼になると温度が高いため、輻射熱（電磁波）により効率よく熱が伝わる。金属製のストーブが熱すると赤く輝き始めるのは熱せられた物体から赤色の光（電磁波）が出ているのである。赤い光は比較的低温で、温度が上がるにつれて青白い光に変わる。

①熱伝導：空気や木材は熱伝導率が小さいので、伝わりにくい。

②対流：気体や液体は温度が高くなると膨張し

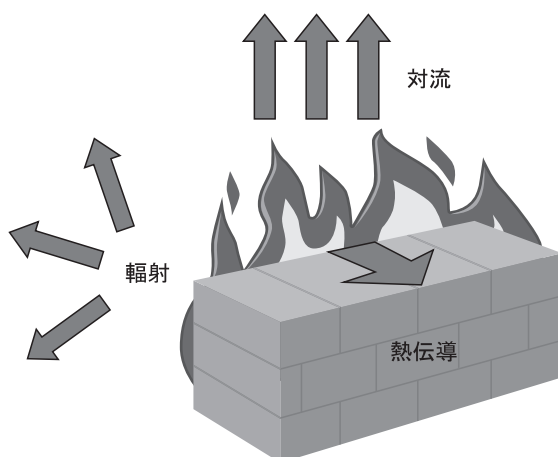


図4 熱の伝わり方

て軽くなるので、上昇する。階段は煙突効果で煙を吸い込み燃焼を促進する。

③熱放射（輻射）：電磁波（赤外線）；反射、拡散、透過、吸収。なお、消防服はアルミ製で赤外線を反射して吸収を低減し、熱伝達を防ぐ。

2. 2 監視カメラが捉えた正殿室内の火災の推移 (1) 正殿裏側の火災の推移

公開された映像は、編集されているので、つながりがなく、断片的である。画像は、正殿裏（東側）の「後之御庭」に設置された監視カメラの映像を切り取って貼り付けた（画像1）。昼間の映像がないので、発光や火炎の位置がわからない。画像1の正殿裏側の全焼時の明るい画像が外側階段や部屋の位置を映し出しているため、時系列で並べて考察した。

正殿裏側の火災までの経緯（右が北側）を画像1に示した。発火状況を時系列で抜粋すると下記の通りとなる。なお、外壁が火災で消失した骨格画像を基準に外側中央階段に合わせて火災推移ごとの画像を縦に並べ、縦線を引くことにより、火災の位置を判断した。

- 2：43…外側中央階段の右側の分電盤室付近で大きなフラッシュを捉える。周りはぼんやりと煙で囲まれている？ その後、数秒ごとに発光を繰り返して映像が終わる（編集でカット）。微小発光や大きなフラッシュは、輝くような白い光であり、かなりの高温度であることがわかる。ショートで発生した閃光が、煙に反射及び屈折して、立体状に輝いて見えたかと推測した。
- 2：46…階段付近で小さな白光を捉えるが、変化しないので、北出口が開いているのでこの光が漏れて映ったと考えられる。
- 3：23…突然、真っ赤な大きな炎が発生する。分電盤室から横に流れるような炎と中央階段を立ち上るような大きな火炎を捉える。
- 3：57…正殿の外壁が燃え尽き、骨組みだけが残存し、部屋や階段などが透けて見える。

以上の経緯から監視カメラの正殿裏側の映像は、北東部の隅に位置する分電盤室からの発火を捉えている。この部屋から正殿西方向（正面）への煙の流れは読み取れないが、隣接する中央階段に流入した可燃性ガスが発火して一気に3階まで炎に包まれた様子が捉えられている。



画像1 正殿裏側の火災までの経緯（右が北側）

（2）正殿正面の火災の推移

正殿正面のウナーの火災までの経緯（左が北側）を画像2に示した。発火状況を時系列で抜粋すると下記の通りとなる。なお、外壁が火災で消失し



画像2 正殿正面の火災までの経緯（右が南側）

た正面側の骨格画像を基準に唐破風の左柱に合わせて火災推移ごとの画像を縦に並べ、縦線を引くことにより、火災の位置を判断した。

- 2:30…夜間照明により奉神殿からウナー、正殿及びやや暗いが北出口まで映っており、煙の漏出した痕跡はみあたらない。
- 2:46…数分後にはウナーは黒煙に覆われ、やや暗い北口は見えなくなるとともに、正殿中央部左側（北側）に小さな火炎を捉える。その後、消えたり、再発炎を繰り返す。黒煙で赤い光が遮られたとも考えられる。
- 2:52…爆発的に炎上し、しだいに南殿方向に延焼し、30分後には全体が炎で包まれる。
- 3:57…正殿全体が炎に包まれ、外壁が燃え尽き、柱などの骨組みと唐破風の外郭だけが残存し、部屋の位置などが透けて見える。

