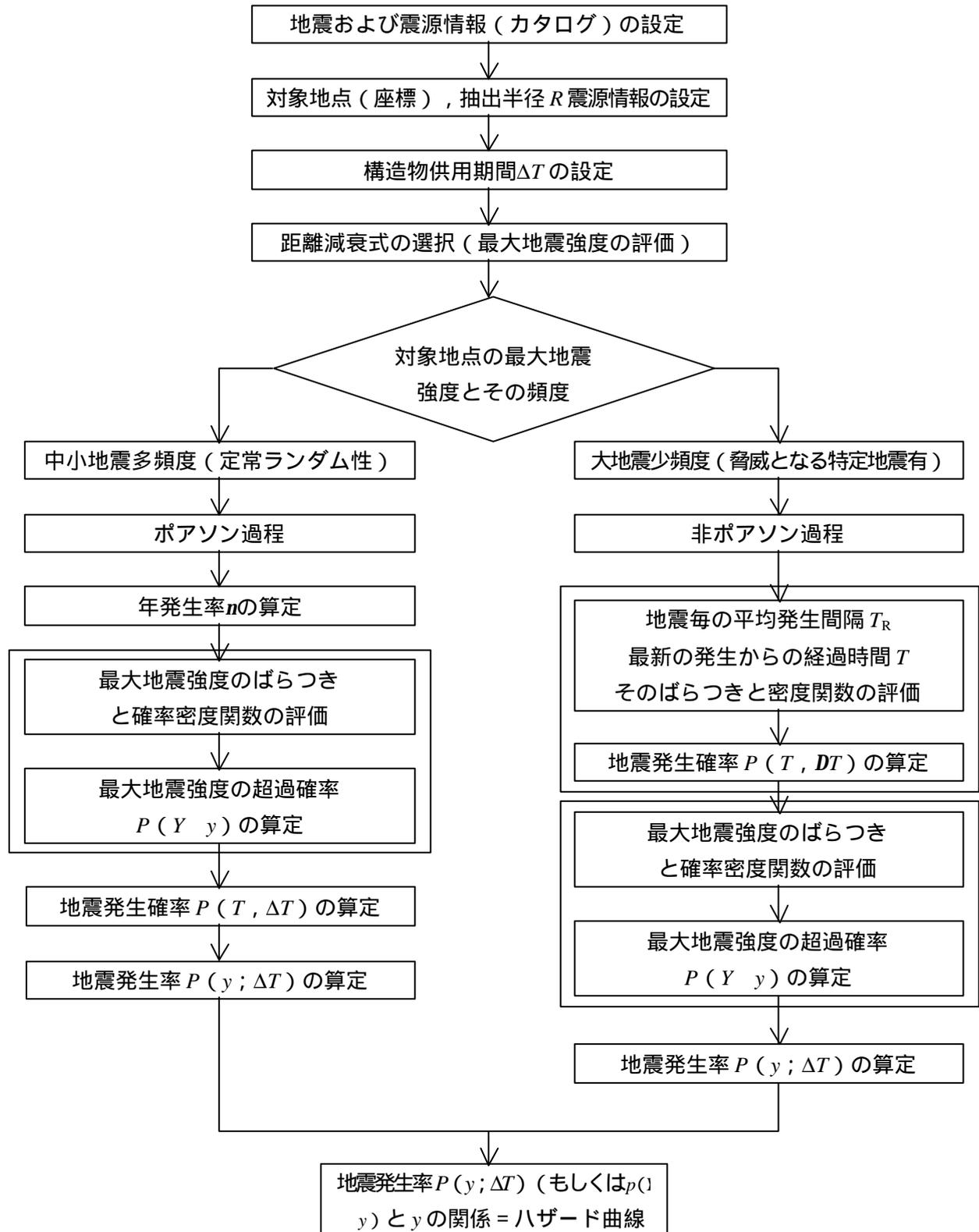


## 地震危険度評価の考え方と評価手順

武蔵工業大学 青戸 拓起 大井幸太 吉川 弘道

### 地震危険度評価のフロー



## 地震危険度評価の方法

ある震域で発生する地震によって供用期間 $\Delta T$ の間に対象地点の地震動強さ  $Y$  が  $y$  を超える確率，すなわち地震発生率  $P(y; \Delta T)$  は式 (1) または (2) で示される<sup>1)</sup>。

