

ドア開放がもたらす区画内火災性状の変化に関する検証

湯浅 弘章*、佐藤 歩*、渡邊 茂男*

概要

この検証では、ある程度の高温を維持した酸欠燃焼時の火災室について、開口部開放後の燃焼性状の変化を調査した。実験の結果、以下の現象を確認した。

- ・同じ開口部であれば、始めから開口部を開放していた時の燃焼と比較し、酸欠燃焼後に開口部を開放した方が、また酸欠燃焼時間が長いほうが、その後の燃焼は激しかった。
- ・酸欠燃焼後に開放する開口部は、大きいほどその後の燃焼が激しかった。
- ・高温を維持した火災室内で、ある程度以上酸欠燃焼時間が長く、開放する開口部が大きいと、通常の開放後の燃焼に先行して小規模な爆発的燃焼が発生することもあった。

これらの結果より、消防隊は、開口部開放後の劇的な燃焼促進に注意するとともに、早期の火災対応と、開口部を小さく開放することで、より安全に活動できる可能性が推察された。

1 はじめに

火災室の開口部が大きく開放されていれば、火災室内の可燃物の燃焼は順次促進し、延焼も順次拡大する。もし火災室が完全に密閉されていた場合、理論上は火災室内の酸素が不足し、火災室内の可燃物の燃焼は鎮火、もしくは緩慢な延焼拡大で留まることが予想される。しかし、実際の火災では、ドアや窓等の主要な開口部が閉鎖されているにもかかわらず、構造上発生する隙間や換気設備等の影響で酸素の供給は十分ではないにしろ続き、酸素不足の火災室内の燃焼が継続することは珍しいことではない。

この検証では、ある程度の高温を維持した酸欠燃焼時の火災室について開口部開放後の燃焼性状の変化を調査するため、火災室を模擬した単一開口部を有する8畳程度の単一耐火区画を用いて、開口部の大きさ3種類に対し、開口部開放後の区画内可燃物の延焼拡大がもたらす区画内熱環境の変化に注目した実験を行った。

この実験結果より、窓の熱破壊や消防隊の開口部の開放がその後の火災室の燃焼促進にどのように寄与するかについて、考え方の基本となる情報を消防職員に提供することで、消防隊が各現場での火災性状をよりの確に推測し、確信を持った消防活動が行えるよう支援することを目的とした。

2 実験

(1) 実験概要

密閉された単一耐火区画火災室において、大きさと位置の異なる3種類の開口部を3種類のタイミングで開放したときの火災室内の熱環境等を測定した。実験結果より、火災室内の可燃物の総合的な燃焼の激しさについて比較した。

(2) 対象区画

実験は耐火区画火災室を模擬した間口3.3m奥行き3.6m、高さ

2.15mの大きさの単一開口部、単一区画で行った。壁、天井については軽量気泡コンクリート製、厚さ50mmで、内装は全面ステンレス鋼板、厚さ0.6mmで仕上げている。区画前面には、幅1.6m、高さ1.85mの開口部を有し、耐熱ガラスで内部が確認可能な両開き扉が備わっている。

この実験区画は換気口、建物隙間が無く気密性が高いため、前面の開口部を完全に閉鎖して内部で可燃物を燃焼させると、酸素不足によりすぐに消炎することを予備実験により確認している。これを踏まえ、本実験では、区画側壁からφ114mmの火災噴射口より区画内に火炎を噴出する燃焼量117kWの予混合バーナーを配置し、開口部を完全に閉鎖した状態においても区画内を高温、低酸素、燃焼継続状態に一定時間保てるようにした。

また、区画内には火災室内の可燃物を模擬するためにクリブ第一模型(A-2)を一基、縦1820mm、横910mmのラワン合板(厚さ5.5mm)を2枚収納した。クリブについてはバーナーが発生する火炎に接炎する位置に配置し、ラワン合板はそれぞれ、床、側壁に配置した。そしてこれらの可燃物がバーナーの火炎を基点として順次延焼拡大したときの区画内の環境を測定した。実験区画と燃焼物の設定、測定内容、測定点の呼称を図1に、映像記録、測定の種類と測定位置を表1に示す。また、実験で使用した測定機器の詳細を表2に示す。

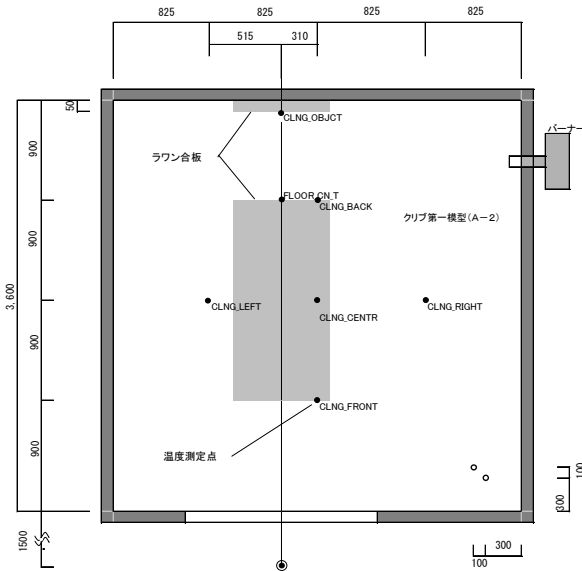
表1 映像記録、測定の種類と測定位置

記録、測定内容	記録、測定位置
可視画像	正面1点、正面全景1点、近景1点
赤外画像	正面1点
温度	天井6点、開口部測定柱1点、区画内測定柱7点、床1点
受熱量	開口部1点
CO、CO ₂ 、O ₂ 濃度	区画内測定柱2点

