

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

高周波振動の影響を考慮した 乗り心地評価法

近年の鉄道的高速化に伴い、車内の高周波振動が増える傾向にありますが、代表的な乗り心地評価法である乗り心地レベルは高周波振動を過小評価するため、乗り心地評価法の改良を行いました。これにより、新幹線等の高速鉄道では体感と合った評価が可能となり、在来線でもこれまでと同じように評価に用いることができます。本稿ではこの改良法を紹介するとともに、乗り心地評価に関する国際基準の動向も合わせて報告します。



中川 千鶴
Chizuru Nakagawa
人間科学研究部
人間工学研究室
主任研究員
[専門分野] 人間工学,
生体医工学, 乗り心地
評価

はじめに

安全性や正確性、速達性が高いレベルにある日本の鉄道において、付加価値として今後さらなるレベル向上が求められるのは、利便性と快適性ではないでしょうか。快適性には様々な要素がありますが、ここでは乗客の快適性の基盤となる振動乗り心地について考えます。乗り心地向上のためには、旅客の感じる乗り心地をいかに推定するか、つまり乗り心地評価法が必要です。そのために、国際的にはISOやEN(欧州規格)があり、日本では「乗り心地レベル」という国鉄時代からの評価指標を主に使っています。しかしながら、近年、乗り心地レベルが、高速走行時やトンネル内などで増加しやすいビリビリするような高い周波数の振動(以下、高周波振動)の乗り心地影響をあまり反映しないことが問題となっています¹⁾。

本稿では近年の乗り心地評価に関する国際動向をご紹介します。鉄道総研が現在提案する、高周波振動にも対応可能な改良乗り心地レベルについてご報告します。

乗り心地評価基準の国際的な動向

ISO 2631

乗り心地の国際基準として、ISO 2631があります(☞参照)。ISO 2631は1974年に策定されたもので、建物・乗り物・産業機械(トラクターなど)全般における全身振動暴露の限界値の規定とそれに基づく重み付け曲線(☞参照)が提案されました。図1に、重み付け曲線を示します(黒実線)。

その後、1997年にISO 2631は大幅に改定されました。改定対象の1つは重み付け曲線で、前後・左右方向はWd(図1(a)の青点線)、上下方向はWk(図1(b)の青点線)です。図からわかるように、前後・左右方向の改定

☞ ISO

International Organization for Standardizationの略で、本部をスイスのジュネーヴに置く国際標準化機構およびここが発行した国際規格のことです。

