

# 歩行干渉の時系列分析に基づく群衆流動の交差フリクションに関する研究

○山田 昇吾\*1 高柳 英明\*2

キーワード：歩行者 混雑 可視化 歩行領域

## 1. はじめに

### 1.1 研究背景

現代での公共施設空間では多岐にわたって機能の複合化が進む傾向にある。またそのような大規模空間においては小規模建築物よりも不特定多数が利用できるよう想定され、空間の広さや通路幅が計画されている。大規模な駅環境の再生・整備事業や、地方核都市の駅前アーバンコアやハイパーマーケットの将来構想を見受けるに、都市機能の集積までも視野に入れた、集人施設としての高機能化が目指されている。こうした高機能空間では極端な高密度群衆を安全かつ快適に収容する性能が求められる、空間設計を群衆コントロールの観点で客観的に評価することが従前より強く求められる。

群衆コントロールの指標として木村<sup>1)</sup>やJ.フルーイン<sup>2)</sup>などにより関係式が研究されてきた流率・群衆密度などがあるが、それらの既往研究では群衆を移動個体の集合として捉えるか、液体のような均質な流れとして捉えるかいずれかの方法がほとんどであった。この方法は空間全体で見た時の利用者の密集や滞留の度合いで混雑を把握しているが、実際の群衆流動を見てみると、群衆密度がある程度高くても歩行者は滞留することなく交差している場合が見られ、歩行者相互が快適に歩行できるよう非定常的に交差をすることでうまくすり抜けをしているものと思われる。交差に関する既往研究では中ら<sup>3)</sup>による交差現象の構造モデル化を嚆矢とし、中村ら<sup>4)</sup>による対向流動に見られる層化現象の定量化において、実測に基づく解析学的見地を得ている。また、筆者らは既報<sup>5),6)</sup>にて交差の種類を分類し、歩き難さの指標とした。こうした個体間距離に着目した評価の指標が確立されている一方、この指標を空間側に落とし込んだ時の、局所的な混雑空間を評価する指標は未だ確立されていないため、本研究を開始するに至った。

### 1.2 研究目的

本研究では群衆挙動の調査・解析に基づき、歩行者相互の交差・すり抜け等により生じる歩き難さや局所的混雑が直感的に把握可能な局所混雑空間評価モデルを構築する。さらに、歩行者一人一人の減速や迂回といった回避行動の要素から見る局所的観点を歩行空間へと落とし込み大局的に見ることで局所混雑空間における歩行干渉を類型化し干渉によって生じる歩き

難さの度合いを示すことによって、空間評価の指標化を行うことを目的とする。

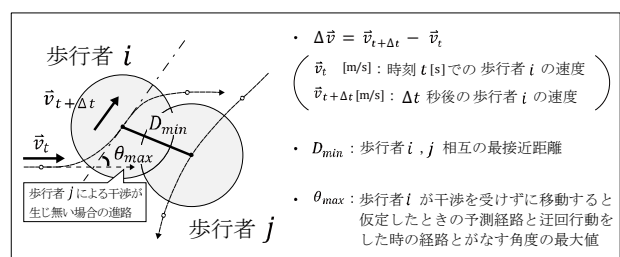
### 1.3 用語の定義

本来、人が感じる歩き難さには心理的要因など様々な要因が関わるため個人差が生じてくるが、本稿では論点を単純化させるため、歩行者の歩行領域の半径を筆者らの研究<sup>5)</sup>に基づき 0.455[m]とし、対向歩行者相互が交差する際、両者の歩行領域が重なる状態を歩行干渉と定義する。さらに、歩行干渉が生じた際の歩行者の挙動に着目し、このときの歩き難さの要因を交差フリクションと定義し、歩行速度変化量  $\Delta v$ [m/s]・回避行動時の迂回の最大角度  $\theta_{max}$ [rad]・干渉時の歩行者  $i$ - $j$ 間距離  $D$ [m] ( $0.6 \leq D \leq 0.91$ )の最小値  $D_{min}$ [m]を用いて表す(図1)。

