避難計算のための群集歩行シミュレーションモデルの
研究とそれによる避難安全性の評価A STUDY OF SIMULATION MODEL FOR PEDESTRIAN MOVEMENT IN FIRE
ESCAPE AND EVALUATION OF FIRE SAFETY OF PLANS BY IT

岡崎 甚幸*, 松下 聡**

Shigeyuki OKAZAKI and Satoshi MATSUSHITA

This is a proposal of an application method of simulation model for pedestrian movement to evaluation of building plans regarding fire escape. The model can visualize the movement of each pedestrian in building plans, so designers can easily find problems of plans to improve them. 11 examples of simulation show that this model is available for evaluation of fire safety of plans as well as existing calculation method, and that the model is available for other problems like changes of coefficient of pedestrian flow and change of path. The accuracy of the model is confirmed by experiments of pedestrian movement.

Keywords : fire escape, simulation model, stagnation, coefficient of pedestrian flow, path
避難, シミュレーションモデル, 滞留, 流動係数, 歩行経路

序

防災評定では「新・建築防災計画指針」¹⁾に基づく避難計算(以後「防災評定避難計算」と呼ぶ)が, 建物の避難安全の評価・検討に用いられている。文献2)によると, この計算は, 避難行動予測手法の分類上「評価・検討型」と呼ばれている。この型の定義は「特定の計画または実体に対して避難の状況, 特に群集流動状況を予測し, 避難安全の評価・検討を行うもの」である。これに対して著者達の電算機による「群集歩行シミュレーションモデル」^{3)~8)}はそこでは「特性解析型」と呼ばれ, 「特定の建物を対象とせず, 主として建物の一部を取り上げて詳細なモデルを組立て, 行動の理論的な原理を解明しようとするもの」と定義されている。

また文献2)は防災評定避難計算に対するものとしてトランザクション法およびその他を挙げ, トランザクション法の中に座標モデル, 経路モデル, メッシュモデルを挙げている。著者達の「群集歩行シミュレーションモデル」は座標モデルに位置づけられているが, 複雑な経路を認知し, それに従って避難できる経路モデルとしての機能も備えている。

この群集歩行シミュレーションモデルによって防災評

定避難計算と同一条件で, 与えられた平面上でシミュレーションを行い, 防災評定避難計算の結果およびそのほかの以下に述べる種々の検討が可能であることを示す。防災評定避難計算で行っている数値計算とグラフによる避難特性の表現ではなく, 個々の避難者の行動を時々刻々画面上に表示し, 建築空間の全体的・部分的な避難特性を視覚的に把握可能にする。またシミュレーション結果から, 必要な任意の時刻における出入口や通路の流動係数や歩行速度が測定可能なので, プログラムが正常に動作しているか否かを容易に検討できる。

このモデルによると防災評定避難計算で行われる避難時間と滞留人数の検討以外に以下の問題に対しても検討が可能である。

- 1) 群集の流動係数は一定の値ではなく, 種々の理由により低下し, それが避難時間の増大につながる。
- 2) 避難途中での歩行者の滞留や交差流の検討。
- 3) 防災評定避難計算で設定されている避難経路とは別の新しい避難経路の検討。

特に1)の流動係数の低下に関しては, 種々の状況下で歩行実験を行い, 実際の群集歩行とシミュレーション結果が一致することを確認する。そして滞留密度の形成

* 福井大学工学部環境設計工学科 教授・工博

Professor, Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Fukui Univ., Dr. Eng.

** 福井大学工学部環境設計工学科 助教授・工博

Associate Professor, Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Fukui Univ., Dr. Eng.

のされ方、群集歩行密度の形成のされ方、群集歩行密度（滞留密度）の値やそれと歩行速度の関係がシミュレーションと実際の調査⁹⁾とで良く一致していることを示す。つまり、与えられた平面図の上で、避難上危険なかなる行動が、いかなる場所で発生するか、あるいは平面全体でいかなる避難経路を設定するのが合理的のかななどを解明するのに役立ち、設計へのフィードバック¹⁰⁾に適している。

この方法は何よりも分かりやすく、それ故説得力がある。しかし現行の簡便な計算方法に取って代わろうとするものではない。ここでは、このような手法の潜在的な可能性を述べるに止め、これを実際に指針化、あるいは基準化するか否かは行政その他の判断にゆだねる。

1. 「新・建築防災計画指針」による避難計算方法の概要

「新・建築防災計画指針」で述べられている避難計算方法では以下の仮定に基づいて、避難時間、滞留人数を計算し、建物の避難安全性を評価する。

1.1 避難計算方法の仮定

避難計算は以下の仮定を前提として行われる。

- 1) 避難対象者は室内に均等に分布している。
- 2) 同一室内の避難はいつせいに開始される。出火室の避難開始時間は $2\sqrt{A}$ 、他の室では $4\sqrt{A}$ 。（ A ：出火室面積）
- 3) 避難者はあらかじめ定められた経路を通して避難する。
- 4) 歩行速度は一定で、追い越しや逆戻りなどが無い。
- 5) 群集流動係数はあらかじめ決められている。
- 6) 出入口が複数で特に誘導がない場合は最寄りの出入口から退出。

