

# 日本全国の地震危険度に関する統計的検討

安中 正<sup>1</sup>・矢代晴実<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 理修 東電設計株式会社 地震技術部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

<sup>2</sup>正会員 工修 東京海上火災保険株式会社 リスクマネジメント業務部 (〒261-8550 千葉市美浜区中瀬1-4)

日本全国を対象とした地震発生モデル及び気象庁87型強震計記録に基づく最大地動（最大加速度と最大速度）と加速度応答スペクトル（減衰5%）の推定式を用いて、全国246地点の地震ハザード曲線を求めた。得られた246個の地震ハザード曲線から、最大地動及び各周期の応答スペクトルに対するフラクタイルハザード曲線を求めた。フラクタイルハザード曲線は、各特性値レベルの全国的な非超過確率が同じになる確率レベルを結んで得られるものである。フラクタイルの値で区分した最大地動に対する確率レベルの全国的な分布、フラクタイルの値と再現期間の関数として得られる加速度応答スペクトル、特定の特性値を超える地震のマグニチュード分布を検討し、日本全国の地震危険度の統計的性質を明らかにした。

*Key Words : Probabilistic seismic hazard analysis, peak ground motion, response spectra, fractile hazard curve*

## 1. まえがき

阪神・淡路大震災を踏まえた土木学会の提言<sup>1)</sup>では、① 建造物の供用期間内に1~2度発生する確率を有する地震動（レベル1地震動）、② 供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動（レベル2地震動）の2段階の地震動を設定し、それぞれのレベルに対応した耐震性能の照査を行うことを提案している。

レベル1地震動は、元々確率的に規定されていること、そしてこのレベルの地震動を生じる可能性がある地震のタイプは一般に複数あり、特定の地震を想定しにくいことから、供用期間中の地震動の発生確率に基づき設定するのが合理的と考えられる。

レベル2地震動は、発生確率が低いことと大きな強度を持つことの2つの側面から規定されているが、提言ではどちらかといえば後者に重点が置かれている。対象地点に大きな強度を持つ地震動を生じる可能性がある地震のタイプは地震動が強くなるほど限定される傾向があることから、そうした地震を想定地震として設定し、想定地震から期待される地震動としてレベル2地震動を設定しようとするのは自然な流れと考えられる。しかし、少なくとも現状では地震動の推定に大きな不確実性が存在する。不確実性に対する判断根拠を明確にするという立場からは、レベル2地震動についても、供用期間中の地震動の発生確率に基づき確率的に設定する方が合理的

と考えられる<sup>2)</sup>。

レベル1地震動とレベル2地震動を確率論的に設定するためには確率レベル（再現期間）を設定する必要があるが、確率レベルは自然科学的な観点だけでは決定できない。それは、社会的に可能であれば、将来のリスクを小さくするために地震動は出来るだけ大きくするのが望ましいが、コストという問題を抱えているために簡単にはそう出来ないからである。確率レベルの設定には、許容できるリスクレベルに関する社会的なコンセンサスが必要である。

社会的なコンセンサスを得る1つの前提として、日本全国の地震危険度に関して共通認識を持つことが重要と考えられる。本研究では、そのために、日本全国の地震危険度の統計的性質を検討した。

## 2. 確率論的地震危険度解析モデル

検討の対象とした、琉球列島を除く、全国246地点の分布を図-1に示す。地点間の間隔は経・緯度とも0.5°である。これらの地点について、地震発生モデルと地震動推定モデルを用い、確率論的地震危険度解析により地震ハザード曲線を求めた。

地震発生モデルは、安中・矢代<sup>3)</sup>による日本列島全体のモデル（時間依存性を考慮しないポアソンモデル）を用いた。モデルは、大地震発生活動域とその他の中小地震を発生する背景の地震発生活動域の2つのタイプの活動域から構成されている。

大地震発生活動域の分布を図-2に示す。歴史地震データに基づく28個の活動域と活断層データに基づく117個の活動域がモデル化されている。

背景的地震発生活動域は、太平洋プレート、フィリピン海プレート、陸側プレート（オホーツクプレート及びユーラシアプレート）の上面に沿って設定されている。太平洋プレートの沈み込みに関連した活動域を図-3に、フィリピン海プレートの沈み込みに関連した活動域を図-4に、陸側プレートに関連した活動域を図-5に示す。太平洋プレートの沈み込みに関連した活動域は、浅い領域ではプレート境界付近に集中しているが、稍深い領域では2つの面（二重深発地震面）に分かれて発生している。これを考慮して、二重深発地震面上面を含むプレート上面付近の活動域（図-3の左側）と二重深発地震面下面の活動域（図-3の右側）が別々にモデル化されている。陸側プレート内では深さ約15kmまでの上部

