

最新の地震情報と連動した地震ハザード解析システムの開発

萩原由訓 野畑有秀
若松邦夫 吉田伸一

(本社原子力本部技術部)

Development of Seismic Hazard Analysis System with Latest Seismic Information

Yoshinori Hagiwara Arihide Nobata
Kunio Wakamatsu Shinichi Yoshida

Abstract

The Headquarters for Earthquake Research Promotion (HERP) publicizes the latest seismic information about active faults and subduction earthquakes in and around Japan. Thus, the authors have developed a seismic hazard analysis system based on seismic source models, which are easily upgraded to new models based on the latest information from HERP. The system uses a set of scenario earthquakes for seismic source models to easily renew these models. Uncertainties in the information are considered when these models are renewed.

This paper reports this new seismic hazard system and an analysis result.

概要

地震調査研究推進本部により主要な活断層や海溝型地震に関する最新の地震情報が数多く公表されている。そこで、日本全域および周辺海域の地震をモデル化し、そのモデルを推本の最新の地震情報によって容易に更新できる地震ハザード解析システムの開発を行っている。本解析システムは、地震モデルの更新を容易に行うために地震モデルとしてシナリオ地震データセットを用いている。また、地震モデルを更新する際、最新の地震情報に含まれる不確実性を考慮に入れたモデルとしている。

本報では、本解析システムの概要を述べるとともに、本解析システムを用いた解析例を報告する。

1. はじめに

耐震設計法の性能規定化に伴い、設計用地震荷重は要求される性能を検討するために、従来以上に細かく設定することが必要になってきており、それらがどの程度の確率で生じるかを定量化して示すことが求められてきている。そのため、建設地点において設定すべき地震動の強度とその発生確率を評価するための地震ハザード解析システムが重要となっている。また、近年の不動産の証券化に関連して必要とされる構造物の確率的損傷評価や建物のPML評価においても、想定される地震動強さとその発生確率を示す必要があり、この分野においても地震ハザード評価の重要性が増していくことが予想される。

現在、文部科学省に設置された地震調査研究推進本部(The Headquarters for Earthquake Research Promotion)(以下、推本またはHERP)により主要な活断層や海溝型地震(プレートの沈み込みに伴う地震)の活動間隔、最新の活動時期、次の地震の発生可能性[場所、規模(マグニチュード)及び発生確率]等の評価が行われており、これらの地震情報はインターネット等で公表され随時更新されている。一方、日本全域および周辺海域を地震活動によりいくつかの地震域にモデル化し、このモデルと活断層データとを組み合わせた地震ハザード解析は、以前から行われてきた。しかし、これらの地震ハザード解析シ

ステムではシステム完成時に地震のモデルが固定されてしまうため、その後最新の地震情報に対応することができない。

そこで本研究では、日本全域および周辺海域で発生する地震をモデル化し、そのモデルを最新の地震情報によって容易に更新することのできる地震ハザード解析システムの開発を行っている。本報は、この解析システムの概要を報告するものである。まず地震ハザード解析の手法について述べ、最後にこれを用いた解析例を示す。

2. 推本の地震情報

推本は、主要な活断層や海溝型地震の活動間隔、次の地震の発生可能性[場所、規模及び発生確率]等を評価し、随時ホームページ¹⁾などで公表している。平成15年6月13日現在、主要98断層帯のうち37断層帯、海溝型地震のうち南海トラフの地震(東南海・南海地震)、三陸沖から房総沖にかけての地震(宮城県沖地震を含む)および千島海溝沿いの地震について評価をまとめ公表している。

98断層帯については、断層位置の2端点(および断層が屈曲している場合はその屈曲点)の緯度経度、断層幅、過去の活動時期、平均活動間隔、想定される地震規模などが公表される。Fig. 1に公表された断層の一例を示す。

