

個体差を考慮した歩行者行動シミュレーションの研究 Simulation of Pedestrian's Behavior Including Individual Differences

田中 正*・杉山 崇**・西 淳二***・奥山 健二****

Tadashi TANAKA, Takashi SUGIYAMA, Junji NISHI, Kenji OKUYAMA

The simulation computer program is developed to examine the usual behavior and individual norm of pedestrians. A number of a pedestrians' activities scenes are taken by digital video camera. Persons from the four interesting scenes are invited to interview based on which a questionnaire has been prepared. The information gained from this questionnaire is implemented in a simulation computer program. The compared results are shown and applied as an essential information to the computer program. The effect of the pedestrian width changing is considered in this study.

key word: DEM, simulation, pedestrian width, space design

1. はじめに

歩行者にとっての安全で快適な空間設計は，特に不特定多数かつ集中的な歩行者の利用が見込まれる空間において求められてくる．例えば，完成後の空間内で歩行者がどこをどのように流れ，さらにどれくらいの数の歩行者が一度に流入すれば，どこでどれくらい滞留するのかをあらかじめ正確に把握する必要がある．事前に歩行者流動に関する滞留などの問題点を予測できれば，通路幅を変更するなど問題点に対応できる．すなわち造った後に問題点が露呈して本来の性能を充分に発揮できないという無駄な投資を避けることができ，安価で快適な（滞留の少ない）空間を造るのに大きく貢献できる．

地下空間は人工的空間で，視覚・聴覚面でコントロールされた空間である．特にホーム空間では乗車あるいは降車後改札へ向かうという単一目的の行動をとる空間である．つまり，地上等の空間に比べて，歩行者行動に与える要因が限定されるので歩行者行動シミュレーションの基礎的な研究に適している．

一方，不特定多数の人々が利用する地下街，地下鉄駅，ビルなどの閉鎖的な空間では，ひとたび地震や火災，地下空間においては水害などの災害が発生すれば，そこに居合わせた人々はともすればパニックに陥る可能性もある．防災計画においても常時，非常時を問わず歩行者の（避難を含む）行動を正確に把握し，その構造物の強度的なものだけでなく空間内の滞留に関しての安全性を評価する必要がある．

快適性および安全性を評価するには，多数の被験者を使って通路などで滞留を起こし，その様子を調査したり，過去の災害事例の詳細な分析などから抽出された避難行動の支配要因の情報を被験者に与えて避難実

キーワード：個別要素法，シミュレーション，通路幅，空間設計

* 正会員 工博 名古屋大学大学院 助手 工学研究科地圏環境工学専攻

** 正会員 工修 戸田建設

*** 正会員 工博 名古屋大学大学院 教授 工学研究科地圏環境工学専攻

**** 正会員 学博 名古屋市立大学 芸術工学部 教授

験を行うなどの方法もある。しかし、緊急時を想定した避難実験では危険が伴ったり、被験者の心理状態を緊急時のパニック状態に操作するのが極めて困難であり、通常時の歩行者行動を分析し、それを拡張利用して避難行動を数値シミュレーションで再現するのが現実的と考えられる。

翻って既存の歩行者行動シミュレーションをたどってみると、予め設定した経路を経て出口（ゴール）に向かって全員が等速で移動するとしたものが多く、そのままでは、これからの空間設計に役立つ情報をもらし得ない。そのようななかで、岡崎ら¹⁾（1992）は磁気モデル、清野ら²⁾（1998）は個体要素仮想パネを用いた個別要素法（DEM）では、個々人が壁・柱などの障害物、他人との距離などの周りの状況を判断して空間内を移動する様子を再現している。また、佐野・渡辺ら³⁾（1996）は六角形メッシュモデルを用いて混雑している（人口密度の高い）エリアを避けて群集が移動する様子を再現し、この分野の研究はここ10年でパーソナルベースの計算機の性能とともに大きく飛躍し始めている。しかし、人間個々の動き（考え）まで考慮したモデルは提案されていない。

そこで本研究では、歩行者行動シミュレーションに、現在残されている課題の一つである、個人個人の判断基準の差（ここではこれを“個体差”と呼ぶ）を含めたシミュレーションを提案し、より現実の歩行者行動に近づけることを目的とした。個体差に関しては、ビデオ映像中の被験者へのインタビュー調査から抽出して作成したアンケート調査で得られたいくつかの場面における特有の行動の確率分布として通常時の歩行者行動シミュレーションに組み込み、個体差を含まないものとどのような違いが出るかを実際のビデオ映像の歩行者流動とともに比較実験した。また、このシミュレーションプログラムを用いて、名古屋市営地下鉄東山線本山駅の異なった階段幅での乗客の排出時間についてケーススタディを行い、考察を加えた。

