心理的ストレス概念に基づく歩行行動のモデル化

MODELING OF PEDESTRIAN BEHAVIOR BASED ON MENTAL STRESS

大佛 俊泰*, 佐藤 航**
Toshihiro OSARAGI and Wataru SATO

A computer simulation of pedestrian flow is an effective method for examining relationships between pedestrian space and pedestrian behavior within that space. However, the characteristics of pedestrian behavior are not fully modeled in earlier studies. In this paper, a model describing pedestrian behavior is proposed by utilizing the concept of mental stress. Unknown parameters of the model are estimated using observed data from real pedestrian behavior. The estimated model can describe the differences of pedestrian behavior according to walkers' characteristics. Through some of the simulations in the proposed model, we can examine comfort or safety of pedestrian flows within crowded pedestrian areas.

Keywords: pedestrian space, pedestrian behavior, mental stress, simulation

歩行空間, 歩行特性, 心理的ストレス, シミュレーション

1. はじめに

歩行空間における群集流動について理解を深めることは歩行空間設計を行う上で重要である。群集流動のコンピュータ・シミュレーションは、建築空間と人間行動の対応関係を明らかにするための有効な方法と考えられる。そのため、その基礎となる歩行者行動のモデル化に関する研究は今までに多くなされてきた。国内では中文¹⁾や岡崎文^{2), 文3)}が早い時期に優れた研究を行っている。岡崎の研究では、歩行者間に作用する目に見えない力を磁気に見立てるというユニークな視点から、いわゆる磁気モデルを提案している。その後、建部ら文^{4), 文5)}は、歩行者の個体領域、歩行者の移動、障害物の移動予測という3つの要因から歩行者の回避行動をモデル化し、さらに、観測データをもとに回避行動開始点における回避距離を推定している。一方、こうした基礎的な研究とコンピュータ技術の進展を背景として、歩行シミュレーションの研究も行われるようになった。例えば、岡崎・松下文⁶⁾の避難シミュレーションの研究や、矢守・杉万文⁷⁾による横断歩道における群集流動パターンのシミュレーションがある。海外では、交通計画におけるNetwork Modelを応用して、歩行者を質点と捉えたTimmsらのモデル文⁸⁾がある。しかし、歩行者は全て一様に扱われており、歩行者ごとに異なる歩行特性は表現されていない。そのため、Kerrideら

文⁹⁾は、セルラーオートマトンを応用して、歩行特性を記述するパラメータを歩行者ごとに設定したモデルを構築している。しかし、パラメータは経験則から設定されており、実データから推定されていない。

パーソナルスペースと呼ばれる概念が存在するように、歩行者は他者が自分に近づくことである種の心理的ストレスを感じている。本研究では、歩行者の回避行動はこのような心理的ストレスを低減させる方向へ行っていると考え、速度や方向をダイナミックに変化させながら回避行動を連続的に繰り返している群集流動における歩行者の挙動を記述する。さらに、群集流動の観測データを用いて歩行モデルのパラメータ推定を行い歩行特性を抽出し、歩行特性に影響を及ぼす要因について検討する。さらに、このモデルを用いてシミュレーション実験を行い、快適性や効率性の視点から歩行空間の環境評価を試みる。

2. 歩行モデルの構築

2.1 歩行モデルの特徴

本研究で提案する歩行モデルの特徴とモデル化の方法を図1に示した。本モデルは、歩行者の挙動を歩行時に受けるストレスで表現している点に特徴がある。歩行時のストレスは歩行者属性・環境

* 東京工業大学大学院情報理工学研究科 助教授・博士(工学)

** 東京工業大学大学院情報理工学研究科 大学院生

Assoc. Prof., Graduate School of Information Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Graduate Student, Graduate School of Information Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

図1 歩行モデルの特徴とモデル化の方法

要因・心理的要因から説明される。さらに、個人の挙動は群集流動の状態を構成し、これが環境要因となって個人の挙動を規定するという循環型のモデルになっている。

2.2 ストレス概念を用いた歩行の記述

2.2.1 歩行時に受けるストレスの定義

歩行者は歩行中に心理的ストレスを感じながら歩行している。例えば、歩行者は他者が近くにくるとその歩行者から心理的ストレスを感じる(以下、「他者ストレス」)。また、歩行者は目的地を持っており、目的地への最短経路上の次時点における移動地点(以下、希望到達地点)からずれるとストレスを感じる(以下、「目的地ストレス」)。そこで、これら二つのストレス概念を用いて、歩行者の挙動をモデル化することを試みた。具体的には、他者ストレスと目的地ストレスを足し合わせた心理的ストレスを求め、ストレスの最も低い地点に歩行者は移動すると考えた(図2)。

