

ハイブリッド重量車の次期排出ガス・燃費評価に向けた試験装置の検討

環境研究領域
自動車安全研究領域

※奥井 伸宜、小林 雅行、新国 哲也
河合 英直

1. はじめに

二酸化炭素排出量削減のため、車両減速時等に発生する回生可能な運動エネルギーを活用するハイブリッド自動車 (HEV) や電気自動車を含む次世代自動車が、図1に示す通り積極的に市場に導入されている⁽¹⁾。

車両総重量 3.5t 超のディーゼルトラック、バス (以下、重量車) についても世界的に普及過程にあり、世界統一が図られたハイブリッド重量車の排出ガス・燃費試験法が求められている。そこで、従来重量車の排出ガス試験法として基準調和が図られた WHDC (Worldwide harmonized Heavy Duty Certification) をハイブリッド重量車にも適用させるため、図2に示す国連欧州経済委員会自動車基準調和世界フォーラム (WP29) 排出ガス・エネルギー専門家会議 (UN/ECE/

WP29/GRPE) で検討が進められてきた⁽²⁾。この基準調和の評価手法の一つに、現在国内のハイブリッド重量車の排出ガス・燃費試験法で導入されている HILS (Hardware-in-the-loop-simulator) 手法⁽³⁾を用いることが決定された。ここで、WHDC サイクルは、従来の内燃機関 (エンジン) 車両における市場での代表的な走行状況が反映されたエンジンのトルクと回転数が規定されたものである。さらに、WHDC はエンジンがコールド (冷機) およびホット (暖機) の状態で排出ガス試験が行われる。今後、WHDC を用いた燃費試験法に話が展開した場合、従来の HILS 手法では下記主要項目が課題として残ることから、対応策が必要である。

- ・コールドスタート時の評価
- ・プラグイン方式等の新技術を採用した次世代ハイブリッド重量車の評価

そこで、交通安全環境研究所は、多種多様なハイブリッド重量車やコールドスタート試験への対応を多角的・効率的に検討するために「ハイブリッド・パワートレイン台上試験システム」を考案し構築した。次に、構築された台上試験システムを用い、現行ハイブリッド重量車試験法の課題を調査し、その解決手法を検討した。最後に、認証試験用ツールとして活用が見込める新たなHILS評価装置についても検討を行った。以上の検討結果を報告する。

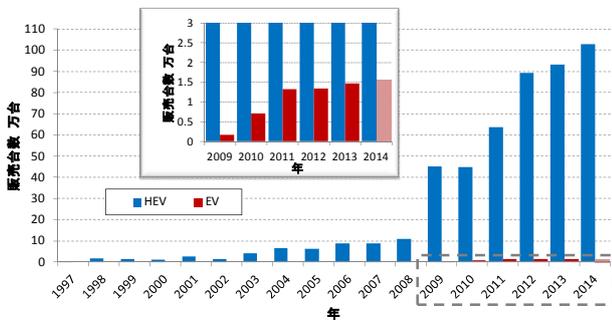


図1 次世代自動車の国内販売台数の推移

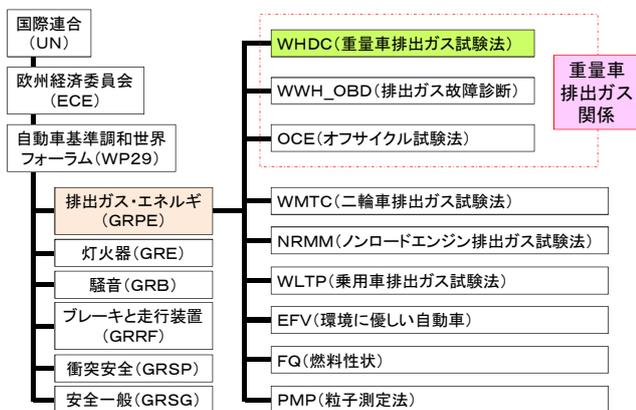
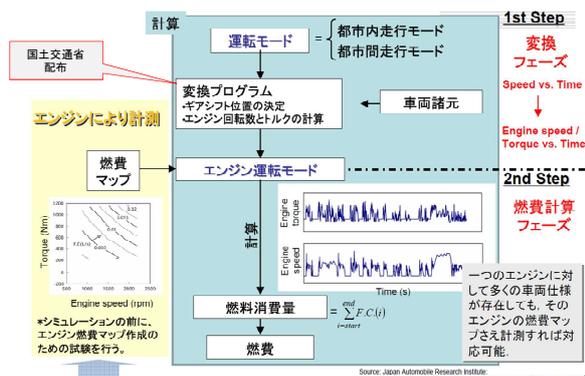


図2 自動車の国際基準調和活動

2. 現行ハイブリッド重量車試験法 (HILS 試験法)

ハイブリッド重量車の排出ガス・燃費試験法に HILS を用いる方法は、2007 年 3 月より国土交通省通達の技術指針「国自環第 281 号および第 282 号」として適用され、運用されている。まず、HILS 試験法の基となった日本における従来重量車の排出ガス・燃費試験法から述べる。

従来重量車の燃費試験法に関しては、図3に示すような「シミュレーション法」を適用することで車両燃



エンジン回転数:6点以上, エンジントルク5点以上,
計30点以上の組み合わせにおける瞬時燃料消費量を実測し、燃費マップを作成【TRIAS】

図3 重量車の排出ガス・燃費試験方法

費を算出している。始めに、エンジン台上試験装置にて、エンジン暖機状態でのエンジンの負荷トルク、摩擦トルク、燃費マップを予め実機エンジンから求める。次に、取得したエンジン実測データや車両諸元、日本の重量車用燃費・排出ガス試験モードである JE05 モード等の车速パターンを、国土交通省配布の「ディーゼル重量車用車速変換プログラム」⁽⁴⁾に入力し、机上の計算機上にてエンジンの回転数およびトルクを算出し、実測した燃費マップに照らし合わせ燃費を求める。排出ガスは、上記プログラムで算出したエンジン回転数およびトルクを用い、エンジン台上試験装置上のエンジン単体で再現し測定する。

一方、ハイブリッド車両は、内燃機関に加え電動機（以下、M/G）、蓄電装置およびハイブリッド制御ユニット（以下、HCU）を搭載し、車両減速時にエネルギー回生を行い、回生したエネルギーを用いて加速時等に出力の一部または全部をM/Gにより駆動することで燃費改善を図っている。実際、ハイブリッド重量車の試験は、図4に示す通り、シミュレーション法で用いた計算プログラムを HILS プログラムに置き換え、車両走行時の回生エネルギーを考慮したエンジンの回転数とトルクを実時間で算出する。その後の燃費や排出ガスの評価手順は、シミュレーション法と同様である。ここで、HILS プログラムは、図5に示すモデル化したハイブリッド車両（ハイブリッドシステム）、運転者および道路状況等から構成される計算機上に構築され、車両固有の実エレクトリックコンピュータシステム（ECU および HCU）と組み合わせられ、高速計算演算装置（DSP）を用いてエンジン運転点が計算される。

つまり、現行の評価手法は、計算機と実エンジンを使い分け、ホットスタート試験のみに対応している。

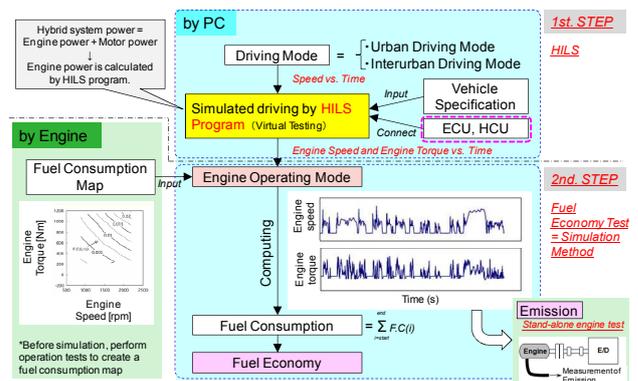


図4 ハイブリッド重量車の排出ガス・燃費試験方法

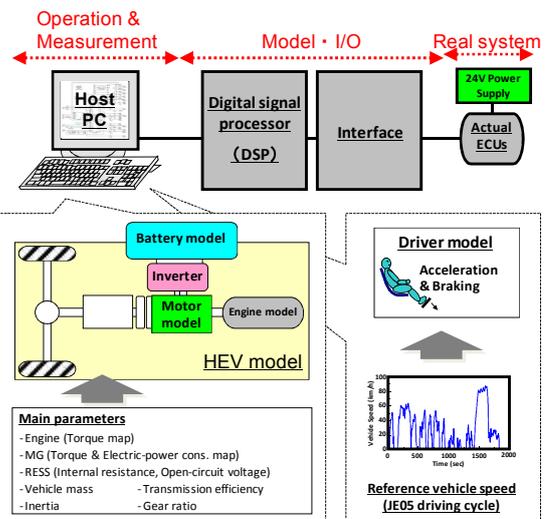


図5 HILS 試験装置の構成図

3. ハイブリッド・パワートレイン台上試験システム

ハイブリッド重量車の排出ガスや燃費等の評価は、現状、上述した HILS 試験法の通り計算機上で仮想車両（モデル）を構築して行うか、実車両（実パワートレイン）を試作してシャシダイナモメータにより行っている。表1に示すように、HILS 試験法は、種々のハイブリッドシステムをモデルにて構築するため、実車両の試作が不要となり、実験費用と工数が抑制できる。しかし、走行中のエンジンやM/Gの発熱状態は、モデルで再現することが難しく、WHDC等の新たな試験サイクルに対応した評価が困難である。

表1 ハイブリッド重量車の各種評価手法の比較

	HEV power-train system	Real Vehicle	Virtual Vehicle (Simulator)
Flexibility of HEV layout	○	×	○
Measurement of exhaust-gas	○	○	×
Heat generation of engine, M/G	○	○	×
Examination cost, time	○	×	○

