

新幹線高速域における軌道管理手法



小野 重亮* 峰岸 大介**

列車走行時の乗り心地及び走行安全性の点から、軌道変位を適切な基準で評価し、整備することを「軌道管理」と称している。乗り心地については、軌道変位に対する車両の振動特性と、振動に対する人体の乗り心地感覚の両方を考慮して決められる。

2003年3月から4月にかけて、上越新幹線においてE2系走行試験を実施した。この結果、特に上下方向について、E2系車両諸元での360km/h走行においては、人体の乗り心地感覚を考慮した車両特性に40m弦・20m弦の検測特性が適合していること、乗り心地レベルの大きい値と40m弦・20m弦高低変位の大きい値に一定の関係があることが判明した。また、車両運動解析モデルによる応答関数を用いて、軌道整備の効果を予測する手法を提案し、実測との対比を行った。

●キーワード：列車動揺、車体振動加速度、軌道変位、正矢法、乗り心地レベル

1 はじめに～車両運動と乗り心地

軌道変位による列車走行時の動揺(本稿では、車体振動加速度と称する)を低減するために、台車には、ばねとダンパーが設置されているが、これらの定数により、軌道変位に対する車体振動加速度特性(応答倍率)が定まる。車両にばねが全くなければ、乗客は軌道変位による加振力を直接受けることになる。軌道変位による加振力は、周波数の2乗と振幅に比例する。図1に車両振動加速度応答倍率と、軌道変位による加振力を示す。低周波ではこれらは一致するが、高周波ほど車体振動加速度が低減される。

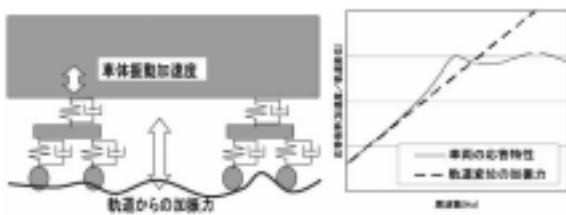


図1 台車および車体振動加速度応答倍率(例)

お客様からみた「乗り心地」は、振動加速度の周波数によって異なる。人間が体感上同等と感じる振動加速度と周波数の関係は、さまざまな研究がなされてきており、現在鉄道分野で使われているものは、「ISO2631」をベースとして、国鉄末期に研究された「乗り心地補正曲線」(図2)である。

軌道変位の管理は、車両の振動特性とお客様の乗り心地を加味して考えられてきた。新幹線における高速化に必要な研究開発の一環として、360km/h域運転時の乗り心地に必

要な軌道管理手法について検討してきた結果を報告する。

なお、左右方向はアクティブ制御

により相当の改善が見込まれるため、本稿では上下方向の軌道変位(高低変位)と乗り心地を論じるものとする。

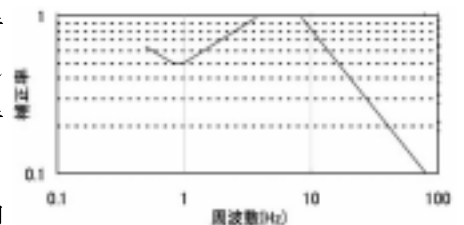


図2 乗り心地補正曲線(上下)

2 軌道管理と乗り心地

現在軌道変位の測定は、高速軌道検測車(East-i)で行っており、車体を基準として3本の車軸位置で軌道の凹凸を測定する「偏心矢法」である(図3)。

一方、現場で簡便かつ確実に軌道変位を測定する方法は「正矢法」といって10mの糸を張りその中間とレールとの距離を測るもので(図4)、East-iの「偏心矢法」から、データ処理によって算出する。

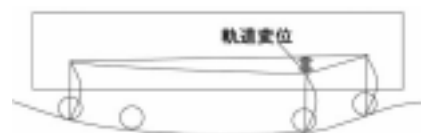


図3 East-iによる軌道検測(偏心矢法)

