



筒内直噴S.I.エンジンにおける混合気形成とノッキングについての考察

Analysis of Fuel-Air Distribution on Combustion and Knocking in a D.I.S.I. Gasoline Engine

沖 秀樹 鈴木 裕一 黒澤 伸一

技術論文

Abstract

The relation between in-cylinder mixture formation and combustion, i.e. knocking was investigated with firing tests using the single-cylinder engine, CFD (Computational Fluid Dynamics) calculations and LIF (laser-induced fluorescence) measurements for the various direct injection fuel spray patterns. These works revealed that even in the early injection to aim homogeneous mixture, there can be significant non-uniformity in the concentration of the fuel-air mixture in the combustion chamber around the ignition timing, and direct injection fuel spray pattern has strong influence for combustion and knocking.

要旨

燃焼室内の混合気分布と燃焼、ノッキングの関係について、筒内直噴インジェクターの噴射方向を変更した場合の単気筒エンジンテスト、LIF(laser-induced fluorescence:レーザー誘起蛍光法)計測、CFD(Computational Fluid Dynamics:計算流体力学)計算を実施した。その結果、比較的均一な混合気分布を得られると考えられる吸気行程噴射の場合であっても、点火タイミング付近の燃焼室内混合気濃度には不均一性が残っており、筒内直噴インジェクターの噴射方向が燃焼、ノッキングに強い影響を及ぼすことが分かった。

1 はじめに

筒内直噴ガソリンS.I.(Spark Ignition:火花点火)エンジンは、日本での本格的な市場投入が始まっており、最近ではヨーロッパでも市場占有率を増やしている。直噴エンジン技術には筒内の混合気分布を操作可能であるという特徴があり、これはエンジン効率の向上、CO₂排出の削減に重要な役割を果たしている。

筒内直噴ガソリンS.I.エンジンの燃焼コンセプトは成層希薄燃焼領域を主眼にしたものが種々提案されている^{1~5)}。一方で、筒内に直接噴射された燃料の気化潜熱により吸入空気、あるいは燃焼室の壁温を冷却してノッキングの発生を抑制することで、圧縮比を向上させる効果をねらった考え方もある。しかし厳密には筒内直噴の混合気形成過程は非常に複雑で、吸気行程噴射であっても真に均一な混合気を得ることは困難であり、それゆえに混合気分布がノッキングの発生に影響するものと予想される^{6~7)}。本稿では、この点について実機試験を実施したうえで、噴霧、燃焼、ノッキングのCFD計算を行い、詳細分析を実施した。

2 単気筒エンジンでの混合気分布変更試験

2.1 単気筒エンジン仕様と実験条件

単気筒エンジンのシリンダーセンター断面形状を図1に、エンジン仕様を表1に示す。単気筒エンジンの燃焼室形状は4弁の典型的なペントルーフ形状で、点火プラグは燃焼室の中央に、直噴インジェクターは吸気ポート下に配置した。供試したインジェクターは70度のコーン角を持つスワール噴霧タイプで、噴射方向はインジェクター中心軸に対してオフセットなしの仕様と、10度オフセットした仕様を用いた。噴射方向は図2に示すUpward、No-offset、Downwardの3仕様である。

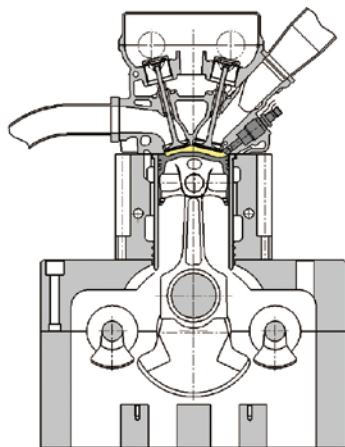


図1 単気筒エンジン断面図

表1 単気筒エンジン仕様

ボア×ストローク	86mm × 86mm
排気量	500cc
圧縮比	14.5
直噴インジェクター位置	シリンダーヘッド 吸気ポート下
燃料圧力	10MPa
動弁系	DOHC 4valve

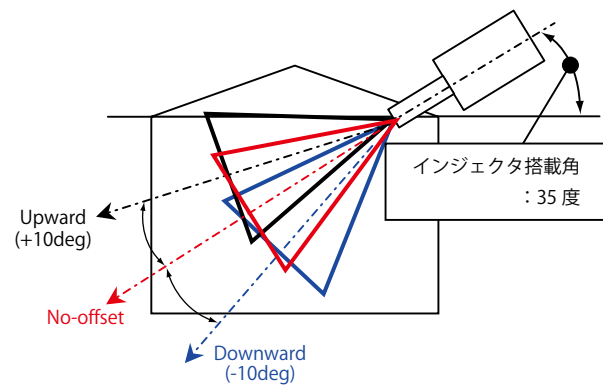


図2 直噴インジェクター噴霧噴射方向

2.2 ノッキング強度計測手法

ノッキング強度計測手法を図3に示す。燃焼圧センサーからの信号にバンドパスフィルター(4kHz～9kHz)を通した波形の片振幅の250サイクル平均値をノッキング強度とした。

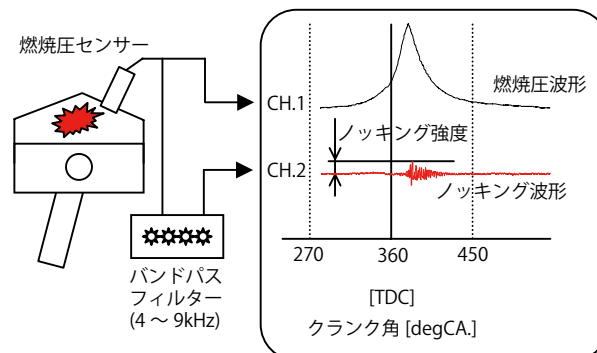


図3 ノッキング強度計測手法

2.3 実験結果

ノッキング強度と噴霧パターンとの関係を調査するために、エンジン回転数2,400rpmの全負荷試験を実施した。図4に実験結果を示す。噴射方向を変えることで点火時期に対するトルクカーブ、ノッキング強度に違いがみられた。Downwardの仕様では、No-offset、Upwardの仕様と比較してMBT (Minimum Advance for Best Torque)を得るための要求点火時期はより進角側に移行し、ノック限界以下の状態でより進角側での運転が可能であった。