(○: Good, ×: bad)

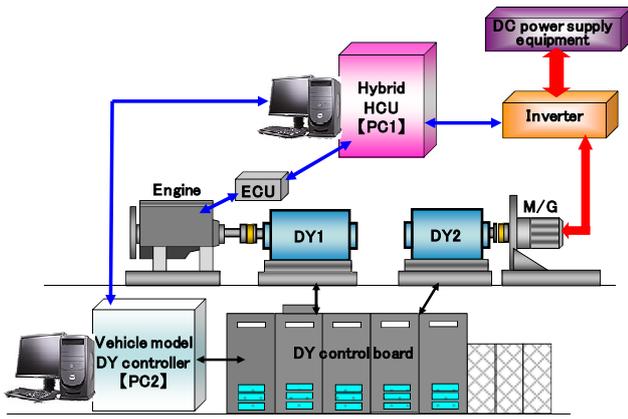


図6 ハイブリッド・パワートレイン
台上試験システムの構成図

そこで、実車両を試作することなく、種々の制御手法を有するハイブリッド車両について多角的・効率的に評価が行える「ハイブリッド・パワートレイン台上試験システム」を考案し、新たに開発を行った。本試験システムは、ハイブリッドシステムの主要な要素であるエンジン、M/G、インバータは実際の装置を用い、それ以外のバッテリー、動力分割伝達機構や協調ブレーキ等の要素はモデル化し、リアルタイムシミュレーションによりモデル化したハイブリッド車両を実験室内に再現することができる。ここで、実車両のハイブリッドシステムは、車両メーカーより内容が開示されることのないHCUの制御ロジック等が重要な役割を果たしている。本試験システムにおいては、この個所をモデルに置き換えることで様々な制御条件を任意に組み合わせることを可能としており、自動車メーカー以外の機関においても、多種多様なハイブリッド車両を構築することができる。その他のシミュレーションモデルは、HILS 試験法で用いられ実績のあるものであり、認証試験と同等の精度を有している。

3. 1 システム構成

エンジンとM/Gを動力源とするハイブリッドシステムの一例として、パラレル方式のハイブリッド車両を想定した。試験システムの構成図を図6に示す。本試験システムは主に、エンジンとエンジン用ダイナモメータ（以下、DY1）、M/GとM/G用ダイナモメータ（以下、DY2）、インバータ、直流電源装置、実車のHCUに代わりハイブリッドシステム全体のハイブリッド制御を行う計算機（以下、PC1）、ハイブリッドシステムの各要素をモデル化した車両モデルをリアルタイムシミュレーションするとともに、DY1、DY2の制御を行う計算機（以下、PC2）から構成される。

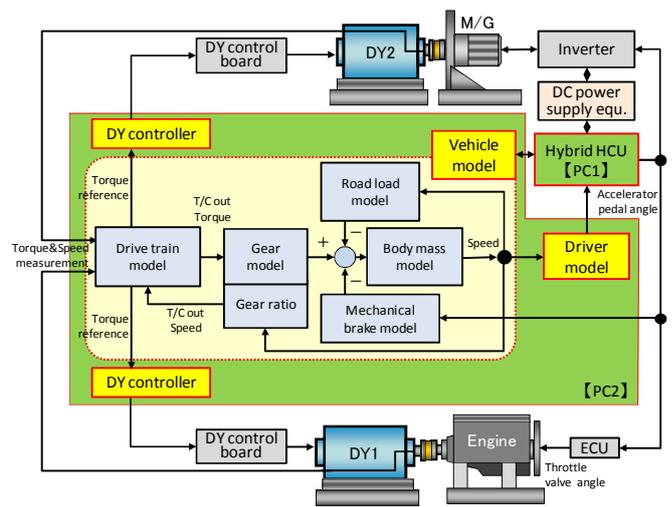


図7 ハイブリッド・パワートレイン
台上試験システムの制御フロー図

本装置の制御フローを、図7を用いて説明する。PC2内の車両モデルにより車両走行状態に必要なトルク指令値が算出され、その指令値に基づきDY1、DY2をDY制御盤が個別に制御する。DY1、DY2のそれぞれの回転軸にはトルクメータ及び回転検出器が取り付けられており、実際に検出されたトルク値、回転速度は車両モデルにフィードバックされる。一方、運転手を代行するドライバモデルは、予め設定された車速指令値に基づき、アクセル開度指令値を決める。ハイブリッド車両の駆動力配分等の制御を行うコントローラ（HCU）であるPC1は、DY1と連結されたエンジンに対してはエンジン制御ユニット（ECU）を通じてアクセル踏み込み量に応じたスロットル開度信号を、インバータに対してはM/G制御信号を出力する。また、PC1は、制御信号に基づき直流電源装置を制御し、DY2に連結されたM/Gを駆動時にはモータとして、回生時には発電機として制御する。M/Gの稼働により変動するバッテリー蓄電状態は、PC1で管理される。この一連の制御フローを繰り返すことで、モデル化した仮想ハイブリッド車両が駆動できる。

3. 2 シミュレーションモデル

3.2.1 ハイブリッド制御ユニット（HCU）

エンジンおよびM/Gのハイブリッド制御を行うコントローラがHCUである。M/Gによるトルクアシスト時には、バッテリーの蓄電状態を参照し、エンジン回転速度やシフト、アクセル開度信号などを変数として、トルクアシスト条件を任意に組み合わせることができ、任意のマップで与えた駆動トルク比率に基づきM/Gを制御する。一方、M/G回生時には、車両減速時の車速

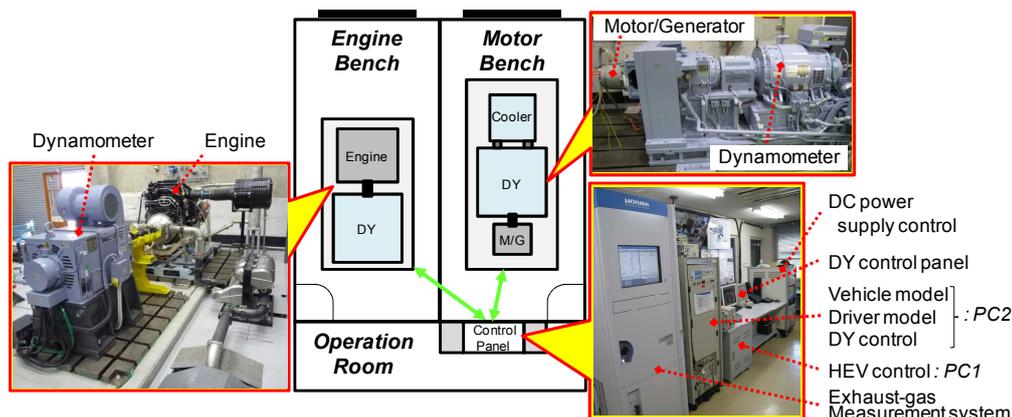


図8 ハイブリッド・パワートレイン台上試験システムのレイアウト図

とブレーキトルクの関係より、M/G および充放電装置を制御する。この際、M/G を協調回生制御あるいは非協調回生制御に設定することが可能である。

3. 2. 2 ドライバモデル

車速指令で与える特定走行モードを走行させる際、ドライバモデルが、実際の運転手の操作（アクセル、ブレーキ等）を模擬し走行を行っている。実際、車速の目標値と計測された車速との差分がゼロになるよう、アクセルとブレーキ操作指令を出力している。

アクセル操作指令は、HCU にて駆動トルク比率を算出し、HCU からエンジンにスロットル指令、M/G にモータ指令を分配して与える。ブレーキ指令もアクセル指令同様、HCU にてブレーキの協調回生比率を算出し、M/G に回生ブレーキ指令、機械ブレーキに機械ブレーキ指令を分配して与える。

3. 2. 3 車両モデル

走行抵抗モデル、駆動系モデル、機械ブレーキモデルおよび車体慣性モデルから成る。以下に主なモデルを説明する。

<駆動系モデル>

クラッチ、トランスミッション、ディファレンシャルギヤ、タイヤの各モデルから成り、走行中の車両動作を模擬する。

<機械ブレーキモデル>

HCU を介して与えられた機械ブレーキ指令から、ブレーキ面で発生するブレーキトルクを算出する。

<車体慣性モデル>

駆動系モデルからの伝達トルク、機械ブレーキトルク、走行抵抗トルクを入力して車速を算出する。

表2 エンジン用ダイナモメータの諸元

Absorbing	Power	225 kW
	Torque	900 Nm
Motoring	Power	180 kW
	Torque	720 Nm
Base Speed		2,386 rpm
Top Speed		8,000 rpm

表3 電動モータ用ダイナモメータの諸元

Absorbing & Motoring	Power	250 kW
	Torque	420 Nm
Base Speed		5,684 rpm
Top Speed		16,000 rpm

3. 3 本台上試験システムの構築

実際に構築したハイブリッド・パワートレイン台上試験システムを図8に示す。パラレル方式のハイブリッド・パワートレインから成り立っている。

3. 3. 1 エンジンベンチ <図8左側の部屋>

実機エンジンは、表2に示す仕様のエンジン用ダイナモメータ（明電舎製、フレックダイナモメータTYPE-i）に接続した。本ダイナモメータは交流式で正・逆回転が可能であり、回転子慣性が1.61[kgm²]と小さく、電流応答性1.5kHzの高速IGBTインバータを使用しており、高応答な制御が可能である。

その他、ベンチ内に燃料温調器、冷却水温調器、エンジンインタークーラー用温調器、吸入空気温調器、層流型空気流量計（司測研製、LFE-300B）、燃料流量計（小野測器製、FM-2500A）などを設置している。

