

セルオートマトン法による避難流動のシミュレーション

大鑄 史男
名古屋工業大学

小野木 基裕
日本アイ・ビー・エム・サービス株式会社

(受理 2006年 8月 7日; 再受理 2008年 7月 7日)

和文概要 本稿では、マルチエージェントセルオートマトン法を用いたシミュレータを作成し、自然で現実的な避難流動を創発させる。歩行者は、認知範囲内の様々な情報を自律的に処理し、ムーア近傍中の各セルを評価した後に移動先セルを決定する。このような情報には、その領域中の様々な流れの向き、障害物、出口への標識、出口への最短経路、煙の拡散などが含まれる。これらの情報は、向きを持ちベクトルとして定式化できることから情報ベクトルと呼ぶ。本稿のシミュレーションモデルでは、2つのタイプのエージェントが考慮される。リーダーエージェントは、出口への最短経路情報を持ち、非リーダーエージェントを誘導する。非リーダーエージェントは、認知領域内の歩行者の流動方向と自らの慣性に依存しながら移動する。慣性は、現状の移動方向を保持しようとする力であり、やはり情報ベクトルとして定式化される。

ムーア近傍中の各セルは、歩行者の現在位置からそのセルに向かうベクトルと情報ベクトルとのズレによって評価する。我々は、歩行者は情報ベクトルを担うもの（例えば、標識のある場所）に直接向かうのではなく、情報ベクトルが示す向きに即して移動しようとする、と考える。

2つのベクトル間のズレを用いるという簡明で統一的なアプローチにより、典型的で容易に了解することが出来る現実的な避難流動が創発させられる。このことによって、本稿のシミュレータが将来におけるより洗練されたシミュレータ作成の出発点になり得ることが分かる。また本シミュレータは、数理的手法の適用が困難である相互依存的かつ自律的に動く多数のものが創発させる複雑現象への意思決定の重要なツールになり得る。

キーワード: シミュレーション, 避難流動, リスク管理, 予測, 施設計画, 公共サービス, アルゴリズム

1. はじめに

火事や地震などの緊急時における避難流動など、閉鎖空間での歩行者流動の創発をあらかじめ予測することは、避難計画の策定や安全性を考慮した施設設計において重要である。しかし、実際に実験を行うことは物理的・経済的に現実的ではない。また数理モデルの構築とその理論解析は、障害物などによる複雑な境界条件により容易ではない。このため歩行者一人一人の動作特性を組み込むことができ、空間内の施設や障害物の配置の自由度が高く、精度の良いシミュレータが求められる。避難流動と歩行者流動のシミュレーションでは組み込む要素に似通ったものが多いが、このようなシミュレータの作成を試みたものには青木 [2], 阿久澤, 他 [3], Burustedde, et al.[8, 9], 堀, 他 [12], 伊藤 [13], 金森, 他 [14], Kirchner[16], 森下, 他 [20], 日本建築学会 [28], 岡田, 他 [31], 大野, 他 [32], 押野 [33], Schadschneider[36], 宇田川, 他 [38] がある。用いられる手法としては、ポテンシャル法やセルオートマトン法が主だったものであるが、いずれも多数の歩行者を考え、それぞれに動作特性を持たせるという意味でマルチエージェント法である。

ポテンシャル法は、物理学の重力ポテンシャルやクーロンポテンシャルに類似のものを歩行空間内の障害物、歩行者、目的地等に設定し、歩行者一人一人の移動先を定めながら歩行

者流動の再現を試みる。数値的に精度のよいものが得られるが、複雑な施設配置や歩行者の感性等に適切なパラメータ設定が難しいといわれている（堀，他 [12]）。しかし，比較的シンプルな空間においては，自然で現実的な歩行者流動の再現に成功しているものもある（阿久澤 [3]，岡田，他 [31]，大野，他 [32]）。

セルオートマトン法はボトムアップ的な手法であり，離散的な時間・空間を取り扱う。歩行空間である二次元平面はセルと呼ばれる格子に区切られ，歩行者一人一人は近傍情報を処理しながら自律的に行動し，その結果として大域パターンが創発させられる。歩行者一人一人の意思決定ルールに様々な要素を組み込んだり外したりしながら大域パターンの創発を理解していくことが出来る。また歩行空間の形状設定や施設配置等における自由度も高く，複雑な形状の境界条件を容易に組み込むことができる。

セルオートマトンは，Neumann[26]により生物の自己再生の数理モデルとして導入され，その後 Wolfram[40]による再発見，Langton[17, 18]による人工生命などを経て，現在では社会，物理，化学等の広範囲における複雑現象解明のための有力な手法となっている。特に多数のエージェントが相互関係のもとで自律的に動作する際の創発現象の理解に優れた手法を提供する（Bandini, et al.[4-7]，Epstein, et al.[11]，森下 [22]，Nigel[27]，日本建築学会 [28]，Resnick et al.[34]，Peter et al.[37]）。また，歩行者や車の流動における渋滞・混雑現象のシミュレーター作成においては基本的な手法の一つとなっている（Burstedde, et al.[8, 9]，Chopard[10]，伊藤 [13]，加藤 [15]，Kirchner, et al.[16]，森下 [19-21]，Nishinari[29]，押野 [33]，Schadschneider[36]，宇谷 [39]）。

本稿では，セルオートマトン法を用いた緊急時における閉鎖空間内の歩行者の避難流動シミュレーターの作成について述べるが，歩行慣性（単純に慣性と呼ばれる），避難誘導員（リーダーと呼ばれる），標識，他歩行者への追従，出口への経路選択，障害物，煙が組み込まれる。歩行者は，これらの要素の影響を総合的に評価してムーア近傍 [22] 内から移動先セルを決定するが，その際に二つのベクトル間のずれを評価するという手法を煙と障害物を除く各要素の評価に統一的に適用する。従来から様々な状況でこれらの要素の一部を組み込み，歩行者流動のシミュレーションを行ったものは多く見られるが，本稿では，これらのすべての要素が統合的に組み込まれる。

本稿では，閉鎖空間における緊急時として火災を想定し，その際もっとも影響の大きい要素として考えられる煙（火災についての基礎知識 <http://bousainavi.com/kasai/>）を組み込むが，煙の拡散モデルは簡明である。目的は，本シミュレーターの挙動アルゴリズムが，煙を前にした歩行者の自然な動きを創発させることを確認することである。地震については，火災の発生だけでなく，壁が崩れるなど閉鎖空間内の構造の物理的变化を考えなければならず，今後の課題とする。

以下に本稿のシミュレーションモデルに組み込まれる各要素の概略と特徴を述べる。

出口への経路選択：出口への経路は，出口と障害物とから定まるグラフにおける最短経路である。避難誘導員を意味するリーダーがこの情報を持ち，最短経路に従って出口に向かう。リーダーは，他の歩行者に追従したり，標識を見たりはしない。

避難誘導（リーダーと標識）：本稿の歩行者には，出口までの最短経路情報を持つ者（リーダー）と持たない者（非リーダー）を考え，状況に応じて前者から後者に出口への最短経路情報が伝達される。リーダーは歩行速度を調整し，非リーダーの追従を容易にする。標識は，出口への最短経路を提示する（宇田川，他 [38]）のではなく，実際の矢印標識のように出口への誘導のための方向を示すのみであり，非リーダーはこの方向に沿って移動しようとする。

つくば市の広域における避難場所までの避難流動のシミュレーション(村木, 他 [23])では避難誘導員と案内標識が組み込まれている。歩行者の移動は歩道上に制限され, 避難誘導員から一般の歩行者に避難場所の位置情報が確率的に伝えられるが, 経路自体は伝えられない。また, 一般の歩行者の避難誘導員への追従は考慮されていない。案内標識は, 避難方向を示す。

閉鎖空間であることおよび歩行者の動作の自由度が高い等の違いはあるが, 本稿でのリーダーから非リーダーへの情報伝達, 標識による移動方向の指示は村木, 他 [23] に近いものである。

