

高周波振動を考慮した乗り心地評価法

中川 千鶴* 島宗 亮平** 高見 創***

渡邊 健# 横山 義彦##

Method of Evaluating Ride Comfort Reflecting Passengers' Subjective Sensation
to High Frequency Vibration

Chizuru NAKAGAWA Ryohei SHIMAMUNE Hajime TAKAMI

Ken WATANABE Yoshihiko YOKOYAMA

According as the speed of Shinkansen trains increases, it has become clear that high frequency vibration in the region of 30 Hz influences ride comfort. However, with respect to the equivalent sensitivity curve used to calculate the current ride comfort level, sensitivity to high frequency is too low, which means that it has a weak weighting factor. The problem therefore, is that with respect to this type of high frequency vibration, the present calculation method will produce a result which does not match with the ride comfort evaluated by the passengers' subjective sensation.

Therefore, a survey was carried out to examine the sensitivity depending on the vibration in the range of 1-50Hz, with a focus on the ride comfort. Based on this survey result, a new equivalent sensitivity curve which reflects passengers' subjective sensation more closely has been developed by modifying the high frequency range of the existing equivalent sensitivity curve. The effectiveness of the new proposal has been examined with test subjects on board the commercial Shinkansen rolling stock and a vibrating test bench. This has confirmed that the ride comfort level evaluated by the proposed new equivalent sensitivity curve is a closer reflection of the ride comfort evaluated by passengers' subjective sensation.

キーワード：乗り心地，高周波振動，評価法，乗り心地レベル，等感覚曲線

1. はじめに

乗り心地レベル¹⁾は代表的な乗り心地評価指標の1つだが、最近の高速車両の乗り心地を評価すると、体感と合わないという問題が生じている。これは、高速化に伴い増加した高周波振動成分(30Hz前後)が、乗り心地に影響しているにも拘らず、乗り心地レベルには高周波振動の影響がほとんど反映されないからである。

このため、本研究では^{2), 3)}、振動周波数ごとの乗り心地影響を調査し、乗り心地レベルに使われている乗り心地フィルタの改良を行った。さらに現車試験や振動台試験で、実際の走行振動への適用を検討し、新幹線はもちろん在来線への適用も可能であることを確認した。

本稿では、乗り心地フィルタの改良および有効性について報告する。

2. 乗り心地レベルとその問題点

乗り心地レベルは、1981年の国鉄時代に提案された乗り心地評価法であり、当時の国際規格であるISO2631(1974年制定、1985年改定)をもとに、0.5~1Hzの範囲を拡張して、上下と左右(前後)それぞれの「等感覚曲線」を定義している(図1)。「等感覚曲線」とは、周波数ごとの「等しい大きさだと感じる加速度実効値」を示しており、この値が小さいほど、大きく感じやすい振動であることを意味する。

乗り心地レベルは、この等感覚曲線をもとにして作られた乗り心地フィルタを用いて走行時の振動の加速度に重み付けを行い、その実効値で評価する方法である。列車振動の中で、大きく感じる成分(等感覚曲線の値が小さい成分)は大きい重み付け、あまり感じない成分は小さい重み付けで加算されるため、上下振動は8Hz、左右振動は2Hz以上で対数的に重み付けが小さくなる、つまり、高周波になればなるほど急速に重み付けが小さくなり、評価にほとんど影響しなくなる。