$P(y; \Delta T) = 1 - \exp \{-v \cdot P(Y > y) \cdot \Delta T\}$  . . . . . ポアソン過程 (ランダムな震源) (1)

・  $n$  : ある震域での地震の年発生率 (回/年)  
 ポアソン過程の場合, 年発生率  $n$  と平均発生間隔  $T_R$  は次式のような関係がある。

$$T_R = \frac{1}{n}$$

歴史上の地震記録より算出する場合直接 を算定する方法があり<sup>2) 3)</sup>，河角の方法とよばれ次式のようになる。

$$n = \frac{n}{T_N}$$

・  $P(Y > y)$  : ある震域で地震が発生したときに対象地点の最大地震強度  $Y$  が  $y$  を超える確率，超過確率  
 $n \cdot P(Y > y)$  : ある震域で地震が発生したときに 1年あたりに対象地点の最大地震強度  $Y$  が  $y$  を超える確率で，年超過確率  $p(Y > y)$  と呼ぶこともある。

$P(y; \Delta T) = P(T, \Delta T) \cdot P(Y > y)$  . . . . . 非ポアソン過程 (特定の地震) (2)

・  $P(T, \Delta T)$  : ある震域で期間  $\Delta T$  の間に次の地震が発生する確率，地震発生確率  
 非ポアソン過程では最新の地震発生からの時間経過による地震発生確率の上昇を考慮するため，次に示す発生間隔の確率密度関数を導入する。この確率密度関数のことを更新過程<sup>4)</sup>と呼ぶ。

・  $P(Y > y)$  : ある震域で地震が発生したときに地震動強さ  $Y$  が  $y$  を超える確率

### 更新過程を用いた地震発生確率および年発生率の計算方法

・ 発生間隔の確率密度関数

$$f(t) \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{T_R} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_R}\right) \quad : \text{指数分布} \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta t} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left\{\frac{\ln t - \lambda}{\zeta}\right\}^2\right] \quad : \text{対数正規分布} \\ z: \text{対数標準偏差} = \sigma_{\ln t} = \left\{\ln\left(1 + \frac{\sigma_t^2}{T_R^2}\right)\right\}^{0.5} \\ \lambda: \text{対数平均} = E[\ln t] = \ln T_R - \frac{1}{2}\zeta^2 \\ \frac{\alpha}{\beta} \cdot t^{\alpha-1} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right\} \quad : \text{ワイブル分布} \\ \text{(} a=1 \text{ の場合, } b=T_R \text{ となり指数分布に等しい)}$$

・発生間隔の累積分布関数

$$F(t) \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_R}\right) & \text{: 指数分布} \\ \int_{-\infty}^t f(x)dx & \text{: 対数正規分布} \\ 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right\} & \text{: ワイブル分布} \end{cases}$$

・供用期間内 $\Delta T$ 年内の地震発生確率  $P(T, \Delta T)$  <sup>5) 6)</sup>

$$P(T, \Delta T) = \frac{F(T + \Delta T) - F(T)}{1 - F(T)} = 1 - \frac{\Phi(T + \Delta T)}{\Phi(T)}$$

$$\Phi(t) = 1 - F(t)$$

・瞬間地震発生率（年発生率） $n(T)$  <sup>7) 8)</sup>

最終地震発生以後  $T$  年間経過しても地震が発生しない場合は、 $T$  年間の累積発生確率  $F(T)$  を  $T$  年以降の分布に比例配分して求めた分布  $f_t(T)$  から発生頻度（瞬間発生率  $n(T)$ ）を求める。

$$f_t(t) = \left[ \frac{1}{1 - F(t)} \right] \cdot f(T) \quad (=v(T))$$

従って、発生間隔の確率密度関数  $f(t)$  が対数正規分布の場合は次のように表せる。

$$P(T, \Delta T) = 1 - \frac{\Phi\left\{\frac{\ln(T + \Delta T) - \lambda}{\varsigma}\right\}}{\Phi\left\{\frac{\ln T - \lambda}{\varsigma}\right\}}$$

$$v(T) = \frac{\exp\left\{\frac{\left\{\frac{(\ln T - \lambda)^2}{2\varsigma}\right\}}{\sqrt{2\pi} \varsigma}\right\}}{\left\{1 - \Phi\left(\frac{\ln T - \lambda}{\varsigma}\right)\right\}}$$

$$\Phi(T) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln T - \lambda}{\varsigma}\right)$$

