

エージェント技術に基づく群歩行シミュレーション

佐藤 和希

Study on Emergent Behaviors of Crowded People in a Station through an Agent-based Simulation Model.

Kazuki SATOH

1. はじめに

都市空間や建物内の安全設計をするためには、群集の歩行流動を予め分析・予測する必要がある。しかし、ターミナル駅やイベント施設など、混雑した場所での歩行流動や災害が発生した際の避難の様子を実測により分析・予測するのは困難である。

実測では困難な分析・予測をする方法の一つとして、コンピュータによる群集歩行シミュレーションが有用とされている。既存研究では、セルオートマトン法 [1][3][4] やポテンシャルモデル [5][6][7] などを用いて歩行流を再現している。しかし、セルオートマトン法では進行方向が限定されるため、斜めに進行する等の歩行を再現することができない。文献 [2] はセルベースで構築した空間に相対座標を導入することにより、細かな歩行を再現している。しかし、壁などの障害物については考慮していない。文献 [5] は、ネットワークモデルとポテンシャルモデルを組み合わせるにより、障害物がある場合の歩行流を再現している。しかし、これら既存研究の中で障害物を考慮したシミュレーションでは、歩行時の人・障害物それぞれに対する詳細なルールや複雑な数式により行動を決定していて、対人・対障害物と区別をしない一般化された規則を持っていない。

本研究では、歩行ルールを対人・対障害物と場合分けをせず一般化する。そして、セルベースで構築した空間に歩行ルールと共に相対座標とネットワークモデルを導入し、シミュレーションを行う。シミュレーションにより得られた結果から、様々な検証方法により歩行モデルの妥当性を確認する。

最後に、本モデルを応用とした例として避難シミュレーションを行い、その結果について考察する。

2. 歩行モデル概要

避難の様子をシミュレーションするにあたり、人の歩行をモデル化した。本章では、エージェントが移動する際に適用される障害物認識規則、移動規則、進行方向を修正するために導入したネットワークモデルについて述べる。ここで障害物とは、壁もしくは他者である。

2.1 定義

エージェント一人を人体円半径 0.3[m] で表す。各エージェントはそれぞれ、標準歩行速度 $V[m/s]$ 、視野 $View[m]$ 、大目的地 G_b 、目的地 G_l 、進行方向 $MyDirection[\varphi]$ を持つ。

V は、エージェントの周囲に障害物が存在しない場合の最大歩行速度である。 V は以下の式で決定される。

$$V = 1.4 + \sigma \quad (1)$$

σ は平均 0、標準偏差 0.1 の正規分布で与えられる値である。

$View$ は、エージェントの周囲に存在する障害物の有無の認識範囲である。エージェントは半径 $View[m]$ 、進行方向の視野角 300° の範囲の障害物を認識することができる。 $View$ は $2[m]$ とする。

G_b はエージェントの目的地を示し、 G_l は G_b までの経路中にある小目的地である。例として自宅から駅までの道のりを考える。駅が G_b であり、途中の曲がり角が G_l である。

$MyDirection$ は自身の進行方向を指し、 $0^\circ \sim 360^\circ$ までの値をとる。値は現在位置と小目的地 G_l の位置が成すの角である。

2.2 障害物認識規則

エージェントに移動規則を適用するためには、エージェントに障害物がどの方向に存在するかを認識させる必要がある。エージェントの障害物認識規則を Fig.1 に示す。矢印はエージェントの進行方向 $MyDirection$ を示している。 $MyDirection$ を基準 (0°) とし、障害物がどの方向 (前, 左右) に存在するか認識する。半径 $View[m]$ 、進行方向の視野角 300° の範囲のうち、進行方向の視野角 60° の範囲の障害物は前方にあると認識する。前方視野の左右両どなり 120° をそれぞれ左, 右と認識する。このうち、エージェントとの距離が最も短い障害物を、各方向に存在する障害物とする。

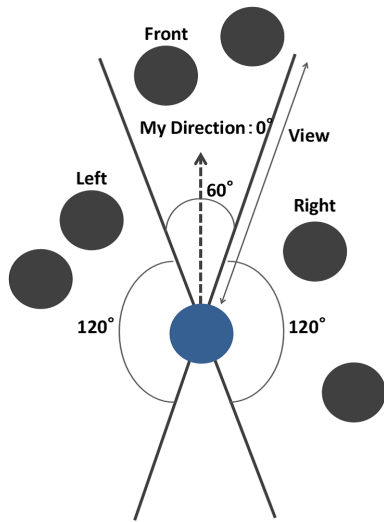


図 1 エージェントの障害物認識

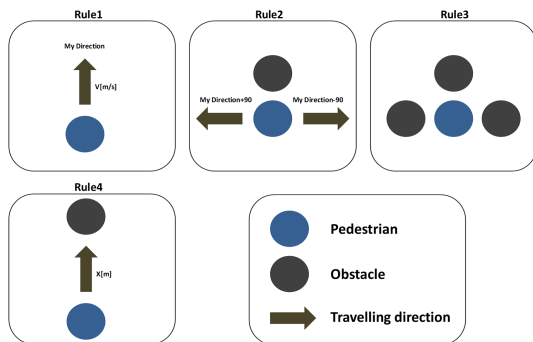


図 2 エージェント移動規則

2.3 移動規則

障害物認識規則により障害物を認識した後，移動規則に基づき移動する．移動規則を Fig.2 に示す．移動規則は以下の 4 つのルールから成っている．

- Rule1**：前方 $View[m]$ 以内に障害物がない場合，進行方向 $MyDirection$ に標準歩行速度 V で移動する．
- Rule2**：前方 $View[m]$ 以内に障害物が存在する場合，左右両方に障害物が存在しない場合は，左 ($MyDirection - 90^\circ$) に移動する．左に障害物が存在する場合は，右 ($MyDirection + 90^\circ$) に移動する．
- Rule3**：前方，左右にも障害物が存在する場合，エージェントは移動せず，現在の位置に留まる．
- Rule4**：前方にある障害物との距離 $x[m]$ が $1[m] \leq x < View[m]$ を満たす場合，対象エージェントはエージェントと障害物の距離 $x[m]$ だけ移動する．

