

地盤から家屋への振動伝達特性と家屋の振動性状の把握実験

Experiment for Grasp on Vibration Transfer Characteristics from Ground to House and Vibration Characteristics of House

北村 泰寿 国松 直 平尾 善裕 太田 賢治
Yasutoshi Kitamura Sunao Kunimatsu Yoshihiro Hirao Kenji Ohta

1. はじめに

現行の公害振動の規制は、排出源規制の考え方に基づいて、振動発生源側の敷地境界における鉛直方向の振動レベル値で行われている。しかし、既報の調査結果等によれば、この規制方法と家屋内に居住する住民の苦情実態との整合性は良くないことが指摘されており、将来的には家屋内における振動値で規制する暴露規制に移行することが好ましいと考えられる。公害振動は、基本的には振動源としての加振力が地盤振動を発生させ、地盤を伝搬した後、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。暴露規制という考え方¹⁾に立つとき、振動源特性、伝搬経路特性、受振特性をシステムとしてどう取り扱うかに掛ってくる。

地盤から家屋への振動の入力特性および家屋内での振動の増幅特性を振動伝達特性として捉えるとき、その特性は昔から多くの研究者によって注目され、重要であるという認識にもかかわらずよく分かっていない。近年の著しく発展した数値解析技術でも実際の現象を定量的に評価することは難しい。これは、振動伝達経路の特性が十分に把握されていないため、振動系のモデル化を適切に行えないことによる。

一方、一般の振動源を利用した家屋の振動増幅特性の調査事例^{2)~6)}では、振動源の振動特性や地盤の振動伝搬特性を特定できないため、地盤から家屋への振動伝達特性を統一的に評価できない。例えば、文献4)では、地盤と家屋間のランニング伝達関数から、家屋の振動増幅量あるいは卓越振動数の計測においては伝達関数の時間的な変動に着目する必要性に触れている。筆者らも、道路交通振動に対して、振動加速度レベルの最大値に基づく振動増幅量には時間的な同期が無いこと、振動加速度のレベル差の時間波形から大型車通過時に必ずしも増幅は生じてはいないことを示した⁷⁾。

一般の振動源を利用しない方法として、常時微動の伝達関数を測定して、低層住宅の振動特性を調べた例がある⁸⁾。軟弱な地盤では振動スペクトルが低域振動数に片寄るため、家屋の固有振動数付近で入力振動の成分が小さくなり、暗振動に対するS/N比が低下して、家屋の振動特性の推定精度が悪くなることがあると記されている。また、常時微動による低層RC造建物の伝達関数に対して、地盤と建物の動的相互作用と建物への入力動の影響が調べられている⁹⁾。地盤・基礎条件による動的相互作用や、交通振動などに起因するレイリー波による回転入力動が伝達関数推定結果に大きな影響を与えている。

筆者らは、統一的に、かつ再現性のある方法で地盤から家屋内への振動伝達特性を把握することを目指して、制御した加振力で地盤を加振する装置（標準加振装置）の開発を進めてきた。標準加振装置の起振器は、人力で可搬可能、使用電源100Vをコンセプトとして、小型軽量のパルスモーターを使用した偏心質量回転式である。加振装置の概要と実用化に向けての基本的な性能等は、すでに文献10)~16)に発表した。

本報では、加振装置によって調査した5棟の住宅に対する家屋近傍地盤から家屋2階床への振動伝達特性を示し、その内の2棟については、家屋2階床の敷点における測定結果から家屋2階床の振動性状を示す。また、2棟の内の1棟については、加振装置による振動調査時に重機作業による振動を測定する機会を得た。両振動源による振動伝達特性の

比較、家屋2階床の振動性状の比較等を通して、加振装置の有用性を示す。

2. 加振装置の起振器と調査した家屋の概要

標準加振装置は起振器と地盤面に固着するための固定装置で構成され、固定荷重として装置に自動車を載荷する構造となっているが、その詳細は既報(10)に譲る。起振器は3号機まで製作しており、その仕様を表-1にまとめておく。現地実験実績による上限加振振動数は、1号機で11.1Hz、2号機水平加振で21.6Hz、鉛直加振で16.0Hz、3号機水平加振で15.8Hz、鉛直加振で15.8Hzである。また、小型軽量の起振器を採用しているため、加振力不足により下限加振振動数は現地実験時の暗振動レベルに大きく左右される。2号機と3号機の大きな相違は駆動方式を2号機のギア方式からタイミングベルト方式に変更したものである。ギアの噛み合わせ音が無くなり、静穏な場所での実験時の騒音問題は回避できることになったが、意図した上限加振振動数の向上は得られず、2号機と同程度の性能に留まっている。

調査した5棟の住宅における加振装置の位置と家屋近傍地盤および2階床の測点の概略図を図-1～図-6に示す。5棟の住宅にそれぞれ名称を付け、M住宅(図-1と図-5)、S住宅(図-2)、D住宅(図-3)、R住宅(図-4)、A住宅(図-6)と呼ぶ。なお、M住宅については、調査を2回行っており、加振位置と測点の配置が異なるので、2つの図に分けて示した。また、A住宅では図-6に示すように、A点とB点の2ヶ所における加振実験と家屋から10m以遠の箇所で行われた重機作業による振動を測定した。

表-1 各起振器の仕様

機番	加振方向	偏心荷重(kg)	錘回転半径(cm)	総重量(kg)	サイズ(幅×奥行×高)(mm)
1号機	水平専用	11.54	9.05	61.7	371×650×370
2号機	水平・鉛直	3.10	4.78	24.24	288×170×394
3号機	水平・鉛直	3.44	4.288	33.1	590×175×316

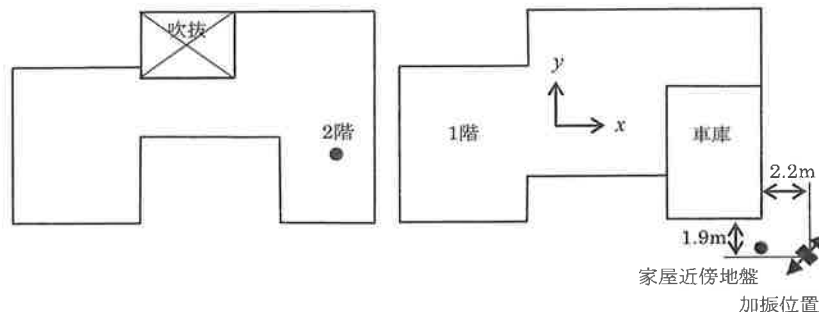


図-1 M住宅の加振位置と計測点(第1回調査)

