

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

今津 雄吾¹・野竹 宏彰²・関澤 愛³・山本 治貴⁴

¹正会員 清水建設株式会社 技術研究所(〒135-8530東京都江東区越中島3-4-17)
y_imazu@shimz.co.jp

²清水建設株式会社 技術研究所(〒135-8530東京都江東区越中島3-4-17)
notake_hiroaki@shimz.co.jp

³東京理科大学教授(〒162-8601東京都新宿区神楽坂1-3)
sekizawa@rs.kagu.tus.ac.jp

⁴損害保険料率算出機構(〒163-1029東京都新宿区西新宿3-7-1-29F)
haruki_yamamoto@giroj.or.jp

東北地方太平洋沖地震では、津波避難ビル等が火災の危険に晒された事例が多数報告されており、津波避難ビル等の津波火災に対する安全確保は課題である。従来の津波火災のリスク評価では、一定のエリア内の出火件数や規模をマクロ的に予測するものが主であるが、避難ビル等の火災リスクを検討する上では、局所的な地形や周辺建物の状況を考慮したモデルが不可欠である。本研究では、津波災害直後の航空写真および航空レーザ測量データをもとに津波瓦礫の分布量を推定し、瓦礫堆積パターンと火災リスクの関係を分析するとともに、100mメッシュによる局所的な火災のリスクを推定する統計的モデルの構築を行った。

Key Words : *tsunami fire, tsunami debris, RiDAR survey, regression analysis, damage estimates*

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波では、浸水被害に加えて津波火災による被害も目立った。切迫する巨大津波への備えとして津波避難ビルが現実的かつ有望な対策となっているが、避難ビルの周囲で火災が発生すると、漂着した瓦礫や氾濫水が支障となって別の建物への二次避難や消火活動が困難となる。そのため、火災リスクも考慮して計画する必要がある。これまでの津波火災のリスク評価では、一定のエリア内の出火件数や規模をマクロ的に予測するものが主である(例えば廣井(2014)¹⁾、今津ら(2014)²⁾、西野ら(2015)³⁾)。しかし、避難ビル等の火災リスクを検討する上では、局所的な地形や周辺建物の状況を考慮したモデルが不可欠である。

そこで、本研究では、東北地方太平洋沖地震直後の航空写真および航空レーザ測量データをもとに津波瓦礫の

分布量を推定し、瓦礫堆積パターンと火災リスクの関係を分析するとともに、100mメッシュによる局所的な火災のリスクの大小を推定する統計的モデルの構築を行った。

2. 津波瓦礫の分布調査

(1) 調査の目的

東北地方太平洋沖地震では、津波火災の直前の状況として、建物と建物間に瓦礫が堆積して建物同士が延焼しやすい状況になっていた様子や、炎上した瓦礫が津波によって運搬される様子が映像等に記録されている。一方、津波によって広範囲が浸水したものの、瓦礫が堆積しなかった地域では津波火災がほとんど発生しなかった例もある(石巻市内陸部など)。これらを踏まえ、瓦礫堆積状況と津波火災との関係を検討するため、陸域への堆積した瓦礫の分布調査を行った。

(2) 堆積瓦礫量の推定方法

福岡ら(2013)⁴⁾を参考に、陸上に堆積した津波瓦礫の分布量の推定を行った。この手法は、高解像度の正射航空写真を画像解析して瓦礫の平面的な堆積箇所を把握した後、航空レーザ測量データから瓦礫表層 DSM)及び地盤面 (DEM)を作成して求めた堆積瓦礫の厚さを重ね合わせることで、空間的な瓦礫堆積量を把握するものである。

a) 画像解析

光学画像の解析にあたり、セグメンテーション処理を行う必要があるが、本研究では各セグメントが一般的な住宅のサイズ程度になるようにパラメータを調整した。画像分類には、福岡ら⁴⁾と同様に瓦礫域、植生域、土砂域、道路の4地表面物を考慮した。瓦礫領域の抽出は、Red Bandの画素値(Digital Number)を用いて植生を分離した後、Blue Bandの標準偏差解析により瓦礫とそれ以外を分離することで行われる。

