

単一走行自動車による地盤振動のモデル化に関する一検討

交通振動 表面波 表層地盤

防災科学技術研究所 国際会員 ○新井 洋

1. はじめに

地盤の S 波速度構造を簡便かつ迅速に推定する手法として、近年、微動を用いた地盤探査法（微動探査法）が注目されている^{1), 2)}。この手法では、微動に含まれる表面波（レイリー波およびラブ波）の特性を利用して、地盤の S 波速度構造を推定する。このため、この手法の有効性と適用限界を検討する上で、微動の波動的性質と振動源の特性を把握しておくことが重要である。

微動探査法では、ボーリング孔内計測を必要としない一方、10Hz 程度以上の周波数帯では、微動の振幅が小さい場合が多いため、表面波の特性を抽出することが難しい。このため、この方法では、表層数メートル程度以浅の S 波速度構造を精度良く推定できない場合がある。この弱点を補う方法として、起振器等を用いて高周波（10Hz 程度以上）の地盤振動を発生させる方法^{1), 3)}があるが、起振器等の追加設備が必要となるため、簡便性に欠ける。

都市部では、車両通行等による地盤振動（交通振動）は、微動と同様、どこにでも存在しており、その振幅は微動よりも大きく、卓越する周波数帯は 10Hz 程度以上である^{4), 5)}。しかし、既往の微動探査法では、観測波形の時間的定常性を仮定しているため、交通振動はノイズとして扱われる場合が多かった。ところが、この定常性の仮定が真に必要なか否かは不明であり、交通振動から 10Hz 程度以上の表面波の特性を抽出できる可能性も考えられる。すなわち、微動探査法と同じ観測機器を用いて、微動と交通振動の両方を利用することで、表層から深部までの地盤の S 波速度構造を精度良く推定できる可能性が示唆される。

以上の背景から、本研究では、交通振動を利用して表層地盤の S 波速度構造を推定する手法に関する準備的検討を行う。具体的には、地盤構造が既知の地点において、単一走行乗用車により生じる地盤振動の同時多点（アレイ）観測を行い、その伝播速度と距離減衰特性を求め、これを弾性波動論から求められる値と比較することで、交通振動の波動伝播特性について考察する。さらに、乗用車走行の振動源を 3 成分地表点加振力でモデル化し、これを観測波形データから逆算することを試みる。

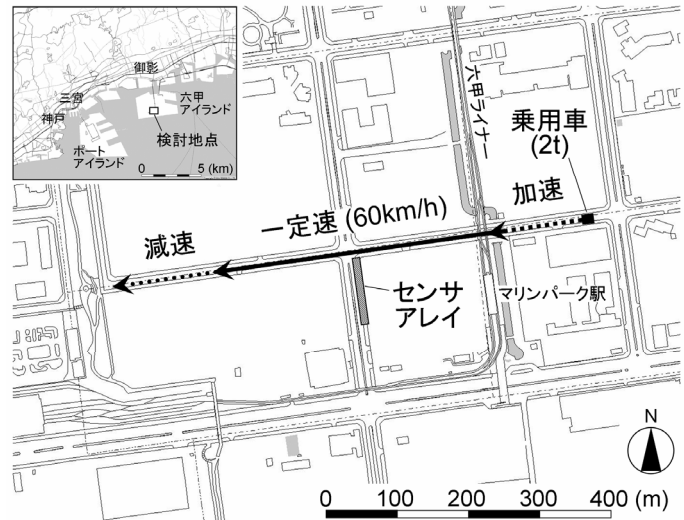


図1 計測サイトの位置および車両走行区間

2. 単一走行乗用車による地盤振動のアレイ計測

2.1 計測地点の特性

計測は、神戸市六甲アイランド南部のマリンパーク駅付近において、深夜 0 時から 4 時頃にかけて行った。計測サイト（センサアレイ）の位置を図 1 に示す。サイトの東および南には神戸新交通六甲ライナーが走っている。また、サイトの周辺には、学校施設や高層住宅、資材置き場、産業道路などが存在している。しかし、計測を行った時間帯は、いずれも運行・就業時間外であり、サイトの周辺には人工的振動源はほとんど見当たらなかった。

計測サイトから北に約 500m 離れた A 地点（六甲アイランドほぼ中央）では、深度 110m までのボーリングおよび PS 検層結果が公開されている⁶⁾。また、A 地点から東に約 200m の B 地点を中心として、最大半径 1km 程度の微動アレイ観測が行われており、深度 2km 程度までの S 波速度構造が推定されている⁷⁾。両者の結果を図 2 に示す。深度 100m 程度以浅では、微動から得られた S 波速度構造は速度検層の結果とほぼ対応している（図 2(a)）。また、近傍のボーリング調査結果⁶⁾およびアレイ内の微動

