

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02324

研究課題名（和文）南海トラフの巨大地震津波による瓦礫火災の市街地延焼リスクと管理手法の構築

研究課題名（英文）Urban Fire Spread Risk and Management Method for Debris Fire Caused by Nankai Trough Giant Earthquake and Tsunami

研究代表者

増田 達男（Masuta, Tatsuo）

金沢工業大学・産学連携室・客員教授

研究者番号：70125095

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：航空写真解析により津波瓦礫を判別して航空レーザ測量データから東日本大震災の全域にわたる津波瓦礫量分布を取得した。これにより既開発の津波瓦礫堆積厚予測法における影響因子を導いて高度化し、他地域に適用可能な評価モデルを構築した。この評価モデルで予測した尾鷲市の津波瓦礫分布により津波火災シミュレーションを実施した結果、瓦礫の堆積範囲では津波による流出を免れた建物とともに延焼が拡大し、津波の浸水がなかった範囲へも延焼が拡大した。明らかになった市街地の延焼リスクに対して、木造家屋の防火性能の向上や樹林帯による延焼の抑止など現時点での社会的実績にもとづいて管理手法を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

南海トラフの巨大地震においては、未曾有の津波火災が予測されている。その脅威に応えた研究成果として社会的意義がある。東日本大震災の全域にわたる高精度の津波瓦礫データにもとづいた津波瓦礫の堆積予測法を開発し、市街地の延焼リスクをコンピューターシミュレーションによって明らかにした点に、学術的意義がある。その上で、現時点における社会的実績にもとづいて可能性のある管理手法を検討した点に社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：The tsunami debris distribution of the Great East Japan Earthquake was analyzed over a wide area by automating the debris discrimination method for aerial photographs, and a debris distribution evaluation method suitable for both rias coasts and sandy beaches was constructed. A tsunami fire simulation was performed using the tsunami debris distribution in Owase City predicted by the evaluation method. As a result, the fire in the debris spread along with the remaining buildings and spread to areas that were not flooded by the tsunami. The risk of fire spread increases with the amount of debris accumulated and the size of the unflooded urban area. Examples of forest areas are useful for controlling the generation of debris and the spread of fire. There are also ways to improve the fire resistance performance of wooden houses. For areas inundated by tsunamis that firefighting vehicles cannot reach, the method of extinguishing forest fires with helicopters can serve as a reference.

研究分野：都市の空間情報学

キーワード：津波火災 南海トラフ地震 瓦礫量 延焼予測 航空レーザ測量 シミュレーション GIS

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来、地震火災は広く研究されてきたが、津波火災は東日本大震災で多発した人類史上初めての経験であり、記録も少なく十分に解明されていない。一方、近い将来に起こりうる南海トラフの巨大地震では、太平洋沿岸の広域にわたり未曾有の津波火災が予測されている。

2. 研究の目的

早急に南海トラフ巨大地震の対象地域において津波火災のリスクを予測する必要がある。津波火災の基本は瓦礫火災であるため、瓦礫堆積分布の予測手法を開発する。これにもとづいて、瓦礫火災とともに浸水しない市街地への延焼リスクを予測し、実施可能な管理手法を構築する。

3. 研究の方法

東日本大震災の航空レーザ測量データを「地理情報システム」で整理し、津波瓦礫の堆積分布を高精度で計測する。その際に、多大な調整を要する航空写真解析の瓦礫判別法を自動化する。これにより、既に関連した津波瓦礫堆積厚の予測法について、広域への適用性を高度化する。南海トラフ巨大地震の対象地域で瓦礫堆積分布を予測して延焼シミュレーションによりリスクを把握し、現時点で実施可能な管理手法を検討する。

4. 研究成果

(1)航空写真解析による津波瓦礫判別の広域適用と精度改良

既に津波瓦礫堆積厚の予測法を開発しているが、その適用性を高度化するため、東日本大震災の全域にわたる津波瓦礫量分布を取得する必要がある。被災直後の航空写真およびレーザ測量データを用いるが、多大な調整を要する航空写真解析の瓦礫判別法を改良し自動化した。画像正規化法および地上解像度に応じたオブジェクト分割法を提案し、画像毎のパラメータ調整なしに概ね良好な精度で解析可能とした。また、平滑化画像との残差により瓦礫域の特徴を抽出し正答率を向上した。

