階層ベイズモデルを用いた地震火災の出火件数予測手法とその応用

Post-Earthquake Fire Estimation Method using Hierarchical Bayesian Models and its Application

廣井 悠[1]

U HIROI[1]

[1]名古屋大学減災連携研究センター
Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University

In this paper, we discuss our estimation methods for the number of ignition fires after a great earthquake. In the Great East-Japan Earthquake, occurred on March 11 2011, 404 fires happened in Eastern Japan area. We proposed three types statistical models (Generalized Linear Model, Generalized Linear Mixed Model and Hierarchical Bayesian Models) and estimated their parameters using Maximum Likelihood Estimation or Markov Chain Monte Carlo Methods. And, we calculated several risk maps for post-earthquake fires. For example, according to Population Exposure to Earthquake Fires, people in Tokyo, Kawasaki and Osaka have extremely high ignition risk after a great earthquake. Finally, we proposed realtime estimation method for the number of post-earthquake fire using these statistical models.

Key Words : *Post-Earthquake Fires, Great East-Japan Earthquake, Bayesian Statistical Model*

１．はじめに

本稿は地震時に発生する火災の「出火」に焦点を絞り，出火件数の予測式をモデル化し，その成果を用いて地震火災リスクの空間分布を評価しようとするものである．わが国ではこれまでにも，過去に発生した地震火災のデータを用いて出火件数を推定・評価する研究が数多く行われている．古くは木造建物の倒壊率から出火率を算出する河角式，季節係数や時刻係数を取り入れた水野式，火災発生数をポアソン分布に従うものとしてポアソン回帰法を用いた小出式，地震動の加速度を説明変数として直接出火率を求める難波式など，様々な予測式が用いられてきた[1),2),3),4)]．このような帰納的出火予測に対して，東京都が公表している火災危険度（地域危険度）[5),6)]は，工学的基盤に最大速度 30kine（以前は 100gal）を入力して地表の計測震度を計算し，過去の地震から火気器具，電気関係，化学薬品など 6 つの出火要因ごとに出火率を算定し，その使用状況も加味したものであり，ミクロレベルの出火確率を積み上げて火災危険度を評価する試みである．いずれにせよこれらは，地震火災の中でも特に地震動によって発生する火災を対象として，その出火リスクを量的評価するものであった[(1)]．

他方で，東日本大震災でその被害が顕在化した津波火災に関するリスク評価については，一般に研究が乏しい．唯一，廣井(2014)が出火の確率分布をポアソン分布として対数リンク関数を用いた一般化線形モデル(GLM：Generalized Linear Model)を構築し，津波火災の出火件数予測を行っている事例がある[7)]．対数リンク関数を用いた一般化線形モデルは，これまでの火災発生数をポアソン分布に従うものとした従来の流れを汲むものであるが，これらはごく狭い領域を対象として評価することが前提であり，広い領域から得られたカウントデータのばらつきを考慮して評価することはそもそも困難である．事実，災害直後に得られるデータは市町村単位のものも多く，特に津波火災については各々浸水面積のばらつきが大きいことから，出火件数も平均と分散が大きく異なる過分散のデータとなることが多い．これは，ポアソン分布を用いて地震火災の出火件数を予測するこれまでの方法論が常に孕んでいた問題であった．廣井(2014)ではこの課題を解決するため，津波火災のデータを車両火災とそれ以外の火災に分けて一般化線形モデルを構築しているが，これも上記の問題を本質的に解決したものではない．

そこで本研究では東日本大震災時に発生したあらゆる種類の地震火災を対象として，地域特性を正規分布と仮定した一般化線形混合モデル(GLMM：Generalized Linear Mixed Model)と，それをベイズ統計モデルに拡張した階層ベイズモデル(Hierarchical Bayesian Models)による出火件数予測手法の定式化を試みる．これによって，地域特性の差異や空間的自己相関，欠損データを含んだデータ群の取り扱いなど，柔軟なモデルを作成することが可能になった．一般化線形混合モデル及び階層ベイズモデルを用いて地震火災の分析を行った研究はこれまでには見当たらないため，本研究の一義的な独自性はこの点にあるが，本稿の 4 章以降でも示すように，確率論的地震出火予測地図や地震出火曝露人口の計算など，東日本大震災の地震火災データと得られた出火件数予測モデルを用いて新たなリスク評価方法を示し，一方でベイズ統計モデルの柔軟性を活用したリアルタイム出火件数予測手法を提案した点も本研究の特徴となる．

２．分析に用いる地震火災データ

本稿では，筆者が幹事を務める日本火災学会地震火災専門委員会および筆者が代表者となった鹿島学術振興財団の研究助成によって得られた「東日本大震災時に発生した地震火災に関する網羅調査」のデータを用いる．この調査は北海道を含めた東日本 1 都 1 道 16 県の全消防本部に対して，2011 年 3 月 11 日から 2011 年 4 月 11 日

までに発生した 1 カ月間の火災概要を尋ねており，回収率は 100%（291 本部）の悉皆調査である[2]．2015 年 4 月末時点で全ての消防本部から得られた回答を集計した結果，調査対象となる火災(調査対象の消防本部で 2011 年 3 月 11 日から 1 か月間に発生した全火災)は 3,162 件であった．このもとで筆者らは表 1 のコード表を作成し，それぞれの要因分類詳細コードごとに地震火災を定義し，これをさらに 1.津波火災，2.揺れによる火災，3.間接的に生じた火災に分類するなど，すべての火災を整理している[3]．その結果，震災後 1 か月に発生した全火災 3,162 件のうち津波火災は 159 件，揺れによる火災は 175 件，間接的に生じた火災は 64 件発生していたことがわかっている．最終的に，東日本大震災時に発生した地震火災は 398 件となっているが，本研究ではこの 398 件を分析対象として議論を進める．なお図 1 は調査対象地域と表 1 に示した地震火災の空間分布を示したものである[4]．

表 1　本調査で用いたコード表

要因分類コード	説明	要因分類詳細コード	詳細説明	津波火災	揺れによる火災	間接的に生じた火災	地震火災	件数
0	無関係	－	地震・津波とは無関係と判断できるもの					1,804
1	津波浸水範囲内で発生した火災	100	101～110以外のよくわからないもの	○			○	2
		101	3月11日の火災（地震動によるもの以外）	○			○	90
		102	3月12日以降の電気関係による火災	○			○	15
		103	3月12日以降の車両火災もしくは車両が出火原因の火災	○			○	25
		105	震災と全く関連のない普段の火災					8
		106	3月12日以降の車両火災・電気関係以外の津波関連火災	○			○	19
		107	間接や復旧作業中の火災			○	○	3
		108	津波浸水地域内の通電火災	○			○	3
		109	津波浸水地域内のロウソク火災			○	○	2
		110	津波浸水範囲の地震動による火災		○		○	5
2	地震に直接関連した火災	200	地震関連でよくわからないもの		○		○	5
		201	本震による3月11日の火災（203，204に該当するものは除く）		○		○	107
		202	本震以外の地震による火災		○		○	17
		203	通電火災（3月11日含む）		○		○	23
		204	地震による破損＋人為的要素（3月11日含む）		○		○	12
		206	本震による3月12日以降の火災（203，204に該当するものは除く）		○		○	6
3	地震に伴う停電等で間接的に生じた火災	300	地震動による破損・移動・転倒等と直接関係のない火災（301，302に該当するものは除く）			○	○	24
		301	津波により浸水した車両＋人為的に移動	○			○	5
		302	地震が無ければ使わなかったロウソク＋何らかの理由による転倒等			○	○	35
4	放火・不審火	－	放火（疑い含む）・不審火・火遊びなど					495
5	関連不明	－	出火原因はわかっているものの，地震・余震や津波の影響の有無が明示的に回答されていないケース					28
6	原因不明	－	出火原因が不明のケース，通常の火災の場合を含む					282
7	無回答	－	基本情報が開示されていないケース。不開示・無回答					147
総計				159	175	64	398	3,162