他歩行者への追従: 緊急時ではない自然歩行のモデルに, 他の歩行者への追従を組み込むことには議論の余地があるが, 緊急時においては, 全くのパニックに陥っていない限り追従を組み込むことは自然である(阿部 [1])。本稿では追従を組み込むが, これは特定の歩行者や歩行者集団への追従ではなく, 視界内の歩行者達が成す多様な流動の方向に自らの進行方向をあわせようとするものであり, 動きそのものへの追従であるといえる。大きな流れに身を任せておけば安心感が得られると言った心理要因の組み込みであると考えてもよい。もちろん追従への視界内のリーダーと非リーダーの影響度は異なる。なお, 追従現象は, 層化現象とも呼ばれる(日本建築学会 [28])。

セルオートマトンを用いた地下鉄駅構内の避難行動シミュレーション(押野 [33])での追従では, ムーア近傍中のセルごとに定められる一定領域における他歩行者の占有率が最も大である方向に向かわせる。規模が最大である歩行者の集まり自体に向かわせようとするものであり, その集まりの動きそのものを考慮したものではなく, また, 避難誘導員, 案内標識は組み込まれていない。

歩行慣性: 歩行者が極端な方向転換をせずにおおよそ直線的に歩行することは実際によく観察される。本稿ではこれを歩行時における慣性として組み込むが, 従来の研究には見られないものである。リーダーが存在しないとき, 歩行者は近傍内の避難流動への追従, 慣性, 標識及び視界内の障害物などの情報処理によって動き, 出口近辺の避難流動が順次末端の歩行者にまで影響していくことで避難が完了する。初動が出口方向と大きくずれた歩行者は, 障害物にあたる等の偶然的な出来事によって出口に至る経路方向に向くと, 後は慣性と流れへの追従によって出口に近づいていくことになる。本稿の非リーダーは視界内に出口を捉えると, リーダーになる。

障害物: 本稿のシミュレーターでは複雑な障害物の配置が可能であり, このことが避難流動に及ぼす影響を見ることが出来る。歩行者による障害物の評価は単なる距離ではなく, 歩行者が向かおうとする方向にある障害物までの距離によって評価される。つまり, たとえ近いところに存在したとしても向かおうとする方向に存在せず, 距離が大であれば, 大きな影響力を持たない。

押野 [33] の障害物では壁と火事(煙)が想定され, デパートに見られるようなショーケース等に類似した障害物は想定されていない。ここでは先に紹介した領域内における障害物の占有率が高い方向を避けさせようとし, 移動方向に於ける障害物の拡がり具合を考慮している。本稿でも同様に移動方向先での状況を見ているが, 拡がりではなく距離によって障害物が評価され, 移動方向に対して直接的に障害となるかどうかの評価されている。避難時における歩行者の意志決定として複雑なものは考えにくく, 本稿では単純なものが想定されている。

煙: 本稿ではさらに煙の発生と拡散が組み込まれ, それによる避難流動の有り様が観察さ

れる．煙を前にした歩行者の挙動をモデル化することに視点がおり、このため、煙の拡散は簡単に2次元とし、ムーア近傍の各セルに確率的に拡散させることでモデル化されている．リーダーは煙の存在によって出口への経路を変更し、非リーダーは単に煙を避けるというきわめて単純な組み込み方であるが、現実的な歩行者流動が再現される．

地下鉄駅構内の避難流動のシミュレーション（押野 [33]）では、煙の3次元的な拡散が組み込みこまれ、歩行者は煙を避けながら各自の目的地に向かうが、そのさほど複雑でない空間構造を全ての歩行者が熟知しているとする仮定は、特に朝夕のラッシュ時であれば自然である．本稿で想定されているデパートのフロアのような多数の障害物が設置されている閉鎖空間に於いては、出口への経路を熟知している者（リーダー）とそうでない者（非リーダー）が存在し、煙を前にしたとき、前者は歩行空間内の構造を熟知しているため出口及び経路の変更が可能であり、後者は単に煙を避け他の歩行者に追従するのみであると考えられる．このような異なる動作特性を持つ歩行者を組み込むことはシミュレーターをより現実的にするために必要なことである．

2003年の韓国での地下鉄火事を動機とする研究である宇田川、他 [38] では、直線的な通路状の両端に出口があるシンプルな空間における煙の影響をシミュレートしている．

避難流動のシミュレーションに特徴的なアプローチを取る Burstedde[8, 9], Kirchner[16], Nishinari[29], Schadschneider, et al.[36] では、各セルに歩行者の足跡が残され、歩行者はこの多寡によって移動先セルの選択を行う．追従のための仕掛けであり、フェロモンに類したものである．dynamic floor field と呼ばれ、拡散と減衰が考えられている．歩行者ごとの自律的処理による計算機への負荷の低減を目指したモデル化であり、避難流動における様々な物理現象を再現するとされている（西成 [29]）．一方、歩行者の観点からは dynamic floor field の自然な解釈に難しさが残ると思われる．これに対して、本稿では歩行者の実際の意志決定が直截的にモデル化されている．

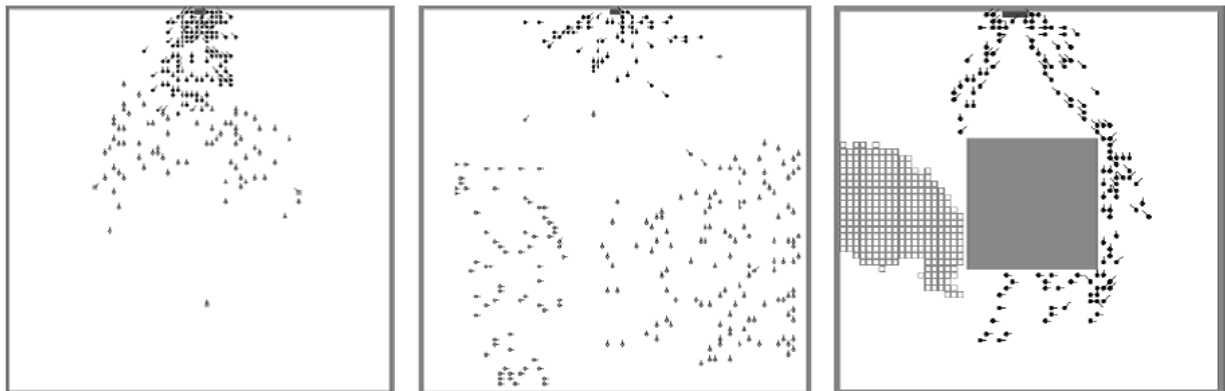


図 1: 左から標識のある場合、標識のない場合、煙と障害物がある場合の避難流動

このようにして作成された本シミュレーターでは、従来部分的に扱われてきた要素が統合的に組み込まれ、様々な現実的な条件の組み合わせの下で、複雑な構造を持つ閉鎖空間における避難流動の再現を可能にする．障害物と出口の位置関係によって出口回りの混み具合が変わるとともに空間内でのスタックの出現場所が大きく変わること、障害物の配置による避難流動の制御の可能性が存在すること、標識とリーダーそれぞれに於いて最適な個数と配置が存在し得ることが示唆される．さらに煙を前にした歩行者が進路変更するなど、自然で現実的な避難流動が創発させられる．これらのことによって、本シミュレーションモデルが基本モデルとし

て十分な性能を持つことが確認できる。特に、図2にあるような障害物が複雑に配置された空間に於いて、リーダーに誘導されながら非リーダー達が退避していく様子が再現されている。このような複雑さは、従来の研究には見られないが、本シミュレーターが、例えばデパートのような相当に複雑な障害物配置を持つ施設に対しても適用可能であることを示唆している。他方、シミュレーター自体の量的な評価は、実際の緊急時データの蓄積が不十分である（堀，他 [12]）等の理由から困難であるが、今後のデータの蓄積を待つと共にそれらを活用した評価方法を考える必要がある。

