

## 2. トンネル建設工事における通風換気システムの改善に関する研究

佐藤 吉 信\*  
桑川 壮 一\*  
杉本 旭\*  
深谷 潔\*

Improvement of the ventilation systems used by tunneling works where methane gushes out

by Y. Sato\*  
S. Kumegawa\*  
N. Sugimoto\*  
K. Fukaya\*

To improve the ventilation systems used by the tunneling works where methane gushes out, the experiments in the diffusion of methane with model tunnels and the examinations of the systems are practiced.

In this study, model rules are set up as follows: (i) Geometric similarity. Two model tunnels, which have same cross sections shaped such as the combination of the half-circle whose radius is  $H/2$  and the rectangular form ( $H \times H/2$ ), and whose length is  $9H \sim 12H$ , are used. The value of  $H$  in the large model is 2[m], in small one it is 0.5[m].  $H$  is taken as the representative length in this model. (ii) Main  $\pi$  numbers of the physical quantities. As the temperature in the tunnels is assumed to be constant, so main  $\pi$  numbers that must be agree between the models and real things are  $Re_t$  (turbulent Reynolds number),  $Fr$  (Froud number), and  $Pe_t$  (turbulent Peclet number). (iii) Another dimensionless numbers related to the representative velocity of the ventilations and the gas gush, density of the gushing gas, and the representative concentration of methane in it are considered.

The experiment is mainly assumed that methane gushes out from the working face, the bottom or the ceiling near the face in the tunnels, and the distributions of methane concentration are examined in several conditions. These conditions are the representative concentration of methane, the distance  $A$  between working face and the tip of the wind duct, the effect of the supports, the representative velocity of the ventilations, the positions of the gas gush points and wind ducts, the ventilation type that is discharge or exhaust, and the presence of the obstacles in it.

In each cases, the dangerous areas where the concentration of methane by vol. is above 5[%] are grasped. It is confirmed that under the conditions that the distance  $A$  is under  $4H$  the dilution of

---

\* 機械研究部 (Mechanical Engineering Research Division)

methane is good, if the distance  $A$  is above  $5H$  the dilution of methane is bad. It is also recognized that when the representative concentration of methane is under 1.5[%] the methane gushing from the place near the working face is completely diluted at the place whose distance from the working face is equal to  $A$ , although some areas above 5[%] exist between the tip of the wind duct and the gas gush points.

It is reported that the  $\pi$  number  $Re_t$  and  $Pe_t$  are satisfied automatically if the air current in the space is well disturbed. And the experiments are performed based on this assumption, but it is not clear if the air current near the working face is well disturbed or not, so it is necessary to check up the realization of the model rules. Then if the large model is assumed to be a real thing, the small one is thought to be a quarter model of large one, some pilot experiments are performed by using these two models. And the result of the experiments shows that the similarity is nearly satisfied from the case of small velocity of the ventilations to the case of relatively high velocity, the adequacy of the model rules is confirmed.

On the basis of these consequences of the experiments and the data of the field studies, some examinations are discussed about the ventilation systems used in the tunnels where methane gushes out.

## 2.1 ま え が き

近年トンネル建設工事の需要の拡大および技術の進歩によって、メタンなどの爆発性ガス湧出地層においても、長大規模のトンネルが掘削されるようになった。このため、小規模トンネルではあまり問題とならなかった、通風換気システム、とりわけメタン等の原因による坑内爆発や坑内火災による災害の防止対策としての通風換気システムの改善が望まれるようになった。

トンネル内へ湧出したメタンガス等による、爆発火災災害を防止するためには、(イ)通常時におけるトンネル内の環境を、安全限界内に保持する事と、(ロ)換気停止時やガスの異常湧出時など異常時におけるガス拡散の現象をよく把握して、適切な対処方法が考えられていなければならない。

現在の時点では、ガスの湧出量の予測など、非常に不確実性の高い問題を孕み、坑道内のメタンガス拡散および稀釈についての研究も従来行われているが<sup>1)</sup>、それ等も現場において、十分活用されているとは言えず、換気システムの設定は経験的に決定せざるを得ない状況にある場合が多い。

そこで、本研究は、現場での換気システム設定の際に、必要とされる情報として、ガス拡散の模型実験の結果、および、通風換気システムの系統的検討を行った。

## 2.2 メタンガスのトンネル切羽における拡散実験

トンネル内におけるメタンガスなどの拡散現象は、その場における、気流や気流の乱れなどの気流性状に依存している。しかしながら、トンネル内などのような、閉鎖的空間<sup>\*1</sup>における気流の乱れに関しては、場所および時間に対する変動が激しく、不明の部分が多い。

このような現状であるので、理論的計算や数値計算も、たとえ大型計算機を用いたとしても限界があり、現実的な問題に適用して、実用に供するには至っていない。一方、この種の問題の対処法として、模型実験の有効性<sup>2)</sup>が提案されている。

以上の経緯を考慮して、トンネル模型を用いた、各種のモデル実験を行い、換気とガスの拡散稀釈との関係や、換気が停止した場合のガスの拡散現象を定量的

に把握するための実験を行った。

記号の説明

H : 模型のトンネル高さ [m]

H\* : 実物のトンネル高さ [m]

l : 切羽からの距離 [m]  $l_0$  : 無次元距離  $l_0 = l/H$

A : 切羽から風管までの距離  $A_0$  :  $A_0 = A/H$

h : 底からの高さ [m]  $h_0$  :  $h_0 = h/H$

(x, y, z) : トンネル内の位置の座標表示 [m]

L : 模型のトンネル長 [m]  $L_0$  :  $L_0 = L/H$

( $x_0, y_0, z_0$ )<sub>0</sub> : トンネル内の位置の無次元座標表示

$x_0 = x/H, y_0 = y/H, z_0 = z/H$

Q : 換気量 [ $m^3/min$ ]

Q\* : H\* = 5 [m] のトンネルに換算した換気量 [ $m^3/min$ ]

q : ガス吐出量 [l/min]

q\* : H\* = 5 [m] のトンネルに換算したガス吐出量 [ $m^3/min$ ]

C( $x_0, y_0, z_0$ ) : ( $x_0, y_0, z_0$ ) におけるガス濃度 [%]

C<sub>0</sub> : 代表濃度 [%]  $C_0 = q/q + Q$

U( $x_0, y_0, z_0$ ) : ( $x_0, y_0, z_0$ ) における平均風速 [m/s]

U<sub>0</sub> : 換気の代表吹出速度 [m/s]

U\*<sub>0</sub> : H\* = 5 [m] のトンネルに換算した換気の代表吹出速度 [m/s]

u<sub>0</sub> : ガスの代表吐出速度 [m/s]

u\*<sub>0</sub> : H\* = 5 [m] のトンネルに換算したガスの代表吹出速度 [m/s]

V<sub>0</sub> : 空気と混合されたガスの代表排出速度 [m/s]

k : 実物の模型に対する倍率  $k = H^*/H$

$\rho$  : 空気の密度 [ $kg/m^3$ ]

$\Delta\rho$  : 空気と吐出ガスの密度差 [ $kg/m^3$ ]

g : 重力加速度 [ $m/s^2$ ]

K<sub>m</sub> : 渦動粘性係数 [ $m^2/s$ ]

K<sub>s</sub> : 物質の渦拡散係数 [ $m^2/s$ ]

Ret : 乱流レイ・ノルズ数

Set : 乱流シュミット数

Pet : 乱流ペクレ数

F<sub>r</sub> : フルード数

### 2.2.1 実験の相似条件

トンネル内ガス拡散に関する相似条件としては、模型の幾何学的相似と、気流や拡散などを支配する物理

\*1 開口率20[%]以下の空間を閉鎖的空間としてよい。

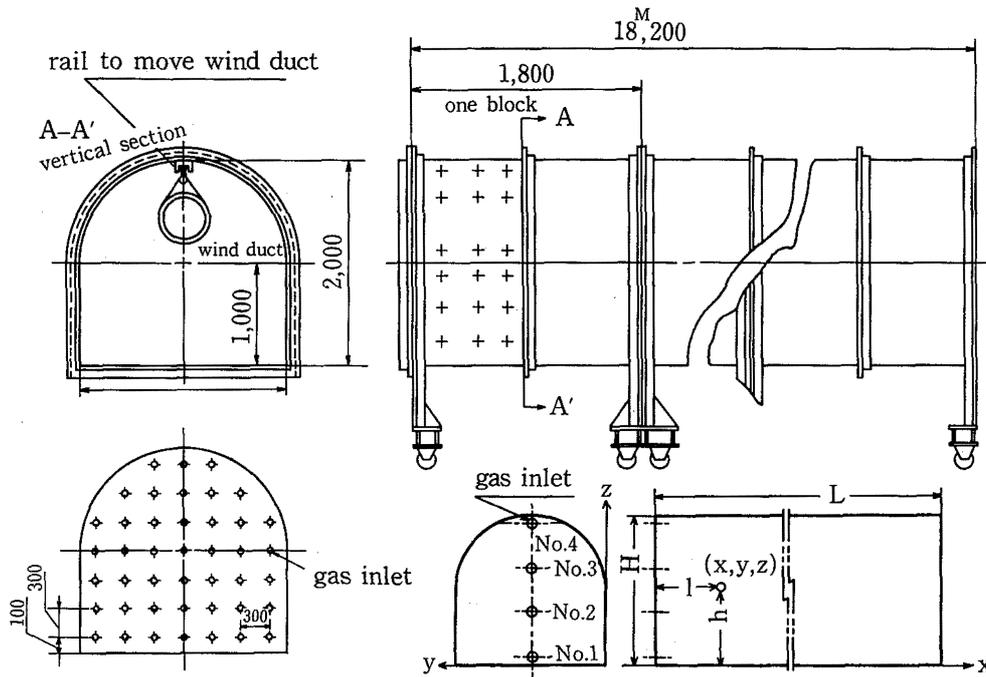


Fig. 2.1 Configuration of the model and axis of coordinates in the tunnel  
模型とトンネル内座標軸の概略図

量の相似が要求される。

### 2.2.2.1 幾何学的相似

本実験では、トンネル模型として、Fig. 2.1に示すような、大トンネル模型を製作した。大トンネル模型は全長  $L \approx 18[m]$ 、高さ  $H = 2[m]$ 、巾が  $2[m]$  で、全体が鋼板、鋼材を用いて作られており、天盤には風管移動用のレールがついている。また切羽部端面等には、ガス注入孔がつけられており、床および側壁の一部に観察用の窓が設けられている。形状は、図のように、上部半断面が  $R = 1[m]$  の半円形で、下部判断面が  $2 \times 1[m]$  の長方形である。また、この大トンネルと幾何学的に相似で大きさが  $\frac{1}{4}$  の小トンネル模型を製作した。小トンネル模型は、全体が透明のアクリル板によって製作され、内部がよく観察できるようになっている。小トンネルの各部には、ガスサンプリングチューブおよび風速計プローブの挿入孔が設けられている。小トンネルの全長は  $L = 9H \sim 12H$  にすることができる。

### 2.2.2.2 物理量の相似

一般的に空間内のガス拡散現象に関与する物理量としては、気体の物質保存、気流の運動量、エネルギー、物質の拡散量があげられる。従って、連続の式、ナビ

アストークスの式、エネルギー方程式、拡散方程式から得られるところの各無次元数、 $Ret$ 、 $Ar$ 、 $Prt$ 、 $Sct$ 、 $Fr$ 、等を実物と模型で一致させることが必要条件となる。

さて、トンネル内の換気条件下においては、空気およびガスは、非圧縮性としてよいし、また、実際のトンネル内は、特殊な場合を除き、温度は岩盤等を介在として、それほど顕著な不均一性はなく、吐出ガス温度も、トンネル内とそれほど差が無いであろうという事情から、模型実験においても温度は一定とした。

それ故、考慮しなければならない物理量は運動量に関するものと物質の拡散量とに関するものとなるのでナビアストークスの方程式より、

$$\left. \begin{aligned} \frac{K_{mi}}{U_0 H} \left( = \frac{1}{Ret} \right) \\ \frac{K_{mi}}{u_0 H} (\text{換気停止時}) \end{aligned} \right\} i=x, y, z \quad (1)$$

吐出ガス密度に関して

$$\left. \begin{aligned} \frac{gH(\Delta\rho/\rho)}{U_0^2} \left( = \frac{1}{Fr^2} \right) \\ \frac{gH(\Delta\rho/\rho)}{u_0^2} (\text{換気停止時}) \end{aligned} \right\} (2)$$

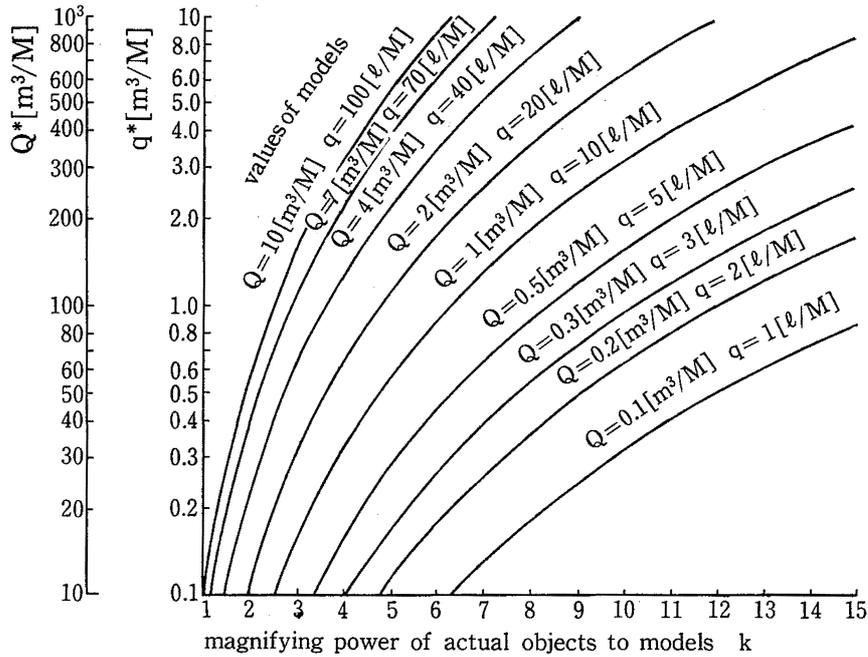


Fig. 2.2 Relationship of Q, q in actual objects and models  
 模型と実物とにおける換気量およびガス吐出量の関係

拡散方程式より,

$$\left. \begin{aligned} \frac{K_{si}}{U_o H} \left( = \frac{1}{Sct} \cdot \frac{1}{Ret} = \frac{1}{Pet} \right) \\ \frac{K_{si}}{u_o H} \text{ (換気停止時)} \end{aligned} \right\} i=x, y, z$$

ガス発生量に関して

$$\left. \begin{aligned} \frac{q}{C_o U_o H^2} \\ \frac{q}{C_o u_o H^2} \text{ (換気停止時)} \end{aligned} \right\} (4)$$

換気およびガスの吹出条件に関するものとして

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_o}{U_o}, \frac{u_o}{U_o} \\ \frac{u_o}{V_o} \text{ (換気停止時)} \end{aligned} \right\} (5)$$

とした。

〔注〕 渦動粘性係数  $K_{mi} (=K_{si})$  の定義について

渦動粘性係数  $K_{mi}$  は、閉鎖的空間内の風速の速度成分を

$$U_i = \bar{U}_i + u_i \quad \bar{U}_i : U_i \text{ の平均値}$$

$$T_i = \int_0^{\tau_o} R_i(\tau) d\tau \quad u_i : \text{乱れの変動成分}$$

$$l_i = \sqrt{u_i^2} \cdot T_i \quad \sqrt{u_i^2} : \text{乱れ速度}$$

$$i = x, y, z \quad R_i(\tau) : \text{自己相関係数}$$

$$\tau_o : R(\tau) = 0 \text{ になるまでの時間}$$

とした時に

$$K_{mi} = \sqrt{u_i^2} \cdot l_i$$

で表わされる量である。

さて、トンネル切羽付近（風管吹出口から切羽までの距離）を  $A = 3H \sim 5H$  と考えれば、開口率  $\gamma$  は多く見積っても、 $\gamma = 10 \sim 15[\%]^2$  であって、

$$\gamma < 20[\%]$$

を満足するから、この部分を閉鎖的空間と言う事ができる。<sup>3)</sup> この時、この空間内の気流が十分乱れている場合

$$K_{mi} (=K_{si}) \propto U_o L$$

が成立し<sup>4)</sup>、無次元数のうち、(1)と(3)は常に満足される。

従って、吐出ガス密度、吐出ガス量、換気の吹出速度、吐出ガス速度等について、実物と模型で無次元数を一致させるようにすればよい。

実験においては、ほぼ  $CH_4 2[\%]$ 、 $He 48[\%]$ 、 $N_2 50[\%]$  の混合ガスを用いている。この混合ガスは、空気に対する比重が、ほぼ  $0.56$  であり、 $98.5[\%]$  の  $CH_4 - Air$  混合ガスに相当し、実際のトンネル内へ湧出してくる  $CH_4$  の比重と同じと考えてよい。すなわち、無次元数(2)において  $(\Delta\rho/\rho)$  は模型と実物で等しい。この

\*2 風管吹出口または吹込口から切羽までを対象空間と考え、その閉鎖面と開口部(トンネル断面)の和に対する開口部の面積とする。

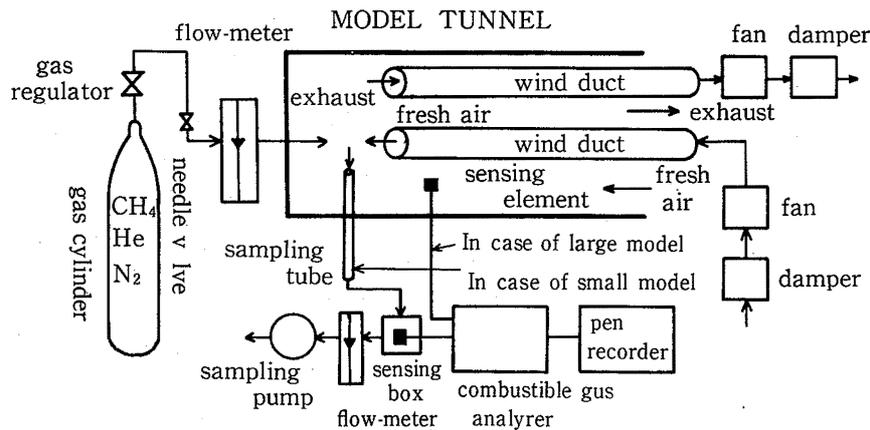


Fig. 2.3 Experimental System  
測定系統

ため、換気の代表吹出し速度、または、ガス代表吐出速度は、

$$\frac{gH}{U_o^2} = \frac{gH^*}{U_o^{*2}} \text{より、} U_o^* = U_o \sqrt{\frac{H^*}{H}} = U_o \sqrt{k}$$

同様に  $u_o^* = u_o \sqrt{k}$  を満足させる必要がある。また、無次元数(4)より代表濃度  $C_o$  を等しくするためには、

$$\frac{q}{C_o U_o H^2} = \frac{q^*}{C_o U_o^* H^{*2}} \text{より } q^* = q \frac{U_o^* H^{*2}}{U_o H^2} = qk^{\frac{3}{2}}$$

としなければならない。

さらに、 $V_o \propto \frac{q+Q}{H^2}$  であるから、(5)式も自動的に満足される。これ等の条件より、模型に対する実物の相似倍率  $k$  に対する、模型の換気量  $Q$ 、ガス吐出量  $q$  の実物における換算量を Fig. 2.2 に示す。

### 2.2.2 相定系統

Fig. 2.3 に測定系統を示す。CH<sub>4</sub>-He-N<sub>2</sub>混合ガスシリンダーから調整器を通して、一定流量になるようにニードルバルブで流量を調節しながらトンネル模型内へ混合ガスを注入する。ガスは、トンネル内の気流により拡散していく。それによって形成されるガス濃度を、大トンネル模型ではトンネル内の雰囲気場へ、直接設置された可燃性ガス検知器の受感部で感知する\*3。小トンネル模型では、測定点へサンプリングチューブ吸込口を置き、その場の雰囲気気をサンプリングして、センサーボックス内へ設置された受感部で感知する。感知された信号は、検知器本体で電圧変換され、ペンレコーダーで濃度を記録させる。

