

津波防災のための市街地改造計画に対する避難行動シミュレータの貢献

Contribution of Crowd Refuge Simulator to Town Planning against Tsunami Flood

後藤仁志¹・原田英治²・丸山由太³・高橋和秀⁴・大庭啓輔⁴

Hitoshi GOTOH, Eiji HARADA, Yuta MARUYAMA, Kazuhide TAKAHASHI and Keisuke OHNIWA

A typical town planning for disaster prevention is conducted according to following steps: i) pick-up of hazardous area from datum for a vulnerability to disaster given by a pilot survey, ii) analysis of land use, and iii) implementation of a scheme for construction of evacuation road or evacuation space. We propose a dynamic approach by using crowd refuge simulator for a disaster-prevention town planning. The crowd refuge simulator provides scenarios of evacuation dynamically in a virtual town.

1. はじめに

政府の地震調査研究推進本部地震調査委員会の発表によると、東南海、南海地震の発生確率は、今後30年以内に40～50%であるから、地震津波によって大きな被害が予想される地域では、災害に強い地域づくりを目指した地域防災計画の検討が必須である。防災都市計画は、一般的に、i)調査段階で得られた災害危険度のデータを基に防災都市計画が検討された後、ii)土地利用の計画等が進められ、iii)避難路や避難場所の整備事業が進められるといったフローに沿って実施されるので、これらの計画プロセスに対する支援ツールとして適切なシミュレーションモデルの開発が求められている。シミュレーションモデルには、群衆の避難行動で見られる避難者の避難通路の狭窄部における閉塞状況や避難者年齢による運動能力の違いを表現することが要求されるため、行動主体である人間のスケールで群衆避難を扱うことが不可欠である。避難者個々の避難行動を追跡するには個別要素法型のモデルが都合良く、著者らはこれまでに個別要素法型の群衆避難シミュレータを開発し、例えば、津波来襲時の避難過程(後藤ら, 2004)や内水氾濫による地下街からの群衆避難過程等を対象としたシミュレーション(原田ら, 2006)を実施してきた。

本研究では、これまで著者らが開発してきた避難行動シミュレータ(後藤ら, 2004)を用いて、津波来襲時の避難場所の適切な設置の観点から防災都市計画を検討する。そして、上記i)～iii)の評価プロセスを具体的に示すことで、この種の評価方法の有効性を明らかにする。

2. 群衆避難シミュレータの概要

ここでは、避難行動シミュレータ(後藤ら, 2004)を用いて群衆避難行動を表現するが、個体の人間要素の運動方程式は、並進および回転の運動方程式：

$$M_{hi} \frac{d\mathbf{u}_{hi}}{dt} = \mathbf{F}_{hnt} + \mathbf{F}_{aw} \quad (1)$$

$$I_{hi} \frac{d\omega_{hi}}{dt} = \frac{d\mathbf{u}_{hi}}{2} \sum_j \{f_{hs}\}_j; \quad I_{hi} = \frac{\varepsilon_h \sigma_h \pi d_{hi}^4}{32} \quad (2)$$

と記述される。ここに、 $\mathbf{F}_{hnt}$ ：要素間(人間/人間および人間/壁)の作用力ベクトル、 $\mathbf{F}_{aw}$ ：人間要素の歩行力(推進力)ベクトル、 $\mathbf{u}_h$ ：人間要素の移動速度ベクトル、 M_h ：人間要素(シリンダー形状を想定)の質量、 σ_h ：人間要素の比重(=0.98)、 ε_h ：シリンダーの体積と人間の実質体積の差を表す係数(=0.24)、 d_{hi} ：人間要素径(=0.379 m)、 ω_h ：人間要素の回転速度、 f_{hs} ：人間要素 i, j 間の接線方向の作用力、 I_{hi} ：人間要素の慣性モーメントである。

要素間作用ベクトルおよびトルクについては個別要素法の標準的な取り扱いに従って記述し、要素間作用力の発現領域(図-1参照)は、視野範囲(人間要素の正面から $\pm \pi/3$)を考慮して、

$$\mathbf{r}_{hi} \leq \begin{cases} \Lambda_{hcf} \left(-\frac{\pi}{3} \leq \theta_{dij} \leq \frac{\pi}{3} \right) \\ \frac{d_{hi} + d_{hj}}{2} \quad (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{r}_{hc} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j; \quad |\mathbf{r}_{hj}| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

$$\cos \theta_{dij} = \frac{\mathbf{u}_{hi} \cdot \mathbf{r}_{hj}}{|\mathbf{u}_{hi}| |\mathbf{r}_{hj}|} \quad (5)$$

