

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 車内の乗り心地を評価する

近年の車両の高速化に伴い増加した高周波振動に対応するため、代表的な乗り心地評価法である乗り心地レベルの補正案を提案しています。また、乗り心地の推定精度を高めるため、複合振動の乗り心地影響を考慮した評価法を提案しました。加えて、これらの乗り心地評価を、車両や軌道など乗り心地に関わる分野で活用しやすくするため、さまざまな乗り心地情報を一度に表示できる乗り心地情報一元表示システムを開発しました。これらの振動乗り心地評価に関する内容を、総括的にご紹介します。



**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



**菅原 能生**  
Yoshiki Sugahara  
車両構造技術部  
走り装置研究室  
主任研究員(上級)  
【専門分野】 制御技術と  
その応用



**清水 惇**  
Atsushi Shimizu  
前 軌道技術研究部  
軌道管理研究室  
研究員  
【専門分野】 列車動揺管理,  
乗り心地・走行安全  
性の評価



**矢坂 健太**  
Kenta Yasaka  
前 軌道技術研究部  
軌道管理研究室  
研究員  
【専門分野】 軌道管理,  
軌道状態評価

## はじめに

列車内の快適性にはさまざまな要素がありますが、振動環境、つまり振動乗り心地(以後「乗り心地」と表記)は重要な要素の1つです。乗り心地の向上には振動低減が不可欠ですが、どのような振動を低減したら乗り心地が良くなるのでしょうか。線区、走行速度、車両により、乗り心地を左右する振動要素は変わります。乗り心地に影響する振動を把握し低減することが、最も効果的で効果的な対策です。

熟練者による添乗検査も有効な方法ですが、床面の振動を測るだけでお客様が感じる乗り心地を自動的に数値化し、影響する振動の特徴や発生地点を特定できれば、乗り心地の品質管理や状態比較、軌道整備効果の確認などさまざまな活用ができます。

ここでは、日本の鉄道での代表的な乗り心地評価法である乗り心地レベル

(図1参照)の高周波振動対応のための補正案、複合振動の乗り心地影響を推定する評価法およびその活用ツールをご紹介します。

## 乗り心地評価レベルの補正

近年の制御技術の進歩により、人間が不快に感じやすい2~8Hzの比較的低い周波数の振動は、大きく低減されました。その一方で、車両の走行速度が上がることで増える高周波振動が、乗り心地に影響するようになってきています。しかし、従来の乗り心地レベルでは、高周波振動に対する人間の感度は非常に低いとされ、高周波成分の影響があまり反映されないという問題点がありました。乗り心地レベルは、人間の振動感度として等感覚曲線(図1参照 図1の黒の一点鎖線)を用いています。そこで、高周波帯域の乗り心地評価に等感覚曲線を用いる委

