

広域地震動評価のための地盤情報

Sub-Surface Soil Information for Estimating Strong Ground Motion in Wide Area

久田嘉章（工学院大学建築学科）

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震を契機に、国や自治体で様々な広域な地震動評価が行われた。例えば、都道府県では活断層を想定した地震被害想定の見直しが行われ¹⁾、また国では地震調査研究推進本部（文部科学省）による地震動予測地図プロジェクト²⁾や、中央防災会議による想定東海地震や東南海・南海地震などの地震被害想定³⁾が行われている。一方、兵庫県南部地震で問題となった地震の直後の初動体制を速やかに確立するために、国や自治体で数多くの早期地震被害推定システムが起動しており、その中で広域地震動のリアルタイムな評価が行われている（例えば文献^{4,5)}）。

1995 年兵庫県南部地震ははじめ、過去の多くの地震災害にみられたように、表層地盤の地震動特性が地震被害に大きく影響することは良く知られている（例えば文献⁶⁾）。従って精度の高い広域地震動評価を行うには、各地域での表層地盤の地震動特性を適切にモデル化する必要がある。本報告では、国や自治体によって広域強震動評価を行う際に用いられている地盤情報や強震動の評価法に関して概説し、強震動予測の高精度化に向けた今後の課題なども述べたい。

2. 全国を対象とした地盤情報と広域地震動評価

全国を対象とした表層地盤データ（ボーリング柱状図、PS 検層データなど）は、残念ながらあまり整備されていないのが現状である。従って全国レベルでの広域な地域を対象とした表層地盤による地震動の増幅特性の評価法は、通常、地形分類図や標高データをもとにした経験式が用いられている（例えば^{2,3,7)}）。ここでは、現在使用可能な地形分類図データと、それを用いた表層地盤の増幅率評価の代表的な手法（松岡・翠川の方法⁸⁻¹⁰⁾）を簡単に説明し、最後にそれらを用いた広域地震動評価の例を紹介する。

a) 地形分類図と標高データ

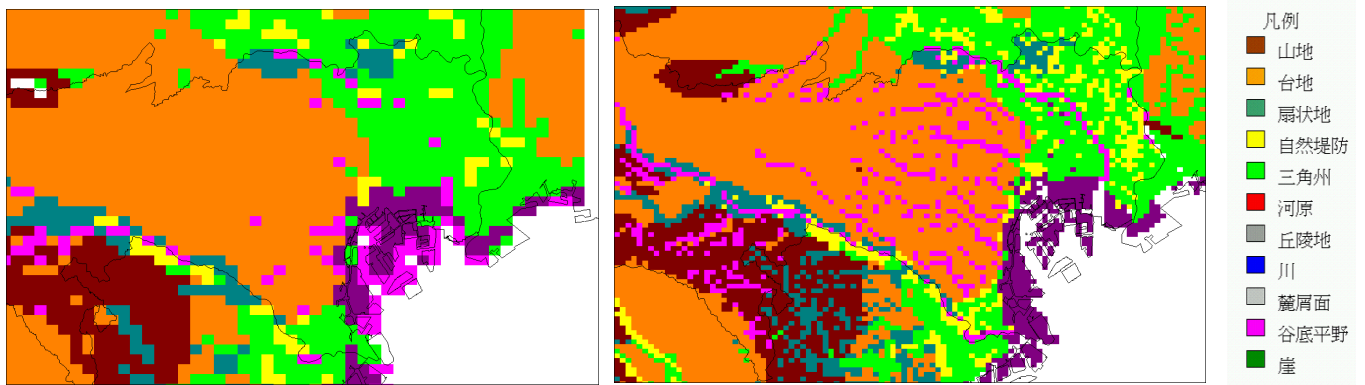
地形分類図は、高度、傾斜や谷密度等の地形に加え、その形成過程を考慮して分類した地図で、一般に山地、

台地、扇状地、自然堤防、砂州、谷底平野、三角州、旧河道、埋立地などに分類される。一般に公開されている地形分類図として「土地分類図」と「土地条件図」がある。

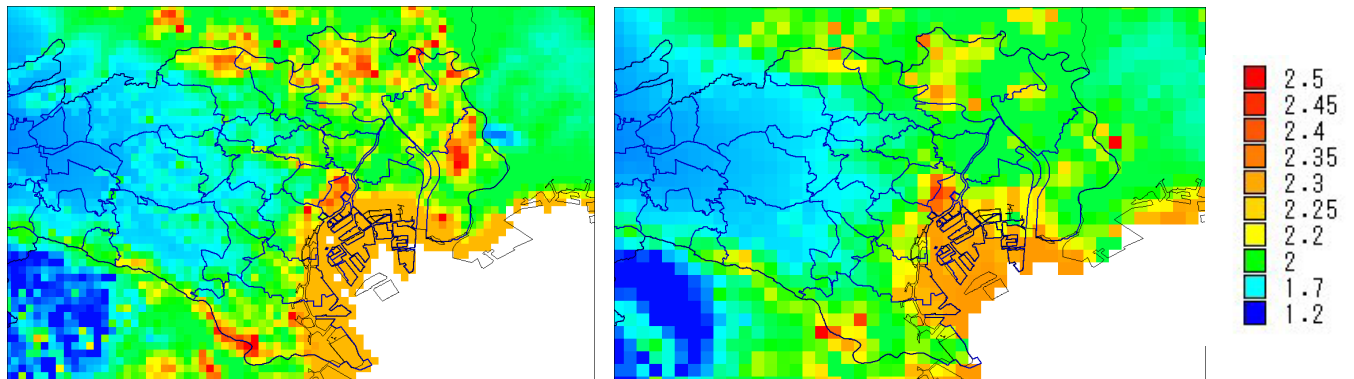
「土地分類図」は、土地分類基本調査により作成され、土地の自然条件や利用現況に関する調査が行われる¹¹⁾。地形分類図のほか、表層地質図、土壌図、土地利用現況図などが作成され、国では 20 万分の 1（または 10 万分の 1）、都道府県では 5 万分の 1 のスケールで地図と説明書にまとめられる。20 万分の 1 地形分類図は全国で整備されており、日本地図センターで地図として販売されているほか、画像データ¹²⁾や国土数値情報として 1 km メッシュの数値データが国土交通省よりダウンロードできる¹³⁾。また 0.5 km メッシュで数値化されたデータも公開されている¹⁴⁾。図 1 にデジタル化された 20 万分の 1 地形分類図の一例を示す¹⁵⁾。一方、都道府県による 5 万分の 1 地形分類図の整備状況は図 2 のとおりである¹⁶⁾。5 万分の 1 地形分類図のデジタル化はあまり進んでいないが、スキャンされた地図は web で公開されている¹¹⁾。また自治体によっては、土地分類細部調査として 1 万分の 1 などの細密な土地分類図も整備している。

