

11 – 5 最新の活断層カタログに基づく BPT 予測

BPT model forecast based on the recent paleoearthquake catalog

統計数理研究所

The Institute of Statistical Mathematics

地震調査研究推進本部（地震本部）による日本に分布する活断層の調査は現在も進められており、長期評価が開始された当初¹⁾と比べてその内容は大きく更新されている。本報告では 2017 年 5 月 1 日時点の地震本部による最新の内陸古地震カタログに対して、地震本部と同じく BPT 分布更新過程を当てはめ、精密な尤度評価を用いて BPT 分布パラメータの推論および長期地震発生確率の評価を行った。

ある活断層における調査年代 $S \sim T$ 中に発生した地震活動年代の系列を $S < t_1 < \dots < t_n < T$ とおき、その活動間隔が平均 μ 、ばらつき α の BPT 分布に従うことを仮定したときの尤度を $L_{[S,T]}(\mu, \alpha | t_1, \dots, t_n)$ と表す。歴史地震を除いて、多くの地震活動年代は 1 時点に特定できず、地震痕跡周辺の堆積物の炭素年代などによる制約条件からしか推測することができない。そのような不確定な地震活動年代を、その確率密度関数 $\psi(t_1, \dots, t_n)$ により表現したとき、厳密な尤度は次のような不確定な地震活動年代に関する多重積分で表される²⁾。

$$L_{[S,T]}(\mu, \alpha | \psi) = \int_S^T \dots \int_S^T L_{[S,T]}(\mu, \alpha | t_1, \dots, t_n) \psi(t_1, \dots, t_n) dt_1 \dots dt_n \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N L_{[S,T]}(\mu, \alpha | t_1^{(j)}, \dots, t_n^{(j)}). \quad (1)$$

上式の最右辺はモンテカルロ法と呼ばれる多重積分の近似計算手法であり、確率密度関数 $\psi(t_1, \dots, t_n)$ からシミュレートした地震活動年代の乱数 $t_1^{(j)}, \dots, t_n^{(j)} (j=1, \dots, N)$ の各々について算出した尤度を平均化したものである。シミュレーションサンプルの数 N を大きくするほど、近似精度は高くできる。また、パラメータ μ, α が与えられたときの将来期間 $T \sim T + \Delta$ における地震発生確率についても、同様に次式のように評価することができる。

$$F_\psi(\Delta | \mu, \alpha) = \frac{\int_S^T \dots \int_S^T L_{[S,T]}(\mu, \alpha | t_1, \dots, t_n) \psi(t_1, \dots, t_n) F_{T-t_n}(\Delta | \mu, \alpha) dt_1 \dots dt_n}{L_{[S,T]}(\mu, \alpha | \psi)} \\ \approx \frac{\sum_{j=1}^N L_{[S,T]}(\mu, \alpha | t_1^{(j)}, \dots, t_n^{(j)}) F_{T-t_n^{(j)}}(\Delta | \mu, \alpha)}{\sum_{j=1}^N L_{[S,T]}(\mu, \alpha | t_1^{(j)}, \dots, t_n^{(j)})}. \quad (2)$$

ただし、 $F_{T-t_n}(\Delta | \mu, \alpha)$ は最新活動年代から $T - t_n$ 年経過時点での、将来 Δ 年間における地震発生確率である。上式は、シミュレートされた地震活動年代ごとに評価した将来地震発生確率について、各々の尤度によって重み付き平均をとったものと解釈することができる。

第 1 表に示した内陸部に位置する直近 3 回以上の地震活動年代が判明している 33 活動区間の地震系列に対して、BPT 分布更新過程を当てはめ、活動区間ごとに異なる平均活動間隔 μ と、全活動区間で共通のばらつき α を最尤法により推定した。ただし、不確定な地震活動年代に対して、地

震本部が与えた年代幅を範囲とする一様分布をその確率分布として与え、以下3つの方式をそれぞれ用いてパラメータ推定のための尤度計算および将来地震発生確率の評価を行った。

