



燃焼安定性におけるポート噴射の影響

The Influence of Port Fuel Injection on Combustion Stability

加藤昇一 林田高典 飯田実

技術論文

Abstract

The demands on internal combustion engines for low emissions and fuel consumption are increasing year by year. On the other hand, engines to be used in motorcycles need to provide high output and quick response to meet user desire. In order to realize low fuel consumption while keeping high performance, it is necessary to properly understand cyclic variations during combustion as well as the influence of the injection system on fuel control during transient periods.

The current paper reports on the results of a study in the influence of port fuel injection on combustion stability in a small displacement motorcycle engine, using both a series of experiments and CFD. The parameters of the injection systems under study are injection targeted area, injection timing, and fuel droplet size. Considering experimental results and CFD results, it is shown that the cyclic variations of combustion can be correlated with the inhomogeneity of the mixture distribution in the cylinder and around the spark plug.

要旨

内燃機関に対する排ガス・燃費の要求は、年々厳しくなっている。その一方で、モーターサイクルエンジンには、その商品性から高出力・高レスポンスも求められている。低燃費と高性能を両立するためには、燃焼のサイクル変動や過渡時の燃料制御に対する噴射系の影響を把握しておくことが必要不可欠である。本報告では、小排気量モーターサイクルエンジンにおける燃焼安定性に対するポート噴射の影響について、実験とCFD(Computational Fluid Dynamics)により調査した結果を報告する。議論される噴射系諸元は、噴射ねらい位置、噴射時期、燃料液滴サイズである。実験結果と計算結果を考察することにより、筒内およびプラグ近傍の混合気の不均一性が燃焼のサイクル変動に影響を与えることが示される。

1 はじめに

内燃機関の低燃費に対する要求¹⁾は、環境やエネルギー問題の高まりに基づき大きくなってきている。希薄燃焼はポート噴射エンジンにおいて、低燃費を実現するためのひとつのアイデアとして知られている。しかしながら、燃焼のサイクル変動のために希薄燃焼の範囲²⁾は限られており、燃焼安定性を保つことが強く望まれている。そのため、希薄燃焼の限界を延ばすために、それが何故、どうやって起きているのかを理解することが不可欠となっている。自動車エンジンにおいては、光学的可視化やCFDを用いることにより、流動場、混合気および火炎伝播の構造について多くの研究が報告されている^{3~5)}。しかしながら、モーターサイクルエンジンに関するものは数少ない。

モーターサイクルは、車載上の要件から噴射系のレイアウトに制限が大きい。また特にスポーツ系の

車両においては、高い比出力要求のため、ショートストロークのレイアウトが多い。このため低負荷燃焼の安定性を確保することが難しい。また加速時の挙動は、特にスポーツ系の車両において重要な商品の魅力のひとつである。このような事情から、燃焼のサイクル変動や過渡時の燃料制御に対する噴射系の影響を確認する必要性は高い。

本報告では、小排気量モーターサイクルエンジンにおける、燃焼安定性に対するポート噴射の影響を実験とCFDを用いて調査した。噴射諸元として、以下の影響を確認した。

- (1) 噴射ねらい位置(吸気ポート上流壁と、両吸気ポートあるいは片側吸気ポートのバルブ傘表面)
- (2) 噴射時期(燃料噴霧が吸気バルブ隙間を直接通過していく場合か、吸気バルブが閉じている場合)
- (3) 燃料液滴サイズ(低圧インジェクターと、微粒化の良いインジェクター)

2 実験方法

本研究では、市販車エンジンをベースとした水冷式4ストローク単気筒エンジンを用いた。供試エンジンの主な諸元は表1に示す通りである。今回用いた噴射系は4仕様である。その主な諸元を表2に、概略図を図1に示す。

表1 供試エンジン諸元

| | |
|--------------|-----------------------|
| ボア × ストローク | 73.0 mm × 59.6 mm |
| コネクティングロッド長 | 116.0 mm |
| 排気量 | 249.4 cm ³ |
| 圧縮比 | 9.7 |
| バルブオーバーラップ期間 | 48 deg |
| バルブ数 | Intake 2 & Exhaust 2 |

