

平成 29 年 6 月 10 日現在

機関番号：82629

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420203

研究課題名(和文)車両振動伝達系における人の振動感受性の方向依存性を応用した乗り心地快適性の向上

研究課題名(英文)Improvement in vehicle's ride comfort with application of anisotropic human-body vibratactile sensitivity

研究代表者

柴田 延幸 (Shibata, Nobuyuki)

独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所・人間工学研究グループ・上席研究員

研究者番号：40333380

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究では、振動を感知する側の人間の振動感受性について周波数依存性や方向依存性と人体各部の振動伝達特性の関係を明らかにするため、被験者を用いた振動実験を行い、人間の体に対する車両座席振動伝達系からの振動の入力と、出力として人の乗り心地快適性の感覚尺度および人体各部における座席面に対する振動伝達率の関係を求めた。その結果、振動感受性の強い上下方向の振動を他の方向に免振することにより、乗り心地快適性を向上させることが可能であることが示された。その際、低周波数あるいは高周波数領域の振動成分における振動感受性の寛容な方向への免振がより効果的であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The aims of this study were to elucidate the effect of the vibration direction and frequency contents on human-body vibrotactile sensitivity and its relationship to the vibration transmissibility characteristics of human body. The results obtained in this study suggest that ride comfort can be improved without reduction of the total whole-body vibration by transfer of the vibration component in the most sensitive vertical direction to the horizontal directions. Also people are sensitive to low / high frequency contents in the vertical whole-body vibration.

研究分野：人体振動

キーワード：全身振動 振動感受性 方向依存性 感覚尺度 振動伝達率

1. 研究開始当初の背景

自動車や建設機械などの作業用車両を含む車両と座位姿勢にある人体によって構成される振動伝達系において、振動が加わった際の乗り心地快適性の向上は座席面やハンドルを介して人体に伝達される振動の低減と密接な関係がある。一般に人体に伝達される振動を低減するためには、大きく分けて二つの方法すなわち、(1)ダンパやその制御方法の開発に代表される振動発生系の動的安定性の向上、および(2)人体と接する座席の振動伝達特性の改善が考えられる。(1)に関する研究は近年いろいろと行われており、さまざまな技術の開発により振動発生系としての車両自体の動的安定性は向上している。しかし、車両搭乗者の乗り心地快適性への要求度の高まりはさらに高く、その大半は満たされていないのが実情である。これは(2)に関する研究において、座席等の機械的な振動伝達特性の改善に注意の大半が向けられ、振動を感知する側の人間の振動感受性および振動伝達特性の考慮が不十分であったことに関連している。

申請者は並進三軸において任意の振動波形および同三軸の周りそれぞれに回転振動の任意波形を再現することが可能な6自由度全身振動実験装置を用いて、これまで人体-車両振動系において人体に振動が加えられた際の乗り心地快適性の主観応答と生体力学的応答の関係について調べてきた。そのなかで、人体に振動が負荷された際の乗り心地快適性に基いた振動感受性は、方向依存性が顕著でありその傾向は立位/座位姿勢の違いで大きく変わることを明らかにした。具体的には、パワースペクトル密度一定のランダム振動波形により直交する3軸に沿ってそれぞれ加振した際の振動負荷に対する乗り心地快適性の感覚尺度を範疇判断法により求めたところ、立位姿勢時には鉛直方向の振動感受性が最も鋭敏であり、これに対して座位姿勢時には前後方向の振動感受性が最も鋭敏であることを明らかにした (Shibata et al., 2009; Shibata et al., 2010; Shibata et al., 2011)。また、生体力学的測定実験により鉛直方向に振動を受ける際、5 Hz 付近に脊柱系の共振周波数のピークが現れるが、座席背もたれ角度を調節することにより骨盤のピッチング運動 (7.5 Hz 付近に共振周波数をもつ) が引き起こされることによって共振による脊柱の動的圧力が緩和されること、この現象の発生と乗り心地快適性の向上とのあいだに有意な相関関係がみられたことなどを明らかにした (Shibata et al., 2012 など)。

申請者は、これまでに得られた成果から、車両-人の振動伝達系において搭乗者が座席等から伝達される多軸系の振動を振動感受性の最も鋭敏な方向から振動感受性の最も寛容な方向に免振してやり、振動マスキング効果を得ることにより搭乗者の乗り心地快適性を向上させることが可能ではないか、

