フィールド調査にもとづく通過しにくさの解析

群集流動横断時の歩行特性に関する研究 その2

ANALYSIS OF CROSSING DIFFICULTY BASED ON FIELD EXPERIMENTS

Study on characteristics of pedestrian crossing flow Part 2

建部 謙治*¹, 佐野 友紀*²

Kenji TATEBE and Tomonori SANO

The purpose of this paper is to clarify the level of walking difficulty through crowd flow. Four subjects crossed a crowd flow in a terminal station at four separate penetration angles each; 45 degrees, 90 degrees, 135 degrees. The crossing pedestrian's difficulty was analyzed from both the human movement and psychological aspects. The result of the analysis is as follows: 1) Mental evaluation of crossing difficulty has a close relation to the crowd density. The perception of crossing difficulty showed the greatest change between 0.25 person/m² and 1.0 person/m². 2) Mental evaluation of a 45 degree crossing angle was more favorable than one of 135 degrees. 3) The results of physical analysis were the same as mental evaluation. 4) The crossing subject tended to cross behind crowd pedestrians. In the case of high density, the avoidance behavior becomes complex, using changes of speed and locus.

Keyword: crowd flow pedestrian crossing field experiment avoidance behavior walking difficulty

群集流動 歩行者 横断 フィールド実験 回避 歩きにくさ

1. はじめに

都市及びその中心となる鉄道ターミナル駅においては、歩行者が高密度に集中し交錯する状態が日常化している。こうした群集流の交差を安全かつ円滑に処理できることが群集制御の課題であり、その対応には群集交差流動内の歩行者の歩きにくさを評価する指標の確立が求められる。本研究はこの視点に立って、歩行者の歩きにくさを実験的に解明し定量化することを目的とする。

前報¹⁾では、単独の歩行者が群集を横断する実験室実験を行い、モーションキャプチャシステムを利用して、歩行者の位置座標と身体の高さを測定した。解析の結果、横断者、群集歩行者とも進入方向と群集密度によって、軌跡の方向変化や速度変化を使い分け回避の方法を変えていることを明らかにした。また、横断者の進入により群集の隊列が変形する様子を数理モデルで示した。しかしこの実験は実験室実験で群集の歩行目的が均質である。したがって実空間における調査にも適用できるか検討する必要がある。また、通過しにくさの解明のためには歩行者の心理面との関係についても明らかにする必要がある。

本報は、実空間で自然発生する群集流への横断実験を行うことによって、群集流動横断時の歩行者心理と動作の関係について解析する。また通過しにくさのメカニズムを解明し、定量的な指標化を行うため、

回避行動のモデル化を行う^{注1)}。

2. 実験の概要

2・1 群集流動横断実験

本実験に先立ち行われた実験室実験¹⁾を通して群集流の状況がコントロールされた状態での通過歩行データを計測した。これを踏まえ、本実験では自然発生する人の流れに対して、実験歩行者による進入する角度を変えた通過歩行データを計測する。計測は、ビデオによる撮影と、各実験終了ごとに進入歩行者に対して通過しにくさの評価アンケートを行った。

2・2 用語の定義

ここでは本研究で使用される用語について定義する。

進入歩行者：群集流に進入していく歩行者。

群集歩行者：群集流を構成する歩行者。

実験室実験：モーションキャプチャシステムを利用した実験室内での実験。群集、進入歩行者ともに状況をコントロールしたものである。

フィールド実験：ターミナル駅コンコースで行った実空間での実験。

群集は自然発生、進入歩行者は実験被験者である。

*¹ 愛知工業大学工学部建築学科 教授・博士(工学)

*² 科学技術振興事業団 科学技術特別研究員・博士(工学)

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Aichi Institute of Technology, Dr. Eng.

Domestic Research Fellow, Japan Science and Technology Corporation, Dr. Eng.

