

## 管路網解析のためのトンネル要素モデルによる 地下空間火災性状予測の一考察

A study to predict fire property in underground spaces  
using a tunnel element model for a circuitry network analysis

今関 修<sup>1</sup>・栗岡 均<sup>2</sup>・天野 玲子<sup>3</sup>，岡 泰資<sup>4</sup>

Osamu IMAZEKI・Hitoshi KURIOKA・Reiko AMANO・Yasushi OKA

In this paper, we pointed out problems in the application of a zone model to analyses in a tunnel space. In order to understand its difference with the zone model, we proposed a new tunnel analysis model and carried out case studies using the model.

In addition to these problems, air resistance of a circuitry becomes a problem when a circuitry network analysis method is applied to a tunnel-shaped air space. It was reported in a field of a mine that when a fire occurred in the space of the gallery, volumes of ventilation increased. As a result, frictional resistance to a wall surface increases due to the effect caused by the narrowing ventilation and the mass flow rate passing through the space decreases. We adopted the narrowing ventilation effect in the analysis model and examined the relationship caused by this effect between volume flow quantity, differential pressure and mass flow rate.

The water flows from the stratum surrounding an underground structure. In addition to this phenomenon peculiar to underground structures, in the case of a fire, combustion of materials produces water vapor. Therefore, it can be thought that the movement of latent heat at the wall surface caused by steam ingredients has a serious influence on a thermal property in a tunnel space. We have developed the analysis model made with consideration to heated water in the case of a fire and carried out parameter examinations.

*key word* : underground space, fire, circuitry network, Heat and water analysis

### 1. はじめに

大深度地下構造物での安全性を考える時，火災に対する安全性が大きく問われる．地下空間で火災が発生した場合，地上部の火災とは異なり，外気との熱交換や換気経路が極めて制限される．また，韓国大邱の地下鉄火災時のように，火災による高温空気・煙の排出経路と外気との新鮮空気の給入経路，避難経路が重なる場合も生ずる．避難時の安全性を考える場合，このように各種の経路が重なった場合の煙の進行を予測することが重要である．また，排煙及び給気設備の設置位置，換気能力及び台数等を算定する上で数値シミュレーションの予測手法は重要な役割を果たす．

複雑に合流・分岐する地下構造物での火災時の熱や煙の流動を短時間でシミュレーションできるマクロな解析方法として管路網解析法がある<sup>1)~6)</sup>．火災の分野での一般的な管路網解析として，トンネル状空間の細長い空間を水平方向に温度が均一と考えられる程度の粗い空間に要素分割して解析するゾーンモデル<sup>7)~10)</sup>を適用すれば良いと考えられている．

しかし，トンネル状空間での温度分布は，トンネル長手方向の流れに沿って連続的な勾配をもって変化するため，適用するモデルを考慮して空間の分割を行なわなければならない．本報告では，トンネル状空間においてゾーンモデルを適用する場合の課題を指摘するとともに，新たなトンネル要素モデルを提案してゾーンモデルとの違い

---

キーワード：地下空間，火災，管路網，熱水分同時移動解析

<sup>1</sup> 鹿島建設 ITソリューション部

<sup>2</sup> 正会員 博士(工学) 鹿島建設 技術研究所

<sup>3</sup> 正会員 博士(工学) 鹿島建設 土木管理本部

<sup>4</sup> 博士(工学) 横浜国立大学大学院工学府

をケーススタディした。また、トンネル状空間に管路網解析法を適用する場合、管路の空気抵抗が問題となる。鉱山の分野では、坑道内空間で火災が発生すると通気の体積が増加し、その結果壁面との摩擦抵抗が増加し通気を絞る「絞り効果」が生じて、空間を通過する質量流量が減少する事が報告<sup>11),12)</sup>されている。そこで、解析モデルに絞り効果を取り入れ、その効果による体積流量、差圧、及び質量流量の関係について検討した。また、地下構造物特有の周囲の地層部からの水分の移動に加えて、火災時には物質の燃焼による水蒸気の発生が生じるため、これらの水蒸気成分による壁面表面での潜熱の移動が空間内の熱性状に及ぼす影響が大きいものと考えられる。そこで、これら火災時の熱水分移動を考慮し、トンネルをはじめとした地下空間の火災性状を短時間で精度よく解析することを目的とした解析モデルを提案し、パラメータ検討を行ったので報告する。