との着想を得た。

2. 研究の目的

本研究では、振動を感知する側の人間の振動感受性の方向依存性および振動伝達特性を明らかにすることにより、振動マスキングの考え方を応用して、乗り心地快適性に悪影響を及ぼす周波数成分を振動感受性の寛容な方向に免振することによって乗り心地快適性の向上を図るといった新しい方法を提案することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、振動を感知する側の人間の振動感受性について周波数依存性や方向依存性と人体各部の振動伝達特性の関係を明らかにするため、被験者を用いた振動実験を行い、人間の体に対する車両座席振動伝達系からの振動の入力と、出力として人の乗り心地快適性の感覚尺度および人体各部における座席面に対する振動伝達率の関係を求めた。具体的には、以下の実験を実施した。

【実験1】

健康な成人男性 10 人 (平均年齢: 24.3 ± 0.92 歳) が実験に参加した。被験者は、加振台上の実験椅子に着席をする。その際、背筋を自然に伸ばした状態で背もたれに背面をふれぬように着座し、両足は左右方向に開きその幅は肩幅とした。さらに、両手はそれぞれ膝の上に開いて置き、それに伴って両腕はリラックスした姿勢を保たせた。この時、踵の上下動や膝の屈伸および骨盤の回転等振動刺激に対してバランスをとるような動作および姿勢の変更の一切をとらないように指示するとともに、実験中の被験者の姿勢を常にモニターした。被験者は、前述の姿勢を保持した状態で実験開始の合図とともに 2 秒間隔で 7 秒間提示される一連の振動刺激に対して、表 1 に示す 5 段階の系列範疇の中から提示刺激に対して自身が感じた不快の程度に最も近いと思われる範疇の数字を選択して口答した。

表 1 5 段階系列範疇

系列範疇	不快の程度
1	全く不快でない
2	少し不快
3	不快
4	かなり不快
5	非常に不快

本実験では、1-20 Hz の周波数帯域をもつ疑似ランダム振動波形を振動刺激として使用した。まず、同帯域でパワースペクトル密

度が一定となる波形を基準として、周波数帯域を 1/3 オクターブバンド中心周波数で L: 1-4Hz、M: 4-10Hz、H: 10-20Hz の 3 帯域に分割し、3 帯域のいずれか 1 つのパワースペクトル密度が強調されるように係数をかける。次にパワースペクトル密度の値を調整して、加速度実効値がそれぞれ 0.2、0.4、0.8m/s² となるように 3 つの大きさの振動波形を作成した。これらの刺激を前後、左右、上下方向それぞれについて割り当てることにより、3 方向において 3 種類の振動加速度を用意、同一条件の振動刺激を 3 回試行するとして、合計 27 個の振動刺激をランダムに順序付けをした。これらの振動刺激はいずれも持続時間が 7 秒とした。また、前後の振動刺激との間に 2 秒間のインターバルを設けることにより一連の振動刺激群を構成した。

本実験では、心理物理学的手法の一つである系列範疇法を用いて全身振動ばく露に対する不快度の尺度構成を行った。刺激 V_i に関する回答値の度数分布が得られたならば、系列範疇 j ($j=1\cdots5$) に関する累積度数分布 G_{ij} を算出することができる。回答値の分布が正規分布に従うと仮定すると、系列範疇 j から範疇上限値までのいずれかを回答する確率は各系列範疇 j の偏差比率 Z_{ij} で表されるので、刺激 i に対する系列範疇 j の幅 D_j は次式で表すことができる。

$$D_{ij} = Z_{ij} - Z_{i(j-1)}$$

したがって、例えば同一加振方向の刺激群 $\{V_i\}$ について各系列範疇の上限値の平均をとることにより、刺激群 $\{V_i\}$ に対する各系列範疇の上下限値を求めることができる。これを用いて、各系列範疇における代表値 U_i (本実験では 50 パーセンタイル値を採用) を内挿することによって求めることができる。Stevens のパワー則によれば、不快度に対する尺度値 U_i は刺激である振動加速度 V と関連づけることが可能であり、その関係は対数表示では次式のようにあらわされる。

$$\log_{10} U_i = \log_{10} c + \log_{10} V$$

ただし、 c は Stevens のパワー則指数、 c は様々な要因に依存する定数である。

【実験 2】

健康な成人男性 12 人(平均年齢:22.3±0.43 歳)が実験に参加した。被験者は、実験 1 の時と同様に着座姿勢を維持するように指示を受けた。

振動加速度の大きさが 0.6m/s² であり、周波数は異なる 6 種類 (1,2,4,8,16,20 Hz) の正弦波振動を用意し、これらを位相差をもって組み合わせることにより、前後・左右・左右・上下・前後・上下方向の二次元振動を構成した。位相差は、0 度から 315 度まで 45 度ずつ八段階を考慮した。

