

## 高周波上下振動が乗り心地に及ぼす影響

中川 千鶴\* 島宗 亮平\*\* 白戸 宏明\*  
富岡 隆弘\*\*\* 高見 創# 渡邊 健##

## Effect of High Frequency Vertical Vibration on Ride Comfort

Chizuru NAKAGAWA Ryohei SHIMAMUNE Hiroaki SHIROTO  
Takahiro TOMIOKA Hajime TAKAMI Ken WATANABE

To develop a more suitable method of evaluating ride comfort of high speed trains in Japan, a fundamental study was conducted on sensitivity of passengers to various frequencies of vertical vibration with respect to ride comfort. Experiments were performed using an electrodynamic vibration system that can generate vibrations in the frequency range of 1 to 80 Hz. The experiments were repeated with several different posture situations of subjects, for example, using armrest or not, with eyes opened or closed and so on. The shapes of threshold vibration curves with different posture situations were very similar to each other and the results indicated that the subjects tend to experience greater discomfort when exposed to high frequency vibrations than that presumed by the conventional Japanese ride comfort assessment method, the "Ride Comfort Level (RCL)." We proposed a new RCL revised based on the results of the experiments and confirmed that the new RCL method was more suited to the sensitivity of passengers with respect to ride comfort than the basic RCL method on the experiments using a real train.

キーワード：乗り心地，高速鉄道，人間工学／高周波振動，評価法，乗り心地レベル

## 1. はじめに

現行の乗り心地評価法である，乗り心地レベル<sup>1)</sup>が，浮上式鉄道や在来方式鉄道の高速鉄道において，体感と合わないことが問題となっている。これは，高速列車内では，高周波振動成分が体感乗り心地に影響を及ぼしており，現行の乗り心地レベルが，その影響を表現できていないためと考えられる。そこで我々は，より体感に合った乗り心地評価の検討を進めており<sup>2), 3)</sup>，乗り心地レベルの高周波振動の重み付けが低すぎることを，被験者による振動感度実験により確認した<sup>3)</sup>。

しかし，この実験では，姿勢条件が1種類のみで，加振範囲も40Hzまでしか行わなかったため，新たに同様の実験を異なる複数の姿勢条件で，最大周波数を80Hzまで拡大して，繰り返し実施した。さらに，この実験結果から得られた感度曲線を基に，乗り心地レベルの補正案を作成し，その効果を現車試験で検証したので，これ

らの結果をここに報告する。

## 2. 振動台実験

乗り心地レベルが周波数重み付け(乗り心地フィルタ)の根拠としている等感覚曲線の形が妥当かどうかを検証するため，乗り心地感度実験を実施した。実験は，被験者の肘掛利用の有無や閉眼など，いくつかの条件について，繰り返し実施した(表1)。なお，高周波振動は上下振動に顕著に現れるため，上下振動を中心に実験を行った。

## 2.1 被験者属性

各実験における被験者属性を表2にまとめる。なお，被験者は全て鉄道関係者である。

## 2.2 実験装置

実験は，水冷による動電方式の低騒音型3軸振動台(IMV製)を用いた。実験では，新幹線用普通座席(二人用)を設置した(図1)。この様な振動に対する感度実験では，座席要因を排除するため振動を直接臀部に伝える方法(直接振動台に着座するなど)を用いるのが一般的であり，例えば従来の乗り心地レベルがベースとして

\* 人間科学研究部(人間工学)  
\*\* JR東日本研究開発センター(前 人間工学)  
\*\*\* 車両構造技術研究部(車両振動)  
# 環境工学研究部(空気力学)  
## 浮上式鉄道技術研究部(電磁力応用)

表1 正弦波振動体感評価試験一覧

実験名	被験者	周波数範囲	肘掛	加振方向	他の条件
実験1 <sup>3)</sup>	38名	1～40Hz	あり	上下	
実験2①	11名	1～81Hz	あり	上下	閉眼
実験2②	8名		あり	上下	
実験2③	8名		あり	上下	フルクライニング
実験3①	55名		なし	上下	
実験3②	54名		なし	左右	

