

CFD による散水設備作動時のトンネル空間熱性状予測
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SIMULATION OF THERMAL BEHAVIOR
UNDER WORKING WATER SCREENS IN THE TUNNEL

佐藤 博臣*，栗岡 均**，今関 修***，田中 太****

Hiroomi SATOH, Hitoshi KURIOKA, Osamu IMAZEKI, Futoshi TANAKA

Recently, research using Computational Fluid Dynamics (CFD) on the flow field and temperature field of various fire phenomena has been progressing. CFD has been a practical method as an analysis tool of the fire phenomena. In this research, experiments using a 1/2 scale tunnel and the numerical analysis by CFD were carried out in this tunnel, and the results were compared with the experiments. The fire experiments were performed using the 1/2 scale tunnel equipped with water screens.

The CFD analysis of the fire field, when water screens work, was carried out using measured heat release rates. When the water screens are working, the inside of the tunnel is sectioned with water screens. The heat flow generated from fire source is intercepted by water screens, and circulates around inside of the section.

key word : tunnel, fire, water screen, computational fluid dynamics

1. はじめに

一般に地下空間は閉鎖されていて，火災発生に伴う熱や煙が急速に充満するために，火災ゾーンを区画化して被災者が避難時に熱や煙に巻き込まれないようにする必要がある．我々は，区画化する境界の天井面に一定間隔で放水ヘッドを列状に配置し，水噴霧により水幕を形成して火災や煙を遮断するウォータースクリーン（以下，WS）による防火区画技術を提案する．これは，今後の大深度トンネルでの新しい防災技術の一つになる可能性がある．

WSによる防火区画の性能を評価するため，1/2のトンネル模型による空間内熱性状把握のための火災実験を行ってきた．実験は物理現象を把握する点では優れているが，多大な費用と人手に加えて環境問題などの課題も抱えている．また，トンネル形状の変更，火源の向き，火源の形状，換気方式などの様々な要因による影響を把握するには費用や時間の制約も多く，今回のような散水を伴った実験の場合には測定が困難な項目も多い．また，熱気流の挙動を把握するための可視化も困難な場合がある．

一方，数値流体力学による数値シミュレーション（以下，CFD）は，条件の変更による火災場の性状を迅速にかつ多角的に捉えることができ，コンピュータグラフィックを用いた可視化も容易なことから，実験の抱える課題を解決する有効なツールとなる．近年，CFDを用いた火災現象への適用研究^{1)~3)}が進み，CFDは研究開発の分野で実用段階になりつつある．乱流モデルLESによるトンネル火災シミュレーションの検討では，川端⁴⁾らの報告がある．また，散水設備作動時の水滴モデルを組み込んだLESコードは，米国商務

キーワード：トンネル，火災，ウォータースクリーン，CFD

* 鹿島建設 技術研究所

** 正会員 鹿島建設 技術研究所

*** 鹿島建設 ITソリューション部

**** 工博 有限会社フルイドテクノロジー（現 東京理科大学）

省技術研究所(NIST)の Building and Fire Research Laboratory が開発した Fire Dynamics Simulator(以下, FDS)⁹⁾がある。

本研究の目的は, WS など散水設備作動時の CFD の実用性を確認するものである。今回は火災実験の結果と FDS によるシミュレーション結果の比較検討を報告する。

2. 実験方法^{6),7)}

2.1 道路トンネル模型

本実験は, 図 2-1 に示すように大空間の実験場内(高さ 25m × 幅 25m × 奥行き 120m) で実施した。模型は, 道路規格第一種 AA 級トンネルの約 1/2 縮尺とし, 高さ 2.7m × 幅 5.4m × 奥行き 18.2m の沈埋トンネルを対象とした箱型である。トンネルの模型装置は, 大空間実験場の壁際に近接して設置した。模型の両開口部近傍に区画境界を設置し, WS 用放水ヘッドを約 1.6m の間隔で 2 列設置した。2 列のヘッドは, 1 列あたり 1.0m 間隔で 5~6 個を千鳥に取り付けた。

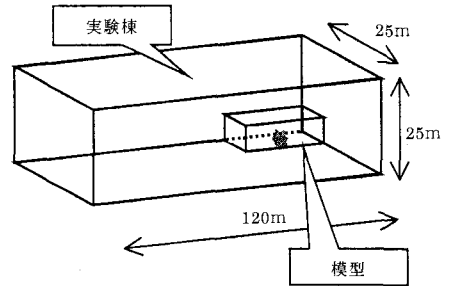


図 2-1 実験場の模型設置位置

2.2 火源の設定

実トンネルの空間高さ 7m, 普通乗用車の中でも大型の VAN (15MW 相当)^{8),9),10)}を想定し, 模型での火源は模型縮尺比を考慮¹¹⁾して, 式(2-1)より設定発熱速度(Q_{model})を 1.5MW とした。式(2-1)は式(2-2)の無次元発熱速度より導出される。

$$\frac{Q_{model}}{Q_{full}} = \left(\frac{H_{model}}{H_{full}} \right)^{5/2} \quad (2-1)$$