以上の経緯から監視カメラの正殿正面の映像は、正座のある中央部から左側（北側）から煙が移流し、1階床あたりから炎が現れ、炎は天井あたりの高さで南殿の方向へと延焼する様子が捉えられている。画像にはないが、南階段が煙突の役割を担い、南側へと煙を吸引した可能性がある。また、室内ではあるが、火災後半では外壁がないので、当日の風向は南殿方向へ向かう北東の風の影響もありうる。なお、正殿と南殿との扉などの有無は把握できていない。

2. 3 正殿火災の煙の流れとは？

無炎燃焼でも発熱し、燃焼範囲が拡大するとともに可燃性ガスが大量に発生する。しかし、燃焼3条件を満たさなければ、火源があっても容易には炎燃焼には移行しない。発火源と思われる分電盤室の通気性に関する情報がないので、警備員の煙に関する証言や監視カメラの映像から推計すると図4のように推測され、階段の配置が大きく影響したのではないかと考えられる。つまり、

- ①分電盤室には防犯センサー（赤外線方式）が設置されていたが、不審者が侵入した形跡がないことは他の監視カメラからも確認されて

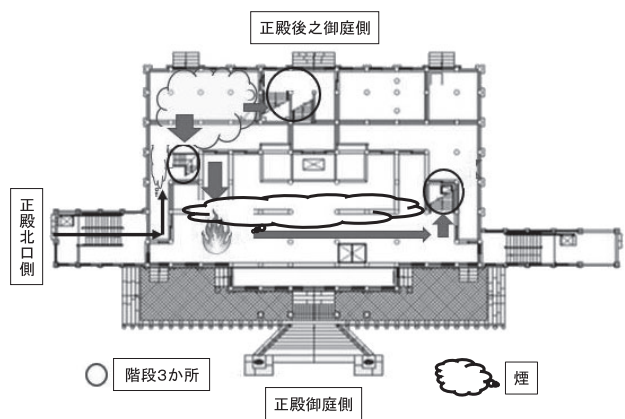


図4 正殿1階における煙の流れの予想図

いる。センサーの赤外線が無炎燃焼で発生した黒煙に遮られて作動した可能性がある。すでにかなり大量の黒煙が発生していたことを示唆する。

- ②警備員が正殿北出口のシャッターを開けて階段を上ったところで、真っ黒い煙が充満して内部が見えなかったとある。警報発令後、わずか2分後程度であり、すでに不完全燃焼で黒煙が大量に発生していたことを示唆する。
- ③正殿裏側からの監視カメラの映像は、北東部隅に位置する分電盤室から発火したことを証明している。この部屋から正殿西方向（正面）への煙の流れは読み取れないが、隣の中央階段に流入した可燃性ガスが発火して一気に3階まで炎に包まれた様子が捉えられている。
- ④正殿御庭側の監視カメラは、正殿正面のやや左側で小さな火炎を捉えている。この位置は分電盤室から漏出した煙が北側階段方向に流れ、正面（西側）に移流したことを示唆する。
- ⑤南殿方向への延焼は、床を這うような煙は映っておらず、上部空間（天井）から南側へと拡大したことを示し、煙の流れを示唆する。なお、風向は北東の風であり、南殿方向へと延焼する方向と一致するので、影響があったことが考えられる。

おわりに

監視カメラの映像を解析することにより、発火地点及び火炎の延焼の経緯が明らかになった。本

火災は、電気関係の微小熱源により無炎燃焼が起こり、大量の煙（可燃性ガス）が発生し続けたが、密閉された室内であったことから室外への漏出が抑えられたこと、および煙センサーが設置されていなかったことで感知が遅れたことなどが、燃焼が拡大した大きな要因であると結論できる。なお、推測であるが、防災センサーも赤外線による感知であれば、無炎燃焼で生じた黒煙により作動したと推測している。また、熱感知センサーは空気の温度が上昇し、空気が膨張した力で作動するので、発熱量の小さな無炎燃焼では、室内温度が上がるまでにかなり時間を要したと考えられる。

これらの不適切ともいえる設備設置は、侵入者による盗難や放火、あるいはローソクやお香など内部からの発火よりも外部からの延焼を防止することに重点を置いて設置されている。今後は、難燃性材料が多く採用されることが考えられるので、無炎燃焼対策に重点を置き、発火初期に消火できる



画像3 正殿裏側の映像が捉えた1階軒下の「白い煙」

方策を採用すべきである。

次回は、火源となった分電盤室での配線のショートが起こった原因について検討するとともに、前号でも問題になった、正殿で火災が発生した後に現れ、1階軒下を這うように正殿を取り巻いた「白い煙」（画像3）の謎について解明したい。

〈引用・参考文献〉

- 1) 2020年2月26日；首里城火災の防犯カメラ映像公開；沖縄総合事務局
- 2) 火災旋風が発生、猛烈な輻射熱が消防隊を襲った；日経クロステック／日経アーキテクチュア（2020.02.12）
- 3) 火災と消火の理論と応用；社団法人 日本火災学会（東京法令出版）（平成17年4月）
- 4) 上原陽一；自然発火のメカニズム、化学と教育、35-3、pp.207-210（1987）
- 5) 木材活用事典；木材活用事典編集委員会、産業調査会事典出版センター（1994.4）