

地下施設火災における煙対策に関する研究

Study of the Smoke Spread in Underground Model Fire Tests

國 本 由 人*
 稲 村 武 敏**
 杉 田 直 樹**

概 要

特別避難階段が2系統存在する地下施設で火災が発生した場合の、煙等の流動状況を把握するため模型火災実験を行ない、半導体式一酸化炭素センサを用いて燃焼生成ガスに含まれる一酸化炭素濃度の変化を調査した。この結果次のことが分かった。

1. 地下施設内の煙拡散について影響の大きいものは火災室に開口している竪穴であり、一般的には空調等のダクトがこれに該当する。
2. 特別避難階段室へ煙が流入した場合、階段室最上部の扉及びその附室の扉を開放しておく、火災階から他の階へ流入する煙等の量を低減させることができる。
3. 複数の階段室が存在する場合、同時に全ての階段室に濃煙熱気が充満する危険性は低く、一の階段室が排煙経路（煙突）になると他の階段室は地上からの空気の供給経路となり清浄な状態が保たれる。

Buildings and structures in Tokyo are being built higher above the ground and deeper below the ground. When a fire occurs in a skyscraper or an underground structure, the potential damage would be enormous.

Smoke spread by an underground fire is one of the immediate themes to be solved.

As a means of studying the smoke spread, a series of fire tests were made, which were modeled on an underground structure with two smokeproof towers. Smoke behavior was detected by the change of the concentration of carbon monoxide contained in fire gases.

The findings were as follows.

1. The smoke spread in an underground structure would be affected by a vertical opening from a room on fire, i.e., an air conditioning duct.
2. When the smoke spreads into a smokeproof tower, it would be better to leave the doors open at the top of the stairwell and its vestibule so that the smoke could be ejected therefrom.
3. When there are two or more stairwells in the underground structure, all of them would not be likely to be filled with smoke simultaneously, i.e., while one stairwell functions as a smoke ventilation route, the others play a role of an air supply route.

1. はじめに

特異空間における火災性状及び火災対策に関する研究として、前年度までの煙対策に関する研究を発展的に継承し、特に地下施設の煙流動性状について検討を進めている。

前年度までの基礎的な研究結果として次の事項を把握した。

- 施設内に複数の竪穴（階段、ダクト等）が存在する場合、火災発生後の早い時期に燃焼生成ガスが流入した竪穴に上昇気流が、他の竪穴に下降気流が発生し、これらを経路として施設内に煙が流動拡散する。
- 施設内に発生する対流の下降気流によって、火災階より下の居室等にも燃焼生成ガスが流入

*整備工場 **第一研究室

し、施設全体が危険な状態になるおそれがある。

- 対流経路にある扉等を閉鎖することによって対流を抑制できるが、火災室の圧力上昇による煙噴出等を考慮すると、根本的な煙拡散防止には排煙が必要である。

今回は、前年度まで1系統であった特別避難階段を2系統に増設して、今までより現実に近い形態で実験を行なうこととし、次の項目を目的として実験を行なった。

- (1) 特別避難階段に発生する気流の把握
- (2) 対流経路となる竪穴が特別避難階段の場合とダクトの場合の煙拡散状況の比較
- (3) 特別避難階段の地上部分の扉の開閉が地下部分の煙拡散に及ぼす影響の把握

実験では煙の流動状況の把握方法として、煙に含まれる気体成分である一酸化炭素ガスの濃度変化を調査することとした。

以下、この実験の内容について記述する。

2. 実験条件

- (1) 実験模型
図1-1、図1-2による。(縮尺1/10)
- (2) 火源熱量
LPGい号、9.5[l/min]、16[KW] (実大火災の熱量5 MW相当)
- (3) 実験はCASE-1からCASE-6までに分類して扉等の開口条件を設定し、実施した。(表1)
- (4) 扉等の寸法
設定した対流経路にある扉等の寸法は次のとおりである。

