DME を用いた過給 HCCI 機関の研究*

堤 優二郎^{*1}, 飯島 晃良^{*2}, 庄司 秀夫^{*3}

A Study of Supercharged HCCI Engine Operating on DME

Yujiro TSUTSUMI^{*4}, Akira IJIMA and Hideo SHOJI^{*4} College of Science and Technology, Nihon University,
1-8-14 Kanda Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8308 Japan

Supercharging the intake air is an effective method of increasing the operating load of Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) engines because it can reduce nitrogen oxide (NO_x) emissions. In this study, in-cylinder spectroscopic measurements and measurements of exhaust gas components were obtained to examine the influence of the intake air pressure on the combustion characteristics of a supercharged HCCI engine when dimethyl ether (DME) was used as the test fuel. The effect of the intake air pressure on the stable operating region of the test engine was also investigated. The experimental results showed that combustion became more moderate and the combustion period was extended as the intake air pressure was increased under a condition of a constant injected heat value. As a result of a detailed investigation made with a spectroscopic method, it was found that the recombination reaction of CO and O slowed, which caused the moderation of combustion. In addition, it was also found that raising the intake air pressure had the effect of reducing NO_x emissions, which, together with the more moderate rate of combustion, made it possible to increase the operating load. However, it was observed that as the operating load was further increased, rapid combustion could not be sufficiently controlled. Therefore, some means of controlling rapid combustion will be needed in order to operate supercharged HCCI engines at higher load levels.

Key Words: Internal Combustion Engine, Combustion, Flame, Spectroscopic Measurement, Supercharging, HCCI, Dimethyl Ether

1. 緒 言

予混合圧縮着火 (HCCI) 機関⁽¹⁾は、筒内に供給された予混合気をピストン圧縮により自己着火させて運転する機関である。火炎伝ば限界を超えた希薄領域での運転が可能であることや、ガソリン機関に比べて高い圧縮比で運転できることから高効率である。また、筒内における混合気濃度分布が均一であるため NO_x と PM の同時低減が可能である⁽²⁾。しかし、物理的な着火手段を持たないため着火時期の制御が困難である。また、燃焼室内全体で予混合気がほぼ同時に着火するので燃焼が急峻であり、高負荷側へ運転領域を拡大することが困難である。一方、低負荷領域では燃焼

の完結性が悪く、HC 及び CO の排出量が多い。これらの問題点を改善することが課題となっている。

HCCI 機関の高負荷側の運転領域を拡大する手法として、EGR の使用^{(3)~(6)}や二種燃料の混合使用^{(7)~(10)}などが挙げられるが、本研究では過給を行う手法^{(11)~(14)}に着目した。一般に HCCI 機関の高負荷限界は、燃焼が急峻であることによる制限のほかに、最高燃焼温度に制限される。その理由は、燃焼温度がある温度に達すると NO_x が生成されるため、HCCI 燃焼のメリットを損なわずに運転することを考えると最高燃焼温度に閾値を設けなければならないためである。過給を行うと、筒内ガスの熱容量が増加するので、最高温度を低減することができる。そのため、高負荷領域での NO_x の生成を抑制することが可能で、高負荷限界を拡大できる。また、低中負荷領域で HCCI 運転を行う場合、排気のエネルギーが小さいため排気タービン過給を行うことが困難であるが、多気筒エンジンにおいては、過給機を使用しなくても排気のプロードダウン

* 原稿受付 2008 年 7 月 3 日。

^{*1} 学生員, 日本大学大学院理工学研究科(〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)。^{*2} 正員, 日本大学理工学部。^{*3} 正員, フェロー, 日本大学理工学部。

E-mail: shoji@mech.cst.nihon-u.ac.jp

圧力を利用して過給を行うことが可能とされている⁽¹⁴⁾。しかし、過給がHCCI機関の熱発生・振る舞いに与える影響や、運転可能領域に与える詳細な影響については十分に解明されていない。

