



## 震度曝露人口による活断層の地震リスク評価

能島暢呂<sup>1)</sup>、藤原広行<sup>2)</sup>、森川信之<sup>3)</sup>、石川 裕<sup>4)</sup>、奥村俊彦<sup>5)</sup>、宮腰淳一<sup>6)</sup>

1) 正会員 岐阜大学工学部、教授 博士 (工学)

e-mail : nojima@gifu-u.ac.jp

2) 正会員 (独) 防災科学技術研究所、プロジェクトディレクター 博士 (理学)

e-mail : fujiwara@bosai.go.jp

3) 正会員 (独) 防災科学技術研究所、研究員 博士 (理学)

e-mail : morikawa@bosai.go.jp

4) 正会員 清水建設(株) 技術戦略室、副室長 博士 (工学)

e-mail : yutaka.ishikawa@shimz.co.jp

5) 正会員 清水建設(株) 技術研究所、グループ長 博士 (工学)

e-mail : oku@shimz.co.jp

6) 正会員 清水建設(株) 技術研究所、主任研究員 博士 (工学)

e-mail : miyakoshi@shimz.co.jp

### 要 約

地震調査研究推進本部により全国地震動予測地図が公表されている。地震ハザード情報の理解と活用を促進するには、地震リスク情報への変換が重要となる。本研究は、防災科学技術研究所の地震ハザードステーション (J-SHIS) による公開データに基づいて、全国の内陸地殻内地震 (主要活断層帯154断層およびその他の活断層179断層に発生する固有地震) による地震リスクを簡易的に比較評価したものである。まず、距離減衰式に基づく地震動予測 (簡易法) における予測式のばらつきを考慮した震度曝露人口の推計方法を提案し、各断層帯に適用して網羅的に震度曝露人口の推計結果を得た。計333断層の震度曝露人口と地震発生確率との関係を「P-PEX関係」として表し、これに基づいて地震リスクカーブを求めた。さらに、切迫度と影響度の重視度合いを連続的に考慮可能な一般化リスク指標を定義し、任意のリスク認知的傾向に対するリスクランキングを構成した。

キーワード: 全国地震動予測地図、地震ハザードステーション、主要活断層帯、その他の活断層、震度曝露人口、リスクカーブ、一般化リスク指標、リスクランキング

### 1. はじめに

平成17年3月、地震調査研究推進本部地震調査委員会は「全国を概観した地震動予測地図」として、「確率論的地震動予測地図」と「震源断層を特定した地震動予測地図」を公表した<sup>1),2)</sup>。前者は、日本列島周辺で想定されるあらゆる地震について、地震発生可能性と地震動の評価を行った上で、将来の期間 (30年、50年)、揺れの強さ、および、その確率の関係を図示したものであり、後者は、特定の震源断層に着目し、そこで地震が発生した場合の強い揺れの分布を図示したものである。評価に用いられたデータや主要な結果については、同年5月より (独) 防災科学技術研究所の「地震ハザードステーション (Japan

Seismic Hazard Information Station、以下、J-SHIS)」を通じて提供され<sup>3)</sup>、地震災害の防止軽減（耐震設計、耐震補強、防災まちづくりなど）やリスクファイナンス（地震保険など）のための基礎データとなっている<sup>4)</sup>。こうした地震ハザード情報は、行政担当者や一般市民にもわかりやすい地震リスク情報に変換して理解と活用を促進する必要がある。例えば、内陸活断層の地震発生確率は概して低い、わが国には多数の活断層が存在するため、全国的な集積リスクは高い。その総量を把握するには地震リスク情報への変換が不可欠である。また地方自治体で地震防災対策を策定するために複数の活断層の候補から対象を選択する際には、地震発生確率と被害量で決まる地震リスクによる比較が参考となろう。ところが詳細な地震リスク評価は多大な労力とコストを伴うものであるから、大量の地震ハザード情報を対象とする目的では、むしろ簡便な方法で網羅的な地震リスク評価を行うことが先決である。

その一方法として、震度分布と人口分布を重ね合わせて震度レベルごとに人口を集計した「震度曝露人口」<sup>5),6)</sup>の利用が考えられる。被害量を規定する三要素としてのハザード・被曝露量・脆弱性のうち、脆弱性を均等とみなした評価となるため、被害量そのものを定量化できるわけではないが、震度曝露人口は、所定の被害関数を介して被害総量と高い相関関係にあることが確認されている<sup>6)</sup>。従って、地震発生確率と震度曝露人口とを組み合わせるリスク分析的手法を適用することによって、地域全体における集積的な地震リスクの概略的な評価と相互比較が可能になると考えられる。このような観点から本研究では、J-SHIS<sup>3)</sup>により公開されている2008年版の全国地震動予測地図の基礎データ（2009年1月取得）を活用して震度曝露人口を推計し、全国的な地震リスクを概略的に捉えることを目的としたものである。ここでは、全国に多数存在する活断層により引き起こされる内陸地殻内地震（陸域の浅い地震）による地震リスクを簡易的に比較評価することとした。なお長期戦略指針「イノベーション25」<sup>7)</sup>に基づく社会還元加速プロジェクト「きめ細かい災害情報を国民一人ひとりに届けるとともに災害対応に役立つ情報通信システムの構築」の一環として防災科学技術研究所では「災害リスク情報プラットフォーム」<sup>8)</sup>の開発を進めており、本研究による地震リスク評価の地震防災への活用のための媒体として期待される。

## 2. 使用したデータ

### 2.1 対象とする地震

確率論的地震動予測地図の作成において考慮されている地震のうち、内陸地殻内地震として考慮されている地震は、次の4種類である<sup>1),2)</sup>。

- (a) 主要活断層帯に発生する固有地震
- (b) 主要活断層帯以外の活断層に発生する地震（以下、「その他の活断層」）
- (c) 主要活断層帯に発生する地震のうち固有地震以外の地震
- (d) 陸域で発生する地震のうち活断層が特定されていない場所で発生する地震

このうち(a)と(b)は、震源断層を特定した地震としてモデル化されており、(c)は「震源断層を予め特定しにくい地震」である(d)に含めて考慮されている。本研究で対象とするのは、(a)に関する154断層と(b)に関する179断層の計333断層である。表1と表2にそれらのマグニチュードと30年発生確率を示す<sup>補注1)</sup>。活断層データは特記したもの以外は2009年1月時点でのJ-SHISの公開データ<sup>3)</sup>に基づくものである。断層諸元の詳細については、文献1), 2)、J-SHIS<sup>3)</sup>、および地震調査研究推進本部ホームページ<sup>9)</sup>を参照されたい。

主要活断層帯の地震発生確率については、確率論的地震動予測地図の作成に用いられた値（長期評価部会による評価値に基づいてJ-SHISで公表されている値）を使用した。地震発生の周期性を考慮して、地震発生間隔は基本的にBPT(Brownian Passage Time)分布でモデル化されており、平均活動間隔と最新活動時期との関係から、2008年1月1日を起点とした30年間および50年間における地震発生確率が評価されている。地震発生確率は平均ケース（平均活動間隔・最新活動時期ともに評価幅の中央の値を採用したケース）と最大ケース（平均活動間隔を評価幅の最短、最新活動時期を評価幅の最古としたケース）に対応した2つの値が求められている。ただし最新活動時期や平均活動間隔を特定できない場合については、地震発生をポアソン過程で表し、地震発生間隔の確率分布を指数分布としている。本研究では、期間を30年に固定して、平均ケースと最大ケースについて比較を行ったが、結果表示は平均ケースのみとした。

その他の活断層についても、確率論的地震動予測地図の作成に用いられた値を用いた。ただしこれら





は長期評価の対象外で、最近活動したことが明らかな4断層以外は地震発生をポアソン過程で表し、平均ケース・最大ケースを区別していない。

## 2.2 地震動分布

主要活断層帯に発生する固有地震の地震動分布としては、J-SHISで公開されている活断層ごとの簡便法による計測震度データを用いた。基準地域メッシュ（3次メッシュ、約1km四方、日本測地系）単位で全国385,561メッシュのうち、断層周辺に矩形に定められた計算領域内における計算結果が収録されている。計算領域はおおむね震度5弱以上が網羅されるように設定されている。

確率論的地震動予測地図の作成に用いられている地震動予測手法は、距離減衰式による簡便法であり、計測震度推定の手順は以下の通りである<sup>1),2)</sup>。まず、断層最短距離をパラメータとする最大速度の距離減衰式<sup>10)</sup>により、S波速度600m/s相当の工学的基盤での最大速度  $PGV_{b600}$  を推定し、表層地盤の速度増幅度算定式<sup>11)</sup>に基づいてこれをS波速度400m/s相当層での最大速度  $PGV_{b400}$  に換算する。次に、微地形区分に基づいて平均S波速度を推定し<sup>12)</sup>、上述の速度増幅度算定式を適用してS波速度400m/s相当層から表層地盤への速度増幅率を求め、地表面における最大速度  $PGV_s$  を求める。さらに、最大速度から計測震度への変換式<sup>13)</sup>を適用して、地表面における計測震度を評価する。

$$I_{INSTR} = 2.68 + 1.72 \log_{10} PGV_s \quad (1)$$

なお、計測震度の値は、各メッシュ内で一様として扱うものとする。

その他の活断層に発生する地震については、計測震度分布がJ-SHISで公開されていなかったため、上記手順を適用して計測震度分布を求めた。その際、断層の傾斜角はすべて90度とし、気象庁マグニチュードは確率論的地震動予測地図の作成手法<sup>1),2)</sup>に従ってモーメントマグニチュードに変換した。

## 2.3 地域メッシュ統計によるメッシュ人口

人口データとしては、平成12（2000）年国勢調査に基づく地域メッシュ統計のうち、基準地域メッシュ（3次メッシュ、日本測地系）単位の人口総数（2009年1月時点で日本測地系のメッシュ人口データとして最新）を用いた。図1にメッシュ人口の分布を示す。図2はメッシュ人口のヒストグラムである。人口ゼロのメッシュ数は229,860メッシュ（全体の約60%）、人口が非ゼロは156,998メッシュである。メッシュあたりの最大人口は30,046人であった。