b) 航空レーザ測量データの解析

航空レーザ測量によるオリジナル点群データ及びグラウンド点群データを内挿することで DSM データと DEM データを算出する。算出解像度は 1m とした。堆積した瓦礫の量は、画像解析で瓦礫と判定されたエリアに DSM 及び DEM を重ね合わせ、その地点の瓦礫高さ(DSM - DEM)を乗じることで空間分布として算出した。

(2) 調査対象地区及び使用データ

瓦礫堆積量の調査対象地区を表-1に示す。岩手県野田村から福島県相馬市までの38地区を対象とし、この内津波火災が発生した地区は○印で示した10地区である。なお本研究では、複数建物の延焼にまで至った津波火災のみを対象とし(以降、単に津波火災と称す)、小規模単独火災や瓦礫のみの延焼は含まない。女川以北の地区は三陸地域特有の周囲を山に囲まれた地形であるため閉じた浸水範囲を地区の区切りとしているが、石巻以南の平野部では、概ね海岸線から内陸への遡上距離と同程度の幅で区切った。

使用したデータは、東日本太平洋沖地震直後(2011年3月12日～19日)に撮影された正射航空写真(国土地理院、解像度 0.2m,0.4m)及び2011年3月～4月にかけて計測された航空レーザ測量データである。

3. 瓦礫堆積パターンと火災リスクの関係

(1) 瓦礫分布と津波火災の関係

図-1は、地区別の陸域堆積瓦礫量を示したものである。地区によって面積が異なるため、浸水面積で除した高さの次元で示している。また、最大浸水深の空間平均は、100mメッシュで取りまとめられた実測の最大浸水深⁵⁾を

表-1 調査対象地区と入手したデータ

No.	地区	航空写真		No.	地区	航空写真	
		撮影日	解像度			撮影日	解像度
1	野田	3/13	0.4m	20	本吉	3/13	0.4m
2	田野畑	3/13	0.4m	21	歌津	3/13	0.4m
3	岩泉	3/13	0.4m	22	志津川	3/13	0.4m
4	田老	3/13	0.4m	23	女川	3/19	0.4m
5	津軽石	3/13	0.4m	24	石巻西	3/12	0.2m
6	大沢	3/13	0.4m	25	石巻東	3/12	0.2m
7	北浜町	3/13	0.4m	26	野蒜	3/12	0.2m
8	山田	3/13	0.4m	27	松島	3/13	0.4m
9	織笠	3/13	0.4m	28	塩竈	3/12	0.4m
10	田の浜	3/13	0.4m	29	七ヶ浜	3/12	0.4m
11	吉里吉里	3/13	0.4m	30	仙台港北	3/12	0.4m
12	赤浜	3/13	0.4m	31	仙台港南	3/12	0.4m
13	大槌	3/13	0.4m	32	荒浜	3/12	0.4m
14	鶴住居	3/13	0.4m	33	閑上	3/12	0.4m
15	釜石	3/13	0.4m	34	岩沼	3/12	0.4m
16	越喜来	3/13	0.4m	35	亘理	3/12	0.4m
17	大船渡	3/13	0.4m	36	山元	3/12	0.4m
18	陸前高田	3/13	0.4m	37	新地	3/12	0.4m
19	鹿折	3/13	0.4m	38	相馬	3/12	0.4m