2.2.2 ストレス関数のバリエーション

歩行者が受けるストレスを表現するための適切な関数を選ぶことは、歩行者の挙動を記述する上で重要である。そこで、ストレスの関数型について検討し(図3参照)、「他者ストレスの関数」+「目的地ストレスの関数」の組み合わせとして、(1)指数型+冪数型、(2)冪数型+冪数型、(3)指数型+指数型、(4)冪数型+指数型という4種類のモデルを考えた。まず、他者ストレスについて考えると、他者の位置が最大値となる距離逆減関数となる(図3(a))。次に、目的地ストレスについて考えると、多少希望到達地点

図2 ストレス概念を用いた歩行の記述

図3 ストレス関数のバリエーション

からずれてもあまりストレスを感じない歩行者や、少しずれるだけで強いストレスを感じる歩行者もいる。このような個人の歩行特性はパラメータの値によって表現される(図3(b))。

2.2.3 情報空間・移動可能領域の定義

歩行者はすべての他者を意識して歩行しているとは考えられず、また、あまりにも多くの他者を考慮に入れるとコンピュータ・シミュレーションを行う際にも、計算量の問題が生じる。そこで、歩行者が歩行時に周囲の歩行者を認識する範囲を「情報空間」と呼び、この範囲内の歩行者からストレスの影響を受けるものとする。また、歩行者が次の時点までに移動できる範囲を「移動可能領域」と呼び、この範囲内に次時点の移動地点が決まるものとする(図4)。具体的な数値は後述する観測データをもとに設定している(注1, 注2)。

図4 情報空間・移動可能領域

図5 後追い範囲

図6 先読み行動の記述

d_{ij} を歩行者 i と他者 j の最近距離、 t_{ij} を最近するまでの時間とすると、
 $\begin{cases} d_{ij} \rightarrow \text{小}; \text{衝突の危険大} \\ t_{ij} \rightarrow \text{小}; \text{衝突の危険大} \end{cases}$ であるので、
 $d_{ij} \cdot t_{ij} \rightarrow \text{小}; \text{衝突の危険大}$ と考え、次のように危険度 D を定義する。

$$D = a \times \sum_j -d_{ij} \cdot t_{ij} + b$$
 [危険度は最大で1、情報空間の端にいる歩行者に対して0になるように a, b を設定した。]
 左右で別々に危険度 D を求める。
 if $D_{\text{左}} < D_{\text{右}}$ then 左に回避
 if $D_{\text{右}} < D_{\text{左}}$ then 右に回避

図7 追い越し行動の記述

歩行者 i が他者 j を追い越す条件

- ①歩行者 i の歩行速度 > 他者 j の希望速度
- ②歩行者 i の進行方向を y 軸正方向にとった相対座標上で、縦軸4m、横軸2mの楕円内に他者 j がいること。
- ③歩行者 i と他者 j の相対速度の横方向成分が0.2m/s以内に収まること。

以上の条件が揃った場合、歩行者 i は追い越し行動を起すこととし、他者 j を追い越すまで希望速度を0.3m/s一時的に増加させる。

2.3 ある条件下で発生する行動特性の組み込み

歩行者の挙動を観察すると、ストレスとは別の要因に依存する行動特性が考えられる。これらの行動特性は、以下に示すようにストレスとは別の方法で表現し、モジュールとしてモデルに組み込む。

2.3.1 先読み行動

群集流動の中で、歩行者は効率的に目的地にたどり着くために絶えず先の状態を予測しながら歩行している。これは、目の前の歩行者を回避する方向（右または左）はその後の歩行効率に大きく影響するためである。そこで、回避行動時の先読み行動の記述方法について考える。先読み行動は後続の他者を含めた周囲の歩行者との衝突を事前に回避する行動と解釈することができる。そこで、衝突の危険を測る尺度を図6に示す方法で構成し、これをもとに先読み行動を記述した。

2.3.2 立ち止まり行動

入り乱れた歩行流では、目の前の歩行者が通り過ぎるのを待つために何度も立ち止る。観測データを用いて子細に検討すると、次時点（0.3秒後）に30cm以内に移動するような挙動はほとんど見られない。そこで、この範囲（30cm以内）を立ち止り範囲とし、次

図8 データの作成

時点の移動地点がこの範囲内に求まっても、歩行者は進まずにその場に立ち止るものとする注3)。

2.3.3 後追い行動

密度上昇に伴い、歩行者は同方向に進む歩行者の後を意識的に追って歩行する。観測によれば、①図5に点線で示した楕円内に他者が2人以上いる密度で、また、②図5に太線で示した後追い範囲内で同方向に進む歩行者の後を追って、後追い行動が発生していた。そこで、両条件が揃うとき、後追い行動を起こすものとする。

