

洞道等の地下構造物の煙流動に関する研究 (第3報)

坂本 利行*, 吉村 延雄*, 杉田 直樹**, 赤坂 浩*

概 要

本研究は、洞道等の地下構造物内で発生する火災において、消防活動上の障害要因となる濃煙・熱気等を効率的に排除して消防活動環境を改善するための方策について検討することを目的としており、第1報¹⁾第2報²⁾では小型洞道模型を使った機械換気による排煙効果について報告した。そして、本報では、洞道を想定した実大規模の実験を実施し、噴霧放水と機械換気を併用した場合の条件等の違いによる影響を把握した。

1 はじめに

洞道や共同溝における代表的な火災は、昭和59年11月に東京都世田谷区の洞道内で発生した通信ケーブル火災であり、119番回線を含む電話回線が広範囲にわたり使用不能となった。近年においても東京消防庁管内での洞道等における火災は毎年数件発生し、過去5年間ににおける洞道等の火災件数は表1のとおりである。

本研究は、洞道等の地下構造物内に発生する火災の研究であり、これに関しては第1報¹⁾において、縦0.3m、横0.3m、長さ4.0mの小型洞道模型で実験を行った結果、最も効率的な換気方法は、送気排気の両側で等しい風速による機械換気であった。また、第2報²⁾において、洞道が屈折や傾斜している場合を想定した、より現実に近いモデルを用い、データを収集した。

そこで、本報は、洞道を想定した実大規模構造物を用いて、洞道内の濃煙・熱気について機械による強制換気、放水器具による噴霧放水、及び両者の組合せによる排煙・排熱効果を測定し、効果的な排熱・排煙要領を検討することを目的としたものである。

まず、実験1では、送気量および排気量が噴霧放水時に生じる送風量³⁾(以下、「噴霧送風量」という。)より小さい場合を想定し、火災による濃煙・熱気から効果的な排熱・排煙の検討を行った。

また、実験2では、送気量が噴霧送風量より大きい場

表1 過去5年間の洞道等の火災件数

年	6	7	8	9	10	合計
件数	2	2	2	4	1	11

表2 クリブの概要

内 容	
火 源	クリブ材質:スギ クリブ寸法:0.045(W)×0.035(H)×0.9(D)m 火災荷重:120kg クリブ井桁寸法:0.9(W)×0.9(D)×0.7(H)m

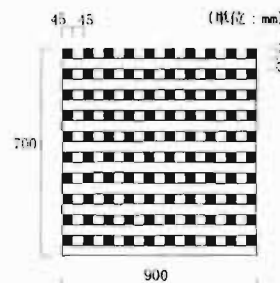


図1 クリブ側面図

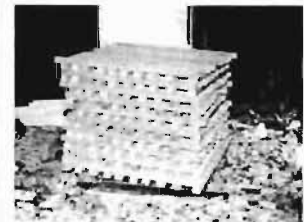


写真1 クリブ

*第一研究室 **青梅消防署

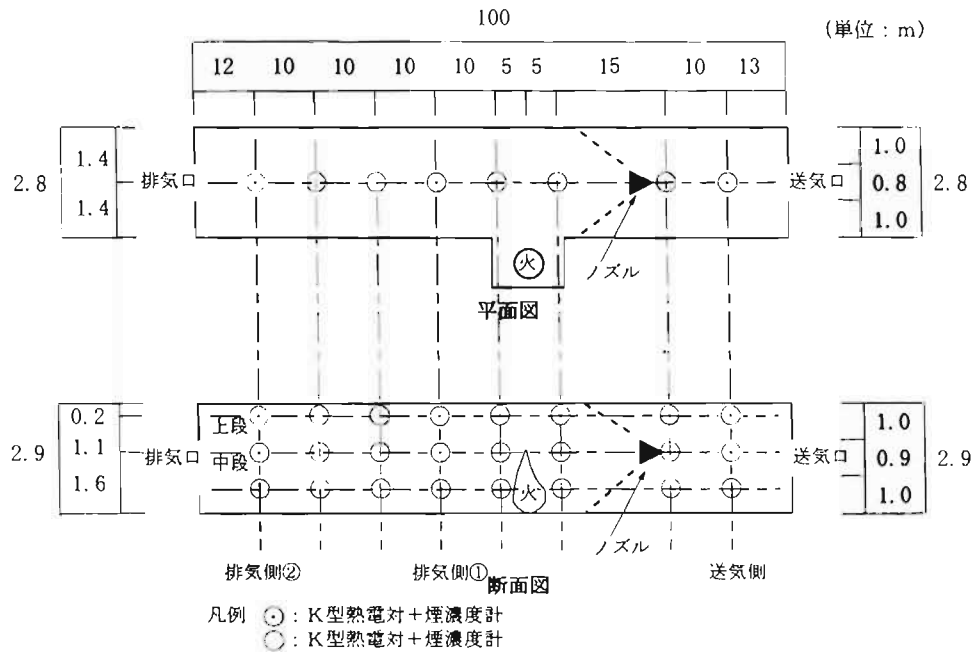


図2 想定した洞道の概要

合を想定し、火災による濃煙・熱気から効果的な排熱・排煙の検討を行った。

2 実験1：送風機による送気量および排気量が噴霧送風量より小さい場合

(1) 実験概要

本実験は、洞道を想定した実大規模構造物内に設置した火源であるクリブに点火し、熱気、煙の効果的な排除方策を得るために、噴霧放水と併せ、開口部から噴霧送風量より小さい風量の機械換気(送気、排気)と自然換気(送気、排気)の組合せ条件を変えて行い、この時の温度測定および煙濃度測定を実施した。

