

# 区画火災の避難行動に及ぼすスプリンクラーの影響

竹内 裕貴<sup>\*1</sup>, 山本 和弘<sup>\*1</sup>, 錦 慎之助<sup>\*2</sup>

(平成 26 年 1 月 29 日受付, 平成 26 年 8 月 22 日受理)

## Effect of Sprinkler on Evacuation Dynamics in Compartment Fire

Yuki Takeuchi,<sup>\*1</sup> Kazuhiro Yamamoto<sup>\*1</sup>, Shinnosuke Nishiki<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup>Graduate School of Engineering, Nagoya University,  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603, Japan

<sup>\*2</sup> Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University,  
1-21-40, Korimoto, Kagoshima, 890-0065, Japan

### Abstract

Since fire is one of the most serious disasters, we need to reduce the potential of damages such as injury and burn, which is mainly caused by high heat fluxes from the burning area with strong luminous flames, accidental explosions, and toxic species of CO and smoke. In order to mitigate these losses, it is important to consider the appropriate room design with exits in the building for setting the safe evacuation route, coupled with effective instruments of fire extinguishers and alarms. For example, a sprinkler is an instrument used to put out a small fire. According to the legislative requirement, a fire sprinkler system is needed in shared accommodation buildings such as hotels. In planning individual actions for safety and in evaluating the effective instruments, it is necessary to understand the phenomena in fire and construct the fire evacuation plan in advance. For this purpose, the establishment of appropriate safety guidelines is essential, and the prediction of evacuees' behaviors in case of fire is important. However, it may be impractical to demonstrate the real fire, because the experiments are expectedly huge and dangerous. To assess the sprinkler during evacuation dynamics, it could be fruitful to conduct a numerical simulation. In this study, we simulated the compartment fire by FDS (Fire Dynamics Simulator). We changed the amount of water and the placement of the sprinklers. Based on data of fire dynamics by FDS simulations, we carried out the evacuation simulation. We examined the effect of sprinklers on the evacuation dynamics in terms of the fire spread and the smoke flow. Then, we discussed the evacuation time and CO exposure time during fire evacuation.

Key Words : Evacuation, Sprinkler, Compartment Fire, Numerical Simulation

## 1. はじめに

甚大な被害が起こりうる火災は非常に複雑な現象であり, 可燃性固体の燃え広がりに関する研究は, 火災時の災害の抑制や防災上有用であると言える<sup>1-3)</sup>. 火災が発生してもその拡大を抑制できれば, 財産の保護や消防活動が確保できるだけでなく, CO や煙などの有害ガスの発生量も抑えられるため, 中毒症状や火傷など人的な被害も含め人命安全の確保が可能となる<sup>4)</sup>.

<sup>\*1</sup>名古屋大学 大学院工学研究科 (名古屋市千種区不老町)

<sup>\*2</sup>鹿児島大学 大学院理工学研究科 (鹿児島市郡元 1-21-40)

建物内の居室のような囲われた空間内での火災は一般に区画火災<sup>5)</sup>と呼ばれるが, 建築基準法や消防法の防火関連規定ではスプリンクラーや警報器などの設置が求められる<sup>6)</sup>. 火災の初期消火に有効なスプリンクラーは, 火災により発生する熱気流を感知して散水を開始する<sup>7)</sup>. スプリンクラーが作動することによりどの程度安全性が向上するかを定量的に評価することは難しい<sup>6,8)</sup>. 例えば, 有毒ガスである一酸化炭素は無色, 無臭の可燃性ガスであり, どの程度発生したかを検討するためには火災再現実験<sup>9)</sup>が必要となる. また, 区画火災が発生した場合の避難行動を予測して具体的な対策を取るためには, 実際の避難行動を想定したデモ実験を行い, データを蓄積することが望ましい. しかし, コストや安全性が問題となり, スプリンクラーの

有効性を避難行動の観点から明らかにすることは困難である。

そこで、数値シミュレーションによる数値実験が有効であり、我々は避難シミュレーションを行うことにより火災時の安全性の評価を行ってきた<sup>10-15)</sup>。我々の解析では、セルオートマトンモデル<sup>16,17)</sup>をベースに、避難者の方向と速度を自由に設定できるよう改良した実数型セルオートマトン法 (Real-Coded Cellular Automata, RCA)を用いている。

本研究では、火災シミュレーションソフト FDS (Fire Dynamics Simulator<sup>18,19)</sup>) により部屋内の火災を模擬し、スプリンクラーが作動した場合としない場合の区画火災の延焼シミュレーションを行う。特に、スプリンクラーの数と散水量を変えてスプリンクラーの影響を定量的に評価することを本論文の目的とした。具体的には、FDS により再現された延焼領域や煙の流動の時系列データを用い、火災発生後の避難行動を数値シミュレーションにより再現することで、スプリンクラーが避難行動に及ぼす影響を避難時間および CO の曝露時間<sup>9)</sup>をもとに検討した。

## 2. 解析方法

### 2.1. Fire Dynamics Simulator (FDS)

ここでは、火災シミュレーションソフト FDS (Fire Dynamics Simulator) について簡単に説明する。FDS は米国標準技術研究所 (NIST) が開発したものであり、予測された温度分布や速度ベクトルの時系列データを可視する後処理用ソフトの Smokeview が付属されている<sup>20)</sup>。今回は Ver.5.5.3 を使用し、質量と運動量の保存式に加えて混合分率 (Mixture Fraction) の保存式をラーゼ・エディ・シミュレーション (LES) により解くことにより燃焼場を決定した。

