

地震火災と津波の複合リスクを考慮した 避難性状予測に関する基礎的検討

西野 智研^{1*}

¹ 工学研究科建築学専攻

キーワード： 人的被害、延焼モデル、避難モデル、南海トラフ巨大地震

地震火災と津波の複合リスクを考慮した避難性状の予測手法の検討を行った。ここでは、筆者により開発されてきた地震火災延焼性状・避難性状の統合予測モデルに、津波避難に関するサブモデルを追加することで、両リスクに対応可能な予測モデルへと改良した。改良した予測モデルを南海トラフ巨大地震に適用し、神戸市長田区における人的被害の可能性について分析した。計算にあたっては、出火や気象といった与条件の不確定性を考慮することで 200 通りのシナリオを想定し、火災と津波による死亡者数を、避難開始時間を 10～70 分に変化させることで試算した。その結果、火災死亡者数の平均は 10.9～16.6 人となったものの、最大値は 683～1172 人となり、避難開始時間が早くとも、火災による大規模な人的被害の可能性が存在する結果となった。一方、津波死亡者数の平均は 1.5～172.2 人、最大値は 65～1317 人となり、避難開始時間が 40 分より遅いと、津波による影響が顕著になる結果が得られた。また、計算結果を時系列に可視化したことで、津波浸水が懸念される沿岸部の密集市街地に特有の避難リスクを明らかにした。

1. はじめに

南海トラフの巨大地震により、人口の集中する都市部においても、津波が市街地に氾濫する危険性が指摘されている¹⁾。しかし、海溝型の地震であっても、都市部に伝播する地震動が強ければ、津波の襲来以前に複数の火災が発生し、その一部が延焼火災に発展する可能性がある。この場合、避難者は延焼火災を避けながら高台等の避難場所に向かって移動することになるが、有効な避難計画の立案には、このような地震火災と津波のリスクが複合する場合の避難性状について、合理的な予測が行える必要がある。

これまでに、避難計画の立案を目的とした避難性状予測に関する取り組みは、いくつかなされている²⁻⁹⁾。しかし、これらの殆どは、地震火災と津波のどちらか一方を対象に、避難者の時系列の行動を予測可能な手法の開発を試みたもので、両者のリスクが複合する場合の予測手法については、依然として存在しない状態にある。

そこで本研究では、地震火災と津波の複合リスクを考慮した避難性状の予測手法の開発を目的とする。本稿では、筆者により開発されてきた地震火災延焼性状・避難性状の統合予測モデル^{2,10,11)}に、津波避難に関するサブモデルを追加することで、両リスクに対応可能な予測モデルへと改良した。また、改良した予測モデルを南海トラフ巨大地震に適用し、内閣府による地震動と津波の被害想定データ¹⁾を与条件とした計算を行うことで、神戸市長田区における人的被害の可能性について分析した。

2. 地震火災と津波の複合リスクを 考慮した避難性状予測モデル

地震火災と津波の複合リスクを考慮した避難性状予測モデルの概念を図 1 に示す。ここでは、避難者の移動方向の予測にポテンシャルの概念を導入し、道路ネットワークを移動する一人一人の避難者（エージェント）を時系列に追跡することで、市街地全体での避難性状の予測に繋げる。ここで言うポテンシャルの概念とは、延焼火災や避難場所といった避難者の移動方向を左右する複数の要因の影響を、市街地に分布する経時的なポテンシャルとして定量化することで、水が高い所から低い所に向かって流れるように、避難者もポテンシャルの高い所から低い所に向かって移動すると考えるものである。こうした考え方は、筆者がこれまでに開発してきた避難モデル²⁾のそれを踏襲するものであり、既存のモデルに改良を加えることで、津波を考慮した避難性状予測手法へと発展させる。

2.1 熱気流と高台を考慮したポテンシャル

延焼火災を避けながら高台等の避難場所に向かうという避難者の動きを表現するには、まず、ポテンシャルをモデル化する必要がある。ここでは、避難者の移動方向を左右する要因として、

(I) 燃焼建物からの輻射と熱気流

(II) 高台等の避難場所

の二つを定義し、これらの影響を次の式で合成することで、市街地の任意の地点に分布し、一人一人の避難者の移動方向を決

定するポテンシャル Φ を与える。

$$\Phi = \gamma_F (\dot{q}'' + h\Delta T) + \gamma_P l \quad (1)$$

ここに、 $\dot{q}''$ はある地点に入射する火災からの輻射熱流束、 ΔT はある地点が曝される熱気流の温度上昇、 h は対流熱伝達率、 l はある地点から避難者の目的地（避難場所）までの道路に沿った最短距離、 γ_F は熱流束をポテンシャルに換算する係数、 γ_P は距離をポテンシャルに換算する係数である。ただし、変換係数については、関東大震災（1923）における火災死者数を良好に再現する値として、 γ_F に $11.0 [\text{m}^2/\text{kW}]$ 、 γ_P に $1.0 [\text{m}^1]$ を得ている²⁾。また、本モデルでは、市街地の道路ネットワークを避難者が移動可能な経路として扱うため、ポテンシャル Φ の計算は、道路ネットワークを構成する交差点について行うことで、計算を簡略化できる。

式(1)の計算に必要な輻射熱流束と熱気流による温度上昇は、市街地火災の物理的延焼性状予測モデル^{10,11)}により計算される燃焼領域の時間変化を基に求める。このモデルでは、市街地火災を一棟一棟の建物火災の集合とみなし、他の建物火災による熱的影響下での個々の建物火災の性状を予測することで、市街地全体での延焼火災の予測に繋げる。

