

モビリティでの環境負荷低減

Reduction of Environmental Load in Mobility

1. ま え が き

地球環境や自然環境を適切に保全し、持続可能な社会を築くために、温室効果ガスの排出量削減や環境汚染物質の抑制が世界的に求められ、各国で規制強化が進められている。自動車メーカー、トラックメーカー、オートバイメーカー、農業機械や建設機械メーカーは、燃費を向上させ、走行/使用によってその内燃機関/エンジンから排出される環境負荷物質を低減させることに日夜奮励している。また自動車の燃費向上とCO₂排出量削減に有効となるハイブリッド車を始めとする電動車両の開発・量産化が進められ、その普及が加速している。

三菱電機では、ハイブリッド車を含めた内燃機関/エンジンを持つ車両で貢献する各種製品を開発・生産し、これらのメーカーに納入している。

本稿では、2章で内燃機関の燃費向上と排出ガスクリーン化に貢献する製品群について、3章で電動車両で採用が拡大するマイルドハイブリッドシステムによる燃費改善について述べる。

2. 燃費向上と排出ガスクリーン化貢献製品群

2.1 排出ガス規制動向

内燃機関を持つ車両に対し、世界各地域の排出ガス規制は、年々強化されている(図1)。

欧州ではEURO6d規制が、中国では国6a規制が、そしてインドではBS6規制が2020年から導入され、NO_x(窒素酸化物)、PM(粒子状物質)、CO₂(二酸化炭素)の、車両からの排出量の更なる削減が求められている。車両の燃料供給口などからわずかに大気に放出される燃料蒸散ガスの排出に関しても、既にアメリカで適用されているものと同様の規制が、中国とインドで導入される。

2.2 EGRバルブ

EGR(Exhaust Gas Recirculation: 排気ガス再還流)バルブは、エンジンに取り付け、排気ガスを再度燃焼室に戻

すことで、排出ガス中のNO_x低減と燃費向上のために使用する。図2にEGRバルブと2.3節から2.5節で述べる製品群の外観及び車両での搭載位置を示す。

エンジン内で燃料が燃焼する際に、その燃焼温度が高すぎると燃焼室内でNO_xが生成される。その対策として、エンジンが吸入する空気に排気ガスを再循環させて混合させるEGRが採用されている。再還流した排気ガスは燃焼室内では燃料の燃焼には寄与せず、発生した熱を奪うことで燃焼室内の温度を下げ、NO_xの生成を抑制する。また、再還流を行うことで、エンジンが新しい空気を燃焼室に吸入する抵抗を低減して燃費も向上するため、特に乗用車用ガソリンエンジンでは、積極的にEGRが採用されている。

EGRバルブは先に述べた再還流させる排気ガス量を調整する装置であり、当社では、その駆動源に乗用車用にはステッピングモータを、トラック、農業機械、建設機械用にはガス量調整を更に高速で行うことが可能なDCモータを採用している。この高速での制御は、エンジン内での燃

地域	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
欧州	EURO6c		EURO6d			(Euro7)		
	NOx	60mg/km			→ RDE導入			
	PM	4.5mg/km						
インド	BS4		BS6					
	NOx	80			→ 60			
	PM	-			4.5			
中国	国5		国6a			国6b		
	NOx	60		→ 60			→ 35	
	PM	4.5		→ 4.5			→ 3.0	

RDE: 実際の運転状態の排出ガス規制

図1. 乗用車用ガソリンエンジンの排出ガス規制

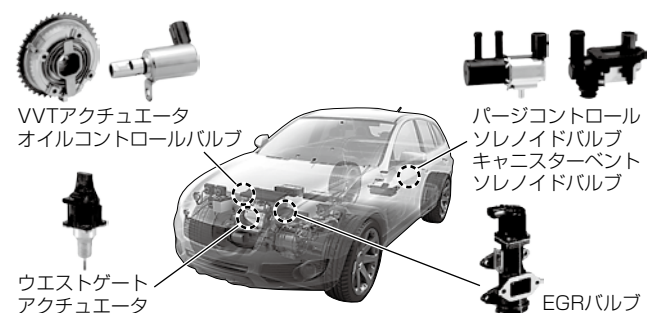


図2. 燃費向上と排出ガスクリーン化貢献製品群

焼を的確に行うことに役立ち、PM発生を抑制できる。当社のEGRバルブは、車両の運転状況に応じて的確かつ緻密に制御を行うことを可能にし、排出ガス中のNOxの低減と燃費向上に貢献している。

