

最適な排煙手法の検証 (第2報)

(数値シミュレーションによる区画火災実験との比較)

山村 重行*, 佐藤 歩**, 湯浅 弘章**, 渡邊 茂男**

概要

開口部のある区画火災における送風機の最適な設置位置について、前検証では、送風機は燃焼で生じる開口部付近の熱気流の流れを助長するように設置することが最適であるという結論を実験により得た。一方、区画内部の様子等が把握困難であったことや、実験結果の一部に十分な説明に至らなかった結果があった。

本検証では、前検証の実験設定に対応する数値シミュレーションを行い、前検証との比較考察を行った。その結果、前検証結果について、数値シミュレーション結果に基づく新たな分析結果と排煙手法に関する詳細な知見を得た。

1 はじめに

消防活動をより迅速かつ安全に行うために、区画火災の効果的な排煙手法に着目し、区画開口部とその送風機の位置の変化による煙濃度等を分析することは、重要である。「最適な排煙手法の検証」¹⁾(以後、前検証とする)では、開口部のある区画火災に対する、送風機による給気排煙(以後、内向き送風とする)、送風機による排気排煙(以後、外向き送風とする)、及び燃焼で生じる自然対流による自然排煙(以後、送風なしとする)の3種類の排煙手法の効率を比較するため、開口部のある区画内において、0.81 m²の表面積でガソリン2リットルを燃焼させ、煙濃度と温度を区画内の上部で測定した。

前検証で使用した区画は、図1に示す4種類であり、これに送風機の設定を加え、16種類の条件で測定した。その結果、燃焼で生じる開口部付近の気流を助長するように送風機を配置することが最適な排煙手法であるとの結論を得た。一方で、区画2の実験では、排煙効率について、送風なしが外向き送風と内向き送風よりも煙濃度が低く、前述の結論に対し、十分な説明に至らなかった。また、前検証では、区画内に充満した濃煙によって、内部の様子が把握できなかった。

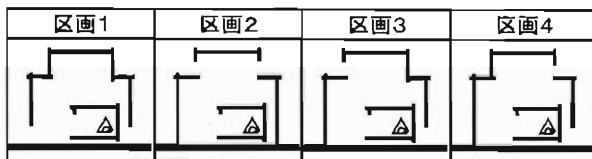


図1 4種類の区画断面図

2 目的

本検証では、開口部のある区画火災について、数値シミュレーションにより、区画内の煙濃度等の状況を可視化し、前検証の結果(以後、実測値とする)との比較を行う。更に前検証の課題について検討することとした。

3 計算方法

(1) 計算に使用した装置等

熱気流の数値シミュレーションプログラムは、米国商務省国立標準技術研究所(NIST)が開発したFire Dynamics Simulator Ver. 5.5.1(以後、FDSとする)を用いた。使用した計算機の性能は、Xeon(TM)3.6GHz CPU、2.0GB RAMであった。

(2) 計算条件

前検証の実験設定に合わせ、FDSで設定した計算条件を表1に示した。

表1 計算条件

設定項目	内容	
全体寸法	6.72m×8.4m×高さ8.4m	
最小格子	105mm立方	
格子数	64×80×80=409,600個	
計算時間	21分間	
煤の生成量	燃料1gあたり0.01g	
湿度	55%(計算領域の内外とも)	
空気温度	33°C(計算領域の内外とも)	
物体温度	33°C	
比熱	コンクリート	0.88kJ/kg/K
	ALC(発泡コンクリート)	1.21kJ/kg/K
	ステンレス	0.50kJ/kg/K
密度	コンクリート	2,100kg/m ³
	ALC(発泡コンクリート)	520kg/m ³
	ステンレス	7,930kg/m ³
伝導率	コンクリート	1.0 W/m/K
	ALC(発泡コンクリート)	0.174W/m/K
	ステンレス	16.0W/m/K

シミュレーションの最小単位である計算格子の大きさは、一辺が105mmの立方体とした。送風機の気流を再現するためには、計算格子の一辺を25mmよりも小さくする²⁾ことが望ましいが、計算機の性能限界のために一辺を105mmと設定した。

