

〔論文〕

UFB 水霧化気を用いた吸気改善技術の開発

重松 郁弥^{*1}・高山 敦好^{*2}・立道 悟^{*1}・笹山 魁斗^{*1}

Development of Suction Air Improvement Technology Using Atomization of UFB Water

Ikumi SHIGEMATSU^{*1}, Atsuyoshi TAKAYAMA^{*2}, Satoru TATEMICH^{*1}
and Kaito SASAYAMA^{*1}

Abstract

The exhaust gas from diesel engines contains numerous pollutants (NO_x, SO_x, CO_x and PM) that cause environmental damage, prompting the need for after treatment technologies. For example, the Selective Catalytic Reduction method (SCR) is used to reduce NO_x emissions, the Exhaust Gas Recirculation (EGR) is used to reduce NO_x and PM emissions, and the Diesel Particulate Filter (DPF) and scrubber are used to reduce PM emissions. However, it is possible to reduce the oxygen concentration of the suction air using a membrane process and EGR, which can subsequently reduce NO_x and PM emissions. The objectives of this study are to reduce the pollutants in diesel exhaust gas, and improve fuel consumption by mixing the OH radical into the suction air. The OH radical can aid in combustion improvement, and also lower the combustion temperature, which reduces the NO_x and PM concentrations. Here a device that extracts radicals from ultrafine bubble (UFB) water and mixes the extracted OH radicals into the suction air is developed and tested. The experimental results indicate that mixing the OH radical into the suction air reduces the NO_x and PM concentrations, while also improving fuel consumption.

Key Words : OH Radical, Ultrafine Bubble, Atomization, Suction Air

1. 緒 言

近年、環境汚染について世界中で問題になっている。自動車や船舶などのエンジンに用いる石油燃料は、燃焼時に発生する汚染物質が原因で様々な環境問題を引き起こしている。排気ガスに含まれる汚染物質はNO_x（窒素酸化物：Nitrogen Oxides）、SO_x（硫黄酸化物：Sulfur Oxides）、PM（粒子状物質：Particulate Matter）などが挙げられる。これらは環境だけでなく、人体にも影響があるため規制の対象となっている。

規制されている汚染物質の中にNO_xがあるが、NO_xとは窒素酸化物の総称を指し、一般的には一酸化炭素、二酸化炭素を総合して呼ぶ。NO_xは自動車などのエンジンや工場などのボイラから排出され、それらが大気中の水分や酸素と化学反応を起こし、大気中に硫酸などの強酸が発生してしまう。よって、強い酸性の雨をもたらす酸性雨となることが明らかとなっている。自動車排出ガス規制とは自動車のエンジンから排出される一酸化炭素、窒素酸化物、炭化水素類、黒煙などの大気汚染物質の上限を定めた規定のことをいう。近年は特にディーゼルエンジンの排気ガスに含まれる粒子状物質（PM）、硫黄酸化物（SO_x）、窒素酸化物（NO_x）の規制が厳しくなる傾向がでており、各メーカーが様々な技術で対応している。

前処理技術として幅広く普及している技術にコモンレールシステムが挙げられる。これは初期モデルでも1500barを超える噴射圧力を有しており、現在では3000barの製品開発に達している。この噴射圧力は燃料の微細化を促進するものがあり、かつ空気との予混合が促進することで燃焼性の向上と同時に燃費の改善が報告されている⁽¹⁾。また、高圧・多段噴射による燃焼促進技術によりシリンダ内の急速な温度上昇を防ぎ、高温域において多く発生するNO_xを低減できるものがある。さらに、排気を循環してNO_xを低減する排気ガス再循環装置（EGR：Exhaust Gas Reduction）との組み合わせが一般的である。後処理技術としては、尿素が含まれるアンモニアを媒体として用いたNO_xを浄化する選

^{*1} エネルギーシステム工学専攻、^{*2} 機械システム工学科
令和元年10月31日受理

択還元触媒 (SCR : Selective Catalytic Reduction) が広く普及しており, ディーゼル粒子フィルタ (DPF : Diesel Particulate Filter) の採用により NO_x と PM の同時低減が可能であり, 燃費に与える影響は皆無である. SCR では AdBlue (アドブルー尿素水) と名付けられた尿水が必要であり, DPF では PM の焼結処理のために高回転運転が必要となる⁽²⁾. これらから前処理技術や後処理技術が多く改善されたものの吸気の改善技術は広く普及していない. そこで, 本研究は UFB 水に含まれる OH ラジカルに着目し, OH ラジカルを燃焼に活用するものである. OH ラジカルは着火性が非常に早く, 低音燃焼と同時に燃焼性の向上が期待できるものである.

そこで OH ラジカルを含む UFB 水を霧化させた UFB 霧化気を吸気に混入させたときの燃焼特性を明らかとする. これは UFB 水から得られる OH ラジカルや, H₂を直接燃焼室に取り込むことで, 燃焼性が向上し汚染物質の低減が期待できるものである.

2. 実験概要

2・1 UFB 水

図 1 に UFB 水の構造, 図 2 にバブルサイズの種類を示す. UFB 水は, 水中に 1 μm 未満の気体が混入したものである. UFB はマイナスの電荷を帯びており, UFB 同士が反発し合うので結合しにくく, 気泡数密度が低下しにくい. さらに水中に漂うプラスの電荷を帯びた微細な汚濁物質を吸着できる. これらから, 抗菌・殺菌が期待でき, 分解しにくい特殊な物質の処理も期待できる. UFB は極小なため肉眼ではその存在を確認できないため, UFB 水は透明な液体に見える. また, UFB は通常の気泡のように大気中に浮上せずブラウン運動をしながら長時間水中に滞在する. 気相と液相の二層間で形成される界面張力により加圧が生じるため, 極小な UFB は圧力により一層小さくなり圧力が高くなる. やがて自己加圧の効果により消滅すると考えられている^{(3)~(8)}.

UFB はラジカルの存在も確認されており, UFB 水を使用することで酸化還元反応が期待できるものである. UFB 水を霧化することで, ラジカルや陰イオンを輸送できるものと期待する. UFB 水の生成手法は, 加圧溶解, 剪断, エジェクタ, 旋回, 微細孔等が挙げられるが, 本研究は加圧溶解に攪拌機能を持たせた加圧溶解攪拌方式を採用した.

2・2 霧化装置

霧化装置は, 初期段階の技術では電気を使用した振動機によりベンゼンを霧化させたものが報告されており, 現在は超音波振動によって霧化する手法が一般的である. これは, 各成分の分子量等の違いを利用して液体を分離・濃縮する技術であり, 霧化分離が一般的となる. 蒸発・蒸留法とは違い, 分子間結合を完全に切り離さないため小エネルギーでの分離が可能である. 通常の超音波霧化技術は, 超音波を液体に照射することで, マイクロオーダーの粒径で霧化することができ, 500mL/h 以下の噴霧量にすることが難しい.

