

# 防災科研における地震動予測地図作成手法の研究について

藤原 広行 (防災科学技術研究所)

## 1. はじめに

防災科学技術研究所では、地震調査研究推進本部地震調査委員会が進めている「全国を概観する地震動予測地図」の作成(地震調査研究推進本部 1999)に資するため、平成 13 年 4 月より、特定プロジェクト研究「地震動予測地図作成手法の研究」を実施している(<http://www.j-map.bosai.go.jp/>)。地震動予測地図は、「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」の 2 種類の異なった地図から構成されることとなっており、本プロジェクトでは、これら 2 種類の地図の作成手法の検討を行っている。

## 2. 不確定性の確率論的評価

地震の発生及びそれに伴う地震動の評価(地震ハザード評価)は、現状では数多くの不確定要素を含んでいる。現状の地震学・地震工学のレベルでは、将来発生する可能性のある地震について、地震がいつ起きるのか、どこで起きるのか、どのくらいの大きさなのか、どのような地震動が発生するのか等について、決定論的に 1 つの答えを準備することは不可能である。こうした不確定性を定量的に評価するための技術的枠組みとして有力と考えられているのが、確率論的手法である。不確定性には、

- ① 自然現象として本質的な不確定性
- ② 情報不足による不確定性

の 2 種類の性質の異なるものが存在する。①に属する不確定性は、自然現象を説明するための物理モデルがある程度解明されていても、そのモデル自体が不確定性を持つもの、あるいは、自然現象として未解明なもの。例えば、地震発生日時や震源での微視的な破壊挙動などが考えられる。一方、②に属する不確定性は、自然現象自身は決定論的なモデルにより説明されているにもかかわらず、モデルを使った予測を行うための初期条件・境界条件として与えるべき情報が不足しているために予測結果が 1 つに定まらないもの、例えば、複雑な地下構造が地震動に及ぼす影響等が考えられる。ただし、不確定性を①と②に分類すること自体が、自然現象の解明を目指す立場からは研究課題でもありえる。例えば、物理モデルに基づいた地震予知が可能になったり、震源の微視的な破壊挙動の原理が解明されれば、こうしたものも②のレベルの不確定性として分類される可能性もある。

こうした不確定性に対して確率論的手法を用いた評価を行う場合、不確定性を取り扱うための確率モデルが適切に与えられ、しかもパラメータ設定に必要な情報が十分あれば、確率論的評価が十分に機能する。例えば、あるサイコロのそれぞれの目の出方などは、自然現象としては、本質的に不確定であっても、実験により確率モデルが正しく与えられ、

その結果に基づいた目の出方の予測に確率論的手法を用いることに問題はないであろう。一方で、情報不足による不確定性の扱いには注意が必要である。1つの思考実験として、形の歪んだ不均質なサイコロを考えよう。この場合、1から6までのそれぞれの目の出る確率は、6分の1になるとは限らない。もしも、必要なだけの回数サイコロを振って実験することが許されていれば、それぞれの目の出る確率を実験的に十分な精度をもって推定することが可能となる。しかし、十分な回数の実験ができない場合、どのようにすればよいだろうか？例えば、出る目の値の期待値を推定することを考えた場合、確率論的な評価の枠組みはできても、パラメータ設定に対する信頼度が低い場合には、どのようなことになるのだろうか？また、確率論的な手法を使わずに、何か別の方法で期待値を設定することはできるのか？そうした場合、確率論的な手法を使った場合とどちらが確からしい答えを得ることができるのか？おそらくこれらに対する答えは、1つではなく、不確定性の程度とそこで使用する「確率論的手法」の枠組みに依存したものとなるであろう。

確率論的手法を用いた地震ハザード評価では、上記に述べた思考実験のような、情報不足による不確定性の扱いが問題となる。情報量がまだまだ不足している現状では、評価の信頼度が低い部分も残っている。しかし、長期的展望の下では、地震に関する調査研究が進み、より正しい確率モデルとそのパラメータ設定に必要な情報が十分に蓄積されてゆくとすると、何れは、確率論的な地震ハザード評価が十分な信頼度を持つことになることを期待される。確率論的地震動予測地図作成は、こうした目標に向けての取り組みと考えられる。一方で、不確定性を扱うために必要な確率論的手法を含めた手法、および、その信頼性の評価についてさらなる検討が必要とされている。

### 3. 確率論的地震動予測地図作成手法の検討

確率論的地震動予測地図を作成するためには、地震ハザード評価が必要となる。地震ハザード評価とは、ある地点において将来発生する「地震動の強さ」、「対象とする期間」、「対象とする確率」の3つの関係性を評価するものである。本研究で用いた地震ハザード評価の大まかな手順は、以下に示す通りである。

- ① 地震調査委員会による地震の分類に従い、震源を特定した地震 [98 断層帯で発生する固有地震、海溝型の大地震、98 断層帯以外の活断層で発生する地震 (グループ1の地震)]、及び、震源を予め特定しにくい地震 [98 断層帯に発生する固有地震以外の地震 (グループ2の地震)、海溝型のプレート境界で発生する大地震以外の地震 (グループ3の地震)、沈み込むプレート内地震 (グループ4の地震)、陸域の地殻内で発生する地震のうち震源を予め特定しにくい地震 (グループ5の地震)] に分けて、対象地点周辺の地震活動をモデル化する。
- ② モデル化したそれぞれの地震について、地震規模の確率、対象地点からの距離の確率、地震の発生確率を評価する。
- ③ 地震の規模と距離が与えられた場合の地震動強さを推定する確率モデルを設定する。

