

地震動予測地図作成のための 強震動評価の現状と技術的課題

藤原広行¹・青井真²・先名重樹³・石井透⁴・早川譲⁵

¹防災科学技術研究所プロジェクトディレクター（〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1）

E-mail:fujiwara@bosai.go.jp

²防災科学技術研究所主任研究員（〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1）

E-mail:aoi@bosai.go.jp

³防災科学技術研究所特別技術員（〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1）

E-mail:senna@bosai.go.jp

⁴防災科学技術研究所客員研究員（〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1）

E-mail:toru@bosai.go.jp

⁵防災科学技術研究所客員研究員（〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1）

E-mail:hayakawa@bosai.go.jp

地震調査研究推進本部地震調査委員会により進められている全国を概観する地震動予測地図の作成においては、確率論的な手法による地震動予測地図とシナリオ地震に対する地震動予測地図の2種類の地図が作成されている。地震動予測地図作成では、地震発生の際の長期的な確率評価と、地震が発生した時に生ずる強震動の評価を組み合わせる総合的な評価を行っているが、本報告では、特に、強震動の評価の部分に限定して、シナリオ地震による地震動予測地図作成のための詳細な強震動評価手法として用いられているハイブリッド法について、その現状と技術的課題をまとめた。

Key Words : Seismic hazard map, strong ground motion, scenario earthquake, hybrid method

1. はじめに

全国を概観する地震動予測地図の作成が、平成16年度末を目途として、地震調査研究推進本部地震調査委員会において進められている。地震動予測地図の作成においては、地震発生の際の長期的な確率評価と、地震が発生した時に生じる強震動の評価を組み合わせる確率論的地震動予測地図の作成と、個別の地震のうち発生確率が高い等、特に重要と考えられるものに対して、ある想定されたシナリオに対する詳細な強震動評価に基づく地震動予測地図の作成を平行して行っており、最終的にはそれら2種類の性質の異なる地震動予測地図をまとめた形で、全国を概観する地震動予測地図として公表される予定となっている。防災科学技術研究所では、平成13年度4月より特定プロジェクト「地震動予測地図作成手法の研究」を開始し、地震動予測地図の作成に資する技術的な検討及び地図の作成作業を行っている。本報告では、地震動予測地図作成のうち、特に強震動評価の部分に限定して、シナリオ地震による地震

動予測地図作成のための詳細な強震動評価手法として用いられているハイブリッド法について、その現状と技術的課題について考察する。

2. ハイブリッド法の要素技術

地震発生の際の長期評価により発生確率が高いと評価された地震については、確率論的な地震ハザード評価に加えて、個別の地震について、あるシナリオを想定し、詳細な強震動評価を行うことにより、シナリオ地震による地震動予測地図を作成している。シナリオ地震による地震動予測地図では、約1kmメッシュの分解能で、工学的基盤での時刻歴波形及び最大速度値、地表面での最大速度値及び最大速度値から求めた計測震度の分布を計算している（図1及び図2）。詳細な強震動評価としては、ハイブリッド法と呼ばれる地震波形の合成法が用いられている。ハイブリッド法は、複数の要素技術の組み合わせからなる複雑な波形合成法であるが、この手法をできるだけ標準化し、誰が計算を実施しても同じ結果が得られることを目標とした手法の検討が行われてい

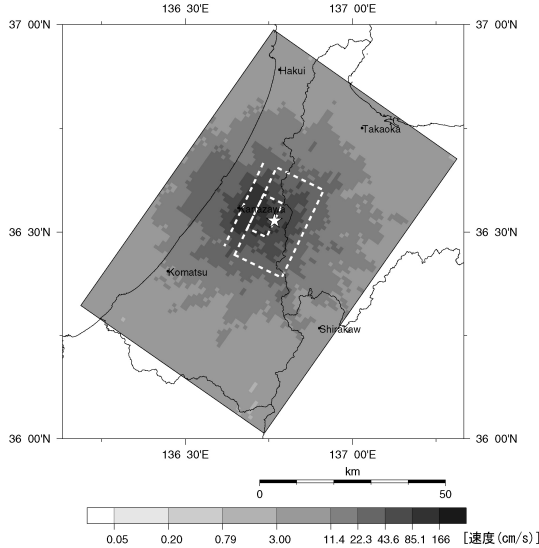


図-1 工学的基盤（S波速度700m/s）での最大速度分布図（森本・富樫断層帯の地震）。

る。以下では、地震動予測地図の作成において用いられているハイブリッド法について、地震調査委員会による「活断層で発生する地震の強震動評価のレシピ」¹⁾及び「海溝型地震の強震動評価のレシピ」²⁾に基づき、その要素技術毎に技術的詳細をまとめる。

