

火災時の避難行動のモデル化と延焼シミュレーション

山本和弘¹, 左高秀多¹, 錦慎之助²

¹名古屋大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻

²鹿児島大学大学院 理工学研究科 機械工学専攻

概要

本研究では、実数型セルオートマトン法 (RCA 法) により火災時の避難シミュレーションを行った。部屋の中央から同心円状に燃え広がる火災を解析コード FDS により模擬し、延焼領域の燃え広がり速度を求めた。また、延焼領域の外側に設定した危険領域でも出口へ向かうモデル I と危険領域で回避行動をとるモデル II を用いてシミュレーションを行い、火災に巻き込まれた人数やその位置を調べて、延焼領域の燃え広がり速度が与える影響について検討した。

Modeling of Evacuation Dynamics in Fire and Flame Spread Simulation

Kazuhiro Yamamoto¹, Shuta Sadaka¹, Shinnosuke Nishiki²

¹Department of Mechanical Science and Engineering, School of Engineering, Nagoya University

²Department of Mechanical Engineering, School of Science and Engineering, Kagoshima University

Abstract

In this study, we simulated a room evacuation in fire by using a Real-coded Cellular Automata (RCA). Two models were used for considering different evacuee's behaviors to avoid burning area. Flame spread was calculated by a numerical code of Fire Dynamics Simulator (FDS) for modeling time-dependent flame position. Based on the discussion of evacuation route and number of fatalities involved in fire, the effect of flame spread rate was examined.

1 はじめに

近年、建築物の多様化や都市部における構造物の集中が顕著であるため、実際に火災が起こった際の被害が甚大となる。避難計画には建築物の構造的な安全性だけでなく、実際に火災が発生したときの安全性の評価も重要である[1,2]。したがって、実際の災害を想定した上で、適切な安全指針を策定することが不可欠である。それには、火災時の避難行動を予測することが必要であるが、実際の火災を想定したデモ実験を行うことは難しい。

我々は、避難行動の解析手法として実数型セルオートマトン法 (Real-Coded Cellular Automata, RCA) を提案した [3-6]。この手法

は、流体の分野で利用されている実数型格子ガス法を避難者の移動過程に適用したものである。フロアフィールド[7-9]により避難者の移動方向を決定するが、セルの上を単純に移動するこれまでのモデルとは異なり、セルによらず任意の速度と方向を自由に設定できる。

本研究では、延焼領域の外側に設定した危険領域でも出口へ向かう従来のモデル I [5,6] と危険領域で回避行動をとる改良モデル II を用いて避難シミュレーションを行い、火災に巻き込まれた人数やその位置を調べて、回避行動が与える影響について検討した。延焼領域の燃え広がり速度は、米国標準技術研究所 (NIST) が開発した火災シミュレーションソフト FDS [10,11]を用いて求めた。

2 計算領域

実数型セルオートマトン法 (RCA 法) について簡単に説明する。避難者の移動はフロアフィールドを参照して決定する。これにより、避難者は出口まで最短経路で向かうことができる。避難経路の途中で延焼領域がある場合は、それを避ける必要がある。今回は 2 種類の避難モデル (モデル I と II) を用いた。その概略を図 1 に示す。火災は部屋の中央から同心円状に燃え広がるものとした。ここでは、延焼領域と危険領域という 2 つの領域を設定している。延焼領域とは、実際に火災が発生している領域であり、この領域に入った避難者は火災に巻き込まれたと判断する。一方危険領域とは、安全に避難するために避けるべき領域であり、幅 L の大きさを持つ危険領域に入った避難者はモデルにより異なる行動をとるものとした。各モデルにおける避難者の移動方法は以下の通りである。

モデル I : 図の Zone 1 にいる避難者は、同心円の延焼領域の接線方向へ移動することで延焼領域を迂回する。Zone 1 以外では、フロアフィールドを参照して出口へ向かう。

モデル II : Zone 1 の移動方法はモデル I と同じである。Zone 2 にいる避難者は、いったん延焼領域から遠ざかるため、延焼領域に対し半径方向に遠ざかる回避行動をとる。Zone 1 および Zone 2 以外ではフロアフィールドを参照して出口へ向かう。