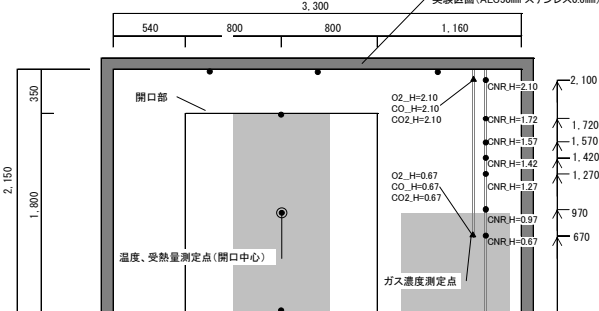
表2 実験で使用した測定機器

測定項目	測定機器等
温度	名称 : K 熱電対 外形寸法 : 素線 0.10mm
熱流束	名称 : 全熱流束計 測定レンジ : 0-5 kW/m ² 出力 : 10mV ± 1.5mV フルレンジ 最大非直線性 : フルレンジの±2% 測定精度 : ±3% 冷却方式 : 水冷
ガス濃度	名称 : CO, CO ₂ , O ₂ ガス分析装置 測定方式 : 非分散型赤外線吸収法、及び磁気式 (酸素) 使用測定範囲 : 0-10% (CO)、0-20% (CO ₂)、0-25% (O ₂) 繰り返し性 : フルスケールの±0.5% ドリフト : ゼロ (フルスケールの±2%/週)、スパン (フルスケールの±2%/週) 応答速度 : 装置入口より 90%応答 60s 以内 試料採取量 : 約 2L/分 出力 : DCO-1V
その他	名称 : データロガー 測定速度 : 同時サンプル (FLASH) 方式、100ms/全点

平面図(mm)



正面図(mm)



凡例 温度測定点 : ● 受熱量測定点 : ○ ガス濃度測定点 : ▲

図1 実験区画と燃焼物の設定、測定内容、測定点の呼称

(3) 延焼拡大のシナリオ

区画内の可燃物の配置については、延焼の順番を考慮して設置した。ク립はバーナーが発生する火炎に接炎する位置に配置することで、もし区画内に十分な酸素を有していた場合、ク

リップが1次的に大きく燃焼する想定とした。正面側壁に立てた合板は、もしク립から大きく炎が立ち上がった場合、上部が接炎する位置であり2次的に直接延焼することを想定した。床に置いた合板は、仮にク립や正面側壁に立てた合板が燃焼しても直接接炎しない位置であり、ク립と正面側壁に立てた合板の激しい燃焼が起こった場合、輻射熱等により3次的に延焼するであろうことを想定した。つまり、もともと開口部が大きく開放されていれば、各可燃物の燃焼がリレーすることで床面の合板まで時間をかけて順次延焼が拡大する。しかし、開口部が閉鎖されていれば酸素が不足しク립が緩慢な燃焼になることで炎が立ち上がらず、合板まで延焼拡大しないような可燃物の配置とした。このような実験設定のもと、常時開放、もしくは開口部を閉鎖から開放に変化させた場合のク립、側壁合板、床面合板への延焼速度について各測定値より比較、評価した。

(4) 実験条件

開口部の大きさと開放時期に注目した実験条件を表3に示す。表中の開放までの時間については、予備実験において一酸化炭素の時系列濃度履歴に注目し、爆発下限界の濃度 12.5 パーセント近傍を上限の基準として設定した。その結果、閉鎖区画内を予混合バーナーで加熱し、5分もしくは10分後にバーナーを停止、1分後にドアを開放することとした。開口部については、開口部の面積、及び中性帯に対する開口部の高さを変化させることで、新鮮空気の流入量が変化することを期待した。

表3 実験条件

開口部の名称と大きさ (開口部正面を見たときのボンチ絵、網掛けは閉鎖部) [mm]	開口因子 (A/H)	常時開放	点火6分で開放	点火11分で開放
ラウン合板 温度、熱流束測定点 1800×1600 (掃き出し窓を想定)	3.86	実験 1	実験 2	実験 3
1800×800 (片開きドアを想定)	1.93	実験 4	実験 5	実験 6
900×800 (腰高窓を想定)	0.68	実験 7	実験 8	

3 実験結果

(1) 各開口部の基本的な特徴

ア 目視による観察

実験1、実験4、実験7は各開口部の設定において始めから開放した状態で内部の可燃物を燃焼させたものであり、各開口部が区画内の燃焼性状に与える影響についてそれぞれの基本的な特徴を捉えることができると考えられる。

掃き出し窓を想定した実験1は、延焼拡大の想定シナリオどおり、まずク립から大きく炎が立ち上がり、正面側壁に立てた合板上部が接炎して2次的に延焼した。床面の合板は、ク립や正面側壁に立てた合板の激しい燃焼により、接炎することなく輻射熱等により3次的に延焼した。床面の合板が燃焼した後が最も燃焼が激しく、天井全面に炎が這い、開口部から溢れるように炎が噴出する様子が確認された。区画内は上層の煙層とクリアな下層に分かれたが、開口部が大きかったことから、煙層が大きく下降することも無く、内部の様子が常に目視で確認できた。写真1に各可燃物の燃焼がリレーする様子を示す。

点火後 30 秒 2 分 00 秒 3 分 30 秒
写真 1 各可燃物の燃焼がリレーする様子

片開きドアを想定した実験 4 についても、延焼拡大の想定シナリオどおり順次延焼拡大した。しかし、実験 1 と比較し、床面の合板に着火する時間が若干遅かった。また開口部が小さくなった影響で、最盛期には煙層が床面付近まで下降し、区画内全体が炎に包まると共に開口部から炎が噴出する様子が確認された。写真 2 に各可燃物の燃焼がリレーする様子を示す。

