M8クラス関東地震発生確率の不確定性について

井元政二郎¹⁾、森川信之²⁾、藤原広行³⁾

1) 防災科学技術研究所、主幹研究員、理博

e-mail : imoto@bosai.go.jp

2) 正会員 防災科学技術研究所、主任研究員、博士（理学）

e-mail : morikawa@bosai.go.jp

3) 正会員 防災科学技術研究所、領域長、博士（理学）

e-mail : fujiwara@bosai.go.jp

要 約

地震調査委員会による相模トラフ沿いの地震活動の長期評価において、地形・地質データに基づいたM8クラス地震発生確率がBPT分布を用いて推定されている。本稿では、歴史地震と地形・地質データとを統合処理する方法を提案し、大正関東地震(1923)、元禄関東地震(1703)、明応関東地震(1495)、永仁関東地震(1293)を含めた場合について確率値を試算した。明応地震を含めない場合、30年確率は長期評価された値と大きく変わらないが、明応地震を含めた場合、有意に大きな値となる。BPT分布と指数分布との尤度比について検討を加えた結果、明応関東地震を含む場合では指数分布の適合度がBPT分布より高いことが判明した。明応関東地震の認識論的不確実性は、確率値の評価に大きな影響を及ぼすと考えられる。

キーワード： 関東地震、M8クラス、確率、不確定性、BPT分布

1. はじめに

地震調査委員会により相模トラフ沿いに発生するM8クラス関東地震の長期評価が公表されている（地震調査委員会、2014¹⁾、以後長期評価報告書とする）。これによると、M8クラス関東地震が今後30年間に発生する確率は0～5%となっている。確率算出に際し、離水地形から推定された9回の地震：5400～5300cal BP、5000-4800 cal BP、4800-4250 cal BP、4250-3950 cal BP、3800-3600 cal BP、3300-3100 cal BP、3050-2850 cal BP、2750-2700 cal BP、2500-2400 cal BPが用いられた^{2),3)}。年代決定の不確実性のため、各地震の発生時期には幅が生じている。このため、BPT分布を仮定してモンテカルロ法により地震時系列を多数生成し、発生時期を満たす系列を選んでいる。地震調査委員会の確率論的地震動予測地図の作成に当たり、平均的ケースとして0.7%、最大ケースとして5.1%が採用されている⁴⁾。

大正関東地震（1923年）や元禄関東地震（1703年）は相模トラフ沿いのM8クラス地震として一般に知られている。永仁関東地震（1293年）も最近の研究によりM8クラス地震と認められるようになってきた

5)。これらの地震は発生時期の不確実性がほぼゼロのため、上に述べた方法で発生時期を合致させることは不可能となる。このため、これら歴史地震の発生間隔は、先の確率算出に直接寄与していないと思われる。本研究では、歴史地震の発生間隔を地形・地質データに合理的に統合する方法を提案し、見解の分かれる1495年明応関東地震の影響について試算する。

さらに、時系列の生成においてBPT分布を仮定した点について、仮定の妥当性検討のため、ポアソン過程を比較の対象とし、指数分布を仮定したシミュレーションを行う（地震発生がポアソン過程に従う場合には、地震の発生間隔は指数分布となる）。試行する時系列数が同数であれば、適合度の高いモデルで発生時期データを満たす時系列数が多くなるとの考えに基づく。

2. 地形・地質データと歴史地震との統合

2.1 モンテカルロ法による確率値の算出

長期評価報告書において用いられた手法(Parsons,2008)⁹⁾を踏襲して、地形・地質データを満足する地震時系列を生成する。この際、BPT分布パラメータは一定範囲（平均地震間隔200年～600年、ばらつき $\alpha 0.1 \sim 1.0$ ）から一様分布として乱数で10000組生起させた。1組のモデルパラメータに対して、50万の地震時系列を生成させた。各組において生成された50万時系列のうち、地形・地質データに合致する地震時系列数が多いほど、そのパラメータが尤もらしいと判断する。図1は合致する時系列に含まれる発生間隔の頻度分布である。長期評価報告書の図4-6と同様の分布を示すことから、本研究の手法は長期評価報告書記載の手法を再現しているといえる。

図1 地震発生間隔の頻度分布

パラメータが精度良く決定される場合には、そのパラメータに基づき確率値等を算出することができる。精度良く決定されない場合には、ベイズ統計の手法に倣い⁷⁾⁸⁾⁹⁾、可能性の高いモデルパラメータによる確率値の加重平均値を用いることとなる。ここでは、全合致時系列の95%を含む範囲で加重平均を行うこととし、合致数の多いパラメータから順に95%に達するまで選択する。

