

## 微動H/Vスペクトルの逆解析による地盤のS波速度構造推定

正会員 ○新井 洋<sup>\*1</sup>  
同 時松 孝次<sup>\*2</sup>

## 1. はじめに

筆者らは、既報<sup>1)</sup>において、水平多層地盤における高次モードまで考慮した表面波の理論H/Vスペクトル（水平鉛直スペクトル比）を提案し、これが微動H/Vスペクトル<sup>2)</sup>をほぼ説明できることを示した。このことは、逆に、提案理論を用いて微動H/Vスペクトルから地盤構造を推定する可能性を示唆している。そこで本報では、微動H/Vスペクトルの逆解析により地盤のS波速度構造を推定する手法を示し、その妥当性を検討する。この逆解析では、遺伝的手法と非線形最小2乗法を併用した逆解析手法を提案する。

## 2. 遺伝的手法と非線形最小2乗法を併用した逆解析

## 2.1 最適化手法

地盤を水平多層構造（図-1）とし、逆解析において最小とすべき評価関数Sを次式とする。

$$S = \sum_i [(H/V)_m(f_i) - (H/V)_s(f_i)]^2 W_i \quad (1)$$

ここに、 $f$ は周波数、 $(H/V)$ はH/Vスペクトルを表し、添字 $m$ は観測値、 $S$ は理論値<sup>1)</sup>を表す。 $W$ はM推定法<sup>3)</sup>における重みである。まず、地盤構造の探索範囲を決め、遺伝的手法（GA）による最適化を行う。安定した解を得るために、乱数の初期値を変えて複数回の試行を行い、各試行での最適解の平均をとる。次に、これを初期値として非線形最小2乗法による最適化を行い、補正量が十分小さくなつた時点の解を最終的な推定地盤構造とする（図-1）。このように、遺伝的手法と非線形最小2乗法を併用することで、両者の利点を生かして、ロバスト性が高く、かつ局所収束能力の高い最適化を最小時間で行うことが期待できる。

## 2.2 逆解析のパラメータ

逆解析に先立ち、 $(H/V)_s$ の感度解析を行った。ある地盤構造において、第j層の層厚 $H_j$ に対する $(H/V)_s$ の感度 $D(f)$ は、次式の無次元化偏微分係数で表せる。

$$D(f) = (H/(H/V)_s(f)) \cdot (\partial(H/V)_s(f)/\partial H) \quad (2) \quad (\text{at } H = H_j)$$

他の物理定数に対する感度も同様に表せる。例として、図-2(a)に示す地盤構造における各層の層厚・密度・P波速度・S波速度に対する $(H/V)_s$ の感度を求め、その周期特性を同図(b)-(e)に示す。密度・P波速度に対する感度(c, d)に比べ、層厚・S波速度に対する感度(b, e)の方が周期変動が大きく、絶対値の大きい場合が多いことがわかる。他の数種類の地盤構造においても同様の傾向が確認さ

