

## 道路交通車両の地盤加振力に関する一検討

### A Study on Exciting Force of Running Heavy Vehicle

北 村 泰 寿  
Yasutoshi Kitamura

#### 1. はじめに

公害振動は、排出規制の考え方に基づいて、敷地境界や官民境界における鉛直方向の振動レベルで規制されている。一方、振動源から伝わってきた地盤振動は家屋基礎から入力し、家屋が振動することにより住民に知覚される。家屋内の振動について、国松らの報文<sup>1)</sup>では、木造家屋 2 階の水平振動の増幅が約 25 dB あったとする事例がある一方、木造家屋 2 階床面の鉛直振動の増幅は従来から言われてきた 5dB よりかなり小さいとも報告している。将来的に住民の振動評価に対応する暴露規制の考え方に立つとき、振動源から伝わる地盤の水平振動にも注目した研究を展開しておく必要があると考える。

道路交通振動の場合、自動車を質点系にモデル化して、路面凹凸との相互作用によるタイヤ面の動的接地荷重を移動加振力としたシミュレーション法が開発されているが、鉛直加振力に限られている。走行する大型自動車による地盤加振力を調べる手段として、車両に取り付けた振動計の振動加速度記録から車両慣性力を求めて動的接地荷重とする方法が利用されるが、これも鉛直加振力である。また、走行車線に近い測定点における地盤の振動加速度記録から加振力を逆推定する方法が考えられている。この方法では、地盤の 3 方向の振動加速度記録を用いて 3 方向の加振力を推定することができるが、固定振動源として加振力を計算することになる。

逆推定の方法として、3 方向の地盤振動加速度を 3 方向の加振力と独立に関係付ける非連成解析と、独立としない連成解析が考えられる。田口ら<sup>2)</sup>は、地盤振動から非連成および連成の逆推定法により固定振動源として加振力を求め、試験車に取り付けた振動計の振動加速度記録から得られる車両慣性力との対比を行っている。その結果では、非連成と連成の逆推定法による鉛直加振力波形の差は小さく、実測の車両慣性力の波形との対応は良い。これより、鉛直方向の地盤振動波形に対して連成効果を見逃した逆推定法でもおおむね妥当な加振力波形が得られると結論付けている。一方、測定点における道路と平行方向の振動は鉛直方向のみの加振力で評価できるが、道路と直交方向の振動の励起は不十分で、道路直交方向の水平加振力の発生を示唆している。また、国松らの報告<sup>3)</sup>でも、同様に地盤振動から連成の逆推定法により固定振動源として加振力を求めている。その結果では、道路直交方向の振動加速度の距離減衰勾配は他の方向の振動加速度の勾配より小さく、遠点では他の方向の振動加速度より必ずしも小さくならない傾向を示しているとして、水平加振力の影響について触れている。

以上のように、走行する大型自動車による地盤加振力としては鉛直加振力に注目しており、水平加振力は取り扱われていない。また、鉛直加振力による地盤の水平振動には触れているが、水平加振力による水平振動については言及していない。本報告は、連成の逆推定法により固定振動源として加振力を求める方法を基にして、移動振動源の 3 方向加振力を推定することを検討したものである。

ところで、前掲の文献<sup>2)</sup>では、加振力の逆推定において舗装をソリッド要素の有限長舗装版に、地盤を薄層要素にモデル化している。筆者は、移動加振力による地盤振動の数値解析に 2.5 次元解析を利用しており<sup>4)</sup>、舗装を境界要素、地盤を薄層要素にモデル化している。本課題を舗装-地盤系として取り扱うなら、逆推定法により固定振動源として加振力を求める場合には、舗装を無限長と見なせる長さの舗装版にモデル化しなければ、移動振動源としての加振力の特

性を検討する場合のモデル化と整合が取れないことになる。現段階では、このような長さの舗装版に対する数値解析技術を有しないため、本報告では舗装は考えない。したがって、本報告は本課題に対する考え方を提示したものであり、この考え方に舗装がどのように関わるかの検討は次のステップとしたい。

## 2. 加振力を逆推定する方法

地表面を  $X, Y$  平面,  $Z$  軸の正を下方に取る座標系において、原点に 3 方向の調和振動の加振力  $P_i(\omega)$  ( $i = X, Y, Z$ ) を作用させる。原点に近い測点 (基準点と呼ぶ) における 3 方向の変位  $U_i(\omega)$  ( $i = X, Y, Z$ ) は、次式によって 3 方向の加振力と関係付けられる。なお、移動振動源を扱う場合には走行方向を  $X$  軸とし、地盤振動の測点は移動振動源、固定振動源を問わず  $Y$  軸上に配置するものとする。

$$\begin{Bmatrix} U_X(\omega) \\ U_Y(\omega) \\ U_Z(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{XX}(\omega) & A_{XY}(\omega) & A_{XZ}(\omega) \\ A_{YX}(\omega) & A_{YY}(\omega) & A_{YZ}(\omega) \\ A_{ZX}(\omega) & A_{ZY}(\omega) & A_{ZZ}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_X(\omega) \\ P_Y(\omega) \\ P_Z(\omega) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $\{U(\omega)\}$  は複素変位ベクトル、 $\{P(\omega)\}$  は複素加振力ベクトルで、 $[A(\omega)]$  は  $3 \times 3$  の複素影響係数マトリックスと呼ばれる。いま、複素影響係数マトリックスの逆行列を求め、式(1)を次式のように変形する。

$$\begin{Bmatrix} P_X(\omega) \\ P_Y(\omega) \\ P_Z(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{XX}(\omega) & A_{XY}(\omega) & A_{XZ}(\omega) \\ A_{YX}(\omega) & A_{YY}(\omega) & A_{YZ}(\omega) \\ A_{ZX}(\omega) & A_{ZY}(\omega) & A_{ZZ}(\omega) \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} U_X(\omega) \\ U_Y(\omega) \\ U_Z(\omega) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

基準点で測定した振動加速度波形をフーリエ変換して、周波数領域において変換した複素変位  $\{U(\omega)\}$  を式(2)に代入すれば、複素加振力  $\{P(\omega)\}$  の周波数スペクトルが得られる。この周波数スペクトルをフーリエ逆変換すれば、固定振動源として逆推定した加振力の時刻歴が求まる。なお、式(1)の複素影響係数マトリックス  $[A(\omega)]$  の計算には 3 次元薄層要素法を用いる。