(1) 震源パラメータの設定（特性化震源モデル）

強震動評価を実施するために必要な特性化震源モデルに対する震源パラメータの設定は、大きく3つの部分に分けられる。具体的には、断層全体の形状や規模を示す巨視的震源特性、主として震源断層の不均質性を示す微視的震源特性、破壊様式を示すその他の震源特性の設定である。

a) 巨視的震源特性

巨視的震源特性とは、断層の幾何学的位置、大きさ、深さ、地震の規模、断層の平均滑り量などである。このうち断層の幾何学的位置、大きさ、深さについては、地震調査委員会による長期評価の結果に基づいてパラメータの設定を行う。地震の規模（地震モーメント M_0 (dyn・cm)）は、活断層で発生する地震に対しては、長期評価から見積もられた断層面積 S (km²)に対して、次式を用いて設定する^{3),4),5)}。

$$S = \begin{cases} 2.23 \cdot 10^{-15} \cdot M_0^{2/3}, & M_0 \leq 4.7 \cdot 10^{25} \\ 4.24 \cdot 10^{-11} \cdot M_0^{1/2}, & 4.7 \cdot 10^{25} < M_0 \leq 1.0 \cdot 10^{28} \end{cases} \quad (1)$$

ただし、海溝型の地震については、過去の地震のデータ等を用いて、それぞれの地震の特性に応じた設定を行う。

b) 微視的震源特性

震源断層の微視的パラメータとは、アスペリティの位置・個数及び面積、アスペリティ及び背景領域の平均滑り量・実効応力、 f_{max} 、滑り速度時間関数などがある。アスペリティの位置に関しては、トレンチ調査等で大きな変位量が観測された地点の付近に置くことを基本とする。また、アスペリティの個数は、1セグメントあたり1個または2個とする。

アスペリティの面積 S_a は、地震モーメントと加速

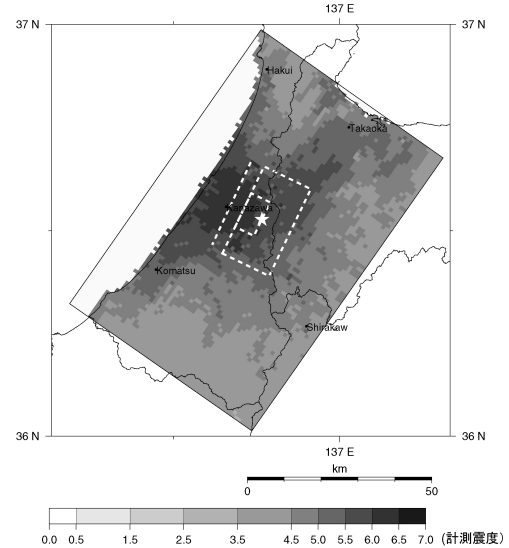


図-2 地表での計測震度の分布図（森本・富樫断層帯の地震）。

度震源スペクトルの短周期レベル A (dyn・cm/s²)の経験的関係をもとに、次式を用いて求める。

$$\begin{aligned} S_a &= \pi r^2 \\ r &= \frac{7\pi}{4} \cdot \frac{M_0}{A \cdot R} \cdot \beta^2 \\ A &= 2.46 \cdot 10^{17} \cdot M_0^{1/3} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 R は断層面積と面積が等しい円形クラックの半径、 β は震源域のS波速度。

アスペリティと背景領域でのそれぞれの平均滑り量 D_a 及び D_b の比は、2対1とする。

アスペリティでの平均応力降下量は、次式を用いて求める。

$$\Delta\sigma_a = \frac{7}{16} \cdot \frac{M_0}{r^2 R} \quad (3)$$

アスペリティでの実効応力 σ_a は、この平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ と等しいと仮定する。また、背景領域での実効応力は、次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{(D_b/W_b)}{(D_a/W_a)} \cdot \sigma_a \quad (4)$$

ここで、 W_a および W_b は、アスペリティ及び背景領域の幅を示す。

f_{max} については、地域性を考慮して地震毎に設定する。しかし、データの蓄積は未だ十分ではない。

滑り時間関数としては、動力学的震源モデルに関する考察より得られた近似式⁶⁾を用いる。

c) その他の震源特性

その他の震源特性としては、破壊開始点、破壊形態、破壊伝播速度がある。

破壊開始点については、活断層の分岐形態が利用できる場合それにより推定し、アスペリティの外側に置く。内陸活断層の場合、特に情報がない場合、アスペリティの下部に置く。破壊の開始点とアスペリティの位置関係は、強震動分布に大きく影響するので、モデル設定の根拠が十分でない場合、複数のケースを想定する。破壊形態は、破壊開始点から一

