不均一濃度場における 圧縮自着火燃焼過程の数値解析

矢野琢潤", 小島隆史**

Numerical Simulation of Premixed Charge Compression Ignition Processes with Heterogeneity of Fuel-air Mixture Concentration

Takahiro YANO^{*} and Takafumi KOJIMA^{**}

Abstract

In recent years, the premixed charge compression ignition engine is attracting a great interest because it is high efficiency and capable of reducing both nitrogen oxide and particulate matter emissions significantly. However, some problems remain not resolved, such as the difficulty of controlling ignition timing and combustion rate in high load. In order to solve this problem, it is investigated using EGR system and heterogeneous mixture.

In this study, the auto ignition and combustion process of heterogeneous isooctane-air mixture in a PCCI engine has been simulated by a multi-dimensional CFD computation. The chemical reaction is described by using a 5-step global reaction model for hydrocarbon fuels. The initial conditions of heterogeneity of a fuel-air mixture was given at the intake valve closing time, which generated a statistically reasonable turbulent fluctuations in both velocity and fuel mass fraction fields. The results show that the heat release rate for the heterogeneous case is more moderate than that for the homogeneous case. In addition, it is found that the distribution of fuel mass fraction is important factor for characterize a combustion processes.

Key Words: Internal Combustion Engine, Premixed Charge Compression Ignition, Numerical Simulation, Heterogeneous Mixture, LES, CFD, Turbulence

1. 緒 言

近年,従来機関を上回る高い熱効率の達成 と有害排出物である NO_x (窒素酸化物)およ び PM (Particulate Matter,微粒子状物質)の 同時低減を実現し得る新燃焼方式として PCCI (Premixed Charge Compression Ignition, 予混合圧縮着火)燃焼が注目されている^{例えば} ⁽¹⁾.しかし,PCCI 方式では燃焼過程が使用燃 料の酸化機構に依存するため,着火時期およ び燃焼速度の制御が難しく,低負荷時の失火 および高負荷時のノックにより運転範囲が制限 される.これらの問題を解決するため,EGR ガス量による着火時期および燃焼速度の制 御⁽²⁾や,不均一予混合気を用いて熱炎の着火 遅れを局所的に変化させる燃焼制御⁽³⁾の可能 性が検討されている.

本研究では、PCCI 機関における高負荷時 の急峻な燃焼を制御するため、機関における 混合気の濃度不均一性が着火および燃焼特 性に及ぼす影響を、乱れ変動を直接的に表現 できる LES (Large Eddy Simulation)手法を 用いた多次元 CFD (Computational Fluid Dynamics)解析により系統的に明らかにする ことを目的とする.本報では、圧縮開始時に おいて種々の不均一濃度場を設定し、PCCI 機関の自着火および燃焼過程をシミュレー トした結果について述べる.

原稿受理 平成17年11月10日 *高松工業高等専門学校専攻科 機械電気システム工学専攻

^{**}高松工業高等専門学校 機械工学科

2. 数值解析手法

自着火の反応モデルには, Schreiber ら⁽⁴⁾ に よる 5 ステップの簡易反応モデルを用いた. イソオクタン燃料に対する各反応式および アレニウス式の係数を表1に示す.反応式1 ~2は高温酸化反応を,反応式 3~5は低温酸 化反応をモデリングしており,炭化水素燃料 の低温酸化から高温酸化までを連続して表 現することができるモデルとなっている.こ こで, 表中の成分 F は燃料であるイソオクタ ン(C₈H₁₈),成分Xは燃料から分解した低 級成分 3C₂H₄+CH₂+CH₃+H, 成分 I は低温酸 化反応における中間生成物 OC₈H₁₅O₂H+H₂O, 成分 P は最終生成物 8CO₂+9H₂O を表してい る. 成分 Y は成分 I からの連鎖分岐担体であ り, OH ラジカルやアルデヒド類を含んでい ると考えられる. 燃焼室内の流動, 温度およ び濃度場の計算は密度加重空間平均された 質量,運動量,エンタルピ,および化学種の 輸送方程式を数値流体力学手法により解き, 乱流計算に LES の考えを導入した空間平均 型流動シミュレーションコード⁽³⁾を用いた. 渦動粘性係数には Smagorinsky モデルを用い, そのモデル定数は 0.1 とした.時間進行法に は予測子・修正子法 (PCM, Predictor-Corrector Method)を用いた.壁面境界条件には対数則 と粘性低層分布則からなる二層モデルを用 いて,壁面の摩擦および熱流束を計算した.