上述の加振力の逆推定方法は振動源が移動しない場合は問題ないが、振動源が移動する場合にも適用可能か検討しておく必要がある。例えば、原点に  $Z$  方向の加振力を作用させる場合は軸対称問題となり、式(1)において  $A_{XZ}(\omega) = 0$  となる。 $X$  方向加振力の場合は  $A_{YX}(\omega) = 0$ ,  $A_{ZX}(\omega) = 0$ ,  $Y$  方向加振力の場合は  $A_{XY}(\omega) = 0$  となる。

一例として、 $X$  軸上を 10Hz の調和振動の加振力が移動するとき、2.5 次元薄層要素法による測点距離 2m における変位波形は図-1 のように得られる。なお、地盤の力学定数はせん断波速度を 200m/s, ポアソン比を 1/3, 密度を 1800kg/m<sup>3</sup>, 減衰定数を 0.05 としている。また、移動速度は 45km/h, 加振力の振幅は 9.8kN である。 $A_{XX}(\omega, t)$ ,

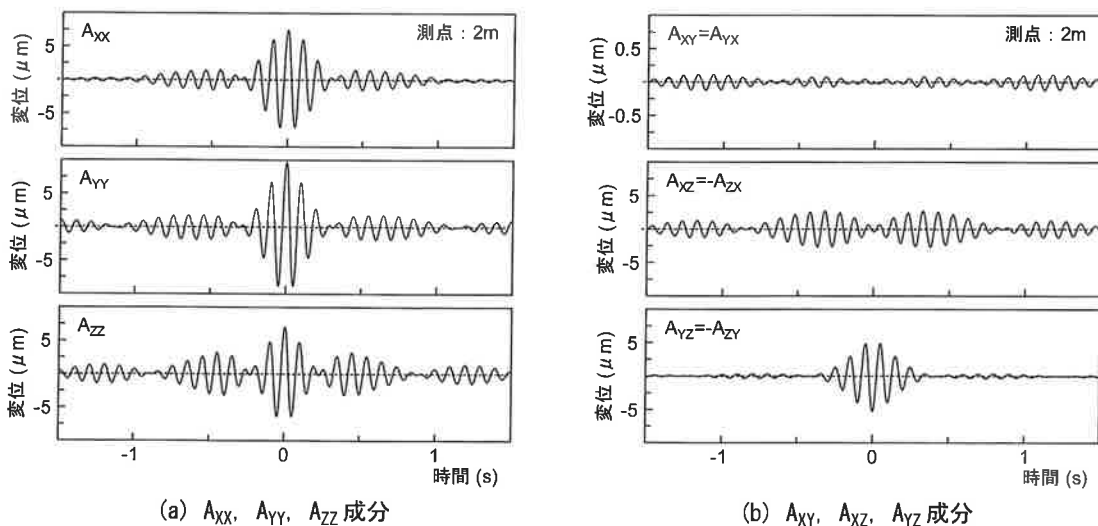


図-1 10Hzの調和振動の3方向移動加振力に対応する地盤の3方向の変位波形

$A_{YY}(\omega, t)$ ,  $A_{ZZ}(\omega, t)$ および $A_{YZ}(\omega, t)$ の時刻歴は、移動加振力が測点に最接近した0秒で最大振幅となる波形になっている。一方、 $A_{XY}(\omega, t)$ の時刻歴は他の時刻歴より振幅がオーダー的に小さいが、 $A_{XZ}(\omega, t)$ の時刻歴の振幅は他の時刻歴よりやや小さい程度である。ただ、 $A_{XY}(\omega, t)$ ,  $A_{XZ}(\omega, t)$ の時刻歴はともに、移動加振力が測点に最接近した0秒で最小振幅となる波形になっている。

移動振動源の場合、固定振動源のように $A_{XY}(\omega, t) = A_{YX}(\omega, t) = 0$ ,  $A_{XZ}(\omega, t) = A_{ZX}(\omega, t) = 0$ とはならないが、移動加振力が測点に最接近した0秒前後の短い時間区間では固定振動源の状態に近いと考えられる。この状態を利用して、後章では鉛直加振力から水平加振力を仮定する方法を提案する。

### 3. 固定振動源として逆推定した加振力の特性

実測の振動加速波形が得られているA, B, C, Dの4地点に対して、式(2)によって逆推定した加振力の特性を調べる。A, B, Cでは土質柱状図が得られているが、測定対象の走行車両に関する情報は得られていない。図-2はA, B, CにおけるN値から換算したS波速度の柱状図で、基盤層のN値は50以上(換算S波速度が340 m/s以上)である。なお、地盤の力学定数は既往の文献等を参照して、土質柱状図に対応した値を仮定したが、その詳細は省略する。また、A, B, Cでの測定は沿道の地盤振動に及ぼす地層構成の影響の比較であったが、本報告の目的ではないためこの考察は省略する。一方、Dでは土質柱状図等の地盤情報は得られていないが、走行実験に用いた大型車のばね上、ばね下の振動加速度データが得られている。このデータを用いて算出したタイヤ面の動的接地荷重を実測の移動加振力として、逆推定加振力に基づいて組み立てる考え方の検証に用いる。地盤の力学定数は図-1の計算に用いた力学定数と同じであるが、微速で試験車を踏板通過させたときの地盤振動波形から読み取った伝搬速度は、おおよそ150~200 m/s程度であった。

