# 3509 車両運動総合シミュレータの開発

# (加速度再現方法の検討)

## **Development of a Vehicle Dynamic Simulator**

## "A Study of Regeneration of Acceleration"

○正 [機] 林 哲也(JR東海) 正 [機] 坂上 啓(JR東海) 正 [機] 森下 佳孝(JR東海)

#### Tetsuya HAYASHI, Kei SAKANOUE, Yoshitaka MORISHITA

## Central Japan Railway Company: 1545-33 Ohyama, Komaki, Aichi, Japan

Abstract : A newly developed vehicle dynamic simulator can generate the motion as it is programmed exactly. Using the vehicle dynamic simulator, train ride comfort is evaluated with precision on a laboratory test repeatedly. The vehicle dynamic simulator consists of three motion systems. A six-degree freedom motion system combined with a three dimensional vibration motion system has fine performance in wide band. A linear motion system generates lateral acceleration that occurs when a train curves. As a result of a reappearance test, the motion of an actual vehicle is regenerated well and rolling motion to represent lateral static acceleration is slow enough compared with the threshold of consciousness, so that subjects feel the motion without incongruity. Through the various ways of evaluation, we are going to improve train ride comfort.

Key words: Railway Vehicle. Simulator with Motion. Train Ride Comfort. Threshold

## 1. はじめに

著者らは、鉄道車両の乗心地評価を実験室内において 可能とするシミュレータを開発し<sup>(1)</sup>、今後の車両開発に おける乗心地の改善および、それらを適切に評価するた めの手法について研究を行っている。

本稿で紹介する「車両運動総合シミュレータ」は、ド ライビングシミュレータ等で培われた動揺生成機構を 利用しつつも、鉄道車両の乗心地評価を行うという装置 の目的に関する部分で性格が異なるため、その設計思想 の違いによる相違点がいくつか存在する。

	the V.D.S.	Driving Simulator
Object	Cabin	Cockpit
Action	Off-line	Real Time
Use of Motion	Evaluation of Comfort	Riding Mood

Table 1 に示すように、例えばドライビングシミュレ ータが、被験者の運転操作に対してリアルタイムに反応 しなければならないのに対して、本装置は予め用意した 動揺データを忠実に再現するシステムとなっている。従 って本装置では従来のシミュレータで採用されていた、 スケールファクターやウォッシュアウトといった考え 方とは異なった、加速度再現のプロセスを採用しており、 これを実現するためのハードウェア構成も異なる。

次章以降では、本装置の設計思想からハードウェア構 成、加速度再現手法について述べる。

## 2. 動揺再現範囲の基本的な考え方

本装置は、予め用意した動揺データを、忠実に再現す ることを第一の目標として設計されている。特に鉄道車 両の乗心地評価を念頭に置いた場合、考慮すべき特徴的 な点が2つ存在する。その第一点目は、再現すべき動揺 の周波数帯域が広いことである。第二点目は、曲線を通 過する際に発生する遠心加速度を初めとした諸現象を、 限られた空間内で違和感なく再現することである。前者 に対しては本装置は、前後、左右、上下それぞれについ て、乗心地基準における「非常によい」から「悪い」ま での範囲の加速度を再現することを目標としている。振 幅の上限は係数3としているが、ハードウェア構成上の 限界と実用性のバランスから、周波数の上限は40Hzと した。また低周波側では、アクチュエータのストローク の限界から、一部振幅が係数3に達しない領域があるが、 近年の高いレベルにある乗心地の車両を対象とする限 り、問題となることはほとんどないと考えている。





後者の曲線での加速度再現については、目安として一 般的に考えられている値に対して、十分な値として 1.47m/sec<sup>2</sup>までの再現能力を確保することとした。但し、 曲線通過時の乗心地評価の対象となるのは並進加速度 だけではなく、緩和曲線におけるロール角速度なども場 合によっては考慮する必要がある。このため左右方向に ついては、後述するように自由度の高い運動再現が可能 な装置構成としている。

### 3. 装置の構成

本装置は前章で述べたような要求を満たすために、動 揺発生装置として3つのハードウェアを組み合わせた 構成となっている。基本となるのは既存の動揺再現機能

[No.03-51] 日本機械学会第10回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集〔2003-12.9~11. 川崎〕