(2) 実験方法

ア 実験施設及び使用機器等

(7) 想定した洞道

想定した洞道は、東京消防庁第7方面訓練場に設置されている濃煙熱気訓練施設を用いて行った。実験は、図2に示すようにコンクリート造の縦2.9m、横2.8m、長さ100mの直線状の空間部分を使用した。

7) 送気口

送気口として、図2の送気側の位置に縦0.9m、横0.8mの大きさの開口部を設けた。

イ) 排気口

排気口として、図2の排気側の位置に縦0.9m、横0.8mの大きさの開口部を設けた。

イ) 火源

火源として使用したクリブは、図1、写真1のスキの角材を段ごとに10本を均等間隔に並べて交互に20段の井桁に組み、幅0.9m、奥行0.9m、高さ0.7mとした。クリブは、表2に示すように縦0.035m、横0.045mの長方

表3 放水形態

	内 容
使用ノズル	軽量ノズル
展開角度	60度
放水圧力	0.6MPa(6kgf/cm ²)
放水位置	火点から20m、高さ1.4m

表4 送風機の概要

	内 容
送風機名	ジェットスイファン1
羽根径	290mm
出力	0.4kW
風量	60m ³ /min

表5 実験要因と種別

実験要因	実 験 種 別
送 気	自然送気のみ、機械(120m ³ /min)と自然送気
排 気	自然排気のみ、機械(120m ³ /min)と自然排気

形で長さ0.9mのスキの角材を用い、火災荷重は120kgである。

(ウ) 放水器具

放水器具として使用したノズルは表3に示した軽量ノズルで、展開角度60度、筒先圧力0.6MPa(6kgf/cm²)とし、火源から20mの位置に設定した。

(エ) 送風機

送風機は、表4に示したように(株)スイデン製のジェットスイファン1を用いた。規格は、羽根径290mm、出力0.4kw、風量60m³/minであり、送気口及び排気口に各2台設置し、120m³/minの送気及び排気が行えるようにした。

イ 実験要因と種別

実験要因は、洞道等の火災の消防活動を想定し、表 5 に示す送気と排気とした。また、各実験要因に対する種別は、同表 5 のとおり、送気は自然送気、機械送気 (120 m³/min) と自然送気の 2 種類とし、排気は自然排気、機械排気 (120 m³/min) と自然排気の 2 種類とした。

ウ 実験条件

実験条件は、表 6 に示した 4 種類であった。

エ 測定項目

測定は、図 2 の 8 箇所 24 点の温度及び煙濃度について実施したが、ここでの測定項目としては、表 7 のとおり、図 2 の○印で示した送気付近上段、送風付近中段、排気側①上段、排気側①中段、排気側②上段、排気側②中段の 6 点とした。各測定位置について、送気付近は火源から送気側に 30m、排気側①は火源から排気側に 15m、排気側②は火源から排気側に 45m の位置で、また、上段とは床面から 2.7m の高さ、中段とは床面から 1.6m の高さである。

オ 測定機器等

温度は K 型熱電対を用い、煙は煙濃度計を用い TEAC DL-9060 のデータ切替器を介して、日本電気(株)PC-9801N パーソナルコンピューターにデータを収納した。

(7) 温度測定器

熱電対は、表 8 に示すように JIS C 1602 規格品で素線径が 0.65mm の K 型熱電対を用いた。K 型熱電対の測定精度は、±1.5℃または±0.4%である。

(i) 煙濃度測定器

煙濃度は、減光法による煙濃度の測定方法 (JIS A 1306) に準じて測定し、煙濃度計の光源および受光部は、表 9 の減光法による煙濃度の測定方法 (JIS A 1306) に準じたものを使用した。

(3) 実験

実験は、図 3 のように、まず、クリブに点火する 1 分前に温度及び煙濃度の測定を開始し、クリブ点火から 8 分後に、噴霧放水するとともに、各実験条件に応じて送気口の送風機や排気口の送風機を始動した。その後、5 分間の測定を継続した後、更に 1 分間の放水、送気及び排気を行った。

(4) 実験結果

実験開始時、放水開始時、放水開始 5 分後の各実験における温度測定結果を表 10 に示した。また、図 4 から

図 9 までの温度の経時変化については、放水開始時を 0 分とした。

なお、煙濃度測定については、送水開始までの熱と

表 6 実験条件

実験No.	実験条件	
	送気	排気
実験1-1	自然送気のみ	自然排気のみ
実験1-2	自然送気のみ	機械(120m ³ /min)と自然排気
実験1-3	機械(120m ³ /min)と自然送気	自然排気のみ
実験1-4	機械(120m ³ /min)と自然送気	機械(120m ³ /min)と自然排気

