

高速鉄道の乗り心地評価を考える

中川 千鶴

人間科学研究部(人間工学 主任研究員)



なかがわ ちづる

はじめに

「乗り心地の良さ」は、乗り物の重要な魅力の1つです。特急列車や新幹線は、特に乗り心地に対するお客様の期待が高いことが過去の調査でもわかっています。

このように、旅客に重視される「乗り心地」は、様々な技術により進歩してきました。数十年前の鉄道と今の鉄道では、速さも快適性も格段の違いがあります。しかし、「快適」と感じるかどうかは、その人の期待値との差で決まるので、今の快適な鉄道に慣れた旅客の要求もまた、より高く厳しくなっていくという側面があります。

同じ列車が高速で走れば基本的に振動は増加します。しかし、制御や保線などの様々な技術が、乗り心地に影響しやすい振動を低減し、「高速でも揺れない鉄道」を実現してきました。その一方で、従来はあまり問題とされなかった、ビリビリするような高い周波数の振動(以下、高周波振動と呼びます)が増え、乗り心地に影響するようになってきたのです。これは、今まで気になっていた振動が低減されたために、高周波振動に注意が向きやすくなったという、イタチごっこのような面もありますが、これからの高速鉄道は、お客様のより高い評価を得るため、この高周

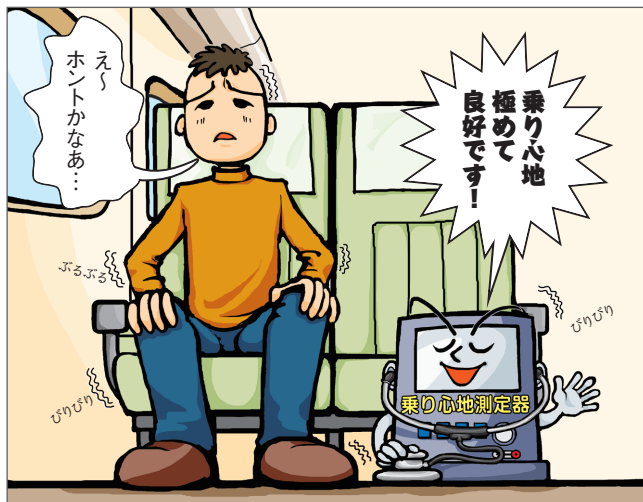
波振動の問題にも取り組む必要があります。しかしながら、現在最もよく使われている乗り心地評価法(乗り心地レベル)は、このような高周波振動が鉄道ではほとんど生じなかった国鉄時代に作られたもので、高周波振動が生じていても、評価にほとんど反映されません。つまり、実際乗車している人はビリビリした振動が生じると乗り心地が悪化したように感じるのに、乗り心地レベルによる評価は悪くならないという問題が生じているのです。

そこで、鉄道総研では、高周波振動が生じていても乗り心地を評価できる方法を検討しています。ここでは、従来の乗り心地評価法である「乗り心地レベル」の問題点と、これを改良する取り組みについてご紹介します。

乗り心地レベル(現在の代表的な乗り心地評価法)

(1) 乗り心地レベルによる評価

乗り心地レベルは、国際規格であるISO2631(1974年制定、1985年改定)をもとに、1981年の国鉄時代に提案された乗り心地評価法です¹⁾。ISO2631では1Hz以上の範囲しか定義していないのに対し、乗り心地レベルでは一般の列車走行で生じる低周波の振動域(0.5~1Hz)まで拡張して、上下と左右(前後)それぞれの「等感覚曲線」を定義しています(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、この値が小さければ小さいほど、小さくても等しく感じる、つまり、人間にとって大きく感じやすい振動であることを意味しています。実際の乗り心地の評価は、この等感覚曲線をもとにした乗り心地フィルタ(重み付け曲線)を用いて、その振動の乗り心地レベル値を計算します。乗り心地レベルの値が大きいほど乗り心地が悪く、小さいほど乗り心地が良いことを意味します。ちょっとわかりにくいですが、要は、その列車の振動の中で、大きく感じる成分(等感覚曲線の値が小さい成分)には、成分量に比例して高い倍率(重み付け)で得点が加算され、あまり感じない成分