### 図1 乗り心地レベル

1981年に提案された乗り心地評価法で、上下と左右振動それぞれに対して、人間の振動感度を反映させて計算されます。

### 図2 等感覚曲線

周波数ごとの「同じ大きさ」と感じる加速度実効値を示すもので、この値が小さいほど、大きく感じやすい振動周波数となります。

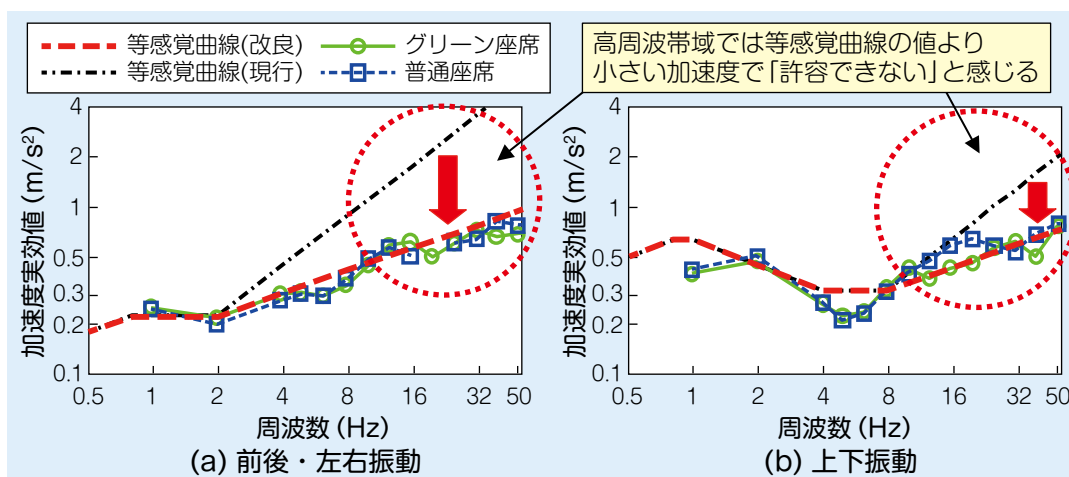


図1 乗り心地レベルの論拠となる等感覚曲線と許容限界実験の結果の比較<sup>1)</sup>

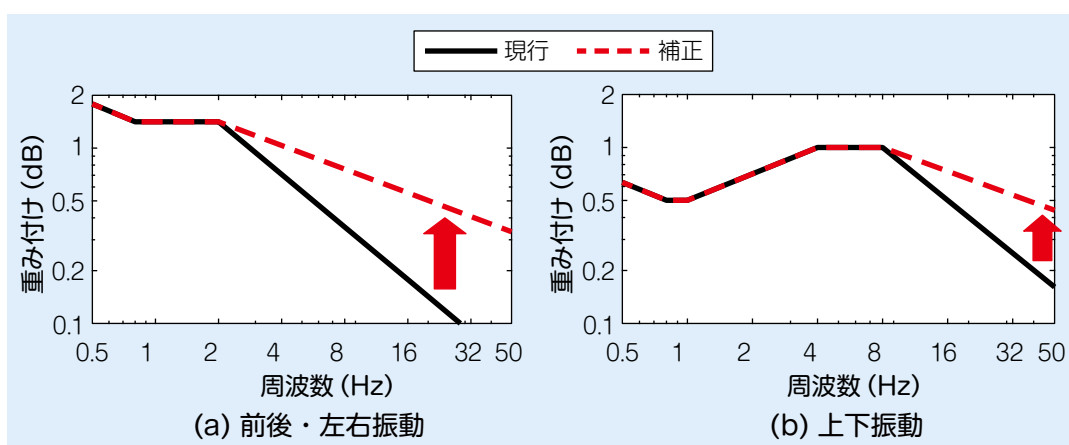


図2 乗り心地フィルター（現行と2011年に提案した補正案）<sup>2)</sup>

当性を調べるため、「新幹線の乗り心地としての許容限界加速度」を調べました。新幹線のグリーン座席と普通座席での結果を図1に示します。図から、高周波帯域で、等感覚曲線より小さい加速度でも許容限界に達していることがわかります。また、この高周波帯域の感度変化の傾きは、他の座席種別でも同じで、着座姿勢や性別の違いの影響もみられなかったため、全ての実験データから、高周波帯域の感度変化を示す近似線（図1の赤点線）を求めました。これをもとに、乗り心地レベルの計算で用いる重み付けフィルター（乗り心地フィルター）を、現行形状（図2の黒実線）から、高周波帯域のみ高くなるよう補正（図2の赤点線）し、乗り心地レベル2011<sup>2)</sup>としました。こ

の方法は、在来線にも適用可能です。なお、以後の乗り心地レベルの算出は、すべて乗り心地レベル2011です。

### 複合振動乗り心地推定法

次に、私たちは、乗り心地推定精度を高めるため、さまざまな方向の振動が混ざった状態、複合振動の乗り心地への影響推定に取り組みました。この考え方は、振動方向別に評価する、従来の乗り心地評価に慣れている方には違和感があるかもしれません。実際、「どの方向が悪いのか、何が悪いかわからなくなる」との不満の声もありました。

しかし、お客様が列車の振動として感じているのは、さまざまな方向の振動が混ざった複合振動です。そこで、

複合振動乗り心地推定法（以後、「複合推定」と表記）を開発しました。図1からもわかるように、人間は、同じ周波数の振動でも方向が違っていると不快や大きさの感じ方が変わります。このため、複合推定の算出では、方向別の加速度波形に、対応する重み付けフィルター（図2）の処理を行った後に合成して算出します。

