

# 防災訓練時観測調査に基づく建物内避難行動シミュレーション

吉行菜津美・大佛俊泰・沖拓弥・岸本まき

## Simulation of Evacuation Behavior in Building Based on Observation on Emergency Drill

Natsumi YOSHIYUKI, Toshihiro OSARAGI,

Takuya OKI and Maki KISHIMOTO

**Abstract:** There are many researches which focus on modeling evacuation behavior in a building in the event of disaster. However, few attempts validate the model based on the observation of evacuation behavior in a whole building. In this paper, we construct a model of evacuation behavior in a building considering pedestrians' psychological stress. Next, using the trajectories of pedestrians obtained by the observation on an emergency drill, we estimate the unknown parameters and validate the accuracy of the model. Furthermore, we demonstrate a simulation analysis from the view point of psychological stress.

**Keywords:** 建物内避難行動 (evacuation behavior in a building), 観測調査 (observation), 防災訓練 (emergency drill), 階段 (stairs), 心理的ストレス (psychological stress)

### 1. はじめに

災害時の建物内避難行動のモデル化に関する研究は数多く試みられてきた。しかし、建物全体の避難行動観測調査データを用いて、モデルの精度を検証する試みは十分になされていない。筆者らは前稿（吉行ほか，2019）で、防災訓練時の避難行動観測調査から歩行軌跡データを作成し、Social Force Model (Helbing et al., 2000) に基づく建物内避難行動モデルを用いて、シミュレーション分析を試みた。しかし、多くの避難者相互や壁から受ける反発力が影響し、狭い階段室内における二列歩行などの歩行性状を再現することは困難であった。

避難者は、周囲の状況に応じて心理的ストレスを感じ、そのストレスを低減させようと、速

度や方向をダイナミックに変化させながら行動すると考えられる。そこで本稿では、心理的ストレス概念（大佛・佐藤，2003）に基づく建物内避難行動モデルを構築し、前稿の歩行軌跡データを用いて、モデルの未知パラメータを推定する。さらに、モデルの精度を検証するとともに、避難者の心理的ストレスに着目したシミュレーション分析を行う。

吉行菜津美 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

東京工業大学 環境・社会理工学院

建築学系 大佛研究室

Email:yoshiyuki.n.aa@m.titech.ac.jp

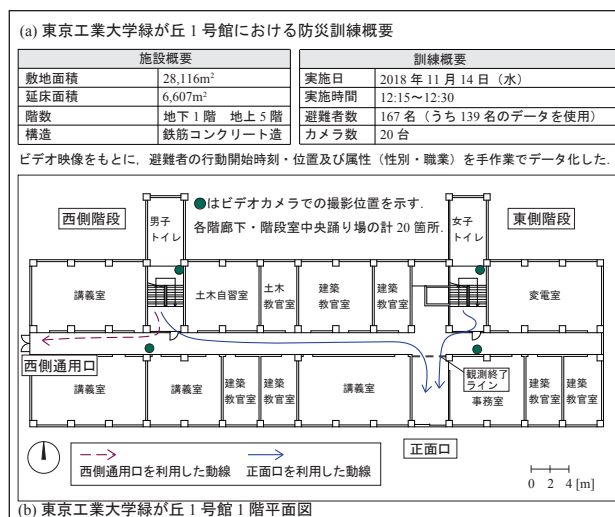


図-1 防災訓練対象施設と避難行動観測の概要

## 2. 建物内避難行動の防災訓練時観測調査

### 2.1 避難行動観測調査の概要

東京工業大学で行われた防災訓練において、緑が丘1号館を対象に、ビデオカメラを用いた避難行動観測調査を行った(図-1(a)). 具体的には、階段室付近の行動が詳細に把握できるように、各階の階段室前の廊下と階段室内の踊り場において、避難行動を観測した(図-1(b)).

### 2.2 観測調査の結果

ほとんどの避難者が、建物外の集合場所に最も近い1階正面口を避難口として利用していた。また、防火扉の前に避難者が集中することで滞留が発生し、扉の通過に時間を要していることが確認できた。階段室内においては、避難者が2~3列になって歩く様子や、廊下歩行時より速度が減少する様子が確認できた。

表-1 ビデオ映像から作成した避難者の歩行軌跡データ

ID	行動開始座標 (X, Y) [※1]	行動開始時刻 [hh:mm:ss.] [※1]	行動開始階 階 [※1]	行動開始エリア ID [※1] [※2]	歩行速度 [階段室] [m/s] [※3]	歩行速度 [廊下] [m/s] [※3]	...
1	(12.38, 2.17)	12:20:00.5	5	500	0.61	1.24	...

