

## 洞道等の地下構造物の煙流動に関する研究 (第2報)

Study of the Smoke Spread in an Underground Structure (Series 2)

坂本 利行\*

吉村 延雄\*

杉田 直樹\*

## 概 要

洞道のような地下構造物内で発生する火災の多くは、長時間の消防活動を強いられている。

このことから、消防活動上の障害要因である濃煙・熱気等を効率的に換気し、濃煙等による困難性を低減するための消防活動対策等の基礎資料に資するため、平成8年度から模型による煙流動実験を行っている。

平成8年度は、直線的な形状の洞道模型を使用して換気時の給・排気口の開口条件、換気条件等を変えて実験を行った結果、給・排気両側で機械換気を同時に行い、それぞれの風速を等しくすることがより効果的であることが確認された。

平成9年度では、本結果を踏まえ、さらに洞道の敷設形態や洞道内の形状等が異なる場合について確認するため、洞道が屈折や傾斜している場合などを想定し、より現実に近づけた模型を使用した煙流動実験を行った。

Underground fires which occur in cable tunnels require many hours of firefighting. Considering this, fire spread test was started in 1996 using a scale model, in order to find ways to ventilate heat and smoke effectively and reduce firefighting difficulty. The results are used as the basic data for on-scene operations.

In the test of 1996 we used a model of a straight-line cable tunnel, and changed the opening and ventilating conditions of an air inlet and outlet. As a result of this it was confirmed that the most effective way of controlling the smoke spread was to mechanically operate both the air inlet and outlet at the same time, making the air flow the same speed at both openings.

Based on the results of this test, we conducted a more practical experiment, using a cable tunnel model with curves or slopes, to deal with cable tunnels of various designs.

## 1 はじめに

洞道は、地中に鉄筋コンクリート等による暗きよを敷設し、その内部に電力や通信ケーブルを設置したものであり、外部からは火災などの影響を受けないが、内部でひとたび火災が発生すると電力や通信のケーブルの被覆などが燃焼し延焼拡大する恐れが高い。

また、地下空間という狭隘で閉鎖された環境下にあることから、濃煙・熱気や有毒ガス等が充満するなど消防活動の障害となることが多い。

これらのことから、消防活動上の障害要因である濃煙・熱気等による困難性を低減するため、洞道のように閉鎖された空間内での煙流動特性を把握し、消防活動対策等の基礎資料とすることを目的として、平成8年度から

研究を行っている。

平成8年度では、縮尺1/10の直線的な形状の模型を使用して換気時の給・排気口の開口条件、換気条件等を変えて実験を行った。

その結果、給・排気両側で機械換気を同時に行い、それぞれの風速を等しくすることがより効果的であることが確認された。

平成9年度は、洞道が屈折している場合など、敷設形態の違いによる特性を検証するため、洞道模型の形状を変えて実験を行ったのでその結果について報告する。

\* 第一研究室

## 2 実験概要

### (1) 実験方法

実験は、模型内に設置したバーナーでLPGを燃焼させ、燃焼に伴って発生するガスのうち煙の挙動と比較的よく一致する一酸化炭素の濃度変化について、一酸化炭素用半導体ガスセンサーを用いて測定することにより、一酸化炭素の流動を煙の流動とみなし、換気時の煙の流動を推定することとした。

また、煙を効率的に排除する方策を得るため、平成8年度と同様に給気・排気側の開口条件、換気条件を変えて行った。

なお、換気に伴う濃度低下を比較するため、換気開始時の濃度を一定とし、各々の換気条件における吐出側の一酸化炭素濃度が1/2に低下するまでの時間について主に比較検討した。

### (2) 実験模型

実験は、洞道等を想定し、大きさ1/10の縮小模型を使用した。

今回使用した実験模型は、次の3種類の形状とした。

ア 傾斜型模型 (図1)

イ L字型模型 (図2)

ウ T字型模型 (図3)

実験模型の材質はケイ酸カルシウム板とし、側面には、観測窓を設置した。

開口部は直径90mmとし、各形状の模型ともそれぞれの端から300mmの位置に設定し、ダクトにより天井部分から換気できるようにした。

さらに、機械換気が行えるようファンを着脱できるものとした。

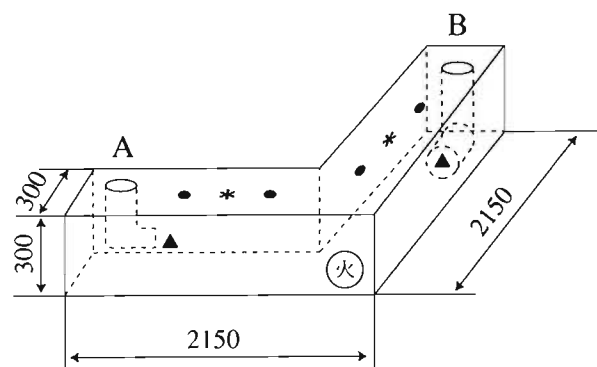


図2 L字型模型 (概要図)

