

首里城炎上⑧ 延焼拡大を促した無炎燃焼に注目 －発火元の分電盤室で頻発したフラッシュ光とは！－

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

前回の「環境施設」第165号（2021年9月）では、「首里城火災に係る再発防止検討委員会報告書」では、火災の未然防止や早期発見よりも火災後の延焼拡大防止に重点をおいて検討されていることを紹介した。発火元は正殿北東部の分電盤室（消防署見解；出火個所は正殿1階北側東寄り付近）であると判断しているが、火災原因や火災センサー感知の遅れについては既存の知見を引用しただけである。

さて、火災の数ヵ月前に撮影されたYouTubeによる見学動画（2019年5月）に分電盤室の様子がアップされており、室内の構造や建具、出入口、センサーの位置などを確認できた。とくに、無炎燃焼で発生する煙を初期に感知できる「煙感知器」は、正殿2階、3階および正殿以外のすべての建造物に設置されていたにもかかわらず、「正殿1階のみ設置されていなかった」ことに驚愕した旨、述べた。

ところで、公開された正殿裏側の監視カメラには、分電盤室が発火元であることを示す映像が記録されており、暗闇の中で微かな光が感知され、その後に大きなフラッシュ光（閃光）が消滅を繰り返しながら頻発に発生し、最終的に中央階段付近で大きな火柱となって大炎上した様子が、一方、正殿正面側の監視カメラには、フラッシュ光はなく、煙の中で消滅を繰り返す小さな炎が次第に拡大、延焼する様子が、それぞれ捉えられていた^{1)～4)}。

ここでは、記録された様々な燃焼に係る基本的な事項について解説するとともに、フラッシュ光

に注目して考察したので紹介する。

1. 分電盤室で発生した無炎燃焼について

首里城火災の前兆は、正殿内監視カメラが捉えた微かな発光に始まり、その後、裏側の監視カメラに正殿北東部の分電盤室においてフラッシュ（閃光）が頻発に繰り返し、中央階段側に移動し、ついに真っ赤なフラッシュオーバが生じて大火災に至った様子が捉えられていた。一方、人感センサーの発報7分後に、侵入者と思い込んで消火器を持参せずに現場に駆け付けた警備員Aは、「西之廊下から室内に進入した時点で奥の廊下付近には煙が充満して消火設備まで前進できず、外から裏側に回ると木口（引き戸？）から黒煙が噴き出していた」と証言している。また、15分後に消火器を持参し駆け付けた警備員Bも、煙で発火元が確認できず外部を探し廻っていた。つまり、火災はまだ発生していなかったものであり、初期消火の絶好の機会を逸した。

1. 1 「燃焼」に関する基本事項について

監視カメラ4台の映像を精査すると、火災の前兆から大火災に至った経緯が時系列で記録されている。大火災に至るまでの主要な現象についてまとめるとともに、燃焼拡大を考察する上で重要な役割を担う基本的な事項について解説する。

（1）監視カメラに記録された前兆について³⁾

火災のはじまりは、まず正殿裏側分電盤室に隣接する中央階段の室内カメラに微かな光が検知され、その約15分後に分電盤室で小さな光を検知さ

れた直後に大きなフラッシュ光が発現し、消滅を繰り返した後に大炎上（フラッシュオーバー）に至ったことが記録されている。一方、正殿正面の室内では、煙の中に小さな炎が確認され、消滅を繰り返しながら大きな炎となり、急速に延焼が拡大し、全焼に至った様子が確認できる。発煙元の分電盤室から漏出した煙は、警備員により開けられた出入口シャッターから外部へ流出し、ウナーは真っ黒な煙で覆われた（写真1、写真2）。さらに正殿室内の正面側に流出した煙は、しばしば火炎（写真3）の消滅を繰り返しながら、大きな火炎へと拡大した。また、火炎の発生に伴ってウナーの煙はしだいに消え、北側の壁を白煙が上昇し（写真4）、2階軒下を取り巻く様子が記録されている。

今回は、正殿裏側の電盤室における発煙から始まり、原因は特定できないがショートと考えられる閃光が大きなフラッシュを発生させたことについて考察した。なお、気密性の高いこの小部屋か

ら煙がどのようにして正殿内部へ流出したかについては次回で紹介する。

以下に首里城が木造建造物であることから可燃物の燃焼特性を取り上げた。とくに、無炎燃焼については、「環境施設」第161号（2020.9）に「首里城炎上シリーズ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～」において解説しているので参考にして下さい。