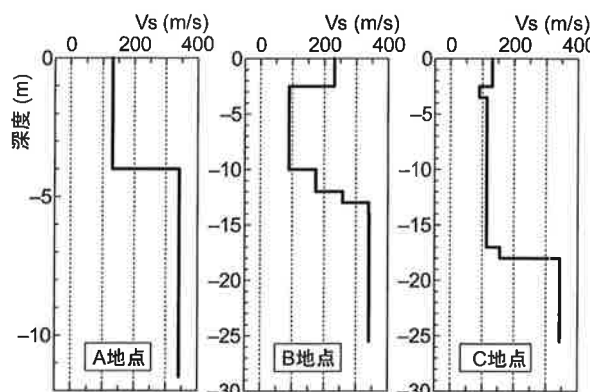


図-2 測定地点の換算S波速度の柱状図

一般的に、振動源に近い地盤の振動波形には加振力の特性が反映されるが、遠ざかるとともに地盤の振動特性が加味されると言われている。したがって、上記の4地点に対しては、走行車線に一番近い測点における振動加速度波形から変換した変位波形を式(2)に用いる。A, B, Cにおける実測の振動加速度波形は文献3)に用いられているデータで、測点は道路端の2.3m点となっている。また、Dにおける実測の振動加速度波形は文献5)に用いられているデータで、測点は車線中央から2.0m点となっている。何れにおいても、車両の両輪の通過位置と測点の距離関係を明確にできないことと、振動源(車両)をばね上-ばね下の2質点系にモデル化することから、2.3mおよび2.0mは点振源の走行路と測点間の離隔距離と仮定する。

#### 3.1 A, B, C地点における逆推定加振力

まず、A, B, Cの基準点において実測した一般の大型車走行による振動加速度の波形を図-3に示す。図中、X方向は道路に平行方向の成分、Y方向は道路に直交方向の成分、Z方向は鉛直方向の成分を意味する。また、図-4はスペクトル・ウィンドウによる平滑化处理を施した振動加速度波形のフーリエスペクトル(図では、DFTと略)で、平滑化のバンド幅は0.8Hzである。A, B, Cにおける測定対象の大型車の状況が分からないため振動加速度の大きさの差には言及できないが、基準点に最接近している5秒付近に見られる振幅の大きい振動加速度波形には大型車に生じている加振力の特性が十分反映されていると考える。図-4では、A, B, Cの何れにおいても、X方向、Y方向のスペクトルはZ方向のスペクトルと形状的に良く似ており、鉛直加振力と水平加振力の関係を推定する手掛かりになる。

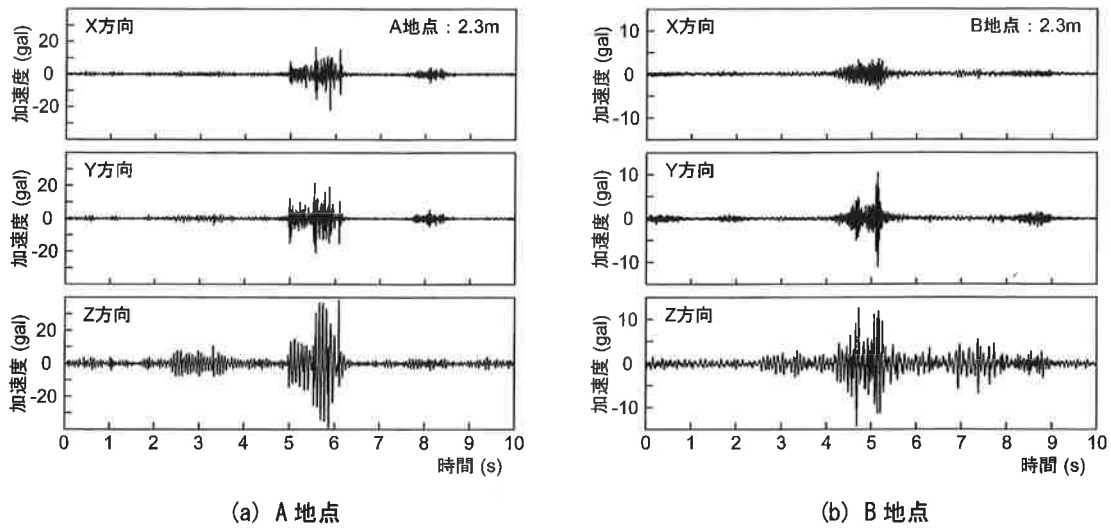


図-3 実測の振動加速度波形 (その1)

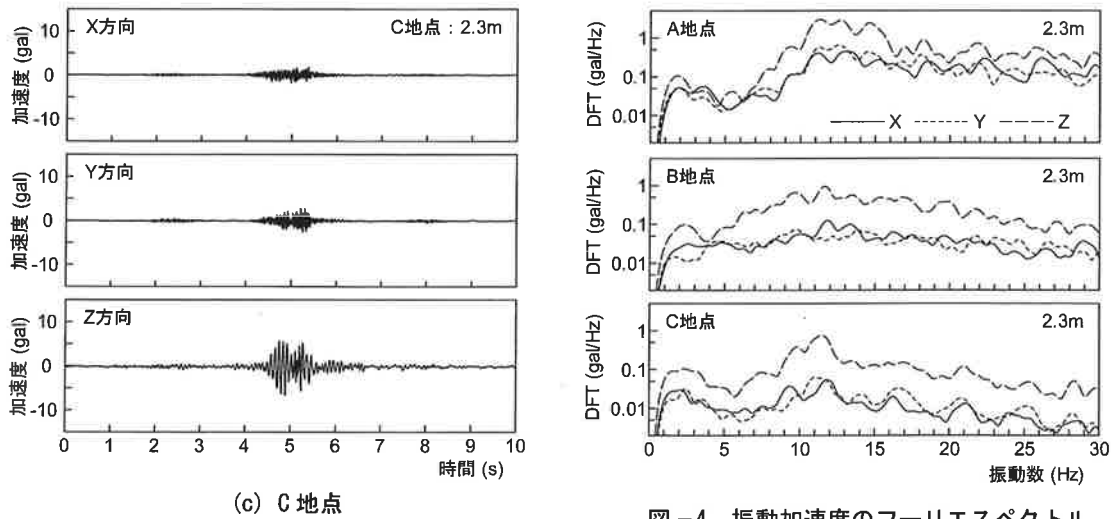


図-3 実測の振動加速度波形 (その2)