ただし, H : トンネル空間高さ[m], Q : 火源の発熱速度[kW], model(添字): 実験模型のスケール, full(添字): 実スケール

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_a C_p T_a g^{1/2} l^{5/2}} \quad (2-2)$$

ただし, Q : 火源の発熱速度[kW], ρ_a : 空気密度[kg/m³], C_p : 空気の比熱[J/kgK], T_a : 空気の温度[K], g : 重力加速度[m/s²], l : 代表長さ(トンネル高さ)[m]

火皿(直径 1000mm × 高さ 200mm)を模型装置中央部の床の上に設置し, 燃料 n-ヘプタン 23.3l に可視化のための 5% トルエンを混合し約 10 分間燃焼させた。

2.3 計測

天井近傍空気温度は, 直径 1.6mm のシース型 K タイプの熱電対により 5 秒間隔で計測した。図 2-2 に, 実験に用いた模型と熱電対の位置 No.1~No.16 を示す。熱電対は天井下 50mm の位置にトンネル奥行き方向中央に 1.0m 間隔に設置した。

2.4 実験ケース

シミュレーションの対象とした実験ケースは, ケース 1 (WS 非作動), ケース 2 (WS 作動) の 2 ケースである。図 2-2 に示すように, 火源は熱電対 No.7 の真下に設置した。また, WS は火源から 4.66m と 6.28m 離れた場所に 2 列に千鳥格子状に配置した。WS の仕様は片側 11 個のヘッドで, 流量は

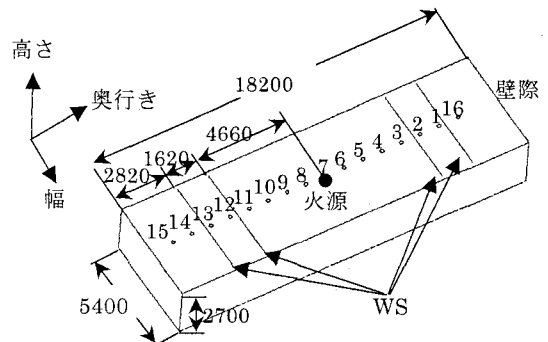


図 2-2 実験に用いた模型

10l/min (左右合計 220l/min), 作動圧力は 1.0MPa, 噴霧初速度は 20m/s, 噴霧角は 170~180 度, ザウダー平均は 200μm である.

2.5 発熱速度

ロードセルを火皿の下に設置して, 可燃物重量ならびに火皿内に落下した水量を計測し, 燃料の単位時間当たりの重量減少値と理論的単位発熱量から式(2-3)より発熱速度を求めた¹²⁾. 燃焼中は, 燃料 (n-ヘプタン) の油膜により水の蒸気が抑制されるものとする.

$$Q = q \left(\frac{\Delta G}{\Delta t} - w \right) \quad (2-3)$$

ただし, Q : 発熱速度[kW], q : 単位発熱量[kJ/kg], $\Delta G/\Delta t$: 燃料の単位時間あたり重量減少量[kg/s],
 w : 散水設備による増加水量[kg/s]

この発熱速度を用いて火災性状のシミュレーションを行った. 発熱速度の時間変化を図 2-3 に示す. WS 非作動のケース 1 は, 約 120 秒で 1000kW になり 300 秒で最大値となる山型である. WS が 90 秒で作動したケース 2 は放水後約 180 秒後にほぼ一定値を示した.

3. 数値シミュレーション

数値シミュレーションは, 模型実験の空間条件, 発熱速度を同一条件で与えて行った. 計算に用いた FDS の特徴を以下に述べる.

3.1 支配方程式と離散化

支配方程式は, 質量保存式, 化学種の質量分率保存式, 運動量保存式 (Navier-Stokes 方程式), エネルギー保存式, 状態方程式の 5 つである. 火災では熱による空気密度変化を考慮しなければならないため, 低マッハ数近似のもとで密度の温度依存性が考慮されている. 流れ場の離散化には差分法を用いており, スカラー成分とベクトル成分を互い違いに定義するスタガード格子を使用している. 移流項を除く全ての空間微分は二次精度中心差分が適用され, 時間積分には二次精度の陽的予測子修正子法が使用されている. 移流項は, 時間積分において予測子の段階では風上差分が使用され, 修正子では風下差分が適用される. ただし, 格子セルごとの局所 CFL 数による重み付けがなされており, これが 1 よりも非常に小さいときには二次精度中心差分に近くなり, 1 に近いときには完全な風上差分に近くなる.

3.2 物理モデル

FDS では, 乱流現象を取り扱うために標準スマゴリンスキーモデルによる LES を用いる. 熱伝導率と化学種の物質拡散係数と乱流粘性係数との対応は, 式(3-1), 式(3-2)に示すように, それぞれプラントル数 Pr とシュミット数 Sc を用いた 0 方程式モデルである.

