

煙流動状況の把握と煙流動シミュレーションに関する調査研究(第1報)

—大規模空間における温度分布と煙流動の変化について—

飯田 明彦*, 苫米地 守**, 森尻 宏*, 富田 功*

概要

水平方向に広い大規模空間の火災性状は未解明部分が多いとされる。本研究では、このような特殊な建物火災の一つとしての大規模空間を想定した実大火災実験を行い、温度、風速、煙濃度等を測定した。

さらに火災シミュレーションソフト(FDS: Fire Dynamics Simulator)を使用して、実験条件を適用した計算空間で火災時の温度分布と煙流動の変化を求め、実験値と計算値の比較と検討を実施した。将来的な消防関連業務の一つとして火災シミュレーションを視野に入れた活用方策を検討した。

1 はじめに

多種多様な火災の危険性を明らかにするために、実大規模の火災実験を行うことは、非常に重要な意味を持つ。しかし、実大規模の火災実験には、建物構造、借用期限、揚煙行為による近隣対策の必要性等様々な制約がある。加えて、可燃物の燃焼量、出火位置、開口部の開閉状況、建物形状、消火設備の稼働の可否等が異なった時の火災性状の差異については、未だ詳細な分析がなされていない¹⁾のが現実である。このような応用的変化を実大火災実験で行うには限界があるため、これらの解決方策のひとつとして、火災シミュレーション技術の活用が期待される。

本研究では、火災シミュレーション技術の現状を把握することを目的とし、実大規模の火災実験を行い、計算結果との比較検討を行った。計算は、空間内における熱・煙流動状況について数値流体計算をコンピュータ上で実行した。

2 数値計算

(1) 背景

熱に関するシミュレーション技術の利用は古く、溶鉱炉の放射熱の計算、ボイラーの熱伝導計算、建築分野でのゾーンモデル(図2.1: 煙層と空気層に分類する手法)を用いた煙層降下の計算等²⁾、大型計算機を用いて

の計算は様々な形で行われてきた。

しかし、近年におけるコンピュータ技術の著しい進展により数値流体力学、いわゆるCFD(Computational Fluid Dynamics)の活用による複雑な計算がパソコンでも可能となり、適用範囲が広がってきている。



a) ゾーンモデル

b) フィnite元モデル(CFD)

図2.1 建築火災分野で使用されてきた数値計算のイメージ

従来、火災現象をCFDにより数値解析することは、低温から高温までの幅広い温度と、幅射、対流、熱伝達、熱伝導等多種の熱量計算を行わねばならないこと、燃焼生成ガスへの対応、煙の発生による複雑化、建物構造の複雑さ、計算手法の選択が難解など、多くの点で困難とされてきた。コンピュータの高速化に伴い、火災現象に対するCFDを活用する試みがなされ、トンネル火災、単室火災における燃焼現象の解明、バルコニーにおける熱流の解析等³⁾、様々な研究成果が学会等で発表されてい

* 第一研究室 ** 新宿消防署

る。

このような中、米国、国立標準技術研究所 (National Institute of Standard and Technology : 以下「NIST」という) の研究機関である建物・火災研究所 (Building and Fire Research Laboratory : 以下「BFRL」という) において、実際に火災モデルを想定したシミュレーションソフト (Fire Dynamics Simulator : 以下「FDS」⁴⁾ という) が開発され各国の研究機関でその検証⁵⁾が行われている。一般的に流体のシミュレーションソフトは非常に高価だが、このソフトはフリーソフトとしてダウンロードして使用できるため、導入に際して障壁は低い。

(2) FDS について

FDS は計算を実行する場合、あらかじめ可視化事項を詳細に決定することが必要となる。事前設定した可視化事項のみを計算し、結果をファイルとして残し、可視化用の専用ソフトで映像化する構成により、計算後に異なる表示を行うことはできないためである。以下に FDS の構成について示す。

ア FDS の構成

FDS は直線直交座標に基づく計算格子 (立方体) を基本単位とし、隣接する立方体へ熱や煙等の流動を計算していくことで、火災現象をシミュレーションしており、ソフトは建物情報や燃焼条件等を入力して計算を行う部分と、計算結果を可視化する部分の 2 種類のソフトから構成されている。

