

# 過去の地震及び活断層情報に基づいた 地震ハザードマップの試算

中尾 吉宏<sup>1</sup>・田村 敬一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地)

<sup>2</sup>正会員 工博 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地の6)

現行の耐震設計基準では、既往の地震ハザードマップを基礎として設定された地域別補正係数により地震動の地域性が考慮されている場合が多い。我が国では歴史資料を含めて過去千数百年程度の地震記録を地震ハザードマップの作成に用いることが可能であるが、活断層で発生する地震の発生間隔が数百年から数千年以上であることを考慮すれば、十分に長い期間の記録が用いられているとは言えない。また、既往の地震ハザードマップの作成ではランダムな位置、時間に発生する地震が一般に想定されているが、活断層やプレート境界では固有の発生位置、発生履歴、規模を持った地震の発生が指摘されている。上記から、本論文では活断層やプレート境界で発生する地震には固有の発生位置、発生履歴及び規模を、それ以外の地震にはランダムな発生位置及び発生時間を想定した地震ハザードマップの試算例を示す。

**Key Words:** active fault, earthquake, seismic hazard analysis, seismic design

## 1. はじめに

我が国では、過去千数百年程度の地震記録が整理されており、それらの記録に基づいて作成された地震ハザードマップ<sup>例えば</sup>が、耐震設計基準における地域性を考慮した設計地震動の設定に活用されている。しかし、活断層に起因する地震の発生間隔が数百年から数千年以上であることを考慮すれば、十分に長い期間の地震記録が地震ハザードマップの作成に用いられてきたとは言えない。また、過去の地震を考慮した地震危険度解析では、ランダムな位置及び時間に発生する地震が一般に想定されるが、活断層やプレート境界では、固有のマグニチュードの地震が固有の場所及び発生間隔で発生することが指摘されている。

このような過去の地震の記録期間に関する実状や、活断層及びプレート境界における地震の発生特性を踏まえれば、地震ハザードマップの作成には、過去の地震記録に加えて活断層やプレート境界で発生する地震を別途考慮することが合理的であると考えられる。

本研究では、過去の地震、活断層及びプレート境界地震を同時に考慮した地震危険度解析手法により、地震ハザードマップの試算を行った。活断層やプレート境界では固有のマグニチュードを有する地震が特定の位置及び発生間隔で発生するものとし、それ以外の地震について

はランダムな位置及び時間に発生するものとして地震ハザードマップを算出した。

## 2. 地震危険度の評価方法

地震危険度の評価では、まず、過去の地震記録、活断層及びプレート境界地震のそれぞれを考慮した解析を行い、次に、その結果を組み合わせることにより、それらを同時に考慮した地震ハザードマップの試算を行った。試算では、最大加速度を対象とした。

### (1) 過去の地震を考慮した地震危険度解析

過去の地震の記録<sup>2,3,4</sup>として解析に用いたのは、震源深さ100km以浅の地震のうち、地震観測網の整備の進展により定常的な地震記録の蓄積がされるようになったと考えられる以下の①、②の地震記録である。図-1に①及び②の地震記録の震央を示す。

①  $M < 6.0$  の地震：気象庁カタログ (1926.1-1996.7)<sup>4</sup>

②  $M \geq 6.0$  の地震：宇津カタログ (1885-1925)<sup>3</sup>、気象庁カタログ (1926.1-1996.7)

ここで、駿河トラフから南海トラフ沿いの地域で発生する大規模な地震（以下、東海・南海地震とする）と相模トラフ沿いの地域で発生する大規模な地震（以下、関東地震とする）は、プレート境界地震として考慮した地

震危険度解析を行うため、①及び②の地震記録から表-1に示す地震を取り除いた。

過去の地震を考慮した地震危険度解析では、我が国及びその周辺を、地震地体構造<sup>9)</sup>等に基づき、地震の発生特性が類似していると考えられる範囲別にサブゾーンとして区切り、各サブゾーン内においては、年平均地震発生回数、マグニチュードの分布特性及び発生し得る最大マグニチュードは一様であるとした。図-1に設定したサブゾーンを、表-2にサブゾーンごとの最大マグニチュードを示す。サブゾーン*i*において、マグニチュード *M* が *m* を超える地震の年平均発生回数 *N<sub>i</sub>[M>m]* [回/年]は Gutenberg-Richter 式：

