

微地形分類と地盤調査地点を考慮した広域的な土層構成空間分布のベイズ推定

新潟大学大学院 自然科学研究科 学生会員 尾崎佑輔
新潟大学 自然系 (工学部) 正会員 大竹雄
新潟大学 自然系 (工学部) 正会員 保坂吉則

1. はじめに

近年の地震工学の発展に伴い、全国規模の確率論的な地震危険度の情報が作成されている。これらの危険度評価は震源特性の不確か性を示しており、地震防災対策において意思決定を行うための重要な情報を提供するものである。

著者らは、このような全国規模の地震ハザード評価を活用しつつ、そこで考慮されていない表層部の地盤応答特性を適切に評価することにより、市や町単位の地域防災計画に詳細かつ有用な情報を提供するための地震マイクロゾーニングの手法の開発を目指している。本稿では、地盤調査から得られる量的データと、微地形分類情報などの質的データを合理的に融合することにより、表層地盤の土層厚の空間分布を確率的に定量化する方法を提案する。その上で、新潟市中心部の地盤応答解析を行い、表層地盤の土層構成の空間分布評価の有用性について考察する。

2. 対象範囲と研究に用いるデータ

(1) 対象地域の概要

本研究では、新潟市中心部を検討対象とする。図-1は、対象地域の微地形分類図に解析範囲(15km×15km)を示した図である。この対象領域全体の土層構成のモデリングと地盤応答特性を把握することが本研究の課題となる。

当該地域には、信濃川と阿賀野川の河口が位置している。両河川は当該地域で氾濫を繰り返し、一時つながっていた時期がある。このため、河口付近には、両河川をつなぐように、大きな旧河道が存在している。また、信濃川下流部は、現在の河道幅の3倍ほどあった時期がある。したがって、これら2つの地域には、堆積年代が新しい軟弱な砂質土が堆積していることが懸念される。

このことは、1964年の新潟地震の液状化被害分布図からも考察される。この地図によると、液状化による被害は、信濃川下流部の堆積年代が新しい砂質土が堆積している地域に集中していることが読み取れる。この2つの地域は、後述する地盤応答解析を通じた有効性検証において、マクロ的な視点から考察に活用する。

(2) 微地形データと地盤調査データ

図-1は、2016年に公開された最新の微地形分類情報¹⁾である。新潟市域における砂丘の形成年代や詳細な旧河道領域の区分などの情報を平面図で提供している。

地盤調査データは、ほくりく地盤情報システム²⁾から得ることができる。このデータベースはWeb上で公開され、標準貫入試験の柱状図、N値の数値情報、各深度の土質区分、調査の位置情報などが取得できる。当該システムから対象地域のデータを抽出し、2476データを得た。以後これを、情報更新用データと呼称する。

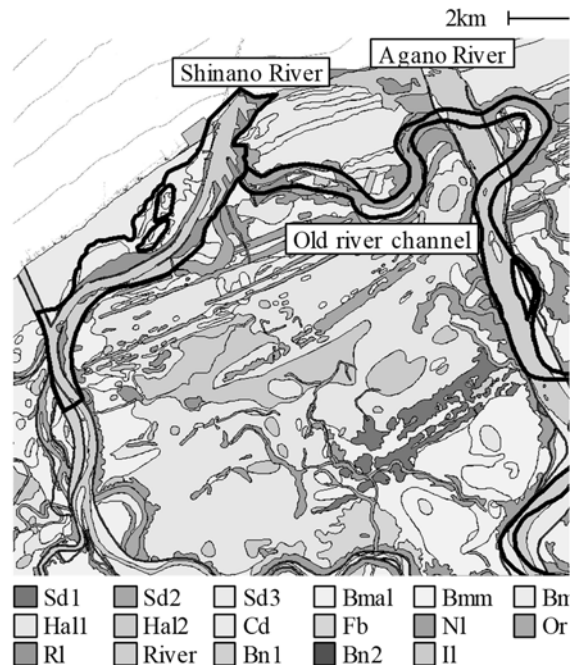


図-1 対象地域の微地形分類情報¹⁾

また、研究活動を進める途中で、対象地域の標準貫入試験データを追加で192本入手することができた。このデータは、後述する調査点間の内挿推定の精度を検証するための検証用データとして用いる。以後、検証用データと呼称する。