表 7 測定項目

測定項目
・送気側送気口付近の温度および煙濃度
・排気側火点付近の温度および煙濃度
・排気口付近の温度および煙濃度

表 8 温度測定に用いた熱電対

熱電対種別	内容
K	JIS C 1602規格品、素線径:0.65mm

表 9 煙濃度測定器

	内容
光源・受光部	減光法による煙濃度の測定方法 (JIS A 1306) に準じたもの

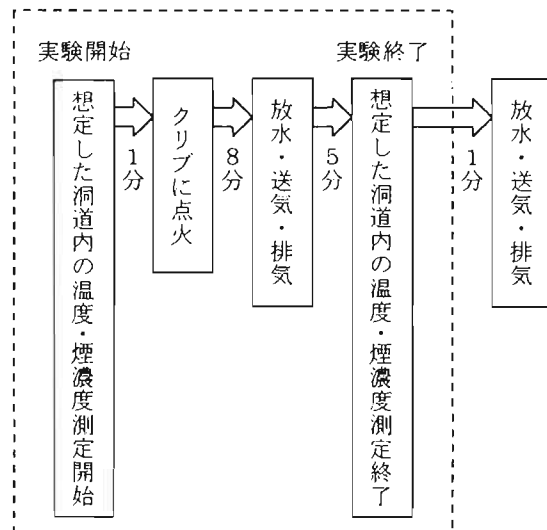


図 3 実験フロー

表 10 各測定点における温度

実験No.	実験条件		実験開始時の温度(℃)						放水開始時の温度(℃)						放水開始5分後の温度(℃)					
			送気側		排気側①		排気側②		送気側		排気側①		排気側②		送気側		排気側①		排気側②	
			上段	中段	上段	中段	上段	中段	上段	中段	上段	中段	上段	中段	上段	中段	上段	中段	上段	中段
実験1-1	自然送気のみ	自然排気のみ	16.8	15.7	15.5	16.9	15.9	12.9	56.4	31.3	103.5	32.8	29.4	14.3	11.2	10.4	128.6	29.3	39.5	18.4
実験1-2	自然送気のみ	機械(120m ³ /min)と自然排気	10.6	10.4	9.7	9.4	9.4	9.4	48.9	26.8	92.6	29.4	22.3	10.5	10.1	10.0	139.2	31.6	39.9	17.4
実験1-3	機械(120m ³ /min)と自然送気	自然排気のみ	30.0	22.0	37.6	24.1	24.6	19.3	92.1	61.2	147.4	61.0	46.0	24.5	17.6	16.7	145.6	35.6	48.2	25.0
実験1-4	機械(120m ³ /min)と自然送気	機械(120m ³ /min)と自然排気	27.1	20.5	24.4	18.2	20.4	18.1	69.4	49.9	115.0	24.9	46.9	21.2	17.1	16.6	124.3	22.2	50.0	25.0

