

トンネル内メタンガス拡散に関する模型実験と数値シミュレーション
Experiments and numerical simulations of methane diffusion in a tunnel.

鹿島建設(株) 稲垣 聡 Satoshi Inagaki *)
鹿島建設(株) 横田 依早弥 Isaya Yokota **)
鹿島建設(株) 池谷 毅 Tsuyoshi Ikeya ***)

SUMMARY

When geological strata including methane is excavated, there is a danger that the methane may explode. It is very important that the ventilation system effectively dilutes and discharges the gas to prevent an explosion.

The behavior of methane in the tunnel was observed in an experimental model. In addition, two types of gas were mixed in a series of numerical simulations and the phenomenon of diffusion was tested. The results described the phenomenon qualitatively, and to some extent quantitatively.

Keywords : methane, tunnel, ventilation

1. はじめに

有機物を含む都市部の地盤や炭田、油田、ガス田、火山帯などの地質にはメタンガスが蓄積されている。このような地質でトンネル掘削を行う場合、メタンガスの湧出によりトンネル内でガス爆発を起こす可能性がある。

爆発を防止するためには、メタンガスを速やかに希釈し坑外に排出する換気システムが重要となる。基本的には、換気量が多いほど安全性は高くなるが、実際は換気設備配置スペースの制限や経済性の観点から適切な換気方式と換気量の設定が必要である。

実際のトンネルにおいてメタンガスの拡散を把握するのは困難であり、従来の換気計画では経験的にマクロな設計が行われてきた¹⁾。模型を使った換気流の観測は中山ら²⁾の粉塵濃度も併せて計測した例があるが、メタンガスを直接扱ったものではない。また、数値計算による解析例も著者らの知る限りはない。

本研究は数値シミュレーションによる定量的な換気設計を最終目標としており、以下に示す研究項目のうち、①及び②について概要を述べる。

- ①トンネル模型によるメタンガス拡散現象の把握。
- ②数値シミュレーション手法の試行。
- ③相似則及び実大トンネルでの検証。
- ④数値シミュレーション手法の確立。

実験では、工事中のシールドトンネルを想定した模型を設置し、最初に発生するメタンガスの基礎的性質を調べるため、換気流の無い状態でトンネル内に模擬メタンガスを発生させ、トンネル天井に形成されるメタンの層(メタンレヤー)について、可視化するとともに、メタン濃度及び拡散流速の鉛直分布の測定を行った。

次に換気風管を配置し、換気方式(送気式、排気式)、換気風管の位置及び換気風量を変化させてトンネル内の流速分布、ガス濃度分布を測定し、換気状況を調べた。併せて、実際の工事中のトンネル内

*) Research Engineer, Civil Engineering, Kajima Technical Research Institute
19-1, Tobitakyu 2-chome, Chofu-shi, Tokyo 182, Japan.

**) Chief Research Engineer, Mechanical Engineering, Kajima Technical Research Institute.

***) Deputy Chief, Western Control Section, Tokyo Branch, Kajima Corporation,
1-3-8, Motoakasaka, Minato-ku, Tokyo, 107, Japan.

に多く存在する台車などの障害物が換気効果に与える影響を調べるため、トンネル内に障害物の模型を設置して計測を行った。

一方、数値シミュレーションでは、メタンガスと空気の2気体混合現象について、乱流拡散、浮力、慣性力等を考慮した3次元計算を行った。基礎式は質量保存式、運動量保存式、化学種の質量保存式、状態方程式であり、乱流モデルには標準的なk-εモデルを用いている。

2. トンネル模型実験

(1) 実験装置

工事中のトンネルの主な換気方法としては、図-1に示すように主風管を通じて外気を切羽へ送り込む送気式と、切羽付近の汚染された空気を主風管を通じて排出する排気式がある。排気式の場合は切羽付近の希釈効果を高めるため、局所送風管を用いるのが普通である。

