

# 日本と欧州における乗り心地評価の違い

## ～国際規格の動向から～



**田頭 尚大**  
Takahiro Tagashira  
人間科学研究部  
快適性工学研究室  
研究員



**渡部 貴浩**  
Takahiro Watanabe  
人間科学研究部  
快適性工学研究室  
主任研究員



**鈴木 浩明**  
Hiroaki Suzuki  
人間科学研究部  
エキスパートマネージャー



**遠藤 広晴**  
Hiroharu Endoh  
人間科学研究部長

### はじめに

列車に乗って移動するとき、車両の揺れや振動が少ないことは、快適な移動サービスを提供するうえで大事な魅力の一つです。工学分野では、揺れや振動に対して人が感じる快-不快の感覚を狭義の乗り心地と定義しており、鉄道分野においても国内外のさまざまな研究を通じて乗り心地の評価手法や改善策の検討が行われています。乗り心地評価では、対象の車両・線区の品質を判断する際にほかの車両・線区と共通した評価体系を用いることが望ましく、評価手法の標準化が進められています。本記事では、日本の鉄道分野における主要な乗り心地評価手法を紹介したのち、欧州の評価手法と関連する規格の動向を概説し、両者を比較しながら現状の課題を示します。

### 日本における乗り心地評価

日本の鉄道分野における主要な乗り心地評価手法として、乗り心地レベルを用いた定常的な振動の評価手法と、曲線通過時の乗り心地に関する基準を紹介します。

#### ■ 乗り心地レベル

鉄道分野では、振動の強度を一般に加速度で

表します。加速度が大きいほど乗り心地は悪化する傾向にありますが、人は周波数によって振動の感じやすさが異なるため、同じ加速度の振動でも周波数が異なると知覚される振動の大きさの印象が変わります。このため日本では、車体床面の振動加速度を人が感じやすい周波数を考慮して補正し、その実効値の大きさから乗り心地を評価する「乗り心地レベル」が用いられています。

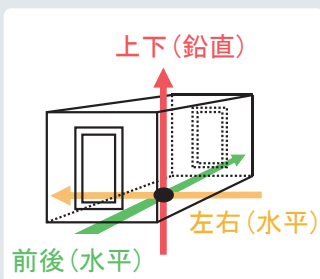
この考え方の元になったのは、[国際標準化機構 \(ISO\)](#)<sup>1)</sup>が1974年に初版を発行した国際規格 [ISO 2631](#)<sup>2)</sup>に示された等感覚曲線です。この曲線は、同じ大きさとして知覚される振動強度をまとめたもので、乗り心地レベルはこれに準じた特性をもつ補正フィルタを用いて乗り心地を評価する手法として1981年に確立されました(図1)。乗り心地レベルの補正フィルタは、ISO 2631の等感覚曲線では定義されていない0.5～1Hzを含めて定義されています。この周波数域には鉄道車両に生じる比較的大きな揺れが含まれるため、当時の国鉄が車両電気協会に依頼して設置された「乗心地管理基準に関する研究委員会」による検討の末、労働衛生研究所の研究に基づく日本独自の形状を採用しました<sup>1)</sup>。

#### 1) 国際標準化機構 (ISO)

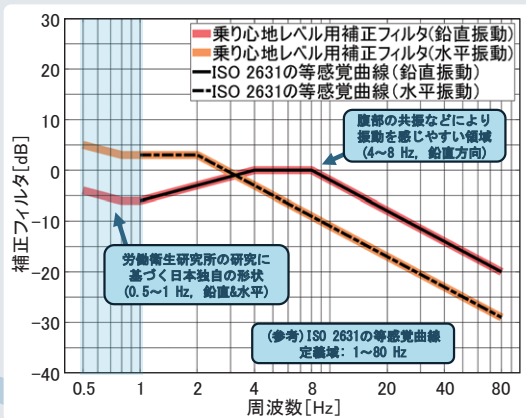
スイスのジュネーブに本部を置き、各国の標準化団体が参加する世界的な標準化機関です。

