

EGR併用による 乳化燃料使用ディーゼル機関のNO_x低減

吉本康文*, 塚原 実**

(平成9年10月31日 受理)

NO_x Reduction with EGR in a Diesel Engine Using Emulsified Fuel

Yasufumi YOSHIMOTO* and Minoru TSUKAHARA**

Regulations regarding NO_x and smoke emissions from diesel engines have become stricter in recent years, and improvements in specific fuel consumption (BSFC) are still an important issue. A simultaneous reduction in NO_x, smoke, and BSFC is difficult. However, diesel engines using water-in-gas oil emulsified fuel have shown simultaneously improvements in NO_x, smoke and BSFC. To achieve further reductions in NO_x emissions, this paper investigates the effect of EGR (Exhaust Gas Recirculation) on engine performance with emulsified fuels. The influence of hot EGR (EGR ratio 0-35%) on engine performance with various water to fuel ratios at two load conditions (BMEP=0.52MPa and 0.26MPa) were investigated. It was confirmed that at 11% EGR with the emulsified fuel and at the rated output (BMEP=0.52MPa) there was a significant reduction in NO_x concentration without worsening smoke density and BSFC. For example, compared with gas oil, an emulsified fuel with a 0.51 water mass ratio reduces NO_x by 58% and a 0.79 water mass ratio reduces NO_x by 76%.

Key words: diesel engine, combustion, emulsified fuel, EGR, NO_x reduction, specific fuel consumption, smoke density

1. まえがき

環境保全の立場から、ディーゼル機関から排出される窒素酸化物 (NO_x) と粒子状排出物 (すす) のより一層の低減が望まれている一方、燃料消費率の改善もなお重要な課題となっている。周知のように、NO_x は良好な燃焼条件のもとで多量に生成する特性をもつことから、燃料消費率および微粒子と同時に低減することは困難である。しかし、先に著者らは直接噴射式ディーゼル機関に乳化燃料を適用した結果、黒煙濃度の悪化なしに NO_x を大幅に低減できること、さらに適切な条件のもとでは燃料消費率の改善も同時に得られることを報告した^{1)~6)}。

本論文は、NO_x のさらなる削減をねらいとして、乳化燃料使用ディーゼル機関に EGR を併用した際の効果について実験的に調べることを目的としている。ディーゼル機関に対して EGR を適用する研究は、これまでに数多くの報告がなされてきており、^{7)~11)} 近年、小形

* 機械制御システム工学科 助教授

** 上越教育大学学校教育学部

エンジンに限らず、中型エンジン（商用車用）の分野でも実用化が進められている状況にある。しかし、これらの報告でも指摘されているように、一般に高負荷域で EGR を行った場合には黒煙濃度と燃料消費率との大幅な増大を伴い、このことが実用上のひとつの障害となっている。一方、乳化燃料を用いた際の燃焼改善効果は高負荷領域でもっとも期待できる¹⁾ことから、これに EGR を併用することによって、燃焼を悪化させずに NO_x をよりいっそう削減できる可能性が考えられる。

実験の結果、乳化燃料を用いて 11% 程度の EGR を行った場合には、定格出力において、EGR のない軽油運転時の最良燃費率を保ちながら、黒煙濃度を増大させずに NO_x を大幅に削減できることがわかった。以下、その詳細について報告する。

2. 記 号

r : EGR 比率	η_{gh} : 発熱の等容度
G_w : 乳化燃料の水添加率	V : シリンダ内のガス容積 m^3
q_0 : EGR なしの時の充填新気量 m^3/s	P : シリンダ内ガス圧力 MPa
q_{EGR} : EGR ありの時の充填新気量 m^3/s	ε : 圧縮比
θ : クランク角度 $^\circ$ CA	ε_θ : 任意の θ に対応する圧縮比
Q : 発生熱量 MJ/kmol	κ : ガスの比熱比
Q_E : 供給燃料の燃焼熱量 MJ/kmol	BSFC : 正味燃料消費率 MJ/(kWh)
Q_C : シリンダ壁への冷却熱量 MJ/kmol	BMEP : 正味平均有効圧 MPa

3. 実験装置, および方法

3.1 実験装置の概要 実験に使用した機関は、たて形・水冷・単シリンダ、無過給のピストンに球形の燃焼室を有する四サイクル直接噴射式ディーゼル機関であり、機関および燃料噴射系統の諸元は表 1 に示すとおりである。

