

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*

小久保聡^{*1}, 山本和弘^{*2}, 山下博史^{*2}

Simulation of Evacuation Dynamics in Fire by Cellular Automata

Satoshi KOKUBO^{*3}, Kazuhiro YAMAMOTO^{*4} and Hiroshi YAMASHITA^{*4}

^{*4}Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan

Since Cellular Automata (CA) was proposed by von Neumann in the late 1940s, CA have been applied in a variety of scientific researches on complex system, including traffic models and biological fields. It is an idealization of a physical system in which space and time are all discrete. 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, 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.

Key Words : Numerical Simulation, Flame, Safety Engineering, Complex System, Cellular Automata, Evacuation

1. 緒 言

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、また、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、数値解析により火災時の安全性を検討することは有効であると思われる。我々

はセルオートマトンモデルに着目し、群集行動の解析手法を検討してきた。

セルオートマトン法 (CA 法) は 1940 年代に von Neumann により提案され、現在では流れや拡散現象^{(5),(6)}、粉粒体あるいは交通流^{(7)~(9)}など幅広い分野において研究されている。群集行動のセルオートマトンモデルとしては、Floor field model^{(10)~(12)}が提案されている。しかし、人の移動方向が 4 方向に限定されており、斜め方向への動きを正確に扱うことができなかった。そこで我々は流体の分野で応用されている実数型格子ガス法 (Real-Code Lattice Gas, RLG)^{(13),(14)}に着目し、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^{(15),(16)}。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。

*原稿受付 2008 年 3 月 日。

^{*1}名古屋大学大学院 (〒464-8603 愛知県名古屋市中種区不老町)。

^{*2}正員, 名古屋大学大学院

E-mail : kazuhiro@mech.nagoya-u.ac.jp

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⁽¹⁷⁾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. 計算方法

2・1 RCA 法 実数型セルオートマトン法 (Real-Coded Cellular Automata) は、流体の分野で利用されている実数型格子ガス法を人の移動過程に適用したものである⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。これにより、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。人の移動過程を詳しく説明する。

2・1・1 人の移動方法 いま、ある避難している人の移動速度ベクトルを \mathbf{v}_i とするとき、その x 方向、 y 方向成分に分け、それぞれ $v_{x,i}$ 、 $v_{y,i}$ とする。格子間隔を Δ 、時間ステップを Δt 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。したがって、 $[v_{x,i}]$ $[v_{y,i}]$ と $\{v_{x,i}\}$ $\{v_{y,i}\}$ は無次元の値である。セルオートマトン法では人の存在位置を常に格子点上とするため、まず、 $[v_{x,i}]$ と $[v_{y,i}]$ の値により上下左右方向に格子点の数だけ移動させる。次に残りの小数部分により、移動を確率過程として表すことにする (Fig. 1)。図中の格子点 A, B, C, D に移る確率をそれぞれ p_A 、 p_B 、 p_C 、 p_D とすると次のようになる。

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

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

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

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

すなわち、人の位置をこの確率により周囲 4 つの格子点に移動させる。もちろん、4 つの格子点の中でもベクトルの先端位置から 1 番近い頂点を選ぶ確率が高くなるが、他の点を選んで移動することも確率的に起こる。このように従来の CA モデルと同様に人の位置は格子点とするが、任意の速度と方向の移動が扱えることになる。

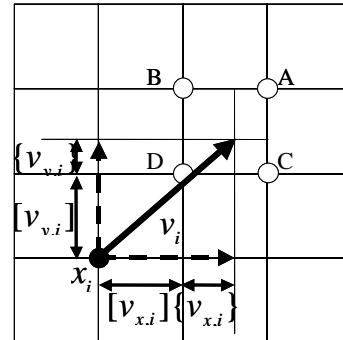
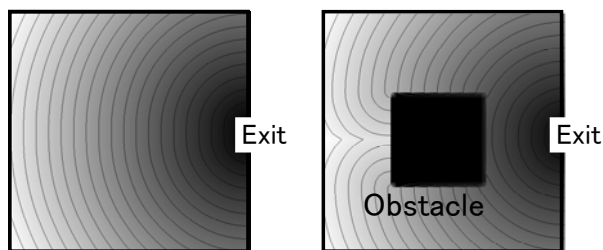


