DME/Methane 混合燃料を用いた過給 HCCI 燃焼特性に関する研究

鈴木 裕和^{*1}, 島 貴大^{*2}, 高村 悠樹^{*1}
飯島 晃良^{*3}, 庄司 秀夫^{*4}

A study of supercharged hcci combustion characteristics using dme/methane fuel blends

Hirotaka SUZUKI^{*1}, Takahiro SHIMA^{*2}, Yuki TAKAMURA^{*1},Akira IIJIMA^{*3} and Hideo SHOJI^{*4}^{*1, *2} Graduate School of Science and Technology, Nihon University
1-8-14 Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308, Japan^{*3, *4} College of Science and Technology, Nihon University
1-8-14 Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308, Japan

Received 27 July 2015

Abstract

An investigation was made of the fundamental combustion characteristics of a supercharged Homogenous Charge Compression Ignition (HCCI) engine operating on a gaseous fuel blend of dimethyl ether and methane. Besides measuring the in-cylinder pressure, spectroscopic techniques were used to measure light absorbance and light emission intensity. Exhaust gas samples were also analyzed with a Fourier transform infrared gas analyzer. The experimental results revealed that varying the input heat energy and the mixing ratios of the gaseous fuels caused the in-cylinder pressure to rise sharply, making stable engine operation difficult. However, it was found that applying supercharging while keeping the input heat energy constant moderated the pressure rise during combustion, though the in-cylinder pressure rose overall. As a result, that made it possible to avoid knocking and also to obtain cleaner exhaust emissions. Consequently, the results of this study demonstrate that applying supercharging according to the engine load is a key factor in controlling HCCI combustion.

Key words: Hcci, Methane, Dme, Supercharging, Thermal efficiency, Equivalence ratio, Exhaust emissions

1. 緒 言

近年、燃費や排ガス規制が厳しくなる中で内燃機関には更なる高効率化と排ガスのクリーン化が求められている。そのため、希薄燃焼による比熱比の向上 (Heywood, 1989) や高圧縮比化 (西田他, 2012) などが所望を満たす手法として用いられている。しかし、希薄化に伴い燃焼が不安定になることや、ノッキングにより高圧縮比化ができないためその実現が難しい (山川他, 2012)。そこで、高効率かつ排ガスもクリーンな予混合圧縮着火 (Thring, 1989) (以下、HCCI) 燃焼に着目した。HCCI 燃焼は、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る燃焼である。HCCI 燃焼は希薄低温予混合燃焼であるため、窒素酸化物 (以下、 NO_x) 及び粒子状物質 (以下、PM) を同時に低減することができる。また、十分に高い圧縮比で自己着火による希薄予混合燃焼運転が可能であることから、高熱効率化を実現できる燃焼方式である。しかし、HCCI 燃焼には大きな課題が 2 点ある。それは「物理的な着火手段を持たないために着火時期の制御が困難」であること、「混合気が筒内の多点で同時に着火するため筒内で急激な圧力上昇を引き起こす」ことである。筒内で圧力上昇が急峻になると機関の騒音やノッキング (Andreae et al., 2007) が生ずるため、運転領域の拡大が困難である。

これまで飯田らの研究 (佐藤他, 2007a, 2007b) では、DME/メタン を用いて HCCI 燃焼させた際に DME 及

No.15-00414 [DOI: 10.1299/transjsme.15-00414], J-STAGE Advance Publication date : 10 February, 2016

^{*1} 正員, 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} 学生員, 日本大学大学院理工学研究科

^{*3} 正員, 日本大学理工学部

^{*4} 正員, フェロー, 日本大学理工学部

E-mail of corresponding author: cshi14010@g.nihon-u.ac.jp

びメタンのそれぞれの部分当量比を変化させた際の運転領域について示し、詳細な燃焼特性について素反応数値計算と実験によって解明した。金野らの研究（金野他，2001）（徳田他，2011）では、DME を HCCI 燃焼させた際の素反応数値計算を行うことで詳細な反応経路及び燃焼特性を解明した。また著者らは、ジメチルエーテル（藤元，2006）（以下，DME）とメタン（藤元，2006）（Methane）の混合燃料を用いた素反応数値計算や実機に適用させ、HCCI 燃焼させた際の燃焼の研究を行ってきた（飯島他，2012a，2012b）（堤他，2009）。以上の研究等により、ガス HCCI 燃焼の基礎的なメカニズムが理解されてきている。今後、実用化に向けて更なる運転領域の拡大のためには、過給が有効だと考えられる。しかし、過給 HCCI の運転領域や燃焼メカニズムは十分には理解されていない（Olsson et al., 2004）。

