

個別要素法を用いた被災時の 避難行動シミュレーション

清野純史¹・三浦房紀²・八木宏晃³

¹正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

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 工修 静岡県島田土木事務所 工事課 (〒427 静岡県島田市中央町 30-1)

筆者らは、地下街などの閉鎖的で特殊な空間を対象に、そこで地震災害や火災などが発生した場合の人間行動を定量的に評価するために個別要素法 (DEM) を用いたシミュレーション手法を提案している。本研究では、障害物を滑らかに回避したり、すれ違いや追い越しなどの基本的な人間行動をできるだけ現実に即して再現できるようなモデルを構築するとともに、平常時および緊急時における個体要素のパネ定数や歩行速度、個体推進力を決定するために、過去に行った簡易実験よりも詳細な実験を行い、解析に用いるパラメータを決定した。そして、これを 1980 年にガス爆発事故の惨事を引き起こした静岡駅前ゴールデン地下街の当時の地下街と現在の地下街に適用し、避難行動解析を行った。

Key Words: distinct element method, emergency evacuation, underground shopping area, earthquake disaster

1. まえがき

大都市中心部の駅舎およびその周辺の整備に伴い、地下街や地下駅、地下道、ビル、デパートなどの地下階は、不特定多数の人々が利用しているため、ひとたび地震災害や火災が発生すれば、そこに居合わせた人々はきわめて危険な状況下におかれることになる。防災計画を立てる上では、このような状況下での群集の避難行動をできるだけ正確に把握し、その危険性を評価する必要がある。このような地下空間における災害時の避難行動を予測するためには過去の被害事例を詳細に調査してその支配要因を抽出し、これに基づいて避難実験や計算機による避難行動シミュレーションを行えばよい。しかし、緊急時を想定した避難実験は実験に危険が伴うことなどの問題点があるため、計算機による避難行動シミュレーションが一般的である。

地震や火災などの災害時における過去の避難シミュレーションの多くは、主として非常口および避難路の通路幅、避難に要する時間、出口までの距離に関する検討が中心である。これは、個人

個人の避難行動に関する心理的な面を含めた定量化が困難であるためである。また、定量的な検討の内、避難途中での各避難者に作用する力から避難安全性を評価する手法はほとんど存在しない¹⁾。人間に作用する力に関する研究は、主に事故防止の観点から安全工学の分野で見られる²⁾が、このような平常時の事故防止の観点からの検討のみならず、避難行動という緊急時における人間行動に着目して避難安全性を検討することも重要である。すなわち、被災時の避難行動において各避難者にどのような力が作用しているかを定量的に解明できれば、混雑状況をあらかじめ予測し、それに対処する構造的、機能的観点から出入口の形状、場所などの平面計画に反映することも可能である。

本研究では、地下街という閉鎖的で特殊な空間を対象に、そこで地震災害や火災などが発生した場合の人間の群集行動を正確に把握し、各避難者の避難時間や、避難の途中で作用する力を定量的に評価するために、個別要素法 (DEM) を用いた避難行動解析を行った。

対象とする空間からの避難安全性に関する研究は、主に建物からの避難を中心に建築の分野で行

われており、そこには心理学的な見地からの情報も多く取り入れられている³⁾。被災時の人間行動を解析するためには、対象とする空間をどのように設定するのか、また避難者を個人として捉えるのか、あるいは全体として捉えるのか、そしてその行動をどのような理論に基づいて解析するのか等をあらかじめ明らかにしておく必要がある。

まず、避難の際の対象空間に着目すると、地震火災を含む大規模火災時を想定した避難行動シミュレーションや洪水時における避難行動など、都市全域などかなり広い地域からの避難行動を対象とした広域型避難シミュレーション^{例えば 4)~9)}と、建物等の限定領域からの避難行動を対象とした局所型避難シミュレーション^{3), 10), 11)}の2つに分類できる⁴⁾。

対象空間のモデル化に関しては、この空間をノードとリンクによるネットワークに抽象化したオートマトンモデル¹²⁾、三次元ネットワークモデル¹³⁾、遺伝子コードモデル¹⁴⁾などのネットワーク型モデル、歩行空間をメッシュ分割することによって、各メッシュ内の歩行者数や密度、メッシュ間の移動人数により群集を表わし、これにより都市空間内の避難行動をシミュレートする¹⁵⁾モデル、大規模地下空間を対象にしたポテンシャルモデル⁴⁾などのメッシュ型モデル、空間座標を用いて対象空間を表現し、その座標空間内を歩行者が移動するような座標型モデル¹⁾の3つに大別される。

避難者のモデル化に関しては、群集流あるいは多質点として人間行動を扱う集団型モデルと、環境がもたらす心理状態の変化と、それに伴う行動の変化を取り入れ、避難者を個別に扱う個人型モデルに大別される。群集の流動状況に基づく群集流モデル^{例えば 17), 18)}は歴史も古く、避難の全体像を捉えられるという利点を持っており、主としてネットワーク型とメッシュ型のモデルで用いられている。その反面、個々の人間行動を表現するには限界があり、特に心理状態を反映させることなどは困難である。

これに対して個人型は、年齢による速度の相違や空間などに対する認知度、役割分担などの属性を個体に与え、その影響をみることができる。また、避難の流れに同調したり、個体間で情報交換を行ったり、介助したりするという、個体間の物理的、心理的、社会相互的作用を説明することが可能である。片山ら⁴⁾によるポテンシャルモデル、平井ら¹⁹⁾によるパニック時の群集行動モデル、位寄⁹⁾による心理状態を考慮したモデル、仲谷¹⁰⁾

らによる避難行動の情報処理モデル、海老原・大槻ら²⁰⁾による災害時人間行動シミュレーションなどがこの範疇に入る。

これら集団、あるいは個人の行動決定は様々な理論に基づいており、情報処理理論、ポテンシャル理論、磁場理論、流体理論、力学理論などが応用されている。

本研究で扱うモデルは、避難の際の対象空間としては、建物からの避難と同様な局所型避難シミュレーションである。対象空間のモデルは座標型、避難者モデルは各時間毎に個々の避難者の物理的、心理的作用を考慮に入れることが可能な個人型、そして行動決定は力学理論を用いたモデルである。また、避難者同士の物理的接触を詳細に考慮することができる点で、従来にはないモデルである。

数値シミュレーションとしての DEM ^{例えば 21)~23)}は、地盤工学や構造工学を始め様々な分野で応用されている。本研究は、この解析法の利点を生かし、人間行動へ応用したものである。

2. DEMの概要と個体要素

著者らが先に提案した DEM による避難行動モデル¹⁾は、部屋などの空間から最短出口に向かったり、階段の平面形状を想定し、そこを使用して避難するような単純かつ局所的な対象空間での避難行動を再現したものであった。しかし、避難者同士が対向したり、前方に障害物が存在する場合など、周囲の状況や対象空間が複雑な場合にはあまり現実的でない現象を生じてしまうという欠点を有していた。

本研究では、まず従来の問題点を解消し、より適用範囲の広い DEM モデルの開発を試みた。すなわち、障害物が存在したり経路が複雑な解析対象空間において各個体要素が各時間毎に目標点を決定し、障害物を滑らかに回避したり、他の人間とすれ違ったり、前方の人間を追い越したりする基本的な人間行動をできるだけ現実に即して再現できるモデルを構築した。このような点を考慮に入れた本研究における DEM モデルの計算手順の概略を示したものが図-1 である。

DEM 要素を人間に置き換えるには、人間の体の厚さや肩幅の寸法が重要な項目となる。本研究では、Fruin²⁴⁾による、実際の寸法よりやや大きめで体の揺れを考慮に入れた占有面積 0.21 m^2 の人体楕円 ($0.45 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$) を参考に、人体を半径 0.259 m 、単位高さの円柱体に置き換えた。また、

