集積可燃物密度の不確定性に着目した 津波火災ハザードマップの推定手法

A METHOD FOR ESTIMATING TSUNAMI-INDUCED FIRE HAZARD MAP FOCUSING ON UNCERTAINTY OF ACCUMULATING COMBUSTIBLE DENSITY

西野 智 研*, 今 津 雄 吾**

Tomoaki NISHINO and Yugo IMAZU

We proposed a probabilistic method for evaluating a hazard map for tsunami-induced fire. Accumulating combustible density is visualized on the map, which represents the fire vulnerability of an arbitrary point. The density is evaluated on the basis of multiple accumulation scenarios and their occurrence probabilities using the existing model for the drift and accumulation of tsunami-driven combustible objects. The result from the application to the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami shows that the proposed method estimates the actual fire damage zone of Yamada town plausibly.

Keywords : *Tsunami-induced fire, Hazard map, Combustible density, Tsunami refuge building, Event tree, Monte Carlo simulation*

津波火災, ハザードマップ, 可燃物密度, 津波避難ビル, イベントツリー, モンテカルロ・シミュレーション

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震の後、陸上へ氾濫を引き起こす規模の津波に対しては、避難によって命を守る重要性が強く認識され、各地で津波避難計画の見直しが行われている。特に、高台への避難に時間を要する地域では、津波避難ビルや津波避難タワーの必要性が指摘されており、津波避難施設の整備は、高台への避難路の整備とあわせて、着実に進められてきた。

しかし、東北地方太平洋沖地震では、津波の浸水域で数多くの火災が発生し、その一部が大規模な延焼火災に発展した結果、全域で約67haが焼失した¹⁾。津波の浸水域で発生する火災は「津波火災」と呼ばれ、家屋や自動車など、津波に押し流された可燃物が、ガレキとなって浸水域に集積し、そこに何らかの要因で火が着いて、周辺のガレキに燃え広がることが多い²⁾。特に、津波からの一時避難場所となった建物が、津波火災によって類焼し、避難者が火災の危険に曝された事例³⁾⁴⁾や、津波火災が林野に延焼し、自然地形の高台が被害を受けた事例⁵⁾が報告されている。こうした事態は、津波避難施設や高台において考慮すべき新たな危険要因の存在を浮き彫りにしたが、現在の津波避難計画では、津波火災から避難者を保護するための対策は、ほとんど検討されていない。

津波火災によって被害を受けやすい場所とそうでない場所を、地図上に可視化したハザードマップがあれば、津波避難施設の配置や火災安全対策を合理的に検討できる可能性がある。筆者ら⁶⁾は、津波によって建物から流出する可燃物が、浸水域のどこにどの程度集積するのかを、物理的に予測するモデルの開発を行ってきた。この

モデルでは、津波氾濫流の流況を既知とし、流出可燃物に作用する力の釣り合いを時系列に解くことで、可燃物の位置を個別に追跡し、浸水域全体での可燃物の空間分布の評価につなげる。津波火災の被害範囲が可燃物の集積範囲と密接な関係にある点に着目すると、評価される集積可燃物量の空間分布は、津波火災ハザードマップの危険度指標として、簡単に要点をつかんでいる。しかし、集積可燃物量の空間分布は、津波や建物の被害といった複数の不確定条件に左右される。このため、予想される様々な集積シナリオとその生起確率を基に、集積可燃物量を確率論的に評価する手法が必要である。

そこで本研究では、既往のモデル⁶⁾を用いて、津波火災危険度の空間的ばらつきを、集積可燃物量に着目して確率論的に評価する手法の提案を目的とする。この手法による評価結果を、津波火災ハザードマップとして展開することで、津波避難施設の配置や指定要件の見直し、火災安全対策の検討に活用されることを目指す。

2. 本研究で活用する計算モデルの概要

2.1 可燃物の漂流・集積モデル⁶⁾

本研究で活用する可燃物の漂流・集積モデルは、近年の地震被害想定において、活用の実績のある津波数値解析^{注1)}と連携し、津波氾濫流の流況を既知とした物理的な定式化がなされている。このモデルでは、津波火災の燃え広がりに寄与する主要な可燃物として、建物から流出する可燃物に着目し、津波に流される個々の可燃物に作用する力の釣り合いを時系列に解くことで、可燃物の位置を個別に追跡する。力の釣り合いを記述する運動方程式については、回転

* 国立研究開発法人建築研究所 主任研究員・博士(工学)

** 清水建設㈱技術研究所 主任研究員・修士(工学)

Senior Research Engineer, Building Research Institute, Dr. Eng.

Senior Research Engineer, Institute of Technology, Shimizu Corp., M. Eng.

運動を無視し、水平方向の重心の並進運動のみを扱って、慣性、抗力、水流の圧力勾配、付加質量、残存建物との衝突力の5種類の作用を考慮した次の式で表す。

$$\underbrace{m_{d,i} \frac{\partial \mathbf{u}_{d,i}}{\partial t}}_{\text{慣性}} = \underbrace{\frac{1}{2} C_d \rho_w A_{d,i} (\mathbf{u}_{w,i} - \mathbf{u}_{d,i}) |\mathbf{u}_{w,i} - \mathbf{u}_{d,i}|}_{\text{抗力}} + \underbrace{\rho_w V_{d,i} \frac{\partial \mathbf{u}_{w,i}}{\partial t}}_{\text{水流の圧力勾配}} + \underbrace{\rho_w C_m V_{d,i} \left(\frac{\partial \mathbf{u}_{w,i}}{\partial t} - \frac{\partial \mathbf{u}_{d,i}}{\partial t} \right)}_{\text{付加質量}} - \underbrace{\phi_1 \phi_2 w_{d,i} m_{d,i} |\mathbf{u}_{d,i}|}_{\text{残存建物との衝突力}} \quad (1)$$

ここに、 i は可燃物の識別記号、 $m_{d,i}$ は可燃物の質量、 $\mathbf{u}_{d,i}$ は可燃物の速度、 $\mathbf{u}_{w,i}$ は水の速度、 ρ_w は水の密度、 $A_{d,i}$ は可燃物の水面下部分を流れ方向に投影した面積、 $V_{d,i}$ は可燃物の水面下部分の体積、 $w_{d,i}$ は可燃物の幅、 C_d は抗力係数、 C_m は付加質量係数、 ϕ_1 は定数、 ϕ_2 は残存建物の面積占有率、 t は時間である。

