

ソーシャルフォースモデルを用いた
教室内における避難行動シミュレーション

指導教員：森口 聡子 准教授

学修番号：14159375

氏 名：安藤 歩

枚 数：20 枚

目次

第1章	はじめに	3
第2章	首都直下型地震の被害について	4
第3章	関連研究	5
3.1	マルチエージェントモデルを用いた研究	5
3.2	ソーシャルフォースモデルを用いた研究	5
第4章	ソーシャルフォースモデル	6
4.1	ソーシャルフォースモデルとは	6
4.2	本研究におけるシミュレーター	7
4.2.1	使用したシミュレーターについて	7
4.2.1	シミュレーターにおけるソーシャルフォースモデル環境	8
第5章	避難行動のシミュレーション	9
5.1	シミュレーション空間の設定	9
5.2	エージェントの設定	10
5.3	シミュレーションの実行	10
5.4	改善策の提案	12
5.4.1	出口を拡大した場合	13
5.4.2	出口を増やした場合	15
5.4.3	通路を広げた場合	16
第6章	考察と今後の課題	18
	謝辞	19
	参考文献	20

第1章 はじめに

日本は地震大国である。2011年の東日本大震災や2016年の熊本地震といった地震の被害が記憶に新しく、首都直下型地震が近い将来起こることが予見されているように、私たちはいつ震災に巻き込まれてもおかしくない状況で日々生活している。そしてその中で、一人一人の防災意識は以前にも増して高まっている。

一方で、私たちが、地震が起こる場所として防災を意識しているのは主に自宅などであり、学校や職場といった普段から利用する施設で地震が起きた場合についてはまだ意識が向いていないのが現状である。特に大学では何百人という人数の学生が一つの教室で授業を受けている。また教室の構造もより多くの学生が授業を受けられるように設計されているため、授業中は特に人口密度が高くなってしまふ。その状況で地震が起き、避難が必要な状況になれば、狭い教室内で大勢の学生が出口に押し寄せることになり、非常に危険である。

しかし、避難時の学生の挙動や、混雑する場所を事前に明らかにすることで、効率の良い避難を行うことが可能となり、人的被害を最小限に抑えることができる。そこで本研究は、大学内の一つの教室において、首都直下型地震など避難の必要がある地震が発生した場合の避難行動をソーシャルフォースモデルによってシミュレーションしたものである。

シミュレーターは **S4 Simulation System** を用い、避難行動に伴って教室内で発生する混雑の原因や教室における配置の問題点について考察し、改善策の提案、その効果の実証を行った。

第2章 首都直下型地震の被害について

首都直下型地震とは、東京湾北部を震源として発生すると推測されているマグニチュード7クラスの直下型地震であり、今後30年間でマグニチュード7クラスの地震が起きる確率は70%程度とされている[1]。表1は冬の12時に首都直下型地震が発生した場合の被害予測である。

表1 首都直下型地震の被害想定(原因別死者数・負傷者数) [6]

死者(人)						
原因別	ゆれ 建物被害	急傾 斜地 崩壊	ブロック 堀等	屋外 落下物	火災被害	合計
東京都	4,972	79	103	4	1,138	6,296
区部	4,841	58	93	4	1,090	6,086
多摩	131	21	10	0	49	210
負傷者(人)						
原因別	ゆれ 建物被害	急傾 斜地 崩壊	ブロック 堀等	屋外 落下物	火災被害	合計
東京都	126,530	99	3,543	301	4,381	134,854
うち重傷者	15,579	49	1,382	32	1,225	18,267
区部	120,472	73	3,210	296	4,305	128,356
うち重傷者	15,252	36	1,252	31	1,203	17,775
多摩	6,058	26	333	5	76	6,498
うち重傷者	327	13	130	0	21	492

表1より、死者、負傷者ともに合計に占める「ゆれ、建物被害」の割合が非常に大きいことがわかる。これは建物からの避難が遅れることでより多くの人被害に遭うことを示しており、避難時間の短縮のために避難行動のシミュレーションを行うこと、空間の現状を可能な限り維持しつつ改善案を提案し、実証することは、非常に意義のあることであるといえる。

第3章 関連研究

3.1 マルチエージェントモデルを用いた研究

押野による「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」[5]は災害時の駅構内における避難行動についての研究である。マルチエージェントモデルを用いて災害時の人間心理を考慮した避難行動をモデル化し、避難者の人数、火の出火位置、避難者の視野について設定を変え、異なる条件下においてシミュレーションを実行している。実行結果から避難に遅れをもたらす要因は、人数の多さ、出火地点など発生状況の悪さ、避難者の認知の範囲の狭さなどであることが導き出されている。

この研究は、改善点として避難者エージェントの数や避難方向の指示を設置することで避難者エージェントが適切な出口をより早く選択することに注目している。しかし、シミュレーションの空間内に元から存在する障害物の影響を考慮していないことから、机など障害物が多く、狭い教室内での避難行動のシミュレーションへの導入は難しいと考えられる。

3.2 ソーシャルフォースモデルを用いた研究

磯崎・中辻による「Social force model を基にした歩行者の避難シミュレーションモデルに関する研究」[2]は地下歩行空間において災害が発生した場合の歩行者の避難挙動をシミュレーションによって再現し、また実際に避難実験を行うことで得られたデータと実験データに合わせたソーシャルフォースモデル、マルチエージェントモデルを比較している。その結果ソーシャルフォースモデルの方が実験データの再現性が高く、局所的かつ歩行者密集という状況下において高精度なシミュレーションを行えることが導き出されている。

本研究で扱う空間も局所的であり、かつ歩行者同士の密度が高く、多くの障害物から影響を受ける。さらに実際のシミュレーション時間が比較的短いことから、同状況下において高精度なシミュレーションを行うことが可能な、ソーシャルフォースモデルによるシミュレーションが有効であると考えられる。