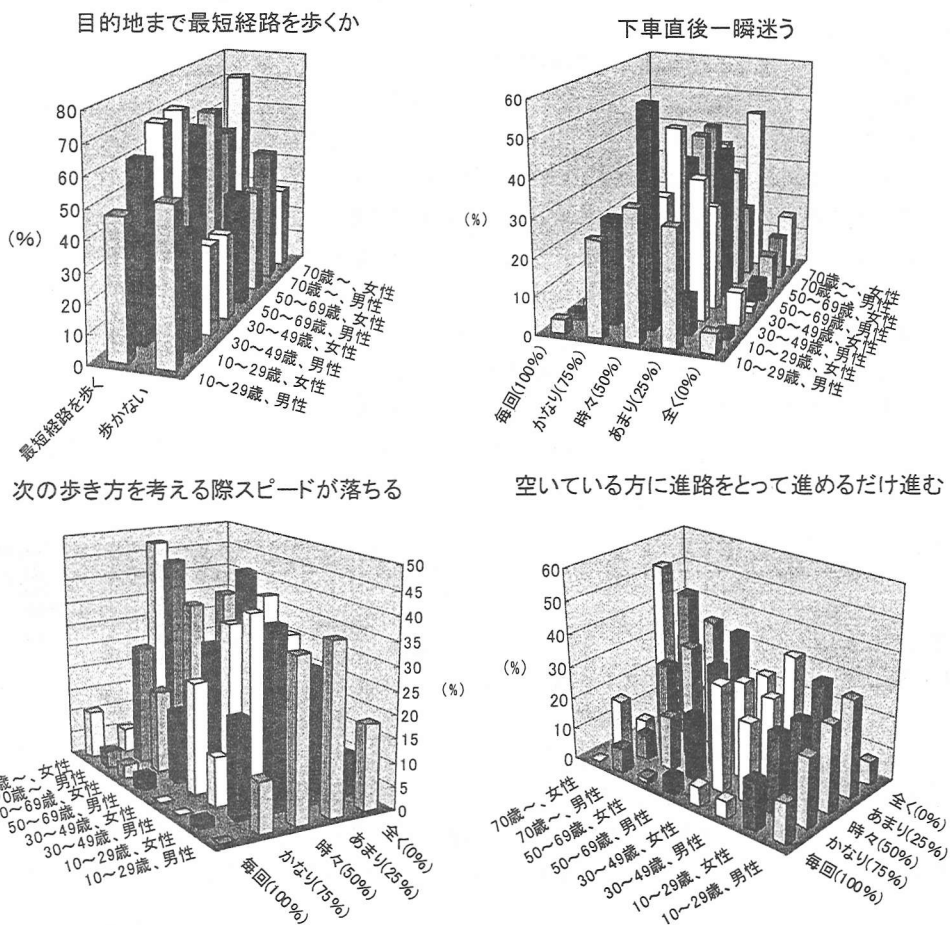
2 歩行時の個体差に関する調査

2.1 歩行者行動のビデオ撮影およびインタビュー調査

歩行者行動シミュレーションプログラムに個体差を組み込むにあたって、人間が歩行する際に発生する様々なシチュエーションおよびそのときに各個人が選択する加速、減速、方向転換にまつわる決断にどのよ

表-1 被験者へのインタビュー結果

歩行状態の変化要素	自分の意思による決定	周囲の状況に左右される決定
加 速	・新たな目標地点（ゲート）に向かった ・だんだん狭くなるすき間（人と壁など）をすり抜けた ・周りに比べて人が空いているエリアに突進した	・周りの流れに乗った ・前の人について行った ・仲間に合わせた
減 速	・横を抜いて前に入ってくる人に譲った ・目標地点（ゲート）を通過するときに、次の目標地点までの歩き方を考えた ・電車のドアからホームに出た直後、左右どちらに行けばよいが一瞬迷った	・仲間に合わせた ・前の人たちが詰まってきた ・外見の怖い人に威圧された ・周りの流れに合わせた ・年配の方に注目していて自分も減速していた
方向転換	・新たな目標地点（ゲート）に向かった ・常に人の空いている方を狙って歩いた ・最短経路を歩くために、次の曲がり角の内側の角を狙って歩いた ・通路の中央付近を歩く ・電車のドアから一度降りてまた乗る人が邪魔だった	・仲間に合わせた ・周りの流れに合わせた ・前の人について曲がった ・90°曲がるときは他人と交錯しないように、曲がる中心からの距離が変わらないように（円を描くように）曲がった ・左右の人との間隔を等しくするためにずれた ・横の人がこちら側に膨らむのに合わせた ・遅い人を抜くためによけた
その他	・ホームは電車側より壁側を歩きたい ・空いているところを歩きたいが、先の方まで見て逆行する人などがいれば空いても突っ込まない	・前の人足元を見て歩くので、周りはあまり見ない ・仲間と歩くときは仲間を注視しているので他人とぶつかりやすい



図・1 4 場面における行動パターンを実行する、世代・性別の分布

うなものがあるか、そしてその決断が各世代・各性別でどのような割合で下されるかを調査する必要がある。そこで今回、名古屋市営地下鉄東山線本山駅において乗客が電車から降りてホームを歩き、階段を上る過程を通勤・通学ラッシュの時間帯と昼過ぎの時間帯の2回にわたって、歩行者流動に与える影響が少ない位置（ベンチの影やコーナー等）を選んでホームビデオで撮影し、あらかじめその中に含まれていた被験者（研究室学生）7名に、別の場所でビデオ映像を振り返って見てもらいながら、各被験者が撮影当時どのような状況の下でどのような決断をして加速、減速、方向転換を行っていたのかを細かくインタビュー調査した。インタビュー結果によると、人間行動の判断基準は、大きく「自分の意思による決定」と「周囲の状況に左右される決定」との2つに区分できる。インタビュー結果を加速・減速・方向転換・その他の4要素および自分の意思による決定と周囲の状況に左右される決定の2要素に分類したものを表・1に示す。

