

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2報)

—CFDによる実火災における適用結果について—

飯田 明彦*, 森尻 宏**, 井上 民子**, 黒田 裕司**, 藤田 栄一郎*,
富田 功***, 菅原 洋一*

概要

火災シミュレーションの消防業務への適用可能性を検討するため、実大火災実験で得られた温度変化、煙流動変化等の結果について火災性状予測計算結果との比較・検証（第一報）を実施してきた。

当報告では、屋内進入を図った消防隊員の個人装備が熱による損傷を受けた建物火災について、火災シミュレーションを実火災に適用させることを試みた。この時の火災性状を把握するために火災シミュレーションから求めた温度変化等を、隊員の証言、火災原因調査結果等とも併せて比較・検証した結果についても紹介する。

1 はじめに

消防法に基づく火災原因調査に関連する業務は出場と同時に開始され、その報告は火災予防行政等に反映される。特異な火災事例については、火災の成長・拡大理由、避難状況などの分析・把握を目的とした消防科学研究所による調査活動も実施され、その後の消防活動の安全管理や戦術、消防装備の改良などの検討資料として活用されることとなる。

近年、コンピュータの高速処理化、大容量化に伴い、消防機関が所有するパソコンレベルにおいても、流体の数値計算のような複雑な計算もある程度可能になりつつある。この様な状況下、火災シミュレーションを広く活用できる可能性について、これまでも検討^{1,2)}してきた。当報告では、火災性状の把握を目的とし、実火災へ火災シミュレーションを適用した事例について紹介する。

2 火災概要

対象とした火災は、平成16年、防火造2階建、作業所併用住宅、建築面積72㎡、延べ面積143㎡のうち、2階部分70㎡を焼損（半焼）したものである。

火災建物の平面図（図1）に示すように、火元は2階の \odot で示した付近であった。当時、図2に示すような隊列で屋内進入していた消防隊は強い熱気を感じながらも活動を続けていた。

その後、屋外へ撤退した時に、1名の隊員の個人装備の一部が熱による損傷を受けたことに気付いたが、共に行動していた他の隊員のは全く影響を受けなかったことが、特異な点として注目された。

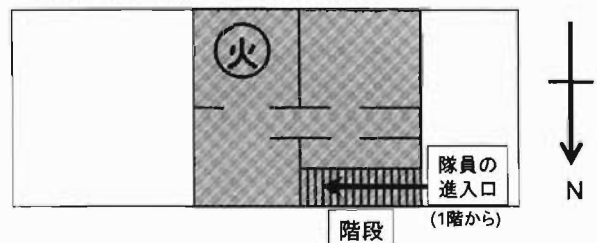


図1 火災建物2階平面図（ハッチ部分は計算対象）



図2 火災室への進入隊形

*第一研究室 **第二研究室 ***秋川消防署



図3 火災建物2階の焼損状況1
床面付近（踊り場付近）



図4 火災建物2階の焼損状況2
建物中央廊下から見た天井付近

3 消防活動時の火災性状の検討

前記2で述べた火災原因調査に伴う現場観察と消火活動時の消防隊員の証言（表1中央）、損傷した個人装備の状況と熱的性質の分析をまとめ、当時の火災現象を推測した。

(1) 鎮火後の現場観察

図1に示す隊列の消防隊が屋内進入を図り、階段を上がりきった床面付近の焼損状況については、図3中矢印で示す部分のように床から約100cmは焼損を免れている。

建物2階の中央付近の廊下から天井方向（図4）を注目すると、天井が燃え抜け、図中央より上方向の梁、柱等が小屋裏にかけて著しく炭化し、脱落している状況も見られる。一方で、その下方向ではあまり強く焼損していない。火災室側の壁体と開口部付近に強く焼損が認められるが、柱の焼損状況は小屋裏のものと対照的である。

このことから、小屋裏に高温雰囲気形成されていたことが考えられ、天井より下方向への燃え下がり、または床面付近での出火室から水平方向への熱気流の流れは比較的弱かったものと考えられる。

