

シールドトンネルにおける火災時の温度特性に関する 解析検討

A THERMAL ANALYSIS IN THE INCIDENCE OF FIRE FOR THE SHIELD TUNNEL STRUCTURE

吉村敏志¹⁾・足立幸郎²⁾・岡嶋義行³⁾・鈴木直人³⁾

Satoshi YOSHIMURA, Yukio ADACHI, Yoshiyuki OKAJIMA, and Naoto SUZUKI

It becomes very important to investigate the effects of fire on tunnel lining stability to avoid fatal damage. In this paper, two scenario fires followed by the accident of 26,000l tanker in the shield tunnel are considered. As the result of thermal analysis using a three-dimensional finite element method, the maximum temperature nearby tunnel lining is simulated 1026℃(100MW fire),and 1142℃(200MW fire).

Key Words : shield tunnel, fire protection, scenario fire, thermal analysis

1. はじめに

道路トンネルの耐火設計に関する検討が重要な課題となっている。近年、各国で道路トンネル火災事故が発生しており、甚大な被害報告や長期閉鎖を余儀なくされた事例もあり、社会的・経済的な影響は大きいと考えられる。近年の国内外の主な道路トンネル火災事故事例を表-1に示す。1999年のMont Blanc(モンブラン)トンネル(フランス・イタリア)、同年のTauern(タウエルン)トンネル(オーストリア)、2001年Gotthard(ゴットハルト)トンネル(スイス)の火災ではトンネル内の温度が1,000℃以上に達したと報告されており、覆工コンクリートの剥落・損傷が激しく、Tauernトンネルでは約3ヶ月、Mont Blancトンネルでは3年以上も閉鎖され、トンネル補修費に各々およそ8.5億円、217億円を要したと報告されている。

表-1 主な道路トンネル火災事故事例

事故発生年	トンネル名	場所	トンネル延長(m)	事故車両・燃焼材料	被害車両、人の被害	トンネル被害	消火までの時間
1949	Holland	アメリカ	2,550	11トン二酸化炭素積載トラック1台	トラック10台、乗用車13台、負傷者56名	200m区間の損傷	4時間
1975	Guadarrama	スペイン	3,345	松やに荷積載のトラック1台	トラック1台	210m区間の損傷	2時間45分
1979	日本坂	日本	2,045	トラック4台、乗用車2台	トラック127台、乗用車46台、死者7名、負傷者2名	1122区間で天井板の落下・覆工コンクリートの剥離	7日
1982	Cardcott	アメリカ	1,028	33,000リットルのガソリン積載トラック1台、バス1台、乗用車1台	トラック3台、バス1台、乗用車4台、死者7名、負傷者2名	天井・壁・路面・他諸設備580m区間で損傷	2時間40分
1993	Serra Ripoll	イタリア	442	紙類積載トラック1台、乗用車1台	トラック4台、乗用車11台、死者4名、負傷者4名	5mの損傷	2時間30分
1993	Hoden	ノルウェー	1,283	バイク1台、乗用車2台	バイク1台、乗用車2台、負傷者5名	111m区間の断熱材破損	1時間
1994	Huguenot	南アフリカ	3,914	乗客45名のバス1台	バス1台、死者1名、負傷者28名	-	1時間
1994	Gotthard	スイス	16,918	トラック1台、バス3台と箱で包囲された自転車積載のトラック1台	トラック1台、トラック1台	天井・舗装・諸設備50m区間で損傷、2.5日間のトンネル閉鎖	28時間
1995	Pfander	オーストリア	6,719	トラック1台、バス1台、乗用車1台	トラック1台、バス1台、乗用車1台、死者3名、負傷者4名	天井・諸設備の損傷、2.5日間のトンネル閉鎖	1時間
1995	Isola delle Femine	イタリア	148	液化ガス積載のタンクローリー1台、小型バス1台	タンクローリー1台、バス1台、乗用車18台、死者5名、負傷者20名	トンネル5mの損傷	-
1999	Mont Blanc	フランス/イタリア	11,600	20トンの「ガソリン」と小麦粉積載のトラック1台	トラック23台、乗用車11台、救急車2台、死者39名	900m区間で深刻な損傷、最大70cmのコンクリート剥離、トンネル閉鎖3年以上	50時間以上
1999	Tauern	オーストリア	6,041	塗料を積載したトラック1台	トラック16台、乗用車24台、死者12名、負傷者59名	1500m区間で損傷、100m区間では30cmのコンクリート剥離、トンネル閉鎖約3ヶ月	17時間
2000	永越	日本	2,370	塩化ビニル製タンク等積載トラック1台	トラック1台、負傷者19名	灰白色化4m、亀甲状ひび割れ7・8割42m	1時間40分
2001	Gotthard	スイス	16,918	バイク積載のトラック1台	トラック他40台、死者11名、負傷者4名	天井200m区間で損傷	37時間