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} C_p}{Pr} \quad (3-1)$$

$$\rho D_{LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc} \quad (3-2)$$

ただし, k_{LES} : 熱伝導率[W/mK], ρ : 空気の密度[kg/m³], D_{LES} : 物質拡散係数[m²/s], μ_{LES} : 粘性係数[kg/ms], C_p : 空気の比熱[J/kgK], Pr : プラントル数, Sc : シュミット数

シミュレーションでは, スマゴリンスキー定数 $C_s=0.2$, プラントル数 $Pr=0.5$, シュミット数 $Sc=0.5$ とし

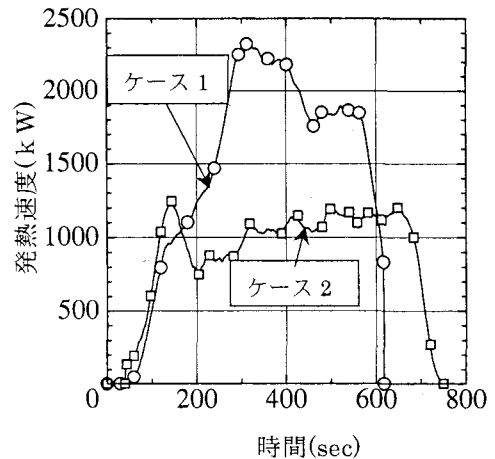


図 2-3 発熱速度の時間変化

た．燃焼モデルは，混合分率燃焼モデル(Mixture Fraction Model)である．このモデルでは，燃料と酸素は出会うと瞬時に燃焼する．その結果，燃料と酸素は同時には存在できないものとする．また，熱放射も考慮して，吸収放射する媒質に対する放射輸送式を有限体積法を用いて解く．

WS から放出される水滴群は，粒径分布として Rosin-Rammler 分布と対数正規分布を組み合わせたものを用いる．水滴群から流れへ及ぶ影響は，Navier-Stokes 方程式の外力項 f として式(3-3)に示すように考慮する．また，個々の水滴の飛跡は，式(3-4)～式(3-6)に示すように決定する．

$$\mathbf{f} = \frac{1}{2} \frac{\sum \rho C_D \pi r_d^2 (\mathbf{u}_d - \mathbf{u}) |\mathbf{u}_d - \mathbf{u}|}{\delta x \delta y \delta z} \quad (3-3)$$

$$\frac{d}{dt}(m_d \mathbf{u}_d) = m_d \mathbf{g} - \frac{1}{2} \rho C_D \pi r_d^2 (\mathbf{u}_d - \mathbf{u}) |\mathbf{u}_d - \mathbf{u}| \quad (3-4)$$

$$C_D = \begin{cases} 24/\text{Re} & \text{Re} < 1 \\ 24(1 + 0.15 \text{Re}^{0.687})/\text{Re} & 1 < \text{Re} < 1000 \\ 0.44 & 1000 < \text{Re} \end{cases} \quad (3-5)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho |\mathbf{u}_d - \mathbf{u}| 2r_d}{\mu} \quad (3-6)$$

ただし， ρ ：空気の密度[kg/m³]， C_D ：抗力係数(局所レイノルズ数 Re の関数)， r_d ：水滴半径[m]， $\mathbf{u}_d$ ：水滴速度[m/s]， $\mathbf{u}$ ：気体速度[m/s]， $\delta x \delta y \delta z$ ：格子セルの体積[m³]， m_d ：水滴の質量[kg]， μ ：空気の粘性係数[kg/ms]， $\mathbf{g}$ ：重力加速度[m/s²]

水滴は床に落ちると計算領域から削除する．物理モデルの更なる詳細は FDS 付属の理論マニュアルを参照されたい⁵⁾．

3.3 計算条件

(a) 格子分割

計算領域は実験に使用した 1/2 トンネル模型と同じであり，高さ 2.7m×幅 5.4m×奥行き 18.2m の箱型の空間を対象とした．格子セル数は，高さ方向 36 セル，奥行き方向 108 セル，幅方向 36 セルの等間隔直交格子とし格子数は 139968 セルである．

(b) 初期条件及び境界条件

初期条件は，全領域で速度は 0m/s，温度は実験と同じく 14℃とした．火源は燃料を n -ヘプタンとし，火源設置位置は実験と同じ床中心に合わせ，火源の形状は直交格子を使用するために四角形にした．また，火源面積は実験と一致させた．発熱速度は実験から求めた発熱速度を使用した．発熱速度を 60 秒毎のステップで直線補間した．壁面の速度境界条件はハーフスリップ，温度境界条件は断熱とした．またトンネル坑口の条件は，流出境界では境界圧力変動がゼロ，流入境界では無限遠方ゼロを仮定する大気解放条件とした．

(c) WS の設定条件

WS の流量や作動圧力，ザウター平均粒子径の設定は実験と同じにした．WS は実験と同じく 90 秒後に作動させた．

4. 結果と考察

本研究では，FDS が火災性状予測ツールとして実用性段階に至っているかを検討した．模型実験の測定値と FDS の計算値は，共に前後 7 点ずつ計 15 点の移動平均を行って比較した．