表2 実験ごとの被験者属性

実験名		性別人数 男性 / 女性	平均年齢[歳] (最小 / 最大)	平均身長[cm] (最小 / 最大)	平均体重[kg] (最小 / 最大)
実験1		33/5	38.5(24/53)	170(154/183)	66(42/98)
実験2	①	10/1	39(28/44)	172(165/178)	73(55/105)
	②③	8/0	39(28/44)	173(165/177)	72(55/105)
実験3	①	46/9	39(22/59)	169(155/184)	65(41/92)
	②	46/8	39(22/59)	169(155/184)	65(41/92)

いるISO2631<sup>4)</sup>も同様である。しかし、本研究の最終目的は、日本の高速鉄道を含む鉄道車両の乗り心地を正しく推定できる乗り心地評価法の開発であるため、新幹線座席を用いた。

2.3 着座姿勢条件

着座姿勢は、①深く腰掛ける、②背もたれに上半身をもたれかける、③頭部はヘッドレストを使わず自立した状態を維持して水平前方を見る（閉眼条件では、これと同等の頭部位置）、④足裏全面を加振台上に載せる、こととした。靴は、通勤時に使用しているものを着用した。

2.4 振動条件、被験者への振動提示方法

振動は全て正弦波振動で、図2に示すように、30秒で徐々に増幅し、最大振幅(1.7m/s<sup>2</sup>)で2秒保持したのち30秒で減衰するものである。振動周波数の提示順序は順序効果を避けるため乱数で決定した。周波数条件は以下の通りである。

【実験1】1, 2, 4, 5, 6.3, 8, 10.1, 12.7, 16, 20.2, 25.4, 32, 40.3Hz (13条件)

【実験2,3】実験1に51, 64, 81Hzを加えた16条件

被験者1名は、新幹線用二人掛座席の左側に着座し、実験の説明を受けた後、振動の体感評価を練習1回(10Hz条件)を含む13回(実験2,3では16回)行った(各条件は後述)。被験者は、提示される振動に対し、「新幹線の乗り心地として許容できない」大きさの間は、手元の評価スイッチを押し続けた(図2)。また、1つの振動条件が終了するごとに質問紙の記入を行った。



図1 振動台上の座席に着座した被験者

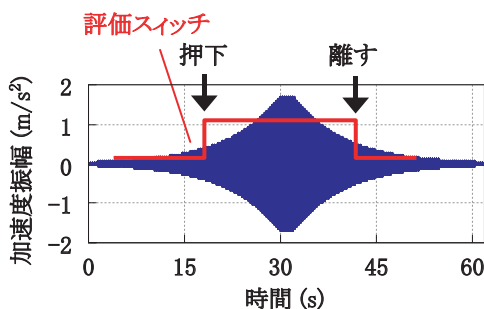


図2 刺激波形(10Hz条件)と評価スイッチの例

2.5 測定項目

加速度は、床面、座面、背もたれについては上下・左右・前後の三方向、肘掛（右側・左側）については上下方向を測定したが、乗り心地レベルは床面上の加速度を分析に用いるため、本報告では床面の上下加速度データのみを分析対象とした。測定した加速度データは、アンプで増幅後に200Hzのローパスフィルタ処理を行い、サンプリング周波数500Hzでデータレコーダに取り込んだ。被験者の手元の評価スイッチも同時に記録し、押下時点と離れた時点の床面上下加速度を検出し、その平均値を、その被験者の振動周波数における許容限界値とした。

2.6 実験結果

振動周波数ごとの全被験者の許容限界平均値（以後、被験者評価値と表記）を図3に示す。(a)は上下振動刺激、(b)は左右振動刺激に対する実験結果と等感覚曲線（乗り心地レベルの根拠）を示している。ここでは、値が小さいほど、その周波数の振動を人間が感じやすい（感度が高い）ことを意味する。現行の等感覚曲線が、高周波域では、人間の感度が急激に鈍くなると想定していることがわかる。