- 1) 正会員 修士(工学) 阪神高速道路公団大阪管理部
- 2) 正会員 工学博士 阪神高速道路公団工務部
- 3) 正会員 修士(工学) (株)建設技術研究所大阪支社道路交通部

このような背景のもと、各国、各機関、特に欧州ではトンネルの耐火に関する検討がさかんに行われている。耐火設計を行う際に用いられている火災時間温度曲線には、例えば RABT 曲線（発火後 5 分で 1,200℃に達し、60 分間継続後 110 分間除冷）（ドイツ）、RWS 曲線（オランダ）、炭化水素燃焼

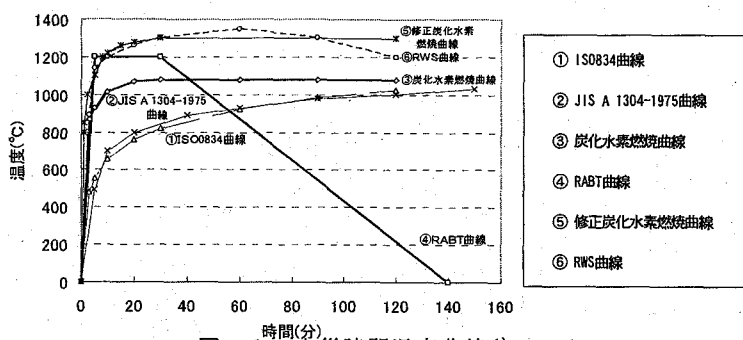


図-1 火災時間温度曲線¹⁾

(Hydrocarbon) 曲線 (Eurocode1) 等がある。これらを図-1 に示す。このうち、道路トンネル火災を想定したものには RABT 曲線、RWS 曲線があり、建築火災を想定したものには ISO834 曲線（以下「ISO 曲線」という）や JIS A 1304-1975 曲線（以下「JIS 曲線」という）がある。また、石油化学プラントや沿岸工業施設等の耐火設計に用いられる炭化水素燃焼曲線や修正炭化水素燃焼(Modified Hydrocarbon)曲線があり、それぞれの火災時間温度曲線が設定されている。近年、耐火設計がなされた海外の主な道路トンネルにおいて、ドイツの Elb(エルベ)トンネル（シールドトンネル）では RABT 曲線(90 分火災継続)が採用されており、オランダの Westerschelde(ウェスターシェルド)トンネル（シールドトンネル）やデンマークとスウェーデンを結ぶ Oresund(オレスンド)トンネル（沈埋トンネル）では RWS 曲線が耐火設計時の火災時間温度曲線として採用されている¹⁾。一方、国内において、大阪咲洲トンネルや神戸港島トンネルでは JIS 曲線（1 時間火災継続）、東京湾横断道路トンネルでは JIS 曲線（4 時間火災継続）、また、東京港臨海道路トンネルや東京港第二航路海底トンネルでは RABT 曲線が耐火設計時の火災時間温度曲線として採用され、新潟みなとトンネルでは炭化水素燃焼曲線が準用されている¹⁾。このうち、大野ら²⁾は東京港臨海道路トンネルおよび第二航路海底トンネルの耐火設計の紹介を行い、RABT 曲線の火災が作用した場合における耐火被覆材の検討を熱伝導解析により実施している。田嶋ら³⁾はコスト削減の観点から二次覆工を省略した場合を想定し、一次覆工を構成する RC セグメントに、RABT 曲線による火災が作用した場合における耐火被覆材の検討を FEM 熱伝導解析により行い、実験結果との比較を行っている。また、松尾ら⁴⁾は沈埋トンネルの鋼コンクリート合成構造沈埋函に、RABT 曲線に類似な火災（発火後 4 分で 1,000℃に達し 30 分継続後 80 分間除冷）が作用した場合における耐火材の検討を熱伝導解析により実施し、実験結果との比較を行っている。このように、耐火被覆材の検討の際に RABT 曲線や RABT 準拠の火災時間温度曲線が設定されているものの、その根拠はあまり明らかでない。さらに、トンネルの構造や断面形状・寸法によって火災時の温度分布特性が異なると考えられるため、各々のトンネルの特徴に応じた火災性状の設定が必要となるが、検討事例が少ないのが現状である。