本研究は, 図 3 に示すように特別なループを採用し, 空気をバブリングさせることで特有の振動数が発生させ, 霧化気の生成を試みた. これは, ナノオーダーの霧化気の発生を狙ったものであり, UFB 水との相互効果を期待する. また最小量の霧化量を 10mL/h とできることから, 吸気に与える影響は無視できる. さらに吸気は負圧であることから, 特別な装置が不要で, 無電化で装置稼働できる.

2・3 実験方法

表 1, 表 2 に使用した供試機関と制御装置の諸元を示す. 図 4 に実験概要図を示す. 供試機関にマツダ製 RF-CDT, 4 サイクル直接噴射式ディーゼル機関を用いた. ボア径 86.0mm, ストロークが 86.0mm であり, 排気量 2000cc, 圧縮比が 16.7 である. 最大出力は 3500rpm で 63.2KW を発生する.

使用した排ガス測定器は Testo 製 testo350XL を採用した. 測定項目は O₂, CO, CO₂, NO, NO₂, SO₂ となっており常時温度を測定可能であり測定点は排気点直後である.

実験条件として回転数 2000rpm, 負荷率を 25%, 50%, 75% で行い, 燃料噴射時期は多段噴射で -3°, -24°, 燃料噴射圧力が 100MPa である. これらは IRS 製の ECS にて制御を行った.

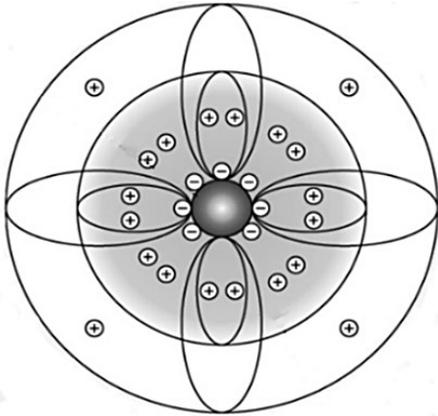


Fig. 1 Structure of UFB

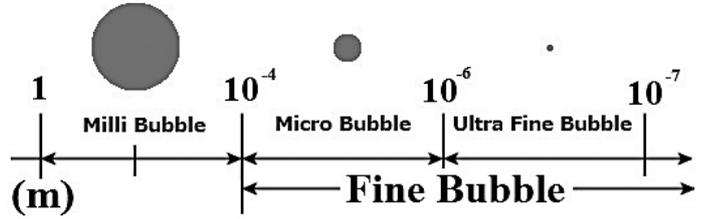


Fig. 2 Classification of Bubble sizes

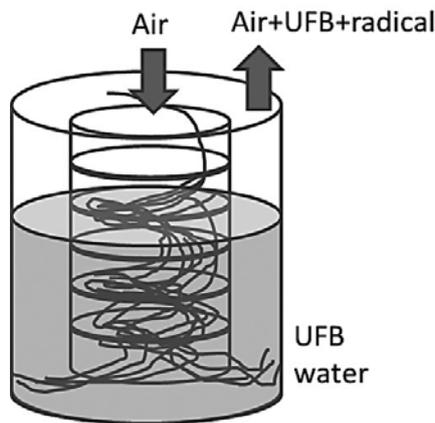


Fig. 3 Atomization Device

Table 1 Engine Spec

Name	RF-CDT	Max Power	63.2kw/3500rpm
Engine System	Direct-injection Four-stroke	Max Torque	178N · m/2000rpm
Cylinder Number	4	Displacement	1998cc
Bore × Stroke	86mm×86mm	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	30MPa~160MPa
Main Injection	ATDC-40° ~40°	Pilot Injection Time	200μs~600μs
Pilot Injection	40°~MI		

本研究で使用した UFB 水の精製方法は、加圧溶解攪拌型ミキサを用い攪拌時間10分、空気を0.1L/min で供給し、純水 1L で生成を行った。図 5 に UFB 霧化気中のナノ粒子密度の計測装置を示す。パーティクルカウンタは、27.3L/min のガス吸引となり、霧化気にて大量の空気が混入されことから希釈装置を併用し実験を行った。希釈空気及び、霧化装置の吸引側はマイクロフィルタ (0.01 μ m) を用いた。計測条件は、計測時間、10s、10回の平均値である。

3. 実験結果

3・1 UFB 水の性状分析

図 6 にマルバーン製 LM-20 NANO Sight で UFB 水に含まれる気泡の粒子数を計測した結果を示す。約100nm 付近にピークを持ち、気泡サイズのバラつきが少ない均一化された約10億個/ml の UFB 水の生成に成功した。これを霧化装置に混入させ実験を行った。霧化においては0.1~0.5 μ m の領域でナノ粒子の輸送が飛躍的に向上しており、UFB 水の輸送に成功したと言える。

3・2 ラジカルの計測

図 7 に ESR でラジカルの有無を計測した結果を示す。水道水および UFB 水に 1 : 1 の割合でラボテック製のスピントラップ剤 (DMPO) と混合した。水道水とスピントラップ剤では波形に大きな変化は見られないが、UFB 水とスピントラップ剤では中央付近に大きな波形が現れ、1 : 3 : 3 : 1 の OH ラジカル特有の波形を確認でき、OH ラジカルが生成されている。