これらを見ると、周囲の状況に左右される決定に関しては、「前の人たちが詰まってきた（減速）」「左右の人との間隔を等しくするためにずれた（方向転換）」「横の人がこちら側に膨らむのに合わせた（方向転換）」「遅い人を抜くためによけた（方向転換）」など、既存の歩行者行動シミュレーションですでに含まれている判断基準が多く見受けられるのに対して、自分の意思によって決定する次の瞬間の歩行動作への判断は、「新たな目標地点（ゲート）に向かう（加速・方向転換）」以外は、実際に歩く際によく見受けられるものがあるながらも、これまでの研究には取り上げられていないものがあることがわかる。

2.2 アンケート調査

前節のインタビュー結果を基に、既存の歩行者行動シミュレーションには含まれていない「自分の意思による決定」を中心に、世代・性別による各決断の発生状況を調べるため、アンケートを約 2000 通（名古屋市民：1800 通強、その他 100 通強）配布し、447 通の有効回答（回答率 23.2%）を得た。これらの回答を集計から、決断に関して世代または性別ごとの特徴が見られた。そこで、世代または性別ごとに違いが見られ、かつプログラムのアルゴリズムが比較的容易な 4 つの場面における行動パターン、すなわち、

- ① 目的地まで最短経路を歩く（働き盛りの世代（30～49 歳）において実行確率が高い）
- ② 下車直後にどちらに行けば良いかわからず一瞬迷う（70 歳未満、女性の実行確率が男性より高い）
- ③ 視覚的場面が変わるとき（ホーム空間→階段空間など）、
次の歩き方を考える際に自然と歩行速度が落ちる。②に同じ）
- ④ 空いている方に進路を取って進めるだけ進む（世代が上がるにつれ実行確率が下がっていく）

の 4 パターンおよび、世代・性別による歩行速度の違いを個体差としてプログラムに組み込むこととした。図-1 に以上 4 パターンの行動を実行する、世代・性別ごとの分布を示す。

3 モデル化と行動の理論

3.1 対象空間と歩行者のモデル化

歩行者行動シミュレーションプログラムを作成するとき、3 つの基本となるモデル化が必要である。すなわち、①対象とする空間のモデル化、②歩行者のモデル化、③人間行動の理論と表現方法である。

本研究で扱う対象空間として名古屋市営地下鉄東山線本山駅ホームの北西側階段付近を選んだ（図-3.1）。ここを選んだ理由は、歩行者（地下鉄降客）の目的が電車を降りてホームを歩き階段を上するという目的で比較的統一されていること、地下鉄ということで地上の駅よりも周りの景色などの影響が少ないことなどがあげられる。

本研究では、このようなごく限られた場所に対する空間のモデル化に適した平面座標型モデルを、歩行者のモデルについては個々の心理的作用を考慮に入れることが可能な力学理論を用いた個人型モデルをそれぞれ採用した。人間行動の理論と表現方法については次項以降に述べる。

3.2 個体要素

本研究における歩行者を表す個体要素は、清野ら（1998）が提案した個別要素法（DEM）モデルを簡略化したものに、本研究におけるアンケートに基づく個体差を加えたモデルを作成した。

詳しく述べると、個体要素としての歩行者を取り扱う場合、人体の厚さや肩幅などの寸法が重要な項目となるが、Fruin⁴⁾（1974）によって紹介されている、ニ

ューヨーク市の地下鉄車両の乗客容量に使用される、アメリカ人の実際の寸法よりやや大きめで体の揺れを考慮に入れた 0.21m²の人体楕円（0.45m×0.65m）を参考に、本研究では直径 0.5m の円に置き換えた。

人間は自分の周囲の個人空間を守り、他人がその空間に入ろうとするとそれを避けようとする心理が働き、

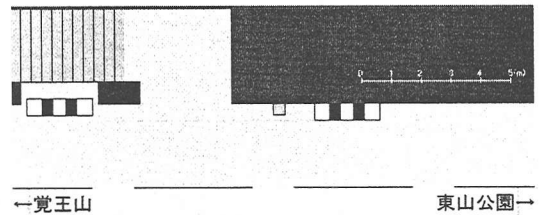


図-2 本山駅ホーム北西階段付近平面モデル

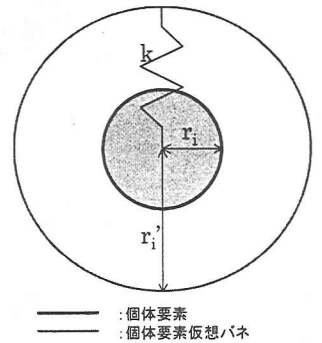


図-3 人間のモデル化

表-2 使用パラメータ

個体要素半径 r_i	0.25(m)
個体要素仮想半径 r_i' (※)	0.98(m)
〃 (電車内)	0.25(m)
個体要素仮想バネ定数 k (※)	$6.62 \times 10(N/m)$
計算時間間隔 Δt	0.1sec
目的地への加速度	歩行速度/1(m/sec ²)

(※) 清野らの研究（1998）による

ある一定の距離を保とうとする。清野らはこれを個体要素仮想バネとして設定し、反発力を発生させているが、本プログラムでもこの個体要素仮想バネを設定した（図-3、表-2）。また個体要素仮想バネは、対象が歩行者の「近づきすぎたら離れたい」という心理を表現したものであるので、仮想バネは個体要素の法線方向のみに作用させる事とした。

