

近接観測点ペアの地震記録に基づく 気象庁震度観測点での地盤の平均S波速度の簡易推定

Empirical Estimates of Average Shear-Wave Velocity of Ground
at JMA Stations using Ground Motion Recordings of Nearby Paired Stations

藤本 一雄¹, 翠川 三郎²

Kazuo FUJIMOTO¹ and Saburoh MIDORIKAWA²

¹千葉科学大学 危機管理システム学科

Department of Risk and Crisis Management System, Chiba Institute of Science

²東京工業大学 人間環境システム専攻

Department of Built Environment, Tokyo Institute of Technology

We developed a simplified method for estimating average shear-wave velocity of ground in the upper 30 meters at strong-motion station derived from peak ground motion recorded at a pair of nearby stations. By applying the method to the ground motion recordings obtained at the K-NET, KiK-net, and JMA strong-motion networks, we derive empirical estimates of the average shear-wave velocity at 257 JMA stations. The average shear-wave velocity predicted in this study shows good agreement with those estimated from borehole logs drilled in the vicinity of 13 JMA stations, site classification at 31 JMA stations, and ground motion records during 9 earthquakes from the 2004 Niigata-Ken-Chuetsu earthquake to the 2007 Noto-Hanto earthquake.

Key Words : average shear-wave velocity, nearby paired station, ground motion record, JMA, K-NET, KiK-net

1. はじめに

現在、全国規模の強震計ネットワークの記録として、防災科学技術研究所の K-NET・KiK-net や気象庁の 95 型震度計ネットワークのものが広く利用されている。K-NET および KiK-net では、すべての観測点において地盤調査が実施されている。これに対して、気象庁の観測点は地盤特性が不明であるため、従来、地盤条件の違いを考慮した解析が困難であった。

地盤特性の違いを表現する簡便な指標として、地表からある一定の深さまでの地盤の平均 S 波速度が有効であることが示されている¹⁾。特に、深さ 30m までの地盤の平均 S 波速度は、わが国の地震動予測地図における表層地盤分類²⁾や米国の耐震設計基準での地盤種別³⁾として使用されている。

地盤の平均 S 波速度を知る方法には、a) 速度検層やボーリング柱状図などの地盤調査データに基づく方法、b) 常時微動の位相速度から推定する方法⁴⁾、c) 1km メッシュや 250m メッシュの地形分類・標高データ等から推定する方法^{5), 6)}、などがある。a) および b) の方法では、任意の地点での地盤の平均 S 波速度を良好な精度で評価できるが、現地での調査・測定が必要なため、これらの方法を多数の地点に適用するには多大な時間・労力を要することとなる。

一方、c) の方法のうち、日本全国をカバーする国土数値情報(1km メッシュ)に基づく方法では、多数の地点での平均 S 波速度を簡便に推定できるため、緊急地震速報

における気象庁の震度観測点(約 4000 地点)でのサイト特性を求めるときに使用されている⁷⁾。しかし、国土数値情報の基本単位は 1km メッシュと空間分解能が低いため、メッシュ単位での平均 S 波速度と当該サイトでの実際の平均 S 波速度に相違が生じる場合が予想される。このため、多数の地点での地盤の平均 S 波速度を簡便にかつ良好な精度で推定することのできる手法が必要であると考えられる。

そこで、近接する 1 組の観測点で得られた地震記録を用いて、地盤条件が不明な地震観測点での地盤の平均 S 波速度を簡便に推定する手法を提案し、この手法を用いて関東地方の気象庁の震度観測点での地盤の平均 S 波速度を推定したところ、比較的良好な精度で推定できていることを確認した⁸⁾。本研究では、全国の K-NET, KiK-net, 気象庁の観測点で得られた地震記録を用いて、全国各地の気象庁震度観測点での地盤の平均 S 波速度を推定する。

全国の気象庁震度観測点での地盤特性を推定した試みとして、87 型強震計観測点(77 地点)を対象として、距離減衰式の地点係数から地盤増幅度が求められている⁹⁾。ただし、距離減衰式を介して抽出された地盤増幅度は地盤特性以外の要因(例えば、地震波の方位依存性や上部マントルの減衰構造の違いによる異常震域など)の影響を含んでいる可能性がある。また、スペクトル分離手法を用いて 95 型震度計観測点(319 地点)でのサイト特性を求めた事例¹⁰⁾もあるが、多くの地点において非常に大きな増幅率(100 倍近いピーク倍率など)を示しており、結果の信頼

性にやや疑問の点も残っている。これら既往の手法に比べて、本手法の特徴は、推定方法が簡便であることと、できる限り地盤特性のみを抽出することができる、といった点が挙げられる。

なお、提案手法を用いて多数の気象庁震度観測点での地盤の平均 S 波速度を推定することより、1) 緊急地震速報で使用されている震度観測点でのサイト特性(現在は国土数値情報などから推定)の推定精度の向上、2) 気象庁震度観測点での強震記録の地盤種別の違いを考慮した分析、などへの応用が期待される。

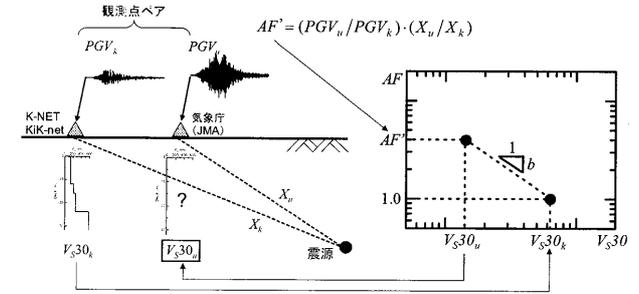


図1 推定手法の概念図

2. 推定手法と使用データ

(1) 推定手法

推定手法⁸⁾の概念図を図1に示す。相互に距離が近い1組の地震観測点(以下、観測点ペア)のうち、一方の観測点で地盤の S 波速度データが得られているとき、地表から深さ 30m までの地盤の平均 S 波速度 V_{s30k} (m/s)が求められる。この観測点ペアで同一の地震での記録が得られているとき、地盤データがある方の観測点での最大地動速度および震源距離を PGV_k (cm/s)および X_k (km)とし、もう一方の地盤データがない観測点での最大地動速度および震源距離を PGV_u および X_u とする。このとき、幾何減衰の補正をした観測点ペア間の相対的な地盤増幅度(AF')は式(1)で与えられる。

$$AF' = (PGV_u / PGV_k) \cdot (X_u / X_k) \quad [1]$$

後述するように、既往の研究¹¹⁾の結果から、地盤の平均 S 波速度(V_{s30})が増加するにつれて地盤増幅度(AF)はおおむね一定の割合(勾配 b)で単調に減少するとみなせるので(図1参照)、地盤データのない観測点での地盤の平均 S 波速度(V_{s30u})は、式(2)から求めることができる。

$$\log V_{s30u} = \log V_{s30k} + \log AF' / b \quad [2]$$

勾配 b に関しては、全国の K-NET・KiK-net 観測点を対象として観測点ペアを作成し、その地震記録に基づく検討から、その平均的な値が求められている¹¹⁾。したがって、任意の観測点ペアについて、 AF' 、 V_{s30k} 、b を式(2)に代入することにより、地盤データがない観測点での V_{s30u} に相当する値を概略推定することができる。