また、可燃物の位置 $\mathbf{X}_{d,i}$ は、力の釣り合いから定まる決定論的な位置と、水流の乱れに起因するそこからの不確定なずれ（拡散）の和であるとみなし、

$$\mathbf{X}_{d,i}^{(n+1)} = \underbrace{\mathbf{X}_{d,i}^{(n)} + \mathbf{u}_{d,i}^{(n)} \Delta t}_{\text{決定論的な位置}} + \underbrace{\frac{1}{2} \frac{\partial \mathbf{u}_{d,i}^{(n)}}{\partial t} \Delta t^2 + \sqrt{24 \kappa_{d,i} \Delta t} \left(\xi_i^{(n)} - \frac{1}{2} \right)}_{\text{不確定なずれ（拡散）}} \quad (2)$$

ここに、 n は現在の時間ステップ、 $n+1$ は次の時間ステップ、 $\kappa_{d,i}$ は拡散係数、 Δt は時間刻み、 ξ_i は0～1の一様乱数である。

集積可燃物量の評価にあたっては、津波に流される可燃物が移動を停止し、地面に漂着する条件が必要になる。ここでは、可燃物の底面が地面に接触した時点で、移動を停止するとみなし、周囲の水深が可燃物の浮遊に必要なそれ h_{cr} を下回った時点とする。

$$h_{cr} = (\rho_{d,i} / \rho_w) h_{d,i} \quad (3)$$

ここに、 $\rho_{d,i}$ は可燃物の密度、 $h_{d,i}$ は可燃物の厚さである。なお、可燃物が一度漂着しても、周囲の水深が浮遊に必要なそれを上回れば、移動が再開される。

図1 可燃物の流出モデルと建物の被害モードの関係

2.2 可燃物の流出モデル

可燃物の漂流・集積モデル⁶⁾を活用した評価では、建物から流出する可燃物の数や初期位置、寸法や質量を、入力条件として与える必要がある。本研究では、津波による建物の被害を、流失や全壊といった状態（被害モード）で定義し、可燃物の流出条件（流出モデル）と対応させることで、流出する可燃物の数や初期位置、寸法や質量を決定する。

図1に、被害モードと流出モデルの関係を示す。本研究では、国土交通省の建物被害区分⁷⁾に倣い、被害モードを、流失・大規模全壊・全壊・大規模半壊・半壊・一部損壊の6区分に分類する^{注2)}。ここでは、各被害モードに対応する流出モデルを、次のように仮定する。

(1) 流失

建物の1階については、津波によって構造が完全に破壊されると考え、形状・質量が一般的な棒状の可燃物となって流出する。この棒状の可燃物については、柱や梁といった構造材の代表的な寸法として、幅0.1m・奥行き2.4m・高さ0.1mを仮定し、代表的な樹種である杉の密度380kg/m³を用いて、質量を与える。

建物の2階から上については、構造を保持したまま流出すると考え、直方体状の単独の可燃物（一つの固まり）となって流出する。この直方体状の可燃物については、幅と奥行きに当該建物の建築面積の平方根 $\sqrt{A_f}$ を、高さに2階床面から屋根までの高さを仮定し、質量は、2階から上に収納・固定される可燃物の重量を与える。

(2) 大規模全壊・全壊・大規模半壊

柱や梁、外壁といった建物の主要構造は、津波に流されず、浸水階に収納される家具のみが流出すると考え、形状・質量が一般的な棒状の可燃物となって流出する。この棒状の可燃物の寸法と質量は、流失の場合と同様に与える。

(3) 半壊・一部損壊

可燃物の流出は生じない。

このとき、流出する可燃物の数は、基本的に、流出源となる階に収納・固定される可燃物の重量を、流出する可燃物の質量で割ることによって、算出される。

$$n_L = \frac{(w_m + w_f) A_f}{m_d} \quad (4)$$

ここに、 n_L は階から流出する可燃物の数、 w_m は収納可燃物密度、 w_f は固定可燃物密度、 A_f は建築面積である。なお、大規模全壊・全壊・大規模半壊の建物については、固定可燃物密度 w_f を無視する。また、流出する可燃物の初期位置は、当該建物の重心から、建築面積の平方根 $\sqrt{A_f}$ の圏内で、ランダムに与える。

3. 津波火災危険度の確率論的評価手法

図2に、津波火災危険度の確率論的評価手法の概念を示す。ここでは、ある地点の津波火災による被害の受けやすさを表す危険度指標として、その地点に最終的に漂着する可燃物の単位面積あたりの総重量（以降では、集積可燃物密度と呼ぶ）に着目する^{注3)}。集積可燃物密度を評価する可燃物には、地域によらず普遍的に存在し、初期位置の特定が容易な、建物に収納・固定される可燃物を扱う。なお、津波火災の燃え広がりには、自動車やLPガスボンベといった

可燃物も関与することが考えられるが、初期位置の特定が容易でないことや、後者については、地域によらず普遍的に存在する訳ではないことを踏まえ、本研究では、扱わない。

本研究では、集積可燃物密度を左右する不確定要因として、次の4種類の要因を考慮する。

- ① 津波来襲時の潮位
- ② 防潮堤といった海岸構造物の被害
- ③ 津波による建物の被害
- ④ 建物に収納・固定される可燃物の密度

①と②は、津波氾濫流の流況に影響を及ぼす不確定要因であり、③と④は、流出する可燃物の数や初期位置に影響を及ぼす不確定要因である。ただし、津波氾濫流の流況は、津波の発生する領域や断層のすべり量といった津波断層モデルの不確定性にも、大きく影響を受ける。わが国の近海での発生が想定される津波については、津波断層モデルの不確定性の評価結果^{8)~10)}が公表されている場合もあり、津波火災の危険度評価に、こうした成果を活用することは可能である。しかし、こうした成果は、被災後の影響が特に大きい重要施設を対象として、設計外力の決定に利用されることを想定したものであり、本研究での津波火災ハザードマップの利用目的に、必ずしも馴染むとは限らない。そこで、津波断層モデルの不確定性を含めた危険度評価は、今後の検討課題とし、本研究では、津波断層モデルを与条件とすることで、津波の発生を決定論的に扱う。

3.1 ネットの集積可燃物密度の定義

火災安全工学では、可燃物の種類や大きさによって、完全燃焼した際の発熱量が異なることを考慮し、可燃物の重量は、発熱量が等価な木材の重量に換算されることが多い¹¹⁾¹²⁾。本研究でも、発熱量の違いが重量に反映される木材換算重量を用いて、集積可燃物密度を評価し、密度の評価単位には、メッシュを用いる。このとき、ある津波氾濫流 j によって、最終的にメッシュ k に漂着する可燃物の集積可燃物密度 w_{jk} は、次のように表される。

$$w_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (\delta_{ijk} \Delta H_i M_i) / \Delta H_w}{d^2} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (\delta_{ijk} m_{d,i})}{d^2} \quad (5)$$

