

避難行動解析へのポテンシャルモデルの応用

横山秀史¹・目黒公郎²・片山恒雄³

¹正会員 博(工)(財)鉄道総合技術研究所(〒185 東京都国分寺市光町2-8-38)

²正会員 工博 東京大学生産技術研究所 助教授(〒106 東京都港区六本木7-22-1)

³正会員 Ph.D. 東京大学生産技術研究所 教授(〒106 東京都港区六本木7-22-1)

地下街や地下駅など、大規模かつ複雑な形状の空間からの、不特定多数の避難者の行動をモデル化し、避難安全性解析を行うための手法として、ポテンシャルモデルにもとづく避難行動モデル化手法を提案した。さらに、提案手法の適用性や妥当性などを調べるため、簡易な通路モデルを対象としてコンピュータシミュレーションを行い、結果を既往の人間行動研究結果と比較検討したところ、提案手法によるシミュレーションが、実際の群集行動特性をよく再現できることがわかった。

Key Words : evacuation, human behavior, potential, computer simulation, underground facilities

1. はじめに

地下街や地下駅など、常時不特定多数の利用者が存在する大規模空間の安全性を確保するためには、構造物の強度面からの安全性を確保するだけでは不十分であり、災害時の人間行動を予測し、混乱を生じず迅速に避難が行われるよう配慮する必要がある。

緊急時の人間行動を調べる方法としては、災害事例調査・被験者実験・避難行動シミュレーションなどが考えられる。災害事例調査は、実際の避難行動情報を入手し、安全性検討の基礎資料とするために、大規模な災害などが発生するたびに詳細な検討が行われている^{1),2)}など。しかし、調査が困難である上、得られる情報には限界がある。例えば、亡くなった人の状況判断などは調査不可能である。

一方、被験者実験の場合、状況設定や必要な情報の収集が容易であるなどの利点があり、渡部による歩行実験^{3),4)}、北後による煙の中での避難行動実験⁵⁾、横山らによる迷路実験^{6),7)}など多くの実験が行われている。しかし、これらの実験は、迷路などの施設を使用し、少人数の被験者に対して行われたものである。地下街や地下駅などの大規模空間を対象とした被験者実験は、安全性などの問題があるため、実施することは難しい。

このように、過去の災害事例調査や被験者実験によって、大規模空間の避難安全性を検討することは困難である。特に、これらの手法を用いて計画段階の大規模空間の安全性を検討することはできない。避難行動シミュレーションの場合、モデルや結果の信頼性検証などの問題はあっても、条件を変えながらケーススタディを行

うことで、安全性検討上有用な情報が得られると期待できる。

このような観点から、従来より多数の避難行動モデル化手法が提案されている。これらの手法は、群集を単位としたモデル化手法と、個々の避難者を単位としたモデル化手法に大別できる。

このうち、群集モデルは戸川による研究⁸⁾など、平常時の群集流動観測にもとづき、通路・出入口・階段などにおける流動係数を求めた上で、避難の所要時間の算定などを行うモデルであり、建築の分野を中心に標準的避難計算法⁹⁾として用いられている。このモデルでは、(a)避難者全体の行動傾向をつかむことが容易である、(b)流動係数などの基本パラメーターを群集流の実測結果から直接求められる、などの利点がある。しかし、(c)個々の人間の心理特性や行動特性の差異を取り入れることが困難である、(d)各避難者の行動を追跡しにくい、などの問題点があり、個々の避難者を単位とした詳細な避難モデルなど、他の避難行動解析手法と組み合わせて安全性検討に応用することが望ましいと指摘されている⁹⁾。

他方、個々の避難者を単位として、個人の行動を詳細に予測することを目的とした避難行動モデル化手法も多数提案されている^{10),11),12)}など。これらのモデルは、群集モデルでは検討が困難な、中小規模施設の詳細な火災安全対策に応用され、成果をあげている。

しかし、これらのモデルの多くは、避難目標物や障害物などが避難行動におよぼす影響を影響力ベクトルとして扱うモデルである。ベクトルモデルの場合、障害物を回り込む行動を取り扱う際には仮目標点を設ける必要があるなど、モデルが複雑になる場合があり、空間的な広