対象とした区画火災の解析領域を Fig.1 に示す。部屋の大きさは 16 m × 16 m であり、右側の壁に幅 1.6 m、高さ 2 m の出口を二か所設けた (Exit 1 と Exit 2)。部屋の横に隣接した廊下の大きさは幅 3.6 m であり、部屋と廊下の高さはそれぞれ 3.2 m とした。床面には可燃物として 8 m × 8 m の正方形で、厚さ 3 cm のポリウレタンを部屋中央に配置した。ポリウレタンの発熱量は 25930 kJ/kg である。ポリウレタンに着火するため、部屋の中心に大きさ 40 cm、500℃の熱源を配置したが、着火後取り除いた。計算には幅 40 cm (人の肩幅に相当) の等間隔格子を用いたが、この空間格子でも安定な FDS の計算が可能であった。煙は、ポリウレタンが熱分解したガスが燃焼することにより発生するが、煙の発生量は質量比で熱分解ガスの 10%とした。

今回はスプリンクラーの有無や配置による違いを検討するため、Table 1 の 3 種類 (それぞれ Case A, B, C) を対象とした。Case A はスプリンクラーがない場合であり、Case B, Case C はスプリンクラーがある場合である。総散水量は 224 L/min で一定とし、Case B と Case C ではスプリンクラーの個数と配置を変えた (Fig. 2)。個々のスプリンクラーの散水量は Case B では 56

L/min、Case C では 25 L/min となる。この場合、Case B では一つ当たりのスプリンクラーの散水量が Case C よりも多くなるため、スプリンクラーの配置を Case B と同じとし、一つ当たりの散水量を Case C と同じ 25 L/min とした計算も行った (Case B')。今回はスプリンクラーの温度が 72℃に達すると散水が開始されるとした。散水の角度は 70~80° (鉛直下向きを 0°とする) であり、水の粒径は 1000 μm 一定とした。

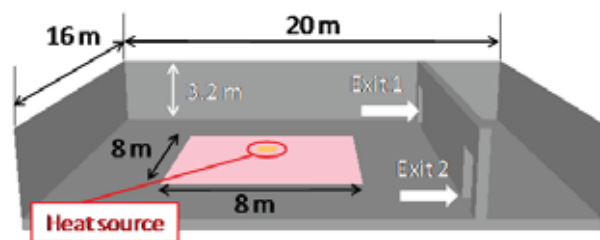


Fig.1 Numerical domain of room fire.

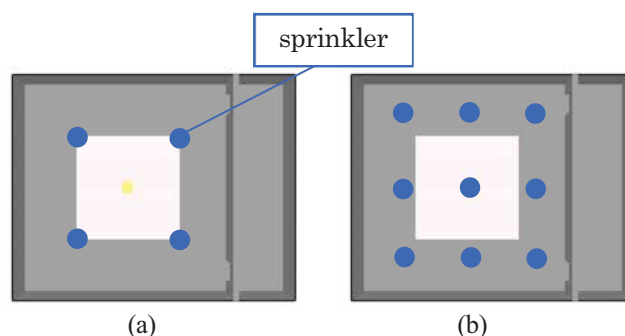


Fig.2 Position of sprinklers in (a) case B, (b) case C.

Table 1 Simulation conditions

Case	Number of sprinkler	Each sprinkler water flow rate (L/min)	Total water flow rate (L/min)
A	0	0	0
B	4	56	224
B'	4	25	100
C	9	25	225

### 2.2. 実数型セルオートマトン法

次に、避難の解析手法について説明する。セルオートマトン法 (Cellular Automata, CA) は、まず避難者がいる 2 次元空間を格子 (セル) で区切る。我々が独自に開発した実数型セルオートマトン法 (Real-Coded Cellular Automata, RCA) では、避難者が隣接するセル上を単純に移動する従来のセルオートマトン法とは異なり、任意の速度と方向を自由に設定できる。避難者の移動は、出口からの距離であるフロアフィールドにより決定する。これにより、避難者は自動的に出口まで最短経路をたどることになる。ただし、避難経路上に火災が発生している場合は、燃焼している領域 (延焼領域) を回避する必要がある。そこで、延焼領域に入った避難者は回避行動をとるようにした<sup>14)</sup>。ここで延焼領域は、FDS の計算結果において床面か

らの高さ 1.6 m における熱量が  $2 \text{ kW/m}^2$  を越えた領域とした<sup>21)</sup>。避難者の移動速度は  $V_0 = 1.6 \text{ m/s}$  一定とし、避難者の人数（初期配置人数  $N$ ）を変えてシミュレーションを行い、避難経路や避難時間を調べた。

一方煙は、見通し距離の減少や目に対する刺激により避難者の歩行速度を減少させることが知られている<sup>22)</sup>。ただし、報告されている実験データにはばらつきがあり、煙濃度から歩行速度を一意的に決定することはできない。そこで、実験データを参考に煙中の移動速度を  $0.8 \text{ m/s}$  とした。また煙濃度  $C_s$ （単位は  $1/\text{m}$ ）は、すす濃度から以下の式により算出した<sup>23)</sup>。

$$C_s = 10^4 \cdot M \quad (1)$$

ここで、 $M$  は FDS により得られるすすの質量濃度（単位は  $\text{kg/m}^3$ ）であり、煙の領域は高さ 1.6 m で  $C_s$  が 0.6 を越えた範囲とした。移動速度  $0.8 \text{ m/s}$  は、煙濃度  $C_s$  が  $0.6 \text{ 1/m}$  の時の歩行速度に相当する。

