

50 車いすと群集流の避難シミュレーション

輸送高度化研究領域 物流システム研究グループ *松倉洋史、勝原光治郎

海上安全研究領域 旅客安全・バリアフリー研究グループ 宮崎恵子、池本義範、今里元信

海上安全研究領域 危険物輸送・防災研究グループ 太田進、疋田賢次郎

環境・エネルギー研究領域 海洋汚染防止研究グループ 宮田修

環境・エネルギー研究領域 リモートセンシング研究グループ 桐谷伸夫

環境・エネルギー研究領域 次世代動力研究グループ 平田宏一

1. まえがき

平成12年に「高齢者、身体障害者等の公共交通機関を利用した移動の円滑化の促進に関する法律（交通バリアフリー法）」が制定され¹⁾、他の交通機関と同様に、船舶についてもバリアフリー技術基準が定められた。今後、バリアフリー技術基準に適合した船舶の増大により、車いす利用者による船舶の利用が促進されると予想される。しかし、車いす利用者が歩行者と共に避難する際、車いすの介在が避難性能に対してどのような影響を与えるかに関する研究は行われておらず、その解明が急務である。

海上技術安全研究所では「車いすと群集流の相互干渉に関する調査」²⁾を実施した。この研究は、実験とシミュレーションによって車いすと群集流の相互干渉時の歩行挙動とその内的メカニズムを明らかにすることを目的としたものである。本報告では、上記研究の実験結果をもとに、車いすと群集流の避難シミュレーションについて検討した結果を述べる。

従来、歩行モデルはポテンシャル等の物理現象を用いてモデル化されることが多かったが、本報告では予見・修正行動を含む人間の認知サイクルや行動戦略選択ルール等を用いることにより、シンプルなルールでありながら実際とよく一致する結果を得ることができた。

2. 実験概要

平成13年11月に、車いすと群集流の相互干渉実験を行った。実験では、一定幅の直線通路において、非パニック状態の歩行者群と車いす利用者が避難する場合を想定し、歩行者の密度・心理等の実験条件を変化させて、歩行者が車いすを追い越す状況を真上から観測した。

図1に本実験の概況を示す。実験の詳細についてはポスターセッション²⁾を参照されたい。

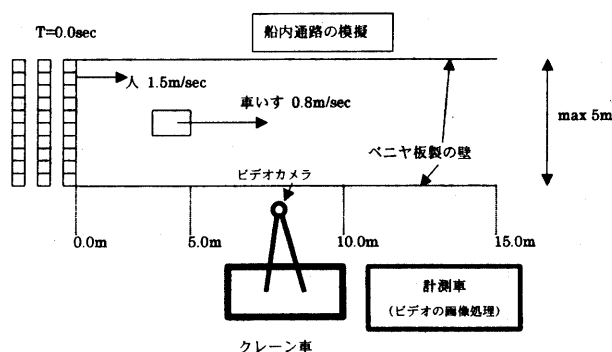


図1：実験状況

3. 実験結果の観察

車いすを追い越す歩行者集団の行動ルールを見いだすという観点から、実験によって得られた全ての実験結果について検討を行った。

全体的な印象としては、車いすを含む歩行者全体の動きは、実験計画の立案段階で予想していたものよりも非常に滑らかであった。

すなわち、当初は車いすを追い越すに際して、歩行者同士の追い抜きや衝突、車いすをすり抜ける直前の流れのつまり等が予想されていた。しかし、実験結果によれば、歩行者が車いすに接近すると歩行者の移動が始まり、前もって車いす用の空間をあけた上で車いすの追い越しを行い、追い越しが終了すると空間が閉じるという一連の動作が滑らかに行われる。歩行者相互の見事な協調動作であるといえる。

なお、本研究は非パニック時の避難行動を対象としているため、本実験の環境で得られた結果は、当該状況下での実際の避難行動と同一の傾向を示していると考えている。

次に、歩行の様子を記録したビデオを詳細に観察した結果、以下の3つの行動特性を抽出した。

①車いすとの位置関係による歩行者の行動パターン

車いすを追い抜こうとする歩行者の行動は、歩行者と車いすとの相対距離に応じて4つのゾーンに分類することが可能である。

まず、歩行者が車いすに十分追いつくまでのゾーンである。ここでは歩行者は一定の速度で移動する。

次は、歩行者が車いすに追いつくまでのゾーンである。このゾーン内では歩行者は車いすを避けようと進路変更を始める。車いすに対して自分が右側にいる場合は右方向に、車いすに対して左側にいる場合は左方向に進路変更する。これにより歩行者は車いすを境に左右に分かれることとなる。このゾーン内では歩行速度が増加する傾向がある。なお車いすと衝突コース上にない歩行者は進路変更を行わない。