第4章 ソーシャルフォースモデル

4.1 ソーシャルフォースモデルとは

エージェントの歩行速度算出のために、移動目標、他のエージェント、壁などの障害物から受ける力の相互作用で運動方程式を解く力学モデルである(図1参照)。

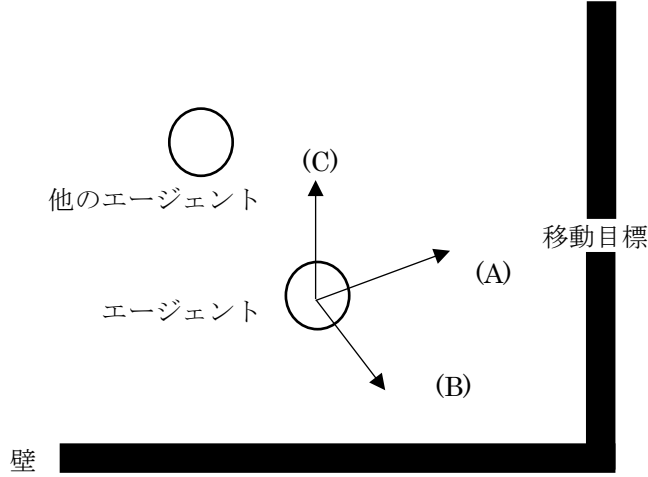


図1 ソーシャルフォースモデルのイメージ [7]

エージェントに作用する力は、(A)移動目標に近づく力、(B)他のエージェントから受ける力、(C)壁などの障害物から受ける力の3種類があり、式(1)のように表される。

各エージェントは、ステップタイムごとに上記の力を計算して、最大歩行速度を超えないように歩行速度を更新する。(A)移動目標に近づく力とは、エージェント*i*が、現在の歩行速度(v_i)から移動目標のある方向(e_i^0)に目標速度(v_i^0)で移動しようとするときの力である。この時の推進力を表すパラメータが(τ_i)で表されている。

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t)e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} f_{ij} + \sum_w f_{iw} \quad (1)$$

(B)他のエージェントから受ける力(f_{ij})を式(2)、そのイメージを図2右に示す。エージェント*i*は、エージェント*j*のいる方向とは逆の方向(n_{ij})に距離($r_{ij} - d_{ij}$)を指数とした大きさの力を受ける。 d_{ij} は、エージェント*i*と*j*の中心間距離を表し、 r_{ij} はエージェント*i*の半径(r_i)と、エージェント*j*の半径(r_j)の和とする。また A_i 、 B_i 、 k 、 κ はそれぞれパラメータを表す。 g はエージェント同士が接触したとき($r_{ij} - d_{ij} \geq 0$)、値が1.0となり、それ以外するとき($r_{ij} - d_{ij} < 0$)値が0となる変数と定義している。これにより、エージェント同士が接触した場合は、反発力がさらに加わるとともに、接線方向(t_{ij})に摩擦力も働く。

$$f_{ij} = \{A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] + kg(r_{ij} - d_{ij})\}n_{ij} + \kappa g(r_{ij} - d_{ij})\Delta v_{ij}^t t_{ij} \quad (2)$$

(C) エージェントが壁などの障害物から受ける力(f_{iW})を式(3)、そのイメージを図2左に示す。エージェント*i*が壁*W*から受ける力は、衝突面の法線方向(n_{iW})に距離($r_i - d_{iW}$)を指数とした大きさの力を受ける。また A_i 、 B_i 、 k 、 κ はそれぞれパラメータを表す。 g はエージェントと障害物が接触したとき($r_i - d_{iW} \geq 0$)、値が1.0となり、それ以外の場合($r_i - d_{iW} < 0$)値が0となる変数と定義している。これにより、障害物と接触した場合は、反発力がさらに加わるとともに、衝突面の接線方向(t_{iW})に摩擦力も働く。表2に各パラメータについて示す。

$$f_{iW} = \{A_i \exp[(r_i - d_{iW})/B_i] + kg(r_i - d_{iW})\}n_{iW} - \kappa g(r_i - d_{iW})(v_i \cdot t_{iW})t_{iW} \quad (3)$$

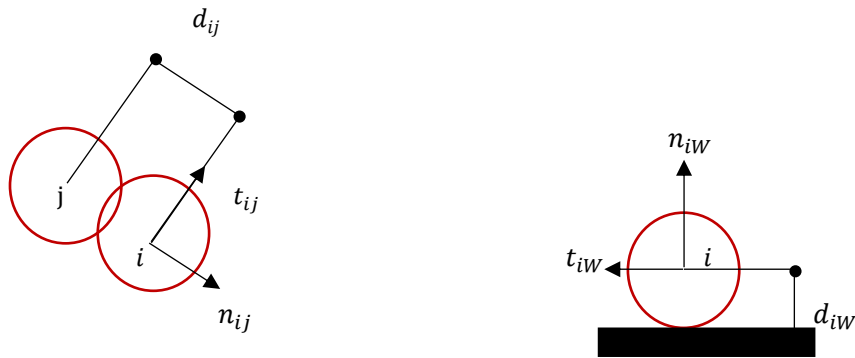


図2 ソーシャルフォースモデルのイメージ [7]

表2 各パラメータについて [7]

τ	推進力係数	κ	衝突時の摩擦係数
A_i	インタラクション作用	v_i^0	目標速度
B_i	反発作用	m_i	エージェントの質量
k	衝突時の反発力係数	r_i	エージェントの半径

4.2 本研究におけるシミュレーター

4.2.1 使用したシミュレーターについて

本研究では S4 Simulation System(エスクワトロ・シミュレーション・システム)というシミュレーターを使用した。本シミュレーターは(株)NTT データ数理システムが開発した汎用的な離散イベントシミュレーションシステムであり、工場などの生産システム、サプライチェーンなどの流通システム、銀行の窓口や ATM、通信システム、交通システム、コールセンターなど、確率的な振る舞いをするものを対象とするような様々な領域のシミュレーションを行う事が出来る。シミュレーションに必要な基本的な部品が全て用意されており、GUI 操作でそれらを組み合わせることで、複雑なモデルを作成、編集することが可能となっている。S4 Simulation System は、簡単にシミュレーションモデルの作成と分析が出来る操作性と、自由度を合わせ持つシミュレーションシステムである[4]。

4.2.1 シミュレーターにおけるソーシャルフォースモデル環境

S4 Simulation System において、質量 m_i を持つ歩行者は下記の運動方程式に従う。

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = m_i \frac{v_{0i}\vec{e}_i(t) - \vec{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} \vec{f}_{ij} + \sum_w \vec{f}_{iw}$$