をもったシミュレータなどと同じ、6軸モーション装置 である。

更に、6軸モーション装置では発生させることが難し い高周波帯域については、並進3自由度の高周波振動台 を備えている。

また、曲線通過時の運動を再現するために、28mのストロークを有する直線モーション装置を備え、前述の2つの装置全体を左右方向に駆動する。以下に各装置の詳細について述べる。



Fig.2 Appearance of the Vehicle Dynamic Simulator

#### 3.1 6軸モーション装置

6軸モーション装置は、6本の油圧アクチュエータを 協調させて制御し、6自由度(前後、左右、上下、ロー ル、ピッチ、ヨー)の運動を生成し、模擬客室全体を駆 動する。ロールおよびピッチについては、それぞれの軸 方向の運動再現に使用されるほか、左右および前後の持 続的な加速度を再現するために、傾斜による分力を利用 することにも使用される。

## Table 2 Specifications of 6-DOF Motion System

Direction	Amplitude
longitudinal	0.735m/sec <sup>2</sup> (5Hz)
lateral	0.588m/sec <sup>2</sup> (5Hz)
vertical	1.176m/sec <sup>2</sup> (5Hz)
roll	15deg
pitch	15deg
yaw	15deg

Three Dimensional Vibration Motion System

Six-degree of Freedom Motion System



Fig.3 Hydraulic Actuator Systems

## 3.2 高周波振動台

6軸モーション装置では再現されない高周波帯域の 加速度は高周波振動台によって再現される。高周波振動 台は6軸モーション装置の上に設置され、模擬客室の最 後部1列(5名)分の範囲をカバーする。駆動源は3本 の油圧アクチュエータであり、リンク機構による拘束を 用いることで、6軸モーション装置に対して並進3軸の 加速度を再現する。

Table 3 Spec of 3-D Vibration Motion System

Direction	Amplitude
longitudinal	2.94m/sec <sup>2</sup> (40Hz)
lateral	2.94m/sec <sup>2</sup> (40Hz)
vertical	$2.94 \text{ m/sec}^{2}(40 \text{ Hz})$



Fig.4 Area of 3D Vibration Motion System

## 3.3 直線モーション装置

直線モーション装置は、油圧モーション装置および模 擬客室全体を 28m に渡って左右方向に、リニアモータ ーによって駆動する。このように大きなストロークを有 する動揺機構を備えることによって、曲線通過時の車両 の運動を表現するのに対して、多様な手法が考えられる。

Table 4 Specifications of Linear Motion System

Acceleration	$1.47 \text{m/sec}^2$
Deceleration	$2.45 \text{ m/sec}^2$
Stroke	28m



Fig.5 Linear Motion System

ここで注意したいのは、本装置は単純に左右方向の遠 心加速度を発生させるために使用される訳ではない点 である。本装置の使用例については、次章で詳しく述べ る。

#### 4. 信号処理と制御

## 4.1 周波数帯域毎の加速度分離

本装置はリアルタイムに運転するシミュレータと異 なり、予め目標となる運動データが用意されていること が前提である。ここで再現する目標となる波形としては、 実車で測定したままの波形のほか、それらを加工したも のや、シミュレーションなどによって計算された波形を 使用することもできる。

実車で測定された運動データには、幅広い周波数成分 が含まれているが、本装置はこれらを前述の複数の動揺 発生装置を使用して、それぞれに適した周波数帯域の加 速度を生成する。このため、目標とするデータ(並進、 回転各3自由度の計6自由度)は、フィルターにより分 離され、最終的には各装置の持つ自由度を合わせた計1 0自由度の制御用データとなる。



#### Fig.6 Flow Chart of Signal Processing

Fig.6にてProcess1とされた部分で、低周波の並進加 速度を模擬客室の傾斜による、重力の床面方向の分力に より再現する分離が行われる。Process2では、高周波帯 域が高周波振動台によって生成されるように分離が行 われる。

