

次世代大型ハイブリッド自動車の研究開発

環境研究領域

成澤 和幸 室岡 絢司

交通システム研究領域

水間 毅 林田 守正 緒方 正剛 大野 寛之

1. まえがき

国土交通省は平成 14 年度から 3 ヶ年計画で大型ディーゼル車の代替となる次世代型低公害車の開発プロジェクトを開始し、交通安全環境研究所が中核的研究機関となり、産・学・官の協力のもとにこれを推進している。

本事業では、14 年度に、新しい動力システムに必要な要素技術の研究開発を行い、15 年度では、次世代型の動力システムをとりまとめ、16 年度に車両の開発を行い東京モーターショーに展示する。また、これらの開発の過程を通して、新技術に対する技術評価手法や、部品等の標準化を進める。

本報では、大型ハイブリッド自動車について、主として 15 年度以降に得られた成果について報告する。

2. プロジェクトで開発する車両

次世代の大型低公害車にふさわしい提案を 14 年度当初に公募した。DME 自動車、CNG 自動車、スーパークリーンエンジンとならんで、公募の結果採択されたハイブリッド自動車は

シリーズハイブリッドバス

パラレルハイブリッドトラック

の 2 種である。いずれも GVW 10 トン以上、あるいは乗車定員 70 人以上の大型車両である。

これらは、既存のディーゼルエンジンに改良を加えたうえで電気動力とのハイブリッド化による超低公害化、車両としての高効率化を目指すものである。

シリーズハイブリッドバスの開発目標を表 1 に示す。シリーズハイブリッド方式のメリットは、内燃機関を発電専用として用いるので、エンジンの運転領域を最大効率点近傍に限定できるところにある。本開発ではこのメリットを最大限に生かし、限定したエンジン運転領域での超低排出ガス化を図る。また、電動機能部品を新たに

開発することにより、新長期規制値の 1/4 の排出ガスと現行ディーゼル車比で 2 倍以上の燃費向上を目指す。

パラレルハイブリッドトラックの開発目標を表 2 に示す。新技術の導入により、パラレルハイブリッド方式の高効率化を図るとともに、非接触誘導給電方式を採用して電動走行の比率を向上させ、新長期規制値の 1/10 の排出ガスと現行ディーゼル車比で 2 倍以上の燃費向上を目指す。

表 1 シリーズハイブリッドバスの目標

72 人乗りの都市バス (GVW 16 t)	
排出ガス: NOx	0.5 g/kWh 以下
PM	0.007 g/kWh 以下
燃費:	2 倍以上
技術的特徴	
● 新燃焼方式と、ワンポイント定常運転により、超低排出ガスをねらった発電専用のディーゼルエンジンの採用	
● 補機駆動を電動とし、エンジン負荷を軽減して排出ガスを低減	
● 連続再生式 DPF に最適化したエンジン制御	
主要な新規開発要素技術	
● 予混合圧縮着火方式をベースとした新燃焼方式エンジン	
● 高性能リチウムイオン電池と、EBS (電子ブレーキ制御) とを組み合わせた高精度協調ブレーキシステム	
● 全電動補機駆動システム	

表 2 パラレルハイブリッドトラックの目標

GVW 13 t クラスの大型トラック	
排出ガス: NOx	0.2 g/kWh 以下
PM	0.003 g/kWh 以下
燃費:	2 倍以上
技術的特徴	
● 排出ガス、燃費を向上させるために、電気駆動の割合を増やし、ディーゼルエンジンを小型化	
● 高効率エネルギー回生機能や、誘導給電システムによる非接触バッテリー充電方式により、電気エネルギー利用率を向上	
主要な新規開発要素技術	
● 高効率永久磁石型同期電動機	
● 電子制御式トランスミッション	
● 誘導給電システム (IPT)	