開口部種別	寸法 (mm)
扉	200×100
ダクト開口部	50×100

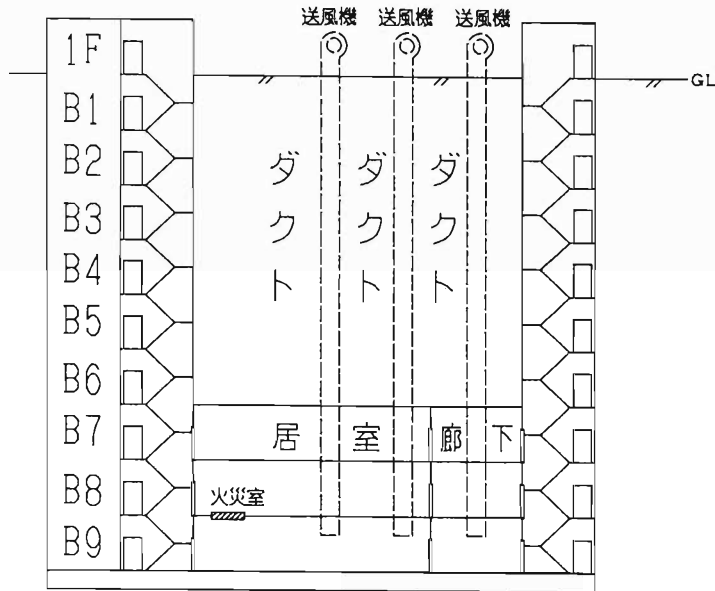


図1-1 実験模型概要図 (立面図)

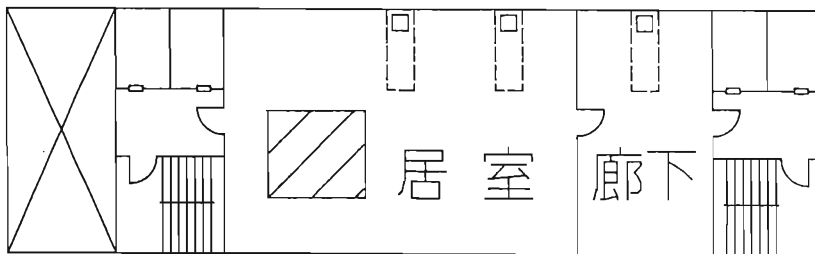


図1-2 火災階平面図

(5) 使用資器材

- 一酸化炭素 (以下「CO」という。) ガスセンサ及び専用増幅器 (株オスト製) 30組
- 熱電対 (Kタイプ) 30本
- パーソナルコンピュータ (NEC(株)製) 1台
- データ切換器 (TEAC(株)製) 1台

表1 扉の開閉状況

位置 CASE	階層	左階段扉	左附室扉	ダクト1	ダクト2	廊下扉	ダクト3	右附室扉	右階段扉
1	1F	×	×	-	-	-	-	×	×
	B1~B6	-	-	-	-	-	-	-	-
	B7	×	×	×	×	×	×	×	×
	B8	○	○	×	×	○	×	○	○
	B9	×	×	×	×	×	×	×	×
2	1F	○	○	-	-	-	-	○	○
	B1~B6	-	-	-	-	-	-	-	-
	B7	×	×	×	×	×	×	×	×
	B8	○	○	×	×	○	×	○	○
	B9	×	×	×	×	×	×	×	×
3	1F	×	×	-	-	-	-	×	×
	B1~B6	-	-	-	-	-	-	-	-
	B7	○	○	×	×	○	×	○	○
	B8	○	○	×	×	○	×	○	○
	B9	○	○	×	×	○	×	○	○
4	1F	○	○	-	-	-	-	○	○
	B1~B6	-	-	-	-	-	-	-	-
	B7	○	○	×	×	○	×	○	○
	B8	○	○	×	×	○	×	○	○
	B9	○	○	×	×	○	×	○	○
5	1F	×	×	-	-	-	-	×	×
	B1~B6	-	-	-	-	-	-	-	-
	B7	○	○	○	×	○	×	○	○
	B8	○	○	○	×	○	×	○	○
	B9	○	○	○	×	○	×	○	○
6	1F	○	○	-	-	-	-	○	○
	B1~B6	-	-	-	-	-	-	-	-
	B7	○	○	○	×	○	×	○	○
	B8	○	○	○	×	○	×	○	○
	B9	○	○	○	×	○	×	○	○