表2 噴射系諸元

| 噴射系 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------|----------|-------------|-------------|-------------|
| ねらい位置 | 吸気ポート上流壁 | 両方の吸気バルブ傘表面 | 片方の吸気バルブ傘表面 | 吸気ポート上流壁 |
| 噴霧形状 | 1-Jet | 2-Jet | 1-Jet | Hollow Cone |
| 噴射角 | - | 18.5deg | - | - |
| 噴霧角 | 5deg | 5deg | 5deg | 45deg |
| 噴射圧 | 0.3 MPa | 0.3 MPa | 0.3 MPa | 7.0 MPa |
| S M D | 120μm | 130μm | 120μm | 30μm |

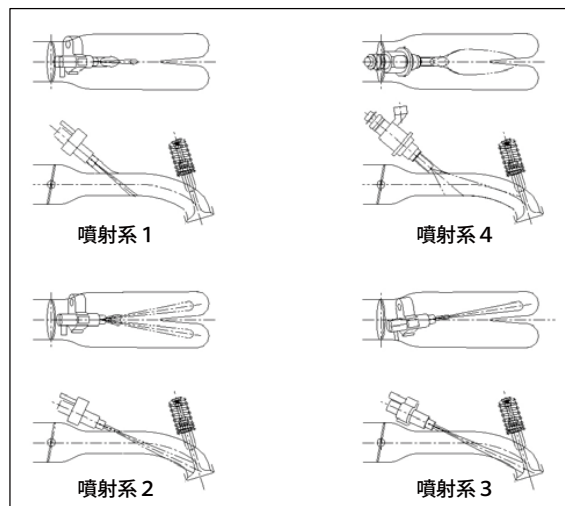


図1 噴射系概略図

噴射系1、2および3では、従来のPFI(Port Fuel Injection)で用いられるインジェクターを用い、噴射系4では微粒化の良いインジェクターを用いた。噴射系1と4では、燃料は吸気ポート上流の壁面をねらって噴射される。噴射系2では、両方の吸気ポートの吸気バルブ傘表面をねらって燃料が噴射される。一方、噴射系3では、片方の吸気ポートの吸気バルブ傘表面をねらって燃料が噴射される。燃料噴霧の初期平均粒径は、東日コンピュータアプリケーションズ(株)製のレーザ光散乱方式粒度分布測定装置「LDSA-1500 A」によって得られた噴孔下50mmでのSMD(Sauter Mean Diameter)である。筒内圧計測にはKISTLER社製 非冷却式圧力センサー「6053C」を用い、燃焼解析には小野測器(株)の燃焼解析システム「DS-228」を用いた。燃焼安定性の評価には図示平均有効圧力(NMEP:Net Mean Effective Pressure)の変動率(COV:Coefficient Of Variance)を用いた。

本報にて報告される実験結果は表3に示すように、回転数4000rpmの部分負荷域での結果である。吸気量はスロットルバルブにて調整した。噴射時期は特に示さない限り、圧縮上死点前(BCTDC) 240degとした。これは、あらかじめ行ったテストにより、燃焼安定性が噴射時期にあまり寄らない条件として設定した。点火時期は、各運転でのMBT(Minimum Spark Advance for Best Torque)である。

表3 エンジン運転条件

| | |
|---------|--------------------|
| エンジン回転数 | 4000 rpm |
| 負荷 | NMEP 300 ~ 700 kPa |
| A F R | 13, 14.5, 16 |
| 冷却水温 | 30, 80 °C |
| 点火時期 | MBT |
| 噴射開始時期 | 240 deg BCTDC |

3 混合気と液膜挙動の数値解析手法

噴射系、噴射時期および、冷却水温によるエンジン内の混合気分布の差異を把握するため、CFDを用いて燃料液滴・液膜の挙動と混合気分布を解析した。計算仕様は、表3に示した実験条件の中から、燃焼安定性への影響を抽出できるような7仕様を選んだ(表4参照)。

表4 計算仕様

| 仕様名 | 噴射系 | 冷却水温 °C | 噴射開始時期 deg BCTDC | 点火時期 deg BCTDC |
|-----|-----|------------|---------------------|-------------------|
| A | 1 | 80 | 240 | 60 |
| B | 1 | ↑ | 380 | 60 |
| C | 2 | ↑ | 240 | 66 |
| D | 2 | ↑ | 390 | 66 |
| E | 2 | 30 | 240 | 64 |
| F | 3 | 80 | 240 | 64 |
| G | 4 | ↑ | 150 | 62 |

