

道路トンネル火災の予測計算 Prediction Model for Road Tunnel Fires

堀内健司, (株)千代田コンサルタント, 東京都千代田区飯田橋 3-3-7, E-mail: k-hori@chiyoda-ec.co.jp
 ロブ・ストークス, (株)千代田コンサルタント, 東京都千代田区飯田橋 3-3-7, E-mail: rob-strk@chiyoda-ec.co.jp

Recently, a number of serious fires in road tunnels are being reported in the international media. Also among tunnel engineers, research and development for suitable measures are being conducted, including numerical analysis based on prediction models. At the same time it is believed that prediction methods accessible to a wider range of tunnels designers can play an important role to find countermeasures to improve fire safety in road tunnels.

1. はじめに

近年、複数の国において道路トンネル火災が発生し、トンネル業界のみならず、国際社会に渡って、深刻なニュースとして取り上げられている。建設コンサルタント業界において以前から着目していたこのテーマは急激に幅広い分野より注目されている。

表1は近年に道路トンネルにおいて発生した大規模火災事故の一覧を示す。これらの火災事故の背景として、多数の課題が国内外において指摘されているが、その一部を以下に紹介する。

- ・ 危険性が高い対面通行トンネルがある (表1示すトンネルの内、対面通行が8割を占めている)。
- ・ 自動車の技術向上により運転中の快適性が改善されつつある反面、トンネル内の走行速度上昇及び運転注意低下にもつながる場合がある。
- ・ 危険物輸送に関する問題として、Mont Blanc Tunnel 事故において火災になったマーガリンと小麦粉のように危険物としてみなさない積載物も、可燃物と同類の火災となり、毒性の激しい煙が発生する危険性がある。
- ・ 積載物の組合せ及び運送状態により、積載物が車内で反応するか外部のものと反応し、危険物となるか危険性が変わる場合があるため、事故時の消火方法・排煙方法・避難誘導方法などの対応が複雑となる場合がある。
- ・ トンネル異常時に有効とされている避難路や安全空間が設置されていても実際は十分に利用又は機能されておらず、避難環境の整備を始め、避難設備・安全設備の表示方法や利用方法などに関する情報提供、訓練・教育などに改善を必要とするトンネルがある。

以上のような指摘は欧州だけでなく、日本においても現実的課題として否定できない内容があるため、表1のような火災事故は日本のトンネルにおいても発生する可能性があるとの認識を高めることが重要であると考えられる。

既に、適切なトンネル防災対策を選定するため、国内における複数の検討や議論が各レベルで行われているが、トンネル火災に関しては、以下に示すような要素が複雑に絡み合い、火災のあり方及びその影響が変化しやすいため、画一的な解決が困難であり、また、その予測に未解決な内容がある。

- ・ トンネルの幾何・車線数・交通方式
- ・ 火災の位置・種類・規模・時間変更・煙発生
- ・ 事故に関わった死傷者・車種・台数・避難状況
- ・ 管理者の体制・情報提供方法・救急方法・設備運用方法

このような状況の中で、従来の予測計算に加えて、トンネル設計者が設定する複数のトンネル・火災の具体的な条件について、信頼性の高く計算速度の速い予測計算方法があれば、トンネル防災対策を検討する際に比較する複数の想定火災をよりよく評価できると考えられる。従って、計算に求められるのは速さ・正確さ・比較の容易さ・具体性がある。

本検討は、トンネル設計者が火災予測計算を実用的なレベルで実行可能な方法を検討したものである。

2. トンネル条件及び計算条件

トンネル内部の気流と温度の予測は、非構造メッシュのモデル化を用いて、基礎的な連続式・運動方程式・エネルギー方程式を基に数値解析法によって求めた。乱流再現は標準的なk-εモデルを用いた。流体と固体との熱伝導、移流による熱拡散などを考慮の上、火災発生時から5分間までの風速分布と温度分布を予測した。

2.1 熱流体計算の基礎式

計算に用いた基礎式は以下のとおりである。

— 連続の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

— 運動方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j - \tau_{ij}) = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \rho f_i \quad (2)$$