一方、海溝型地震は、それぞれの地震の評価対象領域

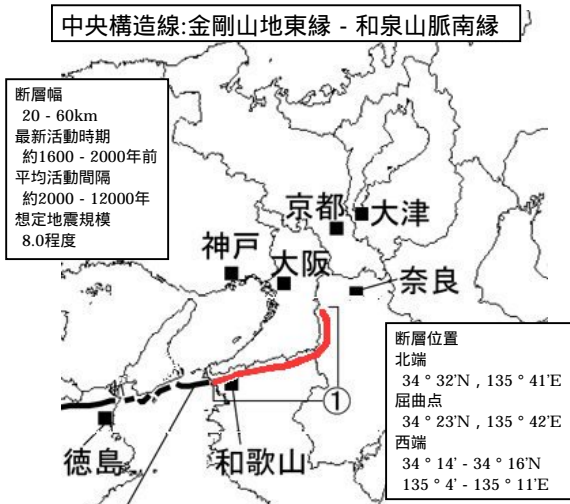
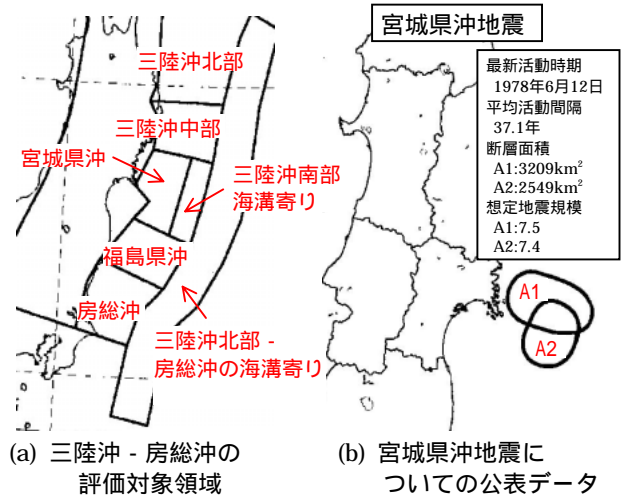


Fig. 1 98断層帯公表例(推本¹⁾に加筆)
Example of Seismic Data by HERP(98faults)



(a) 三陸沖 - 房総沖の評価対象領域 (b) 宮城県沖地震についての公表データ
Fig. 2 海溝型地震公表例(推本に加筆)
Example of Seismic Data by HERP (Subduction Earthquakes)

図(Fig. 2(a))および想定震源域図(Fig. 2(b)),並びに断層面積等が公表される。これに加え98断層帯と同様に過去の活動時期,平均活動間隔,想定地震規模も公表される。