また、発生間隔の確率密度関数  $f(t)$  が指数分布の場合は次のように表せる。

$$P(T, \Delta T) = 1 - \exp\left(-\frac{\Delta T}{T_R}\right)$$

$$v(T) = v = \frac{1}{T_R}$$

#### 河角の方法

例) 西暦 679 年から 2000 年までの南海地域の巨大地震の発生年月日および発生間隔 (data set 南海) <sup>9)</sup>  
684 年 11 月 29 日, 887 年 8 月 26 日, 1096 年 12 月 17 日, 1361 年 8 月 3 日, 1498 年 9 月 20 日, 1605 年 2 月 3 日, 1707 年 10 月 28 日, 1854 年 12 月 23 日の計 8 回の地震が発生。

平均発生間隔 167.152 年、標本標準偏差 55.6655 年

河角の方法:  $n=8$  (回) / (2000 - 679) (年) = 0.006056 (回/年)  $T_R=1/0.006056=165$  (年)

## ハザード曲線の作成例

例題 1 付表 1 を元にハザード曲線の算定，およびポアソン過程を考慮して供用期間内の地震危険度を評価する．

付表 1 - 武蔵工大位置における最大地震強度の評価例

「CRC 地震危険度解析プログラムより」

(抽出条件：抽出期間  $T_N=2000 \sim 679=1322$  年，対象半径  $R=200\text{km}$ ，抽出マグネチュード  $M=6 \sim 8$ ，距離減衰式<sup>10)</sup>：福島田中式)

地震名称	発生年月日	マグネチュード	最大地震強度 (最大水平加速度 推定値)	前回からの発生間隔 (年)
相模武蔵	878.11. 1	7.4	255	
江戸	1615. 6.26	6.5	296	737
武蔵下野	1649. 7.30	7	240	34
江戸川崎	1649. 9. 1	6.4	291	0
江戸	1784.8.29	6.1	216	135
神奈川・保土ヶ谷・品川	1812.12.7	6.3	215	28
江戸	1855.11.11	6.9	334	43
平均	7 回	6.7	264	<b>163</b>
変動係数		0.069	0.170	<b>1.75</b>