本シミュレーターを用い、著者の一人が勤務する大学の11階建ての建物内全域での避難流動のシミュレーションが試みられている。様々な障害物、各部屋の扉の開き具合、部屋ごとに指示される非常階段、避難誘導員、建物外に置かれている自転車などが避難流動に及ぼす影響など、策定された避難計画を様々な状況下で評価する。また、本シミュレーターは、避難教育の際のビジュアル的な手段としても利用可能である。これらについては、既に消防署との話し合いを持っている。



図 2: 複雑な障害物配置における避難流動

2. 基本的な考え方

2.1. 二つの方向ベクトルのずれ

図3にある歩行者に対して、視野内の流れ、標識、慣性などのいずれかがベクトル a の方向を指し示しているとする。これに対して歩行者は、ベクトル y のように a の方向を指し示しているものに直接向かうのではなく、ベクトル x のように a の方向に沿うようにして動くと考え。この時、ベクトル x と y それぞれをベクトル a に即して、 $\|ux - ua\|$ と $\|uy - ua\|$ の量によって評価する。ここで一般的に ua はベクトル a を単位ベクトル化したものである。このノルムは、二つのベクトル間のずれの大きさを表し、値が小さいほどベクトル a の方向に沿い、より好ましい方向であると考え。一般的にある方向が指し示され、他方でいくつかの移動方向の候補がある時、ずれがより小さい移動方向が好ましいとする。

本稿では歩行空間はセルに区切られ、歩行者は、ムーア近傍中から移動先セルを一つ選ぶ。このような状況に即して、二つのベクトルのずれを次のように定義する。歩行者のいる場所の座標を $(0, 0)$ として、ムーア近傍中の各セルの座標を図4のように相対的に定める。この座標系によって成分表示された二つのベクトル (i, j) と (m, n) のずれを、

$$dif(i, j; m, n) = \{2 - \|u(i, j) - u(m, n)\|\} / 2$$

で定義する (i, j) と (m, n) とが全く反対向きであるときは 0 を、同じ向きであれば 1 の値を取る。つまり、 $dif(i, j; m, n)$ は 0 以上 1 以下の値をとるように規格化されたものであり、1 に近い値をとるほど 2 つのベクトル間のズレは小さいことを意味する。

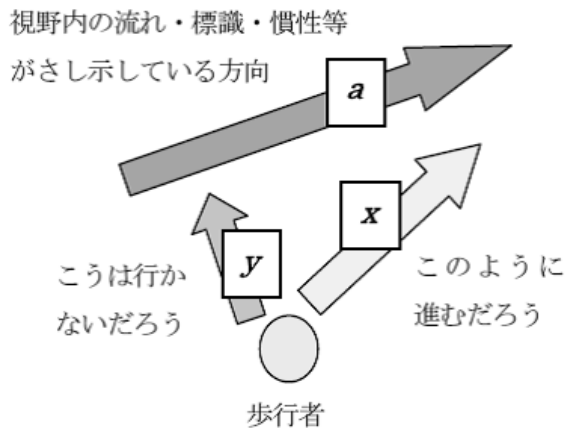


図 3: 歩行者が向かう方向

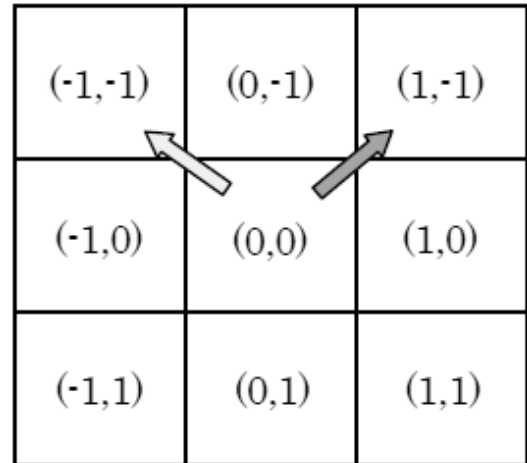


図 4: 歩行者を中心とした相対座標

2.2. グラフ構成，最短距離，最短経路

歩行者がおかれる空間中には，壁，ベンチ，置物，展示物，ショーケースなどを意味する障害物が置かれ，歩行者はこれらを避けながら出口に向かう。

これらの障害物の配置情報は，障害物の端点から少し離れた点をノードとするグラフとして表現される．リーダーは，このグラフ構造に従って最短距離にある出口を目指す．最短経路と最短距離はダイクストラのアルゴリズムによって計算される．非リーダーがリーダーから受け取る出口への経路情報はこのグラフ構造である．

3. モデルの設定

3.1. セルとセルの状態

セルオートマトン法では，歩行空間をセルに分割し，各セルにおける歩行者の有無の状態を時間発展させることで群集流動を創発させる．歩行者は，近傍内（視界内）の情報を処理した上で，移動先セルを決定する．各セルは以下の状態をとる．

- (1) 歩行者の存在・非存在の状態．
- (2) 通路，出口など歩行者が通行可能な状態．
- (3) 障害物の存在など歩行者が通行不可能な状態．
- (4) 出口方向を指し示す標識がある・なしの状態．
- (5) 煙が存在する・しないの状態．

3.2. 歩行者の速度

本稿では1セルを $40[cm] \times 40[cm]$ とし，1セルには歩行者1人が存在できるとする．また，1ステップを実時間の $0.1[s]$ (s は秒を意味する) に設定する．

歩行速度は，もっとも遅い歩行者で $1.00[m/s]$ ，もっとも速い歩行者で $1.33[m/s]$ である．各歩行者の歩行速度は，歩行空間に置かれるときにランダムに設定する．歩行速度から1セル $40[cm]$ の移動に要するステップ数が定められる．たとえば，歩行速度が $1.33[m/s]$ である時は，3ステップに1セル移動することになる．また，斜め方向のセルに移動する場合は，移動に要するステップ数を確率的に定め，その期待値が歩行速度のステップ数の $\sqrt{2}$ 倍になるようにする．実時間への対応は佐藤 [35] を参考にした．

3.3. 移動先セルの決定

各歩行者は自身を中心としたムーア近傍の8セルの中から移動先セルを決定する．そのためにそれぞれのセルを以下の各要素の観点から評価・得点化し，それらの重み付け和が最大のセルを移動先とする．各セルの得点は，歩行者の視界内の状況に依存して決まる．視界は，歩行者を中心とした左右それぞれに90度の角度を持つ扇形であり，半径はシミュレーター上で自由に設定することができる．また重み付け和の重みも変更することができ，各要素の影響度を自由に変えることができる．

(1) 視界内の他歩行者の流動方向 (非リーダーのみ) これは歩行者の視界内における様々な流動の方向性を考慮させることで，避難時における追隨行動を発現させるものである．視界内の他歩行者の進行方向を，図4にある8方向それぞれについて集計し，これに応じて移動先候補セルに点数を与える．リーダーと非リーダーの影響力は異なる．

歩行者のムーア近傍中で座標が (i, j) のセルに対する視界内の流れによる点数 $Tuizui(i, j)$ は次のように定義される．

$$Tuizui(i, j) = \sum_{a=-1}^1 \sum_{b=-1}^1 dif(a, b; i, j) \{k_l L(a, b) + k_f F(a, b)\}$$

ここで， $L(a, b)$ は視界内の (a, b) 方向のリーダーの人数， $F(a, b)$ は視界内の (a, b) 方向の非リーダーの人数， $dif(a, b; i, j)$ は(2.1)節で述べたように， (a, b) 方向の歩行者と (i, j) セルに進んだ場合の向きのずれを表している． k_l と k_f はそれぞれ，リーダーと非リーダーの重みを表す．

(2) 他歩行者の存在・非存在 他の歩行者が存在しているセルには移動できない．

(3) 壁・障害物からの影響 移動先セルへの障害物の影響度は，そのセルへの歩行者の向かい方に依存し，そのセルと障害物との間の最短距離によって一義的に定まるものではない．

(i, j) セルへの障害物の影響による得点は，そのセルに歩行者が移動するとした際の移動方向における障害物との距離によって定める (図5参照)．

$W(i, j)$ を (i, j) 方向での障害物までの距離として，障害物からの影響による得点 $Shogai(i, j)$ を次のように定める．

$$Shogai(i, j) = \begin{cases} W(i, j), & \text{if } W(i, j) < Wmax \\ Wmax, & \text{if } W(i, j) \geq Wmax \end{cases}$$