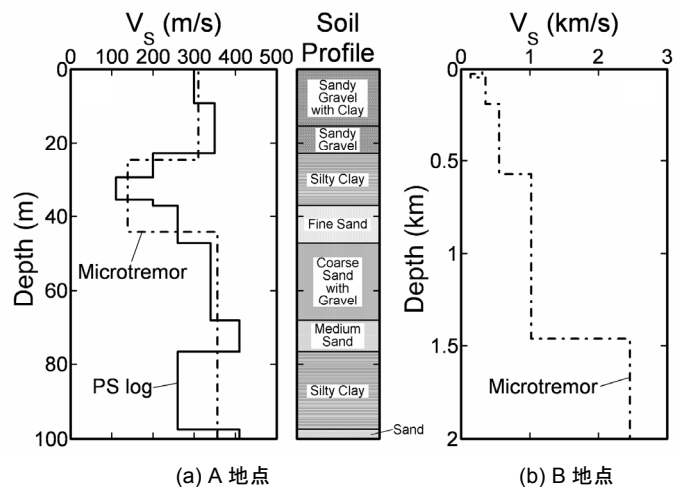


図2 計測サイト近傍の地盤の S 波速度構造^{6), 7)}

の水平鉛直スペクトル比 (H/V スペクトル)^{8), 9)}には、位置の違いによる大きな変化は認められない^{6), 7)}。このことから、計測サイト周辺の地盤構造は、図2の水平成層構造でほぼ近似できると考えられる。

2.2 アレイ計測の概要

ワゴンタイプの乗用車1台(重量約2t)を、図1に示す東西方向の道路区間を一定速度60km/hで西向きに走行させ、これによって生じた地盤振動を、車両走行方向に直交する道路上に展開したセンサアレイにより計測した。用いたセンサは固有周波数1Hzの動コイル型3成分(鉛直1および水平直交2成分)速度計であり、アレイの形状は、図3に示すように、十字(○印:14m×6m)6点および直線(●印:全長90m)6点とした。アレイごとに乗用車を数回走行させ、十字アレイでは各点鉛直(Z)成分計6成分を、直線アレイでは各点3成分(Z, X, Y)計18成分を同時観測した。Z成分の正方向は鉛直上向き、XおよびY成分のそれは図3を参照されたい。観測波形は、増幅器(プリアンプのゲイン60dB)およびローパスフィルタ(遮断周波数50Hz, 勾配-12dB/Oct.)をとおした後、サンプリング周波数200HzでA/D変換(24ビット)し、ノートパソコンに記録した。計測で用いた3成分センサおよびデータ収録装置を写真1に示す。

六甲アイランドは、人工埋立島であるため、周囲を海に囲まれている(図1)。このため、微動(暗振動)のスペクトルには、昼夜を問わず0.2-1Hz程度の低周波成分が卓越しており⁷⁾、これが振動波形データにも含まれていると考えられる。そこで、この低周波成分の影響を除去し、乗用車走行による振動波形を明瞭に識別するため、記録波形には、さらにバンドパスFIRデジタルフィルタ処理(濾過周波数1.5-30Hz, 次数2048)を施した。このフィルタ波形から、走行車線とアレイ測線との交点P(図3)を車両が通過したと思われる時刻を中心とする10.24秒間のデータを切り出して、以後の解析に用いた。なお、走行車線の路面舗装状態は比較的良く、走行時車輪下の大きな路面凹凸はマンホールだけであったことを別途確認している。

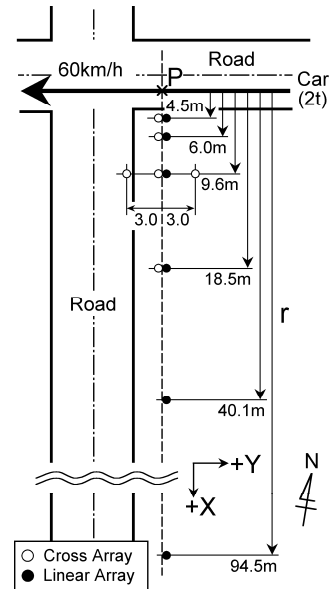


図3 センサアレイ

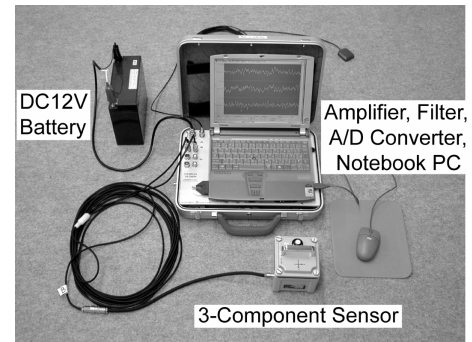


写真1 計測に用いたセンサとデータ収録装置

3. 十字アレイ観測データの分析

図4に、走行車線からの距離(振源距離) $r = 4.5, 6.0, 9.6, 18.5\text{m}$ の4計測点で得られた鉛直動の速度波形を示す。車両がアレイ測線を通過したと思われる時刻(5.12秒)の前後1秒間程度に振幅の大きな波群が認められる。また、振源距離 r が大きいくほど波形の振幅が小さくなる傾向が認められる。なお、いずれの計測点でも時刻4.2-4.5秒付近に振幅の大きな2つのパルス状の応答が見られるが、これは、現場の状況から、点P(図3)近傍に位置するマンホールの上を乗用車が走行した際に生じたものと考えられる。