— エネルギー方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(e + \frac{u^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho \left(e + \frac{u^2}{2} \right) u_i = - \frac{\partial}{\partial x_i} p u_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} u_i + \rho f_i u_i - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \quad (3)$$

表1 最近の道路トンネル火災事故事例

TN	Gotthard	Guldborg-sund	Gleinalm	Tauern	Mont Blanc
所在国名	スイス	デンマーク	オーストリア	オーストリア	フランス/イタリア
延長	16,900m	460m	8,320m	6,400m	12,000m
開通	1980年	1988年	1978年	1974年	1965年
交通方式	2×1車線 対面通行	2×2車線 一方通行	2×1車線 対面通行	2×1車線 対面通行	2×1車線 対面通行
日交通量	18,700 (2000年)	未確認	14,000 (1995年)	3,000 (ピーク 時交通量)	5,500 (1998)
事故年月	H13.10	H13.10	H13.8	H11.5	H11.3
事故車数	トラック 2台	トラック 等9台	ミニバン ・乗用車	トラック 等36台	トラック 等36台
死亡	11名	3名	5名	12名	39名
積載物	タイヤ	豚	—	塗料	マーガリン/ 小麦粉

— 気体の状態方程式

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

但し、

- t : 時間
- u_i : 直交座標 (i=1,2,3)
- p : 圧力
- ρ : 密度
- τ_{ij} : 応力テンソル成分
- q_i : 熱伝導
- R : 気体定数
- T : 温度
- e : 内部エネルギー

2.2 物性値

本検討に用いた空気とトンネル構造としてのコンクリートの物性値に関する設定条件等を表2に示す。

表2 計算条件

項目	設定値など	
空気	密度	28.96 kg/m ³ (mol weight)
	粘性係数	1.81 × 10 ⁻⁵ kg/m·s
	熱容量	1006 J/kg·K
	熱伝導係数	0.02637 W/m·K
コンクリート	密度	2300 kg/m
	熱容量	840 J/kg·K
	熱伝導係数	1.6 W/m·K
熱伝達係数	換気風により自動設定	

2.3 トンネル条件・火災条件

本検討は、米国の Memorial Tunnel (開通 1953 年、L=853m、馬蹄形断面) の閉鎖後に 1994-95 年に実施された火災実験と同等の条件で予測計算し、計算方法の適用性を確認した。同実験は (半) 横流・縦流・自然換気方式、火皿による火災の出力 10・20・50・100MW などの条件で、合計 98 ケースについて実施されたが、本論文は横流・自然換気方式に限定し、表3に示す典型的な実験ケースを対象に比較検討した。

表3 対象実験ケース

ケース No	換気方式	火災規模 (MW)	入口部風速* (m/s)
1	自然換気	10 (乗用車 2 台相当)	1.1
2		20 (小型貨物車 1 台相当)	-1.5
3	縦流換気	20 (小型貨物車 1 台相当)	-2.0

*南坑口から北坑口への風速は「+」、逆方向を「-」としている。

2.4 メッシュ

計算対象としたトンネルの条件は表4、図1のとおりであり、このトンネル全長に対して計算メッシュを表5のように作成した。

表4 対象トンネルの条件：メモリアルトンネルを対象

項目	データ
トンネル延長	853m
トンネル内空断面積	60.4m ²
断面形状	図1 参照

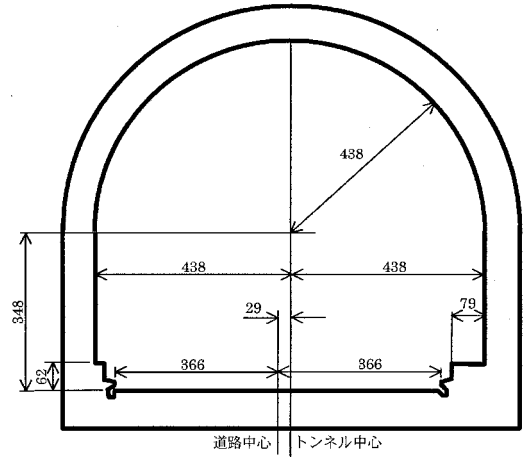


図1 対象トンネルの標準横断面図

表5 メッシュ作成状況

内容	メッシュサイズ
道路軸方向 (x 方向)	0.3~5m 火災発生源近傍を細かくしている。
道路横断方向 (y 方向)	0.2~0.6m
鉛直方向 (z 方向)	0.1~0.5m
総メッシュ数	約 150,000