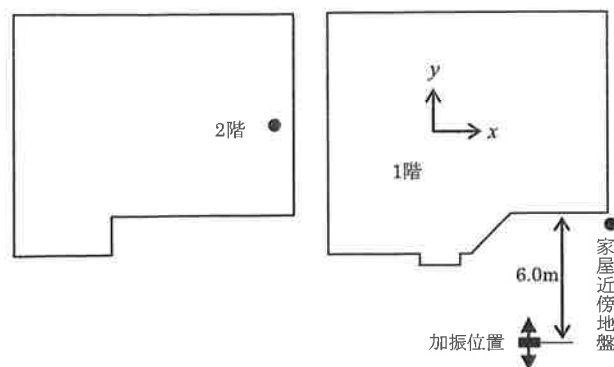


図-2 S住宅の加振位置と計測点

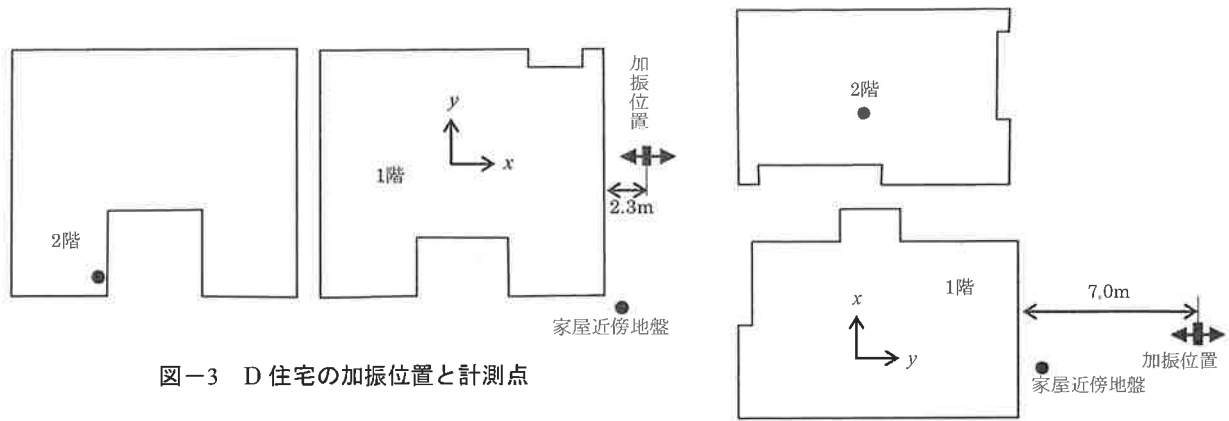


図-3 D住宅の加振位置と計測点

図-4 R住宅の加振位置と計測点

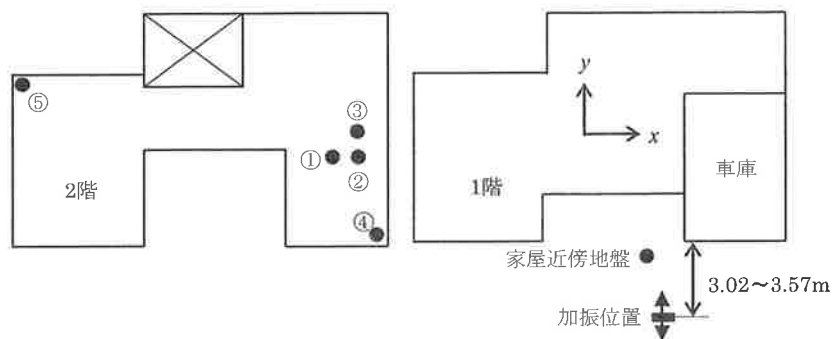


図-5 M住宅の加振位置と計測点 (第2回調査)

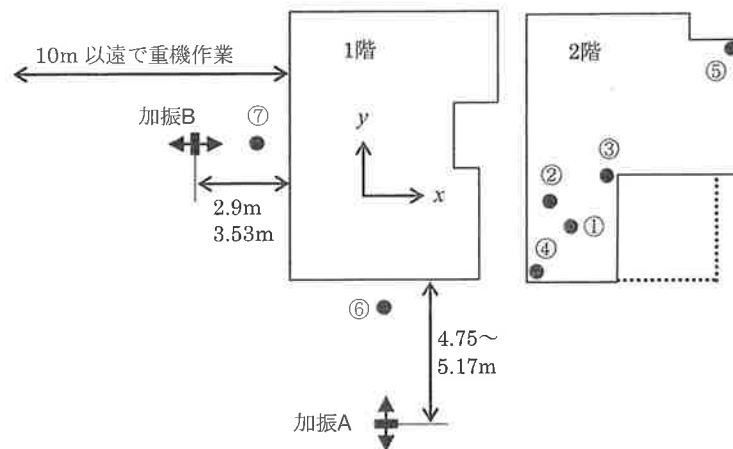


図-6 A住宅の加振位置と計測点

3. 加振装置による地盤から家屋への振動伝達特性の把握

M住宅の第1回調査では2号機を用いて水平振動と鉛直振動の伝達特性を、S住宅、D住宅、R住宅では1号機と2号機を用いて水平振動、2号機を用いて鉛直振動の伝達特性を調べた。なお、2号機による鉛直加振では、暗振動に対するS/N比が悪く、得られた伝達特性の良好な振動数範囲は狭い。M住宅の第2回調査とA住宅では、1号機と2号機を用いて水平振動の伝達特性を、3号機を用いて鉛直振動の伝達特性を調べた。

水平加振実験では、1号機と2号機による振動伝達特性を合成して低振動数から所要の上限加振振動数(約20Hz)までの伝達特性を把握する手法を採用した。振動データ処理の詳細は文献(12)、(13)に譲るが、短時間フーリエ変換(STFT)を適用して加速度レベルで表したSTFTスペクトルを描き、暗振動等に対するS/N比が良好な振動数範囲のスペクトル

をまず取り出す。次いで、家屋近傍地盤と家屋 2 階床の STFT スペクトルのレベル差を振動伝達特性とし、1 号機と 2 号機による伝達特性を合成する、という手法である¹⁵⁾。

S 住宅、D 住宅、R 住宅については、振動伝達特性の合成手法の提案と合成結果として、文献 15) に伝達特性を示したが、統一した図面様式で再掲する。図-7~図-17 に 5 棟の住宅の振動伝達特性を示す。M 住宅の第 1 回調査以外の水平振動の伝達特性は、全て加振方向の振動伝達特性である。なお、M 住宅の第 1 回調査では 2 棟の住宅を同時加振したため、家屋の向きと加振方向は一致していない。