※1) 同じ研究室の人を待たせための滞留など、2~5階の廊下では、再現困難な行動が多くみられた。そこで、階段室に入る7.5秒前の位置と時刻を基準に、行動開始座標・時刻・階・エリアをそれぞれ設定した。  
 ※2) シミュレーションでは、建物内を居室・廊下・階段室から成る全135エリアに分けた。  
 ※3) 他者や壁の影響を受けない状況下での歩行速度(3.2節)。廊下と階段室で避難者の歩行性状が異なることから、歩行速度は別々に設定した。

表-2 分析から除外した避難者(合計:28名)

特異行動の内容	人数
廊下に出るが避難しない/研究室に戻った後避難しない	12
同じ研究室の人や研究室の鍵を閉めるのを待つ	4
地下出口/1階西側出口から避難する	7
トイレへ立ち寄り/廊下で一定時間立ち止まる/エレベーターを利用するなど	5

## 2.3 歩行軌跡データと分析対象者

ビデオ映像から、全避難者(167名)の歩行軌跡データ<sup>1)</sup>を作成した(表-1)。ただし、戻り行動や他者を待つ待機行動など、モデルによる記述が困難と思われる特異な行動をとった避難者(表-2)は除外し、139名を分析対象者とした<sup>2)</sup>。

## 3. 建物内避難行動モデル

### 3.1 モデルの概要

避難行動シミュレーションの流れを図-2(a)に示す。避難者は、周辺環境から受ける心理的ストレスが最小となるよう行動するものとする。歩行可能領域に構成したTIN上の各ノードには、避難口となる1階出口までの進行方向ベクトル  $e_i^0(t)$  を設定する(図-2(b))。これを用いて、各時点における希望到達地点と周辺環境から受ける心理的ストレス(他者ストレス  $SP$ ・目的地ストレス  $SD$ ・物ストレス  $SO$ ) (図-2(c)) を算出する。他者ストレス  $SP$  を算出する際には、自身の後方の避難者からは影響を受けないよう、視界を考慮する(図-2(d))。さらに、各避難者は、他者が  $\Delta t$  秒後に進む到達地点を予測して行動するものとする(図-2(c), (d))。