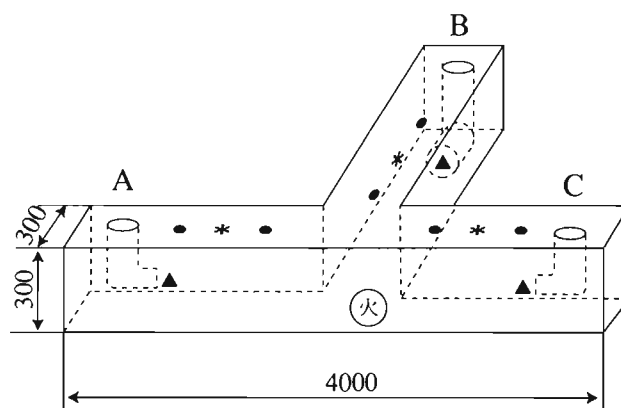


図3 T字型模型 (概要図)

- 凡例
- A, B, Cは、換気位置
  - ・印は、CO濃度測定位置
  - \*印は、CO濃度比較位置
  - ▲印は、風速測定位置

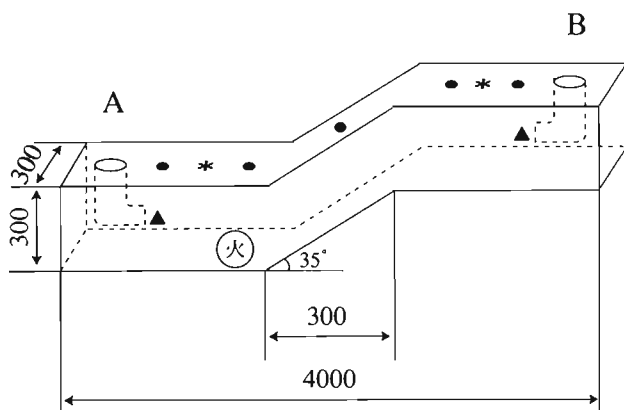


図1 傾斜型模型 (概要図) 単位: mm

### (3) 測定項目

実験に際しては、次の項目について測定を実施した。各測定に必要なセンサーを下表のとおり設置し、データ切替器を介してパーソナルコンピュータによりデータ収録した。

測定項目	傾斜型模型	L字型模型	T字型模型
CO濃度	7	6	9
風速	2	2	3
温度	7	6	9
圧力	2	2	3

(数字は、測定点数)

(4) 測定器材

- ・ パーソナルコンピューター  
日本電気(株)、PC-9801N
- ・ データ切替器  
TEAC(株)、DL-9060
- ・ K線熱電対
- ・ 半導体COセンサー  
(株)オスト、OST-CO01P
- ・ 給気・排気ファン  
山洋電気(株)、SANACE25、最大風量 2.5m<sup>3</sup>/min
- ・ 風速計  
(株)テストー、FC-452、熱式ボール風速センサー使用
- ・ 圧力計  
(株)テストー、FC-452、差圧センサー使用
- ・ 火源 LPGい号

3 実験条件等

今回実施した、各々の形状における換気条件等の設定は、次のとおりである。

また、換気条件の給気・排気は機械換気によるもので、全て3m/sに設定して実験を実施した。

ただし、※を付した箇所の風速は、給・排気の換気量の関係から1.8m/sとした。

(1) 傾斜型模型

実験No.	換気条件		濃度1/2までの所要平均時間 (秒)
	A側	B側	
傾-1	排気	給気	75
傾-2	自然	給気	60
傾-3	給気	自然	60
傾-4	給気	排気	43
傾-5	自然	排気	33
傾-6	排気	自然	50
傾-7	自然	自然	220

(2) L字型模型

実験No.	換気条件		濃度1/2までの所要平均時間 (秒)
	A側	B側	
L-1	自然	自然	310
L-2	自然	排気	150
L-3	給気	自然	186
L-4	給気	排気	63

(3) T字型模型

機械換気数	実験No.	換気条件			濃度1/2までの所要平均時間 (秒)
		A側	B側	C側	
0	T-1	自然	自然	自然	(652)
	T-2	自然	排気	自然	55
	T-3	自然	自然	排気	303
	T-4	自然	排気	閉鎖	149
	T-5	閉鎖	自然	排気	258
	T-6	自然	閉鎖	排気	88
	T-7	自然	給気	自然	(199)
	T-8	自然	自然	給気	(93)
	T-9	自然	給気	閉鎖	96
	T-10	閉鎖	自然	給気	53
	T-11	自然	閉鎖	給気	80
1	T-12	自然	排気※	排気※	(31)
	T-13	排気※	自然	排気※	(60)
	T-14	給気	自然	排気	124
	T-15	自然	排気	給気	23
	T-16	給気	閉鎖	排気	118
	T-17	閉鎖	排気	給気	25
	T-18	閉鎖	給気	排気	25
	T-19	給気※	自然	給気※	38
	T-20	自然	給気※	給気※	99
2	T-21	給気	排気※	排気※	(28)
	T-22	排気※	給気	排気※	(63)
	T-23	給気※	排気	給気※	35
	T-24	給気※	給気※	排気	35

