（試案）
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

地震調査研究推進本部 地震調査委員会
長期評価部会

平成 10 年 5 月 13 日

はじめに

総理府地震調査研究推進本部の地震調査委員会は，地震防災対策特別措置法（平成 7 年 6 月 16 日法律第 111 号）第 7 条第 2 項第 4 号に基づき，関係行政機関や大学から地震に関する調査結果等を収集，整理，分析し，これに基づき総合的な評価を行っている。同委員会は評価の柱の一つとして，地震活動の長期評価を掲げている。これは，数十年以上にわたる長期的な観点から将来の地震活動度を探ろうとするもので，そのために同委員会の下に長期評価部会を設置している。

同部会は長期評価の一環として，平成 9 年 11 月に「長期確率評価手法検討分科会」を設置し，プレート境界やプレート内部の弱線である活断層で発生する大地震について，活動間隔・平均ずれ速度・最新活動時期・活動区間（セグメント）等のパラメータを用いて，その長期的な発生可能性を確率という数字で評価する手法を検討した。発生する地震の規模や地震による揺れの最大加速度等を含めた最終的な長期確率評価のためには，上述の他にも様々なパラメータを取り込む必要があると考えられるが，ここではまず，地震発生の時系列的なところまでを扱うこととした。本報告書はその検討結果をとりまとめたものであり，その手法に基づいてプレート境界及びいくつかの活断層に沿う長期的な地震発生の確率を暫定的なデータを用いて試算した結果も同時に掲載してある。本報告書の内容は，地震調査委員会が最終的に目指す長期的な地震発生可能性の評価の第一段階に当たるものであり，ここに中間報告として公表するものである。

この報告書には長期確率評価手法検討分科会委員（氏名は末尾の参考資料参照）のオリジナルな研究成果が含まれている。その成果の中には，この報告書が公表された後，委員自らの手により原著論文に仕上げられる予定のものもある。

目 次

はじめに i

第 1 章 長期確率評価の考え方 1

第 2 章 手 法 4

2.1 更新過程 4

2.1.1 概要 4

2.1.2 統計モデル 4

2.1.3 確率の数値評価 6

2.2 時間予測モデルの利用 8

2.2.1 概要 8

2.2.2 確率の数値評価 9

2.3 不確定性の取り扱い 9

2.3.1 最新活動時期の不確定性 9

2.3.1.1 危険率の平均化 10

2.3.1.2 発生確率の平均化 11

2.3.2 その他の活動時期の不確定性 11

2.4 論理ツリーの適用 12

第 3 章 適 用 例 14

3.1 プレート間地震 14

3.1.1 南海トラフ沿いの巨大地震 14

3.1.1.1 更新過程を利用する場合 14

3.1.1.2 時間予測モデルを利用する場合 20

3.1.2 宮城県沖地震 21

3.2 陸域の活断層で発生する地震 23

3.2.1 更新過程を利用する事例 23

3.2.1.1 阿寺断層 23

3.2.1.2 丹那断層 25

3.2.1.3 跡津川断層 27

3.2.1.4 長野盆地西縁断層 29

3.2.2 時間予測モデルを利用する事例 30

3.2.2.1 牛伏寺断層 …… 30
3.2.2.2 野島断層 …… 30
3.2.3 発生間隔のばらつきの影響 …… 31
3.2.4 最新活動時期の不確定性の影響 …… 32
3.3 論理ツリーの適用 (糸魚川–静岡構造線活断層系) …… 33
3.3.1 論理ツリーの構築 …… 33
3.3.2 活動区間の設定 …… 36
3.3.3 確率の数値評価 …… 36
3.3.3.1 複数のセグメントの同時活動を考慮しない場合 …… 36
3.3.3.2 複数のセグメントの同時活動を考慮する場合 …… 36
3.3.3.3 数値評価結果のまとめ …… 40

第 4 章 まとめと今後の課題 41
4.1 妥当な統計モデル …… 41
4.2 確率の数値評価のまとめ …… 43
4.3 発生確率の時間変化 …… 45
4.4 確率の誤差評価 …… 51
4.5 長期確率評価によって得られる確率の数値の理解に向けて …… 54

参 考 文 献 55

付 録 A 最尤法について 58
A.1 基本的概念 …… 58
A.1.1 最尤法 …… 58
A.1.2 パラメータ決定の実際 …… 58
A.2 定常更新過程の厳密な対数尤度 …… 59

付 録 B 対数正規分布の確率一覧表 61
B.1 地震発生確率一覧表 …… 61
B.2 地震発生確率の極大値の一覧表 …… 67

参 考 資 料 69

図 目 次

1.1 長期確率評価手法の概念図 …… 2

2.1 対数正規分布と指数分布の確率密度関数（それぞれ式 (2.22) と式 (2.23) に対応）のグラフの一例。$\hat{T} = \bar{T} = 1000,\ \sigma = 0.5$ で図示 …… 10

3.1 表 3.1(a)の data set I における地震発生間隔の累積分布と，各モデルの累積分布関数 $1 - \phi(t)$ のグラフ（文献 [10, p.59] の Fig.3 より。実際は，1498 年の発生年月日を変更しているので正確に一致しないが，差はごく小さい） …… 16

3.2 過去に南海道において繰り返し起きた地震の大きさ（室津港での隆起量）と発生間隔との関係（文献 [15] の図より） …… 20

3.3 糸魚川–静岡構造線活断層帯における地震発生確率計算時の論理ツリーの例 …… 35

3.4 8,000 年間当たり事象 A が 0 回 $(x = 0)$ の場合の地震発生の時系列ダイヤグラムの一例 …… 38

3.5 8,000 年間当たり事象 A が 1 回 $(x = 0.125)$ の場合の地震発生の時系列ダイヤグラムの一例 …… 38

3.6 8,000 年間当たり事象 A が 2 回 $(x = 0.25)$ の場合の地震発生の時系列ダイヤグラムの一例 …… 38

3.7 北部セグメント（$\bar{T} = 2,000$ 年の場合）の発生確率密度分布（強度関数）の模式図 …… 40

4.1 data set 丹那 I（表 3.14参照）において，$\Delta T = 30$ 年とした場合の最新の地震からの経過時間に対する条件付き確率のグラフ …… 42

4.2 data set 宮城沖 III（宮城県沖地震）における，危険率 $\nu(t)$ の経過年数 t に対するグラフ …… 45

4.3 data set 南海 I（南海地震）における，危険率 $\nu(t)$ の経過年数 t に対するグラフ …… 46

4.4 data set 南海 IV（想定東海地震）における，危険率 $\nu(t)$ の経過年数 t に対するグラフ …… 46

4.5 data set 阿寺 I（現在の阿寺断層）における，危険率 $\nu(t)$ の経過年数 t に対するグラフ …… 47

4.6 data set 阿寺 I′（最新の地震発生直前の阿寺断層）における，危険率 $\nu(t)$ の経過年数 t に対するグラフ …… 47

4.7 data set 丹那 I（現在の丹那断層）における，危険率 $\nu(t)$ の経過年数 t に対するグラフ …… 48

4.8 data set 丹那 I′（最新の地震発生直前の丹那断層）における，危険率 $\nu(t)$ の経過年数 t に対するグラフ …… 48
4.9 data set 跡津川 I′（最新の地震発生直前の跡津川断層）における，危険率 $\nu(t)$ の経過年数 t に対するグラフ …… 49
4.10 data set 長野 I′（最新の地震発生直前の長野盆地西縁断層）における，危険率 $\nu(t)$ の経過年数 t に対するグラフ …… 49
4.11 対数正規分布の確率誤差の例 …… 52
4.12 ガンマ分布の確率誤差の例 …… 52
4.13 Weibull 分布の確率誤差の例 …… 53
4.14 二重指数分布の確率誤差の例 …… 53

表 目 次

2.1 本報告で扱うモデルの危険率・信頼度関数・分布の平均 …… *7*

3.1 歴史に記録されている南海地域の巨大地震の発生年月日（西暦）及び発生間隔 …… *15*

3.1(a) data set Ⅰ（文献 [10] の Table 1 のうち，1498 年の地震発生年月日を 9 月 20 日から 7 月 9 日に変更したもの）

3.1(b) data set Ⅱ（data set Ⅰのうち 1361 年以降のもの）

3.1(c) data set Ⅲ（data set Ⅰのうち 1099 年以降のものに 1233 年の地震を加えたもの）

3.1(d) data set Ⅳ（想定「東海地震」の発生確率を計算するために再構築したもの。684 年と 887 年の発生日は仮定）

3.1(e) data set Ⅴ（data set Ⅰのうち 1605 年以降のもの）

3.2 data set Ⅰ ~ Ⅴについて最尤法によって求めた各モデルのパラメータと AIC の値，及び Poisson 過程（指数分布）の AIC の値。bold 体は 4 モデル中の最小の AIC を示す …… *17*

3.3 各分布毎の，各 data set の 1997 年時点での今後 30 年，50 年及び 100 年の地震発生確率 …… *18*

3.4 data set Ⅱ′ ~ Ⅲ′について最尤法によって求めた各モデルのパラメータと AIC の値，及び Poisson 過程（指数分布）の AIC の値。bold 体は 4 モデル中の最小の AIC を示す …… *19*

3.5 各分布毎の，1946 年時点の今後 30 年，50 年及び 100 年の地震発生確率 …… *19*

3.6 南海トラフにおける，発生間隔の分布関数として対数正規分布及び指数分布を用いたときの今後 30 年，50 年，100 年の地震発生確率 …… *21*

3.7 歴史に記録されている宮城県沖の大地震の発生年月日（西暦）及び発生間隔（data set Ⅰ及びⅡは文献 [10] による） …… *21*

3.7(a) data set Ⅰ（文献 [10] の Table 4 による）

3.7(b) data set Ⅱ（data set Ⅰから存在の疑わしい 1770 年の地震を除いたもの）

3.7(c) data set Ⅲ（data set Ⅰから存在の疑わしい 1770 年の地震及び，沖合いの大地震で，この系列に含まれるかどうか疑問のある 1793 年の地震を除いたもの）

3.8 最尤法によって求めた各モデルのパラメータと AIC の値，及び Poisson 過程（指数分布）の AIC の値。bold 体は 4 モデル中の最小の AIC を示す …… *22*

3.9 各分布毎の，各 data set の 1997 年時点での今後 5 年，10 年，20 年及び 30 年の地震発生確率 …… *22*

3.10 阿寺断層の地震の発生年と発生間隔。発生間隔の算出には発生年の中央値を採用。以後 data set 阿寺Ⅰとし，最古の地震を除いたものを data set 阿寺Ⅱとする。更に最新の地震を除いたものをそれぞれ data set 阿寺Ⅰ′，data set 阿寺Ⅱ′とする …… *23*

3.11 data set Ⅰ ~ Ⅱ′ について最尤法によって求めた各モデルのパラメータと AIC の値，及び Poisson 過程（指数分布）の AIC の値。bold 体は 4 モデル中の最小の AIC を示す …… 24

3.12 各分布毎の，阿寺断層を震源域とする，今後 30 年，50 年及び 100 年の地震発生確率 24

3.13 丹那断層の地震の発生年と発生間隔。文献 [27, p.821] の Table 5 のうち，case(2)（暦年補正を行ったもの）の Grade A のみを抜粋し，その中央値又は推定された値を使用。以後これを data set 丹那Ⅰとし，1930 年の北伊豆地震を除いたものを data set 丹那Ⅰ′とする。なお，表中 B.P. は before AD1950 の意 …… 25

3.13(a) 丹那断層の data set Ⅰ

3.13(b) 丹那断層の data set Ⅰ′

3.14 data set Ⅰ及び data set Ⅰ′について最尤法によって求めた各モデルのパラメータと AIC の値，及び Poisson 過程（指数分布）の AIC の値。bold 体は 4 モデル中の最小の AIC を示す …… 25

3.15 各分布毎の，丹那断層を震源域とする，今後 30 年，50 年及び 100 年の地震発生確率 26

3.16 跡津川断層の地震の発生年と発生間隔。発生間隔の算出には発生年の中央値を採用。以後 data set 跡津川Ⅰとし，最新の地震を除いたものを data set 跡津川Ⅰ′とする …… 27

3.17 跡津川断層の data set について，最尤法によって求めた各モデルのパラメータと AIC の値，及び Poisson 過程（指数分布）の AIC の値。bold 体は 4 モデル中の最小の AIC を示す …… 27

3.18 各分布毎の，跡津川断層を震源域とする，1857 年時点の今後 30 年，50 年及び 100 年の地震発生確率 …… 28

3.19 各分布毎の，跡津川断層を震源域とする，1857 年時点の今後 30 年，50 年及び 100 年の地震発生確率（2.3.1.1の方法を適用） …… 28

3.20 長野盆地西縁断層の地震の発生年と発生間隔。発生間隔の算出には発生年の中央値を採用。以後 data set 長野盆地西縁Ⅰとし，最新の地震を除いたものを data set 長野盆地西縁Ⅰ′とする …… 29

3.21 長野盆地西縁断層の data set について，最尤法によって求めた各モデルのパラメータと AIC の値，及び Poisson 過程（指数分布）の AIC の値。bold 体は 4 モデル中の最小の AIC を示す …… 29

3.22 各分布毎の，長野盆地西縁断層を震源域とする，1846 年時点の今後 30 年，50 年及び 100 年の地震発生確率 …… 30

3.23 牛伏寺断層及び野島断層における，活動間隔の分布関数として対数正規分布及び指数分布を用いたときの今後 30 年，50 年，100 年及び 200 年の地震発生確率。牛伏寺断層については前回の地震から 1,200 年が経過しているものとして計算。数値の幅は活動間隔の設定の違いによる …… 31

3.24 計算に用いた，各断層の U_{last}, V 及び $T_{\mathrm{t.p.}}$ の表。大沢断層の V は不明のため，茅野断層板室地点の値を引用 …… 32

3.25 時間予測モデルに従うことを考慮し，分布をより集中させた場合の，各断層の今後 30 年， 50 年及び 100 年の地震発生確率。数値の幅は活動間隔の設定の違いによる …… 32
3.26 表 3.23の牛伏寺断層部分の再掲と，文献 [18] での議論を適用したときの比較。数値の幅は活動間隔の設定の違いによる …… 33
3.27 各パラメータ毎の，今後 100 年以内の地震発生確率一覧表 (対数正規分布， $\sigma = 0.3$ の場合。 $\hat{T}$ は (相乗) 平均活動間隔， T は最新の地震からの経過年数) …… 37
3.28 各事象別の，論理ツリーの各 case 毎の地震発生確率の表 …… 40

4.1 南海トラフ等プレート間地震と陸域の活断層における，今後 30 年以内の地震発生確率 (データは暫定，モデルは対数正規分布，確率の単位はいずれも %) …… 44
4.2 断層の活動を注意喚起するための指標 (データは暫定) …… 50

B.1 今後 30 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.1$ の場合，単位 %) …… 62
B.2 今後 50 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.1$ の場合，単位 %) …… 62
B.3 今後 100 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.1$ の場合，単位 %) …… 62
B.4 今後 30 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.2$ の場合，単位 %) …… 63
B.5 今後 50 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.2$ の場合，単位 %) …… 63
B.6 今後 100 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.2$ の場合，単位 %) …… 63
B.7 今後 30 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.23$ の場合，単位 %) …… 64
B.8 今後 50 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.23$ の場合，単位 %) …… 64
B.9 今後 100 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.23$ の場合，単位 %) …… 64
B.10 今後 30 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.3$ の場合，単位 %) …… 65
B.11 今後 50 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.3$ の場合，単位 %) …… 65
B.12 今後 100 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.3$ の場合，単位 %) …… 65
B.13 今後 30 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.4$ の場合，単位 %) …… 66
B.14 今後 50 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.4$ の場合，単位 %) …… 66
B.15 今後 100 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.4$ の場合，単位 %) …… 66
B.16 今後 30 年以内の地震発生確率の極大値 (上段) 及びそのときの経過年数 (下段) …… 68
B.17 今後 50 年以内の地震発生確率の極大値 (上段) 及びそのときの経過年数 (下段) …… 68
B.18 今後 100 年以内の地震発生確率の極大値 (上段) 及びそのときの経過年数 (下段) …… 68

第 1 章

長期確率評価の考え方

本報告書では，ある断層（帯）に着目して，その断層の活動間隔・平均ずれ速度*・最新活動時期・活動区間（セグメント）等のパラメータを用いて，確率という数値で地震発生の可能性を評価する手法を提案するとともに，実際の断層（海溝沿いのプレート境界・陸域の活断層）で起こっている地震に適用した計算例を示す。現実には，各々の断層で各種パラメータが完全に分かっている場合はむしろ少ないので，パラメータの知られている度合いや考えられる地震の発生様式によって，様々な確率計算手法を使い分けることになる。

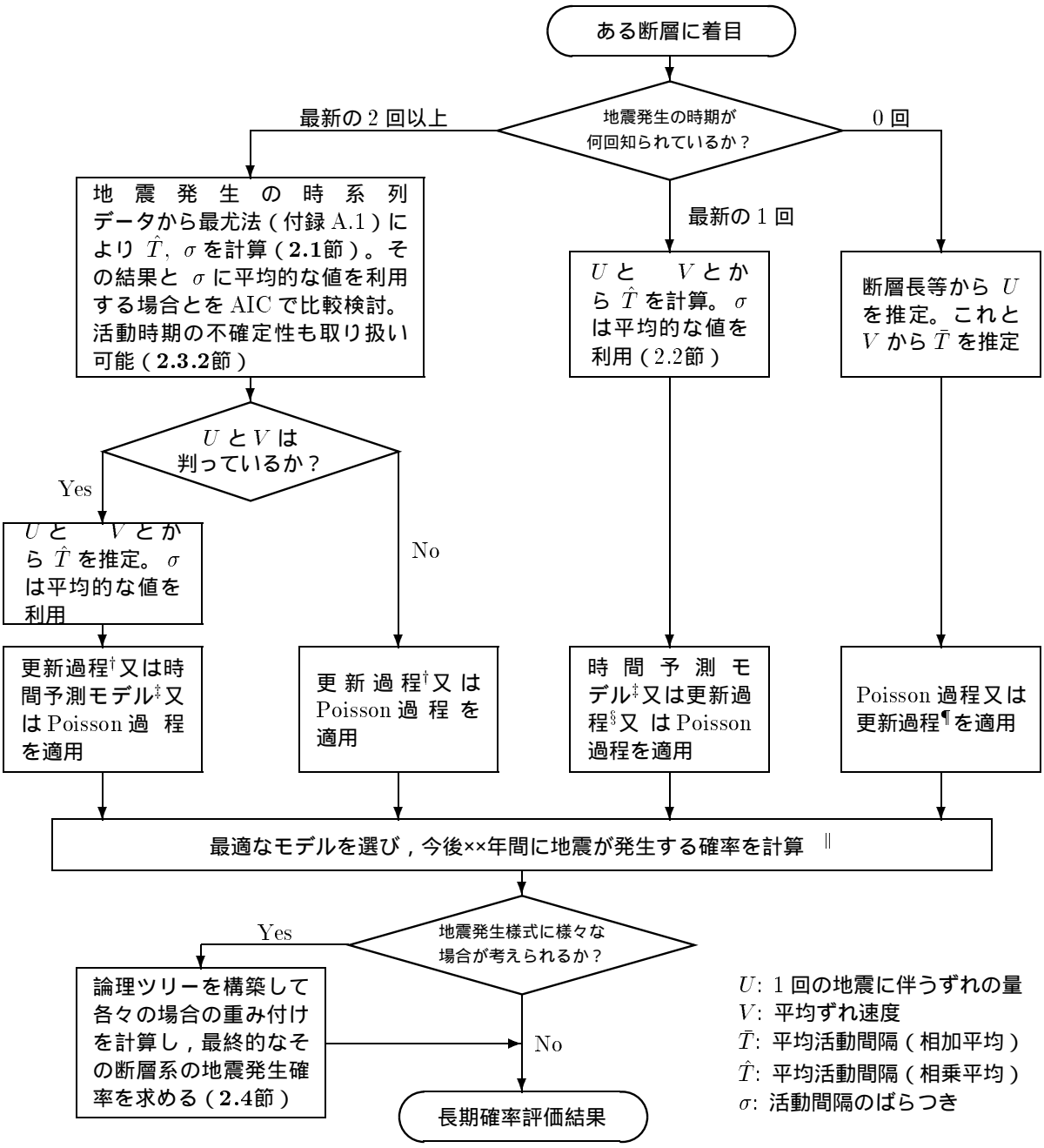
このような確率評価を試みた例として，米国においては既にカリフォルニア州の活断層に関する地震発生について確率予測がなされ，危険度マップが作成されている [2–4]。日本でも，プレート境界型地震を確率評価した研究は以前から行われており [5, 6]，また最近では陸域の活断層についても，例えば桑名断層の確率評価といった個別の事例研究 [7] にとどまらず，更に日本全土の活断層に関する危険度評価図の作成も行われている [8]。しかし，これらの研究では更新過程の計算に用いられた（確率）モデルの妥当性の検討は十分ではなかった。本報告書では，地震発生確率を計算する際に必要な様々なモデルを日本及び近海の同一地域で繰り返し多数回発生した地震のデータから検討し，更に更新過程の各モデルの良否まで議論したところに特徴がある。

ある断層に着目した時の長期確率評価の流れを図 1.1に示す。この図では更新過程や時間予測モデルの利用についての次のような考え方が基本になっている。

地震発生時期が数多く知られている断層の場合は，純粋な統計モデルのみを用い，地震発生の時系列データを更新過程（2.1節）を用いて確率で評価することができる。この場合，地震発生間隔の分布モデルには対数正規分布等を用いる。そのパラメータ（平均発生間隔及びそのばらつき）は最尤法（付録 A.1）を用いて，データに最もよく合うものを選ぶことができる。なお，陸域の活断層の場合，分布モデルのばらつきのパラメータは，個々の断層に個々の値を適用するよりも，一括して一つの平均的な値を適用するのがより適切であるという予備的な結果を得ている（4.1節）。また，地震発生時期に不確定性がある場合は，それも考慮に入れてパラメータの最尤値を求めることができる（2.3.2節）。

地震発生時期が最新の 2 回しか知られていない場合を更新過程で取り扱うときは，物理モデル（固有地震説に基づくモデル）も考慮し，それらの地震の間隔を平均発生間隔とし，ばらつきは上述の平均的な値を仮定して用いることができる。最新の 1 回の地震活動時期しか知られていない断層に

* 地質学的な時間スケールにおけるずれの速度。地震時にずれが生じる時の速度（破壊速度）ではない。この報告書で，用語全般については文献 [1] を参照。



† 地震発生の時系列データに更新過程を適用（2.1節）。その時系列の σ は，他と異なることが明らかな場合を除き，平均的な値を使用する。

‡ 時間予測モデルを適用して $\bar{T}$ を計算。σ は仮定（2.2節）。

x 他の資料から平均活動間隔を推定し，更新過程を適用できる場合もある。

– 歴史時代に活動していないことが確実な場合には，その情報を入れて取り扱う（2.3.1節の応用）。

k 最新活動時期に不確定性がある場合の取り扱いも可能（2.3.1節）。

図 1.1 長期確率評価手法の概念図

更新過程を適用するためには，さまざまな資料を利用して平均活動間隔を求める必要がある。この場合，ばらつきは平均的な値を仮定する。

最新の地震発生時期とそれに伴うずれの量，及び長期的な平均ずれ速度が知られている場合は，物理モデルである時間予測モデル（2.2節）を利用して次の地震までの期待される経過時間が求められる。この際，地震の発生間隔は対数正規分布に従うというモデルを利用する。なお，時間予測モデルの場合，長期的な平均ずれ速度は，地質学的なデータだけでなく，複数回の地震に伴うずれの量から求めることもできる。

地震発生時期が全く知られていない場合には，物理モデルを考慮し，何らかの方法（平均ずれ速度等を用いる）で平均的な地震発生間隔を推定し，地震の発生確率は時間的に不変と仮定した Poisson 過程を用いざるをえない。ただし，歴史時代に活動していないことが確実な場合は，何らかの方法で求めた平均的な地震発生間隔を用いて，活動していない期間の情報を取り込んで，更新過程で取り扱うことができる。

以上で用いる確率密度関数が決定されると，次に最新の地震からの経過時間を考慮して，条件付き確率によって，現在から今後××年間に地震が発生する確率という形で計算を実行する。その際，最新の地震発生時が確定せず，幅をもって推定されている場合は，別途確率の算出方法が提案されている（2.3.1節参照）。

最後に，同一の断層（帯）で活動区間が様々考えられる場合がある。その場合は，論理ツリーを構築して各々の場合の重み付けを考慮して確率的に評価することができる（2.4節参照）。

第 2 章

手 法

2.1 更新過程

2.1.1 概要

ある場所の気温やある銘柄の株価，あるいは電子部品が発生する電気的ノイズなどのように，時間とともに変動する量がある。これらを取り扱おうとする場合，それらの変動の物理学的あるいは社会学的なメカニズムの解明が不十分で，将来を正確に予測できない段階においては，統計的な処理が有効な場合がある。この場合，結論は確率的な表現で述べることになる。地震発生という現象についても同様なことが言える。ここでは，既に発生した地震の時系列データを処理するに当たって，確率過程 (stochastic process) をとりあげる。これにより，将来の地震発生時期を確率的な表現で述べることができるようになる。前述の気温や株価の例は，注目している量が時間的にたえず変動するものであったが，ある地域に起こった一定の大きさ以上の地震の時間的分布を議論するときには，各地震を時間軸上の 1 点に落とし，いわゆる点過程 (point process) として扱うことができる。

