

⑫ ハイブリッドトラックの燃費向上に向けた ハイブリッドアシスト制御の一考察

環境研究領域

※奥井 伸宜

小鹿 健一郎

新国 哲也

小林 雅行

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や電気自動車を含む次世代自動車の研究開発が積極的に行われている。商用車クラスにおいても、ハイブリッドトラックの市場導入が進められている⁽¹⁾。

一般的に、ハイブリッドトラックは、電動モータにて取得した減速エネルギーを、加速時に駆動力のアシストエネルギーとして利用することで燃費向上を図っている⁽²⁾。しかし、走行に必要なエンジンの仕事の一部を電動モータにより補うことから、エンジンの仕事量は減少し、排出ガス温度は低下する。このことが、排出ガス後処理装置の触媒浄化性能に影響を及ぼし、排出ガス特性を悪化させてしまうことも考えられる。

そこで、実エンジンを有する「ハイブリッド・パワートレイン台上試験システム⁽³⁾」を用いて様々なハイブリッドアシスト制御によるハイブリッドトラックのパワートレインシステムを仮想的に再現し、JE05 モードを走行した場合に排出ガス温度の低下を防ぎつつ燃費向上を図るハイブリッドアシスト制御について考察した。

2. ハイブリッドアシスト制御

検討するハイブリッドトラックモデルは、商用車クラスにて主流であるパラレル方式とした。パワートレイン

の構成は「エンジン⇄クラッチ⇄電動モータ⇄トランスミッション⇄車軸」とした。車両諸元は、表 1 に示す中型トラック（半積載状態：GVW 5.87t）とした。エンジンは、4.7L ディーゼルエンジン（UD トラックス）で、最高出力 158kW/2500rpm、最高トルク 628Nm/1400rpm を発生する。電動モータは、永久磁石式同期電動機（澤藤電機）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、市販の小型ハイブリッドトラックが搭載する 1.9kWh (5.5Ah) のリチウムイオンバッテリーを想定し、バッテリーの充電状態（充電率、State Of Charge : SOC）に対する開放電圧と内部抵抗をそれぞれ考慮したモデルを使用した。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わない条件とした。

ハイブリッド制御は、以下に示す 3 種類とした。モデル化した各種制御ロジックは、図 1 に示すハイブリッド・パワートレイン台上試験システムに入力した。

①市販ハイブリッドトラック相当車（モデル車 A）

ハイブリッド制御のモデル化のため、シャシダイナモ試験装置にて市販のハイブリッドトラック（2010 年式、新長期排出ガス適合車両）を走行させ、ハイブリッド制御ロジックを調査した。取得した電動モータの力行/回生の電力データをもとにハイブリッド制御をモデル化し、