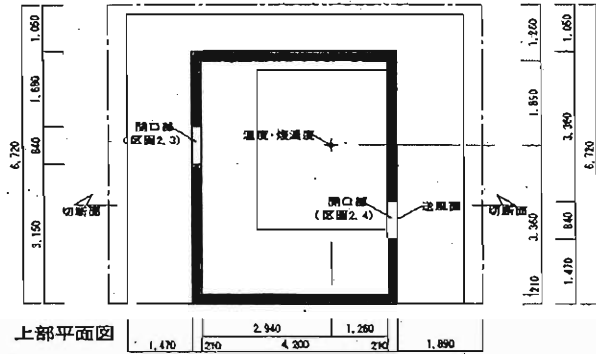
計算時間は21分とし、計算開始と同時に、送風を開始、計算開始から1分後に発熱(発煙)を開始した。

計算領域内の形状について、上部平面図、下部平面図断面図を図2に示した。計算領域の境界は、下面を空気等の出入りがない境界とし、上面と側面を空気等の出入

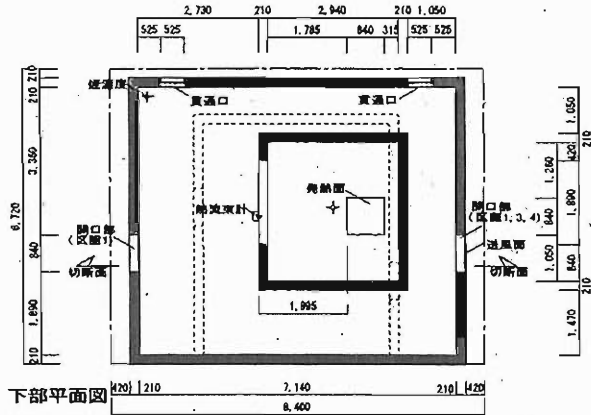
りが自由な境界とした。

区画の主要な開口部は、2箇所であるが、区画ごとに開口部の配置が異なるので、対応する区画を図2中の開口部に記入した。

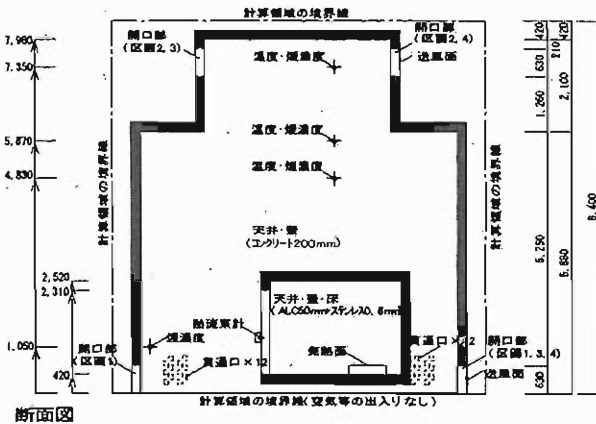
図2に示す貫通口は、実験区画の壁の低い位置に2つあるルーバー形状の開口部(給気口)を模擬するために、105mm角の開口をルーバー形状の開口部面積と同等となる個数を設定した。



上部平面図



下部平面図



断面図

図2 計算領域内の形状

図3に開口部と送風部分について、前検証の設定と計算条件の設定を示した。使用した送風機の形は、円筒状であるが、FDSの計算条件では長方形の面で代替した。送風機の入切は、前検証同様、継続設定とした。

図4に燃熱気を区画内に充填するためにシミュレーションで設定した火源の発熱速度を示した。発熱速度の設

定は、ガソリン2リットルの総発熱量を前提とし、燃焼区画正面の受熱量について、図5に示すFDS計算上の計算値を実測値に接近させるように調整した。

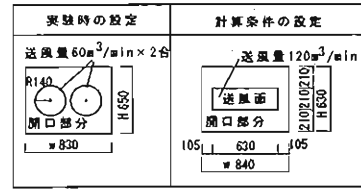


図3 開口部と送風部分

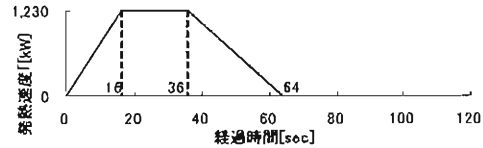


図4 発熱面に設定した発熱速度

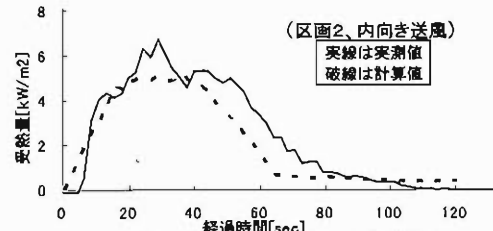


図5 燃焼区画正面の受熱量

(3) 測定項目

FDS計算上の測定項目を表2に示した。表2中の風速断面、温度断面と温度等値面は、シミュレーション結果をFDS付属のSmoke Viewによって、視覚的に表示させるための設定項目である。