3. 3. 2 モータベンチ <図8右側の部屋>

実機M/Gは、表3に示す仕様のM/G用ダイナモメータ（明電舎製、永久磁石式ダイナモメータ EVDY 250）

に接続した。最高回転速度は 16,000rpm を確保し、高回転型の M/G にも対応できる。

その他、実機 M/G 用インバータ、直流電源装置（明電舎製、DC50～500V、500A）を設置している。

3.3.3 制御室 <図8下側の部屋>

制御分担比の設定変更が可能なハイブリッド制御コントローラモデルと車両モデルなどを搭載した高速演算装置（dSPACE 社製）および計測制御装置（小野測器製、FAMS-8000）、直流電源用制御装置から成る。

計測制御装置において、通常のシャシダイナモメータ同様、車両諸元や走行抵抗および勾配などの負荷設定に基づく制御指令を行う。また、各種モード運転パターンや、実際の計測データを集約し管理を行っている。本装置はタッチパネル式制御切替機能を有した手動操作部と接続されており、エンジンおよび M/G を実機またはモデルにて組み合わせた 4 通りの運転に、エンジン単体および M/G 単体での運転を加えた計 6 通りの操作設定が可能である。

計測制御装置と通信で接続される高速演算装置には、MATLAB/Simulink で構築したシミュレーションモデルの制御ロジックがダウンロードされ、モデル制御指令に基づきエンジンとエンジン用ダイナモメータ、M/G と M/G 用ダイナモメータを制御する。

直流電源用制御装置は、実バッテリーの挙動を模擬したバッテリーモデル（バッテリー蓄電状態に対する開放電圧、内部抵抗等を考慮）を活用する。これにより、実バッテリーの代わりに直流電源装置から実機 M/G 用インバータに給電を行っている。

その他、排出ガス計測が可能となっており、排出ガス分析計（堀場製作所製、MEXA-ONE-D1-EGR）およびオパシメータ（AVL 製、4390）を設置している。

表 4 市販小型ハイブリッドトラックの諸元

Vehicle Mass	3,080 kg	
Max. Load Mass	2,000 kg	
Height × Width	2290 × 2180 mm	
Tire (radius)	3607 mm	
Gear Ratio	1st	5.979
	2nd	3.434
	3rd	1.862
	4th	1.297
	5th	1.000
	6th	0.759
Final Ratio	4.555	

3.4 本台上試験システムの動作検証

一般的にハイブリッド車両の燃費改善効果は、加減速頻度の多い走行時に得られやすい。そこで、都市内走行に多用される小型ハイブリッドトラックを本台上試験システムの検証用車両とした。

3.4.1 動作検証条件

検証用車両とした市販小型ハイブリッドトラック（いすゞ自動車製）は、6 段ギアを備えた車両総重量（GVW）5,080kg の車両である。車両諸元を表 4 に記す。ここで、走行時の M/G のトルクアシストや回生といったハイブリッド制御ロジックを抽出するに当たり、半積載状態（4,135kg）の本供試車両をシャシダイナモメータにて JE05 モードを走行させ、図 9 に示すような M/G からの電力データを取得した。

ハイブリッド・パワートレイン台上試験システムに構築する仮想ハイブリッドトラックの車両諸元は、供試車両と同じ値を用いた。ハイブリッド・パワートレイン構成は、供試車両と同じパラレル式で「エンジン⇄クラッチ⇄M/G⇄トランスミッション⇄ディファレンシャルギヤ⇄後輪タイヤ」の構成とした。エンジンは、4L 直列 4 気筒インタークーラーターボチャージャー付ディーゼルエンジン（日野自動車製、型式：N04C-TA）で、最高出力 110kW/3,000rpm、最高トルク 392Nm/1,600rpm を発生する。M/G は、永久磁石式同期電動機（澤藤電機製、型式：YZ901-Z1）で、最高出力 118kW/3,300rpm、最高トルク 340Nm/0-3,300rpm を発生する。ただし、仮想ハイブリッドトラックのエンジンと M/G は、供試車両に搭載されているものと異なる。駆動用バッテリーは、供試車両が搭載する 1.9kWh を想定した。駆動用バッテリーの充電は、車両減速時に発生する回生エネルギーのみとし、走行中のエンジン発電や

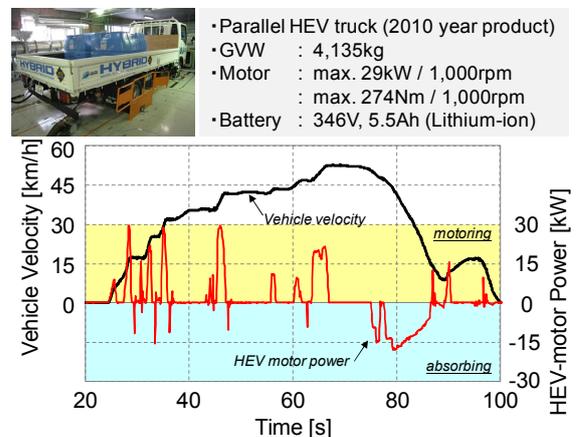


図 9 市販小型ハイブリッドトラックの電動モータの挙動

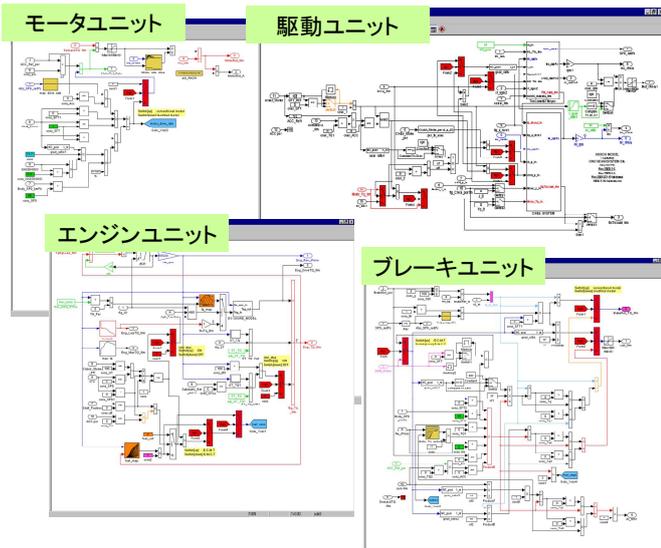


図10 構築したハイブリッド制御モデルの一例

外部給電による充電は行っていない。シフトパターンは、「ディーゼル重量車用車速変換プログラム」から作成したパターンを使用している。

今回の検証は、ハイブリッド・パワートレイン台上試験システムのM/Gは実機で、それ以外の要素はモデルで対応した。エンジンのモデル化にあたり、事前に実機エンジンにてトルクマップおよび燃料マップ情報等を取得し、本システムに反映させた。

3.4.2 供試ハイブリッド車両のHCUのモデル化

3.4.1で取得した供試ハイブリッドトラックのハイブリッド制御をハイブリッド・パワートレイン台上試験システムで再現させるため、実車のHCU等の情報を図10に示すようなハイブリッド・パワートレイン制御モデル(MATLAB/simulink)で構築した。

図11にJE05走行時の供試ハイブリッドトラックと仮想ハイブリッドトラックのエンジン回転数およびM/Gトルクを示す。エンジンのアイドリング停止、走行中アクセルオフに伴うアイドリング運転、M/Gの力行・回生トルクは、両ハイブリッドトラック共に同等の挙動を示すことが確認でき、本台上試験システムで供試ハイブリッドトラックの運転がほぼ再現できた。

以上より、本台上試験システムを用いることで、自動車メーカー以外の機関においても、実車を試作することなく試験室内でハイブリッド車両の走行評価が可能となった。さらに、車両ベース(車速ベース)による評価が行えることでより実車に近い精度での評価が可能となり、従来HILS試験法の机上で燃費、実機エンジンで排出ガスを別々に求める手間が省ける。

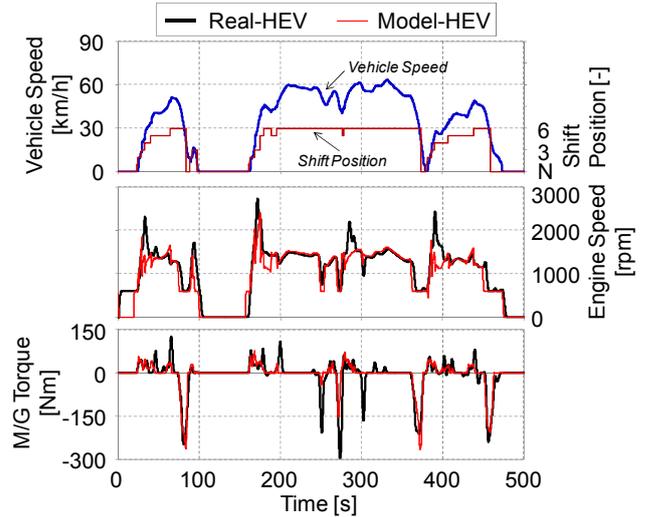


図11 走行性能比較(実車両 vs. 仮想車両)

4. 従来HILS試験法の課題調査

実機エンジンや実機M/Gから構成される台上試験システムは、3.3.3で述べた通り、エンジンやM/Gの一部をモデルに置き換えることができる。下記の通り、計4パターンの動作条件にて仮想ハイブリッド車両を運転することができる。

- ・エンジン：実機， M/G：実機， 車両：モデル
- ・エンジン：実機， M/G：モデル， 車両：モデル
- ・エンジン：モデル， M/G：実機， 車両：モデル
- ・エンジン：モデル， M/G：モデル， 車両：モデル

そこで、この動作条件の違いを活用し、従来HILS試験法の課題調査を行った。

検証用車両として設定した仮想中型ハイブリッドトラック(GVW=7,950kg)は、6段ギアを備えた車両である。車両諸元を表5に記す。調査時の試験車重量は半積載状態(5,870kg)とした。ハイブリッド・パワートレイン構成は、3.4で用いた供試車両の市販小型