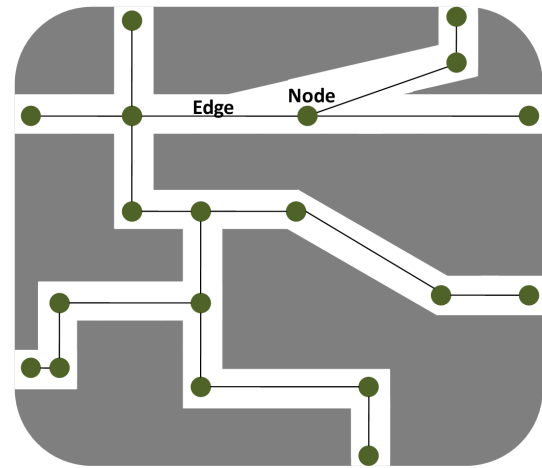


図 3 ネットワークモデル例

2.4 進行方向修正規則

エージェントは上記の障害物認識規則，移動規則に基づき行動する．しかし，曲がり角が多い等の複雑な構造の施設でのシミュレーションを行うとき，最短経路を探索することが困難になる．

そこで，複雑な構造においても最短経路を求め，スムーズな移動ができるようにネットワークモデルを導入する．ネットワークの例を Fig.3 に示す．

Fig.3 のようにネットワークはノードとノード間をつなぐエッジからなる．エッジにはコストがあり，コストはエッジ間の距離である．

エージェントは最初にスタートノードとゴールノード (目的地 G_b) を決定する．エージェントは最短経路 (コストが最も低い経路) を通るものと仮定し，ゴールノードまでの経路を最短経路を探索する方法のひとつであるダイクストラ法により決定する．

エージェントは決定した経路を辿りゴールへと移動する．エージェントは進行方向を，自分の位置と次に辿るべきノード (小目的地 G_l) が存在する位置から決定する．

3. 歩行モデルの妥当性検証方法

本研究で提案したモデルにより形成される歩行流の妥当性を検討する．検討は以下の方法により行う．

1. 提案されている様々な群集密度と歩行速度の関係式と本モデルのシミュレーション結果を比較する．
2. 各モデルと本モデルのシミュレーション結果から，群集密度と歩行速度より求めた群集流動係数を比較する．
3. 進行方向が異なる歩行者が存在することから起き



図 4 測定領域

る隊列化現象が再現されているかシミュレーションを行う。

4. エージェントが一つの出口に殺到した際に発生する，出口付近での滞留の様子を示す。
5. 出口付近に障害物を設置すると避難時間が短縮されるか確認する。

3.1 評価方法

3.1.1 群集密度と歩行速度

堀ならびに岡田 [3,25] によると，群集密度は歩行速度を制約する．群集密度が高くなれば歩行速度は低くなり，群集密度が低くなれば歩行速度は高くなる．群集密度と歩行速度の関係を表したモデルは多く提案されている (Table.1)．Table.1 に示された各モデルと，シミュレーションより得られた群集密度と平均歩行速度を比較し，本モデルが Table.1 に示される関係式に従っているかどうかを検討する．測定領域は， $18[m] \times 12[m] = 216[m^2]$ とする (Fig.4)．初期エージェント数を 10 とし，100 ステップ毎に 10 人ずつエージェントを増加させる．測定する歩行速度は，100 ステップ間に測定領域を通過したエージェントの歩行速度の平均とする．

歩行速度を測定するステップ $a(mod 100 = 0)$ ，各エージェントの歩行速度を V_{ij} ，ステップ毎の領域内に存在するエージェント数を N_i ，毎ステップに領域内に存在したエージェント数を N_a とすると， a ステップ目に測定する平均歩行速度 V_a は以下の式により決定する．

$$V_a = \frac{\sum_{i=a-99}^a \sum_{j=0}^{N_i} V_{ij}}{N_a + N_{a-1} + \dots + N_{a-99}} \quad (2)$$

また，群集密度を $K_a[人/m^2]$ とすると， K_a は以下の式により決定する．

$$K_a = \frac{N_a}{216} \quad (3)$$

上述の式より決定する群集密度が $2.0[人/m^2]$ になるまで，シミュレーションを行う。

表 1 曲線モデル

モデル名	関係式
反比例モデル	$v = \frac{1.4}{K}$
安全間隔モデル	$v = -0.26 + \sqrt{\left(\frac{2.36}{K}\right) - 0.13}$
指数モデル	$v = 1.272K^{-0.7954}$
対数モデル	$v = 1.32 \log_{10}\left(\frac{9.16}{K}\right)$
密度の逆数による指数モデル	$v = 1.4 - 1.7e^{-\frac{2}{K}}$

3.1.2 群集流動係数の比較

歩行空間を考える際に重要な指標となるのが，群集流動係数である．群集流動係数とは，幅員 $1[m]$ あたり毎秒，何人通過するかという数値である [26]．

一般に群集流動係数は歩行速度と密度の積として表わされる．よって，群集流動係数 $Q[人/m/s]$ は以下の式により決定される．

$$Q = KV_a \quad (4)$$

3.1.1 節で述べた群集密度，歩行速度間の各関係式より得られた値から群集流動係数の理論値を算出する．そして，本モデルによるシミュレーションで得られた群集密度と歩行速度から算出した群集流動係数との比較を行う．

3.1.3 隊列化現象の再現

自分と同じ進行方向の歩行者集団と，逆方向に進もうとする歩行者集団がすれ違う時，自分と同じ方向に進む歩行者に追従し，対向歩行者を回避する様子が見られる．これを隊列化現象という．本モデルで隊列化現象が発生するかを確認するシミュレーションを行う．エージェント数を 100 人として，半分を領域の左側から右側へ，残りの半分を右側から左側へと移動させる．

3.1.4 出口付近における群集の様子

人が特定の出口に一齐に殺到するとその出口がボトルネックとなり，アーチ形の滞留が発生することがある．本モデルでもアーチ形の滞留が発生するかを確認する．シミュレーション領域を $60[m] \times 30[m]$ とし，エージェントがスタート地点 *Start* から出口を通り，*Goal* へと移動するシミュレーションを行う (Fig.5)．出口の幅は $1.8[m]$ とする．各スタート地点におけるエージェントの発生率を $2[人/s]$ とし，総エージェント数が 200 人になるまで発生させる．そして，全エージェントが *Goal* に到達するまでシミュレーションを行い，出口付近でアーチ形の滞留が発生するかを確認する．