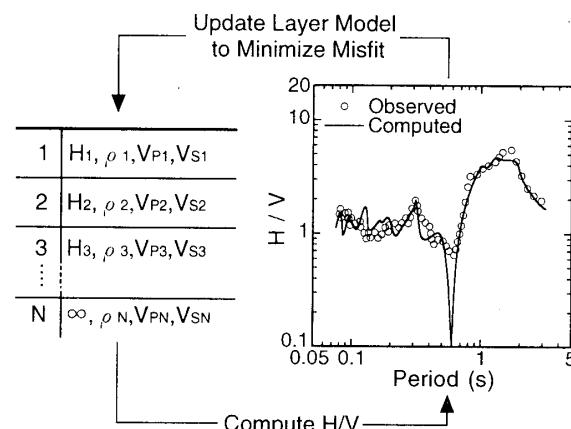


図-1 逆解析のプロセス

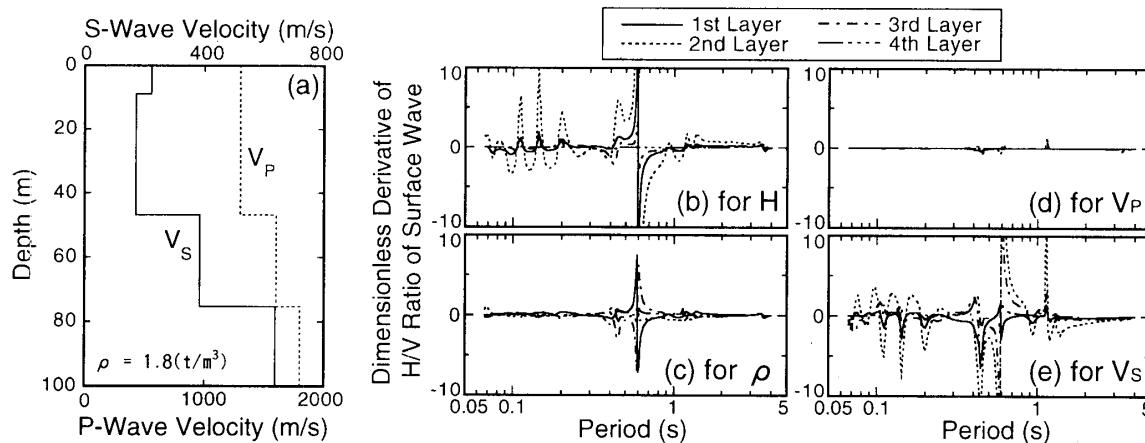


図-2 表面波H/Vスペクトルの感度解析例

Estimation of S-Wave Velocity Profiles by Inversion of Microtremor H/V Spectra

Hiroshi ARAI and Kohji TOKIMATSU

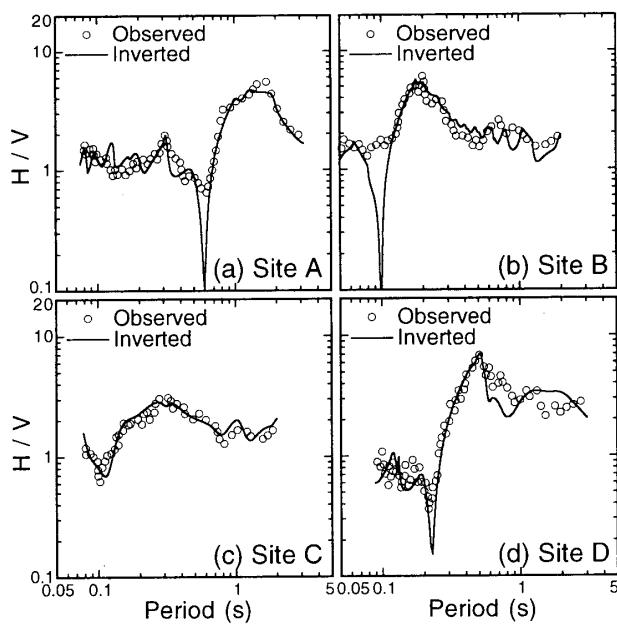


図-3 微動および理論H/Vスペクトル

れた。このことは、 $(H/V)_s$ の逆解析におけるパラメータとして、層厚とS波速度が適当であることを示している。

### 3. 微動H/Vスペクトルに基づくS波速度構造推定

地盤構造既知の東京近郊4地点（サイトA-D）で得られた微動H/Vスペクトル<sup>11</sup>を検討対象とした。各サイトの深度100m以浅の地盤を3-5層にモデル化し、提案手法により逆解析を行ってS波速度構造を推定した。但し、本研究では、各層のS波速度に関する情報は得られているが、その層厚分布が未知である場合を想定して、S波速度は検層結果を参考に固定し、層厚のみを逆解析パラメータとした。また、密度とP波速度はS波速度を参考に仮定した。

各サイトにおける観測H/Vスペクトルと理論H/Vスペクトルの対応を図-3に、推定S波速度構造を図-4に検層結果と比較して示す。図-3より、各サイトとも理論値（実線）は観測値（○印）とほぼ適合しており、逆解析が適切に行われたことが示唆される。推定S波速度構造（実線）は各サイトとも検層結果（破線）と概ね対応しており、また、各層厚の推定標準誤差（鎖線）は最大でも推定値の2割程度と比較的小さく抑えられている（図-4）。

