

研究種目：基盤研究 (A)	
研究期間：2005～2008	
課題番号：17206061	
研究課題名 (和文)	トンネル・地下鉄火災を対象とした多層ゾーン煙流動予測コンピューターモデルの展開
研究課題名 (英文)	Development of the Multi-layer Zone Smoke Transport Model for Tunnel and Subway Fires
研究代表者	田中 哮義 (TANAKA TAKEYOSHI)
	京都大学・防災研究所・教授
研究者番号	70293959

## 研究成果の概要：

建築火災時を想定して開発を進めてきた多層ゾーン煙流動予測モデルを長大空間である地下鉄・トンネルの火災時にも適用できるように展開を行った。また模型トンネルを製作して火源、換気風、トンネル勾配の多数の条件に対して実験を行い、煙流動性状を調べた。実験結果との比較により、多層ゾーンモデルがトンネル火災時の煙流動予測のための実務的手法として有力なモデルとなり得ることを確認した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	11,100,000	3,330,000	14,430,000
2006年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2007年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2008年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
総計	28,300,000	8,490,000	36,790,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・都市計画

キーワード：火災、煙流動、トンネル、予測モデル

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は科研費基盤Bで建築火災時の煙流動予測モデルの開発を念頭に進めて来た多層ゾーンモデルを地下鉄・トンネル火災時の煙流動予測に展開することを図ったものである。多層ゾーン煙流動予測モデルは、従来の2層ゾーンモデルでは出来なかった高さによる温度や煙濃度などの分布を予測出来るが、計算時間は2層ゾーンモデルと殆ど変わらず、CFDモデルと比較した場合の計算負荷は殆ど比較にならないほど軽い。

一方、韓国テグ市の地下鉄火災などにより関心を集めた地下鉄・トンネルなどの空間は

数km、場合によっては10kmを越す長大空間であり、火災時の色々なシナリオや対策について検討する場合には、実務的時間内に計算が可能な煙流動予測手法の便益性が高い。

## 2. 研究の目的

多層ゾーン煙流動モデルの地下鉄・トンネル空間火災時の煙流動予測モデルへの展開を図ることにより、地下鉄システムや道路トンネルなどで火災が発生した場合の避難者の誘導、煙制御対策、消防戦略等について定量的に検討・評価する上で実務的に利用可能な煙性状予測手法を開発する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 多層ゾーンモデルの概念と理論

図1は多層ゾーンモデルをトンネル空間に適用した場合の概念図に示している。トンネル空間は長大なので、トンネルの軸方向に適宜な仮想空間に分割する。この仮想空間は必要とする予測解像度によって自由な長さでよい。各仮想空間は更に垂直に複数の層に分割する。この層の数も基本的に自由である。これにより、トンネル空間は複数の水平の層で満たされることになる。

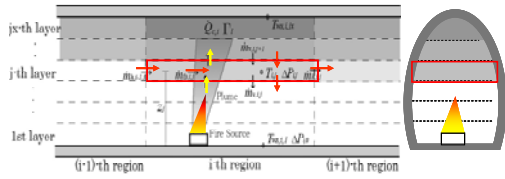


図1 多層ゾーンモデルの概念

多層ゾーンモデルの数学的定式化は、これらの層の各々を物理的性質の様な検査体積と考えて、質量、熱エネルギー、化学種など物理量の保存および理想気体の状態式を適用する。これらの式に含まれる各層間の物理量の移動は流体の移動に関するベルヌイの定理、火災プルームの流量に関する既往の知見、輻射・対流熱伝達の知見などを用い、要素過程のモデルとして定式化する。

これらの式を基にすることにより、先ず各層について温度、化学種濃度の時間変化を与える常微分方程式が得られ、さらにトンネル空間の軸方向に分割した仮想空間の任意のものに含まれる層に対する熱エネルギーの保存式を足し合わせると、任意の仮想空間について下記の式が得られる。

$$\sum_{j=1}^{j=j_{\max}} (h_{i,j-1} - h_{i,j} - Q_{w,i,j}) + Q_{c,i} = 0$$

ここに、 $h_{i,j-1}$ 、 $h_{i,j}$ はそれぞれ気体の流入により持ち込まれ、持ち出される熱、 $Q_{w,i,j}$ は輻射・対流熱伝達により周壁に失われる熱、 $Q_{c,i}$ は火源の燃焼により加わる熱である。