鉛直振動の伝達特性は、M 住宅については第 1 回調査と第 2 回調査の対比のため図示したが、S 住宅、D 住宅、R 住宅については S/N 比が良くないため図示していない。参考のため簡単にまとめると、S 住宅では S/N 比が良好な振動数範囲は無い、D 住宅では 7.0~11.1 Hz で近傍地盤に対する 2 階のレベル差は約 -5 dB ~ -13 dB、R 住宅では 7.9~12.1 Hz でレベル差は約 0 dB ~ -10 dB となっている。

M 住宅 (図-9)、S 住宅 (図-11)、R 住宅 (図-13)、A 住宅 (図-14、図-15) の水平振動では、4~6 Hz に振動増幅が見られるが、これは家屋の共振による増幅と考えられる。一般振動源に対する木造家屋 22 棟、鉄骨造家屋 5 棟の振動増幅の調査結果では、2 階床の水平方向の振動において、4~8 Hz の間に共振現象による増幅傾向が見られ、多くの家

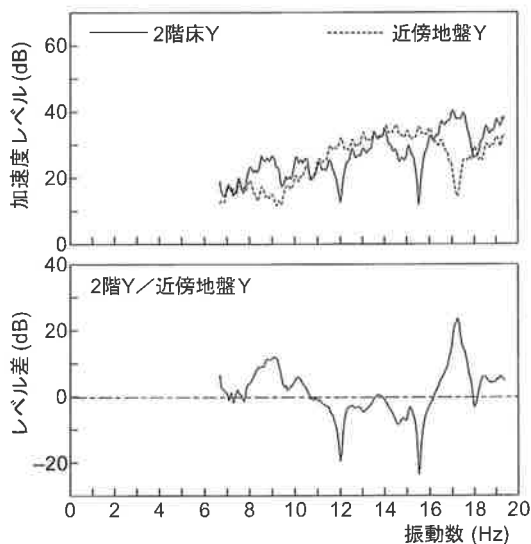


図-7 M 住宅の y 方向水平振動の伝達特性 (第 1 回調査)

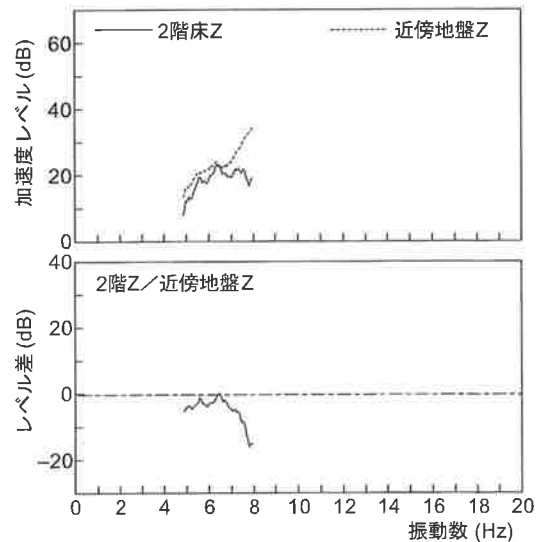


図-8 M 住宅の z 方向鉛直振動の伝達特性 (第 1 回調査)

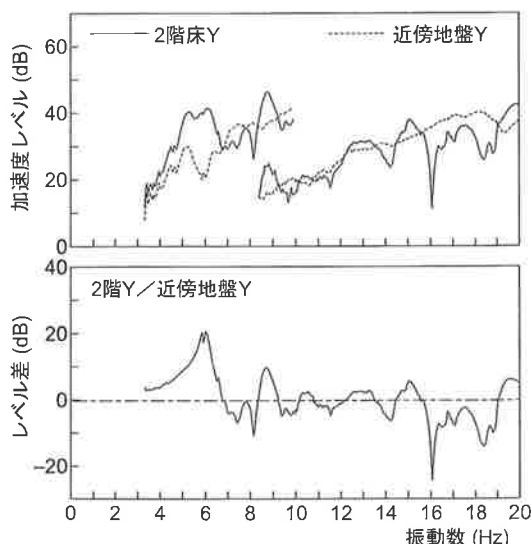


図-9 M 住宅の y 方向水平振動の伝達特性 (第 2 回調査)

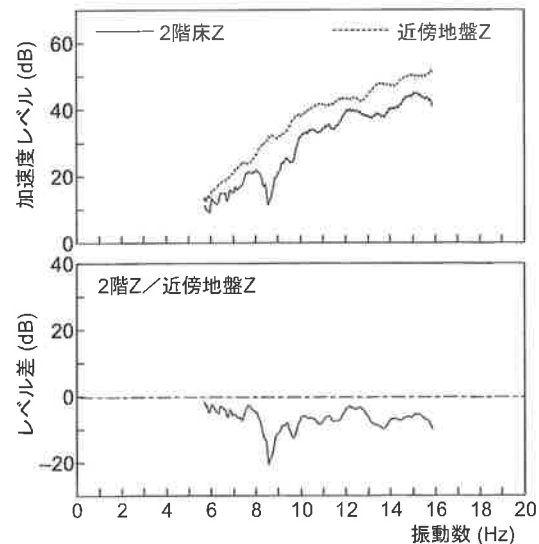


図-10 M 住宅の z 方向鉛直振動の伝達特性 (第 2 回調査)

