

確率論的地震ハザードマップの検討

龍 神 弘 明 斉 藤 芳 人
 嶋 登 志 夫^{*1} 水 谷 守^{*2}
 小 野 一 明^{*2} 矢 尾 板 啓^{*3}

要 旨

近年，地震の発生を確率論的にモデル化し，各地点の地震危険度を地震動確率で表現する確率論的地震ハザード解析が注目されている．本研究では，高速で地震ハザード評価が可能となるシステムを開発し，異なる活動モデルの影響や距離減衰式による評価結果の差異を感度解析により検討し，確率論的地震ハザード解析の特性を考察した．

その結果，１）地震ハザードは，地震活動のモデル化や使用する距離減衰式で評価結果が違ってくため，幾つかの地震活動モデルおよび距離減衰式で検討する必要があること，さらに，２）対象地点に影響を与えるシナリオ地震を抽出し，その地点ではどのような地震を考慮する必要があるのかを把握することは，設計に用いる地震動を決定するのに有用であること，また，３）同じ設計地震動でも，適用する地域によって想定している地震動の発生確率が違っていることに注目する必要があること，などのことが分かった．

キーワード 地震ハザードマップ / シナリオ地震 / 感度解析 / 寄与率 / 超過確率スペクトル

目 次

- | | |
|-------------------|---------------------------|
| １．はじめに | ４．寄与率 |
| ２．地震ハザード評価システムの概要 | ５．一様ハザード応答スペクトルと超過確率スペクトル |
| ３．感度解析 | ６．おわりに |

STUDY ON PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD MAP

Hiroaki RYUJIN	Yoshihito SAITO
Toshio SHIMA	Mamoru MIZUTANI
Kazuaki ONO	Akira YAOITA

Synopsis:

In recent years, the probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) that evaluates the hazard of seismic ground motion at a site by considering all possible earthquakes in the area attracts considerable attentions. In this paper, we developed a fast PSHA system and studied the influence of different seismic activity models and distance attenuation equations on the PSHA system. Some characters of the system are examined as follows.

1) Since different seismic activity models and distance attenuation equations lead to different PSHA results, it is suggested that PSHA on a site should be conducted with several seismic activity models and distance attenuation equations.

2) It is found that extracting all scenario earthquakes affecting a site can make a better understanding of the seismic ground motions and is also useful in earthquake load evaluation.

3) It is necessary to note that the occurrence probability of the earthquake motion differs according to the applied region, when the same design earthquake motion is used.

* 1 本店 リニューアル事業部 * 2 モダンエンジニアリングアンドデザイン * 3 システムソフト

1. はじめに

近年、地震の発生を確率論的にモデル化し、各地点の地震危険度を地震動確率で表現する確率論的地震ハザード解析が注目されている。日本国内においても多くの機関で地震ハザード評価システムが開発され、各種の地震ハザードマップも公開されはじめてきた¹⁾。

一般に、確率論的地震ハザード解析の評価結果は、対象地点において特定の期間に発生する最大の地震動強さとその超過確率を示す地震ハザード曲線の形式で表現される。地震ハザード曲線は対象地点の地震動確率の全容を示し、地震リスクを検討する際に必須となる情報をあたえる。

一方、地震ハザードマップとは、多くの地点に関する確率論的地震ハザード評価結果に基づき、例えば等確率の地震動強さの分布を地図上に示したものである。ハザードマップは「期間」、「地震動強さ」、「確率」の3つのうち2つを固定することで、残り1つの要素の空間的分布を地図上に示すものである。地震ハザードマップを利用すれば、例えば特定の超過確率といった条件のもとでの情報となるが、地震危険度の地域性を視覚的に比較することが可能となる。米国では USGS（アメリカ地質調査所）が地震ハザードマップを評価公表し、それを参照した設計用地震動の設定も行われている。

確率論的地震ハザード解析の手法自体はすでに確立されたものと考えることができるが、多地点に対して評価を実施するには多くの労力を要する。また、解析の基本的な入力条件である地震源の活動モデルについては不確実性が大きく、解析に利用する距離減衰式の選定の影響も大きいといわれている。

そこで、本研究では、高速で地震ハザード評価が可能となるシステムを開発し、異なる活動モデルの影響や距離減衰式による評価結果の差異を感度解析により検討し、確率論的地震ハザード解析の特性を考察した。

本論では、まず開発した確率論的地震ハザード評価システム（MoDUS-SH：Modern Disaster Utility Series-Seismic Hazard）の概要を述べ、本評価ツールを用いて、①地震規模の確率モデル、地震発生の時系列モデルを変更させた場合、また使用する距離減衰式の違いがどの程度地震ハザードに影響してくるかの感度解析を実施する。次いで、②地震活動域モデルの違いおよび各シナリオ地震が地震ハザードに与える影響を把握し、その地点で考慮すべき地震にはどのようなものが考えられるか検討する。さらに、③実際観測された地震波が、本システムではどのような確率で発生する地震波であったのかを示し、同じく建設省告示第1461号四項における加速度応答スペクトル（以下、告示スペクトル）がその地点でどのような確率で発生する地震動のレベルを示しているのかを日本全国で示したハザードマップ（以下、超過確率ハザードマップ）を示す。なお、今回は工学的基盤上での地震ハザード評価の検討について報告する。地盤の増幅率を考慮した表層での地震ハ

