

被災時の群集避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について

清野純史¹・三浦房紀²・瀧本浩一³

¹正会員 工博 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

²正会員 工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

³正会員 工博 山口大学助手 工学部知能情報システム工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

本研究では、個体個々の動きのみならず群集の全体的挙動をも把握することが可能な個別要素法 (DEM) を用いた群集避難行動シミュレーション手法の提案を行った。そして、被災時の地下街のような閉鎖空間からの避難行動に対する基礎的な考察として、避難中の人間が部屋から通路あるいは階段へ移動する場合の群集の動きや、個々に働く力などの時間的、空間的变化について検討を行った。さらに、滞留現象に関する理論式を密度関数で表現し、この関数のパラメータを DEM によるシミュレーションによって避難人数、群集密度、幅員、歩行速度などの関数で表現した。これにより、対象空間全体、あるいはその空間の特定の地点における避難者の行動を時々刻々追跡できるとともに、群集の流動状況の把握が可能となった。

Key Words : *distinct element method, emergency evacuation, crowd flow, panic, mob psychology*

1. ま え が き

近年、日本全土に張りめぐらされた鉄道網の主要駅にはショッピングセンターを中心とした地下街が有り、地震災害や火災などの災害に対応すべく種々の耐災害設計がなされている。地下街は、地上の建物に比べて安全性が高いと言われ、耐震設計がなされていれば少なくとも構造的には安心である。火災については、火災報知器や屋内消火栓、スプリンクラーの設置、非常出口の誘導灯など消防計画に基づいて設計されており、計画通りに機能すれば安全性は高いであろう。

しかし、大地震時に構造的には安全な地下街の機能が麻痺したらどうであろうか。電気がこない。バックアップ電源も使えない。出口を知る者は出口に殺到し、地下街はパニック状態になることは想像に難くない。火災の場合も同様である。出火と同時に鳴らされた非常ベルでパニック状態に陥り、非常口に殺到、また、炎と煙が充満した地下街は逃げ遅れた人々で大混乱となるであろう。

このようなパニック状態、あるいはパニックに至らないまでも避難のために出口に向かって人々が殺到するような状況では、人間相互の力学的関係が群集の避難行動を支配する要因の中で大きなウェイトを占めるものと思われる。このような避難行動やその状況をできるだけ正確に知るためには、パニック時を再現するような実験を行えばその特性をかなり詳細に把握できるが、実験に

は危険を伴うのみならず、特にその力学特性を計測するには限界がある。もし、災害発生時に混雑した地下街にいる人間が避難中の群集からどのように、どのくらいの力を受けて地下街のどの方向に押されて行くのか、出口にたどり着いた人間は、出口に殺到した群集の中でどのような状況に置かれるのか、また出口にたどり着けない場合はどういうケースなのか、スムーズな避難の流れを作るためには地下街の出入口の大きさや形状、場所などの平面計画にどのような工夫を凝らしたらよいか等の現象が数値シミュレーションで定量的に解明できれば、避難者がおかれた状況の定量的把握、地下街での群集流の追跡、それに基づく設備の最適配置が可能となる。したがって、これらの状況を予測し、これに対処できるような構造的、機能的な方策を予め立てておくことは、工学的にも非常に有意義なことである。

本研究の目的は、近年大都市のみならず中小都市でも見られる地下街において地震災害や火災などが発生した場合の人間の避難行動を把握し、安全対策や避難経路や非常口の策定に生かすための基礎的な考察として、閉鎖空間から通路への避難行動や階段を使った避難行動を、主にその力学的側面から捉えた検討を行うことである。このためには、避難者相互、および避難者と地下街の占有物の間の力学的メカニズムを明確にする必要がある。本研究では、このような観点から個別要素法 (DEM) の人間行動への応用を図っている。DEM (Distinct Element Method) とは、対象物を独立したいくつもの

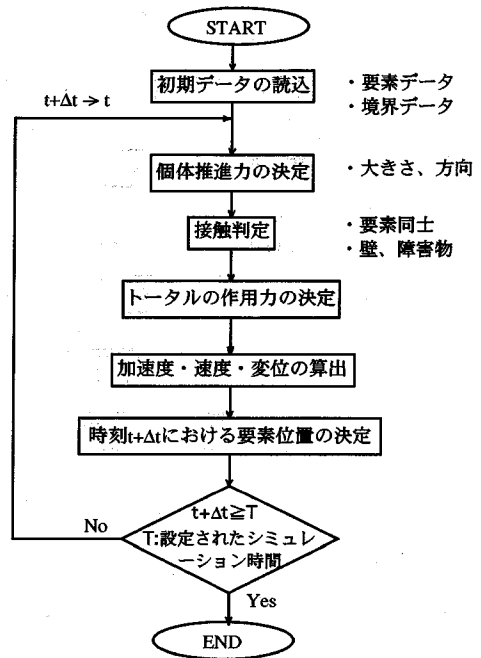
要素からなるものと考え、各要素についてそれぞれ独立の運動方程式を作り、これをステップごとに解いて各ステップにおける要素の位置を逐次求める方法である。要素間の力の伝達は接触点のパネとダッシュポットで行われる。運動方程式を解いているため、各時間ステップでの要素の位置のみならず、各要素に働く力も計算できるので、この力の時刻歴を追跡できる。この群集の避難行動シミュレーションを行うことにより、以下に述べる様な利点や種々の検討が可能となる。

- 1) 従来、地盤解析や構造解析などの分野で用いられていた個別要素法を、地下街を対象とした被災時の人間行動に応用することにより、避難者個々の動きのみならず、群集流としての全体的な挙動の把握も可能となる。また、その行動特性を視覚的に表現できる。
- 2) 被災時の人間行動を、特にその力学的側面から追求することにより、定性的な観点からの検討ではなく、避難者に働く力という観点から避難者が殺到する出入口の位置、形状などに関する定量的な検討が可能となる。出入口における避難者の滞留やアーチアクションに対する検討も可能となる。
- 3) 実現象により即した形でシミュレーションを行うために、基本的な運動方程式に改良を加え、人間行動に関する工学的応用範囲の拡張を図ることにより、今後さらに心理面を取り入れた人間行動の再現に発展できる可能性を秘めている。

人間の避難行動を取り扱った研究は、流体モデル^{1),2)}、粒子モデル^{3),4)}、磁場モデル⁵⁾、推論ベースモデル^{6),7)}、ポテンシャルモデル⁸⁾等数多く存在する。しかし、これらのモデルでは個々の人間行動の追跡や避難口に集中する人間に作用する力の定量的評価に限界がある。本研究では、この点を改良すべく個別要素法(DEM)に着目した。対象要素を小要素の集合と考える解析法の理論研究は、Mogami⁹⁾らによって行われたが、数値シミュレーションとしてのDEM^{10),11),12)}は現在主に地盤工学、構造工学の分野で研究が行われている。地盤の液状化¹³⁾、地盤の動的破壊¹⁴⁾、構造物の破壊¹⁵⁾、岩屑流の解析¹⁶⁾等がその例である。本研究はこの解析法の利点を生かし、人間行動への応用を図ったものである。

