

階段を降りる群衆流動の制御に関する基礎的研究*

A Fundamental Research of Controlling Pedestrian Movement Going Down on Stairs*

岡村洋一郎**・劉建宏**・角知憲***

By Yoichiro OKAMURA**・Chien-Hung LIU**・Tomonori SUMI***

1. はじめに

立体化した都市の歩行空間では、階段の多用は避けられない。階段、特に下り階段を含む歩行空間に多くの歩行者が高密度に流れ込むと、健常者、非健常者にかかわらず転倒の危険性が増す。階段において、高齢者や身体障害者、あるいは子供を含む群衆流動を適切に制御することはきわめて重要である。

歩行者の群衆流動に関する研究は、今までも行われてきた¹⁻⁴⁾。しかし、階段における歩行者の挙動については、いくつかの観測結果が報告されてはいるものの⁵⁾、歩行者が相互の干渉を予測して回避する行動を論じたものなどはほとんどない。

著者らは、歩行者が自分の周囲に他者の存在をどこまで許容するかというパーソナルスペース概念に基づいて、自身の目的方向に向おうとする行動心理や歩行速度と他の歩行者との間隔を確保しようとする行動を併せて考慮するシンプルなルールを用いて、人が相互の干渉を予測し回避する個人型歩行行動モデルを作成している⁶⁾。このモデルは、基本的な条件を設定した歩行実験に基づいて群衆流動の振る舞いを予測するもので、すでに階段における歩行者流にも適用を試みている^{6),8)}。本研究は、混雑した階段昇降中の安全を確保することを目的として、これまでに得た知見に基づいて群衆流動を制御する方法を検討するものである。

2. 平面歩行の行動モデル⁶⁾

(1) パーソナルスペース

著者らがこれまで作成を試みてきた歩行者行動モデルは、次のようなものである。

人のまわりにパーソナルスペース⁷⁾と呼ばれる目に見えない空間を想定する方法がある。本研究で用いるパーソナルスペース：パーソナルスペース、群衆流動、階段、制御

**非会員、九州大学都市環境システム工学

(福岡市東区箱崎6-10-1、TEL092-642-3275)

***正員、工博、九州大学都市環境システム工学

(福岡市東区箱崎6-10-1、TEL092-642-3273)

パーソナルスペースは、前方が長く、横、背後が短いという卵形で、次のように歩行者行動を記述する。

それぞれパーソナルスペースを持つ2人が接近し、互いのパーソナルスペースが接触しようとするれば、2人のいずれか、もしくは両者が、経路を変えてパーソナルスペースを維持する。また、歩行者密度が大きくなって、どう経路を選択しても初期のパーソナルスペースが維持できなくなることがある。その場合、歩行者はパーソナルスペースを短縮して、同時に歩行速度を減少させる。パーソナルスペースが人体の寸法ぎりぎりまで短縮した場合には、歩行速度はゼロとなって停止するとしたものである。

(2) シミュレーションモデル

シミュレーションにおいては、図1のように歩行者には目的地に向かう120°の視野とパーソナルスペースを与え、

- 他の歩行者のパーソナルスペースとの接触を判定し、もし接触すれば視野の範囲で長軸長を維持できる方向を探索し、その方向に歩行させる。
- 視野の範囲で長軸長を維持できなければ、長軸を短縮し、速度を減少させる。視野内で所定の限度以上のパーソナルスペースが見いだせない場合は、視野外(図1の破線つき矢印)を探索する。

というルールで、ランダムに配置した多数の歩行者にそれぞれ初期の位置と歩行速度を与え、時々刻々、個々の移動を追跡する。

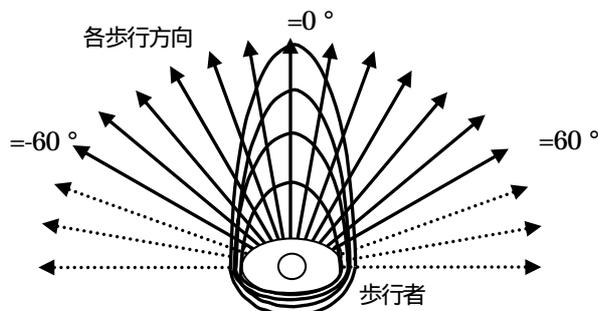


図-1 歩行方向

3. 階段歩行のモデル⁸⁾

(1) 歩行実験

平面歩行のモデルは、基本的な条件を設定した歩行実験によって構成するが、階段歩行においても、同様にいくつかの条件を設定した実験に基づいて、モデルを構成する。その実験は次のようなものである。

