

3. 4. 4 地盤構造モデルの高度化に関する調査研究

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

首都圏の浅部地盤および深部地盤の既存の地盤モデルを収集・整理するとともに、新しいデータの追加を図り、表層から地震基盤に至る切れ目のない3次元地盤モデルの作成を行う。

(b) 平成 20 年度業務目的

埼玉県内で微動の一点観測を実施し、地盤卓越周期のデータを収集するとともに、既存資料の少ない関東平野北東部などにおいて微動アレイ観測による地盤データの収集を継続して行う。また、既存の地盤モデルに基づく地盤震動特性と地震観測記録のスペクトル・インバージョン結果の比較を行い、地盤モデルの改良について検討する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
国立大学法人 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 人間環境 システム専攻	教授	翠川三郎	
同 環境理工学創造専攻	准教授	山中浩明	
同 人間環境システム専攻	助教	三浦弘之	
独立行政法人 海洋研究開発機構 海底地震・津波ネットワーク開発部 リアルタイム情報発信グループ	技術研究主任	大堀道広 (研究協力 者)	

(2) 平成 20 年度の成果

(a) 業務の要約

浅部地盤データを補強するため、埼玉県の地震観測点約 100 地点において常時微動一点観測を行い、水平／上下スペクトル比から地盤卓越周期データを得た。深部地盤データを補強するため、深部地盤の情報が少ない計 13 地点において微動アレイ観測を行い、深部地盤の S 波速度構造データを得た。また、深部地盤モデルから浅部地盤モデルまで切れ目のない地盤モデルを構築するための基礎的な検討として、首都圏の地震観測点計約 680 点を対象として、地震観測記録から得られる地盤増幅特性の逆解析によって、地震基盤上面から地表までの地盤モデルを推定した。

(b) 業務の成果

1) はじめに

一般に、広域での強震動予測では、震源モデルと深部地盤モデルに基づき、ハイブリッド法や統計的グリーン関数法によって得られた工学的基盤面上での地震動強さに、地形・

地盤分類メッシュマップ等から推定される浅部地盤の増幅率を掛け合わせることで、地表面での地震動強さを得る。このため、強震動予測の高精度化、広帯域化を図るためには、詳細な深部地盤モデルや浅部地盤モデルを構築する必要がある。

首都圏における浅部地盤モデルに関しては、三宅他¹⁾や大井他²⁾により、ボーリングデータの収集・整理がなされている。ここで、推定された地盤モデルの妥当性を検証するには、実際の地震記録と比較・検討することが必要である。しかし、既存の浅部地盤モデルに用いられているボーリングデータの多くは、地震観測点で得られたものではない上に、地震動評価に必要なS波速度構造が得られている地点は限られている。一方、深部地盤モデルに関しては、S波速度構造の3次元モデルが推定されているが^{例えば、3)}、モデル構築の基礎となる微動アレイ観測は、例えば関東平野北部や東部では多く行われているわけではなく、十分な精度で推定されているとはいえない。

また、浅部地盤モデルは工学的基盤上面まで達していないものが多いため、深部地盤モデルと浅部地盤モデルは連結しておらず、中程度の深度における地盤には不明確な部分も多くあり、強震動評価の際に地盤モデルの設定で任意性が生じることがある。

このような背景から、本研究では、浅部地盤および深部地盤のデータを補強するために、埼玉県内の地震観測点近傍において常時微動の一点観測を行い、浅部地盤の卓越周期データを収集するとともに、関東平野内で微動アレイ観測を行い、深部地盤のS波速度構造データを得る。また、地震観測記録からスペクトル分離法により地盤増幅特性を求め、その逆解析から浅部地盤および深部地盤のモデルパラメータを同定することにより、地震基盤上面から地表までの連続した地盤モデルの構築について基礎的な検討を行う。

2) 常時微動一点観測による卓越周期データの収集

a) 観測の概要と観測結果

首都圏における地震観測点での卓越周期データを収集するため、常時微動の一点観測を実施した。今年度観測を行った地点は、埼玉県内における地震観測点で、気象庁観測点計7地点、K-NET観測点計11地点、KiK-net観測点計8地点、SK-net観測点計73地点で合計99地点である。なお、埼玉県内では昨年度にも秩父市周辺地域の計15地点で観測を実施している。

観測には周期2秒まで平坦な特性をもつ速度計を利用した。観測では地震計のごく近傍に計測器を設置し、サンプリング周波数100Hz、40.96秒間の計測を1地点につき3回以上実施した。計測された波形からノイズの影響が小さいと考えられる20.48秒間のデータを切り出し、水平/上下動振幅スペクトル比(H/Vスペクトル比)を算出した。計3回の計測で得られたH/Vスペクトル比の平均を各地点でのH/Vスペクトル比とした。

b) H/Vスペクトル比と地形・地盤条件の関係

各地点で得られたH/Vスペクトル比から卓越周期およびピーク値を読み取った。卓越周期の分布を図1(a)に、ピーク値の分布を図1(b)にそれぞれ示す。各点の丸の大きさが卓越周期およびピーク値の大きさを表している。スペクトル形状が平坦に近く、ピークを読み取れなかったものは、各値をゼロとして黒丸で表示している。図1には若松他(2003)⁴⁾による250mメッシュの地形・地盤分類メッシュマップも併せて示している。これをみると、

対象地域は西側は山地が広く分布し、秩父市周辺では台地や丘陵が盆地状に分布している。中央部はローム台地や丘陵が分布し、東側は後背湿地や自然堤防などの低地が河川に沿って分布する。また、北側の低地では扇状地も存在する。

卓越周期やピーク値と地形・地盤条件の関係を比較すると、西側の山地ではスペクトル形状が平坦でピークが読み取れない地点が多く、ピークが読み取れた地点でも周期 0.1 秒と短周期側にみられた。中央部のローム台地上の観測点ではほとんどの地点でピークが認められ、その卓越周期は 0.2~0.5 秒程度にみられた。西側の山地の地点に比べると卓越周期はやや長周期側にみられる。一方、東側の後背湿地や自然堤防上の観測点では、全ての地点で明瞭なピークがみられ、その卓越周期は 0.5 秒以上の地点がほとんどであり、ピーク値も 3 以上の地点が多い。