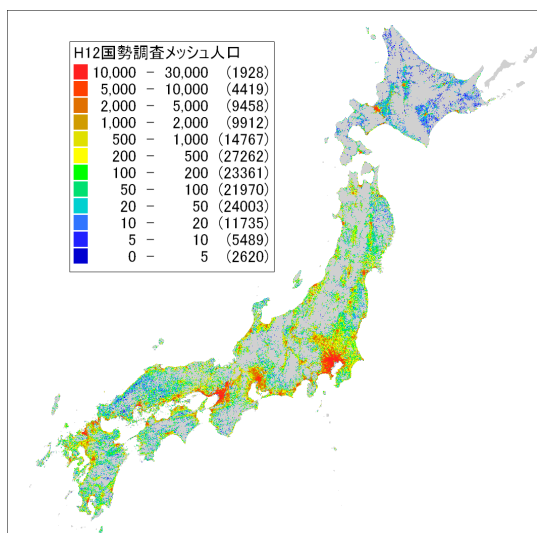


図1 平成12年国勢調査の地域メッシュ統計による人口（基準地域メッシュ）

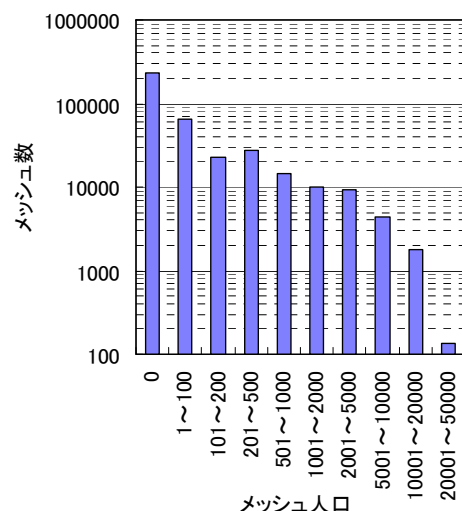
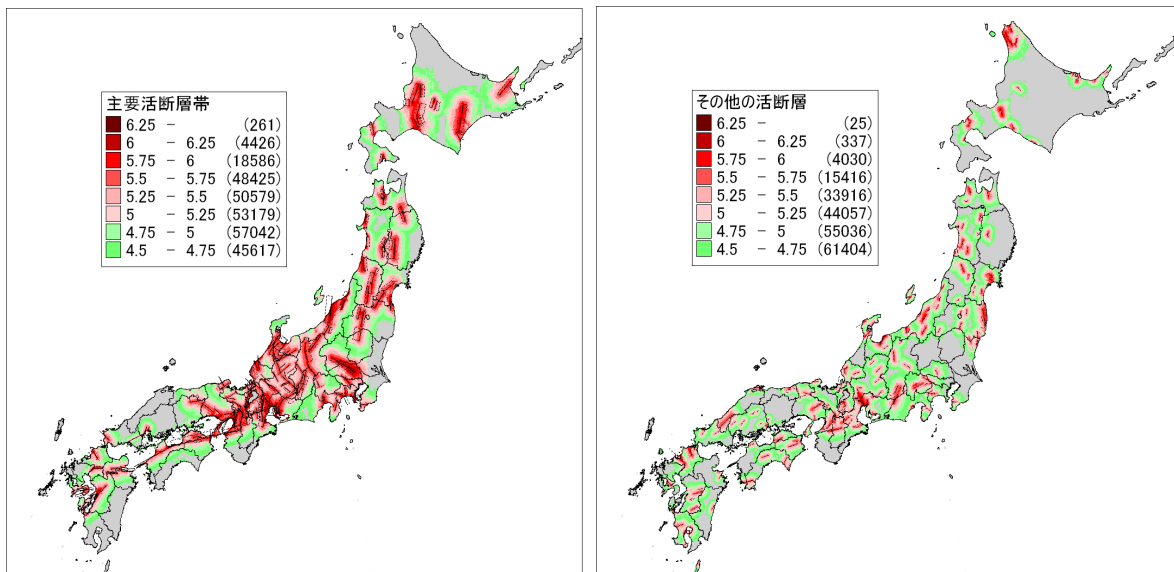


図2 メッシュ人口のヒストグラム（基準地域メッシュ）

### 3. ばらつきを考慮した計測震度分布による震度曝露人口の推計方法

#### 3.1 距離減衰式の中央値を用いた地表面計測震度

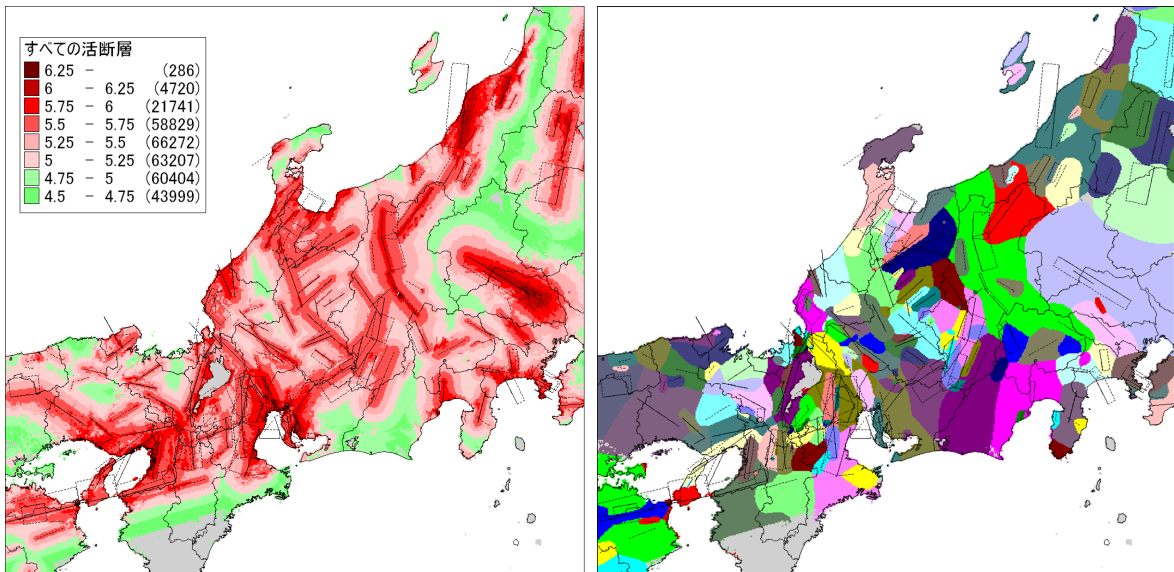
図3は、主要活断層帯およびその他の活断層について、それぞれの地表面計測震度マップ（距離減衰式の中央値）をすべて重ね合わせ、各メッシュにおける最大値を求めて、計測震度4.5以上について震源断層の位置とともに示したものである。図4(a)はすべての活断層<sup>補注(2)</sup>を対象とした結果の一部拡大図である。図4(b)は、計測震度の最大値を与える活断層をメッシュごとに識別した領域分割図である。いわば活断層の「影響圏」を表し複雑な形状となっているが、メッシュごとに注意すべき活断層を視覚的に確認できる。距離減衰式の中央値に基づくこれらの結果には、地震動予測におけるばらつきの影響が反映されていない。最大震度が6強に達する地域がごく一部にとどまり、震度7が現れない一因はそこにある。そこで、次節以下では、ばらつきを考慮した計測震度分布の算定方法について示す。



(a) 主要活断層帯（154断層）

(b) その他の活断層（179断層）

図3 主要活断層帯およびその他の活断層による計測震度の最大値（距離減衰式の中央値に基づく）



(a) すべての活断層（333断層）

(b) 最大震度を与える活断層の影響圏

図4 すべての活断層による最大震度とその影響圏（一部拡大図）

### 3.2 強震動予測と地震リスク評価におけるばらつきの扱いに関する従来の研究

地震動強度のばらつきには、震源特性（応力降下量の違い、破壊伝播による方位依存性、地震波の放射特性）・伝播特性（伝播経路の速度構造、減衰構造）・地盤特性（観測点ごとの揺れ易さ）など多数の要因が複合的に影響している<sup>14)</sup>。距離減衰式の活用において、ばらつきの成因にまで踏み込んだ検討は重要であり、地震間のばらつき  $\sigma_{\text{INTER}}$  と地震内のばらつき  $\sigma_{\text{INTRA}}$  への分解はその有力な手段である。

地震間のばらつき  $\sigma_{\text{INTER}}$  に関しては、震源特性のうち応力降下量の違いが支配的要因と考えられ、全地点で共通する系統の変動はこれで説明されよう<sup>14)</sup>。一方、地震内のばらつき  $\sigma_{\text{INTRA}}$  に関しては、上記の多数の要因が複雑に関連しており、ばらつきの大きさそのものが空間的に変動するとともに、実現値としての揺れの強さには空間相関性が現れると考えられる<sup>補注(3)</sup>。

複数の施設群や建物群などの集積リスク（ポートフォリオ地震リスク）を評価する場合には、ばらつきの空間分布および空間相関性の扱いが結果に大きく影響する。空間相関を単純化して完全相関とみなす場合<sup>15)</sup>や、無相関とみなす場合<sup>16)</sup>があるが、一般には、前者では損失評価のばらつきが過大評価、後者では過小評価となり、予想最大損失（Probable Maximum Loss：90%など規定の非超過確率に対応する損失）などを適正に評価できない。また確率論的地震ハザード評価においては、地震動強度は確率変数で表されているので、超過確率レベルを制御して面的な地震動強度分布を求めることは、地震内のばらつきを完全相関とみなすことに相当し、地震間のばらつきの整合性も保たれない。

ばらつきの空間相関を考慮する方法としては、離間距離に応じた相関行列に従う地震動分布をシミュレーションする方法がある<sup>17)</sup>。ただし、ディレクティブティ効果、焦点効果／拡散効果（フォーカシング／デフォーカシング）、増幅的干渉効果（エッジ効果）など、揺れの空間分布に強いコントラストをもたらす現象<sup>18)-20)</sup>による空間相関は、震源過程や地形条件に強く依存するため、離間距離をパラメータとする関数ではモデル化できない。将来的には、強震動シミュレーションに基づくばらつきの空間分布特性<sup>21), 22)</sup>を、簡易的な強震動予測にも取り入れることが望ましいと考えられる。しかし本研究では、多数の活断層について広領域内の震度曝露人口を評価するため、計算負荷が小さな方法について検討する。

### 3.3 広領域内の地震リスク評価を目的としたばらつきの扱い

地震動予測地図の強震動予測（簡便法）に用いられているのは、断層最短距離をパラメータとする最大速度（対数正規変量）の距離減衰式<sup>10)</sup>である。文献10)では、そのばらつきは対数正規分布で表され、常用対数標準偏差で0.23（自然対数標準偏差で0.53）とされている。最大速度から計測震度への変換式(1)を適用すると、計測震度（正規変量）の予測における標準偏差は  $\sigma_{\text{ATTE}} = 1.72 \times 0.23 = 0.40$  となる。

翠川・大竹<sup>14)</sup>の検討によると、最大速度の地震内・地震間の常用対数標準偏差の比は、1.5 : 1 (=0.24 : 0.16) との結果が得られている。この比率を適用すると、 $\sigma_{\text{ATTE}}$  は  $\sigma_{\text{INTER}} = 0.22$  と  $\sigma_{\text{INTRA}} = 0.33$  に分解される。前節より、イベントごとの空間相関としては完全相関とみなしてよいであろう。また広領域を対象とした場合、イベント内の空間相関による変動は、全体として相殺され平均化される効果を見込める。そこで本研究では、地震内のばらつき  $\sigma_{\text{INTRA}}$  については無相関として扱うこととする。

以上に加えて、最大速度から計測震度への変換式(1)のばらつきが  $\sigma_{\text{CONV}} = 0.21$  であることを考慮する。地震動の振動数成分と計測震度用のフィルター特性の関連から、物理的には変換式(1)のばらつきには相関があることが予想されるが、ここでは  $\sigma_{\text{CONV}}$  をランダムとする。