☞ 重み付け曲線

振動周波数の違いが人間に及ぼす影響の大きさを表しています(値が大きいと影響も大きいことを意味します)。

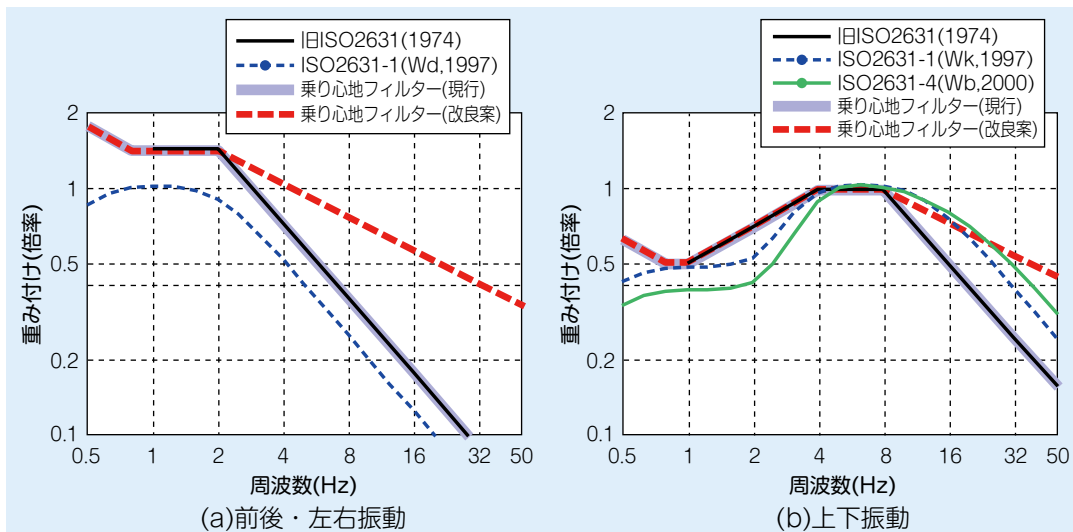


図1 ISO 2631の改定前後の重み付け曲線と乗り心地フィルター（現行と改良案）

(図1 (a) の黒実線→青点線)は、全体に重み付けが下がり0.5Hzまで拡張したものの、2Hz以上の傾きは変わらず、ほぼ旧ISOを踏襲しました。一方、上下方向の改定(図1 (b) 黒実線→青点線)は、8Hz以上の高周波の重み付けは大きく、逆に2Hz付近の重み付けは小さくなりました。また、2000年に鉄道を含む軌道車の乗り心地に限定したガイドラインが提案され、ここではWkよりさらにこの傾向が強いWb(図1 (b) の緑線)の使用も認められました。

ISO改定のもう1つの特徴は、12軸測定推奨(床面3方向に、座面6方向と背もたれ3方向を加えた12軸)で、シート背面用および回転軸用の重み付け曲線も提案されました。しかし、測定や処理の煩雑さや悪化原因の特定のにくさから、日本の鉄道分野では床面だけの測定で算出できる乗り心地レベル(後述)が主に用いられています。

EN12299

ISOではありませんが、鉄道が複数の国を横断するヨーロッパでは欧州基準EN12299(1999年)が使われています。用いる重み付け曲線はISOと同じで、前後・左右振動にはWd,上下振動にはWbを用います。

EN12299は評価の方法がより具体的に提案されており、評価値の算出時間も5分間と定められています。評価式は、標準式と詳細式(座位用と立位用)があり、詳細式の座位用では、ISOと同様、床面だけでなく、座面や背もたれの加速度測定が必要です。標準式は床面3軸の加速度計測で求められます。5分間の評価区間を5秒ずつ区切って方向別に実効値を計算し、その95%タイル値を式1のように合成して求めます。

$$N_{MV} = 6 \cdot \sqrt{(a_{XP95}^{W_d})^2 + (a_{YP95}^{W_d})^2 + (a_{ZP95}^{W_b})^2} \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

$a^{W_i}(t)$: 重み付け処理後の加速度の実効値
 $a_{XP95}^{W_i}$: 5分間の $a^{W_i}(t)$ の95%タイル値

乗り心地レベル

日本の鉄道分野で用いられている最も代表的な乗り心地評価法は「乗り心地レベル」というもので、1981年に策定されました²⁾。乗り心地レベルでは、当時のISO 2631が示した全身振動暴