図 1 に、実験装置の概要を示す。本実験では排気ガスを強制冷却せずに環流する、いわゆる Hot EGR 法を用いた。図 1 に示すように、排気管より分岐した排出ガスの一部を吸気管に直接環流する方法を採用し、EGR バルブの開度を変えることにより環流ガス流量を調整した。

なお、本実験における EGR 比率 r を、次式で定義する。

$$r = \frac{q_0 - q_{EGR}}{q_0} \quad (1)$$

Table 1 Engine specifications

Engine Model	4 Cycle Water Cooled Single Cylinder
Bore \times Stroke	110 mm \times 150 mm
Stroke Volume	1425 cc
Compression Ratio	17.4
Combustion Chamber	Direct Injection (BIP Type)
Rated Output	7.35 kW/1200 rpm (BMEP = 0.52 MPa)
Injection Pump	Bosch A (Plunger = 8 mm)
Injection Nozzle	DN4SD24 : Throttle
Opening Pressure	19.6 MPa

吸入空気温度, 排気ガス温度, 冷却水入口, および出口温度の計測には熱電対を用い, デジタルサーモメータで測定した。

実験は, 潤滑油温度 $54 \pm 2^\circ\text{C}$, 機関回転速度 1200rpm 一定のもとで実施した。

3.2 供試燃料 供試燃料としては, 市販の自動車用軽油 (比重 0.841, セタン指数 57.5) およびこれと水との乳化燃料を用いた。乳化燃料の作製方法と安定性に関してはすでに前報²⁾において示したとおりである。すなわち, 軽油に対して 1% mass の乳化剤 (イオネット S-2, HLB = 6) を加え, 静止形管内混合器を用いて混合することによって油中水滴形のエマルジョンを作製した。水添加率 G_w は, 軽油に対する水の質量割合で定義し, $G_w = 0 \sim 0.79$ mass の範囲を対象として実験を行った。

3.3 測定装置 インジケータ線図の測定にはひずみゲージ式の指圧計を使用し, 噴射弁リフトおよびクランク角度はそれぞれ電磁式変位計, およびフォトインタラプタにより検出して, これらを 4 現象シンクロスコープに入力して観測・記録した。熱発生率の計算に際しては, 燃焼解析装置 (小野測器製 CB-366) を用いて連続 100 サイクルにわたるシリンダ内圧力を採取し, その圧力データの平均値を用いて著者らの作成したプログラムによって算出した。なお, 発熱の等容度 η_{gh} は式 (2) に示すシリンダ内ガスエネルギー平衡式を仮定することによって, 式 (3) から求めた。

$$dQ = dQ_E - dQ_C = \frac{1}{\kappa - 1} (\kappa PdV + Vdp) \quad (2)$$

$$\eta_{gh} = \frac{1}{Q} \int \frac{1 - \frac{1}{\varepsilon_\theta^{\kappa-1}}}{1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}} \frac{dQ}{d\theta} d\theta \quad (3)$$

排気ガス中の NOx の測定には CLA (ダイレック製 MODEL DY-8400), HC については FIA (島津製作所製 GC-9A), CO の測定には NDIR (堀場製作所製 MEXA-201F) をそれぞれ使用した。また, 黒煙濃度はボッシュ式スモークメータ (ゼクセル製 10SM-10B) を用いて測定した。

