

地震動予測地図 (シナリオ地震地図) について

藤原広行 (独立行政法人 防災科学技術研究所)

1. はじめに

独立行政法人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」の作成を支援するため、平成13年4月よりプロジェクト研究「地震動予測地図作成手法の研究」を実施しており、

- ① シナリオ地震による地震動予測地図作成手法
- ② 確率論的手法による地震動予測地図作成手法
- ③ 地震動予測地図公開システム

に関する研究開発を行っている。

以下では、特に①のシナリオ地震による地震動予測地図作成についての解説を行う。

2. シナリオ地震による地震動予測地図

シナリオ地震による地震動予測地図 (シナリオ地震地図) とは、特定の断層震源を想定し、それが活動した場合に、断層震源周辺域で生ずる地盤の揺れの分布を示す地図である。

シナリオ地震地図の具体的なイメージを明確にするために、例として、1923年関東地震に対する南関東地方の広域の計測震度マップ (佐藤他、1999) を図1に示す。シナリオ地震地図の特徴を以下に記す。

- ① 特定の1つの地震を対象としている。
- ② 想定した地震が発生した場合に同時に生じる地震動強さの地域分布を示す。
- ③ 複数の地震を想定する場合、同じ地点であってもそれぞれ異なった結果が得られる。つまり、想定する地震の数だけ地図が必要となる。
- ④ 震源断層を特定し、地震動を予測する地域を限定するため、地震動の推定手法として、経験的手法だけでなく、半経験的手法や理論的手法など高度な強震動予測手法の適

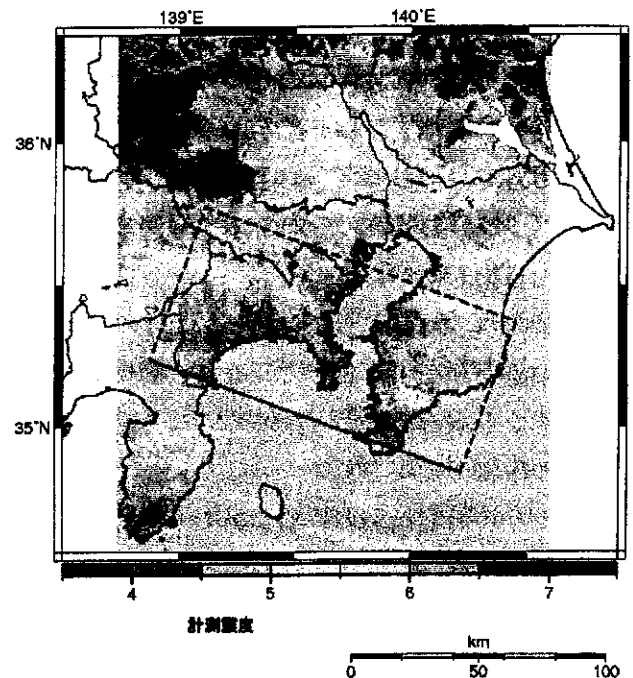


図1. シナリオ地震による地震動予測地図の例 (佐藤・他、1999)

用が可能となる。

シナリオ地震地図は、その特徴が示すように、ある地震を想定したときの地震動分布を、一目でわかるように示した地図であり、直感的に理解しやすいこともあり、これまでも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、震源断層、地球内部構造及び表層地盤特性等の地震学の幅広い分野にわたる詳細な研究成果を取り込むことにより作成されるため、地震調査研究の最新の成果を役に立つ形で世の中に還元するための1つの出口と位置付けることができる。

プロジェクト研究「地震動予測地図作成手法の研究」では、地震調査研究推進本部により推進されている基盤的地震観測網の整備、活断層調査、平野部地下構造調査等の成果、及び防災科学技術

研究所の独自の研究成果をシナリオ地震地図に取り込むことにより、より高精度なシナリオ地震地図作成に向けて研究開発を行っている。以下では、現在、研究開発中のシナリオ地震地図作成手法の概要について述べる。

3. シナリオ地震地図に用いる地震動予測手法

地震動予測地図では、工学的基盤及び地表の2つの出力地点において、約1kmメッシュ程度の分解能で、地震動強度の分布を示す地図を作成することを目指している。

現状では、地震動予測手法として1つの確立された手法が存在するわけではなく、簡便なものから複雑な手続きを必要とするものまで、様々なレベルの手法が提案されている。

シナリオ地震地図の作成にあたっては、地震動の予測手法を、簡便法と詳細法と呼ばれる2つの手法に大きく分類し、目的に応じて使い分けている。

(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。

シナリオ地震地図作成においての簡便法の具体的な利用法としては、簡便法を用いて広域の地表地震動分布を計算し、より詳細な地震動計算を行うべき領域の選定に役立てること、及び、より詳細な地震動予測計算手法と比較することにより、詳細法による震源や地下構造の特性を反映した地震動強度分布の特徴を明らかにすること等がある。

