

〔論文〕

オゾン混合燃料による燃焼特性

清武 零司^{*1}・高山 敦好^{*2}・下伊倉 潤^{*1}・益本 広久^{*3}

Combustion Characteristics with Ozone Mixture Fuel

Reiji KIYOTAKE^{*1}, Atsuyoshi TAKAYAMA^{*2}, Jun SHIMOIKURA^{*1} and Hirohisa MASUMOTO^{*3}

Abstract

In recent years, international commitments have emphasized the importance of reducing greenhouse gas emissions to preserve the global environment. Combustion systems using oil burners are utilized several applications, including incineration plants, combustion furnaces, and plastic greenhouses. Exhaust gas contains pollutants such as nitrogen oxides (NO_x), carbon oxides (CO_x), and particulate matter (PM), and exhaust gas regulations are frequently tightened. In this study, the combustion characteristics of ozone mixed fuel were investigated. In comparison to conventional combustion of kerosene, the combustion of air mixture fuel reduced CO by 37.8% and NO by 26.0%, but there was no difference in fuel consumption. In comparison to the combustion of kerosene, the combustion of ozone mixed fuel reduced CO by 17.5%, NO by 26.0%, and improved fuel consumption by 3.7%. Furthermore, when water spray was applied to cool the ozone mixed fuel during combustion, NO was reduced by 31.7% and fuel consumption was increased by 1.9%.

Key Words : Gas Mixture Fuel, Ozone, UFB Water, Burner, Pollutants (NO_x, CO_x, PM)

1. 緒 言

近年、地球環境保全の観点から温暖化ガスの排出抑制が国際的な公約として要求されている。オイルバーナを用いた燃焼システムは、焼却場や燃焼炉、ビニールハウスなどに活用されているが、排気ガス中には窒素酸化物 (NO_x)、一酸化炭素 (CO)、すす (PM) 等が含まれており、これらの排出規制は強化される傾向にある。また、産業界には、オイルバーナやガスバーナを用いた蒸気システムが多方面で利用されており、この蒸気の供給を担うボイラの形態が、ここ数十年で大きく変化している。従来、大型のボイラや水管ボイラが主力であったのに対し、近年では小型の貫流ボイラを複数台設置する方式に移行している。この背景には、設置の省スペース化やボイラ技師を不要とする運用の簡素化が挙げられ、このような変更を容易にした技術として、小型貫流ボイラにおけるボイラ効率の向上と蒸気量の高出力化がある。このため、ボイラの性能を左右する燃焼器に対しては、引き続き、小型かつ、大容量の高負荷燃焼が要求されていくものと思われる。また、船舶機関に用いられている排気ガス脱硫装置 (スクラバ) や水噴霧を行うことで汚染物質が低減可能である⁽¹⁾が、水噴霧の利用は水の混入により燃費が悪化するという懸念点がある。

ボイラにおいては、燃焼炉と同様、酸素濃度の管理が重要であり、燃料や吸気の変更が求められている。吸気にオゾン (O₃) や水素 (H₂) を用いると、燃焼性が飛躍的に改善する結果が報告されている⁽²⁾。また、燃料中に微細気泡を混入したマイクロバブルを用いた技術では、大幅な燃費向上が期待できることが報告されている⁽³⁾。近年、マイクロバブルよりも小さいナノバブルであるウルトラファインバブル (UFB : Ultrafine Bubbles) に着目し、燃料や吸気に UFB を活用する技術開発が行われている。例えば、実機のディーゼルエンジンを供試機関とし、燃料へ微細気泡を混入させた研究報告⁽⁴⁾や UFB 水を霧化に吸気に混入させた研究報告⁽⁵⁾などが挙げられる。

本研究は、燃料に灯油を採用し、灯油中に微細気泡を混入させた気液混合燃料を採用することで汚染物質である NO_x の低減かつ燃費の改善を期待して実験を行うものである。また、気泡径が 1 μm 未満だとマイクロバブル (MB : Micro Bubbles) ではなく微小な UFB となるため、ラジカルが存在する⁽⁶⁾ことが報告されているため、ラジカルによる相乗効

