

講演 2. 次世代電動技術を搭載したハイブリッド重量車を高精度に評価できる将来 HILS 試験法の検討

自動車研究部

奥井 伸宜

1. はじめに

二酸化炭素排出量削減のため、ハイブリッド自動車や電気自動車を含む次世代自動車が、さらに増加すると見込まれる。一般に、ハイブリッド自動車は、車両減速時等に発生する回生可能な運動エネルギーをバッテリー等に蓄え、次の加速時にモータで走行トルクをアシストする技術を採用している。この他にも、回生したエネルギーには多様な活用方法があり、例えば、①電動過給機の駆動に使い、エンジンのトルクをアシストする、②触媒加熱ヒータで使い、排出ガス後処理装置の浄化機能向上を図る等の次世代技術が検討されている。これら次世代技術搭載ハイブリッド自動車に対する試験法を新たに検討する必要がある。

現在、ハイブリッドトラックやバス等のハイブリッド重量車の燃費・排出ガス試験法¹⁾には、HILS (Hardware-In-the-Loop-Simulator : 以下「従来 HILS」という。) が用いられる。従来 HILS 試験法は、机上計算で評価を行うため、上述した次世代電動技術である①または②等を搭載したハイブリッド重量車

を高精度に評価することができない。例えば、①では、実機エンジンの過渡応答が指令通りになるとは限らずトルクの発生が実機と計算で異なる点、②では、過去の履歴の影響を受ける温度等の熱エネルギーを計算で扱うことが困難な点が課題として挙げられる。

そこで、当研究所では、次世代電動技術を搭載したハイブリッド重量車を高精度に評価できる新たな HILS (以下「拡張 HILS」という。) 試験手法を検討している。実際に、拡張 HILS 装置を構築し、次世代電動技術である①または②を搭載したハイブリッド重量車を評価した。本講演で、以上の内容を紹介する。

2. 従来 HILS

2. 1. 試験装置の紹介

従来 HILS 装置の構成を図 1 に示す。操作 PC 上で実行される HILS プログラムは、ハイブリッド車両モデル、ドライバモデル、道路状況等から構成され、実車両のエンジン制御装置 (ECU)、ハイブリッド制御装置 (HCU) と制御信号を送受信することで、机上で仮想車両が走行できる。

2. 2. 試験手法の紹介

ハイブリッド重量車の排出ガス・燃費試験法に上述した HILS 装置を用いる方法は、2007 年 3 月、国土交通省より通達として出された技術指針²⁾に取り入れられ、運用されている。

まず、HILS 試験法の基となった従来重量車の排出ガス・燃費試験法を紹介する。従来重量車の燃費試験は、図 2 に示す「シミュレーション法」を適用し走行燃費を算出している。初めに、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全負荷トルク、摩擦トルク、燃費マップを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、

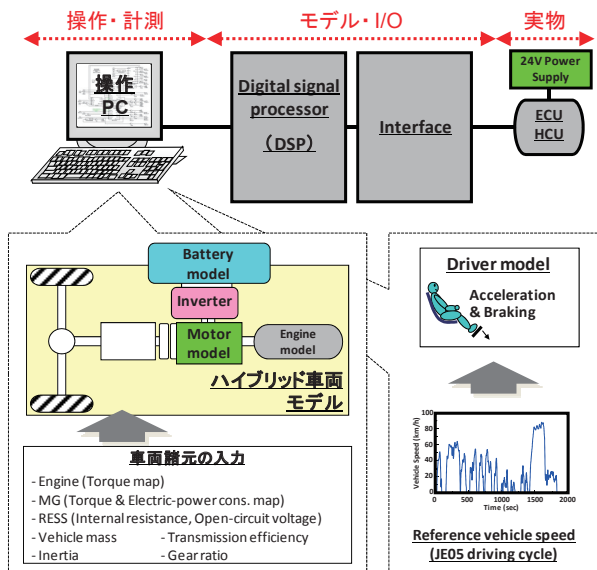
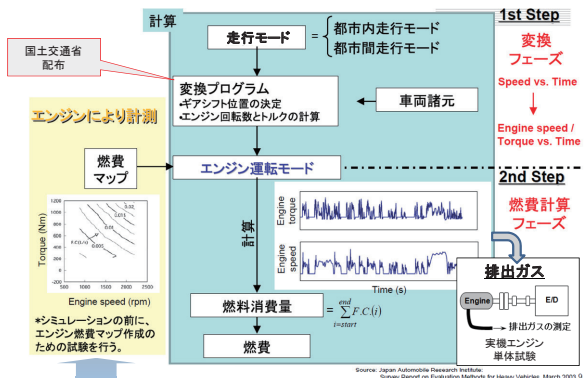