図-4 振動加速度のフーリエスペクトル

図-5は、式(2)によって逆推定した加振力波形で、A、B、CごとにX方向およびY方向の加振力波形と振幅を縮小したZ方向の加振力波形を比較したものである。また、図-6は、バンド幅0.8Hzで平滑化处理した逆推定加振力のフーリエスペクトルを比較したものである。これらの図から、X方向加振力に関しては、Z方向加振力の振幅を1/3程度に縮小すれば似た波形になっており、スペクトルもほぼ合っていることが分かる。一方、Y方向加振力に関しては、B、CではZ方向加振力を1/3程度に縮小すれば波形、スペクトルともに良く類似しているが、Aでは1/10程度に縮小しなければならない。測定時の状況に関する資料が無いためこの現象を検証できないが、B、Cの結果から1/10という縮小は小さ過ぎると考え、ここではこの縮小は適正でないと判断する。

これらの結果から、走行する大型自動車と地盤の動的相互作用によって、道路に平行方向のX方向と道路に直交方向のY方向に、鉛直方向の加振力の1/3程度の加振力が水平加振力として発生していることになる。X方向の加振力はタイヤの転がり抵抗によって発生すると考えられるが、Y方向の加振力の発生メカニズムは良く分からない。転がり抵抗にはタイヤの変形が大きく寄与するとされており、タイヤは周方向の変形とともに断面内の変形(横断方向の変形)が生じる。この断面内の変形によって、Y方向の加振力が生じているのではないかと推測する。

### 3. 2 D地点における逆推定加振力

図-7は、Dの基準点における実測の振動加速度波形と振動加速度レベルの時間変化(以下、波形と呼ぶ)を示したものである。この測定では、試験車に大型ダンプトラックを用い、車速は道路交通法の制限速度を考慮して45km/hと

