

乗り心地評価における高周波振動の影響に関する研究

○中川 千鶴 [機] 島宗 亮平 水上 直樹 [機] 渡邊 健
星野 宏則 [機] 鈴木 江里光 (鉄道総研)

Study on the Effect of High Frequency Vibration on Ride Comfort

○Chizuru Nakagawa, Ryohei Shimamune, Naoki Mizukami, Ken Watanabe,
Hironori Hoshino, Erimitsu Suzuki (Railway Technical Research Institute)

To develop a more suitable method of evaluating ride comfort of high speed trains, a fundamental study was conducted on sensitivity of passengers to various frequencies of vibration with respect to ride comfort. Experiments were performed on 37 subjects using an electrodynamic vibration system that can generate vibrations in the frequency range of 1 to 50 Hz. Results of experiments indicated that the subjects tend to experience greater discomfort when exposed to high frequency vibrations than that presumed by the conventional Japanese ride comfort assessment method, the "Norigokochi Level."

キーワード：乗り心地，高周波振動，快適性，高速化

Key Words：Ride Comfort, High Frequency Vibration, High Speed

1. はじめに

浮上式鉄道や在来方式の高速鉄道の車内では、30Hz 前後の振動成分が、一般的な鉄道と比べ、より多く生じている¹⁾。この帯域の振動は体感乗り心地に影響する可能性があるが、鉄道における代表的な乗り心地評価法である「乗り心地レベル」²⁾では高周波帯域の重み付けが非常に低い³⁾ため、知覚できる大きさであっても、乗り心地評価判定にほとんど影響しないという問題が生じている。

この帯域の振動は、知覚における「大きさ」としては 1～10Hz 帯域に比して極めて小さいものの、「不快感」「違和感」としては無視できない振動成分であり、我々はこの点から、『従来法が振動に対する人間の感度特性として用いている「等感覚曲線」は、振動の「強さ」を尺度として得られたものであり、「乗り心地」感度を完全には説明できない』という仮説を立てた。また、このような振動が生じると同帯域の可聴音（低周波音）も生じる可能性が高く、音も含めた複合的な車内環境評価が重要となる。

そこで、2006 年度には(1)低周波音帯域の音成分が車内環境評価に及ぼす影響に関する基礎実験、(2)車内快適性シミュレータ³⁾を用いた、振動・車内音・車窓風景の乗り心地に与える複合影響の基礎的な調査を実施した⁴⁾。この結果、走行音に低周波成分が含まれると車内快適性に影響を及ぼす可能性があること、また、振動と音の相互影響が確認された。しかし、装置の制約上、8Hz 以上の振動が再現できず、高周波振動が乗り心地評価に及ぼす影響の調査が待たれていた。今回 2007 年 10 月に完成した、50Hz まで

の振動再現が可能な低騒音型 3 軸振動台を用いて、30Hz 前後の「上下振動」が体感乗り心地に及ぼす影響に関する実験を実施したので、ここに報告する。対象を上下振動としたのは、実際の車両で、上下方向に、より高周波成分が多くみられたためである。なお、本報告は振動に対する乗り心地としての感度を調査した結果であり、音との相互影響については対象外とした。

2. 実験内容

2.1 実験システム

実験は、低騒音型 3 軸振動台 (IMV 製) を用いた。これは動電型振動台であり、低騒音を実現するため、水冷方式を用いている。稼働範囲は、上下と左右方向は±100mm、前後方向±50mm である。1Hz から 50Hz までの加振が可能であり、加振台の大きさは 1000×2000mm、最大荷重は 300kg、最大加速度は 7.5m/s² である。

実験は、本振動台上に新幹線の 2 人用座席を設置して行った (図 1)。

2.2 被験者

被験者は健康成人 37 名 (男性 33 名、女性 4 名)、年齢 24～53 歳 (平均 38.5 歳)、身長 154～183cm (平均 170cm)、体重 42～98kg (平均 66.4kg) である。

新幹線の利用頻度は、「月に数回以上」が 6 名 (16%)、「年に数回以上」が 29 名 (78%)、「ほとんど乗らない」が 2 名 (5%) であり、被験者の 95% が新幹線に乗り慣れた人であった。

