

直噴ガソリンエンジン内の熱流体现象に関する数値シミュレーション

Numerical simulation on the thermo-fluid dynamic phenomenon in cylinder of the gasoline direct-injection engine

桑原 雅貴¹, 大八木 重治^{1*}, Jayan Sentanuhady², 杉田 満春³

Masaki Kuwabara¹, Shigeharu Ohyagi¹, Tetsuro Obara¹, Teruo Yoshihashi¹, Mitsuharu Sugita³

¹ 埼玉大学 大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

² ガジャマダ大学工学部 (インドネシア)

Faculty of Engineering, Gadjah Mada University

³ 株式会社 エー・アンド・デイ

A & D Co., Ltd

Abstract

The potential of gasoline direct-injection (GDI) engines for significantly enhanced fuel economy, transient response and cold-start hydrocarbon emission levels has led to a large number of research and development projects that have the goal of understanding, developing and optimizing such engine system. This study deals with the numerical analysis on the thermo-fluid dynamic phenomenon in cylinder of the GDI engine. The analysis is restricted to a period from the compression to the expansion stroke in which include gasoline injection, mixing with air and combustion phenomena. In this study, the combustion process is focused adopting the Weller 3 equation model for the flame propagation in stratified premixed gases.

Key Words: Numerical Analysis, Gasoline Direct-Injection Engine, Stratified Combustion

1. はじめに

近年、化石燃料の枯渇問題や世間の環境問題への関心の高まりもあり、年々さらに燃費が向上され、また自動車の排ガス規制がより厳しく規制されている。その中で近年、直噴ガソリンエンジン (Gasoline Direct-Injection Engine) が開発され、実用化されている。このエンジンは、従来使用されているポート噴射エンジン (Port Fuel Injection Engine) と異なりシリンダ内に直接燃料を噴射することにより燃費向上や出力向上などの様々なメリットが

生まれるものと考えられている。ポート噴射エンジンでの混合気は、吸入ポート内で予混合され、その一様な混合気をシリンダ内に取り込み点火プラグにより点火する方式であるのに対し、直噴ガソリンエンジンは、直接シリンダ内に燃料を噴射し混合気を形成する。したがって、混合気は一様ではなく、燃料濃度に場所的な変化が生じいわゆる成層混合 (Stratified Mixture) の状態になる。シリンダ内のシリンダに対して水平方向の渦のスワール流 (Swirl flow) または垂直方向の渦のタンブル流 (Tumble flow) を利用することにより点火位置付近に点火可能な混合気を形成することにより、通常必要な燃料より少ない燃料によって燃焼を起こすことができ6

* 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255
埼玉大学大学院理工学研究科
電話：048-858-3445 FAX：048-858-3449
Email：ooyagi@mech.saitama-u.ac.jp

るので、通常のガソリンエンジンよりも燃料の消費を抑え、排出 CO₂ の削減が可能である。また、燃料をシリンダ内に直接噴射することで燃料の気化潜熱により、効率的に筒内の空気を冷却する（筒内冷却効果促進）ことができ、シリンダ内の温度を下げることにより、充填効率を増加させる効果もある。燃料を希薄にすることにより耐ノッキング性を向上できるので、高圧縮比に設定できるのでさらに熱効率を増加できる効果もある。しかし問題点もあり、成層燃焼のための可燃層の形成が重要となり、どのようにして可燃層を所定の場所に所定の時間に形成するかが課題に挙げられる。また高負荷時の NO_x の増加問題や、高圧噴射のための装備がエンジンを大きくしてしまうためエンジン自体の重量も増加してしまうなどの問題点もある。

本研究では、4 ストローク直噴ガソリンエンジンのシリンダ内における熱流体现象、特に、噴射された燃料の蒸発、混合過程、成層混合気の形成過程、そしてその気体中の火炎伝播過程に注目し、汎用熱流体解析ソフト STAR-CD を用いて 3 次元解析することにより明らかにしようとするものである。

2. モデル

2.1 基礎方程式と燃焼モデリング

直噴ガソリンエンジンの解析での計算モデルは、STAR-CD 内に実装されているプログラムを使用し、基本的には、圧縮性流動場を表す Navier-Stokes の式を用いて噴霧や燃焼に用いる保存式を加えて計算する。本研究では、圧縮行程開始から膨張行程終了まで解析する。この過程にはシリンダ内の複雑な流れ場に燃料を噴射して蒸発させることによる混合気の形成、火花点火による火炎伝播が含まれており、それぞれモデル化して解析する。

まずシリンダ内の流れや大小の渦などの複雑な乱流は、実装された乱流モデルの $k-\varepsilon$ モデルを使用してモデル化する。STAR-CD で解かれる質量および運動量の保存方程式は、以下のように直交座標系のテンソル形式で表される。式(1)は質量、式(2)は運

