

自動車用過給技術の電動化について

Electric Supercharging Technology for Automobiles



柴田 直道*¹
Naomichi Shibata

安 乗一*²
Byeongil An

陣内 靖明*³
Yasuaki Jinnai

恵比寿 幹*⁴
Motoki Ebisu

山下 幸生*⁵
Yukio Yamashita

各国の自動車環境規制において、より実走行に近い条件での大幅な燃費低減及び排出ガスのクリーン化が要求されている。年々厳しくなる環境規制を満足するために、近年パワートレインの電動化が進んでいる。エンジン搭載のハイブリッド車、プラグインハイブリッド車、48Vマイルドハイブリッド車(以下MHEV)やエンジン未搭載の電気自動車(以下EV)、燃料電池車(以下FCV)など様々な電動車と呼ばれる車両が市場へ投入されている。三菱重工エンジン&ターボチャージャ(株)(以下、当社)では、ターボチャージャ(以下、ターボ)により、燃費低減、排出ガスのクリーン化に貢献してきた。この実績を活かした、将来のパワートレインへ適用可能な電動過給関連技術を開発し、自動車メーカーへ提案している。本稿では、当社の電動過給関連技術の開発内容を紹介する。

1. はじめに

厳しくなる自動車の環境規制を満足するには、エンジンの高効率化のみでは対応が難しく車両の電動化が必要となる。その中で、欧州の自動車メーカーは、車両用電源の定格電圧を従来の12Vから48Vへ高電圧化することで、車両の補機を高効率化する技術を搭載した48V MHEVの市場投入を進めている。当社では48V MHEVに対応した電動過給システムとして、電動スーパーチャージャを使用した電動2ステージターボシステム(以下、電動2ステージ)や電動アシストターボを開発中であり、パワートレインの高効率化、排出ガスクリーン化に有効な技術として自動車メーカーへ提案している。

次節より、48V電動スーパーチャージャを搭載したエンジンの評価事例を中心にその他の電動過給関連技術について説明する。

2. 48V 電動スーパーチャージャ

表1に当社で開発した48V電動スーパーチャージャの仕様を示す。遠心コンプレッサと同軸にモータを備え、モータ及びパワーエレクトロニクスを一体化することでコンパクト、かつ軽量化を実現した。車両のECU*¹とCAN*²通信で電氣的に接続され、出力要求に対し、過給圧を高速に制御することでパワートレインの動力性能、環境性能が向上する。最大モータ出力は5kWで、停止から最高回転数90%までの応答時間は0.3s以下であり、30s間の連続運転が可能である。

*1 三菱重工エンジン&ターボチャージャ(株)ターボ事業部 技術部

*2 三菱重工エンジン&ターボチャージャ(株)ターボ事業部 技術部 首席技師 工学博士

*3 三菱重工エンジン&ターボチャージャ(株)ターボ事業部 技術部 課長 技術士(機械部門)

*4 三菱重工エンジン&ターボチャージャ(株)ターボ事業部 技術部 首席技師

*5 三菱重工工業(株)総合研究所 電気・応用物理研究部 グループ長 技術士(電気電子部門)

また、出力を3kWに抑えることで連続運転が可能となる。上記性能を成立させるため、モータ、パワーエレクトロニクス及び軸受を水冷却している。また、エンジンルームへの搭載性を考慮し、軸受にはオイル潤滑が不要なグリス封入のボールベアリングを採用している。

表1 48V 電動スーパーチャージャの仕様

項目	仕様	
入力電圧	48V	
モータ形式	フラックススイッチングモータ	
最高回転数	80 000rpm	
最大圧力比	1.7	
出力	最大	5kW (30s)
	連続	3kW (continuous)
応答性	< 0.3s (0→90%回転数)	
冷却方式	水冷	
軸受方式	グリス封入玉軸受	

