

## ◆ (災害) 危機管理特集 ◆

## 地震ハザードマップの作成手法の開発

中尾吉宏\* 日下部毅明\*\* 村越 潤\*\*\* 田村敬一\*\*\*\*

## 1. はじめに

地震のマグニチュードや発生頻度など、地震の発生特性には地域性があるため、地震によって生じる地震動は地域により異なる。したがって、地震防災計画の策定や各種構造物の耐震設計を合理的に行うためには、地震動の地域性を適切に考慮する必要がある。地震動の地域性は、一定の期間に各地域において生じる地震動の最大加速度等の大きさを、それが生じる確からしさ(確率)を使って地図上に描いた地震ハザードマップで表現することができる。我が国では、歴史的資料も含めて過去千数百年程度の地震記録が整理されており、それらの記録に基づいて作成された地震ハザードマップ(例えば<sup>1)</sup>)が、耐震設計基準における地域性を考慮した設計地震動の設定に活用されている。しかし、活断層に起因する地震の発生間隔が数千年以上であることを考慮すれば、十分に長い期間の地震記録が地震ハザードマップの作成に用いられてきたとは言えない。また、過去の地震記録に基づく従来の地震危険度解析では、地震が様々な位置でランダムに発生することを想定して地震危険度の評価を行うため、活断層やプレート境界などの特定の場所で繰り返し発生する地震が震源の近傍に及ぼす影響をきめ細かく評価することができない。

このような、過去の地震の記録期間に関する実情や、活断層やプレート境界で繰り返し発生する地震の危険度評価に関する実情を踏まえれば、地震ハザードマップの作成には、過去の地震記録に加えて活断層やプレート境界で発生する地震を別途考慮することが合理的であると考えられる。

本報文は、過去の地震記録、活断層及びプレート境界地震を同時に考慮できる地震ハザードマップの作成手法として、これまでに開発した手法の紹介をするとともに、開発した手法に基づき全国を対象として地震ハザードマップを試算した結果を示すものである。本手法では、活断層及びプレート境界で繰り返し発生する地震は、固有の発生間隔及び固有のマグニチュードで発生すると仮定して地震危険度の評価を行った。また、震源の位置や地震

のマグニチュードを予め特定することが困難な地震については、様々な位置及びマグニチュードで発生する地震として考慮し、過去の地震記録に基づく地震危険度解析において危険度評価を行った。

## 2. 地震危険度解析手法

地震危険度の評価では、はじめに、過去の地震記録、活断層及びプレート境界地震のそれぞれを考慮した解析を行った。次に、過去の地震記録を用いた解析において考慮するランダムな位置で発生する地震と、活断層及びプレート境界で繰り返し発生する地震は、それぞれが独立に発生するものとして、過去の地震記録、活断層及びプレート境界地震を考慮した解析結果を組み合わせるにより、それらを同時に考慮した地震ハザードマップの試算を行った。試算では、地震動特性値として最大加速度を用いた。

## 2.1 過去の地震記録に基づく地震危険度解析

## 2.1.1 過去の地震記録

過去の地震記録<sup>2)~4)</sup>として解析に用いたのは、地震観測網の整備により定常的に地震記録が蓄積されるようになったと考えられる以下の①及び②の地震記録である。これは、古い年代の地震記録には記録の欠如があり、これを新しい年代の地震記録に含めた解析を行うことにより、地震の発生頻度が過小評価されないよう配慮したものである。

- ①  $M < 6.0$  の地震: 気象庁の地震記録 (1926.1-1996.7)
- ②  $M \geq 6.0$  の地震: 宇津の地震記録 (1885-1925)、  
気象庁の地震記録 (1926.1-1996.7)

地震危険度解析では、①及び②の地震記録のうち、耐震設計上考慮すべき地震動を発生させる地震として、震源深さ 100km 以浅の地震記録を用いることとした。また、活断層及びプレート境界地震を考慮した地震危険度解析において別途考慮する地震については、過去の地震記録を考慮した解析においても重複して考慮されないことがないよう、①及び②の地震記録から取り除いた。