いま，地震が起きる時刻を $t_0, t_1, t_2, \cdots$ で表す。このとき，地震の発生間隔 $T_1 = t_1 - t_0, T_2 = t_2 - t_1, \cdots$ が互いに独立で，同一の分布をするような確率過程を更新過程 (renewal process) という。更新過程のうち，特に発生間隔が同一の指数分布に従う場合を Poisson 過程という。

2.1.2 統計モデル

更新過程として扱う地震発生間隔の分布モデルとして，以下の 4 つの確率密度関数で表されるものを検討した。

$$\text{対数正規分布} \quad f(t;m,\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t}\exp\left\{-\frac{(\ln t - m)^2}{2\sigma^2}\right\} \tag{2.1}$$

$$\text{ガンマ分布} \quad f(t;c,r) = \frac{c^r t^{r-1} e^{-ct}}{\Gamma(r)} \tag{2.2}$$

$$\text{Weibull 分布} \quad f(t;\alpha,\beta) = \alpha\beta t^{\beta-1}\exp(-\alpha t^{\beta}) \tag{2.3}$$

$$\text{二重指数分布} \quad f(t;a,b) = a\exp\left\{\frac{a}{b}(1-e^{bt}) + bt\right\} \tag{2.4}$$

以下，それぞれの分布について簡単に説明する。

対数正規分布　平均 m, 分散 σ^2 の正規分布に従う確率変数 x に対し，$x = \ln t$ で定義される確率変数 t は密度関数 (2.1) の分布に従う。この分布を対数正規分布という。世界多数の地震系列について，この分布がよく当てはまることが示されている [9]。密度関数に出てくる σ は，活動間隔 t が変動することによる $\ln t - m$ のばらつきと，活動間隔の推定に伴う m の誤差を含んでいる。オーダーとしては，$\sigma \sim 10^{-1}$ とされている。

ガンマ分布　単位時間当たりの生起率が c の Poisson 過程をある時刻から観測したとき，ちょうど r 個目の事象が起こるまでの時間は，密度関数 (2.2) の分布に従う。この分布をガンマ分布という。r は正の実数に拡張できる。なお，

$$\Gamma(r) \equiv \int_0^\infty e^{-u} u^{r-1} du \quad \text{（ガンマ関数）}$$

である。大地震の時系列のモデルについて取り上げられた更新過程モデルのうちの一つである [10]。

Weibull 分布　前回の破壊の後，時間 t まで破壊が起きていないという条件のもとで，t から $t + dt$ までの間に次の破壊が起こる確率を $\nu(t)dt$ とするとき，$\nu(t)$（信頼性理論でいうところの故障率関数，以下，本報告書では危険率 (hazard rate) と呼ぶ）が t の冪乗に比例する（密度関数 (2.3) の関数形に合わせれば，$\nu(t) = \alpha\beta t^{\beta-1}$）とした場合の確率分布である。この分布は信頼性理論でよく用いられるが，地殻が破壊しない（地震が起こらない）「信頼性」を決めるのにも使われる [11]。$\beta > 1$ のときは摩耗故障型，$\beta < 1$ の場合は初期故障型と呼ばれる。$\beta = 1$ については偶発故障型と呼ばれ，これは Poisson 過程に他ならない。この分布は世界各地の沈み込み帯の活動間隔 [6] に，また南米のプレート境界地震 [12] に対して適用された。

二重指数分布　前述の $\nu(t)$ について，岩石破壊の実験結果 [13]（岩石に応力を与えた後，岩石が破壊する確率が，応力の指数関数で表せる）をもとに，更に応力が t に比例すると仮定した場合，すなわち $\nu(t) = ae^{bt}$ としたときの確率分布モデルである。この分布を用いて，千島–北海道弧のプレート間地震の活動間隔が議論されている [5]。

以上の 4 つのモデルには，いずれも 2 つのパラメータが存在するが，有限個の地震発生時刻のデータからこのパラメータを推定して，それぞれの確率密度関数を決定するという手続きをとることになる。

以下では，上記の 4 つのモデルに加えて，最も基本的な更新過程である Poisson 過程：

$$f(t) = \frac{e^{-t/\bar{T}}}{\bar{T}} \tag{2.5}$$

についても比較のために用いた。ここで，$\bar{T}$ は平均活動間隔（相加平均）である。

2.1.3 確率の数値評価

例えば時間区間 $S < t \leq T$ を等分したとき，各分割区間に含まれている点の個数 $\xi_k = N((k-1)\Delta < t \leq k\Delta), (k = 1, 2, \cdots)$ で表される時系列で，$\{\xi_k\}$ が互いに独立であれば (非定常) Poisson 過程であるが，一般には 独立ではない。

もし細分化された区間の長さ Δ が小さければ $\{\xi_k\}$ はほとんどの k では 0 で，たまに点を含む区間で 1 の値をとる時系列 (0-1 系列) と考えられる。実際には点過程データは点を含む (つまり $\xi_i = 1$ となる) 時刻 $t_i = i\Delta$ のみの系列 $\{t_i\}$ で表記される。このとき，ある時刻 t_k の分割区間が点を含むかどうかは，$\xi_k = 1$ となる条件付き確率 $P\{\xi_k = 1|\xi_{k-1}, \cdots, \xi_1\}$ によって決まる。この条件付き確率の極限的表現として，条件付き強度関数 $\lambda(t|H_t)$ が次のように定義される。

$$P\{N(t, t+\Delta) = 1|H_t\} = \lambda(t|H_t)\Delta + o(\Delta) \tag{2.6}$$

ここで H_t は時刻 t 以前に発生した点事象の履歴 $\{t_i; t_i < t\}$ であり，$o(\Delta)$ は Δ に対して高位の無限小，すなわち

$$\lim_{\Delta \to 0} \frac{o(\Delta)}{\Delta} = 0$$

を満たす量を示す。すなわち，簡単に言えば，無視できる程度に小さい量のことである。強度 $\lambda(t|H_t)$ のとる値の大小につれて，微小区間 $t \leq \tau < t + \Delta$ で点事象が発生する確率が変化する。この関数は時刻 t 及びそれまでの履歴 $\{t_i; t_i < t\}$ の非負値関数である。この関数は他のデータなどの情報に依存することも考えられる。条件付き強度関数が与えられれば，これに対応する点過程が完全に決まる。例えば $\lambda(t|H_t)$ が履歴 H_t に無関係で時刻 t だけの関数である場合は非定常 Poisson 過程であり，時刻 t にも無関係な定数のときは定常 Poisson 過程である。そして，

$$\lambda(t|H_t) = \nu(t - t_{\text{last}}) \tag{2.7}$$

のように $t - t_{\text{last}}$ (t_{last} は時刻 t より前にあって最後に発生した点の時刻) だけの関数であれば，これは更新過程であることが証明できる。関数 $\nu(t)$ は 2.1.2で述べた危険率に他ならない。

$\lambda(t|H_t)$ は予測問題に直接に関係している。すなわち現時刻を t としたとき，極めて近い将来 $t < \tau < t + \Delta$ に点事象が発生する確率は，定義式 (2.6) によって近似的に $\lambda(t|H_t)\Delta$ であり，簡単な確率計算によれば [14]，x だけ先の未来まで点事象が発生しない確率は，

$$\exp\left(-\int_t^{t+x} \lambda(s|H_s)ds\right) \tag{2.8}$$

となる。別の見方をすると，x だけ先の未来までに点事象が 1 回以上発生する確率は，

$$1 - \exp\left(-\int_t^{t+x} \lambda(s|H_s)ds\right) \tag{2.9}$$

である。

以後，我々は更新過程を用いることとする。すなわち，条件付き強度関数 λ が式 (2.7) の形をしている場合を考え，かつ時刻の原点を t_{last} にとる。このとき，式 (2.8) に関連して，

$$\phi(t) \equiv \exp\left(-\int_0^t \nu(u)du\right) \tag{2.10}$$

なる量を考える。これは，式 (2.8) から類推すると，次の地震（故障）が前回の地震（故障）発生時点から t までは起こらない（逆に言えば，t 以降に起こる）場合の確率を表している。一般にこれを信頼度関数と呼んでいる。なお，確率密度関数 $f(t)$ は，式 (2.10) の微分によって

$$f(t) = \nu(t) \exp\left(- \int_0^t \nu(u) du \right) = \nu(t)\phi(t) \tag{2.11}$$

と表すことができる。

この信頼度関数を用いて，式 (2.9) と同様に，前回発生年からの経過時間 T まで地震が発生していないという条件の下で，T 以後の時間 ΔT 以内に地震が発生する確率 $P(T, \Delta T)$ は次のように求められる。

$$\begin{aligned} P(T, \Delta T) &\equiv P(T < t \leq T + \Delta T \mid T < t \leq \infty) \\ &= \frac{P(T < t \leq T + \Delta T)}{P(T < t \leq \infty)} \\ &= 1 - \frac{\phi(T + \Delta T)}{\phi(T)} \end{aligned} \tag{2.12}$$

以後の議論で，各モデルの危険率・信頼度関数・分布の平均（以下，μ と記す）などの特性値は重要な役割を果たす。本報告で扱うモデルのこれらの特性値を表 2.1にまとめておく。

表 2.1　本報告で扱うモデルの危険率・信頼度関数・分布の平均

モデル	危険率 $\nu(t)$	信頼度関数 $\phi(t)$	分布の平均 μ
対数正規分布 （式 (2.1) に対応）	$\dfrac{e^{-(\ln t - m)^2/2\sigma^2}}{\sqrt{2\pi}\sigma t} \Big/ \left\{ 1 - \Phi\left(\dfrac{\ln t - m}{\sigma} \right) \right\}$ *	$1 - \Phi\left(\dfrac{\ln t - m}{\sigma} \right)$	$\exp\left(m + \dfrac{\sigma^2}{2} \right)$
ガンマ分布 （式 (2.2) に対応）	$\dfrac{c^r t^{r-1} e^{-ct}}{\Gamma(r, ct)}$ †	$\dfrac{\Gamma(r, ct)}{\Gamma(r)}$	$\dfrac{r}{c}$
Weibull 分布 （式 (2.3) に対応）	$\alpha\beta t^{\beta - 1}$	$\exp(-\alpha t^\beta)$	$\dfrac{1}{\beta \sqrt[\beta]{\alpha}} \Gamma\left(\dfrac{1}{\beta} \right)$
二重指数分布 （式 (2.4) に対応）	ae^{bt}	$\exp\left\{ \dfrac{a}{b}(1 - e^{bt}) \right\}$	$-\dfrac{e^{a/b}}{b} \mathrm{Ei}\left(-\dfrac{a}{b} \right)$ ‡
指数分布 （式 (2.5) に対応）	$\dfrac{1}{\bar{T}}$（定数関数）	$e^{-t/\bar{T}}$	$\bar{T}$

* $\Phi(z)$ については，式 (2.18) 参照。
† $\Gamma(k, x)$ については，式 (2.19) 参照。
‡ $\mathrm{Ei}(-x) \equiv -\displaystyle\int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = -\lim_{k \to 0} \Gamma(k, x)$（積分指数関数）

式 (2.1) ~ (2.5) から，式 (2.12) 及び表 2.1を用いることによって，最新の地震発生から地震が発生せずに T 年経過した時点で，その後の ΔT 年間に地震が発生する確率 $P(T, \Delta T)$ は，以下の式 (2.13) ~ (2.17) のように求められる。

$$\text{対数正規分布} \quad P(T,\Delta T) = 1 - \frac{1 - \Phi\left(\dfrac{\ln(T+\Delta T) - m}{\sigma}\right)}{1 - \Phi\left(\dfrac{\ln T - m}{\sigma}\right)} \tag{2.13}$$

$$\text{ガンマ分布} \quad P(T,\Delta T) = 1 - \frac{\Gamma(r, c(T+\Delta T))}{\Gamma(r, cT)} \tag{2.14}$$

$$\text{Weibull 分布} \quad P(T,\Delta T) = 1 - \exp\left[-\alpha\left\{(T+\Delta T)^{\beta} - T^{\beta}\right\}\right] \tag{2.15}$$

$$\text{二重指数分布} \quad P(T,\Delta T) = 1 - \exp\left[-\frac{a}{b}\left\{e^{b(T+\Delta T)} - e^{bT}\right\}\right] \tag{2.16}$$

$$\text{指数分布（Poisson 過程）} \quad P(T,\Delta T) = 1 - e^{-\Delta T/\bar{T}} \tag{2.17}$$

$$\text{ここで，} \quad \Phi(z) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z} e^{-u^2/2} du \quad \text{（標準正規分布の累積分布関数）} \tag{2.18}$$

$$\Gamma(k,x) \equiv \int_{x}^{\infty} e^{-u} u^{k-1} du \quad \text{（第 2 種不完全ガンマ関数）} \tag{2.19}$$

式 (2.18) の $\Phi(z)$ は今後確率計算の過程で頻繁に出現するが，この関数値は，正規分布表から，あるいは数値計算[§]で求めることができる。

2.2 時間予測モデルの利用

2.2.1 概要

時間予測モデルとは，地震直前の応力レベルが一定である，すなわち断層の破壊強度が時間によらず一定というモデルである。定性的には，大きな地震の後では次の地震までの間隔が長く，小さな地震の後では間隔が短いということになる。このモデルは，世界各地の，同じ震源域から発生する地震の発生間隔のデータをよく説明するとされている [15, 16]。このモデルにたった場合，最新の地震時のずれの量と長期的な断層のずれ速度とから，最新の地震から次の地震までの期待される経過時間を次のようにして求めることができる。すなわち，最新の地震時のずれの量を U_{last} とし，長期的な断層のずれ速度を V とすると，その期待される経過時間 $T_{\text{t.p.}}$ は次式で求められる。

$$T_{\text{t.p.}} = U_{\text{last}} / V \tag{2.20}$$

[§] おおむね $|z| < 2.75$ 程度までは，$\Phi(z) = \dfrac{1}{2} + \dfrac{\operatorname{sgn} z}{2\sqrt{\pi}} \gamma\left(\dfrac{1}{2}, \dfrac{z^2}{2}\right)$ として計算する。ここで $\operatorname{sgn} z$ は z についての符号関数で，$z > 0$ で 1，$z = 0$ で 0，$z < 0$ で -1 を与える関数である。$|z| \geq 2.75$ においては，前述の式で $\gamma(1/2, z^2/2)$ を $\sqrt{\pi} - \Gamma(1/2, z^2/2)$ で置き換えて計算する。なお，$\gamma(k,x) = \Gamma(k) - \Gamma(k,x)$（第 1 種不完全ガンマ関数）である。

上式から，物理的な制約によって，モデルの確率密度関数に内在するパラメータのうちの一つが固定されることとなる。したがって，同一の確率密度関数を用いたとしても，地震発生時刻の系列はもはや更新過程ではなくなるが，最新の地震に関するデータだけが分かっている場合に更新過程に代わるものとして用いることができる。

データが複数知られている場合には，V を使わずに地震予測モデルから $T_{\mathrm{t.p.}}$ を求めることができる。例えば，最新の地震とその一つ前の地震発生時を，それぞれ T_{last}, T_{penult} とし，ずれの量をそれぞれ U_{last}, U_{penult} とすれば，

$$T_{\mathrm{t.p.}} = (T_{\mathrm{last}} - T_{\mathrm{penult}})U_{\mathrm{last}}/U_{\mathrm{penult}} \tag{2.21}$$

と求められる。この場合には更新過程と時間予測モデルを別々に適用して，両者の結果を比較検討することも可能となる。

2.2.2　確率の数値評価

確率密度関数 $f(t)$ の関数形としては，2.1.2で述べた分布等が用いられるが，ここでは地震発生確率が T に依存する場合の例として対数正規分布を，地震発生確率が T に依存しない場合の例として指数分布を扱う。

- 対数正規分布

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t}\exp\left[\frac{-\{\ln(t/\hat{T})\}^2}{2\sigma^2}\right]\ ,\ t \geq 0 \tag{2.22}$$

  ただし，$\hat{T}$ は活動間隔の相乗平均（最尤推定値）

- 指数分布（Poisson 過程）

$$f(t) = \frac{e^{-t/\bar{T}}}{\bar{T}}\ ,\ t \geq 0 \tag{2.23}$$

  ただし，$\bar{T}$ は活動間隔の相加平均（最尤推定値）

図 2.1にこの 2 つの分布の確率密度関数のグラフを示す。

確率を上述の 2 つのモデルで計算するに当たって，式 (2.22) に出てくる $\hat{T}$ と式 (2.23) に出てくる $\bar{T}$ に式 (2.20) の $T_{\mathrm{t.p.}}$ をあてはめる。指数分布に関しては，$\bar{T}$ が t の平均を与えるが，対数正規分布に関しては，$\ln\hat{T}$ が $\ln t$ の平均を与える¶。$\hat{T}$ も $\bar{T}$ もそれぞれの平均の最尤推定値になっている。その意味で，2 つのモデルの $\hat{T}$ 及び $\bar{T}$ を同様に扱うことは厳密には正しくないが，3.1.1.2及び3.2.2においてばらつきのパラメータ σ をいろいろ変えて計算するため，平均値そのものに σ がはいってこないような形式にする目的で，一律に $\hat{T}$ 及び $\bar{T}$ に $T_{\mathrm{t.p.}}$ をあてはめることとする。

2.3　不確定性の取り扱い

2.3.1　最新活動時期の不確定性

活断層調査の結果からは，前回の地震発生時期が確定されるものはむしろ少なく，ある幅をもっていることのほうが多い。そこで，最新の地震発生時刻がある分布に従っているとして平均化して

¶ ちなみに，対数正規分布 (2.22) の t についての平均は，$\hat{T}\exp(\sigma^2/2)$ であり，$\hat{T}$ より若干大きい。

図 2.1 対数正規分布と指数分布の確率密度関数 (それぞれ式 (2.22) と式 (2.23) に対応) のグラフの一例。$\hat{T} = \bar{T} = 1000, \sigma = 0.5$ で図示

しまう方法が考えられるが，ここでは危険率を平均化して発生確率を求める場合 [17] と，発生確率そのものを平均化する場合 [18] について考える。

2.3.1.1 危険率の平均化

$\psi(\tau)$ を最新の地震発生時刻に関する不確定性の確率密度関数，$\nu(t)$ を 2.1.2で述べた危険率とすれば，時刻 $t > 0$ での発生危険度は，

$$\lambda(t|H_t) = \int_{-\infty}^{0} \nu(t-\tau)\psi(\tau)d\tau = -\int_{-\infty}^{0} \frac{\phi'(t-\tau)}{\phi(t-\tau)}\psi(\tau)d\tau \tag{2.24}$$

である。t_g を前回の地震からの経過時間の上限値，t_h をその下限値 (例えば歴史上地震が発生していないことが確実な期間) とすると，例えば $\psi(\tau)$ として一様分布：$\psi(\tau) = 1_{[-t_g,-t_h]}(\tau)/(t_g - t_h)$ をとれば，式 (2.24) は

$$\lambda(t|H_t) = -\frac{1}{t_g - t_h}\int_{-t_g}^{-t_h} \frac{\phi'(t-\tau)}{\phi(t-\tau)}d\tau = \frac{\ln\phi(t+t_g) - \ln\phi(t+t_h)}{t_g - t_h} \tag{2.25}$$

となり式 (2.9) によって，現在 (時刻 0) まで地震がないとき，その後の時間 ΔT までに地震が発生する確率は，

$$P(\Delta T) = 1 - \exp\left(-\int_0^{\Delta T} \lambda(t|H_t)dt\right) = 1 - \exp\left(\frac{1}{t_g - t_h}\int_0^{\Delta T} \ln\frac{\phi(t+t_g)}{\phi(t+t_h)}dt\right) \tag{2.26}$$

となる。

2.3.1.2　発生確率の平均化

この場合，現在から ΔT 年までに地震が発生する確率 $P(\Delta T)$ は，式 (2.12) の $P(T, \Delta T)$ を前回の地震の発生時刻に関する不確定性の確率密度関数で平均化して求められる。すなわち，

$$P(\Delta T) = \int_{-\infty}^{0} P(\tau, \Delta T)\psi(\tau)d\tau = 1 - \int_{-\infty}^{0} \frac{\phi(\tau + \Delta T)}{\phi(\tau)}\psi(\tau)d\tau \tag{2.27}$$

前例と同様に $\psi(\tau)$ として一様分布： $\psi(\tau) = 1_{[-t_g, -t_h]}(\tau)/(t_g - t_h)$ をとれば，式 (2.27) は

$$P(\Delta T) = 1 - \frac{1}{t_g - t_h}\int_{t_h}^{t_g} \frac{\phi(\tau + \Delta T)}{\phi(\tau)}\psi(\tau)d\tau \tag{2.28}$$

と書き表すことができる。

奥村ら [18] は，$\psi(\tau)$ として

$$\psi(\tau) = \phi(\tau)1_{[-t_g, -t_h]}(\tau) \Big/ \int_{t_h}^{t_g} \phi(\tau)d\tau \tag{2.29}$$

をとった。このとき $P(\Delta T)$ は，

$$\begin{aligned} P(\Delta T) &= 1 - \int_{t_h}^{t_g} \phi(\tau + \Delta T)d\tau \Big/ \int_{t_h}^{t_g} \phi(\tau)d\tau \\ &= 1 - \int_{t_h + \Delta T}^{t_g + \Delta T} \phi(\tau)d\tau \Big/ \int_{t_h}^{t_g} \phi(\tau)d\tau \end{aligned} \tag{2.30}$$

と表され，考えているモデルの信頼度関数の不定積分が求められれば式 (2.30) は容易に計算できる。上限値 t_g が不明のときは，$t_g = \infty$ にせざるを得ないが，t_g がある値（例えば t の平均値あるいは中央値 $+$ 分布の標準偏差の 7 倍）を越えていないと仮定して，式 (2.30) の考え方を適用できるとしている [18]。

2.3.2　その他の活動時期の不確定性

最新の地震のみならず，一般に観測事象列データ $\{t_i\}$ が不確定性を持っている場合には，以下のような取り扱いが可能である [17]。

観測事象列データ $\{t_i\}$ がそれぞれ密度関数 $\psi_i(t)$ に従うとき，不確定データをパラメータとして，これをいわゆる事前分布と考える。確定した時刻については $\psi_i(s) = \delta_{t_i}(s)$（Dirac のデルタ関数）を考えればよい。尤度 $L_{[S,T]}(\theta; t_1, t_2, \cdots, t_n)$（付録 A.2参照）と合わせた事後分布（確率分布）

$$\varphi(t_1, \cdots, t_n|\theta) = \frac{L_{[S,T]}(\theta; t_1, t_2, \cdots, t_n)\prod_{i=1}^{n}\psi_i(t_i)}{\mathcal{L}_{[S,T]}(\theta)} \tag{2.31}$$

が不確定なデータ $\{t_i\}$ の位置の確からしさを示す同時分布を与える。ここで，分母は分子の $\{t_i\}$ に関する積分（規格化因子）

$$\mathcal{L}_{[S,T]}(\theta) = \int_S^T \cdots \int_S^T L_{[S,T]}(\theta; t_1, t_2, \cdots, t_n)\prod_{i=1}^{n}\psi_i(t_i)dt_1 \cdots dt_n \tag{2.32}$$

であるが，これは点過程モデルのパラメータ θ に関する尤度と考えられ，Bayes モデルの尤度（又は積分尤度）と呼ばれている。これを最大化することによってパラメータ θ の最尤推定値を求める。更新過程モデルの場合，その対数尤度関数は次のように書ける。

$$\begin{aligned}\ln \mathcal{L}_{[S,T]}(\theta) &= -\ln \mu_\theta \\ &+ \ln \int_S^T \cdots \int_S^T \psi_\theta(t_1 - S) \left\{ \prod_{i=2}^{n} f_\theta(t_i - t_{i-1}) \right\} \psi_\theta(T - t_n) \prod_{i=1}^{n} \psi_n(t_i) dt_1 \cdots dt_n \end{aligned} \tag{2.33}$$

積分は密度関数 $\psi(t)$ の台 $(\mathrm{support})$ [‖]を等分に離散化して逐次的に数値積分を実行する（台が $\{0\}$ ならば Dirac のデルタ関数）。すなわち

$$G_1(t_1) = \phi(t_1 - S); \tag{2.34a}$$

$$G_i(t_i) = \int_S^T f_\theta(t_i - t_{i-1}) \psi_{i-1}(t_{i-1}) G_{i-1}(t_{i-1}) dt_{i-1}, \text{ for } i = 2, \cdots, n; \tag{2.34b}$$

$$G = \int_S^T \psi_\theta(T - t_n) \psi_n(t_n) G_n(t_n) dt_n \tag{2.34c}$$

ただし，$t_{i-1} \geq t_i$ ならば $f_\theta(t_i - t_{i-1}) = 0$ であることに注意する。このようにして，もしすべてのデータ $t_1, t_2, \cdots, t_n$ が確定していれば，式 (2.33) が付録 A.2の式 $(\mathrm{A}.6)$ で記述される通常の対数尤度に帰着することが分かる。