ザード評価については、またの機会に報告する。

2. 地震ハザード評価システムの概要

図-1に地震ハザード評価システムの概要を、表-1に地震活動域モデルの概要を示す。本システムは、地震データベース作成ツールと地震ハザード解析システムからなる。

2.1 地震活動域モデルの概要

地震ハザードを評価するためには、地震の年間平均発生頻度、マグニチュードの確率分布などで特徴づけられる領域や断層の集合体である「地震活動域モデル」を作成する必要がある。本手法では、歴史地震記録、活断層資料および地震地体構造区分²⁾などの既存地震関連情報をもとに、日本全国を対象に地震活動域モデルとして離散化したマグニチュードの大きさに応じて設定した固有地震（以下、シナリオ地震）を作成し、地震データベースを構築した。このような離散化モデル³⁾を使用する事等により、地震ハザードマップ等の評価の高速化を実現させた。

(1) 地震活動域モデル

地震活動域は、①プレート境界地震領域（特定のプレート境界地震領域（東海～南海地震、関東地震）を含む）、②内陸の活断層⁴⁾、③バックグラウンド地震領域の3種類にモデル化した。

プレート境界地震領域およびバックグラウンド地震領域では、シナリオ地震を緯度経度ともに 0.1° （約10km）間隔で配置している。ただし、特定のプレート境界地震領域に関しては対象領域に、活断層はマグニチュードに応じた矩形断面として、適宜配置した。なお、全シナリオ地震数は26,635個となった。

シナリオ地震の地震規模の確率モデル、地震発生の時系列モデルは、それぞれ以下のようにモデル化している。

(2) 地震規模の確率モデル

内陸の活断層では固有の地震規模モデル、特定のプレート境界地震は一様分布、その他は地震カタログ（宇津カタログ、宇佐美カタログ、気象庁カタログ（2000年））より算出したb値モデルに従い最大地震の規模をカタログの最大マグニチュード+0.1とし、モデル化している。

(3) 地震発生の時系列モデル

特定のプレート境界地震および前回の活動時期が推定できる活断層では、平均活動間隔と最新活動時期を考慮できる再生過程⁵⁾としている。また、前回の活動時期が不明な活断層、プレート境界地震およびバックグラウンド地震は定常ポアソン過程としてモデル化している。

2.2 地震ハザード解析システムの概要

(1) 距離の確率モデル

地震活動域にマグニチュードによって大きさが変化する地震断層面を配置し、評価対象地点から各断層面までの

最短距離としてモデル化している。

(2) 地震動強さの確率モデル

距離減衰式には安中式⁶⁾を用い、式に含まれるばらつきは対数正規分布でモデル化している。

(3) 地震ハザード曲線の算定法

対象地点における地震動の強さが α を超える年間平均超過確率は、定常ポアソン過程と仮定し、次式で求めることができる。

$$P(\alpha) = 1 - \exp(-N(\alpha)) \quad \text{式 (1)}$$

$$N(\alpha) = \sum v_i F(\alpha)_i \quad \text{式 (2)}$$

$$F(\alpha)_i = \int_{\alpha} f_A(a | m_i, x_i) da \quad \text{式 (3)}$$

$P(\alpha)$: 地震動の強さが α を超える年間平均超過確率
 $N(\alpha)$: 地震動の強さが α を超える年間平均発生頻度
 v_i : シナリオ地震 i の年間平均発生頻度
 $F(\alpha)_i$: $M=m_i, X=x_i$ の条件での地震動の強さが α を超える条件付き確率
 $f_A(a | m_i, x_i)$: $M=m_i, X=x_i$ の条件での地震動の強さの確率密度関数

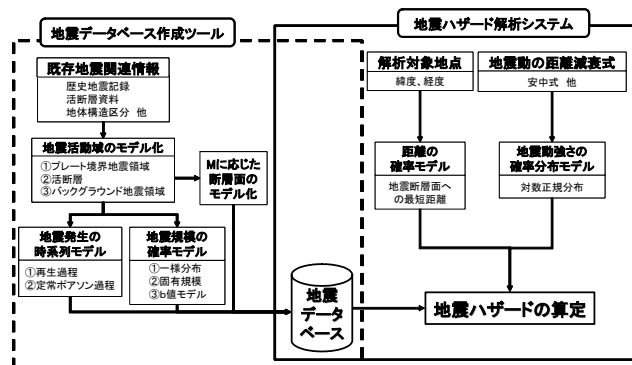


図-1 地震ハザード評価システムの概要

表-1 地震活動域モデル化の概要

地震活動域モデル	活断層	特定のプレート境界地震	プレート境界地震	バックグラウンド地震
データベース	活断層調査結果*1)	過去の地震データ		
地震規模の確率モデル	固有規模	一様分布	b値モデル	b値モデル
位置	活断層調査結果	地震地体構造及び過去の地震データ		
地震発生時系列モデル	再生過程*2) および定常ポアソン過程	再生過程 または定常ポアソン過程	定常ポアソン過程	定常ポアソン過程