次に、避難者の回避行動を Fig. 3 を用いて説明する。部屋の上半分の Zone 1 の延焼領域に入った避難者は、点線のベクトルで示した出口へ向かう方向から反時計回りに  $45^\circ$  の方向へ移動する回避行動をとるようにした。一方、部屋の下半分の Zone 2 では、時計回りに  $45^\circ$  の方向へ向きを変えて移動させた<sup>11)</sup>。避難シミュレーションは避難者の初期配置を変えて各 5 回行い、避難時間の平均値を求めて検討した。

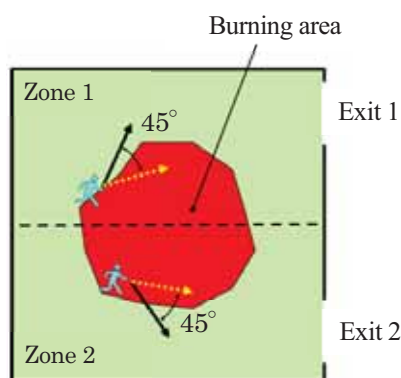


Fig.3 Evacuation model in fire.

### 3. 結果および考察

#### 3.1 延焼領域の燃え拡がり

##### (1) スプリンクラーがない場合

まず、スプリンクラーがない場合の延焼シミュレーションを行い、部屋内における火災の燃え拡がりの様子や煙の流動などについて検討した。Fig. 4 に Case A の熱発生速度分布を示す。ポリウレタンの床に  $500^\circ\text{C}$  の熱源を配置してから経過時間を  $t$  とし、 $t = 25.0, 32.3, 37.3, 45.1$  秒の結果を示す。着火源から実際に火災が周囲へ燃え拡がり始めるまでに約 20 秒の時間が必要であった。ただし、いったん着火すると延焼領域が急激に拡大する様子が再現されている。

次に、煙の流動について調べた。その結果を Fig. 5 に示す。 $t = 23.3, 30.3, 33.7$  秒の結果である。部屋の

中央部分から煙が発生しているが、煙は高温であるために浮力により上昇する。やがて煙が部屋の天井に達すると天井に沿って横方向に拡散した。煙の発生量は延焼領域が拡大するとともに増加するが、天井の煙が周囲の壁まで拡がると壁に沿って降下した。

次に Case A のすす濃度について調べた。Fig. 6 は、32.0, 38.4, 45.0 秒後の床面からの高さ  $z = 1.6 \text{ m}$  におけるすす濃度分布である。これによると部屋の中央で発生したすすが同心円状に拡がり、 $t = 45.0$  秒において最大  $1.0 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$  のすすが発生した。その後、すすは部屋全体に拡がっていくが、降下してきたすすは上下 2 か所の出口を通り廊下まで流れ出た。

一方、 $t = 25.0, 32.3, 37.3, 40.0$  秒の CO の濃度を Fig. 7 に示す。CO は部屋の中央で発生し、時間が経過すると CO の領域が拡大する。ただし、煙の流動とは異なり可燃物であるポリウレタンが燃えている範囲で CO は高い値を示した。

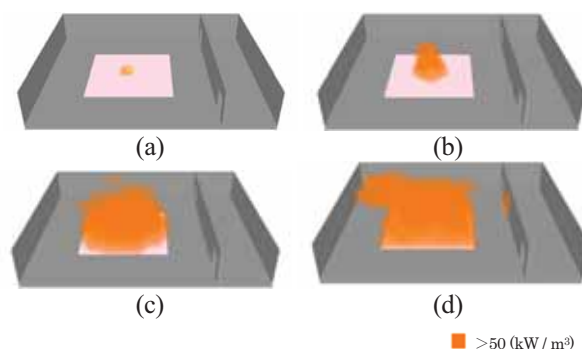


Fig.4 Profiles of heat release rate in case A;  
(a)  $t = 25.0 \text{ s}$ , (b)  $t = 32.3 \text{ s}$ , (c)  $t = 37.3 \text{ s}$ , (d)  $t = 45.1 \text{ s}$ .

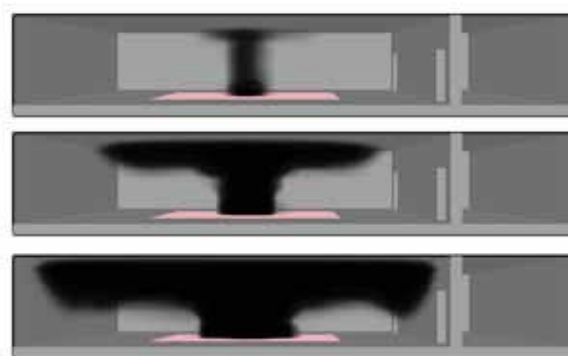


Fig.5 Profiles of smoke; from top to bottom  
at  $t = 23.3, 30.3, 33.7 \text{ s}$ .

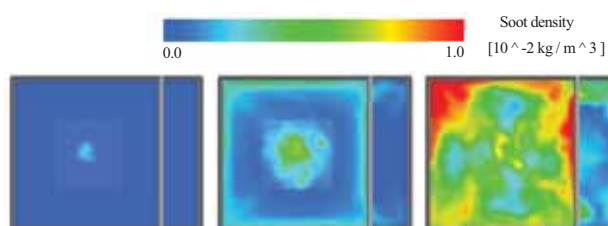


Fig.6 Profiles of soot density at  $z = 1.6 \text{ m}$ ; from left to right at  $t = 32.0, 38.4 \text{ s}$ ,  $45.0 \text{ s}$ .