1.2 避難時間の計算

3通りの避難時間として、居室避難時間（各居室ごとに、その室の全員が室外に避難完了するまでに要する時間）、廊下避難時間（廊下などの第1次安全区画に避難者が存在する時間の長さ）、階避難時間（火災発生時刻からその階の全員が階段室または附室に避難完了するまでの時間）を計算する。

1.3 評価

避難時間および滞留人数を以下のとおり評価する。

- (1) 避難時間の評価：上記各避難時間がそれぞれの許容避難時間より小さいと避難は安全であるとみなされる。居室、廊下、および階許容避難時間はそれぞれ、「 $2 \sim 3\sqrt{A_1}$ 」, 「 $4\sqrt{A_1+A_2}$ 」, 「 $8\sqrt{A_1+A_2}$ 」である。 A_1 は出火室の面積、 A_2 は非出火室の面積と廊下または第一次安全区画の面積の合計である。
- (2) 滞留人数の評価：出入口などのネック部分の最大滞留人数を計算し、必要面積が確保されているかを評価する。

廊下などの第一次安全区画の必要面積

$$= \text{最大滞留人数} \times 0.3 \text{ [m}^2/\text{人]}$$

附室やバルコニー等の第二次安全区画の必要面積

$$= \text{最大滞留人数} \times 0.2 \text{ [m}^2/\text{人]}$$

2. 磁場モデルによる群集歩行シミュレーションモデルの概要

2.1 モデルの概要^{3)~8)}

歩行者に正の磁極、壁や障害物にも正の磁極、各歩行者の歩行目的地に負の磁極を与える。磁極はその種類によって様々な磁場をその周辺に形成する。任意の歩行者に働く力に比例して歩行者の新しい位置、速度、向きを求める³⁾。各磁極が持つ磁荷の値が大きい場合は、歩行者と障害物間、歩行者間に大きな反発力が働き、歩行者と障害物間、歩行者間の距離が大きくなり、全体として歩行者密度が小さくなる。そのような磁場においてシミュレーションを行って流動係数を測定すると、小さい値となる。磁荷の値が小さい場合は逆になる。この歩行者、障害物、目的地などの磁荷の値を調節することにより、群集歩行の変化が起こり、そのシミュレーション結果から測定される流動係数は変化する。

壁、独立柱、柵などの障害物は、歩行領域に対して時計回りになるような壁面のベクトル w_i の連続で与える。すべての壁面の集合を W とすると

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_n)$$

任意の点 m で互いに接続する任意の二つの壁ベクトルを w_i, w_j とすると

$$w_i = ((l_x, l_y), (m_x, m_y))$$

$$w_j = ((m_x, m_y), (n_x, n_y))$$

である。点 m が歩行領域に対して凸になるとき点 m をコーナーと呼ぶ。図—1のように、2つの壁ベクトル w_i, w_j が点 m において結合しているとき、2つのベクトルの成す角度を α とすると、「 $\sin \alpha > 0$ 」のとき、 m はコーナーと見なされる。

このような点 m の集合を M とする。集合 M 中の任意の1組のコーナー m_i, m_j の間を遮る壁面や障害物の有無により、 m_i, m_j 間の隣接関係を以下のように定義する。

$R(m_i, m_j) = 1$ ：隣接関係がある。

（ m_i, m_j 間を遮る壁面や障害物がない。）

$R(m_i, m_j) = 0$ ：隣接関係がない。

（ m_i, m_j 間を遮る壁面や障害物がある。）

図—1 コーナーの計算

集合 M から任意のコーナー m_i を取り出し、次に、 $R(m_i, m_j)=1$ となるコーナー m_j を取り出す。さらにこの手続きを繰り返し、新たに取り出したコーナーに隣接するコーナーを順次取り出し、コーナーの列集合 M_p を形成する。

$$M_p=(m_1, \dots, m_i, \dots, m_n)$$

このようなコーナーの列の最後に歩行者の目的地である出入口を加えたものを歩行経路とする。各歩行者はシミュレーション開始後、目的地に通じる歩行経路上の任意のコーナー m を順次仮目的地とし、そのコーナー m に負の磁極を仮想して、そこからの引力により歩行する。コーナー m に十分近づくと列中の次のコーナーを仮目的地として歩行し、最終的に目的地に到達する。集合 M の中から列集合 M_p を作るとき、その作り方によって、以下の各種の経路が形成される。

- (1) 指定経路 実験者が平面図を見て M_p を指定するもの
- (2) 最短経路 Dijkstra の方法による出発点と最終目標点との間の最短経路
- (3) 探索経路⁸⁾ シミュレーション中に各歩行者が指定経路や最短経路を見失ったとき、一定の規則に従ってもとの経路を探し続けるもの、あるいはシミュレーションの最初から最後まで探索を続けるもの
- (4) 誘導経路⁷⁾ 歩行空間内に誘導標を設定し上記各経路と組み合わせて経路を作成し、それにしたがって歩行するもの