## 2. 歩き難さを可視化する局所混雑空間評価モデル

### 2.1 交差フリクション因子

本モデルは調査・解析に基づいた歩行者の行動再現アニメーションをコンピュータ上の仮想空間で作成し、歩行者の行動を再現した移動個体間に干渉が生じた時、その位置に交差フリクションの因子である 1)干渉が生じた時間 2)干渉時の個体間距離 3)移動個体の速度変化 4)移動軌跡—を可視化する交差フリクション因子を発生させることにより、対象空間での交差フリクションが生じている箇所とその詳細な情報を把握することが可能である(図2)。アニメーションを再生させると交差フリクション因子が自動的に生成され、1フレーム毎に演算された個体間距離や移動時間が交差フリクション因子の色や模様、形といった情報として連続的に記録されていくようプログラムを組んだ。本研究ではフレームレートを映像作品等に一般的に使われている 30[fps]に設定しているため、最大1/30[sec]毎の情報を取得可能である。



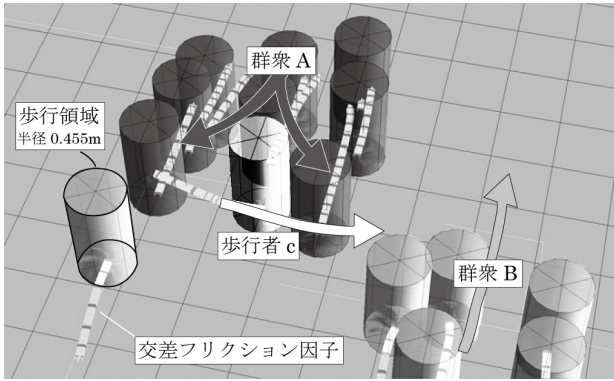


図2 移動個体による歩行の再現と交差フリクション因子

## 2.2 交差フリクション因子の作成手順

交差フリクション因子作成の流れは以下の通りである。

- 1) 評価対象となる空間の群衆流動を撮影する。
- 2) 撮影した映像から歩行の位置座標データを作成する。
- 3) 位置座標データから再現アニメーションを作成する。
- 4) アニメーション再生により交差フリクション因子が生成される。

群衆流動の撮影には固定したビデオカメラによる動画撮影が望ましい。また、後に歩行の位置座標データを作成することを考慮してなるべく正投影に近い、群衆を頭上から撮影できる下向きのアングルで撮影するよう留意する。本研究では調査空間として JR S 駅の 埠外コンコースを選んだ。本空間は幅の広い直線的な空間で群衆流動が一方流であり、また新幹線改札口へと向かうために群衆の流れと垂直に移動する利用者が一定量存在するため、この利用者による一方流への影響が解析しやすいという利点がある(図3)。撮影には 35mm フィルム換算で焦点距離 35mm のカメラを使用した。一度の撮影時間は被験者がカメラの画面端から入り画面端へ出ていくまでの時間 8 秒とする。

撮影した動画を 1 秒毎に切り出し画像にしていく。この画像はパースがかかった座標系であり、またレンズの歪みもあるため、そのままでは正確な軌跡データが得られない。そのため、対象空間の任意の 4 点を繋げた四角形の縦横比を測定し、画像処理環境で撮影画像上の四角形の縦横比が測定値となるように画像の補正を行うことで直交座標系へと写像変換をする。次に描画ツールソフトウェア上で写像変換された画像をもとに、写像変換後の画像歪が最も少ない歩行者の左右の靴底の位置ベクトルから歩行者の重心の位置ベクトルを算出し、プロットをしていく。

作成した位置座標データを映像制作ソフトウェアに取り込みアニメーションを作成する。1 秒毎の位置座標

データを作成したため、映像制作ソフトウェア上では 30 フレーム毎に座標値を打ち込んでいく。本研究ではキーフレームアニメーションを採用しており、数値を打ち込んだキーフレーム間の動きはコンピュータによって演算され補間される。本モデルでは、歩行者を再現する移動個体を歩行領域に基づいた半径 0.455[m] の正円を面に持つ高さ 1.7[m] の円柱として作成した。こうして作成したアニメーションを再生することで各移動個体の位置座標が 1 フレーム毎に演算され、条件に達した時に交差フリクション因子が生成される。交差フリクション因子には干渉時の個体間距離を可視化する距離型、経過時間・軌跡・速度変化を可視化する時間型の 2 種類がある。