ここまでの考察をまとめて、空間的に完全相関とみなして系統的成分として扱うばらつき  $\sigma_{\text{corr}}$  と、無相関とみなしてランダム成分として扱うばらつき  $\sigma_{\text{rand}}$  に再整理すると、次式のようにそれぞれ0.22および0.39となり、両者をあわせて0.45となる。

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{TOTAL}}^2 \quad (=0.45^2) &= \sigma_{\text{ATTE}}^2 + \sigma_{\text{CONV}}^2 = 0.40^2 + 0.21^2 \\ &= \sigma_{\text{INTER}}^2 + \sigma_{\text{INTRA}}^2 + \sigma_{\text{CONV}}^2 = 0.22^2 + 0.33^2 + 0.21^2 \\ &= \sigma_{\text{corr}}^2 + \sigma_{\text{rand}}^2 = 0.22^2 + 0.39^2 \end{aligned} \quad (2)$$

森川ら<sup>23)</sup>による地表面計測震度の距離減衰式の標準偏差は0.72と評価されている。上記の結果より大きい理由としては、地盤増幅のばらつきも含む誤差評価であることが考えられる。

### 3.4 ばらつきを考慮した震度曝露人口の推計方法に関する検討

震度曝露人口は、対象地域内において震度  $I_k$  の揺れに曝される人口  $n_k$  を集計して  $PEX(I_k)$  とする操作をあらゆる震度に対して行うことにより求められる<sup>5),6)</sup>。震度曝露人口は基本的に計測震度 0.1 刻みで評価されるが、必要に応じて震度階単位にまとめた結果が示される。従来<sup>5),6)</sup>の適用例では計測震度は確定値として扱われてきたが、本研究では、計測震度のばらつきの扱いが震度曝露人口の推計に与える影響を比較するため、下記 4 ケースを設定する。

- ・ Case A : 距離減衰式の中央値を採用し、ばらつきを考慮しない。
- ・ Case B : 全ばらつき  $\sigma_{TOTAL} = 0.45$  をランダム成分として与える。
- ・ Case C :  $\sigma_{corr} = 0.22$  を系統的成分、 $\sigma_{rand} = 0.39$  をランダム成分として与える。
- ・ Case D : 全ばらつき  $\sigma_{TOTAL} = 0.45$  を系統的成分として与える。

これらのばらつきを考慮した震度曝露人口の推計方法として、2つの方法を示す。

#### (1) モンテカルロシミュレーションにより震度の仮想的な実現値を与える方法

イベント  $i$  におけるメッシュ  $j$  の計測震度  $I_{ij}$  は、距離減衰式に基づく予測震度を  $I_{ij}^{pred}$  として、モンテカルロシミュレーション (以下、MCS) により次式で求められる。

$$I_{ij} = I_{ij}^{pred} + v_i \sigma_{corr} + s_{ij} \sigma_{rand} \quad (3)$$

ここに  $s_{ij}$  はランダム成分として扱われるばらつき度合いを示す量で、標準正規分布  $N(0,1)$  に従う乱数のサンプル値として、イベントおよびメッシュごとにランダムに与える。また  $v_i$  は系統的成分として扱われるばらつき度合いを示す量で、イベント  $i$  に関する知見 (例えば震源の応力降下量の違いに伴う短周期レベルの違い) をもとに、全メッシュで共通の値を与える。

#### (2) 平滑化ウィンドウにより震度曝露人口の分布を平滑化して統計的に処理する方法

ばらつきが従う確率分布を持つ平滑化ウィンドウを用いて、震度曝露人口の分布形状を平滑化することによって、MCS と同等の効果を得ることができる。ここで平滑化の目的は、分布形状の平滑化そのものにあるのではなく、あくまで、ばらつきを見込むことで震度曝露人口を適正に評価することである。図5に3種類の平滑化ウィンドウ (計測震度 0.1 刻みで離散化し、計測震度  $I_k$  に関する重み係数  $w_k$  を示した分布) を示す。ウィンドウ幅を  $2M+1$  個とし、ウィンドウ中央位置を  $l=0$  とすると、震度曝露人口  $PEX(I_k)$  は次式により  $PEX_{smooth}(I_k)$  に平滑化される。

$$PEX_{smooth}(I_k) = \sum_{l=-M}^M w_{k+l} PEX(I_{k-l}) \quad (4)$$

### 3.5 震度曝露人口推計の一例

立川断層帯を例にとり、震度曝露人口の推計結果を示す。図6は、Case A ( $\sigma=0$ ) と Case B ( $\sigma=0.45$ ) による震度曝露人口の累積分布を比較し、ばらつきの影響およびシミュレーション回数 (MCS の試行回数  $N=1, 5, 10, 50$ ) の影響を検討したものである。Case A では計測震度のレンジが狭く、最高で計測震度 5.9 と高震度領域が過小評価になっている。Case B ではレンジが広く、震度 6 強以上の曝露人口も多い。MCS の試行回数  $N$  による違いはほとんど見られない。広領域の多数のメッシュでランダム化された結果、少ない試行回数でも、全体としてばらつきが適切に評価されたものと考えられる。

次に図7に示す Case C は、ばらつきのランダム成分  $\sigma_{rand}$  について MCS の試行回数を  $N=10$  として震度曝露人口の累積分布を求め、完全相関とする系統的成分として、式(3)で  $v_i=1.0$  と置き、 $+\sigma_{corr}$  だけ分布全体をシフトしたものである。高震度領域の震度曝露人口が増加していることがわかる。Case D はランダム成分を含めて分布を  $+\sigma_{TOTAL}$  だけシフトした結果であり、明らかに過大評価となっている。

ところで、このように震度曝露人口分布を決定論的にシフトできるのは、系統的成分  $\sigma_{corr}$  が予見可能な場合に限られる。事前にシフト量が予見不可能な場合は、その確率分布に従って確率論的に平均化する必要がある。そこで Case C については  $\sigma_{rand} = 0.39$  として求めた震度曝露人口を正規分布  $N(0, 0.22)$  で平滑化し、Case D については  $\sigma_{rand} = 0$  として求めた震度曝露人口を  $N(0, 0.45)$  で平滑化する。その結果、図8に示すように、Case B, C, D でほぼすべて同じ値となった。全ばらつきがランダム成分と系統



的成分の和（全分散=級内分散+級間分散）で構成され、系統的成分が予見不可能ならば、予測のばらつきが全ばらつきに支配されるからである。一方、Case Cにおいて、系統的成分  $\sigma_{corr}=0.22$  の付与分に応じて超過確率レベルに対応させ、震度曝露人口を確率論的に評価することもでき、その例を図9に示す。系統的成分の $\pm\sigma_{corr}$ により見込まれる平均レベルからの乖離は、震度6弱以上の曝露人口で倍半分程度、震度6強以上では3倍・3分の1程度となっており、高震度領域ほど大きな差が認められる。

以上の考察より、ばらつきを考慮した震度曝露人口の推計方法に関して、次の4点が結論づけられる。

- (1) 地震内のばらつきを考慮するには、距離減衰式の中央値で求めた分布の平滑化が効率的である。
- (2) 地震間のばらつきによるシフト量が予見可能な場合、Case Cによる決定論的の評価が適切である。
- (3) 地震間のばらつきによるシフト量が予見不可能な場合、Case Cによる確率論的の評価が適用できる。
- (4) 地震間のばらつきによるシフト量が予見不可能な場合、Case Bによる平滑化が実用的である。

次章では、全断層の網羅的評価を行うため、地震間のばらつきを予見不可能とし、上記(1)(4)の立場から、全ばらつき  $\sigma_{TOTAL}$  に対応する平滑化ウィンドウを適用した結果を示す。

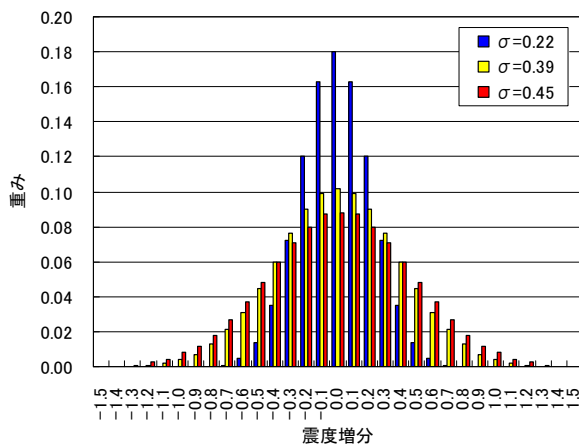


図5 距離減衰式のばらつきを考慮するための平滑化ウィンドウ（計測震度0.1刻みで離散化）

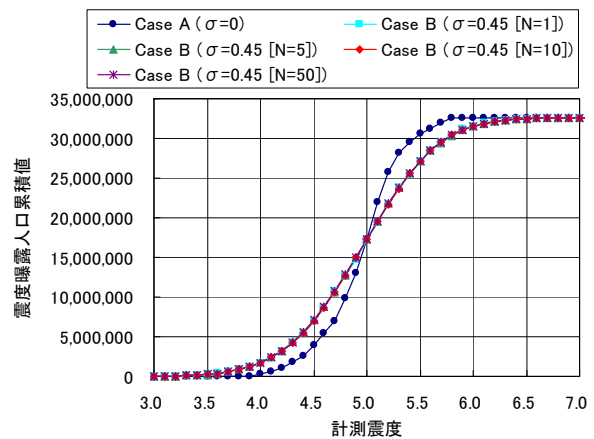


図6 ばらつきを考慮しないCase A( $\sigma=0$ )と考慮したCase B( $\sigma=0.45$ )の震度曝露人口の比較（立川断層帯：試行回数  $N=1, 5, 10, 50$ ）