防災評定の避難シミュレーションのためには指定経路だけで十分であるが、当然その他の経路によるシミュレーションも可能である。そのことによって多様な避難経路の可能性を検討できる。

2.2 シミュレーションデータ

このシミュレーションモデルで用いるデータの主なものは以下のとおりである。これらのデータを入力して、単位時間ごとに平面上の各歩行者の位置、速度、向きを計算し、計算機の画面上に歩行者を表示する。

(1) 空間データ

壁、独立柱、柵などの障害物のデータは壁面の集合 W により構成される。

出入口のデータは集合 M の中から相異なる壁に属する 2 点 m_i, m_j を結ぶ E_i によって作られる。したがって出入口の集合 E は以下のとおりである。

$$E=(E_1, \dots, E_i, \dots, E_n)$$

目的地のデータは出入口の任意のものが目的地として選ばれ、そこに歩行者が到達すると、その歩行者のシミュレーションは終了する。

(2) 歩行者データ

歩行者は集団で入力される場合と個別に入力される場

合がある。数百人に及ぶ歩行者のデータを 1 人ずつ入力することは不可能であるから一般的には集団入力を用いる。歩行者の全集団を G 、その中の任意の集団を G_i とすると

$$G=(G_1, \dots, G_i, \dots, G_n)$$

任意の集団 G_i は以下の特性を持つ。

$$G_i=(N_i, F_i, V_i, T_i, S_i, A_i, M_{pi}, D_i)$$

N_i =集団構成人数

F_i =磁力

V_i =平均歩行速度

T_i =歩行開始時間

S_i =歩行開始領域

A_i =歩行開始時の歩行者の向き

M_{pi} =歩行経路

D_i =歩行開始時の歩行者密度

G_i のデータはその構成員の N_i 人の一人一人のデータ P_i に自動的に変換される。集団内の各歩行者は以下の特性を持つ。歩行者のデータを個別に入力するときはこれらのデータを与える。

$$P_i=(F_i, x_i, y_i, a_i, v_i, T_i, M_{pi})$$

F_i =磁力

x_i =歩行者位置の X 座標

y_i =歩行者位置の Y 座標

a_i =歩行者の向き

v_i =歩行速度

T_i =歩行開始時間

M_{pi} =歩行経路

各歩行者の歩行速度 v_i は平均歩行速度を V_i とし、分散 $=0.25$ の正規分布乱数により定められる。歩行開始時の歩行者位置座標 (x_i, y_i) は歩行開始領域内に一様乱数により定められる。この場合他の歩行者との間隔が小さすぎる場合は再度乱数を発生させ、発生密度を保つように各歩行者の位置を定める。歩行開始領域は居室のゾーン分けされたものの一つ一つである。ゾーン中に乱数によって歩行者が分散配置され、それぞれの場所から避難開始する。歩行開始時の歩行者の向きは A_i であるが、歩行途中では、歩行経路上の目的地 m_i の方向 (a_i) に自動的に調節される。歩行者の磁力 F は全員同じ値を持つ。歩行開始時間 T および歩行経路 M_{pi} は同一集団内の歩行者に共通の値を持つ。

したがって、この方法では防災評定避難計算のように流動係数、歩行距離、出入口幅などを入力する必要はない。

2.3 避難時間の抽出

シミュレーション実行中に、ある歩行者がいずれかの出入口を通過したら、その「歩行者番号」、「時刻」、「出入口番号」が記録される。このデータを参照することにより、指定された任意の出入口に関して最初と最後に歩

行者が通過した時刻を即座に求めることができる。これを用いてシミュレーション結果の3通りの避難時間を以下の方法で容易に計算できる。

$$\text{居室避難時間} = T_{11} - T_{10}$$

T_{10} : その居室の避難開始時間

T_{11} : 居室の出口を歩行者が最後に通過した時間

$$\text{廊下避難時間} = T_{21} - T_{20}$$

T_{20} : 廊下に面する居室の出入口から最初の歩行者が廊下に流入した時間

T_{21} : 最後の歩行者が階段室に流入した時間

$$\text{階避難時間} = T_3 - T_0$$

T_0 : 火災発生時刻

T_3 : 最後の歩行者が階段室に流入した時間

上記の避難時間計算以外にも、以下のような項目が容易に計算でき、群集の歩行または滞留状況を視覚的に把握するほか、数量的にも確認することができる。

任意の出入口における任意の時間間隔内の流動係数

任意の歩行者の歩行速度

平面上の任意の部分の歩行者密度および人数

2.4 シミュレーションのフロー

磁場モデルによるシミュレーションモデルの全体構成は図-2のフローチャートのとおりである。

3. 群集歩行モデルによる避難シミュレーション

本論で提案している群集歩行シミュレーションモデルにより、EX1~EX11の11通りの平面に関して避難行動のシミュレーションを行った。まずその中から、代表的な例を3通り提示し、防災評定避難計算の結果と比較し、防災評定避難計算で行われている避難時間、滞留人

