

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06622

研究課題名(和文)車両と遊戯施設の水平振動を対象とした振動感覚に及ぼす音の影響に関する研究

研究課題名(英文)Effect of sound on vibration sensation for horizontal vibration generated in vehicle and amusement facility

研究代表者

松田 礼 (MATSUDA, Hiroshi)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：30469580

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、水平振動の振動感覚に及ぼす音の影響を心理生理反応から測定した実験的研究である。実験で用いた刺激は、水平振動(左右・前後方向)による振動刺激、雑音(ホワイトノイズ)と音楽による音刺激である。水平振動と音を同等の大きさに感じる等価騒音レベルは振動レベルに比例することが明らかになった。心理反応測定の結果から、振動の感覚的強度は振動のみの条件と比較して、音を加えると僅かに減少する傾向がみられ、振動の不快感は音刺激の音量が大きくなると増加する傾向であった。生理反応測定の結果から、振動と音を同等の大きさに感じる音量よりも小さい音量を振動と同時に暴露すると副交感神経系が優位に働く傾向がみられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の特色は、現時点で適切な評価尺度がない振動と音が同時に存在する複合環境を対象として、振動感覚に及ぼす音の影響を心理反応と生理反応の両面から検証したことである。本研究の成果は、振動のみで評価されていた従来の振動環境評価に対して音の影響を加えた新たな基盤構築として重要な学術的意義をもつ。また、走行中の自動車や鉄道における車両内やローラーコースター等の遊戯施設で使用する音を選定するために活用すれば、振動乗り心地やスリル感の向上に寄与できると考えられる。さらに、振動音響療法等の医用工学の分野に応用できれば、客観的なリラクゼーション効果の評価が可能になると予想される。

研究成果の概要(英文)：This study is an experimental research to investigate the effect of sound on vibration sensation for horizontal vibration by psychophysiological response measurement. The stimuli used in the experiment are vibration stimuli: horizontal and anteroposterior directions, and sound stimuli: noise (white noise) and music. We showed that the equivalent continuous sound pressure level which feel horizontal vibration and sound to the same magnitude, that is, the equal sensation sound volume is proportional to the vibration level. From the results of psychological response measurement, the vibration sensation strength tends to decrease slightly with addition of sound compared to the vibration only condition. Uncomfortable sensation of vibration tends to increase as the sound volume increases. The results of physiological responses showed that parasympathetic nervous tended to hyperactivity when the vibration and the sound less than the equal sensation sound volume were exposed simultaneously.

研究分野：人間工学

キーワード：振動感覚 水平振動 心理生理反応

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人間が機械的振動を受けることで知覚する感覚を振動感覚といい、一般的には人間が感じる振動の強さや不快感等を指す。人間が振動を知覚する振動環境の例として、自動車や鉄道等の車両や遊戯施設が挙げられるが、これらの乗員は振動と同時に音も存在する環境に置かれている。乗物を含む振動環境の評価尺度には、ISO 2631 に規定される人体の全身振動暴露基準があるが、この基準では振動に音が複合された場合については言及していない。

人間の振動に対する評価において、音の影響を考慮する必要があることは従来から指摘されている。騒音暴露下における全身振動の感覚閾値について心理実験により検証し、騒音レベルの上昇による振動感覚閾値の上昇傾向を言及している研究(引用文献)や鉛直振動と実際の道路騒音を同時に暴露する実験室実験により、不快感が増強される可能性を示唆した研究(引用文献)等の例はあるが、これらは工場や高速道路、鉄道路線周辺における住宅室内の振動と騒音を想定した研究である。車両や遊戯施設の乗員を対象とした研究例として、高速列車から発生する 30Hz 前後の高周波振動に付随して生ずる車内騒音が振動乗り心地評価に及ぼす影響について検証した研究(引用文献)、遊戯施設の振動や騒音から受けるスリル感や快適感を実機で測定し、心理生理反応との関連を検討した研究(引用文献)が挙げられるが、振動感覚に及ぼす音の影響を明らかにするには至っていない。また、振動環境評価に関する研究は、ほとんどが鉛直振動を対象とした実験であり、水平振動と音の複合影響に関する研究例は極めて少なく、人体に及ぼす影響も不明な点が多いのが現状である。