次は、歩行者が車いすを追い抜いているゾーンである。このゾーンでは歩行者は車いすを抜きつつあるため、左右の移動はしない。また、このゾーンでは歩行速度が引き続き増加する傾向がある。

最後は、歩行者が車いすの追い抜きを終了した後のゾーンである。このゾーンでは歩行者は当初歩行していた位置まで緩やかに進路を変更する。これにより、全体としては車いすを追い抜くために開いていた空間が閉じる。このゾーンでは歩行速度は一定であるか、あるいはやや増加する傾向が観察された。

②車いすを避ける歩行者のコース取りのパターン

前述のように、当初歩行者が車いすを追い越す際に、歩行者同士の追い抜きや衝突、車いすをすり抜ける直前の流れのつまり等が予想されていた。しかし、そのような例はほとんど観察されず、非常に滑らかに位置変更が行われている。

すなわち、ある歩行者が進路変更を行おうとして他の歩行者と衝突の恐れが生じた場合、進路変更を行おうとした歩行者が他の歩行者に対して前方にいる場合はそのまま進路変更を続け、後方に位置する歩行者が進行方向速度を下げて後方に移動する。また、進路変更を行おうとした歩行者が他の歩行者に対して後方にいる場合は、進路変更を行いつつ進行方向速度を下げて後方に移動し、他の歩行者はその

ままの速度を維持している。以上のようにしてスムーズな位置関係の変更が行われる。

③歩行者相互間距離のパターン

歩行者同士の相互間距離については、ある一定以上には近づかないと同時にあまり離れすぎないという現象が観察できた。②の進路変更に伴う減速が後方の歩行者に伝播すること等により前後の距離が接近しすぎると、後方の歩行者は減速してそれ以上の接近を避ける。また、ある歩行者の前方歩行者の速度が速く空間があいてしまった場合、後方の歩行者は速度を増してそれ以上空間は開かない。

実験結果の例を図2(a)~(c)に示す。なお、各図の時間間隔は1秒である。

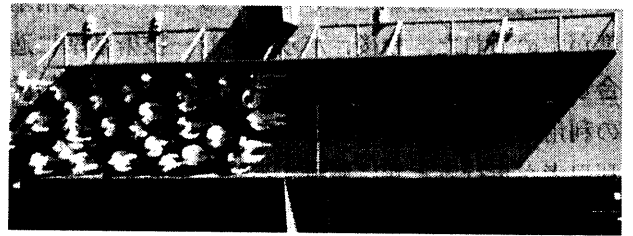


図2(a) 実験結果例 ($t = t_0$ (秒))

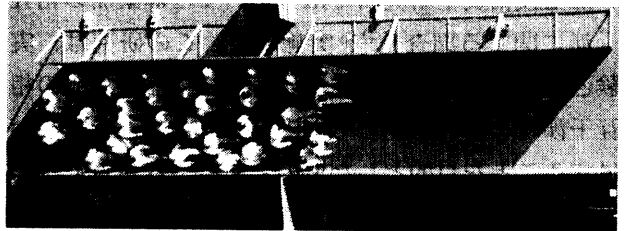


図2(b) 実験結果例 ($t = (t_0 + 1)$ (秒))

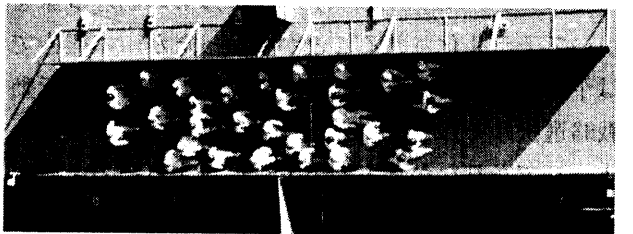


図2(c) 実験結果例 ($t = (t_0 + 2)$ (秒))