図5には、アレイ内の各計測点で得られた鉛直動のフーリエ振幅スペクトルを細実線で示す。図には比較のため、車

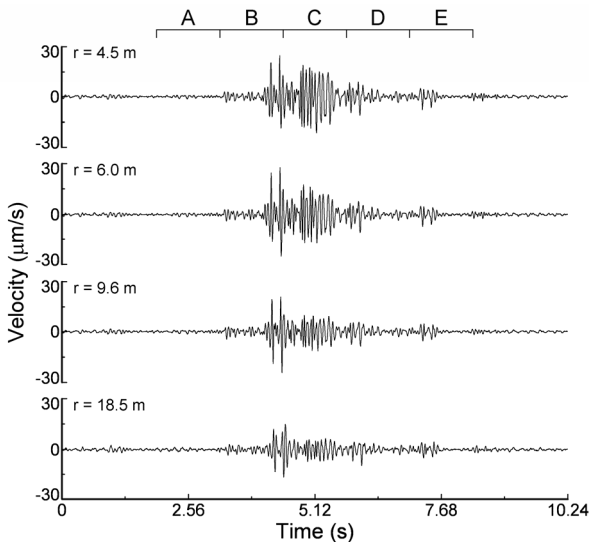


図4 乗用車走行による地盤振動の速度波形(鉛直動)

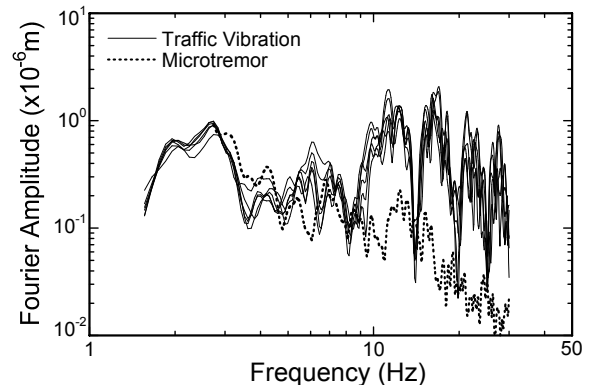


図5 交通振動と微動のフーリエ振幅スペクトル(鉛直動)

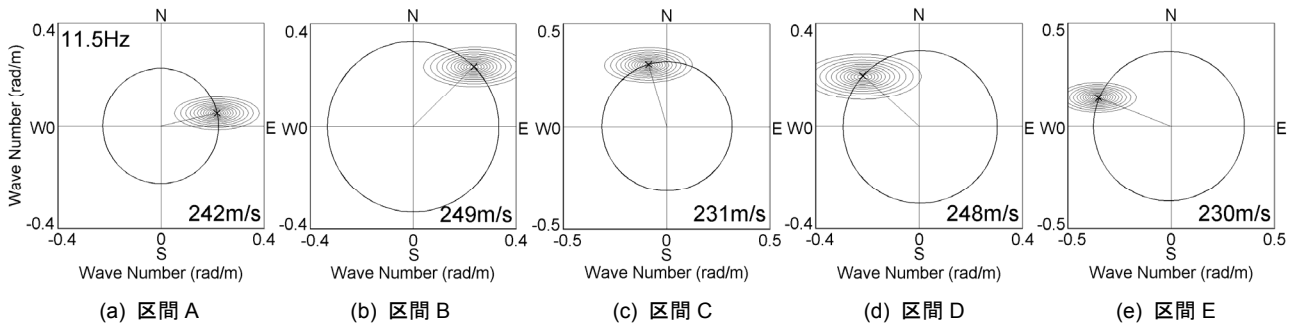


図6 乗用車走行による地盤振動のF-kスペクトルの例（鉛直動, 11.5Hz）

両を走行させていない静寂時における微動（暗振動）のフーリエ振幅スペクトルを破線で示す。図から、乗用車走行により励起される成分は5Hz程度以上であること、とくに、10Hz程度以上の特定の周波数成分（12, 16, 22, 28Hz）が卓越していることがわかる。図は省略するが、直線アレイ観測データの水平動フーリエ振幅スペクトルにおいても同様の傾向が認められた。なお、いずれの車両走行においても、各計測点において、ほぼ同一の振動波形・スペクトルが得られることを確認している。

アレイを通過する地盤振動の波動的特性を把握するため、観測された鉛直動に対して最尤法によるF-kスペクトル解析¹⁰⁾を行った。この際、その時間的変化を検討できるように、観測波形を図4に示す5区間（A-E、各1.28秒間）に分割し、各区間に対して解析を行った。解析周波数は、図5の考察から、5Hz以上とした。図6に、卓越周波数の一つ（11.5Hz）におけるA-E各解析区間のF-kスペクトルを示す。図から、A-Eいずれの解析区間においてもF-kスペクトルには明瞭なピークが認められる。ただし、そのピークの生じる方向は解析区間によって異なっており、これは、A-E各区間の時刻における乗用車の位置にほぼ対応している。一方、ピークの波数から求まる波動伝播速度（位相速度）は、A-Eいずれの区間でも230-250m/s程度であり、乗用車の位置によらずほぼ安定している。

