

トンネル掘削時の切羽付近の換気手法の最適化に関する 数値シミュレーション

Numerical Simulation on Ventilation in Tunnel around Face

村上 周三*・須山 喜美**
Shuzo MURAKAMI and Yoshimi SUYAMA

数値シミュレーションによる乱流現象の予測技術は、最近、急速な進展がみられ、その有効性が広く認められるようになりつつある。しかし、実際問題に適用された事例は限られた分野にとどまっているのが現状である。数値シミュレーションによる乱流予測技術に関してより一層の充実を図るには、その予測精度の向上とともに、予測の適用分野の開拓およびそれにより生じた問題点の抽出等も重要である。本稿では、 $k-\epsilon$ 型 2 方程式乱流モデルを用いてトンネル内の気流性状および汚染質拡散性状を 3 次元的に解析し、従来定性的に検討されてきたトンネル内の換気手法に関して、定量的な方法で最適化の検討を試みたのでその結果について報告する。

1. はじめに

トンネルの施工技術の発達は、トンネルの掘削距離を長大化させるとともに、有害ガスの噴出地層のような悪条件下でのトンネル工事を可能とした¹⁾。また、近年の岩盤力学の進展に伴って合理的かつ安全な施工方法としてロックボルトおよび吹付コンクリートを主体とする NATM (New Austrian Tunnelling Method) が採用

される場合が多くなっている²⁾。NATM によるトンネル工事では、吹付コンクリートによる粉塵などの影響で作業環境は従来よりも悪化する傾向にあるため、大半の作業員の集中するトンネル切羽付近では、特に十分な換気を行う必要がある。しかし、換気方法や設備の配置方法に関して十分な設計指針が確立されておらず、経験的な判断や試行錯誤により決定がなされているのが現状である。今回切羽付近の換気方法に関して、数値シミュレーション

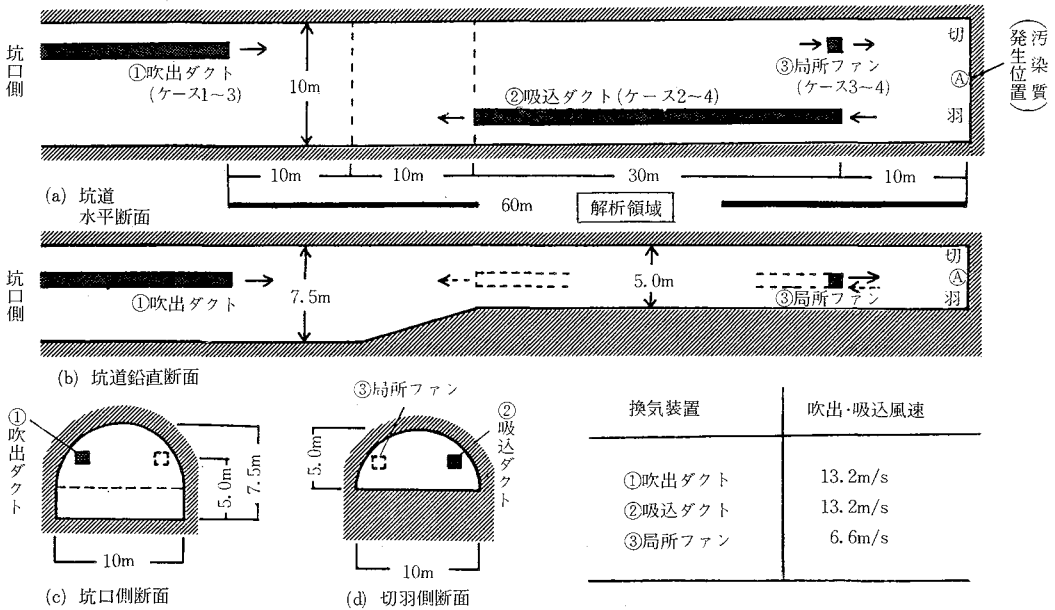


図1 解析対象としたトンネルのモデル

* 東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター
** 民間等共同研究員 ((株)間組 技術研究所)

