

CFD を用いた火災の数値シミュレーション

Numerical Simulation of Fire Behavior by Using CFD

阿部 伸之

独立行政法人消防研究所

Nobuyuki Abe

National Research Institute of Fire and Disaster

E-mail: abe@fri.go.jp

1 はじめに

近年の急速な計算機の発達により高性能計算機を手頃に利用出来る周囲環境が整備されるに伴い、火災を研究対象としている防火安全（火災安全）分野において CFD (Computational Fluid Dynamics) を使った火災の数値シミュレーションが盛んに行われるようになってきた。防火安全分野での数値シミュレーションの主要な目的は、火災に対する安全性の評価やそれに基づいた設計を支援するための手段として位置づけられている。一方、火災実験は費用面、環境面で頻繁に実施することが困難であるという現状から、数値シミュレーションの担う役割もますます大きくなっている。

一口に火災といっても、建物火災、トンネル火災、市街地火災、車両火災、タンク火災など多岐に渡り、それぞれの火災に応じた対策によって要求される計算精度、注目する物理量は異なる。ここでは、建物火災に注目し、特に建物内部での煙流動性状を解析するための区画内における高温熱気流の CFD による数値シミュレーションについて述べる。また、著者はこれまで、新宿歌舞伎町・雑居ビル火災、韓国テグ市・地下鉄火災の煙流動性状を解析するために、CFD を用いた階段室火災、地下鉄駅舎火災の数値シミュレーションを行ってきたので、その適用事例についても紹介したい。

2 火災の数値シミュレーションの概要

2.1 ゾーンモデルとフィールドモデル

数値シミュレーションといえば、防火安全分野では主にゾーンモデルとフィールドモデルの2つの手法が用いられている。CFD による数値シミュレーションをこの分野ではフィールドモデルと呼んでいる。

ゾーンモデルは古くから火災安全性の評価ツールとして活用されてきており、さまざまな実績がある^{(1),(2)}。建物火災のような区画火災では、盛期火災時に見られる区画内に煙が一様に充満している場合（一層）と、初期火災や天井高が大きい時に見られる区画の上部に高温の煙層と下部に空気層の2種類の層に分けられる場合（二層）とがある。ゾーンモデルでは、区画の煙流動性状をマクロな観点から単層もしくは二層とみなして、気体の質量や熱的なバ

ランスから記述した実用的な数学モデルである (Fig. 1)。結果として、フィールドモデル (CFD) に比べ、詳細なデータは得られないものの、火災安全性を評価する上では、煙層の温度や天井からの煙層降下速度など必要な情報は得られる。しかし、複雑な形状で構成された区画、階段やエレベーターシャフト等の縦穴区画が含まれた場合の計算が困難という側面もある。

ゾーンモデルと CFD は、解析する側の要求する精度や目的に応じて適宜選択しており、それらには手法としての住み分けがなされている。複雑計算空間への適用や、より詳細な解析のためには CFD による数値シミュレーションの利用が望まれる。

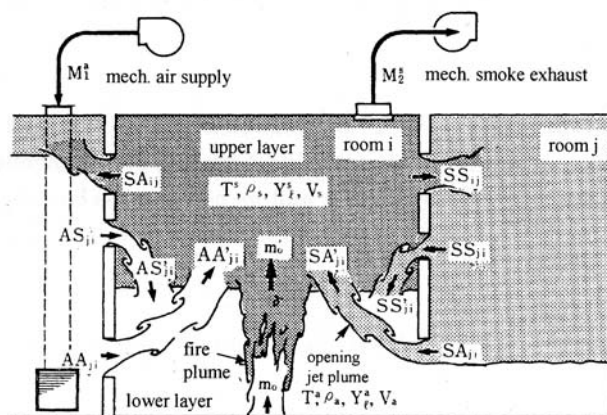


Fig.1 Schematic of two layer zone model^{(1), (2)}

2.2 火災を計算対象とした CFD 計算コード

これまで、火災を対象にした CFD 計算コードが世界中で開発されている。例えば、BF3D (米国)、KAMELEON (ノルウェー)、KOBRA (ドイツ)、RMFIRE (カナダ)、UNSAFE (日本)、SOFIE (欧州各国) などがあり⁽³⁾、各国の研究者が精力的に開発に取り組んでいる。それらは、ゾーンモデルと同様に主に単室区画火災を計算対象としたものが主で、汎用 CFD 計算コードとは仕様が異なる。また、大抵の場合、火災の研究者や技術者は CFD の専門家ではないため、CFD に関連した乱流モデルやアルゴリズム等の研究、開発をするということよりはむしろツールとして利用し現象の解明の手段とすることがほとんどである。

単室区画火災は、一つの区画内に火元である火源が置かれ、時間とともに区画内で火災が発達し、区画に開口部があれば区画内への新鮮空気の流入や区画外への熱気流の流出が起こる、火災シナリオとしては基本的なものである。よって、延焼や壁の燃え抜けなどを考慮する必要がなく、CFD として取り扱う境界条件としては単純化されたものである。逆に実際の建物火災では、境界条件である身の回りの家具や壁が燃え (延焼)、また壁が燃え抜けた場合などは境界条件の大きな変化が伴う。木造家屋の場合を想定すると、実際の火災の進展シナリオを数値シミュレーションで再現することはきわめて難しいと感じる。そのため比較的単純ではあるが、火災シナリオのパンターンを単純化し、かつ火災性状を検討するのに、必要な要素を盛り込んだ単室区画火災を計算対象とするのである。

2.3 Fire Dynamics Simulator⁽⁴⁾

ここでは、第 3 章で後述する CFD の適用事例の際に用いた米国商務省国立標準技術研究所

(NIST) が開発している火災 CFD 計算コード、Fire Dynamics Simulator⁽⁴⁾ (FDS) の概要を説明する。

FDS はフリーウェアとして公開されており、後処理として可視化ソフト SmokeView が付属する。FDS はソルバー部分であり、結果の可視化には専らこの SmokeView を使うことになる。FDS は汎用 CFD 計算コードに引け劣らないさまざまな火災対象に対応できるフレキシブルさを備えている。計算手法としてラージ・エディ・シミュレーション (LES) を用いて計算を行っている。サブグリッド・スケール (SGS) モデルとして、散逸効果が優れているため工学的に広く用いられている Smagorinsky モデル⁽⁵⁾を採用し、Smagorinsky 定数は 0.2 (既定値) としている。燃焼モデルは Mixture Fraction モデル⁽⁶⁾を用いており、計算過程で放射熱も考慮されている。入力データとして、計算空間寸法、計算格子数、壁等の障害物形状の座標、計算終了時刻、火源の発熱速度 (単位時間当たりの発熱量)、可燃物の種類の指定等の情報を与えると、出力データとして温度や速度等の種々の参照面分布データや参照点時系列データが得られる。