### 3.2 歩行速度パラメータの推定

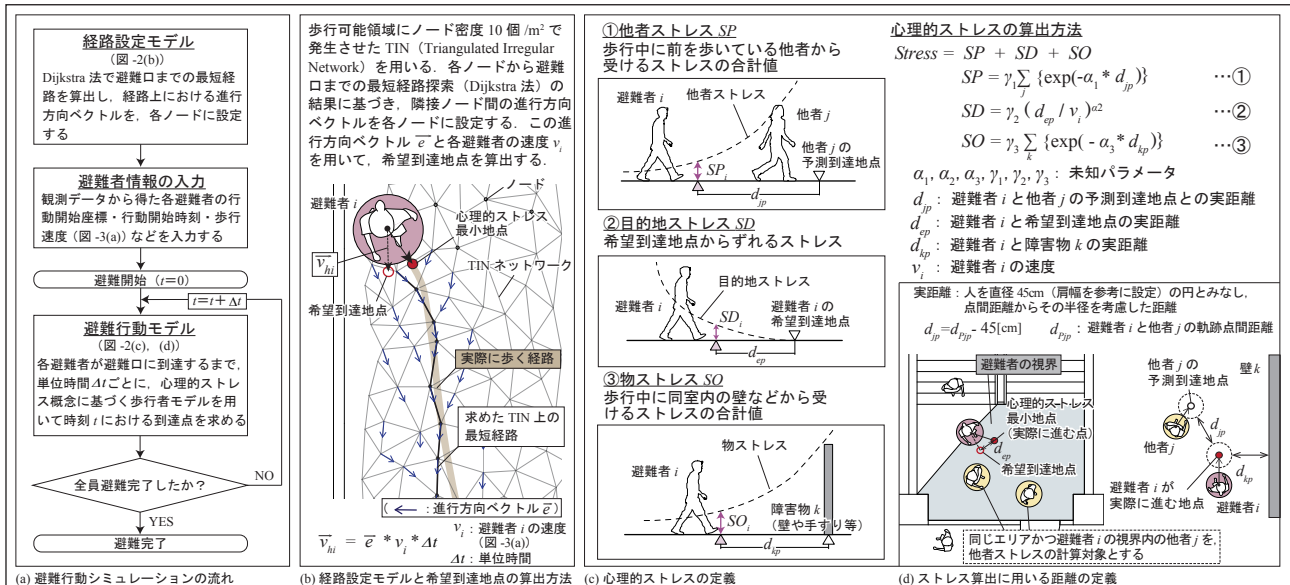


図-2 避難行動シミュレーションにおける各モデルの概要

歩行軌跡データから得られた個人ごとの歩行速度（階段室・廊下）をもとに、廊下と階段室内の最大歩行速度  $v_{Sik}^0$  および  $v_{Cil}^0$  を求め、希望到達地点の算出に用いる（図-3(a)）。このとき、観測とシミュレーションにおける同時刻の軌跡点間の距離和  $D$  [cm]（図-3(b)）が最小となるように、廊下と階段室内における避難者の最大歩行速度を記述する歩行速度パラメータ  $k, l$  を推定する<sup>3)</sup>（図-3(c)）。

### 3.3 心理的ストレスパラメータの推定

観測とシミュレーションにおける同時刻の軌跡点間の距離和  $D$  [cm]（図-3(b)）が最小となるように、心理的ストレスパラメータを推定する。平常時のモデル（例えば、本間ほか，2019）と比較すると、本モデルでは、ストレスの距離減衰が大きい。例えば、他者との実距離が 50cm 以上になると、他者ストレスは極めて小さくなる（図-3(d)）。すなわち、避難行動時には、他者と接近することによるストレスが小さいという特徴が現れている。

### 3.4 避難行動モデルの精度検証

避難者の軌跡誤差（図-4(a)）をみると、約 60% が 40cm 未満に、約 90% が 60cm 未満に収まっており、歩行経路（どこを通過して避難したか）の記述においては、モデルの記述精度は良好といえる（図-4(b)）。

避難中人数と避難終了人数の時間推移をみると（図-5(a)）、観測結果とシミュレーション結果は近似しており、避難終了時間<sup>4)</sup>の分布も概ね再現できている（図-5(b)）。ただし、立ち止まり行動が多かった 2 階西側からの避難者（図-5(b)①、図-5(c)左）や、階段室内の混雑により防火扉や階段での通過順が入れ替わった避難者（図-5(b)②）については、避難終了時間に差が見られる。