歩行者は障害物までの距離を最大 $Wmax$ まで考慮する．もちろん，障害物が置かれているセルには歩行者は進めない．

(4) 出口までの最短経路 (リーダーのみ) ムーア近傍中の各セルは，歩行者から出口までの最短経路にもっとも沿った方向にあるセルが最高点になるように評価する．

2.2節で述べたように，障害物の端点と出口とによってグラフが構成される．各歩行者は，各時刻での自身の場所を新たなノードとして付け加えたグラフにおいて出口への最短経路をもとめる．

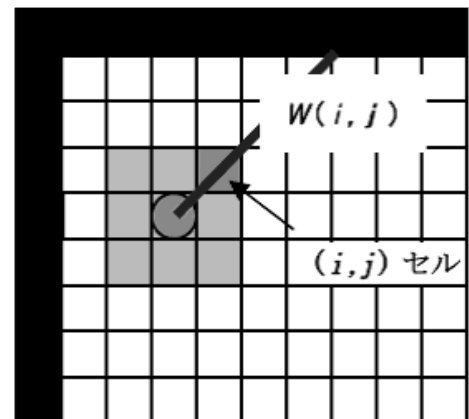


図 5: 壁・障害物の影響評価

例えば、図6では、歩行者はノードQに向かうのが出口への最短である。このとき、ムーア近傍中のセル (i, j) は、ノードQへのベクトル (a, b) 方向とのずれで評価する。

$$Saitan(i, j) = dif(i, j; a, b).$$

(5) 視界内の標識の指示方向(非リーダーのみ)視野内に存在する標識の指示方向をもとに移動候補セルの得点を決める。

ただし標識は、出口への方向情報を与えるだけである。

標識の指示方向が (a, b) である時、 (i, j) セルのこの標識による得点は、次のようにこれら二つのベクトルのずれをそのまま得点とする。

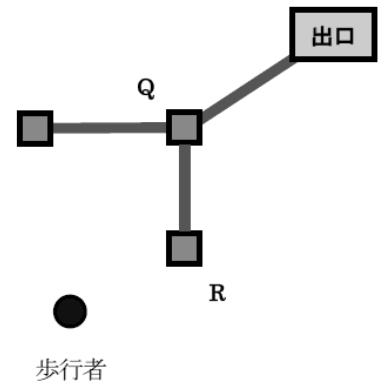
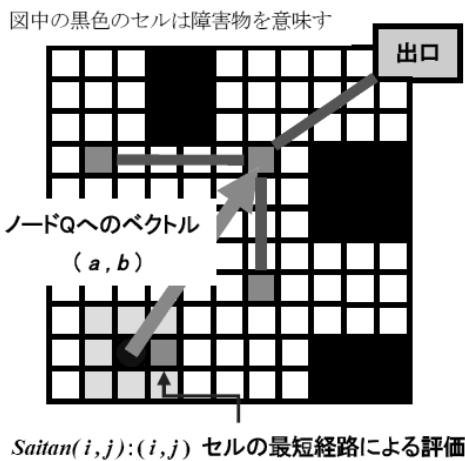


図6: 最短経路に関する評価

$$Hyouusiki(i, j) = dif(a, b; i, j)$$

又標識が視野外に出たときその影響は減衰しながら残る。

(6) 慣性 歩行者の進行方向が (dx, dy) である時、 (i, j) セルの慣性による得点は次のように定義する。

$$Kansei(i, j) = dif(dx, dy; i, j).$$

歩行者の進行方向は、現在の場所に移る前にいた場所からの方向ベクトルによって定められる。たとえば、図7のように現在 $(0, 0)$ にいる歩行者が、 $(-1, -1)$ のセルから移動してきたとき、この歩行者の進行方向は $u(1, 1)$ である。

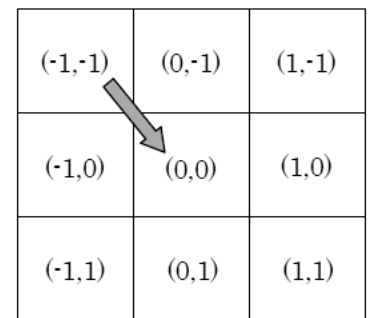


図7: 歩行者の進行方向

(7) 煙 視野内に煙をとらえた時、非リーダーはそのセルには移動できないとして次の移動先セルを決定する。リーダーは、その煙の場所にかかる経路を通行不可能として、新たに最短経路を計算し直す。グラフのノードに変更はないが、煙がかかる辺は削除される。

(8) 移動先セルの決定 ムーア近傍中の (i, j) セルに対する上記の各得点の重み付け総和を次のように取り、総得点とする。

リーダーの場合は

$$Goukei(i, j) = \exp\{k_{S_a} \cdot Saitan(i, j) + k_{S_n} \cdot Shougai(i, j) + k_{K_a} \cdot Kansei(i, j)\},$$

非リーダーの場合は

$$Goukei(i, j) = \exp\{k_{T_u} \cdot Tuizui(i, j) + k_{H_y} \cdot Hyouusiki(i, j) + k_{S_h} \cdot Shougai(i, j) + k_{K_a} \cdot Kansei(i, j)\}.$$

ここで \exp は指数関数を表し k_{S_a} , k_{S_h} , k_{K_a} , k_{T_u} , k_{H_y} はそれぞれ対応する要素の重み係数である。この総得点が最高のセルを移動先セルとするが、複数の歩行者が同一セルを移動先とする場合、つまり衝突する場合は、ランダムに選ばれた一人の歩行者がそのセルに移動し、他の歩行者は現在のセルに留まる。その際、現在のセルに留まった歩行者は、次のステップで再度移動可能とする(3.2節を参照すること)。

3.4. 最短経路の情報の授受

リーダーか非リーダーかは、初期設定のときに定められる。非リーダーは、リーダーとの距離が一定以下である場合、一定の確率で出口までの最短経路情報を受け取る。また、非リーダーでも、視界内に出口が入った場合、出口までの最短経路情報を獲得する。

4. シミュレーション

シミュレーションの結果として観察された特徴的なことを記す。

4.1. 標識の効果

出口への方向を指し示す標識の存在が出口への避難流動を効果的に形成し、存在しない場合に比べて全員避難までのステップ数に大きな違いがある。図8の上側の標識がない場合、一部の歩行者が部屋の左下隅に移動し、そこでしばらくもみ合った後、壁伝いに上に向かう流れが形成される。これらの歩行者は、偶然に出口を視界内に捉えるかまたは出口方向の流れへの追従が発生するかのいずれかによって避難が可能になる。

また、標識は適切に配置すれば、その個数はごく少数で十分であることが判る。図9では、標識は部屋の後方に置かれている。その個数は図8の場合に比べて格段に少ないが、避難は速やかに行われている。出口付近の標識は、出口が歩行者の視界内に入っていること及び追従のためにほとんど意味をなさない。標識は、歩行者が出口への方角をつかめないような場所に一様に配置することで、その効果が十分に発揮される。また、標識の配置問題においては、適切な場所への一様な配置が重要であり、標識の最適配置の問題が存在することがわかる。部屋の大きさ、歩行者の収集可能な情報およびその認知範囲、流動への追従の度合いなどが、最適化の際のパラメーターになる。

