

急速圧縮膨張装置を用いた酸素富化による希薄燃焼 の燃焼促進に関する研究

原田, 一輝
九州大学統合新領域学府オートモーティブサイエンス専攻

安藤, 詩音
九州大学大学院工学研究院機械工学部門

伊東, 侑哉
九州大学大学院工学府機械工学専攻

川添, 裕三
九州大学大学院工学府機械工学専攻

他

<https://hdl.handle.net/2324/7173472>

出版情報 : Transactions of the JSME (in Japanese). 87 (900), pp.21-00168, 2021. 日本機械学会
バージョン :
権利関係 : © 2021 The Japan Society of Mechanical Engineers



急速圧縮膨張装置を用いた酸素富化による
希薄燃焼の燃焼促進に関する研究原田 一輝^{*1}, 安藤 詩音^{*2}, 伊東 侑哉^{*3}, 川添 裕三^{*4}, 橋本 英樹^{*5}, 森上 修^{*2}Study on promotion of lean combustion by oxygen enrichment
using a rapid compression expansion machineKazuki HARADA^{*1}, Shion ANDO^{*2}, Yuya ITO^{*3}, Yuzo KAWASOE^{*4},
Hideki HASHIMOTO^{*5} and Osamu MORIUE^{*2}^{*1} Department of Automotive Science, Kyushu University
744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan^{*2,*3,*4} Department of Mechanical Engineering, Kyushu University
744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan^{*5} Department of Mechanical Engineering, Kobe City College of Technology
8-3 Gakuen-Higashimachi, Nishi-ku, Kobe 651-2194, Japan

Received: 29 May 2021; Revised: 12 July 2021; Accepted: 27 July 2021

Abstract

While lean combustion in SI engine is one of the promising methods to increase the thermal efficiency and reduce the pollutant emissions, it causes instability of ignition and combustion due to the low burning velocity. Thus, we propose to increase the combustion intensity by incorporating oxygen enrichment with lean combustion. The objective of present study is to investigate the effects of oxygen enrichment on lean combustion behavior in SI engine. Premixed methane-air-oxygen mixture was combusted in a rapid compression expansion machine with varying their concentration. Experimental conditions were determined by identifying the conditions where the laminar burning velocity significantly changes by oxygen enrichment with 1-D simulation of premixed combustion. Histories of pressure were measured to evaluate heat release rate. Luminous flame was captured by a high-speed camera to observe the flame propagation. As a result, laminar burning velocity increased with oxygen concentration, which caused reduction of combustion period and enhancement of the indicated thermal efficiency. On the other hand, this trend was suppressed when the fuel concentration is lower than 6.85 %. In addition, when the fuel concentration is relatively large, flame propagation speed increased with increase in oxygen concentration, which can cause autoignition of end gas. NO_x emission decreased or kept almost constant with increase in oxygen concentration, which might be due to the shortened combustion duration.

Keywords : SI engine, Lean combustion, RCEM, Oxygen enrichment, Combustion enhancement

1. 緒 言

ガソリンエンジンにおける希薄燃焼は高圧縮比化・比熱比増大により熱効率の向上が可能となる。さらに、燃焼温度の低温化による熱損失の低減のみならず、排出物の削減にも効果的な手法であると期待される。一方で、燃焼速度の低下による点火・燃焼安定性の低下や燃焼期間の増大なども報告されており（池上他，1993），これらを補う手法の開発が求められている。

酸素富化は燃焼速度の増大やエネルギー利得の増大において有効な手法である。これまで、圧縮点火機関で

No.21-00168 [DOI:10.1299/transjsme.21-00168], J-STAGE Advance Publication date : 4 August, 2021

^{*1} 九州大学 統合新領域学府 オートモーティブサイエンス専攻（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744）^{*2} 正員，九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門^{*3} 九州大学 工学府機械工学専攻^{*4} 正員，九州大学 工学府機械工学専攻^{*5} 正員，神戸市立工業高等専門学校（〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町 8-3）

E-mail of corresponding author: ando-shion@mech.kyushu-u.ac.jp

の適用を中心に酸素富化のエンジン特性におよぼす影響について多く調べられてきた。佐藤・飯田らはディーゼル機関からの微粒子状排出物質の低減を目的として、酸素富化を適用しその効果について報告している (1985, 1986, 1990)。彼らは酸素富化によって微粒子状排出物質が低減されると同時に、酸素濃度が高い場合は窒素酸化物が増加することを報告している。また、Herchel らは酸素富化と EGR を組み合わせて熱効率の増大と窒素酸化物の抑制を同時に実現する可能性について調査し (1997)、さらに周らはニューラルネットワークを用いて雰囲気組成がエンジン特性におよぼす影響の予測を試みている (2000)。酸素富化に加えて、水素添加による燃焼促進手法なども検討されている (Shrestha et al, 2000)。

一方で、酸素富化の火花点火機関への適用とその効果についても多く調べられている。初期の研究としては、Quader が吸気酸素濃度を 21-30% で変化させ、酸素濃度増大に伴い未燃炭化水素が減少し、窒素酸化物が増大するのみならず、希薄側燃焼限界が拡大することを明らかにしている (1978)。また、梶谷らは未燃焼ガスの発生が活発な始動・暖機時での排出量削減を目的として酸素富化の効果を検証し、吸気中の酸素富化により暖機に要する時間が短縮し、未燃炭化水素の排出が抑制されることを示している (1994, 1998)。Caton は火花点火機関の酸素富化の効果をサイクル計算により明らかにしている (2005)。彼の報告によると、吸気中酸素濃度を 21% から 25% に増加させた時、シリンダ内の圧力・温度は増大する一方で、燃焼温度が上昇することで熱損失が大きくなり、BSFC は 11% 増大すると報告している。また、Seers らは可視化エンジンで酸素富化燃焼実験を実施し、酸素濃度増大に伴う圧力上昇時の急峻化・燃焼期間の短縮化とそれによる図示平均圧力の増大を報告している (2013)。このような酸素富化による燃焼速度の増大は吸気中二酸化炭素添加によって抑制できることから、彼らは酸素富化と二酸化炭素添加によって運転条件を操作可能であることを示唆している。このように、酸素富化による火花点火機関の排気特性の改善および希薄運転領域拡大については多く調査されてきたものの、希薄燃焼条件における酸素富化時のエンジン特性および燃焼挙動についての知見は限定されている。酸素富化による燃焼促進効果は希薄燃焼などの極限条件下において特に顕著になると予想される。