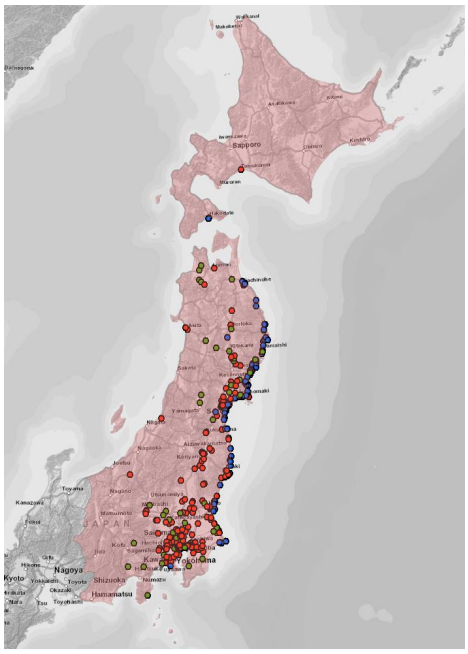

図 1　調査対象地域と地震火災の空間分布（N=398）
（赤：揺れ，緑：間接，青：津波）

3．ベイズ統計モデルを用いた出火件数の推定

このデータを用いて，地震時の出火件数予測式を構築する．はじめに事前分析として全体を俯瞰する意味で，表 2 にさまざまなタイプの地震火災の出火率を示す（市町村単位で集計，なお津波火災は津波浸水地域のみを計上）．ここでは 1. 津波火災，2. 揺れによる火災，3. 間接的な原因で発生する火災，4. 通電火災，5. ローソク火災の 5 種類とし，計測震度ごとに 10,000 世帯あたりの出火率を算出した．下表からは，おおむね津波火災の出火率がもっとも高く，ついで揺れによる火災，ローソク火災，間接的な原因で発生する火災といった順番に地震火災が多く発生していることや（震度 6 強以上の地域において，間接的な原因で発生した火災よりもローソク火災の出火率が低い理由は，後者は津波浸水地域内で発生したローソク火災も含んでいることによる），震度が弱くなるに従って揺れによる火災と間接的な原因で発生する火災や通電火災の差が小さくなっていくことが明らかになる．また津波火災以外の地震火災，すなわち揺れによる火災と間接的な原因で発生する火災の出火率は，震度 6 強以上の地域で 10,000 世帯あたり 0.436 件であり，関東大震災における東京市の出火率である 10,000 世帯あたり 2.0 件，兵庫県南部地震における震度 7 地域の出火率である 10,000 世帯あたり 3.0 件，中越地震における震度 6 強以上地域の出火率である 10,000 世帯あたり 1.2 件に比べ非常に小さいこともわかる．その他，揺れによる火災やローソク火災は震度が大きいほど出火率も高くなっていくが，津波火災や間接的な原因で発生する火災，通電火災は震度に対して単調増加とはいえず，予測式のモデル化については揺れの強さ以外の指標も必要であることが判明した．

表 2　様々なタイプの地震火災の出火率
（震度階級別の 10,000 世帯あたり出火件数）

震度階級	震度6強以上	震度6弱	震度5強	震度5弱	震度5弱未満
計測震度	6.0以上	5.5から6.0	5.0から5.5	4.5から5.0	4.5未満
津波火災	0.594	1.787	1.138	0.335	0.000
揺れによる火災	0.376	0.145	0.058	0.035	0.010
間接的な原因の火災	0.060	0.080	0.010	0.023	0.010
通電火災	0.034	0.042	0.006	0.016	0.015
ローソク火災	0.107	0.019	0.005	0.003	0.000
揺れ＋間接の総和	0.436	0.225	0.068	0.058	0.020

上記の事前分析をもとに，ここでは出火現象がポアソン分布に従うと仮定し市区町村を集計単位としたうえで，津波火災，揺れによる火災，間接的な原因で発生した火災の 3 種類の地震火災を，それぞれ下式の出火数予測モデルにあてはめる．ただし以降ではデータ集計上，北海道を除いた全 707 市町村を対象とした．

(1) 一般化線形モデル(GLM)

はじめに一般化線形モデルの定式化を行う．ここでは小出式や廣井(2014)などと同様に，ある領域 i における分類 k の出火件数 $y_{k,i}$ は(1)式のように非負の整数データという特徴からポアソン分布に従うものと仮定し，それぞれ下記のように定義する；

$y_{1,i}$ ：領域 i における揺れによる火災の出火件数，

$y_{2,i}$ ：領域 i における津波火災の出火件数，

$y_{3,i}$ ：領域 i における間接的な火災の出火件数．

またその平均 $\lambda_{k,i}$ は(2)-(4)式のような線形予測子で示されるものと考えた[5]．各変数は，下記の通りである；

$x_{1,i}$ ：領域 i における世帯数（万），人口（万）[6]，

$x_{2,i}$ ：領域 i における揺れに関する指標[7]

(最大加速度，最大速度， SI 値，計測震度)，

$x_{3,i}$ ：領域 i における全壊建物数（棟）[8],

$y_{1,i}$ ：領域 i における浸水建物数（棟）[9],

$y_{2,i}$ ：領域 i におけるプロパンガスボンベの利用率[10],

$y_{3,i}$ ：領域 i における重油流出有無（ダミー変数）[11],

$y_{4,i}$ ：領域 i における世帯あたり自動車保有率[12],

$z_{1,i}$ ：領域 i における停電率[13].

$$p_{k,i}(n_{k,i}|\lambda_{k,i}) = \frac{\lambda_{k,i}^{n_{k,i}} \exp(-\lambda_{k,i})}{n_{k,i}!} \quad \cdots(1)$$

ただし $(k=1,2,3 \quad i=1,2,3..m)$

$$\lambda_{1,i} = \exp(\alpha_0 + \alpha_1 x_{1,i} + \alpha_2 x_{2,i} + \alpha_3 x_{3,i}) \quad \cdots(2)$$

$$\lambda_{2,i} = \exp(\beta_0 + \beta_1 y_{1,i} + \beta_2 y_{1,i} y_{2,i} + \beta_3 y_{1,i} y_{3,i} + \beta_4 y_{1,i} y_{4,i}) \quad \ldots(3)$$

$$\lambda_{3,i} = \exp(\gamma_0 + \gamma_1 x_{1,i} + \gamma_2 x_{2,i} + \gamma_3 z_{1,i}) \quad \ldots(4)$$

このもとで，上記に示した市区町村別の地震火災発生件数データを用いて，最尤法を用いたパラメータ推定を行った．たとえば揺れに伴う火災については，対数尤度(5)式を最大化するパラメータを推定している[14].

$$\log L(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \sum_i \log \frac{\lambda_i^{n_i} \exp(-\lambda_i)}{n_i!} \quad \ldots(5)$$

本研究は将来の地震火災に対する出火件数予測に資することを目的としているため，変数及びモデルの選択は赤池情報量規準に基づいた．結果として各パラメータとその場合の AIC は表 3，表 4 のように示される[15]．たとえば揺れによる地震火災では，計測震度と世帯を用いたモデルが最も説明力の高いモデルであると判断される（ここでは，(2)式のような線形のみならず $x_{1,i}$ と $x_{2,i}$ を掛け合わせたモデルなど様々なパターンを試行錯誤したが，上式の線形予測式が一番当てはまりがよいことがわかった）．この傾向は間接的な原因によって発生する火災についても同様であった．他方で津波火災は(3)式のモデルで AIC=273.9 となっている．この結果得られたモデルの推定パラメータを表 5 に，3 種類の地震火災についての実データと予測データ比較を図 2 に示す．

