

早稲田大学審査学位論文
博士（人間科学）

歩行者本位のモデル化による
群集流動の可視的評価手法

Visual Crowd Flow Evaluation Method
Using Pedestrian-Oriented Modeling

2017年1月

早稲田大学大学院 人間科学研究科

今西 美音子

IMANISHI, Mineko

目次

1. 序論	1
1.1. 背景	1
1.1.1. 歩行者本位	1
1.1.2. マルチエージェントモデル	2
1.1.3. 歩行者群集の可視化	3
1.2. 本研究と既往研究の関係	4
1.2.1. 群集行動の実験室実験	4
1.2.2. 歩行快適性の評価	5
1.2.3. 群集歩行シミュレーション	6
1.2.4. 歩行者群集の可視化	8
1.3. 研究対象	15
1.3.1. 空間	15
1.3.2. 人物属性	15
1.3.3. 状況	15
1.3.4. データ	16
1.4. 目的	17
1.4.1. モデル化	17
1.4.2. 評価	18
1.5. 論文構成	19
1.6. 用語の定義	22
2. 歩行者群集のモデル化と可視化	25
2.1. はじめに	25
2.1.1. 背景	25
2.1.2. 目的	25
2.2. 歩行者群集のモデル化	26
2.2.1. 密度-速度モデル	26
2.2.2. マルチエージェントモデル	27
2.2.3. 時空間モデル	29
2.2.4. 歩行者行動モデル	30
2.2.5. 歩行における歩行者の変量	31
2.2.6. 歩行者群集の複雑性の分類	32

2.3. 歩行者群集の可視化	34
2.3.1. 時空間モデルおよび次元の圧縮	34
2.3.2. 新規の可視化手法の提案	35
2.3.3. 作画技術	35
2.4. 短時間歩行パス図	38
2.4.1. 作例	38
2.4.2. 記述方法	39
2.4.3. 読図方法	40
2.4.4. 発展的利用	41
2.4.5. 作画技術	41
2.5. 移動方向バラ図	42
2.5.1. 作例	42
2.5.2. 記述方法	42
2.5.3. 読図方法	43
2.5.4. バラ図の既往事例	43
2.5.5. 作画技術	44
2.6. 歩行者主体移動軌跡図	45
2.6.1. 作例	45
2.6.2. 記述方法	45
2.6.3. 読図方法	46
2.6.4. 作画技術	48
2.6.5. ケーススタディ -鉄道駅構内改札前	48
2.7. まとめ	51
2.7.1. 群集モデル	51
2.7.2. 可視化	51
2.7.3. 対象データ	52
3. 群集流横断における歩行者の回避行動	53
3.1. はじめに	53
3.1.1. 背景	53
3.1.2. 既往研究	53
3.1.3. 目的	54
3.2. 方法	55
3.2.1. 群集流横断実験	55
3.2.2. 短時間歩行パス動画および移動方向バラ図	57

3.2.3. 回避強度指標の算出.....	57
3.2.4. 回避強度水準の決定.....	59
3.2.5. 歩行者毎の最大回避強度.....	59
3.2.6. 歩行者主体移動軌跡図.....	59
3.3. 結果.....	60
3.3.1. 歩きにくさの心理評価.....	60
3.3.2. 回避強度水準.....	60
3.3.3. 短時間歩行パス分析.....	64
3.3.4. 横断者の回避シーケンス.....	70
3.4. 考察.....	75
3.4.1. 進入角度・群集密度からみる回避の段階.....	75
3.4.2. 進入角度の違いによる横断者と群集流の関係性の変化.....	76
3.4.3. 回避強度と歩行快適性の関係.....	77
3.4.4. 短時間歩行パス動画からみる回避行動.....	77
3.4.5. 歩行者主体移動軌跡図からみる回避シーケンス.....	77
3.5. まとめ.....	79
3.5.1. 方法.....	79
3.5.2. 結果.....	79
3.5.3. 今後の展望.....	80

4. 開口部通過における群集の行動性状 _____ 83

4.1. はじめに.....	83
4.1.1. 背景.....	83
4.1.2. 既往研究.....	84
4.1.3. 目的.....	84
4.2. 方法.....	85
4.2.1. 開口部通過実験.....	85
4.2.2. 開口部通過時間の計測.....	89
4.2.3. 歩行軌跡および肩の向き抽出.....	90
4.2.4. 開口部通過時点での通過位置および肩の向きの算出.....	90
4.3. 結果.....	92
4.3.1. 流動係数および流動量.....	92
4.3.2. 2群間の開口部通過位置選択の差異.....	95
4.3.3. 開口部前滞留時の肩の向き.....	101
4.3.4. 開口部通過時の通過位置および肩の向き.....	102

4.4. 考察	109
4.4.1. 流動係数における実験値と法規規準値との関係	109
4.4.2. 流動量のステップ関数的増加.....	109
4.4.3. 開口部に対する身体方向.....	109
4.4.4. 肩をひねる行為の流動量への影響.....	110
4.4.5. 心理学領域での間隙実験結果との関係.....	110
4.5. まとめ	112
4.5.1. 方法	112
4.5.2. 結果	112
4.5.3. 今後の展望.....	113
5. 総括	115
5.1. 本研究の位置付け	115
5.1.1. 概要	115
5.1.2. 目的	115
5.2. 歩行者群集モデル.....	116
5.2.1. 歩行者本位マルチエージェントモデル.....	116
5.2.2. 回避行動モデル: 交差流での歩行者-歩行者間回避	117
5.2.3. 回避行動モデル: 開口部での群集流通過.....	121
5.2.4. モデルの利用.....	122
5.3. 歩行者群集評価.....	123
5.3.1. 可視化	123
5.3.2. 歩行快適性.....	124
5.3.3. 評価の利用.....	124
5.4. 今後の展望	126
謝辞	127
参考文献	128

建築とは、人間が自身らの営みをするために空間を操作した巨大な道具です。空間そのものを創造することが建築の本質であり、その中には人間の営みがあります。その空間での営みがより快適に・安全に・愉快地・効率的に行えるようにすることが、建築物を計画する者の求められるところとなります。

群集の流動となると、建造物からの避難時間計算やピーク時の収容可能人数のような効率側の話によりがちですが、その流動体を担う個々の歩行者が、流動の中で歩行をどのように選択して行っているかという視点から空間を捉えることで、歩行者流動というダイナミクスの本質が見えてくるのではないかと考えます。

1. 序論

1.1. 背景

都市施設の大規模化・新たな競技施設の建設など、多数の人が利用する施設の需要が近年高まり、それにともない建築空間における歩行者の計画も複雑化している。現在、歩行者群集流の混雑評価は主に群集密度や流動量を用いておこなわれる¹⁾。これら指標は客観データにもとづいた物理量でかつ計測・推測が容易であるため、避難時間計算や施設の収容人数の算出など歩行者の安全性に関わる建築計画に大いに利用されている。

質の高い大規模建築の設計には歩行者群集流の正しい理解と評価が不可欠である。混雑した群集は避難時間の遅延や事故リスクの増加など歩行者の安全を妨げると同時に、歩行者の快適性も奪う。流動が潤滑かという物理的な群集の質だけでなく、歩行者が流動の中で困難を抱えていないかという歩行者側の歩行者の質の評価も必要とされている。歩行者の歩行者快適性の指標は、Fruin²⁾ の提唱するサービス水準をはじめとし群集の密度や歩行者速度から測るものが主流である。しかし、これら指標は計測は容易であるものの群集流を空間の関数としてとらえており、空間を自律的に移動する歩行者の集合としての群集流を本来の姿でとらえていないといえない。より歩行者の体験と行動に即した歩行者群集の理解と、汎用かつ実際のデータへ適用可能な実用的な歩行者快適性の評価法の開発が求められる。そのためには、歩行者本位の視座で歩行者群集という事象を再構築する必要がある。

1.1.1. 歩行者本位

群集を観察する必要がある者は、多くの場合その建築空間の空間構成情報を把持しており、俯瞰でとらえた群集の行動データを入手する。そしてその俯瞰データをもとに群集を解析し評価を下し建築計画を立てる(図1.1)。しかし実際の歩行者は群集の「中」におり、歩行者が自身の五感で得られる範囲内の情報を基準に行動をとる(図1.2)。特に高密度状態では視界が他の歩行者は遮られるため、歩行者は自身を取り巻く非常に狭い範囲の情報をもとに行動を選択することになる。

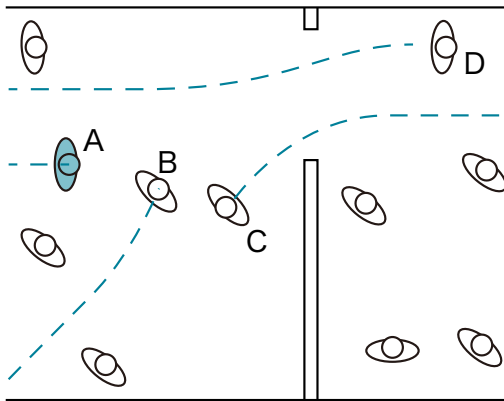


図1.1 俯瞰から見た歩行者の移動

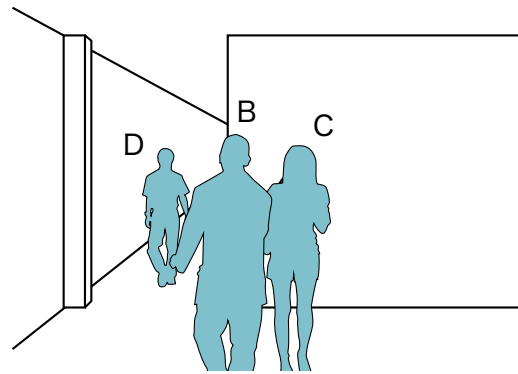


図1.2 移動する歩行者Aが得る情報

近年はスマートフォンなどのモバイルデバイスで歩行者が建築空間の中においても同時に俯瞰的な状況を得ることが可能となってきたが、空間のリアルタイムの状態を高精度でどこでも即時に把握できるにはまだ至っていない。このような状況の歩行者の歩行行動をより現実に即してモデル化・シミュレートするためには、従来の観察者の俯瞰的な視点ではなく、時々刻々と変化する歩行者の周辺の状況をもとに歩行者の視座で群集という事象を再構築する必要がある。よって本研究では、歩行者を本位とした群集の新たなとらえ直しを試みる。

1.1.2. マルチエージェントモデル

近年コンピュータ技術の発展により、非常に複雑な計算を瞬時に行なうことが可能となった。避難計画におけるコンピュータシミュレーションの利用も年々普及している。

コンピュータプログラミングの近代的なパラダイムであるオブジェクト指向は、群集を表現するのに適していると考えられる。「マルチエージェントモデル」とも呼ばれるオブジェクト指向の群集モデルは、それぞれのエージェントの属性や行動判断規範を定義しエージェントにモデル化した行動をさせることで、そのエージェントが構成する社会的な事象を典型化する。ここでエージェントは歩行者と置き換えることができ、実際の歩行者群集のように、歩行者の行動判断基準をモデル化していくことで「歩行者群集」という高次の事象モデルを生成するが可能となる。またオブジェクト指向は既存のモデルの拡張性に優れ、すでにあるモデルにモジュールとして機能を追加するような拡張方法が取りやすい。特定の条件下での歩行者のより詳細な振る舞いモデルを追加することで、既存のマルチエージェントモデルを拡張し、歩行者行動の精度を上げることが可能となる。

1.1.3. 歩行者群集の可視化

本質的に歩行者群集は、3次元空間に時間軸を加えた4次元時空間内を多数のオブジェクトが自律的に移動する非常に複雑な現象である。この複雑な現象を扱うためには、分析者が明確な意図をもって特徴を切り出し強調し、不要な次元はそぎ落とす必要がある。

事象の特徴を読み出すためにはデータの可視化が有効である。工学分野では数値による表現に頼る場面が多いが、状況を視覚的に再整理し提示することは直感的な理解に大きく寄与する。可視化は、特定の概念にしたがって特徴を切り出し現象を要約する。分析者が意図をもってデータを加工することで、人は現象をよりよく理解できる。可視化は第三者に現象をわかりやすく伝えることに加え、今まで隠れていた新たな現象を浮き出しとらえることも可能とする。可視化は複雑な現象を分析・評価する上で強力なツールとなりえる。

1.2. 本研究と既往研究の関係

1.2.1. 群集行動の研究

群集研究は群集密度と歩行速度または流動係数の関係といった群集密度を中心とした関係式の研究が行われてきた³⁾⁻⁷⁾。日本における歩行者群集の基礎的研究としてはまず、木村³⁾による実地調査がある。水平面、斜路、階段など勾配の異なる場所それぞれについて群集密度と速度の関係をまとめ、また異なる幅員出口からの退出時間についても調査をしている。続く戸川^{4), 5)}による群集流動の算出に関する研究では、戸川が行なった実地調査から避難計算に用いる流動係数として 1.5 人/m・s を採用している。この値は今日でも避難計算などで用いられる開口部の流動係数規準値のもととなっている。

群集研究の手法は主に①実地調査、②実験室実験、③シミュレーション実験の3種に分類できる。実地調査は、前述した初期の研究のように対象空間の面積と通過人数・所要時間などを計測する素朴なものは、実施が容易だが条件の統制が難しく、また歩行者の精緻なデータも得づらい。ただし近年では帷子ら⁸⁾によるレーザスキャナを用いた駅構内での群集歩行者の追跡や Johansson ら⁹⁾によるコンピュータの画像認識技術を用いた研究など、実地データからも精緻な歩行者の位置情報が取得可能になってきている。

対して実験室実験は通常、条件を統制した空間を用意し被験者を用いて行われる。近年の群集流に関する実験室実験としては Steffen ら¹⁰⁾による群集流の曲がりの実験や Rupprecht ら¹¹⁾による群集のボトルネック通過が挙げられる。丹下ら¹²⁾の研究は実験室において画像認識によって群集の精緻な移動データの抽出を試みるものである。

複数の手法を用いて結果を比較する研究もある。Bauer¹³⁾ は実験室実験結果と実地データの比較を行なっている。城ら¹⁴⁾による群集が居室のボトルネックである開口部を通り廊下へ移動する実験室実験では、居室前の滞留密度が流動量に与える影響を明らかにし、さらにその結果と同条件でのシミュレーション結果の比較をおこない群集シミュレーションの再現性の検証をしている。

本研究では平地での群集の行動に限って扱うが、上下移動を伴う群集行動は性状が異なるため別途研究が行われている。初期の研究として上田¹⁵⁾は実地により階段での群集の歩行性状を調査し、階段の上部と下部、踊り場では密度が異なることのほか、階段部における歩行者の密度と速度をまとめた。近年では山本ら¹⁶⁾が駅構内の階段の詳細な実地調査をしている。また中村ら¹⁷⁾はエスカレータ利用に関する群集流動の実地調査を行なっている。

群集行動の研究においては、平常時のほかに、とくに避難時に状況を限定しているものも多い。高層建築からの避難では、避難で使用する階段室での群集流動が注目される。北

後ら¹⁸⁾は避難訓練的な実験から階段室での2群集の合流について観察した。佐野ら^{19), 20)}も高層建築物からの避難における階段室での群集流の合流について実験を重ね、合流方向や防火戸の開閉が流動量に影響を与えることを示した。岡田ら²¹⁾は避難時にエスカレータを使用したときの群集流動に関しての実験を行なっている。

移動特性が歩行者と異なる車いす使用者が混在した歩行者流動の実験室実験としては、嶋田ら^{22), 23)}の実験研究がある。この実験では車いす利用者の混流率が変わると流動係数が減少することが示されている。大野ら²⁴⁾はキャリーバッグやベビーカーが他の歩行者に与える影響についてのフィールド調査を行なっており、これも、キャリーバッグやベビーカーが通常歩行者よりも広い空間を必要とすることを明らかにしている。

近年の群集実験はより特定の場面に状況を限定して行われる傾向にあり、群集流動の基礎的な性状については現在でも初期に行われてた研究のデータに頼っている部分が多い。しかし初期の群集研究は、計測技術が確立されていない、現在では通例である実験条件・調査条件の統制が不十分もしくは不明など、結果の利用には課題が多い。群集の基礎的な性状について、最新の技術を駆使した精緻な研究が求められる。

1.2.2. 歩行快適性の評価

歩行快適性の研究としてはまず、Fruin¹⁾による「サービス水準」がある。Fruin は1971年に歩行空間の環境の質を測る指標としてこのサービス水準を提唱した。サービス水準は、群集流内での歩行者の快適性に着目し、それを指標化することで歩行空間の質を評価する。自由歩行が実現できているかを評価の基準におき、流動係数とその空間の一人あたりの歩行者が占有できる空間を示す密度単位「歩行者空間モジュール」(m²/人)から、水準をAからFまでの6段階に区分する(表1.1)。

表1.1 Fruin によるサービス水準

水準	モジュール (m ² /人)	流動係数 ^{注1)} (人/m.s)	歩行の質
A	3.5 -	0.00 - 0.33	好きな歩行速度を自由に選択できる
B	2.5 - 3.5	0.33 - 0.50	正常な歩行速度で歩くことができ、滞留や交差流のあるところでは衝突の可能性がわずかながらある
C	1.5 - 2.5	0.50 - 0.75	歩行速度や追い抜きの自由度が制限される
D	1.0 - 1.5	0.75 - 1.00	大部分の人の歩行速度は低下する
E	0.5 - 1.0	1.00 - 1.33	すべての歩行者通常の歩行速度では歩けず足取りも頻繁に変える必要がある
F	0.0 - 0.5	1.33 -	前進はずり足でしかできない交通マヒの状態

しかしこの初期の歩行者快適性の指標であるサービス水準は、水準の区切りを一般的な群集事例との密度比較からのみで決定している。群集の物理指標から歩行者快適性を測る方法として現在でも知られているが水準の値の根拠は乏しい。

そのほか歩行者快適性の評価として高柳ら^{25), 26)}の「通過しにくさ」のフィールド調査がある。群集流の密度や横断の角度が歩行者の心理的評価である通過しにくさに影響を与えることが示唆されている。山本ら²⁷⁾による研究では駅における交錯流を歩きにくさで評価し、また続く研究²⁸⁾でその歩きにくさの可視化を試みている。

1.2.3. 群集歩行シミュレーション

様々な建築内の群集歩行シミュレーションが、主に避難時間の算出のために開発されている。Kuligowski ら²⁹⁾はシミュレーションで用いられる避難行動モデルを「行動モデル」(behavioral model)、「運動モデル」(movement model)、「部分行動モデル」(partial behavior model) の3種に分類した (表1.2)。

表1.2 E. Kuligowski による避難モデル分類

モデル名称	内容
行動モデル	指定された目的地に向かっての移動し、他の歩行者や建物内の条件によって振る舞いを決定する。
運動モデル	歩行者の振る舞いによらず、目的地に歩行者を移動させる。
部分行動モデル	主に初期条件で移動を決定するが、歩行者の振る舞いも加味されているモデル。意思決定を明示的にはシミュレートしない。

さらに行動モデルについて「暗黙行動」(implicit behavior)「条件/ルール」(conditional or rule)「人工知能」(artificial intelligence)「確率」(probabilistic) の4種の人間行動の再現方法を抽出し (表1.3)、既往の群集歩行シミュレーションを整理した (表1.4)。

表1.3 E. Kuligowski による行動再現方法分類

行動種別	内容
暗黙行動	特定の応答の遅れなど全体の動きに影響を与える属性をエージェントに割りあてる。
条件/ルール	環境の条件にもとづきエージェントに特定の動作を行わせる。
人工知能	人間の知能を模す。
確率	算出結果に確率論的なばらつきを与える。

表1.4 E. Kuligowski による避難シミュレーションの特徴

シミュレーション名称	モデル	行動分類
EVACNET4	運動	なし
WAYOUT	運動	なし
STEPS	行動	条件, 確率
PEDROUTE	部分行動	暗黙行動
Simulex	部分行動	暗黙行動
GridFlow	部分行動	暗黙行動
DFS+Evac	部分行動	暗黙行動, 条件, 確率
Pathfinder 2009	部分行動	暗黙行動
SimWalk	部分行動	条件, 確率
PEDFLOW	行動	条件, 確率
PedGo	部分行動	暗黙行動, 条件, 確率
ASERI	行動	条件, 確率
BldEXO	行動	条件, 確率
Legion	行動	人工知能, 確率
SpaceSensor	行動	条件, 確率
EPT	行動	人工知能
Myriad II	行動	人工知能
MassMotion	行動	人工知能, 確率
PathFinder	運動	なし
ALLSAFE	部分行動	暗黙行動
CRISP	行動	条件, 確率
EGRESS 2002	行動	条件, 確率
SGEM	部分行動	暗黙行動
EXIT89	部分行動	暗黙行動, 条件, 確率
MASSEgress	行動	条件, 人工知能
EvacuationNZ	行動	暗黙行動, 条件, 確率

本研究で支持するオブジェクト指向マルチエージェント的手法は、この表1.2のモデル分類のうち「行動モデル」および「部分行動モデル」に分類され、また環境によって振る舞いを決定する行動再現法は表1.3において主に「条件/ルール」にあたりと考えられる。

表1.4より、26個のシミュレーションモデルのうちおおむね9割がオブジェクト指向マルチエージェント的モデル（行動モデル、または部分行動モデル）を採用している。さらに半数以上が「条件」判断を行動基準として使用しており、周囲の環境の状況に応じて歩行者の振る舞いを決定するモデルが現在の群集避難シミュレーションの主要モデルであることがわかる。

しかし、このマルチエージェント的モデルは実務的なシミュレーションでは広く用いられているにもかかわらず、その前の段階の群集の分析ではあまり用いられていない。

また、このような避難シミュレーションにおける行動モデルを構築するデータそのものも、使用されるパラメータなどについては実実験にもとづく十分な検討がされてはおらず課題がある。群集シミュレーションに取り込みやすい形でのより精緻な歩行者行動モデルが求められる。

1.2.4. 歩行者群集の可視化

多くの商用群集シミュレーションでは、歩行者の状態を建築平面図上に描画して群集の状態を視覚的に表現している。SimTread³⁰⁾ (図1.3) では各歩行者の位置と歩行速度を記号の色分けで示し、EXODUS (図1.4) では歩行者の密度をヒートマップで示している。結果の理解にシミュレーション固有の専門知識を要さず、また現場の計画・設計における問題箇所を発見しやすいことからこのような表現方法は広く用いられている。しかし、このような図は歩行者の単純な情報を示すのにとどまり、群集の動的な状態を定量的に読むことはできない。

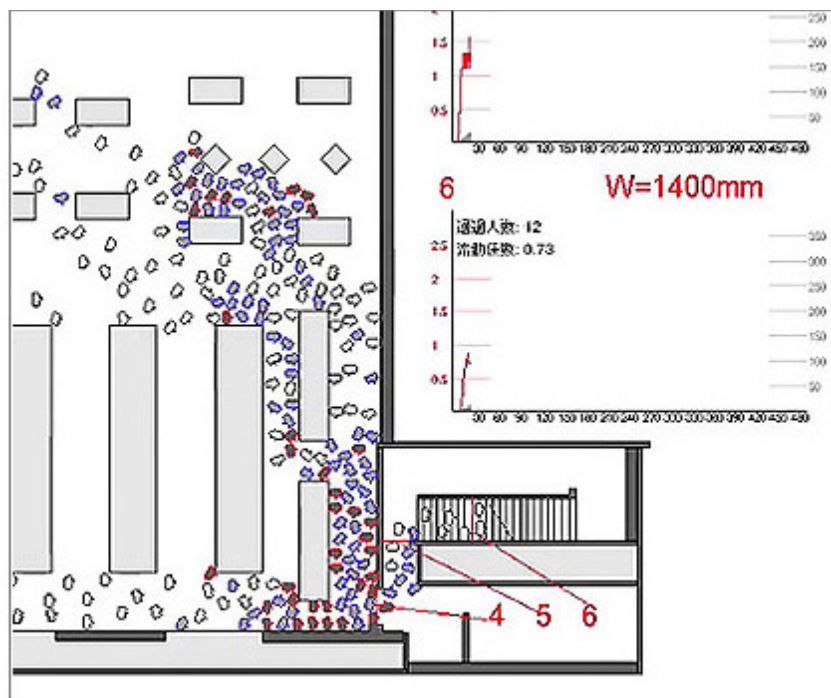


図1.3 歩行者シミュレーション SimTread 結果表示例³¹⁾

出典: エーアンドエー, SimTread,
<http://www.aanda.co.jp/products/simtread/func.html>

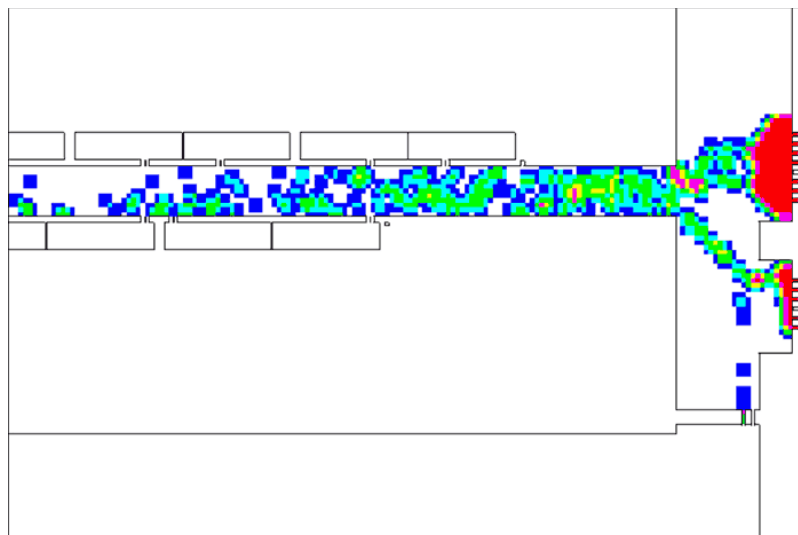


図1.4 避難解析 EXODUS 結果表示例³²⁾

出典: フォーラムエイト, EXODUS,
<http://www.forum8.co.jp/product/shokai/ex-sf.htm>

また、シミュレーション結果を3次元的にアニメーションで表示する機能を備えるものもある（図1.5）。3次元表現は階層を伴う空間移動が直感的にわかるという利点もあるが、ビジネスシーンで魅力的な表現とする目的が大きくそこからの詳細な群集分析は志向していない。



図1.5 避難解析 EXODUS 3次元結果表示例³²⁾

出典: フォーラムエイト, EXODUS,
<http://www.forum8.co.jp/product/shokai/ex-sf.htm>

学術的研究としては、湯^{33, 34)}ら (図1.6) や Porzycki³⁵⁾ ら (図1.7) が、群集内の歩行者間回避行動において一者から見た他者の位置を相対的にとらえ可視化することで群集でのパーソナルスペースをとらえることに成功している。

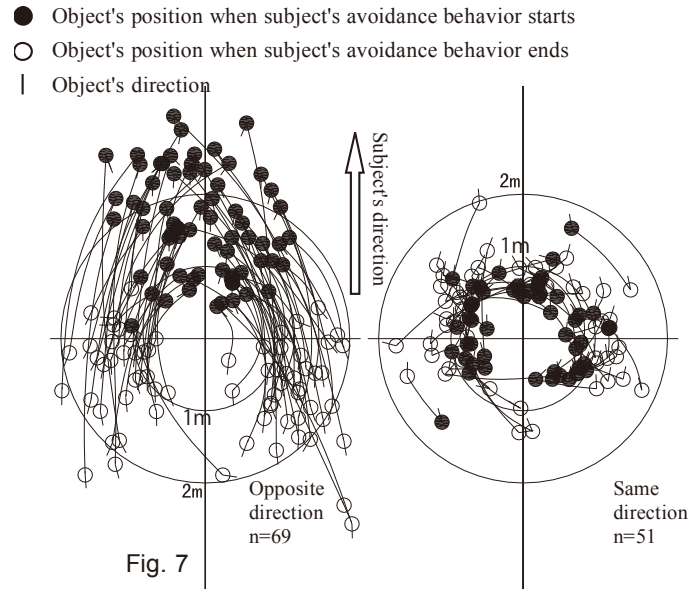


図1.6 他者の分布

出典: 湯寿旋, 郭東潤, 北原理雄: A study of pedestrian personal space in a station square - People-to-people avoidance behavior in nishi-chiba station square, p.2572, Figure 7

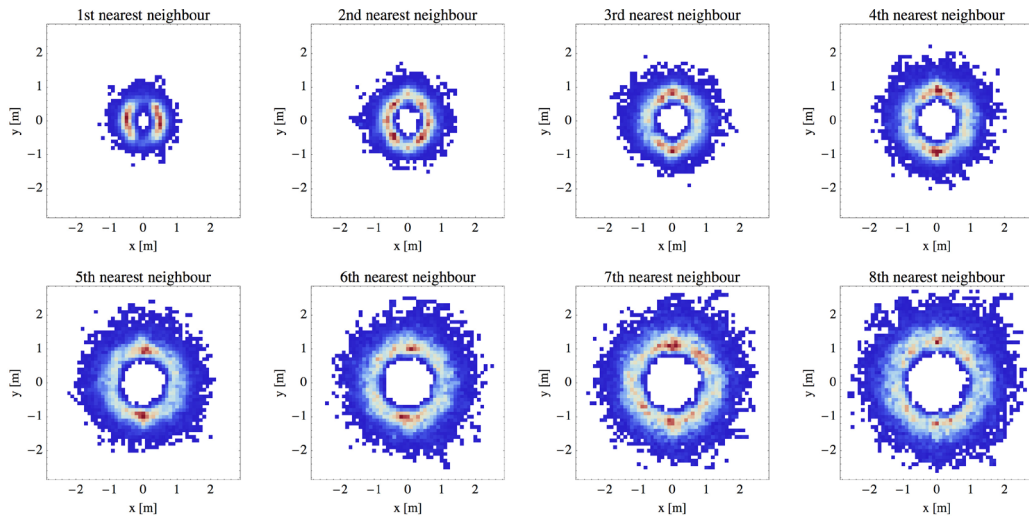


図1.7 n人目までの近接者の相対位置

出典: Porzycki, M. Mycek, R. Lubaś, J. Wąs :Pedestrian Spatial Self-organization According to its Nearest Neighbor Position, p.204, Figure 3

歩行者を主体とした時空間記述の点では本研究と類似性があるが、他者間距離や方向性に着目した研究であるため歩行者本位の行動の記述には至っていない。また、単独歩行者

のパーソナルスペースをとらえることを目的としているため、群集全体の状態の記述には用いることができない。

吉田^{36), 37)}は、EB モデルと命名された抽象化された図解（図1.8）で群集を表現し、静止した群集が移動を開始する際に群集が広がりまたこの広がり具合に応じて断面で見た流動量の変動を示した。歩行者群集をブロックとして一つの物体のようにとらえることでの行動特性を幾何学的に得ることに成功しているが、高度な単純化がなされているため、これも汎用的な群集評価には適さない。

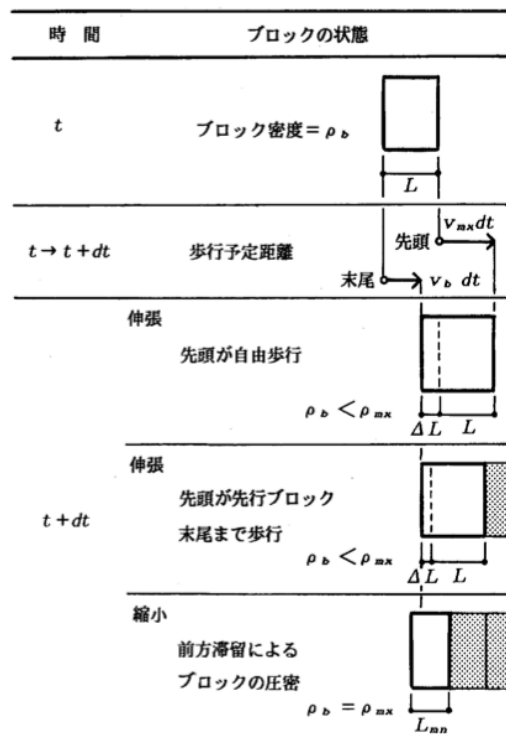


図1.8 EB モデルのブロックの進行

出典: 吉田克之: 避難行動予測における図式解法の問題点とEBモデルの提案, p.39, 表2

商用群集シミュレーションでも多くみられたように、ある時点の歩行者の分布を建築平面図上にプロットし歩行者群集の状態を検討・分析することは学術分野でも広く行われている。しかし、プロットされる歩行者記号は丸など歩行者の代表点を点として示すにとどまり、その平面空間を占める歩行者の領域まで配慮して歩行者記号の大きさは調整されていないことがままある。また歩行者記号として楕円で身体の輪郭が描かれている場合も、多くは歩行者の進行方向などに対して身体の形を便宜的においており実際の身体向きまでは反映していない。このような図からは詳細な空間の検討は難しい。例として図1.9に示す佐野³⁸⁾による駅での歩行者群集調査では、平面図上に点型の記号で歩行者の位置を表したものを連続時間で並べ群集の移動を示している。

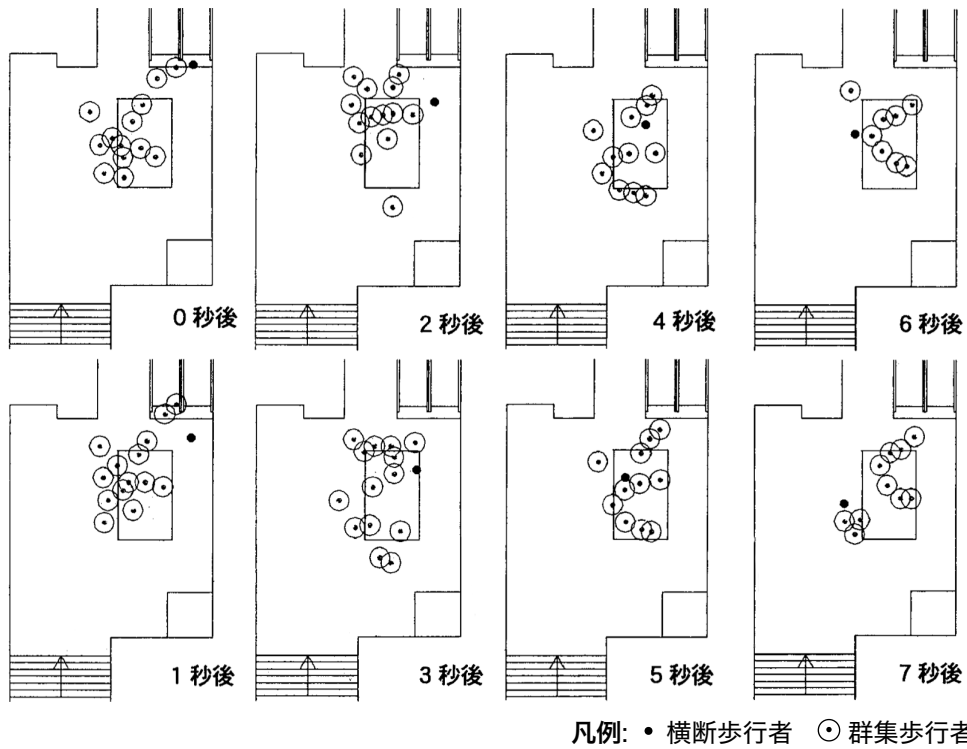


図1.9 位置座標と領域（横断時）

出典: 佐野友紀: 鉄道駅における群集流動横断時の歩行特性に関する研究, p. 312, 図10

群集の状態を視覚的に示す方法としては、実験を記録した動画や写真から直接歩行者の挙動を示したり分析する場合もある。例として城ら¹⁴⁾は、歩行者が居室から廊下部へ移動の様子を実実験とシミュレーションで比較し、その際実験の状況は動画から切り出した画像で示している（図1.10）。実験や実地を記録した実画像はまさにそのときの状況を直接伝えるものであるが、切り出された画像は撮影時のアングルやレンズの歪みを含むため、正確な寸法や角度の検討はできない。

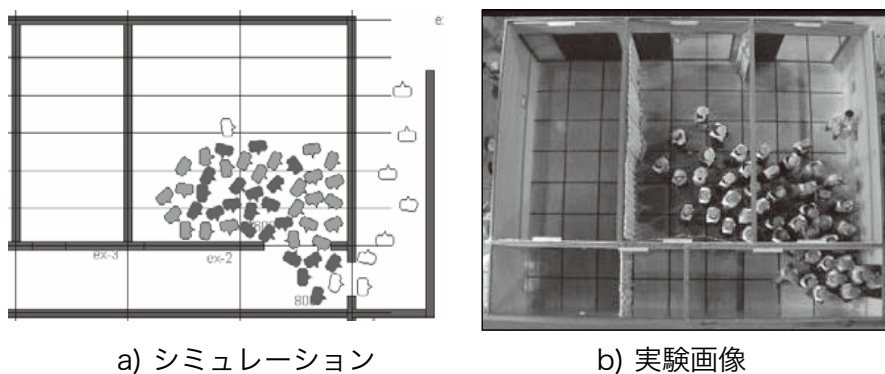


図1.10 居室避難におけるシミュレーション結果と実験結果の比較

出典: 城明秀, 池島由華, 佐野友紀: 廊下の滞留が居室単一開口部の流動量に与える影響 -開口部の群集流動量に関する実大実験およびシミュレーション分析 その1-, p. 299, 図19

また一方で、実画像は状態をそのまま写すがゆえ情報が整理されていない。実験条件としては不要な機器や実験者が写り込む、陰影で目視による歩行者の輪郭抽出が困難、服装や機材の色など不要な情報を含んでいる、などの点から画像を見るときに情報の取捨選択をする必要がある。このように、実画像をそのまま用いる群集の分析は困難も多い。

佐野らによる歩行者空間の混雑評価^{39, 40)}では、時間経過を3次元グラフのz軸にあて、三次元空間による群集の歩行の可視化を試みている(図1.11)。この図示法は対象空間の混雑度合いの把握および歩行者間のインタラクションの理解には優れるが、三次元空間の読み取りは難解であり、また歩行者個人の行動の詳細な変化を観察するには向かない。

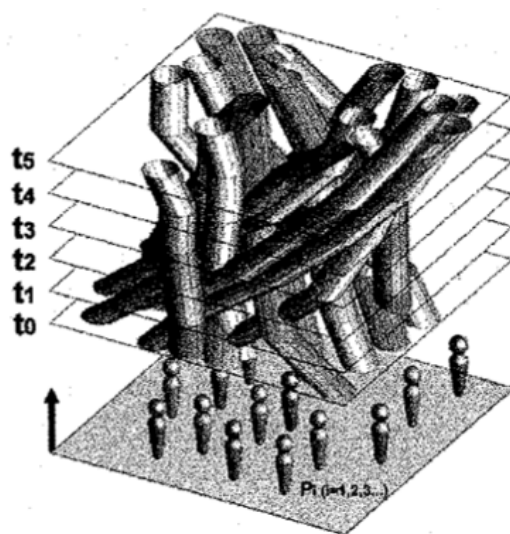


図1.11 歩行領域の時系列記述

出典: 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, p. 192, 図4

三次元による時空間可視化事例としては Nikolic と Bierlaire⁴¹⁾ による三次元ボロノイ図(図1.12)もあるが、これも佐野らの可視化と同様、個々人の行動の読み取りが難解であるという問題を抱えている。

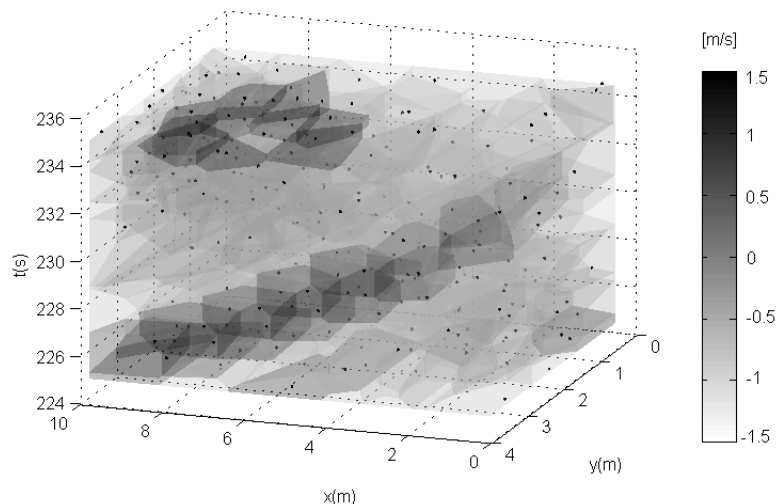


図1.12 3次元ボロノイ図によって表現された列形成の自己組織化現象

出典: M. Nikolic, M. Bierlaire: Pedestrian flow characterization based on spatio-temporal Voronoi tessellations, p.9, Figure 3

一般的に3次元空間を紙面・画面などの2次元平面上に投影した図は、

- x, y, z それぞれの空間の距離が図上で同一ではない。
- 同様に、方向についても検討が難しい。
- 空間的に奥にあるオブジェクトの状態が手前のオブジェクトで隠れてしまう。

などの問題が挙げられる。

さらに、図1.11, 1.12 のように x, y 平面空間と時間 t で構成される3次元空間の場合は、空間 x, y と時間 t という性状の異なるベクトルが同等に扱われることにより特異な読み取りの方法を理解する必要があり難解さがさらに増す。コンピュータ上でインタラクティブに3次元モデルを回転させたり、また表示オブジェクトの切り替えることでこの問題はある程度解決できるが、閲覧者が操作をする必要があるため一覧性に劣る。

1.3. 研究対象

本研究では非常に基礎的な現象として歩行者群集流をとらえモデル化と評価を行なう。そのために以下のように研究の対象を限定する。

1.3.1. 空間

本研究は屋外を含む建築空間内における歩行者群集を対象とする。居室や廊下などひとまとまりの空間を構成する、数メートルから数10メートル程度の規模の空間での移動を想定する。群集を対象としている以上、群集が形成される程度の広い空間が必要となるため、個人住宅の廊下や庭などよりも商業施設を含む公共空間を志向する。