## 2.1.2 地震の発生特性の評価

地震はマグニチュードが大きくなると発生頻度が低くなる特徴があり、そのような地震のマグニチュードと発生頻度の関係は地域によって異なる

ことが知られている。また、発生し得る地震の最大のマグニチュードも地域によって異なると考えられている。ここでは、そうした地域ごとの地震の発生特性を評価するため、過去の地震の発生状況及び地球物理学的なデータ<sup>5)</sup>に基づき、地震の発生特性が一様と見なすことのできるバックグラウンドゾーンを図-1のように設定し、バックグラウンドゾーン内の過去の地震記録を用いて、それぞれのバックグラウンドゾーン内で発生する地震の発生特性を評価した。

バックグラウンドゾーン*i*において、マグニチュード  $M$  が  $m$  を超える地震の年平均発生回数  $N_i [M > m]$  [回/年] はグーテンベルク・リヒター式

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

に従うものとして、バックグラウンドゾーン*i*内の地震記録を用いて  $a_i$  値及び  $b_i$  値を算出し、バックグラウンドゾーン*i*において発生する地震のマグニチュードと発生頻度との関係性を評価した。ここで、図-1のバックグラウンドゾーン125に含まれる地震記録に対して、グーテンベルク・リヒター式を適用した例を図-2に示す。同図は、地震記録の数と記録の蓄積期間とを考慮して算定したマグニチュード  $M > m$  の地震の年平均発生回数に式(1)を適用したものである。図-2に示した式(1)を用いて、それぞれのマグニチュードの地震の年平均発生回数を算定することができる。図-2と同様に、グーテンベルク・リヒター式を各バックグラウンドゾーンの地震記録に適用することにより、それぞれのバックグラウンドゾーン内における地震のマグニチュードと年平均地震発生回数との関係性を評価した。

バックグラウンドゾーン*i*の内部で発生する地震の最大マグニチュード  $M_i^U$  は、基本的には、バックグラウンドゾーン内に含まれる過去の地震記録<sup>2),3),4)</sup>のマグニチュードに基づいて設定した。ただし、マグニチュードの最大値を与える地震記録が、地震危険度解析で別途考慮する活断層やプレート境界地震に対応した地震記録である場合には、バックグラウンドゾーンに含まれる地震記録<sup>2),3),4)</sup>のうち、活断層やプレート境界地震との対応が明らかにされていない地震記録のマグニチュードの最大値を  $M_i^U$  として用いた<sup>6)</sup>。これは、活断層やプレート境界で繰り返し発生する地震として別途考慮する地震が、過去の地震記録に基づく地震危険度解析においても重複して考慮されないようにしたものである。また、古い年代に発生した地震に

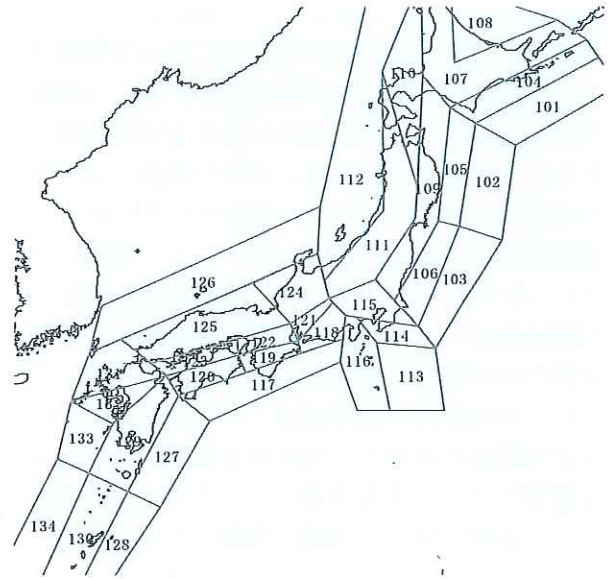


図-1 バックグラウンドゾーン

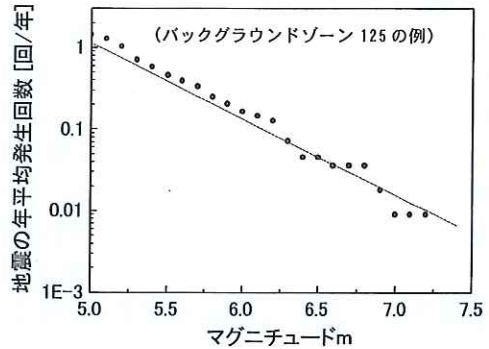


図-2 マグニチュード  $M > m$  の地震の年平均発生回数

についてはマグニチュードが大きな地震でも記録が欠如している可能性があること、更に、平成12年鳥取県西部地震では明瞭な地表地震断層が発見されていない場所において、マグニチュード7.3の地震が発生したことを踏まえ、 $M_i^U$  の下限値をマグニチュード7.3とすることとした。地震危険度解析に考慮する地震の最小マグニチュード  $M_i^L$  については、全てのバックグラウンドゾーンで5とした。また、設定したバックグラウンドゾーン内で発生する地震は、バックグラウンドゾーンに含まれる地震記録の平均的な震源深さの水平面内において、ランダムな位置で発生するものとした。