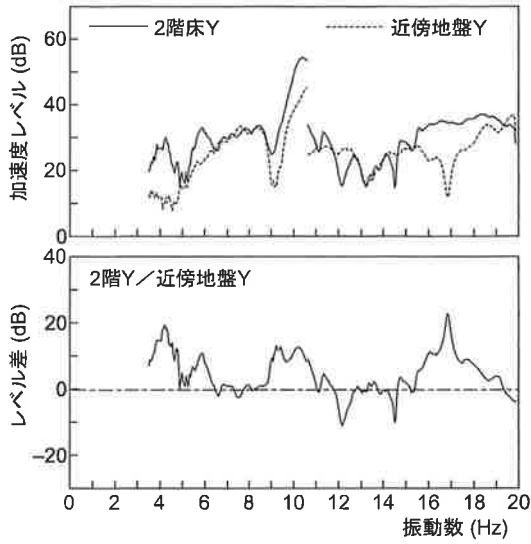


図-11 S住宅のy方向水平振動の伝達特性

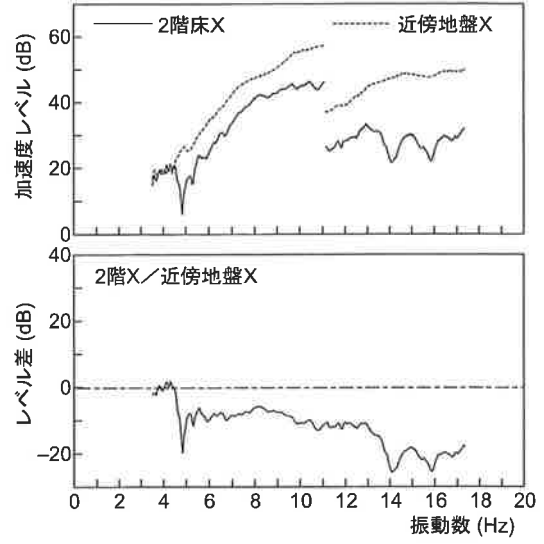


図-12 D住宅のx方向水平振動の伝達特性

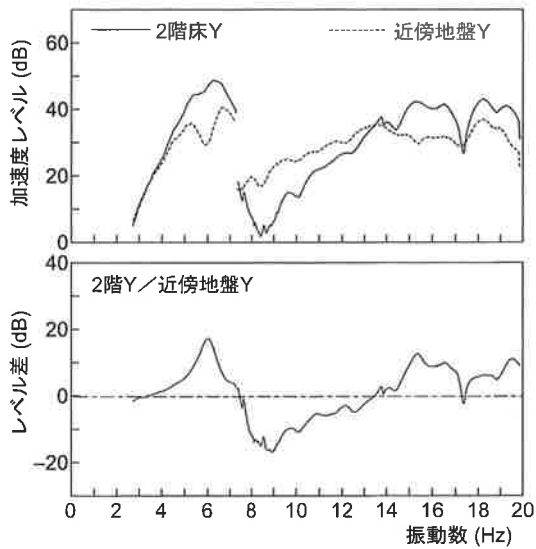


図-13 R住宅のy方向水平振動の伝達特性

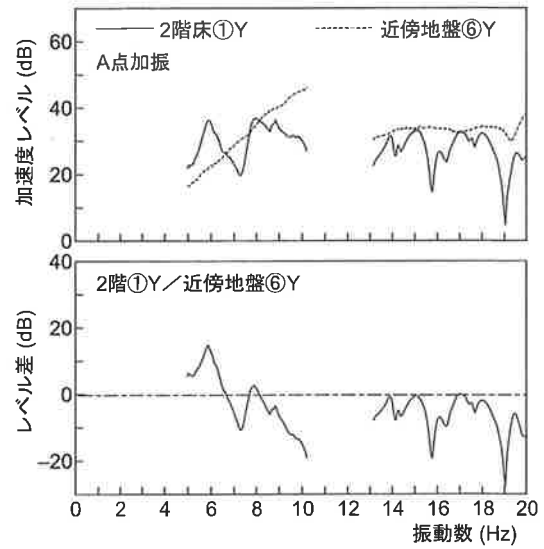


図-14 A住宅のy方向水平振動の伝達特性 (A点加振)

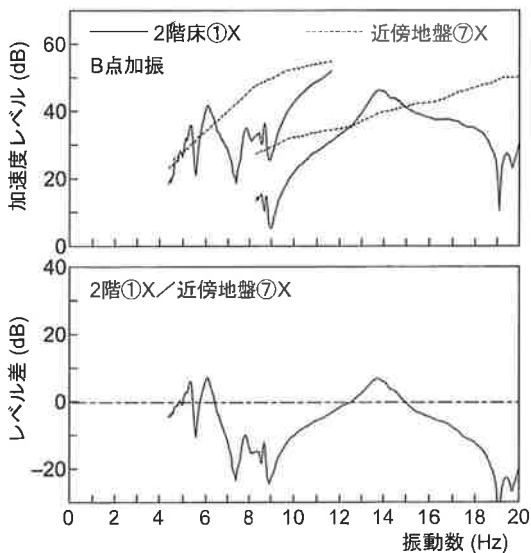


図-15 A住宅のx方向水平振動の伝達特性 (B点加振)

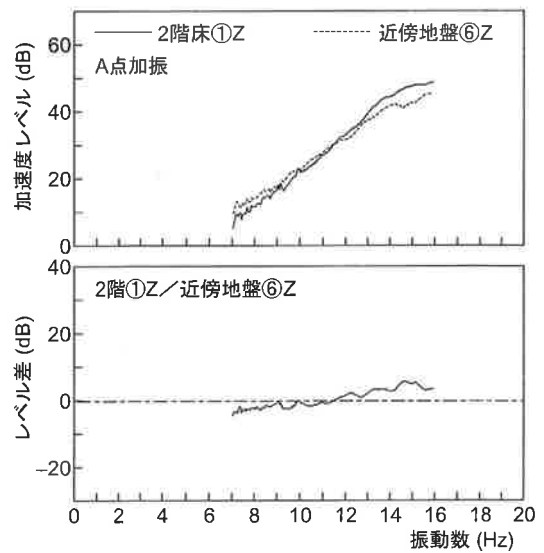


図-16 A住宅のz方向鉛直振動の伝達特性 (A点加振)

屋はこの振動数範囲に固有振動数を有する¹⁷⁾。D住宅(図-12)では、加振方向と2階床測点の位置関係で、4~8 Hzの間に共振による増幅が現れなかったものと推測される。また、一部の住宅において見られる14~17 Hzの振動増幅は、床部材等の共振である可能性があり、個々の家屋構造に影響されるものと思われる。

M住宅における2回の調査結果(図-7, 図-9)と、A住宅のx方向, y方向加振の結果(図-14, 図-15)から、高い振動数域では伝達特性に違いが生じており、加振方向と家の向きによって柱, 床部材等への振動の入力機構が違っている可能性がある。

一方, M住宅(図-8, 図-10), A住宅(図-16, 図-17)の鉛直振動では、低い振動数域での結果が得られていないが、振動増幅を生じないか、生じても僅かである。

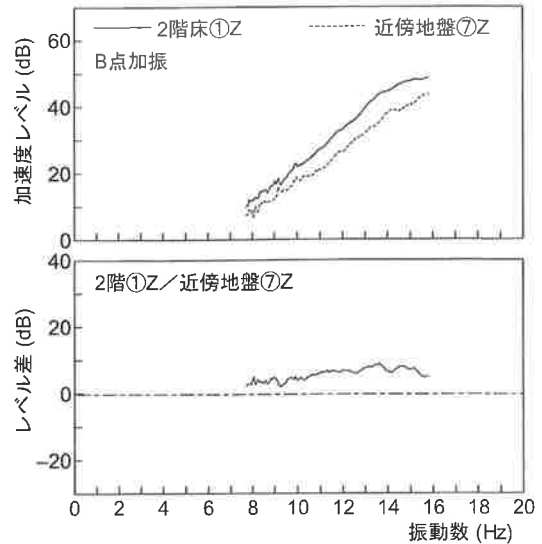


図-17 A住宅のz方向鉛直振動の伝達特性 (B点加振)