ョンを用いた検討を行ったので、その結果を報告する。

2. 解析概要

2.1 解析対象としたトンネルモデル

本解析では、図1に示す形状のトンネルモデルの切羽に近い領域を3次元的に解析する。解析領域は、切羽より坑口方向に60mの領域。上部半断面先進工法による施工のため、坑口側(断面積約65m²)と切羽側(断面積約40m²)の2種類の断面形状を有する。主要な汚染物としてNATMによる吹付コンクリート施工時の発塵を想定し、汚染質発生位置を切羽中央の1点(A点)に設定する。また、汚染質の比重は空気に等しいものと仮定し、パッシブコンタミネントの拡散現象として解析する。

2.2 解析種類

従来行われているトンネル換気手法¹⁾とこれに対する改善等を考慮し、表1に示す4種類の換気手法を検討する。用いられる換気設備は、吹出ダクト(切羽より坑口側に60mの地点にて清浄空気を吹出す)、吸込ダクト(途中に集塵機を組込む場合を想定し、本ダクトでは汚染空気を吸込むが出口では清浄空気を吹出すものと仮定。切羽近くに設置)、局所ファン(吹出風速は吹出ダクトの約半分。切羽近くに設置)の三者を単独または組合わせて使用する。

2.3 解析方法

気流性状および汚染質拡散性状についてk-ε型2方程式乱流モデル²⁾を基礎とする3次元数値シミュレーションにより解析する。解析結果については、現地測定結果⁴⁾との対応を検討し、続いて数値シミュレーションにより気流性状と汚染質拡散性状を詳細に検討する。

2.4 数値シミュレーション概要

基礎方程式を表2に、境界条件を表3に示す。特に、

表1 検討した換気方法の種類

解析ケース	吹出ダクト	吸込ダクト	局所ファン
ケース1	○	×	×
ケース2	○	○	×
ケース3	○	○	○
ケース4	×	○注)	○

凡例：○、使用、×、使用せず

注) ケース4では、吸込ダクトは坑口まで続くものと仮定

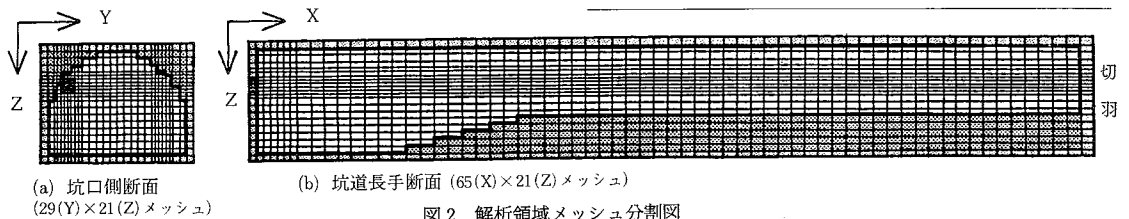


図2 解析領域メッシュ分割図

坑口側の流出面では圧力を0とした圧力型境界条件を採用している。メッシュ分割図を図2に示す。メッシュ分割は65(X)×29(Y)×21(Z)とし、吹出口面、吸込口面は4×4メッシュに分割する。定常解を求めるが、得られた解は時間的空間的に多少振動している。濃度計算では、

表2 数値シミュレーションの基礎方程式

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_j U_i}{\partial X_j} = -\frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{P}{\rho} + \frac{2}{3} k \right\} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \nu t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{\nu t}{\sigma_1} \frac{\partial k}{\partial X_j} \right\} + \nu t S - \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{\nu t}{\sigma_2} \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} \right\} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \nu t S - C_{2\epsilon} \frac{k \epsilon}{\nu t} \quad (4)$$

$$\nu t = k^{1/2} l = \left\{ C_{\nu} \frac{k^2}{\epsilon} \right\} \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{\nu t}{\sigma^3} \frac{\partial C}{\partial X_j} \right\} \quad (6)$$

$$S = \left\{ \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right\} \frac{\partial U_i}{\partial X_j}, \sigma_1 = 1.0, \sigma_2 = 1.3, \sigma_3 = 1.0$$

$$C_{\rho} = 0.09, C_{1\epsilon} = 1.59, C_{2\epsilon} = 0.18$$

また、i, j = 1, 2, 3, (テンソル表示)