2. DEMの概略

DEMとは、媒質を非連続な粒状体の集合と考え、要素間の力の伝達は接触点におけるパネとダッシュポットで行われるものとして各個体の運動方程式を解き、これと前時間ステップでの位置関係を考慮して、現時間での各個体の位置を求める手法¹²⁾である。本研究では人間のモデル化として、このDEMにおける各円形要素を人



図一 DEMによる計算手順

間に置き換える。図一は本研究におけるDEMによる計算手順である。

群集を構成する p 番目($p=1, 2, \dots, N$; N は総人数)の個体の質量を m_p 、この個体の x, y 方向の変位をそれぞれ x_p, y_p とすると、運動方程式は以下ようになる。ただし、人間を対象としているため、回転運動は拘束されているものとみなしているためモーメントに関する運動方程式は考慮しないものとする。

$$m_p \ddot{x}_p(t) = f_p^x(t) \quad (1)$$

$$m_p \ddot{y}_p(t) = f_p^y(t) \quad (2)$$

ここに、 f_p^x, f_p^y はそれぞれ第 p 要素に作用する x, y 方向の合力であり、要素を構成するパネ定数 k なる弾性スプリングによる抗力、減衰係数 c なる粘性ダッシュポットによる抗力、および個体推進力から成る。この個体推進力は本研究で新しく導入した概念であり、その作用方向とともに3.(4)で説明する。

時刻 $t-1 \sim t$ なる Δt 区間内で加速度が一定と仮定すれば、上式を積分することにより時刻 t における速度、変位が以下のように求められる。

$$\dot{x}_p(t) = \dot{x}_p(t-1) + \ddot{x}_p(t-1)\Delta t = \dot{x}_p(t-1) + \Delta \dot{x}_p \quad (3)$$

$$\dot{y}_p(t) = \dot{y}_p(t-1) + \ddot{y}_p(t-1)\Delta t = \dot{y}_p(t-1) + \Delta \dot{y}_p \quad (4)$$

$$\begin{aligned} x_p(t) &= x_p(t-1) + \dot{x}_p(t-1)\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{x}_p(t-1)\Delta t^2 \\ &= x_p(t-1) + \Delta x_p \end{aligned} \quad (5)$$

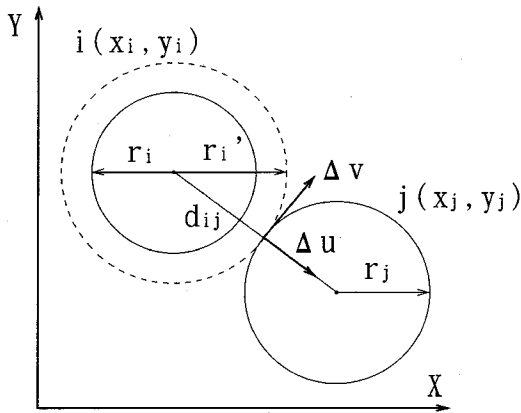


図-2 要素座標と接触判定

$$y_p(t) = y_p(t-1) + \dot{y}_p(t-1)\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{y}_p(t-1)\Delta t^2$$

$$= y_p(t-1) + \Delta y_p \quad (6)$$

いま、図-2にしたがって要素 i, j の中心座標を (x_i, y_i) , (x_j, y_j) , その半径を r_i, r_j とし、また、この2要素間の中心間距離を d_{ij} とすると、接触判定は次式に基づいて行われる。

$$d_{ij} \leq r_i + r_j \quad (7)$$

ここに、

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (8)$$

接触により他の要素から受ける力は圧縮方向のみを考えることとし、2要素 i, j の位置関係から法線、接線方向の変位増分 $\Delta u, \Delta v$ を求める。また、相対速度増分 $\Delta \dot{u}, \Delta \dot{v}$ を考えることなく、相対変位増分と Δt から近似的に $\Delta u/\Delta t, \Delta v/\Delta t$ として相対速度が直接求められる。法線、接線方向のバネ定数、減衰係数をそれぞれ k^u, k^v および c^u, c^v とすると、法線、接線方向のバネとダッシュポットによる時刻 t における抗力 f_k^u, f_k^v , および f_c^u, f_c^v は次式ようになる。

$$f_k^u(t) = f_k^u(t-1) + k^u \Delta u \quad (9)$$

$$f_k^v(t) = f_k^v(t-1) + k^v \Delta v \quad (10)$$

$$f_c^u(t) = c^u \frac{\Delta u}{\Delta t} \quad (11)$$

$$f_c^v(t) = c^v \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (12)$$

これより、法線、接線方向の時刻 t における全抗力 $f^u(t), f^v(t)$ は次式で表される。

$$f^u(t) = f_k^u(t) + f_c^u(t) \quad (13)$$

$$f^v(t) = f_k^v(t) + f_c^v(t) \quad (14)$$

上式より、 p 番目の要素の法線、接線方向の力 $f_k^u(t), f_k^v(t)$ を全体座標の x, y 方向の力に変換し、これに前

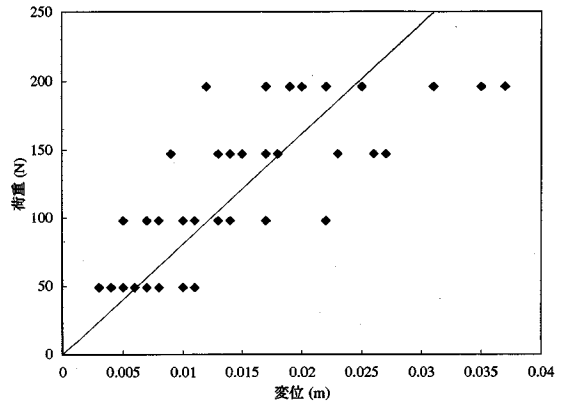


図-3 簡易実験による要素の荷重-変位関係

方向推進力を加えたものを $f_p^x(t), f_p^y(t)$ として式 (1), (2) を解く。全ての要素に対して式 (3)~(6) の前進解法を繰り返すことによって、要素 p ($p=1, 2, \dots, N$) の位置が時々刻々確定する。

3. DEM による人間のモデル化

(1) 個体要素のバネ、減衰係数の決定

DEM 要素を人間に置き換えるためには、要素の各種パラメータを決定しなければならない。まず、要素の法線方向バネ定数 k^u は、図-3 に示すように9人の被験者に対して49, 98, 147, 196 Nと段階的に圧縮荷重をかけ、その変位と荷重との関係から求めた。実験からは胸厚方向と肩幅方向の変位が得られるので、これらを各個人ごとに平均してグラフに表し、その傾きをもって法線方向バネ定数とした。接線方向バネ定数 k^v については計測が困難であるため、法線方向の値を λk^u として低減する形で取り入れた。 λ の値としては、この λ を変化したシミュレーションの結果から試行錯誤的に0.05という値を決定し、以後の解析においては一律にこの値を与えた。