### 2.1.3 地震動強度の推定

過去の地震記録を考慮した地震危険度解析では、バックグラウンドゾーンの内部で、種々のマグニチュードを有する地震が、ランダムな位置に発生することを想定した解析を行う。任意のマグニチュードの地震が、任意の地点で発生した場合に解析対象地点に生じる地震動の最大加速度は、距離減衰式<sup>7)</sup>を用いて、地震のマグニチュード、震源距離

及び震源の深さから推定した。解析に用いた距離減衰式は、強震記録の回帰分析に基づき導出されたものであり、せん断弾性波速度が300~600m/sの露頭基盤における平均的な最大加速度を推定できるとされるものである。実際の地震により生じる地震動の最大加速度は、地震のマグニチュード、震源距離及び震源の深さが同一でも、地震ごとにばらつきを有する。そこで、地震危険度解析では、距離減衰式による最大加速度の推定値と、距離減衰式の回帰分析で得られた標準偏差 $\sigma$ とを、それぞれ、平均値及び標準偏差とする最大加速度の確率密度関数を設定し、解析対象地点に生じる最大加速度にばらつきを考慮した。ただし、距離減衰式による推定値から極端に乖離した値が解析に考慮されることがないように、最大加速度のばらつきには推定値 $\pm 2\sigma$ の上下限値を設けた。

### 2.1.4 地震危険度の評価

地震はマグニチュードや発生位置が様々なため、解析対象地点には様々な大きさの最大加速度 $x$ の地震動が生じる。地震危険度の評価では、今後の一定の期間 $T$ に解析対象地点に生じる様々な大きさの地震動の最大加速度が、それぞれ、どの程度の頻度(希少性)を持って発生するのかを評価するため、解析対象地点に生じる最大加速度 $X$ が $x$ を上回る確率 $P_h(X > x)$ (超過確率)を算定した。超過確率 $P_h(X > x)$ は、期間 $T$ に地震 $j$ が発生する確率 $P_o$ と、その地震 $j$ が発生した場合に解析対象地点に生じる地震動の最大加速度 $X$ が $x$ を超過する確率 $P_e(\text{地震 } j | X > x)$ から、式(2)により算定される。

$$P_h(X > x) = P_o \times P_e(\text{地震 } j | X > x) \quad (2)$$

解析対象地点に影響を及ぼす地震は複数のバックグラウンドゾーン内で発生すること、また、それぞれのバックグラウンドゾーン内では、種々のマグニチュードの地震が、ランダムな位置で発生することを考慮して、それら全ての地震について式(2)を適用し、発生する全ての地震を考慮した場合の $P_h(X > x)$ を算定した。

## 2.2 活断層を考慮した地震危険度解析

### 2.2.1 考慮した活断層

我が国では、これまでの調査により、約2,000の活断層<sup>8)</sup>が発見されている。それらの活断層の中には、単独で地震を発生させるものもあれば、複数の活断層がグループで活動して地震を発生させると考えられているものもある。大地震を起こす単位になると考えられている独立した1つの活



図-3 起震断層

断層及び複数の活断層は、起震断層<sup>9)</sup>と呼ばれている。本試算では、この起震断層を考慮することとした。図-3に考慮した起震断層を示す。

### 2.2.2 活断層に起因する地震の発生特性

我が国では、最近の精力的な調査研究により、起震断層の位置、長さ及び活動性に関する情報が全国を網羅する形で整理されつつある<sup>8)~14)</sup>。また、そうした起震断層の情報から、発生する地震のマグニチュードや繰り返し発生する地震の平均発生間隔を推定するための研究成果<sup>例えば 15)</sup>が得られている。本試算では、起震断層に関する最新の情報<sup>8)~14)</sup>や研究成果<sup>15)</sup>を活用して、発生する地震のマグニチュードや平均発生間隔を仮定した。