さらにその中でも、本研究では扉を抽象化した「開口部」やまったく障害物のない理想空間である「平地」など幾何学的に単純な空間での行動を扱う。階段や勾配のある地面などの上下移動や、床の材質などは本研究では扱わない。歩行者の行動に重点を置くため、空間側は極力単純化を図る。

1.3.2. 人物属性

歩行者の属性においても、歩行に障害ない健康な成人をモデルの素地とする。実際の建築計画では様々な障害がある状態での歩行の想定が必要となるが、本研究ではまず基礎的な性状をとらえるため、歩行者側にはパラメータを置かない。よって、車いすや歩行補助具を必要とする人や、またキャリーバッグなどの大きな荷物を付帯した人も対象としない。人間以外の動的なもの、例えば車や犬や猫もここには出てこない。将来、本研究で得られた成果をもとに多様な歩行者条件に研究が展開されることを期待する。

また、本研究において複数回の実験室実験を行なっているが、いずれも学生が主たる実験参加者である。若く健康な20代の人をデータのもとにしていることは、いずれにせよ留意する必要がある。また、すべての実験は日本国内で行われているので、日本の距離感や寸法・文化の影響も受けている。

1.3.3. 状況

本研究では、高密度の、しかし事故の危険があるほどではなく流動が起きている群集を扱う。ラッシュ時の駅やスタジアム、イベント会場ほか、非常に多くの人が集まる公共空間での群集の状況がその基として想定されている。本研究は群集の問題の解決に貢献できるデータの取得の志向しているため、問題が発生する高密度で動的な作用が起こる箇所に着目する。それまでの流動が乱れるボトルネック通過と交差の制御には、特にフォーカスを当てて解析を試みる。

歩行者は平常時と非常時で行動が異なると考えられるが、本研究では高密度ながら歩行者は興奮していない落ち着いた状態であることを想定している。非常時では火災などの避難の場面のうち上記のような性状の行動のみを対象とする。これは安全に管理された避難の状況に相当する。には状況を限定していない。通常の建築物の利用の中での歩行者流動を扱うため、より中立的な状況を設定した。

1.3.4. データ

本研究では外部から観察できる歩行者の物理的な行動から群集を評価する。歩行者の内的な心理状況や複雑な思考モデルは扱わない。外部から観察・取得できるデータのみを用いることで、行動観察をもとにした工学的に再利用可能なモデルを構築を目指す。

このように、本研究では空間や歩行者を非常に単純化し、行動を定量的に測り、モデル化する。複数の歩行者の集合である複雑な群集を定量的にとらえるために、主眼とするパラメータ以外の性状は極力単純な状態に置く。

1.4. 目的

本研究は、歩行者を本位とした群集流動のモデル化と可視化を用いた群集評価の手法の開発を主眼とする。

1.4.1. モデル化

モデル化は2つのレベルで行われる（図1.13）。まずは巨視的に歩行者群集を概念モデルとして示し、その後実験を通して2つの具体的な場面での微視的な歩行者の行動をモデル化する。

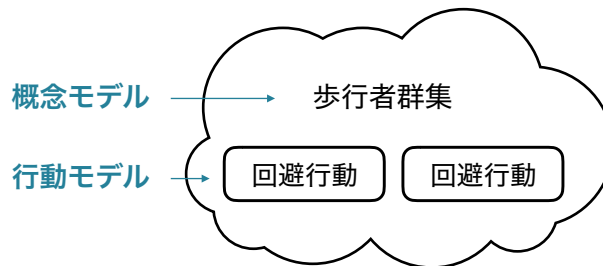


図1.13 2層のモデル化

① 歩行者群集のモデル化

群集と歩行者の移動を歩行者本位の視点であらためてモデルとして示し、群集流をとらえなおすとともに本研究での前提を明確にする。歩行者が周辺の状況に呼応し行動を選択している、という視点から歩行者群集におけるパラメータを整理し、群集流を定量的にモデル化する。

② 回避行動のモデル化

歩行者本位のコンセプトに立脚しながら、実験を通してより具体的な場面として群集内での歩行者の回避場面のモデル化を行なう。歩行者が他の歩行者や静物などのオブジェクトに影響を受け行動を変化させていることを定量的な数値として示すことで歩行者の回避行動をデータから機械的に抽出することを可能にし、シミュレーションなどでの利用を容易にする。

本研究においてはとくに、それまでの流動が乱れる群集流の横断と開口部の通過の2つの場面での歩行者の回避行動をモデル化する。

1.4.2. 評価

構築したモデルをもとに群集を評価する指標を作成する。

① 歩行者群集の可視化

提言する群集モデルに立脚し、動的な群集の状態をよりわかりやすく・本質的に表わす可視化手法を新たに開発する。構築したモデルを視覚的に表現することで研究結果をより明快に提供するとともに、再利用可能な可視化手法を立案する。

② 歩行快適性の評価

歩行者1人ずつの行動として現れた物理的な観察データから、歩行者群集における歩行者の歩行の質「歩行快適性」を定量的に評価できる指標を制定する。

1.5. 論文構成

本研究では、歩行者を本位とした歩行者群集のモデル化とそのモデルを用いた群集流評価の手法の開発を行なう。具体的には、概念としての歩行者本位の群集流モデルの叙述から始まり、そのモデルに則った群集流評価のための可視化手法を開発し、被験者を使った2種の実験室実験を通じて群集流の実際の場面における複雑な現象のモデル化と歩行快適性の評価指標の開発を行なう。実験では群集流において複雑な現象が起こる①群集流の横断と②開口部の通過の場面を取り上げた。①の群集流の横断実験においては歩行者同士の回避行動を、②の開口部通過実験では開口部通過時における歩行者の身体寸法と流動量との関係を定量的に明らかにした。

本文の構成は以下のとおりである（図1.14）。

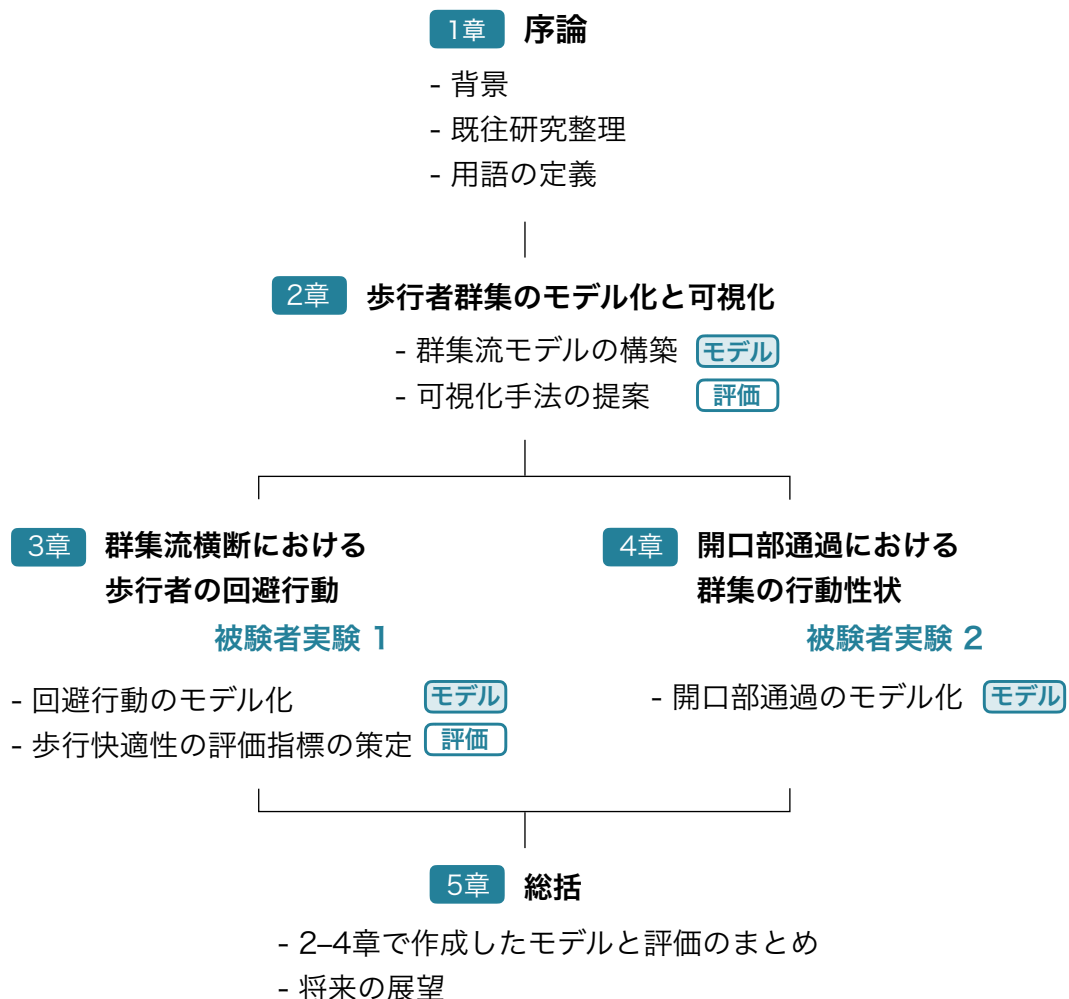


図1.14 本論文の構成

1章 序論

研究背景として現在の群集流評価の主流とその問題点を指摘し、既往の群集流評価法や群集シミュレーションと本研究の関係を明確にした上で、より歩行者本位に立った群集流モデルの必要性について論じた。また本論文の研究目的と構成、および用語の定義について開示した。

2章 歩行者群集のモデル化と可視化

本研究で主張する「歩行者本位」の群集流モデルである「歩行者本位マルチエージェントモデル」の概念と詳細を示し、またそのモデルに立脚した新たな群集の可視化手法を3種提案した。

現在広く用いられている「密度-速度モデル」への批判を踏まえた上で、歩行者の集合としての群集および歩行者の移動をそれを構成する各歩行者の平面空間 x, y と時間 t の変位で表せることを述べた。さらにそこから、歩行者の「歩行速度」と「移動方向」、さらに移動方向に対する「身体の向き」の3要素が歩行時の変量となることを示した。

群集流の可視化手法としては、まず1秒間の座標の短時間変動に着目し群集の動的状態を1枚の図で示す「短時間歩行パス図」、およびその短時間変動により群集流の複雑性を掌握する「移動方向バラ図」を提唱した。さらに3つ目の可視化手法「歩行者主体移動軌跡図」では、時間スケールを含む歩行者の空間移動を歩行者主体の視座で記述することで、単独の歩行者の歩行速度変化や移動方向転換を詳細に読み取ること成功した。また鉄道駅構内のフィールドデータによるケーススタディを行ない、この歩行者主体移動軌跡図の実用性を示した。

3章 集流横断における歩行者の回避行動

被験者を用いた実験室実験を通して、単独の歩行者が群集流を横断するときの双方の回避行動について群集流の密度および横断者の進入角度の影響を解析し、回避の強度を検討した。実験からモーションキャプチャで取得した各歩行者の頭頂および両肩の位置座標データをもとに、2章で提案した3種の可視化手法を実際に用いて詳細な歩行状況を視覚的に示せることを確認した。そこから、歩行者の回避方法が「減速」「迂回」「ひねり」の3種の組み合わせであることを明らかにし、それら各々の回避方法における回避の強度を「潜在回避」「弱回避」「強回避」3段階に区分し、そのしきい値を求めた。さらに歩行者主体移動軌跡図を用いて回避の特徴を図解により詳細に検討し、減速と迂回の二者が起こるメカニズムをシークエンスとして統合的にとらえた。

4章 開口部通過における群集の行動性状

異なる幅の開口部を群集が通過する実験室被験者実験を実施し、群集流の開口部通過における歩行者の身体寸法的作用を明らかにした。実験結果から流動量が開口幅に対して 200 mm 毎のステップ関数的に増加することが認められ、流動量に対する身体寸法の影響が示唆された。さらに歩行者の肩の向きによって移動方向に対する身体幅が異なることに着目し、歩行者の開口部通過位置と開口部に対する肩の向きの関係を定量的に示した。結果として、開口部端から 250 mm 以下の位置を頭頂部が通過した歩行者は中央部を通過した歩行者と比較して有意に肩の傾きが大きく、開口部においても歩行者は肩の向きを調整することで本来正対しているときに通れない幅の隙間を通過していることとその発生条件が確認できた。

5章 総括

総括として2章から5章までで得られた結論を要約し、打ち立てられた群集モデルと評価法について一覧性のある形式で提示した。最後に本研究の知見の実際的な利用について将来の展望を示した。

1.6. 用語の定義

以下、本論文で使用する用語を定義する。

歩行者

移動する存在としての人間。または歩行をしている人間。

(歩行者) 群集

ある連続した一塊の空間を占める歩行者の集合。単に「群集」を記したときは、特別な説明がないかぎり歩行者群集を指す。

群集流

複数の歩行者が一意の方向を目指し移動している流動。

自由歩行

制約のない歩行者が自由に行なう定常速度の歩行。

(群集歩行) シミュレーション

歩行者の動きをコンピュータで再現することを目的としたプログラムまたはモデル。単に「シミュレーション」を記したときは、特別な説明がないかぎり歩行者シミュレーションを指す。

マルチエージェント

自律的に行動し社会的な振る舞いをする複数のエージェントから構成されるシステム。

オブジェクト指向

プログラミングにおけるパラダイムの1つ。すべての事象をオブジェクト同士の相互作用としてとらえる考え方。

モデル

事象を抽象化・単純化することで記述可能にしたもの。

密度-速度モデル

密度と速度で群集流の特徴をとらえる考え方。

可視化手法

ある事象を画像として目に見えるかたちで表現する手法。ビジュアライゼーション。

データソース

あるプログラムや評価システムを通して結果を得るときに必要な元のデータ。

回避

歩行者が他オブジェクトとの衝突を避けるために取る行動。

移動シーケンス

ある意図をもって行われる歩行者のひとまとまりの移動行動。

歩行快適性

歩行者が感じる心理的な歩きやすさ。

歩行者主体マルチエージェントモデル

本研究で提唱する歩行者群集モデルの名称。2章にて解説する。

注

注1) 原文では単位が「人/m・分」であるところを「人/m・s」に変換して表記。

2. 歩行者群集のモデル化と可視化

2.1. はじめに

2.1.1. 背景

1章で論じたように、現在の歩行者群集モデルは分析対象領域の歩行者密度が重要な位置を占めている。主体が対象空間側にあり、その中にいる各歩行者の環境や行動に寄り添ったものとはいえない。いまいちど群集をとらえ直し、歩行者を本位とした群集モデルを構築することが求められる。

群集の可視化手法においても課題は多く、4次元時空間内を自律的に移動するオブジェクトの集合体という非常に複雑な現象である歩行者群集の動的な性状を一瞥してわかりやすく、しかし精緻に示す汎用的な図法はまだない。

2.1.2. 目的

本章では、歩行者本位な視点で群集流をとらえ直し既存の群集モデルの問題点を指摘した上で新たな歩行者群集のモデルを確立すること、またそのモデルに立脚した新たな群集の可視化手法を提案することを目的とする。

2.2. 歩行者群集のモデル化

2.2.1. 密度-速度モデル

群集評価では以前から、対象領域の群集密度とその領域内の歩行者の歩行速度の関係式で群集流をとらえる試みが行われてきた（図2.1）。

$$\text{流動係数 } f = \rho v$$

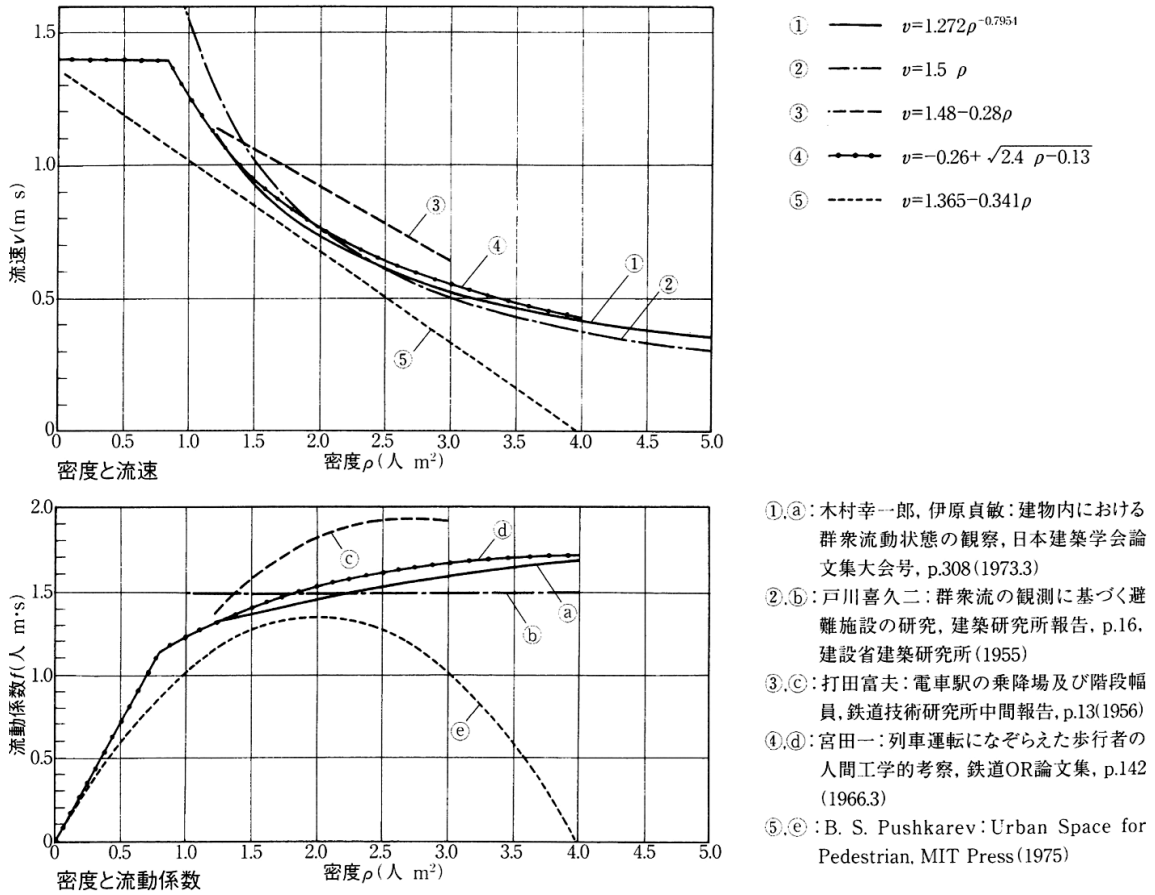


図2.1 水平路一方向流（通勤群集）の密度と流速・流動係数¹⁾

出典: 日本建築学会編集: 建築設計資料集成 - 人間, 丸善, 2003.2, p.128

この式は、廊下など幅員が限定されその対象領域内に歩行者が一様に分布していることが期待できるとき（図2.2）に流量をよく説明できる。

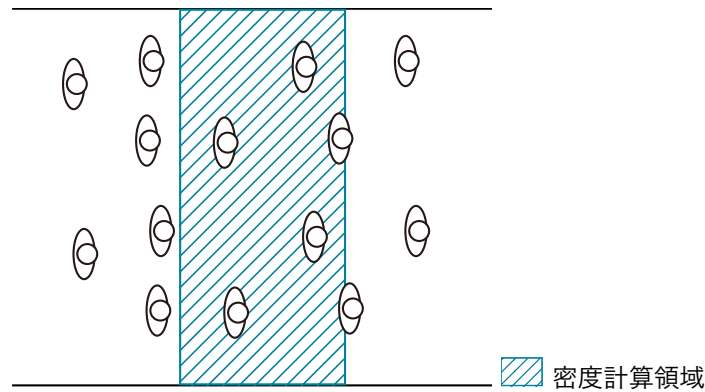


図2.2 廊下部での密度計算領域

しかし、屋外などの物理的空間の制限がない場面（図2.3）やボトルネック前などの歩行者が一様に分布していることが期待できない場面^{注1)}（図2.4）では、分析領域の設定によって領域内の密度が変化してしまい、またその領域の判断は分析者に委ねられるため安定流動係数が一意に算出できず、適切な式であるとはいえない。従来の研究ではこのような場面でも密度-速度モデルの適用がみられたが、分析者の領域設定次第で値が変動するため、特定領域を抽出して密度を得る方法は本来ふさわしくない。歩行者の分布が一様でない場面でも利用できる群集流動のモデルが必要である。

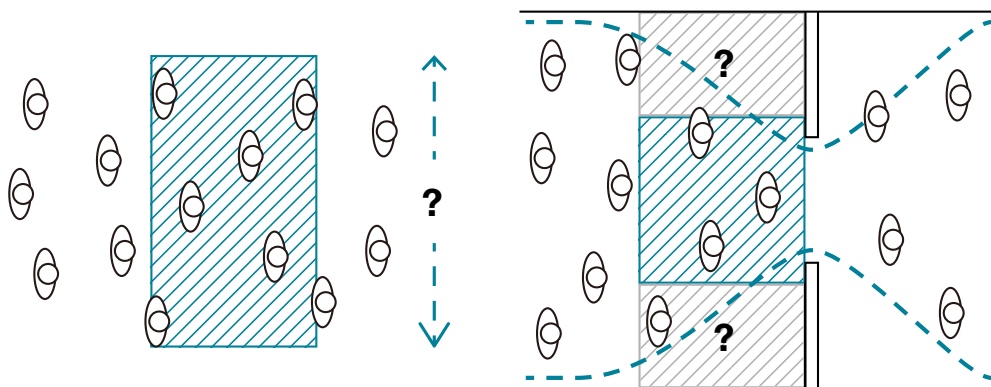


図2.3 開放空間での密度計算領域

図2.4 ボトルネック部での密度計算領域

また、人/m² で表される歩行者の密度計算においては、実質的に歩行者は加算的な 0/1 の点として扱われる。空間面積を評価に含めながら歩行者自身の体積および投影面積は計算に含まれておらず、この点でも密度-速度モデルは歩行者の存在が欠けているといえる。

2.2.2. 歩行者本位マルチエージェントモデル

それを踏まえ本研究では、シミュレーションで用いられるマルチエージェントモデルを基盤にした、歩行者一人一人の行動と状態に着目した群集のとらえ方を採用する。この歩行者各々の行動を本位とした新たな群集のモデルを「歩行者本位マルチエージェントモデル」と命名し、本研究でこれを提唱する。

マルチエージェントモデルでは空間条件を指定し、その中をエージェントである歩行者に歩行させる。各歩行者は現在の歩行速度や進行方向などそれぞれの状態と障害物や他歩行者などの周辺環境から状況を判断し、次の行動を決定する（図2.5）。

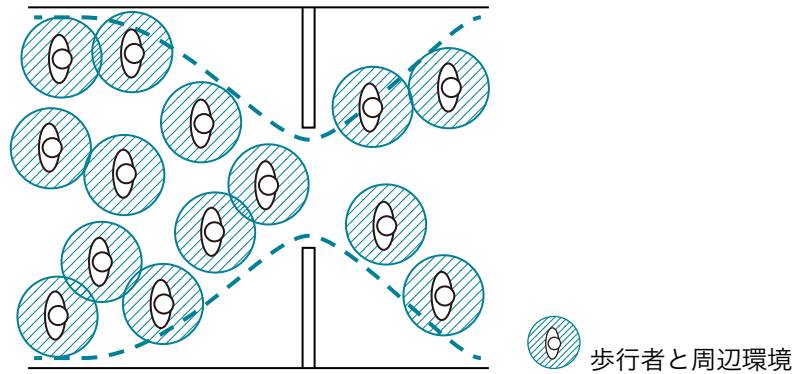


図2.5 それぞれの歩行者が環境を評価

このときに得られた各エージェントのデータを集積することで対象とする空間全体、および群集を評価する（図2.6）のが本モデルの戦略である。そのため評価のための面積を限定せず、よって前述した密度-速度モデルにある問題をもたない。

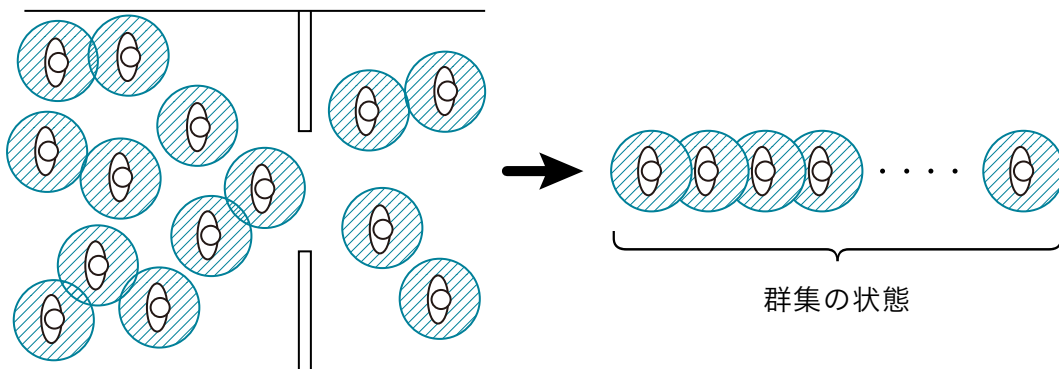


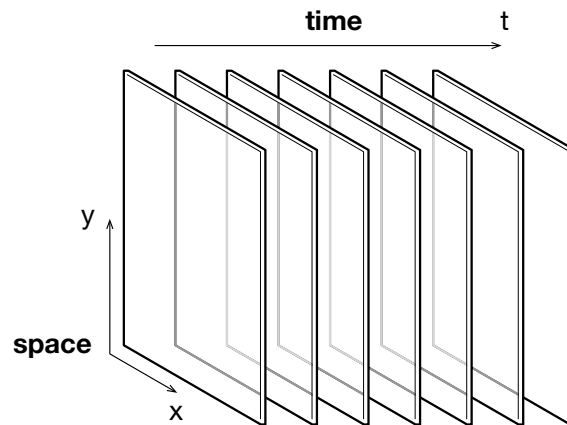
図2.6 歩行者の状態の集積としての群集の状態

この歩行者本位のマルチエージェントモデルは、歩行者周囲の環境が歩行者の位置・行動を決定している点で、実際の歩行者の歩行時の振る舞いに近い。また、歩行者環境を評価値に含めることで、発展的な歩行者の体験の評価も行ないやすくなる。

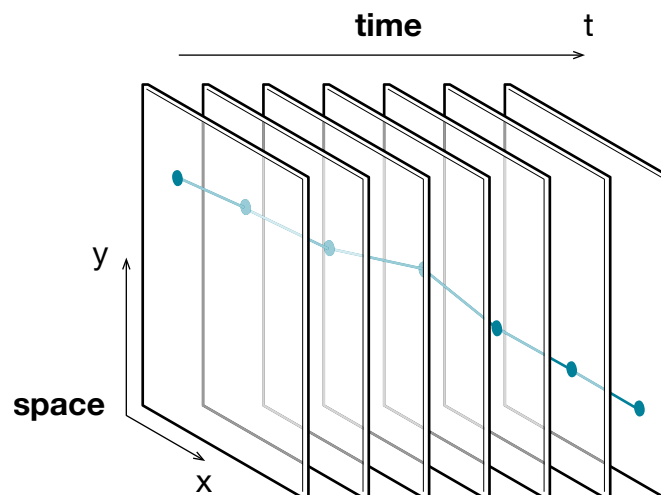
密度-速度モデルに比べ欠点としては、各時間における歩行者の位置情報という精緻な情報を必要とし、また計算処理も複雑となることが挙げられる。しかし、昨今の画像処理や数値処理のコンピュータ能力の上昇をもって現在ではそれを補える。歩行者群集を把握する普遍的でより詳細な次世代の群集モデルとして利用が期待できる。

2.2.3. 時空間モデル

我々が知覚している時空間は3次元空間+時間の4次元であるといえる。しかし本モデルでは、空間の高さ方向を無くした $(x, y)(t)$ の3次元を時空間として扱う (図2.7)。同一建築空間内を移動する歩行者については移動は主に同一平面方向に抑えられるため、平面図上に記述するように空間側を2次元に減じて簡略化を図る。上下移動などの立体的な移動を含む移動はそのまま扱わず、同一平面方向の移動毎に分割して本モデルを適用する。

図2.7 $(x, y)(t)$ 3次元空間

この $(x, y)(t)$ 3次元空間において、歩行者の移動は平面 x, y 座標の時間変異であると表せる。(図2.8)。

図2.8 $(x, y)(t)$ 3次元空間内の移動

2.2.4. 歩行者行動モデル

図2.9はオブジェクト指向的擬似コードとして記述した、本研究における歩行者行動モデルの表現である。歩行者 Pedestrian が時間に依存した位置情報 Position を所有しており、歩行によりこの位置を変化させていく。歩行者は歩行において基本的には自由歩行を目指す。周囲に何か歩行の障害となるものが存在するときは、対処のために振る舞いを変更する。この移動の決定には、歩行速度や移動方向（目的地）などの歩行者個人の属性にも影響を受けると考えられる。

```

struct Position {
    var x: Float
    var y: Float
}

class Object {
    let identifier: UUID
    var position: Position
    var occupiedArea: Area
}

class Pedestrian: Object {
    var walkingSpeed: Float
    var walkingDirection: Float
    // and other pedestrian attributes

    func walk() {
        let area = Area(center: self.position,
                        radius: self.walkingSpeed)

        if let objects = Field.shared.objects(in: area) {
            // avoid other objects
            self.avoid(objects)
        }

        // change position
        self.position.move(distance: self.walkingSpeed,
                          direction: self.walkingDirection)
    }

    private func avoid(_ objects: [Object]) {
        if 回避条件 1 {
            self.walkingSpeed -= F00
        }
        if 回避条件 2 {
            self.walkingDirection += BAR
        }
        // and so on...
    }
}

```

図2.9 擬似コードによる歩行者モデルの記述 (Swift-like)

多くの群集シミュレーションもこれと類似したロジックをもつと推察できる。歩行者のシミュレーションにおいては、この回避行動などの条件分岐とそのときの変更パラメータがより実際の歩行者を反映していれば、より現実に即した信頼のある結果が得られる。

よってコンピュータによる歩行再現においては、多様な場面での歩行者の振る舞いを実験を通じてモデル化し、プログラムに反映可能なかたちで数値化することが求められる。

2.2.5. 歩行における歩行者の変量

歩行者の歩行は体積のある物体の移動であり「移動」はベクトルで表すことができる。歩行においてはこのときベクトルの「長さ」が「歩行速度」、「方向」が「移動方向」に対応する（図2.10）ことから、歩行者の移動は歩行速度と移動方向で表すことができる。

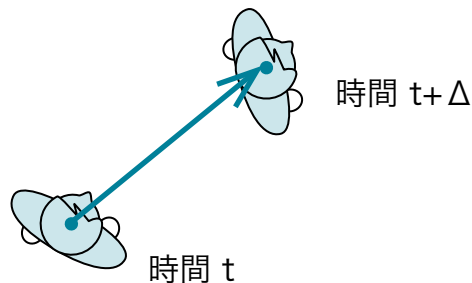


図2.10 歩行による Δ 時間の移動

また歩行者が物体であることから、歩行者の身体は一定の空間領域を占有する。歩行者の身体形状を上方から投影したとき、歩行者の領域は概ね身体の上部である肩の領域が占める。本研究では、歩行者の頭頂点を歩行者の位置座標の代表点とする。肩を含む身体と頭部は脊椎で繋がっているため、代表点となる頭頂点と肩の中心点はほぼ固定される。移動ベクトルに対する肩の向きは歩行者が任意に変化させることができ、肩は脊椎を中心として回転する。歩行者が自由歩行をするとき、肩の向きは歩行者の移動方向とほぼ垂直の位置関係であるが、この関係は常に一定ではない。歩行者が歩行時に身体の大きさ自体を変化させることはなく、また肩の回転の中心点も安定していることから、この占有領域の平面上の時間変化は、歩行者の肩の方向の変数としてとらえることができる（図2.11）。

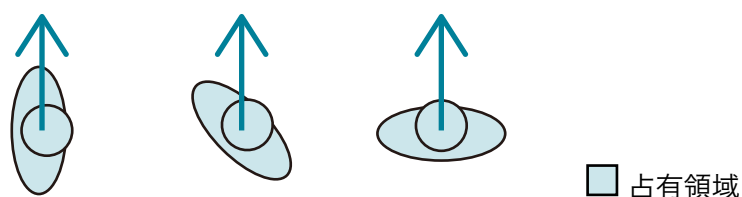


図2.11 肩の向きの変化によるベクトルに対する占有領域の変化

以上から、歩行者の歩行における平面座標上の時間変動値は、「歩行速度」・「移動方向」・「肩の向き」の3要素に分解ができ、この3要素で表すことできる（図2.12）。以下これを「歩行の3変量」と呼ぶ。

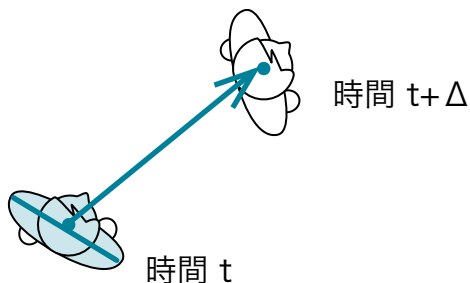


図2.12 歩行の3変量

2.2.6. 歩行者群集の複雑性の分類

① 群集流の安定性

群集内のすべての歩行者が同一の方向を目指し直進できておりその歩行速度も安定しているとき、群集流を「安定した」流れであるととらえる（図2.13）。一方、混雑や複数の群集流の交差など外的な制約によって一定の歩行速度を保てなくなり、また移動方向も本来志向する方向に直進できないとき、その群集流は「乱れた」流れであるとする（図2.14）。

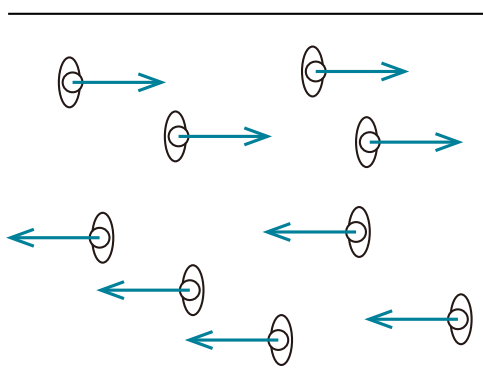


図2.13 安定した二方向流

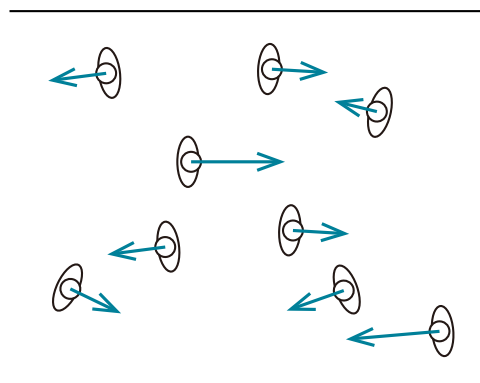






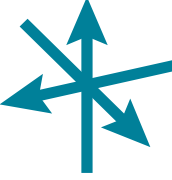
図2.14 乱れた二方向流

乱れた群集流は安定した群集流に比べ流動の効率が悪く、また歩行者も歩調を状況に合わせて頻繁に変更する必要があり快適であるとはいえない。群集流は状態が崩れると「乱れ」るが、それが解決されているかぎり「安定した」状態を志向する存在であると考えられる。

② 群集流の数と方向

複数の方向を志向する歩行者が同一の空間を占める箇所で、この群集の乱れは大きくなる。表2.1は群集の流れの数と移動方向により群集の流動を分類したものであるが、群集流の数が増加しさらにそれらが交わるとき、流動は複雑性を増す。

表2.1. 流れの数と方向による流動の分類

	一方向流	層流	合流	交差流	交錯流
図					
流れの数	1	2	2	2	≥ 3
複雑性	低	←—————→			高

単一の群集流内での瞬間的な移動方向のばらつき、および異なる流れの方向をもつ群集流の重ね合わせ、いずれの場合も、歩行者の進行方向の多様性により群集の複雑性は増す。

2.3. 歩行者群集の可視化

情報を一瞥して把握し論点を顕在化させる上で、可視化は有効な手法である。ここでは、歩行者の各平面座標の時間推移データ（座標 x, y と 時間 t ）から群集の状態の可視化を試みる。

2.3.1. 時空間モデルおよび次元の圧縮

前述のように本モデルでは、空間を2次元に減じることで時空間を3次元で表す。しかし、それでも3次元空間は人間が一瞥して状況を把握することに向かない。時間変動である「移動」を平面上に記述するためには、この3次元をさらに2次元に減じる必要がある。そのため、本研究の可視化では2つの戦略をとる。

① アニメーション

2次元の平面をアニメーションで連続描写することで3次元を再現する。現実の3次元時空間に酷似するが、自由に時間を指定し巻き戻しなどができる点などが異なる。アニメーションでは、時々刻々と変化する情報を認識できるよう、必要な情報を強調しそれ以外を極力簡略化してみせる必要がある。

② 時間の圧縮記述

移動を2次元平面上に書き込む。ただし、単純に線分として書き込んでも時間と位置の対応関係は失われ、また図が複雑になることで一覧性が下がるため、その点の解決が必要である。そこから、さらに以下の2つの戦略をとる。

- 短時間移動

微小時間の移動をベクトルとして平面に描画する。時間を限定し、線分が長くなることを避けることで容易な読み取りを可能とする。本研究では1秒間をこの短時間の単位とする。

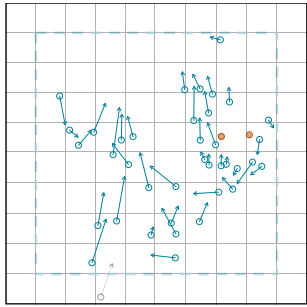
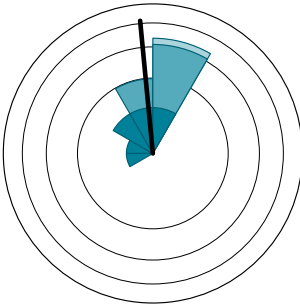
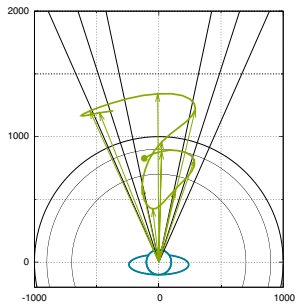
- シークエンスの描画

移動を単独歩行者の1シーケンスに限定して詳細に描画する。歩行者側のデータを1人に限定することで一度に表現する情報量を下げる。

2.3.2. 新規の可視化手法の提案

以上を踏まえ、表2.2に挙げる3種の群集の可視化手法を本研究において提案する。

表2.2. 本研究で新規に開発した群集の可視化手法

名称	短時間歩行パス図	移動方向バラ図	歩行者主体移動軌跡図
図			
単純化手法	短時間移動 (option: アニメーション)	短時間移動	シーケンスの描画

2.3.3. 作画技術

それぞれの可視化手法の作画には、独自に作成した Python スクリプトを用いている。Python で描画に必要な各数値を算出したのち、作図手法毎に適宜最適な描画方法をとっている (図2.15, 2.16)。Python のモジュールとしては numpy, shapely, pyYAML 等を利用している。いずれもオープンソース技術を用いており、特定の商業ベンダーに依存していないため、無償で自由な利用ができる。