注) 1 ※は、風速1.8m/s  
2 所要時間欄の( )内は、2ヶ所の平均値とした。

4 実験結果

(1) 傾斜型模型

傾斜型模型を使用しての一酸化炭素の濃度変化の状況を見ると、図4、図5のとおりである。

さらに一酸化炭素濃度の低下に要する時間と換気条件の関係をみると、3(1)から、

- |   |    |    |        |
|---|----|----|--------|
|   | A側 | B側 | (実験番号) |
| ① | 自然 | 排気 | (傾-5)  |
| ② | 給気 | 排気 | (傾-4)  |
| ③ | 排気 | 自然 | (傾-6)  |
| ④ | 自然 | 給気 | (傾-2)  |
| ④ | 給気 | 自然 | (傾-3)  |
| ⑥ | 排気 | 給気 | (傾-1)  |
| ⑦ | 自然 | 自然 | (傾-7)  |

の順であったが、実験番号、傾-7を除いて大きな差はみられなかった。

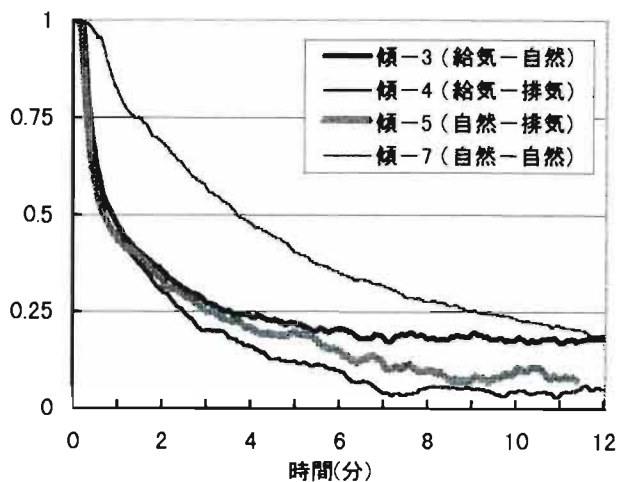


図4 傾斜型模型のCO濃度変化  
(Bの吐出側で比較)

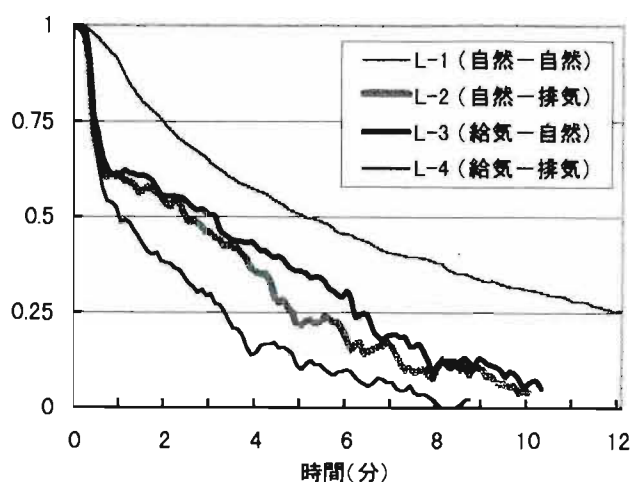


図6 L字型模型のCO濃度変化

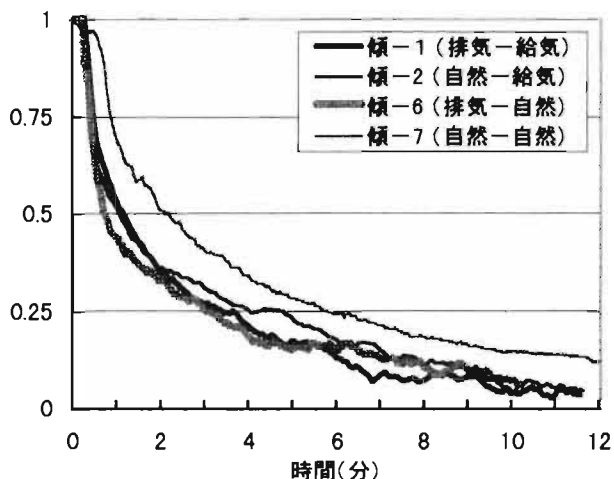


図5 傾斜型模型のCO濃度変化  
(Aの吐出側で比較)

## (2) L字型模型

L字型模型を使用するの一酸化炭素の濃度変化の状況を見ると、図6のとおりである。

さらに、一酸化炭素濃度の低下に要する時間と換気条件の関係をみると、3(2)から、

	A側	B側	(実験番号)
①	給気	排気	(L-4)
②	自然	排気	(L-2)
③	給気	自然	(L-3)
④	自然	自然	(L-1)