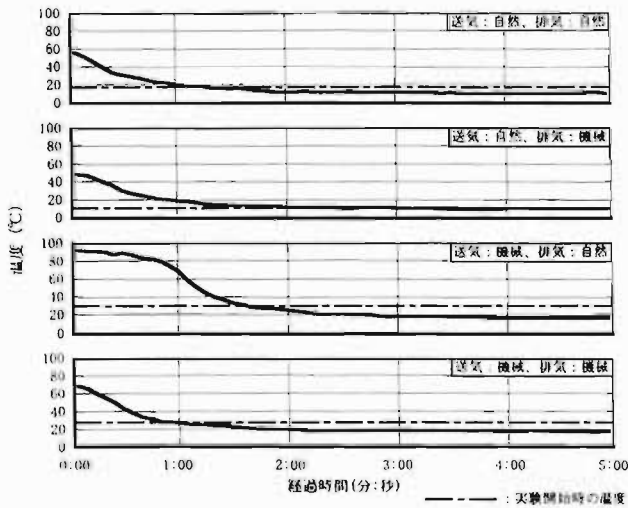


図4 送気側上段の温度変化

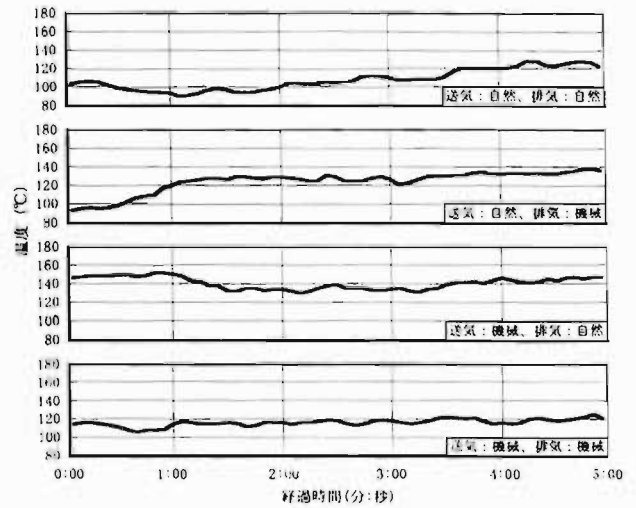


図6 排気側①上段の温度変化

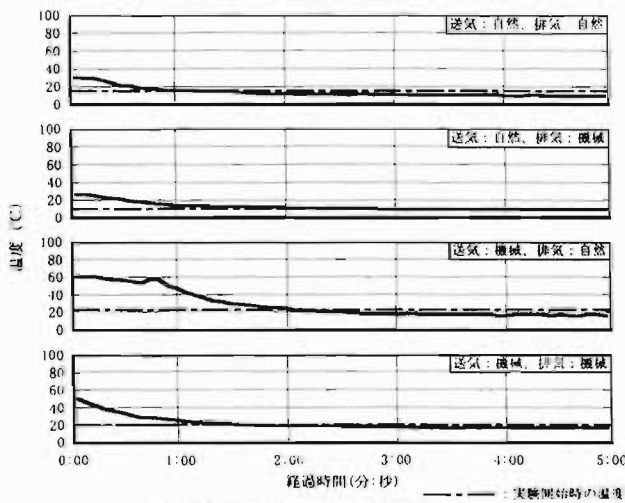


図5 送気側中段の温度変化

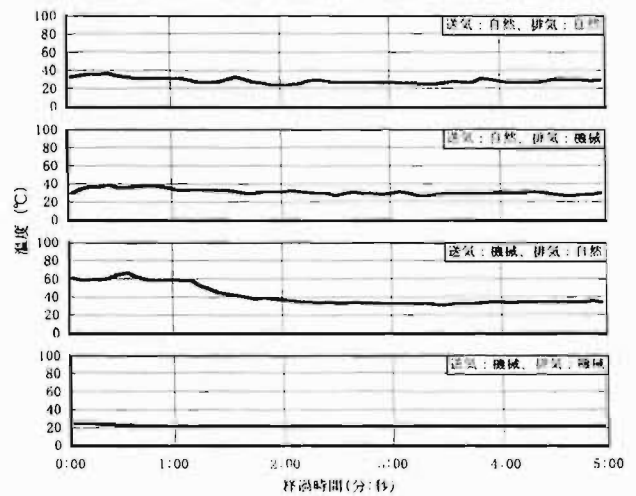


図7 排気側①中段の温度変化

煙等の影響を強く受けたことなどにより信頼でき得る結果が得られなかった。

ア 送気付近の温度測定結果

火災時に消防活動エリアとなる送気付近の温度測定結果は、表 10、図 4 及び図 5 のとおりであった。

その結果は、次のとおりである。

(7) 上段、中段ともいずれの場合も放水及び換気開始から 2 分以内に実験開始時の温度まで低下した。

(イ) 放水及び換気開始からの 2 分間の温度変化では、実験 1-3 は他の実験と比較して、最初の 1 分間の温度低下がゆるやかな傾向を示していた。

(ロ) 放水及び換気開始時の上段と中段の温度差は、各実験では表 10 のとおり、19.5℃から 30.9℃であったが、5 分後にはいずれの場合も 1℃以内となった。

以上のことから送気付近は放水及び換気開始と同時に外部から新鮮な空気が流入し、いずれの場合も濃煙熱気層が排除されたことを示し、各実験条件による大きな差異は認められなかった。

イ 排気付近の温度測定結果

火災時に排煙排熱側となる排気側の温度測定結果は、表 10 及び図 6 から図 9 のとおりであった。

その結果は、次のとおりである。

(7) 排気側①について、図 6 及び図 7 から放水及び換気開始から洞道内がほぼ定常的になったと考えられる 2 分後以降の温度変化は、実験 1-1 の上段の温度変化(図 6 中の第 1 図)を除き、若干の変動があるが上段では 110℃から 150℃、中段では 20℃から 40℃の範囲でほぼ横ばいに推移している。また、実験 1-1 の上段については 2 分以降も若干の温度上昇を示しているが、3 分 30 秒以降にはほぼ横ばいとなっている。

(イ) 排気側①の放水及び換気開始から 2 分間の温度変化では、実験 1-4 が他の実験と比較して早く、約 1 分後にはほぼ横ばいに推移するようになった。

(ロ) 排気側②の測定結果については、図 8 及び図 9 から上段では 30℃から 50℃、中段では 15℃から 25℃の範囲で約 1 分から 4 分後の間にほぼ横ばいに推移しているが、どの時点からほぼ横ばいになったかは、不明確である。これは、測定位置が放水位置から 65m、火源から 45m と

離れていたことと、放水及び換気開始時の温度が上段では 50℃以下、中段では 25℃以下であったことが主要因と考えられる。

以上のことから、実験 1-1 については機械換気を行った他の実験と比較して、機械排熱効果が緩慢となる傾向が見られたが、前アと同様、明らかな差異は認められなかった。