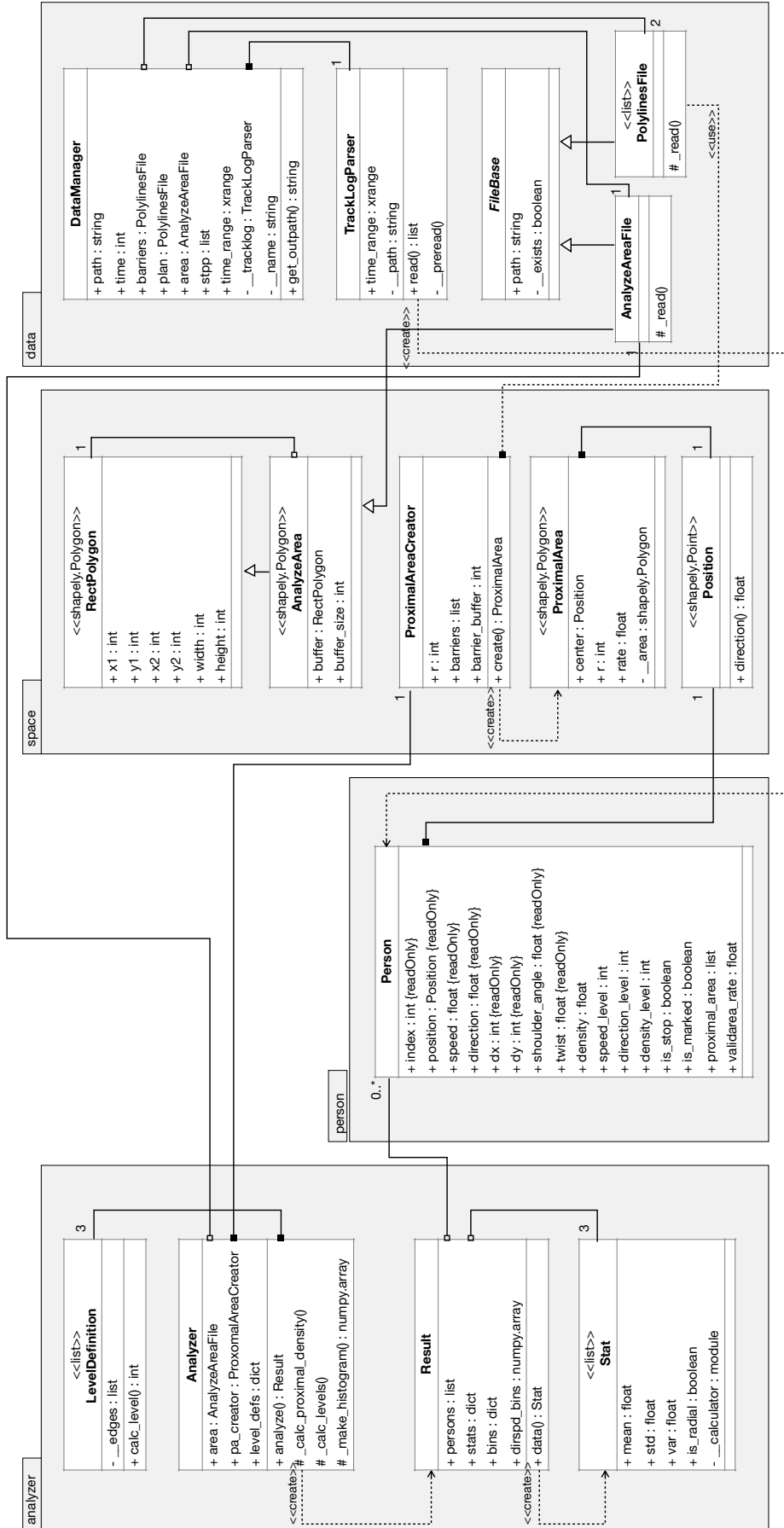


図2.15 分析作図プログラムの UML クラス図

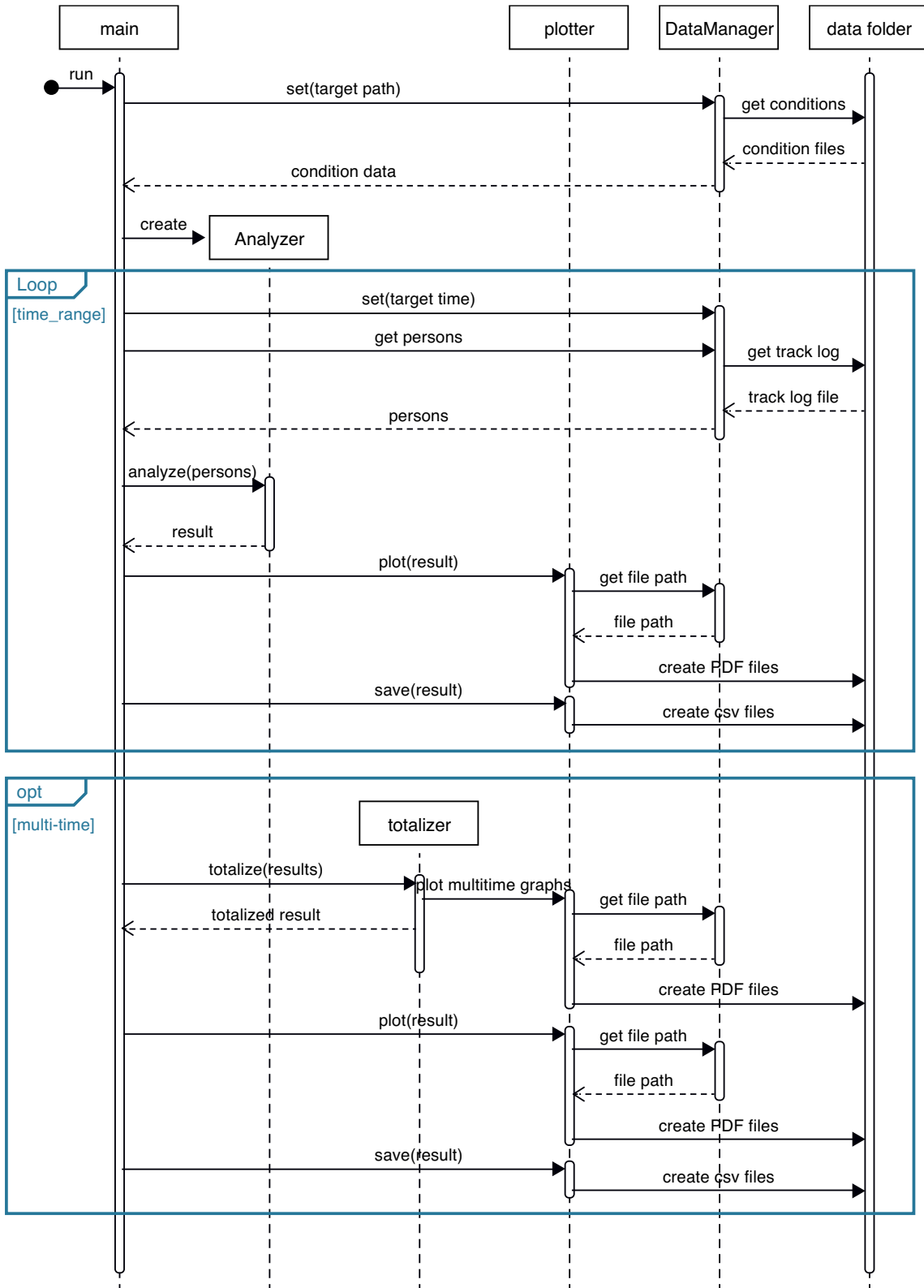


図2.16 分析作図プログラムの UML シーケンス図

2.4. 短時間歩行パス図

「短時間歩行パス図」(Short-Time Pedestrian Path Diagram; STPP-Diagram) は特定空間のある時間の群集の状態を可視化する図法である。この図法は任意の時点での個々の歩行者の位置とその時点での行動を平面図上に同時に示せ、そこから定量的な群集の動的状態を視覚的に理解できる。任意の瞬間の群集の各歩行者の位置に加え、歩行3変量うち各歩行者の「歩行速度」と「移動方向」を表現でき、さらにデータがある場合は「肩の向き」の情報も追加できる。

2.4.1. 作例

例として挙げる図2.17、2.18は実際の首都圏の駅ホーム上エスカレータ前での調査データから作成した短時間歩行パス図であり、同位置の異なった2時点の利用者の状態を示している。

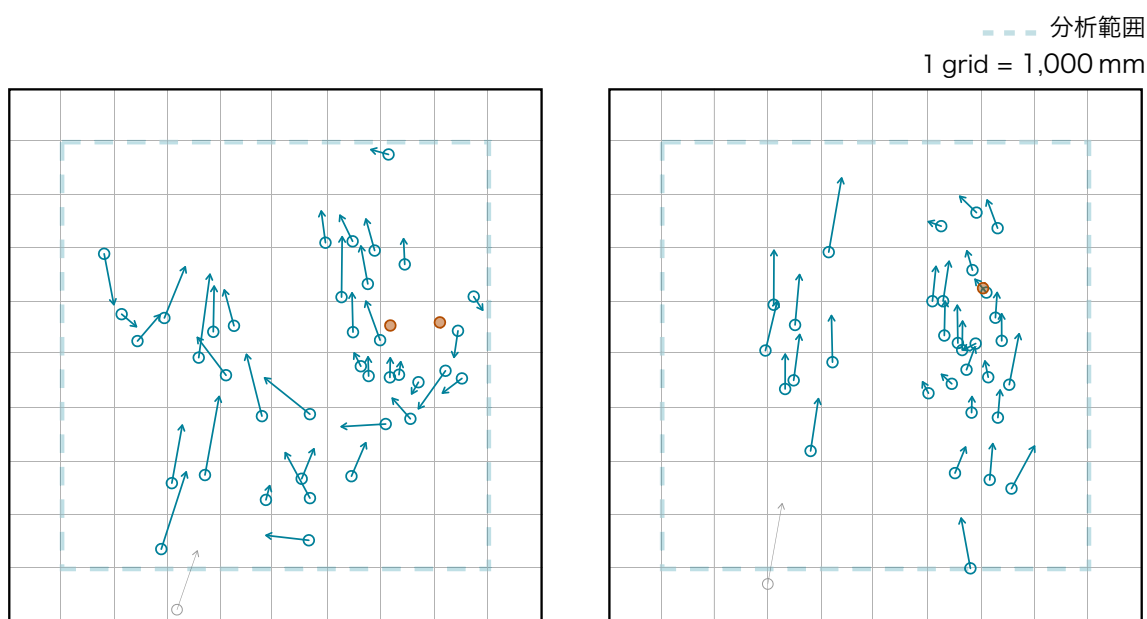


図2.17 短時間歩行パス図
(移動方向のばらつき大)

図2.18 短時間歩行パス図
(移動方向のばらつき小)

また図2.19は本論文4章で実施する開口部通過実験のデータから生成した、領域内の空間要素（開口部）と歩行者の肩の向きの情報とをともなう短時間歩行パス図である。この場合、短時間歩行パス図1枚で歩行の3変量である「歩行速度」「移動方向」「肩の向き」すべてが表せたことになる。空間要素や身体も描くことで空間に占める歩行者の状態がより直感的にわかりやすくなり、歩行者が肩をひねる行動などが精緻に検討可能になる。

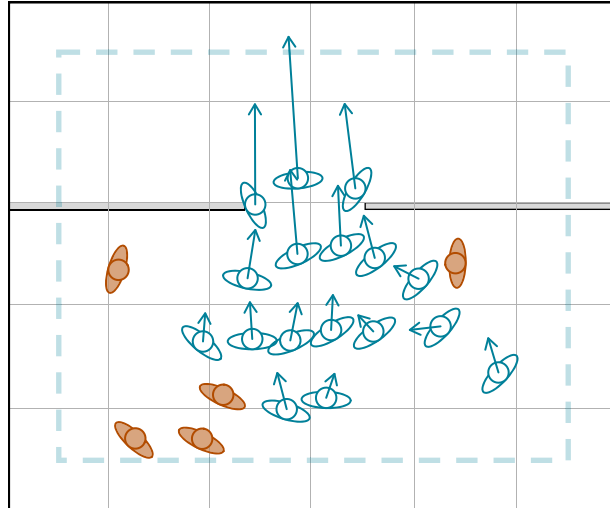


図2.19 開口部通過実験の短時間歩行パス図（開口幅 1,200 mm）

2.4.2. 記述方法

ある任意の時点・空間領域のすべての歩行者の「短時間歩行パス」を平面図上にプロットしたものが短時間歩行パス図である。

短時間歩行パスは、時点 t とその1秒後の $t+1$ 秒の x, y 位置座標を結んだ線分を矢印として平面図上に記す。○が時点 t での歩行者の頭を表し、矢印の向きが移動方向、長さが歩行速度を表している。移動距離が微小の場合は方向を特定できないため速度 0.2 m/s 以下の者は停止とみなし移動方向を示す矢印を描かない。頭の○は正円で直径 200 mm 相当と実際の人頭の寸法と同等に描く。身体の向きがわかる場合は、作例に挙げた図2.19のように身体も $160 \text{ mm} \times 480 \text{ mm}$ の寸法で描画することで、より詳しい歩行者の状態が描ける（図2.20, 2.21）。



図2.20 短時間歩行パスによる歩行者の移動表現（左：頭のみ / 右：身体付き）

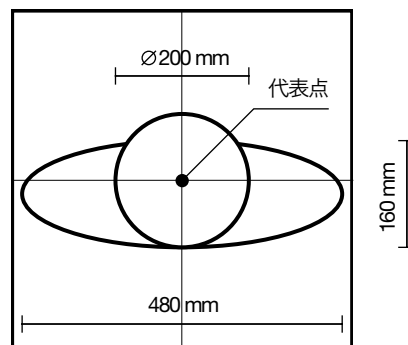


図2.21 短時間歩行パスにおける歩行者記号の寸法

前述のとおり短時間歩行パス図は「短時間歩行パス」の平面上の分布図である。短時間歩行パスは、1秒間の x, y 平面上の移動軌跡である。1秒間という短時間（図2.22）の移動を採取することにより、ある特定の瞬間の歩行者の移動を2次元平面図に映し出す。1秒間は自由歩行における約2歩程度にあたり²⁾、身体動揺の影響を抑えながら実際の歩行者の移動方向を算出するのに十分な時間であり、また同時に、線分が十分短いため高密度の群集でもパス同士が交差しづらい。さらにパスの長さが秒速 (m/s) と対応するため、読解者の直感的な理解を助ける。時間が短すぎると身体動揺や計測誤差により移動方向の算出が困難となる。

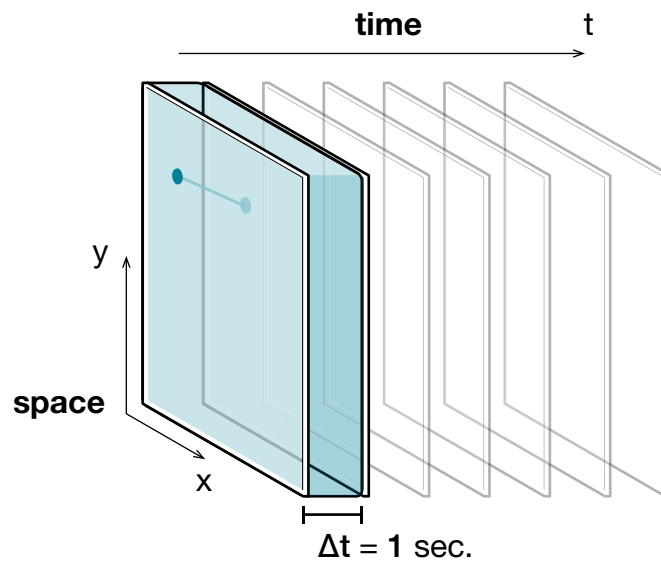


図2.22 短時間

2.4.3. 読図方法

短時間歩行パス図は、ある特定の瞬間の建築空間における単数または複数の歩行者の動的状態をとらえることができる可視化手法である。歩行者の身体スケールを反映した歩行者記号を用いることで壁や開口部などの空間上の要素と歩行者の空間的關係が直感的にわかり、また矢印に注目することで静止画でありながら多数の歩行者の移動方向や歩行速度といった動的な性状も把握できる。また矢印の先が1秒後の歩行者の位置であることから、歩行者同士が相手の進行先を予測しつつ回避をする様子なども検討できる。多数の歩行者の歩行3変数および建築空間内での位置に加え平面図に記載された建築空間そのものの構成要素など、多くの情報を取り込みながら初見でも直感的に読むことができる読解の平易さを備えた非常に汎用的な群集の可視化手法である。

ただし歩行者記号は各歩行者の身体寸法を直接反映してはおらず、あくまで頭頂点の座標と肩の向きから身体の領域を記号的に示したものであることには留意する必要

がある。歩行者記号が占める領域をデータ元となった歩行者の身体が実際に占めていたことは本可視化手法では担保されない。

2.4.4. 発展的利用

この短時間歩行パス図を連続的に繋げ動画として提示することで評価に利用できるほか、歩行パスを色分けして歩行者の他の属性を同時に評価することもできる。続く3章では実際に短時間歩行パス図の動画や色分けを通してより高次の分析を試みる。

2.4.5. 作画技術

描画は Python の PDF 生成ライブラリである reportlab で行なっている。アニメーションは、生成した時間毎の PDF を Darwin の sips コマンドでラスター形式に変換したのち ffmpeg で画像を結合し動画を生成している。

また、SVG アニメーションとして出力する別プログラムも作成した。PDF 版と同様の描画が可能だが、

- ベクター形式であるため、画質が拡大・縮小の影響を受けない
- JavaScript の併用によりアニメーションにインタラクティブな表現が付加できる
- SVG は XML フォーマットであるため、再編集が容易でデータ容量も小さい
- web サイトへの掲載が容易

など SVG ならではの利点がある。

2.5. 移動方向バラ図

移動方向バラ図は、バラ図で群集全体の移動方向の傾向を把握する図法である。群集を構成する歩行者の方向毎の分布とその方向に進む歩行者のおおよその速度を一度に表現することで任意の時点の群集の流れの複雑性を一瞥して把握することを目的とする。時間歩行パス図と同じ1秒間の短時間移動での移動方向と段階的な歩行速度をとらえる。歩行3変量うち、任意の瞬間の群集の「歩行速度」と「移動方向」の水準割合を示すことができる。

2.5.1. 作例

図2.23, 2.24はそれぞれ、2.4.1 の短時間歩行パス図で例示された図2.17, 2.18内のすべての群集についてを移動方向バラ図で示したものである。図2.23は多方向に移動が分散し様々な歩行速度で移動することが、図2.24は一定の方向にほぼ一定の速度で移動することが一瞥して読み取れる。

■ 0.20 m/s - 0.50 m/s ■ 0.50 m/s - 1.00 m/s ■ 1.00 m/s -

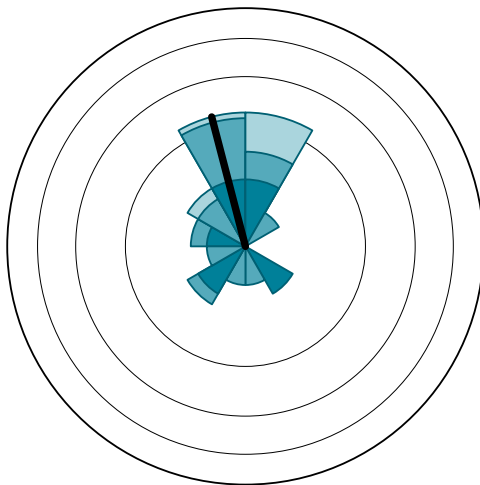


図2.23 移動方向バラ図
(移動方向のばらつき大)

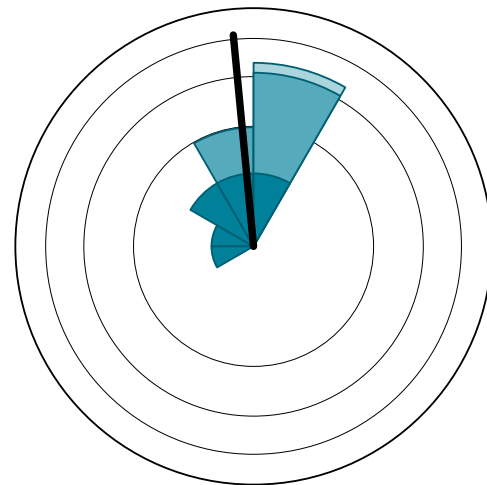


図2.24 移動方向バラ図
(移動方向のばらつき小)

2.5.2. 記述方法

移動方向バラ図では、歩行者の移動方向を30度毎に等分に12方向に区分する。数量を理解しやすいように、軸を平方根として面積割合がそのまま頻度割合を示すようにした。円の外周を頻度割合100%として、75%, 50%, 25%に補助線を引いている。各瓶は歩行速度水準別に塗り分けた。歩行速度が 0.2 m/s 以下で停止と判断された者はこの図には含まれない。図中に併記された線分は、方向が群集全体の平均移動方向を示す。長さは半径を1と

してそこから移動方向の分散をひいた値となっており、この線分が短いほど移動方向にばらつきが大きいことが読み取れる。

読図方法

グラフ円内の瓶がある一定の方向に伸びているときはその方向に主要な群集の流れがあることが、対して瓶がばらつき特定のピークをもたず様々な方向に分散しているときはその群集の流れが複雑であることがわかる。

本可視化法から歩行者の平面上の位置や移動などの詳細な情報は読み取れないが、かわりにグラフ円内の瓶のかたよりから短時間歩行パス図ではすぐに読み取ることは難しい群集の流れの複雑性を瞬時に把握できる。そのため、とくに短時間歩行パス図と併用すると有用である。

2.5.3. バラ図の既往事例

バラ図 (rose diagram) は方向の頻度を示す既存のグラフである。これは度数分布を円形に配置したものであり、ブロックの方向がそのまま値の方向を、そしてブロックの長さで頻度を示している、円形ヒストグラムともいえる記法である。図2.25, 2.26は共に既往研究でみられたバラ図の事例である³⁾。

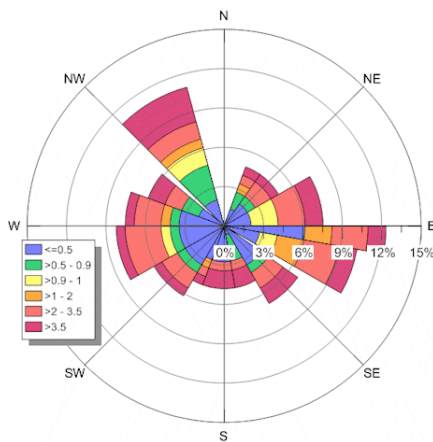


図2.25 バラ図事例1

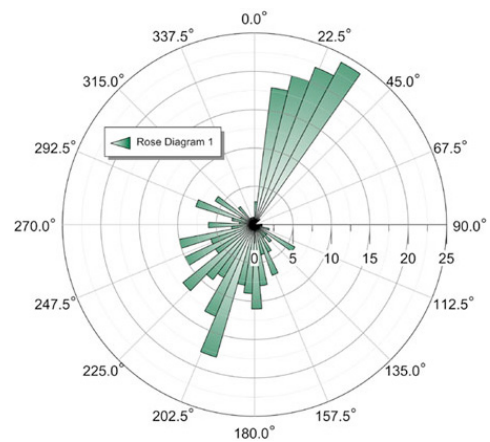


図2.26 バラ図事例2

バラ図の利用は渡り鳥の方角などの生態学や風向きなどの気象分野が多くを占める。これらの場面でバラ図が使用される場合は単独の図として、または季節や地域差など一つの研究内で比較が終わる分析が多くなるため、その比較内で度数の取り方が共通していれば問題は発生しない。そのため、外円を100%にするのではなく奔放に度数を取っているものが大半を占めた。例として、図2.25は15%を最大に割りあてており図2.26は度数を与えている。本研究の目指す群集流の可視化では不特定多数の事例比較を対象としている点でこれらと異なるため、図の最大頻度を100%に固定しさらに軸を平方根としている。

2.5.4. 作画技術

短時間歩行パス図と同様に、Python の PDF 生成ライブラリ reportlab で描画を行っている。

2.6. 歩行者主体移動軌跡図

「歩行者主体移動軌跡図」(Pedestrian-Perspective Movement Tracking Diagram; PPMT-Diagram) は歩行者の移動変量に着目し、それを歩行者主体の座標で描いた図法である。単独歩行者の歩行軌跡データから時間スケールをもった歩行シーケンスを1枚の図として記述し、移動を歩行者を主体とした視座でとらえ、歩行中の回避行動の詳細な解明を試みるものである。単独歩行者の歩行3変量の「歩行速度」と「移動方向」の時間推移を表すことができる。なお、3変量の残る「肩の向き」の情報はこの図には含まれない。

2.6.1. 作例

歩行者主体移動軌跡図の作例を図2.27に示す。

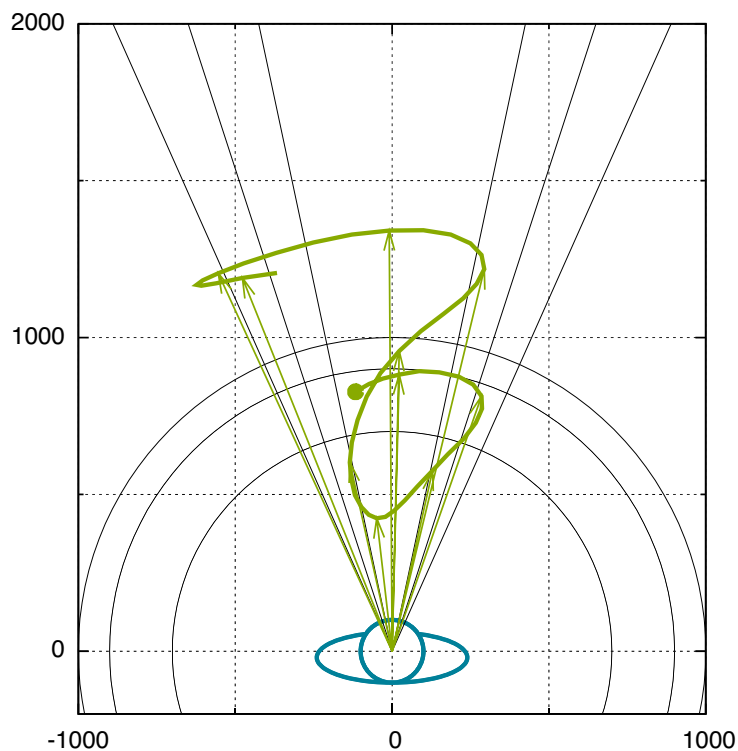


図2.27 歩行者主体移動軌跡図

2.6.2. 記述方法

この図は、座標原点を各時点 t の歩行者の頭頂位置とし、各時点 t における歩行者の移動方向を図の上方Y軸に固定している(図2.28)。その時点 t 歩行者を基準にそこから1秒後の歩行者の相対位置を連続してプロットしている。太線がそのプロットを繋いだ軌跡であり、丸が付いている側の線端が時間軸の開始地点となる。さらに、計測時間0.5秒経過毎には歩行者からそのプロットに対して矢印を引いている。これは短時間歩行パスにおける歩行者がもつ矢印と一致する。

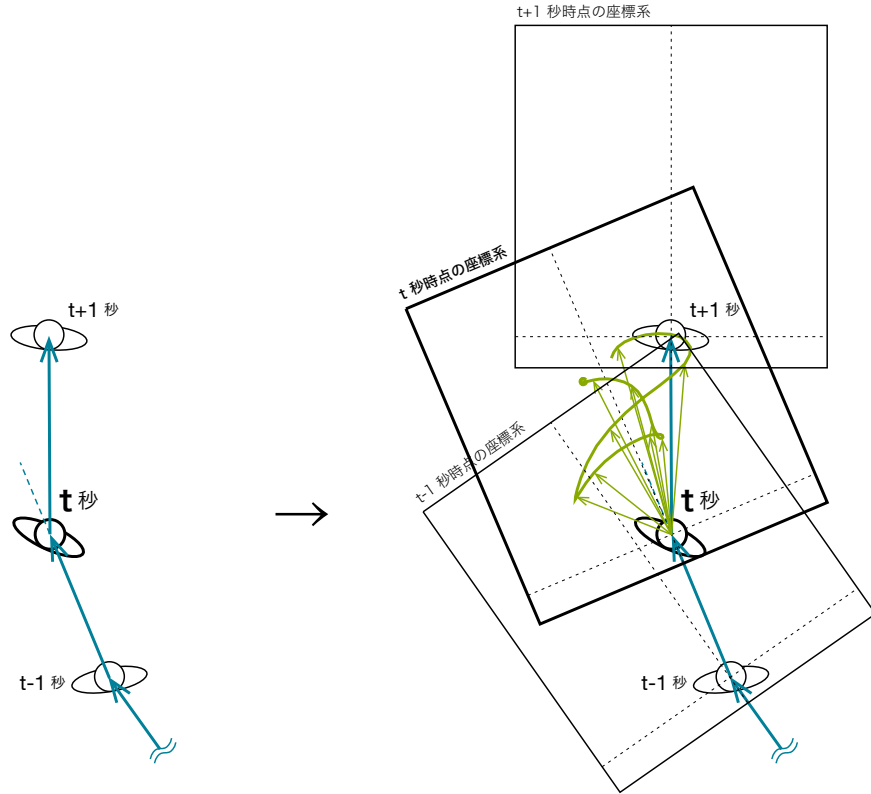


図2.28 歩行者主体移動軌跡図の座標系

2.6.3. 読図方法

本可視化手法は、歩行者の位置と移動方向をグラフ原点とY軸方向に据えることで歩行者の取った行動を描き出すことを狙いとしている。プロット線の展開から、図を一瞥すれば回避状況が判断でき、また精緻にプロット線の形状や矢印の間隔を読むことで、計測時間内の歩行者の詳細な行動の変動も読み取れることができる。

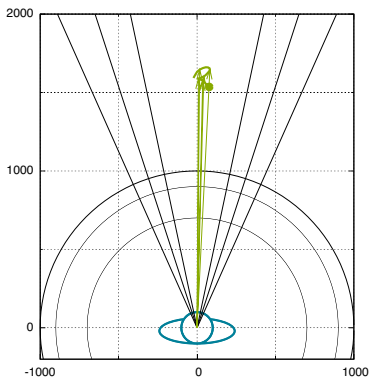


図2.29 自由歩行

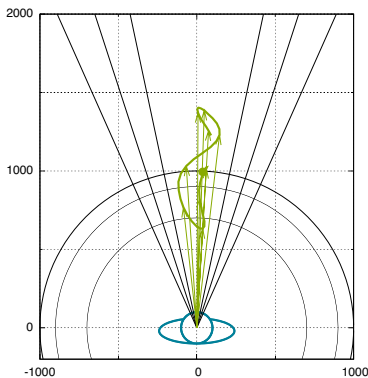


図2.30 減速

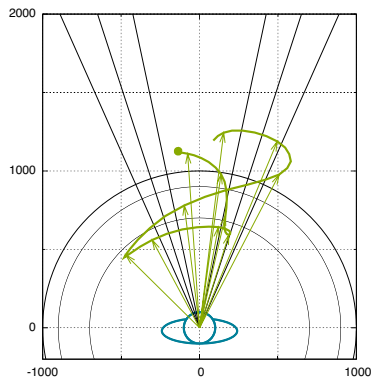


図2.31 迂回と減速

回避がない歩行は前方方向に自由歩行速度で等速に直進する。このとき、図2.29のようにプロット線は前方Y軸上の自由歩行速度 1.0 - 1.5 m/s 付近に集中する。一方、減速や迂回の強い回避行動が行なわれるとプロット線が図上に広く展開される。歩行速度の変更があると、図2.30のようにプロットのY軸方向の位置が変化する。迂回時は歩行者の移動方

向が変動するため、図2.31のようにプロットのX軸方向の位置が変化する。ここから、プロット線の展開状況を見ることで歩行者の回避行動を読むことができる。

計測時間0.5秒経過毎には歩行者からそのプロットに対して矢印を引いている。この矢印間は等時間であることから、この放射矢印線の疎密に着目すると矢印が粗な箇所では変動が大きいことがわかる。

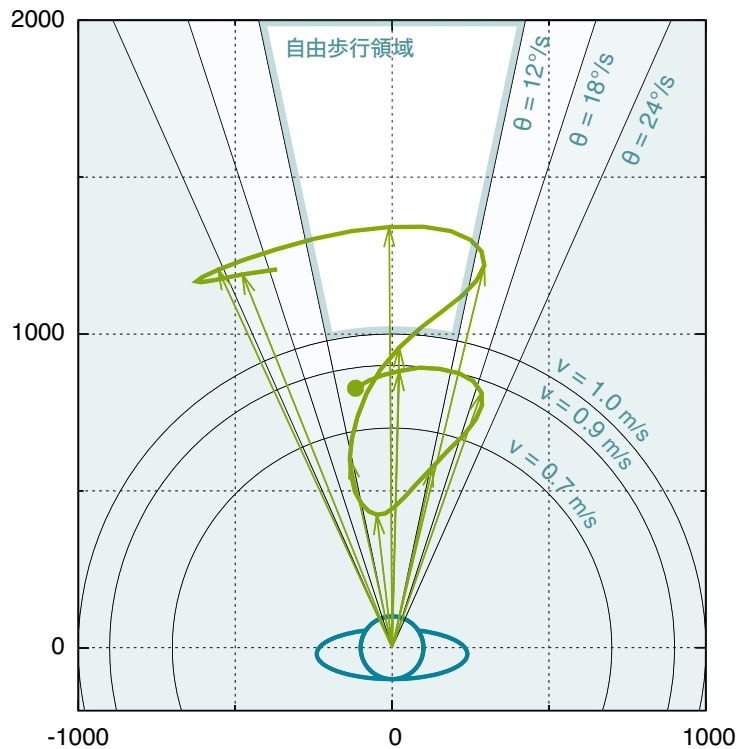


図2.32 歩行者主体移動軌跡図の領域区分

図2.32において塗り分けられた領域は、本論文3章で求めた歩行者の回避強度を示している（表2.3）。歩行者を中心に引かれた3本の円弧型補助線は次章で示す減速回避の3つの強度のしきい値である注2)。同様に放射状の補助線は迂回回避のしきい値である。プロット線がこれら補助線で仕切られたどの領域に跨っているかで、一連の歩行シーケンスの中で発生した回避の強度がわかる。

表2.3 回避強度の範囲（3章より）

	減速 速度 (m/s)	迂回 変化角度 (度/s)
回避なし	1.0 -	0 - 12
潜在回避	0.9 - 1.0	12 - 18
弱回避	0.7 - 0.9	18 - 24
強回避	0.0 - 0.7	24 -

なおこの可視化手法は単独の歩行者のみの移動を表現するものなので、他歩行者や空間要素など対象歩行者以外の事物と歩行者の関係性は本図からは得ることができない。実際の分析時の利用にあたっては、記録ビデオ映像や短時間歩行パス動画、平面図上の移動軌跡など、対象歩行者と他の事物との関係性がわかる情報と併用すると良い。

2.6.4. 作画技術

作画が比較的単純なため低レベルに画像を作成せず、Python で必要数値を算出したのちグラフ描画のコマンドラインプログラムである gnuplot で描画を行なっている。

2.6.5. ケーススタディ -鉄道駅構内改札前

多様な条件での歩行者の行動を分析するため、歩行者主体移動軌跡図を実際の鉄道駅構内の旅客に適用した。実地調査では観察対象の歩行者に事前にモーションキャプチャを取り付けることはできないため、ビデオ撮影から歩行者の歩行軌跡を算出する方法を取る。

2.6.5.1.方法

平日朝7時半から9時半の通勤ラッシュ時に都内S駅在来線改札前ラッチ内側の様子を上方からビデオカメラで撮影した（図2.33）。



図2.33 解析に用いたビデオ映像^{注3)}

解析空間はホームから階段を上がったところにある段差のない開けたラッチ内コンコースであり、障害物等はない。定常的に高密度での交錯流が観測された。解析エリアの混雑密度は平均2.0人/mであった。ビデオのアンクルによる歪みをあとで補正するために、映像

内には座標の基準となる4点の位置も収める。動画から0.2秒毎に静止画を切り出し、それぞれ対象となる利用者の頭頂部をプロットし静止画での座標求める。そして得られた座標を平面上の位置に補正し、利用者の歩行軌跡を算出した。

2.6.5.2.結果

以下、得られた軌跡図のなかから代表的な事例を挙げる。併載した平面軌跡図 図2.35, 2.37 は図上方、図端から約 2 m 先に自動改札が並んでいる配置である。

a. 歩行者の志向するルートを直進

図2.34は回避行動をしていた歩行者Aの軌跡を抽出、平面上に描画したものである。軌跡上の各白丸は0.2秒毎のプロット点を示し黒丸から矢印の方向に進んでいる。図上部に改札、下にコンコースがある。この歩行者Aの歩行を歩行者主体移動軌跡図で記したものが図2.35である。前半自由歩行領域内にあった歩行軌跡が減速し左右方向に展開していることから、減速・迂回両方で強い回避行動が取られたことが読みとれる。

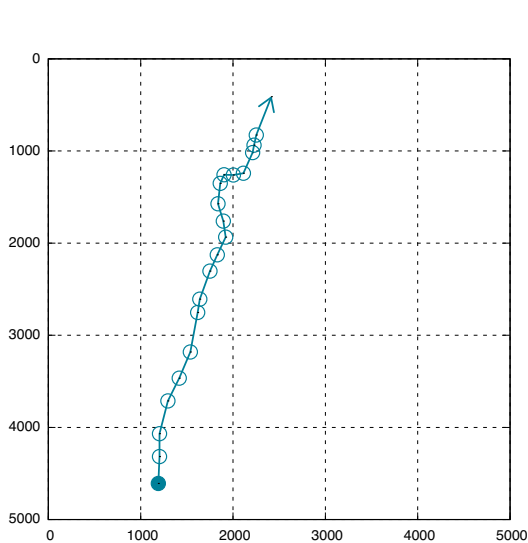


図2.34 歩行者Aの歩行軌跡

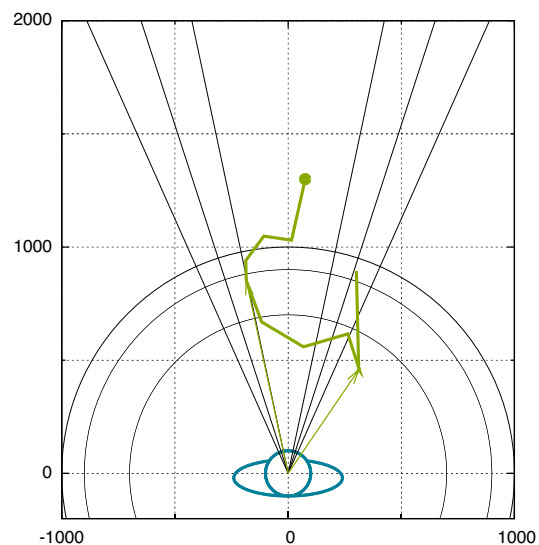


図2.35 歩行者Aの歩行者主体移動軌跡図

b. 歩行者の志向するルートを途中で変更

図2.36は迂回ではなく進行方向の変更をした歩行者Bの軌跡である。図左下から右方向に直進したのち、図面上方向に方向を変換している。歩行者Bの歩行者主体移動軌跡図（図2.37）を見ると、歩行速度は全体的に高く、軌跡は歩行者A（図2.35）と異なり図左面にのみ展開している。これは、歩行者が左方向に移動方向を変更したのち方向の回復を行わなかったことを示しており、障害物の迂回ではなくただの方向転換であることが読み取れる。

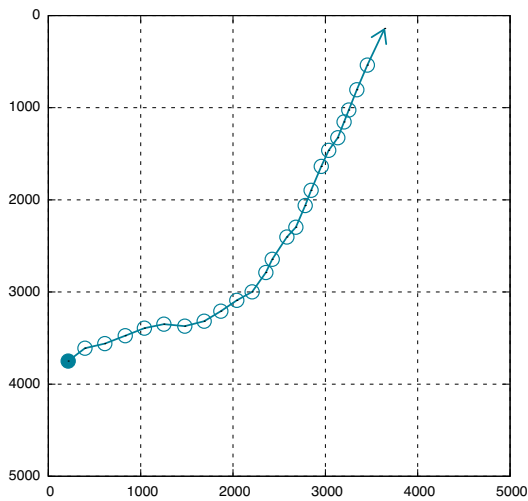


図2.36 歩行者Bの歩行軌跡

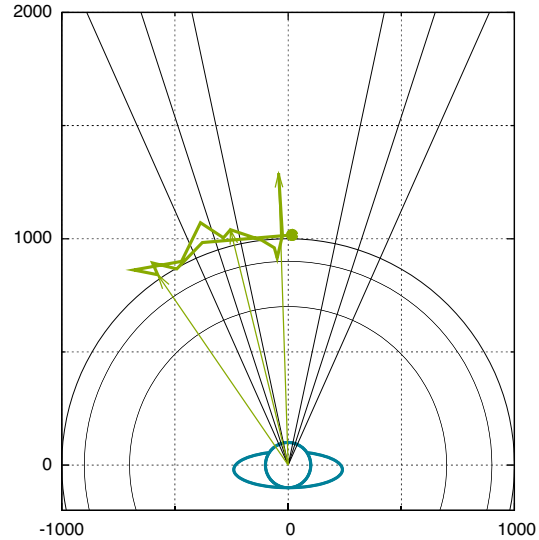


図2.37 歩行者Bの歩行者主体移動軌跡図

2.6.5.3.まとめ

本ケーススタディから、歩行者主体移動軌跡図が実際の群集歩行空間のビデオ映像からも生成・利用できることが確かめられた。また、障害物を回避するための迂回行動はただの進行方向の変更とは異なる軌跡プロットの特徴をもつため、歩行者の進行方向が予想できない状況でも図から進行方向を変更した歩行者を迂回回避行動をとった歩行者から分離できることがわかった。

今後の課題としては、より多くのパターンの回避行動データを収集し、回避行動としての迂回行動を歩行者の意思による進行方向の変更から分離するための具体的なしきい値を定めることが求められる。しきい値により機械的に分析対象エリア内の歩行者の行動の回避強度を算出することで、対象エリアの歩行快適性の数値化が望める。

ただし本分析法では、歩行者の自らの意思での歩行停止や減速を障害物回避としての減速から分離することは現状では困難である。そのため本分析法の適用は、現時点では、待ち合わせ場所などのたまり空間を含まない駅コンコースや実験空間など歩行者・群集が流れていることが前提の空間に限られる。

2.7. まとめ

本章では、本研究の軸となる歩行者群集のモデルを「歩行者本位マルチエージェントモデル」と命名し、その解説を行なった。さらに、群集の状態を可視化する3つの図を開発した。

2.7.1. 群集モデル

本研究で用いる時空間モデル、および歩行者モデルを説明した。

マルチエージェントモデルを採用し、それぞれの歩行者の振る舞いや状態の集合を歩行者群集とみなすことで、群集を積算的にとらえ評価する方向を示した。

それぞれの歩行者の歩行は x, y 平面空間の時間 t による変位ととらえる。移動はベクトルの長さ・方向に分解できることから歩行者の歩行は歩行速度・移動方向の2変量で記述できること、さらに歩行者の占有領域の時間変化は身体の向きという1変量に要約ができることを示した。そこから歩行者の歩行における平面座標上の時間変動値は、「歩行速度」・「移動方向」・「肩の向き」の3要素に集約できることを述べた。

2.7.2. 可視化

「短時間歩行パス図」および「移動方向バラ図」「歩行者主体移動軌跡図」という群集を可視化する3つの図を開発した（表2.4）。

短時間歩行パス図・移動方向バラ図では、単位時間1秒間での歩行者の移動差分という観点から歩行者群集をまとめ、歩行者主体移動軌跡図では単独の歩行者を対象にその移動シーケンスを歩行者を主体とした視点でとらえ直した。

いずれの図も対象となる各歩行者の時間毎の平面座標をパラメータとして取ることで作図ができる。

表2.4. 新規に開発した群集の可視化手法

名称	短時間歩行パス図	移動方向バラ図	歩行者主体移動軌跡図
図			
対象レベル	群集・個人	群集	個人
内容	領域内の歩行者の分布と移動方向・速度	領域内の歩行者の移動方向傾向	単独歩行者の移動シーケンス
表現時間	1秒	1秒	数秒間の連続時間
対象歩行者	領域内すべての歩行者	領域内すべての歩行者	単独の歩行者
読み取り可能な情報	歩行者 - 位置 - 歩行速度 - 移動方向 - (肩の向き) - 領域内の空間要素	歩行者 - 移動方向 (12段階) - 歩行速度 (3段階)	歩行者 - 移動方向 - 歩行速度 - 回避強度