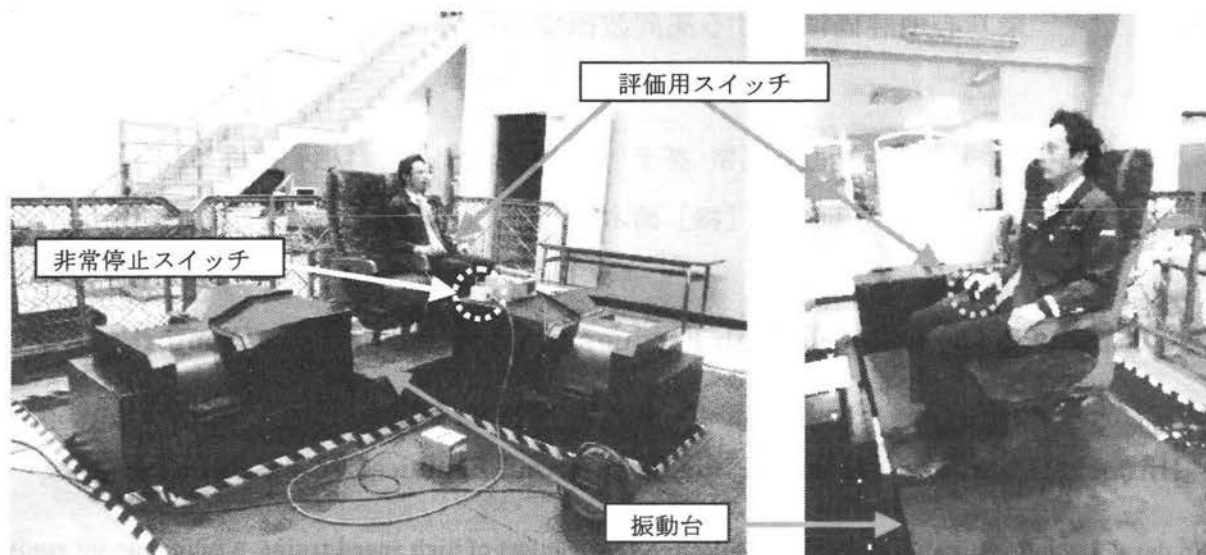


図 1 低騒音型3軸振動台上の座席に被験者が着座している様子

2.3 実験手続き

(1) 実験手順

実験は被験者 1 人ずつ実施した。被験者は 2 人用座席の片側 (左側) に着座し、提示される振動に対し、「新幹線の乗り心地として許容できない」大きさである間は、手元の評価スイッチを押し続けることとした。なお、実験では通勤で使用している靴を着用した。

被験者は、座位姿勢および質問紙の説明を受けた後、10Hz 条件で練習を行い、その後 6 つの試番を行った後に、5 分程度の休憩を取った。休憩後に 7 試番を行い、終了とした。1 つの振動条件が終了するごとに質問紙の記入を行った。

(2) 質問紙の内容と座位姿勢条件

質問紙は、①身体の共振部位を自由記述として回答、②振動から受けた印象として当てはまるものを、「不快感」、「振動感」、「びびり感」など 15 項目の中から選択、というものである。座位姿勢は、①座面に深く腰掛ける、②背もたれに上半身をもたれかける、③頭部はヘッドレストを使わず自立した状態で水平前方をみる、④足裏全面を加振台の上に乗せる、⑤腕の一部を必ず肘掛に乗せる (ただし、

肘掛高さが低かったため、ほとんどの被験者は、肘ではなく、手首付近が肘掛と接した状態) を条件とした。

(3) 刺激条件と提示方法

提示した振動は全て上下方向の正弦波振動で、1~40Hz の範囲で 13 種類の周波数 (1, 2, 4, 5, 6.3, 8, 10.1, 12.7, 16, 20.2, 25.4, 32, 40.3Hz) の振動を提示した。加速度の大きさと変化は全て同じ条件とし、図 2 に示すように、加速度振幅 0.04 m/s^2 から 1.7 m/s^2 の範囲で徐々に増加させ、最大値で 2 秒持続した後に徐々に減衰させた。この間 62 秒であった。提示順序は、順序効果を避けるため、乱数で決定した。

(4) 測定項目とデータ解析

加速度は、床面、座面、背もたれを上下・左右・前後の 3 方向、左右の肘掛を上下方向について計測した。加速度データは 100Hz のローパスフィルタをかけた後に 200Hz サンプリングでデータレコーダに記録した。被験者が扱った評価スイッチの信号も同時に記録した。

