避難シミュレーションにおける避難者流動計測法と 避難者モデルパラメータの推定法[†]

三好 哲也*

Measuring Method of Pedestrian Flow and Estimation Method of Parameters Included in Model of Evacuation Simulator

by

Tetsuya MIYOSHI*

Various preparations for possible disasters should be made so as to minimize the damage in the disasters such as a fire or an earthquake. Several kinds of disaster simulations have been developed to recognize the impact of the damages. In particular, a lot of evacuation simulation methods using multi-agent system, which are considered as the useful and powerful method to deal with complex system containing a lot of elements, have been proposed for guiding evacuees safely. The Social force model is one of the evacuation simulation models that consider the influences and interaction of the other evacuees. In order to improve the precision of the simulation, the parameters included in it should be appropriately determined. In this paper the determination method of the parameters in the social force model is proposed, in which the evolutionary computing method is applied for the collecting evacuees flow data.

Key words:

Evacuation simulation, Social force model, Pedestrian model, Genetic Algorithm

1 緒 言

構造物の信頼性・安全性確保には、ハードウェアの信頼性確保のみならず、構造物を利用する人間要素を含めた全体システムとしての信頼性の確保が求められている。近年、土地の高度利用のために、建造物の高層化や地下利用が進む中、災害時の被害を低減するための対策が様々な観点から進められている。南海トラフなどの巨大災害が高い確率で発生するといわれており、災害によって生じる状況への対策立案は、喫緊の課題である¹⁾。

震災や火災などの災害時に、建造物の被害に加えて、避難対策の重要性が指摘されている。災害時の避難がどのような状況になるのかを予測するために、避難シミュレーション手法が様々な提案されている¹⁾。また、これらの避難シミュレーションが建造物の設計段階で実施され、建造物の構造上の安全性が検証されている。東京都では、避難シミュレータで避難状況を検証し、安全確保のための対策を検討している建造物には、「優良」マークの交付が行われており、避難シミュレーションの有用性が認識されている²⁾。

避難シミュレーションには、避難者や避難環境をエージェントとして定義し、エージェントが一定のルールで変化すると仮定した時の対象の時間的変化を分析するMAS (Multi-Agent System) が利用される場合が多い。MASには、対象環境をメッシュで表現するメッシュ法とエージェントの動特性を運動方程式で表現する方法がある¹⁾。

災害対策の一環で災害時の避難誘導や避難設備配置の計画などを目的として、シミュレーションによる対象の分析を行う場合、シミュレーション結果に対して高い信頼性が求められる。シミュレーション結果に対する信頼性確保のためには、シミュレーションモデルの妥当性やシミュレーション結果に対する評価を厳密に行う必要がある。しかしながら、避難シミュレーションでは、容易に避難状況の観測が行えないなどの理由から、シミュレーション結果に対する検証が困難であるといわれている³⁾。そのため、多くの場合、戸川ら⁴⁾の結果との定性的および限定された環境に限定した結果の妥当性検証が行われることが多い。火災時の避難シミュレーションにおける評価のための標準化に取り組む研究もあり^{5), 6)}、今後、避難シミュレーションの標準化が進められると期待されている。

防災の観点のみならず、防犯、施設運営の観点から人流の計測や再現に関する研究が注目されており、特集記事も報告されている⁷⁾。また、人流シミュレーションのパラメータ推定に関する研究が報告されている^{8), 9)}。人流シミュレーションにおけるエージェントの行動モデルに動的モデルが用いられているため、各パラメータに対する直接的な最適化によるパラメータ決定が困難であり、進化計算を用いた方法が報告されている⁸⁾。

本研究では、避難者を人の群流として計測する実験を実施し、その群流と避難シミュレーションの結果を比較

[†]原稿受理 平成 30 年 8 月 20 日 Received Aug.20,2018 ©2019 The Society of Materials Science,Japan