図-2 シミュレーションモデル全体のフローチャート

数の検討などに有効であることを示し、モデルの実用性を示す。さらに、防災評定避難計算では十分に現れないが、シミュレーションにより発見された問題点として以下のようなものが挙げられる。

- 1) 流動係数は防災評定避難計算では一定として扱われているが、状況により変化する場合が見られる。
- 2) 滞留の発生および、滞留のための有効面積の問題。
- 3) 避難経路の問題。防災評定避難計算では最寄りの出口から避難することとなっているが、場所により、避難時間や滞留人数に著しい片寄りを生じ、非現実的な現象が生じる場合がある。

これらの問題点に関して、確認のために行った実際の歩行実験結果も交えて述べ、より多様な問題の検討に対する有効性を示す。

3.1 シミュレーション例

避難シミュレーションを表-1、表-2に示す11通り

図-3 シミュレーション例 (EX1)

表一 避難計算例（図中の xxxx=出火地点に近くて使用しない出口、 =許容避難時間を超過）

サ ン プ ル	避難種類	室 名	出口	避難時間（秒）			問 題 点	
				許容値	防災評定	シミュレーション		
EX1	居室避難	事務室 1 (323.1㎡)	1	35.9	xxxxx 33.8	xxxxx 50.6	避難開始直後の居室出口における流動係数は低い。出口を出た直後に曲がると、歩行速度が低下し、流動係数が低下する。出口 2 の流動係数は 1.30。居室出口前の廊下に滞留が起こり、その影響で居室出口 3、4 の流動係数が低下し、居室避難が遅れる。出口 3、4 でそれぞれ 0.95、0.51。一方の階段だけが混雑し、他方は閑散とした状態が発生。	
2								
事務室 2 (323.1㎡)		3	24.5	31.0				
		4	24.5	49.2				
廊下避難		階段 1		104.5	54.0	60.6		
		階段 2			47.5	49.9		
階避難	階段 1		209.0	90.0	97.8			
	階段 2			119.5	122.8			
EX2	居室避難	事務室 1 (197㎡)	1	38.0	xxxxx 36.0	37.5 31.1		事務室 1、3 から出た歩行者が事務室 2 の前の廊下を歩行するので、事務室 2 から出難く、流動係数が低下する。階段 2 ヶ所に対して居室出口が 6 ヶ所あり、階段室前に滞留が起こり、広がる。
2								
事務室 2 (364㎡)		3	30.0	12.0	27.4			
		4		12.0	24.0			
事務室 3 (364㎡)		5	38.0	36.0 xxxxx	53.2 xxxxx			
		6						
廊下避難	階段 1		130.0	83.0	110.8			
	階段 2			120.0	110.4			
階避難	階段 1		261.0	121.0	151.9			
	階段 2			158.0	148.6			
EX3	居室避難	事務室 (438㎡)	1	41.0	xxxxx 41.0	30.8 51.2	階段 2 ヶ所に対して居室出口が 11 ヶ所あり、階段室前から中央の廊下、居室の一部まで滞留が広がる。階段室前の滞留の影響で、居室出口 1、8、9 まで滞留が拡大。会議室 1、2、3 の前の廊下を群衆が通るので、会議室 1、2、3 からの流動係数が低下し、居室避難が遅れる。会議室 1、2、3 前の廊下まで滞留が広がる。その時の歩行者密度は 3.00人/㎡・sec、歩行速度は 0.28m/sec。	
2								
会議室 1 (47㎡)		3	30.0	16.0	22.0			
		4		16.0	16.1			
会議室 2 (47㎡)		5		10.0	8.6			
大会議室 (205㎡)		6	32.0	31.4	35.3			
		7		31.4	34.3			
		8		xxxxx 69.2	xxxxx 54.8			
パントリー (110㎡)		9	30.0	8.0 xxxxx	7.1 xxxxx			
		10						
廊下避難		階段 1		126.0	117.0	134.3		
		階段 2			121.0	99.3		
階避難		階段 1		252.0	147.0	164.6		
		階段 2			151.0	159.6		
EX4	居室避難	事務室 (1150㎡)	1	67.0	xxxxx 41.0	xxxxx 72.9	居室出口 2、3 からの避難者が階段 1 に向かい、廊下に滞留が発生。出口 2 からの避難が遅れる。出口 2 の流動係数は 0.74。出口 3 からの避難者が全員廊下に流出しても、出口 2 の手前で滞留が起こっている。居室出口 4、5、6、7 からの避難者が階段 2 に向かい、廊下に滞留が発生。出口 5、6、7 の前に滞留が広がり、居室避難が遅れる。出口 5、6、7 の流動係数はそれぞれ 0.48、0.80、0.84。	
2			21.0		12.7			
3			16.0		16.6			
4			24.0		37.3			
5			25.0		29.2			
6			20.0		30.5			
7								
廊下避難	階段 1		139.0	83.0	74.4			
	階段 2			120.0	70.9			
階避難	階段 1		279.0	121.0	142.8			
	階段 2			158.0	139.0			

