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

SPATIO-TEMPORAL DISTRIBUTION MODELING OF TSUNAMI-DRIVEN COMBUSTIBLE OBJECTS RELEASED FROM DESTROYED BUILDINGS TOWARDS TSUNAMI FIRE SIMULATION

西野 智 研*, 今津 雄 吾**, 北後 明彦***, 野竹 宏 彰****

*Tomoaki NISHINO, Yugo IMAZU, Akihiko HOKUGO
and Hiroaki NOTAKE*

Two sub-models for spatio-temporal distribution of tsunami-driven debris are proposed: (1) tsunami fragility function for building destruction, and (2) debris drift and accumulation model due to tsunami inundation flow. These modeling are the beginning of model development towards tsunami fire simulation. The tsunami fragility function is the logistic regression model based on the data of the building damage after the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami. The debris drift and accumulation model is the extension of the existing model for driftwood by incorporating the debris release model and the blocking effect of surviving buildings on debris movement.

Keywords : *Tsunami fire, Tsunami fragility function, Diffusion simulation, Fire load, Earthquake damage estimation*

津波火災, 津波被害関数, 漂流シミュレーション, 可燃物量, 地震被害想定

1. はじめに

津波に起因して発生する火災を「津波火災」と言う。2011年の東北地方太平洋沖地震では、津波の浸水区域で数多くの津波火災が発生し、その一部が大規模な延焼火災に発展した結果、約67haが焼失した¹⁾。特に、津波火災が避難施設に延焼した事例^{2,3)}や、山林などの非浸水区域に延焼した事例⁴⁾が報告されており、将来の発生が予想される巨大津波に備えるには、こうした津波火災被害にも対策を講じておく必要がある。しかし、対策検討に先立って実施される地震被害想定⁵⁾では、津波火災被害の一般的な特徴に言及した定性的な予測にとどまっており、将来の津波における津波火災の危険性が適切に評価されていない。この原因は、津波火災をシミュレートするための手法が整備されていないことにあり、結果として、津波火災対策を合理的に検討することができない状況を招いている。

東北地方太平洋沖地震以降、日本火災学会⁶⁾を中心とした精力的な調査により、津波火災の形態を明らかにする資料が蓄積されてきた。これによると、津波火災の燃え草は、建物、自動車、石油などその種類が多岐に渡るため、それぞれに異なった火災形態を有しているが、地域によらない普遍的な可燃物である建物に着目すると、津波火災の経過は、次の4つの過程に分けて考えることができる：

(1) 建物が津波により破壊され、押し流される(流出)、(2) 構造物や家財といった可燃物が津波により漂流し、瓦礫となって津波の引いた所に堆積する(漂流・堆積)、(3) 瓦礫に何らかのエネルギー

が付与されて着火する(出火)、(4) 火災が周辺の瓦礫に燃え移り、浸水区域を燃え広がる(延焼)。このため、津波火災のシミュレーションには、それぞれの過程を記述する複数の予測モデルが必要になるが、津波火災が発生した場合に、浸水区域のどの箇所をどのように燃え広がるのか、といった火災被害の評価に繋げるには、まず、浸水区域を流れ溜まる可燃物の分布を知っておく必要がある。

そこで本研究では、津波火災の全体像を予測可能なシミュレーションモデルの開発を最終的な目標とする。本稿では、この端緒として、津波により建物から流出し浸水区域を流れ溜まる可燃物の分布を予測可能な手法について検討することとし、そのために必要な次の二種類の予測モデルを整備する。

- 1) 津波による建物の流出可能性を予測する統計モデル
- 2) 津波による瓦礫の漂流・堆積性状を予測する物理モデル

2. 津波火災シミュレーションの枠組みと前提

図1に、本研究で構想する津波火災シミュレーションの枠組みを示す。本研究では、近年の地震被害想定において主流となっている津波数値解析との連携を前提とし、津波氾濫流の流況が既知であるとして、モデル開発を進める。この津波数値解析では、波長水深比が小さく、重力加速度に比べ水粒子の鉛直加速度が小さい場合に適用可能な長波理論が用いられ、2次元非圧縮性流体の非回転運動を仮定した次の支配方程式(質量と運動量の保存式)を、構造格子を

* 国立研究開発法人建築研究所 研究員・博士(工学)

** 清水建設株式会社 主任研究員・修士(工学)

*** 神戸大学都市安全研究センター 教授・学博

**** 清水建設株式会社 グループ長・博士(工学)

Research Engineer, Building Research Institute, Dr. Eng.

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

Prof., Research Center for Urban Safety and Security, Kobe Univ., Ph.D.

Group Leader, Institute of Technology, Shimizu Corp., Dr. Eng.

用いた有限差分法で解くことが一般的である⁷⁻⁹⁾。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

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

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

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、 t は時間である。このとき、建物といった陸上構造物の影響は、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 n 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ことが多い^{注1)}。

津波火災シミュレーションでは、こうした津波数値解析の結果を活用し、「流出」「漂流・堆積」「出火」「延焼」の4過程について、順に予測を行っていく。まず、津波氾濫流の流況を与条件とし、津波被害関数を用いて、流出する建物を帰納的に予測する。次に、流出する建物を瓦礫の発生源とした漂流シミュレーションを行い、浸水区域における可燃物の分布を時系列に予測する。この情報を「出火」「延焼」を記述する火災モデルの入力条件とし、津波火災被害の評価に繋げる。なお、こうした手続きを実地域に適用するにあたっては、帰納的手法が持つ不確実性に注意し、モンテカルロ・シミュレーションを活用することで、当該地域で起こり得る多様なシナリオを考慮した評価を行う必要がある。

3. 津波による建物の流出可能性を予測する統計モデル

3.1 既往の津波被害関数

津波による建物被害を予測する手法として、建物被害の規模を津波氾濫流の流体力学的な諸量との関連で記述した津波被害関数¹⁰⁻¹³⁾が提案されている。一般的に、この津波被害関数は、北海道南西沖地震津波（1993）やスマトラ島沖地震津波（2004）等、既往の津波

