

ポテンシャルモデルに基づく大学講義棟内における 学生の移動シミュレーション

松崎 頼人^{1,a)} 前田 健司² 花田 良子² 村中 徳明²

概要：平日の大学講義棟内には多数の学生が存在し、休憩時間中に教室間を移動する際、あるいは火事や地震などの災害が発生した際には、学生が群集として一度に移動するため、いくつかの場所で混雑が発生する。このような混雑の発生箇所では、一部の学生が転倒したり、災害時にパニックに陥ったりすることで、群集事故につながる危険性がある。群集事故の危険性を低減するためには、過密状態を緩和する措置についての議論が必要である。本研究では、マルチエージェントシミュレーションにおけるポテンシャルモデルを用いて、学生の移動をモデル化し、関西大学の理工系講義棟を対象として混雑が発生しやすい箇所を特定する。また、混雑度合の時間的な推移を検証することを目的とする。

1. はじめに

人々が合流・対流する通行量の多い場所では、各個人の特定の目的や指向性をもって移動するため、集団による混雑が発生する。このような状況では、周囲の人々との距離が切迫し、狭い範囲に多くの人々が密集して存在するため、各人が自由に移動できる範囲が制限される。あるいは、移動の妨げになるような柱や障壁などの障害物が存在する場合や、多方向からの群集同士の対流によって群集間の接触面に強い力が集まる場合には、事故が発生する可能性が高い。群集によって発生する事故のことを群集事故と呼び、約200年前に江戸の永代橋の崩落事故をはじめ、近年では明石歩道橋事故などが発生し、多くの死傷者を出している。

群集事故の発生を低減させるためには、各々の事故要因や個人および群集での行動の特徴などを分析し、理解することが重要となる。群集行動の分析において、実測実験による再現では被験者の安全性の面での問題があり、一般的にマルチエージェントシミュレーションが用いられる。マルチエージェントシミュレーションでは、群集内の個々のエージェントを適切にモデル化することで、現実空間における様々な環境を仮想的に表現する。これは、現実空間での実験による再現や検証が困難な場合でも短期間かつ手軽に群集の特徴を分析できることを表す。シミュレーション

のシナリオとして、火災 [1]、地震 [2]、津波 [3] などの自然災害からの避難に関する議論が多くなされている。また、避難以外では日常における購買客の移動の流れ [4] や、鉄道の駅における乗客の流動 [5] などが取り上げられている。

本稿では、講義棟内での学生の移動に焦点を当てる。大学キャンパス内において、平日の休憩時間での講義棟では、非常に多くの学生が教室間を移動しており、廊下や階段において群集が発生する。また、地震や火事などの災害によって、屋外に迅速な避難が必要な場合にも出口や階段の合流で群集が発生する。これらの状況において、群集事故を回避するためには、講義棟内で混雑する場所の評価を行い、そのリスクを分析することが不可欠である。大学講義棟内での群集混雑を考慮した教室間の移動に関する議論には、前川らによる時間割および教室配置の最適化のための教室間移動の混雑低減を図る研究 [6] がある。また、災害時における大学講義棟の避難に関する議論には、北島らによる避難誘導による避難効率の影響を図る研究 [7] がある。

本研究では、関西大学の理工学系講義棟を対象に、平日休憩時間における学生の教室間移動および災害を想定した避難訓練実施時による混雑をシミュレーションによって評価する。平日の教室間移動および災害を想定した避難訓練での避難行動の2種類のシナリオのもとで、2次元連続空間モデルによるシミュレーションを構築し、大学講義棟内の混雑について解析・検討する。本シミュレーションでは、2次元連続空間モデルの中でもエージェントを粒子に見立て、エージェントや障害物に正の電荷、目的地に負の電荷を与えてクーロンの法則に基づきエージェントが目的地を目指すポテンシャルモデルを採用する [5]。学生の移動モ

