

# 特集 ハイブリッド車の開発支援設備としての VRS\*

## Development of a “Virtual and Real Simulator” for Hybrid Vehicle Evaluation

堺 昭治  
Shoji SAKAI

小島 靖  
Yasushi KOJIMA

城田 幸司  
Koji SHIROTA

We have developed a system bench called Virtual and Real Simulator (VRS). This is a power train test bench, which simulates vehicle operating conditions using the actual power train components to be evaluated and integrating them with models that include the “virtual” dynamic characteristics of vehicles. This article describes the development of VRS for HV evaluation.

**Key words:** Hybrid vehicle, VRS, Regenerative braking, Slip control, Wave road

### 1. はじめに

従来の自動車の開発においては、完成車を用いてシャシダイナモメータ、あるいはテストコースで車両評価を行ってきた。しかし、シャシダイナモメータ試験ではタイヤスリップのような過渡的な評価を行うことができず、またテストコースでは試件条件が限定されるだけでなく、天候などの影響を受けるため、条件の再現性が乏しいといった課題がある。一方、CAE (Computer-Aided Engineering) によるシミュレーション評価では、各コンポーネントの高精度なモデルが必要という課題がある (Fig. 1)。

評価におけるこれらの課題を解決するため、私たちは VRS<sup>1)</sup> と呼ばれるシステムベンチを活用している。これは、評価対象であるパワートレインの部分は実機部品 (Real) を使用し、車両動特性を仮想的に実現 (Virtual) したモデルと統合したベンチ上で、車両走行状態を再現させるシミュレータベンチである。この VRS ベンチでは、評価対象の駆動力吸収を新規開発された低慣性・

高応答なダイナモメータを使って行っており、従来再現が困難であった多様な路面条件での過渡的な評価を可能とし、また開発の初期段階から完成車を必要としない走行評価が可能となる。

本稿では、この VRS ベンチに改良を加え、今後の車種拡大が期待されるハイブリッド車 (以下、HV) の開発に適用した事例を紹介する。

### 2. VRS ベンチの構成

VRS は、評価対象であるパワートレインの部分は実機部品 (Real) を使用し、車両動特性を仮想的に実現 (Virtual) したモデルと結合したベンチ上で、車両走行状態を再現させるシミュレータベンチである (Fig. 2)。

VRS は、パワートレインに関する部分は、ほとんどすべて実機を使用しているが、タイヤとブレーキは使用していない。この代わりとなるものが、ドライブシャフト両端につながった低慣性・高応答な 2 基のダイナモメータである。シミュレーションで求めた走行抵抗とブレーキトルクをダイナモメータに指令することができる。なおシミュレーションソフトは、Matlab/Simulink を用いて作成している。

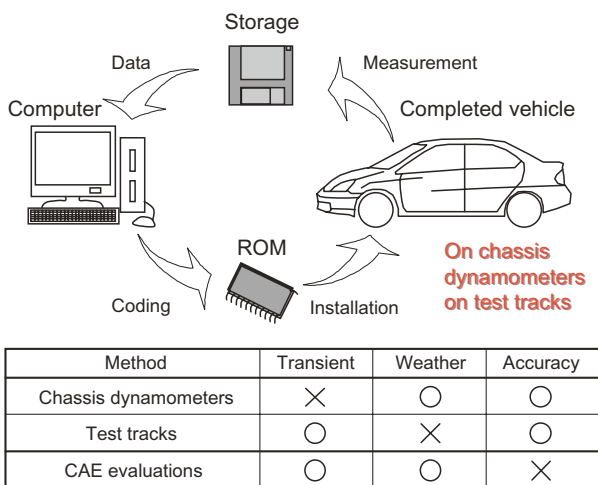


Fig. 1 Conventional automobile development

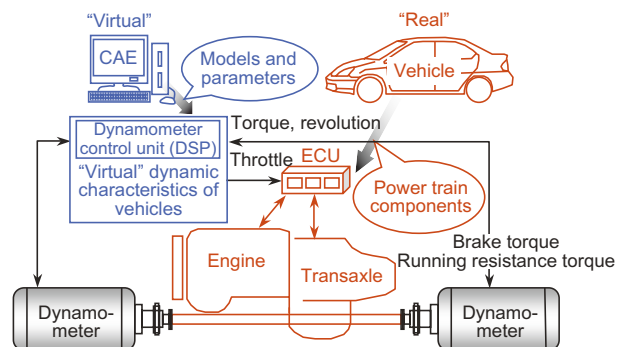


Fig. 2 Conventional configuration of VRS bench

\* (社)自動車技術会の了解を得て、“Proceedings of FISITA 2006 World Automobile Congress Yokohama, F2006 P273” より、和訳して転載