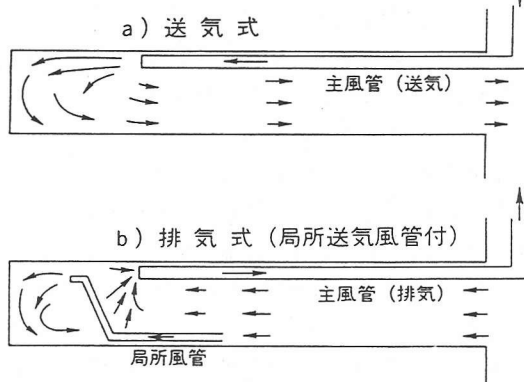


図-1 2種の換気方式

(Fig. 1 Two kinds of ventilation system)

実験装置はどちらの方式にも対応でき、その全景を写真-1に、構造を図-2に示す。

トンネル本体は内径 $D=340\text{mm}$ 、全長 20D (内径 D の20倍、以下も長さも D で正規化) の透明アクリル製の円筒で、切羽部となる先端は閉じている。換気風管は主風管 (内径 $0.147D$) と排気式で使用する局所風管を取り付ける。なお、排気式の局所風管は、実物のトンネルでは送風機を坑内に設置するが、模型では坑外に送風機を設置し、坑口側の空気を一部坑外に取り出しメタン発生口の直前でトンネル内に再び送り込む方式とした。

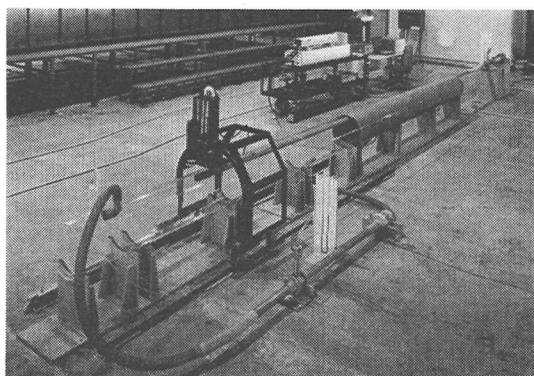


写真-1 実験装置全景

(Photo. 1 Overall view of experimental apparatus)

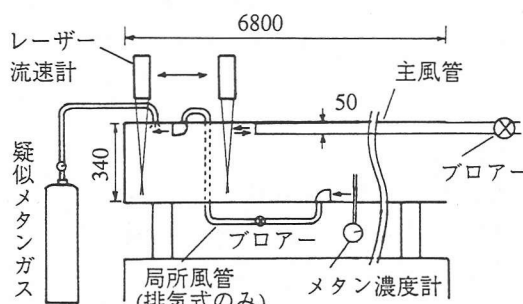


図-2 実験装置概要

(Fig. 2 Diagram of experimental apparatus)

メタンガスの模擬ガスとして、空気に体積濃度1%のメタンガスとヘリウムを混合し、全体の比重をメタンガスと同じ0.55 (空気に対する比重) に調整したものを準備した。模擬ガスは $x=0.5D$ の位置の天井部に設けた $5 \times 50(\text{mm})$ のスリットから鉛直下向きに噴出させた。

流速 (x 成分のみ) の測定にはレーザードップラ一流速計を、またメタンガス濃度の測定には水素炎イオン化方式の炭化水素ガス濃度計を用いている。

(2) メタン拡散の基本性質

最初に、換気を行わない状態でトンネル内に模擬ガスを発生させ、メタンガスが拡散していく様子を調べた。写真-2は、噴出口からメタンガスを 5.43l/min 発生させ、定常状態となったときの可視化写真である。また図-3は、同条件で $x=0.9D$ 、 $1.6D$ 、 $3.8D$ におけるトンネル中心を含む鉛直軸上でのメタン濃度 (値は100%濃度のメタンガスが発生した場合に換算) 及びメタンガス流速の鉛直分布である。