地殻内ではほとんどの地震が発生していることから、北海道南部の浦河付近（深さ30km）を除き、活動

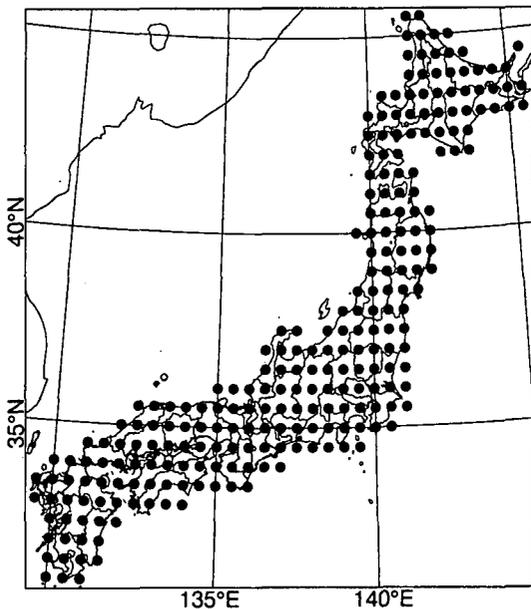


図-1 検討対象とした246地点の分布

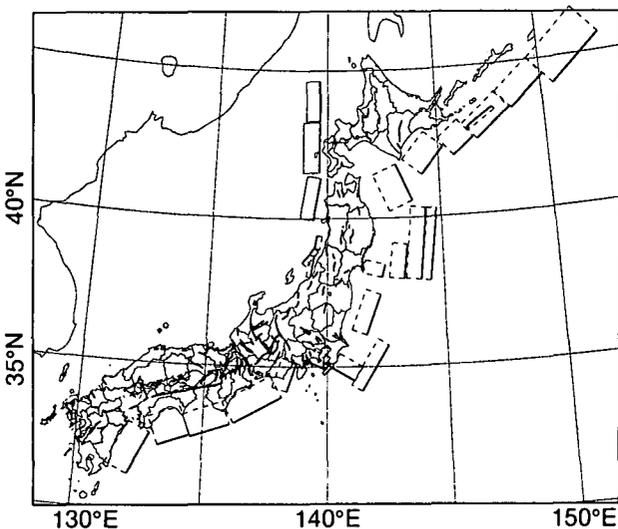


図-2 大地震発生活動域の分布

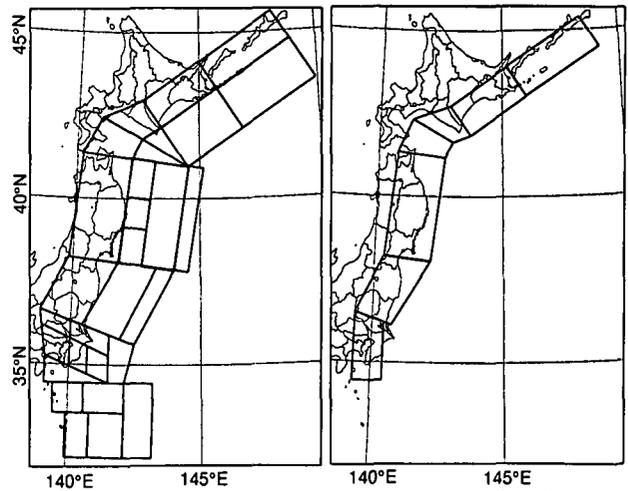


図-3 太平洋プレートの沈み込みに関係した背景的地震発生活動域の分布

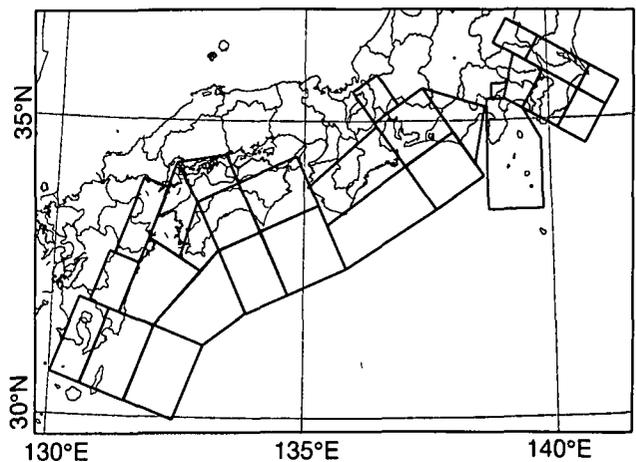


図-4 フィリピン海プレートの沈み込みに関係した背景的地震発生活動域の分布

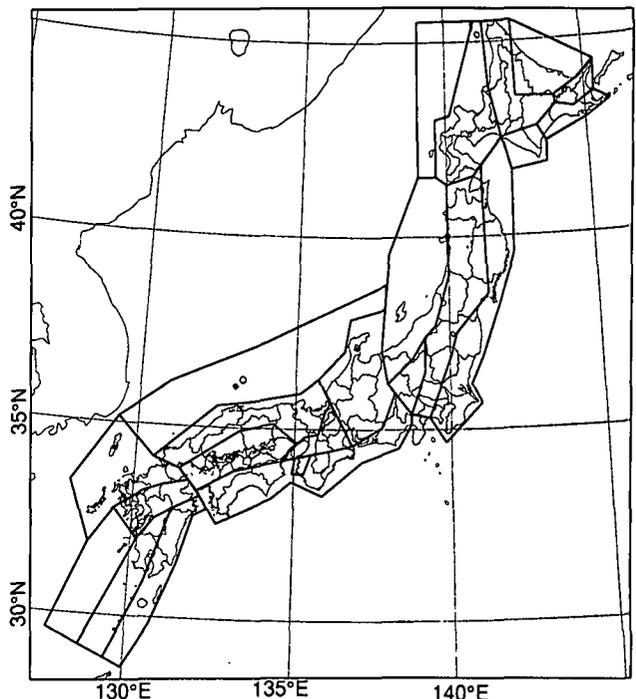


図-5 陸側プレートに関連した背景的地震発生活動域の分布

域の深さは5kmに設定されている。

地震動推定モデルは、気象庁87型強震計記録に基づく安中ら<sup>4)</sup>による最短距離用のモデルを用いた。断層面までの最短距離Rを用いた場合の式の形（常用対数で表示）は次の通りである。

$$\log A = c_m M + c_h H - c_d \log(R + 0.334 \exp(0.663M)) + c_0 + \epsilon \quad (1)$$

ここで、Aは地震動強度（最大地動または減衰5%の加速度応答スペクトルで水平2成分の平均）、Mは地震のマグニチュード、Hは震源深さ（200 km以下

表-1 最短距離式の係数

特性値	C d	C m	C h	C o
最大加速度(cm/s <sup>2</sup> )	2.136	0.606	0.00459	1.730
最大速度(cm/s)	1.918	0.725	0.00318	-0.519
最大変位(cm)	1.635	0.935	0.00091	-2.992

表-2 最短距離式のばらつき（標準偏差）

特性値	$\sigma$	$\sigma \epsilon$	$\sigma_0$
最大加速度(cm/s <sup>2</sup> )	0.274	0.157	0.224
最大速度(cm/s)	0.252	0.131	0.215
最大変位(cm)	0.227	0.111	0.198