この式は、 $h_{i,j-1}$ 、 $h_{i,j}$ が隣接空間との間の圧力差の関数として決まるため、空間の圧力が満たさなければならない条件を与えるが、仮想空間の数だけ立つので、その数だけの連立方程式として各空間の圧力を解かなければならない。しかし、解かねばならない圧力の数が高々仮想空間の数に過ぎないことが、この多層ゾーン煙流動予測モデルの計算がCFDに比較して格段に負荷の小さい理由であり、この手法の核と言える。

#### (2) トンネル煙流動実験

トンネル火災時の煙流動性状を種々の条件下で調べ、また多層ゾーン煙流動モデルの検証データを取得するため、図2に示すような模型トンネルを作成した。トンネルの断面は凡そ幅1.8m×高さ1.8mの正方形、長さは約28mであり、トンネル内換気の影響を調べるため端部に近くに換気扇を設置した。即ち温度と風速について行い、温度はK-type熱電対を、空間の中心線に沿って、風下側には約1.85m間隔、風上側には3.69m間隔で熱電対ツリーを設置し、その上に上下方向の間隔20cmで取り付けた。風速の測定にはKanomaxの熱戦風速計を風下、風上の図2に示す各2つずつの場所で天井から4点を20cm間隔、その下に2点40cm間隔で設置した。

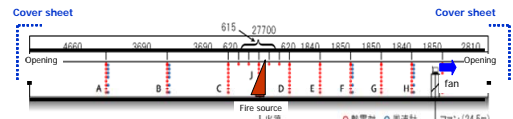


図2 模型トンネルの長手方向断面と温度・流速測定位置

図3は模型トンネルの内部を撮影した写真および断面での温度・流速測定位置である。

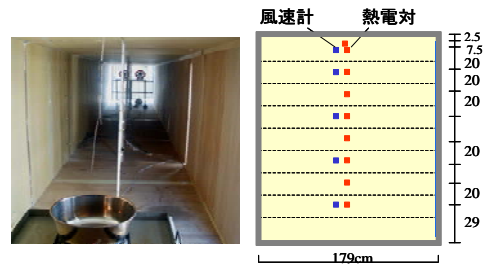


図3 模型トンネルの内観と熱電対・風速計の設置位置

実験の火源にメタノールを用い、容器の径を0.3、0.4、0.5、0.6mの4種類に変えることで燃焼発熱速度を4段階に変化させた。また、火源とトンネルの天井との距離の違いは火災プルームの空気巻き込み量の変化をもたらす、煙流動性状に影響することが考えられることから火源位置についても床上0mと0.6mの2種類を設定した。

換気風速は換気扇を用いて出したが、風速と煙流動の基本的な関係を解析するためには、トンネル断面内で風速分布が一樣である方が有利と考えられたため、トンネル端部に設置した換気扇の噴出し側を外部とした。従って、換気扇位置からみた火源は吸い込み側の上流に位置する。風速は0、0.25、0.5、0.75、1.0、1.25m/sの6段階設定した。

