

マイクロカセグレンセンサを用いたエンジン 局所空燃比計測とシミュレーション精度評価

Measurement of Local Air/Fuel Ratio and Evaluation of Accuracy of Engine Simulation
Using Micro-Cassegrain Sensor

久保田 俊 一*
Shunichi KUBOTA
赤 崎 修 介*
Shusuke AKAZAKI

小 森 隆 史*
Takafumi KOMORI
池 田 裕 二**
Yuji IKEDA

山 本 裕 司*
Yuji YAMAMOTO

要 旨

サイクル変動および気筒間の燃焼状態のばらつきを改善することでさらなるガソリンエンジンの燃費向上が達成できるが、そのためには精度の高い燃焼制御が不可欠である。燃焼制御には筒内空燃比(以下A/F)、特にプラグ近傍の局所 A/F 制御が重要な因子となるため、プラグ近傍の局所 A/F を予測できる三次元エンジンシミュレーションのモデル構築をおこなった。予測精度の評価には車載エンジンでプラグ近傍の局所 A/F 計測が可能なマイクロカセグレンセンサを用いた。その結果、サイクル変動の範囲内で局所 A/F 値が予測できることを確認した。

ABSTRACT

The fuel consumption rate of gasoline engines can be decreased by reducing cyclic variation and variations in the combustion state between cylinders, but this necessitates high-precision combustion control. Control of the air-fuel ratio (A/F) in the cylinders, in particular the local A/F near the spark plugs, is an important factor in combustion control. A three-dimensional engine simulation model enabling prediction of the local A/F near the spark plugs was therefore constructed. A micro-Cassegrain sensor able to measure the local A/F near the spark plugs in a real engine was used to evaluate the accuracy of the prediction. The results indicated that the local A/F can be predicted within the range of cyclic variation.

1. まえがき

近年、環境問題がクローズアップされる中、自動車用ガソリンエンジンはさらなる排ガスの清浄化および燃費の向上を要求されている。従来のガソリンエンジンでは触媒の性能を最大限に利用するために、排ガス空燃比を高精度に制御することが一般的であったが、今後、さらに燃費の改善をおこなうには燃焼効率を向上させ、過渡状態においても燃焼状態を常に最適に保つことが求められる。

この燃焼効率改善には毎サイクル、全気筒正常燃焼させることが望ましく、Fig. 1のように平均筒内圧力以下のサイクルを平均まで押し上げることができると仮定すると、本

* 四輪開発センター

**イマジニアリング株式会社

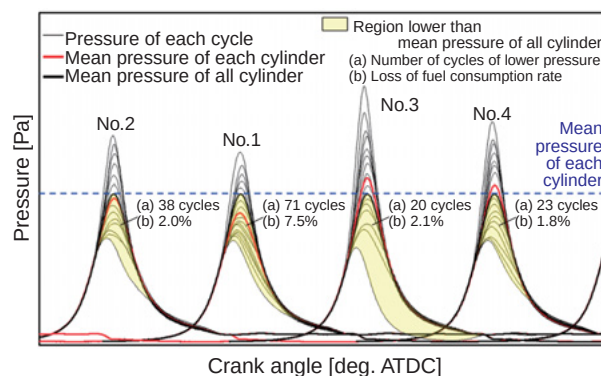


Fig. 1 Pressure history of each cylinder and cycle

供試エンジンでは1気筒あたり平均3.3%, エンジン単体では13.3%の燃費改善が見込まれる。しかし, 実際のエンジンでは燃料濃度⁽¹⁾や内部 EGR ガスの分布変動⁽²⁾などによるサイクル変動⁽³⁾や気筒間のばらつきがあり, それらがエンジンの平均性能を引き下げている要因と考えられる。

火花点火エンジンの燃焼は点火時におけるスパークプラグ近傍の混合気が理想状態であるか否かで, 着火遅れ期間が変化し, 主燃焼がサイクルごとに変動することが実験的にも明らかであった。このことから本研究では混合気, 特に着火性に影響するプラグ近傍の混合気に着目し, その制御手法を構築することを目指した。