一方、「土地条件図」は、1959 年伊勢湾台風による被害体験から生まれたものであり、全国の主要な平野とその周辺について、洪水などの履歴を反映する地形分類や標高データなどハザードマップ作成に必要な地理情報を示した 2 万 5 千分の 1 の地図である¹⁷⁾。例として、関東平野近辺における土地条件図の整備状況を図 3 に示す。現在、スキャンされた地図は web で公開されており、一方、国土地理院地理調査部社会地理課によってデジタル化の作業が進められている（図 4 に一例を示す）。

一方、標高データとして代表的な数値データに、2 万 5 千分の 1 地形図からデジタル化された 50 m メッシュ及び 250 m メッシュデータ（全国で整備）、航空レーザースキャナ測量により計測した 5 m メッシュデータ（主要都市圏のみ整備）などがある。これらのデ



(a) 地形分類図 (国土数値情報¹³⁾: 1 km メッシュ) (b) 地形分類図 (久保他¹³⁾: 0.5 km メッシュ)



(c) 地盤増幅率 (国土数値情報¹³⁾: 1 km メッシュ) (d) 地盤地形分類図 (久保他¹³⁾: 0.5 km メッシュ)

図1 10万分の1土地分類図・地形分類図と松岡・翠川法(1994)による地盤増幅率の例 (東京都)

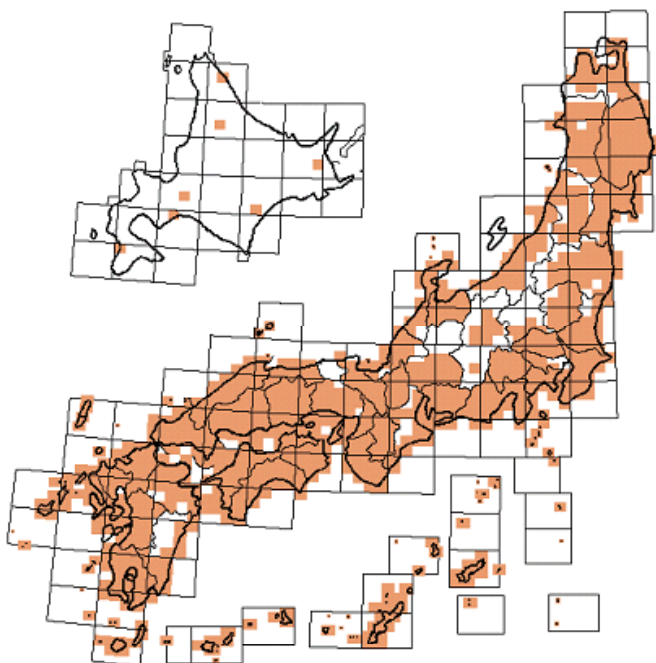


図2 5万分の1土地分類図の整備範囲¹¹⁾

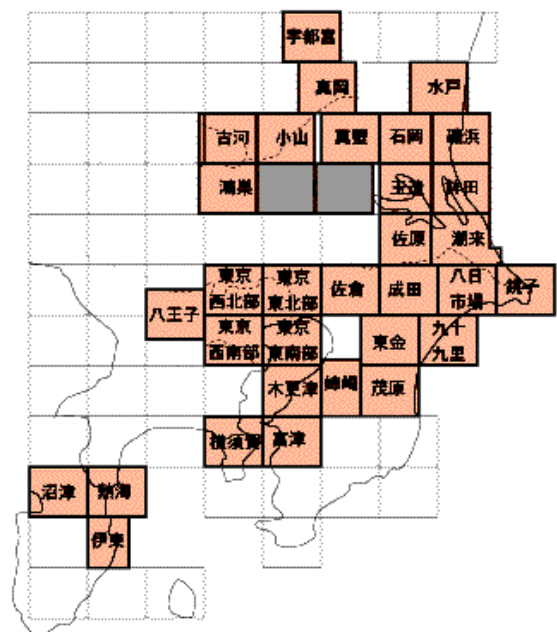


図3 2万5千分の1土地条件図の地形分類 (関東地区の整備状況¹⁷⁾)

