

S8-2-5

シミュレーションと体感評価を用いた曲線の乗心地評価

[機] 林 哲也 (JR東海)

Evaluation of Train Ride Comfort at a Curve Using Simulation and Body Sense
Tetsuya HAYASHI, (Central Japan Railway Company)

This paper presents the method for prediction of train ride comfort using a motion simulator that can reproduce the acceleration same as actual train with high precision. The motion simulator used in this study, can produce not only the acceleration of actual train but also that analyzed virtually with computer simulation. We can evaluate train ride comfort with body sense before the route of rail track is designed using this method.

キーワード: モーションシミュレータ、乗り心地、予測、曲線

Keyword: Motion Simulator, Train Ride Comfort, Simulation, Curve

1. はじめに

著者らはこれまで、鉄道車両の乗心地を実験室内で体感評価することのできるモーションシミュレータ、「車両運動総合シミュレータ」(以下シミュレータと呼ぶ)を開発し¹⁾、快適性に関する様々な実験を行ってきた²⁾³⁾⁴⁾。

本シミュレータは実際の車両の運動を再現することが可能であるが、計算上で求められた車両の運動を再現する機能も有する。例えば、軌道の線形の違いによる乗心地の差、といったものは事前に体感で確認することは従来困難であったが、本シミュレータを使用することで可能となる。本稿では曲線の形状を題材に、このようなアプローチを行った例を紹介する。

2. 計算結果による乗心地評価

2.1 対象とする現象

旧省令(新幹線鉄道構造規則)では、軌道に曲線を設ける際には、最小円曲線長や曲線と直線の間に設ける最小直線長が規定されていたが、新省令(鉄道技術基準省令)ではこれらに関する規定がなく、事業者の判断によって軌道の線形を設計することができる。

Table 1 Provisions of old and new Law

	新幹線鉄道構造規則(旧省令)	鉄道に関する技術上の基準を定める省令(新省令)
緩和曲線長 超過遠心力の時間的変化割合	$0.0075Cd \cdot V$	規定なし
緩和曲線長 カント変化量の時間的変化割合	$0.0062Cm \cdot V$	規定なし
緩和曲線長 脱線に対する安全	$0.3Cm$	$0.45Cm$ (解釈基準にて)
最小円曲線長	100m以上。やむをえない場合は0m。	規定なし
曲線間の最小直線長	100m以上。やむをえない場合は0m。	規定なし

Cm : カント量、 Cd : カント不足量、 V : 速度

地形や既存設備との関係、コストなどを総合的に判断することとなるが、そのためには上記の各項目についてどのような設計が望ましいかに関する情報が必要となる。これらの項目の中で、乗心地は事前の評価が難しいもののひとつである。その理由は、評価を人間の感覚にたよる部分がある一方で、様々な軌道の線形における乗心地を実際に比較することは実際問題として困難であったからである。

従来であれば省令に従った設計を行っていたら、現実問題として、乗心地に関して大きな不都合が生じることは考えにくかった。しかしながら、規制が緩和され事業者の判断による設計が許されるようになった時、その良し悪しも事業者自身で判断することが必要となってくる。

2.2 解析結果

乗心地を事前に予測する手段の一つとして、計算機上で車両の運動をシミュレーションし、車体に発生する加速度を求めることが従来から存在する。ここでは代表的な車両運動解析ソフトである「VAMPIRE」を使用した。車両モデルは Fig.1 に示す通りで、各種パラメータには実際の車両のものを使用した。

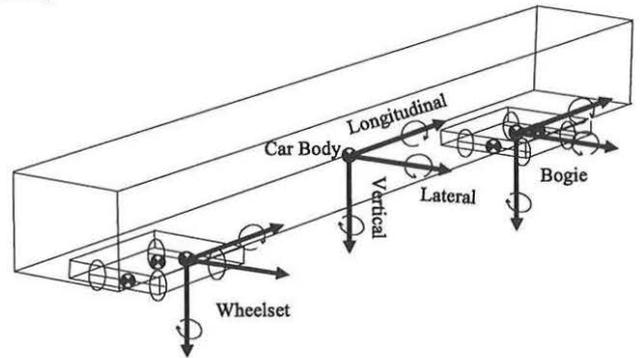
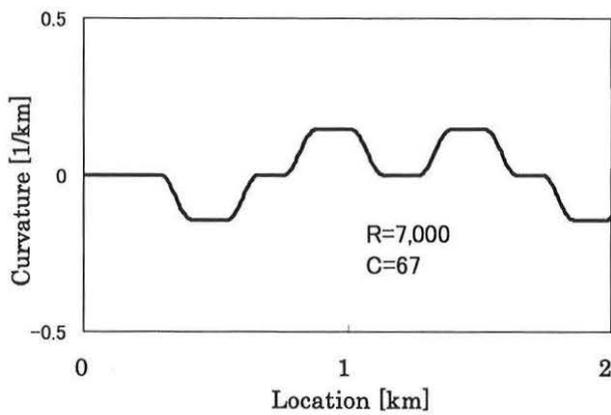