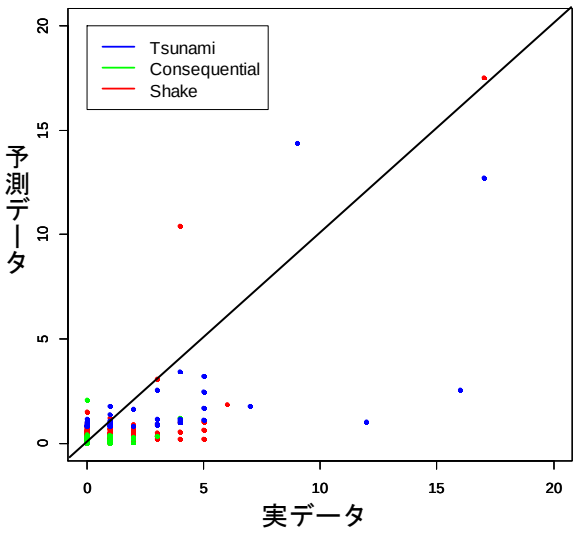

図 2　3 種類の地震火災の実測データ（横軸）と一般化線形モデルを用いた予測データ（縦軸）

表 5 に示す各変数の当てはまりは悪くないものの，図 2 をみると火災の少なかった市町村でやや過小評価となっている．これは，ここで用いた線形予測子が揺れや世帯，全壊率で説明されるのみで，その他の地域性を表すパラメータ（地域パラメータ）が準備されていないことによるものと考えられる．そこで，以降では上記のモデルを基礎とし，地域パラメータが正規分布に従うと仮定した一般化線形混合モデルを構築する．

表 3　各変数の選択と AIC の値（GLM，揺れ）

人口や世帯	人口	人口	人口	人口
揺れの指標	最大加速度	最大速度	SI値	計測震度
AIC	769.97	781.02	772.16	738.69
人口や世帯	世帯	世帯	世帯	世帯
揺れの指標	最大加速度	最大速度	SI値	計測震度
AIC	768.22	780.01	770.96	737.36

表 4　各変数の選択と AIC の値（GLM，間接）

人口や世帯	人口	人口	人口	人口
揺れの指標	最大加速度	最大速度	SI値	計測震度
AIC	384.43	383.77	383.03	380.83
人口や世帯	世帯	世帯	世帯	世帯
揺れの指標	最大加速度	最大速度	SI値	計測震度
AIC	384.4	383.79	383.03	380.77

表 5　一般化線形モデル(GLM)の推定パラメータ
（1%有意を***，5%有意を**，10%有意を*で示した）

火災分類	揺れによる火災				
係数名	α 0	α 1	α 2	α 3	
係数値	−8.348	0.023	1.293	0.854	
Pr(>Z)	0.0000***	0.0000***	0.0000***	0.0000***	
AIC	737.6				
火災分類	間接的な原因で発生した火災				
係数名	γ 0	γ 1	γ 2	γ 3	
係数値	−7.511	0.023	0.845	1.325	
Pr(>Z)	0.0000***	0.0000***	0.0000***	0.0000***	
AIC	380.8				
火災分類	津波火災				
係数名	β 0	β 1	β 2	β 3	β 4
係数値	0.2012	0.0005	0.0012	0.0014	−0.0061
Pr(>Z)	0.1058	0.0222**	0.0002***	0.0000***	0.0043***
AIC	273.9				

(2) 一般化線形混合モデル(GLMM)

上記の一般化線形モデルによるあてはまりは一般には悪くないものと考えられるが，過分散の問題があるため集計単位によっては適切な検討とはいえない可能性がある．そこで上式に地域差を反映しうるパラメータを追加することで，より妥当なパラメータの推定が行えるよう工夫する（一般化線形混合モデル）．ここでは上式(2)-(4)をそれぞれ下式(6)-(8)のように修正した．なお $r_{k,i}$ は分類 k の出火件数に対する領域 i の地域性をあらわす独立のパラメータとし，利便性も考えて(9)式のごとく平均 0，標準偏差 s_k の正規分布と仮にみなす．この結果を用いて出火件数の将来予測を行う際は，$r_{k,i}$ をこれに従う確率分布とみなして用いる．

$$\lambda_{1,i} = \exp(\alpha_0 + \alpha_1 x_{1,i} + \alpha_2 x_{2,i} + \alpha_3 x_{3,i} + r_{1,i}) \quad \ldots(6)$$

$$\lambda_{2,i} = \exp(\beta_0 + \beta_1 y_{1,i} + \beta_2 y_{1,i} y_{2,i} + \beta_3 y_{1,i} y_{3,i} + \beta_4 y_{1,i} y_{4,i} + r_{2,i}) \quad \ldots(7)$$

$$\lambda_{3,i} = \exp(\gamma_0 + \gamma_1 x_{1,i} + \gamma_2 x_{2,i} + \gamma_3 z_{1,i} + r_{3,i}) \quad \ldots(8)$$

$$p(r_{k,i}|s_k)=\frac{1}{\sqrt{2\pi s_k^{\ 2}}}\exp(-\frac{r_{k,i}^2}{2s_k^{\ 2}}) \qquad \ldots(9)$$

このもとで，上記に示した市区町村別の地震火災発生件数データを用いて，最尤法を用いたパラメータ推定を行う．最尤推定にあたっては，(1)式（ただし線形予測子は(6)~(8)で示したもの）と(9)式の両確率分布の積を(10)式のように独立パラメータ $r_{k,i}$ で積分し無限混合分布とみなすことで，尤度 $L_k=\prod_i L_{i,k}$ を最大にするパラメータ α,β,γ,s_k が各々求まる（ここでも対数尤度を最大化するパラメータを推定）．この結果，標準偏差 s_1,s_2,s_3 はそれぞれ 1.51，2.19，0.89 となる．

$$L_{k,i}=\int_{-\infty}^{\infty}p(n_{k,i}|\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,r_{k,i})p(r_{k,i}|s_k)dr_{k,i} \qquad \ldots(10)$$

（ただし(10)式は揺れによる地震火災の一例）

この結果が表 6 - 表 8 である．赤池情報量規準に基づくと，一般化線形モデルと同じく，計測震度と世帯を用いたモデルが最も説明力の高い結果となった（揺れに伴う火災が AIC=437.4，津波火災が AIC=122.7，間接的な原因で発生した火災が AIC=255.6）．津波火災に関しては有意でない変数があるものの，表 5 と表 8 の AIC の値を比べると，全ての種類の地震火災においてモデルの説明力は，(2)-(4)式で定義される一般化線形モデルよりも地域パラメータを導入した(6)-(9)式で定義される一般化線形混合モデルのほうが説明力の高い予測式であることがわかった．

表 6　各変数の選択と AIC の値（GLMM，揺れ）

人口や世帯	人口	人口	人口	人口
揺れの指標	最大加速度	最大速度	SI値	計測震度
AIC	451.3	452.5	449.2	438.6
人口や世帯	世帯	世帯	世帯	世帯
揺れの指標	最大加速度	最大速度	SI値	計測震度
AIC	449.7	451.2	447.8	437.4

