

Role of simulation in safe tunnel ventilation design

(安全なトンネル換気設計におけるシミュレーションの役割)

出典：Tunnel Management International Volume 7・Number 3・2004

著者：水野 明哲、飯田 明由、金野 祥久（工学院大学）

アブストラクト

トンネルの換気設備を設計するとき、火災に対する安全性は最大の関心事である。この論文の最初の部分では、換気における1次元シミュレーションと3次元シミュレーションの役割についてのべる。筆者は1次元のシミュレータを使用して換気設備の運転手法を確立し、そのシミュレータをインターネット経由で使用できるように構築しつつある。この1次元シミュレータを使用すると、種々のトンネルにおける緊急時の換気システム運転計画を作成する場合に、信頼性のある安全設計が可能になる。

記号一覧

A : トンネル断面積[m ²]	t : 時間[s]
c : 煙濃度[1/m]	V : 縦流風速[m/s]
D : 拡散係数[m ² /s]	x : 入口側坑口からの距離[m]
d : トンネル断面の代表直径[m]	λ : 壁面の摩擦損失係数[-]
F : トンネル内大気への力のトータル[N]	ξ_b : 給気運動量係数[-]
F_t : 交通換気力[N]	ξ_e : 排気運動量係数[-]
m : トンネル中の大気質量 [kg]	Ω_e : 煙生成速度[1/s m]
q_b : 単位長あたりの給気量[m ³ /s m]	ρ : 空気の密度[kg/ m ³]
q_e : 単位長あたりの排気量[m ³ /s m]	

緒言

道路トンネル火災に対する安全性の概念は、ヨーロッパで起きた惨事によってここ数年の間に劇的に変化した。火災時に安全を確保するための因子のひとつが換気設備とその運転制御にあることは疑いが無い。筆者はこの20年以上、様々なトンネルに対する換気の数値シミュレーションを実行してきた。これら作業は、関越トンネルの平常時[1]、非常時[2]における縦流換気システムに始まり、東京湾横断道路[3]に引き継がれた。

その後は、モデルトンネルにおける横流換気システムの緊急時換気の検討をおこなった[4-5]が、そこでは縦流風の制御にインバランス換気手法が有効であることが確認された。この手法は、意図的に給気流と排気流の流速に差を与えるものである。これらの検討に使用した運動方程式にはその後疑問が生じ、新しい運動方程式を確立するのに、徹底した考察をおこなった[6]。この新しい方程式に基づいた解析が東山トンネルのシミュレーションに適用された[7]。2003年の初期には同トンネルで実験がおこなわれ、横流換気の過渡状態に対するシミュレーション結果が、実際の現象と十分な精度で合致することが認められた。

筆者の一人は、安全対策には、緊急時に必要なさまざまな事項が注意深く組み合わされていないと述べている[8]。

これまでに述べた一連の数値シミュレーションによる安全性の検討に基づいて、筆者は道路トン

ネルにおける火災時に、避難の確保という観点から安全性の判定基準を確立すべく検討を重ねているが、この論文では、換気設備の能力とその制御ロジックが十分であるかどうかの判定に、議論を留める。

トンネル内で火災が発生した時には、スタッフの適切な指示のもとに利用者が安全な場所（連絡通路や避難所）へと移動する間の環境を確保せねばならない。すなわち火災発生後、直ちに換気制御を緊急モードに切替え、利用者の避難を可能にするために5分から10分維持せねばならない。緊急モードにおいて最優先事項は避難のために安全な環境を整えることである。この検討をするために、最も簡単でかつ重要なプロセスは、1次元(1-D)シミュレータの利用である。1-Dシミュレーションが避難困難という結果を出したときでも、人間の身長付近の煙濃度は、許容レベルに留まっている可能性があるため、2-D、3-Dによる分析が推奨される。

トンネルに分岐合流が存在するときには、気流と圧力の未知数が増加し、計算量を大きくするが、この複雑さを避けるために、筆者はグラフ理論を採用した。これによって圧力項が消去でき、効率的な一連の計算が可能となる。