Fig.1 the Model of a Car

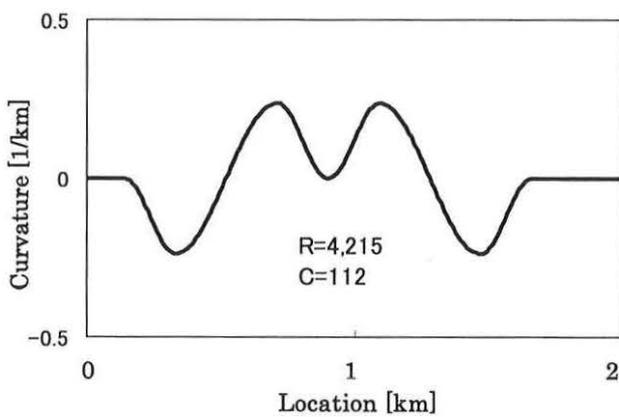
また、走行する軌道の線形としては、Fig.2 に示す2つの案を用意した。ここで Case 0 とは旧省令に準拠した場合である。Case 1 は Case 0 と同一の地点に敷設することを前提に、円曲線長を 0m、曲線と直線の間の直線の長さも 0m としたものである。

上記の条件で解析を行った結果を示したのが Fig.3, Fig.4 である。ここでは平面の線形を比較することを目的としているので、左右方向の加速度とロール角速度に着目した。

実際に線形を決めるにあたっては、乗心地の他に、周辺の

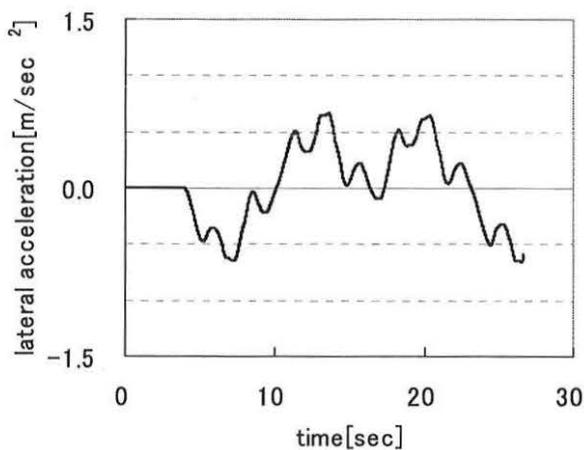


(a) Route of Case 0

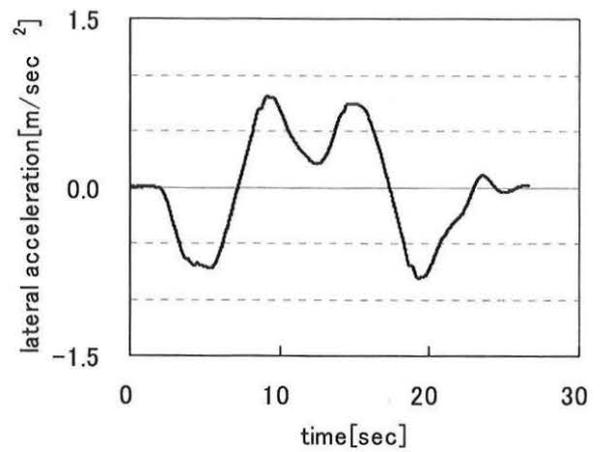


(b) Route of Case 1
Fig.2 Profile of each Case

これらの図からわかるように、Case 0 においては左右加速度のピーク値は小さいが、加速度変化の頻度が多い。一方、Case 1 では加速度変化の頻度は少ないが、左右加速度のピーク値は大きく、一概にどちらが優れているかを波形のみから判断するのは難しいという結果が得られた。