2.4 支配方程式と離散化

FDS における支配方程式は質量保存式 (式(1))、化学種保存式 (式(2))、運動量保存式 (式(3))、エネルギー保存式 (式(4))、状態方程式から成る。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_l) + \nabla \cdot \rho Y_l \mathbf{u} = \nabla \cdot (\rho D)_l \nabla Y_l + \dot{W}_l''' \quad (2)$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right\} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} - \frac{Dp}{Dt} = \dot{q}''' - \nabla \cdot \mathbf{q}_r + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_l h_l (\rho D)_l \nabla Y_l \quad (4)$$

ここで、 ρ は気体密度、 \mathbf{u} は速度ベクトル、 Y_l は化学種 l の質量分率、 \dot{W}_l''' は化学種 l の生成率、 p は圧力、 \mathbf{f} は外力、 $\boldsymbol{\tau}$ は応力テンソル、 h はエンタルピー、 \dot{q}''' は単位体積あたりの発熱速度、 \mathbf{q}_r は放射熱流束、 T は温度である。火災室内では気体は圧縮性ではあるものの低マッハ数流れであるから密度波伝播を捉える必要がない。Rehm ら⁽⁷⁾や Sivashinsky⁽⁸⁾により低マッハ数近似が提案されており、FDS にもその近似が適用されている。

支配方程式の空間微分項の離散化には 2 次精度中心差分法、支配方程式の対流項には 2 次精度中心差分法と 1 次精度風上差分法を組み合わせ、Courant 数をパラメータにした差分法を適用する。一般的には、SGS 応力による乱流粘性より 1 次精度風上差分による数値粘性の方が流れ場に与える影響が強くなる⁽⁹⁾。支配方程式の非線形項の離散化に改善の余地があると思われるが、FDS では計算を安定して実行することを優先しているようである。時間進行法は陽的 Crank-Nicolson 法であり、時間刻み幅は CFL 条件を満足するような可変刻み幅となっている。

3 火災への CFD 適用事例

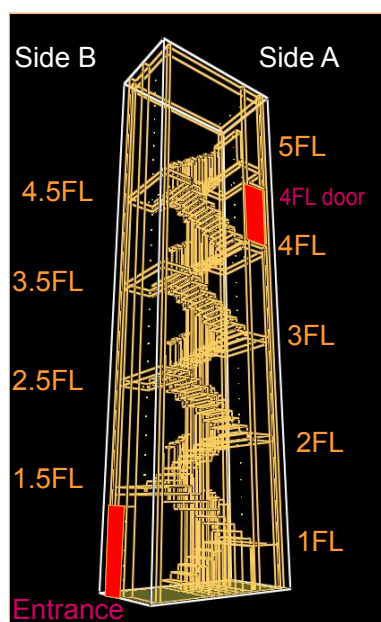
ここでは、FDS を使って、階段室火災および地下鉄駅舎火災を対象とした数値シミュレーションを行ったので、それらを CFD の適用事例として紹介する。

3.1 階段室火災への適用例^{(10)~(12)}

2001 年 9 月 1 日に発生した東京・新宿歌舞伎町の雑居ビル火災では、44 名もの死者を出すという大惨事に至った。そして、この火災の出火源は階段室であった。本来、階段室は避難のための安全な空間（安全区画）であることを前提としており、火災の発生を想定した研究はあまり行われていない。よって、本火災でも見られたように、小規模建物階段室火災の現象把握が今後の消防・避難対策を考える上で重要であると考えられる。火災時における階段室内温度の分布性状及び熱気流の挙動を数値予測において把握するとともにその適用可能性を検討することを目的とし、5 層階段室実大火災実験⁽¹²⁾に対応した CFD を用いた数値シミュレーションによる熱気流解析を行った。

3.1.1 計算条件

計算空間を Fig. 2(a)に示す。著者らが行った小規模建物火災の数値シミュレーション⁽¹⁰⁾に使用した階段室部分を切り出したものである。デカルト座標系で計算空間の寸法は長手(x)方向×幅(y)方向×高さ(z)方向=4.5m×2.5m×16.125m である。計算格子数は 72(x)×40(y)×258(z)=743,040 点（格子幅 0.0625m）の等間隔格子である。階段室は 5 層である。また、1 階から 2 階にかけての踊り場などは便宜的に 1.5 階と呼ぶことにする。階高は 3m である。参考のために実験で用いた階段室実大模型を Fig. 2(b)に示す。計算開始時の初期温度は実験開始時に測定した階段室外部温度であり、速度は全領域で 0m/s とした。計算開始と出火時刻は同一とし、計算は時刻 $t=600s$ まで行った。



(a) Computational domain



(b) Full-scale model

Fig. 2 5-story stairwell

3.1.2 境界条件

階段室のすべての壁面の速度境界条件はハーフスリップ条件、伝熱に関しては壁面内部で壁面に垂直な方向に一次元熱伝導方程式を解き、壁材質を実験と同じケイ酸カルシウム（熱伝導率 0.12W/m/K 、熱拡散率 $1.14 \times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$ ）として失熱を考慮した。Table 1 に示すように、開口条件として階段室入口（幅 $0.9\text{m} \times$ 高さ 2.1m ）及び 4 階ドア（幅 $0.8\text{m} \times$ 高さ 2.1m ）をそれぞれ開放した場合と閉鎖した場合の組み合わせにした。また、階段室の開口部が開放の時には大気開放条件を適用した。発熱源である火源条件としては実験に合わせた発熱速度面積を用いた。本報告では、H30-CC、H30-OC、H30-CO、H30-OO の 4 ケースにのみ注目する。

Table 1 Openings conditions and heat source (Experiment)

Experimental case	Fuel (Pan diam., Quantity)	Openings' conditions	
		4FL door	Entrance
H30-CC	n-heptane (30cm ϕ , 3liters)	Closed	Closed
H30-OC	n-heptane (30cm ϕ , 3liters)	Open	Closed
H30-CO	n-heptane (30cm ϕ , 3liters)	Closed	Open
H30-OO	n-heptane (30cm ϕ , 3liters)	Open	Open
H50-CC	n-heptane (50cm ϕ , 8liters)	Closed	Closed
H50-OO	n-heptane (50cm ϕ , 8liters)	Open	Open
H70-CC	n-heptane (70cm ϕ , 10liters)	Closed	Closed
h70-OO	n-heptane (70cm ϕ , 16liters)	Open	Open