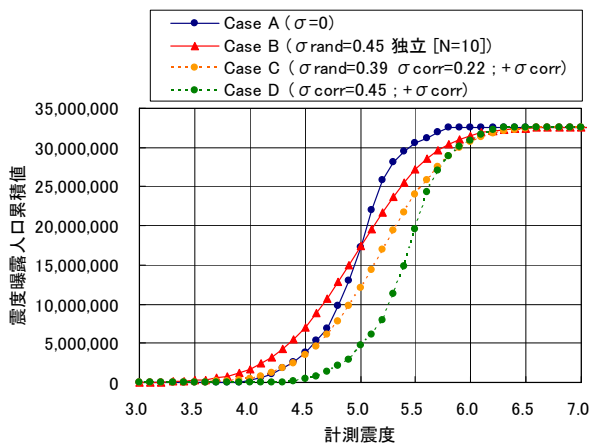


図7 ばらつきの扱いによる比較（立川断層帯：完全相関とする $\sigma_{corr}$ は系統的成分として全体に $+\sigma_{corr}$ ）

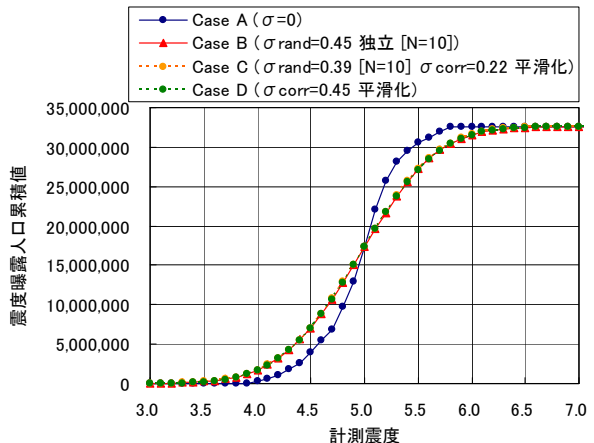


図8 ばらつきの扱いによる比較（立川断層帯：完全相関とする $\sigma_{corr}$ は系統的成分として与えて平滑化）

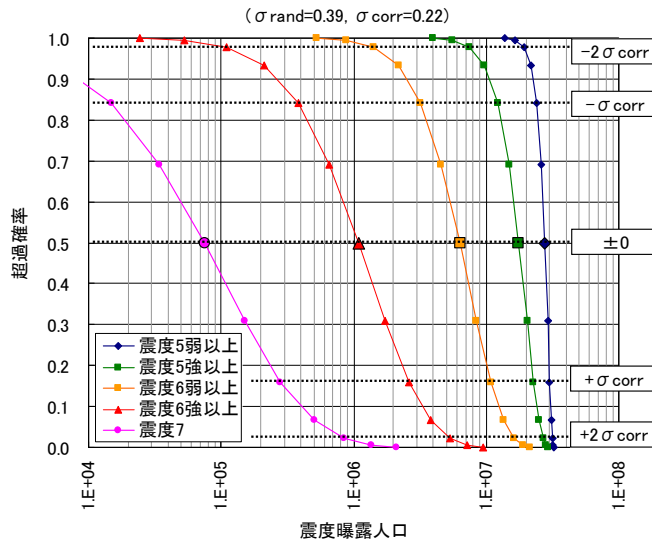


図 9 システム的成分 ( $\sigma_{corr}=0.22$ ) の付与分と超過確率レベルとを対応させた確率論的評価 (ランダム成分  $\sigma_{rand}=0.39$ 、立川断層帯)

#### 4. 震度曝露人口を用いた地震リスク評価

##### 4.1 震度曝露人口と地震発生確率の関係

2. で述べたデータを用いて、3. で述べた手法を、すべての活断層<sup>補注(2)</sup>に適用して得られた結果の例として、震度6弱以上の曝露人口を図10の各断層位置上に示す。図11は各断層の30年地震発生確率である。これらの図では、シンボルの大きさを曝露人口および30年地震発生確率に対応させている。

日本工業規格 (JIS Q 2001:2001 リスクマネジメントシステム構築のための指針)<sup>24)</sup> には、「リスク」は「事態の確からしさとその結果の組み合わせ、又は事態の発生確率とその結果の組み合わせ」と定義されている。いま、断層  $i$  の活動により発生する地震をイベント  $E_i$  で表し、イベント  $E_i$  を「事態」に、その30年発生確率  $P(E_i)$  を「発生確率」に、震度曝露人口  $PEX(E_i)$  を「結果」に対応づけるものとする。図12は、横軸に  $PEX(E_i)$ 、縦軸に  $P(E_i)$  をとって両対数軸上にプロットした結果の例であり、本研究ではP-PEX関係と呼ぶ。主要活断層帯は相対的に断層長さが長いのでマグニチュードが大きく、震度曝露人口が多数になる。地震発生の非定常性を考慮しているため、平均活動間隔が長いものや最新活動時期が近いものについては、30年発生確率がほぼゼロ (全国地震動予測地図では、 $10^{-5}$ (=10<sup>-3</sup>%)未満の確率を「ほぼ0%」と表示) となっている。逆にその他の活断層に関しては、震度曝露人口は相対的に少ないものの主要活断層帯に匹敵するものも多い。また、ごく一部の活断層を除いて地震発生間隔が指数分布でモデル化されているため、30年発生確率がほぼゼロとならないものが多い。

図13は、主要活断層帯に関する平均ケースと最大ケースの30年地震発生確率を比較したものである。最大ケースでは確率1%以上になるものが多く、確率が0から非ゼロに転じるものは18断層ある。最大ケースを用いた場合には、図12の主要活断層帯の確率値 (縦軸) がこれだけシフトすることになる。図14には、ばらつきを考慮しない場合 ( $\sigma=0$ ) と考慮した場合 ( $\sigma=0.45$ ) の震度曝露人口を比較した。震度7の曝露人口があるものは、 $\sigma=0$  では皆無であったが、 $\sigma=0.45$  ではほとんどの地震が該当する。その他の震度レベルについては、高震度ほど差は大きい。図6でも見たように、ばらつきを考慮しなければ高震度の曝露人口は過小評価になる。

このデータに基づいて、次節では全国の地震リスクを集約した地震リスクカーブを示し、次々節では個別のイベントを特徴づけるリスク指標を導出する。

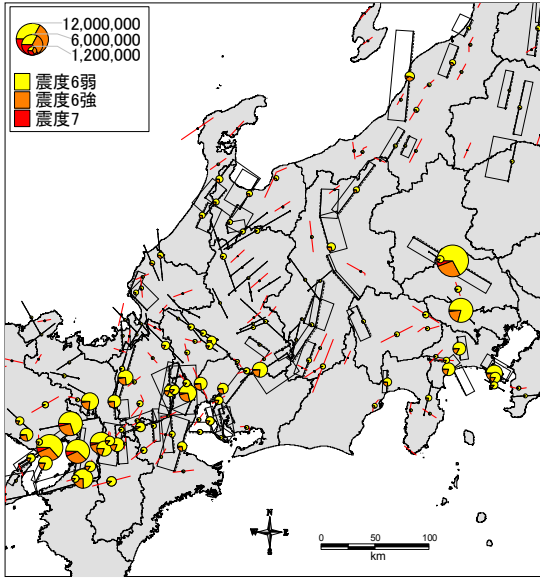


図 10 震度 6 弱以上の震度曝露人口 (単位: 人) (すべての活断層、 $\sigma=0.45$ )

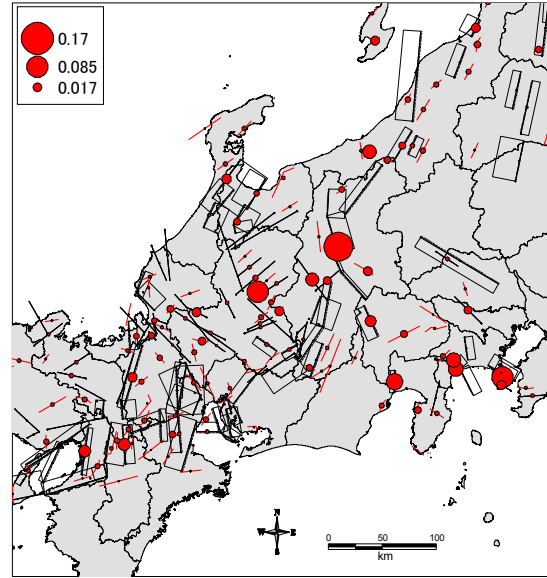
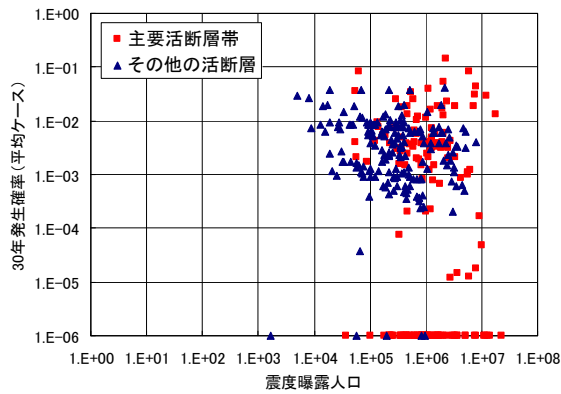
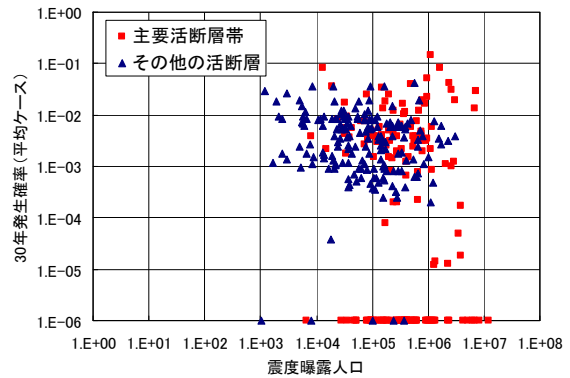


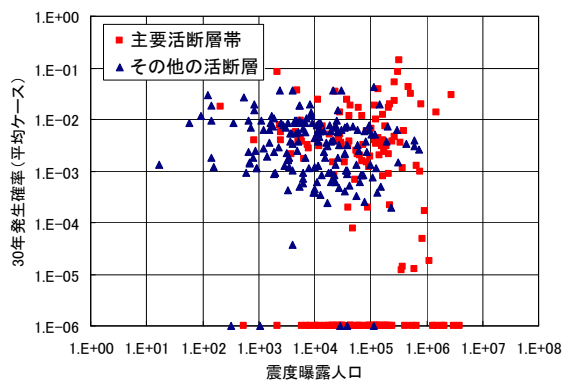
図 11 30 年地震発生確率 (平均ケース)



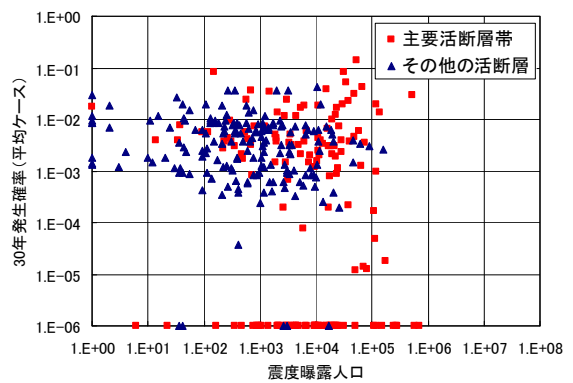
(a) 震度 5 強以上



(b) 震度 6 弱以上



(c) 震度 6 強以上



(d) 震度 7

図 12 30 年地震発生確率と震度曝露人口との P-PEX 関係 ( $\sigma=0.45$ 、平均ケース: 人口ゼロは Y 軸上、確率ゼロは X 軸上にプロット)

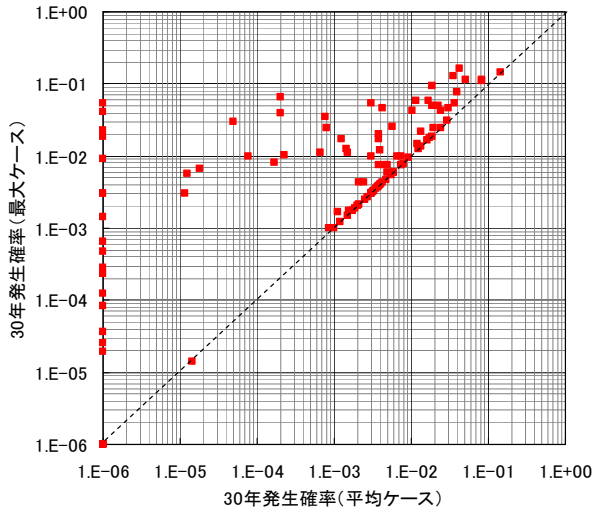


図 13 30 年地震発生確率の平均ケースと最大ケースの比較 (主要活断層帯 154 ケース: 確率ゼロは X 軸および Y 軸上にプロット)