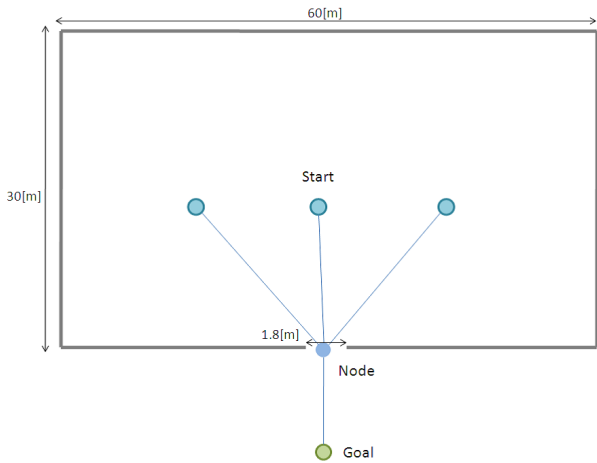


図5 出口付近シミュレーション領域

3.2 出口付近における障害物配置実験

西成 [4] によると、出口付近に棒などの障害物を配置すると、退出時間が短縮されるという。本モデルで退出時間が短縮されるかどうかを検証する。実験は、1) 棒配置なし、2) 棒1本配置、3) 2本配置、の3通りについて行う。エージェント数は200人、シミュレーション空間は3.1.4節と同じものとする。

3.3 実験結果

3.1節で述べた壁回避、群集密度や歩行速度、群集流動係数の測定、隊列化現象、出口の付近の滞留の再現についてのシミュレーション結果について述べる。

3.3.1 群集密度 歩行速度シミュレーション

3.1.1節で述べた設定によりシミュレーションを行い、得られた群集密度と歩行速度の関係を Fig.6 に示す。この図より、群集密度が高くなるにつれて、歩行速度が低下していく様子がわかる。また、本モデルと各モデルを比較すると、本モデルの値は密度の逆数による指数モデルに近い。したがって最小二乗法により求めた本モデルの回帰曲線

$$V = 1.40 + 1.55e^{-\frac{2.17}{K}} \quad (5)$$

と、密度の逆数による指数モデルのグラフを Fig.7 に示す。密度の逆数による指数モデルとの平均誤差は 4.84×10^{-3} であった。

3.3.2 群集流動係数測定シミュレーション

3.3.1節で得られた結果より求めた群集流動係数と、各モデルから求めた群集流動係数を比較する。グラフを Fig.8 に示す。また、最小二乗法により求めた本モデル

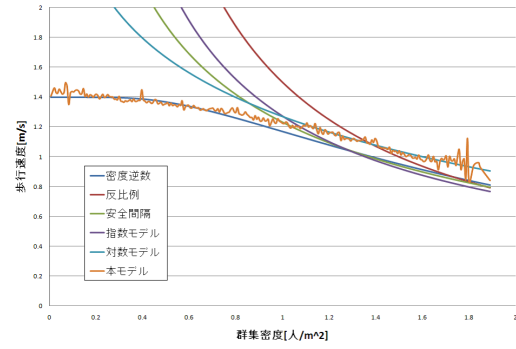


図6 各モデルとの歩行速度の比較

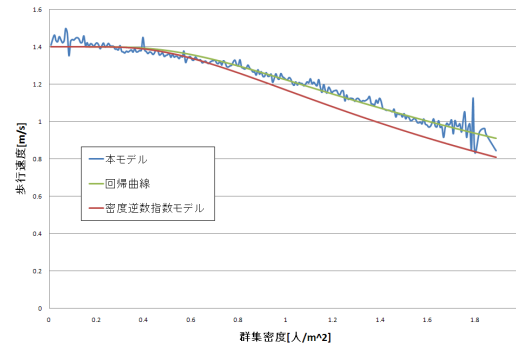


図7 歩行速度回帰曲線との比較

群集流動係数の回帰曲線

$$Q = -0.39K^2 + 1.65K - 0.03 \quad (6)$$

と密度の逆数による指数モデルの群集流動係数のグラフを Fig.9 に示す。密度の逆数による指数モデルとの平均誤差は 6.38×10^{-3} であった。これらの図より、群集密度と歩行速度の関係と同様に、本モデルの値は密度の逆数による指数モデルに近いことがわかる。

3.3.3 隊列化現象再現シミュレーション

3.1.3節で述べた設定でシミュレーションを行い、隊列化現象が起こる様子を検証した。シミュレーション開始直後の様子を Fig.10 に、50 ステップ後の様子を Fig.11

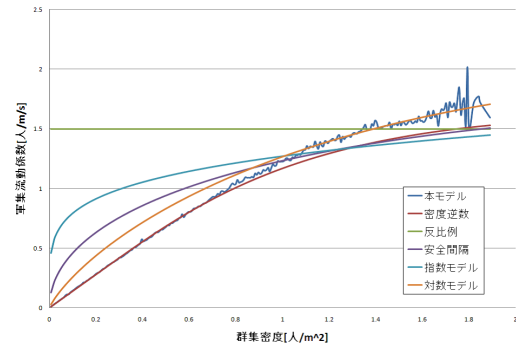


図8 各モデルとの群集流動係数の比較

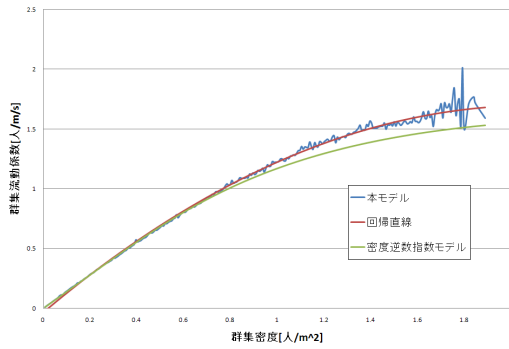


図 9 群集流動係数回帰曲線との比較

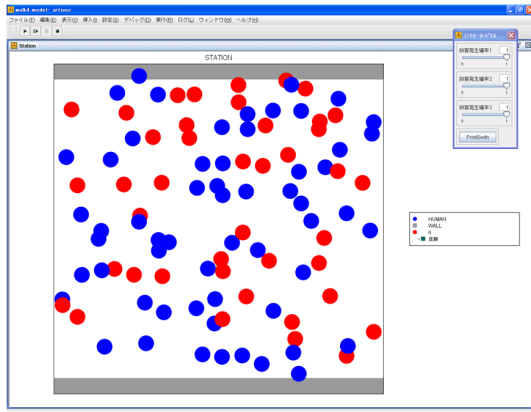


図 10 シミュレーション直後

に示す．青色が左から右へと移動するエージェントを表し、赤色が右から左へと移動するエージェントを表している．シミュレーション直後には各々が進行方向へ移動しているが、次第に同一の進行方向のエージェントで集団となり移動していることが分かる．本モデルは隊列化現象を再現することができているといえる．

