

平成 23 年東北地方太平洋沖地震における 津波浸水区域外の出火傾向の分析

ANALYSIS OF IGNITIONS OUTSIDE OF THE TSUNAMI-INUNDMATED AREAS FOLLOWING THE 2011 TOHOKU EARTHQUAKE

樋本 圭佑*¹ 山田 真澄*² 西野 智研*³
Keisuke HIMOTO, Masumi YAMADA, and Tomoaki NISHINO

Number of ignition that occurred outside of the tsunami-inundated areas following the 2011 Tohoku earthquake was analyzed using statistical models. For the analysis, the number of ignition, seismic data, and areal characteristics were surveyed for 698 municipalities in 17 prefectures of eastern Japan. The data set includes 191 earthquake-generated ignitions occurred within one month after the main shock. Regression analysis using Kawasumi model showed that there was no clear difference in the ignition probability between 1995 Kobe earthquake and 2011 Tohoku earthquake. Further analysis using GLM (Generalized Linear Model) showed that the JMA (Japan Meteorological Agency) seismic intensity, acceleration response with the period of 1.0s, and SI (Spectral Intensity) are the most appropriate explanatory parameters for evaluating the number of ignitions in each municipality. The proposed model could be used to predict the number of ignitions for future earthquakes.

Keywords: Post-earthquake Fire, Ignition, 2011 Tohoku Earthquake, Statistical Model, Seismic Ground Motion

地震火災, 出火, 平成 23 年東北地方太平洋沖地震, 統計モデル, 地震動

1. はじめに

地震火災に対する防災計画の検討には、どういった地域でどの程度の出火が起こりうるのかを評価する必要がある。消防庁のとりまとめによると、2011 年東北地方太平洋沖地震に起因する出火は 330 件¹⁾あったとされる。これだけの規模で出火があった地震は、293 件²⁾を記録した 1995 年兵庫県南部地震以来である。多数の出火実態の比較分析が可能な東北地方太平洋沖地震の記録は、地震時における出火の特徴を明らかにすると同時に、評価手法を整備する上で貴重な基礎資料である。

そこで本研究では、東北地方太平洋沖地震における地震関連火災の出火記録を用いることで、

- (1) 東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震における地震関連火災の出火傾向の比較分析
- (2) 地震被害想定などでの利用が可能な、地震関連火災の出火件数評価手法の構築

を行うことを目的とする。なお、東北地方太平洋沖地震では、多数の津波関連火災が発生したことが報告されている。総合的な防災計画の検討には津波関連火災を含めた出火傾向の把握が欠かせない。しかし、津波関連火災とそれ以外の地震関連火災とは出火のメカニズムが大きく異なることから、本研究では津波浸水区域外で発生した地震関連火災に焦点を絞って検討を進める。

2. 分析方法

2.1 既往研究で採用された分析方法

地震に伴う出火の確率もしくは件数の定量的な評価については、これまでも数多くの研究が行われてきた。河角は、1923 年関東地震における出火記録の分析をもとに、出火確率 p と地震動指標 θ の両対数モデルを提案している³⁾。水野らは、地震の発生時間帯と季節に伴う火気使用率の変化を考慮した補正を加えることで河角式を拡張し、適合度の向上を図っている⁴⁾。小林は、地震動指標 θ のみの対数をとる片対数モデルを用いて、同じく関東地震の出火記録を分析している⁵⁾。また、Scawthorn らは、出火確率 p を地震動指標 θ の二次関数で表し、1906 年から 1989 年にかけて米国で発生した地震関連火災を分析している⁶⁾。この他、出火件数が非負の整数で、個々の出火は独立に発生しているとみなせることを踏まえ、ポアソン分布など離散値型の確率分布を用いて出火件数をモデル化する例も見られる^{7), 8), 9)}。

以上の検討例では、過去の出火記録を帰納的に分析することで、地震動指標 θ と、出火確率 p の関係を整理していた。これに対し、東京消防庁は、出火メカニズムをイベントツリーによって整理することで、演繹的に出火要因別、地表面加速度（もしくは地表面速度、震度）別の出火確率 p を推定する手法を提案している^{10), 11)}。Zolfaghari らも同様の考え方にに基づき、揺れに伴う火気器具の転倒

*1 京都大学防災研究所 助教 博士(工学)

*2 京都大学防災研究所 助教 ph.D

*3 神戸大学大学院工学研究科 助教 博士(工学)

Assistant Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr.Eng.

Assistant Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, ph.D

Assistant Prof., Graduate School of Engineering, Kobe University, Dr.Eng.

や、建物被害に伴う電気配線の断線といった出火要因を確率的に評価することで、建物内での出火確率 p のモデル化を試みている¹²⁾。

2.2 本研究で採用する分析方法

既往研究における出火確率もしくは出火件数の評価は、各種指標との関係を統計モデルで整理する帰納的手法と、出火メカニズムをイベントツリーで整理する演繹的手法の2種類に大別される。このうち後者の演繹的手法は、出火関連要因を積み上げ式に評価していくことから、各種出火対策の効果を検証しやすい利点がある。しかし、低頻度でしか発生しない地震出火では、個々の出火関連要因のモデル化が必要とされるデータの入手が容易ではない。

そこで本研究では、統計モデルにより東北地方太平洋沖地震の出火傾向の分析を行う。具体的には、(1) 河角式、(2) 一般化線形モデルの2つの統計モデルを、目的を分けて利用する。