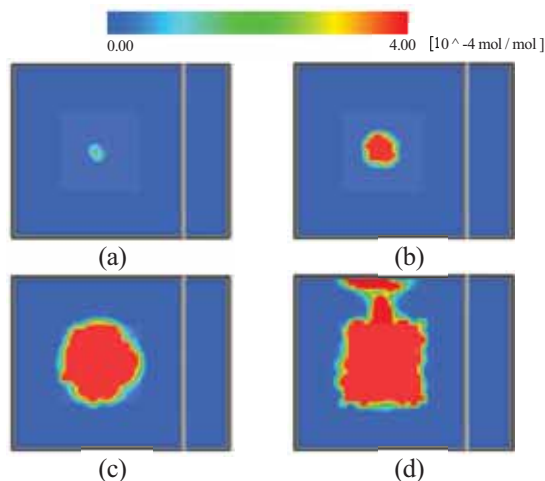


Fig.7 Mole fraction of CO at  $z = 1.6$  m; (a)  $t = 25.0$  s, (b)  $t = 32.3$  s, (c)  $t = 37.3$  s, (d)  $t = 40.0$  s.

## (2) スプリンクラーがある場合

一方、スプリンクラーを配置した Case B, Case B', Case C の結果を示す。  $t = 25.0, 32.3, 37.3, 45.1$  秒の熱発生速度分布とスプリンクラーの散水の様子を Fig.8(a)~(c)に示している。 Case B および Case B' では約 32 秒後、Case C では約 28 秒後にスプリンクラーの温度が  $72^{\circ}\text{C}$  に達し、スプリンクラーが作動して散水が開始された。 火災が発生する位置は部屋の中央であるため、スプリンクラーがその真上にある Case C では、Case B に比べてスプリンクラーの作動開始時刻が早く、その結果 Case B では計算開始から約 49 秒後、Case C では約 46 秒後に火災が完全に鎮火した。これに対し Case B' では、総散水量が少ないため鎮火しなかった。

次に、すす濃度について調べた。 Fig.9(a)~(c)は  $z = 1.6$  m での 32.0, 38.4, 45.0 秒後のすすの濃度分布である。これによると全てのケースにおいて、部屋の中央で発生したすすが部屋全体に広がっている。発生したすす濃度を比較すると、Case B や Case B' に比べて Case C が低いことがわかる。また最大濃度を調べたところ、Case C と Case B はそれぞれ  $2.4 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$  と  $4.1 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$  であったのに対し、Case B' は  $9.2 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$  であった。したがって、Case C, Case B, Case B' の順ですすの発生が抑制されていた。特に Case C では、火災が早い段階で鎮火したことによりすすの発生量も大幅に抑制されることがわかった。

$t = 25.0, 32.3, 37.3, 40.0$  秒の  $z = 1.6$  m における CO の濃度分布を Fig.10(a)~(c)に示す。 Case B' では他の 2 ケースによりも延焼領域が拡大しているため、CO が存在している範囲が広がった。これに対し Case B では、部屋の中央で CO が多く発生しているものの、40 秒後にはスプリンクラーにより火災が鎮火するため CO が存在する領域が狭くなった。 Case C では Case B よりもさらに狭くなっているが、これもより早い段階で火災が鎮火するためである。

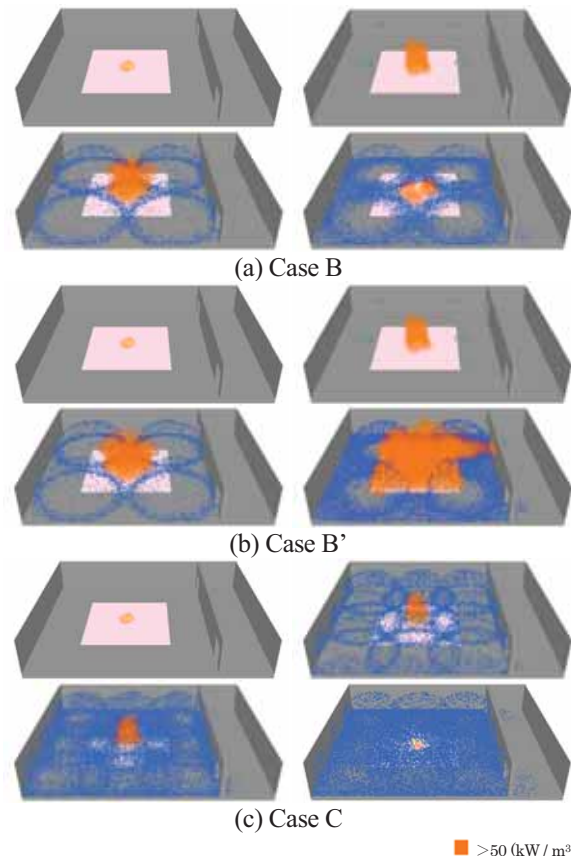


Fig.8 Profiles of heat release rate in cases B, B', C; from left to right and from top to bottom at  $t = 25, 32.3, 37.3, 45.1$  s.