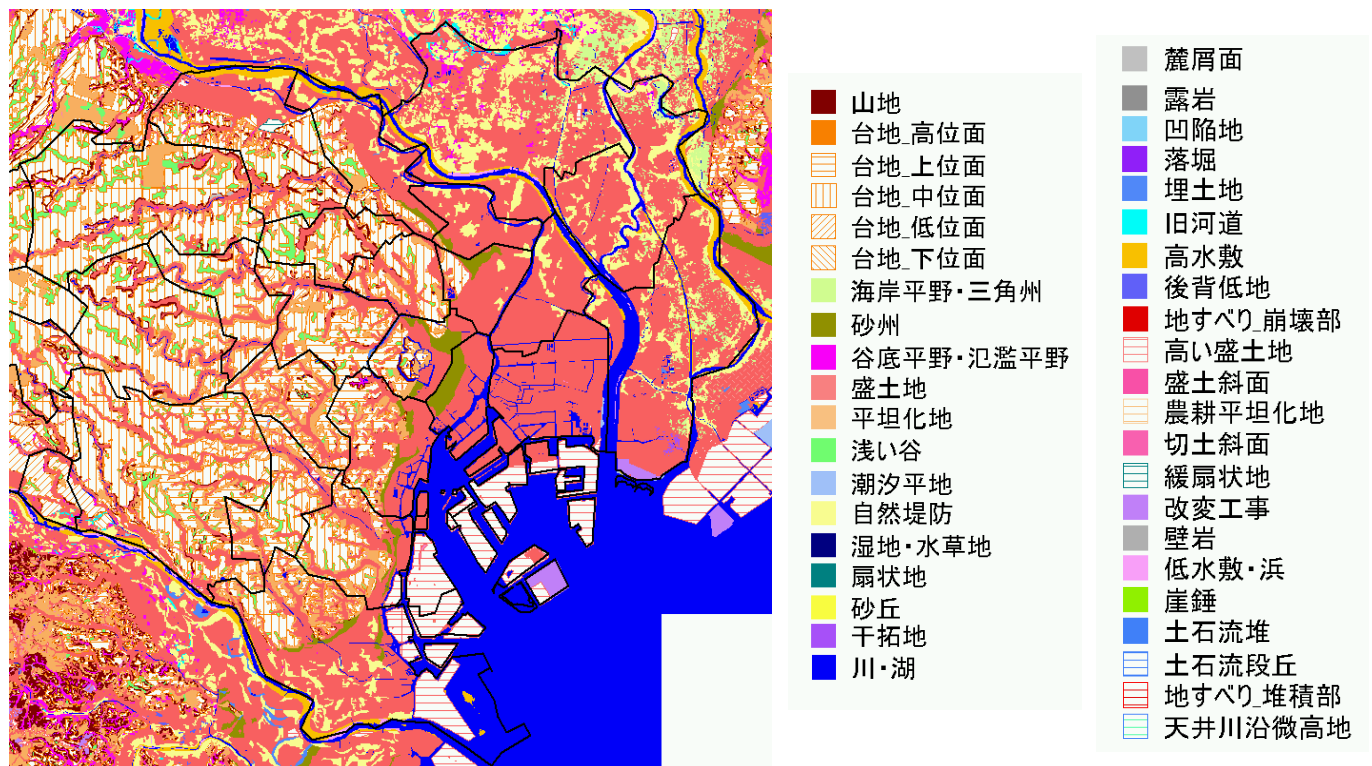


図4 2万5千分1土地条件図・地形分類図の例（国土地理院地理調査部社会地理課より借用）

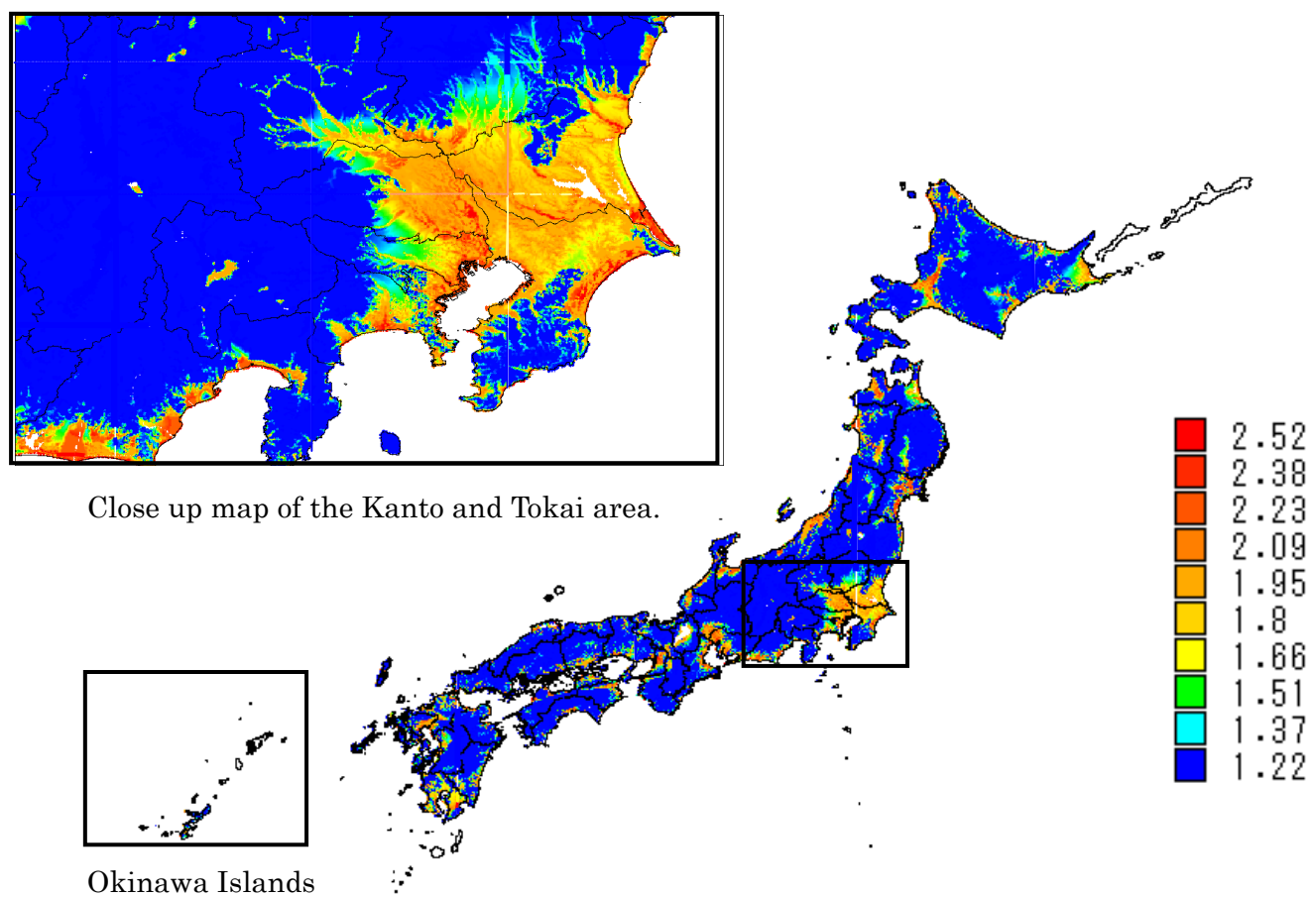


図5 松岡・翠川法(1994)による地盤増幅率の例¹³⁾ (500m メッシュ)

