

個体行動特性の差異を考慮した群集の津波避難行動シミュレーション

加藤 周平 (環境テクノロジー学, 指導教官: 岡安 章夫)

1. はじめに

2004 年のスマトラ沖地震による津波災害の凄惨な映像は人々に津波防災の重要性を明確に認識させ、市民の津波に対する関心は急速な高まりを見せている。津波の直撃を受ける地域においては迅速な避難が生存のための必須条件であり、安全な避難路の確保、適切な避難指示、誘導方法の構築が急務となっている。東南海・南海地震については早い地域で地震発生から 10~15 分での津波到達が予想され、高台への迅速な避難のための避難階段の建設や、避難タワーの計画など、市町村ごとの取り組みが進んでいる。

一方、災害時の切迫した避難と同様の状況を平時の訓練等で再現するのは不可能であり、適切な避難指示、誘導方法、情報伝達方法、構造物(避難口、避難タワーなど)設置位置を検討する手段は決め手を欠く状況にある。

そこで本研究では従来の避難シミュレーションで用いられてきた計算手法、「ポテンシャルモデル」と「個別要素法」の両手法を計算に採用し、避難対象者の個々の属性や情報量を変化させられる、新しいタイプの避難シミュレーション手法の開発をする。そして、実在の海岸をケーススタディとしてシミュレーションを行い、シミュレーション結果を基に津波被災時の最適な避難指示、誘導方法、情報伝達方法を提言することを目指す。

2. 津波避難シミュレーション計算手法の構築

1) ポテンシャルモデル

本研究で取り扱ったポテンシャルモデルは、目黒ら(1995)が提案したモデルを基本としたが、いくつかの修正を行った。既往のポテンシャルモデルは、各要素が、メッシュ上のみを運動するモデルである。本研究では、より各要素に自由度を持たせ、メッシュ上だけではなく、自由に各要素が運動できるよう修正を行った。

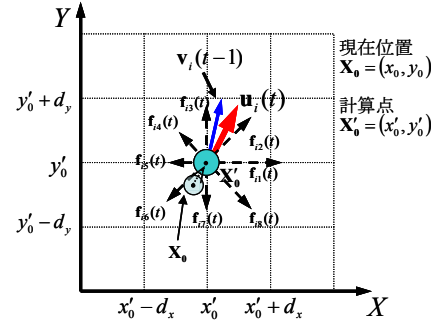


図 2.1 計算点と移動方向ベクトル

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 $\mathbf{u}_i(t)$ は、図 2.1 に示すように、現在位置 $\mathbf{X}_0 = (x_0, y_0)$ の、最近接のグリッド $\mathbf{X}'_0 = (x'_0, y'_0)$ 上のポテンシャル値と、近接 8 個のグリッド $\mathbf{X}'_k (k=1, 2, \dots, 8)$ のポテンシャル値から求め、

$$\mathbf{u}_i(t) = \sum_k \mathbf{f}_{ik}(\mathbf{X}'_k, t) + \alpha_i(t) \hat{\mathbf{v}}_i(t-1) \quad (k=1, 2, \dots, 8) \quad (2.1)$$

と仮定する。ここで、

$$\mathbf{f}_{ik}(\mathbf{X}'_k, t) = (\Omega_i(\mathbf{X}'_k, t) - \Omega_i(\mathbf{X}'_0, t)) \cdot \frac{[\mathbf{X}'_k - \mathbf{X}'_0]}{|\mathbf{X}'_k - \mathbf{X}'_0|^2} \quad (k=1, 2, \dots, 8) \quad (2.2)$$

である。ただし、

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

なお、式(2.1)の第 2 項は人間が進行方向選択の際、直進方向を選びやすい仮定に基づく項である。 $\hat{\mathbf{v}}_i(t-1)$ は、1 ステップ前の速度単位ベクトルであり、重み係数 $\alpha_i(t)$ により各避難者の判断特性の違いを反映させる。今回のモデルでは、各要素はポ

テンシタル以外の外的な要因(障害物, 他の要素)などがない限り, 各要素の最大歩行速度で運動するものとした. よって, $\mathbf{u}_i(t)$ の単位ベクトル $\hat{\mathbf{u}}_i(t)$ に要素 i の最大歩行速さ $v_{\max i}$ を乗じ,

$$\mathbf{v}_{pi}(t) = v_{\max i} \hat{\mathbf{u}}_i(t) \quad (2.3)$$

となる. これを『ポテンシャルの影響のみ』による各要素の歩行速度とした.