以上の推定方式は信頼性のあるデータとそうでないデータを同等に扱わないで，それぞれの不確定性に見合ってモデルのパラメータ θ を推定できるので有利である。不確定時刻のそれぞれの推定周辺密度関数は，その他の時刻に関して事後分布を積分して得ることができる。

2.4 論理ツリーの適用

確率を計算する際に，一つの事象に対して様々な描像が考えられる場合の策として，論理ツリーを構築して，その分岐毎に確率に「重み」をつける方法がある。

論理ツリーを適用するケースとしては，着目している断層帯がそれぞれ活動間隔の異なる断層（セグメント）に分かれていて，地震を起こす起震断層としての各セグメントの組合わせがいろいろ有り得る場合や，地震発生時期の特定が非常に困難な場合等が考えられる。

カリフォルニアにおける評価 [4] においては，同地域の複数の起震断層に対して，「カスケードモデル」というモデルが提唱されている。これは，個々のセグメント毎にあらかじめ今後何年かの地震発生確率を求めておき，確率の値が重複する分だけ同時に地震を起こすとするものであるが，このモデルは個々の断層の発生確率に非常に依存しており，複数の断層のうち一つでも確率が低いものがあれば，それがすべての組み合わせについて同時に動く確率を低くしてしまうことになる。

後の 3.3.3.2では，このカスケードモデルとは異なる手法を提案する。その手法では，一つのセグメントの活動に対し，他のセグメントが一定の確率で同時に活動することを仮定している。すなわち，誘発的な活動が考慮されているが，カスケードモデルではそのような効果は考慮されていない。

[‖] 関数 f の台とは，$\{t : f(t) \neq 0\}$ という集合の閉包のことである。

その意味で 3.3.3.2に提案するモデルはカスケードモデルとは対極に位置するモデルである。実際の場合の適用については，両者の兼ね合いを考慮すべきであろう。

第 3 章

適 用 例

3.1　プレート間地震

南海トラフにおける海溝型地震と宮城県沖地震 [10] を例にとり，対数正規分布・ガンマ分布・ Weibull 分布・二重指数分布の 4 つの更新過程を用い，最尤法により各分布のパラメータの最尤値を求めた後，今後 30 年，50 年及び 100 年以内の地震発生確率を求めた。また各モデルのパラメータの最尤値を求めるに当たって，Poisson 過程を含めて，いずれのモデルがデータによく合うかを調べた。南海トラフ沿いの地震については，発生時刻のデータ数を少なくした場合や，時間予測モデルによる評価も試みた。なお、ここで用いたデータは暫定的なものである。今後、研究に進展が見られた場合には、その成果を取り入れて再計算する必要がある。

3.1.1　南海トラフ沿いの巨大地震

3.1.1.1　更新過程を利用する場合

駿河湾内から四国沖にかけてのプレート境界において，$M8$ 級の巨大地震が 100 ~ 200 年間隔で繰り返し発生している。歴史記録によるこの地域の地震発生年月日及びそれから得られる発生間隔の data set を表 3.1に複数示す。この表の data set Ⅰ は，文献 [10, p.58] で提示されている data set をもとにし，1498 年の地震発生月日 (9 月 20 日) を 7 月 9 日に変更したものである。これは，最近の研究 [19] で，中国の上海付近に津波が伝わったことを根拠として，この年の 7 月 9 日に南海地震が発生したと主張されていることに基づく。更に data set Ⅱ ~ data set Ⅴ として，表 3.1(b) ~ 3.1(e)のように再構築したものを加えた。 data set Ⅱ は data set Ⅰ から，1361 年以降の地震を抽出したものである。 data set Ⅲ (表 3.1(c)) は data set Ⅰ から 684 年と 887 年の地震を除き，考古学調査の結果 [20] に基づき，1099 年の地震と 1361 年の地震の間に一つ地震を加えたもので，比較的発生間隔のばらつきが小さい例である。 data set Ⅳ (表 3.1(d)) は想定「東海地震」の発生確率を，最も単純な仮定に基づいて試算するためのものである。対象とする震源域を紀伊半島の東側から駿河湾にかけてのプレート境界に限ることとし，data set Ⅰ に示した地震発生年月日を，この震源域にふさわしい日付に変更し，かつ恣意的に 1944 年の東南海地震を含めていない。ただし，684 年と 887 年の地震の発生日は仮のものである。これらの年には南海地域を震源域とする巨大地震が発生したことが知られている。また，ほぼ同時期に東南海地域でも巨大地震が発生したことを示す考古学的な資料があるが，その発生日までの特定は困難である。このようなことから，data set Ⅳ では同

じ日に発生したと仮定した。data set Ⅴ（表 3.1(e)）は，データが少ししか分かっていない場合との違いを比較する目的で，信頼度の高い最近の少数のデータのみのセットとして加えた。

表 3.1　歴史に記録されている南海地域の巨大地震の発生年月日（西暦）及び発生間隔

684 年	11 月	29 日	
887 年	8 月	26 日	202.7397 年
1099 年	2 月	22 日	211.4932 年
1361 年	8 月	3 日	262.4438 年
1498 年	7 月	9 日	136.9342 年
1605 年	2 月	3 日	106.5699 年
1707 年	10 月	28 日	102.7315 年
1854 年	12 月	24 日	147.1562 年
1946 年	12 月	21 日	91.9945 年

(a) data set Ⅰ（文献 [10] の Table 1 のうち，1498 年の地震発生年月日を 9 月 20 日から 7 月 9 日に変更したもの）

1361 年	8 月	3 日	
1498 年	7 月	9 日	136.9342 年
1605 年	2 月	3 日	106.5699 年
1707 年	10 月	28 日	102.7315 年
1854 年	12 月	24 日	147.1562 年
1946 年	12 月	21 日	91.9945 年

(b) data set Ⅱ（data set Ⅰのうち 1361 年以降のもの）

1099 年	2 月	22 日	
1233 年	3 月	24 日	134.0822 年
1361 年	8 月	3 日	128.3616 年
1498 年	7 月	9 日	136.9342 年
1605 年	2 月	3 日	106.5699 年
1707 年	10 月	28 日	102.7315 年
1854 年	12 月	24 日	147.1562 年
1946 年	12 月	21 日	91.9945 年

(c) data set Ⅲ（data set Ⅰのうち 1099 年以降のものに 1233 年の地震を加えたもの）

684 年	11 月	29 日	
887 年	8 月	26 日	202.7397 年
1096 年	12 月	17 日	209.3096 年
1361 年	8 月	3 日	264.6274 年
1498 年	9 月	20 日	137.1315 年
1605 年	2 月	3 日	106.3726 年
1707 年	10 月	28 日	102.7315 年
1854 年	12 月	23 日	147.1534 年

(d) data set Ⅳ（想定「東海地震」の発生確率を計算するために再構築したもの。684 年と 887 年の発生日は仮定）

1605 年	2 月	3 日	
1707 年	10 月	28 日	102.7315 年
1854 年	12 月	24 日	147.1562 年
1946 年	12 月	21 日	91.9945 年

(e) data set Ⅴ（data set Ⅰのうち 1605 年以降のもの）

以上の data set から，式 (2.1) ~ (2.4) で表される 4 つの確率密度関数について，最尤法により (m, σ), (c, r), (α, β), (a, b) の各パラメータの最尤値を求めた*。その結果を表 3.2に示す。表には，各モデルの AIC [21,22]（赤池情報量基準 (Akaike Information Criterion) の略。 AIC $\equiv -2\times$（モデルの最大対数尤度）+ $2\times$（モデルの自由パラメータ数）と定義され，その値が小さいほど，データを良く説明する）が示してあり，各 data set 毎に 4 つのモデルのうち最小の AIC を与える数値を表中 bold 体で示した。また表 3.2には式 (2.5) で表される Poisson 過程を用いたときの AIC も示してある。表 3.2から，各モデルの AIC の差は大きくても 2 程度と，大差はない。実際，図 3.1の累積分布関数のグラフを見ても， 4 つのモデルの間には，地震発生直後や発生間隔の平均値付近，また平均値を過ぎたあたりの関数値にそれぞれの特徴が認められるものの，大差がないことが分かる。その一方で， Poisson 過程（指数分布）の AIC は，各 data set での AIC の最小値と 5 ~ 18 の差がある。これは，明らかに有意に差があると言える。つまり，南海地域の巨大地震の発生間隔は Poisson 過程で説明するのは無理があると言える。

図 3.1 表 3.1(a)の data set I における地震発生間隔の累積分布と，各モデルの累積分布関数 $1-\phi(t)$ のグラフ（文献 [10, p.59] の Fig.3 より。実際は， 1498 年の発生年月日を変更しているので正確に一致しないが，差はごく小さい）

* 最尤法については，付録 A.1を，パラメータ決定の実際については，付録 A.1.2を参照。

表 3.2 data set Ⅰ ~ Ⅴについて最尤法によって求めた各モデルのパラメータと AIC の値，及び Poisson 過程（指数分布）の AIC の値。bold 体は 4 モデル中の最小の AIC を示す

data set		南海Ⅰ	南海Ⅱ
対数正規分布	m	4.99622	4.74673
	σ	0.358452	0.178658
	AIC	**90.2**	**48.4**
ガンマ分布	c	0.0499159	0.266589
	r	7.87462	31.2115
	AIC	90.5	48.5
Weibull 分布	α	1.92890×10^{-7}	1.48580×10^{-13}
	β	2.98597	6.10604
	AIC	91.1	48.9
二重指数分布	a	9.88539×10^{-4}	8.25415×10^{-5}
	b	0.0151521	0.0501390
	AIC	92.5	49.3
Poisson	AIC	99.0	59.6
標本平均		157.758 年	117.077 年
標本標準偏差		57.4336 年	21.1867 年

data set		南海Ⅲ	南海Ⅳ	南海Ⅴ
対数正規分布	m	4.78385	5.06365	4.71511
	σ	0.162419	0.332563	0.200559
	AIC	65.4	**79.3**	**31.2**
ガンマ分布	c	0.320880	0.0551132	0.213000
	r	38.8645	9.21230	24.2737
	AIC	65.3	79.5	31.3
Weibull 分布	α	7.67902×10^{-17}	3.51502×10^{-8}	2.13273×10^{-11}
	β	7.63226	3.28135	5.09777
	AIC	**64.8**	79.9	31.7
二重指数分布	a	1.80781×10^{-5}	7.10966×10^{-4}	2.15922×10^{-4}
	b	0.0625031	0.0164466	0.0417169
	AIC	64.9	81.0	32.1
Poisson	AIC	83.2	87.7	36.4
標本平均		121.119 年	167.152 年	113.961 年
標本標準偏差		19.0734 年	55.6655 年	23.8785 年

表 3.2のパラメータから，式 (2.13) ~ (2.17) に基づいて，最新の地震発生年 (1946 年) から 51 年が経過しているものとして (data set Ⅳ に関しては 1854 年から 143 年が経過しているものとして)，今後 30 年， 50 年及び 100 年以内に地震が発生する確率を求めると表 3.3のようになる。

また，参考までに 1946 年の南海地震発生直前の確率を計算するために，data set Ⅱ ~ Ⅲ の最新の地震を除いたもの (data set Ⅱ′ ~ Ⅲ′ とする) において， 1946 年時点での今後 30 年， 50 年及び 100 年以内に地震が発生する確率を表 3.5に示した。なお，パラメータの最尤値は表 3.4に示した。data set Ⅰ ~ Ⅴ の場合と同様に， 4 つのモデルの AIC には有意な差は認められないが， Poisson 過程 (指数分布) の AIC は，やはり有意に大きく，このモデルではデータを説明するのは無理があることが分かる。

表 3.3 各分布毎の，各 data set の 1997 年時点での今後 30 年， 50 年及び 100 年の地震発生確率

	data set	30 年確率	50 年確率	100 年確率
対数正規分布	南海Ⅰ	4.5%	14.3%	52.3%
	南海Ⅱ	2.4%	23.1%	93.5%
	南海Ⅲ	0.8%	14.9%	92.5%
	南海Ⅳ	36.4%	55.6%	84.1%
	南海Ⅴ	5.5%	30.9%	93.4%
ガンマ分布	南海Ⅰ	5.4%	14.4%	49.6%
	南海Ⅱ	3.0%	22.8%	93.9%
	南海Ⅲ	1.1%	14.8%	93.1%
	南海Ⅳ	34.8%	54.6%	85.3%
	南海Ⅴ	6.4%	30.3%	93.6%
Weibull 分布	南海Ⅰ	7.0%	15.0%	44.8%
	南海Ⅱ	6.1%	22.4%	95.0%
	南海Ⅲ	2.7%	14.1%	96.2%
	南海Ⅳ	30.3%	50.1%	85.8%
	南海Ⅴ	9.8%	28.9%	93.4%
二重指数分布	南海Ⅰ	7.8%	14.8%	39.4%
	南海Ⅱ	7.2%	21.3%	95.8%
	南海Ⅲ	3.8%	14.1%	97.3%
	南海Ⅳ	25.1%	44.0%	85.0%
	南海Ⅴ	10.3%	26.4%	93.8%
Poisson 過程	南海Ⅰ	17.3%	27.2%	46.9%
	南海Ⅱ	22.6%	34.8%	57.4%
	南海Ⅲ	21.9%	33.8%	56.2%
	南海Ⅳ	16.4%	25.9%	45.0%
	南海Ⅴ	23.1%	35.5%	58.4%

表 3.4 data set Ⅱ′ ~ Ⅲ′ について最尤法によって求めた各モデルのパラメータと AIC の値，及び Poisson 過程（指数分布）の AIC の値。 bold 体は 4 モデル中の最小の AIC を示す

data set		南海 Ⅱ′	南海 Ⅲ′
対数正規分布	m	4.80298	4.82754
	σ	0.155171	0.131972
	AIC	**38.9**	54.7
ガンマ分布	c	0.338288	0.466748
	r	41.7271	58.7975
	AIC	38.9	54.5
Weibull 分布	α	1.41904×10^{-16}	3.12041×10^{-21}
	β	7.47732	9.65595
	AIC	39.0	53.9
二重指数分布	a	2.08041×10^{-5}	2.84706×10^{-6}
	b	0.0599543	0.0762764
	AIC	39.1	**53.9**
Poisson 過程（指数分布）	AIC	48.5	72.0
標本平均		123.348 年	125.973 年
標本標準偏差		19.0916 年	16.1089 年

表 3.5 各分布毎の，1946 年時点の今後 30 年，50 年及び 100 年の地震発生確率

	data set	30 年確率	50 年確率	100 年確率
対数正規分布	南海 Ⅱ′	48.5%	83.2%	99.8%
	南海 Ⅲ′	42.3%	83.3%	99.9%
ガンマ分布	南海 Ⅱ′	47.1%	83.0%	99.9%
	南海 Ⅲ′	41.3%	83.4%	∼100.0%
Weibull 分布	南海 Ⅱ′	39.2%	81.6%	∼100.0%
	南海 Ⅲ′	33.5%	84.5%	∼100.0%
二重指数分布	南海 Ⅱ′	35.3%	80.6%	∼100.0%
	南海 Ⅲ′	30.9%	84.2%	∼100.0%
Poisson 過程	南海 Ⅱ′	21.6%	33.3%	55.5%
	南海 Ⅲ′	21.2%	32.8%	54.8%

3.1.1.2 時間予測モデルを利用する場合

南海トラフの巨大地震に関係して，例えば高知県室戸岬では地震の前には 5 ~ $7\mathrm{mm}/$ 年くらいの割合で沈降しており，地震のときには 1 ~ $2\mathrm{m}$ 隆起する。この室戸岬の室津港において，江戸時代に潮位を測った結果が日記に残されている [15]。この結果から，地震前と後での隆起量を求めることができる。 1946 年の南海地震の際には，室津では $1.15\mathrm{m}$ の隆起が測定された [23]。これらの資料をもとに得られた室津港における地震時隆起量と地震発生間隔との関係を図 3.2に示す。

図 3.2 過去に南海道において繰り返し起きた地震の大きさ (室津港での隆起量) と発生間隔との関係 (文献 [15] の図より)

図 3.2に基づき，パラメータとして以下の量を用いた。

前回発生年	西暦 1946 年
平均ずれ速度	$V = 0.0124\mathrm{m}/$ 年 (図 3.2から概算)
前回のずれの量	$U_{\mathrm{last}} = 1.15\mathrm{m}$
活動間隔†	V と U_{last} から，$T_{\mathrm{t.p.}} = U_{\mathrm{last}}/V = 92.74$ 年とする
そのばらつき	式 (2.22) の σ にして 0.2 及び 0.3 とする

前回の地震からの経過年数 T は，50 年である。活動間隔のばらつきの程度 (式 (2.22) の σ) は 0.2 及び 0.3 とした。

地震発生確率の試算結果をまとめると，表 3.6のようになる。

† 最新の地震から次回の地震までの間隔

表 3.6　南海トラフにおける，発生間隔の分布関数として対数正規分布及び指数分布を用いたときの今後 30 年， 50 年， 100 年の地震発生確率

モデル		30 年確率	50 年確率	100 年確率
対数正規分布	$\sigma = 0.2$	22.9%	64.7%	99.2%
	$\sigma = 0.3$	29.7%	59.1%	94.4%
指数分布（Poisson 過程）		27.6%	41.7%	66.0%

3.1.2　宮城県沖地震

data set は，南海トラフの地震と同じく文献 [10] で提示されているものを用いた。宮城県沖地震については，発生間隔が短いので，今後 5 年， 10 年， 20 年及び 30 年確率を求めた。

表 3.7　歴史に記録されている宮城県沖の大地震の発生年月日（西暦）及び発生間隔（data set Ⅰ及びⅡは文献 [10] による）

1616 年	9 月	9 日	
1646 年	6 月	9 日	29.7479 年
1678 年	10 月	2 日	32.3151 年
1736 年	4 月	30 日	57.5753 年
1770 年	5 月	27 日	34.0740 年
1793 年	2 月	17 日	22.7288 年
1835 年	7 月	20 日	42.4192 年
1861 年	10 月	21 日	26.1726 年
1897 年	2 月	20 日	35.4164 年
1936 年	11 月	3 日	39.7014 年
1978 年	6 月	12 日	41.6055 年

(a) data set Ⅰ（文献 [10] の Table 4 による）

1616 年	9 月	9 日	
1646 年	6 月	9 日	29.7479 年
1678 年	10 月	2 日	32.3151 年
1736 年	4 月	30 日	57.5753 年
1793 年	2 月	17 日	56.8027 年
1835 年	7 月	20 日	42.4192 年
1861 年	10 月	21 日	26.1726 年
1897 年	2 月	20 日	35.4164 年
1936 年	11 月	3 日	39.7014 年
1978 年	6 月	12 日	41.6055 年

(b) data set Ⅱ（data set Ⅰから存在の疑わしい 1770 年の地震を除いたもの）

1616 年	9 月	9 日	
1646 年	6 月	9 日	29.7479 年
1678 年	10 月	2 日	32.3151 年
1736 年	4 月	30 日	57.5753 年
1835 年	7 月	20 日	99.2219 年
1861 年	10 月	21 日	26.1726 年
1897 年	2 月	20 日	35.4164 年
1936 年	11 月	3 日	39.7014 年
1978 年	6 月	12 日	41.6055 年

(c) data set Ⅲ（data set Ⅰから存在の疑わしい 1770 年の地震及び，沖合いの大地震で，この系列に含まれるかどうか疑問のある 1793 年の地震を除いたもの）

表 3.8 最尤法によって求めた各モデルのパラメータと AIC の値，及び Poisson 過程（指数分布）の AIC の値。 bold 体は 4 モデル中の最小の AIC を示す

data set		宮城沖 I	宮城沖 II	宮城沖 III
対数正規分布	m	3.55635	3.66121	3.72013
	σ	0.252620	0.253785	0.399630
	AIC	**75.9**	**70.8**	**71.6**
ガンマ分布	c	0.435965	0.386430	0.124550
	r	15.7713	15.5326	5.63211
	AIC	76.1	70.9	72.9
Weibull 分布	α	4.50994×10^{-7}	1.55842×10^{-7}	1.97695×10^{-4}
	β	3.96610	4.13565	2.16528
	AIC	77.7	71.9	74.7
二重指数分布	a	2.38569×10^{-3}	1.50681×10^{-3}	9.28282×10^{-3}
	b	0.0892133	0.0905413	0.0241590
	AIC	80.2	73.5	77.4
Poisson 過程（指数分布）	AIC	99.0	86.5	79.0
標本平均		36.1756 年	40.1951 年	45.2195 年
標本標準偏差		9.37779 年	10.4044 年	22.2927 年

表 3.9 各分布毎の，各 data set の 1997 年時点での今後 5 年，10 年，20 年及び 30 年の地震発生確率

	data set	5 年確率	10 年確率	20 年確率	30 年確率
対数正規分布	宮城沖 I	5.9%	22.0%	66.2%	90.8%
	宮城沖 II	2.6%	12.1%	50.3%	81.8%
	宮城沖 III	6.3%	16.7%	42.9%	65.1%
ガンマ分布	宮城沖 I	6.3%	21.3%	64.6%	91.0%
	宮城沖 II	3.2%	12.4%	48.4%	81.2%
	宮城沖 III	6.6%	16.0%	39.1%	61.1%
Weibull 分布	宮城沖 I	7.8%	20.7%	58.0%	89.2%
	宮城沖 II	4.8%	13.4%	43.0%	77.5%
	宮城沖 III	7.4%	16.0%	35.3%	54.5%
二重指数分布	宮城沖 I	7.9%	18.9%	51.4%	86.1%
	宮城沖 II	5.2%	12.8%	37.8%	73.1%
	宮城沖 III	7.5%	15.3%	31.5%	47.6%
Poisson 過程	宮城沖 I	12.9%	24.2%	42.5%	56.4%
	宮城沖 II	11.7%	22.0%	39.2%	52.6%
	宮城沖 III	10.5%	19.8%	35.7%	48.5%

3.2　陸域の活断層で発生する地震

3.2.1　更新過程を利用する事例

阿寺断層，丹那断層（北伊豆・名賀地区），跡津川断層及び長野盆地西縁断層における地震を例にとり，トレンチ調査やボーリング調査から推定された地震の発生間隔の data set（暫定）に対し，対数正規分布・ガンマ分布・Weibull 分布・二重指数分布を用いて，最尤法により各分布のパラメータの最尤値を求めた後，今後 30 年，50 年及び 100 年以内の地震発生確率を求めた。

3.2.1.1　阿寺断層

data set は，地質調査所が，文献 [24] を改訂したもの及び文献 [25, 26] の結果を取りまとめたものを用いた。この data set のうち，最も古い地震の発生年代は推定幅が広く，他の地震と同列に扱うことがはばかられるので，それを除いた data set についても計算した。表 3.10に実際に計算に用いた data set を示す。 以上の data set から，式 (2.1) ~ (2.4) の分布について，3.1での手続きと同様

表 3.10　阿寺断層の地震の発生年と発生間隔。発生間隔の算出には発生年の中央値を採用。以後 data set 阿寺 I とし，最古の地震を除いたものを data set 阿寺 II とする。更に最新の地震を除いたものをそれぞれ data set 阿寺 I′，data set 阿寺 II′ とする

6,496±177 BC ~ 8,477±271 BC	
6,458±143 BC ~ 6,496±177 BC	1,009.5 年
4,178±160 BC ~ 4,284±177 BC	2,246 年
1,947±140 BC ~ 2,331±146 BC	2,092 年
68± 96 AD ~ 381±216 BC	1,914.5 年
1,586 AD（天正地震）	1,810.5 年

に各パラメータの最尤値を求めた。各 data set でのパラメータの最尤値を表 3.11に示す。

表を見る限り，AIC には有意な差は認められず，いずれのモデルが適切かはこのデータからは判断できない。また，この表からも，Poisson 過程（指数分布）の AIC は，4 つのモデルと比べて有意に大きいと言える。

上表のパラメータを用いて，data set I に関する 1997 年時点の，また data set I′ に関する最新の地震発生直前時点の今後 30 年，50 年及び 100 年以内に地震が発生する確率を計算した。結果を表 3.12に示す。

表 3.11 data set Ⅰ ~ Ⅱ′ について最尤法によって求めた各モデルのパラメータと AIC の値，及び Poisson 過程（指数分布）の AIC の値。bold 体は 4 モデル中の最小の AIC を示す

data set		阿寺 Ⅰ	阿寺 Ⅰ′	阿寺 Ⅱ	阿寺 Ⅱ′
対数正規分布	m	7.46771	7.45930	7.60534	7.64000
	σ	0.284968	0.318048	0.0824904	0.0653273
	AIC	80.3	65.9	**56.2**	42.0
ガンマ分布	c	0.00777657	0.00623578	0.0728534	0.112898
	r	14.1106	11.3211	146.854	235.299
	AIC	79.8	65.4	56.2	42.0
Weibull 分布	α	8.43773×10^{-20}	1.38295×10^{-17}	2.27046×10^{-45}	7.48287×10^{-61}
	β	5.78875	5.11066	13.4432	18.0456
	AIC	78.0	64.2	56.5	**41.9**
二重指数分布	a	3.41319×10^{-6}	5.18382×10^{-6}	6.98774×10^{-9}	8.07627×10^{-11}
	b	0.00345991	0.00316963	0.00654819	0.00859331
	AIC	**77.1**	**63.3**	56.6	42.0
Poisson 過程（指数分布）	AIC	87.0	70.0	70.9	53.9
標本平均		1814.50 年	1815.50 年	2015.75 年	2084.17 年
標本標準偏差		429.241 年	479.901 年	166.740 年	135.448 年