による建物被害情報と津波の強さとの関連を統計的に推定し、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。

$$P_D = \Phi \left[\frac{X - \mu}{\sigma} \right], \quad P_D = \Phi \left[\frac{\ln X - \lambda}{\xi} \right] \quad (4)$$

ここに、 P_D は被害率、 Φ は標準正規分布の累積分布関数、 X は浸水深、最大流速、最大抗力等の津波外力指標、 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。

津波数値解析との連携が可能なこの手法は、津波火災シミュレーションにおいて活用できる可能性が高い。その一方で、既往の津波被害関数の多くには、次の課題もある：

- 1) 予測される被害率が、流失と全壊を合わせた被害率となっており、津波被害関数の活用上、両者を区別して予測することができない
- 2) 津波被害関数の推定に用いた被害情報の中に、構造種別といった建物の属性が含まれていないため、建物構造の違いを考慮して被害率を予測することができない

3.2 新しい津波被害関数

本研究では、国土交通省により整備された東北地方太平洋沖地震津波による建物被害情報¹⁴⁾を活用することで、建物の流出確率を構造別に予測可能な津波被害関数を推定する。ただし、津波被害の特性は、地形や土地利用状況の違いにより、地域によって異なることが多く、ある地域で推定される津波被害関数が、他の地域に対しても普遍的に適用できるとは限らない¹⁰⁾。一方で、こうした地域差の影響をモデル化し、津波被害関数の中でこれを陽に考慮することも容易ではない。そこで本研究では、各地域の建物被害情報を合わせた全地域のデータを活用することとし、当該津波の被災地域における全体的な被害特性を表した津波被害関数を推定する。

(1) 活用するデータの概要

全地域のデータ¹⁴⁾には、当該津波により被災した64の市区町村の浸水区域に存在した全ての建物について、構造別・階数別・被害状況別の棟数が、0.5m区切りの浸水深カテゴリで集計されている。このうち、構造種別は「木造」「鉄骨造」「鉄筋コンクリート造」「その他」の4分類であり、都市計画基礎調査や現地調査に基づいている。階数については、「木造」「鉄筋コンクリート造」の建物が「1階建て」「2階建て」「3階建て以上」の3分類であり、「鉄骨造」「その他」の建物には、階数の分類はない。被害状況は「流失」「全壊」「1階天井以上浸水」「大規模半壊」「半壊」「一部損壊」の6分類であり、目視を原則とした現地調査に基づいている^{注2)}。浸水深については、浸水痕跡の実測値を空間補間した5mメッシュの浸水深が推定されており、個別の建物にこの推定情報が付与されている。

(2) 二項分布のロジスティックモデル

本研究では、「木造」「鉄骨造」「鉄筋コンクリート造」の各構造別に、浸水深に対し被害区分が「流失」となる確率を予測するモデルを推定する。階数の分類がある「木造」「鉄筋コンクリート造」については、2階建て以下の低層建物を対象にしたモデルを、階数の分類がない「鉄骨造」については、これを考慮しないモデルを推定する。このとき、推定に活用するデータは、木造低層が130,625棟、鉄骨造が11,655棟、鉄筋コンクリート造低層が3,314棟である。ただし、木造低層建物の被害状況の分布を確認すると、浸水深の小さ

図1 本研究で構想する津波火災シミュレーションの枠組み

いカテゴリでは標本が大きいのに対し、浸水深の大きいカテゴリでは標本が小さくなる特徴が表れている（図2）。この特徴は、他の建物構造についても同様に見られた。既往の津波被害関数の推定¹⁰⁻¹³⁾では、カテゴリ間で標本の大きさに差が生じないようにカテゴリを調整することで、算定される被害率の有意性を均等にし、回帰分析を用いた推定を行っていた。しかし、本研究で活用するデータでは、カテゴリの調整が困難であるとともに、カテゴリ間で差のある標本の大きさをそのまま分母にとって被害率を算定することも適切でない。

そこで本研究では、津波被害関数の推定に、二項分布を用いたロジスティック回帰を採用する。このモデルでは、標本の大きさが n_i 棟の浸水深カテゴリ i において、 y_i 棟の「流失（流出）」が観測される確率 $f(y_i)$ に、次の二項分布

$$f(y_i) = \binom{n_i}{y_i} p_i^{y_i} (1-p_i)^{n_i-y_i} \quad (5)$$

を仮定し、建物の流出確率 p_i に、浸水深 x_i を説明変数とした次のロジスティック関数を採用する。

$$p_i = \frac{1}{1 + \exp(-(\beta_1 + \beta_2 x_i))} \quad (6)$$

ここに、 β_1 は切片、 β_2 は係数である。このとき、次の尤度関数 L を最大化するパラメータ β_1, β_2 を数値計算により求める（最尤推定する）ことで、各カテゴリの標本の大きさ n_i が尤度に直接反映されるとともに、流失棟数 y_i が $0 \sim n_i$ の値を持つことが保証される。

$$L(\beta_1, \beta_2) = \prod_{i=1}^m \binom{n_i}{y_i} p_i^{y_i} (1-p_i)^{n_i-y_i} \quad (7)$$

ここに、 m は浸水深カテゴリの数である。ただし、推定にあたっては、浸水深カテゴリの中央値を説明変数 x_i に使用した。

3.3 津波被害関数の推定結果

図3に、推定された津波被害関数（流出確率 p_i ）の予測曲線を示す。なお、図のプロットは、各浸水深カテゴリに占める「流失」建物の比率を表しているが、標本の大きさがカテゴリにより異なるため、参考値であることに注意する必要がある。また、既往の津波被害関数のうち、代表的なもの^{10,11)}の予測曲線を付記した。モデルの未知パラメータは、木造低層の場合で切片が-4.258、係数が1.012、鉄骨造の場合で切片が-3.727、係数が0.338、鉄筋コンクリート造低層の場合で切片が-3.870、係数が0.282と推定され、浸水深の増加に伴って、流出確率も増加する関係が得られた。木造低層のモデルでは、浸水深が2mの辺りから勾配が鋭くなり、8mの辺りで流出がほぼ決定的となる。一方、鉄骨造や鉄筋コンクリート造低層のモデルは、木造低層のそれに比べて緩やかな曲線を形成しており、耐波性に優れた分布となっている。既往の津波被害関数は、建物の多くが木造で構成された地域を対象に推定されたものと考えられるが、いずれも本研究のモデルに対し安全側となっている。これは、既往の津波被害関数が、流失と全壊を合わせて被害率を定義していることに関係している可能性もあるが、津波被害の特性は、津波外力の局所性、地形や土地利用状況、家屋の耐波性能といった様々な要因の集積として得られるものであるから、あるモデルが他の津波や地域に対しても普遍的に適用できるかについては不明点が多い。

