

実数型セルオートマトン法による火災時の避難シミュレーション

山本和弘¹, 小久保聡¹, 山下博史¹
¹名古屋大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻

概要

本研究では、火災時の避難行動を実数型セルオートマトン法により解析した。火災の燃え広がりはパーコレーションモデルにより再現した。比較のため、火災が起きていない場合と火災のかわりに部屋内に障害物を配置する場合についても同様の計算を行い、避難経路や避難時間について検討した。

Simulation of Fire Evacuation by Real-Coded Cellular Automata

Kazuhiro Yamamoto¹, Satoshi Kokubo¹, Hiroshi Yamashita¹

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

Abstract

In this study, we have simulated fire evacuation by Real-Coded Cellular Automata (RCA), which is proposed as a new approach for evacuation dynamics. To consider the flame spread in discrete time and space in CA simulation, a percolation model is used. For comparison, we considered the situation in the room with obstacle with no fire. We have discussed the evacuation route and time in fire.

1 はじめに

2008年10月1日未明、大阪市浪速区の雑居ビルで15人が死亡するという火災があった。大阪市消防局によれば、出火当時店内には多数の人がいたが、通路や部屋の配置が複雑であり、十分な排煙設備や消火機器がなかったことが被害を大きくした原因と考えられている。また、2001年に東京都新宿区でも類似の火災が発生している。このように、火災は様々な要因によって被害が拡大するため、事前の安全性の評価が難しい[1,2]。既に行った災害の情報を蓄積しておくことが望ましいが、実際に得られるデータは限られており、また、火災を想定した訓練やデモ実験を行うことは、コストや安全性の観点からも現実的ではない。そこで、数値解析により火災時の避難行動や安全性を評価することは有効である。

我々はセルオートマトン法に着目し、群集行動の新しい解析手法として、実数型セルオートマトン法(Real-Coded Cellular Automata, RCA)を提案した

[3,4]。これまでに、出口付近に人が密集するボトルネック現象や大勢の通行人が通路を移動するときに見られる自発的レーン形成を模擬することができた。本研究では、このRCA法を用いて火災時の避難シミュレーションを行った。比較のため、火災が発生していない条件についても同様の計算を行い、避難経路や避難時間について検討した。

2 計算方法

2.1 RCA法

まずRCA法における避難者の移動方法を説明する。避難者の速度ベクトルを \mathbf{v}_i 、その x 方向、 y 方向成分をそれぞれ $v_{x,i}$ 、 $v_{y,i}$ とする(図1)。格子間隔を Δ 、時間ステップを Δ_t とし、その時間内に移動できる距離を格子に対して整数倍の値 $[v_i]$ とそれ以外の値 $\{v_i\}$ に分けると、

$$\begin{cases} v_{x,i}\Delta_t = [v_{x,i}]\Delta + \{v_{x,i}\}\Delta \\ v_{y,i}\Delta_t = [v_{y,i}]\Delta + \{v_{y,i}\}\Delta \end{cases} \quad (1)$$

と表される。まず、 $[v_{x,i}]$ と $[v_{y,i}]$ の値により格子点の数だけ移動させる。次に残りの小数部分により、図中の点(a), (b), (c), (d)に避難者を再配置する。その確率をそれぞれ p_A, p_B, p_C, p_D とすると、それらは図のA, B, C, Dで示した面積で与える。これにより従来のCAモデルと同様に、避難者の位置は格子点としたまま任意の速度と方向の移動が扱える。

移動方向は出口までの距離を示すフロアフィールドの値を参照して決定する。図2に、部屋内に障害物がない場合とある場合のフロアフィールドを示す。また、避難経路の途中に火災がある場合は、火災からある距離 L (今回は1.6m一定) 離れるよう迂回して避難することにした。