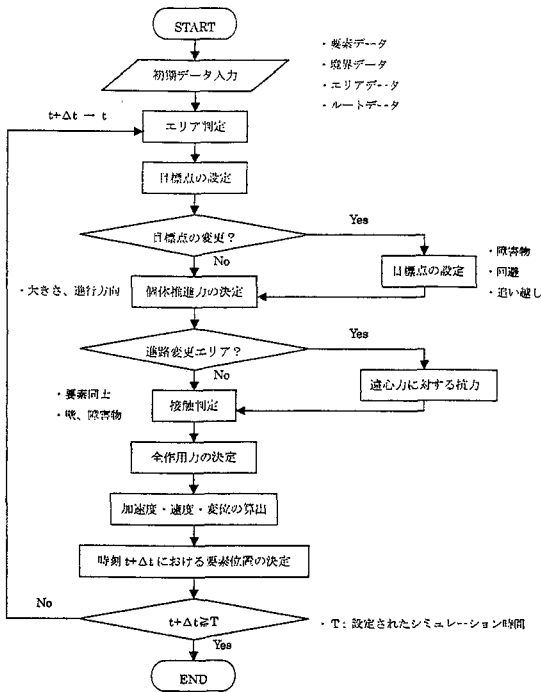


図-1 避難行動解析の計算手順

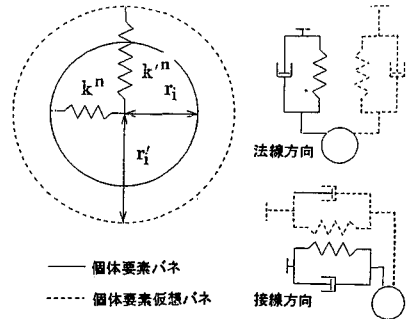


図-2 DEMによる人間のモデル化

$f_i^j(t)$, $f_i^j(t)$ は以下に示すように、それぞれ時刻 t における個体要素 i に作用する x 方向および y 方向の合力である。

$$f_i^j(t) = f_k + f_c + f_k' + f_c' + f_{wk} + f_{wc} + f_f + f_a \quad (j=x, y) \quad (3)$$

ここに、 f_k , f_c , f_k' , f_c' は個体要素 i に接触するすべての要素の個体要素バネ・ダッシュポットおよび個体要素仮想バネ・ダッシュポットからの作用力と、接触する壁などの境界からの反力 f_{wk} , f_{wc} , 個体要素が目標点に向かおうとする個体推進力 f_i , および個体がコーナーを曲がる際に働く遠心力に対する抗力 f_a が作用する。個体推進力に関しては、本研究では、緊急状態を想定した加速度実験を行ってその値を求めるとともに、作用方向の決め方を改良した。その詳細は4.で説明する。

時刻 $t-1 \sim t$ なる Δt 区間で加速度が一定と仮定すれば、式(1), (2)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。

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

$$\dot{y}_i(t) = \dot{y}_i(t-1) + \ddot{y}_i(t-1)\Delta t \quad (5)$$

$$x_i(t) = x_i(t-1) + \dot{x}_i(t-1)\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{x}_i(t-1)\Delta t^2 \quad (6)$$

$$y_i(t) = y_i(t-1) + \dot{y}_i(t-1)\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{y}_i(t-1)\Delta t^2 \quad (7)$$

著者ら¹⁾は、心理的距離を決定するために、通勤時に駅に向かう交差点において赤信号で停止し

個体要素の単位体積重量および単位高さ当たりの質量は、20～25歳の成年男子35人を対象に身長、体重を求めた結果を用いた。それぞれ $1.69 \times 10^3 \text{ N/m}^3$, 36.2 kg である。

人間は、自分の周囲の個人空間を大切にし、相互が物理的に接触することをさ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²⁾。この心理的距離を本研究では個体要素仮想半径と定義する。地盤工学、構造工学で用いられてきたDEM解析では、要素同士が物理的接触することで力の受け渡しを行っているが、ここでは法線方向と接線方向に、個体要素バネとは独立にこの人間の心理的距離を考慮に入れた新たなバネである個体要素仮想バネを設定している(図-2)。

群集を構成する i 番目 ($i=1, 2, 3, \dots, N$; N は総人数)の個体要素の質量を m_i 、この個体要素の x, y 方向の変位をそれぞれ x_i, y_i 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。

$$m_i \ddot{x}_i(t) = f_i^x(t) \quad (1)$$

$$m_i \ddot{y}_i(t) = f_i^y(t) \quad (2)$$

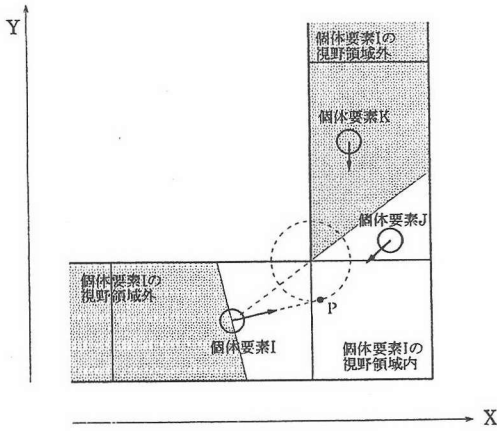


図-3 個体要素の視野領域

た人を撮影し、人間相互の距離の平均値 0.98 m を得た。なお、この距離は Hall²³⁾ のいう近接距離 (0.75m~1.2m) の範囲内に入る。これは 2 個体間の中心間距離であるので、本研究では一方の個体要素半径 0.26m を差し引いた 0.72 m を個体要素仮想半径とし、この値を用いた。法線方向の個体要素仮想バネ定数 k' は、個体推進力 f_f が作用すると、個体要素仮想バネが心理的距離に対応した個体要素仮想半径 r' から物理的な個体要素半径 r まで縮むものとして決定した。接線方向のバネ定数は、多数のシミュレーション結果を基に試行錯誤的に決定した。その値は全て一律に法線方向の 0.05 倍、また減衰は個体間の跳返りを速やかに減衰させるように臨界減衰値を採用した¹⁾。

3. 目標点の決定

本研究では岡崎らの研究^{例えば 11)} を参考に、各個体要素が目標点を任意に決定できる方法を開発し、これを導入した。

目標点の決定に際しては (1) 直進と (2) 進路変更 (右左折など) に分ける。本研究では、接触判定を容易にするために、経路を数メートルごとのブロックに領域分けしている。そして、例えば直進では、次のブロックと 2 つ先のブロックの境界線の midpoint に目標点を定めることによって自然な歩行行動を再現しているが、この目標点のみの行動では個体要素同士が対向したり、前方の障害物を回避する行動を再現できない。そのため、個体要素の周囲の状況変化に応じて目標点を変更する必要がある。その際に、まず図-3 に示す視野領域の

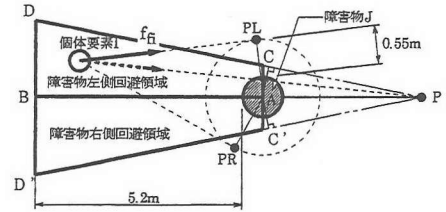


図-4 障害物回避領域

概念を導入した。例えば図中の個体要素 I に関しては、その目標点 P へ向かうベクトルに対して左右 90° の線から前方で、かつコーナーの陰になる領域を除いた白抜きの部分を視野領域内とする。そして、この領域内にいる他の個体要素 (ここでは個体要素 J) に対して回避行動や追いつき行動などを行うために目標点変更を行うものとした。目標点の変更方法には以下の通りである。