*正会員 阪南大学 経営情報学部 〒580-8502 松原市天美東

Department of Management and Information, Hannan Univ., Amami-Higashi, Matsubara, 580-852

することによって、シミュレーションモデルの妥当性や実施避難シミュレーションの評価・検証を行う。その基礎的検討を行うために、少人数での単純流動実験を実施し、流動の計測方法の提案と検証を行う。また、計測された被験者の流動から進化計算手法を用いて、シミュレーションモデルパラメータの決定方法の提案と評価を行う。そして、避難者の人流をシミュレーションした際の表現精度評価方法について考察する。

本論文では、2章で避難シミュレーションの構成法についてまとめる。3章では、評価のために実施した実験方法をまとめ、4章で実験結果をまとめる。5章では、計測データからシミュレーションモデルのパラメータを進化計算によって推定する方法を提案し、その推定結果の評価を行う。最後に6章で本研究の全体をまとめる。

2 避難シミュレーションの構成法

本節では、避難シミュレーションを行うためのシミュレーションモデルを説明する。本研究で用いる避難シミュレーションモデルにおいて、避難者エージェントの避難時の行動の運動方程式を文献¹⁰⁾に沿って以下のように定義する。

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

式(1)は文献¹⁰⁾を基本として定義したが、本研究では、右辺第1項は、現在の速度ベクトル v_i^0 と場の印加力によって定義している。第2項はエージェント ij 間に作用する反発力や摩擦力から定義される印加力である。第3項は壁や什器などの障害物からの反力を表している(Fig.1 参照)。

第2項で表現するエージェント間の反力や摩擦力は

$$f_{ij} = \left\{ a_{1i} \exp \frac{r_{ij} - d_{ij}}{b_{1i}} + kg(r_{ij} - d_{ij}) \right\} n_{ij} + ug(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij}^t t_{ij} \quad (2)$$

で表現する。

第3項で表現する壁や障害物からの反力の算出に当たって、エージェントのサイズに比較して小さい間隔で壁や障害物に節点を設定する。そして、エージェントの現在位置から最近隣節点との位置関係で、エージェントへの印加力の大きさを決定した。壁からの反力を文献¹⁰⁾に準じて定義する。

$$f_{iw} = \left\{ a_{2i} \exp \frac{r_{iw} - d_{iw}}{b_{2i}} kg(r_{iw} - d_{iw}) \right\} n_{iw} + ug(r_{iw} - d_{iw}) \Delta v_{iw}^t t_{iw} \quad (3)$$

3 避難を想定した流動実験の構成

3・1 実験の方法

本実験では、被験者の流動を計測するための2種の実験を実施した。実験1では、歩行者の歩行速度を特定するための実験として実施した。そのために、Fig.2に示す

Fig.1 Force for the agent from the configuration.

Fig.2 Configuration of Walking Experiments.

通路幅や通路長さとなるように教室内に模擬通路を設置し、その通路を被験者に一定方向に歩行させた。実験2では、通路設定は実験1と同様にし、参加者の半数を逆向きに歩行をさせた。実験2は、他の被験者と対面通過する場合に、他の被験者の歩行の影響を受ける場合を想定した実験とした。

3・2 実験で考慮する要因とその水準

各実験では、被験者の移動速度を統制するために、メトロノームを用いて条件に応じたスピードの2拍子の音を提示した。文献¹¹⁾によると、健常者の場合、歩調と歩行速度はおおむね相関が認められると報告されており、歩調100歩の場合、4.0km/時間となり健常者の平均的歩行速度になるとの実験結果が示されている。本実験では非常時避難を想定し、時間的切迫性を感じる歩行を仮定して、平均な歩調より速くし120歩/分、150歩/分、180歩/分の3水準に設定して上記3実験を行った。なお、歩行経路で、人で混雑して渋滞が起こり、歩行速度が維持できない場合でも、歩調は維持するように教示した。