この論文の最後の部分では、インターネットによるシミュレーションサービスの確立について述べている。これが実現すれば興味のある人は誰でも、またどこからでもシミュレータの使用が可能となる。

道路トンネル火災時の安全性判定基準

道路トンネル火災において人命の安全性判定基準は、すべての利用者が適切に避難できるかどうかである。したがって計画や建設の段階から、この観点で安全性を確認することが必要である。事故や火災の発生を避ける方策に対する考察が実行されてきているが、事故が起こった場合には統制が重要であり、まず担当者による覚知が迅速になされ、かつ非常時の放送等によって利用者が迅速に避難するよう、導かねばならない。

換気機はあらかじめ適切に準備された手順で避難環境を確保するように、運転されねばならない。筆者の一人は、これらの安全対策の体系的な確立と表示が必要と力説している[8]。利用者が逃げ道を探している間、安全な環境を確保するのに換気システムが主要な役割を果たす。トンネル間の連絡路や避難所が適切に配置されているという前提では、利用者の避難に要する時間は5分から10分で、歩行速度および火災開始から避難開始までの時間に依存する。

したがって安全性の判定基準は、避難に対応する期間に許容限度以上の煙濃度が、人間の身長の領域に存在しないことである。この条件は考えられるあらゆる状況において維持されねばならない。

1次元シミュレータの役割

一次元シミュレーションによる安全判定

トンネル火災の時の安全性確認に関する筆者の提案は、基本的には空気の流れを解析し、続いて1次元シミュレーションを実行するというものである。空気の流れを解析するシミュレータには、トンネル内のあらゆる流体力学上の現象を記述できる性能を備えておらねばならない。種々の現象が火災地点の風速に影響を与えるためである。またシミュレータは換気機の動特性とその制御ロジックのモデルも備えている必要がある。

筆者の経験から、気流に対しては非圧縮性の解析を推奨する。延長 10km のトンネルでさえ非圧縮で十分取り扱える[1-2]。縦流および横流換気システムに関する基本的な運動方程式については、次章で述べるが、対象トンネルの運動方程式を数値的に解いて、火災地点および他の任意の地点の風速を求めることが出来る。

このようにして解かれた風速を基にして、煙濃度 c に関する移流拡散方程式

$$-\frac{\partial c}{\partial t} + D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \frac{\partial(cV)}{\partial x} + \Omega_e = 0 \quad (1)$$

を解く。ここで Ω_e は火災による煙発生速度である。

1 次元の移流拡散方程式では、任意のトンネル断面における煙濃度は一定とされる。しかし、実際には浮力の効果によって煙は天井付近に滞留する傾向がある。このことは 1 次元シミュレーションの結果は実際よりも厳しい結果を導くことを意味し、特に火災地点近傍では厳しい結果となる。

図 1 に空間と時間を軸とした煙分布の計算結果を示す。ここで斜線は避難する人の移動である。もしこの斜線が図中の煙濃度が高い領域に触れていなければ、利用者が安全に避難できると判断できる。煙濃度は変数 c で定義され、透過度で決まる。

