

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 火災危険度評価指標の提案

今津 雄吾*・野竹 宏彰*・北後 明彦**・今村 文彦***

Geographical Analysis of Tsunami Fires in the Great East-Japan Earthquake and Tsunami Disaster and Risk Index

Yugo IMAZU^{*}, Hiroaki NOTAKE^{*},
Akihiko HOKUGO^{**} and Fumihiko IMAMURA^{***}

Abstract

The Great East-Japan Earthquake on March 11, 2011 caused many fires just after the tsunami attack. Since refuge to the outdoors or fire-fighting is restricted by flood and debris, it is important for tsunami refuge buildings to prepare for fires. However, the mechanisms of outbreak and spread of tsunami fires are not fully solved. In this study, some fire cases in the 2011 event were investigated based on a macro viewpoint of village scale to clarify geographical conditions which effect to the outbreak or outbreak or expansion of tsunami fires. An index evaluating the risk of tsunami fire was also proposed.

キーワード：東日本大震災，津波火災，危険度評価指標，可燃性ガレキ

Key words : the 2011 Great East Japan Earthquake, tsunami-induced fire, tsunami-induced fire risk index, flammable debris

* 清水建設株式会社技術研究所

Shimizu Institute of Technology

** 神戸大学自然科学系先端融合研究環都市安全研究センター

Kobe University Research Center for Urban Safety and Security

*** 東北大学災害科学国際研究所

Tohoku University International Research Institute of Disaster Science

本論文に対する討論は平成27年2月末日まで受け付ける。

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、津波による直接的な人命・財産の被害が顕著であったが、津波来襲直後に火災（以下、津波浸水を起因として浸水域やその周辺で発生する火災を津波火災と称す）が発生した地区も多く、これらの場所では、地震・津波・火災が連続して発生する複合災害となった。実際に気仙沼市では、多くの人が津波から避難した公共施設に、その後周囲から火災が迫る中ろう城を余儀なくされたケース¹⁾や、石巻市では、住民が一時避難した学校の校舎が、二次避難後に火災で全焼した事例が報告されている²⁾。

今後南海トラフに面する沿岸各地で巨大津波の来襲が懸念される中、避難時間に余裕が無い地域などにおいて津波から人命を守るための対策として、津波避難ビル等の指定・新設が進められている。しかし、複合災害である津波火災を考えた場合、湛水やガレキ等の漂流物が障害となり十分な消火活動が行えないことや、二次避難が困難となることなどの防災上の制約が発生するため、津波に対する力学的な安定性確保を主眼とした従来の避難ビルの整備方針^{3,4)}では、安全性が十分に確保されているとは言えない。

津波火災の事例は、1993年の北海道南西沖地震における青苗地区⁵⁾の他、1854年安政南海地震、1896年明治三陸地震、1933年昭和三陸地震などでも記録されている⁶⁾。我が国は、伝統的に木造住宅が主であることや、三陸リアス海岸に代表されるように、沿岸の低平地に密集した形態の集落が多いことから、津波火災の発生に対して不利な条件が多いと推定される。このことは、インド洋沿岸諸国を中心に30万人近い犠牲者を出した2004年のスマトラ島沖地震津波においても、火災による被害がほとんど報告されていないこととの対比からも支持される。

このように我が国においては、「津波」と「火災」は、「地震」と「津波」と同様に分けて扱うことはできないにもかかわらず、100年に数回と発生頻度そのものが低いことや、目撃情報・記録映像の不足などにより、過去の研究は調査報告にと

どまっており（例えば、座間・関澤1993⁵⁾）、火災発生・延焼拡大のメカニズム解明に向けた動きは、東日本大震災後に本格化してきた段階である。例えば、森田ら²⁾は、石巻市の門脇小学校の火災を詳細に調査し、火災発生及び延焼拡大の要因を推定している。また、小林⁷⁾は、市街地スケールのマクロ的な視点に立って、浸水域のエネルギー密度（着火源となるものの密度）と堆積可燃物密度（可燃性ガレキや流出油等の密度）から津波火災のリスク要因を指摘している。

本研究は、小林⁷⁾と同じく集落スケールのマクロ的視点に立って、東日本大震災の被災地を対象に集落ごとの津波火災事例を整理した上で、火災の発生・拡大と住宅分布や地形条件及び来襲した津波規模との関係を統計的に分析し、津波火災危険度の評価につながる指標を提案することを目的としたものである。

2. 東日本大震災における津波火災の概要

2.1 津波火災の発生状況

震災後に行われた日本火災学会による現地調査結果⁸⁾より、市町村別の延焼面積（津波浸水域の火災）をGISにより算出した結果を表1に示す。

表1 津波火災の市町村別の延焼面積

県	市町村	総延焼面積(m ²)	延焼箇所数
岩手県	野田村	500	1
	宮古市	10,400	1
	山田町	198,100	6
	大槌町	129,200	4
	大船渡市	8,200	3
	陸前高田市	900	1
宮城県	気仙沼市	219,100	28
	南三陸町	21,800	1
	石巻市	58,500	7
	仙台市	20,200	7
	名取市	52,700	2
福島県	亶理町	3,000	2
	相馬市	1,100	1
	いわき市	15,400	1

* 1 総延焼面積は、火災学会の調査結果を元にGISにより計測。延焼した範囲に含まれる空地や道路等も含んだ値。

* 2 延焼箇所数は、複数の出火源が特定されている場合でも連続している火災は1箇所とカウント。

延焼箇所数は、気仙沼市が28箇所と特に多くなっている。これは次項で述べるように、危険物油（ガソリン、重油等）の大量流出が発生した影響と考えられる。また、連続する範囲で広域の市街地火災となった地区は、山田町中心部(173,700m²)、大槌町中心部(129,000m²)、気仙沼市鹿折地区(89,000m²)の3地区が突出していた。なお、廣井⁹⁾によると、東日本大震災における津波火災の一火災当りの焼失棟数の平均値は20.37棟で、津波火災以外の火災の1.66棟に比べ非常に高いという特徴があり、ガレキや建物が燃焼を継続する段階へ移行させないことも、津波火災の対策を考える上で重要な課題になる。

2.2 出火原因及び延焼拡大要因

(1) 出火原因

廣井⁹⁾は、日本火災学会東日本大震災調査委員会が各消防に対して行った質問紙調査結果を分析している。同調査結果では、東日本大震災において津波が原因で発生したと推定される火災は149件（青森県4件、岩手県21件、宮城県98件、福島県12件、茨城県9件、千葉県5件）とされている。この内、震災当日の3月11日に発生したものが82件、3月14日までの発生数が110件と津波直後の火災が大半を占めているが、一方で4月中旬頃までは散発的に発生が続いている。その中で、原因が特定されているものは81件有り、大まかに分類すると以下ようになる。なお、3月11日に発生した火災の要因について、再整理を行ったものを表2に示す。

- ①倒壊家屋のガレキから出火
- ②漂着ガレキ（車両を含む）から出火し建物に延焼
- ③水没車両の電気系統から出火（車両火災）
- ④浸水した住宅等の電気設備から出火

④は津波浸水から数日経過してからのケースがほとんどである。また、③は、水没した車両から出火し車両火災となったものであるが、このケースは東北4県に比べて津波の勢力が弱かった茨城県・千葉県で相対的に多数を占める傾向にあった。すなわち、住宅火災や大規模な市街地延焼につながるような火災は、①、②が大半を占めており、

