

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05540

研究課題名（和文）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

研究課題名（英文）Development of a numerical simulation model for tsunami-induced fires caused by the accumulation of combustibles released from destroyed buildings

研究代表者

西野 智研（NISHINO, Tomoaki）

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：00609894

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,200,000円

研究成果の概要（和文）：将来、南海トラフ地震が発生した際には、巨大津波の襲来に伴って、「津波火災」による被害の発生が懸念される。この津波火災の形態については、家屋や自動車など、津波で押し流された大量の可燃物が、瓦礫となって浸水域に集積し、そこで火災が発生することによって、周辺の瓦礫に燃え移り、大規模な延焼火災に発展することが多い。本研究では、津波火災の全体像を数値的に予測可能なシミュレーションモデルを開発することによって、政府や自治体等の地震被害想定で活用可能な津波火災の定量的な被害予測ツールを整備した。

研究成果の概要（英文）：We developed a couple of computational models to numerically simulate the big picture of fires in tsunami-inundated areas: (1) a physics-based model for the drift and accumulation of tsunami-driven combustible objects released from destroyed buildings, and (2) a statistical model for the number of ignitions in tsunami-inundated areas. The applicability of the models was tested by comparing with the survey results on the burned-out areas and the ignitions in the 2011 Tohoku Earthquake. Moreover, we proposed a method for estimating the fire hazard map in tsunami-inundated areas to know where is more likely to be affected by the fires, in which the accumulating combustible density predicted by the model (1) is used as the hazard indicator. Using the proposed method, we estimated the fire hazard map in Shimoda City on the assumption of tsunamis following the future Nankai Trough earthquake.

研究分野：建築・都市火災

キーワード：地震火災 津波火災 火災リスク 地震被害想定 数値シミュレーション ハザードマップ 出火 防災計画

## 1. 研究開始当初の背景

2011年の東北地方太平洋沖地震では、津波の浸水域で100件を超える火災が発生し、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。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、津波で押し流された可燃物が瓦礫となって浸水域に集積し、そこで何らかのエネルギーによって火が着くことによって、周りの瓦礫に燃え移り延焼火災に発展する。特に、津波火災が津波避難施設に延焼した事例や、山林などの非浸水域に延焼した事例が報告されており、津波火災がもたらす二次災害の問題点が明確になってきた。

東北地方太平洋沖地震で経験したような巨大津波は、南海トラフ地震により近い将来にも発生することが予想されており、津波火災に対する防災対策の検討が課題の一つとなっている。研究代表者も、津波火災による津波避難ビルの危険性に着目し、平成24年度～平成26年度の科学研究費補助金（若手研究B）において、津波火災に対し津波避難ビルの火災安全性を確保するための研究を進めてきた。一方、政府や自治体では、対策検討に先立って地震被害想定を実施し、対象地域で予想される被害の全体像を把握することが常である。南海トラフ地震を対象にした被害想定も、2012年に公表された内閣府の地震被害想定を始め、関連自治体でも検討が進められてきた。しかし、こうした被害想定では、津波火災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、例えば、「可燃物が浸水域のどこにどれくらい集積するのか」「津波火災が何件発生するのか」といった点について、被害の実態が合理的に予測されていない。この原因は、津波火災の危険性を数値的に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、防災対策を適切に検討することができない状況を招いている。

津波火災は、1993年に発生した北海道南西沖地震において、奥尻島青苗地区での被害が報告されており、延焼動態や消防活動に関する詳細な調査がなされている。しかし、その後も津波火災の予測に関連する研究は殆どなく、1995年に発生した兵庫県南部地震もあって、大規模火災の被害軽減に向けた研究は、直下型地震に誘発される市街地同時多発火災（以降では、地震火災と呼ぶ）に焦点が充てられてきた。研究代表者も、平成22年度の科学研究費補助金（特別研究員奨励費）において、地震火災の延焼拡大とそれに伴う住民の広域避難行動を時系列に追跡可能なシミュレーションモデルを開発し、地震被害想定での活用を目指した計算ツールを整備してきた。その後、この間に発生した東北地方太平洋沖地震を受けて、日本火災学会を中心に津波火災に関する実態調査が精力的になされ、津波火災の実態を明らかにする資料が収集されるとともに、各地域の出火件数や焼

