

軌道情報を含む乗り心地情報一元表示システムの開発と活用

中川 千鶴* 菅原 能生** 清水 惇***

Development and Application of a Unified Data-relevant-ride-comfort Indication System Involving the Track Information

Chizuru NAKAGAWA Yoshiki SUGAHARA Atsushi SHIMIZU

We develop a unified data-relevant-ride-comfort indication system (UDIS) as an application of the CRQI. The CRQI is a ride quality index: “complex ride quality index (CRQI)” for predicting the change in ride comfort due to complex vibration, which was proposed in our previous studies. The UDIS’s users are able to watch the change in the CRQI and that in the existing ride quality indices together, and to grasp easily the acceleration-data, the existence of some structures like tunnels, and various track-information around his or her target spots. This paper introduce the UDIS by showing some its application examples in some fields.

キーワード：乗り心地，軌道，一元表示システム，快適性，複合振動

1. はじめに

鉄道分野の振動管理は、左右・上下・前後といった方向別に行われることがほとんどであり、快適性に関わる振動乗り心地も同様である。その主な理由は、測定の簡便性と管理上の利便性にあるといえよう。しかし、乗り心地は「旅客がどう感じるか」で決まり、旅客が体感するのは、様々な方向の成分が混在した振動（複合振動）である。

本研究の最終目標は、鉄道のさらなる乗り心地向上であり、そのためには、旅客が感じる乗り心地を正確に把握し、効果的な向上策に繋げることが重要である。筆者らはこれまで、体感乗り心地への左右・上下・前後加速度の複合影響を推定する方法（複合振動乗り心地推定法、以後「複合推定」と表記）を提案し¹⁾、この結果を現場にフィードバックするための「乗り心地情報一元表示システム（以後、「一元表示システム」と表記）」を開発した²⁾。本稿では、これらを解説するとともに、実線区への活用事例を報告する。

2. 複合振動乗り心地評価法（複合推定）

2.1 複合推定の目的

先に述べたように、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、上下振動と左右振動が同時に生じると、旅客は方向別に分析した数値より大きな振動に実際は曝されるが、これは複合振動として捉えなければ把握できない。このため、「3つの方向の振動の合成成分」の影響を推定することが重要になる。

2.2 複合推定による評価値（複合推定値）の算出

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 L_T 」^{3) 4)}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。筆者らは先行研究⁵⁾で、従来の乗り心地フィルタを高周波振動環境にも対応できるように改良しており、本稿ではこの改良フィルタを用いる。フィルタには前後・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、左右の振動加速度 $a_x(t)$, $a_y(t)$ に W_{LTN_XY} , 上下振動加速度 $a_z(t)$ に W_{LTN_Z} を適用して、 $a_{xy}(t)$, $a_{yz}(t)$ を算出する。
- ② $a_{xy}(t)$, $a_{yz}(t)$, $a_z(t)$ を3方向のベクトルとしたときの同時刻での合成ベクトル ($a_{XYZ}(t)$) の大きさを求め (式 (1))、評価区間 T_n ($t_n \sim t_{n+1}$) の実効値 $a_{XYZ,rms}(T_n)$ を求める (式 (2))。

$$a_{XYZ}(t) = \sqrt{a_{xy}(t)^2 + a_{yz}(t)^2 + a_z(t)^2} \quad (1)$$

$$a_{XYZ,rms}(T_n) = \frac{1}{t_{n+1} - t_n} \sqrt{\int_{t_n}^{t_{n+1}} a_{XYZ}(t)^2 dt} \quad (2)$$

- ③ 乗り心地レベル算出と同じ方法でレベル値を求める

* 人間科学研究部 人間工学研究室

** 車両構造技術研究部 走り装置研究室

*** 軌道技術研究部 軌道管理研究室

(複合推定値 $L_{T_XYZ}(T_n)$)。

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

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、各評価時点の複合振動の乗り心地を表す指標とした。なお、ここでは、日本の鉄道分野で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つけるため、式(3)の方法でレベル化を行ったが、複合推定は式(1)、(2)で求まる合成加速度の実効値を用いて、振動方向によらない評価を行うのが基本的な考え方である。