表1に、算出に用いた地形地質データによる関東地震発生時期と関東地震とされる歴史地震を記載する。大正関東地震については、歴史地震と同時に解析するので、ここでは歴史地震に含める。○印は解析に用いた地震発生時期である。第1列は、地形地質データのみによる発生時期に基づく結果であり、

合致数の上位95%による30年確率の平均値は0.8%である。ここに、30年確率は2014年9月1日を起点としてその後30年間に関東地震が発生する確率である。確率論的地震動予測地図の作成においては、平均値として0.7%が採用されている。これは、長期評価報告書の図4-5に示される様に、確率値の下位95%を95%信頼区間とし、その範囲での平均値である。これに対し、本研究では合致数の上位95%を信頼区間として平均値を求めている。最尤推定値の不確定性を補うことを目的として、ベイズ統計の手法に倣った平均値を用いていることを考慮すると、本研究で採用した方法が妥当であると判断できる。

2.2 地形地質データと歴史地震との統合による確率値

前節では、区間推定された発生時期のデータに基づいて、BPT分布パラメータをモンテカルロ法により推定した。BPT分布パラメータについて先験的情報が無いものとして、一様な分布を仮定した。歴史地震によりいくつかの発生間隔が既知の場合には、それを事前分布として用いることにより、2種類のデータを統合した処理が可能となる。

歴史地震から n 個の発生間隔 $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ が既知とする。BPT分布では発生間隔の分布は次の式で表される。

$$f(t | \mu, \alpha) = \sqrt{\frac{\mu}{2\pi\alpha^2 t^3}} \exp\left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\mu\alpha^2 t}\right) \quad (1)$$

ここに、 μ と α はモデルパラメータで、 μ は発生間隔の平均に、 α は発生間隔のばらつきに関する量である。尤度 L は次の式で表される。

$$L(t_1, t_2, \dots, t_n | \mu, \alpha) = \prod_{i=1}^n f(t_i | \mu, \alpha) \quad (2)$$

BPT パラメータ $\{\mu_m, \alpha_m\}$ で尤度が最大値 L_m となるときの、パラメータ $\{\mu, \alpha\}$ に対する重み W を次の式で与える⁶⁾⁷⁾⁸⁾。

$$W = \frac{L(t_1, t_2, \dots, t_n | \mu, \alpha)}{L_m(t_1, t_2, \dots, t_n | \mu_m, \alpha_m)} \quad (3)$$

パラメータ各組における合致時系列数に式(3)の重みを乗じることで、事前分布として歴史地震発生間隔の尤度関数を用いることと同等の効果を得る。

表1の第2列は、大正関東地震、元禄地震、永仁地震の発生間隔2個による重みを用いた結果である。歴史地震の発生間隔が220年と410年であり、地形地質データによる発生間隔の分布と大きく変わらないため、30年確率はほぼ同じ大きさの0.7%になったと解釈される。

計算に用いた地震の発生時期を表1に○で示す。地形地質データに基づく地震の発生時期は区間で与えられていて、各区間の開始・終了年が表示されている。歴史地震はその発生年が記載されている。30年確率は、地震の発生間隔がBPT分布に従うことを仮定した場合に、発生時期を満たす時系列のBPT分布パラメータから求めた確率の平均値である。

2.3 1495年明応関東地震

1495年9月12日（グレゴリオ歴）に神奈川県鎌倉付近を津波が襲い、鎌倉大仏殿に達し、200人の溺死者が生じたとの歴史記録が1点あるが、当時大仏殿が無かった可能性が大きいことから、信憑性が低いとされた。伊豆半島東岸の宇佐美遺跡で発見された津波堆積物から相模トラフ沿いのM8地震の可能

性が示唆されるが、信憑性の高い歴史記録の裏付けが無いため、地震調査委員会の報告において参考扱いとされている。その後、1495年鎌倉における大地震が記載された別の文献の報告¹⁰⁾や、鎌倉を襲った津波の規模を見直す報告¹¹⁾がなされている。これらから、1495年鎌倉における大地震は、誤記として片づけられるのではなく詳細な研究を必要とする段階にあると考えられる。

明応関東地震が存在するとして、先の3地震にこの地震を加えると、220年、208年および202年の発生間隔が得られる。前節と同様に、尤度の比を重みとし加重平均値を求めると1.6%を得る(表1第3列)。