モータには磁石フリーで安価かつ高効率なフラックススイッチングモータを採用している。⁽¹⁾

図1に電動2ステージの構成を示す。吸気側を電動スーパーチャージャとターボの二段過給とし、ターボの回転が上がらないエンジンの低負荷時、過渡時の過給圧を電動スーパーチャージャで補うことができる。エンジンの負荷が上がってくると、ターボだけで必要な過給圧を満足できるようになるため、電動スーパーチャージャの出力を下げ、その後バイパスバルブを開いてターボ単体で運転する。以下に電動スーパーチャージャを使用するメリットを示す。

- ・エンジンの動力性能向上(エンジン低速トルク、過渡応答性の向上)
- ・エンジンの燃費低減技術(ミラーサイクル^{*3}、EGR^{*4}など)に必要な過給圧を供給できるとともに、さらなる過給ダウンサイジングが可能となり、燃費が改善

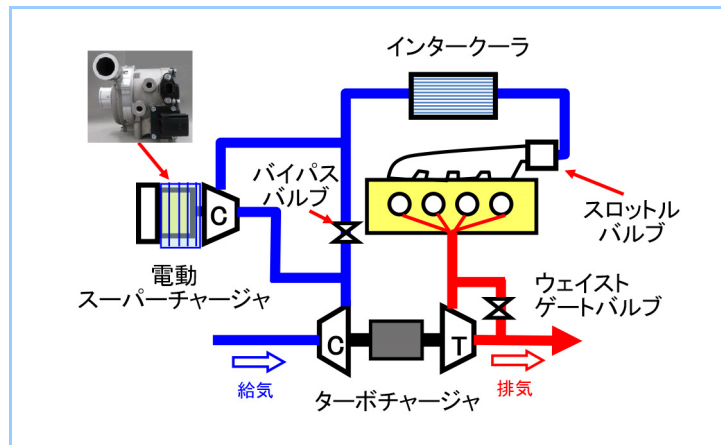


図1 電動2ステージの構成

3. エンジン台上評価

電動2ステージの性能及び制御性を確認するため、エンジン台上にて性能試験を実施した。本試験で使用されるエンジンは、最大トルク422Nm、最大出力221kWの2.0Lガソリンエンジンである。

図2にエンジン定常性能を示す。電動2ステージとベースターボのエンジン回転数とエンジン回転数2500rpmの定常全負荷トルクを基準としたトルク比を比較している。エンジン低速1250rpmにおいて、電動2ステージはベースターボと比較し、電動スーパーチャージャのアシストによりエンジントルクが約122%向上、またエンジン回転数1750rpmでは、ベースターボと比較しエンジントルクが約45%向上する。エンジン回転数の上昇に伴い排気ガスのエネルギーが増加、ターボの出力が向上するため、電動スーパーチャージャの出力を下げても、全負荷に近いエンジントルクが