表 7　各変数の選択と AIC の値（GLMM，間接）

人口や世帯	人口	人口	人口	人口
揺れの指標	最大加速度	最大速度	SI値	計測震度
AIC	258.7	257.8	257.7	257.7
人口や世帯	世帯	世帯	世帯	世帯
揺れの指標	最大加速度	最大速度	SI値	計測震度
AIC	258.8	257.9	257.8	255.6

表 8　一般化線形混合モデル(GLMM)の推定パラメータ
（1%有意を***，5%有意を**，10%有意を*で示した）

火災分類	揺れによる火災				
係数名	α 0	α 1	α 2	α 3	
係数値	−10.00	0.052	1.383	0.911	
Pr(>Z)	0.0000***	0.0000***	0.0000***	0.0000***	
AIC	437.4				
火災分類	間接的な原因で発生した火災				
係数名	γ 0	γ 1	γ 2	γ 3	
係数値	−8.895	0.039	0.796	1.17	
Pr(>Z)	0.0000***	0.0000***	0.0000***	0.0000***	
AIC	255.6				
火災分類	津波火災				
係数名	β 0	β 1	β 2	β 3	β 4
係数値	−0.4471	0.0006	0.0016	0.0002	−0.0008
Pr(>Z)	0.0742*	0.114	0.0137**	0.0003***	0.0488**
AIC	122.7				
標準偏差	s1	s2	s3		
数値	1.513	2.191	0.891		

(3) 階層ベイズモデル

上記のように一般化線形混合モデルを用いることによって，集計単位の異なりに起因する過分散の問題や地域性をある程度考慮しうる地震火災の出火モデルを構築することができた．一般化線形混合モデルを地震火災に当てはめた例は既存研究にもまだなく，今後の被害予測への応用など多様な用途が考えられる．ところで，上記のモデルをより現実的かつ複雑な現象や，空間的自己相関も考慮した柔軟なものに展開しようとしたとき，一般化線形混合モデルで一律のパラメータとした s_k にばらつきを持たせるなど，多数のパラメータを取り扱うことは困難である．本研究は従来どおりの出火予測のみならず，時空間分布を対象としたり，欠損を伴うデータ群から全体像を推定する研究などへの応用をにらんでいる．このため，以降ではベイズ統計モデル（階層ベイズモデル）を用いた出火件数予測式の構築を行う．

ここでは上記と同じく，出火は(1)式のごとくポアソン分布に従うものとし，線形予測子も(6)～(8)式のように表されるものとする．ただし，上記では場所によらず一定値としたパラメータ α,β,γ なども確率分布と考え，これを無情報事前分布として，裾野の長い正規分布で与えた．たとえば α_1 の場合，(11)式のごとく示される．なお $s_{\alpha,1}=s_{\alpha,2}=s_{\beta,1}=\cdots=100$ としている．

$$p(\alpha_1)=\frac{1}{\sqrt{2\pi s_{\alpha,1}^{\ 2}}}\exp(-\frac{\alpha_1}{2s_{\alpha,1}^{\ 2}}) \qquad \ldots(11)$$

一方，複雑な構造を可能とする階層ベイズモデルならでは工夫として，ここでは地域パラメータ（GLMM モデルでは(9)式に相当）に空間的自己相関を考慮する．そこで領域 i の地域パラメータ $r_{k,i}$ を，領域 i と隣接する領域群 J の地域パラメータで説明されるものとし，これらの加重平均 $u_{k,i}$ を用いた正規分布の条件付事前分布で示されるものとした（N_i は領域 i の近傍数）．一次元を仮定した場合，これは(12)，(13)式のように示される（地域パラメータは，隣り合う領域における地域パラメータの加重平均を平均とした正規分布に従い，標準偏差も推定する）．津波火災については被災市区町村を海岸線に沿う形で一次元近似して加重平均を算出し，揺れと間接については隣接する市区町村の平均で与えた．

$$p(r_{k,i}|u_{k,i},s_k)=\sqrt{\frac{N_i}{2\pi s_k^2}}\exp(-\frac{(r_{k,i}-u_{k,i})^2}{2s_k^2/N_i}) \qquad \ldots(12)$$

$$u_{k,i}=(r_{k,i-1}+r_{k,i+1})\big/2 \qquad \ldots(13)$$

この場合，パラメータ推定は一般化線形混合モデルのように最尤法を用いることはできない．したがって，本研究ではパラメータの推定方法にマルコフ連鎖モンテカルロ法（Hamiltonian Monte Carlo 法）を用いる．ここではイテレーションを 100,000 回とし，事前分布の影響を受けぬように最初の 50,000 回のデータをバーンインしチェイン数は 10 回とした．すなわち，3 種類の地震火災に対してそれぞれ 100 万回の試行を行ったことになる．このとき，たとえば津波火災の事後確率分布は結果的に図 3 のようになる．

結果を示す．表 9 が階層ベイズモデルで推定された説明変数のパラメータ平均および地域性パラメータの標準偏差を示したものである[16]．図 4 は津波火災について，一般化線形モデル，一般化線形混合モデル，階層ベイズ

モデルの推計値をそれぞれ観測データと一対一比較したものである．ここからも，他のモデルと比べて階層ベイズモデルが一番当てはまっている様子がみてとれる．これを地図上で表現したものが図 5～図 6 になる．

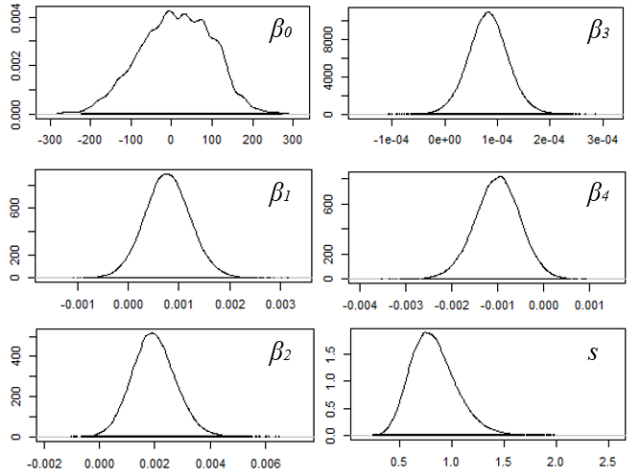

図 3　各パラメータの事前分布（津波火災）

表 9　階層ベイズモデルの推定パラメータ

火災分類	揺れによる火災					
係数名	α 0	α 1	α 2	α 3	s	
平均	−11.937	0.033	1.790	−1.989	0.376	
Rhat	1.3873	1.0252	1.0295	1.6671	1.1031	
火災分類	間接的な原因で発生した火災					
係数名	γ 0	γ 1	γ 2	γ 3	s	
平均	−10.317	0.022	1.113	1.688	0.194	
Rhat	1.7356	1.0012	1.0039	1.0025	1.0178	
火災分類	津波火災					
係数名	β 0	β 1	β 2	β 3	β 4	s
平均	10.483	0.0008	0.0020	0.0001	−0.0010	0.8258
Rhat	1.0852	1.0004	1.0005	1.0001	1.0092	1.0011

