

津波遡上時の街区レベルでの群集避難行動シミュレーション

掛川秀史¹・大山 巧²

実効性の高い津波避難計画の立案に役立つ解析ツールとして、街区レベルの複数建物間での群集避難行動を精緻に予測する手法を構築した。本避難シミュレーションモデルは、エージェントベース言語の Repast をベースにして個人単位の避難行動を詳細に表現するものであり、(1)空間モデル、(2)避難者モデル、(3)津波遡上モデルの3つのサブモデルから構成される。東海地方の沿岸に立地する生産施設の敷地(400 m × 300 m)を想定してケーススタディを行った結果、避難場所の設置場所や避難誘導のタイミングなどを工夫することで、津波による被災者数を大幅に低減でき、本モデルが津波に対する施設計画や避難行動計画立案にとって有効であることが明らかとなった。

1. はじめに

津波遡上時の群集避難を予測することは、津波防災を検討する上で非常に重要である。従来の津波に対する避難行動予測手法は、主に市街地の街路網を対象としており(後藤ら, 2005; 田村ら, 2005)、個別の施設内における詳細な避難行動は考慮されていない。しかし、津波の到達時間が短いと予想される沿岸地域では、遠距離の避難が現実的に難しくなるため、市街地単位での避難計画だけでなく、施設内または街区レベルで完結する避難計画が必要になる。

そこで本研究は、従来予測が困難であった街区レベルの複数建物間での群集避難行動をより精緻に予測する手法を構築することにより、津波避難施設の適切な規模・配置など、実効性の高い津波避難計画の立案に役立つ解析ツールを提案することを目的とする。

2. 避難行動予測モデル

避難行動予測モデルは、海老原ら(1995)、Kakegawaら(1996)の開発した建物火災時の建物内の避難行動を対象としたアルゴリズムを応用し、エージェントベース言語の Repast を用いて複数建物間の個人単位の避難行動を表現した。全体は主に以下の3つのサブモデルで構成されている(図-1)。

(1) 空間モデル

空間モデルは、避難行動予測の対象となる街区内の建物内外の空間構成をモデル化する。建物の空間構成は、建物内の室や屋外の外部通路を仮想的に壁と扉で囲まれた閉空間の集合体とし、メッシュやネットワークによって空間を離散化せず、空間内は連続した領域としてモデル化した(図-2)。異なる閉空間は扉を介して連結させることで、建物及び街区内の空間全体をモデル化する。

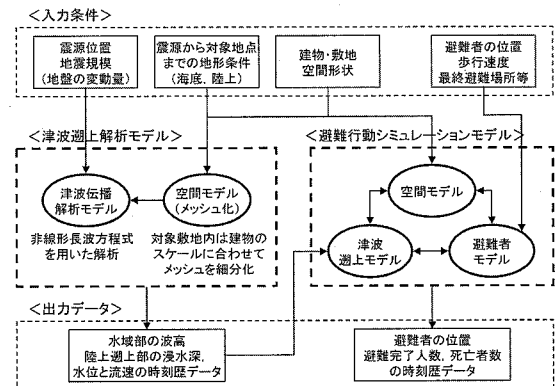


図-1 避難行動シミュレーションのシステム構成

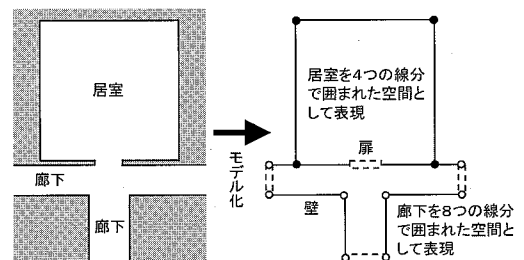


図-2 空間のモデル化の概念

空間モデルにおける基本単位である居室等の閉空間は、複数の領域に分割可能とし、各領域毎に床面の勾配の角度と傾き方向を勾配ベクトルで個別に設定できるようにした。これにより、建物内の階段室や傾斜した街路等の床面が傾斜した空間をモデル化する。