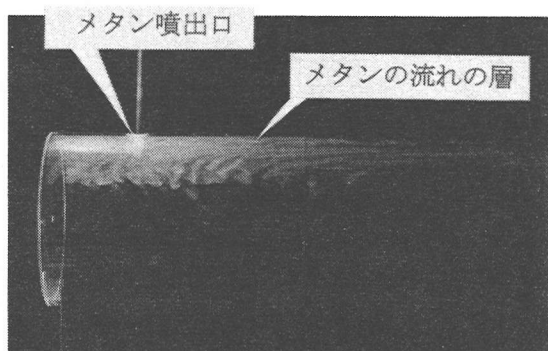


写真-2 メタン拡散の可視化

(Photo. 2 Photograph of methane diffusion)

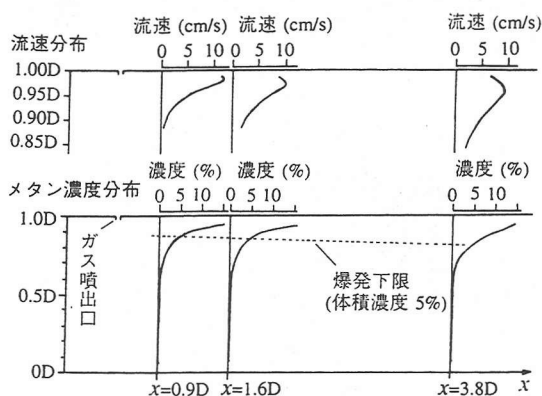


図-3 メタン拡散時の流速分布及び濃度分布

(Fig. 3 Velocity and density distributions during methane diffusion)

メタンガスは比重 0.55 と空気より軽く、噴出後にトンネル天井付近でメタンレイヤーを形成している。天井近くの薄い層では、目に見えてわかる程度のメタンガスの坑口方向への流れがあり、これは希釈されていない高濃度のメタンガス層で、その移動速度はメタンガスと空気の密度差で生じる。

このメタンガス層の流れは、坑口側に行くに従い速度は徐々に小さくなるとともに厚くなっていく。この層の下はほぼ静止している。鉛直濃度分布を計測してみると、坑口側に行くに従い徐々にメタンガスが拡散しており、メタンガスの爆発下限濃度 5% (体積濃度) を超える濃度の層は天井から離れた範囲に広がっていく。

これらメタンレイヤーを解消するには、天井部でのメタンガスの流れに乱れを起こす必要があり、換気流による希釈でも天井付近に重点を置くことになる。

(3)換気特性

a)送気式の換気特性

実験では換気方式、ガス発生量、換気風量、換気風管位置をパラメータとし、また排気式では主風管と局所風管の風量比を変化させて計測を行っている。まず送気式換気における計測例を示す。主風管の位置等と各諸元の記号を図-4に示す。

図-5は $L=5D$ とし換気風量 Q を変化させて、トンネル中心を含む鉛直断面(図-4のA-A'断面)における流速を計測した結果である。

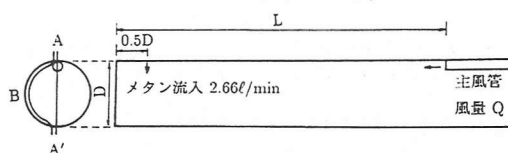


図-4 送気式の設定と記号の説明

(Fig. 4 Explanation of the air supply system)

