

# Social Force Modelを用いた災害時地下歩行空間内における歩行者の避難挙動分析

谷口 豊<sup>1</sup>・中辻 隆<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 北海道大学大学院 工学院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)  
E-mail:taniguchi@eng.hokudai.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 北海道大学大学院 工学研究院 教授 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)  
E-mail:naka@eng.hokudai.ac.jp

本研究は、災害時における歩行者の避難挙動をシミュレーションによって再現をし、また実際に避難実験を行い実験によって得られたデータと比較することでモデルの再現性の検討も行った。シミュレーションモデルとして **Social Force Model** を使用し解析を行った。本研究では、歩行者の避難挙動をシミュレーションによって再現することができ、避難実験と比較し再現性の高いシミュレーションを行うこともできた。そして比較検証から少ない人数の増加でも局地的に人口が集中する場合には避難時間が長くなり危険性が高くなることを明らかにした。

**Key Words** : Evacuation Simulation, Pedestrian, Social Force Model, Underground Sidewalk Area

## 1. 本研究の背景と目的

2011年3月12日に札幌駅前通地下歩行空間（以下、地下歩行空間）（**図-1**）が開通し、開通直後から多くの人が利用し、連日賑わいを見せている。しかし当初予測していた以上の人通りが見られ、地下歩行空間内は過密した状態が発生している。このような閉鎖的な空間である地下歩行空間において、人口が過密状態にある場合には災害時などは非常に危険なものとなる。なぜなら地下歩行空間は出入口の幅が狭い、階段などの段差が多い、イベントによる滞留歩行者の存在などの要因から、災害時に歩行者の混乱を招くことが予想されるからである。

そこで本研究では、地下歩行空間において災害が発生し、避難する必要性が出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をし、また実際に避難実験を行い実験によって得られたデータと比較することでモデルの再現性の検討も行う。さらに交通量などの条件を変えた場合での避難時間の変化に

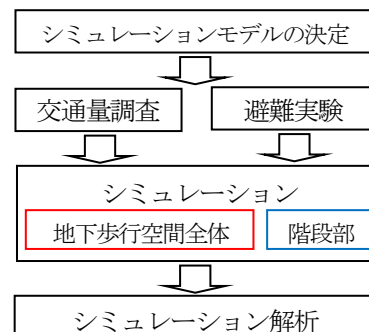


**図-1** 札幌駅前通地下歩行空間

関しての検証も行う。

## 2. 本研究の分析手法

本研究の分析の流れは**図-2**の通りである。まずは使用するモデルを決定する。そしてシミュレーションを行うのに必要なデータを取得するために、現地での交通量調査と、実際に人間を用いた仮想空間での実験を行う。そこから取得したデータを基にシミュレーションを行うが、シミュレーションは地下歩行空間全体と、外との出入口である階段部の2種類に分けて行う。これは避難する連絡路が限られる地下空間において、外との接続部である階段部に歩行者が一斉に避難すると混雑状態が発生し、避難が難航することが考えられるからであり、その際の歩行者の細かい動きを再現するために階段部みのシミュレーションも行う。そしてシミュレーションの結果から解析を行う。



**図-2** 研究のフロー

### 3. Social Force Model

本研究では Social Force Model<sup>1)</sup> というモデルを用いて避難挙動を再現した。このモデルは狭い範囲での一人一人の細かい挙動を表現する場合に適していると考えられているモデルである。特徴としては、他の歩行者や障害物、壁などから受ける反発力を見かけ上の力と仮定して、その力を歩行者が受ける外力と考え、運動方程式に当てはめることで進行方向や速度が算出されることである(式-1)。

$$f_i(t) = m_i \frac{v_i^0(t)e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} f_{ij} + \sum_W f_{iW} \quad (\text{式-1})$$

#### (1) 目的地に向かう力

$$f_i(t) = m_i \frac{v_i^0(t)e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} \quad (\text{式-2})$$

この項は歩行者が目的地に向かう力を表す項であり、シミュレーション内でまずこの項が働かなければ歩行者は目的地に進まない。

#### (2) 他者から受ける力

$$f_{ij} = \left\{ A_i \exp\left[\frac{(r_{ij} - d_{ij})}{B_i}\right] + k\Theta(r_{ij} - d_{ij}) \right\} n_{ij} + \kappa\Theta(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij}^t t_{ij} \quad (\text{式-3})$$