- ④ モデル化された各地震について、対象期間内にその地震により生じる地震動の強さが、ある値を超える確率を評価する。強震動評価手法としては、簡便法と呼ばれる手法を採用している。具体的には、対象地点から断層面までの最短距離を用いた距離減衰式に基づき、工学的基盤における最大速度を求め、これに表層地盤の速度増幅率を乗じることにより地表における最大速度を求め、最大速度と計測震度との関係式を用いて地表の震度を評価している。
- ⑤ 以上の操作をモデル化した地震の数だけ繰り返し、それらの結果を足し合わせることで、全ての地震を考慮した場合に、対象期間内に生じる地震動の強さが、ある値を少なくとも1度を超える確率を計算する。

このようにして、地点毎に地震ハザード評価を実施し、地震動の強さ・期間・確率のうち2つを固定して残る1つの値を求めた上で、それらの値の分布を示したものが「確率論的地震動予測地図」である。

糸魚川－静岡構造線断層帯を含む領域について、上記手順に従って、対象地域周辺で発生する全ての地震をモデル化して、確率論的手法により地震動予測地図を作成する手法を検討した。図1に計算領域及び松岡・翠川(1994)の手法により推定された工学的基盤（S波速度 400m/s）から表層での地盤増幅率を示す。また、図2に全地震によるハザード及びそれぞれの地震グループ毎に分解されたハザードの計算結果を示す。なお、地図は、国土数値情報の3次メッシュで表示されている。