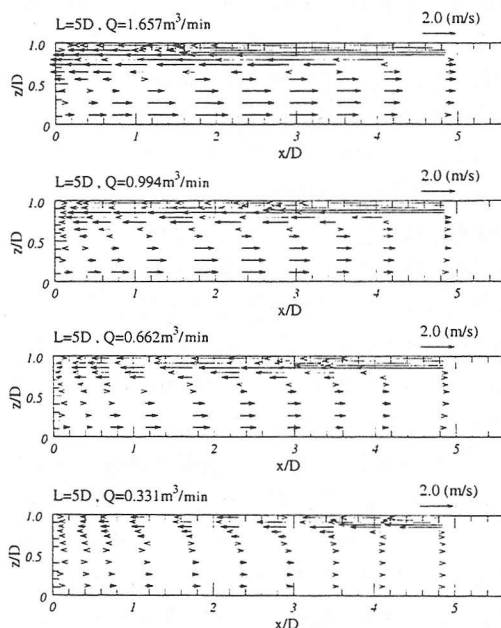
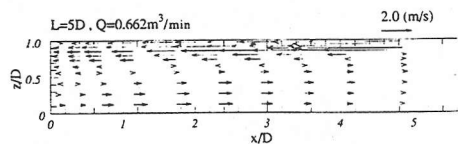


図-5 風量を変化させた時の換気流x成分 (送気式、 $L=5D$ 、A-A'断面)

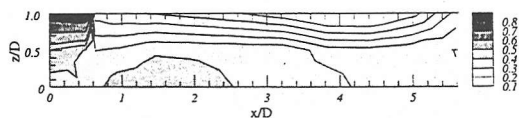
(Fig. 5 Ventilation velocity in different air flows)

流れのパターンは風量 Q に対しほぼ相似であり、 Q が変化しても、換気流の到達距離は変化しない。この傾向は L を変化させた場合も同様であり、この $L=5D$ のケースが換気風速が切羽先端まで到達する最長の距離であった。

図-6 (a)、(b)にメタンガス発生量 $Q=2.66\text{l/min}$ 、 $L=5D$ の場合の同断面における流速 x 成分及びメタンガス濃度の分布を示す。切羽先端まで到達した換気流により、メタン噴射口付近のメタンを速やかに希釈している。



(a) 流速 x 成分



(b) メタン濃度

図-6 送気式の測定結果 $L=5D, Q=0.662(\text{m}^3/\text{min})$
(Fig. 6 Experimental results under air supply system)

次に、本来工事中のトンネル内に存在する機械・台車など換気流に対する障害物の影響を調べるため、トンネル内にシールドマシンの後続台車を想定した直方体の箱（以下障害物模型と呼ぶ）を設置して同条件で計測を行った例を示す。

障害物の設置位置は図-7のとおりであり、図-8 (a)、(b)がそれぞれ $A-A'$ 断面における流速の x 方向成分及びメタンガス濃度の分布である。

障害物の抵抗のため換気流が切羽まで到達せず、切羽付近に噴出したメタンガスの拡散していない部分が現れている。また、噴出後のメタンガスは換気流によって側壁に沿って広がる性質が可視化から観測されており、図-8 (c)に示したメタンガスの側壁に沿った（図-4の $A-B-A'$ 断面）濃度分布を見ると、先に述べた障害物模型のある場合の切羽付近のメタンガス滞留傾向がより顕著に現れている。

切羽付近の障害物模型は、トンネル断面を狭くするものではあるが、換気流を直接妨げるものではない。にもかかわらずこのように換気効果に対して大きな影響を及ぼすことは、今後の換気設計において無視し得ない事項と考えられる。

b) 排気式の換気特性

図-9に排気式の換気風管とメタンガス設定内容と記号の説明を示す。図-10(a)、(b)には $L_2=3D$ 、

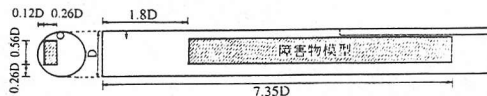
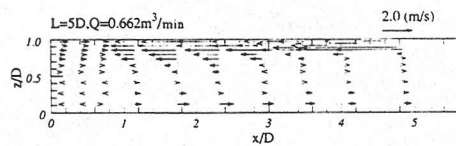
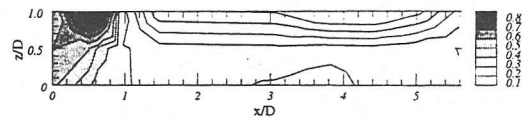