## 2. トンネル状空間においてゾーンモデルを適用する場合の課題

細長いトンネル状空間での火災時の温度分布解析にゾーンモデルを用いる場合の課題を説明するため、式(2-1)と式(2-2)の熱エネルギー保存式を考える。これらの方程式は、ファンや温度差によって生じる流れによる熱輸送及び気体と周囲壁による対流熱伝達による熱移動を考慮したものである。式(2-1)は通称一層ゾーンモデルの熱エネルギー保存式であり、式(2-2)は今回提案する保存式である。式(2-1)と式(2-2)の違いは、右辺第2項の移流相当項であり、式(2-1)の場合は、隣り合う空間要素内で完全拡散した場合の平均温度の差となっているが、式(2-2)の場合は、温度が変化する方向へ温度勾配を連続的に表している。

$$V_T C_{Ta} \rho_{Ta} \frac{\partial \theta_{Ta}}{\partial t} = F_T \alpha_T (\theta_{Ts} - \theta_{Ta}) + C_{Ta} G_{in} (\theta_{in} - \theta_{Ta}) \quad (2-1)$$

$$A_T C_{Ta} \rho_{Ta} \frac{\partial \theta_{Ta}}{\partial t} = S_T \alpha_T (\theta_{Ts} - \theta_{Ta}) - A_T C_{Ta} \rho_{Ta} U_{Ta} \frac{\partial \theta_{Ta}}{\partial x} \quad (2-2)$$

図2-1は、図2-2に示す延長50mのトンネルを利用して、両式の計算結果を比較したものである。火災発生個所をトンネルの第一要素とし、その火災室温度は200℃、トンネル入口の風速は5m/sとした。管路網解析では、解析領域を節点要素と枝要素でトンネル要素にモデル化する。両式の違いと節点間距離(ΔX)の違いによる通気温度への影響(精度)を検討するため、ΔX=2mとΔX=10mとして比較した。トンネル壁面の温度は20℃に固定して、対流熱伝達率を一定(0.005KW/m²K)とした。

式(2-2)では、図2-1に示すように、空間長さの違いによる通気温度への影響は見られなかった。一方、ゾーンモデルでは、空間の分割数により温度分布が異なった。これは、式(2-1)の右辺第2項と式(2-2)の右辺第2項の移流相当項を比べると、式(2-2)は流れに沿って空間の温度勾配を連続的に記述しているのに対し、式(2-1)はゾーン空間の平均気温との熱収支として記述している事が原因と考えられる。このように、ゾーンモデルでは、ケースによっては移流項の影響が大きいもの

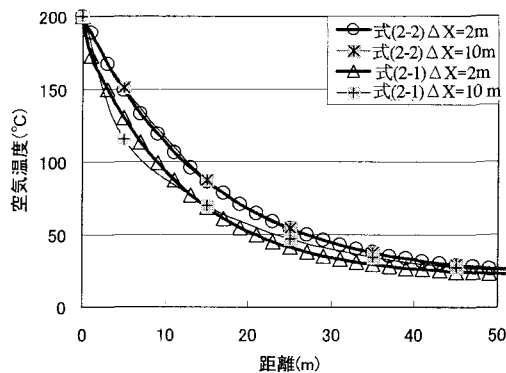


図2-1 式(2-1)と式(2-2)の比較  
(火災室温度200℃、風速5m/s、周囲壁面温度20℃一定)

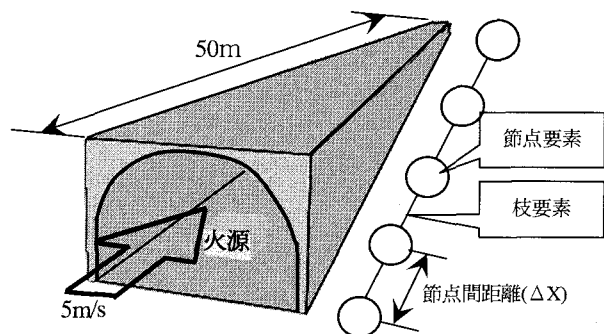


図2-2 延長50mのトンネル解析モデル

のと推定される。従って、空間に沿って流れの方向があるトンネル状空間でのエネルギー保存式は、式(2-1)で算出されるゾーンモデルより式(2-2)で算出されるモデルが望ましい。

### 3. 支配方程式

#### (1) 熱及び水分移動の概念

道路、鉄道トンネル、共同溝、給気・排気ダクトなどの細長い空間を総称してトンネル要素と呼ぶ。本研究では、これらの空間に対して式(2-2)を基本として熱移動を考慮したモデルをトンネル要素モデルと称する。トンネル要素の熱移動の概念を図3-1に示す。トンネル内火災時の熱保存は、火災の発熱速度、周囲壁との対流熱伝達に加え、周囲の地層部からの湧水、側溝流水及び配管・蒸気管の水分との熱交換、物質の燃焼によって発生する水蒸気成分による壁面表面での潜熱移動などを考える必要がある。