さらに、深層学習を用いた CNN およびセマンティックセグメンテーション (SegNet および U-Net) について、瓦礫判別への適用性を検討した。特に SegNet について、精度よく画像内の瓦礫域を判別可能であり、既往手法よりも高精度に瓦礫判別が可能であることを評価した。

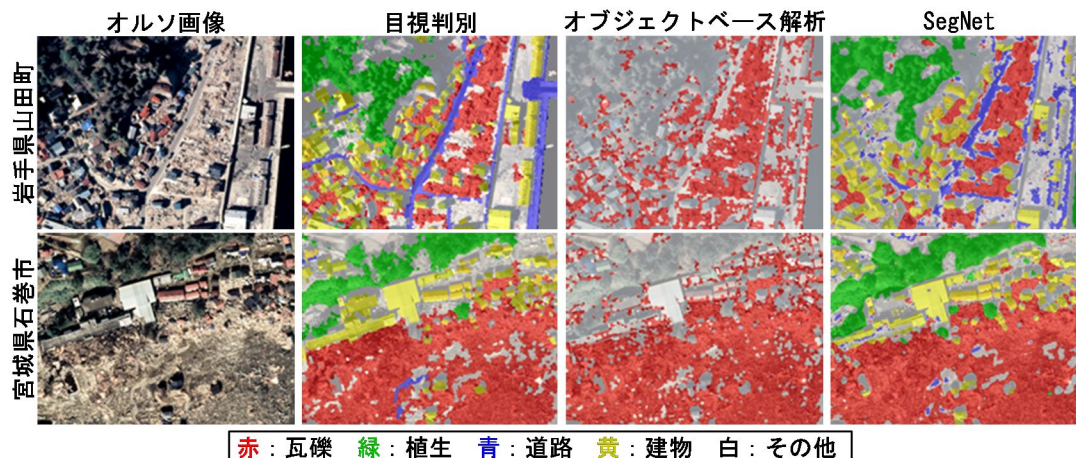


図1 解析対象画像の例と各手法による地表物判別結果

表1 各手法による瓦礫判別精度

Case	Precision	Recall	IoU
OBJ Miyagi	0.683	0.942	0.656
OBJ Iwate	0.613	0.907	0.577
CNN Miyagi	0.784	0.760	0.628
CNN Iwate	0.775	0.790	0.643
SegNet	0.813	0.901	0.746
U-Net	0.802	0.831	0.689

* OBJ: オブジェクトベース解析 (画像全体に対する精度)

* CNN: Convolutional Neural Network (画像全体に対する精度)

* SegNet&U-Net: セマンティックセグメンテーション (テストデータに対する精度)

(2)津波瓦礫堆積厚予測の高度化

航空写真解析により判別した津波瓦礫量分布を用いている。瓦礫堆積に関わる影響因子は既

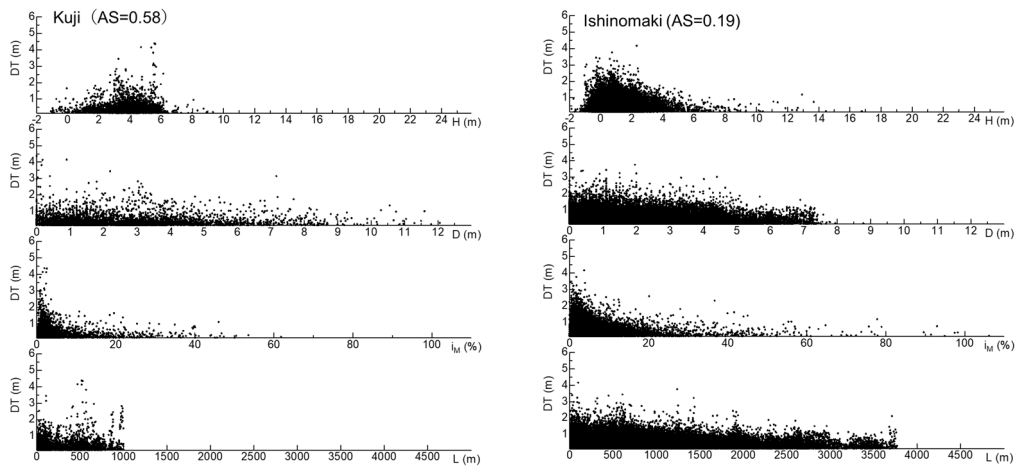
往研究 に倣い、対象地域における浸水域形状係数 AS 、堆積地点の標高 H (m)、浸水深 D (m)、地形勾配 i_M 、任意メッシュ近傍の建物存在有無指標 SI 、遡上境界からの距離 L とし、評価対象は津波瓦礫厚 DT (m) とした。図 2 に H 、 D 、 i_M 、 L と DT の関係を示す。