図-7 障害物模型の設置位置

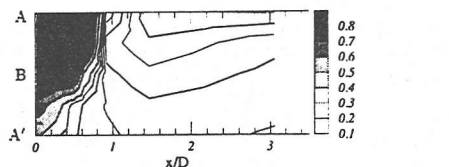
(Fig. 7 Position of obstacle model)



(a) 流速 x 成分



(b) メタン濃度 ($A-A'$ 断面)



(c) メタン濃度 (側壁)

図-8 障害物設置時の測定結果

(Fig. 8 Experimental results incorporating obstacle)

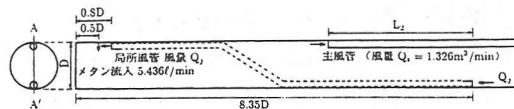
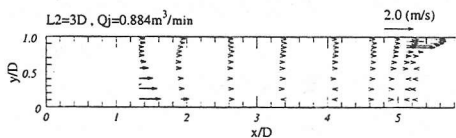
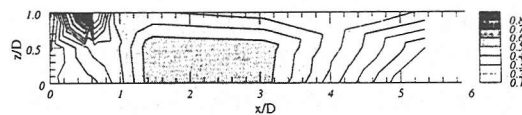


図-9 排気式の設定と記号の説明

(Fig. 9 Explanation of the exhaust system)



(a) 流速 x 成分



(b) メタン濃度

図-10 排気式の測定結果

$L_2=3D, Q_2=0.884(\text{m}^3/\text{min})$

(Fig. 10 Experimental results under exhaust system)

局所風管流量 $Q_i=0.884(\text{m}^3/\text{min})$ の場合の流速とメタンガス濃度分布を示す。排気式実験では、流速分布の測定を、 $x=1.3D \sim 5.3D$ の範囲で行っている。

局所風管から出た換気流が排気管から排出される様子が計測されているが、この A-A' 断面で見ると途中で流速の小さい部分がある。これは実際の流れが 3 次元性であり、トンネル壁面に沿って回り込むような流れが形成されているためと考えられる。

また、排気式換気を考える上で、注意しなければならない現象に、一般に「車風」と呼ばれるものがある。この車風は、局所風管吐出口からの換気流によって切羽後方に移動されたメタンガスが、主風管により充分に排出されず、局所風管の吸い込み口まで達してしまう現象をいう。

今回メタンガスの分布を調べた結果、この $L_2=3D$ 、 $Q_i=0.884(\text{m}^3/\text{min})$ のケースでは、主風管口の吸い込み口より坑口側のトンネル天井に沿った位置で濃度が 0 でない値をとり、それが局所風管入口の付近まで続く様子が計測された。2.(1)で述べたメタンレーヤのように、浮力で天井付近に持ち上げられたメタンが、主風管により完全には排気されず、車風の発生が起こっているものと考えられる。

図-11(a),(b)には、再び図-7と同じ位置に障害物模型を設置した場合の結果について示す。この場合は、先に述べた車風の発生は観測されず、メタンガスはすべて主風管から排出されていた。なお、主風管の吸い込み口までメタンの分布が連続していないのは、流れの 3 次元性によるものと思われる。

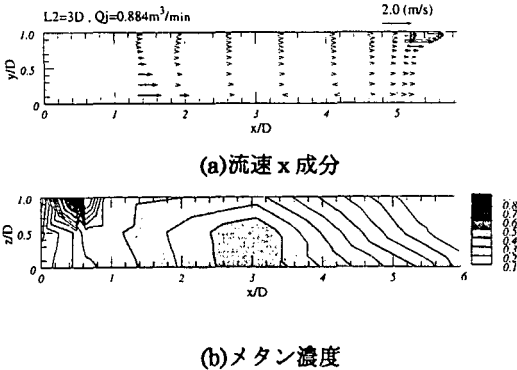


図-11 障害物設置時の測定結果

(Fig. 11 Experimental results incorporating obstacle)