失範囲など、津波火災の数値シミュレーション手法の開発に必要な検証用データが少しずつ整備されてきた。

## 2. 研究の目的

本研究では、津波火災の危険性を数値的に予測可能なシミュレーションモデルの開発を目的とする。さらに、開発したモデルを用いて、南海トラフ地震津波を対象にした津波火災シミュレーションを行い、既往の地震被害想定の中で、本モデルを活用する方法を示す。ただし、津波火災の燃え草となる可燃物は、家屋・自動車・石油など多岐に渡ることから、モデル開発の端緒を開きやすく、可燃物量が支配的と考えられる「木造家屋」に着目して研究を進める。

## 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、次の4種類の課題に取り組む：

- ① 可燃物の漂流・集積性状の予測モデルの開発と東北地方太平洋沖地震の津波火災被害範囲との比較による検証
- ② 津波火災の発生件数の予測モデルの開発と東北地方太平洋沖地震の出火記録との比較による検証
- ③ 東北地方太平洋沖地震における津波火災焼失範囲の可燃物の3次元集積分布の推定
- ④ 集積可燃物密度を危険度指標とした津波火災ハザードマップの推定手法の開発と南海トラフ地震津波への適用

## 4. 研究成果

### ①可燃物の漂流・集積性状の予測モデル<sup>1)2)</sup>

古くから津波や洪水を経験してきた我が国では、漂流物の流動を解析するモデルがいくつか提案されている。この代表的なモデルとして、港湾や河口に貯蔵・係留された木材を対象に、流木に成り立つ運動方程式を時系列に解くことで、その位置を追跡していくものがある。このモデルでは、津波による流木の運動を、回転運動を無視した水平方向の重心並進運動として扱い、運動方程式を慣性、抗力、水流の圧力勾配、付加質量、拡散の5種類の作用により記述している。しかし、このモデルを津波火災シミュレーションで活用するには、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ないため、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、ガレキ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、ガレキの発生数を予測することができない。

建物から流出する可燃物の時空間分布を物理的に予測可能なモデルを開発した。このモデルは、既往の木材流動モデルに、(1) 残

存建物との衝突による作用力、(2) 流出建物から発生するガレキの数、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と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ガレキの位置を時系列に予測する。この情報が全てのガレキについて合わさった結果、浸水域全体でのガレキ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) ガレキの発生モデル、(b) ガレキの漂流モデル、(c) ガレキの漂着モデル。

ガレキの発生モデルでは、建物の被害モードが流出の場合に、建物に積載・固定される可燃物の全てが、ガレキとなって浸水区域に放出されると考える。ここでは、ガレキの特性を形状・密度の様な木材で単純化し、建物から発生するガレキの数は、火災荷重に換算した積載・固定可燃物の重量を、計算単位とする木材のそれで割ることにより算定する。

ガレキの漂流モデルでは、既往のモデルと同様に、回転運動を無視した水平方向の重心並進運動を考える。本研究では、残存建物との衝突力を新たに考慮した運動方程式を時系列に解くことで、ガレキの速度を予測する。また、ガレキの位置は、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て計算する。

ガレキの漂着モデルでは、水深の変化により、ガレキの底面が地表面に接触した時点で、流動が停止するものとする。漂着した個々のガレキの重量は、メッシュ単位で集計することで火災荷重として評価し、燃焼拡大モデルに入力する可燃物密度の空間分布を得る。