データ解析として、評価スイッチが押下された時点 (加速度振幅が増加している時点で被験者が乗り心地として許容できない大きさと判断した時点) と離された時点 (加速度が減少に転じている時点で被験者が乗り心地として許容できる大きさになったと判断した時点) での床面上下加速度の大きさを検出し、その平均値を当該被験者のその周波数における許容限界値とした。

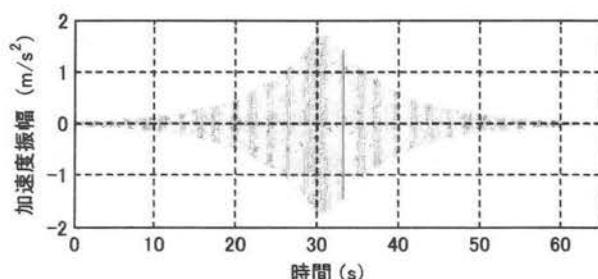


図 2 振動波形例 (加速度周波数 10.1Hz)

3. 実験結果

3.1 許容限界における床面振動の大きさと周波数の関係

周波数ごとの許容限界値 (全被験者平均値) を繋いだ許容限界曲線を図 3 に赤線で示す。また、乗り心地レベルに用いられている等感覚曲線を黒の一点鎖線で示す。

図 3 より、2~4Hz では、許容限界曲線と等感覚曲線²⁾

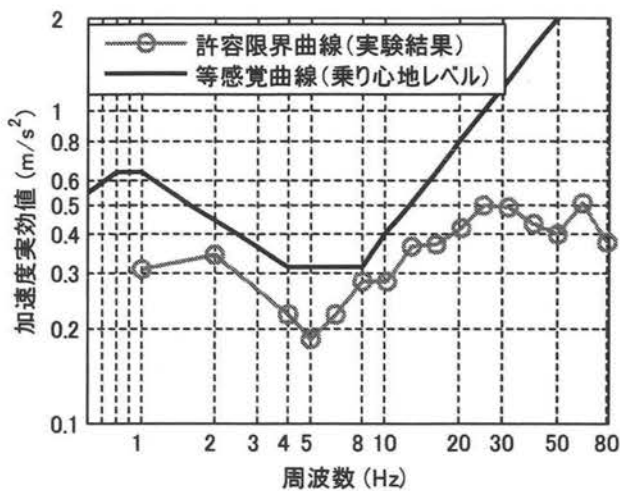


図 3 許容限界曲線と乗り心地レベルに用いられる等感覚曲線

の傾きがほぼ一致する結果となった。一方、1Hz では許容限界値が低下したが、これは、1Hz での最大変位が 60mm (2Hz で 8mm, 4Hz で 2mm) と、他の条件に比して格段に大きいことから、振動知覚への視覚的影響がこの条件のみ特異的に大きくなった可能性がある。5~6Hz 付近で許容限界曲線が最小となり、6Hz 以上で増加に転ずる。8~10Hz では、等感覚曲線とほぼ同じ傾きの増加がみられるが、10Hz 以上で、許容限界曲線の傾きは等感覚曲線より緩やかになって乖離が大きくなり、40Hz 付近で低下を示した。

なお、床面に対する座面の振動伝達率を調べたところ、人体の共振による影響から、本実験結果では 5Hz で伝達率がピークとなり、ここから 1Hz,あるいは 10Hz までは徐々に減少し 1 に近づいた。一方、10Hz 以上では伝達率は 1 以下で、周波数が大きくなるほど振動が減衰した。これは、高周波域では座面から伝わる振動は減少しているにも関わらず許容限界が低下している (図 3) ことを意味する。

3.2 振動周波数の違いに対する評価の変化

質問紙結果から、振動周波数ごとの評価項目 (振動の印象) が選択された数 (以後「該当数」と表記) を図 4 に示す。この結果、図 4 (a) に示すように、5Hz 以下に該当数がピークとなる評価項目は、「揺れ」や「酔い」に関連する項目であるのに対し、図 4 (b) のように、6Hz 以上で該当数がピークとなるのは、「振動感」「びびり感」「しびれ」「落ち着かない」「違和感」などの項目であった。

3.3 許容限界値の周波数変化と評価項目の関係

本実験で得られた許容限界曲線 (図 3) と評価項目の相関を調べた。この結果、相関の高い上位 3 つは、「不快感」、「気分が悪くなる」、「揺さぶられる感じ」 (それぞれ相関係数 -0.87, -0.84, -0.83) であった。図 5 に、この 3 つの評価項目と、図 3 の許容限界曲線値と等感覚曲線の縦軸を飯店したもの示す。この図からも、許容限界値とふかいかんの相関が極めて高いことがわかり、乗り心地という観

