

地震動予測手法の違いが 推定震度分布に及ぼす影響の要因分析

能島 暢呂¹

¹岐阜大学工学部社会基盤工学科教授（〒501-1193 岐阜市柳戸1-1）

E-mail:nojima@gifu-u.ac.jp

「全国地震動予測地図」の「震源断層を特定した地震動予測地図」と「確率論的地震動予測地図」では、工学的基盤における強震動予測手法としてそれぞれ強震動シミュレーション手法による「詳細法」と距離減衰式による「簡便法」が適用されている。本研究では、日本全国の主要活断層帯に発生する地震158ケースを対象として、両手法による推定震度分布の面積比較を行って整合性を検証した。さらに、揺れの広がりの違いを震度6弱以上の面積比（詳細法÷簡便法）で表し、その要因分析を行った。モーメントマグニチュード、深部地盤モデルによる深部地盤深さ（せん断波速度700, 1700, 2700m/sの各上面深度）、平均せん断波速度を説明変数とした重回帰分析により、面積比の予測式を構築した。

Key Words : seismic hazard map, strong motion prediction, detailed method, conventional method, isoseismal area, moment magnitude, deep sedimentary layers

1. はじめに

地震調査研究推進本部調査委員会は、「全国地震動予測地図」として「震源断層を特定した地震動予測地図」と「確率論的地震動予測地図」を作成しており¹⁾⁻²⁾、前者では強震動シミュレーション手法による「詳細法」が、後者では距離減衰式による「簡便法」が適用されている。これら2種類の地震動予測地図は、地震防災対策への活用という面では目指すところは同一であり、両地図の融合により互いの精度向上を図る必要性が議論されている。「確率論的地震動予測地図」に詳細法を適用することは、その有力な方向性として検討されているものの、全ての地震を考慮して評価されるこの地図において、全面的に詳細法を取り入れることは計算負荷の面から困難である。とはいえ、簡便法と詳細法の整合性を検証することは、両地図の融合に先立って実施しておくべき重要課題であり、簡便法に換えて詳細法を取り入れた場合に想定される変化を検討しておくことが重要である。

詳細法による最大速度の推定にあたっては、簡便法で用いられている最大速度の距離減衰式の予測値の中央値±標準偏差の範囲や実地震での観測値から大きく外れていないことが確認されることになっている。また、詳細法と簡便法の震度分布の面的な比較を通じて、整合性・妥当性の確認や各手法の特徴

抽出といった検証がなされている。しかしこれらは、一つ一つの活断層に限定して個別的に比較が行われるのが通常であり、日本全国の活断層を対象とした網羅的な整合性に関する検証は行われていない。そこで本研究では、日本全国の主要活断層帯のすべてを対象として、両手法により推定された推定震度分布の広がりを震度階ごとの面積で比較し、網羅的な検証を行うことにより、揺れの広がりについて検証し、その影響要因について分析を行うものである。

2. 使用データと揺れの面積の比較方法

本研究では、揺れの広がりを表す近似的な面積比較方法として、所定の震度レベル（震度5強, 6弱, 6強）以上となる震度曝露メッシュ数の集計を行う。震度曝露メッシュ数とは「所定の震度レベルに曝されるメッシュ数」である。1メッシュあたりの面積は緯度に依存するので厳密な面積比較にはならないが、地震ごとの強震域の比較においては、ほぼ等価な結果を得ることができる。

集計に用いたデータは、2010年度版全国地震動予測地図に関して（独）防災科学技術研究所の「地震ハザードステーションJ-SHIS³⁾」で公開されている4分の1地域メッシュ（約250m四方）データである。

検証を行う対象は、主要活断層帯全178断層のうち詳細法が適用されている158断層とする。

主要活断層帯を対象とした地震動予測地図の作成領域は、断層帯ごとに個別に設定されている。「詳細法」では、断層端部からの水平距離が約50kmの範囲を含む矩形領域（M7程度で震度5強をおおむね包含）である。これに対して「簡便法」では、断層端部からの水平距離が約80kmの範囲を含む矩形領域（震度5弱をおおむね包含）である。

「詳細法」では断層パラメータ設定（アスペリティの配置方法や断層破壊開始地点など）の違いが及ぼす影響を考慮するため、1断層あたり複数ケースのシミュレーションが行われており、延べ512ケースとなっている。本研究では、まず全ケースに関する詳細法による地表の推定震度分布データに基づいて震度曝露メッシュ数を集計し（①詳細法全ケース）、さらに各断層の複数ケースに関する平均値を集計した（②詳細法平均）。