(5) まとめ

実験は、長さ 100m、高さ 2.9m、幅 2.8m の空間を洞道に想定し、その両端にマンホールの大きさとほぼ同等の開口部を設けて、噴霧放水と送風機による送気又は排気を併用した時の排煙排熱効果について実施したが、各実験条件による明らかな差異は見られなかった。

これは、開口部の大きさは一般のマンホールの大きさ(0.72m²)とほぼ同等としたが、開口部の間隔が 100m と短く、空間容積に対する開口面積の割合が大きかったことが強く影響し、空間内の換気がスムーズに行われたものと考えられる。したがって、本実験においては、噴霧放水により生じる送風量の一部を送風機により送気又は排気しなくても、自然換気だけで十分補えた、と考えられる。

3 実験 2 : 送気量および排気量が噴霧送風量より大きい場合

(1) 実験概要

実験 1 では、実際の消防活動を想定し、送気側の開口部を開放した状態で行ったが、本実験は、送気量による排煙排熱の影響を把握するため、開口部は設けずに送気は全て送風機によるものとし、また、排気条件は一定として実施した。その他の条件は実験 1 と同様にした。

(2) 実験方法

ア 実験実施及び使用機器等

(7) 想定した洞道

想定した洞道は、図 10 のとおり実験 1 と同じものである。

7) 送気口

送気口は設けずに、図 10 の送気側の位置に送風機の送気管が通る大きさの穴を設けた。なお、送風機を使用しない時には閉鎖できるものとした。

4) 排気口

排気口の大きさは、図 10 のとおり実験 1 と同様に、縦 0.9m、横 0.8m とした。

(4) 火源

火源として、実験 1 と同様にスギ材のクリブを使用した。

(ウ) 放水形態

放水形態は、実験 1 と同様である。

(エ) 送風機

送風機は、実験 1 と同様のものを用い、4 台又は 7 台を同時に使用できるように図 10 の送気位置に設定した。

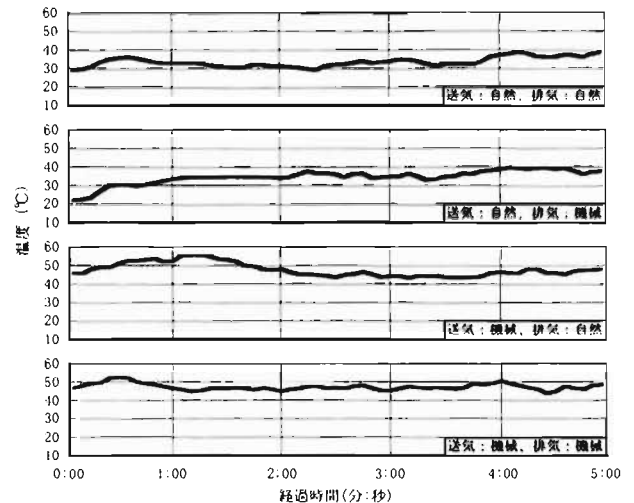


図 8 排気側②上段の温度変化

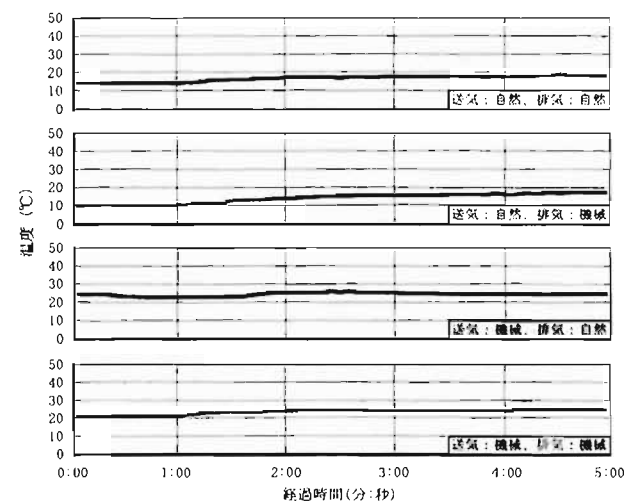


図 9 排気側②中段の温度変化

表 11 実験要因と種別

実験要因	実験種別
送気	送気ナシ、機械送気(240、420m ³ /min)

表 12 実験条件

実験No.	実験条件	
	送気	排気
実験2-1	送気ナシ	自然排気
実験2-2	機械送気(240m ³ /min)	自然排気
実験2-3	機械送気(420m ³ /min)	自然排気

表 13 測定項目

測定項目
・送気側送気口付近の温度および煙濃度、酸素濃度
・排気側火点付近の温度および煙濃度、酸素濃度

イ 実験要因と種別

実験要因は、表 11 のように送気のみとした。実験要因に対する種別は、同表に示したとおり送気ナシ、機械送気(240m³/min 及び 420 m³/min) の 3 種類とした。