本実験では、3 種類の生体動力学応答に関するパラメータ、すなわち座位姿勢の被験者の臀部および座席面の間に働く動的力および座席面上における振動加速度、被験者前頭

部における振動加速度についていずれも前後・左右・上下方向の 3 成分を測定した。

人体の振動伝達特性については、着座姿勢における上半身の動的質量 (以下、APMS) および頭部振動伝達率 (STHT) によって評価した。APMS は、座席面における動的力と座席面における振動加速度の相互スペクトル密度を用いて、STHT については頭部における振動加速度と座席面における振動加速度の相互スペクトル密度を用いて算出した。

4. 研究成果

【実験 1】

前後方向では、低周波数域の振動加速度を強調することにより、比較的低い振動において不快度の増加が認められた。また、中周波数域および高周波数域の振動加速度の協調は不快度の尺度に有意な影響を及ぼさなかった (図 1)。

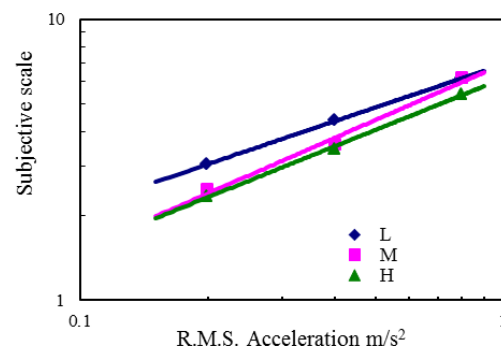


図 1 前後方向における不快の主観尺度と振動加速度の関係 (L: 低周波数域強調、M: 中周波数域強調、高周波数域強調)

左右方向では、前後方向と同様に低周波数域の振動加速度を強調することにより、比較的低い振動において不快度の増加が認められるとともに、中周波数域および高周波数域の振動加速度の協調は不快度の尺度に有意な影響を及ぼさなかった (図 2)。

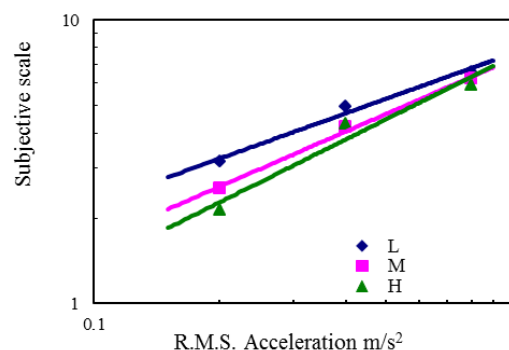


図 2 左右方向における不快の主観尺度と振動加速度の関係 (L: 低周波数域強調、M: 中周波数域強調、高周波数域強調)

これに対して、上下方向ではいかなる周波数域における振動加速度の協調も同方向に

おける深井戸の尺度に影響を及ぼさないことが示された(図3)。

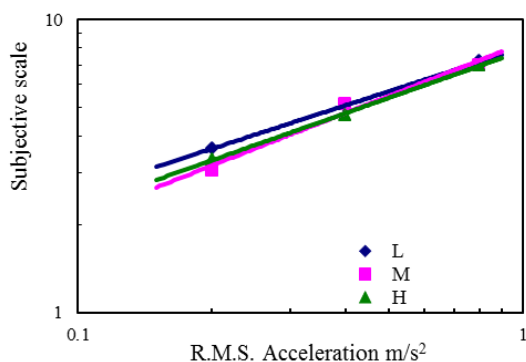


図3 上下方向における不快の主観尺度と振動加速度の関係 (L: 低周波数域強調、M: 中周波数域強調、高周波数域強調)