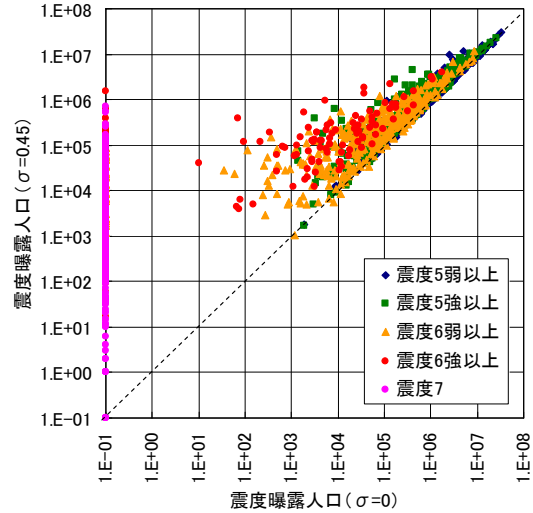


図 14 ばらつきを考慮しない場合 ( $\sigma=0$ ) と考慮した場合 ( $\sigma=0.45$ ) の震度曝露人口の比較 (すべての活断層: 曝露人口ゼロは X 軸および Y 軸上にプロット)

#### 4.2 震度曝露人口による地震リスクカーブ

全国の活断層の震度曝露人口に基づく地震リスク全体を集約した地震リスクカーブを求める。まず震度曝露人口の多い順にイベントを並べかえ、 $j$ 番目のイベントを  $E_j^{(PEX)}$  と表す。震度曝露人口が多い方から  $n$ 番目のイベントに着目し、その震度曝露人口  $PEX'(n)$  と  $n$ 番目までの累積発生確率  $P'(n)$  との関係性を順次プロットする操作を繰り返すと、震度曝露人口に対する累積確率のリスクカーブが求められる。

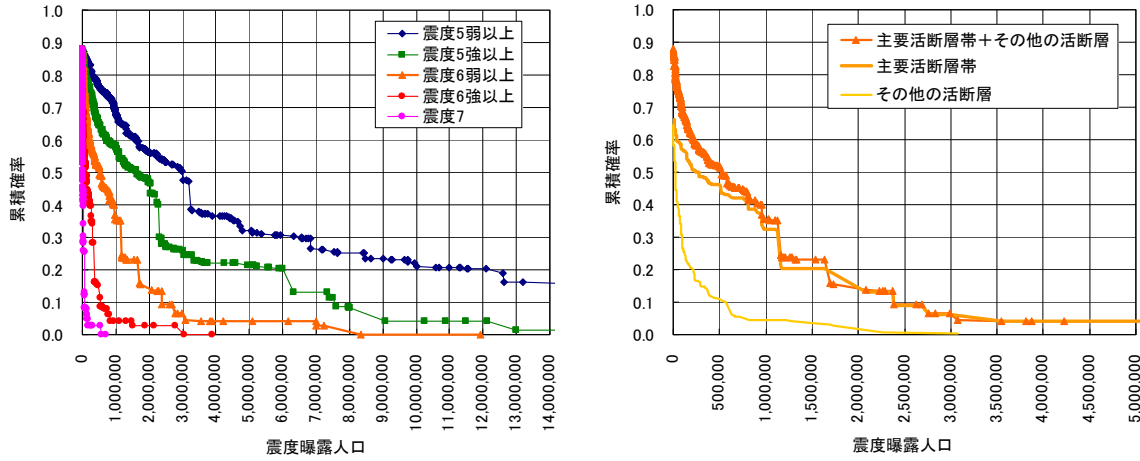
$$\begin{cases} P'(n) = 1 - \prod_{j=1}^n \{1 - P(E_j^{(PEX)})\} \\ PEX'(n) = PEX(E_n^{(PEX)}) \end{cases} \quad (5)$$

図15(a)に示すリスクカーブにより、任意の累積確率に対する震度曝露人口を参照できる。プロット左端の確率値は30年間に地震が少なくとも1回発生する確率に相当し、0.881となっている。30年超過確率3%、6%、26%、50%の相当値について表3にまとめた。図15(b)は震度6弱以上について分解表示したものである。少なくとも1回発生する確率は、主要活断層帯で0.663、その他の活断層で0.646となった。主要活断層帯が支配的であるが、小規模なその他の活断層の影響も無視できない<sup>補注(4)</sup>。

上記の方法とは逆に、発生確率の大きい順にイベントを並べかえ、 $k$ 番目のイベントを  $E_k^{(P)}$  と表す。発生確率の大きい方から  $m$ 番目のイベントに着目し、その発生確率  $P''(m)$  と  $m$ 番目までの累積震度曝露人口  $PEX''(m)$  との関係性を順次プロットする操作を繰り返すと、30年間発生確率に対応する延べ震度曝露人口を表すリスクカーブが求められる。

$$\begin{cases} P''(m) = P(E_m^{(P)}) \\ PEX''(m) = \sum_{k=1}^m PEX(E_k^{(P)}) \end{cases} \quad (6)$$

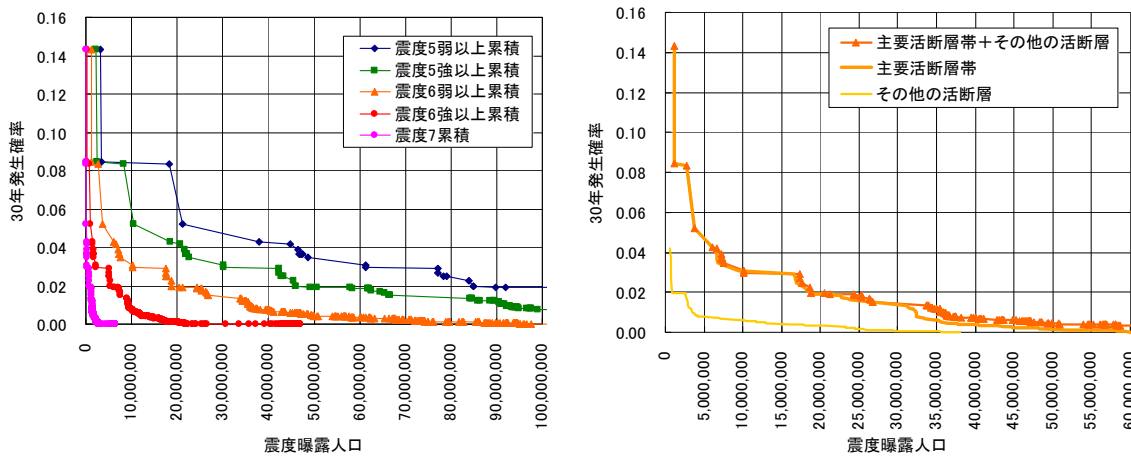
図16(a)に示すリスクカーブにより、任意の地震発生確率に対する延べ震度曝露人口を参照できる。表4に30年確率3%、6%の相当値と、この曲線の下部の面積で表される「期待震度曝露人口」をまとめた。



(a) すべての活断層 (b) 主要活断層帯とその他の活断層の比較 (震度6弱以上)  
 図15 震度曝露人口に対する累積確率のリスクカーブ ( $\sigma=0.45$ : 平均ケース)

表3 30年超過確率レベルに対応する震度曝露人口 (主要活断層帯+その他の活断層; 平均ケース)

確率レベル	震度5弱以上	震度5強以上	震度6弱以上	震度6強以上	震度7
30年超過確率3%	約1,700万人	約1,300万人	約700万人	約150万人	約17万人
30年超過確率6%	約1,580万人	約900万人	約300万人	約80万人	約14万人
30年超過確率26%	約720万人	約300万人	約115万人	約34万人	約4.8万人
30年超過確率50%	約300万人	約165万人	約51万人	約11.5万人	約1.1万人



(a) すべての活断層 (b) 主要活断層帯とその他の活断層の比較 (震度6弱以上)  
 図16 30年発生確率に対する延べ震度曝露人口のリスクカーブ ( $\sigma=0.45$ : 平均ケース)

表4 30年確率レベルに対応する延べ震度曝露人口 (すべての活断層: 平均ケース)

確率レベル	震度5弱以上	震度5強以上	震度6弱以上	震度6強以上	震度7
30年確率3%	約6,130万人	約3,018万人	約1,018万人	約222万人	約26.5万人
30年確率6%	約2,000万人	約1,000万人	約350万人	約80万人	約10万人
30年期待値	約516万人	約280万人	約109万人	約28.5万人	約4.1万人

図16(b)は震度6弱以上について分解表示したものであり、延べ震度曝露人口が多い領域では、その他の活断層の影響も無視できない。

### 4.3 一般化リスク指標の定義

被害想定や地震防災対策のために想定地震を選定する場合、その選定基準の代表例としては、地震の切迫度（発生確率）や、影響度（結果；想定被害量など）が挙げられる。しかし、各基準が無条件に適用されるわけではなく、切迫度を基準とする場合でも影響を無視できる断層は除外され、逆に、影響度を基準とする場合でも発生確率が無視できる断層は除外される。つまり暗黙のうちに両方の基準が参照されている。両者を組み合わせた「結果×発生確率」により、期待値としてのリスク指標が得られるが、「LPHC (Low Probability High Consequence) リスク」<sup>26)</sup> すなわち低頻度であるが発生すれば激甚な被害をもたらすリスクと、それとは逆の「HPLC (High Probability Low Consequence) リスク」が区別されない。前述の地震リスクカーブを用いると、低確率レベルを参照することでLPHCリスクに着目できる一方、イベントごとの情報が失われるため、イベントの相互比較には向かない。

そこで本研究では、「切迫度」と「影響度」に対する態度を明示的に考慮した「一般化リスク指標」を考える。まずイベント  $E_i$  について、中立的リスク指標  $R_N(E_i)$  とLPHC指数  $c_{LPHC}(E_i)$  を式(7)(8)で定義し、さらに式(7)の各項の重み付き積をとった式(9)で一般化リスク指標  $R_G(\alpha, E_i)$  を定義する<sup>補注(5)</sup>。

$$R_N(E_i) = P(E_i) \cdot PEX(E_i) \quad (7)$$

$$c_{LPHC}(E_i) = \frac{PEX(E_i)}{P(E_i)} \quad (8)$$

$$R_G(\alpha, E_i) = P^{1-\alpha}(E_i) \cdot PEX^{1+\alpha}(E_i) = R_N(E_i) \cdot c_{LPHC}^\alpha(E_i) \quad (-1 \leq \alpha \leq 1) \quad (9)$$

