

# 大断面トンネル火災のシミュレーション解析による研究

## Study on Numerical Simulation for Large scale tunnel by a Fire Accident

竹國一也<sup>1)</sup>・下田哲史<sup>2)</sup>・國兼裕子<sup>3)</sup>・川端信義<sup>4)</sup>  
Yuko Kunikane, Nobuyoshi Kawabata, Kazuya Takekuni, Akifumi Shimoda

The behavior of smoke and flame when a fire breaks out in a large-scale tunnel that have been revealed by a report on fire experiments inside the Shimizu No. 3 Tunnel on the New-Tomei Expressway that is now under construction, and by the results of other experiments march in 2001.

The experiments were carried out for the following reason. Tunnels on the New-Tomei Expressway with three lanes plus shoulder are large-scale tunnels with an inside section area of 115 m<sup>2</sup>. Because this inside section area is about twice that of a two-lane tunnel, it is very important to inspect the smoke behavior and heat diffusion in such large-scale tunnels that differ from those in two-lane tunnels.

Based on data obtained from the testing, simulation analyses under various conditions that could not be studied during the testing were performed by the three-dimensional CFD method using an LES (large eddy simulation) turbulence model.

**Key Words :** large-scale tunnel, numerical simulation, smoke behavior, fire accident

### 1. はじめに

第二東名・名神高速道路におけるトンネルは路肩付き3車線で2車線トンネルと比較して2倍以上の内空断面積を有する大断面トンネルとなっている。

このような大断面トンネルにおける非常用施設の新たな基準づくりが急がれるが、そのためには大断面トンネルの特殊性を考慮した火災性状や避難環境確保のための排煙風速の確認、水噴霧設備の効果確認等の検討が必要となる。この未解明な部分を解明するために、車両及びガソリン火皿による火災実験<sup>(1),(2),(3)</sup>(2001年2月26日～3月8日)を行った。また、火災実験においては限られた条件下での検証であるため、実験では検証できない部分の解明を目的に火災シミュレーションを実施した。

本文は、火災シミュレーションの概要、並びにその結果に基づく大断面トンネルにおける火災発生時の避難環境特性について報告するものである。

### 2. シミュレーション手法

本研究で用いたシミュレータ<sup>(4),(5)</sup>では、トンネル坑内の流れの支配方程式として圧縮性流体に対する連続の式、運動量保存式、エネルギー方程式、状態方程式、煙質量濃度の移流拡散方程式を用いた。ただし、速度場に対してのみLES乱流モデルを適用し、温度場、煙濃度場は0方程式

1) 日本道路公団 技術部 道路技術課 課長代理

2) 日本道路公団 技術部 道路技術課

3) 福井大学 大学院 工学研究科

4) 福井大学 工学部 機械工学科 教授

モデルとした。

密度は温度のみによって変化することとし、圧力による密度変化の影響は無視し、火災による燃焼反応は考慮せず発熱・発煙はエネルギー方程式および煙質量濃度の移流拡散方程式は1次精度風上差分とした。その他の空間微分には2次精度中心差分を用いている。

トンネルは閉鎖空間であり、このような場合の火災熱気流の流動現象を把握するためには、トンネル壁面への吸熱量を適切に見積ることが重要である。壁に吸収された熱は、主に壁表面部分を法線方向に伝わるため、本研究では、壁に接するセル表面のそれぞれについて、1次元熱伝導問題を解いて評価した。ただし、このような評価手法は、気体と壁の熱容量の違いについて配慮する必要があるため、壁内分割幅を空間分割幅より極端に小さくし、空間セルの熱容量と壁内セルの熱容量のギャップを少なくするようにした。

壁でのせん断摩擦応力は、壁面の粗さを2mmとして速度条件に粗い壁の対数条件を適用した。また、路面における温度条件は、断熱条件を適用した。さらに、流入条件は圧力 $p=0$ とし、流出条件には、風速を与えた。なお、この風速は、火源から100m(9Gの場合は150m)風下側地点における風速の測定結果から得られる体積流量から、断面で平均化した風速を算出し、風下側坑口流出境界に一様分布として与えた。

