

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01518

研究課題名（和文）橋梁振動に起因する周辺地域の環境振動の評価法

研究課題名（英文）Evaluation of environmental vibration caused by traffic-induced bridge vibration

研究代表者

松本 泰尚（Matsumoto, Yasunao）

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：90322023

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、橋梁振動に起因する周辺居住環境における振動問題に関して、人間の心理的応答に基づく合理的な環境振動評価法の提案を目的とした。この環境振動の特徴である、交通状況に応じた過渡的な水平方向の振動が支配的となる場合や、それに鉛直方向の振動が複合する場合、さらには同時に騒音が発生する場合の心理的反応について、実験室内の加振装置を利用した振動実験により、評価法の構築につながる学術的な知見を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現行の環境振動評価法として代表的な振動規制法に基づく評価法は屋外での鉛直振動に対する評価法であり、また日本建築学会の居住性能評価規準は鉛直、水平方向別の評価法であって、上述のような特徴を持つ環境振動の評価への適用には課題がある。本研究で得られた成果は、人間の心理的反応に基づく合理的な環境振動の評価による問題の効率的解決や、現行の環境振動評価法の改定に資する知見となることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research was to propose a reasonable evaluation method for environmental vibration caused by vibration of bridges based on human subjective responses to vibration. Such vibration can have the following characteristics: dominant horizontal vibration which has a transient nature depending on traffic condition, horizontal vibration combined with vertical vibration, and vibration combined with audible noise correlated with the vibration. Subjective responses to vibrations with those characteristics were investigated in laboratory experiments and the experimental data that can be applicable to the development of evaluation methods were able to be accumulated.

研究分野：環境振動

キーワード：環境振動 振動評価 交通振動 橋梁振動

1. 研究開始当初の背景

道路や鉄道の橋梁や高架構造上を車両が走行することにより橋梁構造の振動が励起され、それが支持地盤さらには沿線建築物に伝達すると、周辺地域における環境振動問題が生じ得る。橋梁振動による環境振動問題は、加振源の橋梁と沿線建築物が近接している、戸建て住宅などの小規模建築物の固有振動数が橋梁の固有振動数に近いことにより共振により特に水平振動が増幅される、居住環境に関する要求が高い、といった条件がそろって日本が多い。環境振動問題は、沿線建築物の居住者や使用者の心理的な応答により顕在化することから、問題の防止や対策には、振動の物理量に基づき人間の心理的応答を適切に評価することが不可欠である。

日本の現行の環境振動評価法としては、振動規制法に基づく評価法と日本建築学会の居住性能評価指針(研究開始当初本研究による知見も考慮され、2018年に居住性能評価規準に改定)がある。振動規制法に基づく評価法は、屋外での鉛直振動に対する評価法であり、居住性能評価指針は、連続正弦振動に対する知見に基づく鉛直、水平方向別の評価法である。一方、橋梁振動に起因する周辺建物での環境振動の特徴としては、建物により水平振動が増幅されて鉛直振動と水平振動が同程度の大きさとなったり水平振動が卓越したりすること、交通状況に応じた過渡的、非定常的な振動が生じること、振動と関連する騒音が生じている場合が多いことが挙げられる。上述した現行の環境振動評価法は、振動がこれらの特徴を持つ場合をカバーできておらず、関連する学術的知見も不十分であった。

2. 研究の目的

本研究では、上述のような特徴を考慮した環境振動の評価法の構築に資する知見を得ることを目的とした。具体的には、

- (a) 過渡的な水平振動に対する心理的反応
- (b) 同時に生じる水平振動と鉛直振動に対する心理的反応
- (c) 振動とそれに関連する騒音が同時に生じる際の心理的反応

