

研究報告

## 混合気形成と燃焼の数値解析

野村佳洋, 宮川 浩, 藤川武敏

## Numerical Analysis of Mixture Formation and Combustion Processes

Yoshihiro Nomura, Hiroshi Miyagawa, Taketoshi Fujikawa

## 要 旨

新しい直噴ガソリンエンジンの燃焼系開発を支援するため、標記解析手法を構築した。開発した手法は、噴霧の壁衝突などの挙動を模擬する噴霧モデル、および未燃ガス温度と断熱火炎温度に着目した適用範囲の広い燃焼モデル、さらに計算結果に応じて格子を効率良く細かく分割する解適応格子法より成る。この手法を用いてスリットノズルによるファンスプレー燃焼系の成層燃焼過程を解析した結果、以下のことが得られた。1) 従来手法と比較して約1/3の計算時間で同等の計算精度が得られた。2) 噴霧単体挙動、筒内の混合気および燃焼過程は実験と良く一致する。3) ファンスプレーはその噴霧形態から生じる縦渦により、高分散でありながら燃料の過度の拡散を防ぐという成層燃焼に適した特徴を持つ。また、これらの結果より本手法がエンジン開発ツールとして十分実用的であることが確認できた。現在エンジン開発に広く利用されている。

キーワード ガソリンエンジン, 数値解析, CFD, 噴霧, 燃焼, 解適応格子

## Abstract

A numerical simulation method was developed and applied for improving the new direct injection gasoline engine. The method consists of a spray wall impingement model, a combustion model based on the unburnt and burnt gas temperatures and a solution based local grid refinement technique. This method was applied for the analysis of the fan-shaped spray combustion system under late injection conditions. The following results were obtained: 1) Almost the same results were obtained in about one-third the CPU time compared to with the conventional method, 2) the calculated spray pattern, mixture formation and combustion processes are in good agreement with the measurements, and 3) The advantage of the mixture formation of the fan spray system became clarified. The eddy induced by the fan spray forms a mixture suitable for combustion with the least amount of overly lean mixture.

Keywords Gasoline engine, Numerical analysis, Computational fluid dynamics, Spray, Combustion, Adaptive grid

## 1. はじめに

Fig. 1は直噴ガソリンエンジンの燃焼系<sup>1, 2)</sup>を示したものである。直噴ガソリンエンジンでは燃料をピストン頂面のキャビティ内に直接噴射し、点火栓周辺のみ可燃混合気を形成し成層燃焼を行う。アイドリングから中速・中負荷までの比較的広い運転条件において成層燃焼を実現することにより、従来のポート噴射エンジンに対して大幅な燃費向上が達成

できる。広い運転範囲、すなわちエンジン回転数や燃料の噴射量が数倍変化するのに対して、点火栓近傍に常に適切な燃料濃度の可燃混合気を形成するのはかなり難しい。そのため、これまでも種々の燃焼コンセプトが提案、実用化されてきた<sup>3-6)</sup>が、まだ決定的なものが無くさらなる改良の必要がある。本号で述べられているスリットノズルを用いた高分散のファンスプレー燃焼系はその極めて有効な手段の一つである。

このスリットノズルを用いた新しいコンセプトを実用化するためには、その特徴を最大限活かす燃焼系（噴霧条件やキャビティ形状など）の開発が不可欠である。従来、こういった開発には主にエンジン試験や可視化エンジンを用いた筒内観察などの実験的手法が用いられてきた。近年、燃焼系に対する要求が厳しくなるとともに、種々の運転範囲において筒内の現象を詳細に解析する必要が生じている。しかし、可視化実験では可視化できる範囲やエンジン運転条件の範囲が限られることや、解析に時間がかかるといった問題がある。そのため3次元数値シミュレーションによる筒内解析への期待が非常に高まっている。筒内解析については、著者らの報告を始めすでにいくつかの解析事例が報告されている<sup>6-9)</sup>。しかし、いずれも筒内における燃料濃度分布の定量的な精度検証までには至っておらず、開発ツールとして用いるのは精度上問題があった。

一方、数値解析のもう一つの課題として計算時間短縮がある。前述のように直噴ガソリンエンジンでは広い運転範囲において成層燃焼を実現する必要がある。したがって、例えばたった一つの噴霧パターンの良し悪しを評価する場合でも、エンジン回転数・負荷・燃料噴射時期・点火時期など数多くのパラメータの影響を評価する必要が生じる。通常1ケースの解析には数日が必要なため、最新の大型並列計算機を用いても評価にはかなりの日数がかかることになる。数値解析の実用性を高めるためには、計算時間の大幅な短縮も必要なのがわかる。