山地や台地のような地形条件の場合、微動 H/V スペクトル比の形状は平坦か短周期にピークをもつ場合が多く、低地では長周期側に明瞭なピークをもつ傾向は、既往の研究でも指摘されており⁵⁾、今回の観測結果からも大局的には地形・地盤条件との間に強い関係がみられた。

3) 微動アレイ観測による深部地盤構造データの収集

a) 観測の概要

深部地盤の S 波速度構造モデルの精度を向上させるために、微動アレイ観測を図 2 および表 1 に示す計 13 地点において実施した。また、これらのアレイは、その中心点が K-NET、KiK-net、自治体震度計などの地震観測点に近い場所に設定してある。これは、前年度と同様に微動観測結果が地震観測記録から得られる地震動特性を考えるために有効に活用されることを想定してのことである。各観測点では、ひとつのアレイで 7 台の上下成分地震計とデータロガーを設置し、30~80 分間の観測を行った。1 地点で大小 2 つのアレイが展開された。それぞれのアレイの大きさは、半径 1.5~2km と 0.3~0.5km 程度である。

b) 解析手法と観測結果

観測された微動の上下成分のアレイ記録を目視によって解析対象の 163.84 秒間のデータに分割した。それぞれのデータに対して周波数-波数スペクトル解析を行い、位相速度を算出した。これらの操作を周期毎に行い、レイリー波の位相速度の分散曲線を得た。得られた位相速度をハイブリッドヒューリスティック探索法（山中(2007)⁶⁾）によって逆解析することによって 1 次元 S 波速度構造を推定した。逆解析の際には、山中・山田(2006)³⁾を参考にして、地震基盤を含めて 4 層モデルを仮定し、地震基盤の S 波速度は 3km/s であるとした。さらに、密度はそれぞれの層で一定値を事前に与え、P 波速度は既往の実験式によって S 波速度と連動させた。順計算では、レイリー波の基本モードのみを仮定した。

ここでは、例として、千葉県木更津 (KSR) と館山 (TTY) での観測結果について示す。木更津でのレイリー波の位相速度を図 3 に示す。観測位相速度は、逆解析モデルによってよく説明できている。また、図には観測位相速度の逆解析によるモデルも示している。山中・山田(2006)のモデルと境界面深度は類似しているが、各層の S 波速度が異なっている。そのために、山中・山田(2006)のモデルに対する理論値では観測位相速度が十分に説明できていない。図 4 に館山での観測結果を示す。観測位相速度は山中・山田(2006)のモデル

の理論値に近い値となっている。逆解析によるモデルは、やや既往の結果よりも全体的に境界面が浅いモデルとなっている。

4) 地震記録に基づく地盤増幅特性の逆解析による表層地盤の S 波速度構造の推定

a) 地震観測記録とデータ処理

検討に用いた地震は、関東周辺で発生した 23 地震であり、M は 4.1~6.1 の間である。また、震源深さは、20~101km であり、フィリピン海プレートおよび太平洋プレートで発生した地震である。これらの地震の際に、100cm/s² 以下の加速度の記録が 5 地震以上で得られ、かつ震源距離が 150km 以内である地点を以下の検討に用いることにした。その結果、K-NET で 115 地点、KiK-net で 42 地点、SK-net で 519 地点の合計 676 観測点を抽出することができた。ほとんどの観測点は、関東平野内であるが、周辺の山地の観測点も検討に加えることにした。これは、後述する基準点の必要性や方位範囲を均質にするためである。以上の観測点と地震の震央の位置を図 5 に示す。

地震記録の水平 2 成分に対して S 波初動部分から約 20 秒間のデータを抜き出し、前後に 1 秒のコサイン型テーパをかけて、水平 2 成分の記録を複素信号として、そのフーリエ変換を計算する。このスペクトル振幅をパルツェン型ウィンドで平滑化した。以上の操作によって、K-NET で 1,777 データ、KiK-net で 499 データ、SK-net で 5,442 データを得た。

b) スペクトル分離方法

岩田・入倉(1986)⁷⁾により、各地点での地盤増幅特性を評価する。本研究では、以下のようにして、地盤特性を分離することにした。まず、KiK-net の孔底でのデータを用いて、伝播経路 ($V_s=4\text{km/s}$ を仮定) の Q 値を評価した。この際に、伝播経路の S 波速度を 4km/s、幾何減衰を震源距離の逆数と仮定した。つぎに、地盤特性と震源特性を分離するが、この方法では、評価すべき未知数がひとつ足りないの、震源か地盤特性について拘束条件を与える必要がある。そこで、KiK-net の観測点のうちの SITH10 を基準点として、そこでの地盤特性が既知であるとした。図 6 に、SITH10 での地表と孔底でのスペクトル比とチューニングした地下構造モデルに対する S 波の理論スペクトル比の比較を示す。観測スペクトルは、チューニングされた地下構造モデルによってよく説明できていることがわかる。なお、この地下構造モデルでの最下層の S 波速度は、2.5km/s であり、後述する地盤増幅特性はこの層よりも浅い地盤による増幅を意味することになる。

得られた伝播経路の Q 値を図 7 に示す。0.8~20Hz の間で安定した値が推定できていることがわかる。得られた Q 値は、 $Q=101f^{0.67}$ によってモデル化できる。この関係式は、既往の関東平野での既往の研究結果^{8)~10)}とも矛盾しない結果である。

図 8 に得られた地盤増幅特性の例を示す。平野端部の TKYH13 では、1 Hz よりも低周波数で振幅が小さく、8Hz 以上の高周波数で大きなピークを有している。一方、平野中央部の TKYH11 では、逆に低周波数で振幅が大きく、高周波数で急激に振幅が低下する特徴が認められる。また、これらの間の地点では、増幅特性の特徴も両者の中間的なものとなっている。これらの周波数による振幅変化の差は深部地盤と表層地盤の効果であると考えられる。こうして得られたすべての地点に対する地盤特性の増幅率の周期別の分布を図 9