3.3.4 群集殺到シミュレーション

3.1.4 節で述べた設定でシミュレーションを行い、一つの出口に殺到した際に形成されるアーチ型の滞留の様子を観察した．その様子を Fig.12 に示す．

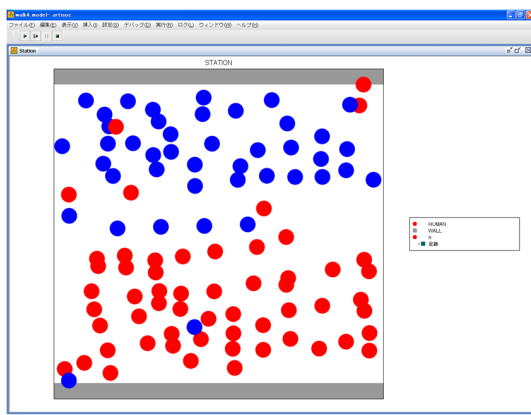


図 11 シミュレーション 50 ステップ後

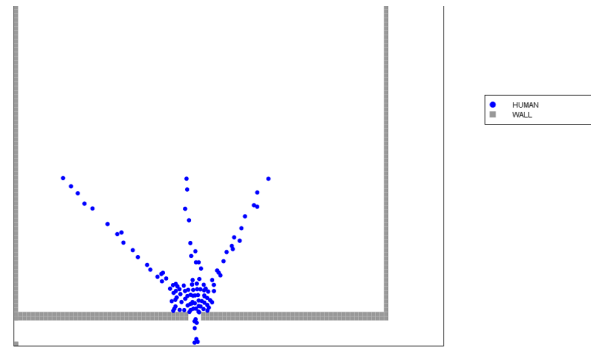


図 12 アーチ形の滞留の形成
表 2 各シミュレーションにおける退出時間

棒の数	通過時間
0	160.60
1	155.46
2	158.78

様子を観察した．その様子を Fig.12 に示す．出口がボトルネックとなり、出口付近に人の滞留が発生している様子がわかる．実際に出口付近で起きる滞留の様子を、本モデルで再現できていることがわかる．

3.4 障害物配置シミュレーション

各シミュレーションを 100 回実行し、全エージェントが退出するまでの時間を測定した．各シミュレーションでの測定結果を表 2 に示す．

結果を考察すると、棒を配置しない場合が最も時間を要している．また、1 本と 2 本の棒を比較すると、1 本のほうが時間が短縮されている．このことから、本モデルでも西成による実験と同様の結果を得ることができた．また、棒の数を増やすことは必ずしも避難時間を短縮することに繋がらないことが分かった．

4. 避難モデル概要

本章では、まず避難シミュレーションに必要な要素の定義について述べる．定義を述べた後、緊急時の歩行者エージェントの動作について述べる．

4.1 環境要素

本研究では 1 セルを $0.6[m] \times 0.6[m]$ とする．そして実在する駅を再現し、シミュレーションを行う．

セルには階段、壁、出入り口、乗車位置、火、煙が存在し、以下の性質をもつ．

- 階段は歩行速度を半分にする．
- 壁は、駅を構成する．また、災害発生時、通路の

破損が生じた際は空いているセルに壁を配置し、歩行者の通行を不可とする。また火や煙もそのセルに存在することができない。

- 出入り口には開、閉の2種類が存在する。開の出入り口が存在する場合、歩行者は目的地とすることができる。閉の出入り口の場合、歩行者は目的地とすることができない。
- 火は、発生したセルから任意の延焼確率で隣接する空きセルへと広がる。
- 煙が存在するセルには歩行者あるいは火が存在することがある。煙は火が存在するセルから任意の確率で、隣接するセルへと広がる。歩行者が存在する座標に煙が存在する場合、歩行者の進行方向に任意の誤差を与える。

4.2 避難時の経路の選択

緊急時は、各々の性格に基づき目的地までの経路を選択する。しかし、経路を選択した後に、環境認識視野 $5[m]$ 以内の経路上に火・煙・通路の破損を確認した場合、経路を再探索する。まず、経路上に火・通路の破損がある場合は通行不可能とし、その経路を除外し他の経路を再探索する。次に経路上に煙がある場合は通行に支障をきたすものとし、その経路のコストに1セル当り $5[m]$ を加算し、経路を再探索する。

4.3 群集過密時

群集が極端な過密状態になると、生命に危険が及ぶ場合がある。文献 [27] や明石市民夏まつり事故調査報告 [28] によると、群集密度が $5 \text{人}/\text{m}^2$ 程度で歩行速度が著しく低下し、歩行者の転倒などの危険性が高まる。本研究では群集密度が $5 \text{人}/\text{m}^2$ 以上になった場合、その周辺にいる歩行者は一定ステップ停止するとする。

4.4 歩行者エージェントの避難時の性格

避難シミュレーションを行うにあたり、人の避難行動をモデル化する必要がある。緊急の際の人の行動は岡田 [26] によると、1) いつも使う出入り口や階段に向かう、2) もと来た道を引き返す、3) 人に追従する、4) 明るい方に向かう、5) 狭い所に逃げ込む、6) 思いもよらない力を発揮する、に分類できる。

以上のことと文献 [15] より、本研究では緊急避難時の歩行者の性格を、「いつも使っている出入り口や階段、もと来た道の方に向かう：逆戻り型」、「周囲の歩行者の流れに従う：追従型」、「最近接の出口の方に向かう：緊急避難型」とした。各性格の歩行者エージェントの行動を以下に示す。

- 逆戻り型では、出入り口から移動してきた歩行者エージェントは、その出入り口を避難出口とし、移動する。乗車位置から移動してくる歩行者エージェントにおいては、いつも利用している出口を仮定し、その出口を目的地として移動する。
- 追従型は視野範囲で複数の歩行者が移動している方向へ移動する。
- 緊急避難型は最も近い開の出入り口に向かう。これを避難完了、あるいは死亡するまで繰り返す。

4.5 歩行者エージェントの行動規則

歩行者エージェントの行動規則は通常時の $RNormal$ と災害発生時・緊急時の $REmergency$ の二種類がある。歩行者エージェントの1ステップの一連の動作を Fig.13 に示す。

$RNormal$ は、各々が選択した目的地に向け固有速度で移動する。移動は2章で述べた歩行モデルに従う。

災害発生直後、歩行者エージェントは $REmergency$ に則り行動する。歩行者エージェントは性格により、どのような行動をとるか決定する。

逆戻り型のとき、出入り口から移動してきた歩行者は、その出入り口を避難出口とする。乗車位置から移動してくる歩行者は、任意に決定した出入り口を避難出口とする。避難出口を決定した後、1ステップ毎に固有の速度で移動する。