4. 加振装置と重機作業による振動伝達特性の比較

A住宅について、重機作業と加振装置による水平振動の伝達特性を比較した結果を図-18に示す。同図で、(a)図はB点加振の場合、(b)図はA点加振の場合を示したものである。まず、(a)図において、加振点Bに近い地盤測点⑦から2階測点①への振動伝達特性(上図)では、約10 Hz以下で加振装置による伝達特性が重機作業による伝達特性よりも小さいが、加振点Bより遠い地盤測点⑥から2階測点①への伝達特性(下図)では測点⑦の場合ほどには小さくない。一方、(b)図では、加振点Aに近い測点⑥から2階測点①への伝達特性(下図)では、10 Hz以下で加振装置による伝達特性が重機作業のそれより小さい。これに対して、加振点Aより遠い測点⑦と2階測点①への伝達特性(上図)では加振装置と重機作業による伝達特性はほぼ一致している。

これより、加振装置による地盤振動では、加振点に近い測点の地盤振動(B点加振では測点⑦, A点加振では測点⑥)が大きく評価されていることになる。加振装置の場合、B点加振では加振点に近い測点⑦のx方向, A点加振では加振点に近い測点⑥のy方向では、面内波動の表面波の生成状況が関係することが考えられる。一方、遠い方の測点では、半径方向と接線方向の波動の合成波動としてx方向成分とy方向成分が得られるため、重機作業による波動の伝搬状況

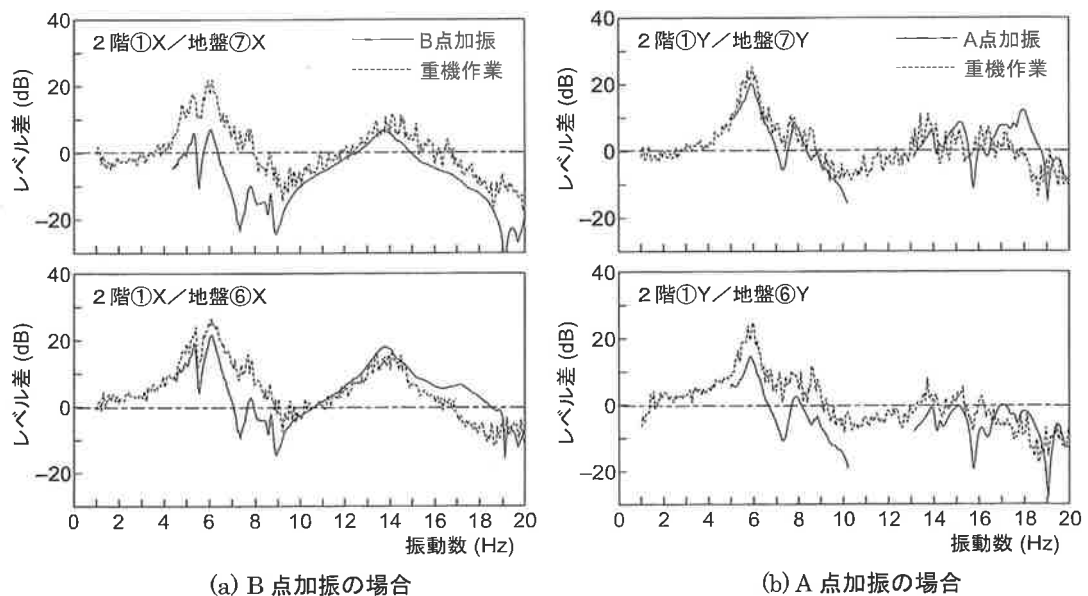


図-18 A住宅における水平振動の伝達特性の比較

と類似の状態になっているものと見なされる。

約 10Hz より高い周波数域については、加振装置による伝達特性と重機作業による伝達特性に大きな差はない。強いで見れば、加振点に近い測点から 2 階床測点への伝達特性は重機作業のそれより少し小さく、遠い測点から 2 階床測点への伝達特性では大きくなるような傾向が窺われる。

5. 加振装置と重機作業による 2 測点の地盤振動の比較

図-19 は、A 住宅において、地盤の測点⑥と測点⑦における地盤振動の加速度レベルを比較したものである。加振装置による地盤振動では、加振点に近い測点の加速度レベル（実線）と遠い測点の加速度レベル（点線）の違いは、前述のように波動の生成状況が違うことと、距離による減衰が重畳しているものと考えられる。また、B 点加振による測点⑦から測点⑥への減衰が、A 点加振による測点⑥から測点⑦への減衰よりも大きくなっている。図-6 において、加振点 B と測点⑥、加振点 A と測点⑦の見通しから、加振点と測点の位置関係による回折減衰が関係することも考えられるが、本報では分析できていない。

両者の地盤振動の減衰の違いが、図-18(a)の上図、図-18(b)の下図の振動伝達特性の違いに反映されている。また、図-18(b)の下図の方が図-18(a)の上図より、加振装置と重機作業による振動伝達特性の差が小さいが、これは上述の地盤振動の減衰の差によるものである。

一方、重機作業の場合、 x 方向の加速度レベルでは少し減衰が生じているが、 y 方向の加速度レベルではほとんど減衰が生じていない。振動測定時の重機の作業位置を確定できていないため速断はできないが、両測点間の距離が加振源から測点までの距離に比して相対的に小さく、加速度レベルの変化が少なかったものと推測される。

6. 加振装置と重機作業による 2 階床各点の振動の比較

加振装置による地盤振動が家屋へ入射する状態は、一般加振源からの地盤振動が家屋へ入射する状況と異なるのではないかとすることが、標準加振装置の開発当初からの課題である。これに対する検討としては十分ではないが、加振装置による 2 階床各点の振動と重機作業による 2 階床各点の加速度レベルを比較してみる。なお、2 階床には 5 測点を設けており、その配置の概略は図-5 と図-6 に示した通りである。