図2 浸水深に対する木造低層建物の被害状況¹⁴⁾

図3 津波被害関数の推定結果

4. 津波による瓦礫の漂流・堆積性状を予測する物理モデル

4.1 既往の木材流動モデル

古くから津波や洪水を経験してきた我が国をはじめ、漂流物の流動を解析するモデル¹⁵⁻²⁴⁾は国内外で提案されている。これらの多くは、港湾や河口に貯蔵・係留された木材や船舶の流動を扱ったもので、基本的に、漂流物に成り立つ運動方程式を解くことで、その位置を時系列に更新していく手法をとる。特に、後藤¹⁵⁾は、津波による流木の運動に、回転運動を無視した水平方向の重心の並進運動を仮定し、運動方程式を次のように記述した。

$$m \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_w + \mathbf{F}_m \quad (8)$$

ここに、 m は流木の質量、 $\mathbf{u}$ は流木の速度、 $\mathbf{F}_d$ は抗力、 $\mathbf{F}_w$ は水流の圧力勾配による力、 $\mathbf{F}_m$ は付加質量効果である。また、流木の位置 $\mathbf{X}$ 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、

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \int_0^t \mathbf{u} dt + \sum_{k=0}^n \sqrt{24\kappa\Delta t} \left(\xi_k - \frac{1}{2} \right) \quad (9)$$

ここに、 $\mathbf{X}_0$ は流木の初期位置、 n は現在の時間ステップ、 κ は拡散係数、 Δt は時間刻み、 ξ_k は 0~1 の一様乱数である。

津波による木材の流動を記述したこのモデル¹⁵⁾は、津波火災シミュレーションにおいて活用できる可能性が高い。その一方で、既往のモデルには、次の課題もある：

- 1) 構造物のない湾内における流動を扱っているため、運動方程式には、漂流物が陸上構造物に衝突することで受ける力の影響が記述されておらず、瓦礫の流動が残存建物に妨げられる効果を考慮することができない
- 2) 解析の対象とする漂流物の数や初期位置は、与条件として任意に設定されるため、個別の建物に積載・固定される可燃物量を考慮して、瓦礫の発生数を予測することができない

4.2 新しい瓦礫流動モデル

図 4 は、本研究における瓦礫の漂流・堆積性状予測モデルの概念を示したものである。このモデルは、木材の流動を解析する既往のモデル¹⁵⁾に、

- 1) 残存建物との衝突により瓦礫に作用する力
- 2) 流出建物から発生する瓦礫の数

を組み込むことで、津波火災シミュレーションに利用可能な手法へ改良を加えたものである。ここでは、津波数値解析から得られる津波氾濫流の流況を既知とし、これに流される個々の瓦礫の位置を時系列に予測する。この情報が全ての瓦礫について合わさった結果、浸水区域全体での瓦礫の時空間分布が得られる。このとき、本研究のモデルは、次の 3 つのサブモデルで構成される：

- a) 瓦礫の発生モデル
- b) 瓦礫の漂流モデル
- c) 瓦礫の漂着モデル

ここで、これらのサブモデルの定式化にあたり、設定した方針・仮定を整理すると、次のようになる：

- ・ 可燃物の種類) 津波火災では、建物から発生する瓦礫だけでなく、自動車や船舶といった可燃物も燃え広がりにより寄与する可能性があるが、本モデルでは、モデル開発の端緒を開き易く、可燃物の多くを占めると考えられる建物由来の瓦礫のみを扱う
- ・ 瓦礫の発生源) 津波により建物が完全に流される「流出」の場合には、建物に積載・固定されている可燃物の全てが瓦礫とな

って浸水区域に放出される。なお、主要構造が損壊した「全壊」の場合でも、建物にある可燃物の一部が瓦礫となって放出される可能性はあるが、本モデルでは、建物全体が瓦礫と化す「流出」に比べ、この場合の瓦礫数は多くないと考え、「全壊」による瓦礫の発生を考慮しない

- ・ 瓦礫の特性) 建物から発生する瓦礫の種類、形状、密度等の特性は様々であるが、このばらつきのモデル化は容易でない。本モデルでは、津波時の映像記録を参考に、浸水区域を流れる漂流物の多くが木造建築部材であることを踏まえ、建物から発生する瓦礫の特性を、形状・密度の様な木材で単純化する
- ・ 瓦礫の発生速度) 津波時の映像記録によると、津波による建物の破壊は、瞬間的ではないことも多く、ある時間を要しながら徐々に破壊が進行し、それに伴って瓦礫が発生しているように見える。しかし、この破壊進行のモデル化は容易でない。そこで本モデルでは、簡単のため、瓦礫の発生はある浸水期間において一様な速度で生じるものと仮定する
- ・ 瓦礫の運動) 津波による瓦礫の運動は、既往のモデル¹⁵⁾と同様に、回転運動を無視した水平方向の重心並進運動を仮定する。この運動方程式には、慣性、抗力、水流の圧力勾配、付加質量に加え、新たに残存建物との衝突力を考慮する。なお、大量の漂流物が一斉に流れるような場合には、漂流物同士の衝突により相互作用が生じることになるが、瓦礫が残存建物と衝突することで受ける力に比べ、この相互作用力は大きくないと考え、周辺の瓦礫との間に生じる相互作用を考慮しない
- ・ 瓦礫の停止) 浸水区域を流れる瓦礫は、その底面が地表面に接触した時点で流動を停止するものとし、周囲の水深と流動に必要な喫水（漂流物の底面から水面までの垂直距離）を比較することで、これを予測する。ただし、瓦礫が一度停止しても、ある時点で水深が必要喫水を超えれば、流動が再開される

