

(78) 複合道路交通振動の発生源別寄与率の推定

Calculation for the Proportion of Complex Traffic Vibration Sources

徳永 法夫*, 日野 泰雄**, 西村 昂***

Norio Tokunaga*, Yasuo Hino** and Takashi Nishimura***

ABSTRACT ; Along urban expressways where an elevated road is adopted frequently, large-scale surface streets are often constructed from viewpoint of accessibility. Therefore, a traffic vibration problem is often caused in such a place. Although the sources of vibration must first be identified for each administrative district, applicable methods are yet to be introduced. This study focuses on the correlation between time-based variance of mean vibration energy levels and time-based variance of traffic conditions on each road. And using multiple regression analysis based on statistical processes proposes an objective method for identifying roads that are the source of problems. This method enables macroscopic identification of sources of the traffic vibration problems in a specific region. This method also enables rapidly, relevant countermeasures against the vibration problems, in that it prioritizes such measures through a calculation for the sources' proportion to an overall vibration level.

KEY WORDS ; Composite Structure Road , Road-induced Vibration, Vibration Influence

1 まえがき

都市内における振動源には、道路交通、鉄道交通を始めとする交通機関によるものと、工場・事業所等から発生する振動がある。そのうち、鉄道交通による振動は、列車の通過時に衝撃的な振動が発生するため容易に確認が可能であり、工場・事業所等から発生する振動は、その作業内容、営業時間等から発生源として比較的認識しやすい振動源であると考えられる¹⁻⁴⁾。

ここで、道路交通による振動は、高架道路から発生する振動と平面道路から発生する振動に分類される⁵⁻⁷⁾。また、都市内においてはアクセス面での配慮から、高架道路の周辺に大規模な平面道路が併設されることが多くなっている。都市内における道路交通に関する振動の苦情は、これらの道路が複合する地域に集中して発生している⁵⁻⁷⁾。それは以下の理由によると考えられる。

- ・限られた土地の有効利用の観点から、都市内には、連続高架構造の道路が多い
- ・高架道路は、平面道路とのアクセスを考慮して一定規模以上の平面道路（通常、4車線以上）の位置に設けられることが多い

このような連続高架道路と平面道路の複合構造道路では、通常連続高架道路と平面道路の道路管理者が異なるため、沿道で苦情が発生した場合に、迅速かつ適切な対応が図りにくいという現状がある。また、道路

* 大阪メディアポート（株）（Osaka Media Port Corporation）

** 大阪市立大学大学院工学研究科（Graduate school of engineering, Osaka City University）

*** 大阪市立大学名誉教授（Osaka City University）

管理者が同一の場合においても、対策を検討するためには、沿道家屋に発生している振動に対する道路別、路線別の寄与分（以下、発生源別寄与率という）を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、振動レベルのエネルギー平均値と各道路別交通条件との時刻変動の関連性に着目し、重回帰分析を用いた統計処理を行うことで、振動の発生源となる道路を客観的に特定する手法を提案するものである。また、本手法に基づいて算出される振動エネルギーの発生源別寄与率から振動対策を行うべき優先順位が求められるため、的確かつ迅速な対策が図れるものと考えられる。

本手法は、各々の道路における交通条件（車種別交通量、平均走行速度）の時刻変動に着目し、その総運動エネルギーを説明変数とし、振動測定地点におけるエネルギー平均値を目的変数とする重回帰分析を利用するものである。本手法の応用によって、一般的な道路交通振動測定によって得られるデータを基に、対象とする道路別の振動エネルギー発生源別寄与率を推計することが可能であり、道路交通振動対策上、対策すべき振動発生源を特定できるものと考えられる。

2 発生源別寄与率の計算方法

2. 1 発生源別寄与率算定の基本的考え方

複合構造道路における各道路別の発生源別寄与率の推計に用いる重回帰モデルを検討する。ただし、このモデルでは、各道路の振動源のエネルギーが測定点に与える発生源別寄与率を推定することを目的とすることから、振動レベルの予測に用いられている地盤性状などのパラメータ⁸⁾は無視するものとし、各道路で発生する振動源のエネルギーを算出するパラメータとしては、振動レベルの予測式⁸⁾の中で大きな影響を与える交通量と速度を対象とした。