MBTにおけるトルクと燃焼期間の比較結果を図5に示す。Downwardの仕様は0-10%、10-90%燃焼期間ともに他の2仕様より長く、トルクは低い。これは、噴射角度を変えることで得られた異なる混合気分布が、全開性能と燃焼速度に異なる結果をもたらしたことを意味する。

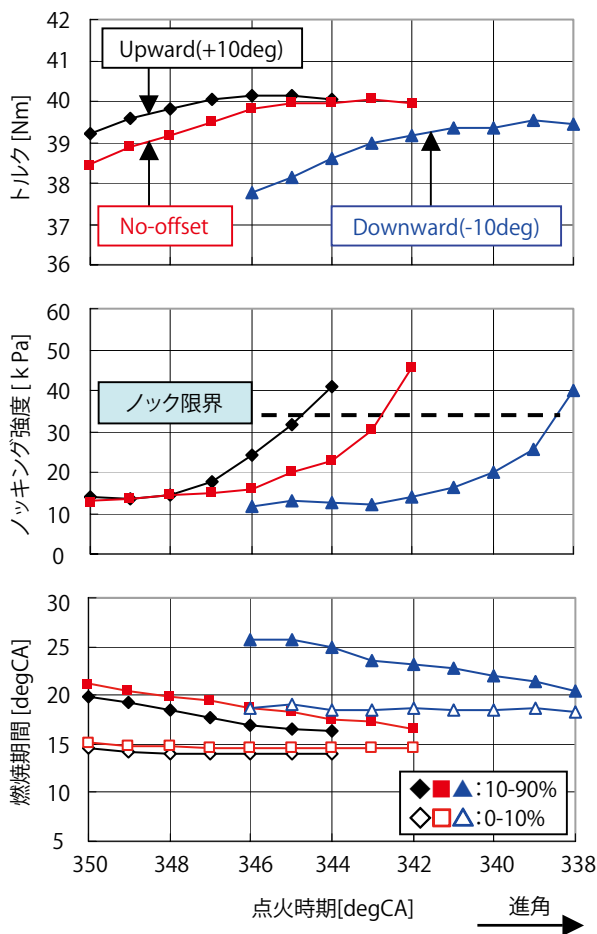


図4 噴射方向を変更した際の点火時期とトルク・ノッキング強度・燃焼期間の関係

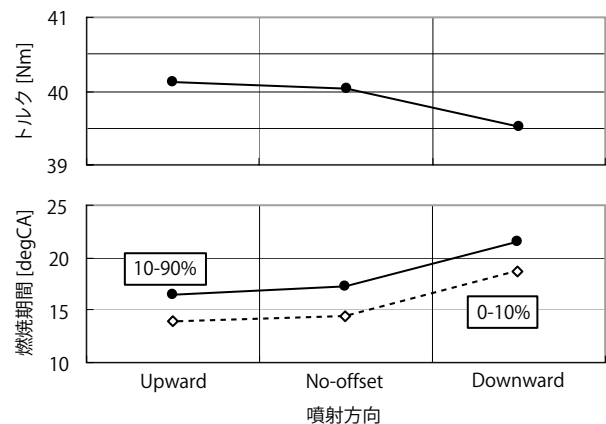


図5 直射方向とトルク、燃焼期間の比較

3 ガラスシリンダーエンジンを用いた筒内の混合気観察

3.1 観察方法

筒内の混合気配置は、LIF法⁸⁻¹⁰⁾によって、単気筒のガラスシリンダーエンジン(DOHC 4valve)で観察した。試験状況を図6に、試験条件を表2に示す。光源には0.4-0.8mm厚の308nmエキシマーレーザーを、燃料には蛍光トレーサーとして10%のアセトンを混合したイソオクタンを用いた。観察用CCD

(Charge Coupled Device)カメラは浜松ホトニクス製C5987を使用し、328nm-472nmのバンドパスフィルターを通してボアセンター断面における筒内のLIFイメージ画像を記録した。ピストントップランドには、TDC (Top Dead Center: 上死点)で燃焼室端までレーザーシート光をあてるために、幅1mm以下の切れ込みを追加している。各試験において燃料噴射量は95.3mg/sec一定で、運転時のA/F(空燃費)は12.5とした。画像撮影は、吸気行程の燃料噴射時期から圧縮終わりまで実施した。

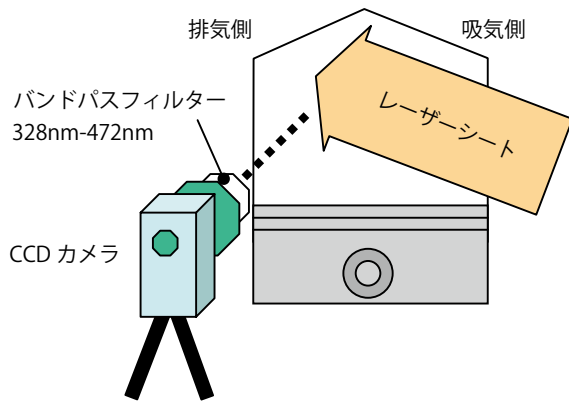


図6 LIF試験状況

表2 LIF試験条件

燃料	Iso-octane 90% Acetone tracer 10%
噴射量	95.3mg/sec
空燃比	12.5
レーザー	XeCl 308nm
CCD カメラ	Hamamatsu Photonics C5987
エンジン回転	2000rpm

