HCCI 機関における予混合気の温度および濃度の不均一性が 燃焼時の圧力上昇率に及ぼす影響の素反応数値解析*

吉 田 茜^{*1}, 重 豊 健 志^{*2}
長 永 麻 里^{*2}, 飯 田 訓 正^{*3}

Numerical Analysis of the Effect of Thermal and Fuel Stratification on Reducing Pressure Rise Rate in HCCI Engine by Using Multi-Zone Chemical Kinetics

Akane YOSHIDA, Kenji SHIGETOYO,
Mari NAGAE and Norimasa IIDA^{*4}

^{*4} Department of System Design Engineering, Keio University,
3-14-1 Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

The purpose of this study is to evaluate the potential of thermal and fuel stratification for reducing pressure rise rate in HCCI engines. The computational modeling work is conducted using a multi-zone code with detailed chemical kinetics, including the effects of thermal and fuel stratification charge on the onset of ignition, pressure rise rate and combustion efficiency.

Key Words: Combustion, Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI), Knocking, Numerical Analysis, Thermal Stratification, Fuel Stratification, Pressure Rise Rate, Di-Methyl Ether (DME), Methane

1. 緒 言

予混合圧縮自己着火(Homogeneous Charge Compression Ignition: HCCI)機関は、空気と燃料の予混合気を燃焼室内に導入し、ピストンによる断熱圧縮によって着火・燃焼させる機関である。多点同時着火のシレク燃焼により希薄な予混合気でも燃焼が可能であるため、NO_x, PM の生成が少なく、かつ高効率な機関として注目されている。しかし、HCCI 機関は負荷を上げると急激な局所の熱発生および圧力上昇が生じ強度のノッキングが発生することから、出力が限定される。そのため、HCCI 燃焼で全負荷運転をするにはノッキングの回避が課題とされている。急峻な圧力上昇を低減してノッキングを回避する方法として、燃焼位相を遅延化する方法¹⁾、予混合気の温度および燃料濃度層状化によって着火時期を時間的・空間的に分散させる方法²⁾が有効であることが知られている。

Magnus³⁾らは、予混合気に温度分布を作成することで、筒内ガスの圧力上昇率が低減することを素反応数値計算により示した。より大きな温度分布を作成することで燃焼期間が長期化し、筒内ガス圧力上昇率が低減することが確認

されている。

また Ozaki⁴⁾らは、単気筒エンジンを用い機関回転数 $N_e=600\text{rpm}$ 、吸気温度 $T_{in}=383\text{K}$ 、当量比 $\phi_{ME}=0.36$ の条件のもとで、燃焼室内における予混合気に燃料濃度分布を作成して実験を行い、局所での着火が時間的・空間的に離散化し、燃焼が緩慢になることを示した。予混合気に濃度分布を作成することで熱発生率のピーク値が低減して燃焼期間が長期化し、それに伴い筒内ガスの圧力上昇率が低減することが示された。しかし、予混合気こどの程度の濃度幅をつけると、圧力上昇率を低減する効果があるか明確になっていないという課題がある。また、燃焼室内に燃料の濃い部分と薄い部分が存在することで着火後の局所での熱発生量が違い、筒内ガス温度に差ができることで排気の CO 及び NO_x 濃度が高くなることが考えられる。これらの結果と課題をふまえ、本研究では、予混合気の温度および濃度の不均一性によって燃焼時の筒内ガス圧力上昇率が低減する機構を解明し、併せて排気特性への影響を調べることを目的として素反応数値解析を行った。

2. 素反応数値計算の計算手法

2・1 供試燃料 本研究では、燃料としてジメチルエーテル(Di-Methyl Ether: DME)とメタン(Methane)を選択した。詳細な素反応を考慮できるマルチゾーンモデルを用い、燃焼室内の温度および濃度の不均一性が筒内ガス圧力上昇率および排気に及ぼす影響について素反応数値解析を行った。