3. 計算結果

表5に示すケース1からケース3について、風速分布、温度分布を非定常解析として計算し、主要な時間経過毎に計算値と測定値を比較した。結果の一例として、表6に示すケースについての実験値と計算値を図2~9に示す。表示温度選定は実験の測定結果 (華氏) に基づく。

火源となる火皿近傍の温度分布が必ずしも一致していない箇所があるが、これは実験時の温度分布測定点数や配置の問題があるものと考えられる。ケース1の経過時間2分と4分 (図2~5) の結果では、経過時間によって計算結果と実験結果との対応が変化しているが、この原因の一つとして実験時の火災発熱状況と計算時に設定した火災発熱条件の差異が考えられる。ケース2、ケース3については、火点よりも前流側の天井部において、実験結果よりも計算結果の方が逆流する傾向が強く現れている。火点よりも後流側においては、計算結果よりも実験結果の方が天井部から路面付近に低い温度の分布が広がる傾向である。これらは天井部における逆流域の再現性が影響しているものと考えられる。

しかし、全般的には、計算上未知な条件等があるなか初期の検討としては概ね良好な計算結果になっているものと考えている。

表6 結果一覧

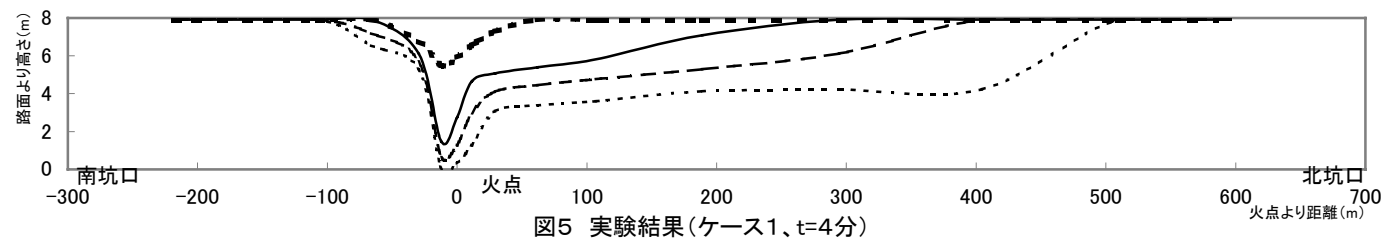
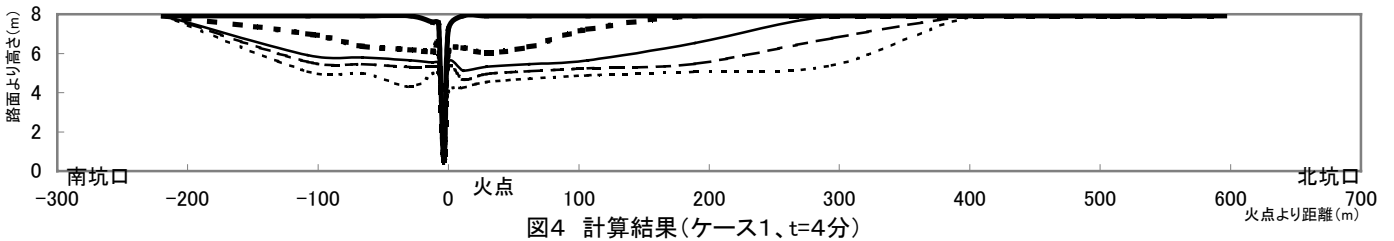