3.2 混合気分布

図7にNo-offsetとDownwardの2仕様におけるLIF画像を示す。285degCA、315degCAを見ると、Downwardの仕様ではNo-offsetの仕様と比較して混合気は吸気側とピストン頂面に偏在している。これは燃焼開始のタイミングでよりリッチな混合気が吸気側とピストン頂面に残っていることを示している。

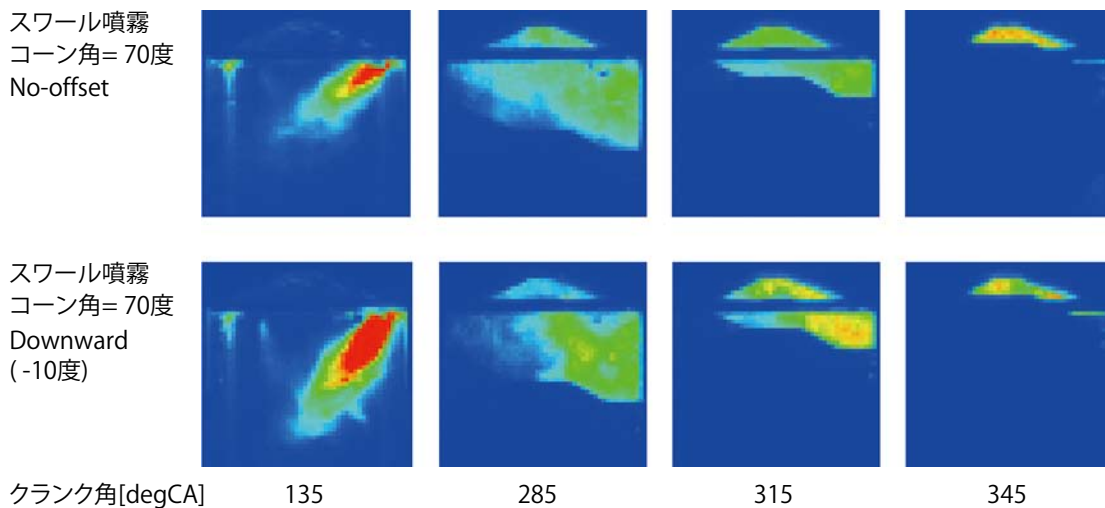


図7 噴射角度と混合気配置の関係

4 CFD 計算の基礎検証

筒内現象のCFD解析では、ガス流動、燃料噴射と混合気形成、燃焼、ノッキングなどの複雑な過程の計算が行われる。したがって、筒内現象のCFD解析の前に、各過程の基本的な計算精度の検証を実施した。ソフトウェアにはリカルド社のVECTIS (V3.9)を使用した。

4.1 噴霧計算

(1) 自由噴霧

単気筒エンジン試験に供試するインジェクターの初期噴射速度、実際のコーン角、噴霧の広がりを知るために高速度カメラによる撮影を実施した。噴霧の液滴径分布は位相ドップラー式レーザー粒子分析計(PDPA)により計測した。これらの計測結果は噴霧計算の入力条件として使用した。計算条件を表3に示す。液滴の抗力モデルには森吉らのモデルを使用した¹¹⁾。No-offsetインジェクターと10deg offsetインジェクターの噴霧形状を比較した結果を図8に示す。0.2msecの画像から10deg offsetインジェクターは若干プリジェットが長い様子が観察される。これ以外の計算パラメーターは両者で同じ値を使用した。図9に示すように計算結果の噴霧ペネトレーションと広がり、計測結果に近い値となっている。図10に噴孔から40mm下流における液滴径分布を示す。計算結果と実験結果は、よく似た分布を示している。

表3 噴霧計算条件

インジェクタータイプ	スワール
コーン角	70度
噴射期間	2msec
噴霧空間圧力	100kPa
噴霧空間温度	300K
分裂モデル	Reitz-Diwakar model
抗力モデル	Takagi.M, Moriyoshi.Y model