を対象に、実際の居住環境での振動や騒音の特性を考慮して設定した条件に対する知見を蓄積し、それに基づく評価法の提案につなげる。

3. 研究の方法

上述の(a)～(c)に関して、実験室内の加振装置を用いた実験により検討した。(a)、(c)に関する実験については埼玉大学、(b)に関する実験については石川工業高等専門学校においてそれぞれ実施した。埼玉大学の加振装置は鉛直・水平それぞれ一方向のみの加振が可能な装置であり、0.8m×0.8mの広さの加振台上に固定したアルミニウム製の椅子に実験参加者1名を着座させて実験を行った。(c)に関する実験では、ヘッドフォンを用いて騒音を実験参加者に提示した。石川高専の加振装置は、鉛直・水平2軸同時加振が可能な装置であり、0.9m×0.9mの広さの加振台上に実験参加者1名を直接着座させて実験を実施した。

実験で用いた振動および騒音の刺激は、いずれも実際の居住環境において道路交通あるいは鉄道に起因するものを測定した記録に基づいており、測定した加速度あるいは音圧の時刻歴を振幅調整して実験に用いた。図1に加速度時系列の例を示す。ただし、比較のため、一部の実験では正弦振動も用いた。振幅調整時には、実際に環境振動問題が生じた居住環境を想定して調整範囲を設定した。刺激の継続時間は、実験に要する時間とその実験内で検討する刺激の条件数の関係を考慮して、最長で40秒程度とした。

(a)～(c)に関する実験は、それぞれ複数回実施した。各検討項目内での実験間においては、入力刺激の条件および実験参加者が異なる。実験参加者は埼玉大学あるいは石川高専の学生とした。表1に各実験の実験参加者数を示す。

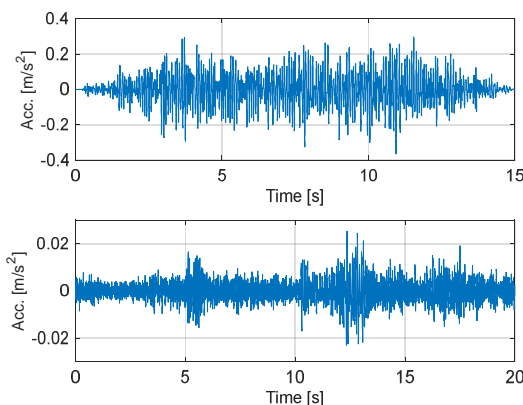


図1 加速度時系列の例
(上：鉄道，下：道路交通)

表1 各実験の参加者

項目	実験	参加者	男性	女性
(a)	(a)-1	20	10	10
	(a)-2	25	14	11
(b)	(b)-1	20	10	10
	(b)-2	30	15	15
(c)	(c)-1	20	10	10
	(c)-2	12	12	0
	(c)-3	20	14	6

心理的反応の測定には心理学的尺度を用いることになるので、実験に先立ち居住空間における環境振動の評価に適用できる尺度に関する検討を行った。インターネットによる全国的なアンケート調査を実施し、850名程度の調査参加者から得られた有効回答に基づき、「振動の大きさ」、「気になり具合」、「不快感」を対象とした尺度を構成した。得られた尺度を上述の実験において用いた。

4. 研究成果

(1) 環境振動評価のための心理学的尺度

表2にアンケート調査結果に基づき構成した心理的反応の評定尺度を示す。本研究における以降の実験では、これらの評定尺度を用いた。各入力刺激提示後に、これらの評定尺度により心理的反応を測定した。

表2 心理的反応の評定尺度

大きさ	気になり具合	不快感
非常に大きく感じる	非常に気になる	非常に不快である
たいへん大きく感じる	たいへん気になる	たいへん不快である
けっこう大きく感じる	けっこう気になる	けっこう不快である
いくらか大きく感じる	比較的気になる	比較的不快である
わずかに大きく感じる	いくらか気になる	いくらか不快である
それほど感じない	あまり気にならない	あまり不快ではない
まったく感じない	まったく気にならない	まったく不快ではない