$$p_A = \{v_{x,i}\} \cdot \{v_{y,i}\} \quad (2)$$

$$p_B = (1 - \{v_{x,i}\}) \cdot \{v_{y,i}\} \quad (3)$$

$$p_C = (1 - \{v_{x,i}\}) \cdot (1 - \{v_{y,i}\}) \quad (4)$$

$$p_D = \{v_{x,i}\} \cdot (1 - \{v_{y,i}\}) \quad (5)$$

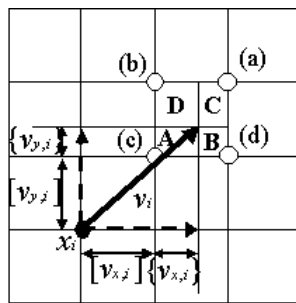
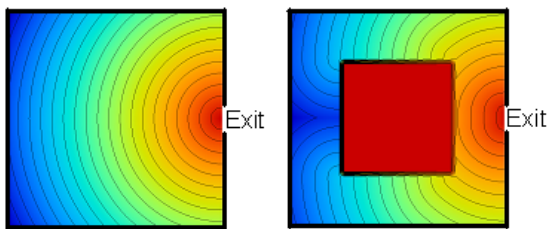


図1: RCAによる避難者の移動方法



(a) 障害物なし (b) 障害物あり

図2: フロアフィールド

2.2 火炎の燃え広がり

次に、火炎の燃え広がりにはパーコレーションモデル [5]により模擬した。図3に火炎の燃え広がりの

モデルを示す。白丸で示した燃焼前の点が燃焼して黒丸の点に変化する。計算初期に部屋の中央に着火源を置き、燃焼した点が隣接した未燃の点に移ることで火炎伝播を模擬した。従来のパーコレーションの計算モデルでは、浸透の際の連結を2次元平面における上下左右方向しか考慮していなかったが、本モデルでは同心円状の火炎の燃え広がりを模擬するため、斜め方向も考慮することにした。ここで、上下左右方向へ燃え広がる確率を P_1 , 斜め方向へ燃え広がる確率を P_2 とする。 P_2 を P_1 の0.3倍とすることで火炎が同心円状にはぼ一定の速度で伝播することを確認している [6]。

図4に、 $P_1=C$ と $P_2=0.3C$ として、火炎の燃え広がり速度 v_f を変化させた結果を示す。これによると、 C の値により v_f の値を0.8m/s以下の範囲で任意に変えることができた。そこで本解析では、この C の値により火炎の燃え広がり速度を変化させた。

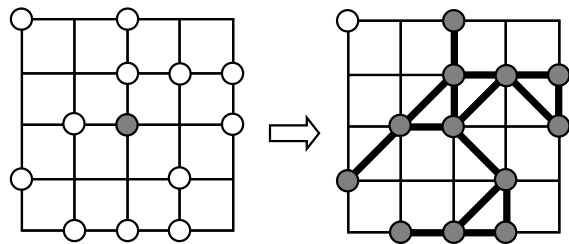


図3: パーコレーションモデル (燃焼前と燃焼後)

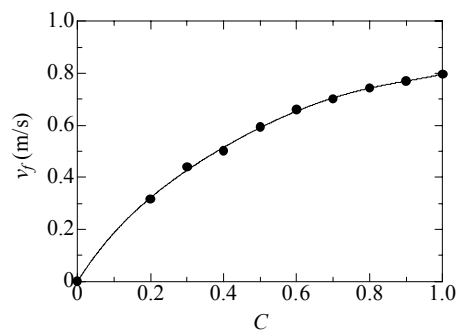


図4: 火炎の燃え広がり速度

2.3 計算領域

本計算では、火災の発生していない部屋A、障害物を配置した部屋B、火災の発生している部屋Cの解析を行い、様々なパラメータを代えることで、避難行動にどのような違いが現れるかを調べた (図5)。

部屋の大きさはすべて $16\text{ m} \times 16\text{ m}$ で正方形の形状の部屋とし、幅 1.2 m の出口を部屋の右側の壁中央に配置した。部屋 B には $8.8\text{ m} \times 8.8\text{ m}$ の正方形の障害物を中心に配置した。火災の発生する部屋 C では、部屋内のすべての領域を燃焼可能な点とした。

一方、計算初期における避難者の配置は乱数により与えた。部屋内の初期人数を N とした。今回の計算で用いる v_i としては、ジョギング程度の 2.2 m/s 、全速力の 5.0 m/s 、その間の速度 3.0 m/s とした。格子間隔 Δ は人の肩幅の平均値である 0.4 m 、1 タイムステップ Δ_t を 0.5 s とした。また、避難できずに火災に巻き込まれた人数を N_D 、総避難時間を T_E とし、様々な計算条件に対して N_D と T_E を求めた。