に示す。1Hzの増幅率は、平野内の多くの地点で大きく、平野端部や山地では小さくなっている。こうした傾向は、4Hzの分布図にも認められる。一方、16Hzの増幅率分布では、平野中央部では小さく、端部では大きくなる傾向がわかる。

c) 地盤増幅特性の逆解析

各地点で得られた地盤特性の逆解析を行い、地表から地震基盤までの1次元モデルのS波速度と層厚を同定した。深部地盤モデルについては、山中・山田(2006)³⁾を参考にして、4層モデルを仮定した。また、表層地盤について、2層モデルを仮定し、全体で6層モデルとした。ただし、誤差が小さくならない場合には、表層部分にさらに1層追加した。各層ではS波速度、層厚、Q値を未知数として、密度は事前に与えた。Q値は、 $Q=V_s/b \cdot f^a$ でモデル化した。ここで、a、bは各地点で未知数とした定数である。最適化すべき目的関数としては、観測および理論増幅特性の差の2乗和とし、これを山中(2007)のハイブリッドヒューリスティック手法⁶⁾によって最小化した。この方法では、未知数の探索範囲を定義する必要がある。深部地盤のS波速度と層厚については、山中・山田(2006)での3次元モデルの各地点の物性の±10%程度とした。一方、表層地盤については、比較的大きな探索範囲を仮定した。なお、逆解析では、周波数0.5から8Hzの観測された増幅特性を用いた。

地盤特性の逆解析結果の例としてTYKH11(江東)での結果を図10に示す。観測された増幅特性は、逆解析による理論値によく一致していることがわかる。ただし、逆解析の際に考慮をしなかった周波数8Hzよりも高周波数の帯域での観測値と理論値の差異は大きい。これは、逆解析の際に仮定した減衰のモデルでは十分に実際の減衰を表現できていないことを示しており、今後検討する必要がある。図には、山中・山田(2006)の深部地盤のみの1次元モデルに対する理論値も示しているが、広い帯域で観測結果を説明できていないことがわかる。図10の中央および右側に、逆解析から得られるS波速度構造を示す。図の右側は表層50mを拡大したものである。深部地盤では、山中・山田(2006)と浅い部分が異なっていることがわかる。また、表層地盤では、工学的基盤深度が40mと厚くなる。特に、最上層のS波速度は、100m/s以下と小さく、軟弱層の存在を示している。こうした解析をすべての地点での増幅特性について行った。得られた表層地盤の第1、2層のS波速度と工学的基盤深度の分布を図11に示す。表層の第1層のS波速度は、中央部～南西部で100m/sと小さく、平野端部では200m/s以上と大きい。一方、表層の第1層のS波速度は250～300m/sに分布している。各層の平均S波速度は、 120 ± 37 m/sと 277 ± 42 m/sとなる。深部地盤については、山中・山田(2006)によるモデルと大きな差異はなかった。これは、地盤増幅特性には表層地盤の影響が強く作用していることになると考えられる。

K-NETの多くの観測点では、深さ20mまでのS波速度構造が明らかにされている。そこで、それらと今回の結果を比較した。その例を図12に示す。CHB007やCHB014などの比較的単純な地盤では、両者は類似した表層地盤モデルとなっている。KNG001の場合では、工学的基盤は20mよりも深いと考えられるが、全体的な速度は、今回の方が大きめになっている。より多くの地点での表層地盤モデルを比較するために、深さ20mまでの平均S波速度(AVS20)をK-NET観測点での検層結果から計算し、本研究の結果と比較した。図13に示すように、多くの地点において400m/s程度までは、両者はよく一致してい

る。

一般的には、地盤増幅特性の評価では、AVS20ではなくAVS30が使われることが多い。そこで、本研究の結果からAVS30を求め、その分布を図14に示す。平野中央部と海岸沿いの一部の地域では、200m/s以下の地点があるが、平野の多くの地点で200~250m/sとなっている。さらに、AVS30と増幅特性の関係を求めた。ここでは、0.8~5Hzの周波数範囲の平均増幅特性とした。全体的にみて、両者はよく右下がりの傾向はあるが、ばらつきは大きい。地盤増幅特性が地震基盤よりも浅い地盤全体の増幅に対応しており、表層地盤だけではなく、深部地盤の影響も含まれていることがばらつきを大きくなることの原因であると推察される。

逆解析から得られた地盤のQ値は、平均的には、 $Q=V_s/16.4*f^{0.44}$ となる。S波速度を変えた場合のQ値の分布を図15に示す。既往の研究の多くでは、本研究とモデル化と異なり、Q値に上限があるモデルが提案されているが、S波速度が大きい深部地盤については同程度の値となっている。

(c) 結論ならびに今後の課題

本研究では、浅部地盤および深部地盤のデータを補強するために、埼玉県内の地震観測点約100点において常時微動一点観測を行い、浅部地盤の卓越周期データを得るとともに、深部地盤の情報が少ない計13地点において微動アレイ観測を行い、深部地盤のS波速度構造データを得た。また、地表から地震基盤までの切れ目のない地盤モデルを構築するために、首都圏内の約680地点の地震観測点を対象として、地震記録のスペクトル分離法から地盤増幅特性を求め、その逆解析から地盤のS波速度、層厚、減衰定数を推定した。

今後は、これらの検討結果に常時微動一点観測による結果も加え、それぞれのデータを統合的に説明しうる地盤モデルの改良についての検討を継続し、各地点で得られた改良地盤モデルを用いて首都圏の3次元地盤モデルを試作するとともに、地震動シミュレーションの準備を行う。

