

地下施設火災における煙対策に関する研究（その3）

Study of the Smoke Spread in an Underground Fire Test Model (Series 3)

平 沢 正 己*

稲 村 武 敏*

杉 田 直 樹*

概 要

模型実験を行い、煙に含まれる一酸化炭素ガスの濃度及び温度を測定することにより、地下施設内で火災が発生した際に地上から階段室を通じて風が流入したときの煙流動の状況及び避難行動、消防活動等を想定して地下の居室等から階段室へ通じる扉を開閉した時の煙の状況について検討した。

その結果以下の事項を把握した。

地下施設内へ風が流入した場合は、施設全体としては外気流入による希釈の効果で煙濃度が低下する傾向が認められたが、風によって押された煙が通過したために無風時より煙濃度が高くなる場所もあった。

また、地下施設内へ流入した風を防煙に利用する場合については、風速、扉の状況、煙の温度等の条件が満たされないとその効果が期待できない。

地下の居室等から階段室へ通じる扉を間欠的に開閉した場合は複数の階段に比較的均等に煙が流入し、浮力が釣り合ってしまうため、上下の階にわたる煙流動現象は発生しにくくなる。

The behavior and the concentration of smoke at an underground fire was studied by monitoring the concentration and the temperature of carbon monoxide in an underground fire test model.

The findings were as follows.

When the fresh air flew into the underground floors, the smoke concentration tended to decrease, but it became thicker in some spaces where there was smoke compressed by the air flow.

The factors of wind velocity, location of the doors, opening and shutting of the doors and smoke temperature have to be considered to make use of the fresh air flow as the smoke shield.

When the doors of the stairwells were intermittently opened and closed, the smoke flew into the stairwells equally from the floor and the smoke became balanced in the stairwells where vertical smoke behavior was rarely seen.

1 はじめに

地下施設から出火した場合の煙流動性状について、模型実験によって特性の把握、対策の検討を進めている。

平成6年度は、模型実験により火災が発生している地下階へ地上から階段を通じて風が流入した場合の煙流動に係わる影響及び風を利用した防煙の可能性ならびに消防活動等に伴う防火戸開閉が地下施設内の煙流動に与える影響について、煙に含まれる一酸化炭素ガス（以下「CO」という。）の濃度変化及び温度を測定する方法により検討した。

前年度までに把握した地下施設内に発生する対流現象

は地下の居室等から階段室に通じる扉を全開にする等、安全対策の立場から見れば極端に悪い条件のもとで発生する現象であった。このため、現実により得る条件として避難等に伴い防火扉が開閉されることを盛り込んで実験を行なった。

2 実験模型、資器材

(1) 模型概要、特性

使用した模型の形状、送風ファンの位置を図1に掲げる。

実際の地下施設は周囲が土砂や地下水に囲まれており外気に対する気密性が非常に高いことが予想される。実験を進めるにあたり、使用する模型の気密性能を把握しておく必要があるが、地下施設を対象とする気密性能の評価方法で模型に対しても適用できるような適

*第一研究室

切なものが無かったため、住宅を対象として開発された評価方法である文献1における気密性能試験を適用することとした。

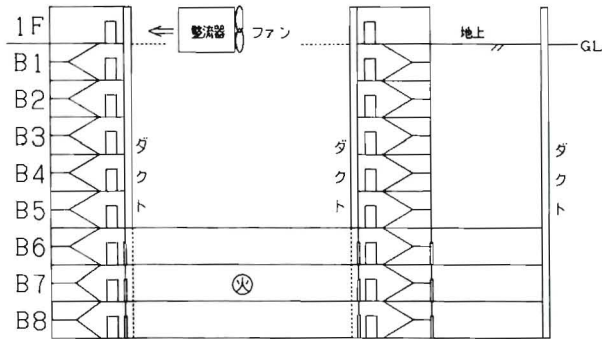


図1-1 模型立面図



図1-2 模型平面図 (地下6階～8階)
※火点は地下7階

この試験は、建築物に計画的に作られている開口部をポリエチレンフィルム、粘着テープ等で密封してから建築物内部を加圧または減圧し、外気との差圧を一定に保つために必要な注入または排出空気量を測定するものである。

模型でこの試験を行なうに際し、模型に設けてある外気に通じているダクトや扉等を密封し、模型内部の扉等は全開にして、模型内部と外気との差圧を1mmAqに保つよう模型に設置してあるファンで吸引し、単位時間あたりの排出空気量を計測した。

