

IV-80

道路トンネル内火災の数値解析

建設省土木研究所 正会員○広瀬哲司

〃

正会員 猪熊 明

1. まえがき

道路トンネル内において火災等の事故が発生した場合は被害が重大なものとなる可能性がある。この被害を最小限にとどめ、人の避難環境を確保するためには、火災時に発生する大量の煙のコントロールが最も重要である。このため、熱気流に伴う煙の流れを十分な精度で把握し非常用などの付属施設のあり方についての検討が必要である。

本報告は、火災時の熱気流の流動特性を把握するための有限要素法による数値解析プログラムの開発の概要を報告するものである。

2. 研究方法

2.1 基礎方程式

基礎方程式は、考えられる流れ場での風速が音速と比較して十分小さいので非圧縮性流体と仮定し、また、気流に対する温度の効果を浮力の影響のみを考慮し、トンネル火災による流れ及び熱気流を支配する方程式として右に示す式を用いた。

解析は、乱流モデルを導入し流速をその平均値と変動量に分け、時間平均操作を行い、 $k-\varepsilon$ の2方程式モデルを用い有限要素法で解く方法で計算を行った。また、 k 、 ε は u 、 v 、 w の変動値で表す物理量であり、乱流動粘性係数 ν_t は以下の式で表す。

$$\nu_t = C_D \frac{k^2}{\varepsilon}$$

但し、 C_D は定数

計算条件を表-1に示す。境界条件を表-2に示す。解析対象として実大トンネルでの火災実験データから一定の発煙量が得られる火皿火災の実験データをもとに選定し解析ケースとした。風速、圧力、温度、 k 、および ε の初期条件はそれぞれ流入境界がトンネル内全域で同じとした。

3. 数値解析結果

3.1 風速ベクトル解析結果

トンネル中心軸の鉛直断面の風速ベクトルを図-1に示す。CASE 1で

基礎方程式

連続式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

エネルギー方程式

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \phi + Q$$

状態方程式

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta (T - T_0))$$

ここに、

t : 時間(s)	ν : 動粘性係数(μ/ρ)(m^2/s)
x, y, z : デカルト座標(m)	T : 温度($^{\circ}K$)
ρ : 密度(kg/m^3)	T_0 : 基準温度($^{\circ}C$)= $24^{\circ}C$
ρ_0 : 基準密度(kg/m^3)= 1.205	κ : 熱伝導率($W/m^{\circ}K$)
u, v, w : x, y, z 方向の流速(m/s)	Q : 外部から流入の単位体積当りの熱量($KJ/m^3 \cdot s$)
P : 圧力(kgf/m^2)	β : 体積圧縮係数($1/^{\circ}K$)
X, Y, Z : 加速度表示の外力(m/s^2)	μ : 分子粘性係数($kg \cdot s/m^2$)
$X=0, Y=0, Z=-g$	C_p : 定圧比熱($KJ/kg^{\circ}K$)
ϕ : 粘性による発熱量($kg/m^2 \cdot s$) ≈ 0	ε : 乱れによるエネルギー散逸量
k : 乱流エネルギー	

表-1 計算条件

CASE	換気風速	火皿面積	発熱量(燃焼速度)	初期値および境界値					計算時間
				風速	圧力	温度	$k(m^2/s^2)$	$\varepsilon(m^4/s^3)$	
1	1.0m/s	2m ²	241KJ/s ($5.3 \times 10^{-4}m^3/s$)	1.0m/s	0.0kg/m ²	24 $^{\circ}C$	1.25×10^{-8}	1.41×10^{-8}	60sec
2	0.8m/s	4m ²	515KJ/s ($4.8 \times 10^{-4}m^3/s$)	0.801m/s	0.0kg/m ²	24 $^{\circ}C$	5.00×10^{-7}	2.25×10^{-10}	60sec
3	0.65m/s	4m ²	631KJ/s ($4.9 \times 10^{-4}m^3/s$)	0.65m/s	0.0kg/m ²	24 $^{\circ}C$	5.29×10^{-8}	2.51×10^{-8}	60sec
4	2.0m/s	6m ²	1294KJ/s ($6.7 \times 10^{-4}m^3/s$)	2.0m/s	0.0kg/m ²	24 $^{\circ}C$	5.00×10^{-8}	2.25×10^{-8}	60sec

