

高周波振動に対する体感を反映した乗り心地評価手法の改良

人間科学研究部 人間工学研究室
主任研究員 中川 千鶴

1. はじめに

昨今の技術開発や保守整備の努力により車両の振動は低減され、新幹線の乗り心地はこの数十年間で大きく向上した。その一方で、高速化に伴う「びびり振動」のような 30Hz 付近の高周波振動が増え、主要な乗り心地評価法の一つである乗り心地レベル¹⁾で高速鉄道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。これが体感乗り心地に影響を与えている。なぜなら、乗り心地レベルは高周波振動の影響をほとんど反映しないからである。

このため、本研究では、振動体感実験を実施し、振動周波数が乗り心地に及ぼす影響を調査した。この結果に基づき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、新幹線だけでなく在来線への適用も可能であることを確認した。

本稿では、改良の基礎となった実験および走行振動による改良法の検証結果について報告する。

2. 乗り心地レベルとは

乗り心地レベル¹⁾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周波数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振動の周波数成分に重みづけを行い、その実効値から算出される。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)は高い重み付け、あまり感じない成分は低い重み付けで加算されるため、左右振動は2Hz以上で、上下振動は8Hzで対数的に重み付けが低くなる(図1)、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、評価に影響しなくなる。

3. 振動周波数が乗り心地に及ぼす影響調査

(1) 実験システムと実験方法

等感覚曲線の妥当性検証を目的として、振動周波数ごとの乗り心地に及ぼす影響を調べる実験を行なった。実験は、図2に示す車内振動騒音評価シミュレータ(低騒音動電型振動台とスピーカー内臓半無響室で構成された実験システム)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(1.2m/s²・rms)を2秒間保持した後、徐々に減衰して停止した(図3)。また、振動台からの音をマスクするため、評価中は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、提示される振動が「新幹線の乗り心地として許容できない」大きさの間、手元の

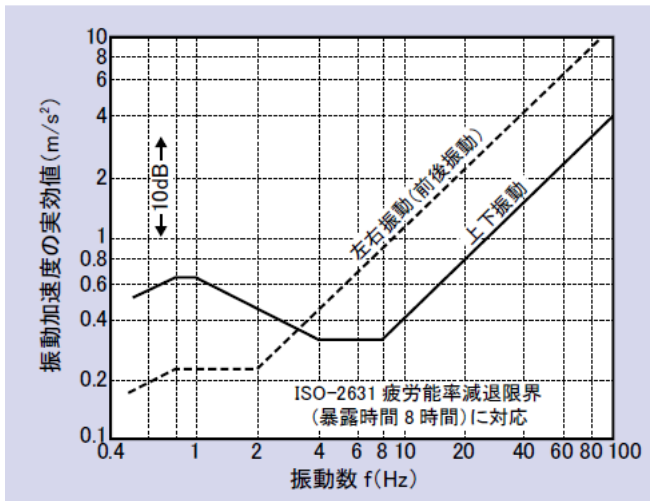


図1 等感覚曲線



図2 試験の様子

評価スイッチを押し続けた。

(2) 座席種別と被験者

振動以外の条件についても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を紹介する。座席種別の影響を調べるため、①新幹線普通座席、②新幹線グリーン座席、③在来特急普通座席の3種類の座席を用いて調査した(実験①～③)。なお、実験装置の都合で、新幹線普通座席の左右振動条件はマスク音なしで実施した。各実験の被験者数は、実験①：14名、実験②：20名、実験③：18名で全て鉄道関係者である。

(4) 測定項目と評価スイッチデータの処理

振動台の加速度と被験者の評価スイッチ信号(図3)を同時に測定した。評価スイッチの押し始めと離れた時点の床面加速度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。

(5) 実験結果と考察

等感覚曲線と実験結果を図4に示す。等感覚曲線は、先にも述べたように、値が小さいほどその周波数の振動を「大きく」感じることを示している。一方、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、値が小さいほどその周波数の振動を「不快に」感じることを示している。黒の太い一点鎖線は現行法の等感覚曲線を示し、赤色の太い実線は、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)。