#### 2) ISO 2631

ISOが定めた全身振動の評価に関する国際規格です。1985年の改訂以降に細分化され、現在はISO 2631-1(総説)、ISO 2631-2(建物)、ISO 2631-4(鉄道)、ISO 2631-5(衝撃)が有効となっています。



① 車体床面の加速度測定  
(前後, 左右, 上下)



② 補正フィルタを用いて  
振動加速度の感覚補正を行う

③ 評価時間(3±2分)で算出した  
補正加速度の実効値を  
基準加速度( $10^{-5} \text{ m/s}^2$ )でdB表示

④ 実効値のdB表示をもとに  
乗り心地を5段階評価

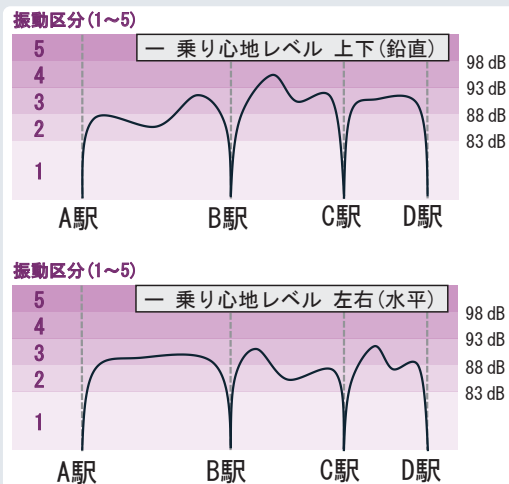


図1 補正フィルタを用いた乗り心地レベルの算出方法

## ■ 曲線通過時の乗り心地に関する基準

鉄道の曲線区間では、走行時の遠心力を和らげるためカントや車体傾斜<sup>【コラム】</sup>によって車体を内傾させます。傾斜角(ロール角)の変化は直線区間と円曲線区間を結ぶ緩和曲線区間(図2)で生じますが、傾斜角の変化が急すぎると乗り心地が悪化します。このため、曲線通過時の車体ロール角速度・角加速度は乗客が許容する程

度に抑える必要があります。1993年に定められた「在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説」では、車体ロール角速度が $5 \text{ deg/s}$ 、車体ロール角加速度が $15 \text{ deg/s}^2$ 以内であれば乗り心地を良いとする目安が記載されており<sup>2)【コラム】</sup>、日本ではこの目安値を超えないことが曲線通過時の乗り心地に関する実質的な基準となっています(図3)。

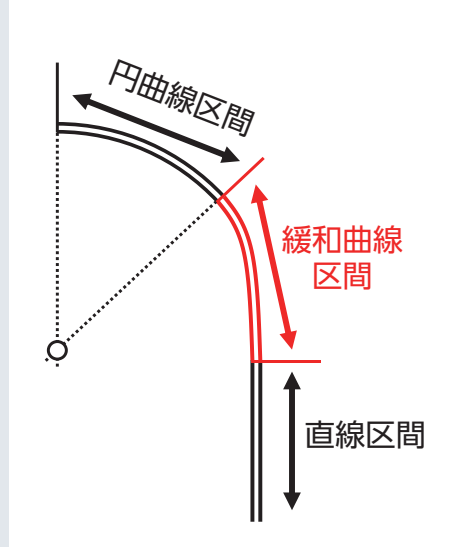
### 【コラム】カント・車体傾斜

列車が曲線区間を通過する際、曲線の外側に向かって遠心力が生じます(図3)。この影響を打ち消すために、曲線の外側にカントと呼ばれる高低差を設けて車両全体を内傾させる方法がとられます。カントによる傾きが急すぎると停車時の安定性が悪くなるため、特急列車では一般にカントのみで遠心力を解消することは困難であり、曲線通過速度を向上するには車体を台車と独立に内傾させる必要があります。日本の振り車両はこの一例ですが、車体を傾斜させるタイミングによって不快感や列車酔いを生じることがあったため、鉄道総研では車両に生じる揺れや振動をもとに不快感を評価できる指標( $TC_T$ ,  $MSDV-y$ )を提案し、一部の鉄道事業者では、それらの指標を用いて不快感を低減する車体傾斜パターンが導入されています。