動量保存式であり τ_{ij} は応力テンソルである。式(3)は熱化学エンタルピー保存方程式を示す^[1]。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = s_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho h u_j + F_{h,j}) = \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + s_h \quad (3)$$

次に燃料噴射は、シリンダ内の気体中に液体である燃料を噴射するため、燃料の蒸発や化学反応により複雑な質量移動・熱移動を考慮したラグランジュモデル（離散型多層流）を用いてモデル化される^[2]。また、燃料の壁面での反射、付着や気化などもモデル化される。

化学反応つまり燃焼は、火炎面積モデルによりモデル化される。火炎面積モデルの仮定として、炎が無限に薄く空間を伝播する表面であり、その過程で種々の物理プロセスの影響を受けるというものです。この研究で使用している火炎面積モデルは、部分予混合モデル内の Weller 3-Equation モデルで、Weller モデル^[3,4]は火炎表面の皺度 (Wrinkling factor) Ξ を変数として定義し、皺度を用いた輸送方程式を解くことにより燃焼過程を計算する。さらに Weller 3-Equation モデルでは、反応の進行度を表す RVB (regress variable) の輸送から反応速度を計算し、部分予混合状態では混合分率 (mixture fraction) も加味して燃焼を計算する。また火花点火のプロセスは複雑で、実際にモデル化するには非常に多くのメッシュに微細な計算時間も必要となってしまうため、点火プロセスもモデル化し解析する。式(4)は皺度 Ξ の定義であり、式(5)は Ξ の輸送方程式となつていま

$$\Xi = \frac{\Sigma}{\Sigma_t} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Xi}{\partial t} + \mathbf{u}_s \cdot \nabla \Xi - \nabla \cdot (\overline{D_t} \nabla \Xi) = G\Xi - R\Xi^2 + \Xi \hat{\mathbf{n}} \cdot \nabla \langle \mathbf{u}_t \rangle_s \cdot \hat{\mathbf{n}} - \frac{1}{\Xi} \hat{\mathbf{n}} \cdot \nabla \langle \mathbf{u}_s \rangle_s \cdot \hat{\mathbf{n}}$$

Table 1 シリンダの寸法

Cylinder Bore [mm]	90.0
Cylinder Stroke [mm]	87.0
Cylinder Volume [cc]	590.93

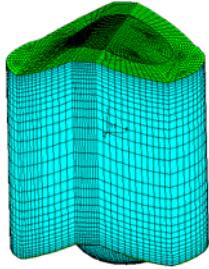


Fig.1 シリンダーモデル

$$+ \left(\langle S_i \rangle_s \left(\Xi - \frac{1}{\Xi} \right) + \bar{D}_i \nabla \Xi \right) \cdot \frac{\nabla |\nabla b|}{|\nabla b|} \quad (5)$$

2.2 燃焼室モデル

モデルを図1に示す。モデルは、吸排気バルブや点火プラグを省略したシリンダとキャビティのあるピストンクラウンからなり、作成した可変メッシュで構成されている。表1にシリンダの寸法を示す。

2.3 燃料噴射モデル

燃料噴射は、シリンダー上部の噴射位置から水平から60°傾けられて噴射される。燃料噴射の基本設定は噴射期間を40deg BTDCから30deg BTDCの間の10 degCA、噴射速度は100 m/s、初期粒径は30 μmとする。

3. 数値解析

3.1 解析条件

解析は、4ストローク直噴ガソリンエンジンにおいて圧縮行程開始から膨張行程終了までのクランク角0 deg (= BTDC 180 deg) から360 deg (= ATDC 180 deg) までを解析した。燃料はオクタン (C₈H₁₈)、シリンダ内にタンブル流を仮定し、またEGRを10%吸入すると仮定します。計算時間は0

Table 2 シリンダ内の条件

Internal Temperature [K]	353
Cylinder Bore Temperature [K]	400
Cylinder Piston Temperature [K]	500
Engine Revolutions [rpm]	1500
Tumble Flow [rpm]	1500
EGR [%]	10

Table 3 シリンダ内の初期状態 (質量分率)

Fuel	C ₈ H ₁₈	0
	O ₂	0.209
Air	CO ₂	0
	H ₂ O	0
	N ₂	0.691
NO _x	NO _x	0
	CO ₂	0.02
EGR	H ₂ O	0.01
	N ₂	0.07