次に、計算領域について説明する。火災が発生している部屋は $16\text{m} \times 16\text{m}$ とし、右側の壁中央に幅 2m の出口を設置した。出口においては、確率を用いて避難者の流出係数が $1.5 \text{ 人}/(\text{m} \cdot \text{s})$ になるように調整した。避難者の移動速度を 1.6m/s 、危険領域の幅 $L = 1.2\text{m}$ 、避難者の初期配置人数を N とし、延焼領域の燃え広がり速度 v_f を変えて避難経路や火災に巻き込まれた人数について検討した。なお、シミュレーションは避難者の初期配置を変えて 5 回行い、その平均値を求めて検討した。

燃え広がり速度を算出するため、火災シミュレーションソフト FDS を用いた。計算方法の詳細は省略するが、低マッハ数近似を仮定した圧縮性の運動方程式などを LES により解いている [10,11]。今回は可燃性のポリウレタンの床面を想定し、 $16\text{m} \times 16\text{m} \times 2\text{m}$ の部屋内における火災を想定した。

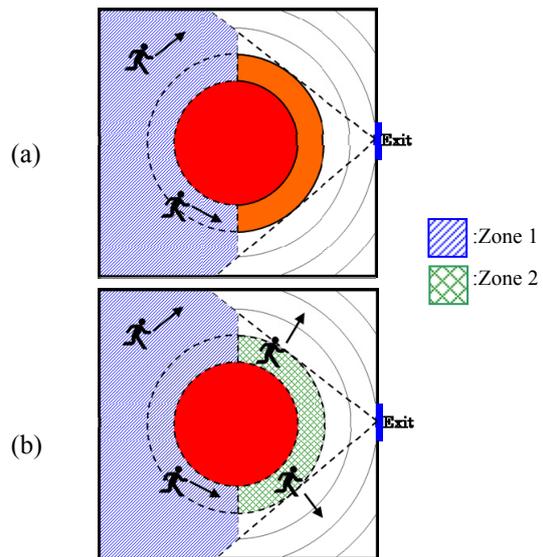


図 1 避難モデル; (a)モデル I, (b)モデル II

3 計算結果及び考察

3.1 延焼領域の燃え広がり速度の算出

まず、FDS により得られた延焼領域の燃え広がり様子を説明する。床から 40cm の高さにおける温度分布を図 2 に示す。計算開始から 8.7 秒後と 10.5 秒後の結果である。部屋の中央から延焼領域がほぼ同心円状に燃え広がっている。

図 3 に、延焼領域の半径 R の時間変化を示す。温度が 200°C を超えた範囲を延焼領域とし、各時刻において延焼領域の面積と同じ面積になる真円の半径を算出して延焼領域の半径を決定した。計算を開始して 8 秒を過ぎると延焼領域が拡大する。多少変動はするものの、ほぼ一定の速度で延焼領域が燃え広がることがわかった。そこで、図に示した 8 秒から 11 秒の間で延焼領域の平均の燃え広がり速度を求めた。図の直線の勾配を求めると 0.8m/s となり、この