M 住宅については、一般加振源による振動の測定データが得られていないため、加振装置による 2 階床各点の加速度

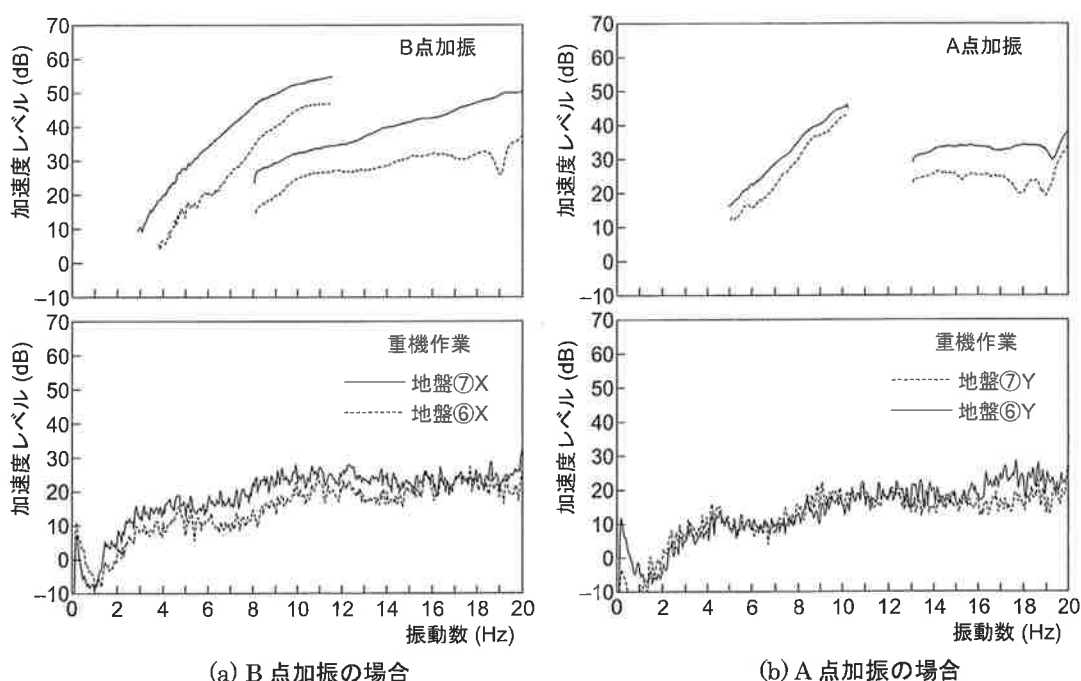


図-19 A 住宅における地盤の水平振動の比較

レベルの比較を図-20に示す。同図(a)は、測点⑤が他の測点と離れているため、これを除いた測点①～④の加速度レベルを比較したものである。水平振動の高い振動数成分で多少の差異が生じているが、振幅特性としては2階床の各測点は同じような振動となっている。一方、鉛直振動についてはほとんど差異がない。

図-20(b)は、測点①を測点①～④の代表点として、離れた測点⑤の加速度レベルと比較したものである。水平振動では、6Hzくらいまでは同程度の加速度レベルとなっているが、振動数が高くなるほど差異が生じており、鉛直振動も同様の様相を呈している。これより、振動数が高くなれば2階床は全体的な振動ではなく局所的な挙動を示すようになっていくものと考えられる。

A住宅については、重機作業による測定結果が得られていることから、加振装置による2階床各点の加速度レベルを重機作業による加速度レベルと比較して図-21～図-23に示す。これらの図の(a)図は、測点⑤が他の測点と離れているた

