

S2-2-1. 乗り心地に影響する動揺周波数と線路の加振原因に関する一考察

[土] ○中川正樹 (鉄道総研) [土] 古川 敦 (鉄道総研) 伍井 正 (JR東海)

Frequency and Causes of Railway Vehicle Vibration which Influences Riding Comfort

Masaki NAKAGAWA, Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo
 Atsushi FURUKAWA, Railway Technical Research Institute
 Tadashi ITSUI, Central Japan Railway Company

For management of riding comfort of Tokaido Shinkansen line, equivalent sensibility filter which transformed from the ISO-2631 is applied to develop effective and efficient track maintenance. However, this filter is not always fitted to human sense in case of irregular vibration like railway vehicle. We studied about relation between riding comfort and frequency of vehicle vibration which was based on field test on Shinkansen vehicle. As a result, we found that there may be more suitable relation than ISO-2631. In this paper, we introduce the new riding comfort evaluation method which is guided from relationship of specific frequencies and estimated causes of vehicle vibration.

キーワード：乗り心地管理、列車動揺、等感覚フィルタ、判別分析、軌道狂い

Keywords: a management of riding comfort, railway vehicle vibration, equivalent sensibility filter, discriminant analysis, track irregularity

1 はじめに

現在東海道新幹線では乗り心地管理につながる効果的・効率的な軌道保守の実現を図るツールとして、人間の快・不快の感覚を乗り心地評価過程で導入している¹⁾。この人間の感覚には図1に示すISO-2631(国際標準化機構「全身振動暴露に関する評価指針」)の基準を鉄道車両用に拡張した「等感覚フィルタ」が用いられている。これは振動に対する人間の感覚を周波数毎に重み付けしたものであるが、鉄道車両のように不規則に加振される場合には、人間の感覚と必ずしも一致しない面もあると考えられる。そこで新幹線営業列車から得た動揺データと複数の被験者により行

った乗り心地評価から、乗り心地評価と動揺周波数の関係について再検討した結果、等感覚フィルタの重み付けとは異なる傾向を有する場合があることを確認した²⁾。本研究では、乗り心地評価と動揺周波数の関係についてさらに分析を進めると共に、乗り心地に影響する動揺周波数を発生させる地上側(線路)の加振原因について検討を行った結果を報告する。

2 乗り心地評価と振動周波数の関係

2-1 データの獲得方法と分析方法

動揺と乗り心地の関係を明確にするため、営業列車での動揺測定と並行して、乗り心地良好な箇所及び気になる箇所それぞれについて体感による乗り心地評価を行い、手押しによるマーキングを行った。被験者は測定列車の最後尾車両最後部座席において着座状態で評価を行い、これらを6列車5被験者で実施した。なお今回の評価における被験者は保線関係の業務に従事している者である。

獲得した動揺データについては、左右動、上下動それぞれについて周波数を0~0.5Hz、0.5~1Hz、1~2Hz、2~4Hz、4~8Hz、8~16Hzの6種類に分割した後、各周波数帯における振動加速度を標準偏差(以下、 σ と記す)で表した。分析は、分割した周波数帯についてそれぞれ2秒間の σ_i ($i=1\sim6$)を算出した後、すべてを1つのグラフ上に重ね合わせて、マーキングが多数行われた箇所で行われる各周波数帯の σ_i から、マーキング箇所にのみ共通する事象を見つけ出すこととした。

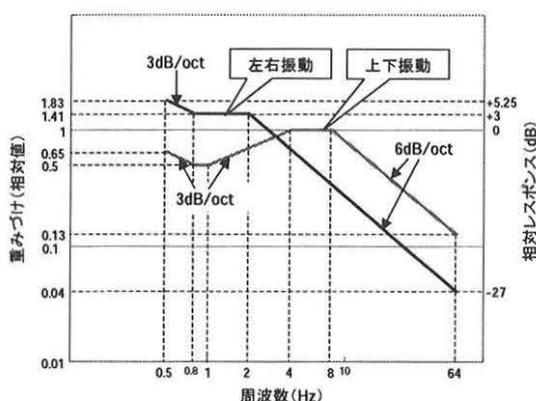


図1 等感覚フィルタ

2-2 マーキング箇所に見られる傾向

左右動 6 種類の周波数帯の σ_1 の重ね合わせによりマーキング箇所の特徴の洗い出しを行った。その結果、特に 1~2Hz、2~4Hz の 2 つの周波数帯がマーキング箇所の特定に大きく寄与する可能性を有していることがわかった。ま