次章以降では、実際にこれらの図を用いて群集の状態を記述し、行動のモデル化を試みる。

2.7.3. 対象データ

本モデルおよび可視化手法のデータは、平面座標の時間経過データであればフィールド観察・実験・シミュレーションなどの性質は問わない。このことから実験結果とシミュレーション結果に比較なども可能となる。

注

注1) 筆者らの研究から、ボトルネック前の歩行者の集積はくさび型・またはすり鉢型になることが明らかになっており、よって歩行者の分布は一様ではない。

注2) しきい値の定義など詳細については3章で述べる。

注3) 画像は個人が判別できないように加工してある。

3. 群集流横断における歩行者の回避行動

3.1. はじめに

3.1.1. 背景

群集流は本来目的方向別に分離して計画することが望ましいとされているが、実際には駅コンコースなどの広がりのある空間では構造上群集流の交差を余儀なくされる場面もある。一方、通勤群集などを実際に観察すると、比較的低密度な交差ではスムーズに互いをすり抜けて通過する場面もみられる。これらの場面では、群集の流れを単独ないしは少人数グループの歩行者が横断している。ここから、ある程度の条件下であれば群集流の交差も円滑に行なえると考えられる。このすり抜け時の歩行快適性は群集流の密度が影響し、加えて佐野らによる事前の実験の検討・分析により、双方の群集の流れがなす角度が関係することが示されている^{1), 2)}。

歩行者が自由歩行しているときは快適な歩行が実現できているといえる。他の歩行者の阻害などで衝突を避けるために回避行動をとると、自由歩行状態が崩れる。回避行動は快適な歩行を妨げる要因であると考えられる。このことから本章では、歩行者の回避行動の出現に注目することで歩行者の歩行快適性を評価することを試みる。歩行者は、自分の歩行速度を調整する「減速」と進む方向を調整する「迂回」、さらに移動方向に対して肩の向きを変える「ひねり」の3つの回避方法を組み合わせることで回避をしていると考えられる。これは、2章で示した歩行の3変量「歩行速度」「移動方向」「肩の向き」の変化に対応しており、そこからこの3種の回避方法で歩行者の回避行動は記述ができるがわかる。

本章では群集流の交差における歩行快適性を検討するが、論点を単純化するために群集流の交差を単独歩行者の群集流横断の集合ととらえ、一方向定常流の群集流とそれを横断する単独の歩行者の問題に置き換えることで、それによって生じる歩行者間の回避行動を考察する。

3.1.2. 既往研究

群集研究は群集密度と歩行速度または流動係数の関係といった群集密度を中心とした関係式の研究が行われてきた。中³⁾、加藤⁴⁾は、交差流の一般的構造をグループ化現象としてとらえ成果をあげている。竹内ら⁵⁾、辻本ら⁶⁾は、画像分析により詳細に歩行者の移動軌跡を分析する手法を開発し、個人間の回避行動を分析している。土屋、古川、長谷見ら⁷⁾⁻⁹⁾、

佐野ら^{10), 11)}、高柳ら^{12), 13)}は、群集内で歩行する状況を分析し可視化手法を用いて示すことで、人間が自分の周りに確保する領域の分析を行なっている。加えて佐野ら¹⁴⁾は、階段室内での合流の態様を実験的観点から分析している。

しかし群集横断時の詳細な挙動については解明されていない部分も多く、群集密度・進入角度による横断歩行特性の違いについて定量的に考察している例は少ない。佐野ら¹¹⁾は単独の歩行者が群集を横断する実験室実験を行ない、モーションキャプチャシステムで歩行者の位置座標と身体の回転を測定した。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。ただし、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。

このため引き続き佐野ら²⁾は、実空間で自然発生する群集流への横断実験を行い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した。また通過しにくさのメカニズムを解明し定量的に指標化するため回避行動をモデル化した。しかし、これらの研究は軌跡を形態から分析するものであり、定量的な詳細分析から群集横断時の回避行動についてとらえてはいない。

歩行者の回避行動の研究としては、建部ら^{15), 16)}や衣田ら¹⁷⁾の実験による歩行軌跡の分析が挙げられる。しかし、建部らの実験では障害物が静止しており、また速度変更による回避は分析の対象としていない。衣田らは単独の歩行者同士の回避実験から回避時の歩行者の回避領域および行動特性を算出している。だが、第2章で観察された減速による回避はこの調査では観察されていない。いずれも十分な空間が確保された中での単独歩行者の回避であり、群集内での回避行動モデルとしては妥当性に欠ける。

3.1.3. 目的

本章では、不特定多数が利用する施設の通行部分における群集流とその横断に着目し、そこでの群集流への進入角度および群集流の密度と、歩行者間の回避行動の関係を明らかにすることで、その際の減速・迂回・ひねりによる回避強度の段階とそのしきい値を求めることを目的とする。さらに、回避という一連のシークエンスの中での各回避行動の関係性をとらえる。また、群集流における回避行動の段階の定量的な指標化を行い、現状の群集流の交差状況の把握および改善のための基礎資料とする。

3.2. 方法

3.2.1. 群集流横断実験

大学生30名（男女各15人）の実験参加者の協力のもと、単独の歩行者が群集流を横断する実験室実験を行った（図3.1）。



図3.1 実験風景

あらかじめ定められた位置に配列した「群集流グループ」と「横断者」が、実験者の合図で歩行を開始し計測エリア中央で交差する。群集流グループには「目的地に向かってまっすぐ歩行してください。横断者と接近した際には自然によけてください。」と教示し、隊列を保ちつつ回避は自然に行なうように指示した。横断者には「やや急ぎ足で目的に向かって直進してください。群集と接近した際には自然によけてください。」と教示し、群集流動の先に目的地があることを想定させた。

この試行を、群集への横断者の進入角度（図3.2）を45度、90度、135度、180度の4種類、群集流グループの密度を 0.25 人/m²、1.00 人/m²、2.00 人/m² の3種類（表3.1）で計12種類各3回ずつ行った（表3.2）。30人の実験参加者全体を横断者5人と群集流グループ25人に分け、実験条件毎にそれぞれ中から横断者1人および群集流グループ15人ないし18人を選出した^{注1)}。また、同一条件下においては、試行毎に群集流グループ内の実験参加者の位置を入れ替えた。

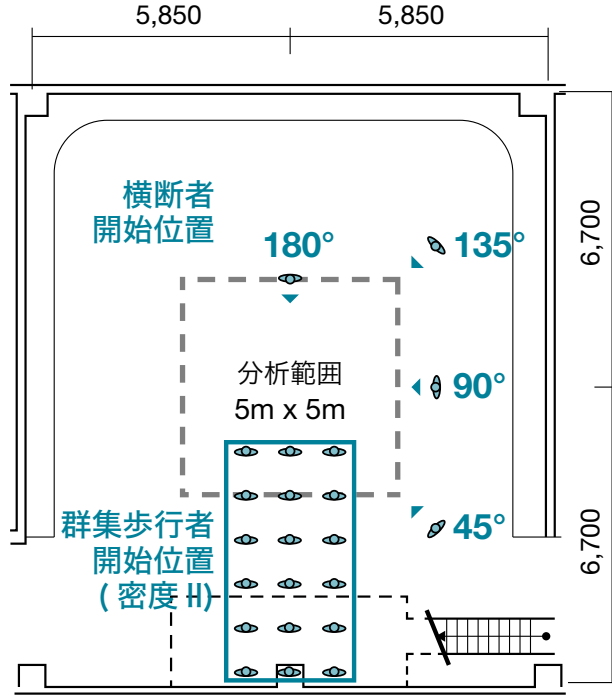


図3.2 実験室内の配置

表3.1 群集の配置パターン

	密度 I	密度 II	密度 III
配置図			
密度	0.25 人/m ²	1.00 人/m ²	2.00 人/m ²
人数	15 人	18 人	15 人

表3.2 実験条件と結果が有効な実験回数

群集流の密度		横断者の進入角度			
水準	密度	↓ 180°	↙ 135°	← 90°	↘ 45°
I	0.25 人/m ²	3回	3回	2回*	3回
II	1.00 人/m ²	3回	3回	3回	1回*
III	2.00 人/m ²	3回	3回	3回	3回

*計測不備によりデータ数減

試行中、実験室のモーションキャプチャシステムで各実験参加者の頭頂部および両肩峰点に取り付けたマーカー（図3.3）の位置座標を取得した。歩行軌跡から算出した各歩行者の速度から実験開始1.5秒以降と定常状態と判断し、この実験開始1.5秒以降の横断者が 5 m 四方の分析範囲内にいる間を分析対象とする。

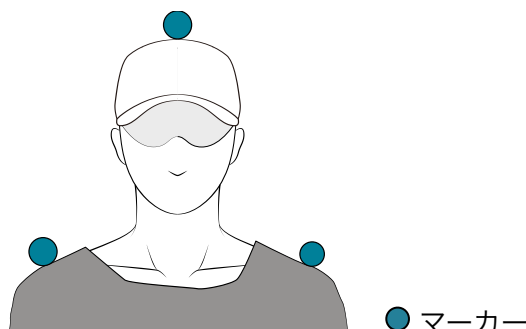


図3.3 マーカー取付位置

さらに、各試行後横断者に歩行快適性のアンケートを行った。回答者は「今の群集の中の歩みにくさ」に対して「歩きやすい」「やや歩きやすい」「普通」「やや歩きにくい」「歩きにくい」の5段階から答えた。

3.2.2. 短時間歩行パス動画および移動方向バラ図

実験で取得した歩行者の位置座標から0.1秒毎に短時間歩行パス図を作成し、それらを繋げ動画を生成し分析に用いる。短時間歩行パス動画を用いることで、回避強度の指標となる歩行速度、移動方向、肩の向きが動画から一度に定量的にとらえられ、現場の実際のビデオ映像では判別が難しい定量的なデータを含む群集の状況を連続的・視覚的に把握できる。そのため、歩行者の実際の動きを確認しながらそれを判断基準として定量的である回避強度のしきい値を探索的に定めることが可能となる。

群集全体の移動方向の傾向を把握するための移動方向バラ図も、同様に0.1秒毎に作成する。

3.2.3. 回避強度指標の算出

歩行者の回避行動を減速・迂回・ひねりの3種に分類し、それぞれの回避について強度の指標となる値を以下のように定めた。2章で述べた歩行の3変量と本章における回避分類は表3.3のように対応している。

表3.3 回避の分類とその指標値

回避分類	歩行の3変量	強度の指標値	単位
減速	歩行速度	歩行速度	m/s
迂回	移動方向	変化角度	度/s
ひねり	肩の向き	ひねり角度	度

3.2.3.1.減速回避

各時点 t からその1秒後の $t+1$ 秒間の歩行者の移動距離（図3.4）を歩行速度と定義し減速回避の指標とする。

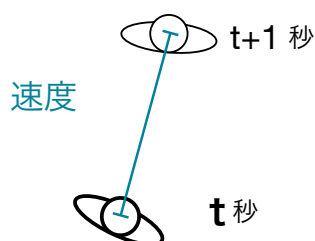


図3.4 速度算出方法

3.2.3.2.迂回回避

各時点 t を基準としたとき、 $t-1$ 秒から t 秒への移動方向と t 秒から $t+1$ 秒の移動方向の差分の絶対値（図3.5）を方向変化角度として迂回回避の指標とする。なお迂回においては算出にその時点の1秒前のデータを必要とするため、最初1秒間は迂回の評価を行わない。

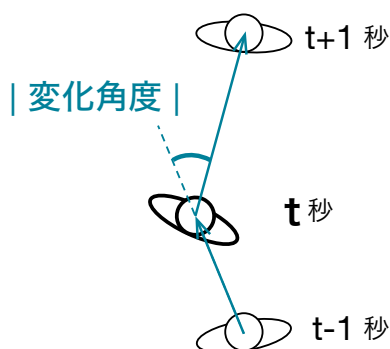


図3.5 変化角度算出方法

3.2.3.3.ひねり回避

モーションキャプチャで得られた肩峰点2点を結んだ線分の角度を肩の向きとする。各時点 t を基準としたとき、 $t-1$ 秒から $t+1$ 秒への移動方向の直角線を、身体が移動方向に

正対していたときの角度とし、その角度からの肩の角度の差分の絶対値（図3.6）をひねり角度としてひねり回避の指標とする。この算出においてもその時点の1秒前のデータを必要とするため、最初1秒間はひねりの評価を行わない。

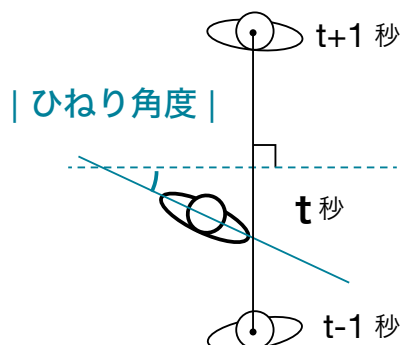


図3.6 ひねり角度算出方法

3.2.4. 回避強度水準の決定

実験で得られた各歩行者の位置座標から、回避の指標となるそれぞれの値を0.1秒毎に算出する。強度指標を等間隔に分割し歩行者記号の色を変更した短時間歩行パス動画を生成する。このとき、減速回避では歩行速度 0.1 m/s ごと、迂回避では変化角度 $3^\circ/s (= 1/60\pi \text{ rad})$ ごと、ひねり回避ではひねり角度 $3^\circ (= 1/60\pi \text{ rad})$ ごとに色分けをした。その動画から複数の研究者により当該方法による回避をしていると判断される行動^{注2)}を探索的に抽出し、回避の性質別に段階区分しそのしきい値を定める。次にこの回避強度別に塗り分けをした短時間歩行パス動画を生成し回避のしきい値の妥当性を検証した。

3.2.5. 歩行者毎の最大回避強度

各歩行者の最大となる回避強度を減速・迂回・ひねりそれぞれについて求め、実験条件ごとにその回避強度分類毎の発生回数を積算する。減速については、明らかに衝突回避でなく実験室環境に起因すると思われるものは分析者の目視判断のもと除外する。

横断者・群集流グループそれぞれにおいて実験条件と対応した最大回避強度のマトリックスを作成し、横断者の進入角度や群集流の密度と歩行者の回避行動の関係を分析する。

3.2.6. 歩行者主体移動軌跡図

横断者の移動軌跡を歩行者主体移動軌跡図として可視化し、歩行者の回避行動をシーケンズとしてとらえる。その上で、独立した事象として計測された減速・迂回の2種の回避行動の関係性をとらえる。

3.3. 結果

3.3.1. 歩きにくさの心理評価

歩きにくさのアンケート回答結果を、「歩きやすい」から「歩きにくい」まで1から5点で点数化し、その実験条件毎の平均点を表3.4に集計した。結果から、群集密度が低いとより歩きやすいことがわかる。もっとも歩きやすい評価を得たのは180度の密度IおよびIIであったが、密度IIIにおいては他の角度と同等の歩きにくさを得た。他の進入角度においては、歩きにくさの境界となる群集密度はIとIIの間であった。

表3.4 横断者の歩きにくさの実験条件毎の回答得点平均

群集流の密度		横断者の進入角度			
水準	密度	↓ 180°	↙ 135°	← 90°	↘ 45°
I	0.25 人/m ²	1.0	1.3	1.7	2.0
II	1.00 人/m ²	1.0	3.7	4.7	4.0
III	2.00 人/m ²	4.7	4.7	4.0	4.0

3.3.2. 回避強度水準

3.3.2.1. 短時間歩行パス図

進入角度45°・密度IIIの短時間歩行パス図である図3.7では、群集流グループの速度を示す軌跡の長さや方向が一定であり、それぞれ回避行動がない状況が読み取れる。

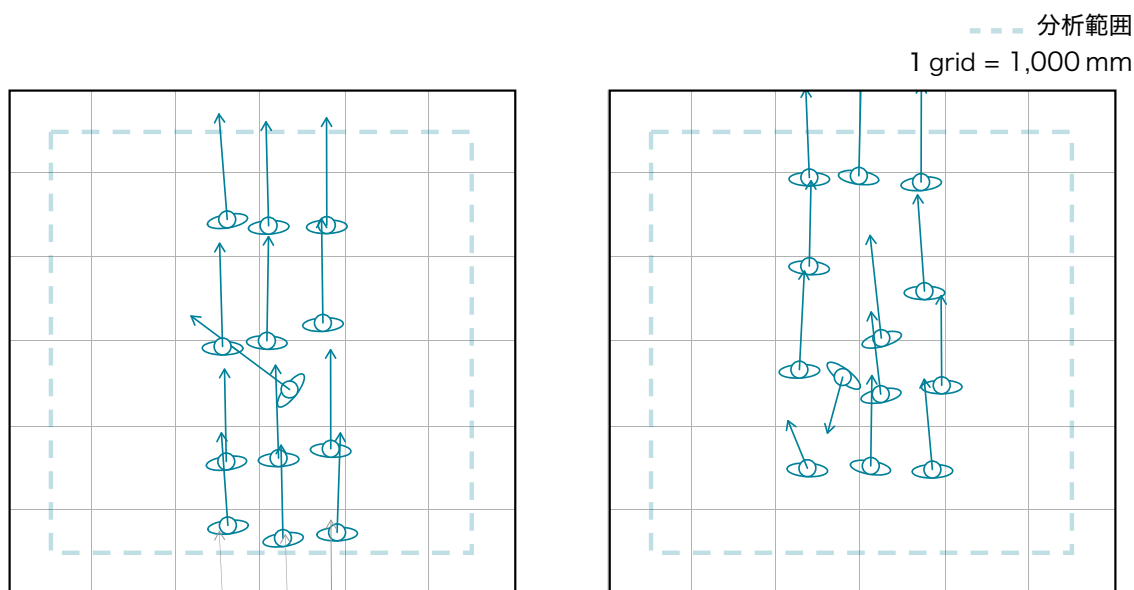


図3.7 短時間歩行パス図
(密度III / 45°)

図3.8 短時間歩行パス図
(密度III / 135°)

3.3.2.2.移動方向バラ図

図3.7と同時点のバラ図である図3.9からは、一定方向に進む群集流グループと、別方向にすすむ横断者の方向が読み取れる。図3.8と対応している図3.10では、一部の歩行者の歩行速度が 1.00 m/s 以下に下がっていること、および迂回を回避したために群集流グループの歩行者の方向がばらついてることが読み取れる。

これらバラ図から、回避が生じてその変化は局地的で群集流の他の歩行者については移動方向や速度はおおむね保たれていることが示唆される。

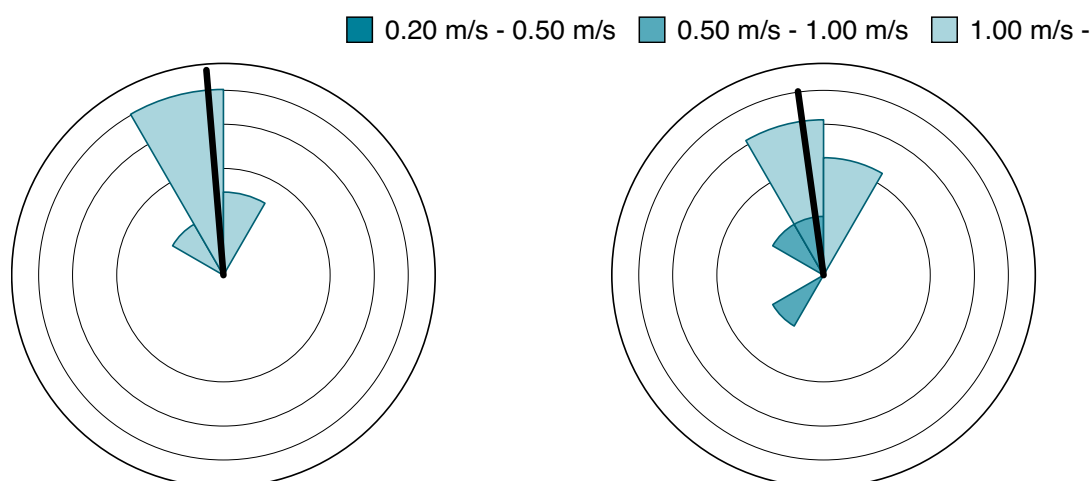


図3.9 移動方向バラ図
(密度Ⅲ / 45°)

図3.10 移動方向バラ図
(密度Ⅲ / 135°)

3.3.2.3.回避強度の決定

短時間パス動画より、横断者が群集流に進入する際に両者に回避行動が起こり、それに強弱の段階があることが確認された。そこから回避の強度を、①行動として観察はされないがデータには現れる「潜在回避」、②行動で見取れる強度の「弱回避」、③周辺の歩行者の影響により進行を阻害されていると考えられる「強回避」の3つの段階に定義した(表3.5)。

表3.5 回避強度とそのしきい値

回避強度	定義
回避なし	回避行動をしていない
① 潜在回避	行動として観察はされないがデータには現れる
② 弱回避	行動で見取れる
③ 強回避	明らかに周辺の歩行者の影響により進行を阻害されている

①の潜在回避は歩行者には負荷を与えない程度の回避行動であり、そこから②、③になるにつれて歩行者の負荷は増加すると考えられる。より負荷の高い回避行動が発生した交差ほど、円滑な群集流交差が実現できていないと評価できる。

3.2.4の手順により、この①から③の定義を判断基準として歩行速度毎に歩行者記号を色分けした短時間歩行パス動画から、減速回避の場合はそのしきい値を、潜在回避を速度 0.9 m/s 以上 1.0 m/s 未満、弱回避を 0.7 m/s 以上 0.9 m/s 未満、強回避を 0.7 m/s 未満とした。それぞれの回避強度がすべての実験における時間毎の速度を累積した分布中での占める位置は図3.11となり、これらの値が定常の歩行速度から外れていることを確認した。なお全体の速度平均は 1.15 m/s、標準偏差は 0.15 m/s であった。

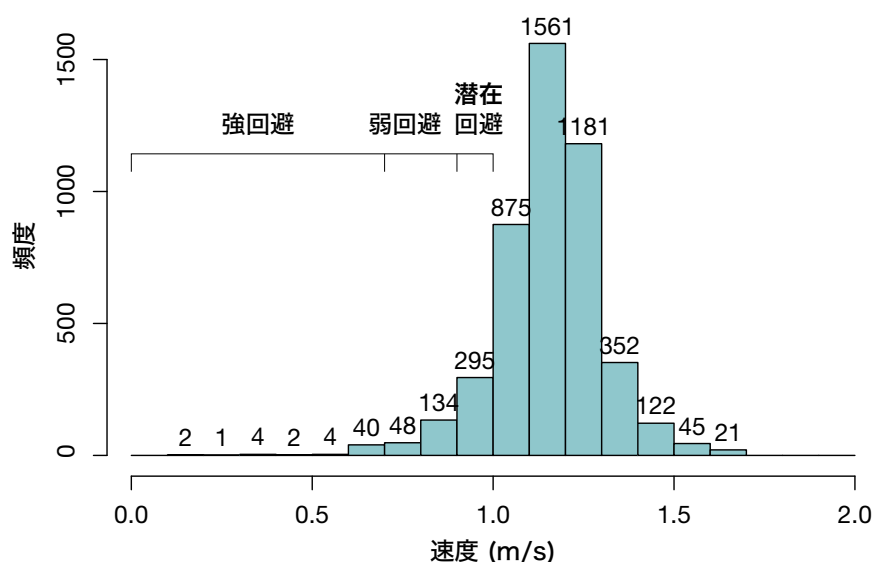


図3.11 速度の時間累積ヒストグラム

同様に迂回避についても3.2.3の手順により、①から③の定義をもとに変化角度毎に色分けをした短時間歩行パス動画から、潜在回避を変化角度 12°/s 以上 18°/s 未満、弱回避を変化角度 18°/s 以上 24°/s 未満、強回避を変化角度 24°/s 以上と定めた。すべての実験における時間毎の変化角度を累積した分布の中での占める位置は図3.12となり、これらの値が直進方向から外れていることを確認した。全体の変化角度の平均は 3.30°/s、標準偏差は 3.67°/s であった。

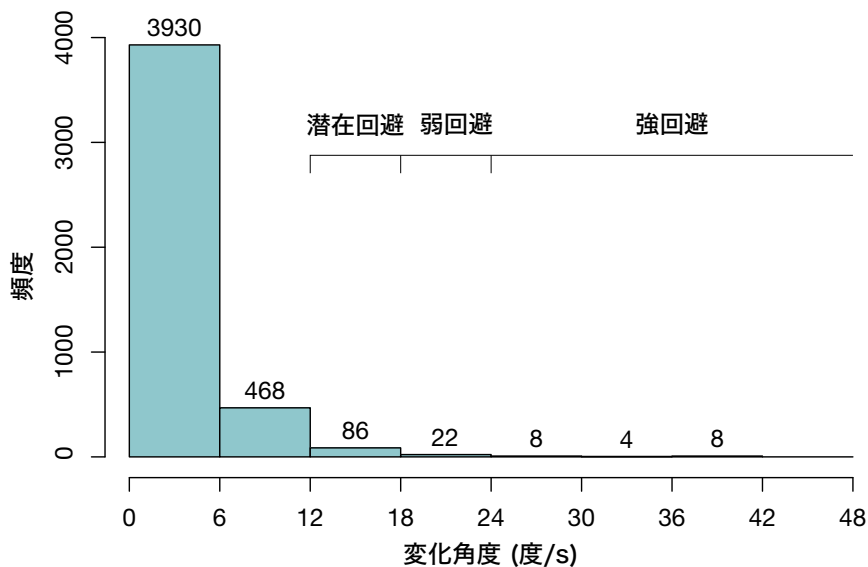


図3.12 変化角度の時間累積ヒストグラム

同様にひねり回避についても3.2.3の手順により、①から③の定義をもとにひねり角度毎に色分けをした短時間歩行パス動画から、潜在回避を変化角度 12° 以上 24° 未満、弱回避を変化角度 24° 以上 36° 未満、強回避を変化角度 36° 以上と定めた。すべての実験における時間毎のひねり角度を累積した分布の中での占める位置は図3.13となり、これらの値が直進方向から外れていることを確認した。全体の変化角度の平均は 4.97°、標準偏差は 6.68° であった。

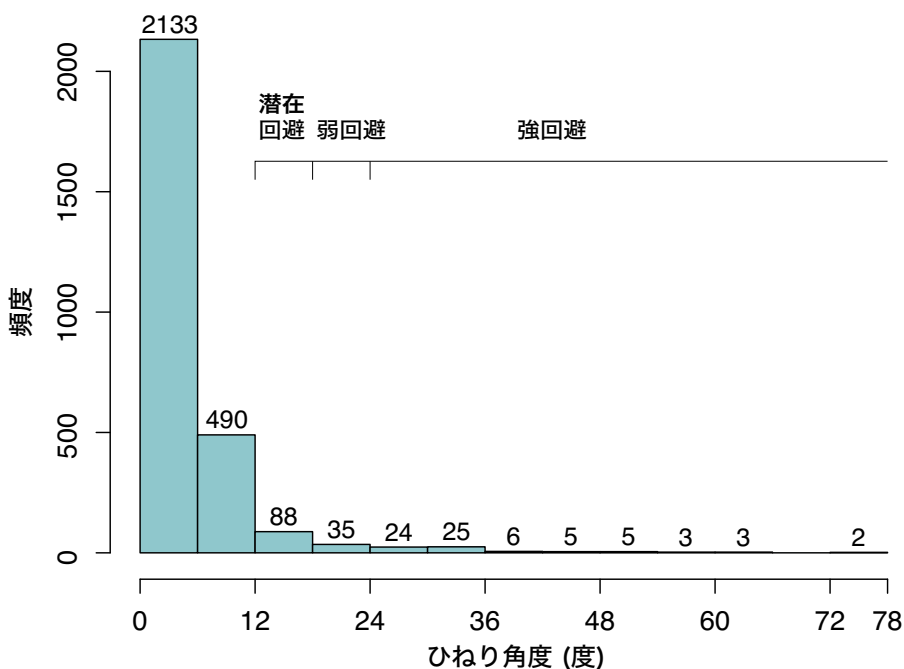


図3.13 ひねり角度の時間累積ヒストグラム

得られたしきい値をまとめたものが表3.6となる。

表3.6 回避強度とそのしきい値

回避種別	減速	迂回	ひねり
指標単位	速度 (m/s)	変化角度 (度/s)	ひねり角度 (度)
回避なし	1.0 -	0 - 12	0 - 12
潜在回避	0.9 - 1.0	12 - 18	12 - 24
弱回避	0.7 - 0.9	18 - 24	24 - 36
強回避	0.0 - 0.7	24 -	36 -

3.3.3. 短時間歩行パス図分析

短時間歩行パス動画から読み取れたいくつかの典型的な回避パターンをここで示す。図3.14から3.20まで、短時間歩行パス図を0.5秒おきの連続時間で縦に並べた。

図3.14から3.16は回避行動がほぼみられなかった密度Iでの代表的な短時間歩行パスシーケンスである。群集流側の歩行者間に十分な空間があるため、横断者はその空間を回避行動を起こさずに自由歩行で通っていることがうかがえる。

つづく図3.17から3.20は、より高密度である密度IIないしIIIの実験条件から特徴的な回避行動が起こった各進入角度の代表事例を取り上げ、各試行において「減速」「迂回」「ひねり」それぞれについて回避強度別に塗り分けた短時間歩行パスシーケンスを並列した。

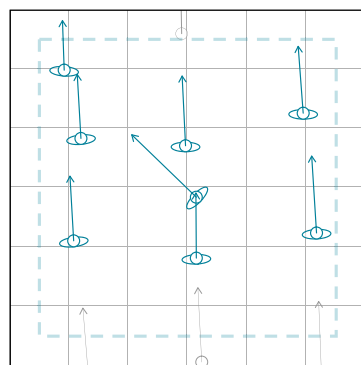
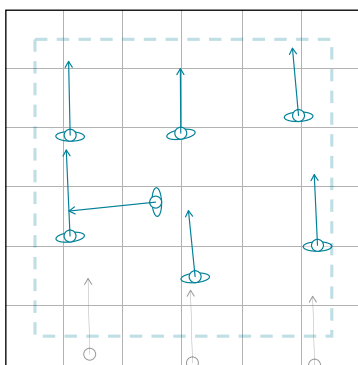
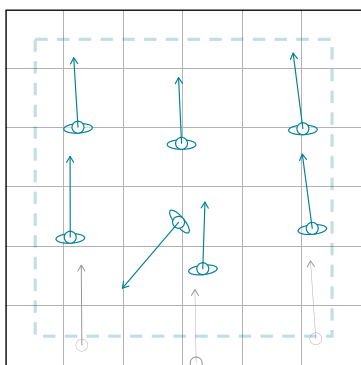
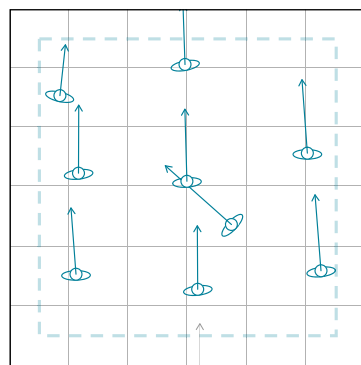
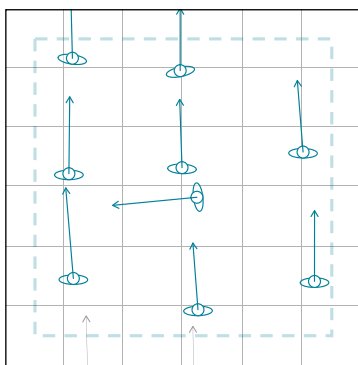
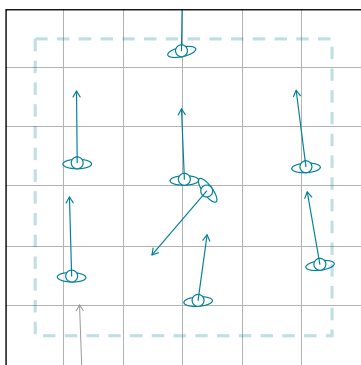
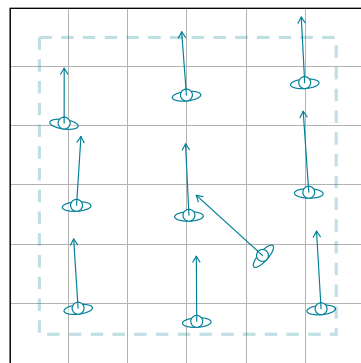
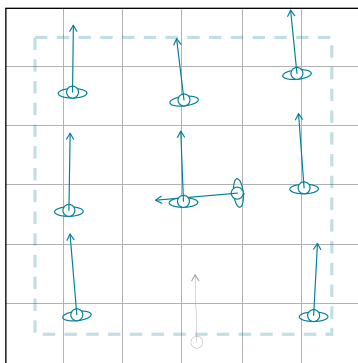
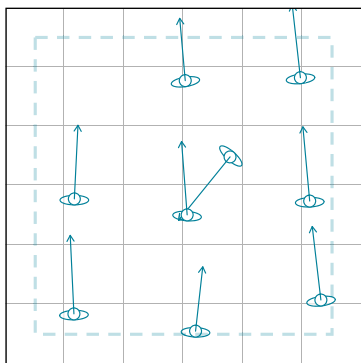
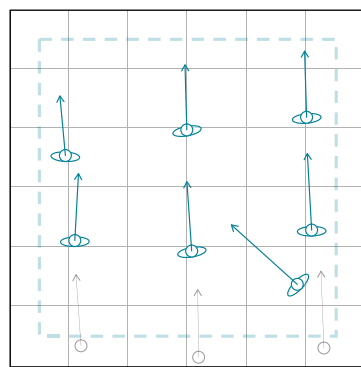
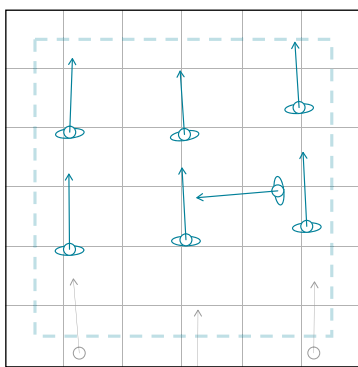
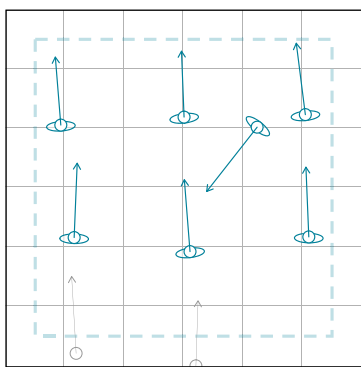


図3.14 短時間歩行パス
シーケンス
(密度I / 45°)

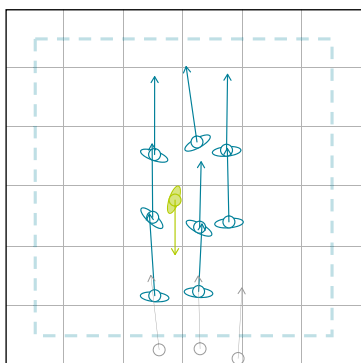
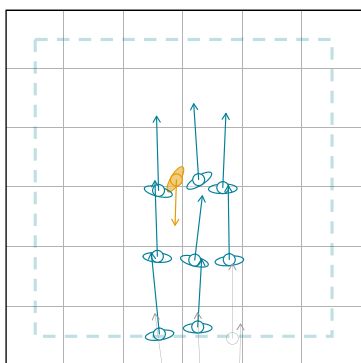
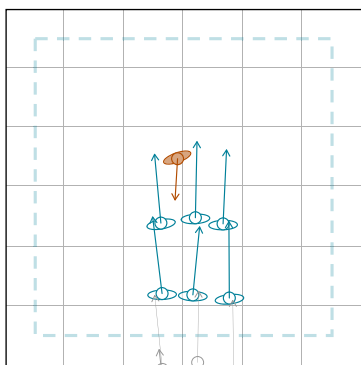
図3.15 短時間歩行パス
シーケンス
(密度I / 90°)

図3.16 短時間歩行パス
シーケンス
(密度I / 135°)

凡例 ○ 分析範囲外 ○ 回避なし ● 潜在回避 ● 弱回避 ● 強回避

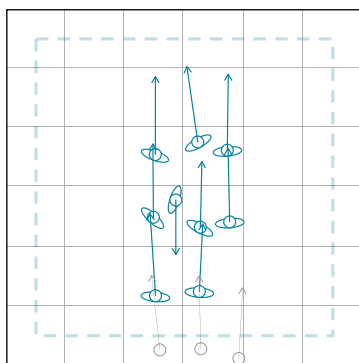
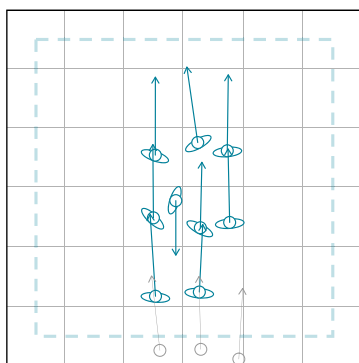
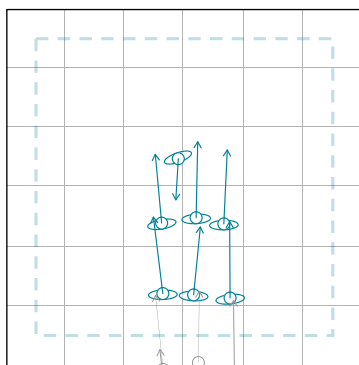
減速回避

横断者：● 強回避
群集流：○ 回避なし



迂回避

横断者：○ 回避なし
群集流：● 潜在回避



ひねり回避

横断者：● 強回避
群集流：● 強回避

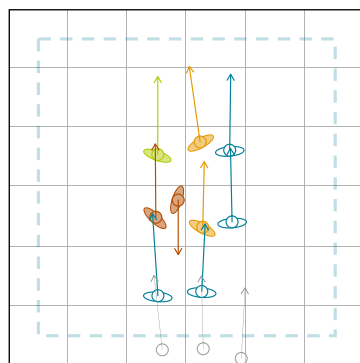
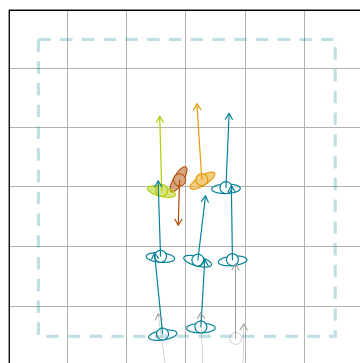
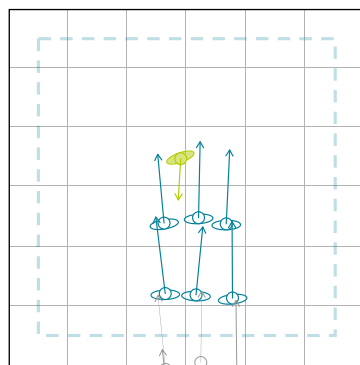


図3.17 短時間歩行パスシーケンス（密度III / 180°）

図3.17は密度III・進入角度180°の試行である。横断者は進行方向に直線に進んでいる。歩行速度を下げつつ群集流に突入し、肩をひねることで狭い隙間の間を抜けている。群集流側も肩をひねるのみで横断者を回避することで隊列を乱さずに歩行ルートは変更していない。

