

シリーズハイブリッド車における エネルギー効率の改善

Energy Efficiency Improvement of Series Hybrid Vehicle

長谷川 祐 介*

Yusuke HASEGAWA

米 倉 尚 弘*

Takahiro YONEKURA

青 柳 暁*

Satoshi AOYAGI

阿 部 浩 之*

Hiroyuki ABE

要 旨

シリーズ型ハイブリッド車の「エンジンと車軸が機械的に連結していないため、エンジンの運転領域を最適化できる」という特徴に着目し、車両の動力性能を損なわずに大幅な燃費向上効果のあるシステムを構築した。

本研究では駆動出力に対して過不足なく発電するリアルタイム発電を主体とし、エネルギー伝達効率の改善とエネルギーストレージの小型・軽量化を行うとともに、BSFC (Break Specific Fuel Consumption) が最小となるようにエンジンを運転することによる発電効率の改善などを行った。また実機による検証を行い、等価慣性重量 1500kg の条件において動力性能を損なうことなく同クラスのガソリン車に対し 94%の燃費向上を確認した。

ABSTRACT

A series hybrid electric vehicle is potentially suitable for operating at optimum range of electric generation as its generator and propulsion motor are mechanically separated. This system has been developed by taking advantage of such characteristics for drastic improvement of fuel efficiency.

In this study the real-time generating and the tracing bottom line of engine BSFC characteristic were mainly used to achieve improving energy transfer efficiency, minimizing energy storage and improving generating efficiency. The system has been tested on a vehicle of 1500kg equivalent inertia weight and proved to achieve the fuel efficiency improvement by 94% or greater without sacrificing vehicle dynamic performance when compared to the same class of gasoline fueled vehicle.

1. はじめに

近年の地球環境問題への関心の高まりにつれ、車の省燃費技術に対する要求はますます強くなってきている。車体では小型・軽量化に注目が集まり、エンジンでは直噴ガソリンやディーゼルのような燃費向上技術の開発が進められてきている。更に車全体の技術としてハイブリッドシステムが注目されてきており、すでに市販化された例もある^{(1), (2)}。

本研究では特にシリーズ型ハイブリッド車(以下, SHEV)の「エンジンと車軸が機械的に連結していないため、エンジンの運転領域を最適化できる」という特徴に着目し、等価慣性重量同クラスのガソリン車を比較車として、これに対して動力性能を損なうことなく大幅な燃費向上を試みた。

2. 研究のねらい

従来のSHEVは電気自動車に小型発電機を搭載し、駆動出力をエネルギーストレージ(以下, E/S)でまかない、放出したエネルギーを発電機で補充するようなE/S主体のものが多く⁽³⁾。この場合、

- (1) 駆動出力をE/Sで保証するため、E/Sの重量、サイズが大きくなる。
- (2) E/Sの充放電損失によりエネルギー伝達効率が悪化する。

といった問題が生じ燃費向上を妨げる要因となっている。

これに対し本研究では、Fig.1に示すように駆動出力に応じて過不足なくリアルタイムに発電を行えば、E/Sを小型・軽量化でき、同時に充放電損失も低減されエネルギー伝達効率も改善できると考えた。この時前述したSHEVの特徴を利用すれば、発電量を変化させてもエンジンを常に効率

の高い領域で運転することができ、比較車に対して大幅な燃費向上効果があると考えた。

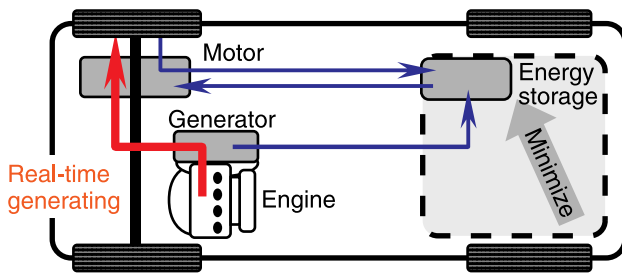


Fig.1 Real-time generating and energy storage minimizing

次に Fig.2 に示すエネルギー伝達系の中で、リアルタイム発電が伝達効率に及ぼす効果を説明する。この中で、 η_{GEN} 、 $\eta_{E/S}$ 、 η_{MOT} はそれぞれ発電機効率、E/S充放電効率、モータ効率である。