3.1.3 火源条件

火源は液体燃料である n-ヘプタンとした。実験で測定した n-ヘプタンの重量減少速度と発熱量から求めた発熱速度を数値計算での火源の発熱速度として用いている。Fig. 3 では実験ケース H30-OO の場合の実験で得られた発熱速度（黄緑色の実線）を計算の火源条件として利用するために、折れ線（緑色の太線）で近似している様子を示す。実験では燃料を丸皿に入れていたが、Fig. 4 に示すように本計算ではデカルト座標系に合わせて火源形状を丸皿の面積と同じ面積である正方形（角皿）とした。火源は実験と同様に 3 階から 3.5 階への階段（およそ 3 階から 3 段目）に設置した。

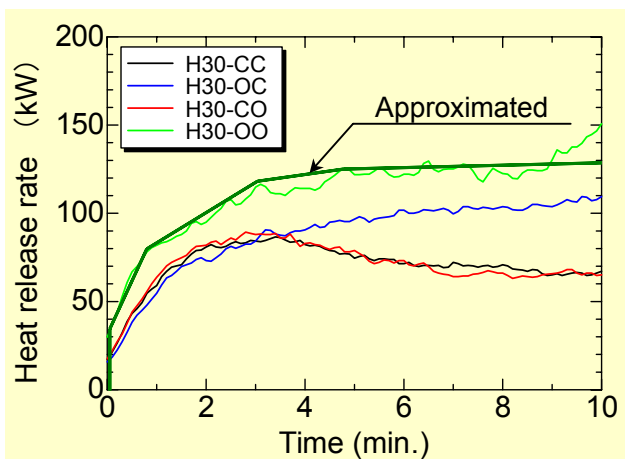


Fig. 3 Heat release rate (Experimental data)

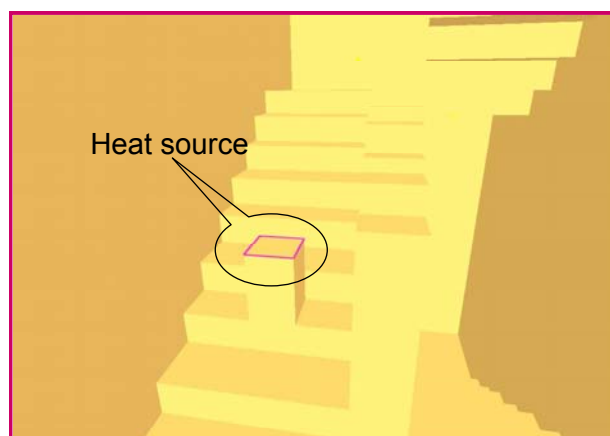
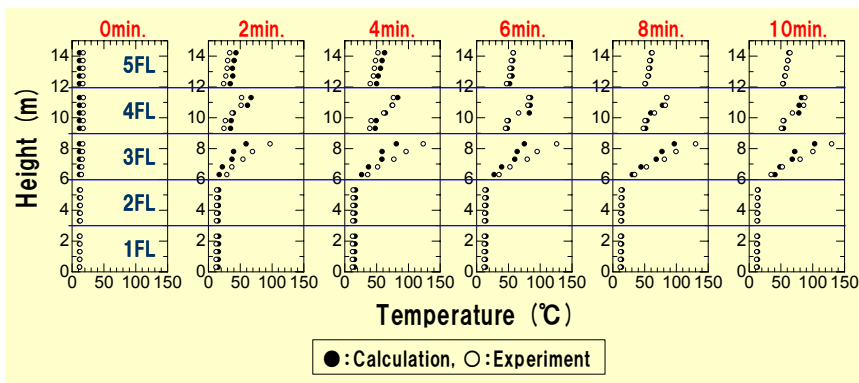


Fig. 4 Heat source area equivalent of oil pan 30cm in diameter

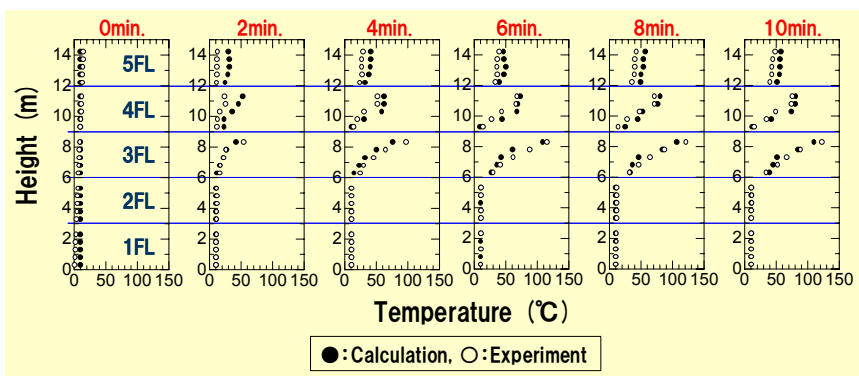
3.1.4 考察とそこから導かれた防火安全対策

Fig. 2(a)に示した階段室内壁面 Side A の壁から離れる方向に 5cm 離れた場所での高さ (z) 方向のガス温度分布を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a)、(b)、(c)を見ると、3 階、4 階では温度は層状に分布している。5 階に関しては一様な温度分布になっており、4.5 階から 5 階にかけて空間容積が拡大する時に高温層と低温層が混合すると考えられる。3 階が最高温度となり、およそ 100°C である。H30-C0 の温度分布は H30-CC に極めてよく似た分布になる。実際の階段室火災において、すべての開口部が閉鎖されていれば、消防隊が階段室入口を開放して進入しても流れ場には影響がないと考えられる。H30-0C の場合は 4 階フロアの床面付近の温度が低くなっており、これは H30-0C の唯一の開口部である 4 階ドアから高温の熱気流が階段室内から外へ排出されると同時に外から階段室内に新鮮空気が流入してくると考えられ、空気の温度と浮力の関係から 4 階ドア上部に高温の熱気流が存在し、下部に新鮮空気の流入があるために、4 階フロアの床面付近の温度が低くなっていると考えられる。Fig. 5(d)に示す H30-00 の場合は 4 階が最高温度およそ 60°C となり、全体的に温度が低くなる。すべての開口部を開放している場合は、3 階の火源からの熱気流が 4 階ドアから外部に流出し、それに伴い階段室入口から新鮮空気が階段室内に流入し上昇する。浮力により熱気流の流出と新鮮空気の流入が効率的に行われる“煙突効果”により、4 階の温度が 3 階のそれに比べて高くなる。