3. 計算対象および条件

計算対象はパンケーキ型燃焼室を持つ圧縮自着火機関とし,図1に示す計算格子系で燃焼室領域を分割した(総格子数:38,400). 対象とするエンジンの基本的な諸元および計算条件を表2に示す.燃料はイソオクタンとし,平均当量比を1.0とした.EGR率は40%としシリンダ内一様,壁面温度は370Kで一定一様とした.

Table 1 Schreiber's five-step scheme for iso-octane

	Reaction	⊿ H ₃₀₀ (kJ/mol)	A (mol-m ³ -s)	E/R (K)
1	$F \to X$	709.9	5.0×10^{8}	18,050
2	$X + 12.5O_2 \rightarrow P$	-4709.9	7.0×10^{6}	7,200
3+	$F + 2O_2 \rightarrow \ I$	-53.9	3.5×10^{9}	19,500
3-	$I\rightarrowF+2O_2$	53.9	$6.0 imes 10^{27}$	37,500
4	$I \rightarrow 2Y$	-60.0	6.0×10^{7}	5,000
5	$\text{Y+0.5F+11.5O}_2 \rightarrow \text{ P}$	-3913.1	1.0×10^9	16,500

4. 初期乱流場設定

燃焼室内の初期乱流場には、一様乱数を用いた乱流場を基に LES 計算により各輸送方程式を繰り返し解き、目標とする乱れエネルギと減衰特性を満足する初期速度場を形成する速度相関形成法⁽³⁾を用いた.ここでは位相平均乱れエネルギは 0.74 Cm²(Cm:平均ピストン速度),積分スケールは 4 mm⁽⁵⁾を目標値とした.

初期乱流場形成過程における平均乱れエネルギおよび速度スケールの時間推移を図2 に示す. 図中の Case A, Case B および Case C は相関形成開始時に与えた一様乱数の違い によるものである. 初期値形成期間は繰り返 し計算で求められた初期乱流場の体積平均 乱れエネルギと k- εモデルを用いた RANS

(Reynolds-Averaged Numerical Simulation) による体積平均乱れエネルギの減衰経過が ほぼ等しくなるように定めた.ここでは初期 乱流場形成期間を 40 ms とし,その時点での 流速分布を初期条件とした.スケールは相関 関数を指数関数近似できるものとして積分 空間スケールを求め,3方向を平均化したも



Fig. 1 Computational grid system

Table 2	Engine spec	fications and	l calcula	te conditions
---------	-------------	---------------	-----------	---------------

Bore×Stroke	82.6×114.3 mm		
Compression ratio	12.0		
Engine speed	900 rpm		
Equivalance matio	1.0		
	(Cylinder-average)		
Intake valve close	146 deg. BTDC		
EGR ratio	40%, uniform		
Wall temperature	370 K, uniform		
Initial tomporature	370 K		
	(Cylinder-average)		
Initial pressure	0.1 MPa, uniform		
Fuel	iso-Octane		

のである.初期乱流場形成終了時の速度スケールは Case A~Cのすべてにおいて 10 mm 程度と目標値より大きくなっているが,これは格子サイズや数値粘性の影響によるものと考えられる.

濃度場についても速度場と同様の相関形 成法により初期値を生成するが,相関形成開 始時期を変化させることにより大きさの異 なる三種類(Large scale, Middle scale, Small scale)の濃度スケールを持つ初期濃度場を形 成した.形成過程における濃度スケールの時 間推移を図3に示す.濃度の相関形成期間は Large scale が26 ms, Middle scale が15 ms, Small scale が4 msとしている.初期濃度分 布は,層状給気等を想定して当量比2.0の混 合気と空気の流体塊が混合せずに存在する と仮定している.初期濃度場形成終了時での 濃度スケールはLarge scale が9~20 mm, Middle scale が7~9 mm, Small scale が4~5 mm程度となっている.