3・3 被験者

被験者は健常な男女27名(男性17人 女性10人)とした。被験者には、実験の目的と実験手順を説明し、参加の意思を確認し参加を得た。

3・4 被験者位置計測方法

本実験では、360度全方位カメラで撮影した実験映像から、被験者それぞれの実験会場における物理的座標を簡便に計算する方法を用いて、実験中の被験者の位置を計測した。360度全方位カメラとしてコダック社製 Action Camera SP360を用いた。

全方位カメラ画像において、カメラ位置を原点としたときの被験者位置 (X, Y) および基準線からの角度 θ_H を Fig.3 (a) に示す。また、これら画像から算出する実際の実験会場における被験者の位置 (x, y) が Fig.3 (b) に図示されている。ただし、被験者の床上の位置座標は、混雑している場合画像から判別できないため、カメラ画像上の被験者の位置 (X, Y) として、頭頂の位置を記録し、被験者の身長を考慮して実際の実験会場における位置座標を算出する。

避難歩行実験に先立ち、カメラ画像上の画素座標 (X, Y) および被験者の身長と教室位置座標 (x, y) の数値的関係を特定するために、実験会場の物理的空間上でカメラ距離と鉛直上方の距離で特定される位置に関するカメラ画像上の座標を事前に計測した。そして、カメラ画像上の画素座標 (X, Y) から教室位置座標 (x, y) へのマッピング関数を特定した。具体的には、3 方向のカメラ距離 (0 から 7.5m の 0.5m 刻み) を定めた上で、その地点での鉛直上方の指定点 (0 から 2.0m の 0.5m 刻み) のカメラ画像の位置座標 (X, Y) の計測を行った。実験空間の物理的制限もあり計測点は 170 点となり、これらのデータ対に基づき、カメラ座標データと鉛直上方距離データから実験空間の床座標へのマッピング関数を非線形回帰手法によって求めた。求めたマッピング関数を Fig.4 に示す。このマッピング関数で変換した実験空間座標の誤差は、平均 1.03% であった。なお、本研究で用いた 360 度全方位画像では、対象物がカメラ中心から放射状に撮影されているが、放射角度 θ_H によって奥行に対する撮影ひずみはほぼ 0 であった。

4 避難を想定した流動実験の結果

4・1 実験 1 の結果

実験 1 において、被験者は歩調を 120, 150, 180 歩/分として、全員時計回りに歩行するよう教示した。それぞれの移動量を計測するために、撮影映像から 500ms で静止画をキャプチャした。そのキャプチャ画像上で位置を特定し、3.4 節で述べた方法で実環境の位置を算定した。Fig.5 に被験者 1 の速度 1 条件および 3 条件での移動軌跡を示す。カメラ位置が原点を示している。Fig.5 において○は、サンプリングタイムごとの被験者 1 の位置である。ランダムに選んだ被験者 5 名の速度条件 1, 3 での平均速度はそれぞれ、0.91m/s, 1.02m/s となっており、歩調の比率にはならなかった。これは、被験者間に一定の空間を確保する傾向が強く、隊列の最後尾に隊列最初が連結する状態になり、指定した歩調での歩行が実現できなかったためである。

4・2 実験 2 の結果

実験 2 では、13 名を時計回り (clockwise) 条件、14 名を反時計回り (anti-clockwise) 条件として、実験 1 と同様に 3 水準の速度条件での歩行実験を行った。歩行において、通路左側歩行として時計回り条件が通路内側、反時計回り条件が、通路外側を歩く条件を教示した。Fig.6 に速度条件 1 での被験者 1, 2 の移動軌跡を示す。この図から教示した左側歩行が実施されていることが確認できる。速度条件別の平均速度は、1.01m/s と 1.33m/s であり、平

(a) Camera picture coordinate (b) Actual coordinate
Fig. 3 Definition of variables.