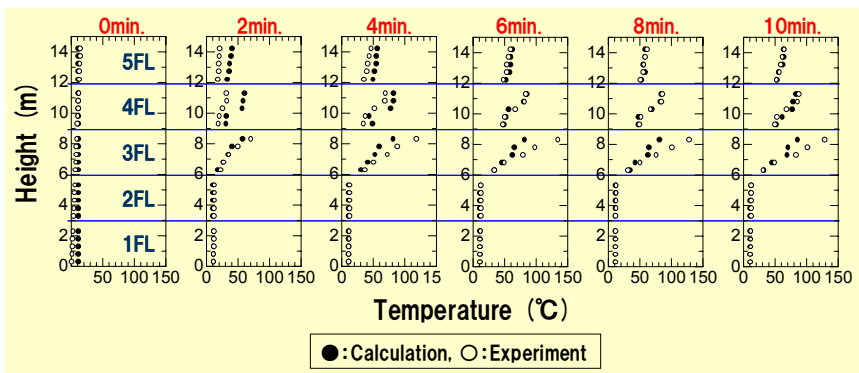
Fig. 6 は人間が避難可能であると判断する限界の温度を $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ と仮定した場合の目安として、出火開始から 2 分後のおよそ 50°C の等温度面を示している。H30-00 の場合は、煙突効果による階段室入口から 4 階ドアへの階段に沿った螺旋状の流れにより、階段の側壁側がその流れの通り道となる。そのため火源から浮力により上昇した熱気流は手すり側に傾く。同時に熱気流は階段に沿うように階段側にも傾き、3 階天井には熱気流はたまらない。階段に可燃物が置かれている場合には傾いた火炎がそれに着火し、上階に延焼するおそれが出てくる。4 階から上方は 4 階ドアが開放されていることから、熱気流が成層することはない。



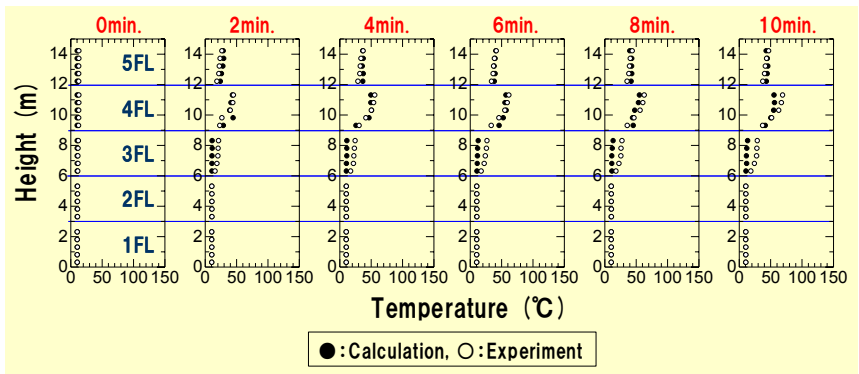
(a) H30-CC (Entrance: Closed, 4FL door: Closed)



(b) H30-OC (Entrance: Closed, 4FL door: Open)



(c) H30-CO (Entrance: Open, 4FL door: Closed)



(d) H30-OO (Entrance: Open, 4FL door: Open)

Fig.5 Temperature profile in the vicinity of the Side A (Fig.2(a))

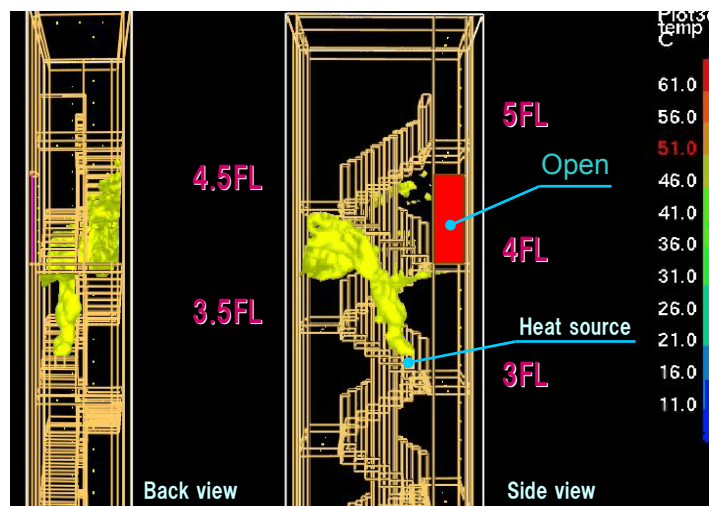


Fig.6 Isosurface of temperature (about 50°C) at 2 min. (H30-00)

以上より、階段室火災において上方の扉を開けることは煙突効果を引き起こし、可燃物が置いてあれば火勢を大きくするきっかけとなりかねない事がわかった。このため、消防戦術上、屋上など上方からの開口部を開放しての消防活動の際には気をつけてアプローチすべきである。また、煙突効果が生じた場合には火炎が階段に沿って伸びるため、階段に可燃物を置くことにより延焼拡大を引き起こす。よって、可燃物を階段には置くことが非常に危険なことである。

3.2 地下鉄駅舎火災への適用例^{(13), (14)}

2003年2月18日、韓国大邱（テグ）市・中央路駅構内で発生した地下鉄駅舎火災⁽¹⁵⁾により約200名もの死者を出す大惨事に至った。本火災は地下3階での液体燃料による車両内での放火による。避難者や消防隊員の証言、鎮火後の駅構内の状況から、車両から発生した煙が駅構内全体に急速に伝播し、避難行動や消防活動を困難にしたと考えられる。

地下鉄構内の流れの数値シミュレーションでは、これまで主に列車入線時のピストン効果によるプラットホームでの空気の流れ及び空調への影響⁽¹⁶⁾など平常時の場合を対象にしており、高浮力熱気流が支配的になる火災時の場合の地下鉄駅構内全体を対象とした研究は過去にほとんど行われていない。以下は、地下3階で発生した地下鉄車両火災による初期火災時の熱気流が地下1、2階など上層階にどのように伝播していくかを、CFDを用いた数値シミュレーションにより検討したものである。

3.2.1 計算条件

計算空間をFig.7に示す。地下1～3階までの3階層で各階は3種類の断面寸法の階段で接続されている。座標原点は地下3階床面（線路上）中央である。駅構内における計算空間寸法（ $x \times y \times z$ ）は190m×16.4m×13.35mである。計算格子数（ $x \times y \times z$ ）は512×64×64=2,097,152点の等間隔格子である。地下3階はプラットホームであり、地下2階はコンコースである。地下1階から地上部分へは大気開放条件を適用している。地下3階のプラットホーム両端から長さ200m×幅7.0m×高さ4.45mのトンネルがあり、その先は堅坑（断面寸法2.0m×7.0m）により地上部分に接続していると仮定した。駅舎、トンネル、堅坑はそれぞれマルチプロッ