方式1：式(1),(2)の多重積分を1年刻みの数値積分で計算。

方式2：式(1),(2)の最右辺（モンテカルロ法）で計算（シミュレーション数 $N = 10$ 万）。

方式3：不確定な地震活動年代を代表値（分布の期待値）に置き換えて計算した近似尤度と最新活動の年代幅を考慮して計算した将来地震発生確率。

まず、共通のばらつきパラメータ α の変化に対する尤度の変化を第1図、そこから求まる α の最尤推定値および最大(対数)尤度を第2表に示した。方式1と方式2では尤度がほぼ一致しており、 α の最尤推定値も同じ0.41という値が得られたが、方式3による α の最尤推定値は0.46となり他方式とはやや異なる推定結果となった。地震本部の長期評価で適用されている $\alpha = 0.24$ という値は、第1図に黒縦破線で示したように本解析の最尤推定値と比べて遥かに当てはまりが悪いことがわかる。また、第3表に示した活断層の活動区間ごとの平均活動間隔 μ の最尤推定値を比較すると、ここでも方式1と方式2の結果は0.1%以内の差でほぼ一致しており、方式3による平均活動間隔は活動区間によるが他方式と0～10%程度の差がある。

第4表には、第2表および第3表に示したパラメータ推定値を用いて、各方式で将来30年間の地震発生確率を評価した結果を示している。地震本部の長期評価と比較すると、三浦半島断層群主部：武山断層帯、糸魚川-静岡構造線活断層系：中北部、阿寺断層帯主部：北部といった地震本部の確率予測が高い区間において、本解析による確率予測が大きく下回っている。逆に、阿寺断層帯主部：南部や別府湾-日出生断層帯：東部のように、地震本部の確率予測は0であるにも関わらず、本解析では僅かながら地震危険があることを示す活動区間もある。いずれも、適用したばらつきパラメータ α の推定値の違いが主に寄与したものと考察される。また、方式1と方式2はほぼ同じ確率予測と与えているが、方式3は阿寺断層帯主部：南部、有馬-高槻断層帯、別府湾-日出生断層帯：東部などの最新活動後の経過率が低いケースにおいて、主に α の推定値の違いにより他方式より数倍大きい確率を与える結果となった。以上から、方式2のモンテカルロ法による計算精度は通常の数値積分と比べてほとんど遜色がないが、方式3のように活動年代を代表値に置き換える方法は異なる結果を与えることに注意すべきである。（野村俊一、尾形良彦）

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部(2001) 長期的な地震発生確率の評価手法について
- 2) Ogata(1999) *J. Geophys. Res.*, **104**, 17,995-18,014.

第1表 本解析で用いた地震本部の活断層カタログ(2017年5月1日時点)