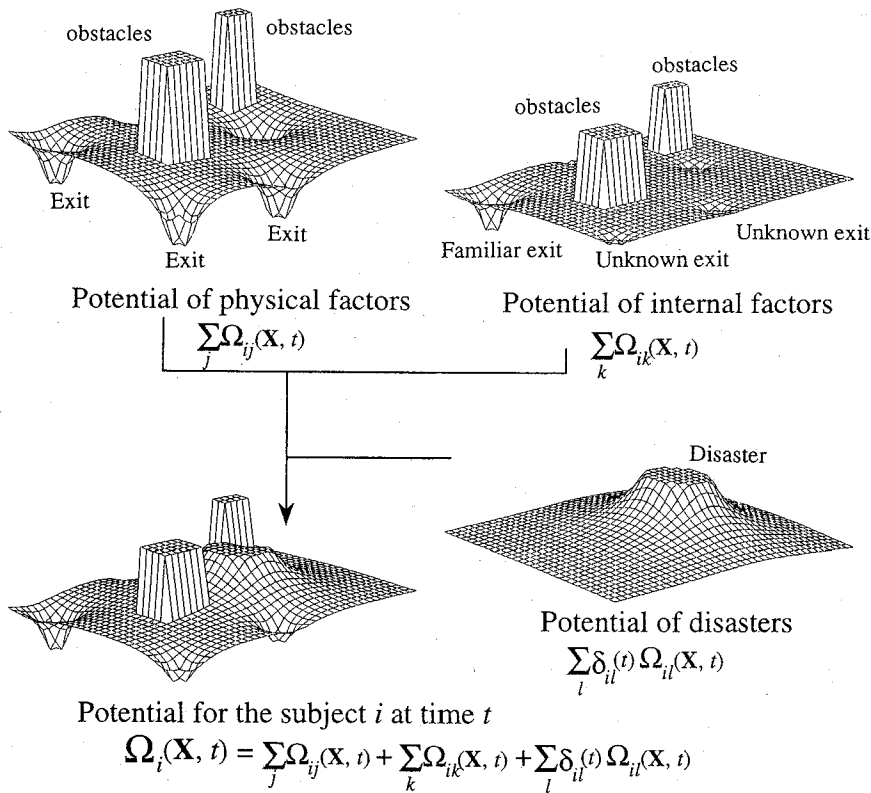


図-1 ポテンシャルモデルの考え方

がり複雑な形状を持つ大規模空間を対象とした避難行動シミュレーションを行うには問題を残している。

本研究では、個人特性の影響を取り入れた大規模空間の避難行動シミュレーションを行う手法として、安全性を検討する空間を、避難に関する各要因の影響を表すポテンシャルの時間・空間分布として各避難者ごとにモデル化し、得られたポテンシャル場から進行方向を決定する避難行動シミュレーション手法を提案する。ポテンシャルモデルを用いることで、通路や部屋などの小規模な空間と、地下街や地下駅・大規模建築物などの大規模空間の避難行動を同一の手法でモデル化できると考えられる。さらに、手法の妥当性及び適用性について検討するための第一歩として、簡易な通路モデルを例題として、避難行動シミュレーション結果を、既往の人間行動研究結果と比較する。

2. ポテンシャルモデルにもとづく避難行動シミュレーション手法

(1) ポテンシャルモデルにもとづく避難行動決定モデル

以下に、説明を簡略化するため、対象空間を2次元の

平面場としてモデル化した場合を例として、提案モデルの基本的な考え方を説明する。なお、3次元の空間場としてモデル化する場合も、2次元座標系を3次元座標系に拡張することで、同様の手法により取り扱うことができる。

避難行動シミュレーションは、大きさ (d_x, d_y) のメッシュ単位で行う。メッシュの大きさおよびシミュレーション時間ステップ Δt は、解析対象とする避難行動のスケールに応じて定める。例えば、通路中の障害物を回避するなどの行動を詳細に検討する場合、メッシュを障害物の大きさより小さくしなくてはならない。また、シミュレーション時間ステップ Δt は、平均的な避難者が1メッシュを通過するのに要する時間を基準として定める。

避難目標物・障害物・災害などに対する反応は、各避難者の性格や知識などの個人特性によって異なると考えられる。また、時間の経過や周囲の状況の変化に応じて、各避難者の判断特性も変化するであろう。提案モデルでは、ポテンシャルの山の高さや谷の深さが、各避難者ごとに異なるほか、同一の避難者に対するポテンシャル分布も時間変化するものとしてモデル化する。

避難者 i から見た時刻 t における対象空間 $\mathbf{X}=(x, y)$

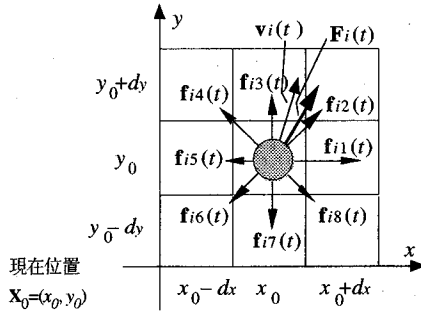


図-2 進行方向の選択

のポテンシャル分布 $\Omega_i(\mathbf{X}, t)$ は、図-1 に示すとおり、対象空間の平面構成や避難者の分布など外的要因の影響の度合を表すポテンシャル分布、避難者の知識や判断特性の違いなど内的要因の影響の度合を表すポテンシャル分布、地震・火災・煙など災害による影響の度合を表すポテンシャル分布などの重ね合わせと定義し、次式により求める。

$$\Omega_i(\mathbf{X}, t) = \sum_j \Omega_{ij}(\mathbf{X}, t) + \sum_k \Omega_{ik}(\mathbf{X}, t) + \sum_l \delta_{il}(t) \Omega_{il}(\mathbf{X}, t) \quad (1)$$

$$\delta_{il}(t) \begin{cases} 0: \text{時刻 } t \text{ で考えない災害} \\ 1: \text{時刻 } t \text{ で考える災害} \end{cases}$$

ここで、 $\Omega_{ij}(\mathbf{X}, t)$ は外的要因 j の影響の度合を表すポテンシャル分布、 $\Omega_{ik}(\mathbf{X}, t)$ は内的要因 k の影響の度合を表すポテンシャル分布、 $\Omega_{il}(\mathbf{X}, t)$ は災害要因 l の影響の度合を表すポテンシャル分布である。

