

### ③ ハイブリッド重量車に対する回生エネルギーの適用性に関する研究

環境研究領域 ※奥井 伸宜 新国 哲也 河合 英直

#### 1. はじめに

輸送機器部門のエネルギーの1/3程度を消費する貨物自動車の中でも、特に長距離貨物自動車（以下、重量車）の省エネルギー化が望まれている。走行に必要なエネルギーが大きい重量車の電動化（EV）はモータやバッテリー性能等の問題から課題が多く、ハイブリッド（以下、HEV）化が現実的な技術として挙げられる。しかし、現状のHEVシステムでは、発進・停止の頻度が多い市街地走行ではある程度の燃費改善効果が見込めるが、高速一定速度走行の場合には十分な燃費向上効果が得られていない<sup>1)</sup>。本研究では、地球環境改善に対する解を提示するため、高速走行時の燃費を改善し、重量車の実用燃費を向上させることを目的とした新たなハイブリッドパワートレインシステムを提案する。さらに、将来、本システムのような高速走行時での燃費改善を目的としたハイブリッドシステムが市場に投入された場合でも、実走行時における燃費、排出ガスの改善効果等を適正に評価可能な試験法を検討することを目的としている。

初報となる本報では、回生機会の少ない高速走行時に得られる回生エネルギー量に着目し、新方式ハイブリッドシステム成立性を、エネルギー（バッテリー）マネジメントの立場から検討するため、車両走行時のエネルギー収支が計算できる簡易シミュレーションを作成し、検討を行った。さらに、本ハイブリッド重量車のシステム構成の検討だけでなく、各種ハイブリッド車の燃費・排出ガス等の評価法を検討する目的で構築している「台上ハイブリッド試験装置」について紹介する。

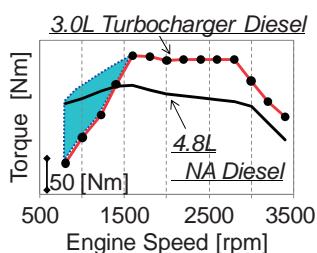


Fig.1 エンジンダウンサイジング化の一例<sup>2)</sup>

#### 2. 回生エネルギー適用性の新提案

一般的に、一定速度走行時に車両が必要とする出力は大きくなく、現状の内燃機関サイズより小型化しても十分に走行可能である。一方、発進時や加速時、急な登坂などの過渡状態で大きな出力、特にトルクを必要とする場面での要求トルクに応えるためには、小型内燃機関ではトルク不足が発生する。ここで、全負荷性能試験結果の一例<sup>2)</sup>を図1に示すが、小排気量過給（ターボチャージャー）エンジンでは、トルク増大までの応答時間が長く、大排気量自然吸気エンジンが発生する低速トルクを満たすことができない。このため、重量車用内燃機関において十分な小排気量化（ダウンサイジング化）が難しく、燃費向上が図れない。

提案する「ハイブリッドエンジン（Hybrid Electric Engine：以下、HeE）システム」は、図2、3に示すように、小排気量過給エンジンによる過渡状態でのエンジントルクの不足分を補うため、電動過給機（電動ブースター）を活用する。電動過給機により任意のタイミングで過給でき、電源には従来の24Vバッテリーではなくハイブリッド用高電圧バッテリーを用いるため、極めて高い応答性で過給できる。小排気量エンジンに電動過給機を採用した際には、過渡応答発生時には短時間で低速トルク不足が補え（図1 青色枠内）、高速巡航時にはエンジン負荷の高い領域、つまり、エンジン