ここに、 n_j は津波氾濫流 j によって流出する可燃物 i の数、 ΔH_i は可燃物 i の単位重量あたりの発熱量、 ΔH_w は木材の単位重量あたりの発熱量、 M_i は可燃物 i の重量、 $m_{d,i}$ は可燃物 i の木材換算重量、 δ_{ijk} は津波氾濫流 j によって可燃物 i がメッシュ k に漂着する場合を1、そうでない場合を0とするダミー変数、 d はメッシュの幅である。

津波氾濫流 j が与えられた時、流出する可燃物の数や初期位置の組み合わせは、事実上、無限に存在することから、最終的にメッシュ k に漂着する可燃物の集積可燃物密度 w_{jk} は、確率変数である。また、津波氾濫流 j も、潮位や海岸構造物の被害によって、流況は無限に存在する。本研究では、津波氾濫流 j が与えられた時の集積可燃物密度 w_{jk} が、平均 μ_{jk} 、標準偏差 σ_{jk} の正規分布、

$$f(w_{jk}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{jk}^2}} \exp\left\{-\frac{(w_{jk} - \mu_{jk})^2}{2\sigma_{jk}^2}\right\} \quad (6)$$

図2 津波火災危険度の確率論的評価手法の概念

図3 ネットの集積可燃物密度の評価の考え方

に従うと仮定し、あらゆる津波氾濫流の生起確率が反映されたネットの集積可燃物密度 $w_{net,k}$ を、次のように定義する。

$$w_{net,k} = \sum_{j=1}^{\infty} p_j w_{jk} \quad \left(\text{ただし、} \sum_{j=1}^{\infty} p_j = 1 \right) \quad (7)$$

ここに、 p_j は津波の発生を決定論的に扱った場合の津波氾濫流 j の生起確率である。ここで、正規分布に従う独立な確率変数の和が正規分布に従うことに注意すると、ネットの集積可燃物密度 $w_{net,k}$ もまた、正規分布に従い、その平均 $\mu_{net,k}$ と標準偏差 $\sigma_{net,k}$ は、次のように表される。

$$\mu_{net,k} = \sum_{j=1}^{\infty} p_j \mu_{jk}, \quad \sigma_{net,k}^2 = \sum_{j=1}^{\infty} p_j^2 \sigma_{jk}^2 \quad (8)$$

そこで本研究では、ネットの集積可燃物密度の平均 $\mu_{net,k}$ と標準偏差 $\sigma_{net,k}$ を、工学的に評価することを検討する。

図4 正規分布を仮定した潮位の離散確率分布への変換

図5 高さ低減による海岸構造物の被害の簡略化

3.2 不確定要因の扱い方

図3に、ネットの集積可燃物密度の評価の考え方を示す。本研究では、イベントツリーとモンテカルロ・シミュレーションを併用することで、有限個のシナリオを抽出し、それらを基に、ネットの集積可燃物密度を評価する。ここでは、

- ・津波氾濫流の流況に影響を与える不確定要因①と②は、離散確率分布として扱い、イベントツリーを作成することで、評価に用いる津波氾濫流のシナリオとその生起確率を決定する。
- ・流出する可燃物の数や初期位置に影響を与える不確定要因③と④は、連続確率分布として扱い、乱数を用いて、可燃物の数や初期位置を決定する。この手続きを十分な回数試行し、可燃物の漂流・集積モデルの入力条件とすることで、津波氾濫流 j が与えられた時の集積可燃物密度の平均 μ_{jk} と標準偏差 σ_{jk} を評価する。

なお、津波氾濫流の流況に影響を与える不確定要因①と②を、離散確率分布として扱うのは、一回の津波数値解析に要する時間が長いことから、シナリオ数を削減することで、手法の簡便性を確保することを考えた。

ネットの集積可燃物密度の平均 $\mu_{net,k}$ と標準偏差 $\sigma_{net,k}$ は、評価に用いる津波氾濫流のシナリオ数を m として、次のように書き直される。

$$\mu_{net,k} = \sum_{j=1}^m p_j \mu_{jk}, \quad \sigma_{net,k}^2 = \sum_{j=1}^m p_j^2 \sigma_{jk}^2 \quad (9)$$

したがって、本研究での津波火災危険度の評価は、津波氾濫流 j の

生起確率 p_j を求め、その下での集積可燃物密度の平均 μ_{jk} と標準偏差 σ_{jk} を評価し、ネットの集積可燃物密度の平均 $\mu_{net,k}$ と標準偏差 $\sigma_{net,k}$ を算出することに帰着する。

(1) 津波来襲時の潮位

海面は、天体間で働く潮汐力によって、周期的に上下することが知られており、台風といった異常気象時に生じる高潮を除けば、潮位を確率変数と考えることはできない。しかし、地域ごとに公開されている潮汐表から、1時間ごとの潮位を積み上げ、度数分布として表現すれば、左右対称の釣り鐘型分布に近い形が得られ、統計的な変数として扱うことが可能になる¹³⁾。

そこで本研究では、潮位の周期的な変動を正規分布で近似した上で、離散確率分布に変換する。ここでは、図4に示すように、正規分布の面積を、下側25%、中央値周辺50%、上側25%の3つの領域に分割し、それぞれの領域の重み付き平均を、離散確率分布の確率変数に設定する。正規分布表によれば、各領域の境界点は、平均 $\pm 0.68\sigma$ の位置に対応することから、各領域の重み付き平均は、下側から順に、平均 -1.27σ 、平均、平均 $+1.27\sigma$ と計算される。本研究では、平均と標準偏差 σ を、地域ごとに公開されている潮汐表から算出し、離散確率分布に従う3つの潮位の値を決定する。

(2) 防潮堤といった海岸構造物の被害

兵庫県南部地震(1995)や東北地方太平洋沖地震(2011)による海岸構造物の被害調査結果^{14)~17)}から、海岸構造物の被害には、地震による堤体の損傷・倒壊や地盤の沈下、津波による堤体の滑動・転倒や地盤の洗掘、クラックの発生など、複数の形態が存在することが知られている。海岸構造物のどこが、どの破壊形態によって、どの程度機能を失うかは、海岸構造物の構造や整備年代、津波の強さといった様々な要因に左右されると予想される。しかし、現状では、関連する知見が不足しており、こうした複雑な要因の影響を合理的に考慮して、被害の評価を行うことは難しい。また、被害の位置の不確定性を考慮すれば、津波氾濫流のシナリオ数が莫大になるが、津波数値解析の負荷を考えると、簡便性を欠き過ぎる。