(2) 証言から推測される現象

ア 消防隊の証言

先着消防隊は現場到着と同時に、ホースを一線延長し、建物一階入口から進入した。（図1矢印）

1階入口から出火階である2階へ進入した時の進入隊形は図2に示すようになっており、先頭の隊員は筒先を持っていた。2階に達する直前までは強い熱気は感じていなかった。また、2番目の位置にいた隊員は、進入前、1階から2階方向を見ると、炎が2階の出火室開口部から、踊り場方向へ噴出してくるのを確認している。この時、階段室内の2階天井付近の煙はまだ薄かった。階段最上部に上がると非常に熱く、一旦後退せざるを得なかったが、階段途中ではそれほど強い熱気は感じていなかった。

筒先から3番目の隊員が最も強い熱気を感じた時、間近の2番目の隊員を見ることができたが、先頭の隊員は白煙に遮られて見えなかった。

なお、この時、消防隊は火炎と熱気の状態に応じて数回、進入と後退を繰り返していたが、1回目の放水を行っている時、青白色の炎が頭上の右方向（居室側）から左方向へ走ってきたのを目撃した。

2回目の進入の後に、一旦後退した時、天井面をなぞるように、右上方から左方向に炎が捲いて来た。その時、援護用のホース線を用いて、天井方向に向けてスプレー気味に間欠放水を行ったが、その際、かなりの熱さの熱湯が流れ落ちてきた。

3回目の進入後、数分で室内が急に明るくなり、火炎が見え、燃焼物が確認できた。放水による吹き返しは水蒸気というよりは黒煙で、それほど強いものではなかった。

イ 証言内容からの推測

前記アから推測された、建物内部で生じた火災の変化について、以下のようにまとめた。

消防隊が屋内進入した火災初期の段階では、居室ドアから階段方向に火炎が噴出していたのが確認されていることから、居室から階段方向への天井に沿った熱気流があったことが考えられる。したがって、屋内進入時には天井がまだ燃え抜けていなかったと考えられる。

熱気の感じ方から、隊員が階段最上部に到った段階で2階床面よりやや上方に急激な温度勾配が形成されるようになっていた。最初の放水時には、既に天井が燃え抜けていたと考えられる。そのことにより、居室側から小屋裏面をたどり、廊下方向への熱気流が生じていたものと考えられる。更に放水を継続した後も高温層が存在し、小屋裏から階段への熱気流が存在し、火源の燃焼も継続していたと考えられる。

最終的に小屋裏が燃え抜け、新鮮空気が流入したことにより、更に燃焼が進行した。火炎の拡大又は、建物外部からの放水によって居室窓が破壊されたことにより、ドア以外の開口部が形成されたことが考えられる。

表1 隊員の証言とその時点での火災性状の推測

	証言者	隊員の証言	火災性状の観点から推測される状態
1	2番目の隊員	進入前の状態について ①火炎が2階出火室から踊り場方向へ噴出した。 ②階段室内の2階天井付近の煙は薄かった。	①居室開口部から階段方向へ熱気流が噴出。 ②天井は存在していた。
2	先頭の隊員	階段踊り場付近で、強い熱気を感じた。	2階床面より上方に急激な温度勾配が存在。
	2番目の隊員	階段途中では、強い熱気は感じられない。	
3	2番目の隊員	1回目の放水時、青白い火炎が、居室側から屋外方向の左方向へ天井付近から噴出してきた。	天井が燃え抜け、居室側から屋根裏に沿う廊下方向への熱気流の発生。
4	3番目の隊員	2回目以後退した時 ①天井面をなぞるように、右上方から左方向に炎が捲いて来た。 ②援護用のホース線を用いて、天井方向に間欠放水を行った直後、熱湯が流れ落ちてきた。	放水継続後も、天井面から熱気流が階段側に流れてきていた。
5	2番目の隊員	3回目の進入時 ①室内が急に明るくなった。 ②火炎及び燃焼物が確認できるようになった。	①屋根面の燃え抜け。 ②酸素濃度の上昇に伴い、更なる燃焼の進行。
6	2番目の隊員	放水時の吹き返しは、弱い黒煙状のものだった。	居室開口部以外に開口部が存在。