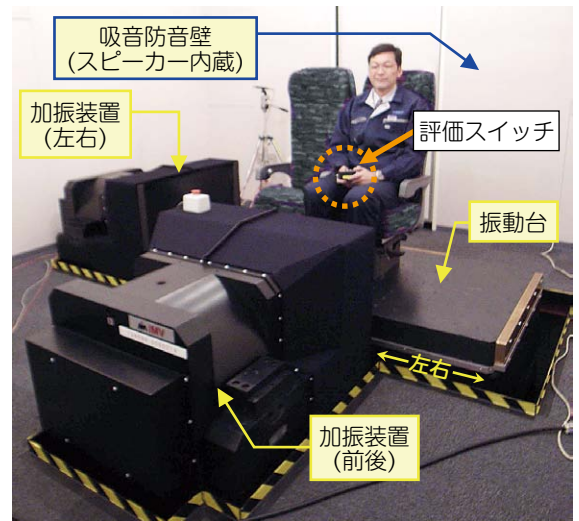


図2 車内振動騒音評価シミュレーターを用いた実験の様子

露の限界値を元に、0.5~1Hzの範囲を拡張して、上下方向、左右・前後方向の振動周波数に対する「等感覚曲線」を定義しています(図3の黒一点鎖線)。等感覚曲線は、周波数ごとの「同じ大きさ」と感じる加速度実効値を示し、この値が小さいほど、その振動周波数は大きく感じやすいことを意味します。乗り心地レベルは、この等感覚曲線を論拠とした「乗り心地フィルター(乗り心地レベル用の重み付け曲線、図1の薄紫太線)」を用いて、振動に含まれる周波数成分ごとに重み付け処理し、その実効値から算出します。

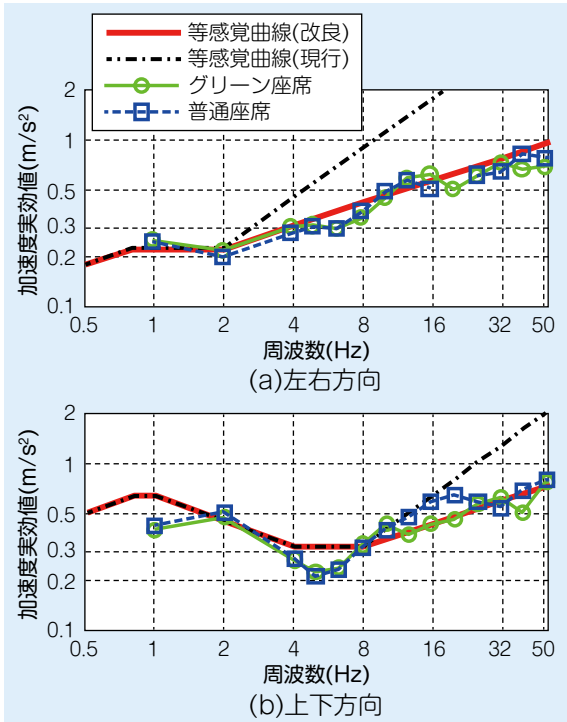


図3 等感覚曲線と許容限界平均値(実験結果)

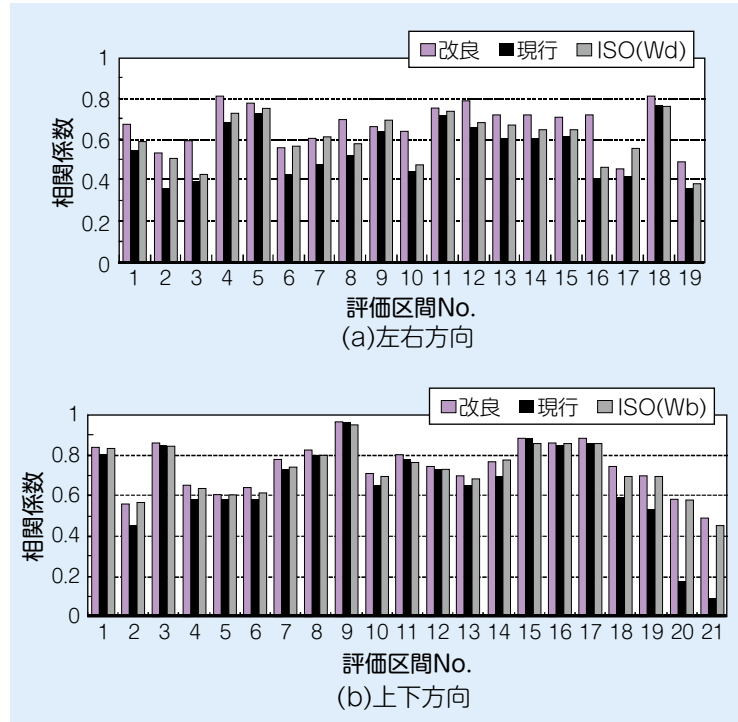


図4 主観評価との相関(走行試験結果)