そこで、本研究は火花点火機関の希薄燃焼条件における酸素富化によるエンジン特性および燃焼特性を明らかにすることを目的とする。実験装置として急速圧縮膨張装置 (RCEM) を用い、希薄予混合メタン/空気を対象とした。予混合気中酸素濃度・燃料濃度については酸素富化の効果が最も顕著となる条件を、1 次元予混合層流燃焼速度を数値計算することで選定した。燃焼室内側面に設置された圧力センサで筒内圧力を測定した他、燃焼室上面の観察窓を介して高速カメラによって内部の燃焼挙動を撮影した。圧力履歴からは熱発生率や図示熱効率を算出した。さらに、燃焼後の排気ガスを採集して NOx/O₂ 分析計により NOx 濃度を計測した。

2. 実験装置

本研究では燃焼実験に RCEM を使用した。本研究で使用した RCEM は村瀬ら (2014) で使用したものと同型であり、ここではその概略についてのみ述べる。RCEM はボア径 80 mm、ストローク 280 mm の長ストローク燃焼装置であり、圧縮比は 15 である。また回転数を 200 rpm に固定し、低負荷時の燃焼計測を実施した。燃焼室側面にはプラグ間ギャップ 0.9 mm の点火プラグ (DENSO, IRIIDIUM POWER FC16HR19) が装着されている。燃焼室上面には石英ガラス製の観察窓が設置されており、燃焼の光学計測が可能である。燃焼の様子は高速カメラ (Vision Research, Phantom V7.3, 3000 fps) で撮影した。高速カメラにはマクロレンズ (Nikon, Ai Micro Nikkor, f105 mm, F2.8) が取り付けられている。撮影画像の解像度は 256×256 であり、PC に保存される。燃焼室およびリザーバタンク周囲にはラバーヒーターおよびガラスウール製断熱材が巻き付けられており、温度調節器 (アズワン, TJA-550P) によって壁面温度を任意に設定可能である。燃焼室内部の圧力は圧力センサ (Kistler, 6052C) によって計測した。圧力信号はチャージアンプ (Kistler, 5011) および A/D 変換器 (National Instruments, PCI-6132) を介して PC に取り込んだ。取得した圧力波形を基に見かけの熱発生率および図示熱効率を算出した。単位クランク角当たりの熱発生率は式(1)で表される。

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{1}{\kappa - 1} V \frac{dp}{d\theta} + \frac{\kappa}{\kappa - 1} p \frac{dV}{d\theta} \quad (1)$$

ただし Q は発熱量, κ は比熱比, V は体積, p は圧力である. 熱発生率導出の際, ローパスフィルタにより 1000kHz 以上の高周波成分を除去し, 39 点毎の移動平均を取ることでノイズを除去した. また, 図示仕事は PV 線図から閉曲線内を台形積分することで評価した. 加えて, 燃焼室側面には排ガスサンプリング用のアタッチメントが用意されており, 燃焼試験後, このアタッチメントを介してサンプリングバッグ内に排ガスを採集した. 最終ガスを NOx/O₂ 分析計 (島津, NOA-7000) によって解析することで, 排ガス中の NOx 濃度を計測した. NOx/O₂ 分析計の測定誤差は最大 4000 ppm で $\pm 0.5\%$ である.

実験手順は以下の通りである. まず, シリンダ/リザーバタンク間のバルブを開けたまま装置内を真空引きする. その後, 別途用意した予混合タンクから予混合気を充填する. 混合気組成については後に述べる. 充填後, 電動モーターによりモータリングを開始し, 規定回転数に到達するまで待機する. 規定回転数到達後, 下死点 (BDC, Bottom Dead Center) 時にバルブを閉じ, 上死点 (TDC, Top Dead Center) 付近において点火する. こうすることで, 圧縮・点火・膨張という火花点火機関の 1 サイクル工程を模擬することを可能とした.

3. 数値計算, 実験条件

既に述べた通り, 燃焼促進効果を確認する指標として燃焼期間が挙げられるが, 燃焼期間を左右する支配因子の一つは層流燃焼速度である. 本研究では実験条件を選定する際, あらかじめ層流燃焼速度を数値計算によって求めることで, 酸素富化による燃焼速度が確認できる条件を絞った. 本章ではその数値計算の条件および結果について述べる

3・1 計算条件

CHEMKIN-PRO を用いて 1 次元予混合層流燃焼速度を算出した. 燃料濃度はメタン/空気 (窒素 79 %, 酸素 21 %) 混合気を当量比 0.4 から 0.9 まで 0.1 刻みで変化させた時の体積分率として設定した. このように各等量比に応じて固定した燃料濃度に対して, 残りの酸素および窒素の体積分率を変化させることで, 酸素富化の効果を検証した. 燃料を除いた体積分率のうちの 21, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 % を酸素が, 残りを窒素が占めるよう変化させた. 計算条件を表 1 に示す. 表 1 中の濃度は全て体積分率であり, 本研究では酸素濃度は燃料を除いた混合気中における体積分率を指すこととする. 反応モデルとして GRI-Mech3.0 (55 化学種, 344 素反応式) を用いた. 圧力として設定した 2.43 MPa は RCEM の BDC で大気圧空気を充填後に圧縮させた時の圧力である. この圧力と燃焼室容積を用いて状態方程式から算出した燃焼室内温度を未燃ガス温度とした.

Table 1 Calculation conditions.

Equivalence ratio (O ₂ : 21 %)	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Fuel concentration [vol. %]	4.03	4.99	5.92	6.85	7.75	8.63
O ₂ concentration (w/o fuel) [vol. %]	21, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100					
Pressure [MPa]	2.43					
Initial temperature [K]	475					

3・2 計算結果

各燃料・酸素濃度において算出した層流燃焼速度を図 1 に示す. 全ての燃料濃度について, 層流燃焼速度は酸素濃度の増大に対してピーク値を示した. また, その時の酸素濃度は体積分率 40-50% だった. 本研究では酸素富化による燃焼促進が観察される条件を対象としているため, 酸素濃度の変化に対して層流燃焼速度の増大が観察された, 酸素濃度 21-50 % で実験を実施することとした. また, 図 1 から燃料濃度が小さくなるほど酸素富化の影響が小さくなることが分かる. 特に, 燃料濃度 5.92 % では層流燃焼速度の増大は 10 % 以下, 4.99 % および 4.03 % では 5 % 以下にとどまった. したがって, 上記と同様に酸素富化による効果を明らかにすることを目的として, 燃料濃度は 5.92 % 以上の条件で実験を実施することとした.