### 年発生率 $n$ を求める

方法 1：・対象地点において地震発生数  $n$  は 7 (回) ．

・抽出期間は  $T_N=1322$  (年) ．

平均発生間隔は  $T_R=T_N / n=1322 / 7=189$ (年) (河角の方法)，すなわち対象地点において地震の年発生率は

$$n=1 / T_R=1 / 189=0.00529 \text{ (回 / 年)}$$

方法 2：・対象地点において地震の平均発生間隔はデータの平均間隔より  $T_R=163$  (年) ．

対象地点において地震の年発生率は

$$n=1 / T_R=1 / 163=0.00613 \text{ (回 / 年)}$$

### 超過確率 $P(Y > y)$ を求める (最大地震強度評価のばらつきは考慮しない)

ex)  $y=200\text{Gal}$  とした場合

・対象地点において地震数  $n$  は 7 (回) ．

・対象地点において最大地震強度が  $200\text{Gal}$  以上となる地震数は 7 (回) ．

対象地点において最大地震強度  $Y$  が  $y$  を超える確率，すなわち超過確率は

$$P(Y > 200\text{Gal}) = 7 / 7 = 1$$

ex)  $y=300\text{Gal}$  とした場合

・対象地点において地震数  $n$  は 7 (回) ．

・対象地点において最大地震強度が  $300\text{Gal}$  以上となる地震数は 1 (回) ．

対象地点において最大地震強度  $Y$  が  $y$  を超える確率は，すなわち超過確率は

$$P(Y > 300\text{Gal}) = 1 / 7 = 0.143$$

ex)  $y=400\text{Gal}$  とした場合

・対象地点において地震数  $n$  は 7 (回) ．

・対象地点において最大地震強度が  $400\text{Gal}$  以上となる地震数は 0 (回) ．

対象地点において最大地震強度  $Y$  が  $y$  を超える確率は，すなわち超過確率は

$$P(Y < 400Gal) = 0 / 7 = 0$$

### 年超過確率 $p(Y > y)$ を求める

より対象地点において1年あたりに最大地震強度  $Y$  が  $y$  を超える確率，すなわち年超過確率は

$$p(Y > 200Gal) = n \cdot P(Y > 200Gal) = 0.00529 \cdot 1 = 0.00529$$

$$p(Y > 300Gal) = n \cdot P(Y > 300Gal) = 0.00529 \cdot 0.143 = 0.000756$$

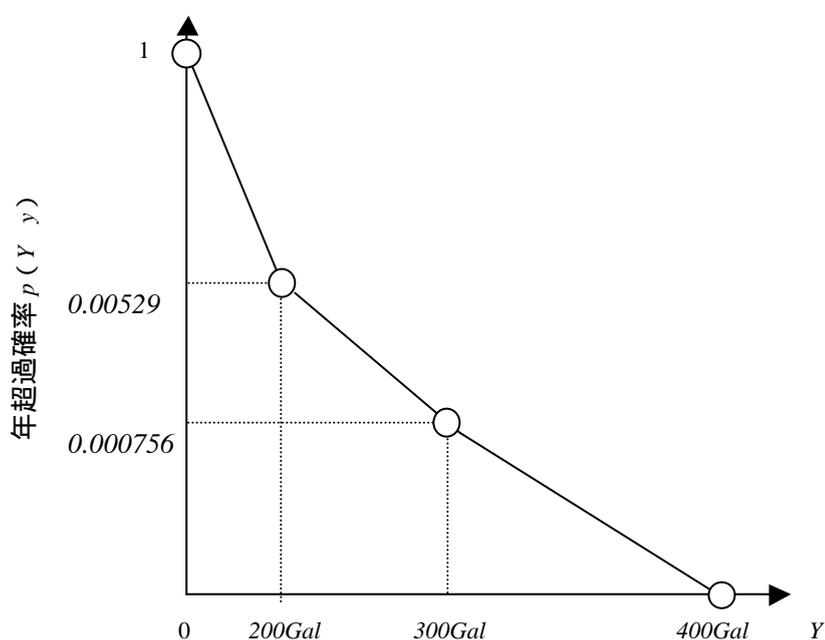
$$p(Y > 400Gal) = n \cdot P(Y > 400Gal) = 0.00529 \cdot 0 = 0$$

### 算定値のプロット

・縦軸に年超過確率  $p(Y > y)$

・横軸に最大地震強度  $Y$

をプロットしたものがハザード曲線となる(付図1)。すなわち対象地点における最大地震強度を確率的に示したものである。



付図2 ハザード曲線の算定例

### ポアソン過程を仮定した供用期間内の地震発生率 $P(y; \Delta T)$ を求める

ex) 構造物の供用期間を  $\Delta T = 50$  年と設定する。

供用期間  $\Delta T$  の間に対象地点において最大地震強度  $Y$  が  $y$  を超える確率  $P(y; \Delta T)$ ，すなわち地震発生率は

$$P(200Gal; 50) = 1 - \exp(-0.00529 \cdot 50) = 0.232$$

$$P(300Gal; 50) = 1 - \exp(-0.000756 \cdot 50) = 0.0371$$

$$P(400Gal; 50) = 1 - \exp(-0 \cdot 50) = 0$$

ex) 構造物の耐用期間を  $\Delta T = 100$  年と設定する。

供用期間  $\Delta T$  の間に対象地点において最大地震強度  $Y$  が  $y$  を超える確率  $P(y; \Delta T)$ ，すなわち地震発生率は

$$P(200Gal; 100) = 1 - \exp(-0.00529 \cdot 100) = 0.411$$

$$P(300Gal; 100) = 1 - \exp(-0.000756 \cdot 100) = 0.0728$$

$$P(400Gal; 100) = 1 - \exp(-0 \cdot 100) = 0$$

対象地点における地震危険度評価の結果をまとめると付表2のようになる。

付表2 対象地点における地震危険度評価の例

地震の年発生率	0.00523		
	200Gal 以上	300Gal 以上	400Gal 以上
最大地震強度	200Gal 以上	300Gal 以上	400Gal 以上
超過確率	1	0.143	0
年超過確率	0.00529	0.000756	0
供用期間 50 年の場合地震発生率	0.232	0.0371	0
供用期間 100 年の場合地震発生率	0.411	0.0728	0