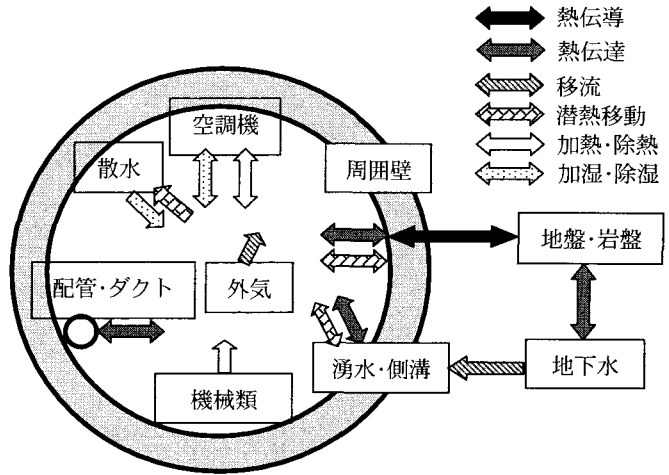


図3-1 熱及び水分移動の概念

#### (2) 支配方程式

熱エネルギーの保存式と水分移動の支配方程式を式(3-1)から(3-9)に示す。ただし、支配方程式を考える場合、次の項目を仮定する。

- ①空気はトンネル軸方向に一樣に流れるものとする。空気温度及び湿度、配管・ダクト内温度、流水温度などは、流れに沿って一樣に変化する。
- ②トンネル周囲のコンクリート壁内や岩盤内の熱流は、トンネル半径方向に一次的に変化する。
- ③トンネル壁面から十分離れた岩盤内温度と地下水温度は、トンネル壁面からの熱流の影響を受けないものとする。

【トンネル内空気の熱保存式】

$$A_T C_{Ta} \rho_{Ta} \left( \frac{\partial \theta_{Ta}}{\partial t} + U_{Ta} \frac{\partial \theta_{Ta}}{\partial x} \right) = S_T \alpha_T (\theta_{Ts} - \theta_{Ta}) + \sum_{i=1} S_p \alpha_p (\theta_{pf} - \theta_{Ta}) + \sum_{j=1} \nabla \cdot q_T \quad (3-1)$$

【トンネル内水蒸気の物質保存式】

$$A_T \left( \frac{\partial X_{Ta}}{\partial t} + U_{Ta} \frac{\partial X_{Ta}}{\partial x} \right) = S_T \beta_T (X_{Ts} - X_{Ta}) + \sum_{i=1} S_p \beta_p (X_{pf} - X_{Ta}) + \sum_{j=1} e_T \quad (3-2)$$

【トンネル内配管流水の熱保存式】

$$A_p C_{pf} \rho_{pf} \left( \frac{\partial \theta_{pf}}{\partial t} + U_{pf} \frac{\partial \theta_{pf}}{\partial x} \right) = S_p \alpha_p (\theta_{Ta} - \theta_{pf}) + H_l \beta_p \rho_{pa} S_p (X_{Ta} - X_{pf}) \quad (3-3)$$

【トンネルコンクリート壁・岩盤の熱保存式】

$$C_{TR} \rho_{TR} \frac{\partial \theta_{TR}}{\partial t} = \lambda_{TR} \left( \frac{\partial^2 \theta_{TR}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_{TR}}{\partial r} \right) + \xi (\theta_{Ta} - \theta_{TR}) \quad (3-4)$$

ただし、コンクリート壁の場合、添字R=c,  $\xi = 0$

【トンネルコンクリート壁の熱収支】

$$-\lambda_{Tc} \left( \frac{\partial \theta_{Tc}}{\partial r} \right)_{r=r_0} = \alpha_T (\theta_{Ts} - \theta_{Ta}) + H_l \beta_T \rho_{Ta} (X_{Ts} - X_{Ta}) \quad (3-5)$$

【コンクリートと岩盤の境界熱収支】

$$\lambda_{Tc} \left( \frac{\partial \theta_{Tc}}{\partial r} \right)_{r=r_2} = -\lambda_{TR} \left( \frac{\partial \theta_{TR}}{\partial r} \right)_{r=r_2} \quad (3-6)$$

【岩盤内湧水の熱収支】

$$U_{Tu} C_{Tu} \rho_{Tu} \frac{\partial \theta_{Tu}}{\partial r} = \xi (\theta_{Tu} - \theta_{TR}) \quad (3-7)$$

【湧水・側溝流水の物質移動収支】

$$\frac{\partial U_{Pf}}{\partial x} = \frac{S_P \beta_P (X_{Ta} - X_{Pf})}{A_P} \quad (3-8)$$

【ガス濃度保存式】

$$A_T \left( \frac{\partial B_T}{\partial t} + U_{Ta} \frac{\partial B_T}{\partial x} \right) = b_T \quad (3-9)$$