クで接続されている。初期条件として、計算空間すべての初期温度を 20°C、速度を 0m/s とした。列車は 6 両編成 (1 両 18m) で、1 両に 4 つあるプラットホーム側扉 (幅 1.3m×高さ 2.0m) は常に開放してある。火源は寸法 1m² (1m×1m) で、列車内の Fig. 7 に示す位置に設置した。燃料はヘプタンで発熱速度は 1MW であり、延焼により発熱速度は拡大していく (Fig. 8)。壁面境界条件について、速度に関してはハーフスリップ条件、伝熱に関しては壁面垂直方向に 1 次元熱伝導方程式を解くことにより、失熱を考慮した。壁面材質はコンクリート (熱伝導率 0.12W/m/K、熱拡散率 1.14×10⁻⁷m²/s) である。計算は初期火災として扱い時刻 t=600s まで行った。

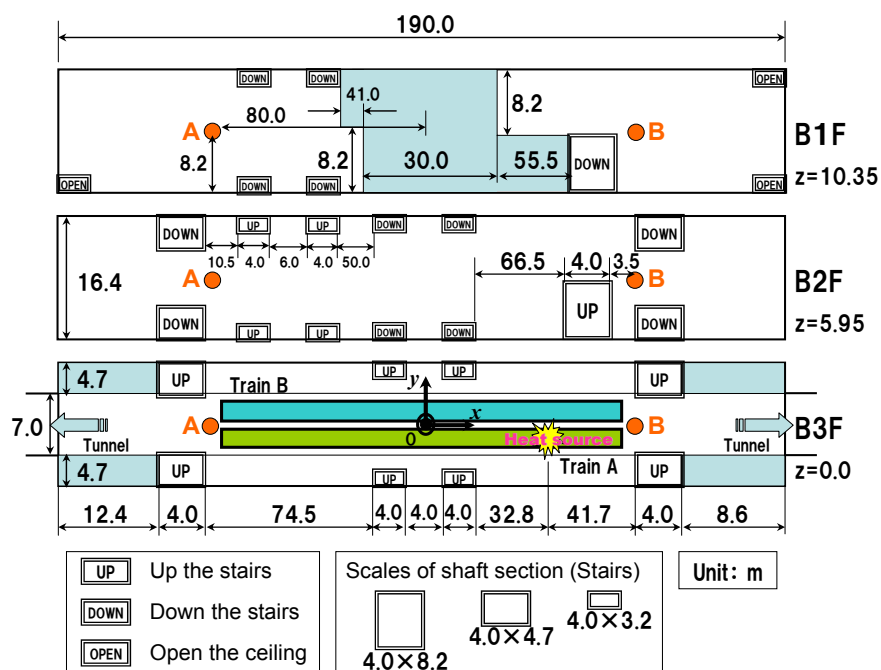


Fig.7 Schematic of the subway station (Computational domain)

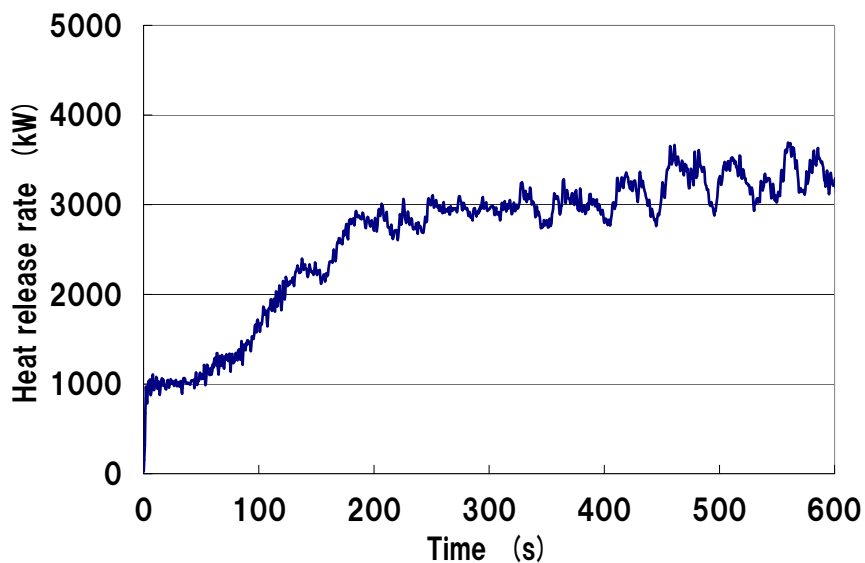


Fig.8 Time evolution of heat release rate

3.2.2 結果とそこから導かれた防火安全対策

Fig. 9 は、各階における床から 2m の高さの位置での温度の経時変化である。火源に一番近い地下 3 階 B 点で約 90s 後から温度上昇が始まり、次いで地下 2 階 B 点、地下 1 階 B 点の順に温度上昇し、熱気流は水平方向よりも鉛直方向に急速に伝播する。約 200s 以降、地下 2 階 B 点が最も温度が高い地点となる。地下 2 階では水平方向に熱気流が伝播し、地下 2 階 A 点で温度上昇が始まる。地下 1 階 A 点では地下 1 階 B 点の空間と直接接続していないので、地下 2 階 A 点を通った熱気流が地下 1 階 A 点に上昇する。出火階である地下 3 階 A 点の温度上昇が最も遅い結果となった。その原因の一つとして、Fig. 9 に示すトンネルからの新鮮空気の流れにより、地下 3 階における水平方向のトンネルに向かう熱気流の移動が遅くなる。