### 【コラム】車体ロール角速度・角加速度と乗り心地の関係

本文で紹介した車体ロール角速度・角加速度に関する目安値は、旧国鉄の鉄道技術研究所が当時の振り車両を用いて実施した研究の報告書に記載されています。この報告では、角速度と角加速度の双方で両者の境界付近のデータが必ずしも十分でないとの見解から、許容限度については目安値の提示に留めています。また、この目安値は角速度と角加速度で独立に提示されていますが、のちに鉄道総研が提案した緩和曲線における乗り心地の良否を総合的に評価する指標( $TC_T$ )では、曲線通過時の車体左右加速度、左右ジャーク(加速度の変化率)、角速度、角加速度の重回帰式を用いることで、角速度と角加速度における互いの影響を考慮した乗り心地評価を行います<sup>3)</sup>。

図2 曲線区間の構成



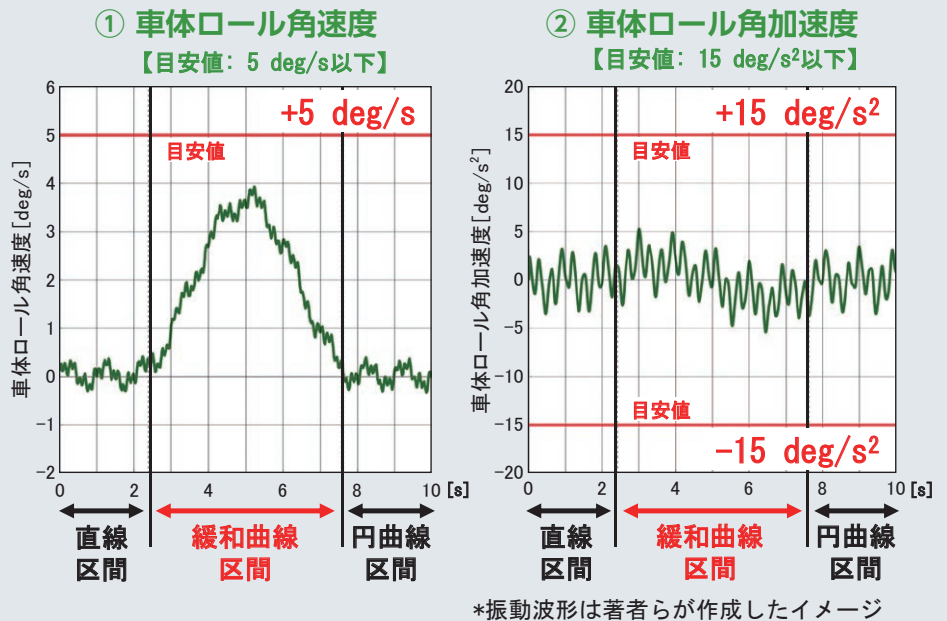


図3 曲線通過時の車体傾斜と車体ロール角速度・角加速度の目安値

## 欧州における乗り心地評価

欧州では、日本とは異なる評価手法が発展してきました。その一部は欧州域内に留まらず、さまざまな国・地域の標準や国際規格にも影響を与えています。ここでは、欧州の鉄道分野で使用されている代表的な規格を中心に、評価手法の動向と特色を解説します。

## EN 12299

欧州における現在の評価体系の中心となっているのは、欧州規格EN 12299の評価手法です。この規格は、1999年に欧州暫定規格(ENV 12299)として発行されたのち、2009年に初版、2024年に改訂版が発行されています。EN 12299は、図4に示す鉄道の乗り心地評価の体

図4 EN 12299における乗り心地評価の体系と指標 (2024年改訂版をもとに著者訳)