2) 個別要素法

人間は, 相互が物理的に接触する前に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. モデルの開発にあたり, 個々の要素の相互作用については, 個別要素法の考え方の一部を取り入れ, ポテンシャルモデルに組み込む.

要素 i の仮想半径(心理的距離) r 内に存在する要素 j から要素 i は,

$$\mathbf{f}_{ij} = -k(l - d_{ij}) \quad (2.4)$$

の反発力をうけると仮定する. ただし,

$$\begin{aligned} l = r & : \text{バネ自然長} \\ d_{ij} = |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i| & : \text{要素間距離} \\ k & : \text{バネ定数} \end{aligned}$$

である.

一方, 人間の視野を考慮すると, 仮想半径内であっても, 要素は正面方向にいる他要素から最も強く反発力を受け, 逆に後方にいる他要素からの反発力は弱いと考えられる. そこで, 要素正面方向を $\hat{\mathbf{u}}_i(t)$ と定義し, 要素正面方向と, 要素 i から見た要素 j の方向とのなす角を θ_{ij} とし, バネ定数 k を

$$k(\theta_{ij}) = k_{\max} \left(0.7 \cos \frac{\theta_{ij}}{2} + 0.3 \right)^6 \quad (2.5)$$

で与える.

よって要素 i に働く要素間作用力は, 式(2.4), 式(2.5)より,

$$\mathbf{f}_{ij} = -k(\theta_{ij})(l - d_{ij}) \quad (2.6)$$

となる(図 2.2, 図 2.3). そして, 要素 i に同時に複数から要素間作用力が働くことを考慮して,

$$\mathbf{F}_{spi} = \sum \mathbf{f}_{ij} \quad (2.7)$$

これを要素 i に働く総要素間作用力とする.

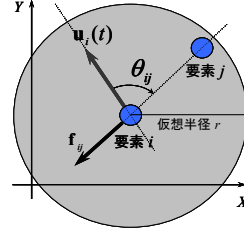


図 2.2 要素間作用力

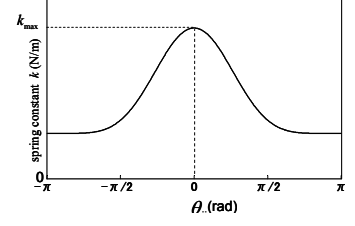


図 2.3 θ_{ij} とバネ定数の関係

3) グループ力

緊急時の避難の際, 家族や, 仲間同士はそのグループ単位で行動すると考えられる. そこで, 本研究では, 同一のグループの構成メンバー同士にかかる力(グループ力)を導入した.

本研究では, グループ力を図 2.3 の a) b) 両方を重み付きで, シミュレーションへ導入可能にした. また, メンバーがお互いを見つかることのできる距離(認知可能距離)には限界がある. 図 2.5 に本研究で仮定した同一グループメンバーの互いの要素間距離とグループ力との関係を示す.

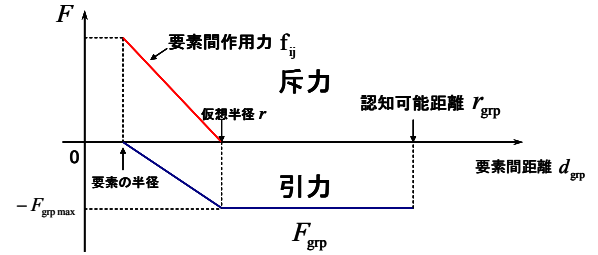


図 2.4 グループ力と要素間距離の関係

認知可能距離は, 自身の周囲にいる人間の密度によって変化する関数にした. ここで, 要素 i に働く総グループ力を,

$$\mathbf{F}_{gpi} = \sum_{j=1}^{n_{grp}-1} \mathbf{F}'_{gpij} \quad n_{grp} : \text{グループメンバー数} \quad (2.8)$$

とすると, 式(2.7), (2.8)より時刻 t における, 要素 i に働く力は,

$$\mathbf{F}_i(t) = \mathbf{F}_{spi}(t) + \mathbf{F}_{gpi}(t) \quad (2.9)$$

となる. ここで, 時間ステップを Δt とし, 要素 i の体重(質量)を m_i とすると, 時刻 t において,

$$\frac{\Delta \mathbf{v}_i(t)}{\Delta t} = \frac{\mathbf{F}_i(t)}{m_i} \quad (2.10)$$