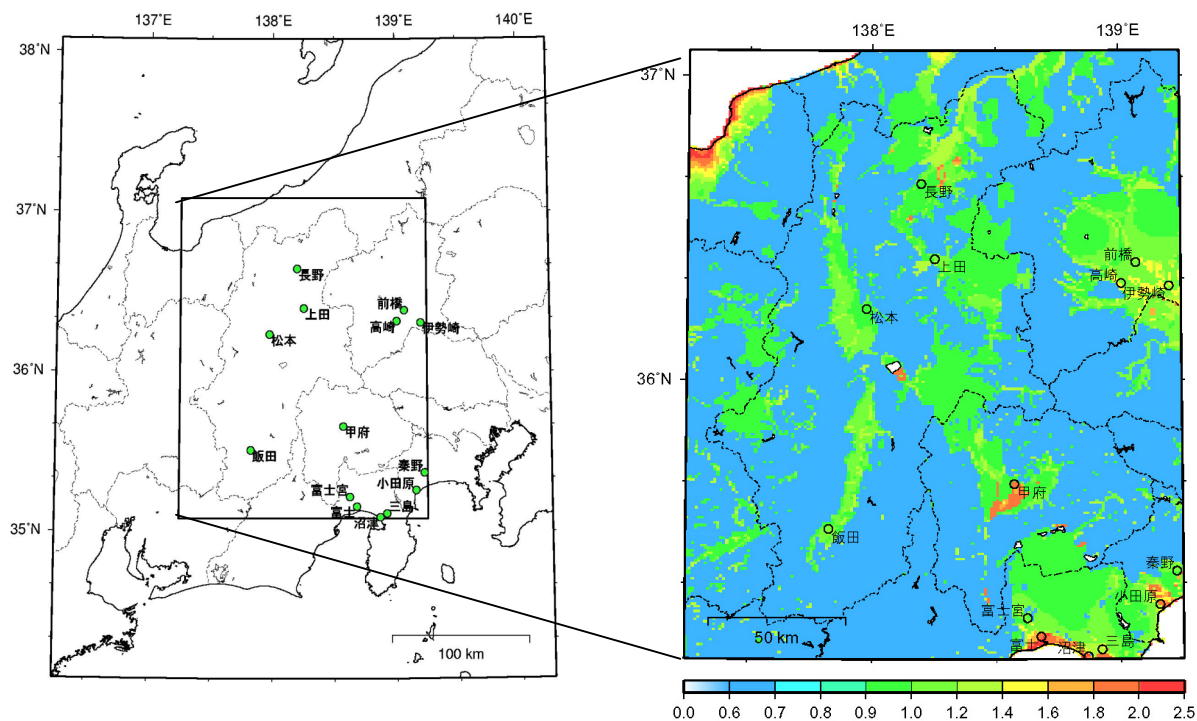


図1 確率論的地震動予測地図の検討領域及びその領域での工学的基盤（S波速度 400m/s）から地表への地盤増幅率。

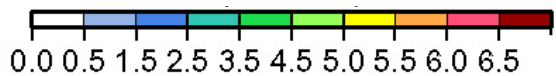
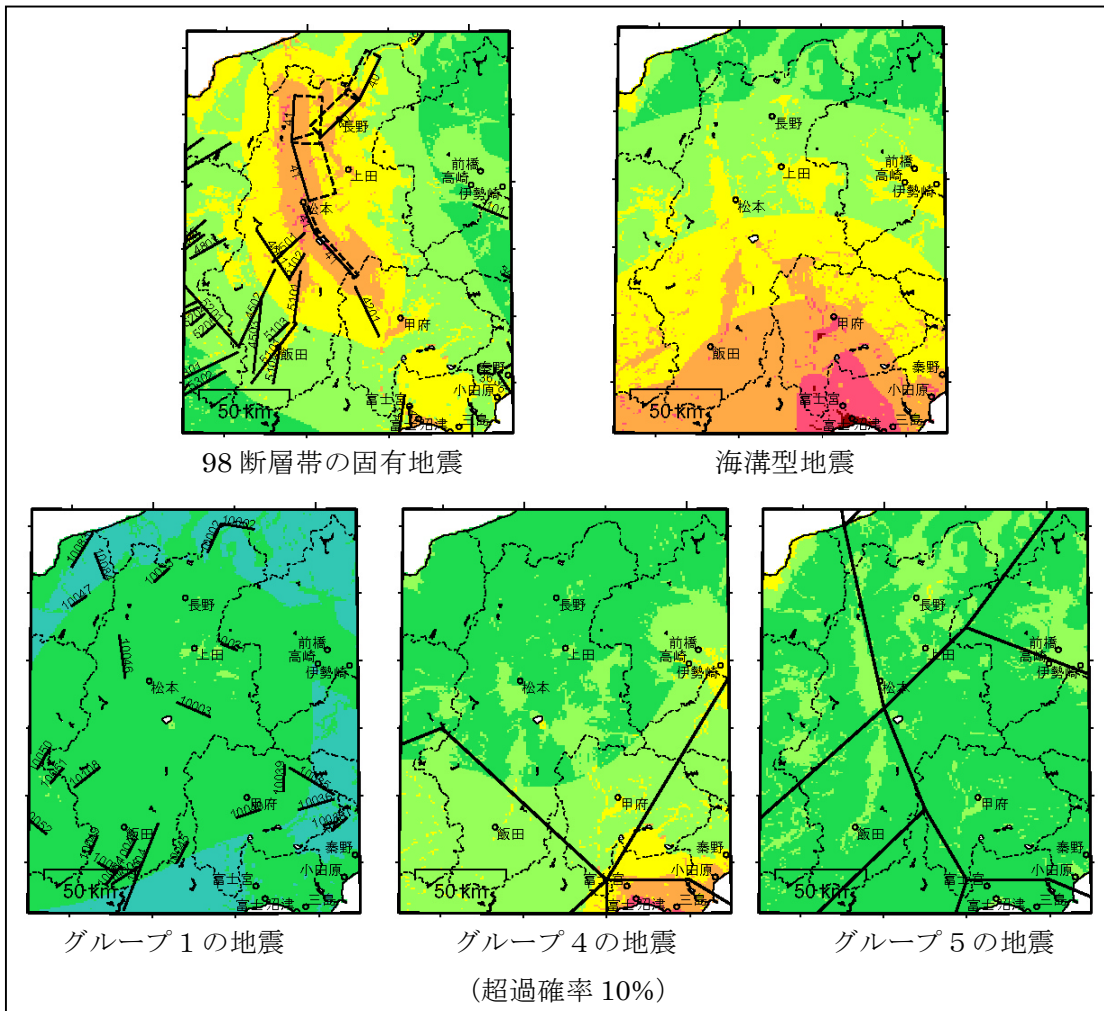
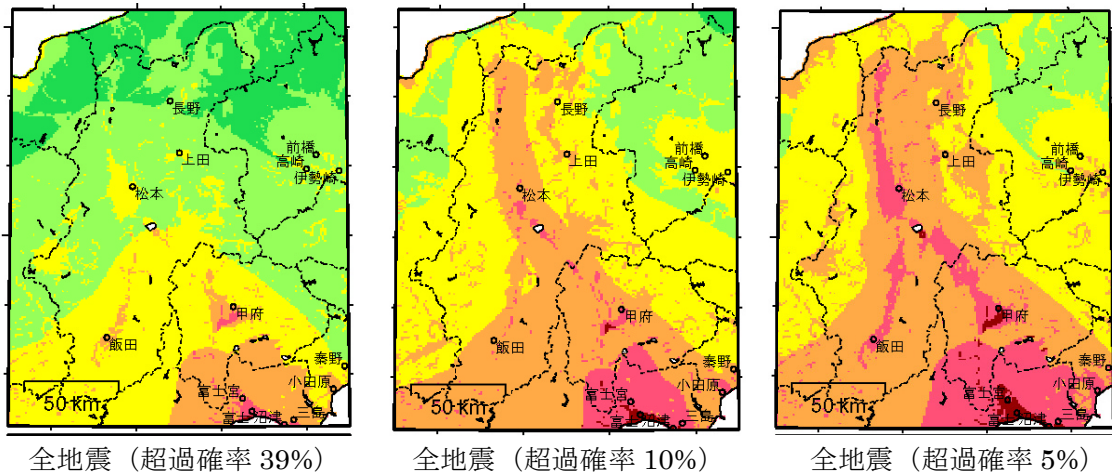


図2 確率論的地震動予測地図の例 (地表計測震度、期間50年の場合)

#### 4. 震源を特定した地震動予測地図の作成手法の検討

震源を特定した地震動予測地図とは、特定の震源断層を想定し、それが活動した場合に、震源断層周辺域で生じる地面の揺れの分布を示すものである。特定の地震発生シナリオに基づくことからシナリオ地震による地震動予測地図、あるいは短縮して、シナリオ地震地図とも呼ばれている。シナリオ地震地図は、ある地震を想定したときの地震動分布を面的に表現した地図であり、直感的にも理解しやすいこともあり、地方自治体等による地域防災計画の策定等で数多く用いられてきた実績がある。また、シナリオ地震地図は、個別の地震発生シナリオに対する計算により作成されるため、計算手法として、震源断層、地球内部構造及び表層地盤増幅特性等の地震学・地震工学の幅広い分野にわたる詳細な研究成果を取り込んだ複雑な計算を必要とする手法が適用可能となっている。