本研究では、DME（ジメチルエーテル）を燃料としたHCCI機関を過給した場合において、吸気圧力が燃焼特性に与える影響を調査した。なお、DMEは着火し易い燃料であるため、HCCI機関に適した燃料として様々な研究が行われている^{(15) (16)}。本実験では、筒内の火炎光及び中間生成物の分光学的計測^{(17) ~ (19)}と排ガス成分を対応させることで、過給することにより熱発生・振る舞いに変化する要因を詳しく考察した。加えて、COの排出による低負荷限界、NOxの排出及び圧力上昇率最大値による高負荷限界を定義して、吸気圧力が運転領域に与える影響を詳細に調査した。

2. 実験装置及び実験方法

表1及び図1は、それぞれ供試機関仕様及び実験装置の概略を示している。機関は四サイクル単気筒ディーゼル機関をベースとした。なお、過給を行った際の新気の吹き抜けを最小限とするため、タペット隙間を調節してバルブオーバーラップをゼロとした。この機関を、機関回転数1400 rpmで運転して実験を行った。DMEはマスフローコントローラを介して流量制御され、予混合装置に供給される。予混合装置内において空気と混合され、この予混合気を機関に供給することでHCCI運転を行った。また吸気管の途中に、モータにより駆動される軽自動車用の機械駆動式過給機を装

Table. 1 Specification of test engine

Bore × Stroke	77 × 66 mm
Displacement Volume	299 cc
Compression Ratio	11.5:1

Fig. 1 Configuration of test equipment

着した。図中のバルブ（V）の開度を調節することで吸気圧力を変化させることができる。吸気圧力を変化することで吸入空気温度が変化するが、インタークーラを使用することで吸入空気温度を約293 K一定に保った。なお、排気タービン過給を想定した排気圧力の調節は行わず、排気は大気開放とした。また、排ガスのサンプリングを行い、排ガス中のCO、CO₂、及びNOxの体積割合を測定した。

図2は、筒内の火炎光の採取及び光の吸収を計測するための装置を示している。この装置は、シリンダヘッド及びシリンダの間に、スペーサのような要領で装着されるようになっている。なお、ピストン冠面に圧縮比調整のための部品を装着した。スペーサ状の装置には、石英製の観測窓が三箇所（図中のA、B、C）に設けられている。Aの観測窓から筒内の火炎光を取り出した。火炎光は、光ファイバによって分光器へと導入され、任意の波長に分光される。分光された光を光電子増倍管に検出させることで、発光の強度を計測した。また、キセノン光源の光をBの窓からCの窓へと通過させた。筒内を通過して出てきた光は、同じく光電子増倍管にて検出される。この光電子増倍管の感度は、筒内の火炎光を検出しないよう考慮して小さめに設定されている。光電子増倍管で検出した透過光の強度 E_A [A.U.] を用いて、次に示す式によって吸光度 A [-] と定義した。

$$A = \frac{E_{A0} - E_A}{E_{A0}} \quad [-] \quad (1)$$

ここで E_{A0} [A.U.] は、ピストンが圧縮行程前の下死点の位置におけるキセノン光源の透過光強度である。なお、筒内の密度勾配の影響によりキセノン光源の光路がずれるということが考えられるが、モータリング時の透過光強度を測定し、その影響が小さいことを確認した。