長期評価報告書では、1495年の地震を含めた歴史地震発生間隔の最尤解を用いた場合の確率値は0%であり、ばらつき $\alpha=0.24$ とした場合には1%とされている。また、地形・地質データでは0.7%である。統合の結果、いずれの場合よりも大きな値が得られている。これは、地形・地質データと歴史地震時系列とで発生間隔の分布が大きく異なるため、統合の結果最適なパラメータがいずれの場合とも異なるためと推察される。これに対して、前節の例では発生間隔が220年と410年であり、地形・地質データによる発生間隔の分布と調和している。このため、歴史地震時系列の統合による影響が小さいと推察される。

30年確率値を比較すると、明応地震の存在により確率値が有意に大きくなることわかる。これは歴史地震の平均発生間隔と地形・地質データによる発生間隔に不整合が生じ、大きい α 値で適合度が高くなるためと推察される。明応地震に関する認識論的不確実性が、30年確率値の不確実性0.7%~1.6%に繋がっている。明応関東地震の存在可能性を認識論的不確実性として量的に評価し、確率値に反映させることにより、この地震に対する知見の積み重ねによる評価の変化にも対応可能となる。

表1 使用した地震時系列と30年確率

				1	2	3
		cal BP				
地形地質データ	1	5400	5300	○	○	○
	2	5000	4800	○	○	○
	3	4800	4250	○	○	○
	4	4250	3950	○	○	○
	5	3800	3600	○	○	○
	6	3300	3100	○	○	○
	7	3050	2850	○	○	○
	8	2750	2700	○	○	○
	9	2500	2400	○	○	○
歴史地震		AD				
	1	永仁	1293		○	○
	2	明応	1495			○
	3	元禄	1703		○	○
	4	大正	1923		○	○
		30年確率(%)		0.8	0.7	1.6

3. 指数分布との比較

前節のモンテカルロ法による時系列生成では、BPT分布を地震発生間隔のモデルとして仮定している。地形地質データに合致する時系列数は、指定された区間の相対的長さ、区間の数(地震数)などに依存して増減する。従って、BPT分布の妥当性は、同じ条件の下で他の分布を仮定したときの合致数とを比較することにより判断できる。ここでは、BPT分布の代わりに指数分布を用いて前節と同様の解析を実施する。

指数分布では発生間隔は次の式で表される。

$$f(t|\mu) = \frac{1}{\mu} \exp\left(-\frac{t}{\mu}\right)$$

ここに、 μ はモデルパラメータで発生間隔の平均に相当する。

表2は、地震の発生間隔が指数分布に従う場合の適合度と確率をBPT分布と比較して示す。上段は合致する時系列数に関する比較である。第1～第3列は表1の各列に対応し、第2、第3列は歴史地震から求めた重みのため、時系列数が実数表記となっている。ここでは、合致時系列数の比を尤度比と見なす。表2のパラメータ10000組の各組において50万時系列を生成し、地質地形データに合致する時系列数が、合致時系列の項に記載されている。地質地形データのみの場合（第1列）、BPT分布の合致数は20万時系列余り得られ、指数分布の5000時系列余りより明らかに多い。これに対し歴史地震による重みを考慮し、1495年に関東地震が発生していた場合（第3列）には、指数分布の合致時系列数の方がBPT分布の時系列数より僅かに多くなり、指数分布の方がBPT分布より適合度が高いと判断される。従って、明応関東地震の存在が確実な場合には、適合度の高い指数分布を採用して30年確率を算出すると、8.5%を得る。合致時系列数の比を尤度比とみなし（表2中段）、尤度比1:1.16で重み付き平均を行うと約5.3%となる。

前節の議論では、BPT分布のみを仮定していたため明応関東地震の有無による30年確率の不確定性は0.7～1.6%であるとした。発生間隔の分布に起因する不確定性まで考慮すると、明応関東地震の認識論的不確実性は、30年確率の不確定性0.7～5.3%に帰着される。

表2 指数分布とBPT分布との比較

	1	2	3
合致時系列数			
Bpt分布	203152	121455.2	2854.7
指数分布	5237	4781.4	3297.6
尤度比			
指数/Bpt	0.03	0.04	1.16
30年確率(%)			
Bpt分布	0.8	0.7	1.6
指数分布	7.5	7.9	8.5

注) 第1,2,3列は表1の第1,2,3列に対応している。

以上の議論では、地震調査委員会の報告に沿って地形・地質データに基づいた関東地震の確率を算出した。この際、地形・地質データの認識論的および確率論的不確定性が存在しないと仮定している。地形・地質データにおける年代測定の誤差に関しては、地震発生年を区間で指定する段階である程度の誤差が見込まれていると解釈する。ちなみに、区間の両端に ± 10 年の正規分布のばらつきを与え、表2第1例のBPT分布について計算すると、0.82%が0.80%へと若干変化するが、その変化量は本稿での議論より一桁小さい値である。従って、年代測定に起因する確率論的不確定性に関しては、本稿の結論に大きな影響を与えないといえる。