表 3.12 各分布毎の，阿寺断層を震源域とする，今後 30 年，50 年及び 100 年の地震発生確率

	data set	30 年確率	50 年確率	100 年確率
対数正規分布	阿寺 Ⅰ	∼0.0%	∼0.0%	∼0.0%
	阿寺 Ⅰ′（1586 年時点）	4.5%	7.5%	14.7%
	阿寺 Ⅱ′（1586 年時点）	1.4%	2.7%	8.1%
ガンマ分布	阿寺 Ⅰ	∼0.0%	∼0.0%	∼0.0%
	阿寺 Ⅰ′（1586 年時点）	4.7%	7.8%	15.4%
	阿寺 Ⅱ′（1586 年時点）	1.4%	2.8%	8.0%
Weibull 分布	阿寺 Ⅰ	∼0.0%	∼0.0%	∼0.0%
	阿寺 Ⅰ′（1586 年時点）	5.3%	8.8%	17.7%
	阿寺 Ⅱ′（1586 年時点）	1.6%	2.9%	7.2%
二重指数分布	阿寺 Ⅰ	∼0.0%	0.1%	0.2%
	阿寺 Ⅰ′（1586 年時点）	4.9%	8.3%	17.2%
	阿寺 Ⅱ′（1586 年時点）	1.6%	2.8%	7.0%
Poisson 過程	阿寺 Ⅰ	1.6%	2.7%	5.4%
	阿寺 Ⅰ′（1586 年時点）	1.6%	2.7%	5.4%
	阿寺 Ⅱ′（1586 年時点）	1.4%	2.4%	4.7%

3.2.1.2 丹那断層

丹那断層については，文献 [27, p.821] の Table 5 の case(2) のうち， Grade A のみを引用した。

表 3.13 丹那断層の地震の発生年と発生間隔。文献 [27, p.821] の Table 5 のうち， case(2) （暦年補正を行ったもの）の Grade A のみを抜粋し，その中央値又は推定された値を使用。以後これを data set 丹那 I とし， 1930 年の北伊豆地震を除いたものを data set 丹那 I′ とする。なお，表中 B.P. は before AD1950 の意

5,850 B.P.	
4,530 B.P.	1,320 年
3,070 B.P.	1,460 年
1,897.5B.P.	1,172.5 年
915 B.P.	982.5 年
20 B.P.	895 年

(a) 丹那断層の data set I

5,850 B.P.	
4,530 B.P.	1,320 年
3,070 B.P.	1,460 年
1,897.5B.P.	1,172.5 年
915 B.P.	982.5 年

(b) 丹那断層の data set I′

表 3.14 data set I 及び data set I′ について最尤法によって求めた各モデルのパラメータと AIC の値，及び Poisson 過程（指数分布）の AIC の値。 bold 体は 4 モデル中の最小の AIC を示す

data set		丹那 I	丹那 I′
対数正規分布	m	7.04508	7.10714
	σ	0.181078	0.147400
	AIC	71.6	56.9
ガンマ分布	c	0.0265226	0.0381151
	r	30.9253	47.0245
	AIC	**71.5**	56.8
Weibull 分布	α	1.65584×10^{-20}	1.84120×10^{-26}
	β	6.38430	8.25540
	AIC	71.6	**56.6**
二重指数分布	a	6.30051×10^{-6}	1.08650×10^{-6}
	b	0.00530562	0.00659903
	AIC	71.9	56.7
Poisson 過程（指数分布）	AIC	82.6	66.9
標本平均		1166.00 年	1233.75 年
標本標準偏差		208.474 年	177.134 年

現時点での発生確率は当然の事ながら非常に低い値にあるが，最新の地震発生直前時点でみると，1930 年の北伊豆地震はかなり低い確率しかないときに発生したことが分かる。統計的仮説の有意性の検定において，統計学の習慣では，有意水準を 5% あるいは 1% に設定して，それ以下の確率しか

表 3.15 各分布毎の，丹那断層を震源域とする，今後 30 年， 50 年及び 100 年の地震発生確率

	data set	30 年確率	50 年確率	100 年確率
対数正規分布	丹那 I	∼0.0%	∼0.0%	∼0.0%
	丹那 I′（1930 年時点）	1.3%	2.4%	6.6%
ガンマ分布	丹那 I	∼0.0%	∼0.0%	∼0.0%
	丹那 I′（1930 年時点）	1.3%	2.4%	6.5%
Weibull 分布	丹那 I	∼0.0%	∼0.0%	∼0.0%
	丹那 I′（1930 年時点）	1.3%	2.4%	5.8%
二重指数分布	丹那 I	∼0.0%	0.1%	0.1%
	丹那 I′（1930 年時点）	1.3%	2.3%	5.5%
Poisson 過程	丹那 I	2.5%	4.2%	8.2%
	丹那 I′（1930 年時点）	2.4%	4.0%	7.8%

持たない事象は起こらないと判断することが多い。しかし，その有意水準の値に必然的な理由があるわけではない。有意水準は，統計的検定に基づく判断が誤った場合の影響の大きさに応じて設定されるべきものである。また，ここで取り扱っている確率の数字は，それを評価する期間の長短に応じて大小することを指摘しておきたい。つまり，危険水準をある値に設定するとしても，それが 30 年間の確率か， 100 年間の確率かも同時に指定する必要がある。

なお，北伊豆地震の発生時期の早さについては，伊豆半島がフィリピン海プレートの北縁に位置し，駿河トラフと相模トラフに挟まれているというテクトニクスが原因しているという考え方もある。文献 [28] によれば，北伊豆地震の 7 年前の 1923 年関東地震の発生により，丹那断層において北伊豆地震型の断層運動が起こりやすくする方向で，応力が 820kPa 増加した。これは，丹那断層の平均活動間隔を約 15%，実年代にして約 190 年短縮させる効果があると概算される。この報告書における伊豆半島のテクトニクスの考察はここまでにとどめ，これ以上は別の場に譲ることにする。

3.2.1.3　跡津川断層

データは，地質調査所が文献 [29,30] をもとに取りまとめた data set を用いた。パラメータの最尤

表 3.16　跡津川断層の地震の発生年と発生間隔。発生間隔の算出には発生年の中央値を採用。以後 data set 跡津川 I とし，最新の地震を除いたものを data set 跡津川 I′ とする

7,569± 74 BC ~ 8,486±113 BC	
5,532±145 BC ~ 5,941±144 BC	2,291 年
2,199±146 BC ~ 3,142±137 BC	3,066 年
1,195±154 AD ~ 1,395±344 BC	2,570.5 年
1,858 AD（飛越地震）	1,958 年

値を表 3.17に示す。 4 つのモデル間に差は見られないが，Poisson 過程とは，やはり有意に差がある。

表 3.17　跡津川断層の data set について，最尤法によって求めた各モデルのパラメータと AIC の値，及び Poisson 過程（指数分布）の AIC の値。 bold 体は 4 モデル中の最小の AIC を示す

data set		跡津川 I	跡津川 I′
対数正規分布	m	7.79910	7.87224
	σ	0.163762	0.119828
	AIC	**63.3**	**47.0**
ガンマ分布	c	0.0151337	0.0262051
	r	37.4012	69.2471
	AIC	63.3	47.0
Weibull 分布	α	1.51406×10^{-23}	9.67293×10^{-32}
	β	6.66705	9.00177
	AIC	63.6	47.3
二重指数分布	a	2.61722×10^{-6}	3.01188×10^{-7}
	b	0.00257367	0.00331578
	AIC	63.9	47.5
Poisson 過程（指数分布）	AIC	72.5	54.9
標本平均		2471.38 年	2642.50 年
標本標準偏差		406.046 年	320.462 年

最新の地震発生時点での地震発生確率を表 3.18に示す。表 3.18の結果から，跡津川断層における

表 3.18 各分布毎の，跡津川断層を震源域とする，1857 年時点の今後 30 年，50 年及び 100 年の地震発生確率

	data set	30 年確率	50 年確率	100 年確率
対数正規分布	跡津川 (1857 年時点)	0.3%	0.6%	1.4%
ガンマ分布	跡津川 (1857 年時点)	0.3%	0.6%	1.5%
Weibull 分布	跡津川 (1857 年時点)	0.6%	1.0%	2.3%
二重指数分布	跡津川 (1857 年時点)	0.6%	1.1%	2.3%
Poisson 過程	跡津川 (1857 年時点)	1.1%	1.9%	3.7%

1858 年の歴史地震は，非常に低い確率で起こったことが読み取れるが，表 3.16から分かるように，1858 年の歴史地震の前の地震の発生推定区間が約 2,500 年とかなり長く，中央値でのあてはめに無理がある可能性もある。そこで，2.3.1.1で述べた，危険率を平均化する方法で確率を計算した。結果を表 3.19に示す。

表 3.19 各分布毎の，跡津川断層を震源域とする，1857 年時点の今後 30 年，50 年及び 100 年の地震発生確率 (2.3.1.1の方法を適用)

	data set	30 年確率	50 年確率	100 年確率
対数正規分布	跡津川 (1857 年時点)	0.7%	1.2%	2.4%
ガンマ分布	跡津川 (1857 年時点)	0.7%	1.2%	2.5%
Weibull 分布	跡津川 (1857 年時点)	4.7%	7.9%	16.3%
二重指数分布	跡津川 (1857 年時点)	5.2%	8.8%	18.2%

3.2.1.4　長野盆地西縁断層

データは，地質調査所が実施したボーリング調査等によるものである。

表 3.20　長野盆地西縁断層の地震の発生年と発生間隔。発生間隔の算出には発生年の中央値を採用。以後 data set 長野盆地西縁 I とし，最新の地震を除いたものを data set 長野盆地西縁 I′ とする

6,688±183 BC ~ 7,150±229 BC	
5,112±120 BC ~ 6,688±183 BC	1,019 年
3,526±240 BC ~ 5,112±120 BC	1,581 年
3,476±310 BC ~ 3,526±240 BC	818 年
1,031±117 BC ~ 3,426±310 BC	1,247.5 年
705±272 BC ~ 1,031±117 BC	1,385.5 年
617± 77 AD ~ 705±272 BC	824 年
969±103 AD ~ 502± 79 AD	779.5 年
1,847 AD（善光寺地震）	1111.5 年

パラメータの最尤値を表 3.21に示す。やはり 4 つのモデルに大きな差はなく，Poisson 過程とは明らかに差がある。

表 3.21　長野盆地西縁断層の data set について，最尤法によって求めた各モデルのパラメータと AIC の値，及び Poisson 過程（指数分布）の AIC の値。bold 体は 4 モデル中の最小の AIC を示す

data set		長野盆地西縁 I	長野盆地西縁 I′
対数正規分布	m	6.96853	6.96211
	σ	0.246703	0.263111
	AIC	**115.8**	**102.6**
ガンマ分布	c	0.0150321	0.0132051
	r	69.2471	14.4397
	AIC	116.0	102.8
Weibull 分布	α	4.11348×10^{-14}	2.54409×10^{-13}
	β	4.34524	4.08690
	AIC	116.7	103.4
二重指数分布	a	4.50940×10^{-5}	5.34703×10^{-5}
	b	0.00355229	0.00335335
	AIC	117.8	104.4
Poisson 過程（指数分布）	AIC	130.0	114.0
標本平均		1095.75 年	1093.50 年
標本標準偏差		273.769 年	292.602 年

表 3.21のパラメータを用いて地震発生確率を求めると表 3.22のようになる。

表 3.22 各分布毎の，長野盆地西縁断層を震源域とする，1846 年時点の今後 30 年，50 年及び 100 年の地震発生確率

	data set	30 年確率	50 年確率	100 年確率
対数正規分布	長野盆地西縁 (1846 年時点)	9.3%	15.1%	28.8%
ガンマ分布	長野盆地西縁 (1846 年時点)	9.0%	14.9%	28.6%
Weibull 分布	長野盆地西縁 (1846 年時点)	7.9%	13.1%	26.0%
二重指数分布	長野盆地西縁 (1846 年時点)	6.8%	11.4%	23.1%
Poisson 過程	長野盆地西縁 (1846 年時点)	2.7%	4.5%	8.7%

3.2.2 時間予測モデルを利用する事例

時間予測モデルによる場合では，糸魚川–静岡構造線活断層系の中の活断層である牛伏寺断層と，兵庫県南部地震が発生した野島断層を対象に 1996 年現在の地震発生確率の試算を行った。陸域の活断層におけるパラメータ値は，あくまで計算例のために用いたものであり，確定したものではないことをあらかじめ断っておく。確率計算には，対数正規分布及び指数分布 (Poisson 過程) を用いた (2.2.2式 (2.22) 及び式 (2.23) 参照) 。

3.2.2.1 牛伏寺断層

当該断層の調査結果 [31] 等に基づき，パラメータとして以下の量を用いた。

前回発生年　　西暦 762 or 841 年

平均ずれ速度　　$V = 8.6 \pm 1.0$mm/ 年 (文献 [31] による)

前回のずれの量　　$U_{\rm last} = 6$ ~ 9m

活動間隔†　　V と $U_{\rm last}$ から，$T_{\rm t.p.} = U_{\rm last}/V = 625$ ~ 1184 年とする

そのばらつき　　式 (2.22) の σ にして 0.2 及び 0.3 とする

前回の地震からの経過年数 T は，前回発生年を西暦 762 年とすると 1234 年，西暦 841 年とすると 1155 年である。ここでは仮に，$T = 1200$ 年とする。地震発生確率の試算結果を表 3.23に示す。

3.2.2.2 野島断層

当該断層の調査結果 [32, 33] に基づき，パラメータとして以下の量を用いた。

前回発生年　　西暦 1995 年

平均ずれ速度　　V =0.7 ~ 0.9mm/ 年 (文献 [32] による)

前回のずれの量　　$U_{\rm last} = 1.4$ ~ 1.8m (文献 [33] による)

† 最新の地震から次回の地震までの間隔

活動間隔[†]　V と $U_{\rm last}$ から，$T_{\rm t.p.} = U_{\rm last}/V = 1556$ ~ 2571 年とする

そのばらつき　式 (2.22) の σ にして 0.2 及び 0.3 とする

前回の地震からの経過年数 T は，活動の翌年の西暦 1996 年現在では 1 年となるが，地震発生確率は 0.1% よりも低い値が出る。意味のある計算が可能なのは，ΔT が少なくとも 500 年を越えたところである。

次に，前回発生年の前年の西暦 1994 年現在で，その前の活動 (西暦 56 年頃) から 1938 年経過している (つまり $T = 1938$) として，また，前回の更に前のずれの量は分かっていないので[‡]断層の長さが約 15km であることから，仮に $U_{\rm last} \simeq 1.5$m として，$T_{\rm t.p.} = 1700$ ~ 2100 年として確率を計算してみた。地震発生確率の試算結果をまとめると，表 3.23のようになる。

表 3.23　牛伏寺断層及び野島断層における，活動間隔の分布関数として対数正規分布及び指数分布を用いたときの今後 30 年，50 年，100 年及び 200 年の地震発生確率。牛伏寺断層については前回の地震から 1,200 年が経過しているものとして計算。数値の幅は活動間隔の設定の違いによる

断 層	モデル		30 年確率	50 年確率	100 年確率	200 年確率
牛伏寺断層	対数正規分布	$\sigma = 0.2$	10 ~ 36%	17 ~ 52%	32 ~ 77%	58 ~ 95%
		$\sigma = 0.3$	7 ~ 19%	11 ~ 30%	22 ~ 51%	40 ~ 76%
	指数分布 (Poisson 過程)		3 ~ 5%	4 ~ 8%	8 ~ 15%	16 ~ 27%
野島断層	対数正規分布	$\sigma = 0.2$	$\ll 0.1\%$	$\ll 0.1\%$	$\ll 0.1\%$	$\ll 0.1\%$
		$\sigma = 0.3$	$\ll 0.1\%$	$\ll 0.1\%$	$\ll 0.1\%$	$\ll 0.1\%$
	対数正規分布 (1995 年時点)	$\sigma = 0.2$	4 ~ 9%	7 ~ 15%	15 ~ 29%	29 ~ 51%
		$\sigma = 0.3$	3 ~ 6%	6 ~ 9%	11 ~ 18%	21 ~ 33%
	指数分布 (Poisson 過程)		1 ~ 2%	2 ~ 3%	4 ~ 6%	7 ~ 12%

3.2.3　発生間隔のばらつきの影響

時間予測モデルが適用されると仮定した場合，適用されない場合に比べて発生間隔のばらつきは小さくなると考えられる。これを考慮して，$U_{\rm last}, V$ ともに値が得られている牛伏寺断層並柳地点と大沢断層金沢地点を例にして，今後の地震発生確率を求めた。計算に使用した数値を表 3.24に示す。

確率密度関数は対数正規分布を用い，前回の地震から 1200 年が経過しているものとした。発生間隔のばらつき σ は，平均値の $1/2$ ~ 2 倍程度を示す 0.3 [§] とそれよりも小さい (分布がより集中した) 0.2 及び 0.1 を用いた。以上の条件で，今後 30 年，50 年，及び 100 年以内にそれぞれの区間で地震が発生する確率を求めた。計算結果は表 3.25のとおりである。

[†] 最新の地震から次回の地震までの間隔

[‡] 時間予測モデルの考え方に忠実に沿うならば，前々回の地震の際のずれの量をもとにして，前回の地震の発生時期を推定すべきであるが，現時点では不明であるため，断層の長さから推定される平均的な値を求めた。

[§] $\ln(1/2) < \ln(T/\bar{T}) < \ln 2 \simeq 0.693$ であるから，$\sigma = 0.3$ にとれば約 $\pm 2.31\sigma$ の範囲となって，$\ln(T/\bar{T})$ が正規分布に従うことを考慮すれば，平均値の $1/2$ ~ 2 倍の範囲の事象は全事象の 97.9% 以上をカバーする。因みに $\sigma = 0.5$ ならば全事象の 83.4% 以上がカバーされる。

表 3.24 計算に用いた，各断層の $U_{\rm last}$, V 及び $T_{\rm t.p.}$ の表。大沢断層の V は不明のため，茅野断層板室地点の値を引用

断層地点	前回のずれの量 $U_{\rm last}$	平均ずれ速度 V	期待される経過時間 $T_{\rm t.p.}$
牛伏寺断層並柳地点	6 ~ 9m($\bar{U}_{\rm last} = 7.5$)	7.6 ~ 9.6m/ 千年 ($\bar{V} = 8.6$)	625 ~ 1184 年
大沢断層金沢地点	6m	5m/ 千年	1200 年

表 3.25 時間予測モデルに従うことを考慮し，分布をより集中させた場合の，各断層の今後 30 年， 50 年及び 100 年の地震発生確率。数値の幅は活動間隔の設定の違いによる

断 層	σ	30 年確率	50 年確率	100 年確率
牛伏寺断層並柳地点 $T_{\rm t.p.} = 625$ ~ 1184 年	0.3	6.8 ~ 19.0%	11.2 ~ 29.7%	21.7 ~ 50.7%
	0.2	10.3 ~ 35.8%	16.9 ~ 52.3%	32.4 ~ 77.4%
	0.1	21.3 ~ 81.3%	34.2 ~ 93.9%	60.8 ~ 99.6%
牛伏寺断層並柳地点 $T_{\rm t.p.} = \bar{U}_{\rm last}/\bar{V} \simeq 872$ 年	0.3	12.4%	19.9%	36.2%
	0.2	22.6%	35.0%	58.5%
	0.1	58.7%	77.5%	95.4%
大沢断層金沢地点 $T_{\rm t.p.} = 1200$ 年	0.3	6.6%	10.8%	21.0%
	0.2	9.8%	16.2%	31.1%
	0.1	19.5%	31.7%	57.7%

表から，ばらつきが小さいと確率は大きくなるという傾向が読み取れるが，対数正規分布についてのこの事実は，既に議論されている [34,35]。

3.2.4 最新活動時期の不確定性の影響

ここでは， 2.3.1.2で述べた考え方をもとに， 3.2.2で牛伏寺断層について行った計算への適用を試みる¶。

3.2.2においては，前回発生年が西暦 762 年か 841 年 (すなわち 1,155 年前か 1,234 年前) である可能性が高いので現在から 1,200 年前として計算した。ここでは，この前回発生年の推定幅を考慮に入れ，地震発生間隔が式 (2.22) で定義される対数正規分布に従う場合の，地震発生確率の再計算を行う‖。

$f(t)$ が式 (2.22) で定義されるとき，表 2.1から，

$$\phi(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(t/\hat{T})}{\sigma}\right) \tag{3.1}$$

であり， $\phi(t)$ の不定積分は，

$$\int \phi(t)dt = t - t\,\Phi\left(\frac{\ln(t/\hat{T})}{\sigma}\right) + \hat{T}\exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)\Phi\left(\frac{\ln(t/\hat{T})}{\sigma} - \sigma\right) + (\text{積分定数}) \tag{3.2}$$

¶ 比較のため，以下の計算は 1996 年を現在として行った。

‖ 3.2.2においては，地震発生間隔が指数分布に従う場合の計算もされているが，この場合は確率が前回地震発生からの経過年数に依存しないため，この議論を適用しても結果は変わらない。

であるから，これを式 (2.30) に適用して，$t_h = 1155,\ t_g = 1234$ として計算すると，牛伏寺断層については表 3.26のように確率が求められる。この例では，前回地震発生からの経過年数を 1,200 年とした場合とほとんど変わらない（0.1% 単位で若干変化）という結果が出たが，経過年数の推定幅がかなり大きくなる場合には有力な方法であると思われる。

表 3.26　表 3.23の牛伏寺断層部分の再掲と，文献 [18] での議論を適用したときの比較。数値の幅は活動間隔の設定の違いによる

断 層	モデル		30 年確率	50 年確率	100 年確率	200 年確率
牛伏寺断層	対数正規分布	$\sigma = 0.2$	10 ~ 36%	17 ~ 52%	32 ~ 77%	58 ~ 95%
		$\sigma = 0.3$	7 ~ 19%	11 ~ 30%	22 ~ 51%	40 ~ 76%
	指数分布（Poisson 過程）		3 ~ 5%	4 ~ 8%	8 ~ 15%	16 ~ 27%
	文献 [18] での議論を適用	$\sigma = 0.2$	10 ~ 36%	17 ~ 52%	32 ~ 77%	57 ~ 95%
		$\sigma = 0.3$	7 ~ 19%	11 ~ 30%	22 ~ 51%	40 ~ 76%

3.3　論理ツリーの適用（糸魚川–静岡構造線活断層系）

糸魚川–静岡構造線活断層系は，北部・中部・南部に分けられるが，ここでは，平成 8 年 9 月 11 日に公表された地震調査研究推進本部地震調査委員会報告 [31] に基づき，北部・牛伏寺断層・中部（牛伏寺断層を除く）のセグメントについての地震発生確率を論理ツリーを適用して試算した。

3.3.1　論理ツリーの構築

計算に当たっては，糸魚川–静岡構造線活断層帯を例にとった。この断層帯については，地震調査委員会報告 [31] において次のように結論づけられている。

- 前回は，1,200 年前に北部 ~ 中部（白馬 ~ 小淵沢）が活動した。
- 過去の活動は，

  ① 前回と同様な地震が 1,000 年おきに発生する

  ② セグメント毎に活動間隔が異なる

  のどちらかであるか判断できない。

したがって，計算に当たっては，上記①,②の可能性を各々五分五分とした。更に，②の内訳として，各セグメントが独立に地震を発生する場合も考慮して，この場合の重みを 5% とする。残り 45% は複数のセグメントが同時に活動する場合とする。以下は，上記②の場合の仮定である。

1. 糸魚川–静岡構造線活断層帯を，大きく 3 つの区間に分け（南部はデータが得られていないため，とりあえず今回の議論からはずした），それぞれの地域の断層の活動間隔を仮に次のとおりと考えた。

区間	北部	牛伏寺	中部（牛伏寺を除く）
活動間隔 $\bar{T}$	2,000 年	1,000 年	4,000 年

2. 複数のセグメントが同時に活動する場合には，牛伏寺断層は，それ以外の断層が動くときは，常に連動するものとした（牛伏寺断層単独で動くことも有り得るとした）。

確率密度関数は，対数正規分布を用い，前回の地震から 1,200 年が経過しているものとし，σ は発生間隔の幅が，平均値から $1/2$ ~ 2 倍にほぼ収まるとされる 0.3 を用いた。以上の条件で，今後 100 年以内にそれぞれの区間で地震が発生する確率を求めた。

計算に用いる論理ツリーは，全域を震源域とする地震が発生する重みを 50%，各セグメントで独立に地震が発生する重みを 5%，地震が発生する場合は必ず牛伏寺断層が活動し（単独もありうる），複数のセグメントが同時に活動する場合の重みを 45% として構築した。これらの重み配分は最終的な評価を直接的に支配するものであり，専門家の判断に基づき，慎重に決定しなければならない。