### 3. HV 評価のために追加したモデル

先の章では、従来の VRS ベンチの構成について説明した。次の章では、HV を評価するために従来 VRS ベンチに追加した仮想モデルとその効果について説明する。

#### 3.1 HV の特徴と VRS の追加モデル

HV の特徴として、回生制動とモータによるスリップ制御がある。従来の VRS ベンチの構成では、この HV の特徴である回生による制動トルクが発生しないという課題があった。またインバータ制御車両である HV では、波状路走行時に発生するモータトルク急変時に作動する空転再粘着制御の応答性を確認する必要がある。これらを実現するため、従来の VRS ベンチにブレーキシステムの仮想モデルを追加し、低慣性・高応答なダイナモメータによる波状路走行を可能とした (Table 1)。

Table 1 Additional VRS models

Characteristics of HVs using motors	Additional VRS models
Regenerative braking	Virtual brake system model Cooperation between dynamometer (hydraulic) braking and regenerative braking
Slip control	Virtual wave roads* driving model Evaluation of control response at sudden changes of motor torque

\*i.e., bouncy corrugated roads

#### 3.2 VRS での回生ブレーキ

追加したブレーキシステムの仮想モデルは、実ブレーキ ECU (Electronic Control Unit) に代わって車両制御に必要な情報を演算し、評価対象に指令する。さらにこれら必要な情報は、CAN (Controller Area Network) を使用して仮想モデルから HV ECU に伝達している (Fig. 3)。

Fig. 4 に仮想ブレーキシステムモデルのブロック図を示す。入力は、減速度から求めた要求ブレーキトルク、ダイナモメータのトルクと回転数から演算した車速などである。一方出力は、回生要求トルクと全車輪速度などである。これにより HV の特徴である回生制動 (電流) とモータによるスリップ制御の再現を可能としている。