凡例 ○ 分析範囲外 ○ 回避なし ● 潜在回避 ● 弱回避 ● 強回避

減速回避

横断者：● 強回避
群集流：● 強回避

迂回避

横断者：● 強回避
群集流：● 弱回避

ひねり回避

横断者：● 潜在回避
群集流：● 潜在回避

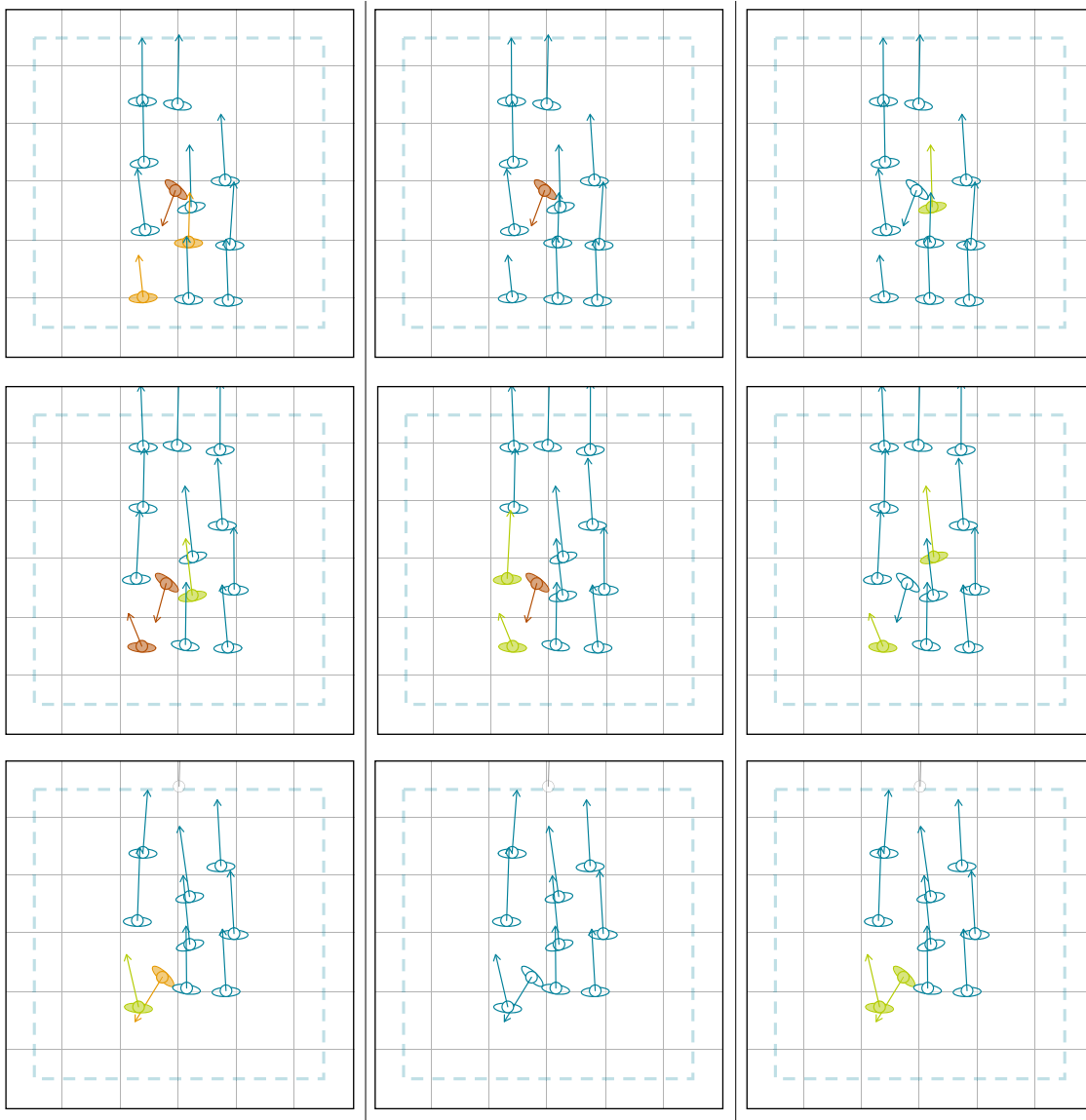


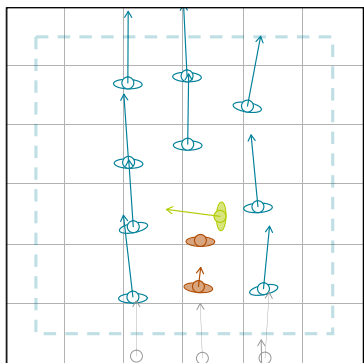
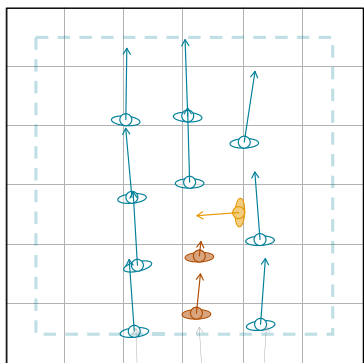
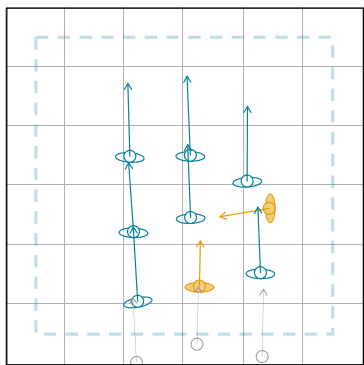
図3.18 短時間歩行パスシーケンス（密度III / 135°）

図3.18は密度III・進入角度135°の試行である。この試行では横断者が群集流の間を縫うように強い減速・迂回で回避し、群集流グループはそれを避ける程度であったことが見て取れる。肩のひねりは潜在的なものに留まっている。

凡例 ○ 分析範囲外 ○ 回避なし ● 潜在回避 ● 弱回避 ● 強回避

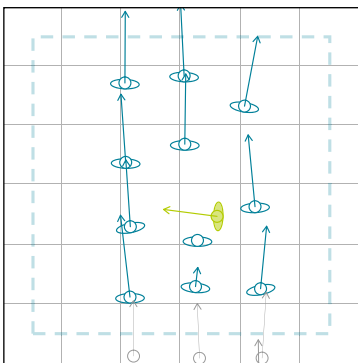
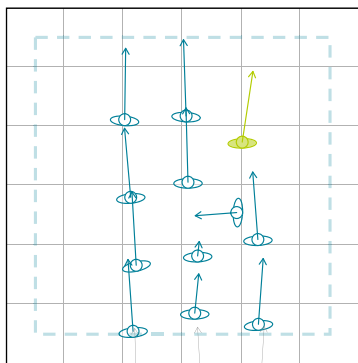
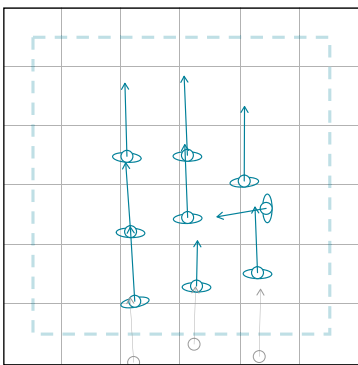
減速回避

横断者：● 弱回避
群集流：● 強回避



迂回避

横断者：● 潜在回避
群集流：● 潜在回避



ひねり回避

横断者：○ 回避なし
群集流：● 潜在回避

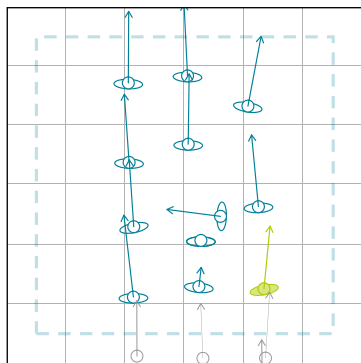
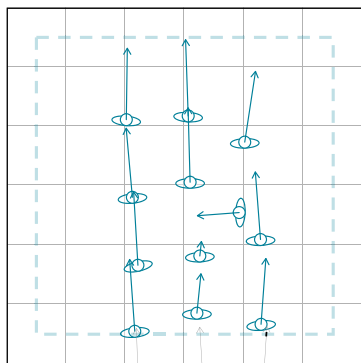
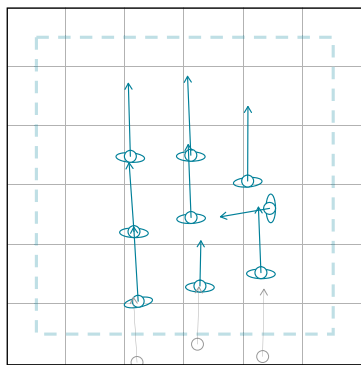


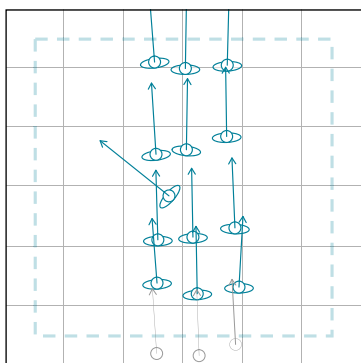
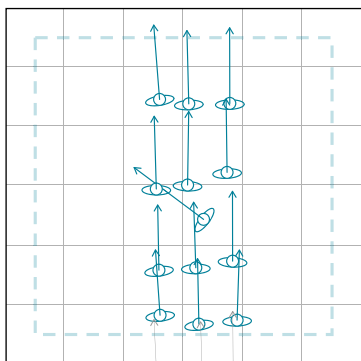
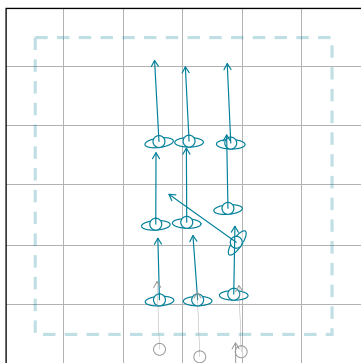
図3.19 短時間歩行パスシーケンス (密度II / 90°)

図3.19では両者のすり抜けのタイミングが合わなかったために、群集流グループ側が減速のみで回避をおこない、詰まりができていたことが読める。その結果、この試行では「渋滞」が発生している。しかし、歩行者の周りには十分な空間があるため、ひねり回避までは必要となっていない。

凡例 ○ 分析範囲外 ○ 回避なし ● 潜在回避 ● 弱回避 ● 強回避

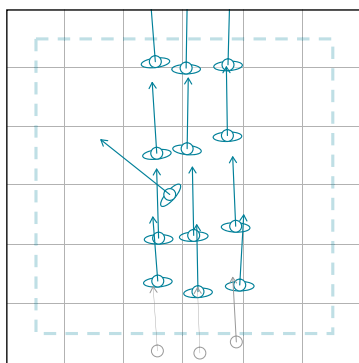
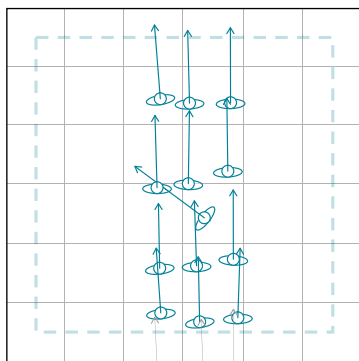
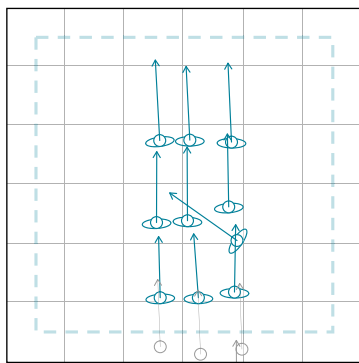
減速回避

横断者：○ 回避なし
群集流：○ 回避なし



迂回避避

横断者：○ 回避なし
群集流：○ 回避なし



ひねり回避

横断者：○ 回避なし
群集流：○ 回避なし

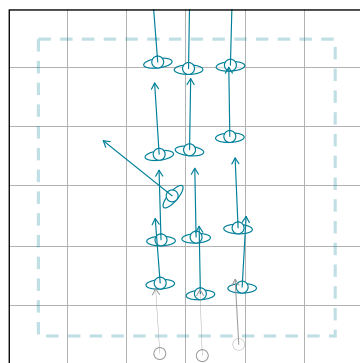
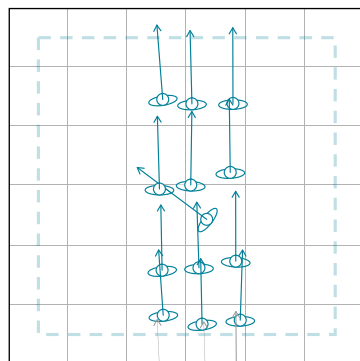
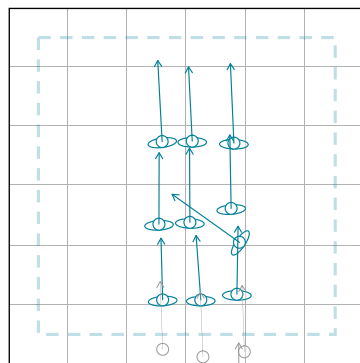


図3.20 短時間歩行パスシーケンス (密度III / 45°)

図3.20は進入角度45°の事例で、高密度にもかかわらず顕在する回避行動が行なわれずスムーズに横断ができている。

3.3.4. 横断者の回避シーケンス

横断者の歩行軌跡を歩行者主体移動軌跡図で示すことで回避行動を一連のシーケンスとしてとらえ、その中での減速回避と迂回避の関係性を探った。歩行者主体移動軌跡図は図内に引く補助線より、軌跡がまたぐ領域をみることで減速回避と迂回避それぞれの回避強度水準がわかるようにした（図3.21）。

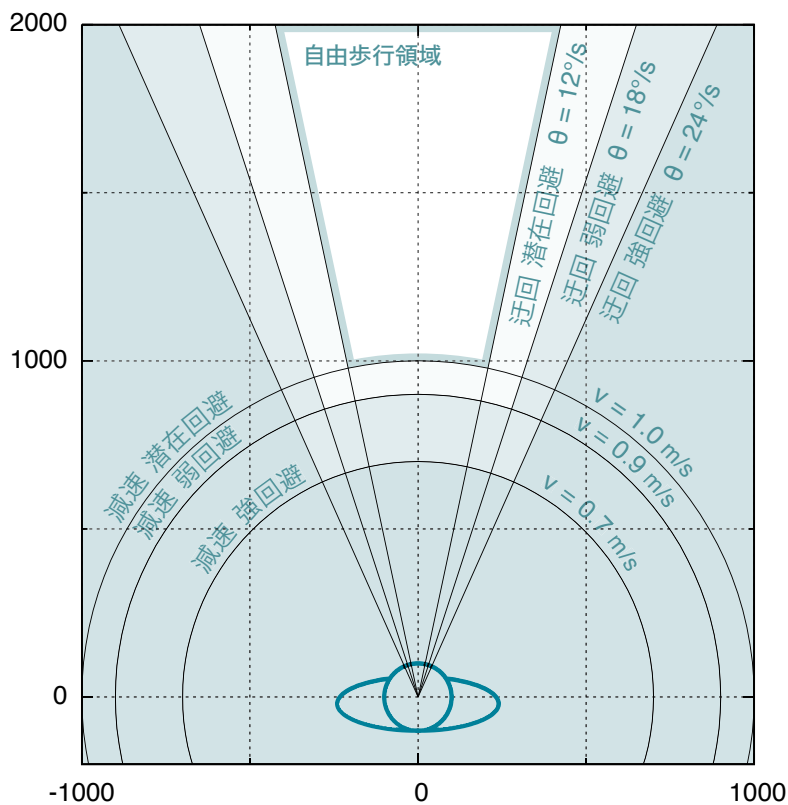


図3.21 歩行者主体移動軌跡図の領域区分

各実験条件での代表試行の歩行者主体移動軌跡図を図3.22から3.33に示す。以下、事例を挙げながら図から読み取れる回避シーケンスの叙述をおこなう。

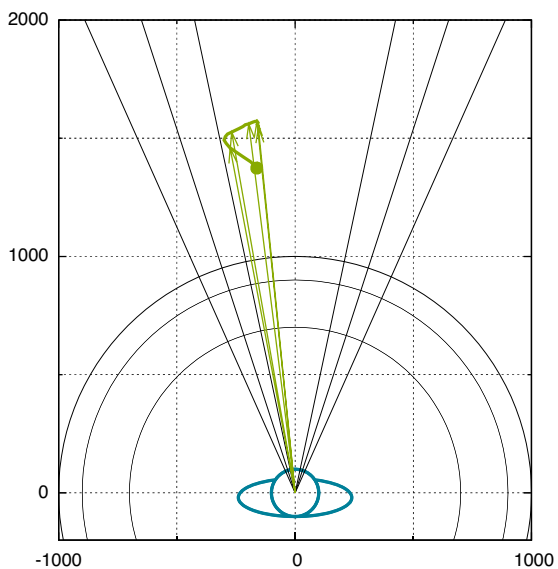


図3.22 歩行者主体移動軌跡図
(密度1 / 180°)

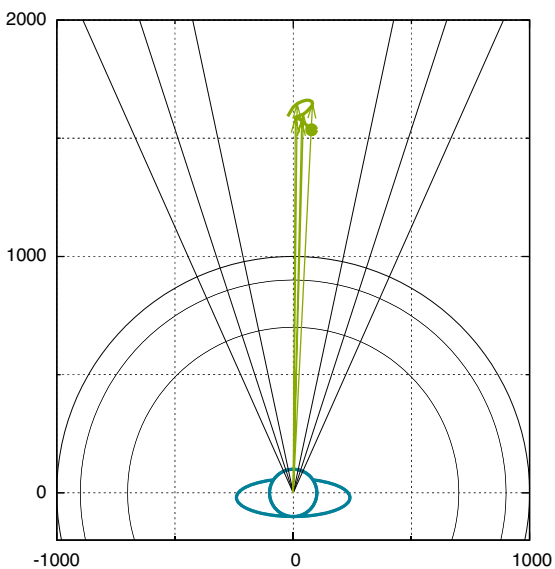


図3.23 歩行者主体移動軌跡図
(密度1 / 135°)

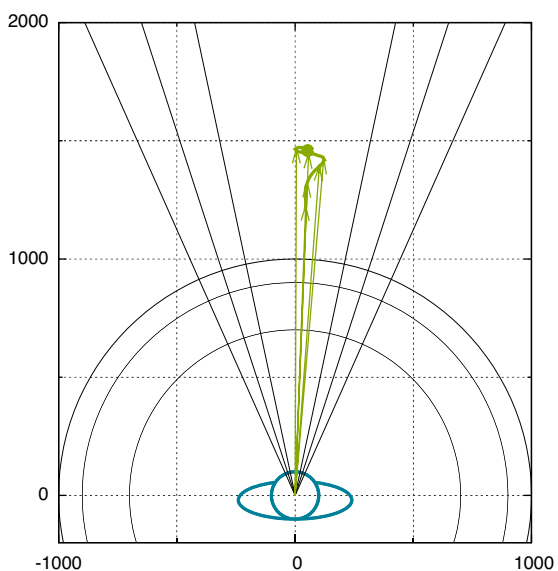


図3.24 歩行者主体移動軌跡図
(密度1 / 90°)

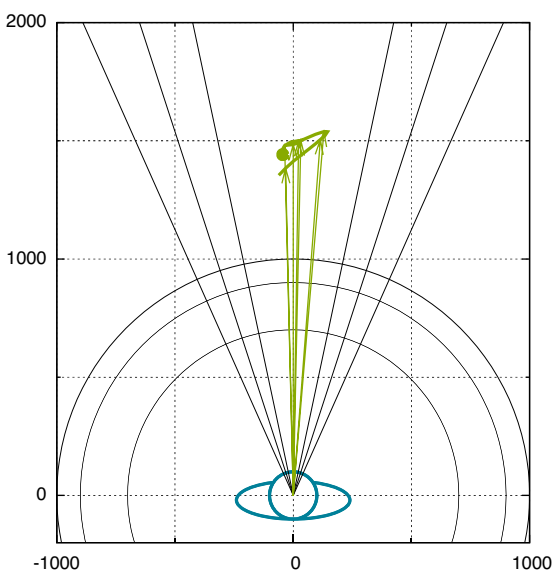


図3.25 歩行者主体移動軌跡図
(密度1 / 45°)

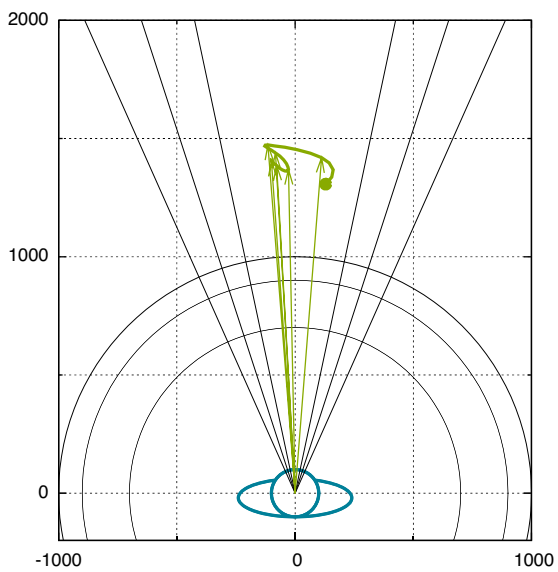


図3.26 歩行者主体移動軌跡図
(密度II / 180°)

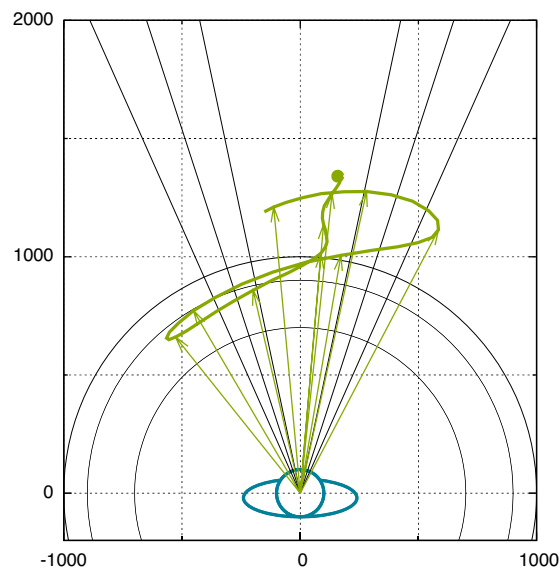


図3.27 歩行者主体移動軌跡図
(密度II / 135°)

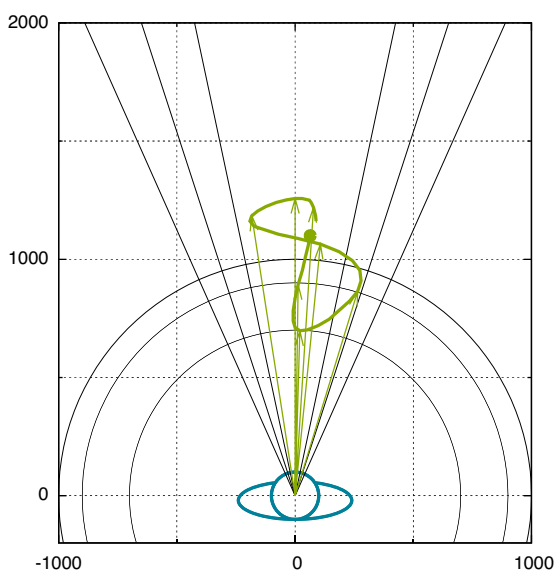


図3.28 歩行者主体移動軌跡図
(密度II / 90°)

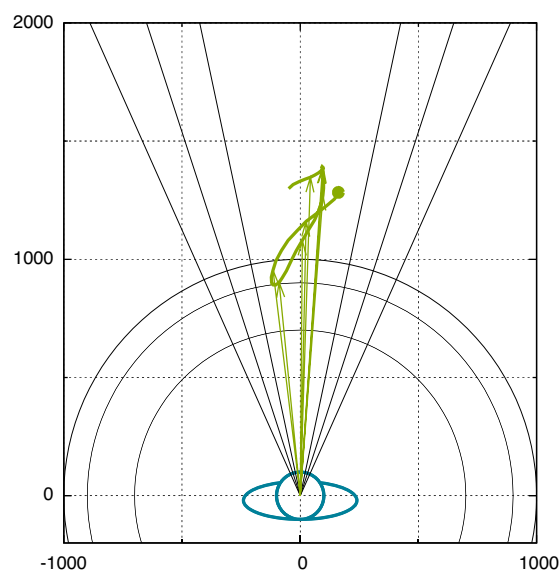


図3.29 歩行者主体移動軌跡図
(密度II / 45°)

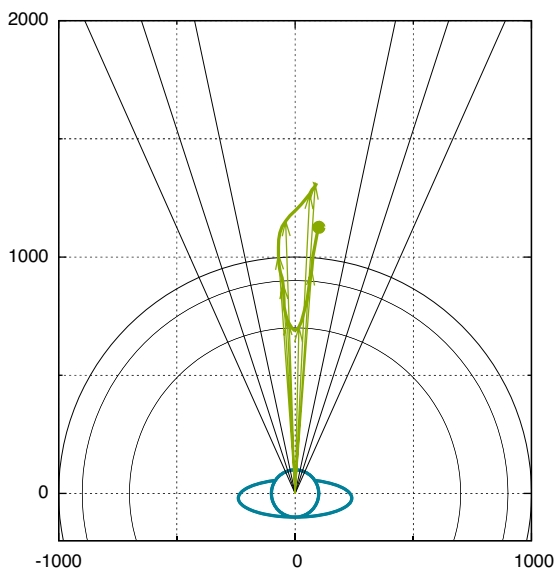


図3.30 歩行者主体移動軌跡図
(密度III / 180°)

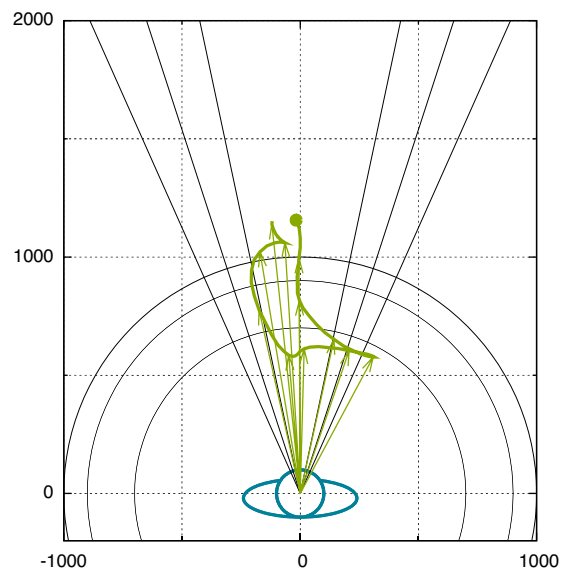


図3.31 歩行者主体移動軌跡図
(密度III / 135°)

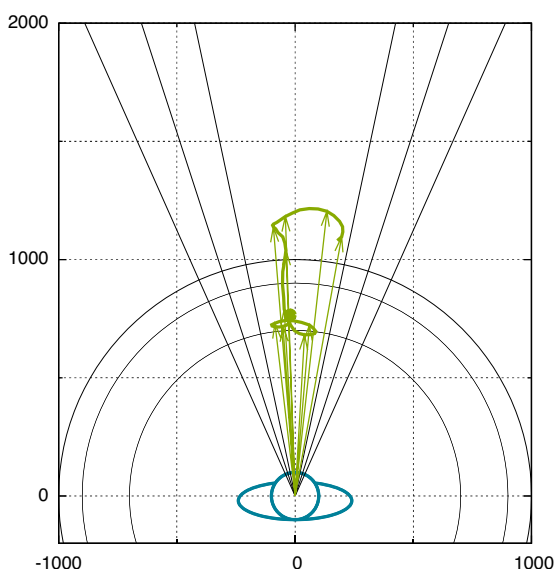


図3.32 歩行者主体移動軌跡図
(密度III / 90°)

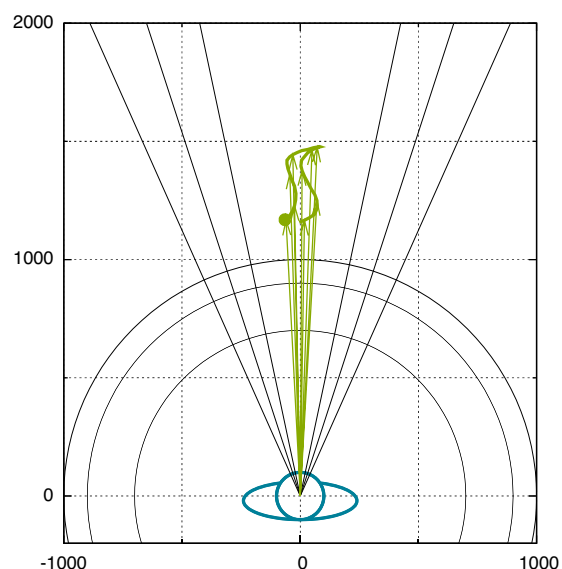


図3.33 歩行者主体移動軌跡図
(密度III / 45°)

まず、回避がない限り速度と移動方向は一定となる。この場合、歩行者は自由歩行速度で直進している。図3.22, 23, 24, 25などで軌跡が前方1点に集まる様が見て取れる。一方、回避行動が行われた図3.27, 28, 31, 32などのケースを見ると、回避が終わるとすみやかに状態が回復し軌跡が図中央に戻り自由歩行になることがわかる。図3.31などの矢印の疎密から、このときの回避行動は素早く行なわれるのに対し回復は速やかにだがゆっくりと起っていることが読み取れる。図3.30は減速回避のみが発生した事例となる。図3.24, 27, 28, 31など迂回回避が行なわれている事例に目を向けると、回避行動としては迂回の前段階と

してまず減速が起こり、そのあと迂回が行なわれる様子が見て取れる。歩行速度 1.0 m/s を超える状態から減速せずに直接迂回回避が行なわれる例はみられなかった。

また、本研究では速度変化において減速による回避行動に着目していたが、事例数は1であるが図3.33では群集を避けるために歩行速度を早めることで回避を行なったことがわかる。

3.4. 考察

3.4.1. 進入角度・群集密度からみる回避の段階

歩行者に負荷がかかるような強度の回避行動をより発生させない群集流交差条件を探るため、試行毎に横断者と群集流において各歩行者それぞれの最大回避強度を算出し、それを実験条件毎に強度別に積算した。試行中に歩行者がとった回避行動のうち、潜在回避・弱回避・強回避の順で最も強度が高いものが最大回避強度となる。そのグラフをマトリクス状に配置したものが表3.7-3.12である。値は3回分の試行の積算値であり、単位は人となる。実験回数に欠損がある実験条件については、合計値を有効な試行回数で割ったのち他の条件に合わせ3倍することで補正をし、3回分の実験の合計値となるように割合を合わせた。

表3.7 横断者の減速回避

密度	↓ 180°			↙ 135°			← 90°			↘ 45°		
	潜在	弱	強	潜在	弱	強	潜在	弱	強	潜在	弱	強
I												
II						2		1			1	
III					1	2						1

表3.8 群集流の減速回避

密度	↓ 180°			↙ 135°			← 90°			↘ 45°			
	潜在	弱	強	潜在	弱	強	潜在	弱	強	潜在	弱	強	
I						1					2	2	
II		1			4	1		6	4	4		6	
III					2	7	4		2	2		7	2

表3.9 横断者の迂回避

密度	↓ 180°			↙ 135°			← 90°			↘ 45°		
	潜在	弱	強	潜在	弱	強	潜在	弱	強	潜在	弱	強
I												
II						2		1	2			1
III		1	1		1	2		1	1			1

表3.10 群集流の迂回避

密度	↓ 180°			↙ 135°			← 90°			↘ 45°			
	潜在	弱	強	潜在	弱	強	潜在	弱	強	潜在	弱	強	
I						1							
II					4	1	2		6	1	1		3
III		2			4	3	1		2		1		

表3.11 横断者のひねり回避

密度	↓ 180°	↙ 135°	← 90°	↘ 45°
	潜在 弱 強	潜在 弱 強	潜在 弱 強	潜在 弱 強
I		1		
II		1 2	1 1	
III	3	1 2	2	1

表3.12 群集流のひねり回避

密度	↓ 180°	↙ 135°	← 90°	↘ 45°
	潜在 弱 強	潜在 弱 強	潜在 弱 強	潜在 弱 強
I		2		1
II	1	3 2	2 1	
III	5 5 13	4 2 6	2 5	

密度Iでは観察できる強度の回避行動はほぼ出現しないが、密度II・密度IIIでは横断者・群集流グループ共に回避行動が出現している。進入角度180°では、群集流の密度が低いときは回避行動がみられないが、密度IIIになると横断者・群集流グループともに主に強いひねりで回避しており、ほか横断者の減速、群集流グループの潜在的な迂回などの回避行動がみられた。進入角度が135°、90°、45°での密度II, IIIにおいて、横断者・群集流ともに回避行動がとられるが進入角度45°では135°・90°と異なり強回避が発生するには至らない。

3.4.2. 進入角度の違いによる横断者と群集流の関係性の変化

本実験では横断者の進入角度をパラメータとして取っているが、進入角度が異なると、①横断者と群集流の相対速度、②群集流グループの歩行者から横断者が視界に入るか否かの2点が異なる。本実験条件においては進入角度が大きくなるほど相対速度は大きくなり、また横断者の視認性は上がる（表3.13）。相対速度は小さくなるほど回避に余裕ができるため回避強度の高い回避をとる必要性は下がる。この2点の違いが、同じ群集密度でも回避行動の出現の仕方に差異があった要因であると考えられる。

表3.13 進入角度による横断者と群集流の関係性の違い

	進入角度			
	↓ 180°	↙ 135°	← 90°	↘ 45°
相対速度	大きい	←		小さい
群集流からの横断者の視認性	よく見える	→		視覚に入らない

3.4.3. 回避強度と歩行快適性の関係

この回避強度の結果は実験参加者の「歩きにくさ」のアンケート結果（表3.4）と傾向が一致している。そこから、物理的な回避行動の強度は歩行者の心理的な歩行快適性に影響を与えていると考えられる。歩行の3変量と回避強度によるこのアプローチは歩行者の移動データのみしか必要としないため、この回避強度の評価をシミュレーション結果などにあてはめることにより、移動データから心理的な歩行のしづらさを推定し評価することも可能であると考えられる。

3.4.4. 短時間歩行パス動画からみる回避行動

密度Iでは歩行者の周りに十分な調整空間が存在するため、観察できる強度の回避行動は起こらない。同様に横断者の進入角度が180°の場合においても密度が低いときは回避行動がないが、密度IIIになると群集流グループの歩行者間隔が身体幅以下になるため横断者の減速、群集流グループの潜在的な迂回などの回避行動がみられた。

進入角度が135°、90°、45°での密度II, IIIにおいては、横断者・群集流グループ共に回避行動がみられた。角度135°では特に横断者が調整して回避行動をおこない、90°では横断者・群集流が対等な関係で回避行動を行なっている。45°は強い回避行動が発生しておらず、これは、進入角度45°では横断者-群集流間の相対速度が下がること、また群集流グループは横断者が視界に入りづらいため回避行動を起こしにくいことに起因すると考えられる。

3.4.5. 歩行者主体移動軌跡図からみる回避シーケンス

歩行の基本状態としてまず 1.0 m/s 以上の安定した速度で前方目的方向を目指す自由歩行状態があり、そこから進行方向上に障害物があるとき回避状態に入り、回避が終わるとまたすみやかに状態の回復が行なわれ自由歩行に戻る。歩行者の回避行動は、まず減速による間合いの調整を試み、のちに必要があれば迂回フェーズに入るという回避シーケンスモデルが考えられる。

① 迂回行動でみられる歩行者主体移動軌跡図の特徴

歩行者が移動方向を変更すると、軌跡がX軸方向に展開する。ここで迂回避に注目すると、歩行者は他歩行者を避けるために移動方向を変更し迂回をする。そしてそのあとにかならず移動方向を修正するために先ほどの移動方向の変更と逆の方向に移動方向を変更する。そのため、軌跡図内でのプロットはかならず左右両方向に展開し、図中央付近に回復することとなる。

② 歩行者の意思による進行方向変更と迂回避行動の分離

本実験では実験条件として進行すべき方向があらかじめ与えられていたため、迂回避が行なわれない自由歩行ではかならず直進することが期待できる。そのため、歩行者の移動方向の変更をそのまま回避行動ととらえることができた。これは、歩行者の志向する進行ルートが直線である限りは成立する。しかし、歩行者が元来から進行方向を変更する予定であったときも、X軸方向への軌跡プロットの展開が発生する。歩行者の回避行動を抽出するには、この進行方向の変更を迂回避行動から分離する必要がある。

2章のケーススタディから、迂回避ではかならず軌跡プロットが左右両方向に展開することがわかっている。歩行者の意思による進行方向の転換の場合は、変更された移動方向を戻す必要がないため、軌跡図内でのX軸方向の展開が片面のみになることが期待できる。

3.5. まとめ

3.5.1. 方法

被験者を用いた実験室実験を通じて、単独の歩行者が群集流を横断するときの双方の回避行動について、群集流の密度および横断者の進入角度の影響を解析した。

移動方向バラ図・短時間歩行パス図という新しい分析・記述方法を用いて、群集流と歩行者の時系列の位置座標をもとに詳細な歩行状態、加えて群集流を横断する歩行者が迂回・減速・ひねりで衝突を回避する状況を視覚的に示せることを確認した。それら回避の強度を迂回避・減速回避・ひねり回避においてそれぞれ3段階に区分し、そのしきい値を定め検証をした。

さらに、歩行者主体移動軌跡図を用いて、時間スケールを含む歩行者回避行動シーケンスを歩行者の視座による1つの図で提示した。この図示法により定性的にとらえていた回避の特徴を図解により詳細に検討可能となり、減速と迂回の二者が同時に起こるメカニズムを統合してとらえられた。

3.5.2. 結果

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

回避強度:

- 歩行者の回避行動は「減速」「迂回」「ひねり」の3種類の物理行動に分類できる。
- 横断する群集流の密度が高くなるほど強い強度の回避行動が現れる。
- 回避行動の種類と強度は、群集を横断する歩行者の進入角度によって異なる。

回避シーケンス:

- 歩行者が直進しているとき、歩行者の回避行動シーケンスは主に以下のように記述できる。
 - まず減速によって間合いを調整し、さらに必要があれば迂回フェーズに入る。
 - 迂回避では移動方向を一度変更したのち、回復のため迂回した方向と逆の方向に移動方向が変化する。
 - 回避行動が終了すると、状態は速やかに安定した歩行に戻る。

歩行快適性:

- 群集流グループの群集密度がより低いとき、横断者はより歩きやすいと感じる。
- 同じ群集密度の群集流でも、横断する角度によって心理的な歩行快適性の評価は変化する。

- ・ 回避強度と横断者が心理的に感じる歩行快適性には強い共通性がみられた。

また、本実験条件からは結果として以下の値を得た。

回避強度:

- ・ 密度I (0.25 人/m²) の場合は歩行者の周りに十分な調整空間が存在するため、観察できる強度の回避行動は起こらない。密度II (1.00 人/m²) ・密度III (2.00 人/m²) では、横断者・群集流グループ共に回避行動がみられた。
- ・ 横断者の群集流への進入角度が180°の場合、群集流の密度が低いときは回避行動がみられないが、密度III (2.00 人/m²) になると群集流グループの歩行者間隔が身体幅以下になるため、横断者の減速、群集流グループの潜在的な迂回などの回避行動がみられた。
- ・ 横断者の進入角度が135°、90°、45°での密度II, IIIにおいては、横断者・群集流グループ共に以下の回避行動がみられた。
 - ・ 進入角度135°では特に横断者が調整して回避行動をおこなう。
 - ・ 進入角度90°では横断者・群集流が対等な関係で回避行動をおこなう。
 - ・ 進入角度45°では強い回避行動が発生していない。これは、進入角度45°では横断者-群集流間の相対速度が下がること、また群集流グループは横断者が視界に入りづらいことに起因すると考えられる。

歩行快適性:

- ・ 本実験においては、横断者は、進入角度180°のときは密度II (1.00 人/m²) を超えると歩きづらいつ感じ、それ以外の進入角度である135°、90°、45°では密度I (0.25 人/m²) を超えると歩きづらいつ感じた。

群集流を横断する歩行者の進入角度と群集密度を条件とした実験を通して、これら条件が回避の強度に与える影響を定量的に示した。回避強度の段階に対応した速度・角度変化の指標で評価することで、群集流の回避行動からみた歩行快適性の検討が可能になると考えられる。

3.5.3. 今後の展望

本研究では回避強度の算出と評価までにとどまり、回避行動の発生条件を得るにまでは至っていない。今後この歩行者回避行動をシミュレーションモデルとして利用するためには、それぞれの回避行動が出現する条件を明らかにする必要がある。

また、実験条件においても直進での横断のみを扱っている、群集流グループが格子状の隊列を組んでいるなど状況が限定されている。歩行快適性の評価については歩行者の回避

行動の強度算出から歩行快適性が推算できるところまでは示せたが、汎用的な評価指標としての回避強度水準のしきい値についてはより多様な条件下での検証などさらなる検討が必要である。

注

注1) 横断時の歩行者同士の相互作用は近接距離によるため群集流グループの人数の違いは無視できる。

注2) 一定速度の直進する自由歩行状態から外れる行動であり、速度変化・方向変化を伴うもの。

4. 開口部通過における群集の行動性状

4.1. はじめに

4.1.1. 背景

群集の開口部での通過流動の検討は、非常時の避難時間および平常時の多人数利用施設での入退出時間を予測、評価するために広く行われている。わが国では新・防災計画指針において扉通過時の流動係数を $1.5 \text{ 人/m}\cdot\text{s}$ として避難時間計算することが定められている。この値は開口部通過量計算の係数として平常時の施設計画にも広く用いられているが、過去の調査や実験ではこの基準値よりも高い値が計測されることもみられる。

理論的な開口部の流動量は数式から歩行者の通過速度と開口幅という2つの変数により決定され、歩行速度を一定であると仮定した場合は開口幅により一次関数的に変化すると一般的に考えられている。これは、流動係数は開口幅の影響を受けない一定値であるという立場である。

しかしながら、歩行者は実際には身体幅をもつ物体であるため、この体積をともなう人体が同時に開口部を通過できる人数は開口幅と共に身体幅によっても制約を受ける。この身体幅による影響は、とくに開口幅が狭いときに顕著に現れると考えられる。これは、流動係数は歩行速度が一定の状況においても開口幅の影響を受けることを意味する。ここで、日本人の成人の平均身体幅は概ね $400 \text{ mm} - 450 \text{ mm}$ である¹⁾。通常の居室に付随する扉は 700 mm から $1,500 \text{ mm}$ 程度であるため、身体寸法は十分にこの影響の範疇である。さらに、歩行者は歩行時に身体をひねることにより移動方向に対する身体幅を調整することが3章から明らかになっており、このため流動係数算出に有効となる歩行者の身体幅は開口部と正対する値のみで一意には決定できない(図4.1)。

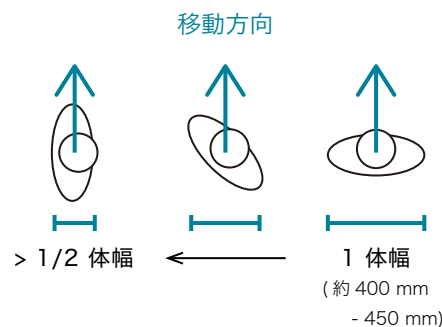


図4.1 移動方向に対する体幅と身体の向き

以上のことから、歩行者の開口部通過の流動係数決定メカニズムは同じ直径を持つ球体の単純粒体よりも複雑であり、この実態を探ることは今後の避難設計やシミュレーションのアルゴリズム作成の上で寄与できるところが大きいと考えられる。