ただし,主要な活断層や海溝型地震においても,現実には各々の断層の地震情報が完全には分からない場合があり,“不明”として公表されることもある。

これらの推本による最新の地震情報を考慮した地震ハザード解析システムについて,3章以降にその概要を報告する。

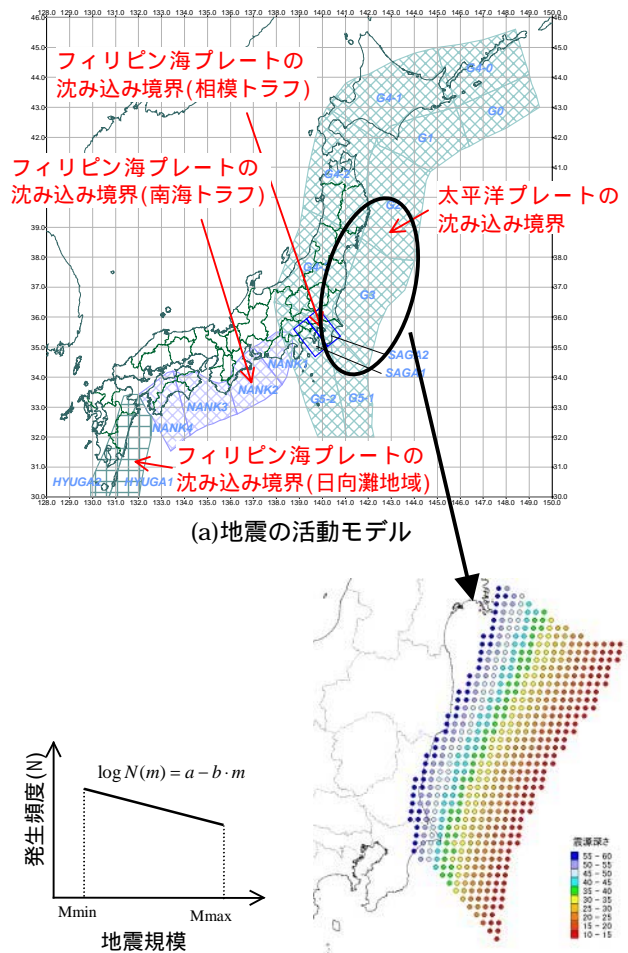
3. 地震のモデル化

3.1 震源モデル

前章で示した最新の地震情報により,ハザード解析に用いる震源モデルの変更・追加を容易に行うためには,代表的な震源域や断層を個々にモデル化し,それらの集合体によって,最終的には全国をカバーできるようなシナリオ地震群を震源モデルとして用いるのが適切である。そこで本解析システムにおいてはYoshida et al.²⁾の提案しているシナリオ地震群を震源モデルとして用いることとした。このシナリオ地震群は,地体構造等³⁾を参考に以下の3の震源タイプを考慮して構築されている。

- 海溝型地震の震源
- 内陸の起震断層
- バックグラウンド震源

は, Fig. 3(a)に示されるように,各プレート(太平洋プレート,フィリピン海プレート)の沈込み境界(相模トラフ,南海トラフ,日向灘地域)で発生する地震の活動モデルであり, Fig. 3(c)のように深さ方向に傾斜する面で領域が規定されており,その領域内では空間的に一様に地震が発生し,発生する地震の規模はFig. 3(b)に示すいわゆるb値モデルに従うモデルである。は, Fig.



(a)地震の活動モデル (b) 地震規模のモデル (c) 断層位置のモデル
Fig. 3 震源モデルの例(海溝型地震)
Example of Seismic Source Model (Subduction Earthquake)

4に示される松田他⁴⁾による263の起震断層の地震活動モデルであり、地震の発生は、松田他の表に記載された地震規模と断層の活動度より推定された再現年で評価するいわゆる固有規模モデルとしてモデル化されている。は地殻内地震であり、松田の起震断層以外で、震源を特定できない地震を対象としたモデルである。Fig. 5に示すような地体構造区分でモデル化され、発生する深さは10km、発生する地震の規模は と同様b値モデルである。本解析システムは、このモデルをベースとして、最新の地震情報の知見に基づき逐次震源のモデル化を変更していくことを考えている。

3.2 地震発生の時系列モデル

地震の発生を取り扱う場合、その発生メカニズムはいまだ解明が十分とはいえず、将来を正確に予測することはできない。このような場合、過去に発生した地震を統計的に処理し、それをもとにポアソン過程や対数正規分布、Brownian Passage Time分布(以下、BPT分布)といった統計モデルに適合させ、確率的に評価することが有効な方法である。

以前より地震発生の時系列モデルとして、統計的解釈が容易である対数正規分布が用いられているが、この分布を用いた場合平均活動間隔を大きく経過すると、地震発生確率が顕著に下がり始めるという欠点がある。そのため本解析システムでは、推本⁵⁾に倣い時系列モデルとしてBPT分布およびポアソン過程を用いる。

ここで、地震が起こる時刻を t_0, t_1, t_2, \dots とする。この時、地震発生間隔 $T_1 = t_1 - t_0, T_2 = t_2 - t_1, \dots$ がお互いに独立で、同一の指数分布に従う場合をポアソン過程という。一方、プレート運動による定常的な応力蓄積過程において、着目する震源域周辺での地震の発生などブラウン運動として表現される応力場の擾乱が加わる中で、応力蓄積が一定値に達し、断層が活動するという物理過程を踏まえたモデルをBPT分布といい、ポアソン過程に比べると物理的解釈が理解しやすいという特徴がある⁵⁾。

