

煙対策に関する研究

Study on the control of smoke

眞 下 薫 雄*
 稲 村 武 敏*
 田 中 康 之**

概 要

地下施設火災における当該施設内の煙等の流動状況を把握するため、模型火災実験を行い、模型内部に配置した半導体ガス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) 外気から遮断された施設内部においては、主として階段、ダクト等の竪穴を通じた対流現象により燃焼生成ガスが各階へ流動拡散する。
- (2) 上下階に通じる竪穴が複数ある場合は、早期に燃焼生成ガスが流入して内部温度が上昇したダクト等の竪穴に上昇気流、火点から離れた階段等の竪穴に下降気流が顕著に発生する。
- (3) 上階に流入した燃焼生成ガスは、竪穴に発生する下降気流によって火災階及びその下階にも流動拡散するが、施設全体の対流経路のなかで階段が下降気流部分となる場合には、煙や有毒ガスが階段を下降して来るおそれがある。
- (4) 燃焼生成ガスの対流経路にある扉、ダクトのダンパー等の閉鎖により、対流現象を抑制することが出来る。
- (5) 燃焼生成ガスの対流現象による拡散を根本的に防止するには排煙が必要である。

We carried out fire experiments in an underground facility model to study the effect of smoke movement. And we traced the fire gases by measuring in the density of carbon monoxide, using a semiconductor gas sensor.

The results were as follows.

- 1 In a room without supply of the air, the fire gases spread to floors by convection through the stairs and the floor openings of ducts.
- 2 In case there are several routes in the floor, the fire gases spread in the room quickly. Rasing movement of the air occur in the floor openings of ducts near the fire site and descending movement of the air occur inside stairs far from the fire site.
- 3 The fire gases spread to the floors above, and in the fire room and to the floors below, too. But in case stairs become a descending route of the air, smoke and toxic fire gases may go down the stairs.
- 4 Closing up the doors and the dampers of ducts, we can control the convection of the fire gases.
- 5 We need to ventilate to stop the spread of fire gases.

1 はじめに

煙対策に関する研究の一環として、平成2年度

から模型実験により地下施設火災における煙流動性状について検討を進めている。これまでの実験で確認された地下施設特有の危険性として、火災発生時に火災階より下の居室等にも煙や燃焼生成ガスが流入して滞留する現象があり、どの階から出火した場合であっても地下施設全体に危険が及

* 第一研究室 ** 国分寺消防署

ぶことが予想される。このことから地下施設では、火災発生時の煙等の対流経路を把握し、対流現象の防止対策を確立することが課題となっている。

今回は煙等の対流について次の項目を主眼に実験を行なった。

- (1) 対流経路の把握
- (2) 扉等の閉鎖による対流抑制効果の確認
- (3) 排煙の効果の確認

実験の実施に際しては地下施設を想定した模型であることに配慮し、特に外部に対する気密性の維持に務めた。

なお、測定にあたっては、模型内部の気流に与える影響を小さくするため、半導体ガスセンサを用いて一酸化炭素等の燃焼生成ガス濃度が上昇する時刻を調査し、対流の状況を把握することとした。

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, 1-2による。(縮尺 1/10)

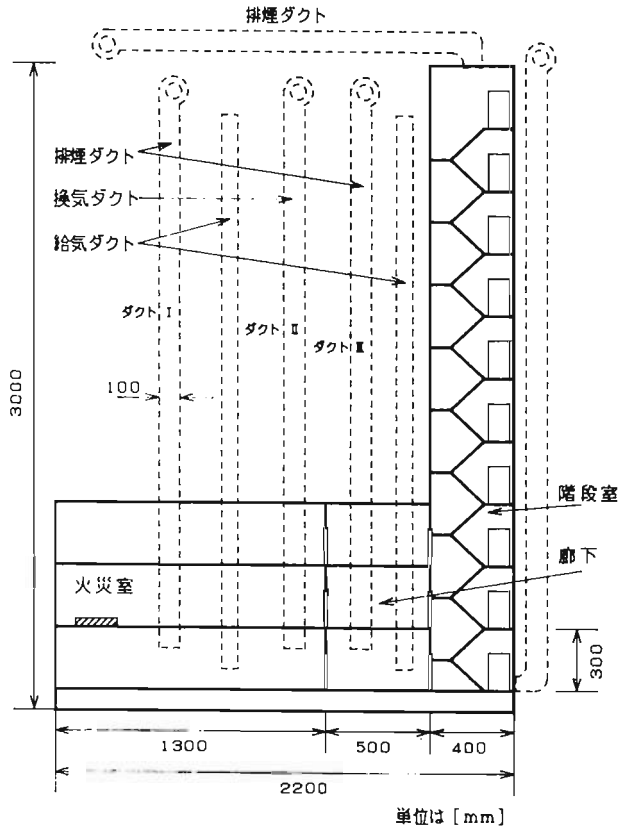


図1-1 実験模型概要 (立面図)