(1) 河角式

東北地方太平洋沖地震における出火の全体的な傾向を把握し、兵庫県南部地震との比較分析を行うにあたり、次の河角式を使用する。

$$\ln p = \ln A + B \ln \theta \quad (1)$$

ここで、 A および B は係数である。また、出火確率 p は、地震後一定期間内に発生した出火件数を世帯数で除したものと定義する。

河角式の利点として、地震動指標 θ を唯一の変数とする比較的簡便な形式を採用しており、過去の地震に遡ってデータを入手しやすいことが挙げられる。また、河角式はもともと経験的に導かれたものだが、青木により、極値分布を仮定した地震外力 S と出火耐力 R の大小関係で出火を評価するモデルであることが示されるなど、理論的な裏付けがなされていることも挙げられる¹³⁾。ただし、出火確率 p と地震動指標 θ の双方の対数をとる式の形式上、 p もしくは θ のいずれかがゼロとなる記録を除外する必要があるといった問題も指摘されてきた。こうした問題を解消するため、建築研究所を中心に実施された研究では、地震動指標 θ をいくつかのカテゴリーに分類し、各カテゴリーの代表値 $\bar{\theta}$ と平均出火確率 \bar{p} を用いる方法が示されている¹⁴⁾。本研究でも、こうした方法を踏襲して平均出火確率 \bar{p} を評価し、出火傾向の比較分析を行う。

(2) 一般化線形モデル

出火件数評価に、河角式をそのまま採用することも考えられる。しかし、同式はあくまで地震動指標が同程度となる複数の市区町村の平均出火確率 \bar{p} を評価するものであり、防災計画の検討が必要とされる市区町村単位の出火件数の評価には、平均出火確率 \bar{p} から算出される総出火件数を、下位の区域に振り分ける手続きが別途必要となる。そこで本研究では、地震動や地域の各種指標を説明変数、応答変数の誤差がポアソン分布に従うとした一般化線形モデルを利用することで、地震後一定期間内に発生した出火件数を評価する。すなわち、ある市区町村 i において出火件数が N となる確率 p は、

$$p(N_i | \mu_i) = \frac{\mu_i^{N_i} \exp(-\mu_i)}{N_i!} \quad (2)$$

ここで、 e は自然対数の底、 μ は平均出火件数 (=分散) である。ただし、平均出火件数 μ の評価には、次の対数リンク関数を採用する。

$$\ln \mu_i = \mathbf{x}^T \boldsymbol{\beta} \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{x} は地震動や地域の各種指標からなる説明変数のベクトル、

$\boldsymbol{\beta}$ は係数のベクトルである。ただし、 T は転置を表す。なお、応答変数の誤差がポアソン分布に従うと仮定した場合、その平均 μ は非負でなければならないが、対数リンク関数を採用することで、説明変数や係数の値に関係なくこの条件は守られる。

これまでに、一般化線形モデル (もしくは一般化線形混合モデル) を出火件数評価へ適用した例は少なく、Davidson の報告⁸⁾がある程度である。しかし、同モデルには河角式とは異なるいくつかの特徴があり、防災計画の検討が必要とされる市区町村単位の出火件数評価にはなじみやすい。まず、同モデルでは、市区町村ごとの出火件数の記録と地震動や地域の各種指標との関係を調べるため、河角式のようにカテゴリー単位で予測された出火件数をさらに振り分けるといった手続きをそもそも必要としない。また、応答変数の誤差が正規分布に従わないデータに対しても線形モデルを適用できるため、より実際のデータ構造に即した分析を行える。

3. 使用するデータ

本研究で使用するデータは、「出火データ」、「地震動データ」、「地域特性データ」の3種類であり、それぞれ市区町村単位 (政令指定市は区単位) で集計した。東北地方太平洋沖地震に関する一覧を表1に、兵庫県南部地震に関する一覧を表2にそれぞれ示す。

各データの内容は以下に示す通りである。

3.1 出火データ

(1) 2011年東北地方太平洋沖地震

出火データは、日本火災学会によるアンケート調査に基づいている^{15), 16)}。同調査は、東日本の17都県 (青森、岩手、宮城、秋田、山形、福島、茨城、栃木、群馬、埼玉、千葉、東京、神奈川、新潟、山梨、長野、静岡) の、東北地方太平洋沖地震後1ヶ月間に発生した火災の内容を確認することを目的として実施された。調査項目には、出火場所、出火日時、出火原因、火災種別、被害の概要、消火活動の状況などが含まれている。調査対象は、これらの都県を管轄する297の消防本部であり、郵送によるアンケート票の送付、回収が行われた。回収されたアンケート票は258であり、回収率は86.9%となっている。この結果、出火状況 (出火なしを含む) を把握できた市区町村は698となっている。なお、同調査では、地震との関連にかかわらず全ての火災の内容を確認している。そこで本研究では、分類コードに基づいて、地震関連火災 (「2. 地震に関連した火災」、 「3. 地震に伴う停電等で間接的に発生した火災」として抽出された191件の出火記録¹⁵⁾を分析に使用した。ただし、本研究では、火災種別による分類は行わず、出火の総数を評価する。

(2) 1995年兵庫県南部地震

出火データには、平成8年版消防白書に記載された消防庁集計を採用した。対象となる地震関連火災は285件であった。これにより出火状況 (出火なしを含む) を把握でき、かつ、後述する住家全壊率およびPGV推定値が得られた地域は、40都府県の134市区町村となった。兵庫県南部地震についても、火災種別による分類は行わず、出火の総数を評価する。

3.2 地震動データ

地震動データについては、「住家全壊率」、「震度」、「PGA (Peak Ground Acceleration)」、「PGV (Peak Ground Velocity)」、「PGD (Peak Ground Displacement)」、「加速度応答」、「SI (Spectral Intensity) 値」

の7つの指標を採用した。ただし、兵庫県南部地震については、入手できた「住家全壊率」、「PGV」のみを分析に使用した。なお、余震に伴う出火の発生も考えられるが、地震動としての余震の大きさや頻度は、本震の地震動データで代表できるものとする。