また、各道路から発生する振動の影響を分離して考えるためには、用いる指標が合成や分離可能なエネルギー値である必要がある。そこで、評価指標として、振動のエネルギー平均値を使用することとし、各振動発生源におけるインパクトをエネルギーとして換算して用いれば、物理的に整合がとれることになる。

このような考え方を基にして、発生源別寄与率算定を考えた線形重回帰式モデルを (1) 式に示す。

$$E = \sum_{i=1}^P E_i = \sum_{i=1}^P a_i (N_{h_i} + 13N_{l_i}) V_i^2 \quad (1)$$

E : 測定点位置での振動エネルギー, E_i : i 番目の道路からの振動エネルギー
 a_i : i 番目の道路の偏回帰係数

N_{h_i} : i 番目の道路における小型車種の交通量, N_{l_i} : i 番目の道路における大型車種の交通量

V_i : i 番目の道路における平均走行速度, P : 分析対象とする路線数

(1) 式における右辺は、各道路で発生する運動エネルギーを表している。ただし、質量は車両台数に比例するものとし、大型車種1台は小型車種13台の台数に換算している⁸⁾。この場合、右辺の説明変数はすべて同次元であるため、簡便性を考慮して、単位の換算等はすべて偏回帰係数に含まれるものとして取り扱った。使用する交通条件は、通常の測定で行われている約10分間の連続測定の交通条件を対応させることにした。

また、このような重回帰式モデルの場合、定数項を含む場合と含まない場合がある。定数項を含む場合は、対象とする道路交通以外の振動源（鉄道交通振動、工場振動等）が存在することを仮定するものであるが、ここでは簡便のために定数項を含まないものとして取り扱うものとした。

2. 2 振動の大きさの評価指標について

現行の振動規制法における規制値は、鉛直方向の時間率振動レベル L_{10} (80%レンジの上端値) である。し

かし、複数の振動源から発生した振動の合成値として測定点の振動の大きさを評価する場合、各道路の振動の大きさを「ある一定時間内における時間率レベル（大きなものから何番目といった順位）の大きさ」よりは、振動のもつエネルギーで評価することが望ましい。そこで、本検討では、振動レベルのエネルギー平均値（ L_{eq} ）を指標として採用した。したがって、(1)式の振動エネルギーは、振動測定において求められるエネルギー平均値から算出するものとする。

$$E = 10^{\frac{L_{eq}}{10}} \quad (2)$$

L_{eq} : 振動レベルのエネルギー平均値(dB)

ただし、振動においてはエネルギー平均値を表す用語はないため、騒音における等価騒音レベルと同じ記号を、ここでは便宜的に用いるものとした。

2. 3 データ数および変動範囲について

重回帰分析を始めとする統計解析においては、使用するデータ数、変数の変動範囲が重要となる。通常、都市内における交通量は朝昼間に多く、夜間に少ない。そこで、本分析においては、1日24時間のデータを使用するものとした。なお、ここでは一般に実施されている振動測定における測定頻度を考慮して、毎正時より10分間の測定値を使用する。

2. 4 道路別の振動エネルギー発生源別寄与率の算出方法

上述した線形重回帰モデルを基にした場合、(1)式の偏回帰係数が、各道路の振動エネルギーの発生源別寄与率を表す。この道路別の振動エネルギーの発生源別寄与率は24時間分のデータを加算して、次式で与えられると考えた。

$$I_i = \sum_{j=1}^{24} E_{ij} / \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{24} E_{ij} \quad (3)$$