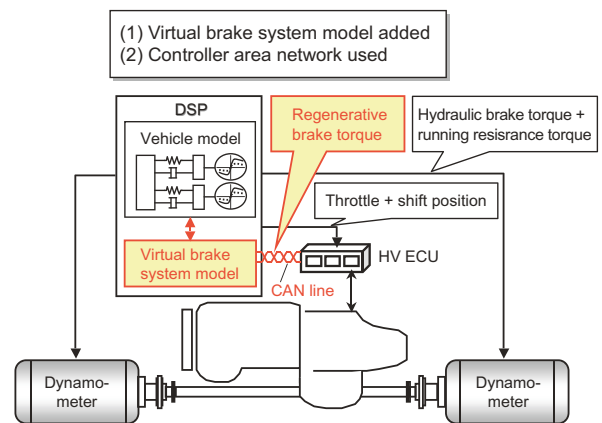


Fig. 3 Virtual brake system model

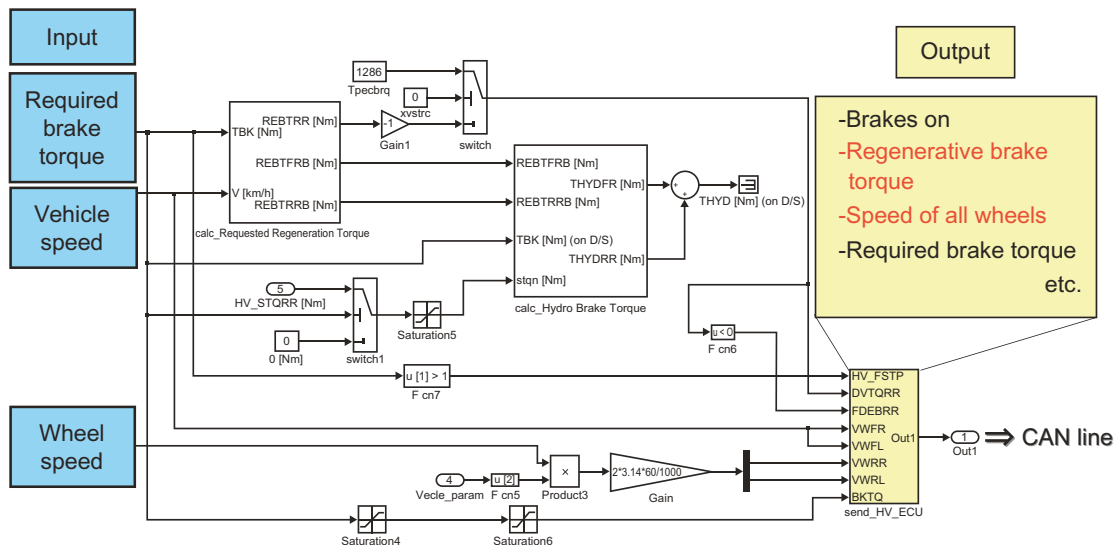


Fig. 4 Block diagram of virtual brake system model

HV 評価のために仮想ブレーキシステムモデルを追加した効果を Fig. 5 に示す。この図は、車両停止状態から全開加速し、緩制動したときの駆動用バッテリーの充放電電流を示している。従来 VRS では、エンジンブレーキ相当の回生電流しか流れていないが、HV 評価のための VRS では、実車相当の回生電流が流れていることが確認できる。

3.3 VRS での仮想波状路走行

波状路走行中は、車両の上下方向の荷重変動により、タイヤと路面間でスリップとグリップが繰り返し発生する。この現象を VRS ベンチで再現するために、車両モデルによる波状路走行時の上下強制力の演算と、実車を用いた波状路走行試験を実施した。ここで得られた結果に基づき、波状路走行中に発生する上下強制力をシャシダイナモメータが吸収する駆動軸回転方向に負荷することで仮想的な波状路走行を VRS ベンチ上で再現可能とした。この仮想的な波状路走行は、Fig. 6 に示す VRS 用ダイナモメータの最大角加速度によって可能となった。

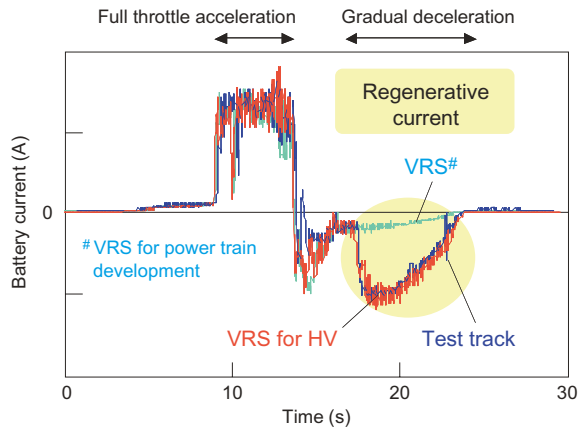


Fig. 5 Comparison of regenerative braking

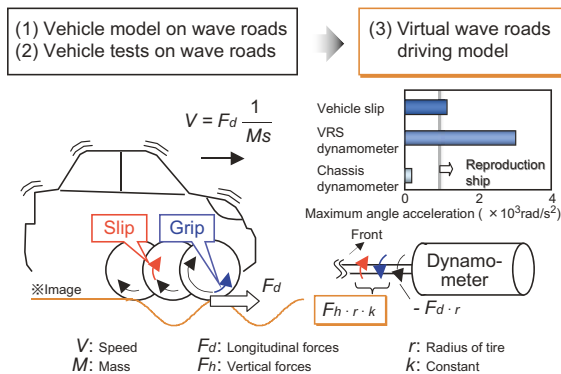


Fig. 6 Virtual wave road driving on VRS

3.3.1 波状路での車両モデル

仮想車両モデルを Fig. 7 に示す。モデル化した車両は、前後に独立した垂直方向のサスペンションを持つ車両前後 2 輪モデルで、車体のピッチ運動と並進運動の 2 自由度とした。サスペンションは、単純なバネ・ダンパー系としてモデリングした。