2.3 複合推定の妥当性について

複合推定の妥当性を検証するため、実際の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)および新幹線の実走行車両を用いた乗り心地評価試験を行い、床面加速度から算出した複合推定値と主観評価を比較した。

2.3.1 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名で、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、新幹線と在来線特急列車の床面で測定された振動加速度(各3分間)をつなぎ合わせたものである。実験参加者は2名一組で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。

2.3.2 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の関係を調べた。実験参加者は鉄道関係者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

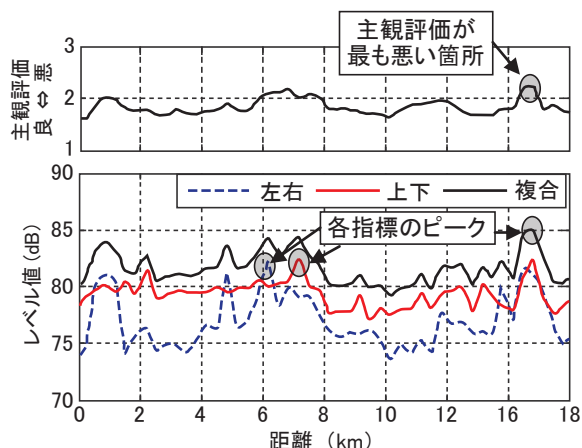


図1 主観評価(上図)と各乗り心地指標(下図)⁶⁾

回あたり10分前後で、14回行ったが、ここではこのうち主観評価平均値が0.8ポイント以上変動した11回分について報告する。

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1に、主観評価と各指標値との相関係数を図2に示す。試験番号No.4～6が立位姿勢、その他は座位姿勢の条件である。

図1の例では、複合推定値と主観評価平均の変化がほぼ一致していること、主観評価の悪化ピークに対して左右と上下振動だけでは推定できていないことがわかる。

図2の主観評価との相関については、複合推定値の方が方向別の乗り心地レベル値より高かったのは11回中7回(64%)で、残り4回中2回(No.4, 11)については大きな差はなかった。しかし2回(No.7, 9)は方向別の方が主観評価と相関が高く、特に差の大きいNo.7について詳細に調べたところ、評価区間(6.3分間)のうち、最初の4分間では、複合推定値は図1の例のように主観評価と極めて類似した変化を示していたが、後半に、主観評価に比べて大きく上昇した場所が2箇所があった。この複合推定値の上昇は、1Hz以下の左右振動の顕著な増加が原因であったが、実際の実験参加者は、背もたれにホールドされる座位姿勢であったため、1Hz以下の左

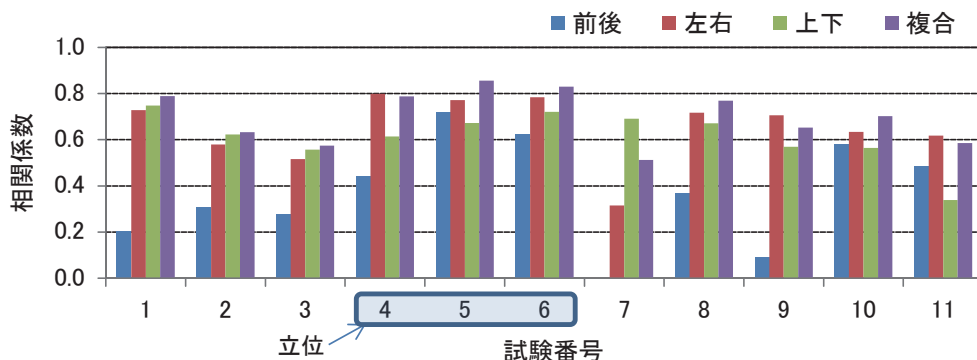


図2 複合推定値および方向別乗り心地レベルと主観評価の相関¹⁾

右成分を感じにくかった可能性がある。

3. 乗り心地情報一元表示システム

3.1 一元表示システムの目的

本システム²⁾は、2つの目的のために開発された。1つは、前章の複合推定を人間の体感評価の代わりとして実用場面で活用するためである。もう1つは、車両と軌道の両分野にまたがる乗り心地検討を容易にするためである。乗り心地に影響する振動はこの両分野に密接に関係する。しかも相互作用により一方だけでは把握できない振動現象が生じることもあるため、より高品質な乗り心地対策や管理には、今後この両分野の連携協力は極めて重要である。このため、本システムは、複合推定を活用しつつ、このような、分野を超えた乗り心地向上のための検討を容易にするために、開発された。