(2) 過渡的な水平振動に対する心理的反応

図2は、実験(a)-2で得られた過渡的な水平振動に対する心理的反応の測定値と振動の評価値との関係の例を示している。図中のデータは、異なる入力刺激に対する気になり具合の評価を全実験参加者の平均値で示している。縦軸の数値は、表2の各カテゴリに付された数値に対応する。横軸の数値は、現行の環境振動評価法の一つである国際規格ISO 2631-1で規定されているVibration Dose Value (VDV)であり、4乗した周波数重み付け加速度の累積値である。周波数重み付けは、人間の心理的反応の周波数依存性を表す。図2中には、評価値と心理的反応の順序関係の相関を示すスピアマンの順位相関係数(ρ)、直接的な関係の強さを確認示すピアソンの積率相関係数(r)をあわせて示している。ばらつきは見られるものの、VDVの増加とともに心理的反応が強くなる傾向が認められ、相関係数も高いことが確認できる。

図2に示したような検討を異なる振動評価値についても行った。図3は、それらの結果をスピアマンの順位相関係数を用いて比較している。気になり具合(Concern)や不快感(Discomfort)については、振動の継続時間を考慮した評価値の方が相関係数は高い傾向が見られることが、2004年版の居住性能評価指針(AIJES 2004)と2018年版の居住性能評価規準(AIJES 2018)との比較や、振動規制法に基づく振動レベル最大値(L_{Vmax})とHVLTL振動レベル最大値に振動継続時間の影響を加味した評価値)との比較から読み取れる。一方、振動の大きさ(Magnitude)の評価に対しては、振動継続時間の影響は小さいことが図3よりわかる。気になり具合や不快感の評価については、他の評価値との差は小さいもののVDVが最も相関係数が高い結果となった。振動の大きさの評価については、MTVV(加速度の移動実効値の最大値)、VDV、 L_{Vmax} 、HVLTLが同程度の相関係数を示した。

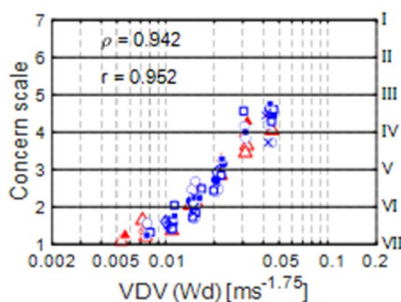


図2 心理的反応と評価値の関係

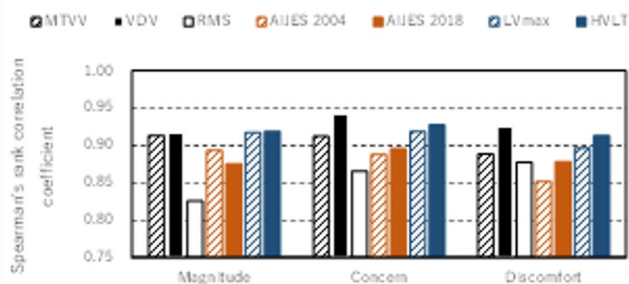


図3 各評価値と心理的応答との相関

(3) 水平振動と鉛直振動の同時曝露に対する心理的反応

図4は、実験(b)-1で得られた実験結果の一例を示している。同実験では、実測された振動の

振幅を鉛直，水平振動それぞれ4段階のレベルに調整して実験に用いており，図の横軸は各レベルに対応する．図の縦軸は，気になり具合の評価結果であり，全実験参加者の中央値で示している．「鉛直」，「水平」はそれぞれ一軸提示に対する結果，「複合」は同レベルの鉛直，水平振動の同時提示に対する結果である．図より，同レベルの鉛直振動と水平振動が同程度の評価結果となっているレベル2とレベル3において，それらを複合した際に一軸の際に比べて気になり具合が増加したことがわかる．他の条件での結果においても，このように一軸では同程度の心理的反応への影響を与える鉛直振動と水平振動を同時提示した場合に，心理的反応への加算的な影響が生じる傾向が見られた．一方で，鉛直，水平いずれかの振動の影響が他方より強い場合には，同時提示した際の心理的反応は，支配的な方向の心理的反応と同等になる傾向も見られた．