4.1 WS 非作動時の再現性

(a)火源近傍の天井温度の挙動

火源近傍天井付近における実測温度を図 4-1 に示す。図中の No. は、図 2-2 に示した模型トンネル内に設置した熱電対の番号に対応する。No.7 は火源の直上、No.6 と No.8 は No.7 から 1m 離れた計測点である。約 160 秒から 450 秒の間で No.6 の温度が No.7 の温度より高くなっている。これは、炎が No.6 側に傾斜していると考えられる。この原因として、図 2-1 に示すように模型設置位置が実験場の壁に近寄っていたため、トンネル模型の両方の開口からの空気の流入量に差が生じたためである。実験中の目視観察においても火炎の傾斜を確認した。一方、計算ではトンネル両方の開口条件が同一となっているため、火炎は傾斜しない。火炎直上の No.7 の実測温度（図中 Exp）と計算温度（図中 FDS）の変化を図 4-2 に示す。計算温度の時間変化を見ると、与えた発熱速度によって温度が上昇し、約 300 秒で最高温度となり約 600 秒で温度は下降する。計算結果は、炎が傾く 160 秒までは実測結果をよく再現していた。実測温度は火炎が傾斜したため、約 160 秒以降、計算温度よりも低くなっている。

(b)WS 側の天井温度の挙動

火源近傍で火源から 2m 離れた No.5 の実測温度と計算温度の変化を図 4-3 に示す。WS 設置場所を通過する前（火源側）の No.3 と WS 設置場所を通過した後（坑口側）の No.16 における実測温度と計算温度の変化を図 4-4 と図 4-5 に示す。実測温度に比べて計算温度は若干高くなっているもののほぼ同じ性状を示した。

(c)実測温度と計算温度の関係

発熱速度が最大となる 300 秒における実測温度と計算温度の比較を図 4-6 に示す。実測温度を横軸にとり計算温度を縦軸にして、天井付近の温度の再現性を検討した。火炎近傍の No.5 から No.8 では、炎の傾きにより実測温度と計算温度に差が見られるものの、火源から遠ざかると実測温度と計算温度は一致する性状を示した。火炎が傾かなかった 160 秒までの実測温度と計算温度の比較を図 4-7 に示す。回帰式を見ると、計算温度が実測温度に比べて約 10% 低くなっているが、よく一致している。

また、天井近傍の温度性状を比較するため、1/7 模型から実大規模の実験結果より求めた簡易推定式^{13),14)} (4-1)、(4-2)との比較検討を行った。比較した結果を図 4-8 に示す。計算温度は簡易推定式より若干高い値を示したが、性状はほぼ一致した。一方、実測温度の性状は火炎が傾斜したため r/H が 2.0 までは簡易推定式より低い、 r/H が 2.0 以上では簡易推定式と一致する。

$$\Delta T^* = \Delta T / T_a / \left(Q_H^* / Q_H^{*2} \right)^{1/3} = a(r/H)^b \quad (4-1)$$

$$Q_H^* = \frac{Q}{\rho_a C_p T_a g^{1/2} H^{5/2}} \quad (4-2)$$

ただし、 ΔT ：天井近傍上昇温度[K]、 T_a ：空気の温度[K]、 Q ：火源の発熱速度[kW]、 $a = -0.3/A_p + 3.53$ 、 $b = -0.15/A_p - 0.353$ 、 A_p ：開口高さ／開口幅、 r ：トンネル幅方向中心位置の火源からトンネル奥行き方向水平距離[m]、 H ：トンネル高さ[m]、 ρ_a ：空気の密度[kg/m³]、 C_p ：空気の比熱[J/kgK]、 g ：重力加速度[m/s²]

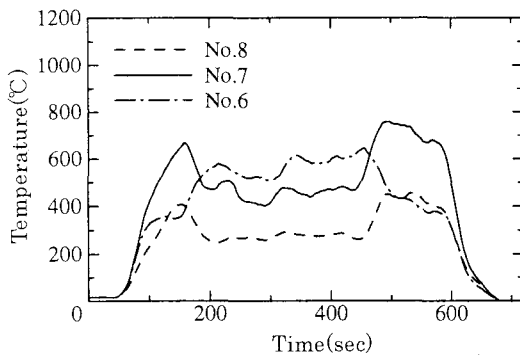


図 4-1 火源近傍の天井付近の実測温度の変化
(WS 非作動時)

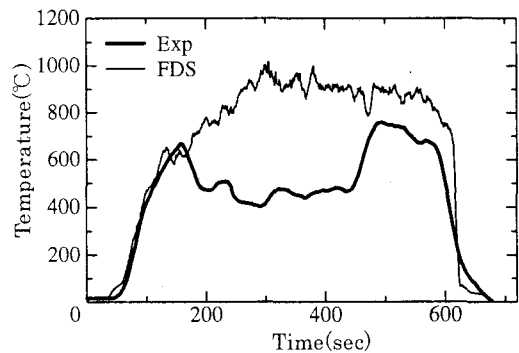


図 4-2 実測と計算の温度変化 (No.7)
(WS 非作動時)