一方、離水地形から読み取られた地震発生時期に関する認識論的不確定性については議論の余地が残されている。1495年の明応関東地震の存在を前提とすると、先の議論では地質・地形データを同時に説明するために、指数分布の発生間隔が期待された。これは、地質・地形データにおける認識論的不確定性がないとしたために導かれた結果である。明応関東地震が存在すれば、歴史地震はほぼ200年の間隔で発生していることになる。この場合、関東地震は規則的に発生しているが離水地形として痕跡が残らない地震が混じっていたとの解釈も可能である。この点に関する議論は本稿の目的を逸れるものであり、今後の研究に期待したい。

4. まとめ

相模トラフ沿いに発生するM8クラス関東地震発生確率の不確定性について検討した。長期評価報告書では、地形・地質データに基づいて確率値が算出されているが、地形・地質データと歴史地震の統合による確率値の算出を提案した。これによると、歴史地震として1495年明応関東地震が存在する場合には平均的確率値が0.7%から1.6%に増加した。また、長期評価報告書では関東地震の発生間隔を先験的にBPT分布に従うとしているが、指数分布を用いて適合性を比較した。その結果、1495年明応関東地震が存在する場合には、BPT分布より指数分布の方が適合度は高く、指数分布に基づく30年確率は8.5%に達する。尤度比を用いて重み付き平均を行うと、明応関東地震の認識論的不確定性によって、関東地震の30年確率は0.7～5.3%となる。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：相模トラフ沿いの地震活動の長期評価（第二版）、2014年、81pp.
- 2) 宋倉正展、原口強、宮内崇裕：房総半島南西部岩井低地の離水海岸地形からみた大正型関東地震の発生年代と再来間隔、地震第2輯、53、2001年、pp.357-372.
- 3) 宋倉正展、鎌滝孝信、高田圭太、鈴木敬一、岡村行信：房総半島南西部における離水浜堤列の調査－大正型関東地震の発生年代の推定－、活断層・古地震研究報告、第5号、2005年、pp.51-68.
- 4) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測地図2014年版～全国の地震動ハザードを概観して～、2014年、449pp.
- 5) Shimazaki, K, Kim, H. Y., Chiba, T., and Satake, K.: Geological evidence of recurrent great Kanto earthquakes at the Miura Peninsula, Japan, J. Geophys. Res., Vol.116, B12408, doi:10.1029/2011JB008639, 2011.
- 6) Parsons, T.: Monte Carlo method for determining earthquake recurrence parameters from short paleoseismic catalogs: Example calculations for California, J. Geophys. Res., Vol.113, B03302, doi:10.1029/2007JB004998, 2008.
- 7) Akaike, H.: A Bayesian extension of the minimum AIC procedure of autoregressive model fitting, Biometrika, 66, 1973, pp.237-242.
- 8) Rhoades, D.A., Van Dissen, R.J. and Dowrick, D.J.: On the handling of uncertainties in estimating the hazard of rupture on a fault segment. J. Geophys. Res., 99, B7, 1994, pp.13701-13712.
- 9) Imoto, M. and Fujiwara, H.: Long Term Probability of a Magnitude 8 Kanto Earthquake Along the Sagami Trough, Central Japan, Earth Planets Space, Vol.64, 2012, pp.e17-e20.

(受理：2015年3月27日)

(掲載決定：2015年10月5日)

Long-term Probability of the Kanto M8 Earthquake along the Sagami Trough, Central Japan

IMOTO Masajiro ¹⁾, MORIKAWA Nobuyuki ²⁾ and FUJIWARA Hiroyuki ³⁾

- 1) Principal Research Fellow, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Sc.
- 2) Member Senior Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Sc.
- 3) Member Director, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Sc.

ABSTRACT

This paper discusses the uncertainty of the long-term probability of the Kanto M8 earthquake along the Sagami trough, central Japan, which has been reported by Earthquake Research Committee, the Headquarter for Earthquake Research Promotion. First, we propose a new method to use of a historical Kanto earthquake sequence in estimating the probability based on simulated earthquake sequences generated with the Brownian Passage Time distribution to match geological and geographical evidence. Next, we examine earthquake sequences generated with the Poisson distribution. Results suggest that the epistemic uncertainty of the Meio Kanto earthquake leads to an uncertainty of 0.7% to 5.3% for 30 yr probability, where the Poisson distribution becomes more likely than the BPT distribution for the 1495 Meio earthquake being one of Kanto M8 earthquakes.

Keywords: Kanto M8 Earthquake, Probability, Uncertainty, BPT distribution, Poisson distribution