群集の中の個体要素 i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$; N は歩行者総数) の質量を m_i とし、 x, y 方向への変位をそれぞれ x_i, y_i とすると、運動方程式は以下ようになる。ただし、ここにおいても対象が歩行者であるため、回転運動に関してはこれを拘束されていると見なし、モーメントに関する運動方程式は考慮しない。

$$m_i \ddot{x}_i(t) = f_i^x(t), \quad m_i \ddot{y}_i(t) = f_i^y(t) \quad (1)$$

$$f_i^j(t) = f_{sk} + f_w + f_g + f_a + f_b + f_c + f_d \quad (\text{ただし, } j = x, y) \quad (2)$$

ここで、 f_{sk} は他人が自分の個人空間に入ってきたことによる個体要素仮想バネからの力、 f_w は壁などの障害物からの反発力、 f_g は個体要素が目的地へ向かう推進力、 $f_a \sim f_d$ はそれぞれ個人 i が今回プログラムに組み込んだ各場面での行動を実行する際に作用する力である。

時刻 $t-1 \sim t$ における時間 Δt での加速度が一定とすると、式 (3.1) を積分することで時刻 t における速度と変位は以下ようになる。

$$\dot{x}_i(t) = \dot{x}_i(t-1) + \ddot{x}_i(t-1)\Delta t$$

$$\dot{y}_i(t) = \dot{y}_i(t-1) + \ddot{y}_i(t-1)\Delta t$$

$$x_i(t) = x_i(t-1) + \dot{x}_i(t-1)\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{x}_i(t-1)\Delta t^2$$

$$y_i(t) = y_i(t-1) + \dot{y}_i(t-1)\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{y}_i(t-1)\Delta t^2$$

表-3 世代・性別の平均歩行速度(m/sec)

50歳未満	男性	1.45
	女性	1.23
50歳～69歳	男性	1.19
	女性	1.04
70歳以上	男性	0.99
	女性	0.89

(注) 清野らの研究 (2000) による

本研究における個体差に関するデータ設定に関しては、被験者総数、各世代・各性別の割合に応じて個体要素 i に世代・性別・歩行速度（表-3）の情報を与え、アンケート結果から得られた各シチュエーションにおける特徴的な行動（前章で述べた4つの行動パターン）の決断の確率分布に基づいて、そのときの行動パターンを実行する確率を割り当て、その確率によって、実際にそのアクションを起こすかどうかを決定、すなわち本研究における個体差を分配した。以上の過程によって個体要素 i に、平常時によく起こり得る場面における判断（個体差）を初期データとして組み込んだ点で、今回のモデルは従来にはないモデルと言える。

3.3 個体要素に作用する各種力の設定

本研究で用いた歩行者行動の解析手順を示す。このプログラムにおいて、各個体要素に個体差を割り当てた後に、発生位置（降りるドア）ごとの人数配分を行い、 Δt ごとに各個体要素に式 (2) の $f_i(t)$ を加えて個体要素位置を更新し、シミュレーションを実行する。シミュレーションを実行するにあたって使用する各種パラメータの値は表-2 および表-3 に示すものとし、以下に各種アルゴリズムを述べる。

(a) 直進および進路変更（右左折）

ホーム空間で各個体要素（歩行者）を移動させるに際して、図-4 のようにホーム空間を各エリアに区切り、階段（ゴール）に到達するまで、現在いるエ

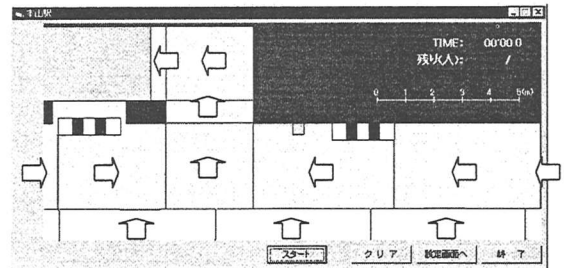


図-4 各エリアにおける f_g の方向

リアとその次のエリアとの境界線を現エリアでの目的地（ゲート）として矢印の向きに力 f_g を加えた。表・2にあるように、この力による加速度は一定（歩行速度）とした。これはビデオ映像により、各歩行者が概ね1歩～3歩（約1秒）の間に歩行速度に達していることを理由としている。

以上のように目的地（ゲート）への力 f_g を次々と加えていくと、個体要素 i の歩行速度が初期設定時の歩行速度を超えてさらに加速するという不具合が起きる。この不具合を防ぐため、全ての力の合力 $f(t)$ （ただし $j=x, y$ ）を加えて加速した後の速度が個体要素 i の初期設定速度を超えた場合は、 x 成分と y 成分の比を保ったまま、

$$\sqrt{\dot{x}_i(t)^2 + \dot{y}_i(t)^2} = v_i \quad (\text{ただし、} v_i \text{ は個体要素 } i \text{ の初期設定速度})$$

となるように速度を圧縮した。この圧縮をすることで、目的地（ゲート）へ向かいながら安定した速度を保つ直線運動を表せるだけでなく、ほぼ円運動に近い進路変更（右左折）を表現する事が可能となる（図・5）。