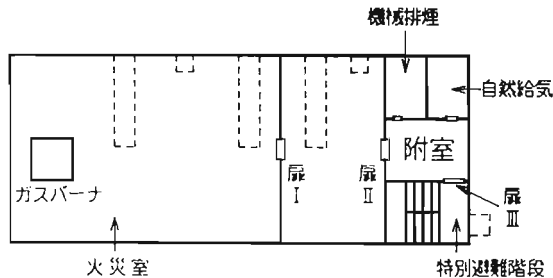


図1-2 火災階平面図

表1 開口部の開閉及び排煙の実施状況

CASE	火 災 室		扉Ⅰ	廊 下	扉Ⅱ	附 室	扉Ⅲ	特別避難階段室	実験実施回数
	排 煙	排気外							
1	機械排煙	□	■	機械排煙	■	機械排煙	■	—	6
2	機械排煙	■	■	機械排煙	■	機械排煙	■	—	2
3	—	■	■	機械排煙	■	機械排煙	■	—	6
4	—	□	■	—	■	機械排煙	■	—	10
5	—	□	□	—	□	—	□	—	17
6	—	■	□	—	□	—	□	—	2

—：排煙無し、■：閉、□：開
 扉Ⅰ：火災室の出入口
 扉Ⅱ：特別避難階段附室入口（廊下側）
 扉Ⅲ：特別避難階段入口

(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) 実験条件

実験は CASE-1 から CASE-6 までに分類し, 対流現象が発生しにくいと予想されるものから順に番号を割り当てた。(表1)

なお, 各CASEの中で部分的に開口部設定等を変更したのも一部実施した。

(4) 使用資器材

- ・可燃性ガスセンサ (フィガロ技研㈱製) 22個
- ・一酸化炭素濃度計 (富士電機㈱製) 1台
- ・熱電対 (Kタイプ) 22本
- ・多点風速計 (日本カノマックス㈱製) 1台
- ・パーソナルコンピュータ (NEC㈱製) 2台
- ・データ切換え器 (TEAC㈱製) 1台

(5) 排煙風量

居室 0.38 [ℓ/min]
 階段附室 0.76 [ℓ/min]
 (いずれも自然給気)

3 一酸化炭素濃度の測定について

本実験で使用した半導体可燃性ガスセンサの, 単品の可燃性ガスに対する特性は図2のように公開されている。(文献1)

実験中に生じる燃焼生成ガスには, 一酸化炭素, 二酸化炭素, 未燃の燃料ガス等が含まれ, 混合状態の可燃性ガスに対する半導体可燃性ガスセンサの感度等が不明であったため, 燃焼生成ガスに対する当該センサの応答特性の調査を行なった。

燃焼生成ガスに対するセンサ出力値 (電圧) と

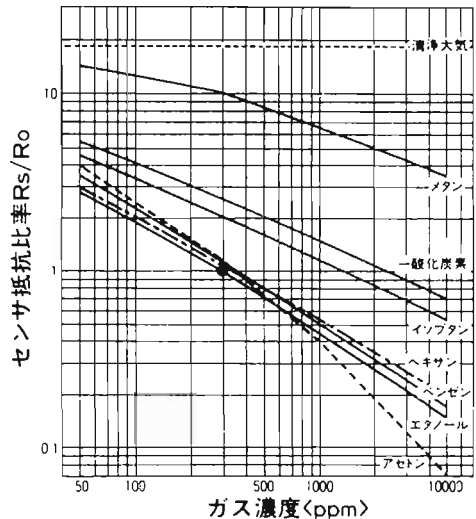
一酸化炭素ガス濃度計の測定値を比較したところ, センサ出力値と燃焼生成ガスに含まれる一酸化炭素濃度との間に明瞭な相関が認められた。(図3) したがって, センサ出力値の変化は一酸化炭素濃度の変化に概ね符合すると判断でき, 次の換算式を採用した。

$$D = 0.0308 V^2 + 0.3681 V - 0.1908$$

D: 一酸化炭素濃度 (%)