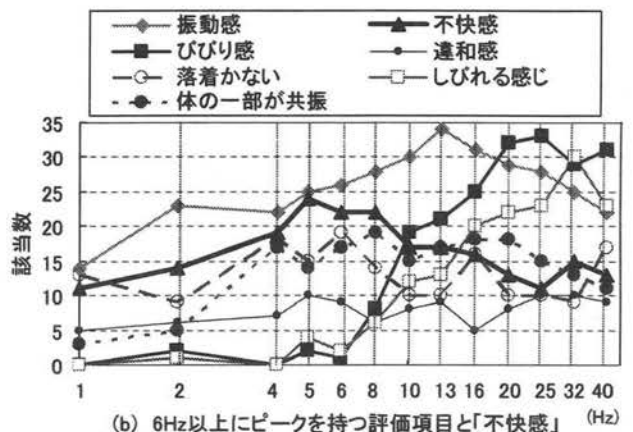
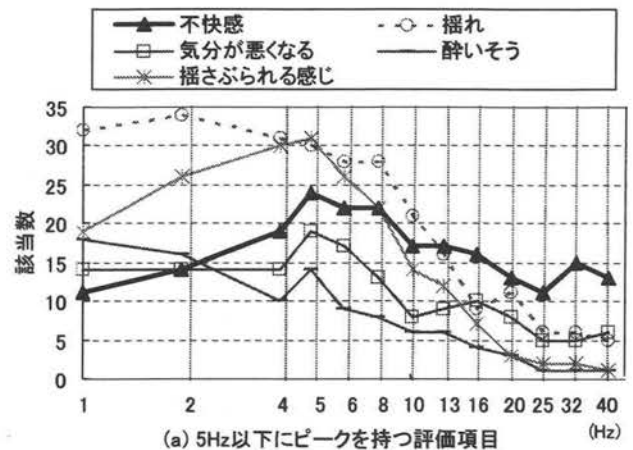


図 4 「振動の印象」の周波数との関係

点での許容限界が「快-不快」尺度に準じたものであることが示された。特に、10Hz 以上の帯域では、許容限界曲線と類似の変化を示したのは、「不快感」と「気分が悪くなる」であるのに対し、「揺さぶられる感じ」は、むしろ等感覚曲

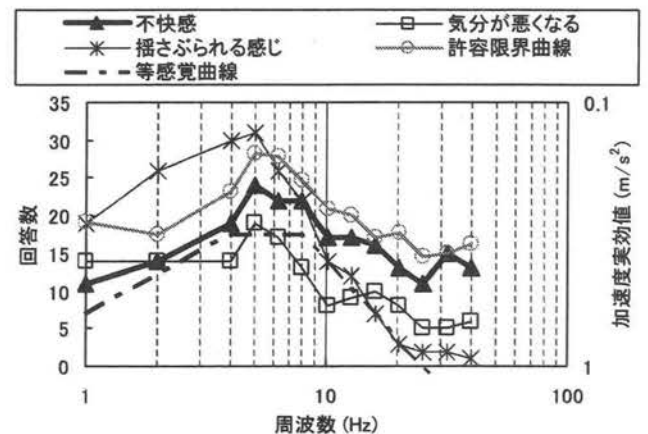


図 5 許容限界曲線 (実験結果) と代表的な 3 つの評価項目の振動周波数に対する変化の比較

線に近い変化を示した。これは、この評価項目が、等感覚曲線が表す「強さ」の感度と関連があるためと考えられる。

4. 高周波振動乗り心地に関する考察

上述の結果を以下にまとめる。

- ① 30Hz前後の振動は、従来の乗り心地レベルが想定していたよりも「体感乗り心地」に影響する可能性が高い
- ② 本実験結果である「乗り心地としての許容限界値」は、主観評価の「不快感」との相関が最も高く、乗り心地感度の変化は、「快—不快」尺度に準ずる
- ③ 乗り心地感度の代用として用いられてきた等感覚曲線は、「快—不快」尺度ではなく、振動の強さ・大きさに準ずるもので、10Hz以上の高周波域において、乗り心地感度を表現するものではない

この結果は、前述した仮説『従来法が振動に対する人間の感度特性として用いている「等感覚曲線」は、振動の「強さ」を尺度として得られたものであり、乗り心地感度を完全には説明できない』という仮説を裏付けるものである。