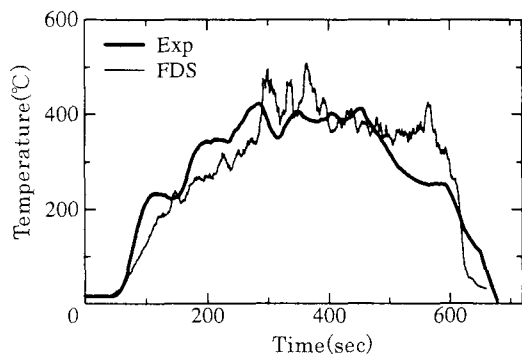


図 4-3 実測と計算の温度変化 (No.5)
(WS 非作動時)

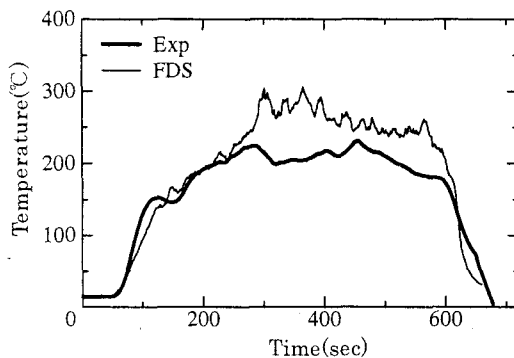


図 4-4 実測と計算の温度変化 (No.3)
(WS 非作動時)

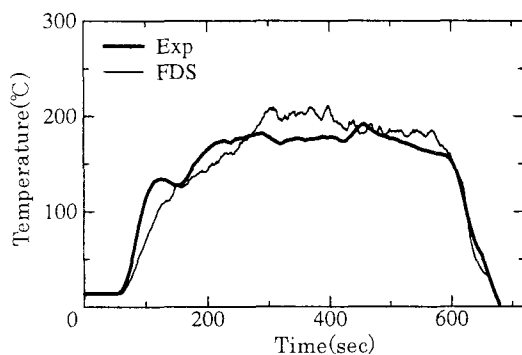


図 4-5 実測と計算の温度変化 (No.16)
(WS 非作動時)

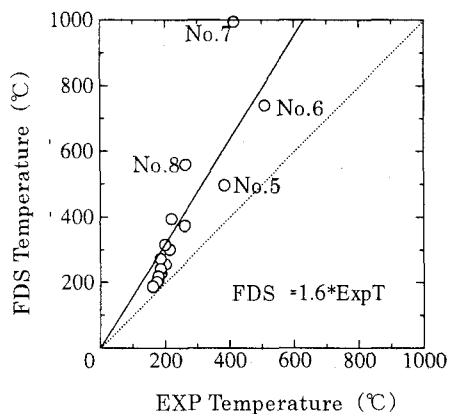


図 4-6 実測と計算の温度の関係(300 秒)
(WS 非作動時)

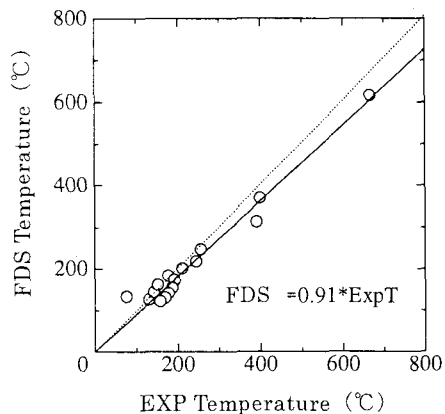


図 4-7 実測と計算の温度の関係(160 秒)
(WS 非作動時)

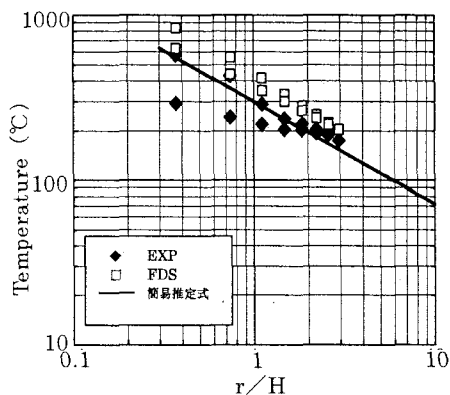


図 4-8 天井近傍の温度性状
(WS 非作動時)

4.2 WS 作動時の再現性

(a)火源近傍の天井温度の挙動

火源近傍天井付近における実測温度の変化を図 4-9 に示す。火源から 1m 離れた No.6 と No.8 は、火源直上の No.7 よりも温度が低くなっている。No.6 と No.8 の温度がほぼ同じ変化をしていることから、火炎は WS 非作動時と異なり垂直に発達したと判断できる。火炎直上の No.7 の実測温度と計算温度の変化を図 4-10 に示す。計算結果は実測結果の性状をよく再現していた。