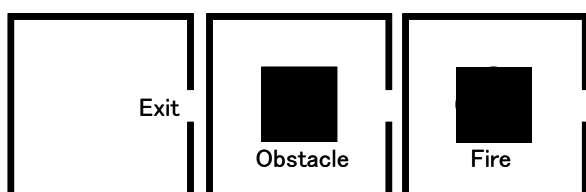


図5：3種類の部屋（部屋A, B, C）

3 計算結果及び考察

3.1 避難経路と総避難時間

まず各部屋について計算を行い、避難経路について検討した。図6-8に0.5秒後、5秒後、9秒後の人の位置を図示した。これらは、 $N=100$ 、 $v_i=2.2\text{ m/s}$ 、 $v_j=0.8\text{ m/s}$ の条件の結果である。火災が起きていない部屋 A では、避難者はほぼ直線的に出口へ向かっている。また、5秒後には出口付近にボトルネックが観察された。一方部屋 B では、障害物を迂回しながら避難する様子が観察された。ただし部屋 A とは異なり、時間がたつにつれて中央に配置した障害物の角でも人が群がって渋滞する様子が見られた。この場合避難者は、最短の経路をとるため障害物の角をめざして移動するので、出口付近で見られるボトルネックの現象が障害物の角でも観察されることになったと思われる。一方、火災の発生している部屋 C の場合、時間がたつにつれて火災が成長するため、ボトルネックの発生時刻や避難経路に大きな違いがみられた。

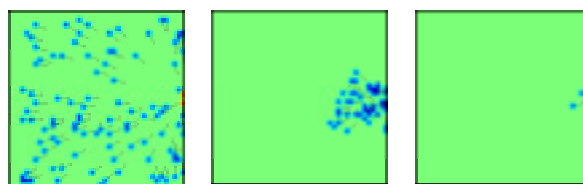


図6：部屋Aの避難の様子（時刻0.5, 5, 9秒後）

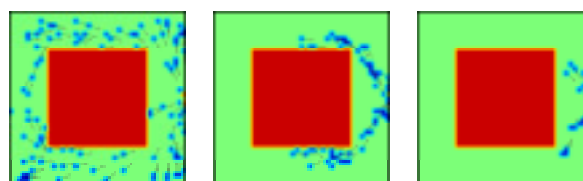


図7：部屋Bの避難の様子（時刻0.5, 5, 9秒後）

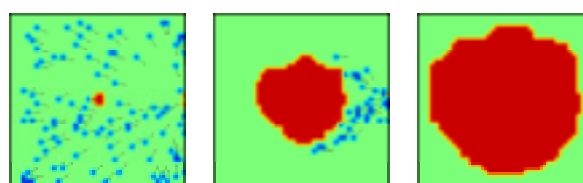


図8：部屋Cの避難の様子（時刻0.5, 5, 9秒後）

そこで、部屋 A, B, C での総避難時間 (T_E) を求め比較した。図9に各部屋について初期配置人数 N を変化させて得られた総避難時間 T_E の結果を示す。ここでは $v_j=0.5\text{ m/s}$ として計算を行い、図中の各プロットは、人の初期配置を変えた5回のシミュレーションの平均値をとった結果である。部屋 C では初期配置人数が100人より大きくなると火災に巻き込まれてしまう人が増え、総避難時間が決定できなくなるため、100人以下の結果のみを示した。その結果、いずれの部屋でも部屋内の人数が多くなると、

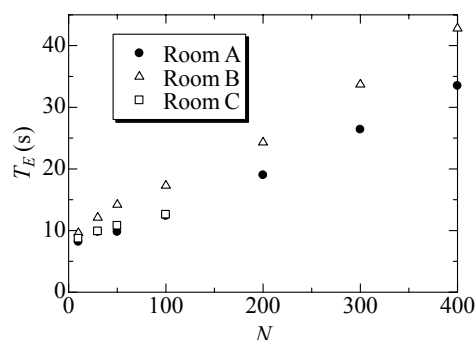


図9：部屋内の初期人数を変えたときの総避難時間

避難時間がほぼ比例して大きくなることがわかった。また、部屋 A と部屋 B を比べると、部屋 B の方が避難時間は3割程度長くなっている。これは、障害物を迂回するため移動距離が長くなり、また、障害物の角付近で渋滞が起こるためであると思われる。