図3(a)での、異なる条件での5つの実験結果を比較すると、閉眼やフルクライニングのほうが、全体的に上にあり、感度が鈍い傾向があることがわかる。一方、肘掛利用ありとなしの結果を比較すると、肘掛ありの条件のほうが下にあり、特に10Hz以上で顕著であり、肘掛を使ったほうが、高周波振動に対する感度が高いことがわかった。このように、条件によって、全体的に上下するものの、周波数に対する感度変化の傾きという点で

は、条件間での再現性が非常に高かった。本研究の目的は、乗り心地フィルタの高周波域での重み付けの妥当性検証であるため、本稿では以後、絶対値ではなく、周波数に対する傾きに着目し、検討を進める。

以上より、上下振動においては、異なる被験者群間、条件間で振動周波数に対する変化の傾きに、ある一定の再現性が見出された。また、先行研究<sup>3)</sup>で示したように、性別、身長、体重が異なっても、上述の変化の傾きはほぼ同じであった。一方、座席種別は検討していないため、その影響は不明であるが、本実験で用いた座席と類似の座席（新幹線用の普通座席）であれば、上下の振動伝播の点で構造的に類似しているため、少なくとも上下振動では、同様の変化傾向を示すことが予想される。よって、「乗り心地として許容できない」ことを尺度とした本結果は、各周波数域の上下振動が乗り心地に与える影響の度合いの変化を捉えているといえよう。

一方、左右振動については、一種類の実験しか行っていないため再現性は不明であるが、図3(b)の結果から、高周波域の人間の感度は、上下振動と同様に、現行の等感覚曲線より高いことが予想される。

2.7 振動台実験のまとめ

本結果は、10～30Hzの範囲で、いずれの着座条件でもほぼ同じ対数的増加を示し、その傾きは等感覚曲線の傾きより緩やかであった。また、30～80Hzの範囲では、感度がむしろ高まるか横ばいになり、現行の等感覚曲線との乖離はさらに大きくなった。つまり、等感覚曲線に基づく乗り心地レベルは、高周波振動が乗り心地に与える影響を過少評価していることがわかった。

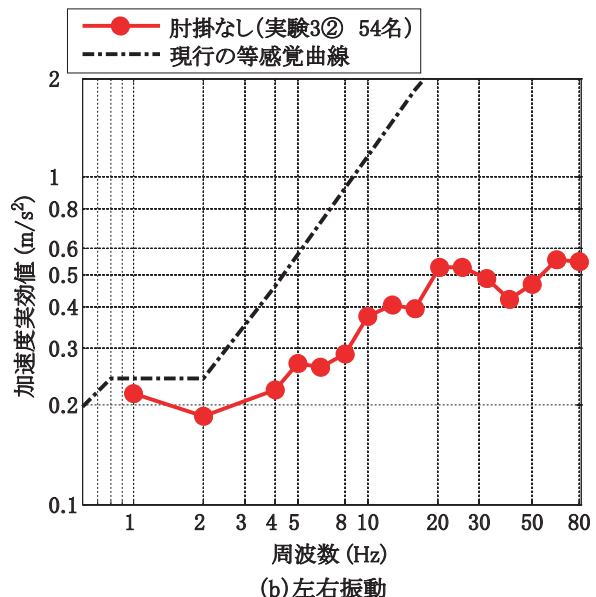
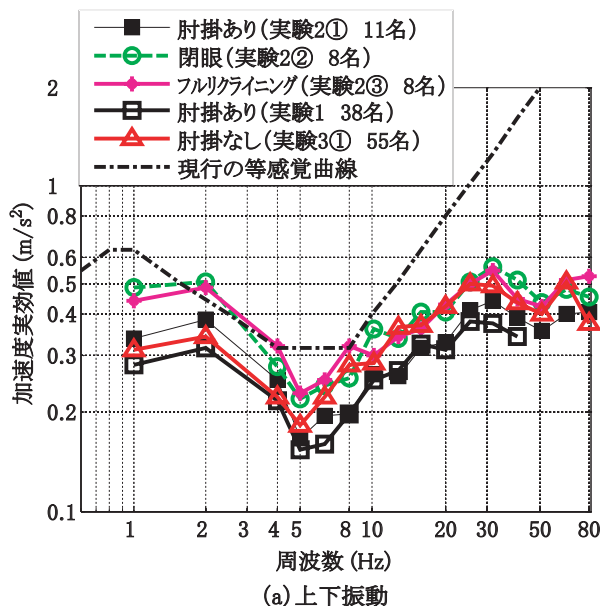