3. 数値シミュレーション

(1)基礎式

本研究で着目しているトンネル内へのメタンガスの拡散現象を数値的に取り扱うには、空気とメタンという密度の異なる 2 気体の混合をシミュレートする必要がある。用いる基礎式を以下にまとめる。

質量保存式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

運動量保存式

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P - \nabla \cdot \sigma \quad (2)$$

化学種 (空気・メタン) の質量保存式

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_i \mathbf{v}) = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) + w_i \quad (3)$$

状態方程式

$$P = \rho R^0 T \sum_i \frac{Y_i}{W_i} \quad (4)$$

ここで、

$$\sigma = \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{U} - \mu [(\nabla \mathbf{v}) + (\nabla \mathbf{v})^T] \quad (5)$$

乱流モデル ($k-\varepsilon$ モデル)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} k}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{v} k) &= \nabla \cdot \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) (\nabla k) \\ &\quad - \bar{\rho} \tilde{v} \tilde{v} \tilde{v} (\nabla \tilde{v}) - \bar{\rho} \varepsilon - \frac{\mu_t}{\bar{\rho}^2} (\nabla \bar{\rho}) (\nabla \bar{P}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{v} \varepsilon) &= \nabla \cdot \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) (\nabla \varepsilon) \\ &\quad - C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\bar{\rho} \tilde{v} \tilde{v} \tilde{v} (\nabla \tilde{v}) + \frac{\mu_t}{\bar{\rho}^2} (\nabla \bar{\rho}) (\nabla \bar{P}) \right) - C_2 \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

D_i : 化学種 i の拡散係数

P : 圧力

R^0 : 一般気体定数

t : 時間

T : 温度 (本計算では一定)

$\mathbf{v}$: 流速

$\mathbf{U}$: 単位テンソル

w_i : 化学種 i のソース項

W_i : 化学種 i の分子量

Y_i : 化学種 i の質量分率

μ : 粘性係数
 μ_t : 有効(渦)粘性係数
 σ : 粘性応力テンソル
 ρ : 密度
 k : 乱れの運動エネルギー
 ε : 乱れの運動エネルギーの消散率

σ_k :
 σ_ε :
 C_1 :
 C_2 :
 C_μ :

定数

なお、 $\bar{}$ は時間平均値を、 $\bar{}$ は質量荷重平均値を、 $\bar{}'$ は質量荷重平均値からの変動量をそれぞれ表す。

なお、計算には富士総合研究所(株)の開発した汎用流体解析ソフト「 α -FLOW」の‘燃焼・化学反応を含む流れ解析モジュール’を使用している。

(5)式中の粘性係数 μ は、分子粘性によるものと、 k - ε モデルで扱う乱流拡散を共に考慮している。

また、用いた定数の値は表-1の通りである。

表-1 使用した定数

(Table. 1 Selected data)

記号	値
R^0	8.315 (J/k·mol)
σ_k	0.7
σ_ε	1.3
C_1	1.45
C_2	1.95
C_μ	0.09

計算に用いたメッシュを図-12(a)~(c)に示す。メッシュ数は送気式・排気式ともに障害物の無い場合が $x \times y \times z = 55 \times 13 \times 14$ 、障害物のある場合は、障害物の設定のため y 方向が一つ多く、 $55 \times 14 \times 14$ としている。

(2)計算結果

計算を行ったケースは、2.(3).a) (送気式)、2.(3).b) (排気式)で疑似メタンガスを発生させた各ケースと条件(換気風量、換気管位置、メタン発生位置、発生量等)を同じに設定したものである。

図-13(a),(b)、図-14(a),(b)に送気式の場合の計算結果を示す。なお、(3)式の Y_1 は質量分率であるが、図では体積濃度に変換している。まず風速を見ると、