このような数値解析の課題に対して、著者らは噴

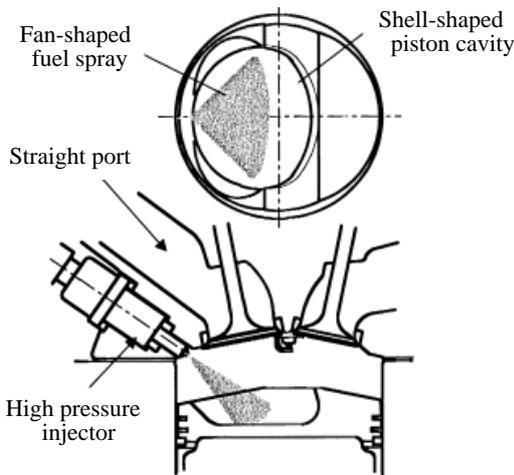


Fig. 1 Combustion system of direct injection gasoline engine with fan-shaped spray.

霧や燃焼解析手法の改良と精度向上<sup>8,9)</sup>、また計算の精度検証にも使用し得る定量的な筒内混合気濃度の計測手法を開発してきた<sup>10)</sup>。一方、計算時間の短縮に対しては解析結果に応じて計算格子を細かく分割する解適応格子法の開発を行ってきた<sup>11)</sup>。本報はこれらの手法およびその計算精度、さらにスリットノズルによるファンスプレー燃焼系の特徴を解析した結果をまとめたものである。燃焼系改良への応用については、本号後出 (p.27) の論文で実験結果とともに述べられるためここでは省略する。

## 2. 数値解析手法の概要

### 2.1 噴霧モデル

#### 2.1.1 壁衝突挙動

前述のFig. 1はスリットノズルを用いたファンスプレー燃焼系の構成である。図からもわかるように筒内の混合気分布は燃料噴霧がキャビティ壁に衝突した後の挙動に大きく影響される。すなわち噴霧の壁衝突を記述するモデルが極めて重要であることが推察できる。Fig. 2 (a)はキャビティを模した壁面に噴霧を衝突させた際の挙動を観察したものである。衝突後の噴霧はキャビティ壁面上で広がった後に、先端部は巻き込むように舞い上がるのが見られる。この時、個々の燃料液滴はFig. 2 (b)に示すような様々な挙動を示すものと考えられる。これらの液滴挙動については従来から数多くの研究が成されているが、残念ながら直噴ガソリンエンジンを対象としたものは少なく、さらに実際に筒内での噴霧挙動を定量的に計測した例は見当たらないようである。

このような状況のため、従来、高精度な筒内解析

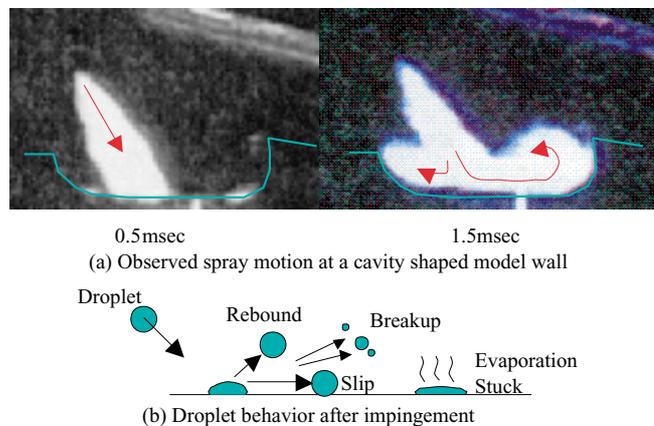


Fig. 2 Spray motion and droplet behavior at the wall.

は難しいと考えられていた。それに対して著者らは、筒内の噴霧挙動を示唆する重要な手掛かりとして小池らの研究成果<sup>13)</sup>に着目した。Fig. 3がその結果の一つであり、燃料としてガソリンと極めて低沸点なイソペンタンとを用いた場合のエンジン性能を比較したものである。可視化実験によるとガソリンではかなりの燃料噴霧がキャビティ壁に衝突するのに対して、低沸点のイソペンタンでは衝突する前にほとんど蒸発している。それにも関わらず、両者によるエンジン性能は非常に似通ったものとなっていることから、火炎伝播時には両者の混合気分布の差は小さいと考えられる。したがって、ガソリンにおける壁面衝突後の大半の液滴はイソペンタンにおける蒸発後の燃料蒸気とほぼ同じ挙動を示していると推察される。すなわち壁面に壁衝突後の噴霧はあたかも衝突ガス噴流のような挙動を示していると考えられる。これらの点を考慮すると、噴霧の壁衝突挙動の記述にはガス噴流を模擬したWall Jet Model<sup>14)</sup>を基本とすることが最適であると考えられる。