例題2 付表3を元に非ポアソン過程を考慮して供用期間内の地震危険度を評価する。

付表3 南海地域の巨大地震の発生日および発生間隔 (data set 南海)<sup>11)</sup> とある地点における最大加速度評価例  
(抽出条件: 抽出期間  $T_N=2000-679=1322$  年)

発生日	マグネチュード	最大地震強度 (最大水平加速度推定値)	前回からの発生間隔
684年11月29日	7	平均 300Gal 対数標準偏差 $z=0.5$ でモデル化	
887年8月26日			203
1096年12月17日			209
1361年8月3日			265
1498年9月20日			137
1605年2月3日			107
1707年10月28日			102
1854年12月23日			147
平均	7	300Gal	167.143
ばらつき	0	対数標準偏差 0.5	標準偏差 60.26

河角の方法:  $n=8$  (回) / (2000 - 679 + 1) (年) = 0.006051 (回/年)  $T_R=1 / 0.006051=165$  (年)

最新地震からの発生期間は現在を2000年6月とすると  $T=145.5$  年

地震の発生間隔の確率密度関数を仮定して地震発生率、および年発生率を算定

ex) 供用期間  $\Delta T=50$  年の場合

対数正規分布・・・ $T_R=167.143$  年, そして  $z=0.3496$ ,  $l=5.058$  だから

$$P(T, \Delta T) = P(145.5, 50) = \underline{0.0588} \text{ (供用開始時)}$$

$$n(T) = n(145.5) = 0.00002 \text{ (供用開始時)}$$

$$P(T, \Delta T) = P(195.5, 50) = 0.3574 \text{ (耐用期間終了時)}$$

$$n(T) = n(195.5) = 0.00403 \text{ (耐用期間終了時)}$$

指数分布・・・ $T_R=167.143$  年だから

$$P(T, \Delta T) = P(145.5, 50) = \underline{0.25855}$$

$$n(T) = 0.00598$$

ex) 供用期間  $\Delta T=100$  年の場合

対数正規分布・・・ $T_R=167.143$  年, そして  $z=0.3496$ ,  $l=5.058$  だから

$$P(T, \Delta T) = P(145.5, 100) = \underline{0.39521} \text{ (供用開始時)}$$

$$n(T) = n(145.5) = 0.00002 \text{ (供用開始時)}$$

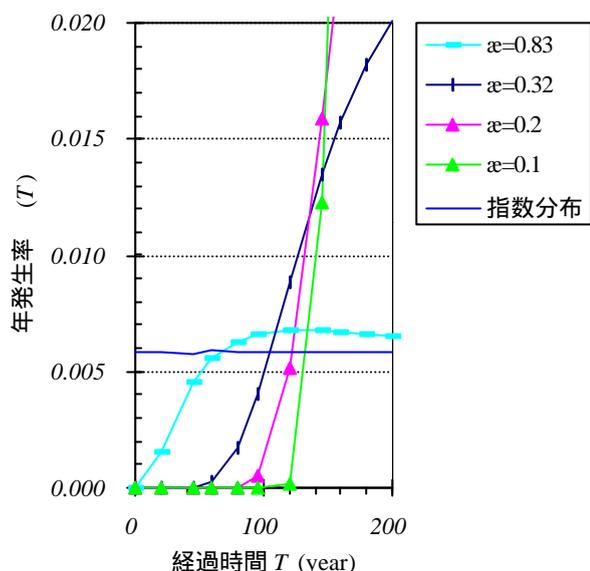
$$P(T, \Delta T) = P(245.5, 100) = 0.85299 \text{ (耐用期間終了時)}$$