一方、「簡便法」は178断層すべてに適用されており、距離減衰式に基づく推定震度の中央値に基づく地表の推定震度分布データを用いた震度曝露メッシュ数の集計を行った（③簡便法期待値）。また、実際に観測される震度には、距離減衰式まわりのばらつきが加わるため、その影響も考慮した推計として、距離減衰式に基づく推定震度に $\sigma=0.45$ のばらつき（最大速度の距離減衰式および最大速度から震度への変換式のばらつきの合成値）⁴⁾を考慮した震度曝露メッシュ数の集計も行った（④簡便法平滑化）。さらに各断層に起因する地震発生を条件として、距離減衰式のばらつきを考慮し、各震度レベルの超過確率を算出した条件付超過確率地図も公表されている。本研究では、各震度レベルに関する超過確率によって重み付けした震度曝露メッシュ数も集計した（⑤超過確率期待値）。以上の集計方法を表-1にまとめた。

3. 震度曝露メッシュ数の集計結果と詳細法・簡便法の比較

例としてまず、養老-桑名-四日市断層帯に関するデータを図-1に示し、集計結果を表-2に示す。なお、詳細法における震度分布は震度5強の範囲は必ずしも網羅されておらず、5強以上における集計結果はやや過小評価となっている可能性がある。

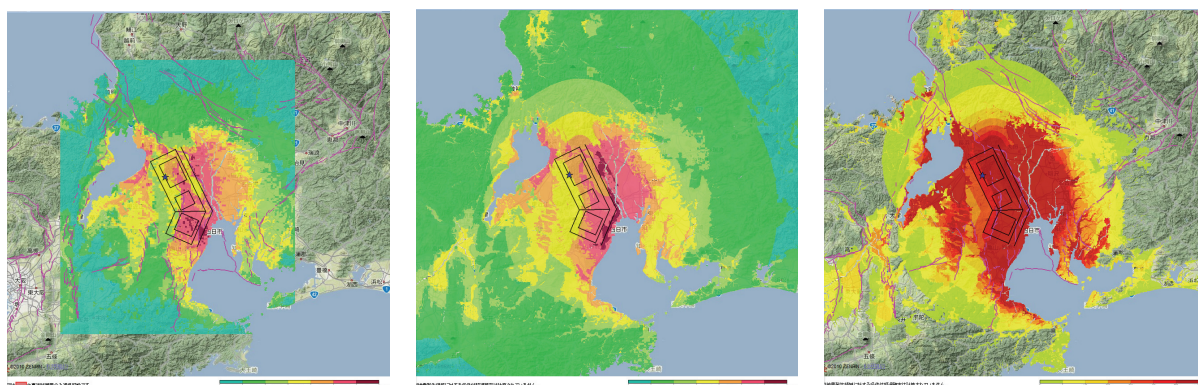
工学的基盤より浅い地盤構造（表層地盤）による地震動増幅率の評価に用いられているのは、日本全国地形・地盤分類 250m メッシュマップに基づいて推定された、地表から深さ 30m までの地盤の平均 S 波速度（AVS30）であり、両地図で共通である。従って、地表の震度曝露メッシュ数を比較する上では、表層地盤による地震動増幅率の影響は相殺され、手法の相違が直接的に表れると考えてよい。

表-1 震度曝露メッシュ数の集計方法

①詳細法全ケース	詳細法による複数ケースの震度分布データをもとに集計した値
②詳細法平均	詳細法の複数ケースに関する集計結果を断層ごとに平均した値
③簡便法期待値	距離減衰式に基づく推定震度の中央値の震度分布データをもとに集計した値
④簡便法平滑化	距離減衰式に基づく推定震度に $\sigma=0.45$ のばらつきを考慮した値
⑤超過確率期待値	所定の震度以上となる確率で重み付け集計した値

