

新世代水平対向エンジンの開発

堀 智宣（富士重工業株式会社）

1. はじめに

燃費規制の強化や新興国の発展に伴う石油資源使用量の増加といった影響から環境性能の強化が自動車産業では重要なテクノロジーとなっている。スバルにおいてもグローバル環境性能の向上を基幹技術として開発している。本報ではその一環であり、今後の環境戦略の基となる新世代水平対向エンジンの開発内容について紹介する。

2. スバルの水平対向エンジンの歴史

スバルでは低振動で高剛性な水平対向エンジンを1966年から製造しており、その歴史について本報で触れておく。

2. 1. 第1世代:EA 型 スバル1000～

自動車産業黎明期において、広い室内空間を有する家用用車を製作するためFF駆動方式を日本初採用した車に搭載するため開発された。回転バランスがよく振動が少ない水平対向エンジンのメリットを生かした自動車用エンジンと言える。(Fig.1)



Fig.1 EA 型水平対向エンジン

2. 2. 第2世代:EJ 型 初代レガシー～

新しいフラッグシップカー企画として AWD 駆動に相応しいエンジンは何かという出発点から検討を行い、シメトリレイアウトが出来ることと、高出力に耐える剛性の高くできる水平対向エンジンを継続してレガシーへ採用した。またもうひとつの特徴である 1.5Lt～2.5Ltの排気量までを同一シリンダーブロック構造で同じ製造ラインで作るといことも確立した。(Fig.2)



Fig.2 EJ 型水平対向エンジン

3. 新世代エンジンの開発コンセプト

スバルが提唱する「走る愉しさと安心感」を車作りで生かすためには水平対向エンジンを継承し、進化させることを基本コンセプトとした。そのため主要ディメンジョンを最適化しベースとしての性能を最良とすることに加え、合理的な燃費向上デバイスを選択し、ポテンシャルを最大限に引き出すことでエンジンパフォーマンスを最大化することを狙いとした。特に燃費性能においては、グローバルに求められる性能として大幅に進化させた新水平対向として「FB 型」を開発した。(Fig.3)



Fig.3 FB 型水平対向エンジン

4. 燃費性能向上について

燃費性能向上のために拘って開発するため

- (1) 基本燃焼性能の向上(ロングストロークとコンパクト燃焼室)
 - (2) 合理的燃費デバイスの採用
 - (3) エンジンフリクションの大幅低減
- に取り組んで開発を行なった。

4.1. 基本燃焼性能の向上

燃費性能向上させるには燃焼限界の向上を含めたベースとなる燃焼性能を進化させることが必要であった。そのため、ストローク/ボア比の変更、吸排気系、燃焼室を1から見直すことが必要であった。先行開発段階から、過去の開発の知見に加え、燃焼性能として最良となるボア x ストロークの組合せ、そしてその時の吸気マニフォールドからシリンダーヘッドの吸気ポート、燃焼室へ一体として最適なガス流動を有することと、タンブル流を圧縮工程まで残存させることができる形状をシミュレーションと評価結果から最適形状を決めた。⁽¹⁾

その結果 EJ エンジンからのロングストローク化とコンパクトな燃焼室との組合せがもっとも良い結果が得られた⁽²⁾⁽³⁾ので、現行プラットフォームに合わせるため90mm ストロークを採用した。搭載車体の制約からエンジン全長は不変であることが前提としてあったため、ストロークアップさせる手法として斜め割コンロッドの採用によって下死点位置を引き下げてながらクランク系の強度確保のできるストローク量とした。(Fig.4)