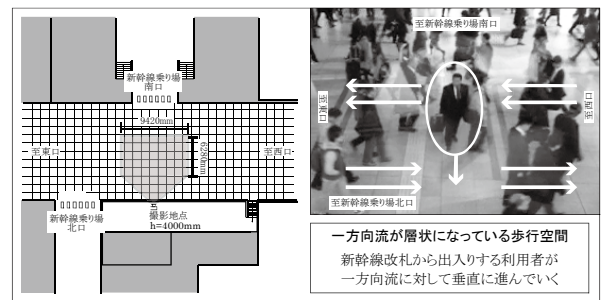


図3 撮影範囲と調査空間の様子

## 3. 距離型交差フリクション因子

### 3.1 接近行動での個体間距離の可視化

距離型交差フリクション因子では移動個体相互が重なる時、つまり歩行干渉が始まる個体間距離  $D = 0.91[m]$  で交差フリクション因子の発生が開始する。距離型交差フリクション因子には干渉中の移動個体間距離  $D$  の情報を RGB 値として持たせている。また歩行者間の挙動は接近行動と離隔行動に大別でき、この 2 つの行動は周囲から受ける影響、周囲へ与える影響が異なると考えられるため、接近行動時の個体間距離  $D_\alpha$  と離隔行動時の個体間距離  $D_\beta$  に分けて考える。

歩行者間の挙動はまず接近行動から始まる。その時の個体間距離を  $D_\alpha$ 、発生する交差フリクション因子の色情報を変数  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 255$ ) を用いて RGB[255,  $\alpha$ ,  $\alpha$ ] とする。歩行者の肩幅・手のふりを考慮して歩行者間が 0.6m になった時、接触が起こる考え、 $0.6[m] \leq D_\alpha \leq 0.91[m]$  において、 $D_\alpha$  と  $\alpha$  の関係を式 1 と定めた。これにより赤色の彩度のグラデーションで干渉時の個体間距離を時系列に可視化することが可能となった(表 1, 図 4)。

$$D_\alpha = \frac{0.31}{255} \alpha + 0.6 \quad (式 1)$$

### 3.2 離隔行動での個体間距離の可視化

一方で離隔時の行動について考察する。移動個体  $i$  に対して進行方向に垂直な線分  $l$  を引く。移動個体  $i, j$ , 線分  $l$  に囲まれた図形のうち、進行方向側の図形の面積

を  $S$ , もう片方の面積を  $S'$  とすると  $S \geq S'$  が成り立つとき  $i$  は接近行動をし、 $S < S'$  が成り立つとき離隔行動をすると定義する。また、移動個体  $i$  に対する  $u, v$  相対座標でみると、個体  $i$  の中心  $O$  と個体  $j$  の中心  $O'$  を結んだ線分  $OO'$  と  $u$  軸がなす角を  $\varphi$  としたとき、 $\sin \varphi \geq 0$  で接近行動、 $\sin \varphi < 0$  で離隔行動となる(図 5)。

離隔行動時の個体間距離を  $D_\beta$  [m]、離隔行動時の色情報を  $RGB[\beta, \beta, \beta]$  とした時の変数  $\beta (0 \leq \beta \leq 255)$  により、 $0.6[m] \leq D_\beta \leq 0.91[m]$  の範囲において  $D_\beta$  と  $\beta$  の間に式 2 で示す関係を与えることによって離隔時の距離と色情報を対応付ける (表 1, 図 4)。

$$D_\beta = \frac{0.31}{255} \beta + 0.6 \quad (式 2)$$

詳細な分析の際は描画ツールソフトウェアで交差フリクション因子の RGB の  $\alpha, \beta$  の値を調べ、式 1, 2 に代入することで干渉時の歩行者間距離  $D_\alpha, D_\beta$  を素早く把握可能である。

