

## 第1章 微動 H/V スペクトルのピーク周波数マップ

(長 郁夫・先名重樹・野々垣 進)

都市域の地質地盤図「埼玉県南東部」(米岡ほか, 2025; 産総研地質調査総合センター・埼玉県環境科学国際センター, 2025)における常時微動(以下, 微動)の Horizontal-to-Vertical (H/V) スペクトル(野越・五十嵐, 1971)のピーク周波数マップは, 同地域の地下数 10 m の地質地盤に起因する共振周波数の分布形態を示すために追加したコンテンツである。地盤の共振周波数は, 地震動の増幅及びその結果として生じる建築物や土木構造物の被害に影響を与え得る重要な量であるから, インフラ整備や地盤リスク, 地震ハザードの評価において, 地質データと併せて互いに情報を補い合う 1 セットの基礎データと位置付けることができる。本説明書では, 地盤の共振と微動 H/V スペクトルのピーク周波数の関係, ピーク周波数マップの作成に用いた微動データ, 解析方法と結果を概説する。この説明書は長ほか(2025)の要約である。また都市域の地質地盤図「埼玉県南東部」のウェブサイト(産総研地質調査総合センター・埼玉県環境科学国際センター, 2025)で閲覧できるコンテンツは長ほか(2025)の図 8 の転載である。詳細は同論文を参照していただきたい。

### 1.1 地盤の共振

軟弱な表層と堅固な下層からなる 2 層地盤に鉛直下方から地震波(S波)が入射すると, 周波数によっては地震波の振幅が著しく増幅する。この現象は地盤の共振と呼ばれ, その時の周波数 $f_0$ は共振周波数と呼ばれる(地震動編集委員会編, 1999)。軟弱層が厚い地点では地盤の共振周波数は低周波側に, 薄い地点では高周波数側に現れる。この共振周波数の違いは地盤種別の判定等に用いられている。例えば道路橋示方書(日本道路協会編, 2017)では, 共振周波数(同書では基本固有周期と呼ばれている)が 5.0 Hz よりも高い地盤は第 I 種地盤, 1.7 Hz 以下の地盤は第 III 種地盤, その中間は第 II 種地盤とされている(第 1 表; 道路橋示方書では周期で表示されているがここでは周波数に変換して表示している)。第 I, III 種地盤は耐震工学的にそれぞれ「良好」「軟弱」な地盤, 第 II 種地盤はそれらの「中間」の地盤ということになる。

### 1.2 微動 H/V スペクトル

地面は波浪や風, 産業活動等の不特定多数の震動源の影響で常に僅かに揺れており, この揺れを微動と言

第 1.1 表 耐震設計上の地盤種別(日本道路協会編(2017)に基づき周期を周波数として記載)。

共振周波数 $f_0$ [Hz]	地盤種別
$5.0 < f_0$	第 I 種地盤
$1.7 < f_0 \leq 5.0$	第 II 種地盤
$f_0 \leq 1.7$	第 III 種地盤

う。この僅かな揺れは, 震動源で励起された揺れが弾性波として地面を伝播するときのものであり, 地下の地質地盤構造に依存する。したがって, 微動を観察, 分析することでその場所の地盤震動特性や地下構造を評価できる可能性がある。例えば, 微動の H/V スペクトルは微動の単点観測(地面に 1 台の地震計を設置する微動の観測形態)による 3 成分波形から同定可能な水平動と上下動のスペクトル比であり, そのピーク周波数 $f_p$ は経験的に地盤の共振周波数 $f_0$ を良く近似することが知られている(Bonnefoy-Claudet *et al.*, 2008)。そこで, ここでは地質地盤図整備において 3 次元地質地盤モデルが構築される深さ数 10 m までの地下構造を反映する周波数帯域で微動の H/V スペクトルのピーク周波数を評価し, 同地質地盤モデルに対応する地盤振動特性(共振周波数)と解釈する。