なお、式(1)の AF' を求める際、PGV の代わりにその他の最大振幅値(例えば、最大加速度など)を使用することも可能であるが、文献¹¹⁾において PGV の方が V_{s30} との相関がよいことを確認しているため、本研究では PGV を使用することとした。

(2) 使用データ

地盤の S 波速度データが得られている観測点として、全国の K-NET 観測点(1,001 地点)および KiK-net 観測点(495 地点)を対象とした。これらの観測点での S 波速度データを用いて、深さ 30m までの地盤の平均 S 波速度(V_{s30k})を計算する。このとき、KiK-net 観測点では深さ 100m 程度ないしそれ以上の深さまで地盤調査が行われているが、K-NET 観測点では最深でも深さ 20m までの S 波速度データしか得られていない。そこで、K-NET 観測点については、最深地点での S 波速度が文献⁵⁾の表 1 の基

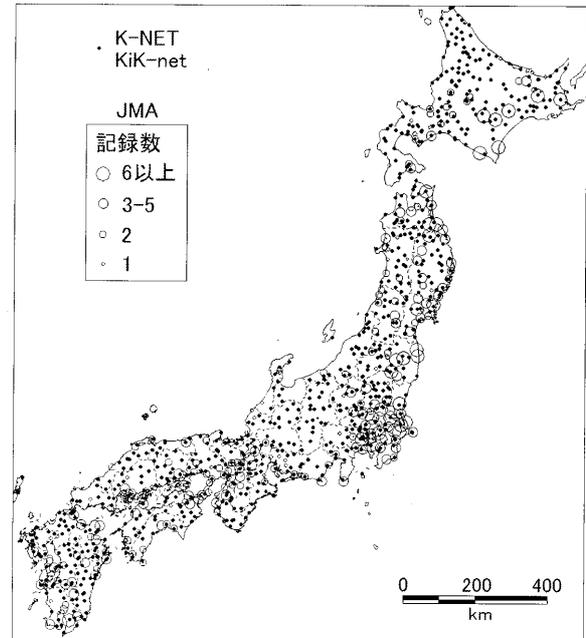


図2 JMA, K-NET, KiK-net 観測点の分布

準を満たす場合、その S 波速度を深さ 30m まで延長して V_{s30k} を計算した。その結果、すべての K-NET・KiK-net 観測点のうち 758 地点での V_{s30k} を計算することができた。図2に V_{s30k} を計算できた K-NET・KiK-net 観測点(●印)の分布を示す。

一方、地盤の S 波速度情報が不明な観測点としては、気象庁の 95 型震度計観測点(以下、JMA 観測点)を対象とした。JMA 観測点は全国に 602 地点あるが、本研究では、そのうち「気象官署の観測点」「都市部の観測点」「郡部の観測点」を対象とした。ただし、後述する地震記録を収集した期間内(~2003 年 12 月)に移設された観測点および 2004 年 1 月以降に新設された観測点については対象から除外した。その結果、全国 397 地点の JMA 観測点での地盤の平均 S 波速度(V_{s30u})の推定を試みることにした。

まず、各 JMA 観測点との距離が最短となる K-NET・KiK-net 観測点を探索し、両者を観測点ペアとする。ただし、JMA 観測点の半径 30km 以内に K-NET・KiK-net 観測点が存在しない場合は観測点ペアは作成しないものとする。この結果、339 地点の JMA 観測点について観測点ペアを作成することができた。つぎに、各観測網の観測開始から 2003 年 12 月までの地震記録を収集した。その際、最大振幅に対する地盤の非線形性の影響を避けるため、JMA 観測点および K-NET・KiK-net 観測点での最大加速度が 100gal 未満の記録のみを収集した。これらの記録を整理したところ、同一地震での記録が一つも得られ

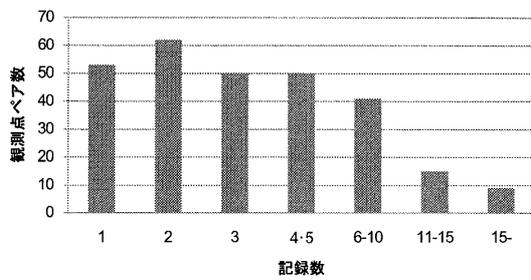


図3 記録数のヒストグラム

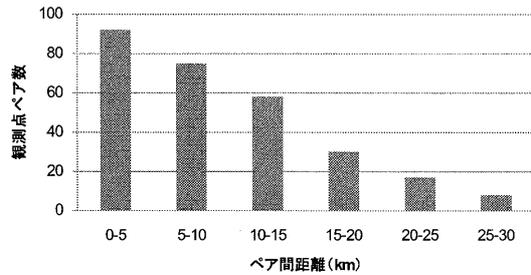


図4 観測点ペア間距離のヒストグラム

ていない観測点ペアが 59 組あった。したがって、観測点ペアを作成することができ、かつ、同一地震の記録が一つ以上得られている観測点ペアは全国で 280 組であった。図 2 に 280 地点の JMA 観測点(○印)の分布を重ねて示す。同図では観測点ペアで共通に得られた地震の記録数によって印の大きさを変えて示している。図 2 より、解

析対象の JMA 観測点は、全国各地に分布しているものの、中部・北陸地方ではやや少ない。また、記録数が多い JMA 観測点は、日本列島の太平洋側の地域により多く分布している。図 3 に観測点ペアで共通に得られた地震の記録数のヒストグラムを示す。記録数 1~2 の観測点ペアが全体の約 4 割を占め、記録数 5 以下の観測点ペアが約 8 割を占めている。図 4 に観測点ペア間の距離のヒストグラムを示す。観測点ペア間の距離が短いほどペア数は多くなり、全体の約 3 分の 1 が 5km 未満であり、約 6 割が 10km 未満のペアで占められている。