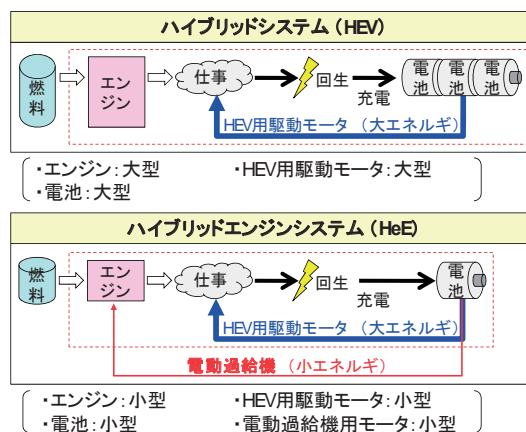


Fig.2 ハイブリッドエンジンシステム（コンセプト）

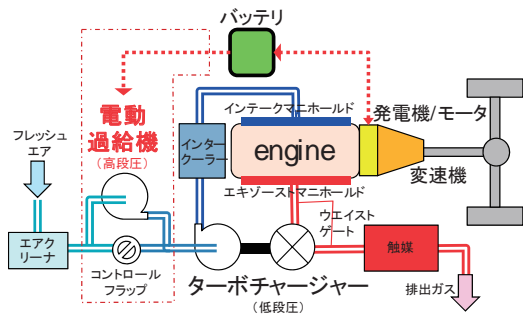


Fig.3 ハイブリッドエンジンシステム (構造)

の高熱効率領域での運転が可能となる。また、電動過給機の電力消費は小さいため、回生機会の少ない高速走行時に得られる回生エネルギー量で長時間 電動過給機の稼働が可能であり、比較的小容量のバッテリー搭載量でも出力性能を十分に確保できると考えられる。

### 3. 新方式ハイブリッドシステムの成立性検討

#### 3. 1. シミュレーションの作成

車両走行時のエネルギー収支を把握するため、一般的な車両の運動方程式に、トランスミッションモデルを組み合わせた車両モデルを作成した。各システム効率は理想状態の100%と仮定し、変速時のクラッチ接合による滑り損失は無視した。

車両モデル検証には、7段ギアを備えた車両総質量25ton車を選定し、車両の半積載状態(17ton)で行った。実際に供試車両をシャーシダイナモメータ上で重量車用燃費・排ガス試験モード(JE05モード)を走行した際の车速、シフトパターン、トランスミッション直後(タイヤ側)の仕事率の結果を、計算結果と比較し図4に示す。JE05モードの一部分を示すが、本重量車モデルの仕事率は実車値を追従している。しかし、僅かであるが変速時の仕事率には差異が認められ、クラッチ滑りの有無による影響と思われる。

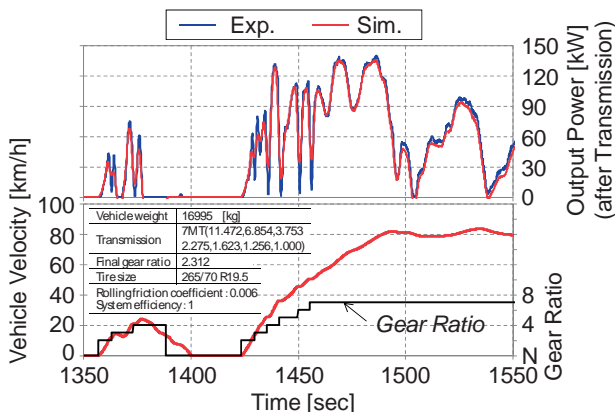


Fig.4 車両モデルの検証結果

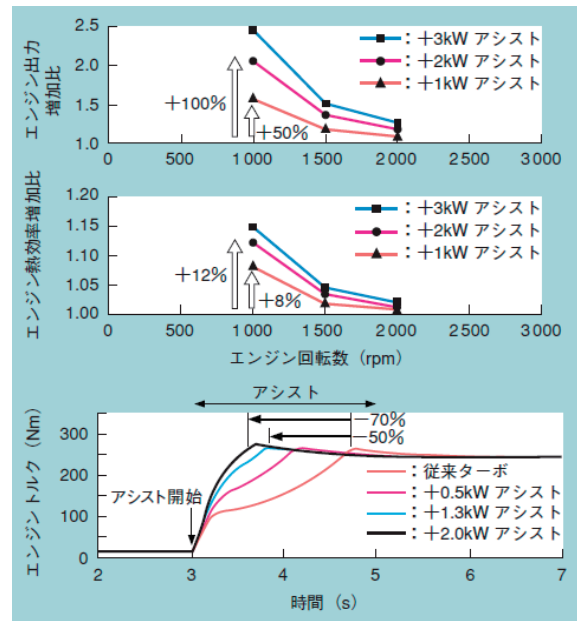


Fig.5 電動過給機モデルの一例<sup>3)</sup>

#### (1) ハイブリッド重量車 (HEV) モデル

今回採用した HEV モデルは、走行中に必要なトルクをエンジンと HEV 用モータが一定割合で分割するパラレル式 HEV モデルとした (図3一点鎖線外参照)。HEV 用モータの最大トルク、バッテリーの出力密度を考慮し、各々の能力以上の力行/回生エネルギーに対し制限を施した。車両制動時には、機械ブレーキ、回生ブレーキ、エンジンブレーキが作用するが、回生ブレーキは協調回生ブレーキモデルとした。クラッチ接合時には、常にエンジンブレーキが作用するため、減速エネルギーからエンジンブレーキを除いたエネルギー分を、HEV 用モータが最大限回生するモデルとした。