図から実験結果は、左右・上下とも最も感じやすい周波数域はほぼ現行の等感覚曲線と一致したが、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、どの条件も類似の傾きを持った。これは、現行の乗り心地レベルが想定するよりも高周波振動に対する許容限界が低い、つまり不快に感じやすいことを示しており、これが、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くなっている原因と考えられる。なお、左右振動の新幹線普通座席の結果が30Hz以上で急激に落ち込んでいるのは、この調査だけ装置初期に実施したためマスク音が付加できず、30Hz以上の振動が音(低周波音)としても知覚され、振動の印象を強くした可能性が高い。

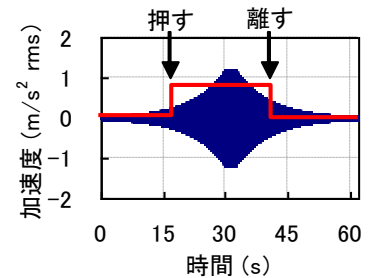


図3 刺激波形(10Hz)と評価スイッチ信号の例

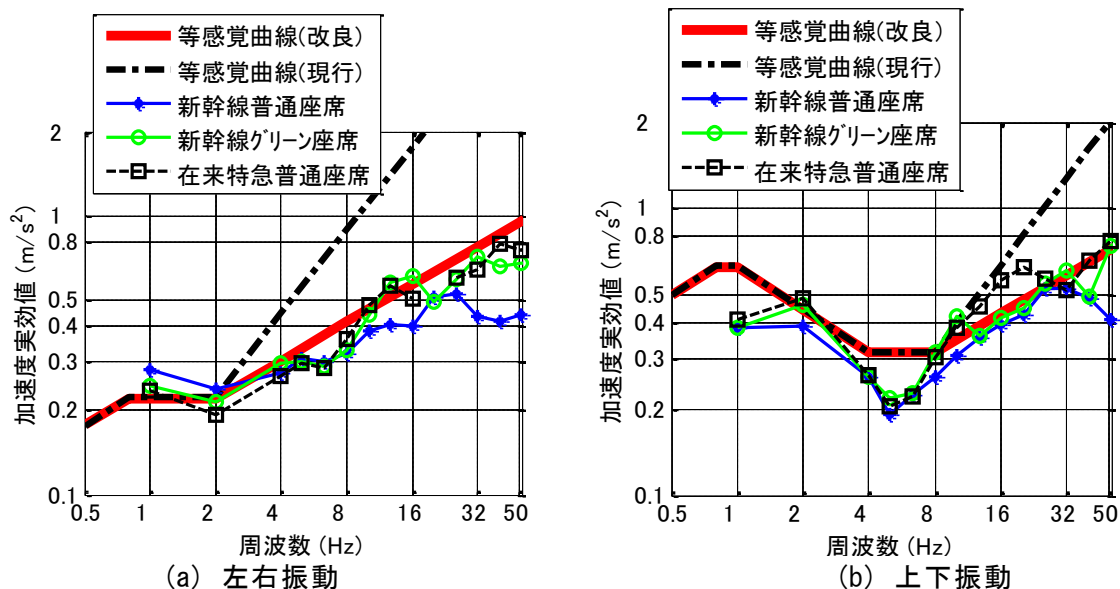


図4 等感覚曲線と許容限界平均値（実験結果）

4. 等感覚曲線と乗り心地フィルタの改良

これらの結果から、座席形状が異なっても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）で表わす共通の線で近似可能であることがわかった。この他にも、背もたれをフルクライニングさせた状態、閉眼状態などでも検討したが、高周波域の傾きは図4とほぼ同じであることを確認した。

上記3種類の座席実験結果を用いて最小二乗法により左右2Hz以上、上下8Hz以上の高周波域の傾きを求めたところ、左右・上下とも -2.7dB/Octave となった。よって、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 に変更することを提案した（図5）。

5. 走行振動による有用性の確認

(1) 新幹線現車試験による確認

改良法は正弦波振動に対する人間の乗り心地としての不快感に基づき作成された。しかし、実際の列車では様々な周波数の振動が含まれる。このため、改良法の走行振動に対する適用を検討するため、新幹線に被験者46名を乗せた現車試験を実施した²⁾。この試験では、10分前後の試

