

Boid 型群衆モデルによる津波避難シミュレーションの提案

後藤仁志¹・原田英治²・酒井哲郎³・丸山由太⁴

津波来襲時の切迫した避難に関して種々の可能性を検討し、合理的な避難計画を実現するためには、避難主体である人間行動の個性を考慮したヒューマンスケールの避難行動シミュレーションが有効である。本研究では、鳥類・魚類の群れ行動モデルとして知られる Boid を導入して、個体の年齢層別の運動能力の相違を考慮した群衆行動シミュレーターを構築し、1,000 人弱の規模の小市街から背後の段丘上の避難場所への群衆避難のシミュレーションを実施した。高齢者優先避難路の導入など、避難シナリオの策定が避難効率に及ぼす影響に関しても考察を加えた。

1. はじめに

スマトラ沖地震津波以来、津波防災の重要性は広く認知されるようになり、既往最大規模を越える大津波の来襲への対策が、日本でも急務となっている。津波の直撃を受ける地域の住民にとっては迅速な避難が生存の鍵であり、避難路の確保が必須要件であるが、災害時の切迫した避難と同様の状況を平時の訓練で再現するのは不可能であり、計画された避難ルートの適切性を検討する手段は決め手を欠いている。さらに、迅速な避難には、災害を想定した住民のイメージトレーニングが有効と考えられ、仮想現実であっても群衆避難行動の進行状況を疑似体験できるシミュレーションが有効な手段となる。

短時間での避難が急務である地域では、避難階段や避難塔といった施設が建設されることも少なくないが、現実の避難では階段下に群衆が殺到するなど、安全上の問題も想定される。このような場合に、どの程度の待ち合いスペースを施設周辺に確保すべきか、施設周辺に集まった群衆によって周辺の街路に閉塞が生じないかなど、群衆行動を考慮した配置計画が重要となる。これらの計画では、地域ごとの市街地特性（狭小街路の存在等）や居住特性（高齢者が多く住む老朽家屋群の存在等）も考慮する必要があるが、多くの情報を反映させた避難行動予測は容易ではない。

本研究では、避難主体である人間行動の個性を考慮したヒューマンスケールで避難過程を解析するため、鳥類・魚類の群れ行動モデルとして知られる Boid を導入して、個体の年齢層別の運動能力の相違を考慮した群衆行動シミュレーターを構築し、1,000 人弱の規模の小市街から背後の段丘上の避難場所への群衆避難のシミュレーションを実施する。地域ごとの市街地特性や居住特性

を反映させることが可能な個体ベースのシミュレーションは、地域ごとのきめ細やかな計画策定に有用な支援ツールとなるであろう。本研究では、その一例として、特定の街区の住民への避難方向の事前周知が街区全体の避難効率に及ぼす影響を検討した。

2. 数理モデルの構成

本研究で導入する Boid (Birdoid すなわち『鳥もどき』の省略語) は、鳥の雁行モデルとして Reynolds (1987) によって提案された群れ行動モデルである。Boid では、1) Separation (衝突回避)、2) Alignment (整列)、3) Cohesion (向心運動) の 3 つの基本規則が導入され、群れの自律的構造が表現される。衝突回避は、近接する個体 (Boid) 同士が相互に衝突を回避するように運動方向を定める規則である。整列は、近接する個体との移動方向を合わせる規則である。向心運動は、個々の個体が群れの中心に向かって移動しようとする規則で、整列とともに群れ行動の維持を担っている。Reynolds は以上 3 つの行動規則を個体に与えることによって、鳥・魚の群れ行動を定性的に再現できることを示した。

(1) 個体の移動方向

本研究では、Reynolds が導入した 1) 衝突回避、2) 整列、3) 向心運動に加えて、4) 壁との衝突回避、5) 壁に沿う向きの運動志向、6) 慣性効果、7) 標識等の外部情報による行動、8) 気紛れ行動 (個体行動のランダム性) を行動規則として考慮する。以上 8 つの規則によって、個体の移動方向が決定される。Boid は個体相互作用モデルであるから、個体を中心とする影響域 (ここでは、円) を想定する。個体の認識が主として視覚に依存すると仮定して、原則として視野 (個体の進行方向を中心とする 120 度の扇型の範囲) 内の他の個体からの影響のみを考慮する。