U_i: 風速の3成分, i (またはX, U): 坑道方向

j (またはY, V): 坑道に直角方向

k (またはZ, W): 鉛直方向

表3 数値シミュレーションの境界条件

(1) 吹出ダクト: U_i = 0.0, U_n = U_{out}, k = k_{out}, l = l_{out}, C = C_{out}

吹出面 U_{out}: 吹出風速, = 13.2m/s

k_{out}: 流込乱流エネルギー, = 0.05m²/s²

l_{out}: 乱れの長さスケール, = 0.5m

C_{out}: 吹出空気汚染質濃度 = 0.0

(2) 吸込ダクト: 吹出ダクト吹出面と同様

吸出面

(3) 吸込ダクト: U_i = 0.0, U_n = U_{in}, ∂k/∂n = 0.0, ∂ε/∂n = 0.0

吸込面 ∂C/∂n = 0.0

U_{in}: 吸込風速, = 13.2m/s

(4) 局所ファン: 吹出ダクト吹出面と同様。

吹出面 ただし, U_{out} = 6.6m/s, ∂C/∂n = 0.0

(5) 局所ファン: 吸込ダクト吸込面と同様。

吸込面 ただし, U_{in} = 6.6m/s

(6) 坑口側: ∂U_i/∂n = 0.0, ∂k/∂n = 0.0, ∂ε/∂n = 0.0

流入・流出面 ∂C/∂n = 0.0, P_{DUMMY} = 0.0

(7) 壁面: (∂U_i/∂n)_{n=0} = m(U_i)_{n=n}/k, U_n = 0.0

∂k/∂n = 0.0, (ε)_{n=n} = {C_b(k)^{3/4}}/{C_b^{1/4}·κh}

h: 壁面から第1セルの差分定義点までの距離

m; U_iがべき乗分布するとみなしたときのべき指数,

m = 1/7

κ; カルマン定数, κ = 0.4

注), 添字i, n: 吹出・吸込面等に対して, それぞれ接線方向, 法線方向を示す。

添字 DUMMY: 仮想セルを示す。

汚染質発生セルにて、空気と等比重の汚染質を吐出速度 0 として、これが解析領域全体に瞬時一様拡散した場合の濃度が 1 となるように定常発生させ、定常解を算出する。

3. 数値シミュレーションと現地測定との対応 (図3, 図4-(c))