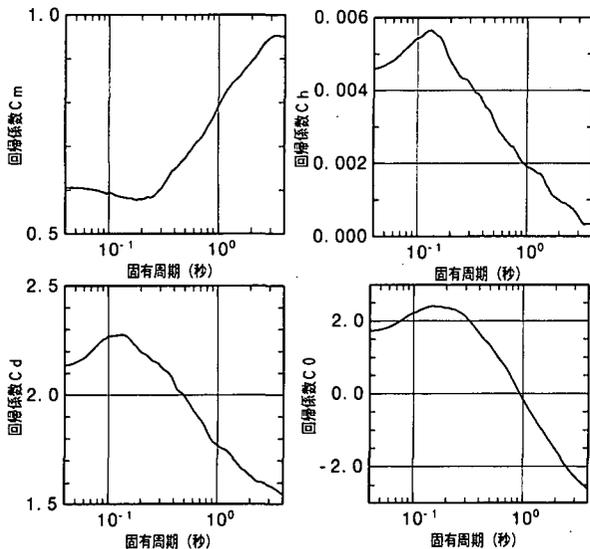


図-6 加速度応答スペクトル推定式の係数と周期の関係

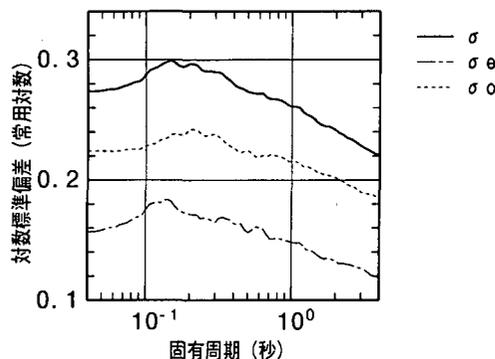


図-7 加速度応答スペクトル推定式のばらつきと周期の関係

で断層モデルを用いる場合は断層中心の深さ)である。ただし、マグニチュード項に対する補正項 $c_h H$ のHについては上限があり、震源深さが100~200kmの場合は $H=100$ kmである。 $\epsilon$ は各記録に対するランダム変数（ばらつき）であり、地震毎に与えられる共通な変動 $\epsilon_e$ とそれを除いて各記録に対して独立に与えられるランダム変数 $\epsilon_0$ の和として、 $\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_0$ で表される。 $\epsilon_e$ は地震間（inter-event）の変動、 $\epsilon_0$ は地震内（intra-event）の変動を示す。 $\epsilon_e$ の分散が $\sigma_e^2$ 、 $\epsilon_0$ の分散が $\sigma_0^2$ 、 $\epsilon$ の分散が $\sigma^2 = \sigma_e^2 + \sigma_0^2$ である。

最大地動に対する係数を表-1に、ばらつき（標準偏差）を表-2に、減衰5%の加速度応答スペクトルに対する各係数と周期の関係を図-6に、ばらつき（標準偏差）と周期の関係を図-7に示す。係数 $c_0$ は日本全国の工学的基盤（S波速度が300~600m/s）における平均的な地震動の予測に用いる係数と考えられている。なお、個別地点の検討では、地震観測記録に基づき係数 $c_0$ を補正して用いるのが望ましい。

### 3. 確率論的地震危険度解析結果

最大加速度に関する全国246地点の地震ハザード曲線の重ねがきを図-8に示す。各地点からの水平最短距離が100km以内の活動域を用い、推定式のばらつきは $\pm 5\sigma$ の範囲で考慮した。

全国246地点の地震ハザード曲線を統計的に処理しフラクタイル表示した曲線を、最大速度の場合と合わせて、図-9に示す。フラクタイル表示は、各特性値レベルの全国的な非超過確率が同じになる確率レベルを結んで得られるものであり、近似的に全国的な面積比を表現している。例えば0.84フラクタイル曲線は、各特性値レベルに対し全国の84%の地点のハザードレベルがそれ以下になるようなレベルを示す曲線と考えることができる。

フラクタイルの値で区分した最大地動に対する確率レベルの分布を図-10に示す。最大加速度につい

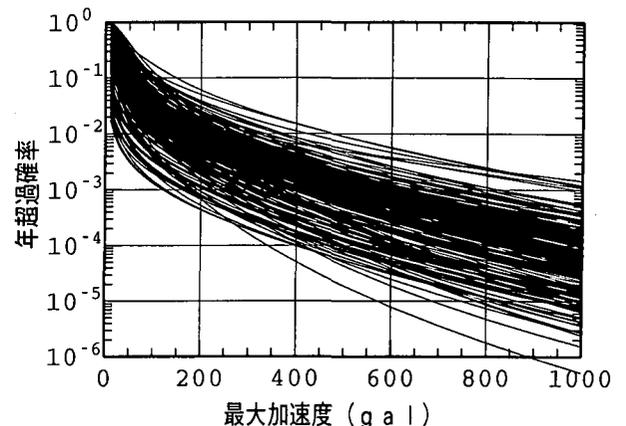


図-8 全国246地点の最大加速度に対する地震ハザード曲線の重ねがき

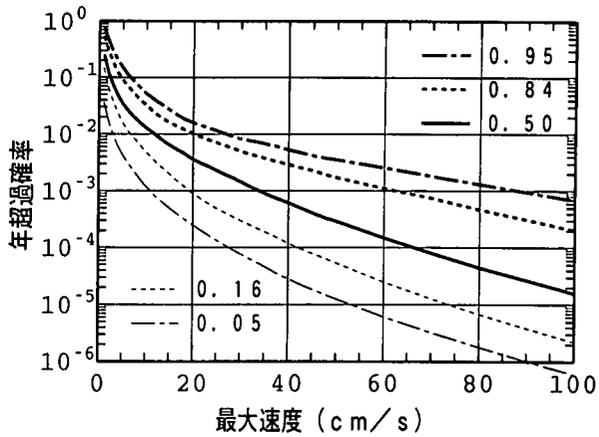
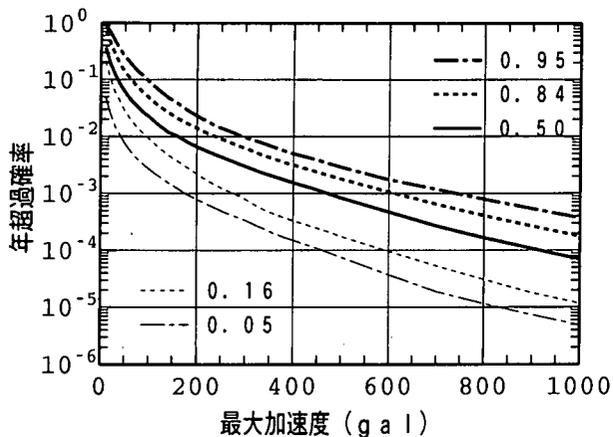