衝突回避ベクトルは、

$$\mathbf{r}_i^{ca} = \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{nei}}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{nei}|} \dots \dots \dots (1)$$

1 正 会 員 工博 京都大学助教授 工学研究科都市環境工学専攻
2 正 会 員 工博 豊田工業高等専門学校助教授 環境都市工学科
3 フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科都市環境工学専攻
4 学生会員 京都大学大学院修士課程都市環境工学専攻

と書ける。ここに、 r_i : Boid i の位置ベクトル, r_{nei} : 半径 r_{ca} の影響域内で個体 i に一番近い個体の位置ベクトルである。整列ベクトルについては,

$$r_i^{vmd} = \sum_{j \neq i} \frac{r_j}{|r_j|} w(|r_i - r_j|); r_e = r_e^{vmd} \dots \dots \dots (2)$$

$$w(r) = \begin{cases} 1/N_w (0 < r \leq r_e; \cos \alpha_{ij} > -0.5) \\ 0 \quad (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

$$N_w = \sum_{j \neq i} w(|r_i - r_j|); \cos \alpha_{ij} = \frac{r_i \cdot (r_j - r_i)}{|r_i| |r_j - r_i|} \dots \dots \dots (4)$$

と表現する ($w(r)$: 重み関数)。ここに、 N_w : 影響域内の他の Boid 数, α_{ij} : 視野角である。向心運動ベクトルは群れの重心 r_g に向かうと定義し,

$$r_i^{fc} = \frac{r_g - r_i}{|r_g - r_i|} w_{rand}(t); r_g = \frac{1}{N} \sum_{j \neq i} r_j; r_e = r_e^{fc} \dots \dots \dots (5)$$

と表現する。

次に、壁との衝突回避ベクトルは、他の Boid との衝突回避と同様に,

$$r_i^{caw} = \frac{r_i - r_{nwall}}{|r_i - r_{nwall}|} \dots \dots \dots (6)$$

と書ける。ここに、 r_{nwall} : 個体 i の視野内で個体が一番近い壁要素の位置ベクトルである。慣性 (現在の運動方向を維持しようとする作用) ベクトルは、1 ステップ前の個体の運動方向ベクトルと定義して,

$$r_i^{ine}(t) = r_i^{init}(t - \Delta t) \dots \dots \dots (7)$$

と表現し (r_i^{init} : Boid i の移動方向を規定する単位ベクトル, 式 (11) で定義; Δt : 計算時間間隔), 壁に沿う向きの運動志向は, ベクトル

$$r_i^{capw} = \frac{r_{nwall2} - r_{nwall}}{|r_{nwall2} - r_{nwall}|} \dots \dots \dots (8)$$

で記述する。ここに、 r_{nwall2} : 個体 i の視野内で個体に2番目に近い壁要素の位置ベクトルである。

実際の避難主体である個々人は、日常生活を通じて避難対象となる街路の特徴を記憶しており、避難路の選択にはこの種の記憶が活用されるであろう。さらに、街路に避難路を示す標識が設置されている場合や、避難訓練を通じて個々人が避難ルートに関する予備知識を有している場合など、個体周辺の群衆の挙動から得られる情報以外に外的に与えられる避難ルート情報が存在する。このような情報の存在を反映させるため、知識・外部情報による行動を規定するベクトル r_i^{sig} を導入した。このベクトルは、道路の交差点等の行動の分岐点の座標にダミー要素として埋め込まれており、個体要素の視野内に入ると、個体の移動方向に影響を及ぼす仕組みになっている。個体行動は交差点等の標識を確認しながら移動とな

るが、これは単なる道路標識ではなく、個体の地理的知識を包含した意思決定のシグナルである。故に、特定の標識が特性の個体グループにしか認識されないような設定で、土地勘の有無などを表現することもできる。最後に、個体行動のランダム性を表現する気紛れ行動ベクトル

$$r_i^{rand} = \frac{\xi_{r1}i + \xi_{r2}j}{|\xi_{r1}i + \xi_{r2}j|} \dots \dots \dots (9)$$