本研究の背景である、高周波振動が多く含まれる場合に乗り心地レベルが体感と合わない現象は、等感覚曲線

* 人間科学研究部 人間工学研究室

** 人間科学研究部 人間工学研究室(現 東日本旅客鉄道株)

*** 環境工学研究部 空気力学研究室(現 ブレーキ制御研究室)

浮上式鉄道技術研究部 電磁力応用研究室

東日本旅客鉄道株

特集：人間科学

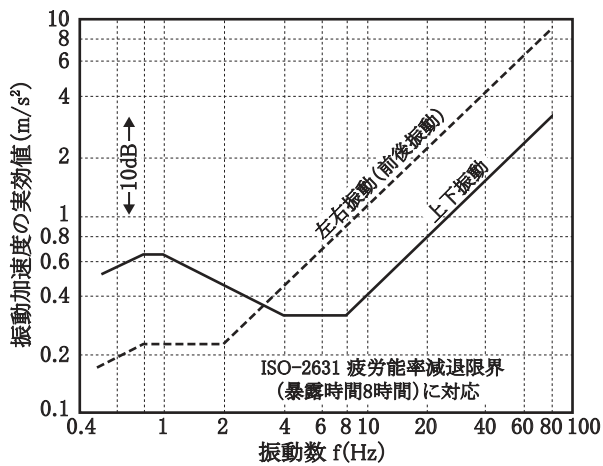


図1 国鉄の乗り心地レベルで用いられた等感覚曲線⁴⁾

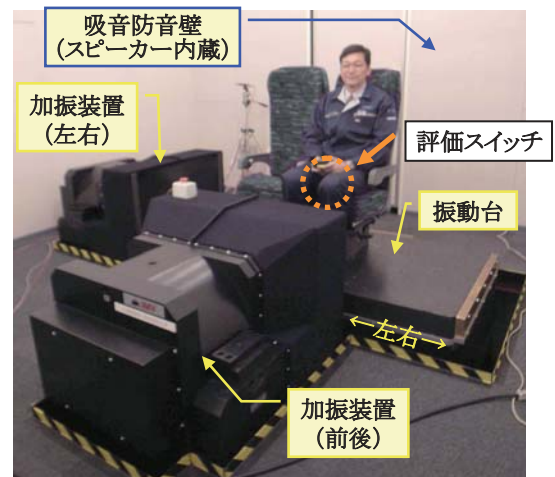


図2 振動台上の座席に着座した被験者

の高周波域の定義に原因があると考えられる。そこで、等感覚曲線が決定された経緯や文献を調査した結果、この曲線が、同じ「大きさ」という尺度で求められたことがわかった。乗り心地は本来、快-不快の尺度で定義されることが望ましいが、大きく感じやすい振動は不快な振動でもあり、当時の車両振動の成分の多くが大きく感じやすい帯域であって、かつ高周波成分が少なかったことが、使用上問題が生じなかった理由と考えられる。

そこで本研究では、高周波振動を多く含む場合でも「鉄道の振動乗り心地」を正しく評価できるよう、乗り心地としての不快感を尺度とした周波数振動ごとの影響を調べる基礎実験を実施した。

3. 振動周波数と乗り心地の関係を把握する実験

3.1 実験内容

実験は、図2に示す車内振動騒音評価シミュレータ(低騒音電動型振動台とスピーカー内臓半無響室で構成された振動と騒音の実験システム)を用いて実施した。

刺激振動は全て正弦波振動で、1～50Hzの範囲で14種類の周波数の振動評価を行った。1回の振動は62秒間で、徐々に増加し、最大振幅(実効値1.2m/s²)を2秒保持した後に減衰して停止した(図3)。また、振動台から

の音をマスキングするため72dB(A)の走行模擬音を流した。

被験者は二人用座席の片側に着座し(図2)、振動が「新幹線の乗り心地として許容できない」と感じられる大きさの間、手元の評価スイッチを押し続けた。

座席種別の違いや姿勢の影響など様々な設定で実験を行ったが、ここでは代表的なものとして、座席種別の影響比較実験について報告する。被験者は全て鉄道関係者で、実験条件と被験者属性を表1に示す。被験者の基本姿勢は、座席背もたれを少しリクライニングし、肘掛を使わない開眼状態とした。座席種別の影響を調べるため、新幹線普通座席(表1のNo.1)、新幹線グリーン座席(No.2)、在来特急普通座席(No.3)および木製の箱

