

## 大断面道路トンネルにおける火災時の換気運用検討 Study of Ventilation Operation in the Case of Fire Accident in a Large Cross Section Road Tunnel

川端 信義\*      八木 弘\*\*      川北 真嗣\*\*

Nobuyoshi KAWABATA, Hiroshi YAGI, Masatugu KAWAKITA

This report is the study result about ventilation operation at fire accident in the large cross section (115m<sup>2</sup>) road tunnel on New Tomei-Meishin Expressway. By using three-dimensional CFD we simulated the movement of smoke and thermal fume caused by fire accident in tunnel. The result showed that the refuge environment in large cross section tunnel is more safe than usual 2-lane road tunnel, under 2m/s longitudinal air velocity. However, in large cross section tunnel, smoke goes up 1.5 times faster than in case of 2-lane tunnel, so we must examine to up the air velocity.

### 1. まえがき

昭和32年はわずか100万台に過ぎなかった自動車保有台数は、平成7年末には6700万台に達している。このめざましいモータリゼーションの進展は日本の高度経済成長を支えてきたが、さらに均衡のとれた国土の発展を目指して14,000kmの高規格幹線道路網の整備が進められている。

第二次世界大戦後の日本の経済成長を支えた現東名・名神高速道路は、昭和44年に全通して以来30年近くが経過しており、東海道メガロポリスをつなぐ幹線道路として、社会・経済の発展と沿線地域の開発に大きく寄与してきた。日平均交通量も東京～横浜130,000台/日をはじめ、茨木～吹田122,000台/日、東名三好～名古屋102,000台/日とそれぞれの大都市圏の入り口で10万台を超え、路線平均でも85,000台/日と交通量が増加してきたことにより、高速道路の本来持つべき高速性、定時性等の機能が十分発揮されておらず、輸送時間の不規則性による非効率や輸送コストの増大など沿線企業への影響も深刻化している。

第二東名・名神高速道路は、現東名・名神高速道路と一体となって機能する道路として三大都市圏の連携を強化し、全国的ネットワーク形成の根幹となるべき重要な役割を果たす道路として、昭和62年の第四次全国総合開発計画で14,000kmの高規格幹線道路網の一部に位置づけられた。第二東名・名神高速道路は21世紀の我が国の基幹をなす路線であり、後世の貴重な遺産になることを鑑み、将来においても高く評価されるように、十分なゆとりを有する道路を目的として、片側三車線の全路肩を確保した断面となっており、断面的には従来の2車線トンネルに比べ断面積で約2倍の115m<sup>2</sup>となる。

本報告は、このような第二東名・名神トンネルの大断面トンネルを対象にトンネル内における火災時の熱や煙の挙動をシミュレーションによって把握し、避難環境および火点付近の状況の評価を行うことによる、火災時における換気運用の検討結果について、報告するものである。

---

\* 非会員 福井大学助教授 工学部機械工学科

\*\* 正会員 日本道路公団技術部道路技術課課長代理

\*\*\* 日本道路公団技術部道路技術課

## 2. 火災時換気運用

### 2・1 火災時換気運用の概要

延長が長く交通量が多い道路トンネルでは、自動車の排出ガス等によるトンネル内空気の汚染防止を目的とし、換気設備が必要となる。換気設備はトンネル内における自動車火災などの非常時においては道路利用者などを熱や煙から守る排煙設備としても利用されることから、トンネル全体として合理的かつ効率的に計画する必要がある。

長大トンネルの換気方式としては昭和40年代までは半横流式や横流式が多く採用されてきたが、都市間高速道路においては電気集塵器や換気立坑などとの併用によって交通換気力を有効に活用出来る縦流換気方式が主流となってきている。縦流換気方式は火災時においては、車両の進行方向に縦流風を吹かせることで火災地点の手前側に滞留する車両を火煙から守り、消火や避難のための環境を確保することとしている。この縦流風はこれまでの火災実験などから、2車線トンネルにおいては火災をあおることなく、かつ煙の迺上を最小限に抑えられる換気風速として2m/s程度が最も適しているとの知見が得られている。

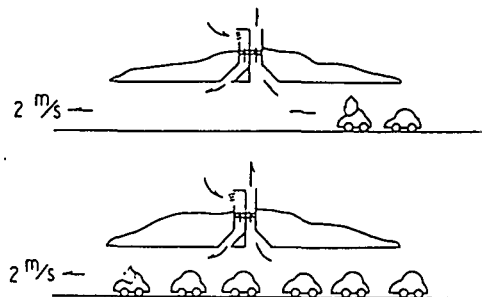
この非常時換気運用の基本的な考え方は、次の通りである。

1. 事故または火災地点より進行方向前方の車両は、車でそのまま避難することが可能である。
2. 大型バス1台程度の火災では、2 m/s程度の縦流風を吹かせることで、火災をあおることなく風上側における避難や消火活動に必要な環境が確保可能である。



図1 ジェットファン式の例

(火災地点が立坑より離れている場合)



(火災地点が排気坑付近の場合)

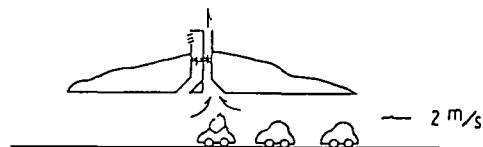


図2 立坑送・排気式の例

### 2・2 縦流換気方式の概要

縦流換気方式は通行車両の走行に伴って発生する交通換気力を有効に活用出来る換気方式である。縦流換気方式には、縦流風を吹かせるための昇圧力をトンネル内に吊り下げたジェットファンによって確保する方式や、換気立坑に接続する換気所の送・排風機によって確保する方式などがある。