表5 仮想中型ハイブリッドトラックの諸元

Vehicle weight	3,790kg	
Full load capacity	4,050kg	
Height × Width	2.465 × 2.230m	
Tire radius	0.4030m	
Gear ratio	1st	6.574
	2nd	3.831
	3rd	2.274
	4th	1.385
	5th	1.000
	6th	0.729
Final gear ratio	4.333	

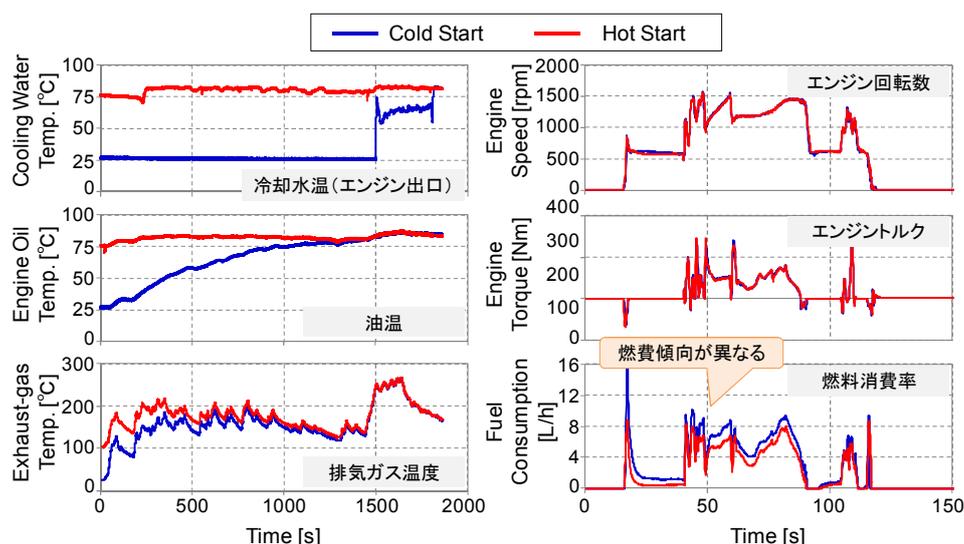


図 12 仮想ハイブリッドトラックのコールドおよびホットスタート試験の比較 (JE05 モード)

ハイブリッドトラックと同じパラレル式で、ハイブリッド制御に関しても同等の制御を用いた。エンジンは、4.7L 直列 4 気筒インタークーラターボチャージャー付ディーゼルエンジン (UD トラック製、GH5TA) で、最高出力 158kW/2,500rpm、最高トルク 628Nm/1,400rpm を発生する。排気ガス後処理装置等の搭載により、平成 22 年排出ガス規制 (ポスト新長期排出ガス規制) に適合している。M/G は、永久磁石同期電動機 (澤藤電機製、型式: YZ901-Z1) で、最高出力 118kW/3,300rpm、最高トルク 340Nm/0-3,300rpm を発生する。駆動用バッテリーは、市販小型ハイブリッドトラックが搭載する 1.9kWh を想定した。

4. 1 コールドスタート試験

従来 HILS 試験法は、エンジンおよび M/G を含め、すべてモデル (マップ) で置き換えている。特に、燃費に関しては、エンジンホット状態の燃費マップを用いて算出を行っており、コールドスタート試験が正確に評価できない。

そこで、仮想ハイブリッドトラックが JE05 モードを走行した際のホットおよびコールドスタート条件による各種挙動を調査した。本台上試験システムは「エンジン: 実機、M/G: モデル」の組み合わせで試験を行った。結果を図 12 に示す。図左上から JE05 モード全体のエンジン出口の冷却水温、エンジン潤滑油温度 (以下、油温)、排気ガス温度、右上図から JE05 モードの走行開始後一山目のエンジン回転数、エンジントルク、燃料消費率を抽出し時系列で示す。赤線で示すエンジンホットスタート試験結果は、エンジンが十

分暖まった後に試験を行ったため、モード走行中は冷却水温や油温はほぼ 80°C 一定であった。また、排気ガス温度も高温状態からスタートしている。一方、青線で示すコールドスタート試験結果は、JE05 モード高速部分の約 1500 秒近くに達するまで油温や排気ガス温度がホットスタート条件と異なる。指令値であるエンジン回転数やエンジントルクは同等の値を与えているため、出力値はほぼ同様であったが、燃料消費率 (燃費) に着目すると、コールドスタート条件の方がホットスタート条件に比べ悪化する傾向が示された。

以上に述べたように、コールドおよびホットスタート条件では、燃費性能に差を生じることが分かった。実際に従来 HILS 装置でコールドスタートの燃費評価を行うには、温度変化に対応できる各機器の詳細な物理モデルの導入、または温度に応じた燃費マップを複数枚用意する必要があると考えられる。しかし、認証試験時に、このような改造を施した従来 HILS 装置を使うことは非現実的であり、実機エンジンを用いずにコールドスタート試験を行うことは非常に困難であると考えられる。

4. 2 過渡応答特性および燃費精度

一般に、実機エンジン、特にターボチャージャー付実機エンジンは、アクセル踏み増し時に過給機の回転上昇の遅れが発生することから、走行中の過渡応答性が課題となる。

そこで、仮想ハイブリッドトラックが JE05 モード (ホットスタート条件) を走行した際のバッテリーエネルギーバランスや燃費に及ぼす影響について調査した。

表6 バッテリーエネルギーバランスの影響

エンジン	電動モータ	走行後SOC
モデル	モデル	60.1%
実機	実機	45.7%

(走行前SOC=60.0%)

その際、本台上試験システムは、従来 HILS 装置を再現した「エンジン：モデル、M/G：モデル」とより実車両に近い条件を再現した「エンジン：実機、M/G：実機」の二つの試験装置条件を設定し比較を行った。表6に試験装置条件の違いにおけるバッテリーエネルギーバランスの影響を示す。仮想ハイブリッドトラックの JE05 モード走行開始時のバッテリー蓄電状態 (State of charge：以下、SOC) は 60.0%に設定した。従来 HILS 装置相当である「エンジン：モデル、M/G：モデル」を使用した際の走行終了時の SOC が 60.0%となるようにハイブリッド制御のパラメータを調整した。次に、同じハイブリッド制御のパラメータを用いて試験装置条件を「エンジン：実機、M/G：実機」に変更し、同様に JE05 モードを走行した。走行後のバッテリー SOC は 45.7%となり、SOC 幅で 13%の差を生じ、JE05 モードの走行開始と終了時の SOC の差 (Δ SOC) はゼロにならなかった。

次に、各装置条件の違いによる燃費を算出した。従来 HILS 装置相当による実験においては、走行前後の Δ SOC がゼロであったため、燃費補正は行わず 8.75km/L であった。一方、試験装置条件が「エンジン：

表7 燃費の影響

エンジン	電動モータ	燃費
モデル	モデル	8.75 km/L
実機	実機	8.43 km/L

(Δ SOC=0に換算)

実機、M/G：実機」の場合は、 Δ SOC がゼロとなるように燃費補正し算出した。その結果を表7に示す。表に示す通り、試験装置条件が「エンジン：実機、M/G：実機」の場合は、従来 HILS 装置相当条件に比べ燃費が 0.32km/L (約 3.63%) 悪化した。

以上に述べたように、仮想ハイブリッドトラックを評価した際、エンジンや M/G が実機またはモデルの組み合わせにより、バッテリーエネルギーバランスや燃費に差を生じることが分かった。

そこで、この差が生じる原因を詳細に調査するため、図13に示すモード走行時の各機器の挙動を確認した。図13は、JE05 モード (ホットスタート) の高速走行開始部分を示す。図左側には前述の仮想ハイブリッドトラックのエンジン回転数、エンジントルク、燃料消費率を時系列に対して示す。また、参考として、図右側に従来ディーゼルトラックにおける試験装置条件の違いを同様に示す。仮想ハイブリッドトラックのエンジン回転数は、試験装置条件の違いによらず、ほぼ同等の傾向を示した。次に、エンジントルクに注目すると、「エンジン：実機、M/G：実機」の組み合わせは、従来 HILS 装置相当条件に比べ、エンジントルク

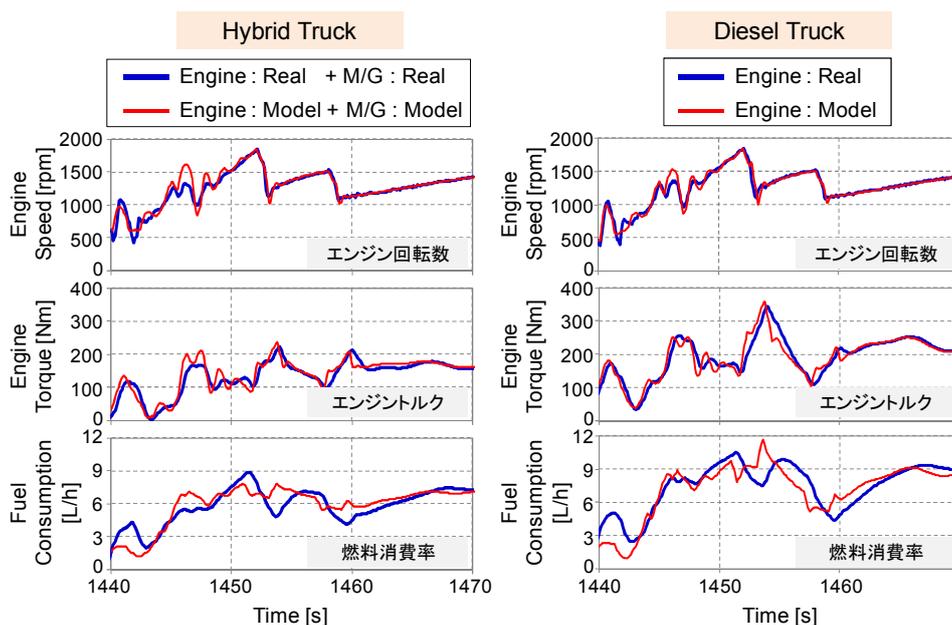


図13 試験装置の要素機器の組み合わせによる影響—その1 (JE05 モード、ホットスタート)

