

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 14 日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤(C)

研究期間：2009 年度～2011 年度

課題番号：21560184

研究課題名（和文） マイクロバブルによる水環境改善に及ぼす各種パラメータの影響把握とその原因の解明

研究課題名（英文） Clarification of Effects of Parameters on the Water Purification Using Micro bubbles

研究代表者

南川久人 (MINAGAWA HISATO)

滋賀県立大学工学部教授

研究者番号：60190691

研究成果の概要（和文）：本研究では、マイクロバブルが水に対してどのような作用を及ぼすのかを、外乱が入りにくい実験室内環境下で明らかにするため、十分にコントロールされた環境下で、一部のパラメータのみを変化させ、マイクロバブルの発生法、気体種、気泡径およびその分布、ボイド率、周囲液相の気体溶存飽和度・温度などが、気泡上昇速度、気泡溶解速度（気泡径変化）、ゼータ電位、液相のDO変化、COD変化、Ph変化、電気伝導度変化、流動時の管内摩擦抵抗、洗浄能力などに及ぼす影響を個々に明らかにすることを目的とした。

得られた結果としては、DO値はマイクロバブルを与えた場合には増加して飽和値をキープしたが、COD値も増加した。マイクロバブルによる洗浄試験では、せん断法による気泡に、一定の洗浄効果が確認できた。一方、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果についても調べ、その結果、せん断方式で作成したマイクロバブルを添加した場合に、比較的大きな摩擦低減効果が表れることを確認した。ゼータ電位についても、発生法や気体種による違いが多少ながらも確認できた。

研究成果の概要（英文）：In order to make clear the effect of micro bubbles on the water purification or the water itself, we made experiments on what effect appears when adding micro bubbles on water with changing the parameters relating to the producing processes of micro bubbles. Measurements were performed in the laboratory consistently controlled lest the disturbances should affect the results. The effects of parameters were investigated under changing the producing method of micro bubbles, gas species, bubble diameter and its distribution, void fraction and temperature. The measured values in the experiments were the zeta potential, the DO, the COD and the ph values of liquid phase, the drag reduction of pipe flow caused by micro bubbles, and the washing capability.

As a result, the DO value kept a saturation value when micro bubbles were supplied, the COD value also increased. On the washing ability of micro bubbles, it was found that the bubbles produced by the sharing method have some ability in washing. On the other hand, the bubbles produced by the sharing method were also effective on the drag reduction of pipe flow. The zeta potential was also affected by the producing method of micro bubbles, and the gas species in some degree.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010 年度	800,000	240,000	1,140,000
2011 年度	100,000	30,000	130,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：(1)マイクロバブル，(2)水質浄化，(3)ゼータ電位，(4)COD

1. 研究開始当初の背景

(1)マイクロバブルによる水環境改善法は，すでに多くの成果を挙げ，申請者らも，大規模かつ深度のある水域に，マイクロバブルによる水質浄化法を適用する方法を検討しているところである．しかし，マイクロバブルが水環境を改善する根本的なメカニズムに関しては，これまでほとんど検討されておらず，予測と推論とで済まされているのが現状である．メカニズム解明を大きく阻害しているのは，これまでの申請者らのものも含めて，実験が自然環境下で行われ，日照や降水，気温変化による外乱が非常に大きく，マイクロバブルによる効果を抽出することが困難となっていることである．