2.3.4 追い越し行動

歩行者の追い越し行動は「後追い→速度上昇→追い越し」というプロセスからなる文¹⁰⁾。そこで、歩行者は図7に示す条件を満たすとき、追い越し行動を開始する(追い越し開始時点)と考えた注4)。どのような方法で速度の増加を表現するかが重要になるが、ここでは希望速度を一時的に増加させることで表現した。希望速度の増加量は観測データをもとに0.3m/sとし、追い越し相手の真横を通過する時点(追い越し完了時点)まで継続するものと考えた。

3. 歩行者データの作成と歩行ストレスモデルの推定

3.1 歩行者の時系列データの作成

駅コンコースにおいて撮影したビデオ映像から歩行者のビデオ画面上での座標データを作成し、これに座標変換を施すことで、歩行者の時系列位置座標データを作成した注5)(図8)。計測誤差は、ビデオ撮影地点からみて縦方向で±10cm、横方向で±5cm以内に収まることを確認した。データ作成の具体的な方法とその精度については朝田・大佛文¹¹⁾・文¹²⁾を参照されたい。

3.2 パラメータ推定

3.2.1 パラメータ推定の結果とストレス関数の選定

観測から得られた実際の歩行軌跡を当該歩行者にとってのストレス最小地点と考え、パラメータ推定を行った。具体的には、モデル上でのストレス最小地点と実際の歩行軌跡との距離自乗和が最小になるように、勾配法を用いてパラメータを推定した(サンプル数は40)。表1に各ストレス関数ごとの推定結果の一部を示してある。また、表1の右端に実際に移動した軌跡と推定された軌跡の位置のずれの平均値(距離誤差)を示してある。

各歩行者の距離誤差をみると、各モデルとも1時点平均で10cm

表1 ストレス関数別のパラメータの推定結果

(1) 指数型+冪数型

歩行者no	α_1	γ	α_2	β_1	β_2	観測距離(m)	距離誤差(m)
1	9.5	3.5	5.4	4.7	0.5	11.5	0.113
2	15.5	1.4	11.7	3.6	2.4	13.5	0.094
3	4.5	2.5	7.9	4.7	1.3	6.7	0.109
...	...	...	...	...	...	...	...
40	14.0	2.3	16.5	0.7	2.3	18.6	0.094
平均距離誤差							0.114

(3) 指数型+指数型

歩行者no	α_1	α_2	β_1	β_2	観測距離(m)	距離誤差(m)
1	10.2	74.5	9.3	0.5	11.5	0.110
2	14.2	41.2	22.0	1.5	13.5	0.094
3	12.4	67.0	11.0	1.5	6.7	0.107
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
40	13.5	48.6	24.0	1.6	18.6	0.099
平均距離誤差						0.117

(2) 冪数型+冪数型

歩行者no	α_1	α_2	γ	β_1	β_2	観測距離(m)	距離誤差(m)
1	25.5	12.5	2.8	3.0	0.8	11.5	0.112
2	20.5	13.5	3.8	8.5	0.4	13.5	0.093
3	13.0	8.5	1.5	10.8	0.8	6.7	0.111
...	...	...	...	...	...	...	...
40	0.5	0.5	0.3	0.5	0.2	18.6	0.105
平均距離誤差							0.115

(4) 冪数型+指数型

歩行者no	α_1	α_2	β_1	β_2	観測距離(m)	距離誤差(m)
1	8.5	1.0	3.2	0.8	11.5	0.108
2	1.0	1.0	5.0	0.5	13.5	0.095
3	1.5	0.8	7.5	1.4	6.7	0.106
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
40	21.0	1.0	20.0	1.6	18.6	0.099
平均距離誤差						0.117

他者と向かい合っって同一直線状を接近する場合のストレスを、 x 方向の一次元空間で考える。

$$\text{Stress}(x_p) = \exp(-\alpha_1 \cdot d_p) + \exp(\exp(-\alpha_2) d_p) = \exp[-\alpha_1(x_j - x_p)] + \exp\{\exp(-\alpha_2)(x_c - x_p)\}$$