そこで本研究では、熱効率が良くかつクリーンな HCCI 燃焼が実現可能な条件を明らかにすることを目的とし、過給 HCCI 燃焼実験を行った。そのベース状態として、吸気圧力一定での投入熱量変化や投入熱量一定でのメタン混合割合変化の実験を併せて実施した。また、燃焼特性を詳細に解析するため分光学的手法（飯島，庄司，2007）（Gaydon，1974）を用いた発光及び吸収計測、フーリエ変換赤外分光法を用いた排ガス分析を行った。

2. 実験装置及び方法

図 1 に実験装置の概略、表 1 に本研究で用いた供試機関の仕様、表 2 に供試燃料の詳細及び表 3 に実験条件を示す。供試機関は、4 サイクル空冷単気筒機関をベースとした。DME とメタンは、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、供試機関に供給し HCCI 運転を行った。また、吸気管の途中にモーターにより駆動される機械駆動式過給機を使用することで、過給を行った。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 0 とした。筒内圧力 P [MPa] はシリンダヘッド上部に取り付けた水晶圧力変換器を用いて測定した。また筒内圧力を測定する際、IMEP 変動率が 5 % 以下の 20 cycle のデータを平均した値を使用し、ノイズを除去するため 1 kHz のローパスフィルターを使用している。熱発生率及び筒内平均ガス温度は筒内圧力の値から算出している。過給により吸気圧力が変化することで吸気温度も変化するが、インタークーラーを使用し、吸気温度 T_{in} [K] を一定に保った。また、排ガスの一部をサンプリングし、フーリエ変換赤外分光法（FTIR，岩田電業製 FAST-3100）により、排ガス中の NO_x 、CO 及び二酸化炭素（以下， CO_2 ）の体積割合を測定し解析した。

表 2 に示したように DME 及びメタンは異なる着火性を有している。この異なる着火性を利用して、表 3 の実験条件で実験を行った。Case 1 はメタン混合割合及び吸気圧力を一定にし、燃料の投入量を変化させる実験である。Case 2 は Case 1 における最大投入熱量条件である 460 J/cycle 一定でメタン混合割合を変化させた実験である。Case 3 は Case 1 及び Case 2 において投入熱量及びメタン混合割合最大である条件で吸気圧力を上昇させた実験である。また Case 1～3 における吸気温度を 323 K 一定とした。

HCCI 燃焼における筒内ガスによる発光及び吸収計測を行うためシリンダとシリンダヘッドの間に石英観測窓付スペーサを設置し、ボア方向の筒内火炎光及びキセノン光源による透過光を採取した。図 2 にその概略図を示す。火炎光及び透過光は光ファイバによって分光器へ導入後、火炎光は 395.2 nm、透過光は 293.1 nm の波長に分光した。前者は、CO と O の再結合反応による強い連続スペクトル発光（CO-O 放射）の波長の一部であり、高温酸化反応（以下，HTR）発生時期に発光するため、HTR の発生期間及び激しさを評価することに有効な波長である（山崎他，2003）。後者は、低温酸化反応（以下 LTR）発生時期に生成される中間生成物であるホルムアルデヒド（以下，HCHO）の生成及び消費の挙動を捉えるのに有効な手段であり、自着火に至るまでの LTR の挙動と活発さを評価することに有効である（Gaydon，1974）（飯島，庄司，2007）。

光電子増倍管で検出した透過光の強度 E_A [A.U.] を用いて次式によって吸光度 $A_{293.1}$ [-] を定義した。ここで、 E_0 [A.U.] は下死点付近の透過光強度の平均である。

$$A_{293.1} = \frac{E_0 - E_A}{E_0} \quad [-] \quad (1)$$

また図 3 に示すように, HTR での熱発生率最大値を HTR_{MAX} [J/deg.], LTR での熱発生率最大値を LTR_{MAX} [J/deg.], 着火遅れ期間 τ [deg.] とした.