### 1 平均的な乗り心地 (Mean Comfort)

乗客の長期的な乗り心地を評価して乗り心地の基準値を提供する

- ・補正加速度の実効値を用いる標準式 ( $M_{MV}$ ) と評価尺度
- ・座席背面の振動などを含めて考慮する詳細式 ( $M_{VA} \cdot M_{VD}$ )

### 2 連続的な乗り心地 (Continuous Comfort)

加速度の実効値を用いて短期的な加速度を監視する

- ・補正加速度の実効値を連続的に算出して指標に活用
- ・左右&上下方向の算出値 ( $C_{Cy} \cdot C_{Cz}$ ) に対する評価尺度

### 3 緩和曲線における乗り心地 (Comfort on Curve Transitions)

軌道の曲率や傾斜によって生じる乗客の不快感を評価する

- ・3つのパラメータ(①~③)の重回帰式 ( $R_{CT}$ ) を用いて乗り心地に不満を持つ乗客の割合 (%) を推定する
- ① 最大左右加速度      ② 最大左右ジャーク
- ③ 最大ロール角速度

### 4 個別事象に対する乗り心地 (Comfort on Discrete Events)

分岐器や軌道の不規則性などの特異な外乱による不快感を時系列で捉える

- ・2つのパラメータ(①~②)の重回帰式 ( $R_{DE}$ ) を用いて乗り心地に不満を持つ乗客の割合 (%) を推定する
- ① 左右加速度のP-P値 (2秒間)
- ② 左右加速度の移動平均 (2秒間)

### 5 車両評価 (Vehicle Assessment)

全体的な快適性に対する鉄道車両の寄与に焦点を当て、的を絞った改善を促す

- ・「1 平均的な乗り心地」の標準式 ( $M_{MV}$ ) と「2 連続的な乗り心地 ( $C_{Cx} \cdot C_{Cy} \cdot C_{Cz}$ )」は、車両評価に活用可能
- ・「1 平均的な乗り心地」の詳細式は、車両評価を行うには複雑であるため、合理的に評価することができない
- ・「3 緩和曲線における乗り心地 ( $R_{CT}$ )」は、特定の条件を満たす車体傾斜車両の評価に活用可能