イ FDS での入力方法

FDS で建物内の火災を計算する場合の手順は次のようになる。

(7) 入力・計算ソフト

① 建物内を小さな立方体 (セル) で分割

この立方体から隣接の立方体への熱や煙の流れを計算することを積み重ねることにより、計算を実行する。この立方体の大きさは任意の大きさに設定することが可能であるが、大きな建物を小さなセルで区切れば、計算に莫大な時間を要し、場合によってはメモリーの能力を超え計算不能となる。

一方、大きなセルで区切ると、階段や、壁等の大きさが厳密に再現されなくなるため、計算に支障を生ずる。

② 初期条件・境界条件の決定

個々のセルの壁面が開放されているか閉鎖されているか、熱の伝達はどうか等を入力する。発熱量や壁面の発火温度、初期の温度、燃料と酸素の比率等様々な値を入力することにより、計算の詳細を決定する。

③ 計算する事象の決定

建物内の温度、境界面等をどのように、どの位置で表示するか、建物内に断面を設け、その位置でのガス濃度を表示させるか、また、粒子の移動状況を表示させるか。表示する事項を予め全て決定する。

(イ) 可視化ソフト

結果を表示する専用ソフト (スモークビュー) で計

算結果 (図 2.2、図 2.3) を表示する。3 次元表示を行うことができ、視点を変えながらシミュレーション結果を覗くことができる。

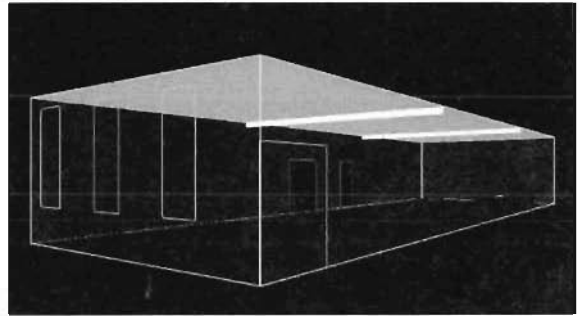


図 2.2 実験室シミュレーションモデル (計算空間)

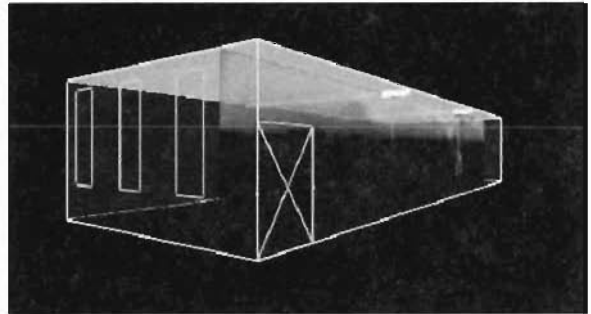


図 2.3 スモークビューで可視化した映像

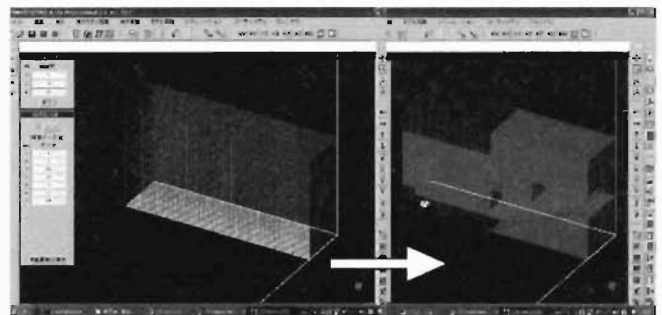


図 2.4 CFD2000 による簡易入力操作画面

(ウ) 簡易入力ソフト (CFD2000)

実用化を考慮した場合、建物の構造を入力すること (座標化) がもっとも難解である。これに対し、グラフィックソフトを用いる方法等も用意されているが、当研究室では、FDS 入力用ルーチンが用意されている CFD ソフト (CFD2000) を用いた。形状入力はこのソフトを用いることで、計算空間 (図 2.2)、立方体 (セル) の設定、セル同士の境界条件の設定について、リアルタイムで 3D 画像を見ながら、非常に簡易に建物構造や境界条件を入力することが可能となる。