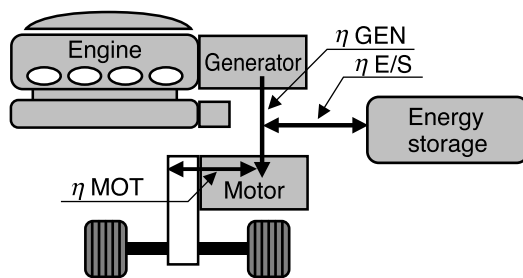


Fig.2 Energy transfer efficiency

このエネルギー伝達系において従来型の発電方式とリアルタイム発電方式を適用した場合のエネルギー伝達効率は、以下の式で表現することができる。

<従来型発電方式>

エネルギー伝達効率

$$= \eta_{GEN} \times \eta_{E/S(充電)} \times \eta_{E/S(放電)} \times \eta_{MOT} \quad (1)$$

<リアルタイム発電方式>

エネルギー伝達効率

$$= \eta_{GEN} \times \eta_{MOT} \quad (2)$$

上記の式(1)(2)において各効率を 90%として計算すると、従来方式でのエネルギー伝達効率は約 65%となるのに対し、リアルタイム発電では 81%となる。

3. 制御システム

3.1. 制御システム構成

制御システムの全体構成を Fig.3 に示す。

システムは大きく分けて下記の3つの制御部位から構成される。

- (1) 発電制御部
- (2) BSFC ボトムトレース制御部
- (3) エンジン、発電機、駆動モータの各制御部

発電制御部は基本となるリアルタイム発電制御部と、要求発電量が低い場合にE/Sの充電状態(State of Charge, 以下 SOC)に応じて発電を ON/OFF する間欠運転制御部とで構成され、アクセルペダル開度と車速などから駆動モータの目標トルク、要求発電量を決定する。