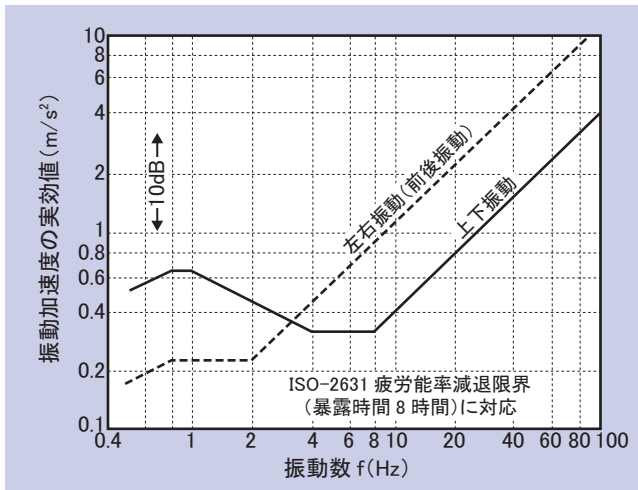


図1 等感覚曲線

表1 乗り心地レベルと振動区分

区分	乗り心地レベル	評価
①	83dB 未満	良 ↑
②	83dB 以上 88dB 未満	
③	88dB 以上 93dB 未満	
④	93dB 以上 98dB 未満	↓ 悪
⑤	98dB 以上	

には低い倍率（重み付け）で加算されます。その総合点で、その振動の乗り心地のレベルを表現しようという考え方です。この計算値を乗り心地レベル値 (L_T) といい、その値を表1のような5段階に分けて評価します。図1からわかるように、上下振動の場合は8Hz、左右振動の場合は2Hz以上で対数的に重み付けが低くなる、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、評価に影響しなくなります。

(2) 乗り心地レベルの問題点

先ほど述べたように、等感覚曲線は、「同じ大きさ」に感じる周波数ごとの加速度を示しています。ここで重要なのは、等感覚曲線が示しているのは、同じ「大きさ」と感じる振動加速度の実効値であって、同じ「不快感」を与える振動加速度の実効値ではないことです。人体の共振周波数（上下方向で5Hz付近、左右方向で2Hz付近）に近い比較的低い周波数では、「大きく感じやすい」振動は「不快に感じやすい」と考えられます。このため、高周波があまり生じなかった従来の鉄道は、大きさを基準とした乗り心地レベルで評価できました。しかし、ビリビリとした高周波振動は、触れている皮膚表面だけを僅かに震わせるような



図2 振動台上の座席に着座した被験者

振動です。決して「大きく」は感じないが、「不快」に感じる、そんな振動なのです。

高周波成分があると体感乗り心地と乗り心地レベル評価が合わなくなるのは、乗り心地レベルの高周波振動に対する重み付けが低すぎるのが原因ではと私達は考えました。

そこで、本当に高周波振動に対する人間の感度がこれほど鈍いのかどうかを調べる実験を行いました。なお、鉄道での高周波が顕著なのは上下方向の振動のため、実験は上下方向を中心に行いました。

振動台実験

(1) 被験者と実験装置

実験は、鉄道総研の低騒音型3軸振動台の上に新幹線用普通座席（二人用）を載せ、そこに被験者が座った状態で行いました。被験者は全て鉄道関係者で、図2の写真のように目を開けて座っている状態や、上下振動に対しては、背もたれを最もリクライニングさせた状態、目を閉じた状態など、様々な条件で行いました。

(2) 実験条件と加速度測定

1～80Hzの範囲の様々な周波数の正弦波振動を体感してもらいました。その振動が徐々に大きくなっていくときと徐々に小さくなっていくときに、「新幹線の乗り心地として許容できない」と感じている間は評価ボタンを押し続けてもらいました。また、1つの振動条件が終了するごとに質問紙に記入していただきました。加振中の床面と座面や背もたれの振動を加速度計で測定しました。