表2 FDS計算上の測定項目

測定項目	位置等	実測
開口部の流量 (m³/s)	区画毎の開口部2箇所	なし
熱流束 (kW/m²)	燃焼区画の開口部付近	あり
温度 (°C)	区画中央 高さ7.35m	あり
	区画中央 高さ5.67m	あり
	区画中央 高さ4.83m	あり
煙濃度 (1/m)	区画中央 高さ7.35m	あり
	区画中央 高さ5.67m	あり
	区画中央 高さ4.83m	あり
	区画隅 高さ5.67m	なし
	区画隅 高さ4.83m	なし
	区画隅 高さ3.78m	なし
	区画隅 高さ2.73m	なし
風速 (m/s) 断面	開口部を含む縦断面2箇所	なし
	区画中央の縦断面	なし
	高さ7.35m	なし
	高さ0.21m	なし
温度 (°C) 断面	区画中央の縦断面	なし
温度 (°C) 等値面	200°C、50°Cの面 (3D表示用)	なし

4 計算結果

(1) 天井付近の煙濃度

前検証で排煙効率の評価に用いた、高さ 7.35m の位置の煙濃度の時間変化について、送風条件ごとに実測値と FDS の計算結果（以後、FDS 計算値とする）の比較を図 6 に示した。

区画 1 について、上部に開口部がないため、実測値、FDS 計算値ともに煙濃度が他の区画条件と比べて高かった。また、実測値と FDS 計算値の送風条件ごとの傾向について、大きな相違はなかったが、送風なしと内向き送風の送風条件について、経過時間約 3～4 分以降の煙濃度は、大きく異なった。また、区画 2 での、実測値と FDS 計算値の送風条件ごとの傾向について、FDS 計算値は送風なしの送風条件が最も煙濃度が高く、実測値と異なった。区画 3 と 4 について、実測値と FDS 計算値の送風条件ごとに傾向に大きな相違はなかったが、経過時間約 4 分

以降の煙濃度は、全体で FDS 計算値の方が低かった。

(2) 送風条件ごとの温度と煙濃度

発熱終了から約 3 分後の煙濃度と温度と区画内部透視図について、計算結果が特徴的であった区画 2 を図 7 に、区画 4 を図 8 に示した。図中の透視図は FDS 付属の Smoke View によって可視化したものであり、対応する送風方向、開口部の流量 (m³/sec) から算出した平均風速 (m/sec) とその方向、温度 (°C) と煙濃度 (1/m) の測定位置を図中に併記した。また、図中の各表には空間上部における温度 (°C) と煙濃度 (1/m) について、実測値と FDS 計算値を示すとともに空間下部 (H=1.05m) における煙濃度について、FDS 計算値を示した。

図 7 (a) 上部の外向き送風について、煙濃度は空間下部で低く、空間上部では高かった。図 7 (b) 送風なしについて、煙濃度は、空間上部全体で高かった。また、温度は空間上部で高かった。図 7 (c) 上部の内向き送風について、

