

屋外からの水力換気が実施可能な資器材効果の検証及び有効な使用方法についての考察

札幌市消防局（北海道） 清水 洋幸

1 はじめに

水力換気とは、換気方法の一つであり、室内から屋外へ放水することにより、室内の空気を放水による水流で巻き込むことで強制的に排出し、放水とは別に吸気となる開口部から外気を吸気するものである。

水力換気は排煙・排熱に有効であるが、室内から屋外への放水を必要とすることから、内部進入が前提となっており、火点室が高温で内部進入することが難しい場面では実施することが困難であった。

このような現状の中、内部進入することなく屋外から水力換気を実施することができる「水力換気ノズル COBRA」（以下「水力換気ノズル」という。）を、海外の製品を参考として当局及び資器材製作メーカーにより、共同開発した(図1)。

水力換気ノズルは、内部進入することなく屋外から任意の開口部に設定し、室内から屋外への放水を可能とする形状となっている。

また、水力換気ノズルには、屋外方向へ放水して空気を巻き込むことで強制排気する「主ノズル」に加え、室内方向へ放水して水の気化熱で室内を冷却することにより火勢拡大を抑制する「抑制ノズル」が装備されている(図2)。

この新たな資器材である水力換気ノズルを有効に活用するためには、その基本的な性能を把握していく必要がある。

そこで、水力換気ノズルの基本的な効果を検証し、有効な使用方法について考察することとした。

2 検証項目

水力換気ノズルの基本的な効果を確認するため、以下の検証を実施した。

(1) 検証1（開口部の位置及び数の違いによる換気効果の比較）

本検証では、同一階に設定された開口部の位置及び数(1～3箇所)が換気量に及ぼす影響について把握するため、換気効果の指標として各吸気口で風速を計測し、計測した風速の平均値及び吸気口の面積から換気量(吸気量)を算出することとした。

なお、排気量については、主ノズルからの放水の影響下で測定することが困難であるため、吸気量と同量であると仮定した。

(2) 検証2 (吸気口と排気口の階層が異なる場合の換気効果の比較)

建物の構造によっては、吸気口と排気口を同一階に設定することができない状況も考えられる。

本検証では、水力換気ノズルを設定した排気口と吸気口の階層が異なる場合を想定し、換気効果の指標として吸気口及び1・2階接続部の風速を計測し、計測した風速の平均値及び吸気口の面積から換気量(吸気量)を算出することとした。

(3) 検証3 (室内温度変化の比較)

水力換気ノズルは、主ノズルからの放水による換気に加え、抑制ノズルからの放水による室内冷却効果が期待できるものである。

本検証では、水力換気ノズル使用時の室内温度変化を検証するため、室内の環境温度を計測することとした。

3 検証概要及び結果

(1) 検証1 (開口部の位置及び数の違いによる換気効果の比較)

ア 検証概要

使用した訓練施設及び検証の設定状況等を図3～図9及び表1に示す。

開口部の位置及び数が換気量に及ぼす影響について検証するため、訓練施設の1階開口部X(1.11m²)に水力換気ノズルを設定し、各開口部の中心部で風速を計測し、吸気量を算出した。

水力換気ノズルについては①「主ノズル単独」で放水した場合と、②「主ノズルと抑制ノズルを併用」で放水した場合の2通りで各1分間放水した。なお、水力換気ノズルの設定位置と放水角度を毎回同じとなるように設定した。

吸気口については1.60 m²の1階各開口部を使用し、【開口部1箇所】、【開口部2箇所】及び【開口部3箇所】とした。

また、参考としてスモークマシンの煙を室内に充満させ、煙の排煙状況を確認した。

イ 検証結果

検証結果について表2及び表3に示す。

開口部の位置の違いについては、開口部が1箇所の場合は、排気口から最も遠くに位置する開口部Cの吸気量が最大となった。

開口部の数の違いについては、複数開口部の場合でも各開口部が全て吸気となることを確認した。開口部を1箇所とした場合と比較し、開口部を2箇所、3箇所と増やすことで各開口部の吸気量は減少した。