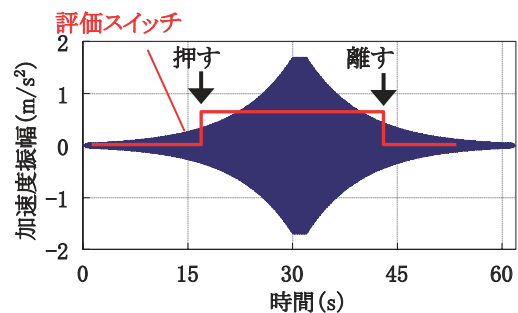


図3 刺激波形(10Hz条件)と評価スイッチの例

表1 座席性種別条件と被験者属性

No.	座席種別	人数	年齢 [歳]	身長 [cm]	体重 [kg]
		男性/女性	平均 (最小/最大)	平均 (最小/最大)	平均 (最小/最大)
1	新幹線普通座席	10/4	39 (28/49)	171 (159/183)	69 (46/105)
2	新幹線グリーン座席	16/4	36 (25/50)	170 (159/183)	66 (46/95)
3	在来特急普通座席	12/6	37 (26/51)	171 (159/184)	68 (48/90)
4	硬質座席	9/2	42 (34/50)	173 (159/183)	71 (46/95)

状硬質座席 (No.4) を用いて調査した。

硬質座席を用いた理由は、クッションや背もたれの影響比較を行うためである。また、人体への振動影響の既存研究は、現行の等感覚曲線の算出も含め、クッションのない硬質座席を用いるのが一般的で、現行の等感覚曲線と類似座席でのデータ比較を行うことも理由の1つである。なお、本研究は乗客の体感乗り心地をより正確に推定することが目的であるため、実際の利用状況と異なる硬質座席ではなく、あえて鉄道座席を用いてのデータ取得に努めた。

振動台の前後・左右・上下方向の加速度と被験者の評価スイッチ信号 (図3) を、200Hzのローパスフィルタ処理後、サンプリング周波数500Hzでデータレコーダに記録した。評価スイッチを押し始めた時点と離れた時点の床面の振動加速度実効値の平均値を、当該被験者のその振動に対する限界値とした。

3.2 実験結果と考察

2章で説明した等感覚曲線と実験結果を図4に示す。黒の太い一点鎖線は現行の等感覚曲線を示し、赤い太い実線は、実験結果を用いて改良した等感覚曲線である (詳細は後述)。座席種別ごとの実験結果は、全被験者の限界値の平均をプロットしたものである。

硬質座席を含めた実験結果は、左右・上下とも最も感じやすい周波数域は現行の等感覚曲線とほぼ一致したが、周波数の増加に伴い対数的に感度が鈍化する高周波域 (左右は2Hz以上、上下は8Hz以上) の傾きは、いずれの振動方向も現行の等感覚曲線ほど急峻に上昇せず、かつ類似の傾きを持った。これは、以下を示すものである。

① 現行の乗り心地レベルとしての評価よりも、実際は高周波振動を不快に感じている

② この傾きの傾向に、座席種別やクッション・背もたれの有無の影響はない

特に①は、現在、高周波振動が多く含まれる場合に乗り心地レベルが体感と合わない原因と考えられる。

4. 等感覚曲線と乗り心地フィルタの改良

3章の結果から、座席種別によらず高周波域の許容限界の変化 (傾き) は、図4の等感覚曲線 (改良) で表わすような共通の線で近似可能であることがわかった。また、ここで紹介できなかった調査として、背もたれをフルクライニングさせた場合や、眼を閉じた場合、肘掛を使った場合も検討したが、高周波域の傾きの傾向は、図4とほぼ同じであった。従って、乗り心地フィルタの改良として、上記3種類の座席実験 (実験1~3) の8~32Hzの結果を用いて、最小二乗法により傾きを求めて等感覚曲線を補正し、これに基づき乗り心地フィルタを改良した。なお、分析の上限を32Hzとしたのは、振動の影響に限定した乗り心地評価を対象としていることから、音による影響を考慮したためである。すなわち、走行模擬音で空気を伝って聞こえる音の影響を排除しているものの、振動台から直接骨を伝って聞こえる音 (骨伝導音) の影響が厳密には除去できないためである。