4.1.2. 既往研究

近年の被験者を用いた開口部通過実験としては、Liao ら²⁾による様々な形状のボトルネックでの群集の滞留を分析したものや、Zhang ら^{3), 4)}による群集の分布と流動に対する開口幅の影響を見たものが挙げられる。山本ら⁵⁾が行なった研究は、歩行者が体積を持つ物質であることに着眼し鋼球を用いて歩行者の開口部通過の再現を試みている。この実験は、開口幅に対する流動量の変化は一次関数ではなくステップ関数となることをすでに示唆している。ただし、この実験で用いられた鋼球は完全球体であるため、実際の歩行者は縦横幅が異なり、かつ個体間で緩衝空間を保とうとする性状が欠落している。植竹ら⁶⁾による劇場および電車の退出時の流動調査でも同様にステップ関数になる傾向がみられている。ここで植竹らは歩行者の身体幅に余剰空間を足した幅を単位とするモデルを立てているが、歩行者が整列して開口部で身体をひねらず直進して通過することを前提においている。Schadschneider ら⁷⁾はボトルネックの入り口に隊列ができる「列形成」(lane formation)の存在を指摘している。また Hoogendoorn ら⁸⁾は 3 m 未満の幅員のボトルネックで歩行者が層ごとにずれて通過する「ジッパー効果」(zipper-effect)を実験から観察し人間の身体幅との関係性を論じている。今西ら⁹⁾⁻¹¹⁾による単独歩行者の群集流通過実験では、歩行者が他人を避ける際に身体をひねることが確認されている。このひねりは歩行者間の隙間を通過するときに自身の身体幅を狭めるためにも行われることが観察されている。心理学領域の研究としては、Warren ら¹²⁾による単独歩行者の間隙通過実験がある。この実験で Warren らは、間隙通過時の歩行者の肩のひねり方を計測し、間隙が肩幅の1.3 倍以下となるとき歩行者が肩をひねって間隙を通過することを明らかにした。これは、歩行者の肩のひねり行動が通過する隙間と身体寸法に依存することを示している。

しかし、実験を通して歩行者群集の開口部通過時の流動係数を精緻に研究した事例は少なく、かつ歩行者の身体幅やひねりといったボリュームをもつ歩行者が動的に通過するものとしてはまだとらえられていない。

4.1.3. 目的

本研究の目的は、実験室実験を通じて、歩行者の身体幅や肩のひねり行動が開口部通過における歩行者流動の流動量および挙動のメカニズムへ与える影響を明らかにすることである。

4.2. 方法

4.2.1. 開口部通過実験

歩行者群集が開口部を通過する実験室実験を行なった。実験参加者は大学生の男女計98人で、これを無作為に49人毎の A・B 2群に分けることで全実験条件を各2回繰り返す。被験者の身体特徴の分布は表4.1および図4.2–4.5に示すとおりである。2群間に有意な身体差はみられなかったが男女比を含め分布には若干の差異がある。

表4.1 実験参加者特性

	A群	B群	t検定 P値	
性別 (男/女)	25 / 24	29 / 20	-	
身長	平均	166.6 cm	166.2 cm	0.73
	標準偏差	9.6 cm	8.0 cm	
体重	平均	59.1 kg	58.0 kg	0.51
	標準偏差	10.4 kg	8.8 kg	

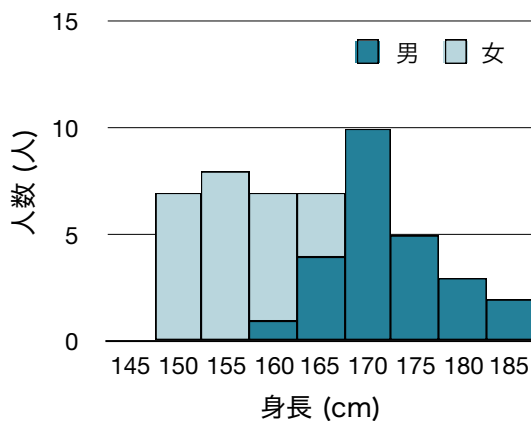


図4.2 身長分布 (A群)

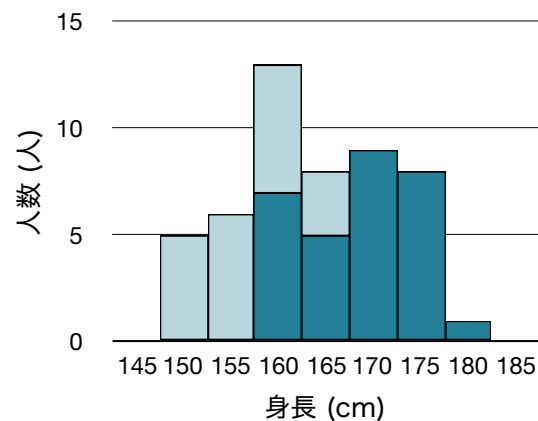


図4.4 身長分布 (B群)

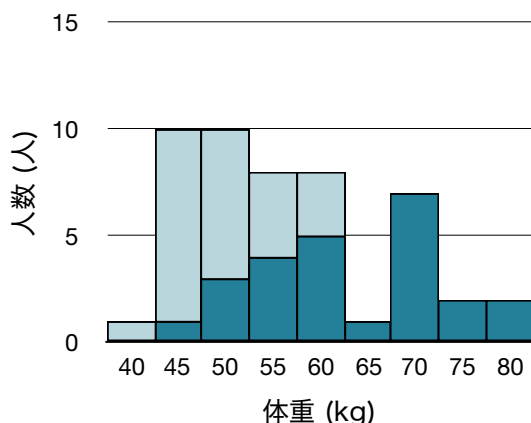


図4.3 体重分布 (A群)

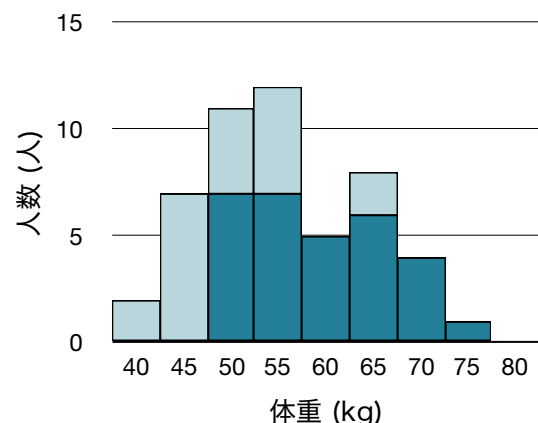


図4.5 体重分布 (B群)

開口部の幅を実験パラメータとし、800 mm から 900 mm、1,000 mm、1,100 mm、

1,200 mm と 100 mm ごとに通過する開口幅を変化させる。実験参加者は開口部から 600 mm 手前の幅 5,000 mm 奥行き 3,000 mm の領域内に立ったところから実験を開始する。ただし、開口幅 900 mm と 1,200 mm については、初期状態の影響を観察するために、群集を2列の隊列にしたパターンと、実験開始前の滞留位置を 2.5 m 手前に離れたパターンの異なる2種のレイアウトについても試行した（表4.2, 4.3）。レイアウト2列以外については、隊列などはとくに設けず実験参加者が領域以内で自由に位置を決定し、試行中の追い越しも禁止しない。レイアウト2列は実験開始前の時点で2列に隊列を組んだ状態で待機させた。

各試行前に「避難訓練のつもりで、安全・かつ速やかに開口部を通過してください」と教示をした。実験者の実験開始の合図とともに実験参加者は前方の開口部を通過する。開口部通過後の進路はとくに指定しない。実験時の実験参加者の服装は男女共にズボン、運動靴に統一した。

この実験の様子を①実験室上方からクレーンで吊るした HDD カメラ、および補助のための②前方・③後方2台のビデオカメラの計3台で撮影した（図4.8-4.10）。

表4.2 群集の配置パターン

レイアウト	模式図 ^{注1)}	説明
直前		開口部から 600 mm 手前の幅 5,000 mm 奥行き 3,000 mm の領域内に配置。
2.5 m 手前		開口部から 2,500 mm 手前の幅 5,000 mm 奥行き 3,000 mm の領域内に配置。
2列		実験参加者に2列の列を組ませ、常にその列を保ったまま開口部を通過させる。先頭の開始箇所は「直前」と同じ。

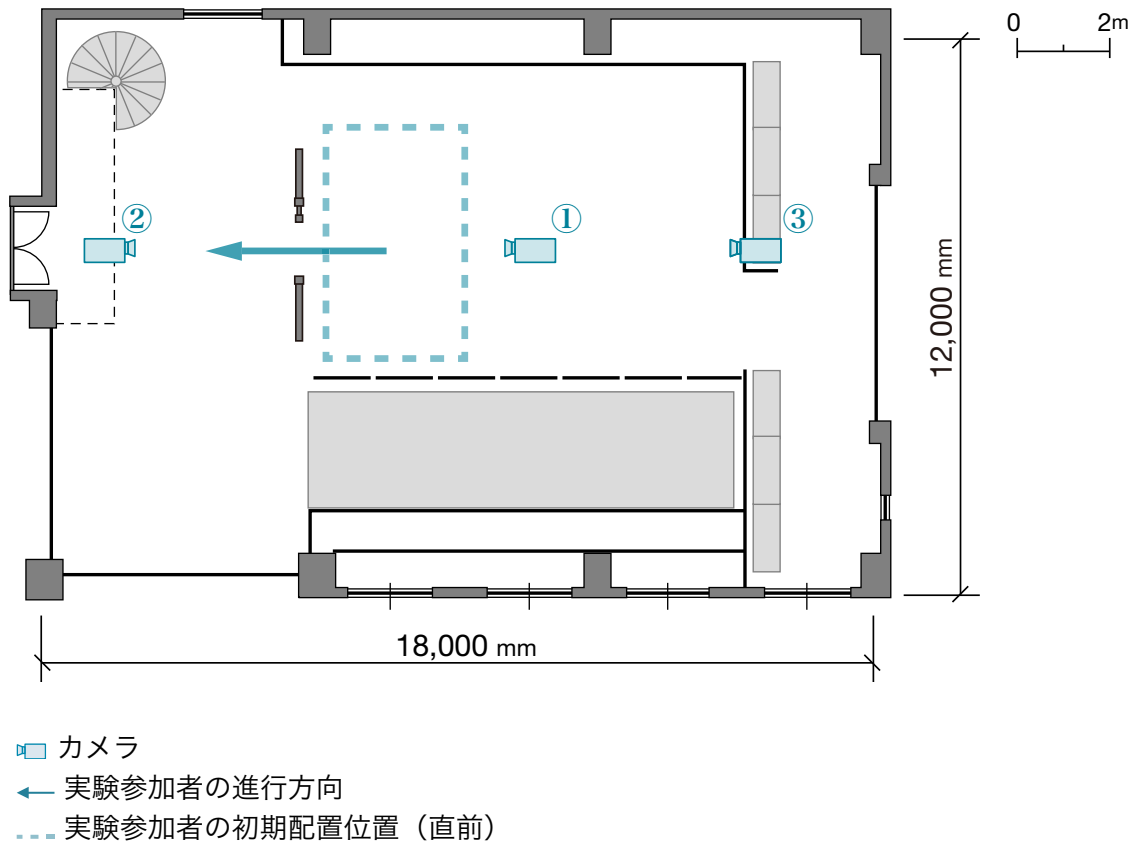


図4.6 機材配置 (平面)

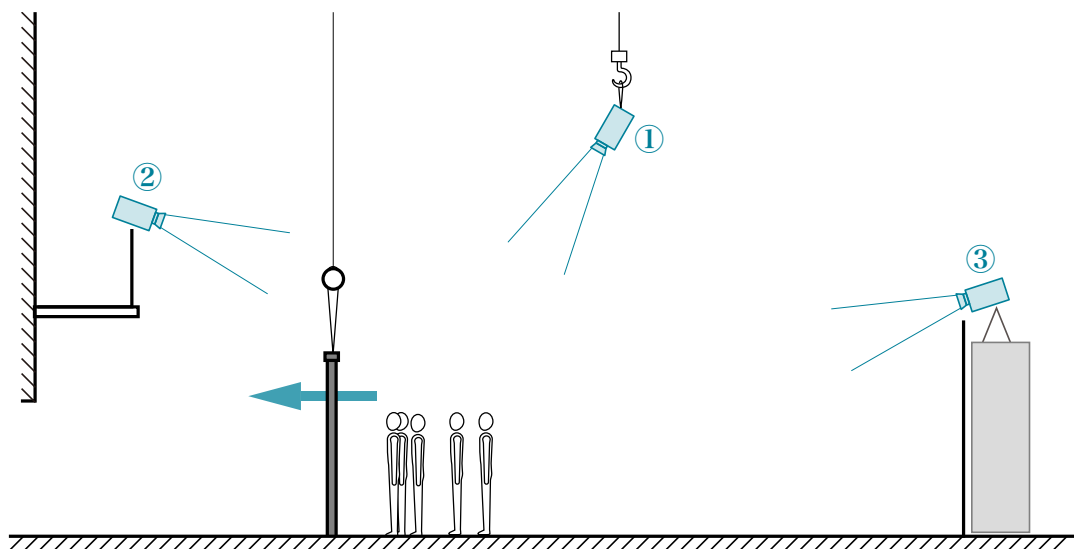


図4.7 機材配置 (立面)



図4.8 ビデオ映像 (カメラ①)



図4.10 ビデオ映像 (カメラ②)



図4.9 ビデオ映像 (カメラ③)

表4.3 実験条件と試行順序

レイアウト	条件 開口幅	試行順序	
		A群	B群
直前	1,200 mm	14	5
	1,100 mm	15	6
	1,000 mm	16	7
	900 mm	17	8
	800 mm	18	9
2.5 m 手前	1,200 mm	12	3
	900 mm	13	4
2列	1,200 mm	10	1
	900 mm	11	2

なお本稿では、図4.11で示すとおり開口の方向を X、実験参加者が進行する方向を Y とし、開口部左端を x, y の原点と置く。

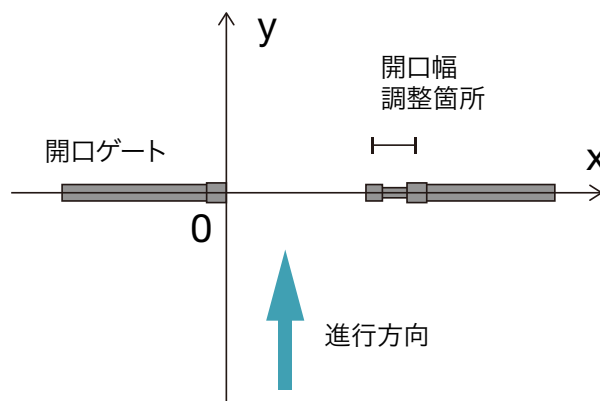


図4.11 実験空間座標系

4.2.2. 開口部通過時間の計測

撮影したビデオを観察し、実験参加者各々が開口部を通過した時間を計測した。この値から、最初の参加者が通過した時間から最後の参加者が通過した時間までを開口部通過の所要時間とし、各試行の流動量および流動係数を算出した。

4.2.3. 歩行軌跡および肩の向き抽出

クレーンで上方から撮影したビデオ動画から、実験参加者の歩行軌跡ならびに肩の向きを抽出した。動画から 0.5 秒毎に静止画を切り出し、それぞれ静止画上ですべての実験参加者の頸部および両肩の座標をプロットし求める。このプロットは画像解析ソフト ImageJ と、独自に開発した ImageJ マクロを用いた。次に、得られた映像上の座標を実験室平面上の位置に補正し、実験参加者の位置と肩の向きを算出した (図4.12)。

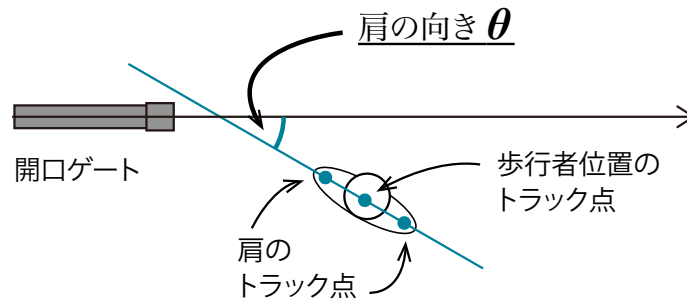


図4.12 歩行者の位置と肩の向き算出方法

4.2.4. 開口部通過時点での通過位置および肩の向き算出

4.2.3で算出した歩行軌跡から開口部通過時の開口部内でのX軸方向の通過位置およびそのときに肩の向きを算出する。開口部通過直前と直後のデータを抜き出し、各地点から開口部へのy座標距離をもとにした比例配分から通過時の値を推算する (図4.13, 4.14)。この結果から歩行者が選択した通過位置と肩の向きを分析する。

$$\text{開口部通過時のX座標: } x_{y=0} = \frac{y_2 \cdot x_t + y_1 \cdot x_{t+0.5}}{y_1 + y_2}$$

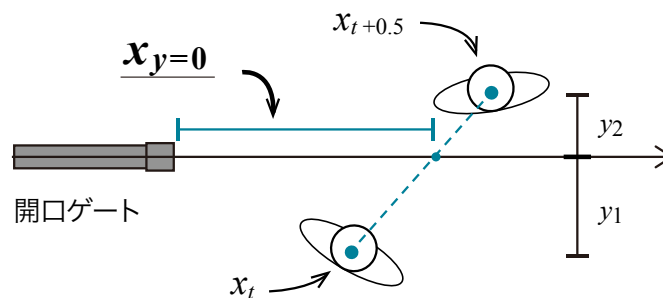


図4.13 開口部通過時点のx座標算出方法

開口部通過時の肩の向き:
$$\theta_{y=0} = \frac{y_2 \cdot \theta_t + y_1 \cdot \theta_{t+0.5}}{y_1 + y_2}$$

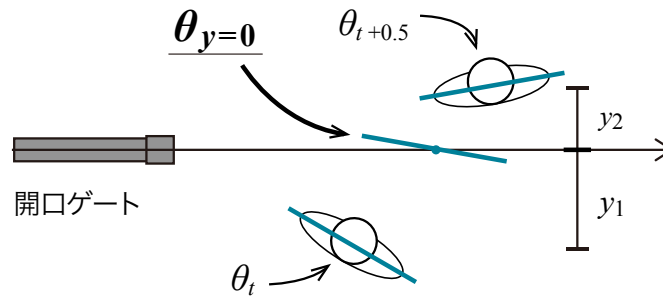


図4.14 開口部通過時点の肩の向きの算出方法

4.3. 結果

4.3.1. 流動係数および流動量

図4.15から図4.20は、それぞれA群とB群の開口部通過人数の時間推移である。開口幅が大きくなるほど全歩行者が通過し終わるまでの時間は短くなる。図4.15と図4.16から、A群では 1,200 mm と 1,100 mm、1,000 mm と 900 mm、800 mm 単独で傾向を同じくするのに対して、B群では 1,200 mm 単独、1,100 mm と 1,000 mm、900 mm と 800 mm でそれがみられるのがわかる。

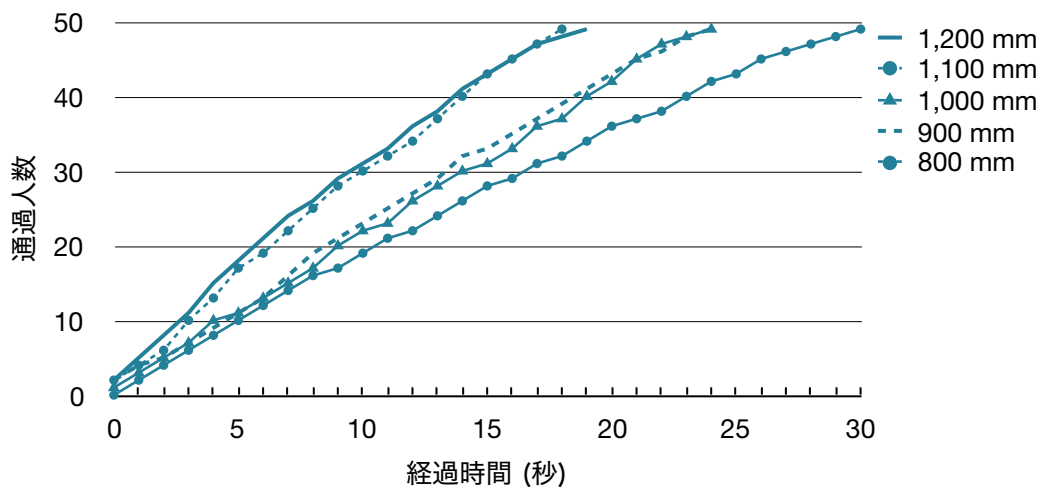


図4.15 「直前」の開口部通過人数推移 (A群)

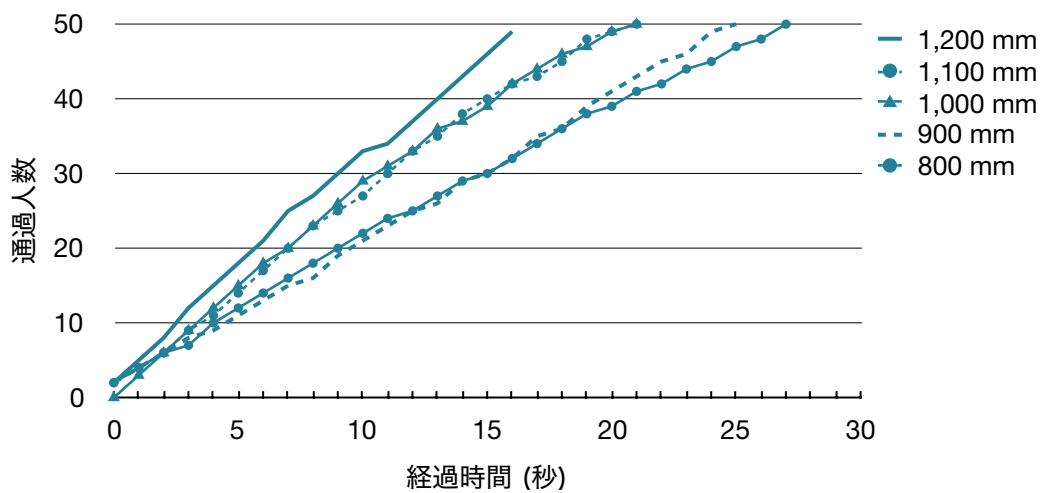


図4.16 「直前」の開口部通過人数推移 (B群)

4章 開口部通過における群集の行動性状

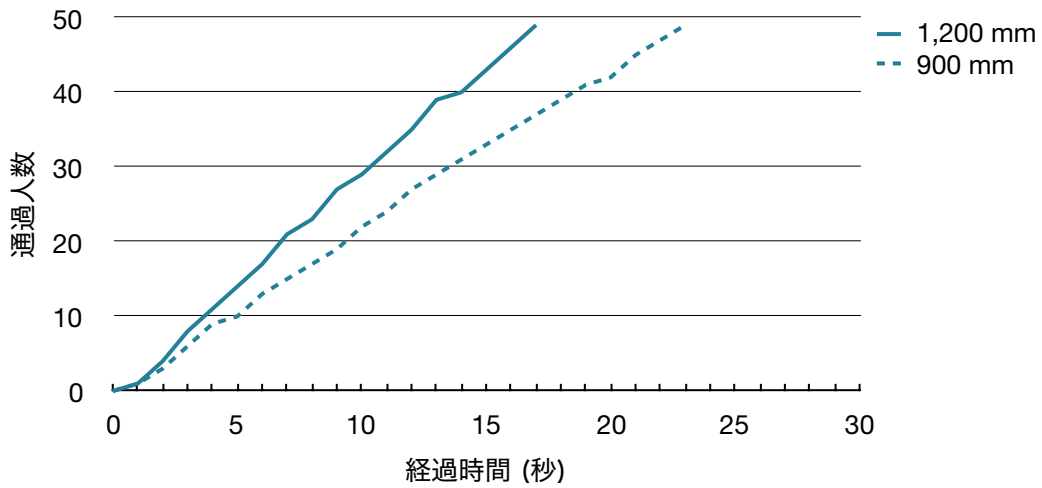


図4.17 「2.5 m 手前」の開口部通過人数推移 (A群)

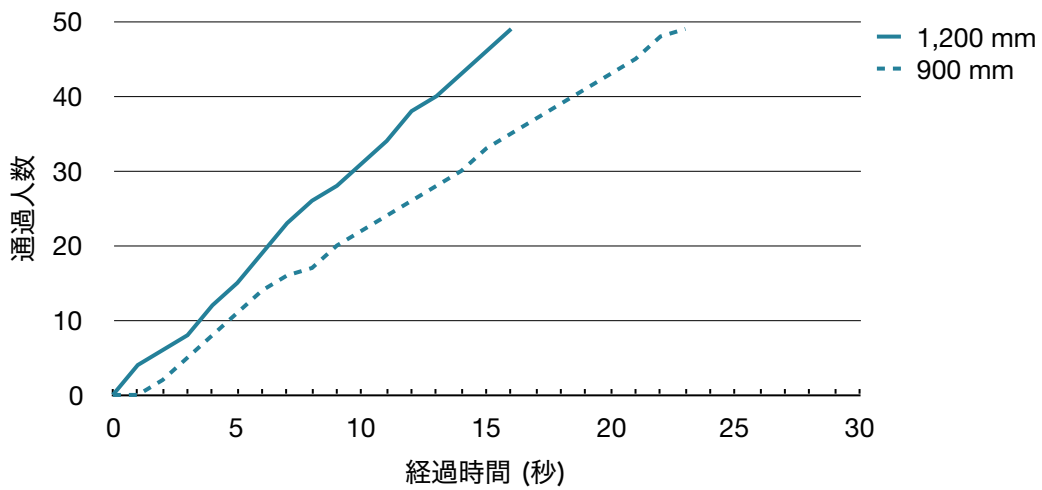


図4.18 「2.5 m 手前」の開口部通過人数推移 (B群)

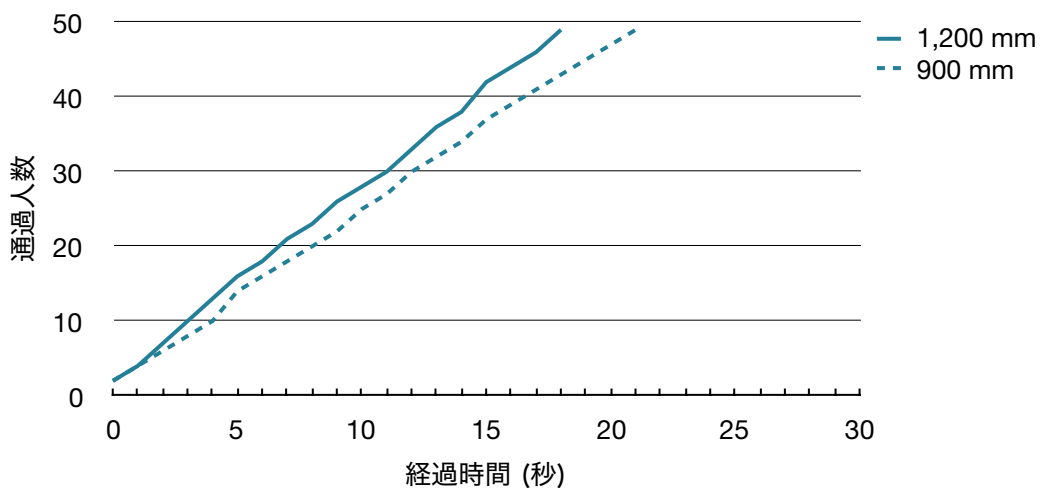


図4.19 「2列」の開口部通過人数推移 (A群)

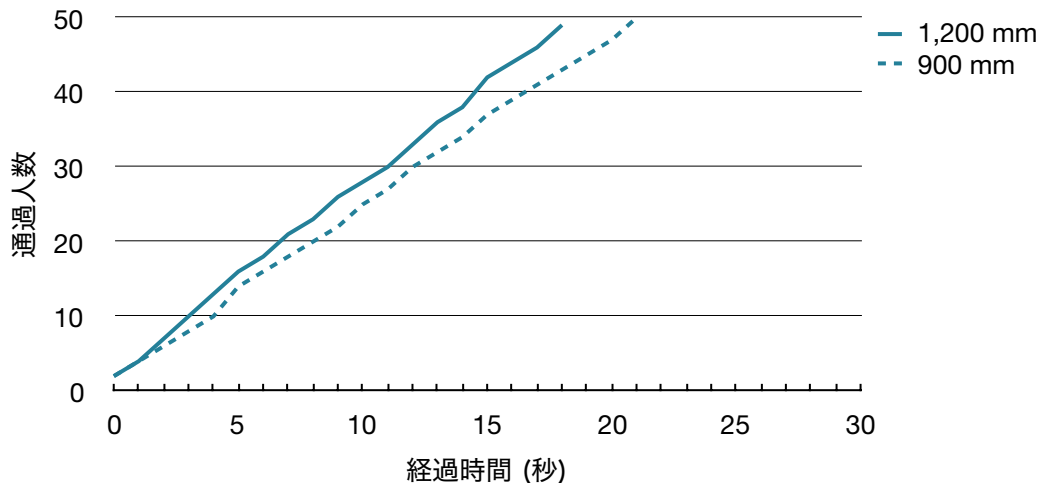


図4.20 「2列」の開口部通過人数推移 (B群)

実験で得られた実験条件毎の流動係数・流動量を表4.4に示す。

表4.4 実験条件毎の流動量および流動係数

実験条件		流動量 (人/s)			流動係数 (人/m·s)		
レイアウト	開口幅	A	B	平均	A	B	平均
直前	1,200 mm	2.50	2.91	2.71	2.08	2.43	2.25
	1,100 mm	2.60	2.37	2.49	2.36	2.16	2.26
	1,000 mm	2.06	2.39	2.22	2.06	2.39	2.22
	900 mm	2.04	1.89	1.97	2.27	2.10	2.18
	800 mm	1.70	1.77	1.74	2.12	2.21	2.17
2.5 m 手前	1,200 mm	2.97	3.13	3.05	2.47	2.61	2.54
	900 mm	2.23	2.19	2.21	2.47	2.43	2.45
2列	1,200 mm	2.23	2.67	2.45	1.86	2.23	2.04
	900 mm	1.99	2.27	2.13	2.21	2.52	2.36

表4.4より、いずれの条件についても、流動係数が避難計算で一般的に用いられている1.5 人/m·s よりもかなり高い数値を指していることがわかる。「直前」では、すべてが2.0 人/m·s を越え、平均は 2.2 人/m·s 前後である。開口部の 2.5 m 手前から開始した「2.5 m 手前」は「直前」と比較してさらに値が高い。これは開口部到達までに加速し通過時の歩行速度が大きくなるためであると考えられる。「2列」で通過した試行は、開口幅1,200 mm と 900 mm で本来一定であるはずの流動量に差がみられた。単独の歩行者が円滑に歩行するためには 600 mm 程度の幅員が必要となること¹⁾から、900 mm は2列に

としてはやや幅が不足しているためであると考えられる。対して、1,200 mm は流動は良好であるが、必要以上の幅であるため流動係数は減少する傾向がある。

「直前」について開口幅と流動量・流動係数の関係を図示したものが図4.21, 4.22である。開口幅と流動量の関係を示した図4.21では、値が一次関数的な変化ではなく 200 mm スパンのステップ関数となった。しかし、A群とB群ではその位相が 100 mm ずれているため、A群とB群の平均を取ると相殺されその値は一次関数的変化に近づく。

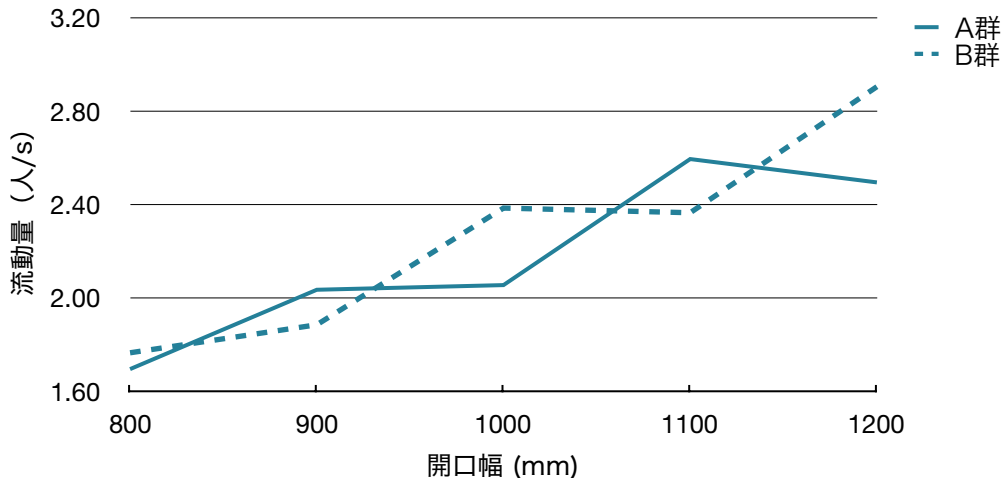


図4.21 流動量と開口幅の関係

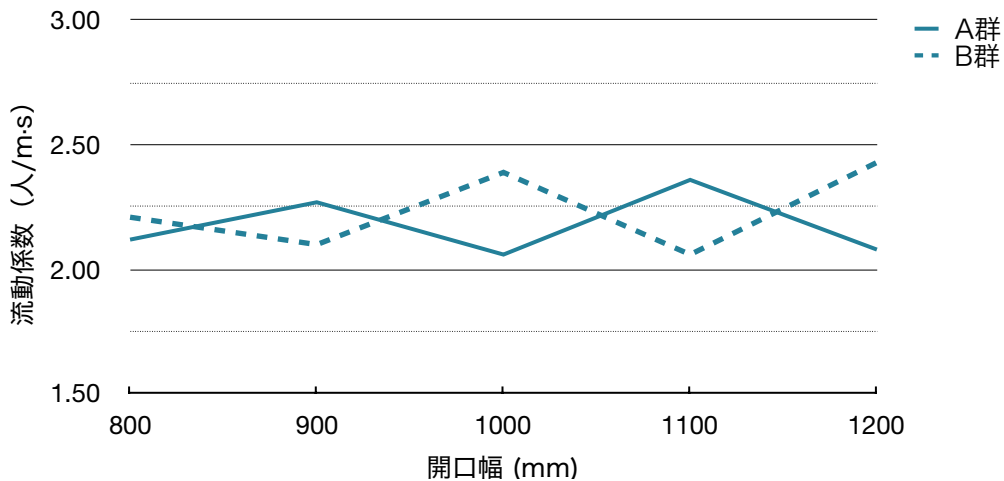


図4.22 流動係数と開口幅の関係

4.3.2. 2群間の開口部通過位置選択の差異

ビデオ観察から開口部通過時の群集の通過に2群間で違いがみられたため、それぞれの開口幅において各実験参加者の開口部通過位置をA群とB群で比較した。代表例として、図4.23–4.26に開口幅 900 mm と 1,100 mm の試行における通過位置のヒストグラムを挙げる。

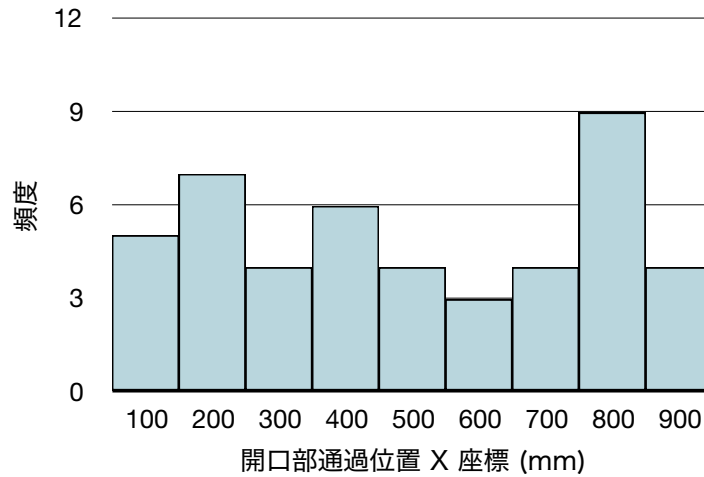


図4.23 開口部通過時のX座標ヒストグラム (900 mm / A群)

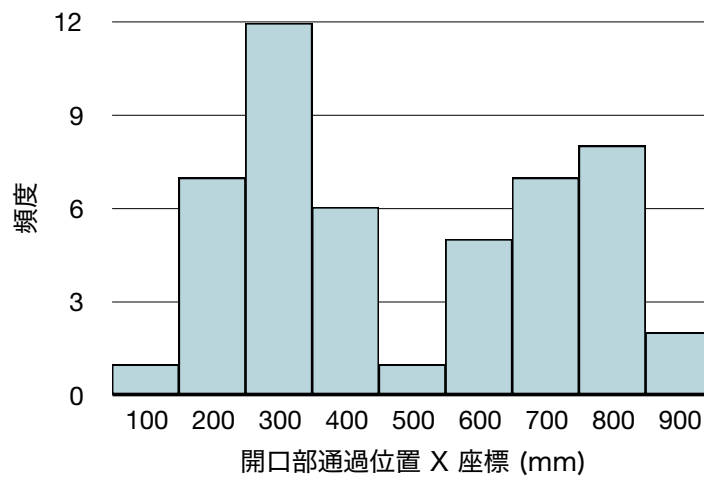


図4.24 開口部通過時のX座標ヒストグラム (900 mm / B群)

900 mm 幅において、B群（図4.24）では通過位置が左右2箇所集中しており、2人が並んで通過する傾向にあることがわかる。一方A群（図4.23）はB群に比べ通過位置が集中していない。同様に、1,100 mm 幅でもA群（図4.25）に比べB群（図4.26）の方が右・中央・左の3箇所に通過位置が集中している傾向が読み取れる。A群とB群で開口部通過位置選択に差異があったことがわかる。

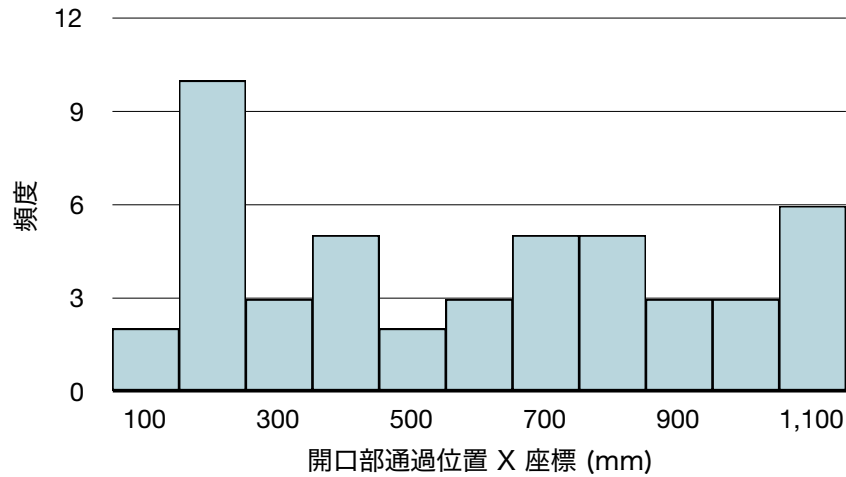


図4.25 開口部通過時のX座標ヒストグラム (1,100 mm / A群)

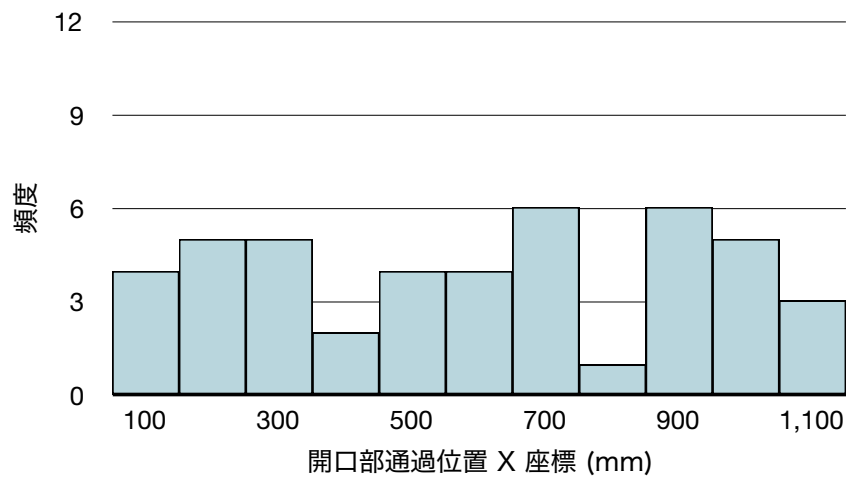


図4.26 開口部通過時のX座標ヒストグラム (1,100 mm / B群)

図4.27-4.36は横軸を開口部のX座標、縦軸を時間 t として、開口部通過時の通過位置とそのときの肩の向きをプロットしたものである。開口部通過時の通過位置と時間経過を読むために作成された。非常に長いグラフであるため、掲載にあたって実験開始から2-16秒の箇所のみを抜き出している。下方向に向かって時間が経過し1秒ごとに補助線がはいる。なお、歩行者に添えられている数字は歩行者の識別子である。開口部端から 250 mm のエリアはグレーで塗り分けられている。250 mm という値については後述する。開口部の同時通過人数により歩行者を色で分類している。同時通過人数の算出としては、まず無彩色のグラフ生成し、通過時間をもとに同時に開口部を通過しているグループをまとめた。データ上の開口部通過時点は推算したものであり通過の同時性を論じるには無視できない誤差が含まれる。そこでより正確な値を得るため実験のビデオ映像と照らし合わせグループピンを補正した。掲載した図4.27-4.36はグループの人数で色を塗り分け再度出力したものである。