V: センサ出力値 (V)

ただし, このようにして算出した一酸化炭素濃度の値については, 未燃の燃料ガスの混合割合から受ける影響が大きいため, 本報告書中では推定値として参考のため記すこととした。



(注) Ro: エタノール30ppmを含む空気中のセンサ抵抗値
 Rs: 各ガス、各濃度でのセンサ抵抗値

図2 ガス濃度とセンサ抵抗比率の関係

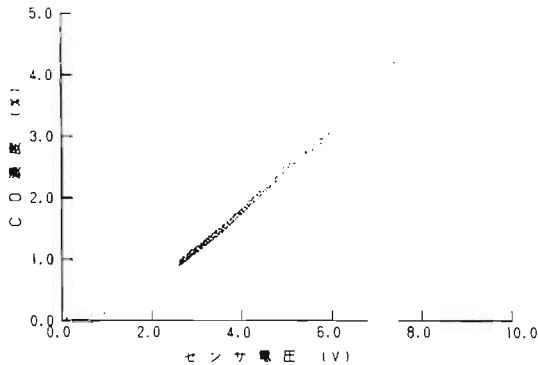


図3 センサ電圧とCO濃度の関係

4 実施結果

実験は表1のとおり43回実施した。それぞれの実験で認められた特徴的な事項は次のとおりである。

(1) CASE-1 (火災室, 廊下, 階段附室の給気と排煙)

ア 火災室の燃焼生成ガスは, 排煙を開始すると5分程度ではほぼ排出された。一酸化炭素濃度は点火後1分に5.5%となり, この時点で排煙を開始して点火後6分には0.1%程度まで低下した。(自然鎮火1分)

イ 火災階における燃焼生成ガスの水平方向への流動は, ほとんど認められなかった。(図4)

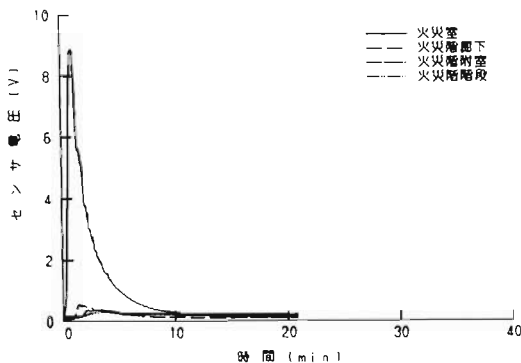


図4 火災階の燃焼生成ガス濃度変化 (CASE-1)

ウ 火災室の直上の居室及び直下の居室 (以下, 「直上室」, 「直下室」という。) では, 点火後1分の排煙開始直後に燃焼生成ガスを検知し, 点火後2分頃一酸化炭素濃度が0.1%程度となったが, その後は実験終了時までその状態が継続した。

(2) CASE-2 (火災室及び廊下は給気なしの排煙, 階段附室は給気と排煙。)

ア 火災室の燃焼生成ガスはCASE-1に比較して高濃度で推移した。一酸化炭素濃度は点火後1分に5.8%, 点火後20分では0.6%程度であった。(自然鎮火1分4秒)

イ 火災階における燃焼生成ガスの水平方向への流動は廊下まで認められ, 階段附室には達しなかった。(図5)

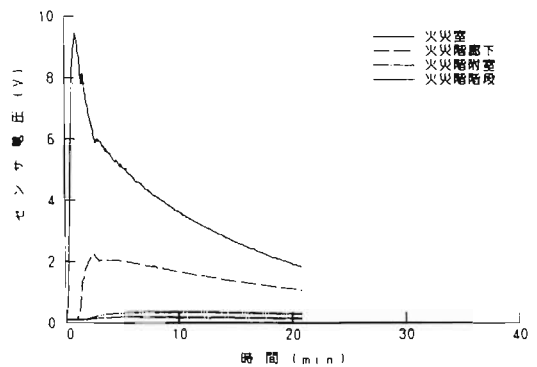


図5 火災階の燃焼生成ガス濃度変化 (CASE-2)