Fig.1 Position and movement of evacuee

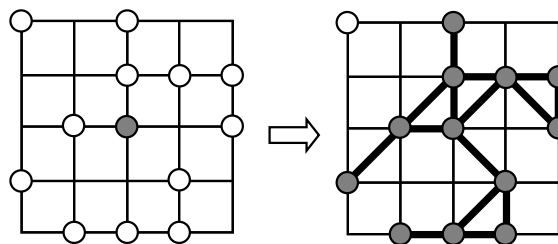
2・1・2 人の向きの変更 次に人の向きを変更する手順について説明する。前節で説明した人の配置後に、すべての人に対して目的地の方向 (出入り口など) に向きを変えるという作業を行う。このとき、人の移動方向は、出口までの最短経路を記述するフロアフィールドの値を参照して決定する。フロアフィールドとは、出口までの正確な距離が記述されている場のことである^{(10)~(12)}。Fig. 2 に、部屋内に障害物がある場合とない場合のフロアフィールドを示した。黒色から白色に変わることによって出口からの距離が遠いこと (フロアフィールドの値が高いこと) を示している。人はこの等高線に垂直な方向に進む。また、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) 離れるように迂回して避難することにした。

また、既に移動する地点に人がいる場合や障害物に衝突する場合など、移動の過程で前に進めない場合には、向きを変えることにする。今回はその過程を簡略化し、元の方向からの変換量を $+45^\circ$ 、または -45° とした (Fig. 3(a))。図において、実線はもとの移動方向、点線は変換後の移動方向である。この 45° の大きさは、現実には人が動いているときにとっさに変えることのできる角度に相当する。その向き (+ or -) は、人の数があるべく少ない方向を選択するが、移動予定の点がすでに延焼している領域となっている場合は上記のルールは適用せず、火災から離れる方向に向きを 45° 変えることにした (Fig. 3(b))。



(a) Room with no obstacles (b) Room with an obstacle

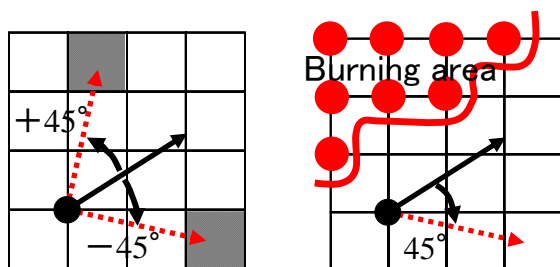
Fig. 2 Floor field in room



(a) Before flame spread

(b) After flame spread

Fig.4 Percolation model



(a) Change of direction

(b) Change of direction

in case of fire

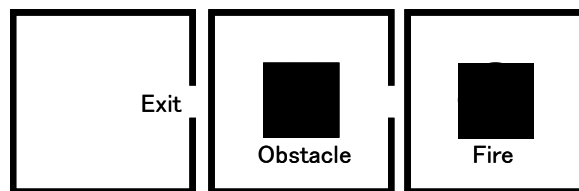
Fig. 3 Update rule of direction

2・2 火炎の燃え拡がり 次に、パーコレーションモデルによる火炎の燃え拡がりの計算方法について説明する。パーコレーションは、浸透現象を説明するために提案されたモデルであり、森林火災や伝染病の伝播などをこのモデルにより再現することができることが知られている⁽⁴⁷⁾。最近の研究では、空間中に液滴などの燃料がランダムに分散している場合を想定し、それらのつながりを考えることで噴霧燃焼を模擬した研究例も報告されている^{(48)・(49)}。

Fig.4 に本解析において用いた火炎の燃え拡がりのモデルを示す。燃焼可能な点を丸の点で示し、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。計算では、初期に部屋の中央に着火源を置き (Fig. 4(a))、燃焼した点が隣接した未燃の点に移ることで火炎の伝播を模擬した。従来のパーコレーションの計算モデルでは、火炎の移動を2次元平面における上下左右の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拡がりを模擬するため、斜め方向も考慮することにした (Fig. 4(b))。また、中心部分に設けた着火源から、火炎を同心円状に伝播させたとき、上下左右方向へ燃え拡がる確率を P_1 、斜め方向へ燃え拡がる確率を P_2 とした。

2・3 計算領域 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. 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、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 、火炎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 $v_i = 2.2\text{ m/s}$ 、全速力の速度 $v_i = 5.0\text{ m/s}$ 、その間の速度 $v_i = 3.0\text{ m/s}$ 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 、避難開始時間から部屋内にいる人がすべて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。