表 1 モデル車の車両諸元

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

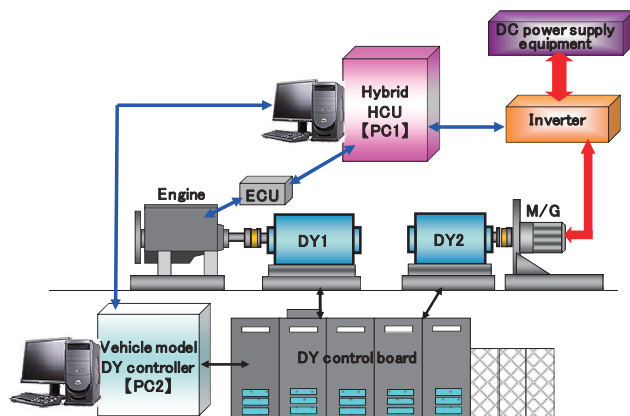


図 1 ハイブリッド・パワートレイン台上試験システム

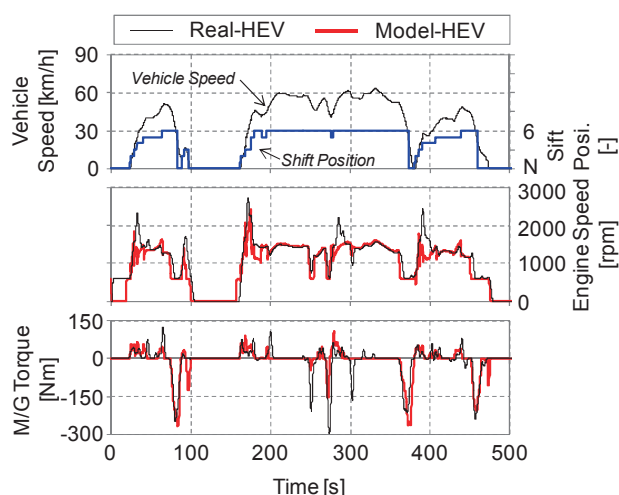


図2 ハイブリッドトラックの実車とモデル車の比較

ハイブリッド・パワートレイン台上試験システムに入力した。ここで、ハイブリッドトラックの実車両とモデル車両のエンジンおよび電動モータの駆動状態を比較した結果を図2に示す。ハイブリッド・パワートレイン台上試験システムにて構築したモデル車両のエンジン、電動モータの動作状況は、実車両とほぼ同様であった。

中型トラックの諸元に今回モデル化したハイブリッド制御ロジックを組み合せ、モデル車Aとした。

②市販ハイブリッドトラック相当車 (モデル車B)

最新の市販ハイブリッドトラックの中には、車両発進時に電動モータ単独で走行する車両が存在する(ただし、クラッチ断にてエンジンはアイドリング状態)。そこで、「1-2速ギア：電動モータ走行+3速ギア以上：ハイブリッド走行(制御ロジックはモデル車Aと同等)」から成る制御ロジックをモデル化し、モデル車Bとした。

③エンジン高効率駆動ハイブリッドトラック

(モデル車C)

エンジンの高効率化を狙い、エンジン最適効率曲線上

にてエンジンが駆動するよう電動モータにて力行/回生制御を行う⁽⁴⁾ハイブリッドトラックの登場も今後考えられる。そこで、供試エンジンの最適効率曲線を事前に調査し、この曲線上にてエンジンを稼働させるようなハイブリッド制御をモデル化し、モデル車Cとした。

3. 結果および考察

3.1 燃費

本実験では、ハイブリッド・パワートレイン台上試験システムのエンジンは実機を、その他の要素機器に関してはモデルで対応を行った。ハイブリッドトラック(モデル車A~C)の比較対象車両には、エンジンのみで運転するモデル車両を用意した。走行パターンは、日本の重量車用燃費・排出ガス試験で使われるJE05モードで、ホットスタート条件である。

JE05モード走行後のハイブリッドトラックの燃費値と燃費改善率を表2にまとめた。なお、ハイブリッドトラックの燃費値は、モード走行開始と終了時のバッテリーエネルギー差がゼロでの値である。従来ディーゼルトラックに比べ、モデル車B<A<Cの順で燃費が改善した。市販ハイブリッドトラック相当車(モデル車A、B)においては約12%、エンジン高効率駆動ハイブリッドトラック(モデル車C)においては約22%の燃費改善効果を得た。この結果を、図3に示す各種ハイブリッドトラックのエンジン回転数-トルク分布図にて考察する。3車種

表2 モデル車の燃費および燃費改善率

	Fuel Economy [km/L]	Rate of Improvement of Fuel Economy [%]
Diesel Truck	7.52	(base)
HEV Truck A	8.45	12.2
HEV Truck B	8.38	11.4
HEV Truck C	9.20	22.2