ここで、 $\frac{\partial \text{stress}(x_p)}{\partial x_p} = 0$ となる点、すなわち、

ストレス最小点 x_{pmin} を求める。ここで、右図のように、 $x_{pmin} = x_c$ となるときの両者間の距離が他者 j に近づく限界距離となることに注意すると、両者間の距離（限界距離） $D_{a正面} = (x_j - x_i)$ は次式で得られる。

$$D_{a正面} = -\frac{1}{\alpha_1} \log \left(\frac{\exp(-\alpha_2)}{\alpha_1} \right) - \frac{\exp(-\alpha_2)}{\alpha_1} V_w$$

$$= \frac{\alpha_2}{\alpha_1} + \frac{\log(\alpha_1)}{\alpha_1} - \frac{\exp(-\alpha_2)}{\alpha_1} V_w$$

ここで、第二項以降は表2に示すように非常に小さい値となるため、以下の近似が成立する。

$$D_{a正面} \approx \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad (\text{他者の正面に近づく限界距離})$$

同様に、他者と同一方向に進行している場合の限界距離、および、横方向の限界距離を求めることができる。

$$D_{a後方} \approx \frac{\beta_2 \alpha_2}{\alpha_1} \quad (\text{他者の後方に近づく限界距離})$$

$$D_{a横} \approx \frac{\alpha_2}{\beta_1 \alpha_1} \quad (\text{他者の横方向に近づく限界距離})$$

α_1 : 他者ストレスのパラメータ
 α_2 : 目的地ストレスのパラメータ
 V_w : 希望速度(一時点間に進む距離)

図9 限界距離とパラメータの関係

前後のずれに収まっており、全歩行者の平均をみても、同程度に記述力は高いことがわかる。ただし、(3)指数型+指数型はパラメータ数が少なく簡潔なモデルであり、また、他者ストレス、目的地ストレスの関数型が同じであることから、以下に示すようにパラメータの解釈が容易となる。これらの理由から、(3)指数型+指数型をストレス関数として採用することとした。

3.2.2 限界距離

歩行モデルでは、歩行者はストレスが最小となる地点へ移動するものと考えている。そこで、ストレスが最小となる地点をパラメータで表現し、これを用いて歩行者 i が他者 j に近づく限界距離を求めた(図9)。この値は歩行者 i にとって、他者の進入を許さない領域の限界を示しており、一種のパーソナルスペースの大きさと考えることができる。すなわち、パーソナルスペースのおおよその広がりモデルのパラメータで表現することができる。

図10 平均相対速度

(a) α_1 と歩行者属性・環境情報の関係

(b) 限界距離と歩行者属性・環境情報の関係

図11 歩行者属性から見た歩行特性

3.3 歩行者属性と歩行特性

3.3.1 歩行者属性からみた歩行特性

モデルの未知パラメータを安定的に推定するため、先に用いていたデータに新しく観測データを追加してパラメータを推定した(サンプル数は57)。次に、推定パラメータと歩行者属性・環境情報の関係について考察した。ここでは歩行者属性として、性別・worker(サラリーマンまたはOL)・グループ(2人組)・推定年齢・身長・

表2 パラメータの構造化

(1) α_1 の重回帰結果 重相関係数=0.775 *** 1%有意 ** 5%有意					(2) 対向者に近づける限界距離 $\frac{\alpha_2}{\alpha_1}$ 重相関係数=0.6962				
変数名	偏回帰係数	標準偏回帰係数	t値	判定	変数名	偏回帰係数	標準偏回帰係数	t値	判定
worker	-0.285	-0.2702	2.89	**	平均相対速度	1.75	0.412	3.77	**
密度	1.070	0.8447	9.04	**	推定年齢	-0.03	-0.167	1.57	
定数項	-1.089		0.72		worker	-0.04	-0.185	1.36	
					密度	-0.10	-0.345	2.78	**
					男性	0.01	0.047	0.32	
					定数項	1.65		1.44	
(3) 横方向の限界距離 $\frac{\alpha_2}{\beta_1 \alpha_1}$ 重相関係数=0.5909					(4) 他者の後方に近づける限界距離 $\frac{\beta_2 \alpha_2}{\alpha_1}$ 重相関係数=0.6596				
変数名	偏回帰係数	標準偏回帰係数	t値	判定	変数名	偏回帰係数	標準偏回帰係数	t値	判定
希望速度	0.134	0.2251	1.90		worker	-0.07	-0.288	2.50	*
推定年齢	-0.002	-0.1727	1.48		平均相対速度	1.38	0.323	3.00	**
身長	0.348	0.3540	2.75	**	密度	-0.10	-0.368	3.15	**
密度	-0.009	-0.4220	3.20	**	定数項	1.54		1.45	
定数項	-0.357		1.92						