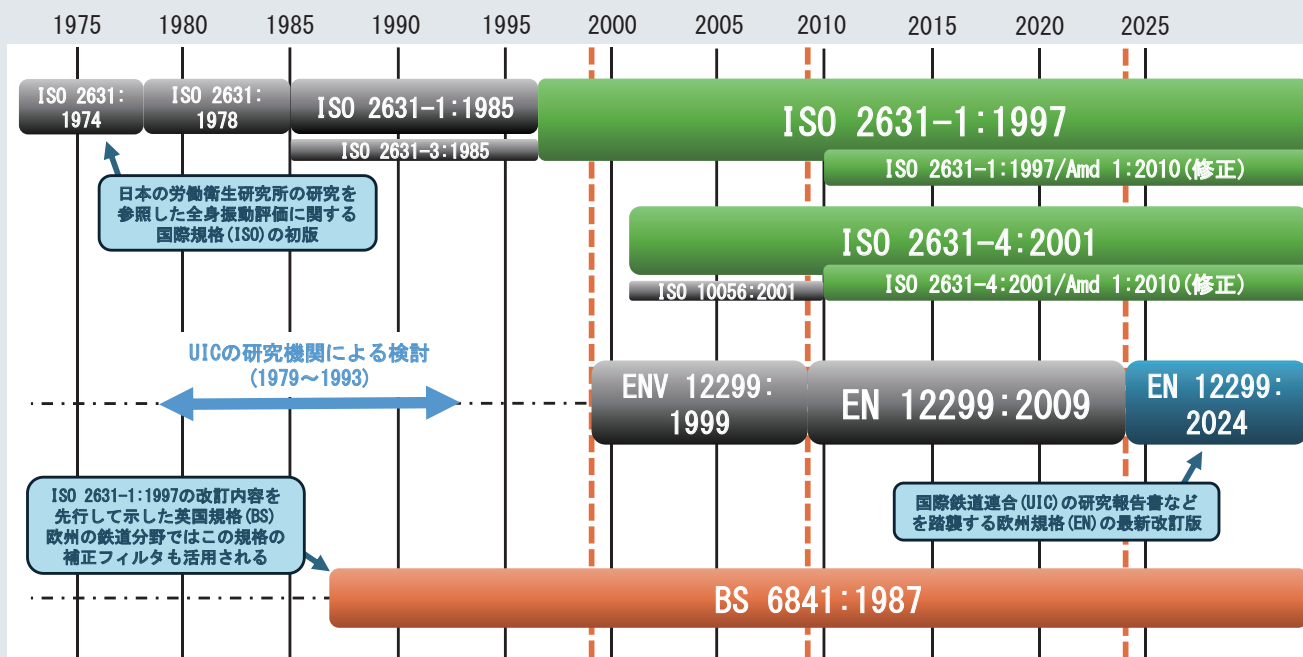


図5 乗り心地評価に関する主な規格の動向

系と具体的な指標を規定しており、平均的な乗り心地の評価に振動加速度を感覚補正した値の実効値を用いる点では日本の乗り心地レベルと共通しています。一方で、補正フィルタの形状が異なること、車両の前後・左右・上下を統合した評価指標を用いること、座席背面などの振動加速度を反映できる詳細式が定義されていること、などが異なります。また、緩和曲線や分岐器などの個別事象に対する乗り心地評価には別の指標が定められており、2024年の改訂では、これらに関する記述が大幅に拡充されています。

### 乗り心地に関する主な規格の動向

欧州における乗り心地評価の規格化には、ISO 2631とその改訂版や、イギリスの国家規格として1987年に制定された [BS 6841](#)<sup>⑤</sup>などの規格開発の流れが関連しています(図5)。日本が乗り心地レベルを検討する際に参照した

ISO 2631は、1974年に発行された初版から改訂・細分化が繰り返されており、現在では1997年に発行されたISO 2631-1が全身振動の評価に関する総説的な内容を扱っています。ISO 2631は鉄道に限らない全身振動全般の評価を扱う規格であるため、[ISO 2631-4](#)<sup>⑥</sup>が発行される以前には、ISO 2631の内容を鉄道の乗り心地評価に適用する方法がさまざまに議論されました。[国際鉄道連合 \(UIC\)](#)<sup>⑦</sup>は所管する研究機関に検討委員会を設置し、イギリスの音響振動研究所が提案した等感覚曲線に基づいて振動加速度を補正する方法を提案しました(図6水色線)。この評価手法はイギリスの国家規格であるBS 6841の内容に影響を与え、1997年版ISO 2631-1の草案に採用されました。EN 12299は、これらのUICにおける研究成果などを最も忠実に踏襲する欧州規格として定められました。

#### ⑤ ISO 2631-4

ISO 2631-1に基づく鉄道システムの設計と乗り心地評価の支援を目的として、2001年に発行されました。鉄道車両の特性に基づく振動の測定方法と評価方針、BS 6841が定義する補正フィルタや主観評価の活用に関するガイドラインを提示しています。

#### ⑥ 国際鉄道連合 (UIC)

フランスのパリに本部を置く、国際的な鉄道協力組織です。EUをはじめ多くの国際組織などと密接な関係を保っており、鉄道に関する国際協力の推進や国際規格の制定などに貢献しています。

#### ⑦ BS 6841

1987年に発行されたイギリスの国家規格であり、1997年版ISO 2631-1の改訂内容を先行して示した規格となっています。欧州の鉄道分野ではBS 6841の補正フィルタを用いた乗り心地評価も一般的であり、ISOはBS 6841の補正フィルタをISO 2631-1に定めた補正フィルタの近似値として利用することを認めています。