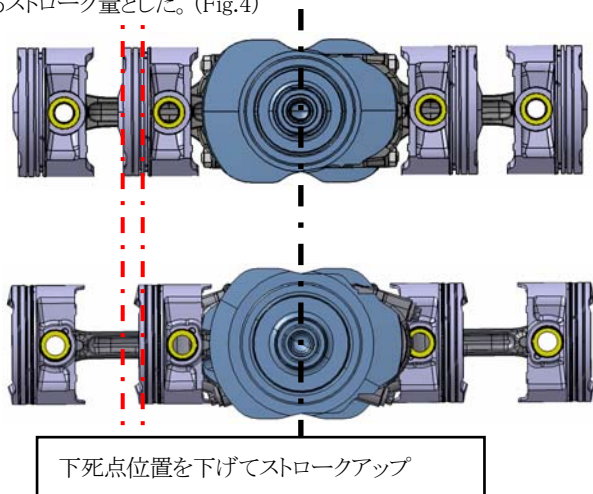


Fig.4 ストロークアップの新旧比較

筒内ガス流動強さの上死点における残存性を高めるためには、従来比でバルブ狭角設定とタイミングチェーンによるカム駆動式の採用によってカム芯間詰めによってコンパクトな燃焼室を形成することが必要であった。そして燃焼が開始する圧縮行程後期までタンブル流を維持するため、ピストンセンターにキャビティを設けることで、燃焼室中央の燃焼室高さ/ボア比(H/B)を大きくした。(Fig.5)燃焼室形状はピストンキャビティへの再流入を良くするよう、極力滑らかに繋がる形状とした。これによりタンブル流の残存性を高められた。

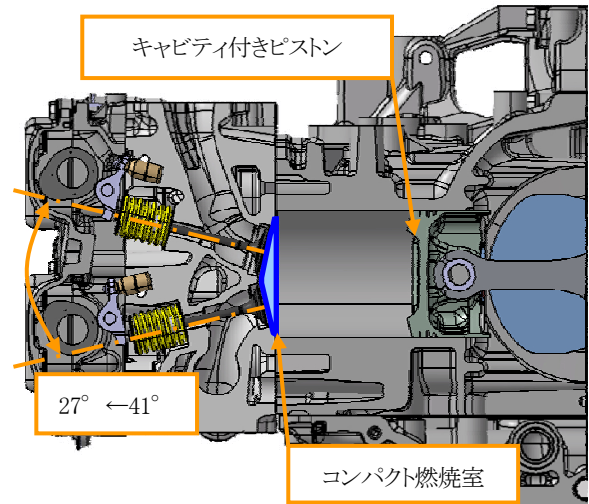


Fig.5 バルブ挟み角と燃焼室形状

4.2. 最適燃費デバイスの採用

基礎となる燃焼性能を進化させたことで、燃費向上のデバイスを持つポテンシャルを十分に引き出す為の良好な素地を備えたエンジンとなった。

FB エンジンは燃費デバイスとして「EGRクーラ」、「AVCS(Active Valve Control System)」、そして「TGV(Tumble Generation Valve)」を採用することとした。

EGRクーラによって、従来比でEGR導入率を上げることが可能となる。とくに高負荷運転域でのEGR率を高めることで、吸入ガス温度低減効果によるノッキング抑制をし、点火進角が可能となり、MBT領域の拡大を達成し、燃費向上を図っている。

一方低負荷域では、EGR率を向上すると逆に熱容量が上がり燃費ゲインが得られない。そこでAVCSを用いて低負荷時はミラーサイクル化させることで、低膨張比サイクルと高負荷域ほどではないが、EGR導入を組合せることで燃費向上を行なった。ミラーサイクル化を達成するためにはエンジン始動時から進角・遅角側の両方向に変換角を有するAVCSが必要となる。そのため油圧式としては初めてとなる中間ロック式AVCSを採用した。(Fig.6) これによって、エンジン始動性、高負荷時の充填効率アップによる性能向上と併せ持つエンジン仕様とすることが出来た。

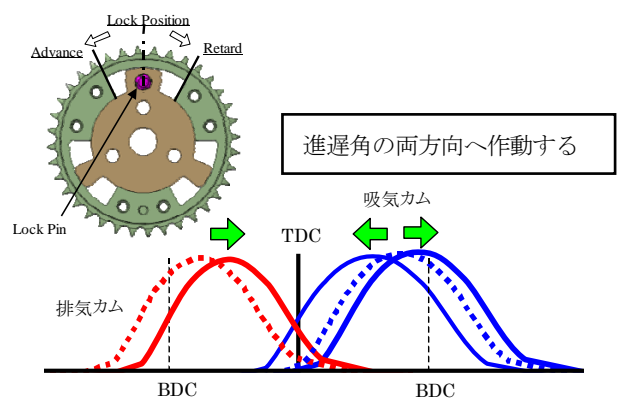


Fig.6 中間ロック式AVCSについて

EGR導入とAVCSによるミラーサイクル化はTGV採用によって得られる筒内ガス流動強化により、燃焼速度の向上が図れているため実行できている。

燃費デバイスを最適かつ合理的に採用したことで、基本性能進化させたFBエンジンの燃費性能の最大化を達成している。

4.3. エンジンフリクション低減

燃費改善を図るうえで、機械の摩擦損失を下げることは合理的かつ有効な手段であるため、新型エンジンでは Table.1 で示すエンジンの低フリクション技術を織込むことで燃費を改善した。