このような鉛直振動と水平振動の複合による心理的反応への加算的な影響の評価に関連し，振動レベルの最大値 L_{vmax} と Vibration Dose Value, VDV ，を対象に，次式の方法で2方向の振動の評価値を合成する評価法の妥当性について検討した．

$$L_{vmax,cmb} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_{vmax,h}}{10}} + 10^{\frac{L_{vmax,v}}{10}} \right) \quad (1)$$

$$VDV_{cmb} = (VDV_h^4 + VDV_v^4)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

添え字 cmb は2軸の合成，h，v はそれぞれ水平と鉛直を表す．図5は， L_{vmax} と VDV それぞれによる1方向評価および2方向評価と各心理的応答との間で算出したスピアマンの順位相関係数を示している．いずれの場合についても相関係数は高く，各評価値と各心理的応答の対応は良いと言える．その中で，いずれの心理的応答に対しても，2方向評価（図中の $L_{vmax,cmb}$ および VDV_{cmb} ）の方が1方向評価（ L_{vmax} および VDV ）より，わずかながら相関係数は高い結果となった．また，妨害感以外は， VDV による評価の方が L_{vmax} による評価より，わずかに高い相関係数となった．

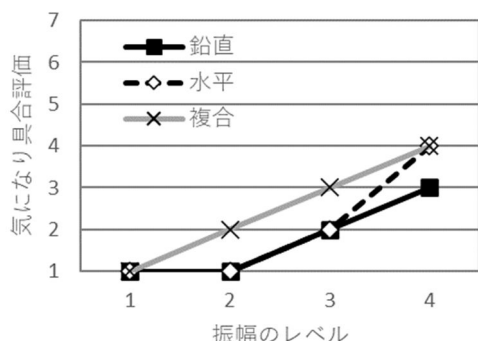


図4 鉛直，水平および同レベルの2軸複合振動に対する心理的反応の例

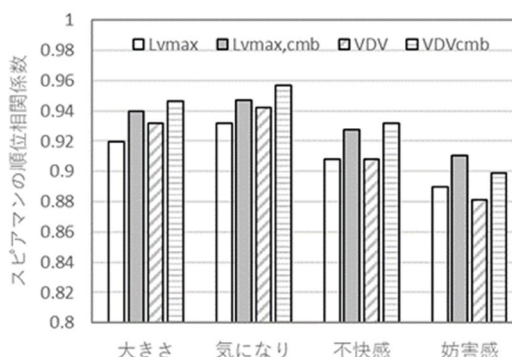


図5 各評価値と心理的応答との相関

(4) 振動と騒音の同時曝露に対する心理的反応

図6は，実験(c)-1～(c)-3で得られた結果を示しており，それぞれの実験での振動のみを提示した際の気になり具合の反応を，居住性能評価規準による評価値(AIJ)と比較している．縦軸は，気になり具合の全実験参加者の平均値である．図には，気になり具合の評価値を従属変数，居住性能評価規準の評価値 AIJ の常用対数を説明変数として線形回帰した結果も示しており，その回帰式は，

$$\psi = 2.84 \log_{10} AIJ - 0.4623 \quad (3)$$

で与えられる．決定係数は $R^2 = 0.885$ であった．

同様の検討を騒音についても行い，気になり具合の評価値を従属変数，単発騒音曝露レベル L_{EA} を説明変数とした線形回帰の結果は，

$$\psi = 0.125 L_{EA} - 5.71 \quad (4)$$

であった（決定係数 $R^2 = 0.849$ ）．

これらの式(3)，(4)を等値すると，次式が得られる．

$$L_{EA} = 22.7 \log_{10} AIJ + 49.4 \quad (5)$$

この式は，気になり具合の測定結果に基づく，振動と騒音の主観的な等価関係を表すものと解釈できる．図7には気になり具合に対して得られた式(5)に加え，不快感，読書に対する妨害感に対して同様の手順で得られた結果を示している．図より，振動振幅が小さい範囲で比較的差が大きくなっているものの，測定対象とした心理的反応の種類によらず，振動と騒音の等価関