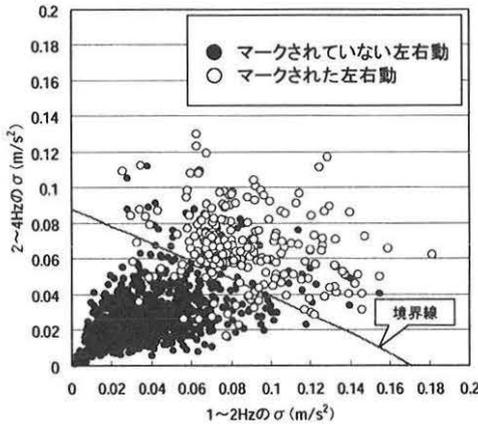


図2 マーキング箇所の分布と判別用境界線

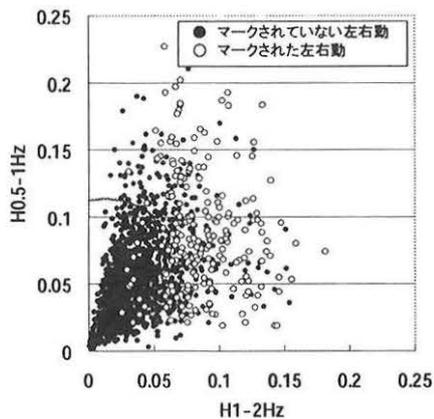


図3 マーキング箇所の分布 (1)

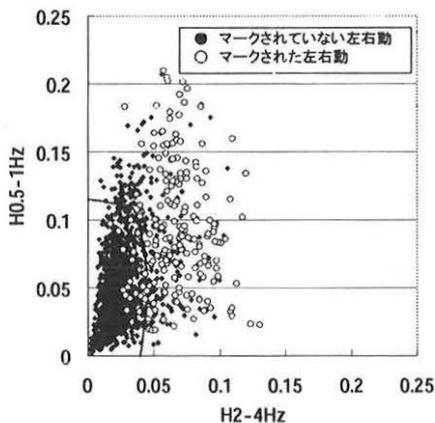


図4 マーキング箇所の分布 (2)

た 6 種類の中から 2 種類ずつを選び、合計 15 パターンについて判別分析を行った結果から、左右動 1~2Hz と左右動 2~4Hz の周波数帯の変化が乗り心地の気になる箇所の特定に関係しており、その影響度は 2~4Hz の方が 1~2Hz よりも大きいという可能性がみられた。結果を図 2 に示す。さらに左右動の等感覚フィルタでは最も高い重みを持つ左右動 0.5~1Hz と左右動 1~2Hz の関係を図 3 に、2~4Hz との関係を図 4 に示す。2 つの図から、1~2Hz の変化が概ね $\sigma=0.06$ を超えた場合、また 2~4Hz の変化が概ね $\sigma=0.04$ を超えた場合については、0.5~1Hz の変化の大小に関わらずマーキングが行われていること、また 0.5~1Hz については、どちらの場合においても $\sigma=0.12$ を超えた場合にはマーキングが行われるということが伺える。つまり 0.5~1Hz と他の周波数帯 (1~2Hz、2~4Hz) の関係は独立で、相互に影響し合うことがないということを今回の結果からは伺うことができる。

2-3 等感覚フィルタとの比較

左右動の等感覚フィルタでは、図 1 に示すように 1~2Hz に対して 0.5~1Hz の重み付けは概ね大きく (0.8~1Hz については、1~2Hz と同じ重み付け)、逆に 2~4Hz、さらに高周波になるにつれ重みはどんどん小さくなる。またある周波数の変化が他の周波数に影響するようなことはなく、各周波数は互いに独立であるとされている。しかし今回行った判別分析の結果から、