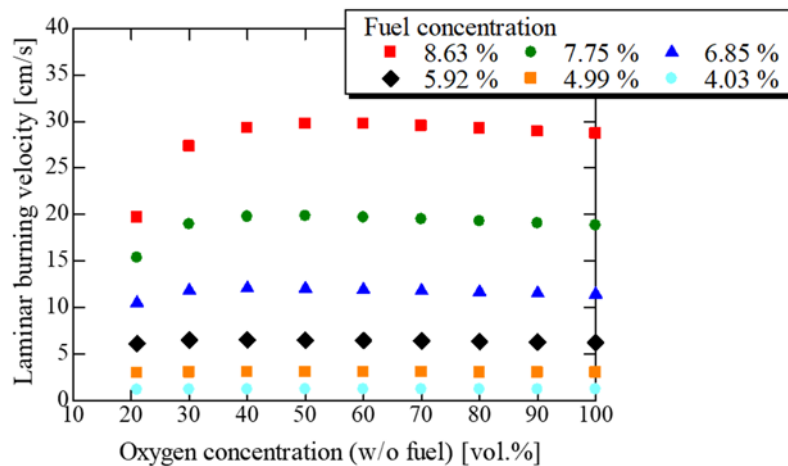


Fig. 1 Laminar burning velocity of methane-air-oxygen mixture with various concentration. As a reference, for example, when the fuel concentration is 8.63 %, the oxygen concentration including fuel corresponds to 19.2, 27.4, 36.5, 45.7, 54.8, 64.0, 73.1, 82.2, and 91.4 % respectively. The effect of oxygen concentration on laminar burning velocity was clearly observed when the fuel concentration exceeded 59.2 %.

3・3 実験条件

以上の数値計算による検証から選定した実験条件を表2に示す。RCEM内の燃焼特性・排気特性には燃料濃度や酸素濃度のみにならず、点火時期もまた大きな影響をおよぼす。層流燃焼速度が大きくなる条件では点火時期の遅角化が予想されるが、本研究は酸素富化の影響自身を調査することを対象とするため、全条件に応じて点火時期を変化させて、最適点火時期を採用することで点火による影響を除いた。すなわち、条件ごとに、2.5degずつ変化させながら図示仕事が増大となる点火時期を求め、これを最適点火時期（MBT）と定義した。また、各条件のMBTにおいて10回の燃焼実験を実施した。

Table 2 Experimental conditions.

Fuel concentration [vol. %]	5.92	6.85	7.75	8.63
O2 concentration (w/o fuel) [vol. %]	21, 30, 40, 50			
Ignition timing [deg. ATDC]	MBT			
Mixture temperature [K]	363			

4. 実験結果および考察

4・1 燃焼期間や図示熱効率の変化

次に、数値計算を基に選出した条件で実験を実施した。まず、酸素富化の効果がこれまで多く報告されている燃焼期間・熱効率について調査した。図2に各酸素・燃料濃度におけるMBT、燃焼期間、図示熱効率を数値計算による層流燃焼速度の計算結果とともに示す。燃焼期間は式(1)を積分して求める、あるクランクアングルまでの発熱量が燃料自体の総発熱量に対する割合（質量燃焼割合、MBF）を基に計算した。すなわち、熱発生率が正になってからMBFが0.8に達するまでの時刻を燃焼期間と定義した。MBTについては酸素濃度が增大するにつれて遅角化する傾向が見られた。ただし、その傾向は燃料濃度によって異なり、酸素濃度が6.85%以下では酸素富化による遅角化は2.5degだけであるのに対し、7.75%以上では10deg前後遅角化した。燃焼期間は酸素濃度の増大に伴い減少した。これは酸素富化による層流燃焼速度の増大が寄与していると考えられる。しかし、燃料濃度6.85%以上で酸素濃度40%および50%条件における燃焼期間を比較すると、層流燃焼速度はさほど変化していないにもかかわらず、燃焼期間は減少しており、このことは燃焼期間が単に層流燃焼速度の関数になっておらず、乱流などその他の要因によっても左右されることを示唆している。また、燃料濃度が5.92%時には燃焼期間

は酸素濃度が增大しても大きな変化が観察されなかったが、これは層流燃焼速度が変化しなかったことが原因と考えられる。図示熱効率は、燃料濃度 7.55 %と 8.63 %では酸素濃度の増加に伴い増加した。これは上で述べたように、燃焼期間の短縮が主な原因と考えられる。特に両燃料濃度について酸素濃度が 20 から 30 %に変化したときは、燃焼期間が大きく減少するとともに、図示熱効率も大きく増大する傾向が確認された。一方で、燃料濃度 6.85 %では酸素濃度の増加に伴う図示熱効率の増加が観察されたものの、酸素濃度 20 %から 30 %にかけては、燃焼期間が減少しているにもかかわらず、図示熱効率も減少した。これは MBT を 2.5 deg 毎に調節したためで、より精密に MBT を制御することで改善されると考えられる。また、燃料濃度 5.92 %では酸素濃度による図示熱効率の変化は観察されず、この挙動は燃焼期間や層流燃焼速度が大きく変化しない挙動と対応する。以上の結果から、メタン/空気混合気の当量比が 1 以下になる燃料濃度では、燃料濃度が大きいときは酸素濃度の増加に伴う MBT の遅角化、燃焼期間の短縮化および図示熱効率の増大が見られることが明らかとなった。一方で、燃料が希薄になるとこの傾向は抑制されることも明らかとなった。