規格化したパラメータを用いて瓦礫厚の傾向を調べた結果 (図 3)、三陸部のリア式海岸と平野部の砂浜海岸で統一した評価モデルを構築することが可能となった。浸水深がごく小さい時に DT/D は爆発的に増大してしまうため、 $D > 1$ m のみ取り扱うことにした。目的変数を説明変数の冪乗積で表現できると仮定して、標準偏差が最小となる回帰モデルとして式 1) を得た。

$$DT/D = 0.46(AS)^{0.08}(D/H)^{-0.19}(i_M)^{-0.10} (SI)^{0.23} \pm 0.27 \quad 1)$$

図 4 に示すように、リア式海岸や砂浜海岸を問わずに DT/D の傾向を良好に説明できる。地形による影響を規格化によって除去することができ、他地域に適用可能な評価モデルを提案することができた。

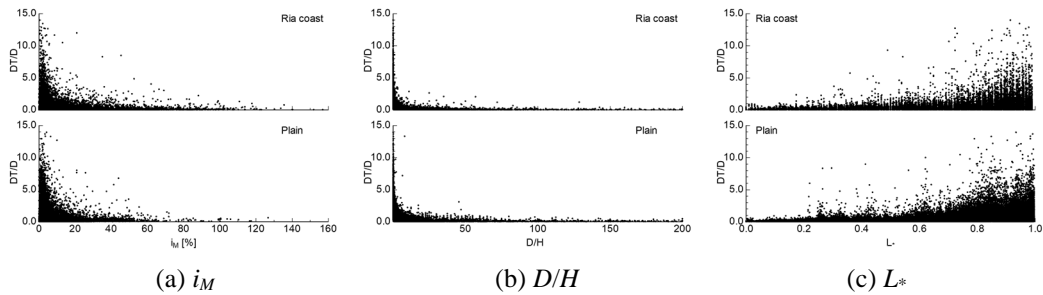
これによる瓦礫の堆積現象を要約すれば、津波で倒壊した木造家屋の瓦礫は、浸水境界まで運ばれてせき止められるため、この付近で最も大量に堆積する。津波は転じて引き波となり、残る瓦礫を海側へ引き戻す途上で、主に残留基礎や残留家屋にまとわりついて堆積する。



(a) 三陸沿岸 (久慈)

(b) 石巻・仙台平野

図 2 H 、 D 、 i_M 、 L と DT の関係



(a) i_M

(b) D/H

(c) L^*

図 3 i_M 、 D/H 、 L^* ($=1-L/L_{max}$) と DT/D の関係

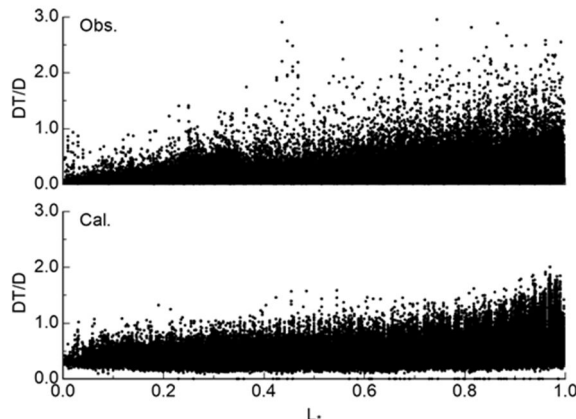


図 4 式(1)による DT/D の整合性

(3)津波瓦礫の延焼火災シミュレーション

適用性を高度化した評価モデルで予測した尾鷲市の津波瓦礫分布により津波火災シミュレーションを実施した。地震・津波条件は想定される条件の中で最も厳しい条件とし、気象条件の風向・風速に関しても最も厳しい条件を選択した。

瓦礫からの出火点として無作為の100ケースについて12時間の延焼拡大状況を計算した結果、瓦礫の堆積範囲では津波による流出を免れた建物とともに延焼が拡大し、津波の浸水がなかった範囲へも延焼が拡大した。建物の焼損は平均で81.2棟、最大で286棟となった。