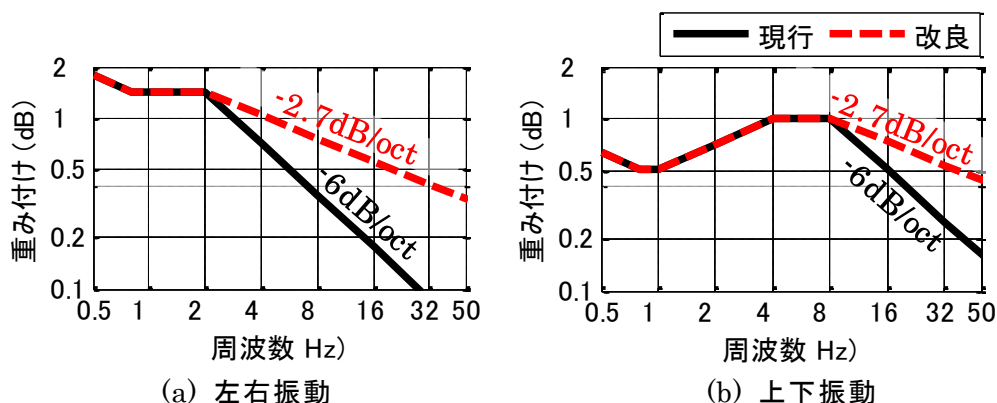


図5 乗り心地フィルタ（現行法と改良法）

験を 19 回実施し、試験中、被験者は 5 秒おきに上下振動の乗り心地を 5 段階で評価した。この結果、全ての試験で改良法が現行法より主観評価との相関が高くなった。また、他の新幹線で左右振動についても同様の現車試験を行ったが、同様の結果を得た。

(2) 在来線と新幹線の走行振動による確認

現車試験では、異なる車両・速度条件の連続評価は不可能だが、車内振動騒音評価シミュレータを用いて在来線と新幹線の走行振動を連続再生した評価実験を行った。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、振動方向は、左右と上下とした。また、実験中は、振動台からの音のマスクングおよび臨場感を与えるため、高速走行中の新幹線走行音（65dB(A)）を流した。

被験者 2 名は二人用座席に着座し、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。

図 6 に、現行法と改良法で算出した乗り心地レベルの値（上段）と、押しボタンによる主観評価平均との相関係数（下段）を示す。結果として、在来線条件では、現行法と改良法の乗り心地レベルはほぼ同じ値となった。これより、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値が算出されることが確認された。また、新幹線条件では、走行試験と同様に主観評価との相関は改良法の方が高く、高周波成分の寄与が高い場合は、改良法を用いた方がより体感と合った評価が可能であることが再確認された。

6. おわりに

高周波振動が含まれる振動環境でも、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フィルタの改良を行い、現車試験や振動台試験で新しい乗り心地評価法の有効性を確認した。

実用に際しては、現行の乗り心地レベルで用いる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を適用することができる。

今後は、この改良フィルタが様々な鉄道車両の評価に活用されるよう積極的に支援する所存である。

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。

参考文献

- 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，島宗，渡邊，白戸，高見，富岡：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, (2009)，pp.35-40

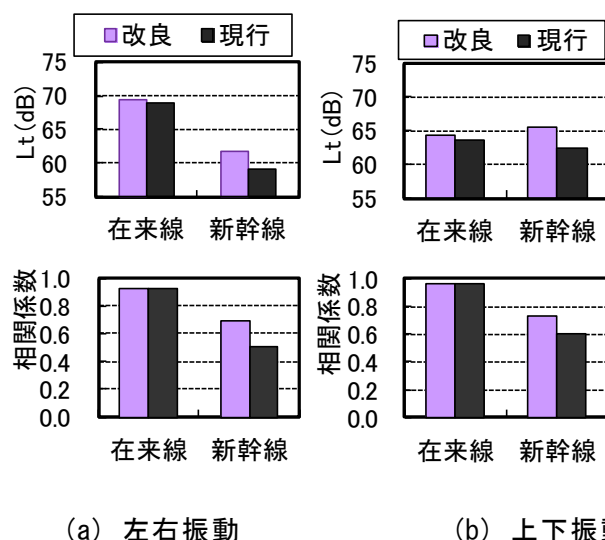


図 6 在来線と新幹線の走行振動に対する評価