1	分離冷却システムによる各部温度適正化 (冷却系回路変更)
2	ダミーヘッド加工・新ヘッドガスケットによる シリンダボア変形の改善
3	ピストン系軽量化による慣性質量の低減
4	ローラロックによる動弁系フリクションの低減
5	軸受け部の加工精度向上
6	オイルポンプの高効率化

Table.1 フリクション低減アイテム

上記アイテム投入により、エンジン全体のフリクション低減効果をまとめると Fig.7 のようになる。狙い通りに従来比で大きくフリクション低減を達成できており、エンジン各部の要素から満遍なく低減しており、新世代化したことで得られた効果といえる。

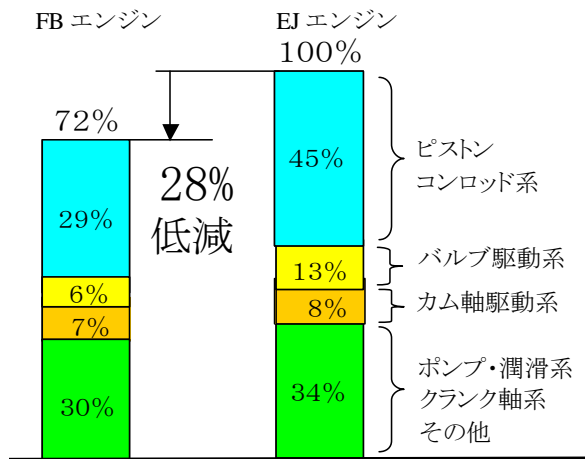


Fig.7 エンジンフリクション低減効果(モータリング時)

4.4. FB20/FB25 のモード燃費改善効果

燃焼改善とフリクション低減の効果により、国内 10-15 モードでの燃費改善効果は11.8%改善した。そのうち、フリクション低減の効果は、3.2%と分析している。改善目標として取り組んだ燃焼改善による図示燃費率分については、競合エンジンと比較してトップレベルを達成できており、開発コンセプト通りとなっている。(Fig.8)

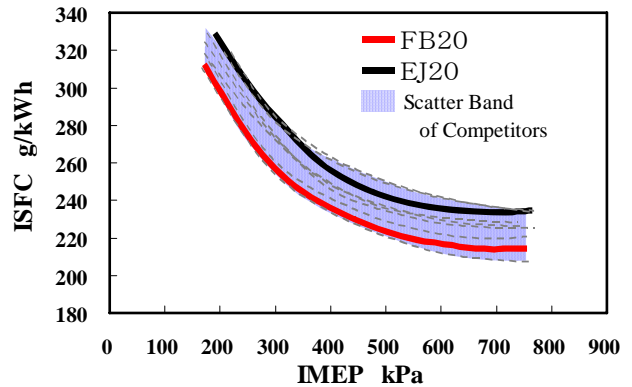


Fig.8 燃焼分の改善効果

5. 排気ガス性能の向上

5.1. 昇温特性の改善

TGVの採用、燃焼改善によるリタード燃焼限界向上により、ファストアイドル時にHC排出量を抑えつつ排気温度を上げることができた。(Fig.9)

5.2. 排気システム

出力性能と環境性能を両立させるために、ブランチ長の最適化と触媒までの熱容量のミニマム化を実施し、低速トルクの維持と触媒昇温性能を向上させた。Fig.10 に形状を示す。各排気ポートから繋がるブランチの集合部形状を工夫することで従来の排気系から表面積を10%削減した。これに燃焼改善に伴うベースエミッションの改善と併せ、排気ガス規制を変更することなく触媒貴金属使用量を30%低減することができた。(Fig.11)