階段室は、踊り場を介して複数の階とつながるため、階段室全体を1つの室としてモデル化するのではなく、1階層を基本単位としてモデル化し、仮想の開口部を介して複数階が連結するようにした(掛川ら, 2006)。基本単位とする1階層の階段室は、踊り場と段床の4室に分割し、仮想の開口部で分割した室を連結した。段床部分は、勾配単位ベクトルで床面の勾配の方向と角度を与

え、分割した各室内では、避難者は室を繋ぐ仮想の開口部を移動目標として設定する。階段を介して異なる階を連結することで、複数階からなる建物全体の空間を再現する。

建物内の什器や機器等の避難上の障害物は、例えば、a) 机等のように高さが低く避難者は通過することはできないが、障害物の反対側にある移動目標や他の避難者等の情報が得られるものと、b) 壁などのように高さが高く通過することも反対側の視覚的な情報も得られないものの2種類を想定できるようにした。このように障害物をモデル化することにより、建物内の避難行動をより現実的に即して再現できる。さらに、個々の障害物の地震時の転倒の有無を別途検討することで、地震後の室内での避難状況を再現することも可能である。

(2) 避難者モデル

避難者モデルは、避難者個人の行動特性データを管理し、避難者個人の移動目標設定、移動方向・位置決定を行う。避難者個人は、専有面積を円でモデル化し、成人男子の平均的な肩幅等のデータ（日本建築学会編、2003）を参照して直径0.55 mとした。

避難者の移動位置決定の流れを図-3に示す。避難行動の予測に当たって、避難者はまず、各時点での位置情報に基づき移動目標を選択し、選択された移動目標に従って、移動方向および移動位置を決定する。避難者の移動目標は、大きく分けて以下の2種類を設定した。

- ・長期移動目標：最終的に避難したい場所
- ・短期移動目標：長期移動目標に到達するために当面の到達目標とする場所（出口扉、誘導灯など）

避難者は長期移動目標に到達するために、当面の目標とする短期移動目標を選択しながら、避難行動を継続する。避難者は長期移動目標の位置を、避難開始時点で予め情報として与えられていない。移動目標は、a) 最終避難場所、b) 出口扉、c) 移動方向を示す誘導灯、d) 扉の順で優先順位を与え、避難者個人・時間ステップ毎に設定する。移動目標の情報および障害物の情報は、空間モデルにおいて、空間単位で個別に管理させ、避難者は自分の存在する空間以外の情報は入手できないこととした。

避難者の移動方向、移動位置決定の考え方を図-4に示す。移動方向は、移動目標や周辺の壁、障害物、他の避難者等の避難者に作用する複数の力をベクトルでモデル化し、各ベクトルを合成して決定する。ベクトルの合成に際しては、人間の動きを現実に近い形とするため、移動してきた方向に対する慣性力を与えた。避難者に作用する力のうち、移動目標からは引力を周辺の壁、障害物、他の避難者からは斥力を受けるものとし、斥力のベクトルの大きさは避難者と対象物との距離に反比例させた。

移動位置は、ベクトル合成により決定した移動方向と、人員密度や避難者個人の歩行速度を考慮して時間ステップ毎に決定する。歩行速度は、避難者周辺の人員密度により低減するものとし、個々の避難者周辺の人員密度の算出対象範囲は、対象とする避難者の移動方向に対して半径3.0 mの半円の範囲とした（図-5）。人員密度と歩行速度の関係式は、戸川（1955）の測定データ等を参照して、以下の式（1）により設定した。ここで、 V は避難者の歩行速度[m/s]、 V_0 は歩行者の単独歩行時（人員密度0人/m²）の歩行速度[m/s]、 ρ は避難者周辺の人員密度[人/m²]を示す。