4. 歩行モデルの考案

前章で抽出した歩行の特徴を実現するような必要かつ十分のルールを検討し、以下の4項目からなる歩行モデルを作成した。

①ゾーンによる行動パターン（戦略）ルール

車いすに対する歩行者の距離によって歩行区域を図3のように4つのゾーンに区分し、その区間毎に歩行者の行動パターン(戦略)が切り替わるとした。

- A. 接近ゾーン：車いすに対して遠方にいた歩行者が、車いすを避けるための進路変更を行う距離に達するまでの区間。
- B. 進路変更ゾーン：車いすを避けるために、必要に応じて進路を変更する区間。
- C. 追い抜きゾーン：進路変更を終了し、車いすを追い抜きつつある区間。
- D. 追い抜き後ゾーン：車いすの追い抜きを終了した以降の区間。歩行者は進路変更を解する前の歩行位置に戻り、歩行を継続する。

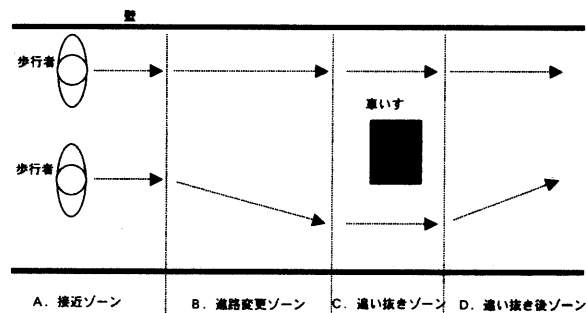


図3 ゾーンの説明

②進路変更ルール

歩行者は車いすの追い抜きに際し、進路変更が必要な場合は、図3のように追い抜きゾーンに入る前に必要な進路変更が完了するように進路変更を行う。車いすに対して自分が右側にいる場合は右方向に、左側にいる場合は左方向に進路を変更するとした。

③予見距離による速度調整ルール

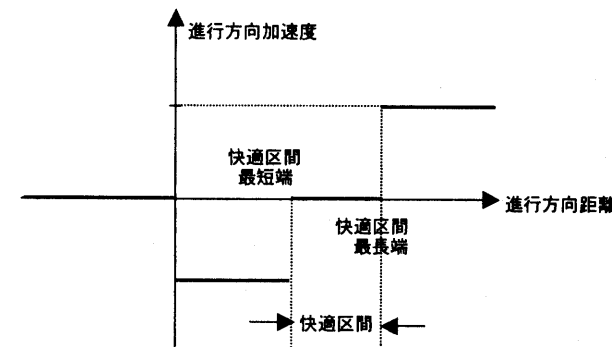


図4 速度調整ルール

集団行動をしている歩行者は、他の歩行者との予見距離によって図4のように自らの速度を調整する。

すなわち、集団行動をしている歩行者は、前方を歩行する者との位置関係について、快適と感じる区間（快適区間）があると仮定する。前後の距離が、その区間を構成する最短距離よりも短くなると減速して快適と感じる距離を確保しようとし、その区間を構成する最長距離よりも距離が長くなると加速して快適と感じる距離を確保しようとする。

なお、歩行者の後方に関しては、注意が向きにくく情報収集が十分できないと考えられるため、速度には影響を及ぼさないとした。

④「希望」「予見」「修正」「実行」認知サイクル

歩行者は一回分の認知サイクルとして、図5の4段階を行うとした。

- 希望：ゾーンにより規定される戦略を達成するよう希望速度を設定する。戦略の種類は、「速度維持」「車いす回避」「加速」「快適距離の確保」「もとの進路に復帰」の5種類とした。
- 予見：現在時刻の周囲の状況（速度・位置等）をもとに、ある時間後に周囲のオブジェクト（歩行者・車いす・壁）がどのような位置にいるのかを計算する。自分に関しては、「希望」のサイクルで設定した希望速度を実行した場合の位置を予想する。

修正：上記で予測した自分と他のオブジェクトとの位置関係から、速度調整ルールにより必要な修正を行う。

実行：最終的に決定された速度により、実際に移動を行う。

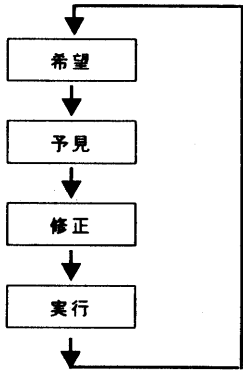


図5 認知サイクル

ただし集団行動を行っている歩行者は、先頭の者と後続の者とは進路決定戦略が異なっていると考えるのが合理的であるため、「希望」のフェーズに限り、先頭と後続の者で異なった戦略をとるとした。