そこで本稿では、まず、トンネル火災が発生した場合のトンネル内の温度分布を求めるための解析手法を確立することを目的として、別途行われた実大トンネル火災実験結果との比較を行い、解析手法の妥当性の検討を行った。次に、本手法を用いて、道路トンネルに大規模火災が生じた場合を想定した解析を行い、どのような火災性状がトンネル構造体に作用するかについて基礎的検討を行った結果を報告するものである。

2. 三次元 FEM 熱流体解析の概要

トンネル火災が発生した場合のトンネル内の温度分布を求めるために、三次元 FEM 熱流体解析を行った。熱移動を含めた流体解析は CFD(Computational Fluid Dynamics: 計算流体力学)とよばれ、機械工学や建築工学、環境工学の分野では研究開発・実用化が行われ、さまざまな手法が提案されている⁵⁾。土木工学においても研究がなされているものの、トンネル火災を想定した熱流体解析はほとんど行われておらず、近年、

各機関において検討がされ始めている。熱流体解析では空気および熱の流れについて取扱う。熱の流れには、対流・拡散・放射（輻射）、の三つの現象があり、今回はこれらすべての現象を取扱った。トンネル内の空気と熱の移動の概念図を図-2に示す。空気は圧縮性粘性流体とし、熱の流れはエネルギー保存式と放射に関する式で、温度差に伴う密度変化の影響はブジネスク近似により浮力項として表現した。以下に基礎方程式を示す。

a) 質量保存式

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

b) 運動量保存式

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial(\mu u_j)}{\partial x_i} \right) + \rho f_i \quad (2)$$

c) エネルギー保存式（熱保存式）

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho C_p u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + H \quad (3)$$

d) 熱放射

$$q = q_c + q_r \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^N \left(\frac{\delta_{ij}}{e_j} - F_{ij} \frac{1-e_j}{e_j} \right) q_r^j = \sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - F_{ij}) \sigma T_j^4 \quad (5)$$

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j dA_i dA_j}{\pi r^2} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (7)$$

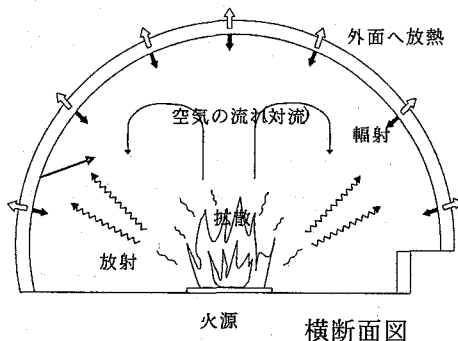


図-2 トンネル内の熱の移動概念図

ここに、 u_i : i 方向の流速成分($i=1,2,3$ のとき $u_i=u,v,w$)、 t :時間、 x_i : i 方向の座標成分($i=1,2,3$ のとき $x_i=x,y,z$)、 ρ :空気の密度、 p :空気の圧力、 μ :空気の粘性係数、 f_i : i 方向の体積力、 C_p :空気の比熱、 T :空気の温度、 κ :空気の熱伝導率、 H :温度外力、 q :壁面における熱流束、 q_c :対流による熱流束、 q_r :熱放射による熱流束、 δ_{ij} :クロネッカーデルタ、 e_j :材料の放射率、 F_{ij} :壁面間の形態係数、 σ :ボルツマン定数、である。ここで、放射率 e_j は機械工学便覧を参考にコンクリート 0.75、耐火パネル 0.85 とした。なお、 e_j は材料の表面の温度や状態により大きく変化するため値を様々に変化させて解析を実施し、値の違いがトンネル内温度にあまり敏感でないことを別途確認している。

次に、(5)式は壁面間要素での熱放射による熱収支を示した式であり、領域を有限な要素で離散化する FEM では、 F_{ij} は(6)式のように記述することができる。ここで A_i, A_j は要素の面積、 β_i, β_j はそれぞれの面の法線が 2 面間を結ぶ直線となす角度、 r は要素面間の距離である。さらに、トンネル内のような閉空間系での F_{ij} は(7)式のように総和が 1 となる。また、乱流の取扱いについては、直接的に解析する手法 (Dynamic Numerical Simulation) や LES (Large Eddy Simulation) モデル等があるが、今回は現在最もよく用いられている手法の一つであり汎用性の高い時間平均化モデルである $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた。また、燃焼現象および爆裂現象については考慮しないこととした。