得られている。各エンジン回転数にて、電動スーパーチャージャの回転数及び出力には余裕があるため、さらなるアシストも可能である。

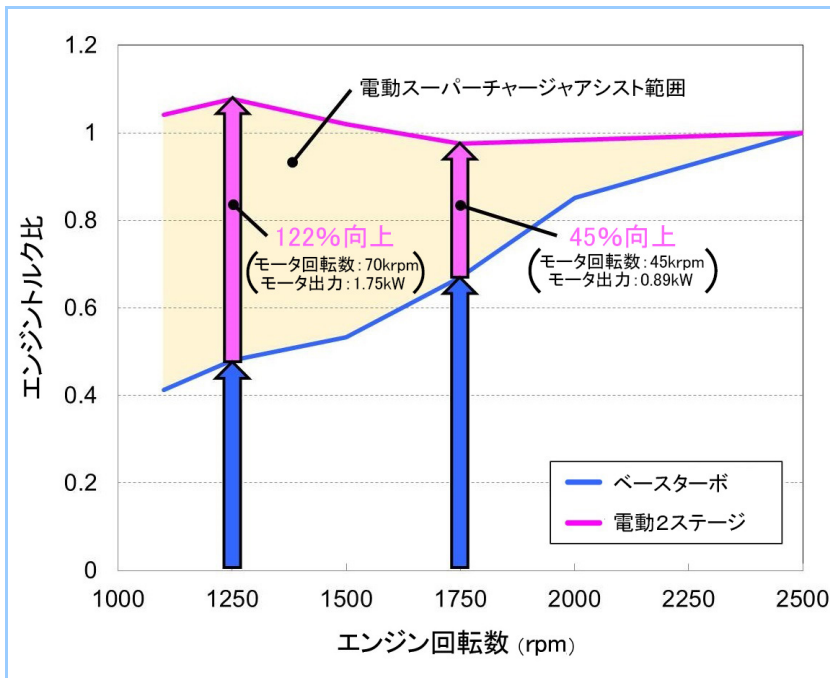


図2 エンジン定常性能

図3にエンジン回転数 2000rpm における過渡性能を示す。スロットルバルブをアイドル開度から全開まで操作した時のエンジントルクの応答性を確認した。なお、電動2ステージはベースターボより吸気配管が長いため、アイドル開度での圧力損失が増加しエンジントルクが僅かに低下している。電動2ステージはベースターボと比較し、約 80%過渡応答性が向上した。今回エンジンの試験設備の都合上、電動スーパーチャージャを最大回転数及び最大出力にて駆動できなかったが、さらなるアシストが可能であり、応答時間の短縮が見込まれる。

以上より、電動2ステージを適用すると、電動スーパーチャージャのアシストによりエンジン低速での定常トルク及び過渡応答性が大幅に向上することを確認した。エンジン低速性能を向上することで、車両では最大出力を維持しつつドライバビリティの向上が期待できる。

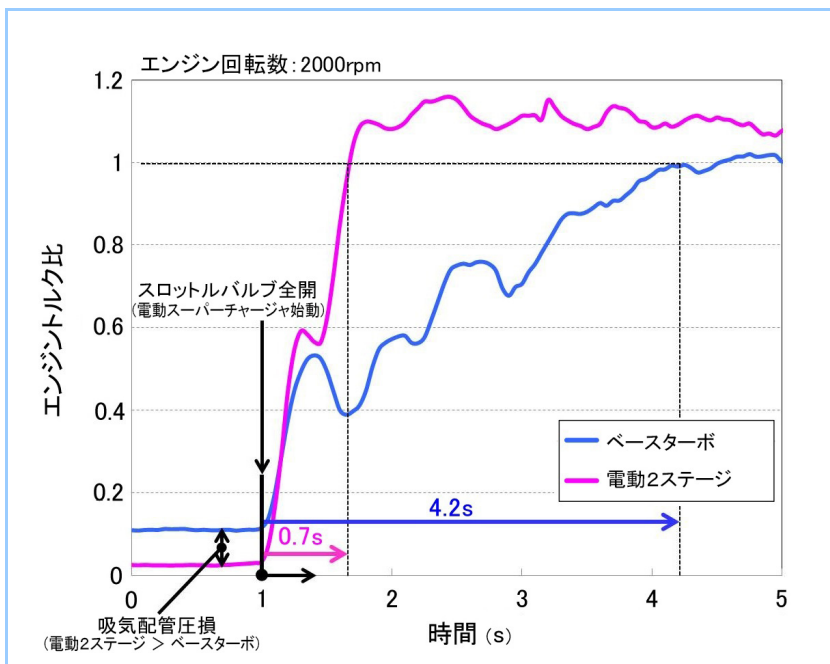


図3 エンジン過渡性能

4. 車両走行シミュレーション

1D エンジンシミュレーションツールを用い、車両走行解析を実施し、電動2ステージの車両走行モードにおける有効性を確認した。表2に解析条件及び走行モードを示す。ガソリン 2.0L の車両モデルを用い、電動2ステージとベースターボの比較を実施した。走行モードは、市街地走行から高速走行を網羅するWLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle) モードを選定した。そして、エンジンの燃費低減技術は、ミラーサイクル及び EGR を適用した。ミラーサイクルはエンジンの吸気バルブを制御することで圧縮行程を短縮し、膨張行程を実質的に高めてエンジンの熱効率を向上する技術、また、EGR はエンジンの排気ガスの一部を吸気側へ再循環することでスロットルバルブにおける圧力損失の低減やエンジンの燃焼におけるノッキングの裕度及び熱損失を改善する技術であり、それぞれ燃費の低減に有効である。ただし、これらの技術を適用すると新気の流入量が減少するため、エンジントルクが低下する。本解析ではこのエンジントルクの低下を補うよう電動スーパーチャージャ並びにターボを制御した。また、電源バッテリーの SOC^{*6} がモード走行前後にて同等になるように走行中に発電を行い、電動スーパーチャージャの駆動で消費する電気エネルギーも加味をして燃費を評価した。