式 (1) により求められるポテンシャル分布 $\Omega_i(\mathbf{X}, t)$ は、対象空間の平面構成や災害など、避難行動に影響すると考えられる要因が、避難者 i の避難行動に与える影響の度合を相対的に評価し数値化したものである。そのため、ポテンシャルモデルを実際の避難計算に応用するためには、各要因ごとに仮定するポテンシャル値を変えて、多数の避難行動シミュレーションを行い、結果を整理検討し、個々の避難行動影響要因に対して与えるポテンシャル値の妥当な決め方を定める必要がある。

図-1 で、ポテンシャルの山の部分は、地震・火災・煙などの災害や、柱・壁などの障害物のある場所であり、逆にポテンシャルの谷の部分は出口や避難誘導灯などの避難目標物のある場所である。このように、提案モデルでは、災害要因や障害物の影響をポテンシャルの山、避難目標物の影響をポテンシャルの谷として表現する。各避難者は、ポテンシャルの山があればそれを避け、ポテンシャルの低い方へと向かう。

避難者 i に対するポテンシャル分布 $\Omega_i(\mathbf{X}, t)$ が定まったときの移動方向ベクトル $\mathbf{F}_i(t)$ は、図-2 に示すように、現在位置 $\mathbf{X}_0 = (x_0, y_0)$ のポテンシャル値と、自分

の周囲の 8 個のメッシュ $\mathbf{X}_k (k=1, 8)$ のポテンシャル値から求め、

$$\mathbf{F}_i(t) = \sum_k \mathbf{f}_{ik}(\mathbf{X}_0, t) + \alpha_i(t) \mathbf{v}_i(t) \quad (k=1, 8) \quad (2)$$

と仮定する。ここで、

$$\mathbf{f}_{ik}(\mathbf{X}_0, t) = (\Omega_i(\mathbf{X}_0, t) - \Omega_i(\mathbf{X}_k, t)) \cdot [\mathbf{X}_k - \mathbf{X}_0] / |\mathbf{X}_k - \mathbf{X}_0|^2 \quad (k=1, 8) \quad (3)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_0 &= (x_0, y_0), \mathbf{X}_1 = (x_0 + d_x, y_0), \mathbf{X}_2 = (x_0 + d_x, y_0 + d_y), \\ \mathbf{X}_3 &= (x_0, y_0 + d_y), \mathbf{X}_4 = (x_0 - d_x, y_0 + d_y), \mathbf{X}_5 = (x_0 - d_x, \\ &y_0), \mathbf{X}_6 = (x_0 - d_x, y_0 - d_y), \mathbf{X}_7 = (x_0, y_0 - d_y), \mathbf{X}_8 = (x_0 + \\ &d_x, y_0 - d_y) \end{aligned}$$

また、 $\mathbf{v}_i(t)$ は直前の移動方向を表す単位ベクトルで、

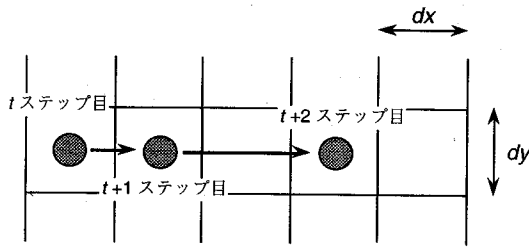
$$\mathbf{v}_i(t) = \mathbf{F}_i(t-1) / |\mathbf{F}_i(t-1)| \quad (4)$$

として求める。式 (2) の第 2 項は、人間が進行方向を選択する際に、直進方向を選びやすいという仮定にもとづく項である。それに対し、ポテンシャル場の値から求められる第 1 項は、周囲の状況の影響を表す項と考えることができる。

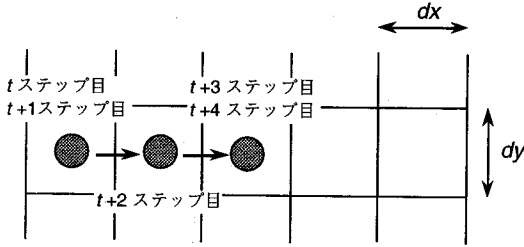
本研究では、避難行動選択にあたって周囲の状況から受ける影響の度合は、各避難者の判断の冷静さ・慎重さなどの個人特性に影響されるものと仮定した。第 2 項の係数 $\alpha_i(t)$ は、ポテンシャル場の値から求められる第 1 項と、直進し続けようとする傾向を表す第 2 項の間に、このような各避難者の判断特性の違いを反映させる重み係数である。 $\alpha_i(t)$ の値を変えてケーススタディを多数行い、シミュレーションにより得られた避難行動結果と $\alpha_i(t)$ の値の関係を整理することで、ある程度妥当なパラメーター決定が可能になると考えられる。

著者らが行った避難行動実験および被験者に対する性格検査結果の解析⁶⁾により、各避難者の緊急時行動特性と、性別や性格などの平常時の個人特性の間にある程度関係があることがわかった。Y-G 性格検査¹³⁾など、一般に広く応用されている性格検査の場合、検査作成時に、多数の被験者を対象とした統計処理が行われており、各性格特性ごとの被験者分布もある程度わかっていることから、避難者全体の $\alpha_i(t)$ の分布を仮定する際の資料として用いることができると考えられる。

避難行動シミュレーションモデルの構築にあたっては、使用するポテンシャルモデルを決める必要がある。本研究では、避難者 i に対する時刻 t における対象空間内のポテンシャル分布計算法として、出口などの避難目的地点に負のポテンシャル値、壁や障害物に正のポテンシャル値を与え、その他の点 p のポテンシャル値は、次式を用いて補間する方法を仮定した。すなわち、ポテンシャルの山ないし谷の頂点のポテンシャル値のみを与えておき、その他の点のポテンシャル値は補間により求め