F-k解析から得られた位相速度と周波数の関係を図7に示す。図には比較のため、図2の地盤構造から計算したレイリー波の高次モードまで考慮した位相速度¹⁾（太実線）および各モードの位相速度（破線）と相対振幅スペクトル¹⁾を示す。図から、乗用車走行による地盤振動の位相速度は、解析区間すなわち車両位置によらず、高次モードまで考慮したレイリー波の位相速度とほぼ対応している。また、レイリー波の振幅スペクトルは、乗用車走行による地盤振動が卓越する周波数帯（5Hz程度以上）では高次モードのそれが卓越している。このため、高次モードまで考慮したレイリー波の位相速度は、その周波数において卓越するモードのそれに近い値となっている。以上から、アレイ内の各計測点で得られた地盤振動の鉛直成分には、車両位置によらず、高次モードレイリー波が多く含まれていたと考えられる。

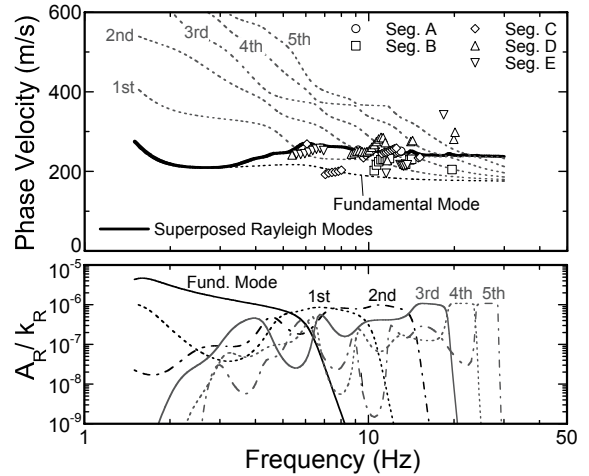


図7 乗用車走行による地盤振動（鉛直動）の位相速度一周波数特性とレイリー波理論値との比較

4. 直線アレイ観測データの分析

ここでは、地盤振動の振幅特性の位置的变化について検討する。図8に、観測波の卓越周波数（11.5, 16.2Hz）におけるZ, X, Y成分のフーリエスペクトル振幅の振源距離rに対する変化（距離減衰特性）を示す。図から、Z成分については、いずれの周波数においても、図4と同様、振源距離rが大きいほど振幅が小さくなっている。一方、XおよびY成分については、Z成分とは異なり、振源距離rがレイリー波およびラブ波の1波長程度（ともに20-25m程度）より小さい範囲では、rが大きくなると振幅も大きくなり、rがそれよりも大きい範囲では、rが大きいほど振幅が小さくなっている。図9, 10には、アレイ内の各計測点で得られた地盤振動の鉛直および水平面内の速度軌跡を示す。図から、鉛直・水平面内とも、軌跡の主軸の傾き・ふ