図-9 最大加速度 (左) 及び最大速度 (右) のフラクタルハザード曲線

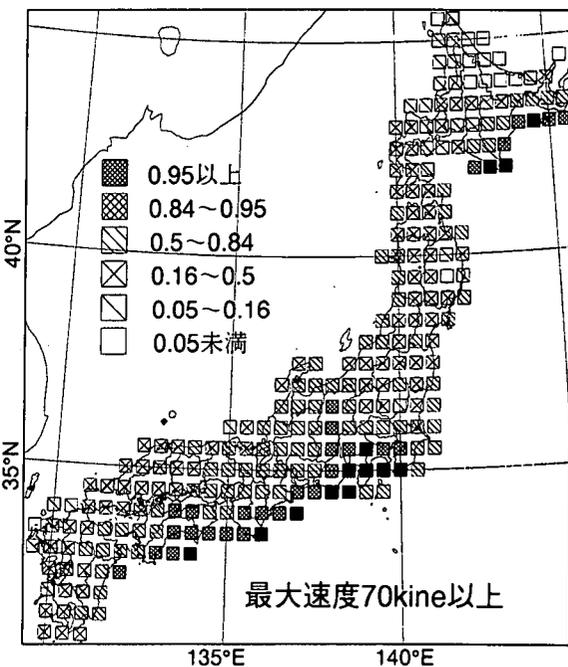
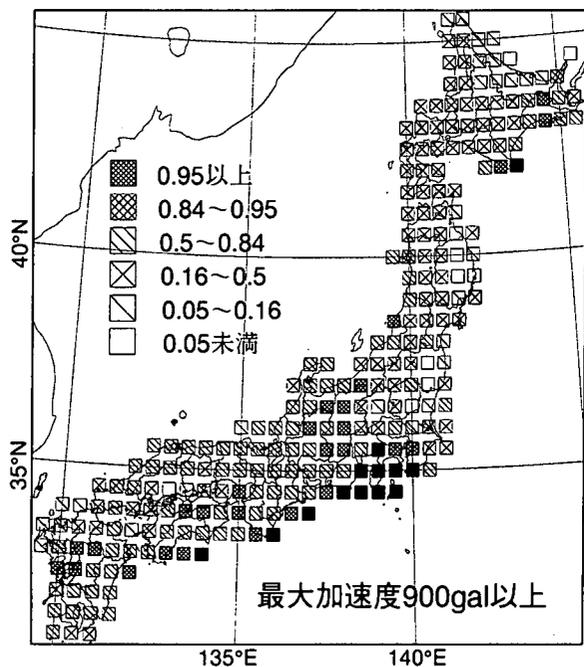
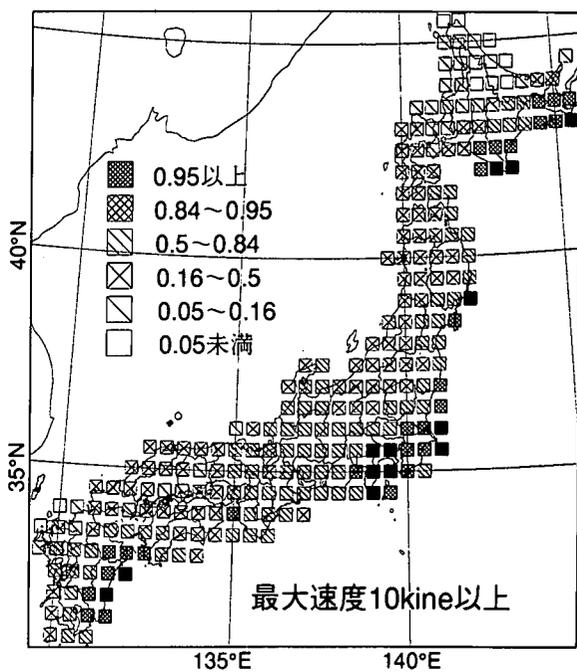
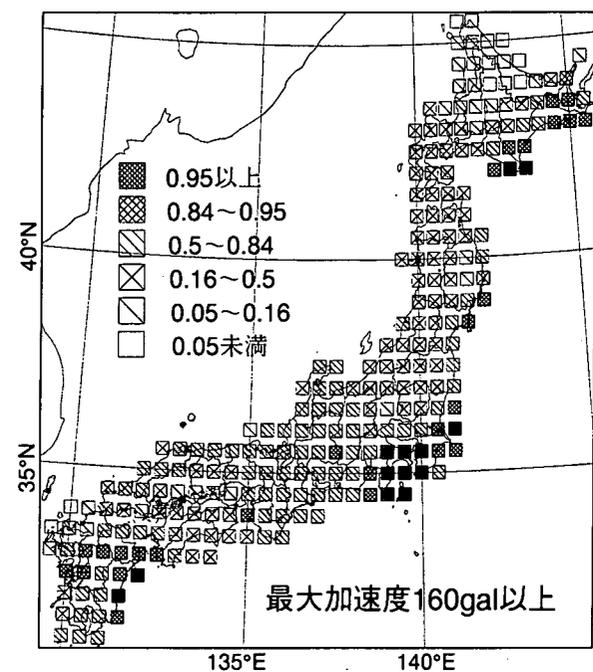