計算にはRICARDO社製ソフトウェア「VECTIS」を用いた。液滴挙動はDDM(Discrete Droplet Method)により解かれ、液膜挙動はBai-Gosmanモデルで計算された。乱れモデルには、k-ε標準モデルを用いた。

次に、エンジンモデルと計算手順について説明する。エンジンモデルでは、スロットルバルブ位置より下流の吸気管、吸気ポート、燃焼室および排気ポートの形状がモデル化された(図2参照)。スロットルバルブ形状そのものはモデル化されていない。今回の計算においては、スロットルバルブ位置に入口境界面を設定した。初期条件および境界条件には1次元性能シミュレーションで求めた物理量の時系列データを与えた。計算で用いたインジェクター噴霧モデルは、直接撮影による噴霧形状と、LDSAによるインジェクター噴孔下50mmでのSMDを元に合せ込んだものを使用した。

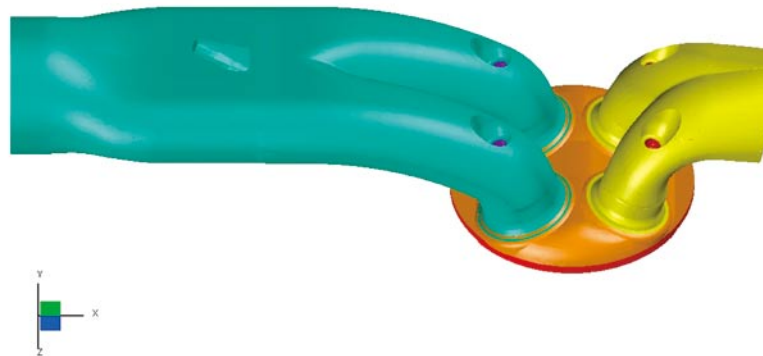
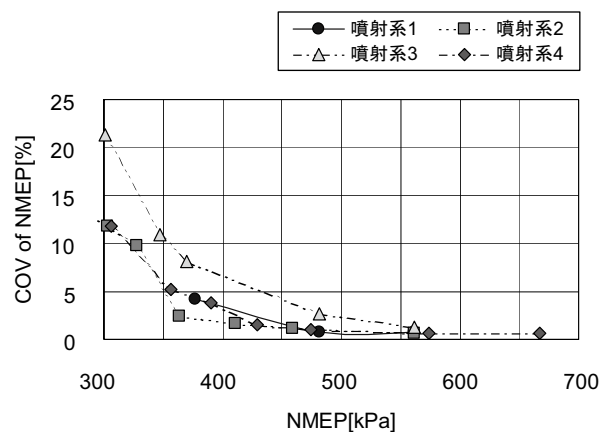


図2 計算モデルの概略図

4 結果と考察

4.1 燃焼安定性

図3に4000rpm、AFR(Air Fuel Ratio:空燃比)14.5での4つの噴射系におけるNMEPのCOVを示す。片側ポートにのみ燃料を噴射した噴射系3は、他の仕様に比べて予想通り燃焼安定性が悪いことが分かる。一方、この条件では微粒化の良いインジェクター(噴射系4)を用いても燃焼安定性には差が出ない結果となった。