(1) 住家全壊率

「住家全壊率」は、住家全壊数を、該当する市区町村内の住家総数で除すことにより求めた。このうち東北地方太平洋沖地震の住家全壊率は、消防庁被害報告¹⁾に記載された値を使用した。ただし、この中には津波によって流失した住家数も含まれているため、住家全壊率に関する検討に限って、津波被災市区町村を集計から除外した。このため、分析対象となる地震関連火災の出火件数は159となった。兵庫県南部地震の住家全壊率は、平成8年版防災白書に記載された値を使用した。ただし、神戸市内の住家全壊率については、区単位の集計値が示されている建築研究所の報告¹⁷⁾を使用した。一方、住家総数は、いずれの地震についても、地震発生以前の最も近い年に実施された住宅・土地統計調査の結果を使用した。

(2) 震度

「震度」は、気象庁観測点の震度計による観測記録に基づいている。ただし、各市区町村の代表値には、各庁舎から30km以内にある観測点のうち、最も近い観測点の観測記録を与えた。なお、兵庫県南部地震においても、一部地域で震度が記録されているが、いずれも体感に基づく震度や、建物倒壊状況から推定された震度であり、東北地方太平洋沖地震の記録との間で一貫性が保たれていない可能性があることから、分析から除外した。

(3) 強震観測網による観測記録

「PGA」、「PGV」、「PGD」、「加速度応答」、「SI値」の算出には、防災科学技術研究所および気象庁の強震観測網による観測記録を使用した。ただし、各市区町村の代表値には、各庁舎から50km以内にある観測点のうち、最も近い5つの観測点の記録を、距離の重み付き平均することで求めた。

「PGA」は、地震計の加速度3成分（上下、東西、南北）の最大値を算出し、それらの二乗和の平方根を代表値とした。

「PGV」は、速度3成分の最大値を算出し、それらの二乗和の平方根を代表値とした。ただし、速度波形は、地震計の加速度記録からバターワースフィルター（コーナー周波数0.05Hz、次数4）によって長周期成分を落とすものを積分して求めた。兵庫県南部地震については、観測点数が限られていることから、断層からの距離を利用した距離減衰式¹⁸⁾と、表層地盤増幅度¹⁹⁾をかけた推定値を利用することとした²⁰⁾。

「PGD」は、変位3成分の最大値を算出し、それらの二乗和の平方根を代表値とした。ただし、変位波形は、地震計の加速度記録からバターワースフィルター（コーナー周波数0.05Hz、次数4）によって長周期成分を落とすものを2回積分して求めた。

「加速度応答」は、5%減衰を持つ1質点・1自由度系が地震波にさらされた時の応答値を示している。ここでは、水平2成分の応答値を算出し、それらの二乗和の平方根を代表値とした。なお、出火確率が周期Tによって異なる可能性を考慮し、Tが0.5秒、1秒、1.5秒、2秒の4条件における値を求めた。

「SI値」は、一般に構造物被害との相関が高い指標と言われ、地震時におけるガス遮断の判断基準などとしても用いられている²¹⁾。ここでは、水平2成分のSI値を算出し、それらの二乗和の平方根を代表値とした。

3.3 地域特性データ

地域データについては、「人口」、「世帯数」、「事業所数」、「従業者数」、「行政区域面積」、「人口集中地区面積」、「用途地域面積」、「農業地域面積」、「農林地帯面積」の9つの指標を採用した。兵庫県南部地震については、一部、地震発生年に近い調査年のデータが取得できなかったことから、「世帯数」のみを必要とする河角式による解析を行った。

(1) 国勢調査

「人口」と「世帯数」の把握には、国勢調査の結果を使用した。東北地方太平洋沖地震については、2010年調査の結果を使用し、該当する市区町村の人口は約5,410万人、世帯数は約2,240万世帯と

表1 使用する市区町村単位のデータ（東北地方太平洋沖地震）

種別	変数	平均	標準偏差	中央値	最小	最大
出火	出火件数	0.274	0.879	0	0	11
	住家全壊率	0.000547	0.00338	0.0	0.0	0.0458
地震動	震度	4.5	0.9	4.5	1.1	6.6
	PGA (cm/s ²)	294.7	363.2	183.5	0.0	3438.0
	PGV (cm/s)	27.0	18.5	23.6	0.0	133.6
	PGD (cm)	23.6	9.2	22.8	0.0	50.7
	加速度応答(0.5s) (cm/s ²)	504.5	509.5	334.0	0.0	2964.0
	加速度応答(1.0s) (cm/s ²)	269.0	222.3	212.7	0.0	1420.0
	加速度応答(1.5s) (cm/s ²)	166.7	131.0	134.4	0.0	959.0
	加速度応答(2.0s) (cm/s ²)	127.0	89.6	111.8	0.0	666.2
SI値 (cm/s)	25.5	21.5	19.5	0.0	124.0	
地域特性	人口	78,340	111,229.4	34,610	210	878,100
	世帯数	32,150	51,046.6	12,170	122	449,500
	事業所数(全産業)	3,602.4	5479.9	1655	30	42,664
	事業所数(第一次産業)	18.4	20.6	11	0	162
	事業所数(第二次産業)	682.7	937.7	362	5	8,293
	事業所数(第三次産業)	2,901.3	4,674.2	1,257	23	39,839
	従業者数(全産業)	39,619.1	83,677.2	15,033	130	1,028,331
	従業者数(第一次産業)	219.2	282.7	120	0	2,291
	従業者数(第二次産業)	8,585.1	13,073.0	4095	15	156,816
	従業者数(第三次産業)	30,814.8	71,980.0	10114	75	881,833
	行政区域面積 (km ²)	181.5	230.7	96.6	4.1	1450.0
	人口集中地区面積(km ²)	7.2	11.7	1.8	0.0	69.3
	用途地域面積(合計)(km ²)	10.5	14.2	5.9	0.0	100.8
	用途地域面積(住居系)(km ²)	7.3	4.0	10.2	0.0	82.4
	用途地域面積(商業系)(km ²)	0.8	0.3	1.3	0.0	7.7
	用途地域面積(工業系)(km ²)	1.4	2.5	0.5	0.0	25.7
農業地域面積 (km ²)	88.7	115.8	50.7	0.0	832.8	
森林地域面積 (km ²)	120.1	189.1	43.7	0.0	1267.2	