3. 研究開発内容

3.1. シリーズハイブリッドバス

本プロジェクトで開発するシリーズハイブリッド動力の構成図を図1に示す。本方式の狙いは、ディーゼルエンジンを発電専用とし、新燃焼方式を用いたワンポイント定常運転をおこなう、補機駆動を電動とし、エンジン負荷を軽減して排出ガスを低減する、連続再生式DPF、リチウムイオン電池等の要素技術の開発により、超低排出ガスと走行燃費ディーゼル車比2倍以上を達成することにある。

そこで以下の開発が進められた。

については、単気筒エンジンによる基礎試験で、予混合圧縮着火燃焼に近い新燃焼システムが成立する条件を明確化した。図2にこの燃焼のコンセプトを示す。

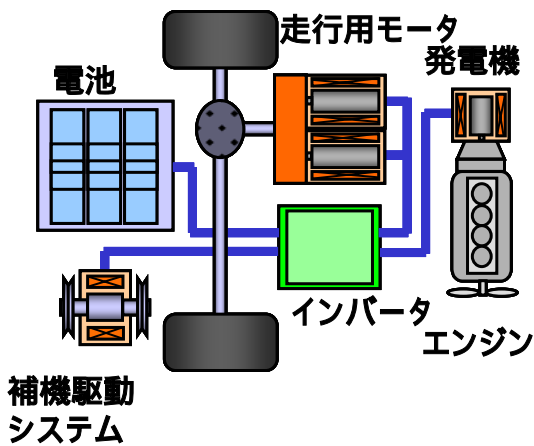


図1 シリーズハイブリッドシステムの構成

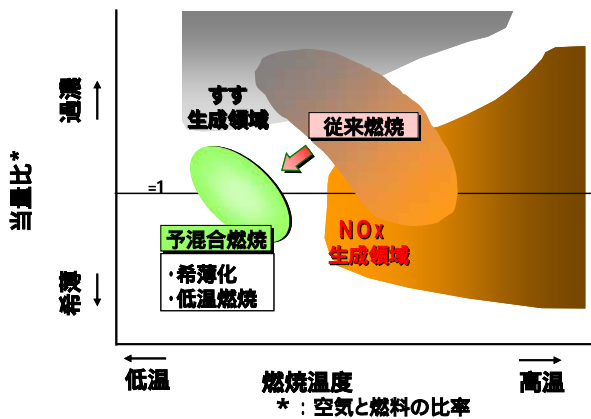


図2 低排出ガス燃焼のコンセプト

大量のEGRにより燃焼温度を低下させ、早期の燃料噴射により過濃混合気を解消して、すすとNOxの両方が生成しない燃焼を実現した。EGRについては図3に示すように、排気を過給機のタービン下流からコンプレッサ上流に還流するLow Pressure Loop EGRシステムを採用することにより、大量の還流が可能になって燃焼温度を下げ、NOxを大幅に低減できた。限定されたワンポイントではあるが、NOx:0.6g/kWh以下、スモーク濃度-2%(Bosch)以下の成立を確認した。その後、さらに過給機の改良、圧縮比の最適化により性能向上を図った。