地震の発生確率の評価では、過去に発生した地震の最新発生時期が特定されている場合には、地震の発生間隔がBrownian Passage Time分布(以下、BPT分布とする)で表されるものと仮定し、最新発生時期が特定されていない場合には、地震の発生が定常ポアソン過程にしたがうものと仮定した<sup>16),17)</sup>。最新発生時期が特定されている場合には、最新発生時期からの経過時間と地震の発生

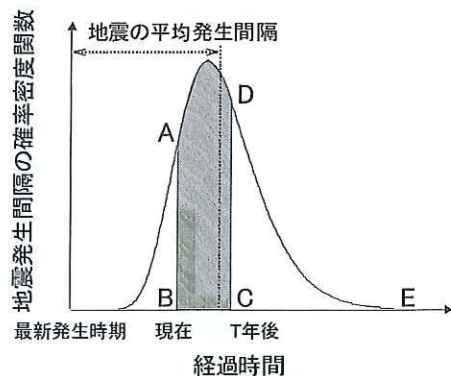


図-4 地震発生確率の算定

確率の関係を図-4 に示すように描くことができる。現在から  $T$  年間の間に地震が発生する確率は、面積 ABCD/面積 ABED で算定することができる。

2.2.3 最大加速度の推定

最大加速度の推定には、2.1.3 と同様の距離減衰式を用いた。距離減衰式に用いる距離の指標としては、起震断層からの最短距離を用いた。また、震源深さとしては、断層幅 (断層面を長方形でモデル化した時の幅) に 13km を、断層の傾斜角に 90° を仮定して算出される断層面の中心深さ 6.5km を用いた。断層幅に 13km を仮定したのは、本試算で考慮する起震断層の 7 割以上のマグニチュードは  $M \geq 6.8$  であり、 $M \geq 6.8$  の内陸活断層の断層幅は 13km で飽和する<sup>18)</sup> とされているためである。また、距離減衰式には、推定値回り  $\pm 2\sigma$  ( $\sigma$  は標準偏差) のばらつきを考慮した。

2.2.4 地震危険度の評価

地震危険度の評価では、2.1.4 と同様に、今後の一定の期間  $T$  において、解析対象地点に生じる様々な大きさの最大加速度  $x$  を上回る最大加速度  $X$  の地震動が生じる確率  $P_f(X > x)$  (超過確率) を算定した。今後の一定の期間  $T$  に起震断層  $j$  で地震が発生し、解析対象地点における最大加速度  $X$  が  $x$  を上回る確率 (超過確率)  $P_f(X > x)$  は、2.1.4 と同様の考え方で式 (3) により算出した。

$$P_f(X > x) = P_o \times P_e \text{ (起震断層 } j | X > x) \quad (3)$$

この場合、 $P_o$  は期間  $T$  に起震断層  $j$  で地震が発生する確率を表し、 $P_e$  (起震断層  $j | X > x$ ) は起震断層  $j$  で発生する固有のマグニチュードの地震により解析対象地点に生じる最大加速度  $X$  が  $x$  を上回る確率を表す。解析対象地点に影響を及ぼす起震断層は複数あり、それぞれが固有の地震のマグニチュード、平均発生間隔及び断層の幾何的な位置を有する。それら全ての起震断層について式 (3) を適用し、発生する全ての地震を考慮した場合の  $P_f(X > x)$  を算定した。

2.3 プレート境界地震を考慮した地震危険度解析

2.3.1 考慮したプレート境界地震

地震危険度解析に考慮したプレート境界地震のリストと断層の幾何的な条件を、それぞれ、表-1 及び図-5 に示す。これらの図表には、プレート境界の特定の場所で繰り返し発生する地震に対して

表-1 プレート境界地震のリスト

| プレート境界地震 | マグニチュード     | 平均発生間隔 [年] | 最新発生時期     | BPT 分布の $\alpha$ |
|----------|-------------|------------|------------|------------------|
| 南海地震     | M8.4        | 90.1       | 1946/12/21 | 0.20             |
| 東南海地震    | M8.1        | 86.4       | 1944/12/7  | 0.18             |
| 東海地震     | M8.0        | 118.8      | 1854/12/23 | 0.24             |
| 関東地震     | M7.9 or 8.2 | 219.8      | 1923/9/1   | 0.24             |
| 十勝沖南地震   | M7.8 or 7.9 | 57.0       | 1962/6/30  | 0.18             |
| 十勝沖北地震   | M8.2        |            |            |                  |
| 根室半島沖地震  | M7.4        |            |            |                  |
| 北海道東方沖地震 | M7.8        |            |            |                  |
| エトロフ沖南地震 | M8.1        |            |            |                  |
| エトロフ沖北地震 | M8.1        |            |            |                  |