^{*1} エネルギーシステム工学専攻、^{*2} IR 推進センター、^{*3} 機械システム工学科
令和 3 年 12 月 2 日 受理

果を期待するものである。加えて、燃料中に混入させる気体に Air とオゾンを採用することで強い酸化作用も期待できる。さらにオゾン混入型気液混合燃料と火炎燃焼中に水噴霧を併用させた際の燃焼特性について検討を行う。

2. 実験装置および実験方法

2・1 オゾン

オゾンは、コロナ放電や光科学反応法により生成でき、一般的に殺菌や脱臭を目的として使用されることが多い。オゾンから放出される酸素原子があらゆる物質と酸化反応を起こすため有害な細菌等の細胞膜を酸化することで細胞そのものを死滅させることで殺菌作用がある。また、脱臭は悪臭物質の成分である化合物と酸素原子の反応が非常に速いことから効果的である。オゾンの分解は発熱反応であり温度と酸素濃度が影響し、温度の影響とともに分解速度が速くなるという特徴がある。このため燃焼室へオゾンが投入されると同時に分解され、酸素と酸素原子が燃焼を促進させると考えられる。加えて、オゾンには直接反応（オゾン酸化）と間接反応（フリーラジカル反応）がある⁷⁾OH ラジカルの生成が期待できる。

2・2 気液混合燃料

気液混合燃料とは、燃料油中に微細気泡を混入させた燃料である。混入させた微細気泡はナノオーダーまで微細化されているため陰イオンやラジカルが生成される。燃料油中に微細な気体が混入していることで、燃料が噴射された後、気泡が燃焼室で周囲の空気を取り込みながら膨張し、同時に燃料を微細化しながら燃料と空気の子混合が促進され、燃焼性が向上することで燃費の改善が期待できる。しかしながら、従来は気泡径が 2 - 5 μm の研究報告⁸⁾が多く、本研究では気泡径を微細化させることに成功した加圧溶解攪拌型ミキサを採用し、1 μm 未満の気泡を利用した検討を行うこととした。図 1 に加圧溶解攪拌型ミキサの概略図を示す。この装置は加圧時に水と気体が混合した気液混相において、気体が中央部に集積する特徴を利用し、1st エレメントにて中央部の孔径を外側の孔径よりも小さくすること、2nd の穴孔径を調節することで、2 流体に流速差を持たせたものである。したがって、2 枚のエレメント間には強い渦流が発生し、高い攪拌力を有する装置である。

2・3 水噴霧

主な水噴霧技術として排気ガス脱硫装置（スクラバ）が存在する。これは排気ガス中に水噴霧を行うことで硫黄酸化物（SO_x）や粒子状物質を低減させる技術であり、主には船舶機関に搭載されているが、海水流による腐食、製造不良や熱衝撃による損傷など未だに難点がある。一方で、火炎燃焼中に水噴霧を行い、すす抑制効果の増大およびピーク値の低減に作用したなどの良い影響を与えたという報告⁹⁾も存在する。そこで本研究では、水噴霧の燃費低下を改善するため、気液混合燃料を採用し燃費を損なわずに環境汚染物質を低減させる方法についても検討を行うこととした。

2・4 ラジカル

図 2 にラジカルの概略を示す。ラジカル（Radicals）は、不対電子を持った原子や分子、またはイオンのことを示し、フリーラジカルまたは遊離基とも呼ばれる。不対電子とは、分子電子の最外殻軌道に位置する対になっておらず、分子対を作っていない電子のことである。化学的に不安定であり、反応性が高い。有機化学においては、不対電子を持つ寿命の短いラジカルが反応経路を説明するのに重要な役割を果たしている。通常、原子や分子の軌道電子は 2 つ対になっ

