

火災時の避難行動のモデル化と解析

山 本 和 弘*

Modeling and Simulation of Evacuation Dynamics in Fire

Kazuhiro YAMAMOTO

In this study, we have simulated evacuation dynamics in fire by Real-coded Cellular Automata (RCA) proposed as a new approach for pedestrian flow. To consider the flame spread in discrete time and space in calculation, a percolation model is used. We change initial number of people, evacuee velocity, exit width, and flame spread rate. We discuss the total evacuation time and number of fatalities involved in fire.

1. はじめに

避難計画には、建築物の構造的な安全性と、火災に対する安全性を考慮する必要がある。構造的な安全性に関する基準は法規によって定められているが、火災に対する安全性は、火災という現象そのものが、様々な要因によって発生し拡大していくため、完全な評価が難しい^{1)~4)}。その中で避難に関する問題は、人命に最もかかわる部分であるため、十分検討する必要がある。本来、実際の火災時のデータを蓄積しておくことが望ましいが、火災発生時のデータは限られており、消火後のデータは解釈が困難となる。また、火災の規模や建物の大きさなどをあらかじめ想定した訓練やデモ実験を行うことはコスト、時間などの面から現実的ではない。そこで我々は、流体の分野で用いられている手法を応用し、人の方向と速度を自由に設定できる実数型セルオートマトン法 (Real-Coded Cellular Automata, RCA) を提案した⁵⁾⁶⁾。これまでに、斜め方向の移動時間を正確に再現できることを確認しており、また、群集の避難行動を解析して出口付近に人がたまるボトルネック現象や、密集した人々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、Floor field model を考慮した RCA 法を用いて、部屋内での火災を想定した避難シミュレーションを行った。離散モデルにより火災の燃え広がり現象を模擬するため、パーコレーションモデル⁷⁾により火災の移動を再現した。人の移動速度、火災の燃え広がり速度、部屋内の人数などのパラメータを変えて解析を行い、避難できずに火災に巻き込まれてしまう人数と避難時間を調

べた。また比較のため、火災が発生していない条件、火災のかわりに障害物を配置する条件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考察した。

2. 計算手法と計算領域

実数型セルオートマトン法は従来のセルオートマトンモデルとは異なり、任意の速度を扱うことができ、方向についてもセルの向きにとらわれず自由に設定できる。時間に関しては従来のものと同様、離散的な値をとる。人の存在位置は格子点上であり、その移動は現在の位置に人の移動速度ベクトルを加えることによって行われる。詳細は参考文献 5, 6 を参照されたい。

次に計算領域について説明する。本研究では、火災の発生していない部屋として部屋 A、火災のかわりに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変えることで、避難行動にどのような違いが現れるかを調べた (Fig. 1)。部屋の大

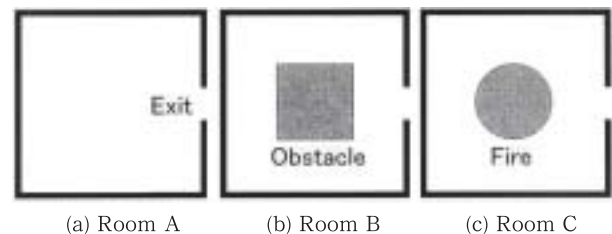


Fig. 1. Evacuation in three rooms A to C

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、出口を部屋の右側の壁の中央に配置している。出口の大きさは W とした。部屋 B には $6.4\text{ m} \times 6.4\text{ m}$ 、または $8.8\text{ m} \times 8.8\text{ m}$ 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

2009年1月27日受理

*豊田理化学研究所研究嘱託
(名古屋大学大学院工学研究科)

な点とした。

一方、計算初期における部屋内の人の配置は乱数により与えた。ここで、初期人数を N 、火災の燃え拡がり速度を v_f 、避難者の移動速度を v_i とした。今回の計算で用いる v_i としては、ジョギング程度の速度 $v_i = 2.2$ m/s、全速力の速度 $v_i = 5.0$ m/s、その間の速度 $v_i = 3.0$ 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てしまった人の人数を N_D 、部屋内にいるすべての人が避難を完了する時間を T_E とし、様々な計算条件に対して N_D と T_E を求めた。

3. 計算結果及び考察

3.1 避難の様子と総避難時間

ここでは、部屋 A、B、C での避難経路と総避難時間 (T_E) の違いについて検討した。Fig. 2~4 に、各部屋 A、B、C について、 $N = 100$ 、 $v_i = 2.2$ m/s、 $W = 1.2$ m、 $v_f = 0.8$ m/s の条件で計算を行い、0.5 秒後、5 秒後、9 秒後の人の位置を図示した。ただし、部屋 B の障害物の大きさは 8.8 m \times 8.8 m である。