Fig. 2 Schematic of spectroscopic system

3. 実験結果及び考察

3・1 吸気圧力の変化がHCCI 燃焼に与える影響

図3は、1サイクルあたりの燃料の投入熱量 Q_{in} を 462 J/cycle 一定に保ちながら、吸気圧力 P_b (abs) を 98.3, 119.3, 139.3 及び 159.0 kPa と増加させたときのシリンダ内圧力 P [MPa], 熱発生率 HRR [J/deg.], 状態方程式から算出した筒内平均ガス温度 T [K] を示している。なお、 $Q_{in} = 462$ J/cycle, P_b (abs) = 98.3 kPa の条件では、NOx が排出され、圧力上昇率最大値が高い運転状態である。図3より、いずれの条件においても二段の熱発生が確認できるが、二段目の熱発生の立ち上がり以降を熱炎と定義する。投入熱量を一定に保ちながら吸気圧力を増加させると、熱炎での熱発生率最大値が減少し、燃焼が緩やかになっている。また、熱発生率最大時期及び圧力最大時期はともに遅角しているが、熱発生率最大時期の遅角に対して圧力ピーク時期の遅角が大きいことが分かる。これは、燃焼が緩慢となり熱発生期間が長期化したためだと考えられる。筒内平均ガス温度の最大値は、筒内ガスの熱容量が増加したことによって大幅に低下している。図4は、投入熱量 $Q_{in} = 462$ J/cycle 一定のもと吸気圧力 P_b (abs) を増加させたときの圧力上昇率最大値 $dP/d\theta_{max}$ [MPa/deg.] 及び排ガス中の NOx の体積割合を示している。吸気圧力が増加することで圧力上昇率最大値が減少していることが分かる。また、吸気圧力が 100 kPa から 120 kPa 程度まで増加すると NOx はほとんど排出されなくなっている。以上より、吸気圧力を増加させることで燃焼が緩慢化し、NOx の排出を抑えることが可能であることが明らかである。

図5は、投入熱量 $Q_{in} = 462$ J/cycle 一定のもと吸気圧力を増加させたときの IMEP [MPa], 着火時期 θ_{ign} [deg.], 熱炎の発生期間 θ_{comb} [deg.] 及び最大圧力をとる時期 [deg.] を示している。着火時期及び熱発生期間の定義を図の上部に示す。着火時期は吸気圧力が増加してもほとんど変化していないが、吸気圧力が 100 kPa から 160 kPa までの範囲では、吸気圧力の増加に伴い図示平均有効圧力 IMEP が増加していることが分かる。これは、図5から分かる通り、吸気圧力が 100 kPa から 160 kPa までの領域では吸気圧力の増加とともに熱炎の熱発生期間が長期化するとともに圧力最大時期が上死点前から上死点後へと遅角して、高い IMEP を

Fig. 3 Influence of intake pressure on combustion characteristics

Fig. 4 Influence of intake pressure on $dP/d\theta_{max}$ and NOx emission

Fig. 5 Effective factor for IMEP

得るのにより適する圧力最大時期をとったためと考えられる。この結果より、燃料の投入熱量を変化させずに吸気圧力を変化させて圧力最大時期を変化させることで、着火時期を変化させなくても図示熱効率を向上させることができると考えられる。加えて、HCCI 燃焼では上死点以降に着火させることが比較的困難であるので、上死点前に着火させ燃焼を安定させるとともに、吸気圧力を増加させて圧力最大時期を遅角させることで、安定した着火を保ちつつ *IMEP* を向上させることができると考えられる。

3・2 分光学的手法を用いた燃焼特性の解析

吸気圧力の変化に伴う熱炎の振る舞いを詳細に調べるために筒内の火炎の発光及び光の吸収を観察した結果を次に示す。筒内の火炎の発光については、高温酸化反応での発光の主体となる CO と O の再結合反応による発光 (395 nm 付近にピークを持つ連続スペクトル⁽²⁰⁾) を観察するため、395

nm の発光強度を記録した。光の吸収においては、ホルムアルデヒド (HCHO) の代表的な吸収波長 293 nm⁽²¹⁾ の吸収を記録し、(1) 式により吸光度を算出した。ホルムアルデヒドは冷炎反応で生成され、熱炎の開始とともに消費されることが知られている⁽²²⁾。