Table 4 燃料噴射の条件

A/F	25
Cone Angle [deg]	35
Fuel [cc]	40.21
Injection Rate [mm ³ /ms]	36.19
Injection Velocity [m/s]	100
Injection Angle(start) [BTDC]	40
Injection Angle(end) [BTDC]	30

degCA~360 degCA で、計算ステップは0~130 degCAでは0.5 degCAずつで130~360 degCAでは0.05 degCAとします。点火は20 BTDCから10 degCA間点火するように設定する。表2, 3, 4は、空燃比A/Fが25の時のシリンダ内、初期状態の温度、質量分率、燃料噴射条件をまとめたものである。

3.2 解析結果

上記のA/F=25時の解析結果を以下に示す。図2はシリンダ内モデルの断面図で、点火する直前

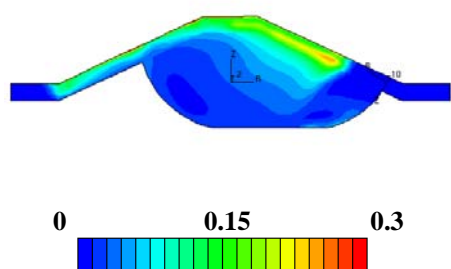


Fig.2 混合気の形成状態

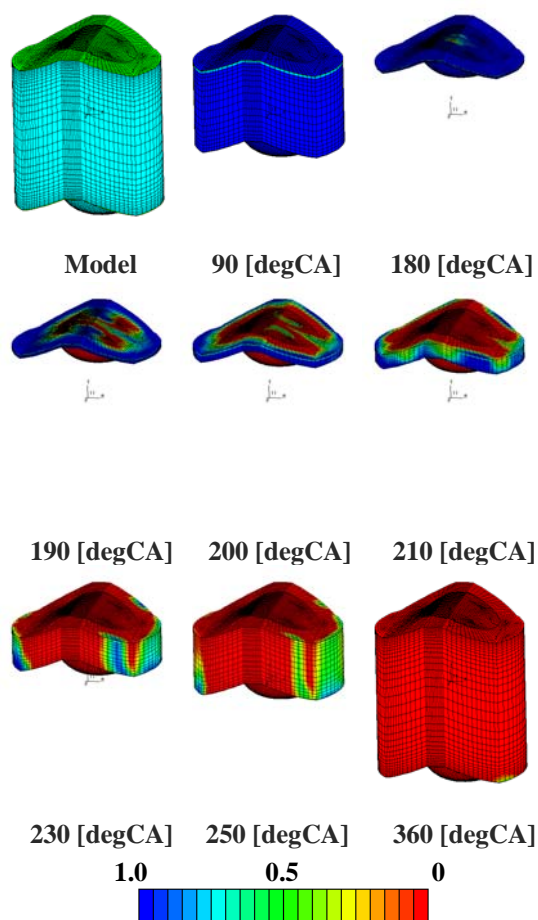


Fig.3 RVB

160degCA 時の混合気の形成状態です。カラーバーは0（青色）から0.3（赤色）で表され、燃料オクタンの混合分率を示す。図3は燃焼の状態を燃焼進行度RVBを用いて示す。RVBは1の時は未燃を示し、0の時は完全燃焼を示しており、カラーバーは1（青色）から0（赤色）で表されている。

図2はエンジンの圧縮行程の終盤で、噴射された燃料がシリンダ内の上部、つまり点火位置付近に可

燃層（燃料の濃い層）を形成していることが分かる。また図3では、シリンダ内上部の点火位置より火炎が伝播していく様子が分かる。膨張行程終了の360degCAでは、シリンダ内の端にまだ完全に燃焼していないところが多少残ってしまっているのが分かる。

4 おわりに

直接噴射式ガソリンエンジン内部の燃料噴射、混合気形成、火炎伝播現象などの熱流体現象について、可変メッシュを用いた3次元数値解析モデルを構築し、Wellerモデルによる計算を行った。結果は物理化学的に妥当なものであるが、実験との比較や燃焼モデルの妥当性については今後の検討が必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、株式会社シーディー・アダプコ・ジャパン技術コンサルティング部、森田篤史氏より StarCD に関して御指導いただいたのでここに謝意を表す。

参考文献

- [1] Warsi, Z.V.A. 1981. 'Conservation form of the Navier-Stokes equations in general nonsteady coordinates', AIAA Journal, 19, pp. 240-242.
- [2] Bracco, F.V. 1985. 'Modeling of engine sprays', SAE Technical Paper Series 850394.
- [3] Weller, H.G., Uslu, S., Gosman, A.D., Maly, R.R., Herweg, R., and Heel, B. 1994. 'Prediction of combustion in homogeneous-charge spark-ignition engines', 3rd Int. Symp. on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines, Yokohama, Japan, pp. 163-169.
- [4] Weller, H.G., Marooney, C.J., and Gosman, A.D. 1990. 'A new spectral-method for calculation of the time-varying area of a laminar flame in homogeneous turbulence', 23rd Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 629-636.