(3) As1・As2境界面のデータ化

図-2は、当該現場の代表的なN値深度分布を示した図である。いずれのN値深度分布でも、砂質土層の中にN値が急激に変化する位置がある。したがって、当該地域の砂質土層は、大きく2つにわけて考えることができる。上部(As1層と呼称)はN値が5前後であり、細粒分含有率Fcが10%程度で、やや細粒分を含んだ砂層である。下部(As2層と呼称)は、N値が40を超え、細粒分含有率Fcが10%以下の比較的締まった砂層である。As1、As2の境界面のインピーダンス比は大きく、この層境界のモデル化が表層地盤の地盤応答特性を把握する上で最も重要であると推察される。

図-3は、As1・As2層境界の深度の頻度分布をそれぞれの微地形分類別のデータ数で除して、密度分布で表現した図である。密度分布は、正規分布に近い分布形状をしていたため、最尤法により正規分布を当てはめた。層境界の平均値は、微地形分類別で比較的大きなバラツキを有しており、最小4.5m程度、最大16.0m程度が得られた。

以上の準備により、観測が得られていない地点についても、その地点の微地形分布に基づいて、As1・As2層境界の大凡の深度を知ることができる。

3. 研究の方法；土層構成の空間分布推定

(1) 基本的な考え方

対象領域 15km×15km の範囲を 75m×75m サイズのメッシュに分割し、そのすべての点 (40000 点) を推定点とした。その上で、5つの境界面の空間分布を設定し、対象地域全体の3次元土層構成を作成する。

地表面については 50mDEM データ、工学的基盤については工学的基盤面の深度分布図を、確定値としてそのまま活用する。As1・As2 境界面については、微地形データと地盤調査データを活用して、ベイズ推定により確率論的に空間分布を作成する。その他の深層部の境界面については、推定に用いる情報が少ないため、地質断面図等を参考に層境界面の空間分布を簡便にモデル化することとした。

本稿では As1・As2 層境界の空間分布の推定方法について述べる。推定の流れは下記の通りである。

- ・STEP-0：事前分布の設定（定常確率場）：
地盤調査が実施された $n=2476$ の As1・As2 境界のデータを収集整理し、平均、分散、自己相関構造を推定する。
- ・STEP-1：微地形データによるベイズ更新：
微地形データを観測値として Simple Kriging（ベイズ推定）により層境界の事後分布を得る。
- ・STEP-2：地盤調査データによるベイズ更新：
STEP-1 の事後分布を事前分布として、地盤調査データによる Simple Kriging（ベイズ推定）により層境界の事後分布を得る。

(2) Simple Kriging（ベイズ推定）

調査点間の内挿には、確率場理論に基づく内挿法として位置づけられる Kriging を用いる。本研究では、ベイズ推定として解釈される Simple Kriging を用いる。カルマンフィルタ等で行われるように、段階的に未知量を推定する問題として、下記の通り定式化することができる。

STEP- k における、推定量ベクトル \mathbf{Z}_1^k と観測量ベクトル \mathbf{Z}_2^k の集合として、新たな観測量ベクトル $\mathbf{Z}^k = [\mathbf{Z}_1^k, \mathbf{Z}_2^k]^T$ を定義し、 $\mathbf{Z}^k \in \mathbf{R}^{n_{est} + n_{obs}^k}$ 、 $\mathbf{Z}_1^k \in \mathbf{R}^{n_{est}}$ 、 $\mathbf{Z}_2^k \in \mathbf{R}^{n_{obs}^k}$ を正規変数ベクトルとする。なお、 n_{est} は推定点数、 n_{obs}^k は観測点数を表す。したがって、 \mathbf{Z}^k は下記の通りに記述される。

$$\mathbf{Z}^k \sim N(\boldsymbol{\mu}^k, \mathbf{V}^k) = N\left(\begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu}_{Z_1^k} \\ \boldsymbol{\mu}_{Z_2^k} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{11}^k & \mathbf{V}_{12}^k \\ \mathbf{V}_{21}^k & \mathbf{V}_{22}^k \end{bmatrix}\right)$$