係はほぼ同等であったことが分かる。振動の評価値 A_{IJ} が2倍になることと等価な単発騒音曝露レベル L_{EA} の増加量は、気になり具合で6.8 dB, 不快感で6.1dB, 妨害感で6.3dBとなる結果であった。

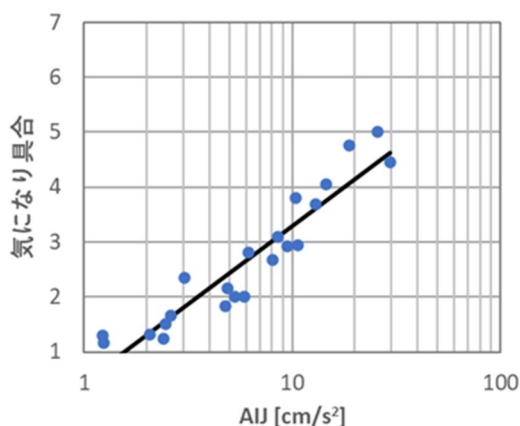


図6 振動のみの提示に対する気になり具合の測定結果と居住性能評価規準の評価値の関係

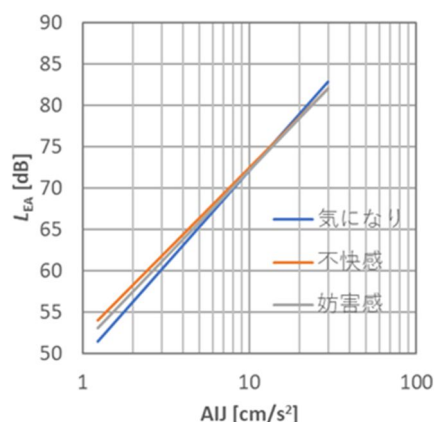


図7 振動と騒音の主観的等価関係

<引用文献>

林健太郎, 松本泰尚, 東田豊彦 (2019) アンケート調査に基づく建物内の振動に対する心理的反応の評定尺度構成, 日本建築学会環境系論文集, 84, 757, 225-234, DOI <http://doi.org/10.3130/aije.84.225>.

林健太郎, 松本泰尚, 横島潤紀, 東田豊彦 (2022) 心理的反応に基づく水平振動の評価方法における振動継続時間の影響に関する検討, 日本建築学会環境系論文集, 87, 801 (掲載決定)

松本泰尚, 池田佑希奈, 土屋亜美, 森原崇, 横島潤紀, 林健太郎 (2020) 鉛直 - 水平2軸交通振動に対する人の心理的反応に関する基礎的検討, 日本騒音制御工学会2020年春季研究発表会講演論文集, 18-19.

松本泰尚, 林健太郎, 森原崇, 横島潤紀 (2020) 鉛直 - 水平2軸交通振動に対する心理的応答評価に関する一検討, 2020年度日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集, 40223, 455-456.

松本泰尚, 森原崇, 横島潤紀, 林健太郎 (2021) 鉛直 - 水平2軸交通振動に対する心理的応答評価に関する検討例, 音響技術, No.195, 26-31.