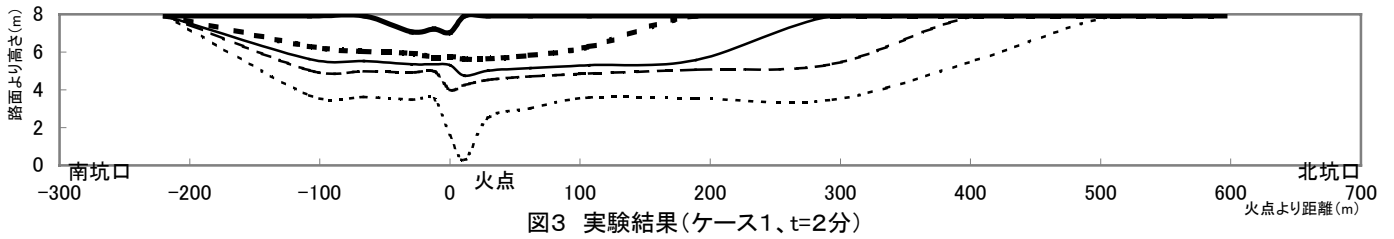
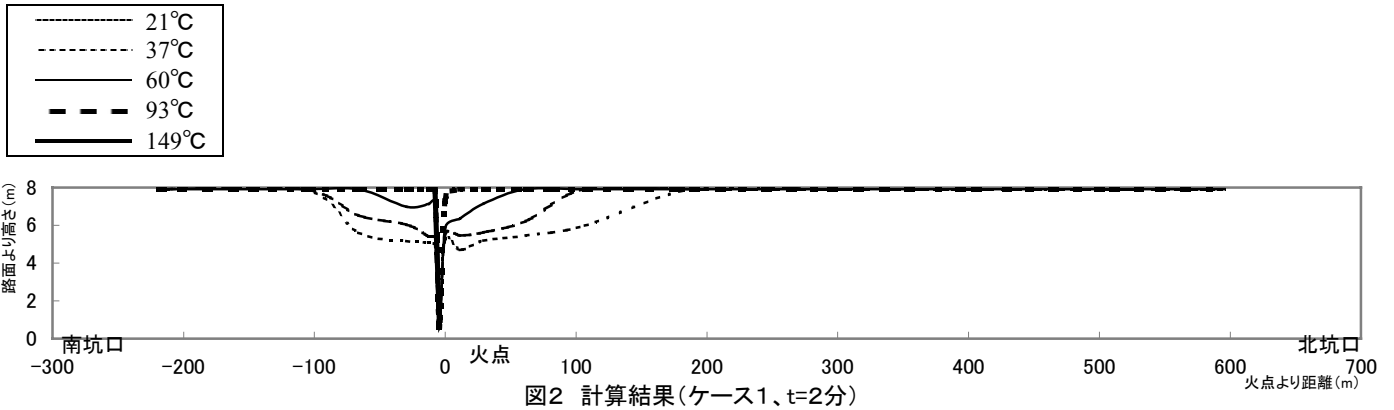
ケース No	経過時間	計算/実験	図
1	2分	計算	図2
		実験	図3
	4分	計算	図4
		実験	図5
2	2分	計算	図6
		実験	図7
3	2分	計算	図8
		実験	図9

4. 結論

Memorial Tunnel の火災実験結果と本検討の計算結果の比較により、計算方法は目的の範囲以内に十分な信頼性をもつと考え、同計算方法を用いるトンネル設計者が行う総合的な評価に基づく防災対策の選定に役立つものと考えられる。今後も、実用性を維持しながら整合性を高めることを目指す。

参考文献

- (1) Mass. Highway Dept. and Fed. Highway Adm. “Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program”, 1995
- (2) Mass. Highway Dept. and Fed. Highway Adm. “Comprehensive Test Report”, 1996



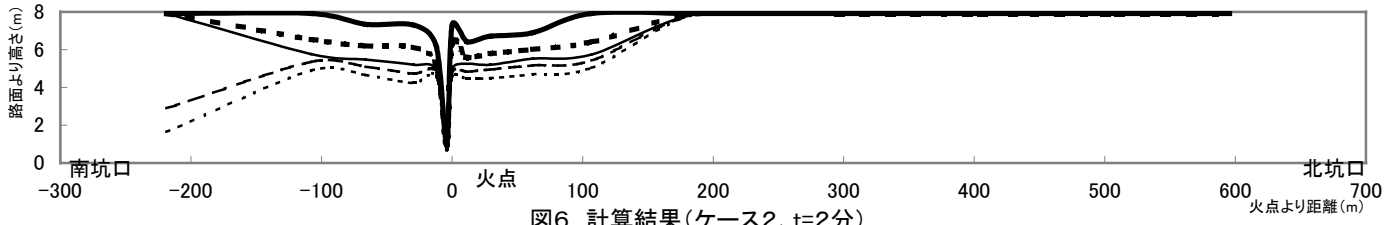
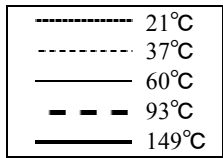