- 乗り心地評価を行う上で 1~2Hz と 2~4Hz の変化は互いに影響し合う
- 2~4Hz の変化は乗り心地の評価に関係し、その影響度は 1~2Hz よりもむしろ大きい

という可能性がみられた。これはフィルタの重み付けに対して異なる傾向を示しているだけでなく、互いに独立であるとされている等感覚フィルタとは異なる複数の周波数帯が互いに評価結果に影響し合うという可能性を示している。また 0.5~1Hz が乗り心地評価に与える影響は、

- 乗り心地評価に単独で影響する
- 同じ変化量である場合、その影響度は 1~2Hz、2~4Hz よりも小さい

という傾向を伺うことができた。

3 乗り心地の気になる箇所の推定

得られた動揺データから、乗り心地評価に必要な周波数帯を抽出し、乗り心地の気になる箇所 (以下、「マーキングポイント」と表現する) の推定方法について検討を行う。

用いる周波数帯として、前述の 3 つの周波数帯 (0.5~1Hz、1~2Hz、2~4Hz) を挙げる。このうち 0.5~1Hz の帯域は、他の周波数帯からの影響を受けず独立であるとして 0.12 を判断のしきい値として用いることとする。また 1~2Hz と 2~4Hz の関係については、 x を左右動揺加速度 1~2Hz の σ 、 y を左右動揺加速度 2~4Hz の σ 、マーキングを行うか否かの指標を m で表すこととし、図 2 に示す境

界線を、

$$m = y + 0.53x \quad (x \geq 0, y \geq 0) \quad (5.1)$$

と一次関数で近似する。そしてこの m が 0.09 を上回った場合、マーキングが行われると推定される。そこで式(5.1)を用い、平成 16 年 2 月の東海道新幹線の動揺測定データを用いて、マーキングポイントの推定を行う。

4 推定されたマーキングポイントの特徴

4-1 乗り心地レベルとの比較

得られたマーキングポイントについて、現在東海道新幹線で乗り心地評価に用いられている乗り心地レベルと比較を行いながら、その特徴について分析を行った。

なおここでいう乗り心地レベルの算定方法は、左右方向の乗り心地レベルの場合、通り狂いによる車両の左右動揺を線形システムとみなし、まず第 1 段階で通り狂いに対して 300 系が 270km/h で走行した際の車両特性を用いて 270km/h 走行時の動揺を予測する。そして第 2 段階で等感覚フィルタを作用させ、人間の快・不快の感覚を車両動揺に盛り込んだ後、その結果を定められた処理によりデシベルで表示するものである。得られた値は、表 1 に示すように区分して、評価が行われている³⁾。

表 1 乗り心地レベルとその振動区分

振動区分	乗り心地レベル (dB)	乗り心地の評価
1	83 未満	非常に良い
2	83 以上 88 未満	良い
3	88 以上 93 未満	普通
4	93 以上 98 未満	悪い
5	98 以上	非常に悪い

