

## 鉄道車両用 HILS システムの開発状況

車両構造技術研究部 車両振動  
主任研究員 佐々木君章

### 1. はじめに

ソフトウェアのシミュレータと評価対象のハードウェアを組み合わせ、実時間シミュレーションを行うシステムをHILS (Hardware In the Loop Simulation) システムという。

実物の評価対象をシミュレーションループ内に組み込むことで、現実の特性を評価できるHILSシステムは、費用と時間のかかる走行試験の大部分を置き換えるものと期待され、自動車開発においては特にエンジンや変速機制御<sup>1)</sup>、ブレーキ制御等<sup>2)</sup>の開発・評価において開発期間の短縮や品質向上に寄与する重要なツールになりつつある。

現状の鉄道車両開発では新装置の開発は走行試験で評価しながら調整、改良を重ねていく手法がとられているが、鉄道の本線走行試験はコスト、労力の面で負担が非常に大きく、走行試験をベンチ試験で代替する手法の開発は開発工程の短縮や品質の向上につながる大きな可能性を持っていると考えられる。また、日本には専用の試験線がないため、走行試験は営業線を用いて行っている。従って、極限状態を調べるような危険を伴う試験は実施が困難である。ベンチ試験でこれらの走行状態を模擬できるようになれば、鉄道車両の安全性向上にも寄与できると考えられる。

このような観点から、分散型リアルタイムシミュレータ、HILS 対応試験装置、車両試験台を有機的に組み合わせた HILS システムにより、「鉄道車両の仮想走行試験環境の実現」を目標とする研究を 2005～2009 年度の計画で実施している。ここでは開発中の鉄道車両用 HILS システムの概要と開発課題について紹介する。なお、本テーマは国土交通省の補助金を受けて実施している。

### 2. システムの開発課題

#### 2.1 性能の検討

##### (1)装置規模

自動車用の HILS は主として電子制御装置 (ECU) の特性評価・調整のために用いられる場合が多く、一つの実験室に収まるような規模であるのに対して、鉄道車両の運動解析では以下の点から大規模なシステムになり、構成要素のリアルタイムネットワークを介する分散配置が必要と考えられる。

- ① 評価対象部品が大きく、HILS 対応試験装置も大型である。
- ② 自動車に比べて構成部品が多く、考慮すべき自由度が多い。
- ③ 編成走行の解析には隣接車両の運動を考慮する必要がある。

##### (2)演算速度

レール/車輪の接触は固い鉄面同士の接触であるため変化が急峻で、接触力の計算周期を 1ms 程度に抑える必要がある。HILS システムは実時間でシミュレーションを実行するため、時間当たりの計算負荷が大きくなり、1 台のコンピュータでは必要な演算周期の確保が困難である。このため、複数のコンピュータで並列処理を行う分散処理システムを考慮する必要がある。

## 2.2 運用方法の検討

本システムの目的から、車両開発・研究のインフラとして多数の研究者が作成するモデルを相互に利用できるようにする必要がある。信頼性を確認したモデルをライブラリ化して共通財産として再利用する仕組みを用意し、ソフトウェア部品(ブロック)としてライブラリに蓄積していくことにより、全体のシミュレーション精度を徐々に高めていくことができる。このためにライブラリの構造とインターフェースをわかり易く定める必要がある。

また、統一的な手順で構成部品の入出力特性を同定し、HILS 試験装置と共通のインターフェースを持つモデルに変換する高精度な同定手法と、そのモデルをライブラリデータに変換するシステムが必要である。

## 3. HILSシステムの構成

### 3.1 ハードウェアの構成

図1にシステム完成時のハードウェア構成を示す。

主な装置は車両実験棟と HILS 試験棟に分かれて配置され、リアルタイムネットワークで接続される。HILS システムはシミュレーション結果に従って試験装置を駆動し、その結果として試験対象が発生する力をシミュレーションの入力に戻すことで次のステップの計算を実行する。従って、シミュレーションと試験対象の物理的な動きは同期している必要があり、情報伝送の定時性が重要である。このため、イーサネットなどの非リアルタイムネットワークは利用できない。本システムでは HILS 制御の部分に FIVA-Channel という光通信方式のネットワークを用い、定時性を要しないダウンロードや操作コマンドなどは別系のイーサネットにより伝送している。