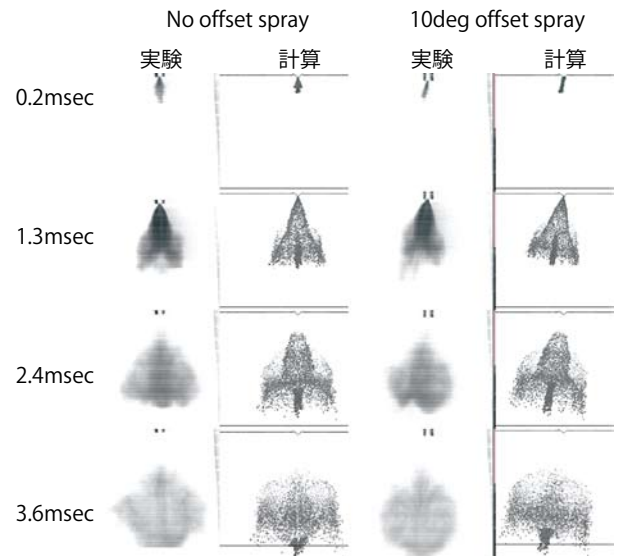


図8 噴霧形状の実験と計算の比較

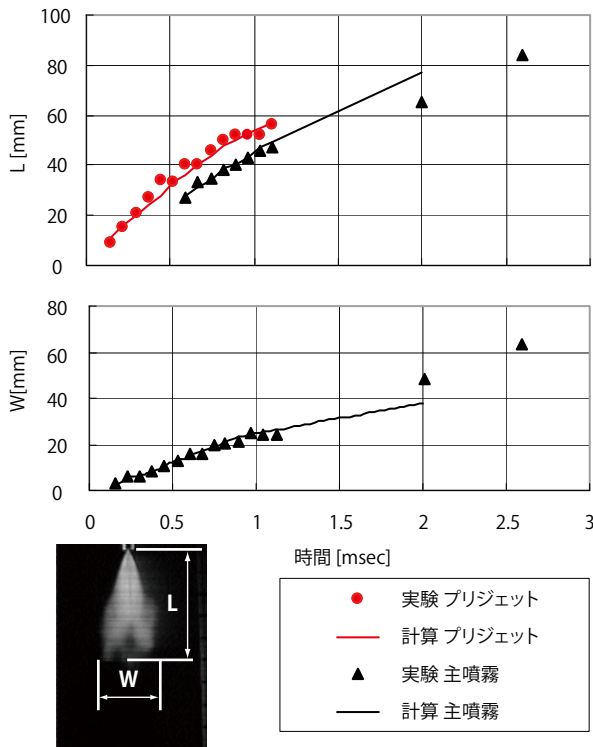


図9 噴霧形状比較

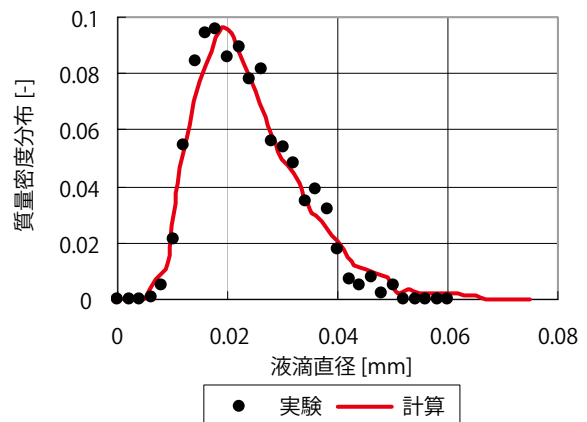


図10 粒径分布比較

(2) 横風を受ける状況下での噴霧

筒内ではタンブル、スワールに代表される非常に強いガス流動があり、噴射された燃料液滴はこの流動の影響を受ける。この現象を、風洞内への噴霧観察で調査した。燃料を横風状態($V_{mean} = 32\text{m/s}$)の風洞内に噴射し、液滴の挙動を高速カメラで撮影した。また、同じ条件で噴霧計算を実施し、両者を比較した。比較結果を図11に示す。計算結果はかなり良いレベルで実験結果の横風の影響を表すことができている。

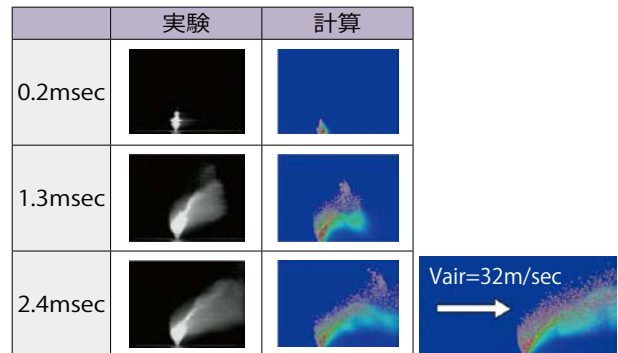


図11 横風空間での噴霧挙動比較

4.2 燃焼計算

燃焼モデルはVECTISのTwo zone flamelet modelを使用し、定容容器内での均一、層状燃焼計算を実施し、燃焼モデルの不均一場への適用性を検証した¹²⁾。検証結果を図12、13に示す。適当な燃焼モデル定数を設定すれば、燃焼圧力カーブ、火炎伝播ともに実験結果をよく再現できることが分かる。なお実エンジンモデルの計算時には、実試験の燃焼解析結果を用いて、燃焼モデル定数の合せ込みを再度実施した。

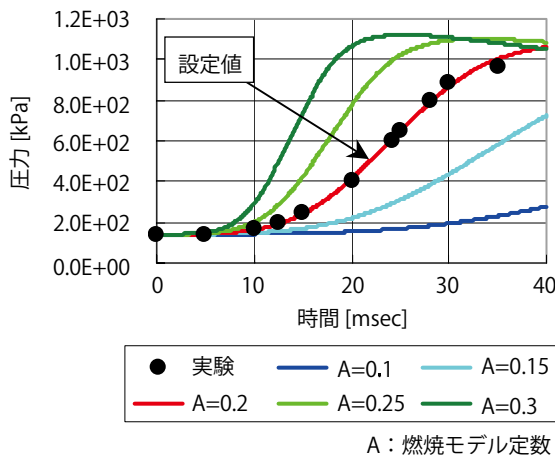


図12 燃焼モデルの定数選定

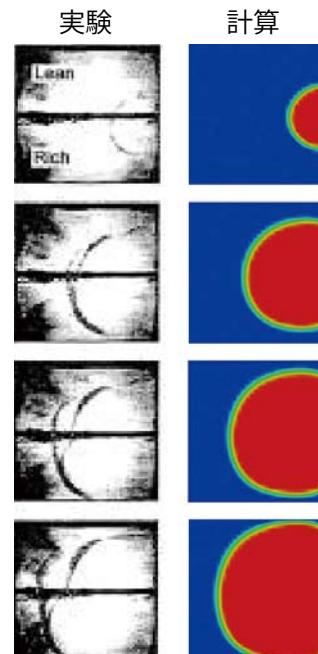


図13 火炎伝播の比較

4.3 自着火計算

SHELL modelによる着火遅れ時間の計算結果をHalsteadらによる急速圧縮装置を用いた着火遅れの実験結果¹³⁾と比較検証した。オクタン価100での検証結果を図14に示す。1.4~1.5[1000/K]に現れる着火遅れの負の温度領域も表現されており、今回の計算に使用可能と判断した。