(b)最終目的地（階段）まで最短経路を歩く

最短経路を歩こうとする性格（個体差）を設定された個体要素 i には、図・6で網掛けで強調されたエリアにおいて、次のエリアまでの目的地（ゲート）への力とは別に図中矢印の方向つまりゲート方向とは垂直な方向に力を加えた。この力により、対象エリアにおいて個体要素 i が最短経路上を最終目的地まで歩行する様子を近似的に再現した。進行方向に対して垂直な方向へ加える力の大きさは、軌跡が不自然にならないように次のエリアへ向かう際の目的地（ゲート）方向への力の $1/3$ とした。

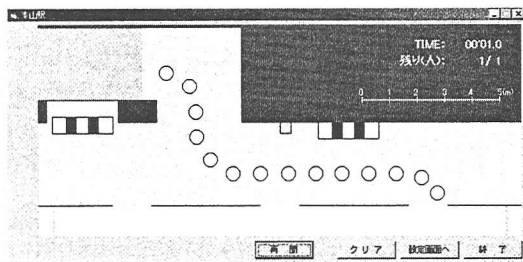
(c)下車直後一瞬迷う

このシチュエーションは、対象駅が不慣れな駅であったり、いつもと違う車両・ドアから降りた際に、電車から降りた直後に目標を失い、続いて降りる人々の邪魔になったり、ホーム上ですでにできている人の流れを妨げたりする現象をシミュレーション上で表そうとするものである。アンケート調査においては70歳以上の世代を除いて、男性より女性にこの傾向がやや強く見られた（図・1）。

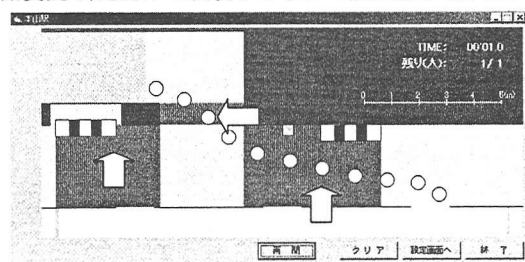
この現象を起こす判断がTrue（実行）となった個体要素 i のうち、ドアから出た時に前方90度の視野内に階段が入らない、すなわち今回の空間モデルでは、対象車両の右端の扉から降りる人に限って、扉を出た瞬間から1.0～2.0秒の間（乱数によりランダムに設定）、左右方向の動きを拘束し、さらに歩行速度を初期設定速度の $2/3$ と仮定し、電車の進行方向と垂直に歩行させた（図・7）。

(d)次の歩き方を考える際減速する

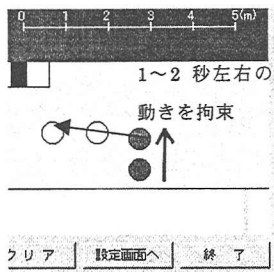
このシチュエーションは、ホーム空間から階段空間へと視覚的場面が大きく変わる時、次の空間をどう歩くか考える際に自然と歩行速度が落ちるというものである。この現象についても、アンケート調査で前項と同じく女性の方が



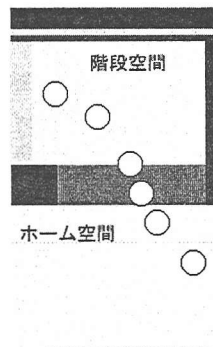
図・5 過剰速度の圧縮による円運動に近い進路変更



図・6 最終目的地までは最短経路を目指す



図・7 下車直後一瞬迷う



図・8 歩き方を考える際減速

True（実行）にやや偏っている（図-1）。

ここでは、対象エリア（図-8 のホーム空間と階段空間の間のエリア）において $t-1 \sim t$ の時間 $\Delta t (= 0.1\text{sec})$ 毎に速度を 10%（1 秒で 2 歩歩くとすると 1 歩毎に約 4 割減）減じた。ただし、滞留などが起こっていて個体要素 i の速度がすでに充分遅いのさらに減速させるのは不自然なので、個体要素 i の速度が初期設定速度の $2/3$ 以下であったらこのイベント自体をキャンセルした。

(e)空いている方に進路を取る

このシチュエーションは、前に人がいる時は空いている所を探しながらできるだけ前進するというもので、アンケート調査によると、世代が若くなるほど True（実行）の確率が高くなっていることがわかる。（図-1）

シミュレーション上では空いている所を探す、すなわち、前方の近い人を避けることでこの行動を表現した。具体的には、個体要素 i が他の誰とも個体要素仮想バネに関する接触を持たないとき（接触を持っていれば、仮想バネにより自動的に反発する）に、自分より前方（ゲートに近い）で一番近い個体要素から $f_d = -k_t \frac{1}{l}$ なる力 f_d を進行方向と垂直の方向に作用させた（図-9 の場合は上向き）。ただしここで l は個体要素間の距離を表し、定数 k_t は、試行錯誤的に $1.0 \times 10^3 \text{ (N} \cdot \text{m)}$ を使用した。