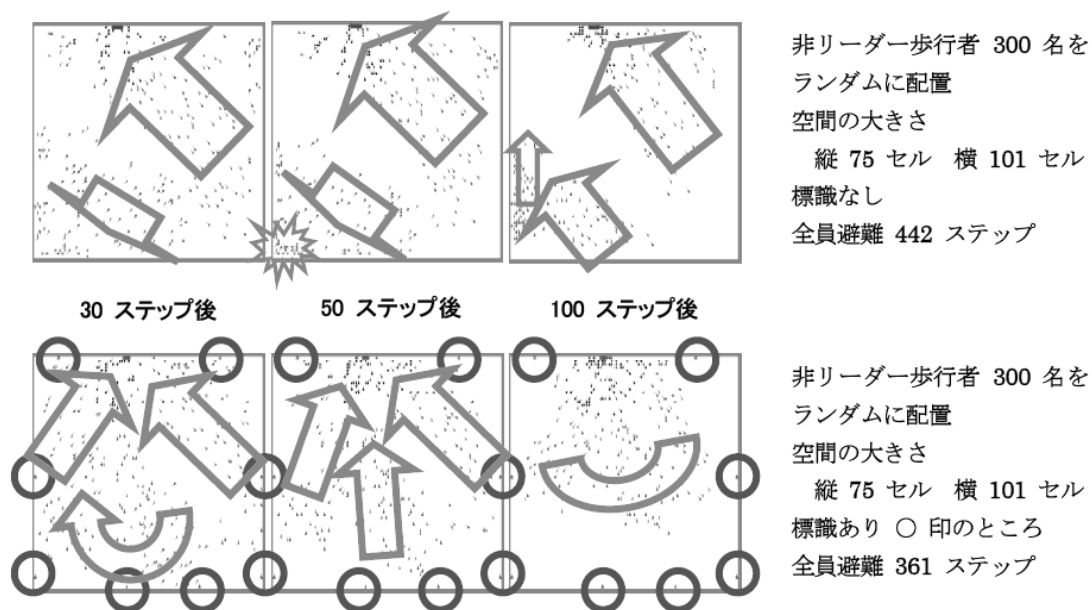


図8: 標識がある場合の避難流動

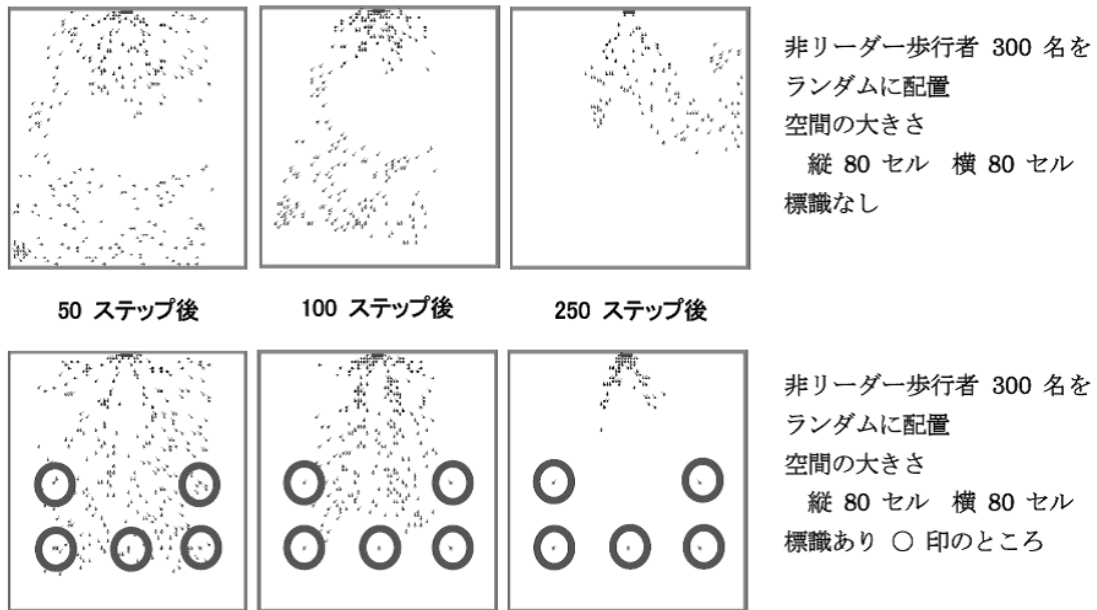


図 9: 少数の標識を適切に配置した場合の避難流動

4.2. リーダーの存在

リーダーの存在は避難流動の形成に大きな影響を与えるが、標識の場合と同様に人数よりはむしろ配置の問題であることが判る。図 10 を参照すること。

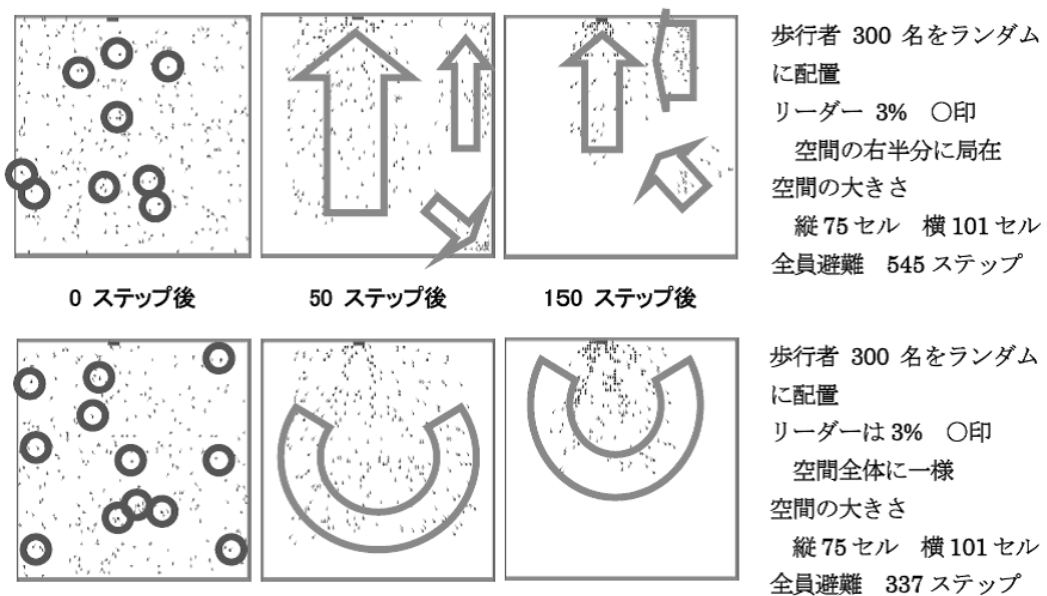


図 10: リーダーが局在する場合と一様に存在する場合の避難流動

リーダー達が局在する場合、視界内にリーダーを捉えられない歩行者は最後まで取り残され、全員の避難の足を引っ張ることになる。つまり、リーダーが局在的に配置されると、その恩恵に与られない歩行者が存在することになり避難に時間がかかる結果となる。図 10 の上図を参照。一方、リーダー達を空間内に一様に配置することによって、リーダーの影響

が空間内の歩行者全員に及び、避難がきわめてスムーズになる．図 10 の下図を参照．

またリーダーが少数であっても，出口から遠くの領域，つまり出口への方向をつかめないような領域に様に配置することで避難流動はスムーズになる．図 11 では 3 名というごく少数のリーダーが出口に対して歩行者全体を下から支えるようにして配置されているが，全員が避難を完了するまでのステップ数は，図 10 の下図にあるような空間全体にリーダーが様に配置されている場合と遜色ない．出口にある程度近い歩行者は，視界内に出口を捉えた歩行者が成す避難流動の影響によって容易に出口に向かうことができる．このため，出口から遠い位置に存在している歩行者を出口方向に少し誘導することで，全体の避難流動がスムーズになるが，その際には多くのリーダーを必要としないことがこのシミュレーションから理解できる．リーダーは動く標識と考えることができるが，標識の場合と同様にもっとも効果的な配置場所と人数が存在するであろう事が予想できる．