4章 開口部通過における群集の行動性状

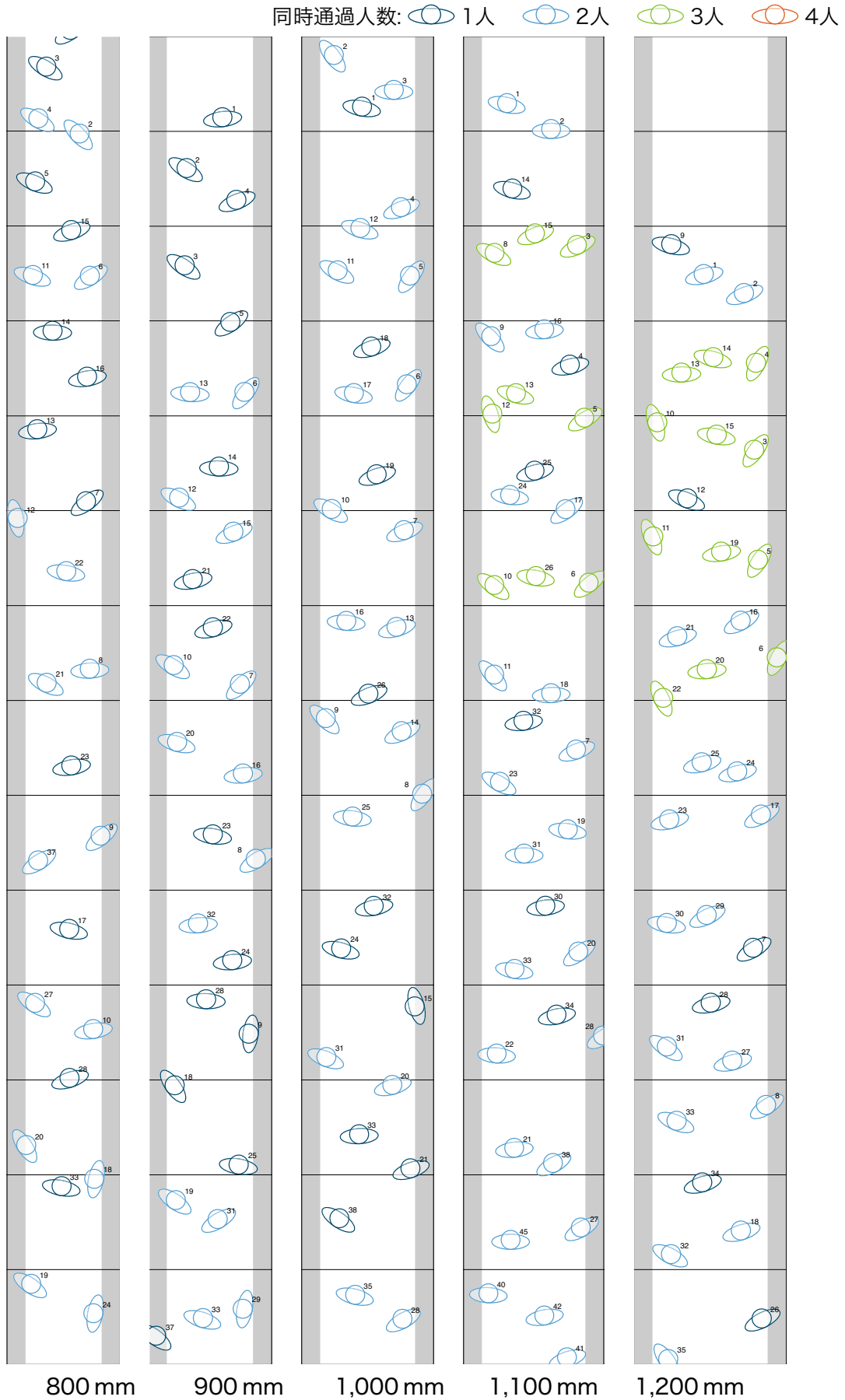


図4.27-31 開口部通過の時間経過 (部分：2秒-16秒 / A群)

4章 開口部通過における群集の行動性状

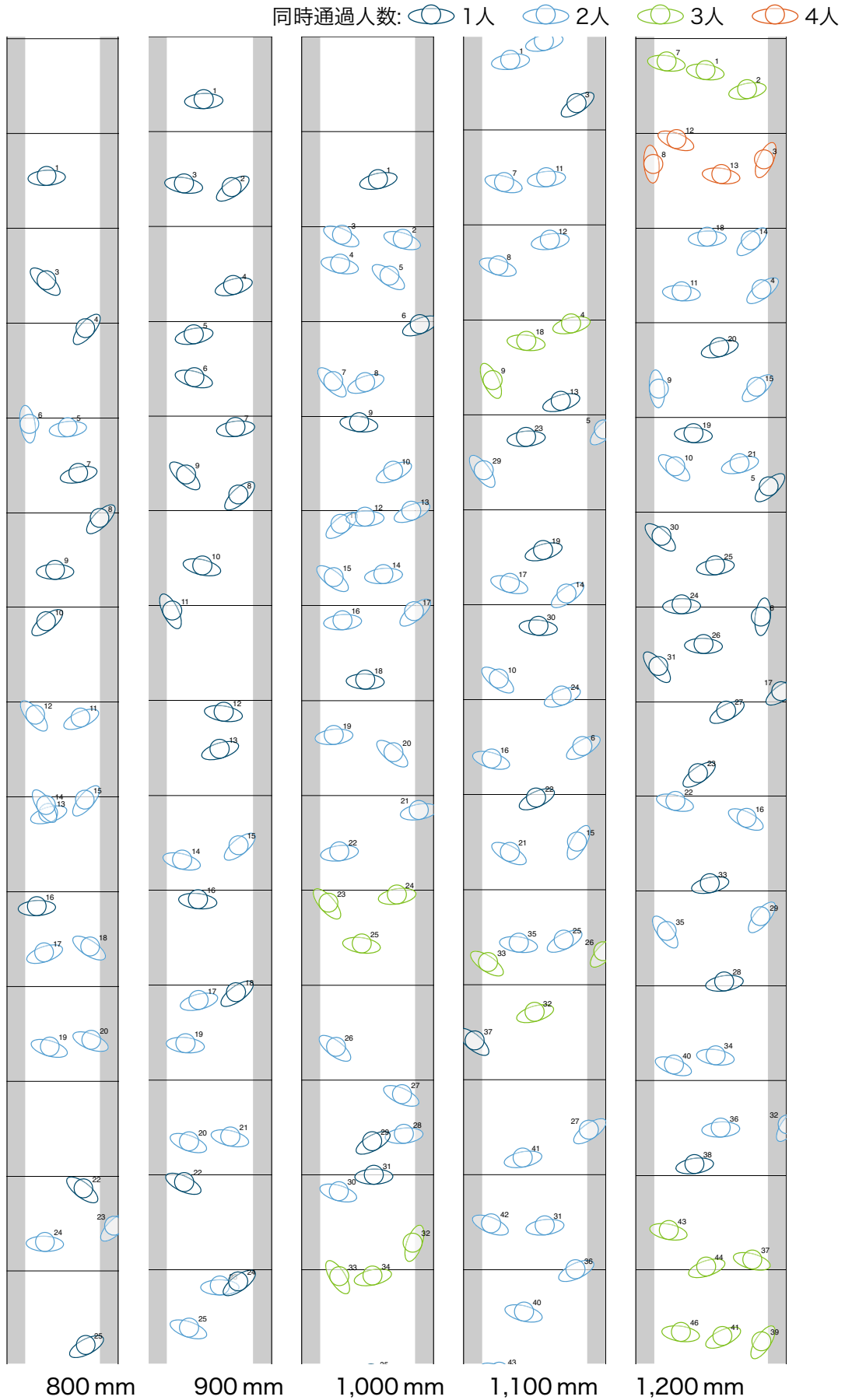


図4.32-36 開口部通過の時間経過 (部分：2秒-16秒 / B群)

図4.37と4.38は図4.27-4.36から得た同時に開口部を通過した人数の分布である。開口幅が広くなると同時に通れる人数が増えることがわかる。しかしながら、A群とB群とでは、開口幅に対して人数が増加するタイミングが異なる。A群の実験参加者が初めて3人同時に通るようになるのが開口幅 1,100 mm であるのに対して、B群では 1,000 mm ですでに3人同時に通る現象がみられる。4人同時に通る現象がみられる。4人同時に通る現象がみられる。

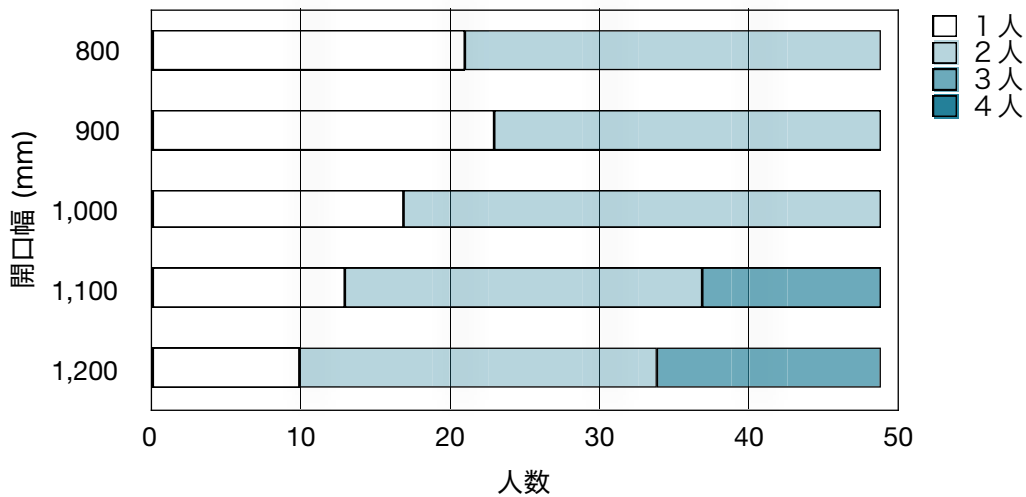


図4.37 同時通過人数の分布 (A群)

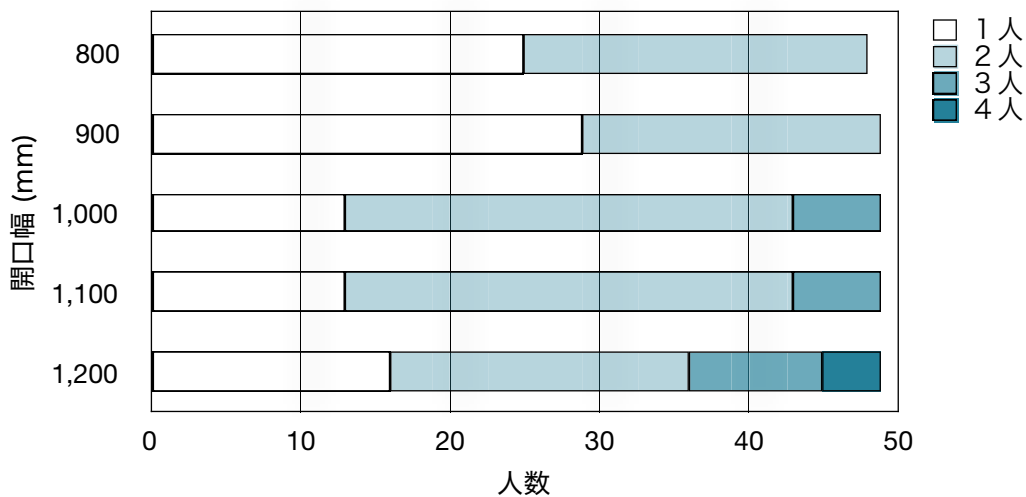


図4.38 同時通過人数の分布 (B群)

このことから、実験参加者間、もしくは実験参加者と開口部間の空間の取り方がA群とB群で異なっていた可能性が示唆される。B群の実験参加者はA群の実験参加者に比べ、間合いを詰める傾向があった。そのため、図4.21のステップ関数に 100 mm の位相のずれが発生したのではないかと推察する。

また開口部を同時に通過する人数は一定でないことから、歩行者が格子状の隊列を形成するいわゆる「列形成 (lane formation)」と呼ばれる現象が本実験では観察できなかったことがわかる。

4.3.3. 開口部前滞留時の肩の向き

図4.39は、開口幅 1,200 mm の試行の実験開始後 9 秒時点の短時間歩行パス図である。開口部通過前の滞留時に歩行者の身体の向きは一様でない。

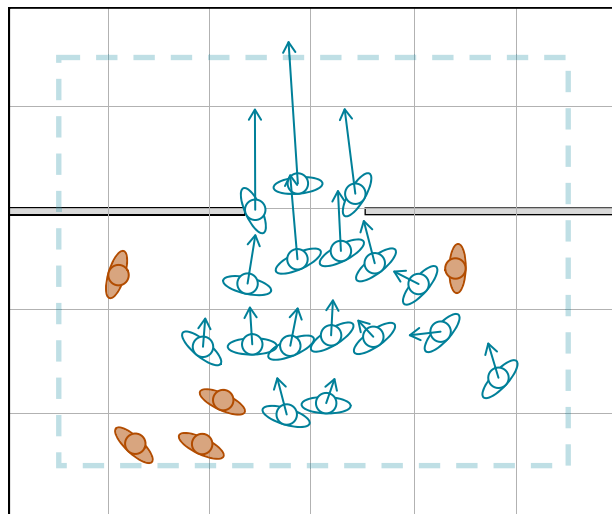


図4.39 短時間歩行パス図 (直前 / 1,200 mm / A群)

図4.40は開口部に対する実験参加者の肩の向きの平均を 100 mm メッシュで平面図上に描いたヒートマップである。0.5 秒毎にすべての歩行者について肩の向きの絶対値を求め、それらをすべて 100 mm メッシュ毎に積算し平均値を算出している。

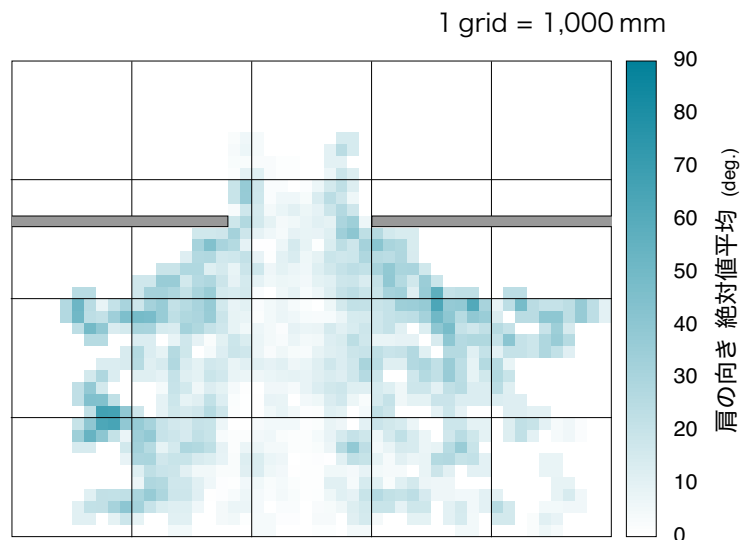


図4.40 開口に対する肩の絶対角度の平面分布図 (直前 / 1,200 mm / A群)

開口部手前の滞留部分に着目すると、開口部正面方向の歩行者は肩の傾きが小さく開口部に正対しているのに対して正面にいない歩行者は傾きが大きくなっており、歩行者は開口部到達前からすでに身体が開口部の方向を向いていることがわかる。ここから、横から回り込んで開口部に到達した歩行者は、開口部到達時にすでに身体の向きが開口部に正対していないことが示唆される。

4.3.4. 開口部通過時の通過位置および肩の向き

レイアウト「直前」について、開口部時点での各実験参加者の開口部内での位置と開口部に対する肩の向きのA・B両群の分布を統合して図4.41-4.45に示す^{注2)}。

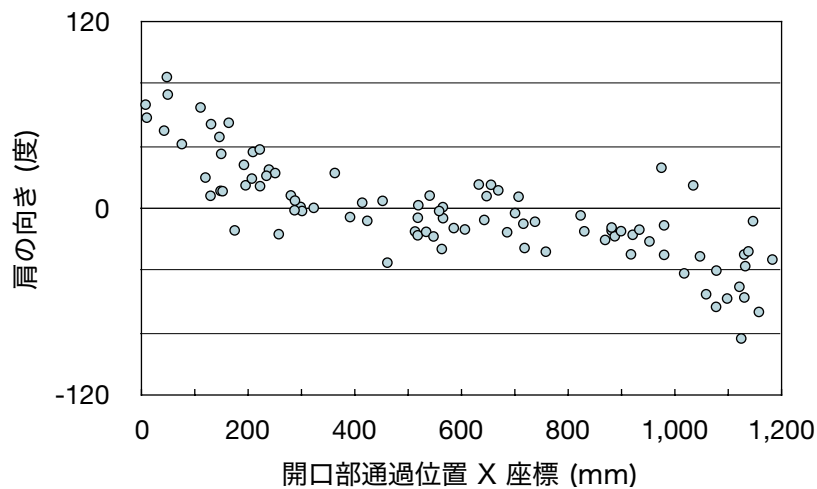


図4.41 開口部通過位置と肩の向きの分布 (1,200 mm)

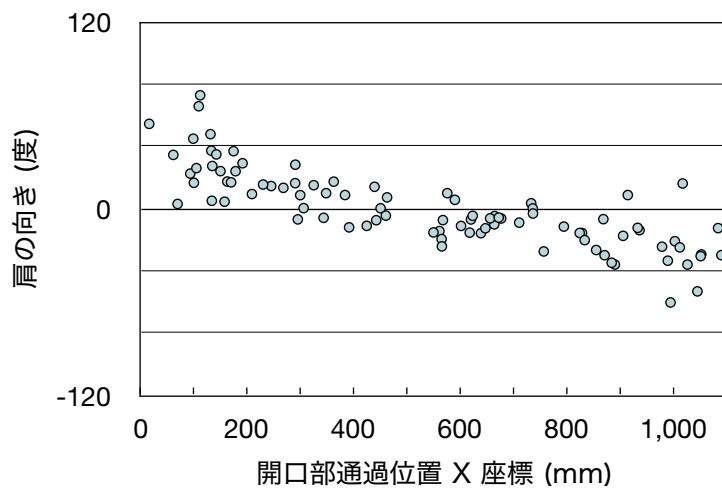


図4.42 開口部通過位置と肩の向きの分布 (1,100 mm)

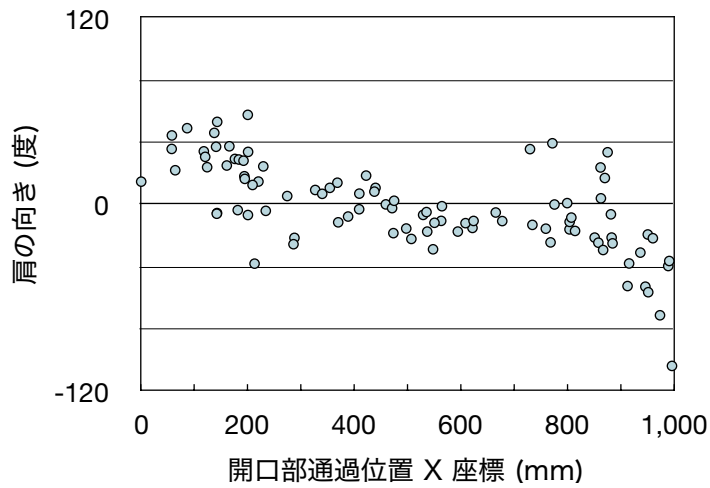


図4.43 開口部通過位置と肩の向き分布 (1,000 mm)

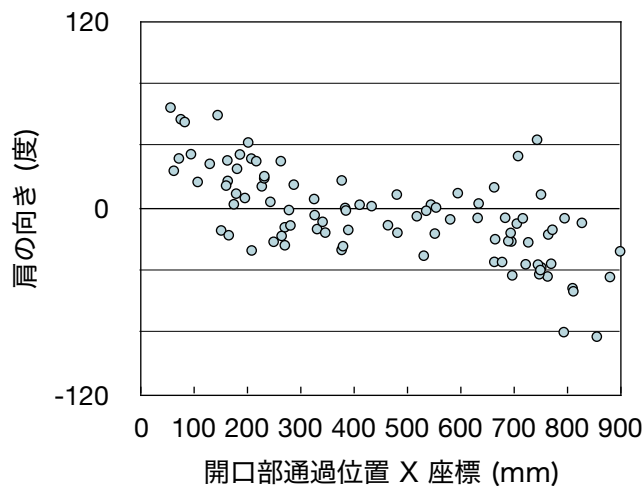


図4.44 開口部通過位置と肩の向き分布 (900 mm)

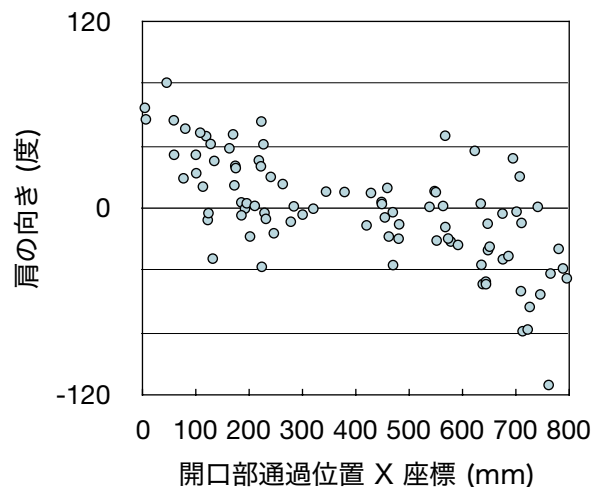


図4.45 開口部通過位置と肩の向き分布 (800 mm)

図4.41-4.45より、開口部端に近づくほど肩の傾きが大きくなる様子が読み取れる。そのとき、開口部端部側の肩を前に出す傾向があることがわかる。またとくに開口幅 1,200 mm の図4.41では、通過位置が両端と中央の3箇所に集中しており、開口部中央を通過しているグループは肩の向きは開口部に対してほぼ正対している。

同様に「2列」についての結果を示したものが図4.46, 4.47である。

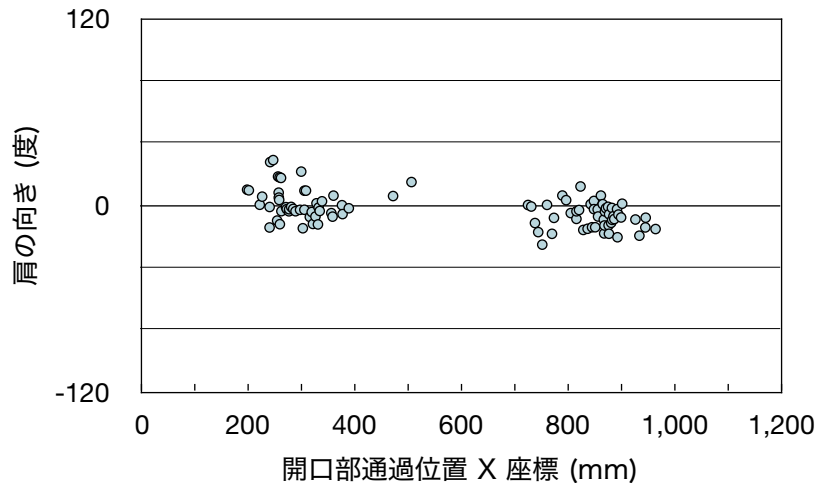


図4.46 開口部通過位置と肩の向きの分布 (1,200 mm / 2列)

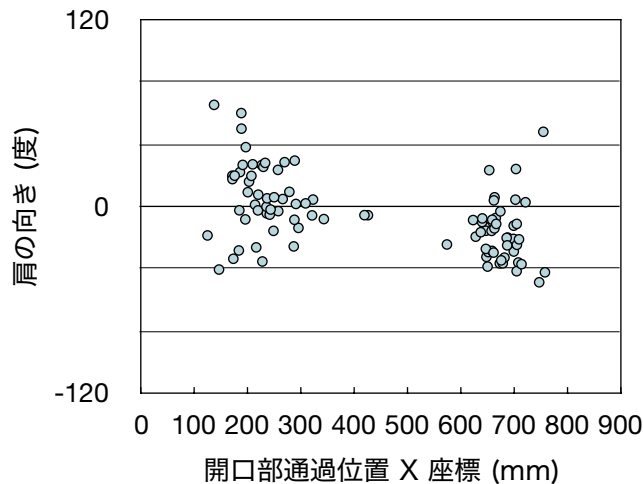


図4.47 開口部通過位置と肩の向きの分布 (900 mm / 2列)

「2列」では、肩の向きの絶対値の平均はそれぞれ 1,200 mm で 8.34°、900 mm で 20.3°であり、二者の等分散性を仮定したt検定では1%の水準で有意な差がみられた。900 mm では狭い開口部を通過するために歩行者が身体を傾けて通過幅を調整していることがわかる。対して、1,200 mm では十分に空間が確保できるため、身体をひねらないと通過ができない開口部端付近は選択されていない。

次に、この肩の向きの絶対値をとり 100 mm 毎に Tukey の箱ヒゲ図で表したグラフを 図4.48から4.51に示す注3)。

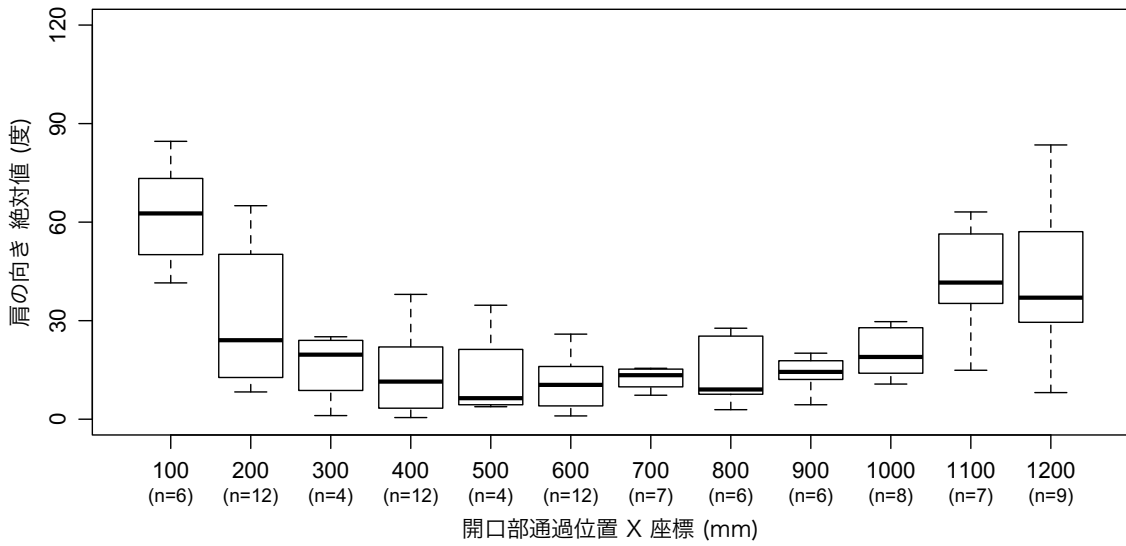


図4.48 肩の向きの絶対値と開口部通過位置の 100 mm 毎の比較 (1,200 mm)

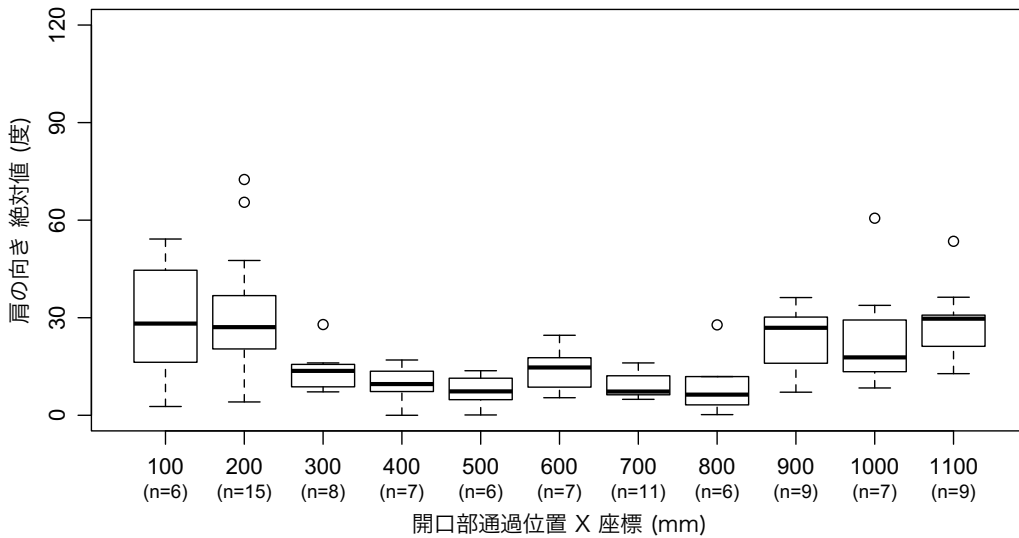


図4.49 肩の向きの絶対値と開口部通過位置の 100 mm 毎の比較 (1,100 mm)

4章 開口部通過における群集の行動性状

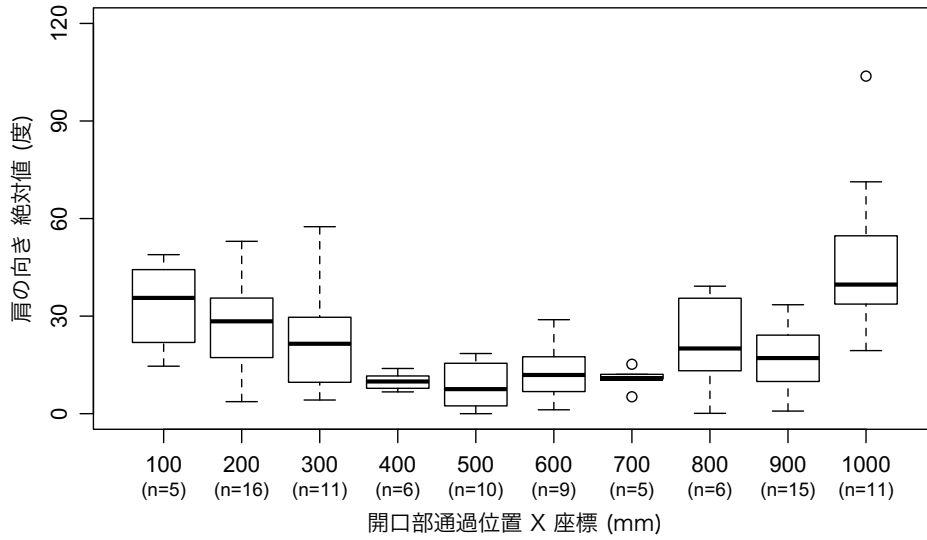


図4.50 肩の向き絶対値と開口部通過位置の 100 mm 毎の比較 (1,000 mm)

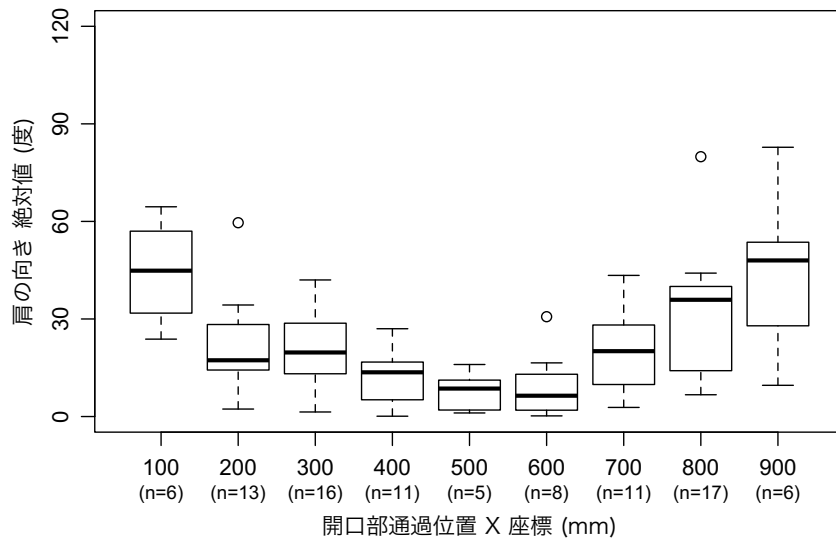


図4.51 肩の向き絶対値と開口部通過位置の 100 mm 毎の比較 (900 mm)

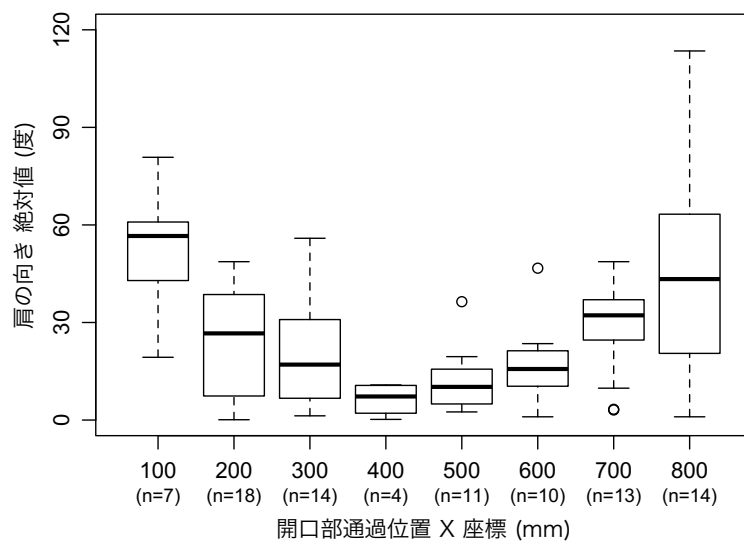


図4.52 肩の向き絶対値と開口部通過位置の 100 mm 毎の比較 (800 mm)

実験条件内でそれぞれの階級を比較して平均値の分散分析を行なうとすべての実験条件において1%の水準で有意な差が得られ、身体の傾きは開口部通過位置に影響を受けることがわかる。

図4.48-4.52のグラフには左右の対称性がみられることから、肩の傾きは開口部端からの距離が影響していると考えられる。また、図4.41-4.45およびビデオ観察から開口部端付近の身体のひねり行動は開口幅によらず同様だと認められる。そこで、サンプル数を確保するためにレイアウト「直前」のすべての試行を合算し、近い側の開口部端からの距離 50 mm 毎に肩の傾きの絶対値を集計し箱ヒゲ図を作成した（図4.53）。この中で、それぞれ隣り合った階級について分散が等しいと仮定したt検定を行なうと、開口部端からの距離が 200 mm - 250 mm と 250 - 300 mm の2群での比較でのp値がもっとも低く1%の水準で有意な差が得られた。さらに、250 mm 以降のグループ比較では差がみられなかったことから、開口部端からの距離 250 mm に肩の傾きのしきい値があると考えられる。

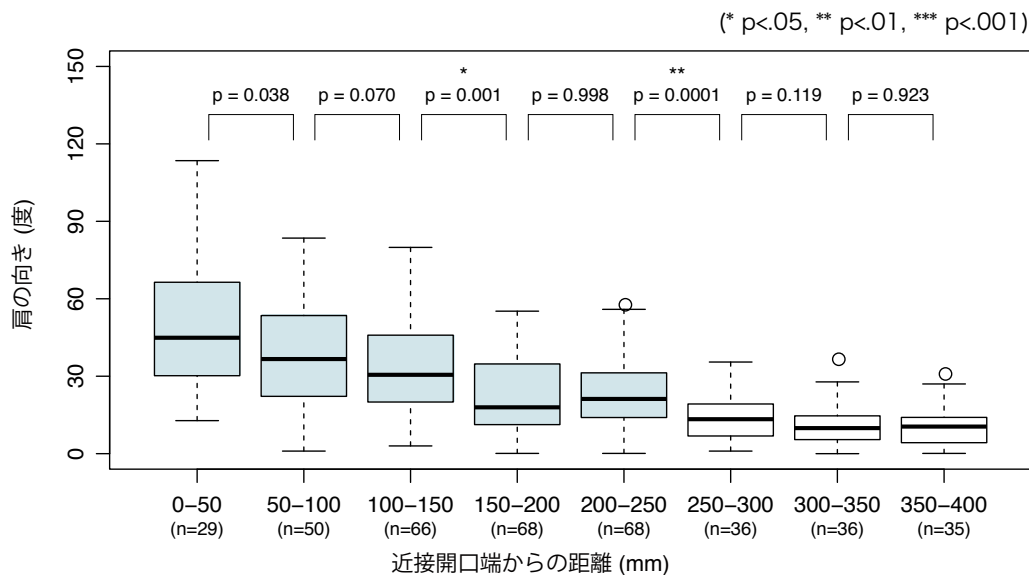


図4.53 肩の向きの絶対値と近接開口端からの距離の 50 mm 毎の比較

ここから、近接開口端から 250 mm 以上離れているか否かで2群に分け、それぞれの開口幅において分散が等しいと仮定したt検定を行なった結果からも1%の水準で有意な差がみられた（表4.5）。

表4.5 近接開口端からの距離で分けした肩の傾きの絶対値比較

実験条件		人数		t検定	
レイアウト	開口幅	< 250 mm	≥ 250 mm	P値	
直前	1,200 mm	29	69	2.80×10^{-4}	***
	1,100 mm	46	45	2.05×10^{-8}	***
	1,000 mm	59	35	2.29×10^{-7}	***
	900 mm	32	64	5.65×10^{-3}	**
	800 mm	71	21	2.79×10^{-9}	***

この 250 mm は身体幅の約半分と考えることができ、通過位置がこの値を下回るときは、開口部に正対したまま通過すると体が開口部端に接触する恐れがある。

4.4. 考察

4.4.1. 流動係数における実験値と法規規準値との関係

本研究における実験では、流動係数は概ね 2.0 人/m・s 以上という高い数値が得られた(表4.4)。これは、実験参加者が健康な若者であったこと、また彼らが開口部周辺に十分集結した状態での実験であったにも起因するが、2.0 人/m・s は群集の開口部通過の流動係数として十分観測される数値であることを示唆している。この値は新・防災計画指針の基準値として示されている流動係数 1.5 人/m・s とは大きな差がある。ただし指針は十分な安全性を担保した値を用いるべきであり、避難計算においては流動係数1.5 人/m・s は妥当である。

4.4.2. 流動量のステップ関数的増加

本実験では、流動量の増加は一次関数的ではなく 200 mm 毎のステップ関数として観測された(図4.21)。一度に通過できる人数が変化する箇所に変化があるならば身体幅である約 400 mm 毎にステップの変化が発生するが、本結果はそれだけではなくその約半数毎に変化が起ることを示した。身体幅の半分の箇所で変化がおきることは、ジッパー効果のように歩行者が千鳥状に開口部を通過する現象や歩行者が身体をひねることで開口幅に対する通過幅を調整していることに起因すると考えられる。

なお、本実験ではA群・B群で 100 mm の位相のずれが発生した。歩行速度は位相差には影響しないため、このずれは2つの群の実験参加者の身体特性および歩行者間距離の取り方の差異によるものと考えられる。実験計画上全試行を通してA群・B群の実験参加者が固定であったため、2群間で状況の想定に違いが生じていたと推測する。図4.27-4.36からも、前に並んだ歩行者の間や開口部端の隙間に千鳥状に入るかどうかなど2群間でアキ空間の詰め方が異なっていたことが見て取れる。

このことから、実際の流動係数は元の開口幅にも影響を受けかつその値には揺れがあるため、開口部計画時には流動係数から算出した流動量に対して揺れ幅分を低減した安全側の値を用いるなど十分な余裕を考慮する必要があるといえる。

4.4.3. 開口部に対する身体方向

歩行者は身体の向きを傾けて開口部を通過することにより、開口部に対する通過幅を変化させる。実験参加者の肩の向きが開口部に対して正対しないことには以下の2つの要因が考えられる。

① 開口部到達以前の進行方向

実験参加者の開口部通過以前の進行方向が開口部と正対していないとき、その身体の向きを十分に回復しないまま開口部を通過する場面がみられた（図4.37）。開口部端付近は壁沿いに横から来た歩行者が集中するためにこの傾向はより強くなる。

② 進行方向に対する身体幅の調整

自身の身体幅を一時的に狭めるために意図的に肩をひねる行為も一方で観察された。これは、開口部進入前に歩行者の身体方向が開口部に正対していても発生する。

①、②いずれの場合についても開口部端で起こりやすく、本研究でも開口部端付近で発生頻度およびその角度が大きくなることが確認された。開口部が狭くなると、この開口部端の影響を受ける範囲の全幅員に対する割合が上がるため、流動量への影響も強くなる。

4.4.4. 肩をひねる行為の流動量への影響

「2列」のレイアウト条件において、開口幅 1,200 mm に比べ 900 mm のとき開口部での肩の傾きが有意に大きかった（図4.46, 4.47）。「2列」では開口部到達以前の進行方向は必ず開口部に正対しているため、この開口幅 900 mm での肩の傾きは開口部通過時に歩行者が肩をひねったことに由来する。

流動量と流動係数の関係を見ると、1,200 mm より 900 mm の方が流動係数は上昇しているが流動量は低下している（表4.6）。開口幅が異なるため流動係数はその影響を受けるが、2列で開口部を通過するという条件を鑑みると流動量は本来同一になるはずである。

ここから、開口部で肩をひねる行為が一時的に歩行速度を下げ流動量を低下させる可能性が示唆される。

表4.6 「2列」での流動量と開口部通過時の肩の向きの絶対値^{注4)}

実験条件 レイアウト	開口幅	流動量 (人/s)	流動係数 (人/m·s)	肩の向きの絶対値	
				平均	標準偏差
2列	1,200 mm	2.45	2.04	8.34°	6.65°
	900 mm	2.13	2.36	20.3°	14.23°

4.4.5. 心理学領域での間隙通過実験結果との関係

「4.1.2. 既往研究」の中で挙げた Warren ら¹²⁾による単独歩行者の間隙通過実験では、歩行者は自身の肩幅の1.3倍を下回る間隙を通るときに肩をひねるという結果を得ている。日本人の平均的な肩幅^{注5)}が 390 mm である¹⁾ので、この肩幅の1.3倍は $1.3 \times 390 = 507$ mm である。これをさらに歩行者の中心点からの間隙の壁面までの距離に変換すると 507

$\div 2 = 253.5 \text{ mm}$ となる。本実験結果の結果で得られた歩行者が肩をひねり始めるしきい値となる開口部端から歩行者頭頂部までの距離 250 mm はこの間隙通過実験における値 253.5 mm と非常に近く、結果の類似性が認められた。