(1) 直進

a) 障害物の回避

歩行者が柱などの障害物を回避する場合、建部らの研究²⁴⁾によると直径 0.4m、高さ 5.0m 以上の障害物を回避する際には、前方 5.2m の距離から回避を開始するとされている。また、中村ら²⁵⁾の報告によると直径 0.5m、高さ 0.75m の円柱物を回避する際の側方間隔 (人体中心-物体面) は、0.55m とされている。

そのため、本研究では図-4 に示すように、障害物 J を中心にその半径に個体要素 I の半径を加えた円を描き、個体要素 I の目標点 P からその円に接線を引き、その接線と障害物 J の中心を通る線との交点 C, C', および障害物 J の側面から 5.2m の位置における線との交点 D, D' からなる台形領域 CDD'C' を障害物回避領域とした。

さらに、この台形領域を 2 分し、障害物の左側の領域 CDBA を障害物左側回避領域、右側の領域 C'D'BA を障害物右側回避領域とし、これらの領域内に入ると個体要素は回避行動を開始するものとした。その際の新しい目標点として、障害物 J との間隔 (個体要素の中心から障害物 J の表面までの距離) が 0.55m を確保して回避できる点 PL, PR を設定した。

b) すれ違い

前方から来る歩行者を回避する場合は、建部らの研究²⁴⁾によると 8.6m 手前から回避行動を開始し、すれ違う際の側方間隔 (人体中心間) は岡崎らの研究²³⁾によると 1.7m であることが報告されている。

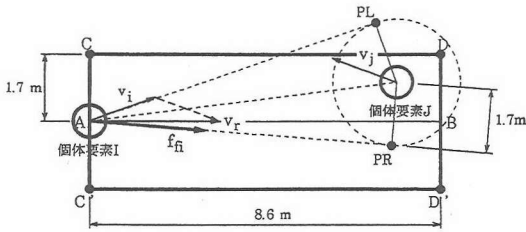


図-5 すれ違いのための回避領域

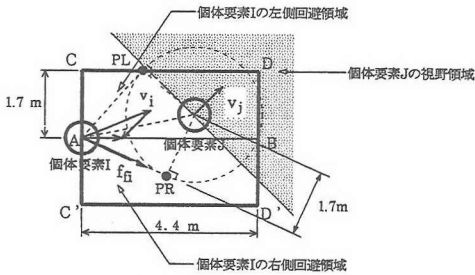


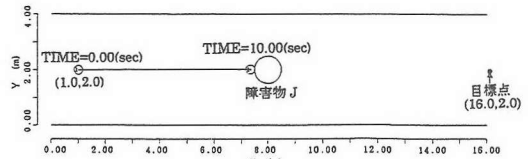
図-6 追い越しのための回避領域

本研究では、図-5 に示すように個体要素 I の速度ベクトル v_i と個体要素 J の速度ベクトル v_j の相対速度ベクトル v_r に平行で、個体要素 I を中心に相対速度ベクトル方向に長さ 8.6m、幅 1.7m の長方形領域を相対速度ベクトルに対して左右に 2 つ考え、その領域内に入った個体に対して回避行動を開始するものとした。その際、長方形領域 ABCD を個体要素 I の左側回避領域、長方形領域 ABD'C' を個体要素 I の右側回避領域とした。また目標点の変更方法は、個体要素 I の左側回避領域内に個体要素 J がある場合は、個体要素 J を中心に半径 1.7m の円を描き、個体要素 I から接線を引き、円と接線の下側接点 PR を目標点とした。個体要素 J が個体要素 I の右側回避領域にいる場合は、上側の接点 PL を目標点としている。

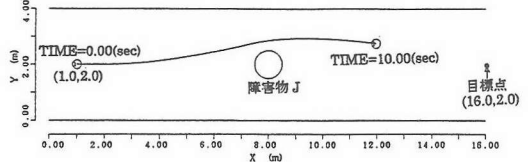
c) 追い越し

前方にいる歩行者を追い越す場合は、建部らの研究²⁴⁾によると 4.4m 手前から回避行動を開始し、すれ違う際の側方間隔は吉岡らの研究²⁵⁾によると対面した相手を回避する場合と同様であることが報告されている。

そのため本研究では、前方からの歩行者を回避する場合と同様に図-6 に示すように個体要素 I と個体要素 J の相対速度ベクトル v_r に平行で、個体要素 I を中心に相対速度ベクトル方向に長さ 4.4m、幅 1.7m の長方形領域を 2 つ考え、その領域内に入った個体に対して追い越し行動を開始するものとした。その際、長方形領域 ABCD を個体要素 I の左側

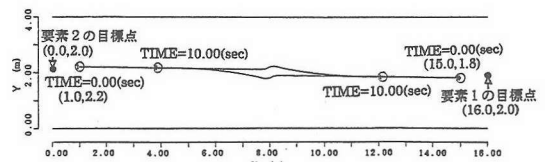


(a) 回避行動を取り入れない場合

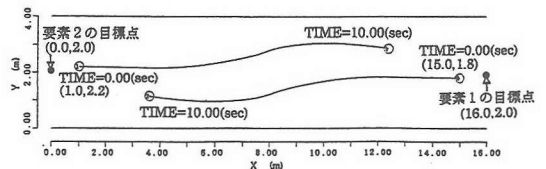


(b) 回避行動を取り入れた場合

図-7 障害物回避行動



(a) 回避行動を取り入れない場合



(b) 回避行動を取り入れた場合

図-8 すれ違い行動

回避領域、長方形領域 ABD'C' を個体要素 I の右側回避領域とする。ただし、要素・障害物・目標点が一直線上に並んだ場合は、予めどちらか一方に決めておくものとする。目標点の変更方法は、すれ違いの場合と同じである。図-6 の網掛け部分は、個体要素 J の視野領域を表し、この領域内に他の個体要素が入ってきた場合に回避行動を開始するものとした。

幅 4.0m、長さ 16m の通路に半径 0.5m の円柱の障害物が存在する場所を、1 人の歩行者が進行する場合に対して、回避行動を考慮しない手法とここで提案する手法の比較を行った。図-7 (a) に示す回避行動を考慮しない手法では、個体要素 I はこの目標点に向かって直線的に進み、障害物に衝突する。一方、図-7 (b) に示すように、回避行動を考慮に入れた本手法では、障害物の 5.2m 手前から初期の目標点 (16.0, 2.0) を回避の目標点に変更して回避行動を開始し、障害物の死角から初期の目標点を直接見ることができるまでその目標点に向かい進行する。その結果、障害物をなめらかに回避しながら目標点に

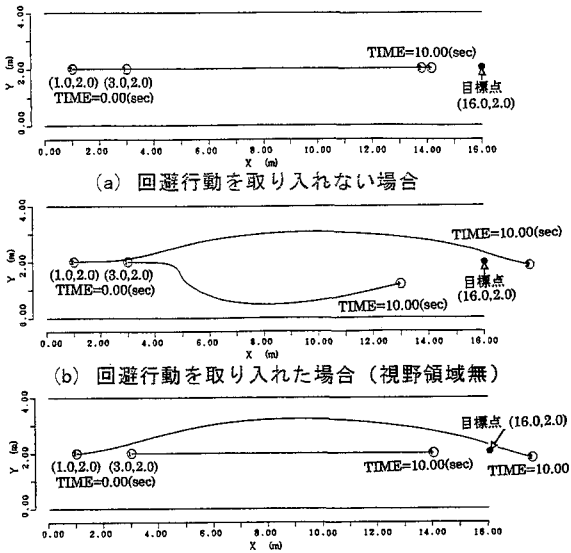


図-9 追い越し行動

向かって進行していることがわかる。

次に、2人の歩行者が相対面する形で配置したモデルですれ違いの検討を行った。その際の初期配置としては、個体要素1を(1.0, 2.2)、個体要素2を(15.0, 1.8)とし、またそれぞれの目標点を個体要素1は(0.0, 2.0)、個体要素2は(16.0, 2.0)とした。図-8(a)のすれ違いのための回避を考慮しないモデルでは、両者がお互いの個体要素仮想半径に接触するまで直線的に進み、個体要素仮想バネが作用して初めて回避し始め、すれ違い後は、各々の目標点に向かって進行する。しかし、ここで提案する図-8(b)のモデルでは、個体要素1の前方8.6mに個体要素2を確認したら、個体要素1は初期の目標点(16.0, 2.0)を側方回避距離の1.7mを考慮に入れた回避の為の目標点に変更して、すれ違いのための回避行動を開始し、個体要素1の視野領域から個体要素2が見えなくなるとはじめて当初の目標点に向かい進行する。

