

東京理科大学「火災安全科学研究拠点」

■ 研究成果概要報告書

研究課題		廊下における避難行動特性に関わる実験的研究	実施年度 平成 27 年度
研究代表者	所属	株式会社大林組 技術研究所	
	氏名	山口純一	
	問合せ先メールアドレス	yamaguchi.junichi@obayashi.co.jp	
受入担当責任者	氏名	大宮喜文	
<p>1. 研究の背景および目的</p> <p>本研究は、マルチエージェント避難シミュレーション等の新しい予測計算法の開発・検証に必要な歩行特性に関わるデータを求めるための避難実験の実施および実験データの分析を目的とする。</p> <p>2000年に建築基準法に性能規定化の考え方を基にした告示（避難安全検証法）が導入され、15年が経過し、適用事例も増え、世の中に浸透してきている。このうち、ルートC（高度な検証方法）は、高度な計算等（避難シミュレーションや実験等）に基づき安全性を確認することにより、一定の安全性を確保しつつ自由度の高い建築計画や防火区画等の減免が可能な手法である。しかし、現状では、告示に定められる計算法を用いる事が通例となり、発展的な展開が見られない現状がある。告示に定められる計算法は、避難行動予測に関わる十分な知見が整わない中で、安全側の設定・単純化を行っているため、現実の避難行動と必ずしも整合しない予測結果を与えることが指摘されている。一方で、告示計算法以外のより精度の高い新しい予測手法等を開発、適用するためには、避難行動予測のベースとなる実態の歩行特性データ（歩行速度、滞留密度、流動係数やそれらを支配する要因）が必要である。告示計算法に用いられている行動特性データは1970年代に行われた実験・調査を基としており、現在の計測技術を用いて再度実験検討を行い、詳細な画像データ等を取得、行動特性や歩行軌跡等を分析することにより、より安全で、より合理的な建築物の実現に寄与することが可能となる。</p>			
<p>2. 利用施設及び利用日</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 火災科学研究センター実験棟（2015年7月31日） 予備実験 ・ 火災科学研究センター実験棟（2015年10月19日～24日） 実験準備、予備実験、本実験 			

3. 実験方法・研究成果、および考察（申請時の計画に対する達成度合いも含む）

※継続課題の場合は、前年度との関係性、進展度合いについても記載すること。

①研究方法

実大歩行実験を実施しその映像の解析を行い、歩行速度、密度、流動係数やそれらを支配する要因などを含んだ歩行特性データを取得する。得られたデータの精緻化や高度化を行い、人的要因として歩行速度、密度、流動係数等、建築的要因として開口幅や通路幅等と歩行特性の関係を整理する。

②実験概要

実験は、2015年10月24日(土)に東京理科大学野田キャンパス火災科学研究センター実験棟にて行った。被験者の属性を表1に示す。また、実験中の様子を写真1に示す。

表1 被験者の属性

年齢	20歳～25歳
人数(性別)	96人(男62人・女34人)
所属	大学生・大学院生・専門学校生
歩行能力	身体が健康かつ歩行に不自由なし



写真1 実験の様子

③実験条件

密度や歩行速度等の基本的な歩行特性を明らかにする実験（Aシリーズ）および出口の通過や合流等の建築空間内の歩行特性を明らかにする実験（Bシリーズ）を行った。Aシリーズについては密度 ρ と歩行速度 V または流動係数 N の関係の整理、Bシリーズについて

は開口幅 B や通路幅 D 等の建築的要因の関係を把握する。

本研究では直線通路(A1)、L型通路(A3)、単純開口(A4)の3種類11ケース、ネックが一箇所ある通路(B1)の5ケースを対象とする。(1)~(4)に各実験条件の概要を、表2に各実験の通路形状等の条件を示す。

(1)直線通路(A1)

ネックがない通路を想定し、通路幅を3通りに変化させた歩行実験を行う。この実験では、直線の通路での人の流れの把握を目的とする。

(2)L型通路(90°折れ曲がり)(A3)