3.2 火炎の燃え広がり速度の影響

次に、火炎の燃え広がり速度を変えた計算を行い、結果を比較した。図 10 に部屋 C について、 $N = 200$ のときの 6 秒後の人と火炎の位置を示す。火炎の燃え広がり速度はそれぞれ $v_f = 0.5 \text{ m/s}$, 0.8 m/s である。これによると、同時刻でも火炎の大きさは大きく異なる。火炎が大きい場合は、出口付近だけでなく、避難途中で火炎に巻き込まれる人が増えることがわかった。

また、避難者の速度 v_i を 2.2, 3.0, 5.0 m/s とした場合に、火炎の燃え広がり速度 v_f を変化させて火炎に巻き込まれた人数 N_D を求めた。部屋内の初期人数を 100 として得られた 5 回のシミュレーションの平均値を図 11 に示す。これによると、火炎の燃え広がり速度が速いほど、火炎に巻き込まれる人数が多くなることがわかった。これは、火炎の近くを移動している避難者だけでなく、出口により早く火炎が到達し、避難できずに出口付近に集まっている人も被害にあうためである。ただし、避難者の移動速度 v_i を大きくすることで、 N_D が小さくなることがわかった。特に、移動速度が 5.0 m/s の条件では、火炎の燃え広がり速度 v_f が速くなっても N_D は小さい値のままであった。したがって、火炎の燃え広がり速度 v_f に対して避難者の移動速度 v_i が相対的に大きいほど、火炎に巻き込まれる人数が少なくなるといえる。

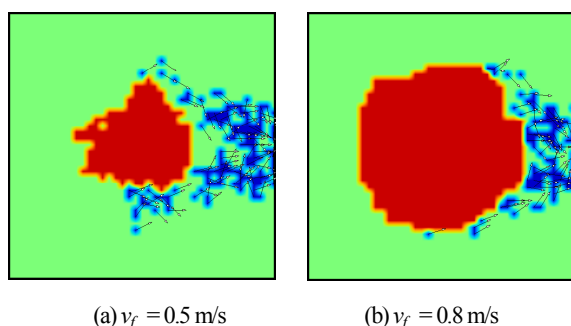


図 10 : 時刻 6 秒後の火炎と避難者の位置

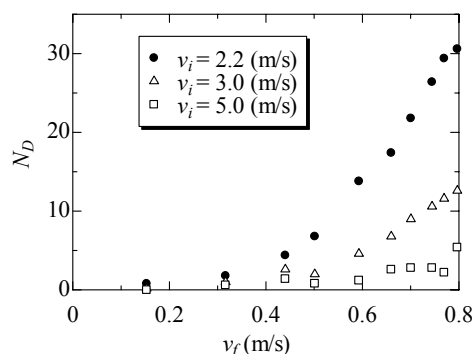


図 11 : 火炎に巻き込まれた人数 (部屋 C)

4 まとめ

本研究では部屋内の火災を想定し、避難行動を実数型セルオートマトン法 (RCA) により数値的に模擬した。比較のため、火災が起きていない部屋と、火災のかわりに部屋内に障害物を配置した部屋についても同様の計算を行い、火災時の避難経路や避難時間について検討した。その結果、部屋内に障害物や火炎が存在すると避難経路が変わり、総避難時間も増えることがわかった。これにより、出口におけるボトルネックの発生に違いが見られることになる。また、火炎の燃え広がり速度が遅いほど、あるいは避難する人の移動速度が速いほど、逃げ遅れて火炎に巻き込まれる人数は少なくなる。

本研究の一部は豊田理化学研究所の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

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** (2002) 167.
- [3] K. Yamamoto, S. Kokubo, K. Nishinari, Lecture Notes in Computer Science, LNCS4173 (2006) 728.
- [4] K. Yamamoto, S. Kokubo, K. Nishinari, Physica A **379** (2007) 654.
- [5] 今野紀雄, 複雑系, ナツメ社 (1998).
- [6] 小久保聡他, 日本機械学会年次大会講演論文集 (2007) 155.