開発した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、津波火災によって約16haが焼失した岩手県山田町を対象にしたシミュレーション（図1）を行った。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、地震発生から6時間分のシミュレーションを行った。15時32分の結果を見ると、津波の第一波により市街地が浸水した後、家屋から発生したガレキの一部が引き波によって海の方へ流れ、山田湾に流出している様子が表れている。一方で、浸水範囲の先端付近に着目すると、津波が引いた所には、既にガレキが堆積していることが分かる。シミュレーションで追跡したガレキの数は、1,850,560個であり、重量で約16,000tonに相当する。ガレキの流動がほぼ沈静化した地震から6時間後には、発生したガレキの約2/3が陸上に堆積し、浸水区域に広く分布している（図2）。このうち、火災焼失区域に堆積したガレキの重量は、約4600tonと計算された。しかし、火災焼失区域の中には、ガレキが堆積していない所があることから、モデルには依然として改良の

余地がある。

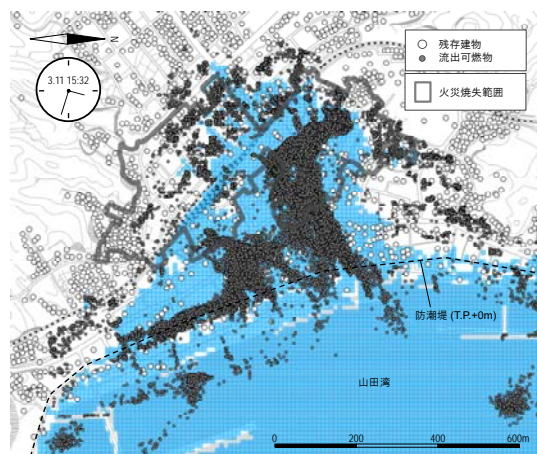


図1 ガレキの漂流・集積解析（山田町）

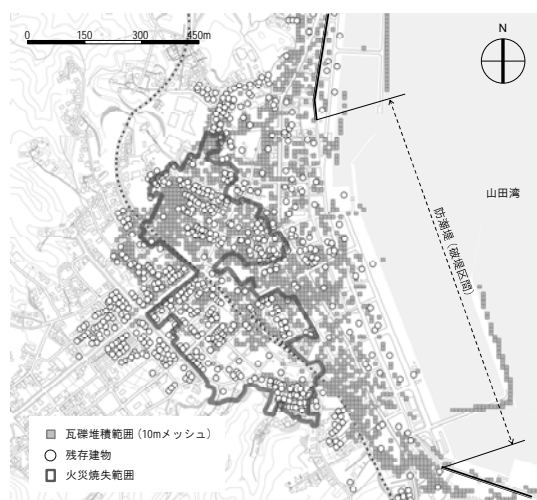


図2 最終的なガレキの集積分布（山田町）

## ②津波火災の発生件数の予測モデル<sup>3)</sup>

2011年に東北地方太平洋沖地震が発生するまで、地震後火災に関するわが国の主要な関心事は、揺れに伴う火器の転倒・損傷を要因とするような地震動に起因する火災であった。このため、この出火件数を予測するモデルが数多く提案されている。これらの多くは、過去の地震において観測された出火記録に、何らかの数理モデルを当てはめた統計モデルであり、地震後火災を経験するたびにモデルの修正が行われてきた。これに対し、津波火災は、1896年の明治三陸地震津波や1993年の北海道南西沖地震津波において発生が確認されているものの、東北地方太平洋沖地震が発生するまで、大規模な観測事例はなかった。その後、日本火災学会により、東北地方太平洋沖地震の被災消防本部に対しアンケート調査が実施され、統計モデルの推定に必要な出火記録が整備されてきた。

日本火災学会の調査により整備された東北地方太平洋沖地震の出火記録を活用し、津波火災の発生件数を予測可能な統計モデルを推定した。このモデルでは、「津波の作用により可燃性ガスが生じるものを着火物として発生する火災」を予測対象の津波火災と