横方向の限界距離から β_1 を求める。
 $\alpha_2 / \beta_1 \alpha_1 = -0.0089 [\text{密度}] - 0.002 [\text{年齢}] + \dots$
 $\beta_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} (-0.0089 [\text{密度}] - 0.002 [\text{年齢}] + 0.3479 [\text{身長}] + 0.1338 [\text{希望速度}] - 0.3571)^{-1}$
 $\beta_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} ((-0.06869 [\text{worker}] - 0.1034 [\text{密度}] + 1.3758 [\text{平均相対速度}] + 1.5362)$

希望速度を用いた。また、環境情報として密度・群集流動の平均相対速度（図10参照）を用いている。

初めにパラメータ α_1 と歩行者属性・環境情報の関係について考察した（図11(a)）。 α_1 はその値が大きいと、近隣の他者から受けるストレスの距離減衰は大きく、遠方の歩行者からのストレスはほとんど影響しなくなる。この α_1 は情報空間内の密度と最も相関が高く、密度が上昇すると α_1 は大きくなる。つまり、密度上昇に伴い遠方の他者から受けるストレスは相対的に小さくなり、近隣の歩行者のみに注意を払って歩行するようになる。また、属性別に α_1 と密度の関係について考察した。密度上昇に対する傾きから、男性は女性よりも、また、worker（サラリーマン・OL）はother（worker以外）よりも、遠方に注意を払って歩行していることがわかる。

次に、図9から限界距離は α_2 / α_1 で近似できることが判明しているので、 α_2 / α_1 と属性の関係について考察した（図11(b)）。図から密度が上昇するほど、また、高齢になるほど限界距離が小さくなり他者が十分接近しないと回避行動を取らないことがわかる注6)。

図10に示すように、平均相対速度は歩行者から見た群集流動の平均的な移動の方向を表している。群集流動が同方向流の場合には、平均相対速度は小さくなり、異方向流の割合が増えると大きくなる。図11(b)から異方向流の割合が増え平均相対速度が大きくなると、限界距離は大きくなり、早めに回避を行うことがわかる。

3.3.3 歩行者属性別の歩行特性のモデル化

推定パラメータの値を目的変数、歩行者属性・環境情報を説明変数として、重回帰分析を行った。その結果を表2に示す。 α_1 については以下の重回帰式が得られた。

$$\alpha_1 = (-0.2851[\text{worker}] + 1.07)[\text{密度}] - 1.0885 \quad (1)$$

ただし、[worker] はダミー変数である。推定された回帰係数を見ると、密度が上昇すると α_1 も大きくなり、近隣の歩行者からのストレスが支配的になることが表れている。また、worker の係数が負であることから、worker は遠方の歩行者に注意を払って歩行していることがわかる。

図12 モデルの適合性の検証

次に、 α_2 、 β_1 、 β_2 を相互に組み合わせて表現される限界距離を目的変数として重回帰分析を試み、得られた結果をもとに、表2に示す要領で α_2 、 β_1 、 β_2 を記述するモデルを求めた。まず、対向者との限界距離 α_2 / α_1 の重回帰式を以下に示す。

$$\alpha_2 / \alpha_1 = (0.01084[\text{男}] - 0.04414[\text{worker}] - 0.09670)[\text{密度}] + 1.7848[\text{平均相対速度}] - 0.02664[\text{年齢}] \quad (2)$$

ただし、[男]、[worker] はダミー変数である。回帰係数が正の値であると、限界距離が大きくなることを示している。すなわち、回帰係数の大きな説明変数は、早めに回避行動を行うように作用する変数である。例えば、平均相対速度が上昇したり、情報空間内の密度が低下すると早めに回避することが回帰係数に表れている。同様に、 β_1 、 β_2 の回帰式を表2に示した。以下では、これらの回帰式を組み込んだ歩行モデルを用いる。

3.3.4 歩行モデルの適合性検証

歩行モデルの適合性を検証するために、実際の歩行軌跡とモデルによって推定された軌跡との位置のずれを求めた。その結果、各時点（0.3秒間隔）の平均距離誤差が約11cmという微小な範囲に収まることを確認した。表1に示した平均距離誤差は個人ごとに異なるパラメータを用いた結果であったが、ここでは、歩行者属性と環境情報をもとに推定したパラメータの値を用いている点が異なる。すなわち、モデルとして一般性を高めたにもかかわらず、モデルの高い記述力は保たれている。

次に、実際の歩行軌跡と歩行モデルによる歩行軌跡を比較して、視覚的に適合性を検証した。図12の(a)には実際の軌跡とモデル

図 13 歩行集団の自動抽出方法

図 14 シミュレーションの設定条件 (その1)