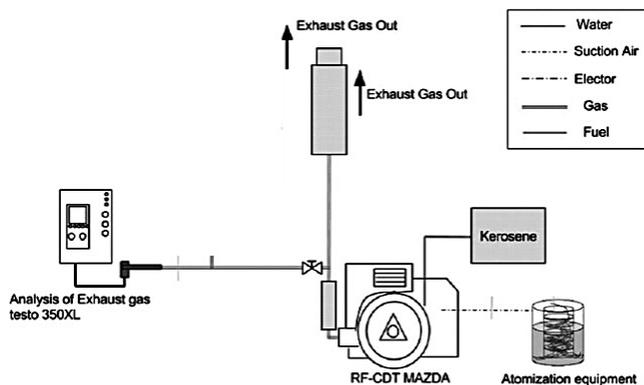


Fig. 4 Experiment device

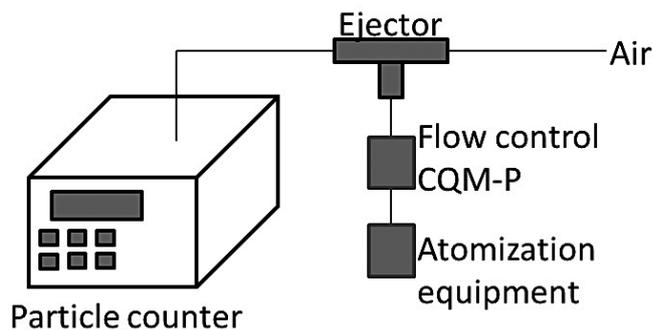


Fig. 5 Measurement of UFB into atomization gas

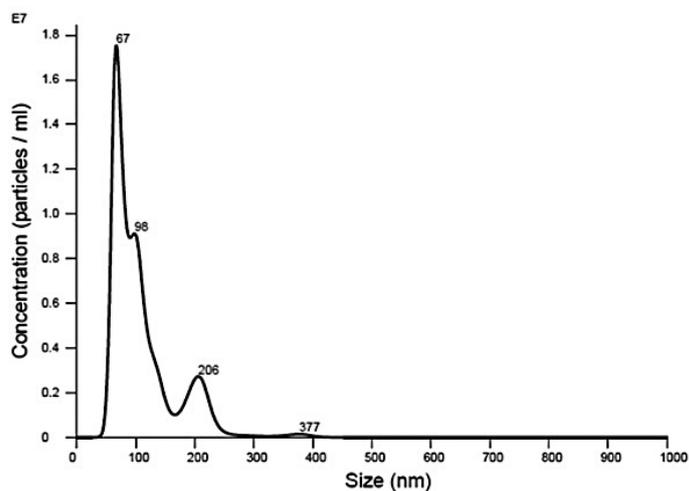


Fig. 6 UFB concentration

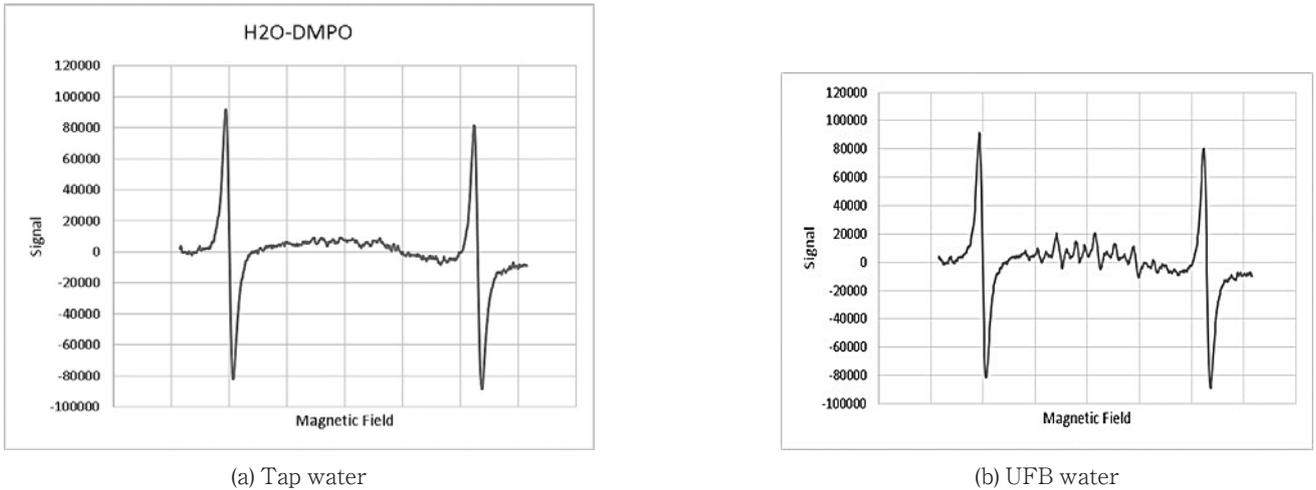


Fig. 7 Amount of OH radical analyzed by ESR

3・3 UFB 水霧化気の性状分析

図8にUFB水由来の霧化気の粒径結果を示す。0.1 μm の粒子数は精製水の霧化気に比べ一桁以上の増加が確認され霧化の形成に成功したといえる。これは、イオンやラジカルの作用によりUFB同士が反発効果を有しており、さらにUFBの圧壊による微細化が促進したものと推測する。

3・4 燃焼実験結果

図9に燃焼実験の結果を示す。UFB水霧化気を混入させたときの場合、ノーマルと比較して、負荷率25%では、NO_x濃度が約16.4%、CO濃度が約19.0%低減した。また燃料消費量は約7.1%改善した。負荷率50%ではNO_x濃度が約20.1%、CO濃度が約29.0%低減した。また燃料消費量は約9.3%改善した。負荷率75%では、NO_x濃度が約21.0%、CO濃度が約16.1%低減した。また燃料消費量は約10.9%の改善に成功した。

3・5 考察

燃焼実験の結果から、UFB水霧化気を吸気に混入することでNO_x濃度、CO濃度の大幅な改善に成功した。また燃料消費量も約10%改善することに成功した。これはUFB水霧化気に含まれるOHラジカルを燃焼室に直接輸送したことで燃焼性が向上し、低温燃焼を行ったことから汚染物質の低減につながったと推測する。燃料消費量に関しては、OHラジカルが燃焼性の向上を促し、燃焼効率が大幅に上昇したことで約10%の改善に繋がったものと推測する。今回使用したUFB水は、10億個/mLと高濃度のものを吸気に取り入れたため、低減率に大きな結果が得られたものと考えられる。また負荷率25%時と比較して、負荷率50%、75%の場合だと、顕著に低減されていることが確認できた。これは、高負

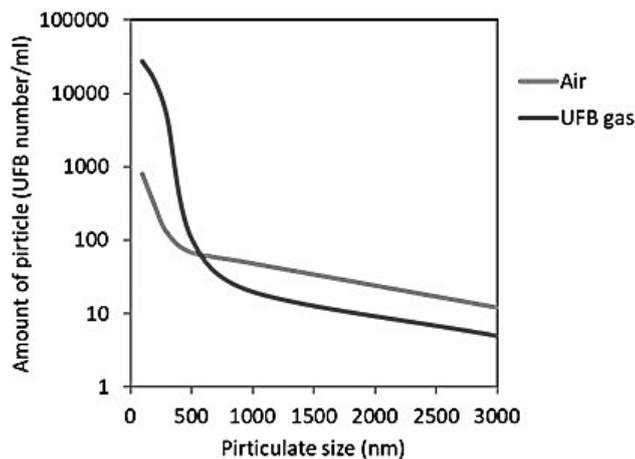


Fig. 8 Atomization of UFB water

荷時では吸気から空気を取り込む量が増えるため、OH ラジカルを含んだ UFB 霧化気を大量に燃焼室に取り込むことで燃焼性の向上に繋がり、汚染物質が低減したものと推測する。今回の実験では空気を混入させた UFB 水を用いたが混入させる気体でラジカルの種類が変更されるため、別の気体を用いて実験を行う必要があると考える。