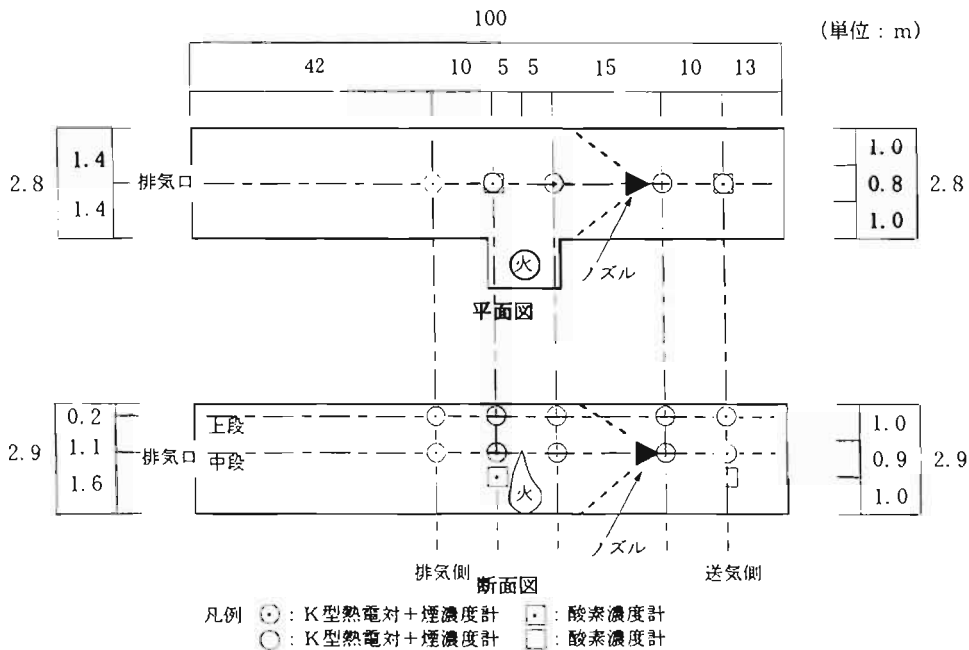


図 10 想定した洞道の概要

ウ 実験条件

実験条件は、表 12 に示したとおりであり、送気なしと自然排気、機械送気 (240m³/min) と自然排気及び機械送気 (420 m³/min) と自然排気の 3 種類であった。

エ 測定項目

測定は、図 10 の 5 箇所 12 点の温度、煙濃度及び酸素濃度について実施し、測定項目としては、表 13 のとおり、図 10 の○、□印に示す送気付近上段、送風付近中段、排気側上段、排気側中段の 4 点の温度と煙濃度と酸素濃度とした。送気付近は、火点から送気側に 40m の位置、排気側とは火点から排気側に 40m、上段は床面から 2.7m の高さ、中段は床面から 1.6m の高さである。

オ 測定機器等

温度は K 型熱電対、煙は煙濃度計、酸素濃度は光明理化学工業(株)MDU-9000 をそれぞれ使い、TEAC DL-9060 のデータ切替器を介して、日本電気(株)PC-9801N パーソナルコンピューターにデータを収納した。

(7) 温度測定器

熱電対は、実験 1 と同様種の K 型熱電対を用いた。

(4) 煙濃度測定器

煙濃度は、実験 1 と同様に、減光法による煙濃度の測

定方法(JIS A 1306)に準じたものを使用した。

(7) 酸素濃度測定器

酸素濃度は、光明理化学工業(株)MDU-9000 を用いて測定した。

(3) 実験

実験は、実験 1 と同様、図 3 のとおり行ったが、送風機による換気は送気だけとし、排気は行わなかった。

(4) 実験結果

実験開始時、放水開始時、放水開始 5 分後の各実験における温度測定結果を表 14 にした。また、図 12 から図 16 の温度及び酸素濃度の経時変化については、放水開始を 0 分とした。なお、煙濃度測定については、実験 1 と同様、信頼でき得る結果は得られなかった。

ア 送気付近の温度及び酸素濃度の測定結果

送気付近の温度及び酸素濃度の測定結果は、表 14、図 12 及び図 13 のとおりであった。なお、酸素濃度については、測定誤差の範囲と考えられたため省略した。

その結果は、次のとおりである。

(7) 実験開始時の温度より低下し、ほぼ一定になるまでの時間は、上段、中段とも送気量 0 の場合約 3 分、送気量 240m³/min の場合は 1 分 30 秒、送気量 420m³/min の

表 14 各測定点における温度

実験No.	実験条件		実験開始時の温度(°C)				放水開始時の温度(°C)				放水開始 5 分後の温度(°C)				放水開始 5 分後の酸素濃度(%)	
	送気	排気	送気側		排気側		送気側		排気側		送気側		排気側		送気側	排気側
			上段	中段	上段	中段	上段	中段	上段	中段	上段	中段	上段	中段		
実験2-1	送気なし	自然	29.2	25.8	35.5	26.1	65.7	45.2	137.4	38.3	25.0	24.9	101.7	32.6	—	16.27
実験2-2	機械送気 (240m ³ /min)	自然	31.3	25.8	55.4	28.6	60.8	46.0	126.1	49.9	24.3	24.4	97.7	30.3	—	19.51
実験2-3	機械送気 (420m ³ /min)	自然	36.9	31.7	50.9	29.0	57.8	40.9	136.8	44.4	23.0	22.7	91.6	29.0	—	20.33