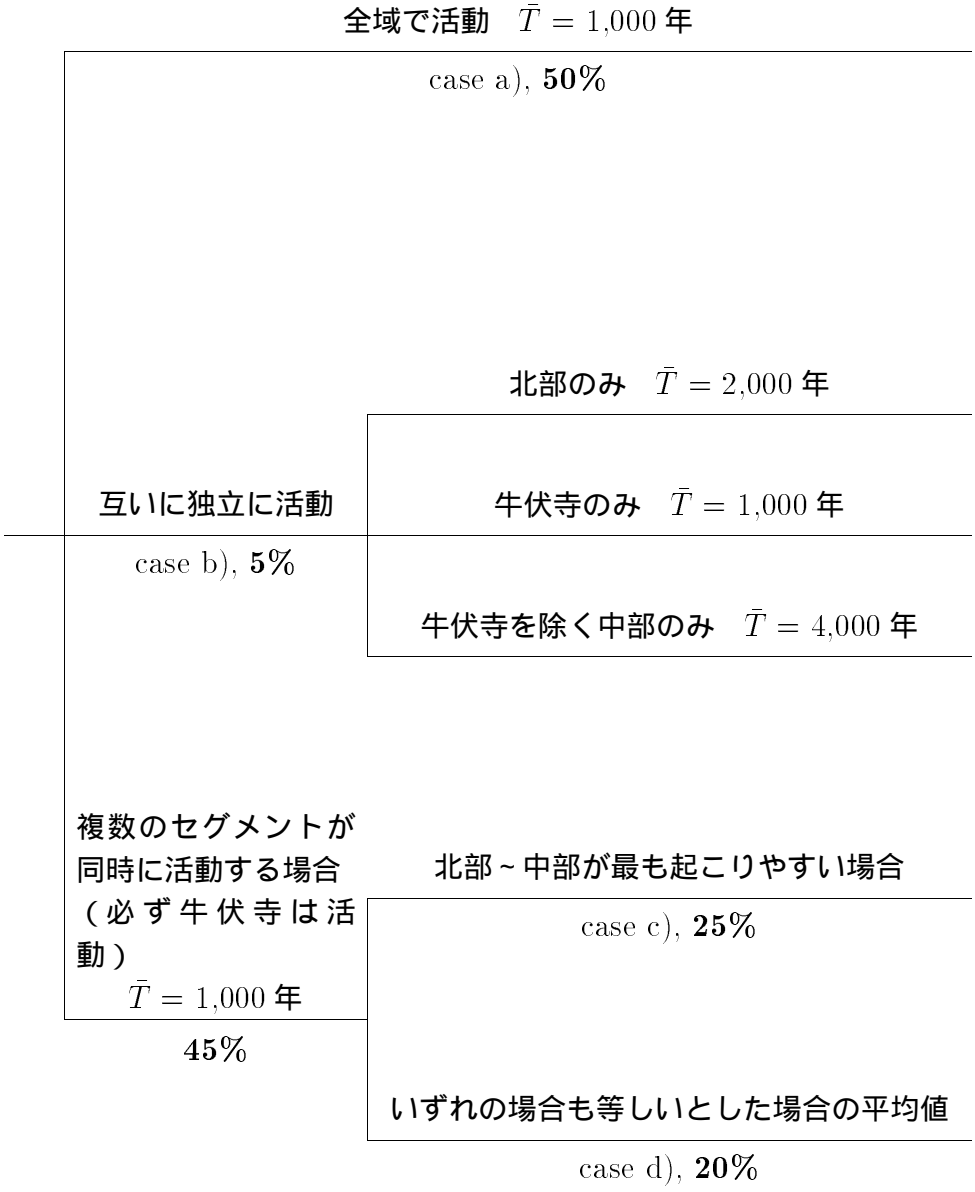
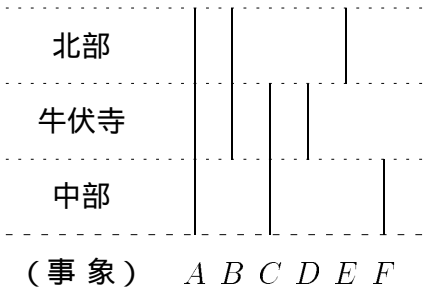


図 3.3　糸魚川–静岡構造線活断層帯における地震発生確率計算時の論理ツリーの例

3.3.2 活動区間の設定

起震断層のモデルとして，以下の 6 つを考慮した。

- 北部 ~ 中部 (以下事象 A，発生確率を P_A とする)
- 北部 ~ 牛伏寺 (事象 B，発生確率 P_B)
- 牛伏寺 ~ 中部 (事象 C，発生確率 P_C)
- 牛伏寺のみ (事象 D，発生確率 P_D)
- 北部のみ (事象 E，発生確率 P_E)
- 牛伏寺を除く中部のみ (事象 F，発生確率 P_F)



以下，「中部」は牛伏寺を除く中部の意とする。

3.3.3 確率の数値評価

3.3.3.1 複数のセグメントの同時活動を考慮しない場合

case a) 全体で活動 (重み **50%**) の場合

全域で発生する場合は，$\bar{T} = 1,000$ 年で $T = 1,200$ 年であるから，表 3.27から，今後 100 年以内の発生確率は $P_A = 29.7\%$ で，重みを考慮すると，14.9% となる。

case b) 独立に活動 (重み **5%**) の場合

$$\left.\begin{array}{rrr} \text{北部のみ} & \bar{T} = 2,000\text{年} & P_E = 3.3\% \\ \text{牛伏寺のみ} & \bar{T} = 1,000\text{年} & P_D = 29.7\% \\ \text{中部のみ} & \bar{T} = 4,000\text{年} & P_F = 0.0\% \end{array}\right\} \text{(表3.27参照)}$$

重みを考慮すると，それぞれ $0.2\%, 1.5\%, 0.0\%$ となる。

3.3.3.2 複数のセグメントの同時活動を考慮する場合

必ず牛伏寺断層が活動するという仮定から，$\bar{T} = 1,000$年 で，$T = 1,200$年 から，確率は 29.7% と求まる。

次に，事象 A, B, C, D のどれが起こるかを求める必要がある。それぞれの事象の重みを Q_A, Q_B, Q_C, Q_D とすると，次の地震は必ず牛伏寺の区間を含むから，

$$\text{牛伏寺について，} \quad Q_A + Q_B + Q_C + Q_D = 1 \tag{3.3}$$

地震発生頻度の比は，北部・牛伏寺・中部において 2:4:1 であるから，

$$\text{北部について，} \quad Q_A + Q_B = 0.5 \tag{3.4}$$

$$\text{中部について，} \quad Q_A + Q_C = 0.25 \tag{3.5}$$

となる。未知数 4 に対し式は 3 つなので，自由度が一つ残る。そこで $Q_A = x$ とおくと，

$$Q_A(x) = x\ ,\ Q_B(x) = 0.5 - x\ ,\ Q_C(x) = 0.25 - x\ ,\ Q_D(x) = 0.25 + x \quad \text{ただし } 0 \le x \le 0.25$$

表 3.27　各パラメータ毎の，今後 100 年以内の地震発生確率一覧表（対数正規分布，$\sigma = 0.3$ の場合。$\hat{T}$ は（相乗）平均活動間隔，T は最新の地震からの経過年数）

T \ $\hat{T}$	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600
500	6.5%	**3.4%**	1.7%	0.9%	0.4%	0.2%	0.1%	0.0%
600	12.4%	**7.6%**	4.5%	2.6%	1.5%	0.8%	0.4%	0.2%
700	18.3%	**12.6%**	8.4%	5.4%	3.4%	2.1%	1.3%	0.8%
800	23.4%	**17.4%**	12.6%	8.8%	6.1%	4.1%	2.7%	1.7%
900	27.5%	**21.5%**	16.5%	12.4%	9.1%	6.5%	4.6%	3.2%
1000	30.6%	**24.9%**	20.0%	15.7%	12.1%	9.2%	6.8%	5.0%
1100	33.0%	**27.6%**	22.8%	18.6%	14.9%	11.8%	9.2%	7.0%
1200	**34.7%**	*29.7%*	**25.2%**	**21.0%**	**17.4%**	**14.2%**	**11.4%**	**9.1%**
1300	36.1%	**31.4%**	27.0%	23.1%	19.5%	16.3%	13.5%	11.1%
1400	37.1%	**32.6%**	28.5%	24.8%	21.3%	18.2%	15.4%	12.9%
1500	37.8%	**33.6%**	29.7%	26.1%	22.8%	19.8%	17.0%	14.6%

T \ $\hat{T}$	1600	1700	1800	1900	2000	2100	3000	4000	5000
500	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	**0.0%**	0.0%	0.0%	**0.0%**	0.0%
600	0.2%	0.1%	0.1%	0.0%	**0.0%**	0.0%	0.0%	**0.0%**	0.0%
700	0.8%	0.4%	0.3%	0.2%	**0.1%**	0.1%	0.0%	**0.0%**	0.0%
800	1.7%	1.1%	0.7%	0.4%	**0.3%**	0.2%	0.0%	**0.0%**	0.0%
900	3.2%	2.2%	1.5%	1.0%	**0.7%**	0.4%	0.0%	**0.0%**	0.0%
1000	5.0%	3.6%	2.6%	1.8%	**1.3%**	0.9%	0.0%	**0.0%**	0.0%
1100	7.0%	5.3%	4.0%	3.0%	**2.2%**	1.6%	0.1%	**0.0%**	0.0%
1200	**9.1%**	**7.2%**	**5.6%**	**4.3%**	*3.3%*	**2.5%**	**0.2%**	*0.0%*	**0.0%**
1300	11.1%	9.0%	7.2%	5.7%	**4.5%**	3.5%	0.3%	**0.0%**	0.0%
1400	12.9%	10.7%	8.8%	7.2%	**5.8%**	4.7%	0.5%	**0.0%**	0.0%
1500	14.6%	12.3%	10.4%	8.7%	**7.2%**	5.9%	0.8%	**0.1%**	0.0%

とあらわすことができる。

図 3.4 ~ 3.6に，$x = 0$, $x = 0.125$, $x = 0.25$ の場合の 8,000 年間の時系列ダイヤグラムの一例を示す。この図はあくまでも一例であり，どの事象がどの順番で表れるかは考慮されていない。図を見ると，事象 A（北部から中部まで全体が活動）の発生頻度がそれぞれの場合で異なるが，北部・牛伏寺・中部の各セグメントの平均的な活動間隔はすべて満足されていることが分かる。なお図 3.4 ~ 3.6では事象 A の発生頻度に着目したのであるが，どの事象に着目してもよく，要は各事象の発生頻度に（発生順序も含めて）自由度が存在する。

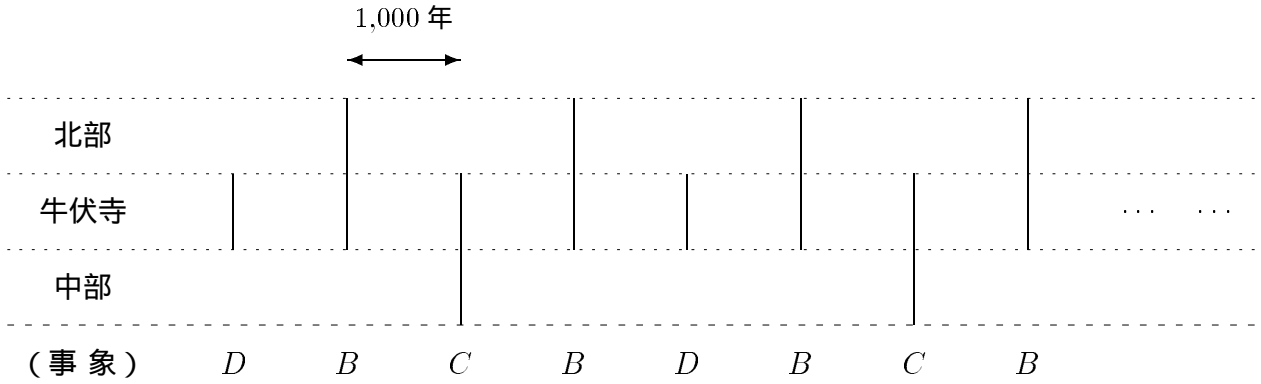


図 3.4 8,000 年間当たり事象 A が 0 回 $(x = 0)$ の場合の地震発生の時系列ダイヤグラムの一例

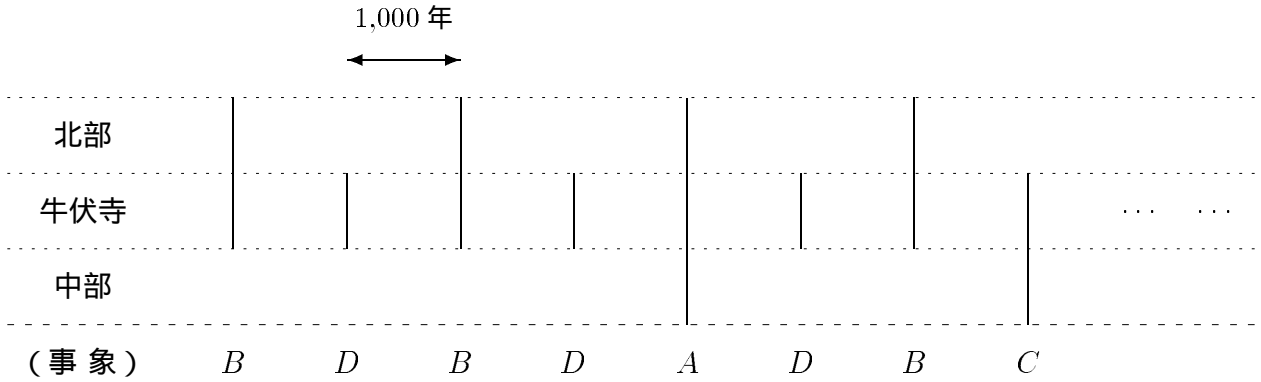


図 3.5 8,000 年間当たり事象 A が 1 回 $(x = 0.125)$ の場合の地震発生の時系列ダイヤグラムの一例

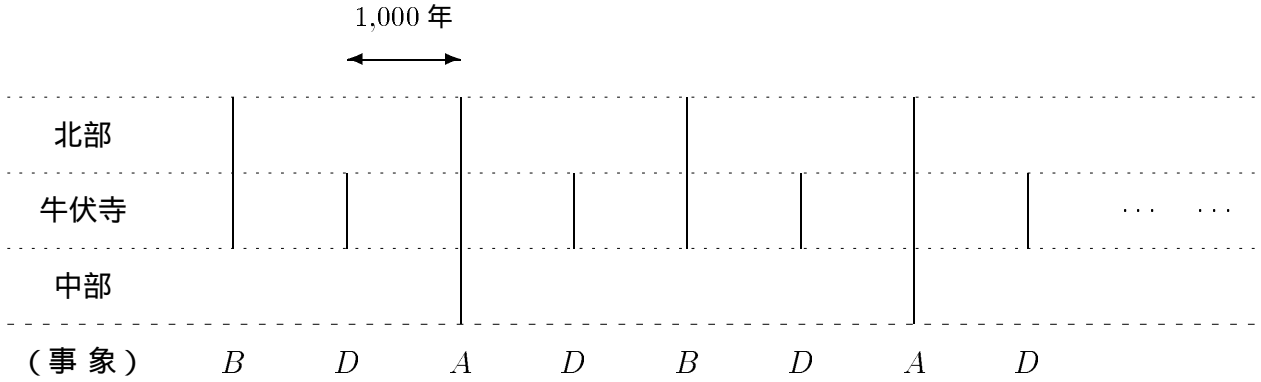


図 3.6 8,000 年間当たり事象 A が 2 回 $(x = 0.25)$ の場合の地震発生の時系列ダイヤグラムの一例

一般的には x の分布関数 $f(x)$ から，$Q_{A\sim D}$ の期待値 $\bar{Q}_{A\sim D}$ を求めることができる。

$$\bar{Q}_A = \int_0^{0.25} x f(x) dx \tag{3.6}$$

$$\bar{Q}_B = \int_0^{0.25} (0.5 - x) f(x) dx \tag{3.7}$$

$$\bar{Q}_C = \int_0^{0.25} (0.25 - x) f(x) dx \tag{3.8}$$

$$\bar{Q}_D = \int_0^{0.25} (0.25 + x) f(x) dx \tag{3.9}$$

$$\text{ただし} \quad \int_0^{0.25} f(x) dx = 1$$

以下，$f(x)$ の例として 2 例を挙げる。

1: 北部 ~ 中部が発生する確率が最も高い場合（中部が活動するときは全体が活動する）

$$f(x) = \delta(x - 0.25) \qquad (\text{Dirac のデルタ関数}) \tag{3.10}$$

を考えると，式 (3.6) ~ (3.9) から，

$$\bar{Q}_A = \bar{Q}_B = 0.25\ ,\ \bar{Q}_C = 0\ ,\ \bar{Q}_D = 0.5$$

2: どのケースも等しい確率で起こるとした場合

$$f(x) = \begin{cases} 4, & \text{for } 0 \le x \le 0.25 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3.11}$$

を考えると，式 (3.6) ~ (3.9) から，

$$\bar{Q}_A = \int_0^{0.25} 4x dx = 0.125\ ,\ \bar{Q}_B = \bar{Q}_D = 0.375\ ,\ \bar{Q}_C = 0.125$$

以上の考察から，

case c) 北部 ~ 中部が最も起こりやすい場合（すなわち，中部が活動するときは全体が活動する）

北部 ~ 中部	$29.7\% \times 0.25$	$= 7.4\%$	重み (25%) を考慮して，	1.9%
北部 ~ 牛伏寺	$29.7\% \times 0.25$	$= 7.4\%$		1.9%
牛伏寺 ~ 中部	$29.7\% \times 0$	$= 0\%$		0%
牛伏寺のみ	$29.7\% \times 0.5$	$= 14.9\%$		3.7%

case d) どのケースも等しい確率で起こるとした場合

北部 ~ 中部	$29.7\% \times 0.125$	$= 3.7\%$	重み (20%) を考慮して，	0.7%
北部 ~ 牛伏寺	$29.7\% \times 0.375$	$= 11.1\%$		2.2%
牛伏寺 ~ 中部	$29.7\% \times 0.125$	$= 3.7\%$		0.7%
牛伏寺のみ	$29.7\% \times 0.375$	$= 11.1\%$		2.2%

3.3.3.3 数値評価結果のまとめ

以上の計算結果を表にまとめると，表 3.28のようになる。

表 3.28 各事象別の，論理ツリーの各 case 毎の地震発生確率の表

	$P(A)$ 北部 ~ 中部	$P(B)$ 北部 ~ 牛伏寺	$P(C)$ 牛伏寺 ~ 中部	$P(D)$ 牛伏寺のみ	$P(E)$ 北部のみ	$P(F)$ 中部のみ
case a)	14.9%	—	—	—	—	—
b)	—	—	—	1.5%	0.2%	∼0.0%
c)	1.9%	1.9%	0%	3.7%	—	—
d)	0.7%	2.2%	0.7%	2.2%	—	—
計	17.5%	4.1%	0.7%	7.4%	0.2%	∼0.0%

更に地域別で考えて各事象を足しあわせると，以下のようになる。

$$\begin{array}{lll} \text{牛伏寺} & P(A)+P(B)+P(C)+P(D) & = 29.7\% \\ \text{北部} & P(A)+P(B)+P(E) & = 21.8\% \\ \text{中部} & P(A)+P(C)+P(F) & = 18.2\% \end{array}$$

各セグメントが独立の場合と，複数のセグメントが同時に活動する場合とで，北部や中部セグメントでの地震発生確率は大きく異なる。北部セグメント（$\bar{T} = 2{,}000$ 年の場合）を例にとり，発生確率密度分布（強度関数）を模式的に描くと図 3.7のようになる。

図 3.7 北部セグメント（$\bar{T} = 2{,}000$ 年の場合）の発生確率密度分布（強度関数）の模式図

第 4 章

まとめと今後の課題

4.1　妥当な統計モデル

以上，4 つの更新過程のモデルについて議論してきたが，ほとんどの場合に AIC に有意な差はなく，モデルによる明確な違いは見られなかった。いずれのモデルが最適かをより的確に判断するためには，データの蓄積を待たなければならない。しかし，4 つのモデルに比べて Poisson 過程は地震発生間隔の統計量を良好に表していないということは間違いないようである。

この 4 つのモデルについてそれぞれパラメータが 2 つあるわけであるが，そのうち対数正規分布のパラメータは，我々に馴染みの深い統計量（平均，標準偏差）と非常に簡単な関係にある。他の 3 つのモデルでは，平均及び標準偏差はパラメータについての複雑な関数で表されるか，簡単に表せても各パラメータと 1 対 1 に対応しておらず，一方を固定して他方を変化させてみたりすることが非常に困難である。このような理由で，これらの 4 つのモデルに特に差異が見られないのであれば，直感的に理解しやすい対数正規分布を用いることが妥当であると考えられる。付録 B.1の表 B.1 ~ B.15には，対数正規分布における，ばらつきをいろいろに変えたときの今後 30 年，50 年，100 年の地震発生確率一覧表を掲げた。

ここで，陸域の活断層について，個々の断層固有のばらつきを仮定した場合と，各断層共通のばらつきを仮定した場合とでどのような差が生じるかを検討してみる。断層の index を k とし，断層 k において分かっている地震発生間隔データの個数を n_k，個々に得られた σ の最尤値を σ_k とする。このとき，各断層の σ が共通であると仮定するとき，その最尤値 $\sigma_{\text{全体}}$ は次のように書き表せる。

$$\sigma_{\text{全体}} = \sqrt{\frac{\sum_k n_k \sigma_k^2}{\sum_k n_k}} \tag{4.1}$$

式 (4.1) を用いて，阿寺断層，丹那断層，跡津川断層及び長野盆地西縁断層について $\sigma_{\text{全体}}$ を求めてみる。式 (4.1) から，

$$\sigma_{\text{全体}} = \sqrt{\frac{5\sigma^2_{\text{阿寺}} + 5\sigma^2_{\text{丹那}} + 4\sigma^2_{\text{跡津川}} + 8\sigma^2_{\text{長野西縁}}}{5+5+4+8}} \simeq 0.23003 \pm 0.04564 \tag{4.2}$$

となる。なお式中の $\pm$ 以降の値は，各 σ_k^2 を観測値とみたときの平均誤差が $\sigma_{\text{全体}}$ に与える誤差伝播として求めた，$\sigma_{\text{全体}}$ の平均誤差である。このときの AIC は約 326.8 となり，個々の AIC の和約 331.0 よりも 4.2 だけ小さい。これは有意な差であり，このことから，少なくとも上記の 4 断層においては，共通のばらつきを用いたほうがより現実的であると結論づけられる。しかし，猿投山北断

図 4.1　data set 丹那 I (表 3.14参照) において，$\Delta T = 30$ 年とした場合の最新の地震からの経過時間に対する条件付き確率のグラフ

層のトレンチ調査 [36] によって見出された 4 回の地震発生時期のデータ (ただし，これは予備的な結果である) ，及び阿寺断層の data set 阿寺 II のように，ほぼ等間隔で発生しているように見える例もあり，式 (4.2) で得られた σ の値がすべての活断層に適用できるかどうかについては今のところ定かではなく，今後も発表されるであろうデータを用いて検討を続けていくことが必要であると考えられる。一般に，データが豊富にある場合にはそれを説明するモデルを作ることができるが，データが少なく，しかもその精度がよくない場合は，パラメータを少なくする (この場合は 1 個にする) ことが望ましいと言える。この意味からも精度のよい発生年が数多く知られている断層のデータを用いて式 (4.2) の $\sigma_{\text{全体}}$ を求める努力を続けていくことが重要である。

式 (2.13) ~ (2.16) の 4 つのモデルの条件付き確率のうち，ΔT を固定したとき，対数正規分布においてはある T で極大値をもつ [37, 38]。それ以外のモデルは T に対して単調増加関数である (図 4.1参照*) 。図から，平均発生間隔付近では，地震発生確率はどの分布をとっても変わらないが，平均発生間隔から更に十分時間が経過したところでは，モデルによりかなりの差が出てくることが読み取れる。対数正規分布における条件付き確率の極大値は，式 (2.13) で $\partial P(T, \Delta T)/\partial T = 0$ としたものを整理した式，すなわち

$$T \exp\left(\frac{\xi^2}{2}\right) \{1 - \Phi(\xi)\} - (T + \Delta T) \exp\left(\frac{\eta^2}{2}\right) \{1 - \Phi(\eta)\} = 0 \tag{4.3}$$

* グラフが示唆するように，ガンマ分布の条件付き確率には 1 以外の上界があり，その値は $1 - e^{-c\Delta T}$ である。これは生起率 c の Poisson 過程における条件付き確率に他ならない。この事実は，2.1.2で述べたように，もともとガンマ分布の更新過程が Poisson 過程の拡張 ($r - 1$ 個おきの事象に着目したもの) であることから理解できる。

$$\text{ただし，}\ \xi = \frac{\ln T - m}{\sigma}\ ,\ \eta = \frac{\ln(T+\Delta T) - m}{\sigma}$$