*1) 調査結果より値が直接求められない場合には他の諸元より経験式を用いて評価する

*2) 前回の活動時期が不明の場合には、定常ポアソン過程とする

3. 感度解析

前述の通り地震源の活動モデルの設定には多くの不確定性要素があり、どのようにモデル化するか、または用いる距離減衰式によって、地震ハザード評価の結果は異なってくると言われている。そこで、活動域モデルや距離減衰式の違いが、どの程度地震ハザードに影響を与えるのかを

把握することは、本システムを利用するにあたり大変有益な資料となる。また、地震活動域のモデル化を行うに際し、地震ハザードに影響を与える項目は注意深く設定する必要がある。

本章では表-2に示した4つのモデルで感度解析を実施し、モデルの違いによる地震ハザードへの影響がどの程度あるのか把握することを目的としている。

地震規模の確率モデルを設定する際の最大地震の規模を全カタログから割り付けられた地震の最大マグニチュード+0.1とし、距離減衰式には安中式を、時系列モデルには定常ポアソン過程を用いたMODEL1を基本モデルとする。また、地震規模の確率モデル、時系列モデルおよび距離減衰式を変更したモデルをそれぞれMODEL2、MODEL3、MODEL4とする。ただし、地震規模の確率モデルはb値モデルでモデル化しているプレート境界地震（特定のプレート境界地震を除く）とバックグラウンド地震、時系列モデルは再生過程のあるシナリオ地震のみが変更となっている。

図-2にMODEL1～MODEL4の50年間の超過確率が5%となるPGV（最大速度）の地震ハザードマップを示す。

表-2 解析モデル

	地震規模の確率モデル	時系列モデル	距離減衰式
MODEL1	全カタログ Mmax+0.1	定常ポアソン過程	安中式
MODEL2	気象庁カタログ Mmax+0.1	定常ポアソン過程	安中式
MODEL3	全カタログ Mmax+0.1	再生過程	安中式
MODEL4	全カタログ Mmax+0.1	定常ポアソン過程	司・翠川式

3. 1 地震規模の確率モデルによる比較

b値モデルの最大地震の規模を気象庁カタログより割り付けられた地震の最大マグニチュード+0.1としたモデルをMODEL2とする。距離減衰式、時系列モデルは基本モデルと共通である。ただし、MODEL1で気象庁カタログから最大マグニチュードが決まっている地震活動域は、MODEL2と同じ地震規模の確率モデルとなっている。

2つの地震ハザードマップを比較するとMODEL2に比べMODEL1は、北海道南東および東北の太平洋側の地震ハザードが大きくなっている。この地域は特定のプレート境界地震および活断層の影響が小さく、地震カタログ最大マグニチュードが気象庁カタログではなく宇佐美カタログあるいは宇津カタログによって決まっているところである。

3. 2 時系列モデルによる比較

時系列モデルを、再生過程にしたモデルをMODEL3とする。地震規模の確率モデル、時系列モデルは基本モデルと共通である。

50年間の再生過程では、中部地方で糸魚川ー静岡構造線、四国地方で中央構造線の影響が明確に見られ、関東、東海地方で定常ポアソン過程による評価(MODEL1)より地震ハ