* 原稿受付 2008 年 3 月 26 日。

^{*1} 慶應義塾大学大学院理工学研究科(〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)。

^{*2} 学生員、慶應義塾大学大学院理工学研究科。

^{*3} 正員、フェロー、慶應義塾大学理工学部。

E-mail: iida@sd.keio.ac.jp

DMEは低温酸化反応(Low Temperature Reaction: LTR)および高温酸化反応(High Temperature Reaction: HTR)と呼ばれる2段の熱発生を有し、全体の熱発生におけるLTR期間の熱発生の割合が大きい燃料である。DME濃度が高いほどLTR期間中の熱発生が増加することがわかっている。そのため、燃焼室内にDME濃度の分布が存在すれば、LTR期間における局所での発熱量の違いによりHTR発現前において温度分布が作成され、着火時期が幅がでることによって燃焼期間が長期化し、筒内ガス圧力上昇率の低減に寄与すると予想される。一方、Methaneは燃焼期間に1段の熱発生のみであり、着火温度の高い燃料である。

2・2 計算手法とLTR、HTR発現時期、50%熱発生時期の定義 本研究で想定したエンジン諸元を表1に示す。計算対象は、吸気弁が閉じた直後から排気弁が開く直前までの一回の圧縮、膨張行程中の閉じた系のガスとした。計算コードとして米国のSandia National Laboratoryで開発されたCHEMKINII⁽⁴⁾およびSENKIN⁽⁵⁾を一部改良したもの、またDMEの素反応スキームとしてCurranらのスキーム(化学種数79, 素反応数351)⁽⁶⁾、Methaneの素反応スキームとしてGRI-Mech3.0のスキーム(化学種数53, 素反応数325)⁽⁷⁾、またNOxスキームとして拡大Zeldovich機構を考慮したモデルを用いた。熱損失、残留ガス、吹き抜けは考慮しておらず、すべての化学種の気体は理想気体、混合気は断熱変化する、質量は保存されるという仮定のもとに計算を行った。

使用したマルチゾーンモデルは、それぞれのゾーンの圧縮膨張時ガス温度、燃料/空気当量比を変化させることで、燃焼室内の温度および濃度の不均一を再現することができる。図1に示すように、それぞれのゾーンはガス温度が均一、化学種の組成が均質な0次元モデルであり、ゾーン間で熱量、化学種の移動はないが、圧力が一様になるよう断熱変化する。図2にLTRおよびHTR発現時期、終了時期、50%熱発生時期の定義を示す。図2(a)(a')に示したように熱発生率 dQ/dt [J/ms]を1サイクルあたりの投入熱量 Q_{in} [J]で割った値を燃焼反応速度 $(dQ/dt)/Q_{in}$ [1/ms]として定義し、この値に閾値を設けた。燃料がDMEの場合には、圧縮開始から初めて0.01((J/ms)/J)を越えた点をLTR発現時期 $\theta_{LTRstart}$ 、下回った点をLTR終了時期 θ_{LTRend} 、次に0.1((J/ms)/J)を越えた点をHTR発現時期 $\theta_{HTRstart}$ 、下回った点をHTR終了時期 θ_{HTRend} と定義した。一方、燃料がMethaneの場合には、圧縮開始から初めて0.0225((J/ms)/J)を越えた点をHTR発現時期 $\theta_{HTRstart}$ 、下回った点をHTR終了時期 θ_{HTRend} と定義した。図2(b)は熱発生率の積算の履歴を示したものである。LTR発現時期からHTR終了時期までの熱発生率の積算を100%とし、50%の熱発生が完了した時期を50%熱発生時期 θ_{CA50} と定義した。

Table 1 Engine specifications

Process	Only 1 Compression & Expansion
Bore x Stroke	112 mm x 115 mm
Displacement	1132 cc
Length of Conrod	205 mm
Crank Radius	57.5 mm
Intake Valve Close*	ATDC -132°
Exhaust Valve Open*	ATDC 132°
Compression Ratio	8.0, 21.6