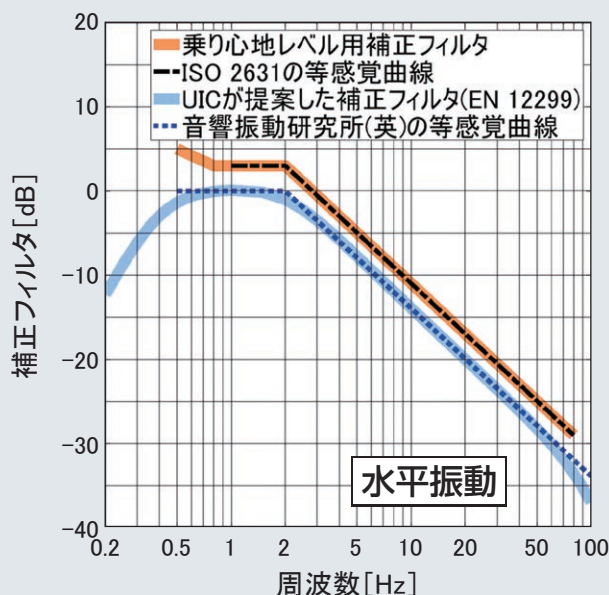
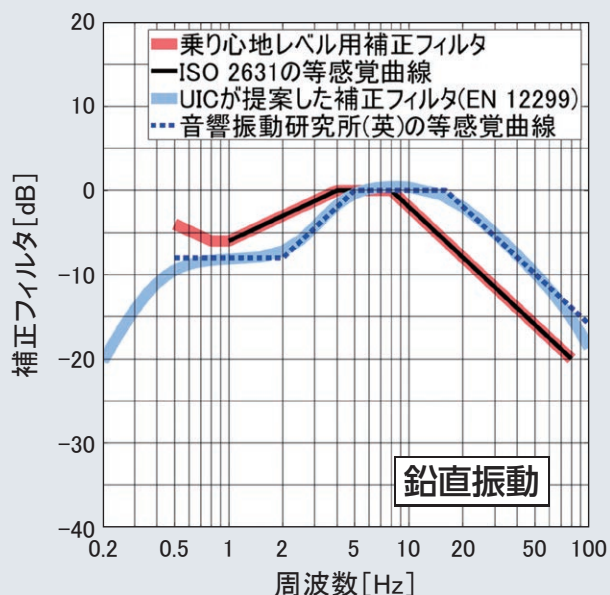


図6 振動加速度の感覚補正に用いられる等感覚曲線の比較

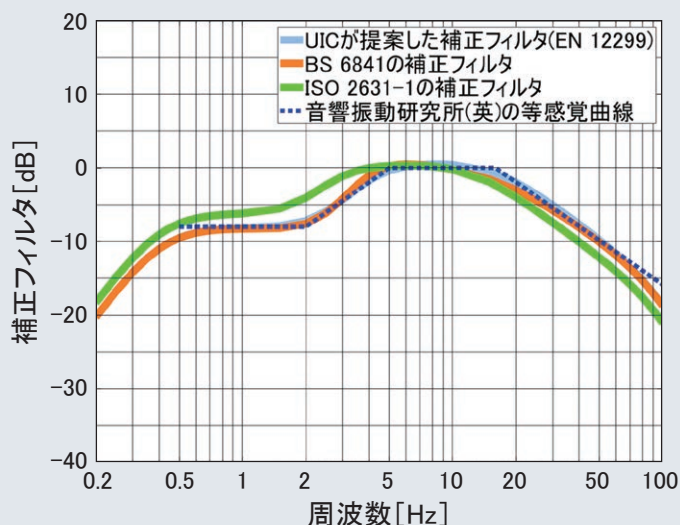
## 日本と欧州における 乗り心地評価の比較と課題

日本と欧州の乗り心地評価は、加速度・角速度などの物理量を人の感じ方に結び付けて評価する点で基本的な考え方は共通していますが、具体的な指標や評価体系は大きく異なります。日本において、旧国鉄が採用した評価手法を今日も活用していることは、乗り心地に関する知見の蓄積という観点では利点といえます。しかし、これらの評価手法が検討された時期と比較して、日本の鉄道は速度向上が図られるとともに