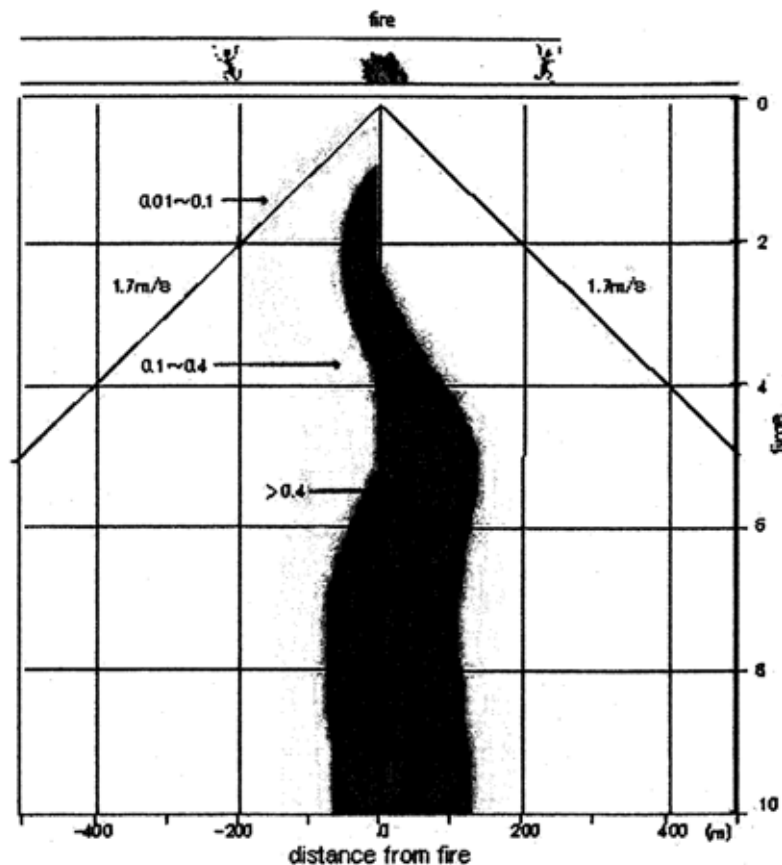


図 1 煙濃度の空間 時間変化の例

1 次元と 3 次元シミュレーションの役割分担

コンピュータの計算速度性能が飛躍的に進歩した結果、次のような主張をする人がいる。「トンネル火災における熱と煙の分布の 3 次元シミュレーションが可能になったからには、1 次元シミュレーションはもはや意味をなさない。3 次元シミュレーションのほうが 1 次元よりもより現実的

な結果を提供する。」

これは必ずしも正しくない。避難の可能性に関する最も重要な情報は、火災地点近傍の縦流風である。これを分析するためには、換気機の仕様やその運転と制御といったあらゆる要素を考慮しなければならない。また煙の挙動は、この風速の解析によって明らかになる。

既述したように1次元による解析では、煙濃度に関して実際よりもより厳しい結果となる。したがって1次元シミュレーションで安全と判定された場合には、安全な避難環境が確保されると考えてよい。またもし1次元シミュレーションで、利用者の避難が可能とされる、煙濃度0.4未満の環境の実現が困難という結果が出た時には、1次元シミュレーションで解いた縦流風速を境界条件として、3次元シミュレーションを行うのがよい。このときの3次元シミュレーションは、火災地点を含む数百mの領域に限定しておこなえばよい。

3次元シミュレーションでは、人間の身長付近における煙濃度が計算でき、それが許容レベルであれば、設置された設備は十分であるが、もしそうでないときには、設備は十分ではなく、換気設備やその制御のロジックを再構築せねばならない。

種々の換気システムへの適用

縦流換気システムの空気力学モデル

縦流換気トンネルの空気の流れに対する解析では、ニュートンの第二法則の運動方程式が適用できる。

$$m \frac{dV}{dt} = F \quad (2)$$

ここで m はトンネル中の空気の質量、 V は空気の速度、 F は加わる力の合成であって、交通換気力、自然風、換気風等である。これらの力の詳細については、他の文献で述べている[1-2]。

横流換気システムの流体力学モデル

横流換気区間においては、縦流風の運動方程式は、微小制御量の慣性保存を考慮して、次のように記述される。

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \left\{ \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\lambda}{2d} V|V| + 2V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\xi_b q_b - \xi_e q_e}{A} V \right\} + \frac{1}{A} \frac{\partial F_t}{\partial x} \quad (3)$$

ここでは非圧縮とし、また換気区間に沿って給気と排気の一様性を仮定している。この方程式は q_b と q_e のあらゆる組合せに対して有効であって、例えば半横流換気システムではこれらのひとつがなくなる。

移動する給気が、縦流の慣性をもたらさないときには、 $\xi_b = 0$ となり、速度の分布が十分一様で $\xi_e = 1$ とみなせるときには、(3)式は次のようになる。