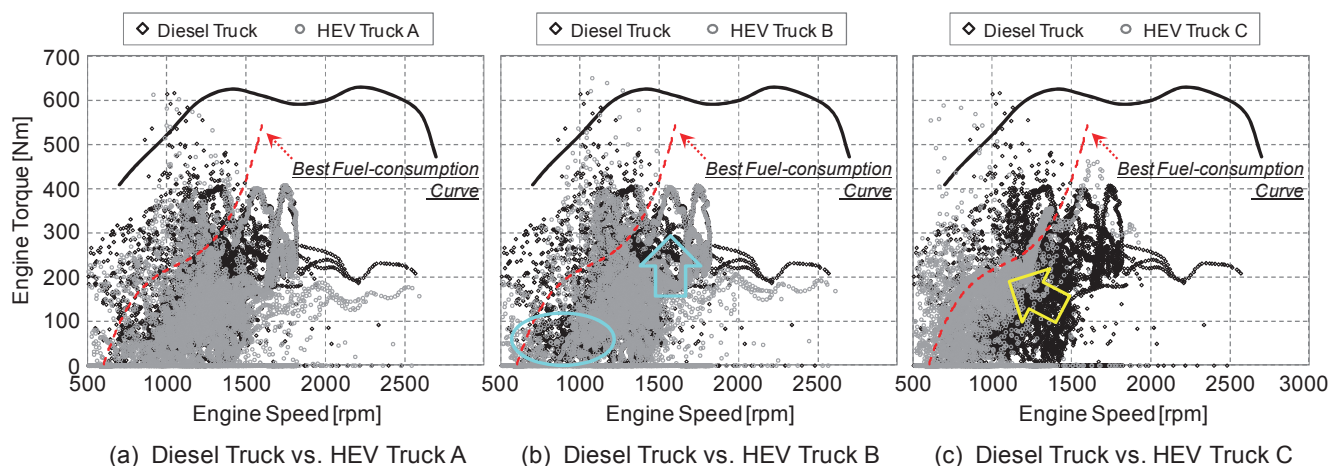


図3 各ハイブリッドトラック(モデル車)におけるエンジン回転数とトルクの比較

中一番燃費改善効果が小さいモデル車 B においては、発進時に電動モータ単独で走行することからバッテリーエネルギーを多く消費する。3 速ギア以上のハイブリッド走行時には、モード走行開始と終了時のバッテリーエネルギー差をゼロとしたため、電動モータによるアシスト量を減少させる必要があった。つまり、3 速ギア以上でモデル車 A と同様のハイブリッド制御ロジックを有するモデル車 B は、より多くのエンジン仕事量を必要とすることから、燃費改善率がモデル車 A より低下したと考えられる。一方、燃費改善効果が一番大きいモデル車 C については、図 3 の分布図から分かるように、他の車両とエンジン回転数-トルクの分布傾向が異なり、エンジン高熱効率曲線付近にて運転する。このように、エンジンの最適効率曲線上にてエンジンが駆動するよう電動モータにて制御することで、燃費が大幅に改善することが分かった。

3.2 排出ガス温度

モデル化を行ったディーゼルトラックとハイブリッドトラック（モデル車 A～C）のモード走行時の排出ガス温度を調査した。排出ガス温度の計測箇所は、図 4 に示す通りエンジン出口直下とした。

図 5 に JE05 モード走行時の排出ガス温度履歴を、表 3 に JE05 モード全体の排出ガス温度の平均値、排出ガス温度 150℃以下または 200℃以下が占める時間をモード全

時間に対する割合で算出した値を示す。平均排出ガス温度は、ディーゼルトラック>モデル車 C>A>B の順に小さくなった。ディーゼルトラックに比べ、モデル車 A、B の排出ガス温度履歴はモード全域で低くなり、平均排出ガス温度は約 10℃低下することを確認した。また、モデル車 A、B の各温度時間割合についても悪化傾向を示した。これは、モデル車 A、B が車両の駆動仕事量を単純にエンジンと電気モータとで分け合ったため、エンジンの仕事量が減少したからである。モデル車 A、B の各温度時間割合に着目すると、150℃ではモデル車 B の割合が多く、200℃においてはモデル車 A が多くなる関係であった。これは以下の理由によるものと考えられる。発進時に電動モータ単独で走行するモデル車 B においては、発進時にはエンジンがアイドル状態を保つため、排出ガス温度は発進毎に他の条件に比べ低くなる。発進後の走行においては、3.1 で述べた通り、モデル車 A に比べより多くのエンジン仕事量を必要としたからである。次に、モデル車 C に着目すると、図 3 に示した通りエンジンを低回転・高負荷領域にて使用したため、モデル車 A、B よりも排出ガス温度が常に増加した。表 3 の 200℃以下に占める温度割合に着目すると、全車両中一番小さかった。特徴的な個所として、高速走行時の排出ガス温度履歴が挙げられる。そこで JE05 モードの高速路に着目し、ディーゼルトラックとハイブリッドトラック（モデル車 A、C）のエンジン回転数、エンジントルク、電動モータトルクを時系列で図 6 に示す。モデル車 A は、時