3.2 一元表示システムの機能と特徴

本システムは、床面の振動加速度（前後・左右・上下）とこれに対応するキロ程情報、線路・構造物情報、軌道管理情報を読み込み、地点に対応させて同期表示し、任意の箇所の振動を分析するシステムである。本システムの画面例を図3に示す。

主な機能や特徴を以下にまとめる。画面の詳細な見方

は次節で述べる。

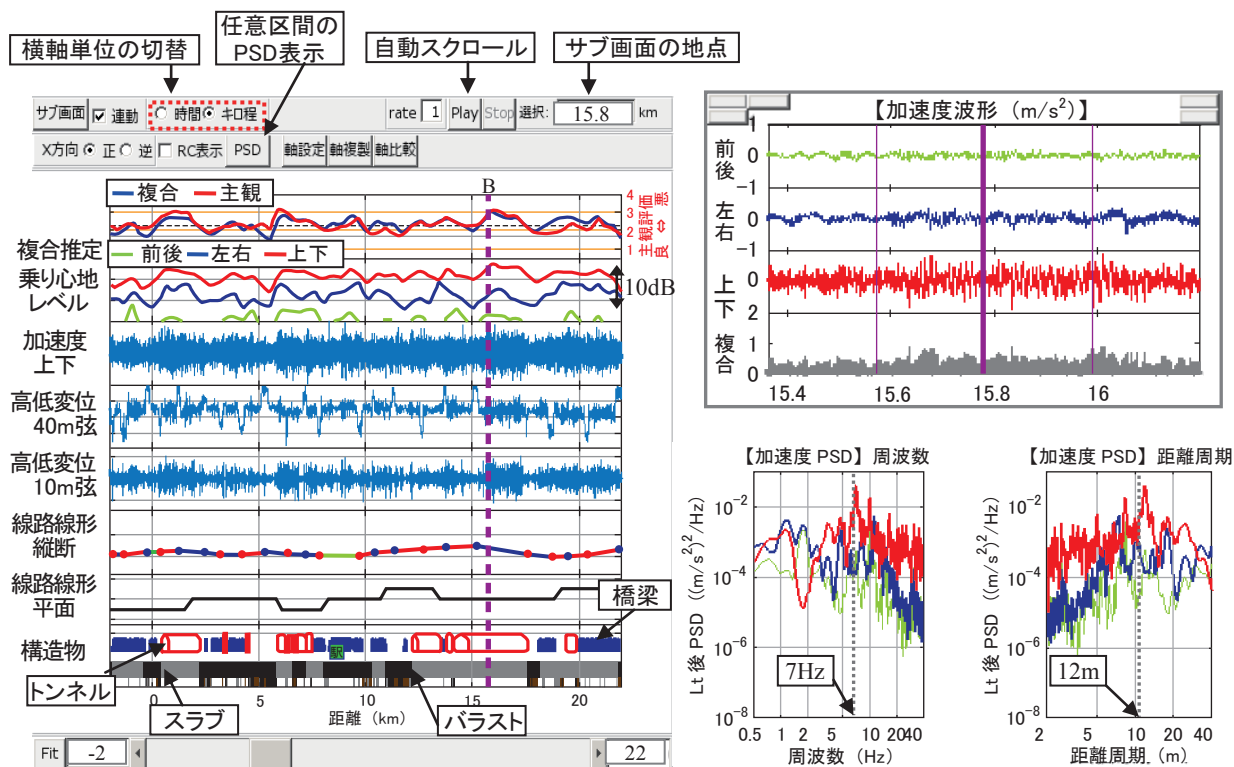
- 複合推定と乗り心地レベルの自動計算・表示
- 任意箇所での振動加速度の波形と周波数分布の表示
- 乗り心地感度フィルタ処理後の周波数分布の表示
- 軌道情報（線形、継目、分岐器等）の表示
- 軌道管理情報（軌道変位等）の表示
- 構造物情報（トンネル、橋りょう、駅等）の表示
- 路盤情報（スラブ・バラスト等）の表示
- 横軸の切替機能（キロ程⇄時間）
- 任意のデータ表示機能（任意データのみ表示）