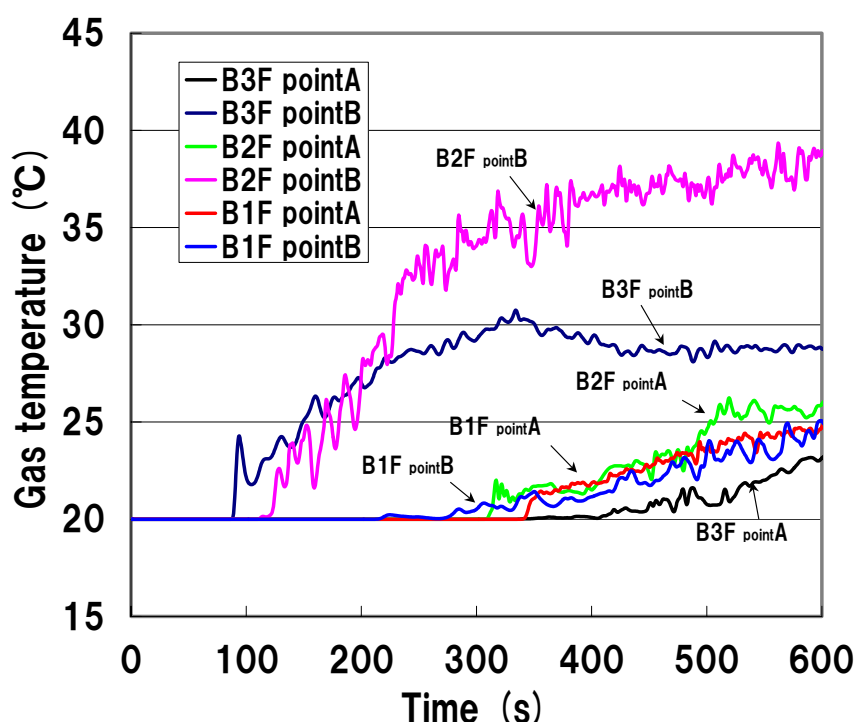


Fig. 9 Time evolution of temperature at height 2m from each floor (point A, B (Fig. 7))

Fig. 10 はプラットホーム(駅舎)長手方向中央断面における減光係数分布である。減光係数(光の吸収係数)は、単位体積中に含まれる煙粒子が光を遮る上での有効断面積と解釈できる⁽¹⁷⁾。計算では、すすの質量分率と気体密度の積が減光係数と比例関係を持つことから、減光係数を導き出している。Fig. 9 で示したように、出火階である地下 3 階の熱気流の伝播が他の階のそれよりも遅いことが Fig. 10 から把握できる。煙先端の水平方向移動速度を 1m/s としても、3 分もあればプラットホームの端から端まで熱気流が伝播しているはずである。出火 10 分後、地下 1、2 階では熱気流が一様に伝播しているが、地下 3 階のプラットホーム階では伝播している過程のみである。Fig. 11 は実際の地下鉄火災時の地下 3 階プラットホーム監視カメラの様子である(撮影方向は Fig. 10 を参照)。避難者はみな歩いて避難している様子から、煙の伝播が遅くないことが監視カメラの映像情報から確認できる。監視カメラ

の映像はこの地下 3 階の情報のみであるが、数値シミュレーションで得られた結果の一端が見られた。

以上より、今回の数値シミュレーションの結果から地下鉄火災ではトンネルからの新鮮空気の流入によりプラットフォーム階の煙の水平方向の伝播よりも垂直方向の伝播が早いことがわかった。地下施設において、避難者が地上に避難するためには発生した煙との競争になるので、的確な避難誘導が必要不可欠になると考えられる。また、地上から消防活動を行う消防隊にとって、地下へのアプローチが困難になるため、消防戦術についても状況に対応した判断が必要となる。

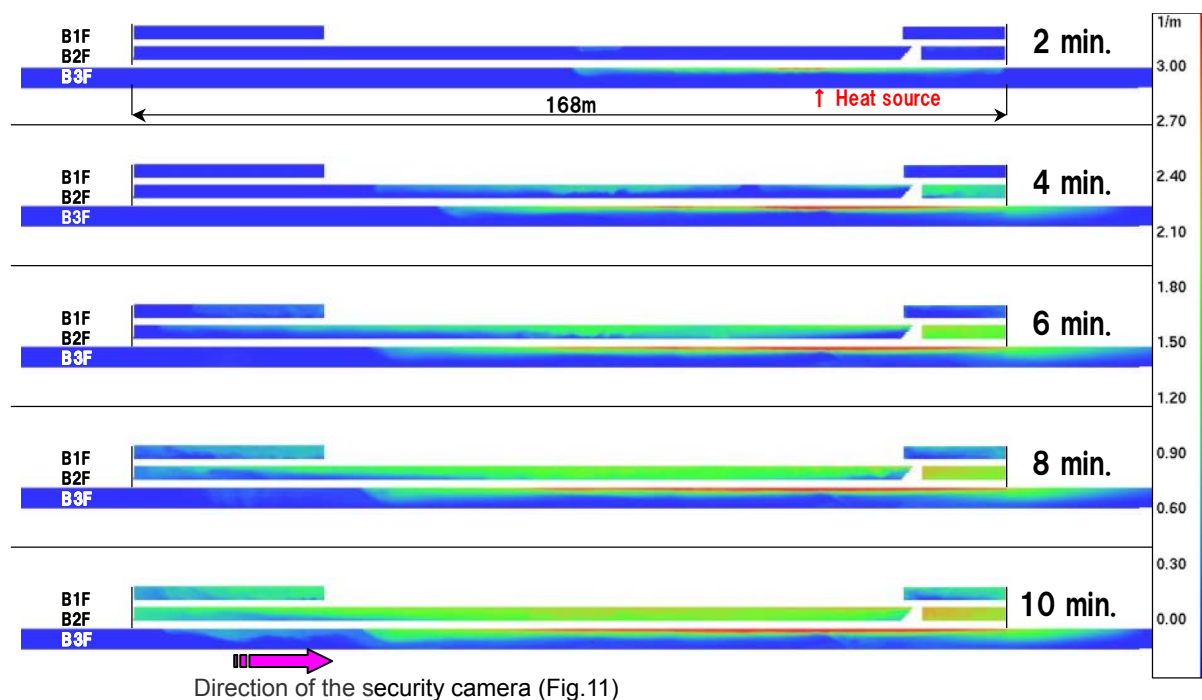


Fig.10 Time evolution of light extinction coefficient distribution ($x-z$, $y=0$)



(a) Fire break-out

(b) In 1 min.

(c) In 2 min.

Fig.11 Smoke movement in the Daegu subway fire (Security camera)