*0 deg is taken to be TDC intake

Fig. 1 Concept of multi-zone model

Fig. 2 Definitions of LTR start, LTR end, HTR start, HTR end and 50% heat release timing

3. DMEを燃料とした時の予混合気の温度および濃度の不均一性がHCCI燃焼に与える影響

3・1 初期ガス温度および濃度均一条件 予混合気中の温度および燃料濃度の不均一性がHCCI燃焼機構に及ぼす影響を考える上で、まず温度および燃料濃度が均一な条件で燃料/空気予混合気を用いた場合のHCCI燃焼特性を把握する必要がある。燃焼室内の温度および燃料濃度分布のないシングルゾーンモデルを用いて素反応数値解析を行い、LTRおよびHTR発現時期および終了時期、50%熱発生時期、LTRおよびHTR発現期間、燃焼期間、筒内ガス最大圧力上昇率、筒内最高ガス温度、各分子のモル数履歴について検討した。

燃料として DME を選択し、機関回転速度 $N_e=750\text{rpm}$ 、圧縮比 $\varepsilon=21.6$ 、圧縮開始ガス圧力 $P_0=0.1\text{MPa}$ 、DME/空気当量比 $\phi_{\text{DME}}=0.25$ 、圧縮開始時ガス温度 $T_0=300\text{K}$ として素反応数値計算を行った際の筒内ガス圧力、筒内ガス温度、熱発生率、DME の反応過程で特に重要となる分子のモル数履歴、燃焼期間を図3に示す。LTR、HTR の2段の熱発生が生じ、燃焼効率⁸⁾は100%であった。LTR は16.3degATDC で発現し、LTR 発現期間は2.1deg、発現温度は757K であった。一方、HTR 発現時期は13.5degATDC、発現期間は4.8deg、発現温度は970K であった。反応中の各分子のモル数履歴より、手崎⁸⁾が検討したとおり、LTR が進行している期間においては、OH が増加している領域で反応が継続し、OH の正味再生率が負となった後に LTR の連鎖反応が停止している。また、LTR の進行に伴い HCHO 、 H_2O_2 などの中間生成物が蓄積され、燃焼期間ではそれが維持された後、HTR の進行に伴いそれらが消費される過程が現れている。

3.2 初期ガス温度不均一条件 均一の場合の計算結果を踏まえた上で、次に予混合気中の温度の不均一性が HCCI 燃焼機構に及ぼす影響を検討した。マルチゾーンモデルを用いて燃焼室内に温度の分布がある条件を模擬した素反応数値解析を行い、その時の LTR および HTR 発現時期および終了時期、50%熱発生時期、LTR および HTR 発現期間、燃焼期間、筒内ガス最大圧力上昇率、筒内最高ガス温度、各分子のモル数履歴について検討した。

Fig. 3 Histories of in-cylinder gas pressure, in-cylinder gas temperature, heat release rate and number of moles

圧縮開始時ガス温度および濃度均一条件の計算を行った場合の圧縮比 $\varepsilon=21.6$ では着火時期が早く、また常温でも燃焼効率が100%となるため、失火する条件の検討が難しかったので、圧縮比 $\varepsilon=8.0$ に下げ、圧縮開始時ガス平均温度 $T_0=400\text{K}$ と初期条件を一部変更して素反応数値計算を行った。機関回転速度 $N_e=750\text{rpm}$ 、圧縮開始ガス圧力 $P_0=0.1\text{MPa}$ の条件において、DME/空気当量比 $\phi_{\text{DME}}=0.25$ と燃料濃度均一な条件とし、それぞれのゾーンの圧縮開始時ガス温度の差を10K ずつとして $T_0=380\text{K}(\text{zone1})$ 、 $390\text{K}(\text{zone2})$ 、 $400\text{K}(\text{zone3})$ 、 $410\text{K}(\text{zone4})$ 、 $420\text{K}(\text{zone5})$ と設定した。このときの圧縮開始時ガス平均温度は $T_0=400\text{K}$ で、全体での温度幅は $\Delta T=40\text{K}$ であり、各ゾーンの1サイクルあたりの投入熱量が同じになるように体積比で調節した。