ータは国土地理院で刊行され、日本地図センターより販売されている¹⁸⁾。

b) 松岡・翠川法(1994)による地盤増幅率の評価

松岡・翠川の方法⁸⁻¹⁰⁾は地形分類図と標高データを用いた地盤増幅率の経験的な推定法であり、全国を対象とした地震動評価法として多用されている(地震調査研究推進本部による地震動予測地図の簡略法²⁾や、内閣府の被害想定マニュアル⁷⁾など)。この方法では、過去の地震被害が地震動の最大速度値と相関が良いことから、最大速度に関する地盤の増幅率を評価する。最大速度は、地表から 30m 程度の表層地盤で増幅されるとし、その増幅率に次式を用いる。

$$\log ARV = 1.83 - 0.66 \log AVS_{30} \pm 0.16 \quad (100 < AVS < 1500) \quad (1)$$

ここで、 ARV は最大速度の表層地盤による増幅率、 AVS_{30} は地表から深さ 30m までの平均 S 波速度 (m/s)、0.16 は標準偏差である。さらに AVS_{30} は地形分類と標高より次の経験式で評価する。

$$\log AVS_{30} = a + b \log H + c \log D \pm \sigma \quad (2)$$

ここで H は標高 (m)、 a 、 b 、 c は地形分類により決まる係数、 σ は標準偏差である。また D は主要河川からの距離 (km) で、三角州・後背湿地の場合にのみ用いられる。ちなみに内閣府のマニュアル⁷⁾では D の平均距離として 2 km を用いており、Table.1 にこの場合の係数 a 、 b の値を示す。一例として地形分類データに 0.5 km メッシュデータを用いて、松岡・翠川の方法で評価した全国の増幅率分布を図 5 に示す。

c) 地震動評価の例 (早期地震動評価 : ROSE)

地震の直後には、限られた情報の中で速やかに初動体制を確立する必要がある。兵庫県南部地震を教訓にして、国や自治体で数多くの早期地震動・地震被害推定システムが起動している。ここではその一例として、防災科学技術研究所による面的なリアルタイム広域地震動予測システムである ROSE (地震情報伝達システム) を紹介したい^{19,20)}。

防災科学技術研究所では高感度地震観測網 (Hi-net) や広帯域地震観測網 (F-net) による常時観測を行っている。このため地震の発生後、速やかに震源位置やマグニチュードなどの評価が可能である (約 1 分後を目標)。さらにその後、震源メカニズム解と余震分布を用いて断層面の推定も可能となる (約 30 分程度を目標)。従って既存の距離減衰式 (司・翠川式や安中式など) を用いて工学的基盤における速度値を推定し、さらに (1) 式による表層地盤の増幅率を乗じれば地表での最大速度値が推定できる。さらに最大速度値から経験式による震度も推定できる。震度の経験式として、被害想定マニュアル⁷⁾では

$$I = 2.02 * \log V_{\max} + 2.4 \quad (3a)$$

が、一方、翠川他²¹⁾では次式で与えられている。

$$I = 1.72 * \log V_{\max} + 2.68 \quad (3b)$$

防災科学技術研究所では、さらにイベントトリガーによる強震観測網 (K-net、Kik-net) を持っている。従って地震発生後に強震記録が得られ次第、距離減衰式による推定結果は、強震記録による推定結果に置き換えられる (地震発生から数時間後を目標)。

表 1 松岡・翠川 (1994) による地形分類と (2) 式の係数の関係 (係数 c 、 D に関しては被害想定マニュアルに習い、 $D=2$ 、 $C=0.25$ で計算している)

classifications	classification code	coefficient		the extent of hight	
		a	b	lower	upper
Mountain	1	2.64	0	-	-
Plateau	2	2	0.28	10m	400m
Alluvial fan	3	1.83	0.36	15m	200m
Natural levee	4	1.94	0.32	5m	30m
Sand bar	5	2.29	0	-	-
Valley plain	6	2.07	0.15	10m	500m
Delta	7	2.34	0	-	-
Reclaimed land	8	2.23	0	-	-
River,others	0	-	-	-	-