$$\log N_i [M>m] = a_i - b_i m \quad (1)$$

に従うものとし、サブゾーン *i* 内の地震記録を用いて表-2に示す *a<sub>i</sub>* 値及び *b<sub>i</sub>* 値を算出した。(1)式から、サブゾーン *i* 内の単位面積における年平均地震発生回数 *v<sub>i</sub>* は(2)式のように、また、地震のマグニチュード *M* の確率密度関数 *f<sub>iM</sub>(m)* は(3)式のように表される。

$$v_i = \frac{10^{a_i - b_i M_{iL}}}{A_i} \quad (2)$$

$$f_{iM}(m) = \frac{b_i \exp[-b_i(m - M_{iL})]}{1 - \exp[-b_i(M_{iU} - M_{iL})]} \quad (3)$$

ここに、*A<sub>i</sub>*：サブゾーン *i* の面積、*M<sub>iL</sub>*：サブゾーン *i* において考慮する最小マグニチュード（本検討では *M<sub>iL</sub>*=5 とした。）、*M<sub>iU</sub>*：サブゾーン *i* において発生し得る最大マグニチュード

本試算では、試算地点に生じる地震動の推定には、(4)式で表される距離減衰式<sup>10)</sup>を用いることとした。当該距離減衰式は、*V<sub>s</sub>*≥300m/s 相当の開放基盤上における最大加速度を推定するものである。サブゾーンで発生する地震に(4)式を適用する場合、断面面との最短距離 *R* としては震源距離を用い、震源深さ *H* としては表-2に示したサブゾーン *i* 内の地震記録の平均的な震源深さを用いることとした。

$$\log x = 0.627M + 0.00671H - 2.212 \log(R + 0.35e^{0.65M}) + 1.711 \quad (4)$$

ここに、*x*：最大加速度[gal]、*M*：マグニチュード、*H*：震源深さ[km]、*R*：断面面との最短距離[km]

なお、距離減衰式による推定値のばらつきとして、平準値回りに±2σ（σは標準偏差）のばらつきを考慮することとした。

期間 *T<sub>D</sub>* [年]において最大加速度 *X* が *x* を上回る確率（超過確率）*P<sub>h</sub>[X>x|T<sub>D</sub>]* は(5)式により算出される。

$$P_h [X > x | T_D] = 1 - (1 - \lambda)^{T_D} \quad (5)$$

$$\lambda = \int_{A_{M_L}}^{M_{iU}} \int_{M_L} f_{iM}(m) P_{X_i}[X > x | m, r] \frac{v_i}{A_i} dmds \quad (6)$$

ここに、λ：1年間に解析対象地点に生じる地震動 *X* が *x* を超過する確率、*A*：地震危険度解析で考慮する範囲(6)式の計算では、サブゾーンごとのマグニチュード *M*

の確率密度関数 *f<sub>iM</sub>(m)*、年平均地震発生回数 *v<sub>i</sub>*、面積 *A<sub>i</sub>* を用いる。

表-1 過去の地震記録から取り除いたプレート境界地震

地震名	発生時期	マグニチュード
東南海地震	1944年12月7日	7.9
南海地震	1946年12月21日	8.0
関東地震	1923年9月1日	7.9

表-2 サブゾーンごとに設定した地震の発生特性

サブゾーン	サブゾーン内の地震記録数	最大マグニチュード	震源の平均深さ(km)	a値	b値	年平均地震発生回数(回/年)
21	1572	8.2	40.9	5.12	0.79	15,300
22	2243	8.55	31.8	4.42	0.87	11,200
31	139	7.1	48.4	4.78	0.90	1,900
32	159	7.5	44.3	5.19	0.92	3,830
33	191	7.5	43.6	5.64	1.02	3,410
41	212	7.75	15.4	7.39	1.27	11,100
42	22	7.75	12.7	3.36	0.74	0,435
51	254	8.2	38.6	4.25	0.75	3,080
61	184	7.3	23.1	4.93	0.91	2,310
62	9	7.3	39.3	3.49	0.88	0,160
71	39	8.4	14.6	4.18	0.80	1,530
72	34	8.4	13.9	3.50	0.87	1,370
73	378	7.75	36.5	5.16	0.88	5,680
81	47	8	13.5	5.81	1.12	1,060
82	93	8	24.3	4.59	0.87	1,780
83	189	8	30.1	4.83	0.87	1,940
91	38	7.75	12.1	4.80	0.86	1,000
92	112	7.75	20.2	5.21	0.93	3,850
93	172	7.25	32.6	3.31	0.59	2,270
101	179	8	6.7	5.02	0.89	3,670
102	1	7	0.0	0.00	0.00	0,000
111	22	7	23.8	4.33	0.93	0,477
112	3	7.75	34.3	2.06	0.66	0,056
121	303	7.3	45.8	5.12	0.92	3,250