表 1 距離型交差フリクション因子の発生過程

step	対向歩行者の関係	交差フリクション因子
1.	歩行者 a, 歩行者 b <sub>1</sub> , 歩行者 b <sub>2</sub> 歩行領域 (半径=0.45m) 歩行干渉前	歩行者 a の重心位置 発生なし
2.	歩行者 a, 歩行者 b <sub>1</sub> 干渉開始 a-b 間接近行動	発生開始 歩行者 a の重心位置で発生
3.	干渉の継続 a-b 間離隔行動	離隔開始から発生する因子の色が変わる 離隔に対応した RGB 値に切り替わる
4.	歩行者 a, 歩行者 b <sub>2</sub> $D_1, D_2$ $D_1 > D_2$ a-b <sub>1</sub> 間より a-b <sub>2</sub> 間の方が近接	$D_1, D_2$ で a-b <sub>2</sub> 間の距離が反映される 歩行者 b <sub>2</sub> との干渉情報が色に反映される
5.	歩行者干渉終了	歩行者 b <sub>2</sub> との離隔開始で因子の色が変わる 歩行者相互の干渉の生じた位置に残る

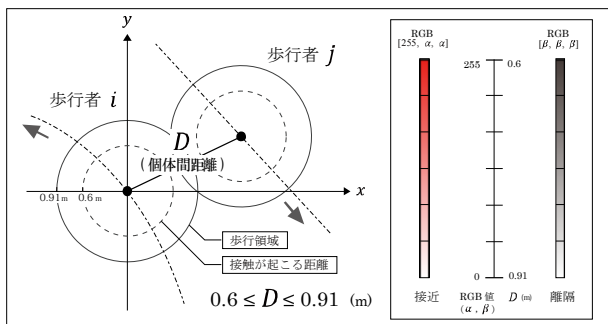


図 4 距離型交差フリクション因子の距離と色の対応

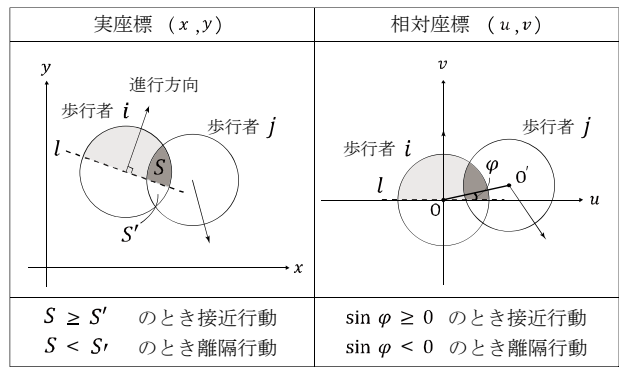


図 5 実座標  $(x, y)$ , 相対座標  $(u, v)$  から見た接近, 離隔の定義

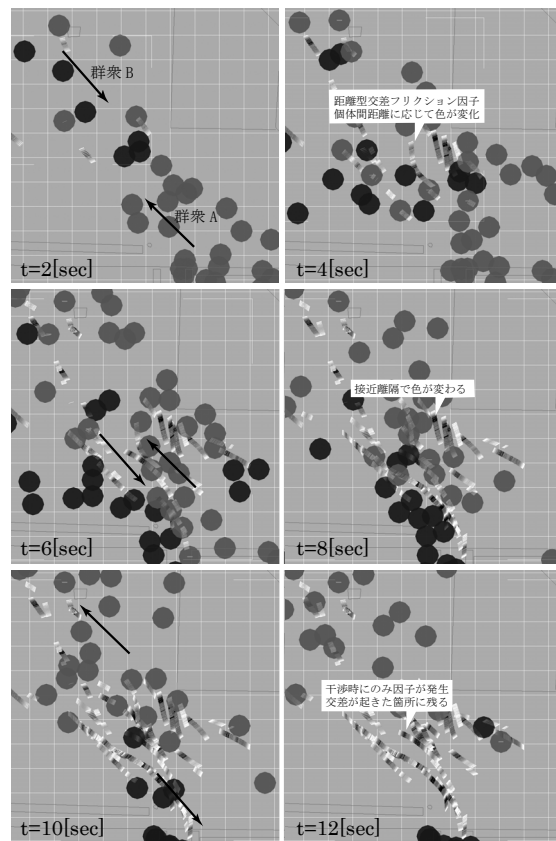


図 6 距離型交差フリクション因子の発生推移