3. JMA観測点での地盤の平均S波速度の推定

まず、280 組の観測点ペアそれぞれについて、地震ごとの PGV と X から式(1)を用いて相対的な地盤増幅度(AF')を計算する。その際、速度波形から振幅の絶対値が最大となる値を取り出し、水平 2 成分に対して式(1)からそれぞれ AF'を計算し、そのうち大きい方の値を使用する。なお、速度波形としては、加速度波形にローカットフィルタ(遮断周波数 0.05Hz)を施して積分したものを使用しており、その最大値のほとんどが S 波部分で発生していることを確認している。各地震での記録から AF'を計算し、これを地盤データが得られている方の観測点での V_{s30k} ならびに勾配 b の全国平均の値(-0.852)¹¹⁾ とともに式(2)に代入することにより、JMA 観測点での地盤の V_{s30u} を推定した。

紙面の都合上すべての JMA 観測点での結果を示すことができないため、図 5 には記録数が多い上位 15 地点の

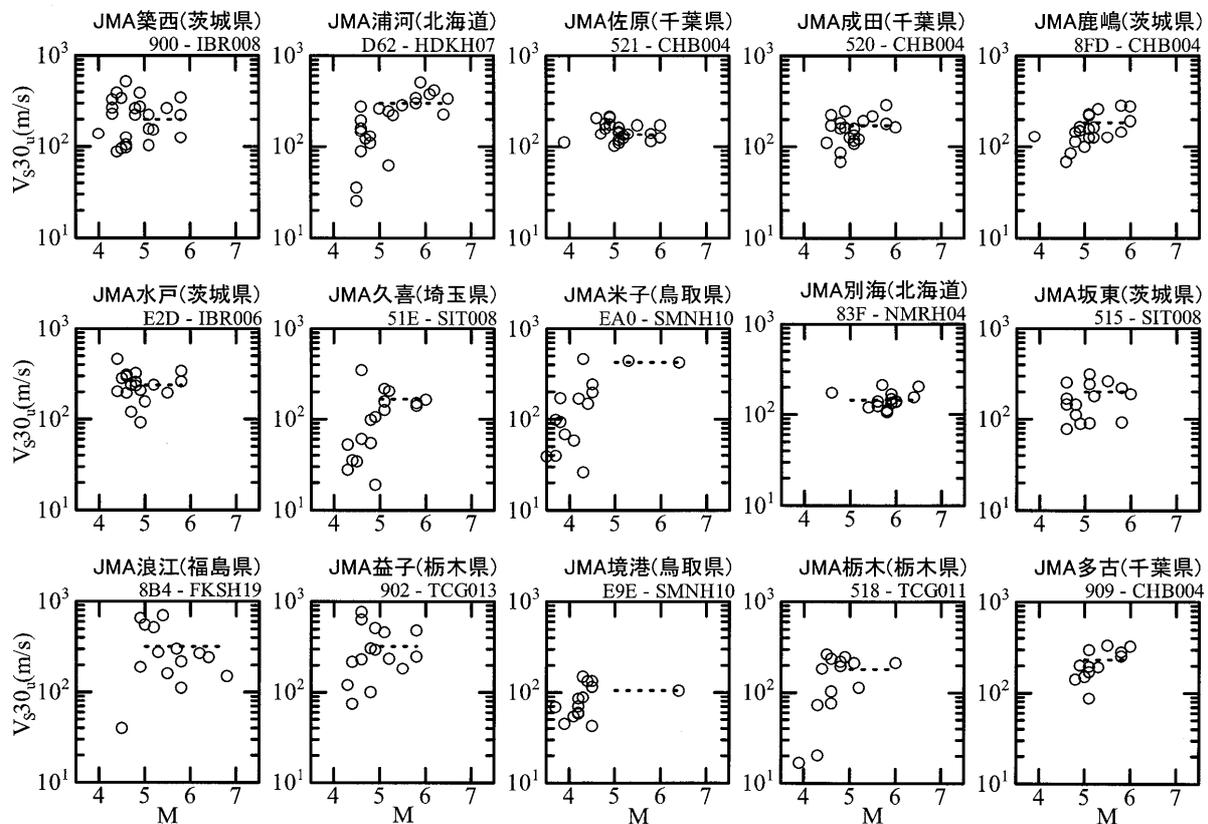


図5 推定した JMA 観測点での平均 S 波速度とマグニチュードの関係

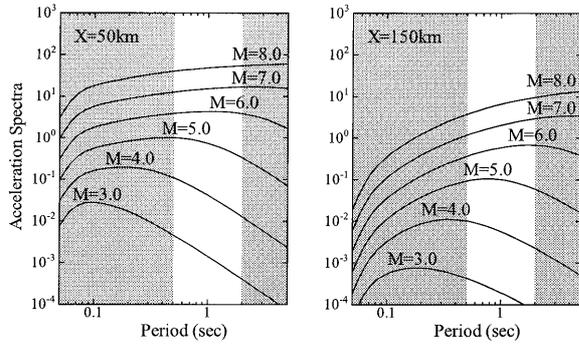


図6 統計的グリーン関数法による加速度スペクトル

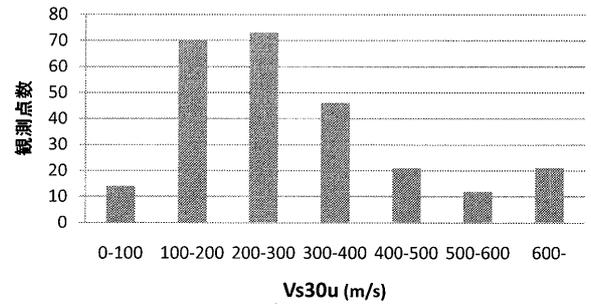


図8 JMA観測点での平均S波速度のヒストグラム

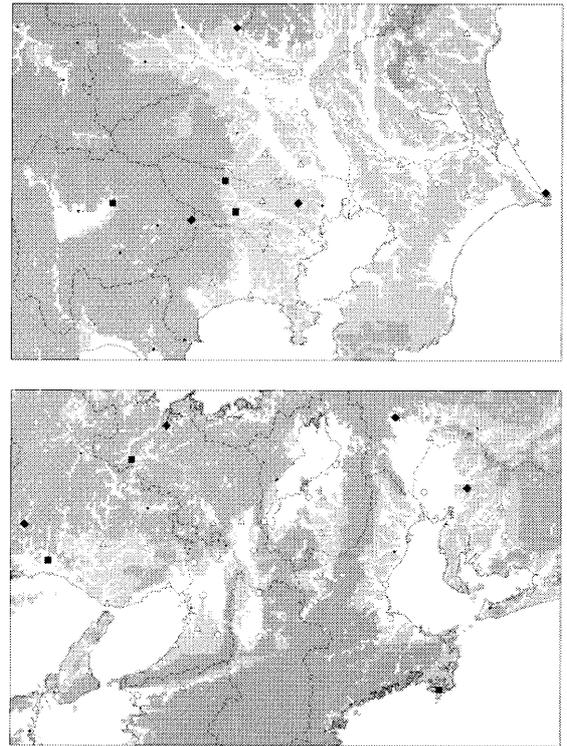
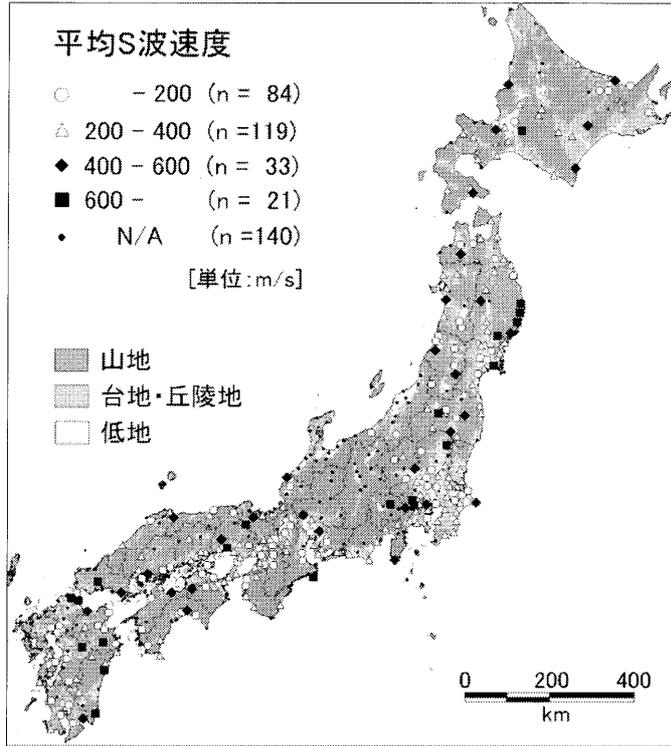


図7 推定されたJMA観測点での平均S波速度(左:全国, 右上:関東地方, 右下:関西地方)