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \left\{ \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\lambda}{2d} V|V| + 2V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{q_e}{A} V \right\} + \frac{1}{A} \frac{\partial F_t}{\partial x} \quad (4)$$

この式を x で積分し、かつ両坑口での圧力差による加速を関係付けると、横流換気システムの運動方程式となる。この方程式のより具体的な適用例は、東山トンネルへの適用で示されている[7]。

一次元シミュレータの構造

先に述べたように1次元シミュレータは、道路トンネル火災時の安全性確認に使用されるが、これには各種機能を持つ数学モデルが組み込まれており、その概要を図2に示す。

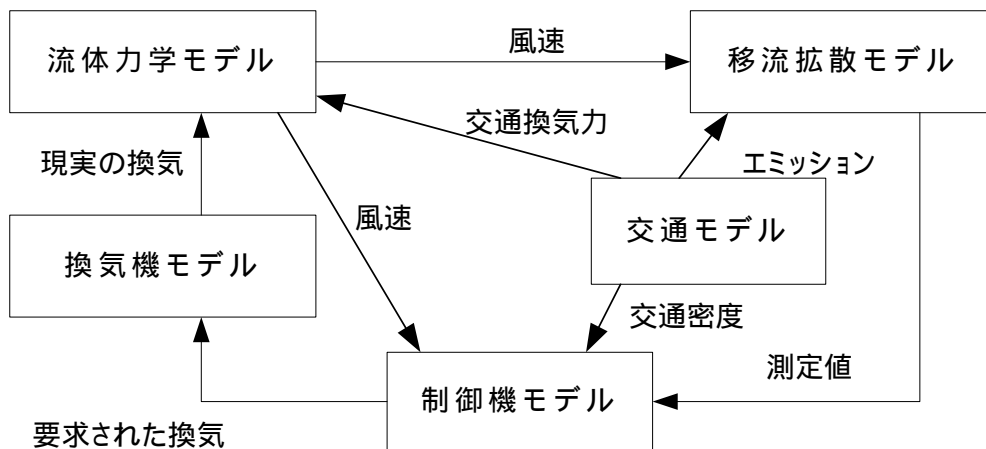


図2 シミュレータの構造

- ・ 流体力学モデル：換気機運転と交通データが条件として与えられたとき、縦流風速は、運動方程式を解いて時間の関数として表される。使用するときには、例えば縦流、横流、それらの組合せといった種々の換気システムで方程式を解かねばならない。横流換気システムにおいては、給気と排気の流れを独立に制御できるので、縦流風の操作が可能である。
- ・ 移流拡散モデル：煙発生強度は時間の関数とし、移流拡散方程式(1)を数値的に解く。拡散は結果に影響することもあるが、通常は無視される。論理的または実験的には、拡散係数 D を採用することが有用である。このような考察をおこなうと、1次元の移流方程式を解いて煙の基本的な挙動を把握できる。しかしこれは任意の断面において煙が一様としたモデルであり、熱による浮力で層流となる現象を記述しない。これは1次元シミュレーションの結果が、現実よりも厳しいということを意味する。すなわち、現実の現象では濃い煙は天井付近に留まり、人間の身長付近には煙が来ないためである。ただし縦流風速が非常に小さいときには、煙は断面の平均値よりも大きな速度で移動するので、1次元シミュレーションの結果が必ずしも安全側であるとはいえない。
- ・ 交通モデル：交通モデルは一方通行、対面通行の両方の場合に必要であり、また事故が起こった場合には、離れる方向の車両は支障なく動くが、背後から接近する交通の流れは止まって、車両が滞留することを記述できなければならない。マクロモデル、ミクロモデルの両方が使用される。マクロモデルは車両の動きを差分的な形で各セルに配置して取扱い、ミクロモデルでは各車両の動きが記述される。緊急時の検討には代数モデルの信頼性が高くかつ有用である。そこでは交通の密度と速度が時間と空間の関数として定義される。