の順であったが、実験番号L-2とL-3では大きな差はみられなかった。

## (3) T字型模型

### ア 濃度変化の傾向

T字型模型において、一酸化炭素濃度の低下に要する時間と機械換気条件の関係をみると、3(3)から、

	平均時間(秒)
① 機械換気数2	23~124
② 機械換気数3	28~63
③ 機械換気数1	53~303
④ 機械換気数0	652

の順であったが、機械換気数が2ヶ所の場合と3ヶ所の場合では、3ヶ所の方が平均的にみると効果的であった。2ヶ所の場合は、換気条件及び開口条件等によって所要時間が大きく異なる結果となった。

### イ 閉鎖された開口部を自然換気とした場合

3ヶ所の開口部のうち、1ヶ所で機械給(排)気を行い、他の1ヶ所を閉鎖した場合と開放した場合を比較すると、機械排気の場合は、T-2とT-4(図7)から、開放されている方が一酸化炭素濃度の低下に要する時間は1/2以下と早くなっているが、機械給気の場合は、T-7とT-9から一酸化炭素濃度の低下に要する時間は、開口部が開放されている方が約2倍を要している。

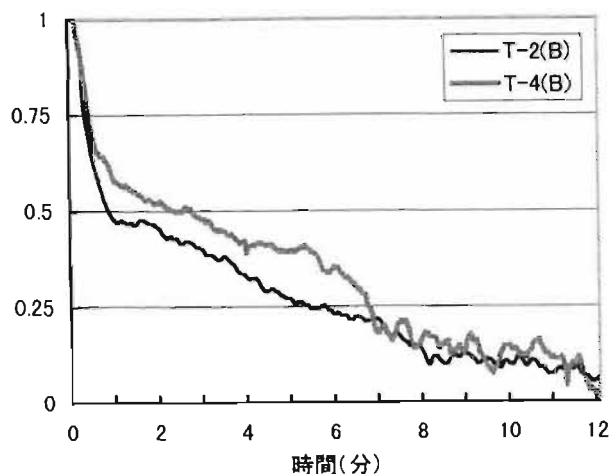


図7 T字型模型におけるCO濃度変化

注) 図中に表示される(A)(B)(C)は、  
図3に示した測定位置を表す。

ウ 自然換気から機械換気とした場合

3ヶ所の開口部のうち、1ヶ所で機械換気を行う場合と2ヶ所で機械換気を行う場合を比較すると、T-2とT-15(図8)、T-4とT-17、T-9とT-18から、2ヶ所で機械換気をする方が一酸化炭素濃度の低下は早く、給気と排気を併用することによって濃度の低下に要する時間は、1/2以下と早くなっている。

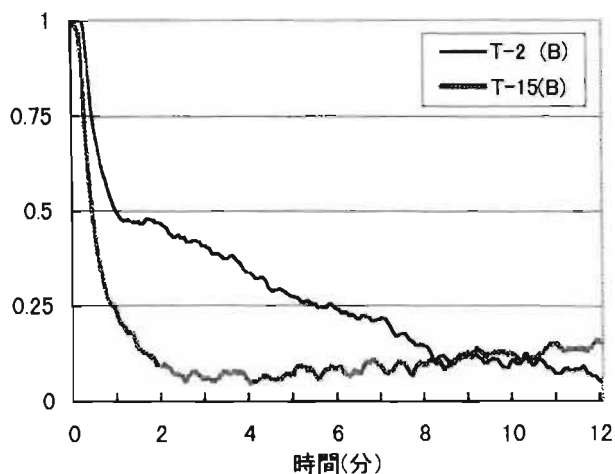


図8 T字型模型におけるCO濃度変化

エ 機械給気と機械排気の比較

3ヶ所の開口部のうち、1ヶ所を閉鎖し、他の1ヶ所で機械給気を行う場合と機械排気を行う場合を比較すると、T-4とT-9、T-5とT-10(図9)、T-6とT-11から、機械換気的位置に係わらず機械給気をする方が一酸化炭素濃度の低下に要する時間は短くなっている。

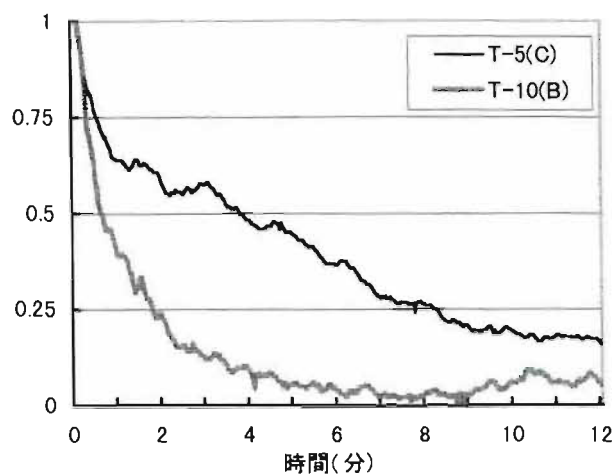


図9 T字型模型におけるCO濃度変化

オ 機械換気的位置の違いによる比較

(7) 機械換気1ヶ所の場合

3ヶ所の開口部のうち、1ヶ所で機械給(排)気を行う場合に、機械換気的位置を変えて比較すると、機械排気の場合は、T-2とT-3(図10)から、自然換気的位置関係が直線状の場合の方が一酸化炭素濃度の低下に要する時間は1/5以下と早くなっているが、機械給気の場合は、T-7とT-8から、機械排気とは逆に直線状の位置関係にある場合の方が2倍程度遅くなっている。