シナリオ地震地図の作成にあたっては、簡便法及び詳細法と呼ばれる強震動評価手法を用いている。

##### (1) 簡便法

簡便法とは、地震規模（マグニチュード）や震源からの距離、地盤増幅率等のごく少数のパラメータを用いて経験的に表現された地震動指標（最大加速度、最大速度等）の距離減衰式を用いる手法である。入力パラメータの数が限られているために、震源や地下構造の固有の性質を十分反映することができず、地震動の時刻歴波形も得られないが、震源や地下構造に関する詳細な情報がない場合でも、平均的な広範囲の地震動分布を容易に評価できるという特徴を持つ。

地震動予測地図の作成において使用している簡便法は、以下に述べるようなものである。工学的基盤での地震動強度の指標として、最大加速度及び最大速度を計算する。これらを計算するための経験的な距離減衰式として司・翠川（1999）の式を用いる。地表での地震動強度を計算するために、松岡・翠川（1993, 1994）の手法により、国土数値情報を用いて地盤の増幅率を求め、工学的基盤における地震動強度（最大速度）にこの増幅率をかけることにより、地表での最大速度を計算する。さらに、翠川・他（1999）による最大速度と計測震度との経験式を用いて、地表における最大速度から計測震度を算定している。

##### (2) 詳細法

詳細法は、断層破壊過程や地下構造の固有の性質を、数多くのパラメータを用いて詳細にモデル化でき、かつ地震動の時刻歴波形が計算できる地震動予測手法である。その特徴をまとめると以下のようになる。

- ① 震源での詳細かつ複雑な断層パラメータの影響を表現できる
- ② 地震波伝播経路での詳細かつ複雑な地下構造の影響を表現できる
- ③ 表層地盤での詳細かつ複雑な地震時挙動の影響を評価できる
- ④ 時刻歴波形が計算できる

地震動予測地図の作成において使用している詳細法としては、具体的には、次に述べるハイブリッド法と呼ばれる手法が、主に用いられている。

ハイブリッド法とは、低周波域では有限差分法等による弾性波動論に基づいた理論的な波形計算の手法を用い、高周波域では統計的グリーン関数法と呼ばれる半経験的な手法を用い、最後にそれらをマッチングフィルターを用いて重ね合わせるにより、全周波数帯域での計算を行う手法である。

地震動の特性は、低周波域では決定論的な物理モデルに基づいた理論的な考察によりある程度説明可能であることが、過去に起きた地震に対する地震動の記録を解析することによって明らかにされてきている。一方で、高周波域では、理論的な予測に必要とされる物理モデルのパラメータに対する不確実性が急速に大きくなるため、事実上決定論的な予測が困難となり、統計的手法の導入が必要となっている。また、決定論的に扱える帯域から統計的な扱いが必要となるような周波数帯域への遷移領域では、物理モデル構築の困難さのみならず、地震動予測計算を行うために必要な計算量が膨大なものとなるために、計算技術的な観点からも解決すべき課題が山積している。

こうした状況の中、高周波数域での地震動計算手法として、理論的手法と簡便法のような経験的手法の中間に位置付けられる半経験的な手法として統計的グリーン関数法と呼ばれる手法が用いられている。統計的グリーン関数法とは、経験的グリーン関数法と呼ばれる予測手法をもとにして作り出された手法である。経験的グリーン関数法とは、大地震による地震動を予測するために、大地震が発生する領域内で発生した中小規模の地震記録を経験的に得られたグリーン関数として、大地震に対する波形を合成する手法であり、伝播経路や表層地盤の不均質構造の影響を強く受ける短周期地震動の予測に非常に有効な手法と考えられている。しかしながら、現実には、地震動の予測を行う場合、予測すべき大地震に対して予測する領域内で、適切な中小地震の記録が得られているとは限らない。このような場合に、中小地震記録の代わりに統計的に評価された模擬地震動をグリーン関数として用いることがある。この手法を統計的グリーン関数法と呼ぶ。統計的グリーン関数法は、グリーン関数が統計的に処理され平均化されたものであるため、対象地域固有の特性を十分に反映しきれない反面、事前に得られる情報が不十分な場合でも比較的安定した地震動評価が可能という特徴を持っている。

地震動の予測を行うために必要な断層モデルとしては、地震規模（マグニチュード等）や断層面全体の形状のような巨視的な断層パラメータだけでなく、断層面内での滑りの不均質性に関する情報が必要となる。これは、被害に直結するような周波数帯域の地震波は、巨視的な断層運動によって生ずるものではなく、断層面内に局所的に分布するアスペリティと呼ばれる領域から励起されることが明らかになってきたためである。これは、近年の地震観測網の整備により得られた地震記録を用いて、震源インバージョンと呼ばれる解析手法により、大地震の震源破壊過程の詳細な研究が行われた結果である。一方で、こうした知見を地震動予測に取り込もうとした場合、断層破壊過程の不均質性を忠実に再現するような断層モデルを設定すると、そのような断層モデル構築に必要なパラメータの自由度が大きくなりすぎて、結果として予測結果の不安定の原因となったり、パラメータ設定に