表2 使用する市区町村単位のデータ（兵庫県南部地震）

種別	変数	平均	標準偏差	中央値	最小	最大
出火	出火件数	2.127	6.42	0	0	41
	住家全壊率	0.0230	0.0598	0	0	0.354
地震動	PGV (cm/s)	25.5	37.3	5.0	0.1	203.3
	人口	175,742	162,632.2	121,776	2,276	802,993
地域特性	世帯数	64,366	59,477.8	45,544	777	283,762
	行政区域面積 (km ²)	146.1	150.7	124.5	4.6	1231.4

なった。ただし、津波が襲来した市区町村については、津波関連火災を分析の対象外としていることから、津波浸水区域外の人口および世帯数を対象としている²²⁾。兵庫県南部地震については、1995年調査の結果を使用し、該当する市区町村の総人口は約2,350万人、総世帯数は約860万世帯となった。

(2) 経済センサス

「事業所数」と「従業者数」の把握には、2009年に実施された経済センサスの結果を使用した。該当する市区町村内の事業所数は250万事業所、従業者数は約2,750万人となった。同調査では、事業所の事業内容を19産業に分類しているが、これらを整理して、全産業、第一次産業、第二次産業、第三次産業の4指標を作成した。ただし、第一次産業は、(a) 農林業、(b) 漁業、(c) 鉱業、採石・砂利採取業からなる。第二次産業は、(d) 建設業、(e) 製造業からなる。第三次産業は、(f) 電気・ガス・熱供給・水道業、(g) 情報通信業、(h) 運輸・郵便業、(i) 卸売・小売業、(j) 金融・保険業、(k) 不動産・物品賃貸業、(l) 学術研究、専門・技術サービス業、(m) 宿泊・飲食サービス業、(n) 生活関連サービス・娯楽業、(o) 教育・学習支援業、(p) 医療・福祉、(q) 複合サービス業、(r) サービス業（他に分類されないもの）、(s) 公務からなる。

(3) 国土数値情報

「行政区域面積」、「人口集中地区面積」、「用途地域面積」、「農用地域面積」、「森林地域面積」は、国土数値情報として提供される地図データをもとに算出した²³⁾。地図データの作成年は、人口集中地区面積が2007年、その他が2011年である。なお、用途地域は、第一種と第二種を区別すると計12種別からなるが、これらを整理して、全指定地域、住居系地域、商業系地域、工業系地域の4指標を作成した。ただし、住居系地域は、(a) 低層住居専用地域（第一種、第二種）、(b) 中高層住居専用地域（第一種、第二種）、(c) 住居地域（第一種、第二種）、(d) 準住居地域からなる。商業系地域は、(e) 近隣商業地域、(f) 商業地域からなる。工業系地域は、(g) 準工業地域、(h) 工業地域、(i) 工業専用地域からなる。

4. 河角式による出火件数の推定

4.1 係数の推定

まず、河角式を利用して出火件数の推定を行った結果を示す。式(1)

の係数 A および B は、回帰分析により求めた。ただし、回帰分析にあたっては、各指標 θ をいくつかのカテゴリーに分類し、カテゴリーごとに出火件数および世帯数を集計した上で、該当するカテゴリーの平均出火確率 \bar{p} を割り出した。また、対応する地震動指標 θ の代表値 $\bar{\theta}$ には、各カテゴリーの中央値を採用した。

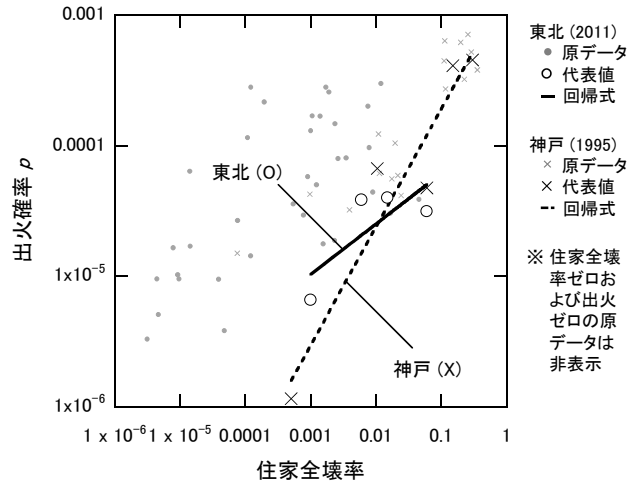


図1 住家全壊率と出火確率

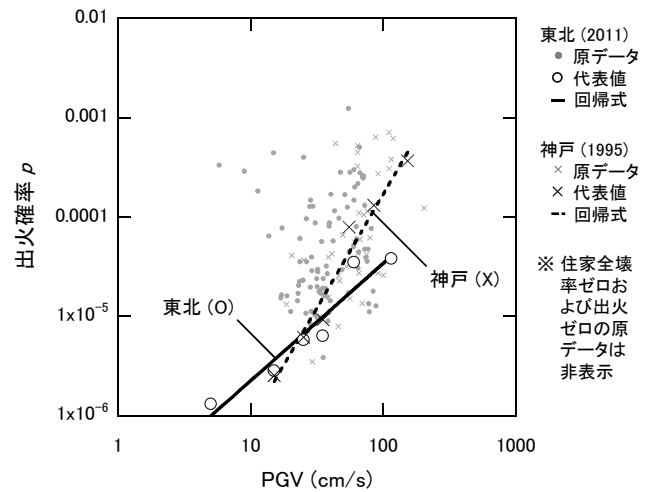


図2 PGVと出火確率

表3 河角式による回帰分析の結果(東北地方太平洋沖地震)