ただし、乗り心地レベルが用いている等感覚曲線と本実験結果は、その導出過程でいくつかの重要な相違点がある。以下にその違いを述べる。

4.1 座面の硬さの違い

1つは座席の違いであり、前者（等感覚曲線）は硬質な座面、本実験ではクッション座席を用いて得られたものである。前者が硬質な座面を用いた理由は、基礎的な人体振動研究においては、人体の振動特性を求めることが目的のため、クッションなど振動特性が変化する材質を経由させず、振動を直接人体に入力させることが重要なためである。しかし、この方法は、実際の場面と乖離するという欠点がある。本研究では鉄道乗り心地に限定し、より体感に合致する評価法の構築を目指しているため、実際の列車座席を用いた。なお本実験での座面の伝達率は10Hz以上で減衰しており、座面から人体への入力はいずれも硬い座面よりむしろ小さかったことから、本結果の高周波振動に対する感度上昇は座面の違いによるものではない。ただし、この結果は1種類の座席の結果であり、今後、座席を変えての検証実験が必要である。

4.2 評価尺度の違い

もう1つの違いは、評価尺度の違い（「振動の強さ・大きさ」と「乗り心地」）であるが、この違いがまさに、等感覚曲線と体感乗り心地との乖離の原因と考えられる。つまり、これまでの鉄道乗り心地に最も影響した10Hz以下、特に人体の共振周波数である5Hz付近のように「体を揺さぶられる」と知覚される振動に対しては、振動の強さが「不快感」と最も相関が高いと思われ、本結果でも確認された。しかし、高周波帯域の振動が乗り心地へ及ぼす影響を考慮するには、「びびり感」のような、大きさは小さく感じても「不快」感は決して小さくない感覚が、乗り心地に影響すると思われる。本実験結果も、振動周波数の帯域変化に伴い、不快原因が変化するという結果が得られ、上記を裏付

けるものであった。

4.3 評価方法の違い

他には、評価方法の違い（「基準振動を用いた一対比較法（同じ大きさ）」と「振動ごとの絶対評価」）がある。大きさという尺度であれば一対比較が適しているが、「不快」という質的な尺度、特に周波数によってその背景となる要因が異なる今回の実験では、一対比較を行なうことで、逆に基準振動の影響から個人内の絶対尺度がぶれる恐れがあった。このため、一対比較ではなく絶対評価を用い、順序効果を避ける方法を取ることで、振動周波数に対する「乗り心地感度」の変化を得ることができたと考えられる。

5. まとめ

実験により、「乗り心地」という尺度で体感評価した場合、30Hz前後の振動は、従来の乗り心地レベルが想定していたよりも人間の感度が高い可能性が示された。

なお、本実験結果の許容限界が、30Hz前後で再び感度上昇しており、等感覚曲線との乖離が最も大きくなった。この理由として、①30Hz前後の振動感受性が高い、②音としても知覚されるため、振動をより大きく感じる、などが考えられる。また、人体への振動入力、床面や座面以外に肘掛や背もたれもある。したがって、音による修飾効果や座面以外の座席からの振動入力の影響については、今後の検討課題である。

6. おわりに

今後は、今回の実験結果を踏まえ、姿勢や座席種類等の条件の違いによって許容限界値が変化するかなど、許容限界値の再現性および信頼性を検証し、より体感と相関の高い乗り心地評価手法を提案していく予定である。また、左右や前後など振動方向を変えた場合の乗り心地感度特性についても検討を進める必要がある。

本研究は、国土交通省からの補助金を受けて実施した。

参 考 文 献

- 1) 広瀬俊夫、高尾忠明、林田聡、田口均：高速車両の高周波振動、第3回交通・物流部門大会講演論文集、pp.277-280, 1994
- 2) 車両電気協会（編）：乗り心地管理体制の充実に関する研究報告書、社団法人車両電気協会、1981
- 3) 白戸弘明、中川千鶴、鈴木浩明：車内快適性シミュレータの開発と活用法、鉄道総研報告、Vol.18, No.2, pp.5-8, 2004
- 4) 中川千鶴、高見創、渡邊健、星野宏則、水上直樹、鈴木浩明：低周波音が浮上式車両の乗り心地に及ぼす影響の基礎実験、鉄道総研報告、Vol.21, No.9, pp.11-16, 2007