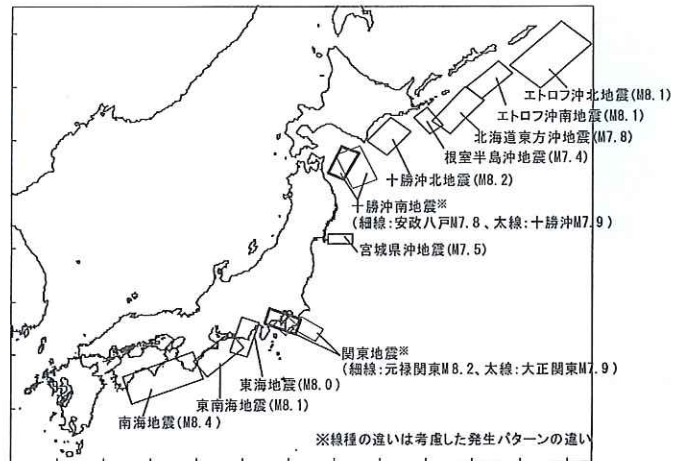


図-5 プレート境界地震

(例えば相模トラフ沿いの地域では元禄関東地震、大正関東地震)、本報文における地震名 (例：関東地震) を付している。

2.3.2 プレート境界地震の発生特性

プレート境界地震の平均発生間隔、最新発生時期、マグニチュード及び断層の幾何的な条件については、過去の地震の発生状況や最新の調査研究成果<sup>11),19)~23)</sup> に基づいて仮定した。それぞれのプレート境界地震に関する詳細は文献<sup>24)</sup> に譲り、ここでは、南海地震、東南海地震及び東海地震に仮定した地震の発生特性を示す。

南海地震及び東南海地震は、それぞれ、図-6 の領域 X 及び領域 Y を中心に発生してきた地震として、地震のマグニチュード、平均発生間隔、断層の位置についての評価<sup>11)</sup> が既に行われており、本試算では、当該評価結果を用いた。また、領域 Z は 1944 年東南海地震の際に破壊せずに残ってしまった領域を含んでおり、東海地震はこの領域を概ね震源域とするとされている<sup>11),23)</sup>。東海地震の平均発生間隔及び最新発生時期は、領域 Z で過去に発生してきた表-2 の地震に基づいて表-1 に示すように仮定した。また、東海地震の断層の位置については、既往の調査結果<sup>23)</sup> を参考に設定した。

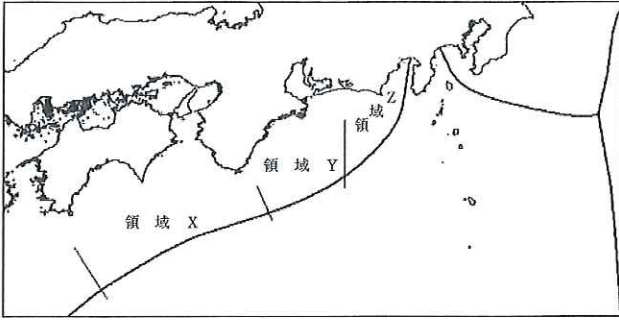


図-6 南海地震、東南海地震及び東海地震の震源域<sup>11)</sup>

表-2 南海・駿河トラフ沿いの震源域の目安<sup>11)</sup>

| 発生年月日      | 地震名     | 領域 X | 領域 Y | 領域 Z |
|------------|---------|------|------|------|
| 1498/9/20  | 明応東海地震  |      | ○    | △    |
| 1605/2/3   | 慶長地震    | ○    | ○    | △    |
| 1707/10/28 | 宝永地震    | ○    | ○    | △-○  |
| 1854/12/23 | 安政東海地震  |      | ○    | ○    |
| 1854/12/24 | 安政南海地震  | ○    |      |      |
| 1944/12/7  | 昭和東南海地震 |      | ○    |      |
| 1946/12/21 | 昭和南海地震  | ○    |      |      |

