

地震の発生確率（Ⅱ）

2012年 9月 30日

産総研 梅田康弘

はじめに

前回の基礎講座「地震の発生確率（Ⅰ）」（4月24日の）の続きです。前回は地震調査研究推進本部が行っている地震発生確率についてご説明し、発生確率の求め方をお話ししました。今回は発生確率を求める際の条件などについてご説明し、確率予測の問題点についてお話しします。

8. 酔っ払いのモデル → BPT 分布と更新過程

BPT とは **Brownian Passage Time** の略である。気体の分子運動の記述に使われているモデルで「ブラウンさんの酔歩モデル」とも言われている。ブラウンさんが酔っ払って家に帰ろうとしているが、酔っているので時々道を外れる。外れても元の道に戻ってくるのだが、外れてから戻ってくるまでの時間は、長い時もあれば短い時もある。こういう時間（**Passage Time**）のばらつきを説明するモデルである。

プレート境界の地震（活断層においても同様に弾性反発による地震）は、短い間隔で起こる事もあるが長い時もある。酔っ払ったブラウンさんがもとの家路に戻るのと同じであり、この分布が採用された。他の、例えば対数正規分布、ガンマ分布などの確率密度関数も、前回の講座「地震の発生確率（Ⅰ）」の図2の下に描いた曲線とだいたい似たりよったりである。条件確率の説明で述べたように、ある年まで地震が起こらなかったという条件を入れるため、地震発生確率は毎年変化する。免許の更新と同じように、毎年更新されるので「**更新過程**」と呼ばれる。そのため調査委員会では毎年1月1日に地震発生確率を発表している。もっとも南海トラフ沿いの地震のように年々確率が上がっている場合はともかく、2000年、3000年に1度の内陸活断層についての確率を示す数値は1年やそこらではほとんど変化しない。

9. 時間予測モデル

BPT 分布では（対数正規分布やガンマ分布も）発生年や発生間隔だけを取り入れ、地震の大きさは考慮していない。ということは、この分布を使うには予め地震の大きさを決めておかななくてはならない。南海地震の場合であれば M8.4 程度の地震とか、上町断層であれば M7.5 程度と言ったように、最大級の地震の大きさを決める。このことはそのプレート境界あるいは断層には固有の大きさの地震が繰り返し発生するという「**固有地震**」説に準拠していることになる。果たしてそういうものだろうか、大いに疑問が残る。

南海トラフで発生した過去の地震には明らかに大きさの違いがある。図 7 は室戸岬の近くにある室津港での地震毎の隆起・沈降を示したもので、横軸は西暦である。ハッキリわかっているのは濃い黒で示した宝永、安政、昭和の 3 回の隆起量であり、あとは沈降の勾配が同じと仮定して描いてある。こういう描き方をすると次の南海地震は、いちばん右の点線で示した線と、年数を示す横軸との交点、つまり西暦 2036 年頃が次の南海地震発生時となる。こういうモデルは時間を予測できるので「時間予測モデル (Time Predictable Model)」と呼ばれており、いちおう地震の大きさ (実際には地震時の隆起量だが) を考慮した事になる。このモデルに従うと次の南海地震は 1946 年の前回の地震から 90 年後ということになる。発生の月まで考慮すると 90.1 年となり、この値が 30 年確率を求める際に採用されている μ の値である。この $\mu = 90.1$ を用いて 30 年確率を求めると図 8 の下のグラフになり、これが地震調査委員会から発表されている南海地震が 30 年以内に発生する確率を表すグラフである。2012 年 1 月には 60% に達している。