数値計算に関しては、時間進行は陽的クランク・ニコルソン法を用い、SMAC法により連続の式と運動方程式を連立し、移流項スキームは、運動方程式は4次精度中心差分、エネルギー方程式は3次精度風上差分、煙濃度移流拡散方程式は1次精度風上差分とし、その他は2次精度中心差分を用いた。なお、乱流プラントル数は0.5、乱流シュミット数は0.5とした。

### 3. シミュレーション解析による検討

実験で収集されたデータに基づき、LES乱流モデルを用いた三次元数値解析手法によって、実験で検証不可能であった条件下でのシミュレーション解析を行った。

シミュレーション解析による検討項目は以下のとおりである。

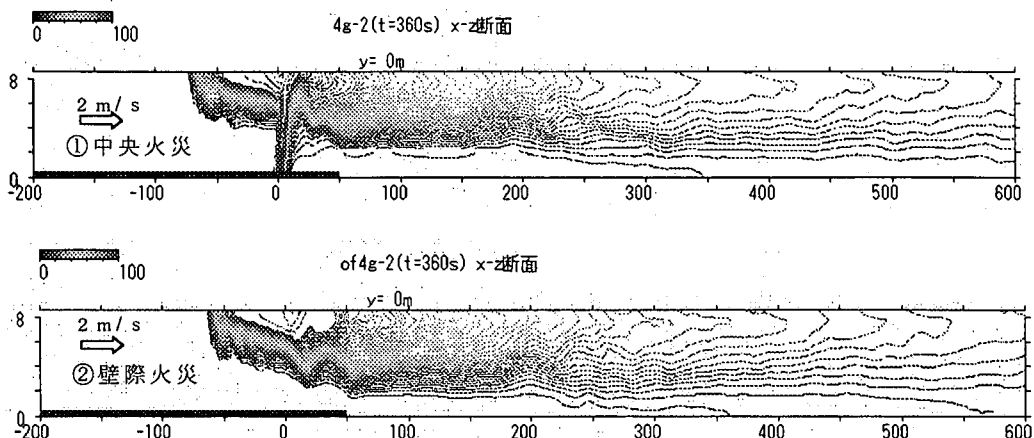
- ① 火点位置の違いによる火災性状と坑内状況の検討
- ② 縦流風速と遡上距離の検討
- ③ 火点上流側に滞留車両が存在する場合の遡上特性の検討

#### 3.1 火点位置の違いによる火災性状と坑内状況の検討

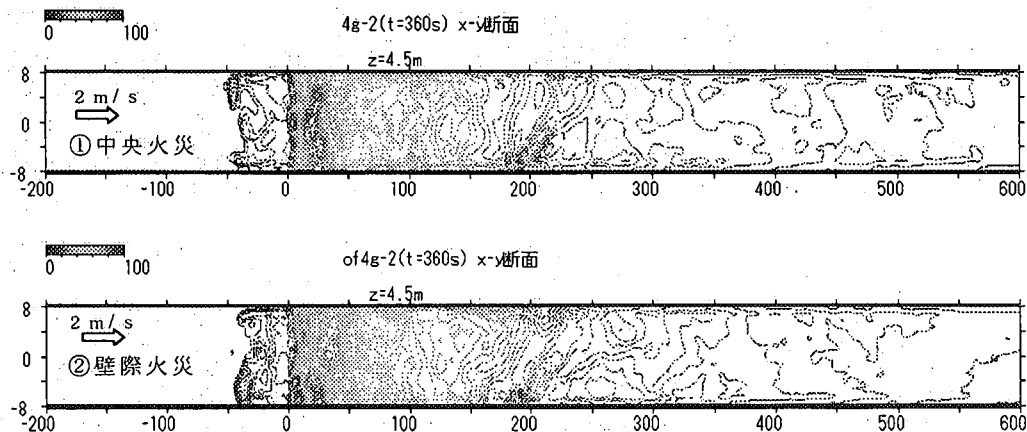
火災実験において火災はトンネル断面中央にて発生させた。しかし、実際にはトンネルの側壁付近においても火災事故の発生する可能性が考えられることから、壁際火災(壁際から3.75m離れた地点に設置)について縦流風2m/sの条件で4㎡火皿火災を想定した熱気流の挙動に関してシミュレーションを行い、中央火災シミュレーション結果と比較することにより、火点位置が熱気流に及ぼす影響を検討した。