なおこれらの挙動は、噴射圧が高く微粒化に優れた直噴ガソリンエンジンの噴霧の特徴である。例えば噴射圧が低いポート噴射エンジンの噴霧では成立しない。また、直噴ガソリンでも特に低温時における未燃HCの挙動の解析、あるいは燃料の微粒化が不十分な場合は必ずしも十分なモデルとは言えない。そのため著者らはさらなる噴霧モデルの改良も進めている<sup>12)</sup>が、誌面の都合上省略する。

### 2.1.2 液滴初期条件

本報で対象とするような燃焼系の初期検討段階ではノズル形状なども定まっておらず噴霧初期条件も重要なパラメータである。液滴の初速度や粒径分布

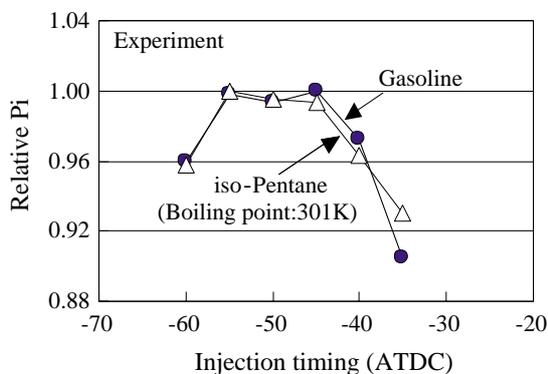


Fig. 3 Effect of fuel property on indicated mean effective pressure.

については想定される噴射圧から従来の知見を基に仮定する。噴霧角や噴射量の分布はシミュレーションによる数値実験の評価パラメータとして任意に設定できるようにしている<sup>8)</sup>。

## 2.2 燃焼モデル

### 2.2.1 火炎の形態

直噴ガソリンエンジン筒内の燃焼過程は、同じ直噴であるディーゼルエンジンが拡散燃焼であるのと異なり、大半はポート噴射エンジンと同様の火炎伝播による予混合燃焼と考えられる。火炎は乱れによりしわ状となり乱流火炎となるが、火炎面の局所では層流燃焼速度で伝播する、いわゆるしわ状層流火炎と仮定できる。このとき燃焼速度は局所の層流燃焼速度と火炎面積との積で表されるため、燃焼モデルとしては局所の層流燃焼速度を表すモデルと乱れによる火炎面積の変化を表すモデルが必要である。

### 2.2.2 層流燃焼モデル

直噴ガソリンエンジンではポート噴射エンジンと大きく異なり、成層燃焼時には筒内の燃料濃度が局所的に大きく異なっている。また、大量のEGRガスが存在する。層流燃焼速度はこれらの濃度の影響を強く受ける。しかしながら従来のモデルは主にポート噴射エンジンを対象としており、成層燃焼に適用できる層流燃焼モデルは存在しなかった。

筆者らは以前に超希薄燃焼の実験的研究を行った際、層流燃焼速度が燃焼前の未燃ガスの温度と燃焼後の火炎温度の両者に支配されるという知見を得た<sup>15)</sup>。そこで、層流燃焼速度 ( $SL$ ) が未燃ガス温度 ( $T_u$ ) と断熱火炎温度 ( $T_{ad}$ ) との中間的な反応温度 ( $T_r$ ) のみに依存するという以下のような層流燃焼モデルを提案した。

$$T_r = Tu + c(Tu + Tad)$$

$$SL = AP^a \exp(-E/RT_r)$$

このモデルにおいては燃料濃度およびEGRガスの濃度は断熱火炎温度のみに影響する。従来の層流燃焼モデルが燃料やEGRガスの濃度に依存した実験定数を持っているのに対し、このモデルはそれらを一切有していないため、成層燃焼への適用が可能である。この層流燃焼モデルは実際に広い燃料やEGRガス濃度、さらには混合気の初期温度が大きく変わっても成立することが確かめられている<sup>9)</sup>。

### 2.2.3 火炎面積

乱流火炎の記述にはCoherent Flame Modelを用いた<sup>9)</sup>。これは気流の乱れにより火炎面がしわ状になる時の火炎面積を予測するものである。基本的な考え方は従来のポート噴射エンジンの燃焼解析<sup>16)</sup>と同様であるため詳細は省略する。

2.3 計算プログラム

計算には汎用流体解析プログラムSTAR-CDを用いた。このプログラムはこれまでに実用的な流れ場において十分な精度であることを確認している<sup>10)</sup>。これに上述の噴霧や燃焼のモデルをユーザーサブルーチンとして当社で組み込んだものを使用した。