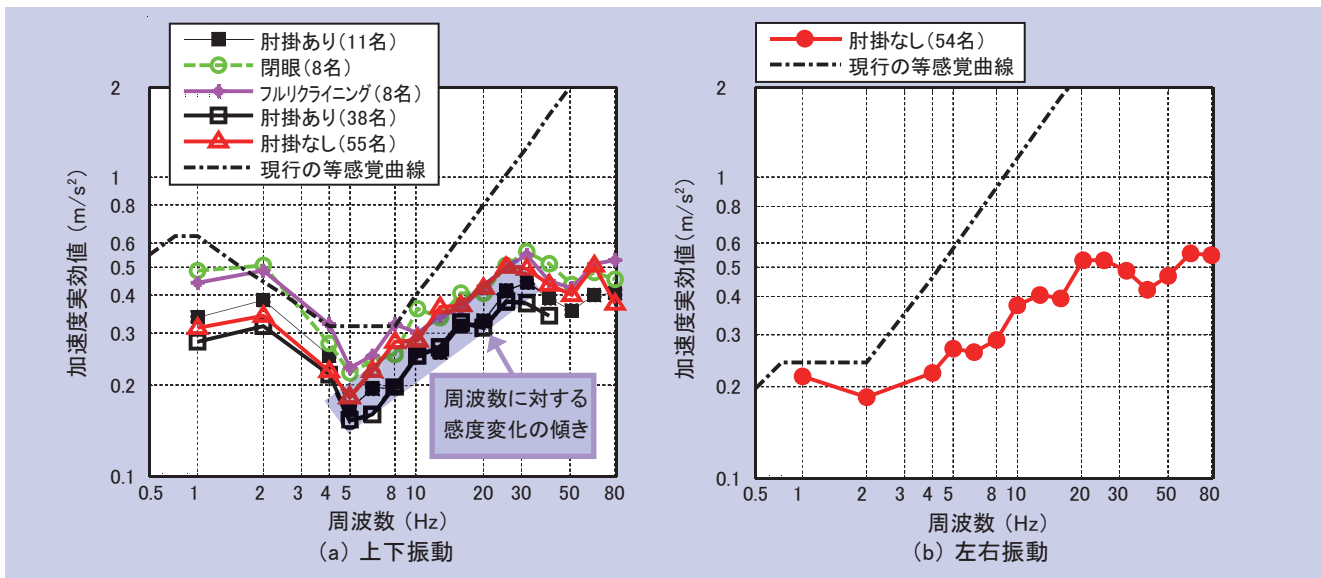


図3 許容限界平均値(実験結果)と乗り心地レベルに用いられる等感覚曲線

(3) 実験結果

評価ボタンが押されたときの周波数ごとの全被験者加速度平均を図3に示します。(a)は上下振動刺激、(b)は左右振動刺激に対する実験結果と乗り心地レベルの等感覚曲線です。値が小さいほど、その周波数の振動を人間が感じやすい(感度が高い)ことを意味しています。

図3(a)での、異なる条件での5つの実験結果を比較すると、閉眼やフルリクライニングのほうが、全体的に上にあり、感度が鈍い傾向がありました。一方、肘掛利用の「あり」と「なし」の結果を比較すると、5Hz以上では肘掛ありの方が全体的に低く、肘掛を使った方が感度が高いことがわかります。このように、条件によって全体的に値は上下するものの、周波数に対する感度変化の傾き(図の半透明の紫色線の傾き)は、条件が異なってもほぼ同じでした。

この実験の目的は、乗り心地レベルでの高周波域の重み付けが妥当かどうかを調べることで、重要なのは値ではなく、周波数に対する線の傾きです。つまり、等感覚曲線の高周波域での傾きがこれで良いのかを調べるのが重要です。実験の結果は、「上下方向も左右方向も、高周波振動が与える『乗り心地としての不快感』は、乗り心地レベルが想定しているより大きい」というものでした。つまり、等感覚曲線に基づく乗り心地レベルは、高周波振動が乗り心地に与える影響を過少評価していることがわかったのです。また、上下振動でしか確認していませんが、眼の閉眼や肘掛の有無、リクライニングの程度の違いなど異なる条件でも、振動周波数に対する変化の傾きの傾向は、ほぼ同じでした。また、私達の先行研究²⁾では、性別、身長、体重が異なっても、変化の傾きの傾向はほぼ同じでした。

乗り心地フィルタの補正案の作成と検証

(1) 乗り心地フィルタ補正案の作成

上下振動用の乗り心地フィルタ(図4の黒実線)を8Hz以上の高周波の範囲だけ、図4の点線のように補正する案を作成しました。この点線の傾きは、図3(a)の実験結果から導いたものです。

(2) 補正案の検証

補正案を検証するため、実際の新幹線で、46名の被験者(一般被験者26名、鉄道関係者20名)による乗り心地試験を行いました。実験では、被験者は5秒おきに押しボタンを使って、乗り心地を5段階(①「全く問題ない」～⑤「非常に不快」)評価しました(図5)。1つの評価区間の長さは10分前後で、評価区間によって、立位姿勢や座位姿勢で評価を行いました。