BSFC ボトムトレース制御部では、発電制御部で決定された要求発電量から BSFC が最小となるように目標発電量とスロットル開度を決定する。

以上より決定された目標トルク、目標発電量およびスロットル開度に従い、駆動モータ、発電機、エンジンの各制御部がそれぞれの制御対象を制御する。

この制御システムの特徴である発電制御部と BSFC ボトムトレース制御部について次節以降で説明する。

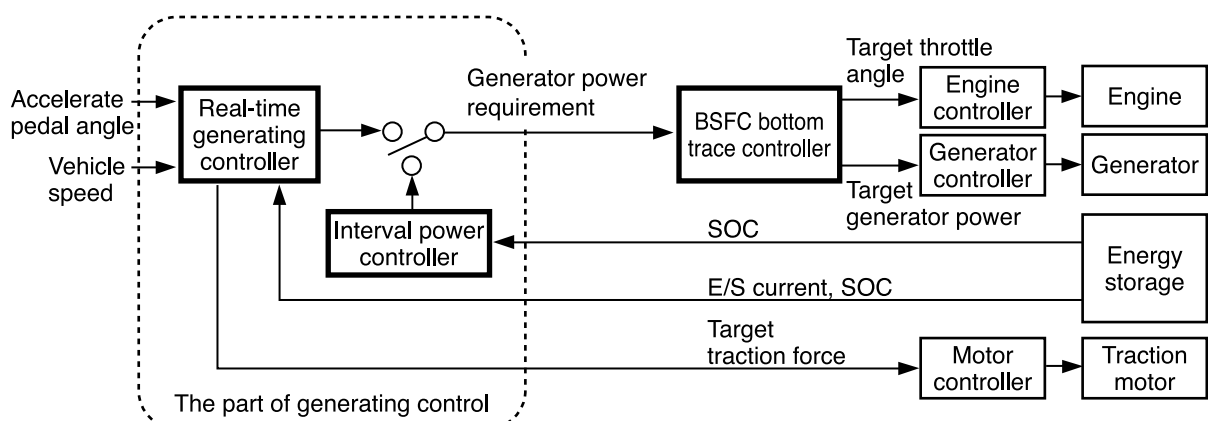


Fig.3 System block diagram

3.2. リアルタイム発電制御

Fig.4 にリアルタイム発電制御部の概略構造を示す。

駆動モータの目標トルクと車速からモータを駆動するために必要な電力を推定し、その他の消費電力を加算して基本発電量を決定する。必要な電力をフィードフォワード系で推定することにより実際の電力消費が始まる前に発電動作に入ることができ発電応答性が向上するので、駆動出力が急激に変化した時でも E/S からの一時的な放電を低減することができ、充放電損失を最小限に抑えるエネルギーマネージメントが成立する。

また上記のフィードフォワード系に SOC フィードバック系を加え、SOC に応じて基本発電量を補正することによって要求発電量を決定する。これにより過渡応答時に発生する E/S からの一時的な放電、減速エネルギーの回収、モータ効率の変化などに起因する実際の消費電力と推定電力との誤差による E/S の過充電・過放電を防止し、SOC をほぼ一定に保つことが可能となる。

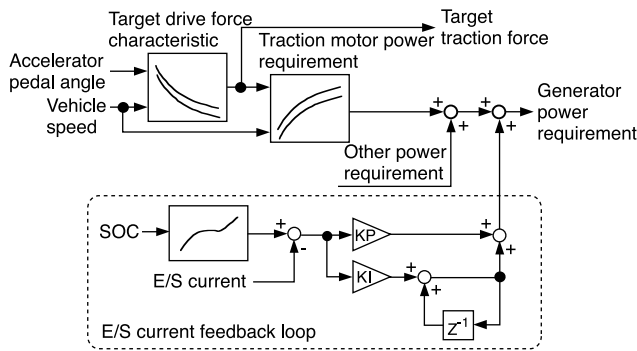


Fig.4 Real time generating control structure

3.3. BSFC ボトムトレース制御

発電効率は「発電機効率×エンジン効率」であるが、ほぼ使用全域にわたりエンジン効率が支配的であるため発電を行う際にエンジンをいかに高効率に運転するかが重要となる。エンジンの回転数が車速に依存しないという SHEV の特徴を利用すれば、要求される発電量は Fig.5 に示す BSFC ボトムライン上で発電できる^{(4), (5)}。

Fig.6 に BSFC ボトムトレース制御の概略構造を示す。発電制御部で決定された要求発電量に対して、BSFC が最小となるようなエンジン回転数とスロットル開度の組み合わせを目標値として算出する。エンジン実回転数をフィードバックしてエンジンと直結された発電機の発電量を制御しエンジンを目標回転数に追従させ、エンジン出力はスロットル開度を制御することにより調整する。特に急激な発電応答を求められるような場合でも、実回転数のフィードバックにより積極的にエンジン負荷を減じてエンジン回転数を上昇させることにより優れた応答特性を実現することができる。