#### 4. 時間型交差フリクション因子による経過時間・速度変化・移動軌跡の可視化

時間型交差フリクション因子では移動個体が動作を始めた瞬間から交差フリクション因子が生成される。この因子の色は各交差フリクション因子が発生した時点からカウントされる時間  $T$  [sec] と関係している。初期状態で  $RGB[255, 220, 220]$  の色情報を持ち、 $\Delta T = 0.2$  [sec] 毎に 1 フレームだけ  $RGB[160, 30, 30]$  になる。これにより 0.2 秒単位で経過時間を計測できるようになっている。さらに接近・離隔行動を区別し移動個体相互の干渉時間を可視化するため、3.2 と同様に  $\sin \varphi \geq 0$  のとき接近行動、 $\sin \varphi < 0$  で離隔行動となると定め、 $\Delta T \neq 0.2$  [sec] のとき接近時の歩行干渉で  $RGB[255, 120, 120]$  に、離隔時の歩行干渉で  $RGB[160, 140, 140]$  になるよう設定した(図 7, 8)。



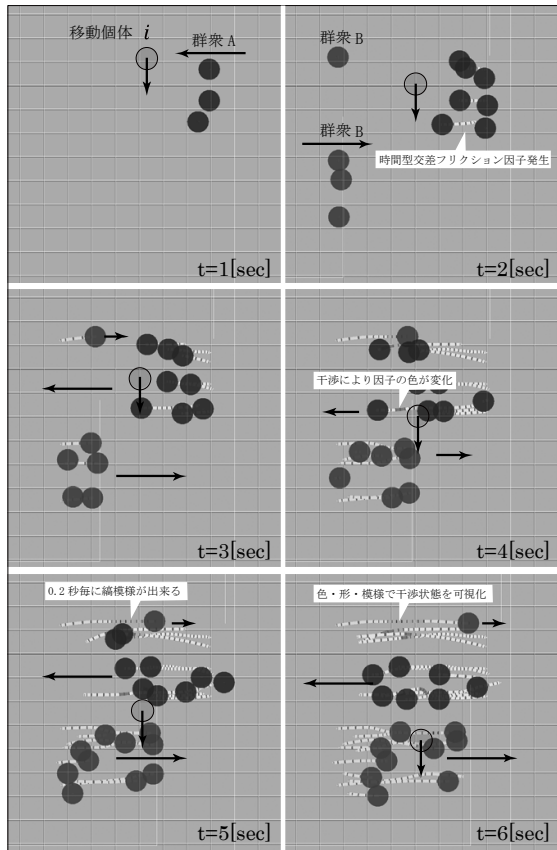


図7 時間型交差フリクション因子の発生推移

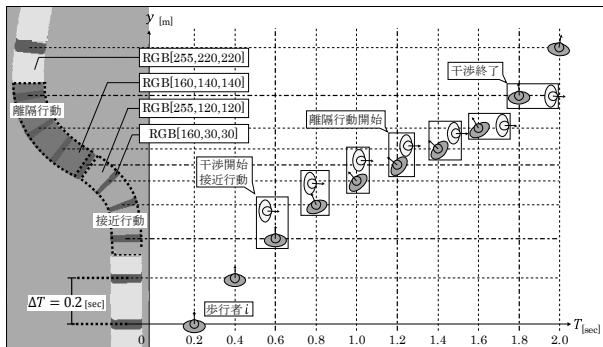


図8 時間型交差フリクション因子の形状、模様と歩行干渉状況

5. まとめ

本研究では局所混雑空間評価の指標となりうる交差フリクション因子の作成を行った。交差フリクション因子には以下のような特徴がある。

- 1) 距離型交差フリクション因子により歩行者相互が干渉した際の最接近距離が把握できる。
- 2) 時間型交差フリクション因子により干渉が生じた時間を把握できる。
- 3) 時間型交差フリクション因子の縞模様の間隔により歩行者の歩行速度の変化が可視化される。
- 4) 時間型交差フリクション因子の形状により歩行者の移動軌跡が可視化される。