2.2 火災と津波に起因する避難の開始

避難の開始を予測するにあたっては、その条件を火災に起因するものと津波に起因するものに分けてモデル化し、どちらか一方の条件が満たされた場合に、避難が始まるものとする。

市街地火災の場合、住民は家財の搬出や消火活動といった財産への固執によって、火災が迫る寸前まで避難を開始しないことがある。そこで、避難者に入射する火災からの輻射熱流束 $\dot{q}''$ 、または、避難者が曝される熱気流の温度上昇 ΔT が次の条件を満たした場合に、火災に起因する避難が始まるものと仮定する。

$$\dot{q}'' \geq \dot{q}_{cr}'' \quad \text{または} \quad \Delta T \geq \Delta T_{cr} \quad (2)$$

ここに、 $\dot{q}_{cr}''$ と ΔT_{cr} は避難が始まる限界熱流束と温度上昇であ

り、輻射および高温環境における人間の耐容限界に関する実験結果^{12,13)}を基に、 $\dot{q}_{cr}''$ は $2.0 [\text{kW}/\text{m}^2]$ 、 ΔT_{cr} は $5.0 [\text{K}]$ を与える。

津波の場合、主に、津波警報といった避難指示を取得することで避難が始まるものと考えられるが、これに関するモデル化は難しい。そこで本モデルでは、津波に起因して避難を開始する時間を避難者によらず一律に与える（全ての避難者は同じ時間に一斉に避難を始める）ものとし、避難開始の遅れが避難の成否に与える影響を分析できるようにする。

2.3 避難者密度と歩行能力を考慮した移動速度

道路を移動する避難者の歩行速度は、周囲の歩行者密度が小さい場合には、周りの歩行者からの影響を受けないが、密度が増加するにつれて周囲の歩行者による制約を受けるため、歩行速度は低下する。ここでは、避難者間で働く相互作用といった微視的な歩行性状を無視し、歩行者密度と歩行速度の巨視的な関係を表す密度速度式を利用することで、一人一人の避難者の移動速度を予測する。

この密度速度式を利用するにあたっては、避難者の歩行能力の違いを考慮する。ここでは、簡単のため、標準的な歩行能力を有する避難者と歩行能力に衰えがある避難者を考え、両者に対応した二種類の密度速度式を用意することで、歩行能力の違いを考慮した移動速度の予測を行う。

標準的な避難者の移動速度 v_1 は、各道路の避難者密度が一樣であると仮定し、戸川による密度速度式¹⁴⁾を基に、自由歩行と群集歩行の異なる状態を考慮した次の式で計算する。

$$v_1 = \min \left(1.0, \frac{1.5}{\rho} \right) \quad (3)$$

ここに、 ρ は任意の道路における避難者密度である。一方、歩行能力に衰えがある避難者の移動速度 v_2 については、老人、視覚障害者、車いす利用者を対象にした住宅団地での歩行実験結果¹⁵⁾を基に、標準的な歩行者の移動速度を半減させた次の式で予測する。

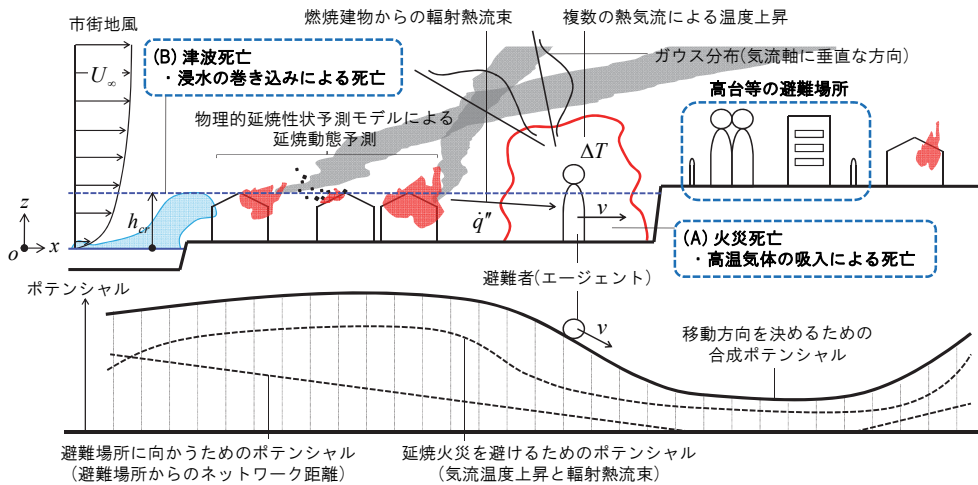


図1 地震火災と津波の複合リスクを考慮した避難性状予測モデルの概念図

$$v_2 = \min\left(0.5, \frac{0.75}{\rho}\right) \quad (4)$$

なお、避難者密度 ρ は、歩行能力に関わらず、各道路に流入・流出する避難者の数を時間ステップごとにカウントし、それを道路の面積で除することによって求められる。

2.4 ポテンシャルに基づく経路選択と経路の容量

交差点に到達した避難者は、そこに接続される道路の中から経路を選択し、それを繰り返しながら移動する。避難者は道路ネットワークに分布するポテンシャルの降下方向へと移動するが、ポテンシャルの降下勾配が大きい道路ほど、避難経路として選択される可能性が高いものとする。ここでは、避難者がいる交差点を i 、それに隣接する交差点を j として、道路 ij が選択される確率 p_{ij} を次のように与える。

$$p_{ij} = \frac{\Phi_i - \Phi_j}{\sum_{j=1}^m (\Phi_i - \Phi_j)} \quad (\Phi_i - \Phi_j > 0) \quad (5)$$