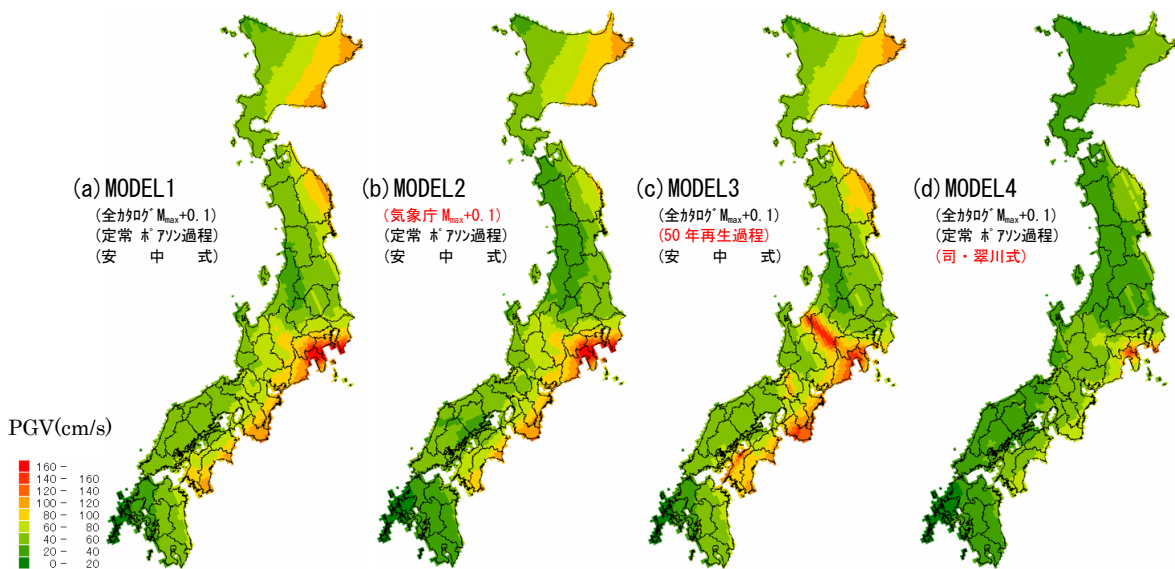


図-2 地震ハザードマップ（工学的基盤）

ザードが小さくなっている。これは、糸魚川－静岡構造線や中央構造線では、50 年再生過程を考慮した時の年間平均発生頻度が定常ポアソン過程より大きく、一方、特定のプレート境界地震である関東地震では、50 年再生過程を考慮した時の年間平均発生頻度が定常ポアソン過程より小さいモデルとなっているためである。

3. 3 距離減衰式による比較

距離減衰式に司・翠川式⁷⁾を用いたモデルを MODEL4 とする。地震規模の確率モデル、時系列モデルは基本モデルと共通である。司・翠川式より安中式で評価した方が全国的に高い値を示している。

また、図-3 に 2 つの距離減衰式で震源深さを 10km と固定した場合の M6 と M7 の震源距離と最大速度の関係を示す。これからも安中式の方が大きな値を示すことがわかる。このように使用する距離減衰式によって地震ハザードの値が変わってくることに注意する必要がある。

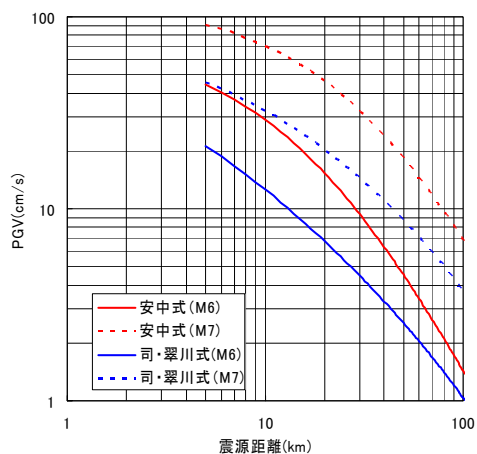


図-3 距離減衰式比較

4. 寄与率

4. 1 地震活動域による寄与率

図-4 に地震活動域モデルに上記の基本モデルを採用した場合の札幌、東京、静岡、名古屋、大阪、福岡の 6 地点での地震ハザード曲線を示す。また、表-3 に示す地震活動域モデルごとの地震ハザード曲線を合わせて示した。さらに図-5 に各地震活動域モデルごとの地震ハザードマップ（50 年間の超過確率が 5%となる PGV）を示し、各地における各地震活動域モデルの影響度を確認した。

札幌ではプレート境界地震が、東京、静岡では特定のプレート境界地震が、名古屋、大阪、福岡では活断層が地震ハザードに大きな影響を与えている。また、各地とも小さな速度ではプレート境界地震やバックグラウンド地震の影響が大きい。例えば福岡では 40cm/s まではプレート境界地震が、それ以上になると活断層が最も地震ハザードに影響を与えている。

以上のように、地震ハザード曲線からはその地点の地震動確率の全体像を読みとることができるが、多くの地点で参照することは難しい。一方、図-5 の地震ハザードマップでは、特定のプレート境界地震として、東海～南海地震、関東地震をモデル化しているため、関東地方南部～四国地方においてその影響が、糸魚川－静岡構造線がある中部地方では活断層の影響が、比較的大きなプレート境界地震が多い北海道、東北地方ではプレート境界地震の影響が大きいことが読みとれる。

表-3 地震活動域モデル

全モデル	全地震活動域モデル
特定地震	特定のプレート境界地震
活断層	内陸の活断層
プレート境界	特定のプレート境界地震を除く
バックグラウンド	バックグラウンド地震