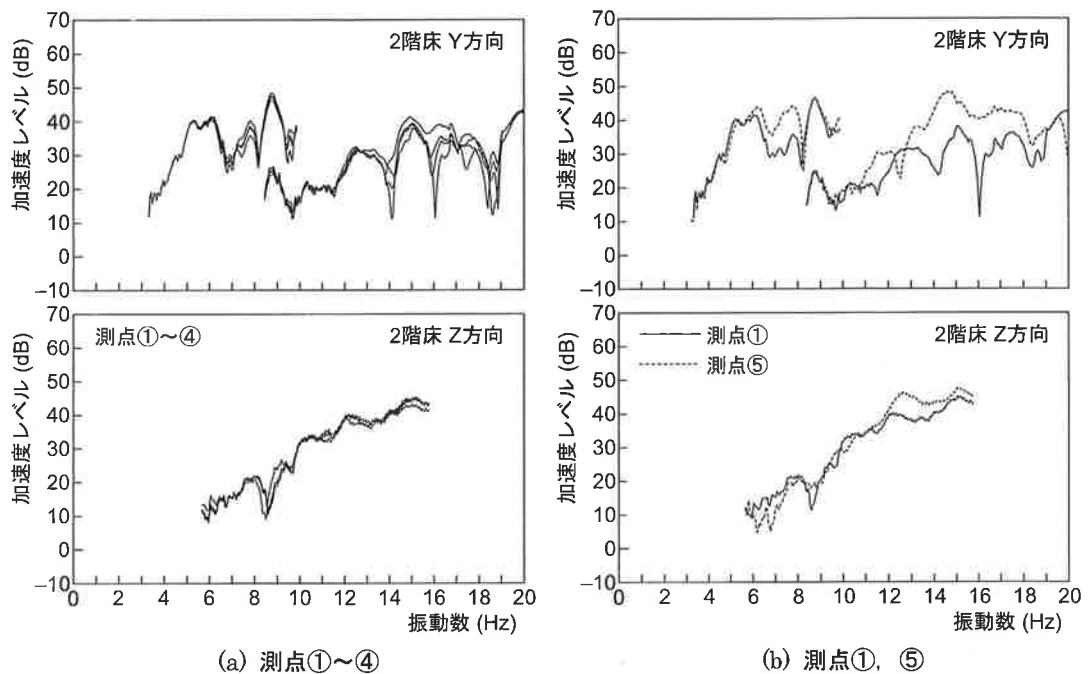


図-20 M住宅における2階床の水平振動の比較

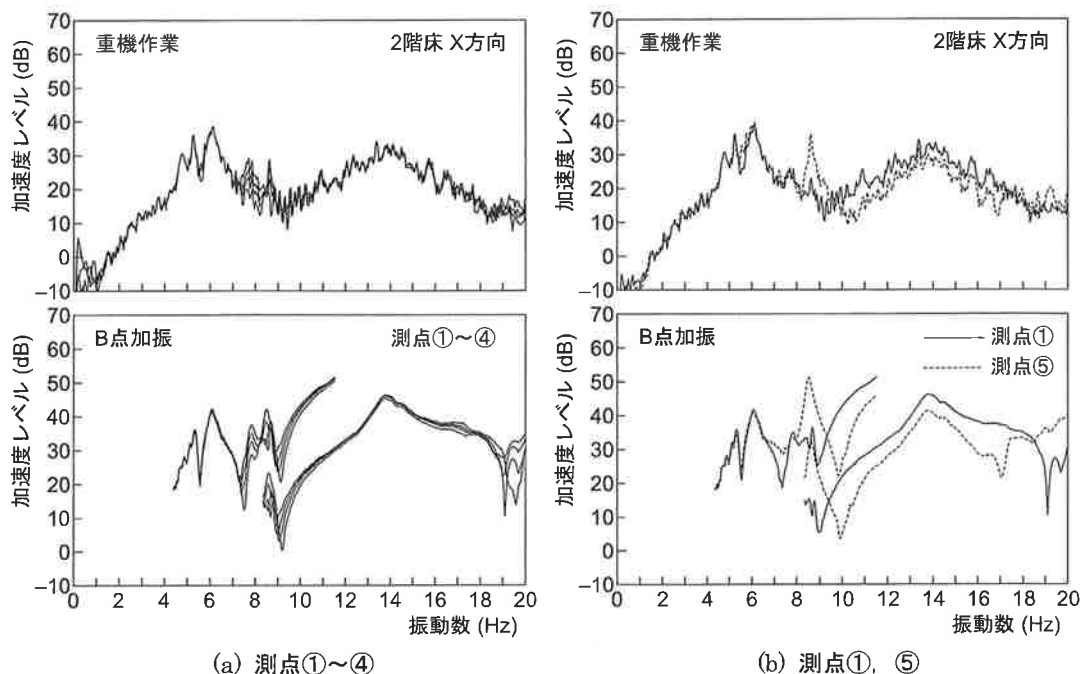


図-21 A住宅における2階床のx方向水平振動の比較(重機作業とB点加振)

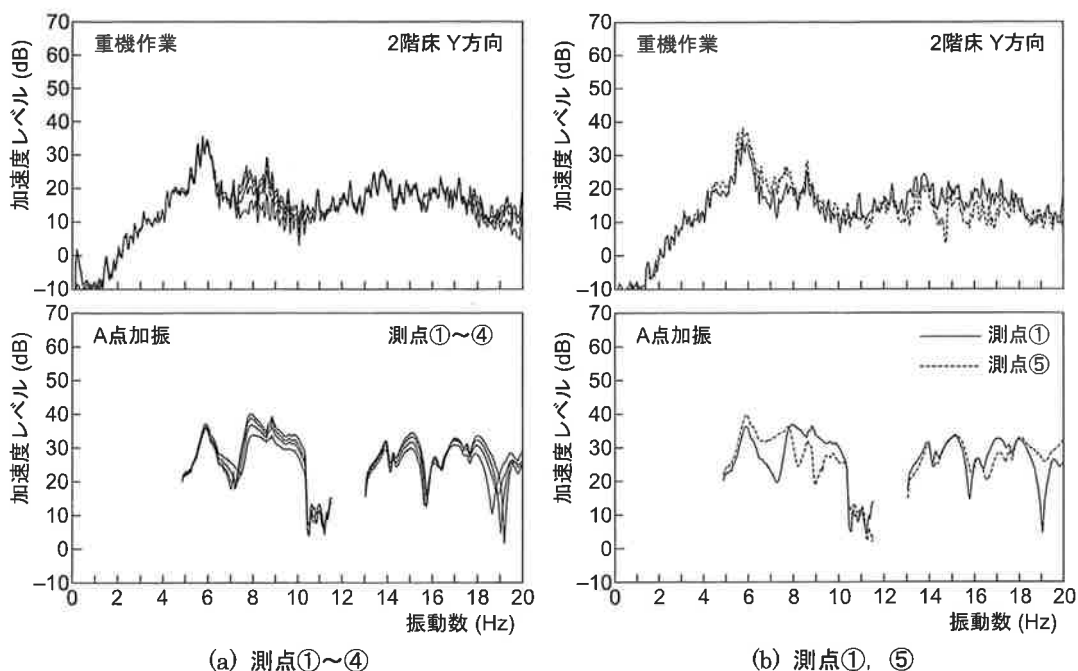


図-22 A住宅における2階床のy方向水平振動の比較（重機作業とA点加振）

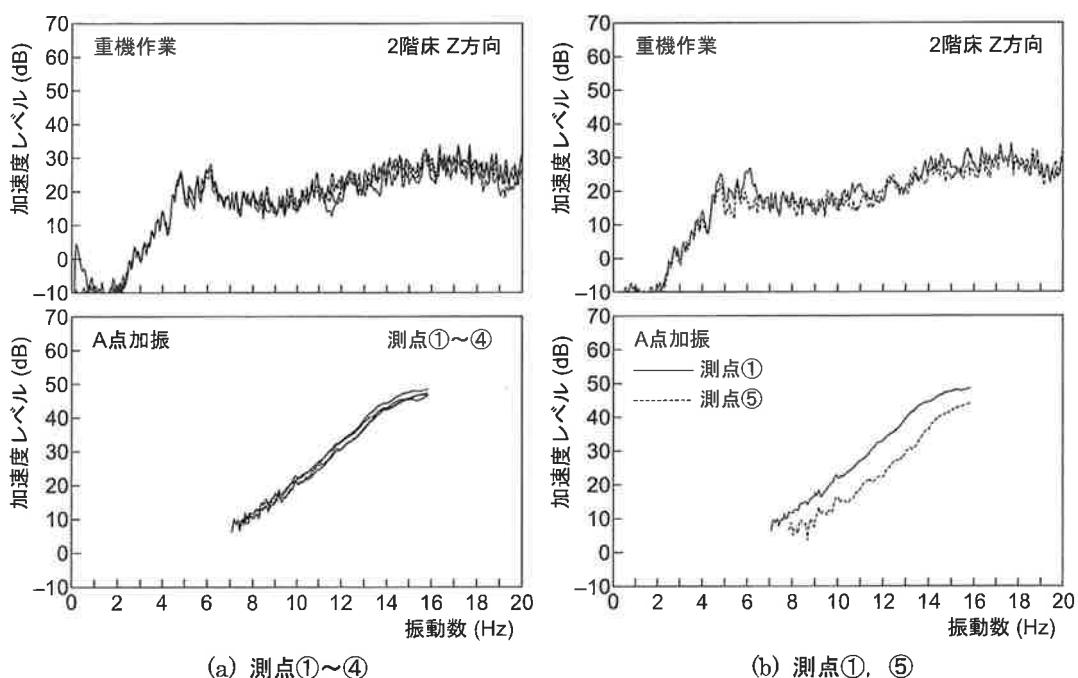


図-23 A住宅における2階床のz方向鉛直振動の比較（重機作業とA点加振）

め、これを除いた測点①～④の加速度レベルを比較したものである。また、(b)図は、測点①を代表点として、測点⑤の加速度レベルと比較したものである。

図-21と図-22の(a)図から、測点①～④の水平振動には多少差異が認められるが、加振装置による振動も重機作業による振動も概ね同じ振動状態と見なせる。図-21と図-22の(b)図から、測点①と⑤の水平振動の約6Hz以上では、加振装置による振動と重機作業による振動は、差異の程度はあるものの、同じような傾向の差異を示している。