$$n(T) = n(245.5) = 0.01350 \text{ (耐用期間終了時)}$$

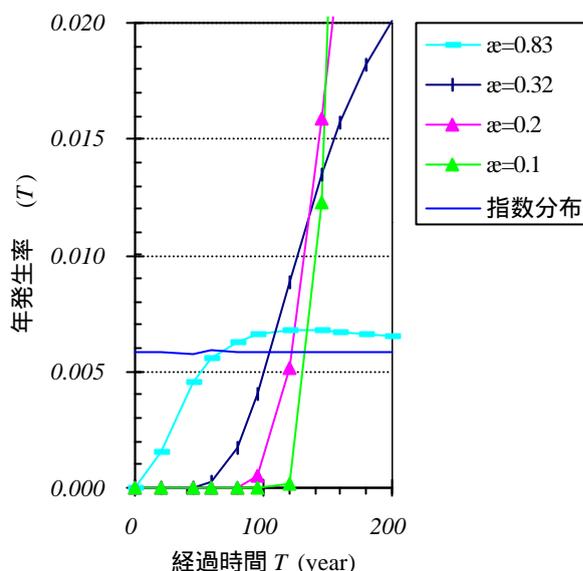
指数分布・・・ $T_R=167.143$  年だから

$$P(T, \Delta T) = P(145.5, 100) = \underline{0.45025}$$

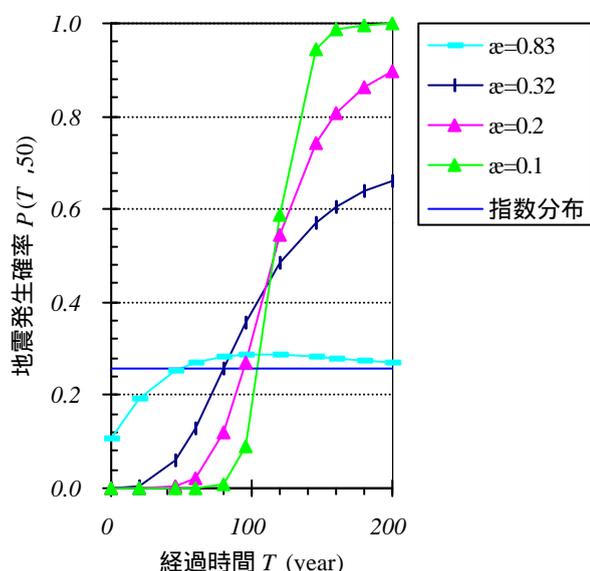
$$n(T) = 0.00598$$



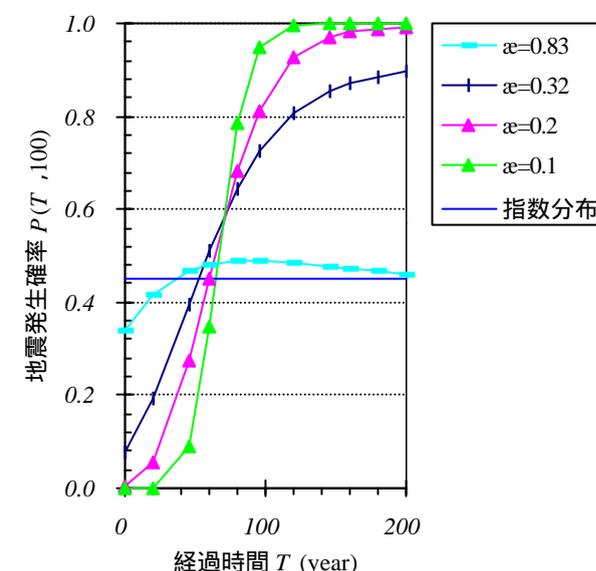
供用期間を 50 年とした場合の年発生率の変化



供用期間を 100 年とした場合の年発生率の変化



供用期間を 50 年とした場合の地震発生確率の変化



供用期間を 100 年とした場合の地震発生確率の変化

地震最大強度推定のばらつきを考慮し、超過確率  $P(Y > y)$  を求める。

平均 300Gal, 対数標準偏差 0.5 の対数正規分布を仮定.  $I=5.579$ ,  $z=0.5$  から

ex) 200Gal 以上の確率密度関数の面積 =  $1 - 0.28742 = 0.71258$

$$P(Y > 200Gal) = 0.71258$$

ex) 300Gal 以上の確率密度関数の面積 =  $1 - 0.59871 = 0.40129$

$$P(Y > 300Gal) = 0.40129$$

ex) 400Gal 以上の確率密度関数の面積 =  $1 - 0.79542 = 0.20458$

$$P(Y > 400Gal) = 0.20458$$

非ポアソン過程を考慮した供用期間内の地震発生率  $P(y; \Delta T)$  を求める

ex) 構造物の供用期間を  $\Delta T = 50$  年と設定する.