また、FDS 用のデータに変換することが、アイコンをクリックするだけで可能となり、自動的に計算ソフトを始動することが可能であることから、コマンドプロンプト画面 (MS-DOS) 上での入力を行う必要性が極めて少なく済み、形状入力が非常に容易となる。また、CFD2000 自体が k-εモデルの計算コードであることから計算結果の比較検討も行うことが可能である。CFD2000 を用いた

入力例を図 2.4 に示す。

3 実験及び計算概要

(1) 燃焼実験

ア 実験日時

実験実施日は、第①実験、平成 15 年 9 月 11 日 (木)、第②実験、平成 15 年 9 月 15 日 (金) とし、両日とも 13:30 に点火した。

イ 実験場所

東京都江東区豊洲六丁目 13 番 20 号、旧東京消防庁豊洲訓練場管理棟 (写真 3.1)



写真 3.1 実験施設概観

ウ 実験施設の施工

豊洲訓練場管理棟 1 階部分を改造し、幅 7.5m (W) × 22.8m (L) × 3.6m (H) の居室を設営し、大規模空間を想定した。(図 3.1 以下「実験室」という)

天井部分は、スラブむき出しの状態とした。また、実験室の床は、厚さ 10mm の合板を下地とした。仕上げは厚さ 10mm フローリング貼りとした。実験室の内壁は、

厚さ 9.5mm のプラスターボードを下地とし、厚さ 10mm の天然木縁付目透かし貼(縦目地加工 W=100)とした。

エ 実験内容

(7) 実験種別

実験室内の温度、煙濃度 (光量)、ビデオ映像による視認状況等をそれぞれ記録し、データの集計を行った。

① 第①実験

メチルアルコール 950cc を、実験室中央北側の位置 (図 3.1、位置①) で燃焼を開始した。

② 第②実験

メチルアルコール 1100cc を、実験室中央の位置 (同 ②) で燃焼を開始した。

(イ) 可燃物量

第①実験、第②実験ともに、メチルアルコールを 0.36 × 0.36 (m) のオイルパンに入れ、燃焼を開始した。この時の発熱速度を求めると 433kW/m² となった。

(ロ) 開口部等設定条件

第①実験、第②実験の両方において、実験室南側の 3ヶ所の開口部と実験室中央西側の 2 箇所の開口部を開放、実験室中央南東側開口部を閉鎖した状態で、実験を行った。

(ハ) 測定項目

測定室には、データロガー、パソコン、テレビモニター、ビデオデッキ等を配置した。

測定は、それぞれの計測機器の電圧出力がデータロガー (江藤電気 CADAC21 モデル 9201A) を経由し、AD 変換された値として収録した。各種実験機器の設置位置を