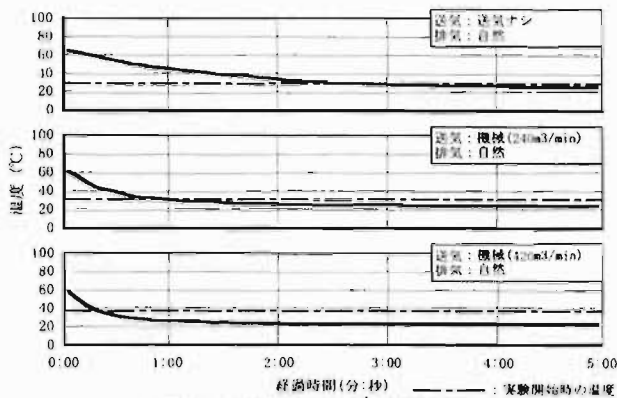


図 12 送気側上段の温度変化

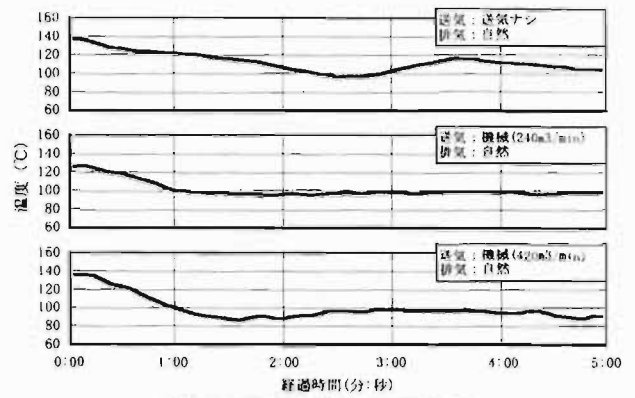


図 14 排気側上段の温度変化

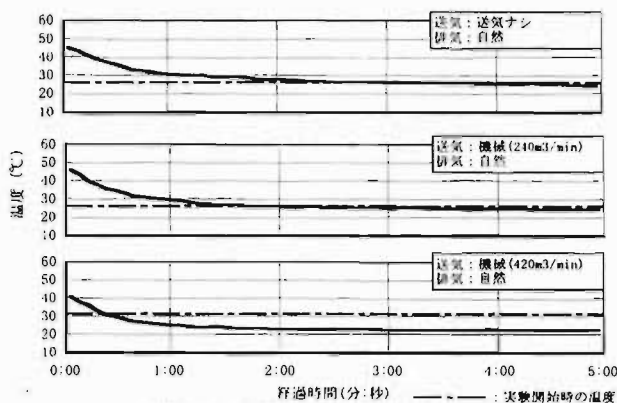


図 13 送気側中段の温度変化

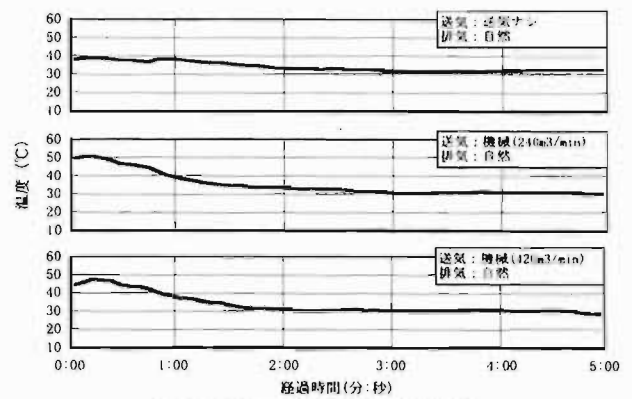


図 15 排気側中段の温度変化

場合は 30 秒であった。

(イ) 送気及び換気開始時の上段と中段の温度差は、表 14 のとおり 14.8℃から 20.5℃であったが、5 分後にはいずれの場合も 1℃以内となった。

以上のことから、送風付近では時間の経過とともに、いずれの場合も熱気層が排除されたが、送気量を多くするほど早く定常的になり、明らかな差異が認められた。

イ 排気側の温度及び酸素濃度の測定結果

排気側の温度の測定結果は、表 14、図 14 及び図 15 のとおりであり、また、排気側の酸素濃度の測定結果は、表 14 及び図 16 のとおりであった。

その結果は、次のとおりである。

(ア) 上段における温度変化では、送気量ナシの場合は、放水開始の温度から 40℃の範囲で変動しているのに対し、送気量 240m³/min の場合は放水開始時の温度から 30℃低下して、また送気量 420m³/min の場合は 40℃以上低下してほぼ横ばいとなっているが、いずれの場合も 5 分後には 100℃前後となっている。

(イ) 中段における温度変化では、放水開始時の温度は 38.3℃から 49.9℃と差があったが、3 分後にはいずれの場合も 30℃前後で横ばいとなっている。

(ウ) 酸素濃度の変化では、送気量ナシの場合は時間とともに低下し 5 分後には約 15%となったのに対し、送気量 240m³/min 及び送気量 420m³/min の場合は放水開始後