$\boldsymbol{\mu}_{Z_1^k} \in \mathbf{R}^{n_{est}}$ は推定点の平均値ベクトル、 $\boldsymbol{\mu}_{Z_2^k} \in \mathbf{R}^{n_{obs}^k}$ は観測点の平均値ベクトルである。

ここで、 $\mathbf{V}_{11}^k \in \mathbf{R}^{n_{est} \times n_{est}}$ 、 $\mathbf{V}_{22}^k \in \mathbf{R}^{n_{obs}^k \times n_{obs}^k}$ はそれぞれ推定点間、観測点間の共分散行列、 $\mathbf{V}_{12}^k = (\mathbf{V}_{21}^k)^T \in \mathbf{R}^{n_{est} \times n_{obs}^k}$ は推定点と観測点間の共分散行列、 $\mathbf{V}_{obs}^k \in \mathbf{R}^{n_{obs}^k \times n_{obs}^k}$ は観測誤差である。

以上の定義に基づいて、観測誤差がある場合の推定量 \mathbf{Z}_1^k の観測量 \mathbf{Z}_2^k の条件付確率（ベイズの定理）の平均と分散は、次のように記述できる。

$$E[\mathbf{Z}_1^k | \mathbf{Z}_2^k] = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\mu}_{Z_1^k} \\ \mathbf{V}_{12}^k \mathbf{V}_{22}^{-k} (\mathbf{Z}_2^k - \boldsymbol{\mu}_{Z_2^k}) \end{pmatrix}, \quad V[\mathbf{Z}_1^k | \mathbf{Z}_2^k] = \begin{pmatrix} \mathbf{V}_{11}^k & \mathbf{V}_{12}^k \\ \mathbf{V}_{21}^k & \mathbf{V}_{22}^k \end{pmatrix}^{-1} - \begin{pmatrix} \mathbf{V}_{12}^k \\ \mathbf{V}_{22}^k \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{V}_{11}^k & \mathbf{V}_{12}^k \\ \mathbf{V}_{21}^k & \mathbf{V}_{22}^k \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{V}_{12}^k \\ \mathbf{V}_{22}^k \end{pmatrix}$$

結果として、推定値と推定誤差は、下記の式で表現できる。

$$\boldsymbol{\mu}_{Z_1^k} = \boldsymbol{\mu}_{Z_1^k} + \mathbf{V}_{12}^k (\mathbf{V}_{22}^k + \mathbf{V}_{obs}^k)^{-1} (\mathbf{Z}_2^k - \boldsymbol{\mu}_{Z_2^k})$$

$$\mathbf{V}_{11}^k = \mathbf{V}_{11}^k - \mathbf{V}_{12}^k (\mathbf{V}_{22}^k + \mathbf{V}_{obs}^k)^{-1} \mathbf{V}_{21}^k$$