と設定する。ここに、 $\mathbf{r}_{hj}$ ：人間要素 i, j 間の位置ベクトル、 θ_{dij} ：人間要素 i の進行方向と人間要素 j の存在方向の成す角、 Λ_{hcf} ：人間相互の心理的平衡距離(=0.976m；清野ら(1996)による実測値)である。式(3)の条件が成立すると、要素間の法線および接線方向に弾性スプリングおよび粘性ダッシュポットを配置して人間要素間の作用力を算定する。また、各個体は存在位置に応じて与えら

- | | | |
|---------|------|-----------------------|
| 1 正 会 員 | 博(工) | 京都大学教授 工学研究科都市環境工学専攻 |
| 2 正 会 員 | 博(工) | 豊田工業高等専門学校准教授 環境都市工学科 |
| 3 | 修(工) | 日本アイ・ピー・エム株式会社 |
| 4 学生会員 | | 京都大学大学院修士課程都市環境工学専攻 |

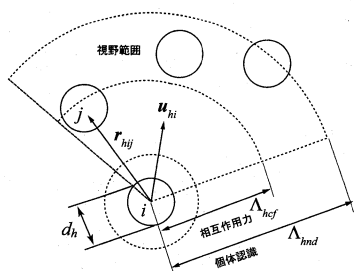


図-1 要素間力の発現領域

れる避難方向に沿って運動し、個々の移動速度には、群衆密度等の視界の状態に応じて平衡値を設定し、平衡歩行速度に達するまでは等加速度運動するとして、個体を追跡する。なお、この避難行動シミュレータは、小関・渡部(1967)が実施した群衆歩行観測から得た群衆密度と歩行速度の関係を良好に再現することは別途確認している。

3. シミュレータを用いた防災都市計画案の作成

(1) シミュレータを用いた計画案作成の概説

一般的に、自治体等が実施する防災都市計画は冒頭でも述べたが、i)調査段階で得られた災害危険度のデータを基に防災都市計画が検討された後、ii)土地利用の計画等が進められ、iii)避難路や避難場所の整備事業が進められるといったフローで実施される。この計画手順に倣いシミュレータを用いた計画では、i)災害危険度の調査として避難施設等を設けない状態を対象としたモデル都市での群衆避難シミュレーションを実施し、この段階で十分な避難が不可能であることが確認された場合、ii)遊休地を利用した避難施設の新設や既存施設を避難施設として利用することの対策を検討する。iii)その後ii)で検討された対策をモデル都市に反映し、再度群衆避難シミュレーションを実施する。なお、ii)の対策案の段階では、群衆避難完了時間の短縮の観点から活用する既存施設の設定や、避難施設を新設する場合にはその設置場所を決定する。次節以降では、具体的にシミュレータによる計画案作成プロセスを示すとともに、防災都市計画に対する本研究で使用する群衆行動シミュレータの有効性を明らかにする。

(2) 計算条件と初期設定

避難行動シミュレータは、個別要素法を基礎に構築されており、避難者個人の行動の追跡が可能である。このシミュレータを用いて津波災害の恐れがある海岸部の小市街地モデルを対象とした市街地計画を検討した。

市街地の地理情報は、我が国の沿岸に広く存在する海岸段丘前面の狭小な市街地の地理的特徴を考慮し、和歌

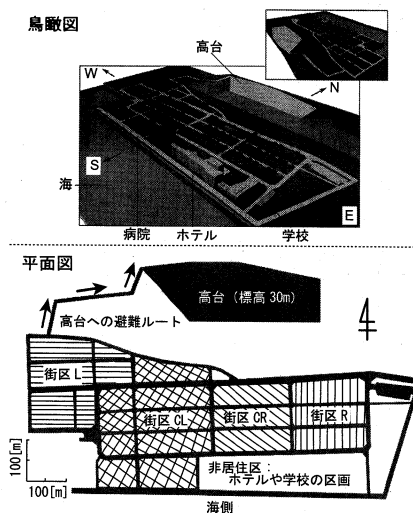


図-2 対象とした小市街地(上:鳥瞰図,下:平面図)

表-1 避難者数とその内訳

年齢・性別構成	人数	比率	歩行速度
10～39 歳男性	132	15.73	1.45
10～39 歳女性	116	13.83	1.23
40～69 歳男性	157	18.71	1.19
40～69 歳女性	178	21.22	1.04
70 歳以上男性	70	8.34	0.99
70 歳以上女性	108	12.87	0.89
小児 (5～9 歳)	78	9.30	1.06
計	839	100.00	-
	(人)	(%)	(m/s)