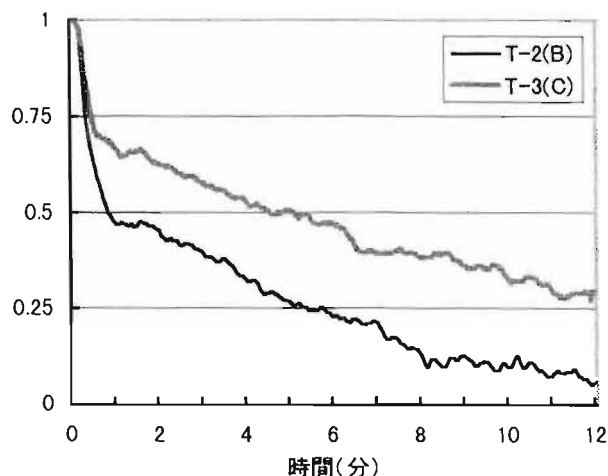


図10 T字型模型におけるCO濃度変化

(i) 機械換気2ヶ所の場合

3ヶ所の開口部のうち、2ヶ所で機械給気または、機械排気を行う場合にそれぞれの2ヶ所の機械換気的位置関係が直線状にある場合とL字状にある場合を比較すると、2ヶ所で機械排気を行う場合は、T-12とT-13から、2ヶ所の機械換気的位置関係がL字状にある場合の方が、一酸化炭素濃度の低下に要する時間は1/2程度と早くなっているが、2ヶ所で機械給気を行う場合には、T-19とT-20(図

11) から、機械排気とは逆に、L字状の位置関係の方が2倍以上遅くなっている。

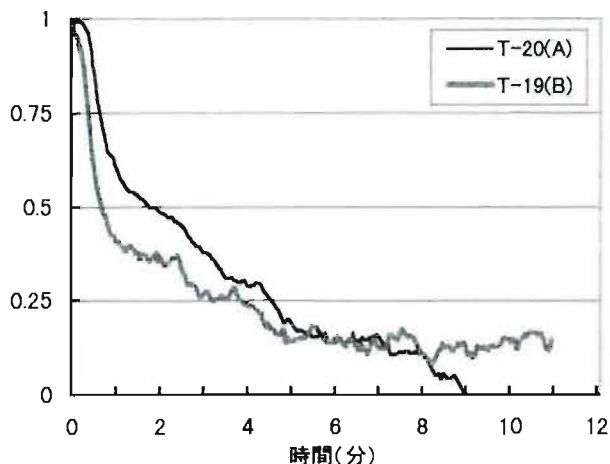


図11 T字型模型におけるCO濃度変化

カ 閉鎖部分の状況

3ヶ所の開口部のうち、2ヶ所で機械給(排)気を行い、他の1ヶ所が閉鎖されている場合の閉鎖された部分についてみると、3(3)の表とは別に、閉鎖された部分の一酸化炭素濃度の低下に要する時間は、T-16は190秒、T-17は145秒、T-18は190秒となり、2ヶ所の給(排)気位置の違いに係わらず、ほぼ同じであり、いずれも緩慢であった。

(図12)

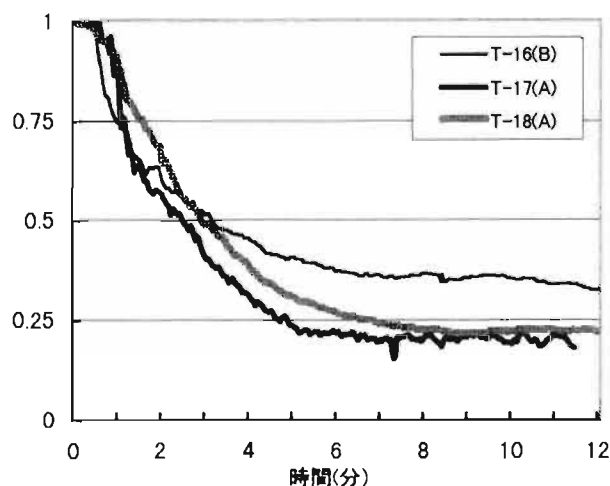


図12 T字型模型におけるCO濃度変化

(4) 各模型形状との比較

前年度に実施した直線模型での実験結果も合わせて比較すると、次のとおりである。

ア 傾斜型模型と直線模型の比較

傾斜型模型と直線模型において、一方を排気、他方を自然換気とした場合の一酸化炭素濃度の変化の

状況を比較すると、傾斜型模型の低所側から排出する場合(傾-1)を除いて、いずれも一酸化炭素濃度の低下に要する時間に大きな差はみられなかった。

(図13~15)