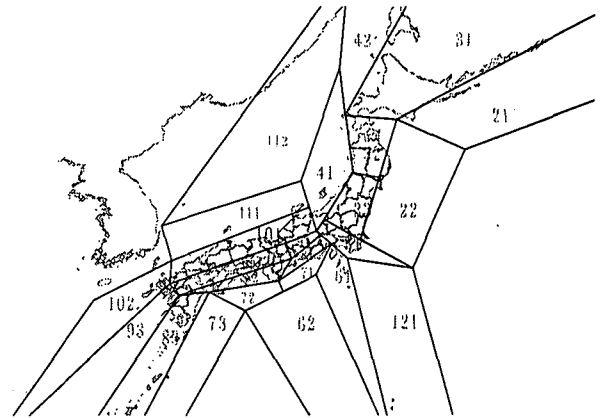


図-1 本検討で用いたサブゾーンの区分

## (2) 活断層を考慮した地震危険度解析

解析に考慮した活断層は次の2種類である。

- ①起震断層<sup>11)</sup>：大地震を起こす単位になると考えられる独立した1つの活断層線及び複数の活断層線
- ②起震断層に位置づけられていない長さ10km以上の活断層<sup>12)</sup>

ここでは、起震断層に位置づけられていない長さ10km以上の活断層についても、それぞれの活断層が1回の地震を起こす単位になるとした。起震断層及び活断層のマグニチュードや活動性に関する情報は、基本的には、それぞれ、松田<sup>13)</sup>及び活断層研究会<sup>14)</sup>に基づいている。ただし、起震断層に関しては、最近の活断層調査により新たな評価結果<sup>10)</sup>や情報<sup>11),12)</sup>が得られている場合には情報の見直しを行った。

起震断層及び活断層で発生する地震のマグニチュード *M<sub>j</sub>* は、断層長さ *L<sub>j</sub>* の関数として(7)式<sup>15)</sup>により、地震の平均発生間隔 *T<sub>Rj</sub>* は、マグニチュードと断層変位量 *D<sub>j</sub>* の関係(8)式<sup>16)</sup>を用いて、(9)式により導出した。

$$M_j = (\log(L_j) + 2.9) / 0.6 \quad (7)$$

$$M_j = (\log(D_j) + 4.0) / 0.6 \quad (8)$$

$$\log(T_{Rj}) = \log(L_j / v_j) + 1.9 \quad (9)$$

ここに、 $v_j$ : 平均変位速度[mm/年]、 $L_j$ : 断層長さ[km]、 $D_j$ : 断層変位[m]、 $T_{Rj}$ : 地震の平均発生間隔[年]

活断層の長さ方向の異なる地点で平均変位速度の情報が得られている場合には、活断層の活動性に関して安全側の評価をするため、最速の平均変位速度を用いた。また、平均変位速度の情報がなく、活動度の情報のみを得られている場合には、活動度 A、A~B、B、B~C、C、D について、それぞれ、 $v_j=5、1、0.5、0.1、0.05、0.005$  [mm/年]とした。

地震の発生確率の評価では、最新活動時期が特定されている場合には発生間隔が対数正規分布で表されるものとし、最新活動時期が特定されていない場合には地震の発生が定常ポアソン過程にしたがうものと仮定した<sup>14)</sup>。地震の発生間隔に対数正規分布を仮定する場合には、対数標準偏差としては 0.23 を用いた<sup>14)</sup>。現在からの期間  $T_D$  [年]に地震が発生する確率は定常ポアソン過程の場合は(10)式により、対数正規分布の場合は(11)式により算出した<sup>15)</sup>。

$$P_j[T_D] = 1 - e^{-\frac{T_D}{T_{Rj}}} \quad (10)$$

$$P_j[T_D] = \frac{F_j(t_{0j} + T_D) - F_j(t_{0j})}{1 - F_j(t_{0j})} \quad (11)$$