に、車両の不慣れた揺れや振動は格段に抑えられました。鉄道技術の発展に伴う車両の振動特性の変化や乗客の期待値の変化、振動の知覚に関する昨今の研究成果が現在の評価に反映されていないことは、日本の乗り心地評価における課題とも捉えられます。

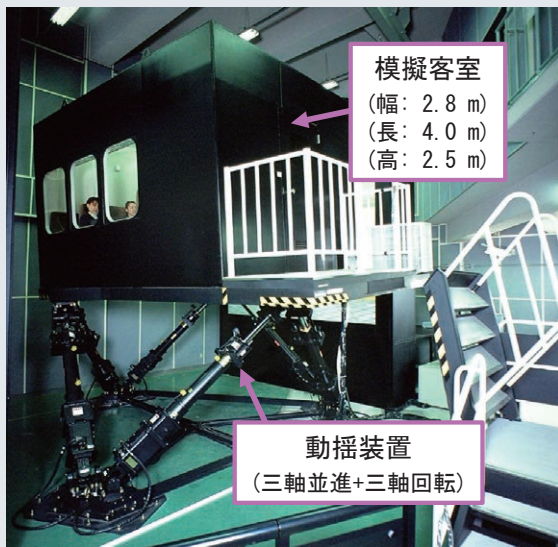
欧州においても、1990年代以前に確立された評価手法の多くが現在も継続して使用されています。規格の改訂や軽微な修正はありますが、評価指標の定義式や補正フィルタの形状は当時から変更されていません。補正フィルタは、当時の社会的事情<sup>4)</sup>などによって各規格が異なる形状を採用していることに加え(図7)、当時の振動台の精度を考慮すると、高周波域の振動知覚<sup>5)</sup>コラムには改めて検討の余地があるとも考えられます。また、これらの規格が列車酔い<sup>6)</sup>や加減速パターンと乗り心地の関係などを十分に規定していないことも課題といえます。

図7 各規格における補正フィルタ形状の違い



## おわりに

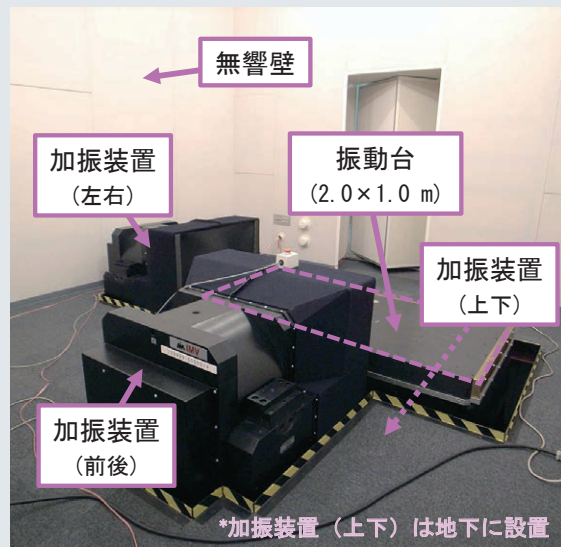
乗り心地は鉄道の快適性を語る上で極めて重要な観点であり、鉄道事業者やメーカーに限らず、鉄道を利用する多くの方々にとっても関心の高いテーマかと思えます。鉄道総研では、日本



模擬客室  
(幅: 2.8 m)  
(長: 4.0 m)  
(高: 2.5 m)

動揺装置  
(三軸並進+三軸回転)

名称	車内快適性シミュレーター
加振方向/出力(最大)	三軸並進: $\pm 5.0 \text{ m/s}^2$ 三軸回転: $\pm 0.3 \text{ rad/s}$ 程度
加振周波数	0~8 Hz
振動以外の条件を再現する主な装置	・ 模擬客室 ・ 模擬視界(プロジェクター投影) ・ 模擬音響