4 課題と展望

4.1 火災への CFD 適用限界と技術上の課題

CFD を用いた火災の数値シミュレーションを通して、CFD の適用限界と技術上の課題について、思いつく点を以下挙げてみた。

- (1) 実火災では出火の位置や時刻等が正確に把握することは難しい。そのような初期条件の若干の違いが支配方程式の非線形性により結果を大いに異なるものとするから、そのことによる火災進展シナリオが変わる恐れがある。他分野でも同様の問題はありと思われるが、実火災では数値シミュレーションのための初期条件の設定の難しさが特に顕著である。
- (2) 防火設備の状況や壁面の焼損、延焼により境界条件が時々刻々と変化する。例えば、壁面の燃え抜けは、障害物としての境界を失うだけでなく、密閉空間であればその燃え抜けた場所から新鮮空気が流入して可燃物の燃焼性状も変化する。それらの境界条件の変化をすべて把握し、数値シミュレーションとしてもそれらを予測しなくてはならない。
- (3) (2) と同様の理由として、実際の火災ではスプリンクラーの散水など消火設備の作動や建物内にいる避難者の人の動きもあり、対策を講じる時にはそのような不確定要素までも考慮しなければならず CFD による数値シミュレーションのみの予測だけに頼ることが出来ない部分もある。
- (4) 可燃物の燃焼での化学反応を伴うマイクロなスケールの場合と対流・拡散する煙流動のマクロなスケールの場合が混在する火災の数値シミュレーションにおいて、現在の計算機能力ではすべてのスケールを考慮して計算することは難しい。よって、解決のためには、より高性能な計算機の登場や優れた燃焼モデルの開発によるところが大きいと考えられる。
- (5) シミュレーションを行う側にとっては手軽に計算機が利用でき、CFD の市販コードが普及しているという反面、CFD 計算コードの中身がブラックボックスであることが多々ある。そのため誤った初期条件や境界条件に対しても結果として実現象とはかけ離れた解(火災進展シナリオ)を得る恐れがあるので、何が計算過程で行われているのかを理解し利用すべきであると考えられる。

4.2 密度流を使った簡易的な煙流動解析

火災は燃焼(化学反応)、熱伝達、熱伝導、熱放射、対流、拡散など種々の現象が複雑に絡み合っている。そのため煙流動性状を詳細に調べる際、燃焼やそれに伴う熱が関与しないほうが取り扱いやすい場合がある。そこで、海洋工学分野で主に研究されている汽水域での塩水・真水の密度差による流れ(密度流、重力流)と同様に、窒素雰囲気中にヘリウムを流入させ、それらの密度差による浮力から煙流動を模擬する実験及び数値シミュレーションを著者は行っている。参考のため、その密度流の数値シミュレーションについて簡単に述べる。

計算手法として、有限差分法を採用し、LES により計算を行っている。ブシネスク近似を適用した非圧縮性流れの質量、運動量、混合分率の保存式を支配方程式とし、乱流モデルとして Dynamic Mixed SGS モデル⁽¹⁸⁾を、圧力解法としては HSMAC 法をアルゴリズムとして適用している。ボイド空間内の煙流動を想定した計算を行った結果の一部を Fig. 12 (時刻 $t=2.5s$ の時の様子) に示す。ボイド空間とは、中庭や光庭などに見られるように、四方が壁に囲ま

れており、天井が大気開放になっている空間である。本計算空間はデカルト座標系（地面中央が原点）で $0.3\text{m} \times 0.3\text{m} \times 0.9\text{m}$ ($x \times y \times z$ (高さ方向)) の寸法である。計算格子数は $60 \times 60 \times 180$ ($x \times y \times z$ (高さ方向)) である。窒素雰囲気中に、床中央の 0.05m 四方の流入口からヘリウムを 1.0m/s で上方に向けて噴出させている。時間刻み幅は 0.1ms 、3 次精度アダムスバッシュフォース法を時間進行法として適用した。

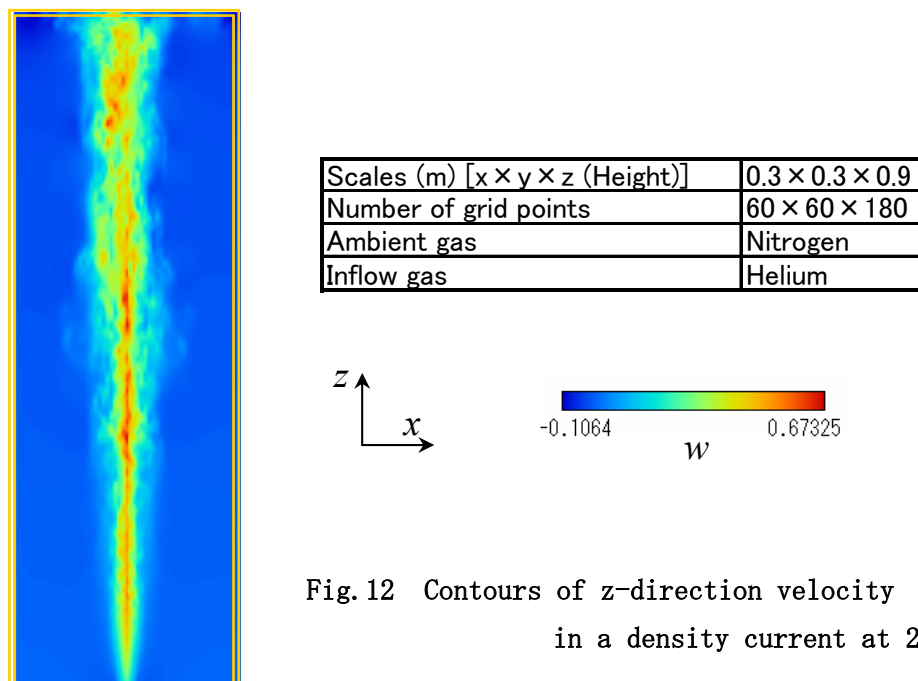


Fig. 12 Contours of z -direction velocity
in a density current at 2.5s

さまざまな計算条件の下でのこのような計算を通して、著者は密度流と煙流動との相違点を明らかにし、取り扱いやすいヘリウム・窒素で煙流動性状が把握できないか試みている。

4.3 CFD を用いた数値シミュレーションのバーチャルリアリティーへの活用

消防研究所では、fire cube⁽¹⁹⁾というバーチャルリアリティー (VR) 技術を用いた火災擬似体験システムを開発している⁽²⁰⁾ (Fig. 13)。本システムは、消防隊員のさまざまな状況下での消防活動訓練や一般向けへの防火安全に対する啓蒙活動へ活用、最適な誘導効果をもたらす誘導灯の配置等の研究などさまざまな用途が考えられる。ここで、VR 空間内での火災の表現、特に煙の挙動が重要になっている。その挙動は科学的な裏付けのあるものでなければ、いたずらに危険を煽ったり、また危険にもかかわらず安全と判断できるような状況を VR 空間内に作り出しかねない。その煙の挙動を CFD による計算結果を利用できれば最適であると考え、現在、著者はそのような取り組みを行っている。CFD による計算出力を 3 次元コンピュータグラフィックスで表現し、その VR 空間内で体験者はその煙の挙動などを立体視により擬似体験できるように試みている。

Fig. 14 は、ホテルニュージャパン火災の VR 空間での再現の様子であるが、描画されている煙はゾーンモデルによる計算結果を VR で表現したものである。現時点では、リアルタイムに計算出力を VR に反映させるために必要な計算速度の制約から、計算の速いゾーンモデルに頼らざるを得ない状況である。