この結果から、左右2Hz以上、上下8Hz以上の乗り心地フィルタの高周波域の傾きを、現行の-6dB/Octaveから-2.7dB/Octaveに変更した改良フィルタを提案した (図5)。また、以後、改良フィルタを用いて算出した乗り心地レベルを L_{TN} とする。

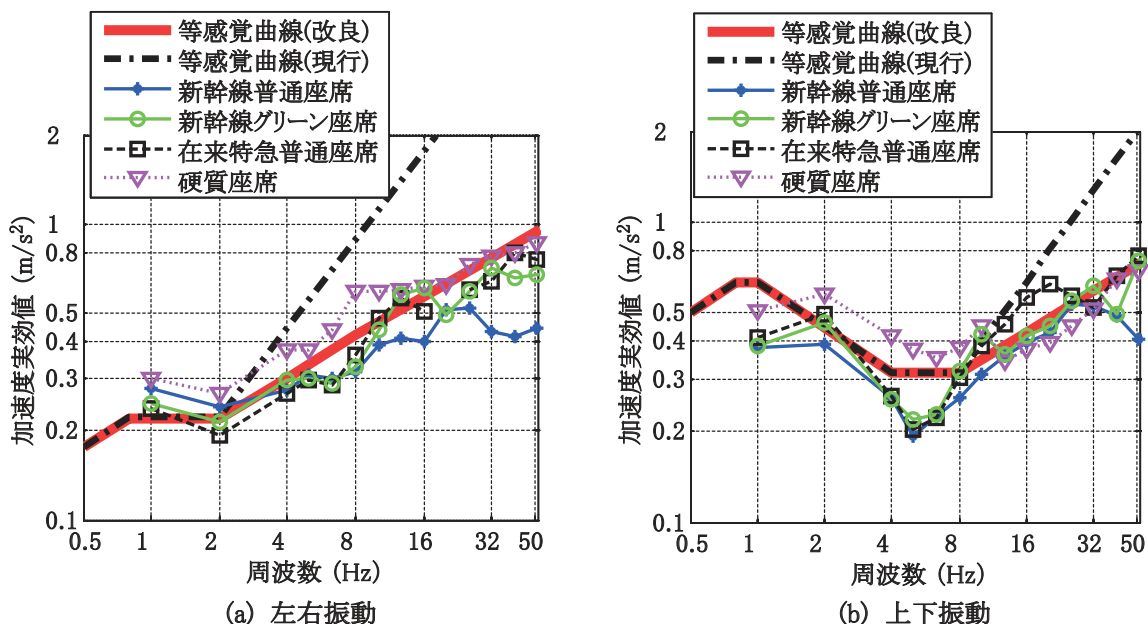


図4 許容限界平均値 (実験結果) と等感覚曲線

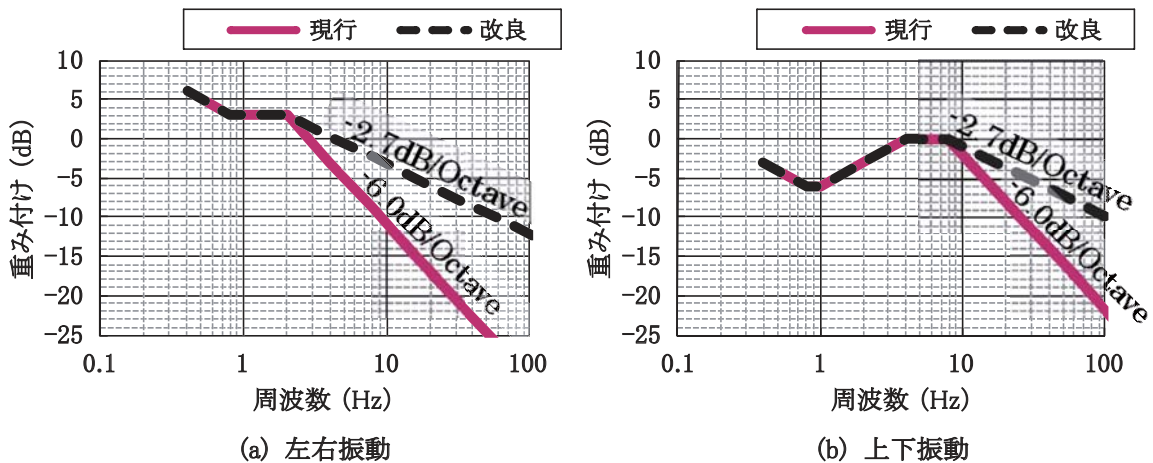


図5 乗り心地フィルタ（現行と改良）

5. 検証1（現車試験による有効性確認）

5.1 試験内容

改良フィルタは、周波数ごとの正弦波振動に対する不快感調査の結果に基づいて作成されたが、実際の列車では様々な周波数が混ざった広帯域の振動が生じる。このため、改良フィルタが実際の走行振動にも有効かどうかを検証するため、新幹線に被験者を乗車させた走行試験を、異なる車両で2回実施した。

1回目の試験は、被験者46名（一般利用者26名、鉄道関係者20名）、2回目の試験は鉄道関係者のべ32名で実施した。いずれも1回10分前後の長さの評価区間を設定し、被験者は5秒おきに乗り心地を5段階尺度（[1]:問題ない～[5]:非常に不快）で評価した。また、床面加速度から、現行フィルタによる乗り心地レベル (L_T) と改良フィルタによる乗り心地レベル (L_{TN}) それぞれを5秒ごとに算出し、被験者の評価との相関を調べた。

5.2 試験結果

2回目の現車試験の結果を図6に示す。上図は各評価区間の乗り心地レベル、下図は主観評価との相関係数を示し、左が左右振動、右が上下振動に対する評価である。この図から、改良フィルタを用いると、乗り心地レベルは、左右、上下振動ともに全ての評価区間において、主観評価との相関が、現行フィルタを用いたときより高いもしくは同等であることがわかる。紙面の都合で省略するが、1回目の現車試験の結果も、全ての評価区間で改良フィルタの方が主観評価との相関が高くなる結果を得ている。また、乗り心地レベルの値は、 L_T より L_{TN} の方が1～3dB高くなった。これは、この試験の走行振動に、評価に影響を及ぼす程度の高周波成分が含まれていたことを示す。ただし、この差は新幹線高速走行時に現れたものであり、高周波成分をあまり含まない在来線や新幹線低速走行時では差はほとんどなくなると考えられる。在来線の走行振動については、次章で検証する。