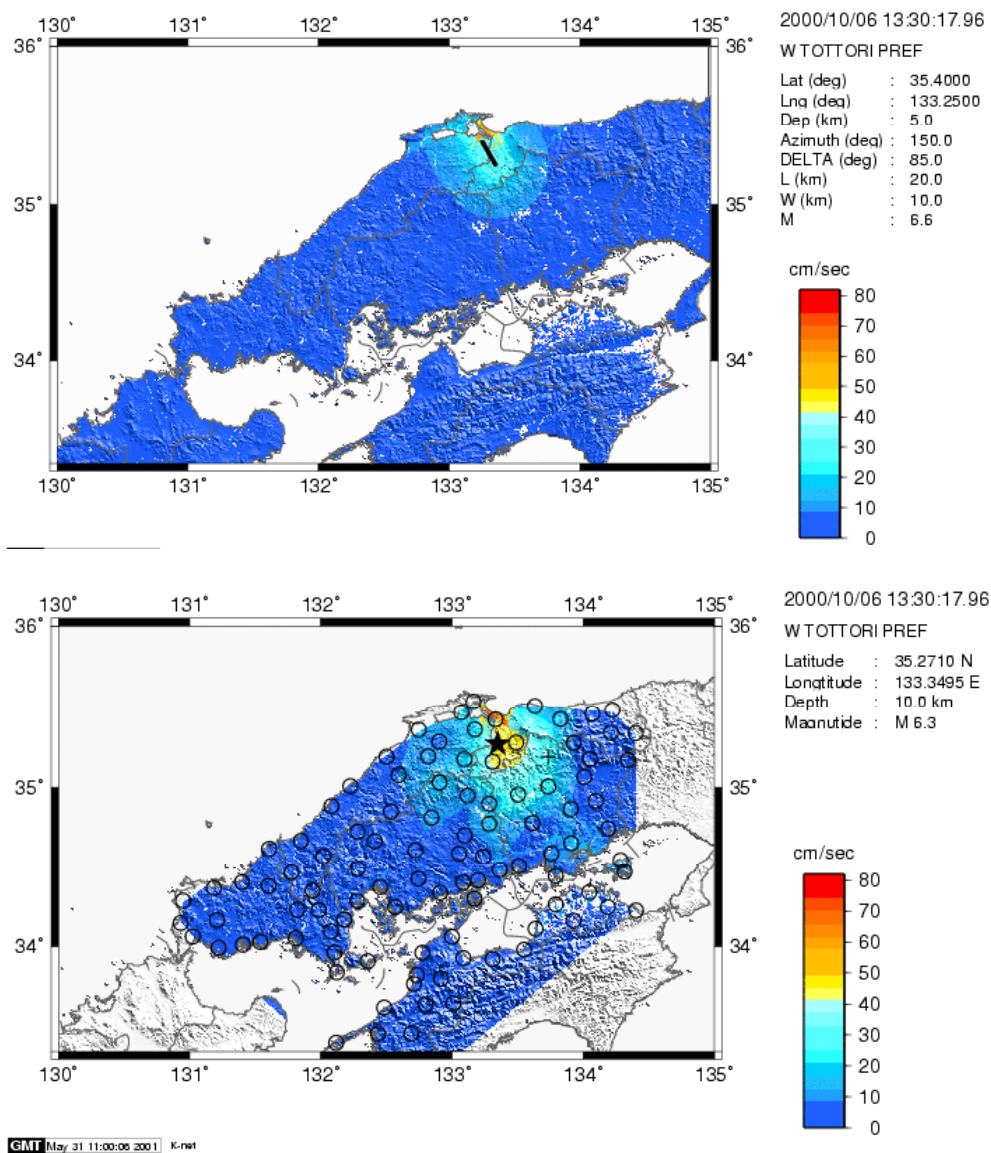


図6 ROSEによる最大速度の鳥取県西部地震の速度推定値²⁰⁾（上：距離減衰式、下：強震観測値から補間）

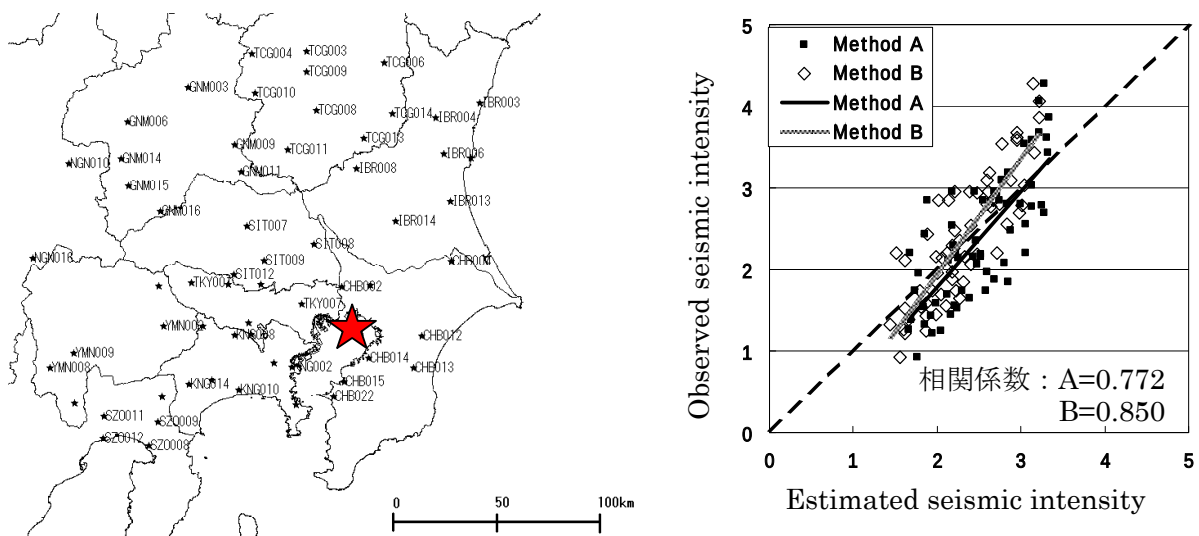


図7 1997年東京湾地震（M5.4）とK-net観測点（左）、及び、地盤増幅率の評価に地形分類と標高データを用いた場合（Method A）とPS検層データを用いた場合（Method B）の推定値と観測値の比較（右）¹³⁾

観測記録の地震動を面的に補間する方法は、まず記録の最大速度を増幅率で除して工学的基盤上に戻し、基盤上にて 0.5 km メッシュ点での補間値を求める。さらに各メッシュ点の地盤増幅率を乗じて地表での地震動を推定する。図 6 には一例として 2000 年鳥取県西部地震を対象に、距離減衰式を用いた場合と、強震記録を用いた場合との、面的な最大速度の推定値分布を示す²⁰⁾。図に見られるように比較的単純な形状をした距離減衰式による最大値の分布は、観測記録では複雑に変化している。