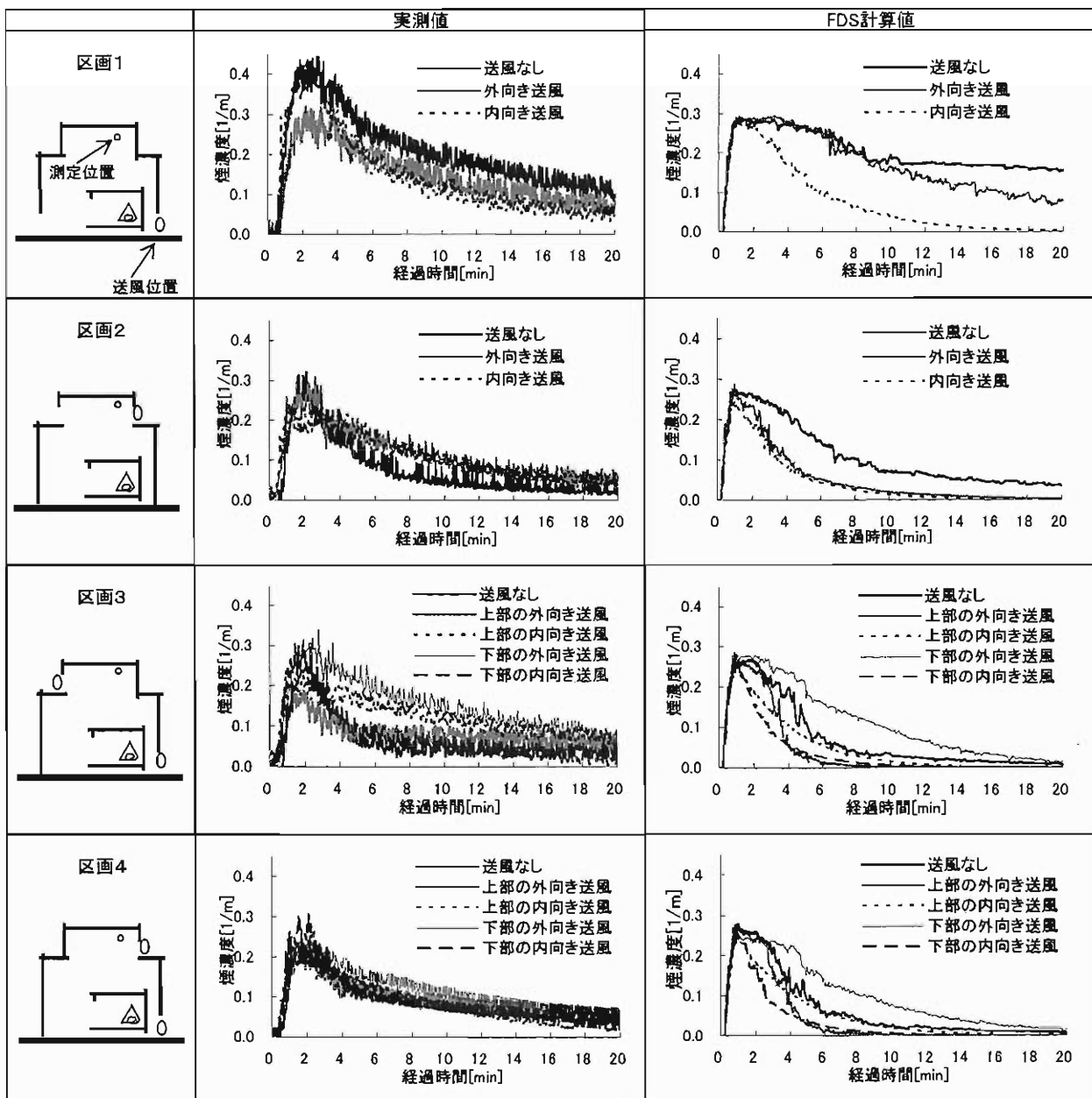


図 6 高さ 7.35m の位置での送風条件ごとの実測値と FDS 計算値の煙濃度の時間変化の比較

煙濃度は、測定位置による差が少なかった。また、温度は、他の送風条件と比較して、空間上部では低かった。

区画2における上部の送風機の有無やその方向による影響を検証するため、図7(a)上部の外向き送風と(b)送

風なしと(c)上部の内向き送風を比較した。空間上部での温度について(c)上部の内向き送風の方が最も低かった。また、空間下部の煙濃度について、(a)上部の外向き送風と(b)送風なしが低かった。空間上部の煙濃度について