### (3) 対流熱伝達率と物質移動係数の関係

濡れた壁面と空気の間では、熱伝達と同時に蒸発、凝縮が起こる。完全に濡れた平滑な壁面では、熱伝達と水分移動の間にルイスの関係<sup>14),15)</sup>が成り立つ。しかし、一般的に岩盤などの壁面は部分的に濡れている場合が多く、壁面形状が粗い場合も多い。そのため、ルイスの関係<sup>14),15)</sup>を補正する必要があり、濡れ率  $\varphi$  によって補正できるよう、式(3-10)に示すように対流熱伝達率  $\alpha$  と物質移動係数  $\beta$  を関係つけた。ただし、ルイスの関係は、 $\varphi=1$  の場合である。

$$\varphi = \frac{C_{Ta} \rho_{Ta} \beta}{\alpha} \quad (3-10)$$

### (4) 壁面温度と絶対湿度の関係

壁面条件として、温度  $\theta_{Ts}$  [°C] に対する絶対湿度  $X_{Ts}$  [kg/kg] を計算する必要がある。そのため、飽和水蒸気圧  $P_w$  [hPa] を Goff-Gratch の式より計算し、絶対湿度を式(3-11)より求めた。

$$X_{Ts} = \frac{0.622 P_w}{P - P_w} \quad (3-11)$$

## 4. 数値解析

### (1) 温度の厳密解

トンネル要素の温度を差分法や有限要素法で離散化して求める場合、風速が速くなると移流項の影響で解が不安定になりやすくなる。そこで、式(3-1)から(3-3)については厳密解を求め、解の安定性のための工夫を行った。これら厳密解の導出の方法は同じなので、式(3-1)の熱保存式の厳密解の導出について説明する。トンネル微小区間  $\Delta x$  [m] 通過後の温度を考える場合、式(3-1)は定常状態と考え、式(4-1)～(4-3)に変形して境界条件の式(4-6)を代入すると、式(4-4)に示す厳密解が求まる。また、トンネル長さ  $L$  [m] の平均温度は式(4-5)で表され、平均温度の位置は、図2-2に示す枝要素の中央とする。

$$K_1 = (S_T \alpha_T \theta_{Tw} + \sum_{i=1} S_P \alpha_P \theta_{Pf} + \sum_{j=1} \nabla \cdot q_T) / (S_T \alpha_T + \sum_{i=1} S_P \alpha_P) \quad (4-1)$$

$$K_2 = (S_T \alpha_T + \sum_{i=1} S_P \alpha_P) / A_T C_{Ta} \rho_{Ta} \quad (4-2)$$

$$U_{Ta} \frac{\partial \theta_{Ta}}{\partial x} = -K_2 \theta_{Ta} + K_1 K_2 \quad (4-3)$$

$$\theta_{out}(n,t) = K_1 + \frac{\theta_{in}(n,t) - K_1}{\exp(K_2 L_n / U_{Ta})} \quad (4-4)$$

$$\begin{aligned} \theta_m(n,t) &= \frac{1}{L} \lim_{dx \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n \left\{ K_1 + \frac{\theta_{in}(n,t) - K_1}{\exp(K_2 i dx / U_{Ta})} dx \right. \\ &= \frac{1}{L} \int_0^L \left\{ K_1 + \frac{\theta_{in}(n,t) - K_1}{\exp(K_2 x / U_{Ta})} \right\} dx \\ &= K_1 + \frac{U_{Ta}}{LK_2} (\theta_{in}(n,t) - K_1) \{1 - \exp(-K_2 L / U_{Ta})\} \end{aligned} \quad (4-5)$$

$$\theta_{Ta} = \theta_{in}(n,t) \quad (4-6)$$

## (2) 流量, 差圧, 抵抗の計算

本解析は、ベルヌーイの定理に基づき、運動エネルギー、位置エネルギー、圧力エネルギーを考慮している。節点の圧力と枝の流量を計算する方法は、最初に節点圧力を仮定して仮の枝流量を計算し、全ての節点において質量流量の合計がゼロになるまで、節点圧力と枝流量の補正を繰り返す圧力仮定法<sup>16)</sup>を採用している。

壁面摩擦抵抗による圧力損失は、式(4-7)に示すDarcy-Weisbachの式が提案されている。摩擦係数は、口径の大きなものに対応できるように考えられた式(4-8)に示すムーディ式<sup>17),18)</sup>を用いた。

$$\Delta P = \zeta \rho \frac{L}{d} \frac{Q^2}{2 A_T^2} \quad (4-7)$$

$$\zeta = 0.0055 \left\{ 1 + \left( 20000 \frac{\varepsilon}{d} + \frac{10^6}{\text{Re}} \right)^{1/3} \right\} \quad (4-8)$$

## 5. 火災時の絞り効果

### (1) 火災の絞り効果

文献<sup>12)</sup>によると、火災時のトンネル空間の絞り効果は、通気の温度上昇による坑道の摩擦抵抗の変化と記述されている。式(4-7)と状態方程式の関係から最終的に式(5-1)が導かれる。

$$\Delta P = \zeta \rho_n \frac{L}{d} \frac{Q_m^2}{2 A_T^2} \left( \frac{\rho_m}{\rho_n} \right) \quad (5-1)$$

式(15)により、火災発生時、体積の膨張によって、みかけの抵抗はトンネル要素の入口温度の場合に比べて  $\rho_m / \rho_n$  だけ小さくなるが、体積流量( $Q_m$ )の項は二乗で急激に増加し抵抗に影響するため、圧力損失が大きくなり、通過する質量流量が小さくなると解釈できる。そこで、式(5-1)を用いて管路網解析を行った。