表-2 養老-桑名-四日市断層帯に関する震度曝露メッシュ数の集計

集計方法	5弱以上	5強以上	6弱以上	6強以上
①詳細法全ケース Case 1	101400	68145	38055	15696
①詳細法全ケース Case 2	102216	70494	40726	17795
①詳細法全ケース Case 3	99167	65680	38365	16874
①詳細法全ケース Case 4	99082	65610	37394	16981
①詳細法全ケース Case 5	98724	64543	36160	16571
①詳細法全ケース Case 6	96249	63261	34264	15955
②詳細法平均	99473	66289	37494	16645
③簡便法期待値	219581	123250	61151	26424
④簡便法平滑化	246828	137707	71681	31950
⑤超過確率期待値	232926	127401	64879	27798



(a) 詳細法による震度分布（ケース 1） (b) 簡便法による震度分布 (c) 簡便法による震度 6 弱の超過確率
図-1 詳細法と簡便法による震度分布および条件付超過確率地図（養老-桑名-四日市断層帯）³⁾

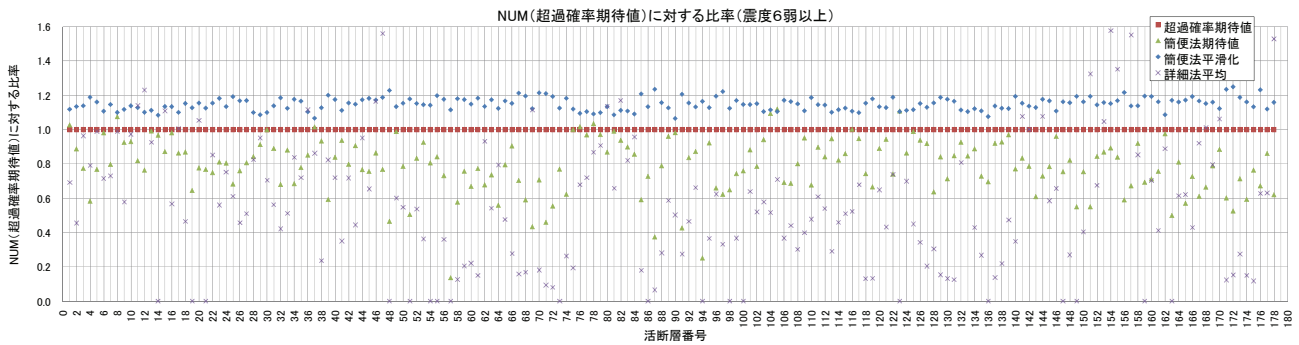


図-2 「超過確率期待値」の震度曝露メッシュ数で基準化した比較（震度6弱以上）

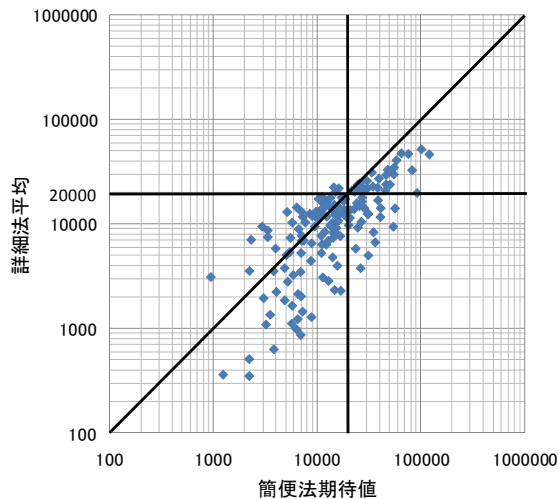


図-3 震度曝露メッシュ数の比較（震度6弱以上）

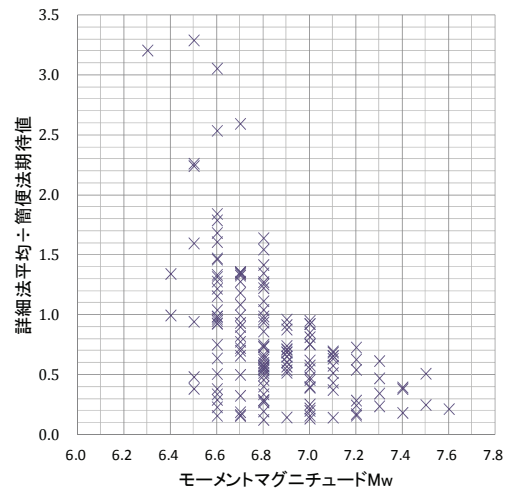


図-4 面積比 r （詳細法÷簡便法）と M_w の関係（震度6弱以上）

次に、すべての活断層帯178断層に4つの集計方法（②詳細法平均、③簡便法期待値、④簡便法平滑化、⑤超過確率期待値）適用して集計を行った。以下では、紙面制約のため、震度6弱以上の集計結果についてのみ示すこととする。