図3 許容限界平均値（実験結果）と乗り心地レベルに用いられる等感覚曲線

特集：ヒューマンファクター

3. 乗り心地フィルタの補正案の作成と検証

3.1 乗り心地レベル  $L_T$  の算出方法

乗り心地レベルの評価値  $L_T$  は、実測加速度波形に対して乗り心地フィルタ（図4の黒実線）による周波数重み付けを行い、さらに実効値  $A_w$  を求め、基準加速度  $A_0$  ( $10^{-5}m/s^2$ ) との比を対数表示したものである（(1)式）。

$$L_T = 20\log_{10}(A_w / A_0) \text{ (dB)} \quad (1)$$

3.2 乗り心地フィルタ補正案の作成

上下振動について、乗り心地レベルが体感とより相関が高くなるよう、現行の乗り心地レベルが用いている乗り心地フィルタ（図4）を補正することを試みた。なお、補正に際しては、以下の点に配慮し、8Hz以下の形状は変えず、8Hz以上も対数変化という点は変えず、傾きのみを補正することとした。

- ① 現行の乗り心地レベルの評価値  $L_T$  と比較可能である
- ② 実験結果から、8Hz以上の重み付けの傾きを緩やかにすることは妥当である
- ③ 複雑な重み付け曲線にしない

2章の実験結果から、8Hz以上の補正案の傾きを導出する。ここで、導出には、被験者数の多い実験1と実験3①の結果を用いることとした。

乗り心地レベルは等感覚曲線に基づく乗り心地フィルタ ( $F$ ) によって重み付けがされるが、両者の間には以下の関係がある。

$$F = -20\log_{10}(A / A_0) \text{ (dB)} \quad (2)$$

$A$  : 等感覚曲線の値

$A_0 = 0.315$  (8Hzでの等感覚曲線の値)

乗り心地フィルタは、8Hz以上では1オクターブあたり6dB減少する。同様に、実験1と実験3①の8～30Hzの範囲において、フィルタに換算した場合の傾きを、周波数を対数に置き換え、線形近似により求めた結果、それぞれ-2.69、-2.71と、ほぼ同じであった（表3）。よって、補正案として、乗り心地フィルタの8Hz以上の傾きを0.45倍（1オクターブあたり2.7dB減少）にすることに決定し、その形状を図4に示す。

ただし、この補正案は30Hz以上の被験者評価値がやや横ばいであることを反映していないことに留意されたい。30Hz以上における変化の横ばいは、以下の2つの理由が考えられる。

- ① 周波数として、振動台が空気を震わし、人間に聞こえる音が発生し、より大きく感じる
- ② 人間の振動に対する感度自体が、このような特性を持っている

しかし、現段階では推測に過ぎないため、今後検討が必要である。

表3 8～30Hzの重み付けフィルタの傾斜

	傾き (dB/oct)	$R^2$	乗り心地フィルタの傾きに対する比率
乗り心地フィルタ	-6.00	1.00	—
実験1より算出	-2.69	0.91	0.45
実験3①より算出	-2.71	0.94	0.45
平均：			0.45