クの遅れが確認できる。特に、過渡応答時の傾向が大きく異なり、「エンジン：実機、M/G：実機」を用いた方がよりなめらかに立ち上がっている。これは、エンジンやM/Gをモデルで置き換えている従来HILS装置相当条件は、過渡応答遅れがほぼ発生しないため、瞬時に最適なトルク配分が与えられる。一方、エンジンやM/Gが実機の際には、過渡応答遅れを発生しやすく、トルク配分やトルク発生時間に対し差異を生じたものと考えられる。同様に、燃料消費量に関しても、エンジンやM/Gが実機およびモデルに対して傾向が異なることが確認でき、同様の要因と考えられる。

ここで、図右側の仮想の従来ディーゼルトラックに着目した場合においても、試験装置の組み合わせの違いによる差が確認できる。この傾向は、仮想ハイブリッドトラックと同様であることから、実機エンジンを使用したことにより影響を生じたものと考えられる。

5. 高精度なハイブリッド重量車評価装置の検討

4章で記述した通り、ハイブリッドトラックのエンジンやM/G等をモデルで置き換えている従来HILS装置による評価では、コールドスタート試験が困難なことや過渡応答遅れに伴うバッテリーエネルギーおよび燃費が実ハイブリッドトラックに比べ誤差を生じることが分かった。

そこで、従来HILS装置のコンセプトを最大限活用し、それら課題を解決する方策を検討した。

表8 試験装置条件の違いによる燃費の誤差

エンジン	電動モータ	燃費の誤差
実機	実機	3.63%
モデル	実機	0.27%
実機	モデル	3.65%

(エンジン：モデル+電動モータ：モデルとの比較)

5. 1 要素機器の組み合わせ検討

ハイブリッド・パワートレイン台上試験システムは、前述の通り、試験装置条件を4パターン組み合わせた実験が可能である。そこで、従来HILS装置のエンジンやM/G部分が、モデルのままがよいのか、実機と組み合わせる方がよいのか調査を行った。評価方法としては、表8に示す各試験装置条件の組み合わせで、JE05モード(ホットスタート)を走行した際の燃費精度の差について確認を行った。比較結果を同じく表8に示す。この時の燃費は、各試験装置条件における走行前後の $\Delta SOC=0$ の状態である。

① 「エンジン：モデル、M/G：モデル」

vs. 「エンジン：実機、M/G：実機」

従来HILS装置相当(エンジン：モデル、M/G：モデル)に比べ、燃費の誤差は3.63%(前述した同試験)。

② 「エンジン：モデル、M/G：モデル」

vs. 「エンジン：モデル、M/G：実機」

従来HILS装置相当に比べ、燃費の誤差は0.27%。

③ 「エンジン：モデル、M/G：モデル」

vs. 「エンジン：実機、M/G：モデル」

従来HILS装置相当に比べ、燃費の誤差は3.65%。

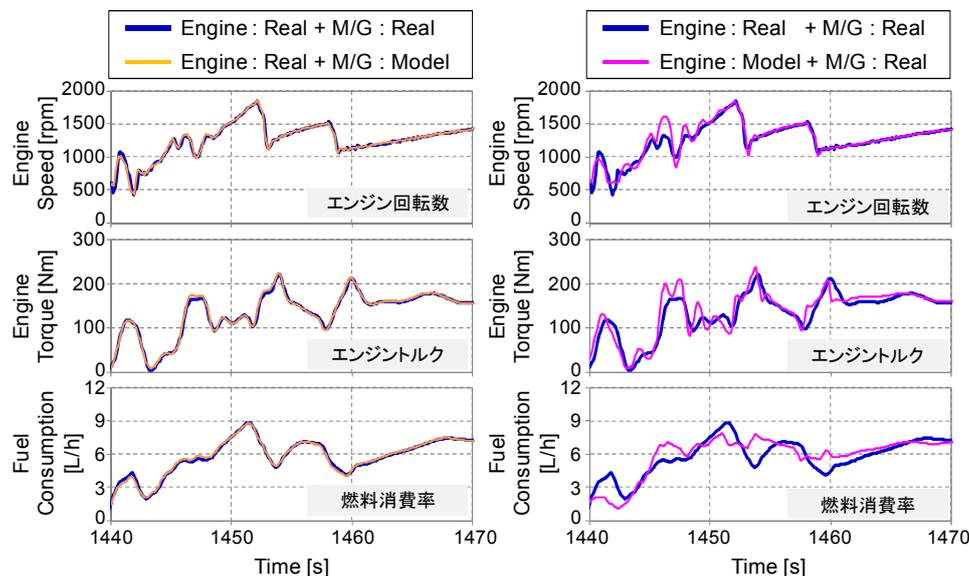


図14 試験装置の要素機器の組み合わせによる影響—その2 (JE05モード、ホットスタート)

以上に述べたように、M/Gが実機またはモデルであっても、燃費に対しほとんど影響を及ぼさない。一方、エンジンが実機またはモデルの場合、燃費に大きな誤差を生じることが分かった。

次に、試験装置条件の違いによる影響を詳細に調べた。各試験装置条件におけるエンジン回転数、エンジントルクおよび燃料消費量の結果を時系列に対して図14に示す。図左側は「エンジン：実機、M/G：実機」vs.「エンジン：実機、M/G：モデル」、図右側は「エンジン：実機、M/G：実機」vs.「エンジン：モデル、M/G：実機」の結果である。図左側の「エンジン：実機、M/G：実機」vs.「エンジン：実機、M/G：モデル」に着目すると、各結果の傾向はほぼ同等であった。つまり、M/Gが実機またはモデルであっても過渡応答遅れをほとんど生じないことが分かる。一方、図右側の「エンジン：実機、M/G：実機」vs.「エンジン：モデル、M/G：実機」では、エンジンのモデル化に伴い、過渡応答遅れによる違いを確認でき、エンジントルクや燃料消費率が大きく異なることが分かった。

したがって、より高精度にハイブリッド重量車の試験を行うには、従来 HILS 装置のエンジンのモデル部に実機を採用することが望ましいことが分かった。

5. 2 従来 HILS 試験装置の拡張によるメリット

本報では、実機エンジン付 HILS 装置のことを「拡張 HILS」と呼ぶこととする。拡張 HILS 採用によるメリットは他にも下記のようなことが考えられる。

- ・評価時間（認証試験時間）の短縮化が可能
- ・コールドスタート時の燃費評価が可能
- ・プラグインハイブリッド車両等の新たなハイブリッド重量車に柔軟に対応することが可能
- ・従来ディーゼル重量車や新技術を導入した従来ディーゼル重量車に対しても評価が可能

上記項目についての具体的な説明は下記の通り。

5. 2. 1 評価時間

図15に従来 HILS 法と拡張 HILS 法の試験手順（ホットスタート試験で、M/G やバッテリー特性の取得試験およびモード走行時の $\Delta SOC=0$ 補正は事前に実施する想定で比較）を示す。従来 HILS 法は2章で述べた通り、エンジン運転条件を HILS 装置で抽出し、予めエンジンベンチにて車両搭載エンジンの燃費マップを取得し燃費を算出する。排出ガスは、抽出したエンジン運転条件を用いエンジン単体によるテストを行う。一方、拡張 HILS 法では、燃費マップ取得が不要とな

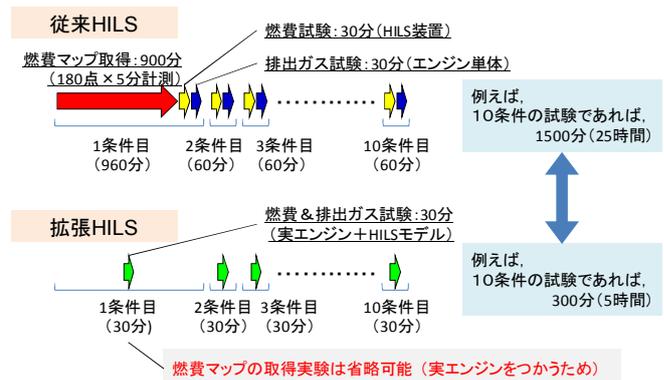


図15 試験手順の比較（一例）

り、さらに HILS 計算を実行しながら実機エンジンを稼働させるため、燃費・排出ガスの同時試験が可能となる。その結果、図15に示す通り、例えば10条件目の試験であれば、従来 HILS は25時間、拡張 HILS では5時間の試験時間となり、拡張 HILS により大幅な認証試験時間の短縮が可能となる。

5. 2. 2 コールドスタート時の評価

従来 HILS 試験装置に実機エンジンを組みわせることで、従来 HILS 装置では試験が困難であったハイブリッド重量車のコールドスタート時の燃費評価も可能になる。

さらに、コールドスタート時に触媒早期暖機を行う車両の登場も今後考えられる。具体的には、M/G を搭載するハイブリッド車両は、M/G によるアシスト割合を任意に変更できることから、触媒等の温度情報を用いてエンジン出力を自在に変更させることが可能である。従来 HILS 試験法は温度変化情報が考慮されていないが、拡張 HILS は実機エンジンや実際の排気触媒等を活用しリアルタイムに車両制御モデルに情報を反映できることから、温度のフィードバック制御が可能となる。したがって、拡張 HILS により、確実に高精度にコールドスタート試験が行うことができる。

5. 2. 3 プラグインハイブリッド車両等の

新たなハイブリッド重量車への対応

将来のハイブリッド重量車においても、プラグイン方式を採用したハイブリッド重量車の登場も考えられる。図16には、プラグインハイブリッド車両（軽・中量車）の評価イメージを示す。特に、プラグインハイブリッド車両を評価する際、試験3日目の赤枠内に着目すると、電池が満充電状態からスタートする際は電気自動車として走行（CDレンジ走行）し、バッテリー残量が少なくなり、ある領域に達すると通常のハイブ