この混合気の挙動を把握する手法として近年盛んにおこなわれている三次元シミュレーションでの解析をおこなうこととした。しかし, これまで Ishikawa⁽⁴⁾らがおこなったポート噴射における可視化エンジンでの筒内 A/F 分布の精度検証では燃焼室内の混合気分布は実測とよく一致していたものの, プラグ近傍の A/F の定量的な評価まではできていなかった。そこで本論文では, プラグ近傍の A/F 予測精度を定量的に評価するため, プラグ近傍を定量的かつ車載エンジンでそのまま計測可能なマイクロカセグレンセンサを用い, 三次元シミュレーションの予測精度を評価した。

2. 筒内局所 A/F 計測の原理

筒内の A/F 計測は一般的に単気筒エンジンによるガスサンプリング法やレーザ誘起蛍光法(LIF)による可視化計測がおこなわれてきたが, エンジンの改造箇所が多く, ピストン形状の変更, 圧縮比の低下などで筒内の流動が変化し, 充填効率や A/F が変化してしまうこと, それに伴いシミュレーションの条件設定が困難になるなど課題が出てくる。本検証では上述した課題に加え, サイクルにおける変動および気筒間のばらつきに着目していることから単気筒エンジンではなく, 多気筒かつ車載のエンジンで計測できることが望ましいと考えた。本検証に用いたマイクロカセグレンセンサは車載エンジンを無改造で計測できる利点があり, これを使用し解析をおこなった。

2.1. マイクロカセグレンセンサの計測原理

Fig. 2 にマイクロカセグレンセンサの構造を示す。マイクロカセグレンセンサは, 燃焼により発生したラジカル自発光を互に向き合った凸面鏡と凹面鏡を用いて反射させ, 光ファイバを介しダイクロイックミラーおよび干渉フィルタを用いて OH ラジカルなどの特徴的なスペクトル波長域の発光強度を光電子増倍管にて検出する。

ファイバのコア径は 230 μm でスパークプラグへの内蔵が可能である。測定領域は 0.1 mm 以下であり, センサ先端から測定位置までの距離は 3 mm である。

2.2. 局所 A/F の計測手法

マイクロカセグレンセンサで検出された発光強度は Fig. 3 に示すように OH*, CH*, C₂* などのラジカルを検知し, その発光強度のピーク値の比によって A/F を同定でき^{(5)・(10)}, その A/F が変化すると各ラジカル発光強度比もリニアに変化する。Fig. 4 に筒内のプラグ周辺における火炎伝播と計測位置の関係の概念図を示す。筒内ではスパークプラグによって点火された混合気より火炎核が形成され, 火炎が伝播していくが, その際に火炎が計測箇所を通過することでラジカルの発光を検知する。したがって, センサが検知した発光強度のピーク時刻と点火信号の時刻を用いて着火遅れ期間を算出し, その情報を用いてプラグ位置から計測点までの距離より火炎伝播速度を取得することができる。また, 発光強度の時系列データの幅から燃焼領域幅も計測することが可能である。

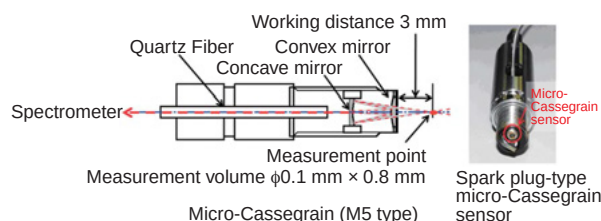


Fig. 2 Schematic of micro-Cassegrain sensor and shape of spark plug-type micro-Cassegrain sensor