点火後 30 秒 2 分 00 秒 3 分 30 秒
写真 2 各可燃物の燃焼がリレーする様子

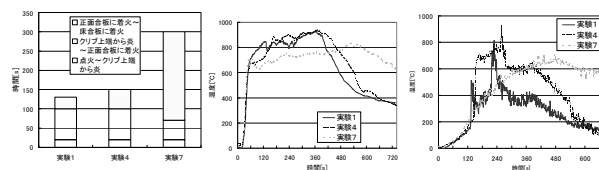
腰高窓を想定した実験 7 は、延焼拡大の想定シナリオどおり順次延焼拡大したものの、床面の合板に着火するまで非常に時間がかかった。クリブから炎が立ち上がるものの、まもなく勢いが衰えるとともに、区画全体が黒煙で満たされてしまい、内部の様子はほとんど目視で確認できなくなった。正面側壁に立てた合板に着火したタイミングで黒煙内にオレンジ色の炎がわずかに確認され、床面の合板に着火した後、徐々に区画内全体に炎が確認されるようになった。開口部から炎が噴出することは全く無かった。写真 3 に各可燃物の燃焼がリレーする様子を示す。

点火後 30 秒 2 分 00 秒 5 分 30 秒
写真 3 各可燃物の燃焼がリレーする様子

なお、実験 1、実験 4、実験 7 について、各可燃物が着火して最終的に床面合板に着火するまでの時間について目視で確認した結果をグラフ 1 に示す。これより、開口部が小さくなるにつれて床面合板に着火するまでの時間が長くなることが確認された。開口部が小さいほど新鮮空気への取り込みが阻まれ、クリブや正面側壁に立てた合板の効率的な燃焼が抑制され、大きな炎が継続的に立ち上がらないことが輻射熱等による床面の受熱量の増加に影響し、床面合板に着火するまでの時間が長くなることが推察される。

イ 区画内温度と解析結果

グラフ 2 に各実験における開口部開放後の天井中心 (CLNG_CENTR) の温度履歴を、グラフ 3 に床面から 0.67m の位置 (CNR_H=0.67) の開口部開放後の温度履歴を示す。



グラフ 1 着火時間 グラフ 2 CLNG_CENTR グラフ 3 CNR_H=0.67

グラフ 2 を見ると、実験 1 と実験 4 は同じような最高温度を示している。実験 7 は低めの温度推移を長時間維持している。グラフ 3 を見ると、実験 4 が最も高い最高温度を示しており、最盛期に煙層が床面付近まで下降し、区画内全体が炎に包まれていたことと一致する。実験 1 では常に上層の煙層とクリアな下層に分かれていたため、床面から 0.67m の位置の温度履歴も低めに推移しているものの、最盛期では一時的に区画全体が高温になることが確認できる。実験 7 については継続的な温度上昇が確認できる。区画全体が常に黒煙で満たされていたことから、開口部が小さいため区画内に籠った熱が天井から床へ拡散することで区画内が徐々に均一な温度分布になっていくことが推察される。

ここで、各測定点で観測された最高温度が高い実験条件ほど最大燃焼時の燃焼が激しいと仮定する。グラフ 2 とグラフ 3 の各実験条件における最高温度の序列の傾向は同じであることから、いずれの測定点においても最盛期近傍における最高温度の序列に関して一定の傾向を示す可能性がある。表 4 に各実験における区画内全温度測定点（正面側壁に立てた合板の崩壊に直接影響を受ける測定点 FLOOR_CN_T は除いた 13 点）について、実験中に観測した最高温度に関する基本統計量を示す。

表 4 最高温度に関する基本統計量 (n=13)

	実験 1	実験 4	実験 7
最大値 [°C]	1001	1050	877
最小値 [°C]	784	789	686
算術平均 [°C]	907	941	798
中央値 [°C]	919	939	814
標準偏差	67.89	64.96	57.34

表 4 より、最盛期近傍では区画内全体が比較的均一に高温環境下となっており、序列に関してもグラフ 2、3 と同様の傾向を示している。よって、これらの各測定点を総合的に捉えることで各実験の最大燃焼時における燃焼の激しさの傾向が比較できると考える。以後、各測定点において観測された最高温度の算術平均を各実験における区画内全体の最大燃焼時の燃焼の激しさを示す代表値として使用する。グラフ 4 に、実験 1、実験 4、実験 7 について、最高温度に関する算術平均（最大燃焼時における燃焼の激しさを示す代表値）を示す。

グラフ 4 において、実験 1 と実験 4 を比較すると、わずかではあるが実験 4 のほうが温度が高い。区画内全体の燃焼を考え

た場合、実験4のほうが燃焼が激しかったことが推察される。また実験1、実験4と比較すると実験7は温度が低めであり、最大燃焼時の区画内の燃焼は比較的穏やかであったことが読み取れる。

次に、各測定地点の最高温度に至る時間に注目する。表5に表4で用いた測定点について、最高温度に至る時間に関する基本統計量を示す。

表5 最高温度に至る時間に関する基本統計量 (n=13)

	実験1	実験4	実験7
最大値 [s]	377	398	556
最小値 [s]	172	256	289
算術平均 [s]	303	334	487
中央値 [s]	323	367	509
標準偏差	64.43	53.70	77.69

表5より、標準偏差がおよそ1分程度あることから、各測定地点が区画内の燃焼性状によりそれぞれ局所的な影響を受け、順次最高温度を観測していることが推察される。グラフ5に表4で示した各実験の最高温度に至る時間に関する算術平均を示す。グラフ5において、実験1と実験4を比較すると、わずかながら実験1のほうが時間が早い。また実験1、実験4と比較すると実験7はかなり時間がかかっている。なお、これらの結果は、床面合板に着火するまでの時間について目視で確認した傾向(グラフ1)に一致している。