この項は歩行者が進む上で他の歩行者を避けるときに働く影響力、歩行者どうしが直接接触れ合った時の圧力による影響力、そして歩行者どうしが直接接触れ合った時の摩擦力による影響力を表わしている。

#### (3) 壁から受ける力

$$f_{iW} = \left\{ A_i \exp\left[\frac{(r_i - d_{iW})}{B_i}\right] + k\Theta(r_i - d_{iW}) \right\} n_{iW} + \kappa\Theta(r_i - d_{iW}) (v_i \cdot t_{iW})_{iW} \quad (\text{式-4})$$

この項は、歩行者が壁から受ける力を表わしており、基本的には算出方法は他者から受ける力と同じだが、壁が半径・速度を持っていないためその部分に違いがある。

Social Force Model の式には含まれていないが、これ以外にもイベントなどによる滞留歩行者もシミュレーションの中では考慮する。

以上の要素から、Social Force Modelを組み立てた。この式を用いて地下歩行空間の避難シミュレーションを行う。

### 4. 交通量調査

避難シミュレーションを行うにあたり、地下歩行空間の交通量など詳細なデータが必要になるが、現地での

調査を行い、データを取得した。図-3 は地下歩行空間の全体図である。

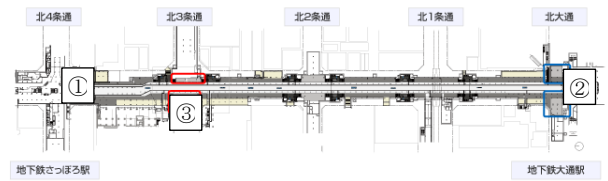


図-3 地下歩行空間 全体図

#### (1) 調査日時

2011年12月25日(日)26日(月)に実施した。  
 25日: 13:30~16:00 (休日混雑時・滞留歩行者有)  
 26日: 7:20~9:00 (平日混雑時)  
 9:50~11:00 (平日非混雑時)

#### (2) 調査場所

札幌駅前通地下歩行空間内  
 ・地下鉄さっぽろ駅との接続部 (①)  
 ・地下鉄大通駅との接続部 (②)  
 ・北3条交差点広場 (25日のみ実施) (③)  
 ※①, ②, ③は図-3の番号を示す。

#### (3) 調査方法

・①②に関しては、地下歩行空間に出入りする人数を、方向別に5分ごとの人数で計測した。  
 ・③に関しては、イベントが行われている広場で立ち止まっている人数を5分に1回カウントした。

#### (4) 調査結果

今回のシミュレーションでは休日のデータを用いて解析を行ったので、休日の結果を示す(表-1)。

表-1 歩行者交通量 (休日)

1時間交通量 (人)	さっぽろ駅→地下歩道	3921
	地下歩道→さっぽろ駅	3964
	大通駅→地下歩道	3876
	地下歩道→大通駅	3801
最大滞留歩行者数 (人)	北3条交差点広場	107

### 5. 避難実験

階段部での歩行者の速度を設定するために、実際に人間を用いた仮想空間での実験から速度を求めることにした。

#### (1) 実施日時

2012年1月23日(月) 18:30~19:00

## (2) 実施場所

北海道大学工学部内

- ・正面玄関近くにあるオープンホールへ上る階段
- ・正面玄関ホール

## (3) 実験内容

### a) 階段部での歩行者速度・密度

歩行者が一斉に階段を上る様子を、ビデオカメラを用いて撮影した。撮影した映像から階段内での歩行者の速度と密度を求めた。ビデオ撮影は階段の真上から3か所で行い、歩行者数は28名で行った。

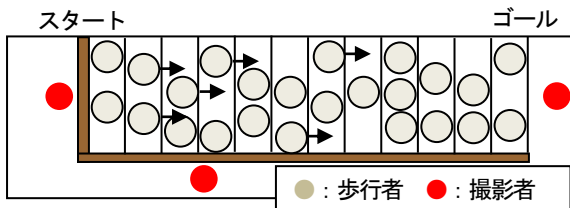


図-4 階段部での実験

### b) 平面部での歩行者速度・密度

階段と同じ幅の空間をカラーコーンで仕切りを作り、階段部での実験と同様に歩行者が一斉に移動する様子を、ビデオカメラを用いて撮影した。ビデオ撮影は正面玄関ホール2階から3か所で行い、こちらも歩行者数は28名で行った。