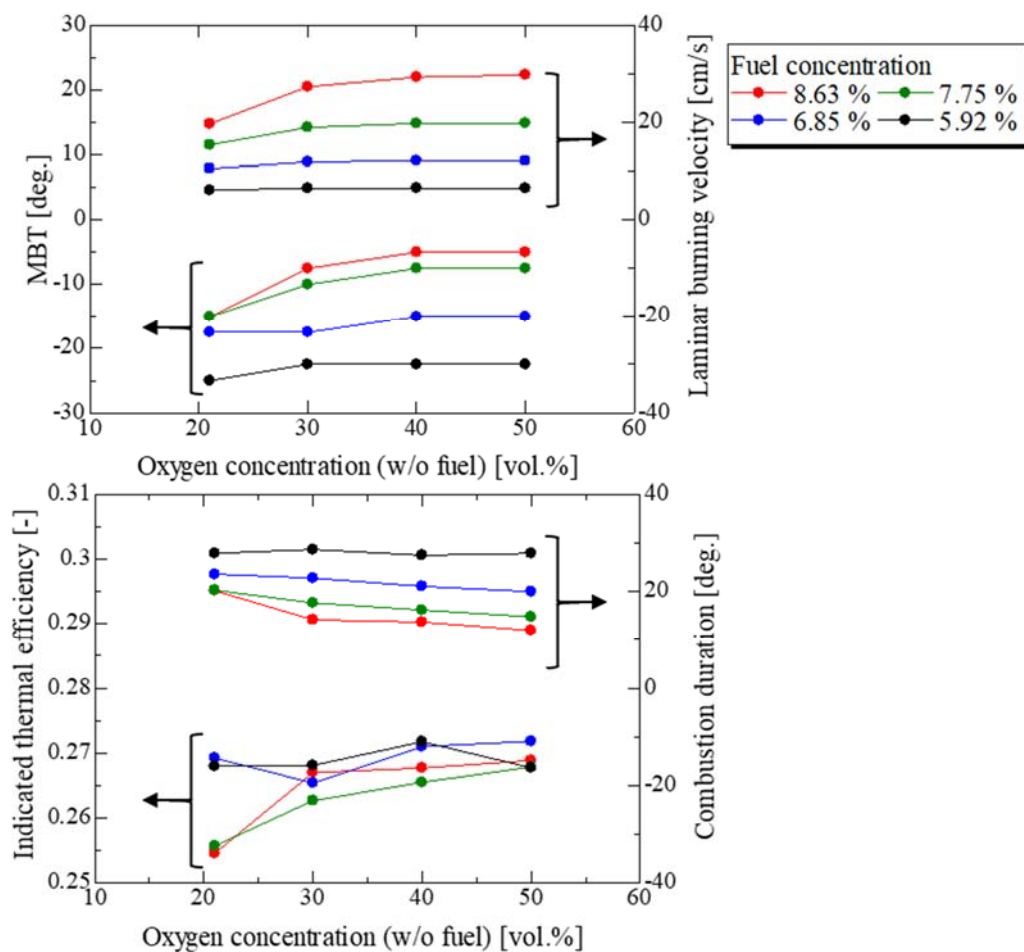


Fig. 2 Laminar burning velocities, MBT (upper), combustion durations and indicated thermal efficiencies of methane-air-oxygen mixture. When the fuel concentration exceeded 7.75 %, MBT was retarded, combustion duration was reduced, and indicated thermal efficiency increased with increase in the oxygen concentration. However, this trend was mitigated when the fuel concentration was less than 6.85 %.

4・2 圧力履歴と熱発生率に与える影響

次に、圧力履歴、熱発生率履歴を基に上記で確認された挙動について解析した。図 3 に各条件での実験で取得した圧力履歴および熱発生率を示す。酸素濃度の増大に伴い MBT が遅角化することは既述であるが、これに対応して圧力および熱発生率の立ち上がりも遅角化している。また、酸素濃度の増加に伴い熱発生率ピーク値は増大し、急峻化するが、燃料濃度が低いほどその傾向は小さくなり、燃料濃度 5.92 %ではほぼ抑制された。これら

のことから、燃料濃度が低い条件では、圧力履歴は酸素濃度変化の影響を受けにくいと考えられ、図 1,2 の層流燃焼速度と燃料濃度、酸素濃度の関係を示した計算結果と同様となった。

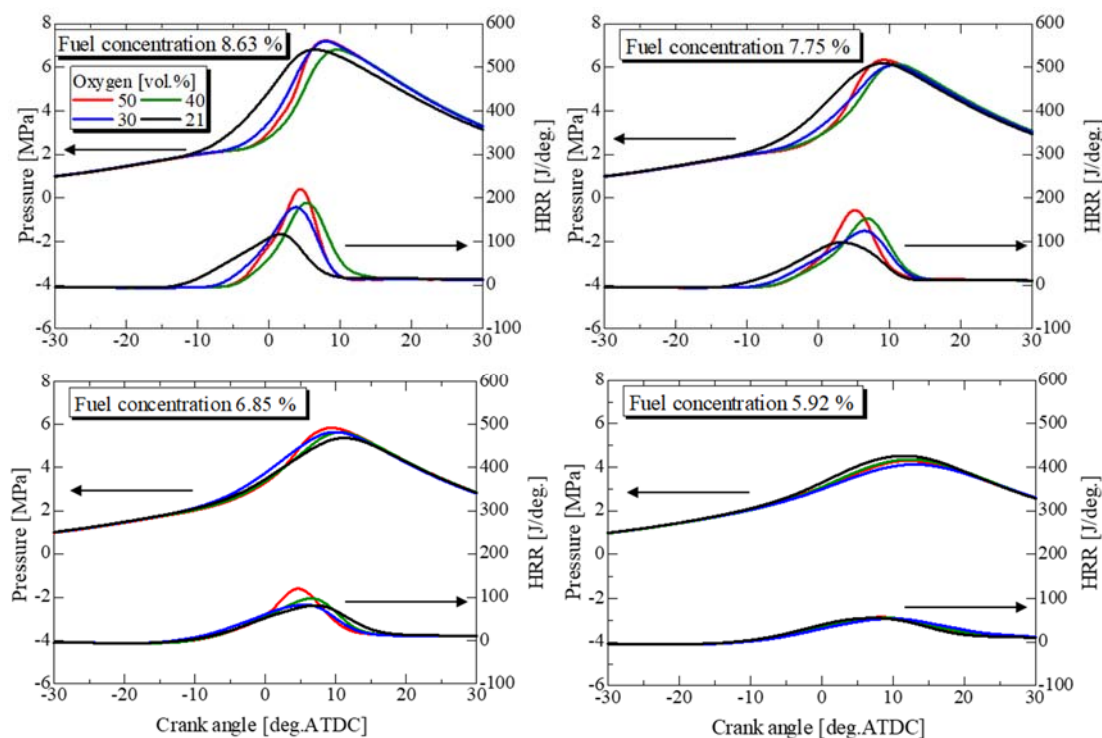


Fig. 3 Time histories of pressure and heat release rate of methane-air-oxygen mixture. Increasing rates of pressure and HRR at ignition increased with increase in oxygen concentration. However, this trend was mitigated with increase in fuel concentration.

