

〔論文〕

コロナ放電下での UFB 霧化による吸気改善技術の開発

立道 悟^{*1}・高山 敦好^{*2}

Development of Suction Air Improvement Technology by
UFB Atomization Using Corona Discharge

Satoru TATEMICH^{*1}, Atsuyoshi TAKAYAMA^{*2}

Abstract

High voltages from 6 to 10 kV can generate ozone through corona discharge, and ozone can be used to solve environmental problems. Moreover, the generation of OH radicals has been confirmed, and the removal of organic substances is expected. However, the half-life of an OH radical is 10⁻⁹ s, and the use of OH radicals is limited. Therefore, we focused on UFB water in this study. UFB water is a functional water-mixed gas with a bubble diameter smaller than 1 μm; substances are re-solved by the energy generated through the self-crushing action of the bubbles, resulting in the generation of radicals. In this study, we attempted to enhance the formation of OH radicals through the atomization of UFB water via corona discharge. The combination of corona discharge and UFB water atomization was found to promote the formation of OH radicals from ozone via water atomization, and a mutual effect between anions and the UFB parent of OH radicals was observed. A reduction of the NO_x concentration in the exhaust gases of fuels was observed for fuels treated by UFB water atomization and corona discharge.

Key Words : Corona discharge, UFB water, Diesel engine, Ozone, OH radicals

1. 緒 言

ディーゼルエンジンは、CO₂排出量が少なく、熱効率が高いことで安定してトルクを得られることから、近年普及が進んでいる。しかしながら、環境規制が度々強化されており、2009年に施行されたポスト新長期規制では、前回の新長期規制より NO_x と PM の排出量を約40~65%に削減することが義務付けられ、さらなる低減技術の開発が急務となっている¹⁾。

これらの環境規制に対応するため、様々な低減技術が自動車に搭載されている。前処理技術は、排気の一部を再び吸気に混合させ酸素割合を下げることで急激な燃焼を抑える排気再循環 (EGR: Exhaust Gas Recirculation)、燃料油中の硫黄分を低減させることで SO_x の排出量を抑制できる低硫黄燃料、燃焼性や排ガス中の汚染物質の抑制を目的とした水エマルジョン燃料、カーボンニュートラルであるバイオ燃料などの代替燃料が挙げられる。後処理技術では NO_x 浄化を目的とした SCR (Selective Catalytic Reduction)、粒子状物質を漉し取り軽減させる DPF (Diesel Particulate Filter) などが現在主流となっている。制御面ではコモンレールが開発されたことにより、従来の機械式噴射に比べ高圧噴射となり PM の低減、多段噴射による NO_x の低減が期待できる。

しかし、今後強化される規制に対して、既存の技術だけで対応するのは困難であり、燃料や吸気に対する前処理技術の構築が必要であると言える。吸気改善として、6~10kVの高電圧ではコロナ放電によるオゾンを生成でき、生成されたオゾンの利用によって環境問題の解決がなされることが報告されている²⁾³⁾。また、OHラジカルの生成が確認されており、低温時でも燃焼性が良好、サーマル NO_x の低減、有機物の除去が期待されており、その活用は重要である。しかしながら、OHラジカルの半減期は1.0×10⁻⁹sと非常に短く、活用において限定的なものである。そこで本研究ではウルトラファインバブル (UFB: Ultra-Fine Bubble) 水に着目した。UFB水は1μm未満の気体が混入した機能水であり、自己圧壊作用により生じたエネルギーで物質が分解されラジカルが生成される。

^{*1} エネルギーシステム工学専攻, ^{*2} 機械システム工学科
平成30年11月19日受理

本研究では、排出ガスに含まれるNOxの抑制として、コロナ放電下で吸気を通過させた場合の燃焼特性を明らかにする。また、コロナ放電とUFB霧化を組み合わせて、コロナ放電の印加によるUFBの膨大化を目的とし、さらなる燃焼性の向上を試みたものである。

2. 実験概要

2・1 コロナ放電

コロナ放電は、電極から電子放出やイオン生成が行われない場合でも、極板間に電圧を印加することで形成される電界により、大気中に電流が流れる状態である。電圧を加えていくことで火花放電を起こすが、コロナ放電とは火花放電の直前であり、その際にオゾンの発生を伴う特徴がある。これらから吸気にコロナ放電を用いることで、オゾンが起源となったOHラジカルの輸送が可能となり、NOxやPMを低減できると同時に燃費が改善できるものと推測する。また、エンジンの負荷率を上げることでコロナ放電による空気活性化の効果が向上するという報告がされている。