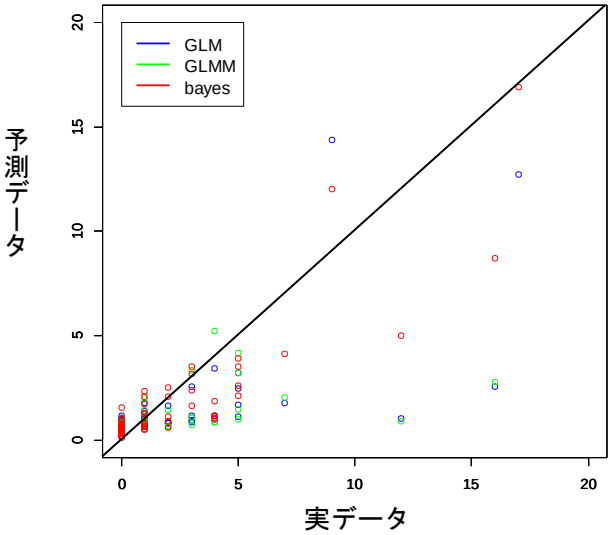

図 4　津波火災に関する 3 種類の統計モデルと実測データとの比較

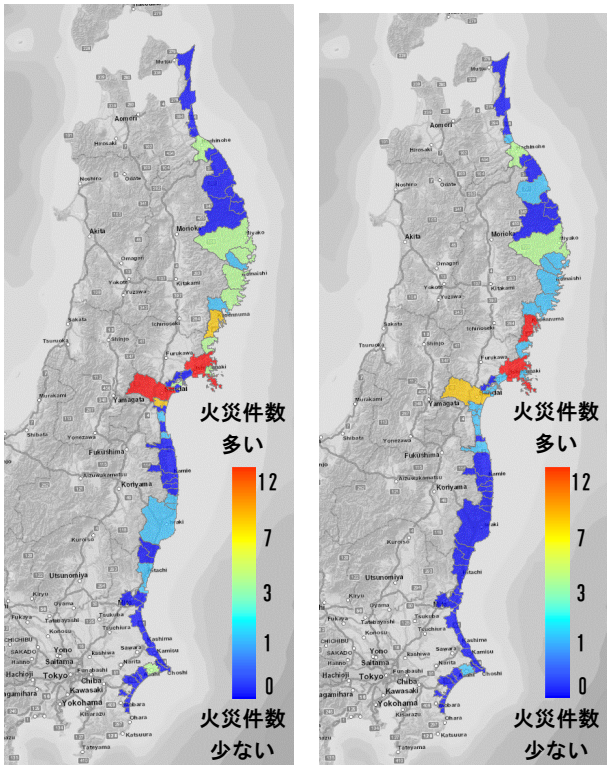

図 5　市町村別の津波火災発生件数
（左：調査データ，右：GLM による予測）

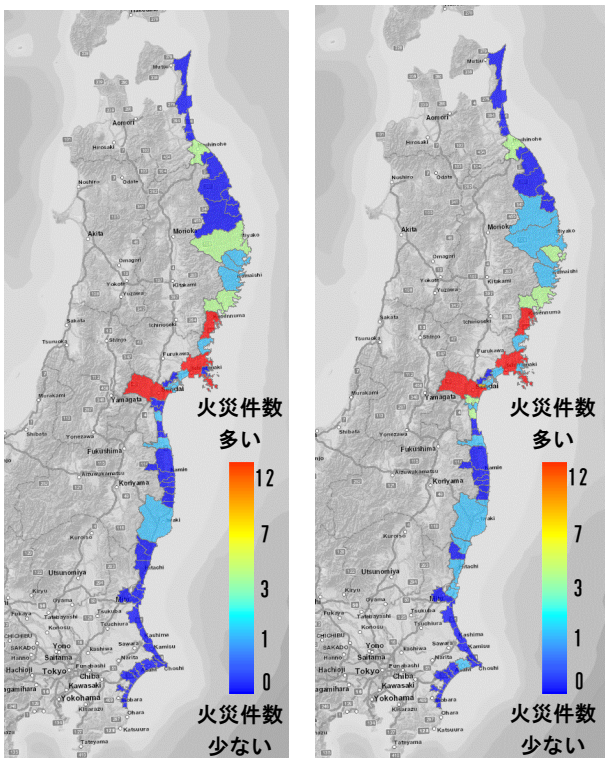

図 6　市町村別の津波火災発生件数（左：GLMM による予測，右：階層ベイズによる予測）

4．集計単位をメッシュとした場合の数値例

上記のように，一般化線形モデル，一般化線形混合モデル，階層ベイズモデルを用いた出火件数の予測式を検討した結果，特に空間的自己相関を考慮した階層ベイズモデルのもとでは，より精緻な出火件数の予測が可能となることが分かった．ところで上記の推定式は市町村単

位で行われたものであるが，集計単位をメッシュとして同様の分析を行うことも可能である．特に地震火災リスクを地域単位や住民が評価する際は，集計単位のばらつく市町村単位の分析よりも適切とも考えられる．このためここでは紙面での可視性も考慮して，上記の調査で得られた地震火災の出火点を GIS ポイントデータからメッシュデータの属性データに変換し，調査範囲を対象とした 2 次メッシュ内の出火件数データを作成した．なお，これまでは揺れによる火災や間接的な原因で発生する火災の出火件数予測の変数として世帯数，計測震度，全壊建物数もしくは停電率の 3 変数を用いたが，ここではこのうち前者の 2 変数（世帯数，計測震度）を用いることとし，改めて得られた予測式を地震発生確率とかけ合わせることで，地震出火リスクを確率的に把握することとした．この結果を図 7 – 図 9 および表 10 に示す．

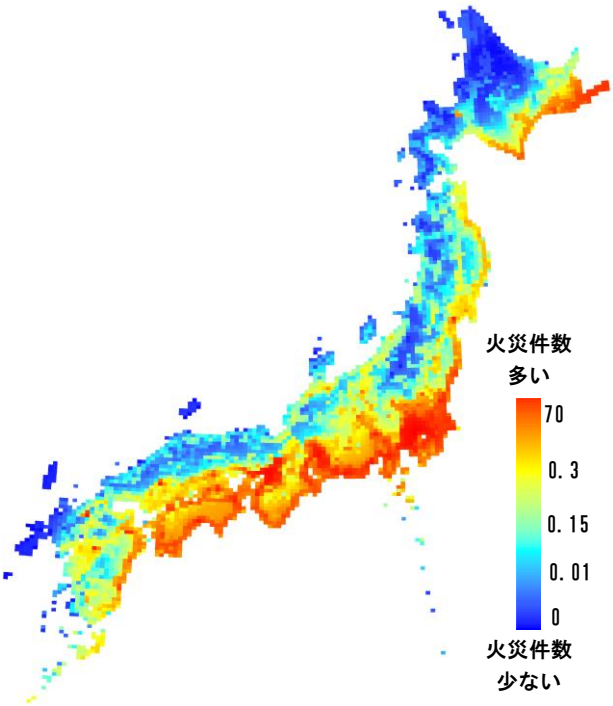

図 7　30 年以内の地震火災発生件数の期待値
（2 次メッシュ内）

これらは確率論的地震動予測地図(J-SHIS)のデータを用いて，各メッシュ内で 30 年の間に地震火災が発生する期待値や 30 年の間に 1 件でも地震火災が発生する確率（これを便宜的に確率論的地震出火予測地図と呼ぶ），および 30 年以内に地震火災が発生する期待値を人口で重ね合わせた被害ポテンシャル指標（これを以降では地震出火曝露人口と呼ぶ）を計算したものである [8]．ただし階層ベイズモデルによる出火予測式を用いた場合，東日本大震災のデータから東日本大震災で被災していない地域の地域性 $r_{k,i}$ を特定することが困難であるため，ここでは一般化線形混合モデルを用いた[17]．図 7 に示した地震火災発生件数の期待値と図 8 に示した発生確率から，太平洋沿岸部の大都市とごく一部の地方都市がスポット的に地震火災のリスクが高いものと判断される．図 9 に示した地震出火曝露人口は都市部の火災リスクが更に顕著に表されており，東京，横浜，名古屋，大阪を筆頭として，人口密集地域のリスクが特に高いものと判断された．表 7 はこれらの値が大きい順にそれぞれ 20 サンプルずつ並べあげたものである(トップ 20)．一部の地域で順番がやや前後するが，出火件数期待値，地震出火曝露人口ともに東京の数値は飛びぬけて高いことがわかる．本稿はハザードとして確率論的地震動予測地図を用いたため，揺れに伴う地震火災と間接的な原因で発生する地震火災を総合して予測地図を作成したが，今後，津波被害の発生確率などが明らかにされれれば，津波火災についても同様の予測地図を作ることができる．