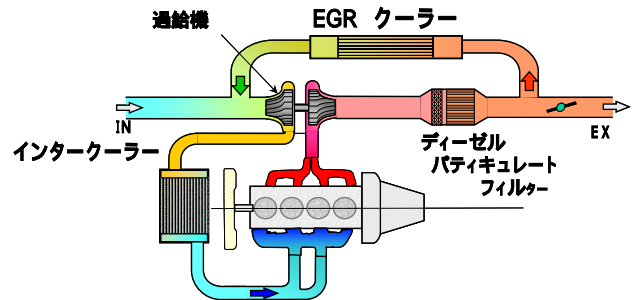


図3 Low Pressure Loop EGRの概要

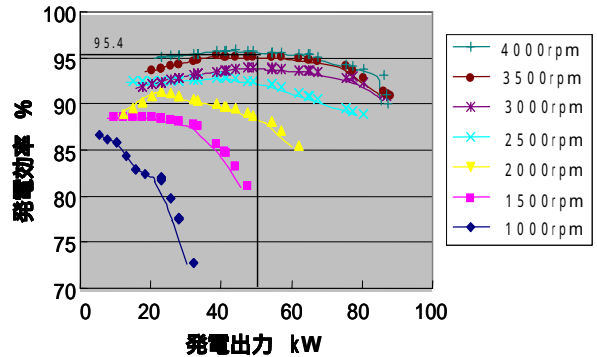


図4 発電機の効率

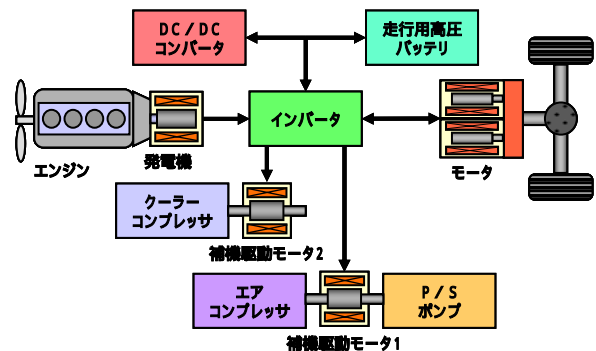


図5 電動補機システムの構成

なおエンジンと組み合わせ発電を行う高速発電機については増速ギヤと組み合わせることにより高効率化を図り、図4に示すように1600rpm/50kWで総合発電効率93.5%を得た。

では、図5に示すように、パワーステアリング油圧ポンプ、エアコンプレッサ、冷房コンプレッサ等、全ての補機の電気駆動システムを採用することにより、エンジン負荷とその変動を低減するとともに、各補機を高効率制御した。またDC/DCコンバータの採用により従来損失の多かった24V系充電効率を改善した。性能予測計算では、現行ハイブリッドバスに対し空調非作動時8%、空調作動時11~17%の市街地走行時燃費向上効果を確認した。

ハイブリッドシステムの要素技術については、述べたように、エンジン出口の排出ガスを大幅に低減できたが、さらにPM低減のために、排気温度、排気酸素濃度とも低い条件で作動する酸化触媒を前段に持つ連続再生式DPFを開発した。

また車載するリチウムイオン電池について、形状変更による集電構造の改良、及び負極活物質の高容量化を行い、放電容量：30Ah(25℃)、出力密度：2000W/kg、を達成した。

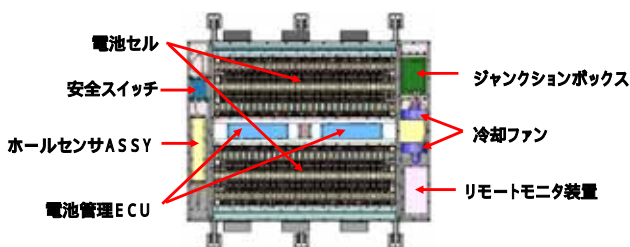


図6 車載用リチウムイオンバッテリー

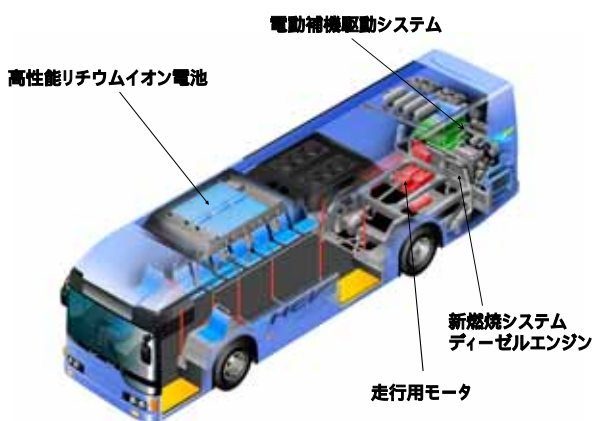


図7 試作したバスの概観

また、角形高性能リチウムイオン電池用バッテリーモジュールの設計及び試作を実施した。その概要を図6に示す。

さらに試作バスの計画設計を行い、新燃焼システムディーゼルエンジンのエンジンマウント、及び吸気系、排気系、冷却系の車両後部への配置を検討した。また、駆動系機器、補機類、制御系機器、走行用蓄電池、高圧機器等の車両機器配置について検討し、図7に示すような概観の試作車両を製作した。