## (4) 実験結果

平面部・階段部の歩行者速度は以下の通りである。

	速度 (m/s)
平面部	1.045
階段部	0.736

## 6. シミュレーション解析

### (1) 条件の設定

#### a) 時間帯

シミュレーションは調査を行った時間帯別に「休日」「平日朝」「平日昼」の3つに分けて行う。今回は休日の場合でのシミュレーション解析を行う。

#### b) 歩行者挙動

シミュレーションは「通常時」と「避難時」に分かれる。シミュレーション開始時は「通常時」の状態で行われ、歩行者の流れが定常になったら「避難時」に切り替わるように設定した。歩行者挙動も「通常時」と「避難時」では違いがあるので、それぞれ説明を行う。

<通常時>

- ・歩行者はあらかじめ決められた目的地に向かって移動

する。

- ・「休日」に関しては、地下歩行空間内のイベントなどに参加している滞留歩行者も再現し、滞留歩行者は通常時では移動しない。

<避難時>

- ・すべての歩行者は最寄りの階段の出入口に向かって移動し、駅との接続部からは出ない。
- ・滞留歩行者も最寄りの階段の出入口に向かって移動する。

## (2) シミュレーションの検証

調査で計測した地下歩行空間に流入する歩行者数から、シミュレーションでの流出する歩行者数を測定し、調査で計測した流出量と比較してシミュレーションの整合性の検証を行った。検証は1時間の交通量で行い、結果は表-2の通りである。

表-2 歩行者流入・流出量

	流入量	流出量	
		調査	シミュレーション
さっぽろ駅	3921	3964	3950
大通駅	3876	3801	3786

表-2 から、シミュレーションの流出量は調査で計測した流出量に近い値を示した。よってシミュレーションの整合性は検証できた。

## (3) シミュレーション結果

### a) 地下歩行空間全体

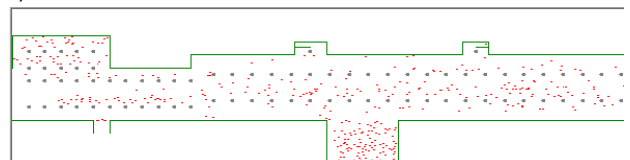


図-5 避難シミュレーション (開始直前)

図-5 は避難シミュレーションが開始する直前の状態である。この状態から避難シミュレーションが開始するように設定した。

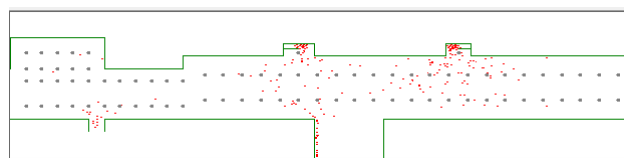


図-6 避難シミュレーション (開始 30 秒後)

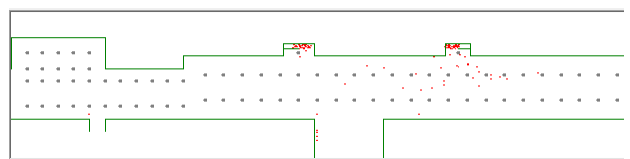


図-7 避難シミュレーション (開始 60 秒後)

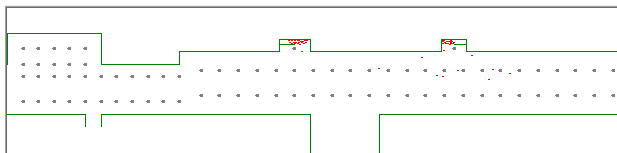


図-8 避難シミュレーション (開始 90 秒後)

図-6~8 は避難シミュレーション開始 30 秒後~90 秒後の様子である。各階段部で歩行者の詰まりが見られることが分かる。そして開始 60 秒後でも多くの階段で詰まりが見られ 90 秒後でも詰まりがまだ見られる階段部があることが分かる。

#### b) 階段部

次に階段部のみでのシミュレーションを行う。対象とするのは、全体のシミュレーションで一番詰まりが顕著に見られた階段部である。階段部での歩行者の発生間隔は、全体のシミュレーションで再現した対象とする階段部に到着する時間を基に設定した。