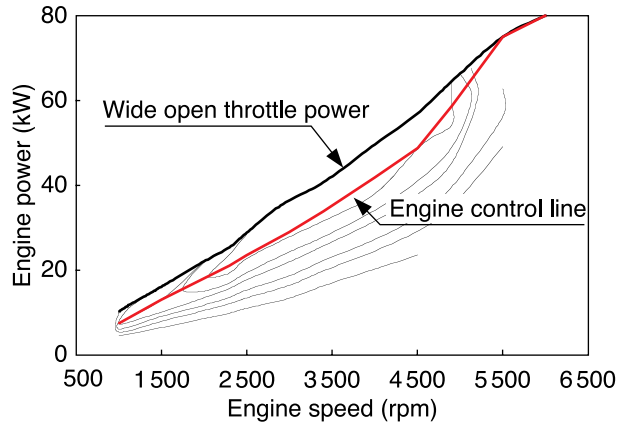


Fig.5 BSFC characteristic

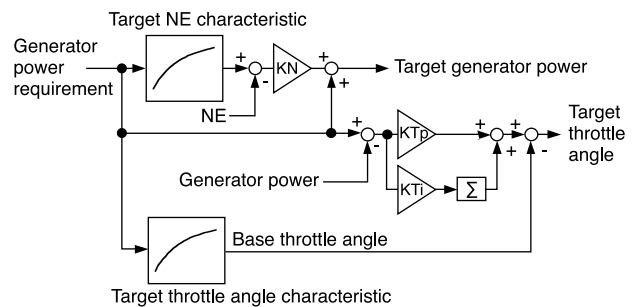


Fig.6 BSFC bottom trace control structure

3.4. 間欠運転制御

前述までのリアルタイム発電制御と BSFC ボトムトレース制御の組み合わせにより、駆動出力に追従した高効率発電を行うことが基本的には可能になるが、エンジンの低出力領域では Fig.5 からわかるように BSFC が悪化する。そのため要求される駆動出力が小さい場合は、BSFC の悪い低出力領域を使用しないように発電機を間欠運転する。間欠運転制御時は Fig.7 に示すように、SOC が上限値以上の場合には発電を停止し電力供給を E/S のみで行い、SOC が下限値を下回った場合は駆動出力を上回る量で発電を行う。また発電を行わない時にはエンジンも停止しアイドリングによるむだな燃料消費を抑える。

このように間欠運転制御は発電効率の低下を防ぐ効果があるが、その反面 E/S の充放電ロスを生じるため、この両者のバランスにより間欠運転制御領域を決定する必要がある。

3.5. 減速エネルギーの回収

減速時に運転者に違和感を与えないようなモータの回生量を Fig.8 に示すように車速ごとに設定した。また少しでも多くの減速エネルギーを回収できるようにブレーキ時にはさらにモータの回生量を増やした。

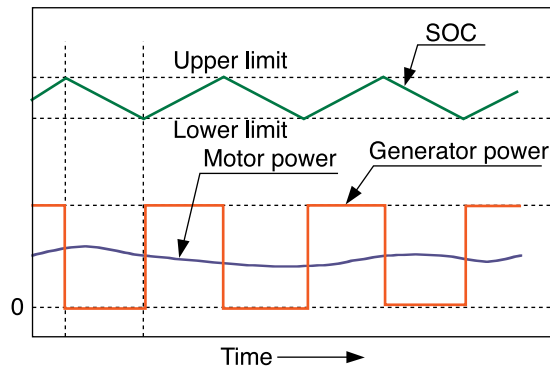


Fig.7 Interval power control

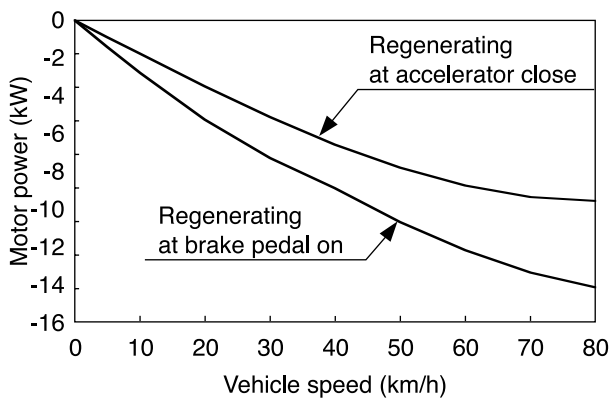


Fig.8 Regenerative braking power curve

4. 実機による検証

4.1. 供試車両の諸元

供試車両を等価慣性重量1500kgクラスとし、Table 1に主要諸元を示す。

Table 1 Major specification

Model		
Vehicle	Inertia weight (kg)	1 500
	Maximum velocity (km/h)	130
Motor	Type	DC brushless
	Maximum power (kW)	73.5
	Maximum torque (N·m)	275
Engine	Type	Water-cooled gasoline engine
	Displacement (cm ³)	1 493
	Valve train	SOHC VTEC
	Maximum power (kW/rpm)	95.6/7 000
	Maximum torque (N·m/rpm)	139.3/5 300
Generator	Type	DC brushless
	Maximum power (kW)	80
	Maximum torque (N·m)	130
Energy storage	Maximum power (kW)	30
	Energy capacity (Ah)	5
	Weight (kg)	60