○：開放 ×：閉鎖 -：模型には存在しない

3. 半導体ガスセンサの特性

センサユニットはセンサ部と増幅部で構成され、センサ部の特性のばらつきを個々に増幅部で補正しており、データは電圧値として出力される。

濃度 (D) と出力電圧 (V) とは、次の関係に

なっている。

$$D = 2V (\%)$$

高濃度領域においては出力電圧が1.6V程度で飽和してしまうが、増幅器の特性が限界に達したものであって、出力電圧が飽和している間の実際の濃度は増幅器の出力電圧で示される値より高いものと思われる。

4. 実施結果

以下、実験における特徴的な事項を掲げる。

なお、時刻は点火からの経過時間であり、記述中の略語の意味は次のとおりである。

- 右階段 模型正面から見て右側の階段室
- 左階段 模型正面から見て左側の階段室
- 火災室 パーナーにてLPGを燃焼させた室
- 火災階 火災室が存する階 (B8)
- 直上階 火災階の一階層上の階 (B7)
- 直下階 火災階の一階層下の階 (B9)
- 二層上階 火災階の二階層上の階 (B6)
- ガス 燃焼生成ガス

(1) 特別避難階段に発生する気流の把握

ア ガスの流動経路が左右の階段だけの場合で火災階以外の全ての階の階段室扉、同附室の扉及び居室の扉が閉鎖されている場合 (CASE-1) は、高温のガスが火災室から左右方向へ拡散した際、距離的に火災室から短い距離にある左階段に多量に流入し、階段室内を上方へ流動したため、二層上階での濃度を左右の階段で比較すると、左階段のほうがはるかに高くなった。右階段内の各階層別に見ると、直下階のほうが高い結果となった。(図2、図3)

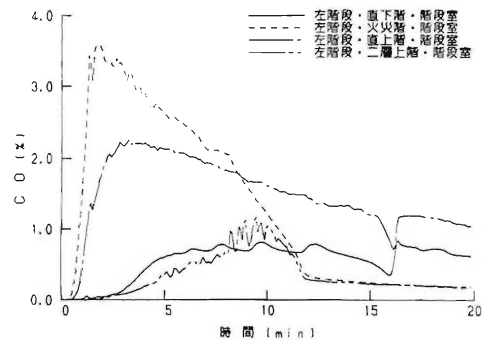


図2 左階段のCO濃度変化 (CASE-1)

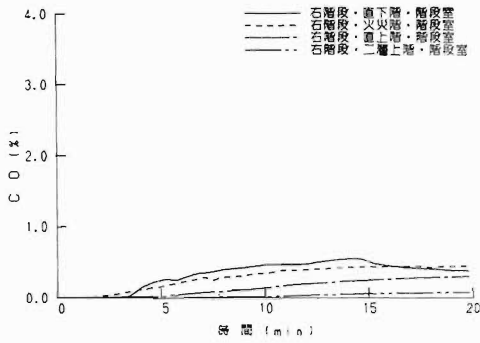


図3 右階段のCO濃度変化 (CASE-1)

次に、直上階と直下階の扉を全て開放した場合(CASE-3)、さらに火災室と直上階、直下階の居室のダクト開口部を開いた場合(CASE-5)について実験した結果、CASE-1と同様に右階段の二層上階では濃度があまり高くなり左階段では上方に向かって濃度上昇が見られるのに対し、右階段では上方へ向かうガスの動きが見られない結果となった。