ジェットファン式の場合は火災地点から遠く熱の影響の少ない個所のジェットファンを運転させて2m/s程度の縦流風を確保することとしている。

また、立坑による送・排気式の場合は、火災地点によって図2に示すような運転を行うこととしている。すなわち、火災地点が立坑の位置より離れている場合は、送・排気運転を行うことによりトンネル内に2m/s程度の縦流風を吹かせることとし、また火災地点が排気坑付近の場合は排気運転を行い煙をトンネル外に排出することとしている。

### 3. シミュレーション手法

従来の2車線トンネルクラスの断面における火災時の熱や煙などの火災性状については、建設省土木研究所の実大トンネルでの火災実験<sup>(1)</sup>などである程度把握されているものの、第二東名・名神高速道路のような大断面トンネルにおいては、火災性状が2車線トンネルとは異なってくることが予想される。このような大断面トンネルでの火災性状の把握のためには、同等の断面を有する実大トンネルでの火災実験による観測・測定が望ましいが、現時点では同等の断面を有するトンネルも存在しないことから、シミュレーションによる火災性状の把握を行い、火災時換気運用の検討を行うこととした。

火災性状把握のためのシミュレーション手法としては、大別して、経験的実験式モデル、CFD(Computational Fluid Dynamics)に基づくモデル、その他の現象論的モデルに分類されるが、ここでは火災時における避難環

境の検討に用いることを目的としているため、熱と煙の詳細な挙動を求め得るCFDによる手法を用いることとした。

CFDによるトンネル火災時に発生する熱気流解析の例としては、 $k-\epsilon$ 乱流モデルによる3次元解析<sup>(2),(3)</sup>、乱流混合長モデルによる2次元解析<sup>(4)</sup>などがある。2次元解析は計算時間が短く、必要なメモリー容量が少ないという長所があるものの、横断面幅方向の流れを考慮できない、3次元性が著しい火源部のモデル化が困難という短所がある。したがって、本研究の目的である火源部近傍における熱と煙の挙動を把握するためには2次元解析では不十分であり、3次元解析を行う必要がある。また、従来のトンネル火災のシミュレーションでは $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いているものが殆どであるが、本研究では、Large Eddy Simulation(LES)を用いた。これは、 $k-\epsilon$ モデルは乱流エネルギーに対してモデル化を行うため、シミュレーションの予測精度を向上させるためにはモデルの改良が必要となるが、LESでは格子サイズ以下の渦をモデル化するため、今後のコンピュータ性能の向上に伴って格子分解能を高くしていくことによって、より高精度な結果が得られる可能性があると考えたためである。

従来の熱対流の数値計算では、温度変化が小さいと仮定し、浮力が温度差に比例すると近似して体積変化の効果を無視したブジネ近似がよく用いられてきた。しかし、火災時に発生する熱気流の場合には、温度変化が大きくなり気体の体積膨張の効果を無視できず圧縮性流体として取り扱う必要があるため、次に示すような圧縮性流体に対する支配方程式を用いてシミュレーションを行う。

連続の式

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

運動方程式

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \tau \quad \text{ただし} \quad \frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (v \cdot \nabla), \quad \tau = \mu_t [(\nabla v) + (\nabla v)^T] \quad (2)$$

エネルギー方程式

$$\frac{DC_v T}{Dt} = \nabla \left( \frac{\nu_t}{\sigma_h} \nabla T \right) + \frac{Q_h}{\rho} - \frac{p}{\rho} (\nabla \cdot v) \quad (3)$$

状態方程式

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (4)$$

煙の拡散方程式

$$\frac{DC}{Dt} = \nabla \left( \frac{\nu_t}{\sigma_c} \nabla C \right) + \frac{Q_c}{\rho} \quad (5)$$

ここで、 $t$ は時間、 $v$ は速度ベクトル、 $p$ は圧力、 $\rho$ は密度、 $T$ は温度、 $C$ は煙粒子質量濃度(単位体積当たりに含まれる煙粒子の質量)、 $\nu_t$ は乱流拡散係数、 $R$ は気体定数、 $C_v$ 、 $C_p$ は定容・定圧比熱である。また、 $Q_h$ は単位体積当たりの発熱速度、 $Q_c$ は単位体積当たりの発煙速度(質量)である。

状態方程式(4)から、

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = \frac{1}{p} \frac{Dp}{Dt} - \frac{1}{T} \frac{DT}{Dt} \quad (6)$$

である。トンネル内における圧力変化は、火災時の場合(爆発のような急激な圧力変化がないような場合)ではせいぜい100Pa程度であり、その変化量は圧力の絶対値約 $10^5$ Paに比べると1/1000程度になる。一方、温度変化は数100K程度であり、その変化量は温度の絶対値(273+数100)Kに比べると1/2前後になる。したがって、トンネル火災の場合、圧力変化による体積変化は温度変化による体積膨張に比べて無視できることが分かる。すなわち式(6)右辺第1項は第2項に比べて無視でき、

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = -\frac{1}{T} \frac{DT}{Dt} \quad (7)$$

と置くことが出来る<sup>(5)</sup>。これを連続の式に代入して、さらにエネルギー方程式に代入すると

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{1}{C_p} \left\{ \nabla \left( \frac{\nu_t}{\sigma_h} \nabla T \right) + \frac{Q_h}{\rho} \right\} \quad (8)$$

となる。さらに上式を再び連続の式に代入すると次式を得る。

$$\nabla v = E, \quad E = \frac{1}{C_p T} \left\{ \nabla \left( \frac{\nu_t}{\sigma_h} \nabla T \right) + \frac{Q_h}{\rho} \right\} \quad (9)$$