の軌跡との進行方向の違いを、(b)には両者の位置のずれを示してある。少数であるが、実際の歩行軌跡とずれたケースも見られた。その例を例2に示してある。実際の歩行軌跡では後続の対向者を意識し、初めの他者を大回りして回避しているのに対し、モデルでは目的地方向に直進している。これは、実際の歩行者の目的地ストレスがモデルのそれよりも小さかったためと考えられる。しかし、全体的には例1のように実際の歩行軌跡とほぼ同じ軌跡をたどっているケースが多く、モデルの記述力は概して良好である。

例3には先読み効果の一例を示した。先読みを加味しない場合(1)では、実際とは異なる方向に対向者を回避し、その後、前方からきた対向者を回避している。これに対し、先読みを加味する場合(2)では、実際と同じ方向に回避し、その後もスムーズに歩行している。すなわち、実際の歩行者をモデル化する上で先読み行動を組み込むことの意義は大きい。

4. シミュレーション実験による群集流動分析

4.1 密度変化による群集流動に関する考察

密度上昇に伴い小集団(以下、歩行集団)が形成され、これらが結合して歩行流が発生する。ここに群集流動の大きな特徴がある。この様子をシミュレーション実験によって観察した。歩行集団の抽出方法は図13に示してある。詳細については佐藤・大佛文¹³⁾、文¹⁴⁾を参照されたい。まず、密度が歩行流に及ぼす影響をできるだけ純粋に抽出するため、図14のような単純な歩行空間を考えた。シミュレーション結果の一部を図15に示してある。図中の線で結ばれた歩行者同士は歩行集団を表している。密度が上昇するに伴い、集団が大きくなることがわかる。なかでも、図15(b)の点線で囲った歩行集団は大きく成長しており、周辺の対向者はこの集団の境界をなぞるように歩行している様子が見られた。

次に、属性別に高密度下で100時点(30秒)間のシミュレーションを行い、各時点で形成されている歩行集団の数(図13(2)に示した歩行者ペアの数)を求めた。その結果、高齢者の場合を1.0としたとき、女性では1.37, workerでは1.17, 男性では1.06となり、女性は歩行集団を形成しやすく高齢者は形成しにくいことがわかった^{注7)}。図16(a), (b)に女性と高齢者のシミュレーション結果の一部を示してある。女性の場合、進行方向に長い歩行集団を形成している。これに対し、高齢者は近隣の歩行者のみと集団を形

図 15 密度変化による歩行集団の形成

図 16 属性別の歩行集団の発生のしやすさ

図 17 シミュレーションの設定条件 (その2)

成していることがわかる。

4.2 駅改札口におけるシミュレーション実験

図17に示した改札口周辺の通路空間を分析対象空間として、歩行モデルを用いて空間分析を行った。また、歩行時の効率性や快適性と改札の通過方向との関係について分析するため、改札への進入方向のパターンを図18(1)(a)~(d)のように変化させた。さらに、電車到着による密度変化の影響を考慮して、歩行者の分析対象領域への参入の仕方(参入領域の発生人数)を変化させた(図18(1)参入パターンI・II)。また、朝夕の混雑時を想定して、高密度下でシミュレーションを行った。

歩行空間を評価する方法として、目的地にたどり着くまでの到達時間を全歩行者で平均した値(以下、平均到達時間)と希望到達地点からのずれ距離(以下、ずれ距離)を用いた。ずれ距離が大きくなるほど、歩行空間としての快適性は低下するものと考えられる。図18には25cm×25cmのグリッド内でずれ距離の平均を求め、その空間分布を示してある(図中のドットは25cm×25cmのグリッドを表しており、色が濃いほど、ずれ距離が大きいことを示している)。また、ずれ距離を空間全体で平均した値(以下、平均ずれ距離)と平均到達時間についても図中に示してある。

まず、改札の方向が左右に分かれる場合(図18(1)(b))につい

図 18 ずれ距離の空間分布

て考察する。図 18 の A では駅から出る人の流れと駅へ入る人の流れがぶつかり、ずれ距離が非常に大きくなるが、B では駅に入る人の同方向流が形成されるため、ずれ距離が殆ど生じない（快適性が高い）。平均ずれ距離は参入パターン I・II を通して比較的小さい値をとっている。しかし、比較対象として設定した参入パターン III（図 18 (3)）の場合、駅を出る人の流れと駅に入る人の流れが交差するため、平均到達時間・ずれ距離ともに大きくなってしまふ。