(1) 瓦礫の発生モデル

本モデルでは、建物から発生する瓦礫の特性を、形状・密度の様な木材で単純化し、この発生は、ある浸水期間において一様な速度で生じると仮定する。火災安全工学の分野では、建材や家具、カーテン類など、種類の異なる可燃物の重量を、発熱量が等価な木材の重量に換算した火災荷重が用いられることが多く、これを基本と

図 4 瓦礫の漂流・堆積性状予測モデルの概念図

した火災性状予測の考え方が整理されている^{25,26)}。本モデルにおいても、今後の火災被害予測を考えれば、浸水区域における可燃物量の分布が火災荷重として予測される方が都合は良い。ここでは、建物 j から単位時間あたりに発生する瓦礫の数 $\dot{n}_{d,j}$ を、全可燃物の放出に要する時間を $t_{r,j}$ として、次のように表す。

$$\dot{n}_{d,j} = \frac{(w_{m,j} + w_{f,j})A_{f,j}L_j}{\rho_l V_l t_{r,j}} \quad (t_{0,j} \leq t < t_{0,j} + t_{r,j}) \quad (10)$$

ここに、 $w_{m,j}$ は収納可燃物密度、 $w_{f,j}$ は固定可燃物密度、 ρ_l は木材の密度、 V_l は瓦礫の体積、 $A_{f,j}$ は建築面積、 L_j は階数、 $t_{0,j}$ は可燃物の放出が始まる時間である。

(2) 瓦礫の漂流モデル

本モデルでは、既往のモデル¹⁵⁾と同様に、瓦礫の運動に回転運動を無視した水平方向の重心の並進運動を仮定する。このとき、瓦礫同士の衝突による相互作用が小さいと仮定すると、浸水区域を漂流する個々の瓦礫には、次の運動方程式が成り立つ。

$$m_{d,i} \frac{\partial \mathbf{u}_{d,i}}{\partial t} = \mathbf{F}_{d,i} + \mathbf{F}_{w,i} + \mathbf{F}_{m,i} + \mathbf{F}_{c,i} \quad (11)$$

ここに、 i は瓦礫の識別記号、 $m_{d,i}$ は瓦礫の質量、 $\mathbf{u}_{d,i}$ は瓦礫の速度、 $\mathbf{F}_{d,i}$ は抗力、 $\mathbf{F}_{w,i}$ は水流の圧力勾配による力、 $\mathbf{F}_{m,i}$ は付加質量効果、 $\mathbf{F}_{c,i}$ は残存建物との衝突力である。

抗力 $\mathbf{F}_{d,i}$ は、物体が一樣な流れの中を移動する際に流体から受ける流れ方向の力で、抗力係数 C_d を用いて、

$$\mathbf{F}_{d,i} = \frac{1}{2} C_d \rho_w A_{d,i} (\mathbf{u}_{w,i} - \mathbf{u}_{d,i}) |\mathbf{u}_{w,i} - \mathbf{u}_{d,i}| \quad (12)$$

ここに、 ρ_w は水の密度、 $A_{d,i}$ は瓦礫の水面下部分を流れ方向に投影した面積、 $\mathbf{u}_{w,i}$ は水の流れである。

水流の圧力勾配による力 $\mathbf{F}_{w,i}$ は、外力のない完全流体を仮定すると、水流の加速度を生み出す力に等しいことから、

$$\mathbf{F}_{w,i} = \rho_w V_{d,i} \frac{\partial \mathbf{u}_{w,i}}{\partial t} \quad (13)$$

ここに、 $V_{d,i}$ は瓦礫の水面下部分の体積である。

付加質量効果 $\mathbf{F}_{m,i}$ は、物体が流体を押しよけて加速度運動をする際に流体から受ける反作用力で、物体の質量増加と同じ働きをもつことから、付加質量係数 C_m を用いて、

$$\mathbf{F}_{m,i} = \rho_w C_m V_{d,i} \left(\frac{\partial \mathbf{u}_{w,i}}{\partial t} - \frac{\partial \mathbf{u}_{d,i}}{\partial t} \right) \quad (14)$$

瓦礫が陸上の残存建物に衝突する際、衝突の前後で残存建物に運動量の変化がなく、完全非弾性衝突を仮定すると、一回の衝突で瓦礫に伝達される運動量は、瓦礫の進行方向に対し衝突面が垂直な場合、自身が持つ運動量と同じ大きさで、移動方向と逆向きの量となる。実際に、進行方向と衝突面の関係は様々であるから、平均的には、自身の運動量の一部が抵抗となって伝達されたと考えると、一回の衝突で瓦礫に伝達される運動量 $\mathbf{f}_{c,i}$ は、

$$\mathbf{f}_{c,i} = -\phi_1 m_{d,i} \mathbf{u}_{d,i} \quad (15)$$

ここに、 ϕ_1 は 0～1 の定数である。ここで、単位時間あたりの衝突回数 $n_{c,i}$ を、瓦礫の単位時間通過面積に存在する残存建物の数とみなせば、瓦礫の幅を $w_{d,i}$ 、単位面積あたりの残存建物の数を ϕ_2 として、

$$n_{c,i} = \phi_2 w_{d,i} |\mathbf{u}_{d,i}| \quad (16)$$

このとき、衝突力 $\mathbf{F}_{c,i}$ は運動量 $\mathbf{f}_{c,i}$ と衝突回数 $n_{c,i}$ の積であるから、次のように表される。

$$\mathbf{F}_{c,i} = n_{c,i} \mathbf{f}_{c,i} = -\phi_1 \phi_2 w_{d,i} m_{d,i} \mathbf{u}_{d,i} |\mathbf{u}_{d,i}| \quad (17)$$