時間予測モデル (Time Predictable Model) を取り入れる

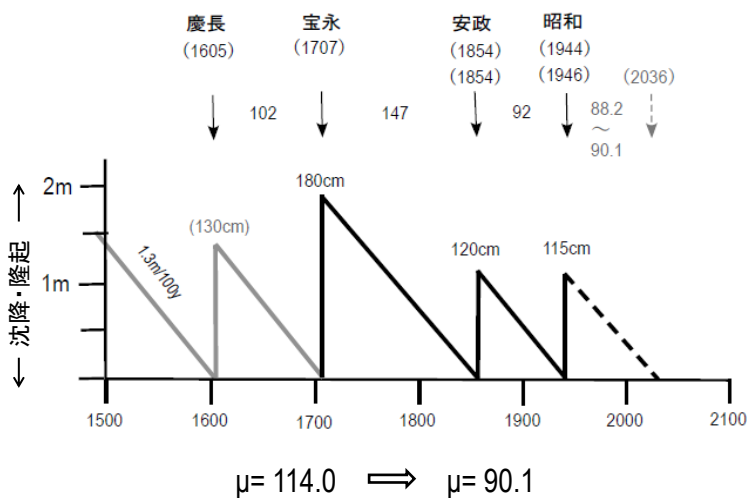


図 7

図 4 では 10 年以内に発生する確率を求めたが、2020 年になっても、10 年以内に発生する確率は 9% であった (正確には前回の南海地震から 80 年後から 90 年の間を計算したので、2026 年から 2036 年の間に発生する確率)。なぜこんなに違いが出るのか。図 4 と図 8 の上の確率密度の影を付けた部分を比べるとよくわかる。図 4 の影の面積に比べると、図 8 のそれは圧倒的に大きい。30 年確率では影の部分の面積がそれより右の面積の倍以上 (60%) を占めているからである。もう一点は、図 4 の場合は発生間隔の平均値として $\mu = 114$ 年を採用しているが、図 8 では時間予測モデルを採用し、 $\mu = 90.1$ 年と短くしたため

ある。

地震調査委員会では「知りうる情報を可能な限り取り入れた」として、時間予測モデルを導入したが、導入できたのは南海地震くらいではないだろうか。いずれにせよ、現在発表されている地震発生確率はもっとも確率が高い場合である。

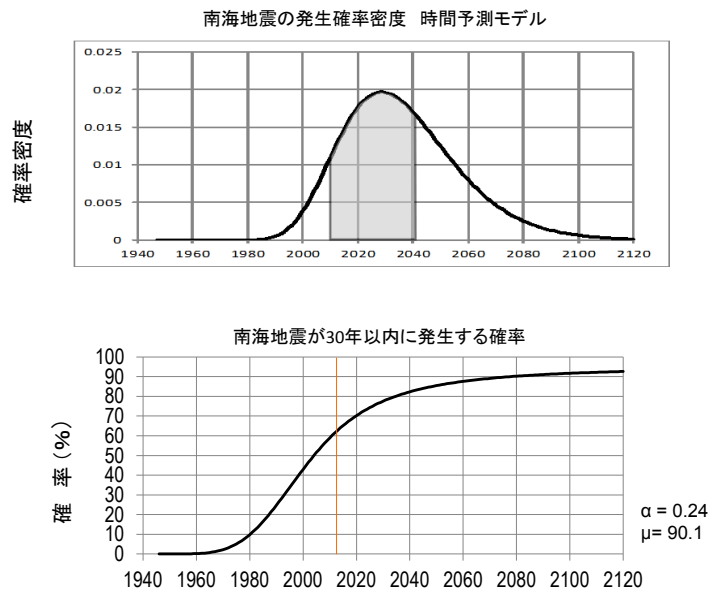


図 8

10. 微妙な末広がり → α について

BPT 分布の α は分布のばらつきを表すものであり、図 3 の頻度分布から決められる。分布がばらついていると確率密度の曲線は裾野が広がったなだらかな山型になるし、逆にばらつきが少ないと急峻な山型になる。 α が大きいほどなだらかな山型になり、逆に小さいほど急峻な山型になる。たくさんのデータがあれば、それ自体で α を決める事ができるが、南海地震でさえデータ数は少ない。そこで調査委員会では、いろいろな断層での地震発生間隔を重ね合わせた結果について α を求め、尤もらしい値として $\alpha = 0.24$ を採用した。

図 2～図 4 の BPT 分布は左右非対称である。これは BPT 分布の特徴であり、 α が大きくなるに従って全体としてなだらかな山型になるが、同時に右側の裾がよりいっそう広がり、左側がやや急峻になる。右側の裾野の広がり具合は、図 3 で、C の面積になるので、発生確率を与える $b/(b+c)$ に微妙な影響を及ぼす。BPT 分布の場合は、ちょうどいい具合に C の面積が減って行くので、発生確率は時間が経過しても 100% に近づいていくが、対数正規分布だと、発生確率はあるピーク時を過ぎると小さくなってしまう。そういう理由もあって調査委員会は BPT 分布を採用している。採用の理由はこちらが本音だろう。