ガレキの存在が大きく関与していると言える。そして、そのガレキ内での直接的な発火要因については、車両、LPGボンベとの情報があるが、「不明」とされているものが圧倒的に多い。ただし、漂流物中のLPGボンベからの出火は確認しにくいことから、「不明」の中にも多数含まれていると推察される。実際に、インターネット上の投稿動画に、漂流ガレキ内でガスが噴射（LPGボンベ）して発火する状況を確認できる動画が数件寄せられている（写真1）。なお、この事例では、ガスに引火し火災を生じたものの、数秒後には自然鎮火している。

(2) 流出油の影響

気仙沼湾沿岸部の浸水範囲及び火災延焼範囲を図1に示す。気仙沼市では、沿岸部に存在した危険物の屋外タンク22基が津波の第1波で漂流し、推定11,521klの危険物（ガソリン1,535kl、軽油1,958kl、灯油498kl、重油7,530kl）が流出した⁸⁾。このような状況下で、流出油とガレキ等の漂流物が混濁したものが何らかの要因で出火して海上火災帯（写真2）が形成され、その後夜間まで津波や風に流され市街地や湾内を往復していた¹⁾。その結果、気仙沼市の火災は、中央公民館周辺地区や対岸（湾東側）の林野など広範囲に延焼箇所が点在するとともに、他の市町に比べて火災発生箇所数が突出して多い（表1）という特徴がある。このように、可燃性の油の大量流出は、海上でのガレキ燃焼を長期化させる働きがあり、延焼拡大や遠方への飛び火に大きく関与するものと考えられる。なお、対岸への飛び火については、炎上した小型船舶が漂流・座礁して延焼したと推測される事例⁸⁾も報告されている（写真3）。危険物油の大量流出が無い場合においても船舶火災が発生する可能性は否定できないが、少なくとも、海上火災帯の形成がそのリスクを大幅に高めていることは明白である。

(3) 津波火災の発生形態と発達要因の抽出

火災の発生や発達に関する主な要因を抽出するために、動画等の記録、既往調査結果、現地地

表2 3月11日に発生した津波火災の要因（廣井⁹⁾を基に再整理）

県	火災種別	発生時刻	出火要因
岩手県	その他	17:00	②漂着ガレキ（車両）から出火
	その他	18:00	②漂着ガレキ（不明）から出火
	建物	15:20	①倒壊家屋のガレキから出火
	建物	15:25	①倒壊家屋のガレキから出火
	建物	15:25	①倒壊家屋のガレキから出火
	建物	15:30	①倒壊家屋のガレキから出火
	建物	15:30	①倒壊家屋のガレキから出火
	建物	15:30	①倒壊家屋のガレキから出火
	建物	15:30	②漂着ガレキから出火
	林野	15:30	②漂着ガレキから出火
	建物	18:00	②漂着ガレキ（車両）から出火
宮城県	建物	16:30	②漂着ガレキ（車両）から出火
	建物	17:10	②漂着ガレキ（車両）から出火
	建物	18:00	②漂着ガレキ（車両）から出火
	その他	17:10	②漂着ガレキ（車両）から出火
	建物	16:20	②漂着ガレキ（不明）から出火
	その他	16:30	②漂着ガレキ（不明）から出火
	その他	15:56	②漂着ガレキ（不明）から出火
	建物	16:50	②漂着ガレキ（車両）から出火
	建物	17:55	②漂着ガレキ（不明）から出火
	建物	17:55	②漂着ガレキ（不明）から出火
	建物	15:48	②漂着ガレキ（車両）から出火
	その他	15:50	③水没車両の電気系統から出火
	建物	15:50	①倒壊家屋のガレキから出火
	建物	16:00	②漂着ガレキ（車両）から出火
	建物	16:00	②漂着ガレキ（車両）から出火
	建物	16:00	①倒壊家屋のガレキから出火
	建物	15:30	①倒壊家屋のガレキから出火
	その他	16:50	①倒壊家屋のガレキから出火
	建物	17:00	②漂着ガレキ（LPG）から出火
	その他	16:45	②漂着ガレキ（車両）から出火
その他	17:50	②漂着ガレキ（不明）から出火	
その他	19:20	②漂着ガレキ（不明）から出火	
建物	16:05	②漂着ガレキ（不明）から出火	
福島県	車両	19:50	③水没車両の電気系統から出火
	車両	15:50	③水没車両の電気系統から出火
	車両	20:35	③水没車両の電気系統から出火
	建物	不明	④浸水した住宅等の電気設備から出火
	建物	不明	④浸水した住宅等の電気設備から出火
	その他	不明	②漂着ガレキ（車両）から出火
	その他	不明	②漂着ガレキ（車両）から出火
茨城県	車両	17:44	③水没車両から出火
	車両	16:10	③水没車両から出火
	その他	17:00	③水没車両から出火

* 1 アンケート調査で要因が特定された44件を記載（全82件中）

* 2 「その他」は、漂着したガレキが空地や田畑で延焼したものなど



写真1 漂流ガレキ内での発火の瞬間映像¹⁰⁾



写真3 炎上した船舶と林野火災跡⁸⁾

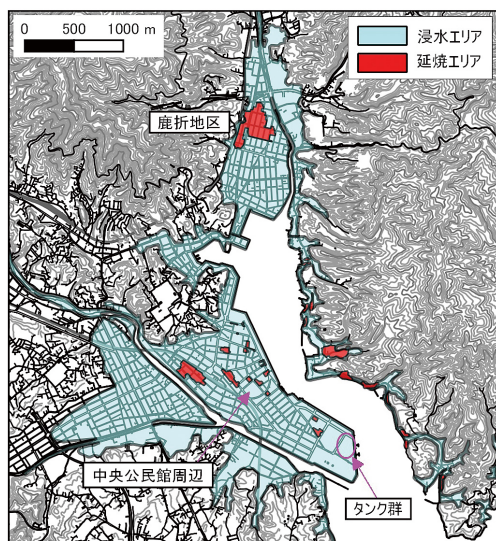


図1 気仙沼湾の津波火災発生状況^{8, 11)}



写真2 海上火炎帯 (気仙沼中央公民館より避難者撮影¹²⁾)

行ったヒアリング結果を総合的に分析し、津波火災の形態を分類した。表3に特徴的な3タイプを示す。タイプ3は重油等の大規模流出が発生した場合であり、海水上で可燃性油を混合したガレキが長時間燃焼し、漂流に伴い飛び火や広域火災をもたらすものである。一方、タイプ1では浮上し漂流している状態の家屋に十分な空間が残されていること、また、タイプ2では津波水位が低下した状態であることから、重油等危険物の大量流出が無くとも発生しうるものである。タイプ1とタイプ2の違いが生じる要因については、来襲する津波のエネルギーや地形および集落形態などが関係している可能性があるが、現在のところ解明されていない。これらの形態別の特徴分析結果を踏まえ、津波火災の発生から広域延焼・飛び火までの発達過程に関与する要因を表4にまとめた。また、津波火災発達における各要因の影響プロセスを図2に整理した。なお、結果は一般市街地を対象としたものであり、危険物が大量に備蓄されている臨港地域などの特殊なケースは該当しない。

出火に関しては、燃料となるものとそれに点火するもの(出火エネルギー)が必要となる。燃料として、一般的な集落では車両に積まれたガソリン・軽油、家庭用LPGボンベ、灯油、船舶用重油等がガレキの衝突等により流出・噴射することが挙げられる。一方、出火エネルギーとしては、ガレキに含まれる金属や石材等の衝突によって生じる火花、車両バッテリーのショートが挙げられる。また、灯油や重油など揮発性の低い燃料の場合は、直接の引火よりも、既に発生した火炎から

