

地点対応可能な複合振動乗り心地推定法

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

鉄道分野では、振動乗り心地を評価する場合は、振動を方向別に扱うことが多い。これは、方向別に分析した方が測定しやすく、原因分析や品質管理に用いやすいからである。しかし、旅客が体感するのは、様々な方向の振動が合わさった「ひとまとまり」の振動（以後、複合振動と表記）であり、方向別に感じているわけではない。旅客が感じる振動乗り心地は、複合振動の印象で決まる。例えば、大きな上下振動が生じたとき、同時に大きな左右振動が生じるかどうかで旅客が感じる乗り心地は変わってしまうが、この違いは複合振動として捉えなければ把握できない。

そこで本研究では、複合振動乗り心地推定法を提案した。本法は乗り心地悪化地点も推定可能である。しかしながら、複合振動乗り心地を推定しても、この情報だけでは、どの方向のどんな振動が影響しているのか、原因は何かを把握するのが難しい。そこで、本研究では、複合振動乗り心地推定に加え、乗り心地が悪化したときの方向別の振動の特徴、キロ程、軌道情報を一元的に表示するシステムを作成し、この問題を解決した。

鉄道事業者が用いる乗り心地評価法は、「評価法としての精度」に加え、「品質管理・向上における有用性」が重要な要素である。本発表では、この2つの要素を満たす評価法を報告する。

2. 複合推定値の算出方法

鉄道分野の代表的な乗り心地評価法として「乗り心地レベル」がある。これは、成分方向別の加速度に、人間の感度を反映した重み付けフィルタ（乗り心地フィルタ）をかけて、評価区間の実効値を求めてレベル値として算出するものである。

我々は先行研究¹⁾で、乗り心地フィルタをより体感と合うよう改良したので、本稿ではこの改良フィルタを用いることとする。なお、このフィルタは前後・左右方向用 (W_{LTN_XY}) と上下方向用 (W_{LTN_Z}) がある。分析の流れを以下に示す。

① 前後、左右、上下振動加速度にそれぞれ時間軸上で重み付けフィルタをかける。

$$\text{前後} : \overset{W_{LTN_XY}}{a_X(t)} \rightarrow a_{Xf}(t), \quad \text{左右} : \overset{W_{LTN_XY}}{a_Y(t)} \rightarrow a_{Yf}(t),$$

$$\text{上下} : \overset{W_{LTN_Z}}{a_Z(t)} \rightarrow a_{Zf}(t)$$

$a_X(t)$, $a_Y(t)$, $a_Z(t)$: 前後, 左右, 上下方向の加速度(m/s²)

$a_{Xf}(t)$, $a_{Yf}(t)$, $a_{Zf}(t)$: 重み付けした後の前後, 左右, 上下方向の加速度(m/s²)

② 上記 $a_{Xf}(t)$, $a_{Yf}(t)$, $a_{Zf}(t)$ を3方向のベクトルとし、これらを合成した同時刻の合成ベクトル ($a_{XYZf}(t)$) の大きさを求め (図1)、評価区間 T_n の実効値 $a_{XYZf,rms}(T_n)$ を求める。

$$a_{XYZf}(t) = \sqrt{a_{Xf}(t)^2 + a_{Yf}(t)^2 + a_{Zf}(t)^2} \quad \dots\dots \text{式(1)}$$

$$a_{XYZf,rms}(T_n) = a_{XYZf}(t) dt \quad \dots\dots \text{式(2)}$$

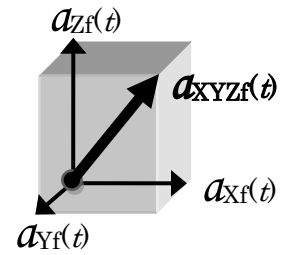


図1 合成ベクトル $a_{XYZf}(t)$

③ 現行の方向別乗り心地レベルと比較するため、乗り心地レベル算出と同じ方法でレベル値にする（以後、複合推定値と表記）。

複合推定値：

$$L_{T_XYZ}(T_n) = 20\log_{10}(a_{XYZf,rms}(T_n)/A_0) \text{ [dB]} \quad \dots\dots \text{式(3)}$$

基準加速度： $A_0 = 10^{-5}[\text{m/s}^2]$

式(3)で求めた値を複合推定値とし、振動成分の方向によらない、各評価時点の総合振動の乗り心地影響を表す指標とした。なお、ここでは、従来から使われている方向別の乗り心地レベル値と対応付けるため、式(3)の方法でレベル値にしたが、振動成分の方向によらない複合推定値としての基本的な考え方は式(1)～(2)に表わされる内容である。

3. 複合推定値と主観評価の比較

複合推定値の妥当性を検証するため、被験者試験による体感乗り心地との一致度を調べた。振動台（車内振動騒音評価シミュレータ）試験と新幹線走行試験を行い、床面加速度から算出した複合推定値と主観評価との対応を比較した。