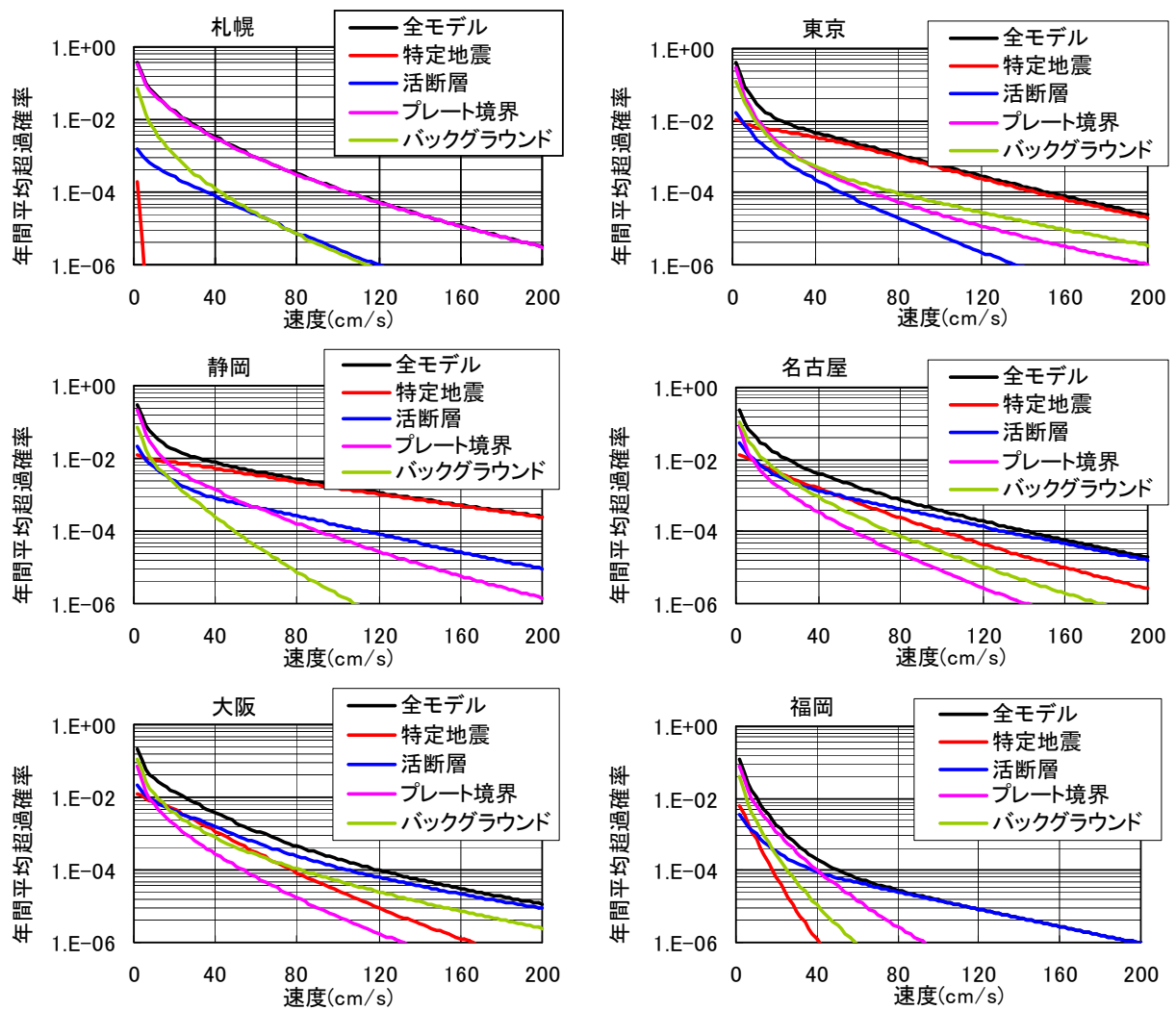


図-4 各地における地震ハザード曲線（工学的基盤）

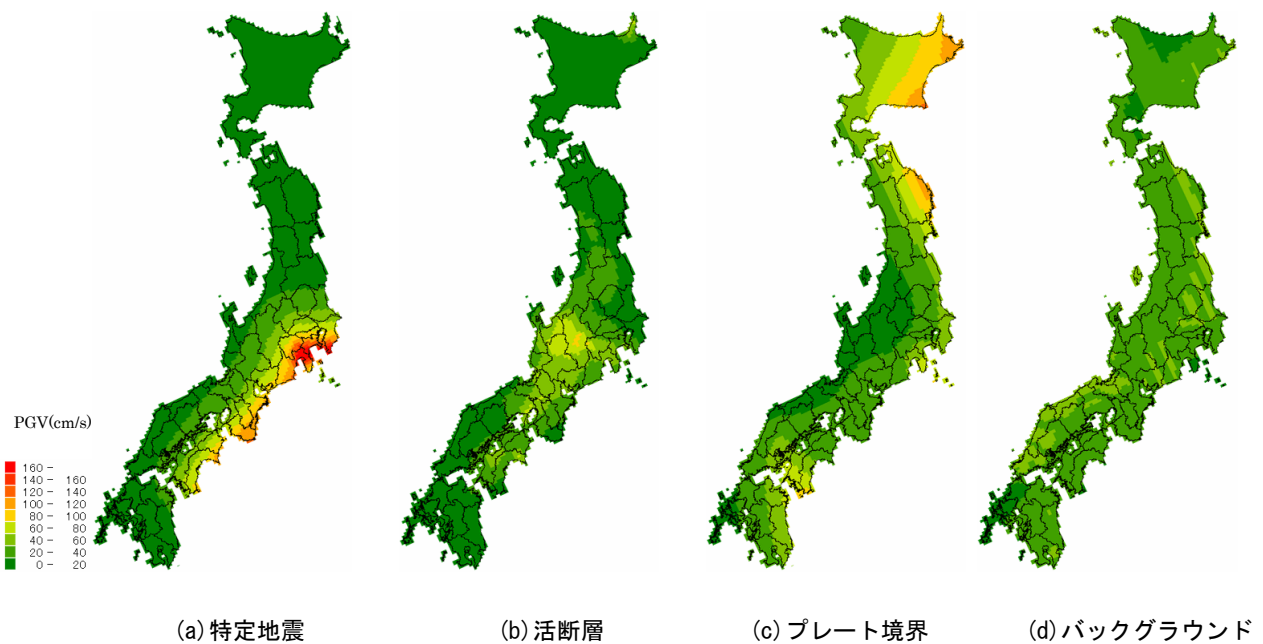


図-5 地震ハザードマップ（工学的基盤）

4. 2 シナリオ地震による寄与率

ここでは、ある地点でどのようなシナリオ地震が地震ハザードに大きな影響を与えているかを把握する。このことは、設計用地震動を考える際にどのような特徴の地震動を設定すれば良いかを検討する際の目安となり得る。例えば、震源距離が遠くてもマグニチュードの大きな地震を想定するのか、あるいはマグニチュードが小さくても震源距離が近い地震を想定するのか、などのような検討資料となり得る。

図-6 に MODEL1 の東京、大阪での 50 年間の超過確率が 5% となる PGV (東京: 84cm/s, 大阪: 74cm/s) のハザードに与える寄与率が上位のシナリオ地震のマグニチュードと震源への最短距離の関係および年間平均発生頻度と地震動が PGV を超える確率の関係を示す。ここで、寄与率は以下のように定義する。

$$\text{シナリオ地震 } i \text{ の寄与率} = \frac{v_i \cdot F(\alpha)_i}{\sum v_i \cdot F(\alpha)_i} \quad \text{式 (4)}$$

ここで、

- v_i : シナリオ地震 i の年間平均発生頻度
- $F(\alpha)_i$: シナリオ地震 i によって地震動が α を超える確率