図-10 フラクタルの値で区分した最大加速度 (左側) 及び最大速度 (右側) に対する確率レベルの分布

ては、 $160\text{cm/s}^2$ 以上の場合と $900\text{cm/s}^2$ 以上の場合を、最大速度に関しては $10\text{cm/s}$ 以上の場合と $70\text{cm/s}$ 以上の場合を図示している。 $160\text{cm/s}^2$ と $10\text{cm/s}$ は図-9の0.5フラクタイル曲線の年超過確率がほぼ $10^{-2}$ のレベルであり、 $900\text{cm/s}^2$ と $70\text{cm/s}$ は0.5フラクタイル曲線の年超過確率がほぼ $10^{-4}$ のレベルである。図-10では確率レベルを6段階に区分しており、全国的に見て確率レベルが非常に高い地点（0.95以上）、かなり高い地点（0.84~0.95）、やや高い地点（0.5~0.84）、やや低い地点（0.16~0.5）、かなり低い地点（0.05~0.16）、非常に低い地点（0.05未満）に分けられている。

確率レベルが高い0.84以上の地点の分布を見ると、最大加速度 $160\text{cm/s}^2$ 以上と最大速度 $10\text{cm/s}$ 以上では、別府-島原地溝帯を除くと、大きな違いは見られない。最大加速度が $160\text{cm/s}^2$ 以上から $900\text{cm/s}^2$ 以上になると、宮城・茨城沿岸や日向灘がほとんどなくなり、四国・紀伊沿岸や中部地方などの内陸の地点が加わっている。最大速度が $10\text{cm/s}$ 以上から $70\text{cm/s}$ 以上になると、宮城・茨城沿岸や日向灘がほとんどなくなる点は最大加速度の場合と同じであるが、加わる地点はほぼ四国・紀伊沿岸に限られており、内陸で加わる地点は最大加速度に比べると限られている。

確率レベルが低い0.16未満の地点の分布では、北

海道北部が多いことは共通しているが、最大加速度が $900\text{cm/s}^2$ 以上の場合は他の3つの分布に比べ、内陸部で大陸プレート内の地震活動度が低い地域に分布する地点が比較的多くなっている。

以上は最大加速度と最大速度のハザード曲線に関する結果であるが、加速度応答スペクトルのハザード曲線については、フラクタイルの値と再現期間を指定することにより各周期の応答スペクトル加速度が決まり、それらを結ぶことで、フラクタイルと再現期間の関数として加速度応答スペクトルを求めることが出来る。5個のフラクタイルに対する再現期間別加速度応答スペクトル（減衰5%）を図-11に示す。再現期間として、30年、75年、500年、1000年、2500年の5つの期間を示している。大雑把