要素の減衰係数の決定について、木山ら¹²⁾は個体間の跳ね返り現象をできるだけ速やかに減衰させるために臨界減衰を採用している。この値は要素の質量 m とバネ定数 k から一意的に求められるので、本研究においても次式で与えられる臨界減衰値を採用した。

$$c = 2\sqrt{mk} \quad (15)$$

(2) 仮想バネの導入

人間は、相互が物理的に接触する前にこの接触を避けようとする心理が働き、ある一定の距離を保とうとする。この心理的距離をここでは仮想半径と定義する。本研究では、DEMの個体の動きを人間の行動に近い状態にす

表一 個体間距離の実測（赤信号停止時）

個体番号	距離(m)	個体番号	距離(m)	個体番号	距離(m)
1	1.383	19	0.960	37	0.960
2	0.871	20	1.080	38	1.840
3	1.587	21	0.424	39	1.760
4	0.768	22	0.880	40	0.920
5	1.229	23	0.960	41	0.580
6	1.229	24	0.800	42	0.580
7	0.666	25	0.800	43	1.080
8	1.287	26	0.821	44	1.144
9	0.956	27	0.898	45	0.948
10	0.666	28	1.029	46	0.880
11	1.348	29	1.265	47	0.760
12	0.692	30	1.150	48	0.760
13	0.692	31	1.222	49	1.092
14	0.736	32	1.341	50	0.832
15	0.560	33	0.659	51	1.060
16	0.720	34	1.177	52	0.880
17	0.760	35	0.911	53	1.000
18	0.740	36	0.920	平均	0.976

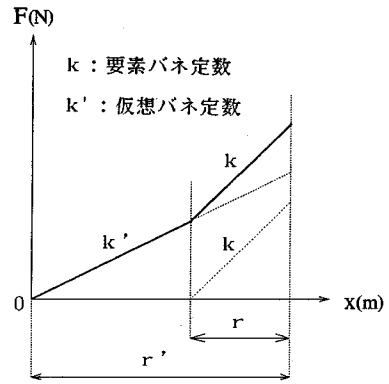


図-5 仮想バネ接触点から重心までの距離と力の関係

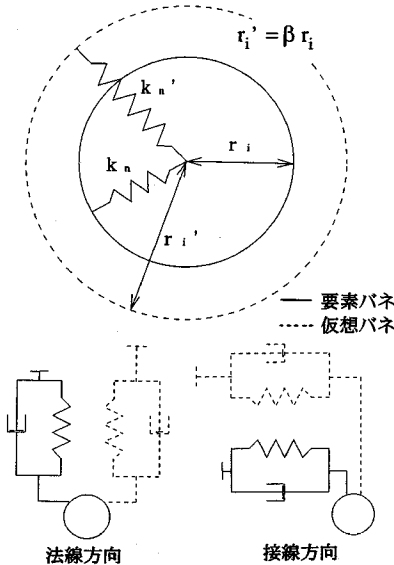


図-4 DEMにおける人間のモデル化

るためにこの距離を実測によって求め、人間相互の物理的な接触によって生ずるバネの他にこの心理的距離に対応した仮想バネを用いることを提案した。

まず、通勤時に駅へ向かう交差点において赤信号で停止した人を撮影し、人間相互の距離を測定した。本研究ではこの距離を、人間が他の人間に心理的抵抗なしに接近できる最小の距離とし、ここで仮想のバネが発生するものと仮定した。ただし、非常時にはこの仮想バネの距離は更に短くなるものと思われるが、その算定については確固たる決定法を見いだせなかったため、本研究では、平常時ではあるが「急ぐ」という心理的要素が強い大都

市の通勤時を選び、この値に換えるものとした。表一は、この個体間の中心間距離の実測値を示したものであり、平均値は0.976 mであった。したがって、仮想半径はこの平均中心間距離から個体半径を引いた値として求められる。この距離以遠では仮想バネが生じないため、要素相互の力は働かないことになる。この関係を示したものが図-4である。各要素は、物理的な接触を示す要素半径と心理的距離に対応する仮想半径を有することになる。法線方向の仮想バネ定数は、3. (4) で決定する個体推進力に基づいて、この力が作用すると仮想バネは仮想半径から物理的な要素半径まで縮むものと仮定して決定した。すなわち、個体推進力を f_i 、要素半径を r 、仮想半径を r' とすると、次式にしたがって仮想バネ定数 k^u を求めた。

$$k^u = \frac{f_i}{r' - r} \quad (16)$$

こうして決定された法線方向の仮想バネ定数は50.0 N/mである。接線方向は要素バネと同様に法線方向の5%の値を用いている。この要素に働く力と変位の関係を示したものが図-5である。横軸は仮想バネ接触点から要素の重心に向かう距離をとったものであり、物理半径以内になると剛性が変化する（大きくなる）ことがわかる。

(3) 個体要素パラメータの決定

要素の直径と質量については、表-2に示す9人の被験者の体型を測定し、肩幅方向と胸厚方向の長さの平均を要素の直径とした。そして、被験者をこの直径を持つ円柱と考え、この体積と体重の関係から単位高さ当たりの単位体積重量を求めた。歩行速度、加速度としては、人間が日常生活において集団で急いで目的地に向かうときの行動を考え、速度は等速で歩行する状態、加速度は停止した状態から等速になるまで加速する状態として

表-2 被験者の諸元

個体番号	身長 (m)	体重 (N)	肩幅 (m)	胸厚 (m)	平均直径 (m)	単位体積重量 $\times 10^3$ (N/m ³)
1	1.760	568.4	0.429	0.207	0.318	4.07
2	1.780	588.0	0.446	0.210	0.328	3.91
3	1.650	617.4	0.448	0.245	0.347	3.96
4	1.740	666.4	0.435	0.226	0.331	4.45
5	1.600	514.5	0.400	0.210	0.308	4.32
6	1.600	539.0	0.432	0.220	0.326	4.04
7	1.830	715.4	0.468	0.247	0.358	3.88
8	1.760	784.0	0.429	0.265	0.347	4.71
9	1.710	656.6	0.453	0.238	0.346	4.08
平均	1.714	627.2	0.438	0.230	0.334	4.18

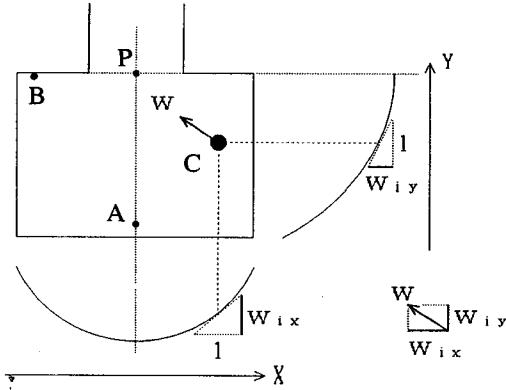


図-6 移動方向ベクトルの決定

同一被験者を対象としてそれぞれ簡易実験によって求めた。これより、要素半径 r は 0.167 m, 単位高さ当たりの質量 m は 37.3 kg, 歩行速度 v は 1.30 m/s, 加速度は 0.861 m/s^2 となった。

