直噴ガソリンエンジンの今後の動向

Future Trend of Gasoline Direct Injection Engine

正 中山 修 (三菱自動車)

Osamu NAKAYAMA, Mitsubishi Motors

1. はじめに

1996年に世界で初めて日本で直噴ガソリンエンジンの実用化が成功して以来、重要な低燃費技術のひとつであるとする共通認識のもと、日本と欧州の各社が市場参入している。現在実用化されている成層リーンバーン直噴エンジンは、そのすべてがウォールガイドコンセプトを採用しているが、ロバスト性は高いものの、エミッション対策も含めたコスト対燃費パフォーマンスの点でまだ十分でなく、またガソリンを選び、アジア等への展開に不向きなため、コスト削減へのスケールメリットを出しにくいこともあり、商品としての普及は今一步というところが現状である。

これまでの直噴の進化を概説し、将来出現する次世代直噴エンジン実用化に向けた今後の動向について述べる。

2. 燃費の現状と課題

2. 1. 直噴ガソリン搭載車の燃費優位性の変遷

図1は、2001年12月末の時点で国内で販売されていたガソリン乗用車の10・15モード燃費と車両重量の関係をまとめたもの⁽¹⁾であるが、直噴ガソリン搭載車が上方に分布しており、その燃費優位性は明確に読み取ることができる。しかし、2002年になると状況は変わり、図2に示すように直噴ガソリン搭載車の分布は以前に比べそれほど明確ではない。

Fig.1 Fuel economy of gasoline passenger car(2001)

Fig.2 Fuel economy of gasoline passenger car(2002)

2. 2. MPI車の部分負荷燃費改善技術の出現

直噴ガソリンエンジンの燃費向上は、成層燃焼を行う部分負荷領域でしかも低負荷ほどMPIに対する燃費の向上代が大きいという本質がある。

最近のMPIガソリン車のトレンドとして、可変動弁機構(VVT機構)を備え、CVTを装着するものが増えてきた。MPIエンジンにVVT機構があると、アイドル回転数を低下させ

ることができるため、アイドル燃費の大幅な低減が可能となる。また、CVTはエンジンの効率をもっとも良好な低速高負荷の使用頻度を上げて燃費を改善する技術であり、直噴の燃費の向上代が大きい低負荷をあまり使わないため、これもMPI車と直噴車の10・15モード燃費の相対差を縮小させる。図2に示される状況は、VVTとCVTを組み込んだ最新型MPI車の出現が生み出したものと理解することができる。

2. 3. 高効率化への課題

図3は、現在市販されている直噴のMPIに対する燃費向上率を、ダイナモ試験の調査から推定して求めたものである。直噴化によって平均有効圧0.5MPa以下の運転域で効率向上を実現しているが、理想的なケースとして、MPIの標準的な等容度を維持した場合のポンピングロス低減と比熱比増大による向上率を計算してみると、直噴エンジンとしては更なる熱効率向上の余地が残されていることがわかる。

Fig.3 Thermal efficiencies of current direct injection gasoline engines

(1)成層燃焼の質の向上と領域拡大

等容度の改善代はまだ残っており、適切な混合気のかたまりを最適な点火時期に点火プラグ周囲の空間に配置すること、バルクフローから乱れへの変換時期を着火タイミングに同期させること、などの工夫が残されている。燃焼効率においても、壁面付着燃料の排除による改善代がある。

(2)予混合燃焼の効率向上

ウォールガイドコンセプトはすべてピストン頂面に設けられた大空間キャビティとの共存で成立しているが、これに起因するS/V比の増大が熱損失増大や燃焼効率低下をひき起こし、結果的に高圧縮比あるいは耐ノック性による高効率化をキャンセルしている。レスキャビティ下の成層燃焼を成立させることが必要である。

(3)リーン運転頻度の拡張

現在市販されている直噴ガソリン搭載車の多くは、NOx規制値を満たすため、アイドルリングと定常走行を除いて、加速時のほとんどをストイキ運転に切り替えて走っている。加速中のリーン頻度を増大させたときに生じる燃費改善ポテンシャルが約7%もあり、NOx触媒の高性能化が直噴ガソリン搭載車の燃費の現状を変え得る大きな武器である。

3. 排ガス低減技術

直噴ガソリンエンジンについて、HC、NOxを低減するのは困難であると危惧する議論が一部にあったが、現在では、燃焼形態を自由に制御できる直噴ガソリンエンジンのポテ

ンシヤルを活かした様々な触媒反応制御技術が開発されており、日本 ULEV 規制、欧州 Euro5 規制、カリフォルニア SULEV 規制にも対応できる可能性が確認されている。

3. 1. コールド排ガス低減技術

直噴ガソリンエンジン固有の特性を利用した効果の大きい技術が開発されており、従来型 MPI エンジンよりも優れた触媒温度の急速な立ち上がりを実現している。⁽²⁾

2 段燃焼は、始動直後のアイドルリングを成層燃焼の採用によって非常にリーンな状態で運転し、膨張行程後半に再度燃料を噴射して高温雰囲気ガスの中で燃料を着火させる。その結果、排気温度は 1,000℃ 近くまで上昇し、触媒は急速に昇温される。(図 4)