この車両でフロントサスペンションが並進速度すなわち垂直方向への自由度に対して与える影響は式 (1) で表される。

$$F_F = 2K_F(L_F \cdot \theta - z) + 2C_F(L_F \cdot \theta' - z') \quad (1)$$

ここで、

- $F_F$  (N) : サスペンションから車体に作用する力
- $K_F$  (N/m) : サスペンションのバネ定数
- $C_F$  (N·s/m) : サスペンションの減衰係数
- $L_F$  (m) : 車体重心からサスペンションまでの水平距離
- $\theta$  (rad) : ピッチ (回転) 角度
- $\theta'$  (rad/s) : 角加速度
- $z$  (m) : 並進 (垂直) 方向変位
- $z'$  (m) : 並進 (垂直) 方向加速度を表す

フロントサスペンションのピッチ運動による影響、すなわちフロントサスペンションによるピッチモーメント  $M_F$  (N·m) は式 (2) で表される。

$$M_F = c - L_F \cdot F_F \quad (2)$$

リアサスペンションについても同様に、それぞれ式 (3)、式 (4) と表される。

$$F_R = 2K_R(L_R \cdot \theta - z) + 2C_R(L_R \cdot \theta' - z') \quad (3)$$

$$M_R = c - L_R \cdot F_R \quad (4)$$

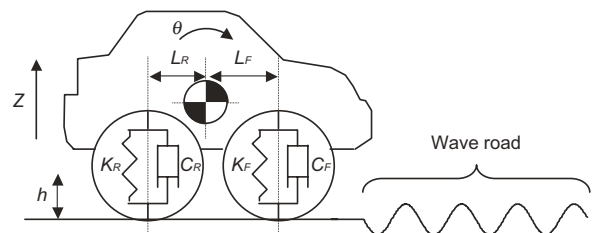


Fig. 7 Front/Rear two-wheel vehicle model

これらの間に、次の関係式が成り立つ。

$$M_b \cdot Z'' = F_F + F_R - M_b \cdot g \quad (5)$$

$$I_{yy} \cdot \theta'' = M_F + M_R \cdot g \quad (6)$$

ここで、

$M_b$  (kg)：車両重量

$g$  (m/s<sup>2</sup>)：重力加速度

$I_{yy}$  (kg·m<sup>2</sup>)：車両重心回りの慣性モーメント

を表す。

こうして作成された車両モデルを用いて波状路の路面変化を sin 波で模擬した場合の車両挙動を確認した (Fig. 8)。路面高さの変化に少し遅れて、フロントサスペンションから車体に作用する力  $F_F$  が同じ周期で垂直方向に作用していることが分かる。

### 3.3.2 波状路での車両テスト

次に波状路での車両テスト結果について示す。Fig. 9 に一定速度で波状路に進入した場合の車輪速の最

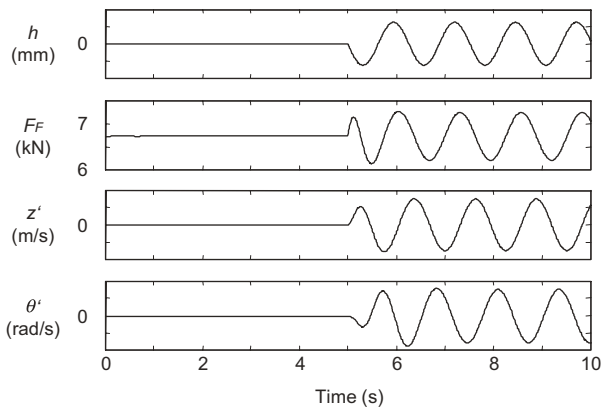


Fig. 8 Simulation on wave road

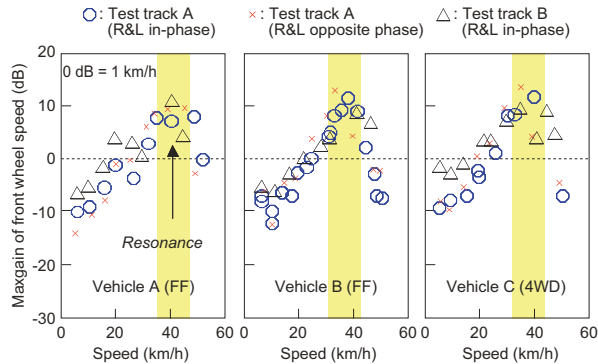


Fig. 9 Vehicle tests on wave roads (at constant speed)