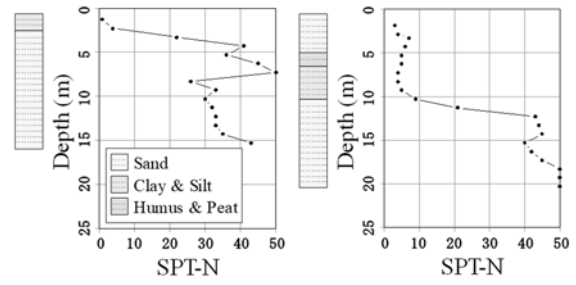


図-2 代表的な標準貫入試験データ

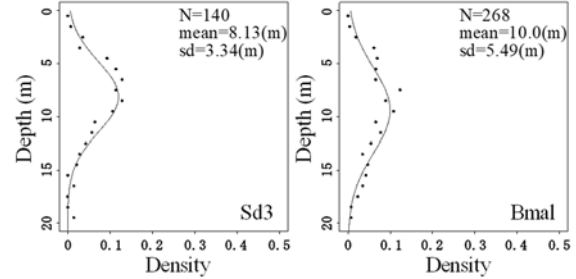


図-3 As1・As2境界面の深度の密度分布

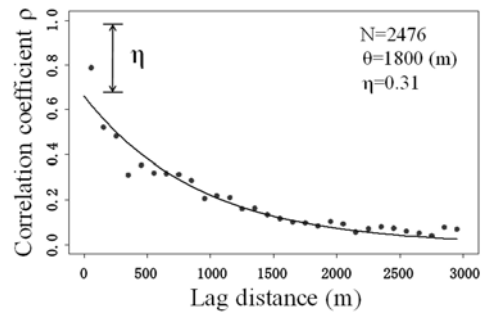


図-4 As1・As2境界面の自己相関構造

4. 解析結果；As1・As2 境界面の内挿と有効性の検証

(1) STEP-0：As1・As2 層境界のモデル化（定常確率場）

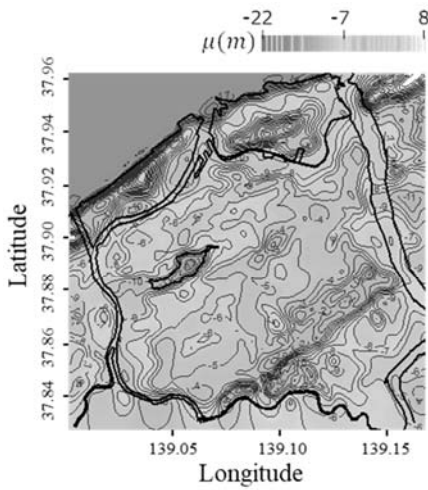
As1・As2 境界面の標高値を用いて、確率場を記述する。地盤調査データ ($n_{obs}^k=2476$, STEP-2 における情報更新用データ) から得た、As1・As2 境界面の標高値の標本平均と標本標準偏差を、一様確率場として設定した。

図-4 は、確率場の自己相関構造を示している。赤点で示される距離に応じた相関係数について回帰分析を行い、青線の自己相関関数を得た。ここで、 η はナジェット効果、 θ は自己相関距離であり、2次元空間で一定値をとるものとする。本研究では、 η を観測量の観測誤差として解釈することとする。

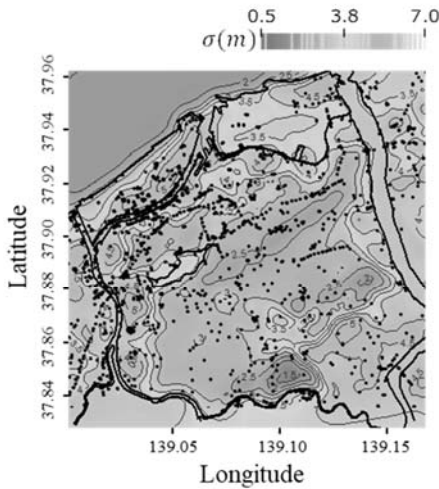
(2) STEP-1：微地形データによるベイズ更新

推定点すべてに微地形分類情報が存在するため、推定点と観測点の数は一致し、 $n_{est}=n_{obs}^k=40000$ となる。 $\boldsymbol{\mu}_{Z_1^k}^0$ は、STEP-0 で設定した $\boldsymbol{\mu}$ を n_{est} 個並べたベクトルで、共分散の部分行列は、 $\mathbf{V}_{11}^k = \mathbf{V}_{22}^k = \mathbf{V}_{12}^k = \mathbf{V}_{21}^k = \mathbf{C}_e$ となる。なお、 \mathbf{V}_{obs}^k の対角項には、推定点の微地形分類に応じて、対応する As1・As2 境界面の分散 σ_{mi}^2 を並べ、対角項以外は 0 とする。また、 \mathbf{Z}_2^k は、微地形分類に応じて、As1・As2 境界面の平均値 $\boldsymbol{\mu}_{mi}$ を格納する。

以上の準備により、ベイズ推定を行った結果を図-5 に示す。図-5(a) は、更新後の平均値 $\boldsymbol{\mu}_{Z_1^k}^1$ の空間分布が示されている。図-5(b) は、更新後の分散が示されており、 \mathbf{V}_{11}^k の対角項の空間分布が示されている。図-5(a) より、信濃川下流部、阿賀野川と信濃川をつなぐ旧河道部において、軟弱な As1 層が厚く