ここに、 m はポテンシャルの降下方向にある交差点の数である。ただし、行く手にある道路が避難者で混雑していることで、その道路に侵入できない場合を考慮し、式 (5) で選択された道路 ij の避難者密度 ρ_{ij} が 4.0 人/m^2 を超える場合には、その道路に侵入できないものと仮定し、次の時間ステップにおいて、再び式 (5) による経路選択を行うものとする。

2.5 火災と津波に起因する死亡

避難場所に逃げ込むことができた避難者は、その時点で避難を完了するものとし、以降の計算は行わない。ただし、避難場所に逃げ込むまでの間に、火災や津波による死亡条件が満たされた場合には、その時点で避難不能になるものとする。

火災による避難者の死亡を予測するにあたっては、高温気体の吸入による気道熱傷をその要因と考え、熱気流の温度上昇を用いた気体温度と時間で定まる次の条件が満たされた場合に、火災による死亡が生じるものと仮定する²⁾。

$$\int_t (T_\infty + \Delta T - 313)^{0.725} dt \geq 10808.0 \quad (6)$$

ここに、 T_∞ は外気温、 t は時間である。

津波による避難者の死亡を予測するにあたっては、津波の浸水深さによらず、避難者が浸水範囲に含まれた時点で、津波による死亡が生じるものと仮定する。ここでは、簡単のため、市街地への浸水がある時点で瞬間的に生じるものと仮定し、沿岸部に到達する津波高さより低地にある部分を浸水範囲として、津波による死亡を次式で予測する。

$$z \leq h_{cr} \quad (t \geq t_{cr}) \quad (7)$$

ここに、 z は避難者がいる地点の標高、 h_{cr} は沿岸部に到達する津波高さ、 t_{cr} は沿岸部に津波が到達する時間である。

3. 南海トラフ巨大地震への適用による神戸市長田区の人的被害の試算

ここでは、これまでに検討した避難性予測モデルを神戸市長田区に適用し、南海トラフ巨大地震に伴う人的被害の可能性

について分析する。内閣府¹⁾によると、長田区における最大クラスの計測震度は 6 弱、津波の到達時間と高さは地震から 86 分後に 3m と推定されている。

3.1 計算条件

(1) 市街地データ

本計算では、一棟一棟の建物の形状や階数といった情報を (株) ゼンリンにより整備される住宅地図 (ZmapTOWN II) から取得した。ただし、延焼火災の予測で重要な構造種別については、データが整備されていないため、ここでは、用途と階数から、構造種別を普通建物・堅牢建物の二種類として、便宜的に推定することとした。また、市街地の地形を数値地図 50m メッシュ (標高) から、避難者の経路となる道路ネットワークを数値地図 2500 から構築した。

(2) 計算シナリオ

図 2 に、計算シナリオを作成するにあたって考慮する確定要因と不確定要因の関係を示す。計算にあたっては、(1) 地震動と (2) 津波の二つを確定要因、(3) 地震の発生時期、(4) 建物倒壊、(5) 出火、(6) 気象、(7) 人口分布の五つを不確定要因と定義し、これらの組み合わせから成る 200 通りのシナリオ (地震から 3 時間分) を考慮する。

<地震動と津波>

地震動と津波については、内閣府¹⁾ による被害想定データから最大クラスの計測震度 (250m メッシュ) と津波到達時間・高さを設定する。

<地震の発生時期>

地震の発生時期については、月・日・時刻によらず一律の確率で発生するものと仮定し、月・日・時刻を各シナリオで無作為に設定する。

<建物倒壊>

建物倒壊については、兵庫県南部地震 (1995) における西宮市の建物被害データを基に回帰された次の被害率関数¹⁶⁾ を用いることとし、地震動を入力変数とすることで一棟一棟の建物の全壊率 p_D を予測し、全壊の有無を判別する。

$$p_D = \Phi\left(\frac{I - \lambda}{\zeta}\right) \quad (8)$$

ここに、 Φ は標準正規分布の累積分布関数、 I は計測震度、 λ は平均、 ζ は標準偏差である。ただし、本計算で利用する建物

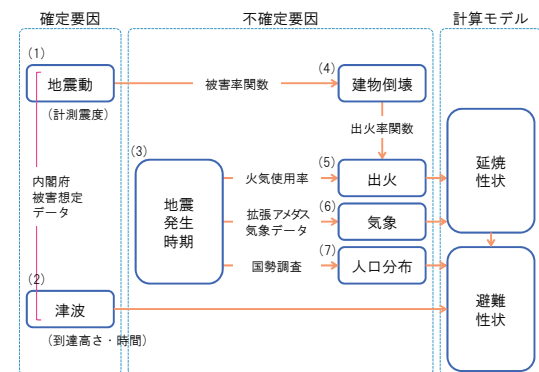


図 2 計算シナリオで考慮する確定要因と不確定要因

データには、全壊率を予測する上で重要な建築年代が含まれていない。そこで、安全側の予測となるよう、普通建物については、1951 年以前の木造建物の被害データに基づくパラメータ $\lambda = 5.71$ 、 $\zeta = 0.562$ を、堅牢建物については、1971 年以前の鉄筋コンクリート造建物の被害データに基づくパラメータ $\lambda = 6.72$ 、 $\zeta = 0.821$ を与えることとした¹⁶⁾。