を導入して、避難路選択における偶然性を考慮する。ここに、 ξ_{r1} , ξ_{r2} : 正規乱数, i , j : x , y 方向の単位ベクトルである。

以上の様に記述される各移動方向ベクトルを重み付き平均して、個体の移動方向ベクトルを,

$$\begin{aligned} \theta_{md} = & C_{ca} r_i^{ca} + C_{vmd} r_i^{vmd} + C_{fc} r_i^{fc} \\ & + C_{caw} r_i^{caw} + C_{ine} r_i^{ine} + C_{capw} r_i^{capw} \dots \dots \dots (10) \\ & + C_{sig} r_i^{sig} + C_{rand} r_i^{rand} \end{aligned}$$

$$r_i^{unit} = \frac{\theta_{md}}{|\theta_{md}|} \dots \dots \dots (11)$$

と記述する。ここに、 C_{ca} C_{vmd} C_{fc} , C_{caw} , C_{ine} , C_{capw} , C_{sig} , C_{rand} は、衝突回避、整列、向心運動、壁との衝突回避、慣性、壁に沿った移動志向、知識・情報、気紛れ行動の強度を規定する重み係数であり、ここでは、 $C_{ca}=4.0$, $C_{vmd}=2.5$, $C_{fc}=2.25$, $C_{caw}=3.0$, $C_{ine}=1.75$, $C_{capw}=4.0$, $C_{sig}=6.0$, $C_{rand}=1.0$ とした。人間要素は、Fruin・長島 (1974) の人体楕円と面積が等価な円要素であり、直径 $d_h=0.52$ m とした。視野長については、 $r_e^{vmd}=r_e^{fc}=6d_h$ と設定した。

(2) 個体の移動速度

個々の Boid の移動速度の関しては、著者らの DEM 型のシミュレーション (後藤ら, 2004) と同様に,

$$v_i = \text{Min}(|v_i(t - \Delta t)| + \alpha \Delta t, v_{equi} - 0.426 \rho_c) \dots \dots \dots (12)$$

と記述する。ここに、 α : 個体の加速度, v_{equi} : 平衡速度, ρ_c : 視野内の群衆密度 (人/m²) である。

$$\rho_c = \frac{3}{\pi r_e^2} \sum_{j \neq i} w_p(|r_i - r_j|) \dots \dots \dots (13)$$

$$w_p(r) = \begin{cases} 1 (0 < r \leq r_e; \cos \alpha_{ij} > -0.5) \\ 0 \quad (\text{otherwise}) \end{cases} \dots \dots \dots (14)$$

以上を用いると、個体の移動速度は,

$$v_i(t) = (1 - \gamma_{sl}) v_i r_i^{unit} \dots \dots \dots (15)$$

と書ける。ここに、 γ_{sl} : 階段および斜面による平衡速度低減係数であり、平面では 0.0, 斜面では勾配に応じて 0.15~0.5 の範囲で与えた (具体的設定については、図-2 参照)。