リアルタイムシミュレーションは計算負荷のピークが大きくなるため、複数の計算機をリアルタイムネットワークに接続し、計算負荷を分散するシステム構成とした。

ダンパや空気ばねの特性再現精度はシミュレーションの精度に大きな影響を及ぼすが、現在のシミ

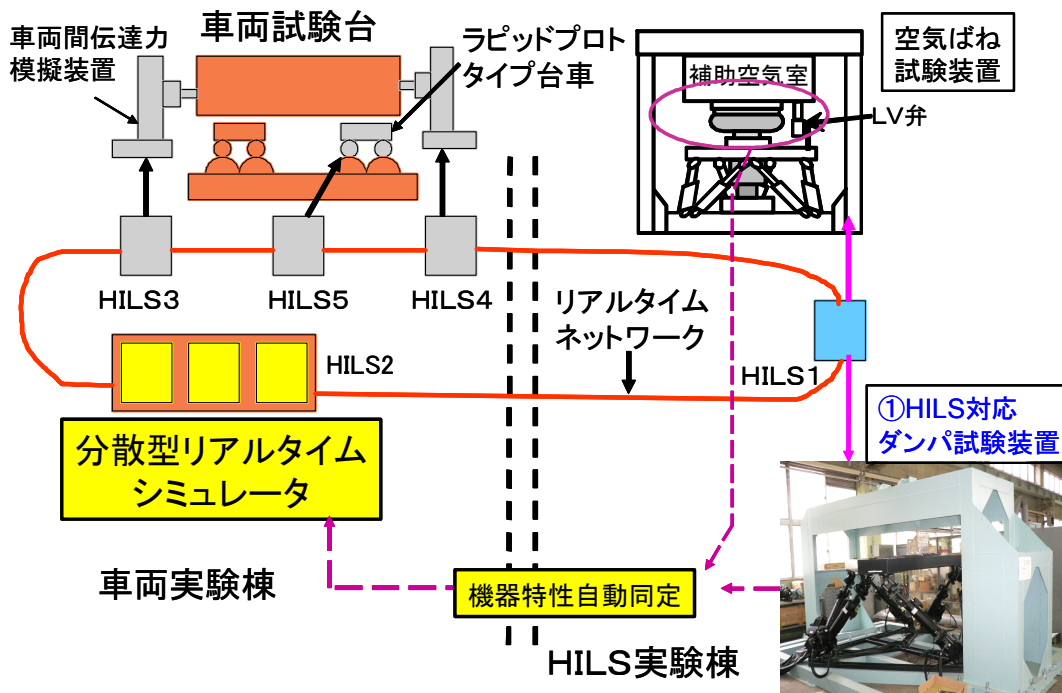


図1 鉄道車両用 HILS システムの構成

ュレーションではこれらの特性を線形化などの方法で近似することが不可欠で、実際の走行条件下の特性と必ずしも一致しない場合がある。これに対して HILS システムのメリットは実物機器を実際に動かして評価するので、近似を行わない正確な特性を再現できることにある。

HILS 対応試験装置はリアルタイムシミュレータと連動して評価対象機器の走行状態における特性を試験する装置で、主要装置として①ダンパ試験装置、②空気ばね試験装置、③車体間運動模擬装置、④ラピッドプロトタイプ台車などを計画しており、現在までに①、②が完成している。

ダンパ試験装置はアダプタの交換により鉄道車両用の全形式のダンパに対応でき、スチュワート型プラットホームと呼ばれる機構で、実車と同じ 6 自由度の運動を再現できるようになっている。これは天板とベースの間に傾斜して配置した 6 本のアクチュエータの長さを制御して、天板の位置・姿勢を任意に制御する機構である。アクチュエータは電動式である。ダンパが発生する力は 6 分力計で測定して、リアルタイムシミュレータに送る。