ここで、 \vec{e}_i は目的地に向かうベクトル、 v_i^0 は歩行者の最適な速度、 $\vec{v}_i(t)$ は現在の速度であり、 τ_i は加速時間である。 $R(\mathbf{c}, \mathbf{p})$ は、平均 \mathbf{p} 、分散共分散共分散行列が

$$\begin{pmatrix} \sigma^2 & 0 \\ 0 & \sigma^2 \end{pmatrix}, \sigma = c\|\mathbf{p}\|$$

の多変量正規分布に従う乱数である。また、 f_{ij} は歩行者 j から歩行者 i に与える外力であり、以下のよう表される。

$$\vec{f}_{ij} = \left\{ A_{iexp} \left(\frac{r_i + r_j - d_{ij}}{B_i} + kg(r_i + r_j - d_{ij}) \right) \vec{n}_{ij} \right\} + \kappa g(r_i + r_j - d_{ij}) \{ (\vec{v}_j - \vec{v}_i) \vec{t}_{ij} \} \vec{t}_{ij}$$

r_i, r_j は歩行者の半径で、 d_{ij} は歩行者 i と j の距離で、 k は弾性係数で、 κ は散逸係数で、 \vec{n}_{ij} は歩行者 j から i に向かう単位ベクトルであり、 \vec{t}_{ij} は $(-n_{ij}^2, -n_{ij}^1)$ である。また、 g は以下とする。

$$g(x) = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

\vec{f}_{iw} は歩行者 i が障害物 W から受ける外力であり、以下のよう表される。

$$\vec{f}_{iw} = \left\{ A_{iexp} \left(\frac{r_i - d_{iw}}{B_i} + kg(r_i - d_{iw}) \right) \vec{n}_{iw} \right\} + \kappa g(r_i - d_{iw}) \{ \vec{v}_i \cdot \vec{t}_{iw} \} \vec{t}_{iw}$$

ここで、 r_i は壁までの距離、 \vec{n}_{iw} は壁への法線方向の単位ベクトルであり、 \vec{t}_{iw} は $(-n_{iw}^2, -n_{iw}^1)$ である。 A_i は歩行者 i の相互作用の強さ、 B_i は歩行者 i の相互作用の範囲である。

また、S4 Simulation System において、シミュレーション空間は2次元の平面であり、左下の座標 (x_0, y_0) と、右上の座標 (x_1, y_1) で定められる。その中に任意の障害物を配置させ、障害物は任意の多角形として指定する事が出来る。ソーシャルフォースモデルでは、各エージェントが(可視な)単一の目的地を持つような場合に、エージェント間と障害物間との相互干渉をモデリングする。つまりソーシャルフォースモデルだけでは、目的地が可視でない場合に、エージェントがスタックしてしまうような現象が容易に発生する。そこで、本モデルでは、ソーシャルフォースモデルとは別に、複数の経路ポイントを経由した歩行者の行動もサポートするように設計されている。そしてエージェントが通過する可能性のある地点を経路地点と呼び、経路地点は面積を持つ円である。互いに経路地点の中心を視認出来る経路地点の組はエッジで結ばれる。そのようにして作成された無向(もしくは有向)グラフを経路グラフと呼び、ソーシャルフォースモデルにおいては、障害物を越えて目的地に到達する事ができない、視認できない目的地が設定された場合は、経路グラフを元に途中の経路が選択される[3]。

第5章 避難行動のシミュレーション

5.1 シミュレーション空間の設定

本研究では、シミュレーション空間として首都大学東京において収容人数が多く面積が大きい6号館110教室(図3参照)を設定し、教室の見取り図を基に図4のように再現した。



図3 6号館110教室

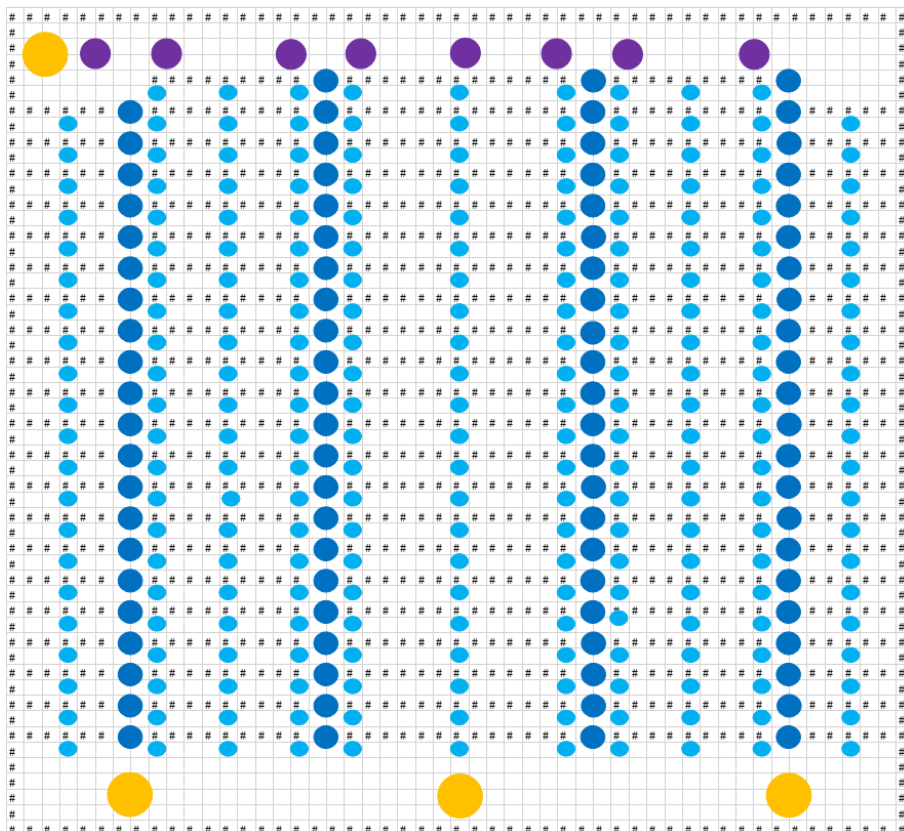


図4 教室のマップ

#は壁や机などの障害物を示している。紫、青、水色の円が経路地点を、黄色の円が出口を示している。空間全体の大きさは縦が約21m、横が約20mである。また、出口の直径は0.8mであり、経路地点の直径は、紫色が1.2m、青色が0.7m、水色が0.4mである。図5はこれらの条件を基に設定したモデル空間である。