1 1. 活断層の地震発生確率

地震発生は BPT 分布に従うものとし、ばらつき具合の指標 (α) も決めてしまうと、あとは地震発生間隔の平均値と最後に発生した年の、ふたつがわかれば確率曲線が描け、確率予測ができる。極端な言い方をすれば、2 回の地震発生年がわかれば確率曲線が描けることになる。地震調査委員会では、主要な 110 の活断層について発生確率を求めているが、なかには地震歴が一回しかわからない場合も少なくない。その場合でも断層のトレンチ調査などから図 9 のような変動速度を決め、確率曲線を求めている。その背景には、その断層では固有の規模の地震が繰り返し起こっているという「固有地震」説がある。

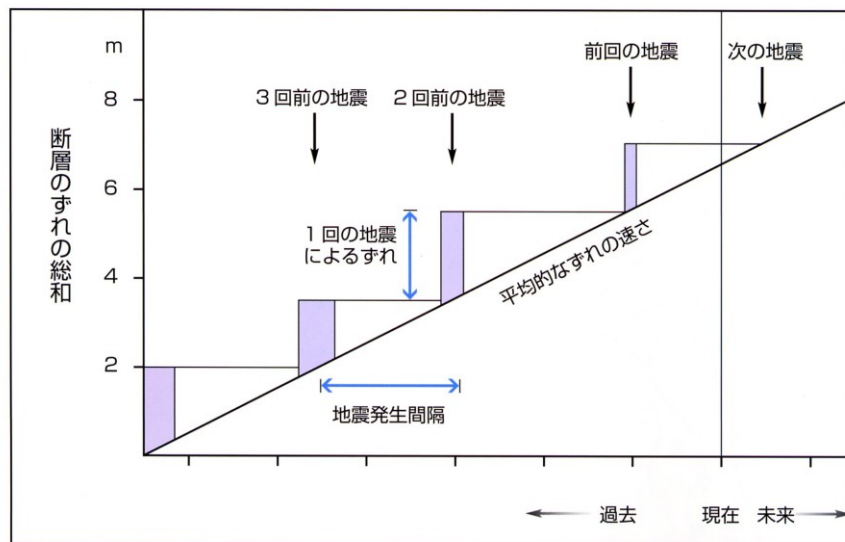


図 9

例えば上町断層帯では M7.5 の地震が 30 年以内に発生する確率は 2%~3%と調査委員会では発表している。M7.5 は全長 42 km の断層が一挙にずれた場合の地震規模であり、これが上町断層帯の固有地震とされている。しかし断層帯は 5 つの断層の連なりであり、そのひとつに大阪市内を通る上町断層がある。上町断層“帯”ではなく上町断層だけの長さをはっきりしないが仮に 10km とすると、この断層で発生する地震規模は M6.5 程度である。この規模でも都市直下では相当の被害が予想されるが、M6.5 は M7.5 が起こる回数の 10 倍起こる。こういったことは調査委員会の発生確率には考慮されていない。

1 2. 地震はデタラメに起こっているのでは。→ ポアソン過程 (ポアソン分布)

前節までは、ある特定の断層またはプレート境界での地震を想定したが、ポアソン過程では、ある地域 (関東地方といったようにかかなり広い範囲) で、地震はランダムに起こっ

ているものと仮定する。ランダムとは時間的にも空間的にも規則性がなく、デタラメに起こるという意味であり、BPT 分布で述べたような条件確率は適用されず、地震発生確率は時間に対してはいつも同じである。つまり今年も来年も更新されることなく同じ確率である。宝くじで言えば、毎年同じ宝くじを発売しているようなものである。

ある地域で、ある大きさの地震がランダムに起こっているとする。ある年数内 ($\Delta \mu$) にその地震の起こる確率 (P) は、

$$P = 1 - e(-\Delta \mu / \mu)$$

で表される。 μ は地震の平均発生間隔である。“e” は exponential の頭文字で、exp とも表現され、2.718 である。P は 1 マイナス e の ($-\Delta \mu / \mu$) 乗なので、計算するには関数計算機能のついた電卓が必要である。

南海地震はランダムに発生しているのではないが、BPT 分布と比較して理解するため、図 10 にポアソン過程として 10 年確率と 30 年確率を描いた。平均発生間隔 (μ) は図 4 と同じ 114 年とした。図を見てもわかるように地震発生確率は年と共に変わらず一定であることがわかる。