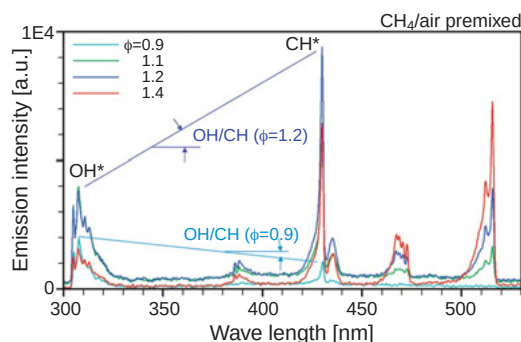


Fig. 3 Emission intensity of fuel wave length

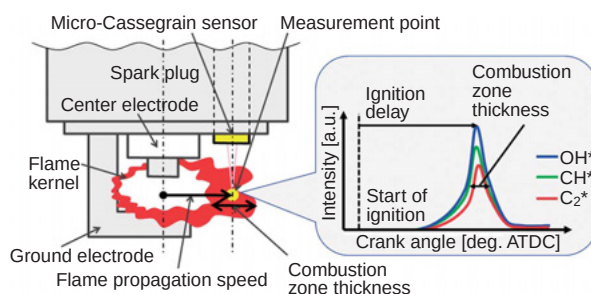


Fig. 4 Schematic of flame propagation and measurement point in cylinder

Table 1 Engine specifications

Engine	2.2L 4-cylinder gasoline engine
Bore × Stroke	87 × 90.7 [mm]
Compression ratio	11.1
Engine speed	1500 [rpm]
Tumble control valve opening	15 [deg.]
Injection	Twin, Primary, Secondary
Injection timing	44.5 [deg. ATDC] (Twin) 25.5 [deg. ATDC] (Primary, Secondary) =>60 [deg. ATDC] (Injection end)
Spark timing	35 [deg. BTDC]

3. 実験方法と計測システム

3.1. 供試エンジンの特徴

Fig. 5 に供試エンジンのインテークマニフォールドのレイアウトを示す。本供試エンジンにはタンブル比を可変できるようにタンブルコントロールバルブとインテークポート内のガス流動を整流するためのプレートを追加した。また、EGRの流動を制御するため、タンブル整流プレート下に外部EGRガス流入口を配置し、燃料供給も混合気形成を制御できるように二つのインジェクタをそれぞれのポートに設置し、各吸気バルブに向け配置した。

3.2. 運転条件と計測位置

精度検証をおこなった計測条件を Table 1 に示す。本検証では上述した二本のインジェクタを二本同時およびプライマリ側のみ、セカンダリ側のための条件で燃料噴射量および噴射終了時刻を合わせて試験をおこなった。

また、計算精度を評価するためのマイクロカセグレンセンサと圧力センサの配置を Fig. 6 に示す。圧力は A/F 評価に重要なガス流動および充填効率を評価できるように上流から下流までの七点を計測し、筒内圧はキスラー社製センサ(type6052B)を用い、合計八点の同時計測をおこなった。ただし、マイクロカセグレンセンサによる A/F 計測をおこなう際は圧力センサを付け替え、計測をおこなっている。

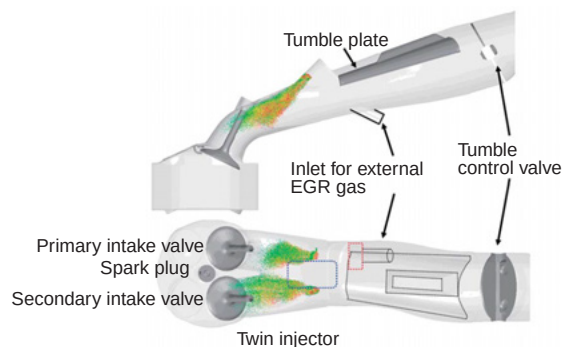


Fig. 5 Test engine intake manifold layout

3.3. 計測システム

Fig. 7 に車載エンジンにおける筒内局所 A/F 計測をおこなったマイクロカセグレンセンサを用いた計測システムを示す。この計測システムは、シリンダ内の発光を検出するスパークプラグ一体型センサ部、センサからの発光を検出する分光ユニット部、解析ソフトからなり、台上計測が可能である。また、センサは本供試エンジンの仕様に合わせて製作した。計測はエンジンのクランク角度検出器から出力された角度信号と気筒判別用燃料噴射信号を検出した発光信号と同期させ、発光強度や検出時刻等を演算し火炎伝播速度等々を出力する。