山県に実在する市街の土地利用状況を参考にして、図-2に示す計算領域とした。長辺方向に1kmの矩形状小市街地の背面の高台上に避難場所を設定した。高台までのアクセスは西側から延びる既設道路の経路のみとした。なお、高台は海拔30mであり、市街地から高台までの経路には傾斜を持たせてある。そのため、群衆の最大避難速度については、市街地での平坦領域の最大避難速度と比較して傾斜を有する経路では0.7倍に減じて評価した。また、避難者数とその内訳(性別・年齢・最大歩行速度)についても和歌山県の対象町村の人口統計を参考に決定した(表-1参照)。避難者は4領域に分割された小市街地に表-2のようにランダムに配置されるが、ホテルや学校はそれ自体が避難場所となり得るので避難者の発生については考慮せず、一般住民の居住者を対象に検討した。それ故、ホテルや学校の区画は非居住区として避難者を配置していない(図-2参照)。

表-2 各領域に配置された避難者の内訳

カテゴリ	10～39 男	10～39 女	40～69 男	40～69 女	70～ 男	70～ 女	小児	合計
街区 L	15	16	21	23	9	9	8	101
街区 CL	62	57	61	64	31	43	32	350
街区 CR	27	17	36	47	12	33	21	193
街区 R	28	26	39	44	18	23	17	195

[人]

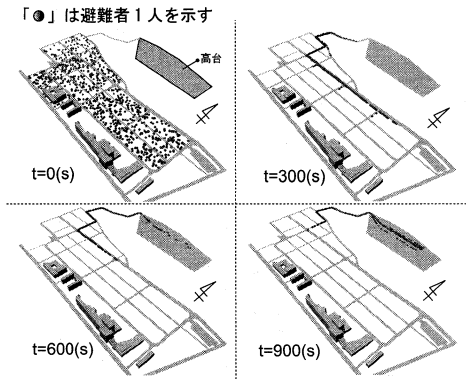


図-3 スナップショット(sim.1)

シミュレーションでは、警報が発令されてから900s後に津波が市街地に到達すると想定した。この時間内に住民は所定の避難場所まで避難する必要がある。対策前の現状では避難場所として海拔30 mの高台のみであるが、計画段階ではこの高台の他に、海拔15 m以上の既存の建築物を耐震補強して活用することや、他所に実在する避難タワーを参考にして収容限度が60人数程度の避難タワーの新設を考えた。なお、耐震補強された建物の収容限度人数に配慮してシミュレーションが実施されていることを付記しておく。

(3) 現状調査のためのシミュレーション

高台のみを避難場所として用いた現状調査のためのシミュレーションNo.1の結果の代表的なスナップショットを図-3に示すが、避難完了時間基準として設定した時刻 $t=900s$ のスナップショットから、多数の避難者が高台へ到達していない状況が確認される。図-4に累積避難完了者数の時系列を示す。最も速やかに高台へ辿り着く避難者でもおよそ300sの避難時間が必要であることが読み取れる。また、避難効率(時系列の傾き)は、避難開始後時刻 $t=600s$ 以降は殆ど変化せず、1.33s当たり1人程度の避難率であることが見て取れる。なお、現状を対象としたシミュレーションNo.1では、全体の避難完了時間が1524sであることや、避難完了時間基準の900sにおける避難完了者数は360人程度(避難完了率40%)であることから現状の避難計画に問題があることが確認できる。図-5に時刻 $t=900s$ の時点で避難未完了者の初期位置を

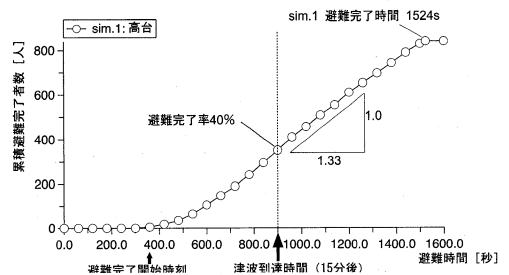


図-4 累積避難完了者数の時系列(sim.1)

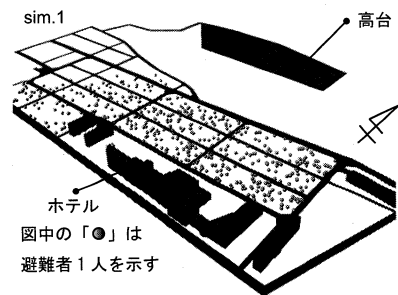


図-5 危険地域判別マップ(sim.1)

