

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K13002

研究課題名（和文）津波流動・がれき挙動双方向結合モデルと火災モデル開発による津波火災モデルの高度化

研究課題名（英文）Improvement of tsunami-fire model by developing two-way coupled flow-debris model and fire model

研究代表者

千田 優 (CHIDA, YU)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・研究官

研究者番号：70774214

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：津波の流体モデルと漂流物モデル間の相互干渉を考慮した津波流動・がれき挙動双方向結合モデルの開発を行った。さらに、同一地域において流出した建物がれきの空間分布の把握と建物がれきを対象にした漂流物計算の両方を実施し、それらの結果を定量的に評価した。その結果、既往の片方向モデルによる結果と双方向モデルの計算結果を比較すると、双方向接続の場合、片方向接続に比べ漂流距離が短くなること等が分かった。さらに建物がれきを対象とする漂流物計算では、漂流過程中的がれきの破壊を考慮した数値モデルへの発展が必要であることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで知見の少なかった津波火災（特に陸上で延焼した津波火災）に対して、数値シミュレーションの活用を通して知見の蓄積を行った意義は高い。特に、浸水計算の条件設定や漂流物計算の条件設定を変えた計算結果を、津波の痕跡高さやがれきの空間分布との比較を通して評価を行い、最適な数値計算条件について言及した。さらに、同一地域でがれきの空間分布の把握と建物がれきを対象にした漂流物計算の両方を実施し、それらの結果を定量的に比較検討した研究は本研究以外にない。

研究成果の概要（英文）：A two-way coupled model of tsunami flow and debris motion was developed. In addition, I carried out both field analysis with high-resolution aerial photograph to evaluate the spatial distribution of building debris and the numerical simulation of the building debris. As a result, it was found that the drift distance becomes shorter in the case of two-way model than in the case of one-way model. Furthermore, it was found that fragmentation assumption in tsunami debris simulation affects substantially the result of the final distribution of debris and intermediate assumption, such as gradual fragmentation, is likely to show better results.

研究分野：津波

キーワード：津波 漂流物 がれき分布 津波火災 双方向結合モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震津波において、数多くの津波に起因する火災(以下、津波火災<sup>1)</sup>と記す)が発生した。東北津波以降、津波火災のメカニズム解明に向けた動きは本格化した。津波火災の一連の現象を数値計算で解析した事例は研究開始時には存在していなかった。富田<sup>2)</sup>(研究代表者の研究グループ)は津波火災被害を推定するための第一段階として、海上で延焼が拡大した津波火災を対象とした津波火災モデルの開発を行った。海上における津波火災では、海上に流出した建物がれきと油の挙動を評価することが重要であった。また、陸上の火災延焼に寄与したのがれき集積は、津波流動場とがれき発生・漂流挙動場が相互に影響を及ぼす複雑な現象であるため、津波流動モデルから得られる結果をがれき発生・漂流モデルの入力条件として計算(片方向の計算)するだけでは不十分で、両モデルを双方向で結合(津波流動・がれき挙動双方向結合モデル)が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、新たに津波流動・がれき挙動双方向結合モデルの開発、火災モデルの開発を実施することにより、津波火災モデルを高度化することを当初の目的としていた。しかしながら、研究を進めていく中で、陸上で延焼した津波火災を予測するためには、今津<sup>3)</sup>の研究にあるように建物がれきの集積範囲・堆積範囲を適切に予測することが最重要であることが分かってきた。建物がれきの挙動を予測するモデルの精度向上に注力するため、本研究の目的から火災モデルの開発や火災モデルの改良に関する部分を除いた。

3. 研究の方法

1) 一般的に建物がれきなどの漂流物の挙動を数値計算モデルで予測する場合、流体モデルと漂流物モデルを片方向接続、すなわち流体モデルの結果を漂流物モデルに利用するのみの接続方法を用いることが多い。しかしながら、津波によって破壊された建物が陸上を漂流する様子が記録された東北津波時の映像を見ると、がれきが群体として漂流しており、このような場合では漂流物が流体側に及ぼす影響も考慮する必要があると考えられる。そこで、既存の数値モデルである津波高潮シミュレータ STOC (Storm surge and Tsunami simulator for Ocean and Coastal areas) に流体モデル (STOC-ML) と漂流物モデル (STOC-DM) 間の相互作用を考慮した双方向接続モデルを実装した。具体的には式(1)~式(5)に示す抗力と慣性力の反作用力としての応力を流体の運動方程式の外力項に加えることにより相互作用効果を考慮した。改良したモデルにより水理模型実験の再現計算を行い、片方向接続モデルと両方向接続モデルの比較を行った。