表3 代表的な津波火災の形態

津波火災タイプ	特徴	例
1 漂流型	津波の遡上先端部で流出した家屋や漁船などが燃焼しながら漂流し、最終的な漂着地点でさらに漂着ガレキや周辺建物に拡大していくタイプ。建物はある程度の形状を保ったまま漂流するため、水位上昇中も燃焼が継続する。	関上、志津川など
2 漂着ガレキ型	津波により集積したガレキの下方に車両やLPGボンベ等があり、水位が低下後にそこから出火してガレキが燃え出すタイプ。	鹿折、山田、石巻など
3 湾上火災型	海域や陸域で発生したガレキに大量流出した重油等が混合した状態で漂流中に、何らかの要因で出火し、水上で燃焼を続けるタイプ。	気仙沼湾

表4 津波火災の発達に関する要因

要素	火災の発達過程				
	発火		燃焼継続	広域火災 (延焼拡大)	飛び火
	燃料	点火			
一般ガレキ		○	○	○	○
車両 (バッテリー)		○			
車両 (ガソリン)	○		○		
家庭用LPGボンベ	○				
住宅等の備蓄燃料 (灯油)	△				
住宅等の電気系統、電線、配電盤		○*			
屋外危険物施設 (重油・ガソリン等のタンク) の流出	△		○	○	○
地下危険物施設 (ガソリンスタンド)			流出事例なし		
小型船舶・漁船	△		△	△	○

△は直接の目撃報告は無いが他の項目から類推される事項
 *発災直後は停電であったが、通電再開後の火災に関与

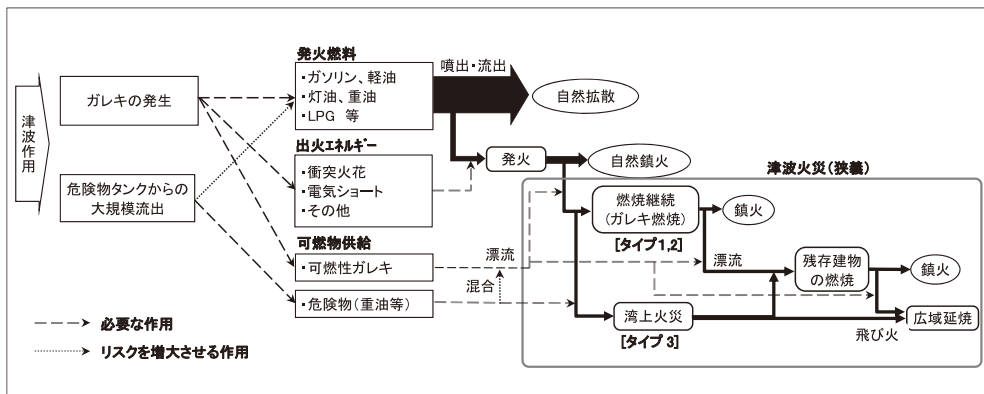


図2 津波火災の発達過程の模式図

のもらい火になるケースが多いと推測される。これらの要素はいずれも、浸水域内の世帯数とほぼ同数存在すると推定されることから、家屋流失の多い場所では、かなりの頻度で出火機会が生じていると考えられる。しかしながら、一時的に火災

が生じても継続時間は通常数秒～数分程度であり、(1)で述べた事例のように、その大半は自然に鎮火していると考えられる。すなわち、浸水域内で燃焼を継続し、ガレキや残存した建物等に延焼するためには、一定密度以上の可燃性ガレキが

連続して供給され続けることが必要と考えられる。さらに、重油等の大量流出が重なった場合には、燃焼継続効果を高める働きにより、津波火災のリスクを上昇させていると言える。

次に、津波火災が発生した時に、複数の周辺家屋に延焼が拡大する広域火災になる要因について検討する。既に述べたように、津波火災は浸水域で発生するため消火活動が困難であることも一つの延焼拡大要因である。加えて、広域火災に発展した気仙沼市鹿折地区では、住宅と住宅の間を何層にも埋め尽くすほどのガレキの堆積が見られ、ガレキの堆積密度も重要な要因であると推察される。また、住宅の形（内部空間）を保ったまま浮遊状態で漂着した住宅も多く、このような場合には、水面上であってもより燃焼しやすい状況となる。なお、ガレキの堆積密度については、住宅密集度などの社会的条件と、津波が来襲した時のガレキの滞留しやすさ（津波規模と地形条件）に関係すると推定されることから、次章以降で検証する。

3. 地形条件の違いによる影響の考察

図3は、津波火災の発生形態の地域の違いを分析するために、三陸地方及び仙台平野地方の代表的な地区を抽出し、浸水範囲¹¹⁾及び震災前後の建物の分布¹³⁾と火災延焼範囲⁸⁾をGISに示したものである。建物ポイントは、震災前のデータ（青丸）の上に震災後のデータ（赤丸）を重ねて表示している。従って、青丸が表示されている部分は震災前後で建物が流失したことを意味する（なお、厳密には、火災による焼失や震災後に解体したケース、逆に震災後に建造されたものも含まれる）。

3.1 三陸地域の津波火災

延焼範囲が特に大きかった（1）山田地区（山田町）、（2）大槌地区（大槌町）、（3）鹿折地区（気仙沼市）に見られる特徴を以下に示す。

- 浸水範囲内にあって、流失した家屋群と残存した家屋群が切り替わる付近を中心に延焼範囲が分布（山田地区、鹿折地区）
- 浸水範囲の境界部（高台の前面）に沿って延焼

範囲が分布（大槌地区）

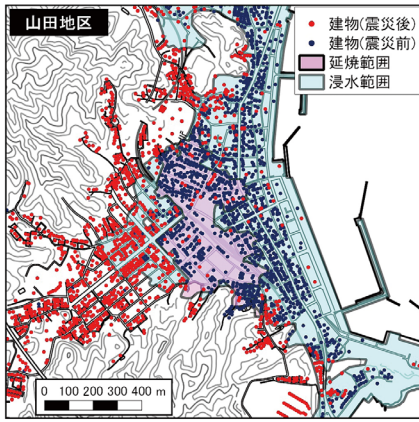
- 延焼範囲よりも海側には、流失した家屋が高密度で分布（共通）

以上の特徴は、津波のエネルギーの大きい沿岸部における高密度でのガレキの発生と、津波エネルギーが減衰する場所へのガレキの蓄積という2つの要素が必要であることを示唆する。これは比較的延焼範囲の狭い（4）志津川地区（南三陸町）及び火災が発生していない（5）女川地区（女川町）との対比からも確認できる。すなわち、志津川地区及び女川地区は、どちらも浸水範囲内の家屋のほとんどが流失しており、ガレキの発生密度としては先に挙げた3地区と同程度であるものの、浸水範囲内に残存する家屋が極端に少ない状況である。この要因は、三陸リアス海岸特有の地形により、津波が狭窄により増幅されたことと、低平地が狭くすぐに山が迫っていることで、津波がエネルギーを減衰しながら遡上する範囲が狭いことによると考えられる。