### 1.3 微動データと解析方法

都市域の地質地盤図「埼玉県南東部」のモデル化対象領域では防災科学技術研究所により平均約 1 km 間隔の格子点上で微動観測が実施されている(先名ほか, 2023)。これに産総研の独自データ 15 地点分を併せ, 全 853 地点の微動データを基礎として H/V スペクトルのピーク周波数 $f_p$ の空間変化を評価した(第 1.1 図)。

各微動観測点の観測形態はアレイ観測, すなわち, 複数の地震計で同時に微動を観測する形態である。アレイの大きさは極小サイズ(半径 0.6 m)及び小サイズ(半径 10 m 程度)の 2 種類であり, これらのアレイはそれぞれ全 6 台の地震計((株)白山工業製 3 成分サーボ加速度計 JU410)で構成されている。このアレイを用いて, 日中, 100 Hz ないし 200 Hz サンプリングで約 15 分間にわたり微動波形が記録された。この観測仕様は全 853 地点で同様である。

各地震計の記録について成分ごとに高速フーリエ変

換 (Fast Fourier Transform : FFT) に基づく直接法でパワースペクトル密度を推定した. 具体的には, アンサンブル平均と周波数領域の平滑化を併用した (Bendat and Piersol, 2010). 微動波形から過渡的なノイズ (車両通行に起因する突発的パルス等) を避けるように 10.24 s もしくは 20.48 s のセグメントを多数取り出し, FFT を適用し, アンサンブル平均に用いた. 周波数領域の平滑化では, 周波数が高くなるとウインドウ幅が大きくなるような周波数依存ウインドウ (Bendat and Piersol, 2010) を用いてスペクトルの安定化を図った. 水平動 2 成分のパワーの和を上下動成分のパワーで除いた量を H/V スペクトルと定義した. 観測点ごとに 6 台の地震計に対応する 6 個の H/V スペクトルが得られるので, それらを周波数ごとに算術平均して観測点を代表する H/V スペクトルとみなした.

H/V スペクトルのピークを同定して  $f_p$  を決めるにあたり, 評価対象周波数帯域の下限と上限  $f_{li}$ ,  $f_{hi}$  をそれぞれ 0.5, 20 Hz とした. すなわち, この周波数範囲でのみスペクトルの最大値を読み取り  $f_p$  を決めた. ただし, この周波数範囲において複数の局所ピークが見られることも多かった. そのような場合であっても, 局所ピークのうち最大値を与えるもの (すなわち, いわゆるピーク) の周波数を読み取って  $f_p$  とすれば良いのだが, H/V スペクトルにはしばしば低周波数帯域に向かって振幅が増大するトレンドが見られた. そのようなトレンドが見られる場合, 単純にスペクトルの最大値を「ピーク」とみなすやり方では浅部地盤に起因するピークを抽出できない (長ほか, 2025). また, スペクトル推定結果の不安定性に起因するばらつきが見られることも多かった. そこで我々は, スペクトル中に複数のピークが見られる場合のピーク選択パラメータ

として  $W$ ,  $R_{II}$  を導入した. これらはそれぞれスペクトルに混入するトレンドやばらつきの影響を小さくするためのものである. その設定値は最終的に得られるピーク周波数マップの概観にも影響を及ぼすが, ここでは  $W$ ,  $R_{II}$  をそれぞれ 4.0, 4.0 と設定した. パラメータの設定値が周波数マップに及ぼす影響や設定根拠等については長ほか (2025) を参照していただきたい.