また、Fig.9に供試車両のモータ最大駆動出力線と、目標とした等価慣性重量同クラスのガソリン4AT車の最大駆動力線を示す。比較車と同等の動力性能を実現するため、その駆動力特性を満足するようにモータ最大駆動出力を73.5kWに設定した。最大発電量はリアルタイム発電時に駆動出力をすべてまかなえるように効率を考慮した上で80kWにした。またE/S搭載量については、従来型SHEVの場合最高駆動出力をE/Sで保証するため80kW/5AhのE/Sが必要となり、出力密度を500W/kgとすると160kg搭載する必要があるが、本システムでは加速時の発電応答遅れと減速エネルギーの回収をE/Sで保証すればよいため30kW/5Ah、60kgが搭載量となり、62.5%の軽量化を実現した。

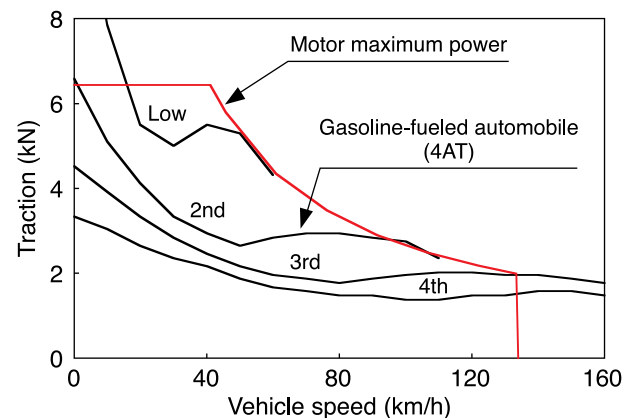


Fig.9 Drive force curve

4.2. 制御アルゴリズム

Fig.10に制御システム全体の挙動を検証するために10-15モードにおける駆動出力、発電量、SOCの推移を示す。駆動出力が高くなる加速時には発電し、クルーズ、アイドリング時など要求発電量の低い領域及び減速エネルギーの回収中は発電を停止している。全体的に駆動出力の小さい10-15モードでは間欠運転制御で発電を停止している頻度が多くなり発電停止時にSOCは減少するが、減速エネルギーの回収およびリアルタイム発電制御時のSOCフィードバックにより、消費したエネルギーが補充されてSOCは常にほぼ一定値に保たれていることがわかる。

Fig.11はFig.10中の特に加速時に間欠運転制御からリアルタイム発電制御へ移行する様子である。駆動出力が所定値の10kWに達するとエンジンを始動し発電を開始している。発電を開始するとSOCフィードバックにより、間欠運転と発電応答遅れで消費したエネルギーを補充するため、駆動出力以上に発電しSOCを回復している。また発電量とエンジン出力はほぼ同じであるから、この時のエンジン運転点は約15kW、2000rpmとなりFig.5に示すエンジンのBSFC最小点と一致する。