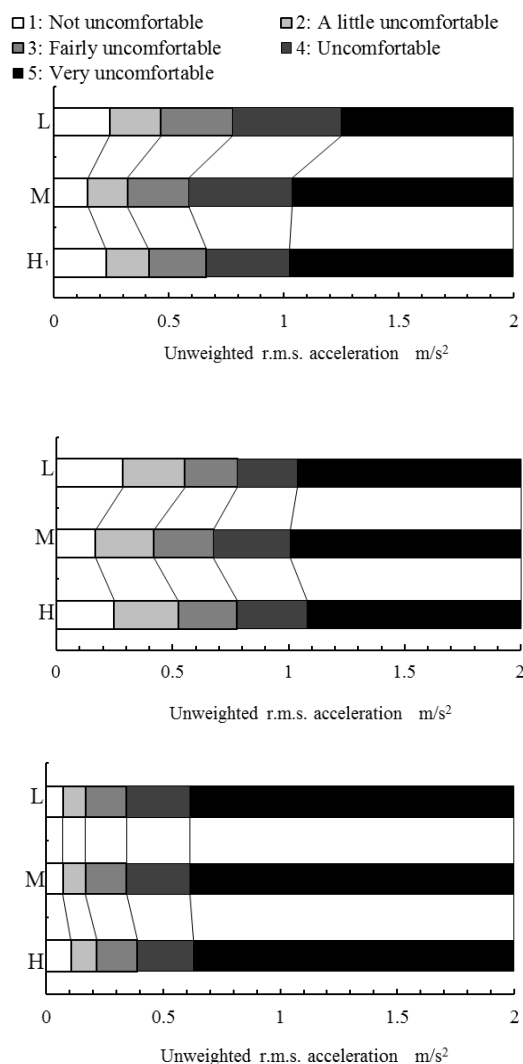


図4 不快度尺度とその上限値 (上段: 前後方向、中段: 左右方向、下段: 上下方向)

これらの結果をもとに、不快度の知覚において各系列範囲ごとに求めた振動加速度の上限値を前後・左右・上下方向ごとに示す(図4)。前後および左右方向における振動を主因

とした不快度の感覚尺度には大きな差は認められなかった。一方、上下方向の振動感覚尺度は他の方向の振動感覚尺度と比較して最も鋭敏であり、振動による不快に対して最も敏感であることが示された。

【実験2】

2軸組み合わせ全身振動ばく露に対する人体のAPMSおよびSHTHの応答は、二つの加振軸間の位相差の影響を受けることが示された。前後・上下2軸振動下における前後方向のSHTHの応答は、前後・左右2軸振動下における前後方向のSHTHの応答よりも大きな値を示し、この傾向は8-20Hzの周波数範囲で顕著であることが示された。また、鉛直方向におけるAPMSおよびSHTHの応答は、低い周波数帯域で位相差の影響を有意に受けることが示された。

また、2軸組み合わせ全身振動ばく露に対する人体のAPMSおよびSHTHの応答は、加振軸の組み合わせによっても影響を受けることが示された。組み合わせ軸間の相互影響の程度は、加振軸の組み合わせに依存することが示された。前後・上下2軸振動下における上下方向のAPMSおよびSHTHの応答は、左右・上下2軸振動下における上下方向のAPMSおよびSHTHの応答と比較して、大きく変動することが示された。

前後・上下2軸振動下における前後方向のSHTHの応答は、8-20Hzの範囲では0.45から0.52の間の値を示し、これらの値は前後・左右2軸振動下における前後方向のSHTHの応答の値(0.05~0.12)よりも有意に大きな値を示した。2Hz付近に認められた前後方向のSHTH応答におけるピーク値は、前後・上下2軸振動下において1.2~1.5であり、この値は前後・左右2軸振動下における前後方向のSHTH応答のピーク値(0.9~1.0)よりも有意に大きな値であった。前後・上下2軸振動下における上下方向のSHTHの応答は、1-8Hzの周波数範囲において前後・左右2軸振動下における上下方向のSHTH応答と比較して大きな変動を呈した。前後・上下2軸振動下における上下方向のSHTHの応答は、4Hz付近においてピーク値を呈した。左右・上下2軸振動下における左右方向のSHTHの応答と上下・左右2軸振動下における左右方向のSHTHの応答の間には16-20Hzにおいて有意差が認められた。

【まとめ】

以上の結果から、人体は上下方向の振動に対して、振動に起因する不快をより厳しく評価するとともに、この上下方向の振動は前後方向の振動と組み合わせられることにより増長されることが明らかとなった。この時、両方向における振動の位相差を制御することにより、上下方向における振動増長の程度を緩和させることが可能であることが示唆された。また、振動感受性の強い上下方向の振動