JMA観測点での V_{s30u} とマグニチュード(M)の関係を示す。図5より、多くのJMA観測点において比較的安定した V_{s30u} が求まっていることがわかる。ただし、M5.0程度以下の記録から計算された V_{s30u} には大きなバラツキが現れている場合がある(例えば、JMA浦河、JMA久喜、JMA米子など)。この原因として、本研究でのAF'はPGVに基づいて計算しているが、Mが小さな地震の記録では、一般にPGVと相関の良い周期帯(約0.5~2秒)¹²⁾に比べて、より短周期の成分が優勢となるため、PGVと周期約0.5~2秒の成分との対応が悪くなることが一つの可能性として考えられる。

そこで、地震規模によって基盤に入射する地震動の周期成分がどのように変化するかを知るため、統計的グリーン関数法¹³⁾を用いて、MとXを変化させて地震基盤におけるS波主要動の加速度スペクトルを計算した(図6)。Mが5.0以上の加速度スペクトルをみると、ピークは周期0.5~2秒(PGVとの対応が良い周期帯)の範囲内ないしそれより長周期側に現れている。一方、Mが5.0程度未満の加速度スペクトルは、ピークを示す周期が0.5秒よりも短周期側に現れている。このことから、Mが5.0程

度より小さい地震記録では短周期成分が優勢となるため、PGVとの対応が悪くなるものと判断される。

以上のことから、PGVとの対応が良いと考えられるM5.0以上の地震記録のみを用いてAF'を計算することとし、その平均値と V_{s30u} 、 $b(-0.852)$ ¹¹⁾を式(2)に代入することにより、 V_{s30u} を推定することとした。このとき、23組の観測点ペアではM5.0以上の記録が得られていなかった。したがって、最終的には257地点のJMA観測点での V_{s30u} を推定することができた。

図7に推定されたJMA観測点での V_{s30u} の分布を示す。参考までに、図5にM5.0以上の記録から求めた V_{s30u} の平均値を破線で示しておく。図7をみると、 V_{s30u} が低い値を示す観測点は、関東平野や大阪平野などの軟弱な地盤が広がっている地域に数多く分布していることがわかる。図8にJMA観測点での V_{s30u} のヒストグラムを示す。推定された V_{s30u} は、100~300m/sを中心として、100m/s以下の軟弱な地盤から400~600m/s以上の工学的基盤に相当する地盤まで幅広く分布している。