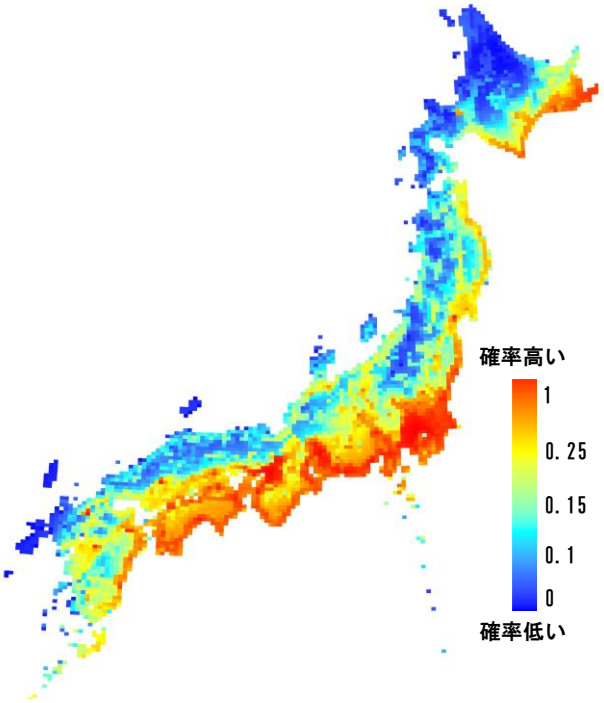

図 8　30 年以内に地震火災が 1 件でも発生する確率
（確率論的地震出火予測値図，2 次メッシュ内）

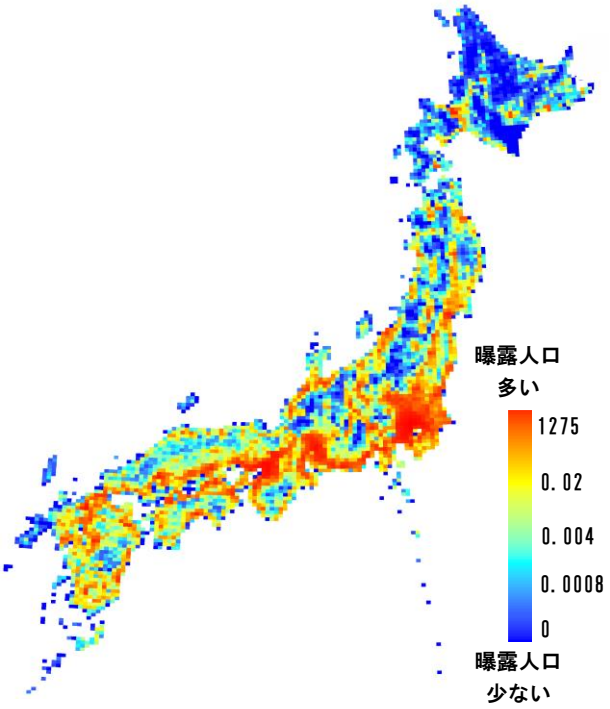

図 9　30 年以内の地震出火曝露人口
（2 次メッシュ内）

表 10　3 種類の地震出火リスク指標のトップ 20

30年の出火件数期待値		30年に1件でも発生する確率		30年の地震出火曝露人口	
メッシュ名	数値(件)	メッシュ名	数値	メッシュ名	数値(万人・件)
東京西部	69.123	東京西部	1.000	東京西部	12755.280
東京西南部	31.856	東京西南部	1.000	東京西南部	5371.829
東京首部	23.356	東京首部	1.000	東京首部	3899.558
川崎	15.297	川崎	1.000	川崎	2297.058
赤羽	10.490	赤羽	1.000	赤羽	1434.536
大阪東北部	8.640	大阪東北部	1.000	大阪東北部	1153.208
大阪東南部	7.078	大阪東南部	0.999	大阪東南部	913.538
吉祥寺	6.712	吉祥寺	0.999	吉祥寺	850.881
溝口	6.279	溝口	0.998	溝口	724.034
草加	5.122	草加	0.994	草加	567.873
船橋	4.641	船橋	0.990	船橋	474.757
横浜西部	4.048	横浜西部	0.983	横浜西部	405.078
名古屋南部	3.175	名古屋南部	0.958	立川	281.572
大阪西北部	3.146	大阪西北部	0.957	大阪西北部	280.224
立川	3.071	立川	0.954	伊丹	277.818
伊丹	2.797	伊丹	0.939	名古屋南部	273.758
戸塚	2.750	戸塚	0.936	荏田	239.581
荏田	2.731	荏田	0.935	吹田	236.914
吹田	2.580	吹田	0.924	戸塚	234.928
原町田	2.380	原町田	0.907	原町田	201.239

５．リアルタイム出火件数予測手法への展開

本研究の分析の枠組みは，将来の地震火災リスクを評価するのみにとどまらず，非常時における出火点予測への展開が可能である．一例として津波火災の事例を取り上げる．本研究で用いた観測データのうち，一部の市区町村における出火件数のデータを欠損させ，欠損データの推定を行う．これは空間的自己相関を考慮した階層ベイズモデルの特長ならではの分析といえる．ここでは仮に，上記した調査で得られた市町村単位の津波火災データから，釜石市，陸前高田市，東松島市，塩竈市，亘理町，新地町，相馬市，南相馬市，双葉町，楢葉町，広野町，大洗町，銚子市，旭市の 14 市町村の津波火災データが欠損したものとして，これらのデータを除いたデータセットを作成し，それをもとに再び階層ベイズモデルのパラメータをマルコフ連鎖モンテカルロ法で推定した（この 14 市町村は，東日本大震災発生から約 1 日が経過した 2011 年 3 月 12 日 14 時に発表された，総務省消防庁の平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖・中越地震被害報（第 22 報）[9]で火災の存在が報告されていない市区町村であり，今回は一例としてその市区町村の火災データが欠損したものとして推定を行うこととした）[18].

これを用いた欠損データの推計結果は表 11 のようになる．釜石市，相馬市，東松島市など，精度よく予測できた地域もあれば，塩釜町，旭市，双葉町，楢葉町，広野町など大きく予測をはずした地域もある．後者のうまく推定できなかった市町村のうち塩釜市や旭市は，おおむね本稿 3 章 3 節の（欠損データなしの）階層ベイズモデルでも当てはまりが悪かったサンプルであり(塩釜市は 1.2 件と推定，旭市は 1.0 件と推定)，用いた統計モデルそのものの問題といえる．他方で双葉町，楢葉町，広野町がうまく推定できなかった原因は，広い範囲で情報収集ができていなかったため，空間的自己相関による補正が活用できなかったためと考えられる．結果として，63 市町村中 49 市町村の出火情報および被害データを収集した段階で，津波火災の総数は 143 件と推定された．本稿の 3 章以降で対象とした津波火災は欠損データも含めると 155 件であるから，やや過小評価といえる（欠損 14 市町は 31 件を 19.2 件と予測した）．これは上記の問題に加え，欠損データとした市町村の出火件数がやや少ない傾向にあったことなどもあげられる．今後は効率のよい推定を可能にするための覚知情報収集基準などの検討が必要であろう．