図-2は、⑤超過確率期待値を基準として、③簡便法期待値、④簡便法平滑化、②詳細法平均を基準化したものである。横軸の活断層番号は、J-SHISのファイル規約³⁾で定められた主要活断層帯断層コード（F000101 標津断層帯～F010901 人吉盆地南縁断層）の順に割り振ったものである（末尾の21断層を除いてほぼ日本列島の北から南の順となっているが、詳しくはファイル規約³⁾を参照されたい）。なお詳細法が適用されていない19断層についてはメッシュ数0と表示している。全般的に、④簡便法平滑化>⑤超過確率期待値>③簡便法期待値>②詳細法平均の順に大きな値をとる傾向にある。④簡便法平滑化と⑤超過確率期待値による震度6弱以上の揺れが相対的に広がる理由は、ばらつきを考慮して高震度の出現を確率論的に見込んでいることによるものである。ばらつきの処理方法が異なる④簡便法平滑化と⑤超過確率期待値では、大きな違いは見られないが、④簡便法平滑化の方が面積を10～20%程度広く評価していることがわかる。

図-3は、ばらつきを考慮しない③簡便法期待値

（横軸）と②詳細法平均（縦軸）による震度曝露メッシュ数を比較したものである。およそ20000メッシュ以下の領域では、ばらつきが大きいものの、②詳細法平均と③簡便法期待値は大きな偏りなく分布しており、詳細法による強震動評価が平均的に距離減衰式の傾向と整合していることを示唆している。一方、震度曝露メッシュ数がおおよそ20000メッシュ以上の領域では、③簡便法期待値は②詳細法平均よりも系統的に大きな値をとっていることがわかる。

4. 詳細法と簡便法による揺れの広がりの違いの要因分析

(1) モーメントマグニチュード M_w に注目した検証

図-3の傾向を分析するため、地震規模を表すモーメントマグニチュード M_w に注目して検証する。簡便法と詳細法の揺れの広がり違いの要因をより詳細に検証するために、ここでは震度曝露メッシュ数を用いて面積比 r （②詳細法平均÷③簡便法期待値）を定義する。図-4は、 M_w （横軸）と詳細法平均の簡便法期待値に対する震度6弱以上の面積比 r （縦軸）の関係を示したものである。 $M_w \geq 6.9$ では詳細法が簡便法を上回る断層はなく、 M_w が大きいほど詳細法による面積は簡便法による面積より狭く

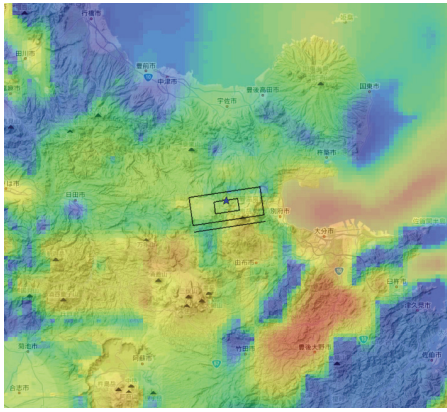


図-5 $V_s=2700\text{m/s}$ 層の上面深度
(大分平野-由布院断層帯西部付近)

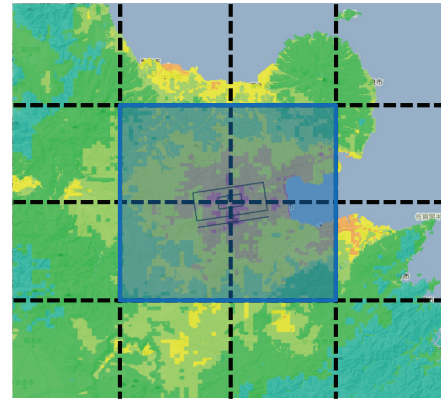


図-6 詳細法の解析領域全体、その中央4分の1の領域
および断層直上の領域（背景図は大分平野-由
布院断層帯西部の地震による予測震度分布）

なる傾向にある。

簡便法では、断層の不均質すべりの影響を考慮せず、断層全体を均質なものとして考え、断層最短距離をパラメータとする距離減衰特性に基づいて地震動強度が評価されている。このため工学的基盤上では断層周辺にほぼ一様に強震域が広がり、図-1(b)にもその傾向が現れている。これに対して詳細法による強震域は、アスペリティ周辺、フォワード・ディレクティビティの方向、揺れやすい地盤が主体となり、揺れの強弱のコントラストが明確である。その傾向は図-1(a)にも現れている。 M_w が大きい場合、こうした効果がより顕著となり、詳細法に対して簡便法が過大評価となると推察される。