2.3 VVTアクチュエータとオイルコントロールバルブ

VVT(Valuable Valve Timing: 可変バルブタイミング)アクチュエータとオイルコントロールバルブは、エンジンの吸気・排気弁の開閉タイミングを変化させ、エンジンの運転状態を向上させることに用いられる。

VVT機構は、エンジン回転数に応じて吸気・排気弁の開閉タイミングを変化させ、エンジンの出力を向上させる目的で採用が始まった。最近では、更にシステムの使用範囲が広がり、燃費向上と排出ガス中の有害物質低減にも活用される。排気弁が開くタイミングを遅らせ、吸気弁が開くタイミングを早めることで、双方の弁が同時に開いている時間を長くすることができる。この状態は、エンジンのピストンが降下する際の抵抗を下げ、無駄な負荷を減らすことができ、燃費を向上させることができる。また同時に、ピストンが降下する際に燃焼室に発生する吸引力を利用して、排気ガスの一部をもう一度燃焼室内に引き込むこともでき、EGRバルブと同様の排気ガス再還流を直接燃焼室で行うことができ、NOxの生成低減も可能になる。

VVTアクチュエータは、その内部に注入されるエンジンオイルの量と圧力で駆動するが、それを緻密に調整するのがオイルコントロールバルブである。VVTアクチュエータとオイルコントロールバルブは、車両の運転性を高めるだけではなく、燃費向上と環境負荷物質の生成低減にも貢献している。

2.4 パージコントロールソレノイドバルブとキャニスターベントソレノイドバルブ

パージコントロールソレノイドバルブは、車両の燃料配管経路に取り付けられ、燃料タンク内で発生する蒸発燃料の大気放出を抑制するシステム内で使用され、キャニスターベントソレノイドバルブは、そのシステムが正常に作動していることを車両が自己診断するシステムで使用される。

駐車時や給油時に車両の燃料タンク内で燃料の蒸発が起こるが、その蒸気をできるだけ大気中に逃がさないようにする必要がある。この大気蒸散に関して、特にインドでは、2020年からオートバイとスクーターに対する排出量規制が強化され、中国でも乗用車とトラックに対し、燃料タンクにつながる配管の気密が保たれていることを自己診断することが義務化される。当然、車両の蒸発燃料抑制システムも、規制に合わせて高度化している。

パージコントロールソレノイドバルブは、キャニスター

と呼ばれる燃料吸着缶に一時的に蓄えられた蒸発した燃料を、最適なタイミングで吸い出し、エンジン内で燃焼させる量を緻密に制御することに使われる。キャニスターベントソレノイドバルブはシステムの自己診断時に配管を確実に閉塞制御する。これらのソレノイドバルブは、蒸発燃料を車両内で適切に処理する一役を担うことで、環境負荷抑制に貢献している。

2.5 ウエストゲートアクチュエータ

ウエストゲートアクチュエータは、ターボチャージャー付きエンジンに取り付けられ、エンジンの出力を最適化するために使用される。

近年、従来の大排気量エンジンの代わりに、低排気量のターボチャージャー付きエンジンを採用する車両が増加傾向にある。例えば、2Lのエンジンの代わりに、1.4Lのターボチャージャー付きエンジンを搭載するケースである。最高出力は小さくなるが、発進時や巡行時は十分快適で、高い燃費も得られる。従来のウエストゲートアクチュエータは、過給圧力が高くなり過ぎないように、また必要以上の排気圧力がターボチャージャーに掛からないように、ターボチャージャーを回転させる排気ガスの一部を排気管に逃がす用途にだけ使われていた。当社のウエストゲートアクチュエータは、駆動源にDCモータを採用することで、この制御がより緻密、かつ的確にできるだけではなく、あらゆる運転時に使うことが可能なため、始動直後にターボチャージャーを経由させず、排気ガスを直接三元触媒に導き、触媒を早期活性化させることで、排気ガス中の環境負荷物質低減の一役を担い、またエンジンのポンピングロス低減、エンジン出力調整等にも活用され、車両を運転する全ての局面で、排出ガスの有害成分低減と燃費改善に貢献している。