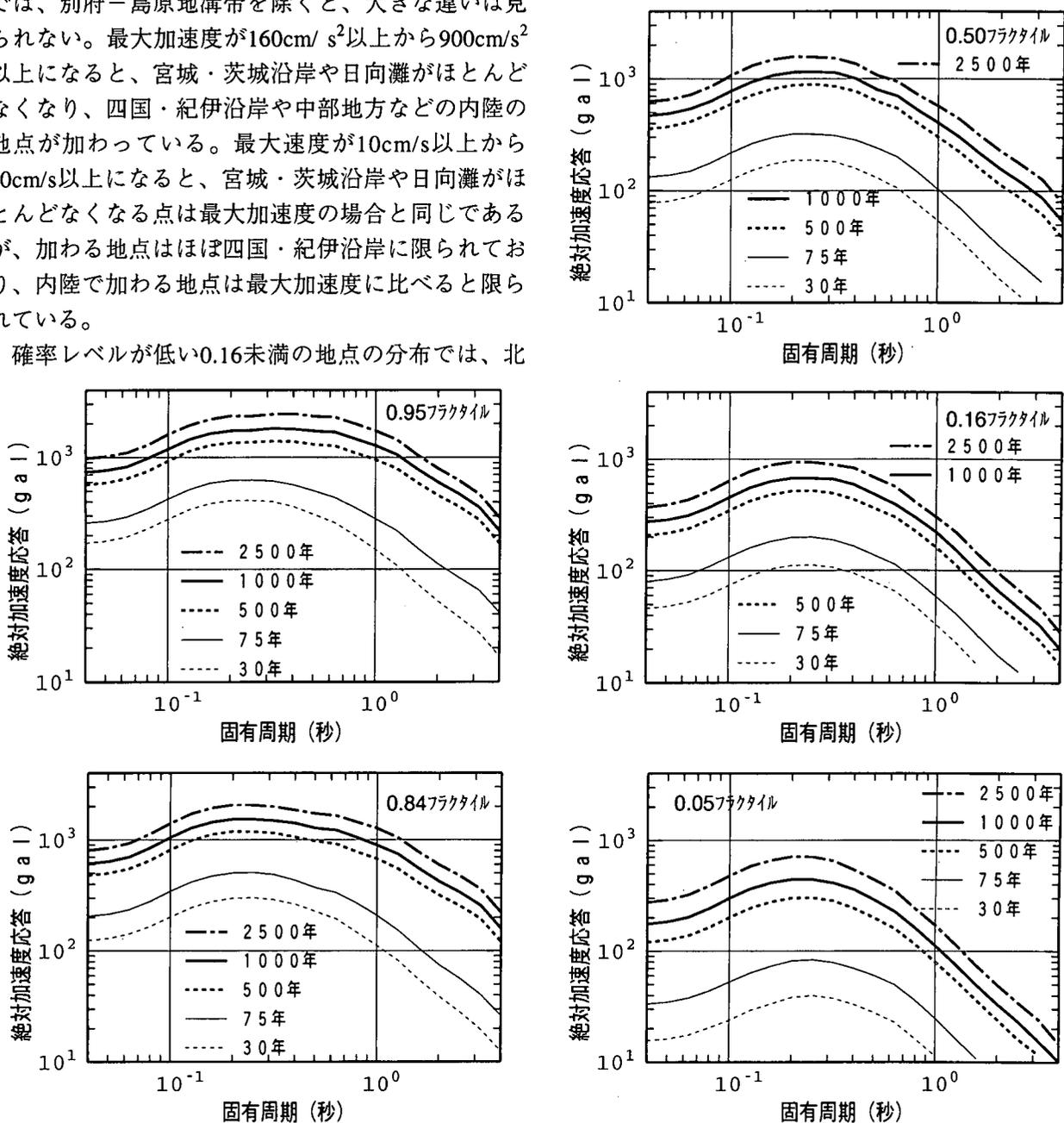


図-11 5個のフラクタイルに対する再現期間別加速度応答スペクトル（減衰5%）

には、前の2つの期間がレベル1地震動の確率レベルの候補であり、後の3つの期間がレベル2地震動の確率レベルの候補と考えられる。

供用期間を50年とした場合、再現期間30年の地震動は、レベル1地震動の定義である「供用期間内に1~2度発生する確率を有する地震動」にほぼ相当する<sup>2)</sup>。図-11で再現期間30年の周期0.04秒における応答スペクトル加速度（最大加速度）は0.95フラクタイルで171cm/s<sup>2</sup>、0.50フラクタイルで78cm/s<sup>2</sup>である。これは、日本全国の95%の領域で再現期間が30年以上である加速度が171cm/s<sup>2</sup>、50%の領域でそうなる加速度が78cm/s<sup>2</sup>であることを意味している。