逆に M_w が小さい場合では、簡便法では（少なくとも距離減衰式の中央値レベルでは）強震域が現れない。これに対して詳細法では、アスペリティ近傍やディレクティビティの影響で局所的に強震域が現れる。図-2で M_w が小さい領域で、詳細法が簡便法を大幅に上回る断層があることの理由としては、この点が挙げられる。また、 M_w が小さい場合でも詳細法が簡便法を大きく下回っている断層も多い。アスペリティ、ディレクティビティ、軟弱地盤などの位置関係により、強震域が現れなかったことによると考えられる。

以上、面積比 r の傾向を M_w によって説明することを試みたが、図-4は下に凸の傾向を示し、ばらつきが大きいので、他の影響要因を考慮する必要があることがわかった。

(2) 深部地盤構造に注目した検証

詳細法では工学的基盤における地震動予測を行う際に、S波速度 3km/s 程度の地震基盤以浅の深部地盤構造における地震波の屈折・反射による増幅効果を考慮している。簡便法では距離減衰式により工学的基盤での地震動予測を行うためこうした増幅効果は考慮されていない。糸井・高田⁴⁾は、深部地盤による増幅効果を考慮して加速度応答スペクトルの距離減衰式を補正する方法を提案した。

本研究でもこの増幅効果を考慮するため、「地震

ハザードステーションJ-SHIS³⁾」で公開されている3次メッシュデータの深部地盤モデルデータ⁶⁾を用いた検討を行う。深部地盤深さ $D[\text{m}]$ は33種類のS波速度の各層の深さがデータ化されており、本研究ではこの中から、工学的基盤相当($V_s=600\text{m/s}$)に近い第8層($V_s=700\text{m/s}$)上面深度 $D_{700}[\text{m}]$ 、中間層として第21層($V_s=1700\text{m/s}$)上面深度 $D_{1700}[\text{m}]$ 、地震基盤面相当の第29層($V_s=2700\text{m/s}$)上面深度 $D_{2700}[\text{m}]$ を用いる。なお、地域ごとに異なる調査結果に基づくデータベースとなっているため、 $V_s=600, 1700, 2700\text{m/s}$ に相当する層が全メッシュで定義されているわけではない。そこで各メッシュで $V_s=600, 1700, 2700\text{m/s}$ 以上となる層が始めて現れる層の深さを採用した。加えて地震基盤から工学的基盤まで地盤特性の総合的指標として $V_s=600\sim 2700\text{m/s}$ 層までの平均せん断波速度 $\text{Ave } V_s[\text{m/s}]$ を用いる。

例として大分平野-由布院断層帯西部周辺の $V_s=2700\text{m/s}$ 層の深度を図-5に示す。ここで D と $\text{Ave } V_s$ は3次メッシュごとに定義されるが、各断層固有の1つの値とするため、ある対象範囲内で平均値をとることとする。その対象範囲については、(1) 詳細法の解析領域全体、(2) 詳細法の解析領域を16分割した中央部分の4分の1の領域（図-6参照）、(3) 断層面直上の領域（強震動評価のために定められた断層のポリゴンを地上に投影した領域、ただし横ずれ断層については地表投影された断層線が通過するメッシュ群）、の3種類を検討対象とし、それぞれの範囲内における平均値を算出した。次章の分析もすべて実施した結果、上記のうち(2)が、深部地盤の影響を最も効果的に表せたことから、本研究ではこの範囲を採用する。

震度6弱以上面積比 r （詳細法÷簡便法）と深部地盤深さ D との関係を図-7に示す。両対数軸上での線形回帰曲線も示している。すべての層に関して、平均深さと面積比 r に弱いながらも正の相関($R=0.467\sim 0.542$)が認められ、深部地盤深さが深いほど地震動が大きく増幅されることを示している。同様に、面積比 r と平均せん断波速度 $\text{Ave } V_s$ との関