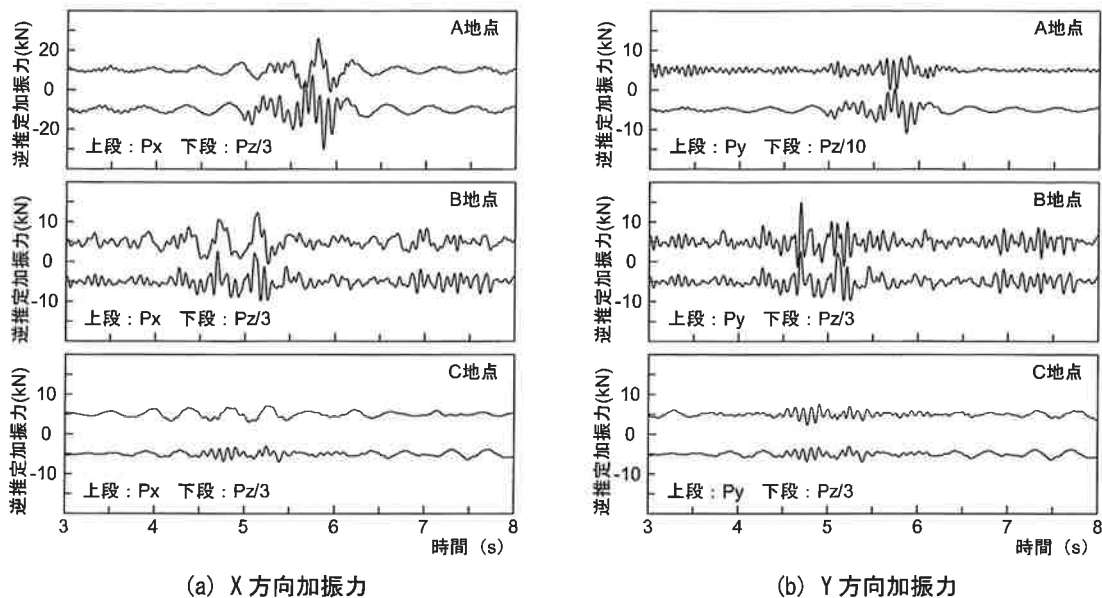


図-5 固定振動源として逆推定したZ方向加振力とX, Y方向加振力の波形の類似性

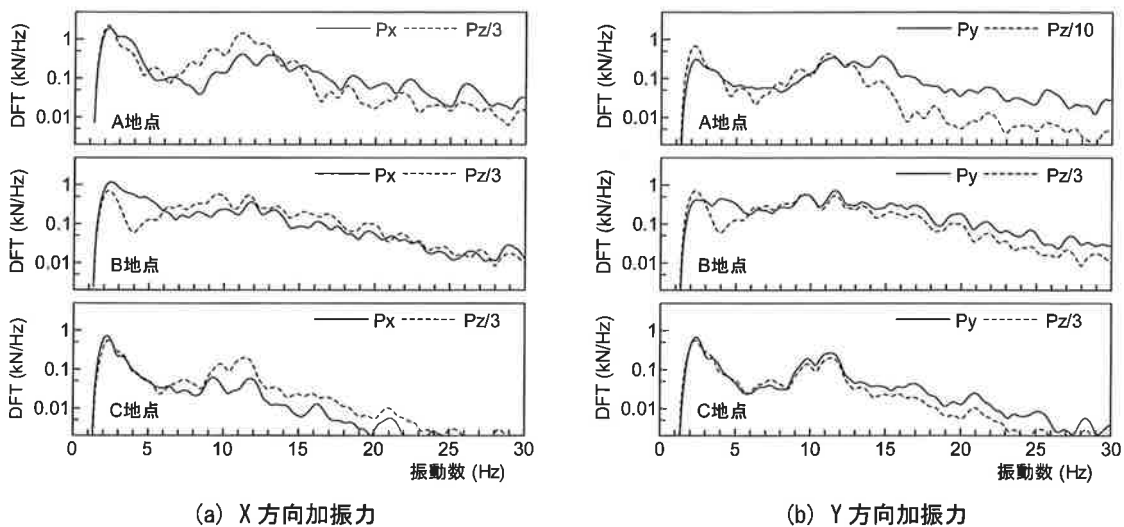


図-6 固定振動源として逆推定したZ方向加振力とX, Y方向加振力のフーリエスペクトルの類似性

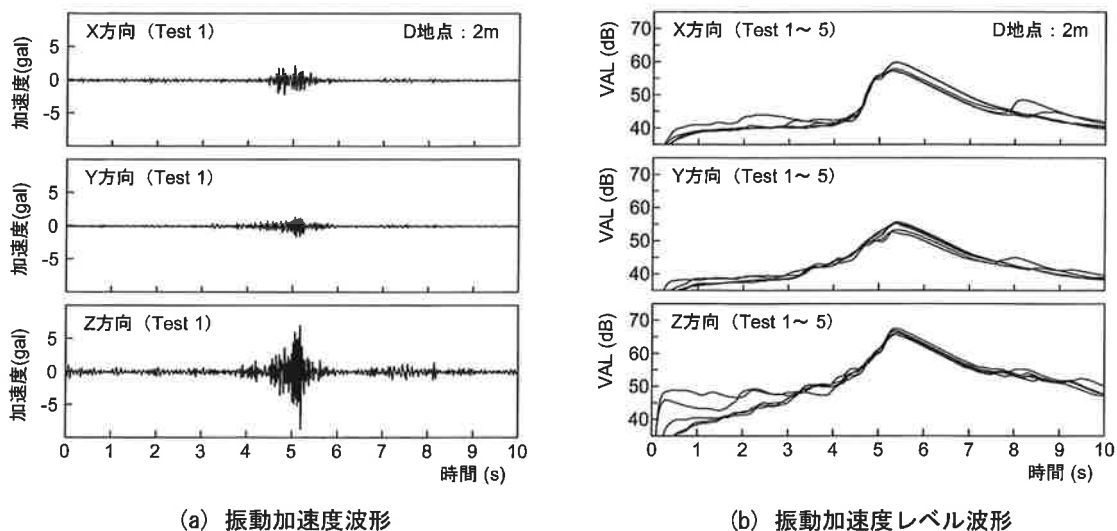


図-7 実測の振動加速度波形と変換した振動加速度レベル波形

している。ただ、測定計器の不具合で車両振動と地盤振動の同時測定ができなかったため、日を改めて同一積載量の同一車両を用い、車速等の条件も同じとして地盤振動を測定している。地盤振動の測定は Test 1~Test 5 の 5 回実施したが、後の図に示す基準点以外の測点の振動加速度レベル波形も含めて、波形の差は小さく測定波形の再現性は良い。

図-8 は、式(2)によって逆推定した加振力波形のフーリエスペクトルで、バンド幅 0.8Hz で平滑化してある。5 回のスペクトルの差は小さく、また X 方向、Y 方向加振力のスペクトルは Z 方向加振力のスペクトルと形状的に良く似ている。この結果を踏まえて、Z 方向加振力の振幅を縮小し、X 方向および Y 方向の加振力と波形およびフーリエスペクトルを比較したものが図-9 である。X 方向加振力に関しては、Z 方向加振力の振幅を 1/3 程度に縮小すれば似た波形になっているが、スペクトルでは 1/2 程度の縮小になっている。一方、Y 方向加振力に関しては、Z 方向加振力を 1/5 程度に縮小すれば波形、スペクトルともに合うことが分かる。