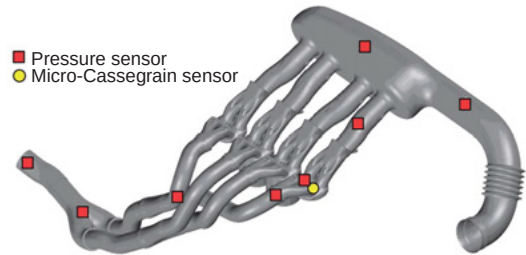


Fig. 6 Measurement point

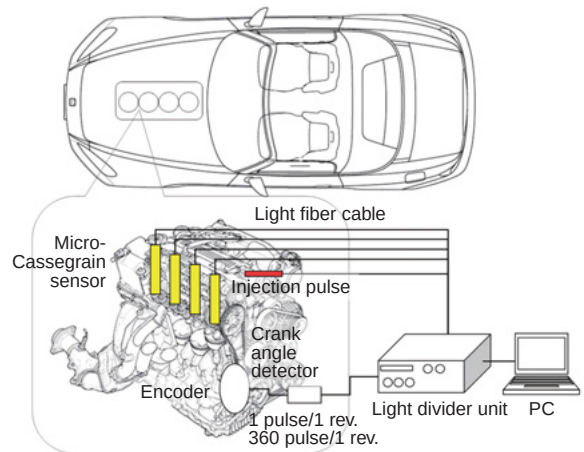


Fig. 7 Micro-Cassegrain measurement system

4. 計測結果

4.1. マイクロカセグレンセンサの局所 A/F 計測結果

Fig. 8 にエンジン設定 A/F を変化した場合のサイクルごとの局所 A/F 計測結果を示す。設定 A/F を 12 から 20 に変化させると、局所 A/F の平均値もそれに追従し、設定 A/F と局所 A/F 平均との差は 3.5%以下であった。

また、吸気圧力を変化させた場合の NTK 製 UEGO センサによる A/F 計測結果とマイクロカセグレンセンサによる局所 A/F 計測の結果を Fig. 9 に示す。UEGO センサによる A/F 計測とマイクロカセグレンセンサの A/F 計測の

結果は、いずれの吸入空気圧でもほぼ同等の結果が出ており、マイクロカセグレセンサの出力は妥当な値を出力することが確認できている。

4.2. 燃料噴射条件を変化させた場合の局所 A/F 計測結果

二本のインジェクタを用いて、両方噴射(Twin)、外部 EGR 流入配管側のみを噴射させた条件による片側噴射(Primary)、その逆側のみ噴射(Secondary)の条件で A/F の違いをサイクルごとに計測し比較した。その結果を Fig. 10 に示す。図中の円で囲われた範囲は各噴射方式による運転状態を示しており、円の半径が小さくかつ中心位置が理論 A/F に近ければ理想の燃焼状態であるということを示している。Primary 側のみの噴射は、Twin に比べ A/F のばら

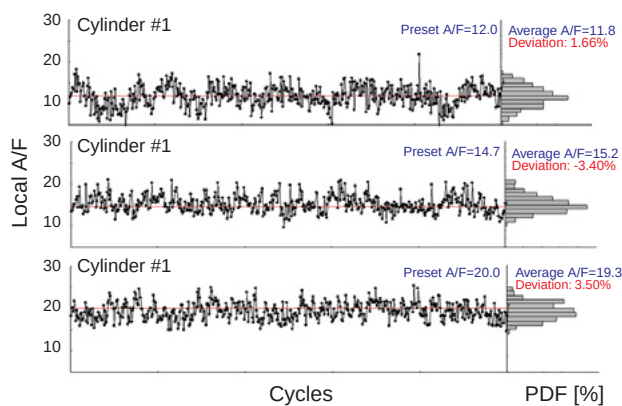


Fig. 8 Results for local A/F using micro-Casagrain sensor

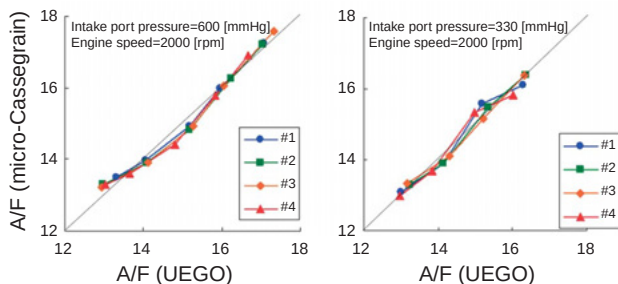


Fig. 9 Comparison of micro-Casagrain and UEGO sensors

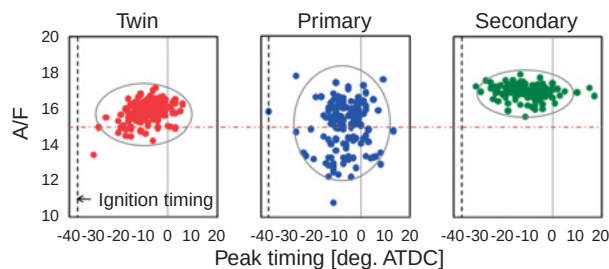


Fig. 10 Results for peak timing and A/F for different injection conditions

つきが大きく、Secondary 側のみは A/F のばらつきは小さいものの、図中の一点鎖線はガソリンの理論 A/F を示しているが、全体的にリーン側にシフトしていることがわかる。これらの結果より噴射条件を変えるとプラグ近傍の混合気濃度がサイクルごとに大きく変化することが確認できた。