$$F_X = (1 - \lambda)F_{DX1} + \lambda F_{DX2} + F_{MX} \quad (1)$$

ここで、 $F_X$ は船主尾方向の流体力、 $F_{DX1}$ 、 $F_{DX2}$ は抗力、 $F_{MX}$ は慣性力である。抗力と慣性力の評価式は式(2)~式(5)、抗力の重みづけパラメータ $\lambda$ は式(5)に示すとおりである。なお、ここでは紙面の都合上船主尾方向の流体力評価式を記載するに留める。

$$F_{DX1} = \frac{\rho}{2} \iint_{sm} C_{DX1,sm} U_{sm} |U_{sm}| dY dZ \quad (2)$$

$$+ \frac{\rho}{2} \iint_{sn} C_{DX1,sn} U_{sn} |U_{sn}| dY dZ$$

$$F_{DX2} = \frac{\rho}{2} C_{DX2} (U_G^2 + V_G^2) \frac{U_G}{|U_G|} BD \quad (3)$$

$$F_{MX} = \frac{\rho}{2} C_M DL \left( \int_{sm} \frac{\partial U_{sm}}{\partial t} dY + \int_{sn} \frac{\partial U_{sn}}{\partial t} dY \right) \quad (4)$$

$$\lambda = \begin{cases} 1.0 - \frac{0.95}{0.2} \left( \frac{h}{D} - 1.0 \right) & : \frac{h}{D} \leq 1.2 \\ 0.05 & : 1.2 < \frac{h}{D} \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 $C_{DX1,sm}$ 、 $C_{DX1,sn}$ 、 $C_{DX2}$ は抗力係数、 $C_M$ は慣性力係数、 $L$ 、 $B$ 、 $D$ はそれぞれ漂流物の長さ、幅、喫水、 $h$ は水深を示す。 $U_{sm}$ 、 $U_{sn}$ は船首、船尾における相対速度、 $U_G$ 、 $V_G$ は漂流物重心位置における船首尾方向および舷側方向の相対流速である。

2) これまで同一地域において、流出した建物がれきの空間分布の把握と建物がれきを対象にし

た漂流物計算の両方を実施し、それらの結果を定量的に評価した研究例は行われていなかった。そこで本研究では、2011年東北津波時の岩手県山田町を対象にがれきの空間分布推定とがれきの漂流計算を実施し、航空写真から推定した建物がれきの空間分布と比較を行った。その際に、既往の建物がれきを対象とした漂流物計算では、建物をあらかじめ一定の形状に分割したものを漂流物とすることが多いが、東北津波時の映像を見ると建物形状を保持したまま漂流するものも多くある。そこで、建物が形状を保持したまま漂流する場合（以下、非破壊ケース）と漂流開始と同時に建物が断片化する場合（以下、断片化ケース）の二種類の漂流物形状を仮定した漂流計算を実施した。さらに、片方向接続モデルと双方向接続モデルによる計算を行い、両モデルの計算結果を比較した。

- 3) 上記項目に関連して、陸上を遡上する津波は残存建物の影響を受け局所的に流れを変化させるため、当然建物がれきもその影響を強く受ける。したがって、破壊した建物と残存した建物を考慮した浸水計算を行うことが、より精度の高い漂流物予測につながると考えられる。そこで、本研究では従来用いられているマンングの粗度係数により浸水計算と建物分布と高さを直接地形データに反映させ、それらの破壊を考慮した浸水計算を行い、両者の比較を行った。

#### 4. 研究成果

- 1) 改良した津波流動・がれき挙動双方向結合モデルにより、がれきの集積・堆積による障害物化といった漂流物が与える流れ場への変化に対応することが可能となった。本改良モデル計算と既往実験<sup>2)</sup>を比較し、流れの阻害効果の有無が漂流物の挙動に与える影響が大きいことを確認した。
- 2) 岩手県山田町を対象に、建物破壊を考慮した浸水計算および破壊建物を対象とした漂流物計算を実施した。建物がれきの発生について、非破壊ケースと断片化ケースといった両極端の現象を対象に漂流物計算を実施した。計算結果を航空写真から推定したがれきの平面分布や海上流出率と比較する（図-1）ことにより、両ケース間の漂流特性や漂着特性の違い、計算条件や結果の妥当性について議論した。主要な結果を以下に示す。
- ・非破壊ケース（片方向）では、移動距離の平均が152mであったのに対して、断片化ケースでは685mであった。
  - ・非破壊ケース（片方向）では、90%以上の漂流物が二波目の引きを最後に漂着したが、断片化ケースでは、二波目以降も50%ほどの漂流物が漂流を続けた。
  - ・非破壊ケース（片方向）では、遡上先端付近には漂着せず、浸水域中央付近に高密度で漂着したが、断片化ケースでは、遡上先端を含め浸水域全体に漂着した。
  - ・岩手県における海上流出率の統計データが30%であるのに対し、非破壊ケース（片方向）では7%と過小評価、断片化ケースでは45%と過大評価であった。
  - ・延焼範囲内の正規化密度の出現割合を比較したところ、断片化ケースのみ正規化密度の高い箇所が北側に集中していた。
  - ・片方向と双方向計算の計算結果を比較すると、双方向接続の場合、片方向接続に比べ漂流距離が短くなることが分かった。
- 実際の現象は、今回用いた両極端の仮定の間にあるものと考えられる。今後は、がれき漂流物計算の再現性を高めるために、漂流過程での断片化を考慮した数値モデルへと発展を考えている。