Z 方向加振力の縮小を X 方向で 1/2 程度、Y 方向で 1/5 程度とすると、A、B、C における縮小と多少異なることになる。この差異については、車速、積荷を含めた車両重量、タイヤの空気圧、舗装状況などが影響すると考えられるが、ここでのデータだけではその要因の特定は難しい。

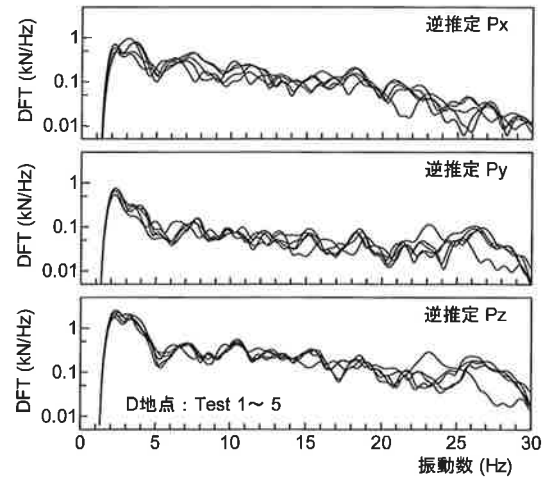
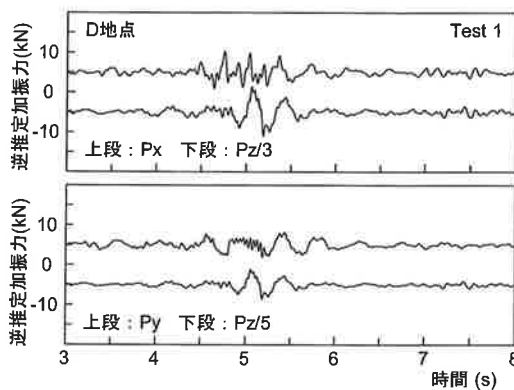
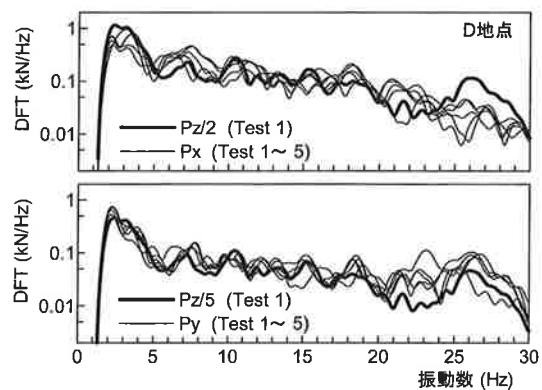


図-8 逆推定した加振力のフーリエスペクトル



(a) 振動加速度波形



(b) フーリエスペクトル

図-9 逆推定した Z 方向加振力と X、Y 方向加振力の波形とフーリエスペクトルの類似性

#### 4. 実測加振力を用いた逆推定法の検証

図-10 は、D で実施した大型ダンプを試験車とする走行実験において、車両のばね上、ばね下振動加速度から計算したタイヤ面の動的接地荷重 (Z 方向加振力) の波形とバンド幅 0.8 秒で平滑化したフーリエスペクトルである。車両振動を測定した試験車走行は 3 回 (Test A, Test B, Test C) 実施した。なお、加振力波形の約 7 秒付近で振幅が大きくなっているが、この箇所にはマンホールと小規模な工事によると思われる舗装の上塗りが認められ、これらの影響が考えられる。一方、フーリエスペクトルには加振力が大きくなる前の 6.5 秒までの波形に対するスペクトルも示したが、全体的な周波数特性は変わっていない。