2・3 実験方法

下記の通り実験を行った。

日時：1999年11月24日(木) 6:30～9:30

場所：私鉄駅改札口内1階コンコース

(図1、撮影用ビデオカメラは2階デッキに設置)

進入歩行者：大学生4名

撮影内容：実験は群集の流れを進入歩行者が単独で進入、通過するものである^{注2)}。進入角度は45度、90度、135度の3種類とし、参考のため180度についても実験を行った(図2)。この角度を、A～Dの4人の進入歩行者に順番に歩いてもらう^{注3)}(図3)。その状況をコンコースの2階デッキから小型8mmビデオで撮影する(図4)。進入回数は1人61～62回、合計247回である。歩行終了時1回ごとに、進入歩行者は通過しにくさの心理評価をアンケートに記入する。

図1：私鉄駅平面図と実験位置

図2：群集の進行方向と進入歩行者の進入角度図

図3：実験の順序の流

図4：カメラ設置位置

図5：歩行者座標計測のフローチャート図

2・4 歩行軌跡の画像処理データ変換

ビデオカメラで撮影したデータから、歩行者の位置座標^{注4)}を算定した。ここでは、事前に制作した画像取り込みシステムと、コンピュータプログラムを用いた^{注5)}。

8mmビデオの映像をビデオキャプチャーボードを経由してコンピュータに取り込む。映像は「NIH image」ソフトウェアで、0.25秒ごとの連続画像movieデータとして、TIFF形式で取り込む。位置座標計測用のMacroプログラムにて画像データ上の歩行者の頭の位置をクリックして座標を抽出し、座標変換プログラムにて画面上の座標を直交座標に変換する(図5)。

3. 通過しにくさの解析と考察

3・1 通過しにくさの解析

・フィールド実験のアンケート結果

アンケートでは、実験ごとに進入歩行者に通過しにくさ感覚を用紙に記入させた。通過しにくさ評価値は1～5の5段階で表すもので、

値が大きいほど通過しにくいことを示す。図6は群集密度^{注6)}と通過しにくさ評価値の関係を度数分布で示したものである。群集密度を0.25人/㎡ごとに階級に分け、階級ごとの回答率を横軸で示す。図6の分布図から、群集密度が0.25人/㎡未満では評価値の多くが1、2と低く、1.0人/㎡以上では評価値が4、5と高いところに集中している。群集密度0.25人/㎡以上1.0人/㎡未満では、評価値の分布にばらつきが見られる。

図6：評価値の散布図

図7：進入角度別評価値の平均グラフ

また、図7は進入角度ごとの評価値グラフである。0.25人/㎡～1.0人/㎡の範囲では、45度 90度 135度の順で通過しにくい評価となる傾向が見られた^{注7)}。しかしこの区間における、各密度ごとの進入角度平均値間の検定では有意差が認められなかった。

・群集密度と通過状態の関係について

密度による群集の違いを写真により図8に示す。群集の密度が上がるとつれて分布状態がランダムな分散から、ところどころ塊のある集塊となり、ほぼ等間隔な密集状態となる。

図8：密度0.1、0.6、1.2(人/㎡)の群集の状態

・群集密度と衝突の確率について

図9は、実験における群集密度と進入者の衝突の割合を示したものである。ここで衝突とは、「他の歩行者を回避しなければならない状態」とし、「進入歩行者が他の歩行者を回避するために、1. 方向を変化する、2. 速度を変化する行動」をビデオ画像より判別して求め

た。0.25 人/㎡以上で衝突が発生しはじめ、1.0 人/㎡以上になるとほとんどすべての場合に衝突が起こる。

図9：群集密度と衝突の確率

3・2 通過しにくさ解析の考察

図6より、群集密度と心理評価の関係には、密度0.25 人/㎡から1.0 人/㎡の付近までは、通過しにくさ評価値にばらつきが見られ、評価が安定しない。また図9では群集密度と衝突の確率の関係において、この区間で衝突の確率が大きく変化する。こうしたことから、群集密度、隙間、衝突確率の相互関係を見て、通過しにくさ評価と群集密度の関係について考察する。

・群集密度と隙間の関係について

アンケート結果から、0.25 人/㎡と1.0 人/㎡付近を境界として、3つのフェーズに分類できる。そこで図8の元データ動画映像を観察し、3つのフェーズにおける群集密度と隙間の関係を以下に示す。