4・3 燃焼画像から見た酸素富化の影響

次に、燃焼挙動の可視化計測を実施することで、酸素濃度の増大に伴う燃焼挙動への影響を光学的に調査した。図 4 に、酸素富化の効果が最も顕著に観察された燃料濃度 8.63 %における 1.6 deg 毎の燃焼画像を示す。写真左側の側面に点火プラグが設置されており、時間経過とともに右側へ火炎伝播している様子が確認される。ここで、各燃料濃度における火炎伝播速度を算出した。火炎伝播速度におよぼす壁面の影響を除くため、点火プラグとその反対側の端点を結ぶ線分の 20 %および 80 %位置を火炎前面が通過する平均速度を火炎伝播速度と定義し、算出した。ただし、後述のように、火炎伝播中にエンドガスの自着火が発生した場合は自着火が発生する直前までの画像から算出した。また、火炎伝播速度は各条件 10 回の実験の平均値で評価している。

図 5 に各実験条件での平均火炎伝播速度の結果を示す。図 5 より燃料濃度 7.75 %以上では酸素濃度増大に伴い火炎伝播速度が増大する傾向が観察された。また、燃料濃度 6.85 % 以下では酸素濃度の増加による火炎伝播速度の変化は見られなかった。図 1 でも示されたように、燃料濃度 6.85 %以上では酸素濃度の変化とともに層流燃焼速度が 10 %以上増大するが、5.92 %以下では 10 %以下の増大に留まったことを考慮すると、燃料希薄条件で酸素濃度の増大による火炎伝播速度の増加が見られなかったのは、層流燃焼速度の変化が限定的であったためと考えられる。

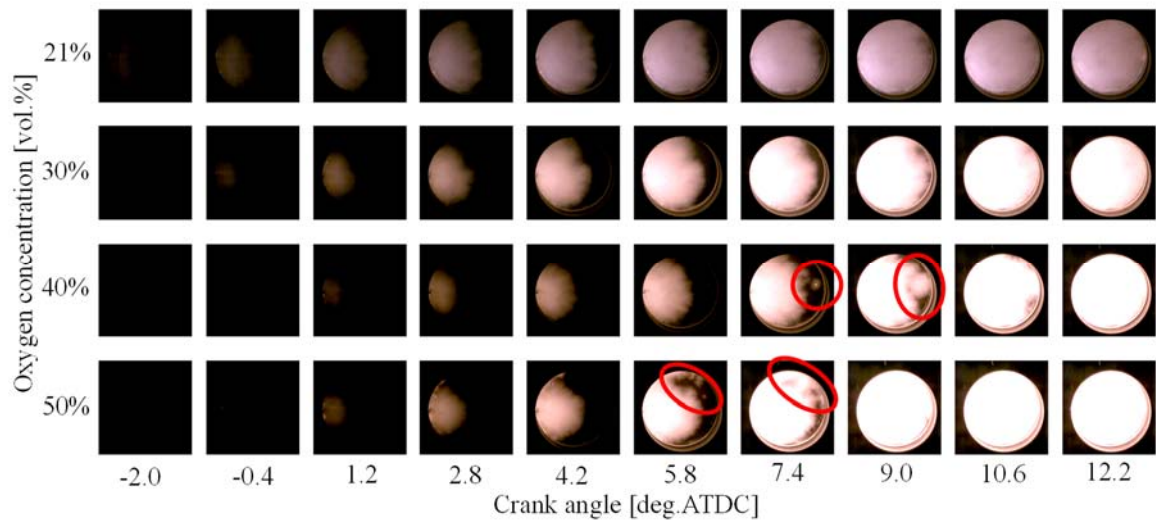


Fig. 4 Luminous flame images of methane-air-oxygen mixture. Red circle represents the location where the end-gas began to ignite. The flame propagated from the left side where the spark plug was mounted on the wall.

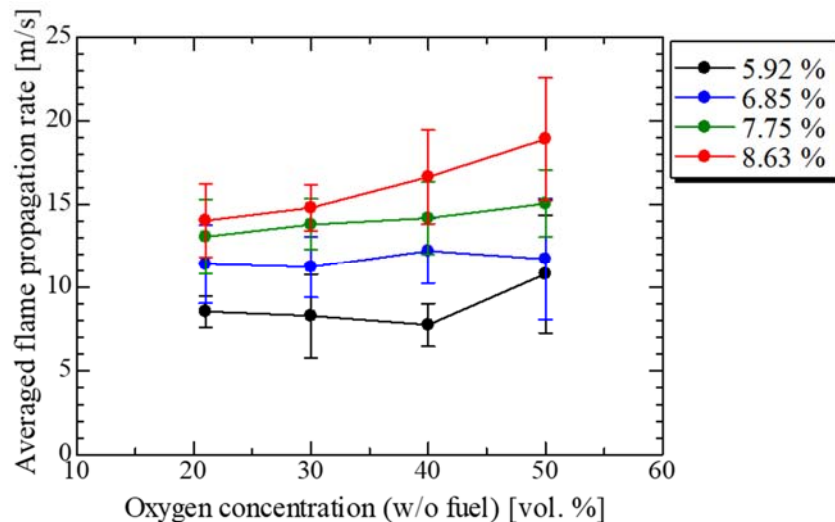


Fig. 5 Averaged flame propagation rates of methane-air-oxygen mixtures. Averaged flame propagation speeds increased with increase in the oxygen concentration. However, when the fuel concentration was 5.92 %, no effect of oxygen concentration on averaged flame propagation rate was observed.