必要な情報量の不足から断層モデルの構築そのものが不可能になったりすることが考えられる。こうした問題を解決し、できるだけ地震学的な知見に基づいた地震動予測を可能にするために、アスペリティ等の地震動予測に必要な不可欠な情報を単純化してモデル化を行う考え方が提案されている。このような手法を、震源の特性化と呼び、このような考え方のもとに構築されたモデルを、特性化震源モデルと呼んでいる。地震動予測地図の作成においては、特性化震源モデルのパラメータの設定を、「特性化震源モデル設定のためのレシピ」に基づいて特性化された断層パラメータ設定の手続きを行っている（地震調査研究推進本部地震調査委員会 2002）。

（3）計算例(地震調査研究推進本部地震調査委員会 2002 より)

糸魚川－静岡構造線断層帯（北部・中部）の地震について、簡便法及び詳細法により計算を行った例を図3、図4に示す。特に詳細法の計算では、北部セグメントにおけるアスペリティの位置を変化させた場合について地震動分布がどのように変化するかを調べるために、3つのケースを想定して計算を行っている。詳細法による計算では、工学的基盤での時刻歴波形の計算も行われており、約1kmの各メッシュで波形記録が計算されている。

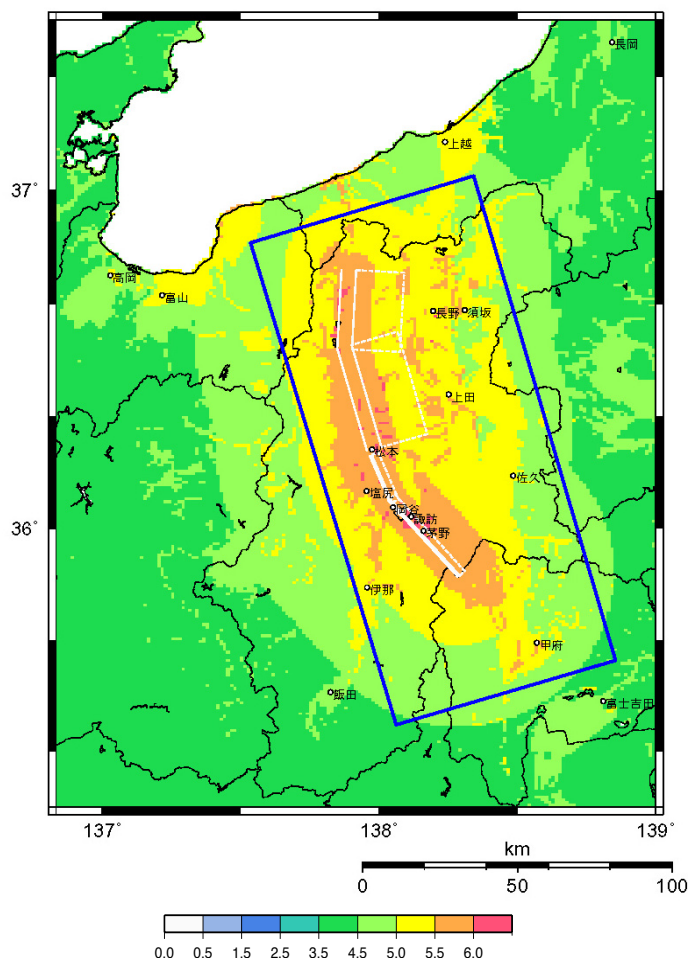


図3 簡便法による地表計測震度の計算例。地図内の矩形領域は、詳細法計算領域

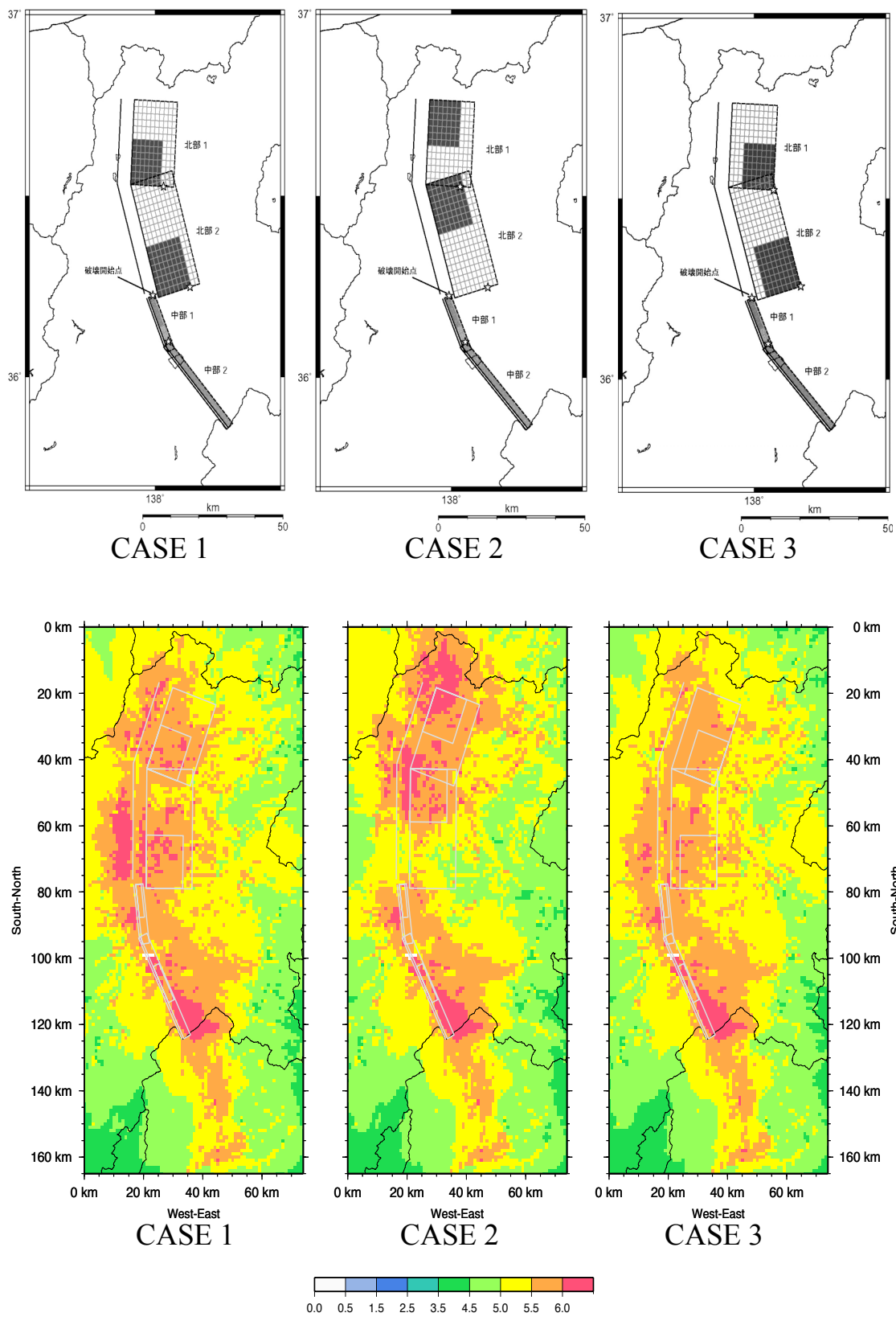


図4 詳細法による地表計測震度の計算例 (アスペリティの位置の違う3つのケース)

## 5. 地震動予測地図の融合についての検討

地震動予測地図は、「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」の2種類の性質の違う地図を一式としたものとされており、両地図の関連を明確にすること、あるいは「震源断層を特定した地震動予測地図」を「確率論的地震動予測地図」に取り込むことを「融合」と呼んでいる。地震動予測地図の融合については、以下に示す2つの考え方が検討されている。

- ① 2種類の地図は独立に作成されるが、それぞれの位置づけを解説し、相互に関連づける。2種類の地図を関連づけるために、確率論的想定地震（亀田他 1997）の概念を用いる。
- ② 「震源断層を特定した地震動予測地図」において用いられる詳細法による地震動評価を用いて、確率論的地震ハザード評価を行う。

考え方①に示されている「確率論的地震動予測地図」における「震源断層を特定した地震動予測地図」の位置づけとは、対象地点における地震ハザードに影響が大きい地震は何か、及び震源断層を特定した地震動評価が対象地点の地震ハザードにおいてどのような位置づけにあるかを明確にすることである。確率論的想定地震とは、対象とする確率レベルに対応するような強さの地震動を起こし得る可能性が高い地震を想定地震として選定するための方法論であり、そのような地震動をもたらし得るような地震の相対的な出現可能性を表す指標としての各地震の「貢献度」を定義している。「貢献度」は、対象とするハザードレベルに応じて変化する指標であり、貢献度が大きい地震ほど想定地震を選定するにあたって重要視すべきものとなる。