追従型のとき、ステップ毎に周囲に 5m 以内に存在する他の歩行者集団の中で、一番多くの歩行者が向かっている方向へ移動する。追従する歩行者が存在しない場合、近くの避難出口を探し移動する。

緊急避難型のとき、ステップ毎に自分の場所から一番近い避難出口を探し、移動する。

例外的に、緊急避難型と逆戻り型の歩行者エージェントは出口の破損や火災の発生により、目的地としている避難出口が閉の場合、4.2節で述べたように避難出口を再探索する。

4.6 歩行者エージェントの死亡条件

現実の災害では、必ずしも全員が生存できるわけではない。残念ながら犠牲者が生じる場合がある。本研究では、建物が破損した際による犠牲者と、火災による犠牲者を想定する。

4.6.1 建物の破損による死亡

地震などの大規模な災害を想定した場合、建物の破損を考慮する必要がある。阪神・淡路大震災において

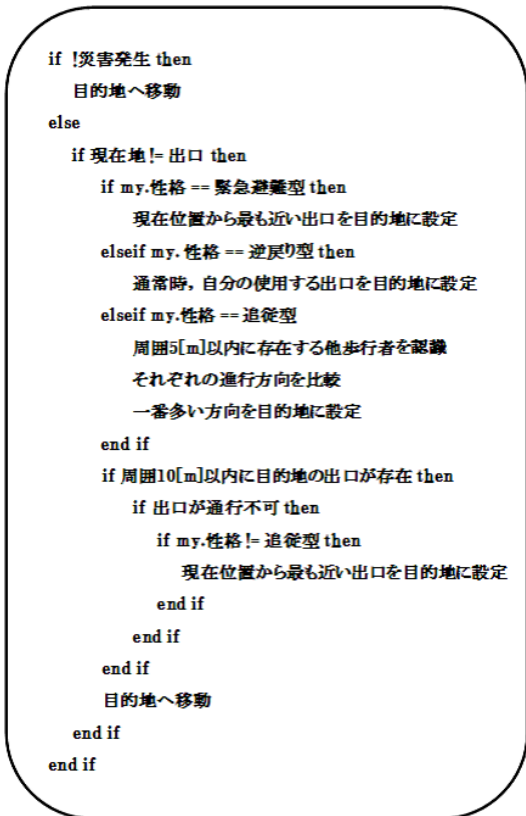


図 13 歩行者エージェントの 1 ステップの動作

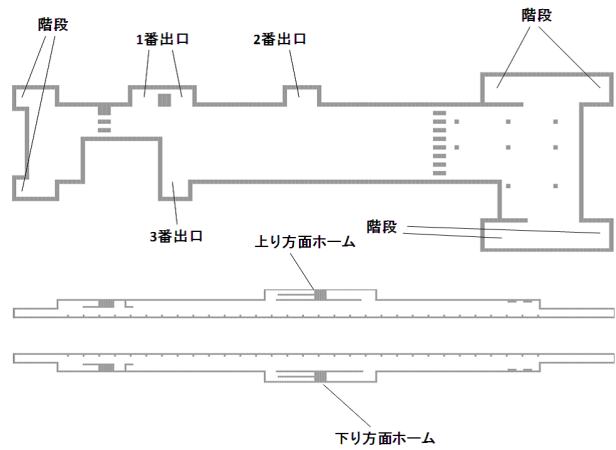


図 14 シミュレーションに使用する地下駅
表 3 シミュレーションパラメータ

パラメータ	設定値
エージェント数	800
下り降車客発生確率	0.1
上り降車客発生確率	0.1
1 番出口客発生確率	0.7
2 番出口客発生確率	0.7
3 番出口客発生確率	0.7
出口の破損	無し
火災の有無	無し

も地下鉄駅の天井が一部崩落する等の被害が報告されている。

本研究では、建物の破損は災害発生直後のみに起きると仮定する。破損した箇所には歩行者が存在する場合、その歩行者は死亡とする。また、歩行者エージェントは破損により壁が配置された場所には移動することができない。破損は空きセルに壁を配置することにより再現する。

4.6.2 火災による死亡

駅構内にはごみ箱や飲食店が存在する場合があります。火災が発生する可能性がある。また、地下駅では気圧の変化により風が吹き、火が広がる可能性もある。本研究では、歩行者が存在するセルの周囲 1 セルを火が囲んだ場合、歩行者は死亡とする。また、火が存在するセルに歩行者が存在する場合も死亡とする。

5. シミュレーション設定

実在する地下駅をシミュレーション上に構築し、避難シミュレーションを行う。地下駅の概略図を図 14 に示す。図の下のホームが地下 2 階で、上が地下 1 階である。災害が発生する想定時間はラッシュ時とする。上り列車と下り列車が同時に到着し、各列車から 300 人

ずつ降車する。出入り口からホームへと移動する歩行者は 200 人とし、計 800 人の避難シミュレーションを行う。災害はシミュレーション実行開始から、100 秒後に発生するものとする。また、避難シミュレーションのパラメータの基本設定を表 3 に示す。

6. 駅構内災害シミュレーションの実験と結果

提案モデルにより、性格別避難時間と 2 つの災害に着目した避難シミュレーションを行った。2 つの災害のうち、1 つめは出口の破損である。2 つめは火災である。

6.1 性格別避難時間の比較

性格によってどの程度避難時間に差があるのかを確認するために、発生割合を変更しシミュレーションを実行した。各シミュレーションの性格発生比率を表 4 に示す。またシミュレーション結果から全歩行者、性格別に避難時間を計測し、その平均をとった結果表 5 に示す。次に全歩行者、性格別の残留人数の推移と平均歩行速度を計測した結果を図 15 に示す。

性格の発生比率を変更しシミュレーションを行ったが、どの場合も逆戻り型が避難に一番多くの時間を要

表 4 各シミュレーションによる性格別発生比率

識別番号	緊急避難型	逆戻り型	追従型
1	1/3	1/3	1/3
2	1/2	1/3	1/5
3	1/3	1/5	1/2
4	1/5	1/2	1/3

表 5 性格別避難完了時間

識別番号	緊急避難型	逆戻り型	追従型
1	196.75	213.85	203.55
2	202.00	218.70	208.10
3	207.75	220.80	216.10
4	183.88	207.31	200.25