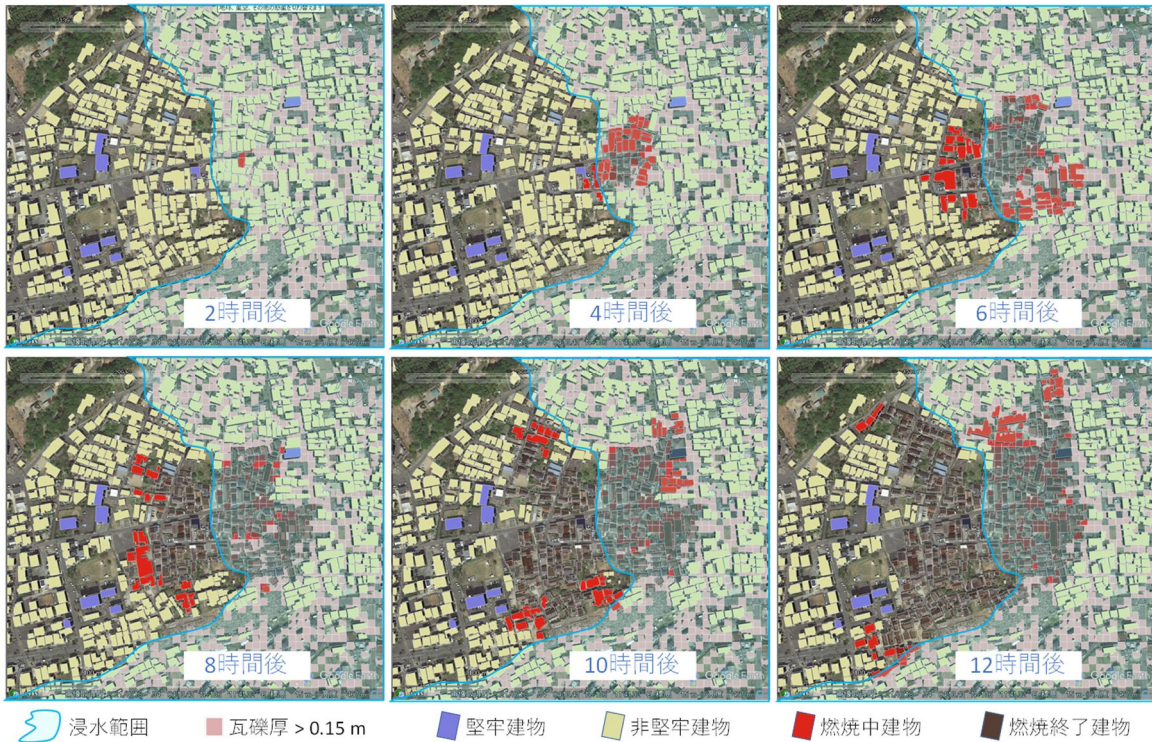


図5 津波瓦礫から発生した火災のシミュレーション例(尾鷲市)

(4)歴史的な津波火災についての知見

歴史的な津波火災についても史料に視点を当てた。安政地震の津波の際に、清水市と田辺市では、浸水深が1~2mであったにもかかわらず、燃えた材木が市街地に拡散して広域の火災に発展したことを明らかにした。津波火災の性状を示す重要な知見である。

(5)市街地延焼リスクと管理手法の構築

1)津波の浸水深が1mから7m未満の範囲では、瓦礫の堆積に伴って車両等の漂着が推定され、津波火災発生リスクが高い。

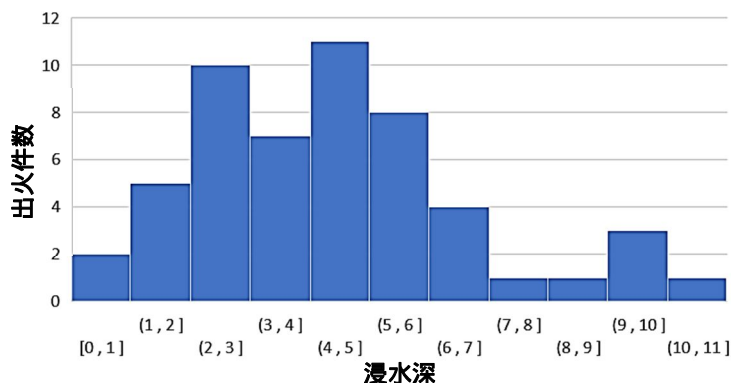


図6 浸水深別の出火頻度(東日本大震災)