ウ 直上室及び直下室では, 点火後1分の排煙開始後に燃焼生成ガスを検知したが, CASE-1より高濃度であり, 点火後5分以降実験終了時まで一酸化炭素濃度0.3~0.4%程度の状態が継続した。

(3) CASE-3 (廊下, 階段附室の排煙)

ア 火災室の燃焼生成ガスはCASE-1, CASE-2に比較してさらに高濃度で推移した。一酸化炭素濃度は点火後1分に5.5%, 点火後20分では1.5%程度であった。(自然鎮火1分8秒)

イ 火災階における燃焼生成ガスの水平方向への流動は, ほとんど認められなかった。(図6)

ウ 直上室及び直下室では, 点火後1分の排煙開始後に燃焼生成ガスを検知したが, CASE-1とCASE-2の中間の濃度レベルであり, 点火後5分以降実験終了時まで一酸化炭素濃度0.2%程度の状態が継続した。

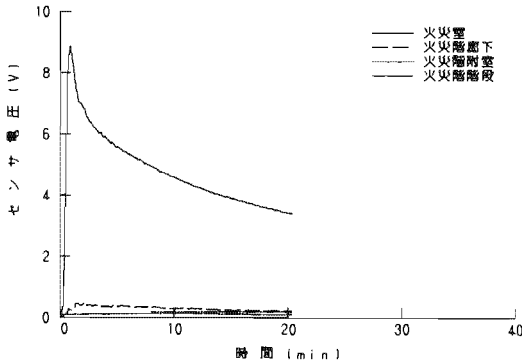


図6 火災階の燃焼生成ガス濃度変化 (CASE-3)

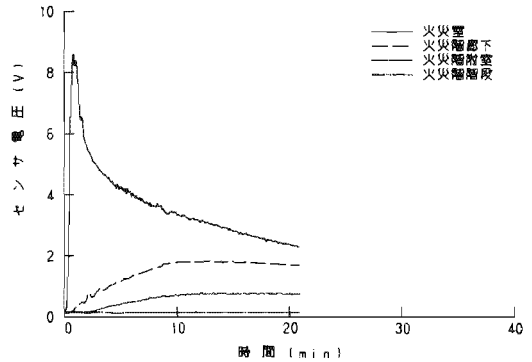


図7 火災階の燃焼生成ガス濃度変化 (CASE-4)

(4) CASE-4 (火災階における階段附室の排煙)

ア 火災室の燃焼生成ガスの状況はCASE-3と同様であった。(自然鎮火1分4秒)

イ 火災階における燃焼生成ガスの水平方向への流動は、点火後1分で廊下に達した。点火後2分で階段のガス濃度が上昇したが、排煙を行なっている階段附室でのガス濃度上昇は認められなかった。この時の一酸化炭素濃度は廊下で0.6%、階段で0.2%程度であった。

(図7)

ウ 上下の階では、火災階の階段附室排煙に伴いいずれも居室→廊下の順序でガス濃度上昇が見られた。直上室では、点火後1分の排煙開始から点火後5分頃までガス濃度が上昇し、一酸化炭素濃度0.3%程度の状態が実験終了時まで継続した。上階の廊下では、直上室より遅れて点火後3分から10分頃までガス濃度上昇が認められ、一酸化炭素濃度0.2%程度の状態が実験終了時まで継続した。また、下階の各位置においても上階と同傾向のガス濃度変化を示した。

(5) CASE-5 (排煙なし、内部の扉、火災室と上下室のダクト開放)

ア 火災室の燃焼生成ガスの状況は、点火後2分頃最大濃度となってその後急下降し、点火後9分以降は火災階における各測定位置のうち最も低い濃度(一酸化炭素濃度0.7%)となった。(図8)(自然鎮火2分24秒)

イ 上階では、点火後3分頃直上室のガスが最大濃度(一酸化炭素濃度2.4%)となり、その

後は下降した。(図9)ガス濃度上昇の順序は直上室→廊下→附室及び階段であり、附室と階段では順序を特定出来なかった。

ウ 下階では、階段→附室→廊下→直下室の順序でガス濃度が上昇し、点火後20分以降はいずれの位置も同程度の濃度(一酸化炭素濃度0.3%)となった。(図10)