(2)R.Cliftらにより1978年に刊行された気泡工学における不朽の名著 "Bubbles, Drops, and Particles"においてでさえ，対象最小気泡径は0.2mm程度で，それより小さい気泡についてはほとんど取り上げられていなかった．しかし，それから四半世紀，今ではそれより数オーダー小さい気泡までが研究対象とされている．いわゆる，マイクロバブル～ナノバブルである．これら超微細な気泡は，ここ数年で急激に注目を浴びようになり，気泡発生技術と利用技術も，めざましく発展しつつある．このようにマイクロバブルが急速に研究され始めた一つの理由は，それを作り出す様々な装置が開発されたことにあるが，さらに大きな理由は，気泡径を小さくしていくと，それまでは考えられなかったようなメリットが多数見つかってきたことであろう．メリットとして挙げられる代表例は，船舶の抵抗低減などに注目されている摩擦抗力低減，単位体積あたり非常に大きい界面を通しての物質移動：具体的には化学反応促進や気体の液体への溶解促進，魚介類の養殖場で発揮された生理活性能力，小規模閉鎖水域では既に具現化している水質浄化能力，洗浄並びに難分解性物質の分解能力，液体物性値変化，流れの可視化やトレーサーとしての利用，医療分野での利用，ソノケミストリへの適用等々，今後も増えていくことが確実な分野である．ところが，各要素技術におけるマイクロバブル技術の科学的な裏付けは，不十分なものがほとんどであり，それが災いしてか，マイクロバブルを用いていると謳った製品の中には非科学的な説明がなされているものも多数ある．

(3)マイクロバブルによる水環境改善法に關しても例外ではなく，たとえば，マイクロバブルを水中で送り込むことにより水中の酸素濃度（以下，DO値）が増大することが一つの主要な要因と考える研究者もいるが，その一方で，牡蠣やアコヤ貝などの養殖，あるいは魚類に対して明らかになったマイクロバブルの生理活性効果，マイクロバブルの持つ電気特性による浮遊分離効果等も影響するとも考えられており，定説といえるものは存在していない．マイクロバブルによる水環境改善のメカニズム解明を大きく阻害している大きな要因は，これまでの申請者らのものも含めて，実験が自然環境下で行われ，日照や降水，気温変化による外乱が非常に大きく，マイクロバブル注入による効果を抽出することが困難となっていることである．

2. 研究の目的

(1)マイクロバブルが環境水に対して，どのような作用を及ぼすのかを，外乱が入りにくい実験室内環境下で明らかにする．単に，水中にマイクロバブルを注入して，その水質を改善すると言っても，その条件は広範であり，それが効果をあげたからと言って，別な場所で成功するとは限らない．それは，影響を及ぼすパラメータがあまりにも多いため，たとえば屋外の池や小規模湖沼であったとしても，降水や日照，生物相の状況，深度や底の状態，といった外乱や条件の違いがまず影響を及ぼしてしまい，マイクロバブルを注入したことの効果だけを取り出すことが難しい現状である．そこで，本研究においては，十分にコントロールされた環境下で，一部のパラメータのみを変化させる．そして変化させたパラメータと被測定物理量の影響を明らかにし，マイクロバブルのどのような作用が，水環境改善に役立っているのかを解明したいと考えた．

(2)そのための基礎データを得ることも目的の一つである．すなわち，多種多様なマイクロバブルの発生法やバブルを作る気体種，あるいは発生させる気泡径とその分布，濃度．これらが，マイクロバブルの種々の特性とどのような関係を持つのかを少しでも明らかにしていくことが，今後のマイクロバブル研究に，有益なデータを与えると考えている．

(3)以上の目的に絡んで，いかにしてマイクロバブルを効率的に発生させるのかについて

も、長いスパンのテーマとして常に研究対象として取り組んでいる。今回の測定でも測定対象とした加圧溶解方式において、その気泡発生効率を向上させるために、いくつかの検討を行って、より濃密なマイクロバブル群を発生させることも目的の一つに加えた。

3. 研究の方法

(1)上でも述べたように、本研究においては、十分にコントロールされた環境下で、一部のパラメータのみを変化させる。マイクロバブルの発生法としては、加圧溶解法とせん断法、ベンチュリ法、旋回流法を用いる。気体種としては、空気、酸素、窒素、アルゴンを用いた。気泡径およびその分布とボイド率は、発生法に従属的ではあるが、ある程度コントロールできる。周囲液相の気体溶存飽和度・温度も、影響を及ぼすので、変化させる必要がある。これらを変化させたうえで、気泡上昇速度、気泡溶解速度（気泡径変化）、気泡のゼータ電位、液相のDO値変化、COD変化、Ph変化、電気伝導度変化を測定した。