行った。その中から問題点が顕著に現れた例を 3 通り示す（図—3—5）。いずれも火災発生時刻は 0.0 秒とし、避難者数、避難経路などの条件は「新・建築防災計画指針」に基づいて設定している。これらのシミュレーションは NEC PC 9801 RA を用いて行い、100 人前後の歩行者の避難計算所要時間は、1 時間程度であった。歩行者数の上限は現在 1000 人としている。

以上の 3 例のほか、この群集歩行シミュレーションモデルにより実行したシミュレーション結果と、防災評定避難計算結果を比較し、問題点をまとめたものが表—1、表—2 である。

3.2 諸々の理由による流動係数の低下の問題

ここでは流動係数は出入口通過前後において歩行方向に変化がない場合に防災計画指針に定められた約 1.5 人

表—2 避難計算例（図中の xxxx=出火地点に近くて使用しない出口、 =許容避難時間を超過）

サ ン プ ル	避難種類	室 名	出口	避難時間（秒）			問 題 点
				許容値	防災評定	シミュレーション	
EX5	居室避難	事務室 1	1	45.2	10.8	9.1	避難開始直後は居室出口付近が混雑していないために、居室出口の流動係数が低い。出口 1 では 1.22、出口 2 では 1.04。 出口 4、5、7 からの歩行者が合流して階段 2 に向かう。混雑して居室出口付近で滞留が発生。出口 4 の流動係数は 0.81、出口 5 では 0.87。
			2		15.4	10.1	
			3		xxxx	xxxx	
			4		23.9	19.0	
			5		19.3	22.0	
			7		-----	-----	
	廊下避難	階段 1			62.2	26.2	
					70.9	37.9	
	階段避難	階段 1			107.4	71.4	
					116.1	114.0	
EX6	居室避難	事務室	1	55.4	18.5	12.4	出口 1、2 では混雑しないため、流動係数は低い。出口 1 では 1.31、出口 2 では 1.23。出口 3 では混雑するが、許容避難時間の範囲内。
			2		11.6	13.1	
			3		35.9	48.5	
	廊下避難	階段 1			70.9	31.7	
					39.0	56.3	
	階段避難	階段 1			126.3	87.1	
					94.5	111.7	
EX7	居室避難（事務室）	ゾーン 1	1	44.0	32.5	40.9	出口 2、3 から出た歩行者が合流して階段 2 に向かう。出口 2、3 と階段 2 との距離が短いため、廊下の有効な滞留面積が不足し、居室内に滞留が起こる。
			2		35.0	35.1	
		ゾーン 2	3		35.0	40.2	
			4		xxxx	xxxx	
	廊下避難	階段 1			42.0	47.2	
					58.0	41.1	
	階段避難	階段 1			86.0	91.7	
					102.0	86.5	
EX8	居室避難	事務室 1	1	31.0	27.0	40.7	事務室 1 の出口 1 から階段 1 に向かうが、廊下が混雑すると、その影響により出口 1 の流動係数は 0.99 となる。事務室 2 から出た歩行者は全員階段 1 が見えているにも関わらず通路を曲がって階段 2 へ向かう。通路の曲がる部分で流動係数が低下する。
			2		25.0	42.0	
	廊下避難	階段 1			69.0	43.4	
					58.0	50.5	
	階段避難	階段 1			99.0	80.5	
					88.0	185.0	
EX9	居室避難	事務室	1	41.0	16.5	42.7	出口 2 から出た歩行者は、上下に分かれるため、流動係数は 1.36。 出口 1 から出た歩行者はすぐに曲がるので歩行速度が低下し、更に出口 2 からの歩行者が廊下を歩行しているため、出口から出難い。その影響により、出口 1 の流動係数は 1.23。
			2		31.2	43.0	
			3		xxxx	xxxx	
	廊下避難	階段 1			66.0	56.2	
					45.0	52.8	
	階段避難	階段 1			107.0	98.1	
					86.0	95.5	
EX10	居室避難	大教室	1	36.8	34.9	33.4	出口 1、2、4 から出た歩行者は階段 1 の手前のホールに滞留する。その混雑の影響により、出口 1、2 の流動係数は、それぞれ 1.11、1.39 となる。
			2		35.6	42.9	
			3		xxxx	xxxxxx	
			4		34.9	36.1	
			5		36.3	61.0	
	廊下避難	階段 1			82.4	111.6	
					47.5	64.2	
	階段避難	階段 1			119.3	148.4	
					84.4	101.0	
EX11	居室避難（事務室）	ゾーン 1	1	38.0	18.4	24.4	出口 1 から階段 1 までの距離が短いため、有効な滞留面積が不足し、居室に滞留が発生し、居室避難が遅れる。 出口 3、4、5 から出た歩行者は階段 2 に集中するが、これも有効な滞留面積が不足し、居室に滞留が発生する。出口 3、4、5 の流動係数はそれぞれ 0.72、0.33、0.56 となる。
			2		xxxx	xxxx	
		ゾーン 2	3		12.4	28.4	
			4		13.9	37.3	
			5		13.5	29.3	
	廊下避難	階段 1			22.0	24.8	
					17.0	38.2	
	階段避難	階段 1			60.0	64.3	
					55.0	76.8	