Fig. 2 Turbulence kinetic energy computed by LES, and averaged length scale of velocity



Fig. 3 Averaged length scale of fuel mass fraction

図4に初期濃度場形成後の各濃度スケール における当量比の空間分布を示す.それぞれ 高さ方向の中央断面(k=12)および図1に示 した A-A'断面の分布である.図より相関形成 開始時期を変化させることにより,燃料濃度 塊の大きさや分布の異なる初期濃度場が形 成されていることが分かる.



Fig. 4 Fields of equivalence ratio at initial condition

5. 圧縮行程における当量比分布

各濃度スケールおよび初期濃度場が異な る Case A~C における圧縮行程中の当量比 PDFの推移を、当量比の空間分布(k=12)と 合わせて図5に示す.どの濃度スケールにお いても 145 deg. BTDC では初期濃度場で与え られた当量比 2.0 の混合気と空気の流体塊が 多く存在するため、Case A~Cに違いがほと んど見られない. その後, 圧縮行程とともに 混合が進み、燃焼開始前である TDC ではそ れぞれ異なるピークおよび分布を持つこと がわかる.Large scale では初期に大きな燃料 濃度塊が与えられているため混合が促進さ れず, TDC においても他のスケールに比べ大 きな濃度変動を持っていることが分かる.逆 に Small scale では混合が促進され, TDC に おいての濃度変動は小さく,均一濃度条件に 近づいている.

TDC における PDF 分布を比較すると, Large scaleでは他のスケールに比べ Case A~ C の違いが大きく, 逆に Small scale では違い Large scale





Small scale



Fig. 5 PDF and fields of equivalence ratio at several selected crank angles

がほとんど見られないことが分かる. Case A ~Cでの PDF分布の違いは前述した初期乱流 場形成時に与える一様乱数の違いに起因し ているため、実際の機関ではサイクル変動と 考えることができ、初期に与える濃度スケー ルが大きいほどサイクル変動に大きな影響 を与えることが分かる.

6. 自着火および燃焼過程

各濃度スケールにおける自着火燃焼過程 のシリンダ内圧力および熱発生率の時間経 過を均一濃度条件の結果と合わせて図6に示 す.均一濃度条件とそれぞれの濃度スケール の結果を比較すると、どの濃度スケールにお いても均一濃度条件に比べ熱炎発生が早く, 燃焼期間が長いため熱発生率のピークが下 がっていることが分かる.また、より大きい 濃度スケールを初期濃度場に与えることで, 燃焼がより緩慢になることが分かる.逆に, 初期濃度場に与えられた濃度スケールが小 さい Small scale では, 均一濃度条件に近い急 峻な熱発生を示している.これらの結果より, 濃度変動を持たせることで,均一濃度条件に おける急峻な熱発生を緩慢にすることがで き、それは初期濃度場に与える濃度スケール が大きいほど効果が大きいことが分かる.し かし,初期濃度場に大きい濃度スケールが与 えられた Large scale では,他の濃度スケール に比べ燃焼後の圧力が上昇していないこと から,未燃の炭化水素が多く排出されると予 想される.

さらに、それぞれの濃度スケールにおける Case A~C の燃焼経過を比較すると, Large scale の場合, Case B では燃焼が他より緩慢 になり、Case C では熱発生率のピークが大き くなっていることが分かる.これは,図5に 示した燃焼開始前の TDC における当量比 PDF の分布に起因していると考えられる. TDC において分布全体が希薄側に歪んだ Case B では燃焼がより緩慢になっており、逆 に分布全体が過濃側に歪んだ Case C では燃 焼がより急峻になっている. Middle scale に おける燃焼経過の比較からも Large scale と 同様の傾向が見られる. Small scale では Case A~Cの TDC における当量比 PDF 分布がほぼ 同様のため燃焼経過に差は見られない.これ より、同じ濃度スケールにおいても燃焼前に 平均当量比より過濃な混合気が多く存在す るほど燃焼が急峻となり, 逆に当量比 PDF が希薄側に歪んだような分布を持つことで,

より燃焼を緩慢にすることができることが 分かる.