送風機から送られる風量はダンパーで調節され、所定の風量が、途中に風速分布を均一化するために取り

つけられたビニールメッシュとハニーカムを有する風管を通して、送風される。またトンネル内の風速も、無指向性熱式風速計で測定される。

次にガス検知器と風速計の仕様を示す。

#### 可燃性ガス自動警報器

機種HM-201-6	検出範囲
X 1レンジ	CH <sub>4</sub> 0~2,000[p.p.m]
X 5レンジ	CH <sub>4</sub> 0~1.00[%]
目盛精度	X 1レンジ ±100[p.p.m]
	X 5レンジ ±500[p.p.m]
応答速度	フルスケールの90[%] 20[sec]

#### 無指向性型サーミスタ風速計 MV-01M-BLR6型

測定範囲	
H.S.レンジ	0~25.0[m/s]
M.S.レンジ	0~10.0[m/s]
L.S.レンジ	0~1.00[m/s]
測定精度	各レンジ円周精度を含めて ±5[%]
応答速度	1/3[sec]

### 2.2.3 測定条件

上記ガス検知器のセンサーは、拡散燃焼方式であり、ガス検知素子はその場の雰囲気中の可燃性ガスを燃焼させ、素子の温度変化による電気バランスを信号として取り出しているため、純粋のメタンと、上記の混合

\*3 換気がある場合の相似確認実験では、大トンネルの場合でも、センサーに換気による風が影響するのを避けるため、サンプリング方式を用いた。

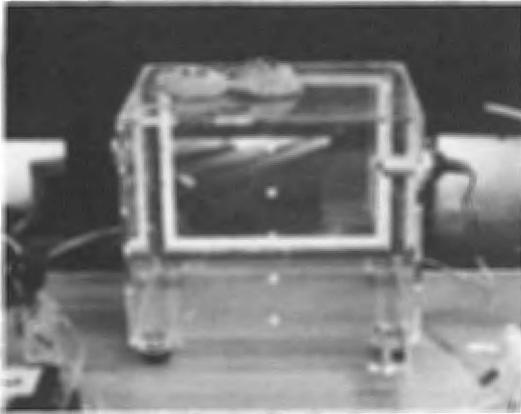


Fig. 2.4 Calibration box  
較正箱

ガスとの比熱の違いが、熱バランスに影響を与える。従って純粋のメタンを用いた検知器出力較正曲線は、そのままでは使えず、実験で用いる混合ガスそのものを使用したキャリブレーションを行わなければならない。

#### キャリブレーション方法

##### 1) センサーを直接雰囲気場に設置する場合

Fig. 2.4 のようなキャリブレーションボックスを製作した。この箱の上部にセンサーを挿入し、定量ポンプで実験混合ガスを注入し、所定の濃度に対する検出器の出力を調べるものである。写真の右側に見えるのはモータとプロペラで、箱内を攪拌する。箱の容積を  $V_B$ [l] または、定量ポンプの容積を  $v_P$ [l] とし、プロペラを回転させ、よく攪拌させながら、定量ポンプで  $n$  回ガスを注入すると、その時の箱内の濃度  $C_n$  は

$$C_n = \frac{100v_P}{\{V_B + (1-K)v_P\}} \left[ \frac{1 - \left\{ \frac{V_B - Kv_P}{V_B + (1-K)v_P} \right\}^n}{1 - \left\{ \frac{V_B - Kv_P}{V_B + (1-K)v_P} \right\}} \right] [\%]$$

ただし注入量と同じ量の空気-ガス混合気体が箱から漏れていくようになっていて、 $K$  はその漏れ方を規定するパラメータ  $0 \leq K \leq 1$  である。ガスを注入した後、ガスの拡散に要する時間が、箱内の空気-ガス混合気体の漏れる時間に比して大きいときは  $K=1$  であり、小さいときは  $K=0$  である。定量ポンプでガスを注入する時間は瞬間的であるので漏れる時間も短く、比して拡散に要する時間が大きい。従って  $K=1$  としたので、本キャリブレーション濃度算定式は

$$E = \frac{v_P}{V_B} = \frac{0.097[l]}{10.7[l]} = 9.1 \times 10^{-3}$$



Fig. 2.5 Making of calibration gas  
キャリブレーションガスの製作

とすると、

$$C_n = \{1 - (1-E)^n\} \times 100 [\%] \text{ とした。}$$

##### 2) センサーを吸引式で用いた場合

ガスパックの中に、実験混合ガスと空気を定量注入し、所定の濃度の規準ガスを作り、Fig. 2.5 の測定系統のサンプリングチューブの先端から、実験と同じ流量で吸引し、センサーボックス内の感知部で、出力を検出した。以上のキャリブレーションは、実験毎に行った。

#### 2.2.4 ガス吐出条件

大トンネル模型におけるガス吐出位置は、Fig. 2.1 において gas inlet No 1 ~ No 4 である。それぞれの吐出孔中心位置は、それぞれ、 $h/H$  が、0.1, 0.35, 0.65, 0.95 である。吐出孔は  $\phi 8$  であり、ガス吐出速度を小さくするために、吐出口にスポンジを被せた。このスポンジの表面積は、 $104[\text{cm}^2]$  であり、空気を  $100[\text{l}/\text{M}]$  および  $200[\text{l}/\text{M}]$  で吐出させた時、スポンジ表面の風速分布を、風速計で調べた結果が Table 2.1 である。

この結果からガスの代表吐出速度  $u_0$  を

$$u_0 = \frac{10 \cdot q}{60 \cdot S \cdot \epsilon} [\text{m}/\text{s}] \quad \begin{array}{l} S : \text{スポンジ表面積} [\text{cm}^2] \\ \epsilon : \text{修正係数} \end{array}$$

とした時 ( $\epsilon$  はスポンジ全表面積のうちガスを通す面積の割合と考えてよい。)  $\epsilon=0.8$  とした。

小トンネル模型では、ガスチャンバーを切羽面の外側およびトンネルの途中に取り付け、ガスチャンバーへ一定量のガスを注入し、各所の吐出孔からトンネル内へ吐出させた。切羽面では、Fig. 2.1 の No. 1 ~ 4 で  $\phi 26$  の孔、および切羽面内 (0, 0.2, 0.3), (0, 0.5, 0.3), (0, 0.8, 0.3) にそれぞれ中心をもつ  $\phi 50$  の吐

Table 2.1 Velocity of the gas gush

Measured point	Velocity of the wind[m/s]	
	100[l/M]	200[l/M]
1	0.46	0.79
2	0.24	0.52
3	0.14	0.27
4	0.10	0.33
5	0.06	0.16
6	0.04	0.08
7	0.04	0.06
8	0.17	0.18
9	0.12	0.39
10	0.19	0.15
11	0.26	0.47
12	0.35	0.25
13	0.40	0.90
14	0.18	0.34
15	0.30	0.50
16	0.16	0.65
17	0.16	0.37
18	0.39	0.60
19	0.12	0.44
20		0.73
21		0.64
22		0.48
23		0.59
MEAN	0.20	0.43

出孔(No5, No6, No7), トンネル中間部では, 床面に, 中心位置が(2.47, 0.14, 0), (2.47, 0.32, 0), (2.47, 0.5, 0), (2.47, 0.68, 0), (2.47, 0.86, 0)で, φ20の吐出孔(No8, No9, No10, No11, No12) および, 天端部に, 天端半円曲面内の, y軸に平行な  $x_0=2.42$ ,  $x_0=2.56$ の2本の中心線をそれぞれ10等分する位置のφ12の11×2個(No13~No23, No24~No34)の吐出孔

である。この場合の代表吐出速度  $u_0$  は

$$u_0 = \frac{10q}{60S} \text{ [m/s]} \quad S: \text{全吐出孔面積 [cm}^2\text{]}$$

とした。

### 2.2.5 換気条件

風管として, 直線部は, 大トンネルではほぼφ400, φ200の塩ビ管, 小トンネルではほぼφ100, φ50の塩ビ管を用い, 曲線部は自在ダクトホースを用いた。直線部へ, ビニールメッシュとハニーカムを入れ, 風管内の風速分布を均一化させた。換気の代表吹出し速度  $U_0$  は,

$$U_0 = \frac{Q}{60 \cdot S} \text{ [m/s]} \quad S: \text{風管断面積 [m}^2\text{]}$$

とした。また換気量  $Q$  は, 風速計を用いて風管内風速分布を測定して求めた。

### 2.2.6 実験結果と考察

#### 2.2.6.1 換気の効果

トンネル内において, ガス吐出量と換気量が一定に保たれた場合, 十分な時間の長さの尺度を考えれば, 空間内の各点における, ガス濃度は定常的な状態になる事が想像される。実際の実験結果によれば, Fig 2.6 に示すように, 5 [%]以上のガスの高濃度域においては, ある平均濃度  $\bar{\gamma}$  に, 乱れ成分  $\gamma^*$  が加った量その場の濃度になる場合が多いことがわかった。これは, 空間内の気流性状の乱れによって生ずる現象であると考えられる。そこで点  $(x_0, y_0, z_0)$  の換気時の濃度  $C(x_0, y_0, z_0)$  の定義をここでは以下のように定めた。

空間内の任意の位置における微小単位体積内のガス濃度を  $\gamma$  とする。この単位体積内へ流入してくる, 単位時間当りの空気の量とメタンガスの量をそれぞれ,

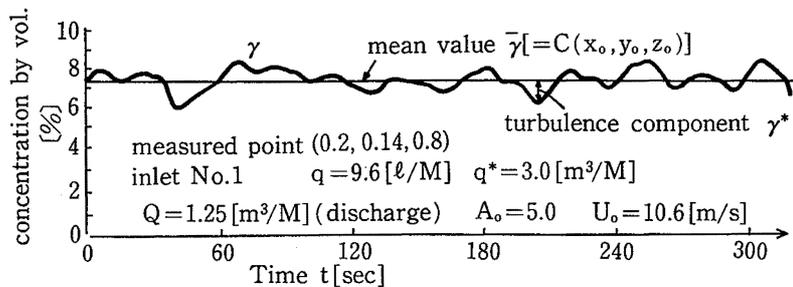


Fig. 2.6 Disorder of the concentration with time

時間に対する濃度変動

$\Phi$ ,  $\varphi$ とすれば,

$$\gamma = \bar{\gamma} + \gamma^* \quad \text{ただし} \quad \bar{\gamma} = \frac{1}{\tau} \int_{\eta}^{\eta+\tau} \gamma \, dt$$

$$\Phi = \bar{\Phi} + \Phi^* \quad \bar{\Phi} = \frac{1}{\tau} \int_{\eta}^{\eta+\tau} \Phi \, dt$$

$$\varphi = \bar{\varphi} + \varphi^* \quad \bar{\varphi} = \frac{1}{\tau} \int_{\eta}^{\eta+\tau} \varphi \, dt$$

と書ける。ただし、 $\bar{\gamma}$ ,  $\bar{\Phi}$ ,  $\bar{\varphi}$  は  $\tau$  時間における平均値であり、 $\gamma^*$ ,  $\Phi^*$ ,  $\varphi^*$  は乱れ成分である。

気体を非圧縮性で見なし、この微小単位体積のメタンガスの収支と濃度変化について平衡式を考えると、高次の微小項を無視して、

$$\frac{d\gamma}{dt} = \varphi - (\Phi + \varphi) \gamma$$

となり、 $t = 0$  で、 $\gamma = 0$  の初期条件を考慮するならば、

$$\gamma = \frac{\varphi}{\Phi + \varphi} [1 - e^{-(\Phi + \varphi)t}]$$

ここで時間  $t$  が十分大きな時間  $\eta$  だけ経過した時の場合を考えると、

$$\gamma = \frac{\varphi}{\Phi + \varphi}$$

と見なしてさしつかえない。さてガスの吐出量と、換気量が一定に保たれ、乱れ成分はあるものの、ある時間長の平均を考えれば、 $\bar{\Phi}$ ,  $\bar{\varphi}$  は定常的なものになり、

$$\bar{\gamma} = \frac{\bar{\varphi}}{\bar{\Phi} + \bar{\varphi} + \Phi_{(0)}^* + \varphi_{(0)}^*} \quad \eta < \zeta < \eta + \tau$$

で示される  $\bar{\gamma}$  も定常的になると考えてよいであろう。

従って、換気時における濃度  $C(x_0, y_0, z_0)$  を

$$C(x_0, y_0, z_0) \cong \bar{\gamma}$$

で定義した。

実際の実験における  $\eta$ ,  $\tau$  等の決定は、記録紙上に表われる濃度変化をモニターしながら、場合に応じて適宜決定した。

以上の点から注意すべき事柄は、以下に示される濃度表示は、平均値であるということであって、例えば 4 [%] と示されていても、その空間が、ある瞬間には、6 [%] になり得るという事である。乱れ成分の詳細については、ここでは述べず、別の機会にゆずる事とする。

トンネル内の中間部分など切羽付近以外の部分を別として、切羽付近では、Fig. 2.7 に示すように、その場における平均風速は、切羽に近づくに従って一般的に小さくなる。従って、通常通気の悪い所ほどガスの

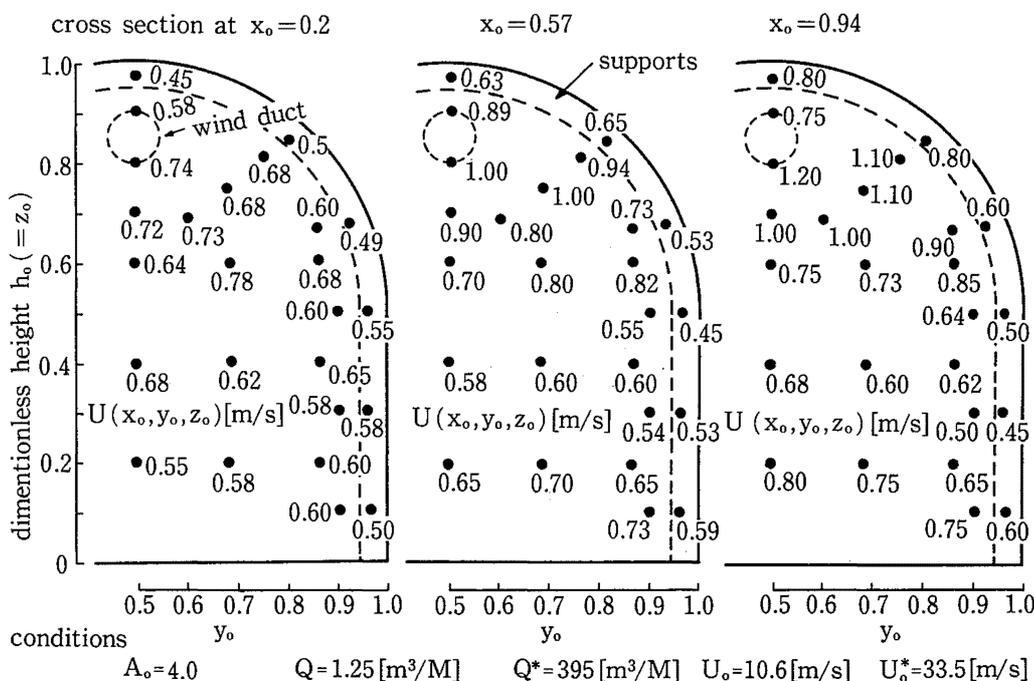


Fig. 2.7 Distributions of wind velocity in the tunnel

トンネル内の風速分布

稀釈が悪化するので、実験では厳しい条件である、切羽面からのガス吐出を問題とした。

換気時のガス拡散の実験は相似確認実験を除いて、小トンネルで行った。前述測定法によって、一つの実験条件について、トンネル切羽付近を100~240点測定し、空間内の濃度分布を求めた。Fig.2.8は、 $q=9.6$  [l/M]吐出位置No.1,  $A_0=5.0$ (押し込み) 5.1(吸引),  $Q=1.25$ [m<sup>3</sup>/M](押し込み) 4.4[m<sup>3</sup>/M](吸引), 障害物のある場合の $y_0=0.5$ の高さ方向(z軸方向)の濃度分布を求めたものである。同様に、x軸方向, y軸方向の濃度分布を求め、空間内の、主要な等濃度曲面を

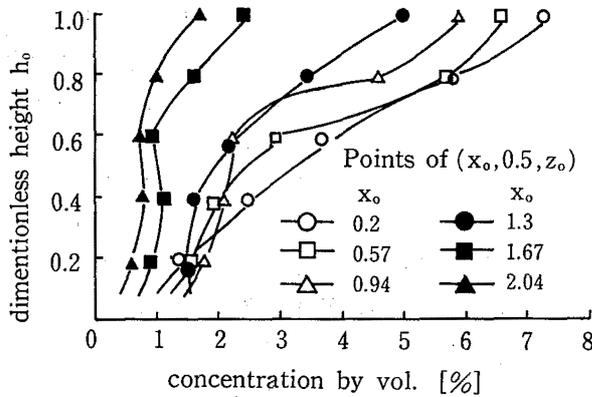


Fig. 2.8 Distributions of methane concentrations in tunnels  
トンネル内のメタン濃度分布

得る事によりFig.2.11以下のように、これをトンネル内の各断面の等濃度曲線として描く事とした。

実際のトンネルの切羽付近は、コンクリートの巻きたてが行われていない場合、壁面条件として、支保工などの影響がある。これを模型でも似せるために、Fig.2.9のような支保工モデルを製作し、トンネル内へ、 $x_0=0.236$ から $0.367H$ の等間隔で設置した。Fig. 2.10は支保工が無い場合の $C_0=2.4$ [%] の条件での実験結果であるが、良く稀釈されている。

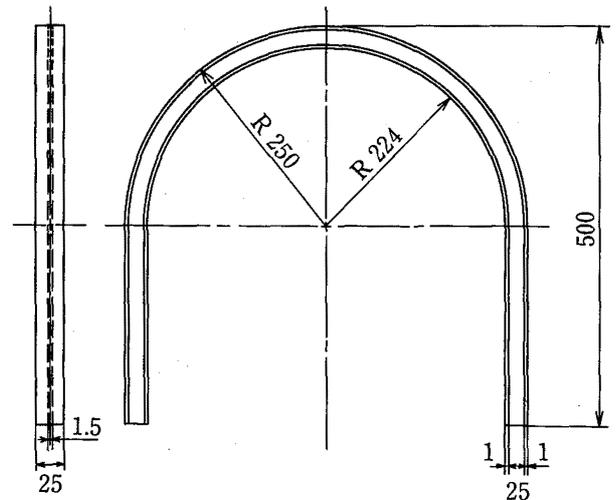


Fig. 2.9 Front and side view of the support model  
支保工模型の正面と側面図

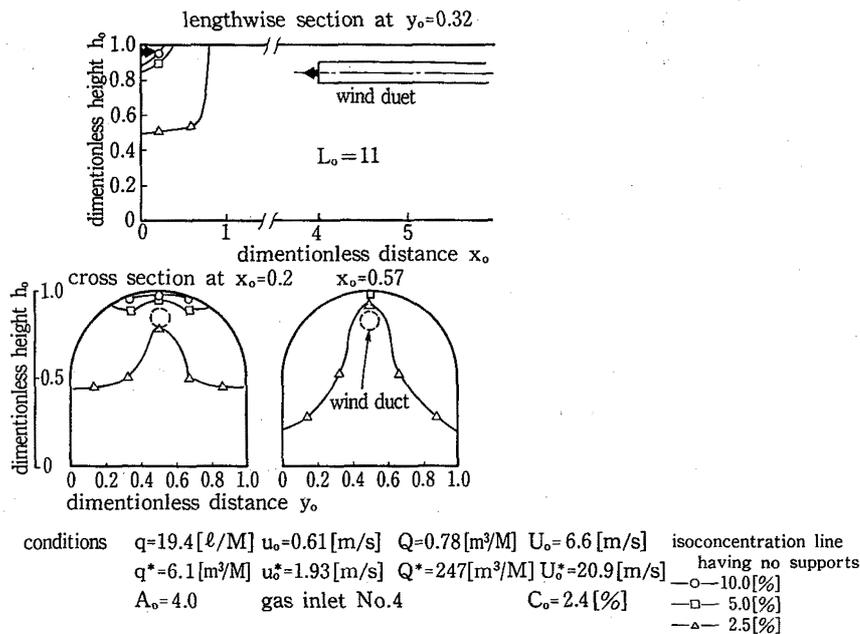


Fig. 2.10 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

Fig. 2.11, 2.12, 2.13は、支保工の有無の影響を、換気とガス吐出を同条件にして調べたものである。支保工などの通気の障害物は、5 [%]以上の高濃度域の