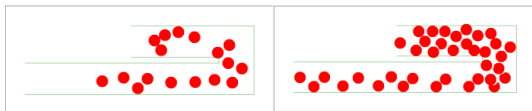


図-9 階段部 (開始 10 秒後, 25 秒後)

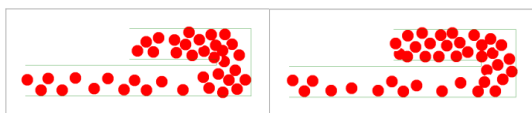


図-10 階段部 (開始 35 秒後, 55 秒後)

図-9, 10 は階段部のシミュレーションの様子である。開始 25 秒後~55 秒後にかけて階段部・踊り場ともに詰まりが見られる。階段部での避難実験でも同様な詰まりが見られたので、シミュレーションによる避難実験の再現が表現できたとと言える。

#### (4) 比較検証

調査から求めた交通量によるシミュレーションの結果は(3)で示したが、交通量を変化させた場合での避難時間の変化に関して検証を行う。歩行者数は表-3 の通りに変化させて検証を行った。

表-3 検証歩行者数 一覧

	通常歩行者(人)	滞留歩行者(人)	合計(人)
★	750	200	950
E(1.5)	1125(+375)	200	1325(+375)
E(2.0)	1500(+750)	200	1700(+750)
V(2.0)	750	400(+200)	1150(+200)
V(3.0)	750	600(+400)	1350(+400)
EV(2.0)	1500(+750)	400(+200)	1900(+950)

※★：交通量調査による歩行者数

設定としては、地下歩行空間内からシミュレーションで対象とした階段部で外に出るまでの避難にかかる総時間を求めた。結果は表-4、図-11 の通りである。

表-4 避難時間 一覧

	合計人数(人)	避難時間(秒)	★との差(秒)
★	950	104.5	-
E(1.5)	1325(+375)	135.2	+30.7
E(2.0)	1700(+750)	158.3	+53.8
V(2.0)	1150(+200)	128.6	+24.1
V(3.0)	1350(+400)	160.1	+55.6
EV(2.0)	1900(+950)	168.3	+63.8

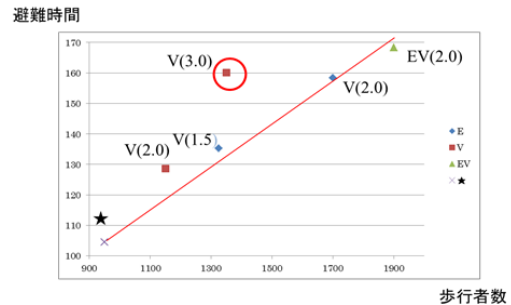


図-11 避難時間 推移グラフ

全体の傾向としては人数が多くなるにつれて避難時間も長くなるが、V(3.0)の滞留歩行者数を 3 倍にした場合には、人数の増加が少ない割に避難時間が大幅に増加していることが分かる。これは対象とした階段が、滞留歩行者が多くいるイベントスペース付近にあり、その歩行者が階段に押し寄せたことが原因ではないかと考えられる。このように少ない人数の場合でも、ある 1 か所に歩行者が溜まっている場合には避難時間が長くなり、災害時には危険である可能性が高いことが分かる。

## 6. おわりに

本研究では、歩行者の避難挙動をシミュレーションによって再現することができた。また階段部においては避難実験と比較して再現性の高いシミュレーションを行うこともできた。そして仮想的ではあるが、比較検証から少ない人数の増加でも局地的に人口が集中する場合には危険性が高くなることが判明した。

今後の課題としては、災害の種類による避難挙動の違い、階段部の詰まりを解消するための入口の形状の違いによる避難時間の違いなどが挙げられる。

### 参考文献

- 1) Simulating Dynamical Features of Escape Panic : Dirk Helbing , Illes Farkas, and Tamas Vicsek
- 2) Social force model を用いた歩行者挙動の再現に関する研究 (磯崎勝吾 平成 19 年度北海道大学卒業論文)
- 3) 歩行者の緊急避難行動シミュレーションに関する研究 (今良太 平成20年度北海道大学卒業論文)