乱流モデルとしてはLES (Smagorinsky) モデルを用い、乱流拡散係数  $\nu_t$  を

$$\nu_t = (C_{sma}\Delta)^2\beta\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)\right]^{1/2} \quad (10)$$

と置く。ここで、 $C_{sma}$  はスマゴリンスキー定数、 $\Delta$  はフィルター幅、添え字  $i, j$  は  $x, y, z$  軸各方向の成分を意味する。また、 $\beta$  は温度成層状態時の乱流拡散の抑止効果を表すため、文献(6)の様におく。

以上から、本シミュレーション<sup>(7)</sup>で用いる基礎式は、連続の式(8)、運動方程式(2)、エネルギー方程式(8)、状態方程式(4)、煙の拡散方程式(5)、乱流モデル(10)となる。これらを、オイラー法によって時間進行し、SMAC法を用いて圧力場と速度場を連立し、対流項は3次精度上流差分、その他の空間離散化は2次精度中心差分を用いて解く。時間進行の際のステップ幅はクラン条件から得られる値に0.3を乗じたステップ幅を用いる。火災による発熱は火源上方(炎の部分)に発熱領域を設定し、その領域に一樣に発熱する巨大な電熱器があるとして取り扱い、化学反応は取り扱っていない。また、実際の火災時には黒煙が大量に発生し、輻射熱はその大部分が黒煙(熱気流)に吸収されると考え、輻射の影響は無視して取り扱った。また、煙の発生領域は発熱領域と同一とし、発煙速度の空間分布も発熱分布に比例するとした。すなわち、強く発熱する位置では発煙も強いとしている。また、発煙領域も発熱領域と同一の領域に設定した。

境界条件は、速度については流体力学的に粗い壁に対する壁法則を適用し、温度に対しては壁に吸収される熱流束  $q_w$  を熱通過係数  $h_w$  を用いて、

$$q_w = h_w(T_\infty - T_w) \quad , \quad h_w = 5.8 + 4.0 u_c [\text{W/m}^2\text{K}] \quad , \quad u_c = (293/T_\infty)u_\infty \quad (11)$$

と評価する<sup>(8)</sup>。ここで、 $T_\infty, u_\infty$  は境界層外の温度、速度(計算では壁に接するセル中心における値)である。また、 $T_w$  はトンネル壁表面の温度であり、トンネル壁内の熱伝導方程式を解いて求める<sup>(7)</sup>。ただし、壁内の熱伝導は壁表面の法線方向にしか伝わらないと仮定し、一次元問題として取り扱う。

本シミュレーションでは上記の  $h_w$  以外にも、いくつかのモデル定数を用いているが、これらは実験結果に合うようにチューニングされる。ここでは400m長の実寸大実験トンネルに対する4m<sup>2</sup>ガソリン火皿を用いた実験結果<sup>(1)</sup>と比較することによって各モデル定数のチューニングを行った<sup>(7)</sup>。ここではその結果について簡単に示す。まず、各モデル定数の一覧と意味、チューニングの対象にしたか否か、および決定した値について表1に示す。決定の経過については参考文献(7)を参照のこと。また、チューニングしたモデル定数を用いたシミュレーション結果と実験結果との比較の一例を図3,4に示す。図3は平均縦流風速0.65m/sの場合、図4は5m/sの場合で、熱気流内部の温度として横断面内の最高温度の長さ方向分布と減光係数の高さ方向分布の発火から2分経過した状態について、それぞれ(a), (b)として示した。なお、これらの図では減光係数  $C_s$  [1/m] を用いて煙濃度の比較を行っているが、減光係数  $C_s$  と煙粒子質量濃度  $C$  は概ね比例の関係に有ることを考慮し、その比例定数を実験結果の減光係数  $C_s$  にシミュレーション結果の質量濃度  $C$  から換算した減光係数  $C_s$  が概ね一致するように決定したものである。なお、減光係数  $C_s$  は煙濃度を光学的な測定による相対濃度として表示したもので、 $C_s$  と見透し距離  $D$  との間に、 $C_s \cdot D$  = 一定の関係が有るため、見透し距離の低下に関係づけ易く避難環境の評価に用いることが多い。減光係数  $C_s$  は、 $C_s = -(1/l) \log(I/I_0)$  ( $I_0$ : 煙がない場合の光量、 $I$ : 厚さ  $l$  の煙層を通過した光量) で表され、ヘプタンの燃焼の場合には、質量濃度と減光係数との間にはほぼ比例の関係が有ることが実験的に確認されている<sup>(9)</sup>。

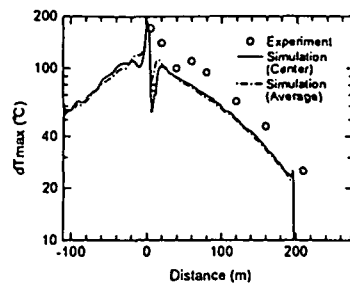
火災時の熱気流と煙の挙動解析では火源からの発熱速度および発煙速度の見積もりが大変重要であるが、図3,4の検討では以下のようにして実験結果を基にして決定している。発熱速度の時間変化は、火源から20m横断面における熱流束の実測値を参考にして時間変化曲線を決定するが、この熱流束は火源からの発熱速

表1 モデル定数

| モデル定数                          | 意 味             | モデル定数の値                   | チューニングしたか否か |
|--------------------------------|-----------------|---------------------------|-------------|
| $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ | 一つのセルのサイズ       | 0.5[m], 0.35[m], 0.345[m] | ○           |
| $C_{sma}$                      | スマゴリンスキー定数      | 0.14                      | ×           |
| $k_s$                          | トンネル壁面の粗さ       | 10[mm]                    | ○           |
| $\sigma_h$                     | 乱流プラントル数        | 0.7                       | ○           |
| $\sigma_c$                     | 乱流シュミット数        | 1.0                       | ○           |
| $h_{out}$                      | トンネル外壁における熱通過係数 | 5.8[W/m <sup>2</sup> K]   | ×           |