図 10 に本章で用いた予測プロセスを簡潔にまとめた．ここでは簡単のため市町村別の津波火災データで試算を行っているが，もちろん揺れに起因する地震火災であっても，集計単位をメッシュにしても同様の推測が可能となる．このような方法論を実装することにより，一部の覚知で得られた情報と計測震度や世帯数などの統計データから，情報未収集地域や全体の出火件数を予測することが可能となる．これは広域応援などを代表とするマクロ的な消防戦術への活用が期待される．

表 11　欠損データの実データと推定値（件）

市町村名	釜石市	陸前高田市	東松島市	塩釜市	亘理町	
実データ	5	3	1	4	3	
推定値	3.9	7.7	1.7	1.1	1.1	
市町村名	新地町	相馬市	南相馬市	双葉町	楢葉町	
実データ	2	1	1	1	2	
推定値	0.5	0.8	0.4	0.2	0.4	
市町村名	広野町	大洗町	銚子市	旭市	14市町	全体
実データ	2	1	1	4	31	155
推定値	0.5	0.5	0.3	0.3	19.2	143.0

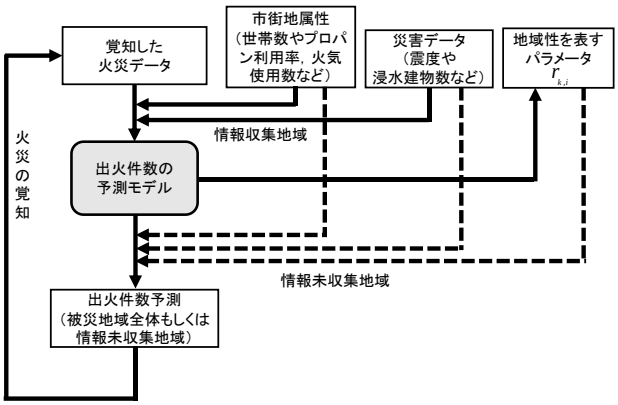

図 10　リアルタイム出火予測のスキーム

６．まとめ

本稿では，東日本大震災の地震火災データ全 398 件を用いて，地震火災の出火件数予測を行うモデル式を提案した．これまでのポアソン分布を仮定した予測式の欠点であった過分散の問題，つまり実用上における集計単位制約を解決するため，一般化線形混合モデルおよび階層ベイズモデルを用いた点や，揺れによる地震火災のみならず間接的な原因で発生した地震火災や津波火災など，様々なタイプの地震火災を対象として出火件数予測式を構築した点が，地震火災研究分野における本稿の新規性である．そして第 4 章では上記のデータを用いて，確率論的地震出火予測地図や地震出火曝露人口などのリスクマップの提案を行った．これは市街地の延焼リスクや避難性能，消防活動を考慮したものではないため，直接的に地震火災の人的被害や物的被害の程度を示すものではないが，地震火災を予測する上で避けることのできない不確実性の高さを考慮すると，想定地震によらず全国的に統一された方法で地震火災リスクを量的評価する 1 つの手法として意義は大きいものと考えられる．

なお本研究は東日本大震災時に発生した地震火災データのみを用いており，地域特性や災害像の大きく異なる災害における地震火災を精度よく予測するには限界がある．この点は今後の課題であり，より精緻な出火件数予測を行うためには，これまでに得られた様々な地震火災事例を収集し，得られたデータの前提条件を整理し統一したうえで，同様の分析を行う必要があるものと考えられる．ところで本研究の最後でその構想を示し，津波火災を対象として具体的な数値計算を行った階層ベイズモ

デルによるアプローチとリアルタイム出火予測手法は，上記の課題を解決するものである．これまでの出火予測研究は原則として，数回の地震火災被害データから地域特性や風速・湿度などの不確実性をできるだけ考慮して，火災被害を記述する真のパラメータを求めたいというアプローチであった．これに対して本研究で行った階層ベイズモデルによるアプローチは，これら真のパラメータの探求には拘らず，その限界を認識した上で，地域性や災害特有の現象も含めて有り得るパラメータの確率分布を直接に求めて，それをそのまま用いようとするものである．そして後者のリアルタイム出火予測手法の取り組みは，災害によって状況が大きく異なることを前提とした上で，災害時に覚知される限られた情報の中から（災害現象ごとの異質性を内生化した上で）帰納的に全体像を把握し，消防戦術（特に広域応援）など意思決定に生かすデータオリエンテッドな推定手法である．これまでの出火予測研究や東京都 [5]や東京消防庁 [6]などが精力的に行う（用途別の出火確率など）ミクロな物理現象を積み上げて出火件数期待値を求める取り組みとの違いはここにある．

もちろん両者の取り組みは対立するものではなく，後者は事前予測に有用であるし，前者は直後対応に効果を発揮しうるものと考えられる．すなわち地震火災被害の不確実性や災害現象の異質性を考慮した場合，発災直後の対応に限っては，本稿で行った数々の検討は意義深い取り組みといえよう．なお本稿の紙幅を超えるため詳細は別文献に譲るが，本研究で仮定した空間的な自己相関を時系列に当てはめ確率過程とすることで，時空間分布の推定を行うこともできる．このためには自己相関関数の同定や余震データの利用など多少の準備が必要となるが，これについては今後の課題としたい．

謝辞

本研究で用いた地震火災データは，鹿島学術振興財団の研究助成金（研究代表者：廣井悠，2013 年度）及び日本火災学会地震火災専門委員会（主査：北後明彦，幹事：廣井悠）で行った調査によるものです．確率論的地震出火予測の算出にあたっては，防災科学技術研究所の確率論的地震動予測地図(J-SHIS)のデータを利用させていただきました．また本研究は科学研究費補助金若手研究(B)：出火リスクを考慮した地震時における市街地の火災安全性能評価と出火対策効果の把握（研究代表者：廣井悠，2010-2012 年度）および「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト（研究代表サブリーダー：林春男京大教授）」の助成を受け，方法論の提案と分析を行うことができました．皆様に謝意を表します．

補注

(1) 本研究は市街地の延焼や消防活動を評価するものではないが，たとえば加藤ら(2006)は出火率を建物単位で一律に与え(10,000 棟あたり 4.8 件)，市街地の地震時火災安全性能を評価している [10]．

(2) ただし，東京消防庁および宇都宮消防本部は震災後 1 ヶ月間に発生した火災の提供はしてもらえず，地震火災のみを提供いただいた．なお，安房郡市広域市町村圏事務組合と川越地区消防局は出火原因の開示が不可能とのことであったため，出火原因以外のデータを入手している．

(3) ここでは津波浸水範囲内で発生した火災を要因分類コード 1 とし，津波浸水範囲外で発生した火災を無関係(要因分類コード：0)，地震関連(要因分類コード：2)，間接(要因分類コード：3)，放火・不審火(要因分類コード：4)，関連不明(要因分類コード：5)，原因不明(要因分類コード：6)，無回答(要因分類コード：7)と分け，各々で要因分類詳細コードの割り当て判断を行った．このうち要因分類詳細コードが 100～103, 106, 108, 301 のものを津波火災，要因分類コードが 110, 100~206 を揺れに伴う火災，要因分類コードが 107, 109, 300, 302 を間接的に発生した火災と定義し，これら全てを地震火災とみなした．

(4) 東日本大震災時に発生した地震火災や津波火災の基本的特徴については，廣井ら(2012) [11]，関澤ら(2013) [12]，秦ら(2014) [13]，廣井(2014) [7]に詳しい（ただしこれらは回収率 100%に満たない段階での調査結果などをまとめたものである）．