表2 電動2ステージの解析条件及び走行モード

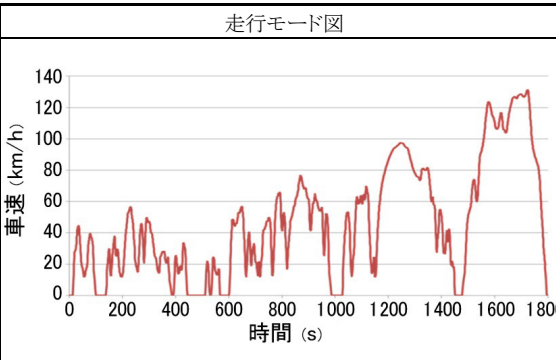
項目	解析条件	走行モード図
エンジン	① ガソリン 2.0L ターボ ② ガソリン 2.0L 電動2ステージ (電動スーパーチャージャ+ターボ)	
走行モード	WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle)	
制御	・燃費低減エンジン技術:ミラーサイクル+EGR ・モード走行前後にて、バッテリーのSOC 同等	

図4にミラーサイクル及び EGR 適用時のエンジンの定常解析結果を示す。電動2ステージとベースターボのエンジン回転数とエンジントルク、燃費を比較した。電動2ステージではベースターボに対し、電動スーパーチャージャのアシストによりエンジン低速・高トルク領域にてミラーサイクル及び EGR が適用される範囲が拡大し、燃費が低減している。また、電動スーパーチャージャを出力範囲内で積極的に使用し、ターボを介さずに排気することでエンジンのポンピングロス^{*7}が減少し、燃費が低減している。このように、電動2ステージを適用するとエンジンの燃費低減技術であるミラーサイクル及び EGR の適用範囲の拡大及びポンピングロスの低減に有効であることが分かった。

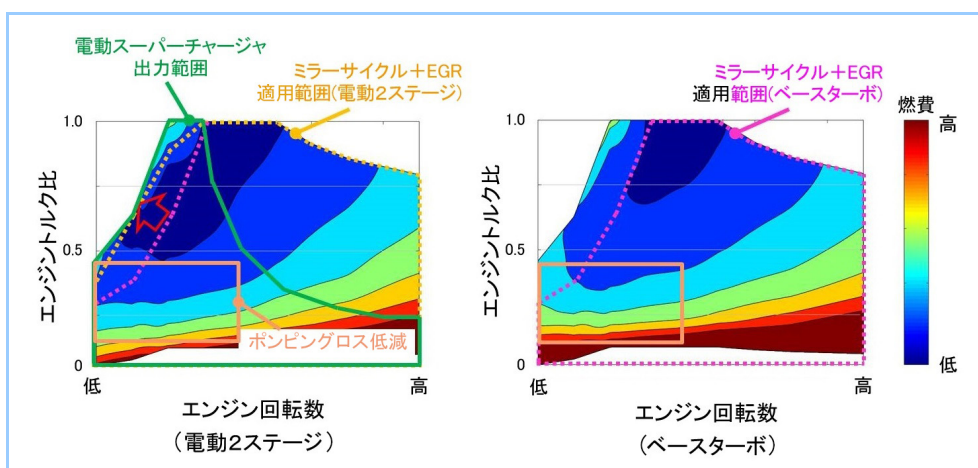


図4 エンジン定常解析(ミラーサイクル+EGR)