今回の実験では、空気を使用した UFB 水を使用したのが、使用する気体を変更することで別の種類のラジカルが生成されることが報告されているため、今後の実験では、空気以外の気体である、窒素や二酸化炭素等を用いた UFB 霧化気を使用して実験を行っていく予定である。

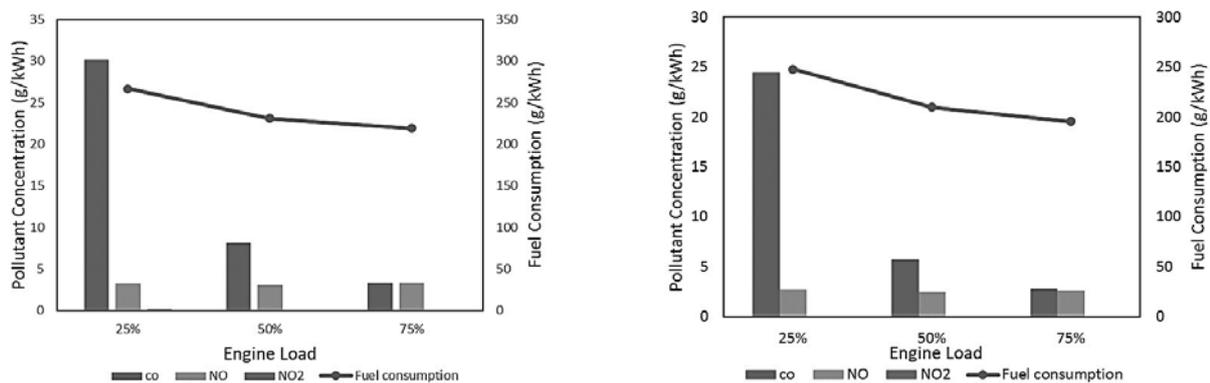
4. 結 語

本研究は、吸気に UFB 水の霧化気を用いた吸気改善技術の報告であり、以下の結論を得た。

1. 本研究の UFB 水の霧化気は、ナノオーダーの微細気泡の輸送に成功した。
2. UFB 水中には、陰イオンが形成されると同時に、OH ラジカルが生成される。
3. UFB 水霧化気を内燃機関の吸気に活用することで、NO_x が約20%低減し、燃料消費量を約10%改善することができた。

文 献

- (1) 中別府修, 土屋智洋, 中村優斗, 長坂圭輔, “燃焼場の壁面熱流束を計測する薄膜抵抗センサに関する研究”, 日本機械学会論文集, 82巻, 840号, pp.16-00083, 2016.
- (2) 村上雅明, 中尾徹, 船用 SCR を搭載した大型ディーゼル機関の就航試験結果, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第50巻, 第1号 (2015) pp.107-112
- (3) 高橋正好, マイクロバブルを利用した廃水処理技術, 日本海水学会誌, (2011) pp.19-23
- (4) 前田重雄, ウルトラファインバブルの生成・計測と産業洗浄分野への応用, 産業洗浄技術情報誌, (2015) pp.21-25
- (5) 安井久一, ウルトラファインバブルの安定化機構, 混相流 (2016), pp19-26
- (6) 柘植秀樹, マイクロバブル・ナノバブルの基礎, 特集「マイクロバブル・ナノバブルの特性とその応用」(解説) Bull. Soc. Sea Water Sci, Jpn, 64, (2010) pp 4 -10
- (7) 高木周, “マイクロバブルの基礎と最近の進展”, オレオサイエンス, 第10巻, 第9号 (2010), pp, 3 - 8.
- (8) 芹澤紹示, “マイクロ/ナノバブルの基礎”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第46巻, 第6号 (2011), pp.56-61



(a) Basic data

(b) Atomization of UFB water into suction air

Fig. 9 Results of combustion experiment

〔論文〕

各温度条件による CO₂UFB 水のナノ個数濃度の影響

藤瀬 恭平*¹・高山 敦好*²

Effect of Nano Number Concentration of the CO₂ UFB Water by
Each Temperature Condition

Kyohei FUJISE*¹, Atsuyoshi TAKAYAMA*²

Abstract

Ultrafine bubble (UFB) water exhibits various effects that are dependent on the gas and mixing size, such that its development is now employed in various fields. However, while numerous studies have utilized UFB water, its properties are still unknown. It is important to technique to make and control high-concentration UFB water. The effect of the gas depends on the nanobubble concentration of the liquid UFB water. High nanobubble concentrations must overcome the temperature influence since the solubility varies based on the gas type and temperature. Here, CO₂ UFB water is analyzed to investigate the temperature effect on the nanobubble concentration. A decrease in temperature from 40°C to 30°C yields increases in both the nanobubble concentration of CO₂ UFB water and total dissolved solids (TDS) concentration. Furthermore, TDS concentration is increased by Nano number concentration, at the same time decrease of pH.

Key Words : UFB Water, Temperature, Nanobubble Concentration, pH, TDS, CO₂

1. 緒 言

ウルトラファインバブル (UFB : Ultra-Fine Bubble) 水は、溶媒に微細気泡を混入させた機能水であり、使用する気体や粒径、濃度によって様々な効果が報告されており、多方面の分野での応用研究が展開されている。UFB 水中には、ラジカルやイオンが生成されることから、殺菌作用や洗浄効果などは、これに起因したものであると推測されるが、その性状は未だに解明されていないのが現状である⁽¹⁾。

食品関係において菌の繁殖を抑えるために、防腐剤や添加物が使用されている。人体への悪影響が懸念されることから、無添加物が好まれる傾向にあるが、消費期限や廃棄物の増加に繋がり新たな問題となっている。また殺菌において加熱殺菌法が用いられる。しかしながら熱による味の劣化や香気成分の損失を招きやすく一般的に用いられているのは次亜塩素酸類による塩素処理である。代替技術としてオゾンや過酸化水素を用いたラジカル処理方法が注目されている。オゾンは殺菌性が高く分解により酸素に変化するため、環境負荷が少ない特徴があるが、水への溶解性が低く水に溶解した状態では半減期が短かく扱いには注意が必要である⁽²⁾。このようなことから、安価での入手が可能でかつ取り扱いの危険性が比較的低く酸性化が顕著に生じる CO₂UFB 水は、次亜塩素酸の代替活用が期待できる。その裏づけとして著者らは、CO₂UFB 水が大腸菌の殺菌・抗菌に効果があることを報告している⁽³⁾。また農業分野では、甘味や香りづけの過程において CO₂の活用が従来から行われていることから、安定的な CO₂UFB 水の生成手法を構築する必要があると言える。