### (2) ケーススタディ

火災時の絞り効果による圧力損失の増加は、ファン容量を始め排煙計画に関係するため、ケーススタディを行い、体積流量、差圧、質量流量に及ぼす影響を検討した。物性値は温度によって変化するものもあるが、今回は一定値とした。図2-1に示した温度分布を見ると、温度変化の激しい領域は、火災発生箇所から下流側に向って100m程度と考え、トンネル長さは入口からの距離を含め120mとし節点間を20mでモデル化した。トンネル断面積は50m<sup>2</sup>である。図5-1は、縦流式換気を想定した高低差のないトンネル空間をトンネル要素で区画化したもので、入口と出口は外気に接している。なお、枝上の番号は枝要素番号を示す。火災発生箇所はトンネル入口側から20mの地点と

した。図5-2に示す特性曲線を持つ排煙ファンは、出口側(枝要素番号6)に設置し、このケースは、外気との差圧分に見合うようファン流量を調整した。また、トンネル周囲壁は、水分移動を考慮しないコンクリートとした。図5-3は、火災空間温度と差圧( $\Delta P$ [Pa])、体積流量( $Q$ [m<sup>3</sup>/s])、質量流量( $G$ [kg/s])の関係を示したものである。差圧は、ファンの容量設定に影響するので、入口から出口まで(枝要素番号1~6)の差圧を示した。体積流量は、絞り効果の最も大きい箇所での変化を見るため、火災室要素(枝要素番号2)の値を示した。ただし、グラフは火災空間温度が20[°C]の場合を基準として、その割合を示す。火災空間の温度上昇とともに体積流量と差圧は増加している。火災による空気の膨張によって体積流量は増加し、この膨張が絞り効果となって抵抗を増加させ、差圧も増加したものと考えられる。一方、差圧の増加によって質量流量は減少した。火災室の温度が1100°Cの場合、火災空間からファンまでの距離100mの圧力損失は約3割増加し、質量流量は約3割減少していた。図5-4に、火災室から出口側への距離と差圧の関係を示す。火災空間の温度が上昇すると差圧が大きくなり、絞り効果が大きくなることがわかる。