複合振動で評価する意義を示すものとして、実測例を図3に示します。これは、新幹線で15名の鉄道関係者が乗り心地を5秒おきに5段階で評価（主観評価）した乗り心地調査の等速走行区間の例です。横軸は距離で、1段目が主観評価の平均値、2段目は複合推定、3段目が左右方向の乗り心地レベル、4段目が上下方向の乗り心地レベ

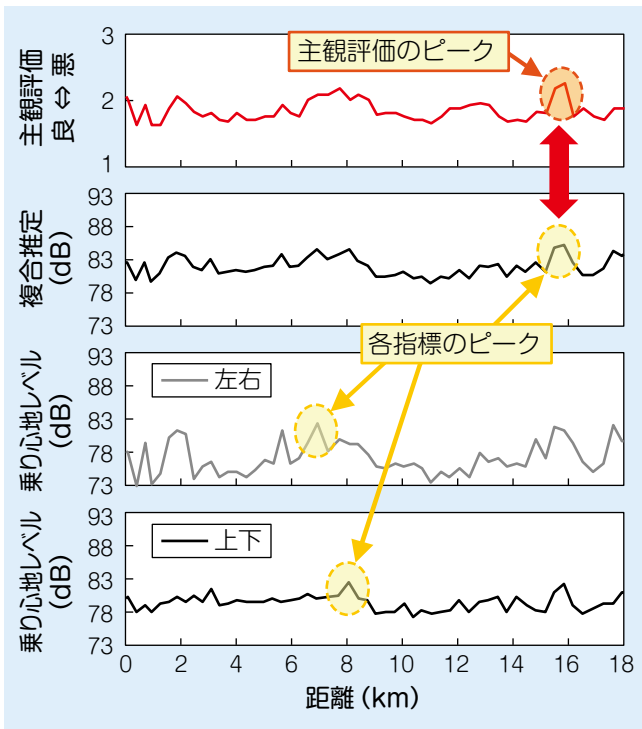


図3 各種乗り心地指標と主観評価の比較例

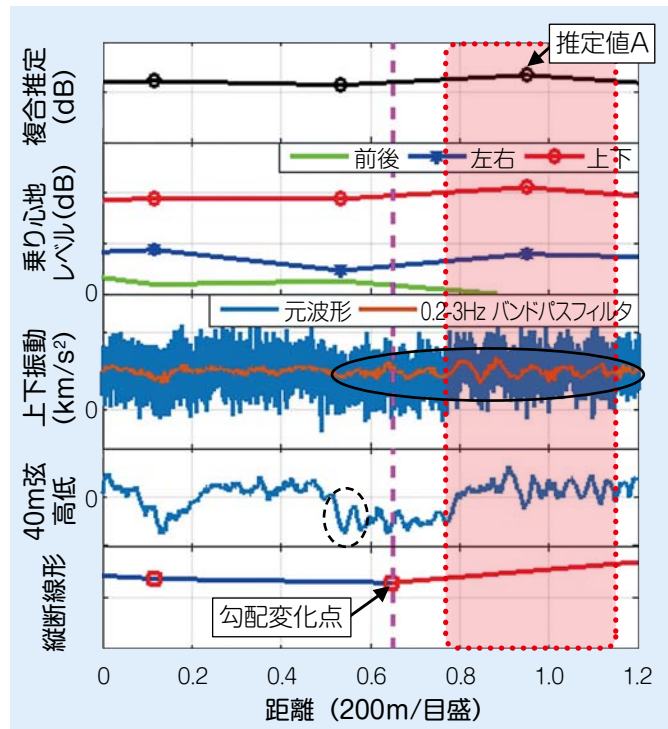


図4 複数の乗り心地に関する情報の表示例

ルです。いずれも値が小さいほど乗り心地が良いことを意味します。

このデータでは、方向別の乗り心地レベル(3, 4段目)のピークと主観評価のピークの地点は一致していません。一方、複合推定のピークは主観評価のピークと一致し、体感上の一番乗り心地評価が低いところを検出できています。このように、方向別の分析ではわからない不快な振動を、複合推定を用いることで捉えられる場合があります。さらなる乗り心地向上を目指す上で、複合振動の影響を捉えることは1つの有用な方策です。