(a) Room A

(b) Room B

(c) Room C

Fig.5 Evacuation in three Rooms A to C

3. 計算結果及び考察

3・1 火炎の燃え拡がりの様子 まず、避難の解析を行う前に火炎が同心円状に燃え広がる条件について検討した。部屋Cについて、 $P_1=1$, $P_2=0.3$ の条件での火炎の燃え拡がりの様子を Fig. 6 に示す。ここで、着火後の火炎の位置について検討するため、Fig. 6(a) に示すように、上下左右を1, 2, 3, 4方向、斜めを5, 6, 7, 8方向とし、各方向の火炎位置 X_f の時間変化を調べた。その結果を Fig. 7 に示す。1方向と5, 6, 7, 8方向の火炎の位置はほぼ一致していることが確認できる。また、火炎位置の時間変化もほぼ同じであったことから、 $P_2=0.3$ とすることで、火炎が同心円状にほぼ一定の速度で伝播する現象を再現できた。

また、 $P_1=C$ と $P_2=0.3C$ として、火炎の燃え拡がり速度 v_f を変化させた。Fig. 8 に C と v_f の関係を示した。この結果、 C の値により確率 P_1 と P_2 の値を同時に変化させ、 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拡がり速度 v_f を変化させた。

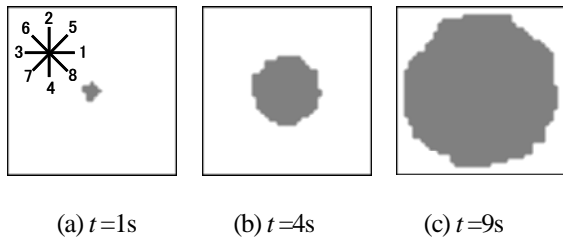


Fig. 6 Fire spread

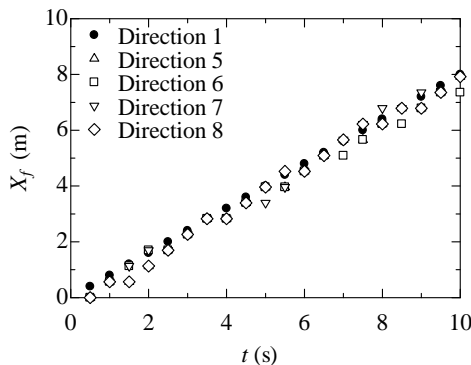


Fig. 7 Flame position along 1, 5, 6, 7, and 8 directions

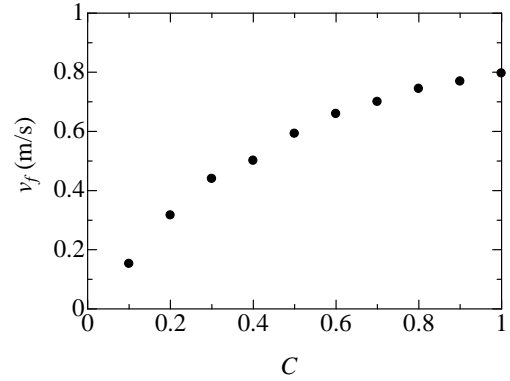


Fig. 8 Flame spread rate

3・2 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. 9~11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8.8m×8.8mである。

これによると、火炎のない部屋Aでは人は最短経路を、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斉に出口に向かうが、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、火炎の発生している部屋Cの場合、時間がたつにつれて火炎が成長するため、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. 12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 $v_f=0.5$ m/s, 障害物の大きさ 8.8 m×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炎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。

ここで避難時間について考察を行った。Fig. 12によれば初期配置人数が少ない時(10人)のときは、総避難時間は8.2sであった。避難時間 T_A を概算すると理論的には、部屋の一番遠い場所にいる人は、出口まで

$$\sqrt{16^2 + 8^2} = 17.9 \text{ m} \quad (6)$$

の距離を移動する必要がある。この距離を人の避難速度2.2m/sで割ると、避難時間は

$$T_A = \frac{17.9}{2.2} = 8.1 \text{ s} \quad (7)$$

となり、初期配置人数が少なくボトルネックがみられない場合は、避難時間が単純に移動距離を移動速度で割った値となるといえる。ただし、Fig. 9(b)でもわかるようにボトルネックが発生する初期配置人数100人のときは総避難時間は12.5sとなっているので、ボトルネックが発生すると総避難時間が長くなることがわかった。