図 1 従来 HILS 装置の構成



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2 重量車の排出ガス・燃費試験方法

日本の重量車用燃費・排出ガス試験モードであるJE05モード等の車速パターンを、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」に入力し、計算機上でエンジンの回転数及びトルクを算出し、これと実測した燃費マップを対応させ燃費を求める。排出ガス評価は、上記プログラムで算出したエンジン回転数及びトルクを設定したエンジンを台上で運転し、その時の排出ガスを測定することにより行われる。

一方、ハイブリッド車両は、エンジンに加え駆動用モータ (M/G)、バッテリー及び 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。それらを実験するにあたっては、図3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、電気エネルギーの収支を加味したエンジン運転点 (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、上述したシミュレーション法と同様である。

2. 3. 試験手法の課題

従来 HILS 試験法に対する課題を以下に記す。

- a) コールドスタート時の燃費評価が困難
- b) 過渡運転時にエンジントルク応答遅れが発生
- c) 熱エネルギーを活用する車両の評価が困難

上記各項目の詳細を確認する。a)については、エンジン及び M/G を含め、すべてモデル (マップ) で置き換える従来 HILS 試験法の燃費に関しては、エンジン暖機状態の燃費マップを用いて算出しており、コールドスタート時の状態の違いを反映できない。一例を図4に示す。ここでは、M/G の影響を取り除くためハイブリッドシステムを有さないディーゼル重量車

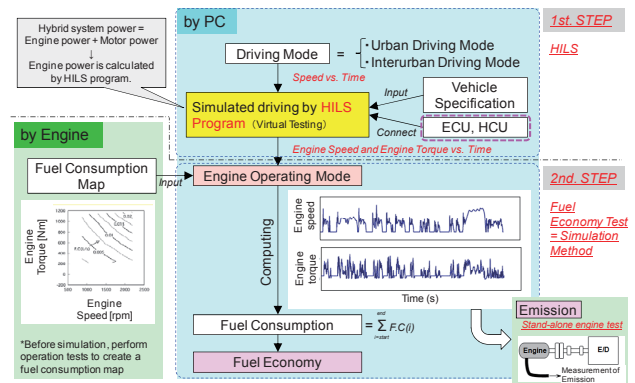


図3 ハイブリッド重量車の排出ガス・燃費試験方法

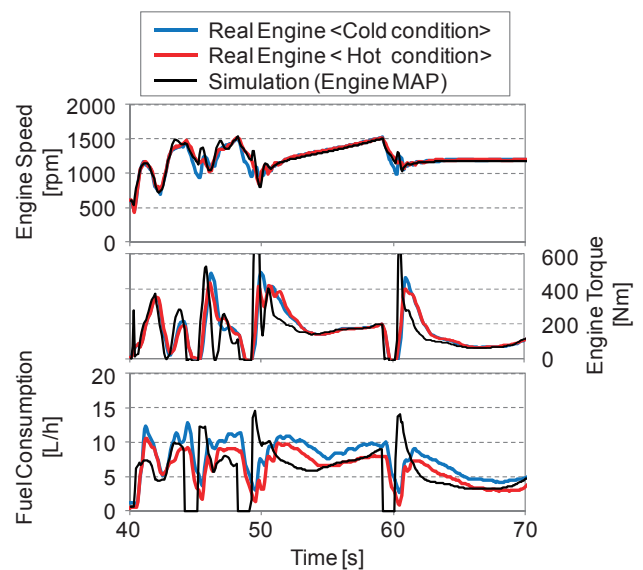


図4 JE05モード走行時のエンジン性能及び燃費 (ディーゼル重量車)