距離減衰式では増幅率を一度用いるだけであるが、観測値の補間法では、一度工学基盤に観測値を戻し、補間後に地表に戻すため、増幅率を 2 度用いることになる。従って、推定値の精度は地盤増幅率の精度に大きく依存することは言うまでもない¹⁵⁾。

d) 強震動評価例(全国を概観した地震動予測地図)

文部科学省の地震調査研究推進本部は、全国を概観した地震動予測地図の作成を当面推進すべき主要な課題とし、その成果として「確率的地震動予測地図」と「シナリオ地震による強震動予測地図」とを平成 16 年度末に完成を目して作業を行っている²⁾。

「確率的地震動予測地図」では、全国の主要な活断層や海溝型の巨大地震、震源を予め特定しにくい地震などを考慮し、地震動強さ・期間・確率に関する地震ハザードマップの公表を予定している。地震動の想定手法は、工学的基盤での地震動は距離減衰式(最大速度値)を用い、表層地盤の増幅率には国土数値情報による 1 km メッシュの地形分類データをもとにした経験式(簡略法、松岡・翠川法⁸⁻¹⁰⁾)を用いている。現時点(2003 年末)では山梨県と北日本を対象とした試作版が Web により公開されている²²⁾。

「シナリオ地震による強震動予測地図」では、危険度が高いと考えられる特定の地震に対して物理的な震源モデルを想定し、地域の地盤構造(工学的基盤以深)をモデル化して強震動シミュレーションを行う(詳細法)。出力結果としては、工学的基盤面上では 1 km メッシュの詳細な時刻歴波形を求めるが、地表面上では簡略法による地盤増幅率を乗じた最大速度値や、(3)式による単純な推定震度のみになる予定である。現時点では糸魚川-静岡構造線断層帯、宮城県沖地震、布田川・日奈久断層帯、三浦半島断層群などの地震を想定した強震動評価が公表されている^{2,22)}。

3. 自治体による広域地震動評価例(長野県の場合)

1995 年兵庫県南部地震の後、活断層などの直下型

地震を想定した地震被害想定が殆どの都道府県で行われた¹⁾。各自治体による地震動推定法は、経験式による簡略法から、強震動シミュレーションによる詳細法に至るまで千差万別である。地盤データに関しては、建築確認申請などによる多くのボーリング調査資料(柱状図など)を所有しておるため、多くの自治体ではこれらのデータを活用した表層地盤の増幅特性の評価を行っている。一例として、長野県の地震対策基礎調査の紹介する。

長野県では兵庫県南部地震の震災を教訓に県内の活断層(糸魚川-静岡構造線、信濃川断層帯、伊那谷断層帯、阿寺断層系など)を想定した地震被害想定を行った²³⁾。強震動評価は、各想定地震に対して統計的グリーン関数法を用いて工学的基盤における地震動波形を 500 m メッシュで計算した。次に表層地盤の非線形の増幅率を評価するため、県内約 3000 本のボーリング柱状図をもとに主要平野部を中心に地盤断面図を作成し、全メッシュを 442 の地盤モデルに分類した。そして全メッシュに対して、各震源モデルから 10 波波形を計算し、その平均的な地震動特性を持つ 1 波を選定し、Shake による等価線形解析を行い、地表での波形を計算した。この方法では、ボーリングデータに基づいてモデル化した地盤の非線形な増幅率を評価しており、地表での波形も得られる。従って計測震度も定義どおりに計算されている。

4. おわりに

現在利用可能な全国でデジタル化された表層地盤のデータベースは標高と地形分類図(1 km メッシュ、または 0.5 km メッシュ)のみであり、従って全国を対象とした広域地震動評価では経験的手法(松岡・翠川法)が用いざるを得ないのが現状である。地形分類図は、都道府県により定義や分類法が異なるなどの問題点も指摘されており、最近ではこれを統一的にモデル化する試みも行われている²⁴⁾。一方、松岡・翠川法はもともと関東平野を対象とした経験式であるため、これを各地域で修正する試みも行われている²⁵⁾。しかしながら最大速度値を対象とし、かつ地形分類や標高のみから表層地盤の増幅率を推定することには、地震被害評価などを行う上で精度に限界があることは否めない。参考に図 7 に、地形分類図による増幅率((2)式)と、PS 検層データによる平均 Vs を用いた増幅率とを使用し、関東平野の K-Net データを用いた計測震度の推定値と観測値の比較を示す¹³⁾。比較対象の K-Net 観測点であり、対象の観測点を除いた周辺の K-Net データを用いて面的補間を行って推定

値を求めている。図7に見られるように、やはりPS検層を用いた増幅率の方が、地形分類による増幅率より観測値とより良い一致を示している。

今後は自治体などで行われているように全国レベルでボーリング調査資料を収集整理し、これらをもとにした地盤増幅のデータベースとしてまとめられることが望まれる。さらに実際の観測記録や歴史地震の被害分布などと比較し、精度をチェックする必要がある。一例として図8は、東京都土木技術研究所によってボーリングデータをもとに作成した詳細な地形分類図である²⁶⁾。図9には武村²⁷⁾による1923関東地震の推定震度分布も示しているが、図から震度7や6+の地域は低地や河谷底などの軟弱地盤と良く対応しているおり、精度の高さが伺える。一部の自治体では画像データながら、ボーリングデータをWebにて公開を始めていることを付記する(例えば千葉県²⁷⁾)。

一方、精度の高い強震動予測を行うためには、地盤の増幅率は最大速度だけでなく、周波数別に与えられることが望ましい。特に最近の地震では、建物の構造被害だけでなく、機能維持に必要な設備など内部施設の重要性が高まっており、この場合、加速度などの高振動数の評価も重要である。一方、2000年建築基準法の改正で、限界耐力設計法が導入され、表層地盤の非線形増幅特性を考慮した入力時震動の評価が必要とされている。これに関連し、米国のFEMAの地震被害想定手法であるHazusでは、表層30mの平均S波速度から地盤の種別化を行い、入力加速度レベルによる地盤非線形を考慮した周期別の応答スペクトルに関する地盤増幅率を提案している。わが国では地形分類のデータ化が進んでいるため、ボーリングデータと共にこれらを活用し、入力レベル・地盤種別かつ周期別の地盤増幅率の経験式を求め、データベース化されることが望まれる。