式(9)の  $\alpha$  は、中立的リスク  $R_N$  に乗じられるLPHC指数  $c_{LPHC}$  の指数部に現れることから、本研究では「カタストロフ重視度」と呼ぶ。図17は式(7)-(9)の図解である。 $\log P$  および  $\log PEX$  を図12と同様の直交軸とすると、これらを時計回りに45度回転したものが  $\log R_N$  と  $\log c_{LPHC}$  である。 $\alpha=0$  は中立的な態度を意味し、リスク軸  $\log R_G(\alpha=0)$  は  $\log R_N$  に一致し、等リスク線  $R_G(\alpha=0)$  は赤実線で表される。一方、 $0 < \alpha < 1$  では震度曝露人口（影響度）を重視し、等リスク線は青破線の  $R_G(\alpha=1/3)$  のように急勾配となり、リスク軸  $\log R_G(\alpha=1/3)$  は  $\log PEX$  に近くなる（青破線矢印）。さらに  $\alpha=1$  とすると青実線  $R_G(\alpha=1)$  のように震度曝露人口のみを考慮する。逆に  $-1 < \alpha < 0$  では発生確率（切迫度）を重視し、等リスク線は緑破線の  $R_G(\alpha=-1/3)$  のように緩勾配となり、リスク軸  $\log R_G(\alpha=-1/3)$  は  $\log P$  に近くなる（緑破線矢印）。さらに  $\alpha=-1$  とすると緑実線  $R_G(\alpha=-1)$  のように発生確率のみを考慮する。このように一般化リスク指標は、切迫度と影響度の重視度合いを連続的に考慮できる指標となっている<sup>補注(5)</sup>。

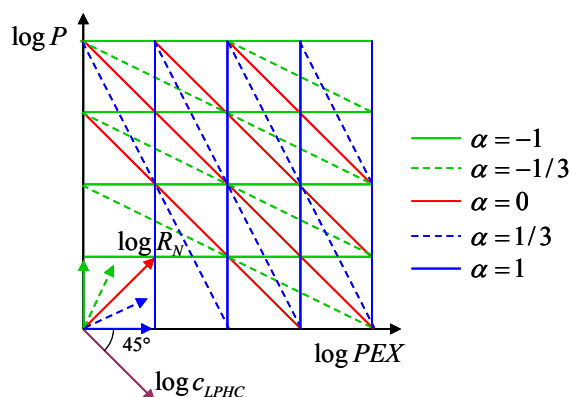


図17 一般化リスク指標の概念（各直線・破線は等リスク線を表す）

#### 4.4 一般化リスク指標による活断層のリスクランキング

すべての活断層（全333断層）について、カタストロフ重視度を  $\alpha=1, \alpha=3/5, \alpha=1/3, \alpha=0, \alpha=-1/3, \alpha=-5/3, \alpha=-1$  の7種類（震度曝露人口  $PEX$ と地震発生確率  $P$  の指数部をそれぞれ、1:0, 4:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:4, 0:1とした場合に相当）として、一般化リスク指標  $R_G(\alpha)$  を評価した。表5は、震度6弱以上の曝露人口と30年発生確率（平均ケース）を用いて  $R_G(\alpha)$  を算出し、それぞれのリスク指標で大きい順に並べ替えたランキングの上位50位である（図12(b)のP-PEX関係に対応）。ランキングの変化パターンを例示するため、下記で言及するいくつかの活断層については、同一の活断層を同色で塗り分けて表示している。

震度曝露人口のみに注目した場合( $\alpha=1$ )では、関東平野北西縁断層帯主部(3101)が1位となったが、その30年地震発生確率（平均ケース）は0であるため、 $\alpha < 1$ では評価値が0となる。こうした活断層には、六甲・淡路島断層帯主部六甲山地南縁-淡路島東岸区間(7901)、有馬-高槻断層帯(7601)、生駒断層帯(7701)など63断層ある。ただし前述のように最大ケースでは18断層が非ゼロに転じ、そのうち10断層が上位50位に入っていることから、ランキングが大きく変化することに注意が必要であろう。

発生確率のみに注目した場合( $\alpha=-1$ )では、糸魚川-静岡構造線断層帯北部・中部(4101)が1位となった。三浦半島断層群主部武山断層帯(3702)、富士川河口断層帯(4301)、神縄・国府津-松田断層帯(3601)などとともに、 $\alpha > -1$ でも上位を保っている。一方、阿寺断層帯主部北部(5201)など、震度曝露人口が少ない活断層は $\alpha > -1$ では急速にランクを落としている。

中立的リスク指標( $\alpha=0$ )では上町断層帯(8001)が1位となり、発生確率と震度曝露人口のいずれか一方または両方が大きいものが上位を占める。石狩低地東縁断層帯主部(601)や長町-利府線断層帯(2001)など、中立的リスク( $\alpha=0$ )で最上位となるような活断層は、切迫度( $\alpha=-1$ )や影響度( $\alpha=1$ )だけに注目すると看過される可能性があるため注意が必要である。

特徴的なのは、震度曝露人口をかなり重視した場合( $\alpha=3/5$ )であり、上町断層帯(8001)、立川断層帯(3401)、奈良盆地東縁断層帯(7501)、琵琶湖西岸断層帯(6501)、京阪奈丘陵撓曲帯(10116)、警固断層帯南東部(10802)、津島断層帯(10093)など、大都市圏近郊の活断層が上位を占める。またそれらの多くは  $\alpha=3/5$  で最上位となっており、低確率でLPHC事象となりうる活断層も比較的上位を占める。

以上のように、カタストロフ重視度  $\alpha$  を変えることで、任意のリスク認知的態度に対するリスクランキングを得ることができる。確率論的地震動予測地図の公開にあたっては決定論的（シナリオ型）地震動予測地図をあわせて提示すべきとの見解<sup>31)</sup>があるように、低確率の活断層の危険性が軽視されないよう、発生確率の影響を緩和した検討（例えば $\alpha=3/5$ ）が有効となろう。現時点での活断層の地震発生確率の評価精度の限界に対処するためにも有意義である。発生確率の信頼度<sup>9)</sup>が低い活断層や平均・最大ケースの差異を考慮して  $\alpha=3/5$  のランキング等を参照する方法が考えられる。また主要活断層帯は拡充されつつある<sup>補注(1)</sup>が、リスクランキングと図3、図4の震度分布とをあわせて検討すれば、候補選択の参考となろう。

なお、人口データを任意の圏域（都道府県、市町村など）に限定して分析を行うことにより、地域の地震環境に対応したランキングが得られる。異なった震度レベルの曝露人口に基づく複数の結果や、被害関数を適用して被害総量に変換して得られる結果は、当該地域で想定すべき地震に関する有用な参考資料となりうる。本論文では割愛したが、下記の今後の課題の検討結果とあわせて別途報告したい。

#### 5. まとめと今後の課題

本研究により得られた成果を以下に取りまとめる。

- (1) 簡便法に基づく推定震度分布を用いて、距離減衰式のばらつきを考慮した震度曝露人口の推計方法を提案した。地震内のばらつきは平滑化により処理され、地震間のばらつきはその予見可能性に応じて、分布の決定論的シフト、確率分布による評価、あるいは平滑化により処理される。全ばらつきの平滑化による方法をわが国の内陸地殻内地震（主要活断層帯に発生する固有地震および主要活断層帯以外の活断層に発生する地震に関する計333断層）に適用して、震度曝露人口の推計を行った。
- (2) 上記の結果と各地震の30年発生確率をあわせて、切迫度（30年地震発生確率）と影響度（各震度階以上の震度曝露人口）による二次元布置を行った。これに基づいて、震度曝露人口を評価指標とした地震リスクカーブを算出して、わが国の活断層による概略的な地震リスク指標を得た。

表 5 震度 6 弱以上の曝露人口による一般化リスク指標の上位 50 位のランキング (平均ケース、すべての活断層、 $\sigma=0.45$ )