値を延焼領域の燃え広がり速度の最大値として、避難シミュレーションを行った。

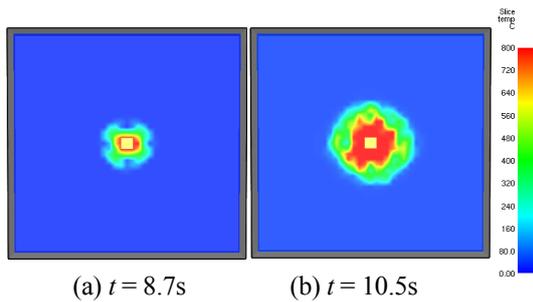


図2 床から40cmの高さにおける温度分布

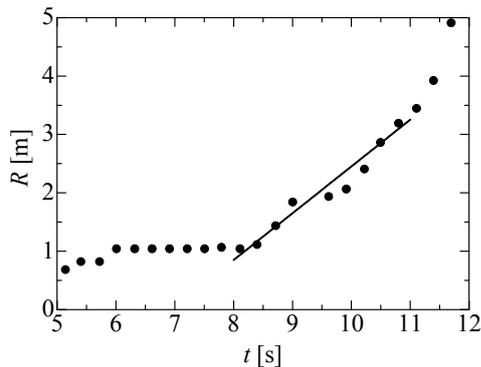


図3 延焼領域の半径の時間変化

3.2 火災時の避難の様子

火災時の避難状況を調べ、2種類の避難モデルの違いを検討した。 $N=100$ 人、 $v_f=0.4\text{m/s}$ としたときの0.33秒後、5.0秒後、9.0秒後の避難状況を図4に示す。延焼領域を赤、危険領域をオレンジで示す。出口に向かって直線的に移動できない人は、延焼領域を迂回して避難している。出口付近では、避難者が渋滞しボトルネックが発生している。モデルIとIIを比べると、5秒まではZone2において回避行動をとる避難者がいないため違いが現れない。9秒後の避難の様子を見ると、モデルIでは危険領域にも避難者がいるのに対し、モデルIIではいったん危険領域の外へ出る回避行動をとるため、危険領域にいる避難者はほとんどいない。

次に、モデルIとIIを用いた場合に避難者が火災に巻き込まれた位置を調べた。 $N=100$ 人とし、 $v_f=0.4, 0.8\text{m/s}$ としたときのモデルIとIIの結果を図5に示す。これによると、延焼領域

の燃え広がり速度が小さい場合には、ボトルネックが発生する出口付近で火災に巻き込まれる人が多いことがわかる。しかし、燃え広がり速度が大きくなると、避難途中で火災に巻き込まれる人も多くなる。ただし、モデルIでは延焼領域を迂回する過程で火災に巻き込まれる人が多く、モデルIIでは部屋の壁際で火災に巻き込まれる人が多いことがわかる。

ここで、各モデルの結果の違いについて考察する。モデルIでは、Zone2の危険領域において回避行動をとらないため、延焼領域の燃え広がり速度が大きいと火災に巻き込まれる人が多くなる。一方モデルIIでは、延焼領域の燃え広がり速度が小さいときは回避行動により部屋の右上や右下に移動した後、危険領域を出て出口へ進むことができる。ただし、延焼領域の燃え広がり速度が大きときは、危険領域を避けても延焼領域が出口付近に達しているため、避難者が部屋の壁際に追い込まれて火災に巻き込まれるケースが多くなる結果となった。

最後に、延焼領域の燃え広がり速度 v_f を変化させ、火災に巻き込まれた人数 N_D を調べた。 $N=200$ とし、モデルIとIIを比較した結果を図6に示す。いずれのモデルにおいても、延焼領域の燃え広がり速度が大きくなると火災に巻き込まれる人数は増加することがわかる。ただし、その値はどちらのモデルでもほぼ同じ値となった。

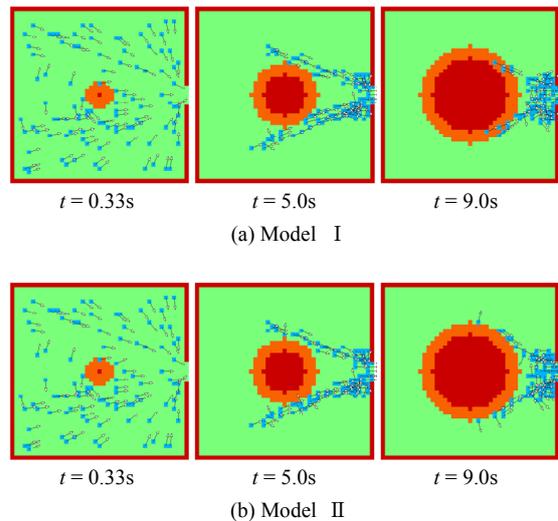
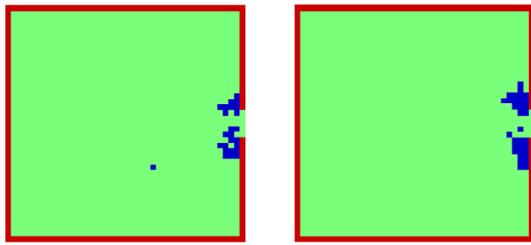
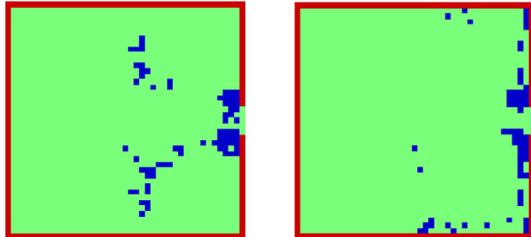