#### (2) ハイブリッドエンジン重量車 (HeE) モデル

前節の HEV モデルに電動過給機モデルを追加し、図3に示す HeE システムを模擬した。本電動過給機モデルは、過給機メーカーの文献<sup>3)</sup>を参考に、図5に示す消

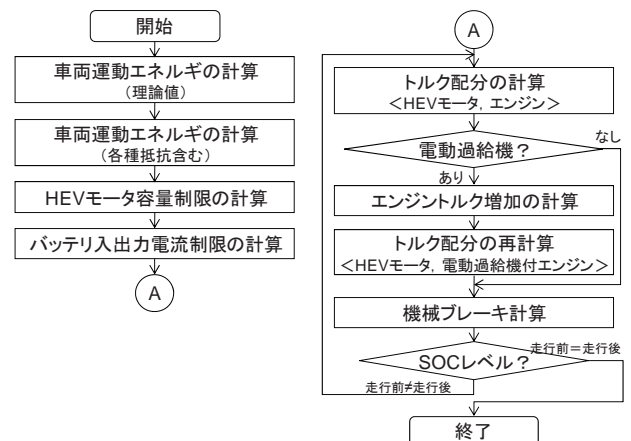


Fig.6 HEV モデル、HeE モデルのフローチャート

費電力+2kW で吸気アシストを得る仕様とし、車両加速時にエンジン回転数 2000rpm まで稼働する設定とした。それ以外の運転状態では、図3のコントロールフラップを開き、電動過給機の駆動を休止させ、ターボチャージャーのみを稼働させた。

図6に、HEVモデルおよびHeEモデルのフローチャートを示す。エネルギー管理を考慮し、バッテリーSOCレベルが走行前と走行後で同等となるよう、エンジンとHEV用モータの力行トルク配分を調整した。特に、HeEモデルではHEV用モータと電動過給機を活用するが、電動過給機に優先的に電力を使い、残りの電力分でHEV用モータを稼働させるモデルとした。

### 3. 2. シミュレーションによる検討

HeE車には、高速走行時のエネルギー回生量に見合った小容量バッテリーの搭載を前提としており、市販小型HEVトラック用のHEV用モータ（最大出力35kW、最大トルク200Nm/1700rpm、重量40kg）およびバッテリー（5.5Ah、66Wh/kg、2600W/kg、重量40kg）を搭載した。HEV用モータは、全ギア、全回転数でアシストを行うが、減速時15km/h以下ではクラッチ接合時であっても回生を停止させ、車両停止時にはエンジンを停止させた。走行開始時のバッテリーSOCレベルは、60%とした。シフトパターン、車両質量およびエンジンサイズは、重量車モデル計算に用いた車両諸元と同等として計算している。また、HEV車においても同様とした。