* 航空レーザ測量は2011年の3月～4月に実施された

○ 津波火災発生地区

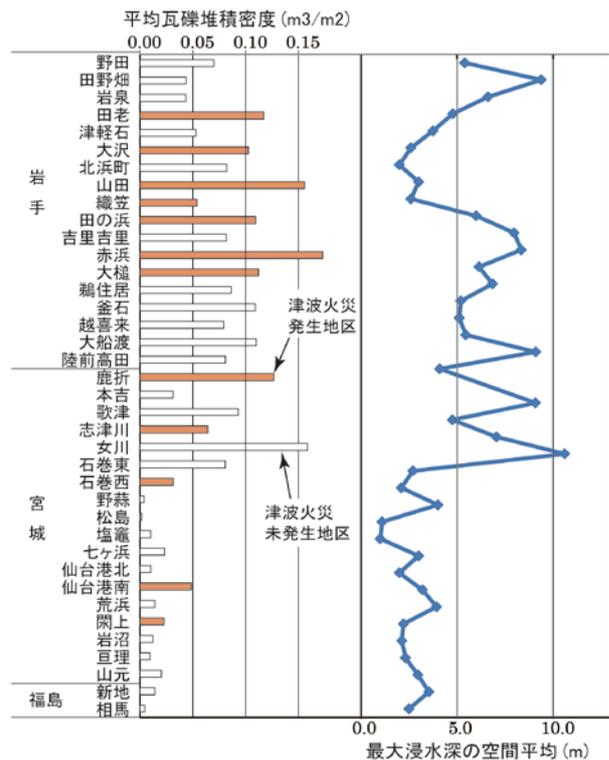


図-1 平均瓦礫堆積密度

対象地区全域で空間平均した値である。

石巻から南側の地区で全般的に平均瓦礫高さが低くなっている理由は、平野型の地形のため浸水範囲が相対的に浅くて広いこと、遡上した津波が発散傾向となり破壊エネルギーが小さくなること、水田・畑等の土地利用の割合が高いことが要因と推定される。一方、女川から北側の地区は、逆の理由により瓦礫の発生密度は高くなる。加えて、海域に流出せずに陸域に堆積する量に地区ごと

に差が生じていると推定され、津波火災発生地区の多くが平均瓦礫密度の上位を占めていることが分かる。なお、このデータには、延焼範囲内で燃焼により体積が減少したのも含まれており、火災直前は更に瓦礫の堆積量に違いがあったと推定される。

以上より、三陸地形の地区と平野地形の地区では瓦礫の堆積特性が異なり、津波火災のリスクも異なっていたと考えられる。次項で、代表的な地区を取り上げ、瓦礫分布と津波火災リスクの関係を考察する。

(2) 瓦礫堆積に影響する要因の分析

a) 野田地区(三陸型地形で比較的開けた地形の集落)

図-2 に野田地区の津波瓦礫の分布と最大浸水深⁵⁾および航空写真(3/13 撮影)⁶⁾を示す。黒塗りの部分は、目視判読で特定した形状を保ったまま漂着した家屋である。同地区は緩やかな勾配となっているため、最大浸水深は海岸線付近の10m超から内陸にかけて徐々に低下している。瓦礫の主要な堆積場所は、南北に走る国道より海側の部分と内陸の最大浸水深2~4m付近となっている。後者は、津波のエネルギーが徐々に減衰して家屋の残存率が増加してくる場所である。また、写真からも分かるように形状を保ったまま漂着した家屋が残存建物の間を埋め尽くす状態になっている。このような地形および集落形態は、最大規模の津波火災が発生した山田地区や鹿折地区(気仙沼市)と類似している(延焼範囲内では、火災直前の瓦礫分布を把握できず)。したがって、野田地区では幸い津波火災が発生しなかったが、津波高が徐々に減衰するような地形で比較的密集した集落が形成されている場合は、瓦礫や漂流家屋が内陸に運ばれ集積しやすくなるため、津波火災のリスクは高いと考えられる。

b) 石巻地区(背後に高台を控えた密集住宅地)