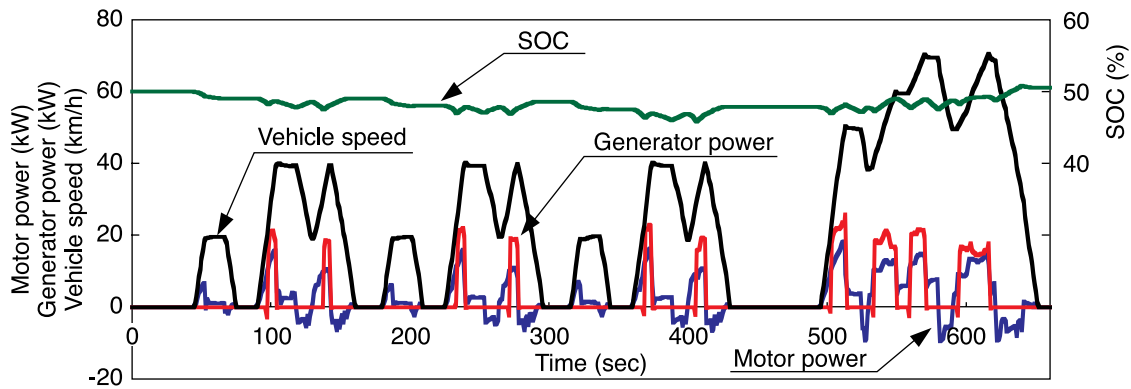


Fig.10 System behavior (10-15 mode)

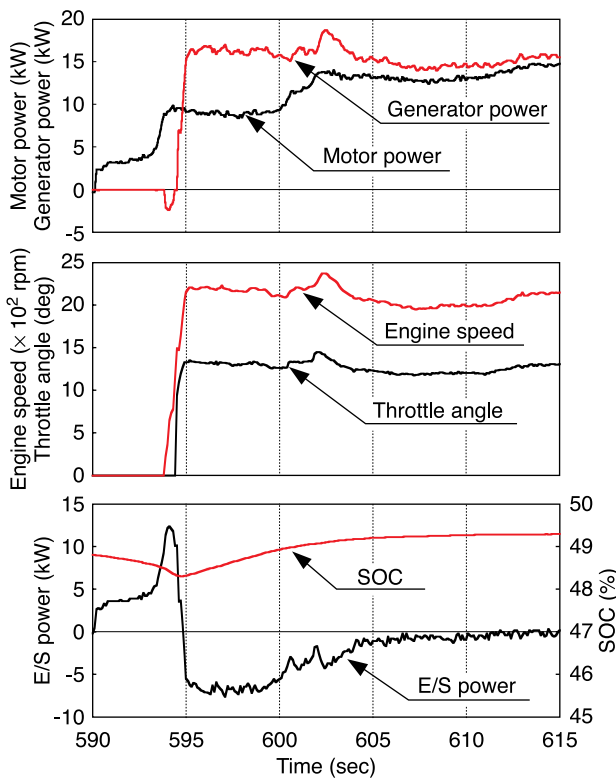


Fig.11 Generating behavior

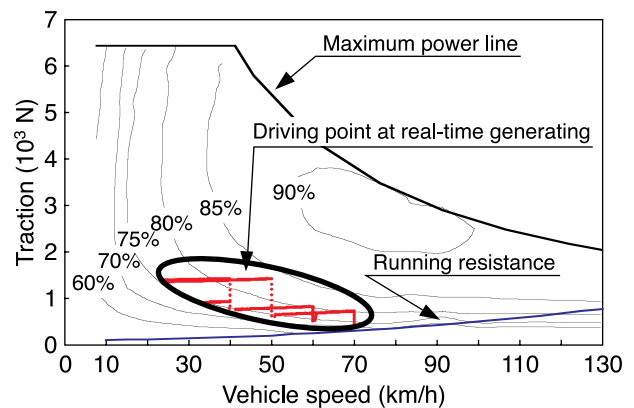


Fig.12 Transfer efficiency characteristic ($\eta_{MOT} \times \eta_{GEN}$)