¹ 関西大学大学院
Kansai University Graduate School, Suita, Osaka 564-8680,
Japan

² 関西大学
Kansai University, Suita, Osaka 564-8680, Japan

a) k438618@kansai-u.ac.jp

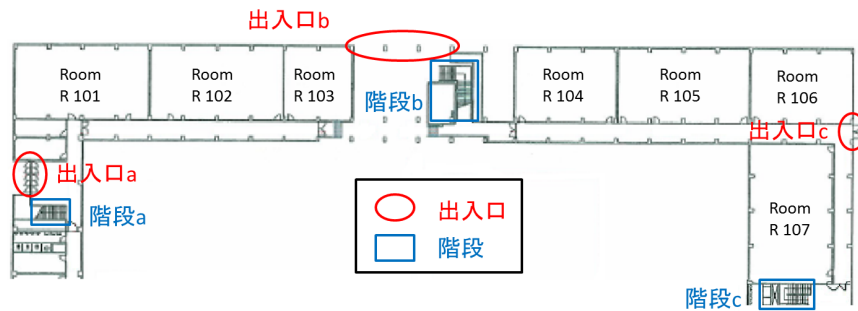


図 1 関西大学理工系講義棟 1 階の図面

Fig. 1 The structure on the first floor in the school building.

表 1 2014 年秋学期各時限ごとの講義棟（教室）内にいる学生数

Table 1 The number of students in each period.

	月	火	水	木	金	土
1 限	832	1,379	1,272	923	1,088	345
2 限	1,497	1,697	1,585	1,652	1,509	683
3 限	1,637	1,201	1,314	1,477	1,533	656
4 限	1,426	1,295	1,293	1,244	902	521
5 限	898	598	393	984	836	141
6 限	89	0	0	136	31	17

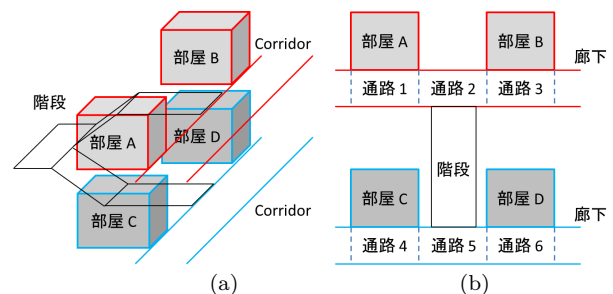


図 2 講義棟空間の平面化

Fig. 2 Example of structure of a floor in school building.

デルについて、休憩時間における講義棟内での移動則および目的地は、実際の講義の履修データをもとに設定する。

2. 大学講義棟の現状とそのモデル化

2.1 大学講義棟の現状

理工系講義棟では、理工系 3 学部を中心とした講義が行われ、講義棟には常時多くの人々が集まるため、混雑が発生しやすい状態におかれている。2014 年度の理工系 3 学部の在籍者数は 5,279 人で、1 学年あたり約 1,300 人である。

本研究では用いる学生のデータはすべて履修データをもとにしており、対象となる講義棟での履修データは全部で 33,088 件である。履修データには、学生を表す ID と履修している講義名、講義が行われる曜日と時限の情報がある。表 1 は履修データから得られた 2014 年秋学期における各時限ごとの講義棟（教室）内の学生の人数であり、1,000 人を超える時限が多く存在することがわかる。

理工系講義棟は全部で 5 階建てであり、教室の数は全部で 38 室（授業に利用されているのは 31 室）である。講義棟と外部との出入りは、1 階の中央と両端の 3 箇所から可能である。各階間を移動する階段は各階の中央および両端に存在しており、エレベータは存在しない。図 1 に講義棟 1 階の構造図を示す。基本的に他の階も 1 階と同じ構造であるが、5 階のみ構造が異なっている。

実際の教室移動および災害を想定した避難訓練の際には、特に中央の階段・出口で混雑が発生している。教室間移動では、講義棟 1 階の中央出口の目前に生協の食堂や自習が可能なスペースを備えた施設が存在しているため、休憩時間にこれらのスペースに移動して講義が始まる前に戻って