/m・sec となるように、モデル中の歩行者や障害物の磁荷を設定してある。また歩行速度は平均 1.3 m/sec、分散=0.25 の正規分布としている。ところが以下のような諸条件によって流動係数が低下し、居室避難時間が

長くなることが、シミュレーション結果により判明し、実際の歩行実験を行いそれを確認した。その結果再び種々の建築空間において避難行動のコンピューターシミュレーションを行い、下記の状況が原因で、防災評定

図—4 シミュレーション例 (EX 7)

図—5 シミュレーション例 (EX 8)

の許容避難時間を越える避難時間を要する場合もあることを示す。

(1) 広い居室で避難開始後しばらくは出口への到達者が少ないため、流動係数が1.5人/m・secに達しない状況がしばらく続く。これに対して防災評定避難計算では、避難開始直後といえども出入口における流動係数は一定の値になっている。[例 EX 1 (38.00 秒), EX 2, EX 10]

(2) 出入口通過後に折れ曲がることによる流動係数低下

群集歩行モデルによってシミュレーションを行うと、出入口通過後歩行方向が直角に折れ曲がる場合に群集流動係数が低下する。これを確認するため群集歩行実験を行うと、同様に流動係数が低下した。実験は以下の方法で実施した。

- 1) 被験者は金沢工業大学および福井大学の建築学科学生。
- 2) 表—3に示す平面内を一度に15～17人の被験者が歩行する実験を3回繰り返した。
- 3) 実験は大学内の建物の教室および廊下で行った。適当な平面形がない場合は、パネル等で壁面を構成して実験空間を構成した。

4) 各歩行実験ごとにネック部における通過人数と通過所要時間を測定し、流動係数を計算して3回の試行の平均値を求めた。

5) 被験者は自然な歩行速度で歩行した。

被験者が自然に歩行して実験を行うと、全体的に流動係数が高い値となった。これは被験者が全員20才台前半の学生であるため、一般の群集よりも歩行速度が速いためと考えられる。そこで、被験者にゆっくりと歩行するように指示し、直進の場合に流動係数が1.5程度になるように調整して実験を行うと、やはり折れ曲がる場合に流動係数が低下した。以上の実験結果を表—3にまとめ、同一平面で行ったシミュレーション結果と比較する。その結果以下のような流動係数低下の傾向と原因が考えられる。

1) 出入口の幅が80 cmの場合

歩行者は1人ずつ出入口から出て歩行するので、直進の場合と折れ曲がる場合の流動係数の違いはほとんど見られない。

2) 出入口の幅が160 cmの場合

折れ曲がる場合に明らかな流動係数の低下が見られた。歩行者が2人並んで出口から出ることができ、出口を出て曲がる歩行者が後続の歩行者の障害となり、流動係数が低下する。また、出口を出てから2方向に分岐する場合は流動係数の低下がより大きい。これは、2方向に分岐するとき、動線の交差がときどき起こるからである。[例 EX 1, EX 4, EX 9]

表—3 流動係数実験およびシミュレーション結果

ネック通過後直進する場合と曲がる場合の比較

歩行の種類及び平面型	各部寸法 (mm)	流動係数 (実験結果)	流動係数 (シミュレーション)
直進	a= 800	2.062	1.689
	b=3,000		
	a=1,600	1.902	1.465
	b=3,000		
ネック通過後 一方向へ曲る	a= 800	2.040	1.595
	b=1,800		
	a=1,600	1.578	1.214
	b=1,800		
ネック通過後 二方向へ曲る	a= 800	1.992	1.648
	b=1,800		
	a=1,600	1.449	1.342
	b=1,800		

(3) ネック通過後の通路の有効幅が、ネック部分と同じ場合は、通路が広がっている場合より、流動係数が低下する。これに関しても歩行実験を行い、実際の群集歩行とシミュレーション結果の両方で流動係数が低下することを確認した。ネック部通過後も群集密度が高いので歩行速度に制限を受け、流動係数が低下すると考えられる。実験方法は、表—3の場合と同様で、平面形は表—4に示すとおりである。[例 EX 8]

表一4 流動係数実験およびシミュレーション結果
ネック通過後の通路幅がネック部分と同じ場合

歩行実験を行った平面型	各部寸法 (mm)	流動係数 (実験結果)	流動係数 (シミュレーション)
	a= 800 b=7,000	1.844	1.625
	a=1,600 b=7,000	1.810	1.280

(4) 通路から通路へ曲がるときは流動係数が落ちる。通路幅が曲がる前後で同じ場合は、曲がるときにわずかに流動係数が低下するだけである。曲がった後の通路幅が曲がる前よりも狭い場合は曲がる部分がネックとなり、滞留が発生し流動係数が低下する。これに関しても群集歩行実験を行い、実際の歩行者の動きとシミュレーション結果を比較すると、一致した結果が得られた。(表一5) [例 EX 8, EX 9]