<出火>

出火については、ある建物で出火が起こる確率 p_I が、建物の全壊率 p_D との関係で与えられるものと仮定し、兵庫県南部地震における地震から3 時間の出火データ¹⁷⁾を基に回帰された次の式で予測する。

$$p_I = \alpha \cdot 0.000488 p_D^{0.58452} \quad (9)$$

ここに、 α は火気使用率であり、地震の発生季節と時刻により変化する。

<気象>

熱気流の性状を予測する上で重要な市街地風の風速と風向は、1981 年から1995 年までの各地域の気象台およびAMeDAS による観測結果を標準年に拡張したデータ¹⁸⁾を用いることとし、無作為に選ばれた地震の発生月、日、時間から、過去の観測履歴を参照することで、風速・風向のペアデータを時間ステップごとに設定する。

<人口分布>

避難性状の予測で重要な人口分布については、町丁目単位で

値を与えることとし、各避難者の初期位置は町丁目にある道路上に設定する。標準的な避難者については、23 時から5 時の人口に国勢調査から得られる夜間人口を、9 時から17 時の人口に昼間人口(夜間人口に昼夜間人口比率を掛けたもの)を設定し、それらの間は線形補間することで、地震の発生時刻で異なる人口分布を考慮する。歩行能力の低い避難者の人数については、高齢者台帳に掲載の単身または二人世帯の者、および、障害者手帳の交付者とし、人数の時間変化は考慮しない。

(3) 避難開始時間と避難先

津波に起因する避難の開始時間(一斉避難の開始時間)は、開始時間の遅れが避難の成否に与える影響を分析することを目的として、地震から10 分間隔で7 条件に変化させた。また、避難者の目的地(計算上の避難場所)は、市街地全体でのマクロな避難ルールの検討に繋げることを目的として、学校区ごとに一つの目的地を設定することとした。設定した学校区ごとの目的地は表1 に整理してある。ここでの目的地は、広域避難場所および指定避難所を中心に選定しており、津波の到達高さより高所では学校区内のものを、低地では津波到達高さより高所で最寄りのものを基本とした。避難場所の収容可能人数は、一人の避難者に必要な面積を2m²として、有効面積を除することで設定し、満員となった避難場所には入れないものとした。

3.2 計算結果と考察

表1 に、200 シナリオの計算により得られた結果の概要を示す。ここでは、長田区を構成する学校区ごとに結果を整理し、「属性」に関する項目として、建物数、世帯数、夜間人口、避

表1 200 シナリオ(地震から3 時間分)の計算により得られた結果の概要

ID	学校区	属性		全壊建物数		出火件数		延焼建物数		死亡者数(40 分避難)					
		建物数	世帯数	夜間人口	避難先	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	1/100 棟延焼率 ^{*1}	平均	標準偏差	死亡者発生率 ^{*2}
ア	真陽	2238	3394	6518	若松公園周辺	219.6	14.3	0.49	0.73	63.9	129.0	0.28	3.5	17.8	0.140
イ	丸山	4682	4857	11618	丸山小学校	210.5	13.7	0.31	0.58	6.4	17.9	0.05	2.8	38.9	0.005
ウ	長田小	2359	3187	7147	長田小学校	160.6	10.9	0.27	0.54	11.7	33.8	0.12	0.4	3.6	0.010
エ	会陽	523	514	1049	室内小学校	35.4	6.2	0.05	0.22	2.1	12.9	0.04	0.0	0.0	0.000
オ	若松	628	1934	3915	若松公園周辺	63.8	7.1	0.32	0.59	5.9	18.4	0.12	0.0	0.0	0.000
カ	真野	2448	1850	3751	長田中学校	189.2	13.0	0.17	0.43	17.2	63.7	0.09	6.2	44.6	0.050
キ	五箇池小	2247	3166	6611	五箇池小学校	267.3	15.5	0.34	0.57	19.8	48.8	0.19	0.5	6.6	0.010
ク	重池	793	1672	3385	夢野台高校	53.9	6.7	0.17	0.46	3.8	14.1	0.09	0.0	0.0	0.000
ケ	池田	2393	2962	6606	西代蓮池公園	271.6	16.1	0.38	0.58	23.3	53.3	0.20	0.0	0.1	0.005
コ	名倉	1901	3316	6800	名倉小学校	116.0	9.8	0.34	0.61	13.5	33.7	0.16	0.6	8.8	0.005
サ	長楽	1840	1757	3709	若松公園周辺	212.7	13.9	0.26	0.60	33.7	72.5	0.22	3.3	22.1	0.100
シ	二葉	2169	2891	5951	若松公園周辺	265.2	15.8	0.31	0.56	73.3	149.0	0.26	18.4	99.2	0.140
ス	番町	723	2394	4343	長田公民館	46.9	6.7	0.28	0.51	3.9	12.4	0.10	0.0	0.0	0.000
セ	志里池北	1089	884	1856	長田中学校	97.8	9.7	0.07	0.26	3.1	16.8	0.04	0.0	0.0	0.000
ソ	長田白山	1990	2922	6447	蓮池小グラウンド	235.9	15.2	0.34	0.60	13.5	35.4	0.15	0.4	5.2	0.005
タ	野田北	612	835	1836	若松公園周辺	49.6	6.6	0.08	0.26	3.5	16.5	0.05	0.0	0.0	0.000
チ	宮川	1810	2574	5733	宮川小学校	106.8	10.3	0.28	0.51	8.9	27.9	0.10	0.0	0.0	0.000
ツ	新長田北	1498	3881	7938	西代蓮池公園	107.9	9.8	0.56	0.76	1.8	4.2	0.03	0.0	0.0	0.000
テ	みすが	639	1572	2972	御蔵小学校	32.2	5.6	0.17	0.42	2.0	9.6	0.06	0.0	0.1	0.005
ト	御蔵	388	780	1586	神楽公園	21.3	4.8	0.12	0.35	0.6	2.3	0.05	0.0	0.0	0.000
ナ	未組織	513	882	1790	名倉小学校	25.4	4.8	0.08	0.29	1.9	12.7	0.05	2.5	34.7	0.005
合計		33483	48224	101561		2893.7	54.9	5.40	3.02	313.7	261.3		38.5	135.3	