実際のトンネルは多少とも勾配を持つことが普通であるため、勾配を0、3、6、9%の4種類に変化させた条件でも実験を行った。

実験条件はこれら異なる火源の発熱速度、高さ、換気風速、トンネル勾配の条件の組み

合わせて設定した。トンネルに勾配がある条件では換気風が勾配に沿って吹き上がる場合及び吹き下がる場合について各2段階設定した。

各勾配についての実験条件の数は表1に示す通りである。なお再現性確認のため、実験は表に示す各条件毎に2回ずつ実施した。

表1 実験条件の数

	火源径	火源高	換気風速	計	
勾配	0	4	2	6	48
	3	4	2	5	40
	6	2	2	5	20
%	9	2	2	5	20

#### 4. 研究成果

##### (1) 多層ゾーンモデルの検証

図4および5に実験での温度・流速の測定結果、多層ゾーンモデルによる予測、世界的に火災性状解析に最も良く利用されているCFDモデルであるFire Dynamics Simulator (FDS) による予測の比較を示している。四角のプロットが測定、太い実線が多層ゾーンの予測、細い実線がFDSの予測である。実測値と比較した場合、まだ若干の誤差は見られるものの、FDSによる予測値と比較しても勝るとも劣らないレベルの精度が得られることが図4、5から窺える。なおモデルは煙の光学濃度や熱伝達のも予測も行っている。実際の火災における性状や対策の評価を行う場合、この程度の予測内容が得られれば殆ど十分と思われる。この程度の予測にCFDでは数日のオーダーの計算時間を要するのに対し、多層ゾーンでは数分のオーダーである。

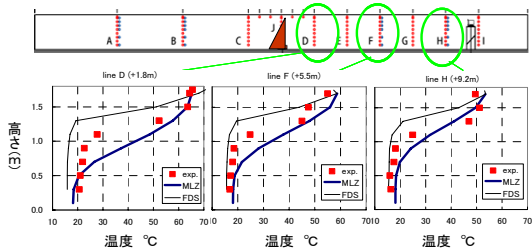


図4(a) 実験・MLZ・FDSの温度(HRR=60kW、無換気)

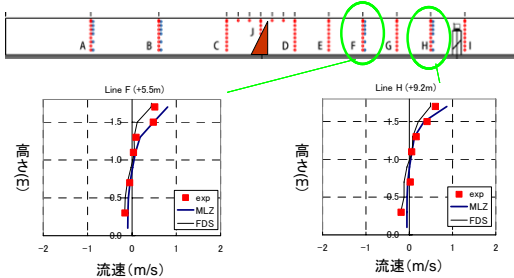


図4(b) 実験・MLZ・FDSの流速(HRR=60kW、無換気)

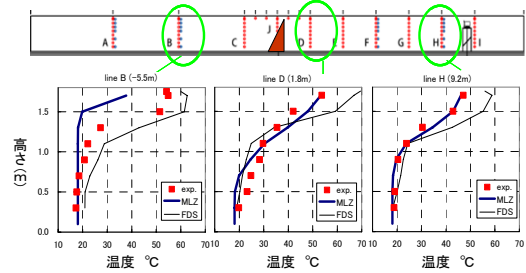


図5(a) 実験・MLZ・FDSの温度(HRR=60kW、換気0.5m/s)

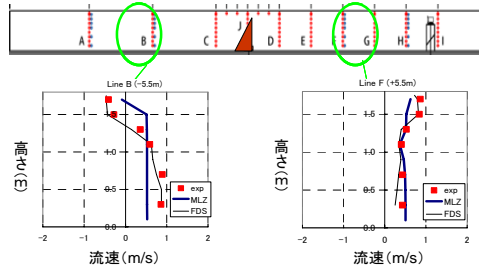


図5(b) 実験・MLZ・FDSの流速(HRR=60kW、換気0.5m/s)

##### (2) 煙流動性状の相似則

実測した多くの実験データの解析を基に、トンネル空間での煙流動の性状を支配する基本的関係の解明し、煙流動性状の相似則を検討した。これは多層ゾーンモデルで実大のトンネル空間での性状を予測した場合の結果が妥当なものかどうか検証する上で有用である。

例えば換気がある場合、図6に図解するように、火源上の火災気流は換気風によって吹き倒され、また上流への煙の遡上が抑制されるが、これはトンネル火災時の避難計画の策定などに有用な情報となる。