これら二つの時系列モデルを用いて、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 ΔT 年以内に地震が発生する確率 $P(T, \Delta T)$ を表すと、以下の式ようになる。

$$\text{ポアソン過程: } P(T, \Delta T) = 1 - e^{-\Delta T / \mu} \quad (1)$$

ただし、 μ は分布の平均(地震の平均活動間隔)

$$\text{BPT分布: } P(T, \Delta T) = 1 - \phi(T + \Delta T) / \phi(T) \quad (2)$$

ただし、

$$\phi(t) = 1 - \left[\Phi(u_1(t)) + e^{2/\alpha^2} \Phi(-u_2(t)) \right]$$

$$\Phi(z) \equiv 1 / (2\pi)^{1/2} \int_{-\infty}^z e^{-u^2/2} du$$

$$u_1(t) = \alpha^{-1} \left[t^{1/2} \mu^{-1/2} - t^{-1/2} \mu^{1/2} \right]$$

$$u_2(t) = \alpha^{-1} \left[t^{1/2} \mu^{-1/2} + t^{-1/2} \mu^{1/2} \right]$$

μ は分布の平均(地震の平均活動間隔)

α は変動係数(再現期間のばらつき)

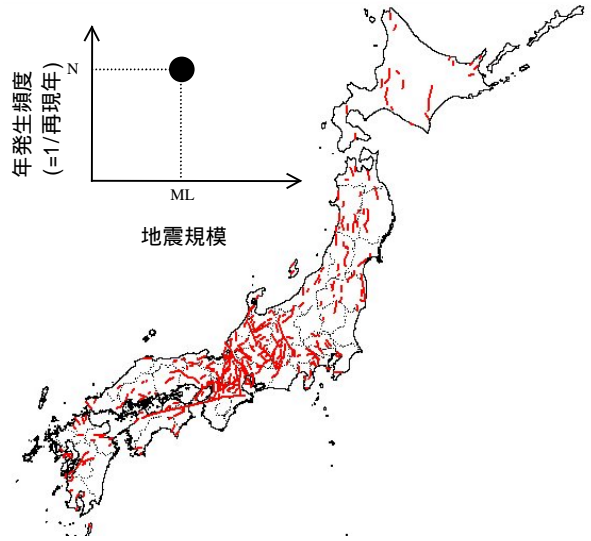


Fig. 4 起震断層モデル
Active Faults Model

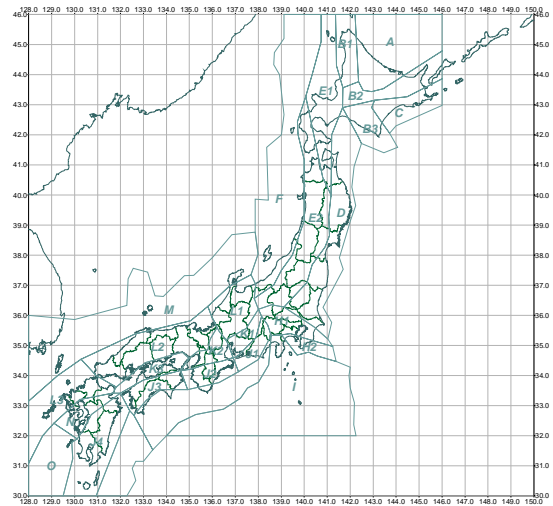
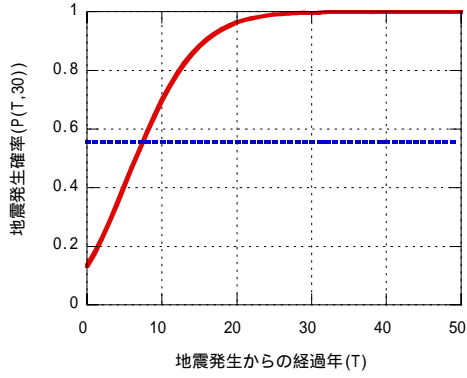
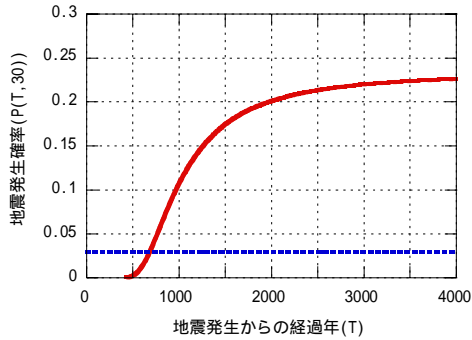