(d) 引用文献

- 1) 三宅弘恵, 瀨瀬一起, 古村孝志, 稲垣賢亮, 増田 徹, 翠川三郎: 首都圏の強震動予測のための浅層地盤構造モデルの構築, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp.214-217, 2006.
- 2) 大井昌弘, 藤原広行, 遠山信彦: 強震動評価のための南関東地域の浅部地盤初期モデル, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp.318-321, 2006.
- 3) 山中浩明, 山田伸之: 強震動評価のための関東平野の3次元S波速度構造モデルの構築, 物理探査, 第59巻, pp.549-560, 2006.
- 4) 若松加寿江, 松岡昌志: 大都市圏を対象とした地形・地盤分類250mメッシュマップの構築, 土木学会地震工学論文集, No.27-050, 2003.
- 5) 先名繁樹, 翠川三郎, 若松加寿江: 常時微動のH/Vスペクトル比と地形・地盤分類を用いたスペクトル増幅率の推定, 日本地震工学会論文集, 第8巻, 第4号, pp.1-15, 2008.
- 6) 山中浩明: ハイブリッドヒューリスティック探索による位相速度の逆解析, 物理探査, 第60巻, pp.265-27, 2007.

- 7) 岩田知孝, 入倉孝次郎: 観測された地震波から、震源特性・伝播径路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震 2, 第 39 巻, pp.579-593, 1986.
- 8) Kinoshita, S.: Frequency-dependent attenuation of shear waves in the crust of southern Kanto area, Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.84, pp.1387-1396, 1994.
- 9) 山中浩明, 中丸明子, 栗田勝実, 瀬尾和夫: 表層の地盤特性の拘束条件にした S 波スペクトルのインバージョンによるサイト特性の評価, 地震 2, 第 51 巻, pp.193-202, 1998.
- 10) 川上洋介, 額野一, 久田嘉章: 地震観測記録より推定した関東平野におけるサイト特性と地形分類との関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B2, pp.687-688, 2004.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果	発表者氏名	発表場所	発表時期	国際・国内の別
Estimation of shallow soil models for the Kanto basin, Japan, using site amplifications from spectral inversion of strong motion data (口頭)	山中浩明、大堀道広、翠川三郎	6th International Conference on Urban Earthquake Engineering (東京丸ビルホール)	平成21年3月	国際
地震記録から得られる地盤増幅特性の逆解析による関東平野における表層地盤のS波速度構造の推定 (口頭)	山中浩明、大堀道広、翠川三郎	日本地球惑星科学連合2009年大会(千葉幕張メッセ国際会議場)	平成21年5月	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