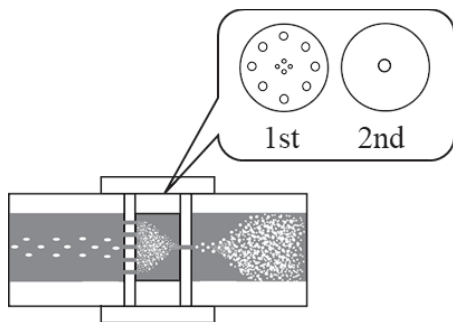


Fig. 1 Pressurized dissolution stirring type mixer

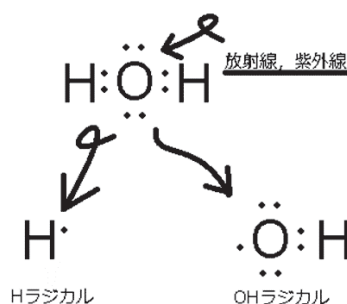


Fig. 2 Radical generation by ultraviolet ray

て存在し、安定した物質やイオンを形成する。外部から熱や光などのエネルギーが加わることで電子が励起し移動、または化学結合が二者均一で解裂を起こすことで不対電子ができ、ラジカルが発生する。ラジカルは通常反応性が高く生成後すぐに他の原子や分子と酸化還元反応を起こし安定した分子やイオンとなる。

ラジカルに1電子を奪われた分子が他の分子から新たに電子を引き抜くことで、他の分子がラジカルを形成するため、連続的に反応が進行する。この反応はラジカル同士が反応して共有結合を生成するまで続く。燃焼もラジカル反応の1つで、ハロゲン分子が炭化水素と反応してハロゲン化アルキルを生じるものもラジカル反応である。

燃焼の際には、熱による分解物としてラジカルが発生しそれが空気中の酸素と結びついて別の有機物となり、さらに分解が進み最終的に酸化物の形となる。これは、高温（熱）によるラジカル生成であるため、特定のラジカルが選択的にできるわけではなく、無作為に生じる。燃焼物質となる共有結合を有する有機材料は常に連続的にフリーラジカルを生成し、その他のフリーラジカルと反応し、燃焼中に安定な化合物を生成する。

2・5 実験方法および供試機関

図3に実験装置の概略図を示す。供試機関は上根製 AR-H オイルバーナを用いた。オイルバーナのノズルチップは3.0 gal とし、圧力は0.7~1.3MPa である。上述した小型燃焼炉に、簡易燃焼炉（直径600mm、長さ860mm）を接続させて実験を行う。用いる燃料は、灯油、気液混合燃料（Air）および気液混合燃料（オゾン）である。排気ガス沿道直後にて排気ガス温度を600℃に固定し、汚染物質濃度測定には Testo 製 testo350 シリーズの排気ガス測定装置を用いた。気液混合燃料生成装置の第1、第2タンクの循環経路配管には加圧溶解攪拌型ミキサが搭載されており、各タンクのポンプ圧により、せん断処理が行われることで気液混相の燃料の攪拌が可能である。第1タンクにて気体（Air、オゾン）を混入させながら燃料を攪拌させることで、燃料と空気（オゾン）の混合を行い気液混合燃料を生成する。そして、第2タンクに移送し、第2タンクは生成された気液混合燃料の常時攪拌とオイルバーナへの輸送を行うバッファータンクとして使用する。実験条件は、圧力0.6MPa、気体混入量1.0L/min、攪拌時間は30min とした。十分に解放された空間でオゾンの発生および気液混合燃料（オゾン）の生成を行った。

空気比とは、燃料を燃焼させるのに必要な理論空気量に対し、実際に供給する空気（オゾン）の割合のことである。理論上、空気比1で運転できればエネルギーの無駄がなく理想的であるが、実際にはすべての空気が燃焼に使われることはないで理想値よりも過剰に供給される。適正な値に対し、空気が過剰になると排ガスによる熱損失が増加してボイラ効率が低下し、逆に空気が不足すると、燃料の不完全燃焼により黒煙（すす）などが発生する。環境汚染を防止するという観点から、ボイラ効率を多少下げても空気比は高めに設定するのが一般的である。多くの企業でも最もエネルギーを使用するボイラでの効率は向上のランニングコストに大きく影響するため、空気比の管理は非常に重要視されており、省エネ法でも数値基準が決められている。空気と混合しやすい燃料であればあるほど空気比は小さくできるため、固体燃料>液体燃料>気体燃料の順に基準空気比は小さくなる。空気比λは下記の式で求められ、xは酸素濃度を示す。本研究は、λ=1.4、すなわち排気ガスの酸素濃度が6.0%となる。

$$\lambda = \frac{20.9 + x}{20.9}$$

実験は、図1に示した加圧溶解攪拌型ミキサによりオゾン UFB 水の生成を行う。生成した UFB 水の性状は全溶存固形物量（TDS：Total Dissolved Solids）が Proster 製 TDS&EC メータ、溶存酸素濃度（DO：Dissolved Oxygen）を