松本泰尚, 小枝希, 林健太郎, 森原崇, 横島潤紀 (2020) 鉄道による振動と騒音の同時暴露に対する心理的反応に関する一検討, 日本騒音制御工学会2020年秋季研究発表会講演論文集, 249-250

松本泰尚, 森原崇, 横島潤紀, 林健太郎 (2021) 交通振動・騒音同時暴露に対する心理的応答評価に関する一検討, 2021年度日本建築学会大会(東海)学術講演梗概集, 40209, 439-440

松本泰尚, 森原崇, 横島潤紀, 林健太郎 (2022) 交通による振動と騒音の主観的等価に関する一検討, 2022年度日本建築学会大会(北海道)学術講演会(発表予定)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 林健太郎, 松本泰尚, 東田豊彦	4. 巻 84
2. 論文標題 アンケート調査に基づく建物内の振動に対する心理的反応の評定尺度構成	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会環境系論文集	6. 最初と最後の頁 225-234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.84.225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 林健太郎, 松本泰尚, 横島潤紀, 東田豊彦	4. 巻 87
2. 論文標題 心理的反応に基づく水平振動の評価方法における振動継続時間の影響に関する検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会環境系論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 松本泰尚, 森原崇, 横島潤紀, 林健太郎	4. 巻 195
2. 論文標題 鉛直 - 水平 2 軸交通振動に対する心理的応答評価に関する検討例	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 音響技術	6. 最初と最後の頁 26-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Hayashi, K., Matsumoto, Y., Higashida, T.
2. 発表標題 Experimental Investigation of Evaluation Method of Horizontal Vibration in Building Caused by External Vibration Sources
3. 学会等名 23rd International Congress on Acoustics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Matsumoto, Y., Yokoshima, S., Hayashi, K.
2. 発表標題 Case examples of the measurement of vibration and annoyance response in residential buildings beside roads and railways
3. 学会等名 23rd International Congress on Acoustics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林健太郎, 松本泰尚, 東田豊彦, 竹廣凌河
2. 発表標題 建物水平振動に対する居住性能の評定尺度に関する実験的検討
3. 学会等名 2019年度日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林健太郎, 松本泰尚, 東田豊彦
2. 発表標題 建物内の振動に対する心理的反応の尺度構成に関する検討
3. 学会等名 日本騒音制御工学会平成30年秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本泰尚, 池田佑希奈, 土屋亜美, 森原崇, 横島潤紀, 林健太郎
2. 発表標題 鉛直 - 水平 2 軸交通振動に対する人の心理的反応に関する基礎的検討
3. 学会等名 日本騒音制御工学会2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本泰尚, 林健太郎, 森原崇, 横島潤紀
2. 発表標題 鉛直 - 水平2軸交通振動に対する心理的応答評価に関する一検討
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本泰尚, 森原崇, 横島潤紀, 林健太郎
2. 発表標題 交通振動・騒音同時暴露に対する心理的応答評価に関する一検討
3. 学会等名 2021年度日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本泰尚, 森原崇, 横島潤紀, 林健太郎
2. 発表標題 交通による振動と騒音の主観的等価に関する一検討
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasunao Matsumoto, Takashi Morihara, Shigenori Yokoshima, Kentaro Hayashi
2. 発表標題 An experimental investigation of the evaluation of subjective response to simultaneous vertical and horizontal building vibrations induced by traffic
3. 学会等名 24th International Congress on Acoustics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nguyen Thanh Tung, Yasunao Matsumoto, Takashi Morihara, Shigenori Yokoshima, Kentaro Hayashi
2. 発表標題 An experimental investigation of subjective responses to simultaneous vibration and noise in buildings induced by traffic
3. 学会等名 24th International Congress on Acoustics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	森原 崇 (Morihara Takashi) (10413767)	石川工業高等専門学校・建築学科・准教授 (53301)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	横島 潤紀 (Yokoshima Shigenori)	神奈川県環境科学センター	
研究 協力者	林 健太郎 (Hayashi Kentaro)	株式会社ベネック振動音響研究所	
研究 協力者	東田 豊彦 (Higashida Toyohiko)	積水ハウス株式会社	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------