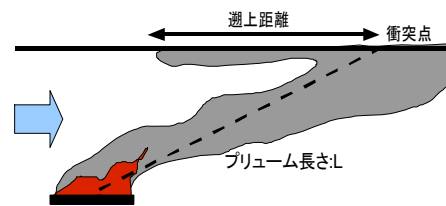


図6 換気風と煙の遡上の概念

これに関して、相似則の検討と実験データより、換気風に吹き倒される火災プルームが天井へ衝突点する点の火源からの水平距離 $X_0$ は、 $U_\infty$ を換気風速(m/s)、 $H$ を天井高さ(m)として

$$X_0 = 8.7 \frac{U_\infty H^{1/3}}{Q^{1/3}}$$

で与えられ、また衝突点の温度での温度上昇 $\Delta T_{max}$ が

$$\Delta T_{\max} = 16.4 \frac{Q^{2/3}}{L^{5/3}}$$

$$\text{ただし、} L = \sqrt{H^2 + X_0^2}$$

で与えられることから、換気風により吹き倒される火災プルームの空気巻き込み量の変化は、専らプルームが傾くことによる巻き込み距離の増加に起因することが明らかになった。また、煙が火源より上流に遡上しない条件は、風速、発熱速度、天井高さの関数として

$$\left( \frac{L^{5/3}}{Q^{2/3}} \right) \frac{U_{\infty}^2}{H} > 0.15$$

で与えられるという結果が得られた。

### (3) 実大トンネルへの適用

多層ゾーンモデルを仮想の実大規模トンネルへ適用してケーススタディーを行った。図7は断面10m(幅)×8m(高)の円形(下部切欠き)、長さ2kmの水平道路トンネルを想定して、換気の無い場合とある場合の煙の温度分布の変化を予測・表示したものである。ただし、表示上のアスペクト比は大幅にデフォルメしており、また2つの例の図で時間は対応していない。

この例では上のものが換気無し、下が右から左向きに2m/sの換気風速がある場合の結果の表示である。換気無しの場合には左右対称に煙が流動するのに対し、換気がある場合は煙が下流に流されるが、なお上流への遡上はあり得ることが示されており、これは模型実験における測定結果とも一致する。

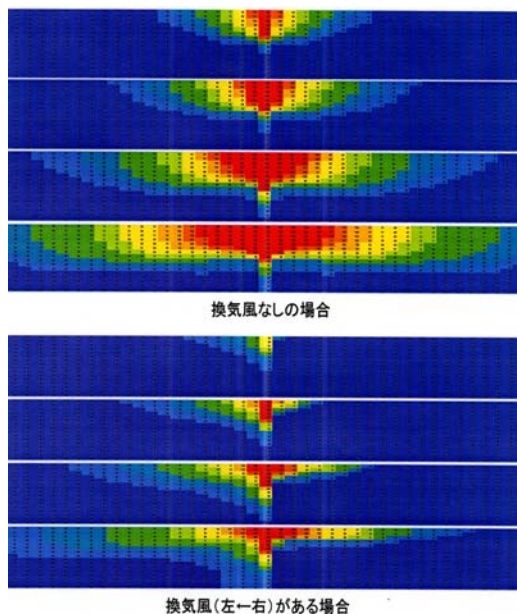


図7 仮想実大トンネルでの煙流動予測例

### (4) 換気風・勾配の影響

トンネル内に設けられる換気やトンネルの勾配は火災時の煙流動に大きな影響を及ぼすと考えられる。本研究では、これらについて多くの実験的データと知見が得られた。下記に火源径0.5m、火源高さ0mを共通として、換気風および勾配の条件が異なる場合の温度の測定値を比較した例を示す。なお、各実験での3列のデータは上から点火後30sec、60secおよび定常状態での値である。また赤、黒のプロットは2回繰り返した実験値であるが、以下に示す実験のいずれにおいても値は殆ど一致しており、実験の再現性が良好であったことを示している。

#### (a) 換気風速0、勾配0の場合

図8は、比較の標準として示した無換気風、勾配0のケースであるが、煙層は比較的薄く、かつ火源の左右に殆ど対称の伝播を見せている。なお、下部の空気層の温度が高いのは実験が夏季に行われたためである。この場合、煙層の温度は時間とともに上昇する傾向を示すが、厚さの変化はそれ程顕著な増加を見せないようであり、また火源からの距離による違いも大きくない。