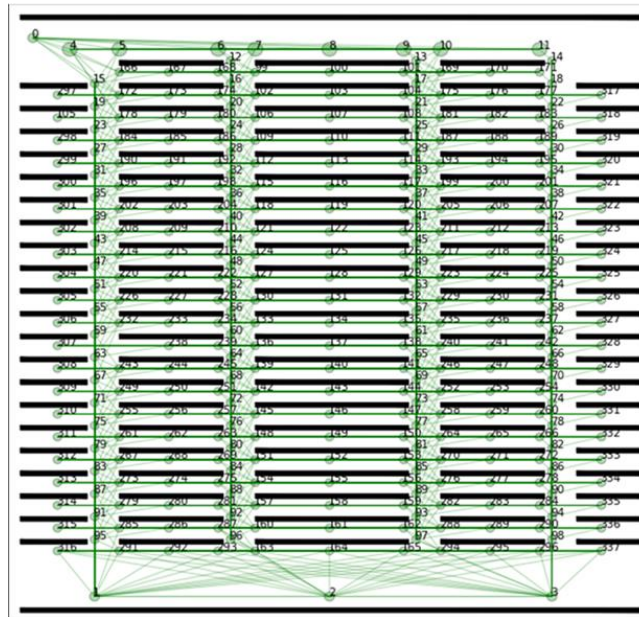


図 5 シミュレーション時のマップ

5.2 エージェントの設定

本研究では授業中に地震が発生したとし、その際の避難行動についてのシミュレーションを行う。教室内の 500 席が全て埋まっており、かつ学生全員が出口の位置等、教室内の配置を把握している。そのためシミュレーションの開始時点ではエージェントはそれぞれ所定の位置に配置され、自分の位置する地点から最も近い出口に向かう。また本研究におけるエージェントは大学生を想定しているため、一般的なデータとして、最適速度は 0.6m/s、最高速度は 1.5m/s、エージェントの直径は 0.4m、体重は 50kg と設定した。

5.3 シミュレーションの実行

上記の条件下でのモデルを基準モデルとし、基準モデルにおけるエージェントの避難行動シミュレーションの実行結果を開始時点から経過時間ごとに以下の図 6 から図 10 に示す。またグラフは経過時間と出口に到達し脱出したエージェントの数との関係を表している。