3. 実大トンネル火災実験結果との比較による本解析手法の妥当性の検討

(1) 実大トンネル火災実験概要

本解析手法の妥当性を検証するために、過去に実施された実大トンネル火災実験を解析計算で再現し、結

果の比較を行った。今回は、実験内容に関して詳しく報告がなされている昭和 55～56 年に建設省土木研究所道路部トンネル研究室で行われた実大トンネル火災実験⁶⁾を対象とした。本実験は、さまざまな規模の火災によるトンネル内の温度・一酸化炭素や NO_x の分布状況、水噴霧の効果の確認を目的として、実験条件である燃焼物（ガソリン火皿および車両）・ガソリン量・換気風速・水噴霧条件を変化させて計 17 ケース行われた。このうち、今回は、ガソリン火皿を火源とし、換気風速 2m/s、水噴霧を用いないケースを対象とした。

（２）解析条件およびモデル

解析モデルを図-3、解析条件を表-2 にそれぞれ示す。解析区間は実験モデルを再現し、トンネル断面の上半の半径 $R=4.9\text{m}$ 、幅 9.8m、長さ 385m、覆工コンクリート厚は 0.3m である。また、火源に関しては、実験条件に合わせ 2 m² の長方形として風上側（南坑口側）から 110m、高さ 0.38m 位置に配置し、単位時間面積あたりの発熱量一定の条件を与えた。ガソリンの燃焼速度は、土木研究所で検討された結果を参考⁶⁾ に $6.7\times 10^{-5}\text{m/s}$ とした。さらに、空気 の物性に関しては機械工学便覧等を参考に設定した。壁面の境界条件は、空気とコンクリート面の熱伝達係数については乱流解析よりヌセルト数を算出し設定し、覆工コンクリート内部はコンクリートの熱伝導率 1.4W/mK を与え、外面は温度一定(27°C)とした。換気風速は実験条件に合わせ 2.0m/s の一様流を風上側の境界より与えた。

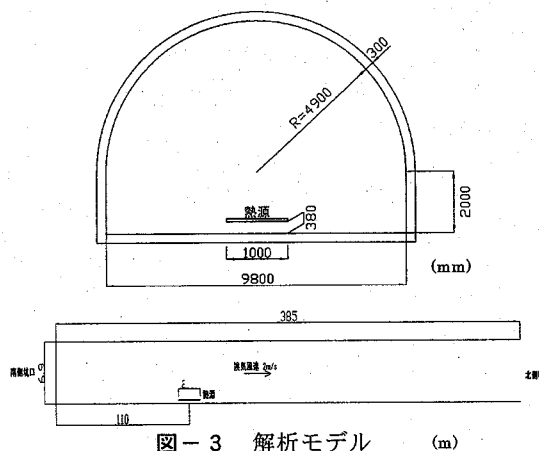


図-3 解析モデル (m)

表-2 解析条件

火災出力	ガソリン量	燃焼面積	換気風速
4.5MW	144kg	2.0m ²	2.0m/s

（３）解析結果と考察

本解析手法を用いて非定常計算を行った結果について述べる。実験結果では着火後数分で不完全燃焼が生じているとの報告がなされている。一方、本解析手法では燃焼現象を考慮しておらず理想状態での燃焼であるため、不完全燃焼を解析では再現できない。したがって、解析の妥当性を評価するには、着火後 3～4 分における実験結果と解析結果とを比較することが妥当と考えられる。まず、着火 3 分後の火源より風下 5m における横断面温度分布の実験値および解析値を図-4 に示す。図より、最高温度に関しては実験・解析とも

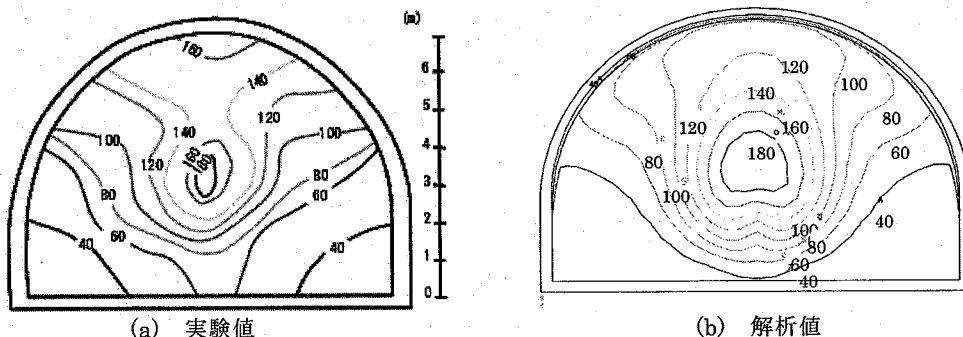
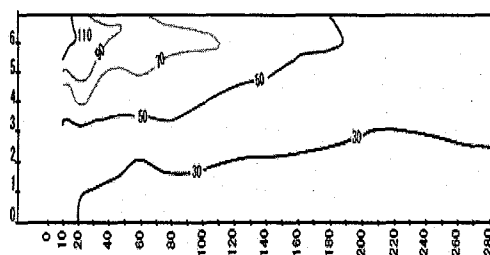
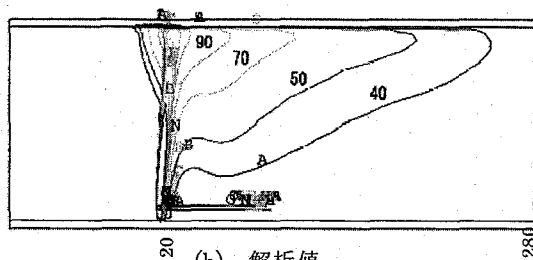