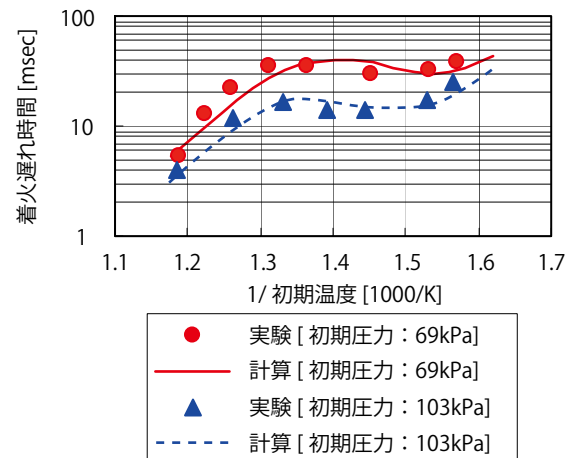


図14 着火遅れ時間の比較

5 実機モデルによるCFD解析

本解析の目的は、直噴エンジンの筒内混合気分布とノッキングの関係を分析することであり、計算は完全に均一な混合気から非均一な混合気分布へと段階的に実施した。

5.1 計算モデル

計算モデルは、実験に用いられた単気筒エンジンの3Dデータを用いて作成し、吸気および排気バルブタイミングとリフトカーブは、実試験と同じとした。モデル形状を図15に示す。モデル規模は吸気排気ポートを含み、要素数は最大で約490,000である。計算モデルのメッシュサイズとメッシュ切り替えのタイミングを表4に示す。計算精度向上のため、燃焼室内、吸排バルブ近傍、壁近傍はメッシュを細分化した。メッシュ切り替えのタイミングは、メッシュ歪が大きくなりやすいオーバーラップ区間は5degCA毎とし、それ以外は10degCA毎とした。

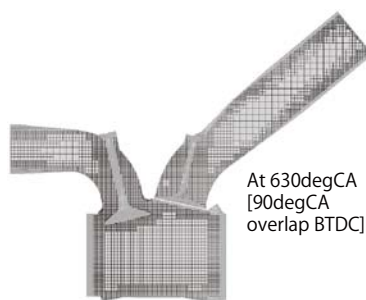


図15 計算メッシュ

表4 計算メッシュサイズとメッシュ切り替えタイミング

メッシュサイズ	
基本メッシュ	4mm
燃焼室	2mm
壁近傍、吸排バルブ近傍	1mm
メッシュ切り替えタイミング	
オーバーラップ区間以外	10degCA
オーバーラップ区間	5degCA

5.2 計算条件と計算仕様

計算は実試験と同じ2,400rpm全負荷で実施した。その際の境界条件等は表5に示す通りで、吸気圧、排気圧は計測の平均値を与え、点火タイミングを実試験と同様に変更して計算した。

計算仕様は以下の5仕様(①～③-3)の混合気分布状態とした。初めに下記①②に示す均一混合気仕様の計算を行い、混合気分布が均一な場合の火炎伝播とノッキングの状態について考察した。次に実試験と同じ直噴3仕様(③-1～3)の計算を行い、均一2仕様との比較から混合気分布が火炎伝播、ノッキングに及ぼす影響について考察した。

- ①完全均一混合気(Ideal homogeneous mixture)
- ②吸気ポート均一混合気(Port homogeneous mixture)
- ③コーン角70度のスワールインジェクターによる3仕様の直噴混合気
 - ③-1 No offset spray
 - ③-2 +10 deg offset spray, upward injection
 - ③-3 -10 deg offset spray, downward injection

③-1～3の直噴混合気計算では噴射タイミングを実試験と同じにした。表6に各仕様の噴射タイミングを示す。

表5 計算条件

ボア×ストローク	86mm × 86mm
圧縮比	14.5
バルブタイミング	
吸気 [開 / 閉]	682degCA/254degCA
排気 [開 / 閉]	477degCA/33degCA
バルブリフト [吸 / 排]	10.4mm/9.3mm
エンジン回転数	2400rpm
計算クランク角 [開始 / 終了]	630degCA/410degCA
吸気境界条件 [温度 / 圧力]	298K/101kPa
排気境界条件 [温度 / 圧力]	853K/106kPa
壁温	
吸気ポート	363K
排気ポート	423K
燃焼室	423K
シリンダー	388K
ピストン	461K
燃料	Iso-octane[RON100]
空燃比	12.5
燃焼モデル	RICARDO Two zone flamelet model
自着火モデル	Shell model

表6 直噴混合気仕様の噴射タイミング

	噴射開始	噴射終了
No offset spray	100	151.3
Upward spray	100	161.3
Downward spray	128	189.2

[degCA overlap TDC at 0degCA]

5.3 エンジンモデルの筒内流動状態

エンジンモデルの筒内流動の様子を図16に示す。筒内流動には強いタンブル成分は発生していない。これは混合気分布とノッキングの関係を調べるとい目的のために、あえて筒内流動よりも噴霧パターンの影響が支配的となるポートを選定したためである。

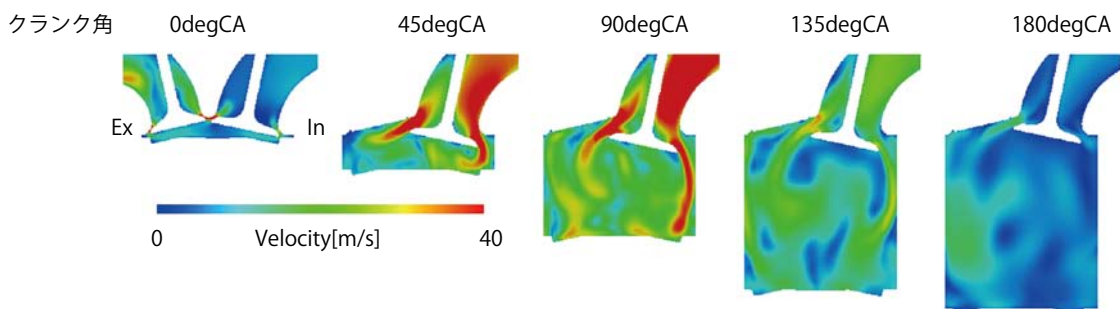


図16 筒内の流速分布

5.4 計算結果の妥当性

点火時期とノッキング強度について計算が正しく表現できているか上記の直噴噴霧3仕様についてチェックした。計算のノッキング強度は、実機圧力センサーと同じ位置の局所的な圧力から4kHz～9kHzの周波数帯を抽出し、その波形から求めた。図17に、その結果を示す。計算結果は実験結果で得られた「ノッキング強度は点火進角するにつれて、また噴射方向ではDownward、No-offset、Upwardの順で大きくなる」ことを同様に示している。よって、混合気分布とノッキングについて分析するに値するものと判断した。