エ 階段付近の各測定位置における燃焼生成ガスの濃度上昇状況を見ると上階の階段→火災階の階段→火災階の階段附室→下階の階段の順であり、下階まで階段を燃焼生成ガスが下降したことが窺える。なお、下階の階段における一酸化炭素濃度は最大1.8%程度に達した。(図11)

オ 火災室及びその上下室に通じるダクト内の燃焼生成ガスの濃度変化を見ると火災室とダクト上部の状況が、また、直下室とダクト下部の変化状況に共通点がみられ、燃焼生成ガスがダクト内を上昇する際の上昇気流によって、下階からも吸気したものと思われる。(図12)

カ ダクト内の温度と階段の温度の比較をみると、ダクト内では火災室の燃焼と共に140°Cまで上昇し、火が消えてからも40~50°Cを保っているのに対し、階段ではほとんど上昇が見られなかった。(図13)

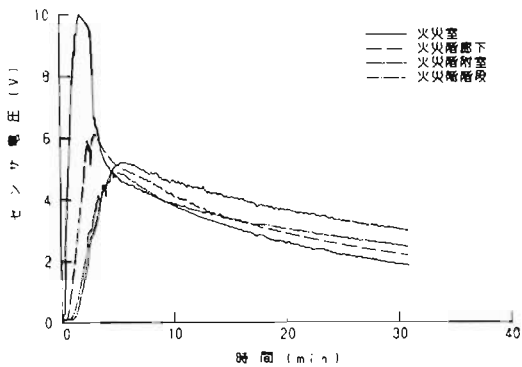


図8 火災階の燃焼生成ガス濃度変化 (CASE-5)

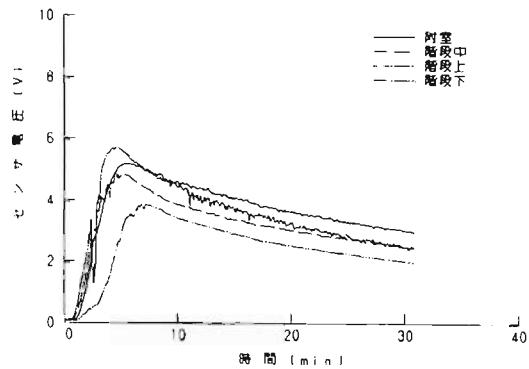


図11 各階段室における燃焼生成ガス濃度変化 (CASE-5)

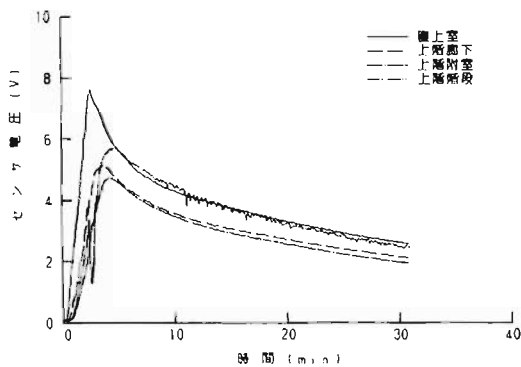


図9 火災階上階での燃焼生成ガス濃度変化 (CASE-5)

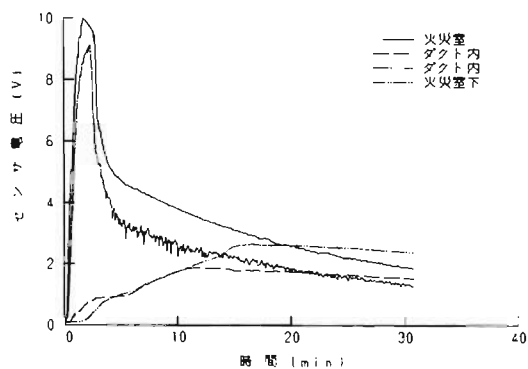


図12 火災室及びその上下室に通じるダクト内の燃焼生成ガス濃度変化(CASE-5)