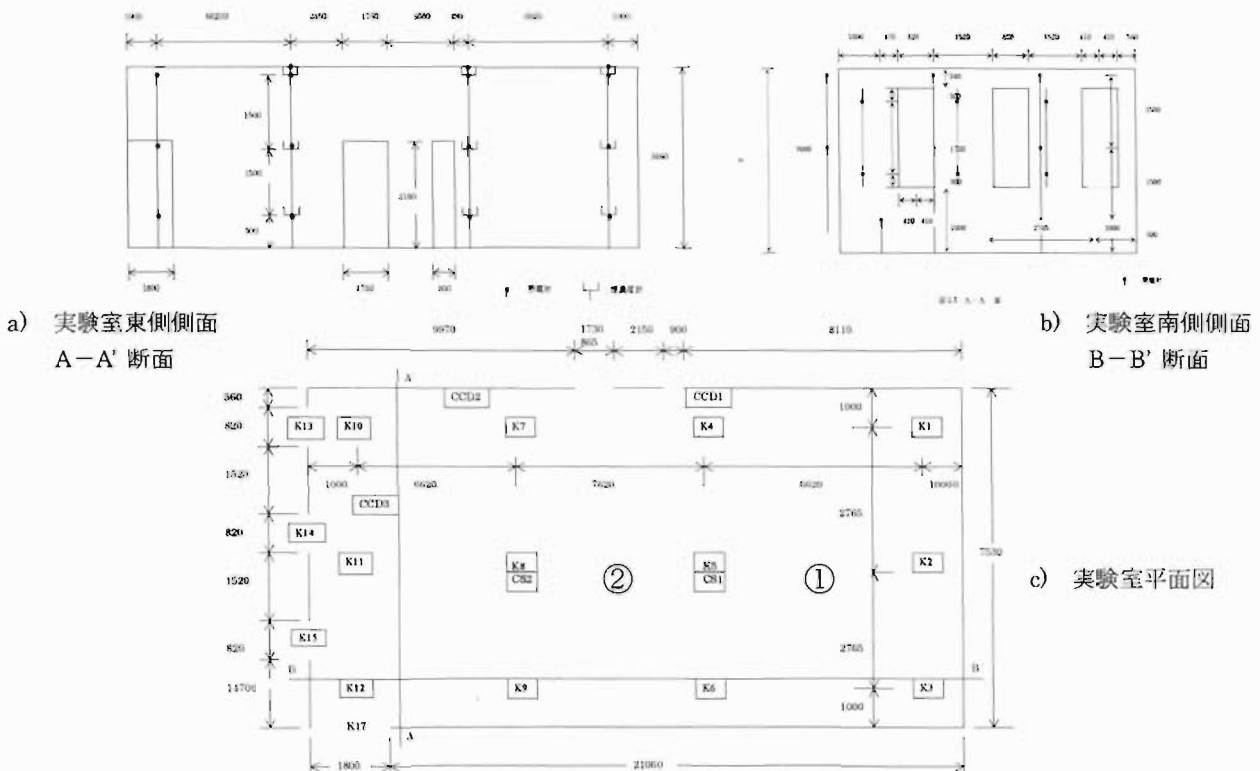


図 3.1 実験室測定機器設置状況 (①、②はそれぞれ実験①、実験②の火源の位置)

図 3.1 に示す。

① 室内温度

0.32mm アルメルクロメル熱電対（グラスウール被覆）を用い、実験室内に 12 ヶ所について、床面から 0.5m、2m、3.5m の部分の温度を測定した。（K1～K12）

② 煙濃度

光源は、発光波長 660nm の赤色発光ダイオードを使用し、制御出力として DC1～5V のモニタ出力が可能なファイバアンプ（オムロン E3X-CN21）に、幅 30mm のエリア検出可能で、光ファイバケーブル長が 20m のファイバユニット（オムロン E32-T16W-2）を用いて、透過光の減衰を計測し、減光係数 C_s を求めた。

設置場所は、実験室の中央 2 箇所に、床面から高さ $0.5 \cdot 2 \cdot 3.5m$ の位置にファイバユニットを取り付けて煙濃度を測定した。（ $C_{s1} \cdot C_{s2}$ ）（図 3.1）

③ 映像記録

北西側倉庫開放部近傍の CCD カメラ（図 3.1 CCD1 高さ 1.5m）を設置し、他に実験室中央から南西側（同 CCD2 の位置）、実験室南側の CCD カメラ（同 CCD3）にそれぞれ設置した。

(2) FDS による数値計算時の設定

今回の実験を検証するための計算条件は以下のように設定した。

ア 計算格子

直交座標系を用い、火災室は内寸（ $x \times y \times z$ ）で $23m \times 7.5m \times 3.5m$ （ $172.5 m^3$ に相当）、計算格子数は $230 \times 75 \times 35 = 603,750$ 点（格子幅 0.1m）の等間隔格子とした。

イ 初期条件

初期条件は、第①実験については室温 $31.8^\circ C$ 、第②実験については $29.3^\circ C$ と双方とも実験開始時の実験室の室温を摘要した。また速度は全領域で $0m/s$ とし、開口部からの流入、流出はフリーな状態とした。

ウ 火源条件

火源条件については、実験条件に合わせるために、収容物中心にバーナー（定常燃焼 表面面積 $0.4m \times 0.4m = 0.16 m^2$ ）を設置し、発熱速度を $350.7kW/m^2$ とした。また、燃焼位置は第①実験では、図 3.1 に示した実験室中央北東側①、第②実験では実験室中央位置②とした。