そこで本研究では、海岸構造物の全ての位置で、同時に平均的な被害が生じると仮定し、被害の位置の不確定性を無視する。ここでは、図5のように、海岸構造物の高さを、場所によらず一定の割合で低減させることとし、機能保持(低減率0%)、機能半減(低減率50%)、機能喪失(低減率100%)の3つのイベントに離散化する。ただし、各イベントの生起確率については、合理的な設定が困難なことから、現状では、一律に $1/3$ として、各イベントの影響を均等に扱うこととする。

(3) 津波による建物の被害

津波による建物の被害を確率論的に予測する手法として、既往の津波による建物の被害と、津波氾濫流の流体力学的な諸量との関連を統計的に推定した津波被害関数^{18)~20)}が提案されている。この津波被害関数は、流失といった被害モードの生起確率と、浸水深といった津波外力指標との関連に、正規分布や対数正規分布を仮定した次の式で表されることが多い。

$$P_D = \Phi\left[\frac{X - \mu}{\sigma}\right], \quad P_D = \Phi\left[\frac{\ln X - \lambda}{\xi}\right] \quad (10)$$

ここに、 P_D は被害モードの生起確率、 Φ は標準正規分布の累積分

図6 本研究で用いる津波被害関数²⁰⁾

布関数、 X は浸水深、最大流速、最大抗力といった津波外力指標、 μ (または λ)、 σ (または ξ) はそれぞれ X または $\ln X$ の平均と標準偏差である。特に、Suppasri²⁰⁾ は、東北地方太平洋沖地震津波の建物被害データ⁷⁾ を用いて、浸水深を説明変数にとった津波被害関数を、建物の構造別に推定している。

そこで本研究では、東北地方太平洋沖地震津波の津波被害関数²⁰⁾ を用いて、浸水深から建物の被害モードを確率論的に決定する。この津波被害関数では、ある規模以上の被害が生じる確率が予測される。ここでは、簡単のため、被害モードの予測は、木造の建物のみを対象とし、可燃物の流出モデルとの対応から、流失被害が生じる確率と、大規模半壊以上の被害が生じる確率を予測する津波被害関数を用いる。前者は、 $\mu=2.22$ 、 $\sigma=1.24$ の正規分布で、後者は、 $\lambda=0.035$ 、 $\xi=0.739$ の対数正規分布でモデル化される (図6)。

(4) 建物に収納・固定される可燃物の密度

既往の可燃物調査の結果²¹⁾²²⁾ から、収納可燃物の密度は、建物や室の用途によって、大きくばらつくことが知られている。本研究では、収納可燃物密度 w_m が正規分布に従うと仮定し、代表的な建物用途における平均と標準偏差を、表1のように設定することで、確率論的に決定する。一方、固定可燃物の密度は、用途によるばらつきは小さくなく、建物の構造によって決まると考えられる。本研究では、固定可燃物密度 w_f の設定は、木造の建物のみを対象とし、既往の実大火災実験に使用された木造家屋の固定可燃物密度の算定結果²³⁾ を基に、平均的な値を決定論的に与える。ここでは、屋根の重量が含まれる最上階の固定可燃物密度に 150kg/m^2 を、途中階のそれに 60kg/m^2 を採用する。

4. 東北地方太平洋沖地震への適用による評価特性の確認

本研究で提案する手法の評価特性を確認するため、東北地方太平洋沖地震津波を対象とした津波火災危険度の評価を行った。ここでは、津波の浸水域で2件の火災が発生し、約16haを焼失する大規模火災に発展した岩手県山田町中心部¹⁾に着目する。

4.1 計算条件

表2に、計算条件を示す。本研究では、モンテカルロ・シミュレーションは、100回の試行とし、各試行につき、地震から6時間分のシミュレーションを行って、津波氾濫流 j が与えられた時の集積

表1 建物用途別の収納可燃物密度の平均と標準偏差の設定²¹⁾²²⁾

建物用途		対象施設の例	収納可燃物密度 (kg/m ²)	
			平均	S.D.
住宅系	住宅	専用住宅	20.0	6.5
	共同住宅	アパート、マンション、寮	36.4	11.7
	店舗併用住宅	事務所や店舗が併設	36.4	11.7
	作業所併用住宅	工業系の施設が併設	36.4	11.7
	その他		20.0	6.5
商業系	商業施設	物販系の施設	19.2	8.6
	業務施設	事務所系の施設	30.1	11.3
	その他		30.1	11.3
工業系	運輸倉庫施設	駅舎系の施設	1.1	0.6
	工業施設	工場	85.8	70.1
	その他		85.8	70.1
公共系	公共公益施設	庁舎・学校・公民館	30.1	11.3
その他	農林漁業用施設	納屋・温室・船小屋	0.0	0.0
	その他	処理場・浄水場	30.1	11.3

表2 計算条件 (東北地方太平洋沖地震・山田町)

項目		設定
津波氾濫流のシナリオ数		9
モンテカルロ・シミュレーションの試行回数		100
計算時間		6 hrs
時間刻み	津波氾濫流の流況	0.1 s
	可燃物の位置変化	0.6 s
メッシュの幅	津波氾濫流の流況	10 m
	集積可燃物密度	50 m
津波断層モデル		東北大学モデル
潮位	上側 25%平均潮位	0.412 m
	平均潮位	0.000 m
	下側 25%平均潮位	-0.412 m
海岸構造物の高さ (防潮堤)	機能保持	4 m
	機能半減	2 m
	機能喪失	0 m
建物	位置・形状・階数	住宅地図
	構造・用途	復興支援調査アーカイブ

可燃物密度の平均 μ_{jk} と標準偏差 σ_{jk} を評価する。津波氾濫流のシナリオ数は、9通りであるため、合計で900通りの集積シナリオとその生起確率を基に、ネットの集積可燃物密度の平均 $\mu_{net,k}$ と標準偏差 $\sigma_{net,k}$ を評価することになる。この集積可燃物密度の評価単位であるメッシュの幅は、50mと設定した。