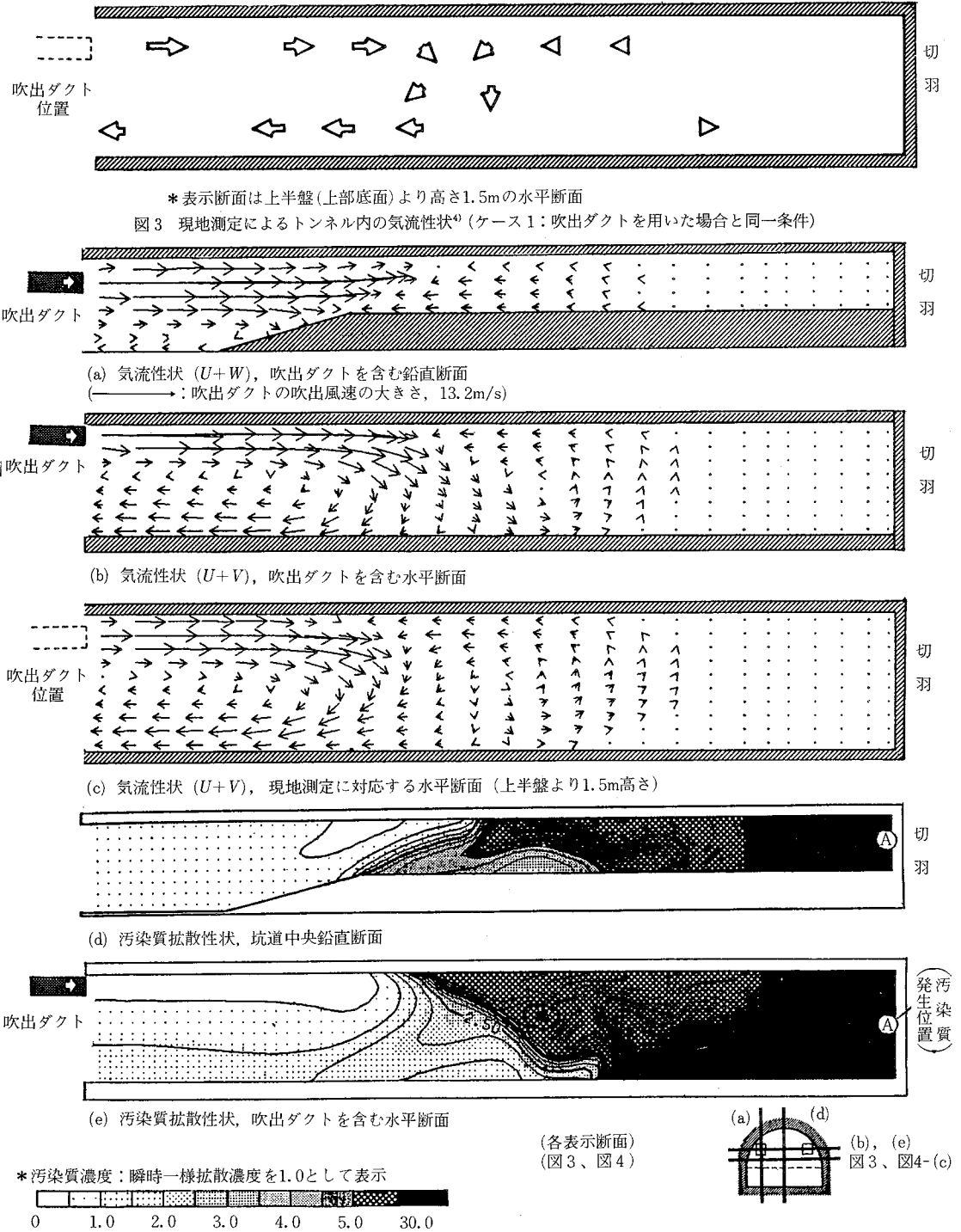


図4 数値シミュレーションによるトンネルモデル内の気流性状および汚染質拡散性状 (ケース1: 吹出ダクトを用いた場合)

図 3 にケース 1 の条件で換気を行ったトンネルの気流性状の現地測定結果⁴⁾を、図 4-(c) に対応する数値シミュレーション結果を示す。吹出噴流が切羽に向かう途中で対向壁付近に生ずる圧力の高い滞留域にぶつかってせき止められ、流れの方向が逆転する様相、吹出噴流の反対側の位置で坑口側に流出する様相など、両者は良く対応している。現地測定例が少ないため十分な比較はできないが、室内気流の解析における両者の詳しい比較^{5,6)}や上記の検討から判断して、数値シミュレーションはトンネル内気流や拡散の性状をある程度正しく再現しているものとみなすことができる。

4. 吹出ダクトによるトンネル換気(ケース 1: 図 4)

吹出ダクトのみを使用する場合、吹出噴流は解析領域中央部に留まる。その先では、低風速の滞留域および切羽近くでは無風領域となる(図 4-(a), (b))。切羽(A 点)で汚染質を発生させた場合、吹出噴流部を除く多くの領域で濃度が 1 以上となり、また、切羽付近の広い領域で著しく高濃度になる(図 4-(d), (e))。このように、