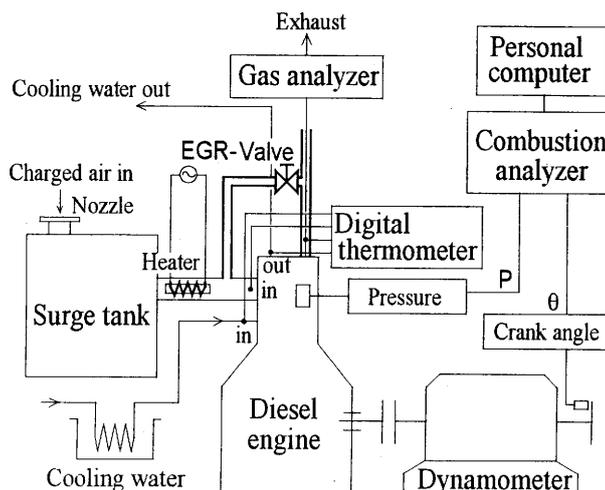


Fig.1 Experimental apparatus

4. 実験結果, および考察

4.1 機関性能に及ぼすEGR比率の影響

図2は、軽油と $G_w=0.51$ mass の乳化燃料を用いて、負荷を2とおり (BMEP=0.52MPa; 定格出力, および BMEP=0.26MPa) に設定し, EGR 比率を変えた際の燃料消費率 (BSFC), NOx, および黒煙濃度を比較して示したものである. なお, 燃料噴射時期は 23°CA.BTDC 一定としたが, この噴射時期は軽油使用時における供試機関の最良燃費率点に相当する. 図2に示すように, NOx はいずれの燃料も EGR 比率にほぼ比例して低減する. 負荷の違いについては, 定格出力運転の方が低減率は高く, また, 乳化燃料では水添加と EGR との相乗効果によって, 軽油に比べより一層の NOx 低減が図られている. 一方, 軽油を用いて定格出力で運転した場合には, EGR 比率が増すにつれて黒煙濃度と燃料消費率はともに大幅に増大する傾向を示す. すなわち, 高負荷領域の EGR については, 燃焼が不十分になり, 性能悪化の原因になる.

これに対して, 乳化燃料では EGR の有無にかかわらず, 高負荷運転時における黒煙濃度, および燃料消費率は軽油に比べ改善される. この相違について調べるために燃焼解析を行って, 検討した. 図3は, 軽油と乳化燃料における熱発生率を比較して示したものである. 図3に示されるように, 軽油運転では EGR 比率の増大とともに燃焼が緩慢になり, 等容度 η_{gh} が低下するのに対して, 乳化燃料を用いた場合には後燃えが少ない. したがって EGR 比率が