2・2 UFB水

図1にUFB水の構造を示す。UFB水とは、1μm未満の微細な気泡が混入したもので、マイナスに帯電していることからプラスの電荷を帯びた微細な有機物を吸着できる。また、UFB同士が反発することで結合しにくく、気泡数密度が低下しにくい特徴がある。さらに、UFB水にはラジカルの存在が確認されており、酸化還元反応の誘発により難分解処理が可能である。OHラジカルの生成は、オゾン(O₃)、過酸化水素(H₂O₂)等からフェントン反応によるOHラジカル等の活性ラジカルが発生する促進酸化法(AOPs: Advanced Oxidation Processes)を広く用いている。また、プラズマ放電や紫外線を用いた発生手法が報告されており、本研究は、コロナ放電とUFB水の組合せを検討したものである。

2・3 霧化装置

霧気装置は、加湿器が一般的な利用方法であり、超音波による生成手法である。1MHz~3MHzでは水の霧化が可能となる。しかしながら、微量の水を霧化することが困難である。そこで、図2に本研究で採用した霧化装置を示す。これは、特別なループ回路を設置したケース内に空気を混入し、特有の振動を発生させた、振動による霧化機構である。本研究手法は、微量の霧化が可能であり、10ml/hの霧化量となることから吸気に与える影響を抑制でき、かつ電源を必要としないことが特徴である。

2・4 実験装置

今回用いた実験装置の概要を図3に示す。本研究で作成したコロナ放電を行うプラズマ発生装置は、平板5枚を加工し取り付け放電板の距離を10mmとし、吸気に対して均等に帯電を行うことが可能な構造とした。印加電圧は、特殊電気社製TOT921にて、電圧7.5kV、電流0.5mAで実験を行った。

図4にUFB水生成装置を示す。UFB水生成装置にNIKUNI製15NPD07Aポンプを採用し、ポンプ吸入側にタンク

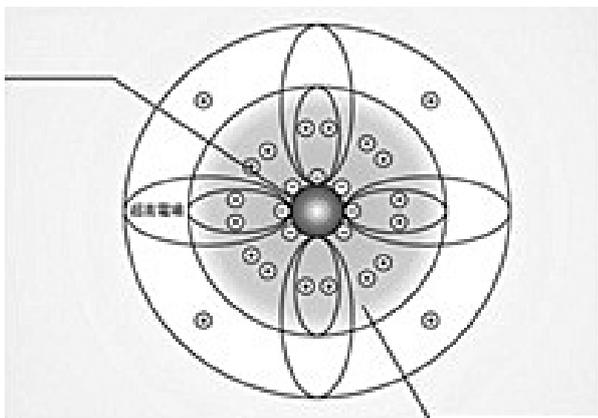


Fig. 1 Structure of UFB

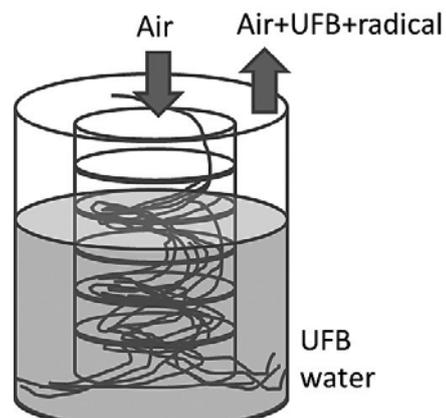


Fig. 2 Atomization equipment

と気体注入口を取り付け1.0MPaに加圧された気液混合水が独自に開発した加圧溶解攪拌型ミキサを通過する循環経路とした。本研究のUFB水生成手法は、加圧溶解方式に攪拌機能を独自に持たせた手法であり、2枚のプレート内で攪拌領域を設け、段階的に圧力開放を行うことで、効率的にUFBが混入できるものである。気体の流量は0.1L/min、工業用精製水1.0L、稼働時間10minである。その後、霧化装置にてUFB水を霧化し吸気改善を試みた。霧化量は、Met One製A2100Cのパーティクルカウンタを用い、霧化粒径測定を行った。