以下に、ゾーンと戦略の対応表を示す。

表 1 ゾーン・戦略対応表

戦略		A. 接近ゾーン	B. 進路変更ゾーン	C. 追い抜きゾーン	D. 追い抜き後ゾーン
前後 方向	希望	現在値を維持する	(先頭) 加減する (後続) 現在の状況に基づき快適距離を維持する	(先頭) 加減する (後続) 現在の状況に基づき快適距離を維持する	(先頭) 現在値を維持する (後続) 現在の状況に基づき快適距離を維持する
	修正	予想状況に基づき快適距離を維持する	予想状況に基づき快適距離を維持する	予想状況に基づき快適距離を維持する	予想状況に基づき快適距離を維持する
左右 方向	希望	現在値を維持する	車いすを避ける	現在値を維持する	もとのコースに戻る
	修正	(予想状況に基づき快適距離を維持する)	(予想状況に基づき快適距離を維持する)	(予想状況に基づき快適距離を維持する)	(予想状況に基づき快適距離を維持する)

5. シミュレーションの開発とその検討

前章で考案したモデルをもとに、シミュレーションを開発した。

5. 1 シミュレーションの概要

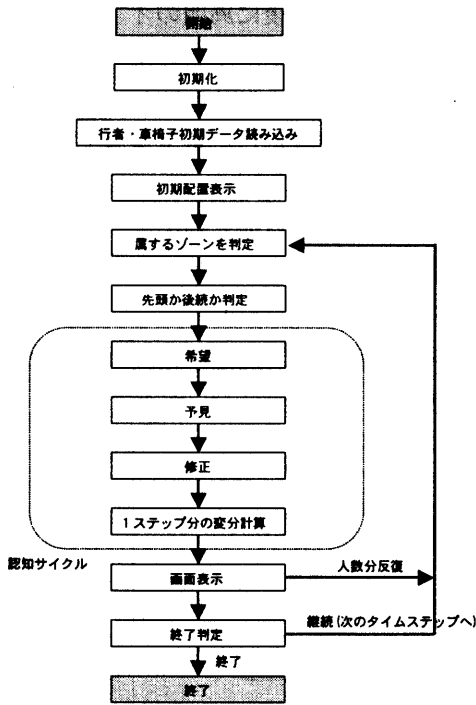


図 6 シミュレーションの簡易ブロックダイアグラム

開発したシミュレーションは、各歩行者がそれぞれ周囲の状況を取り込み、取り込んだ情報に基づい

て判断をして行動するというマルチエージェント型のシミュレーションである。

シミュレーションの簡単なブロックダイアグラムを図 6 に示す。

シミュレーションでは、表 2 のパラメータを用いた。これらは実験条件・実験結果から取得可能なものはそれを用い、そうでないものはチューニングを行って適切な値を設定した。

表 2 パラメータの種類

対象	内容
歩行者について	X・Y 方向の初速・最大速度・加速度（進行方向を X 軸として直行座標系を設定する） 肩幅・快適領域最小および最長距離・行動予見時間
車いすについて	幅・初速
その他	各ゾーンの距離

5. 2 結果表示：シミュレーションコマ送り

図 7 (a)~(c)に、例として通路幅 3 m、車いす移動速度 1 m/s の場合のシミュレーション結果を示す。

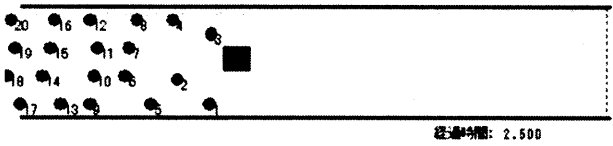


図 7 (a) シミュレーション結果例 (t = t₁ (秒))

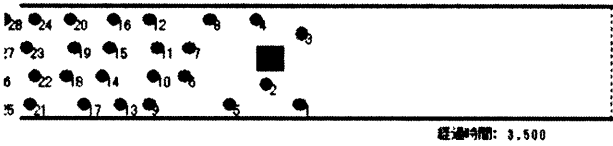


図 7 (b) シミュレーション結果例 (t = (t₁ + 1) (秒))

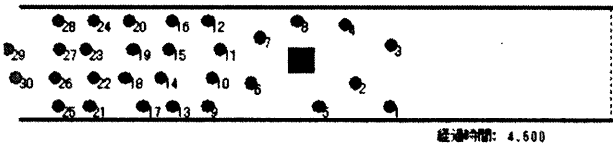


図 7 (c) シミュレーション結果例 (t = (t₁ + 2) (秒))