地震動指標	分析対象			ln A			B			自由度修正済 決定係数 R ²
	市区町村	世帯	出火	推定値	標準誤差	t 値	推定値	標準誤差	t 値	
住家全壊率	650	2,110 万	159	-8.81	1.13	-7.82*	0.387	0.226	1.71	0.392
震度	698	2,220 万	191	-19.0	1.25	-15.2*	4.54	0.779	5.83*	0.868
PGA				-16.5	0.475	-34.9*	0.820	0.087	9.41*	0.956
PGV				-15.7	0.613	-25.6*	1.18	0.177	6.68*	0.897
PGD				-17.2	1.71	-10.1*	1.70	0.529	3.22*	0.652
加速度応答(0.5s)				-16.9	0.583	-29.1*	0.820	0.104	7.92*	0.912
加速度応答(1.0s)				-18.7	0.387	-48.3*	1.17	0.0685	17.1*	0.983
加速度応答(1.5s)				-16.8	0.687	-24.5*	0.942	0.136	6.93*	0.904
加速度応答(2.0s)				-16.7	0.773	-21.6*	1.01	0.156	6.49*	0.892
SI 値				-14.2	0.685	-20.8*	0.765	0.212	3.62*	0.751

* 5%有意であることを示す。

表4 回帰分析の結果(兵庫県南部地震)

地震動指標	分析対象			ln A			B			自由度修正済 決定係数 R ²
	市区町村	世帯	出火	推定値	標準誤差	t 値	推定値	標準誤差	t 値	
住家全壊率	134	860 万	285	-6.48	0.702	-9.23*	0.903	0.164	5.50*	0.880
PGV				-19.2	0.879	-21.9*	2.29	0.225	10.2*	0.954

* 5%有意であることを示す。

表3には、東北地方太平洋沖地震についての回帰分析の結果を示してある。「住家全壊率」の係数 B を除けば、いずれも t 値は 5% 有意となった。自由度修正済決定係数 R^2 についても総じて高い値が得られており、中でも「加速度応答 (1.0s)」は 0.983、「PGA」は 0.956 となった。これに対し、「住家全壊率」は 0.356、「PGD」は 0.639 と低くなった。表4には、兵庫県南部地震についての回帰分析の結果を示してある。ここでは、「住家全壊率」、ならびに「PGV」のみについて回帰分析を行ったが、 t 値は、いずれにおいても 5% 有意となり、自由度修正済決定係数 R^2 も高い値が得られた。

4.2 平均出火確率の比較

図1は「住家倒壊率」に着目して、図2は「PGV」に着目して、それぞれ兵庫県南部地震と東北地方太平洋沖地震の平均出火確率 \bar{p} の比較を行ったものである。なお、図中には代表値だけではなく、原データも示されているが、対数軸を取っている都合上、地震動指標がゼロ、および出火件数がゼロとなる市区町村の原データは示されていないため、代表値に比べると原データが偏って分布している。図1の「住家全壊率」については、 t 値が 5% 有意でない係数も含まれるので参考程度にすべきだが、 $\bar{\theta}$ が小さい場合には東北地方太平洋沖地震の \bar{p} が大きく、逆に $\bar{\theta}$ が大きい場合には兵庫県南部地震の \bar{p} が大きくなっている。図2の「PGV」の場合についても、住家全壊率の場合と同様の傾向が見られる。住家全壊率、PGV のいずれにおいても、 \bar{p} の回帰式が交差していることは、両地震における地震関連火災の \bar{p} が大きくは異なることを示している。

4.3 平均出火確率の補正

一般に、地震関連火災の出火確率 p は、地震発生の時間帯や季節によって大きく変動することが知られている。そこで、平均出火確率 \bar{p} の回帰式を、時間帯と季節について補正した上で、両地震における地震関連火災の出火傾向の比較を行う。

本研究では、図3に示す時間補正係数 α と、図4に示す季節補正係数 β を使用する⁴⁾。これによると、該当する時間補正係数 α は、東北地方太平洋沖地震が 0.98、兵庫県南部地震が 0.85 となった。また、該当する季節補正係数 β は、両地震とも 2.65 となった。これを、両係数と式 (1) 右辺第 1 項との間の関係を表す、

$$\ln A \propto \alpha\beta \quad (4)$$

に代入し、1月1日午後12時に地震が発生したと仮定して補正した回帰式を図5、6に示す。補正により、両地震とも平均出火確率 \bar{p} は補正前に比べて高く評価される結果が得られた。しかし、補正率は、東北地方太平洋沖地震が 1.79、兵庫県南部地震が 1.55 と、両者に大差がなかったことから、補正前と比べて回帰式に顕著な隔たりは生じなかった。図5には、丹後 (1927)、南海 (1946)、十勝沖 (1952)、えびの (1968)、十勝沖 (1968) の各地震における \bar{p} の回帰式を併記してある¹⁴⁾。これらを比較すると、1927~1968年の \bar{p} が、東北地方太平洋沖地震および兵庫県南部地震の \bar{p} に比べて際立って高いことが分かる。これに対し、東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の \bar{p} には、一見する限り顕著な差が見られない。 \bar{p} には、地域性などの検討できていない要因が残されているものの、1995年から2011年にかけて \bar{p} に大きな変化は生じていないものと推測される。なお、東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の2地震と、丹後地震から十勝沖地震にかけての5地震とでは、後者の方が住家全壊率