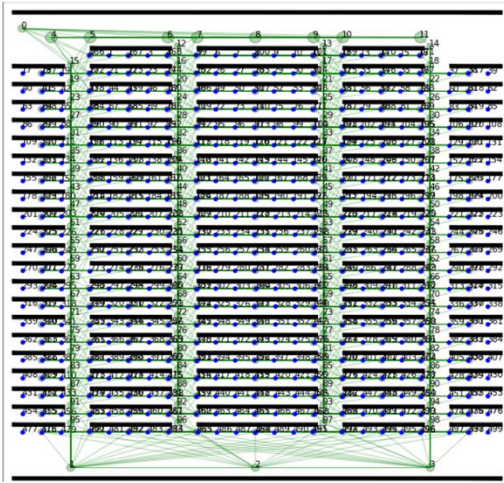


图 6 開始時点

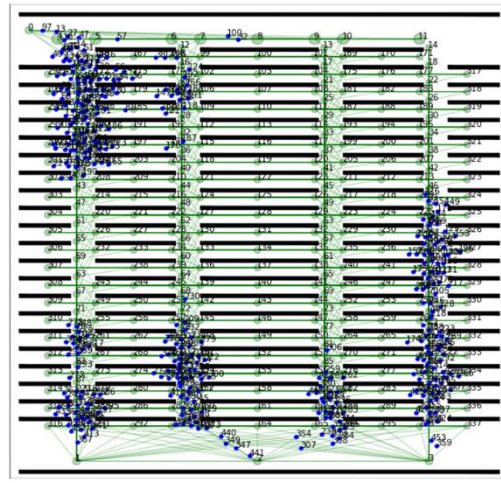


图 7 60 秒時点

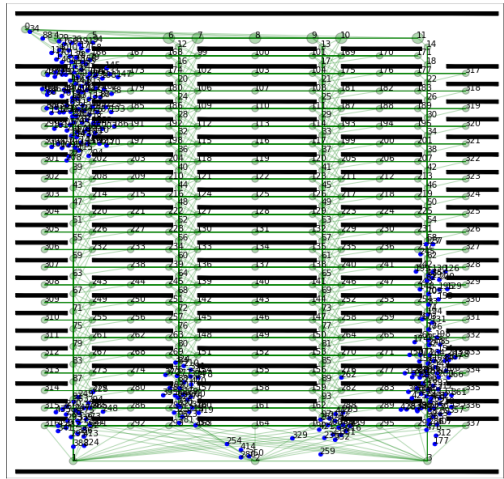


图 8 120 秒時点

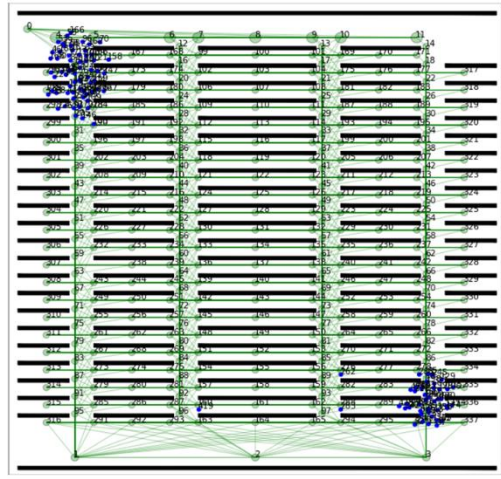


图 9 240 秒時点

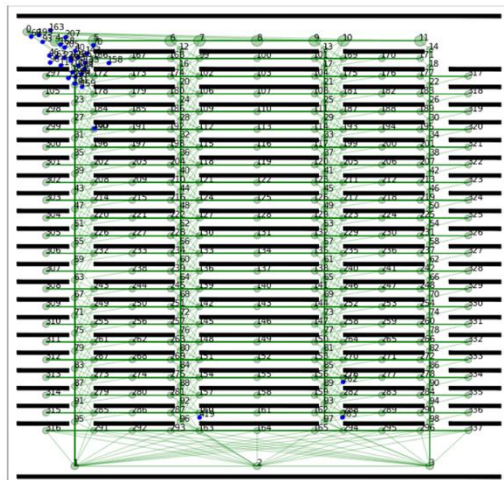


图 10 360 秒時点

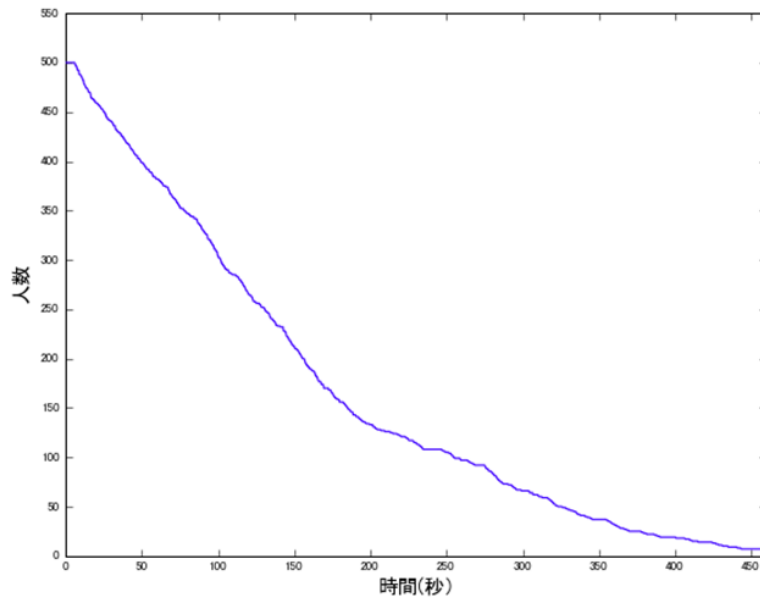


図 11 基準モデルにおける脱出人数と時間の関係

避難完了までに約 450 秒(7 分半)を要しており、一刻も早く教室外に出たい状況においてこの時間は非常に長いといえる。

避難に時間がかかる要因として、教室前方は左側にしか出口がないということが挙げられる。図 8 から分かるように、左前方の出口に人が集まり滞留が発生している。そして図 7 において、右から一列目、二列目の右寄りにいる人は前方に出口がなく後方に進まざるを得ないので右後方においても滞留が発生している。またいずれの通路においても特に後方出口に近づくにつれて滞留が発生しており、これは通路の幅が狭いことが原因だと考えられる。加えて図 7、8 で見られる出口付近の滞留の発生については、出口自体の大きさが小さいことも要因として挙げられる。

5.4 改善策の提案

基準モデルのシミュレーションの実行結果より避難完了までの時間を短縮する改善策として、出口を拡大、出口の増設、通路の拡張の三つが挙げられると考え、実際にシミュレーションを実行した。

5.4.1 出口を拡大した場合

出口の直径を 0.8m から 1.6m に拡大しシミュレーションを行った。この条件下でのモデル空間が図 12 である。実行結果を経過時間ごとに以下の図 13 から図 17 に示す。またグラフは経過時間と出口に到達し脱出したエージェントの数との関係を表している。

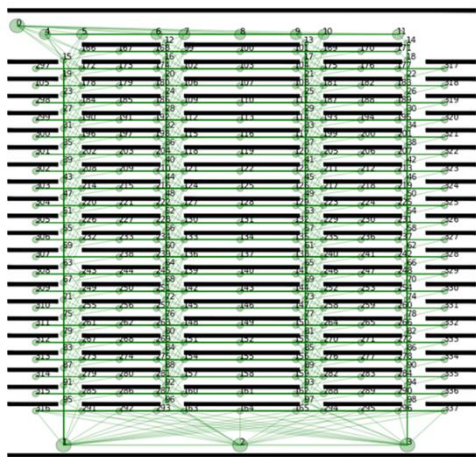


図 12 教室のマップ(出口拡大)