歩行軌跡のカーネル密度分布を比較すると、防火扉付近（図 6(a)）において滞留性状に違いが見られるが、避難方向へ向かう様子は再現

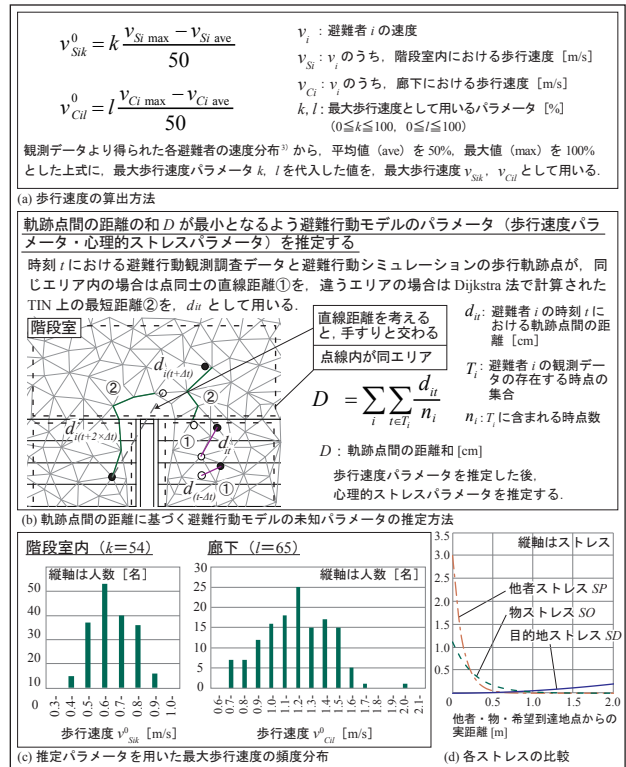


図-3 パラメータの推定方法と結果

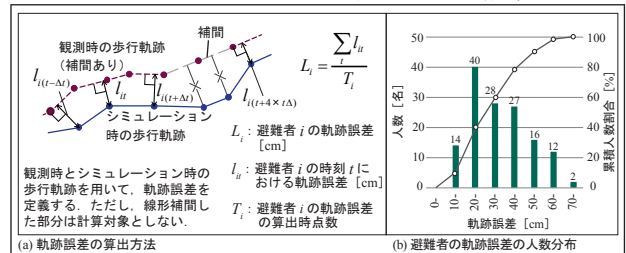


図-4 避難行動モデルによる軌跡の精度検証

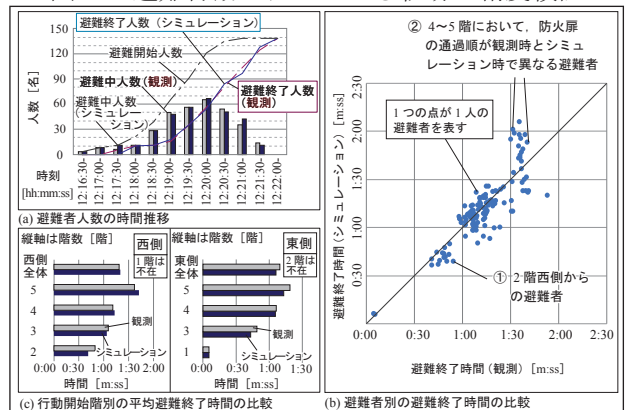


図-5 避難終了時間の比較

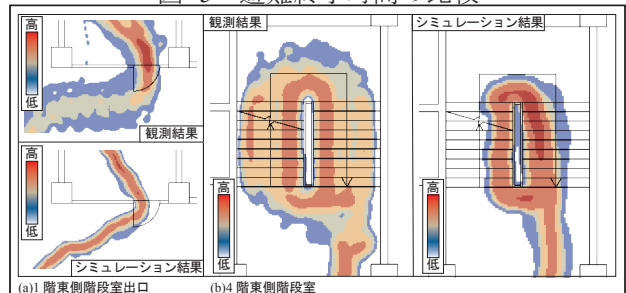


図-6 歩行軌跡のカーネル密度分布

できている。ただし、階段室内における歩行特性の記述に関しては、2列歩行となった際の避難者間距離が実際より小さく、さらなるモデルの改良が必要である（図-6(b)）。

#### 4. 避難者が受ける心理的ストレスに着目したシミュレーション分析

##### 4.1 個人ごと・場所ごとの心理的ストレス

防災訓練時の避難行動観測調査から得た歩行軌跡上での心理的ストレスを、避難行動観測調査データから得た避難者の各指標（歩行速度・歩行性状・避難者間の距離など）と避難行動モデルの推定パラメータ（3.3節）を用いて算出する（図-7(a)）。ここでは、(1)個人ごとのストレスの平均値  $\bar{S}_i$ （図-7(b)）と(2)建物内の各メッシュにおけるストレスの平均値  $\bar{S}_m$ （図-7(c)）を求め、考察する。

##### 4.2 心理的ストレスからみた避難行動・空間の評価

個人ごとの他者ストレスの平均値  $\bar{S}P_i$  をみると（図-8(a)）、他者ストレスの平均値が小さい避難者が多い。これは、避難時には他者からストレスを感じにくいことを表している。また、個人ごとの物ストレスの平均値  $\bar{S}O_i$  をみると（図-8(a)）、物ストレスの平均値は他者ストレスの平均値よりも大きい。避難者個人のストレスの時間推移に着目すると（図-8(b)）、階段室内の混雑により滞留が発生した際に、他者ストレスが一時的に大きくなっている。また、1階階段室内における他者ストレスの空間分布をみると（図-8(c)）、階段室で避難者が進行方向を変える箇所と防火扉付近において高くなっている。さらに、物ストレスの空間分布をみると（図-8(d)）、階段室段部において、壁側と手すり側で高くなっている。本稿では、手すりからも壁と同等のストレスを受けることを想定しているが、実際には、手すりは避難の補助に用いられることから、物ストレスのパラメータを区別する必要がある。