くる学生が多いことが混雑原因と考えられる。また、避難訓練では、学生がいる教室の多くが中央階段・出口を避難経路として利用することが混雑の発生原因と考えられる。

2.2 大学講義棟のモデル化

本研究では、マルチエージェントシミュレーションを用いて理工系講義棟における混雑状況を解析することを目標とする。エージェントの移動モデルには、2 次元空間上を自由に移動可能なモデルを採用する。ただし、本モデルは単純な一本道のような領域には適しているが、大学講義棟のような教室間の移動に複数の経路が存在する場合には工夫しなければならない。休憩時間の教室間移動および避難訓練時の避難行動を実現するには、個々のエージェントに対して、ある教室から別の教室までの移動経路を設定する必要がある。複数ある教室間の移動経路を簡潔に表現するため、本モデルでは建物空間をセグメントに分割し、各セグメントを節、セグメントのつながりを枝としたグラフ構造上で表す。図 2 に建物の立体構造を平面上に抽象化する流れを示しており、図 2 (a) のような立体構造を図 2 (b) のように平面上に簡略化する。このとき、廊下を教室や階段の壁の位置で区切り通路として分割することで、エージェントの移動経路を作成しやすくする。

3. 講義棟内の移動シミュレーション

本研究では、講義棟内の移動シミュレーションを行うため、講義棟内の構造モデルおよび学生の移動モデル、移動

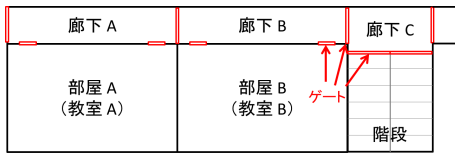


図 3 各空間を通行するためのゲートの例

Fig. 3 Example of gates.

経路の選択モデルをそれぞれ構築する。

3.1 講義棟内における構造モデルの定義

3.1.1 講義棟のパラメータ

講義棟の構造パラメータは、学生の移動に制約を与える役割を持つ。教室、講義棟出入口、通路（廊下）、階段の各空間を区画で定義し、複数の通路を組み合わせることで各階の廊下全体を表現する。空間を定義するために、以下のパラメータを与える。

- 空間を表す ID
- 空間の位置座標 $P_{space} = (x_s, y_s)$
- 空間を表す四角形のサイズ（幅，奥行き）
- 空間内のゲートの座標 $P_{gate} = (x_g, y_g)$
- ゲートのサイズ（長さ）

ここでゲートとは、図 3 のように隣接する空間を接続するための領域であり、教室におけるドアや通路における接続部分を指す。空間やゲートの位置座標は最も左上の座標を選択し、それぞれのサイズはその位置座標からの幅や奥行き、長さで表現する。

3.1.2 学生のパラメータ

学生のパラメータは、シミュレーション内でのエージェントを構成する役割を持つ。本研究では、エージェントをポテンシャルモデルによって移動則を決める。また、エージェントの進行方向や速度が限定されないように、開始地点から目的地点までの移動を微小時間ごとの速度ベクトルで決定する。本モデルでは、シミュレーション時の計算量低減のため、人の体を円形で表わした人体円を利用する。学生を表すエージェントを定義するために、以下のパラメータを与える。

- 学生を識別する ID
- 位置座標 $P = (x, y)$
- 人体幅を表す人体円の半径 R
- 速度ベクトル $V = (u, v)$
- 歩行速度 V_s
- 目的地点の ID（教室番号あるいは講義棟出入口の番号）

3.2 移動モデルによる位置座標の決定

エージェントの移動モデルにはポテンシャルモデル [5] を採用し、単位時間ごとの位置座標を速度ベクトルによって導出する。ポテンシャルモデルでは、クーロンの法則によって各エージェントへの引力や反発力を求め、速度ベク

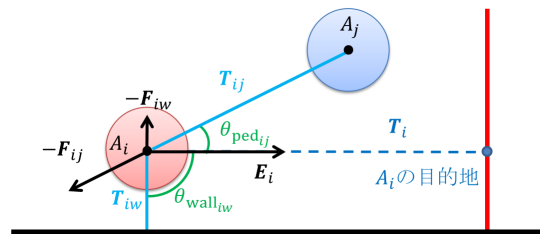


図 4 引力・反発力の決定

Fig. 4 How to determine gravitation and repulsion.