Fig. 1 Configuration of test equipment

Table 1 Engine specifications

4-Cycle Single Cylinder Engine	
Bore×Stroke [mm]	76×66
Displacement [cm ³]	299
Compression Ratio [-]	14: 1
Engine Speed [rpm]	1400
Valve Overlap	0

Table 2 Specifications of test fuels (Fujimoto, 2006)

	DME	Methane
Chemical Structure	CH ₃ OCH ₃	CH ₄
Molecular Weight	46	16
Cetane Number	55-60	0
Octane Number	-	130
Low-temperature Oxidation	Very active	Almost none

Table 3 Experimental conditions

	Case 1	Case 2	Case 3
Input heat energy per cycle, Q_{in} [J/cycle]	400 420 440 460	460	
Methane ratio, γ_{CH_4} [%]	10	10 20 30	30
Intake air pressure, P_{in} [kPa]	100		100 120 140 160 180
Intake air temperature T_{in} [K]	323 (Constant)

Fig. 2 Spectroscopic methods

Fig. 3 Definition of ignition timing

3. 実験結果及び考察

3・1 投入熱量, メタン混合割合, 吸気圧力を変化させた際の燃焼に及ぼす影響

Fig. 4 In-cylinder pressure, heat release rate and mean gas temperature measured for various Q_{in} values while keeping the methane mixing ratio constant. Increasing Q_{in} produced more rapid combustion.

Fig. 5 In-cylinder pressure, heat release rate and mean gas temperature measured for various methane mixing ratios while keeping Q_{in} constant. Increasing the methane mixing ratio lengthened the ignition delay and reduced LTR_{MAX} .

Fig. 6 In-cylinder pressure, heat release rate and mean gas temperature measured for various intake air pressures while keeping Q_{in} and the methane mixing ratio constant. Increasing the intake air pressure moderated combustion.

Fig. 7 Heat release rate, light absorbance and light emission intensity measured for the conditions of waveforms 1, 3 and 5 in Fig. 6. During two-stage heat release of the main combustion, light emission from DME and methane occurred in two stages.

吸気温度 $T_{in}=323\text{ K}$ 一定における, Case 1, Case 2, Case 3 の実験結果を図 4, 5, 6 に示す. 各図とも横軸がクランク角度 θ [deg.], 縦軸が筒内圧力 [MPa], 熱発生率 HRR [J/deg.] 及び筒内圧力から算出した筒内平均ガス温度 T_{mean} [K] である.

図 4 (Case 1) において, 総投入熱量を増加させることで HTR_{MAX} が高くなっている. また, 急激な燃焼に伴い熱発生時期が進角化しているため筒内圧力の上昇時期も進角化している. これは投入熱量増加により着火前の LTR が総じて活発になったことで, 筒内の平均ガス温度が上昇し, 着火時期が早期化したためだと考えられる.

次に図 5 (Case 2) に示すように総投入熱量を一定でメタン混合割合を増加させた場合, HTR_{MAX} はあまり変化せず, LTR_{max} は低下し, 着火遅れ期間 τ が長期化することで, 燃焼全体が遅角している. これはセタン価の高い DME の混合割合が減り, セタン価が低いメタン混合割合が増加したことで, 低温酸化反応の緩慢化により, 筒内平均ガス温度の上昇が緩やかになり, 着火遅れ期間が長期化したことが考えられる. また, 筒内圧力の拡大図に着目すると, 筒内圧力の最大値が増加している. これはメタン割合を増加させたことで, 着火時期がより TDC に近いタイミングまで遅角したためだと考えられる.

さらに図 6 (Case 3) において, 総投入熱量及びメタン割合を一定に保ち過給すると HTR_{MAX} は低下し, 緩やかな熱発生パターンになっている. それに伴い筒内圧力は全体的に上昇しているが, 1 や 2 の波形に比べ急激な圧力上昇は抑えられており, 燃焼は緩慢になっていることが分かる (図中 B). これは投入熱量及びメタン混合割合一定で, 過給したことで筒内の希薄化により, 全体的に低温燃焼化したためだと考えられる. 一方で, LTR 拡大図に着目すると, 吸気圧力の上昇に伴い LTR_{MAX} が増加している. これは, 過給により筒内の酸素濃度が増加することや, 混合気全体が高圧化することで, 低温酸化反応が活発になったためだと考えられる.

図 7 に, 図 6 の Case 3 における波形 1, 3 及び 5 の熱発生率, 発光強度 $E_{395.2}$ 及び吸光度 $A_{293.1}$ を横軸に筒内平均ガス温度で整理した図を示す (吸光度 $A_{293.1}$ の破線部分は着火時に一度低下した後に, わずかに上昇したものであり, 自着火プロセスにおける $HCHO$ の反応とは異なるものだと考えられる).