L型の折れ曲がりがある通路を想定し、通路幅を2通りに変化させた歩行実験を行う。この実験では、折れ曲がりのある通路の歩行特性の把握を目的とする。

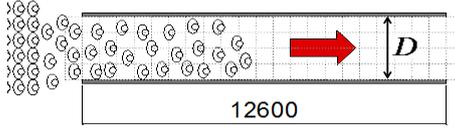
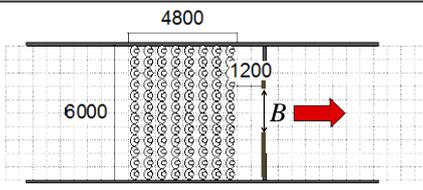
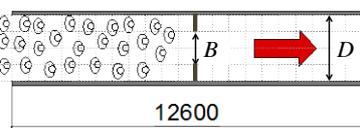
(3)単純開口(A4)

開口幅を6段階に変化させた歩行実験を行う。ここでは、開口部から1.2m離れた位置を先頭として初期密度3.3人/m²で集結させた。この実験では、開口部位置での歩行特性の把握を目的とする。

(4)ネックが一箇所ある通路(B1)

直線通路の中央にネックとなる開口部を一箇所配置し、通路幅と開口幅の組み合わせを5通りに変化させた歩行実験を行う。この実験では、開口部周辺の領域を含めた歩行特性の把握を目的とし、ネック通過前のネックにより通過人数が制限された高密度状態の歩行特性とネック通過後の低密度状態の歩行特性の把握を対象とする。

表2 実験条件概要

直線通路 A1	通路幅 D [m]	1.2									
		1.8									
		2.4									
L型通路 A3	通路幅 D [m]	1.2									
		1.8									
単純開口 A4	開口幅 B [m]	0.8									
		1.2									
		1.6									
		1.8									
		2.0									
		2.4									
ネックが一箇所 ある通路 B1	開口幅 B [m]	0.8	1.2								
											通路幅 D [m]
	B/D	0.67	0.44	0.33	0.67						

④測定方法

床から約 15.2m の高さに設置したビデオカメラから被験者の頭頂部に付けた色彩情報が読みとれるテープを撮影した。その画像をもとに 1/30 秒ごとの位置座標を抽出する解析を行った。また、画像解析を行う際に身長差による位置座標の差異を補正するため、身長 10cm ごとに頭部のテープの色を 4 種類に変化させた。

⑤実験結果

(1)解析データ

図 1 に解析データの概要を示す。画像データを解析して得られた時刻 t の歩行者 i の位置座標 $\{X_i(t), Y_i(t)\}$ から、歩行軌跡 (図 2) および断面 j における流動量 $R_{ij}(t)$ [人/s]、流動係数 $N_{ij}(t)$ [人/m/s] を、領域 k における領域密度 $\rho_k(t)$ [人/m²]、領域歩行速度 $V_k(t)$ [m/s] を算出した。なお、領域歩行速度 V_k は時刻 t において領域 k に属する歩行者 i の歩行速度 の平均値である。

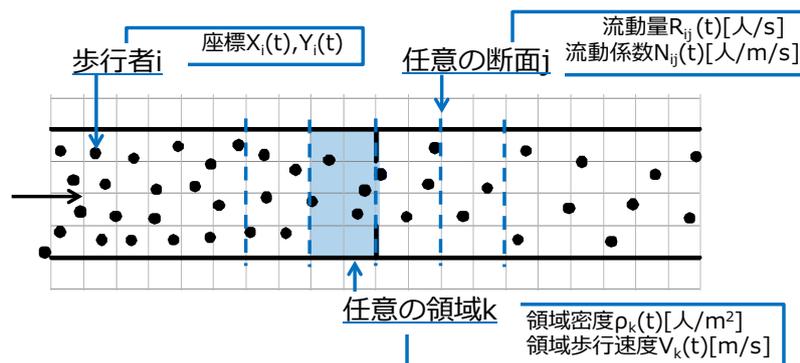


図 1 解析データの概要

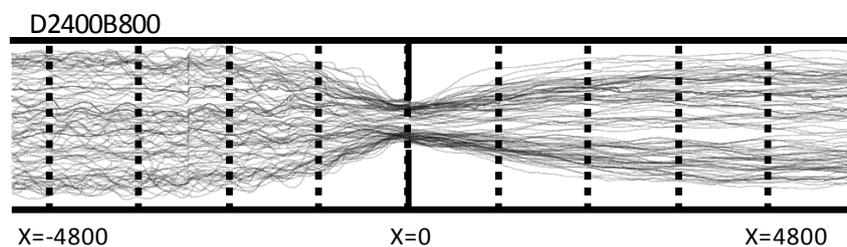


図 2 歩行軌跡の画像解析結果の一例 (B1)