なお、推定されたJMA観測点での V_{s30u} と震源距離、観測点ペア間の距離との関係についても検討したが、今

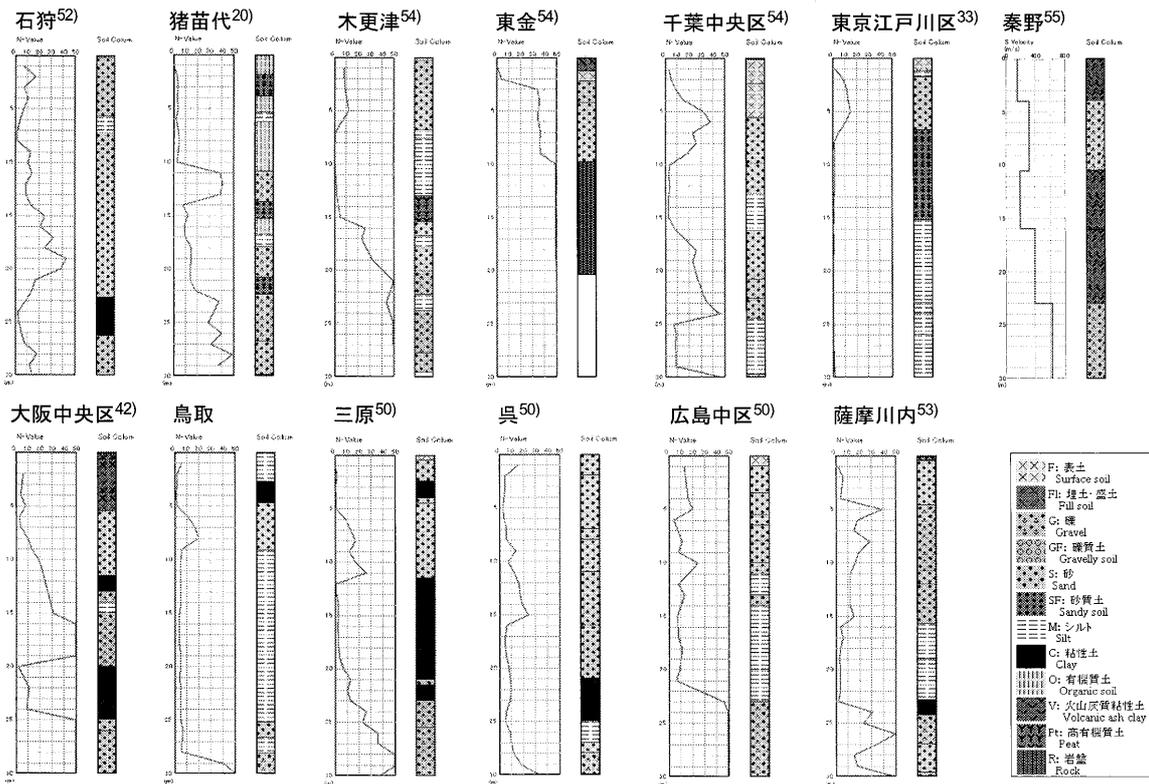


図9 JMA観測点付近のボーリング柱状図

回使用したデータの範囲内では、前述した M 依存性に比べると明瞭な傾向は見られなかった。

4. 手法の妥当性の検証

(1) JMA 観測点付近の地盤調査データとの比較

推定した JMA 観測点での V_{S30_0} の妥当性を検証するため、まず JMA 観測点付近の地盤調査データから平均 S 波速度を推定し、これと V_{S30_0} との比較を行うこととした。このため、全国各地の地盤柱状図集^{14)~51)}、地盤情報データベース^{52), 53)}、Web サイト⁵⁴⁾、論文⁵⁵⁾からボーリング柱状図を収集した。これらのボーリング柱状図のうち、掘削深度が 30m 以上であり、かつ JMA 観測点の半径 200m 以内に存在するボーリング調査地点を対象とする。ただし、距離が近くても地盤条件が異なる場合が予想されたため、土地分類基本調査(縮尺: 5 万分の 1)⁵⁶⁾を用いて、JMA 観測点と付近のボーリング調査地点での地盤条件(地形分類)を確認した。

その結果、1) 掘削深度 30m 以上、2) JMA 観測点の半径 200m 以内、3) JMA 観測点と同一の地形分類、といった条件をすべて満たしたボーリング調査地点は全国で 13 地点であった(図 9)。これら 13 地点の N 値・深度データを用いて、経験式⁵⁷⁾から地盤各層の S 波速度を推定し、これに基づいて深さ 30m までの地盤の平均 S 波速度を計算した。ただし、JMA 秦野では速度検層の結果が得られていたため、S 波速度データから平均 S 波速度を計算している。

図 10 に提案手法により推定した JMA 観測点での V_{S30_0} (横軸)と JMA 観測点付近の地盤調査データから推定した V_{S30} (縦軸)との関係を示す。図 10 より、両者は良

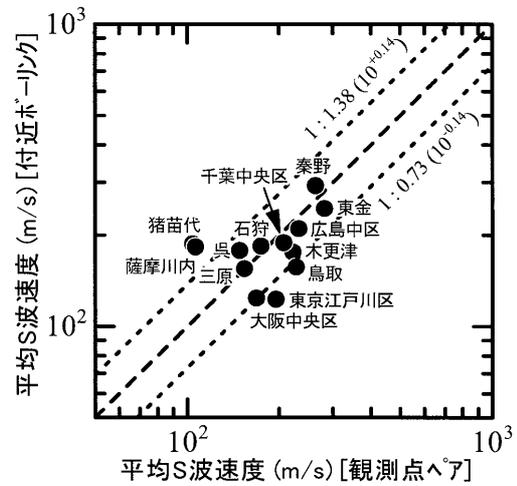


図 10 平均 S 波速度の比較

好な対応を示しており、JMA 観測点での V_{S30_0} の推定精度は±30~40%程度($10^{\pm 0.14}$)と考えられる。ただし、平均 S 波速度を比較することができた観測点は、前述した掘削深度 30m 以上の条件のため、 V_{S30} が 300m/s 以下の比較的軟弱な地盤上の観測点に限られている。このため、硬質な地盤上の JMA 観測点についても、推定された V_{S30_0} の妥当性を検証しておく必要がある。

(2) JMA 観測点の地盤種別との比較

気象庁は、全国の地震観測官署に対してアンケート調査を行っており、110 箇所の JMA 観測点での地盤種別(1 種: 岩盤, 2 種: 硬質地盤, 3 種: 沖積層地盤, 4 種: 軟弱地盤)を公表している⁵⁸⁾。そこで、提案手法により推定

した JMA 観測点での V_{S30u} と地震観測官署での地盤種別との関係を整理することとした。ただし、この地盤種別は 1972 年当時のものであるため、現在の地震観測点(地方気象台, 測候所)の名称が当時と同じであっても、観測点の場所が移動している場合があった。そこで、測候所 Web サイトの「沿革ページ」等を確認したり、測候所に電話照会することにより、 V_{S30u} を推定できた JMA 観測点のうち 31 地点の地震観測官署が 2003 年までに移設されていないことを確認できた。そこで、これら 31 地点を地盤種別によって分類し、地盤種別ごとに V_{S30u} のヒストグラムを求めた(図 11)。

図 11 より、1 種地盤では、 V_{S30u} が 300~400m/s の地点の割合が最も多いが、工学的基盤($V_S=400\sim600$ m/s 程度)ないしそれ以上の地盤と推定されている地点も含まれている。2 種地盤では V_{S30u} が 100~600m/s まで幅広く分布している。3 種地盤の V_{S30u} も幅広く分布するものの、2 種地盤に比べて全体的に低速度側に移行している。4 種地盤では V_{S30u} が 200m/s 以下の地点のみとなっている。このように地盤種別が 1 種から 4 種へと軟弱な地盤になるにつれて、 V_{S30u} の頻度分布も低速度側に移行しており、全般的には両者は良好な対応となっている。

ただし、1 種地盤(岩盤)に分類されているが、 V_{S30u} が 400m/s 程度以下のやや低い値を示す観測点がある。そこで、これらの地点での地盤特性を確認するため、地震記録の上下動振幅に対する水平動振幅のスペクトル比(以下、H/V スペクトル比)を求めた(図 12)。JMA 土佐清水(V_{S30u} : 約 390m/s)の H/V スペクトル比はほぼフラットであり、 V_{S30u} も工学的基盤のそれに近い。しかし、JMA 大船渡(V_{S30u} : 約 415m/s), JMA 洲本(V_{S30u} : 約 320m/s), JMA 浦河(V_{S30u} : 約 300m/s)のスペクトル比には周期 0.2~0.4 秒に明瞭なピークを確認でき、JMA 延岡(V_{S30u} : 約 240m/s)では周期 0.2 秒前後の成分が優勢であるようにみえる。