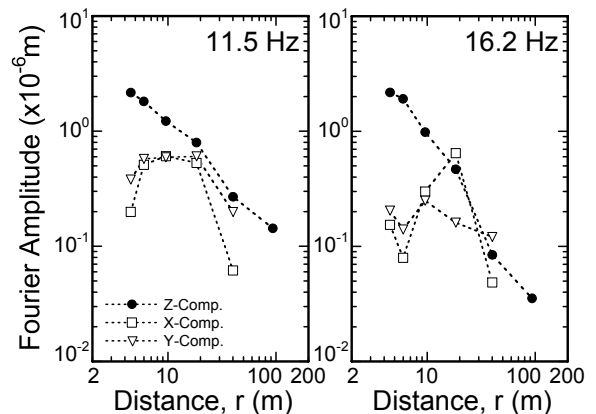


図8 乗用車走行による地盤振動のスペクトル振幅の振源距離rに対する位置的变化（11.5, 16.2Hz）

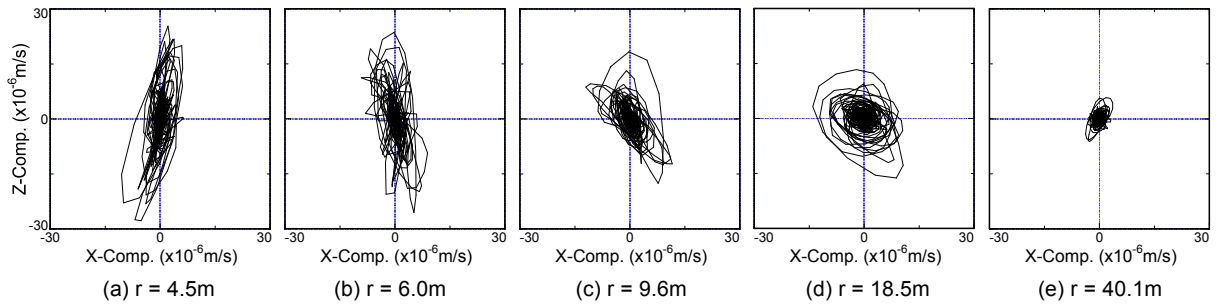


図9 乗用車走行による地盤振動の鉛直面内の速度軌跡の振源距離 r に対する位置的变化

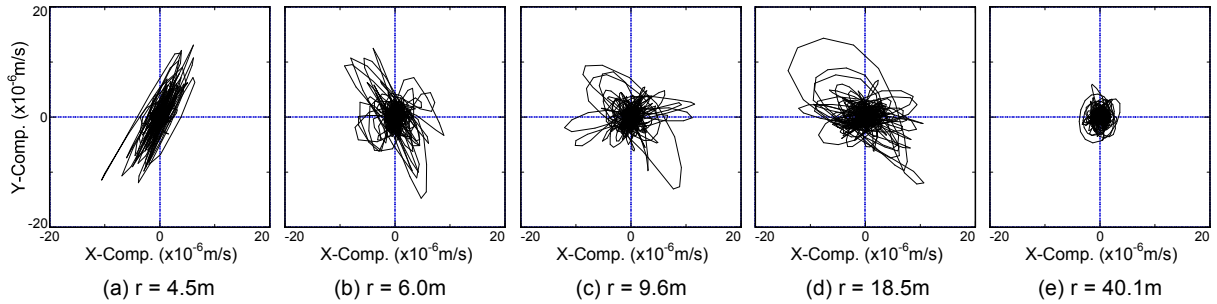


図10 乗用車走行による地盤振動の水平面内の速度軌跡の振源距離 r に対する位置的变化

くらみ度合いが振源距離 r によって変化していることがわかる．このような振動源近傍における水平動の特異な距離減衰特性（図 8）と軌跡の位置的变化（図 9, 10）は，複数モードの表面波と実体波が混在する場合に起こりうるものが，既往の研究^{3), 11), 12)}でも指摘されている．したがって，これらの観測事実の原因を解明するためには，多層地盤上の点加振源から発生する表面波と実体波を区別できる応答変位解^{11), 12)}を用いた検討が必要と考えられる．なお，表面波と実体波の明確な区別は難しいが，本研究では，既往の研究^{11), 12)}にならない，前者が正規モード解，後者が分岐線積分に対応するものとする．

5. 乗用車走行による振動源のモデル化および加振力の逆算

5.1 振動源のモデル化および逆算の方法

図 4, 6, 8 の検討から，観測波形には，乗用車がアレイ測線近傍を通過する際に生じた地盤振動が測線 (+X) 方向に伝播する波動成分が卓越していると考えられる．そこで本研究では，乗用車走行による振動源を，走行車線とアレイ測線との交点 P（図 3，固定点）における 3 成分 (Z, X, Y 方向) 地表点加振力でモデル化することを試みる．なお，同様の検討は花里ら⁵⁾によっても行われている．

多層弾性体上の点加振源に対する地表応答変位解^{11), 12)}のうち，実体波項（分岐線積分）は，表面波項（正規モード解）に比べて，その値の算定が格段に難しい．しかし，Harvey の研究¹³⁾から，図 2(a)の地盤（最下層は半無限体と仮定）における実体波成分は，図 2(b)の地盤において，図 2(a)の最大 S 波速度（400m/s 程度）よりも大きな位相速度を持つ表面波高次モードの重ね合わせによりほぼ表現できることが分かっている．すなわち，図 2(a)における全波動場（正規モード解と分岐線積分の和）は，図 2(b)における正規モード解でほぼ近似できると考えられる¹⁴⁾．

以上から，振動源の位置 P を直交座標系 (z, x, y) の原点にとり，3 成分地表点加振力の時刻歴を $\mathbf{I}(t) = (I_z(t), I_x(t), I_y(t))^T$ ，その周波数領域へのフーリエ変換を $\mathbf{L}(f) = (L_z(f), L_x(f), L_y(f))^T$ とすると，任意の地表面位置 $(0, r \cos \theta, r \sin \theta)$ における応答変位 $\mathbf{U}(f) = (U_z(f), U_x(f), U_y(f))^T$ は次式で表される．

$$\mathbf{U} = \mathbf{C}(\theta)\mathbf{G}\mathbf{L} \quad (1)$$

ここに， $\mathbf{C}(\theta)$ は円筒座標系から直交座標系への変換行列， \mathbf{G} は円筒座標系における正規モード解から成る 3×3 のグリーン関数行列で，その要素 g_{ij} は次のとおり．

$$g_{11} = -\frac{i}{2} \sum_m A_{Rm} H_0^{(2)}(k_{Rm} r) e^{-h_r k_{Rm} r} \quad (2)$$