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なになる。

- 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は、具体的には、次に述べるハイブリッド法と呼ばれるものである。

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ことにより、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

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、アスベ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、誰がやっても同じ結果が出るようにするために、「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（図2）。

（2）深部地下構造モデル化

深部地下構造モデル化とは、ここでは主として堆積平野部・堆積盆地部における地震基盤から工学的基盤までの地殻層の形状のモデル化を意味する。深部地下構造のモデル化及びそれらを考慮した地震動評価の重要性は、地震動の研究分野においては常に主張され続けていたが、平成7年兵庫県南部地震の際に神戸地域に出現した震災の帯と呼ばれる局所的に地震動が増幅される現象を説明するために改めてその重要性が広く認識されることとなった。厚い堆積層により覆われた堆積平野・堆積盆地でのより精度の高い地震動評

価に資するため、現在、文部科学省の地震関係基礎調査交付金により、自治体が主体となった堆積平野の地下構造調査が実施されている。

深部地盤構造として把握すべき事項は、地震基盤の形状のみならず、上位堆積層における地震波の伝播速度ならびに減衰特性、密度などの3次元的な分布である。仮に、地震探査データが既に十分そろっていれば、それらを用いた3次元構造モデル作成が可能となる。しかし、地震探査データの現状は必ずしもそうではなく、点または線の情報がほとんどであり、その分布も地域的に偏在しており、日本全国を見渡した場合、ほとんどの地域でデータが不足している状況にある。シナリオ地震地図の作成にあたっては、こうした地震探査データの不足を補うために、全国に普遍的に分布している既往重力データや地質情報などを援用した、3次元深部地下構造モデル作成手法の検討を行っている。図3に作業手順の例を示す。

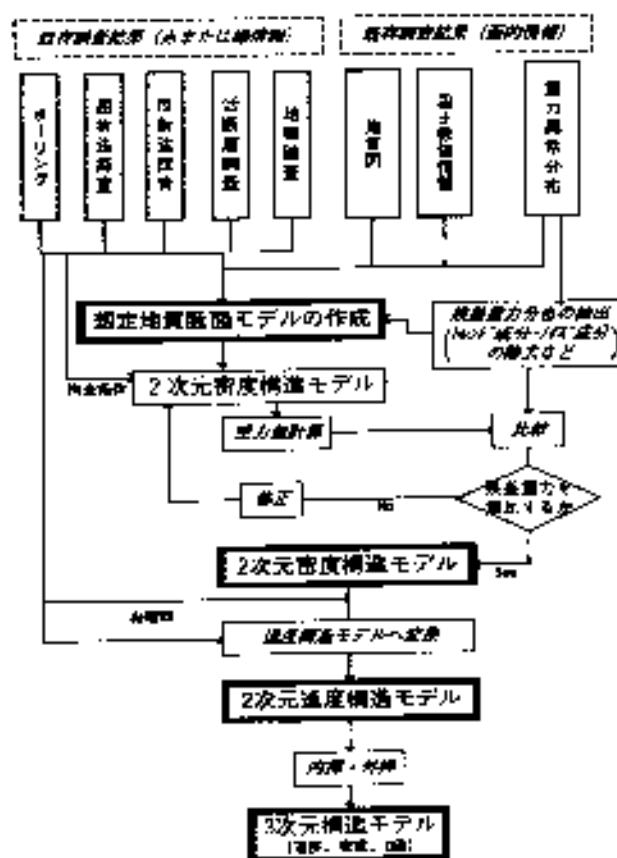


図3. 深部地下構造モデル作成のフローの例

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定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。