図4に筒内ガス圧力、各ゾーンのガス温度、熱発生率と反応過程の各分子のモル数履歴を示す。このとき、筒内ガス圧力は一定のためグラフは一本であるが、各ゾーンの筒

Fig. 4 Histories of in-cylinder gas pressure, in-cylinder gas temperature, heat release rate and number of moles (thermal stratification)

内ガス温度、熱発生率は zone1, zone2, zone3, zone4, zone5 における履歴を示している。

LTR 発現温度がほぼ一定であるため、初期温度の最も高い zone5 において最初に LTR が発現した。その後、初期温度の高かった順に LTR が発現していった。そして LTR 終了時期、HTR 開始時期、HTR 終了時期も、LTR 開始時期と同様に初期温度の最も高いゾーンから低いゾーンへと順番に進んでいった。しかし、それぞれのゾーンにおける LTR が進んでいる期間、縮退期間、HTR が進んでいる期間はそれぞれ、開始時期が早いゾーンほど長く、後で開始したゾーンでは短いという傾向が見られた。反応過程での各分子に着目してみると、それぞれのゾーンにおいては、各分子の挙動は 3.1 節で示した均一条件の結果と同様の傾向が見られた。しかし、各ゾーンの LTR および HTR の開始時期に合わせて、反応が顕著となる時刻にずれが見られた。

次に、この条件における各ゾーンの最高ガス温度と燃焼効率、NOx および CO 濃度を図 5 に示す。あわせて 5 つのゾーンの平均と、DME/空気当量比 $\phi_{DME}=0.25$ の温度および濃度均一の条件における結果を右端に並べて示し、予混合気に温度分布がある条件と結果を比較した。筒内最高ガス温度が 2100K 以上で NOx 濃度が高くなり、1500K 以下では CO 濃度が高くなる。予混合気に温度分布をつけても各ゾーンの最高温度は各ゾーンでいずれも 1500K 以上 2100K 以下で大きな差はなく、排気ガス中の NOx, CO 濃度は均一予混合気の場合と比較してほぼ同じ水準であった。

圧縮開始時ガス温度 $T_0=300$ から 500K の範囲で変化させ、全体での温度幅を $\Delta T=20, 40$ K としたときの燃焼位相 (50% 熱発生時期) と最大圧力上昇率 $(dp_c/dt)_{max}$ の関係を図 6 に、圧縮開始時平均ガス温度と燃焼効率および最大圧力上昇率の関係を図 7 に示す。丸の点は燃焼効率が 100% の点、白抜きひし形の点は燃焼効率が 100% 未満だった点を示している。図 6 より、圧縮開始時の温度差の大小にかかわらず、均一の条件に比べて最大圧力上昇率が半分以下に低減され

ており、その低減率は温度差の大きい条件の方がより大きかった。また、燃焼位相が遅延化するほど最大圧力上昇率が低下していることがわかる。図 7 より、圧縮開始時平均ガス温度が低くなるにつれて、投入熱量が多いにもかかわらず最大圧力上昇率が低下していることがわかる。しかし、圧縮開始時平均ガス温度が低すぎると燃焼効率が低くなり、いずれ失火に至る。圧縮開始時ガス温度均一条件に比べ温度差がある条件では、圧縮開始時平均ガス温度が低下した際の燃焼効率の低下の割合が緩やかで、平均ガス温度が多少下がってもいきなり失火に至ることは無いことから、燃焼のロバスト性の確保を実現できることが確認できた。