供試機関の概要を表1に示す。供試機関はマツダ製RF-CDT直接噴射式4サイクルディーゼルエンジンである。シリンダ数が4、ボアとストローク値が86mm×86mmのスクエア型、圧縮比が16.7、定格出力が3500rpm時に63.2kw、最大トルクが2000rpm時に178N・m、排気量が1998ccでコモンレールシステムを採用している。コモンレールシステムの制御は、表2に示すIRS製ECSを採用した。ECSは、任意の噴射時期、噴射回数、噴射圧力でインジェクタの制御を行えるものである。排出ガスの測定にはtesto社製testo350XLを採用し、測定項目はO₂、CO、FT、NO、NO₂、SO₂である。なお測定点は排気直後とした。エンジンのシリンダ筒内圧は、シチズンファインデバイス社製CAS-15K筒内圧力計を採用し、司測研チャージアンプ、デジタルオシロスコープを用いて計測した。小野測器のクランク角センサと同期し、YOKOGAWA製燃焼解析システムSL1000により、シリンダ筒内圧力及び熱発生率を解析した。

実験条件は、回転数が2000rpm、図示平均有効圧力(IMEP)が0.4MPa、0.6MPaとし、燃料が軽油である。噴射圧力が40MPa、100MPa、噴射時期が単段噴射ATDC-17°にて実験を行った。

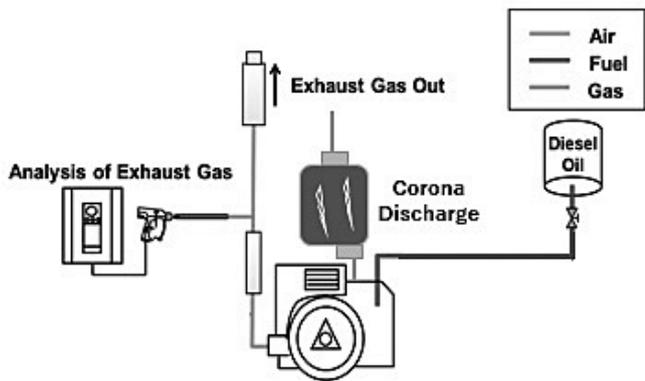


Fig. 3 Experimental Device

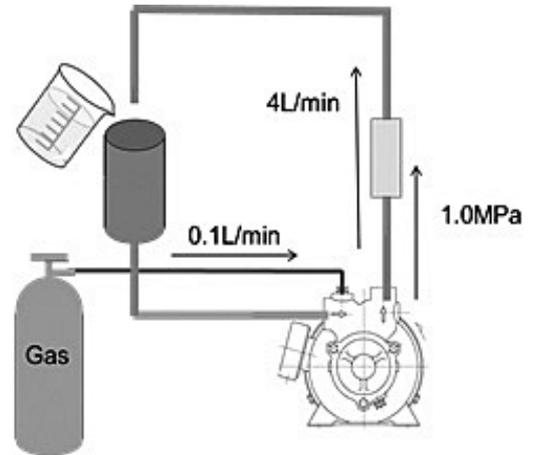


Fig. 4 UFB Water Generation Apparatus

Table 1 Engine Spec

Name	RF-CDT	Max Power	63.2 kw/3500 rpm
Engine System	Direct-injection Four-stroke	Max Torque	178 N·m/2000 rpm
Cylinder Number	4	Displacement	1998 cc
Bore×Stroke	86 mm×86 mm	Injector System	Common Rail
Compression Ratio	16.7		

Table 2 ECS Spec

Name	Engine Control System	After Injection	MI~40°
Pilot Injection	40°~MI	Rail Pressure	30 MPa~160 MPa
Main Injection	ATDC-40°~40°	Pilot Injection Time	200 μs~600 μs
Pilot Injection	40°~MI		

3. 実験結果

3・1 UFB 霧化気及びナノ粒子密度の計測

図5にUFB霧化気の計測結果を示す。UFB霧化気では、100nm, 200nm, 300nmでナノ粒子の増加が見られる。コロナ放電の有無で比較すると空気は約9倍、UFB霧化気が約8.54倍増加と、通常時に比べナノ粒子が増加する傾向が見られた。以上のことから、UFBの大量輸送に成功したものと考ええる。

3・2 供試機関の基本性能

図6に供試機関の排ガス及び燃料消費率について示す。実験条件として、図示平均有効圧0.4MPa, 0.6MPa, 噴射圧40MPa, 100MPaで制御し、各項目で比較を行った。噴射圧力を高圧にすると、NO_xやCOが増加する傾向が見られた。これは、高圧噴射による急激な圧力上昇が要因であると推測する。よって以降の測定は40MPaとした。

3・3 コロナ放電

吸気にコロナ放電を用いた場合の排ガス及び熱発生率について図7に示す。(a)がIMEP=0.4MPa, (b)がIMEP=0.6MPaである。IMEP=0.4MPaではNO_x濃度及び燃料消費率に顕著な変化が見られなかったが、IMEP=0.6MPaの場合、正針コロナ、負針コロナともにNO_x濃度が約7.2%低減、燃料消費率が約3.5%改善した。よって正針及び負針での変化は見られなかった。

