

④ ハイブリッド車の排出ガス・燃費評価のための試験システム開発

環境研究領域	※奥井 伸宜	新国 哲也
自動車安全研究領域	河合 英直	
株式会社 明電舎	鈴木 雅彦	高畑 洋
株式会社 小野測器	前唄 康祐	

1. はじめに

二酸化炭素 (CO₂) 排出量削減のため、車両運転時の減速エネルギー等、回生可能な運動エネルギーを活用するハイブリッド車 (HEV) や電気自動車 (EV) を含む次世代自動車の研究開発が積極的に行われており⁽¹⁾、今後これらの車両の普及が見込まれる。現在の排出ガス・燃費試験法に用いられている走行モードは市場での代表的な走行状況を反映したものであるが、従来の内燃機関車両における再現性に着目して定められているため、新しく開発された積極的に回生エネルギーを活用する車両での走行を正しく反映できているか検討する必要がある。さらに、今後、開発や導入が予想される新しい方式で回生エネルギーを活用する次世代自動車⁽²⁾に対しても対応可能な認証試験法の検討を進め、提案していく必要がある。

交通安全環境研究所では、HEV の走行状態が反映可能な走行モード、次世代 HEV を含む HEV 試験法、試験条件を検討するため、「ハイブリッド・パワートレイン台上試験システム」を考案し開発を行った。本報において、開発した台上試験システムを紹介する。

2. 台上試験システムの概要

HEV パワートレインのシステム効率の適正な把握や評価は、現状、実際の車両システムを試作して行うか、計算機上でやっている⁽³⁾。表 1 に示すように、実車を用いた場合、エンジンや発電機 (M/G) の暖機を考慮した排出ガス評価を可能にするが、種々の HEV システムの

Table.1 Merit or demerit of each test method

	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)

評価を行う際には対応車両の試作が必要となり、費用と実験工数が増大する。一方、モデル車両 (シミュレーション) の場合、実車に比べ利点、欠点の関係が逆転する。そこで、実際の車両を試作することなく、上記の2つの評価方法の利点を取り入れ、車両システムや制御手法について多角的に評価・検討が行える「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、HEV 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統合制御することで、実車を試作することなく試験室内で種々の HEV システムの再現を可能とした。

ここで、実車両のハイブリッドシステムにおいては、車両メーカーから内容が開示されることのないハイブリッド制御ユニット (HCU) 内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、HEV 試験法の検討を多角的に行うことができる。

3. 台上試験システムの構成

3.1 台上試験システムの構成および制御フロー

エンジンと M/G を動力源とする HEV システムの一例として、パラレル式 HEV を再現した試験システム構成の概略図を図 1 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 (DY1)、M/G と M/G 用ダイナモメータ (DY2)、インバータ、直流電源装置、実車のハイブリッド制御ユニット (HCU) と同じ働きをし、HEV システム全体の HEV 制御を行う PC1、HEV 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 PC2 から構成される。

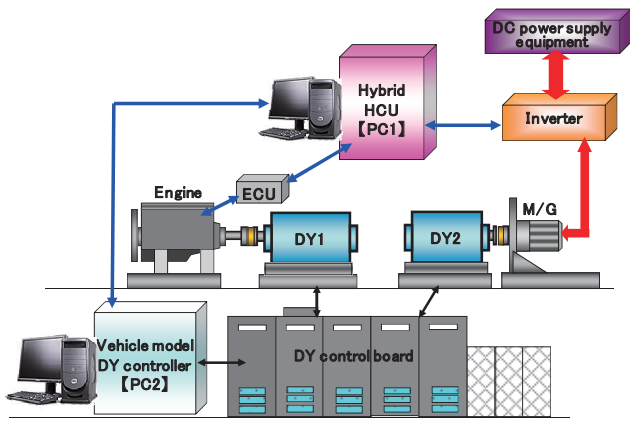


Fig.1 Component of HEV power-train system

本装置の制御フローを、図2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。HEV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。インバータは、PC1からの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HEVが駆動される。