(2)測定領域・断面

図3に示す通り、直線通路(A1,B1)は通路の中心 $X=0$ (ネック)、L型通路(A3)は折れ曲がり部 $X=0, Y=0$ を起点とし、1200 mm 間隔で断面および領域を設定した。なお、単純開口(A4)は開口部を $X=0$ とし、開口部の前後 600 mm を測定領域とした。

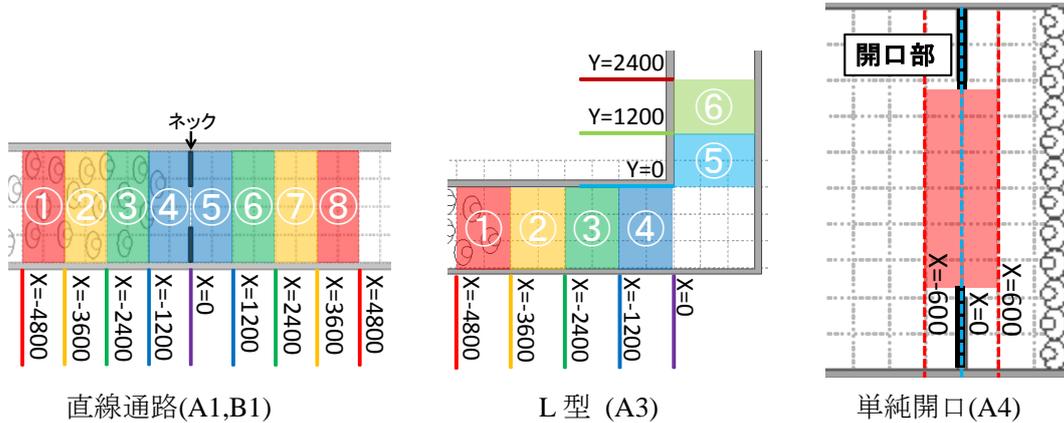


図3 解析断面

(3)解析結果

表3に各ケースの流動量 R_{ij} 、領域密度 ρ_k 、領域歩行速度 V_k の一例を示す。直線通路、ネックが一箇所ある通路は密度等が計測された後 14 秒目からその終了 4 秒前まで、L型通路、単純開口は条件ごとに定常を確認した。また、領域密度 ρ_k の(b-1)においては実測値の 5 秒間の移動平均を表示した。

(3-1)直線通路(A1)

(a) 流動量 R_{ij}

表3の A1(a-1)は各断面の流動量 R_{ij} の時刻歴の一例を、(a-2)は定常時の R_{ij} を時間平均した値を実験条件ごとに示した結果である(以後 b-1,2、c-1,2 においても同じ)。これより、通路幅が同じ場合、どの断面に対しても流動量 R_{ij} はほぼ一定である。また、定常時の流動量 R_{ij} は通路幅に比例して大きくなる。

(b) 領域密度 ρ_k

表3の A1(b-1)(b-2)より、定常時の領域密度 ρ_k は通路幅に依存せず、どの領域においてもほぼ一定である。

(c) 領域歩行速度 V_k

表3の A1(c-1)(c-2)より、定常時の領域歩行速度 V_k は通路幅に依存せず、どの領域においてもほぼ一定である。

(3-2)ネックが一箇所ある通路(B1)

(a) 流動量 R_{ij}

表3の B1(a-1)(a-2)より、どの断面に対しても流動量 R_{ij} はほぼ一定である。また定常時の

流動量 R_{ij} は通路幅よりも開口幅に依存し、流動量 R_{ij} は開口幅に比例する。

(b) 領域密度 ρ_k

表3の B1(b-1)(b-2)より、定常時の領域密度 ρ_k はネック通過前より通過後の方が低くなる。また、ネック通過通過後の領域密度 ρ_k は通路幅と開口幅に依存する。

(c) 領域歩行速度 V_k

表3の B1(c-1)(c-2)より、定常時の領域歩行速度 V_k はネック通過前より通過後の方が高くなる。また、ネック通過前の領域歩行速度 V_k は通路幅と開口幅に依存するが、通過後は大きく依存しない。

(3-3)L型通路(A3)

(a) 流動量 R_{ij}

表3の A3(a-1)(a-2)より、定常時の流動量 R_{ij} は通路幅に比例して大きくなる。また、折れ曲がり部の前後で流動量 R_{ij} の変化は見られない。