図4 各時刻における火災の規模と避難者の位置



(a) $v_f=0.4\text{m/s}$



(b) $v_f=0.8\text{m/s}$

図5 避難者が火災に巻き込まれた位置
(左側: モデル I, 右側: モデル II)

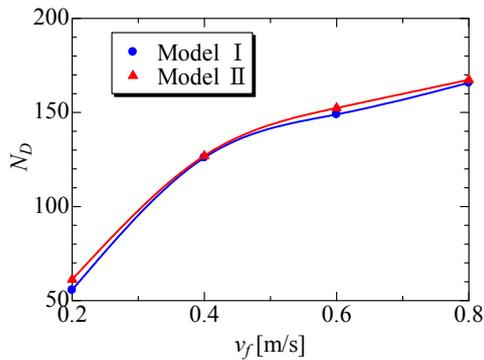


図6 避難者が火災に巻き込まれた人数

図5によれば、延焼領域の燃え拡がり速度が大きいと、モデル I では延焼領域付近で火災に巻き込まれる人が多くなる。一方モデル II では、部屋の壁際で火災に巻き込まれる人が多い。このように延焼領域の燃え拡がり速度が大きくなった場合には、火災に巻き込まれる位置に違いが出るものの、火災に巻き込まれる人数はモデルによらないことがわかった。今後実際の火災を想定し、発生する煙の影響や可燃物の配置などについて検討する予定である。

4 まとめ

本研究では、部屋内で発生した火災の避難シミュレーションを実数型セルオートマトン法

(RCA 法) により行った。部屋の中央から同心円状に広がる火災を想定し、延焼領域の外側に設定した危険領域でも出口へ向かう従来のモデル I と危険領域で回避行動をとる改良モデル II を用いて比較した結果、以下のことがわかった。

- 1) ポリウレタンの床を持つ部屋内の火災では、約 0.8m/s で延焼領域が燃え広がる。
- 2) 部屋の出口付近では、避難者が渋滞しボトルネックが発生する。これにより出口付近で火災に巻き込まれるが、延焼領域の燃え拡がり速度が大きくなると避難途中で火災に巻き込まれるケースが多くなる。
- 3) 延焼領域の燃え拡がり速度が大きくなると、火災に巻き込まれる人数は増加する。回避行動の有無により火災に巻き込まれる位置に違いはあるものの、火災に巻き込まれる人数は変化しない。

参考文献

- [1] 田中哮義, 建築火災安全工学入門, 日本建築センター (1993).
- [2] T. Hirano, Combustion Science for Safety, Proc. Combust. Inst. **29**, 167 (2002).
- [3] K. Yamamoto, et al., Lecture Notes in Computer Science, LNCS 4173, 728 (2006).
- [4] K. Yamamoto, S. Kokubo, K. Nishinari, Physica A **379**, 654 (2007).
- [5] 小久保聡, 山本和弘他, 日本機械学会論文集 (B 編) 第 74 巻 748 号, 2724 (2008).
- [6] 山本和弘他, 第 14 回交通流のシミュレーションシンポジウム論文集, 9 (2008).
- [7] C. Burstedde, et al., Physica A **295**, 507 (2001).
- [8] A. Kirchner and A. Schadschneider, Physica A **312**, 260 (2002).
- [9] A. Kirchner, et al., Phys. Rev. E **67**, 056122 (2003).
- [10] <http://www.fire.nist.gov/fds/>
- [11] 錦慎之助, 常谷梨律子, 門脇敏, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2009 講演論文集, 1-2 (2009).