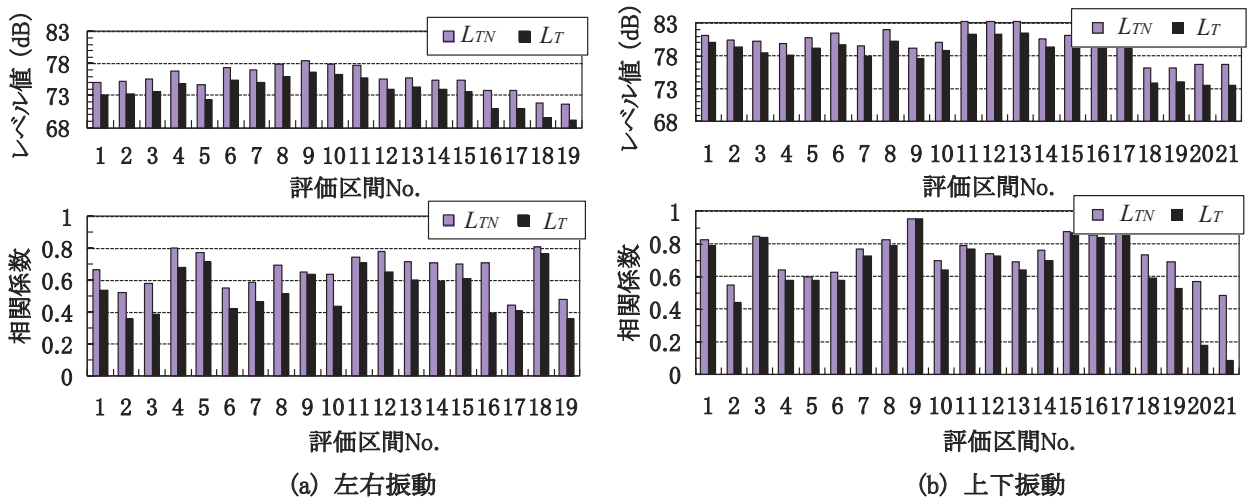


図6 走行試験における乗り心地レベル値と主観評価との相関係数

6. 検証2 (シミュレータによる在来線と新幹線の走行振動試験)

6.1 試験内容

在来線と新幹線の走行振動を連続して被験者に評価させる実験を行った。この実験の目的は、現車試験では実現不可能な、異なる車両・速度条件の連続評価を車内振動騒音評価シミュレータを用いて行い、より広い範囲で改良フィルタの適用性を検証することである。被験者は、鉄道関係者55名、一般利用者71名の合計126名である。

刺激振動は、在来線特急(130km/h)と新幹線(270km/h)の走行振動を各3分間つなぎ合わせたものである。刺激振動のパワースペクトル密度(PSD)を図7に示す。振動方向は、左右と上下とした。また、実験中は、振動台から発生する音のマスクングと車内の臨場感を与えるため、新幹線、在来線とも高速走行中の新幹線走行音を流した。音の大きさは、新幹線明かり区間270km/h走行と同程度の65dB(A)とした。

被験者2名は二人用座席に並んで着座した状態で評価を行った。被験者は、連続提示される振動を、5秒おきに5段階で評価した。評価尺度は、「新幹線の乗り心地をイメージした5段階の不快感(1:問題ない~5:非常に不快、を両端とする5段階尺度)である。被験者は、評価練習を行った後に本番に入った。本番は上下振動のみ、左右振動のみを、数分の休憩を挟みながら実施した。測定項目は3章の実験と同じため詳細は省略する。

6.2 試験結果

試験結果を図8に示す。図の上段は現行フィルタと改良フィルタを用いて算出した乗り心地レベルの値LTとLTN、図の中・下段は押しボタンによる主観評価平均との相関係数を示す。これらの試験結果から以下のことがわかった。

① 新幹線条件では、現行フィルタと改良フィルタによ

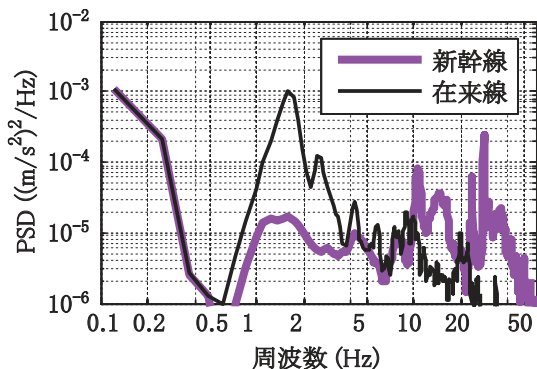


図7 実験に用いた在来線と新幹線の走行振動のパワースペクトル密度(左右振動)