#### (b) 換気風速1.25m、勾配0の場合

図9は、上記(a)と同様に水平トンネルにおいて左から右へ1.25m/sの換気風速がある場合である。無換気の場合と比較した時の特徴は、換気の上流への流れが阻止される(この場合は火源から1.8m付近が遡上の限界と見られる)一方で、下流域では温度分布が広くなだらかに分布することである。これには、換気風によって吹き倒されて巻き込み長さが大きくなることで火災プルームが希釈されること、および一旦上流に向かった天井ジェットの上流が止まり、下流に逆流してくるものの2つが関係していると考えられる。

#### (c) 換気風速0、勾配6%の場合

図10は6%のトンネル勾配が存在する場合である。強制換気は設定されていない。この場合、火源の上流(勾配の下降側)5.4mではなお煙の遡上が見られるが、火源からの距離とともに煙の層は薄くなっており、トンネルの端部にまで達しているか否かが微妙なところである。遡上が抑制される点では、換気風がある場合と似ているが、下流(勾配の上昇側)での煙層厚さと温度低下は換気風のある条件ほど著しくなく、比較的明瞭な成層化が観察される。勾配0の場合と比較しても大差は無いように見えるが、恐らくは上流への遡上が止まった分の下流側への影響はあると思われる。ここには示していないが、天井下に設置した熱電対の温度をみると、勾配0の場合に比較し、火源直上の温度分布がなだらかで、ピークが幾分下流側に寄っていることから、その影響が窺われる。