さらに、2人の歩行者を2mの間隔で同一方向を向く形で配置したモデルを用い、追い越しのための回避行動をとらない場合、また、視野を導入していない場合と視野を導入した場合で、後方にいる歩行者が前方の歩行者を追い越す行動をシミュレートした。その際、後方にいる個体要素2の歩行速度は2.0m/sec、前方にいる個体要素1の歩行速度は1.3m/secとした。図-9(a)に示すように、追い越しのための回避行動をとらないと、個体要素2は個体要素1に近づき、後方から個体要素1を押し形とな

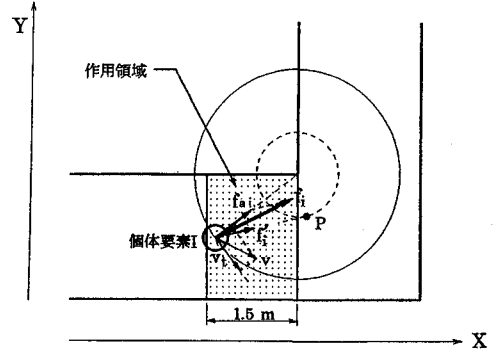


図-10 遠心力に対する抗力の設定

ってしまう。また、図-9(b)に示すように、視野領域を考慮しない場合(360°視野に入ると仮定)は、個体要素2の接近が後方からであるにもかかわらず、個体要素1は2を回避してしまう。この現象はあまり現実的ではない。図-9(c)は視野領域を考慮した場合(視野を180°)である。個体要素1の左後方から個体要素2が追い越そうとしているがこれは個体要素1の視野内に入っていないため、個体要素1は何ら回避行動は行うことなく、直線的に目標点である(16.0, 2.0)に向かって進んでいる。一方の個体要素2は、シミュレーション開始直後から個体要素1の左側にある新しい目標点をめざして進んで行き、個体要素2の視野領域から個体要素1が消えた直後から初期の目標点である(16.0, 2.0)に向かって進んでいる。

(2) 進路変更(右左折)

前述した目標点のみの行動では、個体要素が速い速度でコーナーを曲がると、遠心力のためにコーナーを曲がりきれないような不自然な現象が生ずる。本研究では、個体要素が滑らかにコーナーを曲がることできるように、この遠心力に抵抗する向心力を作用させた。すなわち、図-10に示すように、個体要素が曲がろうとするコーナーから1.5m手前を抗力作用領域(図中網掛け部)とし、この領域内に入った個体要素に向心力を作用させる。 f_c は遠心力に対する向心力(f_a)を考慮しない時の作用力、 f_i はその向心力を付加した後のトータルの作用力である。その際、個体要素*i*に作用させる向心力 f_{ai} は次式によって求めた。

$$f_{ai} = m_i v_i^2 / r_i \quad (8)$$

ここに、 m_i は個体要素の単位高さあたりの質量、 r_i は個体要素とコーナーまでの距離、 v_i はコーナ

ーを中心とした円に対する歩行速度の接線成分である。

4. パラメータ決定のための実験

実際の空間を対象に避難行動解析を行うためには、平常時および緊急時における各種パラメータ、例えば個体要素のバネ定数、減衰係数、歩行速度および個体推進力を決定するための加速度などを明らかにする必要がある。しかし、人間の物理定数や緊急時に出口に逃げようとする際の個体推進力に関する実験はほとんど行われていないのが現状である。DEMモデルのパラメータ決定のために行った過去の簡易実験¹⁴⁾は、被験者が9人と少なかったことと実験方法が簡易的であったために測定誤差が生じていた可能性がある。そこで本研究では、被験者の数を従来の実験方法より増やすとともに、より高い精度の結果を得ることが期待できる実験を行い、その結果から解析に用いるパラメータを決定した。行った実験は個体要素バネ定数を決定する人体圧縮実験と、個体推進力を決定する加速度実験である。

人体圧縮実験では、まず被験者を床に寝かせ、その被験者に載荷板を載せ、載荷板の4点の角から床までの距離を測定してその平均値を求める。次に、その載荷板上に39.2N~196Nの荷重を段階的に静的に載荷し、同様な測定を行う。これを人体の正面方向と側面方向の2方向に対して行い、各圧縮力に対する変位量を求め、変位-荷重関係を得た。被験者は、20~25歳の男子学生35人である。実験に用いた道具と実験の方法を図-11に、正面、側面方向の実験結果をそれぞれ図-12(a)、(b)に示す。人体バネ定数としては、各個人ごとの正面・側面方向のバネ定数の平均を求め、これを更に全個体で平均することにより $1.26 \times 10^4 \text{ N/m}$ という法線方向の個体要素バネ定数を算出した。

次に、平常時および緊急時における個体推進力を与える加速度および歩行速度を求めるために2通りの実験を行った。実験1は、普通に歩行してもらった実験、実験2は、被験者に構内で火災が発生したと仮定してできるだけ急いで逃げるように告げて歩行(避難)してもらった実験である。歩行者の位置が分かるように床にテープでメッシュを描き、被験者の歩行をビデオカメラで撮影した映像を基に分析を行った。各被験者毎に経過時間と歩行速度の関係を求めた結果、各被験者とも2

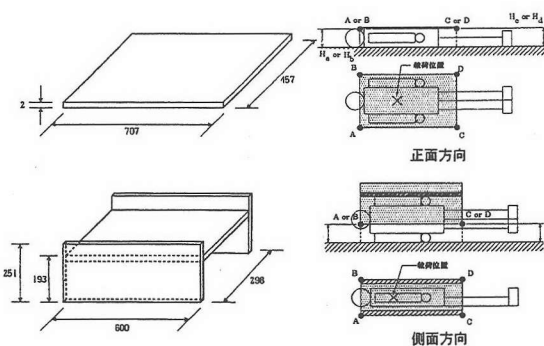
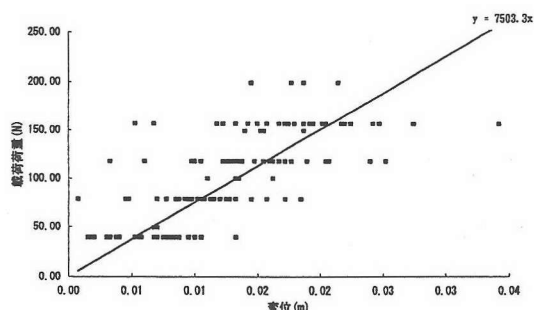
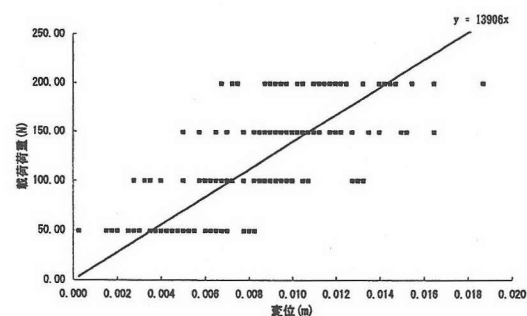