3. 解適応格子法

本手法の基本的な考え方は比較的粗い格子を用いまず計算を行い、その結果を基に、より細かい格子が必要な部分のみを対象に要素を局所的に分割するものである。当社で用いている手法は特に要素分割に方向性を持たせることにより、精度向上と計算時間の短縮という相反する条件を同時に満たすものである<sup>10)</sup>。Fig. 4に筒内解析に応用した結果を示す。噴霧周辺で選択的に格子が細くなっていることがわかる。

計算格子の混合気分布への影響を示したのがFig. 5である。後述の精度検証からこの条件ではFig. 5 (b)に示す20万要素以上の細かい格子が必要であることがわかっている。それに対し、Fig. 5 (c)に示す解適応格子法で必要な要素数は約1/4となり、またFig. 6に示すように計算時間は約1/3であった。これにより精度を確保しつつ計算時間の大幅な短縮が達成でき、初めて筒内数値解析を開発ツールとして実用化することが可能になった。

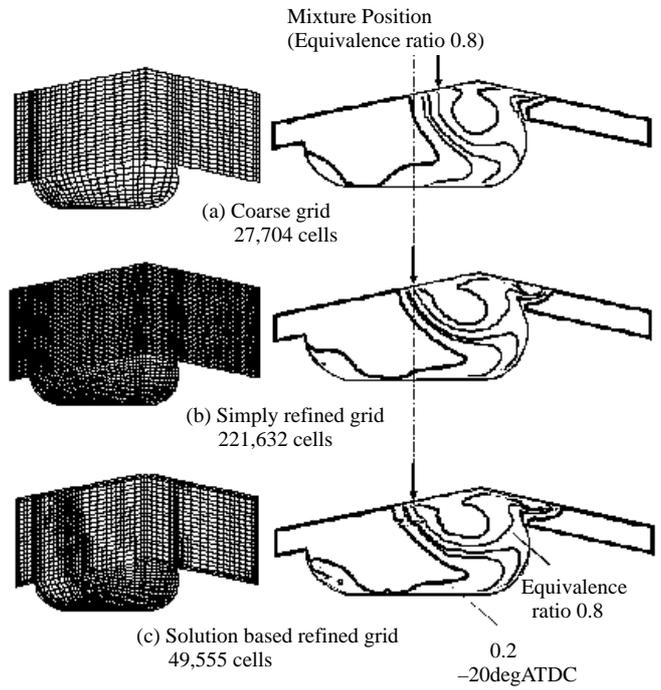


Fig. 5 Effects of computational grid on the fuel distributions.

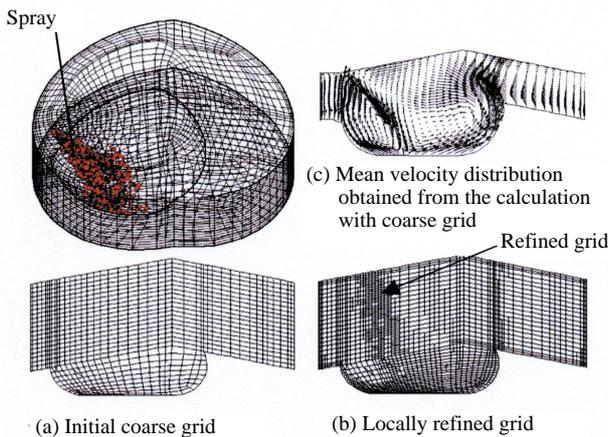
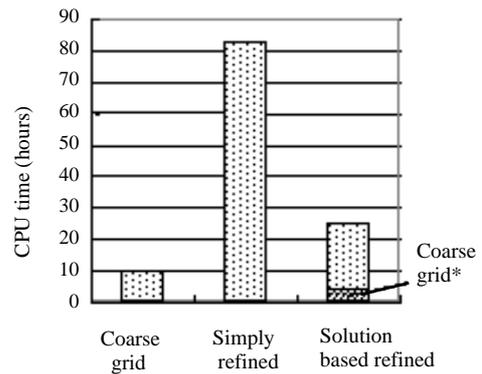


Fig. 4 Calculation procedure with solution based grid refinement.



(\*Only from the injection start to ignition timing)

Fig. 6 Comparison of CPU time with a EWS of single CPU from BDC to TDC.