これらの機能を備えることで、乗り心地が悪化した地点や、その箇所の振動の特徴を把握できる。例えば、以下のような一連の作業を、より円滑に進められる。

- ① 複合推定により乗り心地悪化箇所を把握
- ② その箇所の上下や左右の乗り心地レベルを確認
- ③ 振動波形や線区の特徴（線形や構造物・路盤情報など）を確認
- ④ 原因推定や改善策の検討

3.3 一元表示システムの画面の見方と活用例

実線区データを例として、列車の走行振動と乗り心地体感評価結果⁶⁾を一元表示システムで示し、画面の見方と乗り心地に関連した情報を一元的に把握する方法について述べる。



(a) メイン画面(全体把握)

(b) サブ画面(上図:加速度波形
下図:パワースペクトル密度)

図3 乗り心地一元表示システムの画面例

3.3.1 例示データの概要

新幹線において、鉄道関係者13名による乗り心地体感評価を行ったデータを用いる。乗り心地の主観評価は、2.3.1項と同じ5秒おきの5段階評価である。評価および測定は1号車でを行い、先頭車両となる下り走行で、300km/hの等速走行区間(約25km区間)のデータを分析対象とした。なお用いた加速度データは、客室内に当たる車両中央で測定したものである。

乗り心地レベルおよび複合推定は、主観評価の間隔に合わせて5秒間ごとに計算した。

3.3.2 表示画面の説明と結果

● 複合推定による乗り心地推移の把握と検出

図3は試験データを一元表示システムで示した例である。一元表示システムは、メイン画面(a)とサブ画面(b)で構成され、メイン画面で試験区間全体の情報、サブ画面で任意箇所の詳細分析情報を表示する。メイン画面に表示するデータは任意に選ぶことができる。この例では、一番上から、①複合推定(青)と主観評価(赤)、②方向別乗り心地レベル(前後：緑、左右：青、上下：赤)、③乗り心地フィルタ処理後の上下加速度、④⑤軌道変位データ、⑥⑦線路線形、⑧構造物(上段がトンネルと橋梁、中段がスラブ(灰色)／バラスト(黒)、下段が切り取り(黒)／盛土(茶)／コンクリート橋梁(灰色))である。横軸は距離としたが、時間とすることも可能である。

図3(a)最上段において、複合推定と主観評価の経時的変化が比較的よく一致していることがわかる。軌道や車両を管理する上で、主観評価があまり良くない箇所を捉えることが重要であるが、実際には主観評価を取得するのは容易ではない。この図から、複合推定により、ある程度主観評価値を推定可能であることがわかる。

● 検出箇所の各種情報の把握

メイン画面は、対象線区の地点に依存する乗り心地推移を複合推定により把握し、その箇所の様々な情報を把握するのに適している。図3(a)のメイン画面の縦点線(B地点)を例にとると、1段目の複合推定値からこの箇所ですり心地が悪化し、2段目の乗り心地レベルから主な要因は上下振動であり、左右振動もある程度関係していることがわかる。また、3,4段目からこの箇所は高低変位の振幅がやや大きく、トンネル内のバラスト軌道上であることがわかる。

メイン画面で指定した任意の箇所の振動加速度の詳細を、サブ画面でみることができる。メイン画面左上の「サブ画面」タブをクリックすれば、メイン画面のピンクの縦点線(図3のB地点)のサブ画面が表示される。この例では、振動加速度の波形(図3(b)上図)とパワースペクトル密度(図3(b)下図)が表示されている。ここで表示される波形と周波数分布は、人間の振動に対する感度フィルタで重み付け処理をされているため、乗