2. 研究の目的

乗物の振動環境評価は、振動のみに着目して実施されており、音の影響は考慮されていない。本研究では、車両や遊戯施設等の乗物を想定した水平方向の振動を対象として、人体に振動と音を同時に暴露した時の振動感覚を調査する。本研究の目的は、振動感覚に音が与える影響を心理生理反応の両面から調べ、振動と音を構成する物理量との関係を明らかにすることによって、振動感覚に及ぼす音の影響を定量的に評価する方法を検討することである。

3. 研究の方法

(1) 実験概要と実験環境

本研究では、乗物の振動環境を想定した全身振動を対象として、人間が振動刺激を受けた時に感じる振動の強さや不快感等の振動感覚に音刺激が与える影響を実験的に検討した。実験は質問紙調査による心理学的手法と心電図等の生体情報測定による生理学的手法を用いて実施し、被験者に振動刺激と音刺激を同時に暴露した時の心理生理反応を測定した。

本研究で対象とする振動刺激は、座位状態で臀部からの入力による水平方向(左右・前後)の全身振動である。これは、乗物の客室等において一般的な姿勢である座位状態を想定しているためである。振動刺激は永久磁石方式の振動試験装置(サンエス、SSV-125T)上に取り付けた座椅子に被験者を着座させて臀部より暴露し、音刺激はヘッドホン(オーディオテクニカ、ATH-700)から暴露した。座椅子には足置きステップが設置されており、座面はクッション性のない板材である。座面の背もたれ角は座面に対し 110°であるが、被験者には質問紙記入と安静時間以外は使用しないよう指示した。振動刺激のみを暴露する場合は、暗騒音の影響を低減するため、被験者にイヤーマフ(MSA, Sound Control Apex 30™)を装着させた(Noise Reduction Rating (NRR): 30 dB)。実験時の暗騒音(L_A)は 45 dB 以下である。被験者は健康な大学生延べ 15 名(年齢 21 ~ 23 歳)で構成されているが、実験条件により被験者数に差がある。また、被験者には実験の目的、内容、手順、及び個人情報に対する配慮について適切な説明を行い、これらの内容を十分に理解してもらった上でインフォームドコンセントを得ている。

(2) 音量の決定実験

研究代表者らは、これまでの研究成果から振動条件によって振動感覚に影響を与える音量が異なる可能性を示唆している。そこで、振動条件によって振動と音を同等の大きさに感じる等感覚点があると仮定し、振動周波数と振動加速度レベルが異なる複数の振動条件毎に音を同時暴露する実験を行った。この実験結果から音量 - 振動等感覚線を作成し、これを基準として、後述する振動と音の同時暴露実験における振動条件毎の音量を決定する。

被験者は振動試験装置の上に着座させ、表 1 に示す水平方向の全身振動を臀部から暴露し、音刺激を同時に暴露した。本研究では、乗物から発生する水平振動を想定し、振動周波数は 1 ~ 8 Hz の 4 条件、振動の大きさは振動加速度レベル(VAL, 基準値: 10^{-5} m/s^2) が 80 ~ 100 dB の 3 条件とした。一部の解析には JIS C 1510 の周波数補正值で振動加速度レベルを補正した振動レベル(VL)を用いた。実験に用いた音刺激は表 2 に示す音楽、雑音、変動雑音の 3 種類である。音楽は事前に実施した複数音楽のテンポ測定結果から標準偏差が小さく、標準的なテンポである「展覧会の絵 - プロムナード -」を用いた(テンポ 90 BPM, 速度標語は Andante に対応)。雑音は心理反応測定を行う上で意味のない音刺激としてホワイトノイズ(WN, 全ての周波数のパワースペクトルが一定の音)を採用し、変動雑音は WN の騒音レベルを音楽のテンポ(90 BPM)に合わせて時間変動させたものを採用した。