男女約10名の被験者を用い、階段において十分離れた位置から図2に示すように、(a) 対向者の接近による速度低下、(b) 回避行動、(c) 追い越し行動、の3種類の歩行実験を行い、パーソナルスペースの基準となる長軸長と短軸長を推定した。観測は、30cmごとに階段上に目印を付けて被験者の行動をビデオカメラで撮影し、目印に基づいて位置と時間を読み取る方法をとった。

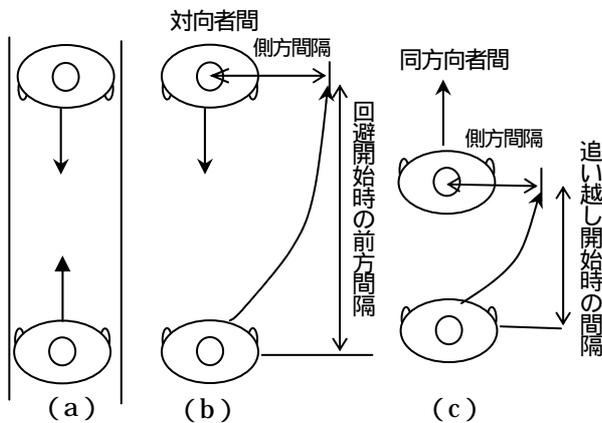


図 - 2 実験の概要

図2(a)に示した対向する歩行者が、相互の水平距離に応じて歩行速度を変化させる様子を図3に示す。昇降による行動特性の差が現れている。

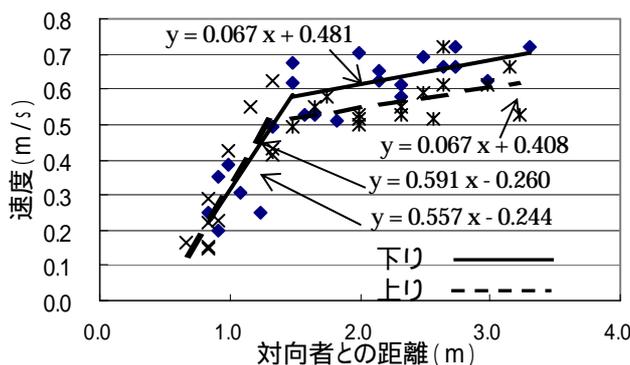


図 - 3 上り、下りにおける速度関数

図2 (b) の実験によつては、一方の歩行者に回避行動を禁じた場合と双方に自由に回避させた場合がある。一方に回避を禁じた場合の前方間隔は、双方に回避を許した場合のほぼ半分であった。この実験から得たパーソナルスペースの長軸、短軸の長さで、長軸は一方回避禁止の場合の間隔と双方回避の場合の間隔の1/2をとって

いる。短軸は回避開始時の側方間隔の数値の1/2をとっている。

また、図2 (c) の追い越し行動については、2人の歩行者を同方向に歩行させ、先行する歩行者には遅い速度で直進するよう指示したうえ後続する被験者に追越させ、追い越し開始時の間隔、すれ違い時の側方間隔を測定する。パーソナルスペースの長軸としては、追い越される側の歩行者の側方・後方に短軸長の部分パーソナルスペースを設定する都合から、平均間隔2mと短軸長との差を与える。この時の側方間隔の半分をとって短軸長としたものである。