消防隊にとっては、開口部の開放状況によりどの程度火災が大きくなり、どのようなスピードで火災が進展するのかを把握することは双方とも重要であり、両方の概念を含んだ値を総合的な燃焼の激しさを示す代表値として使用できればより便利である。ここではこの代表値について考える。例えば、ある測定地点において短時間で最高温度に達する実験条件は、同じ温度に達するまでに膨大な時間がかかる実験条件と比較して、区画内の火災成長速度は速いと言える。ただし、表5のとおり、それぞれの計測地点が最高温度を観測した時間は区画内の気流の影響や可燃物の燃え広がる順番等によりある程度の幅を持っていることから、測定点ごとに「最高温度/経過時間」を考える。これを各測定点の位置における総合的な燃焼の激しさを示す代表値と定義し、この値が大きいほど総合的な燃焼が激しいと仮定する。表6に表4で用いた測定点について、総合的な燃焼の激しさを示す代表値に関する基本統計量を示す。

表6 総合的な燃焼の激しさに関する基本統計量 (n=13)

	実験1	実験4	実験7
最大値 [°C/s]	5.48	3.89	2.97
最小値 [°C/s]	2.34	2.28	1.31
算術平均 [°C/s]	3.15	2.89	1.70
中央値 [°C/s]	3.05	2.70	1.57
標準偏差	0.82	0.52	0.43

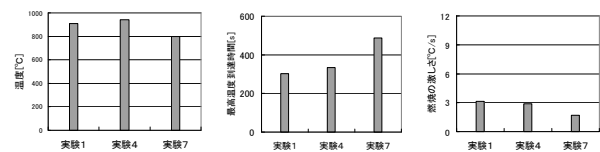
なお、この操作により、特に重要な温度の高低が失われてしまうが、グラフ4に示すとおりいずれの実験条件についても著しく低い温度ではないことから、火災を想定した燃焼の激しさ

としての意味は失わないと考える。この各測定点における総合的な燃焼の激しさを示す代表値の算術平均についてt検定を行い、各実験について差が無いという帰無仮説を棄却できるかについて検討した。その結果を表7に示す。

表7 t検定結果 (Welch法)

	実験1と実験4	実験4と実験7	実験1と実験7
t値	0.96	6.37	5.65
p値	0.35	1×10^{-6}	2×10^{-5}

t検定では、実験1と実験4は片側有意水準5%においても帰無仮説を棄却できず、有意な差とはいえないが、実験4と実験7、実験1と実験7については片側有意水準0.1%においても帰無仮説は棄却され、明らかに有意な差があると判断される。目視による観察や温度測定履歴は、実験1と実験4は比較的似た様な激しい燃焼性状を示したものの、実験7は明らかに違う穏やかな印象をうけた。これより、測定点ごとに「最高温度/経過時間」を考えたとき、この平均を各実験条件における総合的な燃焼の激しさを示す代表値として使用することは有用であると考えられる。グラフ6に、実験1、実験4、実験7について、「最高温度/経過時間」(総合的な燃焼の激しさを示す代表値)を示す。



グラフ4 最高温度 グラフ5 時間 グラフ6 燃焼の激しさ

グラフ6より、吐き出し窓や片開きドアが開放されている場合は室内内部はどちらもよく燃え、これらの差も小さいが、腰高窓が開放されている場合は前2ケースと比較すると燃焼が緩慢であると言える。

(2) 酸欠燃焼について

ア 目視による観察

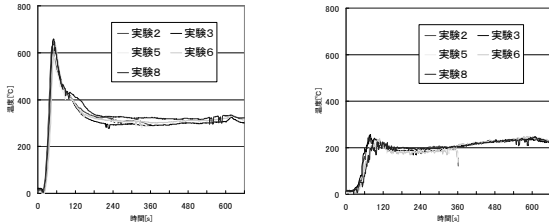
酸欠燃焼時、点火から開口部開放までは、いずれの実験においても全て同じ様子が確認された。バーナー点火後、クリブから大きく炎が立ち上がるころまでは開口部を始めから開放していた場合と全く同じである。その後炎が天井に到達するとまもなく勢いが衰えるとともに煙層が下がり始め、床面まで達する。以後、耐熱ガラス越しに観察する限り、黒煙が区画内を満たしていること以外炎等は一切確認できない状態が続く。写真4に煙層が下がり始めた区画内の様子を示す



点火後50秒 1分00秒 1分10秒
写真4 煙層が下がり始めた区画内の様子

イ 区画内温度

グラフ7に実験2、3、5、6、8における天井中央 (CLNG_CENTR) での開口部開放直前までの温度履歴を、グラフ8に同実験における床面から0.67mの位置の測定点 (CNR_H=0.67) での開口部開放直前までの温度履歴を示す。



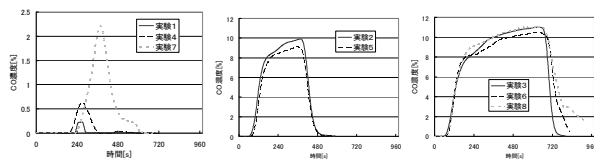
グラフ7 CLNG_CENTR

グラフ8 CNR_H=0.67

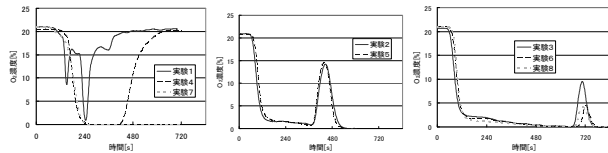
いずれの実験においても区画内は上部で300度、下部200度程度で推移しており、比較的上下に均一な熱環境である。