横軸はラジカル発光強度検出のピーク時刻を表わしており、すなわち着火遅れ期間となる。各噴射方式とも着火遅れ期間にばらつきがあるが、時間軸方向の円の半径および中心位置がさほど変わらないことから、A/F の変動が着火遅れ期間とあまり相関がないことがわかる。したがって、着火遅れ現象には A/F 変動のほかに EGR ガス濃度など別の要因が含まれていることが考えられる。

5. 三次元シミュレーションの精度検証結果

三次元シミュレーションによる局所 A/F 予測精度評価をおこなうために Fig. 11 の手順で計算をおこなう。シミュレーションは、計測した吸排気の圧力と温度を参照し一次元ガス交換シミュレーションをおこない、三次元シミュレーションの境界条件および初期条件を取得する。三次元シミュレーションでは、単体試験で計測した燃料噴霧の条件と結果をもとに燃料噴霧設定パラメータを作成し、三次元ガス流動シミュレーションの入力データとし、吸入空気と燃料の混合および拡散や壁面付着も考慮した混合気分布を計算する。計算結果の精度評価は、前述したマイクロカセグレセンサの計測位置と同位置の A/F 値を取り出し、燃料噴射条件を変えた三条件と比較する。

5.1. 三次元エンジンシミュレーション

三次元エンジンシミュレーションには Ricardo 社製 VECTIS を使用する。その形状モデルを Fig. 12 に示す。この形状モデルに一次元シミュレーションで作成した境界条件および初期条件、噴霧設定パラメータを入力し計算をおこなう。計算に使用したメッシュを Fig. 13 に示す。メッシュサイズは燃焼室内およびインテークバルブ、エキゾー

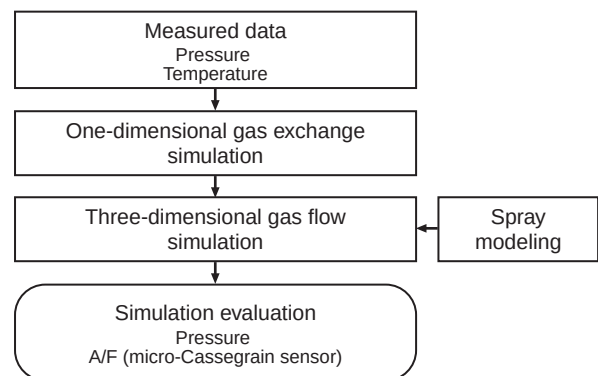


Fig. 11 Engine simulation flow

ストバルブ周りを1mm, タンブルコントロールバルブ流路は0.1mm, それ以外の箇所を2mmとする。

5.2. 一次元ガス交換シミュレーション

一次元ガス交換シミュレーションには Ricardo 社製の WAVE を使用する。そのモデルを Fig. 14 に示す。本供試エンジンの特徴であるタンブルコントロールバルブ, 外部 EGR をモデル化している。Fig. 15 (a), (b) にそれぞれ筒内圧力と吸気ポート内圧力の実測結果と一次元ガス交換シミュレーションの計算結果を示す。Fig. 15 (a) の実測の筒内圧は 100 サイクルの平均値であるが, 計算は実測を良く再現している。また, Fig. 15 (b) の吸気ポート内圧力は, 本検証エンジンに付加されているタンブルコントロールバルブによる絞りの影響で常時 60 kPa 以下の圧力になっているが, 絞り効果パラメータを適切に設定することで圧力履歴も良く再現できている。