(b)WS 側の天井温度の挙動

火源から 2m 離れた No.5 の実測温度と計算温度の変化を図 4-11 に示す。計算温度は実測温度の性状をよく再現している。WS 設置場所を通過する前（火源側）の No.3 の実測温度と計算温度の変化を図 4-12 に、WS 設置場所を通過した後（坑口側）の No.16 実測温度と計算温度の変化を図 4-13 に示す。どの場所においても、計算温度は実測温度の性状をよく再現している。WS 前後に配置された熱電対 No.3 と No.16 における計算結果の全体的な挙動が実測とよく一致することから、WS の液滴と流れ場の間で交換される熱量や運動量が精度良く捉えられていることがわかる。

(c)実測値と計算値の関係

WS 非作動時同様に、300 秒における実測温度と計算温度の比較を図 4-14 に示す。実測温度を横軸にとり計算温度を縦軸にして、天井付近の温度の再現性を示した。回帰式を見ると実測温度に比べて計算温度が 1 割程度低くなっていたが、よく一致する。簡易推定式と天井近傍の実測温度、計算温度との比較を図 4-15 に示す。計算温度を見ると、WS 近傍では大きく温度が減衰し区画化の効果が再現できている。

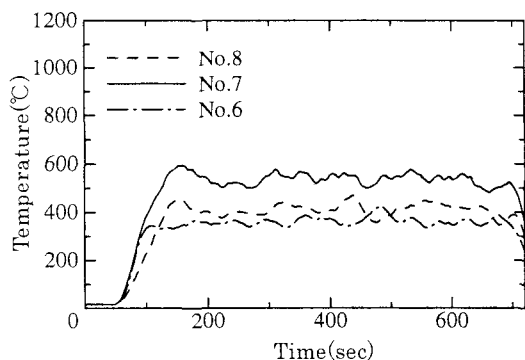


図 4-9 火源近傍の天井付近の実測温度の変化
(WS 作動時)

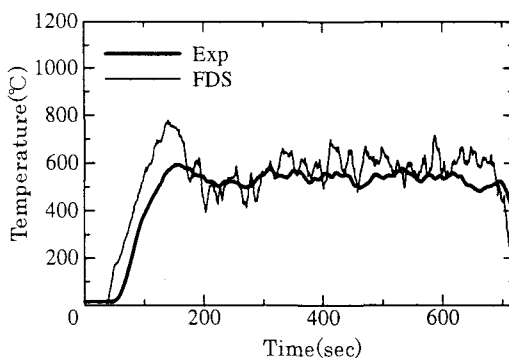


図 4-10 実測と計算の温度変化(No.7)
(WS 作動時)

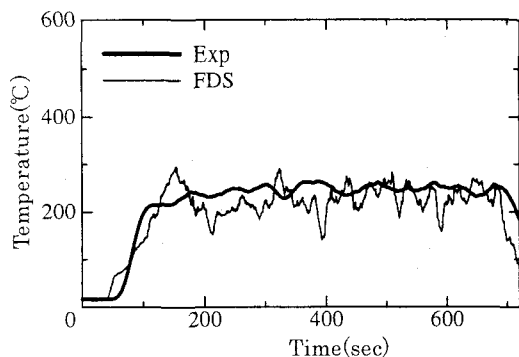


図 4-11 実測と計算の温度変化(No.5)
(WS 作動時)

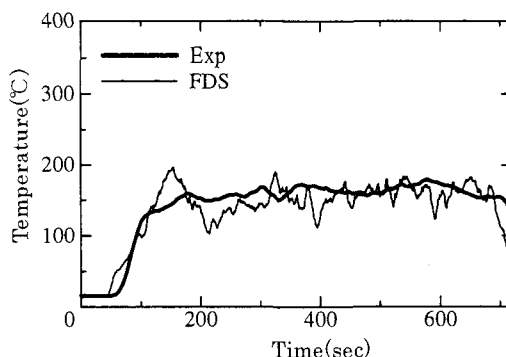


図 4-12 実測と計算の温度変化 (No.3)
(WS 作動時)

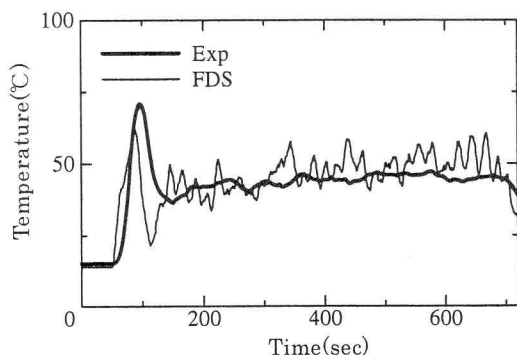


図 4-13 実測と計算の温度変化 (No.16)
(WS 作動時)