振動と音を同等の大きさに感じる等価騒音レベル($L_{Aeq,30s}$)は上昇系列と下降系列の 2 方向からの調整法により測定した。実験に用いる音はヘッドホンより両耳に直接暴露し、被験者に

表1 振動刺激条件

振動方向	振動周波数	VAL (VL) dB		
左右 ・ 前後	1 Hz	80 (83)	90 (93)	100 (103)
	2 Hz	80 (82)	90 (92)	100 (102)
	4 Hz	80 (77)	90 (87)	100 (97)
	8 Hz	80 (71)	90 (81)	100 (91)

表2 音刺激条件

音の種類	テンポ
音楽：展覧会の絵 - プロムナード -	90 BPM
雑音：ホワイトノイズ (WN)	
変動雑音：変動 WN	90 BPM

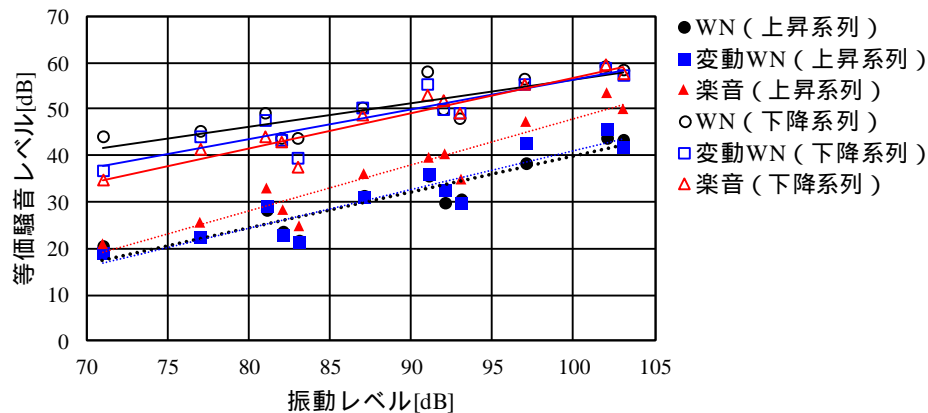


図1 音量 - 振動等感覚線 (左右振動)

はアンプのリモコンによって音量を調整させた。実験開始音量は、下降系列は 70 dB, 上昇系列は 0 dB (無音状態) とした。実験のタイムテーブルは調整時間を最大 180 秒とし、被験者が調整の終了を宣言した時点で刺激暴露を終了し、休憩 60 秒を 1 条件として繰り返し行った。

図1に左右振動における音量 - 振動等感覚線を示す。図1によると、上昇系列、下降系列のいずれの結果も振動と音を同等の大きさに感じる等価騒音レベルは振動レベルに比例していることが分かる ($R^2=0.7$ 以上)。2つの系列間には 10 ~ 15dB の差があり、全条件で有意差が確認された (t -test, $p<0.05$)。また、この結果は前後振動においてもほぼ同様であった。

以上の音量の決定実験の結果から、振動条件毎の「振動と音を同等の大きさに感じる等価騒音レベル」は 1 点に定まるのではなく、10 ~ 15dB 程度の幅をもつ帯域 (等感覚帯域) であると再仮定した。本研究では、下降系列の値を「帯域上限」、上昇系列の値を「帯域下限」として、両者の平均値を「等感覚音」とした。また、帯域上限に 10 dB, または 20 dB を加えた音量を振動よりも音を強く感じる「音優位」、帯域下限から 10 dB 引いた音量を振動よりも音を弱く感じる「振動優位」と定義した。