トルを導出する。

3.2.1 引力および反発力の計算

図 4 に、エージェント i における引力および反発力の例を示す。目的地への移動を表現するため、エージェントに正の電荷、目的地に負の電荷が与えられ、互いの電荷間に働く引力を E_i とする。エージェント i の現在位置から目的地の位置までの距離が最短となるベクトルを T_i 、目的地に与える電荷を Q_e とすると、引力 E_i は、

$$E_i = Q_e \cdot \frac{T_i}{|T_i|} \quad (1)$$

である。このとき、エージェントの位置にかかわらず目的地に引き寄せられる引力の大きさは一定とする。

現実世界におけるエージェント（学生）は、他のエージェントや壁などの障害物の回避を表現するため、エージェントや壁には正の電荷が与えられ、互いの電荷間には反発力が働く。エージェント i と他のエージェント j との位置ベクトルを T_{ij} 、エージェント i と壁 w との位置ベクトルを T_{iw} とすると、他のエージェントからの反発力 $F_{ped_{ij}}$ および壁からの反発力 $F_{wall_{iw}}$ は、

$$F_{ped_{ij}} = \frac{Q_{ped}}{|T_{ij}|^2} \cdot \frac{T_{ij}}{|T_{ij}|} \cdot \cos\theta_{ped_{ij}} \quad (2)$$

$$F_{wall_{iw}} = \frac{Q_{wall}}{|T_{iw}|^2} \cdot \frac{T_{iw}}{|T_{iw}|} \cdot \frac{1 + \cos\theta_{wall_{iw}}}{4} \quad (3)$$

である。 Q_{ped} 、 Q_{wall} は他のエージェントや壁の電荷の大きさ、 $\theta_{ped_{ij}}$ 、 $\theta_{wall_{iw}}$ はエージェント i にかかる引力 E_i と各位置ベクトルのなす角である。式 (2)、式 (3) に余弦を乗ずることで、障害物に向かって進む場合に反発力が大きく、平行移動あるいは遠ざかる場合に反発力が小さくなるようにする。式 (2)、式 (3) から、対象となる他のエージェント数 n_{ped} と壁の数 n_{wall} を用いて、エージェント i にかかる全体の反発力 F_i は、式 (4) のように求められる。

$$F_i = \sum_{j=1}^{n_{ped}} F_{ped_{ij}} + \sum_{w=1}^{n_{wall}} F_{wall_{iw}} \quad (4)$$

3.2.2 視野の範囲判定

人は、前方に他の人や壁などの障害物を認識すると、衝突する可能性を考慮して回避行動を行う。このとき、前方のすべての障害物を認識しているわけではなく、一定範囲

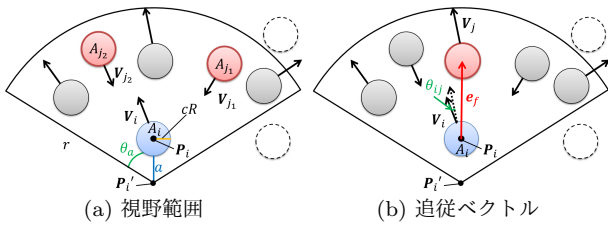


図 5 視野範囲と追従ベクトルの決定

Fig. 5 Range of a visual field and following the other agent.

内に存在する障害物の影響を受ける．この空間を視野と定めており，本研究では視野を扇形として捉える．

各エージェントに視野の範囲を設定する際，前方ほどではないが，真横や後方についても考慮する必要がある．これは，実際には見えなくても，雰囲気で見えなくても真横や後方の障害物の位置を認識し，接触を回避していると考えられるためである．この点を反映させるため，視野の範囲はエージェントよりも少し後方に基準を置いている．