## 4. 計算精度の検証

### 4.1 噴霧

Fig. 7は雰囲気圧を変えた時の噴霧挙動について実験と計算を比較したものである。実験による噴霧は高圧場においてはやや噴霧角が減少し、先端が丸みを帯びた形状に変化している。計算においては、雰囲気圧にかかわらず噴霧の初期条件は同じ値を仮定しているが、噴霧の形状は実験と良く一致した。

これは逆に考察すると、ノズルからの燃料噴射速度や方向は雰囲気圧に寄らずほぼ一定であり、噴射後の液滴と気流の相互作用により噴霧形状が大きく影響されていると考えることができる。雰囲気圧が0.5MPaでも空気密度は燃料密度の1/100程度であり、ノズル内流れに対して雰囲気圧がほとんど影響しないのは極めて妥当な結論と思われる。

以上、計算による噴霧形状が実験と良く一致したことから、前述の液滴初期条件の設定方法が妥当なものであることがわかった。したがって、噴霧角などをこの条件からさらに変化させることにより、種々の噴霧形状を模擬することが可能になった。

### 4.2 混合気形成過程

Fig. 7に示したものと同様なファンブレイ噴霧を用いて筒内の解析を行い、実験と比較検討した結果をFig. 8, 9, 10に示す。実験にはガラスピストンを用いた可視化単筒エンジンを用いた。エンジン回転数は1200rpm、燃料噴射量は $12\text{mm}^3$ 一定とした。その他実験条件などの詳細は後出 (p.27) の藤川らの報告を参照願いたい。

Fig. 8は混合気形成過程を示したものである。LIF実験による混合気分布は点火位置における水平断面の分布を、計算結果は同じく水平断面とシリンダ中心における垂直断面を示した。実験によると混合気はキャビティ壁に衝突後約 $-40\text{degATDC}$ で点火位置に到達している。計算でもその時期はほぼ一致している。その後の混合気の形成過程

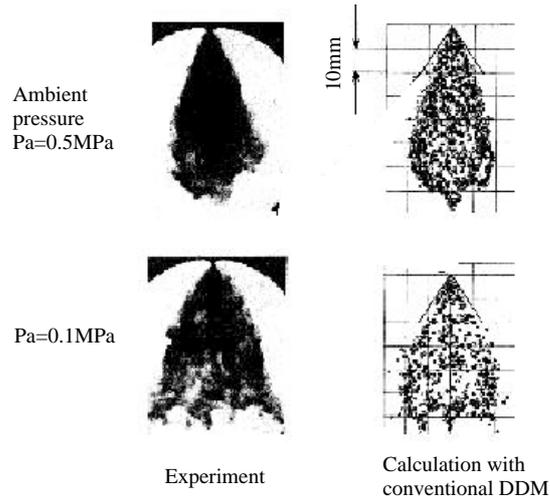


Fig. 7 Comparison of fan spray shapes.

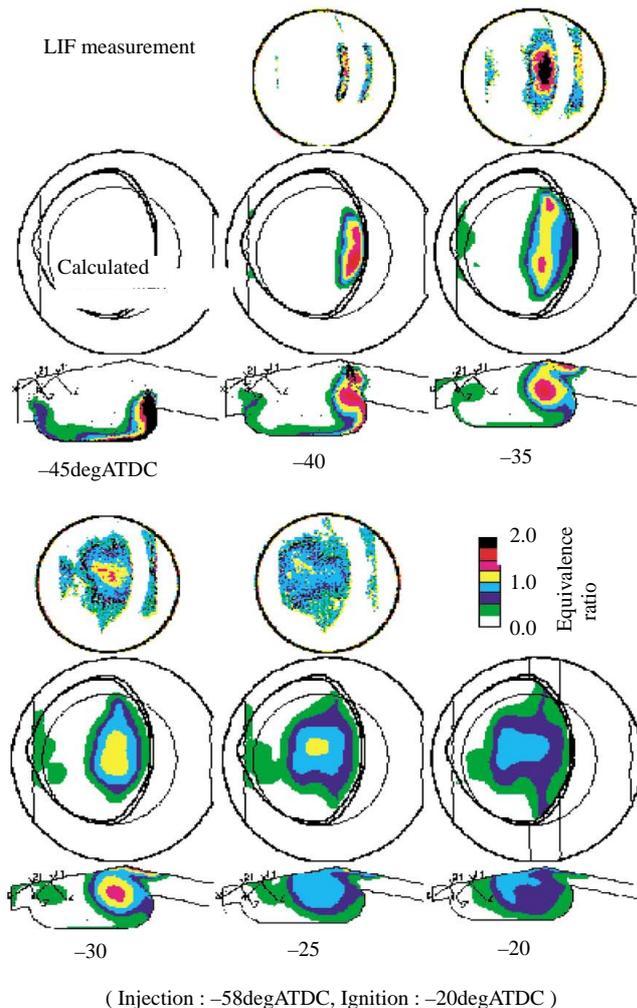


Fig. 8 Measured and calculated fuel distributions in the cylinder at mixture formation processes.