燃焼継続時間は、第①実験では 400 秒とし、第②実験では 462 秒とした。

エ 境界条件

壁面の速度境界条件は、ハーフスリップ、伝熱に関しては壁面内部で垂直な方向に一次元熱伝導方程式を解いた。壁、床の材質は、木材（熱伝導率 $0.17 W/m/K$ 熱拡散率 $8.9 \times 10^{-8} m^2/s$ ）とし、天井は不燃性タイル（熱伝導率 $0.0611W/m/K$ 熱拡散率 $2.6 \times 10^{-7} m^2/s$ ）とした。また、図 2.2 に計算空間、図 2.3 には可視化した映像の例を示す。

4 実験及び計算結果

各実験で計測した温度については、K1～K15 のうち、実験室中心軸上の K2, K5, K8, K11 でそれぞれの高さについて図 4.1a, b に示し、煙濃度については、 C_{s1} 、 C_{s2} の 3.5m の高さにおける計測値を図 4.2a, b に示す。FDS を用いて数値計算を行った結果は温度、煙濃度ともに図 4.1a, b、図 4.1a, b 上にも示している。

(1) 第①実験

エタノール 950cc を図 3.1 に示す実験室中央北側で燃焼を開始した。着火後すぐにエタノールは定常燃焼を開始し、約 400 秒で燃焼が終了した。

実験開始時における室内温度は $31.8^\circ C$ であった。火点近傍の天井付近（高さ 3.5m）では、着火後 57 秒後に $53.3^\circ C$ に上昇し、1 分 36 秒までは $50^\circ C$ 以上の温度を継続したが、その後ゆっくり温度は下降し始め、3 分 36 秒後には $39.7^\circ C$ となり $40^\circ C$ を下回った。（図 4.1a）

大規模空間の実験室内の高さ 2.0m の温度は、実験開始時の温度 $31.8^\circ C$ から、少量の温度変化があり、火点直近では 2 分 54 秒後には $38.3^\circ C$ まで上昇した。

また、大規模空間の実験室内の高さ 0.5m の温度は、実験開始時の温度 $31.8^\circ C$ から大きい変化はみられず、火点直近であっても $32.9^\circ C$ が最大値であった。

煙濃度計 1 での天井付近の高さ 3.5m（図 3.1、 C_{s1} ）での、煙濃度は 15 秒後に煙濃度 C_s 値（以下 C_s 値という）に変化が生じはじめ、45 秒後に C_s 値が $0.44[1/m]$ となった。その後天井付近の C_s 値は、徐々に増加し、5 分 3 秒後に $0.55[1/m]$ となり、その後下降した。

煙濃度計 2 での天井付近の高さ 3.5m（図 3.1、 C_{s2} ）での、煙濃度は 27 秒後に C_s 値に変化が生じはじめ、1 分 3 秒後に C_s 値が $0.25[1/m]$ となった。その後天井付近の C_s 値は、一旦下降するものの徐々に増加し、5 分 48 秒後に $0.43[1/m]$ となり、その後下降した。

(2) 第②実験

エタノール 1100cc を図 3.1 に示す実験室中央で燃焼を開始した。着火後すぐにエタノールは定常燃焼を開始し、約 460 秒で燃焼が終了した。

実験開始時における室内温度は $29.3^\circ C$ であった。火点近傍の天井付近（高さ 3.5m）では、着火後 51 秒後に $54.1^\circ C$ に上昇し、3 分 9 秒までは $50^\circ C$ 以上の温度を継続したが、その後ゆっくり温度は下降し始め、5 分 24 秒後には $39.8^\circ C$ となり $40^\circ C$ を下回った。（図 4.1b）

大規模空間の実験室内の高さ 2.0m の温度は、実験開始時の温度 $29.3^\circ C$ から、少量の変化があり、火点直近では $34.4^\circ C$ まで上昇した。（図 4.1b）

また、大規模空間の実験室内の高さ 0.5m の温度は、実験開始時の温度 $29.3^\circ C$ から大きい変化は観られず、火点直近であっても $31.4^\circ C$ が最大値であった。

煙濃度計 1 での天井付近の高さ 3.5m（図 3.1、 C_{s1} ）では、21 秒後に煙濃度 C_s 値（以下 C_s 値という）に変化が生じはじめ、1 分 18 秒後に C_s 値が $0.39[1/m]$ とな