ウ 区画内ガス濃度

区画内の各ガス濃度については一酸化炭素と酸素濃度に注目する。炎に接していない床面から0.67mの位置の測定点が区画内の環境をよく特徴付けると考えられる。床面から0.67mの位置の測定点について、グラフ9から11に一酸化炭素濃度を、グラフ12から14に酸素濃度を開口部開放時間別を示す。



グラフ9 始めから開放 グラフ10 6分で開放 グラフ11 11分で開放



グラフ12 始めから開放 グラフ13 6分で開放 グラフ14 11分で開放

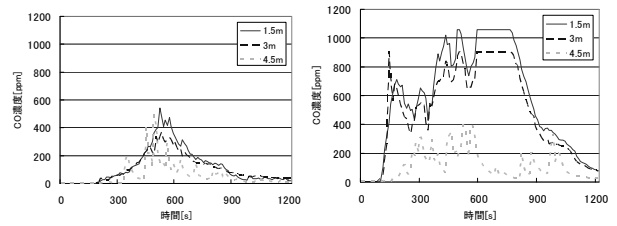
一酸化炭素濃度については、開放直前の区画内一酸化炭素濃度が10%から11%まで上昇する。開口部開放後に大きく下降し、以降、上昇することはない。

酸素濃度については、ほぼ0%まで減少し、その後開口部開放後に一時的に上昇する。

エ 区画外ガス濃度

実験1と実験3において、高さ1m、開口部中心からそれぞれ1.5m、3m、4.5m離れた位置で一酸化炭素濃度を測定した。その結果をグラフ15、16に示す。グラフ15とグラフ16を比較すると、始めから開口部が開放された実験1と比較し、点火11分後に開口部を開放した実験3は開口部を開放する前から区画外部の一酸化炭素濃度が非常に高い値を示している。これは区画の隙間から漏れた区画内のガスが計測されていると考えられる。これより、区画内で酸欠燃焼を起こしている事が、区画外部においても一酸化炭素濃度の上昇という形で察知できる可能性が

確認された。



グラフ15 実験1

グラフ16 実験3

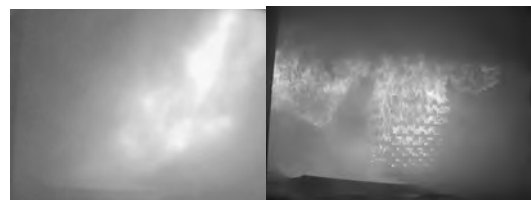
(3) 酸欠燃焼時間の長さによる比較

次に、それぞれの開口部について、酸欠燃焼の有無、もしくは酸欠燃焼時間の長さが開口部開放後の燃焼性状に与える影響に注目して比較する。

ア 目視による観察

掃き出し窓を想定した実験1、実験2、実験3に注目すると、始めから開放した状態で内部の可燃物を燃焼させた実験1と比較し、点火6分後に開口部を開放した実験2のほうが、更に点火11分後に開口部を開放した実験3のほうが、あきらかに開口部開放後のクリブ、側壁合板、床面合板への延焼速度が速く、燃焼自体も激しく感じられた。実験1、実験2、実験3について、開口部開放後から各可燃物が着火して最終的に床面合板に着火するまでの時間について目視で確認した結果をグラフ17に示す。グラフ17より、酸欠燃焼後に開口部を開放した方が、また酸欠燃焼時間が長いほうが床面合板に着火するまでの時間が短い。理由として、酸欠燃焼時間が長いほうが区画内可燃物の熱分解がより進むため、開口部開放後に各可燃物がより効率的に燃焼すること、酸欠燃焼時間が長いほうがその間の熱量を区画に蓄えており、開放後の燃焼に寄与する等が推察される。

実験2では床面合板に着火後、煙層が床面付近まで下降し、開口部から炎が渦巻くように噴出する様子が確認された。実験3においては開口部開放とともに小規模な爆発的燃焼と開口部からの火炎の吹き出しが確認され、その後一息入れてクリブと側壁合板が同時に炎を上げて激しく燃焼を始めたことが特徴的であった。この小規模な爆発的燃焼は、区画内に充満した可燃性ガスが開口部開放後流入した酸素と結合し一気に燃え尽きる現象であると推察される。写真5に実験3における小規模な爆発的燃焼とその後のクリブ、合板の一斉着火を示す。



点火後11分08秒

11分28秒

写真5 掃き出し窓開放後の爆発的燃焼とその後の一斉着火

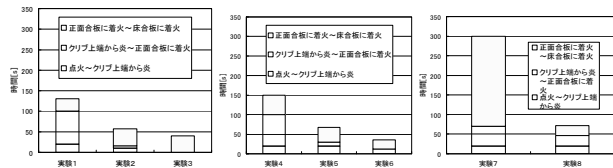
片開きドアを想定した実験4、実験5、実験6についてもおおむね同様の傾向を示し、始めから開放した状態で内部の可燃

物を燃焼させた実験4と比較し、点火6分後に開口部を開放した実験5のほうが、更に点火11分後に開口部を開放した実験6のほうが、あきらかに開口部開放後のクリブ、側壁合板、床面合板への延焼速度が速く、燃焼自体も激しく感じられた。実験4、実験5、実験6について、開口部開放後から各可燃物が着火して最終的に床面合板に着火するまでの時間について目視で確認した結果をグラフ18に示す。