を比較するとやや計算の方が実験より動きが遅い傾向があるものの混合気挙動はほぼ一致している。この時の点火位置を通る中心線上の濃度分布を実験と計算で比較したのがFig. 9である。混合気到達直後の-35degATDCでは誤差が大きいものの、その後の両者の差は20%程度である。この程度の誤差であれば、十分ではないがほぼ混合気分布が予測できるレベルと言える。

#### 4.3 燃焼過程

Fig. 10は燃焼過程における未燃混合気の挙動を示

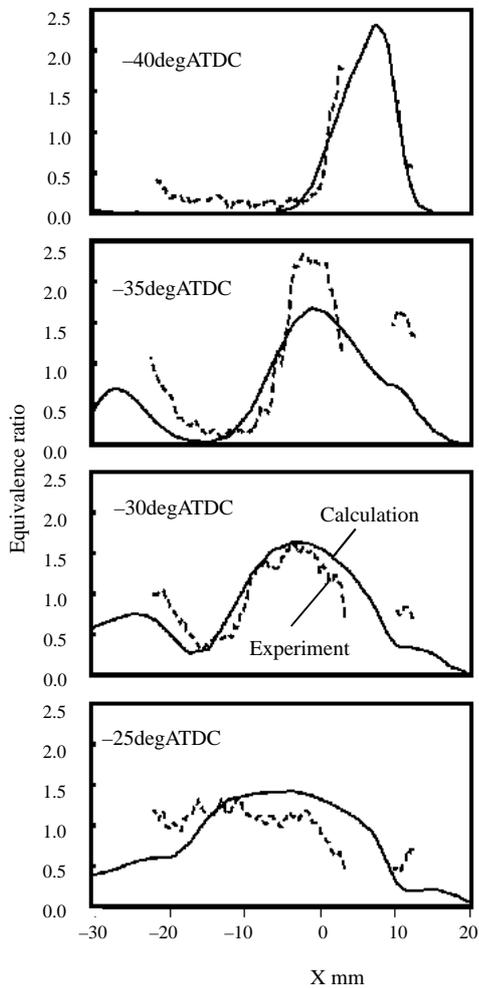


Fig. 9 Comparison of equivalence ratio of calculation and experiment.

したものである。実験によるとシリンダのほぼ中央で点火された混合気はまずキャピティ内を噴射弁側に伝播し、燃焼後期の未燃燃料は主にキャピティ端部に存在することがわかる。計算でも同様な燃焼過程となっている。前述のように混合気予測は若干誤差が大きく、燃焼解析はその誤差の影響を大きく受けるため定量的な解析はまだ難しい面がある。しかしながら、ここで示したように燃焼過程の定性的な予測はほぼ可能と言える。