を満たす T によって与えられる。付録 B.2の表 B.16 ~ B.18に，代表的な $(\hat{T} = e^m, \sigma, \Delta T)$ の組について，式 (B.1)（式 (2.13) と若干異なる）の確率の極大値とそのときの経過年数を，ΔT が 30 年，50 年，100 年の場合について示した。

この，対数正規分布だけが極大値をもつという性質は，4 つの分布のうち，この分布だけが，密度関数の裾が逆冪乗的にゆっくり減衰するという事情に関係している。これに対して，他の 3 つの分布の密度関数の裾は指数的より早く減衰する。発生間隔を大幅に越えても地震が発生しなかった場合，各モデルが与える地震発生確率は図 4.1が示すように大幅に異なるが，いずれのモデルが適切かをこれまでのデータから判断するのは困難である。

なお，一般に，分布の裾が逆冪乗的にゆっくり減衰するような分布は，データに異常値（普通より長すぎる間隔）があってもそれに鈍感で，安定した標準的なパラメタを与える。一方，裾が急激に減衰する分布は異常値に対して敏感に反応する。仮に，発見されていない地震があって，そのために発生間隔が異常に長く見えていても，それが一つぐらいならば対数正規分布を用いて処理することが可能かもしれない。ただし，そのためにはシミュレーションなどで確認することが必要である。

4.2　確率の数値評価のまとめ

海溝型地震及び陸域の活断層による地震の地震発生確率を，モデルを対数正規分布にとり，今後 30 年以内に発生する確率としてまとめると表 4.1のようになる。この表には，用いたデータセット別に，対数正規分布での地震発生確率の極大値及び対応する平均発生間隔を用いた Poisson 過程による地震発生確率も併せて示した。これまでにも述べてきたことであるが，活断層の一部のデータには，信頼度の低いものも含まれているので注意が必要である。信頼度の低いデータしか得られていない断層については，調査を充実させることにより，信頼度を高める必要があることはいうまでもない。そして，信頼度の高いデータが得られた場合は，その都度，計算値を更新することが重要である。例えば，活断層調査が進んで新たなデータが得られた場合，再計算した確率の値が大きく変わるという事態は十分考えられることである。

表を見ると，評価時点が現在の中では，宮城県沖の地震が最も高い確率を示していることが分かる。これは，発生間隔がおおよそ 45 年，前回の地震から約 20 年経過しているという状況下で，しかも今後 30 年間という，発生間隔に匹敵するほどの長い時間幅の発生確率を計算したという事情を反映したものである。次いで高い確率を示すのは想定「東海地震」の震源域である。ここで基づいた仮定は，駿河湾の地震はこれまでおおよそ 170 年間隔で繰り返して発生してきたが，前回の 1854 年の地震から 140 年以上経過している，という，最も単純なものである。

南海トラフ沿いの巨大地震の現時点における発生確率は，何種類かのデータセットを用いて，更新過程を利用して計算した。得られた確率の値は，用いるデータセットによって，表に示した程度の差異（4.5% と 0.8%）が見られる。この地震については，室津の地殻変動データを利用して時間予測モデルも用いて計算したが，更新過程による結果と大きく異なる結果（30%）が得られている。この事情は，更新過程に基づく計算では，前回の地震発生時点から平均発生間隔の時間が経過するまではまだ 60 年以上（用いるデータセットによっては 100 年以上）あるのに対し，時間予測モデル

表 4.1　南海トラフ等プレート間地震と陸域の活断層における，今後 30 年以内の地震発生確率 (データは暫定，モデルは対数正規分布，確率の単位はいずれも %)

断 層	評価時点	σ の値	発生確率 (%) (今後 **30** 年)	対数正規分布での確率の極大値 (%)	Poisson 過程での確率 (%)	掲載表	歴史地震の例とその M
南海 I	現在	0.36	**4.5**	48.1	17	表 **3.3**	1946 年 M8.0
南海 III	現在	0.16	**0.8**	97.2	22	表 **3.3**	〃
南海 *	現在	0.3	**30**	76.3	28	表 **3.6**	〃
南海 III′	1946 年	0.13	**42**	99.4	21	表 **3.5**	〃
「東海」†	現在	0.33	**36**	50.5	16	表 **3.3**	
宮城沖 III	現在	0.40	**65**	85.6	48	表 **3.9**	1978 年 M7.4
阿寺 I	現在	0.28	**∼0.0**	8.1	1.6	表 **3.12**	1586 年 M7.8
阿寺 I′	1586 年	0.23‡	**6.5**	11.9	1.6	—	〃
丹那 I	現在	0.18	**∼0.0**	26.1	2.5	表 **3.15**	1930 年 M7.3
丹那 I′	1930 年	0.23‡	**2.8**	16.5	2.4	—	〃
跡津川 I′	1858 年	0.23‡	**1.4**	8.0	1.1	—	1858 年 M7.0 ∼ 7.1
長野 I′	1847 年	0.23‡	**10.8**	18.8	2.7	—	1847 年 M7.4
牛伏寺	現在	0.23‡	**14**	19.7	3.0	—	762 年? M7.0 以上
牛伏寺 *	現在	0.2	**10 ∼ 36**	21.5 ∼ 36.8	3 ∼ 5	表 **3.23**	〃
野島 *	1995 年	0.2	**4 ∼ 9**	12.8 ∼ 15.5	2 ∼ 3	表 **3.23**	1995 年 M7.2

* 時間予測モデルを使用
† 南海 IV の data set を使用
‡ 式 (4.2) で得られた共通の σ を使用

に基づく計算では，図 3.2から読みとると，既に 40 年以下となっていることと対応していると考えられる。いずれが現実にあっているかは今後の検討課題である。なお，前回の南海地震 (1946 年) は 30 年確率が 42% の時に発生したことが分かる。これは，次回の南海地震もそのとおりになることを意味するものではないことはもちろんである。

表 4.1で，陸域の断層における地震の発生確率は，式 (4.2) で求めた平均的な σ の値を用いて再計算した結果も掲載してある。活動間隔が 2,000 年近い阿寺断層は 1586 年の活動から 400 年程度しか経過していないので，現在の確率は非常に低い状態にある。これはある意味では安心情報と言える。しかし，阿寺断層の周辺には多くの活断層が走っており，特定の場所が強震動をこうむる可能性を検討するためには，周辺の活断層の状態も評価する必要があることはいうまでもない。丹那断層の現在の状態も同様である。

3.2.1.2節及び 3.2.1.3節において，丹那断層における北伊豆地震 (1930 年) や跡津川断層における飛越地震 (1858 年) はかなり低い確率しかない時に発生したと述べた。平均的な σ の値を用いて再計算した結果でも，発生した時の 30 年確率は 5% よりも低いことに変わりはないものの，Poisson 過程での確率，つまり，地震は時間的に一定の確率で不規則に発生すると考えたときの確率よりは大きな確率で起こったことが分かる。善光寺地震 (1847 年) 発生直前の長野盆地西縁断層や現在の牛伏寺断層は，兵庫県南部地震の直前時点の野島断層よりも，高い確率になっていることが分かる。断層の活動間隔のばらつきを考慮すると，牛伏寺断層の次回の活動時期についてはなお 100 年以上のあいまいさが残るが，今回扱っている統計モデルからはこれ以上のことは推定できない。

さて，確率の数字の使い方について，統計的仮説の有意性の検定において，統計学の習慣では，有意水準を 5% あるいは 1% に設定して，それ以下の確率しか持たない事象は起こらないと判断することが多い。しかし，その有意水準の値に必然的な理由があるわけではない。特に，統計的検定に

基づく判断が誤った場合には重大な影響があるような案件では，有意水準はもっと小さな値に設定されるべきであろう。極端な場合には，可能性が 0 でない以上，対策をとっておく，という判断もあるかもしれない。また，ここで取り扱っている確率の数字は，それを評価する期間の長短に応じて大小することも重要な性質である。つまり，有意水準をある値に設定するとしても，それが 30 年間の確率なのか，100 年間の確率なのかも同時に指定する必要がある。一般に，確率を評価する期間の長さは，対策の対象とするものの使用年限に応じて決定されるべきものであろう。

4.3　発生確率の時間変化

対数正規分布と Poisson 過程の違いをより明確に示すために，図 4.2 ~ 4.10に，表 4.1で示した南海トラフ，宮城県沖，阿寺断層，丹那断層，跡津川断層及び長野盆地西縁断層の地震について，経過年数に対する危険率のグラフを掲げた。これらのグラフは各断層の現在おかれている状況及び地震発生直前の状況をよく示している。これらの図から，その断層からの地震発生を注意喚起するためのいくつかの指標を考えることができる。それらの指標を表 4.2にまとめて示した。

図 4.2　data set 宮城沖 Ⅲ（宮城県沖地震）における，危険率 $\nu(t)$ の経過年数 t に対するグラフ

図 4.3　data set 南海 I（南海地震）における，危険率 $\nu(t)$ の経過年数 t に対するグラフ

図 4.4　data set 南海 IV（想定東海地震）における，危険率 $\nu(t)$ の経過年数 t に対するグラフ

図 4.5　data set 阿寺 I（現在の阿寺断層）における，危険率 $\nu(t)$ の経過年数 t に対するグラフ

図 4.6　data set 阿寺 I′（最新の地震発生直前の阿寺断層）における，危険率 $\nu(t)$ の経過年数 t に対するグラフ

図 4.7　data set 丹那 I（現在の丹那断層）における，危険率 $\nu(t)$ の経過年数 t に対するグラフ

図 4.8　data set 丹那 I′（最新の地震発生直前の丹那断層）における，危険率 $\nu(t)$ の経過年数 t に対するグラフ

図 4.9　data set 跡津川 I′（最新の地震発生直前の跡津川断層）における，危険率 $\nu(t)$ の経過年数 t に対するグラフ

図 4.10　data set 長野 I′（最新の地震発生直前の長野盆地西縁断層）における，危険率 $\nu(t)$ の経過年数 t に対するグラフ

表 4.2　断層の活動を注意喚起するための指標（データは暫定）

断 層	評価時点	指標 (1)		指標 (2)	指標 (3)	指標 (4)	指標 (5)
		経過年数	比				
南海 I	現在	−45	0.531	0.0420	0.15	0.094	0.0063
南海 III	現在	−42	0.550	∼0	∼0	0.008	0.0083
南海 III′	1946 年	−8	0.917	0.285	1.0	0.426	0.0079
「東海」	現在	38	1.36	2.16	38.1	0.722	0.0060
宮城沖 III	現在	−7	0.735	0.371	2.6	0.768	0.022
阿寺 I	現在	−798	0.340	∼0	∼0	∼0	0.00055
阿寺 I′	1586 年	557	1.44	4.00	57.2	0.547	0.00055
丹那 I	現在	−825	0.0539	∼0	∼0	∼0	0.00086
丹那 I′	1930 年	9	1.01	1.06	8.9	0.169	0.00081
跡津川 I′	1858 年	51	1.03	1.16	10.1	0.170	0.00038
長野 I′	1847 年	347	1.45	4.04	58.8	0.573	0.00091
牛伏寺	現在	452	1.61	6.06	81.9	0.679	0.0010
野島	1995 年	517	1.36	4.22	53.9	0.470	0.00067

指標 (1):「経過年数」の欄： Poisson 過程の危険率を越えてからの経過年数
（負符号はその危険率を越えるまでに残された年数）
「比」の欄：前回の地震発生時から評価時点までの経過時間 (B) と
前回の地震発生時から Poisson 過程の危険率を越えるまでの時間 (A) の比 (B/A)

指標 (2): 評価時点の危険率と， Poisson 過程の危険率との比

指標 (3): 前回の地震発生時から評価時点までの集積確率 (%)

指標 (4): 今後 30 年間での，確率と対数正規分布での確率の極大値との比

指標 (5): Poisson 過程での危険率（地震発生回数 / 年）

表 4.2で，指標 (1) の欄は Poisson 過程の危険率を越えてからの経過年数（負符号はその危険率を越えるまでに残された年数），及び前回の地震発生時から評価時点までの経過時間 (B) と前回の地震発生時から Poisson 過程の危険率を越えるまでの時間 (A) の比 (B/A) を示す。両者とも大きくなるほど，注意が必要であることを意味する。指標 (2) は評価時点の危険率と Poisson 過程の危険率の比である。これも大きいほど注意が必要であることを意味する。なお，指標 (2) は指標 (1) の「経過年数」の正負に応じて 1 より大きくなったり，小さくなったりするという性質がある。指標 (3) は集積確率 (%) である。これは前回の地震発生時点で見て，その時から評価時点までに地震が発生しているはずの確率である。大きい数字ほど注意が必要であることを意味する。仮に数多くの断層を地震発生直前に評価したとすれば，半分の断層は指標 (3) が 50% 以下で，残りの半分は 50% 以上で地震を起こしたことになると考えられる。指標 (4) は今後 30 年間の発生確率と対数正規分布モデルでの確率の極大値（4.2節の後半の説明及び図 4.1参照）の比で，これは表 4.1の該当する 2 つの欄の値から計算される。これも大きいほど注意が必要であることを意味する。指標 (5) は Poisson 過程での 1 年間あたりの地震発生回数である。これは地震の発生間隔よりも十分長い期間で平均したもので，間隔の短い断層ほど大きな値をとる。

この表から，例えば次のようなことを読みとることができる。まず，南海地震の現在の状態であるが， 30 年確率（表 4.1）は data set I と III とで大きく違っていたが， Poisson 過程の危険率を越えるのはいずれも約 40 数年後と，それほど大きな違いはない。想定「東海地震」の場合は 1854 年

の地震発生から Poisson 過程の危険率を越えるまでの時間の 1.3 倍以上の期間（実年代でいうと約 38 年）がすでに経過しており，集積確率も約 38% に達している。宮城県沖の地震は表 4.1の 30 年確率では高い値を示したものの，Poisson 過程の危険率を越えるまでにまだ 7 年ぐらいある。1586 年の阿寺断層の地震（天正地震）は集積確率が約 57% の時に発生した。この地震が起きているために阿寺断層の次の地震は，Poisson 過程の危険率を越えるまでにまだ約 800 年ある。1930 年の丹那断層の地震（北伊豆地震）も 1858 年の跡津川断層の地震（飛越地震）も Poisson 過程の危険率を越えてすぐ（それぞれ，約 9 年後，50 年後）に起こった。これらの地震は，表 4.1にあるように，30 年確率が 2.8% あるいは 1.4% という低い値のときに起こったが，値が低いと言っても対数正規分布での確率の極大値の，ともに 1/6（約 0.17）程度の大きさは持っていた。1847 年の長野盆地西縁断層帯の地震（善光寺地震）は Poisson 過程の危険率を越えた後，300 年以上経過してから起こった。

なお，表 4.2の数字の多くは 3 桁で記入されているが，これらは前提の与え方によって大きく変化するものであり，取り扱いや解釈には十分な注意が必要である。

4.4　確率の誤差評価

ここでは，更新過程のパラメータの誤差とそれに伴う地震発生確率への誤差の伝播について，簡単な検討を行う。本報告書で扱った更新過程モデルのパラメータは 2 つなので，それを一般的に θ_1, θ_2 とする。対数尤度 $\ln L(\theta_1, \theta_2)$ の Hessian（2 階微分の行列）を

$$H \equiv \begin{pmatrix} \dfrac{\partial^2 \ln L}{\partial \theta_1^2} & \dfrac{\partial^2 \ln L}{\partial \theta_1 \partial \theta_2} \\ \dfrac{\partial^2 \ln L}{\partial \theta_2 \partial \theta_1} & \dfrac{\partial^2 \ln L}{\partial \theta_2^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{\theta_1\theta_1} & H_{\theta_1\theta_2} \\ H_{\theta_2\theta_1} & H_{\theta_2\theta_2} \end{pmatrix} \tag{4.4}$$

とすると†，パラメータの共分散行列 $\mathrm{Cov}(\theta_1, \theta_2)$ は近似的に，

$$\mathrm{Cov}(\theta_1, \theta_2) = (-H)^{-1} \tag{4.5}$$

で与えられる。推定すべき確率が $P(T, \Delta T; \theta_1, \theta_2)$ で与えられるとするとき，その分散は

$$\begin{aligned} \mathrm{Var}(P) &= \begin{pmatrix} \dfrac{\partial P}{\partial \theta_1} & \dfrac{\partial P}{\partial \theta_2} \end{pmatrix} \mathrm{Cov}(\theta_1, \theta_2) \begin{pmatrix} \dfrac{\partial P}{\partial \theta_1} \\ \dfrac{\partial P}{\partial \theta_2} \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{H_{\theta_1\theta_2}^2 - H_{\theta_1\theta_1} H_{\theta_2\theta_2}} \left\{ \left(\frac{\partial P}{\partial \theta_1} \right)^2 H_{\theta_2\theta_2} - 2 \frac{\partial P}{\partial \theta_1} \frac{\partial P}{\partial \theta_2} H_{\theta_1\theta_2} + \left(\frac{\partial P}{\partial \theta_2} \right)^2 H_{\theta_1\theta_1} \right\} \end{aligned} \tag{4.6}$$

となる。以下の図 4.11 ~ 4.14に，data set 南海 I を例にとったときの，今後 30 年における地震発生確率の誤差範囲を真値（グラフの実線）から $\pm\sqrt{\mathrm{Var}(P)}$（グラフの点線）の範囲として示した。これらの図において，確率の数値は真値（グラフの実線）の重みが最も高く，そこから上下に離れるほど小さくなる。

† 実際は，H は対称行列であり，$H_{\theta_1\theta_2} = H_{\theta_2\theta_1}$ である。以後の計算では，この事実を使っている。

図 4.11　対数正規分布の確率誤差の例

図 4.12　ガンマ分布の確率誤差の例

図 4.13　Weibull 分布の確率誤差の例

図 4.14　二重指数分布の確率誤差の例

4.5　長期確率評価によって得られる確率の数値の理解に向けて

本報告書に示した確率の数値は，時間の経過により評価時点が変化することに応じて変化する。地震の発生間隔が短いほど，その変化の割合も大きい。その他にも，以下の事項に留意することが必要である。

(1) データの精度
今後，活断層調査の進展や歴史地震についての新たな知見の蓄積があり，過去の地震活動に関する確度の高いデータが得られた場合に，そのデータに基づいて再度，評価を実施すると，得られる確率の値が大きく変わるということは十分考えられることである。この報告書で確率の計算に用いたデータも暫定的なものであり，精度が悪い場合には，将来，数値が大きい方へ，または小さい方へ変更される場合もありうる。

(2) 確率の信頼度
一般に，信頼度の低いデータに基づいて得られた確率は信頼度が低いと考えられる。このため，基づいたデータの信頼度を表す何らかの表現（例えば A，B，C 等）が考案できれば，間接的に確率の数値の信頼度が分かることになり，その利用価値は高いと考えられる。つまり，データの信頼度を示す記号が，確率の値が今後どの程度変わり得るかを判断する指標となる。

(3) 確率の上限
確率の数値は，長期確率評価で使用するモデルの性格上，最高に上がっても 100% には達しない（表 B.16 ~ B.18参照）。例えば 30 年確率の極大値は，表 4.1に示したように，プレート間の地震の場合でも 50% 台のものもあり，また，陸域の断層では 10% に達しない場合もある。つまり，この評価手法が与える確率の数値は頭打ちになるということである。したがって，低い数値であっても，単に安心情報と理解せず，そのモデルがもたらす確率の最大値と比較して考える必要がある。

(4) 判断への利用
確率の数字を判断に利用する場合には，統計学の習慣では有意水準を 5% あるいは 1% に設定して，それ以下の確率しか持たない事象は起こらないとすることが多い。しかし，その有意水準の値に必然的な理由があるわけではないので，判断が誤った場合に重大な影響が生じる案件では，その重大さに応じて，有意水準をもっと小さな値に設定すべきである。

(5) 注意喚起の指標の利用
長期評価手法で得られる確率の数値は，その数値のみを一面的に捉えるのではなく，4.3節で示した断層の活動を注意喚起するための各種の指標も利用していくことが重要である。なお，それらの指標の利用方法について，更に検討を進めていくことも必要である。

参 考 文 献

[1] 総理府地震調査研究推進本部地震調査委員会 (1997): 『日本の地震活動−被害地震から見た地域別の特徴−』, 391pp.

[2] Working Group on California Earthquake Probabilities (1988): Probabilities of large earthquakes occurring in California on the San Andreas fault; *U.S.G.S. Open-File Report 88–398*, 62pp.

[3] Working Group on California Earthquake Probabilities (1990): Probabilities of large earthquakes in the San Francisco bay region, California; *U.S. Geol. Surv. Circ. 1053*, 51pp.

[4] Working Group on California Earthquake Probabilities (1995): Seismic hazards in southern California: probable earthquakes, 1994 to 2024; *Bull. Seism. Soc. Am.* **85**, 379–439.

[5] 成ヶ沢 憲太郎 (1972): 大地震の時間的空間的分布のシミュレーション; 北海道大学地球物理学研究報告 **28**, 31–46.

[6] Rikitake, T. (1976): Recurrence of great earthquakes at subduction zones; *Tectonophysics* **35**, 335–362.

[7] Suzuki, Y., and M. Matsuo (1995): A probabilistic estimation of the expected accelerations of earthquake motion by inland active faults and its application to earthquake engineering; *"Applications of Statistics and Probability – Civil Engineering Reliability and Risk Analysis" M. Lemaire et al. eds.,*(Balkema Press), 635–641.

[8] 隈 元　崇 (1998): 活断層のトレンチ調査結果を用いて推定した日本の内陸地震の長期危険度評価; 地震第 2 輯, 印刷中.

[9] Nishenko, S. P., and R. Buland (1987): A generic recurrence interval for earthquake forecasting; *Bull. Seism. Soc. Am.* **77**, 1382–1399.

[10] Utsu, T. (1984): Estimation of parameters for recurrence models of earthquakes; *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo* **59**, 53–66.

[11] Hagiwara, Y. (1974): Probability of earthquake occurrence as obtained from a Weibull distribution analysis of crustal strain; *Tectonophysics* **23**, 313–318.

[12] Nishenko, S. P. (1985): Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and southern Peruvian margins of the South America; *J. Geophys. Res.* **90**, 3589–3615.

[13] Mogi, K. (1962): Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthquake phenomena; *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo* **40**, 125–173.

[14] 伏 見 正 則 (1987):『理工学者が書いた数学の本 確率と確率課程』(講談社), 172pp.

[15] Shimazaki, K., and T. Nakata (1980): Time-predictable recurrence model for large earthquakes; *Geophys. Res. Lett.* **7**, 279–282.

[16] 島 崎　邦 彦 (1996): 時間予測モデルとは; 地震ジャーナル **21**, 43–48.

[17] 尾 形　良 彦 (1998): 地震発生時刻が不確実な場合の点過程モデルの比較・推定と予測; 地球惑星科学関連学会 1998 年合同大会講演予稿集, 印刷中.

[18] 奥 村　俊 彦・石 川　裕・亀 田　弘 行 (1997): 活断層の活動履歴に関する情報を考慮した地震危険度評価; 第 2 回 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 49–56.

[19] 都 司　嘉 宣・上 田　和 枝 (1997): 明応 (1498) 南海地震の存在とその日付について; 地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会講演予稿集, 169.

[20] 寒 川　旭 (1997):『揺れる大地　日本列島の地震史』(同朋舎出版), 42–44.

[21] Akaike, H. (1974): A new look at the statistical model identification; *IEEE Trans. Automat. Contrl.* **AC-19**, 667–674.

[22] 坂 元　慶 行, 石 黒　真 木 夫, 北 川　源 四 郎 (1983):『情報量統計学』(共立出版), 236pp.

[23] 沢 村　武 雄 (1953): 西南日本外側地震帯の活動と四国及びその付近の地質，地殻変動との関係; 高知大学学術研究報告 **2** No.15, 1–46.

[24] Tsukuda, E. (1987): Migration of historical earthquakes, central Japan; *Proc. Conference XXXIX, Directions in Paleoseismology, U.S.G.S. Open-File Report 87–673*, 271–284.

[25] 岡 田　篤 正・松 田　時 彦 (1976): 岐阜県東部，小野沢峠における阿寺断層の露頭と新期断層運動; 地理学評論 **49**, 632–639.

[26] 平 野　信 一・中 田　高 (1981): 阿寺断層に沿う第四紀後期の断層変位から推定した地震活動; 地理学評論 **54**, 231–246.

[27] 丹那断層発掘調査研究グループ (1983): 丹那断層 (北伊豆・名賀地区) の発掘調査; 地震研究所彙報 **58**, 797–830.

[28] Kumamoto, T. (1997): Changes in seismic hazard due to large earthquakes estimated from Coulomb failure function in Japan; *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan Univ.* **32**, 1–14.

[29] 跡津川断層トレンチ発掘調査団 (1989): 岐阜県宮川村野首における跡津川断層のトレンチ発掘調査; 地学雑誌 **98**, 440–463.

[30] 粟 田 泰 夫・佃 栄 吉 (1993): 最近 1 万年における跡津川断層の活動 (演旨) ; 日本地震学会講演予稿集 1993 **2**, 199.