$$V = \min(V_0, V_0/\rho) \dots \dots \dots (1)$$

傾斜面での歩行速度は、水平面での歩行速度と基準となる傾斜面での歩行速度を予め設定した上で、任意の傾斜角度における歩行速度を定式化した（掛川ら、2006）。

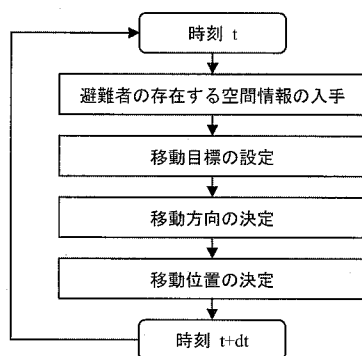


図-3 避難者の移動位置決定の流れ

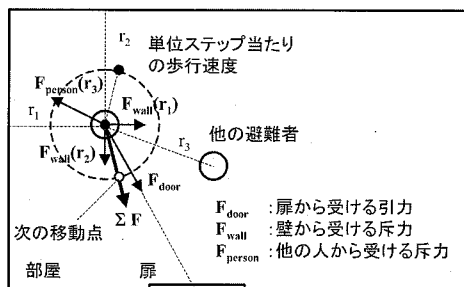


図-4 避難者の移動方向・移動位置の決定方法

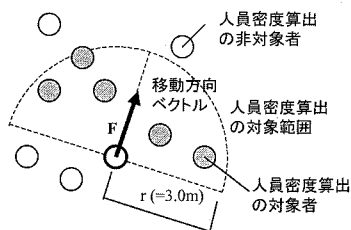


図-5 歩行速度算出時の人員密度の算出範囲

(3) 津波遡上モデル

津波の海域伝播および陸上遡上については、非線形長波モデル（中央防災会議，2003）を適用した。ただし、中央防災会議での計算における最小メッシュが50mであるのに対して、本モデルでは建物の形状が再現できる程度の空間分解能（3m程度）まで計算領域を分割した。漂流物の影響や建物内部への浸水などは考慮していないが、より細かいメッシュを採用することにより、建物による流れの遮蔽効果や道路への集中、河川からの氾濫などが再現できる。

津波遡上解析の結果から得られた対象街区内の浸水深および流速の時系列データを管理し、避難者の被災の有無を判断する。ここでは安全側の条件設定として、津波により浸水した領域で津波の水位以下に存在する避難者は、流速にかかわらず被災すると評価した。

3. ケーススタディ

(1) 計算条件

東海地方の沿岸に立地する生産施設の敷地（400m × 300m）を想定してケーススタディを実施した。対象施設の配置図を図-6に示す。敷地の地盤は全体が平坦で標高はT.P. + 2.0mとした。敷地の北東側は海、南東側は河川に面しており、岸壁の高さは北東側、南東側とも敷地地盤から1.5m（T.P. + 3.5m）とした。敷地内には、表-1に示す10棟の建物を配置し、各々の建物をつなぐ敷地内通路を設定した。建物内外の空間のモデル化において、建物内部の什器や機器等の障害物は考慮していない。

対象津波は、東海・東南海・南海地震の連動による津波とし、津波発生時の潮位はT.P. + 0.68mとした。津波の伝播・遡上解析における津波の波源域と初期水位変動量は、中央防災会議の計算（2003）と同じ条件を用いた。解析領域については、メッシュ幅が1,350mから50mまでの4段階の細分化は中央防災会議と同様とし、さらに対象施設周辺の最小メッシュ幅3.1mの領域まで、合計8段階の領域を設定した。

避難者の初期配置は、街区内の建物及び通路毎に個別に設定し、避難対象人数は敷地内全体で計600名とした。避難者の歩行速度は、1.0m/sを基準として個人毎に±0.5m/s（0.5～1.5m/s）の範囲で一様乱数によりばらつきを与えて設定した。シミュレーションの計算ステップは津波遡上計算が0.1s、避難シミュレーションは0.2sとした。

ケーススタディの条件を表-2に示す。敷地内の最終避難場所は、現状の避難計画として1箇所（事務所棟3階）の場合と、改善計画として敷地中央の工場Dを追加し、2箇所（事務所棟3階、工場D3階）とした場合の

2つの条件を想定した。最終避難場所を2箇所としたケースでは、周辺工場から工場Dへの避難が円滑に行えるように、工場Dに屋外避難階段を追加した。避難場所の設定階は、津波の遡上高さを考慮し3階とした。さらに、避難誘導の違いが避難安全性に与える影響を検討するため、避難開始時間は地震発生10分後と5分後の場合について検討を行った。なお、複数の最終避難場所がある場合、避難者が選択する最終避難場所は、個人毎に予め設定するのではなく、各々が選択した避難経路と最終避難場所との関係に基づき、自由に選択するとした。