り心地に影響している振動成分を直感的に把握しやすい。サブ画面では、振動の特徴やピーク周波数、ピーク距離周期も表示できる。また、サブ画面はメイン画面と連動して、時間的変化を動画として表示する機能があるため、地点や速度に応じた成分変化なども、感覚的に捉えることができる。このように、一元表示システムでは、使い慣れた指標(乗り心地レベルや各種管理データ)とともに、複合推定や他分野の乗り心地関連情報を一目で把握することが可能である。

3.4 軌道保守の前後比較例⁷⁾

一元表示システムを用いて、軌道保守の施工前後の振動加速度を比較し、乗り心地の観点からの、軌道保守効果の確認を行った。

3.4.1 方法

数日の間をあけて2回の走行時の車体の振動測定を行い、この間に400m以上連続で軌道保守の施工が行われた4区間を中心に、車体振動の比較を行った。なお、施工対象区間の保守内容は、軌道変位を修正するためのバラストつき固めである。走行条件を揃えるため、前後の測定は同一編成・同一整備条件の車両で実施し、走行速度パターンも同一とした。以後の分析は先頭車の車両中央床面の加速度を用いた。

なお、1つの施工区間が短く、走行時間が5秒を切る区間もあったため、乗り心地レベルおよび複合推定の計算時間は2秒間とした。

3.4.2 結果と考察

走行区間全体の複合推定比較の結果、軌道保守を行った4区間(施工区間①～④)のうち3区間で、施工前に比べ施工後に複合推定値が2.4～4.4dB減少し、乗り心地が向上した。これまでの走行試験結果から筆者らが確認したところによると、複合推定値の2～3dBの差が主観評価変化の0.5ポイント相当であったことから⁶⁾、これらの施工箇所の乗り心地向上効果は、体感上でも差が知覚されるレベルと考えられる。

乗り心地が向上した施工区間①と②の軌道保守前後の複合推定値を図4に示す。図中の緑枠が施工区間であり、施工後に複合推定値が減少したことがわかる。

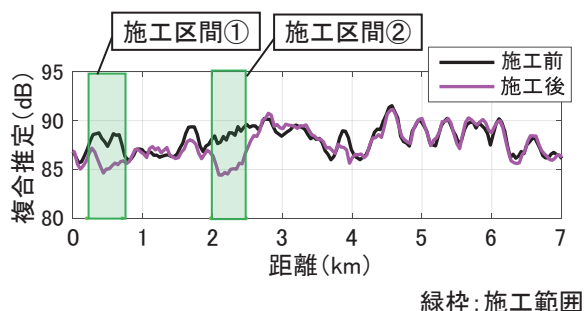


図4 軌道保守前後の複合推定の比較

● 保守前後のパワースペクトル密度比較

図4に示した施工区間①における加速度のパワースペクトル密度(PSD)を図5-1に示す。なお、このPSDのグラフは、乗り心地フィルタ2011⁵⁾による人間の振動に対する感覚補正を、一元表示システムを用いて行っている。図から、上下振動の4~5Hzと10~20Hz付近の成分が、軌道保守の施工後に顕著に減少していることがわかる。特に興味深いのは、施工前に最も大きなピークを示している10Hz以上の帯域成分(図中の緑の丸点線)の減少である。昨今、軌道管理分野における乗り心地を観点とした高周波振動対策のニーズは高いが、従来の軌道保守の施工方法が、結果的に高周波振動対策にもなっていることがわかる。なお、非施工区間からランダムに抽出した5区間(1区間500m)に対して、軌道保守の施工日程の前後で同様のPSD算出結果を比較したところ、変化がないことを確認した。一例を図5-2に示す。このことから、図4および図5-1で生じた差異は、車両側の要因によるものではなく、軌道保守の施工効果と考えられる。

● 一元表示システムによる軌道保守の前後比較

一元表示システムを用いた、施工区間①を含む区間の軌道保守の施工前後の比較例を図6に示す。

1段目が複合推定、2~4段目が軌道変位データ(2段目:40m弦高低変位、3段目:10m弦高低変位、4段目:10m弦通り変位)、5段目が線路の勾配を示す縦断線形、6段目がカーブを示す平面線形、7段目が構造物と軌道