ウ 考察

開口部の位置の違いに着目した場合(条件1)、抑制ノズルの使用の有無に関わらず、排気口からの距離が離れるほど(排気口から近い順に、開口部B、開口部A、開口部C)吸気量が增大した(表2及び表3)。使用した風速計の精度は±0.2 m/sであり、各開口部(A～C)の面積から換気量に換算すると±0.32 m³/sである。風速計の精度の絶対値の差が0.64 m³/sであるため、各開口部(A～C)の吸気量の差は、誤差以上の差であると言える。このことから、排気口と吸気口の距離を離すことで吸気量が大きくなると考えられる。

開口部の数に着目した場合(条件2及び条件3)は、複数開口部の場合でも各開口部が全て吸気となることを確認した。開口部単独(条件1)と複数開口部(条件2及び条件3)を比較すると、表2及び表3中で複数開口部の各開口部の吸気量は、一部を除き開口部単独より0.64 m³/s(風速計の精度の絶対値の差)以上減少することから、開口部を増やすことで各開口部での吸気量は減少する。また、建物全体での吸気量を考えると、開口部Cと複数開口部の合算吸気量を比較すると、複数開口部の合算吸気量の方が大きい傾向にある。しかし、風速計の誤差(条件3で最大0.96 m³/s)を考慮すると、開口部の数が1～3箇所の場合による建物全体での吸気量に明確な差はないと考えられる。

抑制ノズル使用の有無については、各開口部の吸気量を表2及び表3とで比較して、 $0.64\text{ m}^3/\text{s}$ 以上の差がある結果とそうではない結果が見られることから、抑制ノズル使用の有無は吸気量に影響しない。

また、参考として室内にスモークマシンの煙を充満させ、視界1m程度となった状況で水力換気を実施した。吸気口を開口部C単独、開口部2箇所(開口部A及び開口部C)及び開口部3箇所とした3つについて排煙状況を比較したところ、各開口部から排気口を見通せるまでに視界が改善される時間に大きな差は確認できなかった。しかし、水力換気ノズルによる換気を実施直後、吸気量が大きな開口部C単独時の方が、即時に開口部C周辺の視界が改善されていくことが確認できた。このことから、早期に吸気口付近の視界を確保する場合は、吸気量(風速)が大きくなるように吸気口単独とすると効果が高くなると考えられる。

エ 結論

開口部の位置については、排気口と吸気口の距離を離すことで吸気量が大きくなる。開口部の数については、建物全体での吸気量に開口部の数による明確な差はないが、複数開口部とすることで各開口部での吸気量は減少するため、早期に吸気口付近の視界を確保する場合は、吸気口を単独とすると効果が高い。

(2) 検証2 (吸気口と排気口の階層が異なる場合の換気効果の比較)

ア 検証概要

設定条件について表4に示す。

吸気口と排気口の階層が異なる場合の吸気量を検証するため、訓練施設の1階開口部X及び2階開口部Yに水力換気ノズルを設定し、各吸気口及び屋内階段開口部(1・2階を繋ぐ開口部、幅 1.20 m ×奥行 1.00 m ： 1.20 m^2)の中心部で風速を計測し、吸気量を算出した。

水力換気ノズルについては①「主ノズル単独」で放水したものと、②「主ノズルと抑制ノズルを併用」した場合の2通りで各1分間放水した。なお、設定位置と放水角度を毎回同じとなるように設定し、2階を排気口とした検証では①「主ノズル単独」のみの検証とした。

吸気口については 1.60 m^2 及び 1.11 m^2 の各開口部を使用し、1階

を排気【開口部X】とした際は、【開口部Y】、【開口部D】及び【開口部E】とし、2階を排気【開口部Y】とした際は、【開口部X】、【開口部A】、【開口部B】及び【開口部C】とした。

イ 検証結果

検証結果について表5及び表6に示す。

1階開口部Xを排気とした場合、主ノズル単独時については2階開口部D、主ノズル及び抑制ノズルを併用した場合には2階開口部Yを吸気とした場合に吸気量が最大となった。

2階開口部Yを排気とした場合、1階開口部Cを吸気とした場合に吸気量が最大となった。

ウ 考察

1階を排気(開口部X)とし2階を吸気とした場合は、主ノズル単独時については、表5(条件1～3)をみると各吸気口の値に $0.64\text{ m}^3/\text{s}$ (風速計の精度の絶対値の差)以上の大きな差はみられない。主ノズル及び抑制ノズルを併用した場合には、表6(条件1～3)をみると開口部Yと他の吸気口に $0.64\text{ m}^3/\text{s}$ 以上大きな差がみられるが、抑制ノズルの有無について表5及び表6に $0.64\text{ m}^3/\text{s}$ 以上の明確な差は確認できないことから、1階を排気とし2階を吸気とする場合については、抑制ノズル使用の有無は吸気量に影響しないと考えられる。