(2)現在までのマイクロバブルによる水環境改善に関する研究は、特定の生物に対する生理活性効果、湖沼の水質浄化等の、マイクロバブル注入後の結果に関する研究成果はたくさんあるものの、その要因については、ほとんど解明されていない。また、溶存酸素に対するマイクロバブルの寄与に関する研究のように、限定的な物理パラメータに対するマイクロバブル注入の効果は解明されているものの、それらの相互関係は明らかではない。したがって、これらの橋渡しとなる、当申請研究のような研究が、どうしても必要である。ここがあいまいであるため、一部業者は、マイクロバブルさえ使えば、水質は改善されるような表現の広告をするし、ユーザーもよくわからずに採用し、結果的に水質改善が見られないという失敗を招いてしまうのである。

(3)本研究で得られる成果は、とりあえずは水環境改善に関する問題への対応であり、今後のマイクロバブルによる水環境改善法のさらなる改良を目指すものであるが、マイクロバブルのその他諸対象に対する効果への基礎研究ともなると考えている。たとえば、マイクロバブルによる洗浄や難分解性物質の分解能力に対しても、その効果は分かっているが、その原因は解明されているとは言い難い。これらのためにも、本研究のような基礎研究が必要であると考えた。

4. 研究成果

(1)2009年度では、まず前半では、COD計とゼータ電位計の、二種の計測機を購入して、これらのパラメータの計測準備を行った。後半には本実験を行い、系統的にデータを取得していく。COD測定を除く測定では、基本的に水道水を用いて実験を行う。ただし、物性値の微妙な変化が必要な場合に限って、精製水を用いる。一方、COD測定には、滋賀県立大学内の環濠の水を用いて実験を行った。マイクロバブルを発生させる場合とさせない場合、通常の光を当てる場合と当てない場合などについて、DO値と、COD値の経時変化を調べた。与えたマイクロバブルは、加圧溶解法によって発生した、非常に気泡径の小さいもの（平均径 20 μm 程度）とした。その結果、DO値はマイクロバブルを与えた場合には増加して飽和値をキープした。与えない場合は徐々に減少傾向が見られた。しかし、COD値に及ぼす顕著な影響は確認できなかった。今後、気泡発生法や、水の初期COD値の変化を与えて、さらに測定を継続する予定である。また、同時にマイクロバブルによる洗浄試験も行った。これは、気泡自体の性質を調べる一環であり、せん断法による気泡に、洗浄効果が確認できた。

(2)2010年度に得られた結果としては、DO値はマイクロバブルを与えた場合には増加して飽和値をキープしたが、COD値も増加した。マイクロバブルによる洗浄試験では、せん断法による気泡に、洗浄効果が確認できた。一方、マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果についても調べ、その結果、加圧溶解方式のマイクロバブルに界面活性剤を添加した場合に、比較的大きな摩擦低減効果が表れることを確認した。一方、ゼータ電位についても、発生法による違いが確認できた。すなわち、加圧溶解法で作ったマイクロバブルのゼータ電位の絶対値は概して小さい目の値となり、せん断法で作成したマイクロバブルのそれは、より大きい絶対値を示した。このように、作成法による違いが明らかとなってきた。

(3)最終年度では、ゼータ電位に対してさらに系統的データ収集を行った。有意検定を用いて検討を行った結果、発生装置、気体種並びに気泡径によるゼータ電位の影響は、有意的な差は見出せず、測定誤差範囲内で、ほぼ影響が見られない場合と、明らかに有意な差が見られるものに分かれた。なお、測定範囲は発生装置としては加圧溶解法、せん断法並びに旋回法の三種、気体種としては空気、窒