している．次に時間を要するのが追従型で，最後に緊急避難型となっている．これらの結果より，避難時間は各性格の発生比率によらないことが分かった．本研究では識別番号 2 の発生比率によるシミュレーションを基本とし，行うとする．

6.2 基本シナリオのシミュレーション結果

6.1 節で実行した基本シナリオの結果から，性格別の残留人数の推移と平均歩行速度を計測し，平均を求めたものを図 16 に示す．また，出口別の避難人数を図 17 に，改札・出口付近の群集密度を計測した結果を図 18 に，ホームから改札へと続く階段周辺の群集密度を図 19 に示す．

6.3 出口の破損有りのシミュレーション結果

出口が破損し，使用不可になった場合，避難にどのような影響があるかを見るために，出口の破損がある場合のシミュレーションを行った．破損が発生すると出口は使用不可となる．破損した出口を目的地としてい

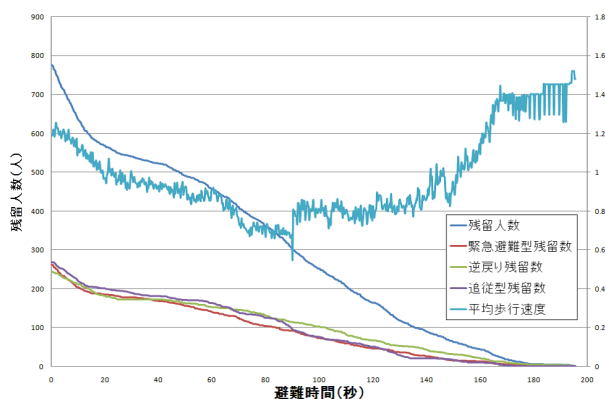


図 15 残留人数の推移 (性格割合：同)

表 6 基本シナリオ性格別避難完了時間

緊急避難型	逆戻り型	追従型	全避難
202.00	218.70	208.10	218.70

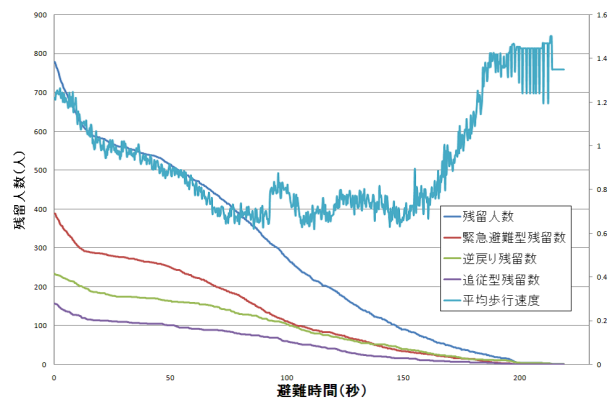


図 16 基本シナリオ残留人数の推移

た歩行者エージェントは，視野 10[m] 以内に出口が存在した場合，破損を認識し別の出口へを目的地として避難を再開する．シミュレーションは 1, 2, 3 番出口がそれぞれ単体が破損した場合と，1 番と 2 番，1 番と 3 番，2 番と 3 番が破損した場合の計 6 通りの条件について行った．それぞれの避難完了までの時間と，破損による犠牲者数を表 7 に示す．また，各出口が破損した際のシミュレーションの群集密度をそれぞれ，図 20，図 21，図 22，図 23，図 24，図 25 に示す．

6.4 火災発生時のシミュレーション結果

駅コンコースで火災が発生した際のシミュレーションを 5 回行った．火災は 1 番出口付近，2 番出口付近で発生する 2 パターンを想定した．火の延焼確率は 0.02，煙の拡散率は 0.2 とした．それぞれの避難完了までの時間と，火災による犠牲者数を表 8 に示す．

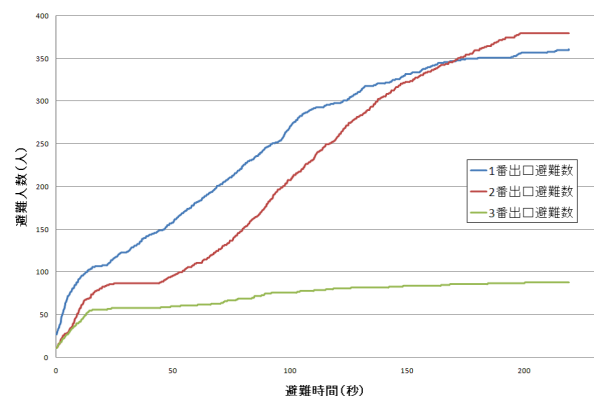


図 17 基本シナリオ出口別避難人数

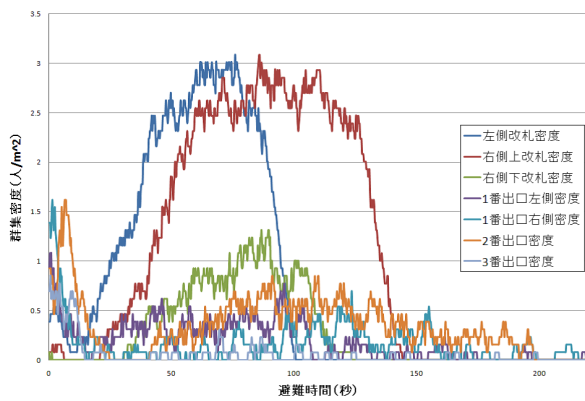


図 18 基本シナリオコンコース群集密度

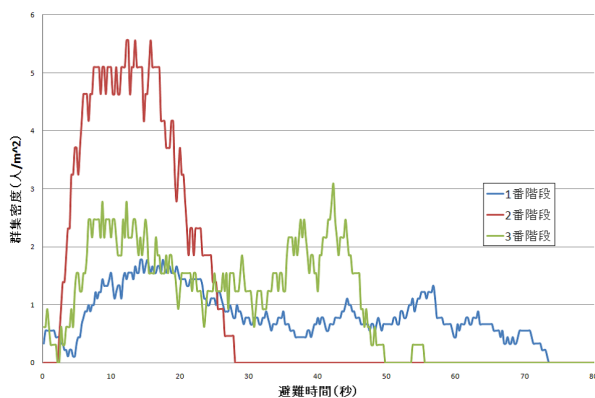


図 19 基本シナリオホーム群集密度

6.5 駅構内災害シミュレーションの実験の考察

まず、基本シナリオ、壁の破損や火災が発生した際のシミュレーションについて考察する。基本シナリオでは避難してくる歩行者のうち、大半が右側の広い改札を通り避難を行う。図 s04 を見ると、歩行者は右側改札の上半分の密度が約 120 秒間にわたり 2.5 ~ 3.0[人/m²]の高い値になっている。これは、1 番出口や 2 番出口に避難しようとする歩行者が集中しているからである。