プレート境界地震の発生間隔には BPT 分布を仮定し、地震の発生確率を評価した。

### 2.3.3 最大加速度の推定

最大加速度の推定には 2.1.3 と同様の距離減衰式を用いることとし、距離の指標としては断層面と試算地点の最短距離を用いた。また、距離減衰式の震源深さには、断層面の中心の深さを用いた。距離減衰式には、推定値回り  $\pm 2\sigma$  ( $\sigma$  は標準偏差) のばらつきを考慮することとした。

### 2.3.4 地震危険度の評価

地震危険度の評価では、2.1.4 と同様に、今後の一定の期間  $T$  において、解析対象地点に生じる最大加速度  $X$  が  $x$  を上回る確率  $P_p(X > x)$  (超過確率) を算定した。今後の一定の期間  $T$  に、プレート境界地震  $j$  が発生し、解析対象地点に生じる地震動の最大加速度  $X$  が  $x$  を上回る確率  $P_p(X > x)$  (超過確率) は、2.1.4 と同様の考え方で式 (4) により算定した。

$$P_p(X > x) = P_o \times P_e (\text{プレート境界地震 } j | X > x) \quad (4)$$

この場合、 $P_o$  は期間  $T$  にプレート境界地震  $j$  が発生する確率を表し、 $P_e$  (プレート境界地震  $j | X > x$ ) は固有のマグニチュードを持ったプレート境界地震  $j$  により解析対象地点に生じる最大加速度  $X$  が  $x$  を上回る確率を表す。解析対象地点に影響を及ぼすプレート境界地震は複数あり、それぞれが固有のマグニチュード、平均発生間隔及び断層の幾何的な位置を有する。それら全てのプレ-

ト境界地震に対して式 (4) を適用し、発生する全ての地震を考慮した場合の  $P_p(X > x)$  を算定した。

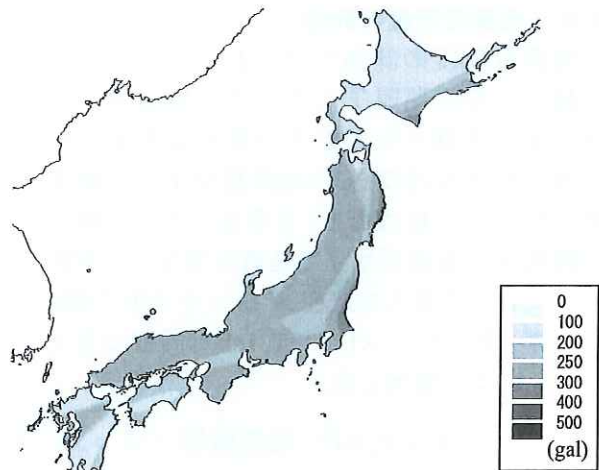
### 2.4 過去の地震記録、活断層及びプレート境界地震を考慮した地震危険度の評価

過去の地震記録、活断層及びプレート境界地震のそれぞれを考慮して算定した  $P_h(X > x)$ 、 $P_f(X > x)$  及び  $P_p(X > x)$  を用いて、解析対象地点の地震危険度を試算する。それぞれに起因する地震の発生が独立であると仮定すれば、対象地点の地震危険度は式 (5) で算出される。

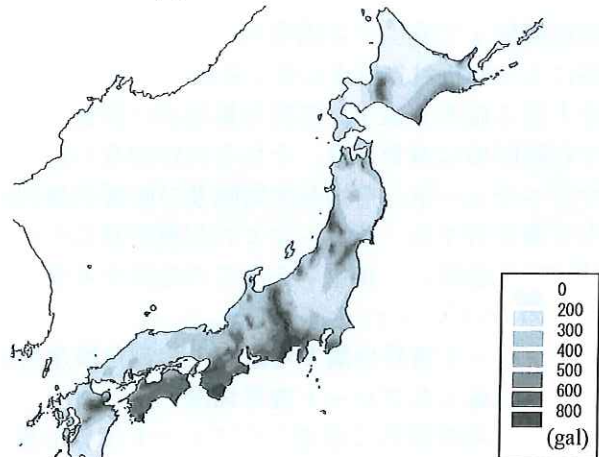
$$P(X > x) = 1 - (1 - P_h(X > x))(1 - P_f(X > x))(1 - P_p(X > x)) \quad (5)$$

### 3. 試算結果

過去の地震記録のみを考慮した場合と、過去の地震記録、活断層及びプレート境界地震を同時に考慮した場合について、2002 年 1 月 1 日より 100 年間の超過確率が 5% となる最大加速度の試算結果を