### 乗り心地情報一元表示システム

先にご紹介した複合推定法は、乗り心地向上に関わる現場で活用されてこそ価値があります。車両振動を考えると、要となるのは車両と軌道であり、乗り心地向上は両分野共通のターゲットです。そこで、複合推定法を自動算出し、かつ、その結果を従来の乗り心地評価値や、乗り心地に関わるさまざまな情報と同時に表示できる乗り心地情報一元表示システム(図5、以後「一

元表示システム」と表記)を開発しました。システム開発に際しては、車両と軌道の両分野で活用しやすいよう工夫しました。

### データの互換性(距離と時間)

車両と軌道では、データの記録方法の違い(車両は時間、軌道は距離)や、管理システムの違いなどがあり、これまで相互のデータ突き合わせは容易ではなかったため、グラフ表示の横軸を距離と時間のどちらにでも切り換え表示できるようにしました。

### 情報の一元的把握

効果的な対策には、乗り心地に影響する振動や発生原因の把握が必要です。そのために、複合推定で乗り心地を推定し、その変化と振動成分や振動発生に影響する分野の情報を関連付けられるようにしました。乗り心地関連情報の一元表示の活用例を図4で説明します。図では、全てのグラフの横軸を地点でそろえて表示しています。まず、1段目で、複合推定の値がやや大きい(相対的に乗り心地がよくない)

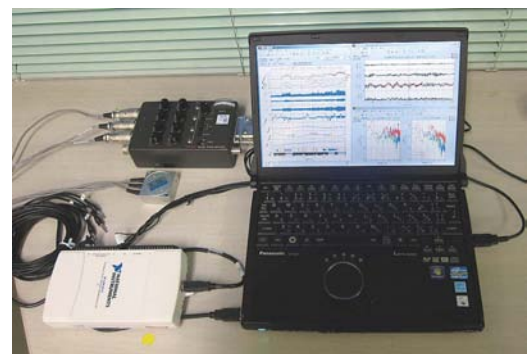


図5 乗り心地情報一元表示システム

箇所として、「推定値A」に着目します。推定値Aが評価しているのは赤い点線枠の区間で、推定値Aと同じ区間の乗り心地レベルの値は、2段目に示されており、3色のうち赤い線の値が大きい、つまり、上下方向の振動が、この区間の乗り心地に最も影響していることがわかります。そこで、この区間の上下振動や軌道高低をみるため、3段目に上下振動加速度(元波形と0.2~3Hz帯域のバンドパス波形)を、4段目に軌道の40m弦高低変位を表示しました。この図から、推定値Aの区間で上下振動に大きな動揺(黒の楕円の箇所)が発生しており、この振動