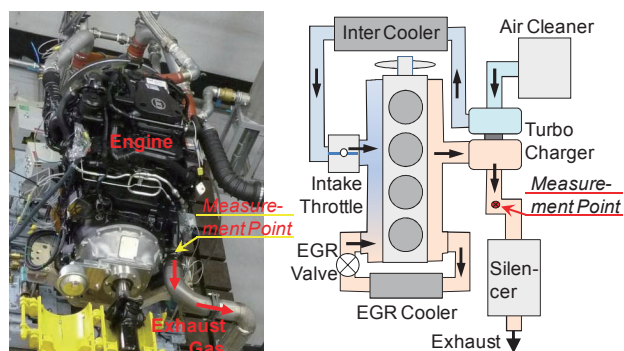


図 4 排出ガス温度計測箇所

表 3 平均排出ガス温度と JE05 モード全時間に対し 150, 200℃以下の排出ガス温度が占める時間割合

	Ex.-gas Temp. (average) [°C]	Time Rate of Ex.-gas Temp.	
		under 150°C [%]	under 200°C [%]
Diesel Truck	187.4	10.4	68.1
HEV Truck A	178.9	20.0	81.0
HEV Truck B	177.7	22.2	78.4
HEV Truck C	187.1	12.3	66.6

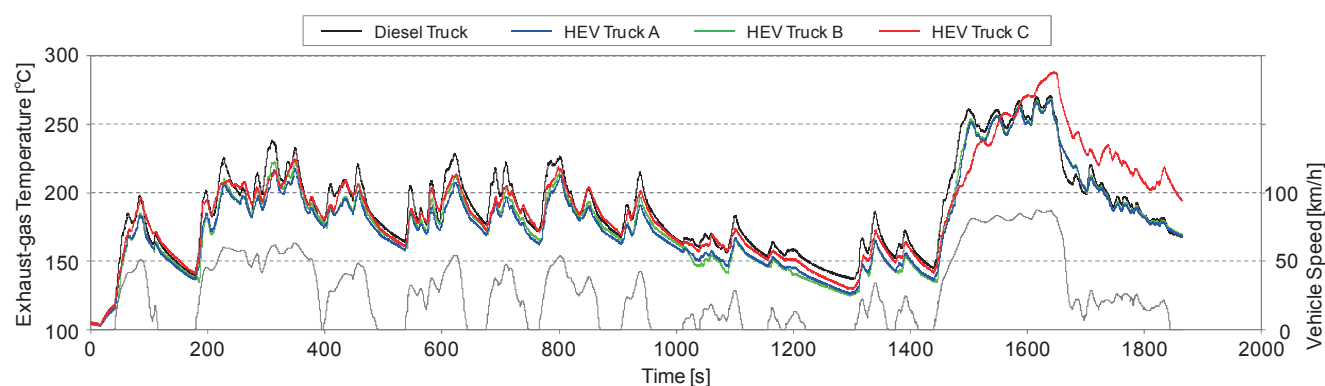


図 5 JE05 モード走行時の各モデル車における排出ガス温度の時間履歴

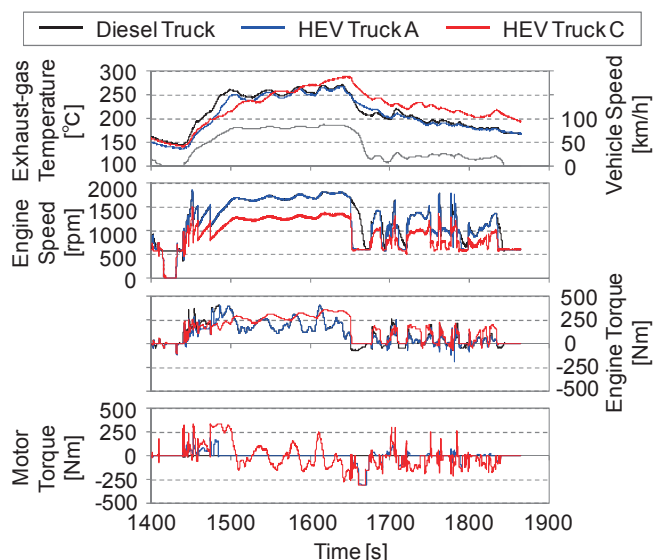


図6 各モデル車におけるエンジン、モータ、排出ガス温度の特性（JE05モード高速走行区間）

速 65km/h 以上の加速時には電動モータによるアシストを停止し、エンジン単独にて駆動した。一方、モデル車 C は、エンジン最適効率曲線上にてエンジンを運転するように電動モータによる力行/回生制御を行った。これに伴い、エンジン低回転・高トルク領域にてエンジンのトルク変動が抑えられた運転ができ、排出ガス温度が増加したと考えられる。