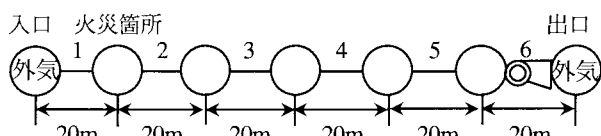


図 5-1 ケーススタディに用いたトンネル要素のモデル化

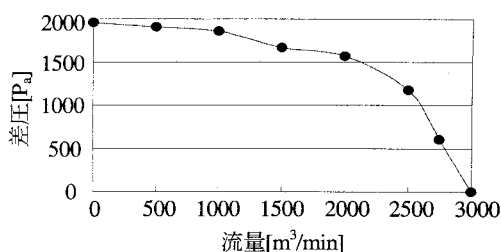


図 5-2 ファンの特性曲線

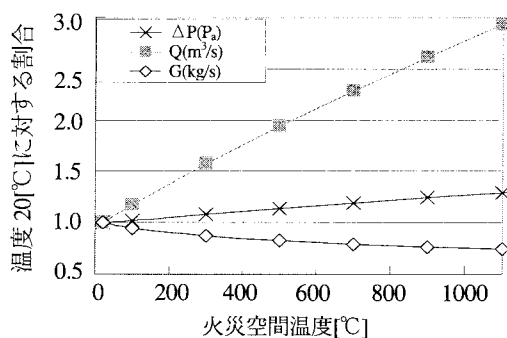


図 5-3 火災空間温度に対する差圧、体積流量、質量流量の関係

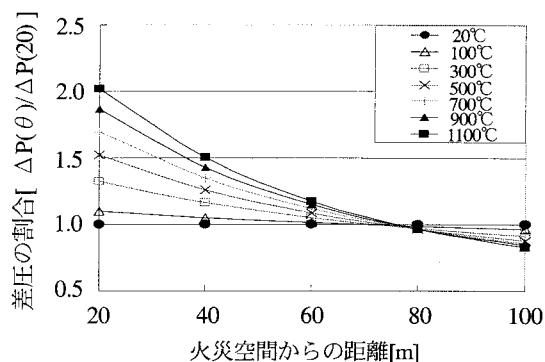


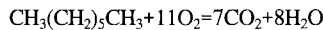
図 5-4 火災空間からの距離と差圧の関係

## 6. 潜熱移動を考慮したケーススタディ

### (1) 解析条件と検討ケース

トンネル長さは200mとし、節点間距離を10mとして20要素でモデル化した。トンネル断面積は一様に55m<sup>2</sup>とした。外気およびトンネル内の空気の初期値は温度を20°C、湿度を50%とし、周囲壁体初期温度は20°Cに設定した。トンネル周囲壁は0.7mのコンクリート(比熱0.837kJ/kgK、密度2500kg/m<sup>3</sup>、熱伝導率1.63W/mK)と6.2m岩(比熱0.837kJ/kgK、密度2700kg/m<sup>3</sup>、熱伝導率3.72 W/mK)とした。火災発生箇所は、図2-2に示した枝要素の第2要素(トンネル坑口から10m~20m)とし、発熱速度ならびに水分発生量を要素の長さ平均値で与えた。その他の条件として、縦流換気方式の火災時のトンネル換気は、遡上防止の観点から3m/s、4m/s、5m/sと変化させて与えた。発熱速度は、現在の所、100°C以下の性状しか組み込まれていないことから、0.3MW、0.6MW、0.9MWと比較的小さいものを解析期間一定に与えた。燃料は、n-ヘプタンとして、発熱速度ならびに水分発生量は式(6-1)を用いて、燃料1kgあたり1.437kg/kgとした。計算ケースは、火源の発熱速度のみ考慮した場合と発熱速度及び燃焼に伴う水分発生を

考慮した2ケースを基本とした。



(6-1)

## (2) 解析結果

発熱速度のみ考慮した場合(ケース1)と発熱速度と燃焼に伴う水分発生の両方の影響を考慮した場合(ケース2)の第2要素のトンネル空気温度と周壁の温度の時間変化を図6-1に示す。周壁体内の温度分布は、式(3-4)に示した方程式を差分法により離散化して計算する。周壁No1からNo4はトンネル空気側から近い順に、0.23m間隔に読んで番号を割り当てた。両ケースとも火災発生とともに空気温度は上昇し周壁の温度を上昇させる。周囲の壁の温度は時間とともに指数関数的に上昇し定常状態に近づく。ケース1とケース2の温度差は、時間とともに徐々に大きくなるが、最大で4℃程度である。

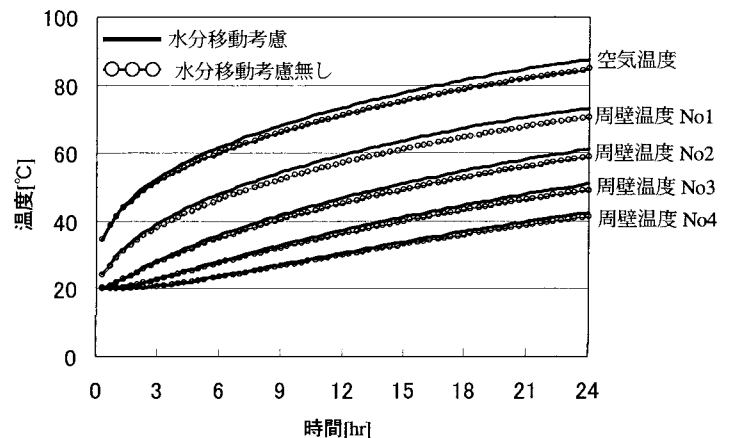


図6-1 第2要素のトンネル空気温度と周壁温度の時間変化  
(発熱速度 0.9MW, 換気速度 3m/s)

図6-2と図6-3に、24時間後のトンネル長手方向の温度変化と相対湿度の変化を示す。図の横軸は、トンネル入口の給気側からの距離を表す。原点がトンネル入口の位置である。火災空間では温度上昇が激しいが、隣接空間ではほぼ初期値に近づく。水分移動を考慮した場合の相対湿度は、火災空間では55%程度であるが、隣接した空間の下流側では100%となる。このことより、火災時に発生した水分が、冷たい壁体に接して凝結し潜熱を放出し、水分移動を考慮しない場合よりも比較的高い温度になったものと推定される。

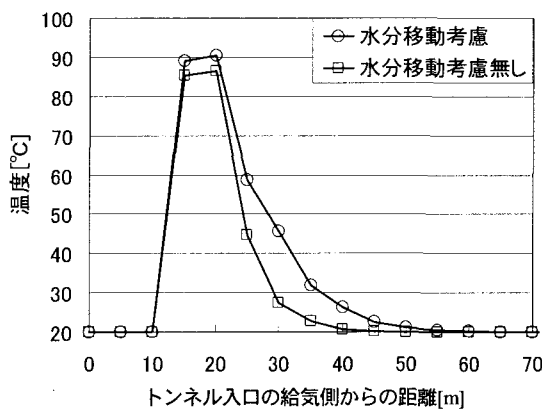


図6-2 24時間後のトンネル内空気温度の距離変化  
(発熱速度 0.9MW, 換気速度 3m/s)