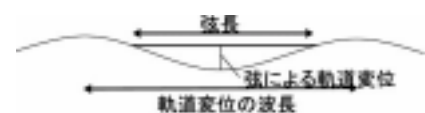


図4 弦による軌道変位測定(正矢法)

弦による測定では、実際の軌道変位波形と振幅が異なる。

この比率である検測倍率と、軌道変位の波長の関係は、図5に示す通りである。軌道変位の波長が弦長に近いと鋭敏な特性を有し、一致したとき最大の2となる。波長が長いほど検出能力が低下し、弦長の2倍以上では検測倍率が1未満となる。車両の特性は走行速度によらないので、在来線の低速区間では「10m弦軌道変位」が適合しているが、速度が高いほど乗り心地に影響の大きい軌道変位の波長が長くなり、「10m弦」より長い尺度が求められる。

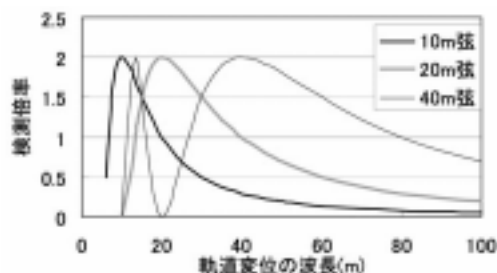


図5 軌道変位の波長と検測倍率

このため新幹線における乗り心地管理については、40m弦と20m弦が用いられている。

3 E2系走行試験における車両特性と軌道管理

3.1 軌道変位と車体振動加速度の関係分析

3.1.1 軌道変位に対する車体振動応答倍率

2003年3月～4月に、上越新幹線においてE2系360km/h走行試験を実施した。このときの車体振動加速度および軌道変位の周波数分析から、軌道変位に対する車体振動加速度の応答倍率を算出した。図6はこれに乗り心地補正を行ったものである。

周波数が2Hz以下(360km/hでの波長50m以上)においては、周波数が小さいほど(グラフの左側に行くほど)応答倍

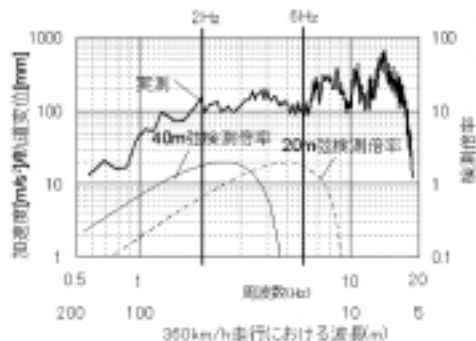


図6 高低変位に対する上下車体振動の応答倍率および40m弦と20m弦の検測倍率

率が低下する。この領域においては、40m弦軌道変位の検測倍率も同じく左下がりの傾向を示し、特性が一致している。このことから、車体振動周波数が2Hz以下(波長50m以上)は、40m弦で管理できると考えられる。2Hz以上については次に考察する。

3.1.2 軌道変位と車体振動加速度との相関

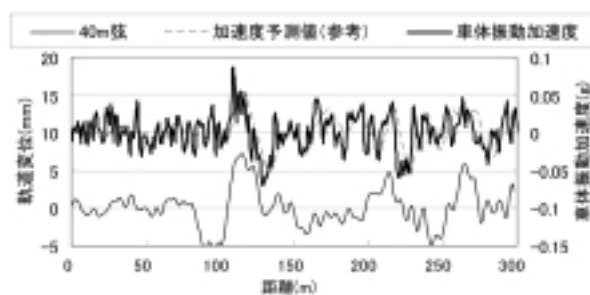
高周波域では、車体の弾性振動の影響も考えられるので、車体振動と軌道変位の相関(コヒーレンス)を算出すると、周波数6Hz以下(波長13m以上)では相関が認められる。