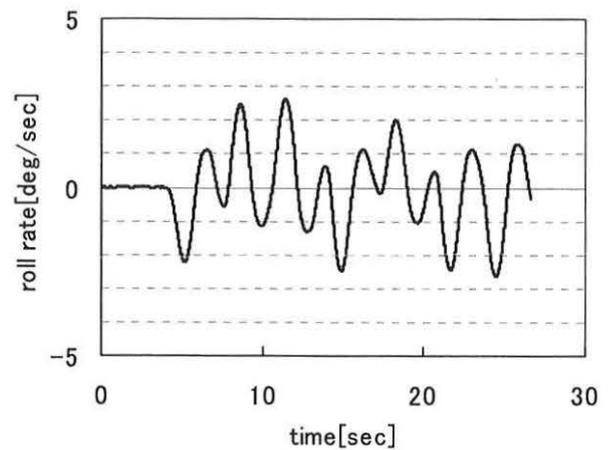


(a) Case 0

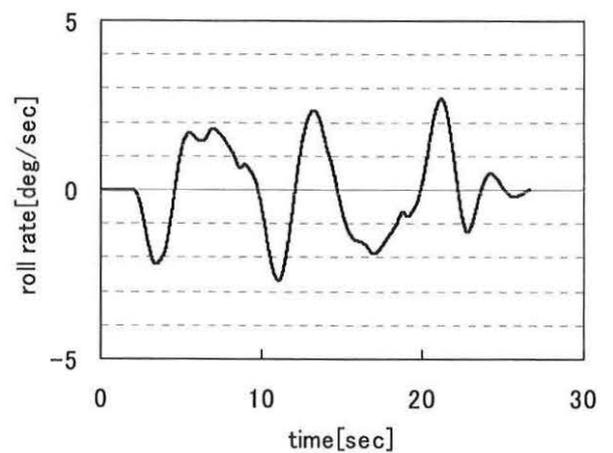


(b) Case 1

Fig.3 Result of Analysis (Lateral Acceleration)



(a) Case 0



(b) Case 1

Fig.4 Result of Analysis (Roll Rate)

3. シミュレータによる運動再現

3.1 解析結果のシミュレータへの適用

冒頭で述べたシミュレータは動揺発生機構として3つの装置を備えており、それぞれ次のような自由度を持つため装置

全体としては10自由度の動作となる。すなわち、(1)直線モーション装置：1自由度（左右）、(2)6軸モーション装置：6自由度（前後、左右、上下、ロール、ピッチ、ヨー）、(3)高周波振動台：3自由度（前後、左右、上下）となり、これらはそれぞれの装置の持つ周波数特性に応じて使い分けられる。

一方、前章で行った解析は左右加速度とロール角速度の2つが意味を持つデータとなっている。そこで、この2自由度のデータをシミュレータへ適用する。ただしここで注意が必要なのは、解析結果とシミュレータの制御信号では座標系が異なることである。解析結果においては、左右加速度は乗客に作用する加速度、すなわち床面に平行に座標軸を採った場合の値となっている。また、ロール角は水平面に対するロール角である。

一方、シミュレータの制御信号は直線モーション装置と6軸モーション装置については、実験室床面を基準とした座標となっている。また、高周波振動台はシミュレータの模擬客室を基準とした座標系である。そこで解析結果を制御信号に変換する際には、以下のような計算を行った。

(1)ロール角速度については積分し、ロール角として6軸モーション装置の制御信号とした。

(2)左右加速度については、2回積分し直線モーション装置の制御信号とした。ただし解析結果はロール方向の傾斜によって生じる重力の床面に平行な成分を含んでいるため、この分を考慮した。すなわち直線モーション装置で発生すべき左右方向の加速度 a_{y1} は