図 6 の (a) ~ (f) は、燃料の 1 サイクルあたりの投入熱量 $Q_{in} = 385 \text{ J/cycle}$ 一定のもと吸気圧力を $P_b(\text{abs}) = 100.2, 121.2, 141.2, 161.2, 179.9, 199.9 \text{ kPa}$ と増加させたときの、筒内圧力履歴から算出した熱発生率 $HRR [\text{J/deg.}]$ 、筒内の火炎光の 395 nm の発光強度 $E [\text{A.U.}]$ 及び 293 nm の吸光度 $A [-]$ を示している。いずれの条件においても、熱発生率波形において冷炎反応及び熱炎反応による二段の熱発生が確認できる。ここで、(a) $P_b(\text{abs}) = 100.2 \text{ kPa}$ のグラフに注目して吸光度の振る舞いを考察すると、まず冷炎反応が発生するとともにホルムアルデヒドの吸収波長に相当する波

Fig. 6 Measured waveforms of CO-O glow and light absorbance corresponding to HCHO ($Q_{in} = 385 \text{ J/cycle}$ constant)

長の吸光度が急増していることが分かる（図中の O）．その後、熱炎の熱発生が開始する（図中 P）とともに CO-O 放射が起こり（図中 Q），それに伴い吸光度が減少し始めていることが分かる（図中 R）．これら吸光度波形の振る舞いは、冷炎反応においてホルムアルデヒドが生成され、熱炎の開始とともにホルムアルデヒドが消費されるという挙動をとらえていると考えられる．

吸気圧力が増加すると、熱炎での熱発生率最大値が減少するとともに熱発生期間が長期化していることが確認できる．これに伴い、CO-O 放射の強度は減少していくことが分かるが、(a) P_b (abs) = 100.2 kPa の条件では発光が一段であるのに対し、(c) P_b (abs) = 141.2 kPa の条件では時間的に二段の発光となっていることが分かる（図中の 1st Glow と 2nd Glow）．ここで、吸気圧力の値が (a) と (c) の間である (b) の条件では、一段目の発光が二段目の発光に部分的に覆われるような形状となっていることが確認できる．さらに (d), (e), (f) と吸気圧力が増加していくと後半の発光がほとんど見られなくなり再び一段の発光となっていることが分かる．また熱発生率と比較してみると、(a) では熱発生が一段であるのに対し、(c) では二段目の発光に対応して熱炎の後半に緩やかな熱発生が起きていることがわかる（図中の Gradual HR）．さらに吸気圧力が増加した (d) の条件では、後半の発光がなくなるとともに後半の緩やかな熱発生が見られなくなっている．よって、二段の発光に対応して、二種類の熱発生が存在していると考えられる．

次にこれらを詳しく解析するため、一段目及び二段目の発光強度の最大値と、熱発生率及び排ガス成分の比較を行った結果を示す．図 7 は、図 6 と同条件において、吸気圧力が変化したときの熱発生率最大値 HRR_{max} [J/deg.]、CO-O 放射の一段目における傾きが $dE/d\theta = 0.1$ [A.U./deg.]となるクラック角度の発光強度 E_{1st} [A.U.] 及び二段目の発光強度最大値 E_{2nd} [A.U.]、排ガス中の CO 及び CO₂ の体積割合を示している．なお図中に、図 6 の (a) から (f) に対応した吸気圧力に記号を記してある．吸気圧力の変化に対する二段目の発光強度の変化と熱発生率最大値の変化の傾向がよく似ていて、熱発生率最大値には二段目の発光強度が大きく関係していることが再確認できる．