熱発生率に着目すると, 吸気圧力の増加によって HTR_{max} の減少と共に最高到達温度が低下している. これは図 6 の考察と同様に, 過給による燃焼温度の低下によるものである. また C の領域に着目すると, HTR において 2 段にわたる熱発生が確認できる. これは燃焼の緩慢化によって温度上昇が緩やかになり, 着火性の異なる DME とメタン及び CO の酸化等の反応が時間的に引き延ばされたためだと考えられる (飯島他, 2012a). 加えて, 吸気圧力が上昇すると HTR における 2 段目の熱発生が小さくなるのは, 不完全燃焼を生じているためだと考えられる.

また, CO と O の再結合反応の際に発光する 395.2 nm の波長の発光強度に着目すると, 波形 1 では強い発光を伴って激しい燃焼をしていたが, 吸気圧力の増加に伴い発光強度は低下し, 2 段階の発光を捉えることが出来た. このことから燃焼の緩慢化が分かる (飯島他, 2012a, 2012b).

$HCHO$ に相当する 293.1 nm の吸光度は, 波形 1, 3 及び 5 の全ての波形において, LTR の発生時期に急増し, HTR 立ち上がり時期に急減していることが分かる. また不完全燃焼をしている 5 の波形においても, $HCHO$ の消費までには至っていると考えられる. さらに D の領域では, $HCHO$ の吸光度が急激に上昇し, 自着火に至っているが, これは自着火前の H_2O_2 ループ反応 (安東, 桑原, 2008) による $HCHO$ の蓄積量が一時的に増加したものだと思われる.

以上より, 投入熱量, メタン割合及び吸気圧力を適切に用いれば燃焼の緩慢化によるガス燃料を用いた HCCI 燃焼の制御が可能であると考えられる.

3・2 投入熱量及びメタン混合割合一定で, 吸気圧力を変化させた際の燃焼に及ぼす影響と過給の重要性

図 8 に Case 3 における最高到達温度 T_{MAX} , 最大圧力上昇率 $dP/d\theta_{MAX}$, 図示熱効率 η_i , NO_x [ppm], CO 及び CO_2 を示す.

吸気圧力の上昇に伴い, T_{MAX} 及び $dP/d\theta_{MAX}$ が低減されている. これは, 過給による希薄化によって燃焼が緩慢化したためである. さらに, NO_x 排出量も希薄低温燃焼の効果によりゼロレベルに抑えられている. また過給の効果により, 急激な圧力上昇を抑え, 最大圧力上昇率を 0.8 MPa/deg. と高い値から 0.4 MPa/deg. を下回る低い値まで低減できた.

Fig. 8 Measured results for T_{MAX} , $dP/d\theta_{MAX}$, η_i , NO_x , CO and CO_2 in Case 3. Increasing the intake air pressure by supercharging lowered $dP/d\theta_{MAX}$ and T_{MAX} .

図示熱効率 η_i に着目すると、 η_i は 140 kPa で最大になった。これは過給により急峻な圧力上昇を抑えられ、TDC に近い長期的な燃焼形態を示したためだと考えられる。これらの結果から、過給による燃焼の緩慢化で発生した HTR 中の 2 段に渡る熱発生により、急峻な圧力上昇を抑える効果が期待出来る。

CO 及び CO_2 に着目すると、CO は吸気圧力が上昇するにつれ増加し、 CO_2 は減少している。これは過度な希薄化により不完全燃焼が生じているためだと考えられる。その中でも、140 kPa では両者とも比較的低い値で抑えられている。これは不完全燃焼及び急激な圧力上昇を伴う燃焼の条件に挟まれた適正な条件で運転されたためであると考えられる。また図 7 の発光強度と比較すると、CO の排出量が少ない 140 kPa 程度までは CO-O 放射が活発である。しかし、CO が増大した波形 5 では筒内平均ガス温度が低下し、燃焼が緩慢化しているのに対応して、CO-O 放射による発光も非常に弱くなっている。よって、CO-O 放射による発光強度で燃焼の活発さや、その進行状況などを評価できると考えられる。

以上より、DME/メタンの混合燃料を HCCI 機関で燃焼させることにおいて、DME/メタンの混合割合、着火時期および吸気圧力の制御を併せて行うことで、より高負荷な運転が可能であり、排ガスのクリーン化も可能である。また、より高負荷域での運転領域を拡大することは過給をして安定した燃焼を得ることが重要であると考えられる。