5.3. 燃料噴霧計算設定パラメータの決定

燃料噴霧計算の設定パラメータを決定するため定容容器内に噴射した燃料噴霧の可視化計測をおこなった。計測は

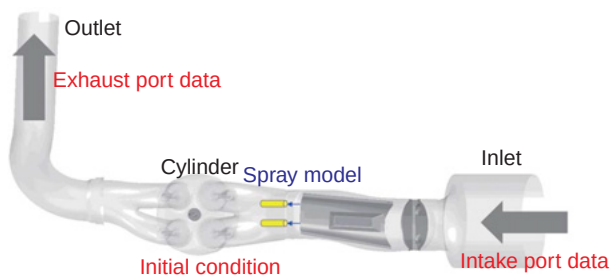


Fig. 12 Three-dimensional simulation model

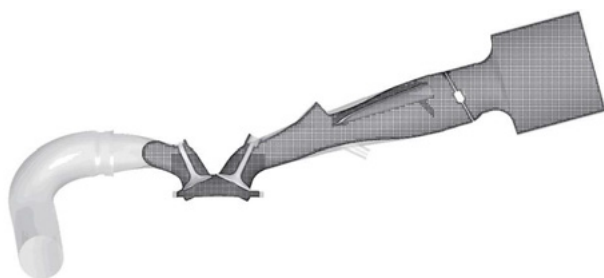


Fig. 13 Mesh used for calculation

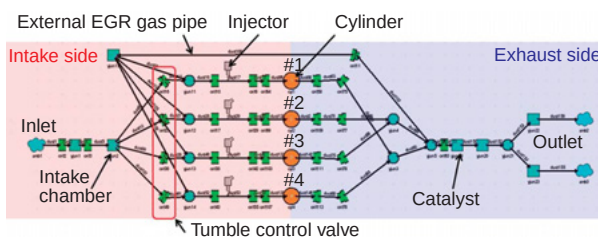
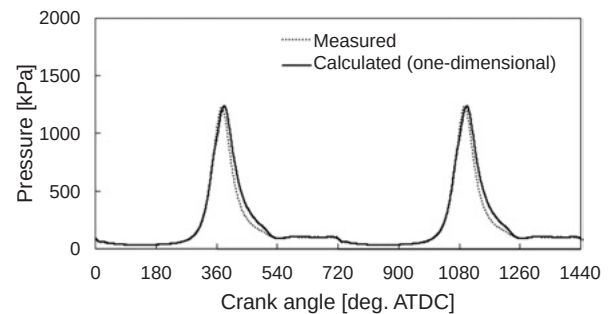


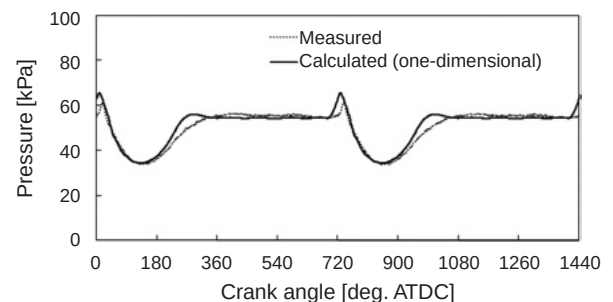
Fig. 14 One-dimensional simulation model

容器内に下方に噴射した燃料を散乱光で撮影した。この時の雰囲気条件は大気圧, 大気温度である。

燃料噴霧計算には, DDM (Discrete Droplet Model) を使用する。境界条件には実測した粒径分布を, 液滴分裂は Reitz-Diwakar モデル⁽¹¹⁾を使用する。計算条件は, 計測した際の雰囲気条件を初期条件に設定し, メッシュサイズを 2 mm, タイムステップを 1.0×10^{-5} s の設定でおこなう。計測した噴霧の可視化撮影結果と計算結果を Fig. 16 に示す。時刻は噴射開始後 0.4 ms である。噴霧角は 18 度を仕様値として設計された実測よりも若干広がっているが, 全体の噴霧形状は卵型になり再現できているといえる。噴霧の先端到達距離の比較を Fig. 17 に示す。先端到達距離はどの時刻においてもよく一致しており精度は充分であると考えられる。



(a) In-cylinder pressure



(b) Intake port pressure

Fig. 15 Comparison between measured pressure and one-dimensional gas exchange simulation