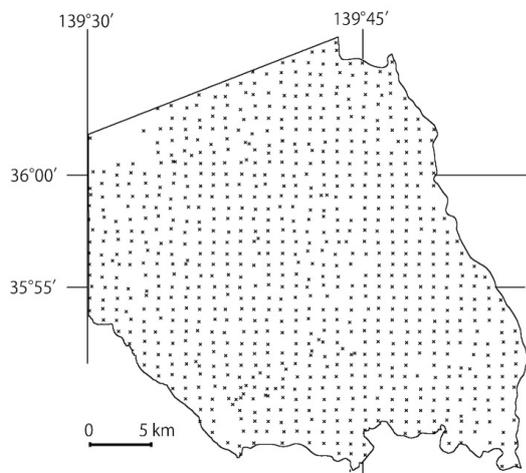
## 1.4 結果

全微動観測点でそれぞれ H/V スペクトル及び  $f_p$  を評価した. 第 1.2 図に, 低地 (表層は低湿地堆積物) と台地 (表層は関東ローム層及び大宮層) の H/V スペクトルを示す. 同図の赤矢印は, 低地 (1.1 Hz), 台地 (4.6 Hz) とで  $f_p$  が大きく異なることを示している.  $f_p$  の違いは表層の軟弱さの度合い (層の厚さ及び固さ) の相違を表すと考えられる.

第 1.3 図は各微動観測点で得られたピーク周波数のデータを空間補間して作成したピーク周波数マップである. 空間補間は, 最小曲率グリidding アルゴリズムに張力パラメータを加えた一般化スプライン補間 (Smith and Wessel, 1990) としている. 地質分布を考慮せずにデータ点を滑らかに繋ぐ単純な補間であるため, もしも微動観測点がない領域で空間的に急激に S 波速度が変化すると考えられる場所においては過剰解釈とならないよう注意を要する. そこで, 同図 (a) にはカラーコンタと微動データの存在箇所との対応が分かるように微動観測点の位置を付した. また, 同図 (b) には高  $f_p$ , 低  $f_p$  の分布を明確にするため軟弱地盤の判断基準である 1.7 Hz (濃赤線), 良好な地盤の判断基準である 5.0 Hz (濃青線) の等周波数線を描画した. これは都市域の地質地盤図ホームページのマップと同様である. 第 1.2 図と第 1.3 図の比較により, 低地と台地では一般に  $f_p$  が異なることが分かる. 中川低地, 荒川低地の付近は赤く塗りつぶされ, 地盤が軟弱であることが示唆される. 一方, 大宮台地は平均的に緑色で所々青みがかっており, 地盤は良好もしくは中間であることが示唆される (第 1.1 表). 各層の層厚分布と  $f_p$  の分布との対応関係については, 長ほか (2025) を参考にいただきたい.

## 1.5 まとめと注意

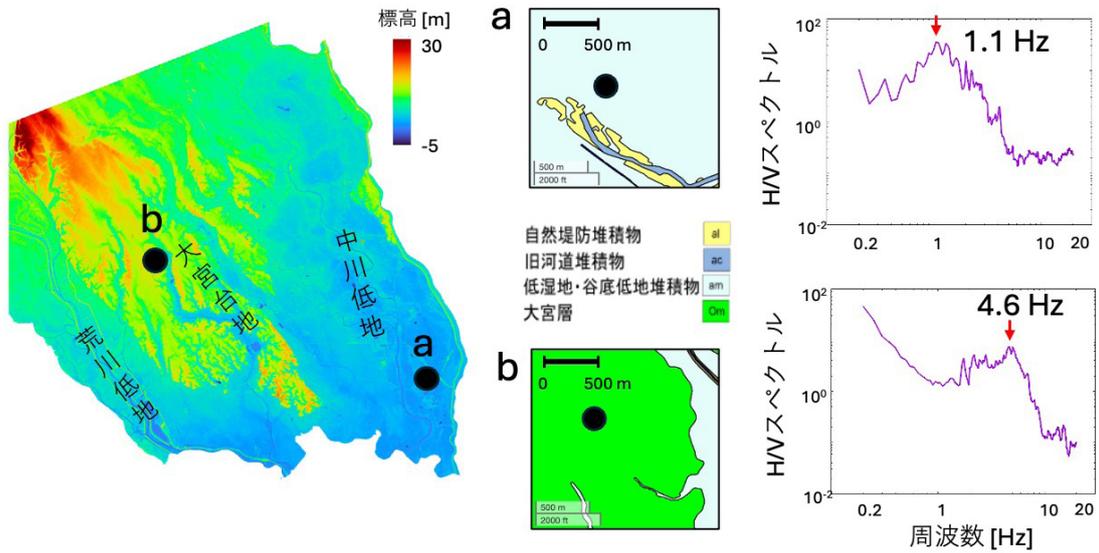
地質地盤図整備の一環として, 都市域の地質地盤図「埼玉県南東部」に微動 H/V スペクトルのピーク周波数マップを追加した. 既に公開済みの地質図や地層基底面の形状と併せて, インフラ整備や地盤リスク, 地震ハザードの評価において互いに情報を補い合う 1 セットの基礎データと位置付けることができる. ただし, 微動 H/V スペクトルからピーク周波数という単一量を抽出するアプローチでは複雑な地下構造を表現しきれ