図-4 横断面温度分布(着火 3 分後)

180℃程度とよく一致していることがわかる。天井部付近での温度分布の違いについては、今回火災を考慮していないため、実験では火炎が天井部付近まで達し高温域が広がっている状況を解析では再現できなかった



(a) 実験値 熱源からの距離(m)



(b) 解析値

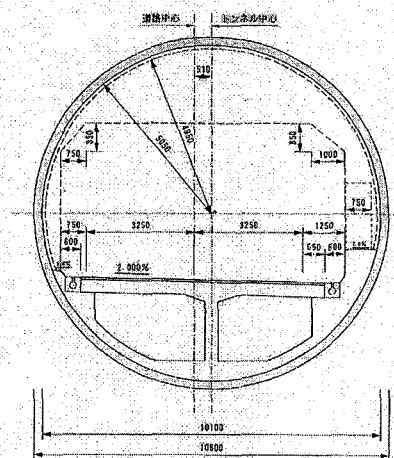
図-5 縦断面温度分布(着火3分後)

ためと考えられる。次に、着火3分後におけるトンネル縦断方向の温度分布を図-5に示す。解析値と実験値の温度分布状況は概ね再現できている。以上より、本解析により実験をシミュレートした結果、トンネル内の温度分布を概ね再現することができ、本解析手法の妥当性を確認することができた。したがって、本手法を用いて道路トンネル火災時の温度分布特性の検討を行うこととした。

4. 道路トンネルにおける三次元 FEM 熱流体解析

(1) 検討対象および火災規模の想定

道路トンネルとして、二次覆工を省略し耐火パネルをトンネル壁面全面に設置した実大規模のシールドトンネル($\phi=10.6\text{m}$)の断面を例にとり検討対象とした。図-6に横断面図を示す。次に、火災規模の想定に関して、現状では前述した図-1に示すような欧州および各機関の既存の火災温度時間曲線により耐火検討が行われている。しかしながらトンネル内の温度分布状態は、個々のトンネルの構造や断面形状、燃焼物の種類や量、換気風速等、様々な要因により変化する。そこで、既存の火災時間温度曲線や実験等を参考に以下のように二つのシナリオを想定し、火災規模と火災出力を決定した。まず、火災規模に関しては、危険車両の自由通行という条件を想定し、国内最大級のタンクローリー(積載物: ガソリン 26,000 ㍓)の単独事故による火災(炭化水素火災)とした。火災出力に関しては、EUREKA 計画を参考に設定した。EUREKA 計画とは、EU が 1990 年にノルウェーの廃坑で行った実大トンネル火災実験であり、その結果、表-3に示すような車種別の火災出力およびトンネル内温度が得られている。乗用車火災では 5MW 程度、可燃物積載(木製家具)の大型貨物車では 100MW 程度に換算されると報告されている。今回想定した火災は可燃物積載の大型トラックに相当すると考えられるため、最大値をとって 100MW とした。また、オランダではガソリン 45,000 ㍓で 300MW の出力での火災を想定しているが、26,000 ㍓からすれば 300MW は過大であると判断される。しかしながら、大規模火災を考えた場合、200MW 程度を想定しておくことは現実性があると思われる。以上により、火災出力は、100MW 及び 200MW の 2 つのシナリオ火災を想定した。