3. マイルドハイブリッドシステムによる燃費改善

3.1 欧州と中国の燃費規制に対する自動車の取組み

地球環境保護の観点から、図3に示すように各国で自動車の燃費やCO₂排出量についての規制が強化されている。中でも欧州と中国は規制値が厳しく罰則もあるため、販売する車種全体の燃費向上が必要になっている。

自動車の燃費向上とCO₂排出量削減には、ハイブリッドやプラグインハイブリッド、電気自動車などのいわゆる電動化が有効だが、燃費向上効果が大きい反面、走行/発電用のモータや、モータを駆動制御するインバータ、電池、充電器等を搭載するため、車両コストが高くなるという課題がある。これに対して、モータでの走行はできないが、

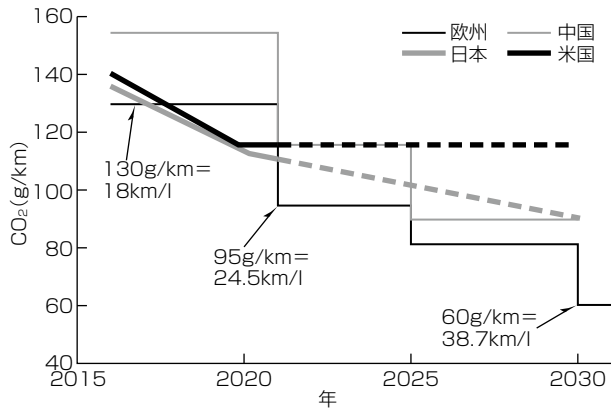


図3. 主要地域の燃費/CO₂排出規制⁽¹⁾

エンジンのアイドリングストップからの再始動性向上とエンジンアシスト・回生発電の出力向上などの機能に限定し、システムコストの増加を抑制するマイルドハイブリッドシステムが普及してきている。燃費向上効果は限定的であるが、システムコストが比較的安く小型車まで含めた幅広い車種に採用可能なため、販売車両全体の燃費を向上させることができ、欧州や中国の燃費規制への対応に有効とされている。ハイブリッドシステムは、エンジンを含むパワートレイン系の中のモータ搭載位置によって、大まかにP0からP4に分類され(表1)、この中のP0及びP1がマイルドハイブリッドと呼ばれる。

3.2 ベルト駆動MGシステム

P0マイルドハイブリッドシステムは、従来の自動車の発電機(オルタネータ)をベルト駆動型モータジェネレータ⁽²⁾(Motor Generator: MG)で置き換えたもので(図4)、ベルト駆動MGシステムと呼ばれる。このシステムは、エンジン回りの部品を大幅に変更しないため、開発コスト及びシステムコストが安価になる利点があり、国内では12V電源を用いたシステムを軽自動車中心に、欧州・中国では48V電源を用いたシステムを中型車やSUV(Sports Utility Vehicle)を中心に適用して急速に市場を拡大している。

表1. モータ搭載位置によるハイブリッドシステムの分類

モータ搭載位置	P0	P1	P2(+P0)		P0+P3	P0+P4
	ベルトプリー	エンジン出力軸	同軸配置	並行軸配置	変速機出力軸	車輪軸
ハイブリッド種類	マイルドハイブリッド		フルハイブリッド/プラグインハイブリッド			
EV走行	不可	不可	可		可	可
ベルトレス化	不可	可	可(+P0の場合は不可)		不可	不可
回生発電	効果あり	効果あり(P0より大)	効果大		効果大	効果大(P2, P3より小)
トルクアシスト	効果あり	効果大	効果大		効果大	効果大
モータ形状	直径	小型	大型	小型	小型	中型
	軸長	中間	短い	中間	中間	長い