供用期間  $\Delta T$  の間に対象地点において最大地震強度  $Y$  が  $y$  を超える確率  $P(y; \Delta T)$ , すなわち地震発生率は (供用開始時)

$$P(y; \Delta T) = P(45.5, 50) \cdot P(Y > 200Gal) = 0.0588 \cdot 0.71258 = 0.0478$$

$$P(y; \Delta T) = P(45.5, 50) \cdot P(Y > 300Gal) = 0.0588 \cdot 0.40129 = \underline{0.0236}$$

$$P(y; \Delta T) = P(45.5, 50) \cdot P(Y > 400Gal) = 0.0588 \cdot 0.20458 = \underline{0.0120}$$

ex) 構造物の供用期間を $\Delta T=100$ 年と設定する。

供用期間 $\Delta T$ の間に対象地点において最大地震強度 $Y$ が $y$ を超える確率 $P(y; \Delta T)$ ，すなわち地震発生率は（供用開始時）

$$P(y; \Delta T) = P(45.5, 100) \cdot P(Y > 200Gal) = 0.39521 \cdot 0.71258 = \underline{0.321}$$

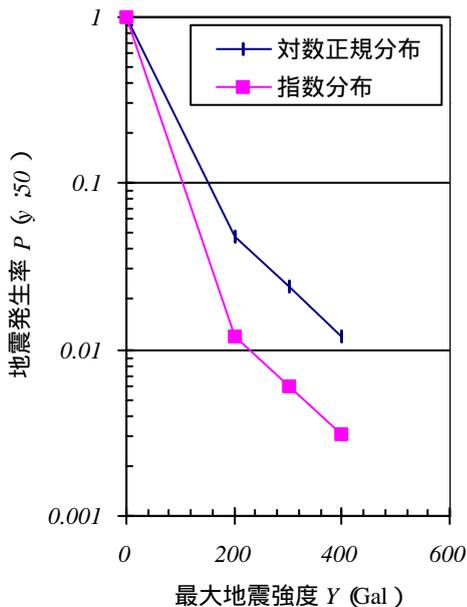
$$P(y; \Delta T) = P(45.5, 100) \cdot P(Y > 300Gal) = 0.39521 \cdot 0.40129 = \underline{0.159}$$

$$P(y; \Delta T) = P(45.5, 100) \cdot P(Y > 400Gal) = 0.39521 \cdot 0.20458 = \underline{0.0809}$$

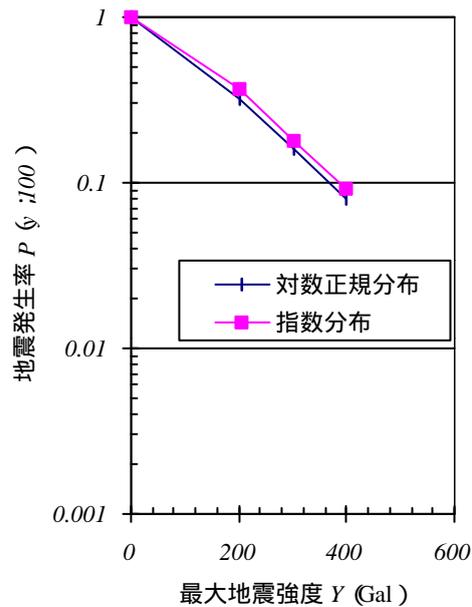
対象地点における地震危険度評価の結果をまとめると付表4，付図3と4のようになる。