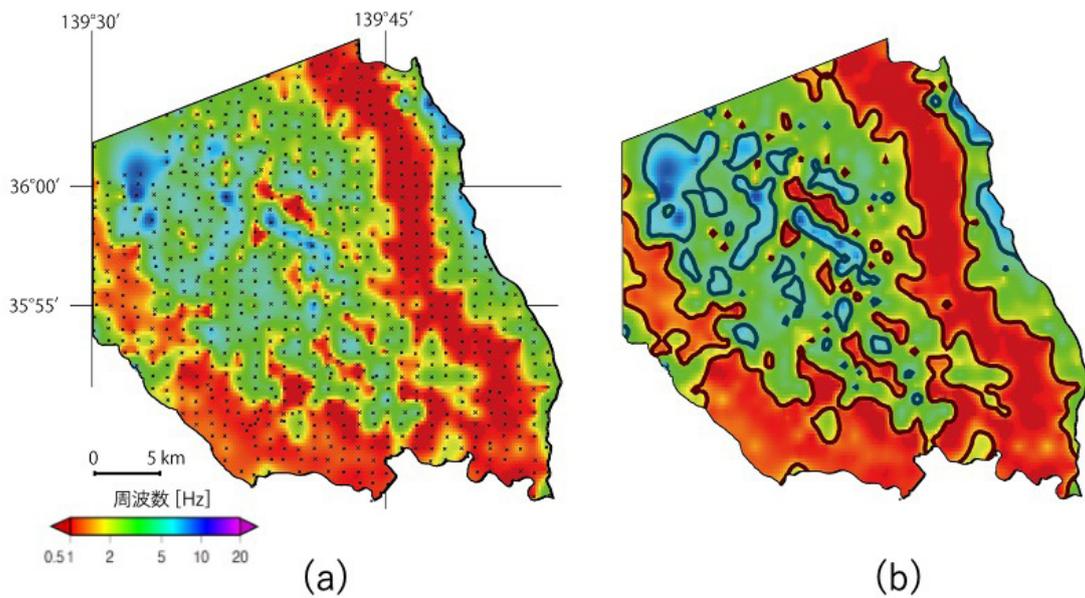
第 1.1 図 モデル化対象領域における微動観測点の分布 (長ほか, 2025).

ない場合やノイズの影響による複数のピークの出現に対処できない場合があること、ピーク周波数を抽出す

る周波数帯域を制限していること等については注意が必要である (長ほか, 2025)。



第 1.2 図 地形・地質と H/V スペクトルとの関係。



第 1.3 図 モデル化対象領域におけるピーク周波数  $f_p$  の分布 (長ほか, 2025)。

(a) 微動観測点の位置を付した結果. (b) 1.7 Hz (濃赤線) と 5.0 Hz (濃青線) の等周波数線を重ね描きした結果.