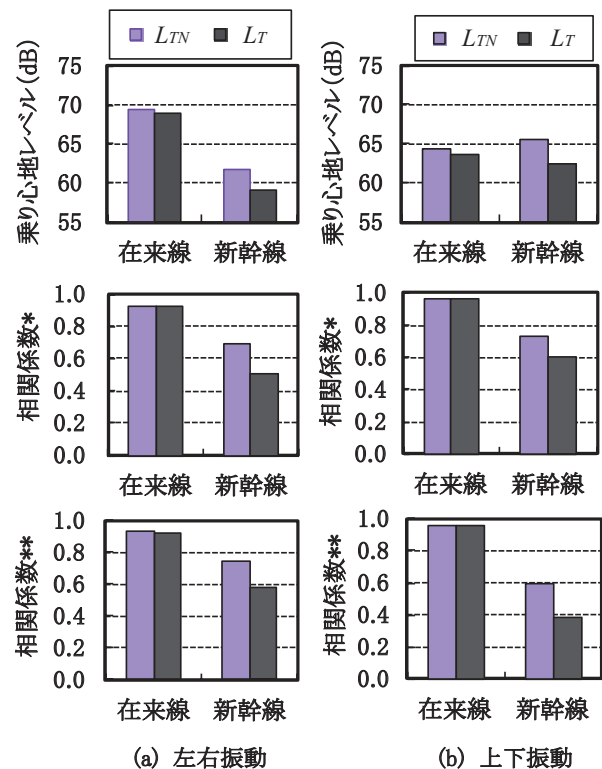
る乗り心地レベルの平均に2.7dBの差が生じた。また、主観評価との相関は改良フィルタを用いた方が高く、5章の現車試験と同様の結果となった。よって、新幹線の高速走行のように高周波成分の寄与が高い場合であれば、改良フィルタを用いた方がより体感と合った評価となる。

- ② 在来線条件では、乗り心地レベルは現行フィルタと改良フィルタいずれを用いてもほぼ同じ値となり相関係数も一致した。よって、在来線のように高周波成分の寄与が低い場合は、どちらの評価方法を用いてもほぼ同じ結果となるため、改良フィルタを在来線に用いても問題ない。
- ③ 鉄道関係者は一般利用者と比べ乗り心地を厳しく評価すると言われるが、両者の主観評価平均の時系列変化の相関係数は、左右・上下とも0.96と非常に高く、統計的検定でも有意差はみられなかった。よって5章、6章の試験では、鉄道関係者と一般被験者を同列に扱って問題ないことが確認された。

7. 検証3 (騒音の影響調査試験)