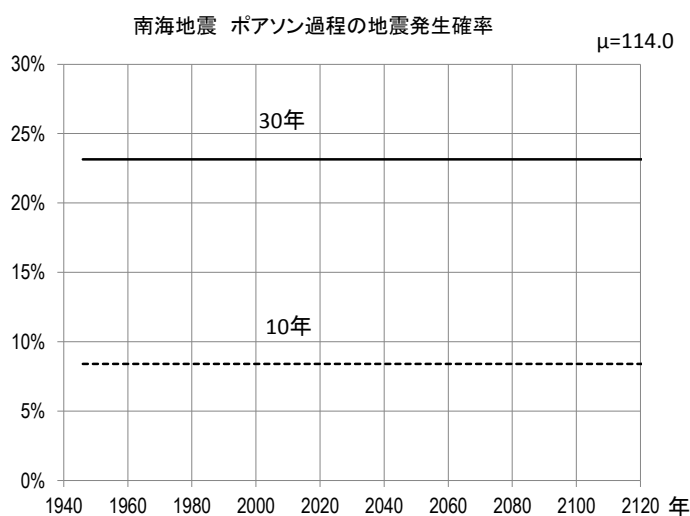


図 10

1.3. プレート境界でもない、断層もわからない関東の地震発生確率

関東南部では相模トラフ沿いに起こる M クラスの関東地震の他に M7 クラスの地震も起きている。前者はフィリピン海プレートと陸のプレート境界で起こるが、後者については震源が地殻内より深いことはわかっているものの、どのプレート境界なのかはわからない。従って、同じプレート境界 (同じ断層面) で繰り返し起きることを前提にしている BPT 過程は使えない。そこで地震調査委員会では、南関東で発生する M7 クラスの深い (30km ~ 80 km) 地震の予測にはポアソン過程を採用した。表 1 に、明治以降に発生した 5 回の地

震を示したが、平均発生間隔は、発生月まで考慮すると 23.8 年（*）である。前節の式で $\mu = 23.8$ 、30 年確率のばあいは $\Delta \mu = 30$ を代入すると、30 年以内に M7 クラスの地震が発生する確率は 70%となる。この確率 70%が、地震調査委員会が発表している数値である。なお、前節で述べたように、この確率（70%）は年が変わっても変化しない。

*： 調査委員会の採用した平均発生間隔は 1885 年から 2004 年までの 119 年間に 5 回、つまり $119/5 = 23.8$ 年を採用している。前回の基礎講座での説明は、G-R 則から推定した平均発生間隔で 54 年間に 11.45 回、つまり 37.4 年と推定したものである。

表 1

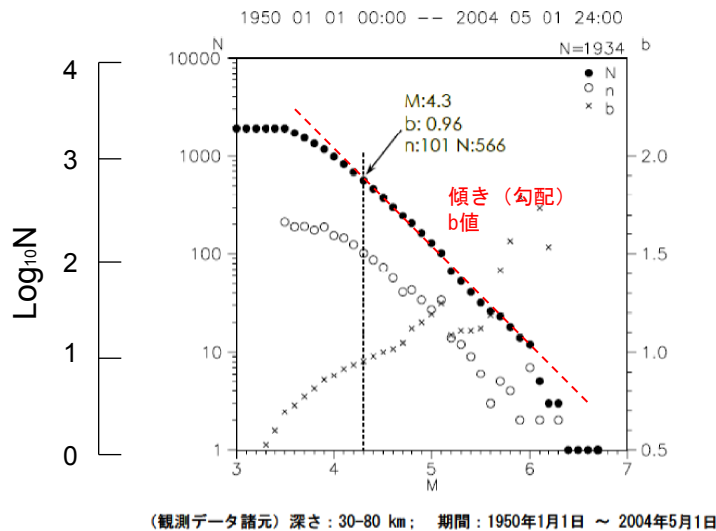
地震発生域	発生年月日	M	発生間隔（年）
東京湾付近	1894/6/20	6.7	
茨城県南部	1895/1/18	7.2	1
茨城県南部	1921/12/8	7.0	27
浦賀水道付近	1922/4/26	6.8	1
千葉県東方沖	1987/12/17	6.5(Mw)	66
		平均の M:6.84	平均 23.8 年