(a) 過去の地震記録のみ考慮



(b) 過去の地震、活断層及びプレート境界地震を考慮

図-7 100 年超過確率 5% の最大加速度

図-7 (a) 及び (b) に示す。同図 (a) 及び (b) の比較から、活断層を別途考慮した地震危険度の評価をすることにより、糸川川-静岡構造線活断層系等の地震の発生確率が比較的高い活断層が支配的な影響を及ぼす結果が得られている。また、活断層の分布密度が高い中部地方、近畿地方及び東北地方南部においては、地震発生確率が高い活断層を中心に比較的広い範囲で活断層の影響が認められる。さらに、プレート境界地震を別途考慮した地震危険度の評価をすることにより、北海道東部、四国地方、紀伊半島南部及び中部地方南部において、プレート境界地震の支配的な影響が認められる。

#### 4. あとがき

本報文では、過去の地震記録、活断層及びプレート境界地震を考慮した地震ハザードマップの作成手法として、これまでに開発した手法の紹介をするとともに、開発手法に基づき全国を対象として地震ハザードマップを試算した結果を示した。過去の地震記録のみに基づく地震ハザードマップに比べて、活断層及びプレート境界地震も考慮した地震ハザードマップでは、地震の発生確率が高い活断層の近傍やプレート境界地震の断層近傍の地域において、その影響を適切に考慮することが可能である。開発した地震ハザードマップの作成手法を活用して地震動の地域性を精度よく把握することにより、耐震設計及び防災計画の合理化が期待される。

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

#### 参考文献

- 1) 建設省土木研究所:新耐震設計法(案),土木研究所資料,第1185号,1977.
- 2) 宇佐美龍夫:新編日本被害地震総覧,東京大学出版会,1996.

- 3) 宇津徳治:地震の事典,朝倉出版,1987.
- 4) (財)日本気象協会:日本付近の主要地震データ,1995.
- 5) 萩原尊禮:日本列島の地震-地震工学と地震地体構造-鹿島出版会,1991.
- 6) 損害保険料率算定会:活断層と歴史地震とを考慮した地震危険度の評価,2000.
- 7) 安中正ほか:気象庁87型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案,第24回地震工学研究発表会,1997.
- 8) 活断層研究会:新編日本の活断層,東京大学出版会,1991.
- 9) 松田時彦ほか:日本陸域の主な起震断層と地震の表,活断層研究,p.19,2000.
- 10) 松田時彦:陸上活断層の最新活動期の表,活断層研究,p.13,1995.
- 11) 地震調査研究推進本部地震調査委員会:活断層及びプレート境界地震の評価,http://www.jishin.go.jp
- 12) 科学技術庁:平成7~11年度地震調査研究交付近成果報告会,1997~2000.
- 13) 文部科学省:平成12年度地震調査研究交付金成果報告会,2001.
- 14) 地質調査所:平成9~10年度活断層・古地震研究調査概要報告書,1998~1999.
- 15) 松田時彦:活断層から発生する地震の規模と周期について,地震,p.28,1975.
- 16) 地震調査研究推進本部地震調査委員会:長期的な地震発生確率の評価手法について,2001.
- 17) 奥村俊彦ほか: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,1997.
- 18) 武村雅之:日本列島における地殻内地震のスケリング則,地震,1998.
- 19) 宇津徳治:地震学,共立出版,1984.
- 20) 地震調査研究推進本部地震調査委員会:日本の地震活動,1997.
- 21) 佐藤良輔ほか:日本の地震断層パラメータ・ハンドブック,鹿島出版会,1989.
- 22) Wald, D. J. and Somerville, P. G.: Variable Slip Rupture Model of the Great 1923 Kanto Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am. Vol.85, 1995.
- 23) 中央防災会議:第7回中央防災会議東海地震に関する専門調査会説明資料,2001.
- 24) 中尾吉宏ほか:全国を対象とした地震ハザードマップの試算,第11回日本地震工学シンポジウム,2002.

中尾吉宏\*



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター地震防災研究室研究官  
Yoshihiro NAKAO

日下部毅明\*\*



同 地震防災研究室長  
Takaaki KUSAKABE

村越 潤\*\*\*



独立行政法人土木研究所構造物研究グループ橋梁構造チーム首席研究員(前 地震防災研究室長)  
Jun MURAKOSHI

田村敬一\*\*\*\*



同 耐震研究グループ振動チーム首席研究員,工博  
Dr.Keiichi TAMURA