3.3 初期ガス濃度不均一条件 次に予混合気中の燃料濃度の不均一性が HCCI 燃焼機関に及ぼす影響を検討した。圧縮開始時ガス温度 $T_0=400$ K と温度が均一な条件とし、それぞれのゾーンの DME/空気当量比を $\phi_{DME}=0.16$ (zone1), 0.21(zone2), 0.25(zone3), 0.36(zone4), 0.46(zone5) とした。このときの DME/空気平均当量比は $\phi_{DME}=0.25$ で、全体での濃度幅は $\Delta\phi_{DME}=0.30$ である。このときの筒内ガス圧力、各ゾーンのガス温度、熱発生率と反応過程の各分子のモル数

Fig. 6 50% heat release timing vs. maximum in-cylinder gas pressure rise rate (thermal stratification $\Delta T_0=0, 20, 40$ K)

Fig. 5 CO and NOx mole fraction in exhaust gas, combustion efficiency and maximum in-cylinder gas temperature (thermal stratification)

Fig. 7 Initial gas temperature vs. maximum in-cylinder gas pressure rise rate and combustion efficiency (thermal stratification $\Delta T_0=0, 20, 40$ K)

歴を図8に示す。燃料濃度の違いによって比熱比 γ の大きさが変化するため、初期濃度の最も低い zone1 において最初に LTR が発現した。その後、初期濃度の低かった順に LTR が発現していき、LTR 終了時期は同様に初期濃度の低い zone1 から順に終了していったが、LTR 終了後に LTR での発熱量の違いによって各ゾーンのカス温度が逆転するため、HTR 開始時期、HTR 終了時期は逆に初期濃度の高い zone5 から順に HTR が開始し、終了していった。反応過程での各分子に着目してみると、それぞれのゾーンにおいては、各分子の挙動は均一条件の結果と同様の傾向が見られたが、各ゾーンの LTR および HTR の開始時期に合せて反応が顕著になる時刻のずれが見られた。また、zone1 においては、最高カス温度が 1500K に達していないため、CO の酸化が活発には行われておらず、熱発生ピークから時間がたってもダラダラと CO の酸化が行われていることがわかった。

次に、この条件における各ゾーンの最高カス温度と燃焼

効率、NOx および CO 濃度を図9に示す。あわせて5つのゾーンの平均と、DME/空気当量比 $\phi_{DME}=0.25$ の温度および濃度均一の条件における結果を右端に並べて示し、予混合気に温度分布がある条件と結果を比較した。予混合気に濃度分布をつけた場合には、一番当量比の低かった zone1 で

Fig. 8 Histories of in-cylinder gas pressure, temperature, heat release rate and number of moles (fuel stratification)

Fig. 9 CO and NOx mole fraction in exhaust gas, combustion efficiency and maximum in-cylinder gas temperature (fuel stratification)

Fig. 10 50% heat release timing vs. maximum in-cylinder gas pressure rise rate (fuel stratification $\Delta\phi=0, 0.10, 0.30$)

Fig. 11 Initial gas temperature vs. maximum in-cylinder gas pressure rise rate and combustion efficiency (fuel stratification $\Delta\phi=0, 0.10, 0.30$)

Fig. 12 Histories of in-cylinder gas pressure, in-cylinder gas temperature, heat release rate and number of moles (Methane)

は最高ガス温度が1500Kを下回り、逆に初期当量比の一番高かったzone5では2100Kを超えていたため、排気中のNOx、CO濃度はどちらも均一予混合気の場合と比較して多くなっていることがわかった。

圧縮開始時ガス温度 $T_0=300$ から500Kの範囲で変化させ、全体での温度幅を $\Delta T_{0ME}=0.10, 0.30$ とした際の燃焼位相と最大圧力上昇率の関係を図10に、圧縮開始時平均ガス温度と燃焼効率および最大圧力上昇率の関係を図11に示す。図10より、圧縮開始時の濃度差が小さい場合には最大圧力上昇率が半分以下に低減されているのに対し、濃度差が大きい場合には均一条件とは同等の最大圧力上昇率を示した。これは、図8を見るとわかるとおり、濃度差が大きい条件では当量比のとても高いゾーンができるので、そのゾーンにおいてHTRが発現したときに急峻な熱発生が生じ、圧力上昇が急激になってしまうためである。また図11より、温度不均一条件の場合と同様に、圧縮開始時平均ガス温度が低下した際の燃焼効率の低下の割合が緩やかであるため、燃焼のロバスト性の確保を実現できることが確認できた。