(2) 解析条件の設定

解析条件を表-4、境界条件を表-5、解析モデルを図-7 にそれぞれ示す。燃焼時間に関しては、ガソリン 26,000 ㍓がもつ総発熱量が 100MW(200MW)の火災出力で燃焼することから算出した。また、燃焼面積は、単位時間当たりの発熱量が〔燃焼面積×ガソリンの燃焼速度×ガソリンの発熱量〕により求まることから算出した。ここで、ガソリンの燃焼速度については、前出と同様に取扱った。次に、境界条件に関して、風上側境界(トンネル入口側)は換気風速 2.0m/s、24℃の一樣流を与え、風下側境界(トンネル出口側)については表-5 のとおりとした。路面は流速 0m/s、断熱境界とし、壁面は流速 0m/s、温度に関しては空気とパネル間、パネルとセグメントとの間の熱伝達を考慮した熱伝達境界とし、セグメント外面は温度一定(24℃)とした。乱流量に関しても表-5 のとおりとした。火源については、ガソリンが路面に完全漏洩することを想定し、風上側(トンネル入口)から 50m 位置、車道中心位置路面高さに火源を設定し、単位時間面積あたりの発熱量一定の条件を与えた。なお、燃焼現象および爆裂現象については考慮していない。

表-4 解析条件

	火災出力	ガソリン量	燃焼面積	換気風速
ケース1	100MW	26,000㍓	43.8m ²	2.0m/s(24℃)
ケース2	200MW	26,000㍓	87.7m ²	2.0m/s(24℃)

解析モデル: 3次元CFD
節点数: 160万節点
乱流モデル: $k-\epsilon$ モデル

表-5 境界条件

	風上側境界	壁面境界	風下側境界
流速	$u=u_0=2\text{m/s}$	$u, v, w = 0$	$\partial u / \partial n_t =$ $\partial u / \partial n_b =$
温度	$T=T_0=24^\circ\text{C}$	熱伝達境界	$\partial T / \partial n_t =$ $\partial T / \partial n_b =$
圧力	-	-	0
k	$k = k_0 =$ $1/2 (0.1 \times u_0)^2$	$k = 0$	$\partial k / \partial n_t =$ $\partial k / \partial n_b =$
ϵ	$\epsilon_0 =$ $k_0^{(3/2)} / 0.1$	$\partial \epsilon / \partial n = 0$	$\partial \epsilon / \partial n_t =$ $\partial \epsilon / \partial n_b =$

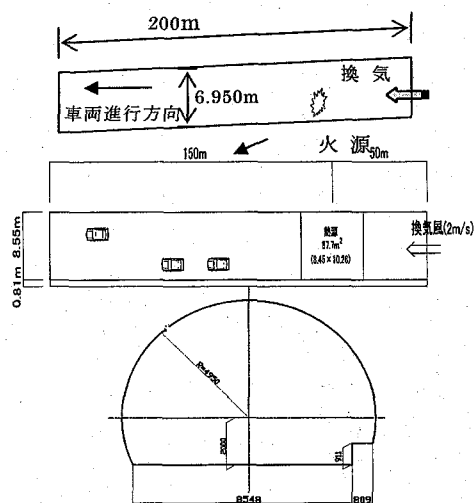


図-7 解析モデル

(3) 解析結果と考察

本検討では、トンネル内の定常状態における温度分布の解析を行った。本来であれば、温度分布の経時変化を知るために非定常計算を行うべきであるが、膨大な計算時間を要するため行わなかった。なお、約 60 秒程度の非定常計算ではほぼ定常状態になることを別途確認している。以下では定常計算結果を示すこととする。火源部における流速ベクトルを図-8-1(100MW)、図-8-2(200MW)にそれぞれ示す。

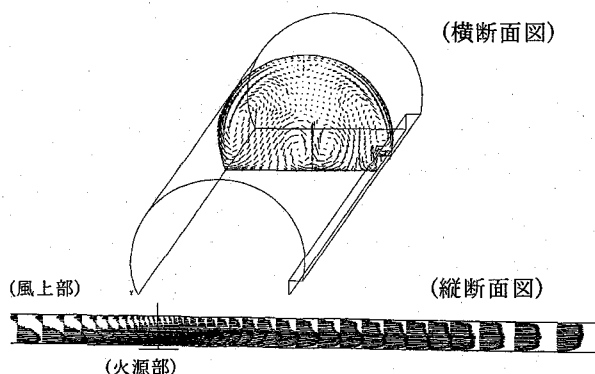


図-8-1 流速ベクトル(100MW)

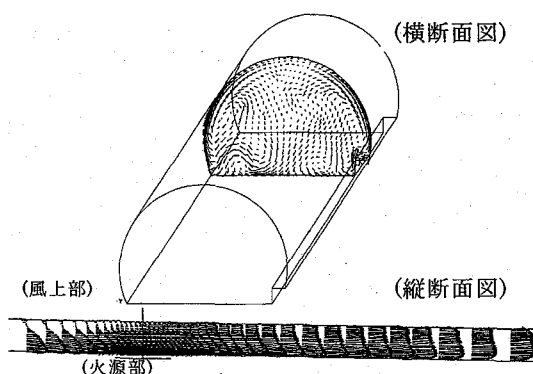


図-8-2 流速ベクトル(200MW)