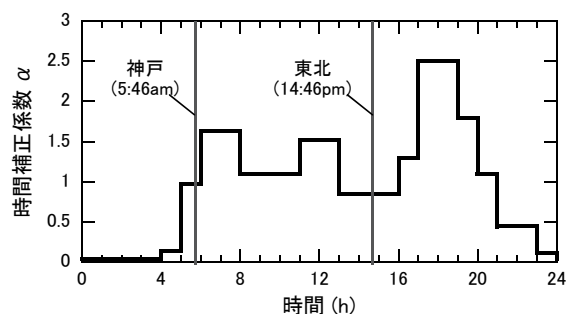


図3 時間補正係数 α

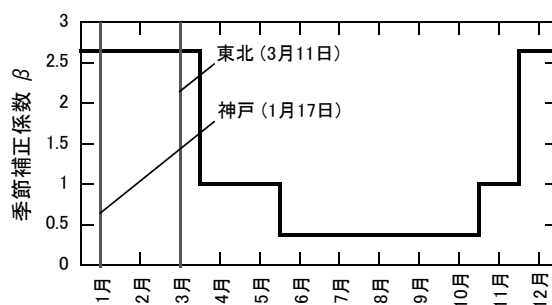


図4 季節補正係数 β

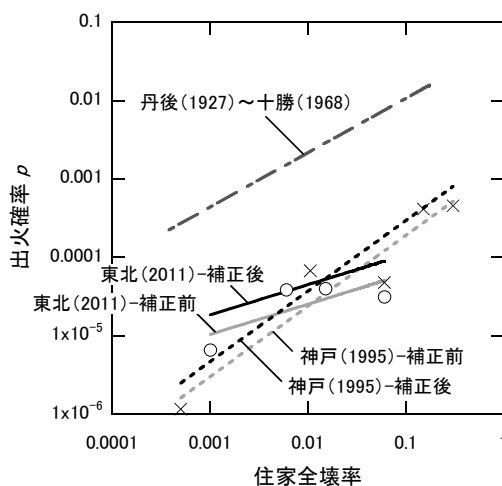


図5 住家全壊率と補正後の出火確率

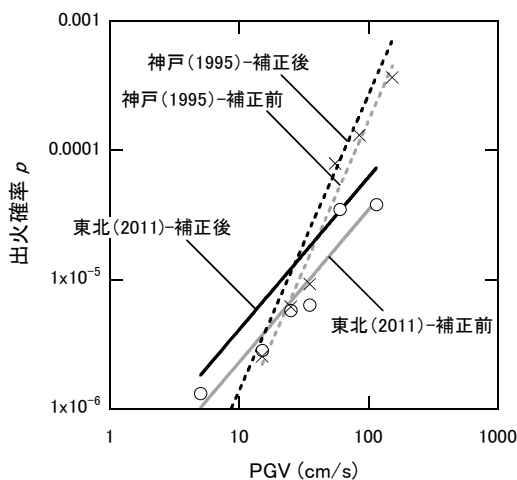


図6 PGVと補正後の出火確率

表 5 地震動指標ごとのモデル選択結果

地域特性	地震動	住家全壊率	震度	PGA	PGV	PGD	加速度応答 (0.5s)	加速度応答 (1.0s)	加速度応答 (1.5s)	加速度応答 (2.0s)	SI 値
人口	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
世帯数	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-
事業所数(全産業)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
事業所数(第一次産業)	○	-	-	-	-	○	-	-	○	○	-
事業所数(第二次産業)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
事業所数(第三次産業)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
従業者数(全産業)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
従業者数(第一次産業)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
従業者数(第二次産業)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
従業者数(第三次産業)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
行政区域面積(km ²)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
人口集中地区面積(km ²)	-	-	○	-	-	○	-	-	-	-	-
用途地域面積(合計)(km ²)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○
用途地域面積(住居系)(km ²)	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
用途地域面積(商業系)(km ²)	○	-	○	○	○	○	-	○	○	○	○
用途地域面積(工業系)(km ²)	-	-	-	-	○	○	-	○	○	○	○
農業地域面積(km ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
森林地域面積(km ²)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
残差逸脱度	※	451.4	485.9	458.6	466.4	456.7	454.0	454.4	464.1	451.6	451.6
AIC	※	714.9	753.3	724.0	737.9	724.2	717.5	723.9	731.6	719.1	719.1
ΔAIC	※	0.0	+38.4	+9.1	+23.0	+9.3	+2.6	+9.0	+16.7	+4.2	+4.2

※ 住家全壊率については、他の指標と標本数が異なるため、AIC の比較を行えない。

は高かったものと考えられる。このため、図 5 において、住家全壊率を地震動指標として同列に扱うことは厳密には難しい。しかし、後者の住家全壊率が地震動に比べて高かったことを踏まえて補正を掛けるとすれば、分布は全体的に左方向に移動することになるため、両者の乖離が図 5 に示した状態より小さくなることはない。

5. 一般化線形モデルによる出火件数の推定

5.1 係数の推定とモデル選択

一般化線形モデルによる分析にあたり、出火要因間のピアソンの積率相関係数を算出した。これによると、多くの地震動指標の間に有意で高い相関関係 ($r > 0.8$, $P < 0.05$) が見られた。そこで、モデル選択にあたっては、地震動指標のうちいずれか一つを説明変数として使用した。モデルの選択基準には AIC (Akaike's Information Criteria) を用い、地震動指標ごとにステップワイズ法により説明力の高いモデルを選択した。