これらの 4 地点のうち、付近でボーリング柱状図が得られていた JMA 浦河の柱状図¹⁵⁾をみると、深さ 3m から N 値 50 未満の風化泥岩が約 10m 連続していた。このことから、これらの地点では、地表付近にある S 波速度のやや低い風化岩の影響により、地盤の揺れが増幅され、このため V_{S30u} が低めに推定された可能性が考えられる。しかし、JMA 浜田(V_{S30u} : 約 280m/s)では、H/V スペクトル比に明瞭なピークがないことから、強い地盤特性を持つとは考えにくく、低めの V_{S30u} が推定された理由については十分な解釈を得ることができていない。

(3) 近年の比較的大きな地震での観測値と予測値の比較

最後に、推定した V_{S30u} の有効性を確認するため、大きな揺れを与えた地震での地震記録と比較することとした。対象としたのは、2004 年 1 月以降に発生した地震のうち、震度 5 強以上を観測した 9 地震(2004 年新潟県中越地震から 2007 年能登半島地震まで)である。

まず、各地震に対して、震源深さによる距離減衰特性の違いを考慮した地震動強さの距離減衰式⁵⁹⁾から工学的基盤での最大速度を求める。その際、各地震の地震規模(M_w)、断層面最短距離(または震源距離)、震源深さ、地震タイプ(地殻内地震、プレート間地震、プレート内地震)は文献⁶⁰⁻⁶³⁾を参考にして設定した。なお、距離減衰式の適用範囲を考慮して、震源距離 300km 未満の記録のみを使用している。推定された JMA 観測点サイトの工学的基盤での最大速度に、本研究で推定した当該サイトでの V_{S30u} を経験式¹¹⁾により表層地盤の地盤増幅度に変換

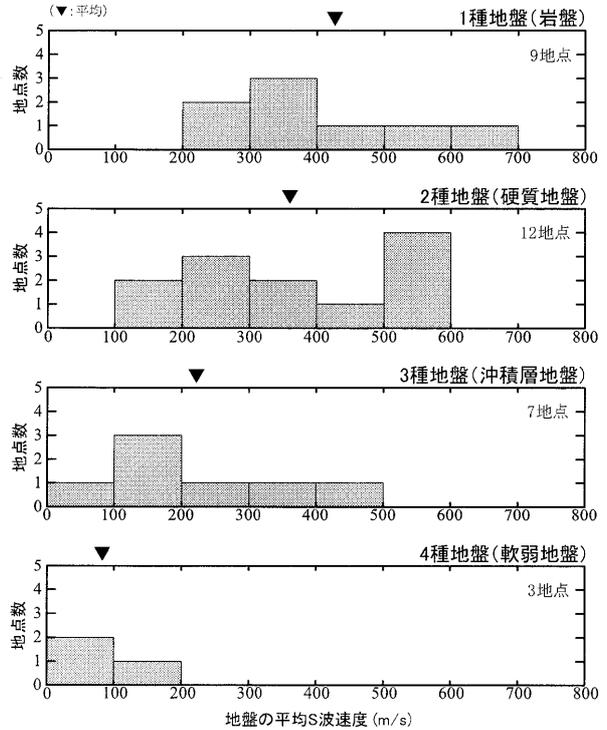


図 11 地盤種別ごとの平均 S 波速度のヒストグラム

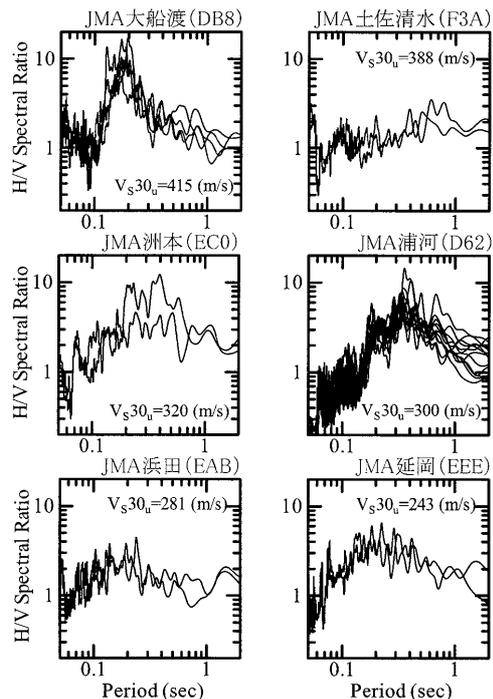


図 12 1 種地盤の地震動 H/V スペクトル比

したものを掛け合わせるにより PGV を求めた。

図 13 に JMA 観測点での PGV の観測値(横軸)と予測値(縦軸)の関係を●印で示す。比較のため、K-NET 観測点(□印)および KiK-net 観測点(△印)での関係も示されている。なお、K-NET・KiK-net 観測点での PGV の予測値は、実測の S 波速度データから算出した平均 S 波速度を経験式¹¹⁾を用いて地盤増幅度に変換し、これに工学的基盤での最大速度を掛け合わせて求めたものである。