以上のようにして得られた長軸長と短軸長の平均値をまとめて表1に示す。

表 - 1 長軸長と短軸長の平均値

	長軸長	短軸長
回避行動	3.0 m	0.65 m
追い越し行動	2.0 m-前の歩行者の短軸長	0.44 m

(2) モデルの再現性の検討

モデルの再現性を確かめるため、既存の観測結果と計算結果を対比してみる。ここで利用する数少ない観測結果は、大量の歩行者が同じ方向に進行するケースのみであり⁵⁾、計算も一方向のみを想定し、パーソナルスペースの個人差は考慮しないで、マクロな再現性を検討する。もちろん、それでもこのモデルを用いるシミュレーションでは、初期条件や進路・速度変更を計算する順序によって結果が相違するので、多数の計算をランダムに行つて平均的な結果を求めなければならない。図4に示すように通路幅を4mとし、距離0m以下の位置に歩行者を240人配置して初期密度を5回変え、0.5秒ごとに接触判断を行うシミュレーションを、上り、下りで各5回ずつ行う。先頭の歩行者の位置から、10m先の場所で前後2.5m、合計5mの範囲での歩行者の平均速度と密度を0.5秒ごとに出力させた。得られた速度と密度の平均値が図5であり、実線はその近似曲線である。また、これまでに発表されている密度と水平方向の分速度の関係⁵⁾を図5の破線で示す。シミュレーションの結果は観測結果に近いので、モデルの再現性はほぼ良好であると言える⁸⁾。

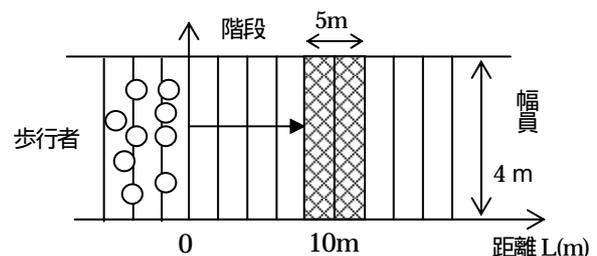


図 - 4 初期設定

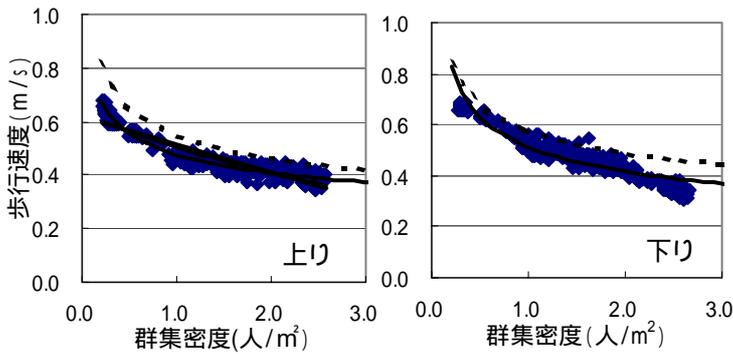


図 - 5 水平分速度のシミュレーションと観測値

4. 平面と階段を含む公共空間への適用

階段歩行中の危険は高所からの転倒にあり、混雑した階段を下りる場合がもっとも危険である。そこで、以下では群衆が階段を下りる行動を検討の対象とする。

平面歩行路が階段への接続点すなわち階段の頂上は、両者の交通容量が一致しないため歩行者が混雑し転倒する危険性が生じる場所である。その危険性を減らすために、通路の両側に制御工を設置し、平面から階段に近づくに従って通路幅が狭くなるようにする。それにより、予め流量を制御し、スムーズに階段の歩行ができるような制御工の適用性を検討してみる。

通常、歩行者が相手を回避する距離や速度には個人差がある。多くの人が集まる場所では、それらが理由で混雑などが起きるといことも考えられる。そこで、以下のシミュレーションでは、得られた長軸長の平均値と標準偏差に基づいて、歩行者の持つパーソナルスペースに個人差を考慮することにする。平均は3.0m、標準偏差は0.79mである。分布は正規分布であると仮定し、60cmごとに区分して与えた。

図6はシミュレーションにおいて設定した通路で、幅を4m、距離20~30mの位置に階段を置いてある。距離0m以下の位置に歩行者を360人配置し、初期密度を2人/m²とする。以後、全員を平面歩行モデルによって階段に向かって歩行させ、階段に到達した後は階段歩行モデルによって歩行させる。