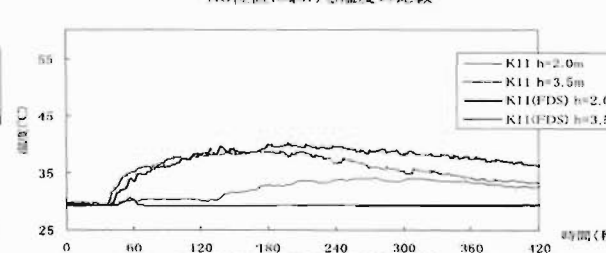
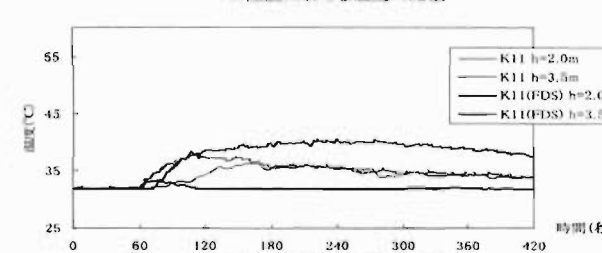
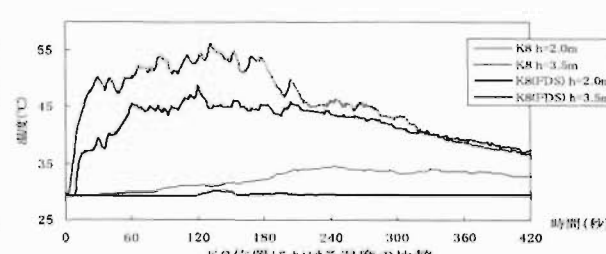
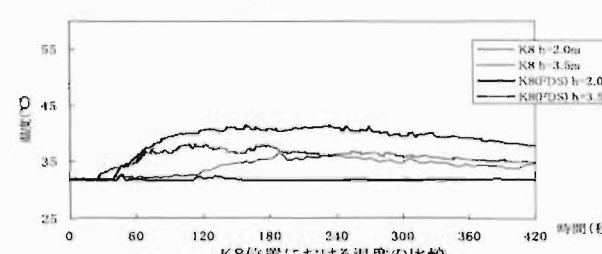
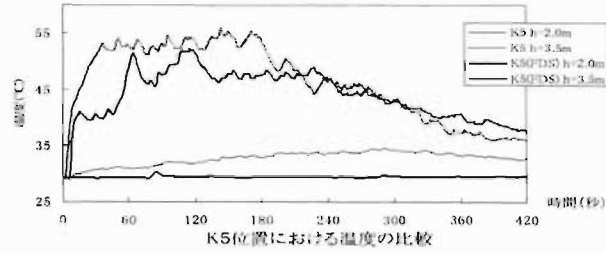
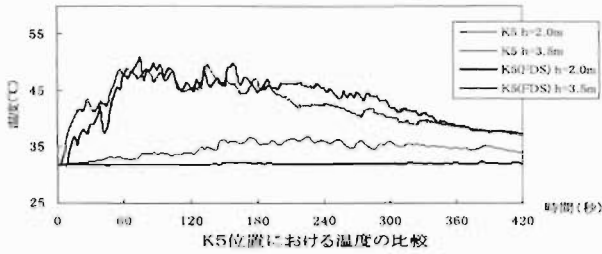
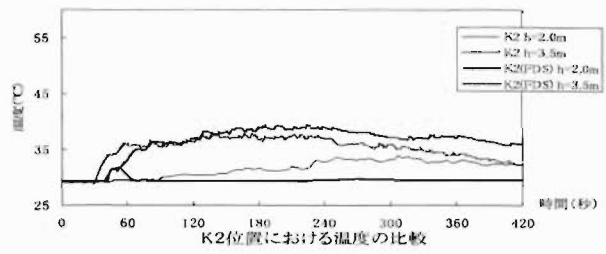
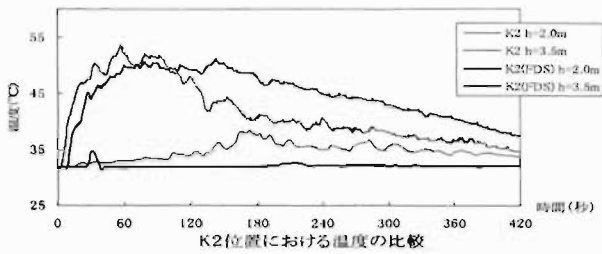