図-3 に石巻市で大規模火災が発生した門脇地区周辺の状況を示す。石巻市街地は平野地形であり、遡上後に津波が増幅せずに広範囲に及んだが、高台(日和山)の前面付近は、津波の進路が阻まれる形となるため周辺よりも浸水深が大きくなり、その付近で発生した瓦礫や漂流家屋が高台の麓に寄せ集められて堆積している(拡大写真参照)。このタイプは津波火災のリスクが高い条件と考えられる。類似した事例として大槌地区の火災が挙げられる。

c) 名取市閑上地区(平野部の水田・集落)

図-4 に名取市閑上地区の瓦礫堆積状況を示す。広い低平地に局所的に集落が形成され、大半は田畑である。浸水範囲が内陸約10kmに及ぶが、最大浸水深はほぼフラットで瓦礫の堆積場所との相関が低い。瓦礫は川の堤防周辺や道路の縁、残存建物が多い場所などにまだらに堆積している。延焼範囲はもともと住宅が密集していた場所

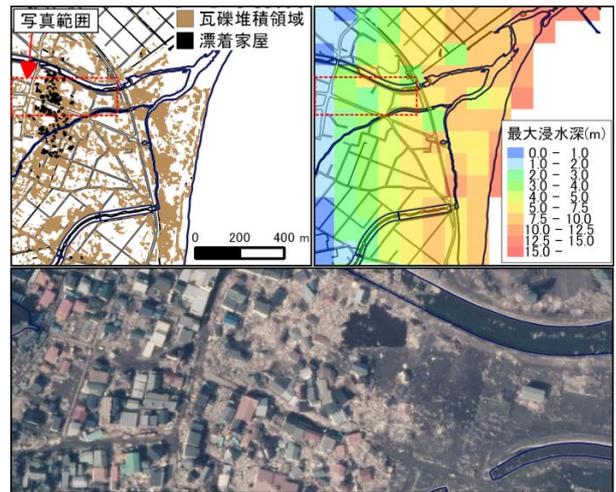


図-2 堆積瓦礫の分布と最大浸水深(野田地区)

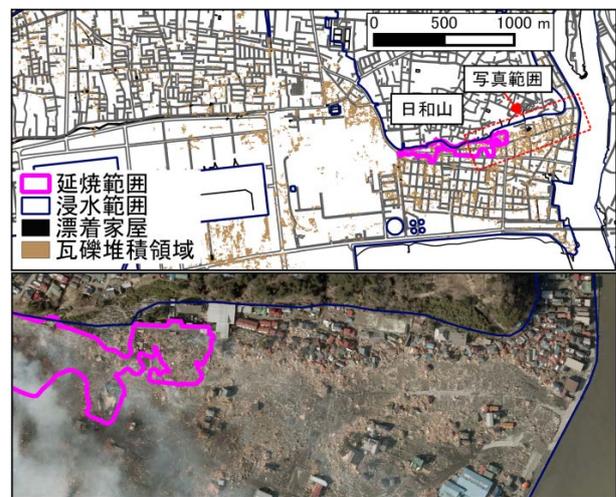


図-3 堆積瓦礫の分布(石巻門脇地区)

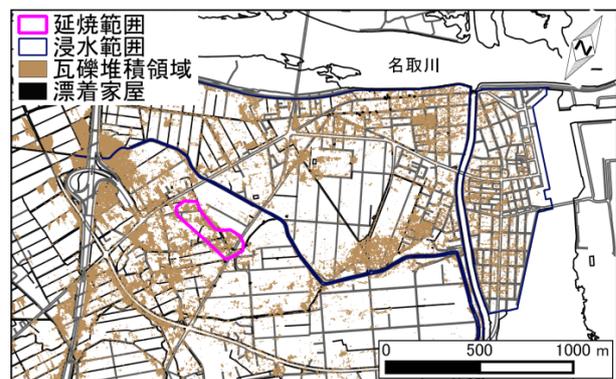


図-4 瓦礫の分布(閑上地区)