素、酸素の三種、気泡径は10~50マイクロメートル程度であった。

気体種ごとに、MB発生方式によるゼータ電位の結果をまとめた。Fig.1~Fig.4にそれぞれ、空気、窒素、酸素、アルゴンの結果を示す。左のグラフは、気泡径とゼータ電位の関係を表し、気泡径ごとに平均をとった。右はゼータ電位と確率密度関数(PDF)の関係を表す。

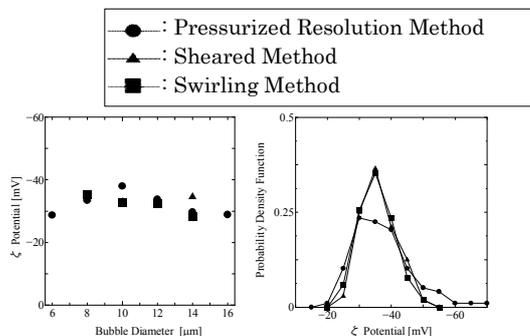


Fig.1 Result of the zeta potential for Air

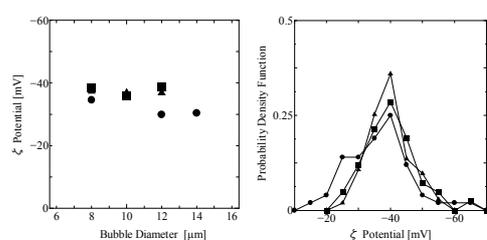


Fig.2 Result of the zeta potential for Nitrogen

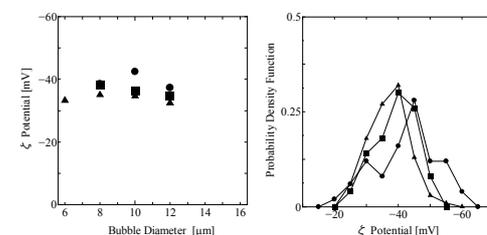


Fig.3 Result of the zeta potential for Oxygen

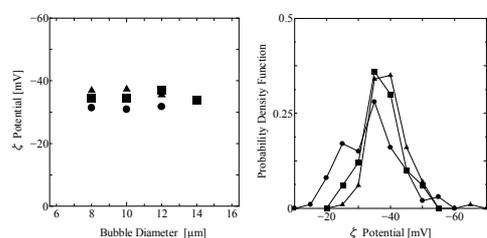


Fig.4 Result of the zeta potential for Argon

図をみると、それぞれの気体種で、ゼータ電位は多少のバラつきはあるが気泡径ごとによる大きな差は見られず、約-30~-40mVの範囲の値を示した。これは、ゼータ電位は

気泡径による差はないという過去の研究結果と一致している。右図をみると、せん断方式と旋回方式が似た分布を示し、加圧溶解方式は横に広がっているのが見受けられ、若干の差があると考えられる。

次に、気泡径を無視し、気体種と発生方式ごとにゼータ電位を表したグラフをFig.5に示す。左図は、縦軸にゼータ電位の平均値を表し、右図は、縦軸に標準偏差を表す。

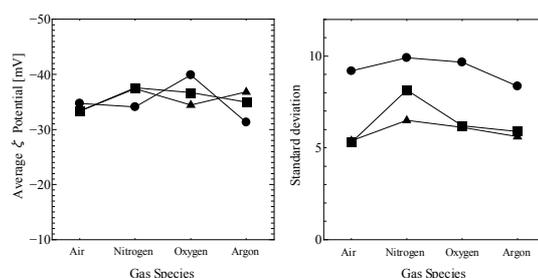


Fig.5 Effect of Gas Species on Zeta Potential

スチューデント t 分布を用いた検定により、平均値に有意差があるかどうかを、有意水準を5%にして調べた。その結果、有意差がある条件とない条件の様々な結果が表れた。まず、気体種を固定して、発生方式を比較すると、空気では、発生方式による有意差はなかった。また、窒素では、せん断方式-旋回方式の間には有意差はなく、加圧溶解方式が2つよりも小さい結果となった。酸素では、左図のグラフに示す大小関係で有意差があった。アルゴンでは、せん断方式-旋回方式の間には有意差がなく、加圧溶解方式が2つよりも小さい結果となった。