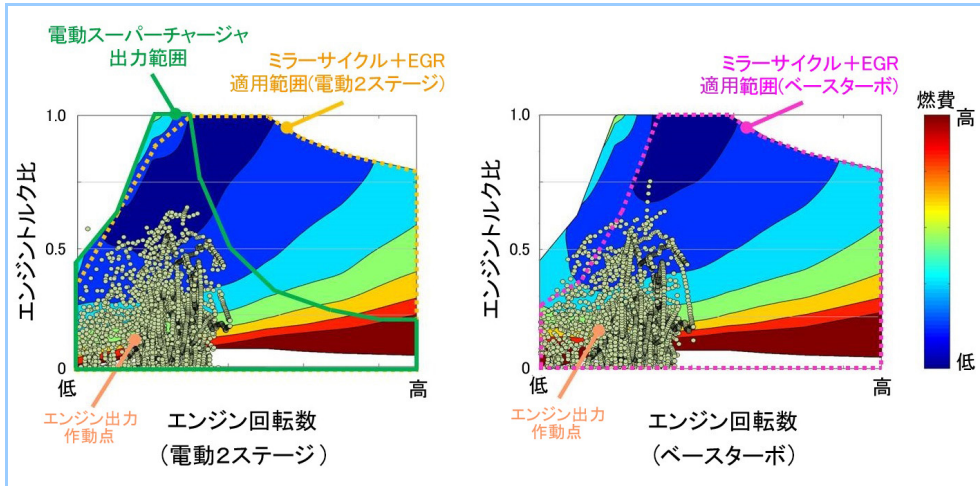


図5 WLTC モード解析

図5はWLTCモード走行におけるエンジンの出力作動点を1Dエンジンシミュレーションで求めた結果である。電動2ステージではベースターボに対し、電動スーパーチャージャの駆動における電気エネルギー収支を含めた積算燃費が約1.0%低減した。これはミラーサイクル及びEGRの適用及びエンジンのポンピングロスが減少することでエンジンの作動領域における燃費が低減しているためと考えられる。今回、トランスミッションの制御は同じとして計算したが、燃費の良いエンジン回転数とエンジントルクに制御を最適化することで、さらなる燃費向上が可能と考える。

5. その他の電動過給関連技術の紹介

表3に将来パワートレインに対するその他の電動過給関連技術を示す。以下は各開発技術の概要である。

表3 パワートレインと電動過給関連技術

パワートレイン	電動過給関連技術	用途	外観
48V MHEV	電動2ステージ (電動スーパーチャージャ+ターボ)	[用途] ・エンジンの動力性能の向上 ・エンジンの燃費低減技術の適用 (ミラーサイクル,EGR,リーンバーンなど)	
	電動アシストターボ	・エネルギー回生 (電動アシストターボ) [特徴] ・高レスポンス ・小型、軽量	
EV	ガスタービン補助発電機 (レンジエクステンダーEV用)	[用途] ・EVの航続距離の延長 ・充電タイミングの自由度を向上 [特徴] ・多様な燃料に対応可能 ・小型、軽量	
FCV	電動コンプレッサ	[用途] ・燃料電池スタックへ空気を供給 [特徴] ・小型、軽量、高効率、低騒音	

5.1 電動アシストターボ

電動アシストターボはモータをターボと同軸に組み込み、排気タービンに加え電気モータによりコンプレッサを駆動することができる。モータでタービンの駆動力をアシストできるため、排出ガスエネルギーの低いエンジン低負荷、過渡時の過給圧を向上できる。このため、エンジン低速トルク

及び過渡応答性が改善する。大きさが通常ターボと大きく変わらないため搭載性に優れ、排気ガスが余剰な動作領域ではモータを発電機として利用することで、排出ガスのエネルギーを電力として回生することも可能である。エンジン低速では通常のターボと比較して、80%以上のレスポンス向上を確認した。当社ではターボのサイズに合わせ、最大出力 5kW 強をはじめ、数種類の仕様を開発中である。