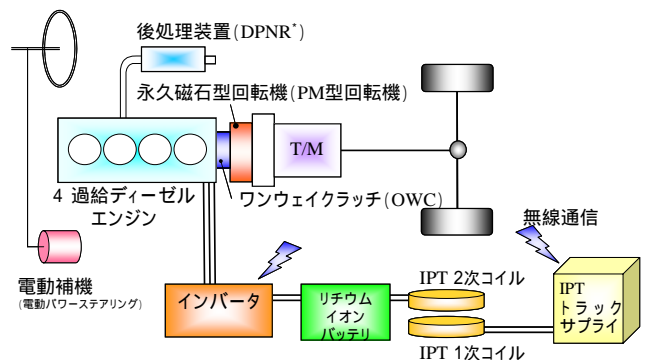
3.2. パラレルハイブリッドトラック

パラレルハイブリッド方式では内燃機関と電気動力とともに車両の駆動に用いる。本開発の狙いは、排出ガス、燃費を向上させるために電気駆動の割合を増やし、ディーゼルエンジンを小型化するとともに、高効率エネルギー回生機能や、誘導給電システムによる非接触バッテリー充電方式により、電気エネルギー利用効率を向上させることにある。図8に、本プロジェクトで開発するパラレルハイブリッドシステムの構成を示す。

そこで以下の開発が進められた。

ハイブリッドシステムの開発では、エンジンを可能な限り小型化するために、圧縮温度低減のため低圧縮比化、混合気形成促進のため小径多噴口化、軽負荷のEGR率増大のためターボの小型化、吸気温度低減のためEGRクーラの大型化などを実施したエンジンを開発した。

駆動用モータ(回転機)/発電機については、マグネットトルク重視型とリラクタンストルク重視型を比較した結果、ほぼ全域で目標値を達成でき、かつ高効率が得られるマグネットトルク重視型を選定した。その性能比較を図9に示す。