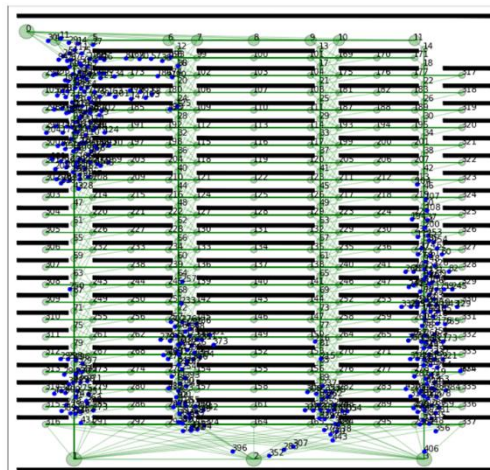


図 13 60 秒時点

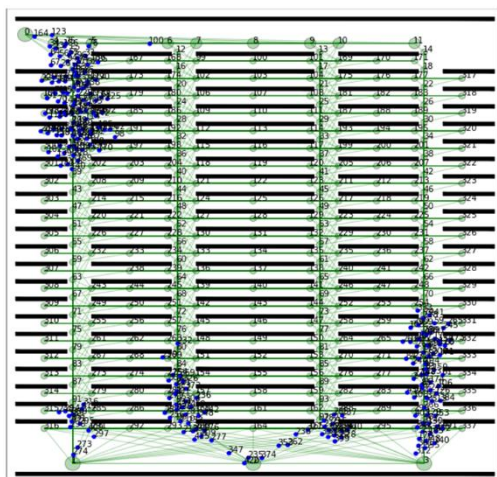


図 14 120 秒時点

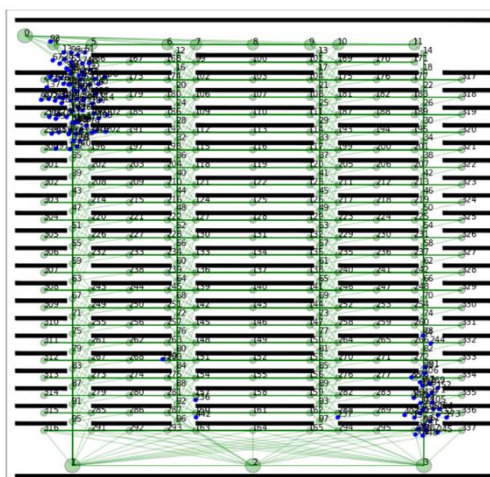


図 15 180 秒時点

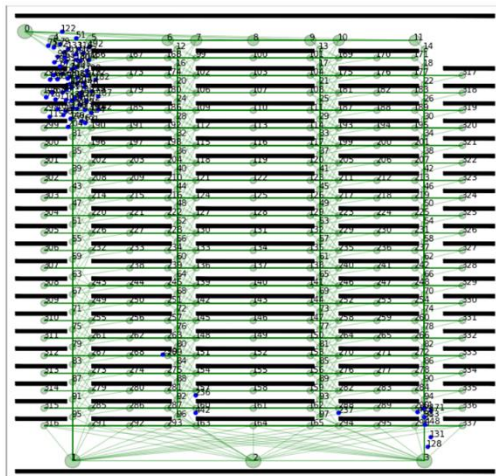


図 16 240 秒時点

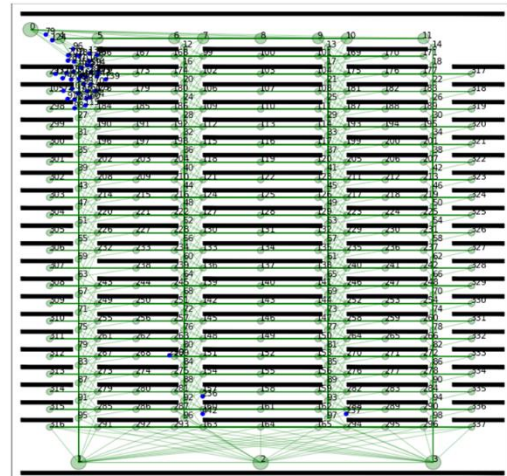


図 17 300 秒時点

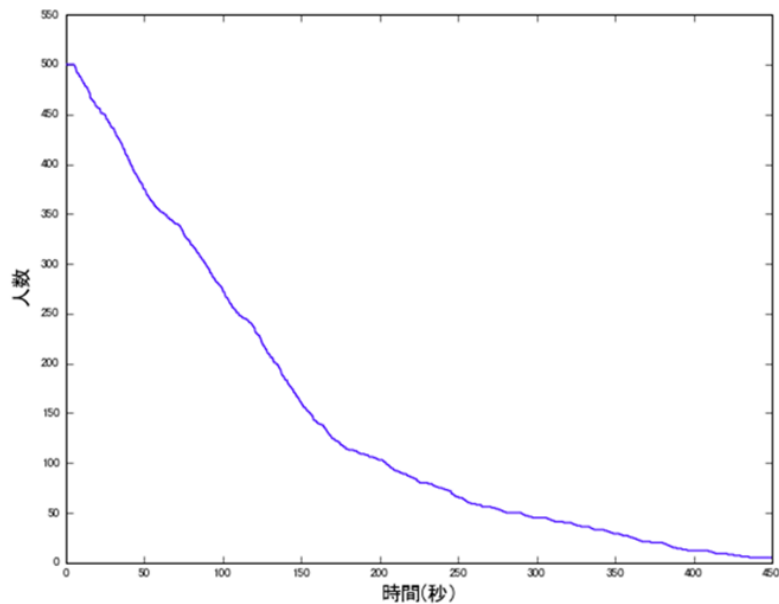


図 18 出口を拡大したモデルにおける脱出人数と時間の関係

避難完了まで約 440 秒ほどであり、ほとんど短縮されていないことがわかる。図 14 と基準モデルの図 8 を比較すると、出口に向かうエージェントの数が増加している。これは出口を拡大したことにより、一度に出口を通ることができるエージェントの数が増えたことによる効果だと考えられる。しかし、個々のエージェントが改善の効果を得ることができるのは、出口を通る時点のみである。このように非常に短い時間しかエージェントの動きに影響を与えられないことから、出口の拡大は避難の時間を短縮する直接的な要因ではないといえる。

5.4.2 出口を増やした場合

出口の数を4個から5個に増やしてシミュレーションを行った。この条件下でのモデル空間が図19である。実行結果を経過時間ごとに以下の図20から図22に示す。またグラフは経過時間と出口に到達し脱出したエージェントの数との関係を表している。