(試験車重量: 5,870kg) を想定し、JE05モード加速走行時 (40s~70s) におけるエンジン性能及び燃費を時系列で示す。燃費に着目すると、黒線で示すモデル運転時は、青線で示すコールドスタート条件における実エンジン運転時の傾向と大きく異なり、実エンジンの特性を従来 HILS で再現することは困難である。これは、次世代自動車として注目されるプラグイン方式のハイブリッド重量車の評価にも影響を与える。つまり、電気走行の一部でエンジンが始動することもあり、ハイブリッド走行に移行してからエンジンが稼働することもあり、コールドスタート状態が一定でなくなるからである。

b)については、一般に、実機エンジン、特にターボチャージャー付エンジンでは、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。図4を用いて説明すると、変速後の急激なトルク上昇が必要な場面において、黒

線で示すエンジンモデルでは指令通りの急峻なトルク上昇が可能であるが、赤線で示す実エンジンではエンジントルクの応答遅れが発生しており、このような状態を従来 HILS に基づく計算で再現することは困難である。特に、ハイブリッド重量車においては、走行に必要なトルクの内、エンジントルク遅れ分を M/G が補うことが考えられるため、上記のようなエンジンの過渡応答遅れが生じた場合、走行中のバッテリー収支が変化し、HCU の制御因子である充電状態 (SOC) を変化させることになる。つまり、従来 HILS に基づく計算では、実機エンジンとは異なる運転状態における燃費を評価することになる可能性がある。

最後に c) については、例えば、車両減速時にエネルギーを駆動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 (例えば、触媒加熱ヒータ) に使用する技術や排熱回収技術が挙げられる。従来 HILS 試験法では回生エネルギーを後処理装置等の排出ガス低減デバイスに使用することは考慮されておらず、触媒温度等を含めた実際のエンジン制御を反映させることができない。

3. 拡張 HILS

3. 1. 試験装置の構築³⁾

従来 HILS 装置及び従来エンジンベンチ等を最大限活用することを前提とし、次世代電動技術の評価に対応可能な装置を検討した。図 5 に示す通り、従来 HILS 装置の制御コンセプトは維持しつつ、エンジン部分をモデルから実機に変更した装置であり、これを「拡張 HILS」と呼ぶ。本装置の特徴は次の通りである。①車両モデルから計算される要求エンジントルク

情報を動力計目標トルクとして与える。②HCU からエンジン指令値を実機エンジンの ECU に与える。

当研究所保有 HILS 装置とエンジンベンチを用い、拡張 HILS を構築した。構築風景を図 6 に示す。これらに係る改造箇所は、制御盤側は通信ボードの増設と 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。