図-11 圧縮実験のための道具と方法



(a) 正面方向



(b) 側面方向

図-12 圧縮実験結果

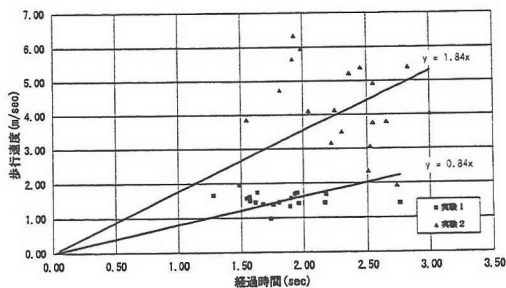


図-13 個体推進力設定のための加速度実験結果

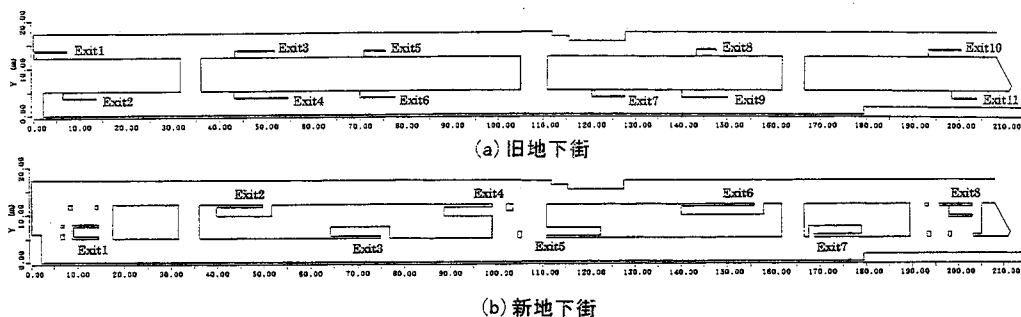


図-14 静岡駅前ゴールデン地下街の平面モデル

秒前後で速度が一定になっていることから、2秒までを加速状態、それ以後を等速状態と定義し、2つのグループ(クラスター A とクラスター B)に分けた。次に加速状態を表すクラスター A は原点を切片とする回帰直線を、また定速状態を表すクラスター B は速度の平均値とした直線を描き2つの直線の交点を求め、これを等速状態に到達した点と定義した。すなわち、この平衡点の横軸からは、その個体がある一定速度に至るまでの時間、縦軸はその一定速度値を表わすことになる。図-13の各点は実験1,2に対してその平衡点をプロットしたものである。実験1より、各被験者の平衡点の平均値が1.81secの時に1.52m/secという結果が得られたので、平常時の個体推進力を与える加速度を0.84m/sec²、実験2より2.33secの時に4.28m/secという結果が得られたので、緊急時の個体推進力を与える加速度を1.84m/sec²とした。

5. 地下街における避難行動解析例

ここでは、1980年にガス爆発事故の惨事を引き起こした静岡駅前ゴールデン地下街の当時の地下街と現在の地下街を対象に避難行動解析を行った。

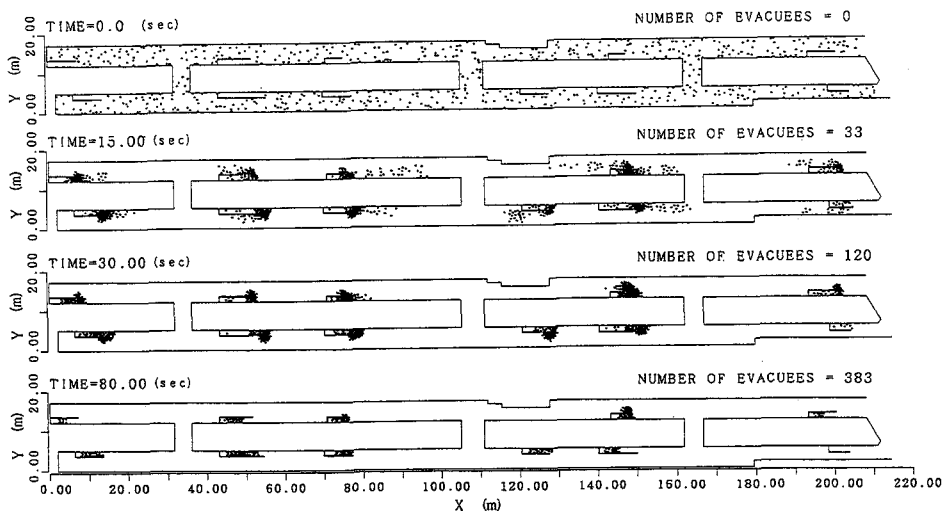
静岡駅前ゴールデン地下街は、JR静岡駅から市の中心部へ通じる繁華街にあり、1980年8月に死者15人、負傷者222人というガス爆発事故を発生した。その後、地上への階段の配置とその数を11カ所から8カ所に変更する工事を1986年に着工し、1989年に完成している。ガス爆発当時の地下通路²³⁾は幅5m、長さ約200m、面積2,242m²であり、地上への階段は11カ所設けられ、JR静岡駅方向は地下道にてさらに延びていた。

表-1 解析に用いたパラメータ

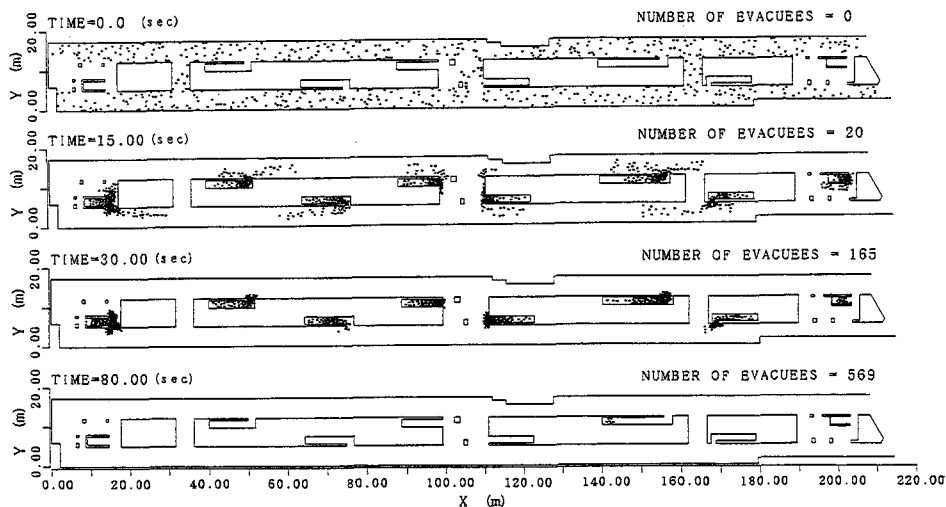
	ケース1	ケース2
個体要素バネ定数(法線方向) $k^x(N/m)$	1.26×10^4	1.26×10^4
(接線方向) $k^y(N/m)$	6.29×10^2	6.29×10^2
個体要素減衰係数(法線方向) $c^x(Ns/m)$	1.35×10^2	1.35×10^2
(接線方向) $c^y(Ns/m)$	3.02×10^2	3.02×10^2
個体要素反復バネ定数(法線方向) $k^x(N/m)$	6.62×10^1	1.45×10^2
(接線方向) $k^y(N/m)$	3.31×10^2	7.27×10^0
個体要素反復減衰係数(法線方向) $c^x(Ns/m)$	9.79×10^1	1.45×10^2
(接線方向) $c^y(Ns/m)$	2.19×10^1	3.24×10^1
個体要素半径 r (m)	0.259	0.259
個体要素反復半径 r' (m)	0.717	0.717
単位体積重量 γ (N/m ³)	1.69×10^2	1.69×10^2
接線方向バネ減衰係数 λ ($k^y = \lambda k^x$)	0.050	0.050
歩行速度 v (m/s)	1.00	2.00
階段部歩行速度 v_s (m/s)	0.50	1.00
加速度 a (m/s ²)	0.837	1.840
個体推進力 f^x (N)	30.3	66.6
計算時間間隔 Δt (s)	0.01	0.01