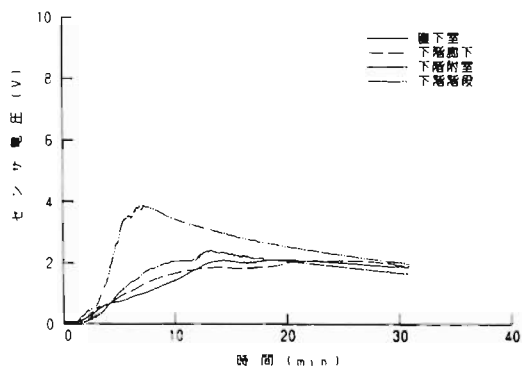


図10 火災階下階での燃焼生成ガス濃度変化 (CASE-5)

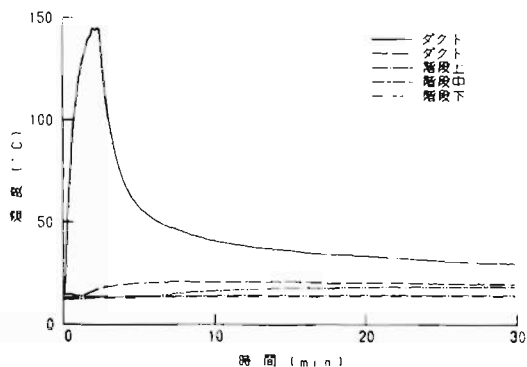


図13 ダクト内及び各階段の温度変化 (CASE-5)

(6) CASE-5' (CASE-5の設定のうち扉1を閉鎖)

ア 廊下、附室、階段では、CASE-5に比較し全般に燃焼生成ガス濃度の上昇ははるかに緩慢であり、かつ、最大濃度のレベルも低かった。

(図14, 15) (自然鎮火1分32秒)

イ 開口したダクトで火災室と通じている直上室及び直下室においては、点火後1分を過ぎて鎮火する頃、燃焼生成ガスの濃度が上昇し、一酸化炭素濃度が直上室で0.5%、直下室で0.2%程度に上昇したがいずれもCASE-5を下回り、その後は顕著な濃度上昇は見られなかった。(図16)

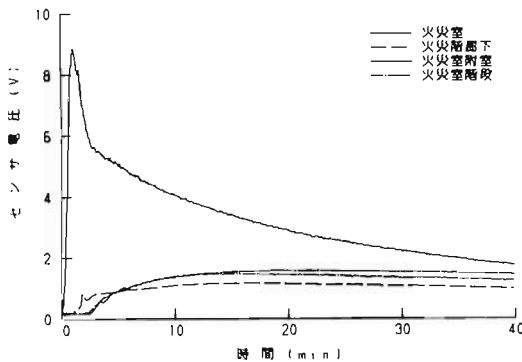


図14 火災室の燃焼生成ガス濃度変化 (CASE-5')

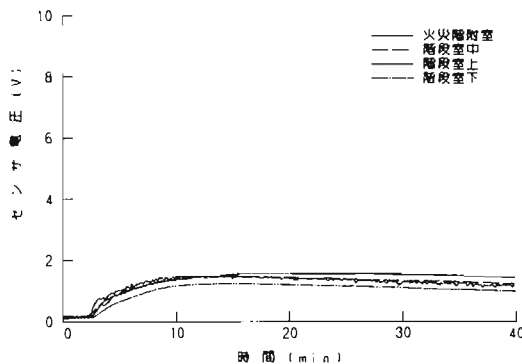


図15 各階段室での燃焼生成ガス濃度変化 (CASE-5')

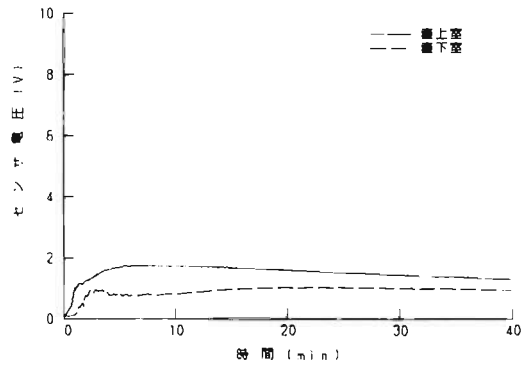


図16 火災室直上室と直下室での燃焼生成ガス濃度変化 (CASE-5')

(7) CASE-6 (排煙なし、内部の扉開放、ダクト閉鎖)

ア 火災階では燃焼生成ガス濃度が火災室→廊下→附室の順序で点火後2分程度で急上昇したのに対し、階段では10分頃まで徐々に上昇した。(図17) (自然鎮火1分24秒)