(3) 振動と音の同時暴露実験

心理反応の実験方法と測定項目

心理反応測定実験は、表1の振動条件と表2の音条件に前述の音量決定実験で決定した音量を用いて、刺激暴露 (振動単独, または振動 + 音) を 30 秒, アンケート回答・休憩を 60 秒の計 90 秒を 1 条件の実験として繰り返し行った。連続実験時間は被験者の負担を考慮して 30 分とした。振動感覚は振動の感覚的強度と振動の不快感を心理アンケートにより測定した。音量の条件は、振動よりも音を大きく感じる状態での影響を調べるために、帯域上限, 音優位 (+10 dB, +20 dB) の 3 条件を設定した。

心理反応は振動刺激の感覚的強度と不快感を測定した。振動の感覚的強度はマグニチュード推定法 (ME 法) で測定した。ME 法とは、刺激の強度を判断し、想定される正の数値を回答することによって感覚量を直接測定する方法である。本研究では振動刺激の強度判断を 1 (想定できる最小の刺激) ~ 100 (想定できる最大の刺激) とし、あらかじめ数値を設定した標準刺激を用いない絶対判断とした。振動の不快感の測定には、単極 7 段階評定尺度を用いた。乗物の

振動環境としての不快感について、全く感じない(0)から非常に感じる(+6)の数値を割り当てて集計した。

生理反応の実験方法と測定項目

生理反応測定実験は、表1の振動条件と表2の音条件を用いる点は心理反応測定実験と同じである。実験のタイムテーブルは、刺激暴露(振動単独または振動+音)を10分、刺激暴露の前後に安静時間4分をそれぞれ設け、1条件の実験時間を18分としている。被験者の負担を考慮して連続2条件とした。被験者は聴覚正常で健康な21~23才の大学生6名である。振動条件は表1と同様で、音量の条件は音よりも振動を大きく感じる状態での影響を調べるために、等感覚音、帯域下限、振動優位(-10dB)の3条件を設定した。

生理反応は心拍数、LF/HF、鼻部表面温度、指尖容積脈波を測定した。心拍数はR-R間隔から算出する。LF/HFは心拍変動周期の周波数成分をパワースペクトル解析したときのLF成分(低周波成分:0.04~0.15Hz)とHF成分(高周波成分:0.15~0.4Hz)のパワー比率である。LF成分は副交感神経と交感神経の両方の活動を反映しており、HF成分は副交感神経の活動指標として用いられる。本研究では、LF/HFから交感神経の活動度を推定することとし、LF/HFが安静時に対して増加した場合は交感神経活動優位、減少した場合は副交感神経活動優位と評価した。鼻部表面温度は、額部温度を基準としたときの鼻頭部との温度差を指す。額部は自律神経活動の変化による影響が比較的少なく、鼻頭部は自律神経系の活動による末梢循環系の血流変化を顕著に反映するため、額部と鼻頭部の表面温度差を測定することによって自律神経系の活動度を評価した。指尖容積脈波は、利き手でない人差し指にクリップ式の光電センサを取り付けて指先血管の血流による容積変化を測定し、自律神経系の活動度を評価した。

4. 研究成果

(1) 心理反応測定結果

振動の感覚的強度

図2に2Hz-VAL80dBの水平振動における音暴露時の振動の感覚的強度の結果を示す。図中の横方向の黒の破線は振動単独を表す。振動の感覚的強度は音を暴露しても振動単独とほぼ一致し、音条件の違いによる影響はほとんどみられず、振動の方向(左右,前後)による違いもみられない。この結果は、他の振動条件についても同様の傾向であった。音条件によって振動単独に対して僅かに振動の感覚的強度が減少する傾向もみられるが、統計的有意差は確認できなかった。よって、水平振動の感覚的強度に及ぼす音の影響は小さいと考えられる。