### 4.2 曲線通過時の運動再現

鉄道車両の乗心地評価にあたって、曲線通過時の左右 加速度は重要な要素の一つである。従来のシミュレータ では、再現される加速度を実際より減ずることによって、 アクチュエータのストローク範囲内で運転するため、被 験者に違和感を与える要因となっていた。このような問 題を解決するため本装置には、6軸モーションシステム 全体を更に、28mに渡って並進方向に移動できる直線モ ーション装置が備わっている。これにより、用途に応じ て被験者により自然な体感を与えることが出来る。

例として、入口の緩和曲線を通過する場合を考える。 このとき遠心加速度はFig.7のごとく、模擬客室を傾斜 させることにより再現する。しかし、この傾斜動作を実 測通りの加速度を再現するように行おうとすると、短い 緩和曲線を高速で通過するような場合、ロール角速度が 大きくなり、被験者に回転したことを知覚させてしまい、 違和感の原因となる。このような現象を回避するため、 例えばFig.8のように、模擬客室の傾斜動作は目標より 緩慢に行う。これによる目標加速度との過不足分は直線 モーション装置で補うことによって、忠実な加速度再現 を行いつつ、被験者には違和感を与えにくくすることが 可能となる。



Fig.7 Generation of Lateral Acceleration



Fig.8 Effect of Linear Motion System

## 5.実験データによる検証

前節で述べた手法を、実データによって検証した例を 以下に示す。

筆者は先ず人間が回転方向の運動に対して、どの程度 の感覚閾を有するかを調べるための実験手法を考案し <sup>(2)</sup>、これを本装置に適用した。その結果、ロール方向の 運動については、Fig.9に示すように、概ね0.5deg/sec までの角速度であれば、本装置上においては被験者は回 転運動を感じないという知見を得た。

一方、実車の加速度を再現する場合の例として、300X 新幹線電車の運動の再現を行った。その結果、シミュレ ータ上で発生するロール角速度は0.3deg/sec以下であ り、Fig.9で示された人間の感覚閾に対して十分に小さい。従って、被験者はシミュレータ上で不要な回転方向の運動を知覚することはなく、違和感のない自然な加速 度再現が行われているということができる。



Fig.9 Threshold of Rolling Rate Measured on the V.D.S.



Fig.10 Rolling Rate Caused Lateral Acceleration on the V.D.S.

最後に Fig.11、12 に左右方向の加速度の再現例を示す。 Fig.11 は、R2500(曲線半径 2500m)曲線の円曲線から 緩和曲線、直線部分へ移行する時系列のデータである。 上段が現車で計測した波形、下段がシミュレータで再現 した波形である。概ね現車の波形と加速度の大きさ、位 相とも一致している。Fig.12 は、東海道新幹線(700 系) のトンネル走行時のデータである。Fig.11 と同様に上段 が現車データ、下段がシミュレータで再現したデータで ある。現車のデータとシミュレータで再現したデータで ある。現車のデータとシミュレータの再現データは、加 速度の大きさ、位相ともほぼ一致している。ただし、詳 細に観察すると、高い周波数域で現車とシミュレータの データでは加速度の大きさに差異があり、完全に再現で きていない領域もある。今後、シミュレータの再現性の 改善に取り組み、シミュレータのさらなる性能向上を目 指す。



Fig.11 Lateral Acceleration (Case of R2500)



Fig.12 Lateral Acceleration (Case of Tunnel)

## 6. おわりに

鉄道車両の乗心地評価用に新たに開発した、車両運動 総合シミュレータの、加速度再現方法について、基本的 な考え方を示し、その妥当性について実データにより検 証した。その結果、本装置の加速度再現手法の有効性、 とりわけ曲線通過時の乗心地を違和感なく表現できる ことが確認された。

本稿で示した加速度の再現手法は、本装置の特徴を現 す一例として述べた。直線モーション装置を有し、加速 度の忠実な再現を狙って設計された本装置を活用する ことによって、様々な角度から実験目的に適した現象の 再現手法が存在すると考える。

参考文献

 林他、機械学会年次大会講演論文集、2003、211-212
林他、機械学会第 11 回交通・物流部門大会講演論文 集、2002、171-174