密度0.25 人/㎡以下……群集密度が低く通り抜ける隙間が多い。

密度0.25 人/㎡～1.0 人/㎡……群集の状態により隙間も変化が大きい。

密度1.0 人/㎡以上……群集密度が高く通り抜ける隙間が少ない。

・隙間と衝突との関係について

図8と図9より衝突の確率は、群集の歩行者同士の隙間と関係があると考えられる。

密度0.25 人/㎡以下……隙間が大きく、衝突はほとんど起こらない。

密度0.25 人/㎡～1.0 人/㎡……群集の隙間が多様であり連続の衝突が起こる頻度も変化する。

密度1.0 人/㎡以上……歩行者間に隙間がなく、ほとんどの事例で衝突が起こる。

・衝突と通過しにくさ評価の関係について

図9では群集密度と衝突の確率の関係を示した。この結果は、フルインの群集流に進入する時の衝突が起こる確率¹⁰⁾とほぼ一致する。

以上のことから、群集密度が高くなるにしたがって隙間が少なくなり、衝突の確率が高くなる。衝突の確率が高くなると、歩行者の通過時の負荷が高くなって、ひいては通過しにくさ評価に影響を与えることになる。

・群集密度と通過しにくさ評価の関係について

群集流を通過する際には、群集密度が通過しにくさ評価に大きく関係することが明らかとなった。表1に、群集の密度を低密度、中密度、高密度に分類し、通過の状態をまとめた。群集密度0.25 人/㎡～1.0 人/㎡の中密度状態では、群集の隙間の大きさが多様であり連続の衝突が起こる頻度も変化するため、通過しにくさの評価値にばらつきが起こる。また、群集密度1.0 人/㎡以上の高密度状態では、隙間がほとん

どないため衝突が起こり、通過しにくさ評価が偏ることが説明できる。

3・3 通過しにくさの近似式

図10は、群集密度と通過しにくさ評価平均値の関係を近似曲線で示したものである。平均値の縦棒はその標準偏差を示している。(1)式によって、群集密度から歩行者が感じる通過しにくさの程度を定量的に把握することができる。

$$y = 1.2045 \ln(x) + 4.307 \quad (1)$$

$$\text{重相関係数 } R^2 = 0.9846$$

(xは群集密度、yは通過しにくさの評価値)

表1 群集の密度と分布状態

群集密度 [人/㎡]	群集状態	群集内歩行者の分布	横断	衝突
低密度	0～0.25	分散	まばらで不均一に分布する	容易
中密度	0.25～1.0	集塊	歩行者の塊の部分と隙間の部分がある	状態により異なる
高密度	1.0～	密集	群集がほぼ等間隔の密集状態で分布する	困難

図10：群集密度と通過しにくさ評価平均値の近似曲線

(縦棒は標準偏差1σを表す)

4. 回避行動の解析

4・1 進入歩行者の回避行動パターン

図11は進入歩行者の歩行軌跡を進入角度別、群集密度別に示したものである。図中の点は0.25秒ごとの進入歩行者の位置を表す。矢印はその歩行の進行方向を表し、群集歩行者は右から左に移動するものとする。(実験位置、寸法、群集と進入歩行者の位置関係は、図1、図2を参照。) 図11から、各角度の歩行軌跡における特徴が読み取れる。点の間隔が大きいと歩行速度が速く、小さいと遅いことを示す。進入歩行者の進行方向を軸とした垂直方向の点のずれから方向変化が読み取れる。表2に群集密度・進入角度と回避行動の特徴を示す。高密度では、135度の速度変化を除き、すべての角度で回避行動が起こる。中密度では135度で方向変化主体の回避、90度、45度では速度変化主体の回避と、それぞれ方法が異なる。

4・2 回避行動解析の考察

歩行軌跡グラフと映像をもとに回避行動特性を以下に考察する。

・個人レベルの回避行動特性

中密度0.6 人/㎡では、全進入角度において、個人の回避は群集を構成する人の後ろ側(背中側)を通り抜ける傾向が多く見られた。進入角度ごとの行動特性は以下のようになる。