これらのことから、1階を排気とし2階を吸気とした場合は、吸気口が単一で窓及びドア程度の開口部であれば、抑制ノズルの有無に関わらず吸気効果があるといえる。

2階を排気(開口部Y)とし1階を吸気とした場合は、表5(条件4～7)をみると各吸気口の値に $0.64\text{ m}^3/\text{s}$ 以上の大きな差はみられないことから、吸気口が単一で窓及びドア程度の開口部であれば、吸気効果があるといえる。

また、表5中の屋内階段開口部で計測した値をみると、2階から1階へ吸気した条件1～3よりも、1階から2階へ吸気した条件4～7の方が平均吸気量が大きい値となっている。また、表5中の各吸気口の値をみると、1階排気(条件1～3)と2階排気(条件4～7)に大きな差はな

い。これらのことから、水力換気ノズルの設定階の違いによる吸気量の差はないが、室内の階段等の開口部付近での気流は、下階排気で上から引き込むよりも、上階排気で下から引き込む方が速いと考えられる。

エ 結論

排気口と吸気口で階層が異なる場合でも、水力換気ノズルの使用で吸気効果がある。また、水力換気ノズルの設定階の違いによる吸気量の差はないが、室内の階段等の開口部付近での気流は、下階排気で上から引き込むよりも、上階排気で下から引き込む方が速い。

(3) 検証3 (室内温度変化の比較)

ア 検証概要

使用した実験室及び検証の設定状況等を図10～図14及び表7に示す。水力換気ノズル使用時の室内温度変化を検証するため、実験室内中央で組み上げた木材(50kg：幅0.80m×奥行0.80m×高さ0.80m)を燃やし、高温下(約400℃)での換気及び冷却放水による室内の温度変化を熱電対により計測した。実験室南側ドア(高さ1.80m×幅0.90m)を窓とみなし、耐火ボードで大きさを調整(高さ0.90m×幅0.90m:0.81㎡)して水力換気ノズルを設定(排気口)し、吸気口については北側ドア(高さ1.80m×幅0.90m)とした。

水力換気ノズルについては①「主ノズル単独」で放水したものと、②「主ノズルと抑制ノズルを併用」で放水した場合の2通りで各1分間放水し、室内(吸気側高所：床面から2.00m、吸気側低所：床面から0.30m)の温度変化を計測した。なお、抑制ノズルによる放水位置については、直接及び反射の水が燃焼している木材及び温度を計測する熱電対にかからない天井の位置とした。

イ 検証結果

検証結果を表8及び図15に示す。

主ノズルを単独で使用した場合は緩やかに室内の温度が低下し、1分間の計測で2.00mの高さで95℃の温度低下、0.30mの高さで90℃の温度低下が認められた。主ノズルと抑制ノズルを併用して使用した場合には、1分間の計測で2.00mの高さで184℃の温度低下、

0.30mの高さで6.6℃の温度低下が認められた。

ウ 考察

主ノズル単独での室内温度変化については、屋外方向への放水により、放水が室内の気体を巻き込むことによって強制的に排気され、排気された分の空気(外気)を吸気口から取り込むことにより換気が成立し、2.00m及び0.30mで徐々に温度が低下したものと考えられる。

主ノズルと抑制ノズルを併用した場合の室内温度変化については、高さ2.00mでは、主ノズルの換気効果に加えて、抑制ノズルによる室内への放水により、天井付近の高温気体や天井及び壁が冷却され、主ノズル単独と比較し大きく温度が低下したものと考えられる。

高さ0.30mでは、主ノズル単独時と比較し、放水前後の温度差が小さい結果となったことから、放水による冷却効果の影響は認められず、主ノズルによる換気効果のみでの温度低下と考えられる。これは抑制ノズルを使用したことにより、実験室の内部でも放水による新たな気流が生じたことで、高さ0.30mの計測点付近の気流に変化があり、換気効果に変化があったと考えられる。前3(1)及び(2)の検証結果で、抑制ノズルの使用の有無による吸気量の変化はないと述べたが、吸気量への影響はないが、抑制ノズルからの放水により発生する気流に起因する、煙や熱の移動が考えられることから、内部環境の変化には注意が必要である。