4.5. まとめ

4.5.1. 方法

開口部通過時の群集の挙動を調査するため、異なる幅の開口部を群集が通過する実験室被験者実験を実施した。開口部の幅は 900 mm から 1,200 mm まで 100 mm 間隔で変化させた。被験者を49人ごとに2群に分けることで同一実験条件を2回繰り返した。

実験結果から開口部通過時の各歩行者の通過位置と肩の向きを算出しその関係を分析することで、開口部通過における身体寸法の影響、開口部端部での現象を定量的に示した。

4.5.2. 結果

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

流動量:

- 開口部の手前から距離をおいて歩行を開始した場合は初速がつき開口部追加時の速度が上昇するため、開口部直前から開始する場合よりも流動係数が高くなる。
- 900 mm の開口幅は2列での通過に対してはやや幅が不足しており、1,200 mm は十分である。
- 流動量の増加は一次関数的ではなく身体幅と関連したステップ関数となる可能性がある。

身体の向き:

- 歩行者は身体の向きを傾けて開口部を通過することにより、開口部に対する通過幅を変化させる。
- 歩行者は開口部端付近 250 mm 以内を通過するとき身体を傾ける傾向がある。

また、本実験条件からは結果として以下の値を得た。

流動量:

- 開口部通過時に流動係数 2.0 人/m·s を超える値が観測された。
- 900 mm の開口幅は2列での通過に対してはやや幅が不足しており、1,200 mm は十分である。
- 流動量の増加は一次関数的ではなく 200 mm 毎のステップ関数として観測された。

開口部通過性状:

- 開口部での列形成は確認されなかった。
- 開口部の同時通過人数は1試行内でもばらつきが大きく、歩行者が隊列状になる・交互に千鳥状に通過するなどの規則性はみられなかった。

本研究で得られた知見は、設計での避難計画や群集シミュレーションにおける、より自然な開口部通過の再現に寄与できると考える。

4.5.3. 今後の展望

本研究では、開口部端付近で歩行者が開口部中央部と異なる振る舞いをする事が明らかになった。今後、この開口部端の通過性状の特異性についてさらなるモデル化が求められる。

また本研究で観察された開口部の流動量の増加がステップ関数的であることについては、ある程度の普遍性が期待できると考えているが、本実験のみではケース数が足りず確証には至っていない。また、本実験では開口幅の変化量が 100 mm ごとであったため 200 mm という結果を得たが、この 200 mm という値やこの値と歩行者の身体特性の関係性についても、発展的な研究の余地がある。

この開口部の群集通過という非常に基礎的な研究について、今後より精緻で統制された実験条件下でのさらなる研究が必要である。

注

注1) 群集の人数などの細部は省略している。

注2) 計測誤差により通過位置が開口部範囲外と算出された歩行者は、以降の分析からはずした。

注3) グラフ中の箱のX座標のラベルは、ラベルの値 -100 mm からラベルの値までの範囲を示す。例として、「100」は「0 mm 以上 100 mm 未満」の意である。

注4) 流動量・流動係数はA群・B群の平均、肩の向きはA群・B群を合わせて算出したものである。

注5) ここで「肩幅」は「肩峰点間の距離」の意である。

5. 総括

5.1. 本研究の位置付け

5.1.1. 概要

本研究では歩行者群集の基礎的な現象について、群集を歩行者本位でとらえ直すことで新たな歩行者群集モデルを確立した。またその歩行者本位の立場から群集をとらえる3つの新たな可視化手法を提案した。さらに群集流の横断・開口部の通過という2つの被験者実験を通じて、より限定的な場面における歩行者の回避行動をモデル化した。群集流の横断実験からは、物理的データである位置座標から群集内の歩行快適性という心理的評価を推算する評価指標の策定も試みた。

5.1.2. 目的

本研究は、歩行者を本位とした群集流動のモデル化と可視化を用いた群集評価の手法の開発を目的とする。

① モデル化

モデル化では、まず概念としての歩行者本位の「歩行者群集のモデル化」と、被験者を使った2種の実験室実験を通じた群集の「実際の場面における回避行動のモデル化」を目指した。

② 評価

群集評価としては、歩行者群集の動的な状態を記述する新たな「可視化手法の開発」と歩行者本位な立場からの「歩行快適性の評価」指標の策定を目指した。

5.2. 歩行者群集モデル

5.2.1. 歩行者本位マルチエージェントモデル

本研究では、歩行者一人一人が周辺の環境に応じて歩行行動を決定し、それを集積したものが「群集」とであるという歩行者行動本位のマルチエージェント的な群集モデルの立場をとった (図2.6)。その上で群集流を構成する各歩行者の移動を平面空間 x, y と時間 t の変位で表した (図5.1)。

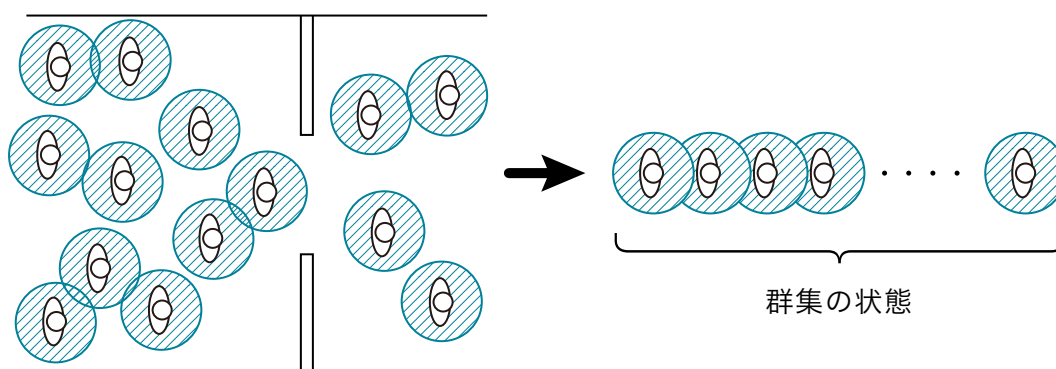


図2.6 歩行者の状態の集積としての群集の状態 (再掲)

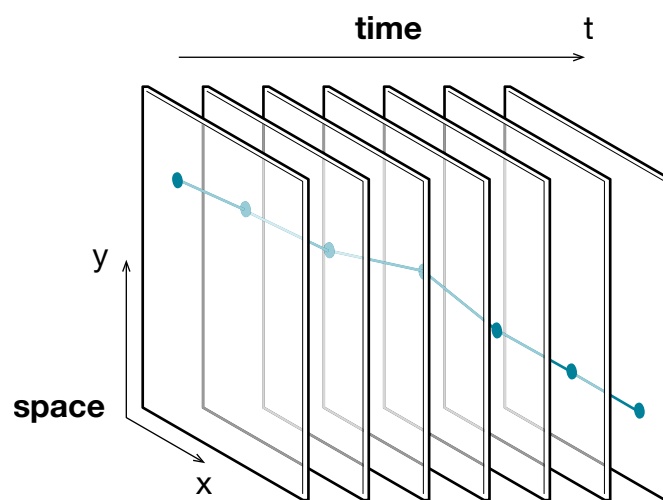


図5.1 $(x, y)(t)$ 3次元空間内の移動

さらに、移動がベクトルであることと歩行者の占有領域が歩行中変化することから、歩行者の歩行における変量は「歩行速度」「移動方向」「肩の向き」の3要素に要約できることを示し「歩行の3変量」として定義した (図5.2)。

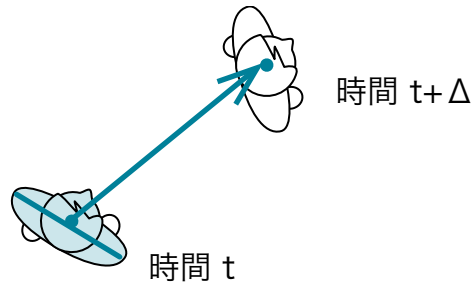


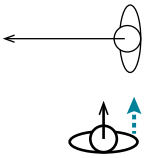
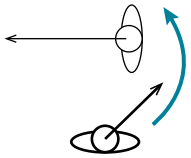
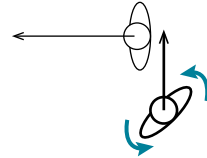
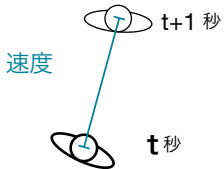
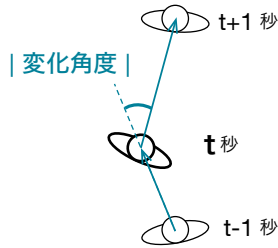
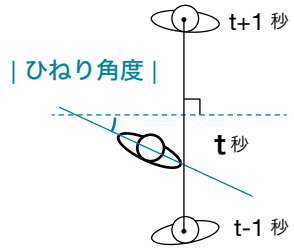
図5.2 歩行による Δ 時間の移動

5.2.2. 回避行動モデル: 交差流での歩行者-歩行者間回避

a) 回避方法

群集流を単独の歩行者が横断するとき、衝突を避けるため歩行者間に回避行動が起こる。この回避行動は歩行の3変量「歩行速度」「移動方向」「肩の向き」に対応して「減速」「迂回」「ひねり」の3種類に分解でき、歩行者はこの3つの回避方法を組み合わせて他歩行者を回避する（表5.1）。

表5.1 3種類の回避方法

	減速	迂回	ひねり
歩行の3変量	歩行速度	移動方向	肩の向き
振る舞い	 <p>減速により他の歩行者とタイミングを調整</p>	 <p>進行ルートを変更し他の歩行者に回り込む</p>	 <p>肩を回して衝突範囲を狭める</p>
算出方法			
指標	歩行速度	1秒間における移動方向変化の絶対値	正対位置に対する肩の傾きの絶対値
単位	m/s	度/s	度

回避行動はそれぞれの指標から4段階の強度に分類できる（表5.2）。

表5.2 回避強度とそのしきい値

回避強度	定義
○ 回避なし	回避行動をしていない
● 潜在回避	行動として観察はされないがデータには現れる
● 弱回避	行動で見取れる
● 強回避	明らかに周辺の歩行者の影響により進行を阻害されている

3章では、被験者実験を通じてそれぞれの回避方法について4段階の回避強度のしきい値を求めた（表5.3）。

表5.3 回避強度とそのしきい値

	減速	迂回	ひねり
	速度 (m/s)	変化角度 (度/s)	ひねり角度 (度)
○ 回避なし	1.0 –	0 – 12	0 – 12
● 潜在回避	0.9 – 1.0	12 – 18	12 – 24
● 弱回避	0.7 – 0.9	18 – 24	24 – 36
● 強回避	0.0 – 0.7	24 –	36 –

b) 回避強度

群集流を単独の歩行者が横断する場面において、実験から、回避強度は交差流の交差角度および群集流の密度により異なることがわかった。

群集流の密度が増すと、横断者・群集流内の歩行者ともに回避行動も大きくなる。ただし、同じ群集密度でも交差の角度によって横断者・群集流内の歩行者それぞれの回避行動の現れ方は異なる（表5.4–5.6）。

この回避強度がアンケートで得られた実際の横断者の心理的な「歩きにくさ」の評価と傾向が一致していることから、外部から観察可能な物理量である回避強度を算出し歩行者の心理的な歩行快適性の評価が行なえる。またこの歩行快適性が横断の角度で変化することは、従来のサービス水準での群集密度からの歩行快適性の評価が不十分であることを示している。

表5.4 群集流の最大回避強度

密度	進入角度			
	↓ 180°	↙ 135°	← 90°	↖ 45°
0.25 人/m ²	— ○ ○ ○	● 弱 ● ● ●	— ○ ○ ○	● 弱 ● ○ ●
1.00 人/m ²	● 潜在 ● ○ ○	● 強 ● ● ●	● 強 ● ● ●	● 弱 ● ● ○
2.00 人/m ²	● 強 ○ ● ●	● 強 ● ● ●	● 強 ● ● ●	● 弱 ● ○ ○

表5.5 横断者の最大回避強度





密度	進入角度			
	↓ 180°	↙ 135°	← 90°	↖ 45°
0.25 人/m ²	— ○ ○ ○	● 潜在 ○ ○ ●	— ○ ○ ○	— ○ ○ ○
1.00 人/m ²	— ○ ○ ○	● 強 ● ● ●	● 強 ● ● ●	● 弱 ● ○ ○
2.00 人/m ²	● 強 ● ○ ●	● 強 ● ● ●	● 強 ● ○ ●	● 弱 ● ● ●

凡例

● 回避 — 総合最大強度

最大ひねり強度
 最大迂回強度
 最大減速強度

表5.6 交差角度による回避行動の現れ方の違い

進入角度	特徴
180° 	≤ 1.00 人/m ² : 回避なし 2.00 人/m ² : 強いひねりで回避
135° 	主に横断者が回避
90° 	横断者と群集流が対等
45° 	強回避なし

c) 回避シーケンス

横断者単独の回避行動に着目すると、回避シーケンスは以下のように記述できる。歩行者はまず減速による間合いの調整を試み、のちに必要があれば迂回フェーズに入り、最後に身体の内ねりによる接触の回避を行なう。そして回避が終わると、再び自由歩行に戻る（図5.3）。実験では減速をせずに迂回のみで回避を試みる例はみられなかった。

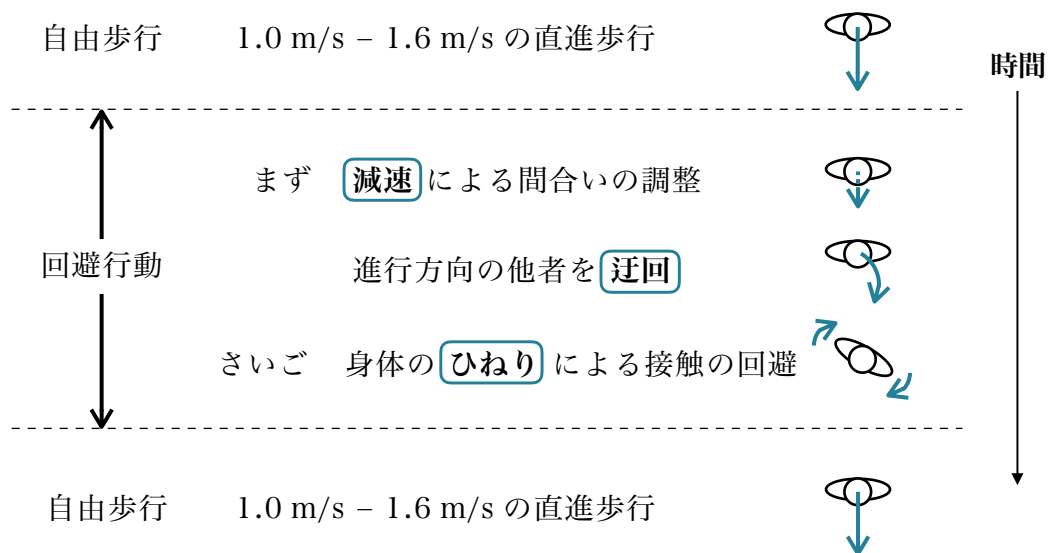


図5.3 歩行者の衝突回避シーケンス

5.2.3. 回避行動モデル: 開口部での群集流通過

群集流の開口部通過では、前述の歩行者-歩行者間のインタラクションに加え、開口部およびその壁という空間要素が歩行者の行動に影響を及ぼす。

群集の隊列を事前に恣意的に作らなかったときは、歩行者は開口部のより近くに行くことを目指し、隊列の形成はみられない。ただし、平面上の人間の身体幅は概ね同じであるため、その制約から通過場所には特徴がでてくる。

開口幅と流動係数は相関関係にあり、実験からは開口幅に対して約 200 mm のステップ関数的な流動量の変動が観察できた (図4.21)。歩行者の身体幅である 400 mm - 500 mm ではなく 200 mm の箇所で変化がおきることは、ジッパー効果のように歩行者が千鳥状に開口部を通過する現象や歩行者が身体をひねることで開口幅に対する通過幅を調整する現象に起因していると考えられる。

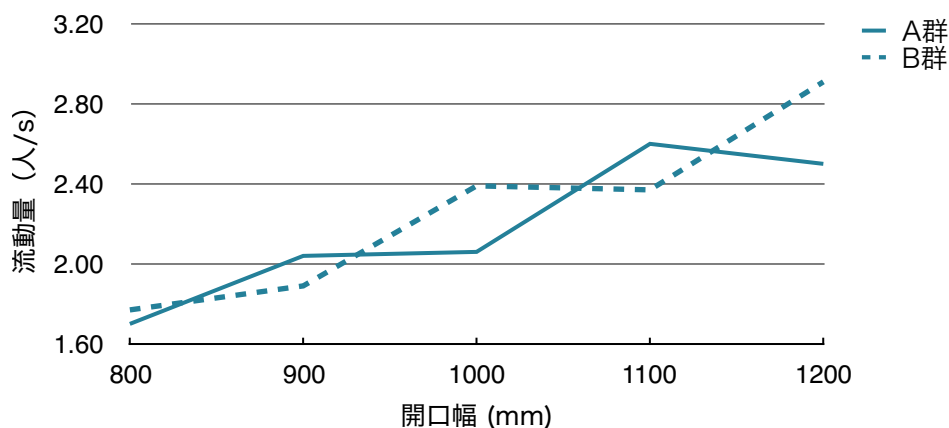


図4.21 流動量と開口幅の関係 (再掲)

群集が開口部を通過するとき、開口部周辺の密度が高いと歩行者は身体を傾けて隙間をすり抜ける行動がみられる。この身体を傾ける行動は開口部端周辺でより大きく発生し、歩行者は頭頂部が 250 mm よりも開口端側を通ったとき強く肩を傾ける傾向がある。この 250 mm は人間の体幅の約半分と考えられ、図5.4の模式図からも、肩を傾けなければ 250 mm 以下の空間には入りづらいことがわかる。なお、人為的に群集流に隊列を作り開口部端から十分距離がある位置を歩行者が通過した場合は、歩行者は必要がないので肩を傾けない。

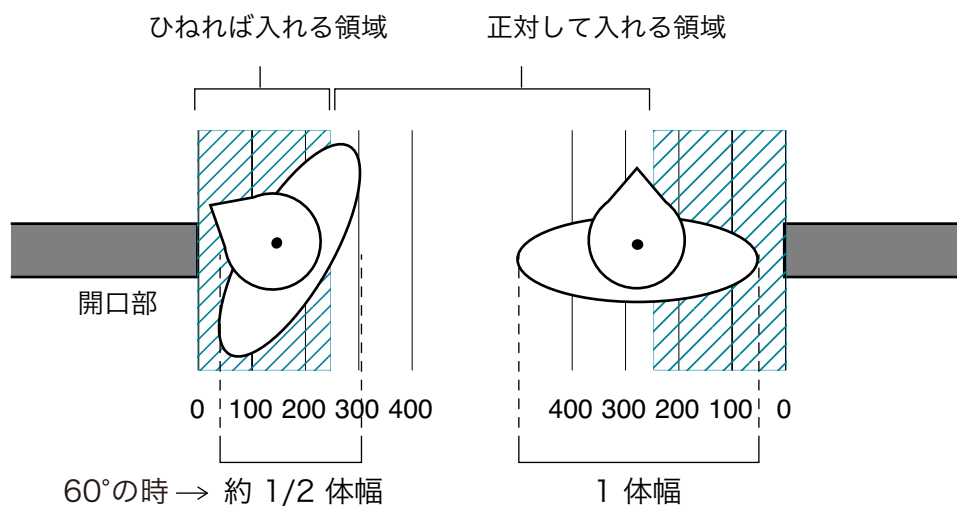


図5.4 開口部端からの距離と肩の向きの関係

5.2.4. モデルの利用

これら歩行者行動モデルは、既往のマルチエージェントシミュレーションモデルに組み込むことで、より現実に即した振る舞いをエージェントにさせることができる。交差流やボトルネックは、群集シミュレーションにおいても再現が複雑でいまだ未解決な技術的課題も多く、本モデルの取り込みはその解決において大きな期待ができる。

さらに、群集が利用する建築空間の評価指標として本研究成果を用いることで、既往、もしくは建築計画における建築空間評価が可能となる。

5.3. 歩行者群集評価

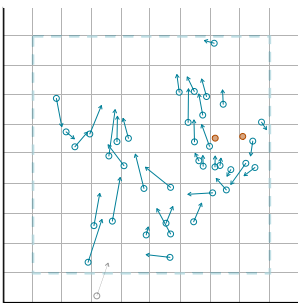
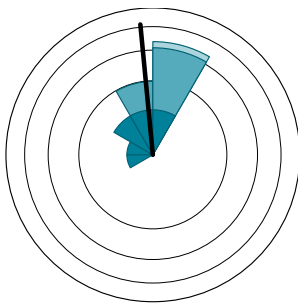
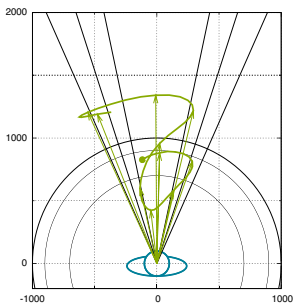
本研究では、群集流動を単独歩行者の行動の集積とし、単独歩行者の移動は平面 x, y 座標と時間 t によって表す。そして群集内の各歩行者の $(x, y)(t)$ データを用いて群集の評価をおこなう。歩行者の肩の向きの時系列データがあるときは、それを追加することで身体寸法の影響を加味したより精緻な評価が可能となる。

5.3.1. 可視化

2章では、群集の可視化を通じた群集評価の可能性を示した。可視化の利点は「一瞥性」と「情報の取捨選択」である。時空間 $(x, y)(t)$ という4次元情報を2次元平面にまで落とし込むことで一瞥して理解しやすい情報を提供できる。また、数値データから必要となる情報を加工し提供することで、着目すべき事象の状態の把握が容易になる。

本研究で示す可視化手法は「短時間歩行パス図」「移動方向バラ図」「歩行者主体移動軌跡図」の3つである（表2.4）。「短時間歩行パス図」および「移動方向バラ図」で分析対象の群集の動的な状態を一目で掴み、「歩行者主体移動軌跡図」で単独の歩行者の行動を歩行者主体の視座で詳細に記述できる。

表2.4. 新規に開発した群集の可視化手法（再掲）

名称	短時間歩行パス図	移動方向バラ図	歩行者主体移動軌跡図
図			
対象レベル	群集・個人	群集	個人
内容	領域内の歩行者の分布と移動方向・速度	群集の移動方向傾向	単独歩行者の移動シーケンス
表現時間	1秒	1秒	数秒間の連続時間
対象歩行者	領域内すべての歩行者	領域内すべての歩行者	単独の歩行者
読み取り可能な情報	歩行者 - 位置 - 歩行速度 - 移動方向 - (肩の向き) - 領域内の空間要素	歩行者 - 移動方向 (12段階) - 歩行速度 (3段階)	歩行者 - 移動方向 - 歩行速度 - 回避強度

これらの可視化法はすべて、歩行者の $(x, y)(t)$ データがあれば作図可能であり、「短時間歩行パス図」については、追加的に歩行者の肩の角度の情報も添加できる。

① 短時間歩行パス図

短時間歩行パス図は、歩行者の1秒間の移動を矢印のベクトルで表すことで、ある特定の瞬間の群集の動的な移動を2次元平面図上に書き示す可視化手法である。さらに歩行者の肩の角度の情報を付加し、身体寸法を考慮したより詳細な寸法の検討が可能となる。本研究における歩行者の歩行モデルで提示した歩行の3変量「歩行速度」「移動方向」「肩の向き」のすべてを定量的に記述できる可視化手法であり最も汎用性が高い。

② 移動方向バラ図

移動方向バラ図は、群集内における歩行者の移動方向のばらつきが群集の複雑性の指標になるという観点から、群集内の歩行者の移動方向の分布をバラ図の形式で示すことで、群集の複雑性を一瞥して読み取ることを目指した可視化手法である。

③ 歩行者主体移動軌跡図

歩行者主体移動軌跡図は、単独の歩行者の移動を新たな視座でとらえ直したものである。観察者＝分析者が外部から観察した俯瞰的な移動を今一度歩行者自身が体験する歩行という視点に描きなおすことで、歩行者を本位においた情報の提供を試みる。これにより、歩行者にとっての「回避」という動的な行動が定量的に分析可能となる。

5.3.2. 歩行快適性

3章では、これら可視化手法を用いつつ被験者実験を通じて歩行者の回避の強度段階を算出し、それを評価することで群集内の歩行者の歩行の質を評価する指標策定を目指した。歩行者の回避行動は歩行者への負荷である、という見解のもと、歩行者の行動を通じて「歩行快適性」を数値化する。群集流の評価を避難時間や空間収容能力などの効率面での評価だけにとどめず、空間内の歩行者への質的影響としてまとめなおすことは、より利用者に寄り添ったサービス空間の計画において必要とされる視点である。また、群集の回避行動からそれを導き実際の平面図内に見える形で提示することで、既往の群集シミュレーションや実地のフィールド調査から得られたデータからの歩行快適性の評価とその議論が可能となる。

5.3.3. 評価の利用

前述のように、本モデルは、 $(x, y)(t)$ という平面座標の時間経過データのみで評価が行なえることを特徴の一つとする。さらに、歩行者の位置だけでなく肩の位置を計測することで

身体の向きおよび身体の空間的な占有領域の情報を付加でき、より詳細な歩行者行動の描写・評価が可能となる。

評価のデータソースは歩行者の平面座標の時間経過データであれば、フィールド観察・実験・シミュレーションなどデータの生成過程は問わない。このことから実験結果とシミュレーション結果などの素性が異なるデータの比較も可能である。また、歩行者の心理面や生理的状态を排除しつつも歩行者の「歩行快適性」という質的評価を導くこともでき、既往の計画への取り込みの親和性が高い。

技術面においても、本モデルのために作成した Python スクリプトを中心として R, gnuplot, imageJ などオープンソース技術を基盤とし、特定の商業ベンダーに依存していないため、ライセンス的束縛も少なく無償で自由な利用ができる。

5.4. 今後の展望

本研究では、群集流の歩行者本位のとらえ直しを行ない、その視点にもとづき新たな評価法を開発した。本論文のタイトルでもある歩行者本位のモデルは、特定の数式に還元される数値モデルではなく歩行者群集に対する新たな視座である。今一度歩行者に立ち返ることで建築空間における歩行者群集の本質に迫り、今後歩行者群集研究が促進されることを望んでいる。歩行者を本位に据えることで、効率を超えて歩行者にとって快適な空間を提供するための知見を積み上げていきたい。

新たに開発した可視化手法は多様な群集データに適用できる非常に汎用的なものであると自負している。今後様々な研究に利用し、普及を目指したい。

回避行動による歩行快適性の評価については、歩行者の回避行動の強度算出から歩行快適性が推算できるところまでは示せたが、汎用的な評価指標としての回避強度水準のしきい値についてはより多様な条件下での検証などさらなる検討が必要である。今後改良を重ね、実用として利用できる指標としたい。

また、本研究で提唱した歩行者本位の歩行者群集モデルは、群集シミュレーションへの組み込みの親和性を狙いの一つとしている。将来的には、実際に既存の群集シミュレーションのアルゴリズムに本研究で得られた回避行動モデルを組み込むことを試みたい。

謝辞

本研究を遂行し学位論文をまとめるにあたり、熱心に指導をしてくださった指導教官である佐野友紀教授には心より厚く御礼申し上げます。

未熟な草稿を精読いただき、本論文執筆にあたり詳細で有意義なご助言をいただきました本学小島隆矢准教授、古山宣洋教授および東京理科大学大宮喜文教授に深謝いたします。

3章で用いたデータの一部は、名古屋市立大学で行われた実験に基づくものです。また4章では、実験参加者として東洋大学ライフデザイン学部人間環境デザイン学科の学生諸氏に協力をいただきました。関連の方々および実験参加者の方々に対してここに感謝の意を表します。

本研究は多くのオープンソース技術に支えられています。とくに ffmpeg, git, ImageJ, numpy, R, reportlab, shapely, webkit, そして Python、これらの素晴らしい技術をオープンソースという形で無償で提供していること、またオープンソースという自由と博愛に満ちた崇高なコミュニティそのものに深い感謝と尊敬の念を抱いています。

最後に、本論文を書くにあたって身を粉にして働いてくれた愛機 MacBook Pro Retina 13-inch Early 2015、および先代 MacBook Pro 13-inch Late 2011 に感謝を捧げます。諸君なしには私の人生はありませんでした。

参考文献

本論文を構成する主たる論文

- 1) 今西美音子, 佐野友紀: 群集流横断における歩行者間の回避強度水準の検討 – 短時間歩行パス分析をもちいた群集解析 その1 –, 日本建築学会計画系論文集, No.698, pp.917-922, 2014.4
- 2) 今西美音子, 佐野友紀, 萩原一郎, 布田健: 群集の開口部通過性状における身体寸法の作用, 日本建築学会計画系論文集, No.714, pp.1799-1806, 2015.8
- 3) 今西美音子, 佐野友紀: 歩行者主体で見た群集内での回避行動の解析 – 短時間歩行パス分析をもちいた群集解析 その2 –, 日本建築学会計画系論文集, No.719, pp.57-63, 2016.1

1. 序論

- 1) 建築設計資料集成 – 人間, p.180, 日本建築学会, 東京, 2003
- 2) ジョン・J・フルーイン: 歩行者の空間, 鹿島出版社, pp.75-92, 東京, 1974
- 3) 木村幸一郎: 建築物内に於ける群集流動状態の観察, 建築學會論文集, No.5, pp.307-316, 1937.3
- 4) 戸川喜久二: 避難群集流の計算について, 建築雑誌, pp.15-19, 1954.4
- 5) 戸川喜久二: 群衆流の観測に基づく避難施設の研究, 学位論文, 1963
- 6) Mcphail, C. and Wohlstein, R.: Using Film to Analyze Pedestrian Behavior, Sociological Method & Research, Vol.10, No.3, pp.347-375, 1982.2
- 7) Khisty. C. J.: Pedestrian Cross Flow Characteristics and Performance, Environment & Behavior, Vol.17, No.6, pp.667-695, 1985.11
- 8) 帷子京市郎, 鈴木智之, 中村克行, 趙卉菁, 柴崎亮介, 仲川ゆり: レーザスキャナを用いた群集の追跡および流動の可視化, 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), No.31, pp.229-236, 2007.3
- 9) Johansson, A., Helbing, D. and Shukla P.: Specification of the Social Force Pedestrian Model by Evolutionary Adjustment to Video Tracking Data, Advances in Complex Systems, Vol.10, pp.271-288, 2008.10
- 10) Steffen, B. and Seyfried, A.: Modeling of pedestrian movement around 90 and 180 degree bends, Proceedings of the Workshop on Fire Protection and Life Safety in Buildings and Transportation Systems, 2009.12
- 11) Rupperecht, T., Klingsch, W. and Seyfried, A.: Influence of Geometry Parameters on Pedestrian Flow through Bottleneck, Pedestrian and Evacuation Dynamics, pp.71-80, 2011.6

参考文献

- 12) 丹下学, 今西美音子, 佐野友紀, 大宮喜文: 複数色マーカーを用いた多人数歩行者群の画像解析と群集避難実験への応用, 日本建築学会計画系論文集, No.730, 2016.12
- 13) Bauer, D.: Comparing pedestrian movement simulation models for a crossing area based on real world data, Pedestrian and Evacuation Dynamics, pp.61-70, 2011.1
- 14) 城明秀, 池島由華, 佐野友紀: 廊下の滞留が居室単一開口部の流動量に与える影響 - 開口部の群集流動量に関する実大実験およびシミュレーション分析 その1 -, 日本建築学会計画系論文集, No.696, pp.293-300, 2014.2
- 15) 上田光雄: 階段に於ける群集流動の性状, 日本建築学会論文報告集, No.55, pp.94-99, 2057.3
- 16) 山本昌和, 吉村英祐: 駅の階段における一方向群集流動の特性の定量的把握, 日本建築学会計画系論文報告集, No.701, pp.1515-1521, 2014.7
- 17) 中村彩子, 佐野友紀, 青木俊幸, 石突光隆: 鉄道駅のエスカレータ、階段に見られる群集行動の分析, 日本建築学会学術講演梗概集 建築計画I, pp.953-954, 2007.07
- 18) 北後明彦, 久保幸資, 室崎益輝: 階段室における2群集の合流に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No.358, pp.37-43, 1985
- 19) 佐野友紀, 竹市尚広, 木村謙, 大宮喜文, 吉田克之, 渡辺仁史: 高層建築物避難を想定した階段室における在館者群集の合流特性, 日本建築学会計画系論文集, No.598, pp.51-56, 2005.12
- 20) 矢嶋雅倫, 佐野友紀, 門倉博之, 関沢愛: 高層建築物避難訓練実態から見た階段室内での避難者の密度と歩行速度の関係および合流比, 日本建築学会環境系論文集, No.710, pp.315-332, 2014.6
- 21) 岡田尚子, 長谷見雄二, 森山修治, 岡本衣未: エスカレータを用いた上方避難に関する実験研究, 日本建築学会環境系論文集, No.668, pp.855-861, 2011.10
- 22) 嶋田拓, 金井昌昭, 矢島規雄, 直井英雄: 車いす使用者を含む群集の避難流動特性に関する実験研究, 日本建築学会計画系論文集, No.569, pp.71-75, 2003.7
- 23) 嶋田拓, 久保田一弘, 直井英雄: 車いす使用者等混入率の増加に伴う流動係数減少率の把握とその予測式の提案 - 車いす使用者を含む群集の避難流動特性に関する実験研究 (その2) -, 日本建築学会計画系論文集, No.622, pp.71-76, 2007.12
- 24) 大野隆造, 金子いづみ, 小林美紀: 実空間における準実験によるキャリーバッグ・ベビーカー利用者に対する周辺歩行者の回避行動計測, 日本建築学会技術報告集, No.47, pp.265-268, 2015
- 25) 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
- 26) 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, No.555, pp.191-197, 2002.5
- 27) 山本 昌和: 駅における歩きにくさを可視化した旅客流動シミュレーション, 鉄道総研報告 No.12, pp.59-65, 2009.12
- 28) 青木俊幸, 石突光隆, 山本昌和: 駅における人の流れ, 鉄道技術情報誌 鉄道技術アラカルト, Vol.65, pp.30-33, 2008.1

- 29) Erica D. Kuligowski, Richard D. Peacock and Bryan L. Hoskins: A Review of Building Evacuation Models, 2nd Edition, 2010.11
- 30) 木村謙, 佐野友紀, 林田和人, 竹市尚広, 峯岸良和, 吉田克之, 渡辺仁史: マルチエージェントモデルによる群集歩行性状の表現: 歩行者シミュレーションシステムSimTreadの構築, 日本建築学会計画系論文集, No.636, pp.371-377, 2009.2
- 31) エアードエー, SimTread | 機能紹介, <http://www.aanda.co.jp/products/simtread/func.html>, 2016年10月13日時点
- 32) フォーラムエイト, 製品情報: EXODUS / サンプル画像, <http://www.forum8.co.jp/product/shokai/ex-sf.htm>, 2016年10月13日時点
- 33) 湯寿旋, 郭東潤, 北原理雄: A study of a distance model of people-to-people avoidance behavior in a station square -Correlative factors of people-to-people avoidance behavior distance, 日本建築学会計画系論文集, No.679, pp.2101-2107, 2012.9
- 34) 湯寿旋, 郭東潤, 北原理雄: A study of pedestrian personal space in a station square - People-to-people avoidance behavior in nishi-chiba station square-, 日本建築学会計画系論文集, No.681, pp.2569-2575, 2012.11
- 35) Porzycki, J., Mycek, M., Lubaś, R. and Wąs, J.: Pedestrian Spatial Self-organization According to its Nearest Neighbor Position, The Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics 2014, pp.201-206, 2014.10
- 36) 吉田克之: 避難行動予測における図式解法の問題点とEBモデルの提案: EBモデル(伸縮ブロックモデル)による群集流の解析 その1, 日本建築学会計画系論文報告集, No.409, pp.35-43, 1990.3
- 37) 吉田克之: EBモデルによる集団歩行特性の検討および在来の図式解法の補正方法の提案 - EBモデル(伸縮ブロックモデル)による群集流の解析 その2-, 日本建築学会計画系論文報告集, No.413, pp.29-38, 1990.7
- 38) 佐野友紀: 鉄道駅における群集流動横断時の歩行特性に関する研究, 日本建築学会研究報告集, Vol.70, pp.309-312, 2000.2
- 39) 高柳英明, 佐野友紀, 渡辺仁史: 群集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, pp.185-191, 2001.11
- 40) 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, No.555, pp.191-197, 2002.5
- 41) Nikolic, M. and Bierlaire, M.: Pedestrian flow characterization based on spatio-temporal Voronoi tessellations, 15th Swiss Transportation Research Conference, No. 679, pp.2101-2107, 2015.4

2. 歩行者群集のモデル化と可視化

- 1) 建築設計資料集成 -人間, p.128, 日本建築学会, 東京, 2003
- 2) 江原義弘, 山本澄子: ボディダイナミクス入門 歩き始めと歩行の分析, 医歯薬出版株式会社, pp.94-99, 東京, 2002

- 3) GroundwaterSoftware, Grapher: an intuitive 2D & 3D graphing package, <http://www.groundwatersoftware.com/grapher.htm>, on 2016-10

3. 群集流横断における歩行者の回避行動

- 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) 建部謙治, 佐野友紀: 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, 日本建築学会計画系論文集, No.554, pp.175-180, 2002.4
- 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) 加藤邦夫, 上原孝雄, 中村和男, 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, pp.119-129, 1980.3
- 5) 竹内啓五: 画像処理による群集の特徴評価に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.486, pp.109-116, 1996.8
- 6) 辻本誠, 志田弘二, 建部謙治: 歩行解析への画像処理技術の応用に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No.436, pp.41-47, 1992.6
- 7) 土屋伸一, 古川容子, 宮野義康, 吉田直之, 長谷見雄二: 車椅子使用者が混在する群集の流動特性に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, No.571, pp.1-7, 2003.9
- 8) 古川容子, 土屋伸一, 稲原攝雄, 長谷見雄二: 高齢者疑似体験用具による高齢者の群集時歩行行動の再現可能性, 日本建築学会環境系論文集, No.581, pp.9-14, 2004.7
- 9) 土屋伸一, 長谷見雄二: 病棟特有の搬送形態による群集避難行動特性, 日本建築学会計画系論文集, No.640, pp.1271-1276, 2009.6
- 10) 佐野友紀, 渡辺仁史: 空間-時間系モデルを用いた群衆歩行軌跡の可視化, 日本建築学会計画系論文集, No.479, pp.125-130, 1996.1
- 11) 佐野友紀, 渡辺仁史: 交差立体可視化モデルを用いた群衆の交錯状態の表現に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.494, pp.147-151, 1997.4
- 12) 高柳英明, 佐野友紀, 渡辺仁史: 群集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, pp.185-191, 2001.11
- 13) 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
- 14) 佐野友紀, 竹市尚広, 木村謙, 大宮喜文, 吉田克之, 渡辺仁史: 高層建築物避難を想定した階段室における在館者群集の合流特性, 日本建築学会計画系論文集, No.598, pp.51-56, 2005.12
- 15) 建部謙治, 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集, No.418, pp.51-57, 1990.12
- 16) 建部謙治, 辻本誠, 志田弘二: 回避行動開始点の判定と前方回避距離: 歩行者の回避行動に関する研究(II), 日本建築学会計画系論文集, No.465, pp.95-104, 1994.11

- 17) 依田光正, 塩田泰仁: 人間同士のすれ違い行動における回避領域の実験的研究, 人間工学, Vol.35, No.1, pp.9-15, 1999

4. 開口部通過における群集の行動性状

- 1) 建築設計資料集成 - 人間, 日本建築学会, 東京, 2003
- 2) Liao, W., Seyfried, A., et al.: Experimental study on pedestrian flow through wide bottleneck, The Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics 2014, pp.26-33, 2014.10
- 3) Zhang, J., Britto, D., et al.: Quantitative validation of PEDFLOW for description of unidirectional pedestrian dynamics, The Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics 2014, pp.733-738, 2014.10
- 4) Zhang, J. and Seyfried, A.: Quantification of bottleneck effects for different types of facilities, The Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics 2014, pp.51-59, 2014.10
- 5) 山本昌和, 柏原士郎, 吉村英祐, 横田隆可, 阪田 弘: 群集の歩行特性から見た避難計算の問題点に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, E-1分冊, pp.1093-1094, 2000.9
- 6) 植竹徹, 渡部学, 奈良松範: 出入口および階段降り口における群集の流動係数について, 日本火災学会論文集, pp.1-7, 1996.4
- 7) Schadschneider, A., Klingsch, W., Klüpfel, H., Kretz, T., Rogsch, C. and Seyfried, A.: Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications, Encyclopedia of Complexity and Systems Science, pp.3142-3176, 2008.2
- 8) Hoogendoorn, S. P. and Daamen, W.: Pedestrian Behavior at Bottlenecks, Transportation Science, Vol.39, Issue 2, pp.147-159, 2005.5
- 9) 佐野友紀, 今西美音子: 進入角度・群集密度が回避時の身体ひねりに与える影響 -群集流横断における歩行者間の回避行動分析 その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, E-1分冊, pp.699-700, 2014.9
- 10) Imanishi, M. and Sano, T.: Level of avoidance in crossing pedestrian flows, The Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics 2014, pp.367-375, 2014.10
- 11) 佐野友紀, 今西美音子: 群集流横断における歩行者間の回避強度水準の検討, 短時間歩行パス分析をもちいた群集解析, その1, 日本建築学会計画系論文集, No.698, pp.917-922, 2014.4
- 12) William, H., Warrent, Jr. and Suzanne Whang: Visual Guidance of Walking Through Apertures -Body-Scaled Information for affordances, Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance, Vol.13, No.3, pp.371-383, 1987.2

5. 総括

なし