している。ここでは、3月12日0時までに津波の浸水区域で発生した火災を出火記録から把握し、これを津波により被災した64の市区町村ごとに集計することで、数理モデルを当てはめるカウントデータとした。ただし、数理モデルの当てはめにあたっては、次のような複雑な要因により、過分散（単純な数理モデルで想定されるばらつき以上にカウントデータがばらつくこと）が生じる可能性に注意する必要がある。

1) 津波や地形等の条件の地域差

津波の強さや方向、地形や土地利用状況、防潮堤の高さや形状といった条件は地域によって異なるため、津波の浸水区域で発生する火災は、こうした地域差の影響を受けると考えられる。カウントデータには、この地域差の影響が含まれており、過分散をもたらす要因となる可能性がある。

2) 調査におけるカウントデータの不備

津波の浸水区域で発生した火災の正確な調査は現実的に困難であり、出火記録から作成されるカウントデータには、不備がある可能性がある。例えば、火災が観測される前に消災したことで、実際の発生件数より少ないカウントとなっている場合や、逆に、観測された火災が元は別の火災から延焼したものであったため、実際の発生件数より多いカウントとなっている場合も考えられる。こうしたカウントデータの不備は、過分散をもたらす要因となる可能性がある。

そこで、カウントデータに当てはめる数理モデルには、過分散に対応可能なポアソン回帰の一般化線形混合モデルを採用した。このモデルでは、地域差といった観測されない複雑な要因による影響をランダム効果（ばらつきの集積）として記述することで、過分散に対応できる。本研究では、津波火災の出火形態に関する既往の調査・分析の結果を踏まえ、モデルの説明変数には、津波により可燃性ガスの発生が予想される着火物に関連した次の三つの指標を採用した：(1) 流失車両数、(2) LPガスボンベ流失世帯数、(3) 浸水工業地域面積。

推定されたモデルの妥当性を検証するため、東北地方太平洋沖地震における津波火災の発生件数の予測を行い、日本火災学会による調査結果との比較を行った（図3）。ここでは、モンテカルロ・シミュレーションを活用し、各市区町村について10000回の繰り返し計算を行って、津波火災の発生件数の分布を予測した。その結果、全ての市区町村において、調査結果は予測結果の95%区間に収まる結果が得られた。

③津波火災範囲の可燃物の集積分布の推定<sup>4)</sup>

2011年に宮城県気仙沼市内の脇地区で発生した津波火災の焼失範囲を対象に、火災前の瓦礫の堆積状態を定量的に把握した。ここでは、火災の前日に航空機によって撮影された2枚の空中写真を活用し、空中写真測量に

よって堆積瓦礫を含む地表面の三次元座標（Digital Surface Model）を取得した。その後、別途特定した津波後の残存建物を除く範囲について、地盤面の三次元座標（Digital Elevation Model）との差分をとることで、瓦礫の堆積範囲と堆積深を推定した（図4）。

内の脇地区火災の焼失範囲36,444m<sup>2</sup>には、87棟の建物が存在し、そのうちの55棟が津波に流されずに残ったことが特定された。瓦礫の堆積範囲はこうした残存建物を除く約26,564m<sup>2</sup>と推定され、焼失面積の約74%が地面に堆積した瓦礫を媒体として延焼したと推測される。焼失範囲における瓦礫の堆積深は50cm未満の所が最も多く、平均、中央値、75パーセンタイル、90パーセンタイルはそれぞれ1.6m、0.8m、2.1m、4.4mと算出された。