図 4.1a 第①実験の設定条件における温度変化

図 4.1b 第②実験の設定条件における温度変化

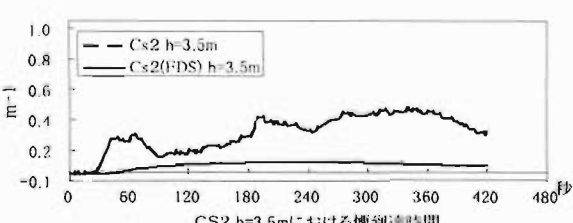
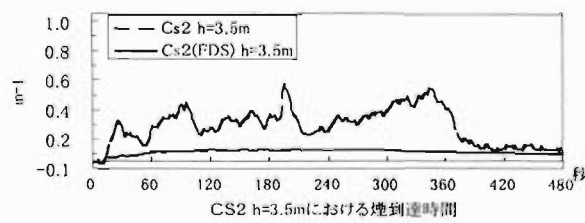
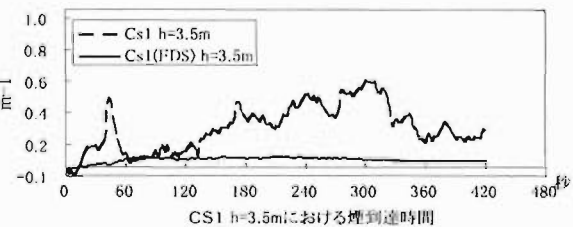
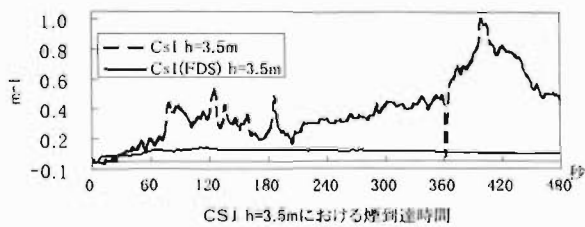


図 4.2a 第①実験の設定条件における煙濃度変化

図 4.2b 第②実験の設定条件における煙濃度変化

った。その後天井付近の C_s 値は、一度安定するも、徐々に増加し、6分39秒後に $0.95[1/m]$ の最大値となり、その後下降した。

煙濃度計 2 での天井付近の高さ 3.5m (図 3.1、 C_s2) では、15秒後に C_s 値に変化が生じはじめ、1分36秒後に C_s 値が $0.39[1/m]$ となった。その後天井付近の C_s 値は、一旦上昇下降を繰り返すものの徐々に増加し、5分45秒後に $0.50[1/m]$ となり、その後下降した。

(3) FDSによる計算結果 (図 4.1a, b、図 4.2a, b)

火源周囲 (第①実験 K2, K5 と第②実験 K5, K8) の温度分布については、高さ 3.5m の位置では、70~100秒で 50°C まで上昇してピークに達した後、緩やかに下降する。実験値より計算値の方が低下するのが速い。

火源から離れた部分では実験開始からそれぞれ約 30秒、60秒後から温度上昇が始まり、およそ 120秒後の 40°C をこえてから下降する。

なお、第②実験では、開口側 (K11 側) 閉鎖側 (K2 側) の温度変化と温度上昇開始時間はほぼ同じ程度であった。

煙濃度については第①実験、第②実験ともに、開始 60~90秒で最大値になり、計算終了時間までほぼ $0.10[1/m]$ で推移した。

5 考察

大規模空間を想定した実験について FDS による火源を定常燃焼とした場合の数値計算結果を比較すると、高さ 3.5m (天井付近) の温度では実験開始と同時に温度上昇し、火災による高温層の拡大により、次第に周囲も温度上昇していく様子が実験値と計算値はよく一致していた。また、温度変化も火災初期は特によく一致したが、ピークを超えてからの計算結果は実験値より低温側に算出される傾向がある。一方で、高さ 2m (天井と床の間付近) の計算値には、ほとんど変化が認められなかった。