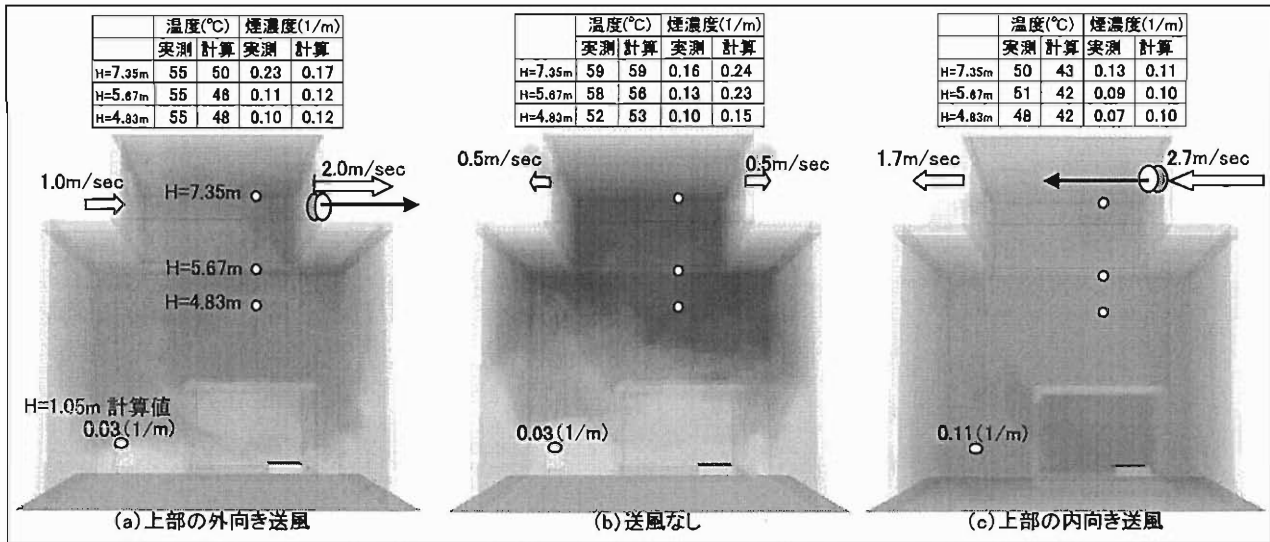


図7 区画2における発熱終了から約3分後の送風条件ごとの温度と煙濃度の比較と内部透視図

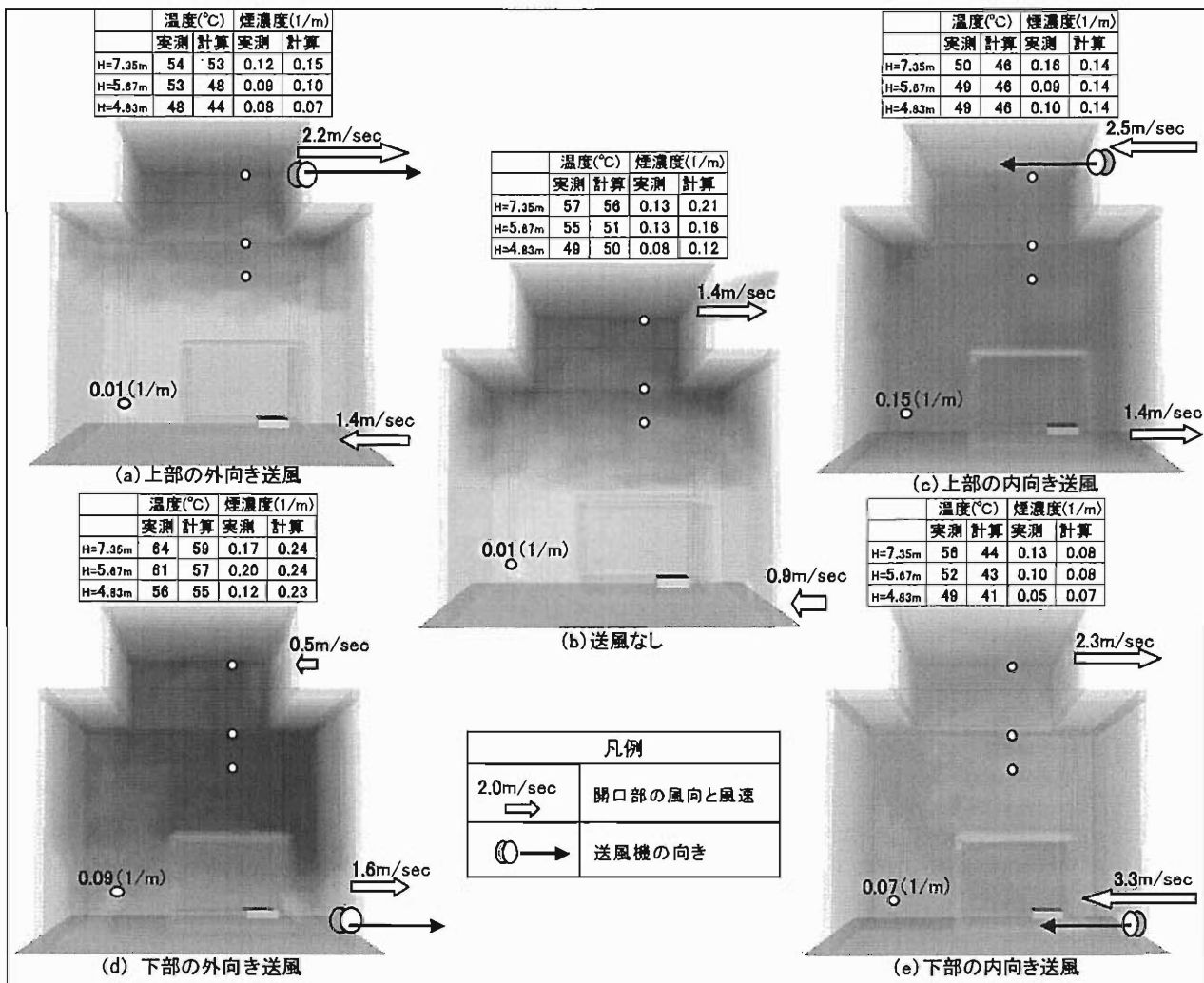


図8 区画4における発熱終了から約3分後の送風条件ごとの温度と煙濃度の比較と内部透視図

(c) 上部の内向き送風が最も低かった。

図8 (a) 上部の外向き送風と(b)送風なしについて、煙濃度は、空間下部で低かった。空間上部の温度は高く、図7 (a) 上部の外向き送風と(b)送風なしの結果と同様であった。

図8 (c) 上部の内向き送風と(d)下部の外向き送風について、現在、効果的に排煙できるであろうとされている送風機の設定位置に反し、上部開口から給気し、下部開口から排煙するものであった。空間全体で煙濃度は高かった。また、図8 (d) 下部の外向き送風については、空間上部の温度は特に高かった。図8 (e) 下部の内向き送風は図7 (c) 上部の内向き送風と同様の結果で空間上部の温度は低く、煙濃度は測定位置による差が少なかった。

区画4における送風機の位置の影響を検証するため、図8 (a) 上部の外向き送風と(b)送風なしと(e)下部の内向き送風を比較すると、空間下部での煙濃度について(a)上部の外向き送風と(b)送風なしが低かった。また、空間上部での煙濃度と温度については(e)下部の内向き送風が最も低かった。

5 考察

(1) 数値シミュレーションと区画火災実験との比較

図6に示した煙濃度の比較の結果、区画1についてFDS計算値が実測値より低いこと等送風条件が同一であっても一致しなかった。また、図7、8についても同様で、FDS計算値は、実験値と比較して送風条件が同一であっても、一定の傾向がなかった。