表-2 境界条件

	境界	境界条件	境界	境界条件
風速	上流境界	u_0	上流境界	$k = k_0 \quad k_0 = 1/2 (0.05 \times u_0)^2$
	壁面境界	$u, v, w = 0$	壁面境界	$k = 0 \quad u_0$: 換気風速
	下流境界	$\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial u}{\partial n_-}$	下流境界	$\frac{\partial k}{\partial n} = \frac{\partial k}{\partial n_-}$
温度	上流境界	$T_0 = 24^{\circ}C$	上流境界	$\varepsilon = \varepsilon_0 \quad \varepsilon_0 = C_D \cdot k_0^2 / 0.01$
	壁面境界	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	壁面境界	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0 \quad C_D$ は定数
	下流境界	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	下流境界	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial n_-}$
圧力	下流境界	$P = 0.0kg/s^2$		

は計算初期で上昇流が発生し、徐々にこの流れが換気風に運ばれている様子が分かる。さらに、時間が経過すると天端付近から熱気流は流出し、地面付近から外気が流入すると思われる。火源より風上側では、換気風におさえられあまり延びていない。坑内換気風が0 m/sの場合は、ほぼ左右対象に風速ベクトルが分布した。実際の流れは、火源付近で鋭く立ち上がり、天端に沿って流れ下流側の渦も火災源に近い所に中心を持つと考えられるが、実験値では少し天端付近の風速が大きくなる傾向にあった。

3. 2 温度分布解析結果

温度分布図を図-2に示す。実大実験温度分布図を図3、4に示す。温度上昇は火炎源で最も大きく、鉛直方向上向きに熱が移動している。上昇した熱は換気風によって運ばれ広がっていく。その運ばれる速度は地表面付近より天端付近の方が大きい。火源より風上側では、温度上昇域が換気風により抑えられているのが分かる。温度分布を比較すると実験値と比較して計算値の方が鉛直方向の拡散が大きく、地面近傍では、実験値より計算値の方が上昇し、逆に火源上部の天端付近では実験値の方が計算値と比較して温度が上昇する傾向にあった。

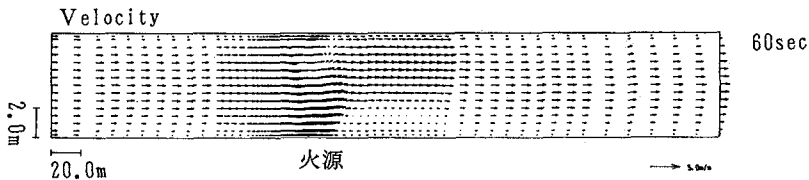


図-1 風速ベクトル (CASE1)

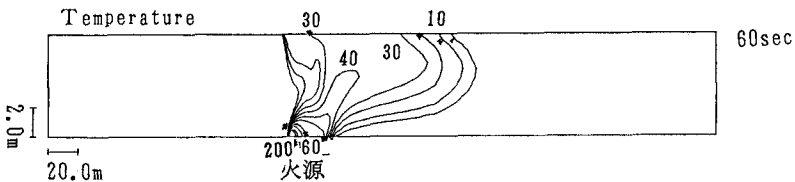


図-2 温度分布図 (CASE1)

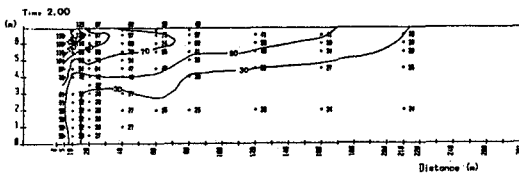


図-3 実大実験温度分布図 (CASE1)

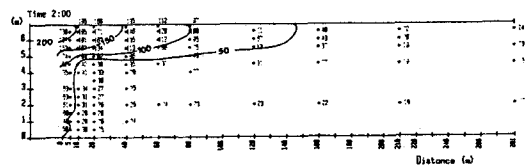


図-4 実大実験温度分布図 (CASE2)

4. あとがき

実大トンネル火災実験は、多くの労力や時間がかかるため設定条件の種類など数多くのケース結果を得ることは困難である。しかし、プログラムを作成しシミュレートを行うことが出来れば多くのケース結果を得ることが出来る。今回開発したプログラムによって火災時の気流・熱の流れの定性的な解が得られることが分かった。今後はさらに解析精度の向上等を図り、また勾配等を考慮した解析が出来るような機能を追加していきたい。

参考文献

- 1) 水谷敏則、猪熊明「3次元有限要素法による流れの数値解析」土木研究所資料第1719号
- 2) 水谷敏則、堀内浩三郎「トンネル内火災実験報告書」土木研究所資料第1876号