(4) 個体推進力とその作用方向の決定

質量と加速度から求められる個体推進力は 32.1 N である。各要素は歩行速度が一定 ($v=1.30 \text{ m/s}$) になるまでこの個体推進力を受けることになる。個体推進力の作用する方向に関しては、部屋の内部にいる場合は x 軸, y 軸両方向に 2 次関数形を与え、その微係数の値をそれぞれの方向成分の値とし、要素はその合成ベクトルの方向へ進むこととした。その一例を図-6 に示す。この場合、A 点に位置する者は P 点を目指して y 方向に直進し、B 点に位置する者は P 点を目指して x 方向に直進する。本研究では C 点に位置する者も P 点を目指して直進するように 2 次関数の係数を定めたが、この係数を変えることによって個体要素の進行経路を変えることが可能である。また、部屋から通路に出た場合には、推進力は y 方向のみ作用するものとした。

以上の個体パラメータをまとめたものが表-3 である。解析を進めるに当たっては、個体要素の物理パラメータ以外の物理定数も必要となる。これらの値も同表に示した。

表-3 解析に用いたパラメータの値

要素バネ定数 (法線方向) k^u (N/m)	8.18×10^3
" (接線方向) k^v (N/m)	4.09×10^2
要素減衰係数 (法線方向) c^u (Ns/m)	1.10×10^3
" (接線方向) c^v (Ns/m)	2.47×10^2
仮想バネ定数 (法線方向) k'^u (N/m)	5.00×10^1
" (接線方向) k'^v (N/m)	2.50×10^0
仮想減衰係数 (法線方向) c'^u (Ns/m)	8.64×10^1
" (接線方向) c'^v (Ns/m)	1.93×10^1
境界バネ定数 (法線方向) k_b^u (N/m)	6.86×10^4
" (接線方向) k_b^v (N/m)	4.09×10^2
境界減衰係数 (法線方向) c_b^u (Ns/m)	4.58×10^3
" (接線方向) c_b^v (Ns/m)	2.47×10^2
要素半径 r (m)	1.67×10^{-1}
仮想半径(r')係数 β ($r'=\beta r$)	4.84×10^0
接線方向バネ減衰係数 λ ($k^v=\lambda k^u$)	5.00×10^{-2}
単位体積重量 w (N/m ³)	4.18×10^3
単位高さ当たりの質量 m (kg)	3.73×10^1
歩行速度 v (m/s)	1.30×10^0
加速度 α (m/s ²)	8.61×10^{-1}
個体推進力 f_f (N)	3.21×10^1
計算時間間隔 Δt (s)	1.00×10^{-2}

4. 解析結果

(1) 解析例

a) 部屋から通路への避難モデル

図-7 で示されるモデル 1 を用い、個体 70 人をランダムに配置して一斉に避難させるシミュレーションを試みた。図-8 は個体の初期配置を示したものである。このモデル 1 では、仮想バネを用いない場合と、用いた場合の解析を行った。個体の避難状況について、両者を比較したものが図-9 である。本研究で想定しているものは被災時の避難行動であるが、簡易実験あるいは実測によって得られた物理パラメータは、人間がある目的地へ急いで向かっている場合である。このような状況下であることを勘案すると、仮想バネを用いない場合の結果は、出口を通過した後も群集が一丸となった不自然な動きをしている (図-9 (a))。これに対し、仮想バネを用いた場合には適度な距離を持って移動している (図-9 (b)) ことがわかる。

群集がパニック状態に陥り出口に殺到するような状況では、出口直前で群集が直接接触しアーチアクションを生じるが、この状態も表現している。アーチアクション

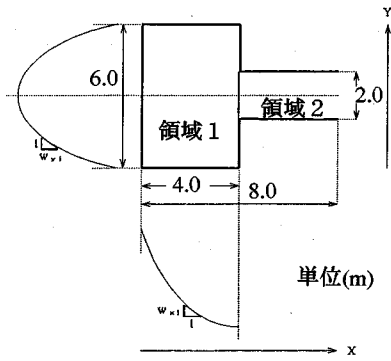


図-7 モデル1の形状寸法と移動方向ベクトル決定のための関数

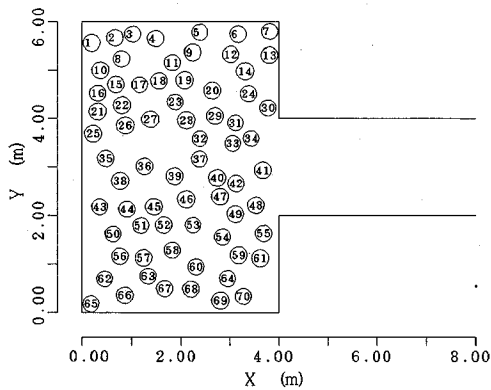
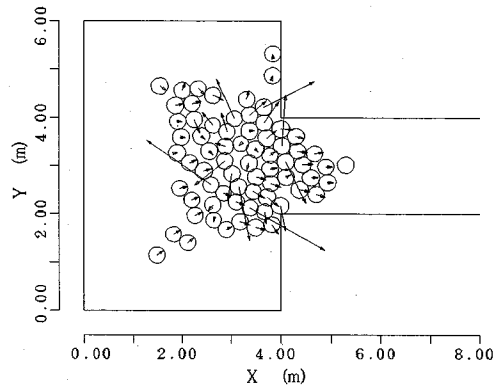
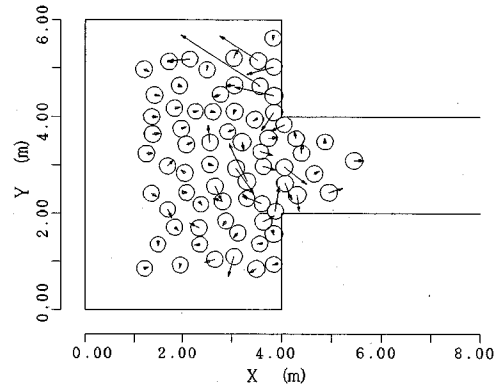


図-8 個体の初期配置 (モデル1)



(a) 仮想バネ無し



(b) 仮想バネ有り

図-9 仮想バネの有無による避難状況の相違 (時刻2.0秒)

とは、狭い出入口に一斉に詰めかけた場合に各個体の力が拮抗するため、内側にいる個体も動きにくくなる効果のことである。これは、側方からの圧力が個体に大きな影響を与えるもので、滞留を引き起こす原因となる。

次に、モデル1の出口の角を円形にした場合をモデル2として、同様の避難解析を行った。モデル1とモデル2の個体の移動分布の時系列的变化、および避難所要時間を示したものがそれぞれ図-10、図-11である。モデル1では、時刻4.0秒と8.0秒の図から、通路への出口付近では側方の個体が内側に入れられない状態が現れている。これはアーチアクションが生じているためと考えられる。モデル2では、特に時刻8.0秒において、モデル1で現れた滞留現象が解消されている。また、避難所要時間を比較すると、モデル2の方が平均所要時間と最大所要時間双方において小さな値を示している。このことから、形状の変化による避難所要時間の比較により、平面計画に対する定量的な評価が可能であることがわかる。ただし、本ケースにおいては、目標点を図-6に示すように通路中央に設定しているため、図-10の時刻