*1 学校区の建物のうち、1/100 が類焼したシナリオの発生率。 *2 学校区の住民のうち、死亡者が発生したシナリオの発生率。

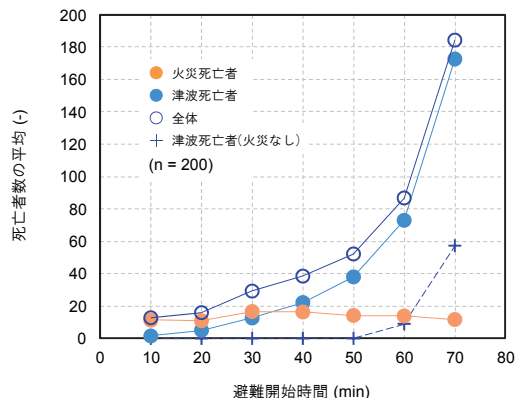


図3 市街地全体での死亡者数の平均

難先の四項目を、「全壊建物数」「出火件数」に関する項目として、それぞれの平均と標準偏差を、「延焼建物数」に関する項目として、平均、標準偏差、1/100 棟延焼率の三項目を、避難開始時間を40分とした場合の「死亡者数」に関する項目として、平均、標準偏差、死亡者発生率の三項目を挙げた。また、市街地全体での結果についても整理してある。ただし、ここでの1/100 棟延焼率とは、各学区の建物のうち1/100 が類焼したシナリオの発生回数を全シナリオ数(200)で除した値を、死亡者発生率とは、各学区の住民のうち死亡者が発生したシナリオの発生回数を全シナリオ数(200)で除した値を意味する。

(1) 延焼火災による建物被害

人的被害の可能性を分析するに先立ち、その原因となる火災の予測結果の性格を見ておく。地震から3時間が経過した時点で火災に巻き込まれた建物数(延焼建物数)の平均は313.7、標準偏差は261.3と推定された。市街地全体での出火件数の平均は5.40、標準偏差は3.02であり、これらの値は延焼建物数に一定の影響を与えているものと考えられる。出火率を説明する全壊率が安全側の予測であることを考えると、ここで得られた延焼建物数も同様の予測となっている可能性がある。各学区で推定された1/100 棟延焼率は、各地域の大規模火災の発生率を表している。計算結果を見ると、「真陽」「二葉」「長楽」といった学区で値が大きい。これは、兵庫県南部地震の被害を免れた密集市街地の存在により、火災が大規模化しやすいことを表している。一方で、1/100 棟延焼率が最も低い「新長田北」では、兵庫県南部地震後の大火を受けて市街地の不燃化が進んだ地域であり、その効果が計算結果にも表れている。

(2) 市街地全体での人的被害のリスク

200 シナリオの計算により得られた市街地全体の死亡者数の平均を図3に、最大値を図4に示す。ここでは、死亡者に関する値をその要因別、避難開始時間別に示してある。なお、延焼火災を考慮せず、津波避難のみの計算を行った結果を、点線で示した。図3を見ると、火災死亡者数の平均は10.9~16.6人となり、避難開始時間によらず概ね一定の値をとる結果となった。一方、津波死亡者数の平均は1.5~172.7人となり、避難の開始が遅れるにつれて、津波に巻き込まれる人数も増加する結果となった。特に、避難を開始する時間が40分より遅れると、火災死亡者数と津波死亡者数が逆転し、津波による影響が顕著になることが分かる。なお、延焼火災を考慮せず津波避難のみを考