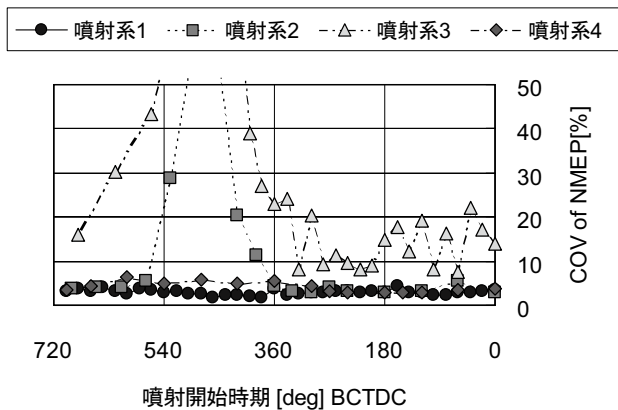


AFR 14.5, 冷却水温 80°C

図3 負荷による影響

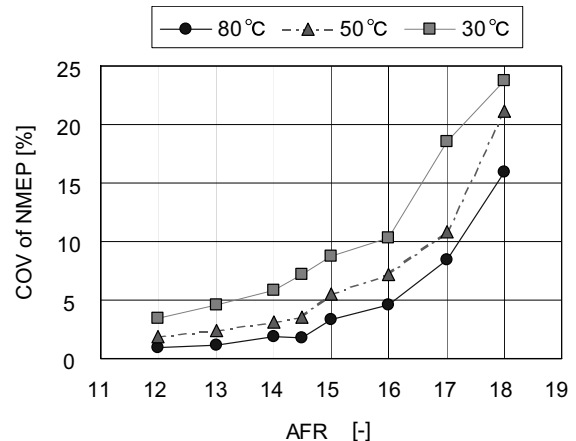
図4に4000rpm、NMEP 380 kPa、AFR 14.5におけるNMEPのCOVに対する噴射時期の影響を示す。吸気ポート上流壁をねらった噴射では、噴射時期に寄らずNMEPのCOVは小さな値でほぼ一定となっている。吸気バルブ傘表面をねらった噴射系2、3では、噴射時期によりNMEPのCOVが急増している噴射区間がある。これは、噴霧速度と噴射孔から吸気バルブまでの距離を考慮すると、燃料が吸気行程中に直接筒内に流入するような噴射時期に相当している。この噴射時期以外においては、噴射時期による低負荷での燃焼安定性への影響は小さい。微粒化の良いインジェクターを用いた噴射系4でも、吸気行程に燃料が直接筒内に流入する噴射時期で、低負荷での燃焼安定性が若干悪化した。

図5に吸気バルブ傘表面をねらった噴射仕様における冷却水温度のNMEPのCOVへの影響を示す。この噴射仕様では、低壁温では、特に、AFRリーン側で燃焼安定性の悪化が顕著である。



NMEP 380 kPa, AFR 14.5, 冷却水温 80°C

図4 噴射時期による影響



NMEP 380kPa, AFR 14.5, 噴射系 2

図5 冷却水温の影響

4.2 燃焼期間

燃焼期間と燃焼安定性との関係について紹介する。ここで示す結果は、全ての実験点におけるものである。図6は、燃焼質量割合0-10%期間とNMEPのCOVとの関係を示す。0-10%期間が伸びるにつれ、燃焼安定性は悪化している。同一0-10%期間でみてNMEPのCOVの幅は比較的広い。図7に、燃焼質量割合10-90%期間とNMEPのCOVとの関係を示す。10-90%期間が伸びるにつれ、燃焼安定性も悪化している。0-10%期間に比べ同一10-90%期間によるNMEPのCOVの幅は狭い。今回の結果から、MBTをとると初期燃焼期間の長期化は必ずしも燃焼安定性の悪化をもたらすわけではないことが分かる。つまり、主燃焼までに時間はかかるが、主燃焼開始までの時間のばらつきが小さく、その結果燃焼安定性は良いという条件が存在する。また初期燃焼期間がある程度以上長くなると、燃焼安定性が急激に悪化する。一方、主燃焼期間の長期化は、必ず燃焼安定性の悪化をもたらすので、燃焼安定性に与える影響は大きいと推測される。