4. Methaneを燃料とした時の予混合気の温度および濃度の不均一性がHCCI燃焼に与える影響

4・1 初期ガス温度および濃度均一条件

MethaneはDMEと違い、HTRのみの1段の熱発生を有する燃料である。DMEの結果より、LTRを持つ燃料において初期温度および燃料濃度の不均一性がHCCI燃焼特性

Fig. 13 Initial gas temperature vs. maximum in-cylinder gas pressure rise rate and combustion efficiency (Methane, thermal stratification $\Delta T_0=0, 20, 40$ K)

Fig. 14 Initial gas temperature vs. maximum in-cylinder gas pressure rise rate and combustion efficiency (Methane, fuel stratification $\Delta \phi=0, 0.10, 0.30$)

と圧力上昇率に与える影響がわかったが、その他の燃料において同様に初期温度および燃料濃度に不均一性がある時に、同様の結果が得られるのかどうかを検討するため、DMEとは異なる性質を持つ燃料の代表としてMethaneを選択しDMEの場合と同様の検討を行った。

機関回転速度 $N_e=750$ rpm、圧縮比 $\epsilon=21.6$ 、圧縮開始ガス圧力 $P_0=0.1$ MPa、Methane/空気当量比 $\phi_{ME}=0.25$ 、圧縮開始時ガス温度 $T_0=475$ Kの時の筒内ガス圧力、筒内ガス温度、熱発生率、DMEの反応過程で特に重要となる分子のモル数履歴、燃焼期間を図12に示す。1段の熱発生が生じ燃焼効率は100%であった。高温酸化反応が13.4deg ATDCで発現し、高温酸化反応発現期間は2.4deg、発現温度は1187Kであった。反応中の各分子のモル数履歴をみると、DMEの場合とは異なりOHやHCHO、HCOなどの中間生成物がピス

トン圧縮による温度上昇に伴って徐々に蓄積され、HTR の進行に伴いそれらが一気に消費される過程が現れている。

4・2 初期ガス温度および濃度不均一条件 圧縮開始時ガス温度および燃料濃度の不均一性がある条件における圧縮開始時平均ガス温度と燃焼効率および最大圧力上昇率の関係を図 13, 14 に示す。DME の結果と同様、圧縮開始時ガス温度が不均一な条件、燃料濃度が不均一な条件、どちらにおいても圧縮開始時平均ガス温度が低くなるにつれて、投入熱量が多いにもかかわらず最大圧力上昇率が低下していることが分かる。しかし、圧縮開始時ガス温度に温度差がある場合には、DME の結果と同様、圧縮開始時平均ガス温度が低下した際の燃焼効率の低下の割合が緩やかであるため、燃焼のロバスト性の確保を実現できることが確認できたが、燃料濃度に濃度幅がある条件においては、燃料が Methane の場合には圧縮開始時平均ガス温度が低下した際の燃焼効率が急激に下がってしまっているため、濃度差のみをつけた場合にはロバスト性の確保の効果は小さいと言える。

5. 結 言

HCCI 機関において給気予混合気に温度分布または燃料濃度分布を与えた場合に、圧力上昇率の低減が生じる機構を調査することを目的として素反応数値計算を行った。モデル燃料として、1 段の熱発生を示す Methane と、2 段の熱発生を示す低温酸化反応における熱発生割合の大きい Di-Methyl Ether(DME)を燃料として選択し、Multi-zone モデルと詳細素反応スキームを用いて素反応数値解析を行った結果得た知見を以下に示す。