a) 先頭の隊員の防火帽

図5 個人装備の損傷状況（防火帽）



b) 2番目の位置にいた隊員の防火帽



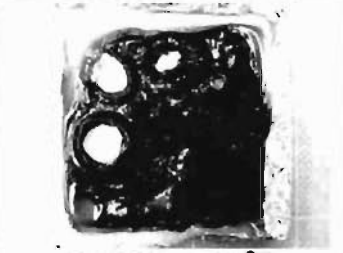


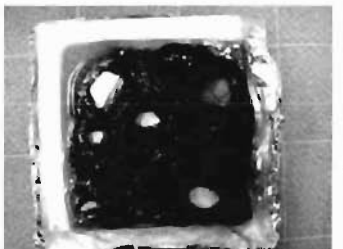


a) 空気呼吸器の損傷状況

図6 先頭の隊員の空気呼吸器損傷状況（空気呼吸器）



b) ポンベ保護カバー上部

表2 損傷した装備から取出した試験体の燃焼試験結果（写真下の数値は裏面温度[°C]）

輻射熱量 と暴露時 間	ボンベカバー	帽 体	防火衣反射テープ
10 kW/m ² 5分	 225.3 °C	 236.1 °C	 225.3 °C
9 kW/m ² 10分	 209.2 °C	 263.9 °C	2 kW/m ² 5分  70.0 °C

(3) 個人装備品からの作業環境の推測

ア 個人装備の損傷状況

損傷した先頭の隊員の個人装備は図5a)に示すように防火帽の左側が著しく損傷している。ほぼ全体が黒く煤けており、徽章、受台と隊名シールの表面が熔融変形している。また、防火帽を裏側から見ると、衝撃吸収ライナーが一部熔融していた。

空気呼吸器（300型）については、背負子本体には損傷はない（図6a）ものの、表面の光沢が失われていた。塩化ビニール製のボンベ保護カバー（図6b）については、上端部の熔融変形が著しい。

また、この他に防火衣については左袖の反射テープの一部及び背中の中左肩部分が若干影響を受け、熔融している。しかし、全体的に煤が多く付着していること以外に、他の部分の損傷、熔融は認められない。手袋等その他の個人装備には損傷は認められず、2番目以降の隊員（図5b）のものは全く損傷していない。

イ 加熱試験

これらの個人装備について、熱の影響を確認するために加熱試験を行った。先頭の隊員の使用した装備と同等品から試験体を採取して、活動状況及び空気呼吸器の使用時間から推測した5～10分間の曝露時間で、コーンカロリメータによる加熱試験を行った。その時の裏面温度を同時に測定した結果は表2に示すとおりになった。

結果として、ボンベ保護カバーは、9 kW/m²で10分間曝露すると損傷品同様に熔融、変形した。この時の試験体の裏面温度が209.2°Cで、輻射強度10kW/m²で5分間曝露の場合は225.3°Cになった。防火帽については、輻

射強度10kW/m²で、5分間曝露の時に損傷品同様に変色が認められ、裏面温度が236.1°Cとなった。

一方、反射テープは最も熱に弱いのが、2kW/m²、5分の曝露では裏面温度70.0°Cとなり、損傷が認められなかった。

ウ 加熱試験結果からの推定

上記において、防火帽表面、ボンベ保護カバーは裏面温度200°C以上において、損傷を受けることが示された。したがって、頭頂部、ボンベ保護カバー上部では200°C以上（場合によっては300°Cほど）の高温にあった可能性がある。また、反射テープについては、状況から防火衣裾の位置では70°C以上の部分が存在した可能性がある。