平坦な街路における群衆移動を対象に、平衡速度を 1.39 m/s, 加速度を 0.861 m/s² で与えて、小関・渡部

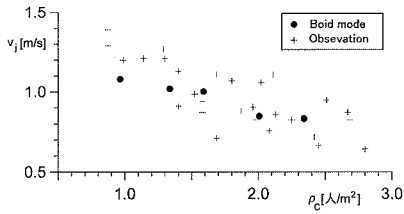


図-1 群衆歩行観測の再現性

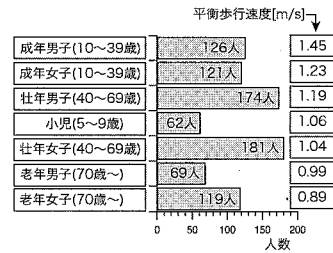


図-3 避難群衆のカテゴリ－

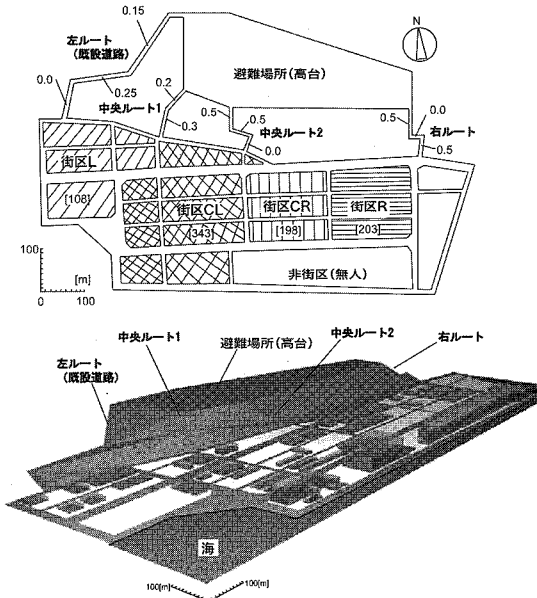


図-2 モデル市街地 (計算領域)

(1967) による十字路における群衆観測結果と比較したのが図-1である。群衆密度と歩行速度の関係は、本シミュレーションのパラメータ設定によって概ね良好に再現されていることが理解できる。

3. 市街地からの避難シミュレーション

(1) 計算領域と計算条件

本稿では、図-2に示す小市街地の住民が津波氾濫から逃れて、既設道路および避難階段を登坂して高台に避難する状況を対象とした。小市街地から背後の段丘上の避難場所には緩やかな傾斜を有する避難路(既設道路、図中の『左ルート』)が存在しているが、市街地の右側の地区からは大きく迂回して避難路を目指すこととなり、避難動線が長くなりすぎる。そこで、市街地と高台を結ぶ新たな3つの避難路(『中央ルート1および2』、『右ルート』)を設けた場合の避難シミュレーションを試みた。図中の各避難ルートに引き出し線で示された数値は、前述の平衡速度低減係数 γ_{sl} であり、市街地内の道路は

全て平坦(勾配0)として、 $\gamma_{sl}=0.0$ とした。市街地内では、幹線道路と路地を区別しており、道路幅員は、5.0~15.0mの範囲で設定した。避難路の幅員については、『左ルート』が7.0m、『中央ルート1および2』、『右ルート』が3.0mである。

群衆の初期配置に関しては、土地利用状況を考慮に入れて、中央の街区CLに中層の集合住宅の存在を想定して343人を配置し、他の街区には、街区Lに108名、街区CRに198名、街区Rに203名を配置した。4つの街区内の各ブロックに対する人数配分については、図-2中の建物の容積に応じて割り振った。

また群衆は運動能力(平衡歩行速度)が異なる7つのカテゴリ(成年男子・女子、壮年男子・女子、老年男子・女子、小児)から成るものとし、和歌山県南部の自治体の人口統計からカテゴリごとの人数を設定し、合計852人の避難行動を追跡した。各カテゴリの年齢定義、人数、平衡歩行速度に関して、図-3にまとめる。

全ての住民は、避難場所である高台の広場が市街地の北に位置することは知っており、南北方向の街路に建物から出ると必ず北に向かって歩行を開始する。東西方向の街路に出た場合には、街区CLおよびLでは西(左)向きに、街区CRおよびRでは東(右)向きに歩行を開始する。Boidモデルでは、前述のように個体の移動方向は個体周囲の状況によって変化し、個体は周囲から得られる情報によって自律的に運動方向を決定する。したがって、街路ごとに予め設定された移動方向(前述の知識・情報ベクトル r_{sig} に相当)と異なる方向にも個体の移動は可能である。

シミュレーションは2つのケースで実施した。ケースAは、前述の通りに知識・情報ベクトルを設定した場合、ケースBは、街区Lのみで西(左)向きに、街区CL、CRおよびRでは東(右)向きに歩行するように知識・情報ベクトルを設定した場合である。