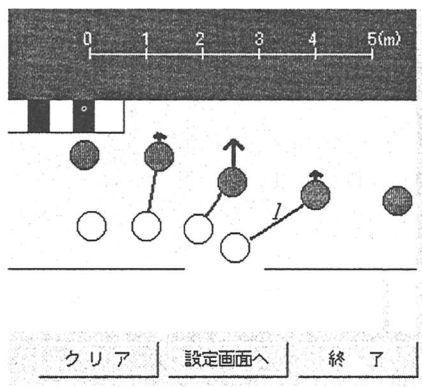


図-9 空いている方に進路を取る

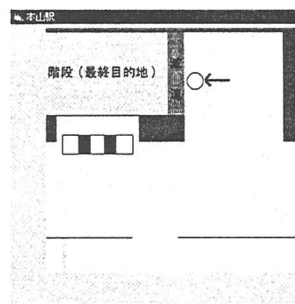


図-10 階段の直前で減速

3.4 階段直前および障害物について

前節までの個体差に加えて付随的な要素として、階段直前のエリア（図-10）において、全ての個体要素の速度を強制的に 0.65 (m/sec) に圧縮した。これは歩行者が 1 秒で 2 歩歩くと仮定して、階段 2 段分の水平距離に相当する。また、図-11 に表したエリアでは、下向きに歩行速度の $1/10$ に相当する加速度がかかるように、作用する力を加えた。

このエリアで直進する事によって障害物に衝突するという不具合を防ぐためのものである。さらに、本シミュレーションにおいて、壁に衝突した時は、はね返り係数を一律 0.5 とし てはね返らせた。

4 個体差の有無および実際のビデオ映像との比較

4.1 個体差の有無によるシミュレーション結果の相違

前章で詳しく述べた歩行者行動シミュレーションプログラムを用いて、個体差を含むときと個体差を含まないとき、すなわち個体要素 i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$; N は歩行者総数) の

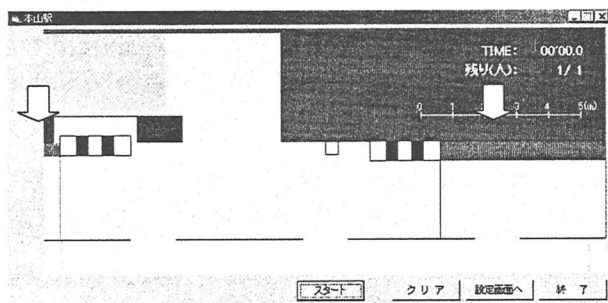


図-11 障害物（ベンチなど）を避けるエリア

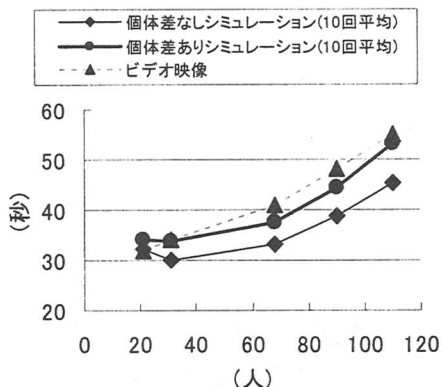


図-12 人数と降出時間

各判断を強制的に False（非実行）にしたときでどのような違いが現れるかを実際のビデオ映像とも比較しながら実験した。図-12 はビデオ映像から得られた 5 パターンの初期データ（各世代・各性別の人数および降りるドア）に基づいて個体差がある場合とない場合それぞれ 10 回ずつシミュレーション実験を行うことにより得られた、乗客の階段への排出時間の平均と、実際のビデオ映像での排出時間をプロットしたものである。また、図-13 は比較実験の一例として、歩行者総数 21 人時の各歩行者の歩行跡をプロットしたもの、そして図-14 は 110 人の乗客がホームから階段に向かって移動する様子を並べたものである。

4.2 結果の考察

図-13 を見ると、個体差を含むシミュレーションの方には最短距離を目指す歩行者や、ドアから出た瞬間にどちらに進むべきかわからず一瞬迷ってしまう歩行者などが確認でき、個体差をシミュレーションプログラムに含むことにより、滞留が起こらない程度の少ない人数

の時に於いて、個体差がないプログラムよりも歩行者が整然としすぎる不自然な状況を改善できていることがわかる。またこの程度の少人数の時は、個体差の有無による乗客の排出時間については相違は見られなかった（図-12）。これは、歩行者の排出完了時刻、すなわち最後の人が階段エリアにたどり着く時刻までに滞留が解消されており、この時刻は一番遠い所からスタートする歩行者の初期位置（乱数による）の影響を大きく受けている。