(a) 熱気流温度の長さ方向分布

——中央部, - - -幅方向平均値



(b) 高さ方向煙濃度分布

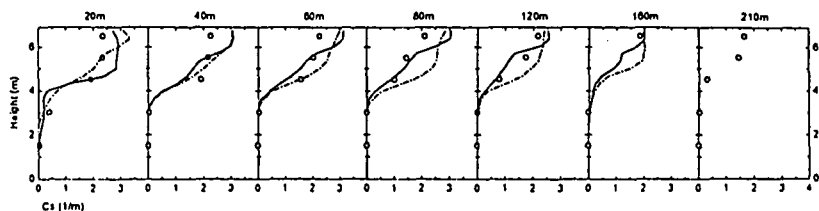
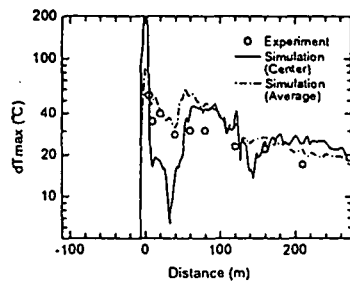


図3 縦流換気風速0.65m/sの場合の実大トンネル実験結果との比較(発火から2分後)

(a) 熱気流温度の長さ方向分布

——中央部, - - -幅方向平均値



(b) 高さ方向煙濃度分布

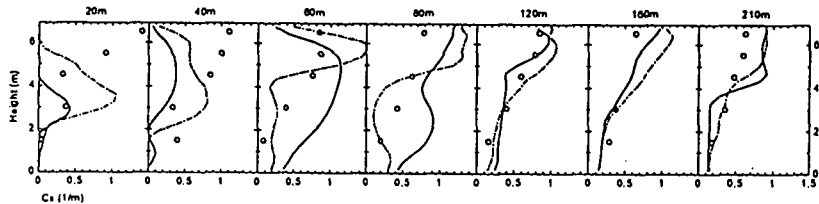
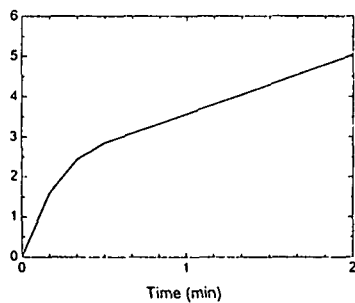


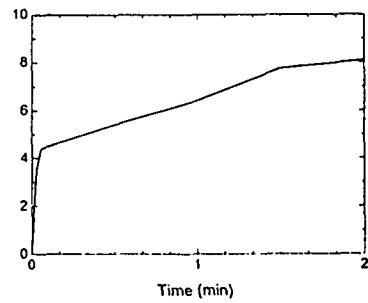
図4 縦流換気風速5m/sの場合の実大トンネル実験結果との比較(発火から2分後)

火源領域からの発熱速度[MW]



(a) 発熱速度時間変化曲線

火源領域からの発煙速度[g/s]



(b) 発煙速度時間変化曲線

図5 発熱速度と発煙速度の時間変化曲線

度を表しているわけではないので、この熱流束にある係数を乗じたものを発熱速度曲線とした。この係数の決定に際しては、いくつかの値に対して試行錯誤的にシミュレーションを行い、実験結果に良く合う値を採用した。その結果、ガソリンの重量減少率の実測値を基にして完全燃焼するとして算出した発熱速度のおおよそ60%が熱気流に寄与する対流熱量として使われ、残りの40%は燃焼継続のための熱量・不完全燃焼・輻射熱・火皿近傍の路面への熱伝導など、対流熱量としては使われなかったものと考えられる。このように決定した発熱速度曲線を図5(a)に示す。また、発煙速度の時間変化曲線は4m<sup>2</sup>ガソリン火皿による発煙特性の実測値<sup>(9)</sup>を基にして図5(b)のようにした。

図3,4中において、実線は横断面中央部の値、一点破線は横断面幅方向に平均した値である。この2つの分布が一致しない場合には幅方向に変化する分布となり、流れの3次元性が強いことを意味している。図3,4から、低風速の場合は実験結果とシミュレーション結果とは概ね一致していることが分かる。また、高風速の場合は、火源の極く近くの煙濃度分布に若干違いが見られるものの火源から100m以上になると概ね一致する。温度分布も概ね実験結果と一致するが、高風速ではほぼ実験と同じかわずかに高い結果となっているが、低風速では実験に比べて定性的な傾向は良く一致しているものの、定量的には低い結果となっている。これは、シミュレーションでは高風速でも低風速でも同じ発熱速度としているが、実験では低風速の場合には熱が火源近傍に滞留し、火源部の温度が高温になり、そのため発熱速度が大きくなることが原因と考えられる。

以上の結果から、本シミュレータ<sup>(7)</sup>が火源から数100m程度の領域における避難環境の評価をする程度の予測性能を有することが確認できた。

#### 4. シミュレーション結果および検討

本研究のような複雑な流動現象に対するCFDでは、定量的な評価に利用できる程にCFDの精度をあげるのは大変困難であり、実用的には定性的な評価に用いる場合が多い。本研究でも、従来の2車断面トンネルの場合と第二東名・名神高速道路の3車断面トンネルの場合を比較するなどの定性的な検討を行うことにする。