ただし、 ϕ_2 には残存建物の面積で重み付けした面積占有率を用いることとし、メッシュ単位でこれを評価する。

瓦礫の位置は、既往のモデル¹⁵⁾と同様に、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）の和であると仮定する。このとき、瓦礫の位置 $\mathbf{X}_{d,i}$ はテイラー展開を 2 次で近似して、

$$\mathbf{X}_{d,i}^{(n+1)} = \mathbf{X}_{d,i}^{(n)} + \mathbf{u}_{d,i}^{(n)} \Delta t + \frac{1}{2} \frac{\partial \mathbf{u}_{d,i}^{(n)}}{\partial t} \Delta t^2 + \sqrt{24\kappa \Delta t} \left(\xi_i^{(n)} - \frac{1}{2} \right) \quad (18)$$

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、 ξ_i は 0～1 の一様乱数である。また、瓦礫の速度 $\mathbf{u}_{d,i}$ は、

$$\mathbf{u}_{d,i}^{(n+1)} = \mathbf{u}_{d,i}^{(n)} + \frac{\partial \mathbf{u}_{d,i}^{(n)}}{\partial t} \Delta t \quad (19)$$

これらの計算に必要な瓦礫の加速度は、式 (12-14,17) を式 (11)

に代入し、移項した次の式で計算する。

$$\frac{\partial \mathbf{u}_{d,i}^{(n)}}{\partial t} = \frac{\left\{ \frac{1}{2} C_d \rho_w A_{d,i} (\mathbf{u}_{w,i}^{(n)} - \mathbf{u}_{d,i}^{(n)}) |\mathbf{u}_{w,i}^{(n)} - \mathbf{u}_{d,i}^{(n)}| + \rho_w (1 + C_m) V_{d,i} \frac{\partial \mathbf{u}_{w,i}^{(n)}}{\partial t} - \phi_1 \phi_2 w_{d,i} m_{d,i} \mathbf{u}_{d,i}^{(n)} |\mathbf{u}_{d,i}^{(n)}| \right\}}{m_{d,i} + \rho_w C_m V_{d,i}} \quad (20)$$

表 1 計算条件

解析	項目	設定内容
津波	計算期間	2011.3.11 14:46～20:46
	計算格子	1350m, 450m, 150m, 50m, 10m で ネスティング（陸上は 10m）
	断層モデル	東北大学モデル（Version1.2） ²⁸⁾
	底面摩擦	建物密集度や土地利用に応じた 粗度係数 ²⁹⁾ （中央防災会議 ³¹⁾ に基づく）
	潮位	TP+0m
	防潮堤	TP+4m（倒壊区間は防潮堤なし） ³⁰⁾
瓦礫	計算期間	2011.3.11 14:46～20:46
	時間刻み	0.6s
	定数(衝突力)	試行錯誤的に調整した 5 条件 (0.0, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0)
	形状・密度	0.1×0.1×2.4m, 380kg/m ³
	津波流出建物	827 棟（国土交通省調査 ²⁷⁾ の「流失」建物）
	瓦礫放出期間	浸水開始から 1 分間
	建物構造種別	木造・S 造・RC 造 （国土交通省調査 ²⁷⁾ の構造種別に基づく）
	収納可燃物密度	構造種別によらず 30kg/m ²
	固定可燃物密度	木造・S 造：100kg/m ² , RC 造：0kg/m ²
	残存建物占有率	国土交通省調査 ²⁷⁾ の「流失」以外の建物で 住宅地図データベースを基に 10m メッシュで算定

図5 2011年東北地方太平洋沖地震津波における岩手県山田町中心部の被害状況

(3) 瓦礫の漂着モデル

瓦礫が流動を停止し、陸上に漂着する条件は、瓦礫の底面が地表面に接触した時点と仮定する。ここでは、周囲の水深と流動に必要な喫水（漂流物の底面から水面までの垂直距離）を比較し、これを予測する。この流動に必要な喫水 h_{cr} は、次の式で計算する。

$$h_{cr} = \frac{\rho_l}{\rho_w} h_{d,i} \quad (21)$$

ここに、 $h_{d,i}$ は瓦礫の厚さである。ただし、瓦礫が一度漂着したとしても、ある時点で水深が必要喫水を超えれば、漂流が再開されるものとする。

4.3 モデルの検証（東北地方太平洋沖地震津波への適用）

モデルの妥当性を検証するため、東北地方太平洋沖地震津波を対象とした瓦礫漂流シミュレーションを行った。ここでは、津波の浸水区域において2件の火災が発生し、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の火災事例⁶⁾に着目する。

図5は、当該地域の被害状況を概観したものである。国土交通省の調査²⁷⁾により、浸水区域にあった建物の構造種別と被害状況が把握されている。なお、建物の被害区分は、3.2で活用した建物被害情報¹⁴⁾のそれと同じである。また、火災により焼失した建物は「全壊」の被害区分に含まれる。津波により流出した建物は、海に近い所に集中しており、海岸に沿って帯状に分布している。その一方で、火災被害のあった範囲では、流出した建物は少なく、全壊と判定された建物が多い。このことは、津波により破壊された沿岸部の建物が、大量の瓦礫となってこの範囲に堆積し、その上を火災が燃え広がった状況を裏付ける。特に、隣棟間隔が広く空地の多い南部においても火災が大規模化したことは、津波により押し流された瓦礫の関与を強く示唆している。

(1) 計算条件

表1に、計算条件を示す。ここでは、数値解析により再現した津波氾濫流の流況を与条件として、地震発生から6時間分のシミュレ

ーションを行った。この津波氾濫流の入力にあたっては、数値解析の結果を1分間隔で出力しておき、これを読み込みながらその間を線形補間することで、入力する津波データとした。ただし、シミュレーションでは、残存建物との衝突力を決定する定数 ϕ_l が未知である。現状では、津波後の瓦礫分布を定量的に把握したデータが存在しないため、予測される瓦礫分布を実測データと比較するような検証は難しい。そこで、火災焼失区域に堆積する最終的な可燃物量が最大となるよう、定数 ϕ_l を試行錯誤的に同定することとし、調整の結果、0.0、0.1、0.2、0.5、1.0の5条件について計算を行った。

a) 与条件とする津波データ

与条件とする津波データは、式(1-3)の長波理論式に基づいた数値解析により予測するものとし、津波の初期水位分布は、今村ら²⁸⁾の断層パラメータより求めた。このとき、家