	PEX ( $\alpha=1$ )	PEX:Prob=4:1 ( $\alpha=3/5$ )	PEX:Prob=2:1 ( $\alpha=1/3$ )	PEX:Prob=1:1 ( $\alpha=0$ )	PEX:Prob=1:2 ( $\alpha=1/3$ )	PEX:Prob=1:4 ( $\alpha=3/5$ )	Prob ( $\alpha=1$ )
1	3101 関東平野北西線断層帯主	8001 上町断層帯	8001 上町断層帯	8001 上町断層帯	4101 糸魚川-静岡構造線断層帯	4101 糸魚川-静岡構造線断層帯	4101 糸魚川-静岡構造線断層帯
2	7901 六甲・淡路島断層帯主	3401 立川断層帯	3401 立川断層帯	4101 糸魚川-静岡構造線断層帯	3702 三浦半島断層群主部武山	3702 三浦半島断層群主部武山	5201 阿寺断層帯主部北部
3	8001 上町断層帯	7501 奈良盆地東縁断層帯	3601 神繩・国府津-松田断層帯	3702 三浦半島断層群主部武山	8001 上町断層帯	3601 神繩・国府津-松田断層帯	3702 三浦半島断層群主部武山
4	7601 有馬-高槻断層帯	6501 琵琶湖西岸断層帯	3702 三浦半島断層群主部武山	3601 神繩・国府津-松田断層帯	3601 神繩・国府津-松田断層帯	3601 神繩・国府津-松田断層帯	4301 富士川河口断層帯
5	3401 立川断層帯	3601 神繩・国府津-松田断層帯	7501 奈良盆地東縁断層帯	3401 立川断層帯	4301 富士川河口断層帯	8001 上町断層帯	3601 神繩・国府津-松田断層帯
6	7701 生駒断層帯	3702 三浦半島断層群主部武山	4101 糸魚川-静岡構造線断層帯	7501 奈良盆地東縁断層帯	7501 奈良盆地東縁断層帯	7501 奈良盆地東縁断層帯	10067 秦野断層帯
7	8101 中央構造線断層帯金剛山	4101 糸魚川-静岡構造線断層帯	6501 琵琶湖西岸断層帯	6501 琵琶湖西岸断層帯	3401 立川断層帯	10067 秦野断層帯	1801 山形盆地断層帯
8	5401 猿投-高浜断層帯	4101 糸魚川-静岡構造線断層帯	4301 富士川河口断層帯	4301 富士川河口断層帯	6501 琵琶湖西岸断層帯	1801 山形盆地断層帯	10054 高田平野東縁断層帯
9	7803 京都西山断層帯	10802 磐固断層帯南東部	4301 富士川河口断層帯	10802 磐固断層帯南東部	10067 秦野断層帯	5201 阿寺断層帯主部北部	10171 池田湖西断層帯
10	7801 養老-桑名-四日市断層	10093 津島断層帯	10116 京阪奈丘陵撓曲帯	10067 秦野断層帯	1801 山形盆地断層帯	6501 琵琶湖西岸断層帯	10024 象潟断層帯
11	3701 三浦半島断層群主部衣笠	5303 恵那山-猿投山北断層帯	8501 山崎断層帯主部南東部	8501 山崎断層帯主部南東部	10802 磐固断層帯南東部	10802 磐固断層帯南東部	10013 八雲断層帯
12	10116 京阪奈丘陵撓曲帯	10117 羽曳野断層帯	10117 羽曳野断層帯	1801 山形盆地断層帯	8501 山崎断層帯主部南東部	8501 山崎断層帯主部南東部	701 黒松内低地断層帯
13	6501 琵琶湖西岸断層帯	5402 加木屋断層帯	10093 津島断層帯	5501 邑知潟断層帯	5501 邑知潟断層帯	3401 立川断層帯	4601 境峠・神谷断層帯主部
14	5303 恵那山-猿投山北断層帯	4301 富士川河口断層帯	10067 秦野断層帯	601 石狩低地東縁断層帯主部	3703 三浦半島断層群南部	4601 境峠・神谷断層帯主部	7501 奈良盆地東縁断層帯
15	7801 大阪湾断層帯	7803 京都西山断層帯	601 石狩低地東縁断層帯主部	3703 三浦半島断層群南部	601 石狩低地東縁断層帯主部	10054 高田平野東縁断層帯	10001 羅臼岳断層帯
16	7501 奈良盆地東縁断層帯	6901 鈴鹿西縁断層帯	5501 邑知潟断層帯	10116 京阪奈丘陵撓曲帯	4601 境峠・神谷断層帯主部	5501 邑知潟断層帯	8001 上町断層帯
17	5402 加木屋断層帯	10115 あやめ池撓曲帯	10115 あやめ池撓曲帯	10117 羽曳野断層帯	10054 高田平野東縁断層帯	3703 三浦半島断層群南部	10174 喜界島断層帯
18	8204 中央構造線断層帯石鐘山	8501 山崎断層帯主部南東部	3703 三浦半島断層群南部	10115 あやめ池撓曲帯	4201 糸魚川-静岡構造線断層帯	4201 糸魚川-静岡構造線断層帯	4201 糸魚川-静岡構造線断層帯
19	3601 神繩・国府津-松田断層	40088 名古屋市付近断層	5303 恵那山-猿投山北断層帯	2001 長町-利府線断層帯	5201 阿寺断層帯主部北部	601 石狩低地東縁断層帯主部	9204 大分平野-由布院断層帯
20	7303 花折断層帯中南部	2001 長町-利府線断層帯	1801 山形盆地断層帯	10093 津島断層帯	9502 雲仙断層群南東部	10171 池田湖西断層帯	8501 山崎断層帯主部南東部
21	10093 津島断層帯	601 石狩低地東縁断層帯主部	10088 名古屋市付近断層	10088 名古屋市付近断層	10115 あやめ池撓曲帯	10024 象潟断層帯	10134 芳井断層帯
22	3501 伊勢原断層	5501 邑知潟断層帯	2001 長町-利府線断層帯	4601 境峠・神谷断層帯主部	10117 羽曳野断層帯	701 黒松内低地断層帯	10002 斜里岳東断層帯
23	6901 鈴鹿西縁断層帯	3701 三浦半島断層群主部衣笠	5402 加木屋断層帯	4201 糸魚川-静岡構造線断層帯	9501 雲仙断層群北部	9204 大分平野-由布院断層帯	10802 磐固断層帯南東部
24	10802 磐固断層帯南東部	3703 三浦半島断層群南部	6901 鈴鹿西縁断層帯	5603 呉羽山断層帯	9501 雲仙断層群北部	2501 櫛形山脈断層帯	5501 邑知潟断層帯
25	10117 羽曳野断層帯	10067 秦野断層帯	5603 呉羽山断層帯	9502 雲仙断層群南東部	10401 曾根丘陵断層帯	9502 雲仙断層群南東部	6501 琵琶湖西岸断層帯
26	3702 三浦半島断層群主部武山	6701 養老-桑名-四日市断層	7702 五丁目断層	5602 砺波平野断層帯東部	10091 谷汲木知原断層	10013 八雲断層帯	2501 櫛形山脈断層帯
27	10088 名古屋市付近断層	6103 柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯主	6103 柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯主	5602 砺波平野断層帯東部	5602 砺波平野断層帯東部	10134 芳井断層	3703 三浦半島断層群南部
28	7102 布引山地東縁断層帯東部	1801 山形盆地断層帯	9101 西山断層帯	9501 雲仙断層群北部	9204 大分平野-由布院断層帯	10091 谷汲木知原断層	10061 霧ヶ峰断層帯
29	6004 濃尾断層帯主部梅原断層	9101 西山断層帯	7803 京都西山断層帯	10124 高塚山断層	10116 京阪奈丘陵撓曲帯	9501 雲仙断層群北部	10051 国中平野南断層
30	10115 あやめ池撓曲帯	8301 那岐山断層帯	3102 平井-櫛挽断層帯	9203 大分平野-由布院断層帯	2001 長町-利府線断層帯	10401 曾根丘陵断層帯	10079 白鳥峠断層帯
31	2701 長岡平野西縁断層帯	3102 平井-櫛挽断層帯	10095 養老山地西縁断層帯	10095 養老山地西縁断層帯	9203 大分平野-由布院断層帯	10061 霧ヶ峰断層帯	6002 温見断層南東部
32	8204 中央構造線断層帯讃岐山	10015 福智山断層帯	10011 野幌丘陵断層帯	8702 五日市断層	5603 呉羽山断層帯	5602 砺波平野断層帯東部	601 石狩低地東縁断層帯主部
33	10119 中央構造線五条	10011 野幌丘陵断層帯	8901 岩国断層帯	5303 恵那山-猿投山北断層帯	10134 芳井断層	4602 霧訪山-奈良井断層帯	9502 雲仙断層群南東部
34	7201 木津川断層帯	8702 五日市断層	10124 高塚山断層	10091 谷汲木知原断層	3901 十日町断層帯西部	3901 十日町断層帯西部	10091 谷汲木知原断層
35	8301 那岐山断層帯	10095 養老山地西縁断層帯	8401 山崎断層帯主部北西部	10054 高田平野東縁断層帯	10124 高塚山断層	9203 大分平野-由布院断層帯	10019 田沢湖断層帯
36	6801 鈴鹿東縁断層帯	8901 岩国断層帯	5602 砺波平野断層帯東部	3102 平井-櫛挽断層帯	10171 池田湖西断層帯	10115 あやめ池撓曲帯	3401 立川断層帯
37	2001 長町-利府線断層帯	8401 山崎断層帯主部北西部	10401 曾根丘陵断層帯	2501 櫛形山脈断層帯	4602 霧訪山-奈良井断層帯	6002 温見断層南東部	4602 霧訪山-奈良井断層帯
38	4101 糸魚川-静岡構造線断層	5603 呉羽山断層帯	9501 雲仙断層群北部	10011 野幌丘陵断層帯	10024 象潟断層帯	10174 喜界島断層帯	10029 尾花沢断層帯
39	10089 天白河口断層	10119 中央構造線五条	401 増毛山地東縁断層帯	401 増毛山地東縁断層帯	701 黒松内低地断層帯	10117 羽曳野断層帯	9501 雲仙断層群北部
40	6103 柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯主	6005 濃尾断層帯主部三田洞断層	101 布引山地東縁断層帯西部	10113 和束谷断層	10093 津島断層帯	10051 国中平野南断層	10040 安達太良山東麓断層帯
41	8203 中央構造線断層帯石鐘山	10123 御所谷断層帯	10123 御所谷断層帯	8901 岩国断層帯	10061 霧ヶ峰断層帯	10040 安達太良山東麓断層帯	10401 曾根丘陵断層帯
42	10155 福智山断層帯	7101 布引山地東縁断層帯西部	10155 福智山断層帯	3901 十日町断層帯西部	10113 和束谷断層	5603 呉羽山断層帯	3901 十日町断層帯西部
43	9701 伊勢湾断層帯主部北部	10124 高塚山断層	9203 大分平野-由布院断層帯	401 増毛山地東縁断層帯	10088 名古屋市付近断層	10124 高塚山断層	10142 大原断層
44	2101 福島盆地西縁断層帯	10118 和泉北麓断層帯	6005 濃尾断層帯主部三田洞断層	401 増毛山地東縁断層帯	10029 尾花沢断層帯	5602 砺波平野断層帯東部	44
45	8501 山崎断層帯主部南東部	10085 笠原断層	10113 和束谷断層	8401 山崎断層帯主部北西部	10095 養老山地西縁断層帯	2001 長町-利府線断層帯	10097 金草岳断層帯
46	4301 富士川河口断層帯	602 石狩低地東縁断層帯南部	9502 雲仙断層群南東部	7101 布引山地東縁断層帯西部	8702 五日市断層	10045 羽津断層帯	10070 達磨山断層帯
47	7902 六甲・淡路島断層帯主	6007 武儀川断層	602 石狩低地東縁断層帯南部	6103 柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯主	10094 鈴鹿沖断層	10001 羅臼岳断層帯	10028 遠刈田断層帯
48	9101 西山断層帯	401 増毛山地東縁断層帯	8301 那岐山断層帯	6901 鈴鹿西縁断層帯	901 青森湾西岸断層帯	10113 和束谷断層	9203 大分平野-由布院断層帯
49	6101 石狩低地東縁断層帯主	501 森本・富樫断層帯	6007 武儀川断層	10092 池田山断層	3102 平井-櫛挽断層帯	10045 羽津断層帯	10045 羽津断層帯
50	10118 和泉北麓断層帯	7303 花折断層帯中南部	9302 布田川・日奈久断層帯中	301 青森湾西岸断層帯	10072 日本平断層帯	10094 鈴鹿沖断層	10108 経ヶ峯南断層

・紙面の都合上、断層名を完全に示すことができないので、断層コードをもとに、表 1、表 2 を参照されたい。

・セルの色分けについては次の通り。 ■：平均・最大ケースとも確率がほぼゼロ、■：平均ケースのみ確率がほぼゼロ、その他：本文中で言及した断層を断層ごとに同色で塗り分け



- (3) 「切迫度×影響度」による中立的リスクを拡張して、「カタストロフ重視度」を考慮した「一般化リスク指標」を定義し、活断層のリスクランキングを得た。意思決定者の地震リスクに対する認知的傾向やデータの信頼度を踏まえて、重視すべき活断層を提示することが可能となった。

こうした成果は、「災害リスク情報プラットフォーム」を構成する「地震ハザード・リスク情報ステーション」<sup>8)</sup>を通じて基礎的な地震災害リスク情報として提供され、被害想定や地震防災対策に活用されることが期待される。

2.1で述べたように、本研究では「(c) 主要活断層帯に発生する地震のうち固有地震以外の地震」および「(d) 陸域で発生する地震のうち活断層が特定されていない場所で発生する地震」については未検討である。断層をセグメント化したひと回り小さな地震群は、P-PEX関係が異なる事象群(具体的にはLPHC事象がHPLC事象に変化)を構成する。また震源不特定の地震群は、b値モデルに従う地震規模とランダムな断層位置を持つため、細分化された多数の低頻度事象群を構成する。適切な地震リスク評価を目指して、対象地域を絞ったうえで、多様な地震タイプを考慮したP-PEX関係の総合的検討を行うことを今後の課題としたい。