##### 4・1 2車および3車断面の場合の火源近傍の流動

本節では、火源近傍の熱気流と煙の挙動について調べる。シミュレーションの対象としたトンネルは長さ400mで上流側入り口から150m地点に火源を置き、火源領域から上流側へ3m離して障害物を設置し、気流に擾乱を与える。2車断面の場合として前節のシミュレーションの検証に用いた実験トンネルの形状を用いる。図6にシミュレーションの対象とした計算領域を示す。本シミュレーションでは直交直線座標系を用いたため、本来滑らかな曲線である天井面は図6に示すように階段状として近似した。なお、火災規模として大型バスの単独火災を想定し、輻射熱等のロスを指し引いた発熱速度として12MW（一定燃焼状態における発熱速度。この値は東京湾横断道路トンネルの4%勾配部における熱気流の挙動の検討の際に用いられた値である。）とする。また、12MW発熱に達するまでの時間変化は前節の4m<sup>2</sup>ガソリン火皿の場合の時間変化曲線

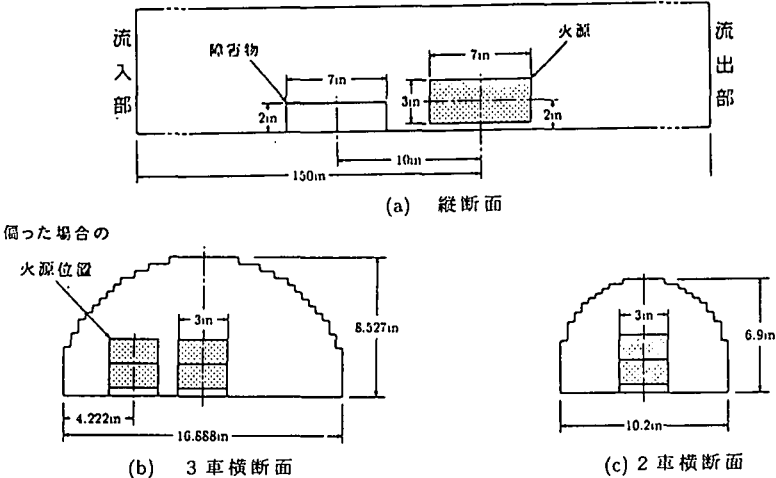


図6 シミュレーション領域の形状

(図5(a))を用いた。発煙速度については大型バス1台の発煙特性<sup>(9)</sup>から一定燃焼時の発煙速度を求め、時間変化曲線は前節の4m<sup>2</sup>ガソリン火皿の場合の発煙速度変化曲線(図5(b))を用いた。なお、煙粒子質量濃度Cから減光係数C<sub>s</sub>への換算係数は前節と同じ値を用いた。また分割数は、3車断面の場合、長さ方向800分割、幅方向20分割、高さ方向20分割(合計空間セル数259,200、セルサイズ $\Delta_x = 0.5\text{m}$ ,  $\Delta_y = 0.422\text{m}$ ,  $\Delta_z = 0.426\text{m}$ )とし、2車断面の場合、長さ方向800分割、幅方向12分割、高さ方向24分割(合計空間セル数194,400、セルサイズ $\Delta_x = 0.5\text{m}$ ,  $\Delta_y = 0.425\text{m}$ ,  $\Delta_z = 0.288\text{m}$ )とした。前節のチューニング時のセルサイズに比べて若干上下しているが、3次精度の風上差分であればセルサイズが50%程度違っていても、熱気流の移動速度、熱気流の厚さなどマクロ的な結果は殆ど影響されないことを確認している。

検討する縦流風速として、低風速2m/sと高風速10m/sの2種類を用いる。これは、従来の2車断面の場合に煙の遡上を阻止するとされている縦流風速2m/sと第二東名・名神高速道路における交通換気力による通常時縦流風速を考慮した10m/sを用いたものである。表2に示すように、それぞれの風速について3車断面と2車断面の合計4ケースについてシミュレーションを行った。ケース番号は始めの数字が換気風速を、真ん中の数字は断面形状を、最後の0は火源位置が断面中央部にあることを意味している。火源部位置による影響は後節で検討し、本節では中央部に火源を置いた場合に対して検討する。図7～図10にその結果を示す。それぞれ、(a)に温度分布(上段に中央縦断面の等温線、下段に横断面の等温線)、(b)に煙濃度(減光係数C<sub>s</sub>)分布を示し、換気風速2m/sの場合は発火から3分経過時の状態を、10m/sの場合は2分経過時の状態を示す。

これらの図から読み取った結果を表3にまとめて示す。表中、熱気流層は平常時温度(0℃)から50℃以上上昇した領域とし、煙層は減光係数C<sub>s</sub>が0.4[1/m]以上(避難可能な限界は0.4[1/m]以下とされている。)の領域とした。また、遡上距離は熱気流が縦流換気風速に逆らって遡上した(火源からの)距離、高さは路面から熱気流層あるいは煙層の下面までの長さ、厚さは層の鉛直方向の厚さ、上流側-30mとは火源位置から上流側へ30mの位置の横断面について、下流側100mとは火源位置から下流側へ100mの位置の横断面についてである。表中の2m/s換気風速の場合には、層の高さと厚さの和はトンネル高さに等しくなっているが、10m/s換気風速の場合には、高さと厚さの和はトンネル高さに等しくなっていない。これは、2m/s換気風速の場合には成層状態になるため天井付近は全て熱気流および煙で充満しているが、10m/s換気風速の場合は100m地点ではまだ成層状態にならず、渦状になっているためである。