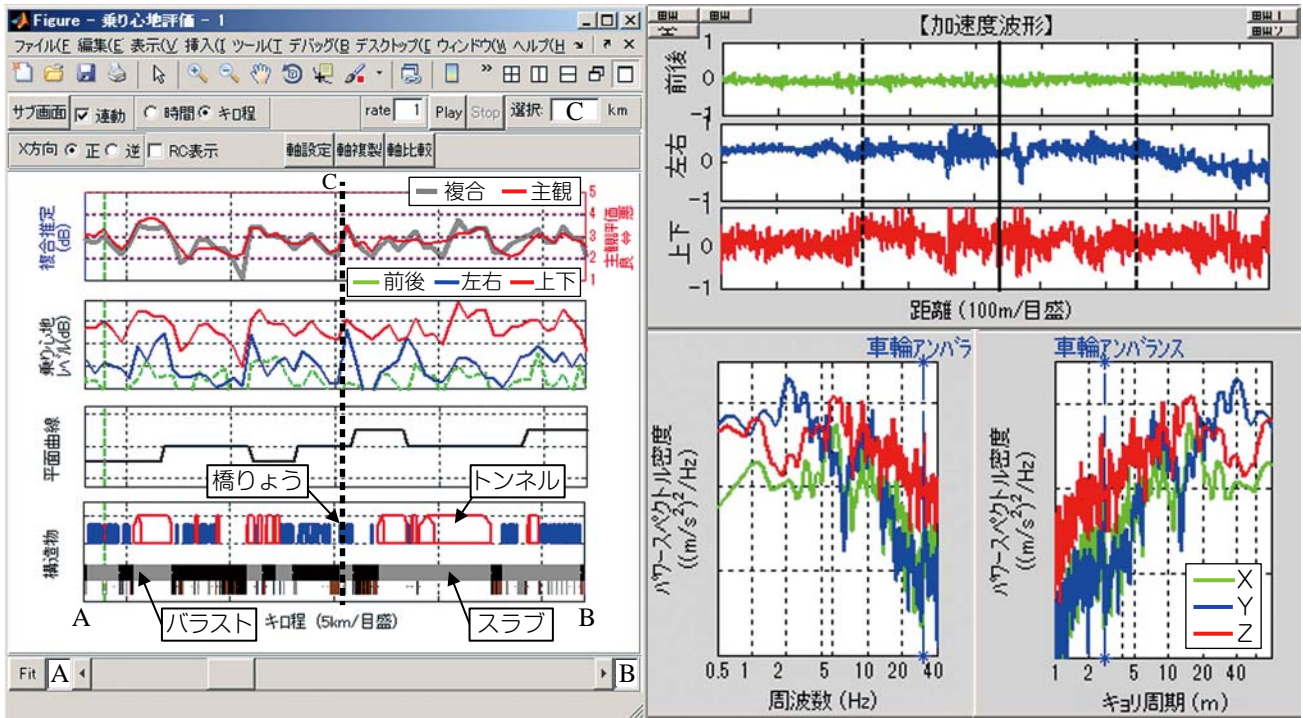


図6 乗り心地情報一元表示システムの画面例(左：メイン画面，右：サブ画面)<sup>4)</sup>

の発生直前に、軌道の上下にわずかな軌道不整(点線の楕円の箇所)があること、5段目の縦断線形情報から、この付近に勾配変化点があることがわかります。

このように、乗り心地に関連する情報を一括して眺めることで、現象を俯瞰的に捉えることができ、複合推定を用いて乗り心地があまりよくない地点の目星をつけることができます。

### 一元表示システムのその他の特徴

一元表示システムは、床面加速度から、複合推定値や乗り心地レベルの計算結果や、加速度のパワースペクトル密度(PSD)のグラフを表示できます。乗り心地フィルターで重み付けした後のPSDの表示も可能です。これに加え、軌道変位や構造物情報などの読み込み・表示も可能で、軌道管理で主に用いられているLABOCS<sup>3)</sup>の出力データの読み込み機能があります。他にも、線路線形や構造物(トンネル・橋りょう・駅)、軌道(バラスト・スラブ)、路盤などの情報を同期表示します。

画面例を図6に示します。図の左がメイン画面で、複合推定を中心とした

対象線区のさまざまなデータを表示します。この画面で対象区間を俯瞰的に把握することで、複合推定から振動乗り心地の変化を把握して、着目すべき地点や、その地点での各データ変化を把握することができます。表示データはユーザーが任意に選ぶことができます。また、任意の時点(地点)の詳細情報をみたい場合は、メイン画面で選んだ箇所(左図の縦点線)の加速度波形やPSDを、サブ画面として表示できます(右図)。ここでは、加速度に乗り心地フィルタを処理した後のPSDも表示されるので、乗り心地に影響した振動成分を把握することが可能です。PSDの横軸も、周波数と距離から選べるので、乗り心地に影響している振動を、周波数と距離周期の両面で捉えられます。

### おわりに

ここでは3つのトピックスをご紹介しました。1つ目は、乗り心地評価法である乗り心地レベルの高周波振動対応のための補正案の提案、2つ目は、さまざまな方向の振動が混ざった状態

での乗り心地影響を考慮した複合振動乗り心地推定法、3つ目は、乗り心地に関係する情報を表示・分析できる乗り心地情報一元表示システムです。

これまで現場のご意見を反映するなど実用性向上に努めてきましたが、今後も現場での試用を進めるなど、より実場面に即したツールにしていきたいと考えています。RRR

### 文献

- 1) 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
- 2) 中川千鶴，島宗亮平，高見創，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
- 3) 田中博文：軌道保守管理データベースシステムLABOCS(ラボックス)の機能紹介と新バージョンのリリース，新線路，Vol.69，No.7，pp.24-26，2015
- 4) 中川千鶴，鈴木綾子，榎並祥太，他：複合振動影響を考慮した乗り心地推定の現場での活用，J-Rail2014，S5-2-2，2014