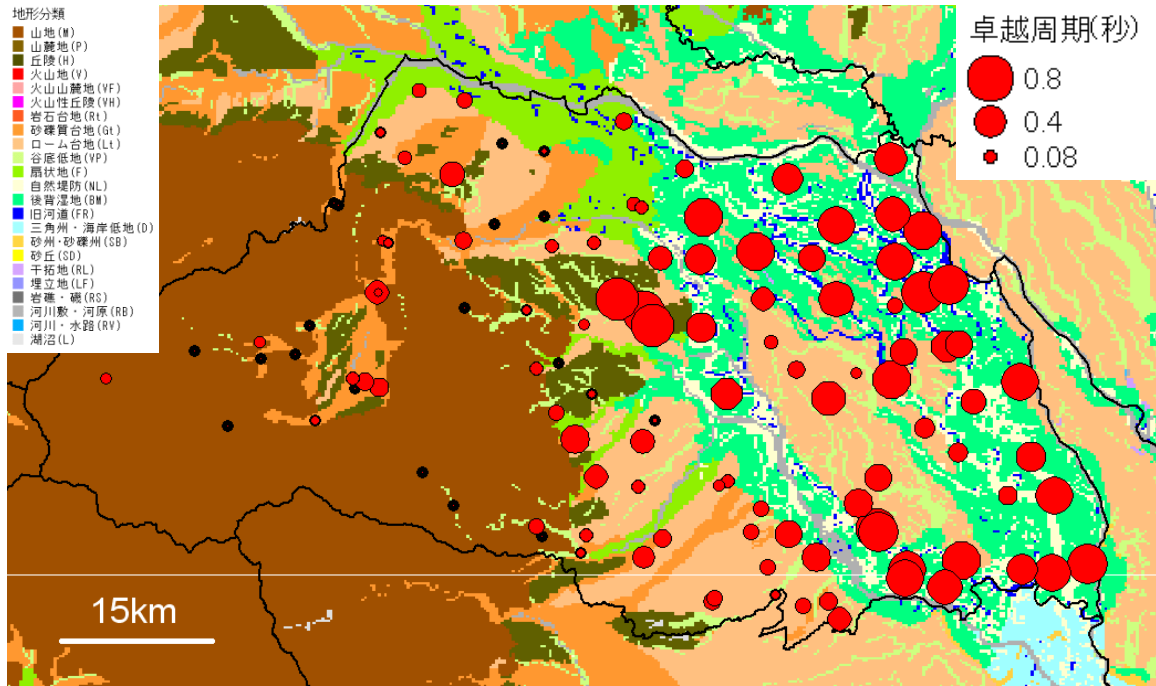
なし

3) 仕様・標準等の策定

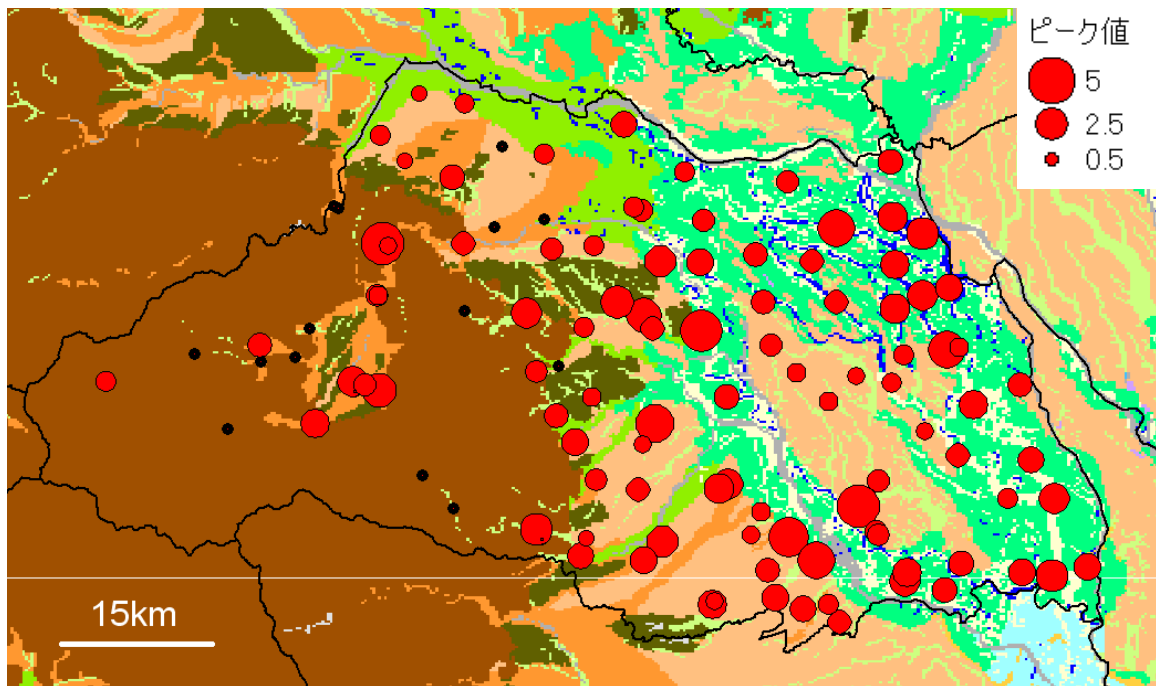
なし

(3) 平成 21 年度業務計画案

平成 21 年度までに収集した浅部地盤の卓越周期データ、微動アレイ観測による深部地盤データおよび地震観測記録の分析結果に基づき、それぞれを統合的に説明しうる地盤モデルの改良についての検討を継続し、今年度は首都圏のより広域に対して実施する。さらに、各地点で得られた改良地盤モデルを用いて表層から地震基盤に至る首都圏の 3 次元地盤モデルを試作するとともに、地震動シミュレーションの準備を行う。



(a) 微動H/Vスペクトル比の卓越周期の分布



(b) 微動H/Vスペクトル比のピーク値の分布

図 1. 常時微動一点観測による卓越周期およびピーク値の分布。

表 1. 微動アレイ観測点。

観測場所	コード	緯度	経度
茨城県銚田市旭村	ASH	36.2306	140.5357
茨城県石岡市八郷町	YST	36.2459	140.1968
茨城県土浦市新治村	NHR	36.1336	140.1575
茨城県稲敷市江戸崎町	EDS	35.9560	140.3238
茨城県つくばみらい市谷和原村	YWR	35.9903	140.0109
東京都大島町	OSM	34.7491	139.3599
東京都杉並区	SGN	35.6863	139.6191
東京都江東区	KOT	35.6874	139.8171
千葉県木更津市	KRS	35.3705	139.9180
千葉県館山市	TTY	34.9946	139.8680
神奈川県真鶴町	MND	35.1583	139.1370
静岡県熱海市初島	HTS	35.0398	139.1691
静岡県下田市	SMD	34.6712	138.9449