文献(1)によれば、幅 W (m)の出口から人数 P (人)の人々が避難するときに要する時間 T_B (s)は、

$$T_B = \frac{P}{aW} \quad (8)$$

となる。ここで a (人/(m・s))は群集流出係数と呼ばれ、避難時には1.5の値が推奨されている。この式を用い、総避難時間を見積もることにした。まず、部屋内で一番遠くにいる人が避難する時刻が、総避難時間になるとする。出口に到着する時刻 T_A は式(7)より8.1sである。計算開始直後からボトルネックの現象が起きているとすれば、時刻 T_A の時点で出口から部屋をすでに出た人数 P_a は、

$$P_a = a \times T_A \times W \quad (9)$$

となる。出口幅は1.2mであるので、

$$P_a = 1.5 \times 8.1 \times 1.2 \cong 15 \text{ 人} \quad (10)$$

となる。初期配置人数を100人とすると、一番遠くにいる人が出口に到着した時点で残りの85人がボトルネックの人数となる。よって、式(8)より、

$$T_B = \frac{P}{aW} = \frac{85}{1.5 \times 1.2} \cong 70.8 \text{ s} \quad (11)$$

となり、総避難時間 T_E は、

$$T_E = T_A + T_B = 8.1 + 70.8 \cong 79 \text{ s} \quad (12)$$

となった。これは、Fig. 12の12.5sと大幅に異なる結果となった。その原因として、ボトルネックが発生する時刻を計算開始直後と仮定したこと、また、理論式で用いた群集流出係数 a も改札口、映画館や百貨店出口で異なる値が報告されるなど、正確な値が不明であることが考えられる。

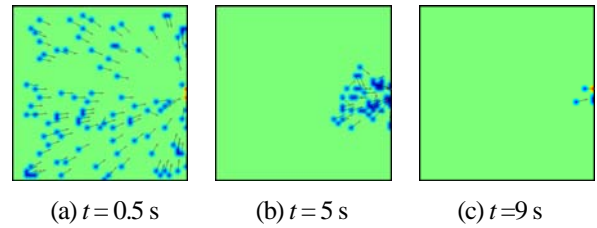


Fig. 9 Evacuation simulation in Room A

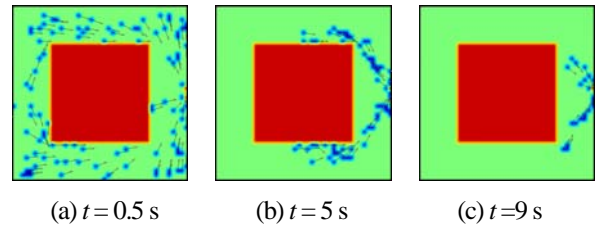


Fig. 10 Evacuation simulation in Room B

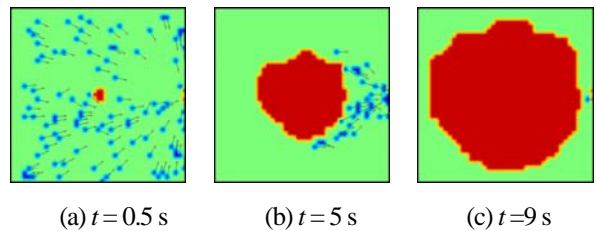


Fig. 11 Evacuation simulation in Room C

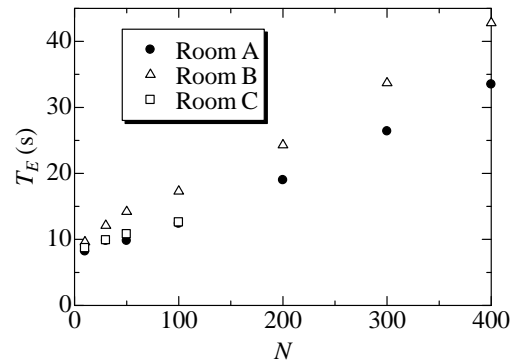


Fig.12 Variation of T_E at different value of N

3・3 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て火災に巻き込まれる人数 N_D を調べた。Fig. 13 に部屋 C について、避難者の速度 $v_i=2.2$ m/s, $W=1.2$ m の条件で、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示す。火炎の燃え広がり速度 $v_f=0.5$ m/s, 0.8 m/s について比較した。Fig. 14 は $N=200$ のときの 6 秒後の人と火炎の位置の違いを示したものである。

Fig. 13 より、初期配置人数 N が小さいときは火炎に巻き込まれる人数 N_D も小さいが、部屋内の人数が多くなると、 N_D が急激に増加することがわかった。これは、人数が少ないとボトルネックが発生せずスムーズに出口を通過し避難できるが、人数が増えることにより出口付近でのボトルネックが起きやすくなり、避難できない人が増えてくるためである。また、火炎の燃え広がり速度を大きくすると、火炎に巻き込まれる人数が増えることがわかる。Fig. 14 によれば、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数が増えることがわかった。