イ 直上室及び直下室の燃焼生成ガスは、点火後2分から3分頃までの短時間に上昇したが濃度は低いレベルに留まり、その後はその状態が継続してCASE-5'とほぼ同様の推移となった。(図18)

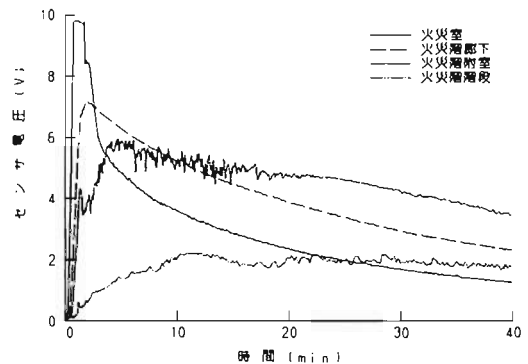


図17 火災階の燃焼生成ガス濃度変化 (CASE-6)

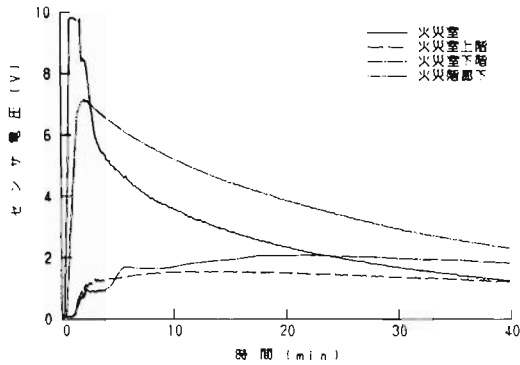


図18 火災室直上室と直下室での燃焼生成ガス濃度変化 (CASE-6)

5 まとめ

(1) 下階対流経路について

上下階に通じる堅穴(ダクト、階段等)が複数ある場合は、堅穴内温度の高い方(ダクト)に上昇気流、低い方(階段)に下降気流が生じて施設内に対流経路が形成された。燃焼生成ガスはこの経路に沿ってダクトを通じ上階へ充填し、この高濃度の燃焼生成ガスを含んだ空気の団塊がさらに流動して階段の下降気流によって下階へ流入した。この結果、施設内各階での燃焼生成ガスの濃度上昇が時間経過と共に発生し、時には下階の方が濃度が高くなる場合があったものと理解される。

(2) 対流抑制対策について

前(1)に比較し、上下階に通じる堅穴が1本の場合または対流経路を扉等で遮断した場合は、燃焼中および鎮火直後にのみ燃焼生成ガスの濃度上昇が見られたが、これは燃焼に伴う火災室内の圧力変動により燃焼生成ガスが他の室へ噴出した影響であり、複数の階層にわたる対流現象は発生しなかったと判断される。

したがって、対流現象によって避難路や上下階に煙や有害ガスが充填することを抑制するためには、階段へ通じる扉や、上下階に通じるダクトの開口部を閉鎖することが重要かつ効果的であることが分かる。

(3) 排煙の効果について

給気をせず廊下等の排煙のみ実施した場合は、煙流動を遮断することは出来なかった。これは、外部に対し気密性の高い施設で排煙のみを行

なっても負圧が生じるだけであり、煙等が排煙口に有効に吸入されないことを示している。

排煙と同時に自然給気を行なった場合は、煙の流動はその位置で遮断されたが、CASE-4のように火災室付近で上下階に煙が侵入する経路が存在すると、それぞれの階に流入した煙が当該階を水平移動したのち階段を通じて排煙を実施している階へ流入する状況が見られた。これは排煙に伴う若干の負圧によって階段などの避難経路を含む様々な経路から煙等呼び寄せしてしまうためであり、地下深層階などで給気ダクトが長くなるような場合は、排煙と同時に機械給気等を行い負圧の発生を防止する必要がある。

扉等の閉鎖で煙の対流が効果的に抑制できることは前項で述べたが、この場合であっても、火災に伴う圧力上昇によって他の区画へ煙が噴出するおそれがあることは実験でも確認されており、火災による圧力上昇を吸収するため火災室の排煙を実施することが望ましい。また、煙流動の危険範囲を施設内のごく一部に止めるためにも火災室またはその近傍での排煙が効果的であると思われる。

文献1 FIGARO GAS SENSOR フィガロ技研㈱