これについて、以下の3点が考えられた。第1にFDS計算のプログラム問題として、計算格子の最小単位が大きく、区画内の気流を細かく計算していないこと、第2に前検証では当日の風位風速、温度湿度等にばらつきがあったが、FDS計算では考慮していないこと、第3に前検証では油煙による天井付近の煙粒子の大小が測定に与える影響が大きいが、計算では天井付近でも均一な煙として扱っていることが考えられた。

第1の問題について、計算格子の大きさによる気流の比較をするため、計算格子を105mm立法と21mm立法のFDS計算値による風速の大きさを色の濃さで表した可視化図を図9に示した。本検証で採用した105mm立方の計算格子では、送風による気流が直線的であり、21mm立方の計算格子と異なる結果であった。

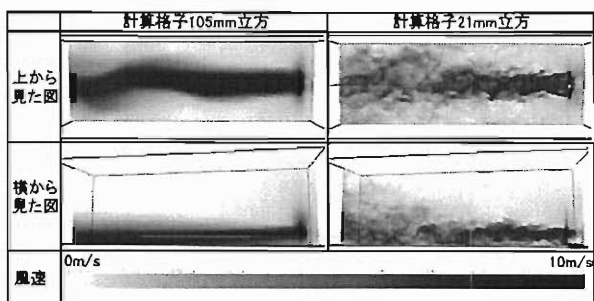


図9 計算格子の大きさによる気流の比較

(2) 前検証の課題に対する数値シミュレーション結果による分析

前検証では、燃焼で生じる開口部付近の気流を助長するように送風機を配置することが最適な排煙手法である

という結論を得た。一方で、前検証の区画2では、煙濃度について、送風なしが外向き送風と内向き送風よりも低く、前述の結論に対し、十分な説明に至らなかった。また、FDS計算値とも異なる傾向であったことから、さらに下部の測定点に着目した。

区画2における煙濃度について、図10に高さ5.67m、図11に高さ4.83mにおける実測値を示した。いずれも煙濃度について、送風なしが送風ありよりも高く、図6の区画2の実験値に示した高さ7.35mにおける煙濃度の実測値のみ、FDS計算値と傾向が異なった。