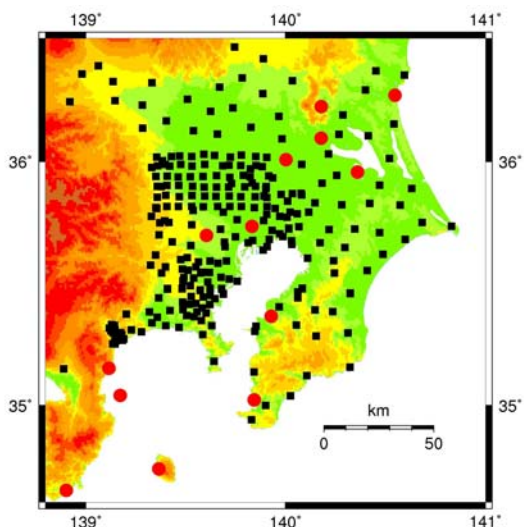


図 2. 微動アレイ観測点の位置。

四角は既往の観測点で、丸は本研究による観測点を示す。

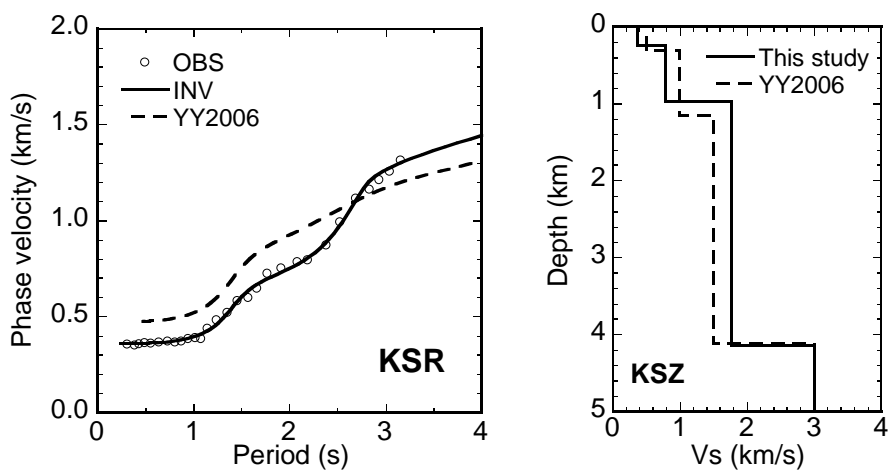


図 3. 木更津での微動アレイ観測結果。

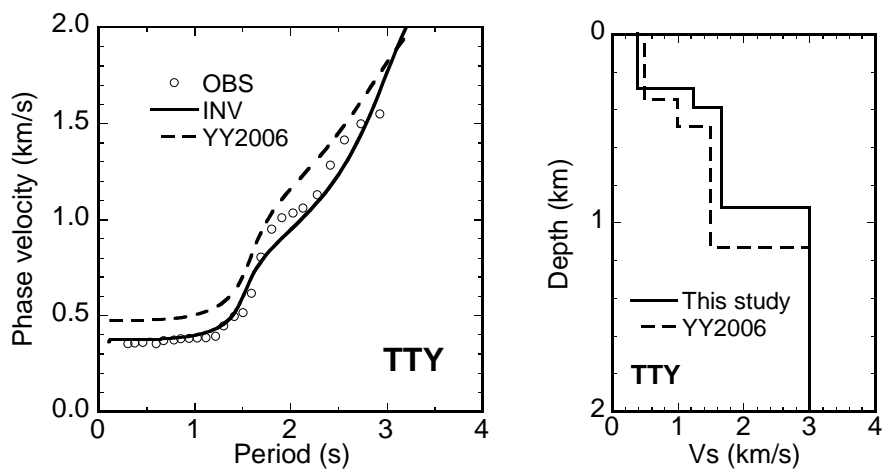


図 4. 館山での微動アレイ観測結果。

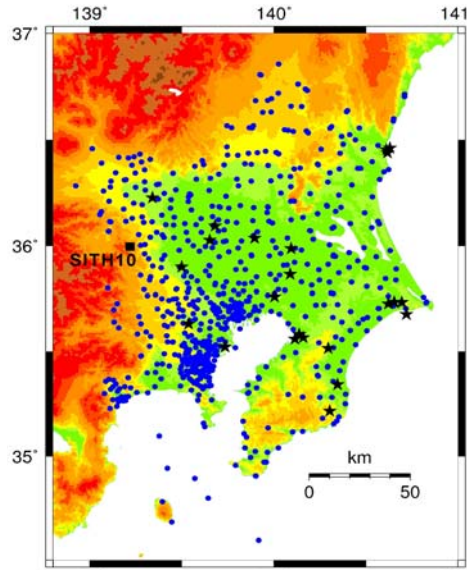


図 5. 地震記録の解析に使用した観測点（丸）と震央（星）の位置。

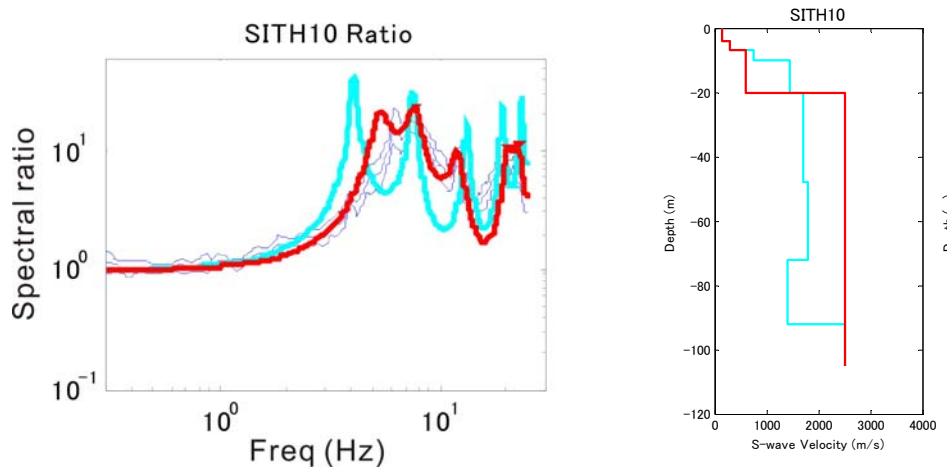


図 6. SITH10 での地表と孔底のスペクトル比（左）と地下構造モデル（右）。
 青細線は、観測値、水色の線は KiK-net による理論値、
 赤色の線はチューニングしたモデルとその理論値。