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、

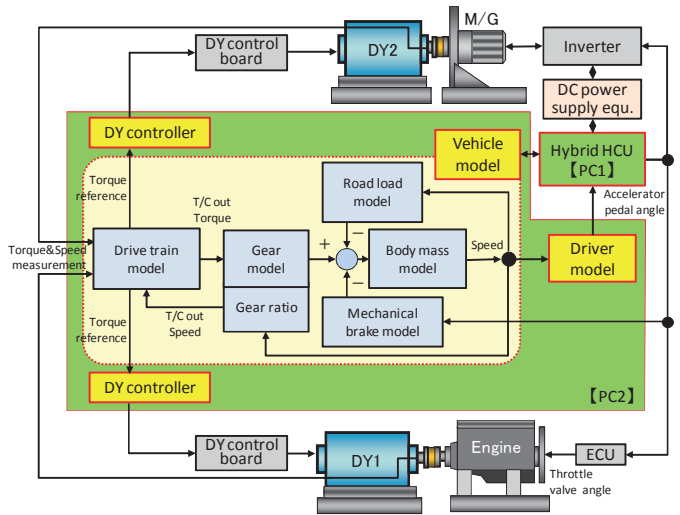


Fig.2 Model flow of HEV power-train system

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

特定走行モード(車速指令)を実際の運転手の操作(アクセル、ブレーキ)を模擬して運転させる場合、ドライバモデルは、車速の目標値と計測された車速との差分が零になるようなアクセルとブレーキ操作指令を出力する。

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にて回生協調比率を算出し、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。

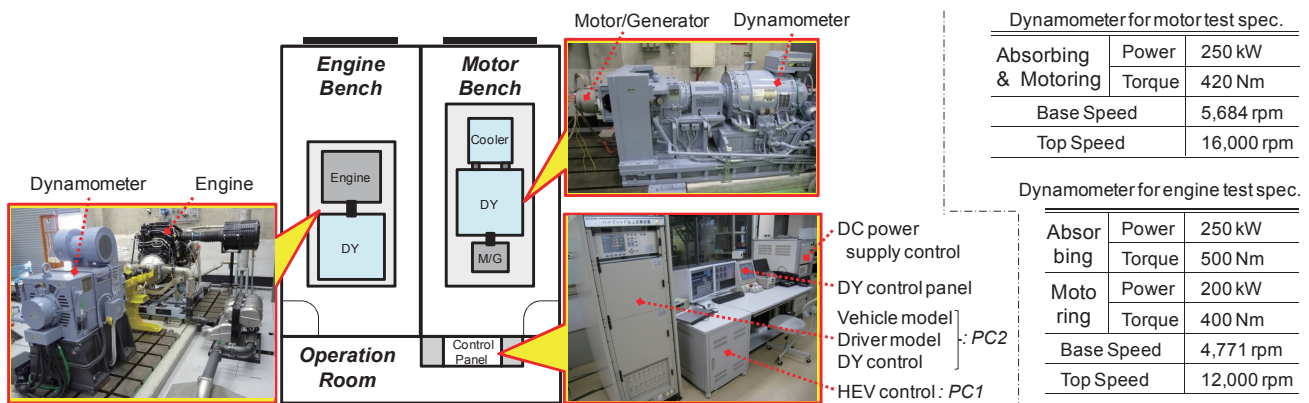


Fig.3 HEV power-train system bench (Parallel HEV)

4. 台上試験システムの構築

現状、構築している台上試験システムは、図3に示すパラレル式ハイブリッド台上試験システムである。

4.1 エンジンベンチ <図3左側の部屋>

実機エンジンは、図3右下表に示すスペックを有する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、単体慣性が 0.6kgm^2 以下と小さい。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、I/C 温調器、吸入空気温調器（ダイキン工業製）、燃料流量計（小野測器製 FM-2500A）など設置している。

4.2 モータベンチ <図3右側の部屋>

実機 M/G は、図3右上表に示すスペックを有する 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 $16,000\text{rpm}$ 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。

4.3 制御室 <図3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、通常のシャン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え機能を有した手動操作部

と接続されており、エンジン単体および M/G 単体、エンジンと M/G を組み合わせた運転の操作設定ができる。

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、実機のバッテリーの挙動を模擬したバッテリーモデルを活用する。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。

4. 台上試験システムでの検証

一般的に HEV の燃費改善効果は、加減速頻度の多い走行で得られやすい。そこで、本システムで都市内走行に多用される小型トラックをモデルとし、パワートレイン構成の違いによる動作検証を行った。検証用モデルは、表2に示す6段ギアを備えた車両総重量 (GVW) 5.87ton 車とし、本システム稼働時には半積載状態 (GVW 4.37ton) で走行させた。HEV パワートレインはパラレル式とした。エンジンは、4L 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（日野自動車

Table.2 Vehicle specification

Vehicle Mass	2,870 kg	
Max. Load Mass	3,000 kg	
Height × Width	2265 × 2180 mm	
Tire (radius)	377.5 mm	
Gear Ratio	1st	5.979
	2nd	3.434
	3rd	1.862
	4th	1.297
	5th	1.000
	6th	0.774
Final Ratio	4.625	