気密性能は「単位床面積当たりの相当開口面積 (EOR)」で表わされ、差圧が1mmAqの時は次のようになる。

$$EOR = \frac{0.628\sqrt{\gamma Q}}{S} \quad (\text{cm}^2/\text{m}^2)$$

Q: 排出空気量 (m³/h)

γ: 空気の比重量 (kg/m³) で

$$\gamma = \frac{353.25}{273.17 + \text{気温 (}^\circ\text{C)}}$$

S: 床面積 (m²)

本試験の評定尺度を次に掲げる。

EOR (cm ² /m ²)	~4.0	4.0~ 7.0	7.0~ 13.0	13.0~ 22.0	22.0~
級	1	2	3	4	5

実験に使用する模型について、吸引ファンの設置場所を変えながら6回測定した結果、最小値2.28(cm²/m²)、最大値2.71(cm²/m²)、平均値2.46(cm²/m²)を得た。これは評定尺度では最も気密性の高い区分である1級に該当する。

(2) 測定器材

- 半導体COセンサOST-CS01P (専用アンプ付、(株)オスト)
- K熱電対
- データ切換器 DL9060 (株)TEAC)
- 風速計 アネモマスターMODEL1500 (日本カノマックス(株))
- 圧力計 FC-452 (テストターム(株))
- パーソナルコンピュータPC-9801RA21、PC9801N (日本電気(株))

なお、COセンサのアンプを通した出力電圧 (V) とCO濃度 (D) とは、次の関係になっている。

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

(3) 火源

LPGい号、1.9 [ℓ/min]、3.16 [kW] (実大火災の熱量1MW相当)。

なお、一部の実験で5.7 [ℓ/min]、9.48 [kW] (実大火災の熱量3MW相当) でも実施した。

3 実験結果

(1) 地上の風の影響

ア 煙流動に及ぼす影響

地上で建築物の開口部に風が吹き付けている場合、風圧力により外気が流入する。この流入外気の影響を確認するため、ファンを用いて実験模型に風を当てながら煙流動の観測を行なった。

風速は、風が流入する模型の開口部で1.0m/secとし、流入した風が模型内部を通り抜けて他の開口部から排出されるよう、風が当たらない位置で外気への開口部を開放している。なお、模型内部で風が通り抜ける経路は図2のように設定した。

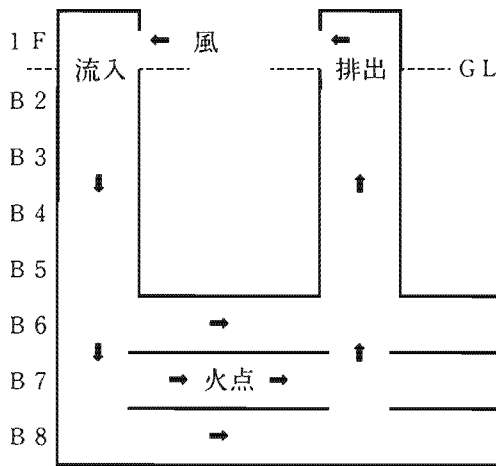


図2 風の経路

風が開口部に流入している場合と無風の場合について、左側の階段内の地下5階及び地下6階のCO濃度を比較したところ図3（地下5階）及び図4（地下6階）のようになった。

左側の階段に風が流入している場合、この階段内にあるこれらの測定点はいずれも火点の風上になるが、点火から10分経過後迄の間に一時的に無風時よりCO濃度が高い状態が見られた。これは、地上の扉から流入した風で階段室の内部に乱れた気流が生じ