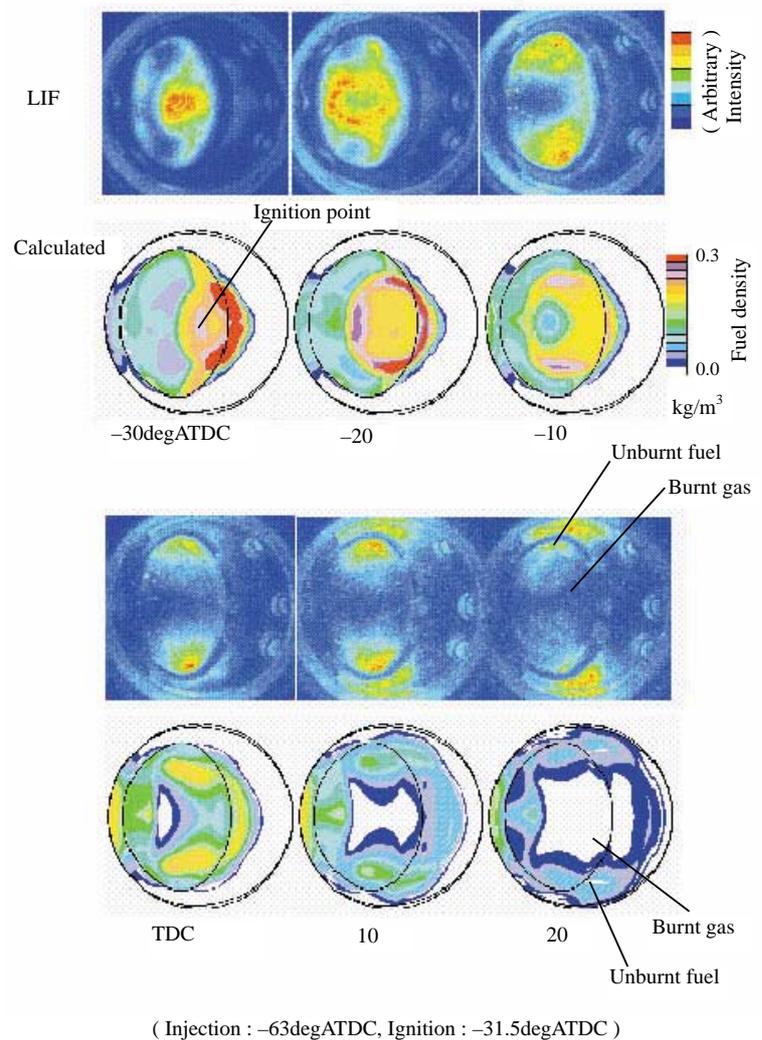


Fig. 10 Comparison of fuel distribution at combustion processes.

## 5. ファンスプレーによる混合気形成の特徴

以上述べてきた数値解析手法を用いて、ファンスプレーによる混合気形成を解析した結果を以下に示す。今回はその特徴を明確にするために、従来から広く用いられてきたスワール弁による噴霧と比較検討した。Fig. 11は計算に用いた噴霧のパターンを示したものである。スワール弁に相当する噴霧としては円錐形状を仮定した。

Fig. 12が混合気分布および速度ベクトルを比較したものである。壁面衝突直後の $-52\text{degATDC}$ において両者を比較すると以下のことがわかる。壁衝突前の燃料蒸気はスワール弁噴霧の方が高さ方向に厚い。また図では示されていないがFig. 11からわかるように、横方向にはスリット弁より狭くなっている。ところがキャビティ壁に衝突後は全く逆になり、壁面上で大きく横方向に広がり、その厚みは非常に薄くなる。一方、ファンスプレーではその噴霧形状から噴霧の上下で強い縦渦を生じる。その縦渦はキャビティ壁衝突後も残り、混合気を厚く巻き上げるように働く。結果として $-22\text{degATDC}$ では点火栓近傍にボール状の混合気を形成する。同時期にスワール弁噴霧の混合気分布を見ると垂直断面ではほぼ同等の濃度分布であるものの、水平断面をみるとキャビティ端部まで燃料が拡散し、かなり希薄な混合気が形成されていることがわかる。Fig. 10の燃焼過程から推察してこのようなキャビティ端部への燃料の過

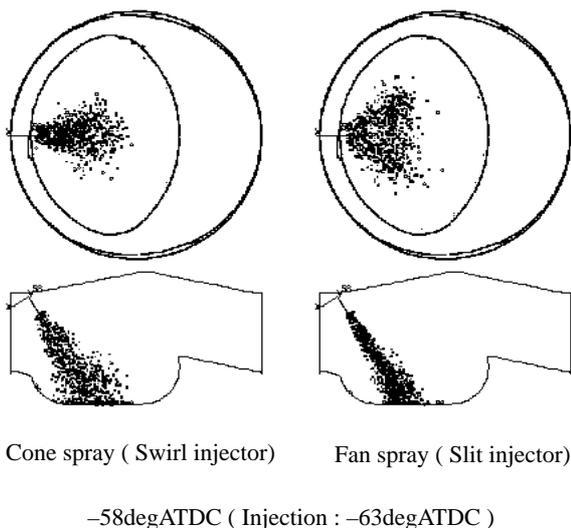


Fig. 11 Comparison of spray pattern.

度の拡散は燃焼面から好ましいものとは言えない。

以上ファンスプレー噴霧による混合気形成をまとめると、その特徴的な噴霧形態から生まれる縦渦により、高分散でありながら燃料の過度の拡散を防ぎ、点火位置に適切な混合気を形成するという成層燃焼に極めて有利な特徴を持つことがわかった。

## 6. まとめ

噴霧および燃焼モデルの改良と解適応格子法により、高精度でありながら計算時間の短い筒内数値解析手法を構築した。この手法をファンスプレー燃焼系に適用し以下のことを得た。