Fig. 5 バックグラウンド震源
Background Earthquake

Fig. 6にポアソン過程とBPT分布における、今後30年以内の地震発生確率 $P(T, 30)$ を2例示す ($\mu = 37.1, \Delta T = 30, \alpha = 0.177$ および $\mu = 1000, \Delta T = 30, \alpha = 0.24$)。図から分かるようにポアソン過程の場合、地震発生からの経過年にかかわらず地震発生確率はいつも同じ値になる。つまり、ポアソン過程を用いた場合、地震発生直後でも、地震発生から地震が発生せずに十分な時間が経過した後も、そこから ΔT 年以内の地震発生確率は常に同じということになる。一方、BPT分布は地震発生からの時間経過と共に地震発生確率が大きくなり、実現象に近いモデルであるといえる。



(a) ($\mu=37.1, T=30, \sigma=0.177$)



(b) ($\mu=1000, T=30, \sigma=0.24$)

(赤実線:BPT分布, 青点線:ポアソン過程)

Fig. 6 地震発生確率(ポアソン過程, BPT分布)
Earthquake Occurrence Rate
(Poisson Process, BPT Distribution)

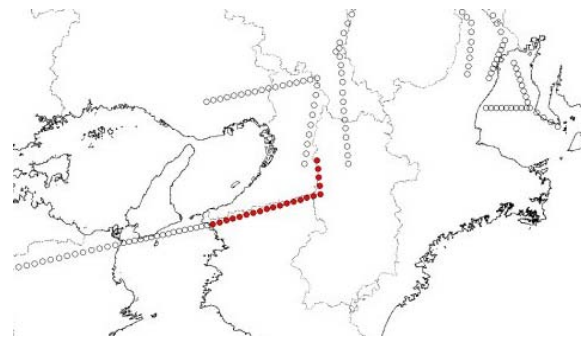
4. 震源モデルの更新及び時系列モデルの選択

4.1 震源モデルの更新

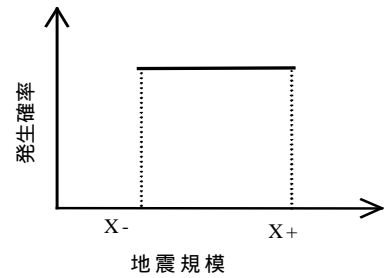
内陸の起震断層については, 3.1節の起震断層モデルと推本が公表する主要98断層帯とを対応させ, 該当する断層の震源モデルを更新する。断層位置は, 推本によって示される断層の2端点(および屈曲点)の情報を用いモデル化する(Fig. 7(a))。地震規模のモデルは, Fig. 1で示したように公表される想定地震規模が“X程度”といった表現のため, 地震規模を X_{\pm} とし, それらがすべて同じ確率で発生する固有規模モデルとする(Fig. 7(b))。

また, 海溝型の地震については, 3.1節の海溝型地震の震源モデルのうち, 推本による評価対象領域内に震源があるものを更新対象とする。

ただし, 海溝型地震は内陸の活断層とは異なり, トレンチ調査などが困難なので, 想定震源域以外でも地震が発生することを否定できないと考え, 推本の想定震源域図をモデル化したものの他に, 震源が評価対象領域内に一様に分布する, 不確実性を考慮した断層もモデル化し, これらを併用したモデルとする。地震規模のモデルについては, 想定震源域によるモデルは公表された想定地震規模を基にした内陸の起震断層と同様の固有規模モデル, 不確実性を考慮したモデルはb値モデルとし, それぞれに