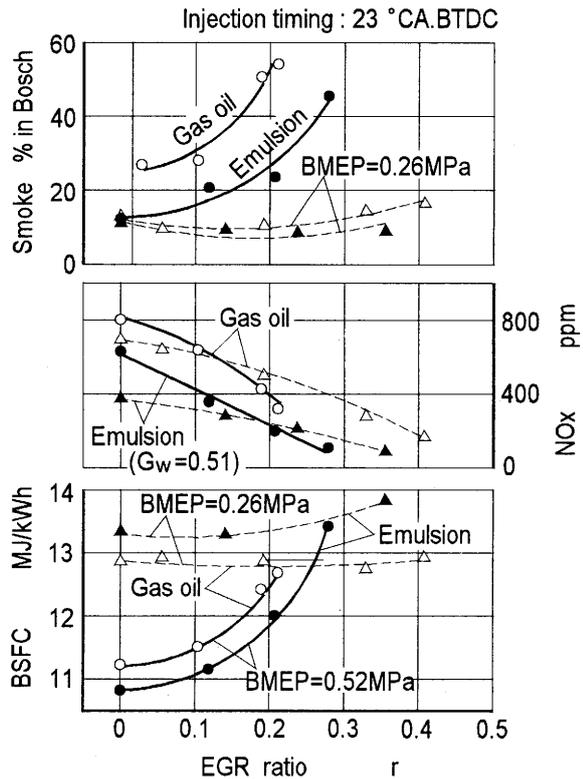


Fig. 2 BSFC, NOx, and smoke density at different EGR ratios

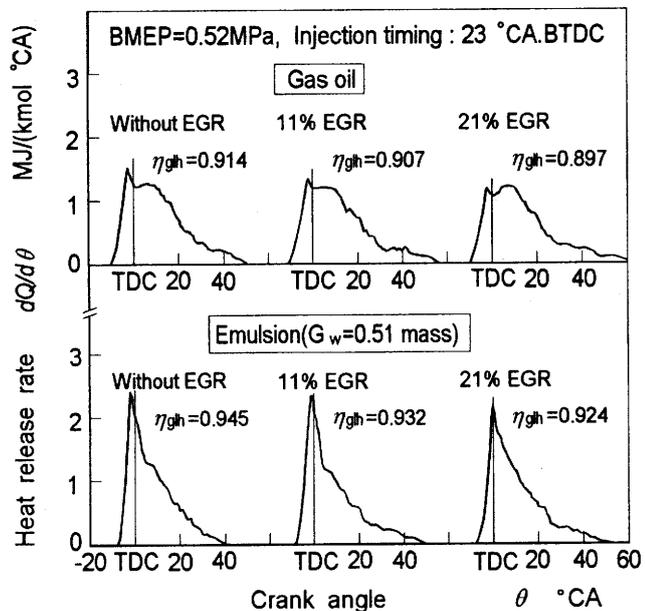


Fig. 3 Comparison of heat release rate

11%程度までは機関性能の悪化を抑え得たものと考えられる。

なお、図2において明らかなように、中負荷である BMEP = 0.26MPa では、多量の EGR を行っても燃料消費率と黒煙濃度の増加はほとんどなく、確実に NOx の低減が得られる。したがって、通常燃料に対する EGR の適用は、中・低負荷領域における NOx の低減対策として有効な手段である。しかし、中・低負荷域で乳化燃料を用いた場合には、高負荷とは反対に、軽油に比べ燃料消費率は増加する。

4.2 EGRと水添加がNOxと黒煙濃度に及ぼす影響

燃焼に対して水添加燃料と EGR の両方が影響する場合を想定し、燃焼ガスの化学平衡計算により断熱火炎温度を算出するとともに、その際生成する NO を反応動学的に解析した。図4は、質量保存則とエネルギー保存則を用いて、炭化水素燃料が定圧燃焼する場合の断熱火炎温度を当量比に対して計算した結果を示す。燃焼生成物として CO, CO₂, H, H₂, H₂O, N₂, NO, O, O₂, および OH の 10 種を仮定し、計算は水谷の方法¹²⁾をもとにして行った。ここで、燃料は n-ヘキサデカン (C₁₆H₃₄) で代表し、雰囲気は大気圧とした。また、EGR の場合には、排気の r×100 % (vol.) が標準状態の空気と予混合するモデルを仮定した。

図4に示されるように、標準燃料に対して G_w=0.5 mass の水添加を行った場合、ならびに r=0.1 の EGR を単独で行った場合には、量論混合比における理論最高到達温度がそれぞれ 100K, および 140K 程度低下する。さらに、水添加と EGR を組み合わせた場合には、280K ほどの温度低下を示すことがわかる。

つぎに、NO の生成反応として拡大 Zeldovich 機構¹³⁾を仮定し、NO 生成量の時間履歴を求めてみた。図5は、量論混合比における燃焼ガス

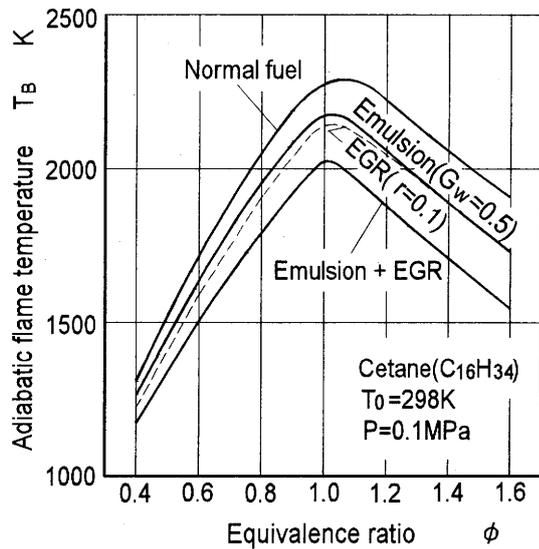


Fig. 4 Adiabatic flame temperature using emulsified fuel and EGR

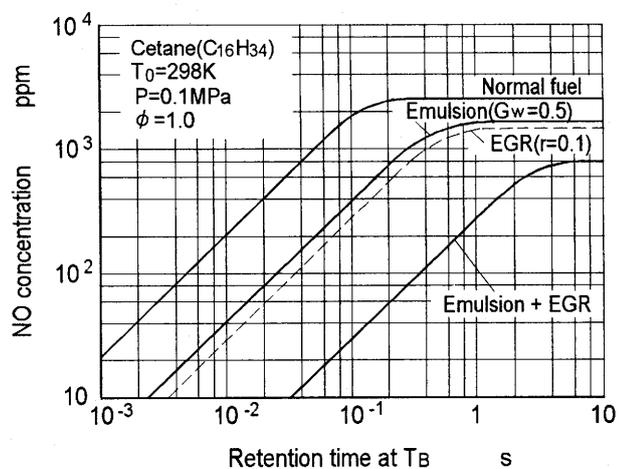


Fig. 5 Comparison of NO concentration using emulsified fuel and EGR

が断熱火炎温度一定のまま保持された場合についての計算結果を示す。ここで、NOの初期濃度は0とし、反応速度定数は文献(13)に示された値を用いた。図5から明らかのように、燃焼ガス温度がNO生成に及ぼす影響は大きく、断熱火炎温度が低下するほどNOの生成速度および平衡濃度は著しく低下する。したがって、水添加とEGRを併用した際のNO_x濃度低減に対しては、熱容量の増大による燃焼域の温度降下が大きな要因になっていることが考えられる。