表一5 流動係数実験およびシミュレーション結果
ネック通過後の通路が折れ曲がる場合

歩行実験を行った平面型	各部寸法 (mm)	測定 位置	流動係数 (実験結果)	流動係数 (シミュレーション)
	a=1,600 b=1,600	1	1.058	1.280
		2	1.066	1.295
		3	0.874	1.140
		4	0.965	1.280
	a=1,600 b=1,200	1	0.919	1.280
		2	0.969	1.160
		3	1.158	1.545
		4	1.167	1.500
	a= 800 b= 800	1	1.296	1.500
		2	1.145	1.565
		3	1.084	1.525
		4	1.005	1.565
	a=1,600 b= 800	1	0.935	1.281
		2	0.882	0.938
		3	1.065	1.374

(5) 廊下の滞留が居室出口の流動係数に与える影響

1) 階段1つに対して出口の数が多く、廊下面積が少ない場合 [例 EX 4 (80.00 秒) 階段2の前の廊下に4つの居室出口が面している。(図一6)]

2) 階段室入口の狭い幅が歩行速度を低減し、そのため発生する滞留の影響により、出口から出られなくなる場

図一6 シミュレーション例 (EX 4 80.00 秒)

図一6 シミュレーション例 (EX 4 80.00 秒)

合 [例 EX 1 (45.00 秒) 出口2から階段Aへの廊下]

3) 居室出口前の通路に滞留または高密度の群集流があり、これに合流する場合には流動係数が低下する。

[例 EX 1 (出口4), EX 2, EX 4, EX 9]

3.3 当シミュレーションモデルによる滞留密度と群集歩行密度・群集歩行速度

避難先の階段室または居室の出入口幅が狭いため滞留が起こり始め、歩行密度が上がれば、歩行速度が落ちるので、居室から廊下への出口の流動係数が落ち始める。防災評定のようにいきなり3人/m²の滞留が発生し、この滞留部分が広がっていくのではなく、シミュレーションでは徐々に群集流の滞留の密度が高まる。長時間滞留が続くと、滞留密度は0.30 m²/人 (3.31 人/m²) 程度になる。図一7にシミュレーション例において、滞留が発生している様子を示す。

図の中央上部付近の広い通路で滞留が起こっている。

図一7 シミュレーション例 (EX 3 90.00 秒)

「新・建築防災計画指針」では滞留人数の評価の部分 (p.125) で、「滞留に必要な面積は、廊下などの第一次安全区画では群集歩行密度を考慮して1人当たり0.3 m²とする」としている。したがってモデルによるシミュレーション結果はモデルがこの面で「新・建築防災計画指針」と一致していることを示している。

当モデルのシミュレーション結果から測定した歩行速度と密度の例を挙げると以下のとおりである。

EX 1 45.00 秒前後 事務室1の出口2通過後の廊下を歩行中の歩行者

歩行密度 約1.45 人/m², 歩行速度 0.84 m/秒

EX 3 90.00 秒前後 会議室1, 2, 3に面する広い廊下で滞留している歩行者

歩行密度 約3.00 人/m², 歩行速度 0.28 m/秒

これらの値はJ. J. Fruinの歩行速度と歩行者占有面積の関係を良く満足している。[文献9) p.49 図3-2]

3.4 経路のとり方のシミュレーション

防災評定避難計算では、避難者は最寄りの出口から避難することとされているが、これに忠実に従うと、近接した居室出口や階段室入り口の一方にのみ歩行者が向かい、一方は混雑するが、他方は閑散としているような非現実的な状況が生じる。[例 EX 1, EX 4, EX 8]

EX 8の平面を用いて避難経路の設定を変更した例を

以下に示す（図—8，図—9）。この例による避難時間は表—6のとおりである。当モデルによると，このような避難経路変更の検討も容易に行える。

事務室1及び2からの歩行者がそれぞれ階段1及び2に分かれて進む

図—8 シミュレーション例 (EX 8 A 63.00 秒)

事務室1及び2の全ての歩行者が階段1に向かう。

図—9 シミュレーション例 (EX 8 B 63.00 秒)

表—6 避難時間の判定 (EX 8 の避難経路変更)

■ = 許容避難時間を超過

避難経路	避難種類	室名	出口	避難時間 (秒)	
				許容値	シミュレーション
EX 8A 事務室1、2の避難者がそれぞれ半ずつ階段1と2に分かれて避難する。	居室避難	事務室1	1	31.0	34.2
		事務室2	2	30.0	30.1
	廊下避難	階段1		92.0	64.3
		階段2			74.2
	附避難	階段1		185.0	97.2
		階段2			106.6
EX 8B 事務室1、2の避難者全員が階段1に避難する。	居室避難	事務室1	1	31.0	56.0
		事務室2	2	30.0	42.1
	廊下避難	階段1		92.0	87.7
	附避難	階段2		185.0	120.1

3.5 当シミュレーションによる附室の滞留状況

「新・建築防災計画指針」(p.140)に述べているように，階段入り口と附室入り口を結ぶ動線外に歩行者が溢れて滞留することは，当シミュレーションでは磁場を想定して歩行者の動きを制御しているのであり得ない。図—10の例では歩行者の軌跡を点線で表示している。左