なお、本検証では抑制ノズルの放水が燃焼した木材に水がかからない設定としたが、実際の火災時には燃焼実態に直接または反射等で間接的に注水することが可能なため、より温度を低下できるものと考えられる。

また、水力換気ノズルを使用することで、抑制ノズルの使用の有無に関わらず、室内温度を低下させる効果が認められたことから、フラッシュオーバーの抑制にも一定の効果があると考えられる。

エ 結論

水力換気ノズルの使用について室内温度変化という観点でみると、室内が約400℃程度の環境下においては、主ノズル単独時は換気効果により室内温度が低下し、主ノズルと抑制ノズルを併用することで、抑制ノズルによる注水箇所付近をより冷却することができる。

また、抑制ノズルの使用の有無に関わらず、室内温度を低下させる効果があるため、フラッシュオーバーの抑制にも一定の効果がある。さらに、その効果は抑制ノズルを使用することで高めることができる。

4 水力換気ノズルの有効な使用方法の考察

前3を踏まえて、訓練施設と同規模である延べ面積約150㎡以下の一般住宅等の建物火災時における、水力換気ノズルの使用について考察していく。

前提として、水力換気ノズルは換気を主とした資器材であることから、新鮮な空気(酸素)が室内に流入することを考慮したうえで、水力換気ノズルによる排煙・排熱を行いつつ吸気側から内部進入し、水力換気ノズルとは別の筒先により、早期に燃焼実態に注水を行うことが必要となる。

水力換気ノズルの設定箇所については効果を高めること及び設定の容易さから、火点室の開口部を優先して設定し、統制を迅速に行うこと及び早期に吸気口付近の視界を確保することを考慮して、開放する吸気口は1箇所とする。なお、この際に開放する吸気口は建物の気密性が保たれている場合、排気口から離れているほど吸気効果が高まることから、内部進入及び活動に支障のない範囲で遠くに設定すると最大の効果を得ることができる。吸気効果を高め、視界及び熱気を早期に改善することで、要救助者の検索・救出や燃焼実態への注水を安全・迅速に行うことができると考えられる。また、1つの吸気口からの消火が困難な場合等には、吸気口で空気の吸い込みを認識できる範囲で複数箇所開放し、複数箇所からの内部進入及び注水も可能である。

放水方法については、抑制ノズルを併用することで、抑制ノズルによる注水箇所付近の高温層(箇所)を早期に冷却することができ、フラッシュオーバーの発生を抑制しつつ早期に内部進入が可能となる。また、主ノズル単独でも換気効果による火点室内の排煙・排熱を行えるため、状況により抑制ノズルの有無を使い分けることで、効率的に活動することができる。

以上のことを考慮しながら水力換気ノズルを状況に応じて使用することにより、火勢拡大を抑えつつ吸気側から内部進入し、早期に人命救助及び消火活動を従前より安全・迅速に行うことが可能となる。

5 おわりに

水力換気ノズルは新たな資器材であるため、今後使用していくうえで様々な課題が見えてくる可能性がある。しかし、それ以上に有効な資器材としてのポテンシャルを確認できた。水力換気ノズルを活用した安全・迅速な活動が、少しでも多くの市民の生命及び財産を守ることに繋がれば幸いである。



図1 水力換気ノズル



図2 水力換気ノズル先端部

※T字部分左側が「主ノズル」、右側が「抑制ノズル」



図3 訓練施設 (南西面)



図4 訓練施設 (南面)

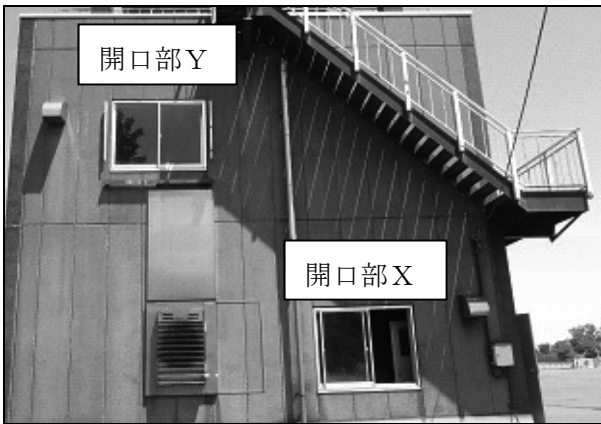


図5 訓練施設 (西面)