図 13 より、全般的には観測値と予測値は良好な対応を

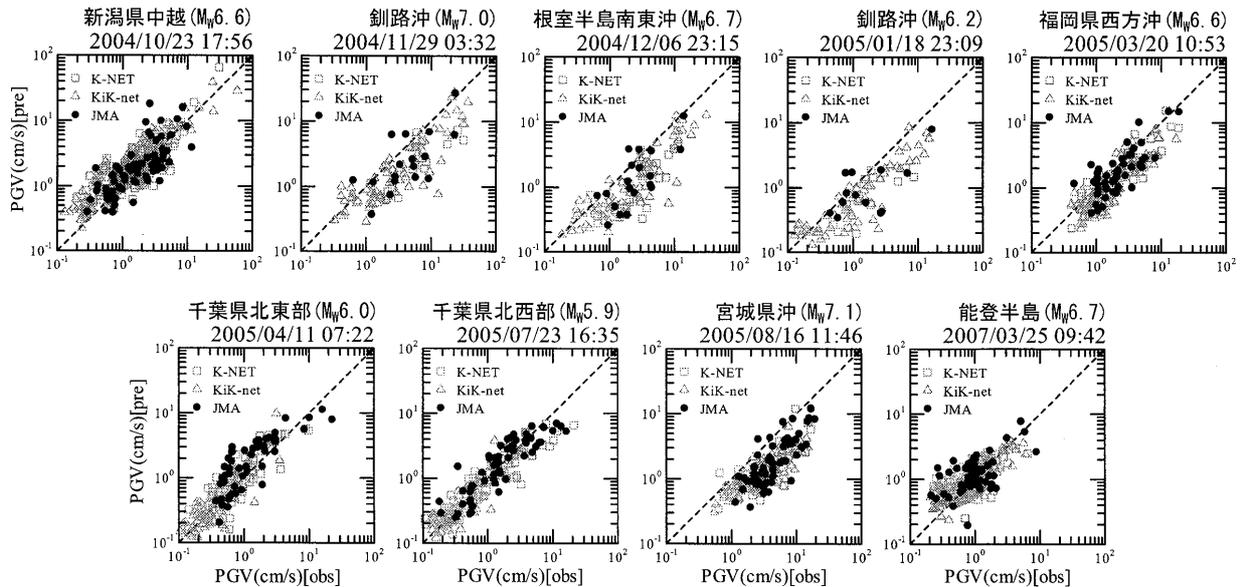


図 13 最大地動速度の観測値と予測値の比較

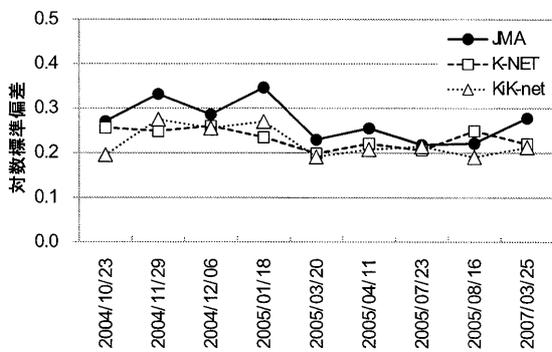


図 14 最大地動速度の対数標準偏差の比較

示しているものの、2004年・2005年釧路沖の地震、2004年根室半島南東沖の地震、2005年宮城県沖の地震では、観測値に比べて予測値は低めで、予測値に偏差がみられる。これらの4地震は、北海道・東北地方の深さ約40～50kmで発生しており、本地域の不均質な地震波減衰構造が地震動の振幅に影響を及ぼしていることが可能性の一つとして考えられる。

PGVの予測値の推定精度を確認するため、予測値に対する観測値の比を求め、その対数の標準偏差を算出した(図14)。2004年・2005年釧路沖地震および2007年能登半島地震においては、JMA観測点での対数標準偏差は、K-NET・KiK-net観測点の値に比べてやや高めであるが、これらの3地震を除けば、予測誤差は同等である。誤差の大きかった3地震についてはJMAの観測点数が少なかったことも原因の一つかもしれない。このことから、提案手法を用いて推定した地盤の平均S波速度は、実測のS波速度データから求めた平均S波速度と同程度の精度を保持しているものと推察される。

5. 結論

本研究では、近接観測点ペアでの地震記録に基づいて地盤条件が不明な地震観測点での地盤の平均S波速度を簡便に推定する手法を、全国規模の強震観測ネットワー

ク(JMA, K-NET, KiK-net)で得られた地震記録に適用し、全国257箇所のJMA観測点での地盤の平均S波速度を推定した。推定されたJMA観測点での平均S波速度の妥当性を検証するため、JMA観測点付近のボーリング柱状図(13地点)、地震観測官署の地盤種別(31地点)、地震記録(9地震)との比較を行った結果、比較的良好な精度で地盤の平均S波速度を推定できていることを確認した。

なお、本手法では、M5.0程度以上の地震での記録が観測点ペアで共通に得られている必要があり、地震記録を収集した2003年12月までの時点では、中部・北陸地方のJMA観測点での地盤の平均S波速度を推定することができなかった。しかし、2004年以降、2004年新潟県中越地震、2007年能登半島沖地震、2007年新潟県中越沖地震などによりM5以上の地震が多数発生しており、これらの観測記録を用いて中部・北陸地方のJMA観測点でも地盤の平均S波速度を推定していく必要がある。

謝辞

本研究では、気象庁95型震度計波形データ、防災科学技術研究所K-NET・KiK-netの地震記録・地盤データを使用させて頂いた。気象庁地震火山部の石垣祐三氏および全国各地の地方気象台・測候所の関係各位にはJMA観測点の所在地等に関する情報を提供して頂いた。構造計画研究所の司宏俊博士には距離減衰式の各種パラメータの設定についてご教示を頂いた。本研究の一部は、科学研究費補助金・若手研究(B)「近接観測点ペアの地震記録に基づく強震観測点での地盤特性の推定に関する研究(課題番号:18710153)」による。記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) Borchardt, R.D., Gibbs, J.F. and Fumal, T.E.: Progress on Ground Motion Predictions for the San Francisco Bay Region, California, Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Microzonation, Vol.1, pp.241-253, 1978.