考え方②で述べられている詳細法による地震動評価は、現状では、計算作業量及び計算に必要な情報量の不足のために確率論的地震ハザード評価全体に対しては用いられておらず、経験的な距離減衰式を用いた簡便法が採用されている。よりきめ細かな強震動評価を行うためには、詳細法による強震動評価を地震ハザード評価に取り込むことが必要と考えられており、今後の重要な課題となっている。そのためには、詳細な強震動評価に必要な情報についての不確定性を考慮した詳細法による地震動予測のばらつき評価が必要となり、そのための検討を現在実施中である。

## 6. 強震動評価手法の検討

### 6. 1 距離減衰式の改良

確率論的地震動予測地図及び震源を特定した地震動予測地図における簡便法では、強震動評価手法として、経験的な距離減衰式が用いられている。平成14年度には、地震調査委員会により、北日本を対象とした確率論的地震動予測地図の作成が行われた。東北日本では、やや深発地震に対して異常震域が現れることが古くから知られている。東北日本で見られる異常震域の要因は、定性的にはプレートの沈み込み帯における上部マントルの特異な減衰構造によって説明されている。相対的に減衰が大きい領域である陸域の上部マントルに対して、沈み込む太平洋プレート（スラブ）は減衰が比較的小さい領域となっており、

スラブ内を伝播する距離が長くなる太平洋側の地域と比べて、日本海側の地域に伝播する地震波のエネルギーが大幅に減衰し、日本海側で観測される地震動が小さくなるというものである。

こうしたスラブ内で発生する地震に対する強震動評価の精度を向上させるため、東北日本において顕著な異常震域が現れる太平洋プレート内で発生するやや深発地震を主に対象とした、距離減衰式の改良について検討した（森川他 2002）。具体的には、司・翠川(1999)による最大加速度、最大速度の距離減衰式を基準に、①太平洋側と日本海側の地震動強さの違いに対応する係数  $V_1$ 、②遠方の地域まで地震波が減衰せずに伝わることに対応する係数  $V_2$ 、の2種類の補正係数を求めた。最大速度に対する補正項は次式で与えられる。

$$\text{Log } V_1 = (-4.021 \times 10^{-5} \times R_{tr} + 9.905 \times 10^{-3}) \times (H - 30)$$

$$V_2 = \max \{ 1.0, (R/300)^{2.064} \times 10^{-0.012} \}$$

ただし、 $R_{tr}$ は海溝軸から観測点までの距離、 $R$ は震源距離、 $H$ は震源深さ。この補正項は、司・翠川の式で推定にされる値に乘じられる。適用例を図5に示す。