図より、火源直上で熱対流（上昇する流れ）が顕著に起こっており、トンネル壁面に沿って下降する流れが生じている。また、縦断方向においては、風上側天井部付近で熱流の影響により逆流が生じていることがわかる。

次に、火源部における温度分布図を図-9-1(100MW)、図-9-2(200MW)にそれぞれ示す。これより 100MW にくらべ 200MW の方が、天井部の高温域がより大きく広がっている。

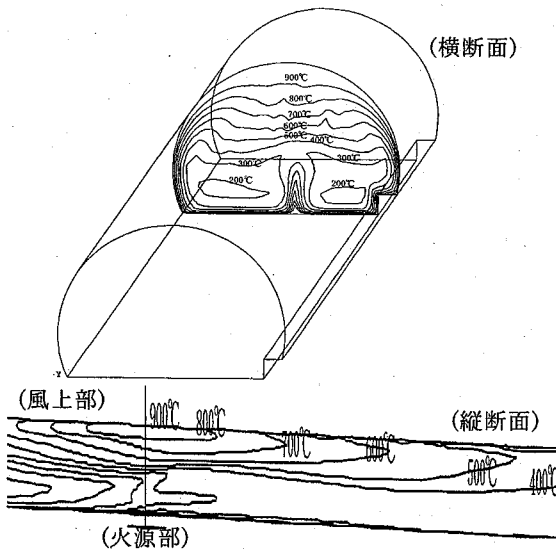


図-9-1 温度分布(100MW)

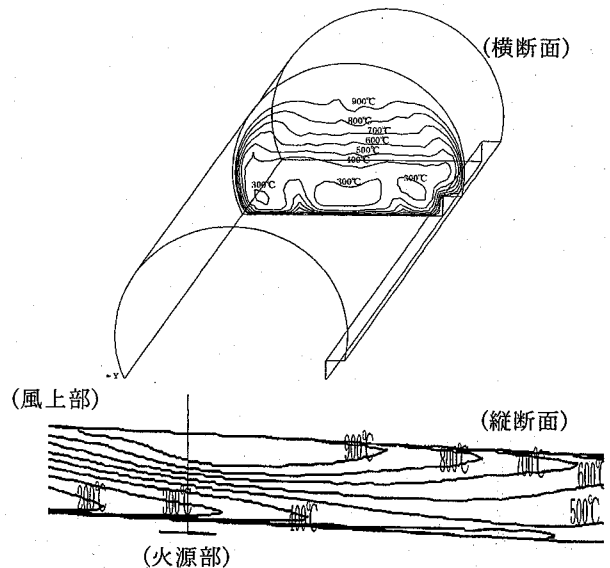


図-9-2 温度分布(200MW)

次に、火源部の横断面温度図を図-10-1(100MW)、図-10-2(200MW)に示す。最高温度は火源部天端付近の壁面直近の空気温度でそれぞれ 1026℃、1142℃であり、図よりトンネル壁面直近の空気温度は 1,000℃以上となっていることがわかる。また、換気風速とガソリン燃焼速度との関係より、100MW では 145 分、200MW では 73 分火災が継続する可能性がある。このことから、トンネル壁面直近の空気には、100MW の場合 1,000℃程度の温度がおよそ 145 分作用し、200MW の場合 1,100℃程度の温度がおよそ 73 分作用することになる。

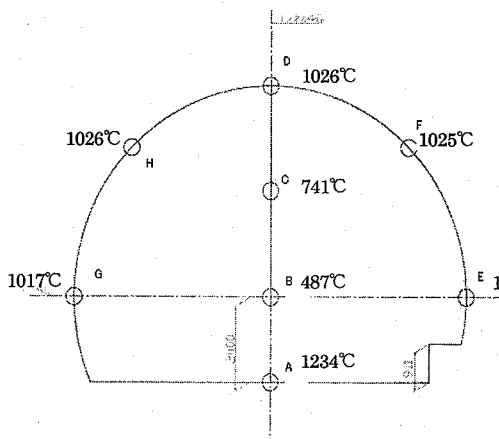


図-10-1 横断面温度図(100MW)