ここで、現状市販されているポスト新長期排出ガス規制適合車両の多くに SCR 触媒が搭載され、NO_x（窒素酸化物）の浄化を行っている。この SCR 触媒の活性化温度は約 200℃とされ、この温度域を下回ると SCR 触媒による NO_x 還元反応が十分に行われず NO_x を低減することが困難となる⁽⁵⁾。本排出ガス温度結果はエンジン出口直下のため純粋に触媒温度を示すものではないが、再度図 5 に注目すると、市販ハイブリッドトラックの制御を再現させたモデル車 A、B の排出ガス温度は、郊外路の一部や高速路を除き、多くが 200℃を下回っている。特に、発進時に電気モータ単独走行を行うモデル車 B の市街地走行では、モデル車 A の排出ガス温度よりもさらに低下している。このことから、モデル車 A と B はディーゼルトラックよりも燃費は改善するが、排出ガス特性は悪化することが懸念される。

参考として、2 章にてハイブリッド制御ロジックの調査に用いた市販ハイブリッドトラックと市販ディーゼルトラック（新長期排出ガス規制適合車両：EGR 機能付、SCR 触媒なし）で、シャシダイナモ試験装置による排出ガス試験を行った。ハイブリッドトラックの NO_x 排出量は、表 4 に示すようにコールド、ホットスタート条件と

表 4 実ハイブリッドトラックの NO_x 排出量 (JE05)

NO _x [g/kWh]	JE05 (Hot)	JE05 (Cold)
Diesel Truck	3.00	5.01
HEV Truck	3.70	5.63

もディーゼルトラックよりも悪化する傾向を確認している。更なる NO_x 低減には当該ハイブリッドトラックに SCR 触媒を搭載する方法も考えられるが、排出ガス温度低下の影響により十分に触媒が機能せず、NO_x が低減できないことが懸念される。

4. まとめ

ハイブリッド・パワートレイン台上試験システムにて、ハイブリッドトラックを仮想的に再現し、JE05 モードを走行した場合に排出ガス温度の低下を防ぎつつ燃費向上を図るハイブリッドアシスト制御について考察した。

(1) エンジン最適効率曲線上にてエンジンを運転させるハイブリッドトラックでは、ディーゼルトラックと同等の排出ガス温度で、約 22%の燃費改善効果を得た。

(2) 市販ハイブリッドトラック相当の制御を行うと、ディーゼルトラックに比べ燃費が約 12%改善した。一方、平均排出ガス温度は約 10℃低下し、排出ガス後処理装置の触媒活性化温度域への到達頻度が減少し、排出ガス後処理装置による NO_x 浄化性能が悪化すると考えられる。

今後、ハイブリッド・パワートレイン台上試験システムに排出ガス計測装置の整備を進め、各種制御を有するハイブリッドトラックの排出ガス特性を調査する。

参考文献

- (1) 鈴木孝幸：ディーゼルエンジンの徹底研究，東京，グランプリ出版，2012，p.258
- (2) 奥井伸宜，新国哲也：小型配送用ハイブリッドトラックの燃費調査および燃費改善の検討，自動車技術会 2013 秋季学術講演会 前刷集，20135787 (2013)
- (3) N.Okui, T.Niikuni, T.Kawai, M.Suzuki, H.Hiroshi, K.Maesoma: Development of Evaluation System for Exhaust Gas and Fuel Economy of Next-generation Hybrid Electric Vehicle, SAE International, 2013-01-2602 (2013)
- (4) O.Dingle, J.Ross, I.Trivic, N.Cavina, M.Rioli: Model-Based Assessment of Hybrid Powertrain Solutions, SAE International, 2011-24-0070 (2011)
- (5) S.Saito, R.Shinozaki, A.Suzuki, H.Jyoutaki, Y.Takeda: Development of Urea-SCR System for Commercial Vehicle, SAE International, 2003-01-3248 (2003)