Fig.4 Relationship between captured distance on experimental picture and actual distance.

a) Speed configuration 1 (120step/sec) b) Speed configuration 3 (180step/sec)

Fig.5 Trajectory of subject 1 while Experiment 1 (Sampling time is 500msec).

a) Subject 1 b) Subject 2

Fig.6 Trajectory of subject 1 and 2 while Experiment 2 (Sampling time is 500msec).

均速度はステップ数程度の比率となっている。実験 1 とは異なり、時計回り、反時計回りとも通路長さに比較してそれほど人数が少ないため、速度が抑制されることなく、歩調に合わせた速度になっていることが確認できる。

5 避難シミュレータのパラメータ推定

5・1 進化計算を用いたパラメータ最適化手法

前節までの方法により計測された人の流動を避難者モデルで表現するためには、避難者モデルに含まれる目標速度、被験者間に作用する反力や摩擦力、壁などの施設

との反力や摩擦力に関するパラメータを正しく設定する必要がある。計測した被験者の流動データから避難者モデルに含まれるパラメータの推定法について述べる。一般に被験者の性別、年齢、身体特徴などの個人特性の相違を考慮すると、避難者モデルに含まれるパラメータは均一ではない。避難シミュレーションにおいて、避難者間の相互作用を考慮した避難者モデルの時間積分として被験者の位置が決定されるため、各パラメータを同時に最適化する問題として定式化することは困難である。そこで、多数エージェントに対する個々のパラメータの組み合わせによって避難モデルが表現されていると考えて、計測された人流データを近似するパラメータ最適化問題として定式化する。すなわち、モデルに含まれるすべてのエージェントに関するパラメータを遺伝子として構成し、その遺伝子で表現されるパラメータを用いたシミュレーション結果と人流データとの乖離が小さい遺伝子を次世代に継承する遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて、パラメータの最適化を行う。

5・2 進化的最適化における評価関数と遺伝子構造

シミュレーションに含まれるエージェント数を I とする。エージェント i ($i=1, \dots, I$) の時刻 t における実測位置を $\mathbf{x}_i^e(t) = (x_{i1}^e(t), x_{i2}^e(t))$ とし、シミュレーション上の位置を $\mathbf{x}_i^s(t) = (x_{i1}^s(t), x_{i2}^s(t))$ とする。各エージェントの各時間における平均距離を避難シミュレーションの実験データとの評価関数 E

$$E = \sum_i \sum_j \|\mathbf{x}_i^s(j\Delta t) - \mathbf{x}_i^e(j\Delta t)\| \quad (4)$$

として定義する。ただし、評価関数の値を算出するにあたっては、エージェントの実測位置およびシミュレーション上の位置ともにサンプリングタイム Δt ごとの位置に離散化して集計する。また、2点間の距離はユークリッドノルムとする。被験者位置およびシミュレーション上の位置の乖離を算出するためのサンプリング回数を J とする。この評価関数値が小さいほど避難シミュレーションの実データへの適合度が高いと評価とする。

避難者モデルには、5つのパラメータが含まれるが、 I 個のエージェントに含まれるパラメータをそれぞれ $\mathbf{v}_0 = \{v_{01}, v_{02}, \dots, v_{0I}\}$, $\mathbf{a}_1 = \{a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1I}\}$, $\mathbf{b}_1 = \{b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1I}\}$, $\mathbf{a}_2 = \{a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2I}\}$, $\mathbf{b}_2 = \{b_{21}, b_{22}, \dots, b_{2I}\}$ とする。今回実施した流動実験では、被験者間の接触はほとんど生じていないため、その他のパラメータは省略した。避難シミュレーションにおいては、 I 個のエージェントに対するパラメータに基づき、エージェント毎に J 個の位置座標 $\mathbf{x}_i^s(t)$ が算出される。これらのパラメータ対を遺伝子表現し、遺伝子ごとのシミュレーションと実験実測値との乖離を表す評価関数値 E を求める。そして、次節で説明する進化計算アルゴリズムに従って、評価関数を最小にする各エージェントのパラメータを推定する。用いる遺伝子構造は、パラメータを連結したベクトル

