

リアルタイム地震出火予測モデルの検討

05000031 東京大学大学院准教授 *廣井 悠 HIROI U

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、リアルタイム性を伴う出火予測手法を構築しようとするものである。わが国ではこれまでも、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)}。このような帰納的出火予測は、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)などを構築し、予測を行っている事例が多い³⁾。しかしながらこれらはごく狭い領域を対象としたうえで、出火件数の平均と分散が同程度であることを前提としてのものであった。本研究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、この過分散の問題を解決するために階層ベイズモデル(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が容易となり、この柔軟性を活用した地震火災のリアルタイム出火件数予測の見通しが概ね得られた。

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。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か月に発生した全火災)は3,162件であった。筆者

らはこれを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し、その結果津波火災は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。本稿ではこの398件を分析対象として議論を進める。

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。ここではある領域*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)式の線形予測子で示されるものと考えた。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),

$x_{2,i}$: 領域*i*における揺れに関する指標(計測震度)

$x_{3,i}$: 領域*i*における全壊建物数(棟),

$y_{1,i}$: 領域*i*における浸水建物数(棟),

$y_{2,i}$: 領域*i*におけるプロパンガスボンベの利用率,

$y_{3,i}$: 領域*i*における重油流出有無(ダミー変数),

$y_{4,i}$: 領域*i*における世帯あたり自動車保有率,

$z_{1,i}$: 領域*i*における停電率.

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

ただし($k=1,2,3 \quad i=1,2,3\dots n$)

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

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

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

$$p(\alpha_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi s_{\alpha,1}^2}} \exp\left(-\frac{\alpha_1^2}{2s_{\alpha,1}^2}\right) \quad \dots(5)$$

なお、ここでは地域パラメータに空間的自己相関を考慮するため、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). 次元の場合は(6), (7)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.

$$p(r_{k,i} | u_{k,i}, s_k) = \sqrt{\frac{N_i}{2\pi s_k^2}} \exp\left(-\frac{(r_{k,i} - u_{k,i})^2}{2s_k^2/N_i}\right) \quad \dots(6)$$

$$u_{k,i} = \frac{(r_{k,i-1} + r_{k,i+1})}{2} \quad \dots(7)$$

この場合パラメータ推定は最尤法を用いることはできないため, 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ーン数は 10 回とし, それぞれ 100 万回の試行を行った.

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	$\alpha 0$	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\alpha 3$	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	$\gamma 0$	$\gamma 1$	$\gamma 2$	$\gamma 3$	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	$\beta 0$	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	$\beta 4$	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

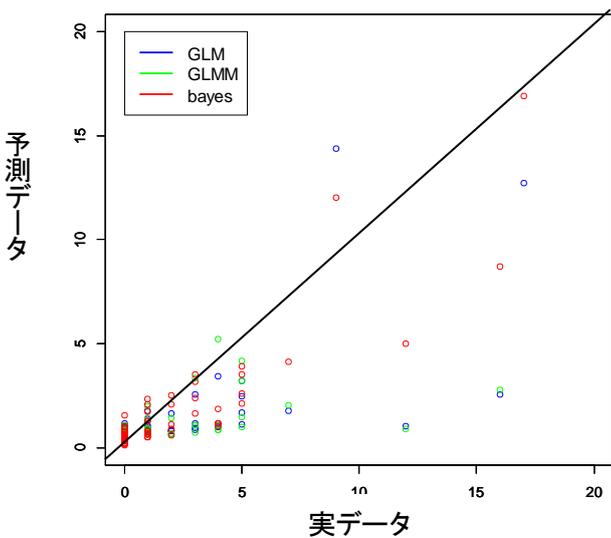


図 1 津波火災に関する 3 種類の統計モデルと実測データとの比較

表 1 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. 図 1 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. 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とれる.

4. おわりに

最後に, 津波火災の事例を取り上げてリアルタイム出火件数予測を行う. ここでは, 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った. 具体的には上記の調査で得られた市町村単位の津波火災データから, 表 2 に示す 14 市町村の津波火災データが欠損したものととして, これらのデータを除いたデータセットを作成し, それをもとに欠損データの推計を行っている. 結果は表 2 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, 檜葉町, 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, 一般化線形モデルでも当てはまりが悪かった地域であり, 用いた統計モデルおよびその変数の問題と考えられる. 他方で双葉町, 檜葉町, 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.

表 2 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	亶理町	
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	檜葉町	
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

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] 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