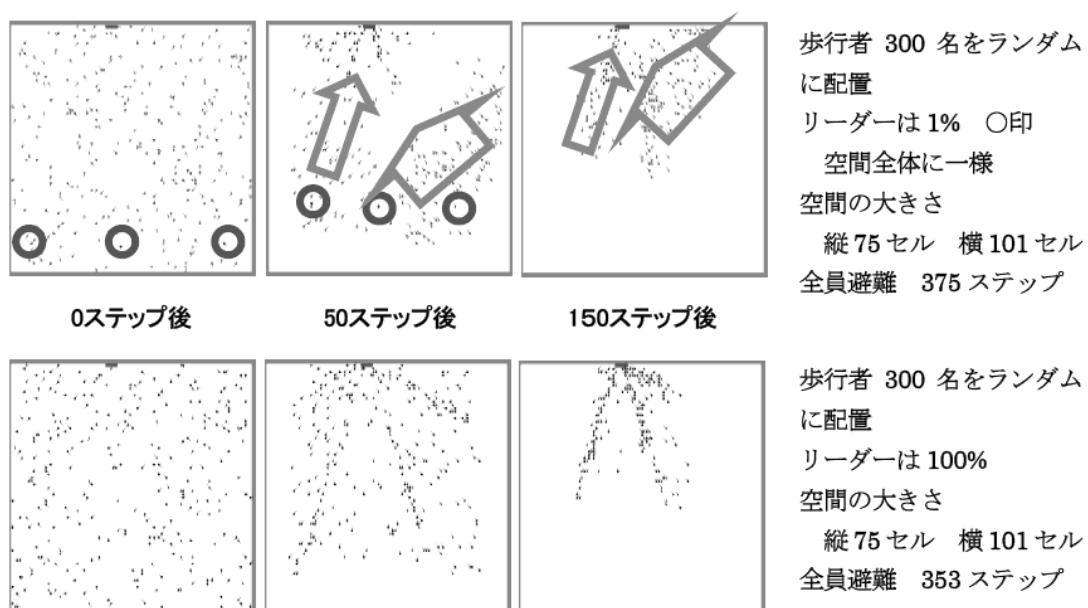


図 11: 少数のリーダーが適切に敗退された場合と全員がリーダーの場合の避難流動

4.3. 出口の数と配置

全員が避難するまでにかかる時間は，出口の数と配置に依存する．出口が一カ所だけであるときに見られる空間全体における混雑現象と全員が避難するまでに要する時間は，出口を複数個にすることで大幅に緩和される．また，出口を複数個設置する場合，場所によって，空間内及び出口付近での混雑の様子と度合いに大きな違いが出る．

図 12 では，ベンチ状の障害物に沿って歩行者が規則的に配置されていて，劇場などの簡単なモデルと考えることが出来る．出口は，上側に一カ所のみ存在する．時間推移とともに歩行者は，出口に向かって進む．出口付近よりはむしろ中央と左右両端の通路に歩行者が集中し，混雑していることが判る．出口付近の混雑度は，グラフから判るように 1 平方メートル当たり平均 2 から 3 名で安定しているが，この場合に全員が避難するまでに要したステップ数は，454 ステップである．

図 13 より出口を複数個にすることで，全員避難までのステップ数が大幅に改善されることがわかる．また，出口の設置場所を上下にするか，左右にするかで混雑現象が大きく変わり，全員が避難するまでの時間にも違いが出てくる．空間内の障害物と出口との位置関係が

避難行動に大きな影響を与えることがこのシミュレーションから見て取れる。



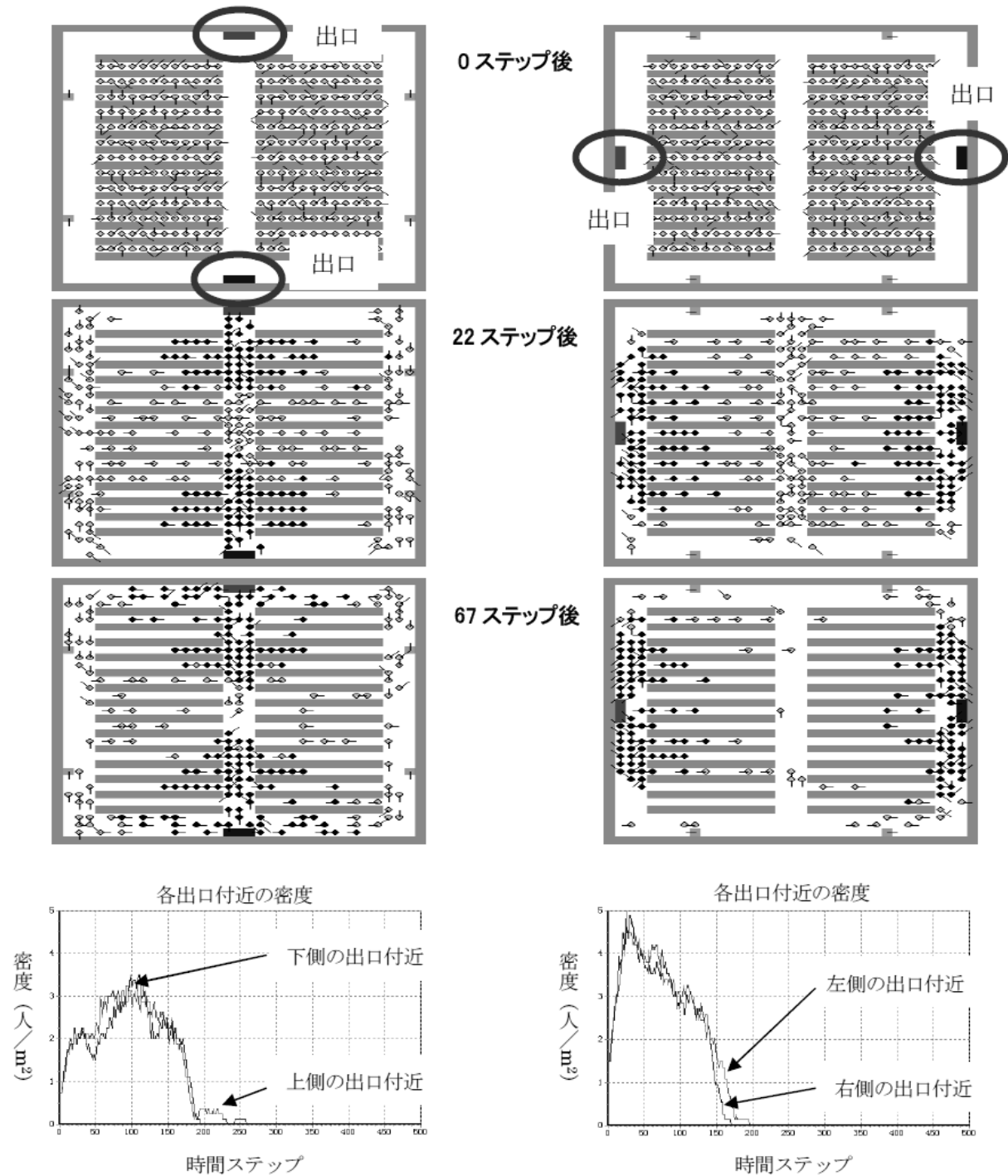
312 人の歩行者がベンチシート状のところに規則正しく配置される
 出口が上に一カ所ずつ配置 (楕円)
 グラフは出口近辺の混み具合の時間推移
 全員避難までのステップ数 454 ステップ
 色の濃い歩行者は出口を認知した者

図 12: 避難流動における混雑の発生場所

図 13 のベンチ状の障害物は、左右への歩行者の流れを生成する。左右出口はこの流れの方向に沿ったものであり、歩行者は一気に出口に到達する。そのため、出口付近での混雑度が急激に上がる。図 13 の右側を参照。一方上下出口の場合、出口付近の混雑度は、左右出口の場合に比べて高くない。これは、出口の場所が、ベンチ状障害物が定める流れに反するからである。このことによって、出口付近の混雑度はさほどではないが、ベンチ状障害物から中央の通路に出るところでの混雑が非常に高くなっていることが判る。

これらのシミュレーションから次のことが判る。出口の個数を増やすことは全員が避難するまでの時間の短縮に大きな効果を持つ。また、出口の設置場所と障害物の配置パターンによって、混雑度が極めて高い場所が出現する可能性がある。出口にスムーズに向かいすぎる