これを直観的に把握するため、軌道変位と車体上下振動加速度の波形の対応を図7に示す。図7(a)全周波数域では、一定の時間遅れで関係が認められる。図7(b)6-15m(6.7-16.7Hz)では、軌道変位と車体振動の振幅が大きい位置が必ずしも対応していない。したがって、相関が乏しいことが裏付けられる。

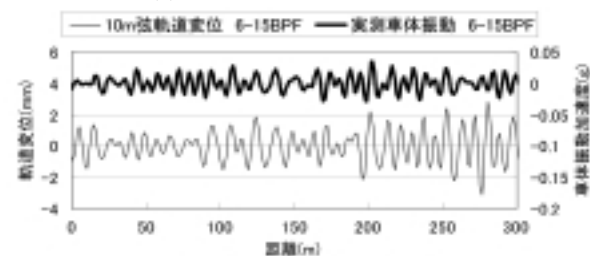
以上より、相関がある6Hz以下に対応する波長領域で、軌道変位の管理を考えることとする。図6より2.6Hzは40m弦と20m弦の検測特性でカバーされ、3.1.1で示したように2Hz以下は40m弦で管理できるので、6Hz以下の波長領域は40m弦と20m弦でカバーされる。

3.2 軌道変位と乗り心地レベルの比較

乗り心地補正された車体振動加速度を、2乗して平均し、対数を取ったものを乗り心地レベルと称している。数式を以下に示す。



(a) 全周波数域(5m移動平均)



(b) 6-15m帯域(6.7-16.7Hz帯域)

図7 高低変位と車体上下振動加速度の対応

$$L = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \left(\int_0^T \{\alpha(t)\}^2 dt \right) / \{\alpha_0\}^2 \right]$$

L : 乗り心地レベル(dB)

T : 評価時間(100mに相当する1s[360km/h])

$\alpha(t)$: 車体振動加速度(乗り心地補正済)

α_0 : 基準車体振動加速度 $10^{-5}m/s^2$

乗り心地レベルは、人体への感覚を考えると、ある程度長い時間を考える必要があり、2秒間の平均値などが用いられが、軌道状態との関係を見る上では短い時間で区切った方が、より評価しやすい。

図8に、100m(360km/hでは1秒)の移動平均で評価した例を示す。図8(a)は車体振動加速度、図8(b)は乗り心地レベル、図8(c)は40m弦高低変位を示す。車体振動加速度は、乗り心地補正を行う前のものを行ったものを示す。

乗り心地レベルは、場所により変動する。乗り心地レベルの大きい場所が40m弦高低変位の大きい場所とおおむね対応している。

乗り心地レベルのピーク値と、これに対応する40m弦高低

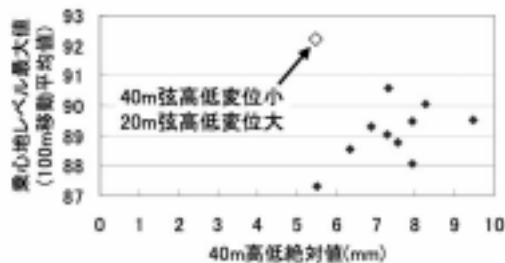


図9 40m弦高低変位と乗り心地レベル最大値

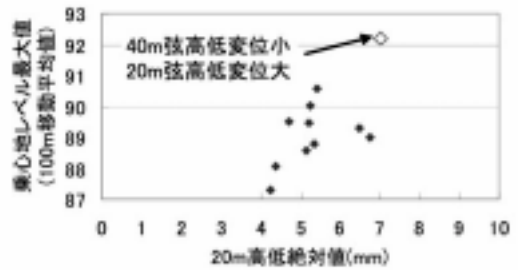


図10 20m弦高低変位と乗り心地レベル最大値

変位のピーク値を、図8b)、図8c)中に示す。この結果を図9に、同様にして得た20m弦との関係を図10に示す。全体的には、40m弦高低、20m弦高低が大きいほど、上下乗心地レベルは大きい傾向にあるが、相関性は40m弦の方が高い。