の路盤情報である。横軸は距離を示し、中央の500m区間(緑の点線で囲まれた区間)が軌道整備区間①の区間である。上から4段目までの図は、施工前後のデータを併記しており、施工による改善状態が把握できる。このように、比較したいデータを地点で位置合わせして併記することにより、改善効果を確認することが可能である。

4. おわりに

複合振動の乗り心地影響を推定する複合振動乗り心地推定法(複合推定)と、これを組み込んだ乗り心地情報一元表示システム(一元表示システム)を解説し、軌道整備の前後比較への活用例を紹介した。本システムの特徴は、複合推定を体感評価の代わりに用いて、走行振動や線区を乗り心地の観点で捉える点にある。また、車両・軌道・人間科学という乗り心地に関わる分野の連携を支援するため、データを時間と距離両方の単位で表示し、複合推定と一緒に従来指標や車両・軌道分野のデータ、線路線形や構造物情報を同期表示するなど、様々な機能を有している。

乗り心地は、複合振動が、周波数依存性のある人間の振動感覚にもたらす印象で決まる。よって、乗り心地品質をさらに向上するには、旅客が感じる乗り心地を簡便かつ精度良く把握し、分野横断的に検討を行うことが重要である。今後は、営業車に搭載された検測装置データの本システムでの活用や、現場のヒアリングに基づくユーザビリティの向上を行い、より実用性の高いシステ