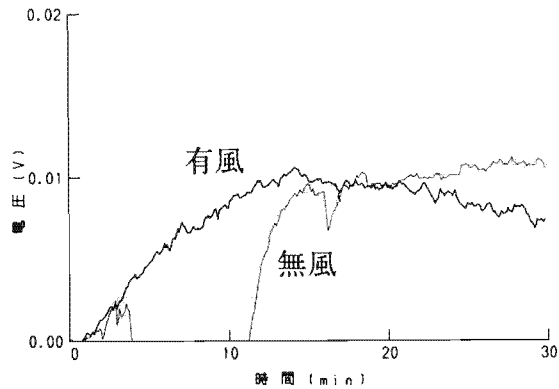


図3 左の階段地下5階のCO濃度

ており、地下の居室等から階段室へ流入した煙がこの気流によって運ばれて、COセンサに早期に感知されたものと思われる。

その後の階段内のCO濃度は、風が流入した時のほうが低濃度に止まっており、外気流入によってCOが薄められていることがうかがわれる。

右側の階段室でのCO濃度変化は、図5（地下5階）及び図6（地下3階）のようになっており、無風時にはCOが地下5階で高濃度、地下3階では比較的低

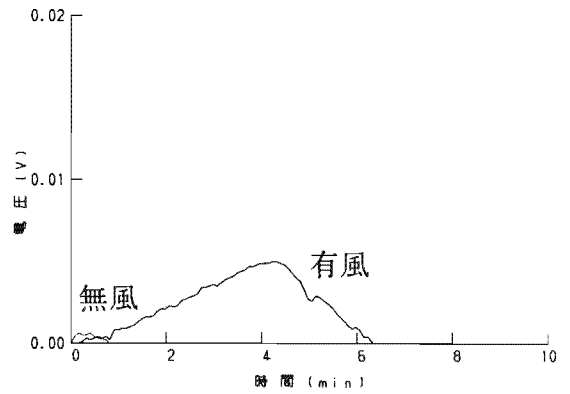


図4 左の階段地下6階のCO濃度

濃度となっているのに対し、左側の階段へ外気が流入した場合は、地下5階部分では、無風時に比較してCO濃度が低下し、地下5階部分より風下になる地下3階部分では無風時に比較してCO濃度は上昇した。このCO測定結果について見ると、無風時には煙は温度差による浮力のみで流動するため、階段室下部からの外気流入が無い地下施設では流動速度が非常に緩慢であり、同じ階段室内でも火災階付近と数階層上部では濃度差が大きい。左側の階段室へ外気が流入した場合は、煙と共に火災になっていない部分を風圧の影響で通り抜けてきた空気も右側の階段室へ流れ込むため、右側の階段室の中ではこれらが混ざりあって無風時よりやや濃度が低下した煙が、無風時より速い速度で地上の開口部へ向かって移動する。このため右側の階段室内の地下5階部分と地下3階部分でのCOの濃度差が小さくなり、地下5階部分では無風時、地下3階部分では有風時の方が濃度が高くなったものと思われる。

また、火点階の下の階では図7のような濃度変化が見られ、無風時の場合に顕著に見られるCO濃度上昇が、外気流入の場合には殆ど見られなかった。これは、施設内対流による下階のCO濃度上昇が発生しなかったものと思われる。

イ 地上の風による防煙効果の検討

前アの結果を踏まえ、階段室の地上にある開口部から風が流入しているときに、風を使ってこの階段室の地下階にある開口部の防煙を行なうことが可能であるか検討した。

火災室から流出した煙は火災室前の廊下部分で60～90℃の温度が記録されており、廊下の左にある階段附室の左端（火点から見て階段出入口より遠い位置）で27℃程度であったため、階段出入口へ達した時点での温度は30℃程度を保持していたと推定される。