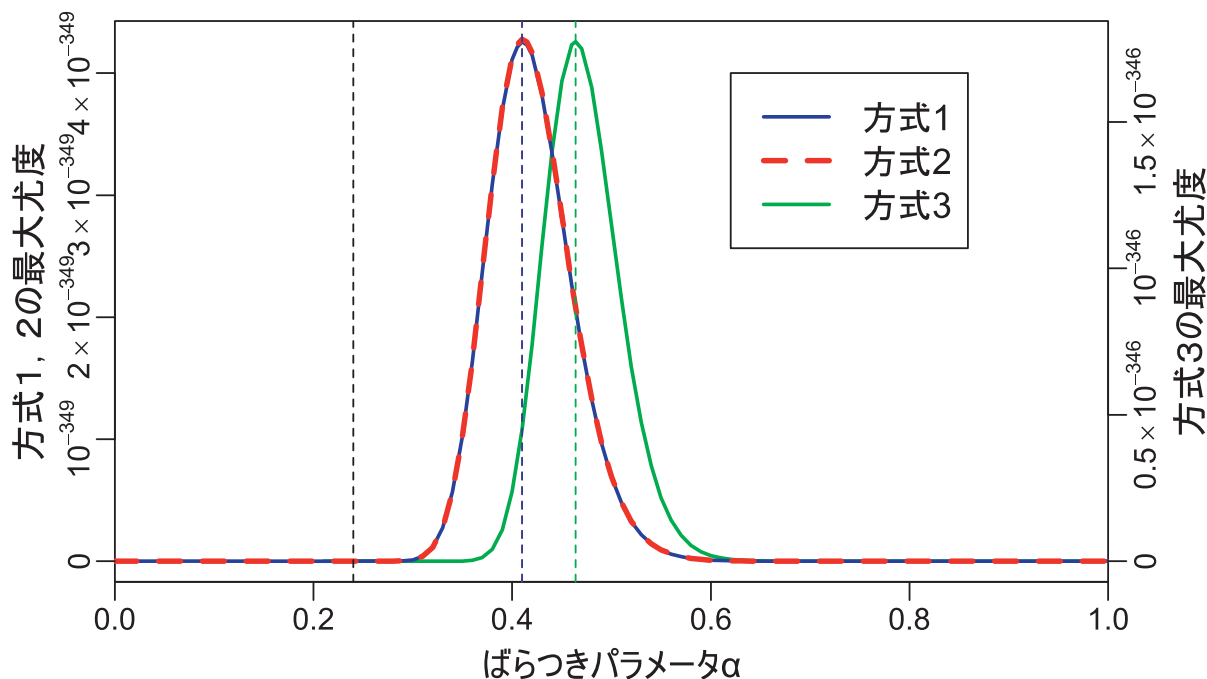
Table 1 Paleoearthquake catalog from HERP as of 5/1/2017 used in analysis

活動区間名	発生時刻 t1	発生時刻 t2	発生時刻 t3	発生時刻 t4	発生時刻 t5	発生時刻 t6	初期時点 S
函館平野西縁断層帯	20000-50000年前	20000-50000年前	14000年前-1611A.D.				50000年前
能代断層帯	6000年前-1694A.D.	6000年前-1694A.D.	1694A.D.				6000年前
山形盆地断層帯:北部	8800-9500年前	5800-5900年前	1600-3900年前				t1と同じ
庄内平野東縁断層帯:南部	7900-9500年前	3000-7900年前	3000年前-1780A.D.				t1と同じ
会津盆地東縁断層帯	16000-21000年前	7600-11000年前	2600-3000年前				t1と同じ
楡形山脈断層帯	8700-11000年前	5600-6800年前	2600-3200年前				t1と同じ
関谷断層	5800-8400年前	3800-5100年前	1300-1700A.D.				t1と同じ
深谷断層帯	31000-45000年前	16000-24000年前	5800-6200年前				t1と同じ
神縄・国府津-松田断層帯	2600-4500年前	2600-4500年前	2400年前-100A.D.	1100-1350A.D.			4500年前
三浦半島断層群主部:武山断層帯	5400-5600年前	2300-3100年前	1900-2300年前				t1と同じ
北伊豆断層帯	5600-6200年前	3100-5600年前	2800年前-500A.D.	838-1300A.D.	1930A.D.		t1と同じ
糸魚川-静岡構造線活断層系:中北部	5900-7200年前	3100-3300年前	2000-2300年前	1600-1700年前	1000-1500年前	800-1200年前	t1と同じ
糸魚川-静岡構造線活断層系:中南部	11000-15000年前	6000-8000年前	5000-5200年前	2900-3200年前	2300-2400年前	900-1300年前	t1と同じ
糸魚川-静岡構造線活断層系:北部	4900-5300年前	3500-4100年前	1900-3100年前	1000-1300年前			t1と同じ
木曾山脈西縁断層帯主部:北部	20000-28000年前	8000-20000年前	3000-4300年前	1200-1300A.D.			t1と同じ
跡津川断層帯	9300-11000年前	7500-8100年前	4000-5300年前	4300年前-1858A.D.	1858A.D.		11000年前
牛首断層帯	11000-15000年前	4900-5600年前	1000-1200A.D.				t1と同じ
伊那谷断層帯主部	11000-13000年前	5100-6700年前	1300-1700A.D.				t1と同じ
阿寺断層帯主部:北部	7000-8000年前	6500-6800年前	3000-3400年前				9000年前
阿寺断層帯主部:南部	8800-9000年前	6000-6500年前	4100-5900年前	3200-4400年前	600-1500A.D.	1586A.D.	11000年前
恵那山-猿投山北断層帯	22000-34000年前	20000-21000年前	5400-7600年前				t1と同じ
邑知瀧断層帯	3700-4900年前	2400-3900年前	3200年前-900A.D.				t1と同じ
温見断層:北西部	6800-7300年前	4000-6000年前	3900年前-600A.D.	1891A.D.			t1と同じ
根尾谷断層帯	4300-7300年前	4500年前-1891A.D.	1891A.D.				t1と同じ
梅原断層帯	28000-31000年前	22000-24000年前	1891A.D.				t1と同じ
有馬-高槻断層帯	1000B.C.	710-1333A.D.	1596A.D.				t1と同じ
京都西山断層帯	9400-13000年前	6300-8400年前	2400年前-200A.D.				t1と同じ
淡路島西岸区間	3700-5100年前	2000年前-400A.D.	1995A.D.				t1と同じ
中央構造線断層帯(石鎚山脈北縁)	5100-5400年前	3000-3300年前	1500-1600A.D.				t1と同じ
菊川断層帯(中部区間)	14000-15000年前	5900-13000年前	3300-5900年前				t1と同じ
別府湾-日出生断層帯:東部	5800-7300年前	5300-6000年前	3600-4600年前	2200年前-300A.D.	1596A.D.		t1と同じ
大分平野-由布院断層帯:東部	6700-7300年前	3400-4500年前	2200年前-600A.D.				t1と同じ
出水断層帯	16000-32000年前	16000-32000年前	9100-16000年前	7300-2400年前			32000年前