津波の発生領域や断層のすべり量を与える津波断層モデルには、東北地方太平洋沖地震津波の浸水範囲を良好に再現できるように調整された東北大学モデル²⁴⁾を用いた。潮位については、山田町に近い宮古市の1年分の潮汐表から、平均と標準偏差を求め、3種類の潮位を算出した。その結果、上側25%平均潮位は、0.412m、平均潮位は、0.000m、下側25%平均潮位は、-0.412mとなった。海岸構造物については、当時設置されていた高さ4mの防潮堤を基準 (機能保持の条件) とし、機能半減の条件では、高さを2mに、機能喪失の条件では、高さを0mにすることで、海岸構造物の被害の影響を考慮した。

建物の位置・形状・階数は、地震前の市街地状況が分かる住宅地図から把握し、3,252棟の建物をデータ化した。また、建物の構造

と用途は、復興支援調査アーカイブ²⁵⁾の建物被災状況データから、特定した。

建物の被害モードの決定に必要な浸水深は、建物の重心位置における水深の最大値を、津波数値解析から事前に求めておくことで与える。また、建物から可燃物が流出する時間は、早くても、床上以上の浸水が生じた時点と考え、水深が 0.3m を超えた時点と仮定した。

抗力係数 C_d は、物体の形状や流れの方向に依存することが知られている。棒状の可燃物については、流れの方向と可燃物の中心軸が常に一致すると仮定し、水面に浮遊させた円柱棒に作用する流体力を調べた既往の水理実験の結果²⁶⁾を用いる。また、直方体状の可燃物については、流れの方向と可燃物の水平断面の間に、仰角が生じないと仮定し、水路に置かれた正角柱に作用する流体力を調べた既往の水理実験の結果²⁷⁾を用いる。ここでは、抗力係数 C_d を、次のように与える。

$$\text{棒状: } C_d = \left(0.89(l/w)^{0.01} + 32.5Re^{-1/2} \right)^2 + 0.01(l/w)Fr^{0.25} \quad (11)$$

$$\text{直方体状: } C_d = 2.12 \quad (12)$$

ここに、 l は可燃物の長さ、 w は可燃物の幅、 Re はレイノルズ数、 Fr はフルード数である。なお、直方体状の可燃物については、レイノルズ数が大きく、水路の幅が正角柱の幅に対して、十分に大きい場合の値を用いた。

付加質量係数 C_m については、既往の水理実験の結果²⁶⁾から、長細比 l/w によらず、概ね一定の値をとることが示されている。そこで、付加質量係数 C_m は、可燃物の形状によらず、0.78を与えた。

拡散係数 κ については、いくつかの水理実験の結果²⁶⁾⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾から、摩擦速度 u_* と水深 h で無次元化した拡散係数 κ/u_*h は、0.032~0.23の値をとることが示されている。ここでは、この結果を参考に、無次元拡散係数 κ/u_*h を 0.2 と設定した。

残存建物との衝突力を左右する定数 ϕ については、当該地域を対象に実施した既往のケーススタディ⁹⁾の結果から、津波火災の焼失範囲に集積する可燃物の総重量を、最大化するように調整された値として、0.1を用いる。

図7 可燃物の漂流・集積シミュレーション結果の一例

4.2 計算結果と考察

図7に、シミュレーション結果の一例を示す。本研究では、津波に流される可燃物の位置を個別に追跡することで、陸域に最終的に漂着する可燃物の空間分布を評価することになるが、シミュレーション結果から、建物から流出した多数の可燃物の位置が、津波数値解析による津波氾濫流の計算結果を与条件として、個別に予測されていることが分かる。このシミュレーション結果では、陸域に漂着している可燃物、陸域を漂流している可燃物、海域に流れ出ている可燃物が評価されている。

図8に、被害モード別の建物棟数の評価結果を示す。ここでは、津波氾濫流のシナリオごとに、平均（積み上げ棒）と標準偏差（エラーバー）を算出した。なお、ここでの建物棟数は、津波によって流出する可燃物の総量を表していると考えられることもできる。被害モード別の建物棟数は、潮位の違いよりも、海岸構造物の被害の違いによって、大きな影響を受けていることが分かる。特に、海岸構造物の機能が保持される条件とそうでない条件では、潮位の違いによらず、評価結果が大きく異なる結果が得られた。海岸構造物の機能が保持される条件では、高さ 4m の防潮堤が、浸水範囲や浸水深の低減に、特に大きな効果を発揮していると考えられる。海岸構造物

図8 被害モード別の建物棟数の評価結果

図9 陸域に最終的に漂着した可燃物の総重量の評価結果

(a) 上側 25%平均・機能保持

(d) 下側 25%平均・機能保持

(b) 上側 25%平均・機能半減

(e) 下側 25%平均・機能半減

(c) 上側 25%平均・機能喪失

(f) 下側 25%平均・機能喪失

図 10 津波氾濫流が与えられた時の集積可燃物密度の平均 μ_{jk} の評価結果

の機能が保持される条件では、流失と大規模全壊・全壊・大規模半壊の間で、建物棟数に大きな差はないが、そうでない条件では、流失が大規模全壊・全壊・大規模半壊の2倍程度となっている。これは、そうでない条件では、被害を受ける建物の中で、浸水深の大きな建物が、多くを占めていることを表しており、津波氾濫流の強さが大きいことが分かる。

図 9 に、陸域に最終的に漂着した可燃物の総重量の評価結果を示す。ここでも、津波氾濫流のシナリオごとに、平均（棒）と標準偏差（エラーバー）を算出した。なお、ここでの総重量は、建物から流出した可燃物の総重量から、陸域に漂着せずに、海域に流れ出た可燃物の総重量を引いたものと考えられる。陸域に漂着した可燃物の総重量は、潮位の違いによって、若干の変化が生じてい

るものの、海岸構造物の被害の違いによって、大きな影響を受けており、被害モード別の建物棟数の評価結果と、同様の傾向が表れている。特に、海岸構造物の機能が保持される条件とそうでない条件では、評価結果に4～6倍程度の差が生じている。これは、両者の間で、建物から流出する可燃物の数が大きく異なることに関係している。

図10に、津波氾濫流 j が与えられた時の集積可燃物密度の平均 μ_{jk} の評価結果を示す^{注4)}。ここでは、評価結果が10kg/m²未満の可燃物密度が小さな箇所については、可視化上除いて示してあるが、集積可燃物密度の分布が不連続なように見えるのは、このことが原因であることに注意する必要がある。集積可燃物は、潮位の違いによらず、海岸構造物の機能が保持される条件では、津波火災の焼失範囲よりも、海側に集中しているが、そうでない条件では、焼失範囲の内側や外側周辺に集中する結果が得られた。これは、両者の間で、津波氾濫流の流況が、特に異なることに起因している。また、陸域に漂着した可燃物の総重量との関係で、海岸構造物の機能が保持される条件では、集積可燃物密度も、全体的に小さな値となっているが、そうでない条件では、集積可燃物密度が大きい箇所が、多数表れている。海岸構造物の機能が保持されない条件では、集積可燃物密度が大きい箇所は、潮位が低くなることで、海側に移動していることが分かる。これは、潮位の低下によって、津波氾濫流の流況が変化することに起因している。評価結果を総じて見ると、ある津波氾濫流では、集積可燃物密度が小さい箇所が、別の津波氾濫流では、大きい箇所となる結果が得られており、集積可燃物密度の不確実性が表れている。