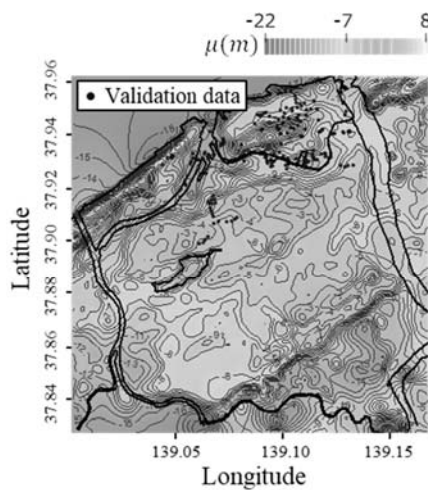


(a) Mean value of posterior distribution

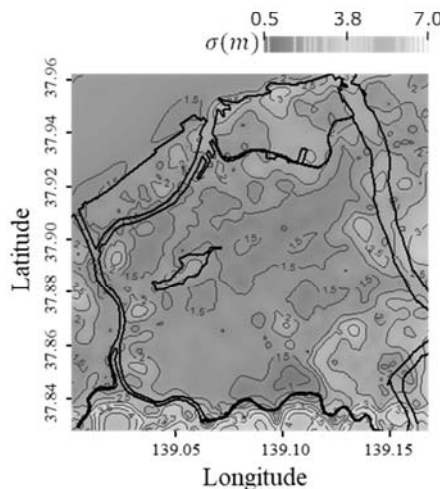


(b) Standard deviation of posterior distribution

図-5 STEP-1におけるベイズ更新結果

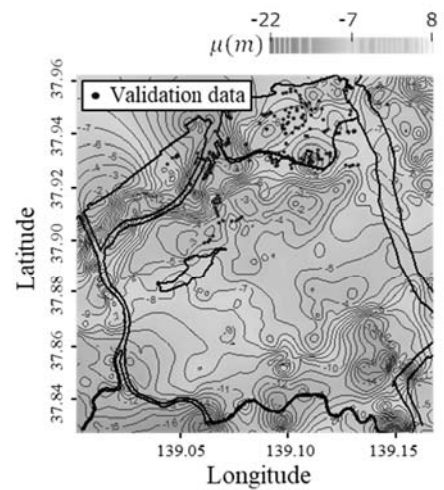


(a) Mean value of posterior distribution

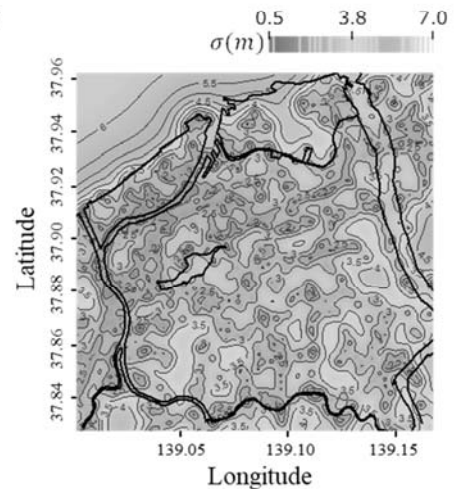


(b) Standard deviation of posterior distribution

図-6 STEP-2におけるベイズ更新結果 (2段階推定法の最終結果)



(a) Mean value of posterior distribution



(b) Standard deviation of posterior distribution

図-7 STEP-1を考慮しないベイズ更新結果 (1段階推定法の最終結果)