より体感と合う評価法に

乗り心地フィルターの改良

従来の乗り心地レベルは、高周波振動の乗り心地への影響をほとんど反映しません。これまでは、鉄道に高周波振動があまり含まれなかったため問題なかったのですが、近年の高速化や快適性の高品質化により、高周波振動の影響も反映できる、より体感と合った評価法が求められています。

高周波振動が過小評価される原因は、元となる等感覚曲線が、「不快感」ではなく「大きさ」が等しく感じる加速度を示しているからです。大きく感じやすい周波数の振動は不快に感じやすいため、このような帯域では問題ないのですが、高周波振動はたとえ不快でも「大きい」印象は与えないため、等感覚曲線に基づく重み付けでは過小評価となるのです。このため、本研究では「鉄道乗り心地としての不快感」という尺度で、様々な周波数の振動に対する感度を調べ直し、その結果をもとに、乗

り心地フィルターの改良を行いました。

鉄道用座席を設置した車内振動騒音評価シミュレーター(図2)を用いて、振動に対する感度を調べました。評価対象は、1~50Hzの14種類の振幅が増減する正弦波振動とし、被験者は振動ごとに、「新幹線の乗り心地として不快」と感じたら評価ボタンを押します。評価ボタンのON・OFF時の振動台床面の加速度を測定し、この平均を刺激周波数に対する許容限界値としました。

この実験を、座席種別、肘掛利用、リクライニングの程度、開眼閉眼の違いなど、様々な条件で繰り返し実施しましたが、ここでは代表的な結果(座席種別の違い)を図3に示します(青:普通座席、緑:グリーン座席)。

この結果から、高周波域では、現行の等感覚曲線より小さな加速度で乗り心地としての許容限界に達しており、変化の傾きも緩やかであることがわかりました。また、この傾向は、座席種別だけでなく、姿勢や閉眼状態、性別

が違って同じであったため、上記の様々な実験結果を元に図中の赤線の近似線を求めました。そしてこれをもとに、乗り心地フィルターの改良案(図1の赤点線)を提案しました。

改良案の妥当性検証

乗り心地フィルターの改良案は、上記のような正弦波振動を用いた実験結果に基づいて作成されましたが、実際の走行振動でも適用可能かを確認する必要があります。このため、新幹線車両による走行試験と、振動台を用いた在来線と新幹線の走行振動の官能評価試験を行いました^{3),4)}。

【走行試験による検証】

1回10分前後の評価区間を複数設定し、被験者が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)で評価しました。これに対し、床面加速度に、各種重み付けフィルターを用いて5秒ごとの乗り心地レベル値を計算し、主観評価との相関を求めました。用いたフィルターは、①改