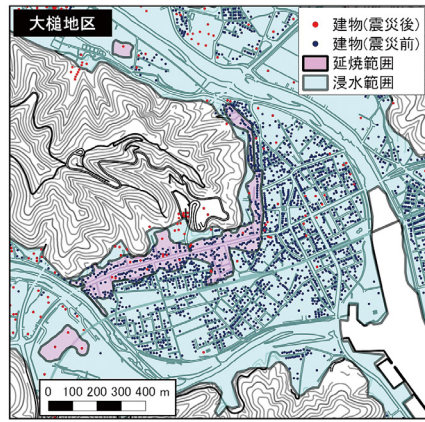
一方、ガレキ発生密度が火災発生に違いを生じた例として、山田地区とその北側に隣接する北浜町地区（火災無し）の違いが挙げられる（図4）。両地区は共に山田湾に面した集落であり、地形が類似しているほか、来襲した津波の規模もほぼ同程度であった。しかしながら、山田地区に比べ北浜町地区は住宅数が少なかったことから、ガレキの発生量・発生密度が小さく、火災発生・延焼拡大のリスクが低かったと考えることが出来る。

3.2 平野地域の津波火災

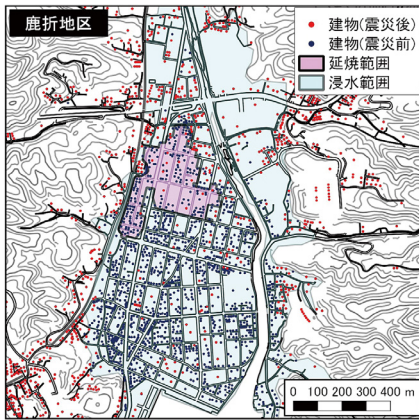
表1において、石巻市以南の火災の多くは、平野部でのものであり、前項の三陸地域の火災とは様相が異なっている。代表的な事例として図3（6）に閑上地区（名取市）の状況を示す。図から分かるように、浸水範囲が大きく、延焼範囲は相対的に小さい。また、火災発生場所も、浸水範囲の端部ではなく浸水範囲の中間となっている。浸水範囲内は、ほぼ水田地帯と住宅地であり地形的な起伏は少ないが、延焼箇所を細かく分析すると、小河川の堤防・橋梁付近及び頑強な公共建築物の近辺で流れが滞留した場所となっている。震



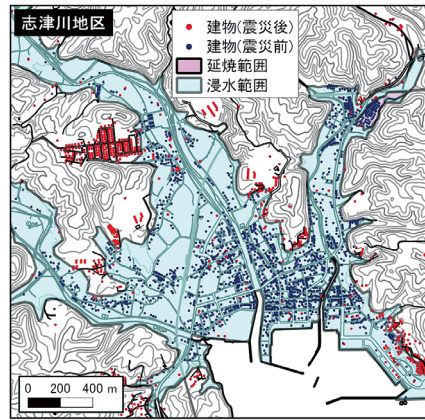
(1) 山田地区



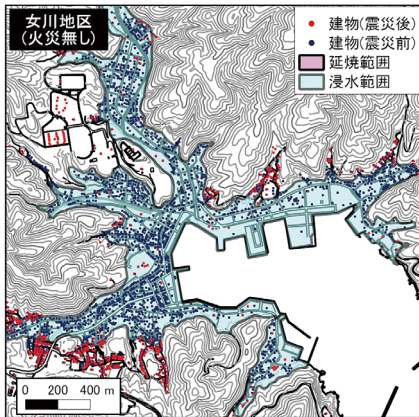
(2) 大槌地区



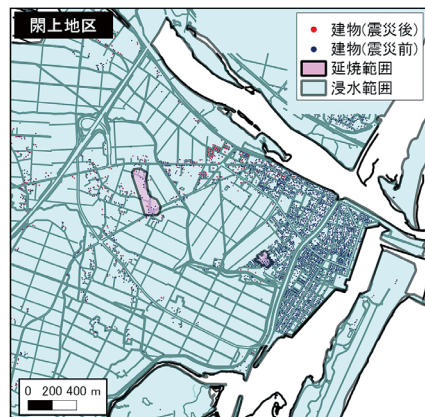
(3) 鹿折地区



(4) 志津川地区



(5) 女川地区



(6) 関上地区

図3 建物分布と浸水・延焼範囲

災当時のヘリコプターからの中継動画（NHK WORLD ニュース映像）では、第1波の遡上進行波とともにガレキが漂流しながら延焼し、最終的に図3（6）に示した延焼エリアに漂着して延焼している状況が確認できる。

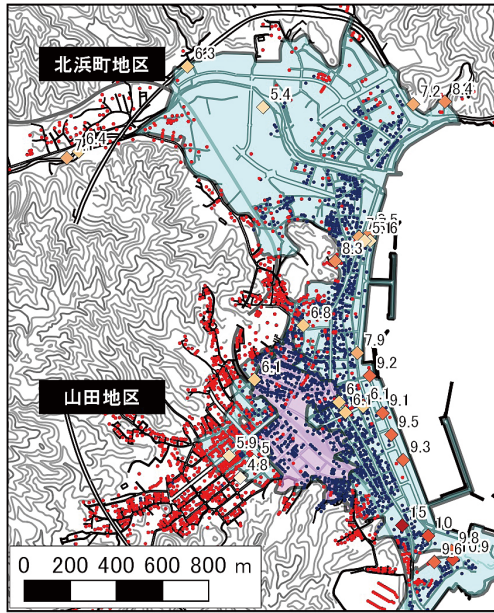


図4 山田地区と北浜町地区の比較

4. 発生可燃物量の推定

前章までに考察したように、津波火災の発生や延焼拡大は、ガレキの発生量及びその密度が大きく関与していると考えられる。そこで、定量的な検証を行うために、建築物から発生した可燃物の量（木材換算した等価可燃物量）を以下の手順で推定する。なお、車両や貯木などは含まれない。

- ①震災の直前・直後の住宅地図データ¹³⁾を用いて、流失建物を特定する。
- ②流失建物の諸元（階数、床面積、用途分類）から構造種別（木造、S造、RC造、SRC造）を推定する。
- ③構造種別の木材使用量¹⁴⁾（ m^3/m^2 ）から木材発生量を算出した後、代表的な木材比重（0.5トン/ m^3 ）¹⁵⁾を用いて重量換算する（A：建築部材からの発生木質ガレキ量）。
- ④建物用途別の等価可燃物量原単位^{16,17)}を用いて、家財から発生する木材換算ガレキ量を算定する（B）。
- ⑤上記で計算したA及びBを合計する。

算出結果を表5に示す。また、発生可燃物量と火災延焼面積の関係を図5に、浸水面積で除して求めた発生密度と延焼面積比（=延焼面積/浸水面積。延焼面積は、浸水範囲外まで燃え広がった部分も含む）の関係を図6にそれぞれ示す。なお、志津川地区は、火災の発生した谷（天王前地区：

表5 建物由来の発生可燃物量（木材換算）

市町	地区名	①浸水面積 (ha)	②延焼面積 (ha)	延焼面積比 (②/①)	浸水建物数	③発生可燃物量 (ton)	可燃物密度 ③/① (kg/m^2)
山田町	山田	61.5	17.4	0.280	1413	29166	47.4
	北浜町	76.0	火災無し		453	7230	9.5
	織笠	66.6	0.3	0.005	340	9680	14.5
	田の浜	17.3	1.9	0.110	272	7490	43.3
	大沢	57.6	0.2	0.003	285	10968	19.0
大槌町	大槌	294.5	12.9	0.044	2841	75164	25.5
	赤浜	18.7	1.0	0.053	248	7366	39.4
	吉里吉里	60.9	火災無し		407	11217	18.4
気仙沼市	鹿折	111.4	8.9	0.080	1334	40425	36.3
	気仙沼中心部	149.3	6.9	0.046	1961	57663	38.6
南三陸町	志津川	52.1	2.2	0.042	707	18151	34.8
女川町	女川	135.4	火災無し		2023	58182	43.0
名取市	関上	483.9	5.4	0.011	3549	74917	15.5