表3 熱気流と煙層の位置

| ケース番号       |      |       | 2-3-0 | 2-2-0 | 10-3-0 | 10-2-0 |
|-------------|------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 遡上距離(m)     |      |       | 113   | 85    | —      | —      |
| 上流側<br>-30m | 熱気流層 | 高さ(m) | 6.4   | 5.6   | —      | —      |
|             |      | 厚さ(m) | 2.1   | 1.3   | —      | —      |
|             | 煙層   | 高さ(m) | 5.7   | 5.2   | —      | —      |
|             |      | 厚さ(m) | 2.8   | 1.7   | —      | —      |
| 下流側<br>100m | 熱気流層 | 高さ(m) | 5.1   | 3.6   | 4.0    | 1.6    |
|             |      | 厚さ(m) | 3.4   | 3.3   | 1.7    | 1.7    |
|             | 煙層   | 高さ(m) | 4.4   | 3.1   | 3.8    | 1.6    |
|             |      | 厚さ(m) | 4.1   | 3.8   | 2.4    | 2.5    |

表2 火源近傍のシミュレーションケース

| 縦流換気風速 | 断面形状 | シミュレーション時間 | ケース番号  | 図番 |
|--------|------|------------|--------|----|
| 2 m/s  | 3車   | 発火前20秒     | 2-3-0  | 7  |
|        | 2車   | ～発火後5分     | 2-2-0  | 8  |
| 10 m/s | 3車   | 発火前20秒     | 10-3-0 | 9  |
|        | 2車   | ～発火後2分     | 10-2-0 | 10 |

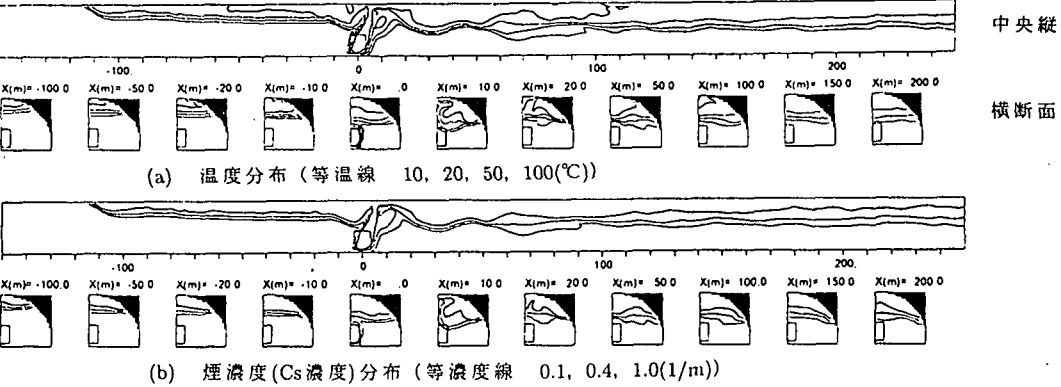


図7 ケース2-3-0(発火後3分経過時)

以上の図表の結果をまとめると、次のようになる。

- 2m/s換気風速の場合の火源から上流側については、3車断面の方が2車断面に比べて煙が遡上しやすく層の厚さも厚くなるものの、下層の避難可能領域は3車の方が広い。これは3車断面のトンネル内空間が大きいためトンネル横断面積に対して熱気流が占める割合が小さくなり、同一縦流風速で比べると遡上を阻止する力が小さくなるためと考えられる。また、3車断面の方が絶対量としては多くの煙や熱気流が遡上するが、天井部の空間が大きいため、多くの煙や熱気流を天井部に溜め込むことが出来るためと考えられる。

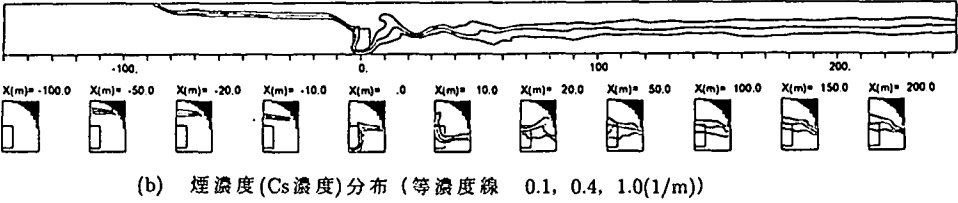
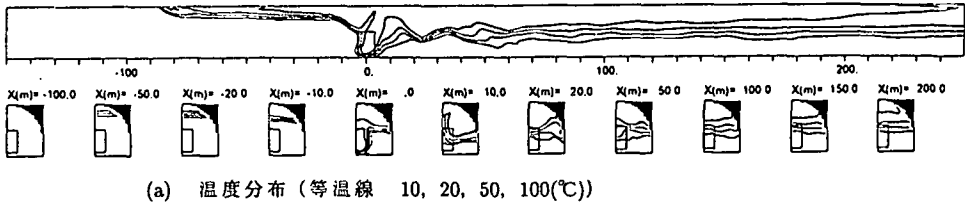


図8 ケース2-2-0 (発火後3分経過時)

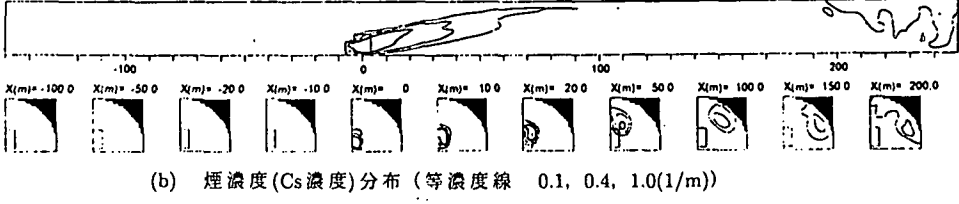
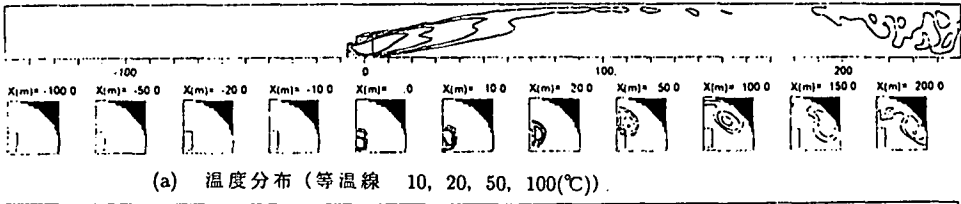