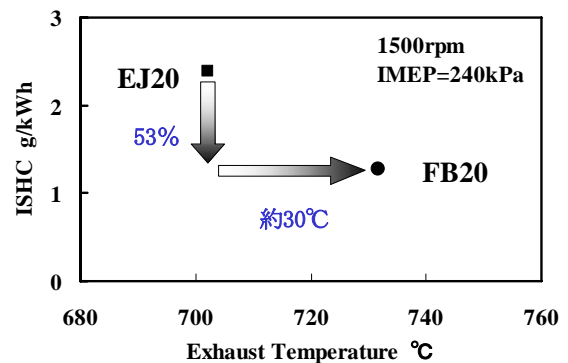


Fig.9 昇温特性の改善結果

7. まとめ

スバルの主力エンジンである水平対向 4 気筒エンジンを刷新するにあたり、従来機の延長線上での向上ではなく、完全な新設計を行い、基本性能向上のためストローク/ボア比の改善、燃焼限界向上に向けた吸気ポートや燃焼室設計の見直し、中間位置ロック機構を有するAVCS、TGVの採用、EGRクーラなどの新機構の採用によりそのポテンシャルを最大限に引き出すことができた。結果として従来比 11.8%のエンジン単体での燃費改善が得られた(10-15 モード)。また出力性能や排気ガス性能についても向上を果たし、環境性能と出力性能を高次元で両立させて、これからのスバル環境戦略の柱となるエンジン仕様としてまとめることができた。

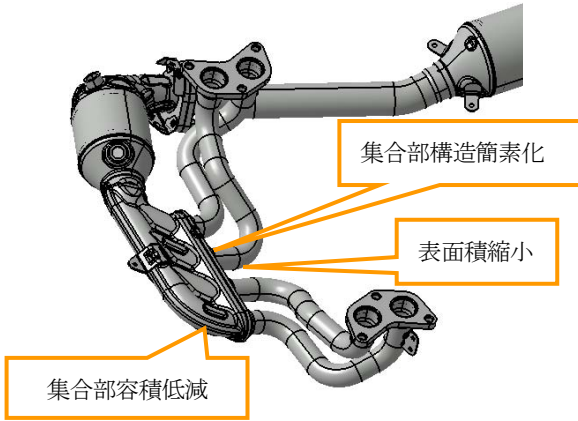


Fig.10 排気系形状

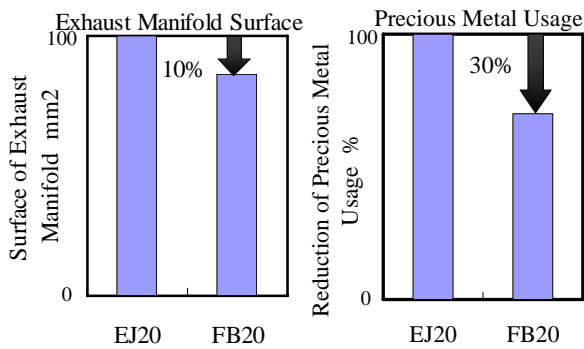


Fig.11 排気系表面積と貴金属使用量の比較

6. 出力性能について

スバルとして「走り」の要素は実用域での運転のしやすさを実感できるようにして、運転する楽しみを得るよう目指した。具体的には Fig.12 に示すように中低速域のトルクを向上させ、カタログスペックは同等とすることで走行性能の進化を行なっている。

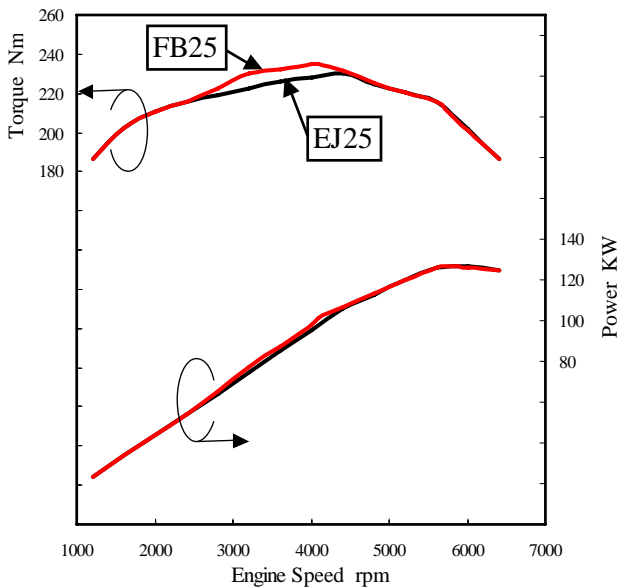


Fig.12 出力性能の比較

参考文献

- (1)金子・ほか:タンブルの生成と崩壊の制御による SI エンジンの燃焼制御, 第 17 回内燃機関シンポジウム講演論文集, p.137-142(2002)
- (2)堀・ほか 6 名:新世代水平対向ガソリンエンジンの開発(第1報), 自動車技術会 2010 年秋季学術講演会前刷集, No.110-10, 20105769 (2010)
- (3)秋本・ほか8名:新世代水平対向ガソリンエンジンの開発(第2報), 自動車技術会 2010 年秋季学術講演会前刷集, No.110-10, 20105781 (2010)