示した危険地域判別マップを示すが、殆どの街区の人が津波の危険に曝されることが理解される。また、避難未完了者は市街地の南東部に数多く存在することから、南東にあるホテルの屋上を避難施設として利用することが、避難率の改善に効果的な対策になると考えられる。そこで、新たにホテル屋上を避難場所として設定した場合のシミュレーションNo.2を実施した。

(4) 避難計画案に対するシミュレーション

シミュレーションNo.2の結果のスナップショットを図-6に示す。時刻 $t=300s$ や時刻 $t=600s$ からは、図-3で示したシミュレーションNo.1のスナップショットと比較して、シミュレーションNo.2では群衆が速やかに避難場所に到達していることが確認される。図-7にシミュレーションNo.2の累積避難完了者数の時系列を重ねて示す。全体の避難完了時間がシミュレーションNo.2はシミュレーションNo.1と比較して1524sから999sへ大幅に短縮しており、明らかに避難効率の向上が認められる。また、避難完了者数が300～600人付近の避難効率が最大となる付近では、

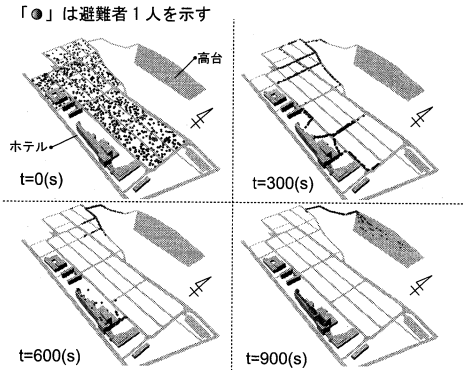


図-6 スナップショット (sim.2)

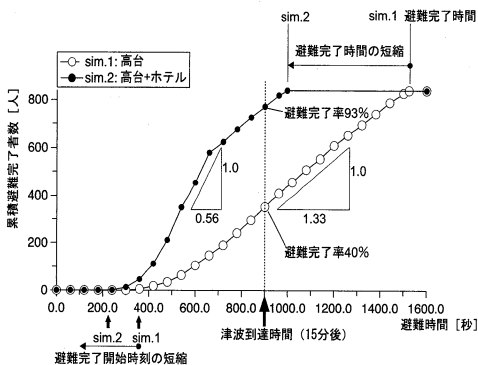


図-7 累積避難完了者数の時系列 (sim.1 & sim.2)

0.56sあたり1人程度の避難率であり、シミュレーションNo.1のそれと比較して約2.4倍に上昇している。避難完了目標時間の900sの時点での避難完了率の観点からも、シミュレーションNo.2の93%はシミュレーションNo.1の40%の2倍以上となっていることから、ホテルを避難場所として利用することの避難率向上に対する有効性が窺える。しかし、避難完了時間が900s以内となるよう改善案をさらに検討する必要がある。図-8に示すシミュレーションNo.2の危険地域判別マップから、避難完了目標時間900sにおける約7%の避難未完了者の計算初期配置箇所が特定できるが、高台とホテルの中間に配置された要素が避難完了していないことが分かる。また、避難未完了者数が68人であることから、中規模避難施設の設定または避難タワー2基程度の新設をこの付近に計画することで目標時間内に避難が完了できると考えられる。そこで、図-9に示す、高台の他に南の市立病院を耐震補強して避難場所として利用するシミュレーションNo.3と避難タワーを図の位置に新設するシミュレーションNo.4の2つの計画案を検討した。シミュレーションNo.3およびシミュレーションNo.4の累積避難完了者数の時系列グラ

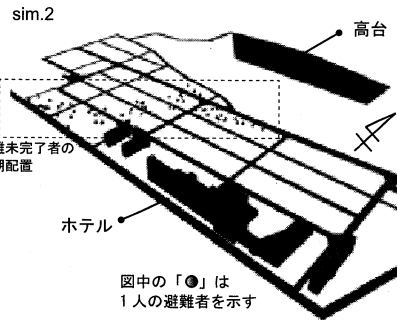


図-8 危険地域判別マップ(sim.2)