135°：方向変化に加え、体をひねる回避を行う。

90°：速度変化による回避を行う。

45°：速度変化を主に、方向変化を従とした回避を行う。

図 11：角度、密度別の歩行軌跡図例

表 2：群集密度・進入角度別回避行動の特徴

進入角度	中密度 (0.6人/㎡)		高密度 (1.2人/㎡)		*参考
	方向変化	速度変化	方向変化	速度変化	
180°	あり	なし	あり	あり	
135°	あり	小さい	大きい	小さい	
90°	小さい	あり	あり	あり	
45°	小さい	あり	あり	あり	

群集密度が 1.2 人/㎡よりもさらに高くなって衝突が増えると、上記の回避行動の他に、さらに速度変化や方向変化を加えた回避をしたり、人の前を通り抜けたりする現象が見られた。

・歩行者の回避の評価について

通過しにくさを感じるのは、回避のための位置変化の大きさよりも進路変更の回数が増えた時である。また、図 8 から密度 0.25 人/㎡以下では衝突の確率が低く、密度 1.0 人/㎡以上ではほぼ全ての場合で衝突が起こることからも、群集密度が高くなるにつれて他者との衝突が重なり、通過しにくいという評価につながると考えられる。

5. 回避行動パターンモデルの作成

5.1 角度別回避行動パターン

ビデオ観察によると、中密度状態では進入歩行者の通り抜け回避行動は比較的一様で、近傍の群集歩行者の直前を通り抜ける場合と、その歩行者を一旦見送って背後を通り抜ける 2 つの場面に大別される。ビデオ画像から中密度状態において、一対一の回避を伴って通り抜けを行う進入歩行者と群集歩行者について、時系列の歩行軌跡データを抽出した。このデータをもとに群集歩行者の進行方向およびこれと直交する方向の軸線上を進入歩行者が通過した地点をプロ

図 12：群集歩行者を基準とした進入歩行者の相対通過位置

表 3：回避距離の平均値と標準偏差 (単位：mm)

平均	45°	平均	90°	平均	135°
前方	642.9	前方	618.6	前方	891.3
後方	-536	後方	-837	後方	-1760
標準偏差	45°	標準偏差	90°	標準偏差	135°
前方	99.91	前方	187.1	前方	414.8
後方	219.1	後方	178.2	後方	578.4

表 4：進入角度と回避行動パターンの関係

進入角度	①群集前方への回避	②群集後方への回避
135°	速度変化(加速)	方向変化(後方)
90°	方向変化(前方)	速度変化(減速)
45°	変化なし(群集減速)	速度変化(減速)

ットし、群集歩行者を基準として進入歩行者の相対的な位置関係(回避距離)を計算した(図 12)。サンプル数は、各進入角度ごと 20 (前後通過各 10) の計 60 サンプルである。各方向前方・後方通過それぞれについて、回避距離の算術平均値および標準偏差を求めたものが表 3 である。45 度、90 度については、標準偏差が小さいことから、通過時に確保する領域寸法を平均値で算定することが可能である。135° については、標準偏差が大きいことから、状況によって回避行動が異なると考えられる。これは、135° が対面状態に近いことから、群集、進入歩行者双方が相手の動きを見ながら回避行動を行うためであると考えられる。この状況では相互の位置関係と歩行速度が関わって通り抜けのタイミングが計られる。

5.2 回避行動に関わる領域分け

同じ回避行動を示す位置関係については領域分けをし、その概念図として図 12 に示すように、それぞれに①②の番号をつけた。進入及び群集歩行者が回避(速度変化、方向変化)せず直進すると想定する。群集歩行者に接近する進入歩行者は、群集歩行者の近傍には近づかないが、それより離れた①のゾーンでは前方への回避を、②のゾーンでは後方を回避する。ただし、進入歩行者と単数の群集歩行者のみが干渉し合う場合とし、進入歩行者はほぼ等速歩行をしていると仮定する。ここでは、回避の対象となる群集歩行者は 1 人としているが、連続の衝突回避が起こることを考慮すると、中密度ではモデルに適合した回避を行うが、高密度では、速度変化と方向変化の複合で回避を行う。この複合の回避は単数の回避に比べ、通過しにくい評価となる。表 4 に示す通り、単数回避では各進入角度ご