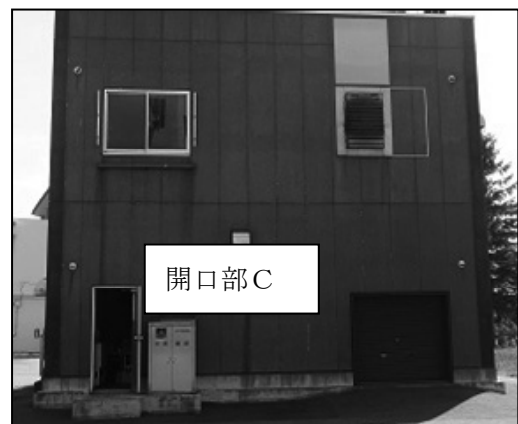


図6 訓練施設 (北面)

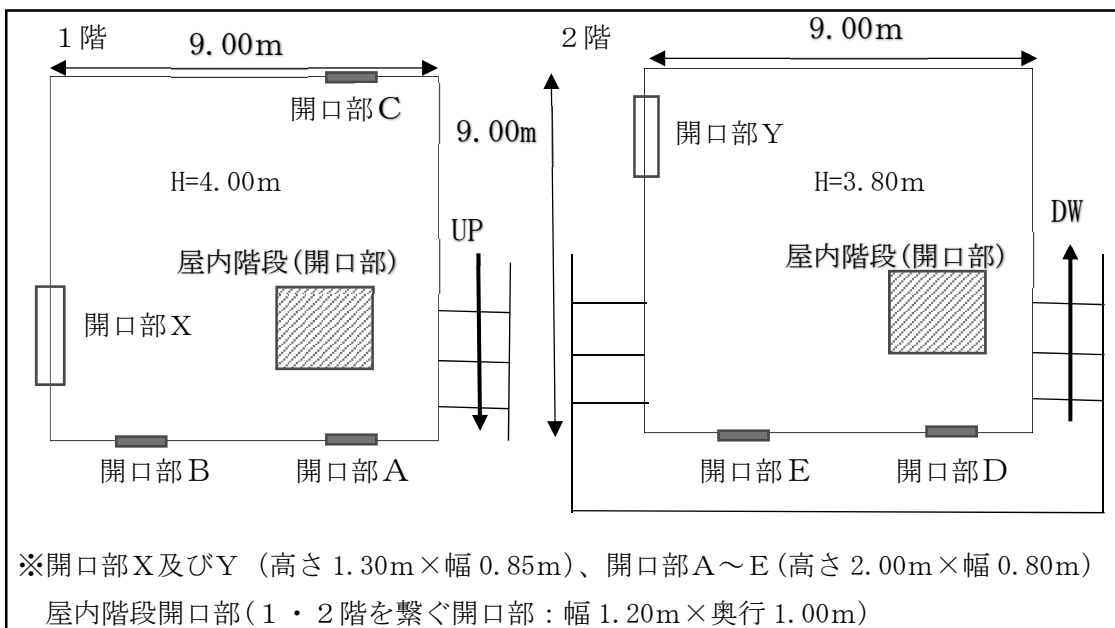


図7 訓練施設 (平面図:1階及び2階)



図8 開口部Xに設定した水力換気ノズル

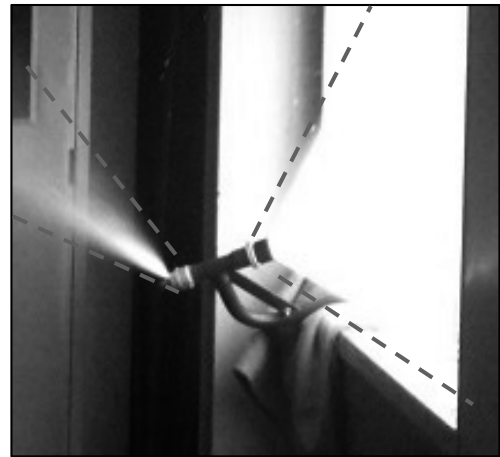


図9 放水状況(室内)