5. 3 シミュレーション結果の検討

4 章で提案した行動モデルが妥当であるかを確認するために、このモデルを忠実に実装したシミュレーションの結果が、抽出した定性的特徴に適合しているかどうかを見る。④の「希望」フェーズにより、抽出した歩行者の動きの特徴が実現されるよう速度

が設定され、「予見」・「修正」フェーズで予測をもとに必要なに応じて速度が修正されるが、それでもなお定性的特徴が実現されるかが問題となる。

まず、全体的な動きであるが、歩行者が車いすに接近すると歩行者の移動が始まり、前もって車いす用の空間をあけた上で車いすの追い越しを行い、追い越しが終了すると空間が閉じるという一連の滑らかな動作を再現することが出来た。

次に、「①車いすとの位置関係による歩行者の速度戦略」であるが、車いすを追い抜こうとする歩行者の行動を、歩行者と車いすとの相対距離に応じて4つのゾーンに分類した。

A. 歩行者が車いすに十分追いつくまでのゾーン

シミュレーション結果では、歩行者は一定の速度で移動しており、実験結果と一致している。

B. 歩行者が車いすに追いつくまでのゾーン

シミュレーション結果では、歩行者は車いすに対して自分が右側にいる場合は右方向に、車いすに対して左側にいる場合は左方向に進路変更している。車いすと衝突コース上にない歩行者は進路変更を行わない。直前に歩行者がいない場合は、最高速度に達していない者は歩行速度が増加し、歩行者がいる場合は速度が減少することが多い。これは、「③速度調整ルール」に基づくものと考えられる。シミュレーション結果は実験結果と合致している。

C. 歩行者が車いすを追い抜いているゾーン

シミュレーション結果では、左右の移動はしていない。歩行速度は、最高速度に達した者を除き増加している。これらは実験結果と一致している。

D. 歩行者が車いすを追い抜いた後のゾーン

シミュレーション結果では、歩行者は当初歩行していた位置まで緩やかに進路を変更している。これは実験結果と合致している。

次に「②車いすを避ける歩行者のコース取りのパターン」について述べる。

シミュレーション結果では、ある歩行者が進路変更を行おうとして他の歩行者と衝突の恐れが生じた場合、進路変更を行おうとした歩行者が他の歩行者に対して前方にいる場合はそのまま進路変更を続け、後方に位置する歩行者が進行方向速度を下げても更に後方に移動している。また、進路変更を行おうとした歩行者が他の歩行者に対して後方にいる場合は進

行方向速度を下げても更に後方に移動し、他の歩行者はそのままの速度を維持している。以上によりスムーズな位置関係の変更が行われており、実験結果と合致している。

次に「③相互間距離のパターン」について述べる。

シミュレーション結果では、歩行者同士の相互間距離についてはある一定以上には近づかないと同時にあまり離れすぎしていない。これは実験結果と合致している。

以上の検討により、提案した歩行者の行動モデルは、実験結果と定性的傾向において非常に良い一致を示していることが分かった。これにより、提案した行動モデルは定性的に妥当であると言える。

6. あとがき

本報告では、実験結果を観察することにより一定幅の直線通路において歩行者集団が車いすを追い越す際の特徴を抽出し、実験結果を再現する基礎的な歩行モデルを考案した。また、歩行モデルを実装したシミュレーションプログラムを開発し、必要なパラメータを与えてシミュレーションを行った。更に、実験結果から得られた歩行者の動作の特徴を、開発したシミュレーションによって再現できることを確認することで歩行モデルの定性的妥当性を検証した。

今後は、段差、扉、階段等の必要な要素を加味すると共に、その成果を本研究所で開発してきた全船版の避難シミュレーション³⁾に組み込み、車いす介在時の避難性能を解析するシステムを開発していきたいと考えている。

参考文献

- (1) 国土交通省、交通バリアフリー法ホームページ (<http://www.mlit.go.jp/crd/city/bf/>)
- (2) 宮崎恵子他、「車いすと群集流の避難実験」、第2回海上技術安全研究所研究発表会講演集、平成14年6月
- (3) 勝原光治郎他、「ヒューマンファクターを考慮に入れた船舶での避難行動シミュレーション」、安全工学、vol. 38 No. 6、1999. 12