従って、複数の階段のうち1つに煙が流入すると、その階段は煙の排出先、他の階段は新鮮空気の供給元としての役割が現れるものと思われる。

(2) 対流経路となる竪穴が階段室の場合とダクトの場合の煙拡散状況の比較

ア CASE-4 (対流経路が階段室) とCASE-6 (対流経路が階段室及びダクト) を比較してみると、火災階右方向のCOについては、CASE-4では右階段及び同附室の濃度上昇が1分頃から発生し、その後あまり高濃度になっていないが(図4)、CASE-6では2分から濃度が上昇して5分頃にCASE-4の2倍以上の濃度(約1%)に達した(図5)。

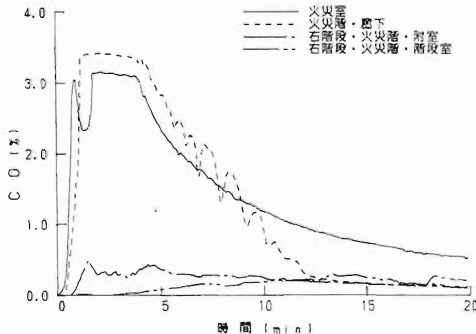


図4 火災階右方向のCO濃度変化 (CASE-4)

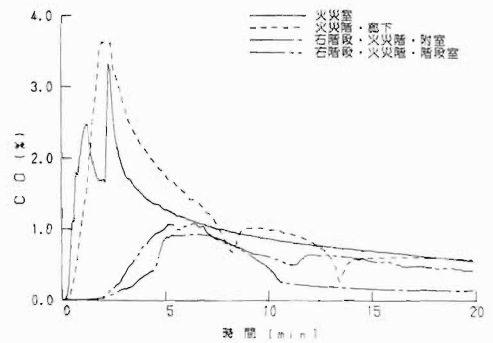


図5 火災階右方向のCO濃度変化 (CASE-6)

右階段のCOについてはCASE-4ではあまり濃度上昇がないが、CASE-6では2分に火災階、3分に直下階、7分に直上階の濃度が顕著に上昇した(図6)。

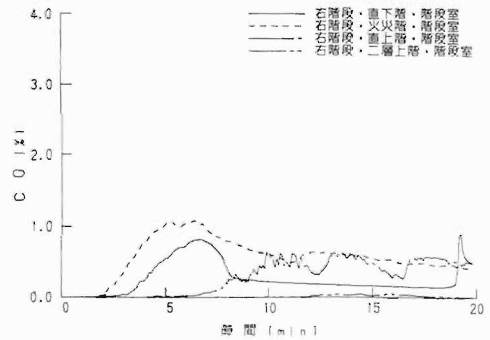


図6 右階段のCO濃度変化 (CASE-6)

直上階のCOについては、ダクトを対流経路とするCASE-6では、直上階居室での濃度上昇はきわめて急激で最高濃度は3.0%以上となり、廊下、右階段附室においても急激な濃度上昇が見られた(図7)。

これに対し、階段を対流経路とするCASE

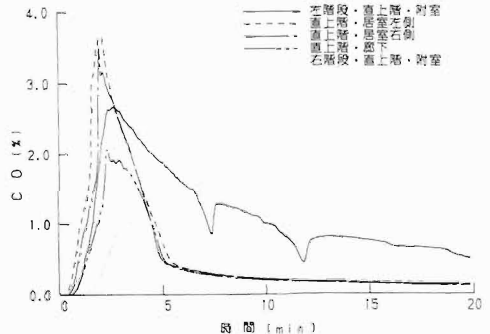


図7 直上階のCO濃度変化 (CASE-6)

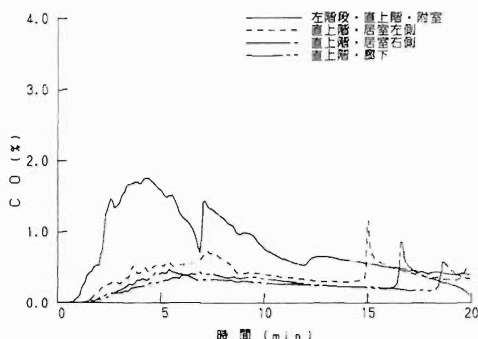


図8 直上階のCO濃度変化 (CASE-4)