しかしながら、点火時期が進んだ場合のノッキング強度の変化に着目すると、計算と実験の差が大きくなっている。これは実際のエンジンではノッキングの増加に起因する壁面の熱伝達促進と、それにとともなう壁温の上昇が起きていると推測されるが、解析は1サイクルだけの計算であるため燃焼室壁の温度上昇は考慮されない。これが計算と実験の乖離原因の一つと考えている。以下の検討では、あまり乖離が大きくない点火時期346degCAにおけるCFD結果を使用することにした。

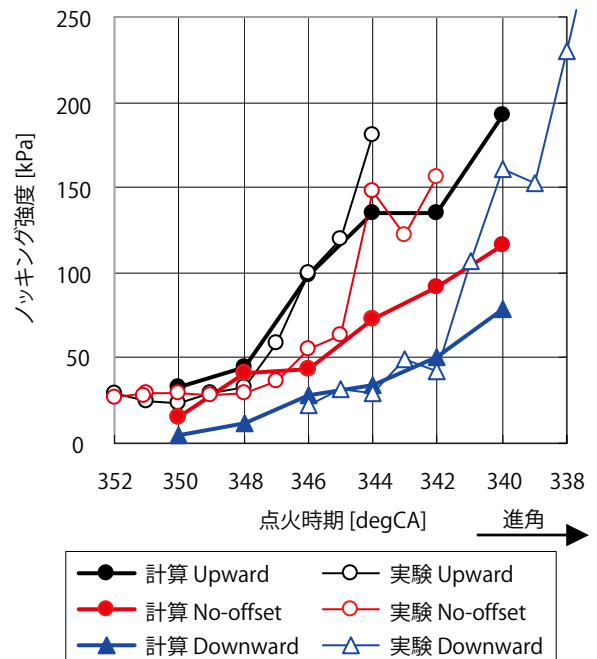


図17 実験と計算のノッキング強度比較

5.5 CFD結果による考察

混合気分布とノッキングの関係を考察するにあたり、計算した5仕様各々に対して筒内の状態を以下のように表現した。混合気分布については、ノッキングに影響すると考えられる点火直前の燃料分布を示す。ノッキング発生時の筒内状態については、Shell modelでノッキング発生の兆候として計算される仮想中間生成物[Q値]の分布を示し、加えて筒内ガス温度分布と燃焼反応率分布を示すことにした¹⁴⁾。表現するタイミングはQ値の局所濃度が増加し始めるクランク角度とノッキング強度が増加し始めるクランク角度の2タイミングを選んだ。ここでは筒内状態を図18に示すA-A断面で表現することにした。

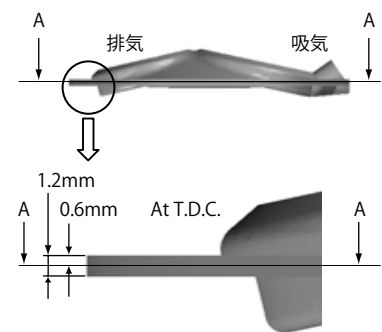


図18 断面位置

(1) 完全均一混合気 (Ideal homogeneous mixture)

初期条件として計算モデル全体をA/F=12.5に設定することで、混合気分布が完全に均一な状態の計算を行った。計算結果を図19に示す。ノッキング発生兆候を示すQ値は燃焼室の4隅(図中A、B)で増加しているが、ここは燃焼反応率で表現される火炎面の進行が遅い領域と一致する。特に吸気側の隅(A)で火炎面の進行が遅く、燃焼反応率が急増しノッキングの起点となっている。ガス温度に関しては、吸気側(A)と排気側(B)では、ほぼ同じである。一般のペンルーフ形状燃焼室では、点火プラグが燃焼室の排気寄りに位置し、点火プラグからの距離は排気側より吸気側の方が長くなる。そのため火炎の壁面への到達が吸気側で遅くなる¹⁵⁾。今回の結果は上記の一般的な知見と同一のものである。

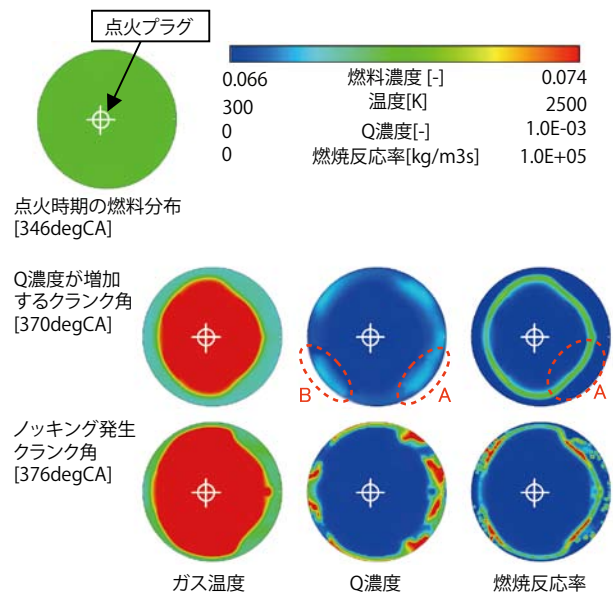


図19 完全均一混合気の結果

(2) 吸気ポート均一混合気 (Port homogeneous mixture)