図-5 瓦礫の堆積状況(女川地区・3/19 撮影)

ではなく、長距離を漂流してから漂着した瓦礫が大半を占めていたと推察される。なお、当日の空撮動画でも炎上しながら漂流する瓦礫や住宅が捉えられているほか、津波火災としての報告されていない小規模な出火の目撃情報が多数寄せられていることから、実際の延焼範囲付近だけが特段津波火災リスクが高いとは判断しにくい。

d) 女川地区(山間の狭い低平地に密集した集落)

図-5 に女川地区の瓦礫堆積状況を示す。谷状地形による狭窄で津波浸水深が非常に大きくなった(臨海部で20m超)ため、大半の木造住宅が大破し、低平地には残存家屋がほとんど見られない。多くの瓦礫は、引き波時に海域に流出したと推定されるが、一部は谷の最奥部に堆積している状況も確認できる。図-1 より堆積瓦礫の平均高さは大規模な津波火災のあった山田地区などと同程度に高いが、形状を保ったまま漂着した建物が少なくいことから、大半は粉碎された瓦礫であったと推定される。

4. 統計モデルによる津波火災危険領域の評価

(1) モデル化の方針

前項の考察を踏まえ、本研究では浸水領域をメッシュに分割してメッシュ単位での延焼期待値を評価するモデルの構築を目指す。ただし、現時点では瓦礫の漂流・漂着を精度良く再現することが困難との立場から、各メッシュにおける状態量でそのメッシュの火災発生有無を説明する統計的モデルとする。そのため、メッシュサイズは浸水深や勾配など地形特性を表現でき、かつ建物密度などの統計量を設定できる必要がある。ここでは、最大浸水深の調査結果⁵⁾が提供される解像度に合わせて100mメッシュとした。また、モデル構築にあたっては、今津ら(2014)²⁾が指摘した次のメカニズムを前提としている。

- ・津波で大量に発生した瓦礫の内部では、家庭用ガスボンベや車両燃料などの危険物と瓦礫の衝突が至る所で発生し、小規模で一時的な出火は十分に発生していた。
- ・それら小規模出火のごく一部が、残存した住宅などに類焼して大規模火災として認識された。

(2) 統計モデル

統計モデルは、延焼が発生したメッシュを $f=1$ 、発生しなかったメッシュを $f=0$ として、 f を目的変数とした一般化線形モデルによる回帰を行い、メッシュの延焼期待値 $E(f)$ を求めるものとした。線形予測子 bx と $E(f)$ の関係を表現するリンク関数はlogit(1式)を設定した。したがって、式変形により $E(f)$ は、(3)式で表すロジスティック関数により表現される。

$$\ln\left(\frac{E(f)}{1-E(f)}\right) = bx \dots\dots\dots (1)$$

$$bx = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_nx_n \dots\dots\dots (2)$$

$$E(f) = \frac{1}{1+\exp(-bx)} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 x_n は説明変数、 β_n は偏回帰係数である。また、 f の取りうる値は0か1のいずれかであるため、その確率分布としてはベルヌーイ分布を仮定した。

前章で検討したように、三陸の地区(女川以北)では最大浸水深や勾配などの条件にある程度関係した瓦礫堆積の特徴が見られたのに対し、平野の地区では粉碎した瓦礫が長距離漂流した後、漂着した場所で火災が発生している例が多く、火災発生メッシュと未発生メッシュを区別するパラメータが抽出出来ていない。そのため本研究では、三陸型の地区を対象としたモデルの構築を行うこととする。したがって、回帰分析は表-1で示した対象地区のうち津波火災が発生した地区(No.4 田老からNo.22 志津川までの全9地区)のデータのみを使用する。火災発生地区のみを使用する理由は、火災未発生地区は調査対象地区以外にも多数存在しており、それらの地区のデータを何地区含めるかによってメッシュの延焼期待値が低下してしまうためである。したがって、本モデルで導かれるメッシュの延焼期待値は、地区内で火災が発生した場合にどの場所の延焼リスクが高いかを表すものとなる。