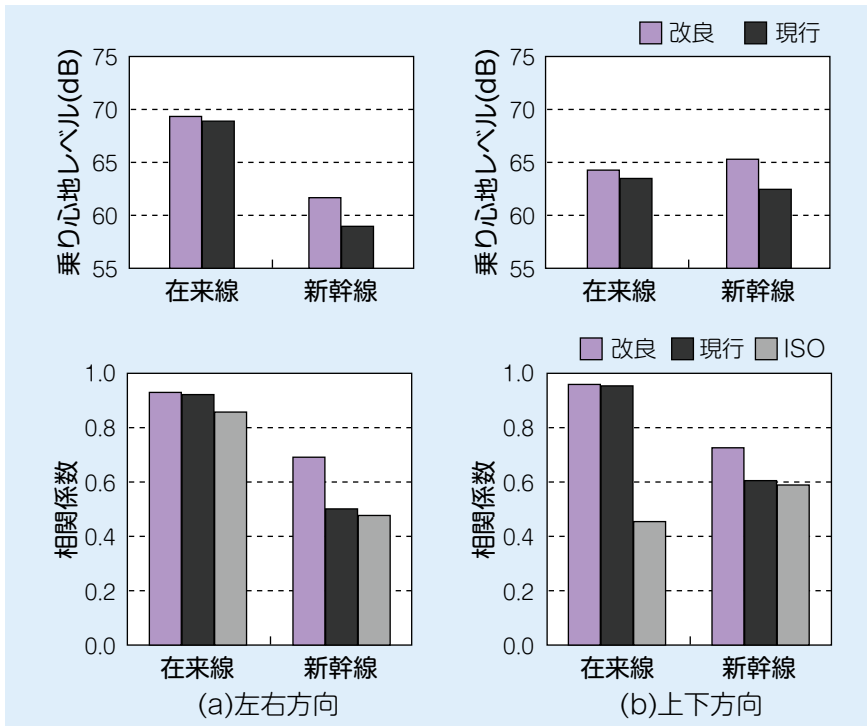


図5 乗り心地レベルの値と主観評価との相関の比較(在来線と新幹線)

良乗り心地フィルター，②現行乗り心地フィルター，③ISO2631の重み付け曲線の3種類です。

現車試験の結果を図4に示します。図は各フィルターを用いて算出した乗り心地レベルの値と主観評価との相関係数を示し，上図が左右振動，下図が上下振動です。相関係数が1に近いほど主観評価とよく一致していることを意味し，この図から，改良した乗り心地フィルターが，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他のフィルターより高いもしくは同等であることがわかります。ISOの重み付け曲線を用いた場合と比較すると，上下振動ではあまり差がありませんが，左右振動では改良した乗り心地フィルターの方が良好な結果となりました。これは，高周波振動に対する修正が，ISOでは上下振動にしか行われなかったためと考えられます。

【在来線と新幹線振動による検証】

車内振動騒音評価シミュレーターを

用いて在来線特急と新幹線の走行振動を再現し，被験者が評価する実験を行いました。被験者(126名)は，刺激振動を，前述の走行試験と同じように5秒おきに5段階で評価しました。

試験結果を図5に示します。上図は改良したフィルターによる乗り心地レベル(紫)と現行のフィルターによる乗り心地レベル(黒)，下図は押しボタンによる主観評価平均と各乗り心地レベル値との相関係数を示しており，左図が左右方向，右図が上下方向の振動の結果です。参考までに，現行ISO2631の重み付け曲線を適用した場合の主観評価との相関値(灰色)も併記しました。

これらの試験結果から，新幹線条件では改良した乗り心地フィルターを用いた方が主観評価と相関が高く，先の走行試験と同様の結果でした。また，在来線条件では，乗り心地レベルは現行と改良いずれのフィルターを用いてもほぼ同じ値となり，在来線のように高周波成分の寄与が低い場合は，改良フィル

ターを用いても値が変わらない，つまり使用に問題ないことがわかりました。

なお，乗り心地レベルと現行ISO2631の評価方法は，フィルターだけでなく，その後の計算方法も異なるため，フィルターだけ流用した本検討は参考に留めるべきですが，振動の方向や新幹線・在来線の違いに関わらず，改良フィルターを用いた方が，主観評価との相関が高いことが確認されました。

おわりに

車内振動に高周波振動が多く含まれていても体感と合った乗り心地評価ができるよう，乗り心地レベルを改良しました。この改良法は，在来線・新幹線を問わず用いることができ，実際に際しては，現行の乗り心地レベルで用いている乗り心地フィルターをこの改良フィルターに置き換えるだけで使用できます。なお，本稿で紹介した国際規格の重み付けフィルターと比較しましたが，改良した乗り心地レベルと主観評価との相関係数は同等かそれ以上の結果となりました。

本研究の一部は国土交通省の補助金を受けて実施しました。RRR

文献

- 1) 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
- 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) 中川千鶴，他：高周波振動を考慮した乗り心地評価法，鉄道総研報告，Vol.26，No.1，pp.33-38，2012
- 4) 中川千鶴，島宗亮平：高周波振動影響を反映した乗り心地評価法，第19回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.85-88，2012