3・4 水道水及びUFB水の霧化

コロナ放電下での水道水及びUFB水を噴霧した場合の排ガス及び燃料消費率について図8に示す。(c)がIMEP=0.4MPa, (d)がIMEP=0.6MPaである。

IMEP=0.4MPa時に水道水噴霧をすることでNO_x濃度が、正針コロナでは約3.5%、負針コロナでは約3%低減となった。燃料消費率については変化が見られなかった。UFB水噴霧の場合NO_x濃度が、正針コロナでは約12.7%、負針コロナでは約17.5%低減した。燃料消費率は正針コロナでは約2.4%、負針コロナでは約4.9%改善した。

IMEP=0.6MPa時に水道水噴霧をすることでNO_x濃度が、正針コロナでは約7.3%、負針コロナでは約7.5%低減した。燃料消費率は正針コロナ、負針コロナともに約3%改善した。UFB水噴霧の場合NO_x濃度が、正針コロナでは約13.7%、負針コロナでは約14.4%低減した。燃料消費率は正針コロナでは約7.0%、負針コロナでは約8.2%改善した。

3・5 考察

エンジンの負荷を上げることでNO_x濃度の低減、燃料消費率の改善を行えた。これは、コロナ放電による吸気の活性化により、燃焼性が向上したからだと推測する。水の霧化ではコロナ放電と併用することでNO_x濃度が上昇する傾向が見られた。これは、オゾンが直接燃焼室に入ること、高温燃焼が促進したものと推測する。次にUFB霧化気の効果の要因は、UFB水中のOHラジカルによる燃焼性の向上が推測される。これは、図9に示すように100nmにピークがあることから、UFB水中にはOHラジカルが多く混入しており、コロナ放電のOHラジカルの生成を助長させる働きが期待できる。以上からUFBに含まれる陰イオンやOHラジカルとの相互効果から、NO_x濃度の低減及び燃費の改善が向上したものと考えられる。

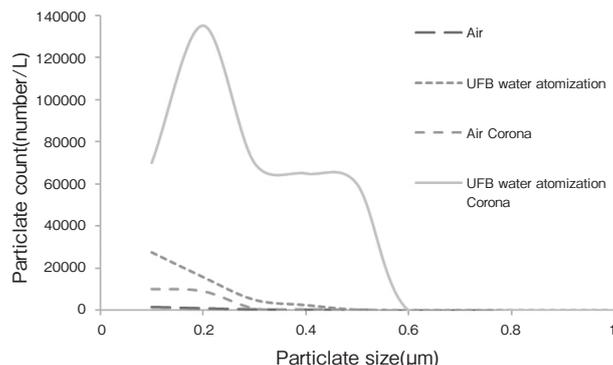


Fig.5 Analysis of atomization gas

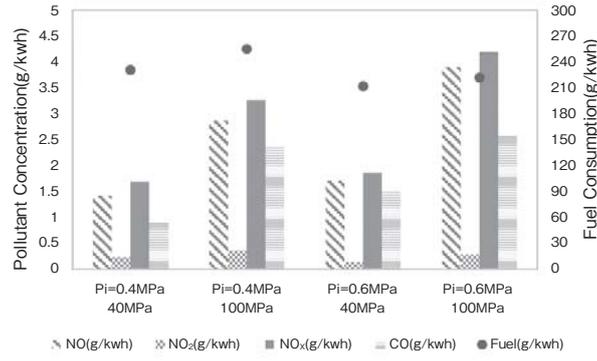
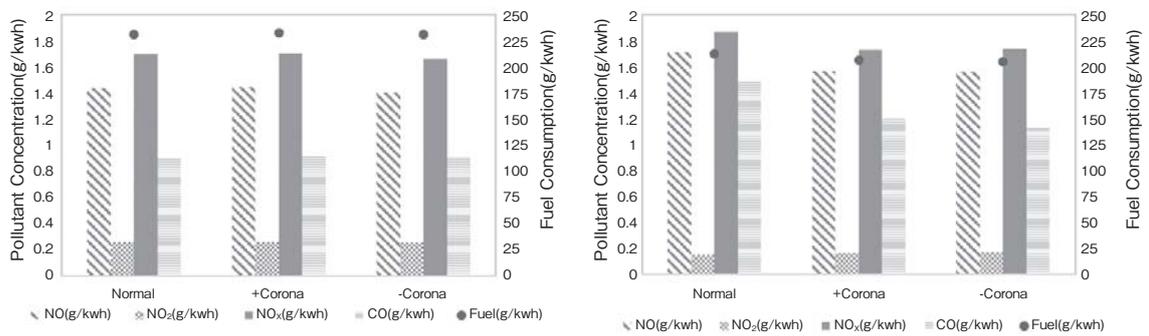