[31] 総理府地震調査研究推進本部地震調査委員会 (1997): 糸魚川–静岡構造線活断層系の調査結果と評価について; 地震調査委員会報告集– 1995 年 7 月 ~ 1996 年 12 月–, 501–510.

[32] 粟 田 泰 夫・鈴 木 康 弘 (1996): 1995 年兵庫県南部地震を生起した野島断層系の活動履歴及び活動性調査; 地質調査所研究資料集 **259** (平成 7 年度活断層研究調査概要報告書) , 248.

[33] 粟 田 泰 夫・水 野 清 秀・杉 山 雄 一・井 村 隆 介・下 川 浩 一・奥 村 晃 史・佃 栄 吉・木 村 克 己 (1996): 兵庫県南部地震に伴って淡路島北西岸に出現した地震断層; 地震第 2 輯 **49**, 113–124.

[34] Savage, J. C. (1991): Criticism of some forecasts of the national earthquake prediction evaluation council; *Bull. Seism. Soc. Am.* **81**, 862–881.

[35] Savage, J. C. (1992): The uncertainty in earthquake conditional probabilities; *Geophys. Res. Lett.* **19**, 709–712.

[36] 野 澤 竜 二 郎・杉 村 昌 広・鈴 木 康 弘 (1998): 活断層の地震危険度評価と近傍地盤変形の検討–愛知県猿投山北断層を例として–; 地盤工学会誌 (土と基礎) **46**-2, 27–29.

[37] Davis, P. M., D. D. Jackson and Y. Y. Kagan (1989): The longer it has been since the last earthquake, the longer the expected time till the next?; *Bull. Seism. Soc. Am.* **79**, 1438–1456.

[38] Sornette, D. and L. Knopoff (1997): The paradox of the expected time until the next earthquake; *Bull. Seism. Soc. Am.* **87**, 789–798.

付 録 A

最尤法について

A.1　基本的概念

A.1.1　最尤法

任意に取り出した無作為標本がある確率密度関数に従うとしたとき，関数に内包される不定のパラメータの推定量を標本から見つけ出す方法として，以下に述べる最尤法 (method of maximum likelihood) がある。

$X_1, X_2, \cdots, X_n$ を密度関数 $f(x; \{\theta_j\}_{j=1}^m)$ をもつ分布からの独立標本とし，それらの同時密度関数を，

$$L(\{\theta_j\}_{j=1}^m; x_1, x_2, \cdots, x_n) \equiv \prod_{i=1}^n f(x_i; \{\theta_j\}_{j=1}^m)$$

とおく。これは $\{x_i\}_{i=1}^n$, $\{\theta_j\}_{j=1}^m$ の関数であるが，データ $\{x_i\}_{i=1}^n$ を固定し，$\{\theta_j\}_{j=1}^m$ の関数と考えたとき尤度関数 (likelihood function) という。更に，$L(\{\theta_j\}_{j=1}^m)$ の値を最大にする $\{\theta_j\}_{j=1}^m = \{\hat{\theta}_j\}_{j=1}^m$ が存在するとき，

$$\hat{\theta}_j(x_1, x_2, \cdots, x_n) \qquad j = 1, 2, \cdots, m$$

を $\theta_j(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ の最尤推定量 (maximum likelihood estimator) という。

$$\ln L(\{\theta_j\}_{j=1}^m; x_1, x_2, \cdots, x_n) = \sum_{i=1}^n \ln f(x_i; \{\theta_j\}_{j=1}^m)$$

であるから，$L(\{\theta_j\}_{j=1}^m)$ の値を最大にする $\{\theta_j\}_{j=1}^m$ を求める代わりに，$\ln L(\{\theta_j\}_{j=1}^m)$ の値を最大にする $\{\theta_j\}_{j=1}^m$ を求める方が計算が簡単になる場合が多い。すなわち，

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \theta_1} = 0 \ , \ \frac{\partial \ln L}{\partial \theta_2} = 0 \ , \ \cdots \ , \ \frac{\partial \ln L}{\partial \theta_m} = 0$$

を満たす $\{\theta_j\}_{j=1}^m$ をもって $\{\hat{\theta}_j\}_{j=1}^m$ とする。同様のことが，独立同分布でない一般のモデルに関する尤度関数でも定義される。

A.1.2　パラメータ決定の実際

3.1等で式 (2.1) ~ (2.4) の分布について，最尤法を用いてパラメータを決定するのであるが，以下では，これら 4 つの確率分布のうち Weibull 分布に対して，パラメータ決定の実際について説明す

る。

いま標本数 n 個の発生間隔の data set $\{T_i\}_{i=1}^n$ があるとするとき，式 (2.3) から，尤度関数 L の対数は，以下のとおりとなる。ただし，式中の $E[\cdot]$ は，括弧内の変数の相加平均を表す。

$$\begin{aligned}
\ln L(\{T_i\}_{i=1}^n;\alpha,\beta) &\equiv \ln\prod_{i=1}^n f(T_i;\alpha,\beta) \\
&= \sum_{i=1}^n \ln\left\{\alpha\beta T_i^{\beta-1}\exp(-\alpha T_i^\beta)\right\} \\
&= n\ln\alpha\beta + (\beta-1)\sum_{i=1}^n \ln T_i - \alpha\sum_{i=1}^n T_i^\beta \\
&= n\left\{\ln\alpha\beta + (\beta-1)E[\ln T_i] - \alpha E[T_i^\beta]\right\} \qquad \text{(A.1)}
\end{aligned}$$

この $\ln L$ を最大にする条件から与えられる以下の 2 式を連立させて，(α,β) の最尤値が求められる。

$$\frac{\partial \ln L}{\partial\alpha} = 0 \quad\longrightarrow\quad \frac{1}{\alpha} - E[T_i^\beta] = 0 \qquad \text{(A.2a)}$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial\beta} = 0 \quad\longrightarrow\quad \frac{1}{\beta} + E[\ln T_i] - \alpha E[T_i^\beta \ln T_i] = 0 \qquad \text{(A.2b)}$$

上記の連立方程式は解析的には解けないので，数値的に解くことになる。他の 3 つの分布のパラメータについても，上と同様の手順で最尤値が求められる。本報告書では連立方程式の解を数値的に求めるに当たり Newton-Raphson 法を用いたが，パラメータの数がある程度大きくなって対数尤度関数の形状が悪くなり，初期値によっては Newton-Raphson 法では収束しにくい場合でも，初期値に余り左右されず安定して最大値を求められる Davidon-Fletcher-Powell 法や Davidon 法などの準 Newton 法が一般的にはよく用いられる。なお，対数正規分布に関しては，2 つのパラメータは解析的にかつ独立に決定される。

A.2　定常更新過程の厳密な対数尤度

A.1において，地震発生の時刻を標本とした。しかしこの扱いでは，調査された時代の最も古い時期から最初の地震発生時の間，及び最後の地震発生時から現在まで地震が起こっていないという情報は使われていない。この情報も尤度に取り込んで取り扱うと，特に既知の地震発生時刻が少ない場合は，かなりの差が出てくる可能性がある。

以下，簡単のために $\{\theta_j\}_{j=1}^m$ を単に θ と表す。条件付き強度関数 $\lambda_\theta(t|H_t)$ から決まる点過程について，区間 $S < t \le T$ 上のあらかじめ指定された配置 $t_1 < t_2 < \cdots < t_n$ に n 個の点が生起するときの同時確率密度関数は，

$$f_{[S,T]}(t_1,t_2,\cdots,t_n|\theta) = \left\{\prod_{i=1}^n \lambda_\theta(t_i|H_{t_i})\right\}\exp\left(-\int_S^T \lambda_\theta(t|H_t)dt\right) \qquad \text{(A.3)}$$

で与えられる。したがって対数尤度関数は，

$$\ln L_{[S,T]}(\theta; t_1, t_2, \cdots, t_n) = \sum_{i=1}^{n} \ln \lambda_\theta(t_i|H_{t_i}) - \int_S^T \lambda_\theta(t|H_t)dt \tag{A.4}$$

となる。

T を現在の時刻とし，S を調査された最も古い時期とする。期間 $S \leq t \leq T$ で地震発生時刻のデータ $\{t_i; i = 1, 2, \cdots, n\}$ が与えられているとする。時刻 S 以前の最後の地震がいつ起きたか全く情報がないとき，更新過程の定常性を仮定すると，最初の発生点までの時刻における条件付き強度とそれ以降の条件付き強度は形が異なり，以下のようになる。

$$\lambda_\theta(t|H_t) = \begin{cases} \phi_\theta(t-S) \Big/ \displaystyle\int_t^\infty \phi_\theta(\omega - S)d\omega, & \text{for } t_{\text{last}} < S \\ -\dfrac{d\phi_\theta(t - t_{\text{last}})}{dt} \Big/ \phi_\theta(t - t_{\text{last}}), & \text{for } t_{\text{last}} \geq S \end{cases} \tag{A.5}$$

これから厳密な対数尤度関数：

$$\ln L_{[S,T]}(\theta) = -\ln \mu_\theta + \ln \phi_\theta(t_1 - S) + \sum_{i=2}^{n} f_\theta(t_i - t_{i-1}) + \ln \phi_\theta(T - t_n) \tag{A.6}$$

が得られる。ただし μ_θ は点区間の長さの期待値である。式 (A.6) の第 3 項が付録 A.1における (近似) 対数尤度に対応しているのが分かる。地震発生のデータ数が十分ならば近似尤度でも有効であるが，余りデータがないときには他の項が無視できなくなると考えられる。なお本報告書の 4 つのモデルに関する式 (A.6) の計算は表 2.1の結果を用いる。

参考文献

Ogata, Y. (1978): The asymptotic behavior of maximum likelihood estimators for stationary point processes; *Ann. Inst. Statist. Math.* **30**, 243–261.

付 録 B

対数正規分布の確率一覧表

B.1　地震発生確率一覧表

以下の表 B.1 ~ B.15は，式 (2.22) で表される対数正規分布について，各 σ に対し，最新の地震からの経過年数 T を縦に，発生間隔の（相乗）平均値 $\hat{T}$ を横にとって，時刻 T から ΔT 年後までに次の地震が起こる確率：

$$P(T, \Delta T) = \int_{T}^{T+\Delta T} f(t)dt \Big/ \int_{T}^{\infty} f(t)dt \qquad \text{(B.1)}$$

を，ΔT が 30 年，50 年，100 年の場合について % 単位で示したものである。

使用例として，糸魚川–静岡構造線活断層系の評価 [A] のうち，「地震は 1,000 年おきに発生し，前回から 1,200 年経過している」場合（これらの数値は，確率計算に使う上からは暫定的なものである）を考えてみると，ばらつきとして $\sigma = 0.23$ をとった 30 年確率は，表 B.7を参照して，T として “1200” の行，$\hat{T}$ として “1000” の列をクロスさせることによって，14.0% と求められる。また，100 年確率は表 B.9を用いて 40.7% であることが分かる。ちなみに，300 年確率を計算すると，81.8% である。もう一つの例として，神縄・国府津–松田断層帯の評価 [B] では，「最新の活動は約 3 千年前で，おおよその活動間隔は 3 千年程度 $\cdots$」と推定（これらの数値も同様に暫定的なものである）されている。この場合の，ばらつきとして $\sigma = 0.23$ をとった 30 年確率は，表 B.7を参照して，T として “3000” の行，$\hat{T}$ として “3000” の列をクロスさせることによって，3.5% と求められる。また，100 年確率は表 B.9を用いて 11.3% であることが分かる。ちなみに，300 年確率を計算すると，32.1% である。この数値を表 4.1に掲載された各断層の発生確率（今後 30 年）と比較することにより，神縄・国府津–松田断層帯の地震の切迫度を他の断層（帯）と比較することができる（更に，付録 B.2も参照）。

参考文献

[A] 総理府地震調査研究推進本部地震調査委員会 (1997): 糸魚川–静岡構造線活断層系の調査結果と評価について; 地震調査委員会報告集– 1995 年 7 月 ~ 1996 年 12 月–, 501–510.

[B] 総理府地震調査研究推進本部地震調査委員会 (1998): 神縄・国府津–松田断層帯の調査結果と評価について; 地震調査委員会報告集– 1997 年 1 月 ~ 12 月–, 353–372.

表 B.1 今後 30 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.1$ の場合，単位 %)

T \ $\hat{T}$	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	2000	3000	4000	5000
500	44.0	7.6	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
600	69.5	37.4	9.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
700	79.9	59.5	32.5	9.8	1.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
800	84.6	70.8	51.3	28.7	10.2	1.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
900	86.9	76.6	62.4	44.7	25.7	10.3	2.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1000	88.1	79.9	68.9	55.2	39.3	23.2	10.3	3.0	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1100	88.8	81.9	72.9	61.8	49.0	34.9	21.2	10.1	3.5	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
1200	89.1	83.1	75.4	66.2	55.5	43.7	31.3	19.5	9.9	3.9	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0
1300	89.2	83.8	77.1	69.2	60.1	50.0	39.2	28.3	18.0	9.7	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0
1400	89.2	84.2	78.2	71.2	63.3	54.6	45.2	35.5	25.8	16.8	9.4	0.0	0.0	0.0	0.0
1500	89.1	84.4	78.9	72.6	65.6	57.9	49.7	41.1	32.2	23.6	15.7	0.2	0.0	0.0	0.0
2000	87.6	83.7	79.6	75.1	70.4	65.5	60.3	55.0	49.5	43.9	38.2	11.8	0.0	0.0	0.0
3000	83.4	80.1	76.8	73.5	70.2	66.9	63.7	60.4	57.2	54.0	50.8	35.0	7.9	0.1	0.0
4000	79.0	75.9	73.0	70.2	67.4	64.8	62.2	59.7	57.2	54.8	52.4	41.2	21.3	6.0	0.3
5000	74.9	72.0	69.3	66.8	64.3	62.0	59.8	57.7	55.6	53.6	51.7	42.7	27.3	14.4	4.8

表 B.2 今後 50 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.1$ の場合，単位 %)

T \ $\hat{T}$	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	2000	3000	4000	5000
500	65.9	16.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
600	87.3	57.7	17.9	1.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
700	93.4	79.2	51.0	18.5	2.8	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
800	95.7	87.7	71.3	45.6	18.7	4.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
900	96.7	91.4	81.1	64.1	41.1	18.5	5.0	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1000	97.2	93.3	86.1	74.5	57.8	37.4	18.2	5.9	1.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1100	97.4	94.3	88.9	80.4	68.2	52.4	34.3	17.7	6.6	1.7	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
1200	97.5	94.9	90.5	83.9	74.6	62.4	47.7	31.7	17.2	7.1	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0
1300	97.6	95.2	91.5	86.1	78.7	69.1	57.2	43.6	29.4	16.7	7.6	0.0	0.0	0.0	0.0
1400	97.5	95.4	92.1	87.5	81.4	73.5	63.9	52.6	40.1	27.4	16.2	0.0	0.0	0.0	0.0
1500	97.5	95.5	92.5	88.5	83.3	76.6	68.6	59.1	48.4	37.0	25.7	0.3	0.0	0.0	0.0
2000	96.9	95.1	92.9	90.2	86.9	83.1	78.7	73.7	68.2	62.1	55.5	19.5	0.0	0.0	0.0
3000	94.9	93.2	91.2	89.0	86.7	84.2	81.5	78.7	75.7	72.6	69.3	51.3	13.1	0.1	0.0
4000	92.5	90.7	88.7	86.7	84.6	82.4	80.2	78.0	75.7	73.4	71.0	58.8	33.0	9.9	0.5
5000	90.0	88.0	86.0	84.0	82.0	80.1	78.1	76.1	74.1	72.2	70.2	60.4	41.2	23.0	7.9

表 B.3 今後 100 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.1$ の場合，単位 %)

T \ $\hat{T}$	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	2000	3000	4000	5000
500	93.2	48.2	6.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
600	98.9	87.7	46.7	8.9	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
700	99.7	96.7	81.8	45.0	11.4	1.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
800	99.8	98.8	93.4	76.1	43.2	13.5	2.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
900	99.9	99.4	97.0	89.3	70.8	41.4	15.1	3.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1000	99.9	99.6	98.3	94.3	84.7	65.9	39.7	16.4	4.3	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
1100	99.9	99.7	98.9	96.5	91.0	80.0	61.6	38.1	17.3	5.4	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0
1200	99.9	99.7	99.1	97.6	94.1	87.3	75.3	57.7	36.6	17.9	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0
1300	99.9	99.8	99.3	98.2	95.8	91.2	83.2	70.9	54.1	35.1	18.3	0.0	0.0	0.0	0.0
1400	99.9	99.8	99.4	98.5	96.7	93.4	87.9	79.2	66.8	51.0	33.8	0.2	0.0	0.0	0.0
1500	99.9	99.8	99.5	98.7	97.3	94.8	90.7	84.3	75.2	62.9	48.1	1.1	0.0	0.0	0.0
2000	99.9	99.8	99.5	99.0	98.3	97.2	95.5	93.3	90.2	86.1	80.9	37.4	0.0	0.0	0.0
3000	99.7	99.5	99.2	98.8	98.2	97.5	96.6	95.5	94.1	92.5	90.7	76.6	25.7	0.3	0.0
4000	99.4	99.1	98.7	98.2	97.6	96.9	96.1	95.1	94.1	92.9	91.6	83.1	55.5	19.5	1.1
5000	99.0	98.5	98.0	97.4	96.8	96.0	95.2	94.3	93.3	92.2	91.1	84.4	65.6	41.1	15.7

表 B.4　今後 30 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.2$ の場合，単位 %)

T \ $\hat{T}$	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	2000	3000	4000	5000
500	22.9	10.6	3.8	1.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
600	31.5	19.3	10.1	4.4	1.6	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
700	36.8	25.9	16.6	9.5	4.8	2.1	0.8	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
800	39.9	30.3	21.8	14.6	9.0	5.0	2.5	1.2	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
900	41.8	33.3	25.6	18.8	13.0	8.4	5.1	2.8	1.4	0.7	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
1000	42.9	35.2	28.3	22.0	16.4	11.7	8.0	5.1	3.0	1.7	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0
1100	43.4	36.5	30.1	24.4	19.2	14.6	10.7	7.5	5.0	3.2	1.9	0.1	0.0	0.0	0.0
1200	43.6	37.3	31.4	26.1	21.3	16.9	13.1	9.8	7.1	4.9	3.3	0.2	0.0	0.0	0.0
1300	43.6	37.7	32.3	27.4	22.9	18.8	15.1	11.9	9.1	6.7	4.8	0.5	0.0	0.0	0.0
1400	43.5	38.0	32.9	28.4	24.1	20.3	16.8	13.7	10.9	8.4	6.4	1.0	0.0	0.0	0.0
1500	43.2	38.0	33.3	29.0	25.1	21.5	18.2	15.1	12.4	10.0	7.9	1.6	0.0	0.0	0.0
2000	41.1	37.0	33.4	30.1	27.1	24.4	21.8	19.5	17.3	15.2	13.3	5.9	0.4	0.0	0.0
3000	36.4	33.5	30.9	28.6	26.6	24.7	22.9	21.3	19.8	18.3	17.0	11.3	4.0	0.8	0.1
4000	32.5	30.2	28.1	26.3	24.7	23.3	21.9	20.7	19.5	18.4	17.4	13.0	6.9	3.0	0.9
5000	29.3	27.4	25.7	24.2	22.9	21.7	20.6	19.6	18.6	17.7	16.9	13.4	8.3	4.8	2.4

表 B.5　今後 50 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.2$ の場合，単位 %)

T \ $\hat{T}$	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	2000	3000	4000	5000
500	36.6	18.4	7.1	2.1	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
600	47.6	31.1	17.3	8.0	3.1	1.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
700	53.9	40.0	27.0	16.2	8.5	3.9	1.6	0.6	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
800	57.5	45.7	34.2	23.8	15.2	8.8	4.6	2.1	0.9	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
900	59.6	49.4	39.3	29.8	21.3	14.2	8.8	5.0	2.6	1.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
1000	60.8	51.7	42.8	34.3	26.3	19.3	13.3	8.7	5.3	3.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0
1100	61.3	53.2	45.2	37.5	30.2	23.5	17.6	12.6	8.5	5.5	3.4	0.1	0.0	0.0	0.0
1200	61.6	54.1	46.8	39.8	33.2	26.9	21.2	16.2	11.9	8.3	5.6	0.4	0.0	0.0	0.0
1300	61.5	54.6	47.9	41.5	35.4	29.6	24.2	19.3	15.0	11.2	8.1	0.9	0.0	0.0	0.0
1400	61.3	54.9	48.7	42.7	37.1	31.7	26.6	22.0	17.7	13.9	10.7	1.7	0.0	0.0	0.0
1500	61.0	54.9	49.1	43.6	38.3	33.3	28.6	24.1	20.1	16.3	13.0	2.8	0.0	0.0	0.0
2000	58.5	53.7	49.2	45.0	41.0	37.3	33.7	30.3	27.1	24.1	21.3	9.8	0.7	0.0	0.0
3000	52.9	49.3	46.0	43.0	40.2	37.6	35.2	32.9	30.7	28.7	26.7	18.2	6.6	1.3	0.1
4000	48.0	45.0	42.3	39.9	37.7	35.7	33.8	32.0	30.3	28.8	27.3	20.8	11.2	5.0	1.6
5000	43.9	41.3	39.1	37.0	35.2	33.5	31.9	30.4	29.1	27.8	26.6	21.3	13.4	7.8	4.0

表 B.6　今後 100 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.2$ の場合，単位 %)

T \ $\hat{T}$	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	2000	3000	4000	5000
500	63.8	39.0	18.3	6.6	2.0	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
600	74.4	55.9	35.9	19.1	8.5	3.2	1.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
700	79.7	65.9	49.6	33.1	19.4	9.9	4.4	1.8	0.7	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
800	82.5	71.6	58.6	44.4	30.8	19.2	10.8	5.5	2.6	1.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
900	83.9	75.0	64.3	52.4	40.2	28.7	18.9	11.4	6.4	3.3	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0
1000	84.7	77.1	68.0	57.9	47.2	36.6	26.8	18.4	11.8	7.1	4.0	0.1	0.0	0.0	0.0
1100	85.1	78.3	70.5	61.7	52.4	42.9	33.6	25.2	17.9	12.0	7.6	0.4	0.0	0.0	0.0
1200	85.2	79.1	72.1	64.3	56.1	47.6	39.2	31.1	23.7	17.3	12.1	1.0	0.0	0.0	0.0
1300	85.2	79.5	73.1	66.2	58.8	51.2	43.5	36.0	28.9	22.4	16.8	2.2	0.0	0.0	0.0
1400	85.0	79.7	73.8	67.5	60.8	53.9	46.9	40.0	33.3	27.0	21.3	3.9	0.0	0.0	0.0
1500	84.7	79.7	74.2	68.4	62.3	56.0	49.6	43.2	36.9	30.9	25.3	6.2	0.1	0.0	0.0
2000	82.7	78.5	74.2	69.7	65.3	60.8	56.2	51.7	47.2	42.8	38.5	19.3	1.6	0.0	0.0
3000	77.7	74.1	70.7	67.4	64.2	61.0	57.9	54.9	52.0	49.1	46.3	33.3	13.0	2.8	0.3
4000	72.8	69.6	66.6	63.8	61.1	58.5	56.1	53.7	51.4	49.2	47.1	37.3	21.3	9.8	3.3
5000	68.4	65.5	62.8	60.3	57.9	55.7	53.6	51.6	49.6	47.8	46.0	38.0	25.1	15.1	7.9

表 B.7 今後 30 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.23$ の場合，単位 %)

T \ $\hat{T}$	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	2000	3000	4000	5000
500	20.0	10.3	4.5	1.7	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
600	26.4	16.8	9.6	4.9	2.2	0.9	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
700	30.4	21.7	14.5	9.0	5.1	2.7	1.3	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
800	32.8	25.0	18.3	12.7	8.4	5.2	3.0	1.6	0.8	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
900	34.2	27.2	21.1	15.8	11.3	7.8	5.1	3.2	1.9	1.1	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
1000	35.0	28.7	23.0	18.1	13.8	10.2	7.3	5.0	3.3	2.1	1.3	0.1	0.0	0.0	0.0
1100	35.4	29.6	24.4	19.8	15.8	12.3	9.3	6.8	4.9	3.4	2.2	0.2	0.0	0.0	0.0
1200	35.6	30.2	25.4	21.1	17.3	14.0	11.1	8.5	6.4	4.7	3.4	0.4	0.0	0.0	0.0
1300	35.5	30.5	26.1	22.1	18.5	15.3	12.5	10.0	7.9	6.1	4.6	0.8	0.0	0.0	0.0
1400	35.3	30.6	26.5	22.8	19.4	16.4	13.7	11.3	9.2	7.3	5.8	1.3	0.0	0.0	0.0
1500	35.0	30.7	26.8	23.3	20.1	17.3	14.7	12.4	10.3	8.5	6.9	1.9	0.0	0.0	0.0
2000	33.1	29.7	26.7	24.0	21.6	19.4	17.3	15.5	13.8	12.2	10.7	5.2	0.6	0.0	0.0
3000	29.1	26.6	24.5	22.6	21.0	19.4	18.0	16.7	15.5	14.4	13.4	9.0	3.5	0.9	0.2
4000	25.8	23.8	22.2	20.7	19.4	18.2	17.2	16.2	15.2	14.4	13.6	10.2	5.5	2.6	1.0
5000	23.1	21.6	20.2	19.0	17.9	17.0	16.1	15.3	14.5	13.8	13.2	10.4	6.5	3.9	2.1