初期条件として吸気ポート内のみをA/F=12.5の均一混合気に設定することで、理想的なポート噴射エンジンを簡易的に模擬した。計算結果を図20に示す。点火時期における燃料分布は排気側にリッチな領域が見られるが、燃料の非均一はA/F換算で±0.3程度と小さい。Q値と燃焼反応率の分布は完全均一混合気の場合とほぼ同じであり、ノッキング発生に優位な差はないことが分かる。

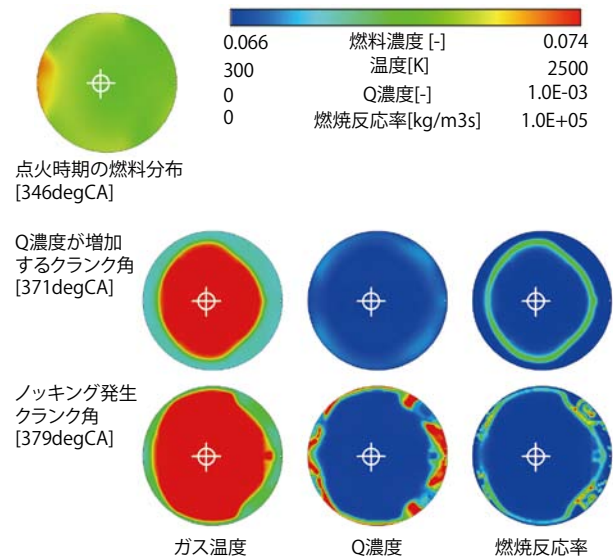


図20 吸気ポート均一混合気の結果

(3) 直噴/+10deg upward spray

+10deg upward spray仕様の計算結果を図21に示す。点火時期の燃料分布は吸気側に2箇所と排気側に1箇所のリッチ領域がある。Q値と燃焼反応率に着目すると、排気側の隅(図中C)で増加していることから、ここがノッキングの起点となっていることが分かる。火炎形状は上記2仕様の均一混合気と同様に吸気側(図中D)がくぼんでいるが、ここがノッキングの起点となっていない。これは完全均一な仕様では、前述したように、吸気側と排気側のガス温度はほぼ同じであるが、この場合は、吸気側(図中D)のガス温度が排気側(図中C)より約120℃低く、このことが、Q値の増加を妨げているからである。ガス温度が上昇しなかった理由は、直噴インジェクターの噴霧パターンが吸気側に局所的なリッチ混合気領域を形成し、リッチ混合気の燃料蒸発潜熱がエンドガス部の温度低下をもたらしたためであり、これが自着火を抑制したと考える。

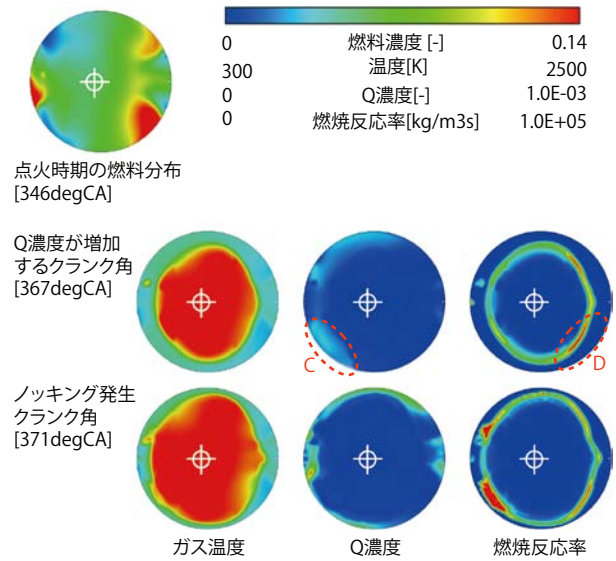


図21 +10deg upward spray の計算結果

(4) 直噴/No-offset spray

No-offset spray仕様の計算結果を図22に示す。点火時期の燃料分布を見ると、吸気側のリッチ領域はUpward仕様よりさらに吸気側へ偏っている。このためQ値は排気側で増加し始め、燃焼反応率に示されているように、排気側(図中E)でノッキングの発生に至る。しかし、火炎形状はUpward仕様と比較して、より真円に近い形状で壁近傍まで到達しており、ノッキングによる燃焼反応率の増加は小さい。

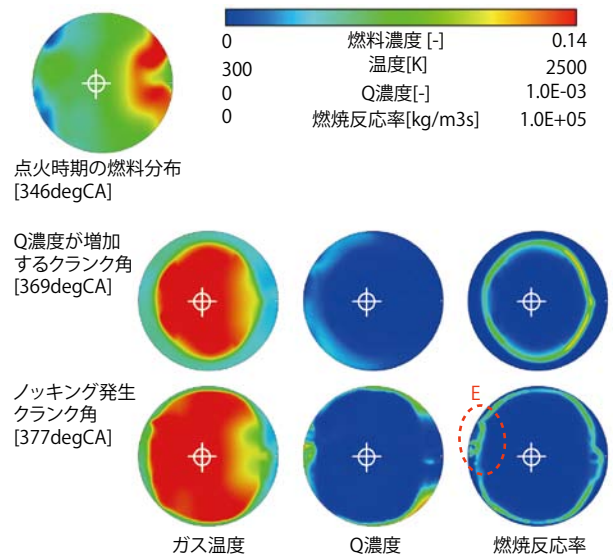


図22 No-offset spray の計算結果

(5) 直噴/-10deg downward spray

-10deg downward spray仕様の計算結果を図23に示す。点火時期の燃料分布は、シリンダー外周全体にリッチ層があり、吸気側の2隅にリッチ領域が広がっている。シリンダーセンター付近は、むしろややリーンになっている。Q値は排気側で増加し始めるが、非常に狭い領域であり、吸気側では、前述したようにリッチ混合気によってガス温度が低くコントロールされているため、ほとんど増加しない。火炎形状は吸気側では扁平であるが、それ以外はより真円に近く、シリンダー壁近傍に到達するまで燃烧反応率の急増は見られない。これは実験結果によるノッキングレベルが低いという事実と合致する。