図9 ケース10-3-0 (発火後2分経過時)

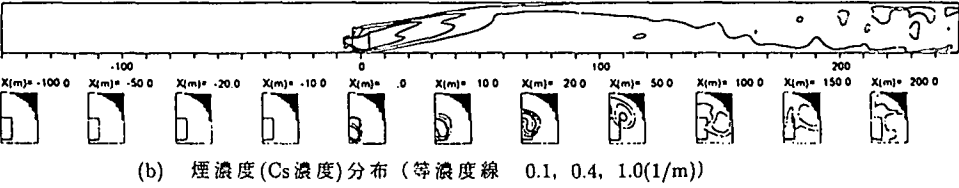
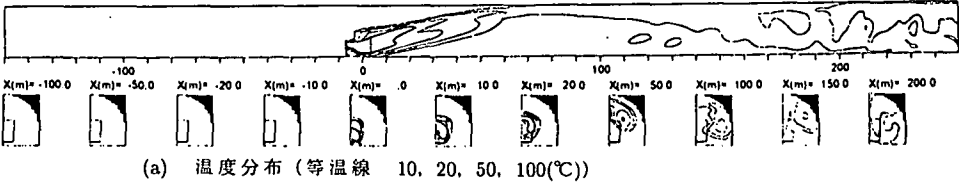


図10 ケース10-2-0 (発火後2分経過時)

- 2m/s換気風速の場合の火源から下流側については、3車断面の方が熱気流層・煙層ともに高く、路面近くの避難環境は良いことが分かる。
- 10m/s換気風速の場合については、当然上流側の遡上は見られない。下流側については、3車断面の方が熱気流・煙の渦状態がより下流側まで(200m程度まで)維持されていることが分かる。すなわち2車断面の方が、渦状態が早く崩れ、煙が早く路面近くにまで拡散し、避難が困難になることが考えられる。また、煙濃度についても3車断面の方が濃度が低い結果となっている。
- 火源の下流側について、2m/sと10m/sの換気風速それぞれについて調べると、10m/s換気風速の場合はほとんど成層状態が維持されることはなく、早く路面付近に煙が降りるが、2m/sの場合は広い範囲で成層状態が維持され、煙の降下が抑止されていることが分かる。

以上から、3車断面では従来の2車断面に比べると避難環境が特に悪くなることは無く、むしろ断面積が大きくなった分煙濃度が低下し、安全側であると考えられる。しかし、低風速の場合における縦流風速に逆らった煙の遡上に関しては、3車断面の方が遡上し易く危険側であるため、遡上を阻止する最低縦流風速について検討することが今後の課題として残された。

#### 4・2 火源位置による影響

前節ではトンネルの断面中央付近で火災が発生した場合について検討したが、実際には左右の側壁付近で発生する可能性もあると考えられる。そこで、本節では側壁付近(火点中心が側壁から4.2m離れた地点)で火災事故が発生した場合を考え、前節の中央部火災の場合との比較を行う。なお、本節では3車断面の場合のみを取り扱い、縦流換気風速は前節と同様に2m/sと10m/sの2種類について検討する。また、本節では中央縦断面に対して対称とすることができないため、全領域をシミュレーション領域としているが、セルサイズは4.1節と同じにしたため合計空間セル数は518,400となった。表3に本節で行ったシミュレーションケースを示す。シミュレーション番号の最後の1は側壁付近に火源があることを意味している。これらの結果を図

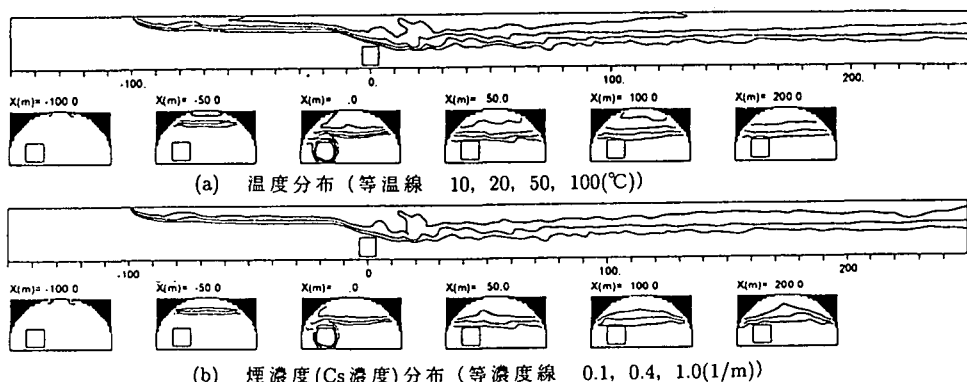


図11 ケース2-3-1 (発火後3分経過時)