基準となるエージェントを A_i ，その位置ベクトルを P_i ，速度ベクトルを V_i とし，認識対象となる他のエージェントの位置ベクトルを P_j とする．また，視界の大きさを r ，視野の広さを θ_a ，視野の範囲の基準となる位置ベクトルを P'_i ， P'_i と P_i の距離を係数 a と定義する．このとき，次の関係式が成り立つ．

$$P'_i = P_i - \frac{V_i}{|V_i|}(R+a) \quad (5)$$

式 (5) で求めた P'_i を用いて，視野の範囲内に他のエージェント j の位置ベクトル P_j が次の条件式を成り立たせれば，エージェント j はエージェント i の視野の範囲内にいるということになる．

$$|P_j - P'_i| < r, \quad \text{and} \quad \frac{P_j \cdot P'_i}{|P_j||P'_i|} > \cos\theta_a \quad (6)$$

図 5 は，エージェント i における視野の範囲を表したものである．図 5 (a) の例では，エージェント i の速度ベクトルと対向する速度ベクトルを持つエージェントは A_{j1} と A_{j2} のみである．そこで，影響を受けるエージェントを対向する速度ベクトルを持つ者のみに絞り込むことで，必要な計算量の低減を図る．エージェント i の速度ベクトル V_i およびエージェント j の速度ベクトル V_j のなす角 θ_{ij} が式 (7) を満たす場合，互いに対向していることになる．

$$\cos\theta_{ij} = \frac{V_j \cdot V_i}{|V_j||V_i|} \quad \left(\frac{\pi}{2} < \theta_{ij} < \frac{3\pi}{2}\right) \quad (7)$$

3.2.3 歩行流を考慮した追従

群集移動での双方向の歩行流（対向流）は，次のように変化する．各エージェントは目的地方向に進んでおり，最前のエージェントが集団の先頭に立って後続をリードする．両方向の先頭がぶつくと互いに回避しあい，後続は先頭のエージェントを追従することで，図 6 (a) のような流れになる．その後，図 6 (b) のように帯状化し，スムー

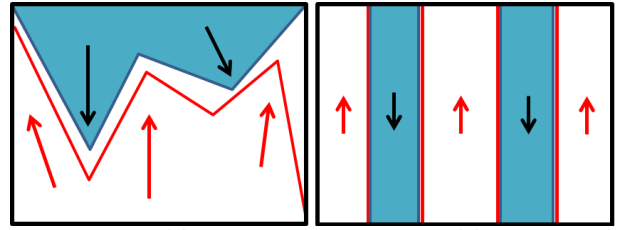


図 6 双方向の群集による歩行流

Fig. 6 Example of walking flow.

ズに交差する．エージェント数が減少すると，周囲の移動可能領域が広がるため，各々の目的地方向に進む．

群集移動における歩行流による追従を表現するため，図 6 (b) のような追従ベクトルを導入する．追従ベクトルは，自身の視野範囲の中で，進みたい方向に最も近い方向に進む他のエージェントへと向かうベクトルである．エージェント i の追従ベクトルを，引力 E_{i2} とする．ここで，エージェント i の速度ベクトルと，視野の範囲内にいる他のエージェント j の速度ベクトルのなす角 θ_{ij} が，定数 α 以上となるエージェント j を自身の進みたい方向に近いエージェントとする．このエージェント j とエージェント i との位置ベクトルを T_f とし，追従ベクトルに対する電荷 Q_{e2} から E_{i2} は，

$$E_{i2} = K \cdot Q_{e2} \cdot \frac{T_f}{|T_f|} \quad (8)$$

で表すことができる．ここで， K は単位面積当たりの対向するエージェント数であり，

$$\text{密度 } K = \frac{\text{視野範囲内での対向エージェント数}}{\text{視野の面積}} \quad (9)$$

で求められる．したがって，式 (8) は，周辺に対向するエージェントが多く歩行流に逆らうような移動時には，最も自身の進みたい方向に近い速度ベクトルを持つエージェント側に強い力が働くことを意味する．