*DPNR: Diesel Particulate-NOx Reduction system

図8 パラレルハイブリッドシステム構成

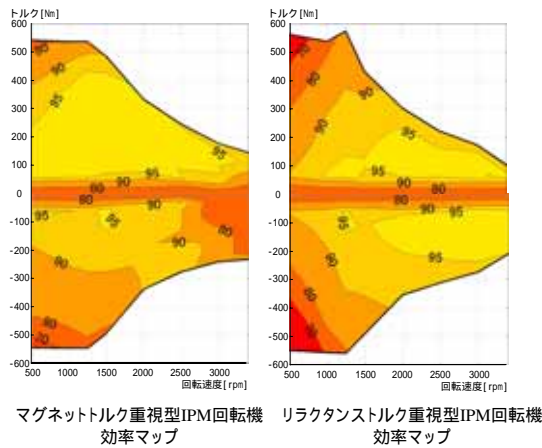


図9 試作したモータ（回転機）の性能比較

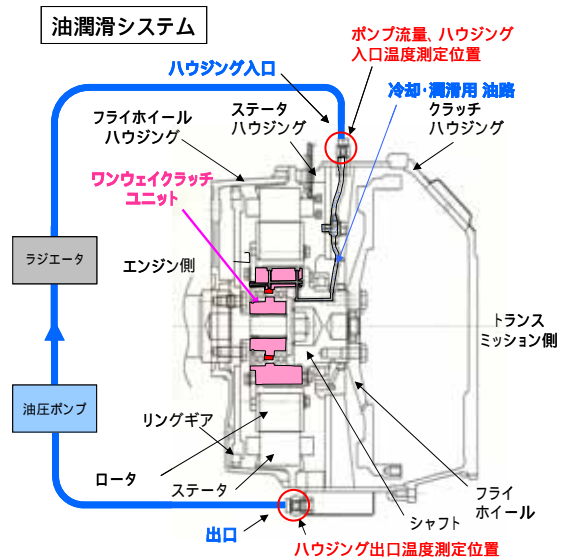


図11 ワンウェイクラッチの概要

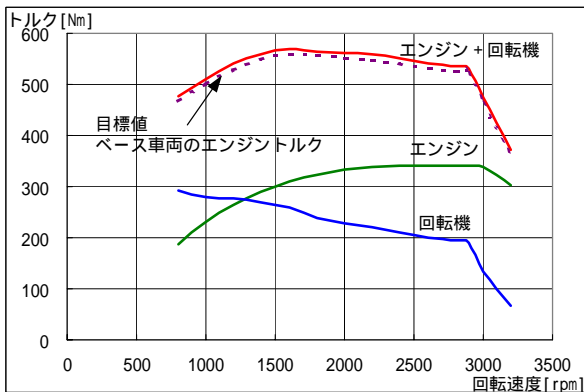


図10 総合トルク特性

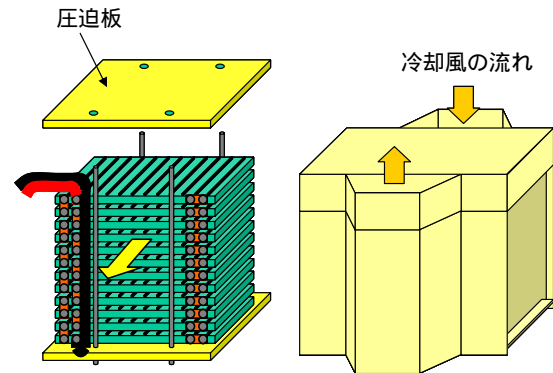


図12 バッテリーパックの概観

またエンジンと駆動用モータ（回転機）/発電機を組み合わせた場合のトルク特性を図10に示すがほぼ目標のトルク特性を得た。駆動用モータ（回転機）/発電機とエンジンとの間に挿入し減速時に切り離すためのワンウェイクラッチ機構についても油潤滑システムや冷却システムなどの検討を加えさらに改良した。外観図を図11に示す。

補機の電動化はパラレルハイブリッドトラックにおいても重要な課題である。そこで14年度に試作した電動パワーステアリング機構について実車評価を行った結果、低速時の操舵角大において温度上昇がある等問題点が見つかり、温度上昇を抑制するために、インバータで速度制御可能な交流モータを採用する、などシステムの見直しを行った。

バッテリーについては、幾つかの候補について基礎的な性能試験を積み重ねた結果から、最適なバッテリーのパックの構造とセルバランス回路について検討し、実車搭載のための設計を行った。バッテリーパックの概観を図12に示す。

また、新しい要素技術として、停車中に外部からバッテリーに電力を非接触で給電する非接触外部給電装置（以下IPT）システムについて実車搭載のための試験を実施した。試験結果を図13に示す。10AhのリチウムイオンバッテリーにIPTの最大能力で充電すると8分（SOC20% 80%）で充電可能であること、1次コイル、2次コイルのずれ量がX、Y軸で50mm以内であれば実用域であること、がわかった。またIPT動作中にBluetoothに