Table 1 Set of value of parameters.

parameters	Set of parameters
v_0	7 以上 23 以下の整数
a_1	50,100,200,300,400,500,600,700,800
b_1	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7
a_2	50,100,200,300,400,500,600,700,800
b_2	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7

$$\mathbf{ge} = \{\mathbf{v}_0, \mathbf{a}_1, \mathbf{b}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{b}_2\} \quad (5)$$

とした。

5・3 進化的最適化アルゴリズム

進化的最適化アルゴリズムの代表的なものに GA(遺伝的アルゴリズム)がある。GA は、以下の手順で多数の組み合わせを効率的に探索するアルゴリズムである¹²⁾。

- (1) 対象問題の遺伝子へのコーディング
- (2) 遺伝子に対する評価値の算出
- (3) 評価値の良い遺伝子の選択
- (4) 選択された遺伝子間の交叉
- (5) 局所探索を回避するための突然変異

手順 (1) の後に、所望の評価値になるまで手順(2)-(5)までの手順を 1 世代として繰り返し実行する。世代を重ねることにより、評価関数を良好にするパラメータの組み合わせが次世代に引き継がれ、その結果、より良いパラメータの組み合わせを算出できる。

手順(3)の遺伝子の選択、手順(4)遺伝子交叉方法、手順(5)の突然変異方法は、様々な改良法が提案されているが、本研究では、基本的なエリート戦略による遺伝子選択、1点交叉による遺伝子交叉を用いる。ただし、遺伝子は、多種類のパラメータから構成されているので、遺伝子交叉は、 $\mathbf{v}_0, \mathbf{a}_1, \mathbf{b}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{b}_2$ のそれぞれで行うこととし、 $\mathbf{v}_0$ と $\mathbf{a}_1$ や $\mathbf{a}_1$ と $\mathbf{b}_1$ での交叉が生じないようにした。

GA によって推定するパラメータの概数を検証するため、全避難者のうち 1 人だけ、避難モデルエージェントとして、実験データの流動を表現するパラメータを個別に算出した結果から、各パラメータの取りうる値を Table1 のように離散的に定めて、GA に基づき変化させた。

5・4 進化的アルゴリズムによるパラメータの推定

- (1) 歩行者流動に対するパラメータ推定

実験 1 (同方向移動)、実験 2 (対面移動) で計測された被験者 27 人の流動に対する避難シミュレーションにおける避難者モデルパラメータを前節の GA を用いて推定した結果を述べる。パラメータベクトル $\mathbf{v}_0, \mathbf{a}_1, \mathbf{b}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{b}_2$ のそれぞれの大きさは 27 であり、それらの結合である遺伝子 $\mathbf{gene}$ の大きさは 135 である。初期の遺伝子は、Table1 からランダムに設定した。遺伝子選択においては、評価関数の値の小さい順に 6 個の遺伝子をそれぞれ $\{3, 2, 2, 1, 1, 1\}$ 個、合計 10 個の遺伝子に対して交叉操作を行った。10 個の遺伝子のすべての組み合わせ、1 点交叉による遺伝子交叉を行い同じパターンになる遺伝子を除いた 83 通りの新たな遺伝子を生成した。通常の遺伝子交叉とは異なり、現世代で良好な多数の遺伝子を次世代に継承するように

Table 2 Minimum values of cost function in each conditions.

(a) 1st Experiment

walking speed	Number of generation	Minimum value of CF	Reference value
Condition1	12	1.197	1.204
Condition2	17	0.586	0.929
Condition3	14	0.881	0.860

(b) 2nd Experiment

walking speed	Number of generation	Minimum value of CF	Reference value
Condition1	42	0.755	3.79
Condition2	46	0.732	2.01
Condition3	47	1.193	3.27

Fig. 7 Values of the cost function with three conditions about walking speed in each generations .