また、 $v_i=2.2, 3.0, 5.0$ m/s, $N=100, W=1.2$ m の条件で、火炎の燃え広がり速度 v_f を変化させて N_D を求めた。5 回のシミュレーションの平均値を Fig. 15 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大き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人だけでなく、出口により早く火炎が到達し、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、火炎の燃え広がり速度 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。

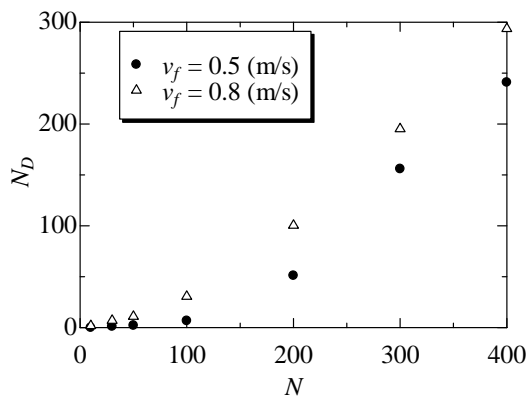
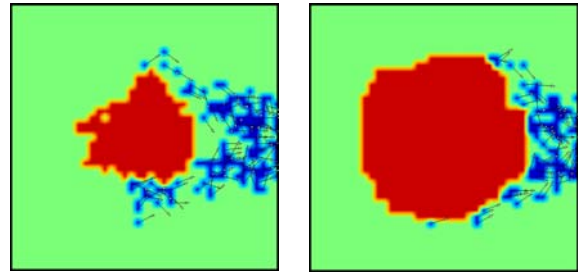


Fig.13 Variation of N_D at different value of N



(a) $v_f = 0.5$ m/s (b) $v_f = 0.8$ m/s

Fig.14 Difference of evacuee position at 6s

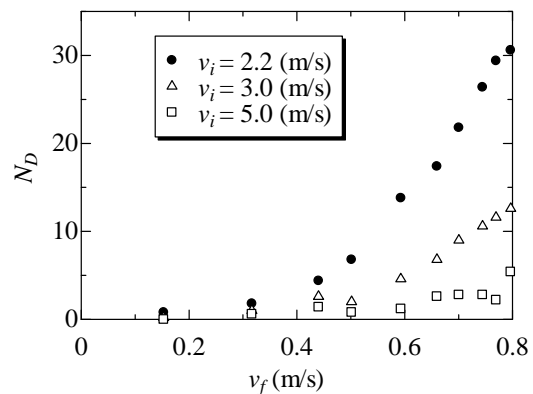


Fig.15 Variation of N_D at different value of v_f

3・4 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. 16 は、火災が発生していない条件の部屋 A について、 $v_i=2.2$ m/s, $N=100$ の条件での 8 秒後の人の位置を示したものである。出口幅 W は 0.4 m と 2.0 m のものを示した。これによると、 $W=0.4$ m のときに出口付近で観察されたボトルネックの現象が、 $W=2.0$ m では見られていない。これは、出口幅が大きくなることで、人がスムーズに部屋から出ることができるようになったためである。

次に、火災が発生している部屋 C についての結果を示す。Fig. 17 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、はじめ火炎に巻き込まれる人数 N_D は小さくなったが、Fig. 16 で示されるように、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炎に巻き込まれるが、出口幅が大きいとボトルネックが発生しにくいいため、 N_D が小さくなったものと

思われる。また、火炎の燃え広がり速度 v_f が小さいほど、 N_D は小さくなった。特に $v_f = 0.3 \text{ m/s}$ の条件では、避難者の移動速度が火炎より十分速いため、出口の大きさにかわらず、 N_D は非常に小さい値となった。