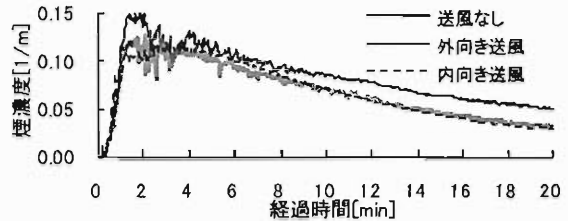


図10 区画2の高さ5.67mにおける送風条件ごとの煙濃度(実測値)

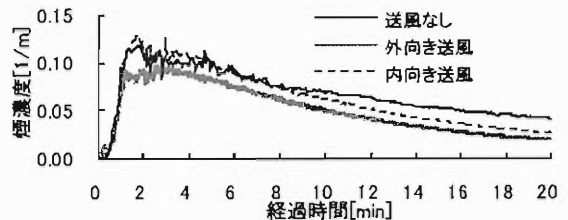


図11 区画2の高さ4.83mにおける送風条件ごとの煙濃度(実測値)

その理由として、前検証では、当日の風位風速、温度湿度等にばらつきがあり、その影響を受けて、天井付近の煙濃度(実測値)が前検証の結論に対して十分な説明に至らなかった可能性がある。

特に建物周辺の風の影響が大きいと考えられる。実験時には、風向は測定していないが、1分ごとの風速を測定しており、平均風速1.10m/sec(標準偏差0.43)であった。

FDS計算では、全ての条件において、無風として計算したが、有風時の影響を推定するため、図12に示すように区画1(送風条件なし)の正面方向全体から、区画に向かって約2m/sec、約1m/sec、0m/sec(無風)の風速を設定し、FDS計算により経過時間1分まで発熱した場合の風上側と風下側の開口部における流入風速と流出速度を図13に示した。

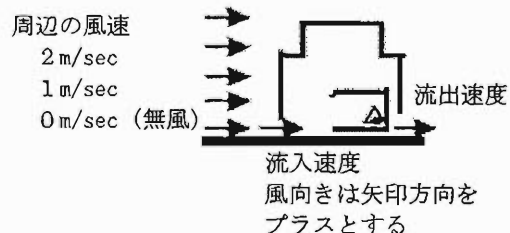


図12 区画1(送風条件なし)の有風時の影響の検討図

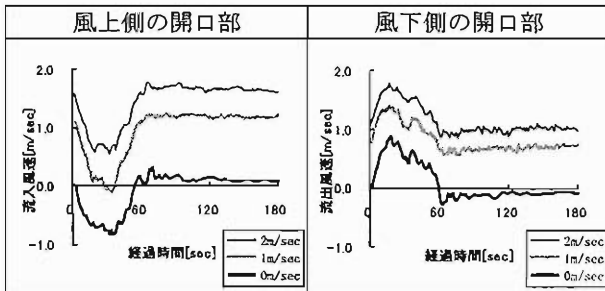


図13 周辺の風速の違いによる、区画の風上側と風下側の開口部における流出方向の風速 (FDS 計算値)

図13により、周辺の風速の違いによる流入風速、流出風速の傾向は同様であるが、周辺の風速が2 m/secでは、区画開口部の風向きが周辺の風向きと同様になるのに対し、周辺の風速が0 m/sec (無風) では発熱終了後の1分まで、区画内の発熱により風向きが区画の内側から外側となり、それ以降開口部の風速がほぼなくなった。このように、周辺の風速が開口部の風速に影響を与えると推測した。

一方、区画3と区画4は、開口部が上下に一つずつある区画という共通点があるが、高さ7.35mの煙濃度について、区画3と区画4の差異が比較的大きい実測値を得た理由についても同様であると考察した。

(3) 本検証から得られた知見

ア 上部の外向き送風に関する排煙手法の検証

図8(a)での上部の外向き送風の計算条件は、空間下部の開口部から給気し、火災による発生熱により上昇気流が生じ空間上部の排気口から排気する排煙手法について検証を行ったものである。この排煙手法は、中性帯^{注)}を形成したまま排煙することができ、空間下部での煙濃度は低かった。しかし、他の送風条件と比較して、空間上部では煙濃度と温度は高い傾向を示した。このことから、複層階が一つの区画となっている空間では、空間上部の煙濃度と温度が高くなるので、上部階での逃げ遅れ情報がある場合や検索を行う可能性がある場合は、活動上留意すべきである。また、図7(b)と図8(b)の送風なしの結果より、もともと空間上部の環境は悪いことから、その場所に送風機を設置する活動自体にも、安全管理上非常に困難が伴うことも容易に推察できる。