ここに、 $T_D$ : 地震の発生確率を算定する期間[年]、 $T_{Rj}$ : 地震の平均発生間隔[年]、 $F_j(t)$ : 最新活動時期が特定されている場合の地震発生確率分布関数、 $t_{0j}$ : 起震断層  $j$  の最新活動時期から現在までの経過時間[年]

なお、発生間隔に対数正規分布を仮定した場合、最新活動時期から現在までの経過時間が平均発生間隔の 2 倍程度を超えて大きくなると地震発生確率が小さくなるため、最新活動時期からの経過時間が平均発生間隔の 2 倍に達した時点で地震の発生確率を飽和させることとした。地震動の推定には(4)式で表される距離減衰式<sup>6)</sup>を用い、活断層で発生する地震の震源深さを  $H=0$  [km]として地震動の推定を行った。また、距離減衰式には、推定値回り  $\pm 2\sigma$  ( $\sigma$  は標準偏差) のばらつきを考慮することとした。

期間  $T_D$  [年]に活断層  $j$  で地震が発生し、解析対象地点における最大加速度  $X$  が  $x$  を上回る確率(超過確率)  $P_{fj}[X > x, T_D]$  は、期間  $T_D$  [年]に活断層  $j$  で地震が発生する確率を  $P_j[T_D]$  とすれば、(12)式により算出される。期間  $T_D$  [年]に解析対象地点に生じる最大加速度  $X$  が  $x$  を超過する確率  $P_{fj}[X > x, T_D]$  は、個々の活断層を対象として(12)式にて算出される超過確率  $P_{fj}[X > x, T_D]$  を用いて、(13)式により算出される。

$$P_{fj}[x > X, T_D] = P_j[T_D] P_{xj}[x > X | M_j, r] \quad (12)$$

$$P_f[x > X, T_D] = 1 - \prod_j \{1 - P_{fj}[x > X, T_D]\} \quad (13)$$

### (3) プレート境界地震を考慮した地震危険度解析

プレート境界地震として、東海・南海地震及び関東地震を考慮した地震危険度解析を行った。東海・南海地震及び関東地震の断層の位置、マグニチュード及び地震発生確率は過去の地震を参考に設定した。解析で考慮した過去の東海・南海地震及び関東地震を表-3に示す。

表-3 過去の東海・南海地震及び関東地震

プレート境界地震名	地震名	発生時期	マグニチュード
東海・南海地震	宝永東海・南海地震	1707年10月28日	8.4
	安政東海地震	1854年12月23日	8.4
	安政南海地震	1854年12月24日	8.4
	東南海地震	1944年12月7日	7.9
	南海地震	1946年12月21日	8.0
関東地震	元禄関東地震	1703年12月31日	8.2
	対馬関東地震	1923年9月1日	7.9

表-3で、1854年12月23日に発生した安政東海地震と同年12月24日に発生した安政南海地震を同時に発生した地震とみなし、1944年東南海地震と1946年南海地震についても同時(1944年)に発生した地震とみなせば<sup>16)</sup>、東海・南海地震の平均発生間隔は119年と算定できる。また、最新活動時期は1944年となる。これらの地震の平均発生間隔と最新活動時期を仮定し、地震の発生間隔が対数正規分布に従うものとして、東海・南海地震の発生確率を算出した。東海・南海地震の断層の位置とマグニチュード<sup>17)</sup>の発生パターンとして、表-3で2つの地震が同時に発生するものとした1854年及び1944年における地震並びに1707年の地震の3パターンを想定し、いずれのパターンが発生するかという確率は均等、すなわち、1/3ずつとした。ここで、1854年に同時に発生するとした地震はマグニチュード8.4、1944年に同時に発生するとした地震はマグニチュード8とした。