2)瓦礫の堆積量に伴って津波火災の発熱量が増大するため、浸水しない市街地に延焼するリスクも高くなる。

3)津波火災に隣接する「浸水しない市街地の範囲」が広いほど、延焼のリスクも高くなる。

4)「瓦礫の発生を抑制する方法」としては、津波が予測されている区域において木造家屋の建設を避ける。樹林帯によって家屋の破壊・流出が軽減された事例が報告されている。

- 5) 「瓦礫の堆積を抑制する方法」としては、樹林帯による漂流瓦礫の捕捉事例が報告されている。
- 6) 「発火を抑制する方法」としては、車両が海水によって発火した事例があり、自動車メーカーが研究を進めているが、現時点では完全な抑制は困難である。
- 7) 「延焼を抑制する方法」としては、開口部に防火扉・や防火シャッター、防火ガラスを使用したり、木部に防火塗料を使用して、木造家屋の防火性能を高める方法がある。道路や空き地などの防火帯を配置する方法や都市防火区画の整備もあるが、津波の浸水範囲では瓦礫が堆積するため効果は限られる。樹林帯による延焼の拡大抑止事例も報告されている。
- 8) 「浸水が予測される延焼範囲を消火する方法」としては、山林火災をヘリコプターやドローンで消火する方法が参考になる。津波火災に隣接する「浸水しない市街地」では、予めリスクに応じて消火体制を設定する。

(6)まとめ

東日本大震災全地域の航空レーザデータから高精度に津波瓦礫の堆積厚を取得するため、航空写真解析法を自動化した。これによって、既に開発済みであった津波瓦礫分布の予測手法において、広域にわたる南海トラフ地震への適用性を高度化した。予測した津波瓦礫分布により延焼シミュレーションを実施し、市街地火災のリスクを把握して実施可能な管理手法を検討した。

さらに、南海トラフ巨大地震津波の対象地域以外においても、東日本を含む全国の沿岸地域に適用が可能である。国外の沿岸地域に対しても同様に適用可能である。

今後は、南海トラフ巨大地震津波における各対象地域の自治体等において、実際にリスクを予測することが重要となる。そのためには、本研究において各専門分野ごとに分担して開発した一連の予測手法を、公開システムとして一元化する必要がある。

<引用文献>

Kentaro Imai, Takashi Hashimoto, Yuta Mitobe, Tatsuo Masuta, Narumi Takahashi and Ryoko Obayashi, Development of a Practical Evaluation Method for Tsunami Debris and its Accumulation, Applied Sciences, Volume12, Issue2, 858, 2022

三戸部佑太, 今井健太郎, 橋本隆司, 増田達男, 航空写真解析による津波瓦礫判別の広域適用に向けた検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 76 巻 2 号, pp. I_1315-I_1320, 2020 年

三戸部佑太, 野村飛翔, 増田達男, 航空写真解析からの津波瓦礫判別における CNN の適用, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 78 巻 2 号, pp. I_1045-I_1050, 2022 年

三戸部佑太, 増田達男, セマンティックセグメンテーションによる航空写真の津波瓦礫判別, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 79 巻, 2023 年

都司嘉宣, 増田達男, 安政南海地震 (1854 XII 24) の津波と高知市街地の火災について, 津波工学研究報告, 第 39 号, pp. 44-55, 2022 年

津波による構造物に与える影響とその被害, 琉球大学島嶼防災研究センター,
<http://bousai.skr.u-ryukyu.ac.jp/tsunami/damage/>, 閲覧日 2023.04.04

東日本大震災からの復興に係る公園緑地整備に関する技術的指針, 国土交通省都市局公園緑地・景観課, 2012

都司嘉宣, 増田達男, 2018 年 19 号台風高潮による西宮市、及び神戸市の自動車火災について, 津波工学研究報告, 第 36 号, pp. 137-144, 2019 年

木製防火ドア (乙種防火認定取得), 株式会社ノナカ,
<https://nonaka.co.jp/fireproof/>, 閲覧日 2023.04.04

国土交通大臣認定防火戸 FG シリーズ, LIXIL 株式会社,
https://www.lixil.co.jp/lineup/entrance/fire_guard/, 閲覧日 2023.04.04

木造住宅用の窓シャッター, LIXIL 株式会社,
<https://www.lixil.co.jp/lineup/window/shutter/>, 閲覧日 2023.04.04

防火窓 G シリーズ アルミ複層, YKK AP,
<https://www.ykkap.co.jp/consumer/products/window/gwindowfp/>, 閲覧日 2023.04.04