12秒に現れているように、この目標点の設定に起因して避難が遅れる場合も生じるが、これは避難者ごとに目標点を細分化することで対処可能である。図-12はモデル1の各個体の動線を示したものである。通路への出口に対して部屋の側方にいた個体は内側に入りやすく、そのため壁際に沿って移動していることがわかる。これは、群集の中心に向かって進入できない個体が物理的な力関係によって外側の個体に沿って移動するため、結果的に実現に近い行動となっている。図-13は個体番号39の力の時刻歴を示したものである。時刻2.0秒から3.0秒まで、激しくぶつかりあっていることがわかる。また、時刻3.0秒から5.0秒あたりまでは、作用する力が小さくなっているが、これはアーチアクションによる滞留が発生し、前から後ろからも押されているので、トータルとしての力のベクトルが小さくなっているためである。また、この様に個体に作用する力のベクトル和としての合力や絶対値の和としての合力を定量的に評価することによって、人間の怪我の可能性に対しても評価

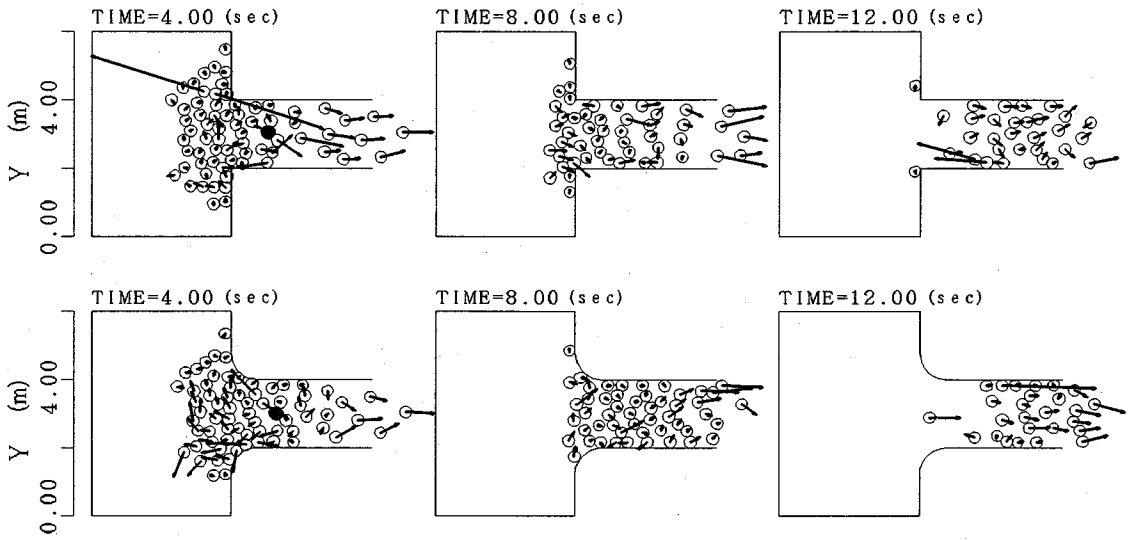


図-10 出口形状の違いによる群集移動の時間的变化
(上段：モデル1，下段：モデル2，黒丸は個体番号39)

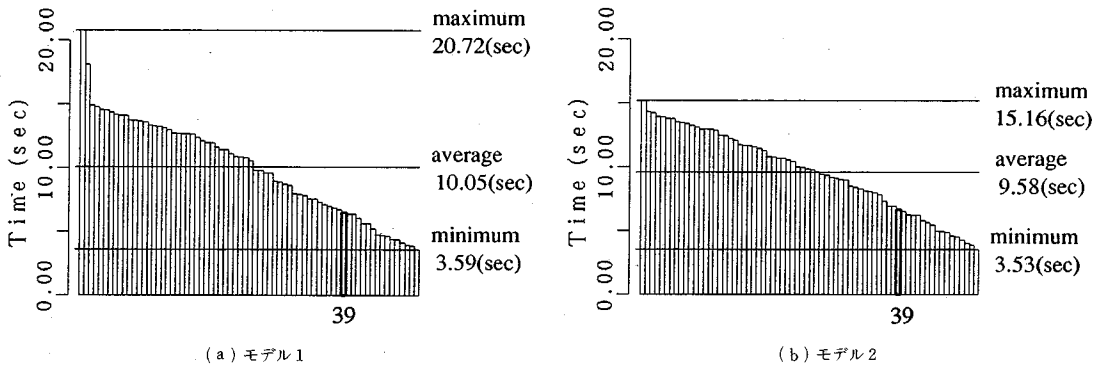


図-11 各個体の避難所要時間の比較 (大線は個体番号39)

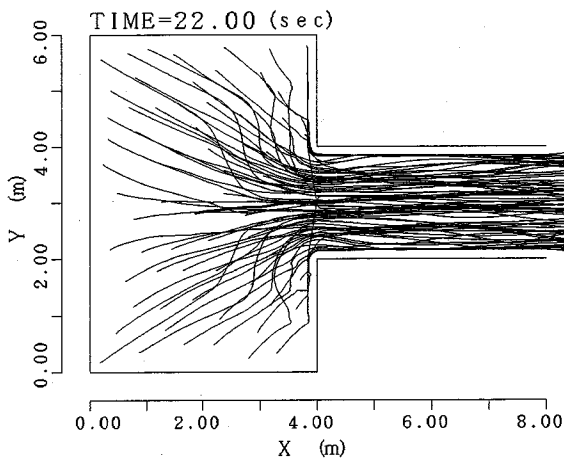


図-12 モデル1の各個体の動線

が可能である。

b) 階段を想定した避難モデル

図-14は階段の避難を想定したモデル3であり、個体の推進力の作用方向を決定する2次元関数も同図に示してある。ただし、実際の階段の3次元的な影響を取り入れたものではなく、単に平面的な形状を表現したモデルである。このモデルを用いたシミュレーションにより得られた、個体の移動分布の時系列的变化を示したものが図-15である。他の個体から力を受けない場合は、図-15に示された2次元関数の傾きの大きさを持つベクトルの合成方向に力を受けて移動するが、中には個体間の物理的な力関係によって外側に周り込む個体も生じる。図-16は避難所要時間を示したものである。平均値を境に避難時間の異なる2つのグループに分けることがで

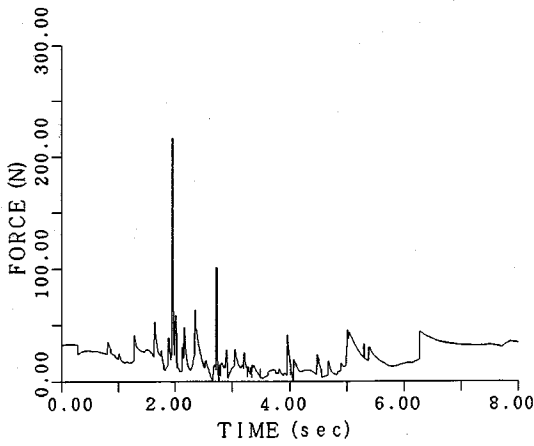


図-13 個体に作用する力の時刻歴 (個体番号 39)