また、筆者らは既報<sup>6)</sup>で交差のパターンを歩き難さの度合い別に分類している(表2)。ここでは干渉時間と干渉

面積によって類型化をしているが、これらの要素は本研究では上記の1)~3)が対応している。そのため今後S駅での調査結果をもとに作成した交差フリクション因子をこれらのパターンとの比較により類型化し、個体間の歩行状態を空間に反映した評価方法としての指標化を目指す。また4)についても、歩行軌跡の急激な変化も歩き難さを測るための指標になりうると考えられるため、今後、歩行軌跡の湾曲度合の類型化を試みる。

表2 交差パターンから見た干渉負荷の分類

高柳英明ほか:空間-時間系モデルを用いた歩行者空間の混雑評価より引用加工

#	歩行者の回避パターン	時系列領域干渉負荷モデル
単 独 型	擦れ違い型 最もポピュラーなabによる阪神片側相互のすれ違い回避パターン。回避継続時間は比較的短い。abいずれも歩行軌跡の乱れ少なく、滑らかである。 	
	待機型 abの進行方向が交錯の関係にある場合、一方が他方の通過をやり過ぎず歩行速度を低減させ回避するパターン。最も合理的な回避方法ではあるが、abいずれかの歩行速度に乱れが生じる。 	
	滞留型 abの進行方向が交錯の関係にあり、周辺の混雑等の要因により両者が歩行速度を低減させつつ回避するパターン。お互いの領域を干渉した状態が長く継続する。ab両方の歩行速度に乱れが生じる。 	

【参考文献】

- 1) 木村幸一郎:建築物内に於ける群衆流動状態の観察, 建築學會論文集, No. 5, pp307-316, 1937
- 2) J. Fruin:歩行者の空間, 鹿島出版, pp45-58, 1974
- 3) 中祐一郎:交差流動の構造-鉄道駅における旅客の交差流動に関する研究(1)-, 日本建築学会論文報告集, 第258号, pp93-102, 1977. 8
- 4) 中村和男, 加藤邦夫, 上原孝雄, 吉岡松太郎:群集対向流動の解析, 日本建築学会論文報告集, No. 289, pp119-129, 1980. 3
- 5) 高柳英明, 渡辺仁史:群衆交差流動における歩行領域確保に関する研究-歩行領域モデルを用いた解析-, 日本建築学会計画系論文集, No. 549, pp185-191, 2001. 11
- 6) 佐野友紀, 高柳英明, 渡辺仁史:空間-時間系モデルを用いた歩行者空間の混雑評価, 日本建築学会計画系論文集, 第555号, pp 191-197, 2002. 5
- 7) 佐野友紀, 今西美音子:実験概要及び移動方向パラ図・短時間歩行パス図を用いた群集の評価方法-群衆流横断における歩行者間の回避行動分析その1, 日本建築学会学術大会学術講演梗概集, 建築計画, pp601-602, 2013. 9
- 8) 山田昇吾, 高柳英明:連続間欠記録式歩行群衆流画像による群衆性状の把握, 第36回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 報告, pp189-192, 2013. 12
- 9) 建部謙治, 佐野智紀:フィールド調査にもとづく通過しにくさの解析:群衆流動横断時の歩行特性に関する研究その2, 日本建築学会計画系論文集, No. 554, pp. 175-180, 2002. 4
- 10) 中村彩子, 諏訪正浩, 佐野智紀, 青木俊幸, 山本昌和, 石突光隆:短時間歩行バス分析による一方向流と交錯流の流動特性比較-鉄道駅の群衆流動評価に関する研究-, 日本建築学会学術大会学術講演梗概集, pp795-796, 2009. 8
- 11) 高柳英明, 長山淳一, 渡辺仁史:歩行者の最適速度保持行動を考慮した歩行行動モデル-群衆の小集団形成に見られる追跡-追従相転移現象に基づく解析数理-, 日本建築学会計画系論文集, No. 606, pp. 63-70, 2006. 8

\*1 滋賀県立大学大学院環境科学研究科環境計画学専攻博士前期課程  
\*2 滋賀県立大学環境科学部環境建築デザイン学科准教授工博