1 4. 地震発生間隔を G-R 則で検定

前節の関東南部の少し深いところで起こっている地震の発生間隔を見ると 1 年～66 年までばらついている。発生月まで入れるともっとばらつきは大きい。これでもって平均発生間隔が 23.8 年というのは余りにもばらつきが大きい。そこで地震調査委員会ではグーテンベルグ・リヒターの法則（G-R 則）で発生間隔の妥当性をチェックした。1 月 31 日の基礎講座の 8 図と同じ図を図 1 1 に再掲した。グーテンベルグ・リヒターの式 $\text{Log } N = a - bM$ に、図 1 1 の中にある、M4.3 の時、地震総数 N は 566 回で、傾き b 値は 0.96 を代入して a を求めると、 $a = 6.88$ となる。従って G-R の式は $\text{Log } N = 6.88 - 0.96M$ となるので、図 1 1 にある M の平均値 6.84 を代入すると、 $N = 2.058$ 回が得られる。これは 1950 年から 2004 年の 54 年間に M6.84 の地震が起こった回数であるから、 $54 \text{ 年} / 2.058 \text{ 回} = 26.2 \text{ 年} / 1 \text{ 回}$ 、つまり約 26 年に 1 回、M6.82 の地震（調査委員会では M7 クラスの地震と呼んでいる）が起こっていることになる。このように G-R 則から求めた M7 クラスの地震が発生する年数は前節で求めた平均発生間隔 23.8 年に近いものであり、発生頻度から求めた発生間隔の検定としている。

1 5. 発生頻度から地震発生の可能性を調べる.

小さな地震がたくさん発生しているのに、大きな地震はまだ起こっていないという場合に、G-R 則を使って大きな地震の発生間隔を割り出せば、ポアソン過程から大地震の発生確率を求める事が出来る。東大地震研究所が発表した発生確率はこの方法である。地震研究所は実際のデータを公表していないので、仮に地震の発生数が 10 倍に増え、M4.3 の N は 5660 回だとすると、a は 7.88 となり、54 年間に 14.48 回、つまり 3.73 年に 1 回の割合で M7 クラスの地震が起きる事になる、この 3.73 が 12 節の中の式の μ の値である。 $\Delta \mu = 4$ 、つまり 4 年以内に M7.0 が起こる確率 P を求めると $P = 0.66$ 、つまり 66% となる。地震研究所が発表した 70% に近い数字である。



地震調査推進本部HPより 海溝型地震の長期評価
 相模トラフ沿いの地震活動の長期評価について
 図7 その他の南関東の地震の評価領域とその領域におけるM別度数分布

図 1 1

このようにして、ある広い範囲で、大きな地震から小さな地震まで時間的にもランダムに起こっている場合、G-R 則を用いるとある大きさ、例えば M7 の地震が発生する頻度 (M7 が何年に 1 回の割合で起こるか) を計算出来る。また、ポアソン分布を仮定すれば、その計算結果を使って、地震発生確率を求める事も出来る。

1 5. 果たしてそうであろうか. G-R 則の適用

近畿地方では和歌山 (和歌山市, 海南市, 有田市附近) のように日常的に小さな地震が起きているところがある。和歌山ほどではないが、丹波山地でもたくさんの微小地震が起

きている。こういう地域に G-R 則を適用して大きな地震の発生確率を求める事は適当ではない。日常的に地震が発生しているところは、地殻のストレスも日常的に発散していて、大地震は起こりにくいと考えられる。大地震はむしろその周辺のストレスを発散していない領域で起こる可能性がほうが高い。従って G-R 則を応用する際には、近畿地方全体というくらい広い領域を対象とするべきである。

また時間的にも長期間とる必要がある。大地震が発生すると、余震とは別に、少し離れたところで地震活動が一時的に活発化することがある。2011 年東北地方太平洋沖地震のあと、関東地方で地震活動が活発化したし、1995 年兵庫県南部地震のあとは近畿北部の丹波山地での地震活動が活発化した。そういう時に G-R 則を適用すると、当然短い期間で大きな地震の発生が予測される。従って発生確率も大きくなる。しかし誘発地震や一時的な群発地震の場合は、日にちが経つにしたがって地震の数は減っていく。東大地震研究所は 2011 年 9 月の時点での発生確率だったが、年が明けて 2012 年 1 月の時点で求めた発生確率は小さくなっていた。

ある比較的狭い地域に限って b 値の時間変化を求めるとか、時間又は地震の総数を限定して地域ごとの b 値の違いを調べるなどの研究には G-R 則はよく用いられる。しかし大地震の予測にはどのくらいの領域が適当か、どのくらいの時間または地震の総数が必要かはわかっていない。

参考資料

地震調査研究推進本部 (<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>)

報告書・会議資料から「長期的な地震発生確率の評価手法について」

(<http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/01b/index.htm>)