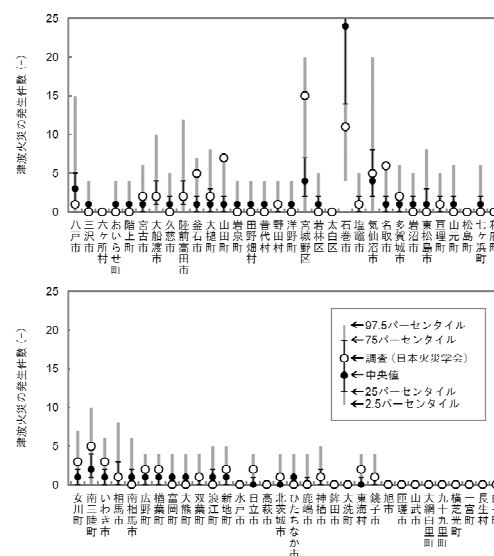


図3 津波火災の発生件数の予測結果

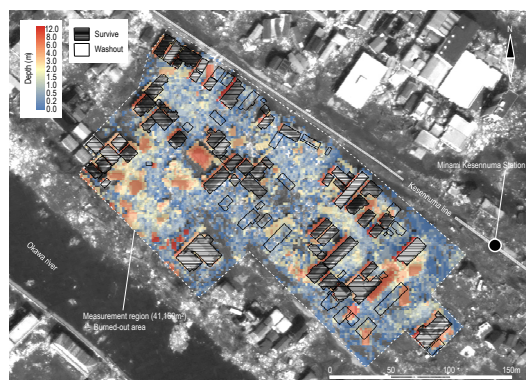


図4 火災発生前の瓦礫の堆積分布（内の脇）

④津波火災ハザードマップの推定手法<sup>5)</sup>

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。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、①で開発した可燃物の漂流・集積シミュレーションによって予測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、簡単で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。

多数の集積シナリオを考慮して津波火災ハザードマップを推定する手法を開発した(図5)。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、①で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(図6)。

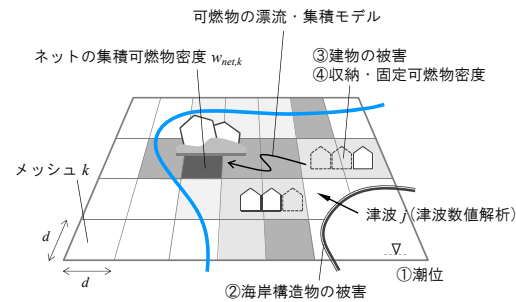


図5 津波火災ハザードマップ推定の概念

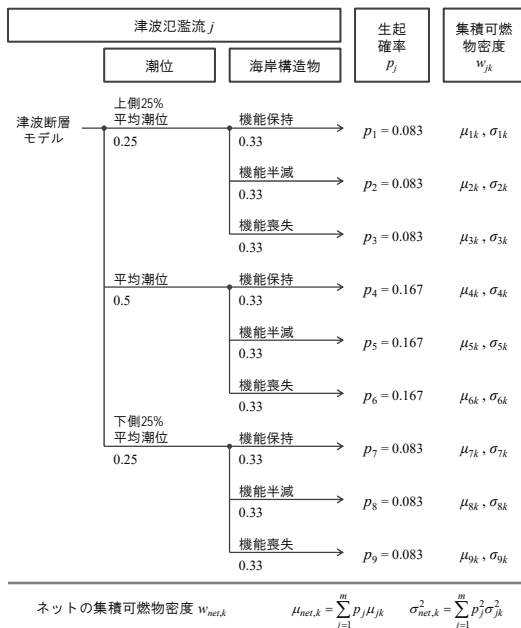


図6 ハザード推定で用いるイベントツリー

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(図7)。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。

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に津波火災ハザードマップの推定を行った(図8)。推定にあたっては、内閣府によって提案されている津波断層モデルを活用した。この推定結果に、現在指定されている津波避難施設を重ね合わせた所、津波火災によって被害を受けやすい津波避難ビルとそうでない津波避難ビルが存在することが分かった。被害を受けやすい津波避難ビルについては、火災を受けても倒壊しにくい構造であることや、火災からの避難者の保護や内部での火災拡大の防止のために、防火区画等の火災安全対策を講じることが必要であると考えられる。