上記の交叉戦略を採用した。交叉後、突然変異確率 1%で要素を変化させた。

初期値を乱数で決定すると大きな誤差を残して局所最小値になる場合が生じるので、各エージェントの避難モデルパラメータは、個別に最適化した値を初期値として与え、その後、前節の遺伝的アルゴリズムを用いて、全体の最適化を行った。1 世代の更新時間は、10 分 20 秒 (windows10, CPU: Intel Core i7-4770, 3.4GHz, メモリ 8GB) であった。

(2) パラメータ推定結果

実験 1 と実験 2 それぞれにおける速度条件 1,2,3 のデータに対して、避難者モデルのパラメータを推定した際の評価関数式(4)の値が最小になる世代数とその値を Table2(a)(b)に示す。Table2 には、個々のエージェントのパラメータ v_0, a_1, b_1, a_2, b_2 それぞれが他のエージェントパラメータと同一値であると仮定して、評価関数を最小化するパラメータを推定した際の評価値を参考値として示した。また、実験 1、実験 2 の歩行速度に関する 3 つの条件に対する世代ごとの評価関数の値の変化を Fig.7 に示す。提案した GA を用いたパラメータ推定において、評価関数値が収束していることが分かる。実験 1 と実験 2 の流動データに対するパラメータ推定時間 (世代数) を比較すると、実験 2 のパラメータ推定に長い時間を要している。

(a) In 10sec and 35sec after start (walking condition 1)

(b) In 10sec and 35sec after start (walking condition 2)

(c) In 10sec and 35sec after start (walking condition 3)

● locations of agents in simulation

○ locations of subjects in the experiment

Fig. 8 Comparisons of locations of between agent in simulation and subjects in the experiments in three conditions (1st experiment).

(a) In 10sec and 35sec after start (walking condition 1)

(b) In 10sec and 35sec after start (walking condition 2)

(c) In 10sec and 35sec after start (walking condition 3)

● clockwise, ▲ anti-clockwise location of agent in simulation

○ clockwise, △ anti-clockwise location of subjects in the experiment

Fig. 9 Comparisons of location of agent between experiments and evacuation simulations in three conditions (1st experiment).

これらのパラメータを用いて流動シミュレーションと実験データとの比較をするために、開始 10 秒後と終了の 10 秒前におけるすべての被験者とエージェントの位置のプロットを Fig.8 および Fig.9 に示す。Fig.8 では、シミュ

Fig. 10 Change of value of the cost function along time (1st experiment).

レーションにおけるエージェント位置を●で、被験者位置を○で示した。また Fig.9 では、時計方向、時計逆方向へ移動するエージェント位置をそれぞれ、●、▲で、被験者位置を○、△で示した。実験データとシミュレーションデータを比較した Fig.8 と Fig.9 のプロット図においても、通路上の左右もしくは上下にずれている場合があるが、おおよそ実験データに近接した位置にエージェントが位置していることが確認できる。評価関数値が他に比較して大きくなった実験 1 速度条件 1 の場合 (Fig.8(a)) と実験 2 速度条件 3 の場合 (Fig.9(c)) のプロット図は、他のケースに比較して被験者位置とエージェントの前後の差異が大きくなっている。

次に、得られたシミュレーションモデルにおける定常性を検証するために、シミュレーション時間経過に対するすべてのエージェントの評価関数値の平均値を Fig.10 に示す。Fig.10 において、実験 1 および実験 2 の流動データとシミュレーションにおける流動データの乖離の程度は、時間経過とともに増減しているが、誤差は増加傾向にはなく定常的に生じているといえる。このことは、得られたパラメータにより、歩行者の大局的な流動特性は表現できることが示されている。一方で、人の流動に関する動特性が時間により変化している可能性が示唆されているが、乖離度の時間的変化については引き続き検証が必要である。