イ 下部の内向き送風に関する排煙手法の検証

図8(e)下部の内向き送風は、空間内の気流を攪拌しながら空間全体の排煙を促す排煙手法について検証を行ったものである。他の送風条件と比較して空間上部の煙濃度と温度は低下した。その一方、空間内の気流を攪拌するため、中性帯が形成されず、空間下部の煙濃度は排煙開始初期において、それほど低くならなかった。消防隊は、建築物の構造等の制約や空間の上部開口にアクセスできないなど、空間の上部に送風機を設定できない場合、下部からの内向き送風により給気排煙を行う。この場合、複層階が一つの区画となっている空間であれば、下部の内向き送風でも、空間上部では、早期に煙濃度と温度は低下し、逃げ遅れ者や消防隊の検索環境を確保できる可能性がある。しかし、空間下部の煙濃度は、排煙開始初期において、低くならないことに留意すべきである。

ウ 一般的な消防戦術に相反する排煙手法の検証

図8(c)上部の内向き送風と図8(d)下部の外向き送風は、空間上部から給気し、空間下部から排気するもので

あり、一般的な消防戦術の排煙手法と相反する送風条件に関する検証を行ったものである。図8(d)下部の外向き送風は、空間上部の温度は高く、図8(c)上部の内向き送風と図8(d)下部の外向き送風共に、空間全体の煙濃度が高かった。このことから、本排煙方式は、排煙効率が良いとはいえないことが、FDS計算からも確認できた。

6 おわりに

区画火災の消防活動をより迅速かつ安全に行うために、開口部とその送風機の位置の関係を検討することは、非常に意義がある。

前検証から、その最適な排煙方法は、開口部を中性帯の上側と下側に設定し、下部の開口部から空気が流入し、上部の開口部から煙と熱を排出する流れを助長する位置に送風機を配置することであることを実験で確認した。

さらに、本検証では、前検証と同等の条件で数値シミュレーションを用いてその煙濃度等を分析した。また、前検証では、一部の区画形状において、十分な結論を得るには至らなかった結果について考察し、さらに前検証では把握困難であった区画内部の煙濃度等の様子を可視化した。送風機の位置や風向の変化による、区画内の煙と熱の分布、中性帯の挙動を、数値シミュレーションにより把握できた知見を以下に示した。

- ・ 空間下部から給気し、火災による発生熱の上昇気流を利用して空間上部の排気口から外向き送風により排気する排煙手法について検証を行い、その効果を確認した。
- ・ 空間下部から内向き送風により、空間内の気流を攪拌しながら空間全体の排煙を促す排煙手法について検証を行い、空間全体の煙濃度と温度は低下できる一方、空間内の気流を攪拌し、中性帯が形成されないことを確認した。
- ・ 空間上部から給気し、空間下部から排気するという一般的な消防戦術の排煙手法と相反する排煙手法について検証を行い、空間上部の温度と空間全体の煙濃度が高かったことから、排煙効率が良いとはいえないことを確認した。

[参考文献]

- 1) 湯浅弘章他2名：最適な排煙手法の検証、消防技術安全所報第45号、P59-P63、平成20年9月
- 2) Kerber, S. : Evaluation of the Ability of Fire Dynamic Simulator to Simulate Positive Pressure Ventilation in the Laboratory and Practical Scenarios、NISTIR 7315、P1-P29、2006

注

区画火災において、上部に煙層、下部に空気層が形成したときの境界部分

Study on the optimal smoke ventilation method (Report No. 2)

(Comparison with compartment fire experiment using the computational
fluid dynamics)

Shigeyuki YAMAMURA*, Ayumu SATO**, Hiroaki YUASA**, Shigeo WATANABE**

Abstract

The previous study looked at the optimal installation position of a fan in a compartment fire with an opening, and the experiment concluded that it was optimal to install the fan where the thermal air current caused by the combustion near the opening could be accelerated. Meanwhile, it was difficult to grasp the situation inside the compartment, and some of the experiment results could not be fully explained.

In this study, the computational fluid dynamics done on the experiment settings corresponding to the previous study, and the results were weighed against the previous study. As a result, in regard to the previous study results, additional analysis results based on the computational fluid dynamics and detailed information related to smoke ventilation methods were obtained.