I_i : i 番目の道路からの振動エネルギー発生源別寄与率、 j : j 番目の測定データ

3 ケーススタディ

3. 1 ケーススタディの目的と検討対象箇所の概要

本節ではケーススタディを通して本手法の有効性を検討する。適用するデータは、高架道路と平面道路が併設された同一路線沿道地域の計5箇所（調査箇所：①～⑤）である。

(1) 検討対象箇所

図－1に代表的な調査箇所④の断面図を示す。また、図－2にその他の調査箇所の概略断面図を示す。高架道路は4車線（上下線各2車線）、平面道路は6車線（上下線各3車線）である。これら5箇所をケーススタディの対象とした理由を以下に示す。

1) 調査箇所①

高架道路の上下方向が分離しており、測定点の反対側の下り方向の影響が現れないと推察されるこ

表－1 検討対象道路構造

調査箇所	高架道路	一般道路	備考
①	上下線分離の単柱形式	平面構造	高架道路の下り側は、測定点よりかなり遠方
②	T型単柱形式	平面構造	特になし
③	T型単柱形式	高架一体型の上下線分離高架構造	一般道路の高架高さは約5m程度
④	T型単柱形式	平面構造	平面道路にマンホールがある
⑤	門柱形式	平面構造	特になし

とや、平面道路の測定点側の交通量よりも測定点と反対側の交通量がかなり多いため、これらの差異が確認されると考えられるため選定した。

b) 調査箇所②

都市内の高架道路における一般的な橋脚形式であるT型単柱形式と、平面構造である平面道路の組み合わせであり、典型的な事例として選定した。

c) 調査箇所③

T型単柱形式の高架道路橋脚下部の左右に、平面道路が高架構造として合体した構造であり、特殊構造形式として選定した。

d) 調査箇所④

調査箇所②と同様な標準的な断面構造であるが、この平面道路にマンホールが存在しており、この影響がどの程度解析に反映されるかを検討するために選定した。

e) 調査箇所⑤

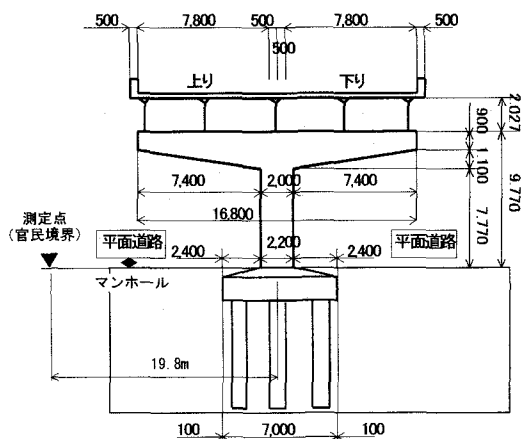
高架道路が門柱形式であり、高架道路の両方向の交通条件が、測定点に及ぼす影響の単柱形式との相違を検討するために選定した比較事例である。

(2) 交通条件

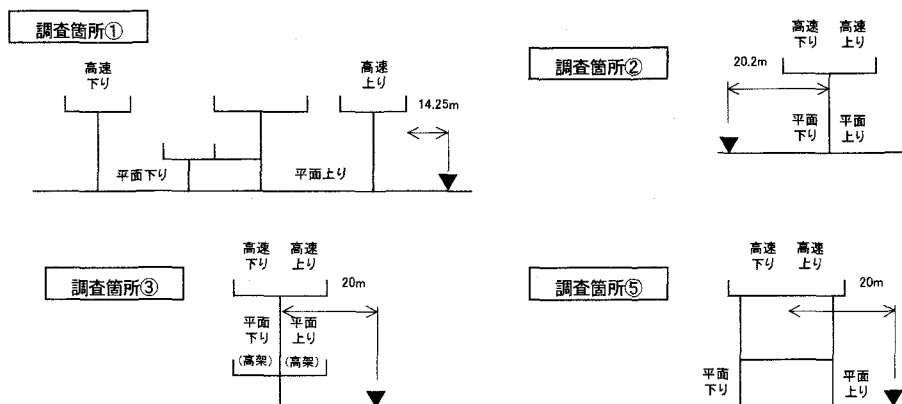
表－2は、この調査箇所の交通条件調査結果の一例である。この例では、高架道路の下り方向の総交通量は、上り方向の総交通量に比べて約2割程度多い。また、同じく高架道路の平均走行速度には大きな差がある。