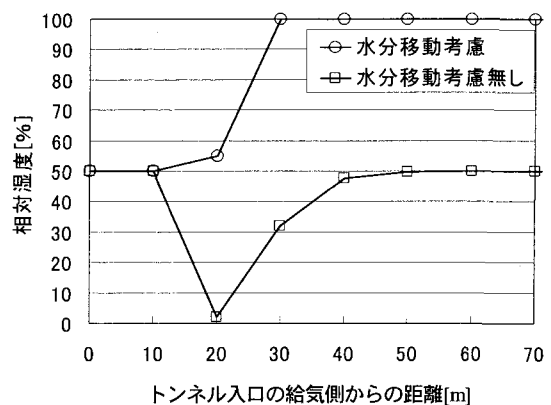


図6-3 24時間後のトンネル内相対湿度の距離変化  
(発熱速度 0.9MW, 換気速度 3m/s)

図6-4と図6-5は、水分移動を考慮しない場合の換気風速の違いと発熱速度の違いによるトンネル内空気温度への影響を検討したものである。図6-4を見ると、火源近傍では風速(小)5m/s→4m/s→3m/s(大)の順で温度が高くなっており、下流側では、(小)3m/s→4m/s→5m/s(大)の順で温度が高くなる。これは、換気風速が速くなれば移流によって下流側へ温度が速く運ばれるためと考えられ、発熱速度が大きくなると、この温度差は拡大するものと考えられる。図6-5を見ると、発熱速度の大きさにともなって火源近傍で温度が上昇し、トンネル入口から下流側へ50mほ

どの所ではば初期温度になる。

検討範囲の発熱速度では、潜熱を考慮した場合は、考慮しない場合よりも数度上昇するだけであったが、今後、より大きな発熱条件での検討が必要と考えられる。

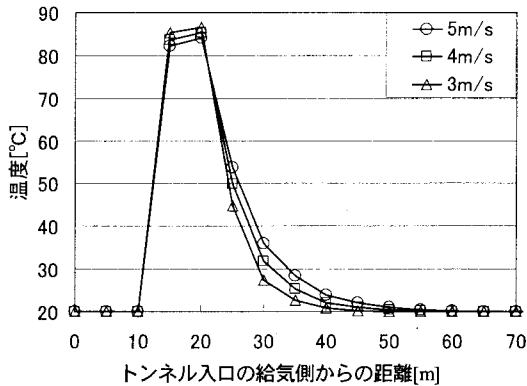


図6-4 風速を変化させた場合の24時間後の  
トンネル内空気温度の距離変化  
(発熱速度 0.9MW, 水分発生考慮無し)

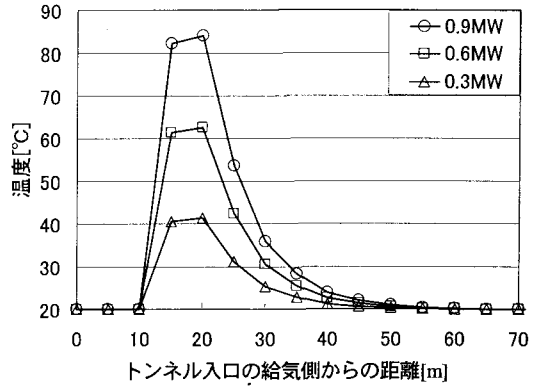


図6-5 発熱速度を変化させた場合の24時間後の  
トンネル内空気温度の距離変化  
(換気風速 5.0m/s, 水分発生考慮無し)

## 7. おわりに

以上の検討の結果、以下の項目が明らかになった。

- ①トンネルのような細長い空間の火災時の解析では、エネルギー保存式の扱いに注意が必要であり、ゾーンモデルでは誤差が生じる場合がある。
- ②提案したトンネル要素モデルは、解の安定と精度の良い結果を得られる。
- ③トンネル空間での火災時の絞り効果は、水平トンネルにおいては、火災空間温度 1100℃の場合、外気温などの場合に比べて、通常、質量流量は3割減少し、差圧は3割増加する。
- ④燃焼による水分発生を考慮した解析モデルを作成し、水分発生を考慮しない解析モデルとの違いを検討したが、実験との比較検討が必要である。

今回提案した解析モデルは、水分移動を考慮しない場合は、温度が1000℃を超えても解析可能である。また、トンネルに傾斜があっても解析可能である。今後は、水分移動を考慮した場合、飽和水蒸気圧の計算に100℃以上の性状を組み込み、水噴霧設備やスプリンクラー設備の冷却効果を取り入れた解析及びCFD解析との比較検討を行っていきたい。