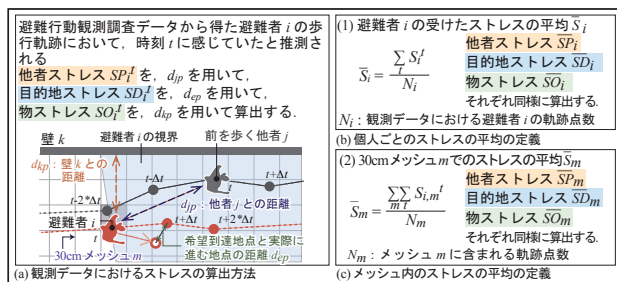


図-7 歩行軌跡に基づく避難評価の手法

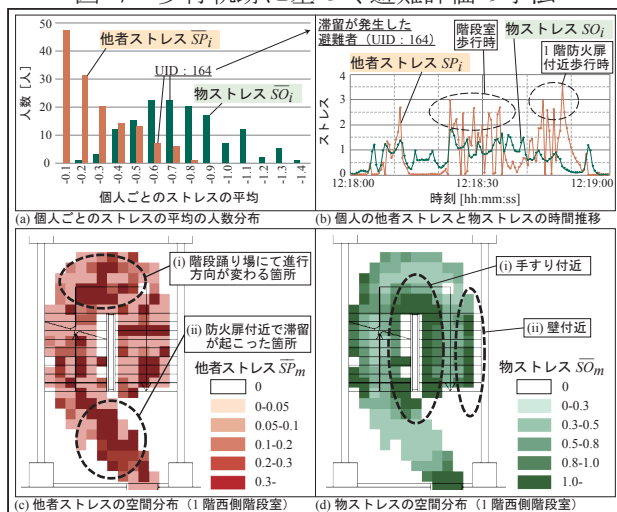


図-8 歩行軌跡に基づく避難評価の結果

#### 5. まとめ

防災訓練時の観測調査によって得た歩行軌跡データを用いて、心理的ストレス概念に基づく避難行動モデルのパラメータ推定とモデルの精度検証を行った。また、避難行動観測調査データを用いて、心理的ストレスからみた避難行動・空間の評価を行った。

#### 謝辞

今回の調査に際し、東京大学の伊山潤准教授、特任研究員の福島佳浩氏、修士課程の福田知広氏に多くのご指導とご協力をいただきました。また、調査の撮影に際し、東京大学及び東京工業大学の皆様には、ご理解とご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

本研究の一部は、JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムによるものです。

#### 注

- ビデオカメラに映らない部分の歩行軌跡は、前後の時刻における歩行軌跡をもとに線形補間している。
- 本稿では、簡単のため属性（性別）を考慮していないが、これらを考慮することで、属性別の行動特性の差異に着目できる。
- 訓練における混雑時の歩行速度を含めると、混雑の影響を過大に受けた歩行速度になってしまう。そこで、図-3(a)の平均歩行速度  $v_{S,ave}$  および  $v_{Cr,ave}$  は、特に混雑した1階踊り場のデータを含めず算出した。
- 観測データに合わせて、行動開始時刻から観測終了ライン（図-1(a)）に到達するまでの所要時間を、避難終了時間としている。

#### 参考文献

- D. Helbing, I. Farkas and T. Vicsek (2000) : Simulating dynamical features of escape panic, NATURE, 407, 487-490.
- 吉行菜津美・大佛俊泰・沖拓弥・岸本まき (2019) : 建物内避難行動の観測とシミュレーション分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (CD-ROM), 5248.
- 大佛俊泰・佐藤航 (2003) : 心理的ストレス概念に基づく歩行行動のモデル化, 日本建築学会計画系論文集, 573, 41-48.
- 本間ありさ・大佛俊泰・金子弘幸 (2019) : レーザセンサによる高精度軌跡データを用いた歩行者モデルの推定と検証, 日本建築学会計画系論文集, 84, 763.