なお乗り心地レベルの算定には、マーキングポイントの推定を目的とした動揺測定と同日に走行した電気軌道総合試験車の通り狂いデータを用いた。

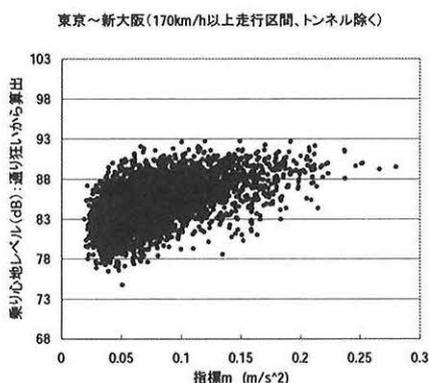


図 5 指標 m と乗り心地レベル (hr) の関係

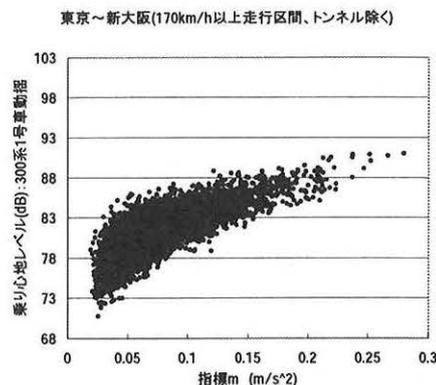


図 6 指標 m と乗り心地レベル (ac) の関係

(a) 算定方法の違いによる乗り心地レベルの比較

通り狂いから算定した乗り心地レベル (以下、「乗り心地レベル (hr)」と表現する) と指標 m の関係を図 5 に、先頭車両の動揺データから算定した乗り心地レベル (以下、「乗り心地レベル (ac)」と表現する) と指標 m の関係を図 6 に示す。それぞれの値は走行距離 150m 間におけるものである。2 つの図について比較を行うと、図 6 の乗り心地レベル (ac) は図 5 の乗り心地レベル (hr) よりばらつきは小さく、かつ指標 m が大きくなるにつれて乗り心地レベル (ac) も右肩上がりとなっている。これは乗り心地レベル (hr) では、通り狂いから車両動揺を推定する際に用いる車両特性が 270km/h 走行時の特性に固定されたものである⁴⁾ため、結果として安全側の動揺が推定されていることが一つの要因として考えられる。さらに線形システムでは再現できない複雑な動きが実際の左右動揺に存在することも、推定された動揺のばらつきが大きくなる要因と考えられる。

(b) 指標 m と乗り心地レベル (ac) の比較

次に乗り心地レベル (ac) と指標 m の比較を図 7 を用いて行う。この乗り心地レベル (ac) と指標 m はどちらも先頭車両の動揺から算定されたものであり、トンネル区間を除いている。図中の縦の実線は指標 m を用いてマーキングポイントを推定する際に用いるしきい値 0.09 を、横線は乗り心地レベル (ac) のしきい値を示しており、図中では「悪い」と「普通」の境界となる 88dB を示している。今、1 回の軌道整備により図中の点 1 つが目標とする指標 m または乗り心地レベル (ac) まで改善されると仮定する。図 7 で目標とする乗り心地レベル (ac) を 88dB とした時、値の大きなものから軌道整備を行っていき、目標を達成するために必要な軌道整備は 46 回となる。一方、同じ回数軌道整備後の指標 m の最大値は 0.20 であり、この m を縦方向の境界線とする。

縦横の境界線から指標 m と乗り心地レベル (ac) を以下の①～④の 4 つの関係に分類する。いずれも境界線を上回った時には軌道整備が計画されると仮定すると、

- ① 乗り心地レベル (ac) でも m でも軌道整備を計画

- ② 乗り心地レベル(ac)では軌道整備が計画されるが、マーキングポイントにはならない判定
- ③ 乗り心地レベル(ac)でも m でも問題なしの判定
- ④ 乗り心地レベル(ac)では問題なしだが、マーキングポイントとなり軌道整備を計画

の 4 パターンになる。①はいずれの指標を用いても軌道整備が計画され、③は逆に計画されない。乗り心地レベル(ac)を用いた場合、②の軌道整備は計画されるが、④については行われない。その結果、④には指標 m が 0.2 を超える点があいくつも残ることになる。この 0.2 は、ある地点を 250km/h で走行中の新幹線が対向列車とすれ違った際に発生した動揺に相当することからも乗り心地上無視できない大きさの動揺であることが想像できる。また m を用いて軌道整備を行った際に②に残る点の最大値は 89.5dB であり、目標とする 88dB との差は小さい。以上から同じボリュームの軌道整備を投入する場合、指標 m を用いた方が得られる投入効果は高いといえる。

次に指標 m では考慮されていない 0.5~1Hz の周波数帯についても乗り心地レベル(ac)と指標 m の関係の検討を行った。結果は 4 つのパターンのうちの③に当てはまる部分がほとんどであり、今回の動揺データからは、この周波数帯が原因でマーキングポイントが推定される確率は小さいことが伺えた。