## 記号

$A_T$ : 断面積[m<sup>2</sup>],  $B$ : 濃度[kg/m<sup>3</sup>],  $b$ : ガス発生量[kg/h],  $C$ : 比熱[kW·h/kg·K],  $d$ : トンネル直径[m],  $e$ : 過湿量[m<sup>2</sup>/h],  $F$ : 壁面積[m<sup>2</sup>],  $G_{in}$ : 質量流量 [kg/s],  $H_f$ : 蒸発潜熱[kW·h/kg],  $L$ : 節点間のトンネル長さ[m],  $P$ : 大気圧[hPa],  $P_w$ : 飽和水蒸気圧[hPa],  $\Delta P$ : 差圧[Pa],  $q$ : 発熱速度[kW],  $Re$ : レイノルズ数[-],  $r$ : トンネル半径方向長さ[m],  $r_0$ : トンネル半径[m],  $r_2$ : トンネル中心から半径方向のコンクリート壁と岩盤の接する距離[m],  $S$ : 周長[m],  $t$ : 時間[h],  $U$ : 速度[m/s],  $V$ : 体積[m<sup>3</sup>],  $X$ : 絶対湿度 [kg/kg],  $x$ : トンネル長手方向長さ[m],  $\alpha$ : 対流熱伝達率[kW/m<sup>2</sup>·K],  $\beta$ : 物質移動係数[m/h],  $\rho$ : 密度[kg/m<sup>3</sup>],  $\theta$ : 温度[K],  $\theta_{in}$ : 風上空気温度 [K],  $\theta_{in}(n,t)$ : トンネル $n$ 要素風上空気温度 [K],  $\theta_{out}(n,t)$ : トンネル $n$ 要素出口空気温度 [K],  $\theta_m(n,t)$ : トンネル $n$ 要素平均空気温度 [K],  $\lambda$ : 熱伝導率[kW/m·K],  $\xi$ : 湧水熱交換率[kW/m<sup>3</sup>·K],  $\phi$ : めね率[-],  $\zeta$ : 管摩擦係数[-],  $\varepsilon$ : 絶対粗度[m]

## 添字

方程式の変数の添え字は、以下のとおり、それぞれ場所や物質を示す変数であることを表す。例えば、 $\theta_{Ta}$ はトンネル空間の空気温度であり、 $\theta_{Ts}$ はトンネル壁面の温度を表す。

a: 空気, c: コンクリート, f: 管内流体, m: トンネル内平均空気温度に対する値, n: トンネル要素の入口温度に対する値, P: 配管・側溝, R: 岩盤, s: 壁面, T: トンネル, u: 湧水, w: 水分。

## 参考文献

- 1) 栗岡均他: 回路網問題における新解法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.565-566, 1984
- 2) 栗岡均他: 自然通気を考慮した地下利用施設の温湿度予測手法について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.1-2, 1985
- 3) 太田勝矢他: 地下空間の温湿度予測手法に関する研究, 鹿島建設技術研究所年報, 第33号, pp.203-208, 1985
- 4) W.L.Weaver et al.: A generic semi-implicit methodology for use in RELAP5-3D, Nuclear Engineering and Design 211, pp.13-26, 2002
- 5) A.Mizuno et al.: On the one-dimensional equation of motion for the numerical simulation of transversely ventilated road tunnels, Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, pp.1-7, 1999
- 6) 今関修他: 回路網解析による地下空間火災の性状予測の研究, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.226-229, 2005
- 7) 田中喺義他: <二層ゾーンモデルの概念に基づく>建物内煙流動予測モデル, 建築研究報告 No. 123, 建設省建築研究所, 1989
- 8) 田中喺義: 改訂版建築火災安全工学入門, 第4章, 日本建築センター, 2002
- 9) 鈴木圭一他: 多層ゾーンモデルによるトンネル火災性状予測, 日本建築学会大会学術講演梗概, pp.93-94, 2002
- 10) 鈴木圭一他: 火災空間における垂直温度分布の予測モデルー多層ゾーン流動予測モデルの開発 その1, 建築学会環境系論文集, 第582号, pp.1-7, 2004
- 11) 井上雅弘他: 坑内火災による通気と風速変化に関する実験的研究, 資源と素材, vol. 106, pp.65-70, 1990
- 12) 井上雅弘他: 坑内火災の影響を考慮した通気解析ー坑内火災のシミュレーションに関する研究(2)ー, 資源と素材, vol. 120, pp.112-118, 2004
- 13) 井上雅弘他: 坑内火災ガス温度の予測についてー坑内火災シミュレーションに関する研究(1)ー, 資源と素材, vol. 119, pp.727-733, 2003
- 14) 空気調和・衛生工学会編: 空気調和・衛生工学便覧 I 第13版, 1編4章, 2001
- 15) 新建築学大系編集委員会編: 新建築学大系 10 環境物理, 第3章, 彰国社, 1984
- 16) 井上雅弘他: 節点解法を用いる通気網解析の実用化, 日本鉱業会誌 vol. 103, pp.493-497, 1987
- 17) 改訂版ずい道等建設工事における換気技術指針, 建設業労働災害防止協会
- 18) 管路・ダクトの抵抗, 日本機械学会, 1979
- 19) P.W.Berg et al.: Elementary Partial Differential Equations, Holden-Day Inc., 1966
- 20) R.V.Churchill: Fourier Series and Boundary Value Problems 3rd Edition, McGRAW-HILL, 1978
- 21) 伊理正夫他: ネットワーク理論, 日科技連, 1992
- 22) 庄司正弘: 伝熱工学, 東京大学出版会, 1995