しかし、40m弦高低が小さいにもかかわらず、乗心地レベルが大きい地点(白抜きで表示)もある。この地点では、図10において20m弦高低が非常に大きくなる。

従って、40m弦高低と20m弦高低の両方を用いることで、上下乗心地レベルが把握できることが示された。

ただし、このように20m弦高低変位が7mmを上回るほど大きいことはまれであり、実際には40m弦のみで管理することが想定される。

3.3 考察

以上より、E2系車両の諸元においては、360km/h走行時の乗り心地は40m弦と20m弦の併用で管理できる見込みを得たが、なぜ速度が上がるのに今までと同じ管理値なのか、という疑問がある。

この理由として、今回は乗り心地補正を考慮したことが挙

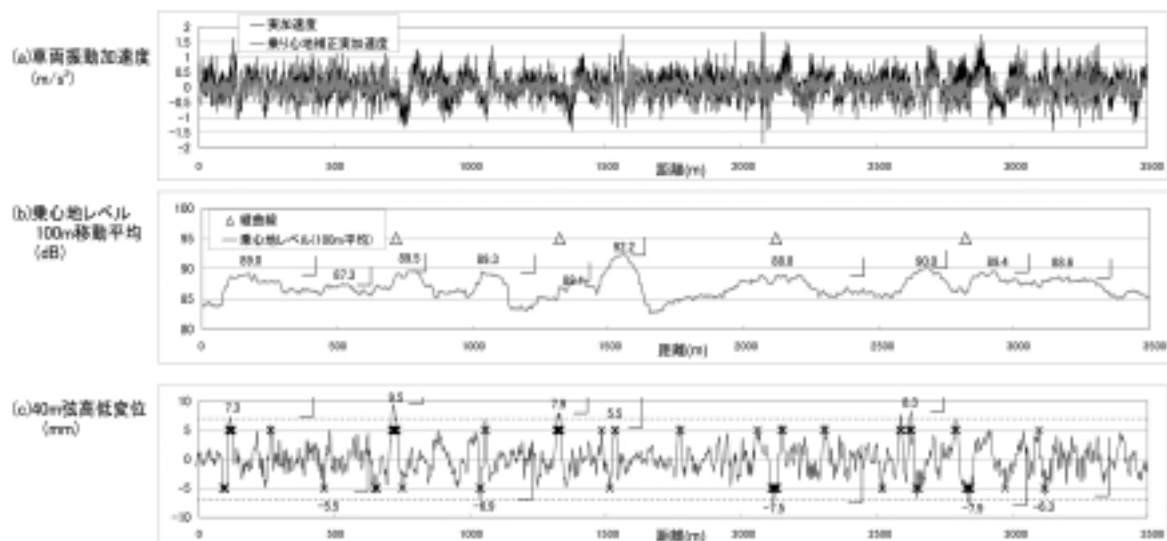


図8 乗り心地レベルと軌道変位

げられる。すなわち、上下方向については、4～8Hz（360km/hで波長12.5m～25m）で補正率が最も大きくなる（図2）。したがって、速度が上がったことで車体振動加速度と関連のある軌道変位の波長が長くなる一方、乗り心地を考慮したことでより短い波長域の軌道変位が重要となり、その両方が相乗したものと理解される。

4 車体振動加速度の予測

このような議論を行う上でのツールとして、車体振動加速度の予測手法を紹介する。

車両は輪軸・台車・車体という剛体と、これらを結ぶばねとダンパからなる。このような、自動車や機械製品に共通した構造を効率よく分析するマルチボディダイナミクス解析ソフトウェアが市販されて