エージェント i にかかる引力は，式 (1)，式 (8) から，

$$E_i = E_{i1} + E_{i2} \quad (10)$$

で表される．

3.2.4 速度ベクトルの導出

単位時間 Δt 後の速度ベクトル $V_{i_{\text{new}}}$ は，現在の速度ベクトル $V_{i_{\text{old}}}$ および歩行速度 V_s ，式 (4)，式 (10) を用いて，

$$V'_i = V_{i_{\text{old}}} + (E_i - F_i) \cdot \Delta t \quad (11)$$

$$V_{i_{\text{new}}} = V_s \cdot \frac{V'_i}{|V'_i|} \quad (12)$$

で求められる． V_{i0} は， $|V'_i|$ の最大値であり，これによって $V_{i_{\text{new}}}$ は 0 から V_s までの大きさの速度ベクトルとなる．

式 (12) から，単位時間 Δt 後の位置座標 $P_{i_{\text{new}}}$ は，現在の位置座標 $P_{i_{\text{old}}}$ を用いて，

$$P_{i_{new}} = P_{i_{old}} + V_{i_{new}} \cdot \Delta t \quad (13)$$

となり、式 (13) から各エージェントの移動を決定する。

3.3 経路選択モデル

3.3.1 目的地の設定

各エージェントは経路移動において、ある1点ではなく、ある空間領域に向かっていていると考えられる。本研究では、目的地を点ではなく線分で表し、その線分上を通過したときに目的地に到達したものとす。また、廊下の通路や階段などの通過地点を中間目的地として設定し、これらの目的地も線分で表す。エージェントの移動経路は、障害物の影響がなければ通常目的地までの最短経路を通る。

3.3.2 移動経路の設定

本研究では、現在地から目的地までの経路をセグメントを基準に選択する。各エージェントの移動経路は移動開始時に決定し、移動開始後は変更しないものとする。教室ごとに、目的地の各教室までの移動経路を事前に作成しておく。

教室間の移動において、開始地点と目的地が同じ階にある場合は、階段を利用する移動経路を利用するとは考えにくいので、移動経路は一意に決まる。開始地点と目的地が異なる階にある場合は、複数の移動経路が考えられるが、一般的には最短距離になる経路を選択する。

本シミュレーションでは、3.1.1 項において講義棟内の各空間に定義したゲートを目的地あるいは中間目的地として利用する。移動開始時には必ず教室か講義棟出入口に存在するため、次の中間目的地は通路であり、エージェントの位置座標から最も近い中間目的地（通路）のゲートを選択する。中間目的地に着いた場合、次の中間目的地の通路や階段あるいは目的地の教室のゲートの線分を次の目的地として選択し移動する。これを繰り返す、目的地の教室に到着すれば、そのエージェントの移動を終了する。この行動をすべてのエージェントが完了することで、ある休憩時間における講義棟内での教室間移動は完了する。

4. シミュレーション実験

本シミュレーションモデルの妥当性を検証するため、関西大学理工学系講義棟の1つをモデル化し、シミュレーションを行う。本シミュレーションでは、講義棟内での休憩時間での教室間移動および避難訓練時の避難行動における混雑箇所を特定する。また、混雑度合の時間的な推移から、混雑緩和の方策を検討することを目的とする。なお、紙面の都合上、本章では避難訓練時の移動シミュレーションについてのみ記載する。

4.1 シミュレーション条件

表 2 にシミュレーションのパラメータを示す。シミュ

表 2 シミュレーションパラメータ

Table 2 Simulation parameters.

項目	パラメータ
対象時限	火曜日 2 限
目的地との電荷	$Q_{e1} = 1$
追従ベクトルの電荷	$Q_{e2} = 1$
障害物との電荷	$Q_{ped} = Q_{wall} = 1$
人体円の半径	$R = 0.25$ [m]
学生の自由移動速度	$V_s = 1.4$ [m/s]
ステップ時間 (単位時間)	$\Delta t = 0.25$ [s]
視野	$a = 2R, \theta_a = \frac{\pi}{3}$

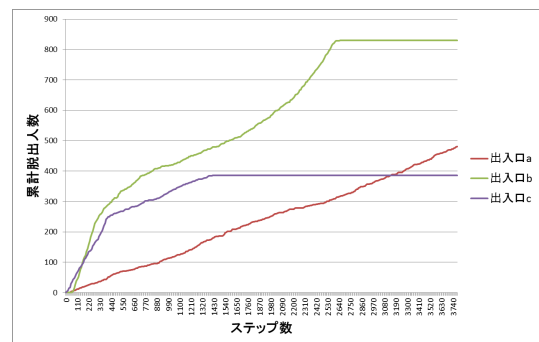


図 7 各出入口における累計脱出人数の推移

Fig. 7 Transition of total number of students in each entrance.