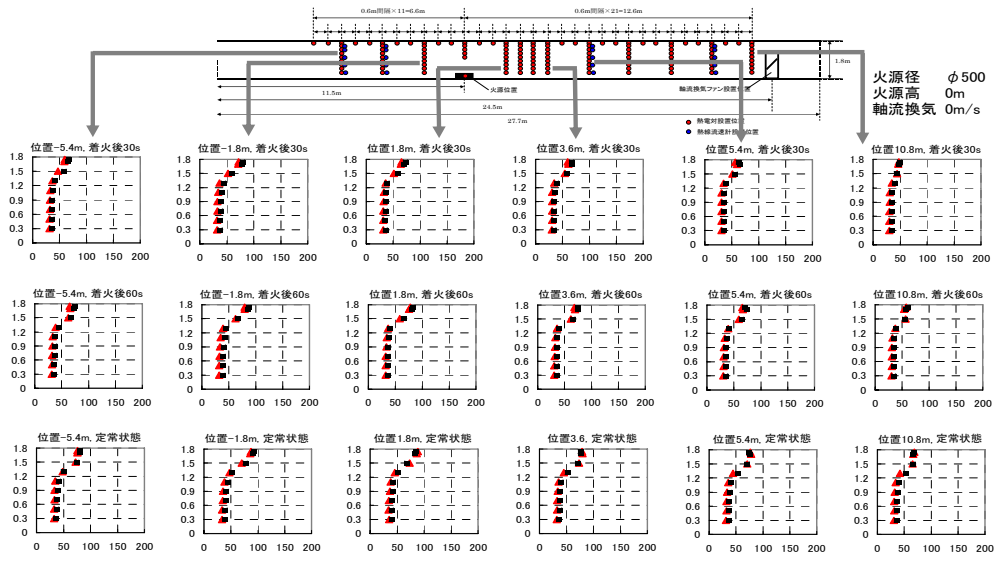


図 8

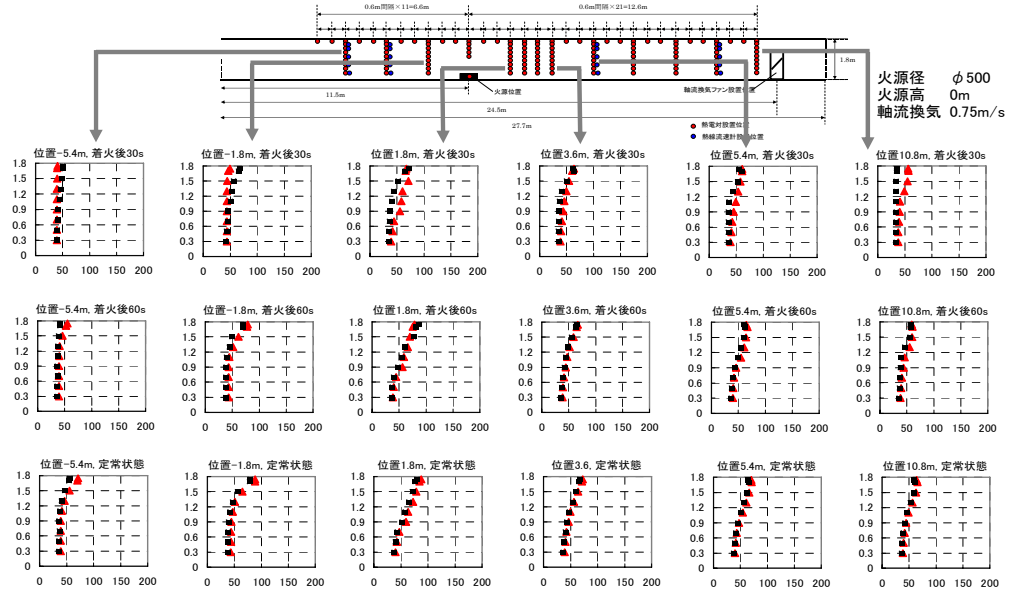


図 9

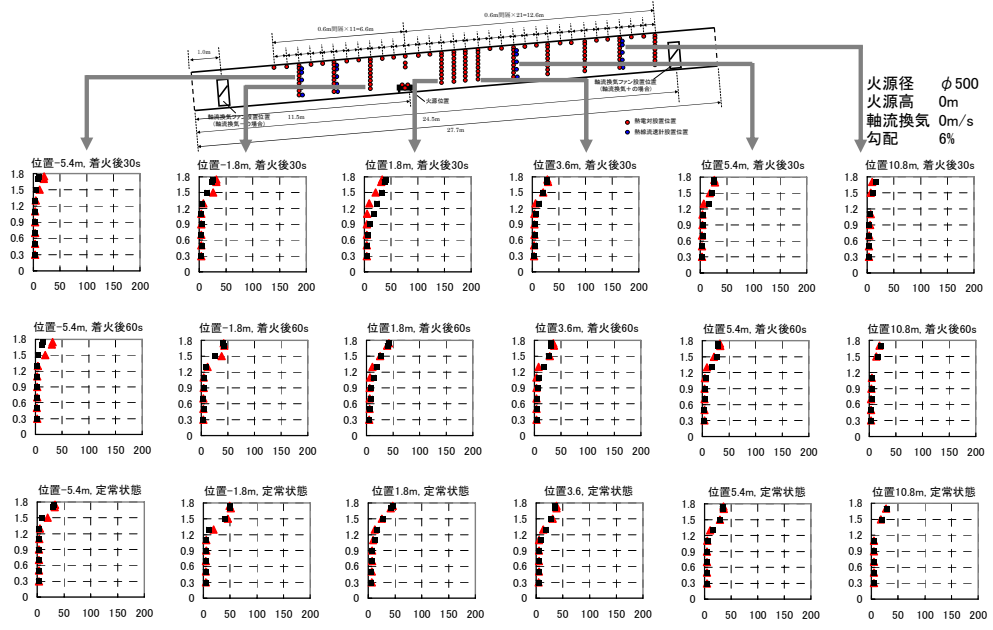


図 10

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

① Akizuki, Y., Tanaka, T., Yamao, K.: Calculation Model for Travel Speed and Psychological State in Escape Routes Considering Luminous Condition, Smoke Density and Evacuee's Visual Acuity, Fire Safety Science, Proc. of 9th Int'l Symposium, p.365-376, 2008.9 (査読有り)