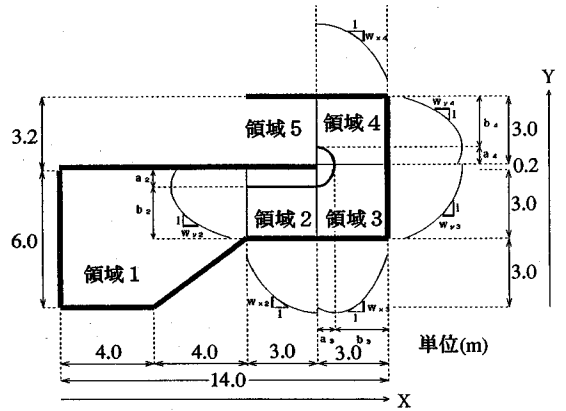


図-14 モデル3の形状寸法と移動方向ベクトル決定のための関数

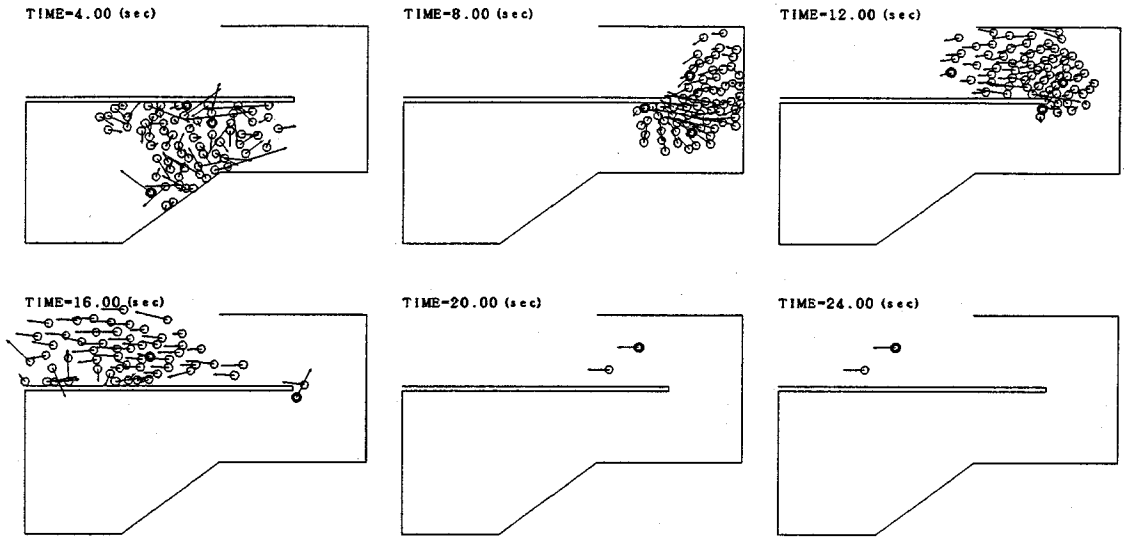


図-15 モデル3における群集移動の時間的変化

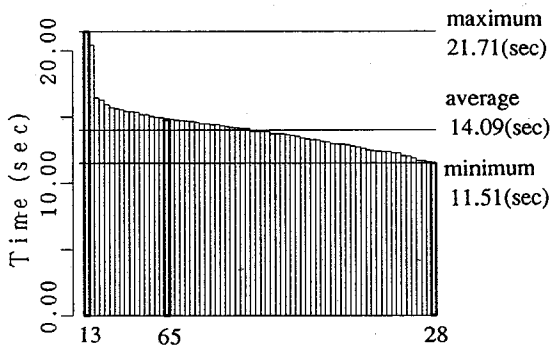


図-16 モデル3における各個体の避難所要時間の比較 (太線は左から個体番号 13, 65, 28)

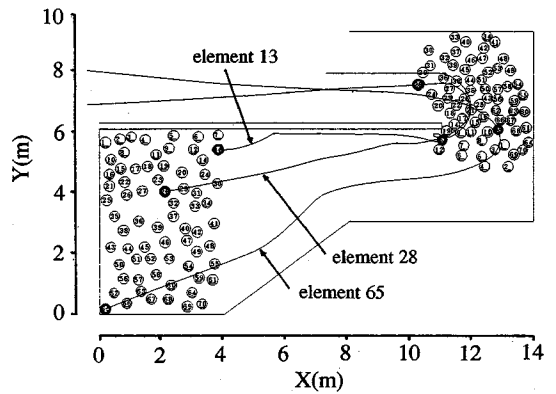


図-17 群集の移動状況と3つの個体の動線

表—4 ワイブル分布パラメータの回帰式

流入式	$p = 3.88 - 0.315x_{11} + 0.116x_{12}$ $(x_{11}: \text{群集密度}, x_{12}: \text{避難速度})$ $t_0 = 85.4 - 39.0x_{21} + 25.2x_{22}$ $(x_{21}: \text{群集密度}, x_{22}: \text{避難速度})$
流出式	$p = 2.18 - 0.639x_{31} + 3.22x_{32} + 0.0753x_{33}$ $(x_{31}: \text{群集密度}, x_{32}: \text{出口幅比}, x_{33}: \text{避難速度})$ $t_0 = -32.2 + 8.41x_{41} - 2.83x_{42} + 33.7x_{43} - 0.00289x_{44} - 1.33x_{45}$ $(x_{41}: \text{縦}, x_{42}: \text{横}, x_{43}: \text{出口幅}, x_{44}: \text{避難人数}, x_{45}: \text{避難速度})$

きる。これは、距離の遠い外側にいる個体が遅れているだけでなく、内側にいる個体も極端に遅れているためである。これを確認するために、各個体の初期位置と時刻10.0秒の位置、および3つの個体の動線を描いたものが図—17である。3本の実線は、避難所要時間が最短の個体28と最長の個体13、および一番距離の遠い個体65の動線を表したものである。個体13は初めに内側の壁に激しく衝突した後、階段内側の滞留に長い時間巻き込まれていた影響で動線が乱れている。個体28は時刻10.0秒において先頭に位置しており、滑らかな動線を描いている。個体65の動線も滑らかであるが、外側に大きく周り込んでいるため、避難時間が遅れている。

これらの例は、一つのサンプルにすぎないが、避難者個々の動きのみならず、群集流としての全体的な挙動の把握、また、避難者に働く力という観点から避難者が殺到する出入口の位置や形状などに関する定量的な検討が可能であることがわかる。

