

曲がりトンネル内の換気性状に関する 3次元一般曲線座標系による 乱流数値解析

Numerical Simulation for Ventilation of Curved Tunnel by $k-\epsilon$ Turbulence Model with Curvilinear Coordinates

村 上 周 三*・加 藤 信 介**・石 田 義 洋***

Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO and Yoshihiro ISHIDA

1. 序

曲がりのあるトンネル内の換気性状を 3次元一般曲線座標系を用いた $k-\epsilon$ 乱流モデル¹⁾により、解析・検討した。シミュレーションは、あらかじめ風洞模型実験²⁾により、トンネル入口およびトンネルに接続する換気塔の各開口の風圧係数を計測し、これを開口部の境界条件とした。

2. 解析対象空間

対象としたトンネルは、幅 24(m)、高さ 4.7(m)、長さ約 200(m)の円弧状のものである。これは建設予定の T 空港ターミナルビル³⁾に設けられたバス・乗用車等による空港利用乗降客のアクセス用のトンネルである。天井部に 2 個の自然排気用の開口、および強制給気用のスロット吹き出しが歩道と車道の境界上に設置されている。

写真-1 にトンネル開口部に作用する風圧力を求めるために使用した風洞模型を示す。図-1 にトンネル形状と各開口位置、およびグリッド分割を示す。グリッドは、円周方向 37 分割、半径方向 20 等分割、高さ方向 10 等分割である。

3. 解析方法

一般曲線座標系による数値シミュレーションプログラム⁴⁾を用いて、 $k-\epsilon$ 型 2 方程式モデルによる乱流の数値シミュレーションを行う。基礎方程式およびシミュレーションの詳細は文献¹⁾を参照されたい。

4. 境界条件

4.1 開口部境界条件

表-1 にトンネル開口部における境界条件を示す。トンネル開口には、風洞模型実験により測定された風圧係数

から、建物高さ (23.4(m)) で 1 (m/s) の風が吹いた場合の静圧を算出し境界条件として与えた。トンネル開口における境界速度は、円周方向成分のみ生じると仮定し、半径方向、円周方向は 0 とした。

4.2 壁面境界条件

本解析法¹⁾では、物理境界面と計算境界面は一致させておらず、計算境界面は微小距離 h だけトンネルの内側(流体側)に設定している。今回用いた微小距離は、 $h = 0.05$ (m) とした。これは高さ方向の格子間隔 $\Delta z = 0.47$ (m) の約 $1/10$ として設定している。

壁面の速度境界条件はこの h を用いて指数則から、速度 u の壁面法線方向勾配を与えた¹⁾。乱流エネルギー k は壁面で free slip と仮定した。

ϵ の境界条件は次式で与える。

$$\epsilon_{(N=h_e)} = \{C_{\mu}^{3/4} / (x h_e)\} k_{(N=h_e)}^{3/2}, C_{\mu} = 0.09 \quad (1)$$

h_e は文献¹⁾では速度の境界条件に与えた微小距離 h と同じ値を用いていたが、ここでは異なる値とし、 $h_e = 0.17$ (m) とした。これは、 h_e が壁面でのエネルギー散逸のレベルに大きく影響し、結果としてトンネル内の圧力損失レベルに大きく影響するためである。すなわち、 h_e の値(すなわち ϵ の値)はトンネル内の流量に大きく影響する。今回の解析では、実験で測定されたトンネル換気量とシミュレートされた換気量が一致するように、この $h_e = 0.17$ (m) を定めている。

5. 拡散計算

トンネル内で発生する汚染質の拡散性状は、流れ場の計算結果より得られた平均速度場 u , v , w , 渦拡散係数(渦動粘性係数) ν_t を用いて、次式の汚染質に関する拡散方程式を解いて求めた。

$$C_t = -\{(uC)_x + (vC)_y + (wC)_z\} + (\nu_t C_x)_x + (\nu_t C_y)_y + (\nu_t C_z)_z + C_0 \quad (2)$$

ただし、 C は濃度、 C_0 は汚染質発生項である。本解析で

*東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

**東京大学生産技術研究所 第 5 部

***鹿島建設(株)情報システム部 (元民間等共同研究員)

研究速報

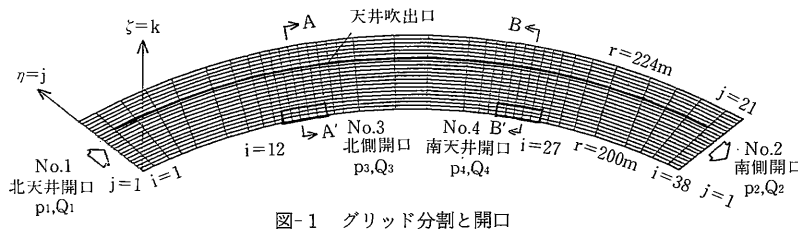


図-1 グリッド分割と開口

表-1 トンネル開口の境界条件

圧力 p : 固定 (表-2)
速度 (反変ベクトル成分) $V = W = 0$ (円周方向成分のみと仮定)
流入乱流量 $k = 3/2(0.1U)^2, \epsilon = C_\mu k^{3/2} / \ell,$ $\ell = 1.5\eta$ (開口高さ)/3, $C_\mu = 0.09$
流出乱流量 $k : \text{free slip}, \epsilon : \text{free slip}$