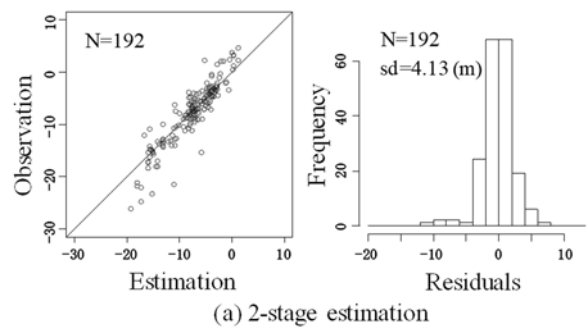
堆積していることが確認される。

(3) STEP-2：微地形データによるベイズ更新

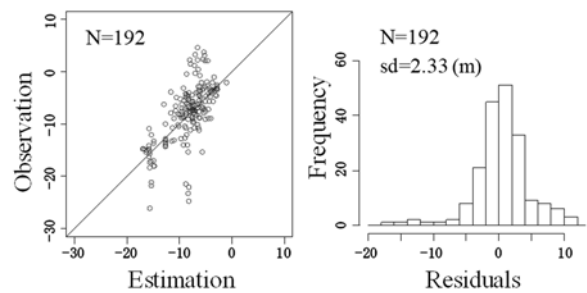
対象区間で実施された $n_{obs}^{k=2}=2476$ の離散的な地盤調査結果に基づいて、さらにベイズ更新を行う。地盤調査データの観測位置は図-5(b)の黒丸で示されている。このSTEPでは、観測と推定量の数に差異が生じているため、STEP-1の事後分布の分散の内、観測がない行と列を削除し、 $\mathbf{V}_{22}^{k=1} \in \mathbf{R}^{n_{obs}^{k=2} \times n_{obs}^{k=2}}$ 、 $\mathbf{V}_{12}^{k=1} = (\mathbf{V}_{21}^{k=1})^T \in \mathbf{R}^{n_{est}^{k=2} \times n_{obs}^{k=2}}$ とする。なお、 $\mathbf{V}_{obs}^{k=2} \in \mathbf{R}^{n_{obs}^{k=2} \times n_{obs}^{k=2}}$ の対角項には、地盤調査の観測誤差相当を配置する。自己相関関数の分析から得られたナジェット効果を観測誤差と解釈し、 $\eta^2 \sigma_e^2$ を $n_{obs}^{k=2}$ 個並べて、それ以外を0とする。

以上の準備により、ベイズ推定を行った結果を図-6に示す。図-6(a)は、更新後の平均値 $\mu z_1^{k=2}$ の空間分布が示されている。図-6(b)は、更新後の分散が示されており、 $\mathbf{V}_{11}^{k=2}$ の対角項の空間分布が示されている。図-6(a)より、当該地域の地質学的な特性がより明瞭に確認できるとともに、図-6(b)より、推定分散が対象領域全体で大きく低減されていることが読み取れる。以後、この一連の方法を2段階推定法と呼ぶ。

図-7は、比較のための参考検討として、STEP-1(微地形データによる更新)を行わず、STEP-0からSTEP-2の更新を行った結果である。以後、この方法を1段階推定法と呼ぶ。



(a) 2-stage estimation



(b) 1-stage estimation

図-8 2段階推定法と1段階推定法の推定精度の比較

図-6 と図-7 を比較すると、信濃川の下流部では地盤調査データが多いため、類似した結果が認められるが、阿賀野川と信濃川の旧河道部やそれ以外の地域では、明瞭な差が見られる。

なお、図-6、図-7 には、検証用データ（追加地盤調査）の観測位置を青色印で示している。図-8 は、これらの検証用データ位置における観測値と推定値の散布図を示した図である。微地形データを考慮した2段階推定法は、それを考慮していない1段階推定法に比べて、大幅に推定精度が改善していることが確認できる。

5. 地盤応答解析による検証

(1) 解析手法

全推定点において、一次元等価線形地盤応答解析 SHAKE³⁾による地盤応答解析を実施することにより、土層構成の空間分布の有効性を検討する。

入力地震動は、図-9(a)に示す3種類の地震動を用いた。地震動-1は、道路橋方書のレベル1設計用地震動、地震動-2と地震動-3は、地震動時刻歴波形の統計的予測法⁴⁾を用い、近傍の主要断層を想定して作成した模擬地震動である。また、図-9には、フーリエスペクトル（バンド幅0.3Hzのパーゼンウィンドウを施している）と伝達関数を示している。

(2) 解析結果と考察

図-10(a)は、2段階推定法によりAs1・As2境界面を推定した場合の地盤応答解析結果を示している。図-10(b)は、参考検討として、As1・As2境界面を設けない場合の地盤応答解析結果を示している。両者は、地震動-3を入射した場合の、工学的基盤からの最大増幅度分布を示している。