次に排ガス成分と比較を行うと、二段目の発光強度が減少していくとともに CO が増加して CO₂

が減少しているの、主に二段目の CO-O 放射が起きている期間に CO₂ の生成が進行していると考えられる．

また、図 6 の吸光度波形に注目すると、いずれの条件においても CO-O 放射が発光し始めるとともに吸光度が急減しているが、(d), (e), (f) のように二段目の CO-O 放射が起こっていない条件においても、一段目の CO-O 放射の発光に対応して吸光度が急減していることがわかる（図中の U）．よって、どのような条件においても一段目の CO-O 放射が起きるとともにホルムアルデヒドは消費されていることが予想される．加えて、図 7 の (d), (e), (f) のように二段目の CO-O 放射が起こっていない条件では CO が比較的多く排出されているので、一段目の CO-O 放射が起きている期間においては、HCHO が消費されて CO の生成が進行していると考えられる．小山ら⁽²³⁾は、熱炎初期における HCHO の消費及び CO の生成を素反応数値計算で示しており、本実験の傾向と一致している．なお、一段目の発光が起きている期間の CO-O 放射の発光は、CO が生成されることで少なからずとも CO₂ の生成が進行しているため発光しているものと考えられる．

以上の分光学的計測結果から、熱炎における

Fig. 7 Comparison between CO-O glow intensity and HRR, exhaust gas emissions

CO-O 放射は二段階の発光によって構成されており、一段目の CO-O 放射が起きている期間に主に CO が生成され、二段目の CO-O 放射が起きている期間に主に CO₂ が生成されていることが分かった。また、吸気圧力の増加に伴う熱発生 の 緩 慢 化 は、主に CO が酸化されて CO₂ が生成される反応が緩慢となることに起因していることが分かった。

3・3 過給を行うことによる運転可能領域の変化について 図 8 は、吸気圧力 P_b (abs) をそれぞれ 119, 159, 199 kPa 一定に保ちながら、燃料の投入熱量 Q_{in} [J/cycle] を変化させたときの圧力上昇率最大値 $dP/d\theta_{max}$ [MPa/deg.]、排ガス中の CO 及び NOx の体積割合を示している。また、排ガス中の CO の体積割合が大きくなり始める投入熱量を低負荷側の運転限界 (図中の A)，圧力上昇率最大値が 0.75 MPa/deg. を超える範囲をノッキング領域 (図中の Knock) と定義して運転可能領域を網掛けで示している。まず、吸気圧力が高くなるほど運転可能領域が高負荷側にシフトしていることが分かる。よって、HCCI 機関を過給することで高負荷限界を高められるが、運転負荷によって適正な吸気圧力があることが分かる。すなわち、低い負荷領域での過剰な吸気圧力の増加は燃焼効率の悪化 (CO の増加) を招く。高負荷限界を制限する要素は、NOx の排出によるものと圧力上昇率最大値によるものがあるが、吸気圧力が 119 kPa の条件では圧力上昇率最大値が 0.75 MPa/deg. に達すると同時に NOx が出始めていて、両者に高負荷限界が制約されているのに対し、吸気圧力が

159 kPa 及び 199 kPa の条件では NOx の排出は十分に低減され、圧力上昇率最大値にのみ制約されていることが分かる。また、吸気圧力が高い条件ほど、運転可能負荷領域が狭くなっていることが分かる。

図 9 は、図 8 と同条件での筒内ガスの最高到達温度に対する排ガス中の NOx 及び CO の体積割合、圧力上昇率最大値 $dP/d\theta_{max}$ [MPa/deg.] を示している。いずれの吸気圧力の条件でも、最高到達温度が約 1800 K を上回ると NOx が増加し、約 1500 K を下回ると CO が増加している。よって、最高到達温度が NOx 排出による高負荷限界と CO 排出による低負荷限界を決める条件であることが分かる。一方、圧力上昇率最大値は吸気圧力が高い条件ほどより低い最高到達温度で閾値 0.75 MPa/deg. に達していることが分かる (図中 1, 2, 3)。この影響により、圧力上昇率限界時の最高到達温度と CO 排出限界時の最高到達温度約 1500 K との差が小さくなっている (図中 X, Y, Z)。このような理由より、吸気圧力が高いほど運転可能な負荷領域が狭くなったと考えられる。加えて、吸気圧力が高い条件ほど、圧力上昇率限界時の最高到達温度が NOx の排出される最高到達温度よりも十分に低くなるため (図中 B)，高吸気圧力条件ほど NOx は十分に低減された状態となることが分かった。よって、高吸気圧力の条件における運転可能領域を広くするためには、NOx の抑制よりも圧力上昇率の低減が重要である。