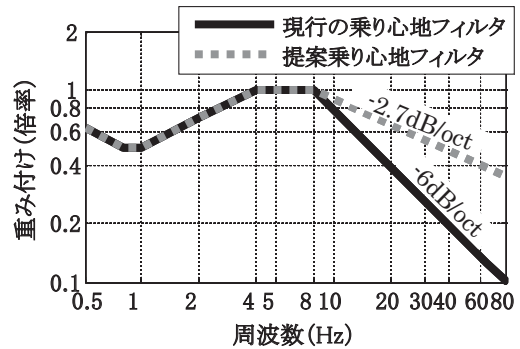


図4 乗り心地フィルタ（上下振動）

3.3 補正案の検証

補正案の検証として、新幹線において、被験者による乗り心地評価および振動と騒音の測定を行った。

(1) 実験内容

(a) 被験者：46名（一般被験者26名，鉄道関係者20名）

(b) 測定内容：

- ・物理量計測：車両中央床面加速度（上下・左右・前後）、車両中央騒音（床面より約1.2m）
- ・乗り心地に対する主観評価：被験者は、乗り心地として、①「全く問題ない」から⑤「非常に不快」の5段階で評価した。評価は、5秒おきの合図（ライト点灯）のたびに、手元のスイッチボックスにある①～⑤の評価ボタンのいずれかを押しに行った（図5）。

(c) 姿勢等測定条件：

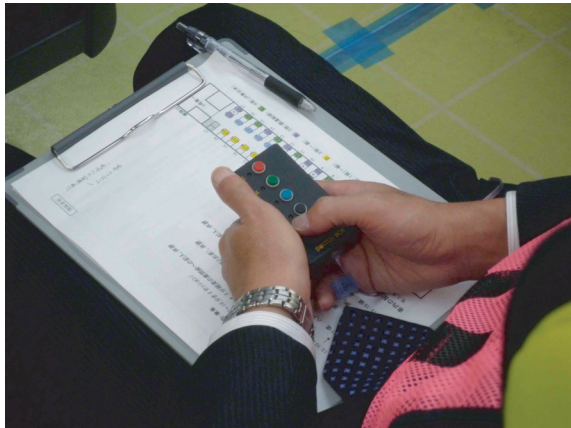
10分前後の測定を19回行い、前半10回を座位、後半9回を立位で行った。なお、座位は、座席にやや深く腰掛け、足は組まずに両足の裏を床につける姿勢、立位は、両足を肩幅程度に横に開き、何にも寄りかからず自立した状態で、列車進行方向に向かって立つ姿勢とした。ただし、立位時に姿勢が崩れそうな場合は前座席の背もたれに掴まってよいことにした。

(2) 実験結果と考察

(a) 実験車両の加速度パワースペクトル密度分布

車両中央の床面で測定した上下振動加速度パワースペクトル密度 (PSD) に対して1/12オクターブ分析を行った結果を図6に示す。図6 (a) は速度ごと

の10～80Hzの範囲のPSDを示しており、速度が上昇するにつれ、高周波成分が増えていることがわかる。また、図6 (b) は、320km/h走行での明かり区間とトンネル区間のPSD比較であり、トンネル区間のほうが、高周波成分が多いことがわかる。



(a) 座位での評価 (手元は評価ボタン)



(b) 立位での評価

図5 現車実験の様子

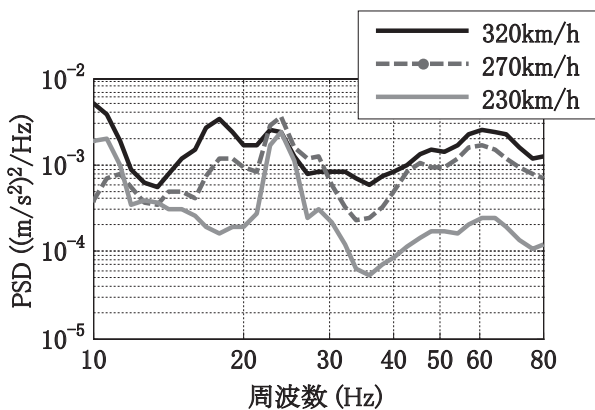
(b) 現行法と提案法の比較

床面振動の上下振動に対し、現行の乗り心地レベル値 (現行 $L_T$ ) と前章で提案した補正乗り心地フィルタを用いた乗り心地レベル値 (提案 $L_T$ ) を算出した。ある測定区間での現行 $L_T$ 、提案 $L_T$ と主観評価 (全被験者の評価平均点) の変化 (上図) と当該区間の速度とトンネル有無 (下図) の例を図7に示す。図から、主観評価平均点が、トンネル区間で悪化する傾向があることがわかる。