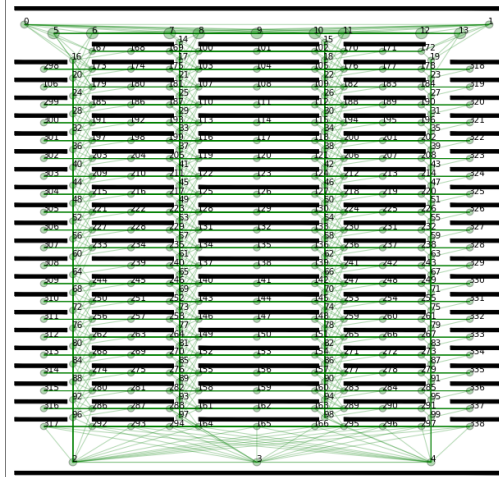


図19 出口を増やした教室のマップ

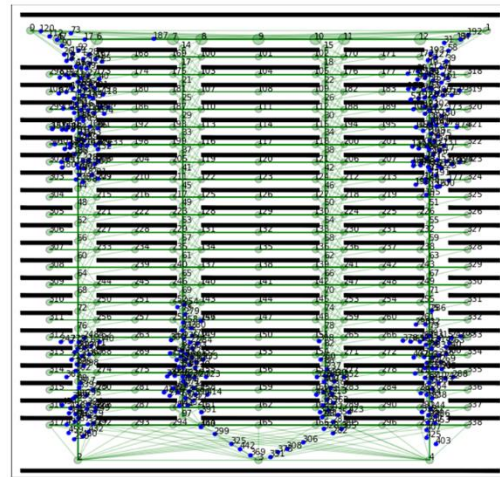


図20 60秒時点

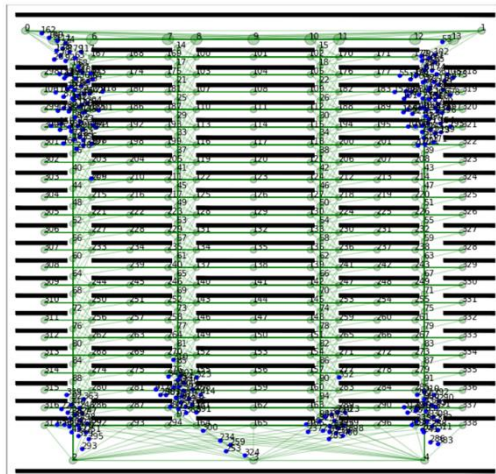


図21 120秒時点

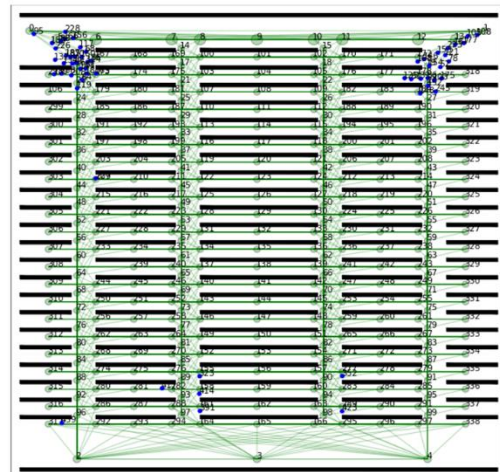


図22 240秒時点

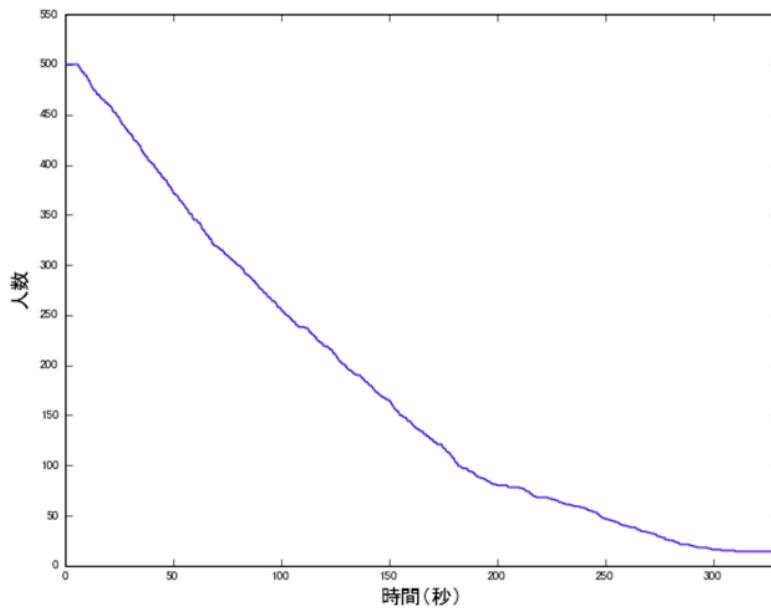


図 23 出口を増加したモデルにおける脱出人数と時間の関係

避難完了まで約 310 秒であり、140 秒短縮することができている。240 秒経過時には避難がほぼ終了しており、2 分以上避難時間を短縮している。図 20 と基準モデルの図 7 を比較したとき、教室の右前方に新しく出口を設置したことによりエージェントが分散され、基準モデルの右端の通路で見られた滞留が大きく改善されていることが確認できる。このことから、出口を増設した場合には、多くのエージェントが同時に改善の効果を得ることができたため、避難時間を大きく短縮することができたと考えられる。

5.4.3 通路を広げた場合

通路の直径(幅)を 0.7m から 1.2m に拡大してシミュレーションを行った。この条件下でのモデル空間が図 24 である。実行結果を経過時間ごとに以下の図 25 から図 27 に示す。またグラフは経過時間と出口に到達し脱出したエージェントの数との関係を表している。