また、図4の赤枠に示されるように酸素濃度40%以上ではエンドガスの自着火と見られる発光が観察され、その着火時期も酸素濃度40%よりも50%で進角化していることが確認される。この発光がエンドガスの自着火であることを確認するために、図6に酸素濃度40%および50%の自着火発生前後の燃焼画像と1 kHz以上の高周波圧力の履歴を示す。図6より、燃焼画像内のエンドガス付近での発光時に圧力振動が確認できるため、圧力波形からも自着火が発生していることが分かる。また、酸素濃度40%と比べて酸素濃度50%では、自着火による圧力振動の発生時期が進角化した。これらのことから、酸素濃度の増加がエンドガスの自着火時期を進角化させたものと考えられる。

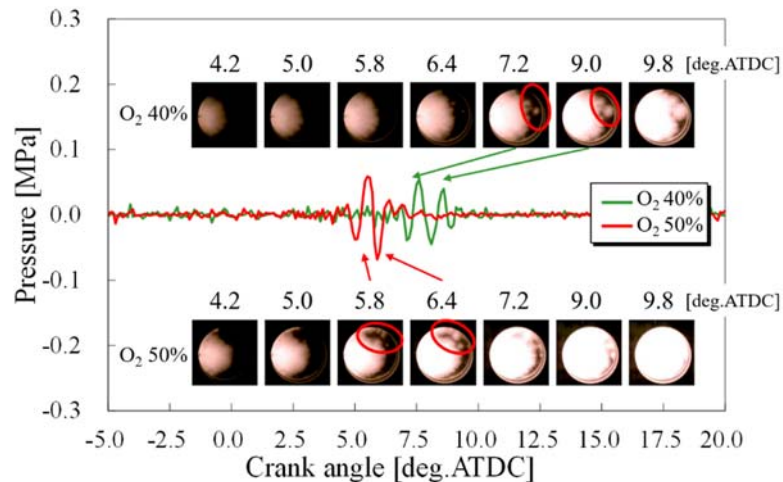


Fig. 6 Time histories of pressure above 1000 Hz and flame images of methane-air-oxygen mixtures. Pressure fluctuations were observed when the end-gas was ignited. Autoignition of end-gas was accelerated when the oxygen concentration was 50 %.

図2から、本研究条件において燃料濃度が7.75および8.63%の時は、酸素濃度の増大とともに燃焼期間が短縮し、図示熱効率が向上することが確かめられた。一方で、酸素濃度を40%から50%に変化させても、層流燃焼速度は大きく変化せず、ゆえに酸素富化による層流燃焼速度の増大のみが燃焼期間の短縮に貢献したものとは考えにくい。一方で、酸素濃度40%および50%の条件ではエンドガスの自発点火が生じており、これが影響したものと考えられる。このことを検証するため、各条件での混合気組成において定容燃焼の自着火計算を実施した。表3に計算条件を示す。計算ツールとしてCHEMKIN-PROの密閉系完全予混合反応系モデルを使用した。このモデルは密閉系、完全混合を仮定した0次元反応モデルである。反応メカニズムは層流燃焼速度計算時と同様にGRI-Mech3.0を使用した。燃料濃度は8.63%とし、酸素濃度を21%、30%、40%、50%とした。初期圧力は燃焼実験で自着火が確認された際の代表的な燃焼室内圧力としており、この圧力と、質量燃焼割合から既燃燃料が完全燃焼したと仮定して算出した燃焼室内の混合気組成を用いて、状態方程式より自着火時の代表的な燃焼室内温度を算出して計算の初期温度とした。

図7に計算結果を示す。燃料濃度を一定とし酸素濃度を増大させることで、予混合気の自着火時期が早まることが計算より示された。特に、酸素濃度40%と50%の自着火時期の差を確認すると、計算結果では約2ms、実験結果ではクランク角で約2deg.であった。本研究ではRCEMの回転数は200rpmとしているため、2deg.は約1.7msに相当しており、定量的にも酸素濃度の増大による点火遅れの短縮の効果と燃焼期間の短縮の効果が一致している。一方で、酸素濃度を30%もしくは21%とすると点火遅れは40%時に比べて3.5ms、9ms長くなるが、ここまで長くなるとエンドガスの自着火が発生する前に火炎前面が右壁まで伝播するため、エンドガスの自着火は観察されない。したがって、酸素濃度21%から30%にかけての燃焼期間の短縮は自着火時期の増大よりもむしろ層流燃焼速度の増大によって説明できることを示している。

以上の燃焼室内光学計測と0次元自着火計算から、酸素富化によって火炎伝播速度が増大することおよびエンドガスの自着火が発生し、その時刻が進角化することが示された。

Table 3 Calculation conditions of 0-D ignition simulation.

Fuel concentration [vol. %]	8.63			
O2 concentration (w/o fuel) [vol. %]	21	30	40	50
Initial pressure [MPa]	4.0			
Unburned gas temperature [K]	1000			

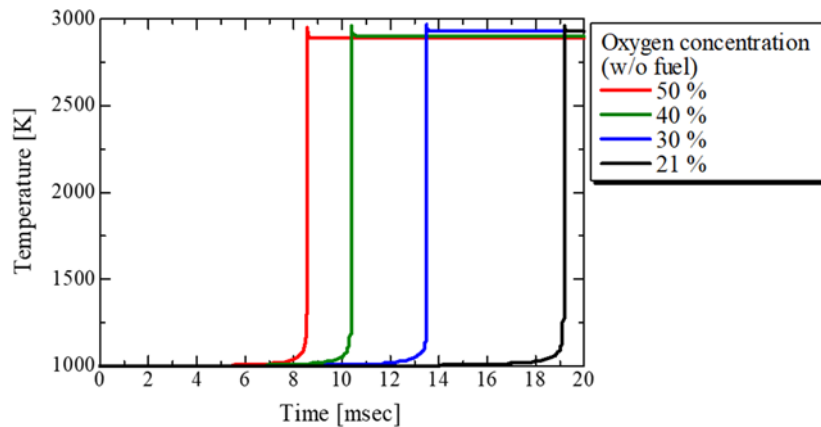


Fig. 7 Time histories of temperature of end-gas of methane-air-oxygen mixtures. Ignition delay became short with increase in the oxygen concentration.