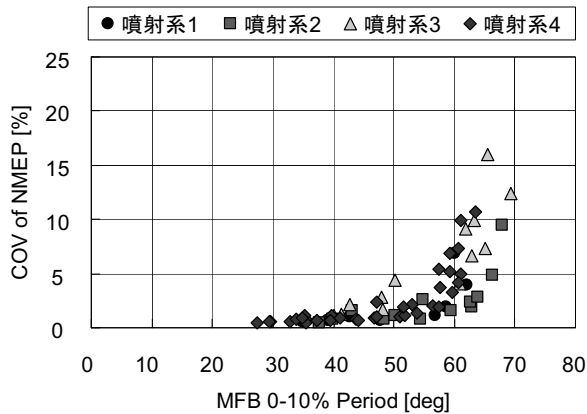


図6 燃焼質量割合 0 - 10% 期間と燃焼安定性との関係

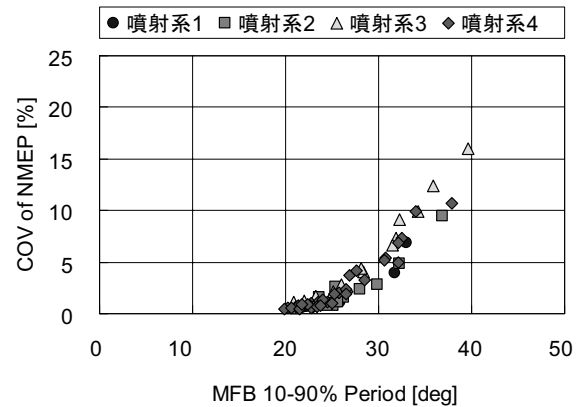


図7 燃焼質量割合 10 - 90% 期間と燃焼安定性との関係

4.3 混合気分布

実験結果より、噴射系の配置、噴射時期ならびに冷却水温は燃焼安定性に影響を与えていることが確認された。噴射の変化は吸気ポート内の混合気形成、燃料液膜位置、燃料液滴径、そして最終的には燃焼室内の混合気分布に影響を与える。それゆえに、噴射系による燃焼の変化は混合気分布と関係があると考えられる。これを検証するため、CFDシミュレーションを実施し筒内の混合気分布を解析した。

図8に各計算仕様における点火時期付近の筒内燃空比分布を示す。図には対応する実験条件でのNMEPのCOVも示す。カラーバーの緑色がAFR14.5付近を示している。尚、点火プラグは計算モデル形状に反映されていないが、燃焼室中央に配置されている。仕様A、B、Gにおいては、混合気の均一性が高いことが窺える。またこれら条件でのNMEPのCOVは順に1.8%、3.1%、3.9%と比較的小さな値であった。一方、NMEPのCOVが比較的に高かった仕様D、E、F(それぞれ11.4%、7.1%、8.6%)では、混合気の均一性は低い。これらの事実より、混合気の均一性が高いとNMEPのCOVは低くなり、また、NMEPのCOVが高いのは混合気の均一性が低いことに関係していると言える。

次に、各噴射系の結果をより詳細に見ていく。吸気ポート上流壁をねらった噴射系1では、実験において噴射時期に寄らず燃焼は安定していた。これは、仕様Aの燃焼室内の混合気分布が仕様Bのそれとほとんど同じ様であることから説明される。また、吸気ポート上流壁をねらっている噴霧は、微粒化を誘起する燃料液滴の壁面衝突によって、均一な混合気形成を促進していることも示している。

噴射系4の仕様Gでは、平均粒径の小さな燃料噴霧が吸気ポート内に噴射され、吸気ポート内の燃料の蒸発と空気との混合が進んでいる。そして、この高い均一性をもった混合気が吸気ポートから筒内へと導入されている。

吸気バルブ傘表面をねらった噴射系2では、実験において噴射時期は燃焼に大きな影響を与えている。燃焼安定性が悪くなるような噴射時期に設定された仕様Dでは、筒内中央部が薄くシリンダー外周部、特に排気側に濃い混合気が存在している。一方、燃焼安定性が良くなるような噴射時期に設定された仕様Cでは、筒内中央において混合気が理論空燃比となっている。さらには、排気側のシリンダー壁近傍の混合気が薄いことから、仕様Dとは全体的に異なることが示されている。