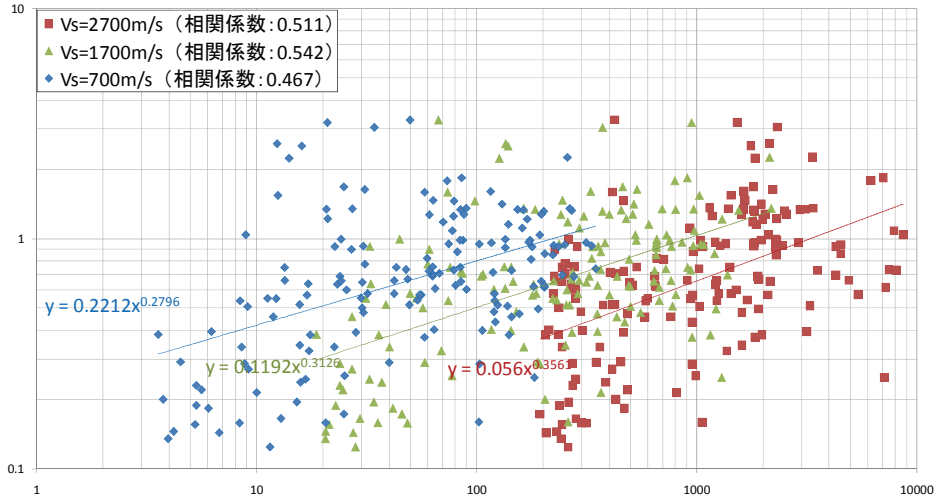


図-7 面積比 r (詳細法÷簡便法, 縦軸) と深部地盤深さ D (横軸) との関係 (震度 6 弱以上)

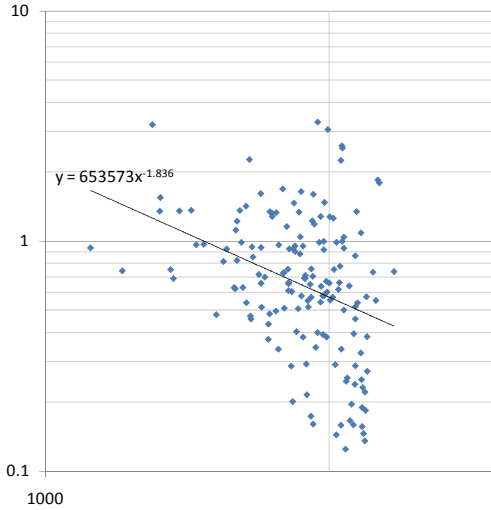


図-8 面積比 r (詳細法÷簡便法, 縦軸) と平均せん断速度 $Ave V_s$ との関係 (震度 6 弱以上)

係を図-8 に示す。弱い負の相関 (相関係数 $R=0.346$) がみられ、対象範囲内の平均せん断速度が小さい断層では、詳細法により集計された面積が簡便法よりも相対的に大きくなる傾向を示している。

(3) 移動平均による影響要因の検討

(1) (2) に示した影響要因について、さらに詳しく検討する。震度 6 弱以上の面積比 r の常用対数 $\log_{10} r$ と各要因の関係を図-9 に示す (以下では対数はすべて常用対数とし底の 10 を省略)。 M_w 以外の説明変数は常用対数をとって表示しており、図中の赤線は移動平均を示す。面積比 $\log r$ と M_w の間には、移動平均はほぼ直線的であり、負の相関 ($R=0.494$) がみられるが、若干下に凸の傾向が見られる。

$\log r$ と深部地盤深さ D の常用対数 ($\log D_{700}$, $\log D_{1700}$, $\log D_{2700}$) について移動平均をみると、深さが一定以上の深さになると $\log r$ の値の推移は頭うちとなる傾向が見られ、移動平均は上に凸の形状を示す。一方、 $\log r$ と $\log Ave V_s$ については、移動平均