$$a_{y1} = a_{ys} - g \cdot \sin \phi_s \quad (1)$$

a_{ys} : シミュレーション結果による左右方向加速度
 ϕ_s : シミュレーション結果によるロール角
 g : 重力加速度

となるように補正している。

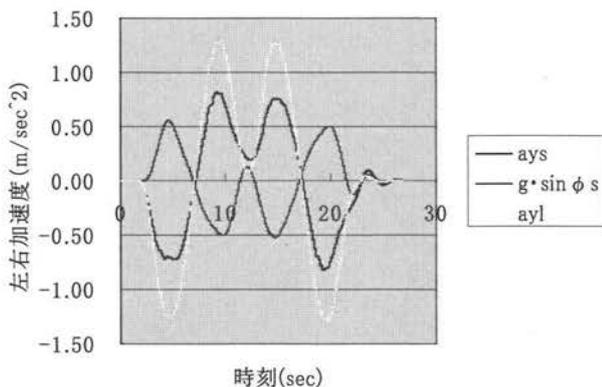


Fig. 1 解析結果と制御データの関係

以上により、シミュレータを使用して Case 0 と Case 1 の2つの条件を体感によって比較することが可能となった。

3.2 軌道狂いの扱い

前節までで解析によって求めた運動をシミュレータによって再現することは可能となったが、シミュレーション結果には、モデルを作成する際に考慮に入れなかった事項は反映されていない。このため、軌道狂いによる振動や車体の曲げ振動など、振動的な動きが表現されておらず、実車とは異なった印象の体感となる。

特に軌道狂いに関して考慮しないのは、今回の検討のように軌道の違いによる乗心地の差を論じる上で現実的ではない。そこでここでは、

(1)解析ソフトの入力データに、ある区間の実際の軌道狂いを与え、解析結果に反映させる。

(2)実車走行時に取得した振動データを、シミュレータの制御データに付加する。

(3)上記の(1)と(2)をともに実施する。

の3通りについて比較を行った。

(1)の手法は線形とともに狂いも解析に加えることで、様々な条件に対する出力を得ることが出来るという利点を持つが、解析ソフトでは表現しきれない振動分が欠落している点で、体感上違和感があった。

(3)の手法は(1)の手法を補うために実施したものであるが、振動的な動きが過剰となり、実車とは異なる体感となった。

そこで体感上最も実車に近い結果が得られる(2)の手法を用い、実車の加速度データから6軸モーション装置の左右方向の制御データを作成した。

3.3 リアル感の向上

以上の検討により、線形と軌道狂いに関係する3自由度の制御データを用意することができた。シミュレータで発生する10自由度の運動のうち、残りの7自由度についても、実車が直線区間を等速で走行した際の実測データを付加し、臨場感の向上を図った。これにより、曲線の線形の違いによる乗心地の差は、解析結果により表現され、実車同様のリアル感の実車データにより表現される制御データがそろった。

Fig.5 に実車で計測された振動データとシミュレータで再現された振動データの周波数成分を比較したものを示す。この図から、1Hz から 40Hz にかけての振動成分は実車とシミュレータで同等であることがわかる。なお、低周波成分については、直線走行と曲線走行の違いの影響により、両者は合致しない。また、40Hz 以上の高周波成分については、本シミュレータのスペックを越えるため再現されないが、これ以上の周波数帯域は、乗心地評価にはあまり寄与しないことが知られている。

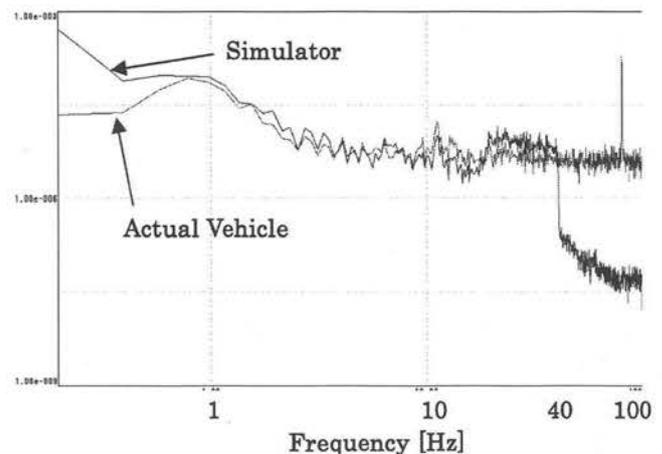


Fig.5 Power Spectral Density of Lateral Acceleration

4. 線形の違いによる乗心地の比較実験

4.1 実験手法

2章で述べた2通りの線形が乗心地に与える影響を調べるため、3章で述べた手法により2通りのシミュレータ用制御データを用意した。試験順序としてはこれに直線走行の条件を加えた3通りの条件を、Table 2 の順に実施した。