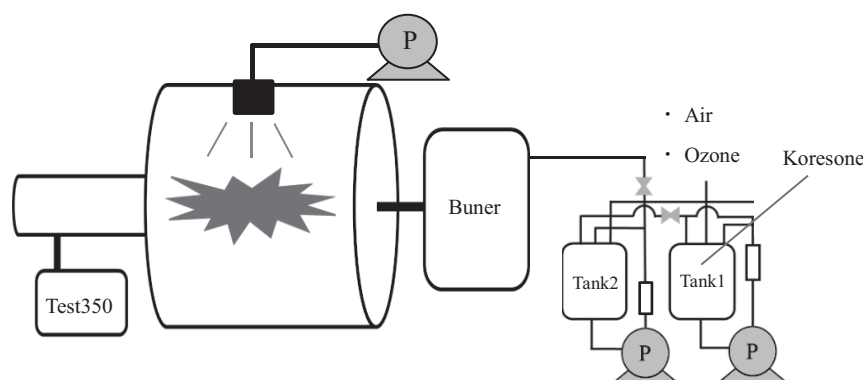


Fig. 3 Experimental device

ハンナインスツルメンツ・ジャパン製 HI9147N-04により求め、pHは東亜 DKK 製 HM-30Pにて測定した。UFB水生成に用いる水溶液には、オルガノ製 RO-N60を使用した純水を用いており、UFB水中のナノ個数密度測定にはマルバーン製 Nanosight LM20により粒度分布および粒子数濃度の測定を行った。燃料の測定は困難なことから、オゾンUFB水としてUFB水を生成するとOHラジカルが発生することが報告⁷⁾で明らかとなっていることに着目して、本研究でも卓上型 ESR を用いアダクトの検出を試みた。ただし、オゾンUFB水ではアダクトは検出されないため、同仁科学社製高純度 DMPO を 1 : 1 で調合して行った。オゾンUFB水の生成条件は0.6MPa、混入量0.1L/min、攪拌時間30min 一定で行った。

3. 実験結果と考察

3・1 オゾンUFB水の性状およびラジカル

表1にオゾンUFB水の性状、図4にナノサイトを用い測定したナノ個数密度を示す。加圧溶解攪拌型ミキサを使用することで100nm付近でピークを持ち、多くの微細気泡が混入することが分かった。純水と比較して25.4mg/Lと高いDO値を示しており、オゾンが安定な酸素となり水溶液中に溶存した可能性がある。平均粒径は152.4nm、ナノ個数密度は約3.4億個/mlであった。オゾンを用いた場合でも水溶液中に微細気泡の混入が認められたことから、灯油でも同様の結果が期待できる。

図5に卓上型 ESR を用いたラジカルの測定結果を示す。図5(a)は純水の測定結果を示すが、図中の□の領域に見ら

Table 1 Properties of ozone UFB water

	TDS(ppm)	DO(mg/L)	pH	Concentration of UFB	
				UFBs (×10 ⁸ /ml)	Average (nm)
pure water	1	6.47	7.68	0.31	139
Ozone UFB water	2	25.4	6.89	3.40	152.4