- 2) 地震調査研究推進本部：「全国を概視した地震動予測地図」報告書(平成17年3月23日), 2005.
- 3) Borchardt, R.D.: Estimates of Site-Dependent Response Spectra for Design (Methodology and Justification), Earthquake Spectra, Vol.10, pp.617-653, 1994.
- 4) 紺野克昭・片岡俊一：レイリー波の位相速度から地盤の平均 S 波速度を直接推定する方法の提案, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.415-423, 2000.
- 5) 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, 日本地震工学会論文集, Vol.3, No.3, pp.13-27, 2003.
- 6) 松岡昌志・若松加寿江：地形・地盤分類 250m メッシュマップを用いた地盤の平均 S 波速度分布の推定, 日本地震工学会大会-2005 梗概集, pp.418-419, 2005.
- 7) 気象庁地震火山部：緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料(平成18年7月27日), 2006.
- 8) 藤本一雄・翠川三郎：近接観測点ペアの地震記録に基づく JMA 観測点における地盤の平均 S 波速度の推定, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.250-253, 2006.
- 9) 大西淳一・山崎雄雄・若松加寿江：気象庁地震記録の距離減衰式に基づく地点増幅特性と地形分類との関係, 土木学会論文集, No.626/I-48, pp.79-91, 1999.
- 10) 川瀬 博・松尾秀典：K-NET, KiK-net, JMA 震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析, 日本地震工学会論文集, Vol.4, No.1, pp.33-52, 2004.
- 11) 藤本一雄・翠川三郎：近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係, 日本地震工学会論文集, Vol.6, No.1, pp.11-22, 2006.
- 12) 小林啓美, 長橋純男：重層建築物の耐震設計を対象とした地震動の強さを評価する簡便な尺度としての地震動最大振幅, 日本建築学会構造系論文集, No.210, pp.11-22, 1973.
- 13) Boore, D.M.: Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.73, No.6, pp.1865-1894, 1983.
- 14) 北海道建築士会函館支部：函館市土質柱状図, 1979.
- 15) 北海道立寒地建築研究所：技術資料 No.1 浦河町, 静内町および三石町の地盤試料, 1983.
- 16) 北海道立寒地住宅都市研究所：技術資料 No.15 稚内市・浜別町・名寄市・江別市・留萌市・旭川市および小樽市の地盤資料, 1991.
- 17) 北海道建築士会帯広分室：帯広市の地盤, 1988.
- 18) 建設省計画局, 青森県：青森県八戸・三沢地区の地盤, 大蔵省印刷局, 1970.
- 19) 建設省計画局, 福島県：福島県常磐地区の地盤, 大蔵省印刷局, 1966.
- 20) 福島県地盤・地質調査資料集編集委員会：福島県地盤・地質調査資料集, 福島県地質調査業協会, 1993.
- 21) 月舘光三, 角野三好：西津軽地方ボーリング柱状図, 土質工学会東北支部, 1990.
- 22) 建設省計画局, 宮城県：仙台湾臨海地帯の地盤, 大蔵省印刷局, 1965.
- 23) 秋田大学土木工学科：秋田市周辺ボーリング柱状図, 土質工学会東北支部, 1987.
- 24) 山形大学農業工学科：山形県ボーリング柱状図, 土質工学会東北支部, 1988.
- 25) 八戸工大土木工学科：八戸周辺ボーリング柱状図, 土質工学会東北支部, 1989.
- 26) 宮城県：宮城県地震地盤図作成報告書, 北海道地区, 1985.
- 27) 建設省北陸地方建設局北陸技術事務所：富山県平野部の地盤図集, 北陸建設共済会, 1979.
- 28) 建設省北陸地方建設局北陸技術事務所：新潟県平野部の地盤図集(新潟平野編, 柏崎平野編), 北陸建設共済会, 1981.
- 29) 建設省北陸地方建設局北陸技術事務所：新潟県平野部の地盤図集(高田平野編), 北陸建設共済会, 1981.
- 30) 建設省北陸地方建設局北陸技術事務所：石川県平野部の地盤図集, 北陸建設共済会, 1982.
- 31) 建設省計画局, 茨城県：茨城県水戸・日立地区の地盤 大蔵省印刷局, 1969.
- 32) 建設省計画局, 茨城県：茨城県鹿島地区の地盤, 大蔵省印刷局, 1964.
- 33) 東京都土木技術研究所：東京都(区部)大深度地下地盤図—東京都地質図集 6—地質柱状図集, 1996.
- 34) 東京都土木技術研究所：東京都総合地盤図(Ⅱ)—東京都地質図集 4—地質柱状図集 山の手・北多摩地区, 1990.
- 35) 東京地盤調査研究会：東京地盤図, 技報堂, 1959.
- 36) 横浜市計画局：横浜市内土質柱状図集(地震と地盤に関する調査・資料 I), 1976.
- 37) 川崎市公署局：川崎市地質図集Ⅱ, 1972.
- 38) 長野県建築士会：長野市地盤図, カシヨ印刷(株), 1973.
- 39) 建設省中部地方建設局中部技術事務所：濃尾平野の地盤資料, 1978.
- 40) 土質工学会名古屋支部技術事務所：最新名古屋地盤図, 1988.
- 41) 建築行政協会京都支部：京都市内ボーリングデータ集, 大熊堂書店, 1986.
- 42) 土質工学会関西支部, 関西地質調査業協会：新編大阪地盤図, コロナ社, 1987.
- 43) 建設省・広島県・広島市：都市地盤調査報告書第5巻「広島地区」, 大蔵省印刷局, 1964.
- 44) 建設省・山口県：都市地盤調査報告書第13巻「山口県周南地区」, 大蔵省印刷局, 1966.
- 45) 建設省・鳥取県・島根県：都市地盤調査報告書第15巻「中海臨海地区」, 大蔵省印刷局, 1967.
- 46) 日本建築学会中国支部：島根県地盤図, 鳥取県建築士会, 1981.
- 47) 中国地方基礎地盤研究会：岡山県地盤図, 1995.
- 48) 建設省・徳島県：都市地盤調査報告書第7巻「徳島県臨海地帯」, 1964.
- 49) 建設省・愛媛県：都市地盤調査報告書第8巻「愛媛県東予地区」, 1965.
- 50) 中国地方基礎地盤研究会：広島県地盤図, 1997.
- 51) 日本建築学会中国支部：山口県地盤図, 1988.
- 52) 地盤工学会北海道支部：北海道地盤情報データベース Ver.2003, 2007.
- 53) 地盤工学会九州支部九州地盤情報システム協議会：九州地盤情報共有データベース 2005, 2005.
- 54) 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>).
- 55) 翠川三郎, 松岡昌志：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, pp.519-529, 1995.
- 56) 国土交通省 土地・水資源局 国土調査課：5万分の1土地分類基本調査(都道府県土地分類基本調査) (http://tochi.mlit.go.jp/tockok/inspect/landclassification/land/basis/5-1/F3_exp.html).
- 57) 太田 裕, 後藤典俊：横波速度を推定するための実験式とその物理的背景, 物理探査, Vol.31, No.1, pp.8-17, 1978.
- 58) 気象庁地震課：気象庁地震観測官署の地盤調査, 験震時報, Vol.37, pp.113-115, 1972.
- 59) 翠川三郎・大竹 雄：震源深さによる距離減衰特性の違いを考慮した地震動最大加速度・最大速度の距離減衰式, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集(CD-ROM), 論文番号117, 2002.
- 60) 堀川晴央：2004年中越地震の断層モデル(序報)(<http://staff.aist.go.jp/h.horikawa/2004Chuetsu/source.html>).
- 61) 山中佳子：EIC地震学ノート(http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/).
- 62) 防災科学技術研究所：地震のメカニズム情報(F-net) (<http://www.fnct.bosai.go.jp/fresia/event/hypo/joho-j.html>).
- 63) 堀川晴央：2007年能登半島地震の破壊過程(第二報)(<http://unit.aist.go.jp/actfault/katsudo/jishin/notohanto/hakaikatei2.html>).

(原稿受付 2008.05.17)

(搭載決定 2008.09.13)