UFB は内部圧力が高く気泡内部の気体が溶け込み収縮することで最終的に自己圧壊を起こし消滅するとされ、その際に発生するジェットや水が分解されることでラジカルが生成されると考えられている。このことから UFB の実用・普及化には、現状よりも大量かつ高濃度化および制御可能化が好ましく、溶媒に封入する気体の効果は、液中の気泡の個数濃度 (ナノ個数密度) に左右される。また、混入する気体の種類や温度によって溶解度が異なることから、高濃度化を目指す上では温度による影響を克服する必要があり、加圧溶解方式においては至難の業となる。

*¹ 工学研究科, *² 機械システム工学科
令和元年10月31日受理

そこで本研究は、CO₂UFB 水に焦点を当て温度の変化による個数濃度への影響の検証および低温下での高濃度化を試みたものである。溶解度の温度依存により、気体は液体や固体より高温になるほど溶けにくい。そのため CO₂は、他分子とほとんど結合せず低温にならなければ凝縮系にはならないため、個数濃度への影響の可能性がある。

2. 実験装置及び実験方法

2・1 UFB 水について

ファインバブル (FB : Fine Bubble) 水は、マイクロバブル (MB : Micro Bubble) やウルトラファインバブル (UFB : Ultra-Fine Bubble) などの微細気泡が水中に溶け込んだものの総称であり、気泡径が数10 μ m から100 μ m 以下のものを MB、MB よりも微小で気泡径が1 μ m 未満のものを UFB と呼ぶ。旧称はナノバブル (NB : Nano Bubble) であり、国際標準規格 (ISO) 化に伴いから名称が変更された⁽⁴⁾。MB 水は、気泡の浮力作用を用いた排水処理や水質浄化技術として利用されており実用化されている。また、混入気体を変えることで様々な効果を得ることができるため、漁業や農業など様々な分野で用いられている。一方、UFB 水に溶け込んだ気泡は微細なため目視で確認することができず、浮力も無視できるほど小さい。また、気泡表面は負の帯電特性を持つため、UFB 同士は反発しあい結合が生じにくく、プラス電荷を帯びた汚れを吸着する作用があり、長時間の水中に保存される特徴がある。気泡の研究は古くから行われており、日本の工業分野では開発の根幹に関わる重要な技術として取り扱われ、多くの技術者や研究者により発展を遂げた。1995年、貝類の養殖に MB を適用したところ問題斃死を解決しただけではなく成長促進効果が現れ、メディアに取り上げられことで注目を浴び、これを境に商業研究施設や企業での積極的な研究が進められ始めた⁽⁵⁾。その結果 MB が水中で縮小し UFB に移行するなど新事実が明らかとなった。現在では、環境汚染や地球温暖化問題が注目され排ガス処理や排水処理などの環境保全技術の研究が進められている⁽⁶⁾。図1に UFB 水の構造、ナノサイトと用いた AirUFB 水の粒度分布の計測結果を示す。UFB 水は100nm をピークとした一本山の形状が特に安定的であると考えられる。

2・2 UFB 水の生成について

図2に UFB 生成装置を示す。NIKUNI 製32NPD15Z 渦流タービンポンプを採用した。ポンプ吸入側に UFB 水の貯水を行なうタンク、ポンプ排出側に本研究室で作成した加圧溶解攪拌型ミキサを接続し、ポンプの気体注入口から気体の供給を行うことで、気体と水の気液相をミキサ内へ送り込みタンクへ戻す循環経路を形成した。気体と水の混合水は加圧溶解攪拌型ミキサを通過することで加圧攪拌が行われ UFB 水が生成される。図3に示す加圧溶解攪拌型ミキサは、2枚のプレートからなっており、一枚目のプレートは中央部に大きな孔径の孔が1つ、二枚目のプレートは中心部とそれを囲むように孔が空いており、中央部の孔は外側の孔の孔径よりも小さい。プレートに一定幅を設けることで気液混相の段階的な圧力開放により、対流が発生し、せん断が行われながら UFB が生成される。また、装置内を循環することでミキサ内の通過回数が増え気泡粒子径は減少する。生成した UFB 水の温度を一定にするため、タンクに戻る UFB 水は冷却装置を用いて温度調整を行なった。

UFB 水の生成条件は、圧力0.6MPa、気体流量0.1L/min とし、攪拌時間を10min、20min として30 $^{\circ}$ C 帯と40 $^{\circ}$ C 帯と温度操作を行い検証した。

2・3 冷却装置

UFB 水を冷却する装置は、柴田科学株式会社製共通すり合わせジムロート冷却管を使用した。ジムロートとは、還流冷却器のことであり、加熱還流条件下で化学反応を行うときに効率よく溶媒蒸気を凝縮させるガラス製の冷却管である。流水側から内部にかけて直管が太くなり、直管の内部には、ガラスコイルが備え付けられている。中央部のガラスコイルに冷却水を流すことでガラスコイルの外側を通過する UFB 水の熱を奪うことで熱交換する仕組みである。冷却能力は、ガラスコイルの接地面積に影響を受けることから、冷却水の流水方向が決められている。選定理由として UFB 水の生成装置への取り付けが容易であり、チラーなど冷却装置とは違い UFB 水が直接通過しないため、ポンプ圧力による冷却装置の破損や生成した UFB 水への影響が受けにくい利点があるためである。また冷却管には、ジムロート以外にもいくつかの種類が存在する。リービッヒ冷却管は、蒸留の時に使用され斜め方向に傾けて利用する。内管がまっすぐなため、斜めにしても液体が溜まることが無い特性を持つが冷却効率はあまり高くない。そのため使用する溶媒が高沸点で蒸気が出てこない場合にのみ使用される。玉入・アリーン冷却管は、最も一般的な冷却管であるが、こちらも低沸点の溶媒で高い冷却効率が必要な場合意外での利用となる。蛇管・グラハム冷却管は、蒸気を冷却し液化させ下部に落ちる構造となっており、冷却効率は高い反面蒸気の通り道が狭いため圧力影響を受ける。以上のことから冷却能力や

装置への適用を考えるとジムロートに優位性があるため採用した。

循環水の負荷（装置）側からの出口温度と入り口温度が判明しているため、必要な冷却能力を以下(1)の式を用い算定し、冷却装置の選定を行なった。本研究では冷却能力が $Q=0.42\text{kW}$ 必要である。また、実際にはタンク内への侵入熱などの損失を見込んで安全率を考慮する必要があり使用したジムロートはジムロート内のコイル長200mmで最大冷却能力は0.58kWとなり、十分な冷却が期待できる。

$$Q = \frac{W \times C \times (t_2 - t_1)}{(H \times 800)} \quad (1)$$

Q：熱量 kW（1 kW = 860 kcal/h）

W：重量 kg（容量 L × 比重）

C：比熱 kcal/kg°C

t₁：低い方の温度°C

t₂：高い方の温度°C

H：冷却に必要な時間 h

2・4 UFB 水の計測装置

マルバーン製 Nano Sight（LM20）によるナノ粒子トラッキング解析法を用い、粒度分布および粒子数濃度の測定を行った。レーザー光を照射することで粒子が行なっているブラウン運動の軌跡を解析する。粒子の移動速度を算出し、粒子径を解析する。少ないサンプルで測定が可能であり、広い測定レンジを持ち測定に物性情報を必要としない特徴が