次世代電動技術搭載ハイブリッド重量車に対する

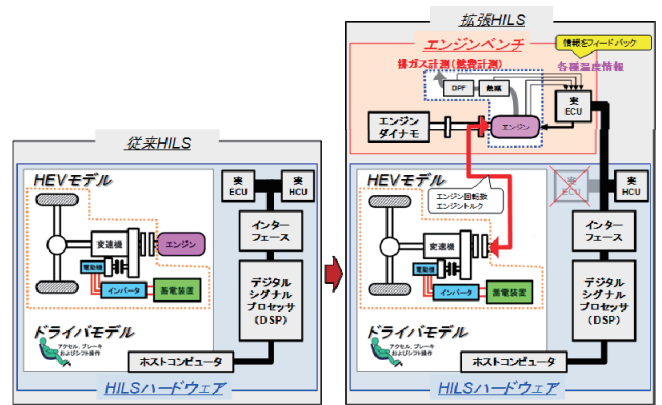


図 5 従来 HILS 及び拡張 HILS の装置概略図

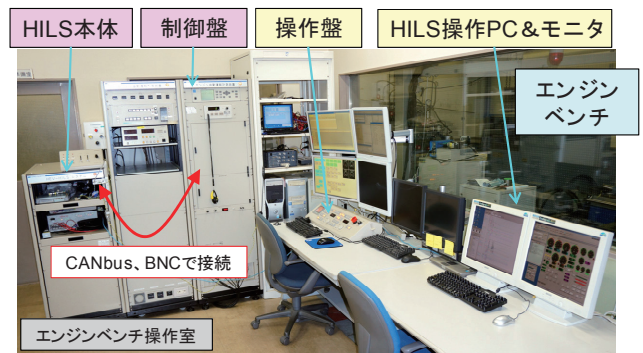


図 6 拡張 HILS 装置の構築風景

表 1 次世代電動技術搭載ハイブリッド重量車に対する各種試験法の比較

対応方法	コールドスタート (PHEVも含む)	将来HEV	試験工数	設備
従来HILS	× (bad) 物理モデルを導入し対応する策もあるが困難	× (bad) 熱エネルギーの扱いが困難	× (bad) 評価困難	× (bad) 熱変化に対応させた物理モデルが必要(大幅改造)
拡張HILS	○ (good) 実機エンジンの温度情報をHILSに取り込むため、実車制御則を反映した試験が可能	○ (good) 実機エンジン+排出ガス後処理装置を使用するため、実車制御則を反映した試験が可能	○ (good) ・HILSを実行しながら実機エンジンを稼働させるため、効率良く車両評価が可能 ・実機エンジンを使用するため、エンジン単体の事前評価(燃費マップ取得)が不要	○ (good) 従来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)
システムベンチ法	○ (good) 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、実車相当での試験が可能	○ (good) 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、実車相当の試験が可能	× (bad) 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	× (bad) 評価対象車種に応じたベンチ整備(ダイナモメータの容量変更や個数変更等)が必要
シャシダイナモ試験	○ (good) 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	○ (good) 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	× (bad) 個々の実車の試験に限られる	× (bad) 高額な設備投資が必要(大型シャシダイナモメータ)

各種試験法を表1に整理した。その中のシステムベンチ法は、実際のエンジンやハイブリッド用電動系機器から構成するシステムをベンチ上に組上げて実験を行う手法であり、大掛かりな試験設備が必要となる。表1より、計算と実機を組み合わせた拡張 HILS は、次世代技術を含むハイブリッド重量車を簡便かつ高精度に評価可能とする装置であることがわかる。

3. 2. 評価事例

3. 2. 1. コールドスタート評価

拡張 HILS を用いたハイブリッド重量車（試験車重量：4,370kg）による JE05 モードを走行した場合のホット及びコールドスタート試験を比較し図7に示す。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条件よりも高回転側で稼働し、エンジンが十分に暖機されるまでその傾向が続く。これらはコールドスタート時の一般的な現象であり、拡張 HILS 手法を適用することでコールドスタートの現象を適切に再現できたといえる。

3. 2. 2. 過渡運転時のエンジントルク応答遅れ⁴⁾

図8に示す電動過給機（eSC、最大出力：3kW/65,000rpm）を用い大幅なエンジンダウンサイジングを行ったハイブリッドシステムを、拡張 HILS を用い評価した。負荷の変動がある場合に着目し紹介する。