図11に、ネットの集積可燃物密度の評価結果を示す。ここでは、平均 $\mu_{net,k}$ に、標準偏差 $\sigma_{net,k}$ の3倍を加えた結果を示した。これによると、集積可燃物密度が大きい箇所は、津波火災の焼失範囲の内側や外側周辺に集中しており、海岸に近い箇所では、集積可燃物密度が小さくなる結果が得られている。このことから、本研究で提案する手法は、実態を再現するための厳密な条件で計算を行った訳ではないものの、実際の火災焼失範囲を尤もらしく推定する結果となった。これは、ネットの集積可燃物密度という指標が、ある地点の津波火災による被害の受けやすさを表す危険度指標として、有効である可能性を示唆している。

図11 ネットの集積可燃物密度の評価結果 ($\mu_{net,k} + 3\sigma_{net,k}$)

5. 南海トラフ地震の津波火災ハザードマップの推定

本研究で提案する手法を、南海トラフ地震津波に適用し、津波火災ハザードマップの推定を行った。ここでは、内閣府³⁰⁾の地震被害想定の結果を参考に、津波による大規模な被害が懸念される静岡県下田市を対象とした。

5.1 計算条件

表3に、計算条件を示す。モンテカルロ・シミュレーションは、100回の試行とし、各試行につき、地震から5時間分のシミュレーションを行った。津波氾濫流のシナリオ数は、9通りであるため、合計で900通りの集積シナリオとその生起確率を基に、ネットの集積可燃物密度の平均 $\mu_{net,k}$ と標準偏差 $\sigma_{net,k}$ を評価することになる。集積可燃物密度を評価するメッシュの幅は、50mと設定した。

津波断層モデルには、内閣府³⁰⁾の地震被害想定成果を活用し、駿河湾～紀伊半島沖に、大すべり域を設定したモデルを用いた。潮位については、下田市の1年分の潮汐表から、平均と標準偏差を計算し、3種類の潮位を決定した。その結果、上側25%平均潮位は、0.642m、平均潮位は、0.156m、下側25%平均潮位は、-0.330mとなった。海岸構造物については、下田湾口に設置されている防波堤を考慮し、基礎である海底のマウンドには、被害が生じないものとして、上方の堤体部分の高さを変化させることで、被害の影響を考慮した。ここでは、内閣府³⁰⁾の海岸構造物データを基に、堤体部分の高さを4mと設定し、機能半減の条件では、高さを2mに、機能喪失の条件では、高さを0mに変化させた。

建物の位置・形状・階数は、最近の市街地状況が分かる住宅地図から把握し、6,522棟の建物をデータ化した。建物の構造については、基盤地図情報から、普通建物・堅牢建物の種別を特定し、前者を木造建物として扱った。また、建物の用途は、住宅地図と電話帳データから、特定した。

その他の計算条件については、東北地方太平洋沖地震津波を対象とした評価と、同様に設定した。

図12 津波火災ハザードマップの推定結果 ($\mu_{net,k} + 3\sigma_{net,k}$)

5.2 計算結果と考察

図 12 に、津波火災ハザードマップの推定結果を示す。ここでは、ネットの集積可燃物密度の平均 $\mu_{net,k}$ に、標準偏差 $\sigma_{net,k}$ の 3 倍を加えた結果を採用した。また、津波からの避難施設として、自然地形の高台と津波避難ビルの位置を、プロットしてある。推定結果によると、下田湾に近い津波避難ビルの周辺では、集積可燃物密度が小さい結果となっており、津波火災によって被害を受ける危険性が比較的小さいことが分かる。一方、下田湾から市街地を進んだ所にある津波避難ビルの周辺では、集積可燃物密度が大きな箇所が連続的に広がっており、津波火災によって被害を受ける危険性が高いことが分かる。こうした地域では、集積可燃物密度が小さな箇所に、津波避難ビルの配置を変更するといった対策が考えられる。または、鉄筋コンクリート造のように、津波火災を受けても倒壊しにくい構造であることや、防火区画や外気開放スペースなど、津波火災から避難者を保護するために有効なスペースが、建物に冗長的に備わっていることが確認されれば、配置を変更しなくても良いといった考え方もある。ただし、集積可燃物密度が大きな箇所は、自然地形の高台の周辺にも、多く存在する結果となっている。東北地方太平洋沖地震では、津波火災が林野火災を誘発した事例⁹⁾が報告されていることから、周辺の集積可燃物密度が大きい高台では、林野火災によって被害を受ける可能性を想定し、二次避難のための経路を整備しておく必要性が考えられる。

6. まとめ

津波火災危険度の確率論的評価手法を提案した。ここでは、ある地点の津波火災による被害の受けやすさを表す危険度指標として、その地点に最終的に漂着する可燃物の単位面積あたりの総重量（集積可燃物密度）に着目した。提案した手法では、筆者らが開発した可燃物の漂流・集積モデルを活用し、多数の集積シナリオとその生起確率を考慮して、ネットの集積可燃物密度を評価する。ここでは、集積可燃物密度を左右する不確定要因として、①津波来襲時の潮位、②防潮堤といった海岸構造物の被害、③津波による建物の被害、④建物に収納・固定される可燃物の密度、の 4 種類を考慮した。評価にあたっては、各不確定要因の影響をモデル化し、イベントツリーとモンテカルロ・シミュレーションを併用することで、有限個の集積シナリオを抽出した後、ネットの集積可燃物密度を算定する。

提案した手法の評価特性を確認するため、東北地方太平洋沖地震津波を対象とした津波火災危険度の評価を行った。岩手県山田町中心部に着目した評価結果は、実際の津波火災の焼失範囲を尤もらしく推定する結果となり、ネットの集積可燃物密度が、ある地点の津波火災による被害の受けやすさを表す危険度指標として、有効である可能性が確認された。また、提案した手法を南海トラフ地震津波に適用し、静岡県下田市を対象とした津波火災ハザードマップの推定を行った。この推定結果に、津波避難施設の現況を重ね合わせ、考察を加えた所、提案した手法によって推定される津波火災ハザードマップは、津波避難施設の配置や火災安全計画に有用であることが示された。