いま、図-10 の加振力 (Z 方向加振力) の振幅を 1/2 に縮小した加振力を X 方向加振力、1/5 に縮小した加振力を Y 方向加振力と仮定する。位相については、転がり抵抗によって生じる水平加振力を考えているので、ここでは Z 方向加振力と同位相と仮定する。図-11~13 は、仮定した X 方向加振力、Y 方向加振力と実測の Z 方向加振力を走行点振源として、2.5 次元薄層要素法によりシミュレーションした地盤の振動加速度レベル波形と実測波形を比較したものであ

る。実測の振動加速度レベル波形 (図(a)) は、測点距離が 2m, 7m, 15m で 5 回測定 (Test 1~Test 5) した振動加速度から変換したレベル波形で、測点 2m の波形は図-7(b)の再掲である。Y 方向の 7m において若干の差異が認められるが、何れの測点においても 5 回測定した振動加速度レベル波形の再現性は良いと判断して、2.5 次元解析による振動加速度レベル波形との比較 (図(b)) には Test 1 の波形を用いた。

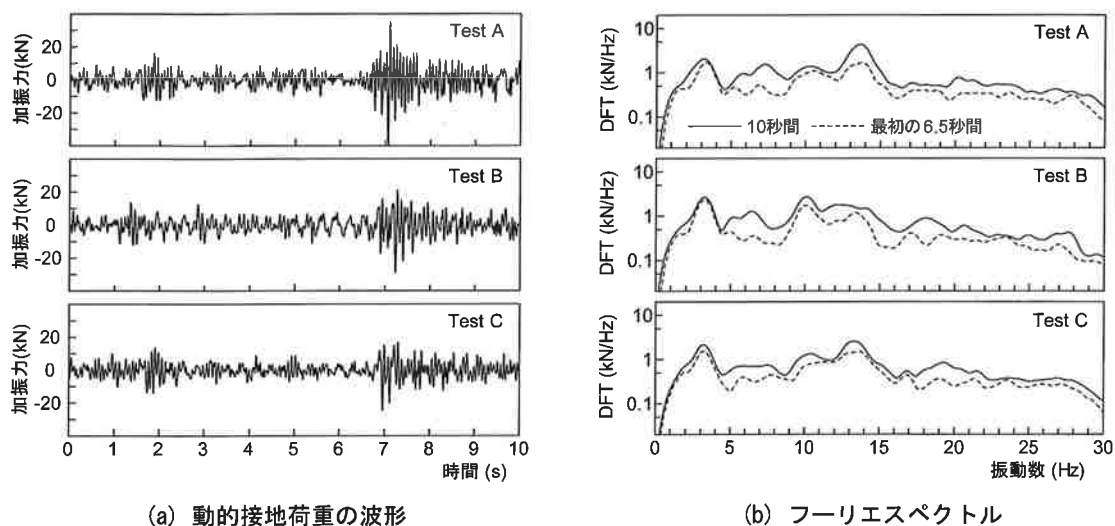


図-10 車両の実測振動加速度から計算した動的接地荷重 (Z 方向加振力) の波形とフーリエスペクトル

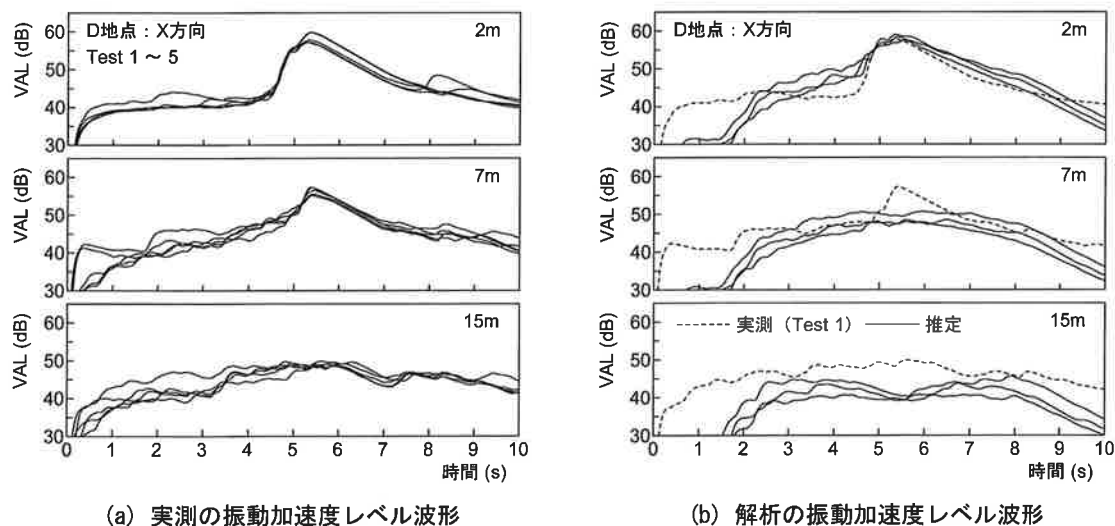


図-11 実測と 2.5 次元解析による X 方向の振動加速度レベル波形の比較

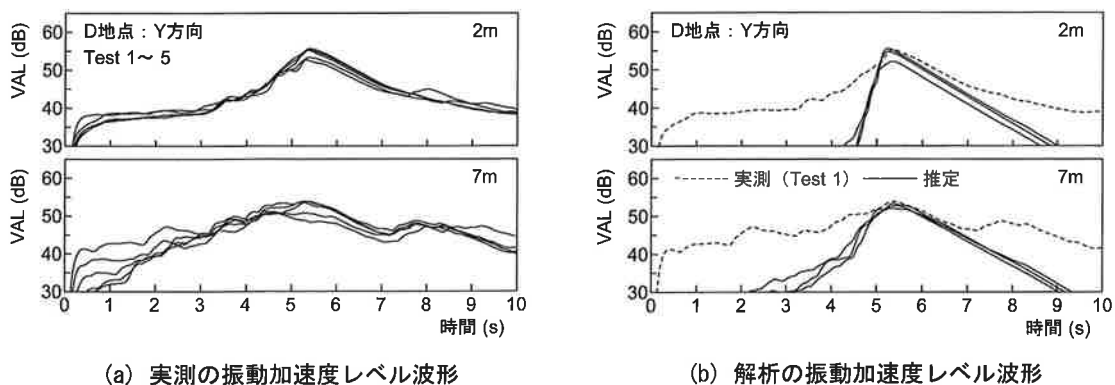


図-12 実測と 2.5 次元解析による Y 方向の振動加速度レベル波形の比較

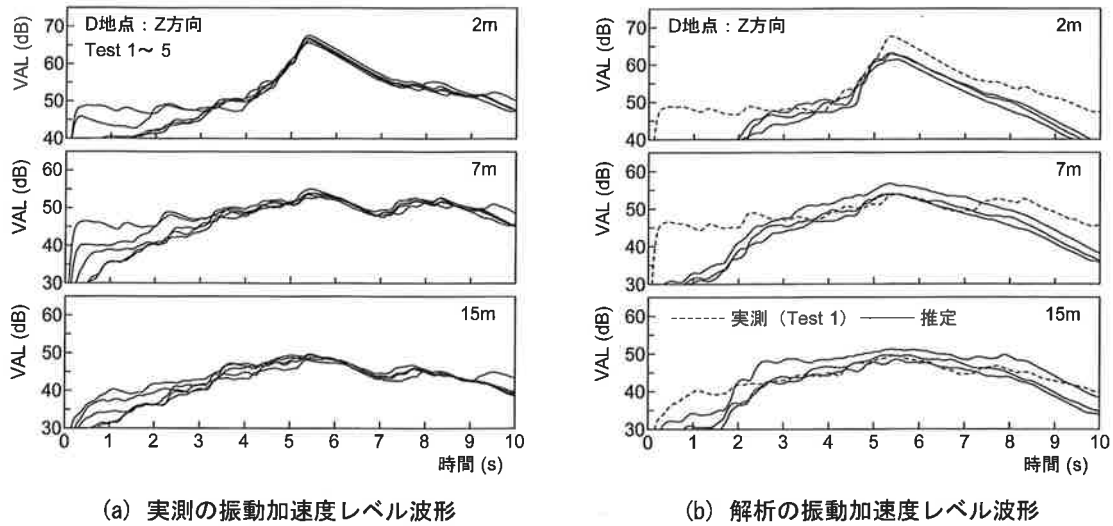


図-13 実測と2.5次元解析によるZ方向の振動加速度レベル波形の比較

図-11(b)より、仮定した3方向加振力によるX方向の振動加速度レベル波形(图中、推定と記した実線)の特徴として、走行路からの距離が離れるとともに、5.5秒付近のレベルが実測のレベルより小さくなり、レベル波形の形状が異なる様子を示している。図-12(b)では、仮定した3方向加振力によるY方向の振動加速度レベル波形は実測の波形より時間方向の幅が狭くなる様子を示しているが、5.5秒付近のピークレベルはほぼ同じ値となっている。図-13(b)のZ方向の振動加速度レベル波形では、測点2mの推定波形が全体的に実測の波形より下がる様子を示しているが、波形の形状は他の測点も含めて実測の波形と似ている。

実測の地盤振動は車両振動と同時測定ではないため、仮定した3方向加振力による振動加速度レベル波形は実測の振動加速度レベル波形と多少の差異は生じていると考える。また、薄層要素にモデル化した地盤の力学定数の仮定も2.5次元解析によるシミュレーション波形に影響を及ぼしている。したがって、図-11(b)~図-13(b)の結果だけではなく更なる実測データによる検証が必要ではあるが、A~Dの逆解析結果からX方向加振力はZ方向加振力の振幅を1/2~1/3程度、Y方向加振力は1/3~1/5程度に縮小したものになるであろうと推測する。

### 5. 水平加振力の影響の程度

前章での検討結果を踏まえて、Dにおける実測のZ方向加振力の振幅を1/2したものをX方向加振力、1/5したものをY方向加振力として、2.5次元解析により水平加振力が地盤振動に及ぼす影響度を調べる。ここでは、計算時間を短縮するため、計算の手数を簡単にする方法を用いる。まず、図-10(a)のZ方向加振力のパワースペクトル密度を図-14の太線のようにバンド幅1Hzで平滑化する。このパワースペクトル密度から1Hzピッチで加振力の振幅を読み取り、この振幅を持つ調和振動の移動加振力による地盤の振動加速度レベル波形をデシベル和算する。厳密に計算処理する場合と若干誤差は生じるが、ここでの検討は相対比較を行うことになるのでこの誤差は問題にならない。