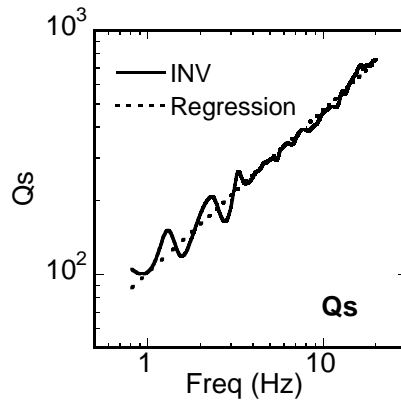


図 7. 伝播経路の Q 値。
 実線は観測値、点線は回帰直線。

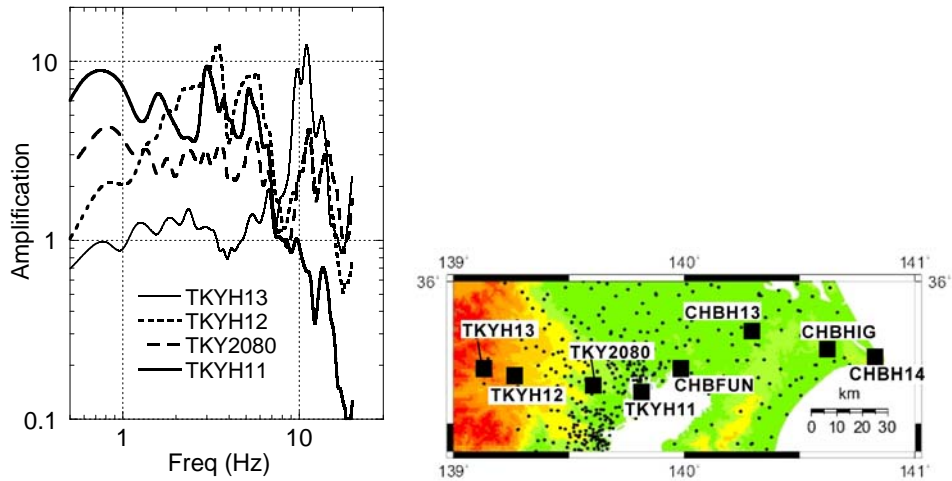


図 8. 地盤増幅特性の例。

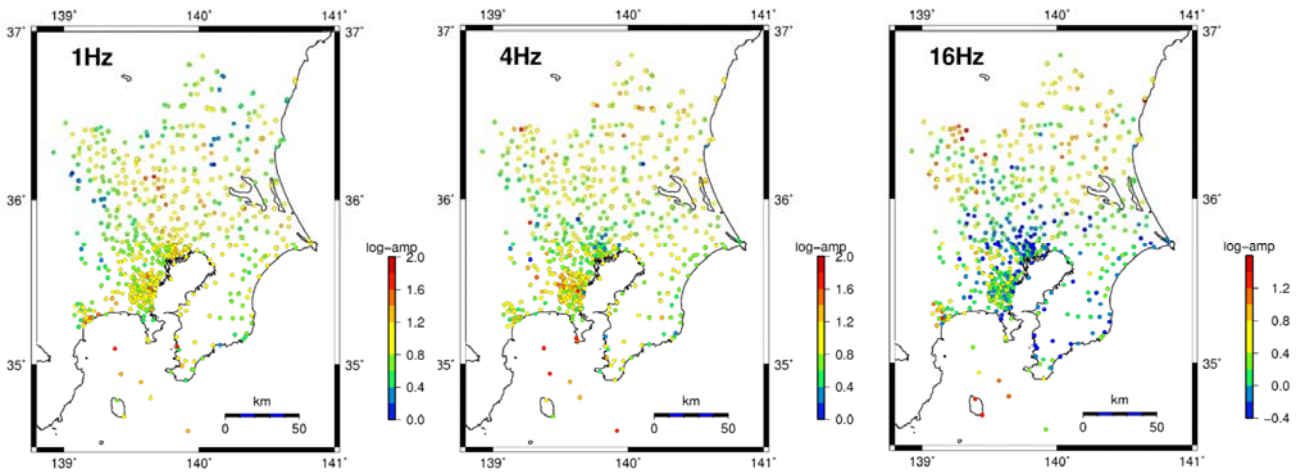


図 9. スペクトル分離により得られた地盤特性の周期別増幅率の分布。

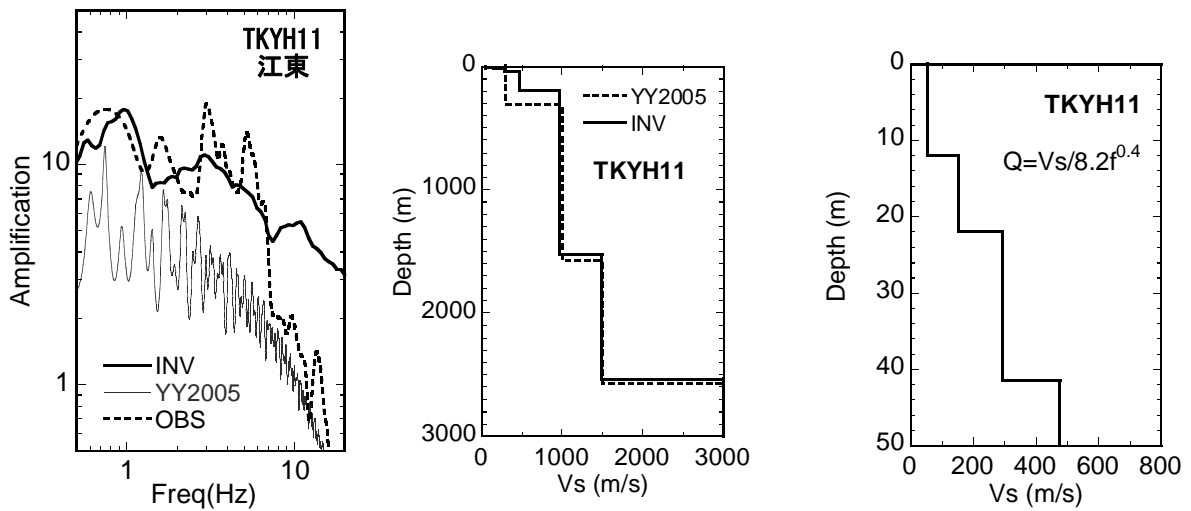


図 10. 地盤増幅特性の逆解析結果の例 (TKYH11)。

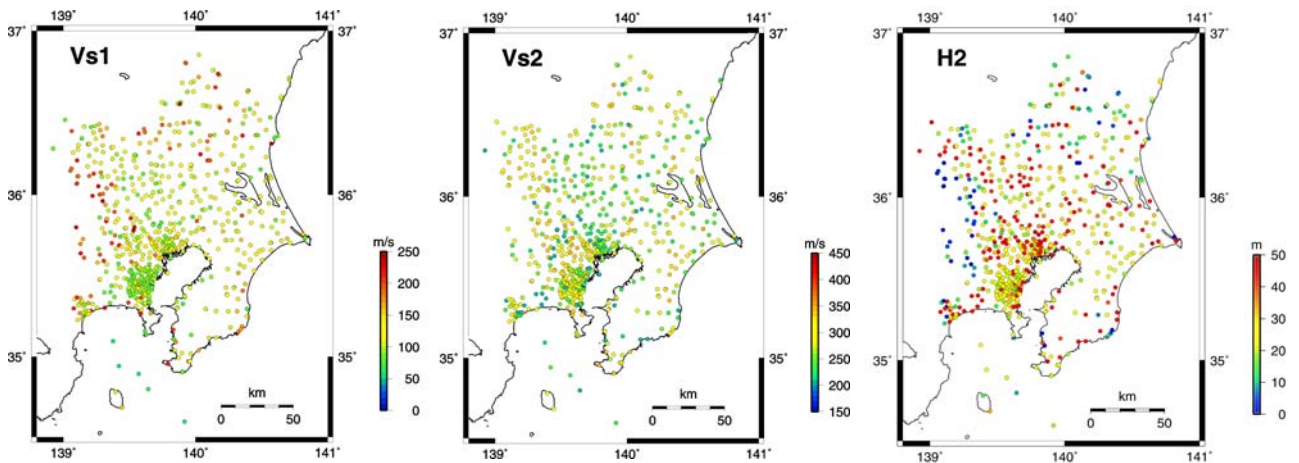