4・4 NO_x 生成率と酸素濃度の関係

酸素富化による燃焼強度の増大が確認される一方で、NO_x 生成の促進が従来懸念されてきた。そこで、希薄燃焼時の酸素富化の NO_x 生成に及ぼす影響を調査した (図 8)。酸素濃度の変化により図示仕事が増加することを考慮し、実際に計測された NO_x 排出量を図示仕事で除した値を示している。先行研究では酸素富化によって火炎温度が増大することにより、サーマル NO_x が増大することが報告されている (梶谷他, 1994)。しかしながら、本研究では燃料濃度 6.85 %以上では酸素濃度の増加に伴い NO_x 排出量が減少する一方で、燃料濃度 5.92 %ではほとんど変化が見られないという結果が得られた。そこで、断熱火炎温度におよぼす酸素濃度の影響を調査した。図 9 に各条件における断熱火炎温度を示す。図 9 に示されるように、燃料濃度に応じて断熱火炎温度は変化するものの、酸素濃度に対してはほとんど影響を受けないことが分かる。したがって、図 8 で燃料濃度 6.85 %以上において酸素濃度の増加に伴う NO_x 排出の減少が観察された原因は燃焼期間の減少によるものと考えられる。新井らの研究では、NO_x の排出量は、酸素濃度とガス温度、高温場での停滞時間に影響を受けると報告されている (1977) 本研究では酸素濃度の増大に伴い燃焼期間が短縮された燃料濃度 6.85 %以上では単位仕事当たりの NO_x 排出量が低下し、燃焼期間の変化が限定的だった燃料濃度 5.92 %では NO_x 排出量もほとんど変化をしなかったと考えられる。

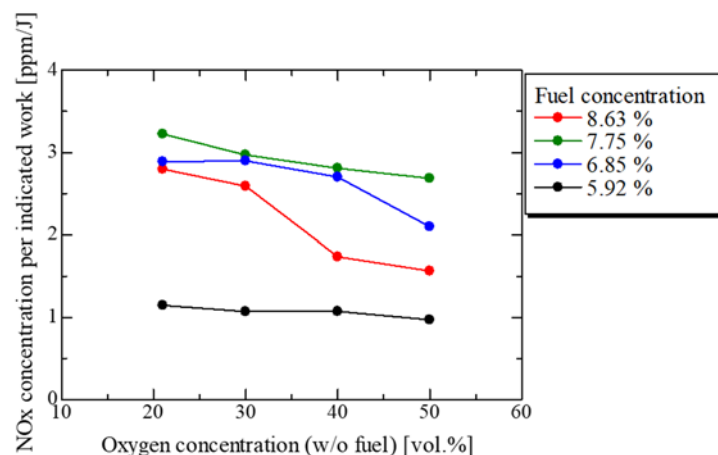


Fig. 8 Concentrations of NO_x emission per indicated work of methane-air-oxygen mixture. When the fuel concentration exceeded 6.85 %, the NO_x concentration decreased with increase in oxygen concentration. However, when the fuel concentration was 5.92 %, it did not significantly change.

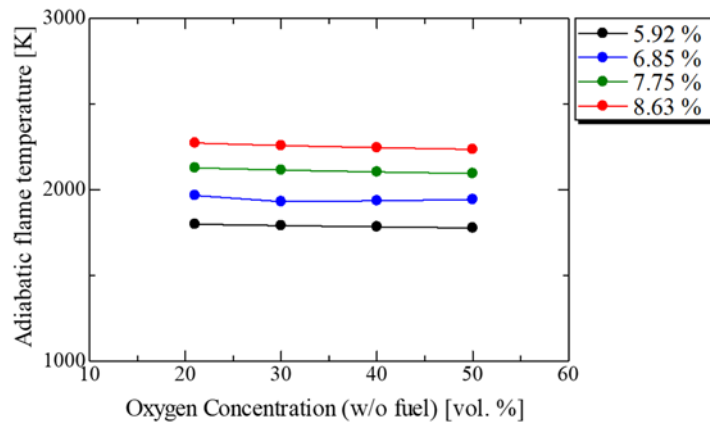


Fig. 9 Adiabatic flame temperature of methane-air-oxygen mixture. The adiabatic flame temperature keeps almost constant regardless of the oxygen concentration.

5. 結 言

火花点火機関における希薄燃焼に対する酸素富化の効果を明らかにすることを目的として、RCEMを用いたメタン・空気予混合気の火花点火実験を実施した。燃焼中の圧力を圧力センサで取得し、熱発生率、図示熱効率を評価した。また、高速カメラによって自発光を撮影し、酸素富化による火炎伝播挙動の観察を実施した。以下の知見を得た。

- ・層流燃焼速度は酸素の増大に対してピーク値を示す。しかしながら燃料濃度が低い時は酸素濃度変化のおよぼす影響は小さくなる。
- ・酸素濃度の増大に伴い、燃焼期間は短縮し、図示熱効率は増大する。しかし、燃料濃度が低い時はこのような挙動は抑制される。
- ・燃料濃度が比較的大きい時、酸素濃度の増大に伴い、火炎伝播速度は増大する。これは層流燃焼速度の増大に起因すると考えられる。
- ・燃料／空気混合気の当量比が1に近い希薄混合気の燃料濃度の下で、酸素濃度を増大させるとエンドガスの自着火が観察される。また、酸素濃度が高いほど自着火に至るまでの時刻が短くなる。
- ・燃料／空気混合気の当量比が1に近い希薄混合気の燃料濃度の下で、酸素濃度を増大させると単位仕事当たりのNO_x排出量は低下する。一方、燃料濃度をさらに希薄にすると燃焼期間は変化せず、NO_x排出量もほとんど変化しない。