店舗は地下通路に沿って全部で44店舗、店舗部面積は11,219m²あり、この中には大型店の地階部分も含まれていた。本研究では、ガス爆発当時の地下街と現在の地下街の出口配置に対する避難シミュレーションを行うために、それぞれ図-14(a),(b)のようにモデル化³⁰⁾した。解析の条件は以下の通りである。

静岡市役所が実施した平成5年11月11日の木曜日の歩行流動調査を基に、同地下街における要避難人員を推定した。調査結果によると、ピーク時は17時~18時までの1時間であり、静岡駅前ゴールデン地下街部分の滞留者数(=直前の時刻までの入場者数の和-直前の時刻までの出場者数の和)は575人であった。各利用者の滞在時間は様々であることが予想されるが、本研究では滞在時間を60分と仮定して、1時間の滞留者数である575人の避難者を対象に避難行動解析を行った。避難者の初期配置としては、旧地下街、新地



(a) 旧地下街



(b) 新地下街

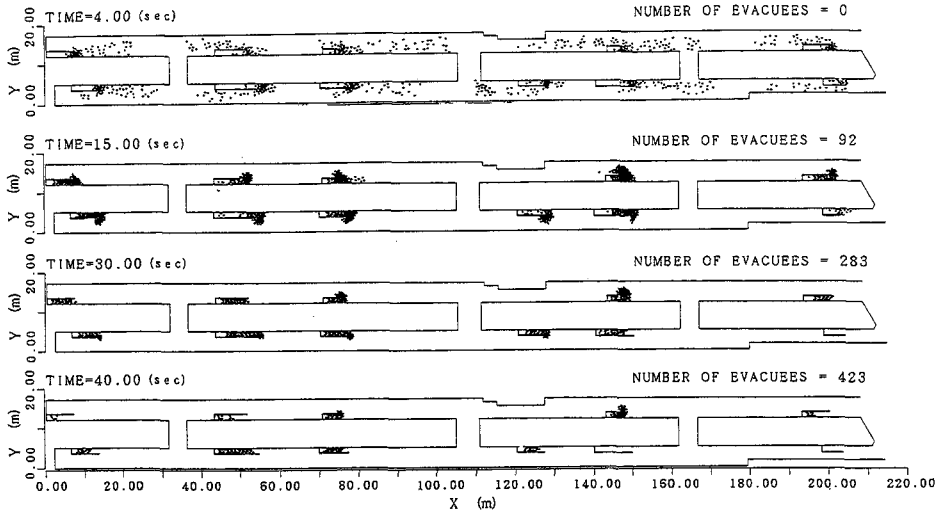
図-15 各時刻における避難者の位置(ケース1)

下街ともに同位置で各通路上にいるとし、対象領域に一樣乱数を発生させてランダムに配置した。

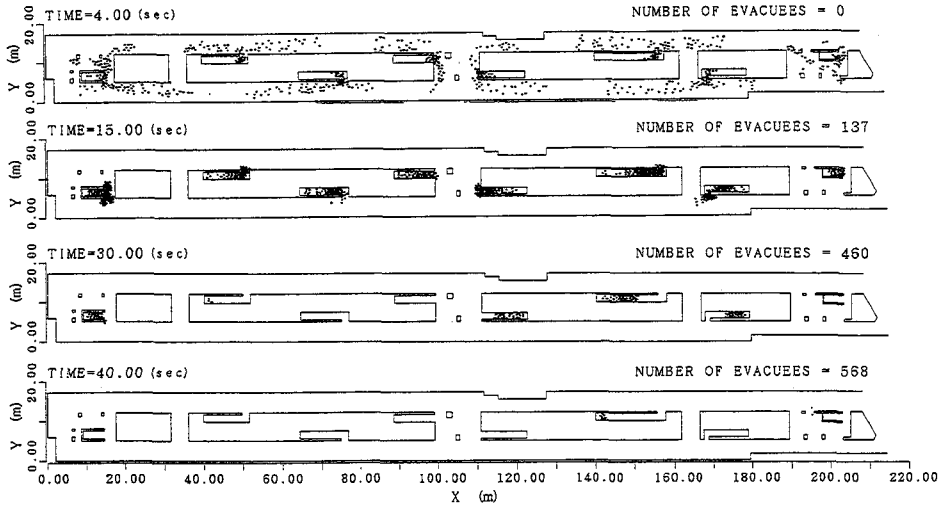
避難時の歩行速度は既存の歩行速度調査で明らかにされた速い人の歩行速度である $2.0\text{m/sec}^{11)}$ と建築防災計画指針¹²⁾による不特定者収容用途の一般の廊下での 1.0m/sec を用いた。この歩行速度を与える加速度としては、実験より得られた緊急時の 1.84m/sec^2 と平常時の 0.84m/sec^2 とした。また、階段での歩行速度は、建築防災計画指針で水平方向の歩行速度の $1/2$ としていることから、本研究でもこの値を用いた。歩行速度は通常群集密度に依存するといわれるが¹³⁾、ここでは歩行調査による代表的な値を用いた。以降、平常

時のパラメータを用いた例をケース1、緊急時のパラメータを用いた例をケース2とする。

避難行動解析に当たっては、条件を簡略化するために、全避難者が同時に最も近い出口に向かって避難を開始するものと仮定した。すなわち、地震等の被災直後に、放送や現場での指示等に従って全避難者が一斉に適切な経路を選択して避難し始める状況を想定している。その際、地下空間内部の変化や、火災・煙の拡大などの要因の影響は考慮しなかった。表-1は解析に用いたパラメータを示したものである。仮想バネ定数は、歩行者の推進力に依存するので、ケース1,2で異なる値となっている。



(a) 旧地下街



(b) 新地下街

図-16 各時刻における避難者の位置(ケース2)

図-15(a), (b)は、ケース1に対するそれぞれ旧地下街と新地下街における各時間毎の避難者の位置を表したものである。旧地下街(a)では、避難開始から15秒後には各出口付近で滞留を始めている。80秒後には出口5, 8付近以外にいる各避難者は階段領域に進入している。新地下街(b)では、避難開始から30秒後には各避難者は階段領域に進入しており、80秒後にはほとんどの避難者が避難を完了していることがわかる。なお、80秒後における出口6の階段領域に避難者がいるのは、階段領域が他の領域に比べ長いからであろう。

同様に、図-16(a), (b)はケース2に対するものである。旧地下街(a)では、避難開始から4秒

後には各出口付近で滞留が生じている。30秒後には出口1, 3, 9, 10, 11付近にいる各避難者は階段領域に進入していることがわかる。40秒後では依然として出口5, 8付近で滞留が生じている。新地下街(b)では、避難開始から15秒後には各出口付近で滞留が生じているが、30秒後には各避難者は階段領域に進入しており、また、40秒後にはほとんどの避難者が避難を完了している。