FDS による計算値は天井付近、特に火災初期の温度変化は実験値とよく一致したが、温度・煙濃度ともに低く見積られる傾向があった。また、煙濃度については、計算値と実験値の間にはあまりよい一致は認められなかった。このことは、初期設定値をそのまま用いたことが原因である可能性がある。FDS は詳細な計算を行う場合、通常用いられる初期設定値の他に、高度な条件設定を行う機能があることから、今後さらなる検証をし、適切な条件設定をする必要があると考えられる。

6 今後の展開

当報告では、大規模空間を想定した実大火災実験に対して、火源を定常燃焼として仮定した場合の FDS による火災性状の検証を試みたもので、ある程度の適用可能性が認められた。

この実験では、計算手法への信頼性、コンピュータの容量等さまざまな問題点があるが、警防面で訓練を行う

にあたり、延焼状況を画像として表示することや、住民指導等でシミュレーションを見せながら、消火や避難訓練を行うことは可能となりつつあると考えられる。

また、今回シミュレーションを始めるにあたっての障害となるデータ入力を容易にするソフトウェアを用意したことで、消防署の業務において CFD によるシミュレーションを活用できる分野は多岐にわたって考えられるようになった。

しかし、本ソフトを使用するにあたって、現在検証過程にあるということとを考慮した上で、実際に入力を行い、計算を実行することで、熱に関する影響、理論等に習熟し、近い将来のシミュレーション化に対する準備を行うという意味からも有効であると考えられる。基本的には、流体の計算を行ったシミュレーションのため適応範囲は広いと考えられるが、シミュレーションの整合性が証明できてから、こうした火災実験との比較をしていくことが今後の課題と考えられる。

実際に当研究室では、図 6.1 に示す事例のように現在いくつかの建物構造や火災事例に対して複数の実験を行ってきた。各種の実験との比較及び、各種の計算条件を変更した実験の検証を行い、これらの結果については今後詳細に報告を行っていく予定である。

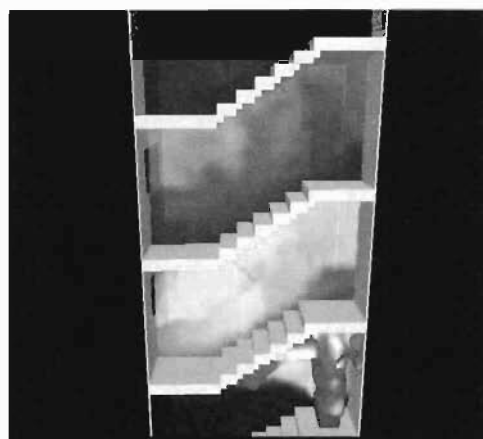


図 6.1 数値計算例 (縦穴区画実験での温度分布)

謝辞

実験にご協力くださった多数の方々に対し、この場を借りて深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 森尻他：消防署における火災シミュレーションの利用方策について、第 51 回全国消防技術者会議資料 (2003)
- 2) 日本火災学会編：火災便覧 第 3 版
- 3) 阿部他：CFD による中高層建物火災時の熱気流の数値シミュレーション、火災学会、平成 15 年度研究発表会概要集 (2003)
- 4) <http://fire.nist.gov/fds/>
- 5) Madrzykowski et al.: Simulation of the Dynamics of a Fire in a Two-Story Duplex Iowa, (1999): NISTIR 6854

RESEARCH ON PHENOMENA AND COMPUTATIONAL SIMULATION OF SMOKE MOVEMENT

PART 1: EXAMINATION INTO THE THERMAL DISTRIBUTION AND SMOKE MOVEMENT IN A LARGE-SCALE COMPARTMENT

Akihiko IIDA*, Mamoru TOMABECHI**,
Hiroshi MORIJIRI*, Isao TOMITA*

Abstract

It is thought that various factors are still left unknown regarding the fire behavior in a laterally elongated large-scale compartment. In this Research, temperature, current velocity, smoke density and others were measured in the full scale fire tests for a large compartment as one of characteristic building fires.

Additionally, the tests' results were compared and correlated to the values obtained by the FDS (Fire Dynamics Simulator) as a computational fluid dynamics (CFD) simulation software for fire behavior analysis. Subsequently, the future possibility of the effective application of a CFD simulator to the fire service was deliberated.

* First Laboratory ** Shinjuku Fire Station