から判断すると、平均せん断速度が一定以上になると急激に面積比が低下する傾向がみられる。

5. 予測モデル式による簡便法による面積の補正

詳細法の簡便法に対する面積比 r を目的変数、上記の各要因を説明変数とする重回帰分析を行い、予測モデル式を構築する。図-9 に表示された移動平均線は直線的傾向からはずれる部分がある。この傾向を踏まえ、予測モデル式は、式(1)に示すように、まず各説明変数の 2 次の項まで考慮しておき、変数減少法を適用して、赤池情報量規準 AIC が最小化されるモデル選択を行うこととした。

$$\log r = a + b_1 M_w + b_2 M_w^2 + c_1 \log D_{700} + c_2 (\log D_{700})^2 + d_1 \log D_{1700} + d_2 (\log D_{1700})^2 + e_1 \log D_{2700} + e_2 (\log D_{2700})^2 + f_1 \log Ave V_s + f_2 (\log Ave V_s)^2 \quad (1)$$

AIC は、モデルのデータへの当てはまりの良さ (対数尤度：大きいほど良好) を表す項と、モデルの複雑化に対するペナルティ (パラメータ数：少ないほど良好) を表す項からなる。AIC を最小化するモデルを選択すれば、予測精度とシンプルさのバランスがとれた良好なモデルが選択される。震度 6 弱以上に関する面積比 r について得られた予測モデル式を示す。

$$\log r = 17.416 - 4.490 \times M_w + 0.279 M_w^2 + 0.821 \times \log D_{700} - 0.228 (\log D_{700})^2 + 0.795 \times \log D_{1700} - 0.187 (\log D_{1700})^2 + 0.337 \times \log D_{2700} - 0.226 (\log Ave V_s)^2 \quad (2)$$

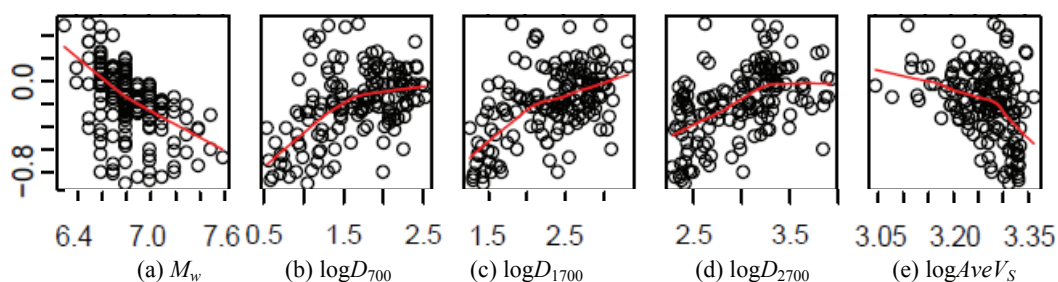


図-9 面積比 $\log r$ (詳細法÷簡便法, 縦軸) と各要因の関係 (震度 6 弱以上)

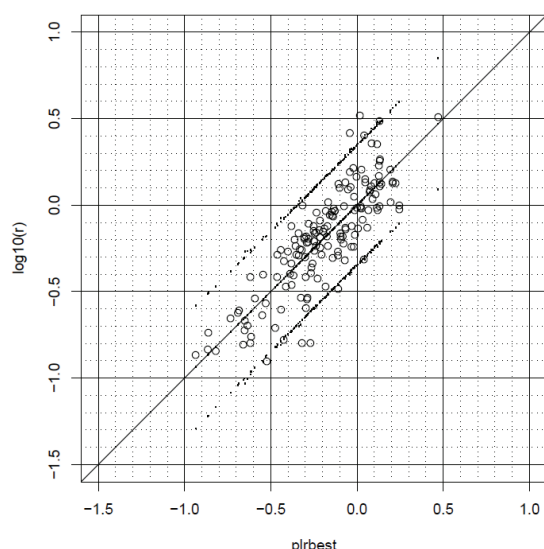


図-10 面積比 r の予測値と実測値の比較 (震度 6 弱以上)

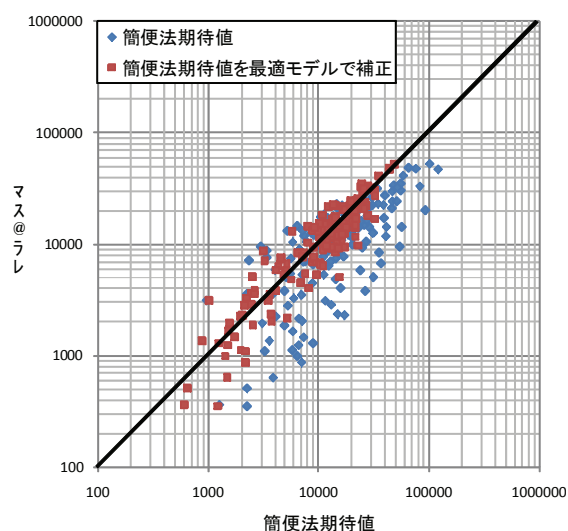


図-11 詳細法平均と簡便法期待値 (補正無, 有) の比較 (震度 6 弱以上)