関東地震については、表-3より、平均発生間隔及び最新活動時期を220年及び1923年とした。関東地震の断層位置とマグニチュードの発生パターンは、表-3に示した地震の断層位置とマグニチュード(1703年関東地震: 佐藤<sup>17)</sup>、1923年関東地震: Wald, D. J. and Somerville, P. G.<sup>18)</sup>)の2種類とし、いずれのパターンが発生するかという確率は1/2ずつとした。

地震動の推定には(4)式で表される距離減衰式<sup>6)</sup>を用いることとし、断層面と試算地点の最短距離を距離の指標として用いた。一回の地震を発生させる断層面が複数ある場合は、それぞれの断層面と試算地点の最短距離の中で最も小さいものを距離の指標として用いることとした。また、震源深さとしては、試算地点との最短距離を与える断層面上の点の深さを用いた。

### (4) 過去の地震、活断層及びプレート境界地震を考慮した地震危険度解析

過去の地震、活断層及びプレート境界地震のそれぞれを考慮した地震危険度  $P_h$ 、 $P_f$ 、 $P_p$  を用いて、対象地点の地震危険度を試算する。それぞれに起因する地震の発生が独立であると仮定すれば、対象地点の地震危険度は(14)式で算出される。

$$P[x > X, T_D] = 1 - (1 - P_I)(1 - P_h)(1 - P_p) \quad (14)$$

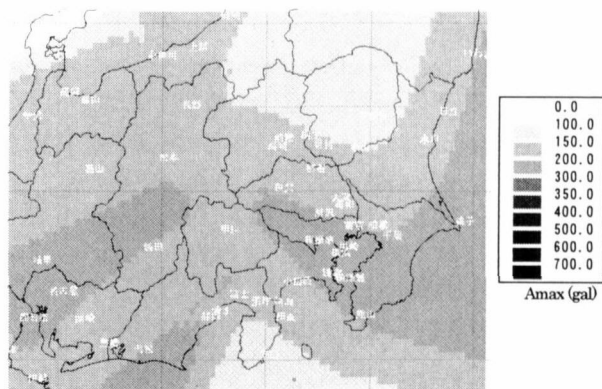
### 3. 試算結果

50年超過確率が39.5%及び500年超過確率が39.4%となる最大加速度の試算結果を、それぞれ、図-2及び図-3に示す。これらの図の(a)及び(b)には、過去の地震のみを考慮した場合と過去の地震、活断層及びプレート境界地震を同時に考慮した場合の試算結果を示した。図-2(a)及び(b)の比較から、過去の地震、活断層及びプレート境界地震を同時に考慮した50年超過確率39.5%の期待値マップでは、過去の地震を考慮した地震危険度が支配的となっているが、地震発生確率が比較的大きい富士川河口断層帯、糸魚川-静岡構造線活断層系などが位置する中西部においては活断層の影響が見られる。また、糸魚川-静岡構造線活断層系と伊那断層の中間領域のように、複数の活断層の中間領域で期待値が特に大きくなっている場合が見られる。これらの活断層は、50年間の地震発生確率が39.5%よりも小さいため、単独では試算結果に影響を及ぼさないが、複数の活断層、過去の地震記録、プレート境界地震の影響の相乗効果により、このような結果が得られたと考えられる。また、図-3(a)及び(b)の比較から、過去の地震、活断層及びプレート境界地震を同時に考慮した500年超過確率39.4%の期待値マップでは、地震発生確率が高い富士川河口断層帯や糸魚川-静岡構造線活断層系等の活断層の周辺で活断層の影響が支配的になっており、東京湾や駿河湾周辺においてはプレート境界地震が大きな影響を及ぼしている。また、それ以外の地域においては過去の地震を考慮した地震危険度が支配的となっている。