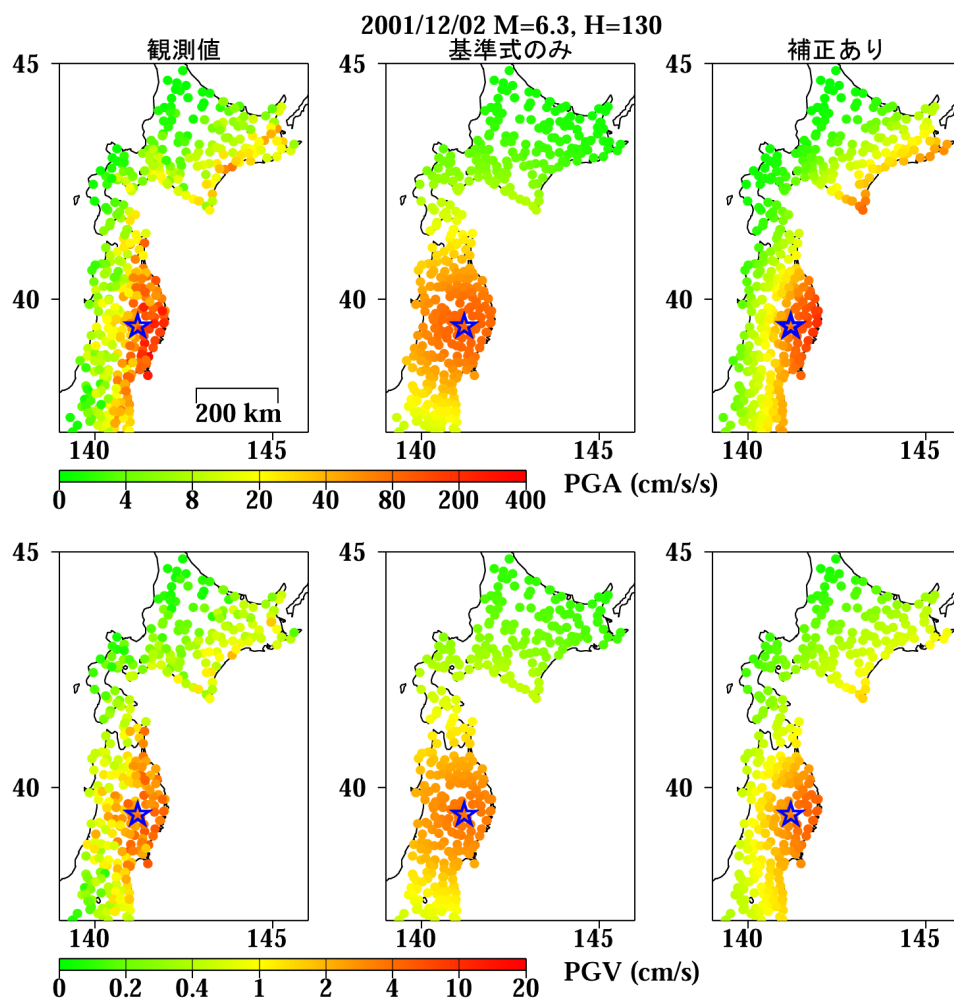


図5 観測値及び予測値による最大震幅分布の比較例。上が最大加速度、下が最大速度。  
☆は震央位置を示す。

## 6. 2 地震動のシミュレーションツールの開発

詳細法による強震動評価においては、与えられた地下構造モデルと震源モデルに対して、3次元弾性波動方程式を解いて地震動を理論的に計算するための作業量が膨大なものとなる。計算機の性能が向上し、大規模な計算が可能になりつつあるとは言え、計算を如何に効率的に行うかが、より進んだ強震動評価手法を検討するための重要なポイントとなっている。このため、理論的な手法による地震動シミュレーション手法の高度化が不可欠となっており、各種の計算手法の開発を実施している。

### (1) 3次元動弾性解析のためのボクセル有限要素法の開発

有限要素法(FEM)は、不整形地盤における地震波動場の3次元動弾性解析のための有力な手法と考えられるが、有限差分法(FDM)(Pitarka1999, Aoi and Fujiwara 1999)と比較すると、実際の地震動数値シミュレーションに用いられた実績が少ない。この理由として、FDMで容易にモデリングできるような媒質中での地震波動伝播のシミュレーションについては、FDMと比較してFEMの方が、地表面の凹凸が容易に取り込める等の地下構造モデリングに対する汎用性を有する代償として、同程度の精度を得るために必要な計算量・メモリー容量が大きく、計算効率が悪いと考えられているためである。非構造メッシュ有限要素法(Bao et al. 1998)は、汎用性に富み、最適なメッシュ分割による計算を実現できる可能性を秘めているが、メッシュ生成そのものに大きな労力が必要であるだけでなく、非構造メッシュに対する剛性マトリクス成分を全て記憶するために膨大なメモリー容量を必要とする。このため、現時点では、大量のメモリー容量が使用可能な大規模なスパコンを除いては、複雑なモデルに対する大規模な3次元動弾性解析を、非構造メッシュ有限要素法を用いて行うことは困難となっている。本研究では、こうした問題を解決するため、より簡便で効率的なFEMコードの開発を目指し、3次元動弾性解析のためのボクセル有限要素法(VFEM)の開発及び性能の検討を実施している(藤原・藤枝 2002)。