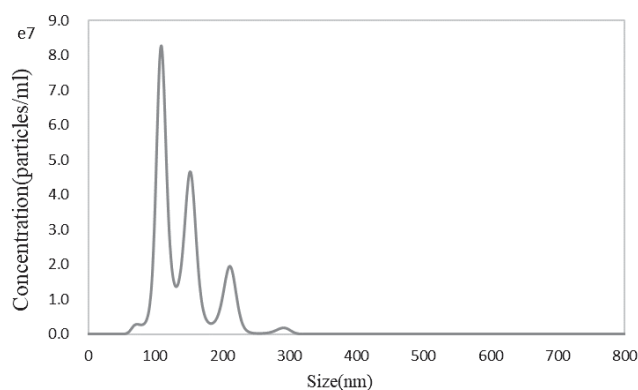
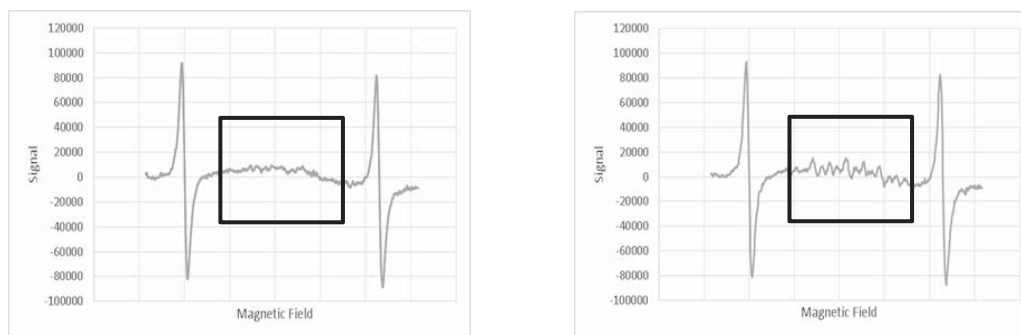


Fig. 4 UFB water concentration



(a) Pure water

(b) Ozone UFB water

Fig. 5 Experimental results of radicals

れるように、アダクトは観察されない。しかし、オゾン UFB 水では図 5 (b)に示すように OH ラジカルの波形が明確に観察される。このため、燃料中にオゾンを混入させた気液混合燃料の場合でも同様に OH ラジカルが発生していると考えられる。

3・2 排気ガス汚染物質濃度

図 6 の(a)に通常燃焼, (b)に水噴霧をした際の実験結果を示す。基本燃焼となる灯油単体に比べ気液混合燃料 (Air) を燃焼させた場合は, CO が約37.8%, NO が20.7%低減したものの燃費に違いは認められない。次に, 気液混合燃料 (オゾン) を燃焼させた場合, CO および NO は約17.5%, 約26.0%低減し, 燃費は約3.7%向上する。更に, 気液混合燃料と水噴霧を併用させた場合, CO が約217.9%悪化したが, NO は約31.7%低減し, 燃費が約1.9%改善したことから, 水噴霧の問題点であった燃費の悪化を克服できた。

3・3 考察

灯油単体燃焼に比べ気液混合燃料を燃焼させることで CO および NO が低減する傾向があり, 気液混合燃料(オゾン)を燃焼させると, 燃費の向上も認められた。これは気液混合燃料にすることで, 混入している微細気泡の気体膨脹による予混合の促進, ラジカルによる燃焼の活性化が考えられるが, 混入する気体をオゾンにすることで, オゾンが酸化剤として作用したため OH ラジカルが多量発生し燃費に良い影響を及ぼしたものと推測する。加えて気液混合燃料(オゾン)燃焼時に水噴霧を行った結果 NO の低減と燃費の改善が確認できた。本来, 水噴霧は水の混入により燃焼性が阻害されるため燃費が悪化する傾向にあるが, オゾンと微細気泡の相乗効果の影響で燃焼性が向上したものと推測する。

また, 灯油は残渣油が入っていないことから LSA 重油と比較して燃焼性が良いため, 灯油を用いて水混合燃料にするなど燃料の改善を試みたが, 大きな変化は見られなかった。LSA に含まれる残渣油が燃焼性の妨げになるため, 気液混合燃料を用いることで約20%程度の燃焼性の向上を確認できているが, 残渣油が混入していない灯油に関しても一定の成果をあげられたものといえる。

4. 結 語

本研究では以下の結論を得た。

1. 加圧溶解攪拌型ミキサの使用により, オゾンを混入させた気液混合燃料が生成できた。
2. 気液混合燃料を用いることで CO, NO が低減され, 気液混合燃料 (オゾン) では CO, NO および燃費が向上した。
3. 気液混合燃料 (オゾン) と水噴霧を併用することで, NO と燃費が改善した。