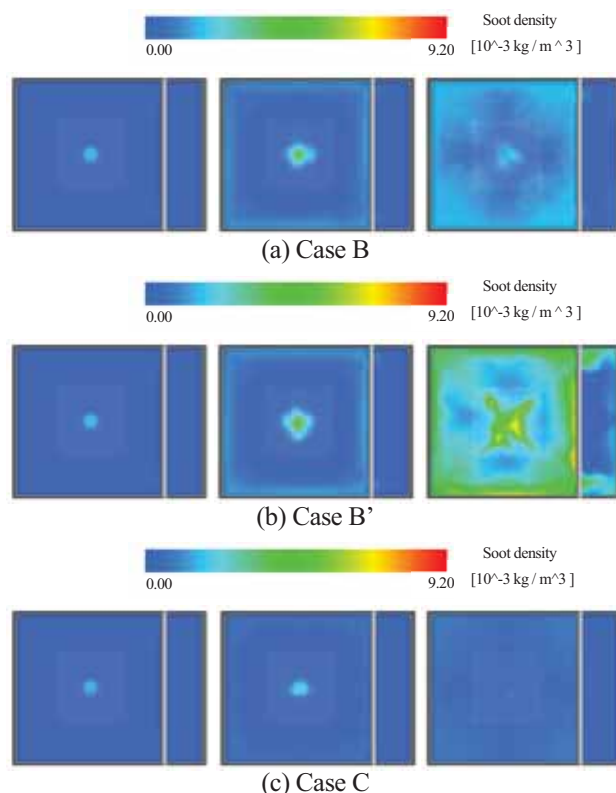
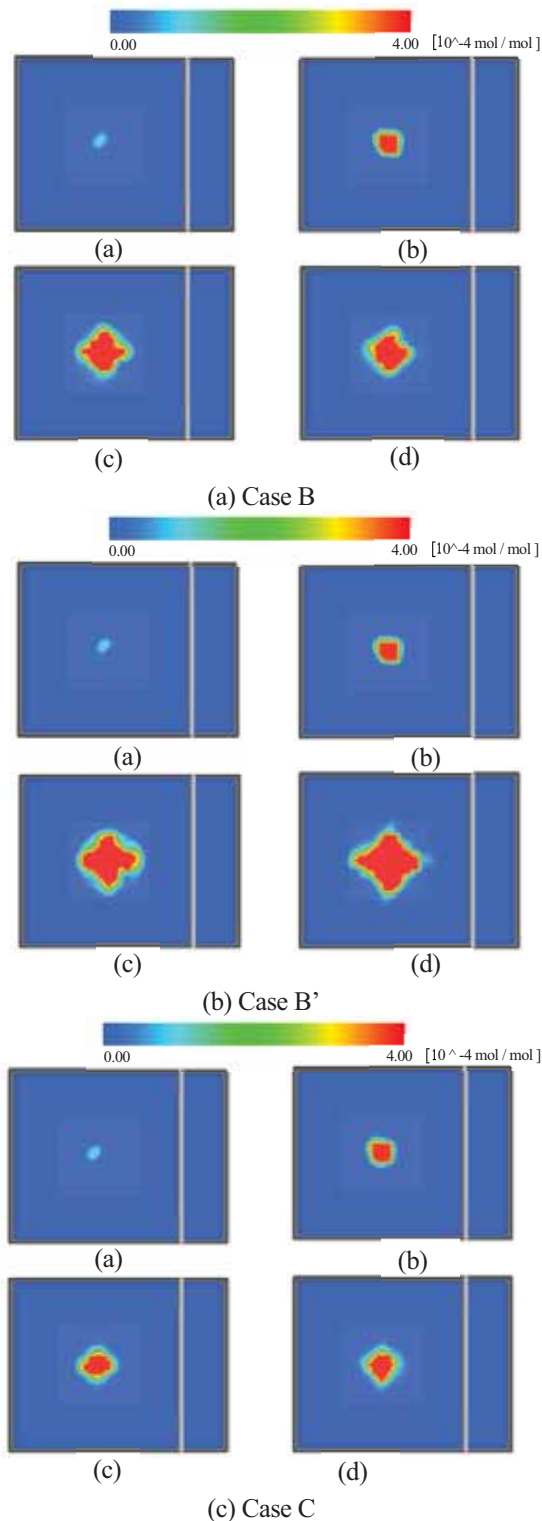


Fig.9 Profiles of soot density at  $z = 1.6$  m in cases B, B', C; from left to right at  $t = 32.0, 38.4, 45.0$  s.



**Fig.10** Mole fraction of CO at  $z = 1.6$  m in cases B, B', C; from left to right and from top to bottom at  $t = 25, 32.3, 37.3, 40$  s.

### 3.2 避難行動と安全性の評価

#### (1) 避難の様子

次に、FDSにより再現された延焼領域の時系列データを用いて避難シミュレーションを行い、スプリンクラーの影響について検討した。実際に避難を開始する

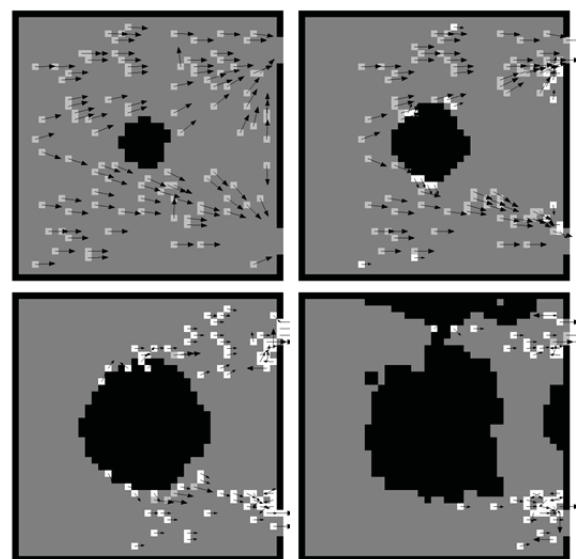
時刻は、建設省告示第1441号第1を参考に決定した。避難開始時間  $T_{start}$  は以下の式により算出した（単位は秒）<sup>24)</sup>。