と、出口での混雑度が高くなりそこでの危険性が高くなる。緊急時における迅速な避難，



312 人の歩行者がベンチシート状のところに規則正しく配置されている。
 左側：出口は上下に一カ所ずつ配置（楕円）。グラフは出口近辺の混み具合の時間推移。
 全員避難までのステップ数は 258 ステップ。
 右側：出口は左右に一カ所ずつ配置（楕円）。グラフは出口近辺の混み具合の時間推移。
 全員避難までのステップ数は 196 ステップ。
 色の濃い歩行者は出口を認知したものの

図 13: 出口と障害物の配置関係が避難流動に及ぼす影響

混雑度とこれによる危険性の回避等の相反した要求を実現するための出口の個数，設置場所などは，空間内の設備・障害物の配置に大きく依存する．少なくともスムーズに出口付近に向かわせるのが無条件で良いと言うわけではなさそうであるし，障害物の設置によって逆に避難流動の制御が可能であることが示唆される．

4.4. 煙の影響

本シミュレーターの可能性を見るために煙を組み込んだシミュレーションが図14である．煙は，丸印が付けられているところで発生し，時間推移とともに周りに拡散する．

拡散は，時間ステップごとに，ムーア近傍中の各セルに一定の確率で進展させることでモデル化されている．拡散のための確率は，上下左右それぞれの方向ごとに変えることが出来，このことによって拡散自体に方向性と速さを持たせることが出来る．リーダーは，煙を認識するとそれを挟むノード間の辺はないものとし，新たに出口までの最短経路を計算し直す．また非リーダーは，煙を避けるのみである．

図14では，当初中央に置かれた障害物に拡散が遮られるが，時間が経つに従い障害物を回り込みながら煙が空間全体に広がっていく様子が見られ

る．また，歩行者が煙を避け，避難経路を大きく変更している様子も見て取ることが出来る．この例では，全員が無事避難できている．煙の発生場所，拡散速度によっては，煙に巻かれ停止する歩行者も出現するが，この例は少し生々しいため，本稿への掲載は控える．

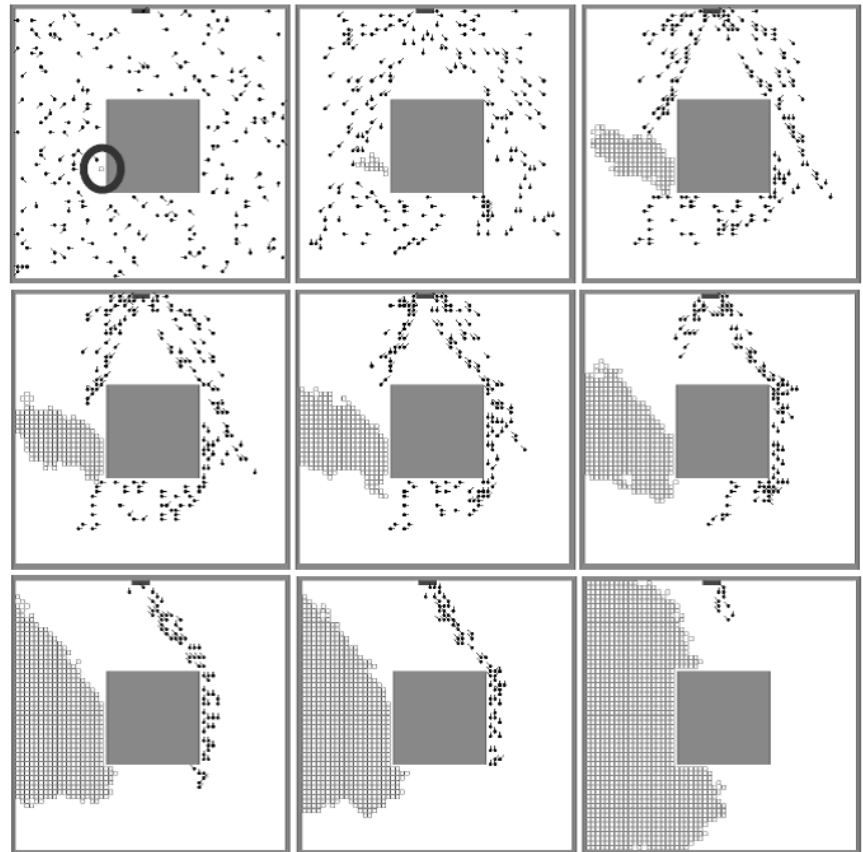


図14: 煙がある場合の避難流動の様子

5. まとめ

本稿では，二つのベクトルのずれを移動先候補セルの評価に用いるという簡明でかつ理解しやすい手法を統一的に用い，避難流動のシミュレーターの作製とシミュレーション結果について議論した．本シミュレーションによって創発してくる流動はきわめて自然なものであり，定性的に納得できるものである．また，直感的に想像できる事柄についても，ビジュアル的かつ説得的に，例えば，障害物，出口の配置，出口の数と避難流動の関係，標識の配置，リーダーの配置などの様々な問題が存在することが示された．さらに，煙の存在を考慮した避難流動のシミュレーションも可能であることを示した．一方，本シミュレーターの歩

行者は、一端脱出口を定めると、その付近がいかに混雑していても、他へ向かうことはない。実際には、例えば、劇場内ではおおよそすべての出口を見渡すことが出来るため、目的とする出口変更もあり得る。またデパートに見られるように、障害物には歩行者の視界を遮るものとそうでないものがあり、これらによっても歩行者の避難行動は影響を受けるが、本稿では障害物の立体的な多様性は十分に考慮されていない。さらに、本稿でのリーダーは積極的な避難誘導を行うのではなく、非リーダーを従わせるだけのものであった。実際の避難誘導係に見られるような丁寧な誘導のモデル化と組み込みは次の課題とする。煙への対応は、そのときの歩行者の心理状態に大きく依存し、煙を前にした歩行者の意志決定は、予測の問題も含み相当に複雑な様相を呈すると考えられる。また、煙の三次元的な拡散、含まれる有毒物質などを考慮することも、シミュレーターをより精密なものにするためには必用なことである。以上の要素を組み込み、歩行者の意志決定をより実際的なものにしたシミュレーターの作成及び多様な設定でのシミュレーションによる提言は今後の課題としたいが、本研究のシミュレーターはその出発点となる基盤的モデルとして十分なものである。第1節でも述べたが、本シミュレーターを用いて実際の施設での避難シミュレーションを行い意思決定へ寄与をはかる。本研究は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(C)(課題番号18510122)のもとで行われた。また、論文審査員の方々には、有益なご意見をいただきました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- [1] 安部北夫: パニックの人間科学(ブレーン出版, 1986), 201-215.
- [2] 青木俊幸: 駅の旅客流動. *bit*, 31-9 (1999), 91-98.
- [3] 阿久澤あずみ, 田口東: 駅構内における群衆歩行シミュレーションモデルの研究. 日本OR学会2005年度秋季研究発表会アブストラクト集(2005), 192-193.
- [4] S. Bandini and G. Mauri (eds.): *ACRI '96, Proceedings of the Second Conference on Cellular Automata for Research and Industry, Milan, Italy, 16-18 October 1996* (Springer, 1997).
- [5] S. Bandini, R. Serra and F. Suggi Liverani (eds.): *Cellular Automata: Research Towards Industry, ACRI '98, Proceedings of the Third Conference on Cellular Automata for Research and Industry, Trieste, 7-9 October 1998* (Springer, 1998).
- [6] S. Bandini and T. Worsch(eds.): *Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata, Proceedings of the Fourth International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, Karlsruhe, 4-6 October 2000* (Springer, 2001).
- [7] S. Bandini, R. Serra and F. Suggi Liverani (eds.): *Cellular Automata, 5th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2002, Geneva, Switzerland, October 2002, Proceedings* (Springer, 2002).
- [8] C. Burstedde, K. Klauck, A. Schadschneider and J. Zittartz: Simulation of pedestrian dynamics using a 2-dimensional cellular automaton. cond-mat/0102397.
http://jp.arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/0102/0102397.pdf
- [9] C. Burstedde, A. Kirchner, K. Klauck, A. Schadschneider and J. Zittartz: Cellular automaton approach to pedestrian dynamics - applications. In M. Schreckenberg and S.D. Sharma (eds.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics* (Springer, 2001), 87-97.