モデル選択の結果を表 5 に示す。これによると、最も説明力の高いモデルは、「震度」を採用したモデルで、AIC は 714.9 となった。これに、「加速度応答 (1.0s)」を採用したモデル ($\Delta AIC = +2.6$)、「SI 値」を採用したモデル ($\Delta AIC = +4.2$) が続いている。「住家全壊率」については、標本数が少ないため、他の指標との間で AIC の比較を行えない。しかし、「震度」の標本を間引き、「住家全壊率」のそれに揃えた後にモデル選択を行った結果、「加速度応答 (1.0s)」を採用したモデルの AIC が 544.4 であったのに対し、「住家全壊率」を採用したモデルの AIC は 623.3 となり、説明力の高いモデルとはならなかった。なお、「加速度応答」の中では、周期 $T=1.0s$ の AIC が最も小さくなったが、河角式を適用した場合にも、 $T=1.0s$ の自由度修正済決定係数 R^2 の値が大きくなっている (表 3)。この結果は、「加速度応答」の中では、 $T=1.0s$ が出火要因と最も強く関連することを示唆している。この結果は、 $T=1.0\sim 2.0s$ の地震動が建物被害との相関が高いという報告²⁴⁾とも整合している。

表 6 に、説明力の高かった 3 モデルで採用された説明変数の、係

表 6 震度を説明変数として採用したモデル

説明変数	係数 β	標準誤差	z 値
切片	-7.908	6.433×10^{-1}	-12.291*
震度	1.134	1.205×10^{-1}	9.414*
人口	1.834×10^{-6}	6.481×10^{-7}	2.830*
従業員数(全産業)	3.818×10^{-6}	3.495×10^{-7}	10.924*
行政区域面積(km ²)	2.562×10^{-3}	1.084×10^{-3}	2.364*
用途地域(合計)(km ²)	1.204×10^{-2}	5.245×10^{-3}	2.296*
森林地域面積(km ²)	-2.085×10^{-3}	1.367×10^{-3}	-1.525

* 5%有意であることを示す。

表 7 加速度応答(1.0s)を説明変数として採用したモデル

説明変数	係数 β	標準誤差	z 値
切片	-3.331	1.732×10^{-1}	-19.231*
加速度応答(1.0s)(cm/s ²)	2.640×10^{-3}	2.312×10^{-4}	11.419*
世帯数	3.532×10^{-6}	1.262×10^{-6}	2.798*
従業員数(全産業)	2.683×10^{-6}	3.604×10^{-7}	7.445*
行政区域面積(km ²)	5.333×10^{-3}	1.045×10^{-3}	5.103*
用途地域(合計)(km ²)	8.331×10^{-3}	5.154×10^{-3}	1.616
森林地域面積(km ²)	-5.404×10^{-3}	1.339×10^{-3}	-4.035*

* 5%有意であることを示す。

表 8 SI 値を説明変数として採用したモデル

説明変数	係数 β	標準誤差	z 値
切片	-3.318	1.736×10^{-1}	-19.113*
SI 値 (cm/s)	2.813×10^{-2}	2.656×10^{-3}	10.591*
人口	1.748×10^{-6}	6.545×10^{-7}	2.670*
従業員数(全産業)	2.569×10^{-6}	5.869×10^{-7}	4.377*
行政区域面積(km ²)	3.216×10^{-3}	1.032×10^{-3}	3.116*
用途地域(合計)(km ²)	1.030×10^{-2}	5.933×10^{-3}	1.735
用途地域(商業系)(km ²)	1.378×10^{-1}	7.340×10^{-2}	1.877
用途地域(工業系)(km ²)	-4.132×10^{-2}	2.982×10^{-2}	-1.386
森林地域面積(km ²)	-3.217×10^{-3}	1.339×10^{-3}	-2.402*

* 5%有意であることを示す。

数 β 、標準誤差、z 値を示す。これら 3 モデルで共通に採用された説明変数は、「従業員数 (全産業)」、「行政区域面積」、「森林地域面積」であった。いずれのモデルにおいても、応答変数である「出火件数」に対して、「従業員数 (全産業)」は正、「行政区域面積」は正、「森林地域面積」は負の効果を持っている。なお、選択された説明変数の中では、「震度」を採用したモデルの「森林地域面積」、「加速度応答 (1.0s)」を採用したモデルの「用途地域 (合計)」、「SI 値」を採用したモデルの「用途地域 (合計)」、「用途地域 (商業系)」

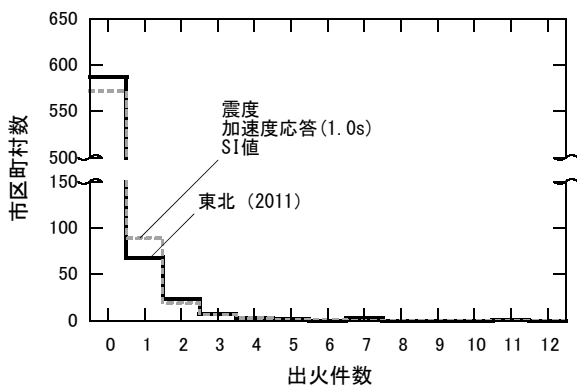


図7 出火件数の比較

「用途地域（工業系）」が、5%有意とならなかった。

5.2 出火件数の観測値と予測値の比較

次に、出火件数の観測値と予測値の比較を行うことで、得られたモデルの妥当性を検証する。表6～8に示すモデルでは、市区町村ごとの平均出火件数 $\hat{\mu}_i$ を予測することができるが、この予測値はポアソン分布に従う誤差を前提としている。そこで、個別の市区町村ごとの出火件数を直接比較するのではなく、対象となった698の市区町村から、平均出火件数が k となる市区町村の数 M_k を算出したものを比較する。ただし、 M_k は次のように算出される。

$$M_k = \sum_i \frac{\hat{\mu}_i^k \exp(-\hat{\mu}_i)}{k!} \quad (5)$$

比較結果を図7に示す。なお、図7には、「震度」、「加速度応答(1.0s)」、「SI値」を説明変数とする各モデルの予測値を併記してあるが、モデル間での顕著な差は見られない。出火件数が0の市区町村は、観測値が587であったが、モデルでは571.1～573.0と過小評価になった。反対に、出火件数が1の市区町村は、観測値が68であったが、モデルでは88.3～89.7に過大評価となった。これは、過分散となるデータに対して、平均と分散が一致するポアソン分布を誤差構造として採用したことが一因と考えられる。なお、過分散は、観測されていない標本差が原因の一つとなっているとも考えられる。今回は組み込まれていない説明変数の検討だけでなく、観測された標本差を固定効果、観測されていない標本差を変量効果とする一般化線形混合モデルの適用も有効と考えられる。こうした点については、今後、継続して検討を進める。