切羽から離れた部分で清浄空気の吹出しのみを行う換気方法は切羽における汚染質排除に対して全く効果がない。

5. 吹出ダクトと吸込ダクトを併用するトンネル換気(ケース 2: 図 5)

ケース 1 の吹出ダクトに加え、吸込ダクトを切羽近くに設置した場合の気流性状と汚染質拡散性状を図 5 に示す。なお、集塵機(集塵効率 100%)の併用を仮定しており吸込ダクト出口では清浄空気を吹出している。吸込ダクト設置の結果、切羽付近の圧力の上昇が緩和され、吹出噴流は低風速ながら切羽に近い領域まで到達する(図 5-(b))。しかし、吸込ダクトにより吸引されるため、清浄空気は切羽までは到達しない(図 5-(a))。切羽で発生した汚染質の大部分は吸込ダクトに吸引され、吸込口より坑口側は清浄となるが、切羽付近の領域には依然として高濃度の汚染質が分布する(図 5-(c), (d))。

6. 吹出ダクト, 吸込ダクト, 局所ファンを併用するトンネル換気(ケース 3: 図 6)

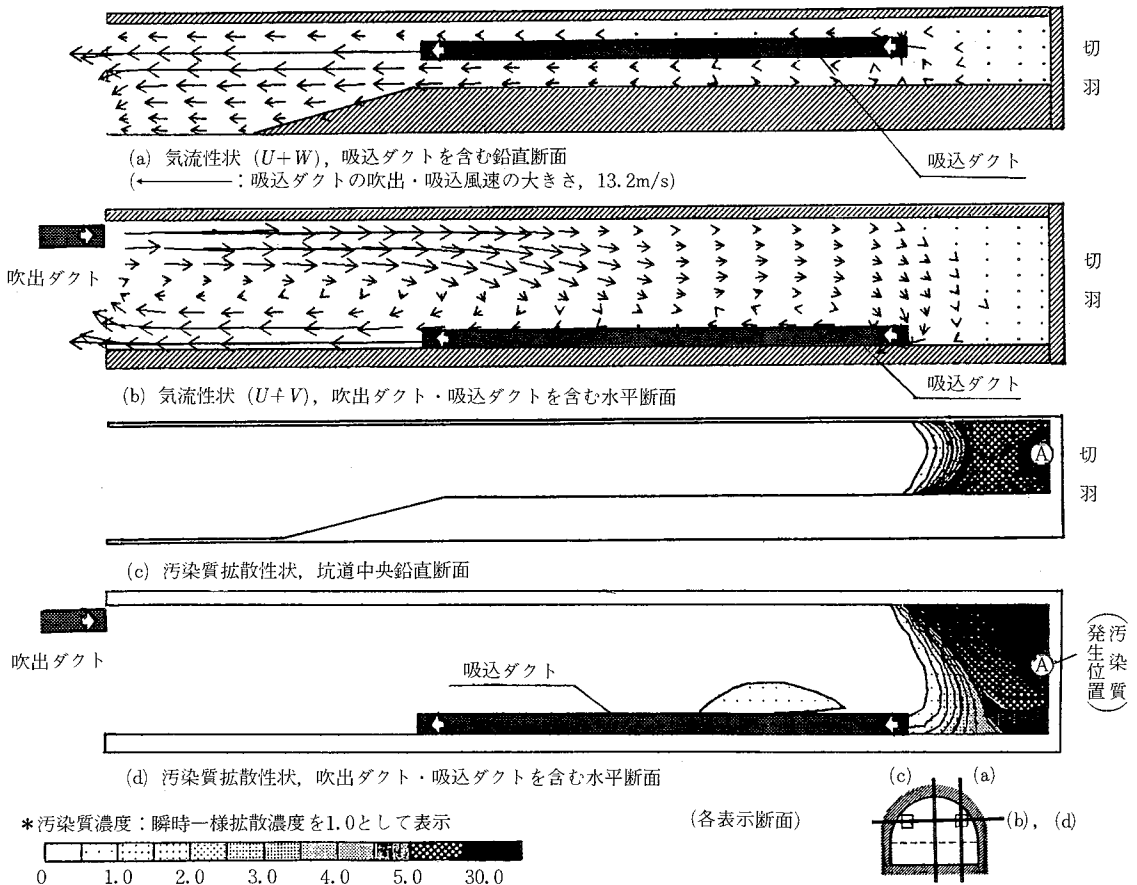


図 5 数値シミュレーションによる予測(ケース 2: 吹出ダクト, 吸込ダクトを用いた場合)

ケース 2 の換気方法に加え、吹出噴流の軸上の切羽近くに局所ファンを設置する場合の気流性状と汚染質拡散性状を図 6 に示す。吹出噴流は解析領域中央部で広がり低速となった後、改めて局所ファンにより切羽に吹付けられる(図 6-(a))、吹出された気流は切羽に到達し、切羽およびトンネル側面に沿って流れた後に吸込ダクトに吸込まれる(図 6-(b))。