空気ばね試験装置も同様に 6 自由度の運動を再現するが、空気ばねの試験には車体荷重相当の大きな静荷重を加える必要がある。この荷重は駆動機構で支えることが困難なので、空気圧シリンダによる釣り合いばねで静荷重を負担し、駆動機構は釣り合い点からの変動荷重だけを負担する構造とした。

車体間運動模擬装置は車両試験台において編成中の車両運動を再現するために、隣接車両の運動を模擬する装置で、2007、2008 年度に製作する計画になっている。

ラピッドプロト台車は車両試験台で使用することを前提とした試験用の可変特性台車である。計画・設計段階で（現存しない）台車の特性を試験・評価して設計にフィードバックすることにより、試作段階の試行錯誤を減少し、開発を効率化することを目的としている。

### 3.2 シミュレーションモデルと開発システム

シミュレーションモデルは車両を車体や台車などの構造体の要素とダンパなどの結合要素に分解し、それぞれが入出力機能と動特性を持つ小さなシミュレーションプログラム（以下ブロックと呼ぶ）として作成する。専用のエディタでこれらのブロックを接続し、入出力関係を定義することでシミュレーションプログラムが生成される。図 2 にシミュレーションモデルの構成例を示す。各ブロックはライブラリに登録しておき、CAD システムの要領で必要により読み込んで使用する。この方式ではそれぞれのブロックが独立しているため、以下のメリットが発生する。

- ① 各 CPU の処理をブロック単位に割り付ける「分散処理」を容易に実現できる。
- ② 部品や車体など、構成要素のモデルを部品としてライブラリ化することにより、再利用が可能である。これによりワークスペース上で必要な部品を選んで接続するだけでシミュレーションを簡単に行うことができる。
- ③ 評価対象のブロックを HILS 対応試験装置のブロックと入れ替えることで HILS によるシミュレーションと通常のシミュレーションのモデル変更を簡単に行うことができる。

### 3.3 自動同定システム

HILS 対応試験装置により非線形性を含む評価対象の応答を同定できれば、入出力特性を再現するブロックを作り、シミュレーションモデルにはめ込んで精度を向上する方法が考えられる。例えば、4 個の空気ばねのうち 1 個は HILS 対応試験装置で HILS シミュレータとして動作させ、残りの 3 個はあらかじめ入出力特性を同定したブロックを用いる。このように再現精度が確認されているブロックを部品としてライブラリに蓄積することで、シミュレーション精度を向上させていくことができる。