$$g_{12} = \frac{i}{2} \sum_m A_{Rm} \begin{pmatrix} u \\ w \end{pmatrix}_m H_1^{(2)}(k_{Rm} r) e^{-h_r k_{Rm} r} \cos \theta \quad (3)$$

$$g_{13} = \frac{i}{2} \sum_m A_{Rm} \left(\frac{u}{w} \right)_m H_1^{(2)}(k_{Rm} r) e^{-h_R k_{Rm} r} \sin \theta \quad (4)$$

$$g_{21} = \frac{i}{2} \sum_m A_{Rm} \left(\frac{u}{w} \right)_m H_1^{(2)}(k_{Rm} r) e^{-h_R k_{Rm} r} \quad (5)$$

$$g_{22} = -\frac{i}{2} \sum_m A_{Rm} \left(\frac{u}{w} \right)_m^2 \left[H_0^{(2)}(k_{Rm} r) - \frac{H_1^{(2)}(k_{Rm} r)}{k_{Rm} r} \right] e^{-h_R k_{Rm} r} \cos \theta - \frac{i}{2} \sum_m A_{Lm} \frac{H_1^{(2)}(k_{Lm} r)}{k_{Lm} r} e^{-h_L k_{Lm} r} \cos \theta \quad (6)$$

$$g_{23} = -\frac{i}{2} \sum_m A_{Rm} \left(\frac{u}{w} \right)_m^2 \left[H_0^{(2)}(k_{Rm} r) - \frac{H_1^{(2)}(k_{Rm} r)}{k_{Rm} r} \right] e^{-h_R k_{Rm} r} \sin \theta - \frac{i}{2} \sum_m A_{Lm} \frac{H_1^{(2)}(k_{Lm} r)}{k_{Lm} r} e^{-h_L k_{Lm} r} \sin \theta \quad (7)$$

$$g_{31} = 0 \quad (8)$$

$$g_{32} = \frac{i}{2} \sum_m A_{Rm} \left(\frac{u}{w} \right)_m^2 \frac{H_1^{(2)}(k_{Rm} r)}{k_{Rm} r} e^{-h_R k_{Rm} r} \sin \theta + \frac{i}{2} \sum_m A_{Lm} \left[H_0^{(2)}(k_{Lm} r) - \frac{H_1^{(2)}(k_{Lm} r)}{k_{Lm} r} \right] e^{-h_L k_{Lm} r} \sin \theta \quad (9)$$

$$g_{33} = -\frac{i}{2} \sum_m A_{Rm} \left(\frac{u}{w} \right)_m^2 \frac{H_1^{(2)}(k_{Rm} r)}{k_{Rm} r} e^{-h_R k_{Rm} r} \cos \theta - \frac{i}{2} \sum_m A_{Lm} \left[H_0^{(2)}(k_{Lm} r) - \frac{H_1^{(2)}(k_{Lm} r)}{k_{Lm} r} \right] e^{-h_L k_{Lm} r} \cos \theta \quad (10)$$

ここに、 i は虚数単位、 A はメディアムレスポンス¹⁵⁾、 k は波数、 (u/w) はレイリー波の水平鉛直振幅比で、添字 R, L はレイリー波、ラブ波を、 m はモードを表す。 $H_n^{(2)}()$ は n 次第 2 種ハンケル関数、 $\exp(-hkr)$ は材料減衰 (減衰定数 h) 考慮のための付加項である。土の微小ひずみにおける h の値は、現時点では不明な部分が多いが、既往の研究¹⁶⁾を参考に $h_R = h_L = \max(0.02 f^{-1}, 0.01)$ と仮定する。なお本研究では、仮定した振動源の位置から $\theta = 0$ である。

ある計測点 $(0, r_0, 0)$ で得られた 3 成分速度波形から、1 階積分とフーリエ変換により変位スペクトル $U_o(f)$ を求め、これを(1)式の左辺に代入すると、 \mathbf{G} と \mathbf{C} は地盤構造と減衰定数および計測点位置によって決まるから、(1)式は右辺の \mathbf{L} を未知数とする複素連立 1 次方程式となる。これを解いて $\mathbf{L} = \mathbf{L}(f)$ を求め、フーリエ逆変換すれば、振動源の加振力時刻歴 $\mathbf{I}(t)$ が得られる。なお本研究では、(1)式を解く際、等価な実方程式に変換した後、LU 分解法を用いた。

5.2 逆算から得られた振動源の特性

各計測点で得られた 3 成分速度波形から、前節に示す方法で振動源の 3 成分加振力の時刻歴を逆算した。図 11, 12, 13 に、振動源に最も近い計測点 ($r = 4.5\text{m}$) で得られた観測波形から逆算した加振力の時刻歴、鉛直および水平面内の軌跡、フーリエ振幅スペクトルを示す。ただし、図 13 では、乗用車走行により生じる地盤振動が卓越していると考えられる 5Hz 以上の周波数帯について示す。図 11-13 から、振動源の加振力は上下 (Z) 方向が卓越していること、また、水平面内では加振力の軌跡はほぼ楕円状となり、その振幅は走行 (Y) 方向よりも直交 (X) 方向の方が大きいことがわかる。他の計測点における観測波形を用いた逆算の結果でも、同様の傾向が確認された。このことは、花里ら⁵⁾の逆算結果とも定性的に整合している。