- ・ 制御機モデル： トンネル内で火災が覚知されたとき、換気制御は緊急モードに切り替わる。これは平常時とは全く異なる動作となる。最初の 5 分から 10 分間は、避難の安全性を最優先にロジックが組まれる。つぎに救援隊や消防隊の活動がスムーズにおこなわれるように換気の目的が切り替わる。ジェットファンのある縦流換気トンネルでは、ジェットファンの投入と遮断で風速を目標値にする動作が始まる。これについては関越トンネルの論文で述べた[2]。一方横流トンネルでは、縦流風の制御は困難と考えられているが、筆者のひとは「インバランス制御」とよぶ手法を提案している[4-5]。この手法では、火災地点の上流と下流とで給気と排気が逆になるような不平衡を作り出して縦流風を操作する。この手法は場合によってはジェットファンほど有効に動作しないので、前もってその効果を確認しておくことを推奨する。基本となる方程式は、前に述べたものから若干の修正が入る[4-5]ので、慣性による移流項をより正確に記述するようにする。
- ・ 換気機モデル： 実際には、風速の測定データが制御モデルに入力されるが、シミュレーションでは流体力学モデルのデータが制御モデルに入力される。得られたデータで制御機モデルは演算を行い換気のための要求を出力する。換気機モデルはそれを受けて調整し、実際と同様に換気機が動作する。それには、ファンの立ち上げ遅延、突入電流を抑制するための起動台数の制限の機能を含んでいる。

シミュレータ内ではこれらのモデルが有機的に結合され、ステップごとに演算が進行するので、風速と煙濃度が時間と空間の推移で出力できる。煙の分布は避難の安全性判定に使用される。

複雑トンネルへの適用

道路トンネルの換気システムは、単純な 1 本のシャフトのトンネル用から、分岐合流をもつ複雑なトンネル用までさまざまである。単純な 1 本シャフトの縦流トンネルでは過渡的な風速は、方程式(2)を時間について解けば求められる。一方横流換気の場合の縦流風速は、方程式(3)による運動方程式を解けば模擬できる。

交通もしくは換気に分岐合流のある複雑換気システムでは、一連の微分方程式を同時に解かねばならない。この場合風速と圧力が未知数となり事態を複雑にするが、筆者が複雑トンネル用に開発した縦流換気[10]または横流換気のシミュレータでは、圧力項を消去できるので効率的な計算が可能である[9]。

インターネットによるシミュレーションサービス

筆者はこの論文で、1 次元換気シミュレータによって、換気設備とその制御方法に関して、火災時の安全性の判定をおこなう可能性について議論した。シミュレータを作り上げるのには、かなりの労力が必要であり、またその正当性の検証も当然必要である。

この問題を解決するために筆者はインターネットを利用したベンチャービジネスの設立を考えている。その事業では、風速と煙の挙動のシミュレーションがインターネット経由で可能となる(図 3 参照)。このシミュレーションは、トンネルの設計および供用中のトンネルの安全確認の両方に