図-1は、発火後 $t=6$ 分のトンネル中心線における温度分布の縦断面を示した中央火災及び壁際火災のシミュレーション結果である。この時点で縦流風に逆らって熱気流が風上側へ流れるいわゆる遡上現象が見られる。これより、遡上距離、遡上時間を見ると、トンネル中央部火災とほぼ同様な状態となり、遡上する熱気流層の厚さも大きな違いは見られないことから、火点位置による遡上距離、遡上時間には違いの無いことが確認された。さらに、図2に $z=4.5$ mの高さにおける温度分布の平面図( $t=6$ 分)を示した。これによると、中央火災の場合、左右対称に壁際付近に高温部が示されているのに対して、壁際火災の場合、左右の壁際に交互に高温部が現れている。ただし、火源から離れるにつれて熱気流の温度が低くなるため、この構造の違いは少なくなることが分かる。

以上のことより、火点のごく近傍の性状は、壁際火災と中央火災で異なるものの、火点から離れると熱気流は同様な形状となる。また、避難環境部(路面から1.5m程度)については、双方に差はないことが判った。



図－１ トンネル中心の縦断面におけるCs濃度分布比較



図－２ 高さ4.5mの熱気流の水平断面図

### 3.2 縦流風と遡上距離の検討

当検討は、トンネルの縦断勾配と火災規模が遡上（避難環境）に与える影響度合いを検証するものである。

図－3 は、点火 10 分後のそれぞれ、ガソリン火皿 4 m<sup>2</sup>（0 % 勾配）、ガソリン火皿 4 m<sup>2</sup>（－2 % 勾配）、ガソリン火皿 9 m<sup>2</sup>（－2 % 勾配）におけるシミュレーション結果について、トンネル中心線の縦断面における煙層の厚さを示したものである。また、火災規模が大きくなるほど遡上し易いが、その遡上する煙の Cs 濃度 0.4 [1/m]（避難環境の基準）は、路面より高さ 1.5 m には達しておらず、避難環境は安全に保たれていることが分かる。

図－4 は、トンネル縦流風と遡上距離の関係を示している。今回シミュレーションを実施した 0 % と 2 % 勾配の範囲内であれば、トンネル縦断勾配がある場合とない場合では、火点近傍で遡上を阻止する風速はほとんど変わらないが、いったん遡上すると勾配がある方（風上側が高くなっている場合）が遡上距離が大きくなる傾向がある。