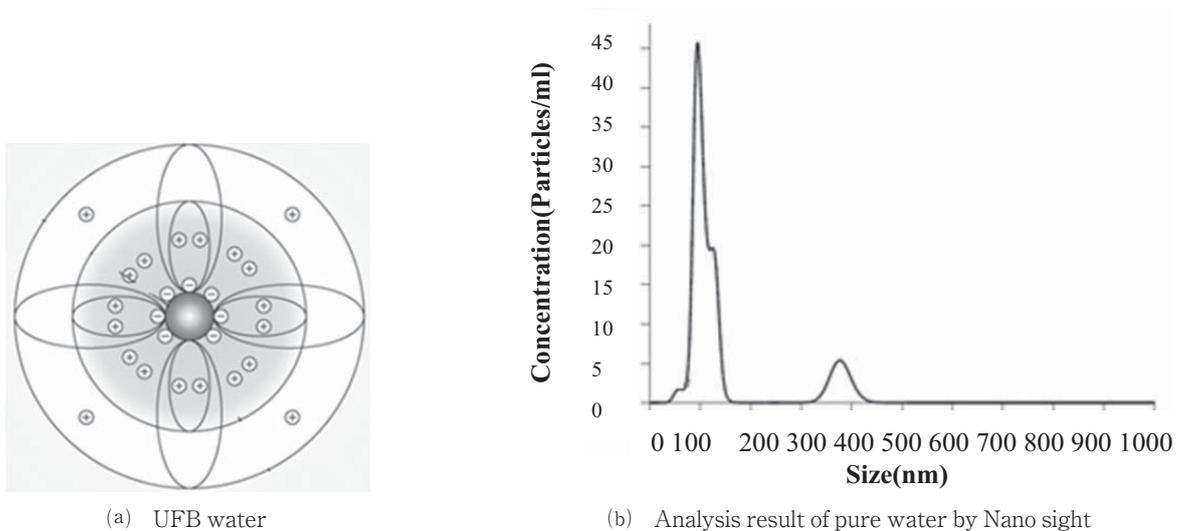


Fig. 1 UFB water

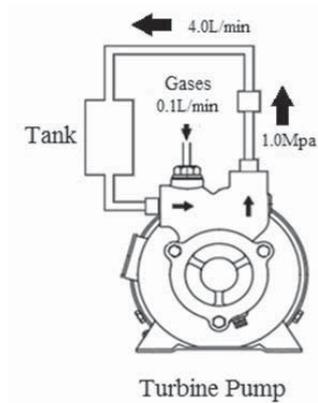


Fig. 2 Experimental device

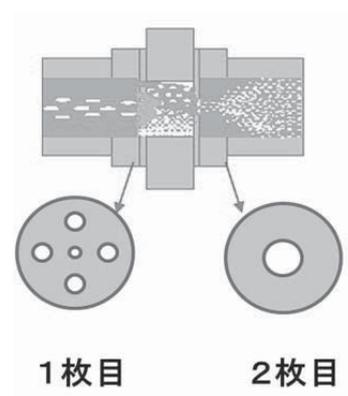


Fig. 3 Pressurization and Dissolution Mixer

ある。測定モジュールに UFB 水を注入することで水平になるようにレーザー光が照射される。性状分析として、UURCERI 製 pH 計、ASONE 製全溶存固形物量 (TDS: Total Dissolved Solids) にて測定を行った。

3. 実験結果

3・1 温度影響と冷却能力

図 4 は、冷却水の有無、600s 稼働させたときのポンプ側とタンク内の水温を示す。冷却を行っていない場合攪拌時間の増加に伴いポンプ表面温度と水温は上がり続け100℃近くまで上昇している。ジムロートを用いた場合ポンプ表面温度、水温ともに温度上昇は落ち着き一定の値を示している。また、図 5 に示すグラフは、条件として精製水 1 L、二酸化炭素の流量 0.1 L/min、稼働時間を 5 min 刻みで粒度分布を計測したものである。その結果、10min では 1.9×10^8 個と多く生成できているが、時間が経過し温度が上昇すると共に個数濃度が減少している。特に二酸化炭素やオゾン温度の影響が大きいと考えられるため、混合させた場合、温度影響を減らすことでナノ個数濃度は上昇する傾向にあることがわかった。

3・2 UFB 水について

図 6、図 7 に各攪拌時間での CO₂UFB 水の 30℃ 帯と 40℃ 帯でのナノサイトによる粒度分布の結果を示す。40℃ 帯での波形は時間経過に関わらず複数の波形が確認され、最頻値は 10min、20min とともに 90nm 付近となっている。30℃ 帯