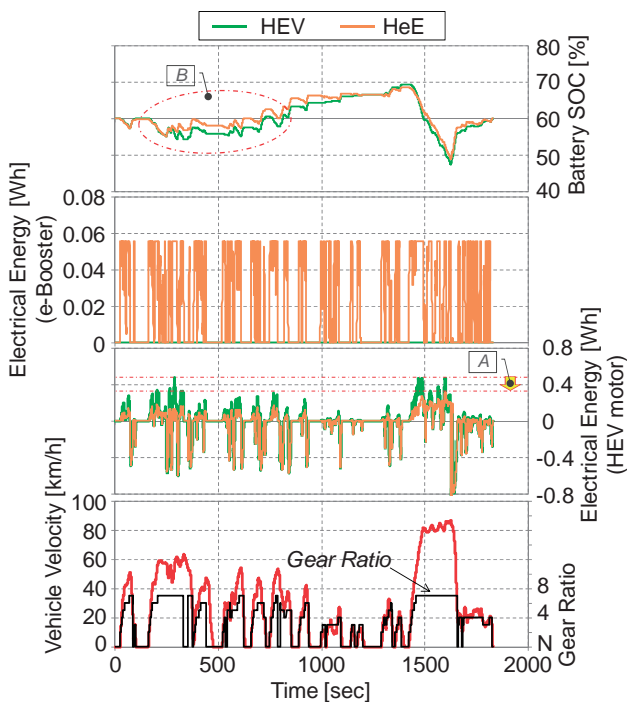


Fig.7 HEVモデル、HeEモデルの計算結果

### (1) システム成立性検討1 (市街地～高速走行)

JE05モード走行時のHEV車およびHeE車のバッテリーSOC推移、電動過給機およびHEV用モータの力行/回生電力量の計算結果を図7に示す。エネルギー管理を考慮したため、モード走行終了時のバッテリーSOCレベルは、走行前の60%に回復している。HeE車の電動過給機は、モデル設定条件通りの稼働を行っており、HEV用モータの約1/10の電力量で稼働している。電動過給効果により、図中AのようにHEV用モータの力行電力量がHEV車に比べ減少した。特に、車両発進、再加速時での減少が顕著となり、図中BでのHeE車のバッテリーSOC減少幅が改善することが確認できた。

図8には、JE05モード走行時のトランスミッション直前（エンジン側）のHEV車およびHeE車の車両、エンジン、HEV用モータの仕事率をそれぞれ示す。HeE車に関しては、HEV用モータの仕事率低減が確認でき、特に車両発進時、再加速時でのHEV用モータの仕事率低減が顕著となった。これは、電動過給効果によるエンジン低速トルク改善によるものと考えられる。

JE05走行時のエンジン車、HEV車およびHeE車の仕事率分割割合を、エンジン車の仕事率を100%として整理し、図9に示す。HEV車のエンジン仕事率割合は

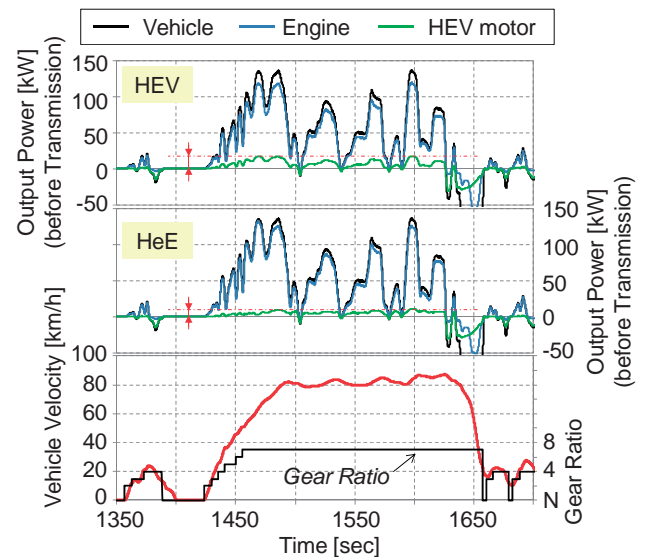


Fig.8 HEV車、HeE車における仕事率

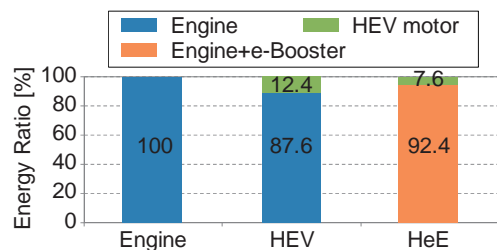


Fig.9 各システムでの仕事率分割割合 (JE05モード)

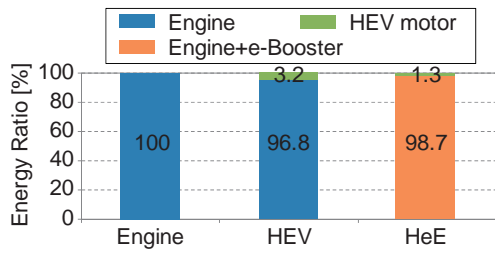


Fig.10 各システムでの仕事量分割割合 (高速モード)