また図-12 によると、被験者総数が多くなるにつれて、歩行者の排出時

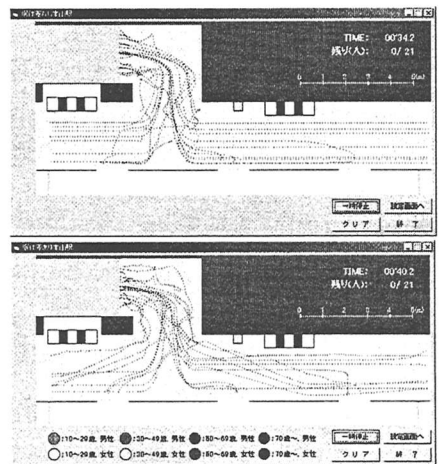
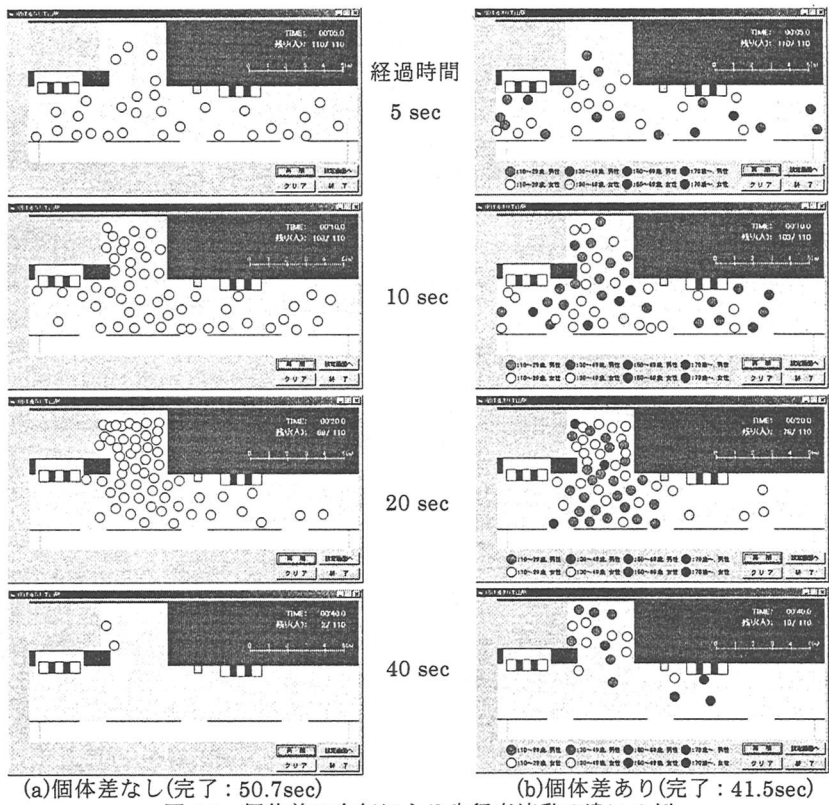


図-13 個体差の有無と歩行跡
(上：個体差なし，下：個体差あり)



(a)個体差なし(完了：50.7sec) (b)個体差あり(完了：41.5sec)

図-14 個体差の有無による歩行者流動の違いの例

表-4 シミュレーション比較結果のまとめ

		個体差あり	個体差なし
滞留小	排出時間	両者ともビデオ映像に基づく実際の歩行者の排出時間に近い結果	
	歩行者の動き	個体差がないときより歩行者の自然な動き	個体差がないため実際とは異なる不自然な動き
滞留大	排出時間	個体差がないものよりも実際に近い結果	実際よりもかなり少ない時間で排出完了
	歩行者の動き	歩行者間の影響が大きく不自然な動きが残る	

間について両プログラムの間に明らかな違いが出てきている。個体差を含めることにより実際のビデオ映像における乗客の排出時間に近づいていることがわかる。両シミュレーションプログラムの差は個体差の有無だけなので、被験者総数が多くなる、すなわち、歩行者の滞留が大きくなるにつれて、排出時間に対する個体差の影響が大きくなる。以上の結果をまとめると表・4 となる。

5 本山駅の階段に関するケーススタディ

駅空間での歩行者の滞留は、主に歩行者の水平方向速度や通路の幅が制限される、階段の上り口を先頭に発生している。そこで、本研究で作成した個体差を含めた歩行者行動シミュレーションプログラムを用いて、今回対象空間とした本山駅において、北西階段の幅を変更すると排出時間にどのような変化が現れるかケーススタディを行った。図・15 に各ケースにおける歩行者の排出時間を、図・16 に階段を 1m 広くした時と狭くした時のシミュレーションの様子を示す（要素総数 68 名）。図・16(a)を見ると、階段幅を広くすることによって混雑が大きく改善され、最後の歩行者が階段に近づく頃には滞留がほぼ解消されているのが読みとれる。

図・15 を見ると、それぞれのプロットに変曲点が見られる。一番最後にゴールする人が階段エリアに到達する前に歩行者の滞留が解消していれば、それまでに滞留があっても歩行者の排出時間はほとんど変わらないことから、この変曲点における人数がその階段（通路）において速やかに乗客を排出できる性能を表すともいえる。本山駅の北西階段において、現在より 1m 階段の幅を広げれば、速やかに乗客を排出できる人数（変曲点における人数）は倍増することになる。従来幅員の算定（例えば、遠藤ら⁵⁾（1973））は、次の電車が到着するまでにホームの人間を排出させようという安全性から見た基準である。今後の空間設計は

安全性だけではなくますます快適性も要求されるため、シミュレーションにより求めた図・15 における変曲点のような快適性に通じる基準を考慮に入れる必要性も今後高くなる。

また、階段の幅を 1m 狭くしてみると、速やかに排出できる乗客数は半減し、それ以上の乗客の排出時間は急激に大きくなっている事がわかる。車椅子の方が駅員などの助けを借りて階段を上る際には

1m くらいの幅はすぐ取ってしまうため、ここがボトルネックとなって予想外の大きな滞留が起こる可能性があることをこの結果は示している。これらのシミュレーションの結果は、歩行者空間における乗降施設の設計