形成に大きな影響を与える事がわかる。従って、以下の実験条件では、特にことわりのない場合は、支保工模型が設置されているものとする。

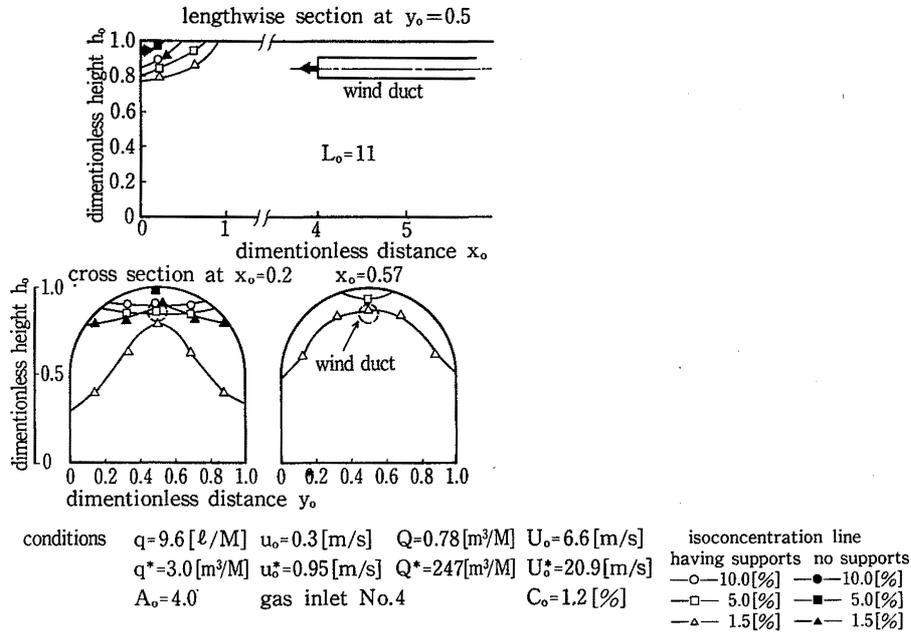


Fig. 2.11 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels

トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

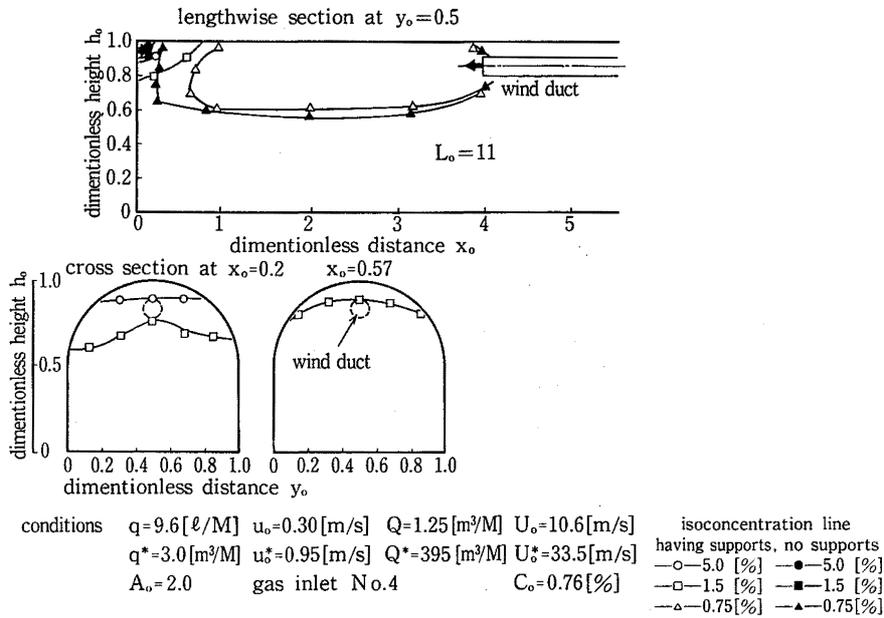


Fig. 2.12 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels

トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

Fig.2.13~18は、ガス吐出位置がNo.4、小風管( $\phi=0.1H$ )を $A_o=4.0$ ,  $Q=1.25[m^3/M]$ で吹き出させた時の、風管の吹き出し口中心位置を(4.0, 0.5, 8.5), (4.0, 0.5, 0.65), (4.0, 0.82, 0.6)に変えた場合の  $q=19.4[l/M]$ ,  $40[l/M]$  に対するトンネル内の等濃度曲線である。No.4のガス吐出位置に対しては、吹き出し口を中央上部にした場合が最も稀釈が良く、吹き出し口を中央部にした場合が最も稀釈が悪化する。

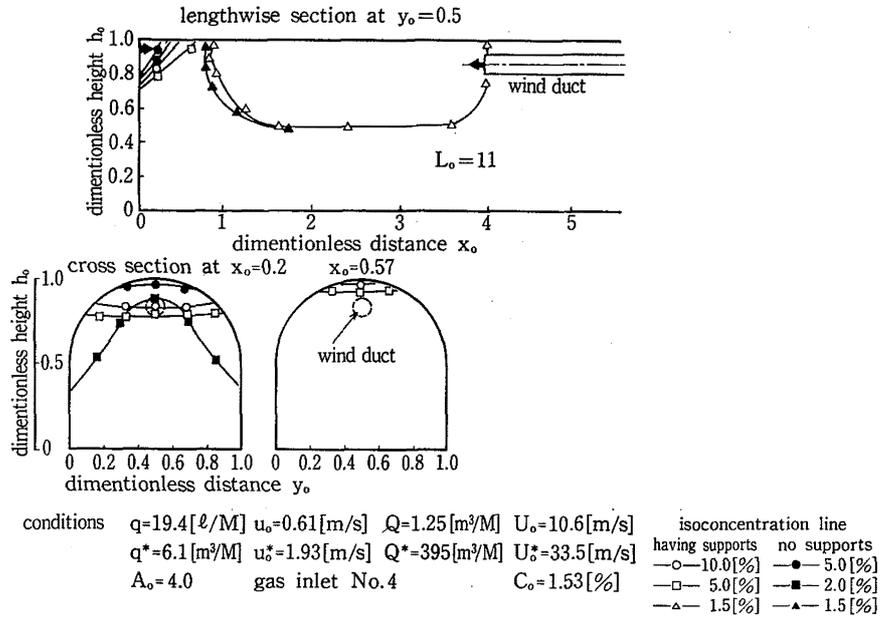


Fig. 2.13 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

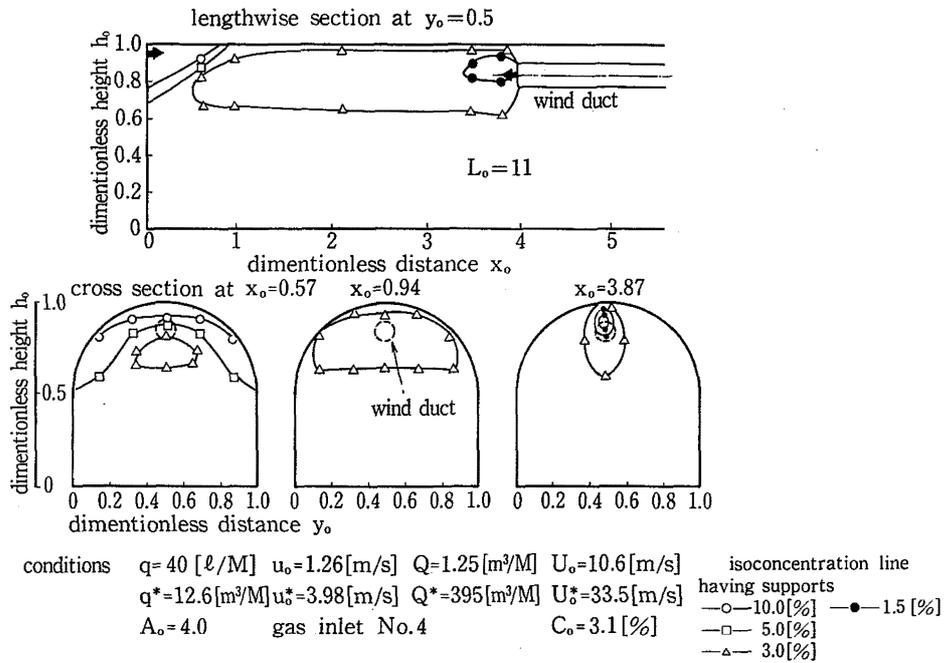


Fig. 2.14 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

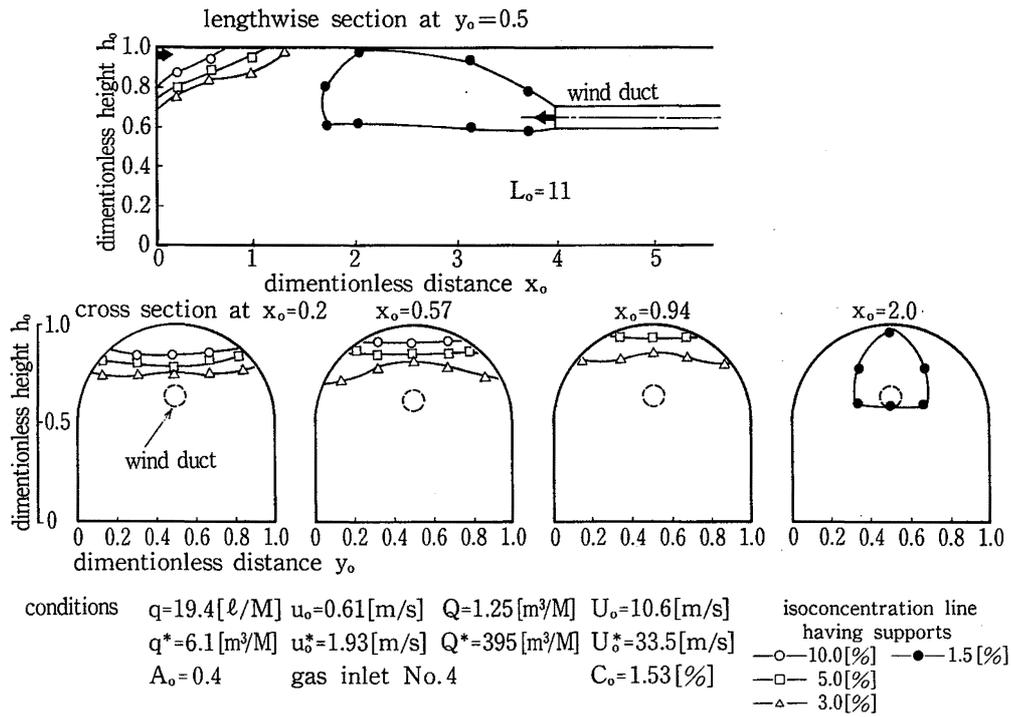


Fig. 2.15 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

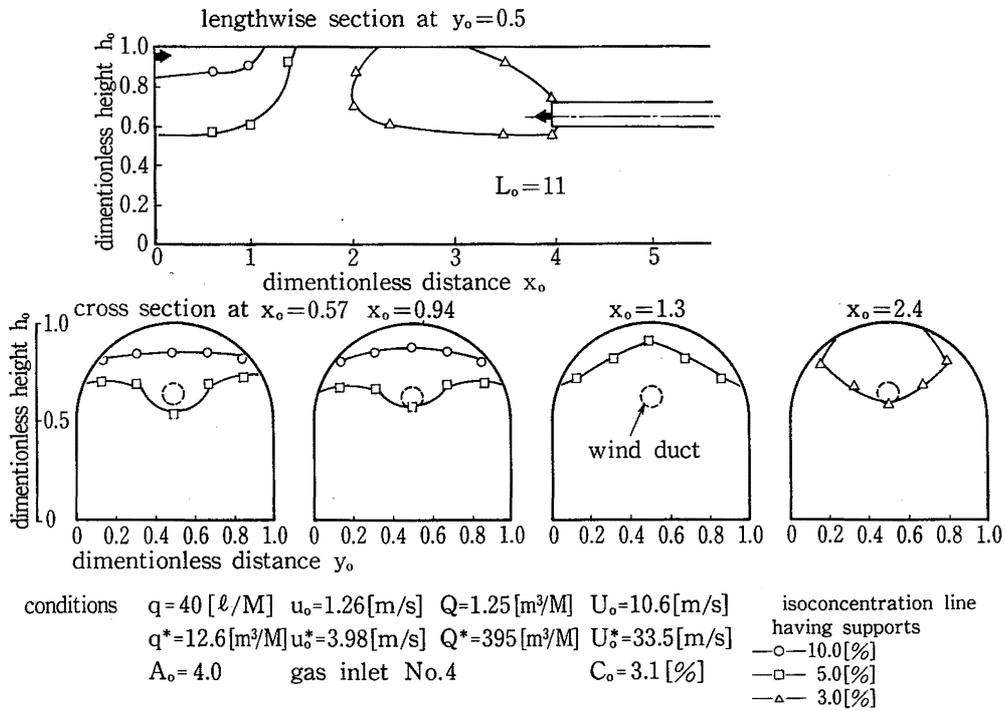


Fig. 2.16 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

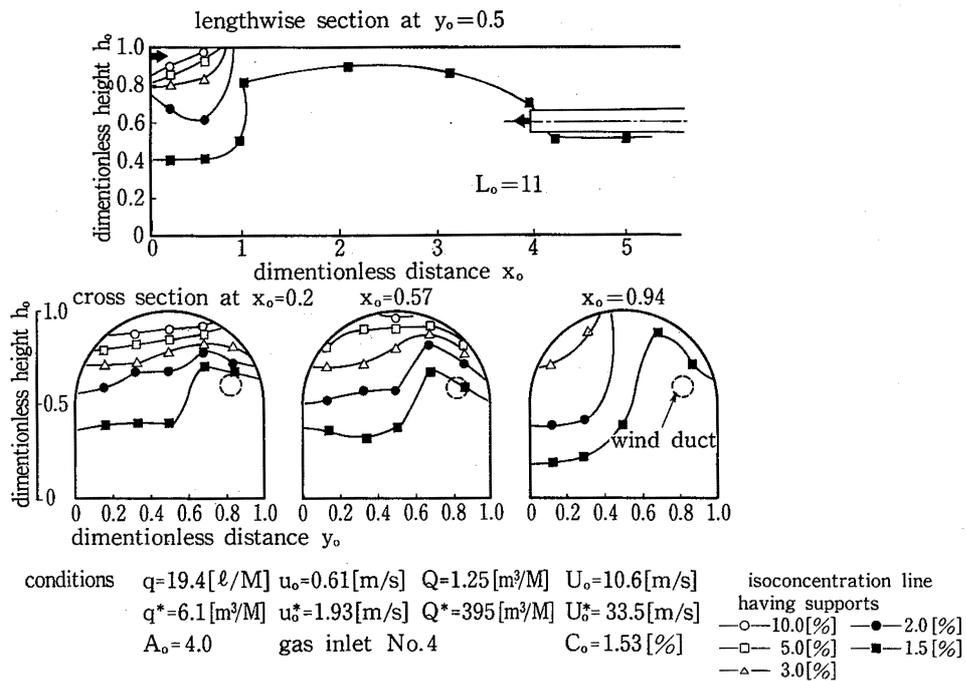


Fig. 2.17 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

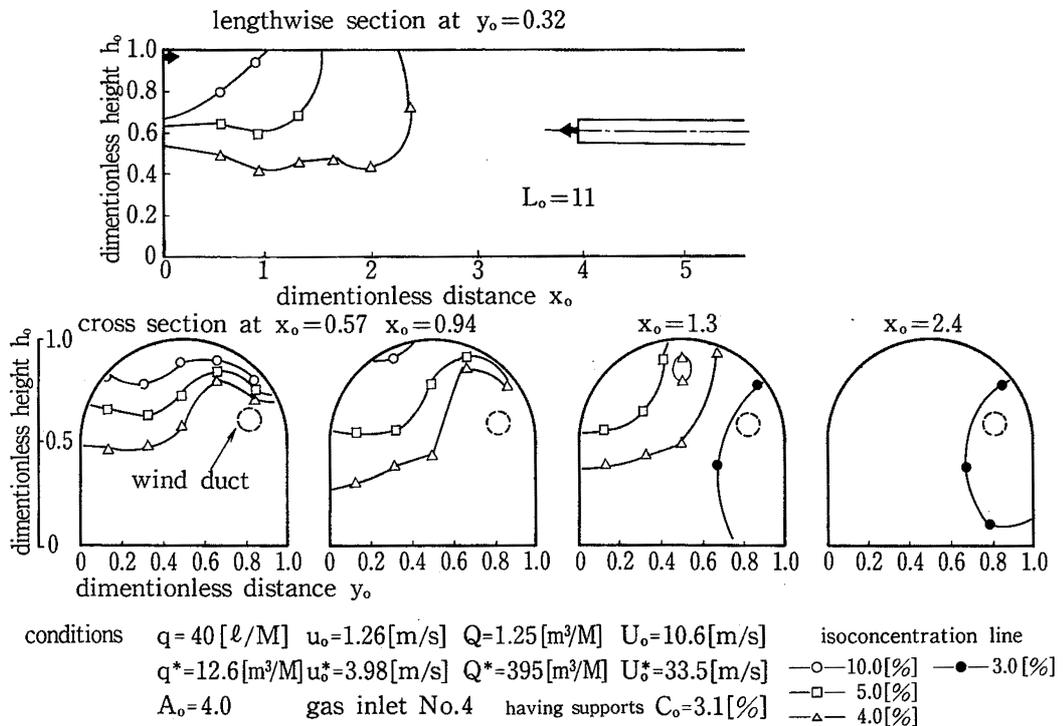


Fig. 2.18 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

Fig. 2.19, 2.20はガス吐出位置をNo.1にした場合であり、Fig. 2.17, 2.18と比較すれば、同じ換気条件に対して、ガスの吐出位置が、濃度分布に大きな影響を与える事がわかる。ガスが上部から出ている場合の方が、稀釈は悪化する。

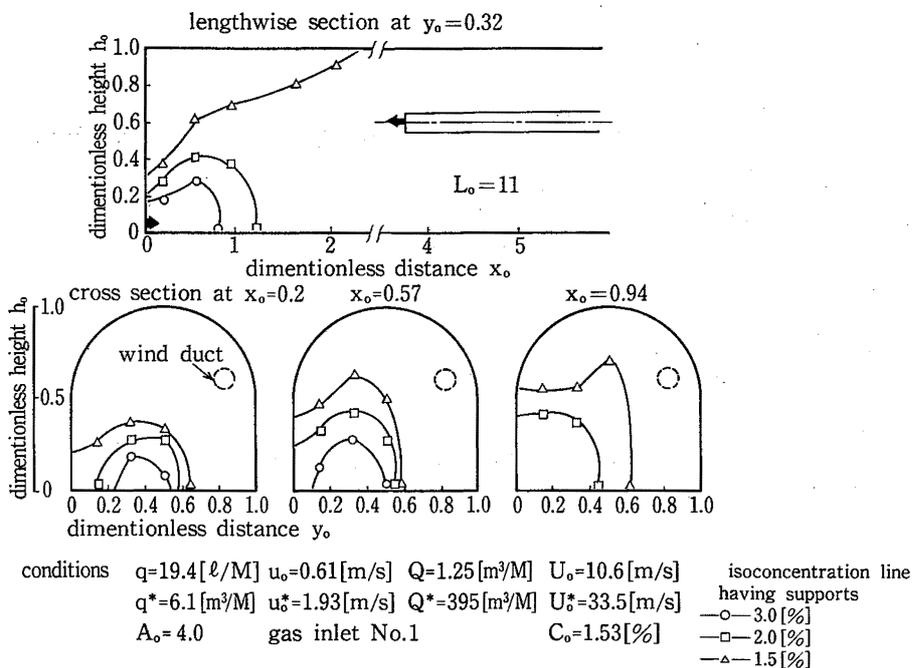


Fig. 2.19 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

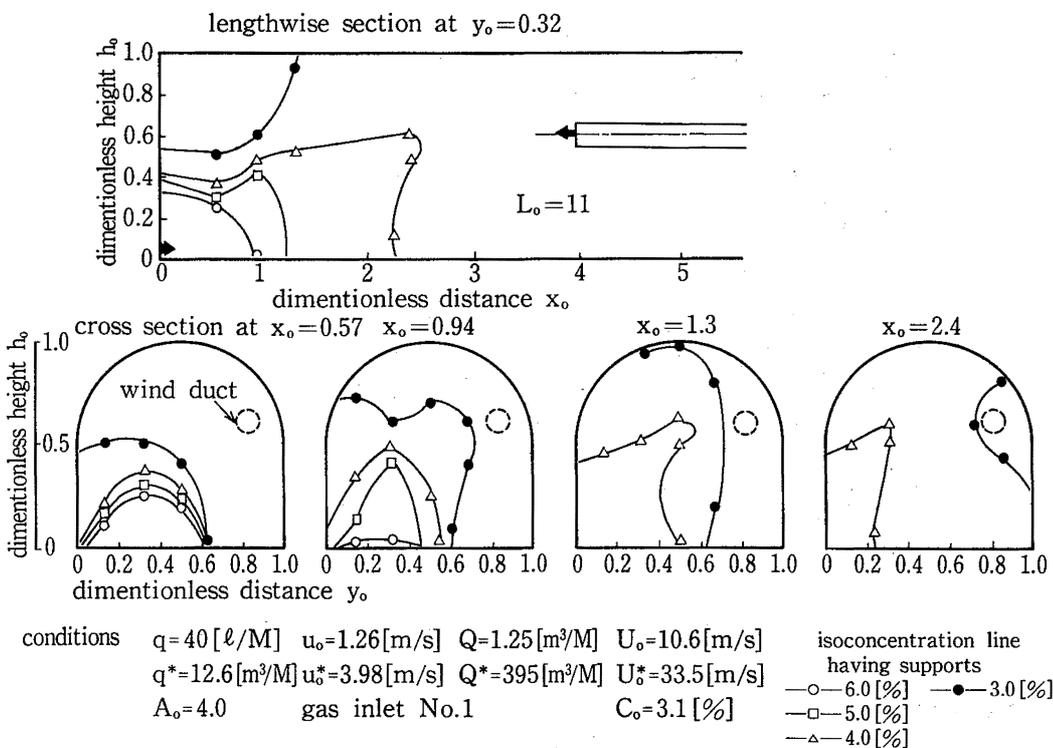


Fig. 2.20 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

Fig. 2.21は、大風管( $\phi 0.2H$ )を $A_0=5$ で吹き出させた場合に、ガス吐出位置をNo.1~4に変えた時のそれぞれの稀釈の状態を比較したものである。やはり上部からの吐出の場合が稀釈が悪いが、Fig. 2.22のよう