(3) 算出パラメータの評価

GA 手法で求めたパラメータである目標速度 v_0 についてのヒストグラムを Fig.11 に示す。実験 1 と実験 2 の流動データに対して推定したパラメータを比較すると実験 2 が大きな値になっており、実験状況を反映している。また、歩行速度条件が速くなるに伴って、速度パラメータも大きな領域で分布している。実験 1 の Condition3 では、停滞する状況を反映して、その変化が小さくなっている。

以上、計測した被験者の流動データとの全時間としての乖離の程度、時間経過したのちの乖離状況、得られたパラメータの定性的評価の観点から考察すると、GA を用いたパラメータ推定法によって適正なモデルパラメータが推定できることがいえる。ただし、シミュレーション

Condition 3.
(a) 1st experiment

Condition 3.
(b) 2nd experiment

Fig. 11 Distribution of parameter v_0 of the simulators for the data of 1st and 2nd experiments.

ンと実測の流動データの乖離の理由については引き続き検証が必要である。

6 結 言

本研究では、避難シミュレーションの精度向上を目指して、避難者モデルのパラメータ決定法として、実験による動特性の把握と、そのデータに対して進化計算を持いて推定する方法を提案した。そして、実験で計測した被験者流動データに対してモデルパラメータを推定し、その結果を評価することで提案法の有用性を示した。

本研究では、基本的な歩行行動に対するモデルパラメータの推定であり、避難シミュレーションを行う際のパラメータ設定の一定の規準を策定できるが、被験者間の強度の交互作用がある場合については、さらなる検証が必要である。そのために、今後は、同種の実験に対するパラメータ決定を行い、パラメータ分布の傾向を考察し、パラメータ決定の指針を集約する予定である。

本研究は JSPS 科研費 基盤研究(C) 16K01295 の助成を受けたものである。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) T. Miyoshi and H. Inomo, "Evaluation of structural reliability and safety in disaster by multi agent simulation", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 65 No. 6, pp. 457-462 (2016).
- 2) M. Morita, "Safety simulation of evacuation from large scale architecture", Journal of The General Insurance Association of Japan, Vol. 240, pp. 44-51 (2010).

- 3) K. Yasufuk, "Characteristics of crowd dynamics model based on self-driven particles and evaluation of evacuation safety in a building", *Japanese Journal of Multiphase Flow*, Vol.29, No.1, pp.27-34 (2015).
- 4) K. Togawa, *Journal of architecture and building science*, Vol.65, p.555 (1965).
- 5) E. Ronchi, E. D. Kuligowski, P. A. Reneke, R. D. Peacock and D. Nilsson, "The Process of Verification and Validation of Building Fire Evacuation Models", NIST Technical Note 1822 (2013).
- 6) E. Kuligowski, R. Peacock and B. Hoskins, "A Review of Building Evacuation Models", 2nd Edition, NIST Technical Note 1680 (2010).
- 7) I.Noda, "Toward informatics for human movements", *Journal of Information Processing*, Vol.58, No.7, pp.590-593 (2017).
- 8) A. Johansson, D. Helbing and P. K. Shukla, "Specification of a microscopic pedestrian model by evolutionary adjustment to video tracking data", *Advances in Complex Systems* Vol.10, pp.271-288 (2008).
- 9) Y. Nonaka, M.Onishi, T.Yamashita, T.Okada, A.Shimada and R.Taniguchi, "Walking velocity model for accurate and massive pedestrian simulator", *The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. C*, Vol.133, No.9, pp.1779-1786 (2013).
- 10) D.Helbing, I.Frankas and T.Vicsek, "Simulation dynamical features of escape panic", *Nature*, Vol.407, pp.487-490 (2000).
- 11) H. Ito, H. Nagasaki, H.Maruyama, K.Hashizume and R.Nakamura, "Age related changes of the walking cycle during fastest walking in healthy male subjects", *Japanese Journal of Geriatrics*, Vol. 26 No. 4, pp.347-352 (1989)
- 12) J. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, second edition (1992).