実験5、実験6共に、床面合板に着火してからは区画全体が炎に包まれ、開口部全体から渦巻くように炎が噴出した。実験6においては実験3ほどではないものの、開口部開放とともに小規模な爆発的燃焼と開口部からの火炎の噴出が確認され、直後にクリブと側壁合板が同時に炎を上げて燃焼を始めたことが特徴的であった。写真6に実験6における小規模な爆発的燃焼とその後のクリブ、合板の一斉着火を示す。

点火後 11分10秒 11分30秒
写真6 片開きドア開放後の爆発的燃焼とその後の一斉着火

腰高窓を想定した実験7、実験8についても同様で、始めから開放した状態で内部の可燃物を燃焼させた実験7と比較し、点火11分後に開口部を開放した実験8のほうが、開口部開放後のクリブ、側壁合板、床面合板への延焼速度が速く、燃焼自体も激しく感じられた。実験8については床面合板に着火後、長い間区画全体が炎に包まれた。実験7、実験8について、開口部開放後から各可燃物が着火して最終的に床面合板に着火するまでの時間について目視で確認した結果をグラフ19に示す。



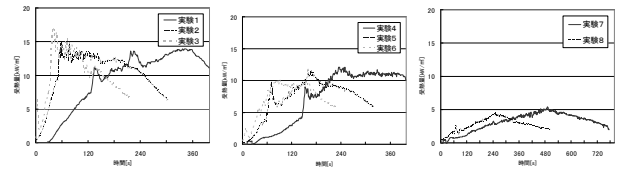
グラフ17 掃き出し窓 グラフ18 片開きドア グラフ19 腰高窓
開口部正面の受熱量と解析結果

同じ種類の開口部について、酸欠燃焼の有無、もしくは酸欠燃焼時間の長さが開口部開放後の燃焼性状に与える影響を比較する場合は、開口部正面の受熱量に注目するのが最も良いと考えられる。開口部から発する熱放射は区画内の燃焼状況の総合的な結果であると共に、開口部を開放する消防隊員が受ける熱的影響、視覚的印象そのものであると考えられる。

よって、本稿3章(1)項イにおける考え方に従い、温度に代わり受熱量に注目し、開口部正面で観測された最大受熱量と最大受熱量に至るまでの時間から総合的な燃焼の激しさを示す代表値を示し、これを比較する。

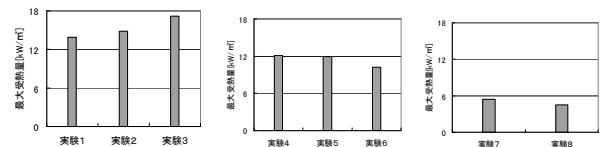
グラフ20からグラフ22に各実験における開放部開放後から

の開口部正面の受熱量の履歴の比較を示す。グラフ20からグラフ22を見ると、いずれの開口部においても、始めから開放した条件と比較し、点火6分後に開口部を開放したほうが、更に点火11分後に開口部を開放したほうが、あきらかに受熱量の立ち上がり方が早い。なお、グラフ20、21の実験3、6において開口部開放直後に受熱量が一旦大きく上昇しているが、これは開口部開放とともに発生した小規模な爆発的燃焼と開口部からの火炎の噴出を捉えたものである。



グラフ20 掃き出し窓 グラフ21 片開きドア グラフ22 腰高窓

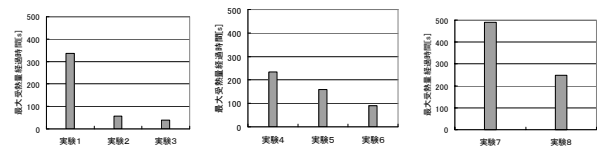
グラフ20からグラフ22をもとに、開口部ごとの最大受熱量(最大燃焼時における燃焼の激しさを示す代表値)の比較をグラフ23からグラフ25に示す。



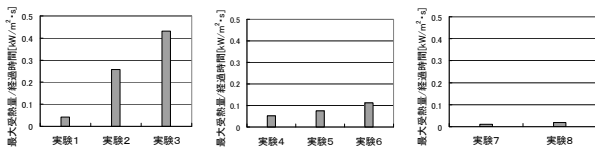
グラフ23 掃き出し窓 グラフ24 片開きドア グラフ25 腰高窓

グラフ23からグラフ25を見ると、掃き出し窓のみ、酸欠燃焼時間が長いほど最大受熱量が大きくなっているが、それ以外の開口部ではわずかではあるものの逆の傾向がある。開口部が小さくなると開放後の急激な換気による新鮮空気への取り入れに難が生じている可能性がある。次に、グラフ26からグラフ28に開口部ごとの最大受熱量に至る時間を示す。グラフ26からグラフ28を見ると、いずれの開口部においても、酸欠燃焼時間が長いほど最大受熱量に至る時間が短い。なお、これらの結果は、床面合板に着火するまでの時間について目視で確認した傾向(グラフ17からグラフ19)に一致している。

最後に、各開口部について、「最大受熱量/経過時間」(総合的な燃焼の激しさを示す代表値)をグラフ29からグラフ31に示す。グラフ29からグラフ31を見ると、同じ開口部であれば、始めから開口部を開放していた時の燃焼と比較し、酸欠燃焼後に開口部を開放した方が、また酸欠燃焼時間が長いほうが、その後の総合的な燃焼の激しさが大きくなる傾向であった。