両者を比較すると、対象地域における地盤構造の特徴である信濃川下流部、旧河道部において、明瞭な差が確認できる。さらに信濃川下流部では、図-11(a)に示す1964年新潟地震の際の液状化被害分布と図-11(b)に示す解析結果が、概ね対応していることが分かる。被害分布図と増幅度の良好な一致は、本研究で行ったAs1・As2境界面の推定方法の有効性を示すものであると考えられる。

6. 終わりに

本研究では、新潟市域の微地形分類情報や地盤調査情報をベイズ推定によって融合することで、3次元地盤モデルの構築を行った。その結果を活用した地盤応答解析から把握した地盤増幅度分布において、増幅度が顕著である地域は、軟弱地盤が堆積している地域と概ね合致した。

今後は、本研究で着目したAs1・As2境界面の推定精度が、地表面の地震動の推定精度に与える影響を分析する方針である。基盤面で定義される地震外力に含まれる各種不確実性と表層地盤のモデリングにおける不確実性の寄与度の分析を行いたいと考える。

参考文献

- 1) 鴨井幸彦, 安井賢, 卜部厚志: 新潟及び内野地域の地質・地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 産業研地質調査総合センター, 2016.
- 2) 北陸地盤情報活用協議会: ほくりく地盤情報システム
<http://www.jiban.usr.wakwak.ne.jp/>

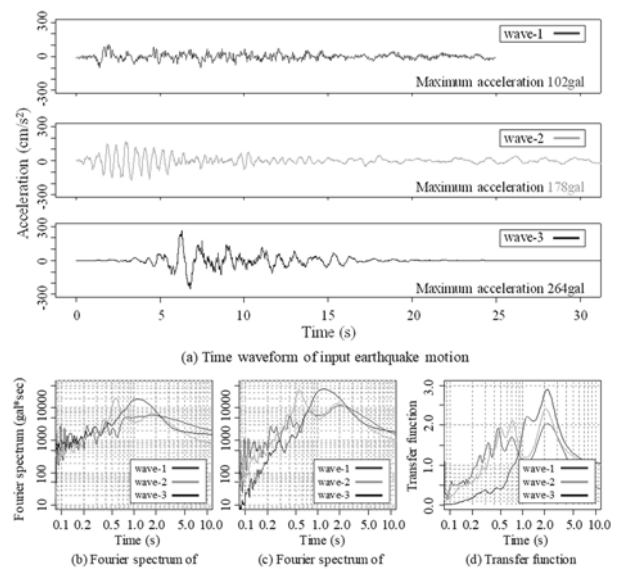


図-9 入力地震動の時刻歴, およびフーリエスペクトルと伝達関数

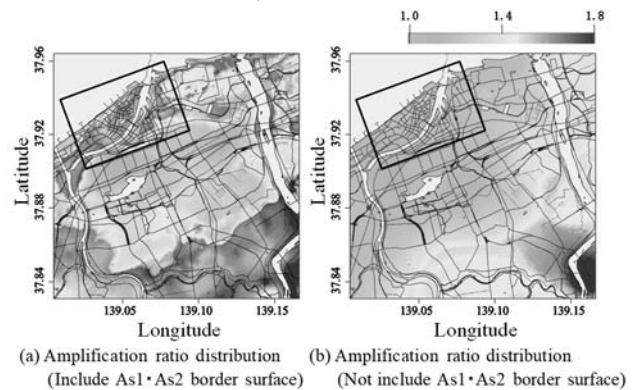
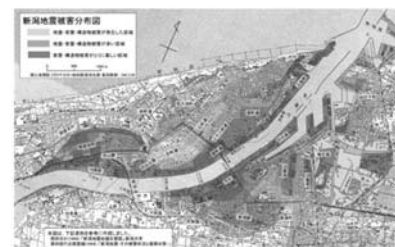


図-10 地盤応答解析の結果 (地震動-3)



(a) Damage distribution for liquefaction in 1964 Niigata earthquake



(b) Maximum of amplification ratio distribution

図-11 1964年新潟地震における液状化被害分布図との対応関係

- 3) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE, A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley, 1972
- 4) 糸井達也, スタフォード ピーターJ, 金子雅彦, 佐藤一郎: 地殻内地震の地震動時刻歴波形の統計的予測法, 第14回日本地震工学シンポジウム論文集 GO16-FRI-8, 2014