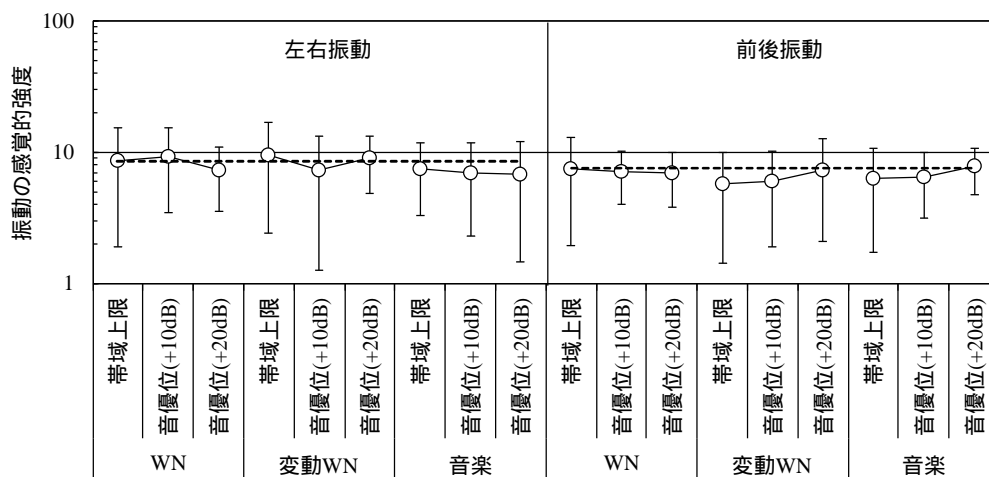


図2 振動の感覚的強度に及ぼす音の影響(2Hz-VAL80dB)

振動の不快感

図3に、振動単独における振動の不快感の結果を示す(参考として鉛直振動の測定結果も示す)。振動レベルに対する振動の不快感の大きさは鉛直振動の方が水平振動(左右,前後)よりも大きく、その差は振動レベルで10~15dB程度であった。したがって、振動の不快感は水平振動よりも鉛直振動の方が感度が高いといえる。図4に2Hz-VAL80dBの水平振動における音暴露時の振動の不快感の結果を示す。図中の横方向の黒の破線は振動単独を表す。図4によると、音量が大きくなると不快感が増加する傾向がみられる。また、音量が音優位(+20dB)の条件では振動単独と比較して不快感が増加する傾向がみられた。音量の違いについてBonferroniの多重比較検定を行った結果、いくつかの条件で有意差が確認された。しかし、振動単独に対してほとんどの条件で有意差はみられなかったため、本実験で設定した音量条件の範囲では音量の違いが振動の不快感に及ぼす影響は小さいと考えられる。