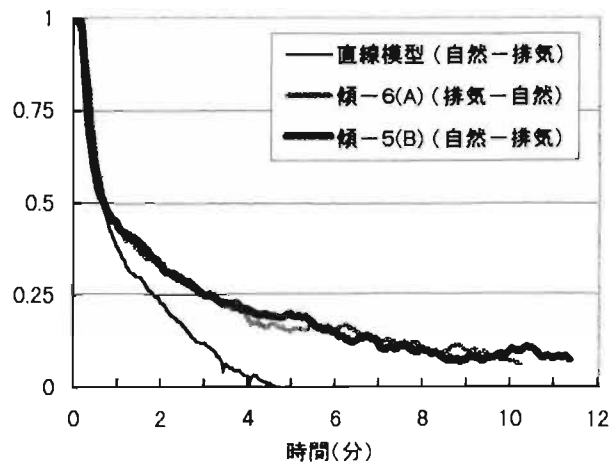


図13 傾斜型模型と直線模型

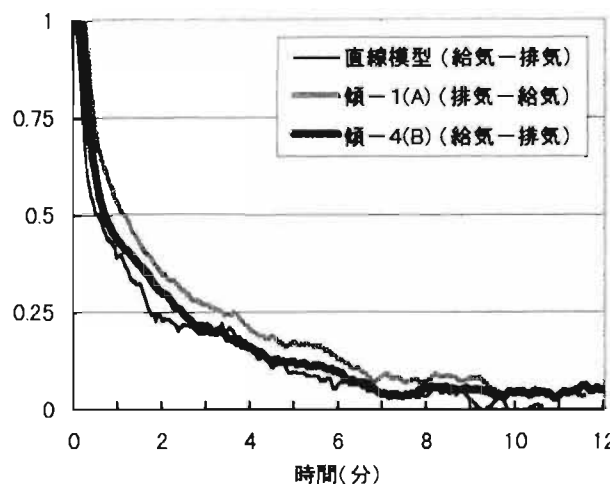


図14 傾斜型模型と直線模型

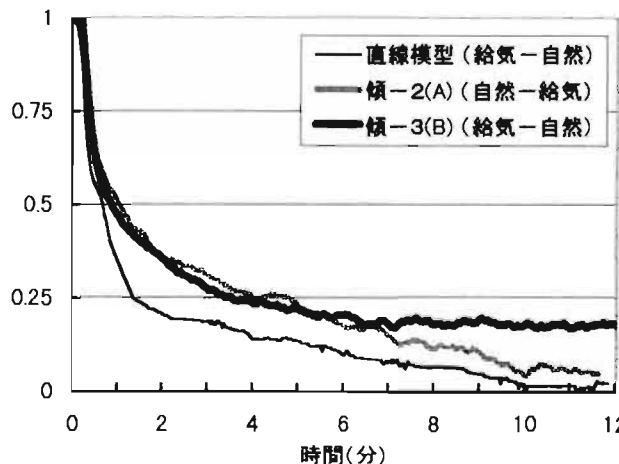


図15 傾斜型模型と直線模型

イ L字型模型と直線模型の比較

L字型模型と直線模型による場合を比較してみると、同一の換気条件では、いずれの場合でも一酸化炭素濃度の低下に要する時間は、L字型模型の方が直線模型より2～4倍の時間を要している。(図16～18)

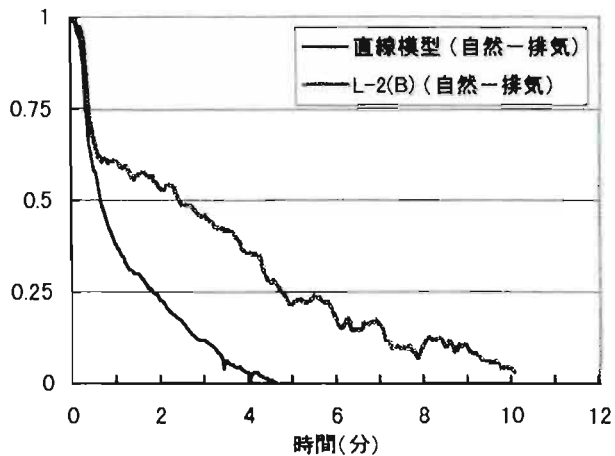


図16 L字型模型と直線模型

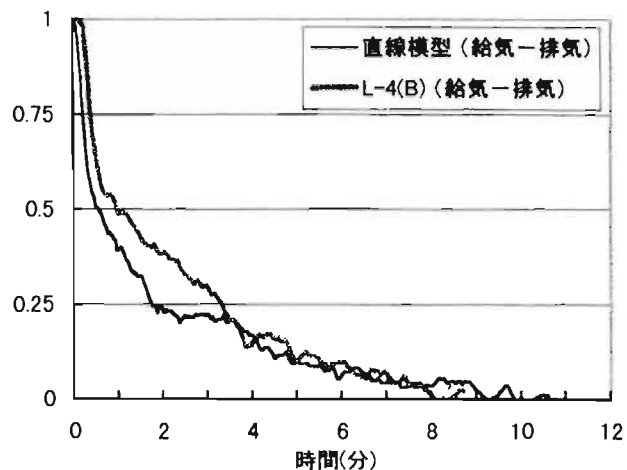


図18 L字型模型と直線模型

ウ T字型模型と直線模型

図19のようにBの換気位置が閉鎖された条件では、同一の換気条件においてはいずれの場合でも、T字型模型の場合は、濃度低下に要する時間が直線模型の2～3倍の時間を要している。(図20～22)