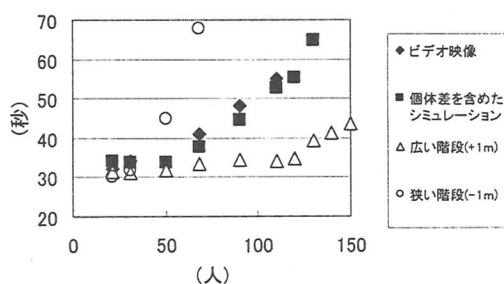


図-15 階段幅による降客数と時間の関係

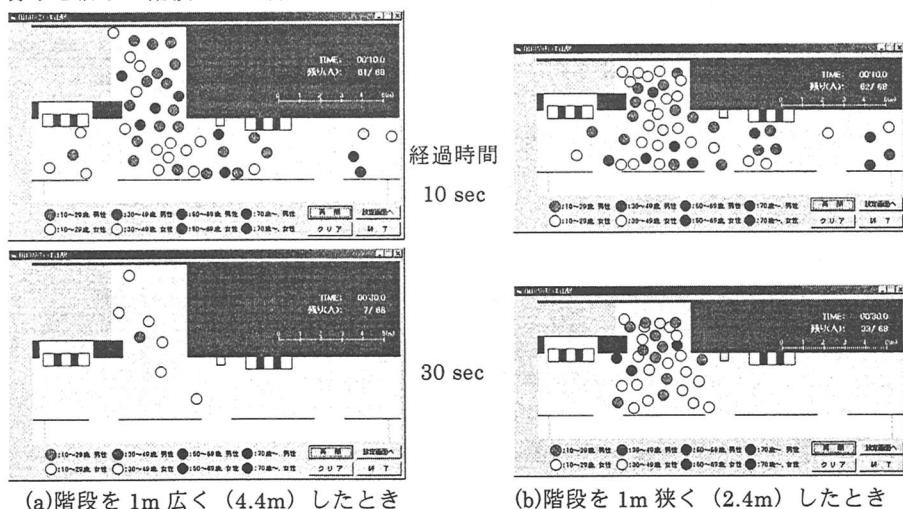


図-16 階段の幅を変更した時のシミュレーションの様子

などに極めて重要な情報を提供できる可能性がある。

6 結論および今後の課題

本研究で以下のことが分かった。

- 1) 地下鉄駅ホームにおけるビデオ撮影，被験者へのインタビュー調査およびこれらを基に作成したアンケート調査により，歩行者の判断基準の差に関するデータを得た。
- 2) アンケート調査の結果から 4 つのシチュエーションにおける個体差（判断基準の差）を抽出し，歩行者行動シミュレーションプログラムに組み込んだ。
- 3) この個体差を組み込んだモデルと個体差のないモデルとの比較において，個体差を組み込んだモデルが歩行者の動きや排出時間に関して実際のビデオ映像により近い結果を提供できる。
- 4) 本プログラムを用いて，名古屋市営地下鉄東山線本山駅の階段幅を変えることによる排出時間の増減をシミュレーション実験で調査し，階段幅の快適性の基準となりうることを示した。

本研究で個体差を組み込むことによって，シミュレーション上の歩行者の排出時間が実際のビデオ映像に確かに近づきはしたが，まだ画面上の歩行者の動きが，（特に歩行者総数すなわち滞留が大きい時）ごく自然な歩行者の動きであるとは言い難く，さらなる改善の余地がある。また，また各種のパラメータの感度について感度分析を行う必要がある。

今後歩行者空間計画において対象空間の安全性，快適性を歩行者行動シミュレーションで評価する際に活用可能な手法である。つまり，本研究で 4 つの個体差を組み込むだけで，シミュレーション結果が実際のものに近くなることがわかったので，これからの研究ではますます 1 人 1 人の「歩く」ということに対する考え方の違いに迫っていくことが可能となる。さらに，同じ年代・性別でも時代によって判断基準が変わる（地べたに平気で座る若者など）ことを見越して判断基準の分布を頻繁に更新することや，少子高齢化・空間のバリアフリー化に向けて，車椅子利用者や高齢者，また子供連れなど交通弱者などの行動への対応も重要な課題であるといえる。

そして，非常時（火災などの災害時）における，個体差を考慮したパニック行動を含んだ歩行者の避難行動を再現できるようになれば，歩行者行動シミュレーションの実用化への大きな一歩となると考える。

7 参考文献

- 1) 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，日本建築学会計画系論文報告集，第 436 号，pp.49～58, 1992.
- 2) 清野純史・三浦房紀・八木宏晃：個別要素法を用いた被災時の避難行動シミュレーション，土木学会論文集，No.591/I-43，pp.365～378, 1998.
- 3) 高瀬大樹・円満隆平・佐野友紀・渡辺仁史：歩行者導線シミュレーションシステムの開発，日本建築学会技術報告集，第 3 号，pp.263～267, 1996
- 4) John J. Fruin （長島正充訳）：歩行者の空間＝理論とデザイン＝，鹿島出版会，206p., 1974.
- 5) 遠藤浩三・田中康男・三好迪男・西野保行：地下鉄建設ハンドブック，山海堂，593p., 1973.
- 6) 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.
- 7) 建部建治・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），日本建築学会計画系論文報告集，第 418 号，pp.51～57, 1990.
- 8) 位寄和久：避難行動モデルに関する研究—火災状況の認識と心理状態を考慮したモデルの提案—，日本建築学会論文報告集，第 325 号，pp.125～132, 1983.