(b) 領域密度 ρ_k

表3の A3(b-1)(b-2)より、定常時の領域密度 ρ_k は折れ曲がり部を通過すると低くなる。

(c) 領域歩行速度 V_k

表3の A3(b-1)(b-2)より、定常時の領域歩行速度 V_k は折れ曲がり部を通過すると高くなる。また、領域歩行速度 V_k は通路幅には大きく依存しない。

(3-4)単純開口(A4)

(a) 流動量 R_{ij}

表3の A4(a-2)より、定常時の流動量 R_{ij} は開口幅に比例する。

(b) 領域密度 ρ_k

表3の A4(b-2)より、定常時の領域密度 ρ_k は開口幅が大きくなるほど減少する。

(c) 領域歩行速度 V_k

表3の A4(c-2)より、定常時の領域歩行速度 V_k は開口幅が大きくなるほど増加する。

表3 各ケースの流動量 R_{ij} 、領域密度 ρ_k 、領域歩行速度 V_k

	流動量 R_{ij}	領域密度 ρ_k	領域歩行速度 V_k
直線 通路 A1	(a-1)	(b-1)	(c-1)
	(a-2)	(b-2)	(c-2)
ネッ クが 一箇 所あ る通 路 B1	(a-1)	(b-1)	(c-1)
	(a-2)	(b-2)	(c-2)
L型 通路 A3	(a-1)	(b-1)	(c-1)
	(a-2)	(b-2)	(c-2)
単純 開口 A4	(a-2)	(b-2)	(c-2)

⑥流動係数・歩行速度・密度に関する考察

(1)流動係数に関する考察

(1-1)流動係数 N_{ij} の比較

先に述べた各ケースの定常状態の流動量 R_{ij} [人/s]をその断面の幅（通路幅 D または開口幅 B ）[m]で除すことにより流動係数 N_{ij} [人/m/s]を算出した。図4に通路幅 D 、開口幅 B ごとに分類した各ケースの流動係数 N_{ij} を示す。図4より全体的な傾向として、ネック（図4の直線ネック有（ネック）、単純開口）の流動係数 N_{neck} は通路の流動係数 N_{co} より大きい。これはネックの手前で人が滞留しているために、ネックの人の流れが多くなったことが影響したと考えられる。また通路の流動係数 N_{co} は、直線通路やL型通路は通路幅 D によらず概ね一定で、それぞれ約 1.55 人/m/s, 1.44 人/m/sをとる。また、ネックのある通路(B1)は直線通路(A1)よりも通路の流動係数 N_{co} が低減しており、ネックの有無は通路の流動係数 N_{co} に影響を与えることがわかる。

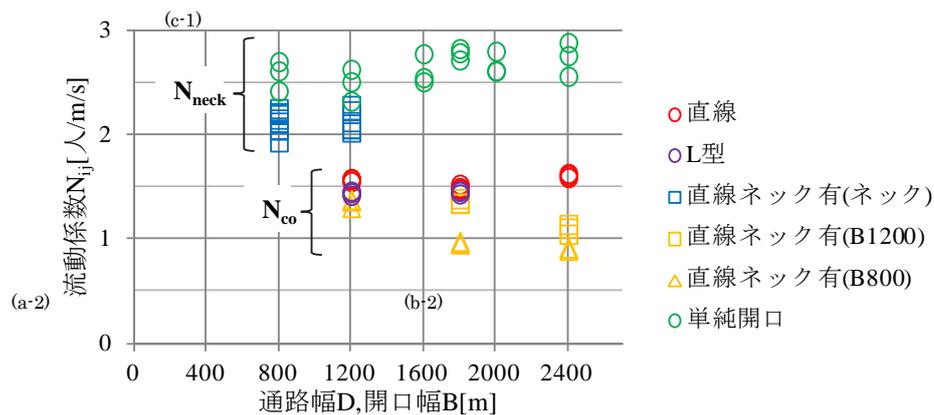


図4 各ケースの流動係数 N_{ij}

(1-2)ネックがある通路(B1)の流動係数 N_{ij}

図5にネックが一箇所ある通路(B1)の定常時における流動係数 N_{ij} と通路幅 D に対する開口幅 B の比 B/D の関係性を示す。一般に、通路の流動量 R_{co} は通路幅 D と通路の流動係数 N_{co} の積で、ネックの流動量 R_{neck} は開口幅 B とネックの流動係数 N_{neck} の積で与えられる。さらに、定常時の流動量 R_{ij} はどの断面でも一定であるので、式(1)が成り立つ。また表3より、各断面の流動量 R_{ij} は開口幅 B に依存することが示されたため、通路の流動量 R_{co} はネックの流動量 BN_{neck} によって支配されると考えれば、通路の流動係数 N_{co} は式(2)により与えられる。ただし、ネックの流動係数の最大値 $N_{neck(max)}$ は実験値より 2.2 人/m/sとした。