切羽で発生した汚染質は、前述の切羽付近の気流により壁面に沿って流れ、吸込ダクトに吸込まれる(図 6-(d))。汚染質は解析領域のほとんどの部分で検出されず、吸込ダクトと切羽の間の領域でも汚染質の濃度は低くその分布範囲もかなり小さくなる(図 6-(c), (d))。

7. 吸込ダクトと局所ファンによるトンネル換気
(ケース 4: 図 7)

吹出ダクトを用いず、吸込ダクトと局所ファンのみを設置した場合の気流性状と汚染質拡散性状を図 7 に示す。なお、この場合吸込ダクトは解析領域の外の坑口まで続いており、解析領域内には排気しないと仮定している。

坑口側では部分的に無風領域を有するものの、気流は低速ながら解析領域内を切羽にむかって一様に流れる(図 7-(a))。気流の一部は局所ファンにより切羽に吹付けられ、さらに切羽およびトンネル側面に沿って流れた後、吸込ダクトに吸込まれる(図 7-(b))。坑口側より局所ファンまでの領域および局所ファンの吹出噴流領域では清浄となり、切羽付近の領域でも汚染質の分布はケース 3 とほぼ同様の様相を呈する(図 7-(c), (d))。

吹出ダクトを除去しても汚染質の濃度はほとんど変化せず、このようなトンネルモデルでは吹出ダクトが汚染質の排除にほとんど効果を持っていないことがわかる。

8. ま と め

NATM で施工されるトンネルモデルの切羽付近の気流性状、汚染質拡散性状を数値シミュレーションを用いて検討した。解析結果は、実測結果とよく対応しており、実測と併用した数値シミュレーションによる詳細な解析はある程度有効であると判断される。本解析で得られた特徴的な気流性状および、汚染質拡散性状は以下のとお

