

ベイズ推定による表面波探査データのインバージョン
Inversion of Surface Wave Exploration Data by Bayesian Inference

○井埜昂介*, 藤澤和謙*
Kosuke INO, Kazunori FUJISAWA

1. はじめに

表面波探査は、人工的に発生させた表面波を複数の受信機で検出し、それから分散曲線を導出することで、逆解析を通して地盤中のせん断波速度分布を推定する。通常は、分散曲線に合致するせん断波速度を深度毎に推定するが、その推定結果に伴う不確かさ（誤差）は提供されない事が多い。本論では、せん断波速度の推定結果の信頼性を評価するため、ベイズ推定を表面波探査の逆解析に適用し、せん断波速度の事後分布を求めてことで、その不確実性の把握を試みた結果について報告する。

2. ベイズ推定を用いたせん断波速度の推定方法

表面波探査においては、図1に示すように、均一な地層が鉛直方向に重なったモデル地盤を仮定し、各層のせん断波速度 β 、圧縮波速度 α 、密度 ρ 、層厚 h をパラメータとして設定する。

従来の方法では、計測した波形データから実験的な分散曲線を作成し、仮定した地盤モデルに基づいて stiffness matrix 法¹⁾により理論的な分散曲線（推定結果）を算出する。その後地盤中のパラメータを仮定した上で stiffness matrix method と呼ばれる方法で理論的な分散曲線を作成する。この際、仮定パラメータのうち、せん断波速度のみを更新しながら理論曲線を再計算し、実験曲線と一致する速度を探索するのが逆解析の手順である。図2に実験曲線と理論曲線の一例を示す。同図の凡例において、 \mathbf{c}_y は実験曲線のデータベクトル、 \mathbf{c}_p は理論曲線の離散値を意味し、これらの次元を N とする。せん断波速度を確率的に推定するにあたり、ベイズの定理を以下のように利用してせん断波速度の事後分布を求める。

$$p(\boldsymbol{\beta}|\mathbf{c}_y) = \frac{p(\mathbf{c}_y|\boldsymbol{\beta})p(\boldsymbol{\beta})}{p(\mathbf{c}_y)}$$

$$p(\mathbf{c}_y|\boldsymbol{\beta}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^N} \exp\left(-\frac{(\mathbf{c}_y - \mathbf{c}_p)^T(\mathbf{c}_y - \mathbf{c}_p)}{2\sigma^2}\right)$$

ここに、 σ^2 は誤差分散であり、上式は二つの分散曲線が示すせん断波速度の誤差が平均ゼロの正規分布に従うとして導かれる。また、 $\boldsymbol{\beta}$ は各層のせん断波速度を並べたベクトルであり、 \mathbf{c}_p は stiffness

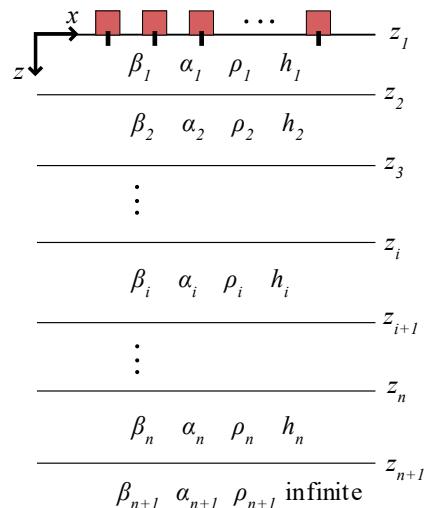


図1 地層の模式図

Fig.1 Model of subsurface

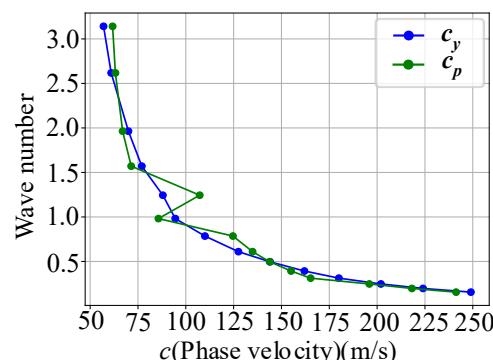


図2 分散曲線

Fig.2 Dispersion curves

*京都大学 Kyoto University

Keywords:表面波探査、ベイズ推定

matrix method により β の関数として求まる。メトロポリスヘイスティング法によるサンプリングを行うことで、せん断波速度の事後分布を求める。

3. 解析結果

解析には、Olafsdottir (2016)²⁾によるアイスランドの 2 地点における探査データを使用した。9 層および 10 層構造の地盤モデルを設定し、実験曲線に対して複数の設定条件でベイズ推定を適用した。図 3(a)～図 3(d)に 10 層構造地盤の各層についての得られたせん断波速度の分布(ヒストグラム)を示す。