### (2) GMS(Ground Motion Simulator)の開発

強震動予測を行う場合によく用いられるハイブリッド法では、地震動の長周期成分を理論的手法により計算する必要があり、この際3次元構造を考慮した決定論的波動合成法として有限差分法(FDM)を用いることが現状では一般的である。

3次元計算波動伝播シミュレーションを行うためには、地下構造モデルや震源モデルなど煩雑なパラメータ設定が必要となり、また計算結果の出力も膨大なものとなる。このため、従来の手作りのプログラムでは、手法やプログラムの詳細を知らないと実用的な計算を行うことは困難である。これらの不便を解消するため、ユーザーフレンドリーなGUI(Graphical User Interface)を採用し、直感的に作業の出来るシステム、GMS(Ground Motion Simulator)の開発を行った。また、本システムは、PCやワークステーション等の安価で汎用的なプラットフォーム上で使用できるため、容易に3次元有限差分法による地震波伝播のシミュレーションを行うことが出来るように設計されている。GMSは、実際の予測地図作成作業にも使用されている。

## 7. 地下構造モデル作成とデータベース整備

強震動評価においては、詳細な断層モデルだけでなく、地下構造のモデル化も重要な課題である。地震動は地盤の影響を受けて増幅する。特に S 波振幅の増幅は大きく、構造物の被害に大きな影響を及ぼすため、S 波速度構造を把握することは地震防災を考える上で極めて重要である。さらに 1995 年兵庫県南部地震では、地震被害に大きな影響を及ぼすような地震動の生成にごく表層だけでなく、やや深い 2 次元、3 次元的な地盤構造が大きく関与していることが指摘された。より高精度な強震動評価のためには、地震基盤までの 3 次元的な S 波速度構造の把握が必要不可欠である。一方、地震予測地図作成には、S 波速度だけでなく、P 波速度、密度、減衰定数などの情報も 3 次元的なモデル化が必要となる。このような情報を得るための手法としては、人工地震を用いた反射法、屈折法やボーリング孔を用いた PS 検層、さらに微動アレー観測や重力探査など様々な手法が存在し、それぞれ得られる情報は異なる。つまり、様々な手法によって得られた情報を適切に組み合わせることによって地下構造モデルは作成されることが望ましい。しかし、これらの情報は地域によってその量に大きなばらつきが存在する。従って、現実的な地下構造モデルを作成するにはこれらの情報を適切に組み合わせるだけでなく、それぞれの対象領域の情報量に応じた作成手法が必要となる。そのため、それぞれの計算対象領域における地下構造に関する情報量に合わせた地下構造のモデル化手法について検討を行っている。

作成された地下構造モデル及びそのために収集したデータは、今後のモデルの改良に不可欠なものであり、それらをいつでも使用可能な状態に整理しデータベース化する事が必要である。さらに、現在、地震動予測地図作成に資するために行われている、平野部地下構造調査で得られたデータ等についても、データの散逸を防ぎ、調査結果を有効に利用するためにも、データベース化が望まれており、検討が開始されている。

## 8. 地震動予測地図に関するデータの公開に関する検討

地震動予測地図は、単に地表での震度値のみを公表するだけでなく、確率論的地震動予測地図においては、様々な形態で表現された地図や、ハザード曲線のデータ等、また、シナリオ地震地図においては、工学的基盤における最大速度、さらには時刻歴波形のデータ等についても WEB 等を用いた公開手法の技術的な検討を実施している。

## 謝辞

防災科学技術研究所に設置された確率論的予測地図作成手法検討委員会（翠川三郎委員長）、及び、地震動予測地図工学利用検討委員会（亀田弘行委員長）からは、貴重なご意見を頂きました。また、検討作業を担当いただいているプロジェクト関係者の皆様に感謝申し上げます。

## 参考文献

- 亀田弘行・石川裕・奥村俊彦・中島正人(1997) 確率論的想定地震の概念と応用、土木学会論文集、第 577 号、75-87.
- 司宏俊・翠川三郎(1999) 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、第 523 号、63-70.
- 地震調査研究推進本部(1999) 地震調査研究の推進について―地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策―.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2002) 糸魚川―静岡構造線断層帯(北部、中部)の地震を想定した強震動評価.
- 松岡昌志・翠川三郎(1993) 国土数値情報を利用した地盤の平均 S 波速度の推定、日本建築学会構造系論文集、第 443 号、65-71。
- 松岡昌志・翠川三郎(1994) 国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング、第 22 回地盤震動シンポジウム論文集、23-34.
- 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄(1999) 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、51-56.
- 森川信之・神野達夫・成田章・藤原広行・福島美光(2002) 東北日本の異常震域に対応した距離減衰式の補正項、日本地震学会秋季大会予稿集.
- 藤原広行・藤枝忠臣(2002) 3次元動弾性解析のためのボクセル有限要素法、第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集.
- Aoi, S. and H. Fujiwara (1999). 3D Finite-Difference Method using discontinuous grids, Bull. Seism. Soc. Am. 89, 918-930.
- Pitarka, A.(1999). 3D elastic Finite-Difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, Bull. Seism. Soc. Am. 89, 54-68.
- Bao, H., J. Bielak et al. (1998). Large-scale simulation of elastic wave propagation in heterogeneous media on parallel computers, Computer Methods Appl. Mech. Eng., 152, 85-102.