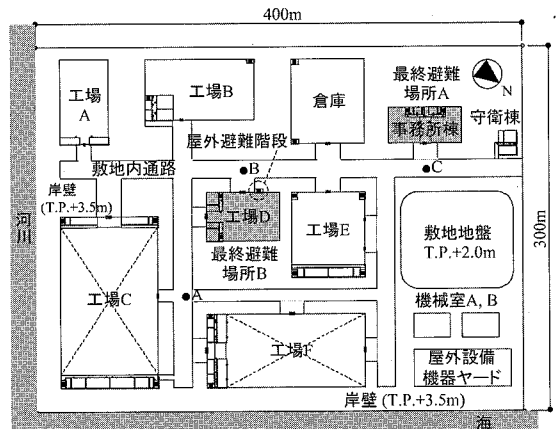


図-6 ケーススタディ対象施設

表-1 対象施設の条件

	階数 [階]	建物寸法 幅 × 奥行 [m]	延べ 床面積 [m ²]	建物 高さ [m]	在館者数 [人]
事務所棟	4	60 × 30	7,200	20	160
守衛棟	1	15 × 20	300	5	10
工場A	1	40 × 70	2,800	10	30
工場B	2	90 × 50	9,000	15	50
工場C	2	80 × 140	12,800	25	150
工場D	3	60 × 40	7,200	10	60
工場E	2	60 × 70	8,400	20	50
工場F	2	130 × 60	8,700	10	70
倉庫	2	60 × 70	8,400	15	0
機械室A、B	1	30 × 20	各600	5	0
敷地内通路	-	-	-	-	20
合計	-	-	66,000	-	600

表-2 ケーススタディ条件

ケース名	最終避難場所		地震発生後の 避難開始時間
	設置数	設置場所	
Case-1	1箇所	事務所棟 3階	10分
Case-2	1箇所	事務所棟 3階	5分
Case-3	2箇所	事務所棟 3階 工場D 3階	10分
Case-4	2箇所	事務所棟 3階 工場D 3階	5分

(2) 計算結果

津波の遡上の様子を図-7, 図-8に示す。津波は地震発生17分50秒後に敷地内へ遡上し始め, 19分40秒後には敷地全体が浸水する。陸上での流れは建物を迂回して敷地内通路に集中するとともに, 複数の流れの分岐・合流など複雑な流況を呈している。敷地内の代表点として, 図-6に示される地点A, B, Cにおける浸水深の時刻歴変化を図-9に示す。工場C, Fの間にある地点Aは, 海からの津波の遡上経路となるが, 浸水深が1mを超えてから2mまでの変化は比較的緩やかである。これに対して, 地点Bは工場Dの背後にあるにもかかわらず, 両側から流れ込む水塊が衝突する位置にあり, 急激に2m程度まで水位が上昇する。また, 事務所棟入口の地点Cでは, 事務所棟が遡上流れに対して遮蔽壁となり, 水塊が滞留するため水位の上昇速度が速く, 津波到達から1分間以内に最大浸水深に達している。このように, 敷地内では建物の存在等により複雑な流況となり, 浸水深の変化は場所的にかなり異なっている。

敷地内の最大浸水深の分布を図-10に示す。浸水深は敷地全体で概ね3mを超えており, 遡上した津波が直接建物に衝突する工場C, Fと事務所棟の海側外壁周辺では部分的に4mを超えている。また, 建物の背後地では, 工場Cのように建物の遮蔽効果により浸水深が小さくなる場合と, 工場Bのように複数の流れの衝突や合流により浸水深が大きくなる場合があるので注意を要する。敷地内の最大浸水深4.3mを基準に考えると, 最終避難場所としては, 建物階数で3階以上を確保する必要がある。