(2) 避難行動の推移

はじめに、ケースAについて、シミュレーション結果の瞬間像の例を図-4に示す。4つのルートを通じて、

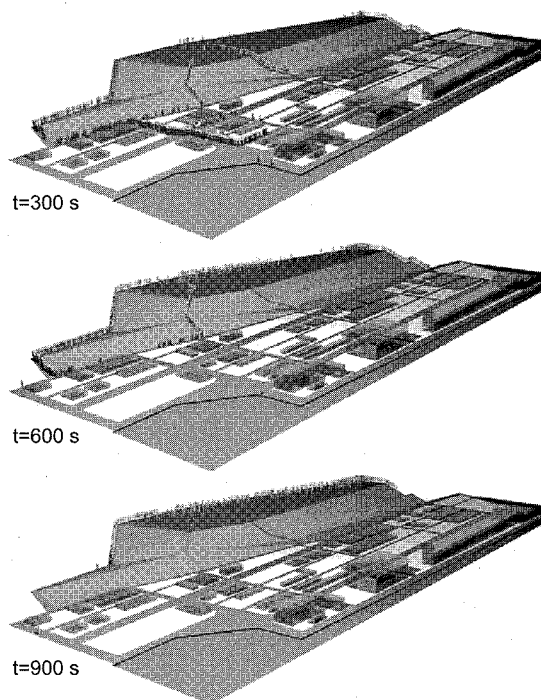


図-4 避難の時間的推移

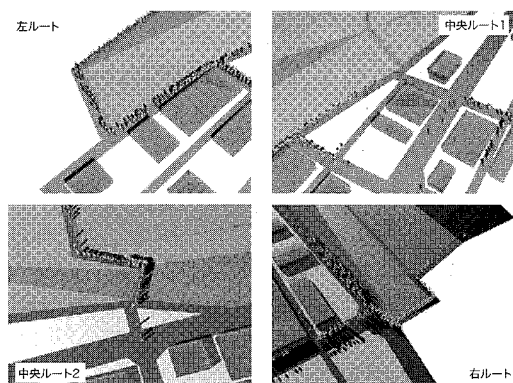


図-5 上り口付近の拡大図

高台への避難が進行する様子が分かる。次に、各ルートの上り口付近の街路の状況のクローズアップを図-5に示す。各ルートにおいてははじめの避難完了者が発生した時刻の60秒後の様子を示しているため、避難ルートごとに表示される時間が異なっている。

ケース A における4つのルートの避難者完了数の推移を、図-6に示す。図中の実線が各ルートの総避難完了者数の時系列、細破線が各カテゴリー別の内訳である。図中の太破線は、各ルートごとの避難完了時刻を示しているが、ルートごとにばらつきが大きく、最も早く避難

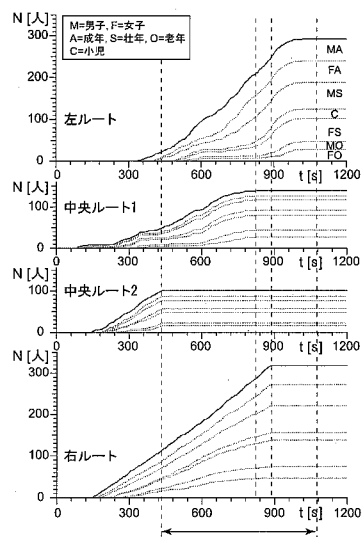


図-6 避難完了者数の時系列 (ケース A)

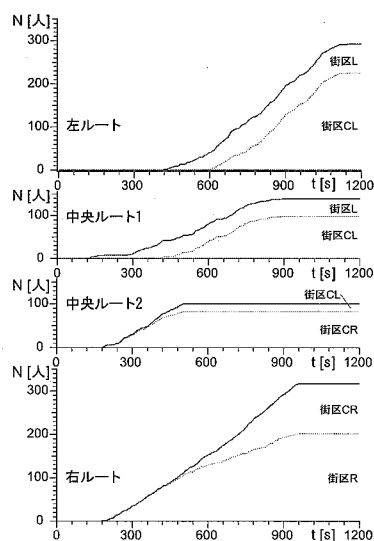


図-7 避難完了者数の居住街区 (ケース A)

が完了する中央ルート2と最も時間を要する左ルートでは、10分以上の開きがある。言い換えると、中央ルート2の容量に余裕があり、避難路の処理能力が充分に活用されていないことが分かる。この状況の改善のため、各ルートの利用者がどの街区からの避難者であるのかを図-7に示す。居住者が集中した中層の集合住宅を海寄りに有する街区CLからの避難者が、避難動線が長く、しかも隣接街区からの避難で混雑する左ルートに多く割り振られていることが理解できる。