レーション対象は火曜日 2 限であり、講義棟内には表 1 より 1,697 人の学生が存在する。目的地、追従ベクトルおよび障害物との電荷は各々 1 とする。人体円の半径は、一般的な肩幅が 0.5 [m]であることを考慮して、0.25 [m] とする。学生が障害物などの考慮せず自由に移動できる速度 V_s を 1.4 [m/s] とし、単位ステップ時間を 0.25 [s] とする。視野の範囲は式 (5) より、後方 1 人分を判断できるように $a = 2R$ 、視野は一般的に片目で 60 度であることから $\theta_a = \frac{\pi}{3}$ と仮定する。

4.2 シミュレーション結果

本シミュレーションで講義棟内にいる学生全員が脱出するまでにかかった時間は、3,780 ステップ (約 15 分) だった。まず、各出入口をどの程度の学生が脱出に利用したかを調べる。図 7 に各出入口におけるステップごとの累計脱出人数の推移を示す。横軸はステップ数であり、表 2 から 1 ステップ 0.25 [s] である。凡例の出入口 a ~ c は図 1 の出入口を示している。図 7 から、出入口 b から最も多くの学生が脱出しており、出入口 c を利用する学生が一番少なかった。しかし、最後に脱出した学生は出入口 a の学生であり、これは出入口に最も遠い教室から移動した人数が多かったためであると考えられる。

次に、混雑箇所の特定を行うため、空間ごとの密度を調べる。本シミュレーションでは、講義棟内での廊下および階段空間の密度を求めることができるが、特に密度が大き

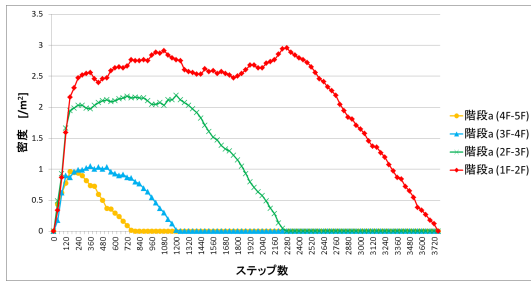


図 8 各階の階段 a 空間における学生の密度の推移

Fig. 8 Transition of the total density of students in stair space 'a' each floor.

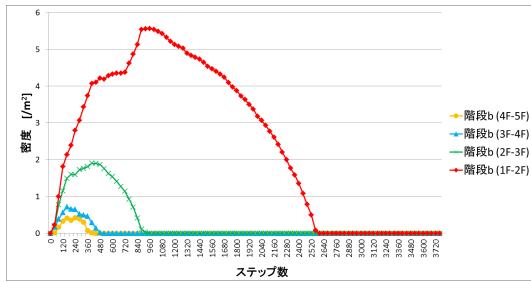


図 9 各階の階段 b 空間における学生の密度の推移

Fig. 9 Transition of the total density of students in stair space 'b' each floor.

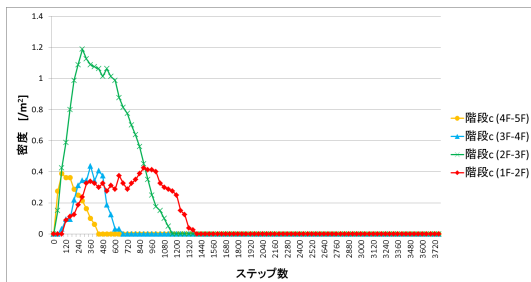


図 10 各階の階段 c 空間における学生の密度の推移

Fig. 10 Transition of the total density of students in stair space 'c' each floor.