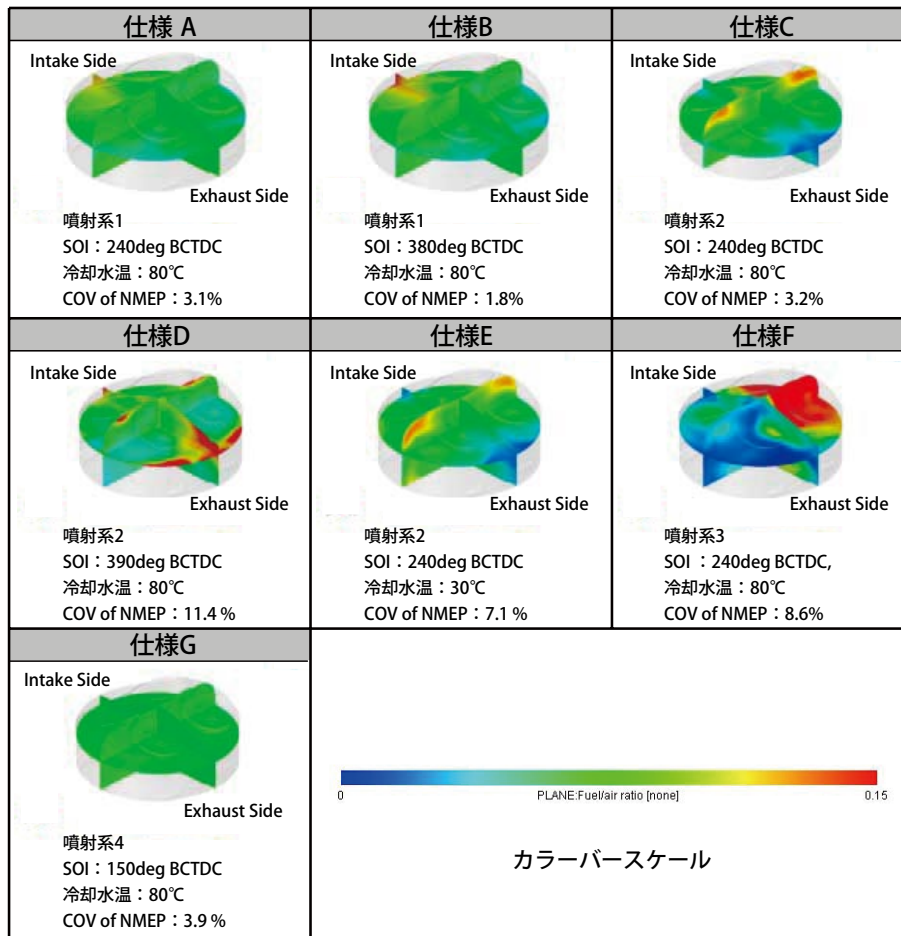


図8 点火時期付近の筒内燃空比分布

図9に、仕様C、DのIVC(Intake Valve Closed:吸気バルブ閉)における吸気バルブ軸線を通る断面上の燃空比分布を、燃料液滴分布および液膜厚さ分布と一緒に示す。両者の大きな違いは、仕様Cでは吸気ポート内には液滴が存在しないのに対して、仕様Dでは筒内に液滴が見られることである。液膜についても、仕様Cでは見られないが、仕様Dにおいては排気バルブ下のシリンダー壁に液膜が見られる。そして、点火時期において排気バルブ下に見られる濃い混合気は、この液膜からの蒸発と考えられる。これらより、液滴として筒内に導入される燃料や排気側に生成される燃料液膜は、筒内で十分に混合されえないため、偏った混合気分布が燃焼変動を導くと結論付けられる。

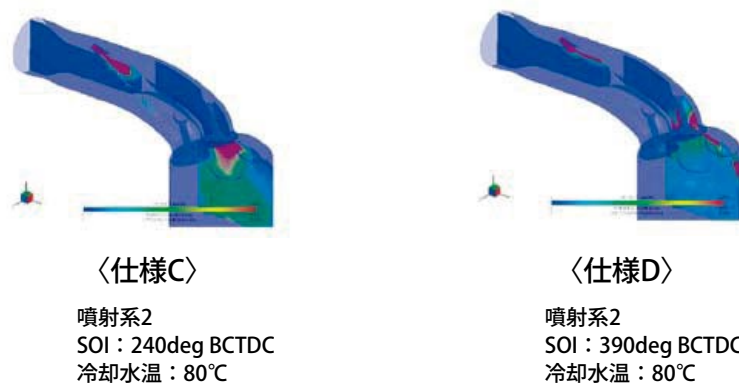


図9 吸気バルブ軸線を通る断面上の燃空比分布、燃料液滴分布および液膜厚さ分布

噴霧速度と噴射孔と吸気バルブの間の距離を考慮すると、燃料噴霧が吸気バルブに到着し筒内に流入する時期は図10のようになる。噴射開始時期(SOI)が530[deg]BTDCの場合、燃料噴霧はほぼIVO(Intake Valve Open:吸気バルブ開)に吸気バルブに到着し始める。SOIが390[deg]BTDCの場合、吸気バルブへの燃料噴霧の到着はほぼIVCまでに終了する。前述したように(図4参照)、NMEPのCOVは上記2噴射時期の間で悪化している。燃焼安定性が悪化する噴射時期は、燃料噴霧が吸気行程中筒内に直接流入してくる条件に関係している。

冷却水温が低い場合(仕様E)、混合気分布の傾向は冷却水温が高い場合(仕様C)と変わらない。しかし、混合気分布における濃淡の差はより大きくなっている。この混合気における強い不均一性が燃焼安定性を悪化させていると考えられる。