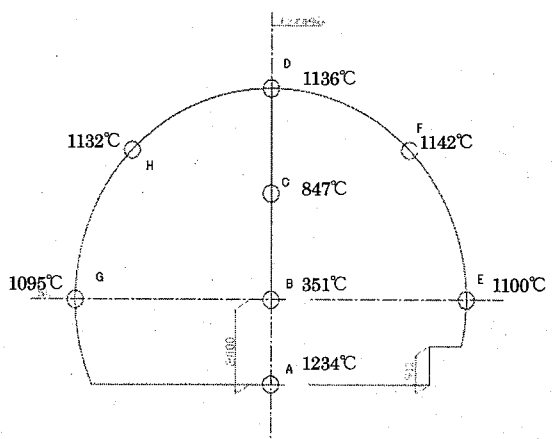


図-10-2 横断面温度図(200MW)

次に、トンネル中心位置での縦断方向温度図を図-11-1(100MW)、図-11-2(200MW)に示す。図より、縦断方向において、火源位置から風下側方向にかけて温度はなだらかに下がっていくものの、路面(A点)を除けば最低でも200℃程度以上の温度分布となる。

(A～D点は図10-1参照)

(A～D点は図10-2参照)

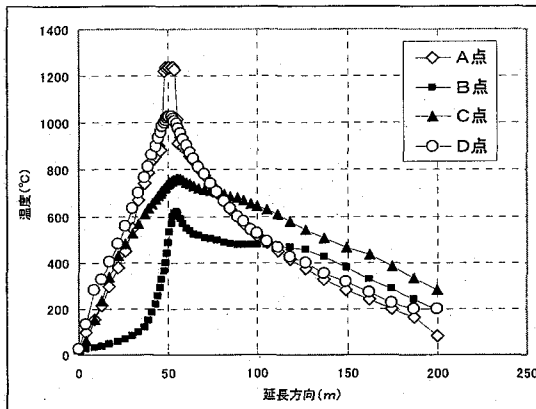


図-11-1 縦断方向温度図(100MW)

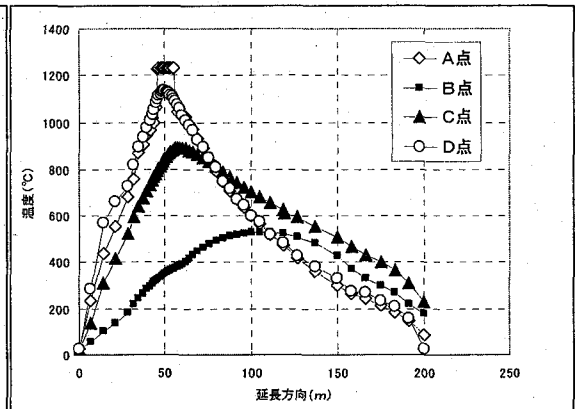


図-11-2 縦断方向温度図(200MW)

5. おわりに

火災時におけるトンネル内の温度分布特性を把握するために三次元 FEM 熱流体解析を実施した。まず、本解析手法の妥当性の確認を行ったところ、本解析では燃焼現象を取扱っていないため火炎による影響等の再現はできなかったものの、実験レベルの火災規模での温度分布状況を概ね再現できることがわかった。次に、本解析手法を用いて、実大規模の道路トンネル断面を対象としてタンクローリーより出火した場合を想定したトンネル内の火災性状に関する検討を行った。その結果、火災出力を 100MW とした場合のトンネル壁面直近の空気の高温度は 1,026℃、200MW とした場合 1,142℃となった。タンクローリーの積載可能なガソリン量から換算した場合、100MW の火災は 145 分、200MW の火災は 73 分継続する可能性がある。これらのことから、欧州で提案されている RABT 曲線は上述したタンクローリーが 200MW 出力の火災を起こした場合、炭化水素燃焼曲線は同じく 100MW 出力の火災を起こした場合に類似することが判明した。この検討を基礎として今後トンネル構造体に考慮すべき火災性状に関する検討を進め、耐火材についての検討を実施していく予定である。

参考文献

- 1) (社) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書（2002）
- 2) 大野皓一郎他（2001）：沈埋トンネルの耐火設計と施工～東京港第二航路海底トンネル トンネルと地下
- 3) 田嶋仁志他（2002）：RC セグメントの耐火における熱伝導解析の検討 第 5 7 回土木学会年次学術講演会 論文集
- 4) 松尾幸久他（2001）：道路トンネル用耐火板に関する研究 トンネルと地下
- 5) 村上周三（2000）：CFD による建築・都市の環境設計工学 東京大学出版会
- 6) 水谷敏則他（1984）：道路トンネル内火災実験 土木技術資料 建設省土木研究所・日本道路公団
- 7) A.Haack（1998）：Fire Protection in Traffic Tunnels：General Aspects and Results of the EUREKA Project Tunneling and Underground Space Technology Vol.13 No.4