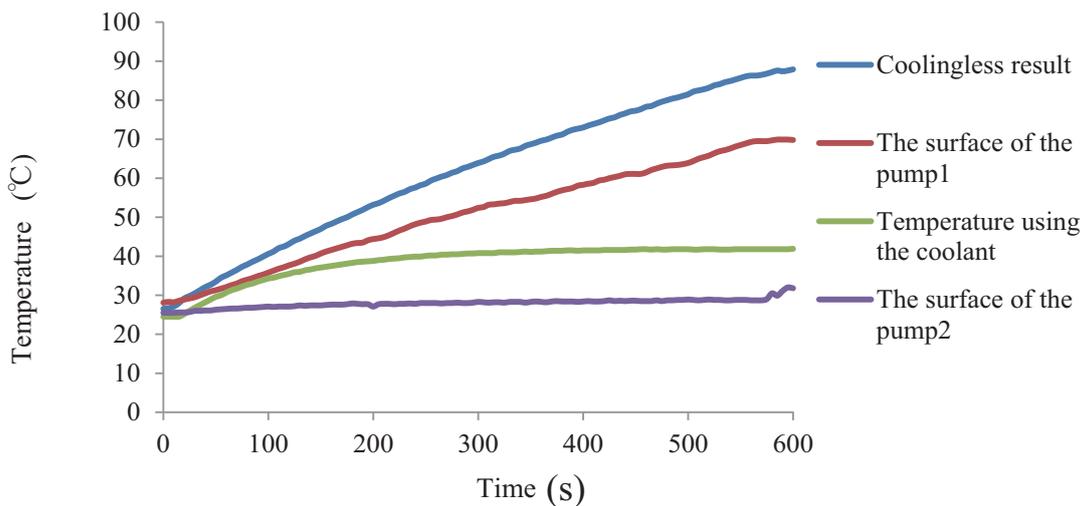


Fig. 4 Effect of cooling water against tank side and pump side

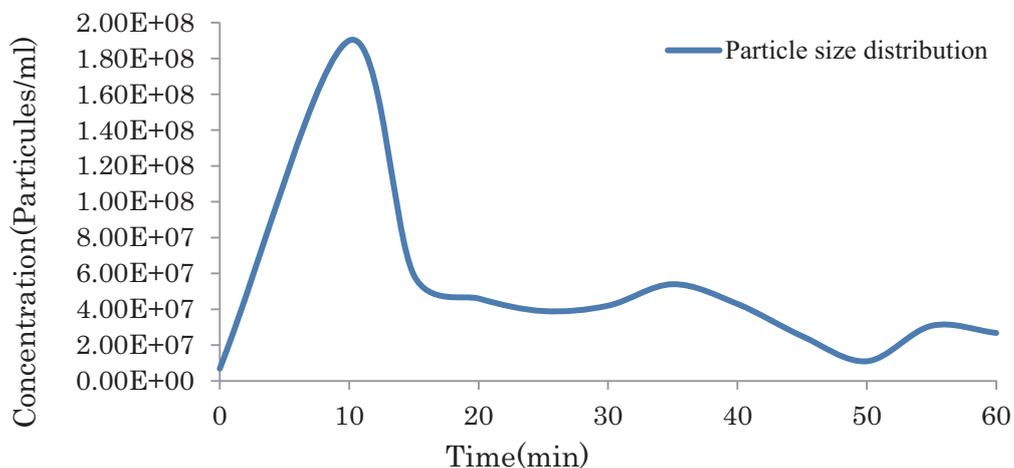


Fig. 5 Cooling less result

の最頻値は10min 時72nm, 20min 時は84nm を示した. 40℃帯と30℃帯を比較すると30℃帯の波形は一本軸に収束しているが40℃帯では波形の山が複数確認できる. 30℃帯での10min と20min の比較では波形が収束し, 粒径は寄り顕著な均等化が起きているが, 40℃帯では, 波形の収束が行なわれていない. また, ナノ個数濃度は40℃帯では 4.5×10^7 個/mL, 30℃帯は 3.6×10^8 個/mL を示し, ナノ個数密度に大きな変化が見られた. これの結果から, 40℃以上での高温度下での UFB 生成は期待できない. なお表1に精製水と CO₂UFB 水の性状を示す.

性状結果では, pH はどちらも酸性を示し, 温度低下により, ナノ個数濃度が向上しさらに酸性化が促進された. 水道水を用いた場合 pH は, 5.0までしか下がらないが, 純水を用いたことで pH はどちらも4.0前後の値を示している. これは緩衝作用が要因であると推察する. 水道水は, 塩素処理による殺菌が行なわれるため, カルキなどの不純物が混有している. そのため, 水道水を用いた場合では CO₂と緩衝作用が起これり, 水素イオン濃度の変化は和らげられ5.0以下の低下は難しい. しかしながら, 精製水では, 不純物が含まれていないことから, 緩衝作用による一定化が起これらず,