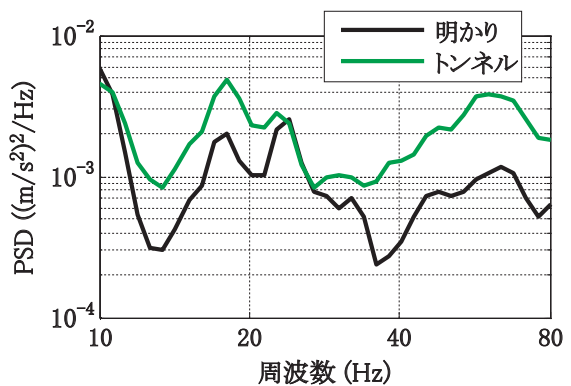
図7の区間での主観評価と各 $L_T$ との相関係数は、現行 $L_T$ が0.47であったのに対し、提案 $L_T$ は0.73であった。一方、測定を行った19区間中、その区間の最高速度と最低速度の差が15km/h以内で評価変動が極めて少なかった6区間を除く13区間を分析対象とし、現行 $L_T$ 、提案 $L_T$ と主観の相関を調べた。この結果、全区間で、提案 $L_T$ のほうが現行 $L_T$ より主観評価との相関が高くなった (図8)。

4. まとめ

高周波振動が乗り心地に及ぼす影響は、乗り心地レベル算出時に用いる乗り心地フィルタの想定よりも大きいことが、実験で確認された。また、肘掛利用の有無や座席のリクライニングの状態、閉眼状態など、異なった条件でも、振動周波数が乗り心地に与える影響の変化は、ほぼ同じであることがわかった。そこで、実験結果に基づいた乗り心地フィルタの補正案を作成した。なお、本研究の目的上、8Hz以上の高周波成分に対するフィルタ形状のみを補正するに留め、 $-6\text{dB/oct}$ だった現行法のフィルタの傾きを、 $-2.7\text{dB/oct}$ に変更した。さらに、この補正案の妥当性を検証すべく、現車での被験者による乗り心地試験を実施したところ、全ての測定区間で、現行法より補正案のほうが、実際の乗り心地主観評価と相