\*加振装置(上下)は地下に設置

名称	車内振動騒音評価シミュレーター
加振方向/出力(最大)	三軸並進: $\pm 7.5 \text{ m/s}^2$
加振周波数	0.5~50 Hz
振動以外の条件を再現する主な装置	・ 模擬視界(HMD) ・ 模擬音響

図8 鉄道総研が所有する乗り心地評価関連の試験設備

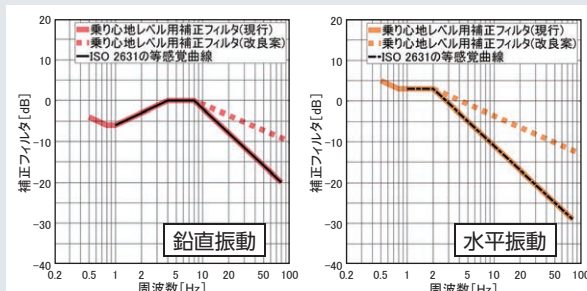
の鉄道技術と国際規格の動向の双方に連動した乗り心地評価に関する研究に取り組み、快適で利便性に優れた鉄道の発展に寄与してきました。今後も将来的な鉄道の発展を見据えて、鉄道総研が有する知見と試験設備(図8)を活用した乗り心地の評価・向上に寄与する研究開発を推進するとともに、鉄道事業者やメーカーの方々との協調を図り、国内外における乗り心地評価の標準化の流れに適切に対応していきます。[RRR]

## 文 献

- 1) 日本鉄道技術協会: 乗心地管理基準に関する研究報告書, 日本鉄道技術協会, 1980
- 2) 鉄道総合技術研究所: 在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説, 研友社, 1993
- 3) 鈴木浩明, 白戸宏明, 田中綾乃, 手塚和彦, 仲川滋: 車体傾斜車両の緩和曲線走行時の乗り心地評価法, 鉄道総研報告, Vol.13, No.11, pp.33-38, 1999
- 4) M.J. Griffin: A comparison of standardized methods for predicting the hazards of whole-body vibration and repeated shocks, Journal of Sound and Vibration, Vol. 215, Issue 4, pp. 883-914, 1998
- 5) 中川千鶴: 高周波振動の影響を考慮した乗り心地評価法, RRR, Vol.70, No.6, pp.8-11, 2013
- 6) 鈴木浩明, 白戸宏明, 手塚和彦: 低周波振動が列車酔いに及ぼす影響, 鉄道総研報告, Vol.18, No.2, pp.9-14, 2004

## 【コラム】高周波域の振動を考慮した乗り心地レベルの改良案

10Hz以上の高周波域では、1997年版ISO 2631-1の補正フィルタの形状が、1974年版ISO 2631の等感覚曲線と大きく異なります。これは、1974年版の等感覚曲線が振動の「大きさ」に対する等感覚を示すのに対し、1997年版は「不快感」に対する等感覚を示すためです。日本の乗り心地レベルは1974年版に沿った補正フィルタを用いるため、現状の補正フィルタが列車の速度向上に伴って増大した高周波域の振動に対する人の感度を十分に評価できないとする指摘があります。これを受けて、鉄道総研では「不快感」に関する等感覚曲線を再検討し、乗り心地レベルに適用可能な補正フィルタの改良案を提示しました(図I)。改良案を用いた評価では、従来の評価結果と比較して新幹線では主観評価との相関が高く、在来線では同等であることを確認しています<sup>5)</sup>。



図I 乗り心地レベル用補正フィルタの改良案

## 列車酔い (乗り物酔い)

列車に乗ることで引き起こされる一過性の自律神経失調状態の総称で、正式には動揺病と呼称されます。鉄道総研では過去に列車酔い発生実態を調査し、ISO 2631-1が扱う船酔いの指標に基づく列車酔い評価指標(MSDV-y)を提案しています<sup>6)</sup>。