-4では、直上階居室の濃度は0.7%程度に止まった(図8)。

その他、ダクトを対流経路とする場合には右階段がガスの下降気流の経路となり、右階段から直下階の各室へガスが流入する状況が見られた。

イ CASE-3 (対流経路が階段室) とCASE-5 (対流経路が階段室及びダクト) を比較した場合については、ダクトを対流経路とするCASE-5の直上階でやはり、点火直後から急激なCOの濃度上昇が認められた(図9)。

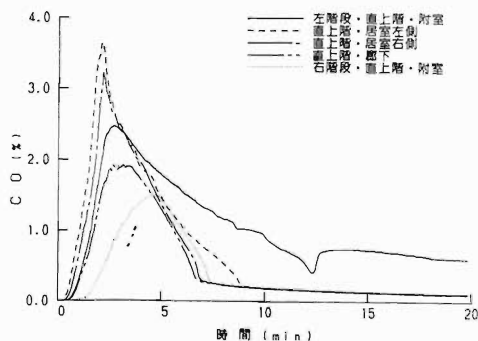


図9 直上階のCO濃度変化 (CASE-5)

従って、ダクトを経路とする煙流動は、短時間のうちに急激な濃度上昇を示す危険性が高い流動形態であるといえる。

(3) 特別避難階段の地上部分の扉の開閉が地下部分の煙拡散に及ぼす影響の把握

階段地上階の扉を開くと、階段における煙の排出経路、空気の流入経路としての傾向がさらに明瞭になるとともに、火災階以外の階の階段室扉が開いていても、それらの階のガス濃度は地上階の扉を閉めた場合に比較して低い状態であった。

ア 地上の扉を開いたCASE-4と閉じたCASE-3についての結果は次のとおりであった。

火災階のCOについて、右階段の附室及び階段室内ではCASE-3の方がCASE-4より2倍以上濃度が高く(図4、図10)、また、左階段でも全般に地上階の扉が閉まっているCASE-3において高い濃度が長時間継続する傾向が見られた。

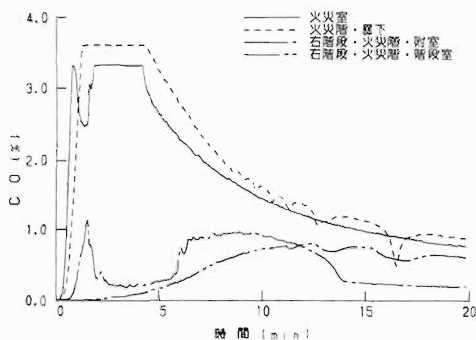


図10 火災階右方向のCO濃度変化 (CASE-3)

右階段のCOについて、CASE-3の方が高い濃度を示し、火災階、直上階および直下階ではCASE-4の2倍以上の濃度、二層上階についてはCASE-4では実験終了の20分まで検出しなかったのに対し、CASE-3では徐々に上昇し、20分には濃度0.15%程度になった。

また、左階段でもCASE-3の方が高い濃度となり、特に二層上階および直下階で2倍以上の値となった(図11、図12)。

直上階のCOについても全般にCASE-3の方が濃度が高くなっており、左階段の附室を除いて全般的に約2倍の濃度となった。

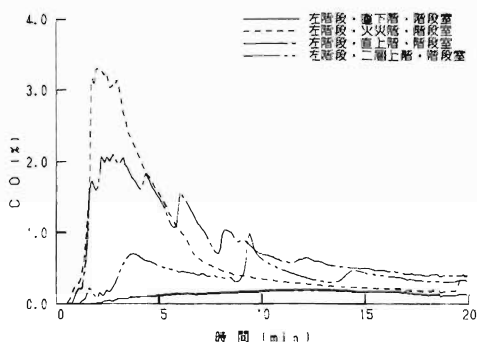


図11 左階段のCO濃度変化 (CASE-4)