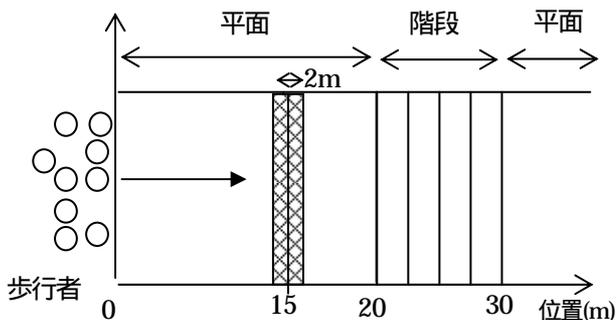


図 - 6 初期設定

次に、制御工を設置した場合の図が図7である。制御工としては、低い柵やテーブル状の障害物を想定している。図7は通路の平面部分の両側に制御工を設置し、階段手前で通路幅を狭くすることにより、予め流量を制御しようとするものである。制御工は表2のようにa~dの4パターンを設定した。

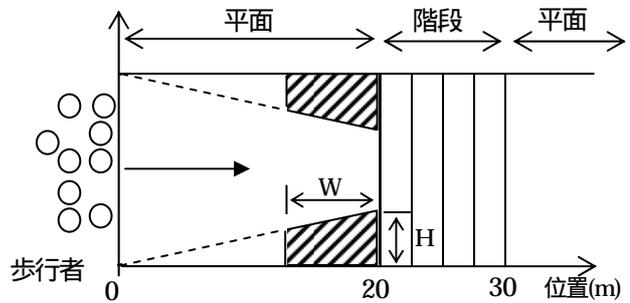


図 - 7 制御工の設置

表 - 2 制御工の寸法と設置位置

制御工	a	b	c	d
W(m)	5	5	5	5
H(m)	0.25	0.5	0.25	0.5
設置位置(m)	15-20	15-20	10-15	10-15

シミュレーションにおいては、0.5秒ごとに接触判断を行わせ、初期条件や接触判断の順をランダムに変える試行を5回行った。計算結果としては、速度と密度を15、17、19、21、29、31mの場所で前後1m、合計2mの範囲で0.5秒ごとに出力させて5秒間の平均密度を求めた。その制御工なしの結果の一例を図8に示す。

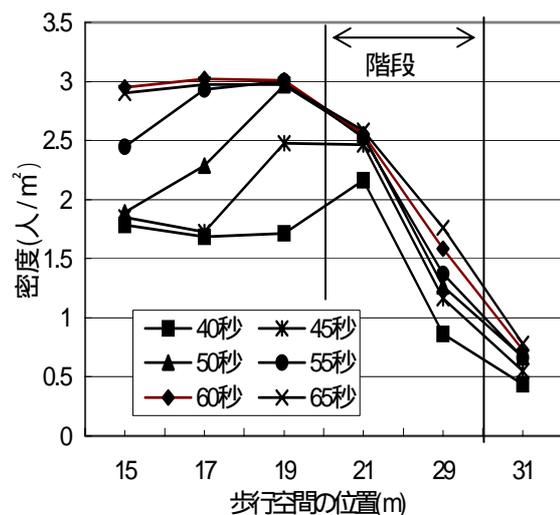


図 - 8 各位置での時間経過による密度の変化

時間が経過するにつれて、歩行空間の各位置における密度の値が定常値に近づく。シミュレーションの時間

経過65秒後において、ほぼ定常値に達するので、横軸に歩行空間の位置、縦軸に歩行者の密度、速度を取り、制御工の有無、設定の相違に従って、その時点の密度、速度の変化を図9, 10に示す。このとき、制御工によってその位置の通路面積は減少するが、図ではそれを考慮せずに、人数/8m²で求めた。

図8において、制御工なしの場合は、制御工ありの場合に比べ、階段より手前の平面の位置で密度が高い。c, dは階段の5m前での通路幅は狭く、流量は減るが、観測区間に入る歩行者の平均速度は高いので、結局階段の手前では混雑してしまう。よって、階段上での密度減少の効果は現れなかった。aは階段の直前に通路幅を狭くして、流量を減らしたが、通路幅の減少割合は少ないので、階段上での密度減少の効果はあまりなかった。最も効果があったのはbの場合で、階段に差し掛かる21mの位置での密度が最も低く、20m~30mの階段上でほぼ一定の値の密度で推移していることが分かる。また、図9より階段において最も速度が速かったことから、a~dの中で一番スムーズに歩行できると考えられる。