(a) 走行速度の比較



(b) 明かり区間とトンネル区間の比較

図6 上下振動加速度パワースペクトル密度の変化

特集：ヒューマンファクター

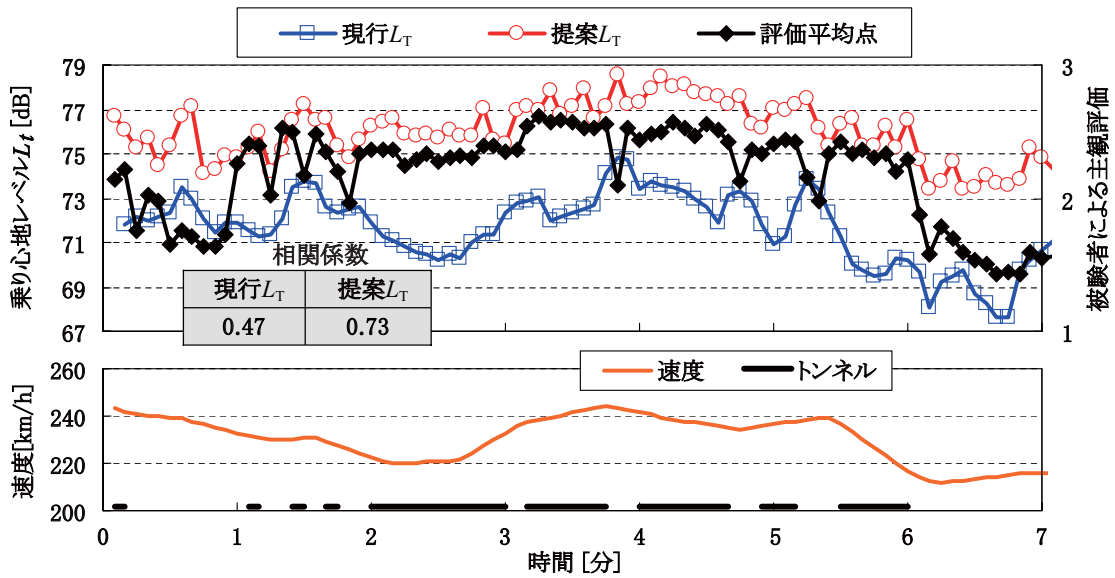


図7 現行 $L_T$ 、提案 $L_T$ と主観評価との比較例

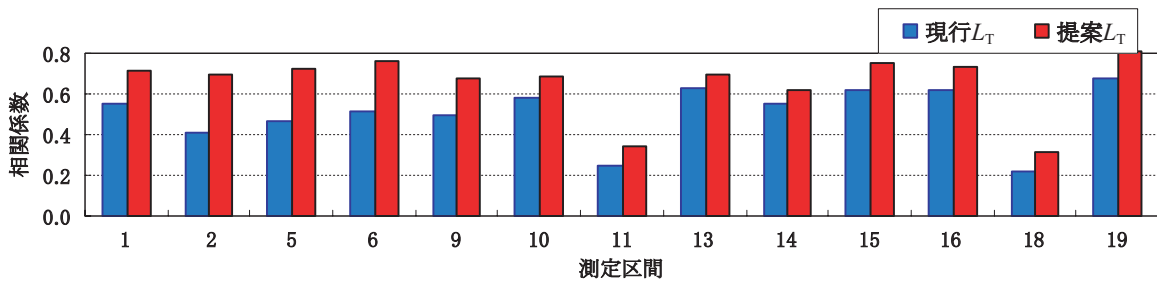


図8 各測定区間における現行 $L_T$ と提案 $L_T$ の主観評価との相関係数

関が高くなった。よって、乗り心地フィルタを補正することで、体感乗り心地とより相関の高い乗り心地評価が可能であると考える。

5. おわりに

本検討では、高周波振動が顕著な上下振動を中心に実施したが、乗り心地という観点では、左右方向の振動も重要であり、今後は左右方向についても、同様の検討を実施する予定である。また、30Hz以上の帯域における、感度特性の変化の減衰は、本提案の補正案には反映されていない。同帯域の音の影響を含め、原因を検討しながら、乗り心地レベルの補正案にどう反映すべきかを検討する必要がある。また、乗り心地評価法としての信頼性を高めるためには、今後、座席要因の影響、異なる線区における確認実験が必須である。

本研究の一部は国土交通省の助成金を受けて実施した。

文献

- 1) 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
- 2) 中川千鶴, 高見創, 渡邊健, 星野宏則, 水上直樹, 鈴木江里光:低周波音が浮上式車両の乗り心地に及ぼす影響の基礎実験, 鉄道総研報告, Vol.21, No.9, pp.11-16, 2007
- 3) 中川千鶴, 島宗亮平, 水上直樹, 渡邊健, 星野宏則, 鈴木江里光:高周波振動が乗り心地に及ぼす影響に関する基礎的検討, 鉄道総研報告, Vol.22, No.11, pp.11-16, 2008
- 4) International Organization for Standardization (1985a). Evaluation of human exposure to whole-body vibration Part 1: General requirements, ISO 2631/1-1985. Geneva: International Organization for Standardization.