$$DN_{co} = BN_{neck} \quad (1)$$

$$N_{co} = N_{neck(max)} \left(\frac{B}{D} \right) = 2.2 \left(\frac{B}{D} \right) \quad (2)$$

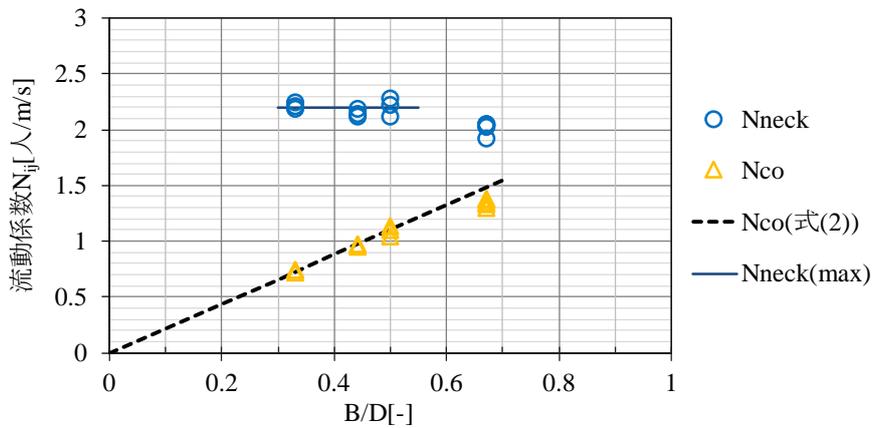


図5 B/D と流動係数 N_{ij} の関係

(2) 歩行速度と密度に関する考察

(2-1) ネットとネット通過後の歩行速度 V_k と密度 ρ_k

直線通路(A1)の全領域、ネットが一箇所ある通路(B1)のネット通過後の領域⑥～⑧における定常状態の領域密度 ρ_k と領域歩行速度 V_k の関係を図6に示す。また、参考として、L型通路(A3)の領域⑥、単純開口の開口部、通路(B1)のネットおよび既往研究^{2) 3) 4)}による値を参考として示す。本実験において側壁のみにより歩行が制限されている条件の ρ_k - V_k は、直線的な関係を示すことが明らかとなった。また、その近似式は式(3)として与えられる。さらに、図4と図6より同じ開口幅 B でも単純開口の方が直線ネット有よりも流動係数 N_{ij} が高い理由はネットで生じる密度の差であると考えられる。