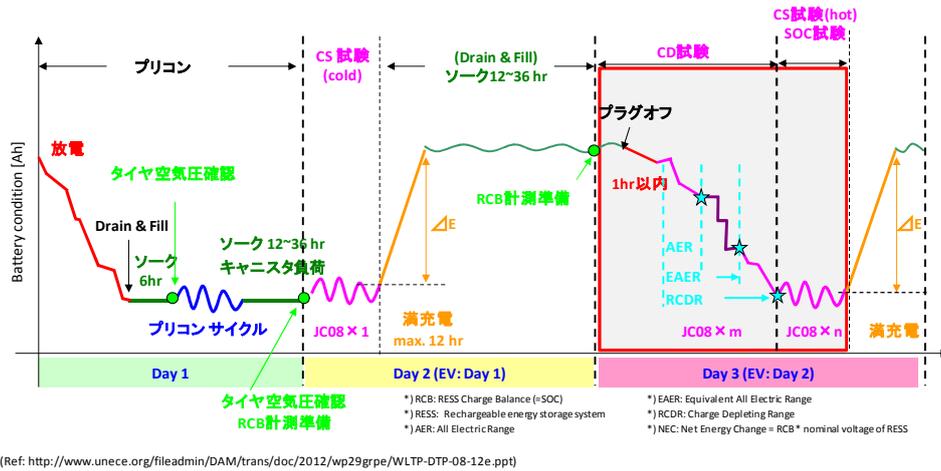


図 16 プラグインハイブリッド乗用車の試験条件

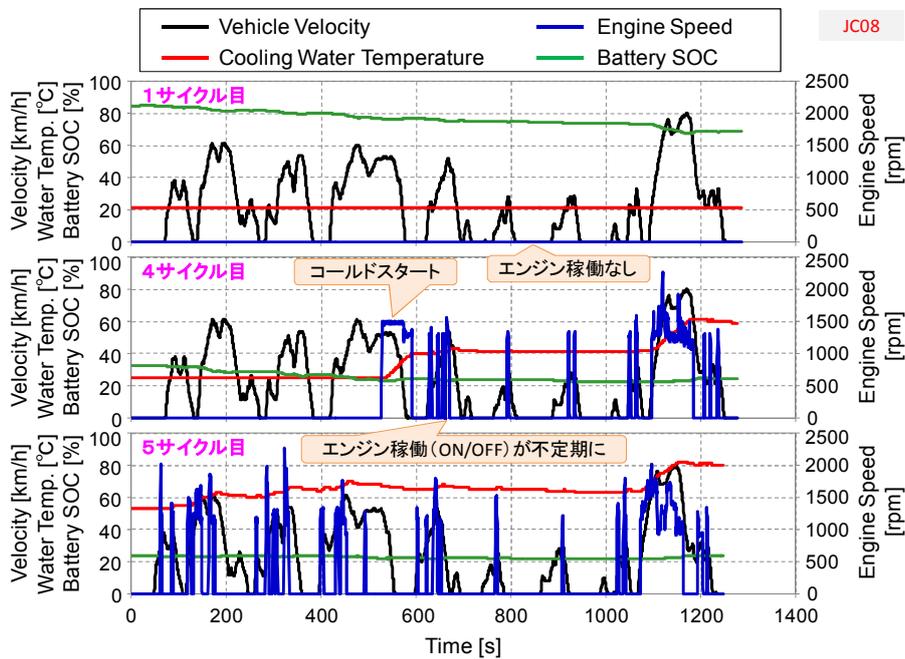


図 17 プラグインハイブリッド乗用車 (PRIUS-PHV) の各種挙動

リッド車両として走行 (CS レンジ走行) する。実際に、市販されているプラグインハイブリッド乗用車を図 16 の試験方法にてシャシダイナモ試験を行った結果を図 17 に示す。JC08 モード 1 サイクル目は CD レンジ走行であり、4 サイクル目において CD から CS レンジ走行に移行する。このサイクルにおけるエンジン状態はコールドスタートである。この 4 サイクル目と CS レンジ走行の 5 サイクル目を比較すると、エンジン稼働の時期や期間は異なっており、CD から CS レンジ走行に移行する際のエンジン稼働状態は不規則である。つまり、エンジンや排出ガス後処理装置の温度状態が不規則となることから、従来 HILS 法で評価すること

は困難である。しかし、拡張 HILS は実機エンジンを用いることから、各種温度変化に応じて変化するハイブリッド制御にも、柔軟に対応可能である。

5. 2. 4 従来ディーゼル重量車や新技術を導入した従来ディーゼル重量車への対応

将来において、従来ディーゼル重量車の燃費改善を目的とした新技術の導入も考えられる。例えば、車両減速時にエネルギーを小型バッテリーに回収し、回収したエネルギーを駆動軸アシストではなく、電動補機類に使用する技術 (エネチャージ技術) や排熱回収技術が挙げられる。従来のシミュレーション法による排出ガス試験は、試験モードをエンジン仕様毎にエンジン回転

表9 ハイブリッド重量車評価の比較表

対応方法	PHEV, コールドスタート試験	試験精度	試験工数	設備
現行HILS	× コールドスタート時やPHEVのCDモード時に、燃費(排出ガス)評価が困難	× 過渡応答性に相違があり、SOCバランスが崩れた評価となる (HILS⇄ベンチ試験)	× Engマップを事前取得し、HILSでEng運転点を実時間で抽出→燃費・排ガスは別々に評価	○ ・現行HILSと保有エンジンベンチを使用 ・コールドスタートに対応したHILSの大幅改良が必要
拡張HILS	○ 実機エンジンの温度情報をHILSに取り込むため、実車のHEV制御則を活用したコールドスタート試験が可能	○ 実機エンジンを使用するため、実車のHEV制御則を活用した試験が可能で、試験精度も良い	◎ HILSを実行しながらエンジンテストを同時に行う (Engマップの事前取得が不要、燃費・排ガスが同時に計測でき、工数が大幅減)	○ 現行HILSと保有エンジンベンチを使用するため、新たな大型設備投資は不要 (インターフェースの信号調整が必要な程度)
システムベンチ法	○ ベンチ内に個々の実車のハイブリッドシステムを構築するため、実車相当のコールドスタート試験が可能	○ ベンチ内に個々の実車のハイブリッドシステムを構築するため、実車相当の試験精度が確保可能	△ 個々の実車のハイブリッドシステムによる試験に限られるため、重量車の車種に応じたシステム構築が必要がある	× 保有エンジンベンチを使用するが、個々の実車のハイブリッドシステムに対応すべくベンチ内を改造する必要がある
シャシダイナモ試験	◎ 実車を用いた試験を行うため、最も実走行に近い形で試験が可能	◎ 実車を用いた試験を行うため、最も実走行に近い試験精度が確保可能	× ・個々の実車の試験に限られる ・実車と設備の確保が必要	× 高額な設備投資が必要 (大型シャシダイナモメータ)

数とエンジントルクに変換し、エンジンベンチにてエンジン単体試験を行っている。つまり、エンジン単体試験時には車両（走行速度）の概念が無くなる。しかし、エネチャージ技術や排熱回収技術を搭載した従来ディーゼル重量車の評価には、車両走行時の運動エネルギー収支が必要となることから、車両（走行速度）の概念を導入した評価が必要である。

拡張HILS装置はハイブリッド重量車評価用に構築したが、この装置のM/G部分を使わずエンジンのみで動かすように車両モデルを組むことで、車両（走行速度）をベースとする従来ディーゼル重量車の評価も可能である。また、拡張HILSの採用により、従来ディーゼル重量車のコールドスタート試験も可能となる。

5. 2. 5 その他

ハイブリッド重量車の国際基準調和を行った排出ガス試験法が国連の下で議論されている。日本や欧州は日本が開発した「従来HILS試験法」を提案し、米国は実際のエンジンやハイブリッド用電動系機器から構成させるシステムをベンチ上に組上げて実験を行う「システムベンチ法（パワーパック法）」を提案し、いずれも採用されている。

ここで、表9に各種ハイブリッド評価装置とその評価項目の比較を示す。評価に必要な各項目に対してすべて良好な傾向を示す拡張HILSは、日本・欧州方式と米国方式の中間に位置することから、新たなハイブリッド重量車の試験ツールとして、非常に有効なツールになると考えられる。

以上に述べたように、ハイブリッド重量車の評価、特に燃費評価に拡張HILS装置を用いることは、多くの面で有用であることがわかった。しかし、ハイブリッド・パワートレイン台上試験システムは上述の通り、特殊な試験ツールである。拡張HILSを認証試験用ツールとして展開するには、従来HILS試験法で用いられている汎用性のあるHILS装置の利用が望ましい。そこで、従来HILS装置を改造し拡張HILSが構築できるか検討を行った。

6. 拡張HILS試験装置の構築

拡張HILSは、従来HILS装置の制御コンセプトはそのままに、エンジン部分をモデルから実機に変更した装置とした。拡張HILSの概要は図18に示した通りであり、そのコンセプトは従来HILS装置、従来エンジンベンチなどの従来品を最大限活用することにより、