表1 検証1 設定条件 (開口部の位置及び数の違いによる換気効果の比較)

放水量 ①主ノズル単独 ②主ノズル+抑制ノズル	主ノズル 340L/min 主ノズル 340L/min : 抑制ノズル 80.0L/min
放水角度	放水が窓を通過時、概ね窓を包含する角度
水力換気ノズル設定箇所(排気口)	1階開口部X (1.11 m ²)
開口部の開放(開口部A~C)	条件1 : 開口部1箇所 (1.60 m ²) 条件2 : 開口部2箇所 (計 3.20 m ²) 条件3 : 開口部3箇所 (計 4.80 m ²)

表2 検証1 吸気量(換気量)算出結果①(主ノズル単独)

条件	組み合わせ	平均吸気量(m ³ /s)			合算吸気量 (m ³ /s)
		開口部A	開口部B	開口部C	
条件1	それぞれ単独	3.36	2.41	4.19	
条件2	A+B	1.80	1.98		3.78
	A+C	2.69		2.27	4.96
	B+C		2.54	2.37	4.91
条件3	A+B+C	2.29	1.12	1.26	4.67

※平均吸気量=計測した風速(平均値)×各開口部の面積

※合算吸気量=各開口部の平均吸気量の総和

※網掛けは条件ごとの最大値(平均吸気量又は合算吸気量)

表3 検証1 吸気量(換気量)算出結果②(主ノズル+抑制ノズル)

条件	組み合わせ	平均吸気量(m ³ /s)			合算吸気量 (m ³ /s)
		開口部A	開口部B	開口部C	
条件1	それぞれ単独	3.10	2.54	4.64	
条件2	A+B	2.30	2.02		4.32
	A+C	2.72		1.98	4.70
	B+C		2.67	2.62	5.29
条件3	A+B+C	2.22	1.79	2.27	6.28

※網掛けは条件ごとの最大値(平均吸気量又は合算吸気量)

表4 検証2 設定条件(吸気口と排気口の階層が異なる場合の換気効果の比較)

放水量 ①主ノズル単独 ②主ノズル+抑制ノズル	主ノズル 340L/min 主ノズル 340L/min : 抑制ノズル 80.0L/min
放水角度	放水が窓を通過時、概ね窓を包含する角度
水力換気ノズル設定箇所(排気口)	1階開口部X及び2階開口部Y
排気【開口部X】 (1階排気、2階吸気)	吸気 条件1 : 開口部Y 条件2 : 開口部D 条件3 : 開口部E
排気【開口部Y】 (2階排気、1階吸気)	吸気 条件4 : 開口部X 条件5 : 開口部A 条件6 : 開口部B 条件7 : 開口部C

表5 検証2 吸気量(換気量)算出結果①(主ノズル単独)

排気口	吸気口	平均吸気量(m ³ /s)	
		各吸気口	屋内階段開口部
1階排気 (開口部X)	条件1 : 開口部Y	2.81	1.80
	条件2 : 開口部D	2.85	2.08
	条件3 : 開口部E	2.59	1.93
2階排気 (開口部Y)	条件4 : 開口部X	2.62	3.00
	条件5 : 開口部A	2.58	3.17
	条件6 : 開口部B	2.66	3.24
	条件7 : 開口部C	2.94	3.08

※網掛けは排気口ごとの最大値

表6 検証2 吸気量(換気量)算出結果②(主ノズル+抑制ノズル)

排気口	吸気口	平均吸気量 (m ³ /s)	
		各吸気口	屋内階段開口部
1階排気 (開口部X)	条件1: 開口部Y	3.30	1.78
	条件2: 開口部D	2.34	1.72
	条件3: 開口部E	2.51	1.96

※網掛けは排気口ごとの最大値



図10 実験室(南西面)

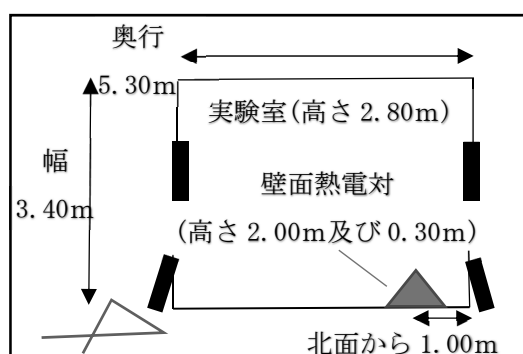


図11 検証図(平面図)