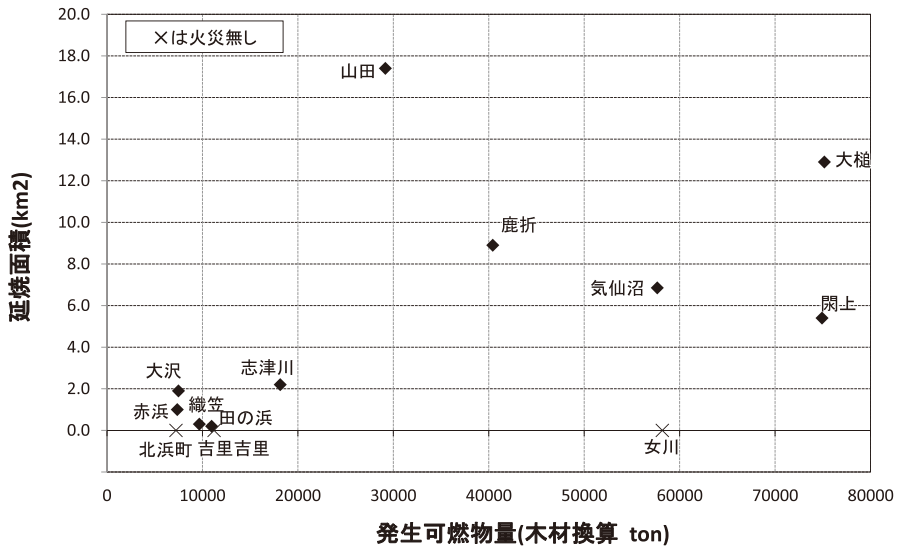


図5 発生可燃物量と延焼面積

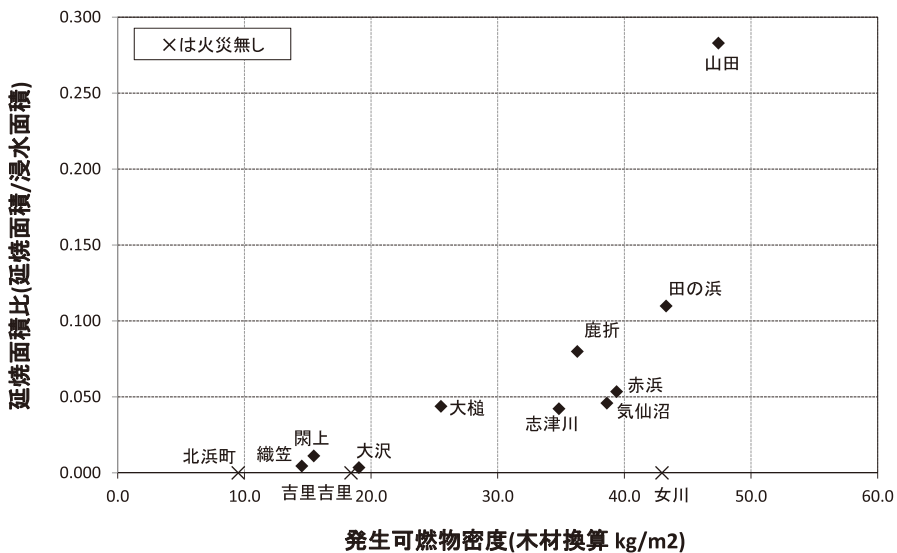


図6 発生可燃物密度と延焼面積比

図3 (4) の一番右側の谷に) 関係する範囲を対象とした。広域の火災に発展した山田地区、大槌地区、鹿折地区及び気仙沼中心部は、発生可燃物の総量が特に大きいことが分かる。しかし、女川地区は、これらの地区と同等以上の発生量にも関わらず、火災は発生していない。

一方、延焼面積比と発生可燃物密度の間には明瞭な正の相関が見られ、発生可燃物密度が30 (kg/m²) 付近から勾配が大きくなっている。このことは、広域火災に発展するためには、一定密度以上の可燃性ガレキが必要であることを示唆している。一方、大槌地区や女川地区は、他の地区と

異なる傾向を示している。その要因として、大槌地区では、住宅地と農地が分離して浸水域内でのガレキ分布が一様でなく、また、浸水範囲が広くガレキが均等に拡散しないことなどが考えられるが、前章で考察したように地形的な特性によりガレキが陸域に留まりやすいか否かも大きく関係していると考えられる。従って、津波火災の危険度を予測するには、潜在的なガレキの発生量だけに着目しても不十分であると言える。

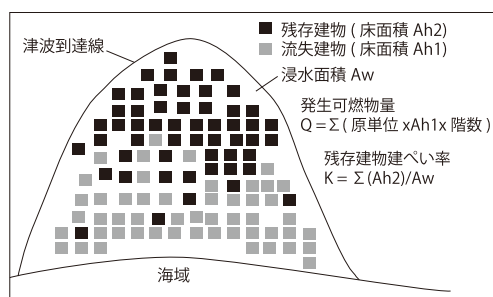


図7 津波火災リスク指標の模式図

5. 津波火災の危険度評価指標

5.1 指標の立案

著者らは既往の研究¹⁸⁾で、浸水面積に対する火災延焼面積（火災面積率）は、浸水域内に占める建物の総面積（建床面積率）に相関があること、そして、建床面積率が一定値以下では、火災延焼面積比が急激に低下することを示し、津波火災の延焼規模はその地区の可燃物堆積密度に依存するとの仮説を提示した。本論では、前章で考察した結果に基づき、可燃性ガレキの堆積密度と陸域での滞留しやすさを考慮して、津波火災の危険度評価指標の立案を試みる。

まず、津波火災に直接影響する有効ガレキ堆積密度 (D) を以下のように定義する。

$$D = \frac{\alpha Q(1-x)}{A_w(1-K)} \quad (1)$$

ここに、Q：可燃性ガレキ発生量、Aw：浸水面積、α：ガレキ量換算係数、x：海域への流出率、K：残存建物建ぺい率（残存建物の建床面積/Aw）である（図7参照）。ガレキ量換算係数αとは、ガレキ量Qが建物由来の可燃性ガレキ量で定義されていることから、車両などを含めた津波火災に影響するガレキ量への換算する係数を導入し厳密性を持たせたものである。ただし、本研究では、ガレキ換算係数は全ての対象地区で同一と仮定する。

前章での分析（図6）によると、延焼面積比はガレキ密度がある程度高くなると急激に上昇する関係が見られることから、以下のようにロジスティック曲線での説明を行う。

$$R_f = \frac{A_f}{A_w} \sim \frac{1}{1 + \exp(F)} \quad (2)$$

$$F = b_0 + b_1 D \quad (3)$$

ここに、R_f：延焼面積比、A_f：延焼面積であり、この場合Fが津波火災リスク指標となる。ただし、Dに含まれる流出率xは、津波火災の発生率や延焼拡大リスクに大きな影響を及ぼすと推定されるものの、現時点では十分な知見がなく直接算出することができない。そこで、以下のように考え、より簡易的な指標に置き換える。ガレキは津波の押し波に伴い発生し、一旦内陸側に押し流された後、引き波で海に向かって運ばれる。その際、十分な水深が無いと、地面からの抵抗を受けるようになり、その場に留まりやすくなると考えられる。この効果の大小をマクロ的に表す指標として平均浸水深（最大浸水深の空間平均値）を用いる。これにより、図8上段のように津波規模に対して相対的に低平地が狭くすぐに山の斜面に至るような地形（ガレキが滞留しにくい）と、下段のように勾配が緩やかで徐々に浸水深が低下する地形（ガレキが滞留しやすい）を数値的に区別できる。