図—10 階段附室におけるシミュレーション例

右の図を比較すると，附室の有効面積の違いは明らかである。

以上により，当群集歩行シミュレーションによる避難性能の検討方法の有効性を立証した。防災評定避難計算に基づく避難時間および滞留面積の検討が可能であるばかりでなく，防災評定避難計算では扱っていない事項に関しても検討可能であることをシミュレーション結果により示した。さらに実際の群集歩行実験によってそれを確認した。シミュレーション結果により，視覚的に計画上の問題点を容易に把握可能であり，設計へのフィードバックにも適していることを示した。

結 語

シミュレーションの結果とそれに基づく実際の歩行実験の結果，以下の各項が明らかになった。

(1) 当モデルのシミュレーションにより避難全体の時間的・空間的状况を動画として把握できるようになり，危険な時刻や場所の発見，経路の変更，時差避難等を考慮しながら最適な避難計画を求めることができる。これにより当モデルは，「新・建築防災計画指針」の関題点として指摘された設計へのフィードバック¹⁰⁾のためには，現防災評定避難計算より適していると思われる。

(2) 防災評定避難計算にはない，避難中の流動係数の低下が以下のように起こることが分かり，それらは実際の歩行実験でも確認された。流動係数の低下はすべての避難時間の増大につながり，特に居室避難時間に重大な影響を与える。(表—1，表—2)

1) 広い居室で避難開始後しばらくは出口への到達者数が少なく，流動係数は低い状態から始まり，そのため居室避難時間は長くなる。

2) 出入口通過後折れ曲がる場合。出入口の幅により，流動係数の低下が異なる。幅が80 cmの時は1列で歩行するため，流動係数に変化がない。幅が160 cmになると曲折時に2人が交差する場合が起こるため，流動係数が低下する。このとき左右の2方向に曲がるときは低下が著しい。1方向のみに曲がるときも低下する。

3) 同一幅員の通路が直角に曲がるときは，屈折直後，やや流動係数が低下するが，その屈折を過ぎると，すぐにもとの流動係数に戻る。

4) 防災評定避難計算では気付き難いが，居室出口前の通路に滞留または高密度の群集流があると，出口の流動係数が低下する。

5) ネック(出口)通過後の通路幅が，出口より広がっている場合より，出口と同じ幅の場合のほうが流動係数が低い。

(3) 滞留密度と速度の関係も実測値⁹⁾に近い。またほとんど停滞してしまったときの滞留密度は防災評定避難計算の値に近い。

(4) 廊下の群集歩行密度が高くなるにつれて、徐々に歩行速度が落ち、それが居室出口の流動係数を低下させる点が防災評定避難計算とは異なる。

以上により当モデルによる避難シミュレーションが避難計画上の問題点を指摘するのに有効であることを明らかにした。防災評定避難計算に基づく避難時間および滞留面積の検討に対する有効性に加え、防災評定避難計算では扱っていない事項に関しても検討可能であることをシミュレーション結果および歩行実験結果により示した。このシミュレーション結果によれば、視覚的に計画上の問題点を容易に把握可能であり、設計へのフィードバックにも適している。

参考文献

- 1) 建設省住宅局建築指導課監修：新・建築防災計画指針 1985 年版，日本建築センター，1985 年
- 2) 吉田克之：新建築学体系 12 建築安全論 5.2.4 避難行動の予測，彰国社，pp. 260～268，1983 年
- 3) 岡崎甚幸：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 その 1 磁気モデルの応用による歩行モデル，日本建築学会論文報告集，第 283 号，1979 年 9 月，pp. 111～117
- 4) 岡崎甚幸：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 その 2 混雑した場所での歩行，日

本建築学会論文報告集，第 284 号，pp. 101～110，1979 年 10 月

- 5) 岡崎甚幸：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究，その 3 停滞や火災を考慮して最短経路を選ぶ歩行，日本建築学会論文報告集，第 285 号，pp. 137～144，1979 年 11 月
- 6) 岡崎甚幸，山本 親：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究，その 4 群集歩行の透視図による表現，日本建築学会論文報告集，第 299 号，pp. 105～113，1981 年 1 月
- 7) 岡崎甚幸，松下 聡：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究，その 5 探索歩行及び誘導標による歩行，日本建築学会論文報告集 第 302 号，pp. 87～93，1981 年 4 月
- 8) 松下 聡，岡崎甚幸：巨大迷路歩行実験による探索歩行のためのシミュレーションモデルの研究，日本建築学会計画系論文報告集，第 429 号，pp. 51～59，1991 年 11 月
- 9) J. J. Fruin, PEDESTRIAN Planning and Design, Kajima Institute Publishing Co. Ltd. 歩行者の空間，長島正充（訳），鹿島出版会 1974.
- 10) 日本建築学会建築計画委員会：安全計画 I，安全計画の視点 2-3 C，避難計算の考え方，pp. 45～50，1981 年 10 月

(1991 年 12 月 9 日原稿受理，1992 年 4 月 8 日採用決定)