に、実物におけるボーリングマシーンを想定した障壁物のモデルを、図のように設置した場合は、No.1の吐出位置に対する通気が悪くなるので、吐出位置がNo.1の場合でも稀釈は悪化する。

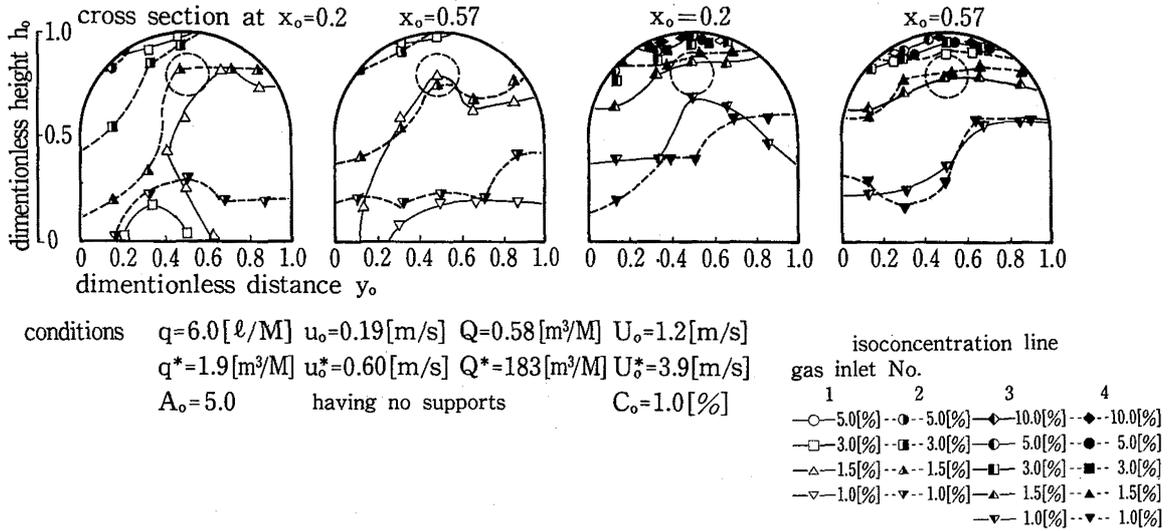


Fig. 2.21 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
 トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

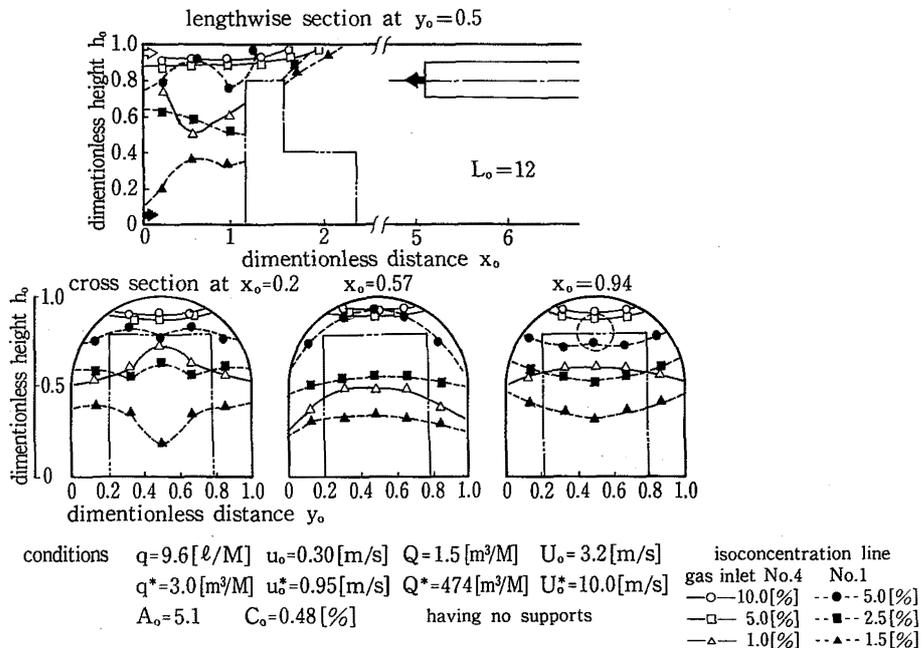


Fig. 2.22 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
 トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

Fig. 2.23~2.27は大風管吹き出し口を ( $A_o$ , 0.5, 0.8) に設置して吹き出させた場合である。  
 Fig. 2.23とFig. 2.12を比較すると,  $C_o \approx 0.8[\%]$ , 大風管の  $U_o = 5.1[m/s]$ , 小風管の  $U_o = 10.6[m/s]$  で,  $C_o$  が等しければ, 吹き出し速度の大きい方がよく稀釈される事を示している。

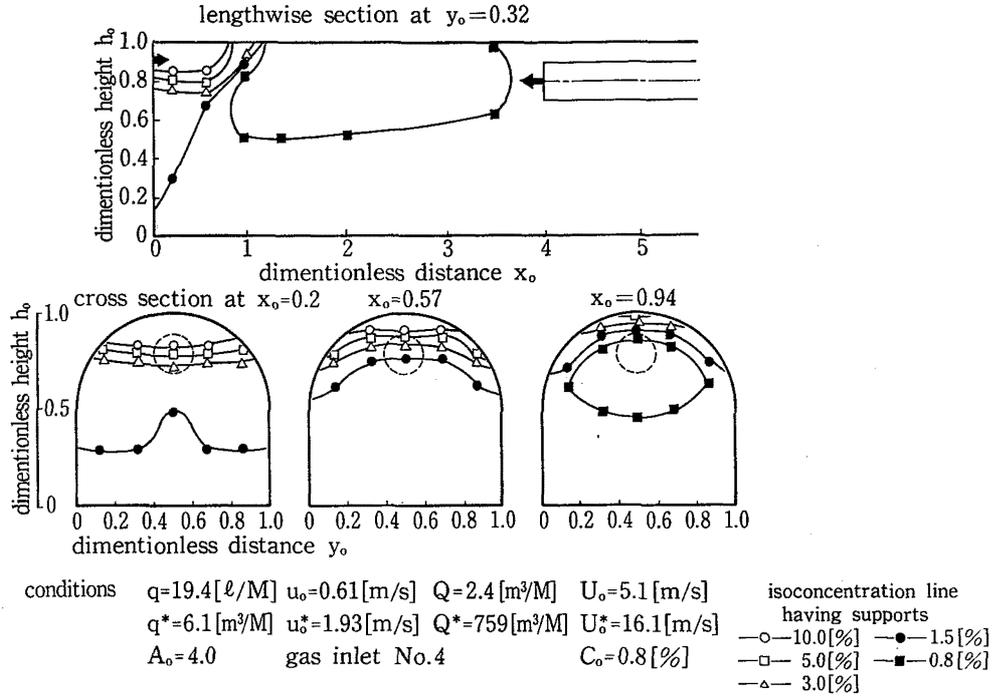


Fig. 2.23 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
 トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

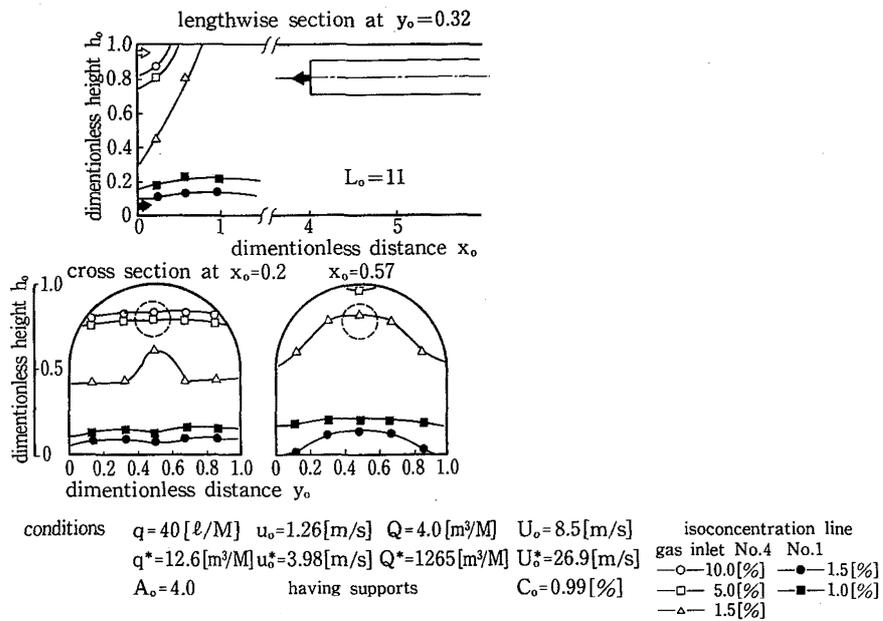


Fig. 2.24 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
 トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

Fig.2.24~2.27は、 $A_o$ を4.0から5.1に変えた場合の濃度分布を示している。 $A_o=4.0$ の場合は、 $q=40$ [ $\ell$ /M]の時吐出位置No.1ではほとんど5[%]以上の高濃度域は小部分に限られるが、 $A_o=5.1$ では、Fig.2.26

に示すように広範囲に渡って5[%]以上域が現われてくる。

また吐出位置No.4についてもNo.1ほどではないが同様の事が言える。

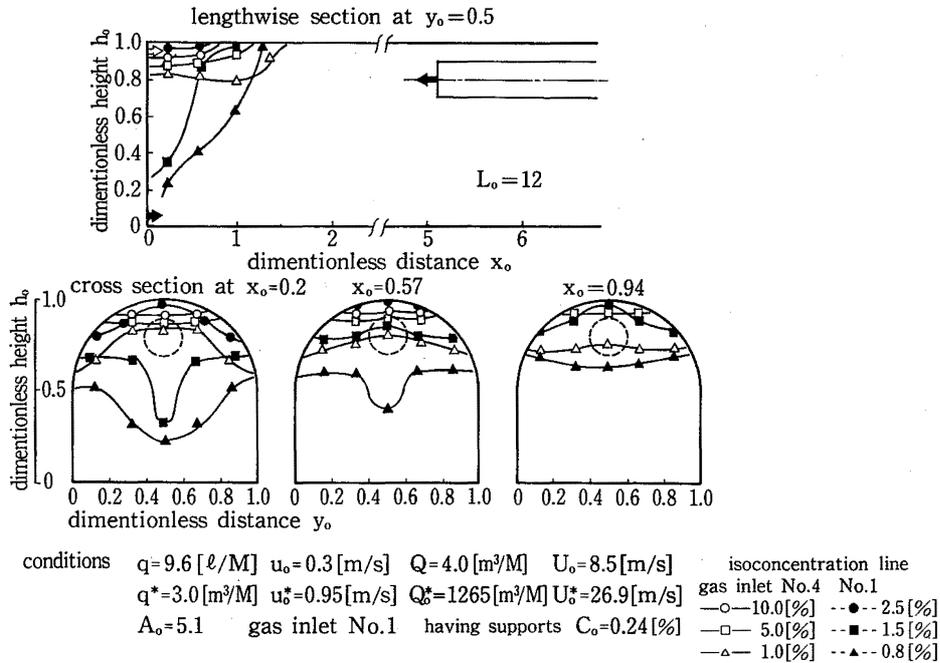


Fig. 2.25 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

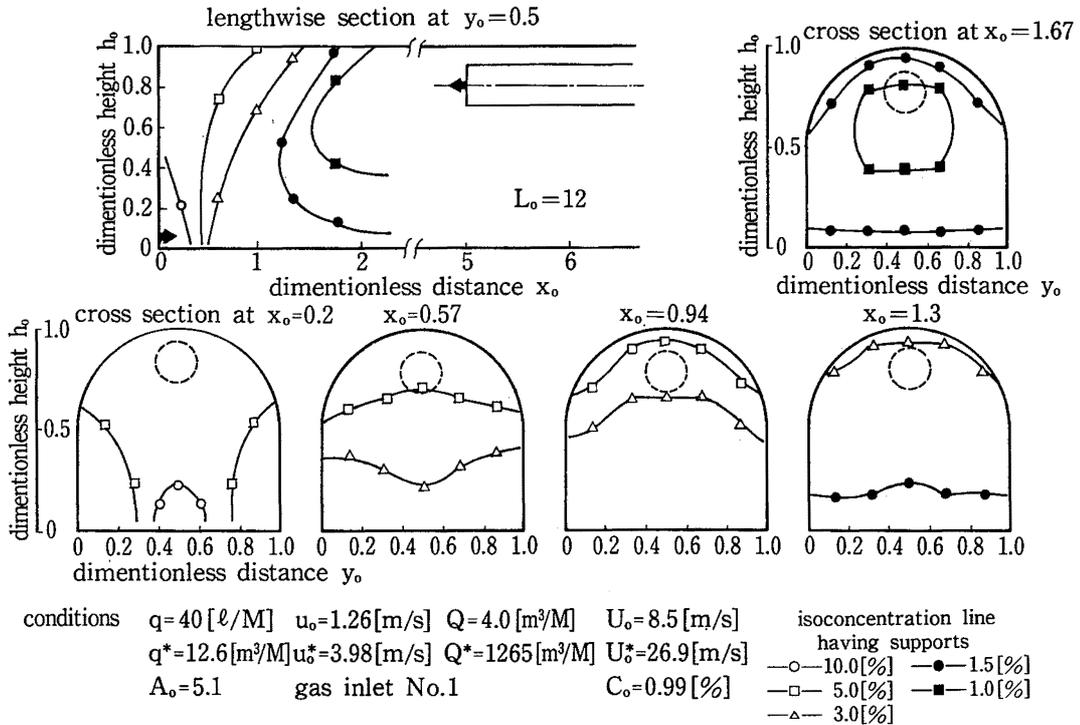


Fig. 2.26 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

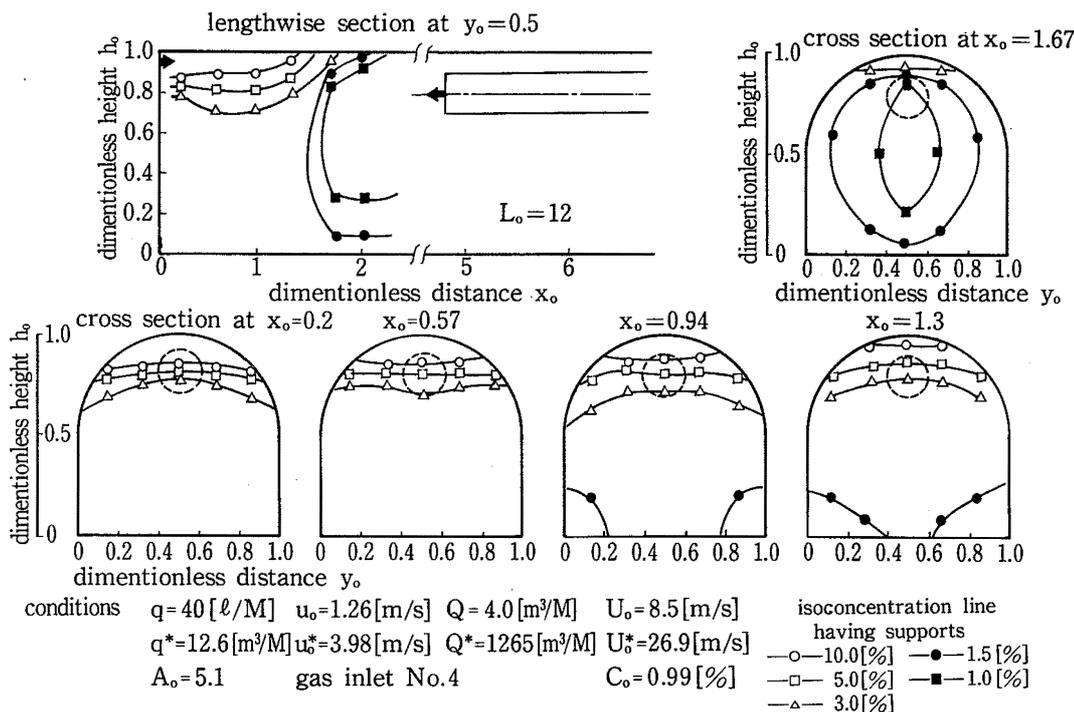


Fig. 2.27 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

Fig. 2.28は、Fig. 2.20と比較して $A_0 = 5.0$ にした場合であるが、 $A_0 = 4.0$ では、高濃度域がガス吐出口の近傍だけであるのに対して、 $A_0 = 5.0$ にすると、5 [%]以上の高濃度域が $x_0 = 2.0$ までの広範囲に拡大してくる。

Fig. 2.29, 2.30は、小風管の横側( $A_0, 0.82, 0.6$ )

吹出口からの押し込み換気だけの場合と、それに( $A_0, 0.5, 0.8$ )の中心位置の大風管の吸引排気が組合された場合との比較を行ったものである。 $x_0 < 2$ では、空間内の同一点で、濃度にして1~2割後者が低くなる。また吸込口の前後から坑口までは新鮮な空気が通气される事がわかる。