次に、改札の方向が交互に入れ替わる場合（a）では、空間全体でずれ距離が大きくなっている。これは、駅から出る人と駅へ入る人が隣接して改札を通過するため、改札付近を中心として、空間全体で群集流動に乱れをもたらししているためである。しかし、平均到達時間は参入パターン I・II とともに最も短く、効率的に歩行者は目的地にたどり着いている。

最後に、中央に同方向の改札をまとめた（c）（d）のパターンについて考察する。図の C、D、E、F では、同方向流が形成され、ずれ距離が小さくなっている。さらに、最も混雑する参入パターン I であっても、（c）の平均ずれ距離は最小値をとっており、最も快適性が高いことが分かる。また、参入パターン I・II を通して（c）のパターンは（d）よりもずれ距離が小さい。すなわち、より多くの歩行者（ここでは駅構内から外へ出る人）が通過する改札を中央にまとめる方が、快適性は高くなることがわかる。

これらの考察から、混雑時には、平均到達時間の効率性を重視する視点からすれば（a）のパターンが良く、空間の快適性を重視すると（c）のパターンが良いことがわかる。図 18 (2) には低密度における（a）（c）のパターンのシミュレーション結果を示した。図から（a）の改札パターンは（c）のパターンよりも平均ずれ距離が小さいことがわかる。（c）のパターンでは改札の通過方向が入れ替わる付近に歩行者が集まりやすく、かえって快適性は低減する（図 18 (2) の G、H）。つまり、低密度時では、（a）の改札パターンは効率の面だけでなく快適性の面でも優れているといえる。

以上より、電車の発着時刻や密度の変化に応じて、改札への進入方向を切り替えることにより快適で効率的な改札空間とすることが可能となることがわかる。本モデルを用いれば、空間設計のためのこうした子細な基礎情報を得ることができる。

5. まとめ

本研究では、歩行者が歩行中に感じるストレス（他者ストレスと目的地ストレス）を用いて歩行モデルを構築した。また、ストレス概念では直接表現しにくく、ある条件が揃うことで発生する行動特性についても考察し、歩行モデルに組み込んだ。さらに、実データをもとにパラメータを推定することで歩行者の歩行特性と歩行者属性・環境要因との関係を明らかにした。歩行モデルの検証を試み、歩行者の挙動を良好に表現できることを確認した。さらに、シミュレーション実験では、個人を記述した歩行モデルであるものの群集流動の特徴である歩行集団の形成を表現できることを示した。さらに、効率性・快適性に着目した歩行空間の環境評価を試み、本研究で提案した歩行モデルの有用性を示した。

注

- 「情報空間」の大きさは次に示す要領で設定した。①まず、回避行動をとる歩行者の進行方向を縦方向とする相対座標空間を用意する（図 4 参照）、②すべての回避行動データについて、文献 10）に示した方法で「回避行動開始時点」を求める、③回避行動開始時点における回避相手の位置を相対座標空間へプロットする、④すべての回避相手の位置を包含する最小の楕円（半径 7m、縦横比 2m）を情報空間とする。以上の手続きで得られる「情報空間」の大きさは、回避行動開始時点（すでに回避相手の存在を意識している状態）に基づくものであるが、相対距離の最大値をカバーする空間範囲を求めることで、回避相手を意識している「情報空間」を記述できるものと考えた。
- 「移動可能領域」の大きさは次に示す要領で設定した。①注 1）と同様に相対座標空間を用意する、②各歩行者の次時点における自らの位置を相対座標空間にプロットする、③移動可能距離は歩行速度が速い人で大きく遅い人で小さいことから、②で求めた相対座標空間のプロット図を、各歩行者の希望速度で基準化する、④すべての歩行者についてプロット図を重ね合わせ、ほとんどすべての点が収まる空間範囲（縦方向に希望速度の 1.7 倍、横方向に希望速度の 1.4 倍の範囲）を「移動可能領域」とする。希望速度をもとに「移動可能領域」を設定することで、歩行速度の異なる様々な歩行者について適用することができる。
- 入り乱れた群集流動では、目の前の歩行者が通り過ぎるまで立ち止まることがある。本研究で扱うような歩行者密度においては、1 時点間（0.3 秒）というわずかな時間内に微小距離だけ移動することは実際ではなく、わずかに進むスペースがあってもその場に瞬間的に静止することの方が自然である。現時点に対する次時点の移動座標をプロットしてみると、30cm 以内の移動はほとんど観測されなかった。そこで、この 30cm の範囲を立ち止まり範囲とし、仮にストレス最小地点地点がこの範囲に存在しても、歩