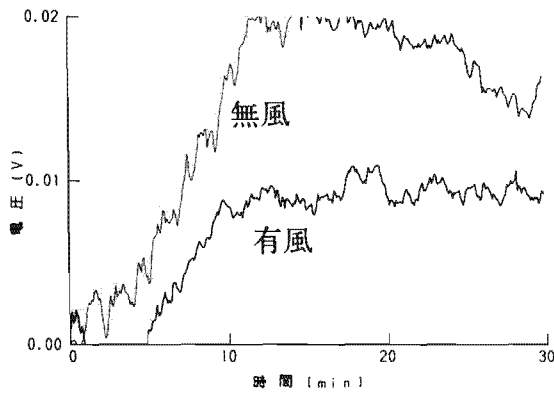


図5 右の階段地下5階のCO濃度

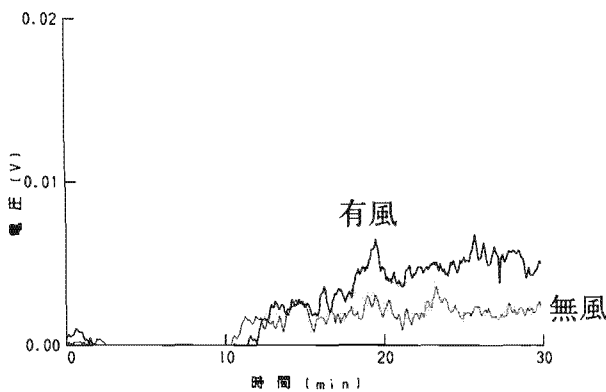


図6 右の階段地下3階のCO濃度

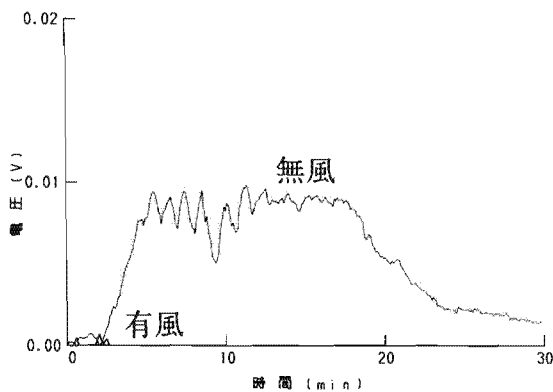


図7 右の階段地下8階のCO濃度

この温度の煙が通過しようとしている開口部に煙と逆方向の風を送り防煙するのに必要な風量 m_d は

$$m_d = 2/3 \alpha B \sqrt{2g\gamma_a (\gamma_a - \gamma_s)} h^{3/2}$$

- B : 扉の幅
- h : 扉の高さ
- γ_s : 煙の比重量 (kg/m³)
- γ_a : 空気の比重量 (kg/m³)
- α : 流量係数

と表わされ、開口部から流入する風量と風速は

$$m_d = \alpha B h v$$

v : 風速 (m/sec)

の関係にあることから

$$v = 2/3 \times h^{1/2} \sqrt{2g\gamma_a (\gamma_a - \gamma_s)}$$

となり、模型の開口部 (0.1m×0.2m) で30°Cの煙に対する防煙効果を生じる風速は0.35m/sec以上となる。

この実験のように、1.0m/secの風速で外気が階段室の地上の出入口へ流入し、地下階の階段室出入口から居室等へ風が出て行っても、地上の出入口 (風の入口) と同じ開口面積の3箇所以上の地下階の階段室出入口 (風の出口) があると、それぞれの風の出口では風速が3分の1の0.33m/secとなり、十分な防煙効果が現われないことが分かる。

(2) 階段出入口扉が開閉を繰り返した場合

点火したのち、間欠的に火災階の階段室扉を開く操作を繰り返し行なったところ、階段室における上昇気流、下降気流は顕著には発生しなかった。

今回は、次の条件で実験した。

- ・火災室は地下7階の2系統の階段の間にある居室
- ・ダクト開口部は全て閉鎖
- ・火災階以外 (地上階も含む) の階段室及び階段附室の扉は全て開放
- ・火災階の階段附室扉は開放

点火後、2系統の階段の火災階にある扉を同時に1分間開放、1分間閉鎖を繰り返す要領で10分間開閉操作した。

この場合左右2系統の階段いずれについても火災室から階段内の地下5階に至る間でCO濃度、温度が上昇したが、地下3階ではCO濃度の上昇、温度上昇いずれもほとんどなく、火災階より下階への流動もなかった。

なお、この実験における地下5階での煙の温度は室温プラス1.7度であったが、階段扉を常に開放状態にした実験では室温プラス4.5度が観測されている。

今回の実験で顕著な対流が見られなかった理由として、次のことが考えられる。

- ・階段扉を開閉操作したため、常時開放に比較して煙が廊下から階段附室までの間に滞留しやすくなり、扉の開放時に2系統の階段にはほぼ同時に流入したため、煙の浮力が釣り合ってしまった (図8、9)。
- ・階段扉の開閉により、煙が階段に流入するのに時間を要するようになり、冷却によって煙の温度が低下してしまった。

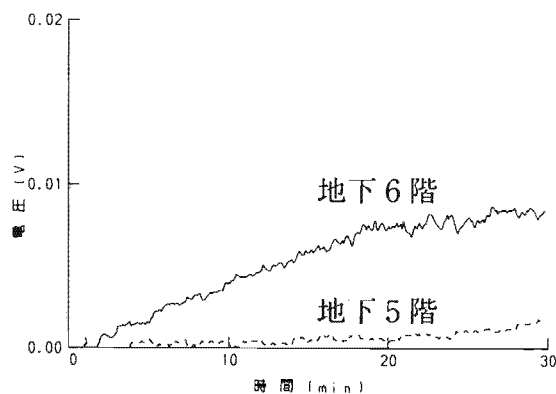


図8 左の階段CO濃度（地下5、6階）

この実験については燃焼させるLPGの量を1.9[l/min]に設定して行なったほか、3倍の5.7[l/min]に増やした場合についても行なってみたが、LPGの燃焼量が増大したため早期に酸素不足となって立ち消えてしまい、温度上昇は同程度であり同様の結果となった。

