

日時： 2013年7月13日(土) 13:30-16:30

場所： 名城大学天白キャンパス・タワー75 15階レセプションホール

出席者： 21名

調尚孝(主査, 日本自動車部品総研)[追: 金原賢治], 山川正尚(マツダ株式会社), 高橋周平(幹事, 岐阜大学), 田村守淑(幹事, 東邦ガス), 中村俊秋(豊田自動織機)[追: 山下優, 高松昌史], 寺地淳(日産自動車), 小島晋爾(名城大学), 松田淳(名城大学), 大平哲也(スズキ)[追: 井上裕章], 鬼頭俊介(豊田高専), 野田進(豊橋技術科学大学), 内田登(新エイシーイー), 太田安彦(元名古屋工業大学), 内田睦(大阪ガス)[代: 高島良胤], 木下久寿(ヤマハ発動機)[代: 荒木裕次], 藤村俊夫(愛知工業大学), 小池誠(トヨタ中央研究所)

議事

1. 話題提供

(1) マツダ株式会社パワートレイン開発本部 山川正尚氏 (13:30-15:00)

「高圧縮ガソリンエンジンの燃焼技術」

要旨:

マツダ株式会社の開発した、高圧縮比ガソリンエンジン SKYACTIV-G(圧縮比 14)の開発に関する話題提供があった。

ガソリンエンジンには、現時点でも燃焼領域だけで50%以上熱効率を改善できるポテンシャルがあると考えている。この改善項目の1つとして圧縮比向上が挙げられる。圧縮比は、エンジンの歴史とともに上がってきているが、2010年において12程度が、その最大値となっている。高圧縮比を取ると、理論熱効率はもちろん増加するが、同時に全負荷時のノックによるダメージを回避するため、点火時期リタードをかける必要があり、結果トルクが低下する。しかし一方、ペントルーフ加工したピストンヘッドを用いて、圧縮比を11から15まで次第にあげて実験を行うと、圧縮比13を超えても、ノックリミット点のトルクがそれ以上低下しないという現象が見られた。そこで、点火時期をATDC⁸に固定して熱発生率を比較すると、圧縮比が11.2から13に変化する際には、熱発生率が緩やかになる現象が見られたが、圧縮比をさらに15にあげても、熱発生率はさほど変化せず、また点火時期の直前に、低温酸化反応によると見られる発熱が観察された。このときの点火前低温酸化反応による寄与はP-V線図上においても確認され、圧縮比15においてもBMEPが低下しない原因と考えられた。このときのシリンダ内部の流動をPIVで観察したところ、実験で採用したペントルーフ型のピストン形状を用いた場合は、圧縮比が高くなるとタンブル流が互いに干渉しあい弱まること、また初期火炎もピストンと接触して火炎伝播を阻害していることが分かった。また、詳細反応を考慮した化学動力学モデルを組み込んだ数値計算を行った結果、圧縮比14以上で点火前の低温酸化反応が開始され、燃焼室中心部の温度は上がるもののエンドガス部の温度はほとんど上がらずノック強度の低下への影響は少ないことが示唆された。さらに、この低温酸化反応が層流燃焼速度に及ぼす影響を0次元計算で調べたところ、圧縮比15の条件においても、圧力・温度上昇による燃焼速度増加の効果が、低温酸化に伴う中間体生成による燃焼速度低下の効果を打ち消すことで、高圧縮比条件において燃焼速度が高くなることが分かった。これらの結果から、圧縮比15の全負荷条件においても、圧縮比13の条件とさほどトルクが変わらず、当初予想していた大幅なトルク低下はないことが分かった。この事実は、エンジン高圧縮比化に当たり、圧縮比13程度への対応で実現可能であることを暗示し、大きな励みとなった。

そこで、高圧縮比エンジン実現に当たり、まずノッキング改善に取り組んだ。タンブル流を阻害するペントルーフ型ピストンを、キャビティ付き形状に変更した。また、この形状では初期火炎核がピストンに触れることがなくなったため、火炎伝播がスムーズになり、結果、等容度が3.8%改善された。同時に、これまで採用していたスワールインジェクタをマルチホールインジェクタに変更することで、タンブル流の減衰を避け、かつ、燃料の気化熱を予混合気の冷却に効果的に利用できるようにした。点火プラグを2点に増やす案も検討されたが、量産時にはボア径の縮小などで代替した。これらの改良を採用した結果、全負荷時のトルクは、圧縮比14.5においても、圧縮比11.2のエンジンと同様の値を得ることに成功した。また、開発過程において、部分負荷時の燃費が、圧縮比13で頭打ちとなり、高圧縮比条件での更なる燃費向上とはならないという問題もあった。この原因を熱収支で検討した結果、燃焼室のS/V比の増大により冷却損失が増大していることが分かった。この問題も、ピストン形状をキャビティ型へ変更することにより、燃焼温度が高くなる場所の局所S/V比が改善され、冷却損失が低減し、圧縮比14.5の部分負荷条件においても、高い燃費を得ることができた。