次に、出口が破損した際のシミュレーションについて考察する。表 7 を見ると、2 番出口が通行可の時だけ基本シナリオと同等あるいはそれ以上の避難時間を要している。図 20、図 22、図 24 を見ると、歩行者の大半は右側の改札を通り、最も近い 2 番出口へと避難していることが分かる。最も近い出入り口のため時間を費やさず避難できそうだが、2 番出口が残っている場合だけが避難に多くの時間を費やしている。

避難の様子を確認したところ、2 番出口は最も近い位置にあるために歩行者がまとまって群集となり避難していた。それにより出口付近に滞留が発生し、避難に時間を要しているものと考えられる。

一方、2 番出口が破損している場合は基本シナリオより避難時間が短くなっている。このシナリオでは、2

表 7 出口破損別避難時間と犠牲者数

破損	緊急避難型	逆戻り型	追従型	全避難	犠牲者数
1	208.56	221.38	214.06	221.38	26
2	190.4	191.8	189.95	191.8	14.0
3	205.75	215.5	205.85	215.5	18.0
1,2	192.9	191.7	191.15	192.9	29.6
1,3	203.5	219.85	206.15	219.85	32.8
2,3	189.88	185.44	186.44	189.88	21.8

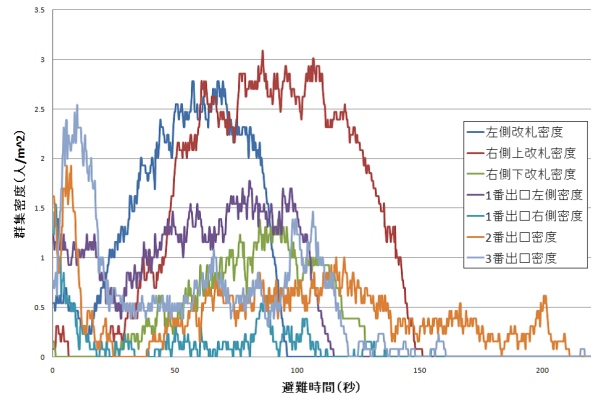


図 20 群集密度 (1 番出口破損)

番出口より遠い 3 番出口へと多くの歩行者が避難している。

避難の様子を確認したところ、歩行者の歩行速度が異なるために、3 番出口に到達するまでにばらつきが生じていた。一回に出口に到達する歩行者が少ないために、滞留が発生せずスムーズに避難することができ、結果として避難時間の短縮に繋がったと考える。

次に、火災発生時のシミュレーションについて考察する。表 8 を見ると、1 番出口付近で火災が発生した場合、避難時間には基本シナリオと大きな差はない。しかし、平均犠牲者数が 53.3 人と、大きな値となった。この値は現実に同じ火災が発生すると必ずこの程度の人が死亡するというものではなく、危険度が高いことを表すものである。

犠牲者数が多くなった要因は、1) 火災が発生していることを認識しつつも、出口がすぐ近くにあることから、その出口へと避難しようとした、2) 通路まで火災が延焼してきているが、大勢の人が一度に移動しようとした、の 2 点である。2 番出口付近で火災が発生した際には犠牲者が 5 人程度となっていることから、主な要因は 2) であると考えられる。

表 8 火災発生箇所別避難時間と犠牲者数

火災	緊急避難型	逆戻り型	追従型	全避難	犠牲者数
無し	202.00	218.70	208.10	218.70	0
1	207.44	217	199.13	217.38	53.3
2	190.30	189.90	187.10	190.30	5.0

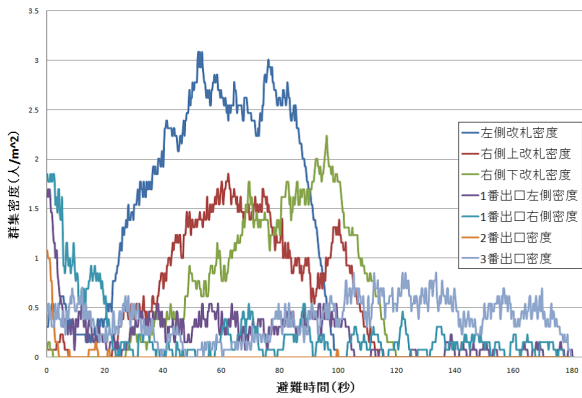


図 21 群集密度 (2 番出口破損)

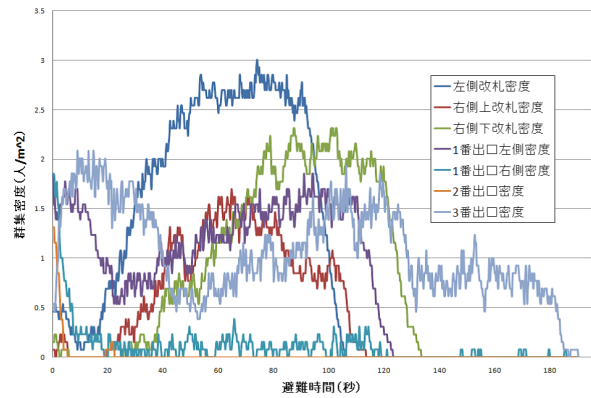


図 23 群集密度 (1,2 番出口破損)

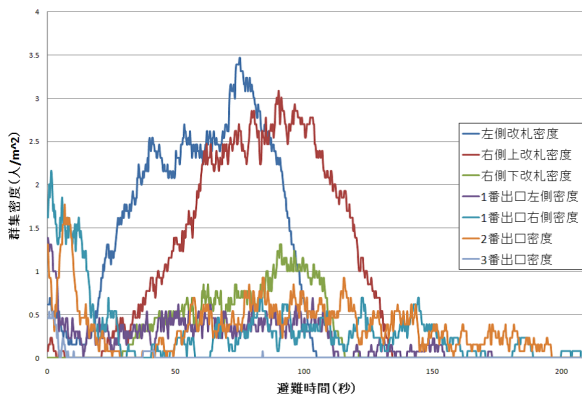


図 22 群集密度 (3 番出口破損)