(5) 一般化線形モデルの常套手段として，ここでは平均値が指数関数とその指数項において要因の線形和で示されるものと仮定している．また，この要因については様々なものが考えられるが，ここでは既存研究 [1), 3), 4), 7]で用いられている一般的な人口の指標，揺れの指標，浸水建物数，自動車保有数などを採用した．自動車保有率やプロパンガスのボンベの利用率は，浸水建物数との積を考えることで浸水地域内における要因の絶対数を予測した．ただし，間接的な原因で発生する地震火災については，これを予測する学術論文がないため，単純に人口の指標，揺れの指標，停電率で示されるものと考えた．この過程では様々な式のもとで変数減少法を用いた（例えば揺れ指標や停電率が世帯との積で説明変数になる場合など），各説明変数が 1%有意を満たし AIC の最も高いものを最終的に選択している（ただし浸水建物数については 1%有意にならなかったが，5%有意であり，なおかつ既存研究で浸水建物からの延焼が少なくないことが分かっているため [11]，採用することとした）．なお，ここでの自動車保有率などの割合は全て%ではなく無次元である．

(6) 人口，世帯は国勢調査のデータを用いた [14]．

(7) 揺れに関するデータは国土技術政策総合研究所による本震の最大加速度，最大速度，SI 値および計測震度の推定結果を用いた [15]．

(8) 全壊建物数は総務省消防庁の被害報より入手した [16]．

(9) 浸水建物数は，国土交通省国土政策局の「平成 23 年度東北地方太平洋沖地震における津波被害市区町村の浸水被害建物計測業務業務報告書」における浸水建物数を利用した [17]．

(10) プロパンガスボンベの利用率は，日本ガス協会のガス事業便覧で明らかにされている都市ガスの普及率を 1 から引くことで利用率とみなした [18]．なお，この数値は供給区域内普及率であるため，実際の数値とは多少の乖離があるものと考えられる．

(11) 重油流出の有無については，筆者らのヒアリングにより重油の流出が確認できたもののみダミー変数として 1 を与えることとした．

(12) 世帯あたり自動車保有率は，自動車検査登録情報協会の都道府県別自動車保有車車両数統計による．ここでは自家用乗用車の普及状況における世帯あたりの自動車保有台数（軽自動車も含む）データを用いた [19]

(13) 停電率は東北電力 HP および東京電力 HP より得られた 2011 年 3 月 12 日 11 時の停電戸数と，国勢調査から戸数を 1 を空家率で引いたものを除すことにより算出した [20]，

[21].

(14) ただし津波火災は青森県から千葉県の沿岸市町村を対象とした．なお，紫波町や鎌倉市で発生した津波火災は浸水範囲外で発生したものであるため，分析データから除くこととした．

(15) 表 3, 4, 6, 7 は人口の指標や揺れ指標の中から，AIC を用いて適切な具体指標を決定するために示した図であり，全壊建物数や津波火災の各説明変数などは変数選択の対象とはしていない．

(16) 収束の判断指標である Gelman-Rubin の $\hat{R}$ は 1.1 以下であれば十分とされるため，本検討はおおむね収束したものとみることができる．揺れによる火災と間接的な原因で発生した火災は推定パラメータが非常に多く，一部の変数で十分に収束ができていない可能性もあるが，津波火災は十分に収束したものとみなすことができる．なお表 5 および表 8 と比べて表 9 の定数項が大きく異なるが，これはここで用いた地域パラメータの平均が 0 ではなく，地域固有の数値を有していることによる [22]．

(17) ここでは簡単のため，J-SHIS のデータから各メッシュにおける震度 5 弱以上 5 強未満，震度 5 強以上 6 弱未満，震度 6 弱以上 6 強未満，震度 6 強以上の 30 年確率と，計測震度 5.0，5.5，6.0，6.5 の際の出火件数の線形和を計算し，30 年間の出火件数期待値を求めた．30 年間の曝露人口は，これにメッシュごとの人口をかけることで導出し，30 年以内に 1 度でも発生する確率は，前述のように出火をポアソン分布とみなし，(1)式を用いて 30 年間の出火件数期待値から求めている．

(18) 本稿の趣旨からは，時々刻々発生し，また覚知される出火データの更新を行いつつ出火件数予測をすべきであるが，ここでは簡単のため情報収集市町村においては全ての火災データが既知であり，情報未収集市町村においては全ての火災データが未知であると仮定して推計を行っている．この点は，本研究で提案した出火予測式を近い将来時空間モデルに展開する際，確率過程による出火予測モデルの構築とあわせて検証を行う予定である．

参考文献

1) 堀内三郎：建築防火，朝倉書店，1972.
2) 小出治：ランダム分布による大震時火災被害予測の検討，都市計画別冊(17)，pp.571-576，1982.
3) 小出治：大震火災時の被害予測手法の研究，東京大学博士論文，1984.
4) 難波義郎，保野健治郎，他：地震時出火件数の推定に関する一考察，日本建築学会大会学術講演概要集，pp. 1345-1346，1992.
5) 東京都都市整備局：地震に関する地域危険度測定調査報告書（第 7 回），2013.09.
6) 東京消防庁：東京都の地震時における地域別出火危険度測定（第 8 回），2013.03.
7) 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.111-122，2014.
8) 能島暢呂，久世益充，杉戸真太，鈴木康夫：震度曝露人口による震災ポテンシャル評価の試み，自然災害科学，23-3，pp.363-380，2004.
9) 総務省消防庁：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖・中越地震被害報（第 22 報），2011 年 3 月 12 日 14 時.
10) 加藤孝明，山口亮，ヤルコンユスフ，程洪，名取晶子：建物単体データを用いた全スケール対応・出火確率統合型の地震火災リスクの評価手法の構築，地域安全学会論文集，NO.9，pp.279-288，2006.11.
11) 廣井悠，山田常圭，坂本憲昭：東日本大震災における津波火災の調査概要，地域安全学会論文集，NO.18, pp.161-168，2012.
12) 関澤愛，佐々木克憲：2011 年東日本大震災による火災の発生状況に関する研究-日債消防本部へのアンケート調査結果に基づく分析-，日本火災学会論文集，Vol. 63，No. 3, pp. 23-30，2013.
13) 秦康範，原田悠平：2011 年東北地方太平洋沖地震における地震型火災の特徴，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 70，No. 4，pp. I_1107-I_1117，2014.
14) 総務省統計局：平成 22 年国勢調査.
15) 国土技術政策総合研究所：地震動分布デジタル値，http://www.nilim.go.jp/lab/rdg/index.htm.
16) 総務省消防庁: 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 149 報).
17) 国土交通省国土政策局：平成 23 年度東北地方太平洋沖地震における津波被害市区町村の浸水被害建物計測業務業務報告書，2011.07.
18) （一社）日本ガス協会：ガス事業便覧，2011.
19) （一社）自動車検査登録情報協会：都道府県別自動車保有車車両数統計，2014.
20) 東北電力：地震発生による停電などの影響について，http://www.tohoku-epco.co.jp/emergency/9/1182245_1807.html
21) 東京電力：東北地方太平洋沖地震における当社設備への影響について，http://www.tepco.co.jp/cc/press/11031219-j.html
22) Steve Brooks, Andrew Gelman, Galin L. Jones and Xiao-Li Meng : Handbook of Markov Chain Monte Carlo, Chapman & Hall/CRC, 2011.
23) 樋本圭佑：想定南海トラフ地震時の出火に関する基礎的考察，平成 26 年度日本火災学会研究発表会概要集，pp.282-283，2014.

(原稿受付　2015.6.6)
(登載決定　2015.9.19)