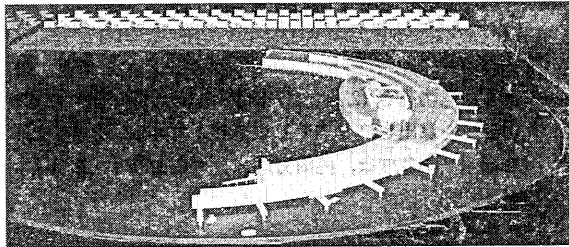


写真-1 模型の設置状況 (風向N)

表-2 計算ケース

ケース	内容	圧力条件($p = \Delta p / \rho$)	備考
1	風向南, 風力換気	$p_1 = 0.045$ $p_2 = 0.01625$ $p_3 = 0.045$ $p_4 = 0.045$	実験における換気量 60.4×3600m ³ /s
2	風向南+強制換気 (図-1参照)	$p_1 = 0.045$ $p_2 = 0.045$	吹出風量300,000(m ³ /h) 吹出面積257.7(m ²) 吹出速度 $w = -0.323$ (m/s)
3	無風+温度差換気	$p_1 = 0, p_2 = 0,$ $p_3 = p_4 = g\theta H \Delta T$ $\Delta T = G / (c_p \cdot Q \cdot 3600)$	設計発熱量 $G = 347.522$ (kcal/h), $c_p = 0.29$ (kcal/ m ³ C), $H = 12$ (m), $g = 9.8$ (m/ s ²), $\Delta T = 333/Q$ (°C)

* $p_1 \sim p_4$ は風洞実験より求めた。これは建物高さ(23.4m)の風速が1m/sの場合の値である。

は汚染質発生量 C_0 は1 (ppm/s)として与え、床面に接する計算セル上で一様に発生させた。なお、この発生量を空間積分として得られるトンネル内の総汚染質発生量は0.001m³/sである。境界条件は、流入側では $C = 0$ 、流出側および壁面では法線方向勾配 $C_n = 0$ とした。

6. 計算ケース

表-2に示す3ケースに関し、流れのシミュレーションを行い、その結果より汚染質拡散に関するシミュレーションを行った。ケース1では、風洞模型実験とシミュレーションでの換気量が一致するように ϵ の境界条件を調整している。ケース2では、風圧力に関しては、ケース1と同様の条件を与え、さらにトンネル内の機械給気に関しては、表-2に示す吹出条件を与えた。吹出口設定格子点は ($i = 2 \sim 37, j = 15, k = 11$, 図-1参照)である。ケース3は無風時の内部発熱時の温度差換気の場合である。ただし、トンネル内の温度分布はシミュレートしておらず、温度差換気の駆動力は、内部発熱量 G と換気量 Q から算出されたトンネル内の外気温度に対する上昇温度 ΔT を算出し、この外気との温度差により生ずる浮力による静圧力差 ΔP をトンネル天井面開口とトンネル入口開口に与えた。 Q を再びシミュレーション結果より算出し、この Q を用いて ΔP を再計算するという繰り返し計算を行って、浮力換気時の ΔP を算出した。

7. 解析結果

図-2, 図-3にケース1の速度分布と濃度分布を示す。空気は北側トンネル入口から流入し、一部天井開口から

流出し、大部分は南側開口から流出している。トンネル内周で速度が大きく、外周(歩道側)では小さい。この結果に対応し、汚染質濃度も歩道側で高い値を示している。また、北側流入、南側流出という流れのパターンによって、南側から新鮮な空気が入ってこないため、汚染質濃度はトンネルの南側に進むにつれて高くなり、特に南側開口で高濃度になっている。床面で汚染質を発生しているのだから、当然ながら、床面から天井部に向かうにつれて、濃度は低下している。このケースでは、天井開口が有効に機能せず、汚染質濃度が全体が高い。

図-4, 図-5にケース2の速度と濃度分布を示す。天井から300,000(m³/h)の吹き出しを行った結果、トンネル開口の両側とも流出となる。また、天井の両開口からの流出はトンネル両開口よりも多く(図-4(b), (c)), 天井開口が有効に機能している。換気量が機械換気により、ケース1より多くなっているのだから、全体の濃度分布はケース1より低くなる。給気口は歩道と車道の境界に位置する天井部で、下向きに吹き出しており、特に歩道側の濃度がケース1に比べて低くなっている。