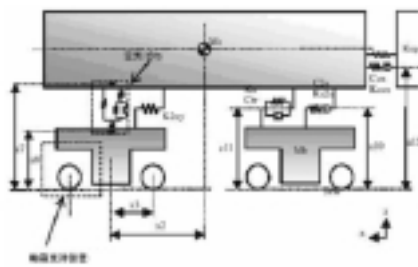


図11 SIMPACK車両モデル（上下）

いる。研究開発センターでは、ドイツで開発された「SIMPACK」を導入し、新幹線車両の諸元を入力

して、車両運動解析を可能とした（図11）。左右については、なお改良の必要があるが、上下については、実測とほぼ一致した波形を得た（図12）。

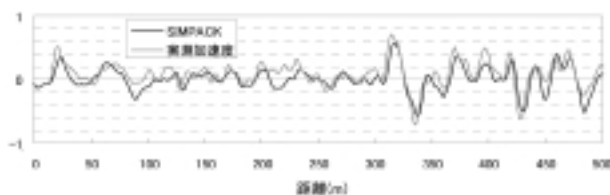


図12 車体上下振動加速度 実測(10HzLPF)と計算

上下については、線型の関係が成立するので応答関数を算出し、車両運動シミュレーションで計算しなくても、実際の軌道変位から簡便に車体振動加速度を予測することができる。軌道整備の前後で、実測を予測と比較した例を図13に示す¹⁾²⁾。対象はE2系営業車で、乗り心地レベルの平均時間は20m相当の0.267秒（270km/h）である。この例では、予測でも実測でも、軌道整備区間では乗り心地レベルが最大10dB低減し、似た傾向が認められる。

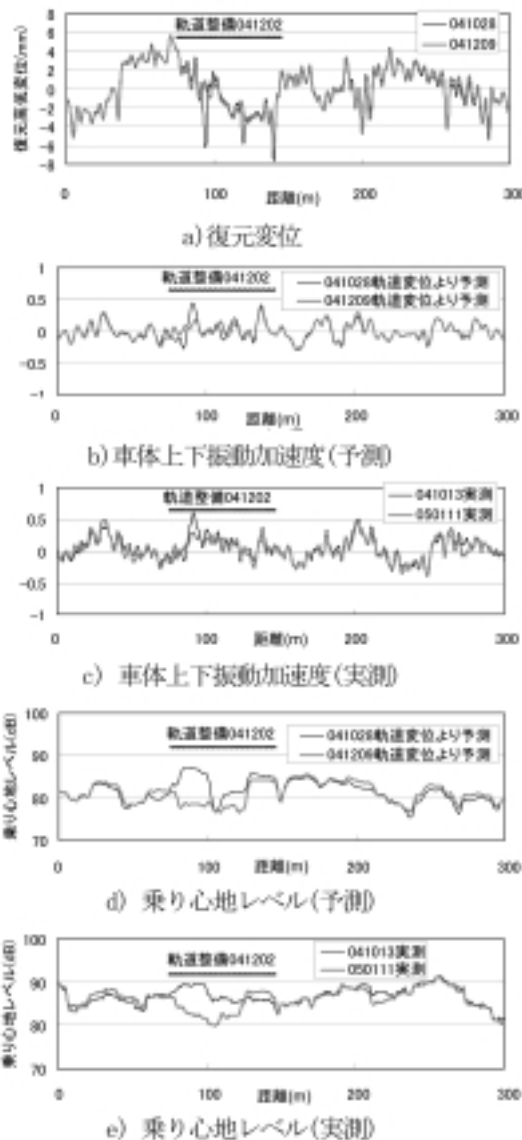


図13 軌道整備前後の車体上下振動加速度、乗り心地レベルの予測と実測の列

5 おわりに

走行速度の向上とともに、乗り心地上考慮すべき軌道変位の波長域は拡大する。軌道変位と乗り心地レベルの関係をさらに解析し、効果的な乗り心地管理手法の構築に取り組んでいる。

参考文献

- 1) 小野重亮; 高速列車の短区間乗り心地レベルを考慮した軌道管理、第11回鉄道技術連合シンポジウム、2004.12、pp283-286
- 2) 小野重亮; 軌道整備の乗り心地改善効果の実測、第12回鉄道技術・政策連合シンポジウム、2006.1、pp259-262