ただし、本研究で提案した手法には、いくつかの課題が残されている。津波断層モデルの不確定性や、海岸構造物の被害の位置の不確定性については、決定論的な扱いや簡略化がなされているが、評

表 3 計算条件（南海トラフ地震・下田市）

項目		設定
津波氾濫流のシナリオ数		9
モンテカルロ・シミュレーションの試行回数		100
計算時間		5 hrs
時間刻み	津波氾濫流の流況	0.1 s
	可燃物の位置変化	0.6 s
メッシュの幅	津波氾濫流の流況	10 m
	集積可燃物密度	50 m
津波断層モデル		内閣府モデル
潮位	上側 25%平均潮位	0.642 m
	平均潮位	0.156 m
	下側 25%平均潮位	-0.330 m
海岸構造物の高さ（防波堤）	機能保持	4 m
	機能半減	2 m
	機能喪失	0 m
建物	位置・形状・階数	住宅地図
	構造	基盤地図情報
	用途	住宅地図・電話帳

価結果に及ぼす影響は小さくないと予想されるため、改良の余地がある。また、本研究では、集積可燃物密度の不確定性に着目して評価を行ったが、ある地点の津波火災による受害可能性は、本来、出火や延焼の不確定性を含めて評価される必要がある。津波火災によって生じる損失の大きさとその生起確率を基に、津波火災リスクを評価する手法を検討することで、出火や延焼の不確定性を含めた評価を実現できる可能性がある。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 若手研究（A）「津波による流出家屋に起因した「津波火災」のシミュレーションモデルの構築」（No. 15H05540）の助成を受けたものです。

注

注 1) 津波は、水深数 km の海底において、数十～数百 km の空間的広がりをもった地盤変動によって発生するため、水深（鉛直）方向よりも水平方向のスケールが、十分に大きい波であると言える。このため、津波現象の多くの部分は、長波近似による流体力学の理論方程式で記述され、粘性を無視した非圧縮性流体の 2 次元非回転問題として扱われる³¹⁾。津波数値解析では、こうした仮定の下、次のような質量と運動量の保存式を、メッシュを用いた有限差分法で解く。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \tag{A1}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2 M}{D^{7/3}} \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \tag{A2}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2 N}{D^{7/3}} \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \tag{A3}$$

ここに、 η は水位、 D は全水深、 g は重力加速度、 n は Manning の粗度係数、 M と N は x 方向と y 方向の流量フラックスである。ただし、建物が津波氾濫流に及ぼす影響は、その形状を地形モデルの中で陽に考慮するのではなく、建物の密集度に応じた粗度係数³²⁾を与えることで、底面からの摩擦力の一種とみなし、流れに与える抵抗を巨視的に考慮する。本研究では、簡単のため、建物の流失被害に伴う抵抗の変化を無視し、粗度係数は、初期値のまま変化させない。

注 2) 国土交通省による東北地方太平洋沖地震津波の建物被害調査⁷⁾では、被害モードの判定根拠を、「流失」が「基礎だけを残し、建物が完全に流

されている」,「大規模全壊」が「主要構造が損壊しており,補修により元通りに再利用することが困難」,「全壊」が「1 階天井以上浸水しており,大規模修繕等による再利用も可能」,「大規模半壊」が「床から概ね 1m 以上(天井未満)浸水」,「半壊」が「床から概ね 1m 未満の床上浸水」,「一部損壊」が「床下の泥等を取り除けば再利用可能」としている。

注 3) 津波火災によって,ある地点が被害を受ける条件は,その地点の周辺に可燃物が集積し,何らかの要因で出火が生じて,その地点に延焼する,といった過程で表すことができる。このため,ある地点の被害可能性は,可燃物の集積の不確定性だけでなく,出火や延焼の不確定性にも,影響を受ける。しかし,津波火災ハザードマップの危険度指標としての直観的な分かりやすさや,津波避難施設の火災外力の設定に活用することを考え,本研究では,集積可燃物密度の不確定性に着目した評価を行うこととし,出火や延焼の不確定性を含めた評価は,今後の課題とする。

注 4) 本研究では,津波氾濫流 j が与えられた時の集積可燃物密度 w_{jk} が正規分布に従うことを仮定している。ここでは,各メッシュで得られる集積可燃物密度 w_{jk} の平均と中央値の関係,および,平均に 3σ を加えた値と 99 パーセンタイルの関係を,散布図を用いて確認した。その結果,いずれも,両者の値が概ね一致していたことから,集積可燃物密度 w_{jk} の正規分布の仮定に,大きな問題はないと考えられる。