図9に評価対象とした電動過給機搭載ハイブリッド重量車（車両総重量 25,000kg）のシステム構成図

を示す。給気バイパス路付電動過給機とターボチャージャの二段過給構造から成るディーゼルエンジン（排気量 4.7L＝中型トラック相当）、M/G（定格力 112kW）と駆動用バッテリーを備えたパラレルハイブリッドシステムで構成される。ハイブリッド制御方法は、車両走行トルクや SOC に合わせ任意に変化し、回生エネルギー取得機会が多い街中走行時は、M/G を使って積極的にアシストし、回生エネルギー取得機会が少ない高速走行時は、M/G を積極的に発電に使う制御である。その際エンジンは、HCU の指令により M/G が発電及び駆動を行うことで、図10に示すようにエネルギー効率の優れた3本の線上（a：エンジン最適動作線、b：エンジン全負荷トルク、c：エンジン+eSC全負荷トルク）で稼働した。

電動過給機搭載ハイブリッド重量車の従来 HILS の計算パートから算出されるハイブリッドシステム運転状況と、拡張 HILS の実機エンジンを使用して都市間モードを走行させた際のハイブリッドシステム運転状況を比較し、図11に示す。図上段から車速及び道路勾配、矩形波にて表すエンジン稼働指令値（エネルギー効率の優れた上記3本の線を HCU が選択）、エンジントルク、M/G トルク及び燃費を示す。初めにエンジントルクに着目する。赤線で示す HILS 計算より求めたトルクは、エンジン稼働指令値が出力された瞬間の過渡応答運転においても、瞬時に目標値と一致する。しかし、実機エンジンを使った場合、エンジン回転数や負荷の変動が大きい場合には、ターボチャージャの応答遅れにより吸気圧力が瞬時に増大しないことから、トルクの上昇遅れが確認できる。特に、