が成立する. 式(2.3)から時刻 t における要素 i の速度 $\mathbf{v}_i(t)$ は,

$$\mathbf{v}_i(t) = \mathbf{v}_{pi}(t) + \Delta \mathbf{v}_i(t) \quad (2.11)$$

で表せる．よって，式(2.10)と式(2.11)から

$$\mathbf{v}_i(t) = \mathbf{v}_{p_i}(t) + \frac{\mathbf{F}_i(t)}{m_i} \Delta t \quad (2.12)$$

となる．

4) その他の属性

1)～3)以外に以下の属性を導入できるようにシミュレーションを構築した．

- a)護岸，壁，障害物，など空間を遮る構造物を仮想粒子の集まりで表現し，個別要素法の計算に取り入れた．
- b)各要素に微小なポテンシャル値を与え，各要素が人間の密度(混雑)を感知可能にした．
- c)ポテンシャルマップを無視し，グループのメンバーを探す行動を取り入れた．

3. テスト計算

今回構築した津波避難シミュレーションに関して，各種のテスト計算を行った．以下に結果を示す．

1) 個別要素法動作テスト

2人の人間が互いに，a)すれ違う場合，b)追い越す場合，について，2つの各要素がどのように運動するか計算した．図3.1に一定時間ごとにプロットした画像を示す

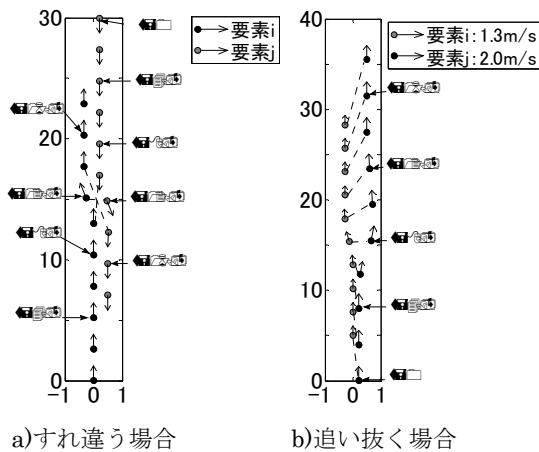


図 3.1 個別要素法動作テスト

2) 群衆の避難を想定した計算

後述の三浦海岸への適用を想定し，ある空間から，1つの避難口(幅 10m)を通り別の空間へ群衆(2000人)が避難する様子を時間ステップ $\Delta t=0.1s$ で計算した(図 3.2)．また， $t=80s$ のときの出口付近の様子を図 3.3 に示す．出口付近，中央付近でより滞留が起こっていることがわかる．

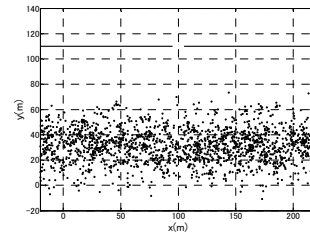
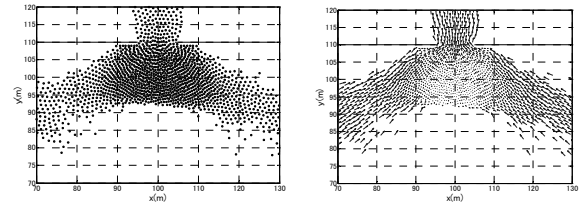


図 3.2 要素初期位置



a)要素位置 b)要素速度ベクトル図

図 3.3 出口付近の避難の様子($t=80s$)

4. 三浦海岸への適用

三浦海岸は，神奈川県三浦市に属し，三浦半島南東部に位置している．最寄駅から海岸までが比較的近く，都心からアクセスしやすいなどのことから，海水浴シーズンには毎年 50 万人近くの人々が訪れている．普段は波穏やかで，海水浴に適した海岸であるが，南関東大地震や東海地震発生時には最大 5m 程度の津波の到達が予想されている．

本研究では，実際の海岸への避難シミュレーション適用にあたり，調査の利便性も考慮し，三浦海岸が比較的単純，かつ，この種の海岸では一般的な空間構造であるため三浦海岸を選定した．以下に三浦海岸の空間的な構造を示す(図 4.1)．

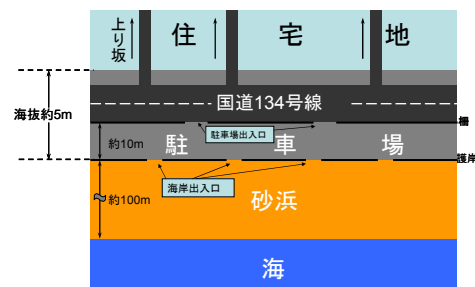


図 4.1 三浦海岸構造概念図

三浦海岸の海水浴ゾーンの約 700m にわたって調査を行った結果，

a)海岸→駐車場出入口間隔：平均 35m

b)駐車場→国道出入口間隔：平均 100m

であった．駐車場から国道への出口が少なく，駐

車場から出口への避難が困難となる可能性が大きいと考えられる。また、同出入口は柵がある箇所(図 4.2b)が多数見られ、迅速な避難をより困難にさせる可能性が考えられる。