難燃 WOOD 塗るだけ, 大成建設,
<https://www.yomiuri.co.jp/economy/20220522-0YT1T50031/>, 閲覧日 2023.04.04

大阪府防災都市づくり広域計画の骨子,
<https://www.pref.osaka.lg.jp/attach/4842/00000000/3syoun.pdf>, 閲覧日 2023.04.04

山林火災消火に係わる行動, 陸上自衛隊,
<https://www.mod.go.jp/gsdf/news/dro/2014/20140707.html>, 閲覧日 2023.04.04

導入が始まる消防現場を支援するドローンたち, Drone Design,
<https://www.drone.jp/column/2021040611103544563.html>, 閲覧日 2023.04.04

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 三戸部佑太, 今井健太郎, 橋本隆司, 増田達男	4. 巻 76.2
2. 論文標題 航空写真解析による津波瓦礫判別の広域適用に向けた検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_1315, I_1320
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.76.2_I_1315	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 -
1. 著者名 都司嘉宣, 増田達男	4. 巻 37
2. 論文標題 安政東海・南海地震(1854)の津波による駿河国清水湊、及び紀伊田辺での市街地火災の発生	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 津波工学研究報告	6. 最初と最後の頁 17,31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 都司嘉宣, 増田達男	4. 巻 36
2. 論文標題 安政東海南海地震(1854)と宝永地震(1707)の火災発生状況	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 歴史地震	6. 最初と最後の頁 159,178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -
1. 著者名 三戸部佑太, 野村飛翔, 増田達男	4. 巻 78.2
2. 論文標題 航空写真からの津波瓦礫判別におけるCNNの適用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_1045-I_1050
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.78.2_I_1045	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 -

1. 著者名 Kentaro Imai, Takashi Hashimoto, Yuta Mitobe, Tatsuo Masuta, Narumi Takahashi and Ryoko Obayashi	4. 巻 12(2)
2. 論文標題 Development of a Practical Evaluation Method for Tsunami Debris and its Accumulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied sciences	6. 最初と最後の頁 858
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app12020858	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 -

1. 著者名 都司嘉宣, 増田達男	4. 巻 39
2. 論文標題 安政南海地震(1854 XII 24)の津波と高知市街地の火災について	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 津波工学研究報告	6. 最初と最後の頁 44, 55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 三戸部佑太, 増田達男	4. 巻 79
2. 論文標題 セマンティックセグメンテーションによる航空写真の津波瓦礫判別	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集B3(海洋開発)	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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10件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 増田達男, 今井健太郎, 橋本隆司, 三戸部佑太
2. 発表標題 南海トラフ地震における津波火災のための瓦礫堆積予測
3. 学会等名 日本火災学会2020年度研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 都司嘉宣, 増田達男
2. 発表標題 火災発生件数は安政東南海地震(1854)と宝永地震(1707)とでなぜこんな大差を生じたのか?
3. 学会等名 歴史地震研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井健太郎, 大林涼子, 柄本邦明, 岩瀬浩之, 中井健太郎
2. 発表標題 堤体基礎の強震動脆弱性が津波漂流物挙動に与える影響
3. 学会等名 2020年度地震学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 増田達男, 今井健太郎, 橋本隆司, 三戸部佑太
2. 発表標題 津波瓦礫堆積予測の適用性拡張に向けた取り組み
3. 学会等名 日本火災学会2021年度研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西條 駿, 三戸部佑太
2. 発表標題 航空写真解析による津波瓦礫判別の広域適用
3. 学会等名 令和2年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三戸部佑太, 野村飛翔, 増田達男
2. 発表標題 航空写真からの津波瓦礫判別におけるCNNの適用
3. 学会等名 第69回海岸工学講演会
4. 発表年 2022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
研究分担者	岩見 達也 (IWAMI Tatsuya) (20370744)	国土技術政策総合研究所・建築研究部・防火基準研究室長 (82115)	
研究分担者	今井 健太郎 (IMAI Kentaro) (20554497)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震津波予測研究開発センター)・副主任研究員 (82706)	
研究分担者	三戸部 佑太 (MITOBE Yuta) (60700135)	東北学院大学・工学部・准教授 (31302)	
研究分担者	林 吉彦 (HAYASHI Yoshihiko) (70212157)	国立研究開発法人建築研究所・防火研究グループ・グループ長 (82113)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	都司 嘉宣 (TSUJI Yoshinobu)		
研究協力者	橋本 隆司 (HASHIMOTO Takashi)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関