花里らの研究⁵⁾は、西阪・福和⁴⁾が行った実験 (10t ダンプトラックの 60km/h 単独走行) に対して、3 次元薄層要素-有限要素ハイブリッド法により等価な地表点加振力を逆算したものであり、本研究とは使用した車両 (2t 乗用車) および順解析の理論が異なる。しかし、本研究で推定された振動源加振力の絶対値は花里ら⁵⁾の推定結果の 1/5-1/10 程度であり、これは、用いた車両重量の違い (5 倍) とほぼ対応している。また、本研究で得られた加振力の時刻歴の包絡形状やスペクトルの周波数特性は、花里ら⁵⁾の結果と良く似ている。

なお、図 13 において、10Hz 以上で卓越する周波数帯は図 5 のそれとほぼ一致している。このことから、観測され

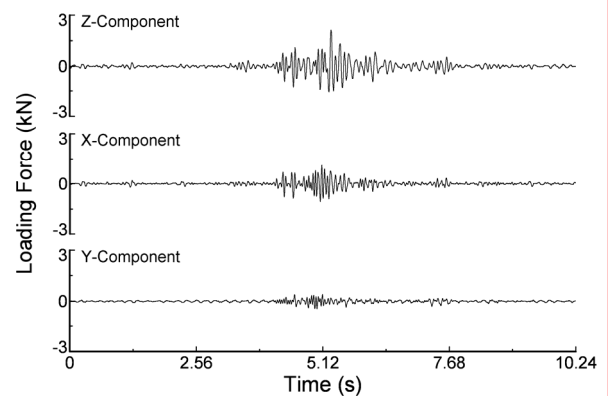


図 11 振動源に最も近い計測点 ($r = 4.5\text{m}$) で得られた観測波形から逆算した 3 成分加振力の時刻歴

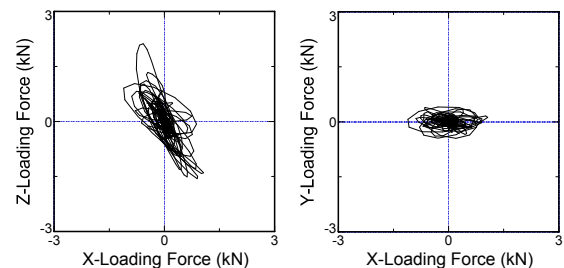


図 12 振動源に最も近い計測点 ($r = 4.5\text{m}$) で得られた観測波形から逆算した加振力の鉛直および水平面内の軌跡

た地盤振動の 10Hz 以上の卓越周波数は、振動源の特性によって励起されたものと考えられる。ただし、振動源の Z 成分のスペクトルに見られる 6-7Hz の卓越周波数は、観測波のそれ (図 5) では顕著ではない。この原因として、複数モードの表面波と実体波の干渉により観測波の振幅が減少した可能性が考えられるが、現時点では未確認である。

さらに、乗用車走行による地盤振動の数値シミュレーションの可能性を検討するため、図 11 の振動源加振力を用いて、(1)式により、全計測点での地表応答波形を計算した。各計測点で算定された応答の鉛直面内の速度軌跡を図 14 に示す。これと図 9 との比較から、鉛直成分の最大振幅とその距離減衰特性および $r = 40.1\text{m}$ 地点での応答はほぼ再現できているように見える。しかし、途中地点での軌跡の主軸の傾き・ふくらみ度合いの位置的变化および水平成分の特異な距離減衰特性は再現できていない。図は省略するが、水平面内でもほぼ同様の結果であった。この原因として、本研究では、実体波成分を高次モード表面波の重ね合わせによって近似的に扱っていること、路面の凹凸を考えず、振動源を単一固定点としていること、あるいは振動源の移動による影響を無視していることなどが考えられるが、現時点では詳細な議論は難しい。今後の課題としたい。