推定構造の精度について、さらに1次元重複反射理論による検討を行った。図-5に、サイトA、Bの推定S波速度構造から求めた地表/G.L.-100mのS波理論伝達関数（上段：振幅比、下段：位相差）を実線で示す。図中の破線は各サイトの検層結果から求めた理論伝達関数である。両サイトとも、振幅・位相いずれの次元においても、微動観測から推定した伝達関数は、検層結果から求めたそれとほぼ対応している。他のサイトでも同様の対応が確認された。以上の結果は、地盤各層のS波速度に関する情報が得られている場合、微動の1点3成分観測に基づいて、その深さ方向分布をある程度の精度で推定できることを示している。

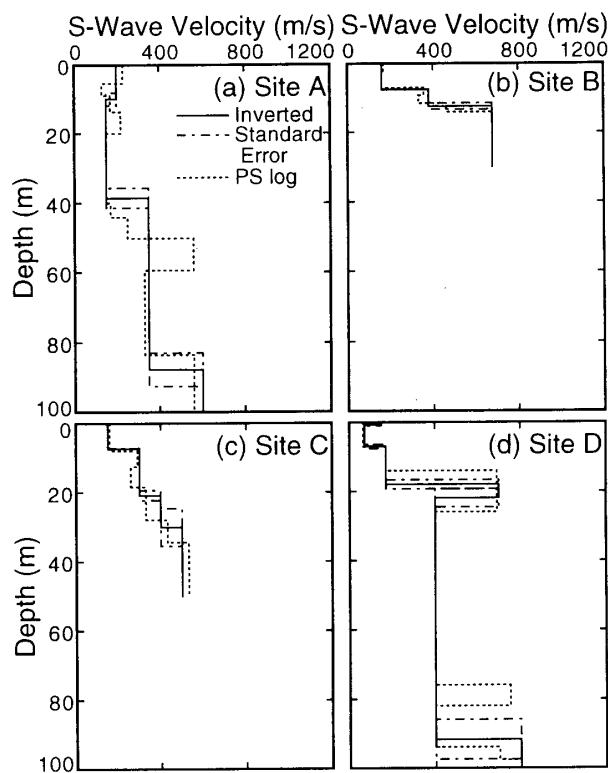


図-4 推定S波速度構造と検層結果との比較

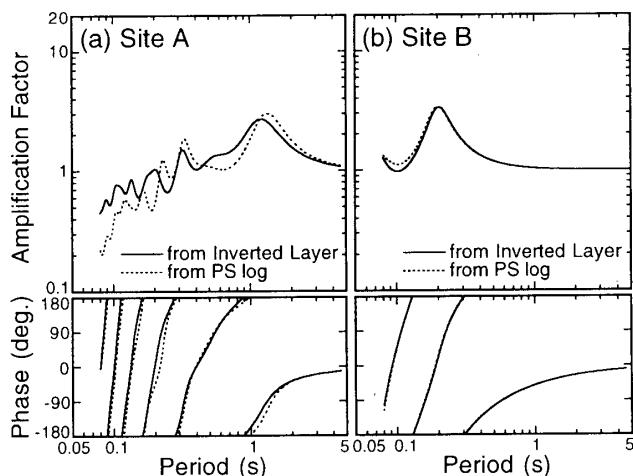


図-5 S波伝達関数の比較

### 4.まとめ

水平多層地盤における表面波の理論H/Vスペクトルを用いて、微動H/Vスペクトルの逆解析により地盤のS波速度構造を推定する手法を提案し、その妥当性を検討した。その結果、各層のS波速度に関する情報が得られている場合、提案手法により、地盤のS波速度構造をある程度の精度で推定できることを示した。

【参考文献】 1) 新井、時松：レイリー波とラブ波の振幅比が微動H/Vスペクトルに与える影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、構造II、199-200、1997。 2) 中村、上野：地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み、第7回日本地震工学シンポジウム講演集、265-270、1986。 3) 中川、小柳：最小2乗法による実験データ解析、東京大学出版会、1982。

\*1 東京工業大学工学部建築学科 助手・博士(工学)

\*2 東京工業大学工学部建築学科 教授・工博

Research Assoc., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.  
Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.