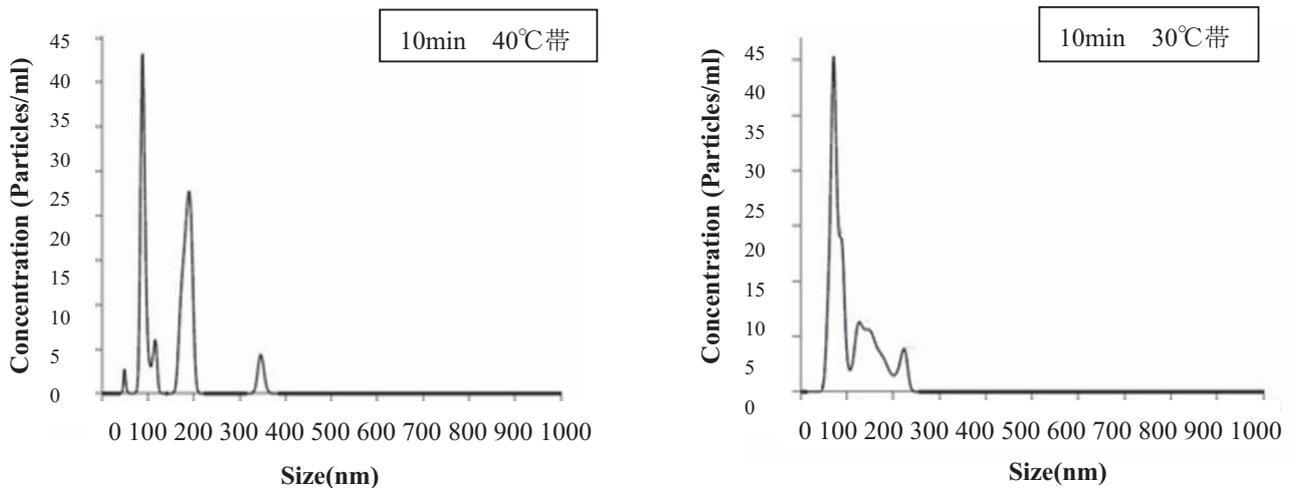


Fig. 6 Particulate Size 10 min

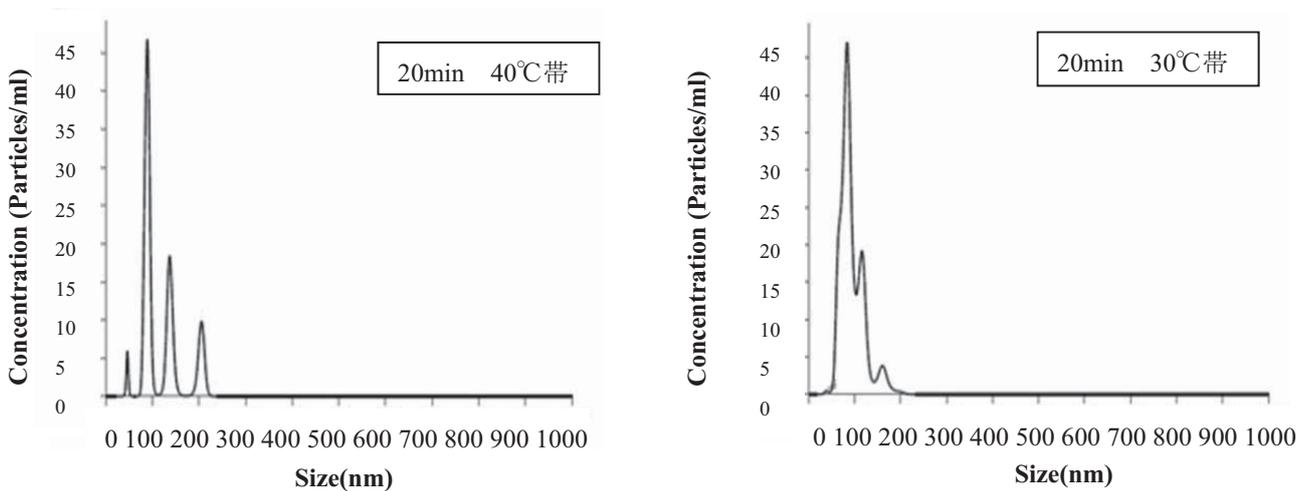


Fig. 7 Particulate Size 20 min

Table 1 Water quality analysis result

	pH	℃	TDS (g/ml)	Nano Number concentration
Purified water	6.92	18	0	1.9×10^7
CO ₂ UFB water	4.34	45	12	4.5×10^7
CO ₂ UFB water by cooling system	4.19	31	15	3.6×10^8

酸性化が進み4.0前後の値を示した。また、30℃帯と40℃帯を比較するとでは、30℃帯でのほうが若干の pH 低下が見られる。これは、気泡中に含まれる CO₂成分により、水素イオン濃度が変化したため、ナノ個数濃度が優れる30℃帯で酸性化が進んだ。

TDS 値はいずれも10g/mL以上を示しており、温度低下により、さらに濃度が向上する傾向がみられた。AirUFBではTDS値変化は起こらないが、CO₂を用いた場合TDSは上昇する。通常のバブリングでもTDSは変化するが、UFB水と比較すると効果は低い。本実験結果では、温度低下に伴いナノ個数濃度が増加したことで、TDS値の上昇に繋がりが、TDSが10g/mL以上の値を示した。このことから、液中のナノ個数濃度とTDS値には、相関性がある可能性があり含有量を示す指標としてTDS値は有効であると推測される。

3・3 考察

通常の生成方法と冷却装置を用いたUFB水のナノサイトによる粒度分布の結果を比較すると通常の生成方法での波形は時間経過に関わらず複数の波形が確認され、10min、20minともに最頻値は90nmであった。冷却装置を用いた場合、10min時に最頻値は72nm、20min時に最頻値は84nmを示した。波形は乱れがあるものの時間経過と共に一本の軸の波形に変化しつつある。また、表1に示す性状結果では、従来の生成方法では15℃近くの温度差があり、温度の低減に成功した。個数濃度は従来の生成方法では 4.5×10^7 個/mL、冷却装置を用いた場合 3.6×10^8 個/mLを示し、1桁単位での変化が見られた。TDS値は、わずかな上昇が確認することができた。

温度の低減により個数濃度が上昇した原因は、水に対する気体の溶解度が要因と考えられる。溶解度とは、溶質が一定量の溶媒に溶ける限界量であり、溶解度は温度と相関性があり、気体は液体や固体より、高温になるほど溶けにくい性質を持つ。液体や固体を形成している原子、分子は他の原子、分子とよく結びつくことができ大きな物質を作ることから水中であっても水分子と結びつきやすい。高温下では水の水素結合が破壊される為、他分子と結びつく可能性が高くなる。しかし、窒素炭素やCO₂などは、他分子とほとんど結合を行わないため、低温度にならなければ凝縮系にはならない。このように気体分子が水中にあっても、水分子間の引力は極めて小さく、金属中の自由電子や、容器中の液体と同様で、水面から容器の端までの仕事関数を獲得すると外に飛び出してしまふ。

粒子が高さU（活性化エネルギーに相当するもの）の壁を越える確率は $\exp(-U/kT)$ に比例する。kはボルツマン定数であり、1モルの場合には気体定数Rになる。つまり系の温度が絶対温度のとき、溶液中に存在しない確率がこの因子で表される。水中の気体分子は、温度が上昇すると熱運動により活発に動く。その結果、溶液から抜け出す量が増加し、高温での気体の溶解度が減ると考えられる。気体分子運動論におけるCO₂の二乗平均速度は0℃で 0.393×10^3 m/sしかし50℃では 0.427×10^3 m/sとなるため、溶液が熱を得ることで気体分子の運動エネルギーは増加する。よってCO₂の溶解度は温度の変化に伴い指数関数的に増加し水温が低い0 - 20℃で溶解度の勾配が急激に変化する^{(7),(8)}。またナノサイトでUFB水を測定する際、観測されるナノ粒子は使用気体に関わらず、ブラウン運動を行っている。ブラウン運動は、温度が高いまたは、微粒子が小さいほど激しくなる性質があることからMBより微小であるUFBは、温度影響を受けやすい。高温下ではUFB水の個数濃度は上昇せず、O₃やCO₂などの気体はより顕著な影響を受けると推察する。

4. 結 言

本研究は、冷却装置を用いて、CO₂UFB水を生成することで以下の結論を得た。

- 1) 水温に関わらず微細気泡を混入したCO₂UFB水の生成に成功した。
- 2) 水温を低下させることで本実験ではCO₂UFB水の粒子濃度は、水温が40℃帯の時は 4.5×10^7 個/mLで30℃帯の時は 3.6×10^8 個/mLを示した。
- 3) 水温が低下することで、TDS濃度、液中のナノ個数濃度が向上する傾向にあり、pHも同様に酸性化が進む結果となったことから、液中に封入されるCO₂濃度が向上できたものと言える。
- 4) TDS値とナノ個数濃度に相関性が見られた。

文 献

- (1) 安井久一，“ウルトラファインバブル”日本音響学会誌，73(7)，(2017)，pp424-431.
- (2) 五十部誠一郎，“非加熱殺菌法を中心とした新規殺菌技術”，日本食品微生物学会雑誌，273，(2010)，pp115-122.

-
- (3) 藤瀬恭平, 高山敦好, “UFB 水中のナノ粒子密度による抗菌・殺菌の処理効果”, 環境工学総合シンポジウム, (2018)
 - (4) 寺町宏一, 氷室昭三, 安藤景太, 秦隆志, ファインバブル入門, 日刊工業新聞社, 東京, (2016).
 - (5) 朝日新聞夕刊: 41090号 (日刊) 2000年 8 月 5 日
 - (6) 矢部彰, “ファインバブルの国際標準化を支える研究成果”, 混相流, 30(1), (2006).
 - (7) 理科年表オフィシャルサイト気体の水に対する溶解度, 丸善出版株式会社
https://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/buka/buka_012.html (2018年12月 7 日閲覧)
 - (8) 池田和博, 理科年表国立天文台編平成30年第91冊, 丸善出版株式会社, pp526