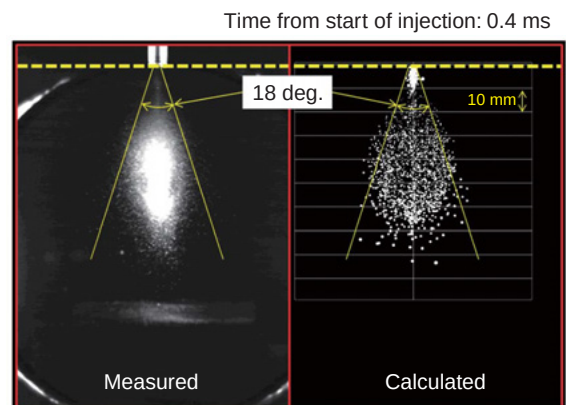


Fig. 16 Comparison of form of fuel spray

5.4. 精度評価

Fig. 18に実測と三次元シミュレーションによる筒内圧力の結果および実測と計算の差を示す。計算はガス流動および燃料と空気の混合までを計算しているため、点火時期である 35 deg. BTDC で終了している。実測と計算の差は点火時期で4.8%高いが圧力履歴はよく一致しており、筒内の圧力場が精度良く再現できているといえる。このことより、インテークポートを経てバルブを通過し、筒内に流入する空気および燃料の単位時間当たりの流量や挙動を良く再現しているものと考えられる。圧力4.8%の差は充填効率でいえば 0.8%増加、A/Fに換算すると 0.66 減少となり、計測した局所 A/F のサイクル変動幅と比べてもかなり小さく、評価に十分な精度であるといえる。

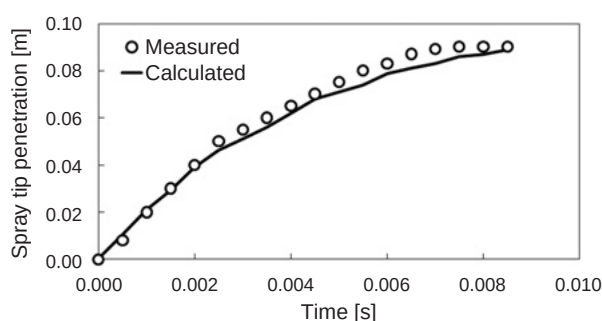


Fig. 17 Comparison between measured spray tip penetration and calculation result

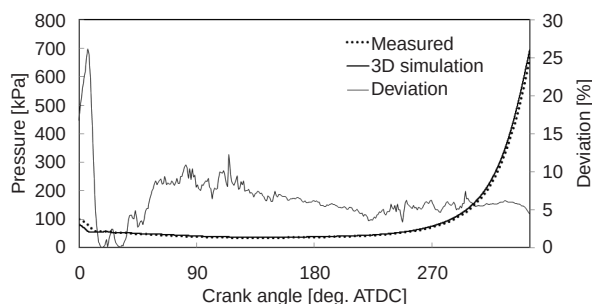


Fig. 18 Comparison between measured in-cylinder pressure and in-cylinder pressure calculation result

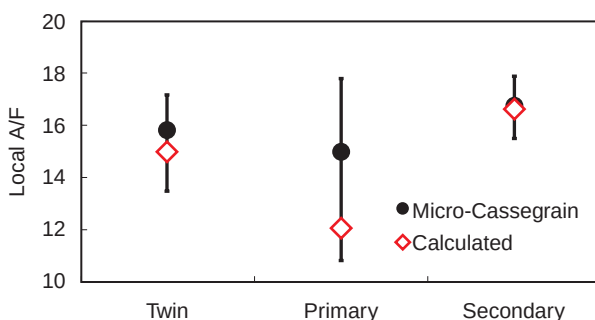


Fig. 19 Comparison between local A/F using micro-Cassegrain sensor and calculation result

Fig. 19 にシミュレーションによるプラグ近傍の A/F と計測した A/F のサイクル平均を示す。図中のエラーバーは Fig. 10 に示す局所 A/F のサイクル変動を表している。計算した局所 A/F はサイクル変動内に収まっており、また濃度の傾向も一致していることからプラグ近傍の A/F が精度良く計算できているといえる。