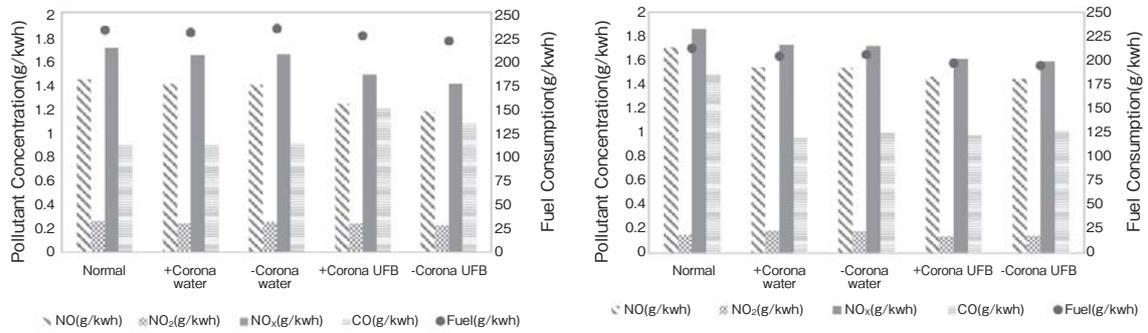
Fig. 6 Pollutant Concentration & Fuel Consumption



(a)IMEP = 0. 4MPa

(b)IMEP = 0. 6MPa

Fig. 7 Corona Discharge



(c)IMEP = 0. 4MPa

(d)IMEP = 0. 6MPa

Fig. 8 Tap Water & UFB Water

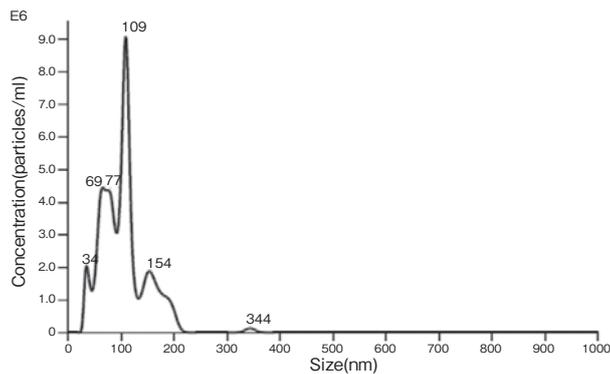


Fig. 9 Analysis of UFB

4. 結 語

本研究は、コロナ放電下での UFB 水霧化を用いた吸気改善技術を報告したもので、以下の結論を得た。

1. UFB 霧化気は、空気中に含まれるナノ粒子と比べ、100nm, 200nm, 300nm の粒径において顕著な増加が見られ、UFB の輸送に成功したものと見える。
2. UFB 霧化気の吸気混合は、燃焼温度を低下させ、低温燃焼時でも燃費が改善され、サーマル NO_x の低減が可能であった。
3. コロナ放電を用いた吸気改善技術は、NO_x 濃度の低減および燃費改善は微小であり、オゾン自体の燃焼によりむしろ燃焼温度が上昇する傾向にあった。
4. コロナ放電と UFB 霧化気を組み合わせることで、水蒸気によりオゾンから OH ラジカルの変換が促進され、かつ UFB に含まれる陰イオンや OH ラジカルとの相互効果が見られ、NO_x 濃度の低減、および燃費の改善が飛躍的に向上した。
5. コロナ放電と水の霧化気との組み合わせでは、NO_x 濃度が上昇する傾向が見られた。これは、オゾンによる酸化反応で酸素が発生し、燃焼がより活発的に行われたからだと推測する。

文 献

- (1) 森雄一, “自動車における排出ガス規制動向と計測技術について”, 日本機械学会誌, Vol. 58, No. 184 (2016), pp. 65-72.
- (2) 高山敦好, 藤田浩嗣, “コロナ放電と Ca(OH)₂による船舶排ガス低減技術の開発”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 48, No. 2 (2013), pp. 119-125.
- (3) 天野航介, 吉本隆光, “船用ディーゼルエンジンでの吸気条件による燃焼・排ガス特性”, 神戸高専研究紀要, 第51号 (2013), pp. 19-24.