図6 計算結果(ケース2、t=2分)

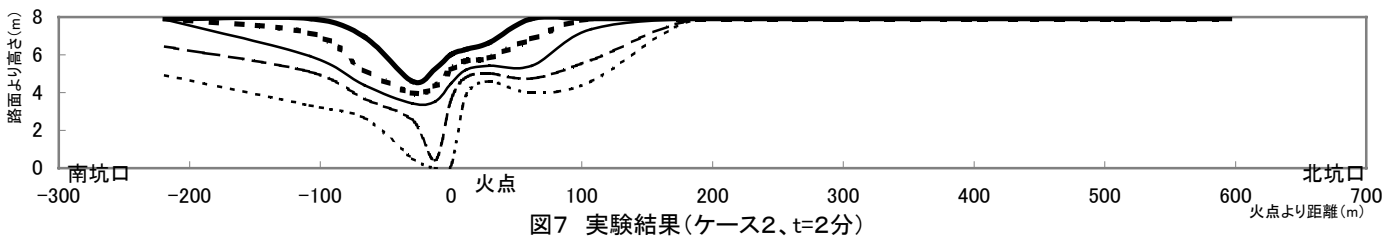


図7 実験結果(ケース2、t=2分)

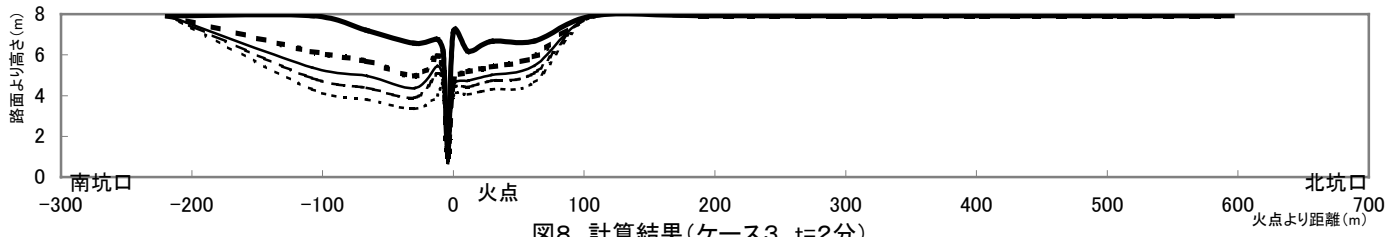


図8 計算結果(ケース3、t=2分)

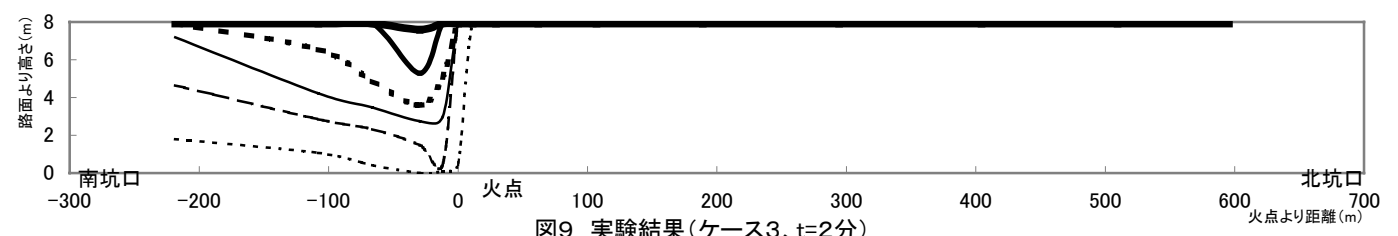


図9 実験結果(ケース3、t=2分)