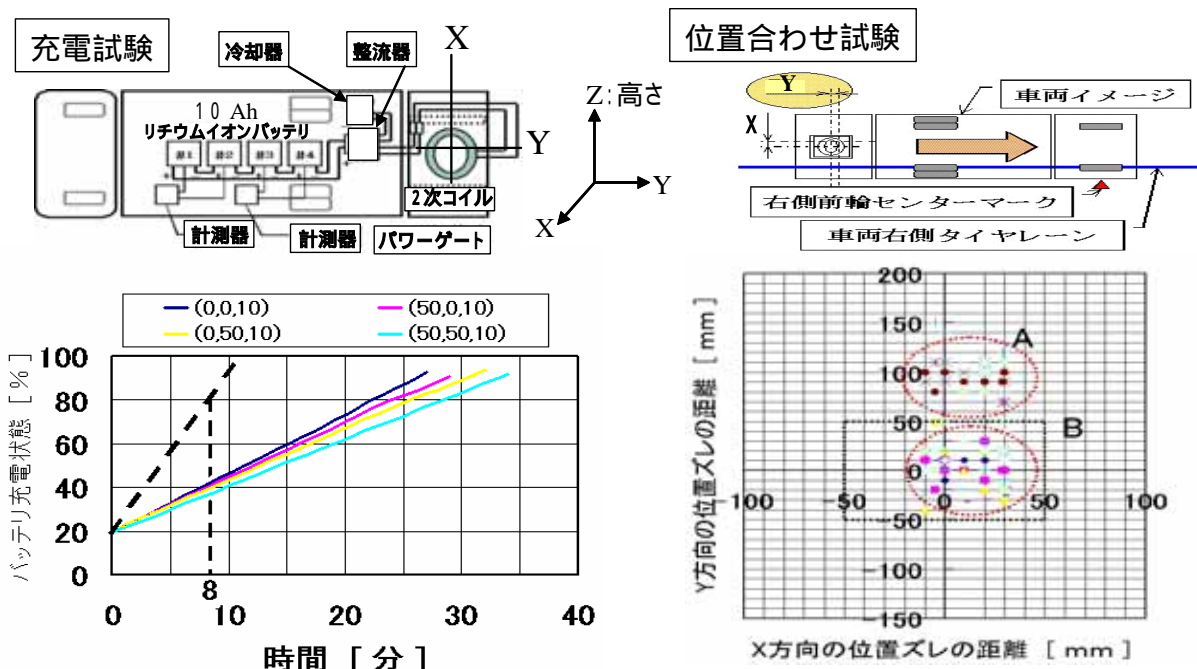


図 13 IPTの試験結果

よる通信を実施し問題ないことを確認した。

シミュレーションによる NOx および燃料消費効率 (CO2 による予測) の推計を行い、IPT を用いた場合に、これを使用することで目標値を満足するシミュレーション結果が得られているが、今後実車による評価が必要である。

3.3. 評価手法の検討

交通安全環境研究所においては、シリーズ、パラレル等各ハイブリッド方式に共通する技術的課題として、ハイブリッド自動車用モータシステムの高効率制御の検討、大型車用ハイブリッドシステム各要素技術の評価方法、ハイブリッドシステム台上シミュレーション手法の検討、について研究を進めた。

については、モータの性能、車両の重量、走行抵抗を設定し、最適な電動機と制御方式をシミュレーションにより検討した。その概要を図 14 に示す。駆動時の効率においては同期機が優れているが、回生効率は誘導機の方が優れており、走行方法、走行路の特性により最適な制御方法が存在することが確認された。10・15 モードでは、連続モータ電流により熱定格が決定されるものの、ピークの駆動電流、回生電流と連続電流との比が大きく、通常の定格設定では、制御容量が大きくなり、重量的な

損失が大きくなるので、S 種定格 (過負荷定格) を設定して、最適制御容量を設定するソフトウェアを開発した。

については、大型自動車の路上車速データを解析し、要求エネルギーや回生エネルギーを計算して、過渡的な実走行条件に即した実機台上試験によるモータシステム、二次電池、スーパーキャパシタ等の評価方法を検討した。