屋等の構造物は地形モデルでは考慮せず、建物密集度に応じた底面摩擦として抵抗を与えることで、その影響を考慮した²⁹⁾。また、当該地域の防潮堤のうち、津波による倒壊が生じた1200mの区間³⁰⁾については、当初より防潮堤がなかったものとして解析を行った。

数値解析により得られた津波氾濫流の再現性については、予測された浸水区域を実際のそれと重ね合わせ、両者が概ね一致することを確認した。ただし、水位や流速の変化といった津波氾濫流の流況については、検証に利用可能なデータが不足しているため、現時点で、その再現性を確認することは困難である。本研究では、こうした再現性検証の限界を踏まえ、得られた流体力学的諸量（水位、流速）は瓦礫漂流シミュレーションに適用可能であると判断した。

b) 漂流解析の条件

浸水区域を流れる漂流物は、柱や梁といった構造物材がその大半を占めるものと考え、瓦礫の形状を0.1m×0.1m×2.4mの棒状とみなした。抗力係数 C_d や付加質量係数 C_m 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。ここでは、簡単のため、瓦礫の中

図6 漂流・漂着別の瓦礫量の時間変化(定数 $\phi_l=0.1$)

心軸と流れ方向は常に一致するものと仮定し、円柱を対象にした既往の水理実験の結果³²⁾を基に、それぞれの係数を次のように与える。

$$C_d = \left(0.89(l/w)^{0.01} + 32.5Re^{-1/2} \right)^2 + 0.01(l/w)Fr^{0.25} \quad (22)$$

$$C_m = 0.78$$

ここに、 l は瓦礫の長さ、 w は瓦礫の幅、 Re はレイノルズ数、 Fr はフルード数である。また、拡散係数 κ については、いくつかの水理実験の結果³²⁻³⁴⁾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、 $0.032 \sim 0.23$ 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。

津波により流出する建物については、津波被害関数を用いた確率論的な予測を行うのではなく、国土交通省の調査²⁷⁾により「流失」と判定された建物を与条件として設定する。このとき、当該地域で流出する建物は827棟であった。ただし、瓦礫の放出開始時間 $t_{0,j}$ や放出所要時間 $t_{r,j}$ については、現時点で信頼性の高い情報が殆ど存在しない。そこで、便宜的に、津波の先端が建物に到達した時点から瓦礫の放出が始まるものとし、そこから1分間で全ての瓦礫が放出されるものと仮定する。

建物に積載される可燃物の密度は、国土交通省の調査²⁷⁾により既知となっている構造種別（木造・鉄骨造・鉄筋コンクリート造・その他）に応じて設定した。このうち、収納可燃物密度 $w_{m,j}$ については、既往の調査結果²⁵⁾を参考に、構造種別によらず 30kg/m^2 と設定した。また、固定可燃物密度 $w_{f,j}$ については、過去の実大火災実験に関する計測結果³⁵⁾を参考に、木造、鉄骨造のそれを 100kg/m^2 、鉄筋コンクリート造のそれを 0kg/m^2 と設定した。なお、「その他」の構造種別は、分類根拠を参考に、鉄骨造と読み替えた。

単位面積あたりの残存建物の数 ϕ_2 には、残存建物の面積で重み付けした面積占有率を用いることとする。ここでは、国土交通省の調査²⁷⁾の被害区分のうち、「流失」以外の建物の占有面積をゼンリンの住宅地図データベースから把握し、10mメッシュで面積占有率を算定した。

(2) 計算結果と考察

a) 津波氾濫流による瓦礫動態の全体像

図6に、定数 ϕ_1 を 0.1 と設定した場合に予測された漂流・漂着別の瓦礫量の時間変化を示す。ここでは、津波氾濫流との対応が分かるよう、数値解析により得られた流域面積の変化も示してある。

津波氾濫流の流域面積は、地震から30分が経過した辺りで、急激に増加しており、この時点から津波が陸上に溢れ、市街地を遡上し始めたことが分かる。流域面積は、地震から36分が経過した15時22分に

図7 瓦礫漂流シミュレーションの一例(定数 $\phi_1=0.1$)

図8 計算終了時点における陸上の可燃物分布(定数 $\phi_1=0.1$)

ピークを迎え、約 70ha が浸水する結果となった。これに対応して、漂流瓦礫の量も同様の変化を示しており、氾濫流により破壊された建物から、莫大な数の瓦礫が発生し、津波に流されていることが分かる。最大の流域面積を記録した 15 時 22 分の計算結果を可視化すると、図 7（上）のようになる。発生した大量の瓦礫は、津波の先端に近い範囲にかたまっており、帯状になって海から遠ざかる方向に流れている様子が分かる。本計算で発生した瓦礫数は 1850,560 個であり、重量では約 16,000ton に相当する。

流域面積がピークを迎えた後、引き波が行ってその面積は一度減衰していくが、これとは逆に、漂着瓦礫の量は増加していく結果となった。これは、押し波によって水深の浅い所に運ばれた瓦礫の一部が、引き波によって戻されることなく、水の引いた所に堆積したためと考えられる。流域面積が最大となってから 20 分が経過した 15 時 42 分の計算結果を可視化すると、図 7（下）のようになる。これを見ると、大量の瓦礫の一部は、引き波によって海側に流されており、海上への流出が始まっている。その一方で、浸水区域の境界に近い一部の範囲では、水が引いたことで慣性を失った多くの瓦礫が、既に堆積している。