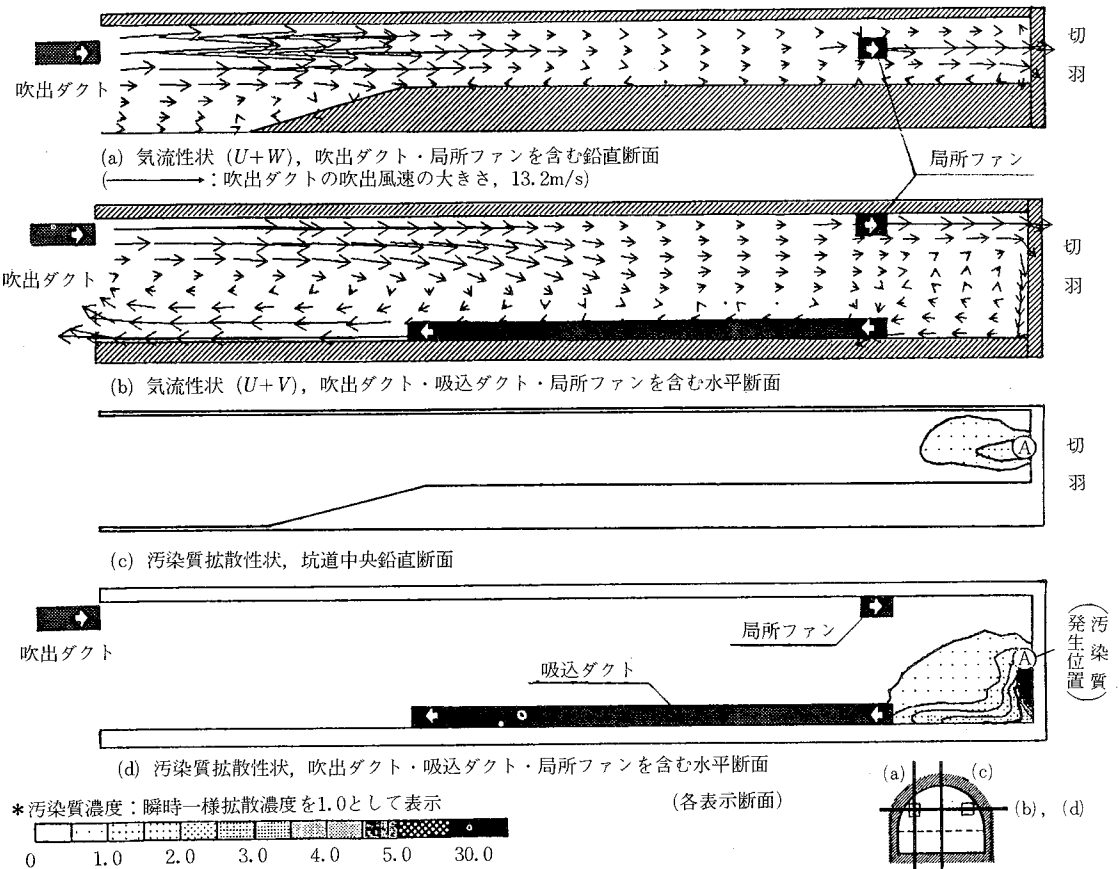


図 6 数値シミュレーションによる予測 (ケース 3: 吹出ダクト, 吸込ダクト, 局所ファンを用いた場合)

りである。①切羽付近で発生する汚染質に対して、切羽から離れた位置に設置された吹出ダクトにより清浄空気の吹出しを行う場合、清浄空気は切羽付近に形成される圧力の高い滞留域に遮られ、切羽に全く到達しない。この場合、トンネル全体が汚染される。②切羽近くで吸込みを行うことにより、トンネル途中に留まっていた清浄空気を切羽に近い位置まで導くことができるが、依然として切羽まで到達させることはできない。この場合、吹出ダクトより吸込ダクト吸込口までの領域は清浄となるが、切羽付近には高濃度の汚染質が滞留する。③局所ファンの設置により、清浄空気の一部を切羽に到達させることができ切羽付近の汚染質濃度は著しく低下する。④吹出ダクトを使用しない場合、坑口まで排気する吸込ダクトと局所ファンを設置すれば、吹出ダクト、吸込ダクトおよび局所ファンを設置した場合とほぼ同様の換気効果をあげることができる。すなわちここに示すモデルの場合、吹出ダクトは汚染質の排除に全く効果がない。

以上のように、数値シミュレーションによる解析手法を利用することにより、トンネルのような特殊な空間においても有効な換気計画を立案することができる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、トンネル工事に関する実際上の問題点について、(株)間組 技術研究所 城内哲彦氏、松垣光威氏、木田川一弥氏に御教示いただいた。記して感謝の意を表す。
(1985年11月11日受理)