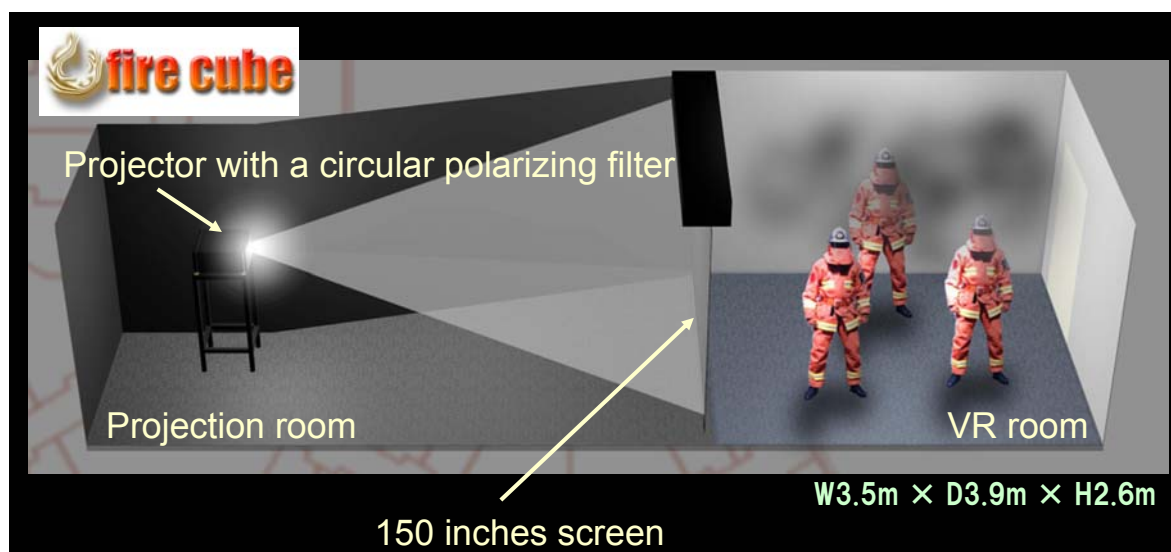


Fig. 13 Walkthrough-type fire simulator “fire cube” based on virtual reality technique



Fig. 14 Smoke movement in the Hotel New Japan fire (Virtual reality space)

以上、CFD を用いた火災の数値シミュレーションについて現状と課題を述べさせていただいた。防火安全分野では、CFD を用いた数値シミュレーションはまだ発展途上で、研究者や技術者はその開発や活用法について試行錯誤している段階であり、防火対策を考える上でも大きく発達することが望まれている。また、火災だけでなく、天気予報、地震や土砂災害などあらゆる分野において数値シミュレーションが発達し、防災に役立てれば幸いと感じる。著者もその一端を担う研究者として力を尽くしたいと思う。

謝辞

本報告で紹介した計算結果に対して、米国商務省国立標準技術研究所 (NIST)・Baum 氏か

ら大変貴重な助言をいただいた。また、消防研究所・鄭炳表氏には韓国大邱市地下鉄火災に関して貴重な情報を提供していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 田中哮義, 中村和人: “二層ゾーンの概念に基づく建物内煙流動予測計算モデル”, 建築研究報告 No.123 (1989)
- (2) Nakamura, K., Tanaka, T.: “Predicting Capability of a Multiroom Fire Model”, Fire Safety Science, Proc. of the 2nd Int'l Symposium (1989), 907-916
- (3) Friedman, R.: “Survey of Computer Models for Fire and Smoke (Second Edition)”, FORUM for International Cooperation on Fire Research (1991)
- (4) URL <http://fire.nist.gov/>
- (5) Smagorinsky, J.: “General circulation experiments with the primitive equations; Part 1. The basic experiment”, Monthly Weather Review, 91-3 (1963), 99-164
- (6) Mell, W.E., McGrattan, K.B. and Baum, H.R.: “Numerical Simulation of Combustion in Fire Plumes”, 26th Symposium (International) on Combustion (1996), 1523-1530
- (7) Rehm, R.G., Baum, H.R.: “The equations of motion for thermally driven, buoyant flows”, Journal of Research of the National Bureau of Standards, 83 (3) (1978), 297-308
- (8) Sivashinsky, G.I.: “Hydrodynamic theory of flame propagation in a enclosed volume”, Acta Astronautica, 6 (1979), 631-645
- (9) 朴南燮, 小林敏雄, 谷口伸行: “チャンネル内立方体障害物周辺の流れの LES と QUICK の影響について”, 第 10 回数値流体力学シンポジウム講演論文集 (1996), 172-173
- (10) 阿部伸之, 山田常圭, 箭内英治, 鈴木健, 関沢愛: “小規模建物階段室火災における熱気流の数値シミュレーション”, 消防研究所報告 第 93 号 (2002), 12-24
- (11) 阿部伸之, 山田常圭: “小規模建物階段室火災における熱気流の数値解析”, 第 16 回数値流体力学シンポジウム講演要旨集 (2002), 85
- (12) 阿部伸之, 箭内英治, 栗岡均, 鈴木健, 山田常圭, 佐藤博臣, 関沢愛: “階段室における火災性状に関する実験的研究 その 2 5 層階段室における火災性状”, 2002 年度日本建築学会大会 (北陸) 学術講演梗概集 (2002), 179-180
- (13) 阿部伸之, 山田常圭: “CFD による地下鉄火災時の駅構内における熱気流の数値シミュレーション”, 2003 年度日本建築学会大会 (東海) 学術講演梗概集 (2003), 43-44
- (14) ABE, N.: “Numerical Simulation of Thermal Plume in a Subway Fire”, The international symposium of 2. 18 Daegu subway fire disaster for the memorial of one year anniversary (2004)
- (15) 大邱広域市消防本部: 大邱地下鉄火災関連資料 (2003)
- (16) 松平晏明, 白鳥敏正, 小西奎二, 田代伸一: 地下鉄 12 号線の空調方式に関する調査 (その 2) 報告書, 東京都立科学技術大学 (1989)
- (17) 田中哮義: 改訂版 建築火災安全工学入門, 財団法人日本建築センター (2002), 318

- (18) Vreman, B., Geurts, B., Kuerten, H.: “On the formulation of the dynamic mixed subgrid-scale model”, Phys. Fluids, A6 (12) (1994), 4057-4059
- (19) 商標：第 4723831 号
- (20) 阿部伸之, 山田常圭, 須賀昌昭：“バーチャルリアリティー技術を用いた火災擬似体験システムの開発”, 日本環境管理学会中国支部技術発表会 (2004)
-