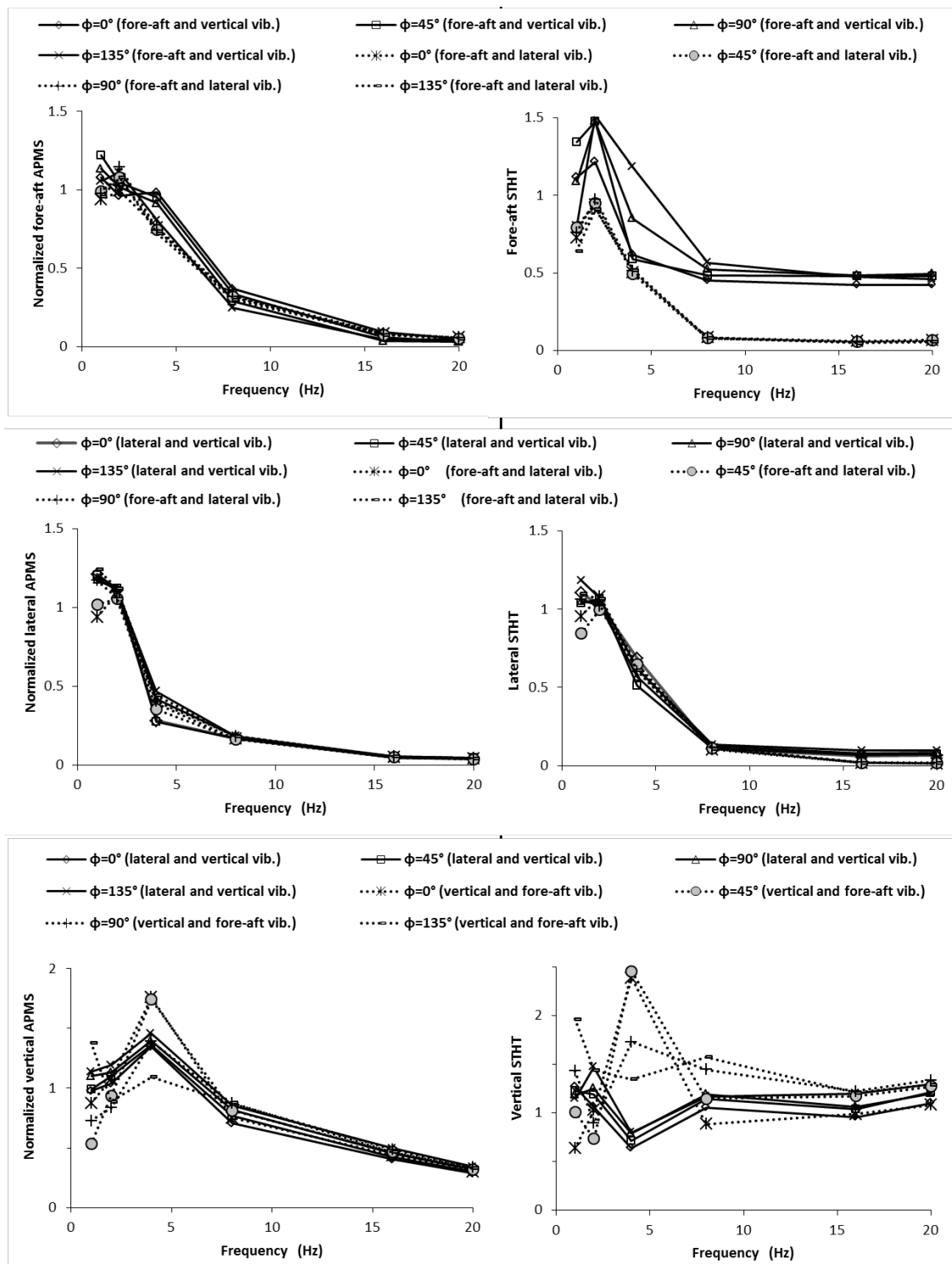


図5 異なる2つの加振軸とさまざまな位相差の組み合わせにおけるAPMSおよびSTHT値の比較

を他の方向に免振することにより、振動自体を減少させることが困難な車両-人振動伝達系においても乗り心地快適性を向上させることが可能であることが示された。その際、低周波数あるいは高周波数領域の振動成分における振動感受性の寛容な方向への免振がより効果的であることが示唆された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

1) Nobuyuki Shibata (2015) Effect of phase difference on biodynamic response of seated body to dual-axis vibration. International Journal of Industrial Ergonomics 45: 55-63.

〔学会発表〕(計4件)

- 1) Nobuyuki Shibata (2013) Posture effect on discomfort of subjects exposed to whole-body vibration. Proceedings of 20th International Congress on Sound & Vibration, p1-6, in DVD-ROM.
- 2) Nobuyuki Shibata (2013) Effect of phase difference on biodynamic response to dual-axis sinusoidal whole-body vibration. Program and Abstract Book of 5th International Conference on Whole Body Vibration Injuries, 55-56.
- 3) Nobuyuki Shibata (2014) Effect of body posture on subjective response to whole-body vibration. Proceedings of the 7th Forum Acusticum 2014, p1-6, in DVD-

ROM.

- 4) Nobuyuki Shibata (2016) Subjective response of standing person affected by frequency contents of whole-body vibration, Proceedings of 23rd International Congress of Sound and Vibration, , p1-5, in micro SD.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

柴田 延幸 (SHIBATA , Nobuyuki)

独立行政法人 労働者健康安全機構労働
安全衛生総合研究所・上席研究員

研究者番号：40333380