(3) 交通条件および振動レベルの時刻変動

高架道路と平面道路の交通条件および振動レベルの時刻変動パターンの例（調査箇所④）を、図－3～図－4（交通条件）、図－5（振動レベル、鉛直方向）に示す。この例に示したように、高架道路および平面道路では、交通量の時刻変動パターンは類似しているが、走行速度の時刻変動パターンには相違が認められる。また、振動レベルの時刻変動パターンと交通量単独の時刻変動



図－1 調査箇所の断面図（調査箇所④）



図－2 調査箇所の概略断面図

動パターン、走行速度単独の時刻変動パターンの関係は明確ではない。このように複合構造道路の沿道における道路交通振動は、高架道路および平面道路の両者の影響を受けていることがわかる。

3. 2 ケーススタディの分析結果

(1) 振動エネルギーの重回帰分析結果

ここでは、本研究で対象とした5箇所の高架道路、平面道路沿道における振動レベル(鉛直方向)のエネルギー平均値と交通条件を用いた重回帰分析⁹⁾の結果を示す。なお、本論文では発振源特定方法の有効性を検討する目的から、分析対象とする道路を高架道路(上り、下り)、平面道路(上り、下り)の4種類(P=4)に設定した。

ここで、ケーススタディに取り上げたような高架道路と平面道路が併設される道路では、前述したように時刻変動パターンにある程度の類似性が認められることが多い。この場合、上記の4種類の説明変数間に多重共線性¹⁰⁾の問題が生じる危険性があるため、ここでは上記の4種類の変数をすべて用いる強制投入法ではなく、変数増減法(stepwise method)¹¹⁾を用いることにした。その際の変数の投入基準は $F=0.05$ 、除去基準は $F=0.10$ に設定した。なお、この変数増減法では説明変数のいくつかの組み合わせが提示されるが、ここではそのうち、得られたモデルのF値の有意確率が0.05未満で、かつ選定された説明変数が最も多いモデルを採用した。

分析結果のモデル集計結果を表-3に示す。

これによると、すべての調査箇所での調整済み重相関係数の自乗値は0.8以上であり、かなり分析精度は高い(この場合の相関係数が、5%有意水準で有意であるためには、自由度から約0.42程度が基準となる)と考えられる。また、F値変化量の有意確率によると、すべての調査箇所、選定された説明変数は5%の有意水準で有意であると言える。また、このような時系列データを用いた重回帰分析では、残差の経時的変化にある程度の傾向が生じる。調査箇所③のダービン・ワトソン比は2に近い、ほぼ残差がランダムとなっていると判断され

表-2 道路別交通条件(調査箇所④)

道路区分	方向	日交通量 (台/日)	大型車類 混入率 (%)	平均 走行速度 (km/h)
高架道路	上り	40,000	20	48
	下り	49,000	20	80
平面道路	上り	43,000	17	47
	下り	39,000	15	53

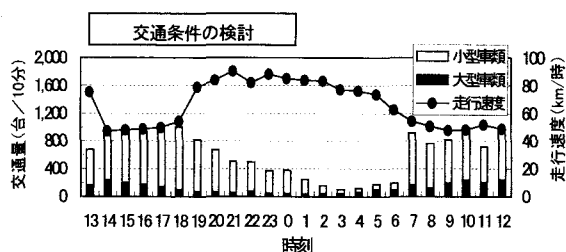


図-3 交通条件の時刻変動(高架道路)(調査箇所④)

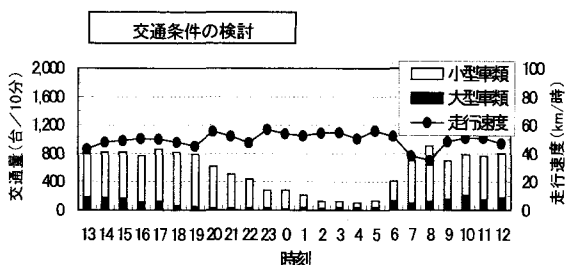


図-4 交通条件の時刻変動(平面道路)(調査箇所④)