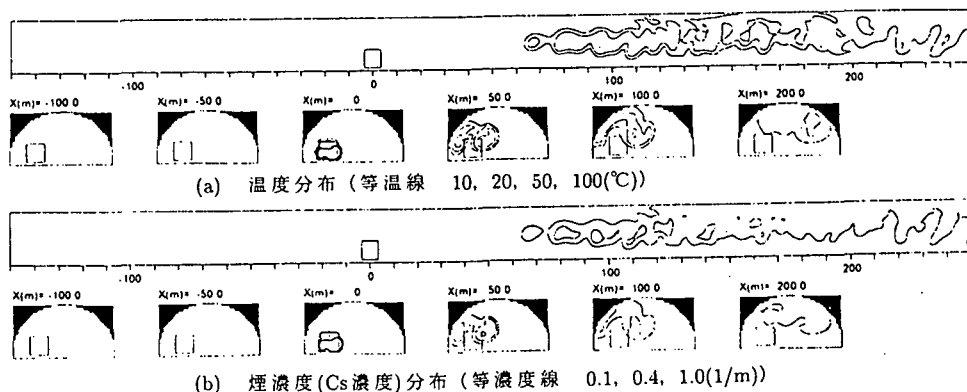


図12 ケース10-3-1 (発火後2分経過時)

11,12に示す。また、前節と同様にして図から読みとれる値を、表3の中央部火源の場合の結果を含めて表5に示す。

これらの図表の結果を、中央部火源の場合と比較してまとめると、次のようになる。

- 2m/s換気風速の場合の火源から上流側については、中央部火源の方が熱気流・煙ともに層の厚さが厚くなり、遡上もしやすいことが分かる。したがって、中央部火源の方が危険側になる。
- 2m/s換気風速の場合の火源から上流側については、大きくは違うことはないが、若干側壁部火源のほうが層の厚さが小さくなっていることが分かる。
- 10m/s換気風速の場合には、側壁火源の場合の方が下流側の熱と煙層はより早く拡散し、路面近くに降ることが分かる。したがって下流側については側壁部火源の場合がより危険側であることが分かる。

表4 側壁部火源の場合のシミュレーションケース

| 縦流換気風速 | 断面形状 | シミュレーション時間       | ケース番号  | 図番 |
|--------|------|------------------|--------|----|
| 2 m/s  | 3車   | 発火前20秒<br>～発火後5分 | 2・3・1  | 11 |
| 10 m/s | 3車   | 発火前20秒<br>～発火後2分 | 10・3・1 | 12 |

表5 熱気流と煙層の位置

| ケース番号       |     |       | 2・3・0 | 2・3・1 | 10・3・0 | 10・3・1 |
|-------------|-----|-------|-------|-------|--------|--------|
| 遡上距離 (m)    |     |       | 113   | 100   | —      | —      |
| 上流側<br>-30m | 熱気流 | 高さ(m) | 6.4   | 7.0   | —      | —      |
|             |     | 厚さ(m) | 2.1   | 1.5   | —      | —      |
|             | 煙層  | 高さ(m) | 5.7   | 6.4   | —      | —      |
|             |     | 厚さ(m) | 2.8   | 2.1   | —      | —      |
| 下流側<br>100m | 熱気流 | 高さ(m) | 5.1   | 5.5   | 4.0    | 3.3    |
|             |     | 厚さ(m) | 3.4   | 3.0   | 1.7    | 1.7    |
|             | 煙層  | 高さ(m) | 4.4   | 4.6   | 3.8    | 3.3    |
|             |     | 厚さ(m) | 4.1   | 3.9   | 2.4    | 3.0    |

## 5. おわりに

近年、電算処理能力の向上と共に様々なシミュレーション技術が発達してきている。今回第二東名・名神高速道路トンネルクラスの大断面トンネルにおける火災時の煙や熱の挙動の把握を目的にシミュレーションを行い、火災時の換気運用について検討を行った。シミュレーションはLESモデルによる乱流解析に基づき、各種モデル定数および発熱・発煙速度曲線は実大トンネルにおける火災実験結果との比較を行って決定したことから、一部火源の極近傍における挙動については不明確な点はあるものの、火点から数100m程度以内ならば、今回の検討に対して満足できる予測が出来たと考えている。

今回行ったシミュレーション結果から、換気風速2m/sの場合、第二東名・名神トンネルクラスの大断面トンネルでは、従来の2車線トンネルに比べ断面が大きいことから熱気流や煙層の高さが高く、路面近くの安全な避難環境が確保されやすいことが分かった。しかしながら、第二東名・名神トンネルの方が従来トンネルに比べて風上側への煙の遡上速度が1.5倍程度速いことから、火災時の換気風速を上げることにより煙の遡上範囲を抑える検討が必要であることなどがわかった。日本道路公団では今回のシミュレーション結果をもとに第二東名・名神高速道路の非常時の換気運用についてさらに検討を進めていきたいと考えている。

21世紀の社会資本整備に向けて地下空間の開発・利用が幅広く行われるようになってきている。地下空間を安全にかつ有効に活用するためには、火災の発生を防止することが重要なことは言うまでもないが、発生時に被害を最小限にとどめる対策も忘れてはならない。シミュレーションによる予測手法がさらに精度が向上し、実用に即した検討が行われることにより、安全で快適な地下空間が開発されることを望むものである。

## 参考文献

- (1) (財)高速道路調査会、道路トンネル内自動車火災における水噴霧設備の調査検討報告書、昭58-3
- (2) S.Kumar et.al., Proc. of 5th Int. Symp. Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, 1985
- (3) 自治省消防研究所、地下利用の特殊空間内における火災性状に関する研究報告書、平成6-3
- (4) N.Kawabata et.al., Proc. of 8th Int. Symp. Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, 1991
- (5) K.Kuwahara, Proc. of 4th Int. Conf. on Appl. Num. Modeling, (1984)
- (6) 富永・村上・持田、日本建築学会学術講演概要集、1993
- (7) 佐々木・川端・内藤・加藤、機械学会100周年記念北信越支部講演会 (1997.9発表予定)
- (8) 西川・藤田、伝熱学、理工社(1982)
- (9) (財)高速道路調査会、第二東名・名神のトンネル内付帯設備の設計・施工に関する調査検討報告書、平成