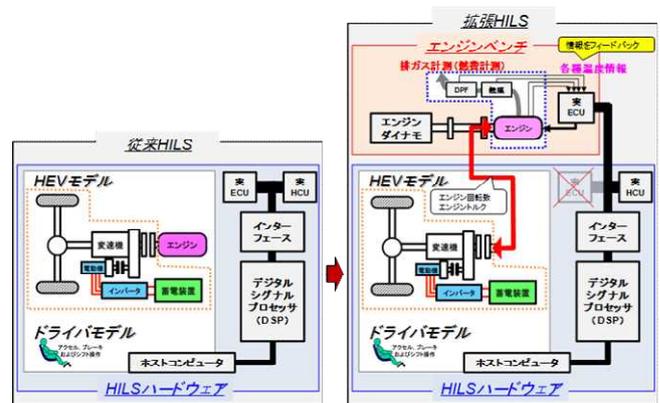


図18 拡張HILS装置の概略図

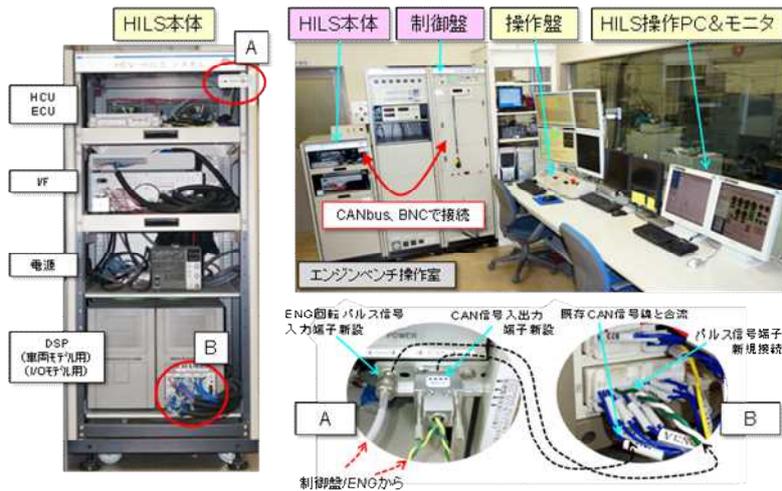


図 19 拡張 HILS 制御信号接続の概要図

これまでにない簡便かつ精度の高い評価装置および評価手法を構築することが可能である。

本装置の特徴は、下記の通りである。

- ・車両モデルから計算されるエンジントルク情報を、動力計目標トルクとして与える。
- ・ドライバモデルによるアクセル・ブレーキ信号を実 HCU に与え、HCU からのエンジン指令値を実機エンジンの ECU に与える。

6. 1 システム構成

本手法では、従来 HILS のハイブリッド車両モデル内にあるエンジンモデル部と実機エンジンとの情報を相互に入出力することで従来 HILS と同等の構成にすることが可能と考えシステムを構築した。HILS とエンジンダイナモメータ制御盤との間を、CAN 通信を用

いて各種信号を送受信させる。この他、フライホイールリングギアから取得した回転信号をパルス用のボードへ入力し、エンジン回転として認識させた。拡張 HILS 制御信号の接続概要図を図 19 に示す。

本手法で用いた HILS とエンジンベンチの仕様を表 10 に示す。本 HILS は、従来 HILS 試験法で使用されている装置である。エンジンベンチは、トラックメーカーで用いられている一般的な仕様である。実機エンジンは日野自動車製 N04C を用いた。これらに係る改造箇所は、制御盤側は CAN 通信用ボードの増設と次項で説明する HILS から入力されるエンジン負荷トルクを目標トルクとしてエンジンダイナモメータ（以下、ダイナモ）を制御する簡易なプログラム修正、HILS 側はパルス入力用配線の接続やモデルの簡易変更である。

表 10 拡張 HILS の各種仕様

名称		仕様			
HILS	DSP 1 (I/O モデル)	CPU 周波数	GHz	2	
		ADIO ボード	枚	2	
		CORE ボード(パルス用)	枚	2	
		CAN ボード(2ch)	枚	1	
		シェアードメモリボード	枚	1	
	DSP 2 (車両モデル)	CPU 周波数	GHz	2	
		シェアードメモリボード	枚	1	
	DPS 用 PC OS		Linux PRO		
	操作 PC ソフトウェア		CRAMAS、Simulink		
	車両モデル		JARI モデルの T/M 仕様と ENG 仕様を変更 (Hino Dutro 相当)		
通信仕様 (①: HILS⇒制御盤、 ②: 制御盤/ENG⇒HILS)		CAN 2.0A/B、J1939、 10msec 周期 ① エンジン負荷トルク、① アクセル開度、 ② エンジン回転数			
擬似負荷ボード		小野測器製			
ダイナモシステム	ダイナモメータ	明電舎製			
	制御盤	小野測器製 FAMS-8000			
	実機エンジン	Hino N04C 4.0L ディーゼルエンジン			

6. 2 モデル構成

HILS モデルの構成概要を図 20 に示す。図では、エンジンをコントロールするドライバモデルからのアクセル信号と、エンジン回転が車速へ変換される信号の流れを示す。なお、本 HILS では、ドライバモデル

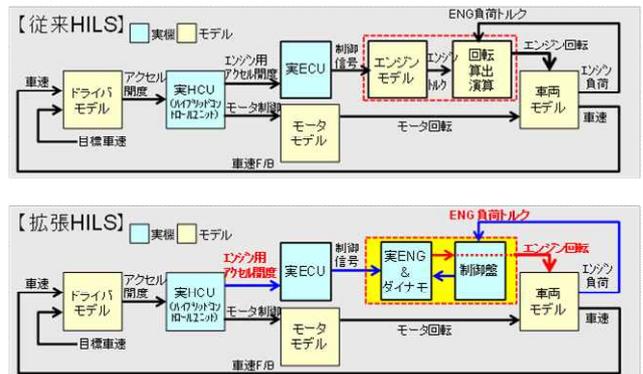


図 20 HILS モデルの構成概要

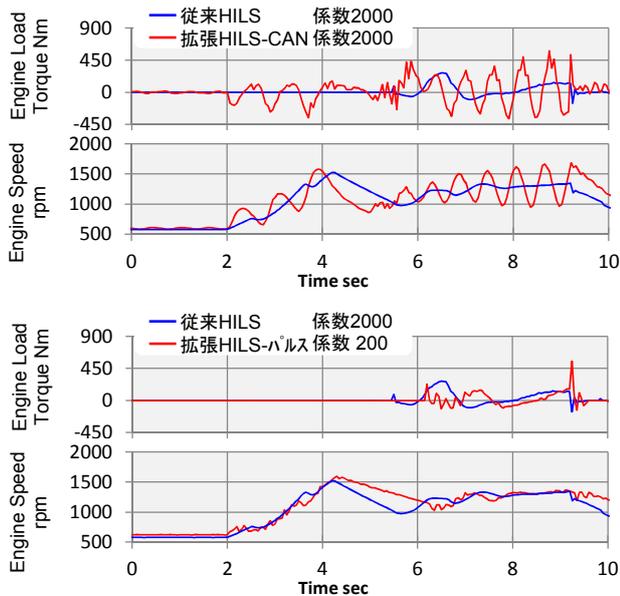


図 21 エンジン回転信号形式の影響

に JE05 モードの目標車速が与えられ、この車速が追従するようにアクセル操作が行われ仮想ハイブリッド車両が走行する仕様である。

仮想車両の走行に必要なエンジン回転は、従来 HILS ではエンジンモデル（トルクマップ）から得られるエンジントルクと、車両側からエンジンに掛るエンジン負荷トルクを用いて算出される。拡張 HILS におけるエンジン回転は、図中の破線で囲まれたエンジン回転を算出するモデル部を実機で再現する。具体的には、ダイナモにおいて実エンジントルクとダイナモに発生させたエンジン負荷トルクを用い、これらのトルク差で生じる変位がエンジン回転となる。演算に使用する実際のエンジントルクの制御は、モデル内のアクセル開度情報を ECU に入力して行い、エンジン負荷トルクの制御は、モデル内で算出された値を制御盤へ入力してダイナモを制御する。

以上に述べたように、拡張 HILS の構築に当たり、従来 HILS モデルの構成要素をそのまま利用することが可能であることがわかった。

6. 3 拡張 HILS の動作検証

拡張 HILS を実際に作動させて、モデル内算出データの推移および実機エンジンの挙動を評価した。

6. 3. 1 エンジン回転信号評価

本装置は HILS モデルへ入力するエンジン回転信号に、CAN 信号とパルス信号の両方が使用できる。本装置に最も有効な信号を選定するため、エンジン回転信

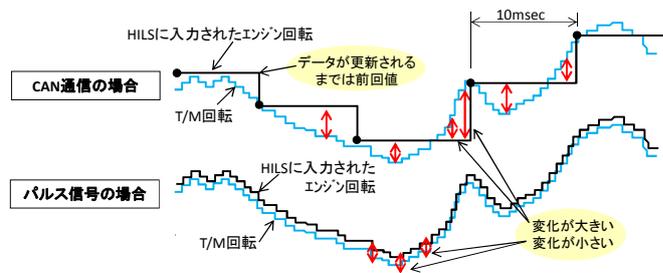


図 22 CAN 信号とパルス信号による演算違い

号の応答速度や周期が HILS モデルの演算に対してどのように影響を及ぼすかを検討し、最終的にパルス信号方式が有効であると判断し、本装置に用いる方式として選定した。以下に検討結果を示す。運転条件には、図 21 に示す JE05 モード開始直後の加速部分を用いた。

CAN 信号を用いた場合、ダイナモを制御するエンジン負荷トルクの値がハンチングを起し、この影響でエンジン回転も不安定となり運転の継続ができなかった。これに対しパルス入力の場合、エンジン負荷トルクおよびエンジン回転挙動を共に従来 HILS とほぼ同等に再現することができた。

CAN 信号を用いた場合にエンジン負荷トルクがハンチングした理由は、CAN を用いた場合のエンジン回転信号の遅れが 10msec 前後あり、データ更新周期については 10msec 間隔のため、エンジン負荷トルク演算に用いる同回転とトランスミッション (T/M) 回転に時間的ずれが生じ、さらに、図 22 の解説図のように比較参照値の差が実際の挙動に対して拡大や正負が反転することが影響していたと考えられる。

パルス信号による今回の結果は、エンジン負荷トルク演算部に含まれるねじり剛性係数(図 21 の「係数」)を変化させている。この係数は車両モデルのクラッチ部に影響する定数で、本設定は負荷変動が増大した瞬間に若干のクラッチ滑りを発生させ、ハンチング挙動を緩衝させる役割を持たせている。一方、CAN 通信の場合は、ねじり剛性係数を変更させてもハンチング挙動を抑えることができなかった。