グラフ26 掃き出し窓 グラフ27 片開きドア グラフ28 腰高窓



グラフ 29 掃き出し窓 グラフ 30 片開きドア グラフ 31 腰高窓

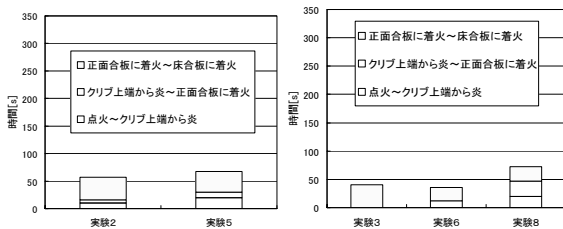
(4) 酸欠燃焼時における開口部の種類による比較

次に、酸欠燃焼時間（開口部開放までの時間）の長さが同じであったとき、開口部の種類が開口部開放後の燃焼性状に与える影響に注目して比較する。

ア 目視による観察

点火6分後に開口部を開放した実験2、実験5に注目すると、掃き出し窓を想定した実験2は、片開きドアを想定した実験5と比較し、開口部開放後のクリブ、側壁合板、床面合板への延焼速度が速く、燃焼自体も激しく感じられた。実験2、実験5について、各可燃物が着火して最終的に床面合板に着火するまでの時間について目視で確認した結果をグラフ32に示す。

同様に、点火11分後に開口部を開放した実験3、実験6、実験8に注目すると、掃き出し窓を想定した実験3と、片開きドアを想定した実験6については床面に着火するまでの時間についてはそれほど大きな差が感じられなかった。しかし、実験3のほうが開口部開放後の燃焼が激しいような印象を受けた。また、腰高窓を想定した実験8は実験3、実験6と比較してあきらかに開口部開放後のクリブ、側壁合板、床面合板への延焼速度が遅く、燃焼自体も鈍く感じられた。実験3、実験6、実験8について、各可燃物が着火して最終的に床面合板に着火するまでの時間について目視で確認した結果をグラフ33に示す。



グラフ 32 6分で開放 グラフ 33 11分で開放

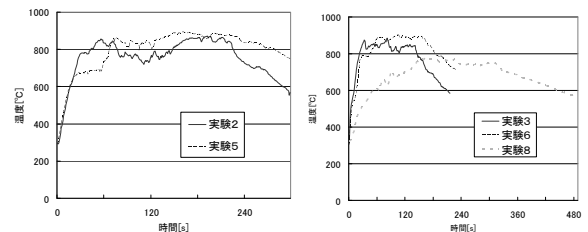
これより、開口部が小さくなるにつれて床面に着火するまでの時間が長くなる傾向が確認された。開口部が小さいほど新鮮空気の区画への取り込みが阻まれ、クリブや正面合板の効率的な燃焼が抑制されることから、大きな炎が継続的に立ち上がらないことが輻射熱等による床面の受熱量の増加に影響し、床面合板に着火するまでの時間が長くなったことが推察される。

イ 区画内温度と解析結果

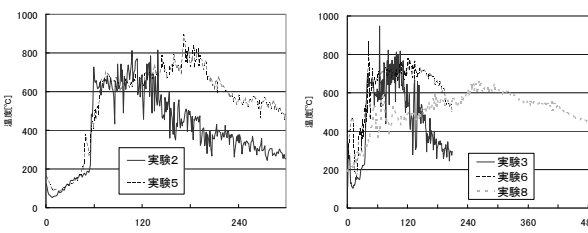
本稿3章(1)項イにおける考え方に従い、区画内の各測定点で観測された最大温度と最高温度に至るまでの時間から総合的な燃焼の激しさを示す代表値を示し、これを比較する。

グラフ34、35に各開放時間における天井中心の開口部開放後の温度履歴を、グラフ36、37に各開放時間における床面から0.67mの位置の開口部開放後の温度履歴を、表8に表4で用い

た測定点について、実験中に観測した最高温度に関する基本統計量を示す。さらに、表8を基に、開放時間ごとの各測定点の最高温度に関する算術平均（最大燃焼時における燃焼の激しさを示す代表値）についてグラフ38、39に示す。グラフ38において、6分で開放した場合は、最高温度にほとんど差がない。グラフ39において、11分で開放した場合は、開放する開口部が小さいほど最高温度が低くなる結果となった。



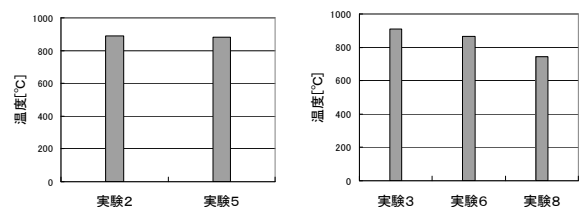
グラフ 34 6分で開放 グラフ 35 11分で開放



グラフ 36 6分で開放 グラフ 37 11分で開放

表 8 最高温度に関する基本統計量 (n=13)

	実験2	実験3	実験5	実験6	実験8
最大値 [°C]	996	10956	949	932	818
最小値 [°C]	739	766	766	739	632
算術平均 [°C]	888	911	882	865	745
中央値 [°C]	890	922	894	873	766
標準偏差	80.12	89.92	47.53	50.17	56.51

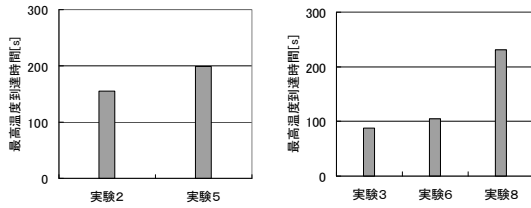


グラフ 38 6分で開放 グラフ 39 11分で開放

次に、各測定地点の最高温度に至る時間に注目する。表9に表4で用いた測定点について、最高温度に至る時間に関する基本統計量を、グラフ40、41に表9で示した各実験の最高温度に至る時間に関する算術平均を示す。

表 9 最高温度に至る時間に関する基本統計量 (n=13)

	実験2	実験3	実験5	実験6	実験8
最大値 [s]	229	145	248	156	313
最小値 [s]	98	44	150	38	73
算術平均 [s]	155	88	198	105	231
中央値 [s]	140	82	178	113	263
標準偏差	39.59	30.55	36.87	41.31	74.66