Fig. 20 は計算による筒内 A/F 分布を示しているが、Primary 側のみ噴射の場合、A/F の空間的ばらつきが大きいことがわかる。Fig. 19 の Primary のエラーバーすなわちサイクルごとの変動が他の条件に比べて大きな原因は、混合気濃度の空間的な分布の偏りが他の噴射条件よりも大きく、サイクルごとに流動パターンが微妙に変化することにより、局所 A/F の変動幅が大きくなっていると予測される。このことより、点火時期におけるプラグ近傍の混合気の移動範囲とその均質度がサイクル変動低減のための制御パラメータとして有効と考えられる。

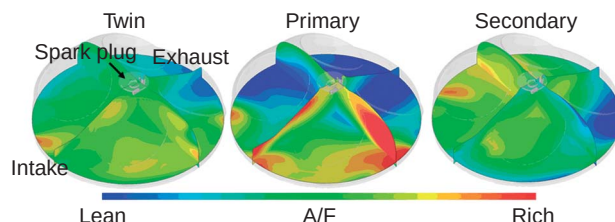


Fig. 20 Three-dimensional A/F distribution

6. まとめ

ガソリンエンジンのサイクル変動における因子としてプラグ近傍 A/F に着目し、三次元シミュレーションの精度検証をおこなった結果、以下の知見を得た。

- (1) これまで計測が困難であった車載エンジンのプラグ周りの A/F 計測をマイクロカセグレセンサによっておこない、UEGO センサなど従来の計測法と同等の結果になると確認した。
- (2) マイクロカセグレセンサおよび三次元シミュレーションのプラグ近傍 A/F を比較した結果、計算結果はサイクル変動の範囲内にあり、噴射条件による A/F の相関も得られた。
- (3) 三次元シミュレーションはプラグ近傍およびサイクル変動を踏まえたその周囲の混合気挙動を解析するために有用なツールである。

参考文献

- (1) 池田裕二, 西山淳, 竹内章, Ernst Winklhofer: 混合気不均一性計測を用いた燃料噴射の最適化, 自動車技術

- 会学術講演会前刷集, No.28-06, p.15-20(2006)
- (2) 谷野章吾, 小栗康文, 鈴木隆: ガソリン機関におけるサイクル変動と残留ガスの相関, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.118-07, p.17-21(2007)
- (3) 白石拓也, 木村宏: 点火仕様がエンジン燃焼性能に及ぼす影響, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.107-05, p.1-4(2005)
- (4) Ishikawa, N., Hiraide, A., Takabayashi, T.: Air/Fuel Distribution Simulation in a Port-injected Gasoline Lean-Burn Engine, SAE Paper, No.2001-01-1230(2001)
- (5) 小嶋潤, 池田裕二, 中島健: メタン・空気層流予混合火炎の反応帯において高空間分解能測定された自発光スペクトル(自発光強度比 OH^*/CH^* と当量比の相関), 日本機械学会論文集B編, 66 巻 647 号, p.1871-1878(2000)
- (6) Ikeda, Y., Nishiyama, A., Kawahara, N., Tomita, E., Arimoto, S., Takeuchi, A.: In-Spark-Plug Sensor for Analyzing the Initial Flame and Its Structure in an SI Engine, SAE Paper, No.2005-01-0644(2005)
- (7) 西山淳, 鄭海泳, 片野博樹, 池田裕二: マイクロカセグレンセンサを用いた冷機始動直後の筒内 A/F 計測, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.17-08, p.11-14(2008)
- (8) Ikeda, Y., Jeong, H., Nishiyama, A., Baritaud, T.: Cylinder to cylinder A/F fluctuations measurement in a racing engine by chemiluminescence, COMODIA 2008, JSME No.08-202, p.535-540(2008)
- (9) Jeong, H., Ikeda, Y., Nishiyama, A., Lee, K.: Cycle-resolved flame characteristics measurement with soot in a HSDI diesel engine using micro-Cassegrain system, COMODIA 2008, JSME No.08-202, p.541-546(2008)
- (10) Nishiyama, A., Ikeda, Y., Jeong, H., Katano, H.: Application of a Micro Cassegrain System to A/F Measurements Under Cold Start Conditions, COMODIA 2008, JSME No.08-202, p.555-561(2008)
- (11) Reitz, R. D., Diwakar, R.: Effect of Drop Breakup on Fuel Sprays, SAE Paper, No.860469(1986)

■ 著 者 ■



久保田俊一



小森隆史



山本裕司



赤崎修介



池田裕二