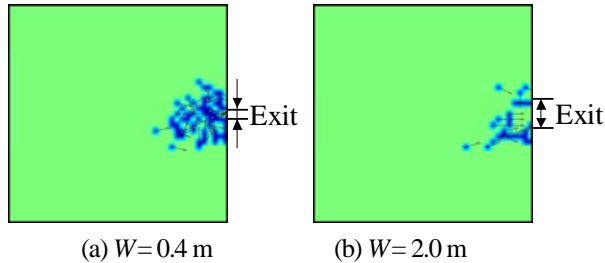


Fig.16 Pedestrian position at 8s

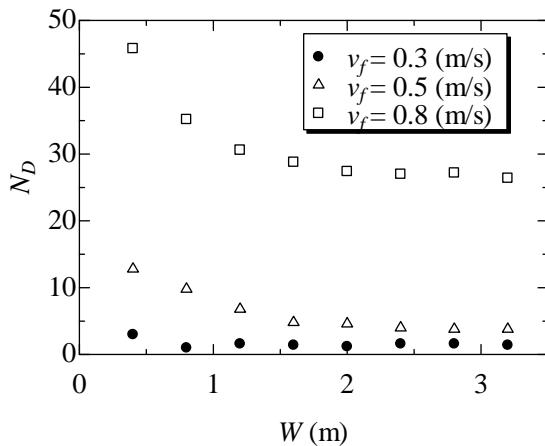


Fig.17 Variation of N_D at different value of W

4. 結 言

本研究では $16\text{m} \times 16\text{m}$ 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。火炎の燃え広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) パーコレーションモデルで火炎の燃え広がり現象を模擬したところ、上下左右方向を $P_1=1$ 、斜め方向を $P_2=0.3$ とすると、火炎がほぼ同心円状に広がる。また、 $P_1=C$ 、 $P_2=0.3C$ とすることで 0.8m/s までの任意の燃え広がり速度を設定できる。

(2) 部屋内に障害物や火炎が存在す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。

(3) 火炎の燃え広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。

(4) 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 1.6m 以上で、ほぼ一定の値になった。

謝 辞

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。

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) Y.Matsukuma, R. Takahashi, Y. Abe, H. Adachi, Lattice Gas Automata Simulations of Flows through Complex Geometry, *Japan Society for Mechanical Eng.*, Vol. 64-622 (1998) pp. 1617-1622.
- (6) K. Toba, S. Morishita, S. Itagaki, Simulation of Diffusion Phenomena by Cellular Automata, *Symposium on Environmental Engineering*, Vol. 2001 (2001) pp. 53-56.
- (7) N. Yamamoto and S. Morishita, Simulation of Traffic Flow by Cellular Automata and its Control, *Japan Society for Mechanical Eng.*, Vol. 65-637 (1999) pp. 3553-3558.
- (8) T. Tamaki, S. Yasue, E. Kita, Traffic Simulation Using Cellular Automata, *Design & Systems Conference*, Vol. 2002-12 (2002) pp. 440-441.
- (9) S. Morishita and T. Shiraishi, Evolution of Billboards Based on Pedestrian Flow in the Concourse of the Station, *Lecture Notes in Computer Science*, LNCS4173 (2006) pp. 716-719.
- (10) C. Burstedde, K. Klauck, A. Schadschneider, J. Zittartz, Simulation of pedestrian dynamics using a two-demensional cellular automaton, *Physica A*, Vol. 295 (2001) pp. 507-525.
- (11) K. Nishinari, A. Kirchner, A. Namazi, A. Schadschneider, Extended floor CA model for evacuation dynamics, *IEICE Transactions on Information and Systems*, E87-D (2004) pp. 726-732.
- (12) D. Yanagisawa, K. Nishinari, *Reports of RIAM Symposium* (in Japanese), No. 17ME-S2, Article No. 28

- (13) Y. Hashimoto, Yu Chen, H. Ohashi, Immiscible real-coded lattice gas, *Computer Physics Communications*, Vol. 129 (2000) pp. 56-62.
- (14) A. Malevanets, R. Kapral, *Europhys. Lett.*, 44, (1998), pp. 552-558
- (15) K. Yamamoto, S. Kokubo, K. Nishinari, New Approach for Pedestrian Dynamics by Real-Coded Cellular Automata (RCA), *Lecture Notes in Computer Science*, LNCS4173 (2006) pp. 728-731
- (16) K. Yamamoto, S. Kokubo, K. Nishinari, Simulation for pedestrian dynamics by real-coded cellular automata (RCA), *Physica A*, Vol. 379 (2007) pp. 654-660.
- (17) N. Konno, Complex system, Natsume Publishing Company (1998) pp. 155-196
- (18) S. Takamori, A. Umemura, Application of Percolation Theory to Spray Combustion, *Journal of the Combustion Society of Japan* (in Japanese), Vol. 45, No. 132 (2003) pp. 95-102.
- (19) H. Oyagi, K. Yagi, H. Shigeno, M. Mikami, N. Kojima, Flame-Spread Characteristics of Randomly Fuel-Droplet Arrays in Microgravity, *Journal of the Combustion Society of Japan* (in Japanese) Vol. 49, No. 147 (2007), pp. 62-69.