津波の押し引きはこれ以降も継続するため、流域面積の増減も繰り返される。このため、一度漂着した瓦礫であっても、場所によっては再来した押し波に流されることから、漂流・漂着別の瓦礫量も増減を繰り返す結果となっている。ただし、時間が経過するにつれて、津波氾濫流の勢いは弱まっていくことから、こうした瓦礫量の推移も変化が少なくなり、地震から 6 時間後には、概ね一定の状態に収束する結果となった。最終的に、陸上に堆積した瓦礫量は全体の約 3 分の 2 に相当する 12,000ton であり、残りの 3 分の 1 は概ね海上に流出したことになる。

b) 最終的な可燃物分布に与える定数 ϕ_1 の影響

図 8 に、定数 ϕ_1 を 0.1 と設定した場合に予測された計算終了時点における陸上の可燃物密度の分布を示す。ここでは、瓦礫の追跡に拡散係数を用いた確率論的な予測が組み込まれていることに注意し、モンテカルロ・シミュレーションを用いて 100 回の繰り返し計算を行った。このとき、各試行においては、計算終了時点において得られる個々の瓦礫の位置から、その重量を 10m メッシュで集計しておき、全試行が終了した時点で、その期待値を算出した。なお、図に

図 9 火災焼失区域に堆積する総瓦礫量(期待値)

は、津波により流されなかった残存建物（国土交通省の調査²⁷⁾における「流失」を除いた「全壊～一部損壊」の建物）を丸印で示してある。

計算終了時点における陸上の瓦礫は、火災のあった焼失区域に限らず、海岸に近い所から離れた所まで、浸水区域の広い範囲に分布していることが分かる。火災のあった焼失区域に着目すると、北部では、瓦礫の量が多く全体的に分布しているのに対し、南部では、瓦礫の量が少なく一部に偏って分布する結果となった。この南部において、予測された瓦礫量が少ない要因には、次の可能性が考えられる：(1) 数値解析により予測された津波氾濫流の流況のうち、この地域における再現性が不足している、(2) 漂流物間で生じる摩擦の影響が考慮されていないため、堆積する瓦礫量が過小評価されている。

計算終了時点における火災焼失区域の総瓦礫量（期待値）が、定数 ϕ_1 によりどのように変化するかを調べると、図 9 のようになる。これによると、定数 ϕ_1 を 0.1 と設定した場合に、火災焼失区域に堆積する可燃物量は最も多くなる結果となった。残存建物との衝突力が全く考慮されない条件（定数 ϕ_1 が 0.0 の場合）は、瓦礫が流されやすくなるため、可燃物量が少なくなるものと考えられる。一方、定数 ϕ_1 が大きくなりすぎると、海側に近い残存建物の影響が支配的となり、火災焼失区域に瓦礫が流れ込みにくくなるため、可燃物量が少なくなるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、津波火災シミュレーションに向けたモデル開発の端緒として、津波により建物から流出し浸水区域を流れ溜まる瓦礫の分布を予測可能な手法について検討を行った。ここでは、近年の地震被害想定において主流となっている津波数値解析との連携を前提とし、「流出」「漂流・堆積」の各過程を記述する次の二種類の予測モデルを整備した。

- 1) 津波による建物の流出可能性を予測する統計モデル
- 2) 津波による瓦礫の漂流・堆積性状を予測する物理モデル

まず 1) のモデル開発では、東北地方太平洋沖地震津波による建物被害情報を活用し、浸水深から建物の流出確率を構造別に予測可能な津波被害関数を、ロジスティック回帰により推定した。また、得られた津波被害関数の予測曲線を示し、既往の津波被害関数と比較することで、モデルの特性を明らかにした。ただし、本研究の津波被害関数は、当該津波による各地域の建物被害情報を合わせた全地域データを基に構築されており、被災地域全体の被害特性を反映したものであるから、これがその他の津波や地域に対しても普遍的に適用できるかについては不明な点が残る。

次に 2) のモデル開発では、木材の流動を解析する既往のモデルに、残存建物との衝突により瓦礫に作用する力、および、流出建物から発生する瓦礫の数を組み込むことで、津波火災シミュレーションに利用可能な手法へ改良を加えた。このモデルの妥当性を検証するため、モデルを東北地方太平洋沖地震津波に適用し、津波火災被害のあった岩手県山田町中心部を対象にした瓦礫漂流シミュレーションを行った。ここでは、瓦礫の流動がほぼ収束したと考えられる地震から 6 時間後に着目し、火災焼失区域に堆積する瓦礫量が最大となるよう、モデルの未知定数 ϕ_1 を試行錯誤的に同定した。その結

果、予測された瓦礫分布は火災焼失区域の大部分を包含していたものの、一部の区域では、瓦礫量が少なくなる結果が得られた。このため、モデルには依然として改良の余地がある。

本研究で整備した二種類のモデルを組み合わせ活用すれば、今後の発生が予想される津波に対しても、可燃物が浸水区域のどこにどの程度溜まるのか、について予測が可能であると考えられる。この情報を、避難施設や浸水区域外への延焼といった火災被害の評価に繋げるには、津波火災の「出火」「延焼」を予測するモデルの開発が課題となる。

注

注 1) 津波数値解析で設定する粗度係数は、津波による建物の流出に伴い、変化することが自然である。この場合、建物の流出は不確定であるため、多様な流出パターンにおける津波氾濫流の流況を事前に計算することになる。しかし、一試行の津波数値解析に要する時間は、瓦礫漂流シミュレーションのそれに比べて非常に長いので、地震被害想定での活用を考えると、簡便さを欠き過ぎる。そこで本研究では、津波数値解析における粗度係数の設定では、建物流出の影響を考慮しないものとし、建物流出が生じない場合の粗度係数設定により予測される津波氾濫流の流況を、津波火災シミュレーションの与条件とする。

注 2) 国土交通省による建物被害区分の判定根拠は、「流失」が「基礎だけを残し、建物が完全に流されている」、「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」、「1階天井以上浸水」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」である¹⁴⁾。

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) 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
- 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) 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
- 5) 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
- 6) 日本火災学会：東日本大震災火災等調査報告書（速報版）、2011
- 7) IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission): IUGG/IOC TIME PROJECT, Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-frog Scheme, UNESCO, pp.1-24, 1997
- 8) 高橋智幸：津波防災における数値計算の利用、日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌, Vol.12, No.2, pp.23-32, 2004
- 9) 首藤伸夫：津波の事典、朝倉書店, 2007
- 10) 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
- 11) 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
- 12) A. Suppasri, S. Koshimura, F. Imamura: Developing Tsunami Fragility Curves Based on the Satellite Remote Sensing and the Numerical Modeling of the 2004 Indian Ocean Tsunami in Thailand, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol.11, pp.173-189, 2011
- 13) E. Mas, S. Koshimura, A. Suppasri, M. Matsuyama, T. Yoshii, C. Jimenez, F. Yamazaki, F. Imamura: Developing Tsunami Fragility Curves Using Remote Sensing and Survey Data of the 2010 Chilean Tsunami in Dichato, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol.12, pp.2689-2697, 2012
- 14) 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)