（2）「燃焼」にかかる基本事項について

首里城正殿には、2階と3階に煙センサーが設置されていたが、1階には1個も設置されていなかった⁵⁾。これは1階で発生した煙は、速やかに上昇して上階で感知できるとの想定であろう。しかし、分電盤室のような気密性の高い小部屋で発煙した場合、煙が封じ込められて漏出しないので、上階のセンサーはまったく感知しないことは常識である。消防設備を精査すると、放火や延焼によ



写真1 煙流出前のウナーの様子



写真2 黒煙に覆われたウナーの様子



写真3 正殿正面室内における炎発生



写真4 正殿北側壁を上昇する白煙

る火災（有炎燃焼）に対応した設備であり、正殿内の受配電を統括する分電盤室には比較的感度の低い温度センサーを対面の出入口上部に設置しただけである。この分電盤室に煙感知器を設置していなかったことが致命的であり、首里城全焼を招いたと言っても過言ではない。

今回の火災では、木造部室において煙りによる発煙（無炎燃焼）に始まり、無炎燃焼の拡大とともに大量の煙が発生し、室内に滞留し、燃焼条件が揃った段階で発火、あるいは可燃性の煙が一瞬で爆発的に燃焼する映像が記録されている。このように様々な燃焼形態を経て消火ができないほどの大火災に至ったのである。以下に「燃焼」に関わる基本的な事項について解説する。

【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、「熱を伴うが、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、これらの燃焼の三要素が揃わない限り、燃焼は継続しない。火災は燃焼ではあるが、すべての燃焼は火災ではない。焚き火や花火も燃焼しているが、火災とは言わない。

なお、人間にとって有用なものが燃えることを火災と呼んでいる。「火災」は行政機関（消防）が認知した火事であり、「消防庁では火災を建物火災、林野火災、船舶火災、航空機火災、車両火災、その他の6つに分類している。

- ①可燃性物質（燃えるもの）；首里城は木造建築物であり、燃えやすい
- ②酸素の供給（空気）；外部からの空気の流入が必須であり、シャッター開放、外壁や窓の破損により流入
- 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、分電盤下部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

れたままであり、「これがショート（短絡）し、火源となった」と疑われているが定かでない。しかし、60人以上の作業員が、夜中の1時半までイベント準備作業を行っており、これらの作業とはまったく関係なく1時間半後にこのコードが都合良くショートしたと想定することは、あまりにも不自然である。

【燃焼熱と炎および温度について】

火災時における色と温度の目安を表1に示す。木材などの有機物の主成分である炭素の酸化反応時の発熱量は酸化反応に伴う反応熱であり、不完全燃焼である無炎燃焼の発熱量は、完全燃焼時の約1/3程度である。このため、可燃物の熱分解により可燃ガス（煙）が発生しても着火しない状態で煙り続け、空気が流入して所定の酸素濃度および着火温度の条件が満たされると、激しく燃焼する。

燃焼時には、熱と光を伴うので、煙や火炎は高温になり、さらに酸化反応（燃焼）を促進させる。例えば、野外での火事では、酸素が均一に混合しないことや放熱があるので、様々な炎の色が現れる。有機物が最も高温で燃焼しているときは白色または黄色の炎に、やや温度の低い部分ではオレンジ色の炎に、さらに温度が低くなると赤い炎になる。赤い炎の上では燃焼は起きず、燃焼しかなかった炭素粒子が黒い煙となって上昇する。

なお、通常、家庭用コードならショートで発生

表1 火災等の色と温度（完全黒体）の目安⁶⁾

種 類	色	温 度
煙	黒	400℃ 以下
	初期の発熱	500℃ 以下
火 災	赤色	700℃
	橙赤色	900℃
	鮮明な橙赤色	1,000℃
	橙黄色	1,100℃
	鮮明な橙黄色	1,200℃
	白熱	1,300℃
	眩しい白熱	1,500℃

する温度は2,000～3,000℃と言われているが、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場合が多いと考えられる。しかし、条件次第では炎の出ない無炎燃焼は起こりうる。分電盤室は倉庫としても使用されていたので、イベント準備用の旗などの布、木材など燃えやすい可燃物が保管されていた可能性が高い。

(3) 首里城火災で起こった様々な燃焼について

首里城に設置された監視カメラの映像には、火災の初期から大火災に至る経緯の中で、様々な燃焼（火災）の様子が記録されている。初めに分電盤室で確認された微光からフラッシュ光を経てフラッシュオーバ、警備員による正殿内の煙充満、ウナーを覆う黒煙や北側壁を上昇する白煙、正殿正面室内における炎発生から延焼拡大への推移が記録されている。