6. 3. 2 JE05 モード評価

前項の検証で得られた設定を用いて、JE05 モード走行の検証を行った。装置条件として、従来 HILS、拡張 HILS ホットスタートおよび拡張 HILS コールドスタートの 3 条件を用いた。仮想ハイブリッドトラックの仕様は、エンジン最大出力 110kW、エンジン最大トルク

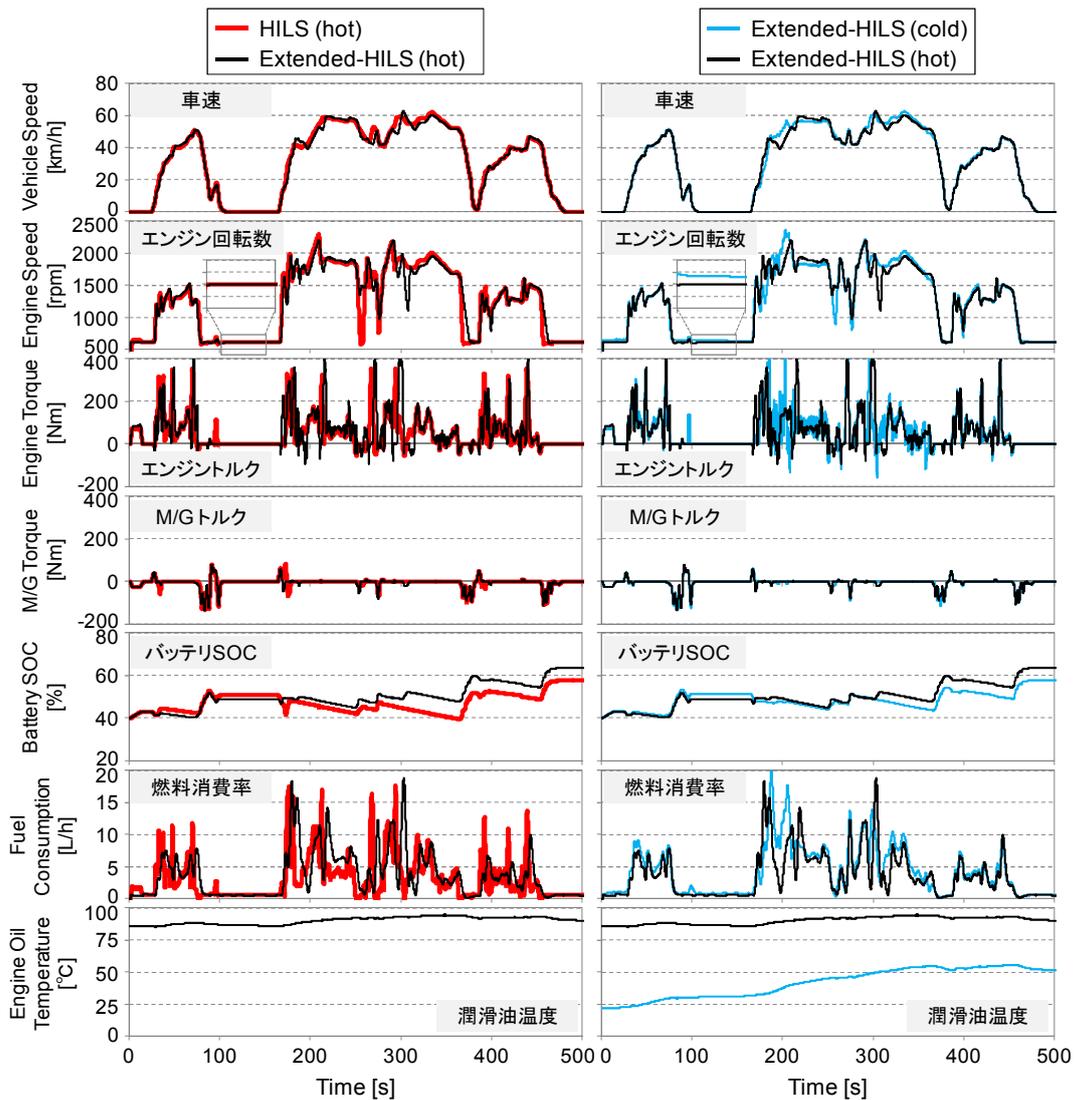


図 23 JE05 モード走行時の各種運転条件の比較（モード中の 0 秒から 500 秒の区間を抜粋）

392Nm、モータ最大出力 55kw、モータ最大トルク 130Nm、バッテリー（キャパシタ）容量 33.5F で、車両重量 4,370kg（半積）の平行方式のハイブリッドトラックである。HCU は、メーカーオリジナルの装置を使用している。

図 23 左側に示す比較データは、従来 HILS および拡張 HILS ホットスタートの条件で、モード開始後 3 山目までの 500 秒間を示す。一方、図右側には拡張 HILS ホットスタートおよびコールドスタートを同様に示す。走行開始時の SOC は 40% に設定した。これは、従来 HILS 走行時の Δ SOC がほぼゼロの条件である。

図 23 左側のホットスタート条件を比較すると、エンジン回転数についてはほぼ同等の挙動を示している。エンジントルクや M/G トルク、バッテリー SOC に着目すると、同等の設定条件にも関わらず、両者に差異

を生じることが確認できる。また、車速については、200 秒以降の 2 山目の加速時において追従性が低下している。これらは、エンジンのモデルと実機による応答性の違いによるものと考えられる。モデルの場合、アクセル開度に応じて瞬時にトルクが出力される。これに対し実機エンジンの場合、過給機の回転上昇遅れなどの影響によりドライバーの要求通りに瞬時にエンジントルクが発生できず、応答性が遅れることが要因として挙げられる。

次に、図右側の拡張 HILS によるホットおよびコールドスタート条件を比較する。コールドスタート時に実機エンジンを使用することで、走行開始後からエンジンの潤滑油温度が徐々に増加している。エンジンアイドリング運転に着目すると、コールドスタート条件は走行開始後からエンジン回転数がホットスタート

表 11 各種運転条件と燃費の比較 (JE05 モード)

	JE05 mode	燃費
従来HILS	Hot start	9.09 km/L
拡張HILS	Hot start	8.58 km/L
拡張HILS	Cold start	7.77 km/L

(Δ SOC=0に換算)

条件よりも高回転側で稼働することが確認でき、エンジンが十分に暖機されるまでその傾向が続く。燃料消費率を確認すると、コールドスタート条件はホットスタート条件よりも多くの燃料を消費することが分かった。

最後に、各種運転条件の違いによる JE05 モードを走行した際の燃費 (Δ SOC=0) を比較した結果を表 11 に示す。上述した要因により拡張 HILS から求めた燃費は、従来 HILS に比べ約 5.6%悪化することを確認した。さらに、コールドスタートの燃費も拡張 HILS を用いることで評価可能となることが分かった。

以上に述べたように、拡張 HILS は、従来 HILS に比べ実車同等の運転挙動が再現でき、エンジン冷機時の運転挙動も適切に捉えることが可能であることがわかった。したがって、拡張 HILS は、今後の認証試験用ツールとして有効な試験装置の一つとして挙げられる。

7. まとめ

現行ハイブリッド重量車試験法 (HILS 試験法) の課題を調査し、今後の認証試験用ツールとして活用が見込める新たな HILS 試験装置について検討を行った。以下にまとめる。

(1) 従来ハイブリッド重量車試験法の課題

今後新たに求められるハイブリッド重量車の認証試験を、従来 HILS 装置を用いて実施する際、以下の三項目が主な課題に挙がることが分かった。

- ・コールドスタート時の燃費評価が困難
- ・エンジンの過渡応答特性の影響により、バッテリーエネルギーバランスおよび燃費の精度が低下
- ・プラグインハイブリッド車両等の新たなハイブリッド重量車に柔軟に対応することが困難

(2) ハイブリッド重量車の新たな評価手法の検討

実車両の試作を伴わず、試験室内で実車相当のハイブリッド車両が走行している状態を再現できるハイ

ブリッド・パワートレイン台上試験装置を構築し、上記 (1) の課題が解決できる手法を検討した。その結果、従来 HILS 装置のエンジンモデル部分を実機エンジンに置き換えることが有効であることを確認した。

(3) 拡張 HILS 試験装置の構築に向けた検討

汎用性のある従来 HILS 装置のエンジン部分を、現状のモデル(マップ)から実機へと拡張した「拡張 HILS 装置」が、簡易な改造で構築できることが分かった。

(4) 拡張 HILS の有効性

ハイブリッド重量車の評価に拡張 HILS を用いることで、以下のメリットが得られるものと考えられる。

- ・コールドスタート時の燃費評価が可能
- ・過渡応答特性に再現性がある
- ・評価時間 (認証試験時間) の短縮化が可能
- ・プラグインハイブリッド車両等の新たなハイブリッド重量車に柔軟に対応することが可能
- ・従来ディーゼル車や新技術を導入した従来ディーゼル車に対しても評価可能
- ・国際基準調和を図った試験ツールの一つとして活用が見込める

8. 謝辞

ハイブリッド・パワートレイン台上試験システムの構築においては、株式会社明電舎および株式会社小野測器に協力を頂いた。ここに謝意を表する。

9. 参考文献

- (1) 日本自動車部品協会, <<http://www.japa.gr.jp/data/index.html>>
- (2) 環境省：中央環境審議会大気環境部会 自動車排出ガス専門委員会 資料 (2010)
- (3) 黒川陽弘, 森田賢治：HILS 認証試験法の剛体系 HEV モデルの開発, 自動車研究, Vol. 33, No. 7, pp. 25-28 (2011)
- (4) 国土交通省, <http://www.mlit.go.jp/jidosha/sesaku/environment/osen/2_osenj.htm>