くなった階段に焦点を当てて結果を示す。図 8 ~ 図 10 にそれぞれ階段空間 a ~ c の各階におけるステップごとの密度を示す。各図共に、横軸はステップ数、縦軸は階段空間の密度であり、階段 a ~ c は図 1 の階段のことである。図 8 ~ 図 10 を比較すると、最も密度が高くなるのは階段 b の 1F-2F である。このとき、840 ステップから 1,320 ステップまで密度は $5[1/m^2]^*$ を超えており、非常に混雑していることがわかる。階段 b では、階段において廊下側 2 方向からの学生による群集の合流があることから、瞬間的に密度が跳ね上がってしまうと考えられる。一方、図 8 から、密度が $2\sim 3[1/m^2]$ 程度で長く推移しており、脱出する学生が最も遅くなっていることがわかる。これは、一瞬で特定の箇所に学生が集まったのではなく広い範囲で学生の群集が形成され、緩やかに避難が進んでいったことを意味

*1 一般的に歩行速度が著しく低下するのが密度 $5[1/m^2]$ 以上であり、群集事故の危険性が増す。

しており、図 7 の結果からも一定の人数がステップごとに脱出できていることがわかる。図 7 および図 10 より、階段 c ではほとんど密度が高くならなかったが、これはこの階段を利用する学生数が少ないことも起因していると考えられる。つまり、階段 b を経路に使っていた学生の一部が階段 c を経路として利用すれば、階段 b での混雑を解消することができると思われる。

5. おわりに

本研究では大学講義棟内の移動において、群集事故が発生しやすい場所を特定するためのシミュレータを構築した。学生の移動モデルには、エージェントを粒子に見立て、与えられた電荷をクーロンの法則に基づき速度ベクトルを導出するポテンシャルモデルを利用した。実際の講義棟の実測値および学生の履修データを基に、実際の移動速度や障害物との接触を回避するような移動を設定することで、教室移動の様子を再現した。シミュレーション結果から、避難訓練時の移動シミュレーションにおいて階段で混雑が確認され、各教室からの避難経路を再検討する必要があることを示した。今後、様々な条件のもとでシミュレーションを行い、群集事故の危険性を含む混雑が発生しないような避難経路や教室間移動の検討を行う。

参考文献

- [1] 鈴木達也, 村上達也, 藤本まなと, 和田友孝, 榎原博之, 岡田博美: 非常時緊急救命避難支援システム (ERESS) におけるリアルタイム協調型避難経路探索方式の検討, 電子情報通信学会技術研究報告. IN, 情報ネットワーク, 112(209), pp.105-110 (2012).
- [2] 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, Vol. 3, pp.138-145 (2005).
- [3] 北原武嗣, 岸祐介, 久保幸奨: 高低差を考慮した津波災害時の群衆避難における経路選択に関する一検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.4, pp.1067-1075 (2013).
- [4] Purba Daru Kusuma and Azhari SN: Multi Agents based Traditional Market Customers' Behavior Design, 2013 International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications, pp.331-336 (2013).
- [5] 上水流友望, 富井規雄: マルチエージェントモデルによる繁忙期における新幹線駅ホーム上の旅客流動シミュレーション, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol.134, No.8, pp. 750-759 (2014).
- [6] 前川廣太郎, 澤勢一史, 延原肇: 教室移動時間最適化のための群集団移動と多重解像ダイクストラ法を取り入れたマルチエージェントシステムと遺伝的アルゴリズムの開発, ファジィシステムシンポジウム講演論文集, Vol.28, pp.275-279 (2012).
- [7] 北島徹也, 伊津野和行, 八木康夫, 大窪健之: 大学の講義棟における災害時避難に関する一考察, 日本地震工学会論文集, Vol.11, No.1, pp.72-80 (2011).
- [8] 山下倫央, 野田五十樹: マルチエージェントシミュレーション: 6. 避難シミュレーションの実社会への応用, 一般社団法人情報処理学会 情報処理, Vol.55, No.6, pp.572-578 (2014).