(a) 歩行速度 $1.5 \cdot dx / 1$ 時間ステップの避難者の場合



(b) 歩行速度 $0.8 \cdot dx / 1$ 時間ステップの避難者の場合

図—3 行動特性モデル

る方法である。

$$\Omega_{ip}(t) = \sum_{j=1}^n c_{ij}(t) \exp \left[- \left(\frac{\Delta r_{ijp}}{dr_{ij}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

ここで、 $\Omega_{ip}(t)$ は、避難者 i に対する時刻 t における点 p のポテンシャル値、 n はポテンシャル値を与えた点の数、 $c_{ij}(t)$ は時刻 t における点 j ($j=1, n$) のポテンシャル値、 Δr_{ijp} は点 j からポテンシャル値を求める点 p までの距離である。また、 dr_{ij} は相関距離と呼ばれ、点 j のポテンシャル値の距離方向の相関の程度を決める係数である。本研究では、ポテンシャルの山や谷の裾の引き方を調整するパラメーターとして用いた。避難者の対象空間についての知識や、個々の避難目標物・障害物・災害要因の特性により相関距離の大きさを変えることで、各々の要因の影響度をモデル化する。なお、式(5)による補間法は、ポテンシャルモデルにもとづいて避難行動シミュレーションを行うため、仮に用いた手法であり、より妥当なポテンシャル分布計算法について検討する必要がある。

距離モデルとしては、最短距離・直線距離・直達距離・心理的距離などが考えられる¹⁴⁾。本研究では、最短距離を仮定し、障害物などは回り込む形で距離計算することを仮定した。また、今後の課題として、距離計算モデルとして、各避難経路の性質や対象空間に対する個々の避難者の知識などに応じた重みを付けた心理的距離を用いることで、避難者の個人特性なども取り入れたモデル化が可能であると考えられる。

(2) 行動特性のモデル化

(1)の検討により、ポテンシャルモデルにもとづく、個々の避難者を単位とした状況判断と進行方向選択モデルの基本構成を示した。

しかし、地下街や地下駅などの実際の大規模構造物の避難安全性解析を行う際には、各避難者の状況判断特性に加え、行動特性の違いによる影響を考慮しなくてはならない。また、階段での歩行速度は、水平面での歩行速度の約半分に低下し、避難行動に影響を与えることが指摘されている¹⁵⁾。このような行動特性の違いを、避難行動シミュレーションに取り入れる必要がある。

提案モデルでは、対象空間をメッシュ化して避難行動シミュレーションを行うため、各避難者の歩行速度の違いを直接モデル化するためには、メッシュを非常に細かく分割しなくてはならず、大規模空間の避難行動解析への応用は困難となる。

そこで本研究では、図—3に示すように、1回の移動では1メッシュだけ移動するとし、各避難者の歩行速度に応じて、各シミュレーション時間ステップごとの移動可能回数を設定する方法を用いた。

例えば、メッシュの大きさを $1\text{m} \times 1\text{m}$ 、1シミュレーション時間ステップを1秒とした場合、平常歩行時の歩行速度が 1.5m/秒 の避難者は、1シミュレーション時間ステップに1.5回まで移動できると考える。このとき、0.5回の移動はそのままではメッシュモデルで表現できないため、移動回数を次の時間ステップへ繰り越せるものとする。すなわち、ある時刻 t からの移動を考えると、 t 時間ステップ目では1回のみ移動し、 t ステップ目で移動できなかった0.5回分を、 $t+1$ ステップ目に繰り越す。これにより $t+1$ ステップ目では2回移動できる。一方、平常歩行時の歩行速度が 0.8m/秒 の、非常に遅い避難者の場合、 t ステップ目では0回、 $t+1$ ステップ目では1回移動できるものとする。このとき、例えば5シミュレーションステップでの平均歩行速度を考えれば、歩行速度 0.2m/秒 の違いまで表現することができる。

このような手法を用いることで、メッシュの大きさやシミュレーション時間ステップをある程度の大きさに保ちつつ、各避難者ごとの歩行速度の違いを表現できると考えられる。

3. 通路モデルによる検討例

(1) 避難行動シミュレーション条件

次に、簡単な形状の通路モデルを例題として、平常時の群集流動状態の再現を目的としたコンピュータシミュレーションを行い、ポテンシャルモデルにもとづく避難行動モデル化手法が、実際の人間行動をどの程度再現可

能かを検討する。

提案手法にもとづく避難行動シミュレーションを行うには、避難安全性検討の対象となる空間をメッシュに分割するとともに、メッシュサイズに応じたシミュレーション時間ステップを定める必要がある。メッシュサイズは、検討対象空間全体の大きさ、対象空間内に存在する歩行障害物などの大きさなどを考慮して定める。また、シミュレーション時間ステップは、平均的な避難者が1メッシュ移動するのに要する時間を基準とする。

本検討例では、柱や壁などの障害物の多くが1m~数十m程度の大きさであること、通常の歩行速度が1m/秒~2m/秒程度¹⁶⁾であることを考慮し、メッシュの大きさを1m×1m、シミュレーション時間ステップを1秒として、避難行動シミュレーションを行った。また、歩行時の群集密度が4人/m²以上になると、群集が歩行できずほとんど停止状態になるという研究結果¹⁶⁾を考慮し、1メッシュに4人まで入れると仮定した。