このことを踏まえ、陸域滞留率(1-x)を平均浸水深W_dで代表するとともに、有効発生ガレキ密度D₀を用いて、火災指標Fを以下のように書き換える。

$$F = b_0 + b_1 D_0 + b_2 \frac{1}{W_d} \quad (4a)$$

$$D_o = \frac{Q}{A_w(1-K)} \quad (5)$$

なお、 W_d は値が小さいほど火災リスクを高めることから逆数で表している。また、ガレキ密度と浸水深の寄与を分かりやすくするために、指数関数内で線形結合としている。

5.2 簡易分析手法

前項で提案した指標の有効性を検証するため、以下に示す手法により簡易的に浸水深を求め統計的分析を行った。対象とした地区は表5に示すとおりである。各地区の浸水エリアを50mのメッシュで区切り、その地区の津波到達高（調査結果による水際線上の最高地盤高）で一様の最高津波水位面が形成されたと仮定して、各メッシュの地盤高との差を最大浸水深と設定する（図9）。その結果を基に浸水域内の平均浸水深を算出する。

5.3 指標の適用（延焼面積比の評価）

表5に示した対象地区のデータより、(4a)式の津波火災リスク指標と、さらに比較のため平均浸水深を考慮しない以下の(4b)式を用いて、それぞれ(2)式へのフィッティングを行った。

$$F = b_0 + b_1 D_o \quad (4b)$$

なお、火災の有無については不確定要素も多く、また、解析に使用する未発生地区の数によって結果に影響を与えてしまうことから、火災発生地区のみのデータを使用した。従って、ここで得られる結果は、直接的には「火災が発生した場合に延焼が拡大する危険度」を表すものと解釈すべきであるが、火災発生確率についても一定の相関はあると考えられる。

フィッティングを行った結果、回帰係数は表6のようになった。フィッティング結果を表7及び図10に示す。有効ガレキ発生密度のみを説明変数とした(4b)式においても、ある程度良好な相関関係が得られているが、平均浸水深を考慮した(4a)式の場合、AIC（赤池情報量基準）値が低下し、モデルの適合性が大幅に上昇している。このことから、平均浸水深は津波火災を説明する上で重要な指標であることが分かる。

次に、この予測式を火災未発生地区に適用した場合について検証する。北浜町地区や吉里吉里地区では津波火災危険度指標も低い水準であり、延焼面積比の予測値も小さい（1%未満）ことから、仮に火災が発生したとしても広域火災には至らないと評価される。特に、山田湾内に面して隣接する山田地区（火災面積率が最大）、織笠地区、北浜町地区の津波火災の相対的な津波火災危険度の違いを良好に説明できていると言える。なお、これ

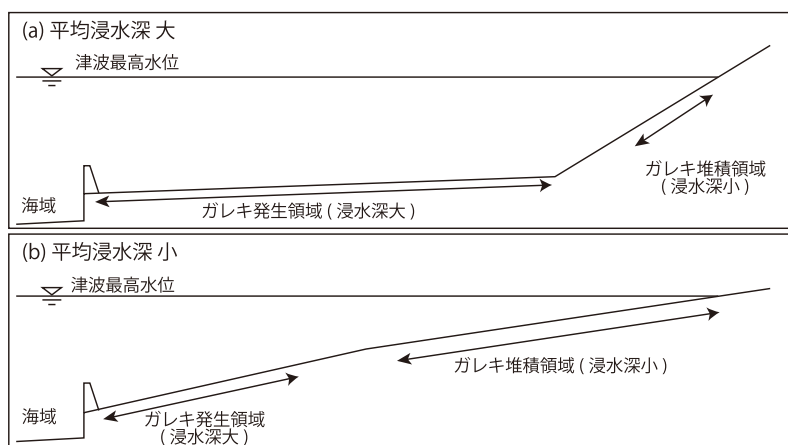


図8 地形断面のパターン

らの地区は、主にガレキ発生密度の寄与が大きいことから(4b)式でも同様の関係が得られる。一方、ガレキ発生密度が高い女川地区は、(4b)式では鹿折地区よりも危険度が高いと評価されるが、平均浸水深を考慮した(4a)式では逆転しており、地形と来襲津波規模との関係により、ガレキの発生量に対して相対的に危険度が低下したと解釈できる。しかしながら、(4a)式においても女川地区は比較的高い予測値となっており、十分に説明で

きているとは言えない。これは、火災発生地区のみで分析した結果(事後確率)を適用しているためである。従って、真の津波火災危険度を評価するには、火災発生(図2における狭義の津波火災)の有無を判定する有効な指標を抽出することが重要であり、今後の課題である。

5.4 津波火災危険度チャート

前項の検証により、(2)及び(4a)式で浸水面積に対する延焼面積の比として、津波火災延焼危険度を評価できることが確認された。しかしながら、浸水面積を基準にしているため、平野部で浸水範囲が広大な地区(例えば関上)では、実際の延焼面積は比較的大きいにも関わらず危険度が低く評価される問題がある。そこで、以下のように予測式を改良し、直接延焼面積を評価するチャー

表6 回帰係数

津波火災指標	b0	b1	b2	AIC*
(4b)式	-6.90	0.11	-	126.7
(4a)式	-7.10	0.10	1.21	117.2

* Akaike's Information Criterion

表7 対象地区の諸元と適用結果

市町名	地区名	浸水面積 Aw (ha)	延焼面積 Af (ha)	延焼面積比 Af/Aw	有効発生 ガレキ密度 Do (kg/m ²)	平均浸水深 Wd (m)	結果 (4') 式		結果 (4) 式	
							F'	Af/Aw	F	Af/Aw
山田町	山田	61.5	17.4	0.283	54.8	3.2	-1.10	0.250	-1.03	0.262
	北浜町	76	-	-	9.7	2.2	-5.87	0.003	-5.52	0.004
	織笠	66.6	0.3	0.005	14.6	3.6	-5.35	0.005	-5.24	0.005
	田の浜	17.3	1.9	0.110	45.7	9.1	-2.06	0.113	-2.22	0.098
	大沢	57.6	0.2	0.003	19.7	4.0	-4.82	0.008	-4.75	0.009
大槌町	大槌	294.5	12.9	0.044	26.9	4.3	-4.06	0.017	-4.03	0.017
	赤浜	18.7	1.0	0.053	40.8	9.7	-2.58	0.070	-2.74	0.060
	吉里吉里	60.9	-	-	18.7	8.3	-0.92	0.007	-5.01	0.007
気仙沼市	鹿折	111.4	8.9	0.080	42.7	3.0	-2.38	0.085	-2.27	0.094
	気仙沼	149.3	6.9	0.046	42.4	5.2	-2.41	0.082	-2.47	0.078
南三陸町	志津川	52.1	2.2	0.042	35.4	10.2	-3.15	0.041	-3.31	0.035
女川町	女川	135.4	-	-	43.9	10.2	-2.25	0.096	-2.42	0.082
名取市	関上	483.9	5.4	0.011	15.8	1.3	-5.23	0.005	-4.50	0.011