4 火災シミュレーションによる火災性状の検討

本研究で用いた計算コードは米国、国立標準技術研究所（National Institute of Standard and Technology）において開発されたFire Dynamics Simulator³⁾（以下「FDS」という。今回はFDS ver. 3.0を採用した。）を使用した。FDSは現在各国の研究機関で、その計算結果の適用可能性の検証が行われており、実火災の検証^{4,5)}も例外ではない。

採用されている計算手法は有限体積法で、LESにより乱流を扱う。燃焼モデルは、混合分率モデルを用い、放射熱伝達も考慮している。

計算結果は専用ソフト（スモークビュー）で3次元表示することができ、後の数値計算結果との比較にも使用できる。今回のシミュレーションに使用した計算空間については、火災室のある2階部分で、火災初期を想定し

た「天井あり」の場合と「天井なし」の場合の2ケースについて以下の設定で、温度場の計算を行い、両者の比較をした。

(1) 計算条件

ア 条件の設定

計算空間(図2)の寸法は、W5.4m×D5.6m×H6.4mとした。建物は2階層分で階高は2.5m、火災室がある階は2階の西側居室として設定した。計算格子数は(x)48×(y)64×(z)64=196,608点(格子幅0.11×0.09×0.1m)の等間隔格子である。

イ 境界条件の設定

速度境界条件をハーフスリップとし、温度境界条件は2階部分の周囲の壁体は無反応壁としたが、他の壁体等は全て石膏ボードとし、熱的性質はFDSのデフォルト値を使用した。また、2階火災室に2つの窓(0.45×0.9m, 0.9×0.9m)、1階の階段下の進入口開口部(1.24×2.0m)をそれぞれ設定し、いずれも大気開放条件とした。

ウ 火源条件及び初期条件

火源は家具を想定して、木質系可燃物の数値(床面に火源寸法1.0×1.5m)を用い、発熱速度 $Q = 750$ [kW]の定常燃焼とした。その他、初期条件として、速度を0m/s、室温を20℃とした。

(2) 温度場の計算結果

図7では「天井あり」の場合、図8は「天井なし」の場合を、視覚的に理解しやすい視点から立体的に示したもので、a, b)はそれぞれ計算上の火災の初期及び最盛期を時間的変化を相対的に示したもので、図上の濃色、淡色の面はそれぞれ200℃、50℃の等温度面を示している。

熱気流は「天井あり」の場合、初期において居室開口部から噴出し、「天井なし」の場合、小屋裏の傾斜に沿って、天井側から急速に降下してくる。

いずれも、50℃の等温度面は早期に形成され、定常状態になった時は階段室では同様の高さ(床上100cm付近)に形成される。「天井あり」では2階床面付近から、火炎の噴出を確認することができるが、「天井なし」では、熱気流が天井を捲いて降下し、短時間で温度の急勾配を形成する。このことは、証言と一致する内容となっている。

さらには、天井が焼け落ちたことによる熱気流の流動変化に伴い、図9の様な隊員の位置と温度分布の関係になったもので、この高温層に個人装備が接触したことが、局所的に個人装備が損傷した原因と考えられる。

このことは天井が燃え抜けた時には、小屋裏から天井にかけて形成されていた高温雰囲気急速な降下を認識する間もなく、2階床近くまで高温層が形成されてしまう危険性が生じることを意味する。極めて希な例ではあるが、消防活動時はこのような危険性が起こりうることを念頭におくべきであろう。

5 まとめ

シミュレーションによる当火災の検証結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 2階床面の約1.0m上部の空間から急激な温度変化面が存在していた可能性がある。
- (2) 隊員の証言内容と、「天井あり」及び「天井なし」のシミュレーション結果を対比したところ、火炎の視認状況と温度変化について、一致が認められる。
- (3) 天井が燃え抜けた場合、居室から小屋裏方向へ強い流れが生じる。
- (4) 小屋裏付近には、高温の雰囲気があり、燃焼が急激に変化する可能性があった。