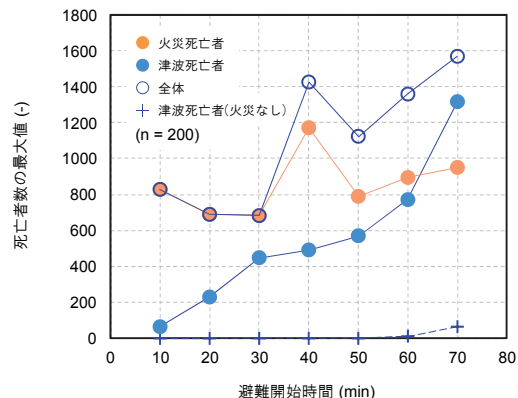


図4 市街地全体での死亡者数の最大値

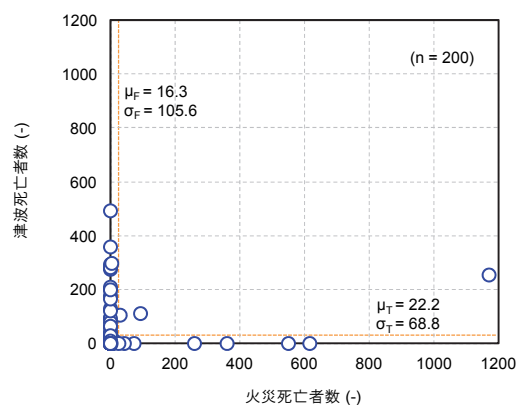


図5 死亡者数のばらつき (40分避難)

えると、60分以降の避難開始で死亡者が発生する結果となったが、その平均は9.0~57.3人であった。これらの傾向は、死亡者数の最大値(図4)にも表れており、火災死亡者数の最大値は683~1172人と、避難開始時間が早くとも火災による大規模な人的被害の可能性が存在することが分かる。一方、津波死亡者数の最大値は65~1317人となり、概ね右上がりの関係にある。なお、津波避難のみを考えた場合の最大値は、12~65人となった。延焼火災を考慮する場合としない場合では、市街地全体での死亡者の数に顕著な差がある。このことは、延焼火災が津波避難の重大な障害となる可能性を示唆している。

ここで、避難開始時間を40分とした条件に着目し、各シナリオで予測された火災死亡者数と津波死亡者数の関係を示せば、図5のようになる。これを見ると、プロットの多くが左下に集まっており、平均的には、火災死亡者も津波死亡者も数十人の規模であることが分かる。一方で、大規模な死亡者が発生するシナリオとして、(A) 津波による死亡者は殆ど発生しないが、火災により大人数が死亡するシナリオ、(B) 火災による死亡者は殆ど発生しないが、津波により大人数が死亡するシナリオ、(C) 両者の複合により大人数が死亡するシナリオの三種類が存在し、これらに相当するシナリオの数も少なくない。

(3) 大規模な人的被害の要因パターン

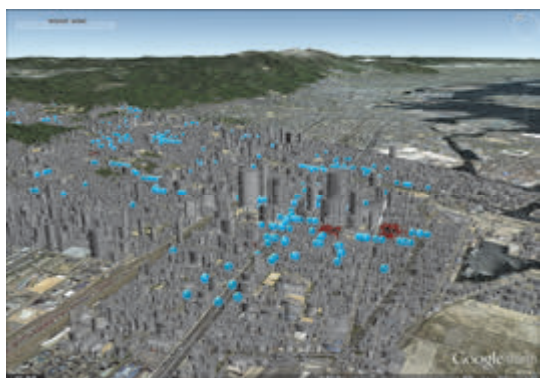
このような大規模な人的被害の要因を分析するため、火災と津波の複合により大人数が死亡するシナリオ(図5右端のプロ