各避難者の最高歩行速度は、渡辺がまとめた既往の歩行速度調査結果¹⁶⁾を参考に、速い人で1.8m/秒、普通の人で1.5m/秒、やや遅い人で1.2m/秒と仮定し、速い人・普通の人・やや遅い人が1:3:1の割合で分布すると仮定した。本研究では避難時を想定しているため、通常よりも速く歩行すると仮定し、出勤時の歩行速度調査により得られた値を用いた。

出口や壁のポテンシャル値および相関距離、式(3)における $\alpha_i(t)$ などの経路選択特性については、別途行った予備解析結果や建部・中島の研究¹⁷⁾などにもとづいて定め、全員に対して同じ値を用いた。2.(1)で述べたように、ポテンシャル値は各避難行動決定要因の影響の度合を相対的に数値化したものである。本検討例では、最も影響の大きい要因のポテンシャル値の絶対値を1としてポテンシャルを計算した。

まず、出口については、行動目標物であり、行動にもっとも影響が大きいと考えられるため、ポテンシャル値を-1.0と仮定した。また、出口の影響は通路全体に及ぶと考え、相関距離は例題で用いた通路の長さである100mと仮定した。一方、壁などに沿って歩行する場合、歩行者は壁から0.5~1m程度離れて歩こうとすることが報告されている¹⁷⁾。本研究では、出口へ向かおうとする傾向と比較し、壁から離れようとする傾向は弱いと考え、ポテンシャル値は0.005、相関距離を0.8mと仮定した。 $\alpha_i(t)$ は、式(2)の第1項と第2項の比が大きくなりすぎない値として、本検討例では1/128を仮定した。これは、予備的に行ったシミュレーション結果にもとづき、ポテンシャル分布により規定される周囲の状況を完全に無視して壁や袋小路の方へ直進したり、逆にポテンシャルの局地的な谷に入り込み同じ箇所を堂々回するなどの、不自然な行動を取りにくい値を仮定したも

のである。これらの各パラメーターについては、今後多数のケーススタディを行い、妥当な決定法を検討する必要がある。

緊急時における、避難者相互の影響としては、2つの効果が考えられる。人間相互の距離が非常に小さい場合、互いに不快感を覚え、一定の距離を開けようと行動する^{16),17)}。一方、避難群集など共通の目的を持った群集の場合、他の避難者に追従するなどの現象がみられる場合があることが報告されている^{1),18)}。

このうち、2番目の要因に関連する、他の避難者による影響は、群集密度・他の避難者集団との距離・避難者自身の性格や対象空間に対する知識などにより異なると考えられる。例えば、対象空間の構成や周囲の状況を熟知した避難者が、他の避難者を誘導するなどの積極的行動を取った例が、過去の災害時に観察されている^{1),18)}。このように、他の避難者による避難行動への影響は、各避難者の個人特性や周囲の状況に依存する部分がきわめて大きいと考えられる。

そこで本研究での検討例では、第1の要因に関する影響のみをモデル化し、第2の要因に関する影響は考慮しなかった。具体的には、避難者が存在するメッシュのポテンシャル値を、避難者1人につき0.0075高めることにより、避難者周囲の1メッシュから他の避難者を遠ざけようとする傾向をモデル化した。

群集行動特性指標としては、流動係数(flow volume)・平均歩行速度・動線のフラクタル次元¹⁹⁾を用いた。流動係数は、通路・階段・非常口などの単位幅・単位時間あたりの通過人数である。また、群集密度の指標としては、Fruinによる歩行者空間モジュール²⁰⁾と呼ばれる指標を用いた。歩行者空間モジュールとは、通常の密度の指標である1平方メートルあたりの人数の逆数にあたり、歩行者空間設計などに用いられる指標である。

フラクタル次元は、図形の複雑さを定量化した指標であり、形状の複雑さの主観的評価とよく対応している¹⁹⁾。歩行動線の形状が、線分に近い単純な形であれば、動線のフラクタル次元は直線の次元である1次元に近い値となり、多数の折れ曲がりなどがある複雑な形状の場合、平面の次元である2次元に近い値になる。

シミュレーション条件は、避難者が通路内に一様に分布している状態で、出口へ向って歩く状態を仮定した。すなわち、通勤時などの群集歩行状態で、一方向だけに群集が歩く、均質な状態での群集流動状態である。計算は、18通りの群集密度について、各4例ずつ計72ケースについて行った。歩行者空間モジュールが41.25m²/人以上の群集密度が低い場合には40人刻みで、歩行者空間モジュールが0.63~1.25m²/人のところでは80人刻みで避難者数を変えながら計算を行った。歩行者空間モジュールが0.63m²/人以下の群集密度が高いところ