$$V_k = 1.5 - 0.31\rho_k \quad (3)$$

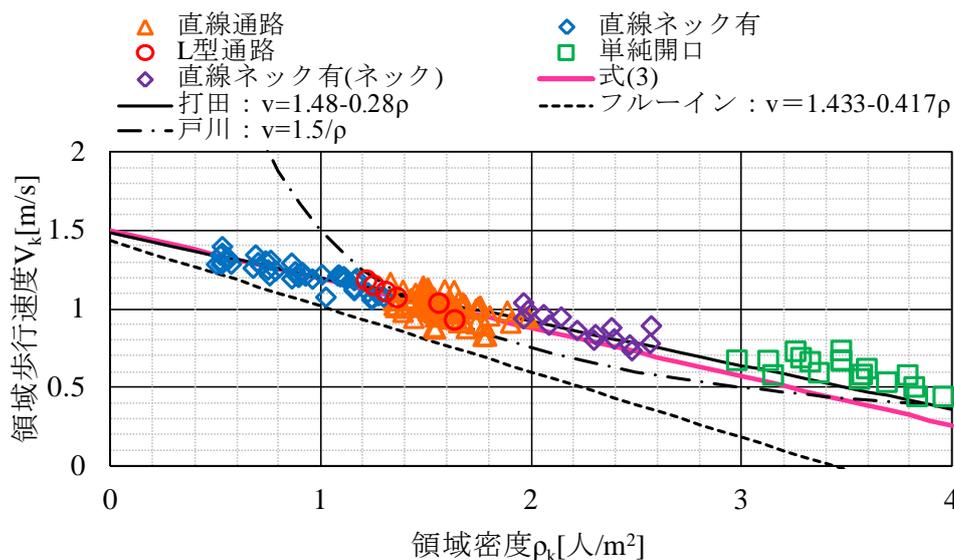


図6 側壁のみにより歩行が制限されている条件

(2-2)ネックにより流動が制限された場合の歩行特性

ネックが一箇所ある通路(B1)の領域①～⑤における定常時の領域密度 ρ_k と領域歩行速度 V_k の関係を図7に示す。定常時には、通路の流動量 R_{co} とネックの流動量 R_{neck} が等しく、また一般に流動係数 N_{ij} は領域密度 ρ_k と領域歩行速度 V_k の積⁴⁾で与えられるので式(4)が成り立つ。したがって、ネックにより歩行が制限されている群集の領域歩行速度 V_k は、ネックの流動量 R_{neck} 、領域密度 ρ_k 、通路幅 D 、開口幅 B により決定されると考えられる。ここで、定常時のネックの流動係数 N_{neck} は概ね一定 ($N_{neck(max)}=2.2$) とすると、式(5)に示すように領域歩行速度 V_k は領域密度 ρ_k に反比例する。またその比例定数は通路幅 D に対する開口幅 B の比 B/D に依存する。

$$\rho_k V_k = \frac{R_{neck}}{D} = \left(\frac{B}{D}\right) N_{neck} \quad (4)$$

$$V_k = \left(\frac{B}{D}\right) \left(\frac{N_{neck(max)}}{\rho_k}\right) = \left(\frac{B}{D}\right) \left(\frac{2.2}{\rho_k}\right) \quad (5)$$

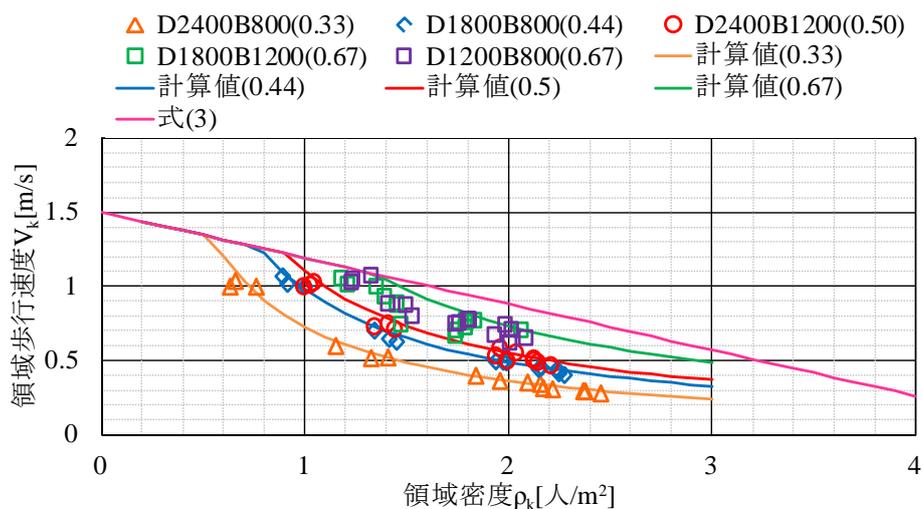


図7 ネックにより流動が制限された場合の歩行特性

⑦まとめ

本研究は新しい予測計算法の開発や検証に必要な人的要因（流動量・速度・密度）や建築的要因（ネック幅、通路幅など）を考慮した歩行軌跡や密度、流動係数等の歩行特性データの取得を目的として、実大歩行実験を実施し、その映像からデータの解析および整理を行った。得られた知見を以下に示す。