Fig. 8 Influence of intake pressure on operating range

Fig. 9 NOx and CO emission and $dP/d\theta_{max}$ as a function of maximum gas temperature

4. まとめ

外部過給機を使用することで、吸気圧力がDMEを用いたHCCI機関の燃焼に与える影響について調査した結果、以下のような知見を得た。

- (1) 機関への燃料の投入熱量が一定の場合、吸気圧力を増加させると熱発生が緩やかとなり、燃焼期間が長期化する。そのため、着火時期が変化しない場合でも圧力最大時期が遅角し、図示平均有効圧力IMEPが向上する。このため、上死点後に安定した着火を保つことが困難であるHCCI機関において、着火時期を上死点前として着火を安定させつつ、吸気圧力を増加させることで圧力最大時期が遅角させることが可能であることが分かった。
- (2) 分光学的手法を用いて筒内のCO-O放射を観察した結果、二段階のCO-O放射が観察された。ホルムアルデヒド相当の光の吸収挙動及び排ガス中のCO・CO₂の計測を行った結果と対応させることで、一段目のCO-O放射が起きている期間にCOが生成され、二段目のCO-O放射が起きている期間にCO₂が生成されていることが示唆された。この結果を熱発生率と対応させることで、吸気圧力を増加させることによる燃焼の緩慢化は、主にCOの酸化反応が緩慢となることに起因していることが分かった。
- (3) 吸気圧力を増加させることで高負荷限界を向上させることができるが、燃料の投入熱量に対して過剰に吸気圧力を増加させると、筒内ガスの最高到達温度が低くなりすぎるため排気中のCOが増加する。よって、COの排出を抑えて運転するためには、運転負荷に応じて吸気圧力を調節する必要がある。
- (4) 吸気圧力を増加させることで、NO_xの排出を低減することは比較的容易だが、高負荷になるほど圧力上昇率最大値の低減が十分でなくなるため、運転可能領域を拡大しにくくなる。よって、HCCI機関の高負荷化には圧力上昇率最大値の低減が重要な課題となる。