第2表 ばらつきパラメータ a の最尤推定値 (標準誤差) と最大 (対数) 尤度

Table 2 Maximum likelihood estimates of common aperiodicity parameter a with their standard errors and maximum likelihoods with their logarithms

	方式1 (数値積分)	方式2 (モンテカルロ法)	方式3 (代表点近似)
ばらつき a の最尤推定値 (標準誤差)	0.41 (0.04)	0.41 (0.04)	0.46 (0.03)
最大尤度 (最大対数尤度)	4.26×10^{-349} (-802.153)	4.28×10^{-349} (-802.149)	1.76×10^{-346} (-796.127)



第1図 共通のばらつきパラメータ a を固定したときの各方式で算出した平均パラメータ (平均活動間隔) μ に関する最大尤度. 方式1と2の縦軸は左側, 方式3の縦軸は右側にとっている. 黒, 青, 緑の縦破線はそれぞれ $a = 0.24, 0.41, 0.46$ を表す.

Fig. 1 Maximum likelihoods with respect to mean recurrence times μ with fixed common aperiodicity parameter a calculated by respective methods. Axis for Method 1 and 2 is shown in the left side while axis for Method 3 is shown in the right side. Black, blue and green vertical dashed lines represent $a = 0.24, 0.41$ and 0.46 , respectively.

第3表 平均パラメータ（平均活動間隔） μ の最尤推定値（年）

Table 3 Maximum likelihood estimates of mean recurrence times μ (yrs)