行者は微小距離を移動せず、現在地点に立ち止まるものと考えた。

- 4) 歩行者Aの前方を歩行者Bが歩いているとき、①Bの希望速度がAの希望速度よりも遅く、②A-B間の距離が詰まっており、③Bの進行方向がAの進行方向とはほぼ一致していると、Aは一時的に歩行速度を高めながらBを追い越そうとする(追い越し行動開始時点)。追い越し行動の観測された歩行者ペアのデータのみを抽出し、追い越し行動開始時点における両者の位置関係を回避者(歩行者A)の目的方向をY軸正方向(縦方向)にとった相対座標空間にプロットすると、縦方向4m、横方向2mの楕円に収まることが判明した。また、回避者が希望速度で目的方向に向かったときの速度ベクトルと回避相手の速度ベクトルの差をプロットしてみると、横方向の速度ベクトルの差は0.2m/sに収まっていることが判明した。以上より、追い越し行動をとる条件として、図7に示すような値を設定した。
- 5) 観測場所の選定に当たっては、①歩行者以外の交通や障害物の影響が少ないこと、②観測精度を高めるために、できるだけ高所からビデオ撮影が行えること、③多様な性別・年齢の歩行者で構成される空間であることなどを勘案して、京王・井の頭線・渋谷駅改札前コンコースにおいてビデオ観測調査を行った。観測時間は、午前11時から12時と午後2時から4時である。歩行者の身長については柱に設定した目盛をもとに推定した。また、歩行者の性別やおおよその年齢などについてはビデオ画像を拡大して目視により推定した。
- 6) 限界距離と推定年齢との相関係数は1%水準で有意であると判定されたが、強い相関が得られているわけではないので、サンプル数を増やしてより精緻に検討することが望ましい。また、平均相対速度についても同様である。
- 7) 各時点における集団を形成している歩行者ペアの数の平均値は、値の小さいものから順に、老人が42.0、男性が44.5、workerが49.0、女性が57.5であった。これらの値について平均値の差の検定(サンプル数=100)を試みたところ、各属性間で平均値の差は1%水準で有意と判定された。

参考文献

- 1) 中祐一郎：建築の分野における歩行研究，鉄道技術研究報告，No. 1079，pp. 115-117，1978. 3
- 2) 岡崎甚幸：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究(その1)磁気モデルの応用による歩行モデル，日本建築学会論文報告集，第283号，pp. 111-117，1979. 9
- 3) 岡崎甚幸：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究(その2)混雑した場所での歩行，日本建築学会論文報告集，第284号，pp. 101-110，1979. 10
- 4) 建部謙治・中島一：静止した障害物に対する単独歩行者の回避行動-歩行者の回避行動に関する研究(I)，日本建築学会論文報告集，第418号，pp. 51-57，1990. 12
- 5) 建部謙治，辻本誠，志田弘二：回避行動開始点の判定と前方回避距離-歩行者の回避行動に関する研究(II)，日本建築学会論文報告集，第465号，pp. 95-104，1994. 11
- 6) 矢守克也・杉万俊夫：横断歩道における群集流動の巨視的パターンのシミュレーション，実験社会心理学研究，第32巻，第2号，pp. 79-88，1992
- 7) 岡崎甚幸・松下聡：避難計算のための群集歩行シミュレーションモデルの研究とそれによる避難安全性の評価，日本建築学会論文報告集，第436号，pp. 49-58，1992. 6
- 8) Timms P, Cavalho S: Inclusion of pedestrians and cyclists in network planning models, in Proceedings of the DRIVE Conference Advanced Telematics in Road Transport Research, Elsevier Amsterdam, pp.1076-1094, 1991
- 9) Kerride J., Hine J., Wigan M.: Agent-based modelling of pedestrian movements: the questions that need to be asked and answered, Environment and Planning B, Vol.28, pp.327-341, 2001
- 10) 朝田伸剛・大佛俊泰：歩行者の回避行動に関する研究，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.105-108，2001
- 11) 朝田伸剛・大佛俊泰：歩行空間における歩行者と自転車の回避行動，日本建築学会大会学術講演梗概集，E-1，pp.1059-1060，2000
- 12) 朝田伸剛・大佛俊泰：自転車と歩行者の回避行動に関する考察，地理情報システム学会講演論文集，Vol.9，pp.281-284，2000
- 13) 佐藤航・大佛俊泰：群集流動における歩行集団の抽出方法と視覚化，日本建築学会大会学術講演梗概集，E-1，pp.785-786，2001
- 14) 大佛俊泰・佐藤航：群集流動における歩行集団の抽出方法と視覚化，地理情報システム学会講演論文集，Vol.10，pp.189-192，2001

(2003年4月2日原稿受理，2003年8月26日採用決定)