有用である。

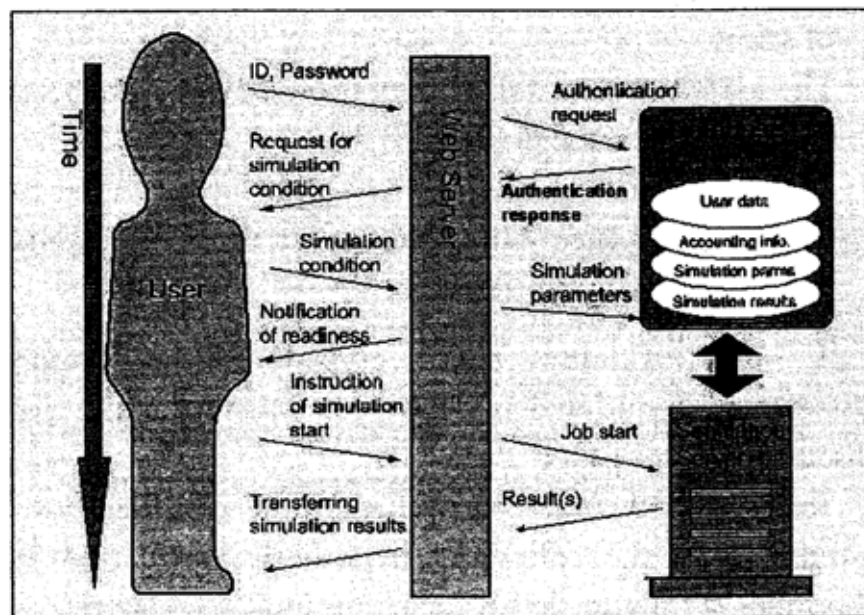


図 3：インターネットによるシミュレーションサービス

結論

覚知用のシステム、避難ガイド、消火器等種々の設備が道路トンネルの安全のために備えられている。これらの中でも換気システムは最も重要である。この認識の下に筆者は 1 次元シミュレーションによる火災時の安全性の判定法を提案した。この議論が世界的に広がり、トンネルの火災時の安全性に対する統一された世界標準が確立されることを希望する。

文献

- [1] Ohashi, H., Mizuno, A., Nakahori, I., and Ueki, M., "A new ventilation method for the Kan-etsu road tunnel," *Proceedings of the 4th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels* (York, UK, March 1982), BHRA Fluid Engineering Centre, Cranfield, UK, 1982, pp. 31-47.
- [2] Mizuno, A., Ohashi, H., Nakahori, I., and Okubo, N., "Emergency Operation of Ventilation for the Kan-Etsu Road Tunnel," *Proceedings of the 5th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels* (Lille, France, May 20-22, 1985), BHRA Fluid Engineering Centre, Cranfield, UK, 1985, pp. 77-91.
- [3] Mizuno, A., Sasamoto, T., and Aoki, I., "The emergency control of ventilation for the Trans-Tokyo Bay Tunnel," *Proceedings 7th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Brighton, UK, Nov. 1991.
- [4] Mizuno, A. and Ichikawa, A., "Possibility of controlling longitudinal air flow velocity in emergency for a transversely ventilated tunnel," *Proceedings of the 7th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, (Brighton, UK, November 27-29, 1991), BHRA, pp. 349-364.
- [5] Mizuno A. and Ichikawa A., "Controllability of longitudinal air flow in transversely ventilated tunnels with multiple ventilation divisions," *Proceedings of the 1st International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels* (Basel, Switzerland, November 23-25, 1992), ITC, pp. 425-437.
- [6] Mizuno, A. and Kanoh, T., "On the one-dimensional equation of motion for the numerical simulation of transversely ventilated road tunnels," *Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference* (San Francisco, USA, July 18-23, 1999), on CD-ROM.
- [7] Dobashi, T., Imai, T., Yanagi, H., and Mizuno, A., "Numerical simulation of emergency ventilation for a tunnel with longitudinal and transverse ventilation systems combined," *Proceedings of the 10th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Boston, USA, 2000, pp. 581-595.
- [8] Mizuno, A., "What is needed for saving human lives and preventing fire spreading in a road tunnel fire?," *Proceedings of the 4th International Conference Safety in Rail and Road Tunnels*, April 2-4, 2001, Madrid, Spain, pp. 647-656.
- [9] Makino, M., Sangu, M., Ito, T., Yachi, S., and Mizuno, A., "The ventilation system and emergency simulation of the Shinjuku Tunnel," *Proceedings of the 11th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, July 2003, Luzerne, Switzerland.
- [10] Nishiuma, N., Goto, Y., Fukushima, H., and Mizuno, A., "An aerodynamic model of complex tunnels for ventilation system design," *Trans. of JSME*, Vol. 68, No. 675, Nov. 2002, pp. 2990-2996 (in Japanese).
- (a) Visibility in the extension of l [m] in the smoke density of C_s is $C_s = -(1/l) \log \tau$, where τ is the rate of light penetrating through certain density of smoke with the distance. Ordinary criteria is: At $C_s = 0.01$ smoke can be noticed, at 0.1 smoke is thicker but one can walk, over 0.4 smoke is thick and walking is disturbed.