- 15) 後藤智明：津波による木材の流出に関する計算、第 30 回海岸工学講演会論文集, pp.594-597, 1983
- 16) 中川一・高橋保・池口正晃：洪水氾濫に伴う流木群の拡散に関する研究、水工学論文集, Vol.37, pp.379-384, 1993
- 17) 中川一・井上和也・池口正晃・坪野考樹：流木群の流動に関する研究（2）ー流木群の堰止めー、京都大学防災研究所年報, No.36, B-2, pp.487-498, 1993
- 18) 藤井直樹・大森政則・池谷毅・朝倉良介・武田智吉・柳沢賢：港湾における津波漂流物の数値解析、海岸工学論文集, Vol.52, pp.296-300, 2005
- 19) K. Kumagai, K. Oda, N. Fujii, Applicability of Simulation Model for Drift Behavior of Containers due to Tsunami, Proceedings of Techno-Ocean 2006/19th JASNAOE Ocean Engineering Symposium, NO.72, 2006
- 20) 橋本貴之・越村俊一・小林英一：津波による大型船舶の漂流挙動解析ーインドネシア・パダンアチェにおける事例ー、土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.65, No.1, pp.316-320, 2009
- 21) T. Tomita, K. Honda: Practical Model to Estimate Drift Motion of Vessels by Tsunami with Consideration of Colliding with Structures and Stranding, Coastal Engineering 2010, pp. 1-11, 2010
- 22) 菅裕介・越村俊一・小林英一：2011 年東北地方太平洋沖地震津波による気仙沼湾における大型船舶の漂流・座礁の解析、土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.251-255, 2012
- 23) G. Prasetya, K. Black, W. Lange, J. Borrero, T. Healy: Debris Dispersal Modeling for the Great Sumatra Tsunamis on Banda Aceh and Surrounding Waters, Natural Hazards, Vol.60, pp. 1167-1188, 2012
- 24) L.C.-M. Lebreton, J.C. Borrero: Modeling the Transport and Accumulation Floating Debris Generated by the 11 March 2011 Tohoku Tsunami, Marine Pollution Bulletin, Vol.66, pp.53-58, 2013
- 25) 油野健志・山仲秀利・大宮喜文・高橋清・田中峰義・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
- 26) 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
- 27) 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)
- 28) 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 東北大学モデル (version1.2) , http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku_2011/model/dcrc_ver1.2.pdf (2014/12/1 閲覧)
- 29) 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
- 30) 東北地方太平洋沖地震及び津波災害に関する漁港海岸の被害状況及び考察、第 1 回岩手県津波防災専門技術委員会、http://www2.pref.iwate.jp/~hp0212/fukkou_net/pdf_doc/tsunamibousai_02_01_5.pdf (2014/12/1 閲覧)
- 31) 内閣府中央防災会議、日本海溝千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会, 2006
http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/nihonkaiko_chisimajishin/index.html (2014/12/1 閲覧)
- 32) 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
- 33) Elder, J. W.: The Dispersion of Marked Fluid in Turbulent Shear Flow, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 5, p.544-560, 1959
- 34) 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
- 35) 国土交通省総合技術開発プロジェクト：まちづくりに関する防災評価・対策技術の開発 報告書、国土交通省, 2003

SPATIO-TEMPORAL DISTRIBUTION MODELING OF TSUNAMI-DRIVEN COMBUSTIBLE OBJECTS RELEASED FROM DESTROYED BUILDINGS TOWARDS TSUNAMI FIRE SIMULATION

Tomoaki NISHINO^{}, Yugo IMAZU^{**}, Akihiko HOKUGO^{***}
and Hiroaki NOTAKE^{****}*

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

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

^{***} Prof., Research Center for Urban Safety and Security, Kobe Univ., Ph.D.

^{****} Group Leader, Institute of Technology, Shimizu Corp., Dr. Eng.

Two sub-models for spatio-temporal distribution of tsunami-driven debris are proposed: (1) tsunami fragility function for building destruction, and (2) debris drift and accumulation model due to tsunami inundation flow. These modeling are the beginning of the model development towards tsunami fire simulation and assume the collaboration with the existing numerical simulation of tsunamis.

The tsunami fragility function is the logistic regression model based on the data of the building damage after the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami. This model represents the relation between inundation depth and washout probability of buildings according to their construction types. Characteristic of this model was identified by comparing the predicted curves of this model with the existing tsunami fragility functions.

The debris drift and accumulation model is the extension of the existing model for driftwood by incorporating the debris release model and the blocking effect of surviving buildings on debris movement. In order to validate the proposed model, debris diffusion simulation for Iwate Yamada area after the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami was conducted in a given condition of numerically-simulated tsunami inundation flow. Field survey after the tsunami has reported that two fires broke out in tsunami inundation zone of this area and developed into conflagrations resulting in 16 hectares of burned area. In this simulation, a single unknown parameter governing the blocking effect of surviving buildings was calibrated by trial and error to maximize the debris amount accumulating in the fire-damaged zone within 6 hours after the earthquake. The obtained result indicates that about two thirds of released debris eventually accumulated onshore and broadly distributed in tsunami inundation zone. The predicted debris distribution covers most of the fire-damaged zone. However, the predicted debris amount was relatively small in a part of the fire-damaged zone.

Combination use of these two models will also enables to predict how combustibles objects accumulate in tsunami inundation zone for future tsunamis. In order to lead such information to the damage estimation of tsunami fire, further model development for ignitions and fire spread of tsunami fire is needed.

(2014 年 12 月 3 日原稿受理, 2015 年 7 月 16 日採用決定)