なお、対象となる地区は、気仙沼の鹿折地区(都市ガス供給率36%)を除き都市ガス非供給地域である。また、いずれも小規模な工場などは含まれるものの一般住宅を中心とした市街地もしくは集落である。

(3) 候補となる説明変数

説明変数の候補を表-2に示す。NH1は東北地方太平洋沖地震の直前の建物数(住宅地区、市町村によって最終更新年度が異なり2008年~2010年である)、Dwはメッシュの最大浸水深⁵⁾、SLは角度の単位で表したメッシュの平均勾配、Beは山や高台に隣接するメッシュの場合1でそれ以外は0となるインデックスである。

(4) 最適モデルの選定と考察

表-3は4つの説明変数を組み合わせた16種類のモデルでの回帰分析結果を示す。本研究ではP値が0.2未満の場合に有意と判定した。

NH1(建物数)を含んだモデルは、説明変数を用いないモデルに比べてAICが大きく低下しており、主要な説明変数であることが分かる。最適モデル(No.6)はNH1にDwを追加したものであり、NH1のみのNo.12と比較しても、明らかにAICが低下している。一方、No.6にSLやBe

を追加しても有意なモデルは得られなかった。

No.6 モデルにおいて NH1 は瓦礫の発生ポテンシャルを表すものであるが、同じ建物数密度であったとしても、Dw が大きい場合は住宅が流失してしまうため、その場所での延焼期待値は低くなる傾向が統計的に有意に表れていると解釈することができる。しかし、それ以外の支配要因は特定できていない。これは、実際の延焼範囲の方に偶発的要素が含まれているためであり、むしろNH1 と Dw については、それだけ再現性の高い変数であると解釈できる。

図-6 は No.6 モデルで計算したメッシュの延焼期待値を図示したものである。延焼火災が発生した地区(山田, 大槌)における実際の延焼範囲(図中に示した)には偶発的な要因も含まれていると考えられるため、必ずしも延焼期待値が最大の場所とはなっていないが、大槌地区の高台前面の火災や、山田地区の火災のように図-2 や図-3 で考察した領域において相対的にリスクが高い状況が表現出来ている。

(5) 火災未発生地区への適用と考察

図-6 において、火災未発生地区(野田, 女川)に適用した結果(これらの地区のデータはモデル構築の際に使用していない)に着目すると、野田地区では図-2 で示したような瓦礫堆積の多い領域で延焼期待値が相対的に高くなると評価されている。また、女川地区では、全般的に津波の浸水深が高かったことで、延焼期待値の高い領域は遡上先端部や山際に限られていることが分かる。

以上より、本モデルで求めた延焼期待値は瓦礫の堆積しやすさも反映されていると考えられ、東北地方太平洋沖地震の事例に基づいての判定であるが、地区内の相対的な津波火災リスクを評価できるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、岩手県から福島県にかけての東北地方太平洋沖地震の津波浸水地域において、航空写真及び航空レーザ測量データを用いて津波瓦礫の分布状況を把握した。さらにその結果に基づき、堆積瓦礫と津波火災リスクの関係を分類するとともに、場所的な条件に応じて津波火災の発生リスクを評価する統計モデルを構築した。本研究の成果と課題を以下に示す。

- 1) 瓦礫堆積パターンから、大規模な津波火災の発生しやすい条件として、浸水深が徐々に減少する緩やかな勾配地形の地区や高台の麓に住宅地が形成されていることなどが抽出された。
- 2) 浸水深が全域にわたって大きくなる谷地形(三陸型)で

表-2 説明変数

説明変数		内容	単位
x1	NH1	震災前の建物数	(棟)
x2	Dw	最大浸水深	(m)
x3	SL	勾配	(度)
x4	Be	山際, 平地の区分	1 or 0