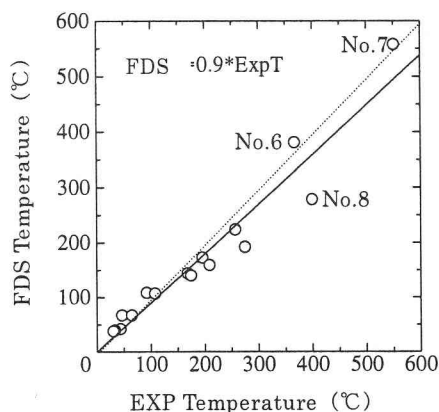


図 4-14 実測と計算の温度の関係(300 秒)
(WS 作動時)

4.3 気流と温度の可視化

図 4-16 に火源からトンネル坑口に向けて WS 非作動時の気流のベクトル図を示し、図 4-17 に WS 作動時の気流のベクトル図を示す。ベクトル図は、X、Y、Z 方向流速のベクトル合成を表したものである。いずれの図も奥行き方向と高さ方向から成る中心断面を可視化した結果である。

(a) WS 非作動時の結果

WS が非作動の場合、火源からの火炎ブルームが天井に衝突し天井ジェットとして天井部に高温層を形成して、坑口上部から外へ流出する。また、坑口下部から新鮮な空気が流入し火源近傍において火災ブルームの巻き込み空気となり大きな対流が形成される。その結果、温度分布も上部に高温層、下部に低温層の二層流が形成された。

(b) WS 作動時の結果

図 4-17 のベクトル図を見ると、火源側の WS では気流が突き抜けているが、坑口側の WS では上から下への流れが保たれていて流れが遮断されているのが分かる。気流は、坑口側の WS を境に大きく二つの対流が形成される。WS が作動している場合には、水幕による区画化が形成され上部の高温層の流れは遮られるとともに WS の散水によって床方向に流れの向きを変えて、再度火源に向かって流れる循環流を形成する。この結果、WS が区画化の役割を果たしていることが容易に把握できる。

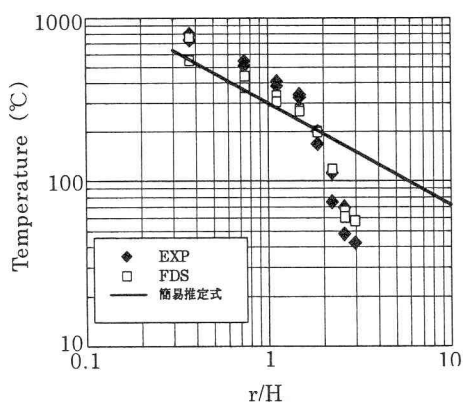


図 4-15 天井近傍の温度性状
(WS 作動時)

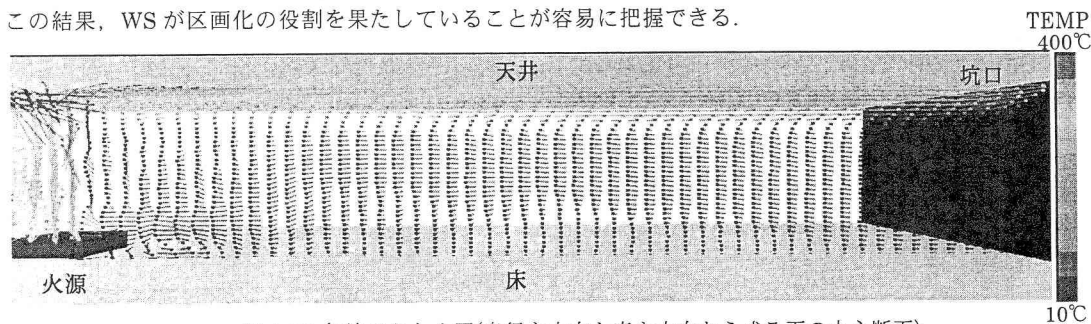


図 4-16 気流ベクトル図(奥行き方向と高さ方向から成る面の中心断面)
(WS 非作動時)

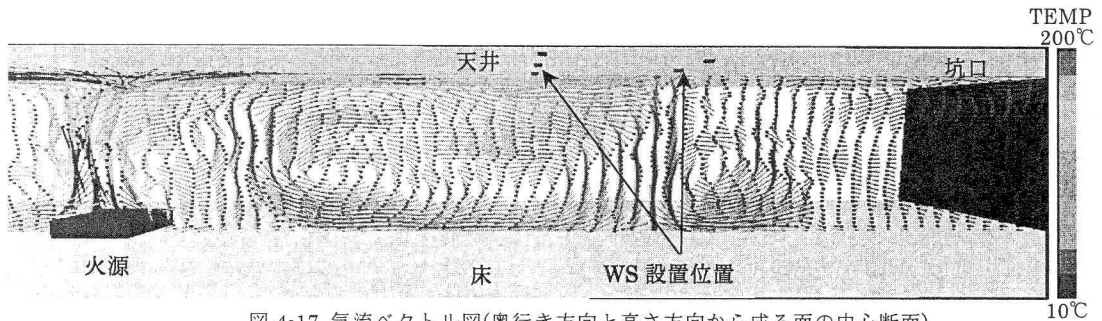


図 4-17 気流ベクトル図(奥行き方向と高さ方向から成る面の中心断面)
(WS 作動時)