- [10] B. Chopard, P. Luthi and P.A. Quelo: Cellular automata models of car traffic in a two-dimensional street network. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, **29** (1996), 2325–2336.
- [11] J.M. Epstein and R. Axtell: *Growing Artificial Societies - Social Science From The Bottom Up* (The Brookings Institution, 1996). (服部正太, 木村香代子 監訳: 人工社会—複雑系とマルチエージェント・シミュレーション (共立出版株式会社, 1999))
- [12] 堀宗朗, 犬飼洋平, 小国健二, 市村強: 地震時の緊急避難行動を予測するシミュレーション手法の開発に関する基礎的研究. *社会技術研究論文*, **13** (2005), 138–145.
- [13] 伊藤悠太郎: エージェントベースシミュレーションを用いた群集流動マネジメントに関する研究. 第4回 KK-MAS コンペティションアブストラクト (2004).
- [14] 金森寛, 斉藤正俊, 田口東: 効用を考慮した人間の歩行シミュレーション. *日本 OR 学会 2003 年度秋季研究発表会アブストラクト集* (2003), 34–35.
- [15] 加藤恭義, 光成友孝, 築山洋: *セルオートマトン法 - 複雑系の自己組織化と超並列処理 -* (森北出版, 1998).
- [16] A. Kirchner, K. Nishinari and A. Schadschneider: Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, **67** (2003), 056122.1–056122.10.
- [17] C.G. Langton: Studying artificial life with cellular automata. *Physica*, **22-D** (1986), 120–149.
- [18] C.G. Langton: Life at the edge of chaos. In C.G. Langton, C. Taylor, J.D. Farmer and S. Rasmussen (eds.): *Artificial Life II: Proceedings of the Workshop on Artificial Life Held February, 1990 in Santa Fe, New Mexico (Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity Proceedings)* (Addison-Wesley Publishing Company, 1990), 41–91.
- [19] 森下信, 山本英臣, 大高善光, 中野孝明: セルオートマトンによる小売店舗内購買シミュレーション, *Transactions of JSCES*, Paper No.19990019 (1999).
- [20] 森下信, 石原利明, 杉内肇, 梅津充幸: CA による駅構内流動シミュレーションと交通広告認識度, *計算工学講演会論文集*, **5** (2000).
- [21] 森下信, 西山裕二, 栗山浩一, 大釜みち代: 駐車場周辺道路の交通シミュレーション. *Transactions of JSCES*, Paper No.20000018 (2000).
- [22] 森下真: *セルオートマトン 複雑系の具象化* (養賢堂, 2003).
- [23] 村木雄二, 狩野均: マルチエージェントシステムを用いた広域災害避難シミュレーション. *情報処理学会 第 66 回全国大会* (2004), 3M-6.
- [24] 中村賀英, 稲垣康善: 鉄道駅構内における群集流動に関する基礎的研究について. *名古屋鉄道株式会社「研究報告」*, **34** (1998).
- [25] 中嶋正之監修: *複雑系の理論と応用* (Ohmsha, 1998).
- [26] J. von Neumann: *Theory of Self - Reproducing Automata* (University of Illinois Press, Urbana and Chicago, 1966).
- [27] G. Nigel and K.G. Troitzsch: *Simulation for the Social Scientist* (Open University Press, 1999). (井庭崇, 岩村拓哉, 高部陽平 訳: *社会シミュレーションの技法* (日本評論社, 2003))

- [28] 日本建築学会編: 複雑系と建築・都市・社会 (技報堂出版, 2005), 158.
- [29] K. Nishinari, A. Kirchner, A. Namazi and A. Schadschneider: Extend floor field CA model for evacuation dynamics. *IEICE Transactions on Information and Systems*, **E87-D** (2004), 726–732.
- [30] 西成活裕: 渋滞学 (新潮選書, 2006).
- [31] 岡田公孝, 和田剛, 高橋幸雄: 個人行動をベースにした歩行モデルと歩行流シミュレーション. 日本 OR 学会 2003 年度春季研究発表会アブストラクト集 (2003), 102–103.
- [32] 大野将春, 高橋幸雄: ペア歩行を考慮した歩行モデルとシミュレーション, 日本 OR 学会 2004 年度秋季研究発表会アブストラクト集 (2004), 88–89.
- [33] 押野麻由子: マルチエージェントモデルを用いた避難行動のシミュレーション.
<http://www.ise.chuo-u.ac.jp/ise-labs/taguchi-lab/pdf/r01d8104038.pdf>
- [34] M. Resnick: *Turtles, Termites, and Traffic Jams - Explorations in Massively Parallel Microworlds* (The MIT Press, 1994). (山本順人, 西岡知之 共訳: 非集中システム (コロナ社, 2001))
- [35] 佐藤方彦 監修: 人間工学基準数値数式便覧 (技報堂出版, 1999), 285–286.
- [36] A. Schadschneider: Cellular automaton approach to pedestrian dynamics - theory. In M. Schreckenberg and S.D. Sharma (eds.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics* (Springer, 2002), 75–85.
- [37] P.M.A. Sloot, B. Chopard and A.G. Hoekstra (eds.): *Cellular Automata, 6th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2004, Amsterdam, The Netherlands, October 2004, Proceedings* (Springer, 2004).
- [38] 宇田川金幸, 増田浩通, 新井健: 地下鉄駅構内における避難行動シミュレーションモデルの構築.
http://www.umekkii.jp/college/syllabus/04s_social_system/report2_paper.pdf
- [39] 宇谷秀明, 鈴木勝: セルラーオートマトンによる場のモデル化に基づく物流計画に関する研究. *Transactions of JSCES*, Paper No.20000009 (2000).
- [40] S. Wolfram: Statistical mechanics of cellular automata. *Review of Modern Physics*, **55** (1983), 601–644.
- [41] S. Wolfram: Universality and complexity in cellular automata. *Physica*, **10D** (1984), 1–35.
- [42] S. Wolfram: *A New Kinds of Science* (Wolfram Media, Inc., 2002).
- [43] 山影進, 服部正太: コンピューターの中の人工社会 –マルチエージェントシミュレーションモデルと複雑系– (共立出版株式会社, 2002) .

大鑄史男

名古屋工業大学 おもひ領域

〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町

ABSTRACT

A SIMULATION OF EVACUATION DYNAMICS OF PEDESTRIANS IN
CASE OF EMERGENCY BY A 2-DIMENSIONAL CELLULAR
AUTOMATON METHOD

Fumio Ohi

Motohiro Onogi

Nagoya Institute of Technology IBM Japan Services Company, Ltd.

In this paper, using the multi-agent cellular automaton method, we construct a simulator for evacuation dynamics of pedestrians in case of emergency, and show some natural and acceptable qualitative results. Each pedestrian decides autonomously his next target cell in his Moore neighborhood, considering environmental information in his cognitive region. Such information contains the directions of various flows in the region, the position of obstacles, indicators to the exits, the shortest paths to the exits and diffusing smoke, which are used to evaluate each cell in his Moore neighborhood. Each of these information elements has a direction and is expressed to be a vector, so called an information vector.

In our simulation model two types of agents are considered, one is a leader agent who knows the shortest paths to the exits and leads non-leader agents to the exits, and other is a non-leader agent who moves depending on the flow of other agents in the cognitive region and his/her own driving force making him/her to keep the present direction. The driving force is also formulated to be an information vector.

When evaluating a possibly move-to cell, we use the differences between the information vectors and the vector from the pedestrian's present position to the move-to cell, because we think that we do not necessarily move to the object showing the direction but we move along the direction.

Taking account of the simple and unified approach using the difference of two vectors, we can emerge typical, easily acceptable and realistic patterns of evacuation flows and our simulator is considered to be a starting point to develop more sophisticated simulator in the future, which may be an important tool for understanding and decision making approach to complex phenomena emerged from many autonomously and interactively moving agents, for which mathematical methods may be hardly applied.