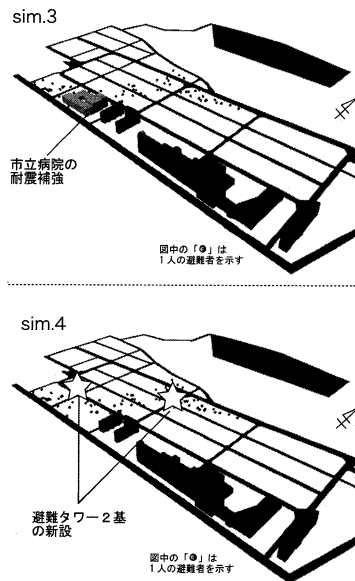


図-9 危険地域判別マップを利用した新設避難場所の検討

フを図-10にそれぞれシミュレーションNo.1およびシミュレーションNo.2を重ねて示すが、それぞれの避難完了時間は795sおよび828sであり、津波襲来前に全員が避難完了可能となる結果が示された。双方の計画案は、避難完了時間の観点における防災都市計画の目標は達成しているが、現実の計画案ではここから、病院の耐震補強か避難タワーの新設かを選択するに当たり、費用面や景観面などの事項について考慮する必要があると考えられる。

4. おわりに

群衆行動シミュレータを用いて、津波襲来時に逃げ遅れる可能性のある箇所を明らかにし、避難時間短縮のための対策案を立案することで、防災都市計画案の作成過程を具体的に示した。本研究で用いたシミュレータは、個々の避難者行動の追跡が可能であり、計算結果のアニメ

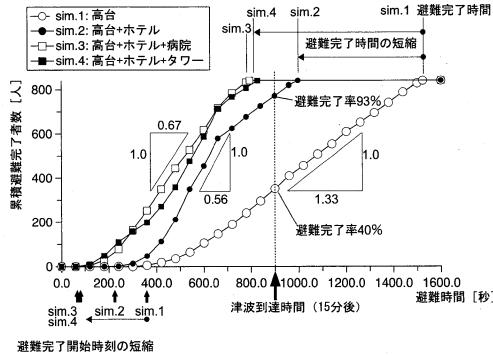


図-10 累積避難完了者数の時系列(sim.1, sim.2, sim.3, sim.4)

メーションから避難に対する危険箇所を視覚的に確認することができるため、防災計画事業で得られた改善計画案の避難者(地域住民)への分かり易い説明にも一定の有効性があると考えられる。今後は、より分かり易い説明に向けて計算結果のCG化にも力を注ぎ、防災都市計画支援ツールとして、この種の群衆行動シミュレータを普及に努めたいと考えている。CG化の一例として、本研究で対象とした小市街地モデルの鳥瞰図とシミュレーションNo.3の病院付近とシミュレーションNo.4のホテルおよび避難タワー付近の避難過程のCGを図-11に示すが、この種のCGによって実際の避難状況のイメージが格段に把握しやすくなる。これらのCGでは、カメラアングルの変更によって様々な視点から避難状況を示すことができるため、避難者視点でのアニメーション作成を通じて、擬似避難訓練ツールとしての用途の可能性も探りたい。

参 考 文 献

小関憲章・渡辺貞清(1967): 群衆旅客流の交差, 日本建築学

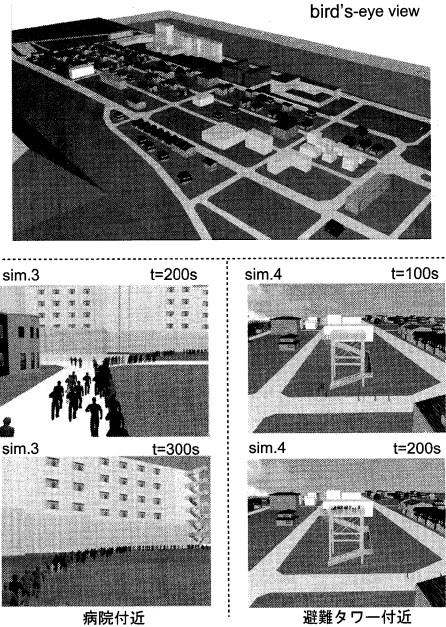


図-11 CGによるスナップショット(上: 小市街地モデルの鳥瞰図, 左下: sim.3, 右下: sim.4)

会論文報告集号外, p. 762.

清野純史・三浦房紀・龍本浩一(1996): 被災時の群衆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, 第537/I-35, pp. 233-244.

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.

原田英治・後藤仁志・酒井哲郎・久保有希(2006): 地下街浸水時の群衆避難の個体ベースシミュレーション, 水工学論文集, 第50巻, pp. 589-594.