図 11. 表層地盤の第 1 (左)、2 層 (中) の S 波速度と工学的基盤深度 (右)。

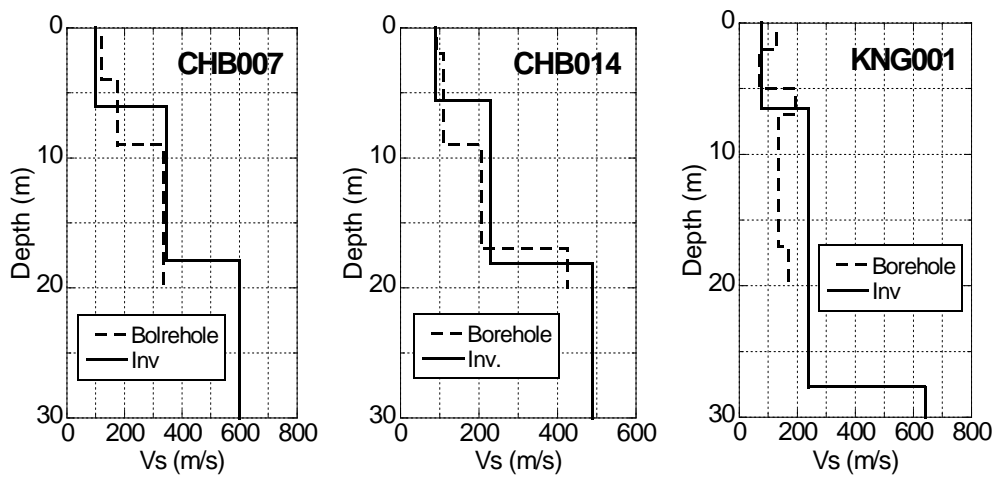


図 12. 逆解析による表層地盤の S 波速度構造と検層による S 波速度構造の比較。

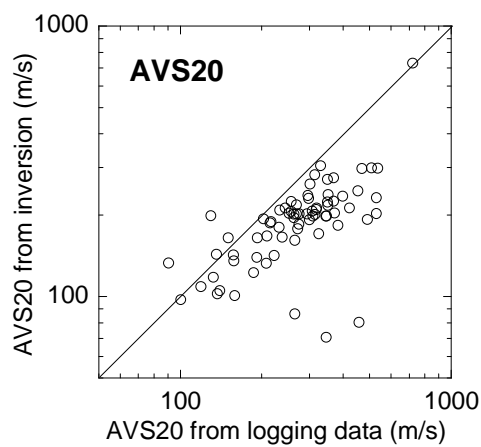


図 13. 逆解析による表層地盤の AVS20 と検層による AVS20 の比較。

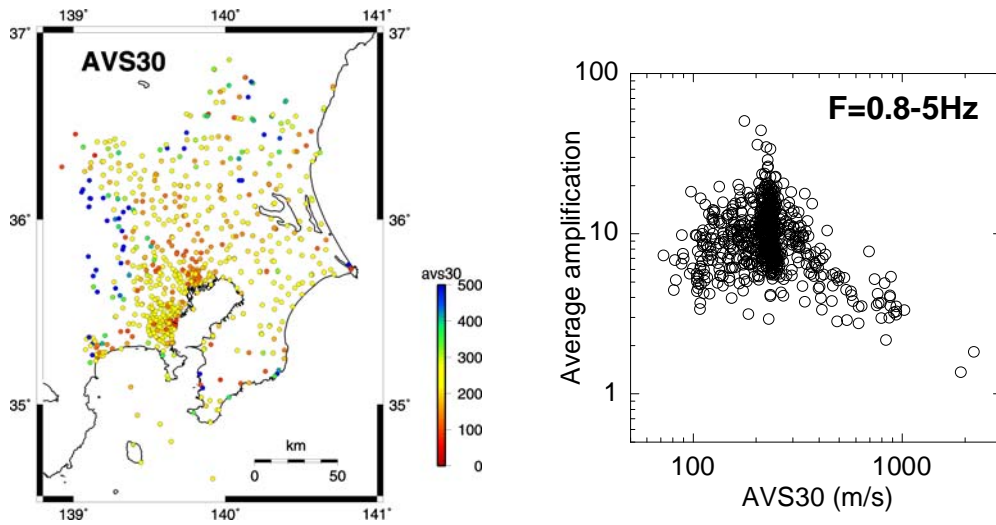


図 14. 逆解析モデルの AVS30 分布と AVS30 と増幅倍率の関係。

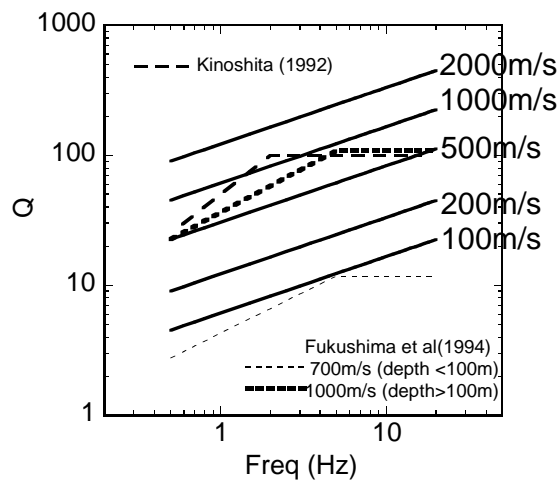


図 15. 逆解析による地盤の Q 値と既往の研究結果の比較。