- $v_i \cdot F(\alpha)_i$: シナリオ地震 i によってあるサイトの地震動が α を超える年間平均発生頻度

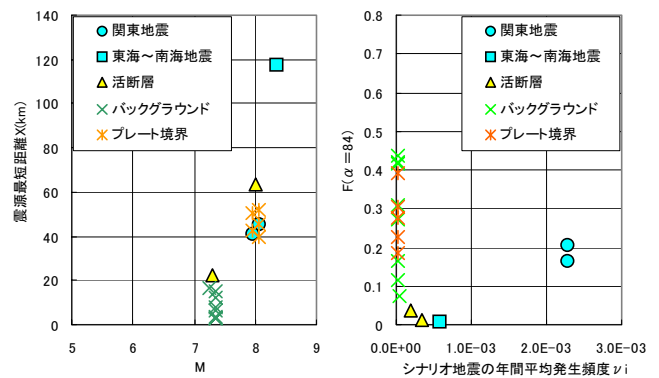
寄与率の高い順番に累積し、全体の 95% を超えるまでのシナリオ地震を抽出し、以下の検討に用いる。

東京では、M7 強、震源距離 10km 程度のバックグラウンド地震、M8 程度、震源距離 50km 程度の関東地震を含むプレート境界地震、M8 強、震源距離 120km 程度の東海～南海地震の寄与率が高い。同じく、大阪では M7 強、震源距離 20km 程度の活断層およびバックグラウンド地震、M8 強、震源距離 100～120km 程度の東海～南海地震の寄与率が高い。また、年間平均発生頻度 v_i とシナリオ地震 i によって地震動が α を超える確率 $F(\alpha)_i$ の関係より、距離が離れた震源でも年間平均発生頻度の高いシナリオ地震は寄与率が高いことがわかる。

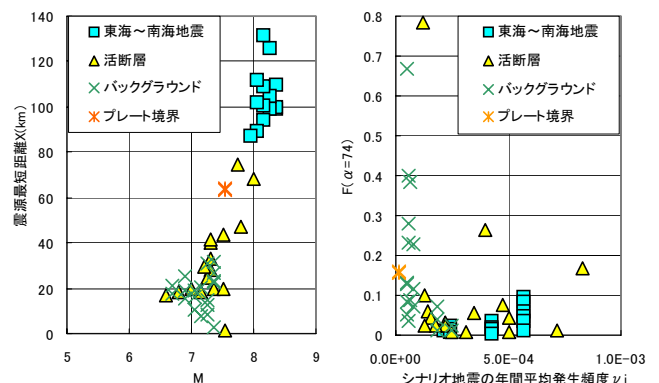
図-7 は主要 8 都市で 50 年間の超過確率が 5% となる PGV に寄与するシナリオ地震を特定のプレート境界地震、活断層、バックグラウンド地震およびプレート境界地震に分類し、その比率を示したものである。この図より、本地震活動モデルでは、札幌、仙台、福岡ではプレート境界地震が、東京、静岡では特定のプレート境界地震が、名古屋、大阪、神戸では活断層が最も地震ハザードに寄与していることがわかる。