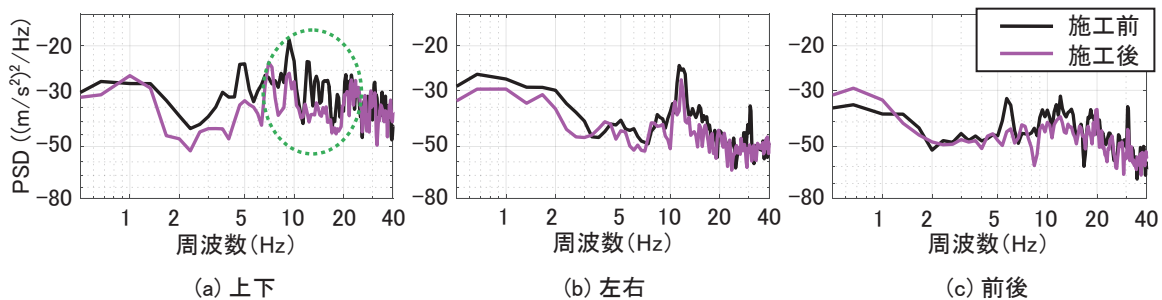


図5-1 人間の感度を反映した加速度パワースペクトルの軌道保守前後比較(施工区間①)⁷⁾

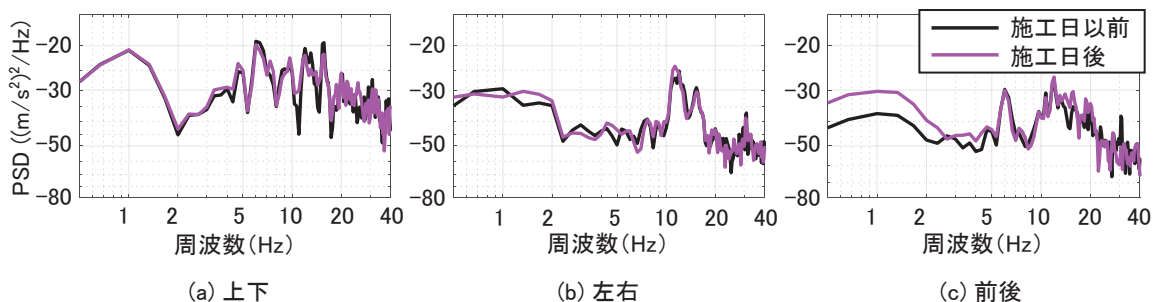


図5-2 人間の感度を反映した加速度パワースペクトルの軌道保守前後比較例(非施工区間)⁷⁾

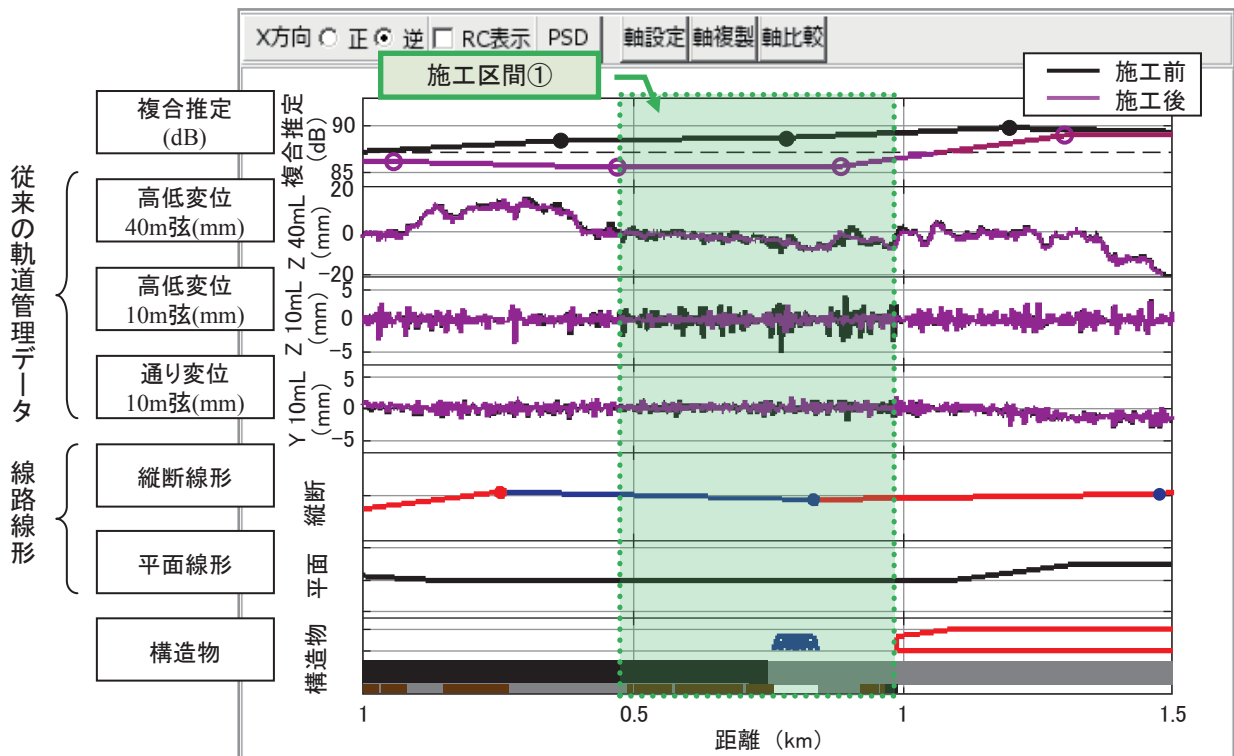


図6 複合推定と主な軌道管理データを表示した一元表示システムの画面（施工区間①を含む）⁷⁾を改変

ムとなるよう開発を進める予定である。

謝 辞

調査の実施に関してご協力をいただきました西日本旅客鉄道株式会社の関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

文 献

1) 中川千鶴：複合振動に対する乗り心地の時間変化推定，日本人間工学会第54回大会講演集，pp.356-357, 2013
 2) 中川千鶴：乗り心地情報一元表示システムの開発，第20回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.277-278, 2013

3) 車両電気協会（編）：乗り心地管理体制の充実にに関する研究報告書，社団法人車両電気協会，1981
 4) 鈴木浩明：鉄道車両の振動乗り心地に関する人間科学的研究，鉄道総研報告（特別号），No.24, 1998
 5) 中川千鶴，島宗亮平，高見創，渡邊健，横山義彦他：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
 6) 中川千鶴，鈴木綾子，榎並祥太，清水惇，矢坂健太，菅原能生，千代誠：複合振動影響を考慮した乗り心地推定の現場での活用，第21回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，S5-2-2, 2014
 7) 中川千鶴，千代誠，高山宜久，藤嶋昭久，矢坂健太，清水惇，菅原能生：実用に向けた乗り心地評価法の表示システムの改良，交通・物流部門大会講演論文集，Vol.2015, No.24, 2103, 2015