5. まとめ

実験結果と FDS の計算結果を比較して以下の項目が得られた。

- (a)WS 非作動時の場合、境界条件を忠実に再現していなかったため、火源中心部の温度は、FDS の計算結果が高い温度を示した。空間全体の温度分布性状の再現性は高かった。
- (b)WS 作動時、空間全体の温度分布性状の再現性は非常に高かった。
- (c)WS 作動時、区画化の形成が再現できた。
- (d)WS 作動時、区画化により天井ジェットは遮断され区画内は循環流になると予測できる。

CFD を用いて散水設備区画化による熱性状予測の報告は少ない。今回の検討で、FDS の計算結果は実験値と良好な適合性を示した。実験では条件が限られる事が多いが、数値シミュレーションでは比較的容易に様々な現象を検討できる。今後、事前の実験ケースの絞込み、またコストや環境面で制約があつて実験では得られなかった性状を予測する場合に FDS は有効と判断できる。今回の数値シミュレーションでは空間のメッシュ分割は等間隔で行ったが、火災近傍では気流変動や温度変化が急激であるため、メッシュの粗密化による検討や境界条件の検討が残されている。また、散水設備による冷却効果並びに遮断効果については、別途、気流や温度分布の分析を進める必要がある。今回は、第一段階として箱型の実験模型での比較検討を行ったが、山岳トンネルで多く用いられている円形断面では、高温熱気流が矩形断面よりも強く発達するため、この再現性の検討や、高レイノルズ数流れの場合の直交格子による境界近傍の数値精度の検討を進める必要がある。また、WS 設置間隔 (WS 二段の間隔、トンネル幅方向の設置間隔、トンネル奥行き方向の設置間隔)、散水ヘッドからの散水量などについても検討を進めたい。

謝辞

本実験を行うにあたり、鹿島建設の天野玲子氏、橋本和記氏、新井芳明氏ならびにホーチキ株式会社の辻利秀氏、石田博志氏、林龍也氏をはじめ関係者の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kohyo Satoh, K.T. Yang : Simulations of Swirling Fires controlled Self-generated Entrainment Flows, Fire Safety Science Proceedings of the fifth International Symposium, pp201-212, 1997
- 2) W.K. Chow, N.K. Fong : Numerical Simulation on Cooling of the Fire-induced Airflow by Sprinkler Water Sprays, Fire Safety Journal 17, pp263-290, 1991
- 3) William Mell, McGattan KB, Borm HR : Large Eddy Simulation of Fire-Driven Flows, ASME HTD Vol.304, National Heat Transfer Conference Vol.2, pp73-77, 1995
- 4) 國兼裕子・川端信義・石川拓司・竹國一也・下田哲史 : 大断面トンネルにおける火災熱気流と煙の挙動シミュレーション, 日本火災学会研究発表会概要集, B2, pp96-99, 2002

- 5) Kevin B, McGrattan et al : Fire Dynamics Simulator (Version3) Technical Reference Guide,
<http://www.bfrl.nist.gov/>
- 6) 橋本和記, 天野玲子, 出石陽一, 栗岡均, 佐藤博臣 : 地下空間における新しい火災防災システム, 土木学会年次学術講演会梗概集, pp721-722, 2003
- 7) 出石陽一, 橋本和記, 天野玲子, 栗岡均, 佐藤博臣 : 火災区画化技術としてのウォータースクリーンの特性, 土木学会年次学術講演会梗概集, pp723-724, 2003
- 8) Carola Steinert : Smoke and Heat Production in Tunnel Fires, Proceeding of the International Conference on Fire in Tunnels, SP REPORT, 1994
- 9) Haukur Ingason : Measurements in Tunnel Fire", Proceeding of the International Conference on Fire in Tunnels, SP REPORT, 1994
- 10) PIARC : Design Manual for Roads and Bridges Chapter5, August, 1999
<http://www.official-documents.co.uk/document/deps/ha/dmr/b/vol2/sect2/bd7899b.pdf>
- 11) G.Su, J.G Quintiere, N.Schultz : Physical Scaling of Fire Suppression By Water Mist, Proceeding of 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition November 11-16, 2001, New York, NY, HTD-Vol.369-4, MECE2001/HTD-24238, pp97-100
- 12) 栗岡均, 佐藤博臣, 天野玲子, 橋本和記, 出石陽一 : トンネル模型空間における散水設備作動時の発熱速度, 土木学会年次学術講演会梗概集, pp725-726, 2003
- 13) 栗岡均・岡泰資・佐藤博臣・桑名秀明 : トンネル火災時における天井ジェットの温度減衰特性, 地下空間シンポジウム論文, 報告集, 第5巻, pp75-84, 2000
- 14) Hitoshi Kurioka, Yasushi Oka, Hiroomi Satoh, Osami Sugawa : Five Properties in near field of square fire Source with longitudinal ventilation in tunnel, Fire Safety Journal 38, pp319-340, 2003