また、発生方式を固定して、気体種を比較すると、加圧溶解方式では、酸素がアルゴンよりも大きい結果となった。せん断方式では、空気-酸素、窒素-アルゴンの間には有意差がなく、窒素-アルゴンが空気-酸素よりも大きい結果となった。旋回方式では、窒素-酸素-アルゴンの間には有意差はなく、空気が一番小さい結果となった。

次に、Fig.5の右図から、標準偏差を発生方式で比べると、加圧溶解方式は、せん断方式と旋回方式に比べ高い値を示し、ゼータ電位が広い範囲に分布することが確認できた。これは、せん断方式と旋回方式は、せん断力などの力を利用して、MBを発生させるメカニズムである一方、加圧溶解方式は発泡させるメカニズムであり、その発生メカニズムの差であるのかもしれない。

(4)摩擦低減効果についても、さらなる実験を

行い、以下の結論を得た。Re~30000 程度の乱流において、加圧溶解法で作成した場合よりもせん断法でマイクロバブルを作成した場合により大きな摩擦低減効果が表れることが確認された。この際界面活性剤 3-ペンタノールを加えたら、摩擦低減効果は低減した。また、大きな摩擦低減効果が表れている際、速度分布を超音波流速分布計によって測定したところ、壁面近傍の時間平均速度勾配が低下していることが確認できた。

(5)加圧溶解における気泡発生促進に関する論文が公表できた。これは、加圧溶解法における最気泡化を行うべきノズル内に、セラミック焼結体を入れることによって、最気泡化をより活発化させ、発生するマイクロバブルの濃度を高めたものである。入れるセラミックスの種類や細孔径にも影響を受けることも判明した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

①Hiroshi YAMASHITA, Hideki AOYAGI and Hisato MINAGAWA, Enhancement of Microbubble Generation in a Dissolution Process by Packing the Nozzle with Porous Ceramics, Water Science and Technology, 査読有, Vol.65, No.1, 2012, pp.69-75.

摩擦抵抗低減については現在執筆中

[学会発表] (計 7 件)

①永松幹浩, 南川久人, 安田孝宏, 山田哲史, 湖水に対するマイクロバブルの供給 -COD への影響の検討-, 日本機械学会関西支部第 85 期定時総会講演会(2010)

②東郷裕也, 南川久人, 安田孝宏, 山田哲史, マイクロバブルによる洗浄効果, 日本機械学会関西支部第 85 期定時総会講演会(2010)

③東郷裕也, 南川久人, 安田孝宏, 山田哲史, マイクロバブルによる洗浄効果, 日本混相流学会年会講演会 2010 (2010)

④曾我部統一朗, 南川久人, 安田孝宏, 鉛直管内でのマイクロバブルを含むミルキーバブル流による摩擦抵抗低減効果, 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会(2011)

⑤山下宏, 青柳秀紀, 南川久人, 多孔質セラミックを用いたマイクロバブル生成効率の向上, 化学工学会第 43 回秋季大会(2011)

⑥曾我部統一朗, 南川久人, 安田孝宏, マイ

クロバブルを含むミルキーバブルの鉛直管内流による摩擦抵抗低減効果, 日本機械学会 2011 年度年次大会(2011)

⑦渡部 晃也, 南川 久人, 安田 孝宏, マイクロバブルのゼータ電位に及ぼす発生方式及び気体種の影響, 日本機械学会関西支部第 87 期定時総会講演会(2012)

6. 研究組織

(1)研究代表者

南川久人 (MINAGAWA HISATO)
滋賀県立大学・工学部・教授
研究者番号: 60190691

(2)研究分担者

安田孝宏 (YASUDA TAKAHIRO)
滋賀県立大学・工学部・助教
研究者番号: 60347432