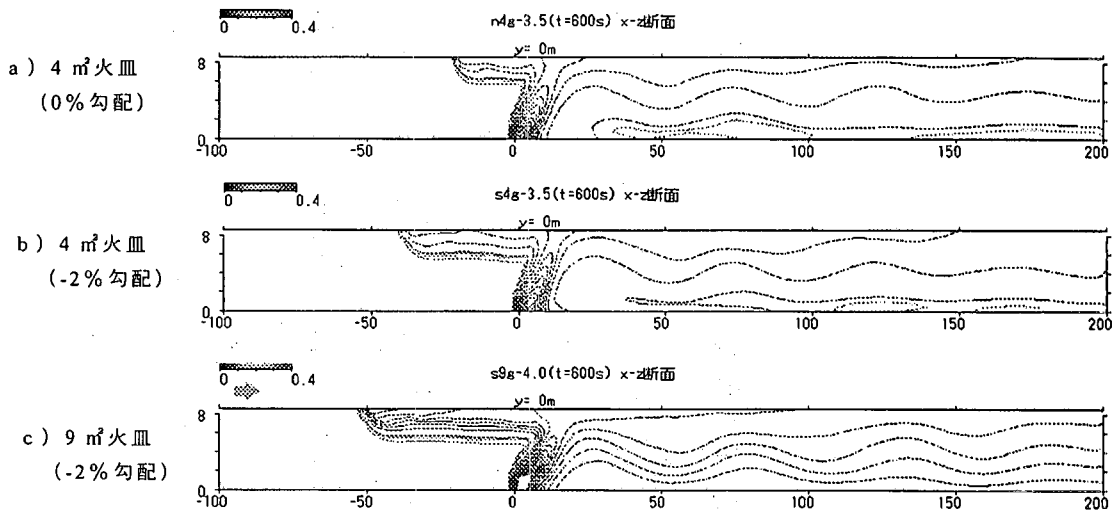


図-3 熱気流通上距離の比較

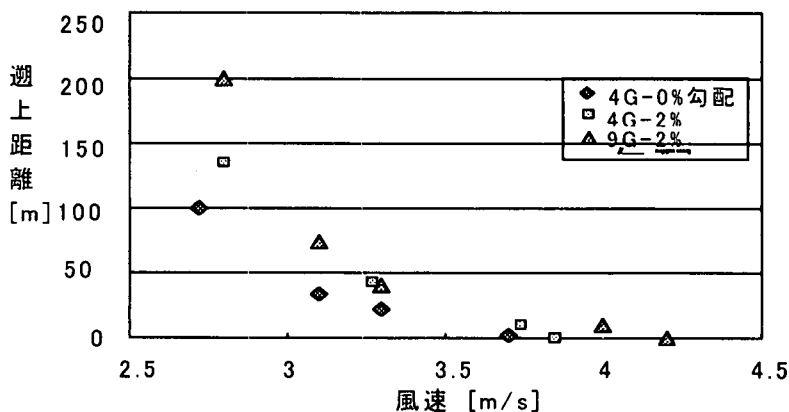


図-4 縦流風速と遡上距離の関係

### 3.3 風上側に滞留車両が存在する場合

一方通行トンネルの場合、トンネル内火災事故が発生した場合の避難環境としては、発火点から風上側へ避難するのが一般的と考えられることから、火点より風上側を安全な環境に保つことが重要となる。火点より風下側に存在する車両は、そのまま出口まで通り抜けるため、煙や熱の影響を受けないと考える。しかし風上側は停車している車両が火点付近からトンネル入口まで滞留した状態となることが想定される。この場合、これらの滞留車両が避難環境に悪影響を及ぼさないか否かの検証が必要となる。よって、ここではシミュレーションにより滞留車両の配置を図-5のように設定した。シミュレーションに当たっては、4 m³火皿の火災規模で縦流風速 2m/s の条件で行った。

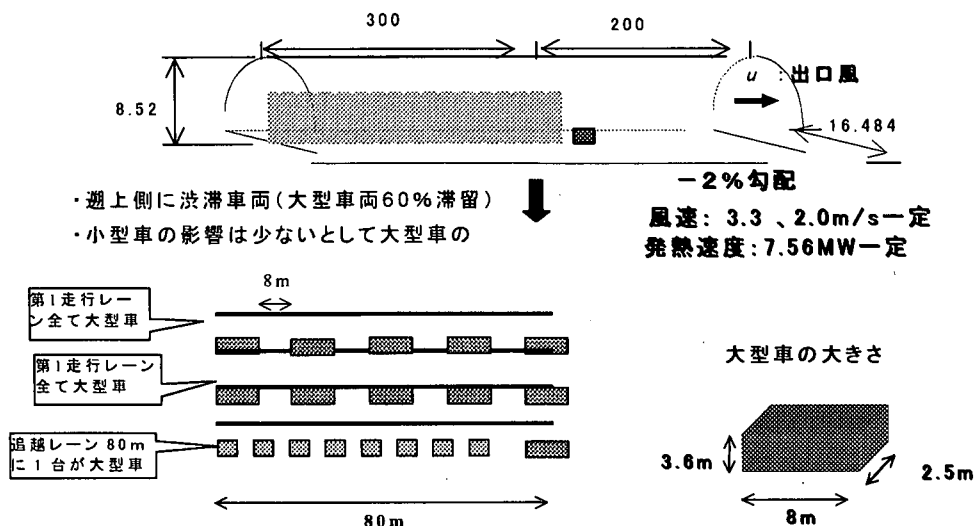


図-5 シミュレーション条件

煙濃度の分布を図-6 に示す。滞留車両ありの場合の方が、火点近傍での熱気流の乱れが見られるものの遡上距離が短くなり、遡上阻止風速が低くなる結果となった。つまり、滞留車両が避難環境を悪化させることはなく、むしろ良好な避難環境を確保できることを意味している。