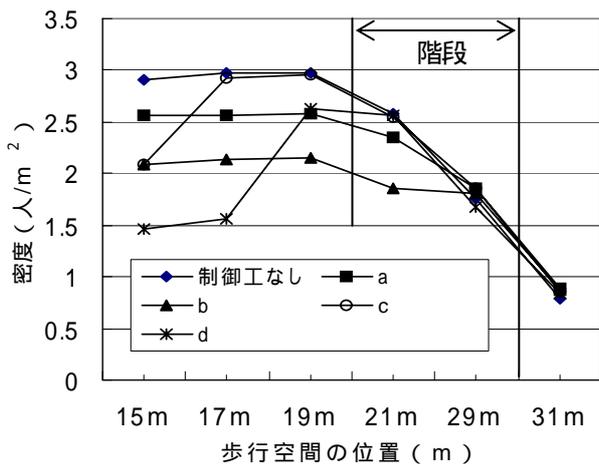


図 - 9 時間経過 65 秒後の各位置での密度の変化

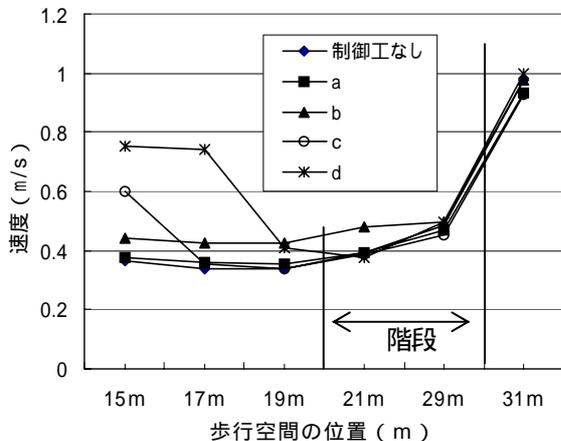


図 - 10 時間経過 65 秒後の各位置での速度の変

5. 結論

本研究では、個人歩行を対象にパーソナルスペースという概念を用いてミクロな視点から歩行行動をモデル化し、モデルが十分な再現性を持つことを確かめた。また、このモデルを用いて、階段を含む公共空間でシミュレーションを行い、密度の増加、速度の低下やその伝わり方などが定量的に表せることを示した。

また、通路の両側に制御工を設置し、階段手前で通路幅を狭くすることにより予め流量を制御し、スムーズに階段の歩行ができることを示した。階段は、同じ幅の平面通路より容量が小さいので、通路全体の容量は階段で決まる。制御工を設置することで、予め流量を絞って階段の容量に等しくするとともに、混雑を危険な階段頂上から、比較的安全な平面通路に移そうというのが今回のねらいである。

このモデルは今後、健康者だけでなく、高齢者や幼児、あるいはそれらを伴ったグループの歩行特性（パーソナルスペース等）を考慮するように拡張し、あるいは階段昇降が錯綜した群衆流動に適用するなどが比較的容易に実行できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 海老原学ら：オブジェクト指向に基づく避難・介助行動シミュレーションモデル，日本建築学会計画系論文集，Vol.467，pp.1-12，1995．
- 2) 青木俊幸：駅の旅客流動，bit，Vol.31，No.9，pp.91-98，1999．
- 3) 岡崎基幸：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，Vol.283，pp.111-117，1979．
- 4) 中村和男：集合行動ダイナミクスにおける力学的概念の応用，製品科学研究所研究報告，Vol.19，pp.9-15，1976．
- 5) 木村幸一郎ら：建築物内における群衆流動状態の観察，建築学会大会論文集，1937．
- 6) 劉建宏ら：車椅子混入による歩行者の交錯と回避行動，第25回交通工学研究発表会報告集，pp.217-220，2005．
- 7) 渋谷昌三：人と人との快適距離-パーソナル・スペースとは何か-，日本放送出版協会，1997．
- 8) 劉建宏ら：階段を含む公共空間における歩行モデルに関する基礎的研究，第26回交通工学研究発表会報告集（投稿中）