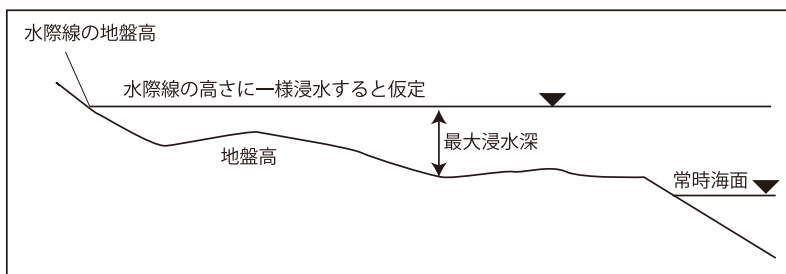
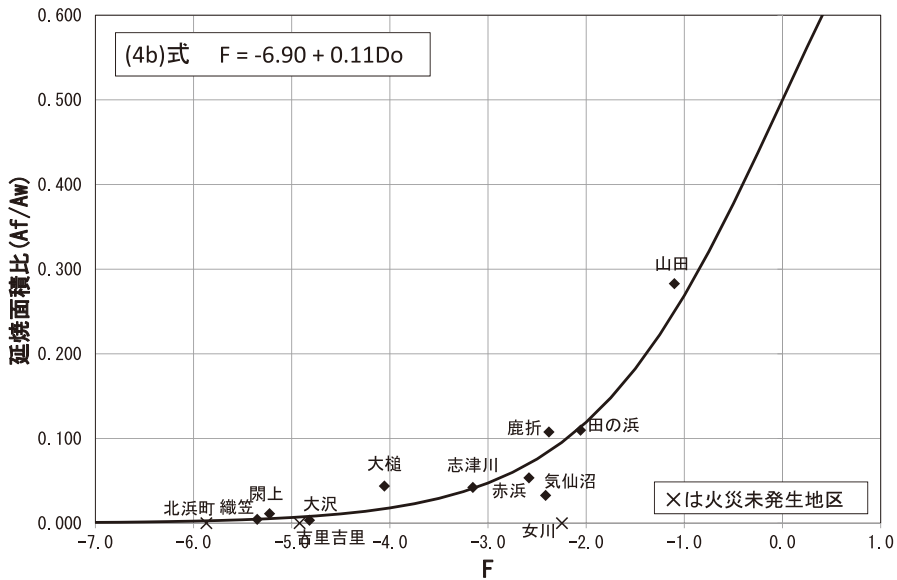
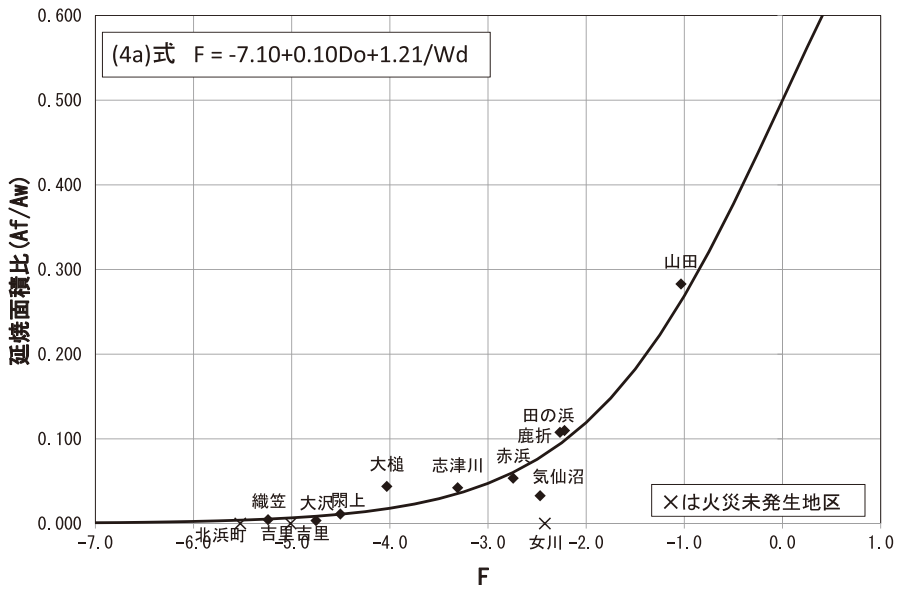


図9 簡易分析手法



(1) (4b) 式



(2) (4a) 式

図10 津波火災リスク指標と延焼面積比

トを構築する。(2)式への回帰において、実際の延焼面積比は最大でも0.3程度までとなっており、実質的には指数関数で近似できることから、(2)式を(6)式のように変形する。さらに、両辺の

対数をとった(7)式より、 $\log(A_w)$ をオフセット項として、火災指標 F を説明変数とした線形回帰を行う。なお、 F は(4a)式を用い、 $\log(A_f)$ はガンマ分布に従うと仮定する。

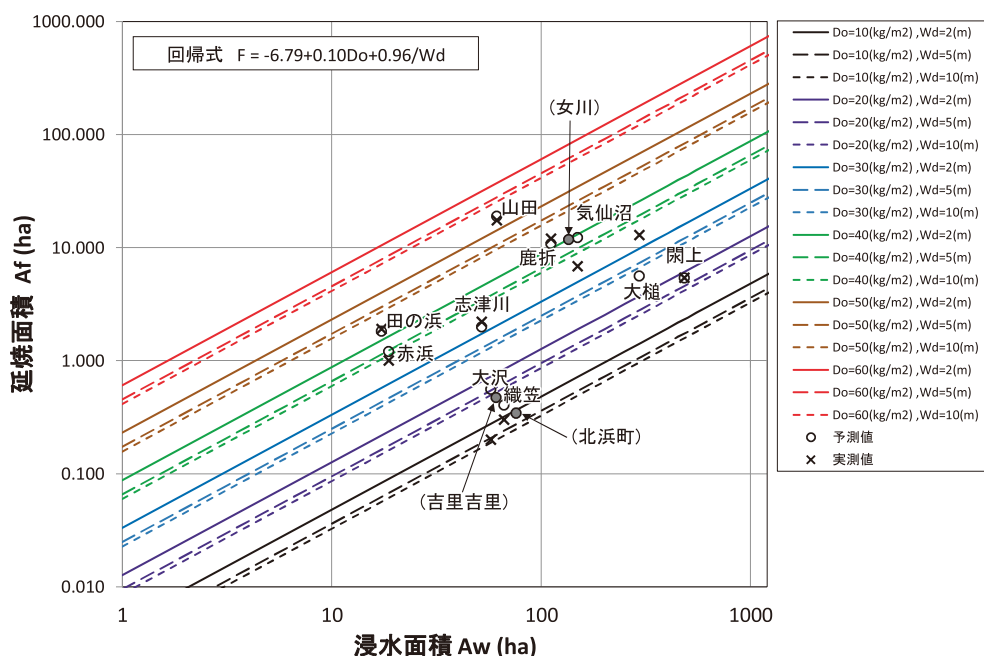


図11 津波火災危険度チャート

$$\frac{A_f}{A_w} = \exp(F) \quad (6)$$

$$\log(A_f) \sim F + \log(A_w) \quad (7)$$

回帰結果より作成した延焼面積評価チャートを図11に示す。図では、有効発生ガレキ密度 (D_o) が高いほど延焼面積が大きくなることを示しており、 D_o が 10 kg/m^2 増大すると延焼面積の期待値が約2.6倍に増大する。一方、 D_o が同じ場合には、平均浸水深が10mから2mになった場合、火災面積の期待値が約1.4倍に増大する関係となっている。

また、図中には各地区の予測値と実測値をプロットした(参考として火災未発生地区の予測値もグレーの丸印でプロットしている)。閑上地区では、津波火災リスク指標 F は小さいものの、延焼面積が大きい状況を良好に評価できている。他の地区においては、大槌地区や気仙沼地区でやや誤差が大きい結果となったが、概ね実際の延焼面積を予測できている。なお、大槌地区は過小評価