② Suzuki, K., Tanaka, T., Harada, K.: Tunnel Fire Simulation Model with Multi-Layer Zone Concept, Fire Safety Science, Proc. of 9th Int'l Symposium, p.713-726, 2008.9 (査読有り)

③ Watanabe, J. and Tanaka, T.: Prediction of Ceiling Jet Smoke Concentration under Two Layer Environment, Fire Science and Technology, 24, 3, 151-164, 2005 (査読あり)

④ Akizuki, Y., Tanaka, T., Suzuki, H. and Tsuchihashi, T.: Calculation Method for Visibility of Emergency Sign in Fire Taking into Account of Smoke Adherence, Fire Safety Science, Proc. of the 8th Int'l Symposium, pp1093-1108, 2005. (査読有り)

⑤ 鈴木圭一、田中哮義、原田和典、吉田治典：区画火災鉛直温度分布予測モデルの拡張と検証および火災ブルームへの連行を考慮した天井ジェット温度予測 多層ゾーン煙流動予測モデルの開発 その2、日本建築学会論文集 No.590 (環境系), 2005.4, pp1-7 (査読有り)

[学会発表] (計 9 件)

① 山尾耕平、田中哮義、鈴木圭一：軸流換気および勾配がトンネル火災煙流動に及ぼす影響に関する研究、日本火災学会研究発表会、p.282-283、2009.5.19, 東京都

② 鈴木圭一、田中哮義、原田和典、山田茂：多層ゾーン煙流動予測モデルと他モデルとの比較検証、日本火災学会研究発表会、p.284-285、2008.5.21、神戸市

③ Keichi Suzuki, Takeyoshi Tanaka and Kazunori Harada: Application of Multi-Layer Zone Smoke Spread Model to a Building Fire, 3RD International Symposium Building "Center of Excellence" of Research & Education for Fire Safety Science and Developing a Global Network, 2008.3.10, 東京都

④ 鈴木圭一、田中哮義、原田和典、山田茂：多層ゾーン煙流動予測モデルの避難安全性検証への利用に関わる諸問題の考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、2007.9.30, 福岡市

⑤ Suzuki, K., Tanaka, T. and Harada, K.: Computation of Smoke Spread in a Building Fire by Multi-Layer Zone Model, 7th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, 2007.9.21, Hong-Kong

⑥ 鈴木秀和、大浦宗明、鈴木圭一、田中哮義

、原田和典：トンネル火災への多層ゾーン煙流動予測モデルの適用に関する研究 その2 相似則の検討、日本火災学会研究発表会、p.101-102、2007.5.22, 東京都

⑦ 鈴木圭一、鈴木秀和、田中哮義、原田和典：トンネル火災を対象とした多層ゾーン煙流動予測モデルの展開 その2 計算との比較と検討、日本火災学会研究発表会、pp.448-451、2006.5.18, 京都市

⑧ 鈴木秀和、鈴木圭一、田中哮義、原田和典：トンネル火災を対象とした多層ゾーン煙流動予測モデルの展開 その1 計算との比較と検討、日本火災学会研究発表会、pp.448-451、2006.5.18, 京都市

⑨ Keichi Suzuki, Takeyoshi Tanaka and Kazunori Harada: Tunnel Fire Simulation Model with Multi-Layer Zone Concept, Risk and Fire Engineering, Tunnel Management International, p.193-202, 2006.4.19、Hong-Kong

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他] 特に無し

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 哮義 (TANAKA TAKEYOSHI)  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号：70293059

(2) 研究分担者

原田 和典 (HARADA KAZUNORI)  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：90198911

大宮 喜文 (OHMIYA YOSHIFUMI)  
東京理科大学・理工学部・准教授  
研究者番号：10287469

(3) 連携研究者

鈴木 圭一 (SUZUKI KEIICHI)  
清水建設・技術研究所・研究員  
研究者番号：80416817

(4) 研究協力者

山田 茂 (YAMADA SHIGERU)  
フジタ・エンジニアリング統括部・主席コンサルタント