5.2 ガスタービン補助発電機

当社ではターボの技術を応用しレンジエクステンダーEV 用ガスタービン補助発電機を開発している。EV は環境負荷が小さく、今後各国で普及が進んでいくと予想される。しかしながら、バッテリーコストがまだ高く、充電時間が長い等課題も多い。このため、EV に内燃機関による小型発電機を搭載することで、航続距離を延長できるとともにバッテリーの充電タイミングの自由度を向上できると考える。モータ発電機をターボをベースに開発した小型ガスタービンと同軸に組み込み、燃焼器からの燃焼ガスによってタービンを駆動、同軸のコンプレッサにて圧縮空気を燃焼器へ供給し、余剰タービン出力を電力として回収する。レシプロエンジンを利用した発電機と比較し、ガスタービンは小型高出力であるためコンパクトであり、排出ガスがクリーンであるため後処理装置を使用しなくても排出ガス規制を満足できる可能性がある。また、燃焼器の変更のみで多様な燃料に対応可能であることもガスタービンの利点といえる。ガスタービンとターボは共通な機能を有する部品も多く、システムの低コスト化にターボの技術を応用することも可能である。小型の高効率な発電機は EV のみならず、将来電動化が進むと考えられる商用車、航空機、船舶といった他のモビリティの航続距離延長にも有効な技術と考える。

5.3 FCV 用電動コンプレッサ

FCV 用電動コンプレッサは燃料電池スタックの出力要求に対し、過給圧を高速に制御することが求められる。他にも小型化、高効率化、低騒音化も重要な要素であり、当社ではターボ及び電動スーパーチャージャの技術を応用した、FCV 用電動コンプレッサを開発している。さらに、一軸二段の遠心コンプレッサ採用することで、モータの回転数を下げつつ高い過給圧、軸受の高寿命化が可能である。

6. まとめ

パワートレインの電動化に向けて、当社が開発中の電動過給関連技術について紹介した。その中で、48V MHEV 車向け電動スーパーチャージャにおけるエンジンの動力性能の向上及び燃費低減の可能性を実験及び解析にて確認した。今後、多様なパワートレイン技術に対応した過給システムを提供することで、持続可能社会の実現に貢献したい。

*1 ECU: Electronic Control Unit の略。エンジンの電子制御装置。

*2 CAN: Controller Area Network の略。電子機器間の通信規格。自動車に使用される電子機器間の通信に使用されている。

*3 ミラーサイクル: エンジンの吸気バルブを制御することでエンジンの圧縮行程を短縮し、膨張行程を実質的に高める技術。ミラーサイクルを適用するとエンジンの熱効率が向上し、燃費が低減する。ただし、新気の流入量が減るため、エンジントルクが低下する。

*4 EGR: Exhaust Gas Recirculation の略。エンジンの排気ガスの一部を吸気側へ再循環すること。ガソリンエンジンでは、EGR を適用することでスロットルバルブにおける圧力損失の低減、ノッキングに対する裕度の改善、熱損失の改善により燃費が低減する。ただし、全体の空気量に対する新気の割合が減るため、エンジントルクが低下する。

*5 過給ダウンサイジング: 大きなエンジンと同等の出力をターボチャージャ付の小さなエンジンで達成すること。これにより、エンジンの機械損失が低減し燃費の改善に効果がある。

*6 SOC: State Of Charge の略。バッテリーの充電量。

*7 ポンピングロス: 排気経路の圧力損失により排気工程でピストンが排気を押し出す際に生じる損失。

参考文献

- (1) 山下幸生ほか, 自動車ターボ用高速単相モータの開発, 三菱重工技報 Vol.56 No.1 (2019)
- (2) 安兼一ほか, 自動車向け電動2ステージターボシステムの開発, 三菱重工技報 Vol.52 No.1 (2015) p.76~81
- (3) 山下幸生ほか, 自動車用エンジンのダウンサイジングに貢献する電動スーパーチャージャの開発, 三菱重工技報 Vol.47 No.4 (2010) p.12~17
- (4) Y. Yamashita et al., Two stage boosting system using 48 volt electric compressor, 22nd Supercharging Conference 2017