図12 検証3 状況図①

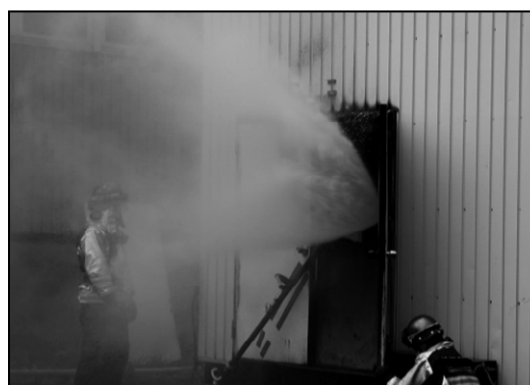


図13 検証3 状況図②



図14 検証3 状況図③(▲の箇所内部の温度を計測)

表 7 検証 3 設定条件(室内温度変化の比較)

放水量 ①主ノズル単独 ②主ノズル+抑制ノズル	主ノズル 340L/min 主ノズル 340L/min : 抑制ノズル 80.0L/min
放水角度	放水が排気口を通過時、概ね排気口を包含する角度
南面排気口※耐火ボードで調整 北面吸気口	高さ 0.90m×幅 0.90m : 0.81 m ² 高さ 1.80m×幅 0.90m : 1.62 m ²
可燃物	木材(50kg : 高さ 0.80m×幅 0.80m×奥行 0.80m)
温度計測(熱電対)	北面から 1.00m、高さ 2.00m及び 0.30mの東側内壁に設定
実験開始温度	400℃(熱電対で計測)

表 8 検証 3 実験結果

	計測箇所	放水開始 温度(A) 【0秒】	放水停止 温度(B) 【60秒】	温度差 (A-B)
①主ノズル単独	吸気上①	405℃	310℃	95℃
	吸気下①	207℃	117℃	90℃
②主ノズル+抑制ノズル	吸気上②	401℃	217℃	184℃
	吸気下②	219℃	153℃	66℃

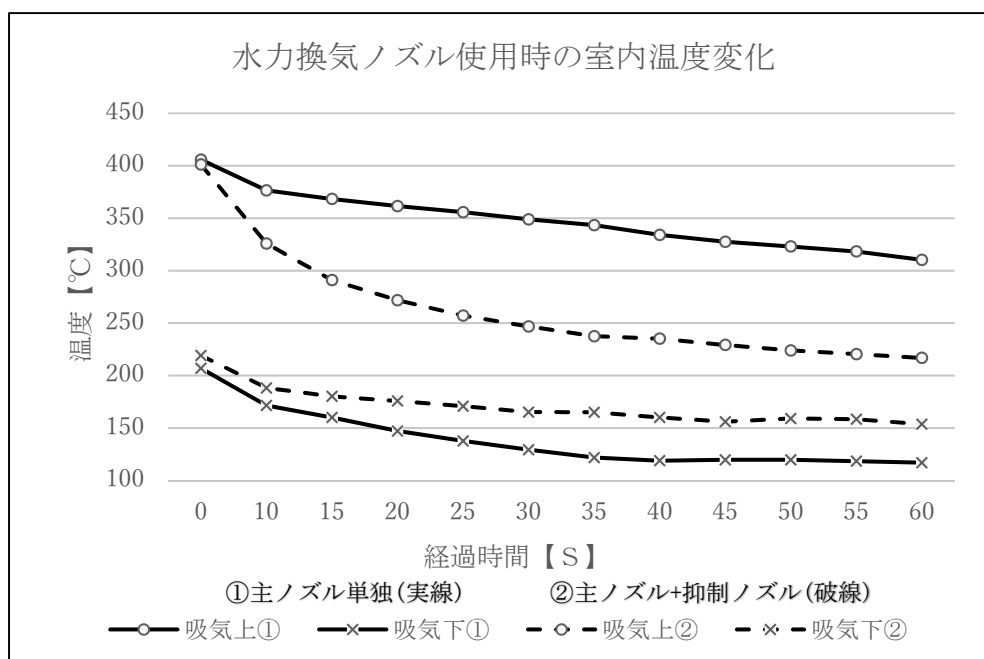


図 1 5 検証 3 実験結果(グラフ)