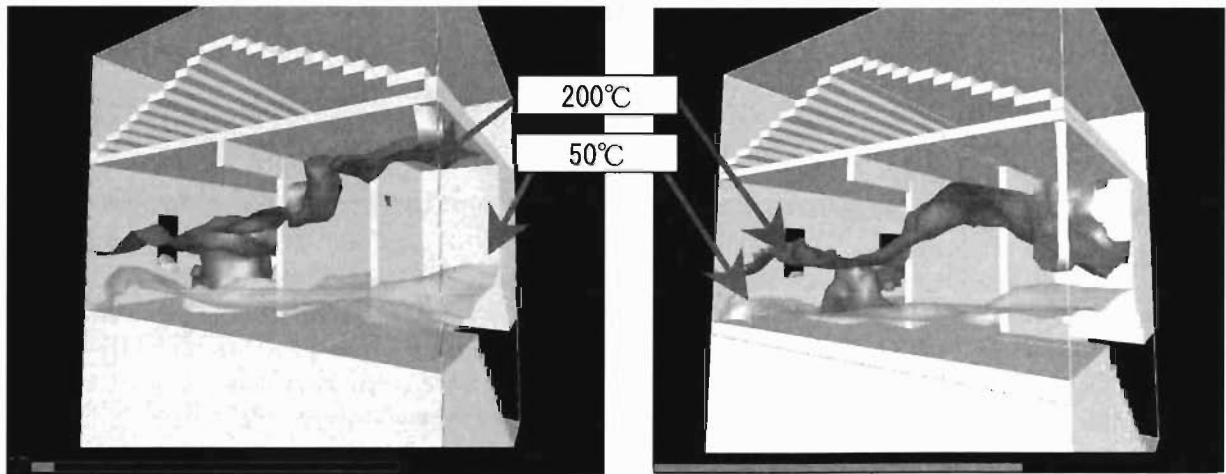
したがって、今回の火災事例に対する火災シミュレーションによる検証事例では、証言等による火災性状との整合が見られた好例であったと考えられる。

謝辞

火災シミュレーションソフトを提供し、助言を下さったNISTのMcGrattan博士、この火災事例を検討するにあたり、指導・助言を下さった(独)消防研究所の山田常圭先生、阿部伸之先生に感謝いたします。

参考文献

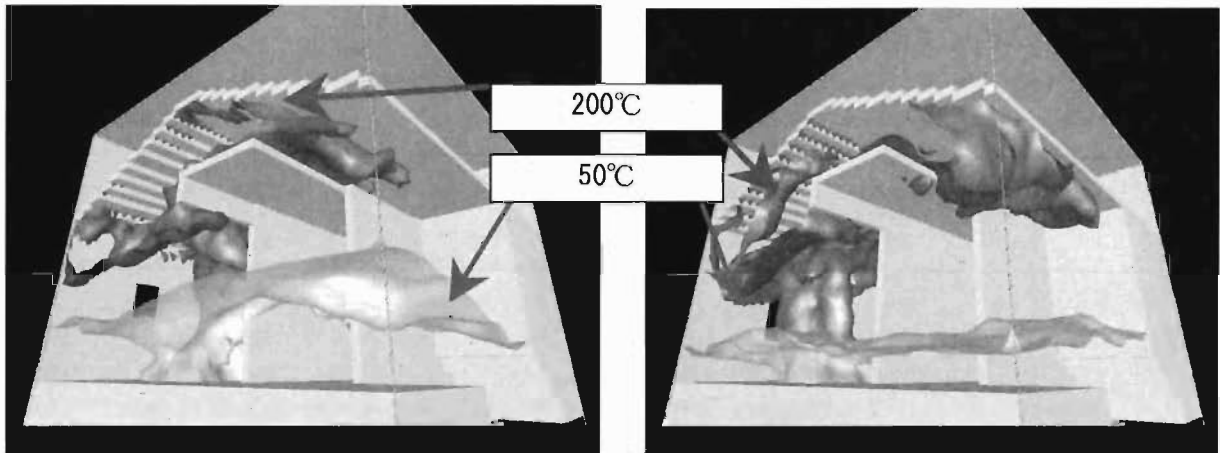
- 1) 森尻他:消防署における火災シミュレーションの利用方策について、第51回全国消防技術者会議資料(2003)
- 2) 飯田他:煙流動状況の把握と煙流動シミュレーションに関する調査研究 その1 大規模空間における温度分布と煙流動の変化について、消防科学研究所、第41号(2004)
- 3) <http://fire.nist.gov/fds/>
- 4) Madrzykowski et al.: Simulation of the Dynamics of a Fire in a Two-Story Duplex Iowa, (1999): NISTIR 6854
- 5) Madrzykowski et al.: Simulation of the Dynamics of the Fire at 3416 Cherry Road NE, Washington D. C., (1999): NISTIR 6510