文 献

- (1) Thring, R. H., Homogeneous-Charge Compression-Ignition (HCCI) Engines, *SAE Paper*, 892068 (1989).
- (2) Aoyama, T., Hattori, Y., Mizuta, J. and Sato, Y., An Experimental Study on Premixed-Charge Compression Ignition Gasoline Engine, *SAE Paper*, 960081 (1996).
- (3) Ishibashi, Y., and Asai, M., Improving the Exhaust Emissions of Two-Stroke Engines by Applying the Active Radical Combustion, *SAE Paper*, 960742 (1996).
- (4) Urushihara, T., Hiraya, K., Kakuhou, A. and Itoh, T., Expansion of HCCI Operating Region By the Combination of Direct Fuel Injection, Negative Valve Overlap and Internal Fuel Reformation, *SAE Paper*, 2003-01-0749 (2003).
- (5) Aoyagi, Y. and Hyodo, Y., New Technology on Diesel Engine: Premixed Compression Ignition Combustion, *Journal of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol. 59, No. 4 (2005), pp. 110-115.
- (6) Iijima, A., Watanabe, T., Yoshida, K. and Shoji, H., A Study of HCCI Combustion Using a Two-Stroke Gasoline Engine with a High Compression Ratio, *2006 SAE Transactions*, Vol. 115, Section 3 (2007), pp. 1031-1042.
- (7) Sato, S., Yamashita, D. and Iida, N., Influence of Fuel Compositions on the Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion (First Report) -Effect of the Variations of Fuel Compositions of the Oxidation Reaction Processes of Pre mixture-, *JSAE Transactions*, Vol. 38, No. 2 (2007), pp. 113-118.
- (8) Sato, S., Yamashita, D. and Iida, N., Influence of Fuel Compositions on the Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion (Second Report) -Effect of the Mixing Ratios of Double Componential Fuels on the Operating Region of HCCI Combustion-, *JSAE Transactions*, Vol. 38, No. 2 (2007), pp. 119-124.
- (9) Muto, T., Nishimi, S., Nomura, H., Iijima, A. and Shoji, H., Analysis of Combustion in DME and Methane Fueled HCCI Engine, *JSAE Transactions*, Vol. 37, No. 4 (2006), pp. 95-100.
- (10) Shudo, T., An HCCI Combustion Engine System Fueled with Onboard-Reformed Gases of Methanol -Ignition Control by Hydrogen-, *Journal of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol. 58, No. 9 (2004), pp. 87-92.
- (11) Christensen, M., Johansson, B., Amneus, P. and Mauss, F., Supercharged Homogeneous Charge Compression Ignition, *SAE Paper*, 980787 (1998).
- (12) Olson, J., Tunestal, P. and Johansson, B., Boosting for High Load HCCI, *SAE Paper*, 2004-01-0940 (2004).
- (13) Harada, A., Miyamoto, T., Asaumi, Y. and Aoyagi, Y., Premixed Lean Diesel Combustion Characteristics on Supercharged Diesel Engine, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 66, No. 649 (2000), pp. 237-244.
- (14) Takanashi, J., Awasaka, M., Kakinuma, T., Takazawa, M. and Urata, Y., A Study of a Gasoline HCCI Engine equipped with an Electromagnetic VVT Mechanism -Increasing the Higher Load Range with "Inter-Cylinder EGR Boost System"-, *JSAE Transactions*, Vol. 37, No. 6 (2006), pp. 109-114.
- (15) Konno, M., Chen, Z., Kajitani, S., Yoneda, K., Oguma, M. and Goto, S., An Examination of Dimethyl Ether HCCI Combustion from the Viewpoint of Chemical Reactions, *JSAE Transactions*, Vol. 34, No. 2 (2003), pp. 15-20.
- (16) Yamada, H., Suzuki, K. and Tezaki, A., A Study of Low-temperature Oxidation of Dimethyl Ether in a Engine Using Quadrupole Mass Spectrometer, *JSAE Transactions*, Vol. 33, No. 4 (2002), pp. 63-68.
- (17) Shoji, H., Atsushi, S. and Shiino, K., Simultaneous Measurement of Light Emission and Absorption

- Behavior of Unburned Gas During Knocking Operation, *1993 SAE Transactions*, Vol. 102, Section 4 (1994), pp. 1492-1500.
- (18) Shoji, H., Shiino, K., Watanabe, H. and Saima, A., Simultaneous Measurement of Light Absorption and Emission of End Gas During Knocking Operation, *JSAE Transactions*, Vol. 25, No. 2 (1994), pp. 11-16.
- (19) Iijima, A., Koji, Y. and Shoji, H., A Spectroscopic Study of Ignition in a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 74, No. 742 (2008), pp. 1433-1442.
- (20) Iijima, A. and Shoji, H., A Study of Homogeneous Charge Compression Ignition using Light Emission and Absorption Measurement, *JSAE Transactions*, Vol. 38, No. 6 (2007), pp. 83-88.
- (21) Gaydon, A. G., *The Spectroscopy of Flame* -2nd Edition, London, Chapman and Hall Ltd (1974).
- (22) Takahashi, H and Ohta, Y., Low Temperature Flames (1), *Internal Combustion Engine*, Vol. 22, No. 285 (1983), pp. 41-47.
- (23) Koyama, T., Ibaragi, Y. and Iida, N., Numerical Calculation of the Homogeneous Charge Compression Ignition Process by using an Elementary Reaction Model of Dimethyl Ether, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 67, No. 657 (2001), pp. 165-171.