図7に不均一濃度条件(Middle scale)の燃 焼過程における温度 PDF を均一濃度条件の 結果と合わせて示す.均一濃度条件では反応 が同時に進行するため,熱炎発生時期にあた る8.0~10.0 deg. ATDC において狭い温度範 囲で PDF 値が高くなっていることが分かる. 不均一濃度条件では反応の進行が局所的に 異なるため,均一濃度条件に比べ熱炎発生後 (10.0 deg. ATDC)においても広い温度領域 を持っていることが分かる. さらに, 8.0~ 10.0 deg. ATDC の結果から,不均一濃度条件 では均一濃度条件に比べ熱炎が早く発生し ていることが分かる.

不均一濃度条件(Middle scale)での燃焼過 程における φ-T マップを図 8 に示す. ただし ここでの当量比は未燃・既燃ガスの燃料換算 当量比についてのプロットである. 5.0~7.0



Fig. 6 Time histories of cylinder averaged pressure and total heat release rate

deg. ATDC の冷炎発生に当たる時期では,当 量比が 1.0~1.2程度の領域を中心に温度上昇 が見られる. その後の熱炎発生時期に当たる 8.0~10.0 deg. ATDC では比較的当量比の高 い領域(1.4 付近)から熱炎が発生し,当量 比の低いほうへ順々に移行していくのが分 かる.



Fig. 7 PDF of temperature at several selected crank angles



Fig. 8 ϕ -T map for middle scale at several selected crank angles



Fig. 9 Fields of equivalence ratio and temperature calculated for heterogeneous (middle scale) case



Fig. 10 Fields of temperature calculated for homogeneous case

図9に不均一濃度条件(Middle scale)の燃 焼過程における温度および当量比の空間分 布(k=12)を示す.冷炎発生時期に当たる5.0 ~7.0 deg. ATDCでは当量比の分布にあまり 関係なくシリンダ内全域で温度上昇が観察 される.その後の熱炎発生時期である8.0~ 10.0 deg. ATDCでは,前述の結果と同様に熱 炎は当量比の比較的高い(1.4 付近)領域か ら発生し,その後当量比の低い領域へ高温の 領域が広がっていくのが分かる.比較のため, 均一濃度条件での燃焼過程における温度の 空間分布(k=12)を図10に示す.均一濃度 条件では冷炎発生時期および熱炎発生時期 においてシリンダ内全域で反応が同時に進 行している様子が観察できる.

7.結言

PCCI 機関における高負荷時の燃焼制御を 目的に、予混合気に濃度変動を与え、その濃 度不均一性が着火および燃焼過程に及ぼす 影響を調査した.乱れ変動を直接的に表現で きる LES 手法を導入し、種々の予混合気の濃 度場について多次元 CFD 解析を行った結果、 以下の知見を得た.

- (1) 混合気に濃度変動を持たせることで、均 一予混合気における急峻な熱発生を抑え ることができ、それは燃焼前の濃度変動 が大きいほど効果が大きい。
- (2) 不均一予混合気において、冷炎発生時期では当量比が1.0~1.2程度の領域を中心に温度上昇するが、熱炎は当量比が比較的高い領域(1.4付近)から発生し、その後、当量比の低い領域へ順々に移行していく.
- (3) そのため、不均一濃度条件では燃焼前に 平均当量比より希薄側に歪んだ濃度分布 を形成することで燃焼をより緩慢にする ことができる。

参考文献

- (1) 畑村, 自動車技術会論文集 Vol.36, No.2, 2005, pp.13-18
- (2) 池本・小島・飯田、日本機械学会論文集, B, 71-709, 2005, pp.119-126
- (3) Saijyo, K., Kojima, T. and Nishiwaki, K., Proc. COMODIA 2004, B2-3, 2004, pp.239-246.
- (4) Schreiber, M. et al., 25th Symp. (Int.) Combust., 1994, pp.933-940.
- (5) Ikegami, M. et al, SAE Trans., Vol. 96, Paper No.870372, 1987.