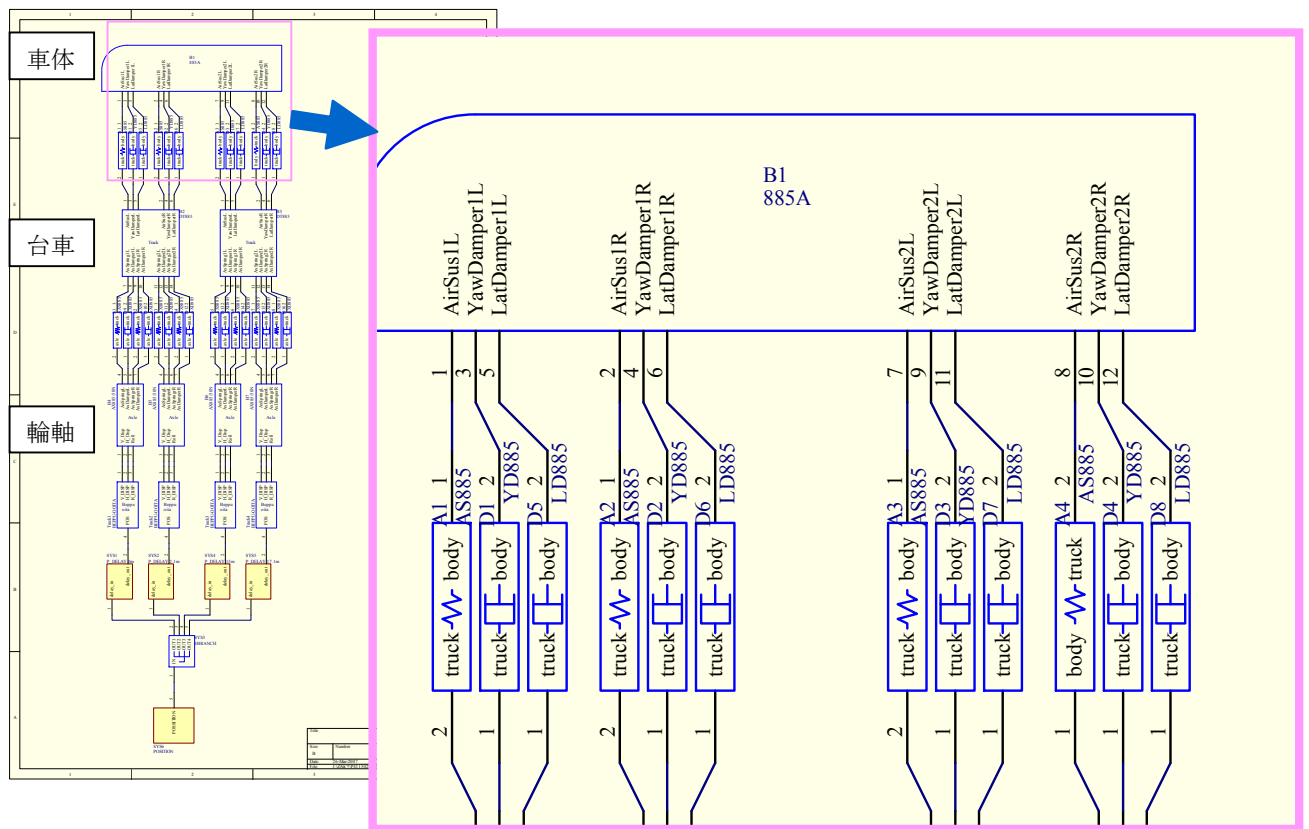


図 2 シミュレーションモデルの構成例

このためには統一的で自動的なシステム同定の手法が必要であり、ダンパを対象に自動同定法を開発した。これは HILS 対応試験装置で実験した対象部品の入力と出力の関係をニューラルネットワークにより自動的に学習するシステムで、非線形性を含む 6 自由度運動に対する 6 自由度の出力特性を同定する。学習後のモデルを部品ブロックに変換することで精度の良い同定モデルを自動的に生成できる。他の装置についても同じ手法の自動同定システムの開発を進めている。

ただし、これで得られるのは入出力関係だけのモデルであり、評価対象の内部状態を知ることは不可能であるから、装置改良のために必要な内部状態量を観測するためには HILS 試験による対象の観測が不可欠である。

#### 4. 今後の展開

走行時特性の十分な試験・評価は車両技術開発の基本であるが、専用試験線のない日本では走行試験に強い制約がある。HILS を応用した試験・評価システムは従来の車両開発の方法を変え、車両の品質を高めるツールとなる可能性を持つと考えられる。また、このシステムの開発には広範で難度の高い技術開発要素を含んでおり、他分野への波及効果も期待できると考えられる。車両メーカーや鉄道事業者の車両開発における新しいインフラとして受け入れられるものに育てていきたい。

1) 荻原顕治, 寺山哲, 竹田洋平, 依田公: 自動変速制御システム開発への HILS の適用, 自動車技術, Vol.56, No.9, p64-69, 2002.9

2) 鈴木万治, 稲葉康弘, 鈴木伸彦: DSP-SIT (Alpha-combo) および veDYNA を用いた車両シミュレータ, デンソーテクニカルレビュー, Vol.5, No.2, 2000.2