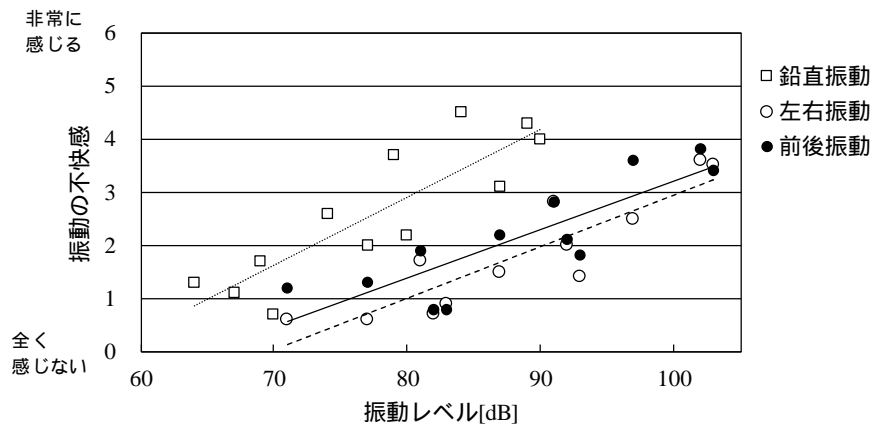


図3 振動単独における振動の不快感（水平振動（左右・前後），鉛直振動）

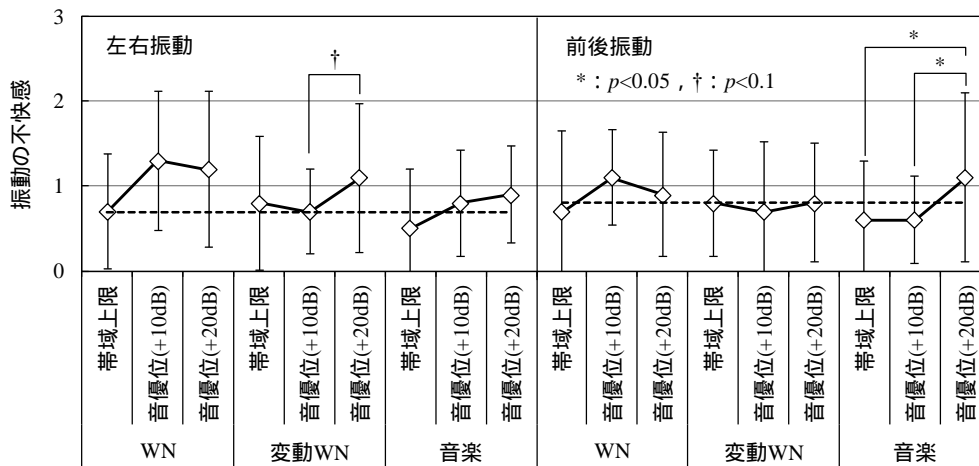


図4 振動の不快感に及ぼす音の影響（2 Hz-VAL 80dB）

(2) 生理反応測定結果

図5と図6に左右振動に等感覚音量の音刺激を暴露した時のLF/HFと鼻部表面温度の測定結果を示す。両図共に図中の横方向の黒の破線は変化比率1を示しており、変化比率が1を超えると安静状態に対して交感神経活動が優位、変化比率1以下は副交感神経活動が優位であることを示す。図5によると、LF/HFは全体的に変化比率が1以下の条件が多いことから、振動単独、または振動と音の同時暴露によって副交感神経系が優位に働いている傾向であることが分かる。図6に示す鼻部表面温度も同様で、多くの条件で安静状態とほぼ同じ副交感神経系が優位に働いている傾向であった。音刺激の種類や音量の違いによる生理反応の違いはみられず、振動単独と比較しても統計的有意差は認められなかった。この結果は前後振動においても同様であった。以上の結果をまとめると、等感覚音量よりも小さい音量を暴露すると副交感神経系が優位に働く傾向がみられる、つまり音刺激は水平振動に対してリラックス効果をもたらす可能性が示唆されたといえる。しかしながら、振動単独と振動に音を加えた条件を比較すると統計的有意差はみられなかったため、本研究における実験条件の範囲では水平振動に及ぼす音の生理学的影響は小さいと考えられる。今後の課題として、振動よりも音を強く感じる条件（音優位）での実験、振動と音の同時暴露時における生理反応の時間変化の解析について検討を進める予定である。