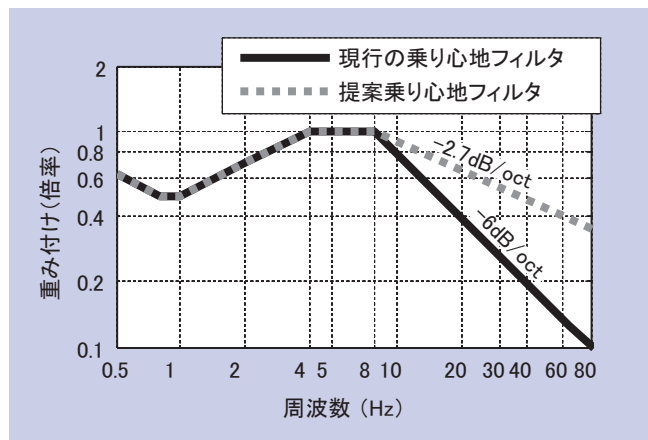


図4 乗り心地フィルタ(上下振動)



図5 現車実験の様子

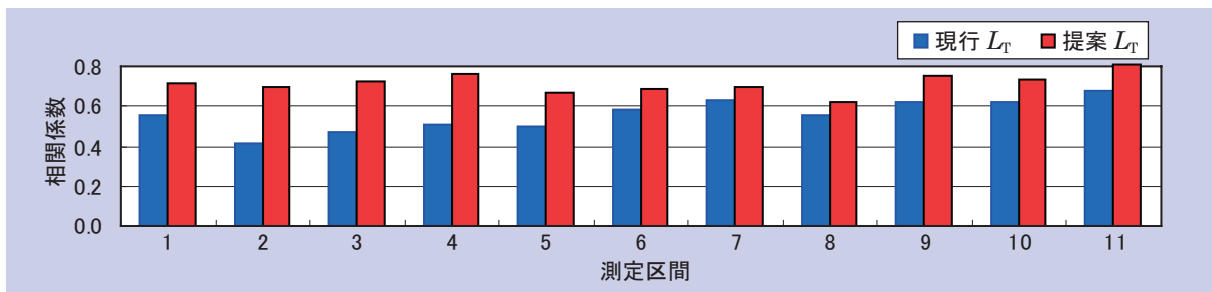


図6 各測定区間における現行 L_T と提案 L_T の主観評価との相関係数

(3) 実験結果

床面の上下振動から、従来の乗り心地レベル値（現行 L_T ）と（1）の補正乗り心地フィルタを用いた乗り心地レベル値（提案 L_T ）を算出しました。測定を行った19区間中、その区間の最高速度と最低速度の差が15km/h以内で評価変動が極めて少なかった6区間と、前後方向に大きな振動が生じた2区間を除く11区間を分析対象として、現行 L_T 、提案 L_T と主観評価（評価ボタン平均値）の相関を調べました。この結果、全区間で、提案 L_T のほうが現行 L_T より主観評価と相関が高くなりました（図6）。

まとめ

従来の乗り心地レベルでは、高周波振動が乗り心地に及ぼす影響を必ずしも反映できていないことが、実験で確認されました。また、背もたれの角度や眼の開閉状態などが違っても、振動周波数が乗り心地に与える影響の変化は、ほぼ同じでした。そこで、実験結果に基づいた乗り心地フィルタの補正案を作成し、この補正案の妥当性を検証すべく、現車での被験者による乗り心地試験を実施しました。この結果、全ての測定区間で、現行法より補正案のほうが、実際の乗り心地主観評価と相関が高くなりました。よって、乗り心地フィルタを補正することで、体感乗り心地とより

相関の高い乗り心地評価が可能であると考えます。

おわりに

本検討では、高周波振動が顕著な上下振動を中心に実施しましたが、乗り心地という観点では左右方向の振動も重要であり、今後は左右についても同様の検討を勧める予定です。また、20Hz以上の振動は音として耳に聞こえる場合があり、音の影響調査³⁾も重要です。乗り心地評価法としての信頼性を高めるためには、今後、座席種類の影響や、異なる線区、車両での確認実験が必須と考えています。

本研究の一部は国土交通省の補助金を受け実施しました。

RRR

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，水上直樹，渡邊健，星野宏則，鈴木江里光：高周波振動が乗り心地に及ぼす影響に関する基礎的検討，鉄道総研報告，Vol.22，No.11，pp.11-16，2008
- 3) 中川千鶴，高見創，渡邊健，星野宏則，水上直樹，鈴木江里光：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