なお、2009年版の全国地震動予測地図では、地盤増幅度の評価や空間解像度の面で大幅に改善がなされるとともに、詳細法による主要活断層帯の網羅的な地震動予測地図が公表された<sup>32)</sup>。断層パラメータの不確定性を見込んで複数ケースの震度分布が示されるものが多い。震度曝露人口の推計による詳細法のケース間比較や、簡便法による評価結果との比較については、今後の課題としたい。

## 補 注

- (1) 下記の12断層帯は、データ取得時(2009年1月時点)で既に主要活断層帯に分類されていたものの、簡便法による震度分布がJ-SHISで公表されていなかったため、主要活断層帯以外の活断層に分類してそれらと同等に扱った。

サロベツ断層帯(9901)、曾根丘陵断層帯(10401)、魚津断層帯(10501)、警固断層帯北西部(10801)、警固断層帯南東部(10802)、人吉盆地南縁断層(10901)、幌延断層帯(10006)、花輪盆地断層帯(10017)(→花輪東断層帯)、高田平野東縁断層帯(10054)、高田平野西縁断層帯(10055)、六日町断層帯(10052)、宮古島断層帯(10177)

主要活断層帯にはさらに、周防灘断層群主部(10601)、秋穂沖断層帯(10602)、宇部南方断層帯(10603)が加えられている。また主要活断層帯以外の活断層のコードは30000番台に変更されている。

- (2) 本研究では、主要活断層帯(154断層)とその他の活断層(179断層)をあわせた333断層を「すべての活断層」と称している。
- (3) 距離減衰式周りのばらつきには、マグニチュード依存性、距離依存性、振幅依存性などの特性が指摘されている<sup>14)</sup>。特に震源近傍では、ばらつきが減少する傾向と、逆にばらつきが増加する傾向も確認されているが、本研究ではこうした効果を考慮するには至っていない。
- (4) 藤原・奥村<sup>25)</sup>は、確率論的地震動予測地図に用いられている内陸浅発地震の地震活動モデルに基づいて、将来30年間(起点:2005年1月1日)に発生する地震の期待発生個数を推定してモデルの検証を行った。 $M_{JMA}=6.5$ 以上の地震は、主要活断層帯(平均ケース)およびその他の活断層についてそれぞれ1個程度、震源を予め特定しにくい地震は6個程度、あわせて8個程度と評価されている。本研究のリスクカーブの結果は、影響度を加味した類似の検討と位置づけられる。
- (5) 認知心理学や意思決定論の立場から式(9)の意味を考える。一般に人々は、事態の発生確率や結果の大きさを必ずしも客観的に捉えておらず、置かれた状況に応じて「認知バイアス」が生じる<sup>26)</sup>。これを踏まえて意思決定分析や効用理論の分野では、客観確率  $p$  と結果  $x$  に代わる測度を導入し、人々の行動原理を説明する「記述的モデル」や行動規範を描く「規範的モデル」が提案されている<sup>27)-29)</sup>。期待効用理論では  $x$  に代えて効用関数  $u(x)$  が用いられ、さらに主観的期待効用理論では  $p$  に代えて主観確率  $f(p)$  が用いられる。またプロスペクト理論では、主観的重み関数  $w(p)$  と価値関数  $v(x)$  が用いられる。代替案の選択により発生しうる結果  $x_j$  とその確率  $p_j$  に関する積和 ( $\sum_j p(x_j) u(x_j)$ 、 $\sum_j f(p(x_j)) u(x_j)$ 、 $\sum_j w(p(x_j)) v(x_j)$ ) が代替案の評価値となる。また藤井・竹村<sup>30)</sup>は、関数  $F(p)$  および関数  $G(x)$  を用いて、価値関数を  $U(x, p)=F(x)^a G(p)^{1-a}$  で定義し、パラメータ  $a$  が状況に依存して変化するという「焦点化の状況依存性仮説」を提唱した。式(9)の一

般化リスク指標は、こうした系譜の延長線上に位置づけられる。ただし本研究では、イベントごとの地震リスクの相对比较に主眼を置いているので、意思決定論における択一的な代替案選択の枠組みとは目的を異にしている。

## 参考文献

- 1) (独) 防災科学技術研究所：全国を対象とした確率論的地図作成手法の検討、防災科学技術研究所研究資料、第275号、2005.8、393p. (CD-ROM添付)
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「全国を概観した地震動予測地図」報告書、2007.3.
- 3) (独) 防災科学技術研究所：(旧) 地震ハザードステーション (J-SHIS; Japan Seismic Hazard Information Station) ホームページ、<http://wwwold.j-shis.bosai.go.jp/>、2009.7.
- 4) (独) 防災科学技術研究所：地震動予測地図の工学利用－地震ハザードの共通情報基盤を目指して－、防災科学技術研究所研究資料、第258号、2004.9、314p. (CD-ROM添付)
- 5) 能島暢呂・久世益充・杉戸真太・鈴木康夫：震度曝露人口による震災ポテンシャル評価の試み、自然災害科学、Vol.23、No.3、2004、pp.363-380.
- 6) 能島暢呂・久世益充・杉戸真太：2000～2005年の主な地震による震度曝露人口と住家・人的被害との相関に関する考察、自然災害科学、Vol.25、No.2、2006、pp.165-182.
- 7) 閣議決定：長期戦略指針「イノベーション25」について、2007.6.
- 8) (独) 防災科学技術研究所防災システム研究センター：災害リスク情報プラットフォームの研究開発(パンフレット)、2008.12.
- 9) 地震調査研究推進本部：ホームページ 長期評価 [http://www.jishin.go.jp/main/p\\_hyoka02.htm](http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02.htm)
- 10) 司 宏俊・翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、No.523、1999.9、pp.63-70.
- 11) 松岡昌志・翠川三郎：国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング、日本建築学会第22回地盤震動シンポジウム、1994、pp.23-34.
- 12) 藤本一雄・翠川三郎：日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均S波速度分布の推定、日本地震工学会論文集、第3巻、第3号、2003.9、pp.13-27.
- 13) 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係、地域安全学会論文集、Vol.1、1999、pp.51-56.
- 14) 翠川三郎・大竹 雄：地震動強さの距離減衰式にみられるバラツキに関する基礎的分析、日本地震工学会論文集 第3巻、第1号、2003.1、pp.59-70.
- 15) 石川 裕・武田正紀・奥村俊彦・林 康裕・掛川秀史：建物の地震リスクの評価方法、日本建築学会技術報告集、第11号、2000、pp.275-278.
- 16) 福島誠一郎・矢代晴実：地震ポートフォリオ解析による多地点に配置された建物群のリスク評価、日本建築学会構造系論文集、日本建築学会構造系論文集、No. 552、2002.2、pp. 169-176.
- 17) 林 孝幸・福島誠一郎・矢代晴実：地震動強度の空間的な相関がポートフォリオの地震リスクに与える影響、日本建築学会構造系論文集、第600号、2006.2、pp.203-210.
- 18) 大野 晋・武村雅之・小林義尚：観測記録から求めた震源近傍における強震動の方向性、第10回日本地震工学シンポジウム、1998、pp.133-138.
- 19) 川瀬 博・松島信一：三次元盆地構造を考慮した1995年兵庫県南部地震時の神戸地域における強震動シミュレーション、日本建築学会構造系論文集、第514号、1998.12、pp.111-118.
- 20) 司 宏俊・翠川三郎：統計的グリーン関数法に基づく地震動最大振幅に対する破壊伝播効果による方位依存性の評価、日本建築学会構造系論文集、日本建築学会構造系論文集、No. 546、2001、pp.47-53.
- 21) 奥村俊彦・佐藤俊明・石井透・Paul Somerville・Robert Graves・Nancy Collins：断層パラメータの変動に伴う地震動のばらつきに関する基礎的検討、土木学会地震工学論文集 Vol.28、2005、論文No.00167(CD-ROM).
- 22) 山田雅行・先名重樹・藤原広行：強震動予測レシピに基づく予測結果のバラツキ評価の検討、日本地震工学会論文集、第7巻、第1号、2007.2、pp.43-60.

- 23) 森川信之・神野達夫・成田 章・藤原広行・福島美光：強震動記録に基づく計測震度の距離減衰式、B31-05 (演旨)、日本地震学会講演予稿集秋季大会、日本地震学会、2007、p.62.
- 24) 日本規格協会編：JIS Q 2001:2001 リスクマネジメントシステム構築のための指針、2003.9、108p.
- 25) 藤原広行・奥村俊彦：中越地震と地震動予測地図作成への今後の課題、月刊地球号外、No.53、2006、pp.239-247.
- 26) 日本リスク研究学会：リスク学事典 増補改訂版、阪急コミュニケーションズ、2006.7、423p.
- 27) 市川惇信：意思決定論 (エンジニアリング・サイエンス講座33)、共立出版、1983.7、150p.
- 28) 繁榘算男：意思決定の認知統計学 (行動計量学シリーズ)、朝倉書店、1995.11、156p.
- 29) 田村坦之・中村 豊・藤田眞一：効用分析の数理と応用、コロナ社、1997.11、182p.
- 30) 藤井 聡・竹村和久：リスク態度と注意：状況依存焦点モデルによるフレーミング効果の計量分析、行動計量学、第28巻第1号、2001、pp.9-17.
- 31) 鈴木康弘・熊木洋太：2003年7月26日宮城県北部地震M6.4が提起した地震動予測地図と活断層評価の課題、日本地震工学会論文集、第4巻、第5号、2004.11、pp.1-4.
- 32) (独) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション (J-SHIS; Japan Seismic Hazard Information Station) ホームページ、<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>、2009.7.

(受理：2009年8月24日)  
(掲載決定：2010年2月5日)

## **Seismic Risk Assessment of Active Faults in Japan in Terms of Population Exposure to Seismic Intensity**

NOJIMA Nobuoto <sup>1)</sup>, FUJIWARA Hiroyuki <sup>2)</sup>, MORIKAWA Nobuyuki <sup>3)</sup>,  
ISHIKAWA Yutaka <sup>4)</sup>, OKUMURA Toshihiko <sup>5)</sup> and MIYAKOSHI Junichi <sup>6)</sup>

1) Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Gifu University, Dr. Eng.

2) Member, Project Director, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Sci.

3) Member, Researcher, *ditto*, Dr. Sci.

4) Member, Deputy Director, Technology Planning Office, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

5) Member, Group Leader, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

6) Member, Senior Researcher, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

### **ABSTRACT**

This study evaluates and compares seismic risks associated with inland crustal earthquakes in Japan on the basis of published data available on the Japan Seismic Hazard Information Station (J-SHIS). First, taking account of prediction uncertainty of the attenuation law of seismic intensity, the evaluation method for population exposure (PEX) to seismic intensity is presented. The method is applied to 333 seismic events potentially caused by main active faults (154 cases) and other active faults (179 cases). The relationship between population exposure and the probability of occurrence of seismic events ("P-PEX relation") and the resultant seismic risk curves are obtained. Generalized risk index which incorporates the effects of focusing on urgency (probability) or significance (PEX) is defined, producing various risk rankings of active faults.

*Key Words: National seismic hazard maps for Japan, J-SHIS, Main active faults, Other active faults, Population exposure to seismic intensity, Risk curve, Generalized risk index, Risk ranking*