なお、実際のディーゼル機関にEGRを適用した場合のNO_x低減に対しては燃焼および膨張の時間経過による火炎温度低下のほかに燃焼域における酸素濃度低下の影響も考えられるので、これについてはさらに検討が必要である。

図6は、環流ガス中の余剰空気を考慮して求めた実質的な空気過剰率 λ_a を横軸にプロットし、これと黒煙濃度との関係を示したものである。いずれの燃料もEGRの有無に関わらず、黒煙濃度は実質的な空気過剰率 λ_a によって定まるといえる。図6に示されるように、乳化燃料を用いた場合には低空気過剰率の場合に黒煙濃度が顕著に低減する。これに関しては、噴霧の運動量増大やマイクロ爆発などにより燃料と空気との混合が促進される、物理的効果が主因と考えられる³⁾。

4.3 EGR併用による乳化燃料のNO_x低減効果 図7は、定格出力、および燃料噴射時期=23°CA.BTDC一定の条件のもとで、乳化燃料における水添加率 G_w とEGR比率とがNO_xと燃料消費率、ならびにNO_xと黒煙濃度との関係にどのような影響を及ぼすかをまとめて示したものである。なお、図はEGRなしの軽油(機関の

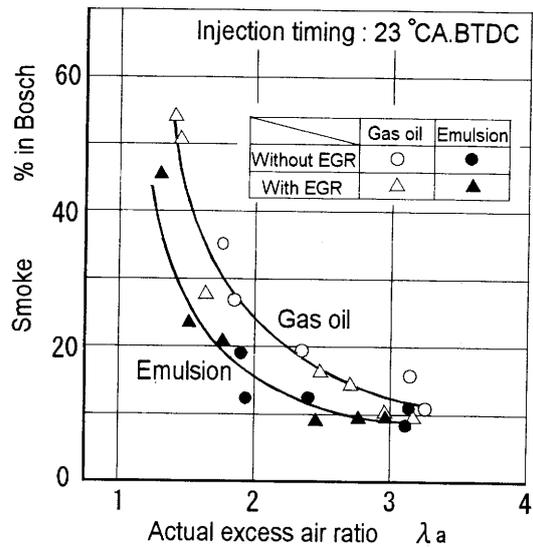


Fig. 6 Relation between smoke and actual excess air ratio

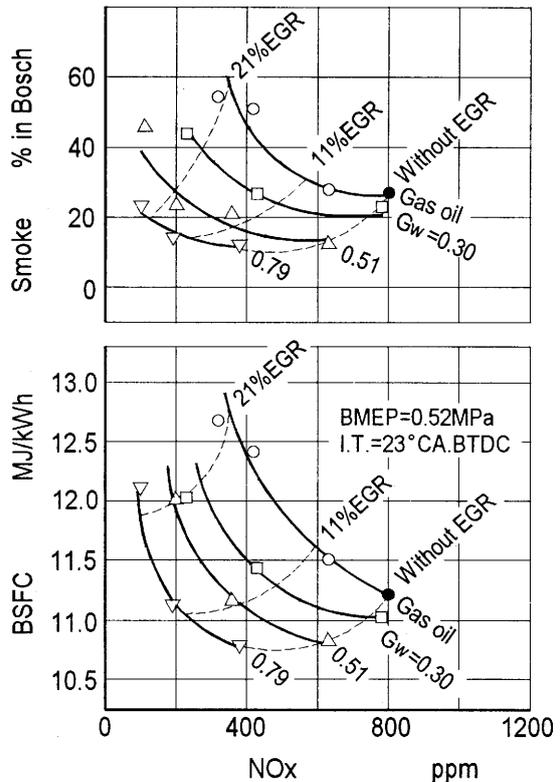


Fig. 7 Comparison of BSFC vs. NO_x and smoke vs. NO_x using emulsion and EGR

燃費率最良点) を基準に表している。図に示されるように、EGR は軽油における NO_x を低減する効果を有するものの、同時に燃料消費率と黒煙濃度の大幅な増大をもたらす。しかし、水添加を行うことでその傾向は顕著に抑制される。すなわち、乳化燃料を用いて 11% 程度の EGR を行った場合には、EGR なしの軽油における最良燃費率を保ちながら、黒煙濃度を増大させずに NO_x を大幅に低減できることが明らかである。たとえば、水添加率 $G_w = 0.51 \text{ mass}$ の乳化燃料では軽油に比べ 58%、 0.79 mass では 76% の NO_x 低減が得られる。

以上のことから、乳化燃料運転に EGR を併用することは、高負荷領域における NO_x 濃度をもっとも効果的に削減しうる手段のひとつと考えられる。

5. 結 論

NO_x の削減を図ることを目的として、乳化燃料使用ディーゼル機関に EGR を併用した際の効果について調べた。研究の結果を要約すると、つぎのとおりである。

(1) 乳化燃料を用いて 11% 程度の EGR を行うことによって、EGR なしの軽油における最良燃費率を保ちながら、黒煙濃度を増大させずに NO_x を大幅に低減できた。すなわち、水添加率 0.51 mass の乳化燃料では軽油に比べ 58%、 0.79 mass では 76% の NO_x 低減が得られた。

(2) 水添加燃料と EGR を併用した場合には断熱火炎温度が著しく低下し、その結果、NO の生成量が低下する。また、水添加の有無にかかわらず、黒煙濃度は環流ガスを考慮した実質的な空気過剰率によって定まる。

文 献