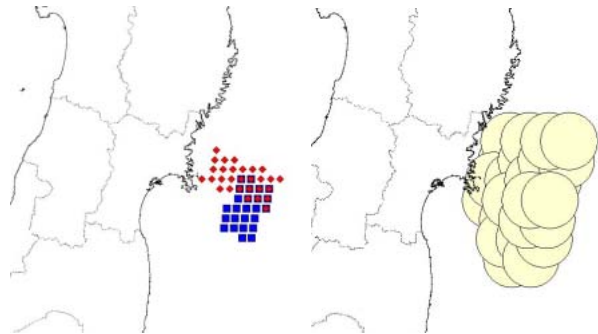


(a) 位置のモデル

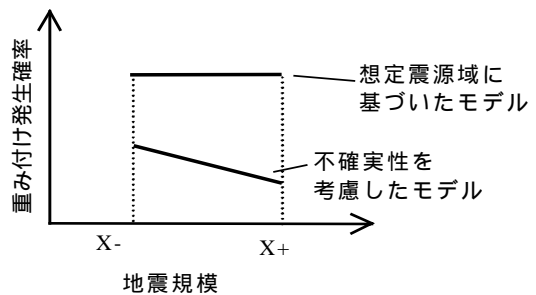


(b) 地震規模のモデル

Fig. 7 更新した震源モデルの例(中央構造線)
Example of Renewed Seismic Source Model



(a) 推本の想定震源域のモデル (b) 不確実性を考慮したモデルの断層面



(c) 地震規模のモデル

Fig. 8 更新した震源モデルの例(宮城県沖地震)
Example of Renewed Seismic Source Model

重み付けしたものをを用いる (Fig. 8(c))。Fig. 8に宮城県沖地震を例にした震源モデルを示す。Fig. 8(a)は、推本の想定震源域 (Fig. 2(b)) をモデル化したものである。Fig. 8(b)は、宮城県沖地震の評価対象領域内に様に分布した、不確実性を考慮した断層モデルの断層面を示したものである。解析ではこれを Fig. 8(a)と同様にグリッドでモデル化したものをを用いる。

4.2 時系列モデルの選択

2章の最後で述べたように、推本の調査によって常に地震ハザード解析に必要な項目全てが判明するわけではなく、“不明”として公表される場合がある。トレンチ調査などから断層の平均活動間隔と最新の活動時期がともに判明し公表された場合は、時系列モデルとしてBPT分布を用いることができ、地震発生からの経過年が大きい断層は発生確率が大きく、逆のものは小さく求められることができる。一方、地震情報を公表された断層のうち断層の活動履歴が“不明”とされた断層および未公表の断層並びに推本の評価対象外の断層の場合は、時系列モデルとしてポアソン過程を選択することになり、3.2節で述べたように、経過年によらず常に同じ発生確率ということになる。

5. 地震ハザード解析

5.1 地震ハザードの算出方法⁶⁾

着目地点において、地震によって ΔT 年間に少なくとも1回の地震動の強さが y を超える確率 $P(Y > y; \Delta T)$ を、一般に地震ハザードカーブと呼ぶ。地震ハザードカーブは、いずれの地震によっても y 以下である確率を1から引くことにより評価できる。

$$P(Y > y; \Delta T) = 1 - \prod_k \{1 - P_k(Y > y; \Delta T)\} \quad (3)$$

ここに、 $P_k(Y > y; \Delta T)$ は k 番目の地震によって ΔT 年間に少なくとも1回地震動の強さが y を超える確率である。

地震の発生をポアソン過程とした場合には、

$$P_k(Y > y; \Delta T) = 1 - \exp\{-v_k(Y > y) \cdot \Delta T\} \quad (4)$$

で求めることができる。ただし、 $v_k(Y > y)$ は k 番目の地震によって地震動の強さが y を超える年あたりの頻度である。

一方、地震の発生をBPT分布とした場合は、

$$P_k(Y > y; \Delta T) = P_k(T, \Delta T) \cdot P(Y > y | E_k) \quad (5)$$

で求めることができる。ただし、 $P_k(T, \Delta T)$ は k 番目の地震が、最新の地震発生から発生せずに T 年経過した時点で、その後 ΔT 年間に発生する確率であり、 $P(Y > y | E_k)$ は、地震 k が1度発生した条件下で地震動の強さが y を超える条件付確率である。

最後に、本地震ハザード解析システムのフロー図を示す。(Fig. 9)