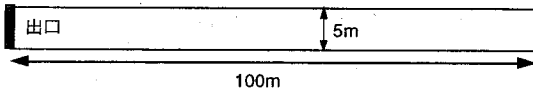
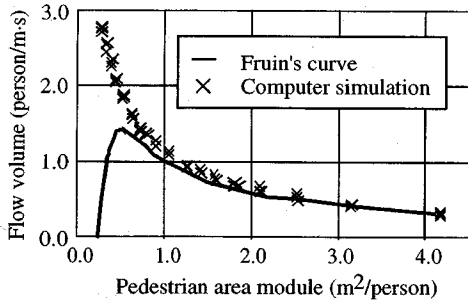
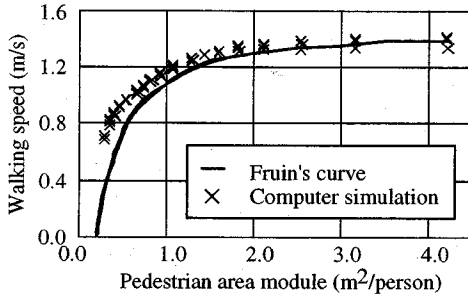


図-4 通路モデル



(a) 流動係数



(b) 歩行速度

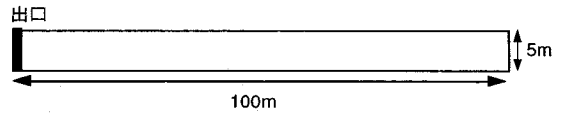
図-5 既往の避難行動式との比較

では、避難者の刻みを200人とした。

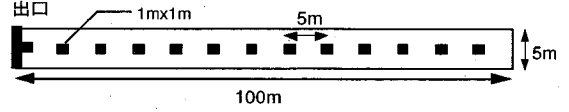
(2) 障害物のない通路での群集行動特性の検討

図-4に示す形状の、地下鉄通路を模した通路モデル(通路幅5m、長さ100m)における避難シミュレーション結果を、Fruinが、歩行群集の実測結果にもとづき提案した群集流動の特性曲線とあわせて図-5に示す。この図より、歩行者空間モジュール0.5 m²/人以下で極度に群集密度が高い場合を除き、避難行動シミュレーション結果とFruinによる実測結果とは、流動係数・歩行速度の両指標とも比較的良好に対応しており、ポテンシャルモデルによる避難行動シミュレーションにより、実際の人間行動特性を再現できることが確認できた。

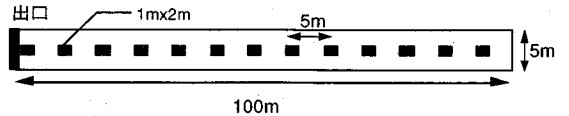
群集密度が非常に高い場合には、シミュレーション結果のほうが流動係数・群集密度とも大きい。ここに示したシミュレーション例では、通勤群集などの比較的均質な群集流をモデル化しており、通路モデル・避難者特性ともにFruinによる最も良好な通路および流れの条件を満たしている。通勤群集などの均質な群集流では、一般に流動係数が高くなることが指摘されており¹⁵⁾、一般



(a) 障害物がない場合

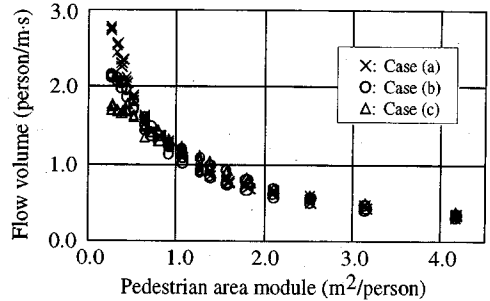


(b) 通路中央に1m×1mの柱がある場合

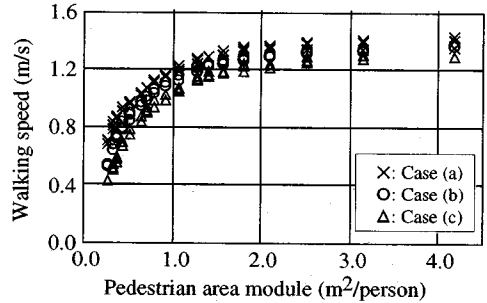


(c) 通路中央に1m×2mの柱がある場合

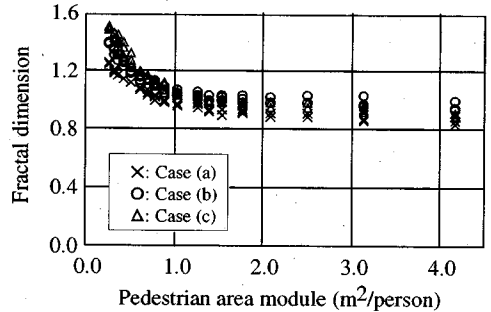
図-6 中央に柱のある通路モデル



(a) 群集密度と流動係数の関係



(b) 群集密度と歩行速度の関係



(c) 群集密度と動線のフラクタル次元の関係

図-7 障害物による避難行動への影響

の群集流動をモデル化した Fruin の式と比較して高めの値となったと考えられる。

(3) 避難行動に対する障害物の影響

次に、通路内に柱や壁などの障害物が存在する場合の影響について検討する。図-6 に示す形状の、通路中央に柱がならんだ直線通路モデルにおけるシミュレーション結果を、図-7 に示す。通路モデル以外のシミュレーション条件は、(2) と同様である。

これらの図より、群集密度が高い場合、通路中に障害物が全くないケース (a) と比較し、 $1\text{m} \times 1\text{m}$ の柱があるケース (b)、 $1\text{m} \times 2\text{m}$ の柱があるケース (c) の順で、流動係数・歩行速度は低くなり、フラクタル次元は大きくなっていくことがわかる。歩行者空間モジュールが $0.83\text{m}^2/\text{人}$ 程度より小さくなると、歩行速度の低下が著しくなることが、既往の人間行動研究により指摘されており¹⁶⁾、本シミュレーションの結果が実際の群集行動特性とよく対応していると考えられる。