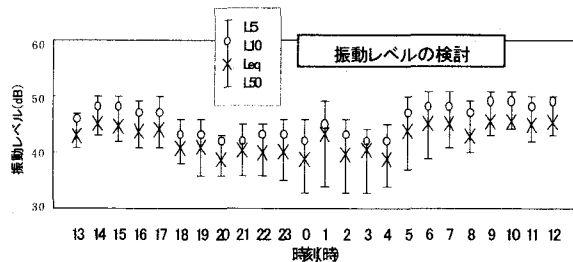


図-5 振動レベルの時刻変動(調査箇所④)

表-3 モデル集計結果

調査箇所	調整済み重相関係数の自乗値	F値変化量の有意確率	ダービン・ワトソン比
①	0.965	0.006	0.594
②	0.959	0.030	1.250
③	0.943	0.009	1.447
④	0.903	0.000	0.986
⑤	0.838	0.019	0.941

るが、調査箇所①では、残差の経時変化に傾向が生じていると考えられる。

(2) 非標準化偏回帰係数

前述の重回帰分析による、各説明変数の非標準化偏回帰係数を表－４に示す。表－４中の空欄は、前述した変数増減法により選定されなかった説明変数であることを示している。

調査箇所①～⑤のうち、高架道路のみの変数が選定された箇所（調査箇所⑤）および平面道路のみの変数が選定された箇所（調査箇所④）が各々１箇所であり、その他の３箇所（調査箇所①②③）は、高架道路と平面道路の複合的な影響を受けていると考えられる。

このようにすべての調査箇所で、使用した４種類の説明変数すべてがモデルに選定されていないが、これは前述したように複合道路における交通条件の時刻変動パターンの類似性によるものと考えられる。

(3) 推計モデルの評価分析

求められた非標準化偏回帰係数を用いて、各道路の発生源別寄与率算出の基準となる振動レベルのエネルギー平均値を算出することができる。ここでは、推計モデルの評価分析として振動レベルのエネルギー平均値の実測値の時刻変動パターンと、推計モデルによる推計値の時刻変動パターンの比較を行ったものを図－６～図－１０に示す。これらは、各調査箇所における各説明変数（交通量、走行速度）に表－４の偏回帰係数を乗算し、以下に示す(4) 式、(5) 式にしたがって各道路および全体の振動レベルのエネルギー平均値を算出したものである。

$$L_{eq_i} = 10 \log_{10} E_i \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^n E_i \quad (\text{dB}) \quad (5)$$

L_{eq_i} : 各道路の振動レベルのエネルギー平均値, L_{eq} : 全体の振動レベルのエネルギー平均値

これらより、各調査箇所の複合構造道路としての、高架道路と平面道路の道路交通振動の影響の度合いに関して、以下に示すような特徴が認められる。

a) 調査箇所①（図－６）の特徴

測定点側である上り側の高架道路の影響が大きく、次に測定点側と反対側の平面道路の影響が存在する。測定点と反対側の下り方向の高架道路は遠方にあるため、影響は存在しない。また、測定点近傍ではあるが交通量の極端に少ない平面道路の上り側の影響も存在しない。

b) 調査箇所②（図－７）の特徴

測定点側である高架道路の下り側の影響が卓越しているが、測定点側の平面道路の影響も存在する。平面道路では、測定点側である下り方向の影響が存在するのは妥当であるが、上下方向の影響が等分に現れると期待される高架道路では、測定点側である下り方向のみの影響が現れている。

c) 調査箇所③（図－８）の特徴

測定点側の平面道路の影響が卓越している。上り側平面道路のジョイント部にあった損傷箇所の影響を受けている可能性が考えられる。

d) 調査箇所④（図－９）の特徴

測定点側の平面道路の影響が卓越している。この箇所は、調査箇所の選定理由にも述べたように、この平

表－４ 非標準化偏回帰係数

調査箇所	高架道路		平面道路		測定点の位置
	上り線	下り線	上り線	下り線	
①	2.58E-03			1.64E-02	上り
②		6.81E-03		7.88E-03	下り
③	2.98E-03		2.01E-02		上り
④				9.13E-03	下り
⑤	1.37E-03	1.70E-03			上り