$$T_{start} = 2\sqrt{A} \quad (2)$$

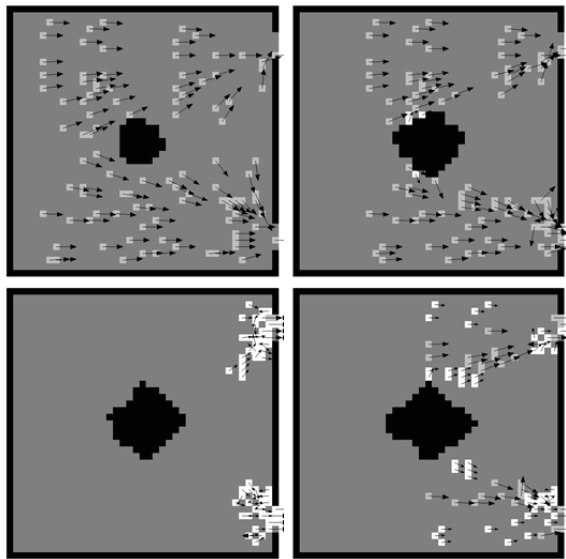
ここで  $A$  は居室の床面積であり、単位は  $m^2$  である。今回の部屋の面積を適用すると避難開始時間は 32 秒となる。ポリウレタンの床が燃焼しはじめるのに要する時間は 20 秒なので、避難開始前に火災が発生する。ただし、スプリンクラーが作動する時刻がこれより早い場合は、スプリンクラーが作動した時間を避難開始時間とした。その結果、Case B と Case B' では Case A と同様 32 秒、Case C では 28 秒であった。なお、全員の避難が完了するまでの時間を避難時間  $T_E$  とした。

初期配置人数を  $N = 100$  とした時の  $t = 32, 34, 37, 42$  秒の避難の様子を Fig.11 に示す。図中の点と矢印は避難者の位置と移動方向を示しており、煙に巻かれた避難者の色を変えている。これによると、延焼領域を避けるため避難者が回避行動をとっていることがわかる。34 秒後には出口付近に避難者が密集した（ボトルネックと呼ばれる<sup>10)</sup>）。これにより出口で渋滞が起こり、避難時間が余計にかかることになる。また、37 秒後にはほとんどの避難者が煙に巻かれていた。

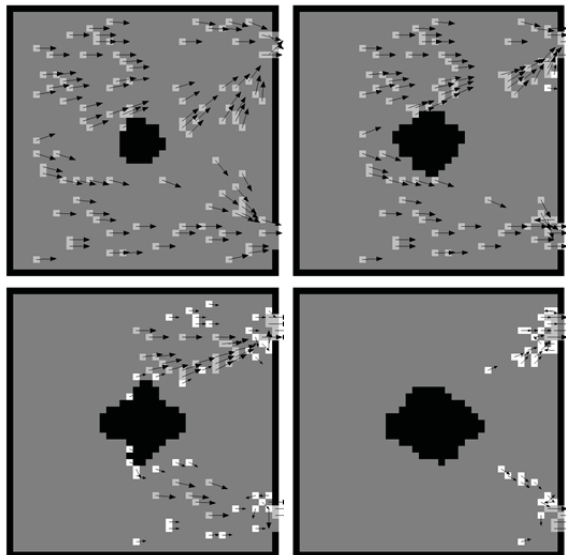
初期配置人数を  $N = 100$  とした Case B, Case B', Case C の  $t = 32, 34, 37, 42$  秒の結果を Fig.12(a)~(c) に示す。スプリンクラーがある Case B と Case B' では延焼領域が Case A に比べて小さいものの、回避行動をとる避難者が依然存在した。一方、Case C では避難を開始する時間が早いため 32 秒の時点で部屋の奥にいた避難者は中央付近まで移動していた。さらに、スプリンクラーにより延焼領域が消失するため多くの避難者が回避行動をとらずに最短経路で出口に向かっていった。ただし、出口に形成されるボトルネックの大きさは、スプリンクラーの流量や配置によらずほぼ一定であった。



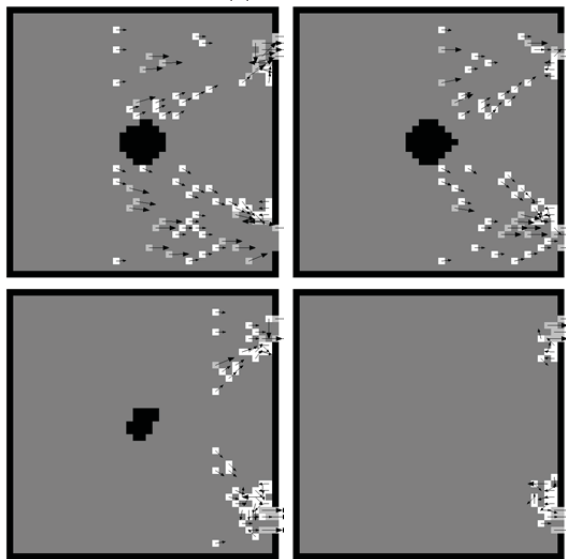
**Fig.11** Evacuation without sprinkler at  $t = 32, 34, 37, 42$  s in case A;  $N = 100$ .