定速度で、同心円状に破壊が伝播するとする。破壊伝播速度は、 $V_r = 0.72\beta$ とする⁷⁾。

(2) 地下構造のモデル化

地下構造のモデル化では、上部マントルから地震基盤（S波速度3km/s相当層）までの地殻構造、地震基盤から工学的基盤（S波速度300m/s～700m/s相当層）までの深部地盤構造、工学的基盤から地表までの浅部地盤構造に分けてモデル化を行う。

a) 地殻構造

地震学的手法により求められた地震波速度構造、地震波減衰構造を用いてモデルを作成する。内陸の活断層の地震では、深さ方向にモホ面を含む領域まで、また海溝型の地震では、プレートの構造をモデリングする必要がある。

b) 深部地盤構造

深部地盤構造は、地震動の比較的長周期部分の特性に大きな影響を与える地下構造であり、決定論的に扱える周波数領域での地震動の計算において重要な要因となる。深部地盤構造モデリングのためのデータとしては、深層ボーリング、反射法・屈折法弾性波探査、微動探査、重力探査などのデータがある。ただし、これらのデータは地域により一様ではないため、地域ごとに、データの蓄積の状況に応じたモデル作成の考え方が必要となる。強震動評価のための地下構造モデリングにおいては、弾性波の速度構造が最も重要なパラメータとなる。従って、これらの値を直接的に求めることのできるデータが多く得られるほどモデル化の精度は高まると考えられる。十分なデータが利用できる場合、複数の深部ボーリングデータにより速度構造を各点毎に正確に把握し、広域的な形状は屈折法データ、山地境界部等の詳細な構造は、反射法探査データから推定し、それらの隙間を微動アレイ探査や重力探査、地質情報等を用いて補完することにより三次元構造モデルを作成する。実際の地震動観測記録とその構造モデルを用いた計算結果を比較することにより、作成した構造モデルの検証を行うことが望まれる。

しかし、実際には上述した手法により3次元構造モデルを作成するに足る情報が十分に得られていない場合が多い。このような場合、面的な情報として利用可能なものは、重力探査データ及び地質構造情報であり、これらを用いて間接的に速度構造を推定しなければならない。重力探査データは、密度構造を反映したものであり、重力探査データのみから速度構造を求めると不確定性が大きくなる。このため、これを補完するために地質構造情報を用いたモデリングを行うことも有効である。

c) 浅部地盤構造

浅部地盤構造のモデル化では、表層地質データやボーリングデータを用いて地盤構造モデルを作成することが基本となる。ただし、浅部地盤構造は局所的な変化が大きく、面的に精度良く広域を覆う浅部地盤モデルを作成するためには、膨大なデータ収集が必要となる。そのため、現状では、広域での面的

な評価が必要な場合には、簡便な表層地盤増幅率の評価法として、国土数値情報を利用した手法⁸⁾を用いている。具体的には、全国を網羅した3次メッシュ（約1kmメッシュ）の国土数値情報のうち、地形区分データ及び標高データ等に基づいて、微地形区分データを作成し、それぞれの微地形区分に対して標高や主要河川からの距離を考慮した経験式を用いて、表層30mの平均S波速度を計算し、次に、表層30mの平均S波速度と工学的基盤から表層への地震動の最大速度の増幅率との経験的な関係式を用いて、それぞれのメッシュ毎の浅部地盤による最大速度の増幅率を得る。

一方、浅部地盤に対する情報が十分に収集可能な場合は、より詳細なモデル化の手法として、多数のボーリングデータ及び地形・地質データを収集し、地形・地質から区分できる地域ごとに代表となるボーリング柱状図を抽出し、これをメッシュ毎に当てはめる方法も有効である。

(3) 波形合成法（ハイブリッド法）

地震動の特性は、低周波数帯域では弾性波動論に基づいた決定論的な物理モデルによる理論的考察によりある程度定量的に説明可能であることが、過去に起きた地震動の記録を解析することにより明らかにされてきている。一方で、高周波数帯域では、震源のモデル化及び地下構造のモデル化の双方において、物理モデルに基づく理論的な予測に必要とされるパラメータ決定のための情報量が不足し、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る。詳細な手法による強震動評価では、周波数帯域が0.1Hz～10Hz程度の地震動を評価することを目指しており、この周波数帯域には、上述した低周波数帯域及び高周波数帯域の両方、そしてそれらの中間の遷移周波数帯域が含まれている。

このように物理的性質の違う2つ周波数帯域を含んだ広周波数帯域に対して強震動の評価を行うためには、それぞれの周波数帯域の特徴を活かした計算手法を用いることが最も効率的である。ハイブリッド法は、このような背景の中で提案された手法である。ハイブリッド法では、決定論的な取り扱いが有効な低周波数帯域に対しては、有限差分法^{9),10)}や有限要素法¹¹⁾により弾性波動論に基づいた理論的なモデルに対して波形計算を行い、統計的な取り扱いが必要な高周波数帯域に対しては、統計的グリーン関数法¹²⁾と呼ばれる半経験的な手法を用いて波形合成を行う。最後に遷移周波数領域においてそれぞれに対してマッチングフィルター処理を施して重ね合わせることで、全周波数帯域での計算を行う。

a) 低周波数帯域での計算法

低周波数帯域での波形合成は、特性化震源モデルと地殻構造及び深部地盤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^{9),10)}や有限要素法¹¹⁾など