との回避行動パターンは2種類である。この事からも単数の回避は比較的通過しやすいと思われる。しかし、複合の回避ではさらにパターンが増え通過しにくくなることになる。

図 13：相対的隙間モデルの概念図

5. 3 相対位置座標による隙間モデル

一方向に向かう群集流では、大きくとらえると、横方向に幾重にも重なる複数の列のように見える。進入歩行者による群集流の横断は、この列を一列ずつ渡ってゆく行動としてとらえる事もできる。そこで、群集流を通過する行動を、群集歩行者の列の中に生じる隙間を通り抜ける行動に置き換え、群集流を複数の並行する列の連続としてモデル化を行う(図 13)。進入歩行者と群集はともに移動しながら交差するため、実際の進入角度と群集からみた相対的な進入角度は異なる。群集歩行者に対する進入歩行者の進入角度と、それぞれの速度の比率から、群集歩行者を基準とした相対速度と相対角度を求める。同時に、進入歩行者から見た群集歩行者間の見かけの隙間を算定する。群集のベクトルを V_c 、進入歩行者のベクトルを V_p 、進入角度を θ_p とする。相対ベクトルの速度を V_r とし、角度を θ_r とする。実際の群集歩行者間の隙間(a)、相対的にみた見かけの隙間(Ar)とすると、

$$\theta_r = \cos^{-1} \left(\frac{V_p \cdot \cos \theta_p}{|V_p| \cdot |V_c|} \right) \quad \dots\dots (2)$$

$$Ar = a \cdot \sin \theta_r \quad \dots\dots (3)$$

(2)式から相対角度を求め、(3)式から見かけの隙間を計算する。実験に対応して、進入歩行者の進入角度 45 度、90 度、135 度の場合の計算例を示す(図 14) 注8。

5. 4 隙間モデルによる進入角度と通過しにくさの関係

速度比、進入角度と見かけの隙間比の関係を以下に示す。図 15 は進入角度を 90°としたときの進入歩行者の群集歩行者に対する速度比 (V_p/V_c) と見かけの隙間比 (Ar/a) の関係を示したものである。群集歩行者の速度が一定の場合、進入歩行者の速度が下がるほど速度比は小さくなる。見かけの隙間比が小さくなると通過しにくくなると考えると、群集に対して進入歩行者の速度が小さくなるほど通過しにくいといえる。

図 16 は、進入歩行者と群集歩行者の速度を同一としたときの進入角度 (θ_p) と見かけの隙間比 (Ar/a) の関係を示したものである。進入角度が大きくなるほど見かけの隙間は小さくなり通過しにくことが分かる。

見かけの隙間が小さい方が歩きにくいとすると、45 度、90 度、135 度の順で歩きにくくなる。この結果はフィールド実験の心理評

相対角度・速度

見かけの隙間

図 14：進入角度例と相対的隙間モデル

図 15：進入角度 90 度の時の速度比と見かけの隙間比

図 16：速度同一の時の進入角度と見かけの隙間比

価の結果と一致する。

6. 結論

従来の建築計画においては、異なる方向への群集の動線は分離することが原則であったが、実際には交差を許容しなければならない場合も多くみられた。ここでは群集流を通過する時の通過しにくさの視点を通して、動線の交差を評価する方法を提案した。主な結果は以下の通りである。

- ・群集密度が高くなるにつれて歩行者は通過しにくさを感じる。群集の密度(x)と通過しにくさの心理評価(y)の関係を近似式で表すと、

$$y = 1.2045 \ln(x) + 4.307, \text{ 重相関係数 } R^2 = 0.9846$$

となる。

- ・心理評価では、歩行者は進入角度により 45 度、90 度、135 度の順で通過しにくさを感じる。

- ・相対位置座標の解析から回避行動をモデル化し、見かけの隙間寸法、相対速度の違い、進入角度により群集への通過しにくさが異なることが明らかとなった。この結果は心理評価結果と一致した。
- ・群集密度 0.25 人/㎡未満や密度 1.0 人/㎡以上では評価にばらつきは見られない。しかし、群集密度 0.25 人/㎡～1.0 人/㎡では評価にばらつきが見られる。これは歩行者間の隙間のばらつきと衝突確率から説明することができる。
- ・進入歩行者は通常、群集歩行者の後方をねらい通り抜ける。しかし高密度では回避が複雑になり、群集歩行者の前方を回避する行動の割合が増えたり、速度変化や方向変化による回避を組み合わせることで通過する。