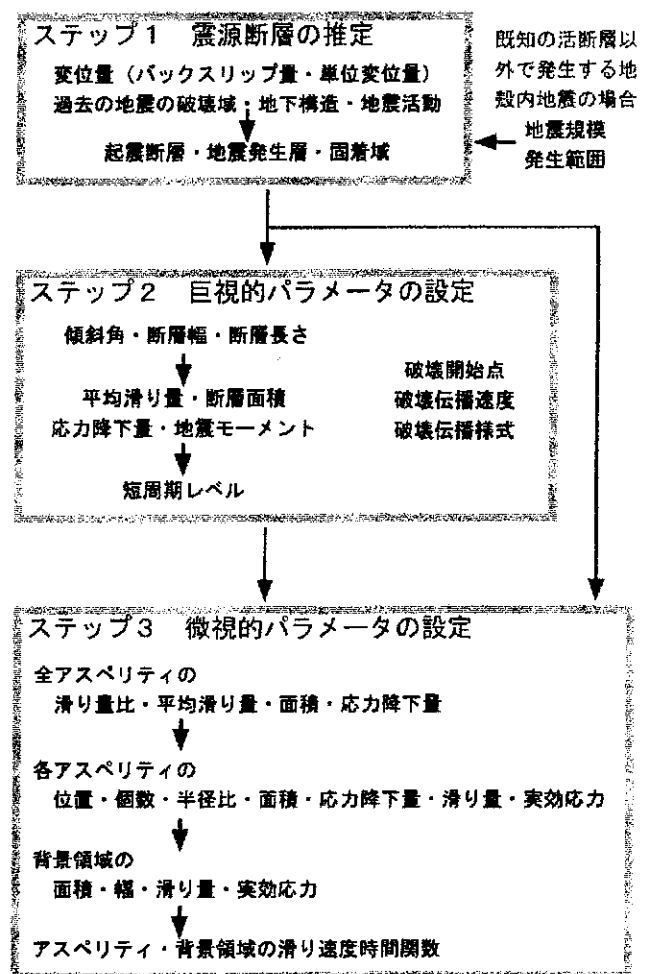
こうした状況の中、高周波数域での地震動計算手法として、理論的手法と簡便法のような経験的手法の中間に位置付けられる半経験的な手法として統計的グリーン関数法と呼ばれる手法が用いられている。統計的グリーン関数法とは、経験的グリーン関数法と呼ばれる予測手法をもとにして作り出された手法である。経験的グリーン関数法とは、大地震による地震動を予測するために、大地震が発生する領域内で発生した中小規模の地震記録を経験的に得られたグリーン関数として、大地震に対する波形を合成する手法であり、伝播経路や表層地盤の不均質構造の影響を強く受ける短周期地震動の予測に非常に有効な手法と考えられている。しかしながら、現実には、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。

4. 詳細法のための要素技術

詳細法（ハイブリッド法）による地震動予測は、様々な要素技術を統合したものとなっている。以下では、詳細法による地震動予測手法で必要となる要素技術についてまとめる。

(1) 特性化震源モデル

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



断層パラメータ設定の流れ

図2. 特性化震源モデルに対する断層パラメータ設定のフロー

(3) 浅部地盤モデル化

地表面での震度分布等の予測地図を作成するためには、深部地下構造モデルだけでなく、表層地盤の増幅特性の評価が重要となる。表層の増幅特性を評価するために用いる浅部地盤として、工学的基盤（構造物の基礎となるS波速度 400～700m/s 程度の地盤）から地表までの地盤を考える。このように定義された浅部地盤のモデル化手法としては、国土数値情報を用いた松岡・翠川(1994)による簡便な手法と、ボーリングデータ等を収集しそれらの情報に基づいて地盤モデルを設定し増幅率を計算する手法が考えられる。

浅部地盤のモデル化に際して基本的な資料は、ボーリングデータである。しかし、ボーリングデータはどこでも均等に存在するわけではなく、地域的な粗密があり、山間部などでは全くデータがないところもある。全国を概観するような地震動予測地図を作成するためには、ボーリングデータが極端に少ないか、あるいは全く存在しない場合にも、地盤の増幅率を算出することができる手法を採用する必要がある。松岡・翠川(1994)により提案された、国土数値情報に含まれる地形学的情報に基づき地盤の増幅率を求め、工学的基盤における地震動強さにこの増幅率をかけることにより、地表での地震動強さを求める手法は、予測精度の限界はあるものの、簡便に日本全国に適用可能な手法であるため、簡便法としての位置づけで地震動予測地図作成に使用されている。

一方で、ボーリングデータ等が十分に得られる地域においては、地表でのより信頼性の高い地震動評価を行うために、ボーリング柱状図ごとに地盤のモデル化を行う手法が考えられる。こうした地点においては、得られる情報の多寡に応じて、線形解析、等価線形解析、逐次非線形解析等を実施し、手法の妥当性を検討した上で、地震動予測地図作成においても、できる限り詳細な浅部地盤の情報を反映した地震動評価を実施していくことを検討している。