87.6%、HEV 用モータ仕事量割合は 12.4%となった。一方、HeE 車のエンジン仕事量割合は 92.4%、HEV 用モータ仕事量割合は 7.6%となり、HeE 車は電動過給効果によるエンジン低速トルク改善により、HEV 用モータ仕事量割合が HEV 車に比べ約半減することが分かった。

## (2) システム成立性検討 2 (高速走行のみ)

JE05 モードの高速走行部 (1500~1640 秒) を繰り返し 10 回走行する任意の高速走行モードを作成し、走行結果を図 10 に示す。HEV 用モータ仕事量割合は HEV 車で 3.2%、HeE 車で 1.3%とともに少ないが、HeE 車は電動過給効果により、その割合が半減した。

以上より、HEV 車、HeE 車ともに、高速走行中に回生できる僅かなエネルギーをバッテリーに溜めるが、そのエネルギーを主に電動過給機に使用する HeE 車は、バッテリー容量が小さくても、電動過給効果を長時間に渡り持続させることができる。そのため、小排気量エンジンが採用でき、高速走行時でのエンジン高効率化が図れることから、燃費改善に寄与できると考えられる。

## 4. 新方式ハイブリッドシステムの燃費効果検討

HeE 車に最適となる小排気量エンジンを導入し、エンジン高効率化による燃費改善効果を検証するため、台上ハイブリッド試験装置の整備を進めている。

### 4. 1. 台上ハイブリッド試験装置の全体概要

エンジン試験用、モータ試験用の各動力計の連結をソフトウェア上で行い、車両質量、パワーバランス、バッテリー能力および動力伝達機構などを自由に構成できる装置である。シリーズ HEV、パラレル HEV、各々を組み合わせた HEV システムやそれ以外の新たな HEV システムにもソフトウェアの変更により対応できる。

本システムは、運転手を代行するドライバモデルからアクセル開度情報を受け、HEV 用制御モデルがエンジン用 ECU および駆動モータ用インバータへ指令を行う。車両モデルが走行時の負荷を演算し、各動力計はエンジンおよび駆動モータへ与えるべき負荷指令を

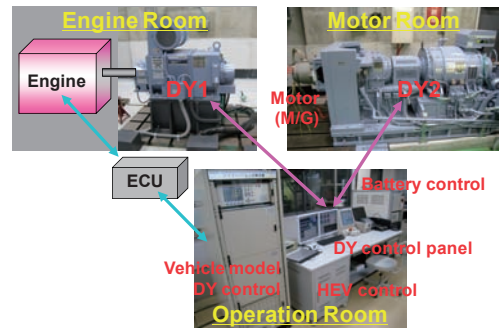


Fig.11 台上ハイブリッド試験装置

行う。一方、回生時の情報は回生モデルで演算され、HEV 用制御モデルと連携して充放電装置へ充電情報を与え、バッテリーに給電する。本試験装置作動時には、走行中のエンジン、駆動モータ、バッテリーの状態をリアルタイムに観察することができる。

## 4. 2. 進捗状況

パラレル式ハイブリッドシステムの構築を目指し、昨年度は図 11 に示すように、実機モータ (M/G) をダイナモメータ (DY2) と接続し、ハイブリッド制御モデルと車両モデルから成るシステムを構成した。現在、ダイナモメータ (DY1) に実機エンジンを接続し、システム調整を行っている。

## 5. まとめ

重量車のエネルギー効率向上を狙った新方式ハイブリッドシステムを提案し、そのシステム成立性を検討するため、簡易解析モデルを構築した。HEV 車に電動過給機を組み合わせたハイブリッドエンジンシステムでは、エンジン低速トルクが改善し、従来 HEV 車に比べ少ないバッテリー搭載量でも走行可能であることが把握でき、本報で目的とした「システム成立性」が確認できた。今後は、燃費改善効果を検証するため、台上ハイブリッド試験装置を用い研究を進める。

## 参考文献

- (1) (社)全日本トラック協会、ハイブリッド貨物自動車の技術調査 報告書 (2004)
- (2) 石川直也 他：機械式過給機を用いたディーゼルエンジンの過渡排出ガス低減に関する研究、自動車技術会論文集、Vol. 41、No. 2、p. 347-352 (2010)
- (3) 茨木誠一 他：電動アシスタターボチャージャ“ハイブリッドターボ”の開発、三菱重工技報、Vol. 43、No. 3、p. 36-40 (2006)