今後の課題として、さらに回避行動における微視的な動作特性や包括的な視点からの群集流動の研究が必要であると考えられる。

注

- 1) 群集の交差流動を扱った研究には、岡崎²⁾、中³⁾、中村⁴⁾によるものがあり、それぞれの視点から現象の解明に成果をあげているが、いずれも交差流動内での歩行者の心理については言及していない。
- 2) 実験室実験とフィールド実験では、歩行速度はそれぞれ 1.0～1.2m/s で同じである。
- 3) 本研究では、最終的に安全に交差が行える群集状態の把握を目的としていることから、進入歩行者に対しては、「出発点から速やかに目的地点に移動して下さい」との教示をした。
- 4) 座標基準図形は図 1 の黒塗りの 5m×4m のエリアとし、衝突の算定範囲は座標基準図形中央を中心とする直径 4m の円内とした。
- 5) 機器構成：Apple PowerMacintosh 7600/180
解析ソフトウェア：NIH Image
システム開発言語：MacPerl
- 6) 群集密度の計測は、座標基準図形内にいる歩行者をその面積で割った値を、進入歩行者が基準図形内に進入した時と退出した時について求め、これを平均した。ただし、線上にかかる歩行者については 0.5 人としてカウントし、進入歩行者は人数に入れている。

7) 図 7 の群集密度 0.125 人/㎡については、サンプル数が少ないこと、また密度が低く偶発的な衝突の影響が見られるため考察から除外した。

8) 45° 90° 135° の進入方向の通過に対して、相対的な歩行速度および、相対的な進入方向・速度を算定して示すことで、進入角度が大きくなるとともに、見かけの隙間が小さくなることに加えて、その隙間をすり抜ける速度が増加し、通過が困難になることを示した。進入歩行者の群集流に直角方向の速度は、45° と 135° で同じであるが、並行方向の速度は大きく異なるために、接近時間が大きく異なる。また、通り抜けに必要な見掛けの隙間の大きさも異なるため、通過の負荷は異なると考えられる。

参考文献

- 1) 佐野 友紀、志田 弘二、建部 謙治：物理指標からみた交錯についての実験的研究、群集流動横断時の歩行特性に関する研究 その 1、日本建築学会計画系論文集、No.546, pp.127-132, 2001.8
- 2) 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、No.283, pp.111-119, 1979.9 他
- 3) 中 祐一郎：交差流動の構造、鉄道駅における交錯流動に関する研究 (1)、日本建築学会論文報告集、No.258, pp.93-102, 1977.8
- 4) 上原 孝男、中村 和男他：群集対向流動の解析、日本建築学会論文報告集、No.289, pp.119-129, 1980.3
- 5) KHISTY, C.J. "Pedestrian cross flow characteristics and performance", ENVIRONMENT AND BEHAVIOR, Vol.17 No.6, pp. 667-695, 1985.11
- 6) 建部 謙治、志田 弘二：画像処理を利用した歩行者の回避行動に関する研究、移動する歩行者に対する前方回避距離と回避歩行モデルの再検討、日本建築学会東海支部研究報告、pp.0.477-480, 1995.2
- 7) 佐野 友紀、建部 謙治：群集流を通過する時の歩きにくさに関する研究、愛知工業大学研究報告、No.35, pp.167-172, 2000.3
- 8) 建部 謙治、佐野 友紀：モーションキャプチャを用いた群集横断歩行の解析、日本インテリア学会大会学術講演梗概集、pp.37-38, 1999.10
- 9) 佐野 友紀、志田 弘二、建部 謙治：モーションキャプチャを用いた歩行者の群集横断歩行特性の解析、日本建築学会第 22 回情報システム利用技術シンポジウム論文集、pp.253-256, 1999.12
- 10) ジョン・J・フルーイン：歩行者の空間、pp.45-58, 鹿島出版社、東京、1974

(2001年7月9日原稿受理, 2002年1月10日採用決定)