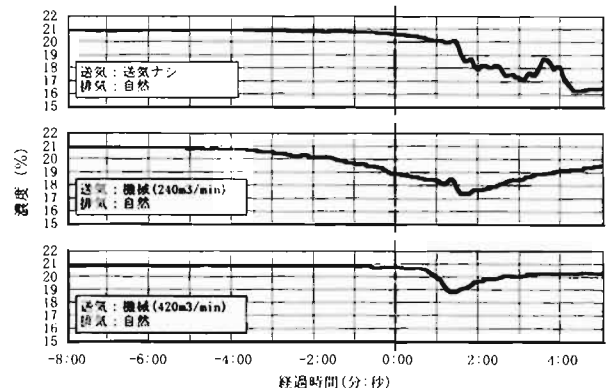


図 16 排気側の酸素濃度変化

いったん低下するが 2 分以内に上昇して 5 分後には約 20%となったが、送気量 420m³/min の方が高濃度で推移していた。

以上のことから、送気による排気側の燃焼に及ぼす影響について見ると、温度変化からは温度が低下する状況は異なっているが、いずれの場合もほぼ同じ温度まで低下し、明らかな差異が認められないが、酸素濃度を比較すると、送気ナシの場合と送気した場合の差が明らかに異なっていることから、排気側においては、延焼拡大の面から酸素濃度を低下させた方がよいことから、送気量を少なくするほど良い結果が得られた。

(5) まとめ

本実験は、排気条件を一定として、送気側の送気条件を変えて洞道内の排煙排熱効果について実施したが、その結果、送気側で見ると送気量を多くするほど、また、排気側で見ると送気側とは逆に、送気量が少ないほど良い結果となった。

一方、消防活動の安全性と効率化を考えると、排気側より送気側の結果をより重視することになる。

従って、送気量を多くすることが有効となるが、送気量が 240m³/min と 420m³/min の場合の明らかな差異が認められなかったことから、延焼拡大に関する面を考慮して本実験では、噴霧放水時に生じる送風量とほぼ等しい送気量(240m³/min)以上を確保する必要があると考えられる。

4 結論

実験 1 及び実験 2 の結果から、次のとおりである。

(1) 実験 1 から、洞道内の空間容積に対して送気側及び排気側の開口部の割合が大きく換気条件が良い条件では、送風機による機械換気を併用した場合と自然換気だけの場合の差異は認められなかった。

(2) 実験 2 から、排気側を良好な条件で一定とした場合には、送気側は噴霧放水時に生じる送風量以上の送風量を確保する必要があること。

以上の結果から、実験 1 及び実験 2 のように排気側の開口部が十分確保されている条件下においては、送気側から噴霧放水時に生じる送風量以上の外気を確保できれば良好な消防活動エリアとなる送気側の良好な環境は、噴霧放水一線で維持できると推定される。

従って、送気側及び排気側の開口面積が小さい、又は開口部の間隔が長い等により換気条件が悪い場合には、必要な送気量を確保するため、送風機による機械換気を併用することの有効性が確認された。

5 今後の課題

本実験は、前年度までの模型実験結果を踏まえ実大に近い規模で実施したが、実験に要する準備や実施期間等の関係上、排気条件を変えた場合の排煙排熱効果に関する実験を行えなかった。

また、煙濃度や酸素濃度等の測定項目については、一部に明らかな異常値を示したものがあり、測定値の信ぴょう性に欠けるものがあった。このため、今後は、測定項目及び測定要領について検討し、今回実験できなかった排気条件による排煙排熱効果について実施し、本実験結果と合わせて総合的な検討を行うとともに、さらにその結果に基づき、詳細な実験を繰り返し実施し、検証していく必要がある。

参考文献

- 1) 昆文雄、吉村延雄、杉田直樹：洞道等の地下構造物の煙流動に関する研究(第 1 報)、消防科学研究所報 34 号、pp. 33~37、1997 年 9 月
- 2) 坂本利行、吉村延雄、杉田直樹：洞道等の地下構造物の煙流動に関する研究(第 2 報)、消防科学研究所報 35 号、pp. 17~25、1998 年 9 月
- 3) 坂本利行、吉村延雄、赤坂 浩：噴霧放水時に生じる風量の測定結果について、消防科学研究所報 36 号

STUDY OF SMOKE SPREAD IN AN UNDERGROUND STRUCTURE (SERIES 3)

Toshiyuki SAKAMOTO*, Nobuo YOSHIMURA*, Naoki SUGITA**, Hiroshi AKASAKA*

Abstract

For effective ventilation of smoke and heat which hamper firefighting in a cable Tunnel and other underground fires, we made a smoke movement test using a cable Tunnel model.

In the first and second series, we reported smoke ventilation effects in a Small-sized cable tunnel model. This year we made a test on effective ventilation Of smoke and heat by changing the conditions of air supply and exhaust.

* First Laboratory ** Oume Fire Station