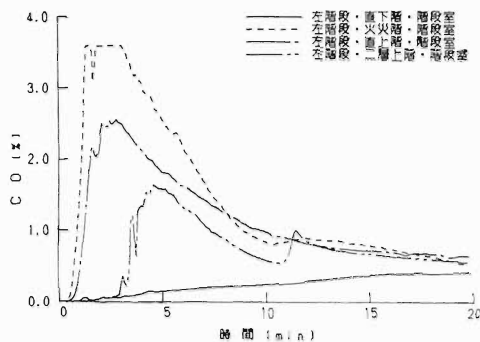


図12 左階段のCO濃度変化 (CASE-3)

直下階のCOについても全般にCASE-3の方が約2倍の濃度となった。

イ また、他のケースでも全般的には同様の傾向があったが、地上部分の扉を開放した場合のほうが、火災階各部分において新鮮空気とガスとの交換が滑らかに行われるようであり結果としてガスの流動が早くなることもあった。

5. ま と め

(1) 特別避難階段に発生する気流について

高温の燃焼生成ガスが流入した階段室に上昇気流が、他の階段室に下降気流が発生することは既に報告しているが、階段室の地上部分の扉を開放した場合はこの傾向が明確になり、それぞれ排煙経路(煙突)、空気供給経路としての役割を持つことになる。従って同時に全ての階段室に濃煙熱気が充満する危険性は低く、空気供給経路となった階段室は清浄な状態に保たれる。

(2) 特別避難階段の地上部分の扉の開閉が地下部分の煙拡散に及ぼす影響について

各階の階段室扉が開いている等、火災の煙の危険が他の階へ波及しやすい場合を想定した実験では、階段室の地上部分の扉を開放した場合の方が閉鎖した場合より施設内のほとんどの場所においてCO濃度が低く、概ね1/2程度の濃度に止まっている。

また、さらに火災室、その上下の居室へ通じるダクトが開放されている条件も盛り込んで実験を行ってみたが、この設定においても直上階、直下階では階段室の地上部分の扉を開放した場合の方がややCO濃度も低めであった。

(3) 対流経路となる竪穴が特別避難階段の場合とダクトの場合の煙拡散状況の比較について

ダクトが対流経路となった場合は、燃焼継続時間が長く最高温度も高くなっている。これは火災室へ新鮮な空気が比較的多量に流入し、燃焼生成ガスが他の部分へ拡散しやすくなっていることを示すものである。

直上階では、火災室と同じ系統のダクトが開いている居室をはじめその階の全域で火災発生直後から急激なCO濃度の上昇があり、短時間のうちにきわめて危険な状況になる事が分かる。また、右階段を下降するガスにより、直下階の危険性も高くなっている。

これに対し特別避難階段が対流経路となった場合は、階段へ通じる扉の開口面積がダクト開口面積の4倍もある設定にもかかわらず濃度上昇は比較的ゆっくり推移し、直上階、直下階の最高濃度も、ダクトが対流経路となった場合に比較すると1/4以下に止まっている。

本実験だけで実火災時の有毒ガス濃度を定量的に推定することはできないが、濃度だけが人命を危険に曝す要素なのではなく、避難する時間的余裕の有無も当然考慮されるべきであり、火災室に開口している竪穴による煙拡散の早さから見て、これらの竪穴(空調ダクト等)を通じた拡散は危険性が非常に高いといえる。

以上3項目について実験を通じて考察したが特に、地下深層で火災が発生した場合に早期に階段室の地上階扉を開放することが、他の階への危険性の波及を低減し、かつ、避難および消防活動における安全性確保に効果があると認められる。実験では、扉の開閉等の設定によってその効果に違いが見られ、さらに効果的な方法を検討する必要性は残っている。しかしながら、この方法は特別の設備を要さず、また、消防隊員に限らず誰にでも容易に実施できる操作であり、排煙設備の不作動時等の非常手段としても有効であるので、消防職員への周知を図ると共に都民指導の一項目に掲げて啓蒙の機会を作ることが望ましいと考える。