5. 一様ハザード応答スペクトルと超過確率スペクトル

地震が起きたとき、マグニチュードがいくつで、ある地域では震度がどれくらいであったという情報は容易に入手することができるが、実際その地震は稀に起こる地震だったのか、あるいはしばしば起こる地震であったのかの情報は入ってこない。そこで本章では、安中式を使って 5%



(a) 東京



(b) 大阪

図-6 シナリオ地震の $M-X$, $v_i - F(\alpha)_i$ 関係

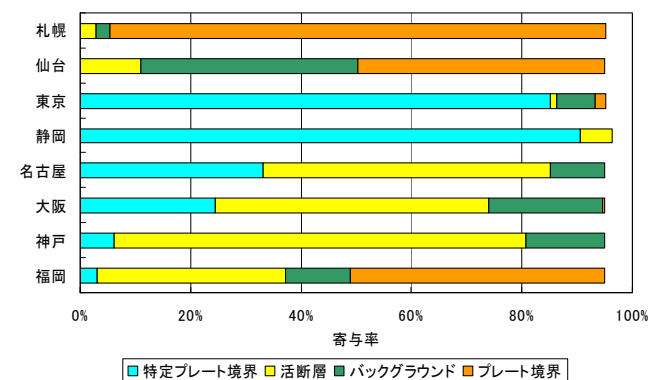


図-7 50 年間の超過確率が 5% となる PGV への寄与率

加速度応答スペクトルで周期毎に等確率に発生する応答値を結んだ一様ハザード応答スペクトル⁸⁾を作成し、まず、実地震波を用い、それがどれだけの発生確率をもった地震波であったかを検討してみる。検討には JMA 神戸 (1995 年) と八戸港湾 (1968 年) の水平成分 2 方向の記録を用いて計算した 2 次元応答スペクトル (5%減衰) を用いた。ただし、一様ハザード応答スペクトルは確率論的に応答スペクトルを規定したもので、一般にはそのような地震波は存在しないことに注意する必要がある。

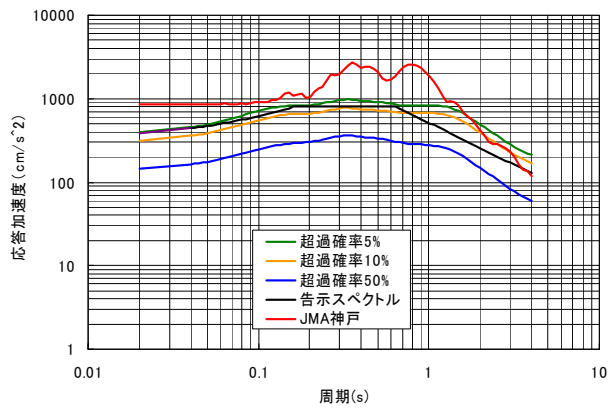


図-8 一様ハザード応答スペクトル(神戸)

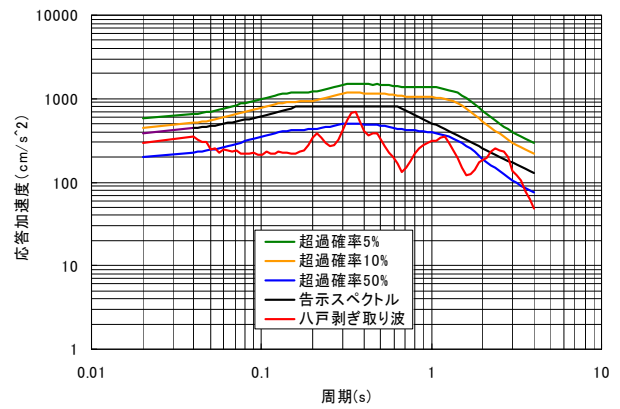


図-9 一様ハザード応答スペクトル(八戸)

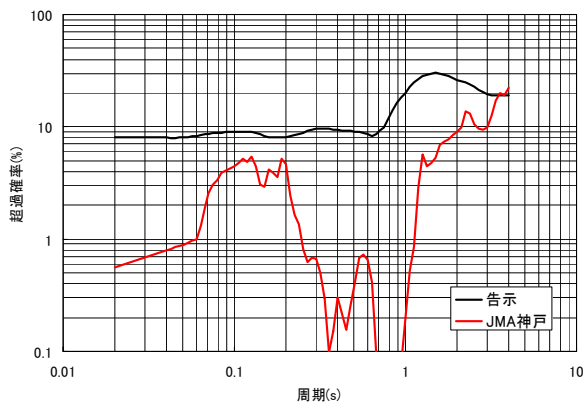


図-10 超過確率スペクトル(神戸)