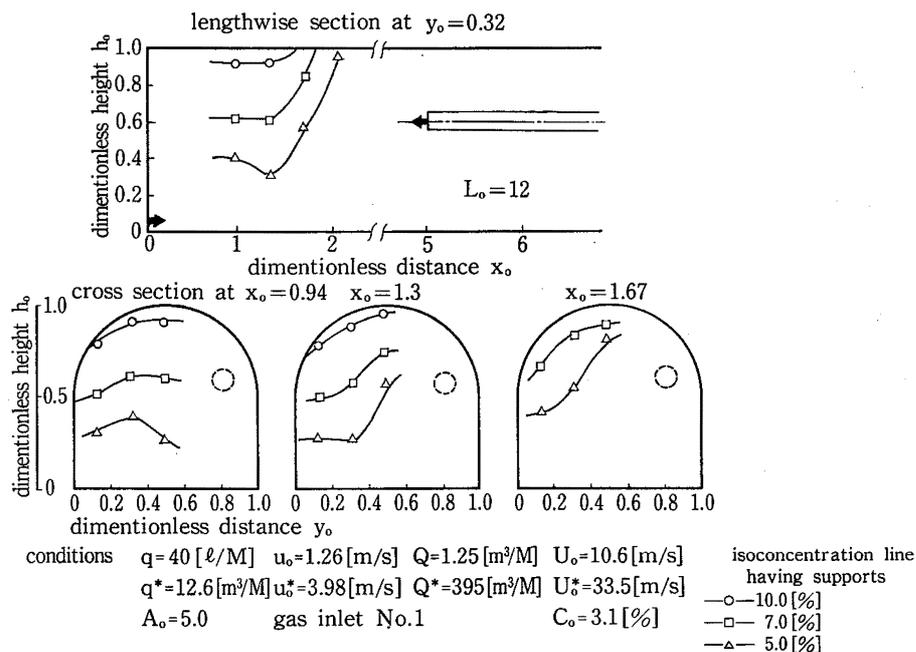


Fig. 2.28 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

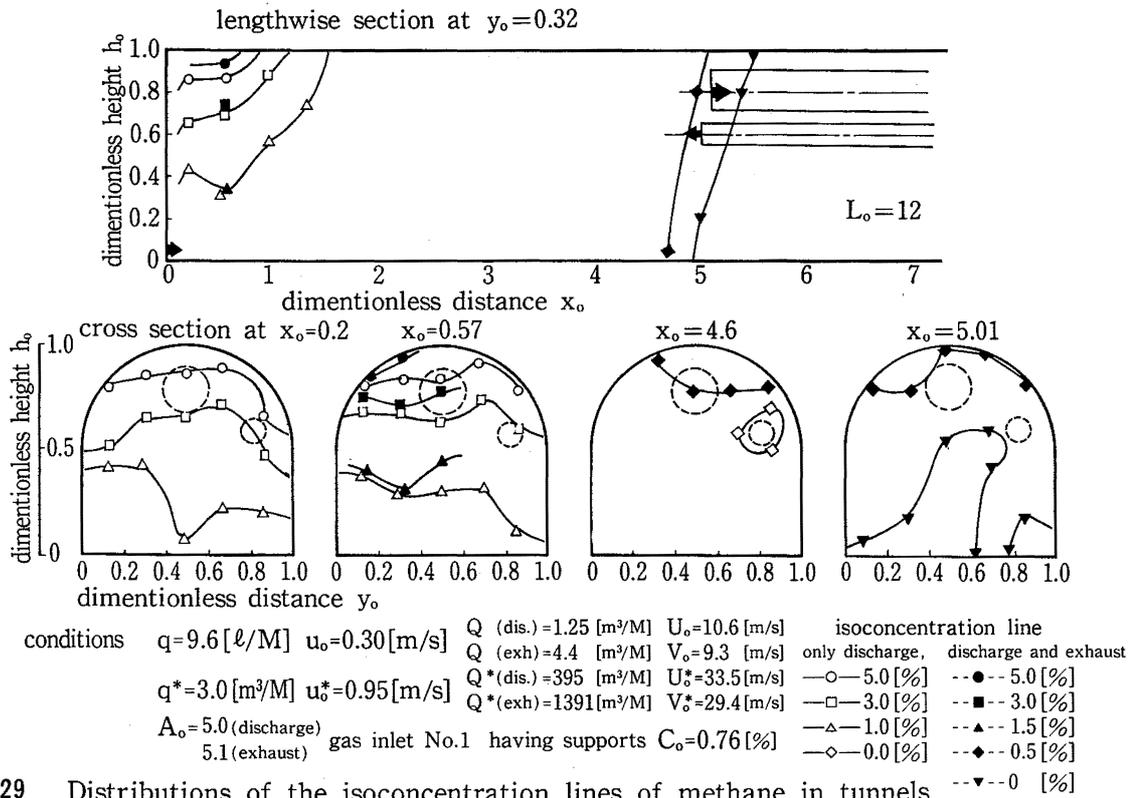


Fig. 2.29 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
 トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

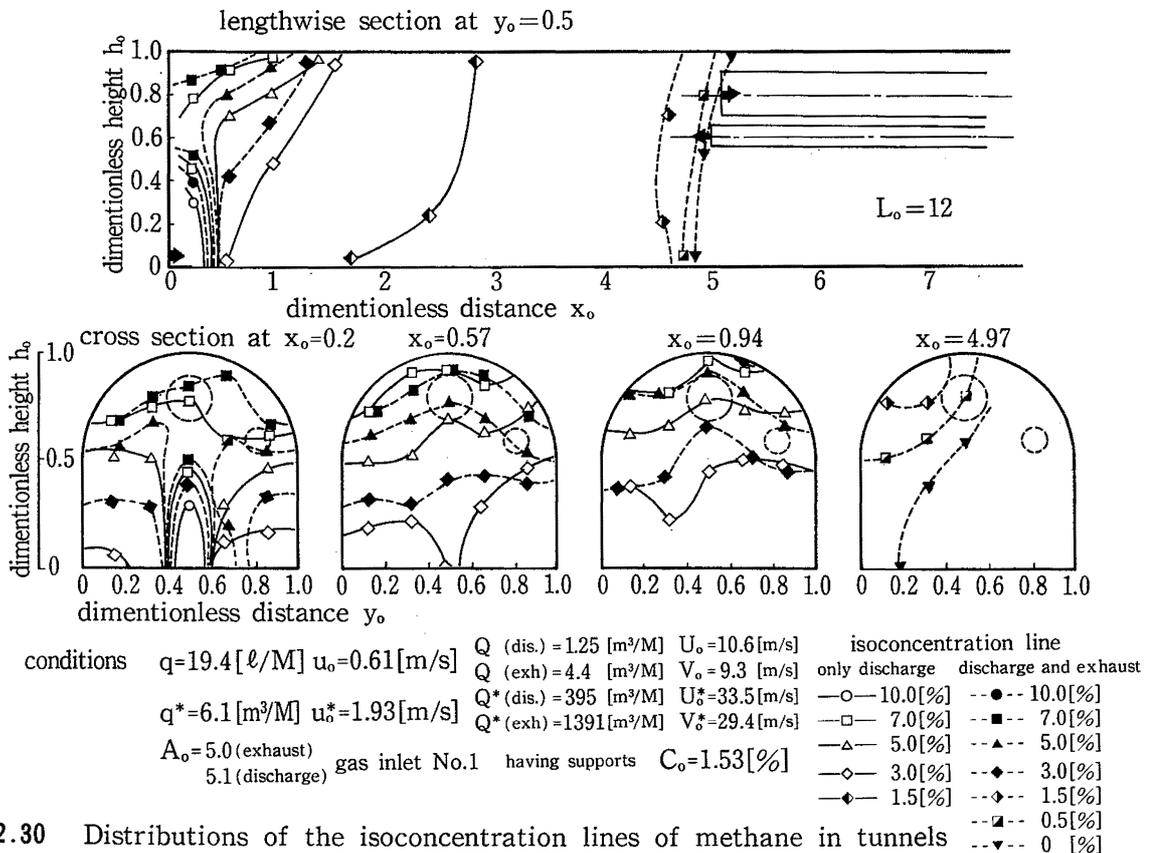


Fig. 2.30 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
 トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

Fig.2.31~2.36は、実物におけるロコを想定した障害物を切羽近傍に設置した場合の濃度分布を示している。Fig.29の障害物のない場合と、Fig.31, 32の障害物のある場合とを比較すれば、障害物によって高濃度域がかなり広く拡がることになる。

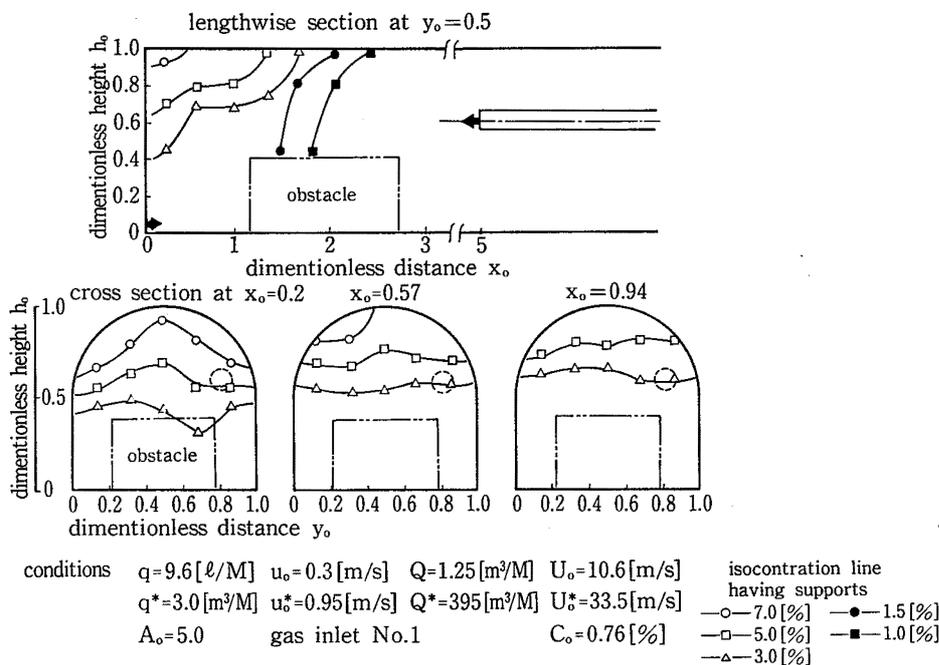


Fig.2.31 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

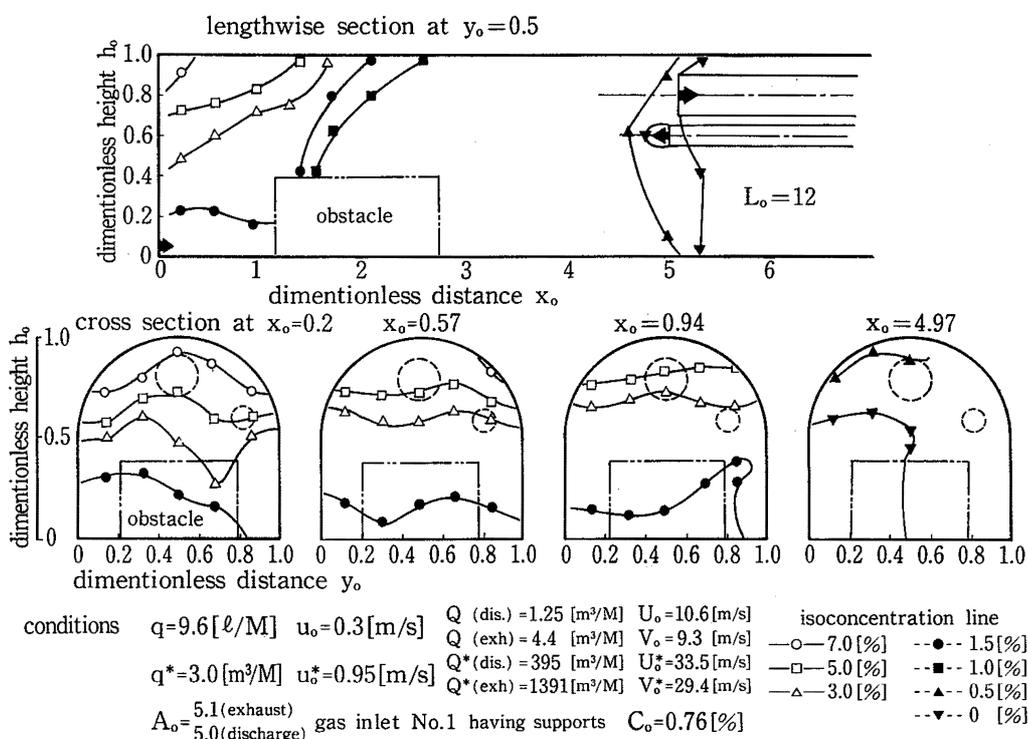


Fig.2.32 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

Fig.2.31~2.33は、 $q=9.6[1/M]$  吐出位置No.1, 障害物がある場合における、 $A_o$ の影響を調べたものである。 $A_o=5$ では $x_o < 1$ の上半に5[%]以上の高濃度域が生成されるが、 $A_o \leq 4$ では、ガス吐出部位近

傍を除いて高濃度域は生成されないことがわかる。またFig.2.34のように $q=19.4[1/M]$ の場合でも、 $A_o \leq 4$ なら、5[%]以上の高濃度域は、下部のガス吐出部位の近傍に限られてくる。

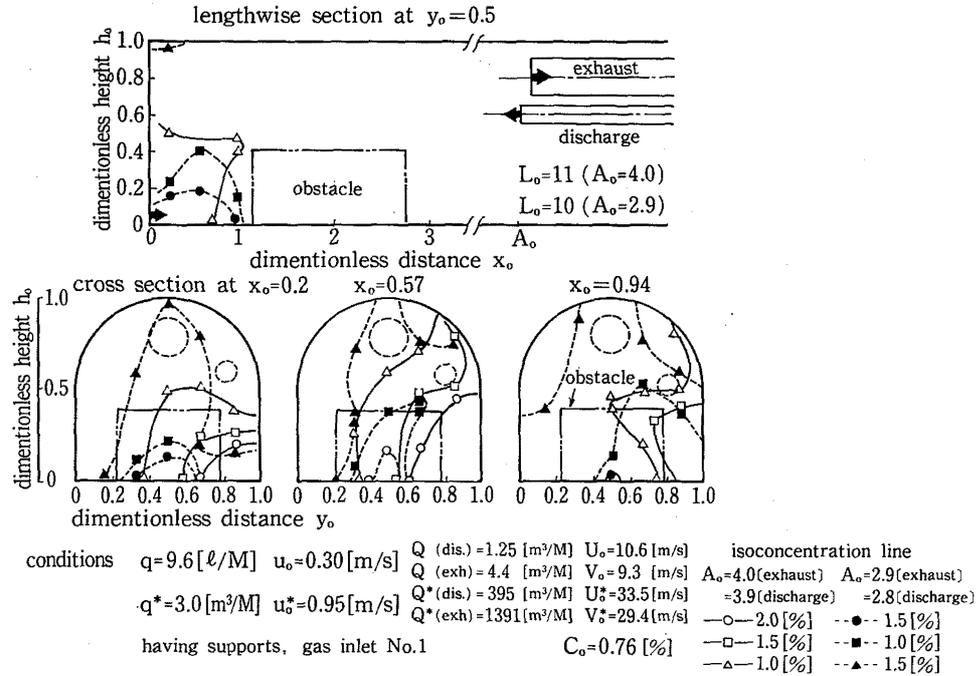


Fig.2.33 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

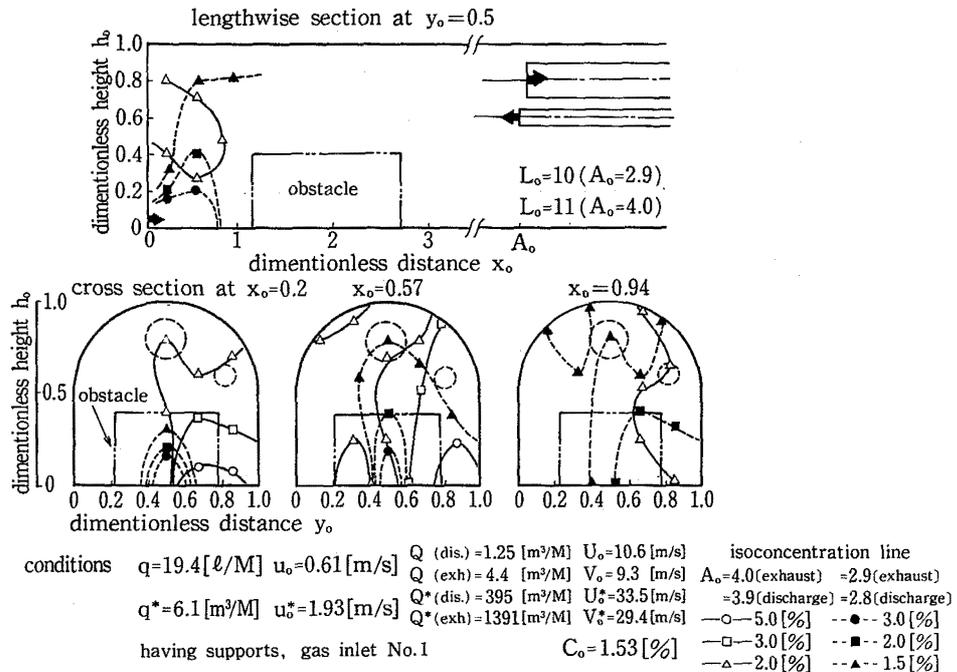


Fig.2.34 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

Fig. 2.35, 2.36は、ガス吐出量が19.6[l/M] 吐出口がNo.4の場合で、障害物の有無と $A_o=4.0, 2.9$ とを比較したものである。この場合もやはり障害物があると稀釈が悪化する。