以上より、CFDによる混合気分布を考慮すると、吸気バルブ傘表面をねらった噴射系においては、吸気行程に同期した噴射時期や低壁温での燃焼安定性悪化は混合気分布に起因すると考えられる。

噴射系3の仕様Fは、燃料が導入される吸気ポート側にひどく偏った混合気分布を示している。また点火プラグまわりには、一様でない混合気分布も存在する。このCFD結果と実験結果より、片側吸気ポートに燃料噴射する場合、点火プラグ近傍および筒内の不均一な混合気分布が、燃焼のサイクル変動に結びつくと結論付けられる。

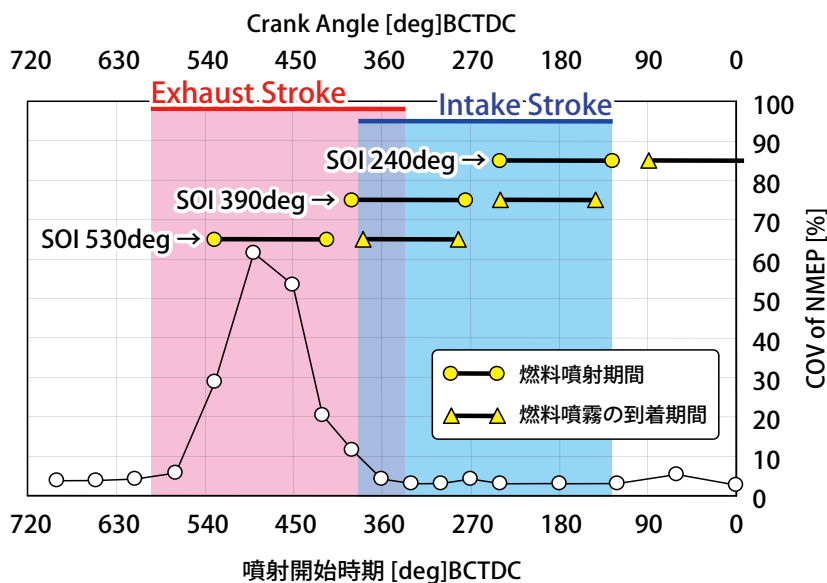


図10 燃料噴霧吸気バルブ到着時期と燃焼安定性悪化時期との関係

4.4 液膜量

噴射系は燃焼安定性だけでなく、過渡性能にも影響を与える。そこで、その影響を定量的に把握するため、CFDによるエンジン内液膜挙動の解析を行った。図11にCFDによるポート内燃料液膜量の推移を示す。吸気ポート上流壁をねらった噴射(仕様A、B)では、噴射時期に寄らずポート内燃料液膜量は比較的多い。液膜量はまだ収束していない。これは過渡性能への影響が懸念される。液膜分布の例として、IVO付近におけるものを図12に示す。噴射後噴霧が衝突する位置から吸気ポート分岐部にかけて液膜が存在しているのが分かる。一方、吸気バルブ傘表面をねらった噴射(仕様C、D、F)では、ポート内燃料液膜量は比較的小さいので、過渡性能は良いことが期待される。一方、低壁温(仕様E)では、ポート内

燃料液膜量は比較的多いので、過渡性能悪化が懸念される。微粒化インジェクターを使用した場合には、ポート内燃料液膜量は従来のPFIインジェクターを使用した場合よりも少なめであるので、過渡性能は若干良くなることが期待される。