となっているが、浸水域内における住宅分布の偏りが大きいことが要因として考えられる。この点はマクロ的なアプローチの限界でもあることから、ガレキの漂流・堆積の挙動をモデル化しガレキの空間分布を予測するシミュレーション的手法が必要となる。

最後に、チャートの考察から津波火災の対策を検討する上での留意点を述べる。津波規模が大きくなると、一般的に発生ガレキ量は増大するが、同時に浸水範囲も変化することに伴いガレキ密度や平均浸水深も変化する。このことは、対象地区の地形や住宅の分布によっては、想定最大津波の場合よりも小さい津波が来襲した時のほうが、津波火災危険度が増す状況があり得ることを示唆している。従って、津波避難ビルを計画する上では、最大規模の津波のみを検討対象とするだけでは不十分と言える。なお、本手法は、簡易的に浸水深を評価できることから、複数のシナリオでの評価が容易である。

6. 結論

本論文では、既往の調査結果に基き東日本大震災における津波火災の発生事例を分析し、火災の発生から延焼拡大への支配的な要因を抽出し、メカニズムの推定を行った。次いで、三陸地方と仙台平野地方での津波火災の形態を比較することで、地形的・社会的な要因を考察した。その結果を踏まえ、津波火災の危険度を評価する指標を提案するとともに、東日本大震災の事例により検証を行った。以下に、主な結論を示す。

- 津波火災の多くは、漂流ガレキ中に多数存在する発火燃料（自動車燃料やLPGボンベ等）と、それらに点火する作用（ガレキの衝突火花や車両の電気系統のショート）によってもたらされる。
- 上記により一時的に火災を生じても、大半は自然鎮火するが、可燃性ガレキが高密度で継続的に供給されるなどの条件が重なった場合に、燃焼が継続され、残存家屋等に延焼することにより本格的な津波火災につながる。従って、高密度のガレキの存在が不可欠である。
- 危険物タンクからの重油の流出や家庭の備蓄燃料（灯油）は、ガレキの燃焼を助長するため、燃焼を継続させる働きにより延焼・飛び火のリスクを高めるが、津波火災発生においては必ずしも必要な条件ではない。
- 三陸地方では、浸水域内で流失した家屋が多い区域と残存した家屋が多い区域の境界付近で火災が発生した事例が多い。そして、発生するガレキが残存家屋の間を埋め尽くすほど高密度に堆積するような条件となった場合に、特に延焼範囲の拡大をもたらしている。
- 仙台平野地域では、浸水範囲に比べて火災範囲が局所的となる事例が多い。これは、浸水範囲が広く浅くなるため、ガレキの平均的な密度が低いことによる。そのため、火災は、橋や公共施設など局所的に滞留しやすい場所の周辺にガレキが集まって発生する。
- 発生ガレキ量を推算した結果、火災延焼面積と正の相関があり、ガレキ密度が一定以上になると延焼面積比が急増することが確認された。

○ガレキの発生密度と平均浸水深を説明変数とした津波火災のリスク指標を提案し、津波火災が発生した場合の延焼面積を良好に説明できることを確認した。

○上記より、本論で定義した可燃性ガレキ密度が2倍になると火災延焼面積が2.6倍に、また、平均浸水深が10mから2mに低下した場合には災延焼面積が1.4倍になる関係が導かれた。

7. おわりに

本研究で提示した津波火災危険度チャートを適用することで、南海トラフ地震等の想定津波浸水域（浸水範囲が連続する集落単位）における津波火災発生時の延焼面積をおおまかに予測することができ、集落内での具体的な火災発生場所は特定できないものの、地区全体としての津波火災の被害家屋数を推定することが可能となる。具体的な入力情報として、津波シミュレーションに基づく浸水面積および平均浸水深と、住宅地図の情報から浸水深に応じた建物被害率（例えば、郷右近ら（2012）¹⁹⁾、国土交通省都市局（2011）²⁰⁾）を適用して推算した発生ガレキ量を用いることが考えられる。

なお、本研究は、津波火災で最も支配的な要素の一つであるガレキの分布に着目して、簡易的に被害を予測するための分析手順を示すことに主眼を置いたものであり、分析対象は東日本大震災の限られた事例に基づいている。したがって、本チャートは普遍的なものではなく、今後のデータの蓄積により変化し得るものである。また、都市ガス地域か否か、近隣で大規模な重油等の流出が発生した場合など、各種条件の違いに対応した危険度チャートを作成することで、様々な施策によるリスク低減効果が評価可能となるものと期待される。

謝辞

本研究を進めるにあたり、日本火災学会内田博士記念研究助成を受けた。また、火災データの分析にあたっては、神戸大学大学院の西野智研助教（現独立行政法人建築研究所）ならびに清水建設技

術研究所の長谷部雅伸主任研究員より貴重なご意見を頂いた。ここに記して深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 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, 火災, Vol.63, No.1, pp.1-8, 2013.
- 2) 森田 武・近藤史朗・野竹宏彰：東日本大震災における鉄筋コンクリート建造物の火害－門脇小学校の事例－, 火災, Vol.62, No.3, pp.1-4, 2012.
- 3) 津波避難ビル等に関わるガイドライン検討会：津波避難ビルに関わるガイドライン, 内閣府, 2005.
- 4) 国住指第2570号：津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について (技術的助言), 2012.
- 5) 座間信作・関澤 愛, 1993年北海道南西沖地震とその被害について, 消研輯報, 第47号, pp.3-11, 1994.
- 6) 津波の事典 (首藤伸夫・今村文彦・越村俊一・佐竹健治・松富英夫編集), 朝倉書店, 200p, 2007.
- 7) 小林恭一：津波火災の実態から見た津波危険地域における建築物の再建のあり方～木造は制限すべきか～, 2012年度日本建築学会大会 (東海) 防火部門研究協議会資料, 2012年9月, 日本建築学会防火委員会
- 8) 東日本大震災等調査報告書 (速報版)：日本火災学会東日本大震災調査委員会編集, 2011年11月.
- 9) 廣井 悠：平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震後の出火状況アンケート調査 (その3 浸水地域における津波火災の概要), 火災, Vol.63, No.2, pp.1-6, 2013.
- 10) 投稿画像より加工：<http://www.youtube.com/watch?v=irNAFv7a3Ew>, 2014年1月7日.
- 11) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ.
- 12) 小野寺亮介撮影：津波にのまれた気仙沼中央公民館より4, <http://www.youtube.com/watch?v=Z8Wb9m487X4>, 2014年1月7日.
- 13) (株)ゼンリン：ZmapTown II, 建物ポイントデータ2012.
- 14) 建設資材・労働力需要実態調査【建築部門】 (平成21年度原単位)：国土交通省, 2009.
- 15) 建設廃棄物処理ガイドライン：厚生省.
- 16) 油野健志・山仲秀利・大宮喜文・高橋 清・田中哮義・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, 第483号, pp.1-8, 1996.
- 17) 建築物の火災荷重および設計火災性状指針 (案)：日本建築学会, pp.52-57, 2013
- 18) 今津雄吾・野竹宏彰・長谷部雅伸・北後明彦：津波浸水域で発生した火災の地域特性の考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp.441-442, 2013.
- 19) 越村俊一・郷右近英臣：2011年東北地方太平洋沖地震津波災害における建物脆弱性と津波被害関数, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, 2012, pp. I-336-I-340.
- 20) 東日本大震災の津波被災現況調査結果 (第2次報告), 国土交通省都市局, 平成23年10月4日

(投稿受理：平成26年1月10日
訂正稿受理：平成26年5月13日)