図-15は、X、Y、Z方向の加振力が作用するときの振動加速度レベル波形(图中、3方向加振)と水平加振力を無視し

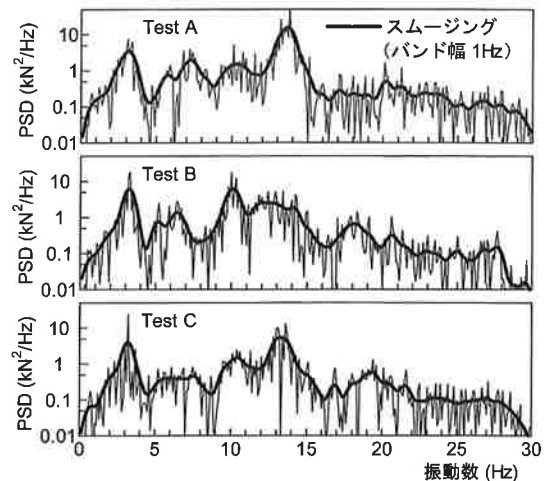
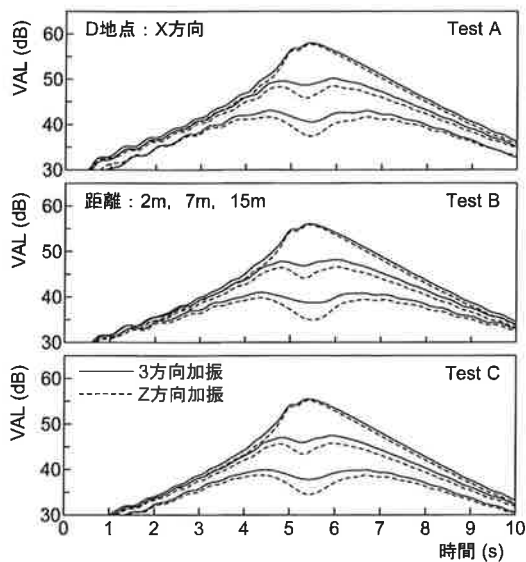
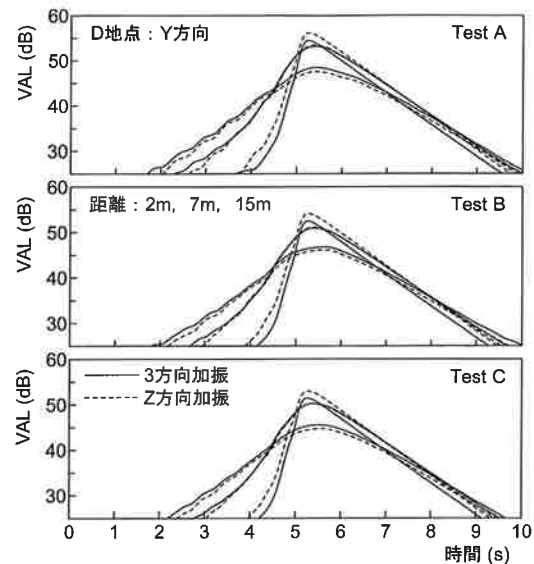


図-14 動的接地荷重のパワースペクトル密度





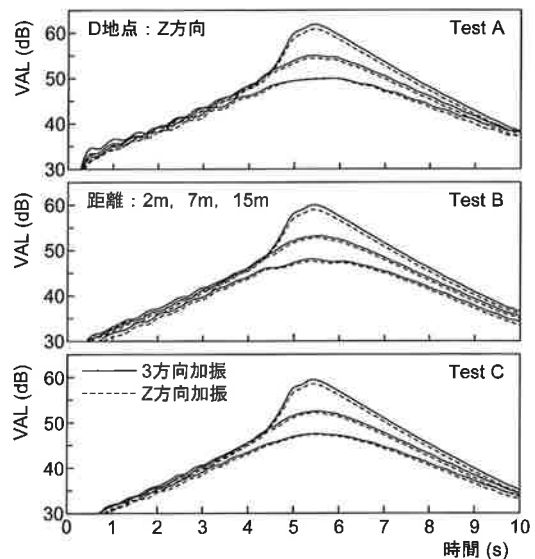
(a) X方向の振動加速度レベル波形



(b) Y方向の振動加速度レベル波形

図-15 3方向加振力とZ方向加振力による振動加速度レベル波形の比較 (その1)

たZ方向加振力のみが作用する場合(図中、Z方向加振)の振動加速度レベル波形を比較したものである。図中、それぞれの加振力に対して描いた3組の線はほぼ上から距離が2m, 7m, 15mの測点に対応している。Y方向およびZ方向の振動加速度レベル波形では、3方向加振とZ方向加振の結果の差異は小さく、水平加振力の寄与は考えなくても良いことを示唆している。一方、X方向の振動加速度レベル波形では、移動加振力が測点に近接する時間付近で差異が生じており、測点の距離が大きくなるとともにこの差が開く傾向を示している。これらの結果より、X方向の振動加速度レベル波形に多少の差異が生じるが、全体的には水平方向の加振力が走行路と直交する測線上の地盤振動に与える影響は小さいものと推測する。



(c) Z方向の振動加速度レベル波形

図-15 3方向加振力とZ方向加振力による振動加速度レベル波形の比較 (その2)

## 6. あとがき

単一振動数の調和振動の移動加振力による地盤の振動加速度波形は、時間的に振幅が変化し、振動数も単一とはならない。このため、固定振動源のように地盤振動の測定データから加振力を周波数領域で逆解析することはできない。本報告では、調和振動の移動加振力による地盤振動のシミュレーション波形の特徴に対する考察を踏まえて、固定振動源として逆解析し、水平加振力を鉛直加振力と関係付けることを試みた。D地点の地盤モデルに対して一例の検証しか行っていないので、得られた知見は可能性として下記に列挙する。

- (1) 走行車線に近い測点で実測した振動加速度波形を用いて、固定振動源として逆推定した加振力の特性から、移動振動源の3方向の加振力を推定できる。
- (2) 自動車と地盤の相互作用によるタイヤ面の動的接地荷重の  $1/2 \sim 1/3$  程度が道路方向の水平加振力、 $1/3 \sim 1/5$

程度が道路直交方向の水平加振力として作用する。

- (3) 2.5次元解析によるシミュレーション結果では、道路方向および道路直交方向の水平加振力が道路直交方向の測線の地盤振動に及ぼす影響は小さい。

#### 参 考 文 献

- 1) 国松 直・平尾善裕・松本泰尚・北村泰寿：公害振動評価に関わる諸問題と今後の対応，騒音制御，35巻，3号，pp.271～278，2011.
- 2) 田口典生・花里利一・池田能夫・石田理永：道路交通振動の加振力特性－地盤環境振動の予測手法に関する研究 その2－，日本建築学会環境系論文集，第73巻，第633号，pp.1241～1247，2008.
- 3) 国松 直・北村泰寿・平尾善裕：地盤振動伝搬特性に及ぼす地盤特性と加振力特性の影響，日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集，pp.61～64，2009.
- 4) 北村泰寿・国松 直・内田季延・平尾善裕：盛土・切土道路からの環境振動予測計算法の構築に関する検討報告，建設工学研究所論文報告集，第58号，pp.9～20，2016.
- 5) 北村泰寿・山本和宏・大国晃之：大型車走行実験に基づく地盤振動のシミュレーション法の検討，建設工学研究所論文報告集，第47号，pp.1～11，2005.

#### 著 者

北村 泰寿 元所員，工学博士，構造力学，振動工学