4. 結 言

4 サイクル空冷単気筒機関を用いて DME/メタンの混合燃料によって HCCI 燃焼運転を行い、投入熱量、メタン混合割合及び吸気圧力をパラメータとして変化させた種々の実験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 本研究において、投入熱量、メタン混合割合及び吸気圧力を適正に設定することによって、HCCI 燃焼の制御が可能である。また吸気圧力、投入熱量、DME 及びメタン混合割合の組み合わせにより、着火時期、圧力上昇率、LTR の活発さ、着火遅れ、熱発生パターンが変化する。
- (2) 過給や投入熱量の組み合わせによる燃焼温度が、HCCI における急峻な燃焼、完全燃焼、不完全燃焼及び失火などの燃焼状態に強く影響を及ぼす。そのため、適性な燃焼状態に制御された HCCI 燃焼を実現するためには、着火から完全燃焼に至るまでの温度履歴が重要である。
- (3) DME/メタンの混合燃料を用いて HCCI 燃焼させた場合、負荷条件に応じて適正な吸気圧力で過給を行うことで急峻な圧力上昇を緩慢化させ、より高負荷領域での運転が可能であることが分かった。

文 献

- Ando, H. and Kuwahara, K., Difference of reaction schemes on low initial temperature conditions with LTO reactions and high initial temperature condition skipping them, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, COMODIA 2008 (2008), pp. 483-490.
- Andreae, M., Cheng, W., Kenny, T. and Yang, J., On HCCI engine knock, SAE Technical Paper 2007-01-1858 (2007).
- 藤元薫, DME ハンドブック, オーム社 (2006), p. 568.
- Gaydon, A. G., The spectroscopy of flames - second edition, London Chapman and Hall Ltd. (1974).
- Heywood, J.B., Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill Book Company (1989).
- 飯島晃良, 浅沼光雄, 小松聖志, 清水亮介, 吉田幸司, 庄司秀夫, 混合燃料を用いた過給 HCCI における多段熱発生機構の研究 - FTIR による中間生成物測定, 筒内分光測定, 素反応数値計算を用いた反応解析 -, 自動車技術会論文集, Vol. 43, No. 2 (2012a), pp. 337-343.
- 飯島晃良, 石川芳広, 浅沼光雄, 吉田幸司, 庄司秀夫, 混合燃料を用いた過給 HCCI における多段熱発生機構の研究 (第 2 報) - 分光分析および反応数値計算を用いた混合燃料種の影響調査 -, 自動車技術会論文集, Vol. 43, No. 6 (2012b), pp. 1233-1238.
- 飯島晃良, 庄司秀夫, 発光・吸収計測による予混合圧縮着火燃焼の研究, 自動車技術会論文集, Vol. 38, No. 6 (2007), pp. 83-88.
- 金野満, 梶谷修一, 陳之立, 渡部泰幸, ジメチルエーテル圧縮着火機関の燃焼特性, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 67, No. 662 (2001), pp. 223-229.
- 西田正美, 山川正尚, 養祖隆, 藤川竜也, 西本敏郎, 高圧縮比エンジンの燃費改善技術について, 第 21 回内燃機関シンポジウム・講演論文集, 日本機械学会, (2012), pp. 539-544.
- Olsson, J., Tunestal, P. and Johansson, B., Boosting for high load HCCI, SAE Technical Paper 2004-01-0940 (2004).
- 佐藤進, 山下大輔, 飯田訓正, 予混合圧縮自己着火燃焼に及ぼす燃料成分の影響 (第 1 報) - 燃料成分の違いが予混合気の酸化反応過程に及ぼす影響 -, 自動車技術会論文集, Vol. 38, No. 2 (2007a), pp. 113-118.
- 佐藤進, 山下大輔, 飯田訓正, 予混合圧縮自己着火燃焼に及ぼす燃料成分の影響 (第 2 報) - 二成分混合燃料の混合割合が HCCI エンジンの運転領域に及ぼす影響 -, 自動車技術会論文集, Vol. 38, No. 2 (2007b), pp. 119-124.
- Thring, R. H., Homogeneous - charge compression - ignition (HCCI) engines, SAE Technical Paper 892068 (1989).
- 徳田龍人, 水田勝大, 金野満, DME 酸化簡略化反応モデルの構築, 年次大会: Mechanical Engineering Congress, Japan, G070051 (2011).
- 堤優二郎, 飯島晃良, 庄司秀夫, 過給が HCCI 機関の熱発生に与える影響, 自動車技術会論文集, Vol. 40, No. 4 (2009), pp. 1023-1028.
- 山川正尚, 養祖隆, 藤川竜也, 高圧縮比ガソリンエンジンの燃焼技術の開発, 自動車技術会論文集, Vol. 43, No. 1 (2012), pp. 81-87.
- 山崎由大, 高橋晋也, 飯田訓正, ラジカル発光計測による DME 空気予混合圧縮自己着火機関の燃焼解析, 自動車技術会論文集, Vol. 34, No. 4 (2003), pp. 75-80.