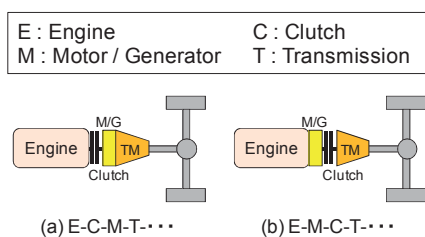


Fig.4 HEV power-train system layout

製、型式：N04C-TA) で、最高出力 110kW/3000rpm、最高トルク 392Nm/1600rpm を発生する。M/G は、永久磁石式同期電動機（澤藤電機製）で、最高出力 118kW/3300rpm、最高トルク 340Nm/0-3300rpm を発生する。駆動用バッテリーは、同クラスの市販 HEV トラックが搭載する 1.9kWh (5.5Ah) を想定した。

本 HEV モデルにおける M/G の発生トルクは、車両走行に必要なトルクに対し任意の一定比率で設定した。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外部給電による充電は行っていない。シフトパターンは、国土交通省の「ディーゼル重量車用車速変換プログラム⁽⁴⁾」から作成したパターンを使用した。

本システム検証時は、M/G は実機、それ以外の要素はモデル化で対応した。エンジンのモデル化にあたり、事前に実機のエンジンにてトルクおよび燃料消費量マップ情報等を取得し、本システムに反映させている。

現在市販される小型 HEV トラック（パラレル式）の HEV パワートレイン構成の多くは、図 4 (a) に示す「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」である。この構成を本システムの車両モデルで再現し、JE05 モードを走行させた。ΔSOC=0 条件を得るためにエンジンと M/G のトルク比率は、シフト 1-4 段で 85% : 15%、シフト 5-6 段で 100% : 0% に設定した。図 5 中段 720 秒以降のように、減速中のアクセルオフ時に発生するエンジン駆動損失はクラッチ制御によりカットされ、より多くの車両エネルギーを M/G で回生していることが分かる。結果、エンジン車に比べ 7.0% の燃費改善効果が得られた。一方、文献(1) の HEV トラックの前モデルは、前述の HEV パワートレイン構成のクラッチと M/G の配置が逆の図 4 (b) であった。その構成を本システムの車両モデルで再現した。ΔSOC=0 条件を得るためにエンジンと M/G のトルク比率は、シフト 1-4 段で 88% : 12%、シフト 5-6 段で 100% : 0% となる。図 5 最下段に示すように、減速時にエンジン駆動損失が発生し、M/G による車両エネルギーの回収が少

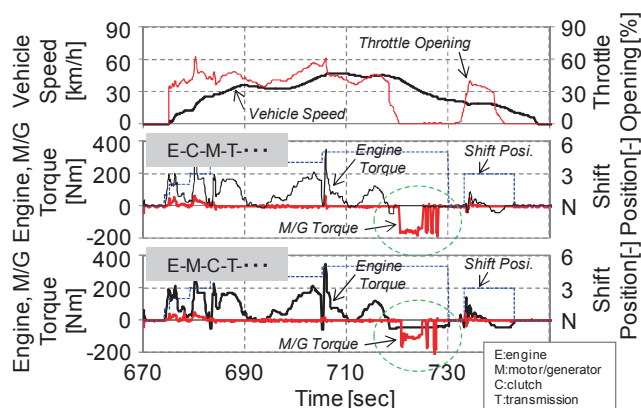


Fig.5 Comparison of HEV power-train system layout

なくなる。燃費改善効果は、エンジン車に比べ 5.7% に留まることが分かり、結果として、最新モデルのパワートレイン構成の優位性が検証できた。

以上、実車を作成することなく各種 HEV パワートレイン構成を容易に再現し各種検討を行い、定量的な評価を可能とした。

5. まとめ

HEV の走行状態が反映可能な走行モード、次世代 HEV を含む HEV 試験法、試験条件を検討するための有効なツールとなる「ハイブリッド・パワートレイン台上試験システム」を開発し、そのシステム検証を紹介した。本試験システムでは、多種多様な HEV システムの要素の一部をモデル化することにより、試験室内に HEV パワートレインシステムを再現することを可能とした。車両メーカー以外の試験機関においても、実際の HEV を試作することなく様々な性能要件、制御条件を取り入れた走行が評価でき、HEV 認証試験法策定に向け多角的な検討が行える。

今後、排出ガス計測も考慮したハイブリッド・パワートレイン台上試験システムの整備を進める。

参考文献

- (1) 加部賢志、澤山昭、荒木智彦、横田明彦、大槻進：小型トラック用ハイブリッドシステムの開発、自動車技術会 2011 秋季学術講演会、20115746、p.1-4 (2011)
- (2) 奥井伸宜、新国哲也、河合英直：ハイブリッド重量車に対する蓄電エネルギー活用方法に関する研究、自動車技術会 2012 春季学術講演会、2012515、p.15-20 (2012)
- (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>