(1) 給気予混合気に温度分布を付与すると、圧縮開始時の温度差が圧縮行程で拡大する。そして温度の高い領域が低い領域に先行して自己着火し反応を開始する。その結果、各領域の自己着火のタイミングがずれて熱発生率の位相が拡大することで、燃焼室全域での熱発生率が低下し、HCCI 燃焼時の圧力上昇率が低減する。この時、各領域の反応速度には大きな違いは生じない。

(2) 燃料を層状給気した場合、HCCI 燃焼時の圧力上昇率の低減効果は燃料種により異なる。

たとえば、Methane のように低温酸化反応の発熱を経ずに着火する燃料の場合、圧縮行程において比熱比の違いにより燃料濃度差に応じた温度差が生じる。その結果、燃料濃度の低い領域が高い領域に先行して着火し、各領域の燃焼位相の分散効果により HCCI 燃焼時の圧力上昇率が低減する。

一方、DME のように低温酸化反応過程で比較的多量の熱発生を生じる燃料の場合、低温酸化反応による発熱により

自己着火の直前には各領域の燃料濃度差がほぼ比例した温度差が生じる。これにより、上記(1)に示した機構によって HCCI 燃焼時の圧力上昇率が低減する。

(3) 給気予混合気に温度分布を付与した場合、各領域の最高ガス温度がほぼ等しく 1500K から 2100K の間となるため、NO_x, CO の排出量は低く抑えられる。このため、均一条件と同程度の NO_x, CO 排出量を抑えたまま最大圧力上昇率を低減することができる。

一方、燃料濃度分布を付与した場合、当量比の低い領域では最高ガス温度が 1500K を下回ったため排気中の CO 濃度が高くなり、当量比の高い領域では 2100K を超えたため NO_x 濃度が高くなった。このため、各領域の最高ガス温度が 1500K 以上 2100K 以下となるよう、圧縮開始時ガス温度を変化させるなどの工夫が必要である。

文 献

- (1) Susumu Sato, Soonpyo Kweon, Daisuke Yamashita, Norimasa Iida, Basic Research on an Applicable Fuel for the HCCI Combustion, *JSAE Paper*, Vol.36 No.6 Page.79-84 (2005)
- (2) Sjoberg, M., Dec, E.J., Cernansky, P.N., Potential of Thermal Stratification and Combustion Retard for Reducing Pressure-Rise Rates in HCCI Engines, Based on Multi-Zone Modeling and Experiments, *SAE paper* 2005-01-0113 (2005)
- (3) Ozaki, J., Iida, N., Effect of Degree of Unmixedness on HCCI Combustion Based on Experiment and Numerical Analysis, *SAE paper* 2006-32-0046 (2006)
- (4) Luz, A.E., Rupley, F., Miller, J.A., CHEMKIN-II: A FORTRAN Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics, *Sandia National Laboratories Report*, SAND89-8009B (1989)
- (5) Luz, A.E., Kee, R.J., Miller, J.A., SENKIN: A FORTRAN Program for Predicting Homogeneous Gas Phase Chemical Kinetics With Sensitivity Analysis, *Sandia National Laboratories Report*, SAND87-8248 (1988)
- (6) Curran, H.J., Pitz, W.J., Westbrook, C.K., Dagaut, P.B., Boettner, J.-C., Cathonnet, M., A Wide Range Modeling Study of Dimethyl Ether Oxidation, *International Journal Chemical Kinetics*, 30-3, 229-241 (1998)
- (7) GRI-Mech3.0, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech
- (8) Hiroyuki Yamada, Kotaro Suzuki, Atsumu Tezaki, A Study of Low Temperature Oxidation in Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine with Dimethyl Ether, *JSME Papers*, Vol.69 No.679 Page.743-750 (2003)
- (9) Hiroyuki Yamada, Atsumu Tezaki, Yuichi Goto, A Mechanism of Thermal Ignition Appearance in Homogeneous Charge Compression Ignition Process, *JSME Paper*, Vol.72 No.721 Page.2293-2299 (2006)