文 献

- 新井紀男, 東辰夫, 架谷昌信, 杉山幸男, N₂・O₂成分系での Thermal NO_xの生成, 化学工学論文集, Vol.3, No.3 (1977), pp.243-247.
- Caton, J. A., The effects of oxygen enrichment of combustion air for spark-ignition engines using a thermodynamic cycle simulation, Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference (2005), pp.135-147.
- 飯田訓正, 澤田隆, 佐藤豪, ディーゼル機関の微粒子状排出物質の低減に関する研究: 第2報, 酸素富化給気と微粒子状排出物質の性状, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.52, No.479 (1986), pp.2753-2760.
- 飯田訓正, 渡辺潤二郎, 津幡義道, 佐藤豪, 酸素および不活性ガス給気による直接噴射式ディーゼル機関の微粒子とNO_xの低減効果, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.56, No.531 (1990), pp.3573-3579.
- 池上詢, 塩路昌宏, 朱啓明, 佐藤謙一郎, 高柳文成, 火花点火ガス機関の希薄燃焼, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.59, No.562 (1993), pp.2094-2099.
- 梶谷修一, 七尾勇一郎, 微量酸素富化空気駆動火花点火機関の研究, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.60, No.571 (1994), pp.1081-1086.
- 金野満, 陳之立, 梶谷修一, 舟串卓也, 酸素富化空気駆動火花天火機関の研究(暖機運転時の未燃炭化水素排出特性について), 日本機械学会論文集 B 編, Vol.64, No.621 (1998), pp.1581-1586.

- Machacon, H. T. C., 志賀聖一, 柄沢隆夫, 中村壽雄, 大量 EGR と酸素富化によるディーゼル燃焼制御の可能性, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.63, No.605 (1997), pp.336-343.
- Murase, E., Moriue, O., Hashimoto, H., Nakashima, F. and Komai, Y., A study on the direct control of the start of homogeneous charge compression ignition combustion by pulsed flame jet with rapid compression expansion machine, International Journal of Engine Research, Vol.15, No.5 (2014), pp.549-556.
- Quader, A. A., Exhaust emissions and performance of a spark ignition engine using oxygen enriched intake air, Combustion Science and Technology, Vol.19, No.1-2 (1978), pp.81-86.
- 佐藤豪, 澤田隆, 飯田訓正, ディーゼル機関の微粒子状排出物質の低減に関する研究: 第 1 報, 酸素富化給気の効果について, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.51, No.467 (1985), pp.2479-2486.
- Seers, P., Foucher, F. and Mounaïm-Rousselle, C., Influence of O₂-enriched intake air with CO₂ dilution on the combustion process of an optically accessible spark-ignition engine, International Journal of Engine Research, Vol.14, No.1 (2013), pp.34-44.
- Shrestha, S. B., LeBlanc, G., Balan, G. and De Souza, M., A before treatment method for reduction of emissions in diesel engines, SAE Technical Paper, No. 2000-01-2791(2000), DOI: 10.4271/2000-01-2791.
- 周斌, Machacon, H. T. C., 志賀聖一, 譚達明, 柄沢隆夫, 小保方富夫, 中村寿雄, ニューラルネットワークの手法を用いた吸気ガス組成によるエンジン性能制御とその予測, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.66, No.644 (2000), pp.1243-1248.

References

- Arai, N., Higashi, T., Hasatani, M. and Sugiyama, S., Formation of thermal NO_x in binary system of Nitrogen-Oxygen, Kagaku Kogaku Ronbunshu, Vol.3, No.3 (1977), pp.243-247 (in Japanese).
- Caton, J. A., The effects of oxygen enrichment of combustion air for spark-ignition engines using a thermodynamic cycle simulation, Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference (2005), pp.135-147.
- Iida, N., Sawada, T. and Sato, T., Study of the reduction of particulate emission from a direct diesel engine (2nd report, oxygen-enriched charging and characteristics of particulates), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.52, No.479 (1986), pp.2753-2760 (in Japanese).
- Iida, N., Watanabe, J., Tubata, Y. and Sato, T., Influence of intake oxygen and carbon dioxide concentration on NO_x and particulate, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.56, No.531(1990), pp.3573-3579 (in Japanese).
- Ikegami, M., Shioji, M., Zhu, Q. M., Sato, K. and Takayanagi, F., Lean-burning characteristics of a gas-fueled spark-ignition engine, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.59, No.562 (1993), pp.2094-2099 (in Japanese).
- Kajitani, S. and Nanao, Y., Spark ignition engines operated with minutely oxygen-enriched air, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.60, No.571 (1994), pp.1081-1086 (in Japanese).
- Konno, M., Chen, Z., Kajitani, S. and Funakushi, T., A study of S.I. engine operated with oxygen enriched air (unburned hydrogen characteristics during warming-up), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.64, No.621 (1998), pp.1581-1586 (in Japanese).
- Machacon, H. T. C., Shiga, S., Karasawa, T. and Nakamura, H., A feasibility study on the control of diesel combustion by high EGR ratio and oxygen enrichment, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.63, No.605 (1997), pp.336-343 (in Japanese).
- Murase, E., Moriue, O., Hashimoto, H., Nakashima, F. and Komai, Y., A study on the direct control of the start of homogeneous charge compression ignition combustion by pulsed flame jet with rapid compression expansion machine, International Journal of Engine Research, Vol.15, No.5 (2014), pp.549-556.
- Quader, A. A., Exhaust emissions and performance of a spark ignition engine using oxygen enriched intake air, Combustion Science and Technology, Vol.19, No.1-2 (1978), pp.81-86.
- Sato, T., Sawada, T. and Iida, M., Study on reduction of particulate engine emission from a direct injection diesel engine (1st report, effects of oxygen enriched charging), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.51, No.467 (1985), pp.2479-2486 (in Japanese).
- Seers, P., Foucher, F. and Mounaïm-Rousselle, C., Influence of O₂-enriched intake air with CO₂ dilution on the combustion process of an optically accessible spark-ignition engine, International Journal of Engine Research, Vol.14, No.1 (2013),

pp.34-44.

Shrestha, S. B., LeBlanc, G., Balan, G. and De Souza, M., A before treatment method for reduction of emissions in diesel engines, SAE Technical Paper, No. 2000-01-2791 (2000), DOI: 10.4271/2000-01-2791.

Zhou, B., Machacon, H. T. C., Shiga, S., Tan, D., Karasawa, T., Obokata, T. and Nakamura, H., A neural network prediction method for engine behavior study, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.66, No.644 (2000), pp.1243-1248 (in Japanese).