表-3 回帰分析結果

Model No.	Intercept		NH1		Dw		SL		Be		AIC
	β	P	β	P	β	P	β	P	β	P	
1	-2.11	0.00	0.06	0.00	-0.22	0.00	-0.05	0.17	0.34	0.34	548.0
2	-2.13	0.00	0.06	0.00	-0.22	0.00	-0.03	0.29			546.9
3	-2.36	0.00	0.06	0.00	-0.22	0.00			0.02	0.93	548.1
4	-3.26	0.00	0.05	0.00			-0.03	0.37	0.42	0.23	591.0
5	-0.75	0.00			-0.19	0.00	-0.14	0.00	0.60	0.08	601.5
6	-2.35	0.00	0.06	0.00	-0.22	0.00					546.1
7	-3.29	0.00	0.06	0.00			-0.01	0.81			590.5
8	-3.41	0.00	0.06	0.00					0.22	0.42	589.9
9	-0.75	0.00			-0.20	0.00	-0.10	0.00			602.6
10	-1.19	0.00			-0.18	0.00			-0.36	0.16	620.0
11	-1.87	0.00					-0.12	0.00	0.70	0.04	643.6
12	-3.33	0.00	0.06	0.00							588.5
13	-1.30	0.00			-0.18	0.00					620.1
14	-1.89	0.00					-0.08	0.00			645.8
15	-2.18	0.00							-0.15	0.55	656.9
16	-2.21	0.00									655.3

■ P>0.2となり棄却

は、津波により流失する建物が多くても、津波火災のリスクは相対的に低い傾向があることが確認された。

- 3) 仙台平野では、広範囲が一様に浸水するため、瓦礫の移動距離が大きく、堆積パターンは局所的に濃淡を生じている。そのため、津波火災のリスクを評価するためには、瓦礫の漂流・漂着をシミュレーションモデルなどで予測する必要があると推察される。
- 4) 三陸型地形の地区では、100m メッシュで津波火災の延焼期待値を評価するモデルが統計構築できた。最適モデルは、メッシュ内の建物数とメッシュの最大浸水深の2変数で規定された。
- 5) 同モデルを火災未発生地区に適用した結果、瓦礫堆積の多い場所や他地区で津波火災が発生した山際などで相対的に延焼期待値が高い結果が導かれ、ある程度危険箇所を抽出することが可能であると考えられた。
- 6) 上記モデルは津波火災発生地区のみのデータを用いて構築していることから、その予測結果は火災が発生した場合の危険箇所を評価しているものと考えられる。津波火災の被害想定を行う上では、地区全体での火災発生確率を評価する必要がある。
- 7) 今回のモデルでは火災の発生源については直接評価していない。そのため、社会的な条件(住宅構造, 都市ガスの普及率, 住宅地以外の地域など)によっては適用条件が異なることになる。また、東北地方太平洋沖地震の事例のみであるため、気象条件なども反映されていないことにも注意が必要である。