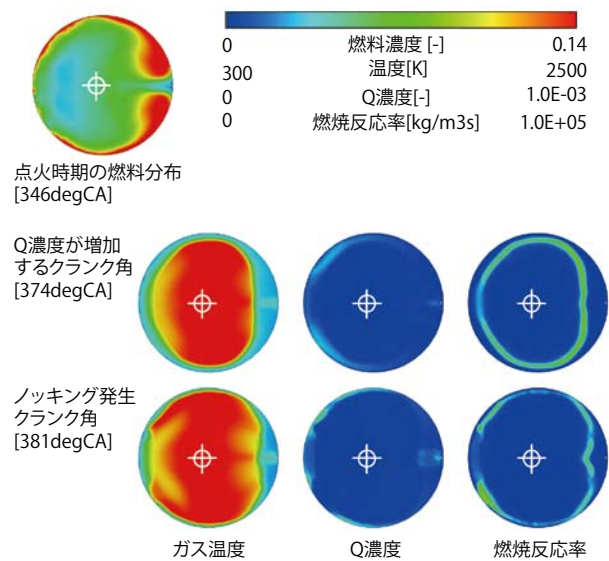


図23 -10deg downward sprayの計算結果

6 おわりに

ペントルーフ形状燃焼室を持つ4バルブエンジンにおいて、混合気分布とノッキングの関係に着目して解析を行った結果、以下の知見を得た。

- ① 理想的に均一な混合気が得られた場合では、火炎面の進行は吸気側と排気側の4隅で遅くなり、吸気側がノッキングの起点となる可能性が高く、均一な混合気がノッキングをコントロールする上で必ずしも最善ではない。
- ② 一般のペントルーフ形状燃焼室で点火プラグが排気側にオフセットした位置にあっても、最終的に火炎面が壁近傍に到達する時点で真円に近い形状であることがノッキングを抑制する上で有利である。
- ③ ②のような状態が実現できない場合、火炎面の進行が遅い領域については、局所的にリッチ混合気領域を形成することで、ノッキングコントロール性能を向上させる可能性がある。

注) 本論文の図表の一部は、SAE International からの許可を得て、SAE Paper 2006-01-0230から流用させて頂いています。

■参考文献

- 1) Makoto koike and Akinori Saito, Terutoshi Tomoda and Yasuhiro Yamamoto, "Research and development of a New Direct Injection Gasoline Engine", SAE 2000-01-0530
- 2) Mutumi Kanda, Toyokazu Baika, Senji Kato and Minoru Iwamuro, Makoto Koike and Akinori Saito, "Application of a New Combustion Concept to Direct Injection Gasoline Engine", SAE 2000-01-0531
- 3) Shizuo Abe, Masanori Sugiyama, Hiroyuki Kishi, Jun Harada, "Development of a new V-6 High Performance Stoichiometric Gasoline Direct Injection Engine", 25 Internationales Wiener Motoren Symposium 2004

- 4) A.Eiser, Th.Heiduk, M.Fitzen, J.Gessler, W.Hatz, "The new V-6 FSI-engine from AUDI", 25 Internationales Wiener Motorensymposium 2004
- 5) Rainer Ortmann, Stefan Arndtm, Juergen Raimann, Romann Greszik and Gernot Wuerfel, "Methods and Analysis of Fuel Injection, Mixture Preparation and Charge Stratification in Different Direct Injected SI Engines", SAE 2001-01-0970
- 6) Yoshihiro Nomura, Hiroshi Miyagawa and Taketoshi Fujikawa, Terutoshi Tomoda, Masato Kubota and Shizuo Abe, "Numerical Study of Mixture Formation and Combustion Processes in a Direct injection Gasoline Engine with Fan-Shaped Spray", SAE 2001-01-0738
- 7) Edward S. Suh and Christopher J. Rutland, "Numerical Study of Fuel/Air Mixture Preparation in a GDI Engine", SAE 1999-01-3657
- 8) M.E.A. Bardsley, P.G.Felton and F.V.Bracco "2-D Visualization of Liquid and Vapor Fuel in an I.C. Engine" SAE 880521
- 9) W.Lawrenz, J.Koehler, F.Meier, W.Stolz, R.Worth and W.H.Bloss, R.R.maly, E.Wagner and M.Zahn, "Quantitative 2D LIF Measurements of Air/Fuel Ratios During the Intake Stroke in a Transparent SI Engine", SAE 922320
- 10) Rio Shimizu, Seiichi Matumoto, and Shigeo Furuno, Motohide Murayama and Shiniji Kojima, "Measurement of Air-Fuel Mixture Distribution in a Gasoline Engine Using LIEF Technique", SAE 922356
- 11) Masahide Takagi, Yasuo Miriyoshi, "Modeling of a hollow-cone spray at different ambient pressures", The International Journal of Engine Research. Dec. 2003
- 12) Yasuo Moriyoshi, Hideaki Morikawa, Takeyuki kamimoto, "Analysis of Flame Propagation Phenomenon in Simplified stratified Charge Conditions", JSAE 9740343
- 13) M.P.halstead, L.J.Kirsch and C.P.Quinn, "The Autoignition of Hydrocarbon Fuels at High Temperatures and Pressures- Fitting of a Mathematical Model", Combustion and Flame 30,45-60 (1977)
- 14) H.Schepertoens and W.Lee, "Multidimensional Modeling of Knocking Combustion in SI Engines", SAE850502
- 15) Atsushi Teraji, Tsuyoshi Tsuda, Toru noda, Masaaki Kubo, Teruyuki Itoh, "Development of a Three Dimensional Knocking Simulation for a Spark Ignition Engines", JSAE 20035629

■ 著者

沖 秀樹 Hideki Oki
AM事業部AM第1技術部

鈴木 裕一 Yuichi Suzuki
AM事業部AM第3技術部

黒澤 伸一 Shinichi Kurosawa
AM事業部AM第1技術部