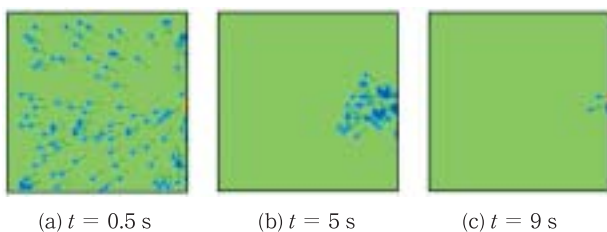


Fig. 2. Evacuation simulation in Room A

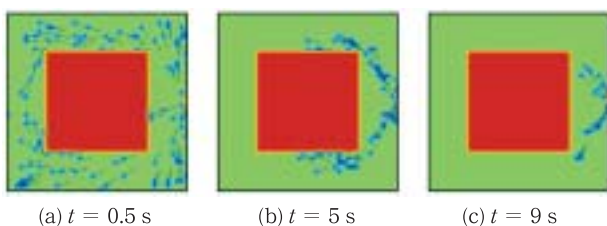


Fig. 3. Evacuation simulation in Room B

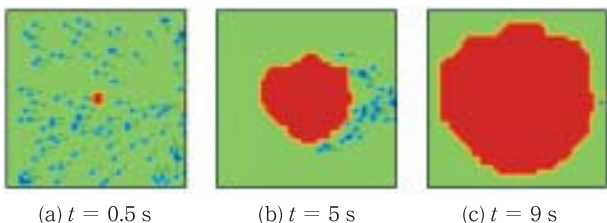


Fig. 4. Evacuation simulation in Room C

これによると、火災のない部屋 A では避難者は最短経路を、ほぼ直線的に出口へ向かっている。また、 $t = 5$ s において出口付近にボトルネックの現象が観察された。一方、障害物のある部屋 B では、迂回しながら避難する様

子が観察された。ただし部屋 A の結果とは異なり、はじめはランダムに配置した人々が一齐に出口に向かうが、時間がたつにつれて中央に配置した障害物の角に人が群がって渋滞している様子が見られた。おそらく避難者はこの場合、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延焼している領域が拡大するため、部屋 A と B に比べ、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。

また、Fig. 5 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

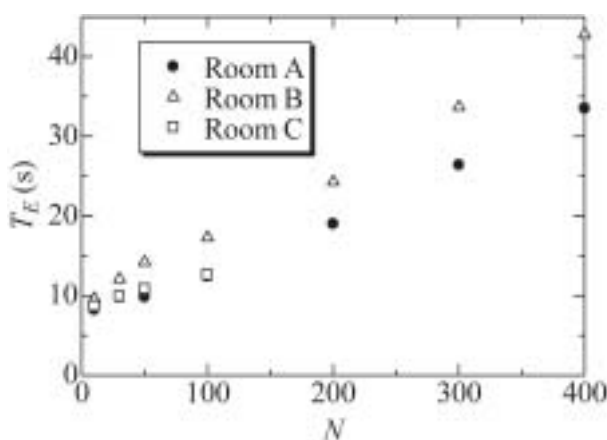


Fig. 5. Variation of T_E at different value of N

$v_f = 0.5$ m/s、障害物の大きさ 8.8 m \times 8.8 m 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。

これによると、どの場合でも部屋内の人数が多くなると、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、障害物の角付近で起きる渋滞により出口に到着する時間が遅れるためである。また、障害物をより大きくすると、総避難時間が長くなることがわかった。

3.2 火災の燃え拡がり速度の影響

次に、火災の燃え拡がり速度を変えて火災に巻き込まれる人数 N_D を調べた。部屋 C について、初期配置人数 N を変化させて得られた 5 回のシミュレーションの平均値を求める。 $v_i = 2.2, 3.0, 5.0$ m/s、 $N = 100$ 、 $W = 1.2$ m の条件で、火災の燃え拡がり速度 v_f を変化させて N_D を求めた。その結果を Fig. 6 に示す。これによると、火災の