付表4 対象地点における地震危険度評価の例（上段：対数正規分布、下段：指数分布）

地震の年発生率	0.00002（供用開始時）、0.00403（耐用期間終了時） 0.00598		
最大地震強度	200Gal 以上	300Gal 以上	400Gal 以上
超過確率	0.71258	0.40129	0.20458
供用期間 50 年の場合			
地震発生確率	0.0588 0.25855		
地震発生率	0.0478 0.0123	0.0236 0.00610	0.0120 0.00310
供用期間 100 年の場合			
地震発生確率	0.39521 0.45025		
地震発生率	0.321 0.366	0.159 0.181	0.0809 0.0922



付図3 供用期間を50年とした場合の地震危険度カーブ

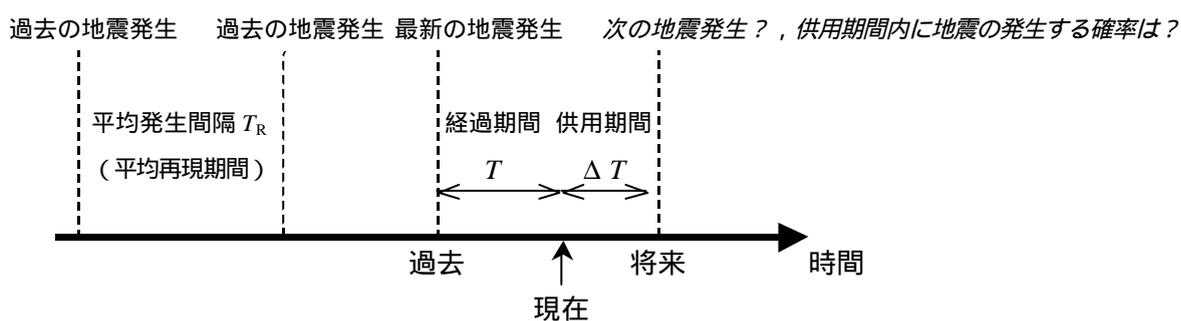


付図4 供用期間を100年とした場合の地震危険度カーブ

用語の定義

経過期間	$T$	(年)	
供用期間	$\Delta T$	(年)	
平均発生間隔, 平均再現期間	$T_R$	(年)	
発生間隔の確率密度関数	$F(t)$	-	
発生間隔の累積分布関数	$F(t)$	-	
発生間隔のばらつき (標準偏差)	$s_{TR}$	(年)	
データ抽出期間	$T_N$	(年)	
供用期間内 $DT$ 年以内に地震の発生する確率, 地震発生確率	$P(T, \Delta T)$	-	$= T / T_R$
ある震域で地震が発生したときに対象地点の地震動強さ $Y$ が $y$ を超える確率, 超過確率	$P(Y > y)$		
供用期間 $DT$ の間に対象地点の地震動強さ $Y$ が $y$ を超える確率, 地震発生率	$P(y; \Delta T)$		
瞬間地震発生率, 年発生率	$n(T)$	(回/年)	
地震発生数	$N$	(回)	
地震動の最大強度	$Y$		加速度であれば $Gal (=cm/sec^2)$ 、速度であれば $Kine (=cm/sec)$
マグネチュード	$M$		
年超過確率	$p(Y > y)$		$= n \cdot P(y; \Delta T)$

付図 ある地域の巨大地震の発生間隔



## 参考文献

---

- 1) 石川裕，奥村俊彦，亀田弘行、：活断層を考慮した神戸における地震危険度評価，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp61-68，1996.1
- 2) 総理府地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会：長期的な地震発生確率の評価手法及びその適用例について，1998.5
- 3) Watabe, M. and Tohdo, M. : Seismic hazard analysis for design earthquakes loads , Computer Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures A Handbook D. E. Beskos & S. A. Anagnostopoulos ( Editors ) , Computational Mechanics Publications , pp.241-269,1997
- 4) 2) に同じ
- 5) 4) に同じ
- 6) 1) に同じ
- 7) 佐藤 一郎，平川 倫生，神田 順：活断層を考慮した地震危険度解析と最適信頼性への応用，第 10 回日本地震工学シンポジウム,pp.145-160,1998
- 8) 蛭沢，高荷，田中，阿部
- 9) 2) に同じ
- 10) 土木学会：動的解析と耐震設計[第 1 巻]地震動・動的物性，技報堂出版，pp29-80，1989.6
- 11) 2) に同じ