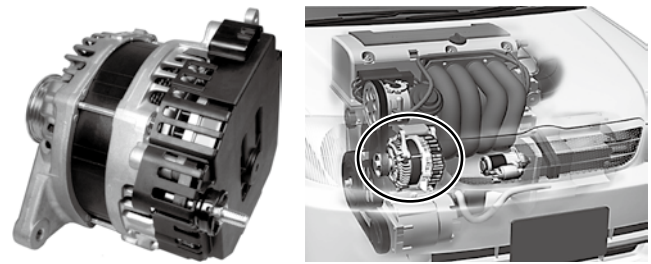


図4. ベルト駆動MGシステム

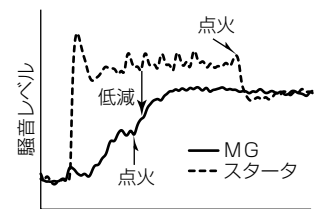
オルタネータの代わりに搭載するために、当社はオルタネータをベースに整流器を小径かつ薄型のインバータに置き換えて、モータとインバータ一体型として、世界最小クラスの製品を開発・量産化した。

ベルト駆動MGは、P0マイルドハイブリッドシステムの燃費向上技術であるアイドリングストップ(エンジンの迅速始動)、減速時の回生発電、走行時の駆動アシストを担うP0マイルドハイブリッド車の主要製品である。

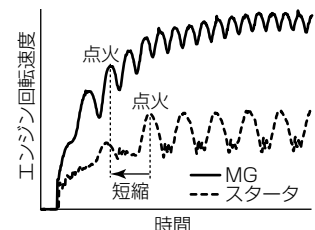
従来、エンジンはスタータで始動されていたが、ベルト駆動MGシステムでは、ベルトを介してエンジンを再始動するため、スタータでの再始動時に発生するギヤの音がなくアイドリングストップから発進時に発生する騒音を低減できる。また、スタータより高回転までトルクが出せるため迅速に始動ができる(図5)。高回転でのトルク出力は、自動車の電動クリープ走行や加速アシストにも適用され、回生で蓄えたエネルギーの有効利用を可能にしている。

発電に関しては、回転子の仕様を変更することで、短時間発電出力を従来のオルタネータに対して約50%向上させ、減速時に回生するエネルギーを増加させている。オルタネータの整流器がダイオードであるのに対して、ベルト駆動MGではインバータのトランジスタを使用して整流し、損失を低減することで発電効率を向上させ、より大きな電力を生み出すことで燃費向上に貢献している。

近年になって、電源を12Vから48Vに変更したベルト駆動MGシステム



(a) 騒音レベルの比較



(b) エンジン回転速度の比較

図5. 駆動特性の比較

が欧州や中国で量産化されており急速に拡大する見込みである。48V対応ベルト駆動MGは、電圧が12Vから48Vで4倍となることから、最大出力も4倍程度の10kWクラスとなり、駆動・発電共に大幅に出力が向上することから燃費改善効果も大きくなる。高電圧になることからインバータの半導体素子の高電圧化、制御方式の変更が必要になり、サイズ、コスト共に大きくなるが、12Vベルト駆動MGシステムと同様にオルタネータの搭載位置に置き換えられるのが利点となっている。電源もリチウムイオン電池のセルが増加することからサイズ、コスト共に増加し、システムコストが増加するため、適用されるのはより燃費改善効果の得られる中型車や大型車になる。当社も48Vベルト駆動を開発中であり、早期量産化を目指している。

3.3 エンジン出力軸直結型ISGシステム

ベルト駆動型MGシステムは既存車両のレイアウト変更が少ないという利点があるが、ベルト伝達能力の制約から高トルクやトルク応答速度には限界がある。そこで、エンジン出力軸上に扁平(へんぺい)薄型モータを搭載する方式が検討されている。図6にシステムの構成を、図7に当社が開発したエンジン出力軸直結型48V-ISG(Integrated Starter-Generator)システム⁽³⁾⁽⁴⁾の外観をそれぞれ示す。このシステムの利点としてボディアースを介して様々な車載機器に電力を供給できる点がある。これによって、ターボチャージャー、ポンプやエアコンなど補機電動化や電気加熱触媒などの電費(電力消費率)・排出ガス改善のためのデバイスを多数追加する場合に利点を持つ。