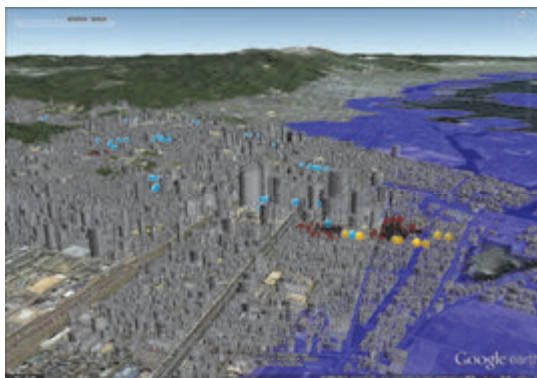
(1) 地震から 40 分後



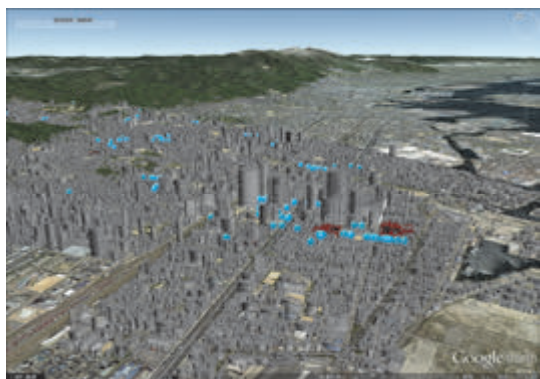
(5) 地震から 80 分後



(2) 地震から 50 分後



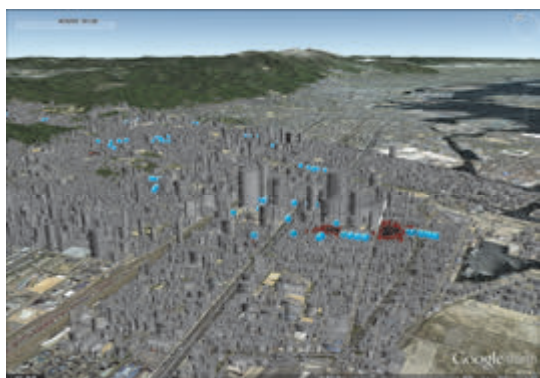
(6) 地震から 90 分後



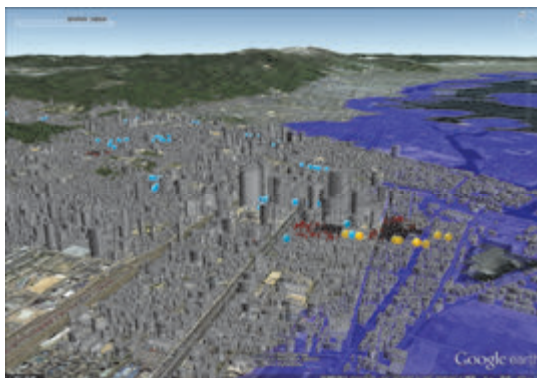
(3) 地震から 60 分後



(7) 地震から 100 分後



(4) 地震から 70 分後



(8) 地震から 110 分後

図6 計算結果の可視化例 (40 分避難) (赤：延焼火災, 紫：津波浸水範囲, 青丸：避難者, 黄丸：死亡者)

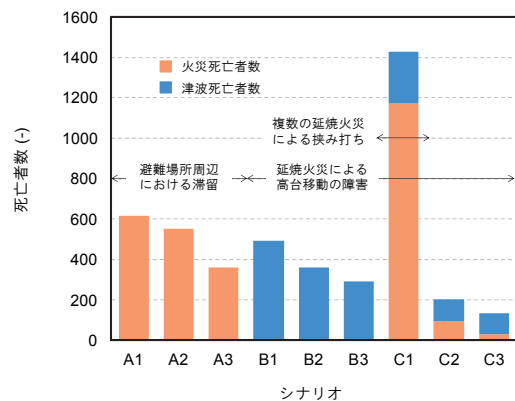


図7 下位シナリオの人的被害要因パターン (40分避難)

ット)に着目し、計算された避難の全体像を可視化すると、図6のようになる。ここでは、地震後40分から110分の計算結果を示しており、火災建物を赤色、焼失建物を黒色、津波浸水範囲を紫色、避難者を青色、死亡者を黄色で表してある。なお、可視化の対象とした避難者は、予め、30人に1人の割合で無作為に抽出し、避難場所に逃げ込んだ避難者は、それ以降可視化の対象から除いた。このシナリオでは、全体で7件の出火が発生し、その一部が沿岸部に近い密集市街地で発生したことで、火災が大規模化する結果となった。地震から40分後には、市街地全体で避難が始まり、多くの避難者が避難場所に向かって移動した結果、満員となった避難場所の周辺で避難者が滞留している様子が分かる。避難が落ち着く70分、80分の時点でも、沿岸部に近い所では、二か所で拡大を続ける延焼火災に行く手を遮られ、迂回できずに高台への移動が遅れている避難者が存在する。こうした避難者は、86分に襲来した高さ3mの津波に巻き込まれ、死亡する結果となった。さらに、二か所の延焼火災に挟まれた所では、火災による死亡者が発生しており、近接する大規模火災が避難者の迂回をより困難にした可能性が考えられる。

ここで、(A) 火災により大人数が死亡するシナリオ、(B) 津波により大人数が死亡するシナリオ、(C) 両者の複合により大人数が死亡するシナリオについて、それぞれの死亡者数の下位三シナリオを抽出し、計算結果の可視化より把握できた人的被害の要因パターンを整理すると、図7のようになる。これによると、人的被害の要因パターンは、(1) 満員となった避難場所の周辺で滞留しているうちに延焼火災が接近し死亡する[A1～A3]；(2) 延焼火災に高台への移動を阻まれているうちに津波に巻き込まれる[B1～B3, C1～C3]；(3) 近接する複数の延焼火災に挟まれ死亡する[C1]、の組み合わせから成る。

(4) 地震火災と津波による負の相乗効果

図8に、学校区ごとに得られた1/100棟延焼率(大火の発生率)と死亡者発生率の関係を示す。津波の浸水を受けない高所の学校区(海岸に隣接しない学校区)を見ると、大規模な火災が発生する可能性にはばらつきがあるものの、死亡者が発生する可能性はいずれも低い範囲に集まっていることが分かる。一方、津波の浸水を受ける沿岸の学校区では、密集市街地の存在により大火の可能性が高いとは言え、死亡者の発生率は高所の学校区と比較してかなり大きい。これは、地震火災と津波が複

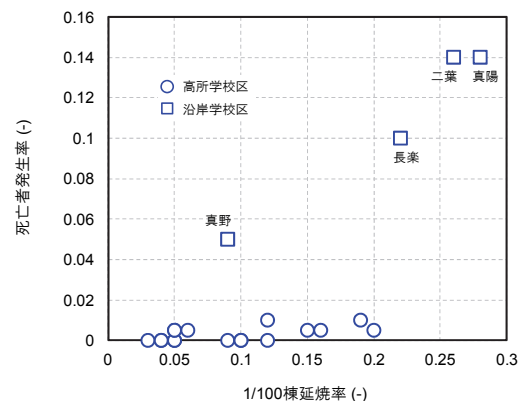


図8 学校区の大火と死亡者の発生率の関係 (40分避難)

合することで、相乗的に避難上のリスクが増加することを意味している。

4. まとめ

地震火災と津波の複合リスクを考慮した避難性状の予測手法の基礎的な検討を行った。ここでは、筆者により開発されてきた地震火災延焼性状・避難性状の統合予測モデルに、津波避難に関するサブモデルを追加することで、両リスクに対応可能な予測モデルへと改良した。