なお、図-7 において、歩行者空間モジュールが比較的大きい部分では、流動係数の値が (a)、(b)、(c) の3モデルともほぼ同じであるのに、歩行速度は異なっているように見える。これは、流動係数と歩行速度のグラフの縦軸のスケールが異なるためであり、歩行速度の値に群集密度 (= $1/\text{歩行者空間モジュール}$) を掛けると、流動係数の値にほぼ等しくなる。

次に、動線のフラクタル次元に着目すると、歩行者空間モジュールが大きく群集密度が低い場合には、3 ケースとも直線の次元である1次元程度である。群集密度が高くなり、歩行者空間モジュールが $1\text{m}^2/\text{人}$ より小さくなると、フラクタル次元が急速に大きくなり、動線形状が複雑になってくることがわかる。これは、他の歩行者との間に衝突回避などの相互干渉を生じているためと考えられる。なお、群集密度が低いときの平均フラクタル次元が1以下となるのは、シミュレーション開始時の初期位置が出口に近く、通路全体の大きさと比較して歩行距離が極度に小さいため、動線形状を実質的に点とみなしうる歩行者が存在するためである。

4. ま と め

地下街や地下駅など、多数の避難者が滞在する大規模で複雑な空間における避難行動シミュレーション手法として、ポテンシャルモデルにもとづく避難行動モデル化手法を提案し、簡易な通路モデルを対象に、モデルの妥当性と適用性を検討した。その結果、ポテンシャルモデルによる避難行動シミュレーション結果が、実際の人間

行動特性とよく対応しており、大規模空間の避難行動解析に適用可能であることがわかった。

参考文献

- 1) 森田耕市：プレイトウンにいた53名の人たち（大阪千日デパート火災より）、火災、Vol.23, No.1, pp.28-34, 1973.
- 2) 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.
- 3) 渡部勇市：迷路における人間の避難行動実験 第1報 歩行経路の記憶、日本建築学会論文報告集, No.322, pp.157-161, 1982.
- 4) 渡部勇市：迷路における人間の避難行動実験 第2報 歩行経路の学習、日本建築学会論文報告集, No.340, pp.169-176, 1984.
- 5) 北後明彦：煙のなかにおける人間の避難行動実験—避難経路選択および歩行速度に関する実験的研究—、日本建築学会計画系論文報告集, No.353, pp.32-38, 1985.
- 6) 横山秀史, 永田 茂, 山崎文雄, 海老原学：迷路実験による緊急時の人間行動特性、土木学会論文集, No.441/I-18, pp.107-115, 1992.
- 7) 山崎文雄, 永田 茂, 横山秀史, 大槻明：避難行動の迷路実験結果、土木学会論文集, No.441/I-18, pp.203-206, 1992.
- 8) 戸川喜久二：避難群集流の計算について、建築雑誌, No.4, pp.15-19, 1954.
- 9) 日本建築センター：新・建築防災計画指針, 1985.
- 10) 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.
- 11) 岡崎基幸, 松下聡：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、日本建築学会計画系論文報告集, No.436, pp.49-58.
- 12) 海老原学, 大槻 明, 岩城英朗, 矢代嘉郎, 掛川秀史：災害弱者施設の火災安全対策その1~4、日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp.1335-1342, 1993.
- 13) 辻岡美延：新性格検査法—Y-G 性格検査実施・応用・研究手引、日本・心理テスト研究所, 1982.
- 14) 岡田光正：施設規模、新建築学大系13 建築規模論、彰国社, 1985.
- 15) 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, 1983.
- 16) 渡辺仁史：空間と人間行動、新建築学大系11 環境心理、彰国社, 1982.
- 17) 建部謙治, 中島 一：歩行者の障害物に対する回避行動特性、日本建築学会東海支部研究報告, pp.353-356, 1989.
- 18) 室崎益輝：ビル火災、大月書店, 1982.
- 19) 横山秀史, 永田 茂, 山崎文雄, 片山恒雄：フラクタル次元を用いた人間行動動線の定量的分析、土木学会論文集, No.450/I-20, pp.181-187, 1992.
- 20) Fruin, J.：長島正充訳、歩行者の空間、鹿島出版会, 1974. (1994.6.14 受付)

APPLICATION OF POTENTIAL MODEL FOR THE ANALYSIS OF EVACUATION BEHAVIOR

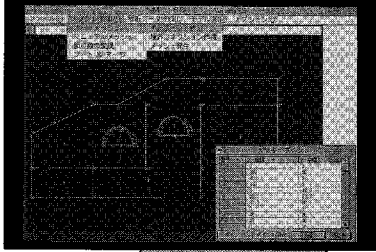
Hidehumi YOKOYAMA, Kimiro MEGURO and Tsuneo KATAYAMA

A new computer simulation method based on potential model is proposed to analyze human behavior during evacuation in large and populous underground facilities. Previous models cannot efficiently handle obstacles in the path. To check the adequacy of the method for human behavior analysis, this method is applied to simple corridor models. By comparing the results of the computer simulation to the results of past researches on human behavior, the proposed method is found to be a good and practical method to simulate human behavior in populous underground facilities.