津波による被災者数と最終避難場所毎の避難者数を

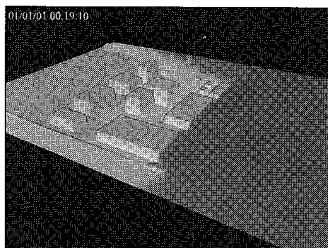


図-7 津波遡上解析結果 (遠景, 地震発生19分10秒後)

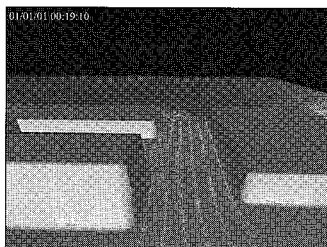


図-8 津波遡上解析結果 (近景, 地震発生19分10秒後)

表-3に, 最終避難場所に到達した避難者数の時刻歴変化を図-11に, 避難行動の予測結果の例を図-12, 図-13に示す。敷地内の最終避難場所が1箇所の場合, 避難場所から最も遠い工場Cの避難者が最終避難場所へ避難する途中で敷地内に津波が遡上するため, 地震発生10分後に避難した場合 (Case-1) では, 事務所棟周辺の敷地内通路で174名が被災する (図-12)。最終避難場所1箇所での地震後の避難開始時間を5分とした場合は, 被災者数を大幅に低減することができるものの, 避難開始から終了するまでの間に15分程度の時間を要するため, 25名が被災し, 避難者の安全性は必ずしも確保できないことがわかる。

一方, 最終避難場所を2箇所とした場合, 工場Dが敷地中央に配置されているため, 施設全体として避難者が最終避難場所まで移動する時間が短くなり, 避難を開始してから10分以内に避難を完了できる。こうした傾

表-3 ケース毎の被災者数, 最終避難者数

ケース名	被災者数 [人]	最終避難者数[人]	
		事務所棟3階	工場D3階
Case-1	174	426	—
Case-2	25	575	—
Case-3	3	234	363
Case-4	0	234	366