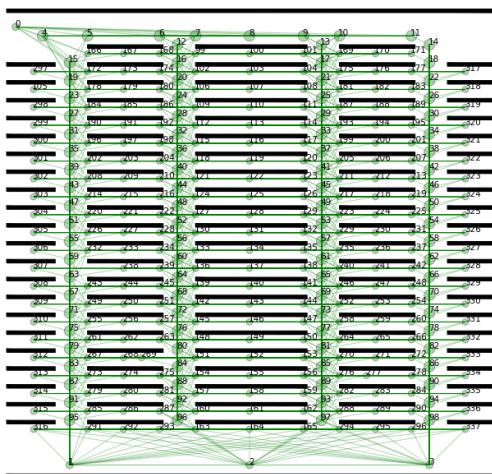


図 24 通路を拡張した教室のマップ

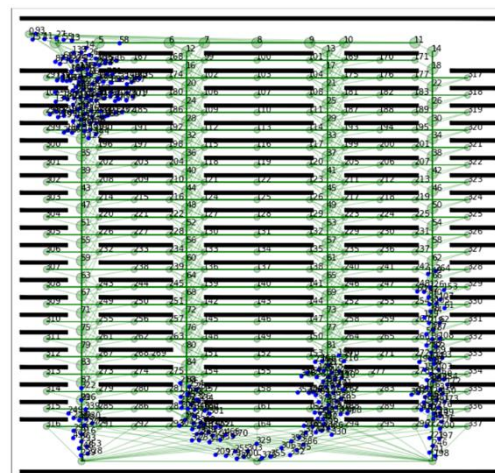


図 25 60 秒時点

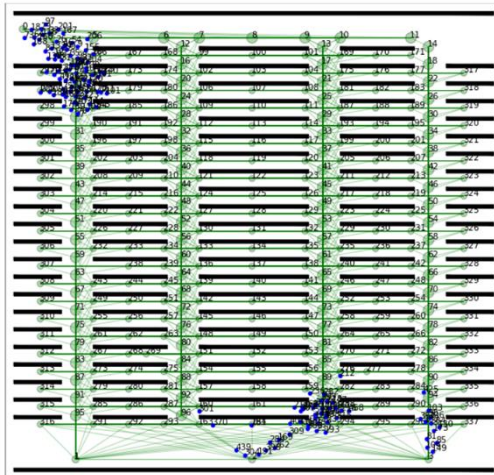


図 26 120 秒時点

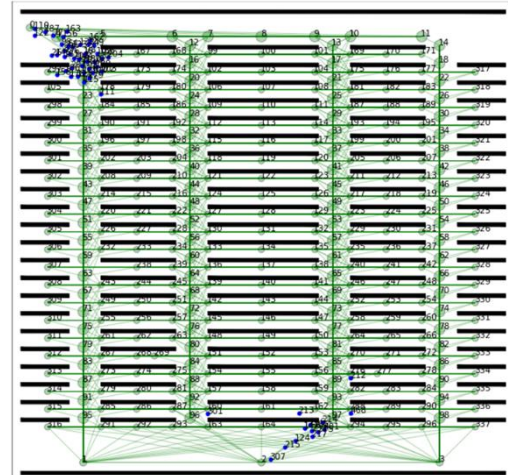


図 27 180 秒時点

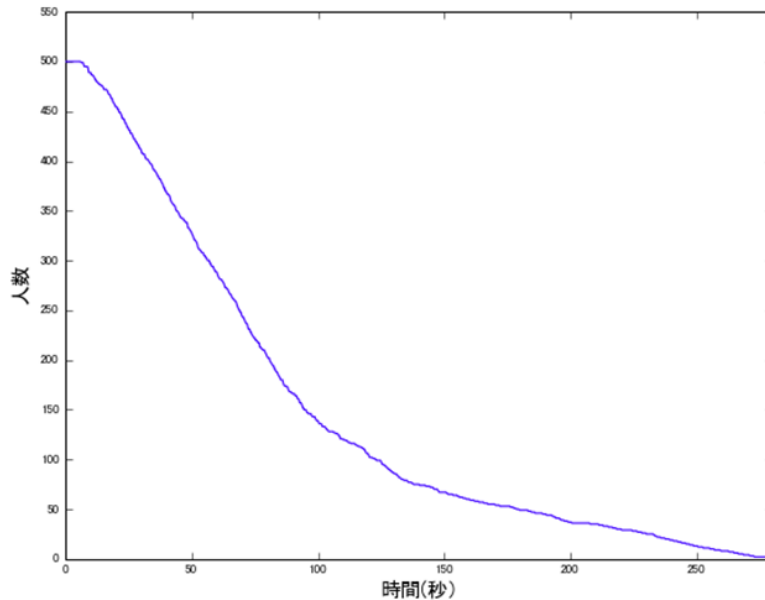


図 28 通路を拡張したモデルにおける脱出人数と時間の関係

避難完了まで約 280 秒であり、170 秒短縮することができている。3 分弱の短縮を達成しており今回のシミュレーションの中では最も避難時間が短かった。エージェントの動きは基準モデルと同様だが、通路が広がったことでより早く出口付近に到達することが可能になり、避難時間の短縮につながったといえる。エージェントが通過する時間が最も長い通路を広げることですべてのエージェントが同時に、長い時間改善の効果を得ることができる。そのため、通路の拡張は避難時間の短縮に非常に大きな効果があるといえる。

しかし本モデルはエージェントの数を揃えるために広げた分の通路を新たにシミュレーション環境の面積として加えているので、他のモデルと比べてシミュレーション環境が広がっており、単純な比較は難しい。

第6章 考察と今後の課題

5.3節、5.4節の実行結果から、シミュレーション環境を改善することによって避難時間を短縮するためには、より多くのエージェントに、同時に、長い時間影響を与えることが重要であると分かった。本シミュレーションにおいては、同時に影響を与えるエージェントの数が少なく、影響を与える時間が短い出口の拡大よりも、多くのエージェントに、同時に、長い時間影響を与えることができる通路の拡大や出口の増設の方が有効であるといえる。

また、本シミュレーションでは、全てのエージェントに長い時間影響を与えることができる、通路の拡大が最も避難にかかる時間を短縮できたが、これは既存の環境を広げるなど、規模の大きい改善を伴うものである。しかし、条件を満たせば、出口の増設といった部分的な改善でも避難時間を大きく短縮できるということが分かった。このことからソーシャルフォースモデルを用いた避難行動シミュレーションは、環境を改善する際にかかるコストの削減と、避難の効率化を同時に達成することができる有効な手段であると考えられる。

今後の課題としては、本研究で行ったのはシミュレーションのみであるため、シミュレーションと併せて実証実験等を行い、その結果と比較することや、平面のみではなく三次元についても考慮したモデルでシミュレーションを行うことで、実行結果をより現実的なものにすることなどが挙げられる。加えて本シミュレーションでは、エージェントをすべて大学生と仮定し、同じ条件を設定したが、歩く速さの違いや、出口の場所を知らないエージェントを追加するなど個々のエージェントに異なる条件を設定することで、大学の教室にとどまらず、より規模の大きい環境をモデルとしたシミュレーションを行うことができるようになると考えられる。

謝辞

本論文の執筆にあたり、森口聡子准教授から様々なご指導ご助言を頂いたこと、シミュレーターをご提供頂いたことに深く感謝の意を表します。また、シミュレーターを扱う上で、様々な技術的アドバイスをして下さった(株)NTT データ数理システムの嶋田佳明様にも深く感謝致します。最後に、支えていただいた森口ゼミの同期、後輩の皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 一般社団法人国土技術研究センター「地震の多い国、日本」(2018/1/12 アクセス)
http://www.jice.or.jp/knowledge/japan/commentary12#jump_06
- [2] 磯崎勝吾・中辻隆「Social force model を基にした歩行者の避難シミュレーションモデルに関する研究」、平成 21 年度土木学会北海道支部論文報告集第 66 号 D-3
- [3] 株式会社 NTT データ数理システム、「S4 Simulation System Version 4.3 psim 言語リファレンスマニュアル」、2017 年
- [4] 株式会社 NTT データ数理システム、「S4 Simulation System Version 4.3 操作マニュアル」、2017 年
- [5] 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」
中央大学理工学部情報工学科、卒業論文、2005 年
- [6] 東京都>首都直下地震等による東京の被害想定、概要版(2017/12/26 アクセス)
http://www.bousai.metro.tokyo.jp/res/projects/default_project/page/001/000/401/assumption_h24outline.pdf#search=%27%E9%A6%96%E9%83%BD%E7%9B%B4%E4%B8%8B%E5%9E%8B%E5%9C%B0%E9%9C%87+%E8%A2%AB%E5%AE%B3%E6%83%B3%E5%AE%9A%27
- [7] 安福健祐「避難行動フレームワークを用いた群集歩行モデルの比較分析と避難安全検証への適用性」、日本建築学会計画系論文集 第 75 巻第 655 号、2010 年、2081-2088 ページ