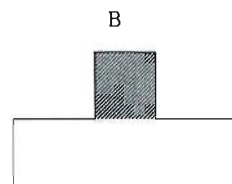


図19

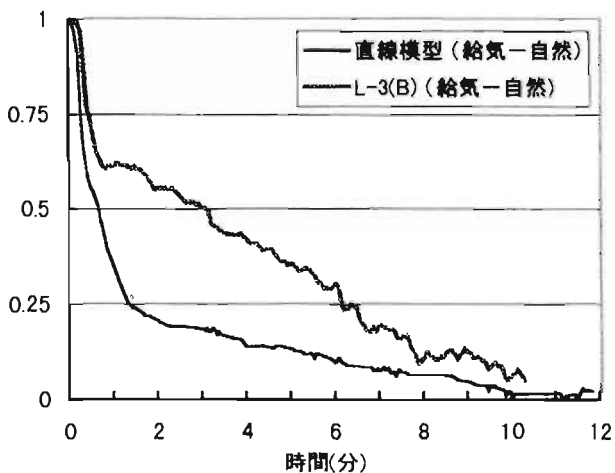


図17 L字型模型と直線模型

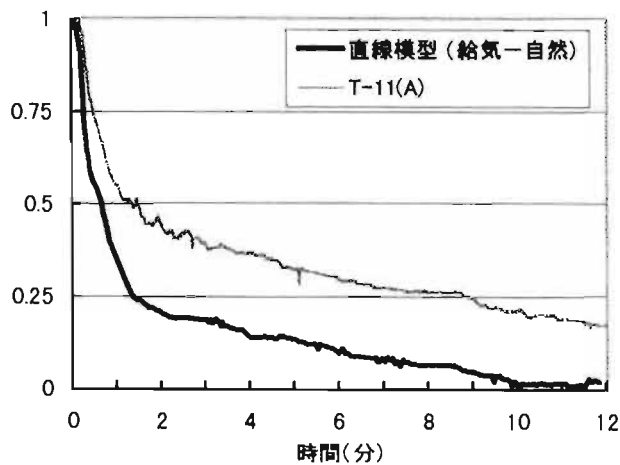


図20 T字型模型と直線模型

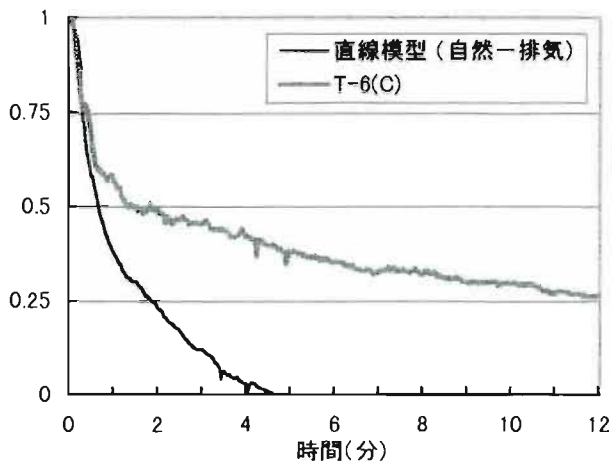


図21 T字型模型と直線模型

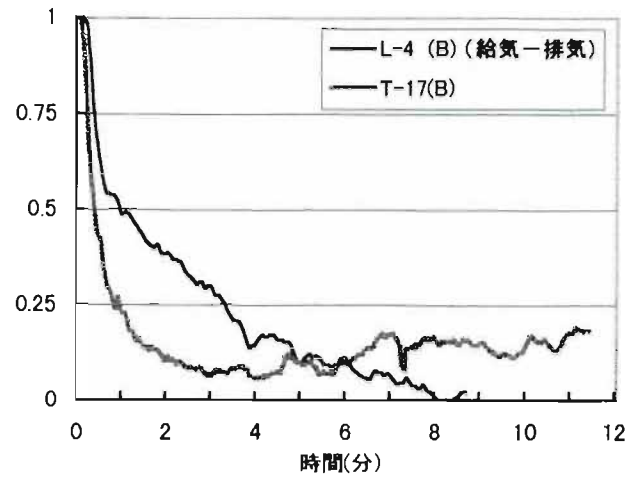


図24 L字型模型とT字型模型

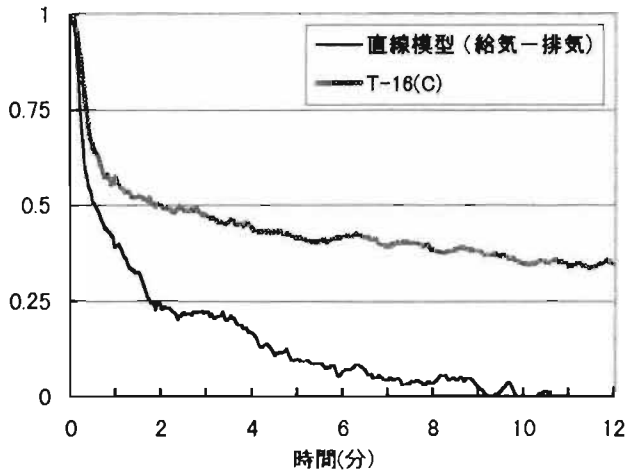


図22 T字型模型と直線模型

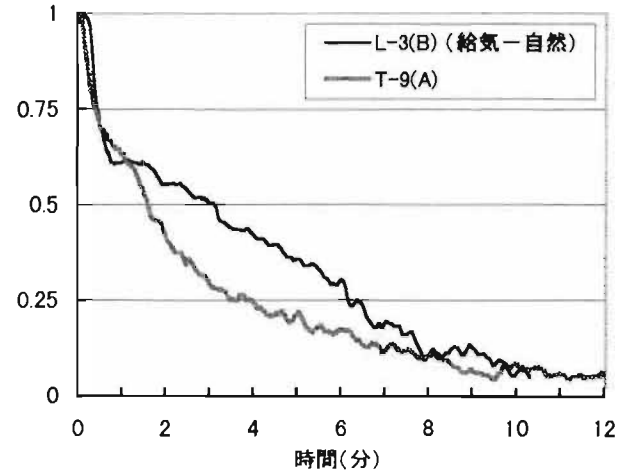


図25 L字型模型とT字型模型

エ L字型模型とT字型模型

図23のようにCの位置の換気口が閉鎖された場合は、L字型部分についてだけみると、換気条件に係わらずT字型模型の方が、L字型模型と同等か、より早い時間で一酸化炭素濃度の低下がみられた。

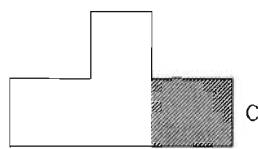


図23

(図24~26)

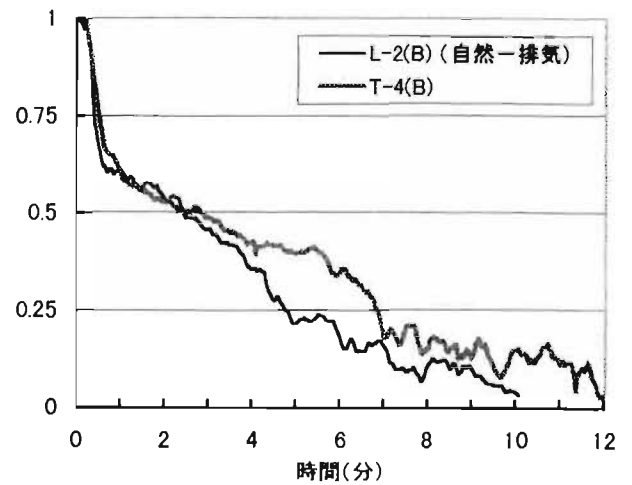


図26 L字型模型とT字型模型



(1) 傾斜型模型について

機械給気と機械排気のいずれか一方で換気を行う場合は、換気位置の高い方から機械排気を行う方が早く換気される。機械給気と機械排気を併用する場合には、換気位置の高い方を機械排気とし、低い方を機械給気とする方が効率的であった。