(4) 数値シミュレーション手法

ハイブリッド法により地震動予測を行う場合、低周波域の予測は、特性化震源モデルと深部地下構造モデルを組み合わせた物理モデルに対して、地震波動伝播を記述する弾性波動方程式を、有限差分法や有限要素法のような数値計算手法を用いて解くことにより予測計算を行う必要がある。

近年の計算機性能のめざましい進歩と計算手法そのものの高度化（例 Pitarka 1999, Aoi and Fujiwara 1999）により、現在では、できる限り現実に近いモデルを構築し、それに対する方程式を解くことが可能になりつつある。

具体的には、例えば、東西 100km、南北 100km、深さ 60km の領域を考えた場合、仮に 200m メッシュでこの領域を分割した場合、500*500*300 のメッシュ分割が必要となる。この程度のメッシュ分割に対する有限差分法による地震動計算は、高性能WSを用いれば、数日程度で計算を完了することができる。計算量の見積の目安として、計算メッシュサイズが半分になる毎に、計算時間は16倍、計算に必要なメモリー容量は8倍となることがわかっており、これをもとにより詳細な計算に必要な計算機環境、計算作業工程を見積もることができる。

ハイブリッド法による低周波域と高周波域の接続周波数の設定は、本来は、地震波動場の特性を考慮して、決定論的なモデリングが可能な周波数領域と、統計的なモデリングが不可欠となる周波数領域の遷移領域中に設定すべきである。

しかしながら、現状では、以下の2つの理由により、接続周波数が物理的な遷移領域よりも低周波側に設定される場合が多い。

- ① 計算機性能・計算技術の限界
- ② 深部地下構造モデル化の限界

ここで、①の計算機性能・計算技術の限界については、今後数年程度で大幅な改善が期待でき、近い将来に上記の問題点はある程度解決できる可能性がある。

一方、②の深部地下構造モデル化の限界については、①と比較して解決が圧倒的に困難である。地下構造モデル化のための手法の確立という技術的側面もさることながら、日本全国に散在する堆積平野や堆積盆地の深部地下構造の詳細なモデル化を行うためには、長期間にわたる計画的な地下構造調査が不可欠となる。さらに、こうした地下構造調査により得られたデータは、国土に関する基本的な情報として管理され、一般に公開されるようなデータベース化が重要である。

5. 今後に向けて

地震動予測地図は、確率論的な手法による地震動予測地図と、ここで述べてきたシナリオ地震による地震動予測地図の2つの構成要素からなる。確率論的な地震動予測地図が、将来発生する可能性がある全ての地震についての危険度をまとめ上げたものであるのに対して、シナリオ地震地図は、1つ1つの地震についてのオーダーメイドの予測地図といえる。そのため、地震調査研究の最新の成果を短期間に取り込むことが比較的容易であり、地震が実際に発生する毎に、そこで用いられた予測手法の妥当性の検討が可能となる。

一方で、詳細法によるシナリオ地震地図作成のための前提となる、深部地下構造のモデル化及び浅部地盤のモデル化のための基礎データは、未だ十分な状況にはない。予測精度の向上のために必要不可欠なこうした地下構造データの収集・データベース化は、今後の地震動予測地図作成において極めて重要な課題となっており、これまで以上に積極的な取り組みが望まれる。

また、今後作成される地震動予測地図は、将来、実際に発生する地震により引き起こされる地震動と比較検討することにより改善がなされ、高精度化されていかなければならない。こうした、検証作業を可能とするためには、現在、防災科学技術研究所で運営されている K-NET・KiK-net に代表されるような全国的な規模で展開された強震

動波形データ収集のための観測網の維持管理及び、さらなる観測体制の強化が必要不可欠と考えられる。詳細な手法による地震動予測地図作成の試みはまだ始まったばかりであり、その予測精度に関しては、未知数の部分も数多くある。少なくとも今後数十年以上にわたる地道な観測データの集積とそれに基づいた検証作業を継続することが、本当に信頼の置ける地震動予測地図作成のために必要な条件であろう。

地震調査研究の推進は、地道な観測網の維持管理や様々なデータ収集のための調査によって支えられている。今後とも多くの方々のご理解ご支援をお願いしたい。

参考文献

- 佐藤俊明・他(1999) 関東地震の強震動の再現を目指して—予測手法を駆使するシミュレーションが実用域へ—、SEISMO、9月号、6-7。
- 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。
- 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。
- 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.