謝辞

本報告に関して、文部科学省による「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」、科学技術振興事業団・計算科学技術活用型特定研究開発推進事業による「地震災害予測のための大都市圏強震動シミュレータの開発」、及び、学術フロンティア事業である「工学院大学 地震防災・環境研究センター」による研究助成を頂いています。また2万5千分1土地条件図の数値データは国土地理院地理調査部社会地理課より借用させて頂きました。

参考文献

- 1) 損害保険率算定会、地震被害想定資料集、地震保険調査報告 28, 1998
- 2) 防災科学技術研究所、地震動予測地図作成手法の研究プロジェクト、<http://www.j-map.bosai.go.jp/j-map/>
- 3) 中央防災会議、<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/>
- 4) 翠川三郎、リアルタイム地震防災システムの現状と利用例、日本建築学会大会・災害部門パネルディスカッション、「インフォメーションテクノロジーと地震防災」資料集、2002
- 5) 内閣府、地震防災情報システムの整備、<http://www.cao.go.jp/kanbou/dis-s.html>
- 6) 武村雅之・諸井孝文・八代和彦、明治以後の内陸浅発地震の被害から見た強震動の特徴-震度 VII の発生条件-, 地震 第2輯, 第51巻, pp485-505, 1998
- 7) 内閣府、地震被害想定マニュアル、<http://www.susono.com/~new/nsvc/siryo/manual/>
- 8) 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, 日本建築学会, 23-34
- 9) 翠川三郎・松岡昌志, 1995, 国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価, 物理探査 Vol.48, No.6, 519-529
- 10) Midorikawa, S., M. Matsuoka, and K. Sakugawa, 1994, Site effects on strong-motion records observed during the 1987 Chiba-ken-toho-oki, Japan earthquake, Proceeding of ninth Japan Earthquake Engineering Symposium, 3, 85-90
- 11) 国土交通省、国土調査・土地分類調査、<http://tochi.mlit.go.jp/tockok/tochimizu/catalog.html>
- 12) 国土交通省、国土調査・土地分類調査、都道府県別・土地分類図、(<http://tochi.mlit.go.jp/tockok/tochimizu/F2/index.html>)
- 13) 国土交通省、国土数値情報ダウンロードサービス、<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>
- 14) 石田瑞穂、久田嘉章、500m メッシュ地形分類データのダウンロード、http://www.j-map.bosai.go.jp/j-map/500m_dl/index.html
- 15) 久保智弘・久田嘉章・柴山明寛・大井昌弘・石田瑞穂・藤原広行・中山圭子、全国地形分類図による表層地盤特性のデータベース化、および、面的な早期地震動推定への適用、地震 2, 56, pp21-37, 2003
- 16) 国土交通省、国土調査・土地分類調査、5万分の1土地分類図、<http://tochi.mlit.go.jp/tockok/tochimizu/F3/index.html>
- 17) 国土地理院、土地条件図、<http://www1.gsi.go.jp/geowww/landcondition/landcondition.html>
- 18) 日本地図センター、<http://www.jmc.or.jp/map/chiran/top.html>
- 19) 石田瑞穂・大井昌弘、地震情報伝達システム ROSE の開発、日本建築学会大会・災害部門パネルディスカッション、インフォメーションテクノロジーと地震防災, 2002
- 20) ROSE (地震情報伝達システム)、防災科学技術研究所 <http://www.hinet.bosai.go.jp/rose/index.html>
- 21) 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄、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, pp. 51-56, 1999
- 22) 地震調査研究推進本部、地震に関する評価 http://www.jishin.go.jp/main/w_hyoka.htm#kyoshindo
- 23) 長野県、長野県地震対策調査・報告書、2002
- 24) 若松加寿江、松岡昌志、久保純子、長谷川浩一、杉浦正美：全国地形・地盤デジタルマップの構築と K-NET, KiK-net 観測点の微地形特性, 第11回日本地震工学シンポジウム CD-ROM, pp.47-52, 2002.
- 25) 藤本一雄、翠川三郎、日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均S波速度分布の推定、日本地震学会論文集、http://journal.jae.gr.jp/users/submit/jv03n03/030302_Paper.pdf
- 26) 小川 好、地図/ボーリング情報のデータベース化とその地震被害予測への応用、東京大学生産技術研究所博士論文
- 27) 武村雅之、1923年関東地震による東京都中心部(旧15区内)の詳細震度分布と表層地盤構造、日本地震学会論文集 http://journal.jae.gr.jp/users/submit/jv03n01/030101_Paper.pdf
- 28) 千葉県、千葉県地質環境インフォメーションバンク <http://www.pref.chiba.jp/pbgeogis/servlet/infobank.index>
- 29) FEMA、HAZUS99 SR2 Technical Manual http://www.fema.gov/hazus/dl_sr2.shtm