地盤FEM解析プログラム

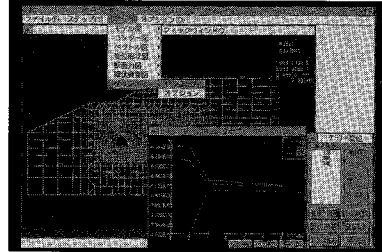
業界すべてのエンジニアへ 優れた機能を 抜群のコストパフォーマンスで

内蔵簡易CADによるメッシュエリア作成



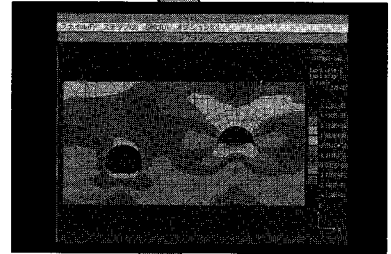
オートメッシュで簡単に
メッシュデータ作成

応力、変位着目点はより詳細に



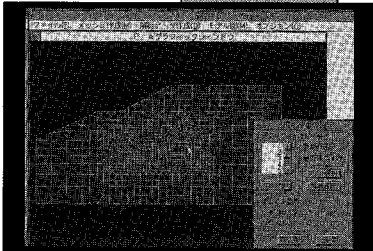
さらに詳細検討へ

充実したポスト処理機能



各種ポスト処理へ

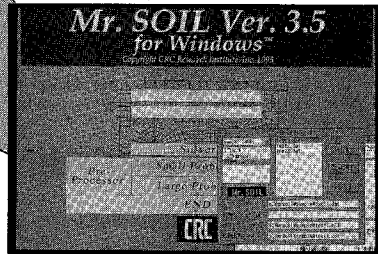
境界、荷重条件、掘削指定もすべてマウスで



高速、高精度ソルバーへ

**Our Concept
Real Easy!
Real Speedy!**

3000節点規模の解析も可能



Windowsは、米国マイクロソフト社の商標です。

画面構成は変更する場合があります。

Mr. SOILは地盤の応力、変形特性、土木構造物との相互作用を
総合的に解析可能な強力なCAEツールです。

詳細資料のご請求は下記の担当までお問い合わせ下さい。

Mr. SOIL Ver.3.5 for Windows™

開発/販売元

株式会社 **CRC総合研究所**

西日本事業部 科学システム営業部 担当/村中
〒541 大阪市久太郎町4-1-3
TEL 06-241-4121 FAX 06-241-4136

土と水の連成逆解析プログラム

UNICOUP

応力解析と浸透解析がドッキングした!

軟弱地盤の解析に!

海洋開発・埋立

盛土・掘削

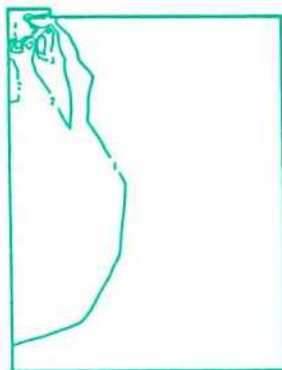
出力項目

- 各節点での変位、各要素での応力
- 各節点での全水頭・圧力水頭 他
- 豊富な図化処理
変位図、変位ベクトル図、応力ベクトル図、応力コンター図、安全率コンター図、水頭コンター図、圧力水頭コンター図

プログラムの特長

- 応力と地下水の流れをカップルさせた問題が解析可能です。(圧密含む)
- 地下水の流れは飽和・不飽和域を対象としています。
- 多段掘削・盛土や降雨等が扱えます。
- 梁や連結要素も扱え実用的です。
- 経時観測記録(変位・水位)があれば、非線形最小二乗法に基づき変形係数や透水係数が逆解析できます。(順解析、逆解析がスイッチにて選択可能です。)
- 弾性・非線形弾性・弾塑性・弾粘塑性を示す地盤が扱えます。
非線形弾性(電中研式、ダンカン・チャンの双曲線モデル)
弾塑性(ドラッカー・ブラガー、モール・クーロン、カムクレイモデル、ハードニング、ソフトニング)
弾粘塑性(関口・太田モデル)

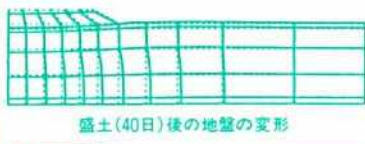
(荷重)



応力増分コンター ($d\sigma V$)
(10日後)



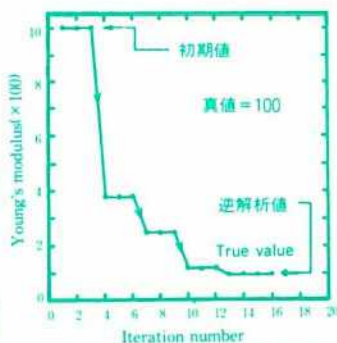
変位ベクトル図 (40日後)



盛土(40日)後の地盤の変形



盛土(40日)後の地下水の流れと水頭
コンターおよび自由水面



ヤング率と繰り返し回数の関係
逆解析によるパラメータの推定

この製品は、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。
通商産業省 特別認可法人

IPA 情報処理振興事業協会

株式会社 CRC 総合研究所

西日本事業部

〒105 東京都港区芝公園三丁目1番38号
TEL. (03) 3437-2301

問合せ先

〒541 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06) 241-4121 営業担当: 岩崎
(03) 3665-9741 本社窓口: 菅原