a) 火災発生初期 (22.1 秒)

b) 最盛期 (359.9 秒)

図7 天井がある時の等温度面 (200°C、50°C) の変化 (括弧内の時間はシミュレーション上の時間)



a) 火災発生初期 (17.9 秒)

b) 最盛期 (24.2 秒)

図8 天井がない時の等温度面 (200°C、50°C) の変化

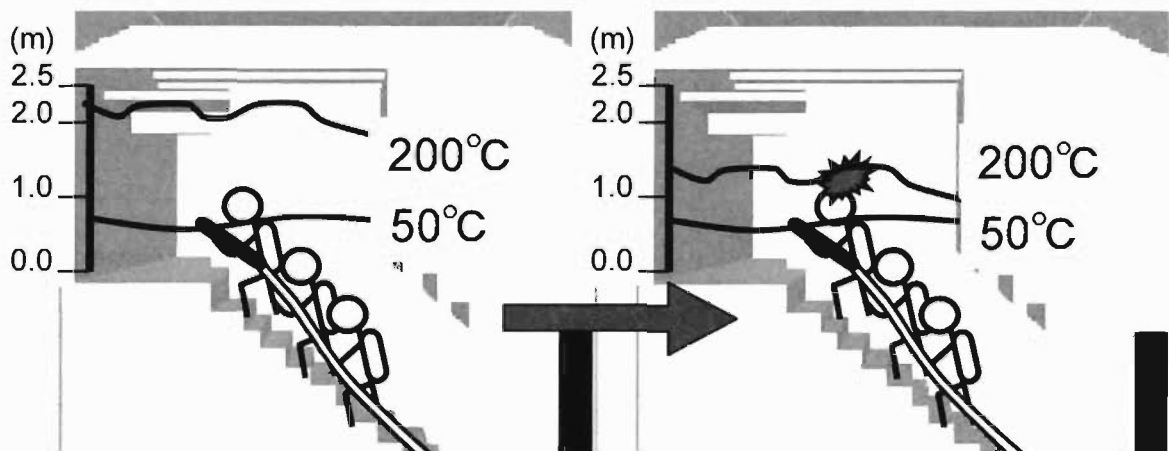


図9 2階部分の温度変化状況 (200°C、50°Cの境界面)

RESEARCH ON THE PHENOMENA AND COMPUTATIONAL
SIMULATION OF SMOKE MOVEMENT (Second Report)
CFD-ASSISTED EXAMINATION ON FIRE BEHAVIOR IN A TWO-STORY HOUSE

Akihiko IIDA*, Hiroshi MORIJIRI**, Tamiko INOUE**, Yuji KURODA**,
Eiichiroh FUJITA*, Isao TOMITA***, Youichi SUGAWARA*

Abstract

In the first report, the temperature, concentration of smoke and others measured in full scale fire tests were compared and correlated to the values obtained from the calculation by fire simulation for the purpose of examining the utilization of the fire simulation in fire services.

In this research, a scenario of firefighters' equipment being damaged from heat when a fire crew were working in a house on fire was recreated with real fire used. This paper describes the result obtained from the analysis of firefighter's reports and fire investigation, as well as the thermal distribution and other values obtained from the calculation by fire simulation, in order to grasp the behavior of fire.