レベル2地震動は、確率的に規定されていないが、1000年に1回程度が検討の目安（たたき台）ではないかと考えられる<sup>2)</sup>。図-11で再現期間1000年で0.50フラクタイルの応答スペクトルは周期0.04秒で471cm/s<sup>2</sup>、周期1.00秒で403cm/s<sup>2</sup>である。レベル2地震動の全国的な下限として、この程度の地震動あるいは短周期領域ではこれと同程度になる再現期間500年で0.84フラクタイルの地震動（周期0.04秒で480cm/s<sup>2</sup>、周期1.00秒で671 cm/s<sup>2</sup>）などが候補になると考えられる。これらは周期0.1~0.7秒程度の範囲で1000cm/s<sup>2</sup>程度の応答加速度を与える。

2つの周期（0.04秒と1.00秒）において再現期間500年で0.84フラクタイルの応答加速度値を超える地震を全国246地点で抽出し、全地震のマグニチュード相対頻度分布を比較した例を図-12に示す。短周期領域の0.04秒ではマグニチュード6.5程度以下の比較的小さな地震の寄与がかなりあるが、やや長周期側の1.00秒では、マグニチュード6.5程度以下の地震の寄与はほとんどなく、マグニチュード7.0以上の地震の寄与が支配的である。この結果は、構造物の損傷に対して影響の大きな周期帯の違いにより、影響する地震の分布が大きく変化することを示している。また、これらの分布は、図-11のような加速度応答スペクトルから模擬地震動を作成する際の位相特性を与える場合に活用することが出来る。

#### 4. あとがき

日本全国を対象とした地震発生モデル及び気象庁87型強震計記録に基づく最大地動（最大加速度と最大速度）と応答スペクトル（減衰5%）の推定式を用いて、全国246地点の地震ハザード曲線を計算した。得られた246個の地震ハザード曲線をフラクタイルハザード曲線の形で整理し、日本全国の地震危険度の統計的性質を検討した。

日本全国の地震危険度に関して共通の認識を確立していくことは、レベル1地震動とレベル2地震動

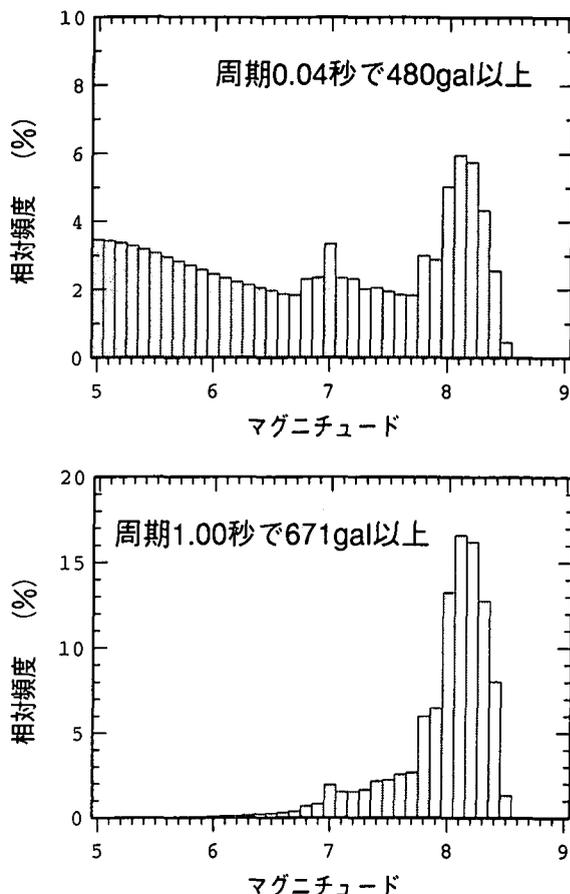


図-12 2つの周期における0.84フラクタイル再現期間500年の応答加速度値以上を生じる地震のマグニチュード分布の比較

の発生確率（再現期間）に関する社会的なコンセンサスを得ていく上で重要と考えられる。本研究はそうした試みの1つであるが、地震ハザード曲線自体の不確定性の評価や地震活動の時間依存性の考慮などについて、さらに検討する必要があるとされている。

レベル1地震動とレベル2地震動の発生確率については、本研究での結果や生涯コスト最小化等による経済的評価、従来の耐震設計で使用されてきた荷重との比較、想定地震による平均的な地震動との比較などにに基づき、意味付けが明確な確率レベルを設定していく必要があると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」, 1996.
- 2) 安中正：確率論的地震危険度解析に基づく設計用入力地震動の設定方法, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, 1999. (投稿中)
- 3) 安中正・矢代晴実：大地震の発生サイクルを考慮した日本列島の地震危険度解析モデル, 第10回日本地震工学シンポジウム, 489-494, 1998.
- 4) 安中正・山崎文雄・片平冬樹：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講演論文集, 161-164, 1997.