7.1 試験内容

主な走行振動の帯域は音として聞こえないが、特に30Hz付近の振動は、低い音(低周波音)として人間に聞こえる周波数である。このため、低周波音が振動乗り心



相関係数*: 一般利用者, 相関係数**: 鉄道関係者
図8 在来線と新幹線の走行振動に対する評価

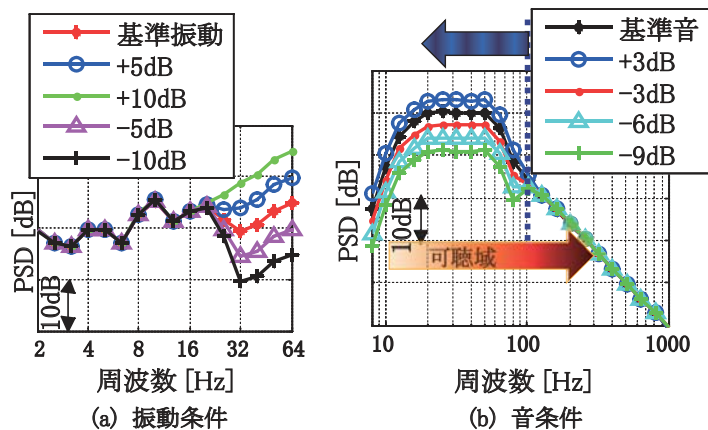


図9 刺激条件

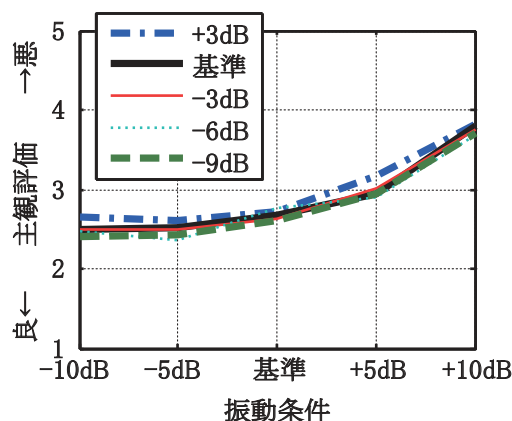


図10 振動と音の30～100Hz成分が主観評価に及ぼす影響

地に影響を及ぼすことが懸念される。そこで、車内振動騒音評価シミュレータを用いた走行環境（走行振動と走行音の複合環境）において、高周波振動と同帯域の音が、振動乗り心地評価に影響を及ぼすかどうかを調査した。具体的には、走行振動の30Hz以上、走行音の100Hz以下の成分を増減させ、高周波振動と同帯域の低周波音が、振動乗り心地評価に及ぼす影響を調査した。

実験条件として、下記の振動5条件と音5条件の組み合わせ25条件を評価対象とした（図9）。なお、1つの条件の長さは1分である。

- ① 振動：基準振動（新幹線の320km/h トンネル走行時の振動）と増減条件（基準振動の30Hz以上の高周波振動成分が±5, ±10dB変化した4条件）の5条件
- ② 音：基準音（新幹線の320km/h トンネル走行時の車内音）と増減条件（基準音の100Hz以下の低周波音成分が±3,-6,-9dB変化した4条件）の5条件

被験者2名は二人用座席に並んで着座し評価を行った。被験者は、30秒間、振動と音を体感した後、評価用紙に評価を記入した。評価用紙は、乗り心地としての①振動、②音、③振動と音、それぞれの不快感の印象を5段階評価で答えるものである。

7.2 試験結果

振動騒音評価試験の結果の一部を図10に示す。これは試験条件ごとに「振動乗り心地としての不快感」を尋ねたときの評価平均を音条件別にプロットしたものである。

この結果、振動乗り心地の主観評価は、走行振動の30Hz以上の成分（高周波成分）の増減に影響され、高周波成分が増加すると、最大で主観評価が1段階悪化した。しかしながら、音条件の違いを示す線種は図からも分かるようにほぼ重なっており、振動評価に音条件の違いは影響しなかった。

この結果から、振動乗り心地の評価に、走行音の低周波成分はほとんど影響しないことがわかった。

8. まとめ

高周波振動を含む振動環境でも、より体感と合う評価ができるよう、乗り心地レベルで用いる乗り心地フィルタの改良を行い、現車試験や振動台試験で改良フィルタの有効性を確認した。また、高周波振動と同帯域の音が、走行環境で振動乗り心地に影響を与えないことを確認した。

改良した乗り心地フィルタでは、高速鉄道など高周波振動が多く含まれる場合は、体感乗り心地とより合致した評価が可能である。また、在来線のように高周波振動があまり含まれない場合は、現行フィルタを用いたのほぼ同じ評価値を算出する。

実際に際しては、現行の乗り心地レベルで用いる乗り心地フィルタをこの改良フィルタに置き換えるだけで良く、乗り心地レベルの算出方法および尺度は現行のものがそのまま適用される。

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

文献

- 1) 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
- 2) 中川千鶴，島宗亮平，白戸宏明，富岡隆弘，高見創，渡邊健：高周波上下振動が乗り心地に及ぼす影響，鉄道総研報告，Vol.23, No.9, pp.35-40, 2009
- 3) 中川千鶴：高速鉄道の乗り心地評価を考える，RRR，Vol.67, No.5, pp.18-21, 2010
- 4) 鈴木浩明：鉄道車両の振動乗り心地に関する人間科学的研究，鉄道総研報告（特別号），No.24, 1998