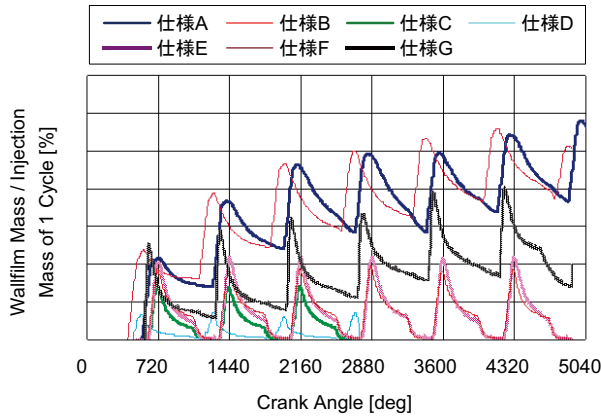


図 11 各仕様の1噴射量で基準化した時の液膜量の推移

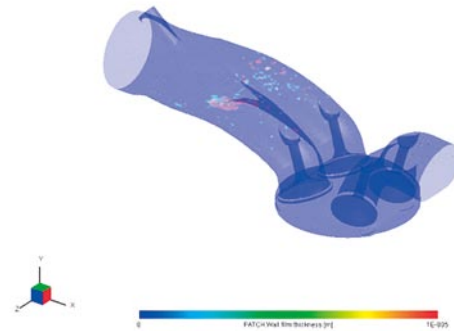


図 12 仕様 A における IVO 時期付近の液膜厚さ分布

5 まとめ

小排気量モーターサイクルエンジンにおける燃焼安定性に対するPFI噴射系の影響を実験と数値解析によって調査した。以下の知見を得た。

1. 低負荷での燃焼安定性は筒内の混合気分布に強く影響される。
2. 筒内の混合気分布は、ポート噴射でも噴射諸元の影響を受ける。
3. 噴射諸元の燃焼安定性に対する影響は、CFDで得られる混合気分布で定性的に説明できる。
4. 試験した噴射系には以下のような特性がある。
 - ・吸気ポート上流壁をねらった噴射では燃焼安定性に対する噴射時期の影響は小さい。これは、点火時期における筒内混合気の均一性が極めて高いことによると考えられる。ただし、ポート内燃料液膜量は比較的多いので、過渡性能への影響が懸念される。
 - ・吸気バルブ傘表面をねらった噴射でも、吸気行程に噴霧が直接筒内に導入されないタイミングでの噴射ならば、低負荷での燃焼安定性への影響は小さい。また、ポート内燃料液膜量は比較的少ないので、過渡性能は良いことが期待される。
 - ・吸気行程に噴霧が直接筒内に導入される噴射時期は、吸気バルブ傘表面をねらった噴射で、低負荷での燃焼安定性悪化要因となる。この噴射時期では、微粒化インジェクターを用いても、低負荷での燃焼安定性が若干悪化する。これは、筒内の混合気分布や液滴量の増加が原因と考えられる。ただし、ポート内燃料液膜量は比較的少ないので、過渡性能は良いことが期待される。
 - ・吸気バルブ傘表面をねらった噴射で、低壁温・低負荷での燃焼安定性は悪化、特に、AFRリーン側で燃焼安定性悪化は顕著である。これは、筒内の混合気分布や液滴量の増加が原因と考えられる。同時に、ポート内燃料液膜量は比較的多いので、過渡性能への影響が懸念される。
 - ・片側ポートのみへの燃料噴射では、燃焼安定性は悪化する。これは、筒内の混合気分布の偏りが原因していると考えられる。
 - ・平均粒径が小さな噴射では燃焼安定性が良く液膜量が少ない。

■参考文献

- 1) Hiroyuki Tsuzuku, "Improving the Fuel Economy of Motorcycles", Yamaha Motor Technical Review No.36 (2003-9).
- 2) Inoue T, Matsushita S, Nakanishi K, Okano H, "Toyota lean combustion system: the third generation system", SAE paper 93087, 1993.
- 3) Y.Hardalupas, A.M.K.P.Taylor, J.H.Whitelaw, K.Ishii, H.Miyano and Y.Urata, "Influence of Injection Timing on In-Cylinder Fuel Distribution in A Honda VTEC-E Engine", SAE paper 950507, 1995.
- 4) N.E.Carabateas, A.M.K.P.Taylor, J.H.Whitelaw, K.Ishii, K.Yoshida and M Matsuki, "The Effect of Injector and Intake Port Design On In-Cylinder Fuel Droplet Distribution, Airflow and Lean Burn Performance for Honda VTEC-E Engine", SAE paper 961923, 1996.
- 5) P.G.Aleiferis, A.M.K.P.Taylor, J.H.Whitelaw, K.Ishii and Y.Urata, "Cyclic Variations of Initial Flame Kernel Growth in a Honda VTEC-E Lean-Burn Spark-Ignition Engine", SAE paper 2001-01-1207, 2001.

■著者



加藤 昇一
Shouichi Kato
MC事業本部技術統括部
CAE実験部



林田 高典
Takanori Hayashida
コーポレートR&D統括部
パワートレイン研究部



飯田 実
Minoru Iida
コーポレートR&D統括部
パワートレイン研究部