(2) 滞留に関する検討

a) 理論式

閉鎖空間から速やかに避難するためには、出口での滞留現象に関する群集流の計算が必要である。滞留は、出口における集結人員が流出人員を上回る場合に生ずる。避難の際に混雑の主因となるものがこの滞留現象であり、避難行動が混乱するばかりでなく避難時間も大きくなる。この滞留現象を理論的に扱ったものとして戸川の研究¹⁾が挙げられる。これは、出口の単位幅当たりの毎秒の流出人数、すなわち群集流出係数 $N(t)$ を与えることにより、ある地点を通過する総員を求めたものである。本研究では、 $N(t)$ を密度関数の形で表現して分布形状のフィッティングを行い、これを基にパラメータの決定を行った。ただし、ここでいう出口とは、本研究では部屋と通路の境界を指すものとする。したがって、毎秒の流出人数は、この境界を毎秒通過する人数をカウントして算出する。

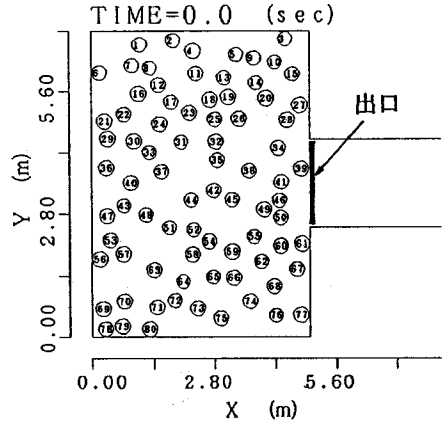
まず、以下のように時刻 t までに流入、あるいは流出した人数の割合を与える密度関数 $N^d(t)$ を用いて流入式、流出式を定義した。

$$z_{in}(t) = n \int_0^t N_{in}^d(t) dt \quad (17)$$

$$z_{out}(t) = n \int_0^t N_{out}^d(t) dt \quad (18)$$

ここに、 $z_{in}(t)$ 、 $z_{out}(t)$ は時刻 t までに流入、あるいは流出した人数、 n は総群集人数、 $N_{in}^d(t)$ 、 $N_{out}^d(t)$ はそれぞれ流入、流出の密度関数である。滞留は、流入と流出の差によって生ずるから、式(16)、(17)より滞留式 $z(t)$ は次式で与えられる。

$$z(t) = z_{in}(t) - z_{out}(t) \quad (19)$$



図—18 個体の初期配置 (モデル4)

b) 密度関数の当てはめ

部屋にいる群集が一つの出口から通路を抜けて避難するようなモデル1 (図—7) と同様のモデルを考える。

まず、0.5秒ごとに避難人数をカウントし、避難時間と単位時間当たりの全避難者に対する避難人数の割合のヒストグラムを作成し、この密度関数を以下に示すワイブル分布で近似した。

$$f(t) = \frac{p(t-\gamma)^{p-1}}{t_0} e^{-\frac{(t-\gamma)^p}{t_0}} \quad (20)$$

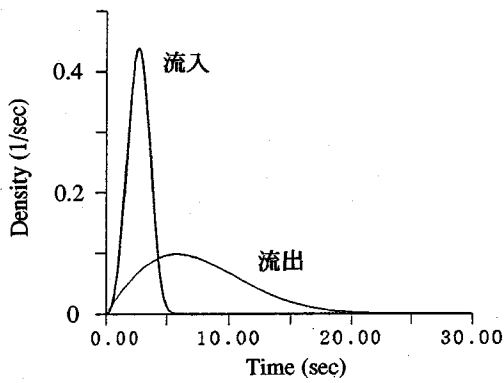
ワイブル分布は、形状、位置、尺度を表す3つのパラメータ p 、 γ 、 t_0 を有している。本研究では、ヒストグラムに最もフィットするワイブル密度関数のパラメータを最尤法によって求めた。ただし、ここでは時刻 $t=0$ からすぐに流出が始まるモデルを考えているので、 $\gamma=0$ としている。したがって、求めるパラメータは形状パラメータ m と尺度パラメータ t_0 の2つである。

c) 重回帰分析

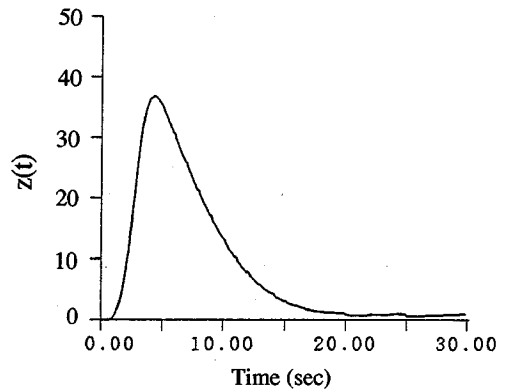
これらのパラメータと避難状況の因果関係を明らかにするために、モデル1の寸法、群集人数、通路幅、歩行速度を、以下の範囲内で一様乱数を与えることにより種々に変化させて100組のモデルを発生させ、重回帰分析を行って線形重回帰モデルを作成した。

x_1 : 部屋の縦の長さ (2.0—10.0 m)

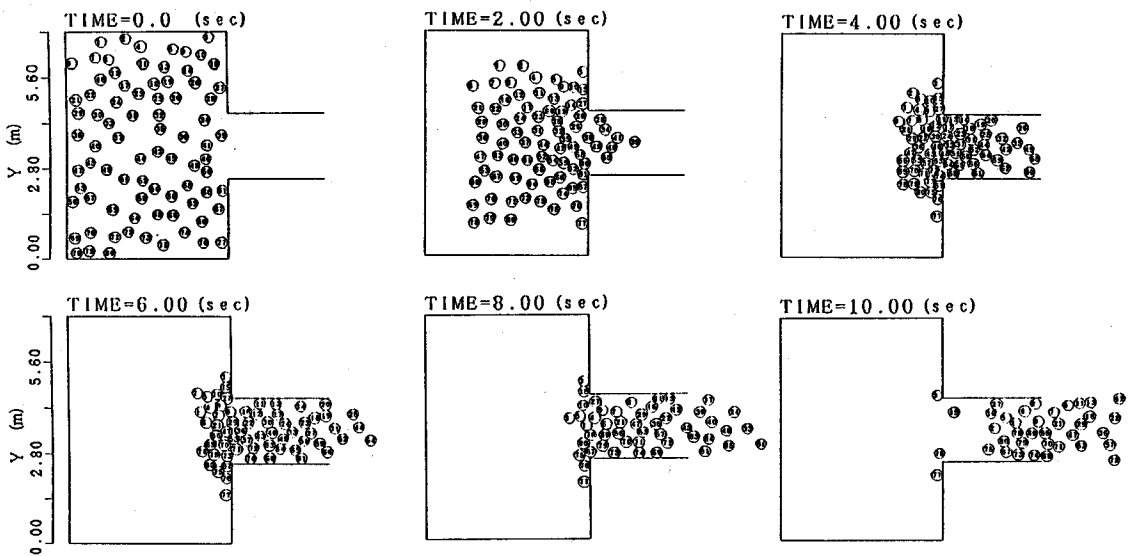
x_2 : 部屋の横の長さ (2.0—10.0 m)