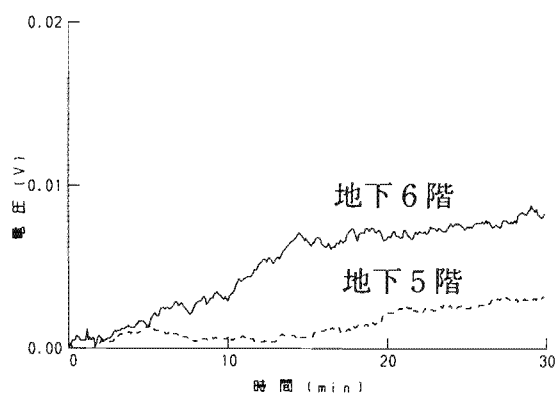


図9 右の階段CO濃度（地下5、6階）

4 まとめ

- (1) 風が地上の階段室出入口から階段室に流入し、地下の階段室出入口から居室、廊下等を通って、他の階段室経路で風圧のかかっていない地上の階段室出入口から排出される経路が形成された場合、風の流入によって
 - ・ 有毒ガスを含んだ煙が風に押されて、火災発生箇所から離れた場所まで早く、広く流動拡散する。→危険な範囲の拡大が早い。
 - ・ 風によって煙が流動する際、流入した外気や地下施設内の空気と混ざり、煙の濃度が低下する。→煙が薄められて見通し距離が延びたり、有毒ガスの濃度低下で毒性が低くなる等危険性が低下する。

という相反する効果が生まれる。ただし、実大火災実験ではCOの最大濃度が10%~13%に達する例もしばしば見られるので、10~20倍の希釈ではまだ人命に危険な濃度である。なお、外気流入によって強制的に煙が移動してしまうと、施設内における煙の対流の発生が抑制されるので、下階へ煙が下降流入して滞留蓄積するおそれは少なくなり、下階の煙による危険性は少なくなる。

危険性の予測として考察すべき要素のうち、煙流動の空間的な広がりはこの実験方法で考察できるが、煙の発生量と流入する外気量、攪拌、希釈による煙の予想濃度、燃焼物質によって異なる有毒ガスの種類と発生量、さらに人間の煙中の避難行動力等まで強い関連を持っており、最終的にいくつかの実大実験のデータを取り込んで危険性予測を行なう必要がある。

次に、風を積極的に防煙に使うことが可能かどうかであるが、今回検討した風速1.0m/secは、実大規模では約3m/secに相当し、風が通り抜ける経路を設定しておけば窓や扉から取り込むことが可能な風速である。検討条件としては、風が階段室に流れ込む地上の階段室出入口（風の入口）と、地下階で階段室から居室等へ出てゆく階段室出入口（風の出口）の寸法を等しくし、入口の数を1箇所、出口の数を3箇所に設定したが、この程度の風を防煙に活用するには、風を取り込む方法に工夫を要するとともに防煙を実施する開口部を極限する必要がある、多数の階層で避難等のために防火戸が開かれることを想定すると、強風時以外はやや効果が低いと思われる。

- (2) 本実験の結果から、避難行動等に際し一時的に防火戸が開かれ階段室に煙が流入しても、複数の階段室に一斉に煙が流入してしまうとかえって顕著な煙流動は発生しないという結論になった。これは、高い気密性を有し、外気へ面する窓ガラスが熱で破壊して大量の外気が流入すること等がない地下施設特有の状況と思われる。

しかしながら、今回の実験では階段室内の煙の温度が常温よりわずかに数度高いだけとなっており、本実験模型がガラスを多用しているため煙が冷えやすくなっていると思われる、その影響が出ている感拭えない。実大火災実験では、条件が異なるにせよ今回より高い温度の煙が観測される場合が多いので、本件についてはさらに検討する必要があると思われる。

この実験から得られるデータは、本質的に煙の温度に大きく影響を受ける。従って、再検討を要する事項については、燃焼方法、煙の温度管理、煙流動の観測方法等の洗い直しや今までに実施した模型実験のデータ、実大火災実験のデータとの比較等を十分に行って

確認を行ないたい。

また、今後は模型のガス燃焼量や空調機器の風量等を変えながら実験を行なうと共に、建築等各分野で検討されている煙の流動予測技法と模型実験や実大火災実験の結果との比較検討なども併せて行い、避難安全対策、消防活動対策をまとめていくつもりである。

参考文献

- 1 建築研究報告 No87 MARCH 建設省総合技術開発プロジェクト 住宅性能総合評価システムの開発研究報告書 建設省建築研究所
- 2 建設省住宅局建築指導課監修 新・排煙設備技術指針 1987年版 日本建築センター
- 3 消防科学研究所報 平成5年 30号 東京消防庁消防科学研究所
- 4 消防科学研究所報 平成6年 31号 東京消防庁消防科学研究所
- 5 消防学校第二校舎火災実験報告書 平成4年9月 東京消防庁