Fig.4 Process of 2-stage combustion

2 段燃焼は長時間続けると燃費悪化が問題となる。成層スライトリーン燃焼は、5～10 秒間の 2 段燃焼で触媒温度を CO の酸化反応が開始可能な最低温度まで上昇させた後に行われる。ゆるやかな成層燃焼で排ガス中に酸素と CO を共存させると、CO の酸化反応が触媒表面で瞬時に始まり、その反応熱で触媒が早期に加熱される。

3. 2. リーン NOx 触媒技術

(1) 触媒反応制御

NOx トラップ触媒は、リーン運転時にトラップした NOx を短時間のリッチ運転で脱離・還元することにより NOx の浄化を行っているが、この一連の反応プロセスそのものが制御対象となっている。直噴では、膨張行程の追加噴射で HC 濃度の高い排ガスを供給し NOx 浄化率を高めるといふ、触媒反応の選択性まで適合操作する燃焼制御に至っている。⁽³⁾ これは直噴にしかできない NOx 触媒の反応制御技術であり、低燃費技術としてきわめて意義が大きい。

(2) サルファ被毒の抑制

燃料サルファから生成される排ガス中の SO₂ は、トラップ剤との結合が NOx より安定であるため、触媒を被毒させる。したがって、実用化に当たっては蓄積した硫黄分を除去する操作(サルファ・パージ)が必要となる。パージ速度は、触媒温度に対して指数的に増大するため、パージには昇温操作が使われる。昇温させる場合、昇温に要したエネルギーだけ燃料消費量が増大する。燃料サルファ濃度が高い程、同じ NOx 排出レベルを実現するために、昇温操作の頻度を大きくする必要があり、燃料消費量が増大する。

サルファフリー燃料は、燃費の悪化なしに、よりクリーンな排ガス性能をもたらすと同時に、リーン運転頻度拡張による燃費改善をもたらすものでもあり、実現された場合の直噴エンジンに与える恩恵は非常に大きい。

4. 直噴を手段とする周辺技術の発展

燃料供給系から歴史を振り返ってみると、三元触媒のために登場した MPI が、吸気慣性効果、多弁化、可変バルブタイミング、高出力ターボ、大量 EGR といったエンジンの高性能化と低燃費につながる技術を生み出してきた。

同様に、直噴ガソリンエンジンも成層燃焼の実現という当初の目的とは別に、表 1 に示すような直噴の迅速始動と高応答のトルク制御性を用いるアイドルリングストップ、小型モータ HEV、直噴の耐ノック性を生かした過給ダウンサイジング、そして直噴の触媒反応制御技術を使う NOx トラップ付き予混合リーンバーンといった周辺技術を発展させていくことになる。

Table1 Integration of direct injection and peripheral technologies

	成層燃焼	耐ノック	迅速始動	NOx 触媒反応制御
第一世代	○	○		○
ストイキ高圧縮比		○		
過給 Downsized		○		
アイドルストップ	○	○	○	○
小型モータ HEV	○	○	○	○
予混合リーン		○		◎
次世代型	◎	○		◎

4. 1. アイドリングストップ

アイドルストップ機能が広く受け入れられるには、エンジン停止状態から発進する時に、速やかに発進加速できることが必要条件である。直噴の場合は、エンジンの起動後に圧縮行程の気筒内に直接燃料を噴射することができるので、遅れは大幅に短くなる。さらに、リーン燃焼でトルクが抑制されるため、始動後の余分な回転吹上りを抑えることができアイドルストップで確実に燃料を節約できるようになっている。

4. 2. トルク制御性

直噴エンジンは筒内に直接燃料を噴射するので、1 サイクルごとにトルクを変えることも可能である。この高応答のトルク制御は、CVT の効率とドライブビリティ・耐久性のトレードオフ問題の解決を容易にしたり、駆動系のねじり共振をねじり振動周波数にあわせた高速トルク制御で抑止するのに使われている。

また、ハイブリッドエンジンで小型モータを使った場合でも、直噴では超リーン成層燃焼によって出力をきわめて小さく保つことができ、エンジン起動時のショックを抑制できる。このように、トルクを自由に制御するという直噴にしかできない特徴を使って、各種トレードオフ問題を解決していく手法は、今後もさらに進展していくものと予想される。

5. 今後の展望

直噴ガソリンエンジンが実用化されてからの歴史は浅く、まだまだ進化の余地が残されている。今後とも世界の各所で、ウォールガイドから抜け出す次世代コンセプトの確立に向けたブレークスルーへの挑戦に凌ぎが削られよう。

その一方で、周辺技術は順調に進展し、現在の直噴エンジンとの組み合わせで、いくつかの低燃費システムが市場に導入されるであろう。このような環境にあって、リーン NOx 触媒の性能改良とその反応制御技術の開発、そしてサルファフリー燃料の導入がきわめて重要な位置を占めている。

- (1) 国土交通省：自動車燃費一覧 (2001 年 12 月現在)
- (2) Shigeo Yamamoto et al.: Mixing Control and Combustion in Gasoline Direct Injection Engines for Reducing Cold-Start Emissions, SAE Paper 2001-01-0550
- (3) Takashi Dogahara et al.: Development of Advanced Emission-Control Technologies for Gasoline Direct-Injection Engines, SAE Paper 2001-01-0254
- (4) Katsunori Ueda et al.: Idling Stop System Coupled with Quick Start Features of Gasoline Direct Injection, SAE Paper 2001-01-0545