の数値計算手法を用いて解くことにより行う。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により、現在では、現実に近いモデルに対する計算が実施可能となりつつある。具体的には、例えば、森本・富樫断層帯の地震に対する強震動評価では、90km*60km*40kmの領域を地震基盤より上部を100mメッシュでモデル化した計算を、有限差分法を用いて行っているが、この場合の計算時間は、防災科学技術研究所の計算機（origin3800）で64cpuを用いた並列計算を行った場合、6000タイムステップの計算で4時間半程度を要した。計算量の見積もりの目安として、同一の領域に対して計算メッシュサイズが半分になると、計算時間は16倍、計算に必要なメモリー容量は8倍となるため、計算機環境及び作業工程を踏まえたモデル作成が必要となる。

b) 高周波数帯域での計算法

高周波数帯域の計算で用いられる統計的グリーン関数法¹²⁾は、経験的グリーン関数法をもとに作り出された手法である。経験的グリーン関数法では、大地震による強震動を評価するために、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グリーン関数として用い、大地震の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評価に有効な手法と考えられている。しかし、現実には、強震動の評価を行う場合、評価すべき大地震に対して評価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。このような場合にも適用できる手法として提案された統計的グリーン関数法では、グリーン関数として中小地震の記録の代わりに、統計的に評価された関数をグリーン関数として用いることにより、データが十分得られていない場合でも評価可能となっている。ただし、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、本来グリーン関数が持っている位相情報が失われているため、対象地域及び震源固有の特性を十分には反映しきれないという限界がある。

c) 2つの手法の重ね合わせ

ハイブリッド法による低周波数帯域と高周波数帯域の接続は、現状では1Hz程度の周波数を設定して、マッチングフィルターを用いて行っている。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帯域と、統計的なモデリングが可能な周波数帯域の遷移周波数帯域内に設定すべきであるが、現状では、以下の3つの理由により、接続周波数が物理的な遷移周波数帯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 震源のモデル化の限界
- ③ 地下構造のモデル化の限界

3. 今後の技術的課題

シナリオ地震による地震動予測地図の作成においては、ある特定のシナリオを選定する必要がある。現在行われている選定の基準では、将来最も起こる

可能性が大きなシナリオを選定することになっている。しかし、将来発生する地震について、これまでの調査で得られた情報は限られており、シナリオの選定においては多くの不確定要因を抱えた状況での判断が必要となる。このため、パラメータ設定の不確定性に伴う評価結果のばらつきの評価が重要な課題となっている。

また、ハイブリッド法の精度を上げるためには、前述した3つの要因について、計算技術の高度化、震源モデルの高度化及び地下構造モデルの高精度化が不可欠である。このうち計算技術については、近い将来問題が解決されることが期待できる。一方、震源及び地下構造に関しては、地震観測網の充実及び地下構造情報のデータベース化が研究発展にとって不可欠であり、これまで以上に積極的な取り組みが望まれる。

謝辞：本研究は、地震調査研究推進本部地震調査委員会及び関連する部会・分科会の指導の下に実施された。

参考文献

- 1) 地震調査委員会：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について、2002.
- 2) 地震調査委員会：宮城県沖地震を想定した強震動評価について、2003.
- 3) Somerville, P.G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, T., Kagawa, T., Smith, N., Kowada, A.: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological Research Letters*, 70, 59-80, 1999.
- 4) Wells, D.L. and Coppersmith, K.J.: New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 974-1002, 1984.
- 5) 入倉孝次郎, 三宅弘恵：シナリオ地震の強震動予測, *地学雑誌*, 110, 849-875, 2001.
- 6) 中村洋光, 宮武隆：断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式, *地震*, 53, 1-9, 2000.
- 7) Geller, R.J.: Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 66, 1501-1523, 1976.
- 8) 松岡昌志, 翠川三郎：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資料集, 23-34, 1994.
- 9) Pitarka, A.: 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 54-68, 1999.
- 10) Aoi, S., and Fujiwara, H.: 3D finite-difference method using discontinuous grids, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 918-930, 1999.
- 11) 藤原広行, 藤枝忠臣：3次元動弾性解析のためのボックス有限要素法, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, 94, 2002.
- 12) 壇一男, 佐藤俊明：断層の非一様滑り破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測, *日本建築学会構造系論文集*, 509, 49-60, 1998.

(2003.9.10 受付)