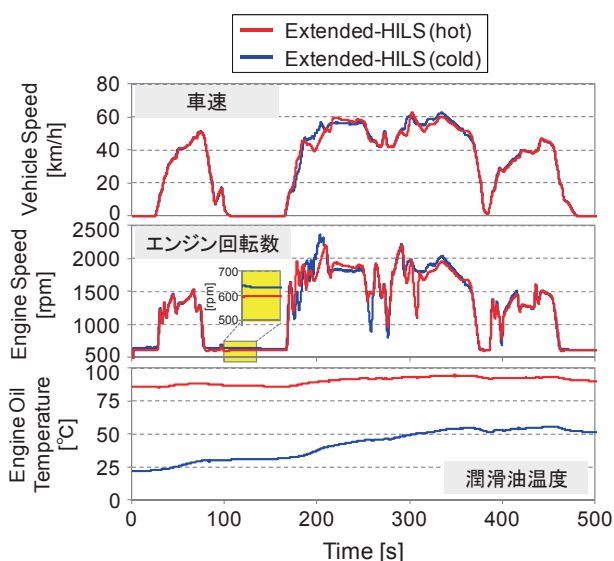


図7 コールドスタート評価（JE05モード）

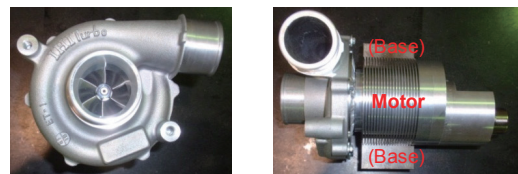


図8 電動過給機（eSC：electric SuperCharger）

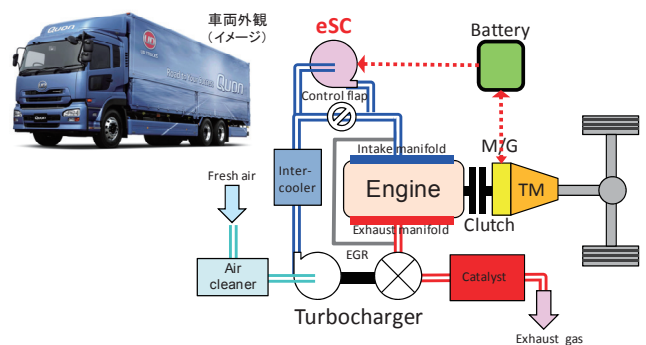


図9 電動過給機搭載ハイブリッドシステム

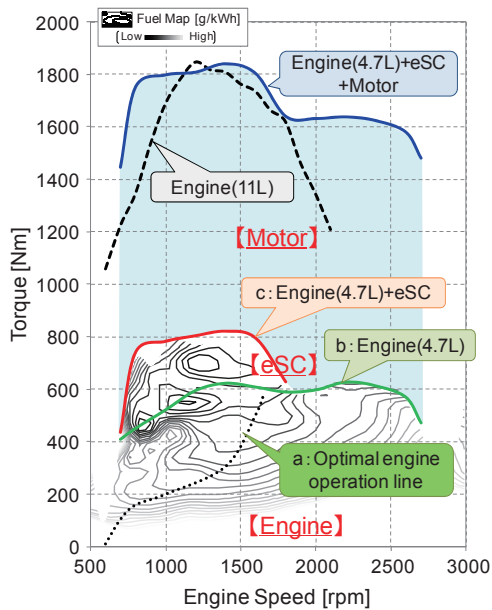


図 10 電動過給機搭載ハイブリッドシステムのシステムトルク曲線

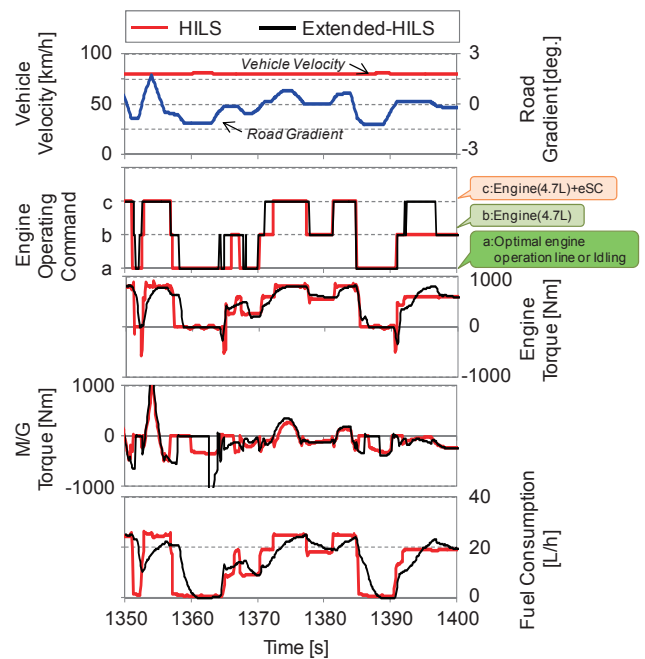


図 11 従来 HILS と拡張 HILS の走行性能の比較 (都市間モード)

1390 秒以降に着目すると、HILS 計算から算出されたエンジン稼働指令値は「b: エンジン全負荷トルク」曲線上の運転を指令しているが、拡張 HILS においてはエンジントルクの上昇遅れが影響し、「b: エンジン全負荷トルク」値よりも大きい「c: エンジン+eSC 全負荷トルク」曲線上で運転している。これらの過渡応答によるトルク遅れは、燃費に対しても差異を生じさせる。当該車両 (全積載) が都市間走行モードを走行した際の拡張 HILS の燃費は、従来 HILS に比べ、約 3.7% の悪化を示し、それが電動過給機搭載ハイブリッドシステムの実際の運転により実際に近いものと考えられる。以上のことから、電動過給機を用いるようなハイブリッド重量車の高精度評価においても、拡張 HILS 手法を適用することが必要である。

3. 2. 3. 熱エネルギーを活用する車両の評価⁵⁾

触媒加熱ヒータで排出ガス後処理装置の浄化機能を向上させる際、その温度情報が必要となる。拡張 HILS を用いた結果の一例を紹介する。

本実験には、図 12 に示す市販ディーゼル乗用車に搭載される触媒加熱ヒータ (EHC) を使用した。EHC の加熱部はコイルヒータで構成され、加熱したい触媒の前に装着される。ヒータの温度調整制御は、EHC 上流及び下流等に取り付けた熱電対の温度情報を用いて行われる。ここでは、電力消費を抑えつつ NOx を効果的に低減させるため、選択還元触媒 (SCR) 前の排出ガス温度が 180°C (本 SCR が NOx 浄化に必要な最低温度水準) 以下であればヒータを加熱 (通電あ