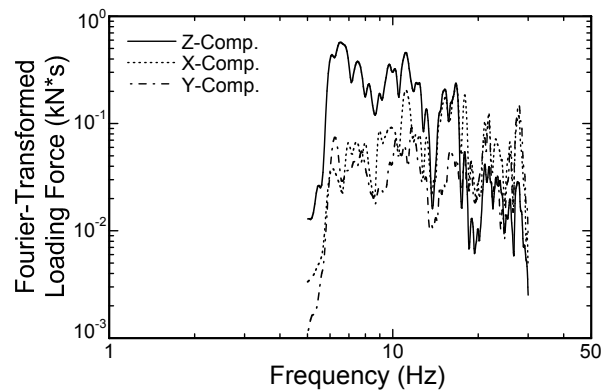


図 13 振動源に最も近い計測点 ($r = 4.5\text{m}$) で得られた観測波形から逆算した加振力のフーリエ振幅スペクトル

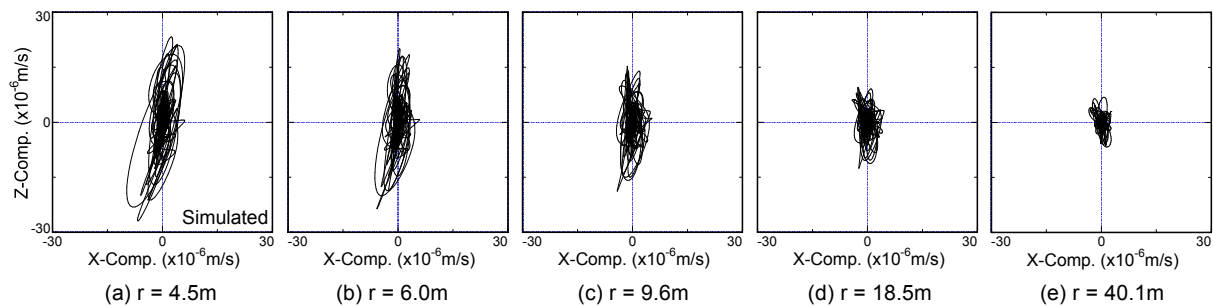


図 14 推定された振動源モデルに基づく地盤振動のシミュレーション (鉛直面内の速度軌跡)

6. まとめ

地盤構造が既知の地点において、単一走行乗用車により生じる地盤振動のレイ観測を行い、その伝播特性について検討した。その結果、交通振動の鉛直成分からレイ波の位相速度が得られることを示した。また、振動源の近傍における水平成分の特異な距離減衰特性を説明するためには、表面波と実体波を区別できる応答変位解を用いた検討が必要であることを確認した。さらに、乗用車走行の振動源を 3 成分地表点加振力にモデル化し、これを観測波形データから逆算したところ、既往の研究結果と調和的な結果を得た。ただし、得られた振動源モデルの精度は、これに基づく交通振動の数値シミュレーションを行うには未だ不十分であり、今後、さらなるデータの蓄積と検討が必要である。

謝辞：現場実験では、日比野浩氏、春名常洋氏、渦岡良介氏、大熊裕輝氏 (当時、理化学研究所) の協力を得た。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) Tokimatsu, K.: Geotechnical site characterization using surface waves, *1st Intl. Conf. Earthquake Geotech. Eng.* **3**, 1333-1368, 1997.
- 2) Okada, H.: The microtremors survey method, *Geophysical Monograph Series 12, Soc. Exploration Geophys. Japan*, 155pp, 2004.
- 3) 時松孝次, 田村修次: 高次モードと回転軌跡を考慮したレイ波分散曲線の逆解析, *建築学会構造系論文報告集* **432**, 97-103, 1992.
- 4) 西阪理永, 福和伸夫: 交通振動問題における車両動荷重特性に関する研究, *建築学会構造系論文集* **491**, 65-72, 1997.
- 5) 花里利一ほか: 平面交通振動の加振力特性に関する研究 (その 2), 第 38 回地盤工学研究発表会, 2251-2252, 2003.
- 6) 積水ハウス: 六甲アイランド CITY, 1995 年兵庫県南部地震の地震動観測記録と分析 (地盤と地震動について), 123pp, 1996.
- 7) 時松孝次ほか: 微動観測から推定した神戸市住吉地区の深部 S 波速度構造と地震動特性, *建築学会構造系論文集* **491**, 37-45, 1997.
- 8) 中村豊, 上野真: 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, *7th JEES*, 265-270, 1986.
- 9) 時松孝次, 宮寺泰生: 短周期微動に含まれるレイ波の特性と地盤構造の関係, *建築学会構造系論文報告集* **439**, 81-87, 1992.
- 10) Capon, J.: High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, *Geophysics* **34**(1), 21-38, 1969.
- 11) 時松孝次, 田村修次: 3 次元多層地盤における地表面鉛直点加振の応答変位に対するレイ波と実体波の寄与, *建築学会構造系論文集* **476**, 95-101, 1995.
- 12) 時松孝次, 田村修次: 3 次元多層地盤における地表面水平点加振の応答変位に対する表面波と実体波の寄与, *建築学会構造系論文集* **481**, 47-54, 1996.
- 13) Harvey, D. J.: Seismogram synthesis using normal mode superposition, *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* **66**, 37-69, 1981.
- 14) 時松孝次, 新井洋: レイ波とラブ波の振幅比が微動の水平鉛直スペクトル比に与える影響, *建築学会構造系論文集* **511**, 69-75, 1998.
- 15) Harkrider, D. G.: Surface waves in multilayered elastic media, part 1, *Bull. Seism. Soc. Am.* **54**(2), 627-679, 1964.
- 16) 建築学会: 地盤震動 -現象と理論-, 408pp, 2005.