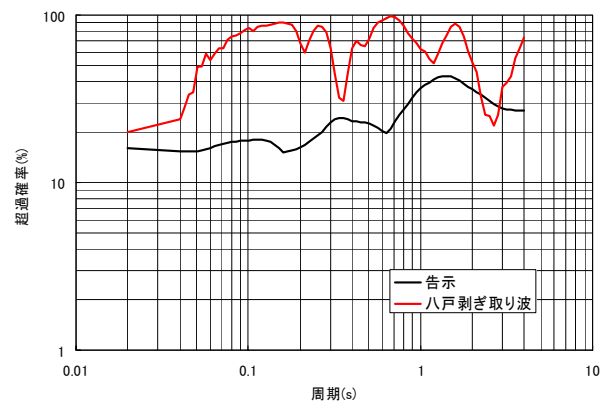
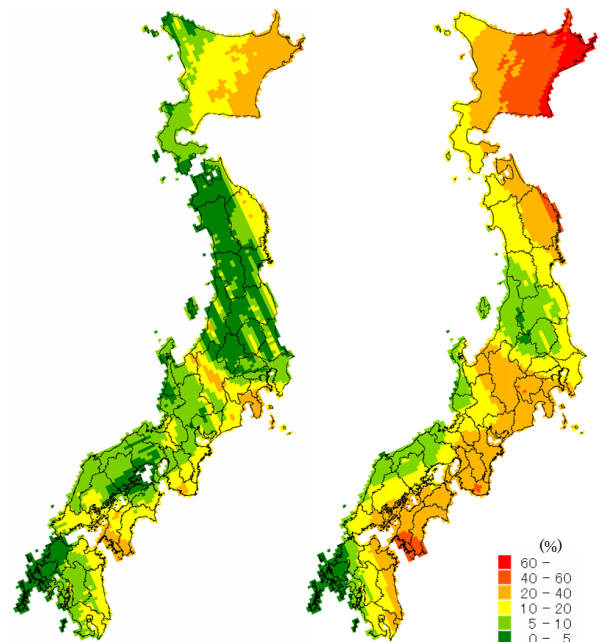


図-11 超過確率スペクトル(八戸)

図-8、図-9に神戸、八戸の一様ハザード応答スペクトルを図-10、図-11に超過確率スペクトルを示す。これよりJMA 神戸は、ほとんどの周期帯域で超過確率5%以下の極希に起きる地震、八戸港湾は、ほとんどの周期帯域で超過確率50%を超える地震であることがわかる。

次に、確率論的に考えると現在設計用スペクトルとして用いられている告示スペクトルは、図-10、図-11より、神戸では超過確率10%程度の地震であるが、八戸では超過確率20%の地震となっている。このように同じスペクトルでも地域によって異なった発生確率の地震動を想定していることになる。そこで、周期0.2秒および1.0秒の周期帯で告示スペクトルがどのような超過確率をもった地震動を想定していることになるかを、図-12に示す超過確率ハザードマップで示す。なお、超過確率は令第88条第1項に規定されている地域係数 Z を考慮したスペクトル値に基づいて算出している。

周期0.2秒では全国的に超過確率5~10%程度の地震動となっており、北海道南東や活断層、特定のプレート境界地震がある付近では超過確率が高くなっている。また、1.0秒では0.2秒に比べて超過確率が高くなり20%~60%の超過確率の地震動を示していることになる。



(a) 周期0.2秒

(b) 周期1.0秒

図-12 超過確率ハザードマップ

6. おわりに

本報告では作成した「地震ハザード評価システム」を基に検討した結果、以下のようなことがわかった。

1) 地震ハザードは、地震活動のモデル化や使用する距離減衰式で評価結果が違ってくる。地震ハザード評価を行う際に一つの地震活動モデルや距離減衰式から評価することには注意が必要であり、幾つかの地震活動モデルおよび距離減衰式で検討する必要がある。

2) 対象地点に影響を与えるシナリオ地震を抽出し、その地点ではどのような地震を考慮する必要があるのか把握することは、設計に用いる地震動を決定するのに有用である。

3) 告示スペクトルで作成した同じ設計地震動でも、適用する地域によって想定している地震動の発生確率が違っていることに注目する必要がある。

今後、表層地盤の増幅特性も考慮し、用地選定における地震ハザードマップの検討や設計用の地震動の検討に、本システムを利用していく。

参考文献

- 1) 例えば、独立法人防災科学技術研究所：確率論的地震動予測地図作成手法の検討と試作例，防災科学技術研究所研究資料第 236 号，2002
- 2) 萩原尊禮：日本列島の地震，鹿島出版，1991.
- 3) S. Yoshida, Y. Imazuka, M. Mizutani : Seismic Risk Assessment Procedures for a System consisting of Distributed Facilities -part two- Seismic Hazard Modeling , ICSSAR' 01, 2001.
- 4) 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評価の研究，地震保険調査研究47，2000.
- 5) 奥村俊彦，石川裕，亀田弘行：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論文集，pp. 49-56，1997.
- 6) Annaka, T. and Y. Nozawa , A probabilistic model for seismic hazard estimation in the Kanto district: Proc. 9th WCEE, II-107-II-112, 1988.
- 7) 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, pp. 63-70, 1999.
- 8) U.S. Nuclear Regulatory Commission: Identification and characterization of seismic sources and determination of safe shutdown earthquake ground motion, Regulatory Guide 1.165, 1997.