モータは集中巻の永久磁石型同期モータを多極多スロット化することで大径・薄型のレイアウト制約に対応した。ステータには分割コアの巻線技術を採用することで、巻線の太線化と高密度な巻線を両立させた。また、コアと巻線の絶縁を従来の樹脂ボビンから絶縁紙にすることで放熱性向上を図るとともに、フレームに冷却水路を直接形成することで、冷却性能を向上させた。さらに、多極の集中巻構造を採用することでトルク密度を高めるとともに、弱め磁束制御に必要な電流を低減することによって、高速回転域まで高効率運転範囲を広げることが可能にした⁽⁵⁾。

インバータは、モータと一体化して交流配線をシステム内部に配置するために、エンジン周辺に搭載される。そのため、熱や振動に対し過酷な環境になる。熱の課題に対しては、半導体チップを当社独自のパワーモジュール構造であるTPM(Transfer molded Power Module)にして耐熱性を向上させるとともに、平滑コンデンサを水冷化している。振動に対しても、CAEを駆使してインバータの支持方法や内部構造を工夫し、耐振性の向上を図っている。

制御系については、モータが多極機のため高速回転での

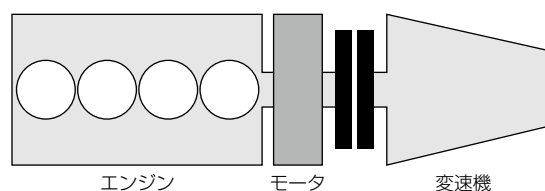


図6. エンジン出力軸直結型ISGシステムの構成

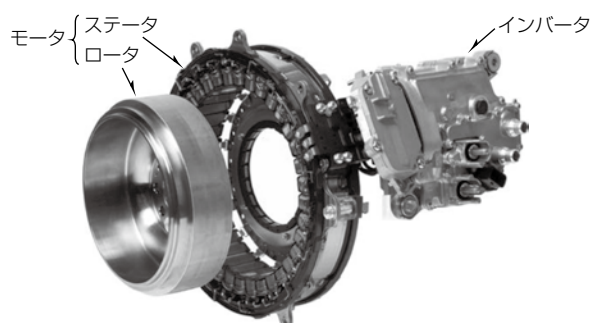


図7. エンジン出力軸直結型48V-ISGシステム

制御が難しくなるが、複数コア搭載マイコンのソフトウェアアーキテクチャを工夫し、処理負荷を最小化することで制御安定性を確保した。さらに、過電圧や過電流に対するインバータ保護、各種フェールセーフ機能、そして複数コア間でのソフトウェア動作監視や別体LSI(Large Scale Integration)とマイコンとの相互監視などを織り込み、機能安全を実現している。

今後は、更なる小型・軽量・高出力化に向けた開発を行い、自動車の燃費改善によるCO₂抑制に貢献していく。

4. む す び

昨今、電動化への大きな流れがある。しかしながら、モータだけを搭載する車両のシェアは限定的であり、ハイブリッド車が主役と予想され、今後も多くの車両には、内燃機関/エンジンが搭載され続ける。各車両メーカーは、引き続き、環境規制に対応した、更なる燃費性能を改善させたエンジンを開発していくことが想定される。当社では、国内外の車両メーカーのエンジン開発のニーズに応える、付加価値の高い製品群を開発・提供し、環境負荷低減に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 和知 敏：自動車のパワートレイン向け発電電動装置，自動車技術会シンポジウムテキスト，12～19，42～47 (2019)
- (2) 藤田暢彦：ベルト駆動式モータジェネレータ，三菱電機技報，90，No.3，199～202 (2016)
- (3) 吉澤敏行，ほか：車載用発電電動機の進化，電気学会自動車研究会，VT-18-002，7～11 (2018)
- (4) エンジンクランク軸搭載用48V-ISGシステム，三菱電機技報，92，No.1，21 (2018)
- (5) 北尾純士，ほか：エンジン出力軸直結型48V-ISGシステム用モータの電磁気設計，三菱電機技報，93，No.5，316～319 (2019)