図-17は旧地下街の出口8付近における避難開始5秒後の個体配置を示したものであり、(a)がケース1、(b)がケース2である。避難時間の早いNo.42に着目し、この個体に作用する力の時刻歴を示したものが図-18(a), (b)である。(a)で4

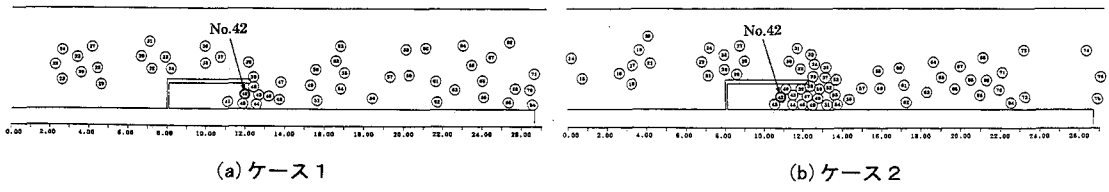


図-17 旧地下街出口8付近の避難状況（5秒後）

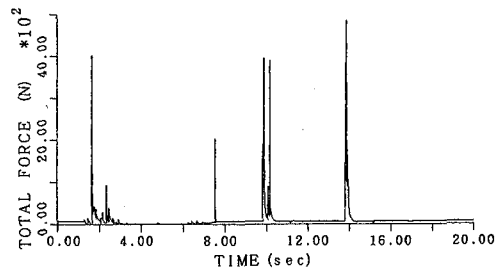
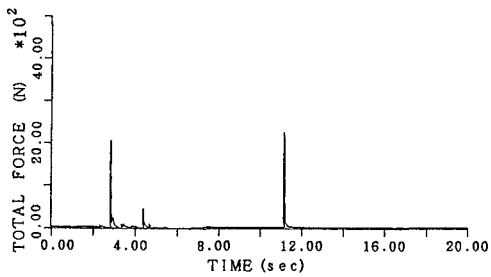


図-18 図-17のNo.42に作用する力の時刻歴

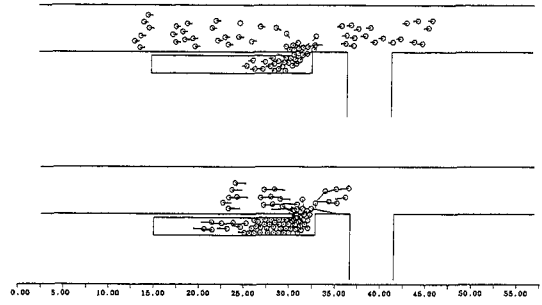
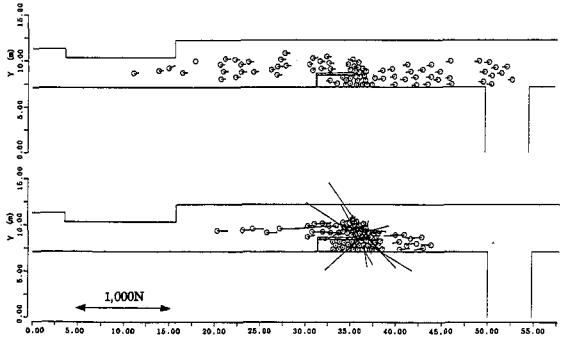


図-19 旧地下街出口8と新地下街出口6付近の避難開始10秒後避難状況
(上・下段：ケース1・2，左・右側：旧・新地下街)

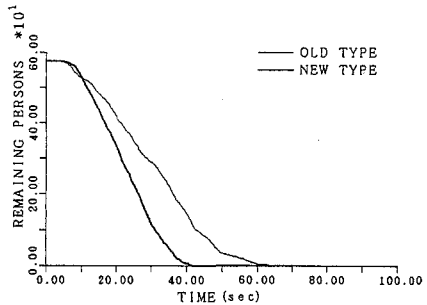
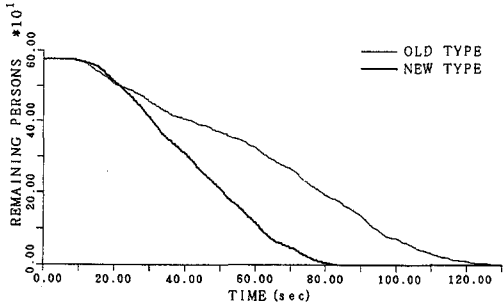


図-20 新・旧地下街の避難残留者数の経時変化

秒付近に現れているピークが (b) では 2 秒付近に現れており、歩行速度の差がそのまま現れた形となっている。しかし、(b) では 10 秒以降にも大きなピークが生じており、緊急時には平常時よりも大きな合力を受けることになる。この場合、瞬間的な接触によって一方向に大きな加速度がパルス的に働き、(a) では数百 N、(b) では数千 N の力が一時的に作用していることがわかる。この値は合力ベクトルの絶対値を表わしたものであるが、絶対値の和で比較してもほぼ歩行速度に比例した値となっていた。図-19 は避難開始 10 秒後における旧地下街の出口 8 と新地下街の出口 6 の避難状況、および避難者に作用する力とその方向を示したものである。上段がケース 1、下段がケース 2、左側が旧地下街、右側が新地下街である。図の右下に 1,000N のスケールを挿入している。出口の位置や数が違うため最短距離でこの出口を選択する避難者も異なるので厳密な比較はできないが、新地下街の出入口数が少なく設定されているにもかかわらず、特にケース 2 に現れるような旧地下街での滞留現象は新地下街には現れていないことを勘案すれば、新地下街の方が避難がスムーズに行われているといえよう。

旧地下街と新地下街における両ケースの避難残留者数の違いを示したものが図-20 (a)、(b) である。図中の太線と細線がそれぞれ新地下街と旧地下街の避難残留者数を表している。各個体の避難完了の基準は、出口の終点に達した時をもってその避難者の避難が完了したものとす。両ケースともシミュレーション開始からわずかな区間を除き、ほとんどの区間で新地下街 (太線) の方が避難効率が高く、ケース 1 で 80 秒あたり、ケース 2 で 40 秒あたりで避難が完了している。旧地下街の避難残留者数から新地下街の避難残留者数を差し引いた避難残留者の差は、ケース 1 では 60 秒あたりで、ケース 2 では 30 秒あたりで最大となっており、両者ともその差が 200 人程度にも及ぶことがわかる。

静岡駅前ゴールデン地下街の旧地下街と新地下街を比較すると、避難時間の面からは、新地下街は旧地下街に比べ、安全性が高くなっていることがわかった。これは、主に新地下街の出入口数は減ったものの、その形状が両サイドから流入できる形になったことに起因する。ケース 1、ケース 2 のシミュレーション結果から、設定した歩行速度の速いケース 2 の方が個体要素同士の衝突の際に生じる力が大きく、アーチアクションが形成され易いが、避難完了時間は避難の際の歩行速度が

2 倍になると 1/2 になり、歩行速度にほぼ反比例して早くなることがわかった。

本解析例では、基本的なケースを取り扱ったため、歩行速度として全個体に平均的な値を与えており、また避難出口も歩行者にとって最寄りの出口を与えている。したがって、個体同士の回避行動は行われているものの、追い越しやすれ違い現象は生じない。しかし、災害時には周囲の状態に依存して避難方向が決定されるはずであり、目標点の設定の仕方いかんによっては、3. で提案した全てのモードが有効に活用できる。このためには、例えば実測や実験に基づいて歩行速度を密度や年齢により変化させたり、周囲の環境 (火災による煙の伝播など) からの影響や個体の心理的影響を定量的に取り入れ¹⁴⁾、避難口への経路や目標点を適切に設定する必要がある。