(a) Case B



(b) Case B'



(c) Case C

Fig.12 Evacuation with sprinkler at  $t = 32, 34, 37, 42$  s in cases B, B', C;  $N = 100$ .

## (2) 避難時間

次に、避難時間に与えるスプリンクラーの影響について検討した。初期配置人数  $N$  を変化させて、全員が避難し終える時間（避難時間） $T_E$  を調べた。その結果を Fig.13 に示す。いずれの場合も初期配置人数が増えるにつれて避難時間は増加することがわかる。これは、避難者の人数が増えるにつれて出口に形成されるボトルネックが大きくなり、滞留が解消される時間も長くなるためだと思われる。避難時間は Case A, Case B, Case B' ではほぼ同じ値となった。すなわち、スプリンクラーがある Case B と Case B' の避難時間が Case A と同じであった。ただし、Case C は避難開始時間が早いことから避難時間は短くなった。

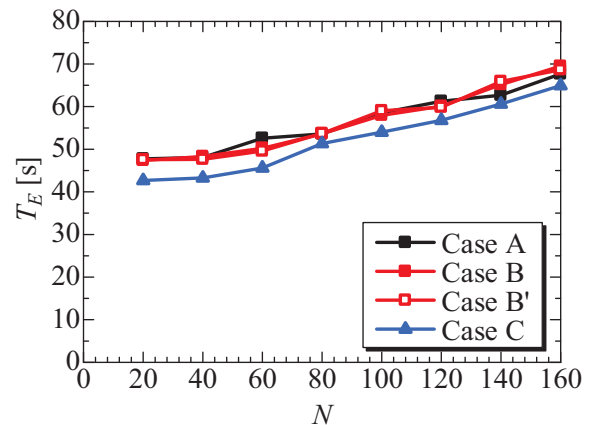


Fig.13 Variation of evacuation time with  $N$ .

## (3) 一酸化炭素の曝露時間

最後に、CO の曝露時間を求めてスプリンクラーの影響を評価した。今回は濃度が 0.04% 以上の一酸化炭素に曝されていた時間を  $T_{CO}$  とした。0.04% の CO 濃度は致死濃度の 10 分の 1 であり、文献 9 では頭痛およびめまいが出る濃度とされている。  $N = 100$  の結果を Fig. 14 に示す。一酸化炭素に曝されていた時間を 4 秒ごとに分け、各時間ごとの人数をヒストグラムで示しているが、12 秒以上 CO に曝された避難者は一つにまとめた。これによると、スプリンクラーが作動しても火災の初期に発生した CO が室内に拡散するため、スプリンクラーがある場合でも CO に曝される時間がゼロにはならないことがわかった。ただし、スプリンクラーにより CO の発生量が抑制されるため、CO に曝される時間は減少した。特に、スプリンクラーがない場合は 8 秒以上 CO に曝されるケースが他に比べて非常に多くなった。Case B と Case B' を比べると、Case B' は 4 秒以上 CO に曝される避難者が多く存在することがわかる。また、Case B と Case C を比較すると、Case B では 4 秒以上 CO に曝される避難者が存在するが、Case C では存在しない。したがって、スプリンクラーが作動することで CO の曝露時間が大きく減少すること、また、1 つ当たりのスプリンクラーの散水量が少なくてもその個数が多い方が CO の曝露時間が短くなることがわかった。

なお、スプリンクラーが着火源（＝出火点）の真上



にない Case B と B' でも、スプリンクラーが熱を感知して散水している。実際の火災では出火点がどこになるかを正確に予測できないことから、1つ当たりのスプリンクラーの散水量が少なくても個数は多い Case C のスプリンクラーの配置がより安全だと言える。

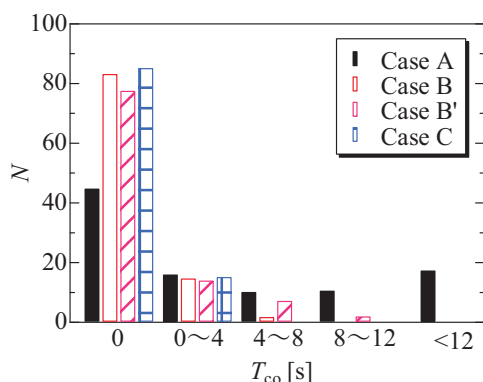


Fig.14 Exposure time of CO; N = 100.

#### 4. まとめ

区画火災における避難行動を数値シミュレーションにより評価し、煙の流動や延焼領域の拡大の違いからスプリンクラーが避難行動に及ぼす影響を避難時間および CO の曝露時間をもとに検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 部屋の中央に配置したポリウレタンが燃焼し始めると次第に延焼領域は拡がり、すすと一酸化炭素が発生する。スプリンクラーがない場合、煙は天井にまで達し、その後、部屋の壁に沿って降下して部屋全体に拡がる。CO も部屋の中央から発生するが、煙の流動とは異なり可燃物であるポリウレタンが燃えている領域で高い値を示す。
- 2) スプリンクラーがある場合、Case B および Case B' では 32 秒後、Case C では 28 秒後にスプリンクラーが作動して散水が開始される。スプリンクラーが火災発生位置の真上にある Case C では、Case B に比べてスプリンクラーの作動開始時刻が早い。その結果、Case B では計算開始から約 47 秒後、Case C では約 44 秒後に火災が完全に鎮火する。Case B とスプリンクラーの配置が同じ Case B' は、総散水量が少ないため火災が鎮火しない。
- 3) 異なる配置で散水量が同じ Case B と Case C を比較すると、Case C の方が早くスプリンクラーが作動するため延焼領域の拡大が抑えられ、すすと一酸化炭素の発生量が抑制される。
- 4) スプリンクラーの有無によらず、初期配置人数が増加すると出口に形成されるボトルネックの影響により避難時間は増加する。ただし、出口に形成されるボトルネックの大きさは初期配置人数に依存し、スプリンクラーの流量や配置によらない。
- 5) スプリンクラーがない Case A では、CO の発生量