図-6, 図-7にケース3の速度と濃度分布を示す。流れ場および濃度分布は左右対称な境界条件に対応し、左右対称になっている。北側開口からの流れは北側天井開口に吸い込まれ、南側開口からの流れは南側天井開口に吸い込まれており、両天井開口の間の部分にほとんど気流が生じない。また、ケース1と同様にトンネル外周で速度が小さく、内周で大きくなっている。濃度は床面では高いが、人間の高さ($z = 1.41$ (m), $k = 3$)以上では小さくなっている。流れが南北のトンネル開口から流入

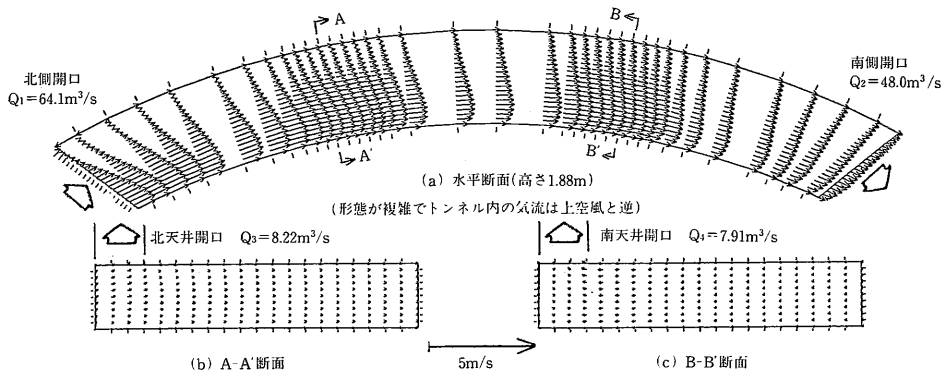


図-2 速度分布と換気量 (ケース 1, 南風向, 風力換気)

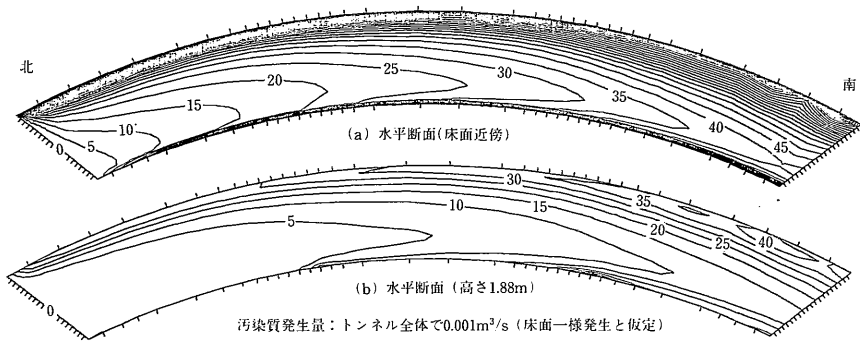


図-3 濃度分布 (ppm) (ケース 1, 南風向, 風力換気)

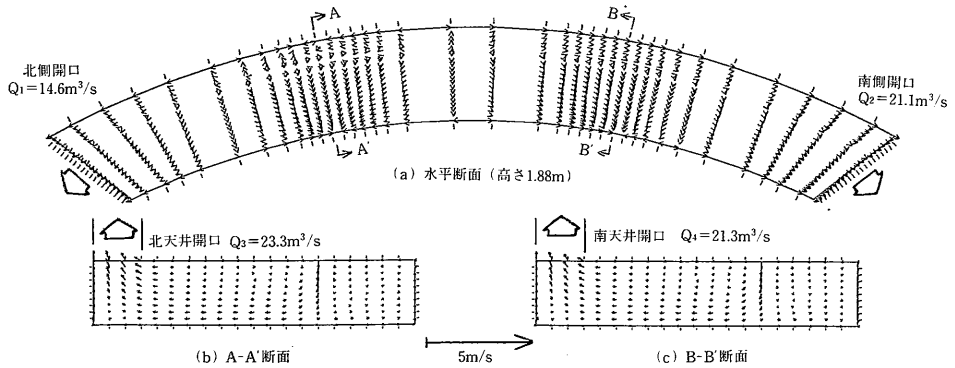


図-4 速度分布と換気量 (ケース 2, 南風向+強制換気)

し、かつ流量が多いために、他のケースに比べてトンネル内部全体の濃度は低くなっている。ただし、中央部の両天井開口の間の部分は空気が滞留し、汚染質濃度が高くなっている。