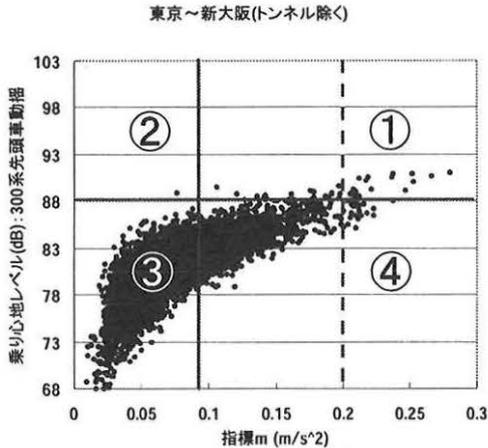


図 7 指標 m と乗り心地レベル(ac)の関係 (2)

4-2 マーキングポイントとなる線路の加振原因の検討

ここでは前述の④に当てはまるうち、乗り心地レベル(hr)で 88dB 未満かつ指標 m が 0.09 以上となる部分の中から、地上側が加振原因と推定される箇所を紹介する。図 8 に上記の条件を満たす箇所の軌道狂いと動揺チャートおよび乗り心地レベル(hr)、乗り心地レベル(ac)のチャートを示す。緩和曲線から円曲線に入った箇所での乗り心地レベル(hr)はその前後より低くなり 87dB であるが、指標 m は○印の付近で 0.2 と、この区間での最も高い値を示している。このように m を用いることで軌道狂いが直接起因となっていないにも関わらず、乗り心地に影響する箇所が特定

できる可能性を伺うことができる。この場所をメインにレールの状態や構造物などに目を向け、発生原因を特定、パターン化することが重要である。

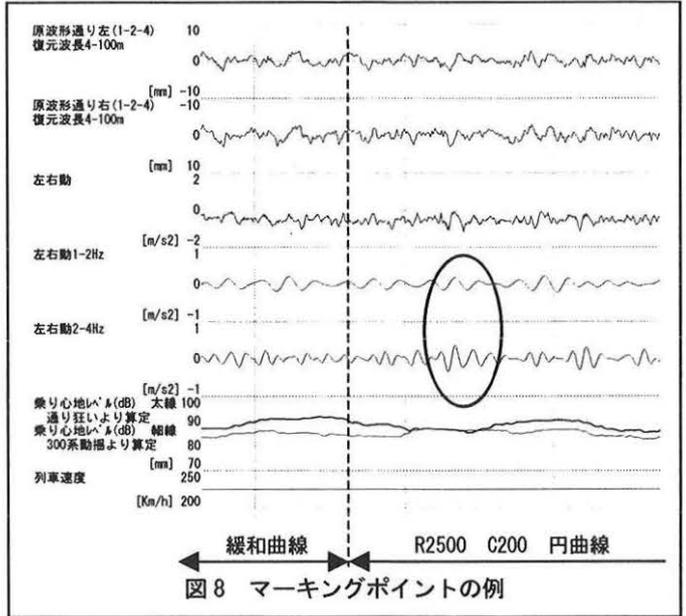


図 8 マーキングポイントの例

5 まとめ

乗り心地レベル(hr)と比較した場合について、マーキングポイントの推定に用いる指標 m の特徴を以下に示す。

- 動揺データから直接推定するため、実際の動揺値で判定される ⇒ 適切な保守投入量につながる
- 標準偏差を用いて算出しているため、注意すべき箇所がチャート上で容易に判断できる。
⇒ 保守する側にわかりやすい指標を提供

6 今後の課題

マーキングポイントが推定された後の軌道整備実施の是非については、その揺れが軌道起因か否かの判別が必要となる。今後はまず明かり区間について要注意箇所、さらには揺れの卵となった揺れ始めの箇所についても注目し発生原因について推定・検討すると共に、指標 m の妥当性についても被験者を増やした乗り心地評価を行うなど、さらに追求する予定である。

【参考文献】

- 1) 窪野代男:「線路部門 小特集 東海道新幹線における乗り心地向上対策」, 日本鉄道施設協会誌, 2002.11
- 2) 中川他:「乗り心地評価と動揺周波数の関係に関する一考察」, 第 59 回土木学会年次学術講演会, IV-024, 2004.9
- 3) 永沼他:「新幹線車両の動特性を考慮した軌道管理手法」, RTRI REPORT, Vol.9, No.12, 1995.12
- 4) 永沼他:「列車速度の変化に対応した乗り心地予測」, 日本鉄道施設協会誌, 2004.3