り) し、180°C 以上であれば通電を停止 (通電なし) させる制御を設定した。

初めに、本 EHC をハイブリッドシステムを有さないディーゼル重量車 (排気量 4L、試験車重量 4,360kg) に適用し、JE05 モードをコールドスタートで走行した。結果を図 13 に示す。この時の触媒レイアウトは、排気上流側より「酸化触媒 (DOC) - 黒煙除去フィルタ (DPF) - 尿素添加用インジェクタ - EHC - SCR - DOC」とした。図中段に示す排出ガス温度履歴は、EHC 下流及び SCR 上流の温度を示す。ヒータへの通電ありは、通電なしに比べ常に温度が高く推移している。その際、図中段に示す投入電力の履歴 (Electrical Power) に着目すると、SCR 触媒温度が 180°C となるようヒータへの通電が制御され、例えば、図中緑色部

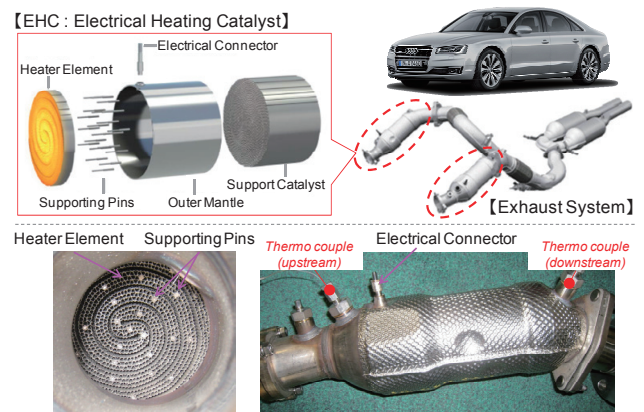


図 12 触媒加熱ヒータ (EHC: Electrical Heating Catalyst)

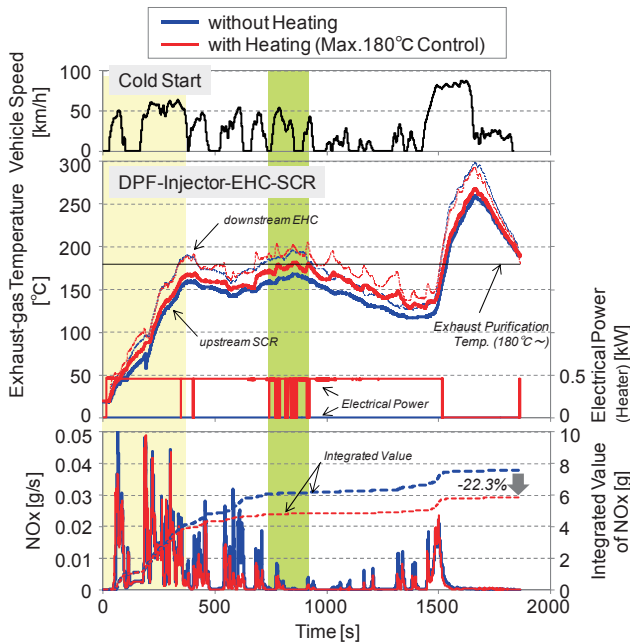


図 13 触媒加熱ヒータ搭載ディーゼル重量車の各種性能 (JE05 モード)

で通電あり/なしを繰り返している。次に、図下段に NOx 排出率及びその積算値の履歴を示す。走行開始から 400 秒程度まで (図中の黄色部) の排出ガス温度は、両条件とも SCR の触媒活性化温度に到達するまで時間を要することから、NOx 排出率は同等の傾向であった。しかし、400 秒以降において、ヒータへの通電ありの NOx 排出率は、通電なしに比べほぼ半減し、その後も同様に推移した。モード走行後の積算 NOx 排出量は、ヒータへ通電した効果で約 22.3% 低減できることが分かった。