これは滞留車両によって坑内の圧力損失が大きくなり、乱れた速度分布が熱気流にあたり抵抗となり遡上速度を遅くするものと考えられる。

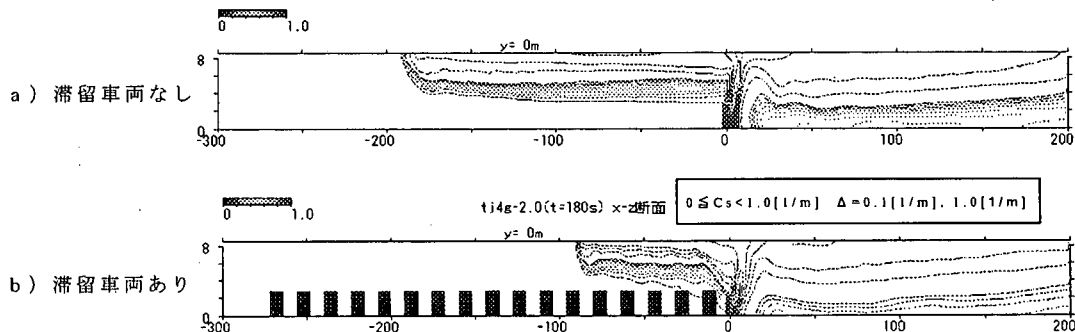


図-6 滞留車の有無による煙分布比較

## 5. まとめ

本実験の結果及びシミュレーション結果より、大断面トンネルにおける火災発生時の避難環境は下記の通り評価される。なお、1)～3)については、火災実験<sup>(2)</sup>、<sup>(3)</sup>より得られた結果であり、本論分では詳細を記載していない。

- 1) 火点風上側への煙の遡上は2車線トンネルに比べて遡上距離は伸びる傾向にあるが、天井部の蓄煙効果が大きいので路面付近の避難環境に大きな影響はない。(遡上特性)
- 2) 坑内風速 5 m/s 程度の高風速時においても火点風下側の煙濃度  $C_s$  値は概ね 0.4 に達することはない。(稀釈効果)
- 3) 水噴霧設備に期待される火源抑制、類焼防止、冷却効果については2車線トンネル同様の効

果が確認できた。

- 4) 壁際火災では、火源のごく近傍の性状は、中央部での火災時と異なるが、火源から離れた位置では、熱気流の厚さや温度はほとんど同様となる。
- 5) 大断面トンネル形状において、火点直上での臨界遡上阻止風速は従来の予測値よりも大きくなるがその避難環境は安全に保たれる。
- 6) 勾配がある場合とない場合では、火源近傍で遡上を阻止する風速はほとんど変わらないが、いったん遡上すると勾配がある方が遡上距離が大きくなる傾向がある。
- 7) 火源上流側に滞留車両が存在する場合の方が、遡上距離が短くなり、遡上阻止風速が低くなる。

以上より、大断面トンネルの避難環境特性としては放熱効果、蓄煙効果や稀釈効果が2車線トンネルに比べ有利であることが確認された。また、今回のシミュレーションからは、大断面トンネルが避難環境上不利となるような結果はなかった。

今後、水噴霧放水を考慮したシミュレーションを実施し、大断面トンネルの総合的な火災発生時の避難環境を評価していく予定である。

#### 参考文献

- (1) 第二東名高速道路清水第三トンネルにおける火災実験 竹國、下田、高速道路と自動車 VOL. 44No6, 平成 13 年 6 月
- (2) 大断面トンネルの火災発生時における避難環境評価 竹國、下田、横田、高速道路と自動車 VOL. 45No7, 平成 14 年 7 月
- (3) 第二東名清水第三トンネル火災実験による大断面トンネルの防災特性について 竹國、下田、横田 トンネル工学研究会論文 2001. 11
- (4) 川端他, 日本機学会論文集(B), 65-634, p.1870-1877 (1999)
- (5) 王謙他, 日本機学会論文集(B), 67-656, p.911-918(2001)