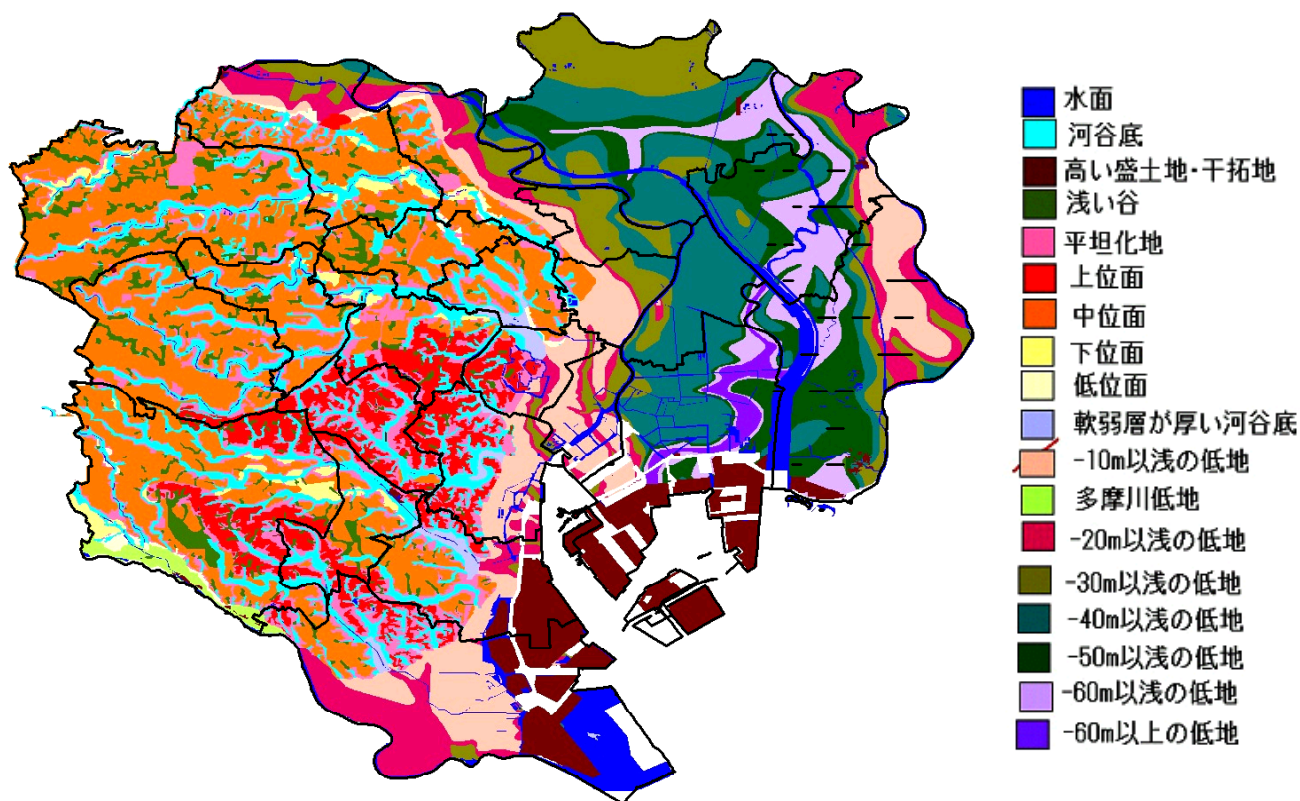


図8 東京土木技術研究所によるボーリングデータを用いた地形分類図²⁶⁾

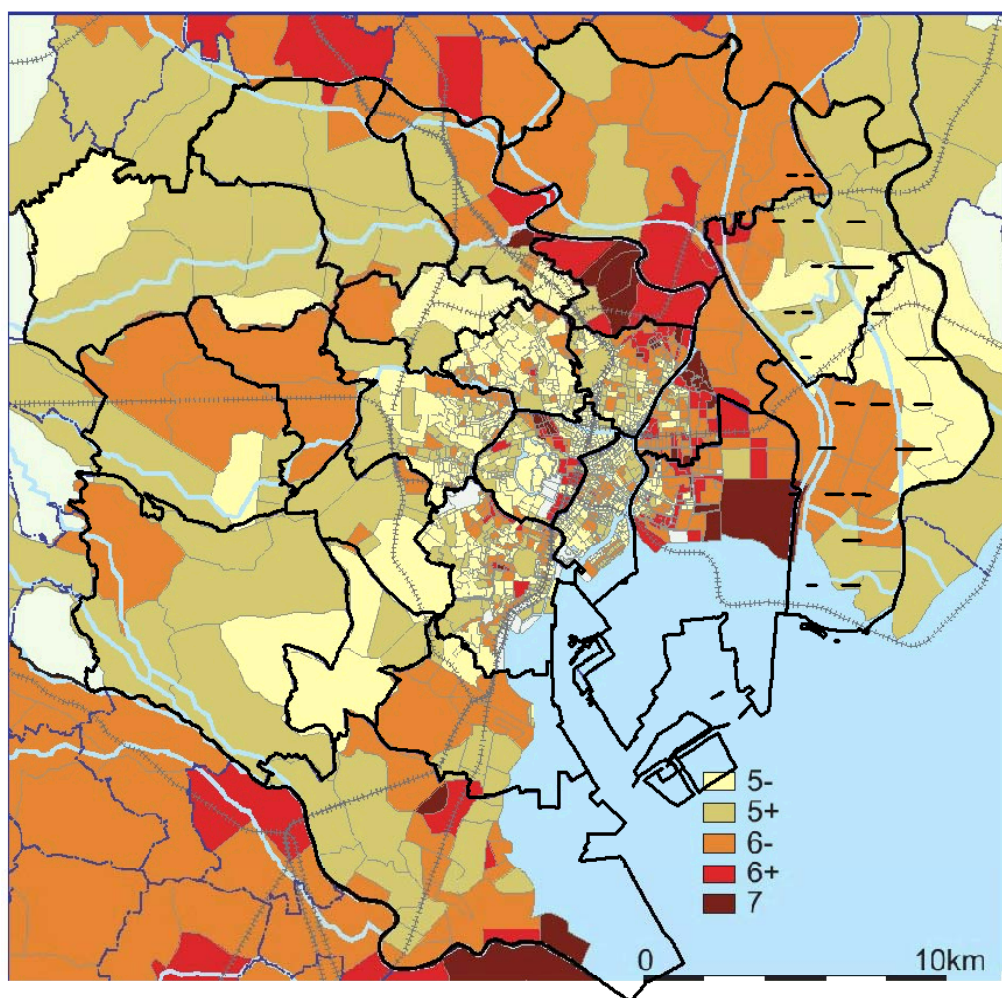


図9 武村らにより推定された1923年関東地震の震度分布²⁷⁾