2.(3).a)で述べた、障害物の無い場合の $L=5D$ のとき換気流が切羽まで丁度到達する様子や、障害物の存在する場合に換気流が切羽まで到達しない様子が再現されている。メタンガスの分布についても、障害物のある場合はメタンガスが切羽付近に滞留する様子が見られるなど、実験結果を定性的には良く表現している。定量的には、メタンガス濃度の値は実験より若干小さくなっている。定量的精度を向上させるためには、メタンガスの発生及びメタンガスの質量保存の精度を上げる必要がある。

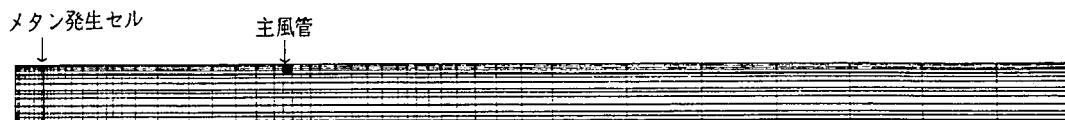
図-15(a),(b)、図-16(a),(b)には排気式における計算結果を示した。車風の発生に着目すると、傾向として障害物を設置しないケースに、局所風管入口により近い箇所までメタンガスの拡散が見られ、その意味では2.(3).b)と一致するが、異なる点は計算ではメタンガスはトンネル下部に広がる分布となっている。実験結果の測定精度の問題もあるが、計算においても密度差による浮力の扱いの改良が必要と考えられる。

4. おわりに

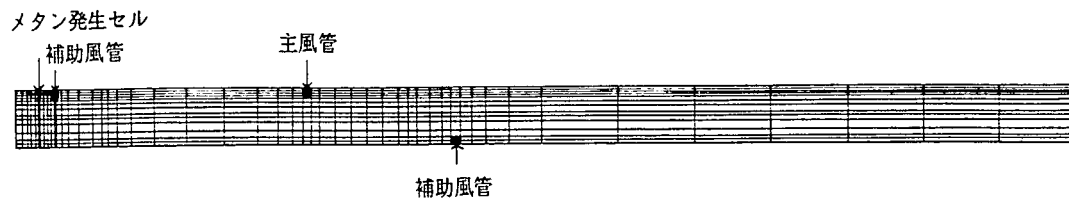
本研究ではトンネル模型内に換気風管を配置し、模擬メタンガスを発生させ、換気流速分布及びガス濃度分布の測定を行った。またその結果に対応する数値計算を行い、精度を検証した。

- 換気を行わない状態でガスを発生させた場合、空気より密度の小さいメタンガスは噴出後にトンネル天井付近でメタンレヤーと呼ばれる層を形成し、天井近くの薄い部分にメタンガスの坑口方向への流れが生じる。
- 送気式換気では、障害物の影響を考察し、実測と計算で定性的な一致を見た。
- 排気式換気では、実測においては流れの3次元性が顕著に見られた。また障害物の有無と車風の発生という点では、実測と計算で傾向は一致したが、メタンガスの分布で異なる点が見られた。

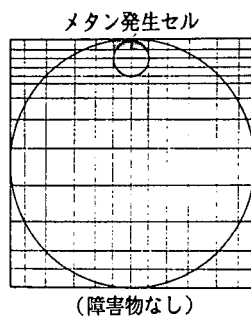
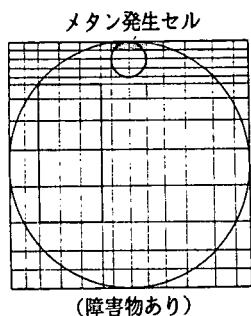
今後は本研究での結果を踏まえ、数値モデルの改良を行い、メタンガスが発生するトンネル工事の換気計画に役立つ手法を確立していく予定である。



(a)送気式 (x-z 断面)



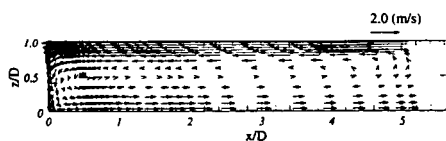
(b)排気式 (x-z 断面)