改良した予測モデルを南海トラフ巨大地震に適用し、神戸市長田区における人的被害の可能性について分析した。計算にあたっては、出火や気象といった与条件の不確定性を考慮することで200通りのシナリオを想定し、火災と津波による死亡者数を、避難開始時間を10～70分に変化させることで試算した。その結果、火災死亡者数の平均は10.9～16.6人となったものの、最大値は683～1172人となり、避難開始時間が早くとも、火災による大規模な人的被害の可能性が存在する結果が得られた。一方、津波死亡者数の平均は1.5～172.2人、最大値は65～1317人となり、避難開始時間が40分より遅れると、津波による影響が顕著になる結果が得られた。

ただし、大規模な死亡者の発生要因については、計算結果を時系列に可視化したことで、(1) 延焼火災に高台への移動を阻まれているうちに津波に巻き込まれる、(2) 満員となった避難場所の周辺で滞留しているうちに延焼火災が接近し死亡する、(3) 近接する複数の延焼火災に挟まれ死亡する、といった要因パターンが得られたものの、死亡者が発生しにくい条件については、分析に至らなかった。今後は、こうした条件の分析を進めるとともに、人的被害を軽減可能な対策を立案し、その有効性を検証する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、神戸大学大学院工学研究科 山本翔子さん(修士2年)の協力を得た。また、神戸大学都市安全研究センター 北後明彦教授から、貴重なコメントを頂いた。ここに、感謝の意を表す。

References

- 1) 南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告），2012
- 2) T. Nishino, T. Tanaka and S. Tsuburaya; Development and Validation of a Potential-based Model for City Evacuation in Post-earthquake Fires, *Earthquake Spectra* (2013)
- 3) 西野智研, 田中孝義, 北後明彦; 市街地避難の性状を支配する不確定要因の影響を考慮した地震火災リスクの評価に関する基礎的検討, 日本建築学会計画系論文集, No.676, pp.1265-1274, 2012
- 4) 大佛俊泰, 守澤貴幸; 都市内滞留者・移動者の多様な状態と属性を考慮した大地震時における広域避難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, No.660, pp.389-396, 2011
- 5) 上田遼, 瀬尾和大, 元木健太郎; 道路閉塞・火災延焼被害を考慮した地震時における災害時要援護者救助シミュレーション, 地域安全学会論文集, No.8, pp.341-348, 2006
- 6) 片田敏孝, 桑沢敬行; 津波に関わる危機管理と防災教育のための津波災害総合シナリオ・シミュレータの開発, 土木学会論文集 D, Vol.62, No.3, pp.250-261, 2006
- 7) 小野祐輔, 清野純史, 金子愛; 人的被害低減を目的とした津波避難シミュレーション, 地域安全学会論文集, No.11, pp.363-368, 2009
- 8) 藤岡正樹, 石橋健一, 梶秀樹, 塚越功; 津波避難対策のマルチエージェントモデルによる評価, 日本建築学会計画系論文集, No.562, pp.231-236, 2002
- 9) 大畑大志郎, 高井伸雄, 鏡味洋史; 釧路市中心市街地における津波避難施設配置の評価, 日本建築学会計画系論文集, No.612, pp.87-91, 2007
- 10) 西野智研, 円谷信一, 樋本圭佑, 田中孝義; 準定常的な計算法を用いた都市火災延焼性状の簡易予測モデルの開発, 日本建築学会環境系論文集, No.647, pp.9-18, 2010
- 11) 西野智研, 樋本圭佑, 田中孝義; 住民による消火活動を考慮した飛び火現象の確率論的予測モデルの開発, 日本火災学会論文集, Vol.60, No.2, pp.1-10, 2010
- 12) 長谷見雄二, 重川希志依; 火災時における人間の耐放射限界について, 日本火災学会論文集, Vol.31, No.1, pp.7-14, 1981
- 13) 東京消防庁; 消防科学研究所報 31 号, pp.131-136, 1994
- 14) 戸川喜久二; 群集流の観測に基づく避難施設の研究, 建設省建築研究所建築研究報告, No.14, 1955
- 15) 足立啓, 小松和郎, 荒木兵一郎; 障害者を考慮した住宅団地の研究（その 1）歩行行動からみた障害の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）, pp.1233-1234, 1980
- 16) 山口直也, 山崎文雄; 西宮市の被災度調査結果に基づく建物被害関数の構築, 地域安全学会論文集, No.2, pp.129-138, 2000
- 17) 日本火災学会; 1995 年兵庫県南部地震における火災に関する調査報告書, pp.32-40, 1996
- 18) 日本建築学会; 拡張アメダス気象データ, 丸善, 2000

A Study on the Estimation of Urban Evacuation Dynamics Considering Multiple Risks of Post-earthquake Fire and Tsunami

Tomoaki NISHINO¹

¹*Graduate School of Engineering, Department of Architecture*

Key words: Human Damage, Urban Fire Spread Model, Urban Evacuation Model, Nankai Trough Earthquake

The author developed a prototype model for urban evacuation dynamics of residents considering multiple risks of post-earthquake fire and tsunami. This model is a modification of the existing model only for fire by incorporating the algorithm related to tsunami such as traveling toward higher ground and death by tsunami. The numerical simulation for Nagata district in Kobe city was carried out under two hundreds fire scenarios following the Nankai Trough Earthquake. As a result, the mean and the maximum of fatalities were obtained for each cause of fire and tsunami.