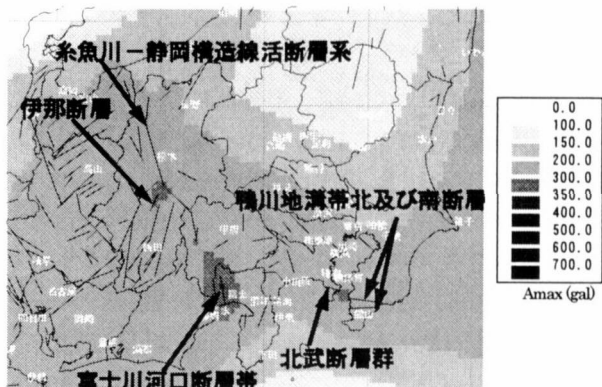
謝辞：本研究の実施に当たっては、土木研究所に設置された「レベル2地震動の設定手法に関する技術検討会(座長：大町達夫東京工業大学教授)」において、ご指導、ご助言を賜った。ここに記して、深甚なる謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 建築研究所：昭和51年度総合技術開発プロジェクト新耐震設計法の開発報告書「地盤種別地震入力の実験解析(日本付近の地震危険度に関する考察)」, 1977
- 2) 宇佐美：新編日本被害地震総覧, 東京大学出版会, 1997
- 3) 宇津：地震の事典, 朝倉出版, 1987
- 4) (財)日本気象協会, 日本付近の主要地震データ, 1995
- 5) 萩原：日本列島の地震-地震工学と地震地体構造-鹿島出版会, 1991
- 6) Annaka, et al.: A Probabilistic Model for Seismic Hazard Estimation in the Kanto District, Proc. of 9th World Conference Earthquake Engineering Vol. II, 1988
- 7) 松田：最大地震規模による日本列島の地震分帯図, 地震研究所彙報, 1990
- 8) 活断層研究会：新編日本の活断層, 東京大学出版会, 1991
- 9) 松田：陸上活断層の最新活動期の表, 活断層研究, 13, 1995
- 10) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：活断層の評価, <http://www.jishin.go.jp/main/chousa/chousa2.htm>
- 11) 科学技術庁：平成7～10年度・平成8年度地震調査研究校付近成果報告会, 1997～1999
- 12) 地震調査所：平成9～10年度活断層・古地震研究調査概要報告書
- 13) 松田：活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震, 28, 269-283, 1975
- 14) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：改訂試案「長期的な地震発生確率の評価手法について」, 1999年1月
- 15) 奥村ほか：活動履歴に関する情報量に応じた活断層での地震発生確率の評価法, 土木学会第51回年次学術講演会概要集I-B, 498-499, 1996
- 16) 損害保険料率算定会：活断層と歴史地震とを考慮した地震危険度の評価, 2000
- 17) 佐藤ほか：日本の地震断層パラメータ・ハンドブック, 鹿島出版会, 1989
- 18) Wald, D. J. and Somerville, P. G.: Variable Slip Rupture Model of the Great 1923 Kanto Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am. Vol.85, 1995

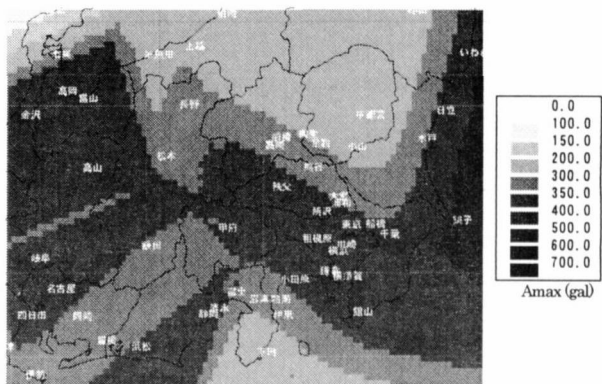


(a)過去の地震のみ考慮

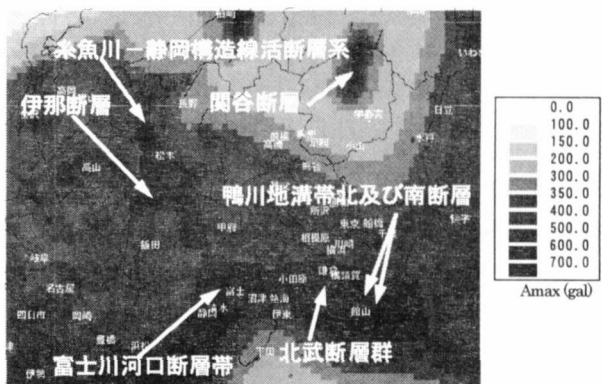


(b)過去の地震、活断層及びプレート境界地震を考慮

図-2 50年超過確率39.5%の最大加速度の期待値マップ



(a)過去の地震のみ考慮



(b)過去の地震、活断層及びプレート境界地震を考慮

図-3 500年超過確率39.4%の最大加速度の期待値マップ