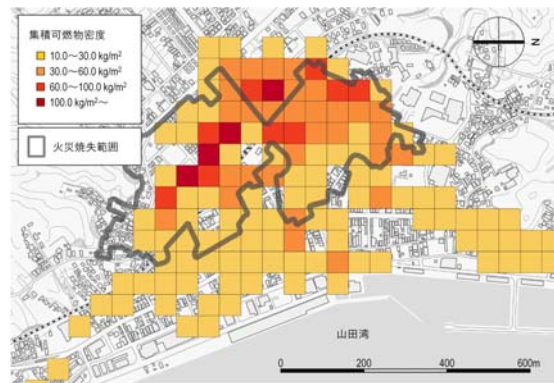


図7 ネットの集積可燃物密度(山田町)

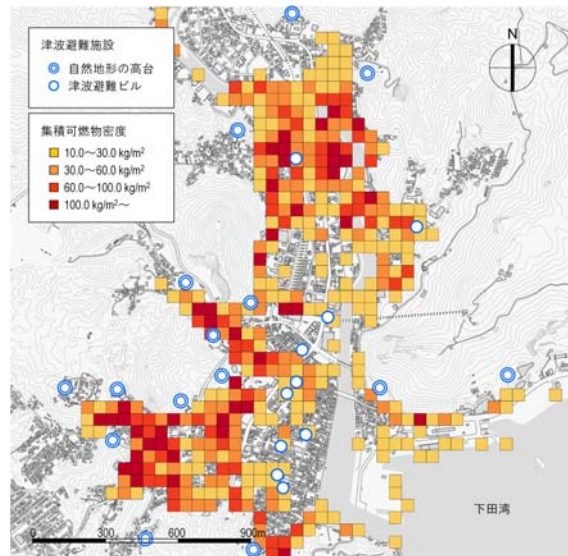


図8 津波火災ハザードマップ(下田市)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- 1) Nishino, T., and Imazu, Y.: Modeling of the Drift and Accumulation of Tsunami-Driven Combustible Objects: Towards Tsunami-Induced Fire Spread Simulation, *Fire Technology*, Vol.52, pp.1159-1178, 2016.
- 2) 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.
- 3) 西野智研・北後明彦: 一般化線形混合モデルを用いた津波火災の発生件数の予測手法, 日本建築学会環境系論文集, Vol.80, No.718, pp.1105-1114, 2015.
- 4) 西野智研: 空中写真測量を用いた津波火災延焼範囲の瓦礫堆積深の把握, 日本火災学会論文集, Vol.65, No.3, pp.19-26, 2015.
- 5) 西野智研・今津雄吾: 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, 日本建築学会環境系論文集, Vol.82, No.734, pp.289-299, 2017.

[学会発表] (計 6 件)

- 1) 西野智研・今津雄吾・北後明彦・野竹宏彰: 津波火災の被害想定手法に関する研究その 1-津波により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 2015 年度大会学術講演会, 東海大学, 2015.
- 2) 北後明彦・西野智研: 津波火災の被害想定手法に関する研究その 2-津波火災の発生件数の予測モデル-, 日本建築学会 2015 年度大会学術講演会, 東海大学, 2015.
- 3) 西野智研・北後明彦: 津波火災の発生件数の予測手法その 1-出火記録の信頼度不明を考慮した統計モデルの推定-, 日本火災学会 2015 年度研究発表会, 山形大学, 2015.
- 4) 北後明彦・西野智研: 津波火災の発生件数の予測手法その 2-津波数値解析と連携した将来津波時の火災件数の予測-, 日本火災学会 2015 年度研究発表会, 山形大学, 2015.
- 5) 西野智研・今津雄吾: 津波火災ハザードマップの推定手法に関する研究, 日本建築学会 2016 年度大会学術講演会, 福岡大学, 2016.
- 6) 西野智研・今津雄吾: 避難計画や消防計画のための津波火災ハザードマップ, 日本火災学会 2016 年度研究発表会, アオーレ長岡, 2016.

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

西野智研 (NISHINO Tomoaki)

京都大学防災研究所 准教授

研究者番号: 00609894