謝辞: 本研究をまとめるにあたり、損害保険料率算出機

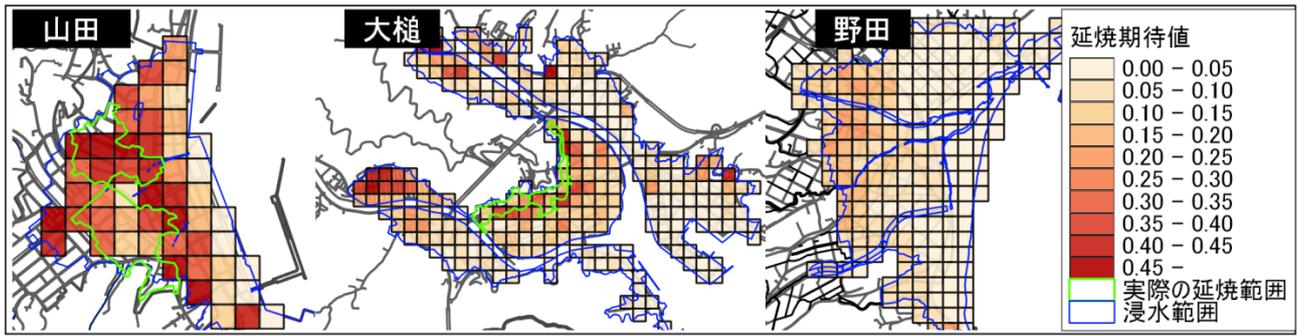


図-6(1) 延焼期待値算出結果(山田地区, 大槌地区, 野田地区)

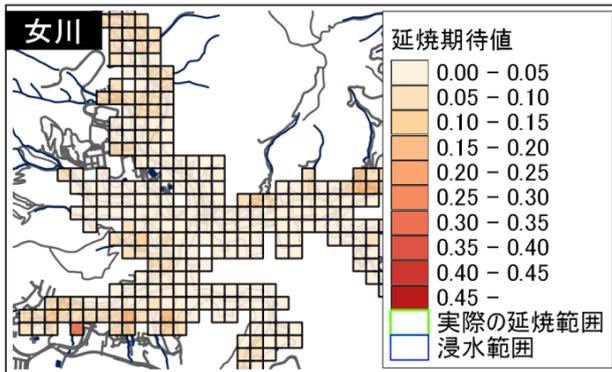


図-6(2) 延焼期待値算出結果(女川地区)

構災害科学研究会(委員長:菅原進一)の各委員からは貴重なご意見をいただいた。また,国土交通省国土地理院,岩手県,宮城県より空撮画像ならびに航空レーザ測量データを使用させていただいた。記して謝意を表す。本研究は地震保険調査研究費による調査研究事業の一環として実施した。

参考文献

1) 廣井悠, 津波火災に関する東日本大震災を対象とした

質問紙調査の報告と出火件数予測手法の提案, 地域安全学会論文集, No.24, pp.1-11, 2014.11

2) 今津雄吾, 野竹宏彰, 北後明彦, 今村文彦, 東日本大震災で発生した津波火災における地形的影響の考察と津波火災危険度指標の提案, 自然災害科学, Vol.33, No.2, pp.127-143,2014

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, 平成 27 年度日本火災学会研究発表会概要集 (2015.5), 266-267

4) 福岡巧巳, 越村俊一, 航空写真と LiDAR データの統合解析による津波瓦礫の 3 次元マッピング, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, 2013, I_1436-I1440

5) 復興支援調査アーカイブ(参照日 2016.3.15), <http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>

6) 国土交通省国土地理院, 平成 23 年(2011 年)東日本大震災に関する情報提供 (参照日 2016.3.15), http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html

(2016.3.16 受付)

DEVELOPEMENT OF LOCAL TSUNAMI FIRE RISK ASSESSMENT METHOD BASED ON THE TSUNAMI DEBRIS DISTRIBUTION SURVEY IN THE TOHOKU PACIFIC OCEAN EARTHQUAKE

Yugo IMAZU, Hiroaki NOTAKE, Ai SEKIZAWA and Haruki YAMAMOTO

In the Tohoku Pacific Ocean Earthquake, some tsunami evacuation buildings have been exposed to the risk of fires. It highlights a requirement of the tsunami evacuation buildings for the tsunami fires. Most of existing risk assessment methods of tsunami fire predicts macroscopically the number of fires and its scales within a large area. In order to estimate risk of tsunami fire for a certain building, it is essential to consider the circumstance of the local terrain and surrounding buildings. In this study, the relationships between tsunami fire risk and debris distribution was investigated analyzing aerial photos and LiDAR data after the tsunami. Furthermore, the statistical model for estimating the risk of localized fire at 100m mesh was proposed.