大変化速度を示す。試験は 3 台の異なる車両で二つのテストコースを使って行った。いずれの条件でも時速 40 km/h 付近に共振ピークが見られた。このピークは車両のバネ下共振によって発生している。これら試験結果を参考に、波状路を走行した場合に駆動軸回転方向に発生する強制力をダイナモメータに指令することで仮想の波状路走行を再現する。

### 3.3.3 追加した仮想強制力

仮想波状路モデルの設定パラメータは、波状路ピッチ、振幅と左右位相差。一方、入力は走行距離、車両速度である (Fig. 10)。これら入力はシミュレーションで算出する。出力は、波状路走行によって発生する駆動軸回転方向の左右強制力であり、この強制力をダイナモメータに指令する。

### 3.3.4 適用結果

波状路の中で停止状態から全開加速を行った場合の結果を Fig. 11 に示す。左図は、時間に対する右前輪の車輪速、右図は、駆動用バッテリーの電流変化の様子を示している。テストコースでの結果と VRS ベンチでの結果がほぼ一致していることが確認できた。

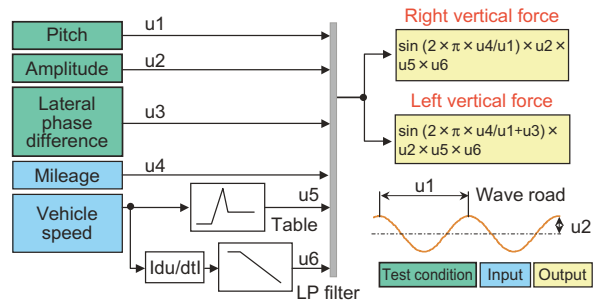


Fig. 10 Virtual wave roads driving model

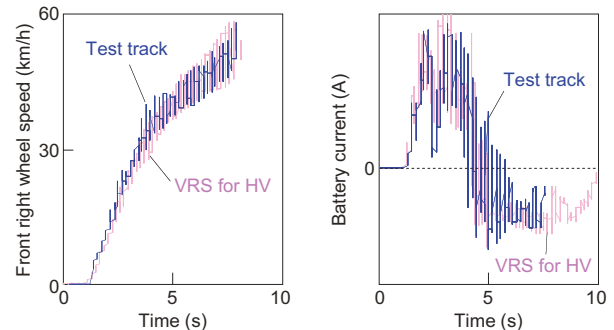


Fig. 11 Virtual wave road driving Vs. Actual wave road driving

4. おわりに

最初に車両評価用 VRS ベンチについて説明した。このベンチは評価の対象であるパワートレインの部分は実機部品を使用し、車両動特性を仮想的に実現したモデルと統合したベンチ上で、車両走行状態を再現させるシミュレータベンチである。さらに仮想波状路走行を再現可能な低慣性・高応答なダイナモメータを持っている。

次に HV を評価するために従来 VRS ベンチに追加した機能として、仮想ブレーキモデルと仮想波状路走行の実現方法について説明した。これら機能は HV の評価に欠かせないものである。

VRS ベンチ導入以降、こうした特徴を生かした緻密な走行評価を、HV 開発の初期段階から行うことが可能となった。

<参考文献>

- 1) Baba, K.Shirota, et al., "Development of 'Virtual and Real Simulator' for Engine", SAE Paper 2001-01-1355 (2001).



<著者>



堺 昭治  
(さかい しょうじ)  
(株)日本自動車部品総合研究所  
研究2部  
HV 関連の要素技術開発に従事



小島 靖  
(こじま やすし)  
トヨタ自動車(株)  
HV ユニット開発部  
HV システム評価に従事



城田 幸司  
(しろた こうじ)  
トヨタ自動車(株)  
計測技術部  
HV・駆動系分野の計測・評価技術  
開発に従事