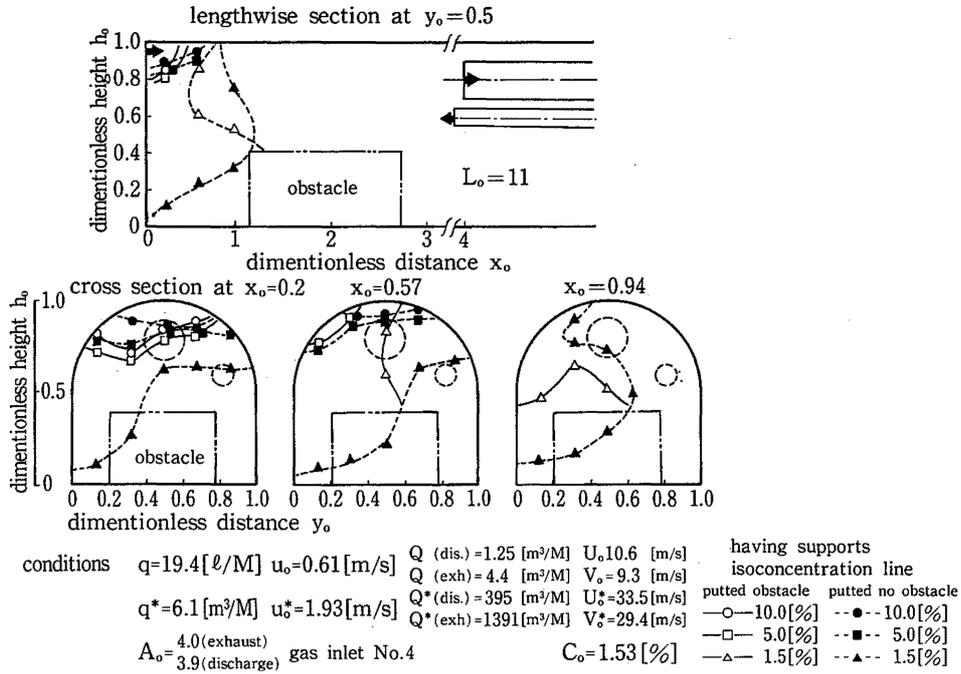


Fig. 2.35 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

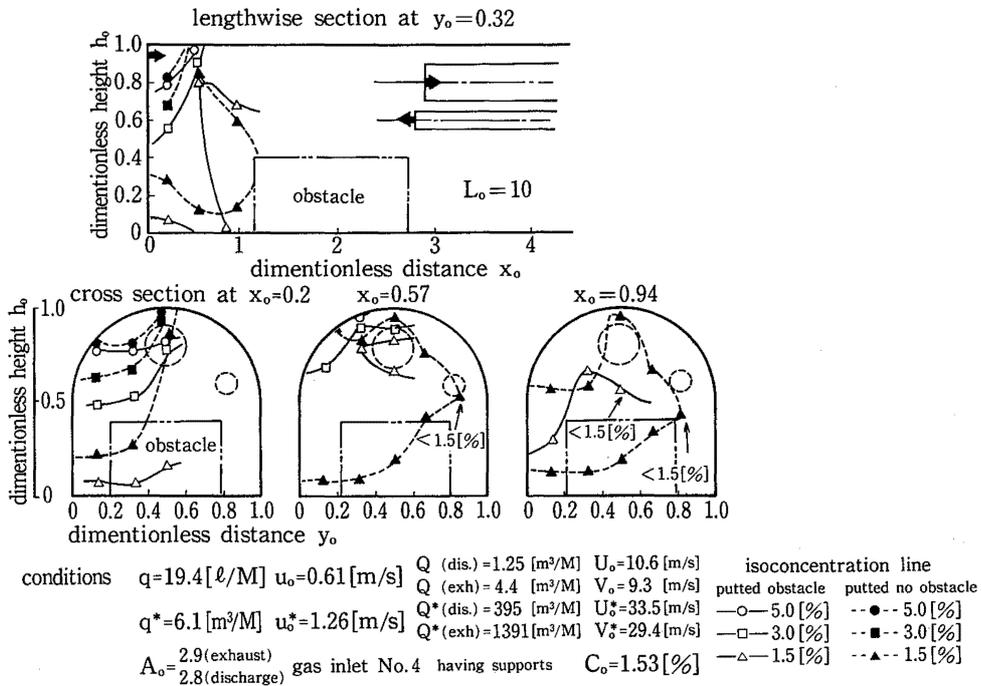


Fig. 2.36 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

Fig.2.37~2.39は、大風管で吸込みだけを行った場合、気で通気されるが、切羽から吹込口までの間は5[%]以上の高濃度域が厚く発生する。

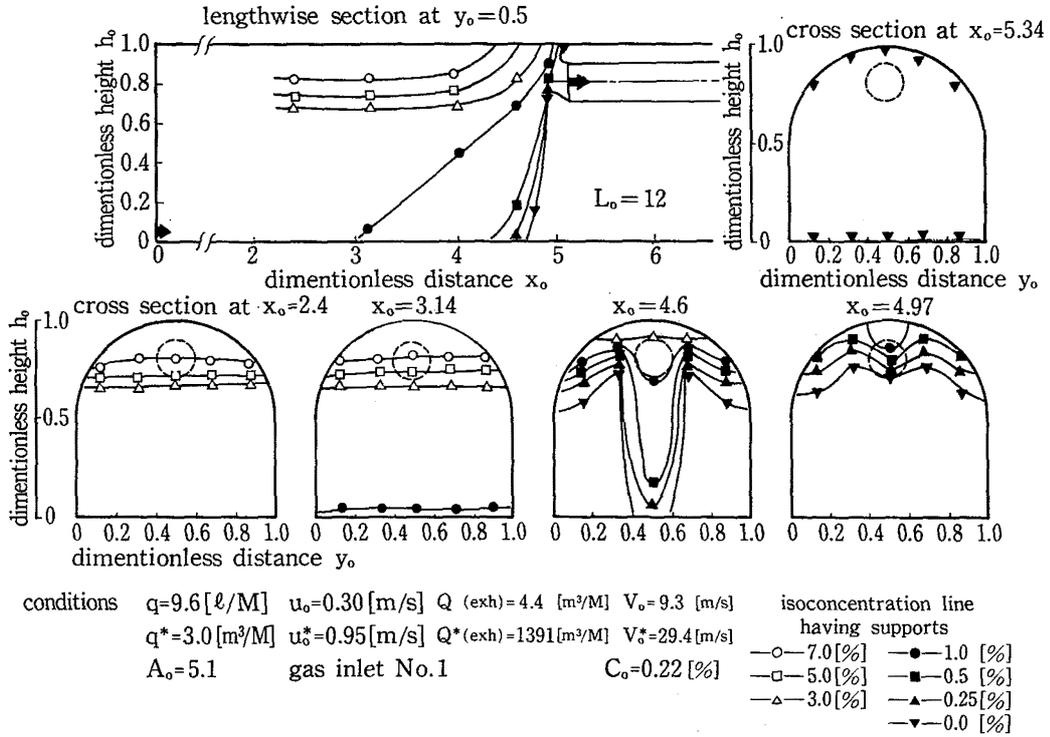


Fig.2.37 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

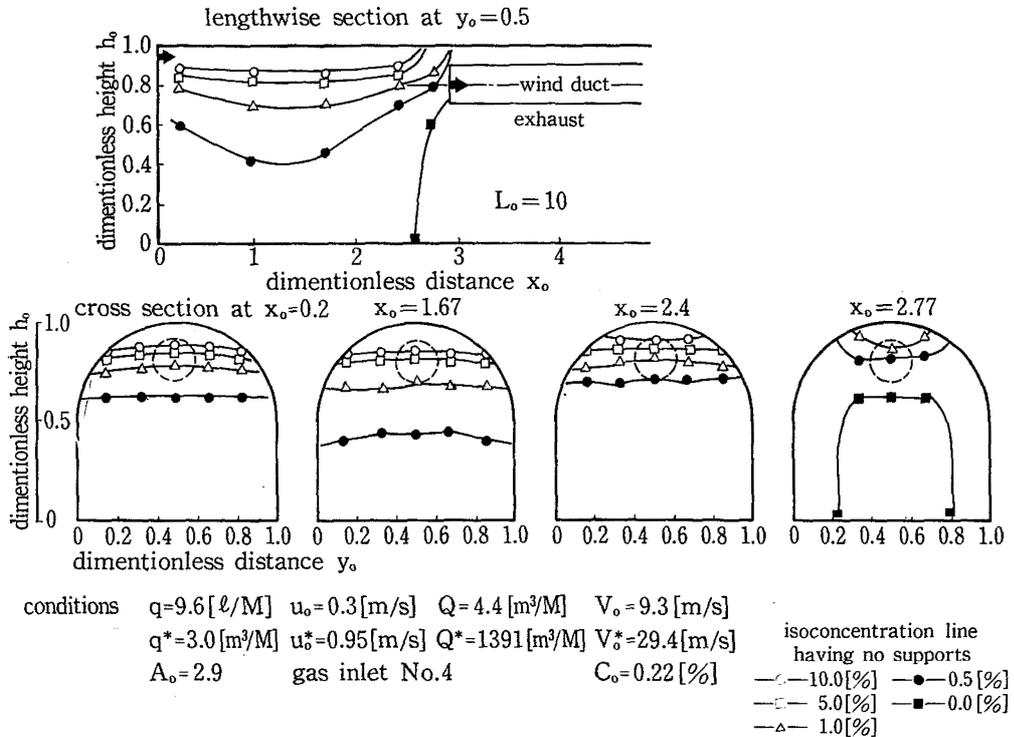


Fig.2.38 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

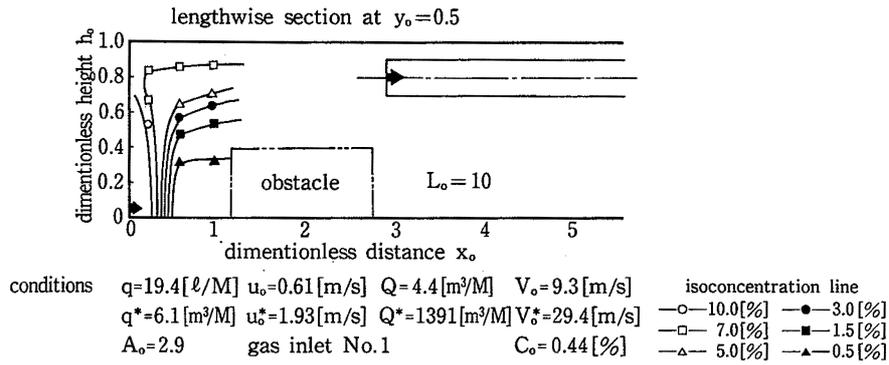


Fig. 2.39 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels  
 トンネル内におけるメタン等濃度曲線の分布

2.2.6.2 換気停止時

換気システムの故障や風管延伸作業のために、通気が一時止まる事がある。このような場合に、坑内へ湧出しているメタンガスの拡散挙動を把握するために、大トンネル模型 (Fig. 2.40および2.44~2.47) と小トンネル模型 (Fig. 2.41~2.43) を用いて実験を行った\*4。空間内ガス濃度の定義については、前述の換気がある場合と基本的には同じである。しかし前者は  $\eta$  が十分大きな半定常状態について考えたのであるが、後者は、換気が停止した時点からの時間のファクターを考慮した非定常状態にも興味をもたれる。すなわち、換

気が停止してから、どの位の時間で、その場のガス濃度が上昇するかという問題である。このような現象に、トンネルの長さのファクターが少なからず影響を与えるであろうと思われるが、ここでは、大トンネルでは、 $L_0=9.0$ 、小トンネルでは $L_0=12$ として、主として  $0 < x_0 < L_0/2$  の区間を問題とした。

実験結果によれば、換気が停止すれば、その空間内へ与える運動量が減少するので、一般に、 $\gamma^*$  は換気時よりも小さくなる。またFig. 2.40に示すように、ある程度時間が経過すれば、 $\bar{\gamma}$  の増加率が非常に小さくなるので、ほとんど半定常状態になったと考えてもよい。

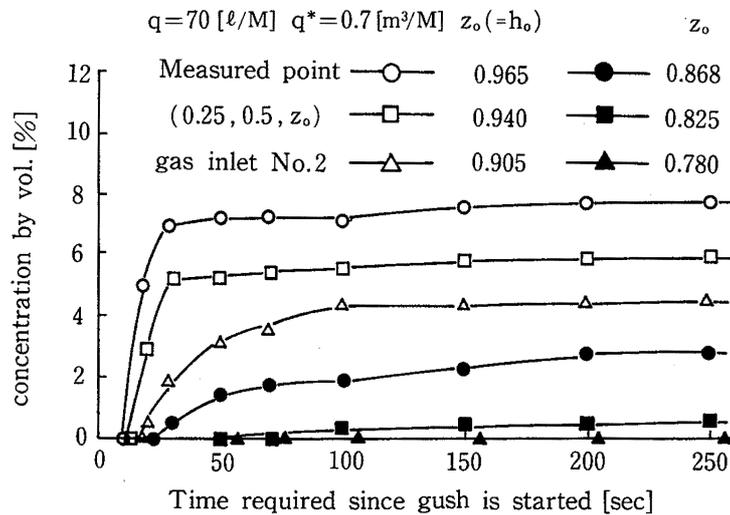


Fig. 2.40 Change of the concentrations of methane with the time required since gush is started

吐出開始からの時間に関するメタン濃度の変化

\* 4. 換気停止時の実験は全て支保工が無いものとする

この時、空間内のガス濃度分布に与える初期条件すなわち、換気による気流および乱れの条件についていくつかの実験によって得られた結果によれば、換気の効果が高い方が、この半定常状態に至るまでの時間がよけいにかかるという事である。また濃度の絶対値については、半定常状態に至る前の過渡的状态の時、初期条件の影響により、換気が強かった方が、低濃度域のふくらみがある。しかし、十分時間が経過すれば、初期条件の影響はほとんど薄れ、ほぼ同一の濃度分布に近似できた。従って、大トンネル模型での実験では、換気を停止して、一定時間経過後、ガスを吐出させ、この吐出開始からの時間をもって、換気停止後の時間とした。

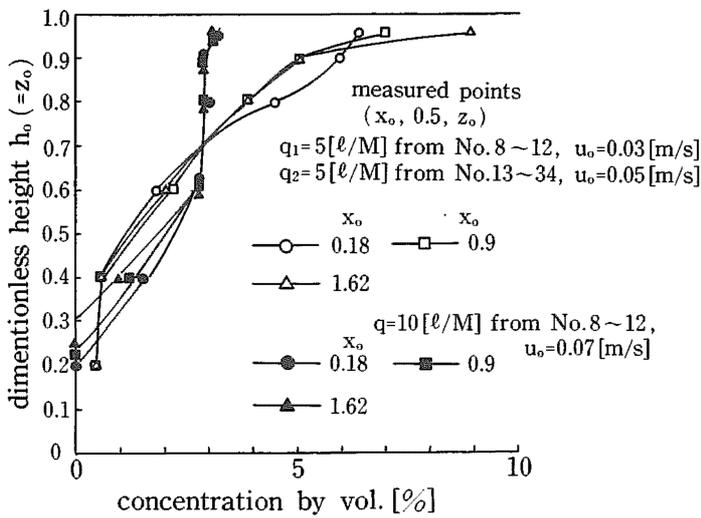


Fig. 2.41 Distributions of the methane concentrations in tunnels when the ventilation is stopped  
換気停止時におけるトンネル内のメタン濃度分布

小トンネル模型では、換気  $Q=1.25[m^3/M]$ ,  $U_0=10.6[m/s]$ , 吹き出し部(5.0, 0.82, 0.6)の停止を初期条件とし、停止からを所用時間とした。

Fig. 2.41は、小トンネル模型で、吐出位置No. 8~12から、 $10[1/M]$ ,  $q^*=3.2[m^3/M]$  で吐出した場合と、No. 8~12から  $5[1/M]$ , No.13~34から  $5[1/M]$  で吐出した場合である。ガスの吐出位置が拡散に強く影響し、

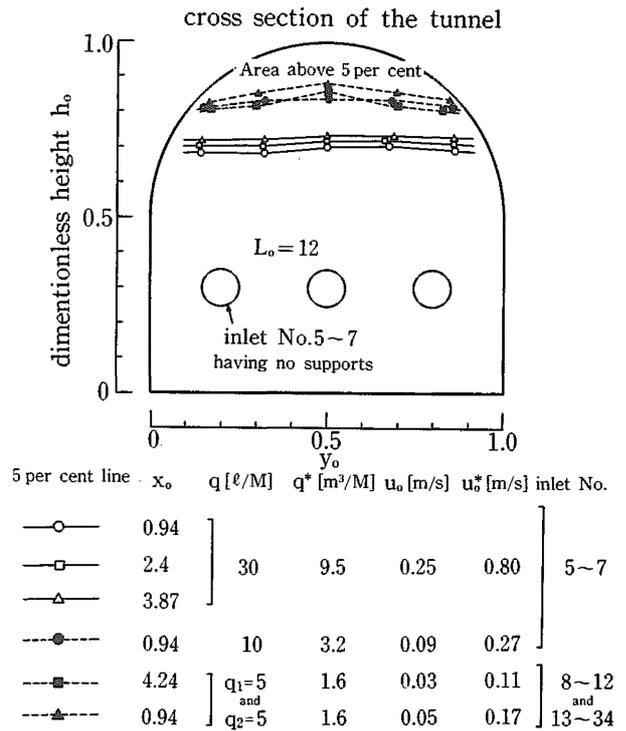


Fig. 2.42 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels when the ventilation is stopped  
換気停止時におけるトンネル内のメタン等濃度曲線の分布

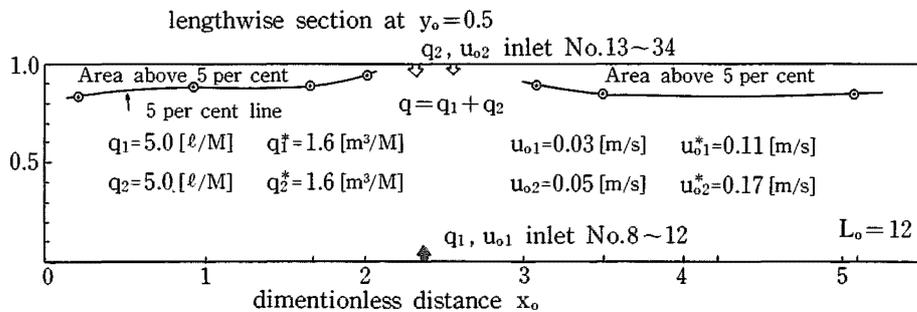


Fig. 2.43 Distribution of the isoconcentration lines of methane in tunnels when the ventilation is stopped  
換気停止時におけるトンネル内の等濃度曲線の分布

床からだけ吐出の場合は、吐出部位の近傍を除いて、5 [%]以上の高濃度域ができにくいのに対して、天端から吐出がある場合は、拡散しにくく、容易に高濃度域の発生をみる。Fig. 2.42は、図中の吐出条件に対する、y 軸方向の等濃度曲線の分布を描いたもので、壁

面近傍を除けば、換気がない時は、ほぼ水平に近い分布をする事がわかる。Fig. 2.43は、x 軸方向の濃度分布である。これらはいずれも、換気停止後300[sec]を基準にしたものである。

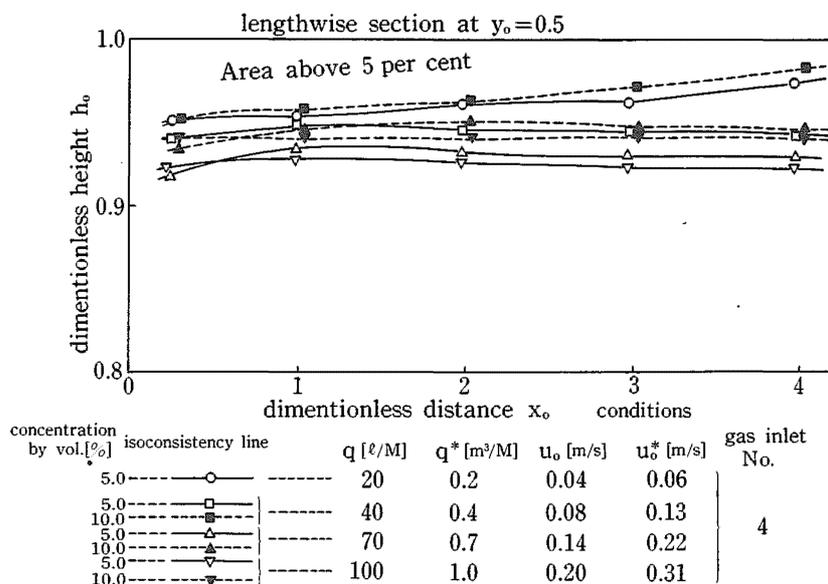


Fig. 2.44 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels when the ventilation is stopped  
換気停止時におけるトンネル内のメタン等濃度曲線の分布

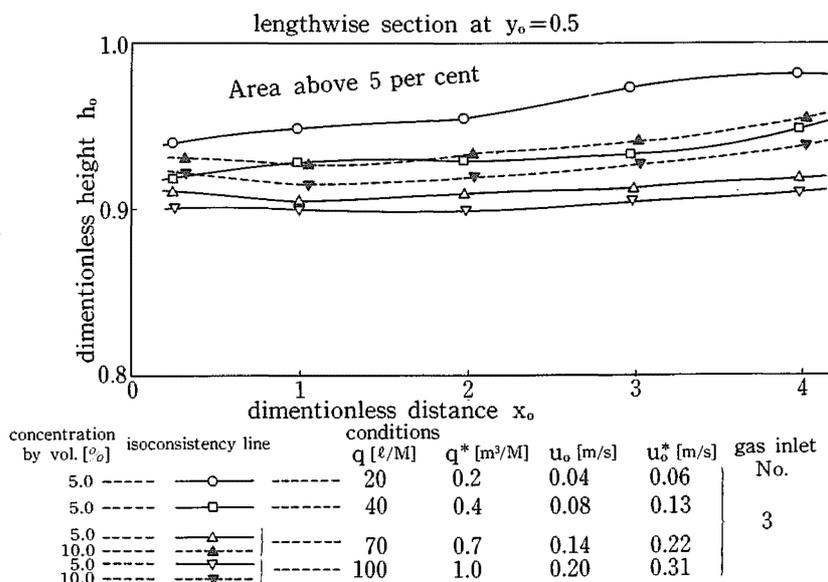


Fig. 2.45 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels when the ventilation is stopped  
換気停止時におけるトンネル内のメタン等濃度曲線の分布

Fig.2.44~2.47は、大トンネル模型を用いて、切羽面からのガス吐出における濃度分布を示している。これ等は、ガス吐出開始後240[sec]を基準にした濃度分布であるが、5[%]以上の高濃度域の生成およびその

大きさは、ガス吐出位置が強く影響することがわかる。大トンネル模型の実験では、ガス吐出開始後240~300[sec]後にほぼ半定常状態になった。しかし、Fig.2.40で見ると、いずれもはじめの数秒で、最終

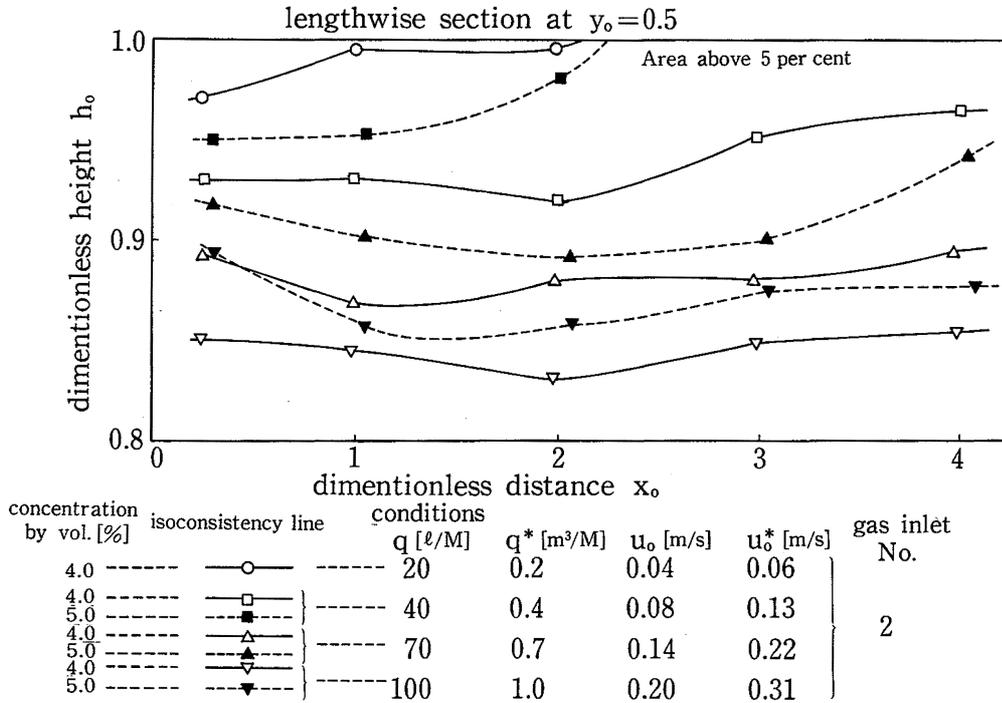


Fig. 2.46 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels when the ventilation is stopped