面道路の下り側にマンホールが存在し、マンホール上を車両が走行する際の振動の影響が顕著に現れているものと考えられる。

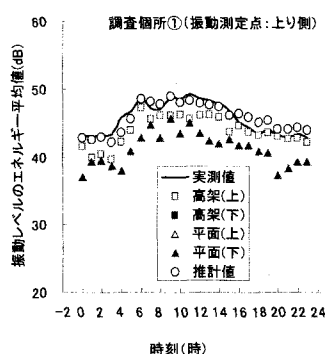
e) 調査箇所⑤（図－10）の特徴

平面道路の影響は存在せず、高架道路の上り方向と下り方向の影響が同程度であることがわかる。

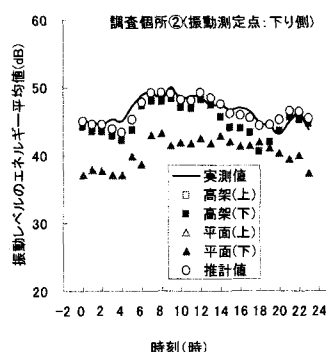
（４）実測値と推計値の分布と推計精度

振動レベルのエネルギー平均値の実測値と、推計モデルによる推計値との分布を検討したものを図－11に示す。

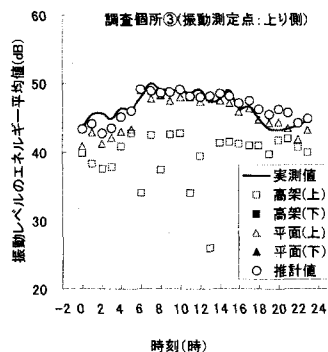
図－11は、全調査箇所の実測値と推計値の分布を表したものである。これによると、振動エネルギーが大きいほど実測値と推計値の乖離は小さくなることがわかる。振動レベルのエネルギー平均値の小さな領域における乖離は、主に推計モデルの説明変数として選択されなかった道路からの影響が加算されていないことによる誤差と、道路交通振動以外の振動源による暗振動の影響によるものと考えられる。しかし、振動として問題となる大きな振動レベルのエネルギー平均値の領域における実測値と推計値の乖離が小さいこと、および表－3に示したように全体としての推計精度が良いことなどから考えると、本論文で提案した単純な重回帰モデルでほぼ精度よく実測値が表現できているものと思われる。



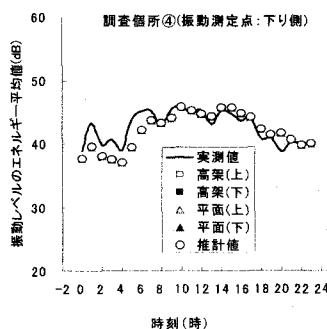
図－6 実測値と推計値の時刻変動（調査箇所①）



図－7 実測値と推計値の時刻変動（調査箇所②）



図－8 実測値と推計値の時刻変動（調査箇所③）



図－9 実測値と推計値の時刻変動（調査箇所④）

3. 3 道路構造別の振動エネルギー発生源別寄与率

平面道路が併設される高架道路沿道における振動の実態を把握するために、この平面道路と高架道路別に振動エネルギーの発生源別寄与率を算出したものを図-12に示す。これによると、調査箇所①、②、⑤では高架道路の発生源別寄与率が高く、調査箇所③、④では平面道路の発生源別寄与率が高いことがわかる。このようにほぼ同一形式構造の連続高架道路においても、平面道路の併設形態や路面状況により、その振動エネルギーの発生源別寄与率に相違があることがわかる。的確かつ迅速な対策の検討を行うには、このような道路維持管轄別の振動エネルギー発生源別寄与率の考え方が必要になるものと考えられる。