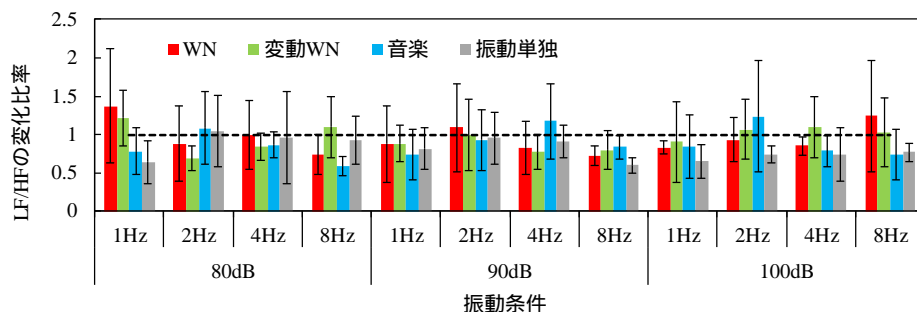


図5 LF/HFの変化比率（左右振動，等感覚音量）

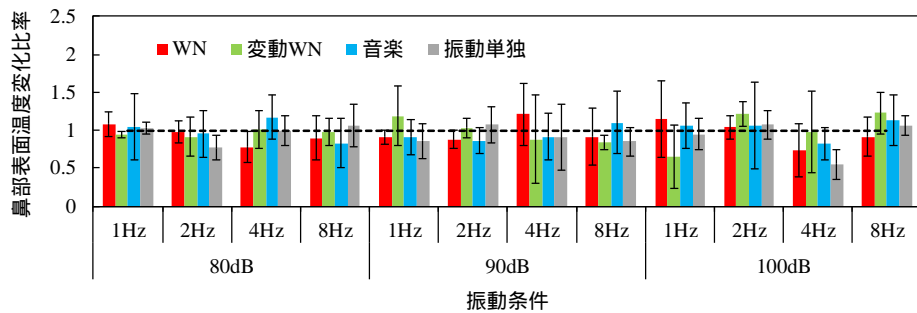


図6 鼻部表面温度の変化比率（左右振動，等感覚音量）

<引用文献>

佐藤哲身, 前田節雄, 矢野隆, 騒音暴露下の全身振動感覚閾値に関する実験, 日本建築学会北海道支部研究報告集, no.79, 2006, 183-186
 徳山久雄, 騒音と振動の複合入力による感覚反応, 騒音制御工学会誌, vol. 6, no.3, 1982, 43-47
 中川千鶴, 島宗亮平, 高見創, 高周波振動に対する体感を考慮した鉄道客室の乗り心地評価法, 騒音制御工学会誌, vol.36, no.5, 2012, 339-344
 町田信夫, 遊び機械の乗り心地設計 - スリルライドの安全と快適性 -, 設計工学会誌, vol.33, no.6, 1999, 184-187

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計8件)

並木敬祐, 松田礼, 町田信夫, 水平振動による振動の感覚的強さと不快感に及ぼす音の影響, 第62回日本大学理工学部学術講演会, 2018年12月5日, 日本大学理工学部(東京都千代田区)
 並木敬祐, 松田礼, 町田信夫, 水平振動の全身振動感覚に及ぼす音の影響に関する検討, 日本音響学会2018年秋季研究発表会, 2018年9月12日~9月14日, 大分大学旦野原キャンパス(大分県大分市)
 米田圭佑, 松田礼, 町田信夫, 振動と音を同等の大きさに感じるレベルの検討, 第61回日本大学理工学部学術講演会, 2017年12月1日, 日本大学理工学部(東京都千代田区)
 米田圭佑, 松田礼, 町田信夫, 振動感覚に及ぼす音の大きさの影響に関する検討, 日本騒音制御工学会2017年秋季研究発表会, 2017年11月16日~11月17日, 東京電機大学東京千住キャンパス(東京都足立区)
 米田圭佑, 寺山聡, 松田礼, 町田信夫, 人間の全身振動感覚に音を与える影響, 第60回日本大学理工学部学術講演会, 2016年12月3日, 日本大学理工学部(東京都千代田区)
 寺山聡, 米田圭佑, 松田礼, 町田信夫, 全身振動と音の複合環境下における振動感覚に関する研究, 第60回日本大学理工学部学術講演会, 2016年12月3日, 日本大学理工学部(東京都千代田区)
 米田圭佑, 寺山聡, 松田礼, 町田信夫, 鉛直方向の全身振動感覚に及ぼす音の作用に関する研究, 日本騒音制御工学会2016年秋季研究発表会, 2016年11月19日~11月20日, 名城大学天白キャンパス(愛知県名古屋市)
 寺山聡, 松田礼, 町田信夫, 全身振動に及ぼす音刺激の影響, 日本人間工学会第57回大会, 2016年6月25日~6月26日, 三重県立看護大学(三重県津市)

6. 研究組織

該当なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。