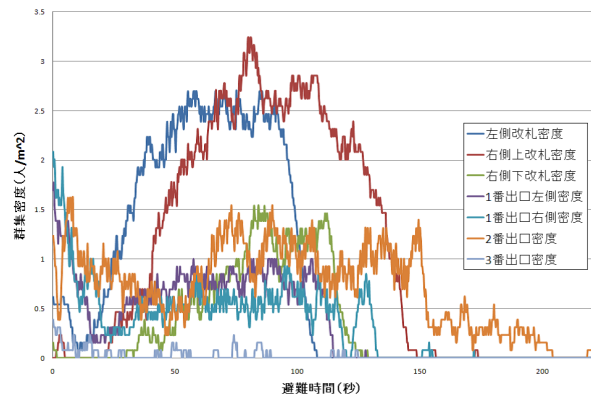


図 24 群集密度 (1,3 番出口破損)

7. 結論

対人・対障害物と場合分けした歩行ルールではなく、対障害物ルールという一般化した歩行ルールに基づき歩行するモデルを構築した。

歩行速度と群集密度、群集流動係数の比較、隊列化現象、アーチ形の滞留の発生、棒配置による退出時間短縮を確認するシミュレーション実験を行った。これらの実験により、本モデルの妥当性を確認した。

最後に、本モデルを応用した例として避難シミュレーションを行った。数種の実験から、1) 近い出口から避難することは、必ずしも最適な行動ではない、2) 的確な誘導を行うことにより、避難時間を短縮することが可能である、との結果を得た。

参考文献

[1] Toshiyuki Kaneda, Tomohiko Suzuki, "A simulation analysis for pedestrian flow management", Agent-Based Simulation Vol.1, pp220-232
 [2] Toshiyuki Kaneda, Daichi Okayama, "A Pedestrian Agent Model Using Relative Coordinate Systems", Agent-Based Simulation Vol.3, pp63-70
 [3] 鈴木智彦, 山田哲也, 三阪朋彦, 兼田敏之, "エージェントシミュレーションを用いた群集事故分析の試み", 日本

建築学会大会学術講演梗概集 pp471-472, 2003

[4] 柳澤大地, "拡張フロアフィールドモデルによるボトルネック周りの群集運動の解析", 応用力学研究所研究集会報告, 2008
 [5] 阿久澤あずみ, "駅構内における群集歩行シミュレーションモデルの研究", 日本オペレーションズ・リサーチ秋季研究発表会 pp192-193, 2005
 [6] 岡田公孝, "個人行動をベースにした歩行モデルと高密度シミュレーション", 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会 pp178-179, 2004
 [7] 浅野美帆, "先読み行動を考慮した歩行者交通流シミュレーション", 生産研究 59 巻 3 号 pp38-41, 2007
 [8] 広瀬弘忠, "人はなぜ逃げおくれるのか-災害の心理学", 集英社, 2004
 [9] 国島正彦, 浅見絵里佳, "大邱の地下鉄火災", 失敗知識データベース失敗百選
 [10] 梶秀樹, 堀越功, "都市防災学", 学芸出版社
 [11] 寺野隆雄, "エージェント・ベース・モデリングへの招待", 日本オペレーションズ・リサーチ 2004 年 3 月号 pp131-135, 2004
 [12] B.Maury, J.Venel, "Handling of contacts in crowd motion simulations"

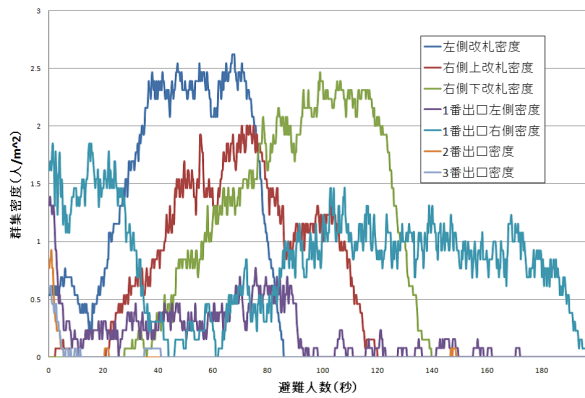


図 25 群集密度 (2,3 番出口破損)

- [13] A.Kirchner, A.Schadshneider, “Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics”
- [14] 岡崎甚幸, 松下聡 “避難計算のための群集歩行シミュレーションモデルの研究とそれによる避難安全性の評価”, 日本建築学会計画系論文報告集 第 436 号 pp38-41, 1992
- [15] 森下信, 中塚直希, “セルオートマトンを用いた避難シミュレーション”
- [16] 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”, 社会技術研究論文集 pp138-145, 2005
- [17] 小野木基裕, 大鏑史男, “セルオートマトン法を用いた緊急避難時における群衆流動シミュレーション”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2006 年春季研究発表会
- [18] 清野純史, 三浦房紀, 八木宏晃, “個別要素法を用いた被災時の避難行動シミュレーション”, 土木学会論文集 No.591, 1998,4 pp365-378
- [19] 宇田川金幸, 増田浩通, 新井健, “地下鉄駅構内における避難シミュレーションモデルの構築”
- [20] 海老原学, “避難誘導戦略が避難安全性確保に与える影響”, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2003
- [21] 大鏑史男, 稗島隆大, 大田直樹 “セルオートマトン法による避難時歩行者流動のシミュレーション”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会, 2007
- [22] 近田康夫, 廣瀬智士, 城戸隆良, “CA を用いた歩行シミュレーションモデルの構築”, 土木情報システム論文集 Vol.9, 2000 p19-30
- [23] 岡田公孝, “歩行速度・密度・交通流量間関係式の評価”, 東京工業大学学士論文, 2001
- [24] 何雁峰, 兼田敏之, “目的移動機能を有する自律的歩行者エージェントによる群集シミュレーションの研究”
- [25] 森尻宏, “煙と避難”, 予防時報 212 2003
- [26] 岡田光正, “建築人間工学 空間デザインの原点”, 理工学社
- [27] 西成活裕, “渋滞学”, 新潮社

- [28] 明石市民夏まつり事故調査委員会, “第 32 回明石市民夏まつりにおける花火大会事故調査報告書”
- [29] 青木俊幸, 石突光隆, 山本昌和, “駅における人の流れ”, RRR pp30-33, 2008
- [30] 青木俊幸, 大戸広道, “旅客流動シミュレーションを用いた駅計画”, 鉄道技術連合シンポジウム pp469-472, 1995
- [31] 埴光雄, 加藤正二, 青木俊幸, “山手線設備の現状と旅客流動評価”, 鉄道技術連合シンポジウム pp473-474, 1995