(1)歩行特性（歩行軌跡、流動量、流動係数、歩行速度、密度）について、空間形状ごとの特徴を定性的、定量的に示した。

①直線通路(A1)やL型通路(A3)の流動係数は通路幅によらず概ね一定で、それぞれ約 1.55 人/m/s、1.44 人/m/s である。

②ネックの有無は通路の流動係数に影響を与える。

(2)ネックが一箇所ある通路について、ネックに依存する通路の流動係数に関する簡易的な予測式および、歩行速度と密度に関する近似式と理論式を提案した。

①ネックがある通路において、通路の流動量がネックの流動量によって支配されるとき、通路の流動係数は通路幅に対するネック幅の比 B/D に比例する。

②一方向の群集流と考えられる条件の領域密度と領域歩行速度は直線的な関係を示すことが明らかとなり、その関係は打田やフルーインの結果と同等となった。

③ネックにより歩行が制限されている群集の領域歩行速度は、ネックの流動量、領域密度、通路幅および開口幅により決定される。さらにネックの流動係数は概ね一定と考えれば、領域歩行速度は領域密度に反比例し、その比例定数は通路幅に対する開口幅の比 B/D に依存する。

④通路幅と開口幅の比 B/D が一定ならば、領域流動係数は一定の値となり、その値は比 B/D に依存する。

記号

B:開口幅[m], D:通路幅[m], N_{co} :通路の流動係数[人/m/s], N_{ij} :流動係数[人/m/s], N_{neck} :ネックの流動係数[人/m/s], $N_{neck(max)}$:ネックの流動係数の最大値[人/m/s], R_{co} :通路の流動量[人/s], R_{ij} :流動量 [人/s], R_{neck} :ネックの流動量[人/s], V_k :領域歩行速度[m/s], ρ_k :領域密度[人/m²]

参考文献

- 1) 防火関係技術指針作成委員会：避難安全検証法の解説及び計算例とその解説、2001
- 2) 戸川喜久二：群集流の観測に基く避難施設の研究,建築研究報告、1955
- 3) 打田富雄：電車站の乗降場及び階段幅員、鉄道技術研究中間報告、1956
- 4) J.j.フルーイン,長島正充訳：歩行者の空間,鹿島出版会,1974

4. 今後の展望（今後の発展性，見込み等についても記述）

本研究では、群集の歩行特性を空間条件と比較し、マクロな視点に基づいて関係性の整理を行った。今後、群集内のより詳細な歩行特性を把握するためには、歩行者間の前後距離や歩行者が向いている方向などといったミクロな視点に基づいた特性を探る必要がある。この検討によって、群集の歩行特性を多角的に把握することができ、マルチエージェント避難シミュレーション等の検証精度の向上に寄与すると考えられる。

5. 成果の公表状況（学会への発表，学術誌への投稿等を記述。予定も含む）

①平成 28 年度日本火災学会研究発表会

群集歩行性状に関する実験的研究

- その 1 実験概要
- その 2 画像解析による分析
- その 3 直線通路
- その 4 L型通路
- その 5 単純開口
- その 6 ネックのある通路
- その 7 直線通路における密度, 歩行速度および流動係数に関する考察
- その 8 開口部における密度, 歩行速度および流動係数に関する考察
- その 9 ロ型通路
- その 10 合流のある通路

②2016 年度日本建築学会大会（九州）学術講演会

群集歩行性状に関する研究

- その 1 実験概要
- その 2 画像解析による分析
- その 3 直線通路
- その 4 L型通路
- その 5 単純開口
- その 6 ネックのある通路
- その 7 合流のある通路
- その 8 直線通路における密度, 歩行速度および流動係数に関する考察
- その 9 開口部における密度, 歩行速度および流動係数に関する考察
- その 10 定常予測計算法

廊下の滞留を考慮した群集歩行性状の簡易予測計算法 その 2

6. 経費の使用状況

消耗品費・会議費・印刷費等		旅費		人件費	
事 項	金額(円)	事 項	金額(円)	事 項	金額(円)
通路模型製作 費(パーティシ ョン、段ボー ル、カラーコー ン、養生シー ト、ガムテープ 等)	570,981				
宿泊費	12,000				
小計	582,981	小計		小計	
東京理科大学 負担分 総計 582,981 円					
その他 負担分 総計 2,400,000 円					

※スペースが足りない場合はページを増やしても構いません。

※上記5に記載された成果公表については、別刷1部をご提出願います。PDFファイル等の電子データでも構いません。

※本成果報告概要書に記載された内容は、本拠点の成果報告としてWeb等で公開されることをお含み置き下さい。

※本成果報告概要書と併せて、研究報告書を提出頂いても構いません。(フォーマットは問いません。)

※後日開催予定の成果講評会で使用されるプレゼンテーション用の電子ファイルについても提出願います。(学内での報告に使用)