換気停止時におけるトンネル内のメタン等濃度曲線の分布

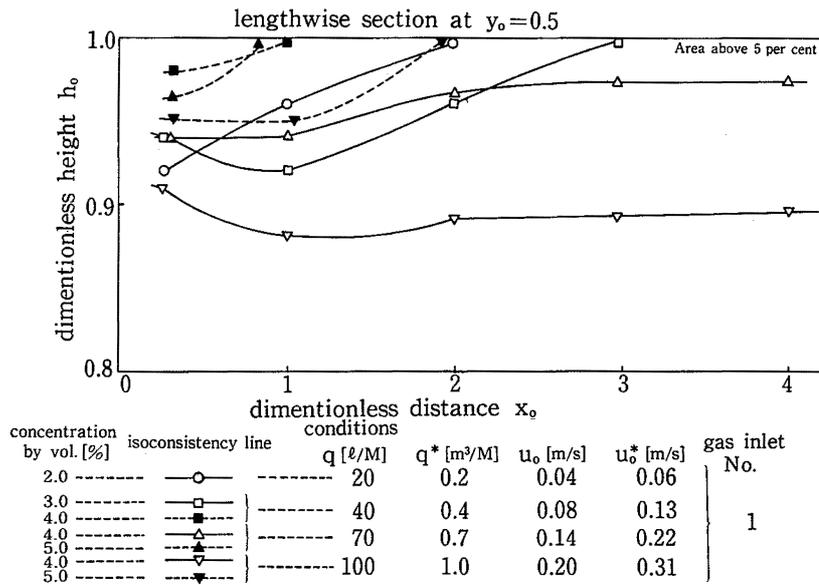


Fig. 2.47 Distributions of the isoconcentration lines of methane in tunnels when the ventilation is stopped

換気停止時におけるトンネル内のメタン等濃度曲線の分布

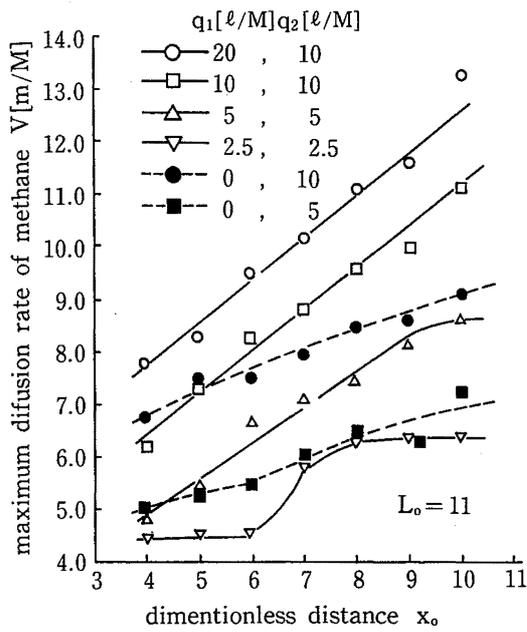


Fig. 2.48 Change of the maximum diffusion rate of methane with the dimensionless distance  $x_0$  and regard  $q_1, q_2$

$q_1, q_2$  に関して、無次元距離  $x_0$  に対するメタン最大拡散速度の変化

的濃度の80~90[%]に達する。このためメタンの拡散流速を小トンネル模型で調べた。Fig.2.48は、半定常態になった場合の条件下で、煙による可視化によって、気流の移動速度の最大値の10回の測定の平均を求めたものである。

2.2.6.3 相似確認実験

相似条件のところで述べた Ret 数の一致については、気流が十分乱れている場合について成立するが、トンネル内の気流が十分乱れているかどうかは、明確には判定できないので、相似の確認実験を行う必要がある。

大トンネル模型を実物とした時に、小トンネル模型は、その1/4のモデルと考えられるから、この二つのトンネル模型を用いて相似の確認実験を行った。

Fig. 2.49は、換気停止時の場合の両者の濃度分布を比較したものである。過渡的状态変化はあまり一致しなかったが、半定常状態では  $h_0 < 0.95$  ではほぼ一致し、実用的には相似が成立すると考えてよい。

Fig. 2.50は、換気時の大トンネル内の濃度分布を比較したものである。いずれも壁面の近傍を除いて、よく分布が一致し、今回の実験範囲内では相似の成立が確認された。

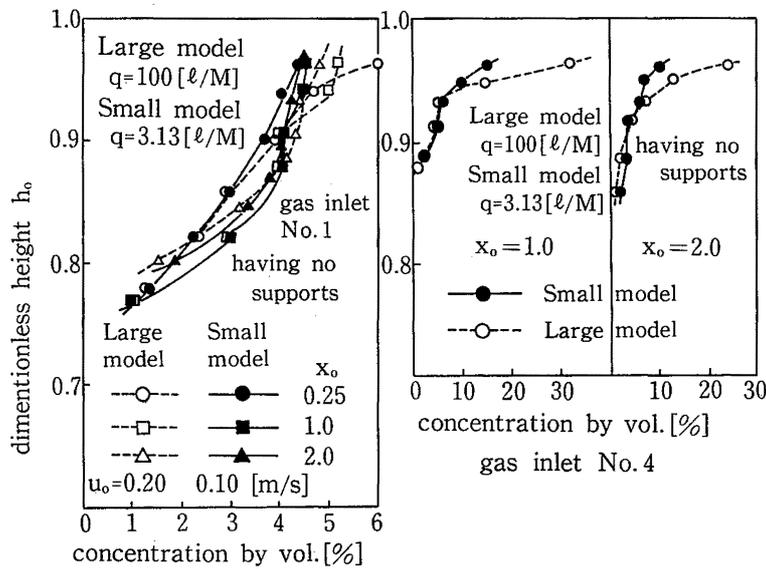


Fig. 2.49 Distributions of the methane concentrations in tunnels by the pilot experiments when the ventilation is stopped

相似確認実験における換気停止時のトンネル内のメタン濃度分布

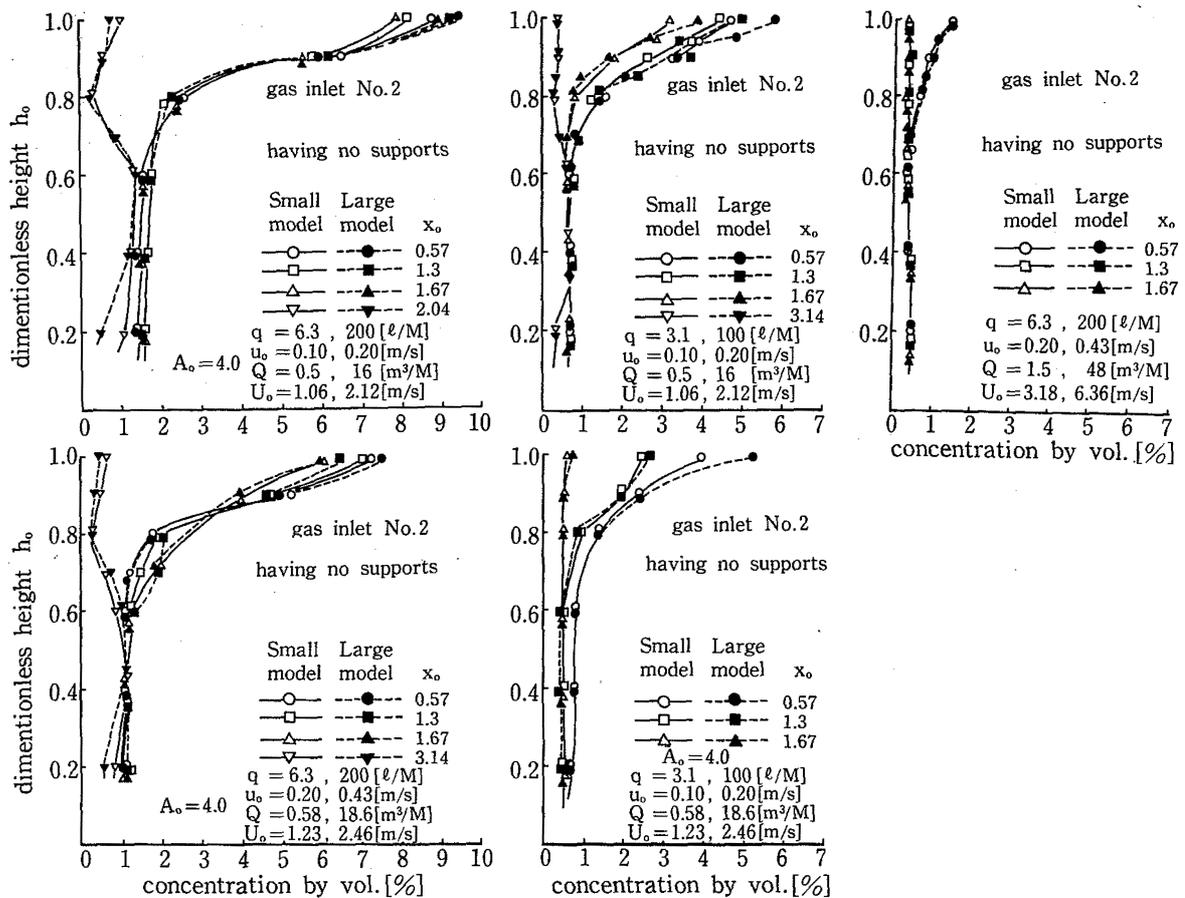


Fig. 2.50 Distributions of the methane concentrations in tunnels by pilot experiments  
 相似確認実験におけるトンネル内のメタン濃度分布

### 2.3 メタンガス爆発火災に関するシステ 的検討

トンネル内において、湧出してくるメタンガスによ  
 って生ずる災害としては、(A)メタンと可燃物が燃焼す  
 る事によって生ずる、一酸化炭素中毒、酸欠、熱傷な  
 ど火災による災害、(B)メタンガスの汚染による酸欠災  
 害、(C)メタンガスの爆発によって生ずる、人体の損傷  
 による災害が考えられる。

これ等の災害の発生と、通風換気システム等の関係  
 をF.T.A<sup>5)</sup>で解析するとFig.2.51のようになる。

Fig.2.51に示された各要因について、現場調査資料、  
 アンケート、文献、実験結果などから検討を加える。

(a)

主風管は、堀削の進展にともない、延伸していかな  
 ければならない。この点を考慮して、二系統の送風管

(ただし一方は圧縮空気による予備的送気設備) を用  
 意している現場もあったが、ガスの湧出量もそれほど  
 多くないためか、一系統の送気系が大部分であった。

主風管で、新鮮な外気をトンネル内へ押し込む方式  
 と、トンネル内の汚染空気を排気する方式とがあるが  
 押し込み方式の方がやや多く使用されていた。

この主風管の延伸作業を行う時は、送風を停止しな  
 ければならない。この作業は他の作業の行なわれない  
 休日などに実施される場合が多く、15~30[m/1回]位  
 を標準としている。アンケートによると、ある現場で  
 は、1回の延伸作業で、F.R.V.と先端がビニール風管  
 の主風管をF.R.V.45分ビニール風管15分合計1時間要  
 し、300[m]のローカルファン取付には1時間要する  
 他の現場では、スライドフォーム切羽間10[m]のビニ  
 ール風管の移動に、台車を用いて0.5時間、スライ  
 トフォーム後方のF.S.V.風管を30[m]延伸するので6  
 時間要する。

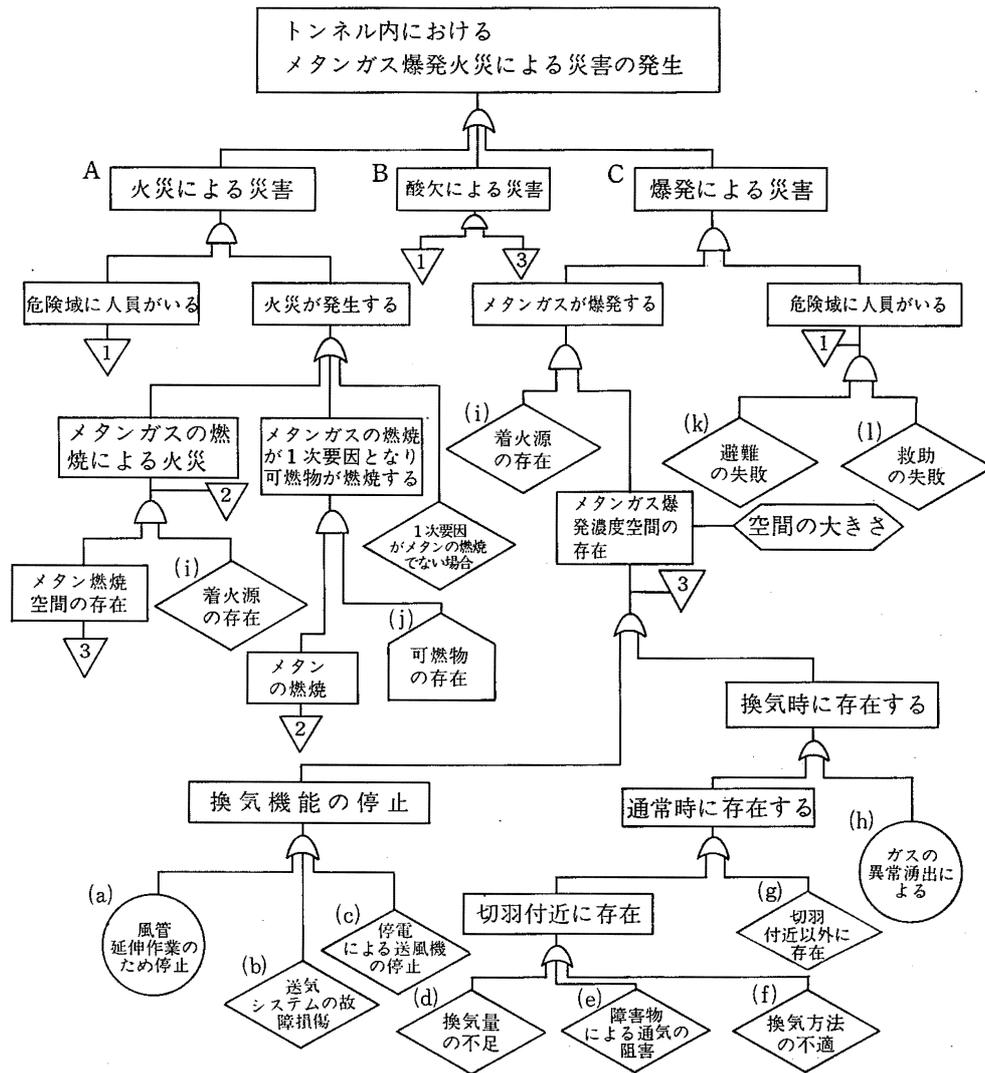


Fig. 2.51 F.T.A. related to the occurrence of the fire and explosion accidents by methane gas in tunnels.  
トンネル内におけるメタンガスによる爆発火災災害の発生に関する F.T.A.

次に現場において、風管延伸作業所要時間の実測を行ったので、結果を示す。

条件：φ900，長さ2400[mm/1本]，プラニウム管12本の取付け

φ1000，長さ30[m/1本]，ビニール風管1本の取りはずしおよび取付け

スライドフォーム後方30[m]から坑口まではプラニウム風管であるが、スライドフォームを挟んで、切羽までの200[m]はビニール風管である。作業は、送気停止後、スライドフォーム後方30[m]のビニール風管を取りはずし、その部分にプラニウム風管を増設し、先端のビニール風管に取りはずしたビニール風管

を継ぎ足す内容である。プラニウム風管の増設は、ダンプ車の上に組んだ足場上で行なわれ、先端のビニール風管の取付けは、はしご車で行う。

実測結果

ファン停止からビニール風管取りはずし	2分30秒
プラニウム風管の増設の所要時間	1時間50分
ビニール風管継ぎ足し所要時間	50分
送風開始に要する時間	3分30秒
合計	2時間46分

(b)

送気システムの故障損傷にどのようなものがあるかを、アンケートを取ったところ、いくつかの回答を得

たので以下に記す。

アンケート結果

(故障要素)	(故障の要因)	(修理時間)
コントラファン	○絶縁不良によるモータートラブル 1件	○2週間
	○雨雪によるモータートラブル 1件	○10日間
エアムーバー	○取扱い上の欠陥による外目詰り 1件	○3時間
風管ジョイント部の切損	○取り付けの不適 1件	○1時間
その他、風管のずれ等による漏風	数件	

(c)

停電対策としては、二系統の電源を有する事が理想的であるが、地理的に困難な現場が多く、ジェネレーターを有する現場が若干あった。

従って、供給電源の停止および内部の電力システムのトラブルがある場合は、ファンは、ほとんど停止するものと予想される。なお、電力供給機能の故障モード効果解析およびコンプレッサーの供給空気にCOの含まれる問題は、文献6)の「送気システムの信頼性」の項を参照されたい。

さて換気機能が停止されると、前節の実験結果に従って、トンネル内に爆発燃焼範囲濃度のメタン層が生成される。

文献7)には、EllisonとTurnerによる、天井の小さな傾斜の場合のメタンレイヤーの自由流れ速度理論式が紹介され、8×8ftアーチ型坑道での理論値と実験値の比較図が示されている。

(d)

換気量の不足は、(イ)ガス湧出量の予測の失敗、(ロ)換気システム設計の失敗とが考えられる。

ガス湧出量の予測についての現場アンケートでは、岩石中に含有され得るメタンガス量と単位時間当りの掘削量とからメタンガスの湧出量を算定するもの、湧水中に含有され得るメタンガス量と単位時間当りの湧水量の予測から、メタン湧出量を算定するもの等が示されているが、少量のメタン湧出量の場合は問題がないとしても、破碎帯などから集中的に湧出してくる場合については、問題が残存する。

換気量の算定は、①発破の跡ガスを稀釈する量、②作業員の呼気に必要な量、③内燃機関の排気ガスを稀釈する量、④可燃性ガスを稀釈するに必要な量のうち、

同時進行する条件の組合<sup>\*5</sup>せから、最大値を必要換気量としている。現にメタンガスがかなり湧出している現場を除くと、ほとんど、②+③+④または、①+②+④によって決められている。

また、作業員1人当りに必要とされる換気量を3[m<sup>3</sup>/M]としているものが大部分であったが、2[m<sup>3</sup>/M]、あるいは1[m<sup>3</sup>/M]としている所も若干存在した。

送風量算定の際の風管100[m]当りの漏風率βは、F.V.R.風管で0.015~0.035、スパイラル風管で0.015、プラニューム風管で0.022、ビニール風管で0.04、ダイポリン風管で0.01で計算されている場合が多いが、ある現場における風量測定の実測データをいただく事ができたので示す。

風管：ダイポリンウイント風管φ500

ファン：MFT70S-FF、片吸込型1段ターボファン

ファン吐出口からの距離[m]	100[m]当りの漏風率β
10~100	0.075
100~200	0.078
200~300	0.042
300~400	0.100
400~500	0.040
500~600	0.106
600~700	0.047
700~800	0.071
平均	0.056

この現場の送風システムの管理は比較的良好な状態にあると思われたのであるが、風速計による実測は上記のような結果になったのであり、現行の計算におけるβの値が妥当かどうか、各現場で検討してみることも必要であろう。

トンネルが延長されるに従い、送気の圧損が増加し通常のコトラファンの吐出圧では不足してくる場合がしばしばある。このような時に、風管を切り離して使用する断続直列方式が行なわれている場合が若干あるが、断続点における漏風率が20~30[%]にも達すると思われるので、非常に送気効率が悪化する。できるならこの方式は避けた方が賢明である。

(e)