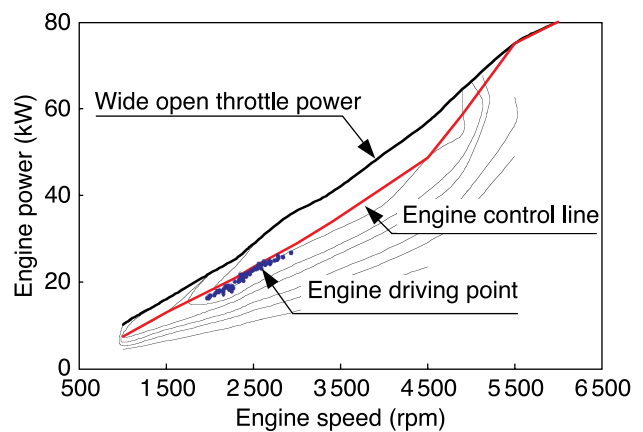


Fig.13 BSFC characteristic and engine driving point

4.3. 効率

Fig.12 と Fig.13 はそれぞれ 10-15 モードにおけるエネルギー伝達効率とエンジン運転領域を示している。リアルタイム発電制御を行うことによりエネルギー伝達効率は当初のねらいどおり約80%を達成し、エンジン運転領域についても BSFC ボトムトレース制御を行うことにより BSFC ボトムライン上にあることがわかる。

4.4. 燃費

Fig.14 は 10-15 モードにおける各制御手法の燃費向上効果である。モード燃費は最終的に 23.3km/L を達成し、比較車に対して 94%の燃費向上効果が確認できた。

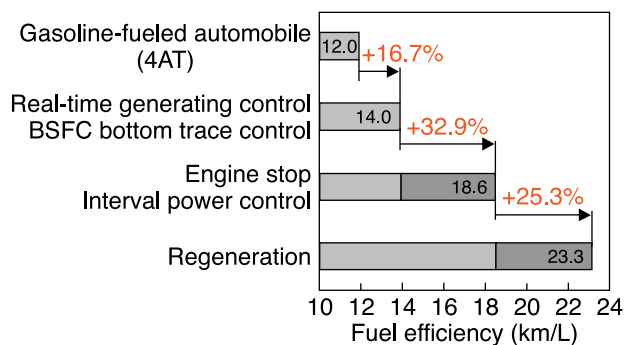


Fig.14 10-15 mode fuel efficiency

5. まとめ

SHEV の「エンジンと車軸が機械的に連結していないため、エンジンの運転領域を最適化できる」という特徴に着目して車両の動力性能を損なわずに大幅な燃費向上効果のあるシステムを構築し、以下の成果を得た。

- (1) 駆動出力に対して過不足なく発電を行うリアルタイム発電制御により、E/S に要求される出力を減らすと同時にエネルギー伝達効率を向上し、E/S の 62.5% の軽量化および 10-15 モードにおけるエネルギー伝達効率 80% を達成した。
- (2) リアルタイム発電制御と BSFC ボトムトレース制御により、エネルギー伝達効率を上げるとともにエンジンの BSFC を常に最小となるように発電を行い、10-15 モードで比較車に対して 16.7% の燃費向上効果を得た。
- (3) 間欠運転制御を行なってエンジン効率の悪い低出力領域でエンジンを停止することにより、上記(2)に対しさらに 32.9% の燃費向上効果を得た。
- (4) 減速エネルギーの回収により、上記(3)に対しさらに 25.3% 燃費を向上し、最終的に 23.3km/L を達成した。これは比較車に対して 94.2% の燃費向上効果となる。

参考文献

- (1) 阿部眞一ほか：乗用車用量産型ハイブリッドシステムの開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.975, p.25-32 (1997)
- (2) 青木薫ほか：モータ式ハイブリッドパワートレインの開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.98-99, p.9-12 (1999)
- (3) Kikuchi,T., Morita,H., Inada,E., Aso,T.: Evaluation Test of Nissan Hybrid Electric Vehicle, EVS-14 (1997)
- (4) 北田眞一郎ほか：CVT を利用したハイブリッド EV の開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.79-98, p.1-4 (1998)
- (5) 山本和久ほか：エンジン・CVT 統合制御システムの開発，HONDA R&D Technical Review, Vol.11, No.1, p.93-100 (1999)

■ 著 者 ■



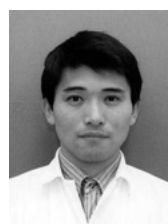
長谷川 祐介



青柳 暁



米倉 尚弘



阿部 浩之