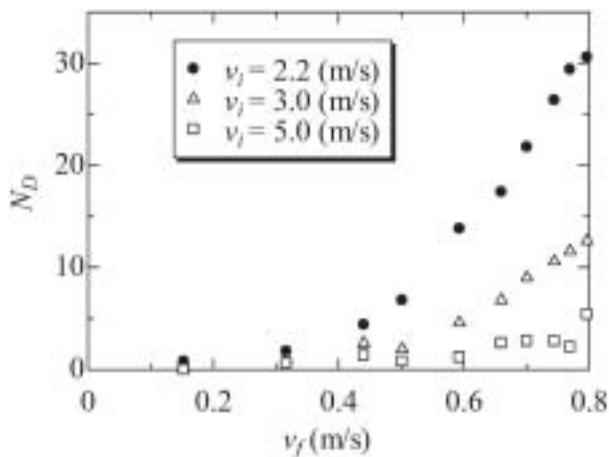


Fig. 6. Variation of N_D at different value of V_f

燃え拡がり速度が速いほど、火災に巻き込まれる人数が大きくなることがわかった。これは、火災の近くを移動している人だけでなく、出口により早く延焼している領域が到達し、避難できず出口付近に集まっている人を巻き込んでしまうためである。ただし、避難者の移動速度 v_i を大きくすることで、 N_D が小さくなった。特に、移動速度が 5.0 m/s の条件では、火災の燃え拡がり速度 v_f が速くても N_D は小さい値のままであった。したがって、火災の燃え拡がり速度 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、火災に巻き込まれる人数が少なくなるといえる。

3.3 出口幅の影響

最後に、部屋の出口幅の影響について調べた。Fig. 7 は、 $v_i = 2.2$ m/s, $N = 100$, $v_f = 0.3, 0.5, 0.8$ m/s の条件で、出口幅 W を変化させて得られた N_D の平均値を示す。出口幅 W を大きくしていくと、はじめ火災に巻き込まれる人数 N_D は小さくなったが、ボトルネックが観察されなくなる 1.6 m 以上になると一定の値をとった。出口

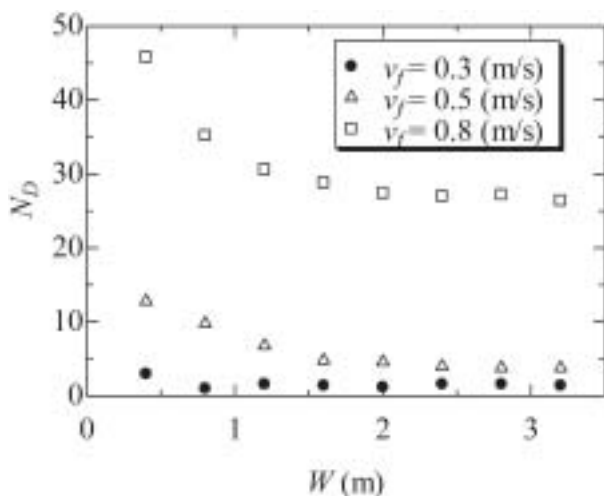


Fig. 7 Variation of N_D at different value of W

幅が小さい時には、単位時間に出口を通過できる人数が少ないために、ボトルネックが発生し、出口付近で多くの人が火災に巻き込まれるが、出口幅が大きいとボトルネックが発生しにくいので、 N_D が小さくなったものと思われる。また、火災の燃え拡がり速度 v_f が小さいほど、 N_D は小さくなった。特に $v_f = 0.3$ m/s の条件では、避難者の移動速度が火災が拡がる速度より十分速いため、出口の大きさにかかわらず、 N_D は非常に小さい値となった。

4. ま と め

本研究では 16 m × 16 m の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。火災の燃え拡がりに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、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、以下のことが明らかとなった。

- (1) 部屋内に障害物や火災が発生していると人の避難経路が変わるため総避難時間が 3 割程度増える。また、出口におけるボトルネックの発生に差が見られた。
- (2) 火災の燃え拡がり速度が遅いほど、また避難する人の移動速度が速いほど、逃げ遅れて火災に巻き込まれる人数は少なくなる。
- (3) 出口幅が大きくなると、火災に巻き込まれる人数は減少するが、出口でボトルネックが見られなくなる出口幅 1.6 m 以上で、ほぼ一定の値になる。

参 考 文 献

- 1) T. Tanaka, Textbook on Architectural Fire Safety Engineering, Japan Architectural Center, (1993)
- 2) T. Hirano, Combustion Science for Safety, *Proc. Combust. Inst.* **29** (2002) pp. 167–180.
- 3) K. Yamamoto, K. Mori and Y. Onuma, Trans., Effects of Ambient on Flame Spread over Solid Fuel, *Japan Society for Mechanical Engineers* **68–672** (2002) pp. 2437–2443.
- 4) K. Yamamoto, Trans., A Study for Model of Flame Spread over Solid Fuel, *Japan Society for Mechanical Engineers* **69–680** (2003) pp. 954–961.
- 5) K. Yamamoto, S. Kokubo, K. Nishinari, New Approach for Pedestrian Dynamics by Real-Coded Cellular Automata (RCA), *Lecture Notes in Computer Science*, LNCS 4173 (2006) pp. 728–31.
- 6) K. Yamamoto, S. Kokubo, K. Nishinari, Simulation for pedestrian dynamics by real-coded cellular automata (RCA), *Physica A*, **Vol. 379** (2007) pp. 654–660.
- 7) N. Konno, Complex system, Natsume Publishing Company (1998) pp. 155–196.