障害物による通気の阻害については、若干前節の実験結果に示してある。実際においては、切羽に障害物

\*5 この他にも粉じん、地熱などの対策に必要な換気量があるが調査範囲では対象とされていない。

が存在する場合は、適宜ガス検知を行い、もし濃度が高ければ、局所換気を行う必要がある。A建設(株)のY作業所では、小トンネルにおけるボーリングマシン等の障害物の通気阻害の解決のために、主送気風管の中に伸縮可能な小径の風管を接続して利用していた。発破時には、主風管内へ後退させ、作業時には引き出して、マシンの上部を通過させるものであり、小トンネルでは実用上よいアイデアであると考えられる。

(f)

実験結果から判るように、吸引排除方式だけの換気であると、吸込口と切羽との間が通気が悪化するので、押込式の局所換気で、切羽に向かって送風してやらなければならない。実験では、吸込口と坑口の間は、ほとんど新鮮空気となっていたが、文献1)によると、一般的な場合(吸引量の少ない場合)では、押込局所換気の吸引口は、主吸引風管の吸込口よりも坑口側へ、1だけ離す事が必要とされる。ただし1は

$$1 > 1.4 D_e \left( \frac{Q_s - 1}{Q_j} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$D_e$ : 水力直径

$Q_s$ : 吸込風量

$Q_j$ : 押込風量

実験結果から、ガスが多量に切羽から湧出している場合は、押込風管の吹き出し口を  $A \leq 4H$  とする事が効率の良い通気を得る事がわかる。ただし、発破時における岩石等の飛来を考慮しなければならない場合(アンケートによれば、飛距離は15~25[m]程度であるというから、 $H < 6[m]$ のトンネルにあてはまる。)は、適当な防護か、 $A > 5H$ のときは、移動可能な局所ファン等の工夫が望まれる。

(g)

切羽付近以外から湧出してくるメタンガスは、その湧出部位によって、いわゆる高濃度メタンレヤーを生成する。特に天盤や側壁からの湧出の場合は拡散しにくい。また矢板裏などは非常に通気が悪いために、ほとんど稀釈されないものと考えてよい。部分的には、エアムーバやバッフルなどで稀釈する事が考えられるが、むしろNATM工法等により、メタンの坑内への湧出を押える方が能率的な場合も考えられる。ただし、コンクリート吹きつけの際、天盤より滴の静電気によるスパークで、メタンに着火する事があるから、局所換気やエアムーバで、突きつけ部位をよく稀釈し、ガス濃度を確認してから行なわなければならない。

坑道の天盤際に層をなしたメタンの拡散稀釈を支配するファクターとしては、天盤の幾何学的形状、通気速度、メタン湧出量があって、これ等のファクター間のメタンの混合稀釈状態を評価する尺度として、Bakke等により、「レヤーリング数」という無次元数が提案されている。またより現実の坑道に当てはまるように改良された「レヤーリング指数」も提案されている<sup>9)</sup>

エゼクタなど噴流による局部通気が、メタンの混合稀釈に与える効果の研究報告が文献8)に述べられている。実験は  $H = 20[cm]$  の正方形断面の坑道模型で、メタンを  $15[1/M]$  天盤から湧出させ、噴流で稀釈させるものである。結論としては、ガス湧出点と、噴流口までを  $5 \sim 5.5H$  以内とし、メタンを混合するに、無枠坑道で  $0.8 \sim 1.0[m/s]$ 、施枠坑道で  $0.5[m/s]$  の最小速度が必要であるとされている。

ここでは相似則についての検討はなされていないが、前節の相似条件がここでも成立するものとすれば、 $H = 5[m]$  のトンネルに換算すると、 $q^* = 47[m^3/M]$ 、最少風速がそれぞれ  $4 \sim 5[m/s]$ 、 $2.5[m/s]$  となる。 $q^*$  が  $47[m^3/M]$  という事はかなり大きな値であり、実際の場合のもっと小さな  $q^*$  では、当然、混合最少速度は、メタンガス吐出量に依存するであろうから、最少速度は、それより小さな値でもよいと思われる。

(h)

ガスの異常湧出は地層条件によるものと、気圧の変化などによるものが考えられる。いずれも詳細は本報告集Vに述べられているが、特にFig.2.8は、A建設の長野市にある作業所で、気圧と坑内メタン濃度との関係を実測したものを会社の御好意により公開させていただいたもので、押し込み式の換気システムで、定置式のガス検知器のセンサーを(イ)切羽近傍、(ロ)切羽より  $80[m]$ 、(ハ)  $280[m]$ 、(ニ)  $480[m]$  の4点設置したものである。

気圧低下時に最大濃度を示すのは、切羽より  $80[m]$  のチャンネルであり、時間遅れを持って、(ハ)、(ニ)と濃度の増加を示し、異常湧出したメタンが、拡散しながら坑口へ向って流れていくのがよくわかる。

(i)

着火源としては電気設備が原因となるもの(本報告集防爆編参照)、機械的摩擦や衝撃火花によるもの、タバコの火によるもの、吹きつけの際の静電気スパークによるものが考えられる。

(j)

可燃物としては、矢板、内燃機関の燃料、ボーリンマシン類の油圧用オイル、\*6可燃性の風管、アセチレンガス等が考えられる。

(k)

避難が失敗する一つの要因として、坑内のガス濃度の把握が正しくできない事があげられる。アンケートによれば、大部分の現場では、定置式のガス検知警報器と、ポータブルタイプのガス検知器とによって、常時、ガス濃度をモニターしている。

ガス検知器の点検は、メーカーの係員が、2ヶ月ないし3ヶ月に1回、定期的に行うのが大部分であった。

ある現場における定期点検時における修理には下記のようなものがあった。

検知素子劣化交換 2点

メーターのひっかかりの為ブザー鳴らず 交換1点

ケーブルの断線 1ヶ所

警報回路MB-4 交換1点

警報用ナツメ球の切れ 交換1点

検知器は使用条件により、かなり信頼性が劣化するものと考えられるので、過信することは避けるべきである。

## 2.5 ま と め

切羽付近のメタンガスの換気による拡散実験では、切羽から、 $H^* = 5$  [m]のトンネルに換算して約 $2$  [m<sup>3</sup>/M]~ $13$  [m<sup>3</sup>/M] 程度のガス湧出に対するいくつかの換気条件下における、ガス濃度分布が得られた。切羽から風管吹き出し口までの距離Aが、 $A < 4H$ のときは稀釈は良好であるが $A = 5H$ になると悪化する。風量が同じならば、 $U_0$ が大きい方が混合が良好である。押し出しと吸引を同時に行った時は、切羽付近の濃度を2割前後減少させ、吸込み口から坑口間の濃度をほとんど0にする事ができる。押し出しだけの換気の場合は、代表濃度 $C_0$ を $3.1 \sim 0.24$  [%] までについて行った。吹き出し口付近、すなわち $x_0 = A_0$ 付近では、 $C_0$ が低い程様に良く混合され、 $C_0 = 3.1$  [%] の場合でも危険域が生じない程度には、混合稀釈されていた。従って、切羽からのメタンガス湧出に対しては、 $C_0 = 1.5$  [%] 以下になるように換気をしてやれば、風管吹き出し口より後は、危険濃度域は生成されないと思われる。ただし、メタンガスの湧出部位には必ず危険域が発生し、その範囲は図示したとうりである。

吸引だけの場合は、坑口から吸い込み口までの範囲を汚染されていない外気と同じにする事ができるが、ガス湧出部位と吸い込み口との間に、広範な危険域の発生がみられる。その範囲は図示したとうりである。

メタンガスの湧出部位が切羽近傍でない時で、特に側壁や天盤からの場合、メタンレヤーとなって稀釈されにくい。矢板裏はほとんど稀釈する事はできない。エアムーバーなどの局部換気や、バッフルなどの工夫が必要とされるが、NATM工法など工法的手段で、ガスの湧出を阻止する方がより善策であると思われる。ただし、モルタル吹きつけの際は静電気スパークによる着火が心配されるので、吹きつけ部分の十分な稀釈とガス濃度の確認が必要となってくる。

次に、正常な作業条件を保持するために必要な換気技術基準についての詳細は、文献9)「地下工事における換気設備等に関する技術基準報告書」等を参照されたいが、特に、可燃性ガス対策の見地から、換気方式の適用について検討する。

(イ) 大型断面先進導坑方式の場合

この場合は、切羽面が複数に別れ、通気径路が錯綜しがちであるので、主風管は吸引排気方式として、全断面掘削完了部位まで坑道送気とする。導坑は小口径風管で、主風管の吸い込み口後方から、切羽まで押し込み方式とする。こうすれば、風管の圧損が少く、\*7比較的長いトンネルにも適用できる。タイヤ工法で、排気ガスが多量の時は、主風管を送気方式とする事も考えられる。

(ロ) 大型全断面掘削方式の場合

トンネルの途中が湧出ガスや、タイヤ工法の排気ガスで汚染されない時は、主風管を吸引排気方式とし、切羽面に移動可能な攪拌用の押し込み式の、局所換気を設ければ、圧損が少く、吹き出しの $U_0$ を大きくする事が可能となる。

途中がガスで汚染される場合は、主風管を押し込み(送気)式として、切羽付近に新鮮な空気が供給されるようにする。

(ハ) 小断面の場合

径の大きな風管を設置する事ができない場合が多いので、トンネルが長くなると、圧損が大きくなり、換気たて坑などを設けなければならない事がある。また、作業空間が小さいので、局所換気設置なども設けにくい

\*6 難燃性のオイルが開発されている。

\*7 先進導坑の小口径風管が短かくてすむから。

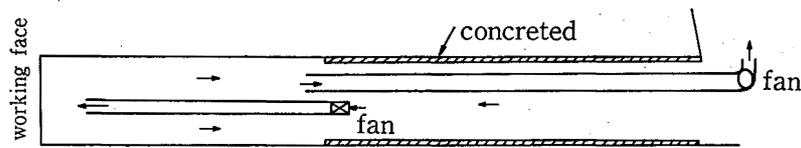


Fig. 2.52 A ventilation system for the small section and long tunnels

小断面長大トンネルのための一つの換気システム

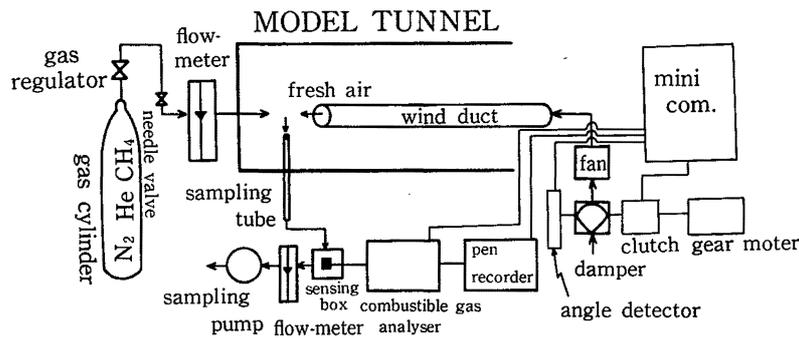


Fig. 2.53 Experimental System

実験系統

場合が多いので、切羽面は押し出し方式が用いられる場合が多い。断続直列方式は、漏風率が大きくなり、最悪の場合、断続点と断続点の間で、通気が循環する現象が生じ危険である。

一つの考え方として、Fig. 2.52に示すように、コンクリート巻きたて完了点（ただし、圧損のカバーできる地点が限度）まで吸引排除方式として、そこから押し出し（送気）方式とする事も考えられる。

### (参考) 送風量制御の実験

坑内におけるメタンガスの変動<sup>\*8</sup>の原因は、掘削の進展に共う地質条件に変化によるもの、大気圧の変化によるもの等が考えられる。このため、湧出量の最大値に対する換気能力を用意する事が望ましいが、(イ)通風量が多いと、切羽等の膨張を促進する。(ロ)必要以上の換気量はエネルギーの損失。(ハ)通風量が多いと、坑内火災発生的好条件となる。などのマイナスの効果をもたらす、特に(イ)については切実な問題点となる。現場調査アンケートでも、(イ)の理由により、通風量を手で管理しているという現場が存在する事がわかった。

(ロ)については、送風機の回転数を制御する事になれ

ば、所要動力は回転数の3乗で増減されるので、大幅な省エネルギーとなる<sup>10)</sup>

(ハ)については、通風量を制御する事により、坑内の不必要な乾燥を抑制することとなる。

以上の理由により、ミニコンTOBAC-40Lおよび小トンネル模型を用いて、換気量制御のシミュレーション実験を行った。

### 実験方法

Fig. 2.53に示すような実験系統で、ガス検知器から、ミニコンへガス濃度の情報を入力する。ミニコンはこれからガス濃度を予測し、プログラムに従って、クラッチを正転あるいは逆転側につなぎ、ダンパーを回す。ダンパーは、角度検出器によってその開度がミニコンにフィードバックされる。この一連の動作により、送風量制御をシミュレートする。Fig. 2.54はダンパー制御部の装置図である。Fig. 2.55に送風量制御のフローチャートを示す。

計算機は過去のガス濃度から、未来のガス濃度を予測し、その値に基づいて、送風量の増減、警報の発令、

\*8 メタンガスに限らず内燃機関使用の場合の坑内汚染ガスについても同様の事が言える。



Fig. 2.54 Experimental equipment  
実験装置

電源の遮断などの動作を行う。

ガス濃度の予測式は次のものを使用した。

$$C_{i+n} = C_i + \delta \cdot n \cdot \dot{D}$$

$$\dot{D} = (3C_i - 4C_{i-N} + C_{i-2N}) / 2\delta N$$

$\delta$  : ガス濃度のサンプリング時間間隔[sec]

$C_i$  : 現在のガス濃度[%]

$C_{i+n}$  : 現在から  $n$  回目のサンプリングにおけるガス濃度の予測値[%]

$C_{i-N}$  : 現在より  $N$  回前のサンプリングにおけるガス濃度[%]

$C_{i-2N}$  : 現在より  $2N$  回前のサンプリングにおけるガス濃度[%]

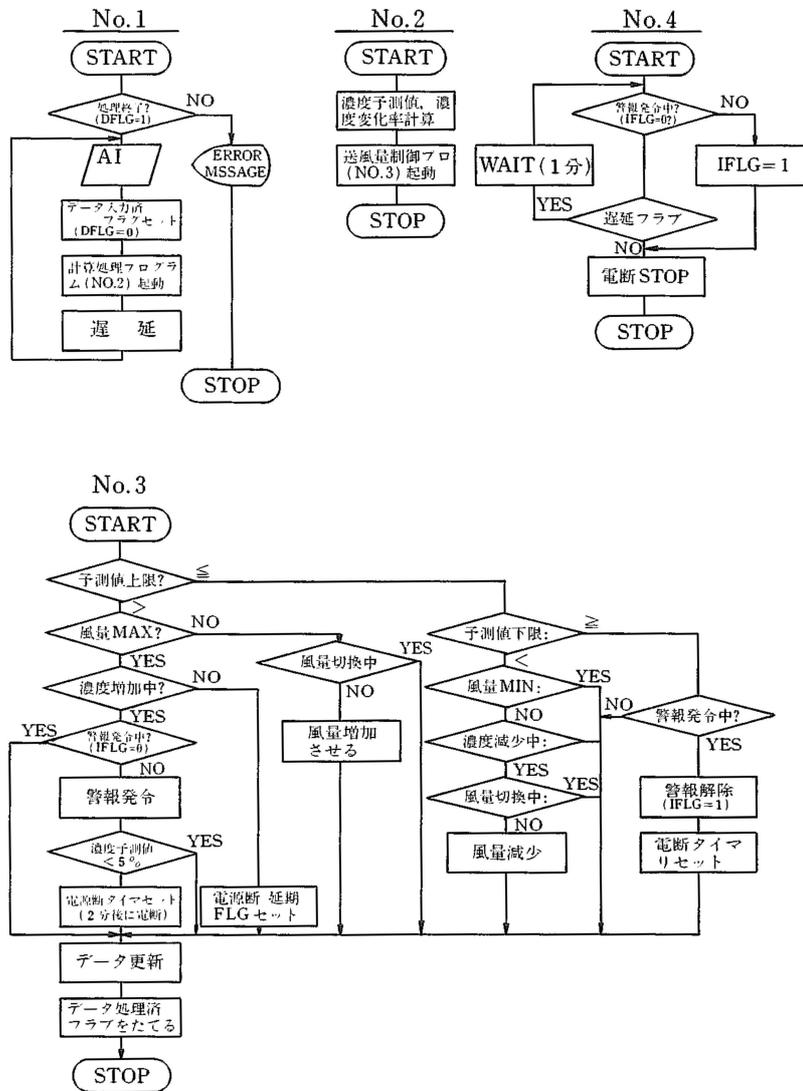


Fig. 2.55 Flow chart for the control of the ventilation  
換気量制御のためのフローチャート

実験は、 $\delta$ を3, 5, 7 [sec] の三種類,  $N$ を1, 2, 4の三種類,  $n$ を1, 2の二種類, ガス濃度の制御目標値の上限および下限を1.5[%], 0.5[%]および, 1.5[%], 0.3[%]の二種類について行った。Fig.2.56に実験結果の一例を示す。

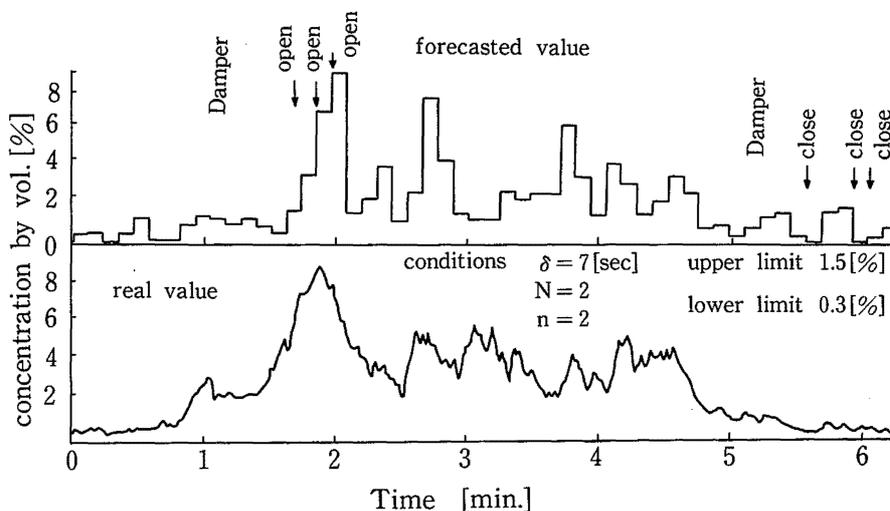


Fig. 2.56 Forecast of the concentration of methane and the actions of the damper

メタン濃度の予測とダンパーの動作

## あとがき

本研究を行うに当たり、公害資源研、高木英夫主任研究官には、貴重な資料をいただき、メタンの換気方法について、御示唆をいただきました。実験方法について、東京工芸大、小林信行助教授から御教示をいただきました。実験には、創合電子(株)榎本氏、新コスモス電機(株)中村氏に御協力をいただきました。現場調査では、三井砂川鉱業所、松島炭鉱にて、長い歴史を有する、炭鉱のガス対策を実施で御教示をいただきました。トンネル掘削の現場では、青木建設湯之瀬作業所、熊谷組明科作業所、前田建設西村上トンネル作業所を始め多くの現場の皆様と、安全担当の皆様から御協力、御教示および貴重な資料をいただき、現場測定にも参加していただきました。皆様の御尽力により本報告書が作成されましたので感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 高木英夫「トンネル工事のガス対策」トンネルと地下 Vol.8, No.3
- 2) 小林信行, 大場正昭「室内における拡散に関する実験」空気清浄第15巻第6号
- 3), 4) 勝田, 村上, 小林「閉鎖的空間の気流性状に関する研究」第1報, 第2報, 日本建築学会論文報告集, 234号, 238号
- 5) 井上威恭監修「F.T.A.安全工学」日刊工業新聞社
- 6) 産業安全研究所 SRR-78-1「潜函工法等に対する総合安全対策にかかわる特別研究」
- 7) 高木「坑道気流中におけるガスの流動拡散について」, 採鉱と保安 Vol.22, No.7
- 8) 高木「局部通気に関する研究」採鉱と保安, Vol.20, No.6
- 9) 「地下工事における換気設備等に関する技術基準報告書」, 社団法人日本トンネル技術協会
- 10) 「可変速化が急ピッチで進む流体機械の駆動装置」日経メカニカル, 4-14, 1980