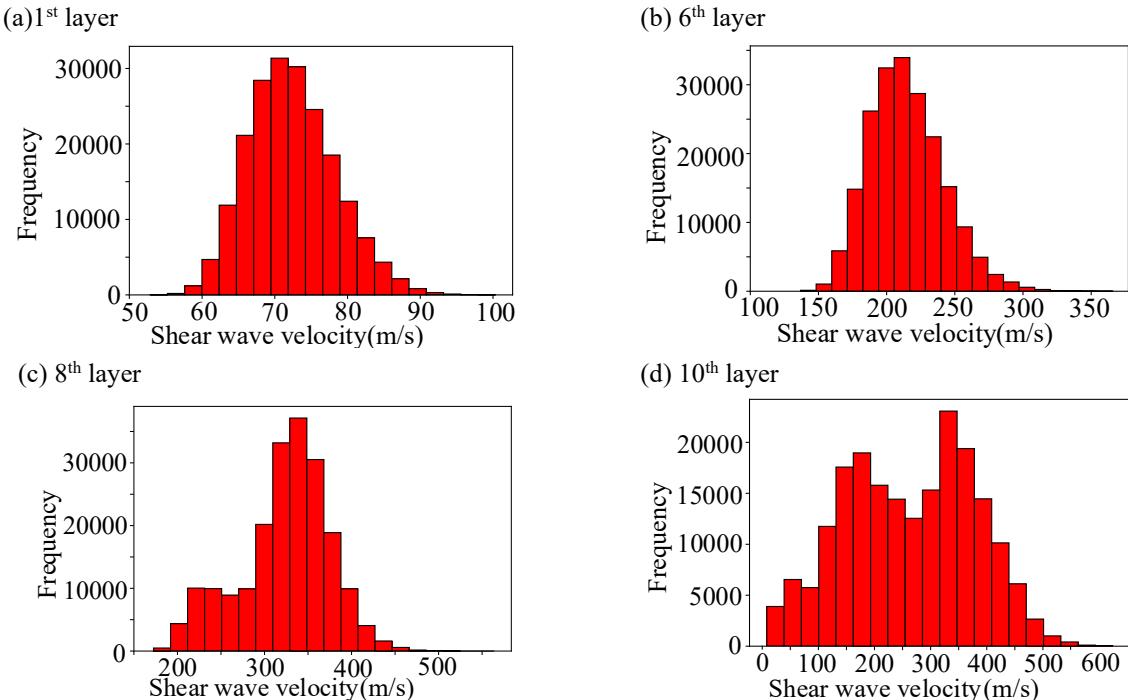


図 3 せん断波速度分布
Fig3. Shear wave velocity distribution

6 層目までの浅い層では、せん断波速度の分布範囲は比較的狭く Olafsdottir (2016)の探査結果と近い値に分布することが確認できた。一方で、深い層では分布範囲が広がり、推定値の分散が大きくなる傾向が見られた。特に、第 7 層以降では複数のピークが現れる場合もあり、一意的な推定が困難な層が存在する。この原因には、非線形問題に対する逆解析では解が一意に定まることがなく、実験曲線に適合するせん断波速度の組み合わせが複数存在することが挙げられる。

4. まとめ

本論では、表面波探査にベイズ推定を導入することでせん断波速度を確率的に求め、従来の解析方法による精度の評価を行った。その結果、比較的浅い層のせん断波速度は有効に推測できるものの、深い層の推定値は不確実性が大きくなるということが明らかとなった。これを改善するには FWI (フルウェーブインバージョン) のような全波形データを有効に利用する他、サンプリング方法についても工夫が必要と考える。

参考文献 : 1) Eduardo Kausel, José Manuel Roësset (1981): Stiffness matrices for layered soils. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6): 1743–1761. 2) Olafsdottir, E. A. (2016): Multichannel analysis of surface waves for assessing soil stiffness, M.Sc. thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, University of Iceland.