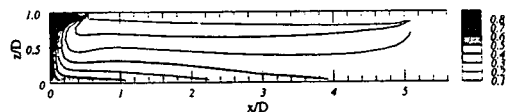
(c)y-z 断面

図-12 計算メッシュ

(Fig. 12 Calculation mesh)



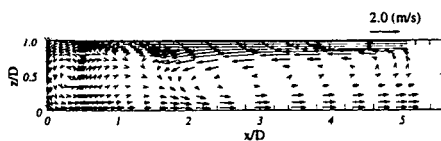
(a)流速 x, z 成分



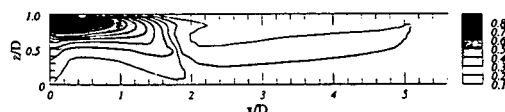
(b)メタン濃度

図-13 送気換気方式時計算結果

(Fig. 13 Calculation results under air supply system with ventilation)



(a)流速 x, z 成分



(b)メタン濃度

図-14 障害物設置時計算結果 (送気式)

(Fig. 14 Calculation results under air supply system incorporating obstacle)

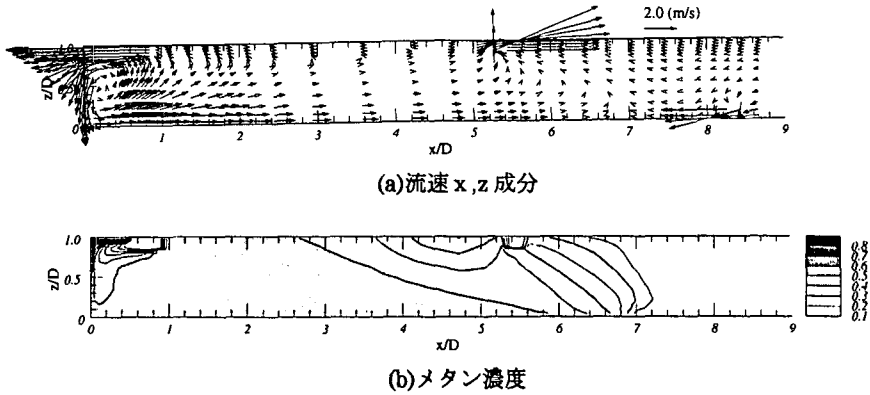


図-15 排気式換気時計算結果

(Fig. 15 Calculation results under exhaust system with ventilation)

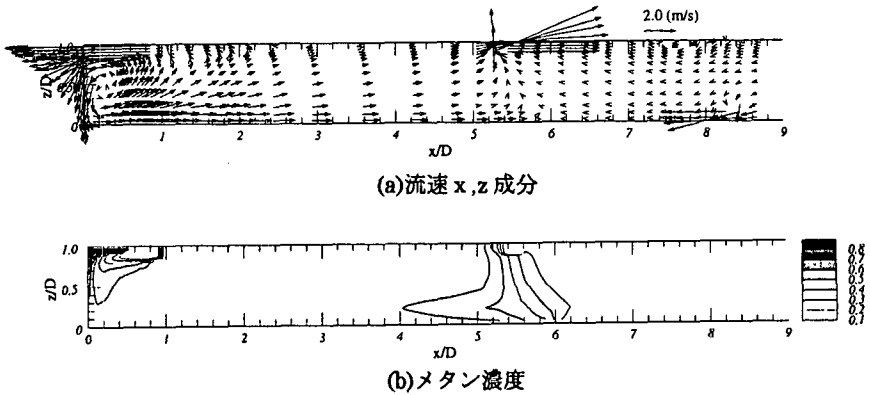


図-16 障害物設置時計算結果 (排気式)

(Fig. 16 Calculation results under exhaust system incorporating obstacle)

参考文献

- 1) 中山泰喜、青木克巳、沖 真他：トンネル工事の換気に関する研究、日本機械学会論文集 (B編) 56巻 532号、1990年
- 2) 建設業労働災害防止協会編：ずい道工事等における換気技術指針、1991年