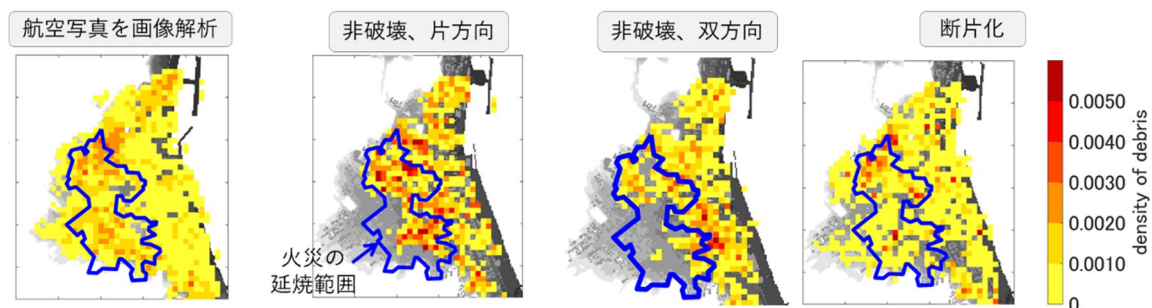


図-1 航空写真を画像解析した結果と計算結果の比較。カラーは正規化密度を示す。正規化密度 = (25m 四方の範囲内に堆積したがれきの重量) ÷ (全がれきの重量)

- 3) 建物の考慮方法を変えた浸水計算を実施し、津波の浸水計算の妥当性を評価するのに用いられる相田の指標によりそれぞれの浸水計算結果を評価した（表-1）。相田の指標は以下の式(6)～式(7)の通りであり、一般的には  $0.95 < K < 1.05$  ,  $\kappa < 1.45$  が妥当性の目安とされている。

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log K_i \quad (6)$$

$$\log \kappa = \left[ \left\{ \sum_{i=1}^n (\log K_i)^2 - n(\log K)^2 \right\} \right]^{1/2} \quad (7)$$

ここでn: 地点数、 $K_i = R_i/H_i$ 、 $R_i$ :i番目の地点での津波痕跡高、 $H_i$ :i番目の地点での計算値である。

表-1 建物の考慮方法を変えた浸水計算の結果

	粗度係数一定(0.025、 建物無し)	建物全部健全	浸水深により建物 破壊、片方向	浸水深により建物 破壊、双方向
<b>K</b>	0.92	1.12	1.03	1.05
<b>κ</b>	1.34	1.16	1.18	1.16

これらの結果から、建物を考慮せず粗度係数で津波浸水計算を行う場合は計算結果が痕跡結果に比べ過大評価、建物をすべて健全で考慮する場合は痕跡に比べ過小評価となった。ただし、粗度係数で考慮した今回の計算は建物分布にかかわらず粗度係数を一定値としているため注意する必要がある。建物を浸水深条件によって破壊する場合は、片方向、双方向共に痕跡結果を良く再現していた。

#### 参考文献

- 1) 日本火災学会: 2011 年東日本大震災火災等調査報告書(要約版), p.30, 日本火災学会, 2015.
- 2) 富田孝史, 千田優: 震災漂流物の漂流推定手法と津波火災の発生推定手法の開発, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 72, No. 2, pp.I\_421-I\_426, 2016.
- 3) 今津雄吾, 野竹宏彰, 関澤愛, 山本治貴: 東北地方太平洋沖地震時の津波瓦礫分布調査に基づく局所的津波火災リスク判定手法, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 72, No. 2, pp.I\_1615-I\_1620, 2016.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 CHIDA Yu, TAKAGAWA Tomohiro	4. 巻 75
2. 論文標題 NUMERICAL STUDY ON THE DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF DEBRIS DUE TO TSUNAMI BY USING NONDESTRUCTIVE AND FRAGMENTED DRIFT OBJECT	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_445 ~ I_450
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.2208/kaigan.75.1_445">https://doi.org/10.2208/kaigan.75.1_445</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 千田優、高川智博
2. 発表標題 津波による建物の非破壊漂流・断片化漂流ががれきの分布特性に与える影響に関する数値的な検討
3. 学会等名 第66回海岸工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Chida
2. 発表標題 Development of Numerical Simulation Method for Uncertain Motion of Debris
3. 学会等名 International Tsunami Symposium, Bali, Indonesia (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----