が多くなるため、CO の曝露時間もスプリンクラーが作動する場合に比べて増加する。Case C では火災の鎮火が早いため、4 秒以上 CO に曝される避難者が存在しない。実際の火災では出火点がどこになるかを正確に予測できないことから、1つ当たりのスプリンクラーの散水量が少なくても個数は多い方が安全だと言える。

#### 謝辞

本研究の一部は、平成 23 年度内田博士記念研究助成により行われた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) Hirano, T.: “Combustion Science for Safety,” *Proc. Combust. Inst.* Vol.29, pp.167-180, 2002.
- 2) 山本和弘, 森幸一, 小沼義昭: “可燃性固体の燃え拡がりに及ぼす周囲雰囲気の影響 (周囲温度の影響と鉛直下方燃え拡がり限界酸素濃度)”, 日本機械学会論文集 (B 編), 68 巻 672 号, pp.2437-2443, 2002.
- 3) Yamamoto, K., Ogata, Y., Yamashita, H.: “Flame Structure and Flame Spread Rate over a Solid Fuel in Partially Premixed Atmospheres,” *Proc. Combust. Inst.* Vol.29, pp.167-180, 2002.
- 4) 田中孝義: 建築火災安全工学入門, 日本建築センター, pp3-12, 1993.
- 5) 日本火災学会: 火災と建築, 共立出版, pp.93-101, 2002.
- 6) 日本火災学会: 火災と建築, 共立出版, pp.11-20, 2002.
- 7) 日本火災学会: 火災と建築, 共立出版, pp. 157-180, 2002.
- 8) 太田充, 松山賢, 大宮喜文, 山口純一, 野秋政希: “スプリンクラー設備作動環境下の煙流動予測性状”, 建築学会大会学術講演梗概集, pp39-40, 2012.
- 9) 杉田直樹: “火災時に発生する一酸化炭素などの燃焼ガス生成について”, 予防時報 233, 防災基礎講座, pp. 8-13, 2008.
- 10) Yamamoto K., Kokubo, S., Nishinari, K.: “New Approach for Pedestrian Dynamics by Real-Coded Cellular Automata (RCA)”, *Lecture Notes in Computer Science*, LNCS4173, pp.728-731, 2006.
- 11) Yamamoto K., Kokubo, S., Nishinari, K.: “Simulation for Pedestrian Dynamics by Real-coded Cellular Automata (RCA)”, *Physica A*, Vol.379, pp.654-660, 2007.
- 12) 小久保聡, 山本和弘, 山下博史: “セルオートマトンによる火災時の避難行動のシミュレーション”, 日本機械学会論文集 (B 編), 第 74 巻, 748 号, pp.2724-2730, 2008.
- 13) 山本和弘, 左高秀多, 錦慎之助: “RCA モデルを用いた火災時の避難行動のシミュレーション”, 平成 23 年度研究発表会概要集, pp.270-271, 2011.
- 14) 山本和弘, 左高秀多, 錦慎之助: “火災時の避難行

- 動のモデル化と延焼シミュレーション”, 第 17 回  
交通流のシミュレーションシンポジウム論文集,  
pp.117-120, 2011.
- 15) 竹内裕貴, 山本和弘, 錦慎之助: “RCA モデルを用  
いた火災時の避難行動のシミュレーション(第二  
報)”平成 24 年度研究発表会概要集, pp.162-163,  
2012.
- 16) 柳澤大地, 西成活裕: “群衆の集団運動と拡張フロ  
アフィールドモデル”, 応用力学研究所研究集会  
報告, No.17ME-S2, Article No.28, 2006
- 17) Ying Jheng, Bin Jia, Xin-Gang Li, Nuo Zhu,:  
“Evacuation Dynamics with Fire Spreading Based on  
Cellular Automaton”, *Physica A*, Vol.390,  
pp.3147-3156, 2011.
- 18) <http://www.fire.nist.gov/fds/>
- 19) 錦慎之助: “トンネル火災時のスプリンクラー散水  
と煙の流動に関する数値シミュレーション”, 平  
成 25 年度研究発表会概要集, pp.278-279, 2013.
- 20) 阿部伸之: “CFD を用いた火災の数値シミュレーシ  
ョン”, 日本流体学会誌数値流体力学部門 Web 会  
誌, 第 12 巻, 第 2 号, pp.69-84, 2004.
- 21) 天野和洋, 今関修, 抱憲誓, 井田卓造: “熱流動を  
考慮した避難シミュレータの開発”, 平成 25 年度  
研究発表会概要集, pp.182-183, 2013.
- 22) 神忠久: “煙の中での歩行速度について”, 火災,  
Vol.25, No.2, pp.44-48, 1975.
- 23) 菊本智紀, 川端信義, 丸山大輔, 山田眞久: “乗用  
車専用小型道路トンネル内における火災時の熱  
気流挙動特性”, 土木学会論文集, Vol.63,  
pp.448-459, 2007.
- 24) 建設省: 建設省告示第 1441 号, 2000.