グラフ 40 6分で開放 グラフ 41 11分で開放

グラフ 40、41 を比較すると、いずれも開口部が小さくなるにつれて最高温度に到達するまでの時間が長くなる。なお、これらの結果は、床面合板に着火するまでの時間について目視で確認した傾向（グラフ 32、33）に一致している。

最後に、各実験条件における総合的な燃焼の激しさを示す代表値として、測定点ごとに「最高温度／経過時間」を考える。表 10 に表 4 で用いた測定点について、総合的な燃焼の激しさに関する基本統計量を示す。

表 10 総合的な燃焼の激しさに関する基本統計量 (n=13)

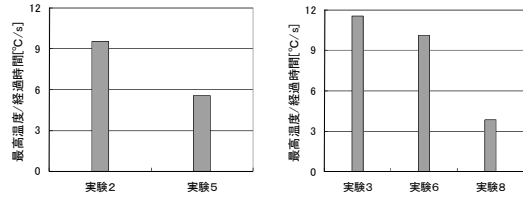
	実験 2	実験 3	実験 5	実験 6	実験 8
最大値 [°C/s]	9.54	18.11	5.54	22.3	10.84
最小値 [°C/s]	4.02	5.76	3.49	5.71	2.14
算術平均 [°C/s]	6.10	11.58	4.57	10.10	3.84
中央値 [°C/s]	5.86	10.78	4.53	7.63	2.70
標準偏差	1.79	3.97	0.77	5.57	2.33

この各測定点における総合的な燃焼の激しさを示す代表値の算術平均について t 検定を行い、各実験について差が無いという帰無仮説を棄却できるかについて検討した。その結果を表 11 に示す。t 検定では、実験 2 と実験 5 は片側有意水準 5% において帰無仮説は棄却され、有意な差があると判断できる。実験 3 と実験 6 については、片側有意水準 5% においても帰無仮説は棄却されず、有意な差があるとはいえない。実験 3 と実験 8、実験 6 と実験 8 ついては片側有意水準 0.1% もしくは 1% において帰無仮説は棄却され、明らかに有意な差があると判断される。

表 11 t 検定結果 (Welch 法)

	実験2と実験5	実験3と実験6	実験3と実験8	実験6と実験8
t値	2.84	0.78	6.06	3.73
p値	0.01	0.44	7×10^{-06}	0.002

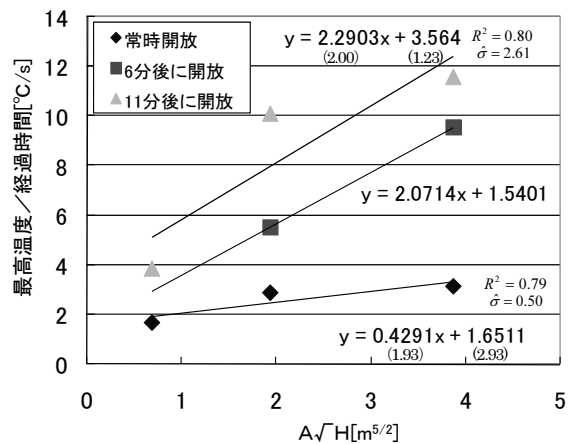
目視による観察や温度測定履歴は、実験 2 と実験 5、実験 3 と実験 6 は比較的似た様な燃焼性状を示したものの、その他は明らかに違う印象をうけたことから、本結果とも概ね一致している。グラフ 42、43 に、「最高温度／経過時間」（総合的な燃焼の激しさを示す代表値）を示す。グラフ 42、43 より、酸欠燃焼後に開口部を開放する場合は、掃き出し窓を開放したときがその後の室内は最もよく燃え、これと比較すると若干劣るものの片開きドアを開放した場合もよく燃える。しかし腰高窓を開放する場合は前者と比較し明らかにその後の燃焼が緩慢であると言える。



グラフ 42 6分で開放 グラフ 43 11分で開放

4 開口因子による整理

最後に、今まで述べてきた各実験結果について、最高温度から導く総合的な燃焼の激しさを示す代表値を開口因子 ($A\sqrt{H}$: A は開口面積、H は開口高さ) で整理し、開口部開放時間ごとの最小自乗法による単回帰分析結果と共にまとめると、グラフ 44 の様に示すことができる。



グラフ 44 開口因子による整理

5 おわりに

この検証では、ある程度の高温を維持した酸欠燃焼時の火災室について、開口部開放後の燃焼性状の変化を調査した。

実験の結果、以下の現象を確認した。

- ・同じ開口部であれば、始めから開口部を開放していた時の燃焼と比較し、酸欠燃焼後に開口部を開放した方が、また酸欠燃焼時間が長いほうが、その後の燃焼は激しかった。
- ・酸欠燃焼後に開放する開口部は、大きいほどその後の燃焼が激しかった。
- ・高温を維持した火災室内で、ある程度以上酸欠燃焼時間が長く、開放する開口部が大きいと、通常の開放後の燃焼に先行して小規模な爆発的燃焼が発生することもあった。

これらの結果より、消防隊は、開口部開放後の劇的な燃焼促進に注意するとともに、早期の火災対応と、開口部を小さく開放することで、より安全に活動できる可能性が推察された。特に、掃き出し窓、片開きドアの開放と比較し、腰高窓を開放する場合は前者より明らかにその後の燃焼が緩慢であると言える。また、本検証にて再現した、開口部開放後に劇的な燃焼促進を示すような酸欠燃焼を伴う火災現場では、火災室の外部においても一酸化炭素の濃度が極端に上昇している可能性があり、事前に察知できる可能性があることを確認した。