参 考 文 献

- 1) 原田実：地下工事の換気・集塵の知識，鹿島出版会，昭和60年3月
- 2) 天野礼二，長友成樹：新体系土木工学70，トンネル(I)，山岳トンネル，技報堂出版，1980.1
- 3) 村上周三，加藤信介，須山喜美：乱流数値シミュレーションの診断システムに関する研究，生産研究，1986.1
- 4) 松垣光威，木田川一弥：工事中のトンネル切羽付近における気流の計測結果と2,3の考察，土木学会関東支部研究発表概要集，1985.3
- 5) 村上周三，加藤信介：室内気流の数値シミュレーションと実験との対応，生産研究，1984.12
- 6) 加藤信介，村上周三，須山喜美：クリーンルーム内の気流性状に関する研究(その13)，空気調和・衛生工学会学術論文集，1985.9

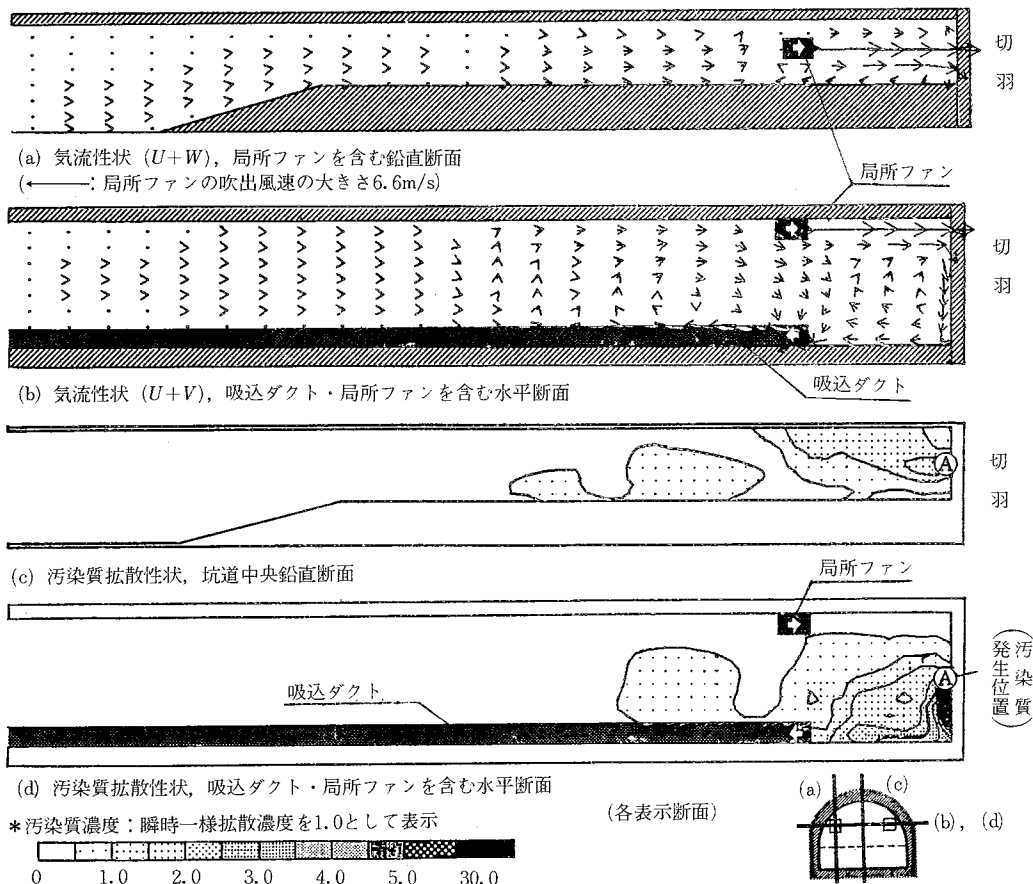


図7 数値シミュレーションによる予測(ケース4:吸込ダクト,局所ファンを用いた場合)