以下に、これらの首里城が大火災に至った燃焼形態について検討した。

【無炎燃焼とは！】

首里城火災の発火源は分電盤室であると判断されている。電気的なトラブルによるショートであると推測されているが、その原因については不明であるとの結論である。電気的な小さなショート、煙草などの微小火源では、火種ができたとしても熱供給が少ないので、周辺の可燃物を熱分解する力が弱い燃え上がることがなく、じわじわと熱分解が進行し、炎を出さずに燃焼が継続することがある。これを無炎燃焼というが、燻焼、いぶし燃焼ともいう。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、火種ができやすい。
- ②不完全燃焼なので、発熱速度が遅く、発熱温度も低く、伝搬速度も遅い。
- ③低い酸素濃度の雰囲気でも、燃焼が伝搬することがある。熱分解で生成した酸素と反応することもある。
- 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。

無炎延焼は、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。反応熱が小さいので燻り続けるだけで火災に至らず、大量の黒煙を発生する。酸素が十分であれば、いずれ完全燃焼が起こって二酸化炭素（CO₂）が発生する。この場合は発熱量が大きいので周りの可燃物を熱分解し、可燃ガスが炎を出して勢いよく燃える。完全燃焼とはいえ局所的には酸素不足で不完全燃焼が起こり、煤（すす）が大量に発生することもある。また、一酸化炭素は可燃性で、燃えると発熱して二酸化炭素を生成する。

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拡大して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ので、燃焼は緩やかに継続する。

【有炎燃焼；炎燃焼とは！】

前述したように、木材の燃焼は、木材そのものが直接燃えるのではなく、熱分解で発生した可燃ガスが燃える。可燃ガスと空気が十分に混合した部分は高温で燃焼し光を発するが、空気不足になった部分は不完全燃焼して「すす」が発生する。「すす」は固体微粒子であり、高温になると赤からオレンジ色に輝く。なお、酸素と反応した炭素は、不完全燃焼した場合は一酸化炭素に、完全燃焼すると二酸化炭素になり、いずれも無色透明で見えない。また、木材成分である水素も燃焼して水を生成するが、温度が高いので水蒸気となる。通常、見えないが、外気に冷やされるとミストになり、「白煙」となって見える。

監視カメラには、北口シャッターを開放後にウナーが黒煙で覆われ（写真1、写真2）、正殿正面室内において小さな炎（写真3）が消滅を繰り返して南側へ移動し、燃焼が拡大する様子が捉えられている。また、同時に北外壁を上昇する白煙（写真4）が確認されている。無炎燃焼で発生した「すす」を大量に含む黒煙はウナーに流出し、一方、外壁を上昇する白煙は、燃えた様子がないので可

燃性ではなく、炎燃焼後の温度の高い煙に含まれる水蒸気ではないかと推測される。

【フラッシュ（閃光）とは！】

正殿裏側の監視カメラによると、分電盤室において微光があり、数秒後に大きなフラッシュ（写真5）が記録され、大小を繰り返しながら約9分後に隣接する中央階段付近において爆発的に燃え上がり、瞬く間に炎上する様子（写真6）が記録されている。なお、フラッシュ光から中央階段部のフラッシュオーバ（火柱）までの映像が約3分45秒にわたって編集でカットされているので、フラッシュの移動の状況がわからない、つまり発火源を特定できなかった。最初に確認された微かな光は電氣的なトラブルによるショートによる発光であるとしても、その後のフラッシュは何を意味するのであろうか？ 報告書ではまったく説明されていない。

【フラッシュ光の意味することは！】

分電盤室では、無炎燃焼により可燃物の熱分解が進行し、可燃性ガスを含む煙が発生していた。電氣的なショートによる閃光であれば、単なる発光が記録されているはずであるが、映像では大きなフラッシュ光が繰り返し記録されている。可燃ガスが一瞬で燃焼して高温になり光を発したならば、必ず燃焼にムラが生じて温度の低い赤い色（写真6；白黒で分らないが！）を伴うと考えられる。白色の高温は発する光は白色光を発するショート