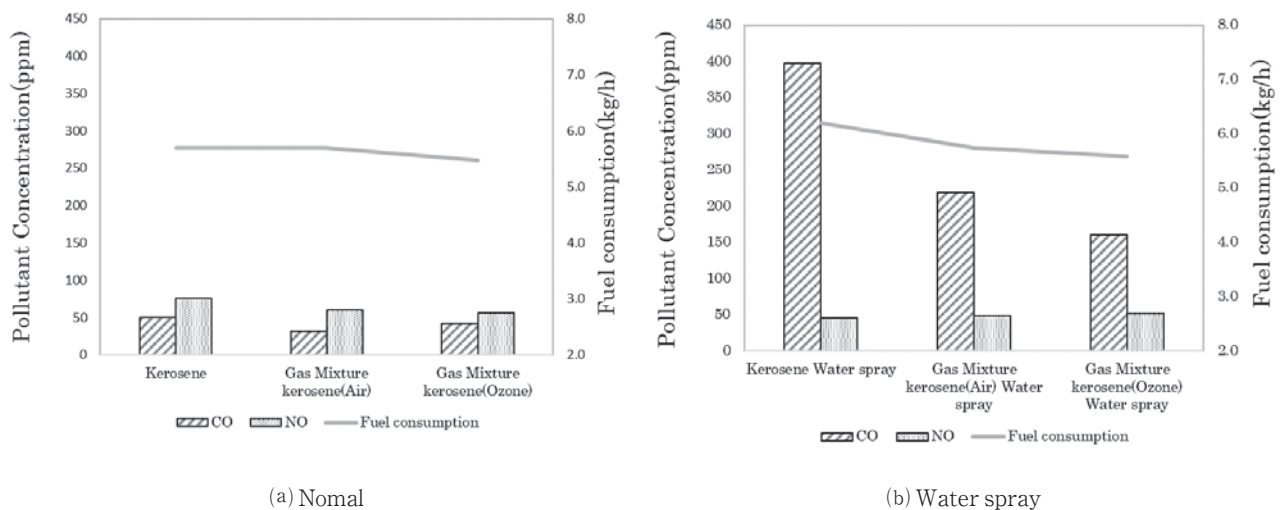


Fig. 6 Experimental result

文 献

- (1) 島田一孝, “水技術 (水エマルジョン, 水噴射, 吸気加湿等) による NO_x 低減技術”, マリンエンジニアリング学会誌, 第46巻, 第6号 (2011), pp. 831-836.
- (2) 山田健太, 高山敦好, 立道悟, “吸気と燃料の改質によるディーゼル機関の燃焼特性”, 久留米工業大学研究報告, No. 41 (2019), pp. 13-19.
- (3) 中武靖仁, 渡邊孝司, 江口俊彦, “エジェクタ式マイクロバブル混入燃料によるディーゼル機関の燃焼改善”, 日本機械学会論文集 (B編), 73巻, 735号 (2007), pp. 196-202.
- (4) 中武靖仁, “超微細気泡混入軽油によるディーゼル機関の環境負荷低減”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第46巻, 第6号 (2011), pp. 880-885.
- (5) Atsuyoshi Takayama, “Combustion Improvement of Diesel Engine by Mixing · OH Radical to Fuel Derived Ultrafine Bubble”, Journal of the JIME, Vol.53, No.3 (2018), pp. 101-106.
- (6) 高山敦好, “加圧溶解攪拌による UFB 水の生成”, 混相流, 34巻, 1号 (2020), pp. 188-193.
- (7) 山部長兵衛, “オゾン発生技術とオゾン利用”, 電気学会論文誌A, 126巻, 9号 (2006), pp. 874-877.
- (8) 天寅喬文, 溯端学, “軽油-水エマルジョン燃料中の分散水滴径がディーゼル機関の運転特性に及ぼす影響”, 日本機械学会論文集, Vol. 85, No. 875, (2019), pp. 1 - 9.
- (9) 西田修身, “噴霧火炎中のすす濃度分布と低減法について”, 日本船舶機関学会誌, 第15巻, 第6号 (1980), pp. 42-47.