6. まとめ

本研究では、東北地方太平洋沖地震の発生から1ヶ月間の、東日本698市区町村の出火データを用いて、同地震による津波浸水区域外で発生した火災（地震関連火災）の出火傾向を分析した。まず、河角式を用いた分析では、同地震と兵庫県南部地震における地震関連火災の出火確率の比較を行い、両者に顕著な違いが見られないことを確認した。次に、ポアソン分布を誤差構造とする一般化線形モデルを適用することで、市区町村ごとの出火件数を予測するモデルを構築した。この結果、「震度」、「加速度応答(1.0s)」、「SI値」を採用したモデルのAICが最小となった。なお、「加速度応答(1.0s)」は、河角式でも自由度修正済決定係数 R^2 が最大となっている。こ

のことは、周期 $T=1.0s$ 前後の地震動が出火件数と強く関連することを示唆している。今後は、現在のモデルで評価できていない過分散の効果を組み込むなど、モデルの改良を進める。

参考文献

- 1) 消防庁:平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)について(第147報),2013.3
- 2) 消防庁:阪神・淡路大震災について(確定報),2006.5
- 3) 日本火災学会:火災便覧,第3版,共立出版,1997.5
- 4) 水野弘之・堀内三郎:地震時の出火率と住家全壊率の関係について,日本建築学会論文報告集,Vol.247,pp.101-110,1976.9
- 5) 小林正美:1923年関東地震における出火状況の分析 都市地震火災の出火状況の予測に関する研究(第一報),日本建築学会論文報告集,Vol.337,pp.99-105,1984.3
- 6) Scawthorn C, Eidinger JM, and Schiff AJ. Fire Following Earthquake, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, Monograph No.26, American Society of Civil Engineers.
- 7) Zhao SJ, Xiong LY, and Ren AZ, A Spatio-temporal Stochastic Simulation of Fire Outbreaks Following Earthquake Based on GIS, Journal of Fire Sciences, Vol.24, pp.313-339, 2006.7
- 8) Davidson RA. Modeling Postearthquake Fire Ignitions Using Generalized Linear (Mixed) Models, Journal of Infrastructure Systems, Vol.15, No.4, pp.351-360, 2009.12
- 9) Kelly EJ, and Tell RN. Modeling the Number of Ignitions Following an Earthquake: Developing Prediction Limits for Overdispersed Count Data, LA-UR-11-01857, Los Alamos National Laboratory, 2011.
- 10) 東京消防庁:直下の地震を踏まえた新たな出火要因及び延焼性状の解明と対策,火災予防審議会答申書,1997
- 11) 南部世紀夫・加藤孝明・小出治:兵庫県南部地震による東京消防庁地震出火件数予測手法の検証,日本建築学会計画系論文集,Vol.520,pp.239-246,1999.6
- 12) Zolfaghari MR, Peyghaleh E, and Nasirzadeh G. Fire Following Earthquake, Intra-structure Ignition Modeling, Journal of Fire Sciences, Vol.27, pp.45-79, 2009.1
- 13) 青木義次:地震時出火の確率構造 都市火災拡大の確率論的分析研究 その4,日本建築学会計画系論文集,Vol.412,pp.53-60,1990.6
- 14) 建築研究所:市街地における出火・延焼の予測手法に関する研究,建築研究報告,No.102,1983.2
- 15) 村田明子・北後明彦: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1 調査の概要と出火要因),火災,Vol.63, No.1, pp.1-6 2013.2
- 16) 樋本圭佑・山田真澄・西野智研: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5 世帯あたり出火件数といくつかの地震動指標の関係),火災,Vol.63, No.2, pp.13-18 2013.4
- 17) 建築研究所:平成7年兵庫県南部地震 被害調査最終報告書,1996.3
- 18) 司宏俊・翠川三郎:断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式,日本建築学会構造系論文集, No.523, pp.63-70, 1999.9
- 19) 松岡昌志・若松加寿江・藤本一雄・翠川三郎:日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均S波速度分布の推定,土木学会論文集, No.794, I-72, pp.239-251, 2005.7
- 20) 藤原広行・河合伸一・青井真・石井透・早川譲・奥村俊彦・功刀卓・神野達夫・森川信之・小林京子:確率論的地震動予測地図作成手法の検討と試作例,防災科学技術研究所研究資料, No.236, 2002.12
- 21) Housner, G.W., Spectrum intensities of strong-motion earthquakes, Symposium on Earthquakes and Blast Effects on Structures, 1952.
- 22) 総務省統計局:浸水範囲概況にかかる人口・世帯数(平成22年国勢調査人口速報集計による), <http://www.stat.go.jp/info/shinsai/index.htm> (2013年2月確認)
- 23) 国土交通省国土政策局, <http://nfltp.mlit.go.jp/ksj/> (2013年6月確認)
- 24) 境有紀:2011年東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と建物被害の対応性,日本建築学会構造系論文集, Vol.683, pp.35-40, 2013.1