表 B.8 今後 50 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.23$ の場合，単位 %)

T \ $\hat{T}$	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	2000	3000	4000	5000
500	32.1	17.6	8.1	3.2	1.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
600	40.7	27.2	16.3	8.7	4.1	1.8	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
700	45.7	34.0	23.6	15.1	8.9	4.8	2.4	1.1	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
800	48.7	38.4	29.0	20.8	14.0	8.9	5.2	2.9	1.5	0.8	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
900	50.4	41.3	32.9	25.2	18.6	13.1	8.7	5.5	3.3	1.9	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1000	51.3	43.2	35.6	28.6	22.3	16.8	12.2	8.5	5.7	3.6	2.2	0.1	0.0	0.0	0.0
1100	51.8	44.4	37.5	31.0	25.2	19.9	15.3	11.4	8.2	5.7	3.9	0.3	0.0	0.0	0.0
1200	51.9	45.1	38.7	32.8	27.4	22.4	18.0	14.1	10.8	8.0	5.8	0.7	0.0	0.0	0.0
1300	51.8	45.5	39.6	34.1	29.1	24.4	20.2	16.4	13.0	10.1	7.7	1.4	0.0	0.0	0.0
1400	51.6	45.7	40.2	35.1	30.4	26.0	22.0	18.3	15.0	12.1	9.6	2.2	0.0	0.0	0.0
1500	51.2	45.7	40.5	35.7	31.3	27.2	23.4	19.9	16.7	13.9	11.3	3.2	0.1	0.0	0.0
2000	48.8	44.4	40.4	36.7	33.3	30.2	27.2	24.5	22.0	19.6	17.3	8.5	1.0	0.1	0.0
3000	43.5	40.3	37.4	34.8	32.4	30.2	28.2	26.3	24.5	22.9	21.3	14.6	5.7	1.5	0.3
4000	39.1	36.4	34.1	32.1	30.2	28.5	26.9	25.5	24.1	22.8	21.6	16.4	9.0	4.3	1.7
5000	35.5	33.3	31.3	29.6	28.0	26.6	25.3	24.1	23.0	21.9	21.0	16.7	10.6	6.4	3.5

表 B.9 今後 100 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.23$ の場合，単位 %)

T \ $\hat{T}$	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	2000	3000	4000	5000
500	57.2	36.4	19.3	8.7	3.4	1.2	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
600	66.5	49.7	33.2	19.6	10.2	4.8	2.1	0.8	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
700	71.4	58.0	43.8	30.5	19.4	11.2	6.0	3.0	1.4	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
800	74.1	63.1	51.1	39.1	28.1	18.9	11.8	6.9	3.8	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
900	75.7	66.2	55.9	45.5	35.3	26.1	18.3	12.1	7.6	4.6	2.6	0.1	0.0	0.0	0.0
1000	76.4	68.1	59.2	49.9	40.8	32.1	24.3	17.6	12.2	8.1	5.2	0.3	0.0	0.0	0.0
1100	76.8	69.3	61.3	53.1	44.9	36.9	29.5	22.8	17.0	12.2	8.5	0.9	0.0	0.0	0.0
1200	76.9	70.0	62.8	55.4	47.9	40.7	33.7	27.2	21.4	16.3	12.1	1.8	0.0	0.0	0.0
1300	76.7	70.3	63.7	57.0	50.2	43.5	37.0	30.9	25.3	20.2	15.7	3.1	0.0	0.0	0.0
1400	76.5	70.5	64.3	58.1	51.9	45.7	39.7	34.0	28.6	23.6	19.1	4.8	0.1	0.0	0.0
1500	76.1	70.4	64.7	58.9	53.1	47.4	41.8	36.4	31.3	26.5	22.1	6.8	0.2	0.0	0.0
2000	73.7	69.0	64.4	59.9	55.6	51.3	47.2	43.2	39.3	35.6	32.0	16.8	2.2	0.1	0.0
3000	68.0	64.2	60.7	57.4	54.2	51.2	48.4	45.7	43.0	40.5	38.1	27.2	11.3	3.2	0.6
4000	62.8	59.5	56.5	53.8	51.2	48.8	46.5	44.4	42.3	40.4	38.5	30.2	17.3	8.5	3.4
5000	58.3	55.4	52.7	50.3	48.1	46.1	44.2	42.4	40.7	39.0	37.5	30.7	20.1	12.4	6.9

表 B.10　今後 30 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.3$ の場合，単位 %)

T \ $\hat{T}$	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	2000	3000	4000	5000
500	15.4	9.3	5.3	2.8	1.4	0.7	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
600	18.8	12.9	8.5	5.3	3.2	1.8	1.0	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
700	21.0	15.5	11.1	7.7	5.2	3.4	2.1	1.3	0.8	0.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
800	22.2	17.2	13.1	9.8	7.1	5.0	3.5	2.3	1.5	1.0	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0
900	23.0	18.4	14.6	11.4	8.7	6.5	4.8	3.5	2.5	1.7	1.2	0.1	0.0	0.0	0.0
1000	23.3	19.1	15.6	12.6	10.0	7.8	6.1	4.6	3.5	2.5	1.8	0.3	0.0	0.0	0.0
1100	23.5	19.6	16.3	13.5	11.0	8.9	7.1	5.7	4.4	3.4	2.6	0.5	0.0	0.0	0.0
1200	23.4	19.8	16.8	14.1	11.8	9.8	8.1	6.6	5.3	4.2	3.3	0.9	0.0	0.0	0.0
1300	23.3	20.0	17.1	14.6	12.4	10.5	8.8	7.3	6.1	5.0	4.0	1.2	0.1	0.0	0.0
1400	23.1	20.0	17.3	14.9	12.8	11.0	9.4	8.0	6.7	5.6	4.7	1.6	0.1	0.0	0.0
1500	22.9	19.9	17.4	15.1	13.2	11.4	9.9	8.5	7.3	6.2	5.3	2.1	0.2	0.0	0.0
2000	21.4	19.1	17.1	15.3	13.8	12.4	11.2	10.1	9.0	8.1	7.2	4.0	0.9	0.1	0.0
3000	18.4	16.8	15.4	14.2	13.2	12.2	11.3	10.5	9.8	9.1	8.5	5.9	2.6	1.0	0.3
4000	16.2	14.9	13.8	12.9	12.1	11.3	10.7	10.0	9.5	8.9	8.5	6.4	3.7	2.0	1.0
5000	14.4	13.4	12.5	11.8	11.1	10.5	9.9	9.4	9.0	8.5	8.1	6.4	4.1	2.6	1.6

表 B.11　今後 50 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.3$ の場合，単位 %)

T \ $\hat{T}$	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	2000	3000	4000	5000
500	24.9	15.7	9.2	5.0	2.6	1.3	0.6	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
600	29.7	21.0	14.2	9.1	5.6	3.3	1.8	1.0	0.5	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
700	32.6	24.8	18.2	12.9	8.8	5.8	3.7	2.3	1.4	0.8	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
800	34.4	27.2	21.1	16.0	11.8	8.5	5.9	4.0	2.7	1.8	1.1	0.1	0.0	0.0	0.0
900	35.3	28.9	23.2	18.4	14.3	10.9	8.1	5.9	4.2	3.0	2.1	0.3	0.0	0.0	0.0
1000	35.8	29.9	24.7	20.2	16.3	12.9	10.1	7.7	5.9	4.3	3.2	0.5	0.0	0.0	0.0
1100	36.0	30.5	25.7	21.5	17.8	14.6	11.8	9.4	7.4	5.7	4.4	1.0	0.0	0.0	0.0
1200	35.9	30.9	26.4	22.5	19.0	15.9	13.2	10.8	8.8	7.1	5.6	1.5	0.1	0.0	0.0
1300	35.7	31.0	26.9	23.2	19.9	16.9	14.3	12.0	10.0	8.3	6.7	2.1	0.1	0.0	0.0
1400	35.5	31.0	27.1	23.6	20.5	17.8	15.3	13.0	11.1	9.3	7.8	2.8	0.2	0.0	0.0
1500	35.1	30.9	27.2	24.0	21.0	18.4	16.0	13.9	12.0	10.2	8.7	3.5	0.3	0.0	0.0
2000	33.0	29.7	26.8	24.2	21.9	19.8	17.9	16.2	14.6	13.1	11.8	6.6	1.5	0.3	0.0
3000	28.8	26.4	24.4	22.6	20.9	19.5	18.1	16.9	15.8	14.7	13.7	9.6	4.4	1.7	0.6
4000	25.4	23.6	22.0	20.6	19.3	18.2	17.1	16.2	15.3	14.5	13.7	10.5	6.1	3.3	1.6
5000	22.8	21.3	20.0	18.8	17.8	16.8	16.0	15.2	14.5	13.8	13.2	10.5	6.8	4.3	2.6

表 B.12　今後 100 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.3$ の場合，単位 %)

T \ $\hat{T}$	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	2000	3000	4000	5000
500	45.7	31.3	19.9	11.7	6.5	3.4	1.7	0.9	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
600	51.8	39.3	28.2	19.2	12.4	7.6	4.5	2.6	1.5	0.8	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
700	55.3	44.4	34.4	25.6	18.3	12.6	8.4	5.4	3.4	2.1	1.3	0.1	0.0	0.0	0.0
800	57.3	47.7	38.7	30.5	23.4	17.4	12.6	8.8	6.1	4.1	2.7	0.3	0.0	0.0	0.0
900	58.3	49.8	41.7	34.2	27.5	21.5	16.5	12.4	9.1	6.5	4.6	0.7	0.0	0.0	0.0
1000	58.9	51.1	43.7	36.9	30.6	24.9	20.0	15.7	12.1	9.2	6.8	1.3	0.0	0.0	0.0
1100	59.0	51.9	45.1	38.8	33.0	27.6	22.8	18.6	14.9	11.8	9.2	2.2	0.1	0.0	0.0
1200	58.9	52.3	46.0	40.2	34.7	29.7	25.2	21.0	17.4	14.2	11.4	3.3	0.2	0.0	0.0
1300	58.6	52.4	46.6	41.2	36.1	31.4	27.0	23.1	19.5	16.3	13.5	4.5	0.3	0.0	0.0
1400	58.2	52.4	46.9	41.8	37.1	32.6	28.5	24.8	21.3	18.2	15.4	5.8	0.5	0.0	0.0
1500	57.8	52.2	47.1	42.3	37.8	33.6	29.7	26.1	22.8	19.8	17.0	7.2	0.8	0.1	0.0
2000	54.9	50.4	46.3	42.6	39.1	35.8	32.7	29.9	27.2	24.7	22.4	12.9	3.2	0.5	0.1
3000	49.1	45.7	42.7	40.0	37.4	35.1	32.9	30.9	29.0	27.2	25.6	18.4	8.7	3.5	1.2
4000	44.3	41.5	39.0	36.8	34.8	33.0	31.3	29.7	28.2	26.8	25.5	19.8	11.8	6.6	3.3
5000	40.4	38.0	35.9	34.0	32.3	30.8	29.4	28.0	26.8	25.6	24.6	19.9	13.2	8.5	5.3

表 B.13 今後 30 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.4$ の場合，単位 %)

T \ $\hat{T}$	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	2000	3000	4000	5000
500	11.6	8.0	5.4	3.6	2.4	1.5	1.0	0.6	0.4	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
600	13.1	9.7	7.1	5.1	3.7	2.6	1.8	1.3	0.9	0.6	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0
700	14.0	10.9	8.4	6.4	4.8	3.6	2.7	2.0	1.5	1.1	0.8	0.2	0.0	0.0	0.0
800	14.5	11.6	9.2	7.3	5.8	4.5	3.5	2.7	2.1	1.6	1.2	0.3	0.0	0.0	0.0
900	14.8	12.1	9.9	8.0	6.5	5.3	4.2	3.4	2.7	2.1	1.7	0.5	0.0	0.0	0.0
1000	14.8	12.3	10.3	8.6	7.1	5.9	4.9	4.0	3.3	2.7	2.2	0.7	0.1	0.0	0.0
1100	14.8	12.5	10.6	8.9	7.6	6.4	5.4	4.5	3.8	3.1	2.6	1.0	0.1	0.0	0.0
1200	14.7	12.5	10.7	9.2	7.9	6.7	5.8	4.9	4.2	3.6	3.0	1.3	0.2	0.0	0.0
1300	14.5	12.5	10.8	9.4	8.1	7.0	6.1	5.3	4.5	3.9	3.4	1.5	0.3	0.0	0.0
1400	14.3	12.4	10.8	9.5	8.3	7.3	6.3	5.6	4.8	4.2	3.7	1.8	0.4	0.1	0.0
1500	14.1	12.3	10.8	9.5	8.4	7.4	6.5	5.8	5.1	4.5	3.9	2.0	0.5	0.1	0.0
2000	13.0	11.6	10.4	9.4	8.5	7.7	7.0	6.4	5.8	5.3	4.8	3.0	1.1	0.4	0.1
3000	11.0	10.1	9.2	8.5	7.9	7.3	6.8	6.4	5.9	5.6	5.2	3.8	2.0	1.0	0.5
4000	9.6	8.8	8.2	7.6	7.2	6.7	6.3	6.0	5.7	5.4	5.1	3.9	2.4	1.5	0.9
5000	8.5	7.9	7.4	6.9	6.5	6.2	5.8	5.6	5.3	5.0	4.8	3.9	2.6	1.8	1.2

表 B.14 今後 50 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.4$ の場合，単位 %)

T \ $\hat{T}$	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	2000	3000	4000	5000
500	18.8	13.3	9.1	6.2	4.1	2.7	1.8	1.1	0.7	0.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
600	21.1	15.9	11.8	8.6	6.2	4.4	3.1	2.2	1.5	1.1	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0
700	22.4	17.6	13.7	10.6	8.1	6.1	4.6	3.4	2.5	1.9	1.4	0.3	0.0	0.0	0.0
800	23.1	18.7	15.0	12.0	9.6	7.6	5.9	4.6	3.6	2.7	2.1	0.5	0.0	0.0	0.0
900	23.4	19.3	16.0	13.1	10.8	8.8	7.1	5.7	4.6	3.6	2.9	0.9	0.1	0.0	0.0
1000	23.5	19.7	16.6	13.9	11.6	9.7	8.1	6.7	5.5	4.5	3.7	1.3	0.1	0.0	0.0
1100	23.4	19.9	17.0	14.5	12.3	10.5	8.8	7.5	6.3	5.3	4.4	1.7	0.2	0.0	0.0
1200	23.2	20.0	17.2	14.9	12.8	11.0	9.5	8.1	6.9	5.9	5.0	2.1	0.3	0.1	0.0
1300	23.0	19.9	17.4	15.1	13.2	11.5	10.0	8.7	7.5	6.5	5.6	2.6	0.5	0.1	0.0
1400	22.7	19.8	17.4	15.3	13.4	11.8	10.4	9.1	8.0	7.0	6.1	3.0	0.6	0.1	0.0
1500	22.4	19.7	17.4	15.4	13.6	12.1	10.7	9.5	8.4	7.4	6.5	3.4	0.8	0.2	0.0
2000	20.7	18.5	16.7	15.1	13.8	12.5	11.4	10.4	9.5	8.6	7.9	4.9	1.8	0.6	0.2
3000	17.7	16.2	14.9	13.8	12.8	11.9	11.1	10.4	9.7	9.1	8.5	6.2	3.3	1.7	0.8
4000	15.4	14.3	13.3	12.4	11.6	10.9	10.3	9.8	9.2	8.8	8.3	6.5	4.0	2.5	1.5
5000	13.7	12.8	12.0	11.2	10.6	10.1	9.5	9.1	8.7	8.3	7.9	6.4	4.3	2.9	2.0

表 B.15 今後 100 年以内の地震発生確率一覧表 ($\sigma = 0.4$ の場合，単位 %)

T \ $\hat{T}$	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	2000	3000	4000	5000
500	35.1	26.0	18.7	13.2	9.1	6.2	4.2	2.8	1.8	1.2	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0
600	38.3	30.0	23.1	17.4	13.0	9.5	6.9	4.9	3.5	2.5	1.8	0.3	0.0	0.0	0.0
700	40.0	32.6	26.1	20.7	16.2	12.6	9.6	7.3	5.5	4.1	3.1	0.7	0.0	0.0	0.0
800	41.0	34.2	28.3	23.2	18.8	15.1	12.1	9.5	7.5	5.9	4.5	1.2	0.1	0.0	0.0
900	41.3	35.1	29.7	24.9	20.8	17.2	14.1	11.6	9.4	7.6	6.1	1.9	0.2	0.0	0.0
1000	41.4	35.7	30.6	26.2	22.3	18.8	15.8	13.3	11.0	9.1	7.5	2.7	0.3	0.0	0.0
1100	41.2	35.9	31.2	27.0	23.4	20.1	17.2	14.7	12.5	10.6	8.9	3.6	0.5	0.1	0.0
1200	40.9	35.9	31.6	27.6	24.2	21.1	18.3	15.9	13.7	11.8	10.1	4.4	0.7	0.1	0.0
1300	40.5	35.8	31.7	28.0	24.8	21.8	19.2	16.8	14.7	12.8	11.1	5.3	1.0	0.2	0.0
1400	40.1	35.6	31.7	28.3	25.2	22.4	19.8	17.6	15.5	13.7	12.0	6.1	1.4	0.3	0.1
1500	39.6	35.4	31.7	28.4	25.4	22.8	20.4	18.2	16.2	14.4	12.8	6.9	1.7	0.4	0.1
2000	36.9	33.5	30.6	28.0	25.6	23.5	21.5	19.7	18.1	16.6	15.2	9.7	3.7	1.3	0.4
3000	32.1	29.6	27.5	25.6	23.9	22.4	20.9	19.7	18.5	17.4	16.3	12.1	6.5	3.4	1.7
4000	28.4	26.4	24.7	23.2	21.9	20.7	19.6	18.5	17.6	16.7	15.9	12.5	7.9	4.9	3.0
5000	25.5	23.8	22.4	21.2	20.1	19.1	18.1	17.3	16.5	15.8	15.1	12.3	8.4	5.8	3.9

B.2　地震発生確率の極大値の一覧表

対数正規分布における条件付き確率はある経過時間で極大値をもつことが知られている。その極大値は，式 (B.1) で $\partial P(T, \Delta T)/\partial T = 0$ としたものを整理した式，すなわち

$$T \exp\left(\frac{\xi^2}{2}\right)\{1 - \Phi(\xi)\} - (T + \Delta T)\exp\left(\frac{\eta^2}{2}\right)\{1 - \Phi(\eta)\} = 0 \tag{B.2}$$

$$\text{ただし，}\ \xi = \frac{\ln(T/\hat{T})}{\sigma}\ ,\ \eta = \frac{\ln\{(T + \Delta T)/\hat{T}\}}{\sigma}$$

を満たす T によって与えられる。

以下の表 B.16 ~ B.18は，$(\hat{T}, \sigma, \Delta T)$ の組が与えられたときの，式 (B.1) の確率の極大値とそのときの経過年数を Newton-Raphson 法により求め，ΔT が 30 年，50 年，100 年の場合について示したものである。

付録 B.1において，神縄・国府津–松田断層帯の 30 年確率を $\sigma = 0.23$ の場合について，3.5% と求めた。この確率は一見小さく見えるが，その極大値は，表 B.16を用いて，$\hat{T}$ として 3000 の列，σ として 0.23 の行の上段の数字を拾うことによって，7.1% であることが分かる。小さい確率であっても最大値の半分程度にまで達していることが分かる。

表 B.16 今後 30 年以内の地震発生確率の極大値（上段）及びそのときの経過年数（下段）

σ \ $\hat{T}$	100	300	500	1000	1500	2000	3000
0.1	∼100.0%	97.6%	89.2%	67.2%	52.4%	42.7%	31.0%
	252.188	784.720	1317.62	2650.03	3982.49	5314.96	7979.92
0.2	94.3%	61.6%	43.7%	24.9%	17.4%	13.4%	9.1%
	237.316	740.065	1243.19	2501.17	3759.19	5017.23	7533.31
0.23	88.9%	51.9%	35.6%	19.7%	13.6%	10.4%	7.1%
	231.363	722.186	1213.39	2441.56	3689.79	4898.02	7354.50
0.3	73.7%	36.0%	23.5%	12.5%	8.5%	6.5%	4.4%
	215.476	674.458	1133.83	2282.44	3431.11	4579.78	6877.14
0.4	55.1%	23.5%	14.8%	7.7%	5.2%	3.9%	2.6%
	189.518	596.430	1003.77	2022.29	3040.87	4059.47	6096.67

表 B.17 今後 50 年以内の地震発生確率の極大値（上段）及びそのときの経過年数（下段）

σ \ $\hat{T}$	100	300	500	1000	1500	2000	3000
0.1	∼100.0%	99.8%	97.6%	84.4%	71.0%	60.5%	46.2%
	243.410	775.131	1307.87	2640.16	3972.58	5305.03	7969.96
0.2	99.2%	79.7%	61.6%	38.0%	27.3%	21.3%	14.7%
	228.563	730.484	1233.44	2491.29	3749.28	5007.29	7523.36
0.23	97.4%	70.5%	51.9%	30.7%	21.7%	16.7%	11.5%
	222.624	712.610	1203.64	2431.69	3659.87	4888.09	7344.55
0.3	89.2%	52.4%	36.0%	20.0%	13.8%	10.5%	7.2%
	206.781	664.897	1124.10	2272.58	3421.19	4569.84	6867.18
0.4	73.7%	36.0%	23.5%	12.5%	8.5%	6.5%	4.4%
	180.922	586.903	994.051	2012.44	3030.97	4049.54	6086.72

表 B.18 今後 100 年以内の地震発生確率の極大値（上段）及びそのときの経過年数（下段）

σ \ $\hat{T}$	100	300	500	1000	1500	2000	3000
0.1	∼100.0%	∼100.0%	99.9%	97.6%	91.6%	84.4%	71.0%
	224.018	752.049	1284.02	2615.73	3947.96	5280.31	7945.15
0.2	∼100.0%	95.9%	85.2%	61.6%	47.1%	38.0%	27.3%
	209.279	707.443	1209.62	2466.88	3724.67	4982.59	7498.55
0.23	99.9%	91.3%	76.9%	51.9%	38.6%	30.7%	21.7%
	203.398	689.590	1179.83	2407.29	3655.27	4863.38	7319.74
0.3	98.8%	77.3%	59.0%	36.0%	25.7%	20.0%	13.8%
	187.748	641.947	1100.33	2248.19	3396.61	4545.15	6842.39
0.4	93.0%	59.0%	41.4%	23.5%	16.3%	12.5%	8.5%
	162.319	564.112	970.380	1988.10	3006.41	4024.87	6061.94

参 考 資 料

長期確率評価手法検討分科会の設置について

平成 9 年 11 月 21 日
地震調査研究推進本部
地震調査委員会
長期評価部会

1. 分科会の設置趣旨

長期評価部会の審議に資するため，本部会の下に，長期確率評価手法に関する審議を行う長期確率評価手法検討分科会を設置する。

2. 分科会における審議事項

(1) 長期的な地震発生可能性を活断層パラメータ等を用いて確率で評価する手法

(2) その他必要な事項

3. 分科会の構成員等

(1) 分科会を構成する委員及び専門委員については，部会長が別途定める。

(2) 分科会に主査を置き，分科会の構成員の中から部会長が指名する。

(3) 主査は，分科会に専門家を招へいし，意見を聴取することができる。

地震調査研究推進本部 地震調査委員会
長期評価部会 長期確率評価手法検討分科会

（主 査）	島 崎　邦 彦 (しまざきくにひこ)	東京大学地震研究所教授
（委 員）	今給黎 哲郎 (いまきいれてつろう)	建設省国土地理院地殻調査部観測解析課 （現：測地観測センター地震調査官）
	井元 政二郎 (いもとまさじろう)	科学技術庁防災科学技術研究所 地震調査研究センター第二地震前兆解 （現：発震機構解析研究室室長）
	尾 形 良 彦 (おがた よしひこ)	文部省統計数理研究所調査実験解析研究
	隈 元 崇 (くまもとたかし)	東京都立大学理学部助手
	佐 竹 健 治 (さたけけんじ)	通商産業省工業技術院地質調査所 地震地質部活断層研究室主任研究官
	鈴 木 康 弘 (すずきやすひろ)	愛知県立大学文学部助教授 （現：情報科学部助教授）
	森 滋 男 (もりしげお)	気象庁地震火山部管理課地震情報企画官

長期確率評価手法検討分科会検討状況

平成 9 年 12 月 5 日
　　第 1 回長期確率評価手法検討分科会

平成 10 年 1 月 28 日
　　第 2 回長期確率評価手法検討分科会

平成 10 年 2 月 18 日
　　第 3 回長期確率評価手法検討分科会

平成 10 年 3 月 25 日
　　第 4 回長期確率評価手法検討分科会