ケース B では、先述の通り、街区CLの住民も建物から街路に出た時点で一旦は東(右)に向かって歩き始め

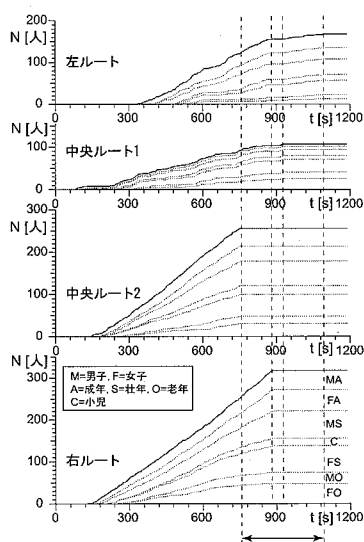


図-8 避難完了者数の時系列 (ケース B)

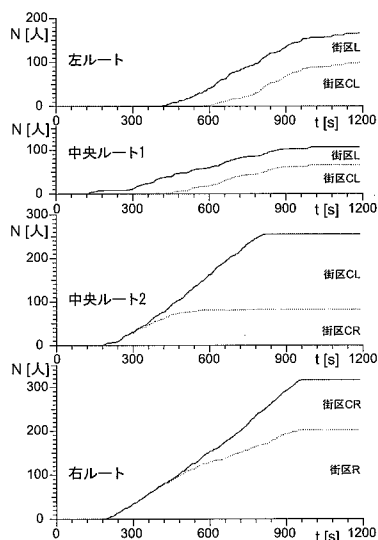


図-9 避難完了者数の居住街区 (ケース B)

るように事前情報を与えている。ケース B における 4 つのルートの避難者完了数の推移を、図-8 に、各ルートの利用者がどの街区からの避難者であるのかを図-9 に示す。避難完了時間のルートごとの差は、最大でも 6 分程度に短縮されており、左ルートの利用者数より中央ルート 2 の利用者数が多くなり、ケース A の状況とは大きく異なる推移を示している。各ルートの利用者の居住街区別の内訳を見ると、人口の多い街区 CL の住民の半数程度が中央ルート 2 を通じて避難しており、中央

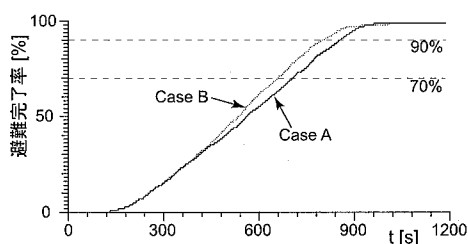


図-10 避難完了者総数の時系列

ルート 2 の処理能力が有効活用されるように改善されている。

全てのルートを集計した避難完了率の時系列を図-10 に示す。4 つのルートの分担率が均等な方向に修正されたケース B が、70 % 避難完了時刻で約 50 秒、90 % 避難完了時刻で約 70 秒の短縮を実現していることが分かる。

4. おわりに

本稿では Boid 型群衆行動モデルを構築し、津波来襲時の小市街地から高台への避難についてシミュレーションを実施した。種々の要因の重ね合わせによって時々刻々の最適移動方向を個体が選択するという個体ベースモデルであり、パニック避難に特有の群れ行動と人間固有の思考力・判断力の両者を考慮に入れたモデルである。

避難行動の初動段階 (建物から街路へ出た時点) での避難方向に関する事前情報の有無によって避難完了時刻に有意な差が生じることが示され、種々のシナリオによる避難シミュレーションによって、簡便で最適な避難ルールを検討することの重要性が示唆された。

シミュレーション結果からはアニメーションを製作することができるので、対象地区の住民に津波避難の疑似体験の機会を提供することなど、避難計画策定以外にも幅広い活用を模索したい。

参考文献

- 小関憲章・渡部貞清 (1967) : 群衆旅客流の交差, 日本建築学会論文報告集号外, p. 762.
- 後藤仁志・原田英治・久保有希・酒井哲郎 (2004) : 個別要素法型群衆行動モデルによる津波時の避難シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.1261-1265.
- Fruin J.・長島正充 (1974) : 歩行者の空間, 鹿島出版社, 206 p.
- Reynolds, C. W. (1987): Flocks, Herds, and Schools, A Distributed Behavioral Model, the proceeding of SIGGRAPH, Vol.21 (4), pp. 25-34.