- 1) M. Tsukahara, T. Murayama, and Y. Yoshimoto, Influence of Fuel Properties on the Combustion in Diesel Engine Driven by the Emulsified Fuels, Bulletin of the JSME, 25-202 (1982), 612-619.
- 2) 塚原・村山・宮本・吉本, ディーゼル機関に水・エマルジョン燃焼法を適用した場合の燃焼促進効果に及ぼす燃焼室形状の影響, 日本機械学会論文集 (B 編) 48 巻 426 号 (1982), 381-387.
- 3) M. Tsukahara, Y. Yoshimoto, and T. Murayama, W/O Emulsion Realizes Low Smoke and Efficient Operation of DI Engines without High Pressure Injection, SAE Trans. 98 (1990), 777-783.
- 4) M. Tsukahara, Y. Yoshimoto, and T. Murayama, Influence of Emulsified Fuel Properties on the Reduction of BSFC in a Diesel Engine, SAE Trans. 98 (1990), 1795-1804.
- 5) 吉本・塚原, 乳化燃料使用ディーゼル機関の性能に及ぼす燃料噴射方向の影響, 日本船舶機関学会誌, 第 28 巻第 3 号 (1993 年), 228-235.
- 6) Y. Yoshimoto, M. Tsukahara, and T. Kuramoto, Improvement of BSFC by Reducing Diesel Engine Cooling Losses with Emulsified Fuel, SAE Paper 962022 (1996).
- 7) 塩崎・鈴木・大谷, ディーゼルエンジンにおける EGR とその問題点について, 日野技報 No.38, AUG. (1989), 3-15.

- 8) K. Narusawa, M. Odaka, et al., An EGR Control Method for Heavy-Duty Diesel Engines under Transient Operations, SAE Paper 900444, (1990).
- 9) S. Röpke, G.W. Sweimer, and T.S. Strauss, NOx Formation in Diesel Engines for Various Fuels and Intake Gases, SAE Paper 950213, (1995).
- 10) T. Shiozaki, H. Nakajima, et al., The Analysis of Combustion Flame Under EGR Conditions in a DI Diesel Engine, SAE Paper 960323, (1996).
- 11) H.T.C. Machacon, 志賀・柄沢・中村, 直接噴射式ディーゼル機関における排気再循環が排出微粒子とその成分に及ぼす効果, 日本船用機関学会誌, 第 31 巻第 10 号 (1996), 228-235.
- 12) 水谷, 燃焼工学, (1991), 227, 森北出版.
- 13) 日本機械学会編, 技術資料, 燃焼に伴う環境汚染物質の生成機構と抑制法, (1980), 51.