8. 結 び

シミュレーションにより得られた流れ場、汚染質分布の性状は、実験²⁾で得られた傾向に良く対応していた。シ

ミュレーションの結果にある程度の信頼性をおくことができる。なお、今回適用したトンネル入口の速度境界条件 ($V=0, W=0$) の仮定は、トンネル入口で必ずしも成立しているとは言えない。また、壁面での壁関数による境界条件が、トンネル内の圧力損失、すなわちトンネル通過流量に大きく影響する。両者を含め、圧力を固定する入口境界条件に関しては、今後の課題としてさらに検討を行う必要がある。

研究速報

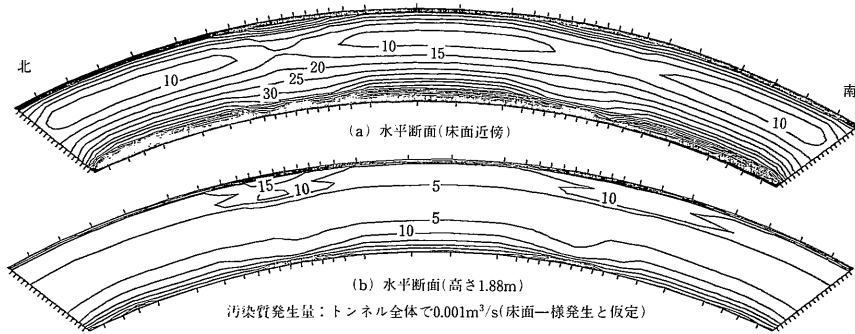


図-5 濃度分布 (ppm) (ケース2, 南風向+強制換気)

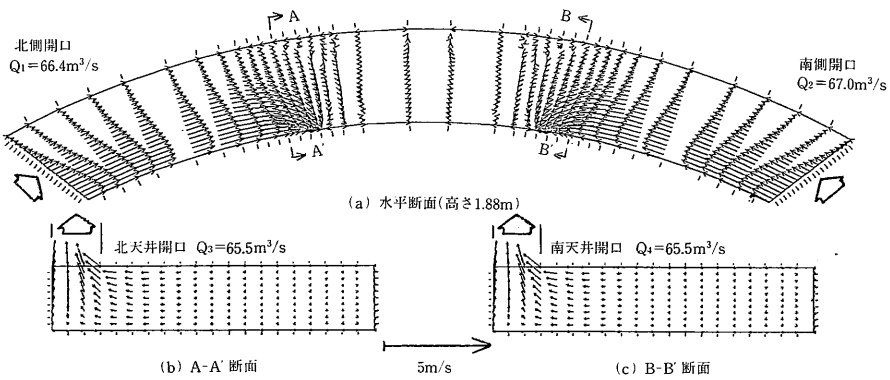


図-6 速度分布と換気量 (ケース3, 無風, 温度差換気)

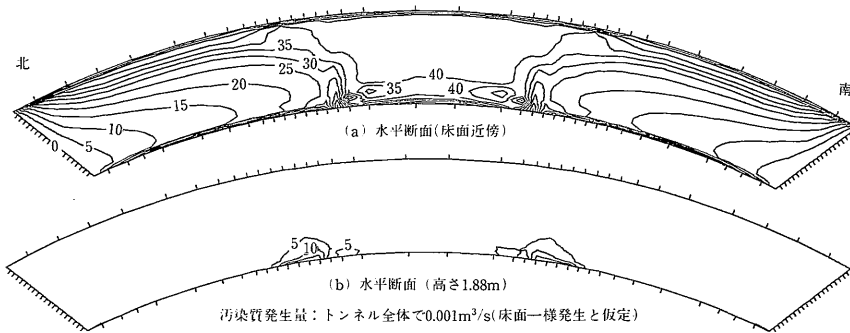


図-7 濃度分布 (ppm) (ケース3, 無風, 温度差換気)

謝 辞

風洞実験, シミュレーションにあたり, 北海道日建設計ならびに日建設計の関係者各位のご協力を得ました。ここに記して謝意を表します。(1990年5月28日受理)

参 考 文 献

- 1) 村上周三, 加藤信介, 石田義洋: 一般曲線座標系による室内気流数値シミュレーション その4, 日本建築学会

論文報告集第408号, 1990年2月

- 2) 村上周三, 加藤信介, 長谷川巧, 高橋岳生, 金永徳: 大空間の自然換気に関する研究(その6) 自然換気口を持つトンネルの換気性能に関する風洞実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学) 1989年10月
- 注1) 北海道に建設中の新千歳空港ターミナルビル, 風洞実験並びにシミュレーションは同ターミナルビル基本計画時点の諸元に基づく。実験, シミュレーション結果は同アクセス用トンネルの換気設計に反映された。