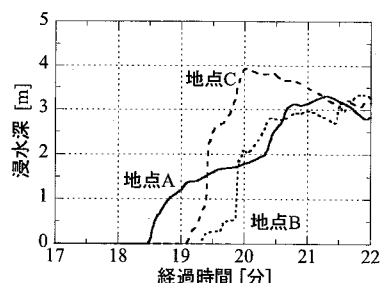


図-9 津波遡上時の浸水深の時刻歴変化

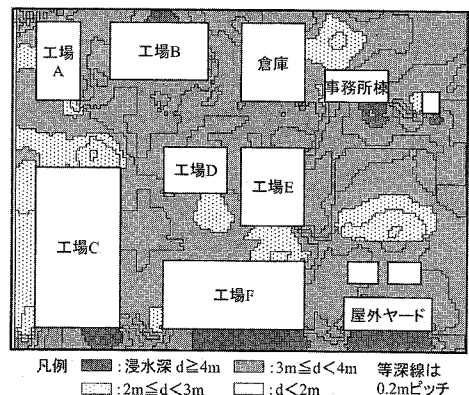


図-10 津波による敷地内の最大浸水深の分布

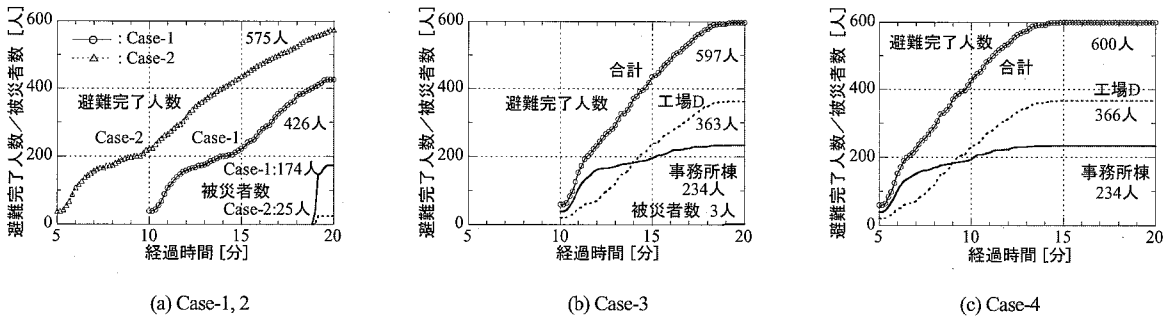


図-11 ケーススタディによる避難者数、被災者数の時刻歴変化

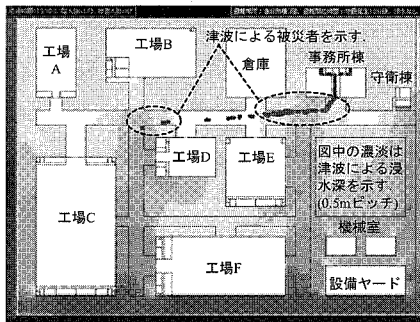


図-12 避難行動予測結果の例 (Case-1:地震発生19分10秒後)

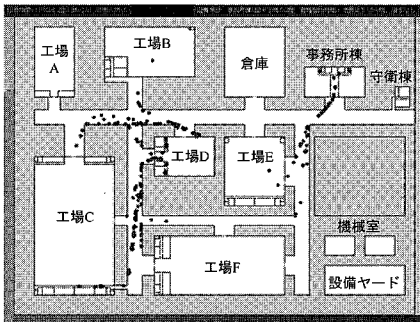


図-13 避難行動予測結果の例 (Case-3:地震発生13分後)

向は、図-13において、工場B、C、F等の事務所棟から離れた建物の避難者が、工場Dに向かって避難する状況からも推察される。従って、避難開始が地震発生10分後であっても被災者数を174名から3名に大幅に減らすことができ、さらに地震発生5分後に避難を開始すれば、津波が到達する前に全員の避難が完了できる。各々の避難場所への避難者数を比較すると(表-3)、全員が安全に避難できたCase-4では、事務所棟234名に対して工場Dが366名であり、敷地中央に配置された工場Dの方が、事務所棟よりも避難場所として有効に利用されていることがわかる。

以上の結果から、津波による避難安全性は、最終避難場所の配置や避難誘導による避難開始のタイミング等の防災対策の違いが大きな影響を与えることがわかる。

4. ま と め

個々の建物の配置・形状、建物内の空間構成および避難者の行動特性を考慮した詳細な避難行動予測手法を開発し、津波の遡上解析モデルと連結することにより、従来予測が困難であった街区レベルでの精緻な津波避難行動の予測が可能となった。本モデルにより、避難場所の設置や地震後の避難行動の開始時間などを含めて、人的被害を最小限に抑えるための実効性の高い施設設備計画、避難行動計画の策定が可能になる。

謝辞：避難行動モデルの開発に当たっては、東京大学の関沢愛教授、東京理科大学の海老原学講師、(株)デジタルネットワークの大脇厚博士にご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 海老原学・掛川秀史(1995)：オブジェクト指向に基づく避難・介助行動シミュレーションモデル，日本建築学会計画系論文集，第467号，pp. 1-12.
- 掛川秀史・海老原学・関沢愛・野竹宏彰・大脇厚(2006)：階段内歩行のモデル化による全館避難の検討，平成18年度日本火災学会研究発表会概要集，pp. 482-485.
- 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.
- 田村保・西畑剛・森屋陽一・瀧本浩一・三浦房紀(2005)：街路閉塞を考慮した津波浸水時の避難シミュレーション手法の適用，海岸工学論文集，第52巻，pp. 1286-1290.
- 中央防災会議(2003)：東南海、南海地震等に関する専門調査会(第16回)資料3 東南海、南海地震の強震動と津波の高さ(案)および参考資料2津波の計算手法，<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/index.html>.
- 戸川喜久二(1955)：群集流の観測に基づく避難施設の研究，建築研究報告，No. 14.
- 日本建築学会編(2003)：建築設計資料集成[人間]編，丸善.
- Takegawa, S., Y. Yashiro and M. Ebihara (1996)：Life safety evaluation of large populations with mixed-abilities, 13th joint panel meeting of UJNR panel on fire research and safety, pp. 27-34.