図—19 流入・流出に対するワイブル密度関数



図—20 モデル4における滞留人数



図—21 滞留状況の時間的变化

x_3 : 通路幅 (1.0—3.0 m)

x_4 : 群集密度 (0.5—2.5 人/m²)

x_5 : 避難速度 (1.0—3.0 m/s)

重回帰モデルは以下の式で与えた。

$$q = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 \quad (21)$$

ここに、 q は目的変数であるワイブル密度関数の2つのパラメータ、 x_i ($i=1, \dots, 5$) は説明変数である。説明変数としては上述の部屋の寸法や避難人数、通路幅、避難速度を考えているが、重相関係数をできるだけ高くするために、これらのパラメータの組み合わせも考慮して最適な回帰式を選択した。この回帰モデルと係数の値を示したものが表—4である。

d) 滞留式に基づく解析

縦7 m横5 mの部屋の中にいる80人の群集(図—18:モデル4)が1.7 m/sの速さで避難する場合を考える。

この流入、流出に対する推定式によるワイブル密度関数を示したものが図—19であり、この流入、流出の密度関数から式(19)を用いて滞留人数を計算したものが図—20である。時刻4秒で35人程度が滞留していることがわかる。このケースのサンプルを示したものが図—21であり、この場合も時刻4秒において30~40人程度の滞留が生じており、推定式が妥当であることがわかる。また、避難時間に関しては流出式の密度関数を積分することにより、どの時刻に全体の何%が避難を完了したかがわかる。これより、ここで導出した理論式を用いれば、実際に観測またはシミュレーションすることなく、流入式、流出式を用いることにより避難人数を近似できる。出口が複数の場合には、その個数分だけ流入、流出分布を重ね合わせて新たな密度関数を作成すれば、避難時間や滞留人数の把握が可能となる。

5. 結 論

本研究は、被災時の人間の避難行動に対するDEMの適用の可能性を検討し、その基礎的な考察として部屋から通路の避難、階段の避難および滞留に関する検討を行ったものである。本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) DEMにおける要素を個々の人間に置き換えた避難行動の解析によれば、各個体の動きやそれに作用する力、および全体的な群集の動きが時間ごとに把握でき、部分的なものから巨視的なものまで解析可能である。
- (2) DEM解析において、要素に仮想バネを取り入れることによって、人間相互の距離や行動の特性をうまく表現できる。
- (3) 出入口の形状変化による避難所要時間の差や、出入口に群集が殺到する際に生ずるアーチ効果などによって生ずる滞留を検討することにより、空間形状の変化による避難所要時間の比較や、個体に作用する力の時系列的変化の把握が可能である。
- (4) 滞留に関する基礎的検討の結果、群集流入および流出密度関数をワイブル分布で近似し、そのパラメータを関連要因の関数として表現すれば、滞留人数および避難完了時間の理論的導出が可能である。

本解析では、周囲から力を受けない場合の個体の推進力の方向に、予め想定した関数を与えている。実際には、避難する個体の主観的な要素が避難行動を大きく左右する場合もあるであろうし、逆に、個体の主観判断よりも群集心理にしたがって行動が決定される場合もあろう。実験、実例を通し、個体自身の推進力およびその方向を客観的に妥当なものとして取り入れることが今後の課題である。

謝辞：本論文をまとめるにあたっては、数値計算の一部は山口大学工学部学生中嶋庸一氏（現防府市役所）、末松美香氏（現（株）ニュージェック）および山口大学大学院生八木宏晃氏のご協力を得た。ここに感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 戸川喜久二：避難計画，建築学体系 21（建築防火論），pp. 329-343, 1970.
- 2) 藤田隆史：大震災火災時における住民避難の最適化，計測自動制御学会論文集，第12巻4号，pp. 425-431, 1976年.
- 3) 中村和夫，吉岡松太郎：歩行者流動モデルとそのシミュレーション，人間工学，Vol. 10, No. 3, pp. 93-102, 1974.
- 4) 平井一正，樽井賢治：パニック時の群集の行動とそのシミュレーション，システムと制御，Vol. 21, No. 6, pp. 331-338, 1977.
- 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1，磁気モデルの応用による歩行モデル，日本建築学会論文報告集，No. 283, pp. 111-117, 1979.
- 6) 中谷義雄，荒屋真二：情報处理的アプローチによる避難行動シミュレーション，計測自動制御学会論文集，Vol. 20, No. 3, pp. 223-240, 1984.
- 7) 海老原学，大槻明，風間真奈歩：オブジェクト志向型言語を用いた地震時人間行動シミュレーション，第3回人工知能学会全国大会予稿集，pp. 617-620, 1989.
- 8) 片山恒雄：地震火災時の人間の避難行動に関する実験およびシミュレーション研究，平成5年度科学研究費補助金（一般研究（B））研究成果報告書，Report No. 94-1(17), 1994年.
- 9) Mogami, T. : A Statical Approach to the Mechanics of Granular Materials, *Soils and Foundations*, Vol. V, No. 2, pp. 26-36, 1965.
- 10) Cundall, P. A. : A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movement in Blocky Rocksystem, *Symp. ISRM, Proc. 2*, pp. 129-136, 1971.
- 11) 伯野元彦，平尾寿雄：粒状体のランダムパッキングに関する一つの試み，土木学会論文報告集，No. 219, pp. 55-63, 1973.
- 12) 木山英郎，藤村 尚：カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析，土木学会論文報告集，No. 333, pp. 137-146, 1983.
- 13) 垂水祐二，伯野元彦：Quick Sandと液状化に関する粒状体シミュレーション，地震研究所彙報，Vol. 62, pp. 535-577, 1987.
- 14) 岩下和義：粒状体シミュレーションによる地盤の動的破壊解析—その1—，地震研究所彙報，Vol. 63, pp. 201-235, 1988.
- 15) 目黒公郎，伯野元彦：粒状体シミュレーションによるコンクリート構造破壊解析，地震研究所彙報，Vol. 63, pp. 409-468, 1988.
- 16) Lucia Casaverde, M., K. Iwashita, Y. Tarumi and M. Hakuno : Distinct Element Analysis for Rock Avalanche, *Struc. Eng. / Earthq. Eng.*, Vol. 6, No. 1, pp. 131s-140s, 1989.

(1995. 5. 1 受付)

SIMULATION OF EMERGENCY EVACUATION BEHAVIOUR DURING DISASTER BY USING DISTINCT ELEMENT METHOD

Junji KIYONO, Fusanori MIURA and Koichi TAKIMOTO

Human behaviour in a closed space such as an under ground structure during disaster is simulated by using distinct element method (DEM). DEM is the numerical analysis method in which the positions of the elements are calculated by solving the equations of motions step by step. Not only the individual but also the group behaviour can be obtained by using this method.

In this paper, we considered the DEM elements as human beings and investigated the behaviour of the crowd flow that evacuates from the closed space to the outside through the passage or the steps. The trace of evacuating people and time history of the force that acts on the people can be easily calculated. The theoretical equations of input and output flow at the exit of the room are proposed according to the regression analysis based on the results of the DEM simulations. The present method enable us to simulate the evacuation during disaster.