6. 結論

本研究では、被災時の地下街における DEM を用いた新たな避難行動解析手法を提案するとともに、シミュレーションに必要な DEM パラメータを実験から決定した。そして、実際の地下街を対象にシミュレーションを行い、その地下街での避難時間の算出と避難者に作用することが予想される力についての検討を行った。

本研究で行ったこと、および得られた成果は以下の通りである。

(1) 障害物の回避、すれ違い、追い越しなどの人間行動を再現できる DEM モデルを開発した。避難者同士の物理的接触も詳細に追跡することができる点で、従来にはないモデルといえる。

(2) 人間のバネ定数を求めるための人体圧縮実験と、緊急時の歩行速度と加速度を求めるための加速度実験を行い、避難行動解析に用いるパラメータを決定した。この結果より、人体バネ定数 $1.26 \times 10^4 \text{N/m}$ を法線方向の個体要素バネ定数とした。また、平常時の個体推進力を与える加速度は 0.837m/sec^2 、緊急時の個体推進力を与える加速度は 1.840m/sec^2 という結果が得られた。

(3) 実際に過去にガス爆発事故を起こした静岡駅前ゴールデン地下街と 1989 年に改装された地下街を対象に、2 つの歩行速度を設定して避難行動解析を行った。その結果、歩行速度の速い場合の方が避難者同士が衝突し易く、大きな力が相互に作用し易い反面、避難完了時間は避難の際の歩行速度にほぼ反比例して早くなることがわかった。

静岡駅前ゴールデン地下街の旧地下街と新地下街を避難残留者数で比較検討することにより、新地下街は旧地下街に比べ避難が早く完了することがわかった。

参考文献

- 1) 清野純史, 三浦房紀, 瀧本浩一: 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, 土木学会論文集, No. 537/I-35, pp. 233-244, 1996.
- 2) 内田祥哉, 直井英雄, 三浦武広, 松尾幸晴: 日常生活の中での人体による衝撃力と板ガラス強度の関係 — その2 人体による衝撃力の推定および衝撃破壊現象に対する整合性の検討 —, 日本建築学会論文報告集, No. 302, pp. 67-75, 1981.
- 3) 位寄和久: 避難行動モデルに関する研究—火災状況の認識と心理状態を考慮したモデルの提案—, 日本建築学会論文報告集, No. 325, pp. 125-132, 1983.
- 4) 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.
- 5) 室崎益輝: 建物火災時の避難行動予測モデルについて, 火災, Vol. 38, No. 2, pp. 12-20, 1988.
- 6) 田沼米辰雄, 守谷栄一: 大地震時における火災発生と避難行動のシミュレーションによる研究(I), 日本建築学会論文報告集, No. 327, pp. 108-115, 1983.
- 7) 森脇哲男, 松本博文, 江田敏男: 大震火災時の避難行動シミュレーション, 日本建築学会論文報告集, No. 341, pp. 142-149, 1984.
- 8) 小坂俊吉, 堀口孝男: 広域避難シミュレーション手法による大震火災時の群衆行動解析, 土木学会論文集, No. 365/IV-4, pp. 51-59, 1986.
- 9) 梶秀樹, 熊谷良雄, 李載吉, 林広明, 西垣太郎: 繁華街の避難安全性評価に関する研究 — 繁華街避難モデルの構築 —, 地域安全学会論文報告集, pp. 165-170, 1993.
- 10) 仲谷善雄, 荒屋真二: ESCAPE-II: 情報処理的アプローチを用いた避難行動シミュレーション・モデル, 情報処理学会論文誌, Vol. 26, No. 4, pp. 609-616, 1985.
- 11) 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. 111-119, 1979a.
- 12) 渡辺仁史, 位寄和久, 池原義郎, 中島高史, 中村良三, 宇土正浩: 人間—空間系の研究 建築計画のためのネットワーク・オートマタモデル, 日本建築学会論文報告集, No. 298, pp. 89-97, 1980.
- 13) 岡田光正, 柏原士郎, 吉村英祐, 横田隆二, 東 利彦: 視覚情報に基づく建物火災時の三次元ネットワーク,

避難シミュレーションシステムの開発, 日本建築学会・情報システム技術委員会, 第12回情報システムシンポジウム, pp. 421-426, 1989.

- 14) 瀧本浩一, 三浦房紀, 清野純史: 防災要員と避難者の間の情報の伝達を考慮に入れた避難行動シミュレーション, 土木学会論文集, No. 537/I-35, pp. 257-266, 1996.
- 15) 堀内三郎, 小林正美: 都市防災計画のシステム化に関する研究(II) 防災システムのシミュレーション, 日本建築学会論文報告集, No. 258, pp. 123-130, 1977.
- 16) 清野純史, 三浦房紀, 瀧本浩一, 中嶋庸一: 個別要素法(DEM)を用いた群集行動シミュレーション, 1994年地域安全学会論文報告集, No. 4, pp. 322-327, 1994.
- 17) 戸川喜久二: 避難群衆流の計算について, 建築雑誌, No. 4, pp. 15-19, 1954.
- 18) 吉田克之: 火災安全対策, 新建築学大系12 建築安全論, 彰国社, 第5章, 1983.
- 19) 平井一正, 樽井賢治: パニック時の群衆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.
- 20) 海老原学, 大槻明, 風間真奈歩: オブジェクト指向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講演概要集, pp. 617-620, 1989.
- 21) Cundall, P. A. : A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movement in Blocky Rock System, Symp. ISRM, Proc. 2, pp. 129-136, 1971.
- 22) 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.
- 23) 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, 地震研究所語彙報, Vol. 63, pp. 409-468, 1988.
- 24) Fruin, J. 長島正充訳: 歩行者の空間, 鹿島出版会, 1974.
- 25) Hall, E. T. : The Hidden Dimension, Anchor Books, pp. 10-22.
- 26) 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), 日本建築学会論文報告集, No. 418, pp. 51-57, 1990.
- 27) 中村和男, 小林 実: 交通環境における歩行行動, 国際交通安全学会誌, Vol. 10, No. 5, pp. 300-313, 1984.
- 28) 吉岡松太郎, 中村和男, 稗田哲也: 歩行者間の相互干渉特性の分析, 製品科学研究所研究報告, No. 96, pp. 39-47, 1983.
- 29) 長田克俊: 静岡駅前ゴールデン街ガス爆発事故について, 火災, Vol. 30, No. 6, pp. 3-8, 1980.
- 30) 静岡市役所市街地整理課・永田博幸氏, 同防災課・望月準平氏, 紺屋町名店街(旧ゴールデン地下街)

管理組合・石垣明氏との私信による。

- 31) 日本建築学会編：安全計画 I 安全計画の視点，
彰国社，1981。
32) 建設省監修：新・建築防災計画指針 1985 年版，日
本建築センター，1985。

- 33) Peter A. Thompson and Eric W. Marchant: Simplex;
Developing New Computer Modeling Techniques for
Evaluation, *Fire Safety Science, Proc. of the
fourth Int. Symp.*, pp. 613-624, 1994.

(1997. 6. 9 受付)

SIMULATION OF EVACUATION BEHAVIOR IN A DISASTER BY DISTINCT ELEMENT METHOD

Junji KIYONO, Fusanori MIURA and Hiroaki YAGI

Distinct Element Method (DEM) is applied to the simulation of evacuation behavior during disaster. Motion of each element can be compute by solving the equation of motion step by step. We proposed the algorithm in which an element can avoid collision and pass the other elements naturally.

The DEM parameters, such as spring constant and driving force for human body, are determined based on the experiments. We simulate the evacuation behavior for the explosion accident that occurred at the underground shopping center near Shizuoka Station in 1980. Based on the results, a new underground shopping center, which was reconstructed after the explosion, is safer than old one from a view point of disaster prevention.