水平振動については、M住宅の場合と同様に、振動数が高くなるほど2階床は全体的な振動ではなく局所的な挙動を示すようになってきているものと考えられる。しかし、その差は重機作業による振動でも表れており、標準加振装置の開発当初からの課題であった「加振装置による地盤振動が家屋へ入射する状態は、一般加振源からの振動が家屋へ入射する状況と異なるのではないか」ということに対しては、同様の入射状況であると考えても良い可能性を示唆している。

一方、図-23の加振装置による鉛直振動については、測点①～④は加振振動数に関わらずほぼ同一の振動になっており、離れた測点⑤は加振振動数に関わらず測点①～④の振動と差を生じている。これに対して、重機作業による鉛直振動では、離れた測点も含めて差が生じていない。これは、加振装置による鉛直振動の場合には、加振点と家屋の離隔距離が小さい場合、地盤から家屋への入射波動の局所性が生じる可能性を示唆している。

7. おわりに

筆者らは、研究成果を参考文献10)～16)に公表しているように、平成20年度から平成23年度にかけて、統一的に、かつ再現性のある方法で地盤から家屋内への振動伝達特性を把握することを目指して、環境振動調査用の標準加振装置の開発を行ってきた。研究期間内においては、ハード面から起振器の改良、ソフト面から振動データ処理の改善に取り組んできた。本報は、これらの取り組みの成果を踏まえて、5棟の住宅に対して実施した振動調査結果を取りまとめたものである。5棟の住宅に対する地盤から家屋2階床への振動伝達特性を比較するとともに、2棟の住宅では2階床の多点測定結果により全体的な挙動を調べた。また、加振装置と重機作業による振動の比較を行い、振動源の違いが家屋の振動性状に与える影響を調べた。

得られた知見は、以下のようにまとめられる。

- 1) 重機作業と加振装置による振動伝達特性の比較から、家屋近傍地盤の測点が加振点に近い場合、地盤振動が大きく評価され、振動伝達特性を小さく見積もる可能性があることが分かった。
- 2) 重機作業と加振装置による2測点の地盤振動の比較から、加振装置の場合には2測点間の振動減衰が重機作業の場合よりも大きかった。これは、上記1)と関連している。
- 3) 加振装置による2階床の5測点の水平振動の比較から、6Hzくらいまでは家屋2階床は全体的な振動を示し、加振振動数が高くなれば局所的な挙動を示すようになってきているものと考えられる。
- 4) 鉛直振動については、加振装置と家屋の離隔距離が小さいことから、地盤から家屋への入射波動の局所性が生じている可能性が考えられる。

謝 辞

本報告は、環境省地球環境保全等試験研究費による「外部振動源による家屋内環境振動の人体感覚評価・予測に関する研究」の一部である。また、現地実験に関しては、日本ツーバイフォー建築協会の協力を得て実施した。記して、関係各位に謝意を表します。

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) 田中靖彦・富澤 稔・松村恒夫・小林俊雄：交通振動を受けるS造建物の環境振動予測手法，日本建築学会構造系論文集，第470号，pp.151～158，1995。
- 3) P. Clemente & D. Rinaldis：Protection of a monumental building against traffic-induced vibrations，*Soil Dynamics and Earthquake Engineering*，Vol.17，pp.289～296，1998。
- 4) 徳永法夫・西村 昂・日野泰雄：道路交通振動における2・3階家屋の動特性，土木計画学研究・講演集，21-2巻，pp.185～188，1998。
- 5) O. Hunaidi, W. Guan & J. Nicks：Building vibrations and dynamic pavement loads induced by transit buses，*Soil Dynamics and Earthquake Engineering*，Vol.19，pp.435～453，2000。
- 6) 平尾善裕・横島潤紀・国松 直：地盤振動に起因する家屋振動増幅特性の測定法および事例について，日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集，pp.49～52，2009。

- 7) 国松 直, 北村泰寿, 平尾善裕: 道路交通振動の時間変化に注目した伝搬特性の把握, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp.201~204, 2009.
- 8) 松岡達郎・白石英孝・毎熊輝記: 常時微動の伝達関数測定による低層住宅の動特性の決定, 物理探査, 第40巻, 第2号, pp.117~128, 1987.
- 9) 八木茂治・飛田 潤・福和伸夫: 常時微動計測による低層RC造建物の伝達関数に地盤・建物動的相互作用が及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.46B, pp.435~444, 2000.
- 10) 北村泰寿・国松 直・太田賢治・平尾善裕: 環境振動調査用の標準加振装置の試作と基本性能実験, 建設工学研究所論文報告集, 第51号(報告), pp.169~182, 2009.
- 11) 太田賢治・国松 直・北村泰寿・平尾善裕: 家屋の振動特性測定用標準加振源の開発, 物理探査学会第121回学術講演会論文集, pp.43~46, 2009.
- 12) 国松 直・北村泰寿・太田賢治・平尾善裕: 地盤から建物への振動伝達特性把握のための標準加振装置の開発, 日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集, pp.175~178, 2010.
- 13) 北村泰寿・国松 直・太田賢治・平尾善裕: 環境振動調査用の標準加振装置の実用化に向けての検討, 建設工学研究所論文報告集, 第52号(論文), pp.1~10, 2010.
- 14) 国松 直・北村泰寿・平尾善裕・太田賢治: 環境振動調査用加振装置の実用化に関する検討, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp.141~144, 2011.
- 15) 北村泰寿・国松 直・平尾善裕・太田賢治: 環境振動調査用の標準加振装置による振動伝達特性の把握, 建設工学研究所論文報告集, 第53号(論文), pp.1~9, 2011.
- 16) 国松 直・北村泰寿・平尾善裕・太田賢治: 環境振動調査用加振装置による地盤から建物への振動伝達特性の把握, 日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集, pp.107~110, 2012.
- 17) 国松 直・平尾善裕・北村泰寿: 振動数を考慮した家屋内振動の予測方法, 騒音制御, 36巻, 1号, pp.89~99, 2012.

著 者

- | | |
|-------|----------------------------|
| 北村 泰寿 | 所員, 工学博士, 構造力学, 振動工学 |
| 国松 直 | (独)産業技術総合研究所, 工学博士, 振動工学 |
| 平尾 善裕 | (財)小林理学研究所, 博士(工学), 振動工学 |
| 太田 賢治 | 応用地震計測(株), 技術士(応用理学), 物理探査 |