図 15 に試験装置の概要を示す。

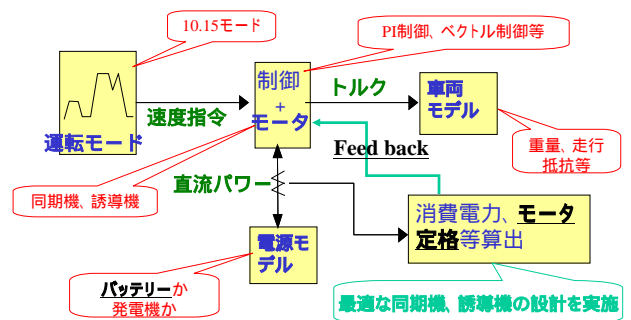


図 14 シミュレーションに用いる制御系

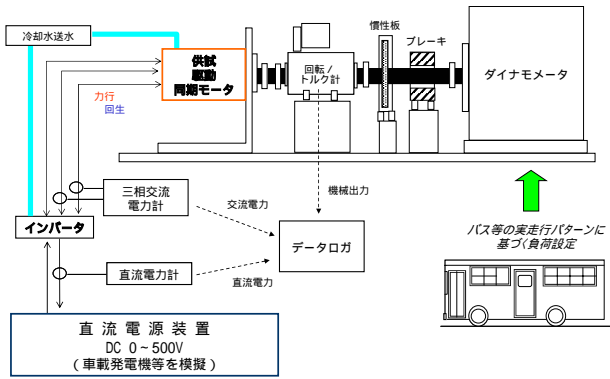


図 15 要素技術評価用台上試験装置の概要

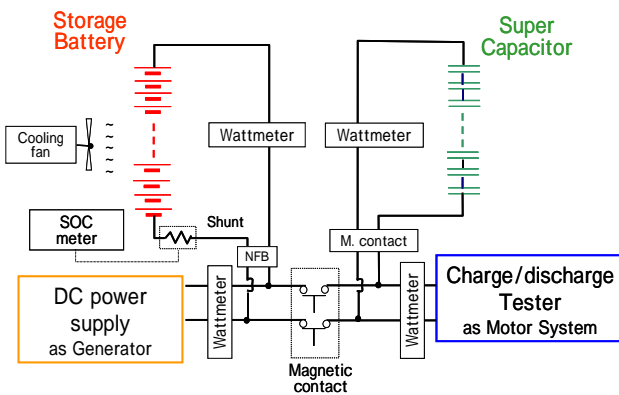


図 16 全構成要素評価用模擬試験装置

同期モータシステムによる都市内運転では、誘導機を用いたシステムに比べて要求電力量が 20%程度低減され、回生電力量が 15%前後増加し、それによって消費電力量は概ね 25%前後減少する結果を得た。また都市内走行条件の範囲では、直流電源電圧をモータシステム公称値の 60~80%の範囲で変化させても、回生エネルギーの要求エネルギーに対する比率や、電気-機械エネルギー変換効率の差はほとんど見られなかったため、ハイブリッド評価試験において必要となる直流電源装置の電圧は、モータシステムの公称値より低めに設定できる可能性を見いだした。

については、モータシステム、発電機、エンジン等の構成要素をモデル化し、仮想的なパラレルハイブリッドシステムを構築してシミュレーションを行い、それぞれのハイブリッドシステムの燃費改善効果等を試算し、

実車評価のための基礎資料を得た。さらに図 16 に示すような構成要素を全て含めたハイブリッド動力システムの模擬台上試験方法について検討し、蓄電装置の適切な取り扱い等について検討を行った。これにより、二次電池やスーパーキャパシタの充放電損失は、近似的にはそれらの電気抵抗のみによって生じるとみなせることを明らかにし、抵抗と起電力または静電容量から成る簡単なモデルを仮定した。それに基づいて加減速運転時の電力出入から充放電損失電力量を算定し、発電電力量の 10%前後に留まるものと評価した。

またハイブリッド制御コンピュータに模擬走行時の入力信号を与えてエンジン作動指令信号を取り出し、エンジン部分のみの稼働をダイナモメータで再現することにより排出ガス、燃費を求める、H I L S (Hardware In the Loop Simulator) を用いた CPU 実稼働シミュレーション方式について検討を開始した。

4. まとめ

平成 14 年度より 3 ヶ年計画でスタートした次世代大型低公害車の開発プロジェクトのなかで開発されている大型ハイブリッド自動車について、研究開発状況を報告した。

これらの車両は今年の東京モーターショーで展示されたが、本格的な性能評価が残されている。十分な実用性を持ち、かつ環境にやさしい自動車であるかどうかを確認するための、実車排出ガス試験、燃費試験等を今後実施する予定である。さらにこれらの結果を用いて、新技術を用いた将来のハイブリッド車に対応できる排出ガス試験法等の各種基準の提案を行っていきたい。