(1) 妥当性検証1：振動台試験

車内振動騒音評価シミュレータを用いて、一般利用者 71 名を被験者とし、在来線特急および新幹線走行振動に対する乗り心地評価試験を実施した。用いた振動刺激は、新幹線と特急列車の 2 条件（各 3 分間）をつなぎ合わせたものである。被験者 2 名は振動台上の新幹線用二人掛け座席に腰掛け、提示される振動に対し、「新幹線の乗り心地」としての不快感を 5 段階尺度（1：問題ない～5：非常に不快）で 5 秒おきに押しボタンで回答した。

床面の加速度を用いて前述の方法で 5 秒おきの複合推定値を求め、主観評価平均値との相関係数を調べた結果、在来線特急では 0.9、新幹線では 0.8 と高い相関を示した。

(2) 妥当性検証2：実車走行試験

新幹線による実車走行試験を行い、複合推定値と主観評価との関係を調べた。被験者は鉄道関係者 23 名（全て男性）で、車内振動の乗り心地について 5 秒おきに 5 段階（前述の振動台試験と同じ）で回答した。評価は 1 回 10 分前後で、14 回の試番を行ったが、ここでは主観評価が 0.8 ポイント以上変動した 11 回分の試番について報告する。主観評価と各指標値（複合推定値と方向別乗り心地レベル）の時間変化例を図 2 に、主観評価と各指標値との相関係数を図 3 に示す。No. 4～6 が立位姿勢、その他は座位姿勢である。

図 2 から、主観評価と複合推定値の変化が類似していることがわかる。また、主観評価が最も悪い地点で、複合推定値もピークを示したのに対し、左右と上下の乗り心地レベルのピークは、別の地点で生じており、左右と上下振動を別々に分析しては、乗り心地が悪い地点を正確に把握できない場合があることがわかる。

各指標（複合推定値、方向別乗り心地レベル）の主観評価との相関を調べた結果（図 3）、複合

推定値の方がいずれの方向別乗り心地レベルより高かったのは7試番（64%）で、残り4試番中2試番（No. 4, 11）も大きな差ではなかった。しかし乗り心地レベルの方が主観評価と相関が高かった試番（No. 7, 9）もあった。この理由について、特に差の大きいNo. 7について調べたところ、全体としては良好な推定が行われていたが、主観評価に比して複合推定値が大きく上昇した箇所があったために相関係数が低下したことがわかった。その箇所では、左右振動の1Hz以下の成分増加による複合推定値の上昇に対し、実際の被験者は、背もたれのホールドにより、1Hz以下の左右成分にあまり鋭敏に反応しなかったためと思われる。

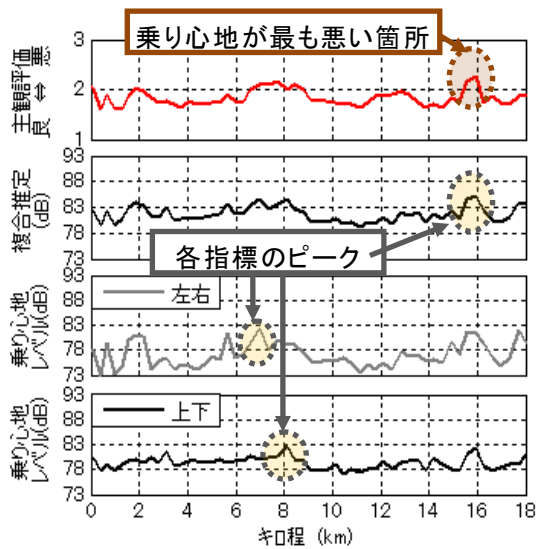


図2 主観評価と複合推定や方向別の乗り心地レベルの比較（走行試験）

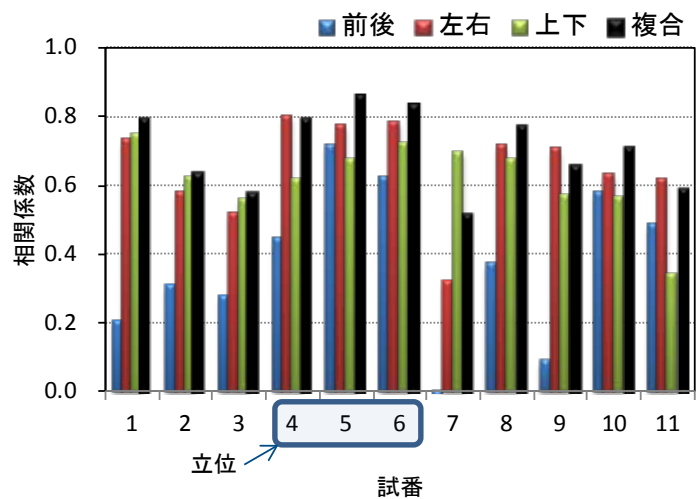


図3 複合推定値および方向別乗り心地レベルと主観評価との相関

4. 乗り心地情報一元表示システム

1章で述べたように、乗り心地複合推定値の精度が高くても、これだけでは、乗り心地管理や向上対策に直接的に活用することは難しい。そこで、複合推定値と従来の方角別の乗り心地レベル値を併記したグラフを表示するシステムを考案した。システムの画面例を図4に示す。