5.2 地震ハザード解析例

本報では、地震動強さのモデルとして司・翠川⁷⁾による

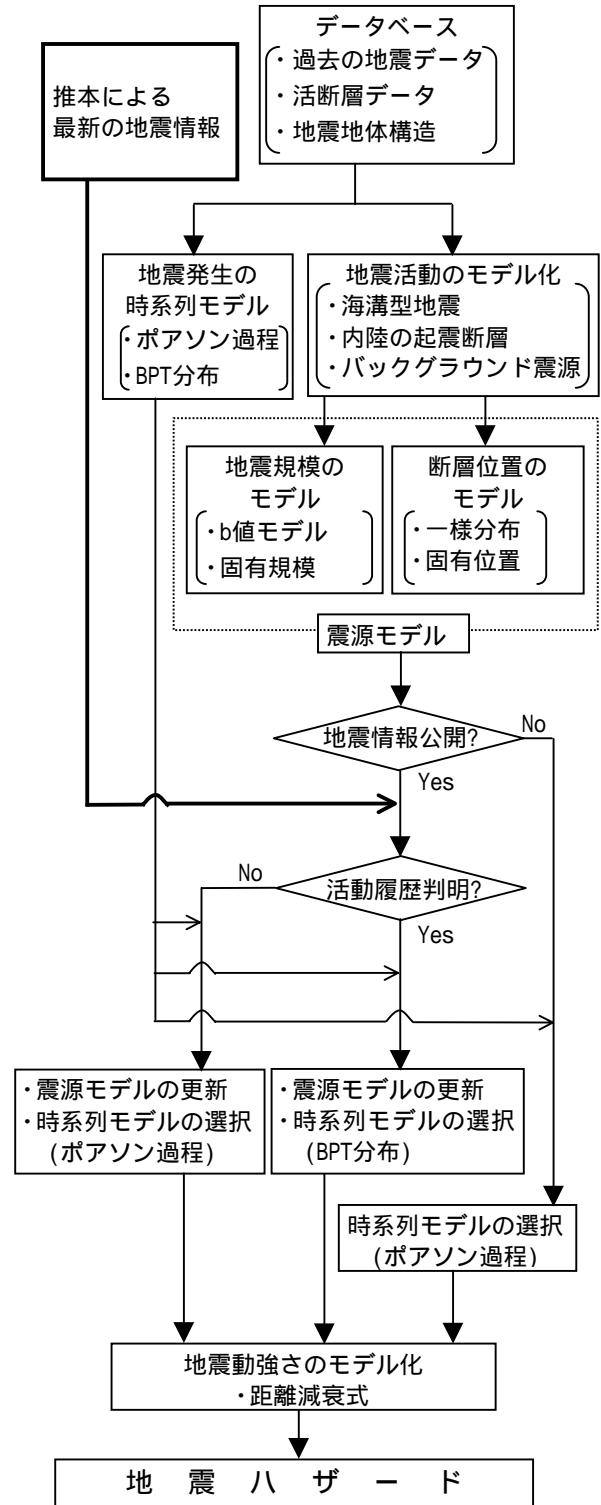


Fig. 9 地震ハザード解析システムのフロー
Flow Chart of Seismic Hazard Analysis System

距離減衰式を用いた。ただし、地震のモデル化による差異を見るため距離減衰式のばらつきは考慮せず、距離減衰式から求められた中央値を用いることとした。

5.2.1 日本における地域による差異 Fig. 10に札幌、仙台、東京、名古屋、大阪、福岡の6都市における地震ハザードカーブを示す。PML評価で用いられる50年で超過確率が10%となる最大加速度を比較すると、6都市の中で東京が一番大きくなっており、一番小さい福岡の3倍以上となった。一方、超過確率1%となる最大加速度を見ると、福岡が札幌以外の4都市とそれほど変わらない値となっている。福岡では他の5都市と比べ200gal程度以下の地震の発生確率は小さいが、400～500gal程度の地震は他の都市と同じくらいの確率で発生するということがいえる。また、札幌については超過確率が10%、1%ともに他の都市と比べて最大加速度が小さい。これは札幌近くには大きな加速度となる断層がないことによっている。一方、超過確率10%で札幌と同程度の最大加速度である大阪には、発生確率は低いものの最大加速度が400gal～となる内陸の活断層が存在するため、超過確率1%で見ると札幌よりかなり大きな値となっている。このように、断層の有無などの環境によって地震ハザードが各地域で異なることが確かめられた。