震度6弱以上における面積比 r の実測値 (縦軸) と予測モデル式による予測値 (横軸) を図-10に示す。1:1線に並行するプロットは95%信頼区間を示す。高い相関 ($R=0.829$) を示しており、詳細法と簡便法の揺れの広がりの違いを、式(2)でかなり説明可能であると考えられる。

ここで、詳細法による結果を真値と仮定して、距離減衰式そのものに新たなパラメータを加えることなく、簡便法を用いた予測震度分布に補正を行うことで、詳細法に整合させることを検討する。図-11は震度6弱以上に関する結果である。詳細法平均と補正前の簡便法期待値との相関係数は0.726であったのに対し、補正後の相関係数は0.923となり詳細法による面積との整合性が高くなっている。特に、震源規模が大きい震度曝露メッシュ数が20000メッシュ以上の断層において補正効果が大きく、系統的なずれが解消されている。

6. おわりに

本研究で得られた成果を以下に示す。

- 1) 評価手法の違い (簡便法と詳細法) とばらつきの考慮の有無という 2 つの観点から、4 つの集

計方法 (詳細法平均, 簡便法期待値, 簡便法平滑化, 超過確率期待値) を用いて、主要活断層帯 158 断層を対象として推定震度分布の面積比較を行って整合性を検証した。

- 2) 揺れの広がり合いの違いを震度 6 弱以上の面積比 (詳細法平均÷簡便法期待値) で表し、モーメントマグニチュード、深部地盤モデルによる深部地盤深さ (せん断波速度 700, 1700, 2700m/s の各上面深度), 平均せん断波速度との関係を検証した。モーメントマグニチュードは面積比と負の相関を持ち、深部地盤深さは正の相関、平均せん断波速度は負の相関を持つことがわかった。
- 3) これらを説明変数とした重回帰分析により、面積比の予測式を構築した。詳細法平均と簡便法期待値との相関係数は 0.726 であったのに対し、予測式によって簡便法期待値による面積を補正した結果、相関係数は 0.923 に向上した。

地震による被害総量を対象としたリスク評価を行う場合は、強震域の広がり合いが重要な意味を持つため、両手法の整合は重要な検討課題である。今後、簡便法による地震動予測手法の高度化や、「震源断層を

特定した地震動予測地図」と「確率論的地震動予測地図」の融合を目指す上での活用方法を検討する方針である。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測地図 2010年度版，地図編＋手引き・解説編，2010.5.
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測地図 技術報告書，2009.7.
- 3) (独)防災科学技術研究所：地震ハザードステーション (J-SHIS; Japan Seismic Hazard Information Station) ホームページ
- 4) 能島暢呂・藤原広行・森川信之・石川 裕・奥村俊彦・宮腰淳一：震度曝露人口による活断層の地震リスク評価，日本地震工学会論文集 第10巻，第2号，2010，pp.22-40.
- 5) 糸井達哉，高田毅士：深部地盤増幅特性を考慮した地震動距離減衰式の有効性の検討，第13回日本地震工学シンポジウム，pp.3889-3896，2010.
- 6) (独)防災科学技術研究所：強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討，防災科学技術研究所研究資料，第337号，2009.12.

COMPARISON AND ANALYSIS OF SPATIAL EXTENTS OF ISOSEISMAL REGIONS USING DETAILED AND CONVENTIONAL METHODS FOR STRONG MOTION PREDICTION

Nobuoto NOJIMA

Strong ground motions at the engineering bedrock for "Seismic Hazard Maps for Specified Seismic Source Faults" and "Probabilistic Seismic Hazard Maps" are evaluated using a strong motion simulation model (a detailed method) and an empirical attenuation model (a conventional method), respectively. In this study, spatial extents of isoseismal regions evaluated by both methods are compared for 158 cases of earthquakes occurring on major active faults. A multi-regression model is derived for prediction of the ratio of isoseismal areas (detailed / conventional) with independent variables such as moment magnitude, depths of the bedrock surface of deep sedimentary layers and average shear-wave velocities.