References

- Ando, H. and Kuwahara, K., Difference of reaction schemes on low initial temperature conditions with LTO reactions and high initial temperature condition skipping them, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, COMODIA 2008 (2008), pp. 483-490.
- Andreae, M., Cheng, W., Kenny, T. and Yang, J., On HCCI engine knock, SAE Technical Paper 2007-01-1858 (2007).
- Fujimoto, K., DME Handbook, Tokyo: Ohmsha (2006), p. 568 (in Japanese).
- Gaydon, A. G., The spectroscopy of flames - second edition, London: Chapman and Hall Ltd. (1974).
- Heywood, J.B., Internal combustion engine fundamentals, New York: McGraw-Hill Book Company (1989).
- Iijima, A., Asanuma, M., Komatsu, K., Shimizu, R., Yoshida, K. and Shoji, H., Study of mechanism producing multi-stage heat release in supercharged HCCI using blended fuel (first report) -reaction analyses by FTIR method, in-cylinder spectroscopy and chemical kinetic simulation-, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 43, No. 2 (2012a), pp. 337-343 (in Japanese).
- Iijima, A., Ishikawa, Y., Asanuma, M., Yoshida, K. and Shoji, H., Study of mechanism producing multi-stage heat release in supercharged HCCI using blended fuel (second report) -influence of fuel type on combustion by spectroscopic analysis and chemical kinetic calculation-, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 43, No. 6 (2012b), pp. 1233-1238 (in Japanese).
- Iijima, A. and Shoji, H., A study of homogeneous charge compression ignition using light emission and absorption measurement, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 38, No. 6 (2007), pp. 83-88 (in Japanese).
- Konno, M., Kajitani, S., Chen, Z. and Watanabe, H., Combustion characteristics of a compression ignition engine fueled with dimethyl ether, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 67, No. 662 (2001), pp. 223-229 (in Japanese).
- Nishida, M., Yamakawa, M., Youso, T., Fujikawa, T. and Nishimoto, T., Fuel consumption improvement with high compression ratio, The 21th Internal Combustion Engine Symposium, The Japan Society of Mechanical Engineers (2012), pp. 539-544 (in Japanese).
- Olsson, J., Tunestal, P. and Johansson, B., Boosting for high load HCCI, SAE Technical Paper 2004-01-0940 (2004).
- Sato, S., Yamashita, D. and Iida, N., Influence of the fuel compositions on the homogeneous charge compression ignition combustion (first report) -effect of the variations of fuel compositions on the oxidation reaction processes of pre-mixture-, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 38, No. 2 (2007a), pp. 113-118 (in Japanese).
- Sato, S., Yamashita, D. and Iida, N., Influence of the 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 engine-, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 38, No. 2 (2007b), pp. 119-124 (in Japanese).
- Thring, R. H., Homogeneous - charge compression - ignition (HCCI) engines, SAE Technical Paper 892068 (1989).
- Tokuda, R., Mizuta, M. and Konno, M., Reduced elementary reaction model for dimethyl ether oxidation, Mechanical Engineering Congress, Japan, G070051 (2011) (in Japanese).
- Tsutsumi, Y., Iijima, A. and Shoji, H., The effect of supercharging on heat release in an HCCI engine, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 40, No. 4 (2009), pp. 1023-1028 (in Japanese).
- Yamakawa, M., Youso, T. and Hujikawa, T., Combustion technology development for a high compression ratio gasoline engine, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 43, No. 1 (2012), pp. 81-87 (in Japanese).
- Yamasaki, Y., Takahashi, S. and Iida, N., Auto-ignition and combustion analysis of DME air mixture in an HCCI engine by radical luminescence measurement and numerical calculation, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 34, No. 4 (2003), pp. 75-80 (in Japanese).