このシステムは、左右・上下・前後の加速度波形とキロ程情報があれば、自動で複合推定値を算出し、グラフ表示する(メイン画面上部)。この例では、被験者試験による主観評価結果を1段目のグラフに併記しており、複合推定値とよく一致していることがわかる。このシステムは、中段に表示したような方向別の振動情報に加え、駅・トンネル・橋梁等の構造物情報、平面曲線や分岐器などの軌道情報、バラスト・スラブなどの路盤情報なども一元表示が可能となっており(メイン画面下部)、振動の変化とこれらの情報を一目で突き合わせて把握できる機能を有している。

さらに、グラフ横軸の単位は、画面上部のメニューで「時間」か「キロ程」を選択でき、図中の緑の縦点線をマウスで左右にドラッグすることで、その線が示す地点のキロ程の値(メイン画面右上部)や、サブ画面(図右側の(b)(c))による振動の詳細情報をみることができる。

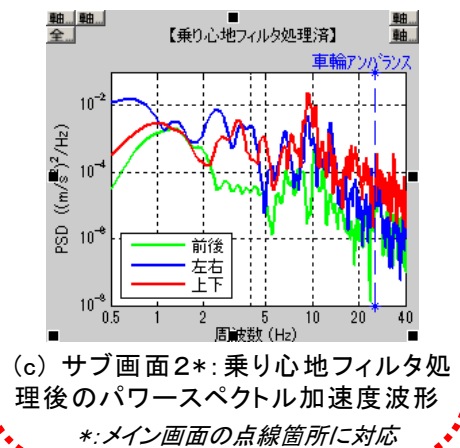
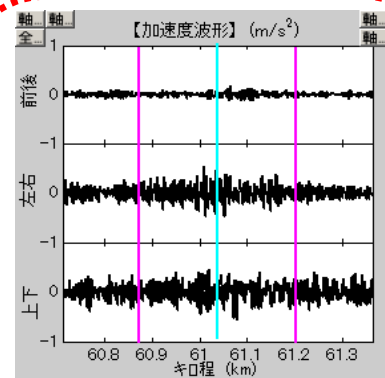
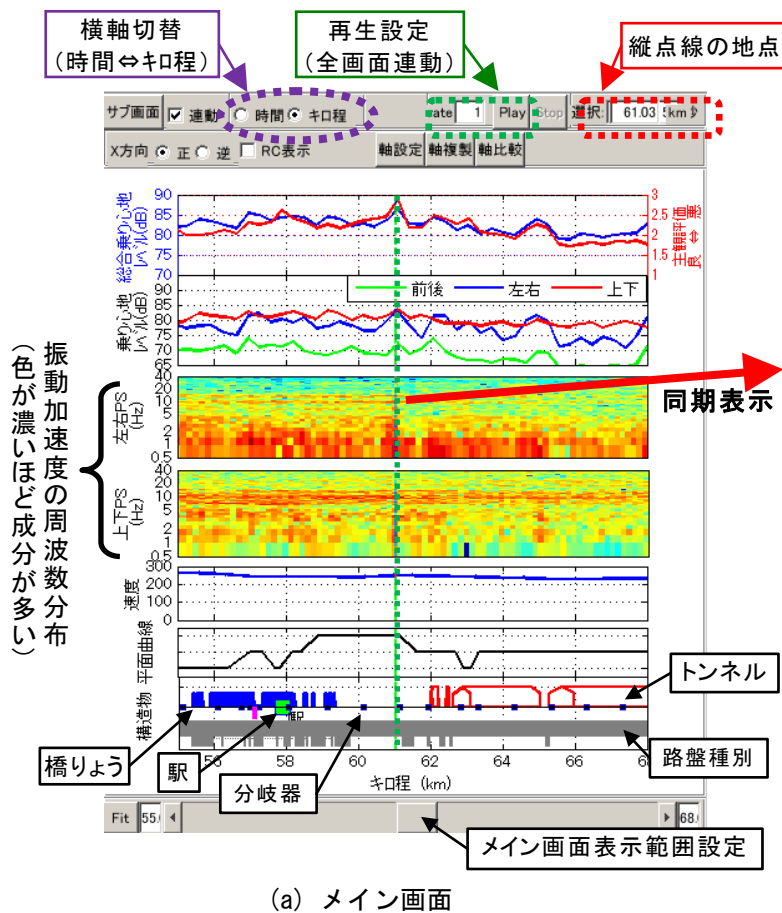


図4 乗り心地情報一元表示システムの画面例

5. おわりに

乗り心地をより高い精度で推定するための複合推定振動乗り心地を提案し、これを効果的に活用できる乗り心地情報一元表示システムを開発した。これは、横軸を時間とキロ程に切り替えて表示できるので、車両と保線の両分野での活用が可能である。

振動乗り心地を評価するのは旅客である。その体感に直結する客室の振動は、軌道と車両の状態に大きく影響され、ときとして相互的な影響も生じる。振動乗り心地の改善には、軌道と車両分野の連携が重要であり、乗り心地改善策の検討の場で、本システムおよび複合振動乗り心地推定法が役立つものと考えている。

参考文献

- 1) 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.