参考文献

- 1) 消防庁消防研究センター:平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震の被害及び消防活動に関する調査報告書(第 1 報),消防研究技術資料第 82 号,2011
- 2) Hokugo A, Nishino T, and Inada T: Tsunami Fires after the Great East Japan Earthquake, Journal of Disaster Research, Vol.8, No.4, pp.584-593, 2013
- 3) 西野智研・北後明彦:映像記録の観察を中心とした津波避難ビル周辺で発生する火災の事例研究,日本火災学会論文集,Vol.63, No.1, pp.1-8, 2013
- 4) 野竹宏彰・森田武・近藤史朗・広田正之・水落秀木:東日本大震災の津波火災における避難拠点建物の延焼拡大要因の分析と防火対策に関する考察,清水建設研究報告, No.89, pp.57-66, 2012
- 5) 小林悟志:2011 年の震災津波による二次災害で発生した岩手県大槌町の山林火災の現状,自然災害科学, Vol.31, No.2, pp.145-153, 2012
- 6) 西野智研・今津雄吾・北後明彦・野竹宏彰:津波火災シミュレーションに向けた建物から流出する可燃物の時空間分布予測モデル,日本建築学会環境系論文集, Vol.80, No.716, pp.857-866, 2015.10
- 7) 国土交通省都市局:東日本大震災からの津波被災市街地復興手法検討調査, <http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi-hukkou-arkaibu.html> (2014/12/1 閲覧)
- 8) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会:確率論的津波ハザード解析の方法, 2011
- 9) 岩渕洋子・杉野英治・蛇澤勝三:確率論的手法に基づく基準津波策定手引き, 原子力安全基盤機構, 2014
- 10) 福谷陽・Suppasri Anawat・安倍祥・今村文彦:確率論的津波遡上評価と津波リスクの定量化,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.1381-1385, 2014
- 11) 国土開発技術研究センター編:建築物の総合防火設計法(第 4 巻 耐火設計法), 日本建築センター, 1989
- 12) 油野健志・山仲秀利・大宮喜文・高橋清・田中哮義・若松孝旺:実態調査に基づく可燃物量とその表面積の分析,日本建築学会計画系論文集, No.483, pp.1-8, 1996.5
- 13) 久宝保・竹沢三雄:海岸構造物の設計基準水面について,第 11 回海岸工学講演会講演集, pp.228-233, 1964
- 14) 稲富隆昌・善功企・外山進一・上部達生・井合進・菅野高弘・寺内潔・横田弘・藤本健幸・田中祐人・山崎浩之・小泉哲也・長尾毅・野津厚・宮田正史・一井康二・森田年一・南兼一郎・及川研・松永康男・石井正樹・杉山盛行・高崎伸彦・小林延行・岡下勝彦:1995 年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告,港湾技研資料, No.857, 1997
- 15) 熊谷兼太郎・渡邊祐二・長尾憲彦・鮎貝基和:2011 年東北地方太平洋沖地震津波による海岸保全施設の被害調査,国土技術政策総合研究所資料, No.658, 2011
- 16) 熊谷兼太郎・永廣迪・浅井正・宮田正史・松田茂・鷺谷忠彦・鎌木雅之:2011 年東北地方太平洋沖地震津波による海岸保全施設の被害調査(その 2),国土技術政策総合研究所資料, No.781, 2014
- 17) 加藤広之・中村隆・鈴木彰:東北地方太平洋沖地震津波による漁港海岸保全施設の被災メカニズムの検討,一般財団法人漁港漁場漁村総合研究所,調査研究論文集, No.22, pp.7-15, 2012
- 18) 越村俊一・行谷佑一・柳澤英明:津波被害関数の構築,土木学会論文集 B, Vol.65, No.4, pp.320-331, 2009
- 19) 越村俊一・萱場真太郎:1993 年北海道南西沖地震津波の家屋被害の再考ー津波被害関数の構築に向けてー,日本地震工学会論文集, Vol.10, No.3, pp.87-101, 2010
- 20) Suppasri A, Mas E, Charvet I, Gunasekera R, Imai K, Fukutani Y, Abe Y, and Imamura F: Building Damage Characteristics Based on Surveyed Data and Fragility Curves of the 2011 Great East Japan Tsunami, Natural Hazards, Vol.66, pp.319-341, 2013
- 21) 日本建築学会:建築物の火災荷重および設計火災性状指針(案), 2013
- 22) 松山賢・林吉彦・清水恵一・野崎洋之・小林裕・中濱慎司:工場出火時の延焼拡大と近隣住居への類焼予測に関する研究 その 1 工場可燃物実態調査結果について,日本建築学会関東支部研究報告集 I, Vol.75, pp.317-320, 2005
- 23) 国土交通省総合技術開発プロジェクト:まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発 報告書,国土交通省, 2003
- 24) 今村文彦・越村俊一・馬淵幸雄・大家隆行・岡田清宏:東北地方太平洋沖地震を対象にした津波シミュレーションの実施, http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku_2011/model/dcrc_ver1.2.pdf (2014/12/1 閲覧)
- 25) 国土交通省都市局:『復興支援調査アーカイブ』データ, <http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/> (2014/12/1 閲覧)
- 26) 後藤智明・首藤伸夫・佐々木順次:津波による木材の流動,第 29 回海岸工学講演会論文集, pp.491-495, 1982
- 27) 秋山壽一郎・重枝未玲・小林俊彦・大田和正:定常自由表面流中の正角柱に働く流体力,水工学論文集, Vol.46, pp.827-832, 2002
- 28) Elder, J. W.: The Dispersion of Marked Fluid in Turbulent Shear Flow, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 5, p.544-560, 1959
- 29) 中川一・高橋保・池口正晃:流木群の流動に関する研究,京都大学防災研究所年報, No.35, B-2, pp.249-266, 1992
- 30) 内閣府:南海トラフ巨大地震の震度分布、津波高等及び被害想定について, 2012
- 31) IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission): IUGG/IOC TIME PROJECT, Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-frog Scheme, UNESCO, pp.1-24, 1997
- 32) 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫:GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法,海岸工学論文集, Vol.45, pp.356-360, 1998

A METHOD FOR ESTIMATING TSUNAMI-INDUCED FIRE HAZARD MAP FOCUSING ON UNCERTAINTY OF ACCUMULATING COMBUSTIBLE DENSITY

Tomoaki NISHINO^{} and Yugo IMAZU^{**}*

^{*} Senior Research Engineer, Building Research Institute, Dr. Eng.

^{**} Senior Research Engineer, Institute of Technology, Shimizu Corp., M. Eng.

We proposed a probabilistic method for evaluating a hazard map for tsunami-induced fire. Accumulating combustible density is used as the indicator visualized on the map, which represents the fire vulnerability of an arbitrary point. The accumulating combustible density is evaluated on the basis of multiple accumulation scenarios and their occurrence probabilities using the existing model for the drift and accumulation of tsunami-driven combustible objects. Here, the following factors are defined as the uncertain factors which governs the accumulation scenarios: 1) sea level in the event of tsunami arrival, 2) damage of coastal structures such as a seawall, 3) damage of buildings, and 4) density of movable and fixed combustible objects loaded on buildings. A finite number of accumulation scenarios are sampled to evaluate the average and the standard deviation of accumulating combustible density using event tree and Monte Carlo simulation.

We applied the proposed method to Yamada town in the 2011 Great East Japan Earthquake Tsunami to verify the evaluation characteristics. Field survey after the tsunami has reported that two fires broke out in tsunami inundation area of Yamada town and developed into spreading fires resulting in 16 hectares of burned area. As a result, the proposed method could estimate the actual fire damage zone plausibly, because high accumulating combustible density areas are concentrated within or around the fire damage zone. This result indicates that the accumulating combustible density is available as the indicator of tsunami-induced fire hazard map which represents the fire vulnerability of an arbitrary point.

A tsunami-induced fire hazard map of future Nankai Trough Earthquake was estimated using the proposed method. Here, Shimoda city was adopted as the target area of hazard map estimation, and safety of tsunami refuge facilities against the fire was considered by overlaying the high grounds and the tall buildings on the map. The result shows that the hazard map estimated by the proposed method is useful for planning of location and fire safety of tsunami refuge facilities.

(2016年6月1日原稿受理, 2017年1月10日採用決定)