4 まとめ

本論文では、高架道路と平面道路が複合する複合道路構造において、各々の振動エネルギーの寄与を分離し、発生源を特定する手法の提案を試みた。

本手法の実用性を検討するために行った道路構造の異なる5箇所における実測データを用いた結果によると、振動のエネルギー平均値のモデル化による推計値の時刻変動パターンは、実測値の時刻変動パターンとほぼ整合がとれていることがわかった。また、算出された振動エネルギーの発生源別寄与率を用いて、各道路の振動エネルギーの発生源別寄与率と交通条件に整合性のあることを確認した。

この手法は交通条件を説明変数として使用するため、使用する交通条件の調査対象以上に、振動の影響を分離することはできない。また、普遍性のある道路交通振動の予測計算手法を確立することを目的としたものではないため、現象の説明や解釈には限界がある。

しかし、ここで提案した手法は、一般的に行われる振動測定によって得られるデータを利用することにより複合道路における振動源を特定できるため、沿道振動環境対策の実務において的確かつ迅速な対処方法の一助となるものと考えられる。

また、説明変数の部分を適宜選択すれば、道路交通騒音における等価騒音レベルにも応用可能であると思われる。

参考文献

- 1) 環境庁大気保全局特殊公害課：建設作業振動防止技術指針，1994

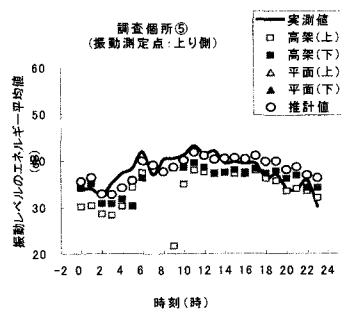


図-10 実測値と推計値の時刻変動
(調査箇所⑤)

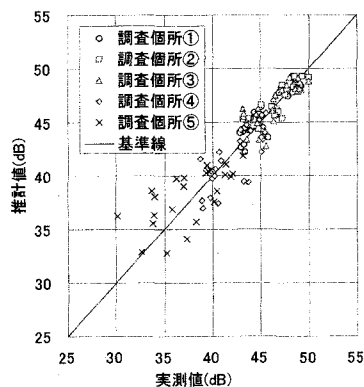


図-11 実測値と推計値の分布 (全調査箇所)

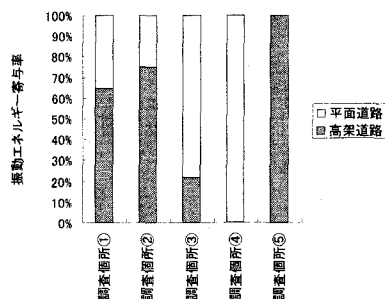


図-12 高架道路、平面道路別の振動エネルギー発生源別寄与率

- 2) 環境庁大気保全局特殊公害課：工場・事業場振動防止技術指針，1993
- 3) 環境庁大気保全局特殊公害課編集：道路交通振動防止技術マニュアル，ぎょうせい，昭和55年
- 4) 公害防止の技術と法規編集委員会編：新訂 公害防止の技術と法規「振動編」，1990
- 5) 徳永法夫，西村昂，日野泰雄，大竹由紀夫：連続高架道路と平面道路の道路交通振動特性に関する一考察，交通科学，Vol.27，No.1/2（合併号），pp.25-32，1998
- 6) 山本豊，徳永法夫，西村昂，日野泰雄：都市内交通振動の主たる振動源に関する一考察，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，第7部，VII-70
- 7) 徳永法夫，西村昂，日野泰雄，山本豊：都市内交通振動の振動源に関する一考察，第17回交通工学研究発表会論文報告集，1997
- 8) 道路環境影響評価の技術手法：財団法人道路環境研究所，2000
- 9) 社団法人 交通工学研究会編：交通工学ハンドブック，技報堂出版，第1版3刷，1991
- 10) 武藤眞介著：統計解析ハンドブック，朝倉書店，p.218，初版第二刷，1996
- 11) 田中豊，垂水共之，脇本和昌編：パソコン統計解析ハンドブック II 多変量解析編，共立出版株式会社，初版15刷，1989