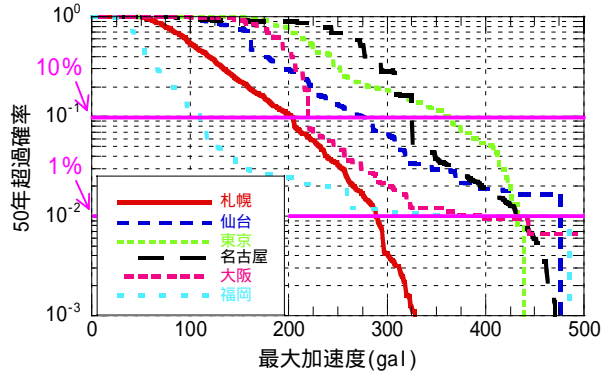


Fig. 10 各都市における地震ハザードカーブ
Seismic Hazard Curve

5.2.2 最新の地震情報を用いない場合との比較 Fig. 11に長野市、山形市における地震ハザードカーブを示す。比較として、最新の地震情報を用いない場合、つまり時系列モデルをすべてポアソン過程とした場合の解析結果(グラフ中：ポアソン過程結果)を併記する。長野市では350gal付近から本システムによる解析結果がポアソン過程結果に比べ急激に小さくなっている。これは、長野市近辺に存在する信濃川断層帯(平均活動間隔：800～2500年)が、1847年の善光寺地震によって活動したため、この断層によって今後50年以内に地震が発生する確率が低く、本システムがこの地震情報を取り込んでいるからである。逆に、山形市では、山形盆地断層帯(同：3000年)が活動したのは約6000年前であり、この断層による地震の発生確率が高いため、本システムの結果がポアソン過程結果を上回っている。このように、本システムと最新の地震情報を用いない場合との地震ハザードカーブに差があることが確かめられた。

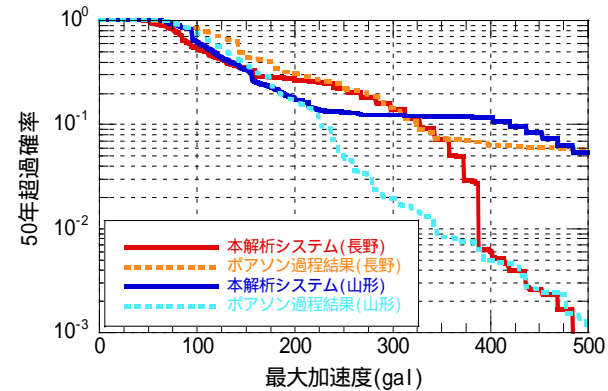


Fig. 11 各都市における地震ハザードカーブ
Seismic Hazard Curve

本報では、地震発生モデル化および不確実性について述べたが、地震ハザード評価の結果は地震動強さの予測(距離減衰式)のばらつきに大いに依存するので、今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部：http://www.jishin.go.jp/main/
- 2) S.Yoshida et al.: Seismic risk assessment procedures for a system consisting of distributed facilities. Part two-seismic hazard modeling, ICSSAR2001, (2001)
- 3) 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，215p.，(1991.1)
- 4) 松田時彦，他：日本陸域の主な起震断層と地震の表-断層と地震の地方別分布表-，活断層研究19，pp. 33～54，(2000)
- 5) 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，46p.，(2001.6)
- 6) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：確率論的地震動予測地図の試作版(地域限定)，pp. 26～27，(2002)
- 7) 司宏俊，他：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大，第523号，pp. 63～70，(1999.9)

6. まとめ

本報では、解析に用いるモデルを、推本が公表する最新の地震情報に基づいたモデルに随時更新することのできる地震ハザード解析システムの概要を報告した。また、その解析例として、代表都市における地震ハザードカーブを求め、それらから地域による地震ハザードの差異の検討および最新の地震情報を用いない場合との比較をした。

その結果、断層の有無などの環境の違いによる地震ハザードの地域差が確認できた。また、本システムと最新の地震情報を用いない場合(ポアソン過程を用いた場合)との結果に差があることが確かめられた。