以外には想定できない。つまり、フラッシュ光は、発生した煙にショートで発生した高温の閃光が反射した散乱光であると解釈することができる。映像の時系列をみると、微かな光を感知した3秒後に大きなフラッシュ光が記録されているので、この時点ですでに煙が溜まっていたことを示唆する。なお、煙のみではフラッシュは発生しないので、フラッシュ光が頻繁に繰り返されたことは数多くのショートが起こったことおよびフラッシュの終了は断線したことを意味する。

映像に捉えられたフラッシュ光の回数は、配線のショートの回数と比例すると考えられるので、溶融痕の数との相関性がありそうである。このようにフラッシュ光は、ショートによる強い光が煙に反射して発生したと考えると、様々な現象を合理的に説明することができる。最終的に分電盤室に大量に蓄積した煙（可燃ガス）が隣接する中央階段に流出し、空気と混合して輻射熱等により一瞬で爆発的な燃焼が起こり、大炎上に至った（写真6）と推測できる。

《フラッシュオーバ》火災によって発生した熱が建物内に蓄積され、天井、側壁、収容物等の可燃物が加熱され、燃焼しやすい状態になり、部屋全体が一度に燃え出し、急速に延焼拡大する現象をいう。《バックドラフト》空気不足による不完全燃焼に始まり、一酸化炭素等の可燃性ガスが溜まり、温度上昇の中で、開口部の開放によって空気の供給が急激に行われることにより爆発的な燃焼が起こることをいう。



写真5 分電盤室で捉えられたフラッシュ光



写真6 中央階段付近に移動した火柱

以上より、中央階段付近のフラッシュオーバーは、分電盤室に溜まった可燃性ガスが階段に流出し、外壁の破損により一気に空気を吸引して炎上したと推察される。

おわりに

監視カメラには、火災が、正殿裏側の分電盤室で起こった無炎燃焼に始まり、炎燃焼やフラッシュオーバーにより爆発的な大火災に至ったこと、また、正殿正面室内の煙の中で火炎が消滅を繰り返しながら、大きな火炎に成長した様子が記録されている。様々な発火、燃焼形態が記録されているので、首里城火災と密接に関わる燃焼に関する基本事項を取り上げて解説を試みた。

とくに、特徴的な事象は、正殿裏側で検知されたかすかな光が、大きなフラッシュ光となり、繰り返しながら、ついには、中央階段付近で大きな火柱となって燃え上がったことである。ここでは、フラッシュ光の発生は、室内に溜まった可燃ガス(煙)に電気的なトラブルによるショートで眩しいほどの白色の光が煙により散乱して生じたと想定した。つまり、フラッシュが起こる前にすでに無炎燃焼により煙が発生し、分電盤室に充満していたこと、フラッシュ光の消滅はショートの回数を、終了は断線を示すと考えた。なお、フラッシュ現象を、稲妻が雲(ミスト)に散乱、反射して白く

輝く様子をイメージした。

今回は、発火元の分電盤室に設置された火災報知器が人感センサーより6分も遅れて発報した原因及び正殿室内への煙の流出について考察するとともに、正殿前庭のウナヘへの黒煙の流出や北出入口から北壁を上昇する白煙の挙動について寄稿する。さらに、首里城火災は、無炎燃焼による煙(可燃ガス)が正殿正面に供給されたことから、消火を著しく困難にせしめ、首里城全焼の要因であったことを解説したい。

【付記：首里城火災復旧・復興支援寄付金】

2021年10月31日時点で約53億2,594万円です。

【追記：住民監査請求（沖縄新報 2021年6月6日）】

「首里城火災は「美ら島財団」の責任、県民9人が住民監査請求」と報道された。損害額の内訳は、財団が県に収めるべき固定納付金約2億3千万円のうち、火災後に県が減額した約9,700万円と、損傷した建物内の収蔵文化財の被害おおよそ5千万円を含めて約1億4,700万円とした」と報道された。

「原因不明」とのことで誰も責任を取らない首里城消失に一石を投じ、請求が棄却された場合には訴訟へと進む、とあった。

〈引用・参考資料〉

- 1) 首里城火災に係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）
- 2) 第1回から第6回首里城火災に係る再発防止検討委員会議事録；令和2年3月～令和3年3月
- 3) 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
- 4) 首里城 新エリア散策；2019.5.3（ユーチューブのURL；<https://youtu.be/KLC1woBLuvk>）
- 5) 参考資料3 前回復元時の首里城正殿等の設計（詳細）、内閣府沖縄総合事務局
- 6) 改訂 火災原因調査要領（化学火災編） 財団法人 消防科学総合センター（平成15年8月）