次に、図 13 と同じ諸元でハイブリッド化した EHC 搭載ハイブリッド重量車における燃費及び NOx 排出量を図 14 に示す。図中の値は、モード走行開始と終了の充電量収支 (Δ SOC) ゼロを示す。EHC を使用したことで、燃費は通電なしの場合に比べ、コールドスタートで約 1.9%、ホットスタートで約 2.8% 悪化した。これは回生エネルギーの一部を EHC による触媒昇温に使用したためである。NOx 排出率は、コールドスタートで約 20.8%、ホットスタートにおいても約 9.1% の改善を示した。以上の通り、次世代電動技術である EHC の評価実験を行った。このように、従来 HILS 試験法で評価ができない次世代電動技術に拡張 HILS 手法を適用することの有効性が示された。

4. まとめ

従来 HILS 試験法では対応が難しい次世代電動技

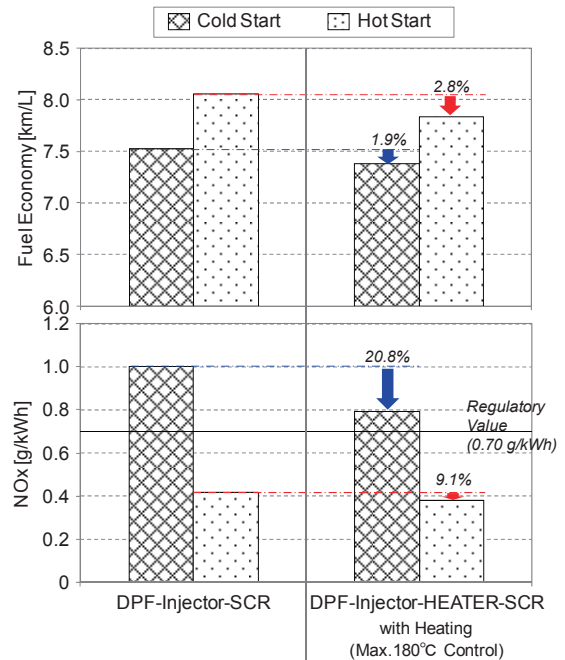


図 14 触媒加熱ヒータ搭載ハイブリッド重量車の各種性能 (JE05 モード、 Δ SOC=0)

術を搭載したハイブリッド重量車を高精度に評価できる将来 HILS (拡張 HILS) 試験手法を検討し、実際に装置を構築した。また、その装置の有用性を、実例を用いて紹介した。

今後は、拡張 HILS を新たな試験手法として提案するため、拡張 HILS の精度検証 (例えば実車との性能比較) を行う予定である。

謝 辞

本研究は、国土交通省の「次世代大型車の新技術を活用した車両開発等に関する事業」の一環として推進した内容を含んでいる。ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 森田賢治ほか：HILS を用いた重量 HEV 燃費・排ガス試験法 (第 3 報) -HEV モデル標準化と試験手順確立-、自動車技術会論文集, Vol.39, No.4, p.131-136 (2008)
- 2) 国土交通省：技術指針「ハードウェアインザループシミュレータシステムを用いた電気ハイブリッド重量車の燃料消費率及び排出ガスの試験法について」、国自環第 281 号
- 3) 小林雅行, 奥井伸宜：実エンジンを用いたハイブリッド重量車モデルの評価を可能とする Extended-HILS の検討, 自動車技術会学術講演会前刷集, 20156280, p.1455-1460 (2015)
- 4) 奥井伸宜, 小林雅行：電動過給機搭載大型ハイブリッドトラックの燃費改善の一検討, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.4, p.901-906 (2016)
- 5) 奥井伸宜, 山口恭平：触媒昇温装置搭載 xEV 重量車の環境性能評価 (第 1 報), 自動車技術会学術講演会前刷集 (2016 年 10 月 21 日に発表予定)