図 4.2 三浦海岸出入口形状例

今回の計算では、出入口の形状(図 4.2a)は考慮せず、出入口の幅によって表 4.1 のように分類した。なお駐車場→国道への出入口に関しては、全て出入口幅 10m として計算した。海岸幅 240m にわたり、図 4.3 のように出口を配置した。また図 4.3 に基づくポテンシャルマップを図 4.4、各種計算条件を表 4.2 及び表 4.3 に示す。

計算したシミュレーション画像を図 4.5 に示す。滞留の状態など、実際の避難の様子に近いが、空いている出口があるにも関わらず、左から 2 番目に密集する要素は移動しようとしな。これは要素が隣接するグリッド上のみのポテンシャル値から基本的な移動方向を決めているためと考えられる。

5. 結論・今後の課題

避難時における出口付近での滞留状態やグループ力などが表現でき、今回開発したモデルが今後有力なツールとなり得ることを確認した。

今後は、実効性を高めるため、個人個人にポテンシャルマップを与え、各種パラメーターの値を定め、定量的な解析、最適な津波避難に向けた検討を可能にする必要がある。

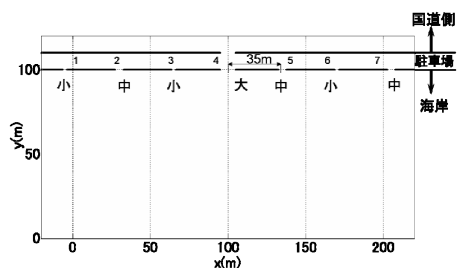


図 4.3 シミュレーション避難口配置図

表 4.1 出入口の分類 (調査域約 700m)

海岸→P出入口分類	出口の個数	実際の幅(m)	計算上の幅(m)
小	7	~3.0	2.5
中	9	3.0~7.5	5
大	4	7.5~	10
P→国道出入口分類	出口の個数	実際の幅(m)	計算上の幅(m)
大	7	各種出入口の組合せ	10

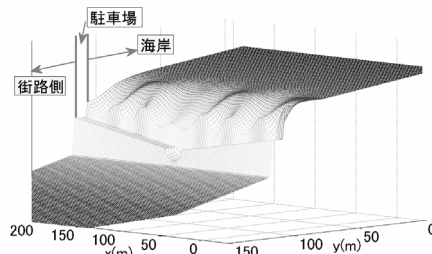


図 4.4 ポテンシャルマップ

表 4.3 グループ数

表 4.2 各種計算条件

要素数	2000
1ステップ	0.1s
グループ力	あり
グループメンバー探知	t<100sで発見
最大歩行速度	1.3m/s
仮想粒子	海岸→駐車場護岸 駐車場→国道柵

メンバー数	初期状態	グループ数	人数(人)
1人			600
2人	集合	60	120
	バラバラ	40	80
3人	集合	60	180
	バラバラ	40	120
4人	集合	60	240
	バラバラ	40	160
5人	集合	60	300
	バラバラ	40	200
合計		500	2000

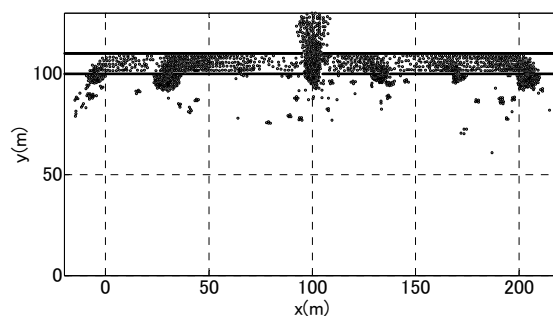


図 4.5 要素位置(t=80.0s)

参考文献

- 後藤仁志・原田英治・久保有希・酒井哲郎(2005) : 津波氾濫時の市街地内群衆避難の個体ベースシミュレーション, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.1251-1255.
- 横山秀史・目黒公郎・片山恒雄(1995) : 避難行動解析へのポテンシャルモデルの応用, 土木学会論文集 No.513/I-31, pp.225-232
- Fruin,J.・長島正充訳(1974) : 歩行者の空間, 鹿島出版会