活動区間名	方式1	方式2	方式3	地震本部
函館平野西縁断層帯	17547	17554	16597	13000-17000
能代断層帯	2236	2235	2234	1900-2900
山形盆地断層帯:北部	3823	3822	3963	2500-4000
庄内平野東縁断層帯:南部	3786	3783	3995	2500-4600
会津盆地東縁断層帯	8144	8146	8630	6300-9300
橢形山脈断層帯	4045	4047	4276	2800-4200
関谷断層	3498	3501	3581	2600-4100
深谷断層帯	16335	16340	17758	10000-25000
神縄・国府津-松田断層帯	1150	1151	1126	800-1300
三浦半島断層群主部:武山断層帯	1956	1955	1748	1600-1900
北伊豆断層帯	1461	1461	1516	1400-1500
糸魚川-静岡構造線活断層系:中北部	889	889	873	600-800
糸魚川-静岡構造線活断層系:中南部	1931	1931	2064	1300-1500
糸魚川-静岡構造線活断層系:北部	1501	1501	1586	1000-2400
木曾山脈西縁断層帯主部:北部	6659	6659	7148	6400-9100
跡津川断層帯	2517	2517	2609	2300-2700
牛首断層帯	6068	6066	6413	5000-7100
伊那谷断層帯主部	6158	6159	6367	5200-6400
阿寺断層帯主部:北部	2576	2576	2388	1800-2500
阿寺断層帯主部:南部	1763	1763	1657	1700
恵那山-猿投山北断層帯	12669	12668	11963	7200-14000
邑知瀧断層帯	1712	1712	1633	1200-1900
温見断層:北西部	2415	2416	2554	2200-2400
根尾谷断層帯	2834	2834	3061	2100-3600
梅原断層帯	13460	13462	13311	14000-15000
有馬-高槻断層帯	1256	1256	1186	1000-2000
京都西山断層帯	4895	4895	5090	3500-5600
淡路島西岸区間	2264	2264	2387	1800-2500
中央構造線断層帯(石鎚山脈北縁)	2576	2576	2636	1000-2500
菊川断層帯(中部区間)	5844	5843	6232	4100-5900
別府湾-日出生断層帯:東部	1674	1673	1616	1300-1700
大分平野-由布院断層帯:東部	2933	2933	3048	2300-3000
出水断層帯	8160	8160	8209	8000

第4表 2017年以降30年間の確率予測 (%)

Table 4 Probability forecast (%) of the next 30 years from 2017

活動区間名	方式1	方式2	方式3	地震本部
函館平野西縁断層帯	0.111	0.111	0.109	0-1
能代断層帯	0	0	0	0
山形盆地断層帯:北部	1.067	1.068	0.990	0-8
庄内平野東縁断層帯:南部	0.448	0.451	0.405	0-6
会津盆地東縁断層帯	0.045	0.045	0.061	0-0.02
櫛形山脈断層帯	1.149	1.148	1.016	0.3-5
関谷断層	0	0	0.001	0
深谷断層帯	0.032	0.032	0.036	0-0.1
神縄・国府津-松田断層帯	3.830	3.827	4.005	0.2-16
三浦半島断層群主部:武山断層帯	3.592	3.595	3.863	6-11
北伊豆断層帯	0	0	0	0
糸魚川-静岡構造線活断層系:中北部	7.373	7.389	7.338	13-30
糸魚川-静岡構造線活断層系:中南部	1.469	1.473	1.392	0.8-8
糸魚川-静岡構造線活断層系:北部	3.403	3.405	2.967	0.008-16
木曾山脈西縁断層帯主部:北部	0	0	0	0
跡津川断層帯	0	0	0	0
牛首断層帯	0	0	0	0
伊那谷断層帯主部	0	0	0	0
阿寺断層帯主部:北部	3.048	3.049	2.955	6-11
阿寺断層帯主部:南部	0.019	0.019	0.104	0
恵那山-猿投山北断層帯	0.175	0.175	0.246	0-2
邑知潟断層帯	3.552	3.560	3.722	2
温見断層:北西部	0	0	0	0
根尾谷断層帯	0	0	0	0
梅原断層帯	0	0	0	0
有馬-高槻断層帯	0.297	0.297	0.764	0-0.03
京都西山断層帯	0.246	0.246	0.288	0-0.8
淡路島西岸区間	0	0	0	0
中央構造線断層帯(石鎚山脈北縁)	0.001	0.001	0.003	0-0.3
菊川断層帯(中部区間)	0.843	0.845	0.731	0.1-4
別府湾-日出生断層帯:東部	0.026	0.026	0.108	0
大分平野-由布院断層帯:東部	1.154	1.158	1.134	0.03-4
出水断層帯	0.367	0.366	0.366	0-1