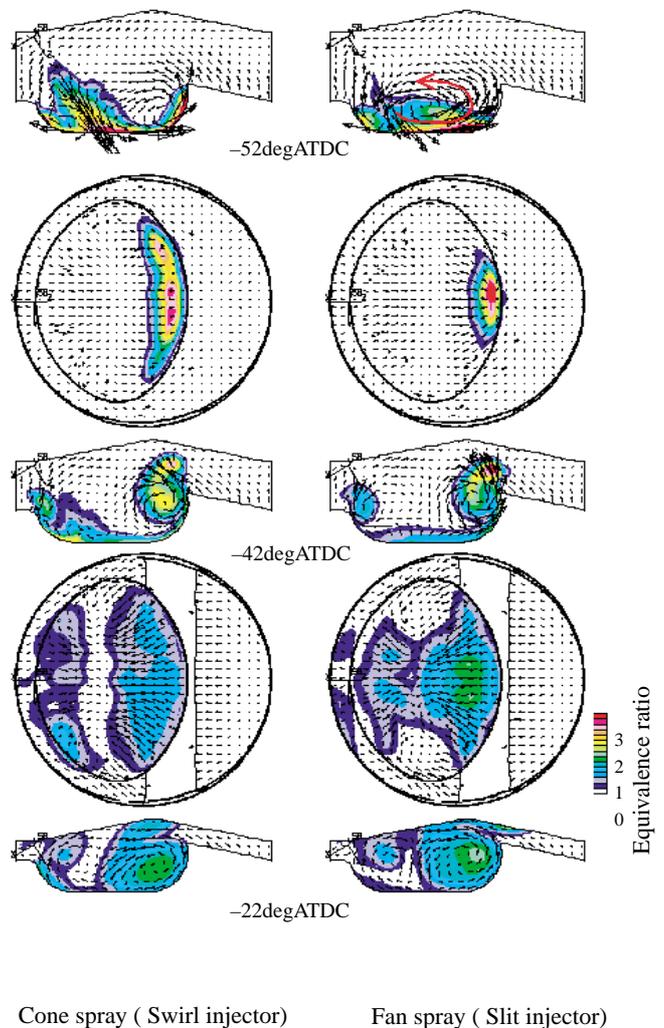


Fig. 12 Effects of spray pattern on the mixture formation.

(1) 従来手法と比較して計算時間を約1/3に短縮することができた。

(2) 噴霧単体挙動，筒内の混合気および燃焼過程について実験との良い一致が得られた。

(3) ファンスプレーはその噴霧形態から生じる縦渦により，高分散でありながら燃料の過度の拡散を防ぐという成層燃焼に適した特徴を持つことがわかった。

以上の結果より，特に成層混合気形成の解析についてはほぼ実用段階に達したと言える。応用例については本号次の報告を参照願いたい。

#### 参考文献

- 1) Koike, M., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.2000-01-0530 (2000)
- 2) Kanda, M., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.2000-01-0531 (2000)
- 3) Harada, J., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.970540(1997)
- 4) Kume, T., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.960600(1996)
- 5) Takagi, Y., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.980149(1998)
- 6) Duclos, J. M., et al. : Proc. COMODIA98, (1998), 335
- 7) Shu, E. S. : SAE Tech. Pap. Ser., No.1999-01-3657(1999)
- 8) 野村佳洋, 藤川武敏, ほか3名 : 第76回日本機械学会全国大会講演論文集, No.98-3(1998), 513
- 9) Miyagawa, H., et al. : Smart Control of Turbulence, (2000), Springer Verlag, Tokyo
- 10) Fujikawa, T., et al. : JSME Int. J., Ser. B, 42-4(1999), 760
- 11) 野村佳洋, 大久保陽一郎 : 自動車技術会学術講演会前刷集, No.952(1995), 231
- 12) Tomoda, T., et al. : COMODIA2001 [CD-ROM], (2001)
- 13) 小池誠, 鈴置哲典, ほか4名 : 自動車技術会学術講演会前刷集, No.982(1998), 103
- 14) Naber, J. D., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.880107(1988)
- 15) 野村佳洋, 大久保陽一郎, ほか1名 : 日本機械学会論文集, B編,57-534(1991), 710
- 16) Miyagawa, H., et al. : Proc. COMODIA98, (1998), 227

(2001年11月29日原稿受付)

#### 著者紹介



野村佳洋 Yoshihiro Nomura

生年：1960年。

所属：直噴ガソリン研究室。

分野：エンジン筒内現象の数値解析 (CFD)。

学会等：日本機械学会，自動車技術会，日本ガスタービン学会会員。工学博士。



宮川 浩 Hiroshi Miyagawa

生年：1966年。

所属：直噴ガソリン研究室。

分野：エンジン筒内現象の数値解析 (CFD)。

学会等：日本機械学会，自動車技術会会員。

2000年日本機械学会奨励賞受賞。



藤川武敏 Taketoshi Fujikawa

生年：1957年。

所属：直噴ガソリン研究室。

分野：エンジン筒内現象のレーザ計測。

学会等：日本機械学会，自動車技術会会員。