(2) L字型模型について

機械排気と機械給気を併用するのが効率的である。

換気方式の違いによる特徴は、直線状の場合と同じ傾向にあるが、換気に要する時間は直線状の場合と比較して2倍以上となっている。

(3) T字型模型について

ア 機械換気を1カ所で行う場合と2ヶ所で行う場合では、2ヶ所で行うことより換気効果は著しく大きくなる。

また、2ヶ所で行う場合と3ヶ所で行う場合を比較すると、3ヶ所の方が相対的に換気効果は大きくなっているが、2ヶ所で行う場合でも、位置関係によっては大きな効果が得られることがある。

イ 開口部3ヶ所のうち、1ヶ所だけで機械給(排)気を行う場合には、機械給(排)気的位置にもよるが、機械排気よりも機械給気とする方が効果的であった。

また、機械給気の場合は、直線状部分にあたるA又はC側の方がB側より効果的であった。

ウ 機械換気を行う場合には、機械給気と機械排気を併用し、給気と排気の双方の換気量を等しくすることによって効率的に換気が行える。

エ 機械給気を行う場合と機械換気を行う場合の換気位置の違いによる換気効果については、給気の場合は、直線状にあるA又はC側からの方が、また、排気の場合はB側からの方が効果的であり、相反する傾向がみられた。

今回の実験では、洞道を想定した縮小模型を使用して行ってきたところであるが、T字型模型による実験では開口部の位置をそれぞれの交点から等しい距離としており、実際の洞道等においては換気条件の他に距離の関係も影響されることから、模型実験とは傾向が異なることが考えられる。

このためにも、今後は実大規模での実験を行い、模型実験で得られた結果を検証する必要がある。