次に、排気系にも改良を加え、4-2-1排気サイクルを導入して、脈動と排気干渉により、残留ガスの掃気と体積効率の向上を試みた。また同時に、吸気弁からの流れをピストン形状が妨げないように、キャビティ付きペントルー

フ（エベレスト型）の頂点を切った富士山型形状を採用することにより、体積効率の向上が達成された。また、新たに採用した排気系は触媒での温度が低く、高圧縮比においては触媒が活性化しにくいという問題があった。このためマルチホールインジェクタの各穴から出た燃料が、プラグ位置に来る時間をそれぞれずらすことにより成層燃焼をさせ、大幅な点火時期リタードに対応できるようにした。この結果、触媒温度を上げることができ、触媒の早期暖気が可能となった。これらの技術を統合して、圧縮比 14 のエンジンにおいて、現行エンジン比 15%の燃費改善、低・中速トルク 15%向上が達成できた。

質疑

Q.1 1500rpm においても、点火時期が ATDC8° と遅いようだが、Pmax は燃焼圧でなく TDC での圧力ということになるのか？回転数が上がると相当の遅角になるのでは？

A.1 このエンジンをそのまま車に搭載しているわけではなく、4-2-1 排気系を導入して、もっと点火時期を早期化している。

Q.2 MBT を出そうとすると、20° 以上進角する必要があると思うが、排気系を工夫するだけでそんなに進角ができるのか？

A.2 低速では MBT までは到達していない。

Q.3 圧縮比 15 の条件で、P-V 線図において TCD 後に圧力が高い領域があるが、これは熱発生率の図のどこに相当するのか？

A.3 点火時期の前のやや盛り上がっている部分が相当する。

Q.4 圧縮比が高い条件では、低温酸化反応が起こっている中でスパークが飛んでいるのか？この場合は、低温酸化反応で壊れた燃料が存在している中を火花が伝播しているということか？

A.4 その通り。初めから意図したわけではないが、低温酸化反応中に火花点火するとどのような影響が出るかを調べている。圧縮比が 16 に達すると、いわゆるプリグニッションと呼ばれる高温酸化反応も起きるが、圧縮比 15 以下ではその前にピストンが下降して圧力温度が降下するので高温酸化反応は起きない。

Q.5 残留ガスを掃気すると初期温度が下がりノックが抑制されるというが、残留ガスの存在は同時に着火を抑制する効果もある。そのため、ノック抑制は温度・圧力・組成を勘案して判断すべきで、温度を下げるのがノックを抑制するとは直接には断定できないと考える。圧縮比を 13 から 15 に上げた際の挙動も、燃焼室形状に依存した結果ではないのか？たとえば、低温酸化反応による出力への寄与を言及しているが、そうだとするとオクタン価を下げたほうが出力が上がったりする現象が見られるのか？

A.5 今回報告した結果は、燃焼室依存の現象であり、我々も採用した燃焼室形状下での結果ととらえている。また、オクタン価を減らした場合は、低温酸化反応による寄与は確かに大きくなるが、点火時期のリタード量が大きくなるため出力増加には至らない。さらに減らすと、プレイグニッションも起こす。低温酸化反応の利用がすべての問題を解決するというのではなく、高圧縮比エンジン開発のハードルが意外と低いかもかもしれないというきっかけになったと、捉えていただければと思う。

Q.6 高出力・低燃費・排ガスのクリーン化というのを同時に狙っているが、例えば、高膨張比と 4-2-1 排気を採用した結果、触媒温度が低下し、これを解決するために点火時期のリタードをかけている。この対策は、低燃費にはマイナスに作用すると思うが、それぞれの効果がどの程度お互いに影響しているかの評価などはしているのか？また、排気のエネルギーを回収するようなことは考えているのか？

A.6 それぞれの損得の影響までは、計算していないが、触媒暖機のためのリタードは始動時のごく僅かな時間なので影響は小さい。排気損失はピストンで回収するのが得で、廃熱の積極的利用はあまり得でないと考えている。

Q.7 4-2-1 排気を使って掃気して点火時期を進角させているとのことだが、この場合、低温酸化反応は実際に使っているのか？

A.7 低温酸化反応の程度は少なくなる。たとえばノッキングに有利な低吸気温やハイオク燃料では低温酸化反応が生じないが、点火時期は早期化できるので出力は幾らか上がる。逆を言えば、ノッキングに不利な条件でも低温酸化反応のおかげであまり出力は落ちない。

2. 事務連絡(15:10-15:20)

次回(第7回)は 10/12(土) 武豊火力発電所で開催予定。見学会を行う。

3. 名城大学研究室見学(15:20-16:45)

名城大学の小島研、松田研、村上・中島研の紹介と研究室見学を行った。

以上