

マイクロバブル生成器の開発と汚染水浄化システムの実用化

—その技術紹介—

田村 岩男 (株式会社アース・リ・ピュア R&D 部門, i.tamura@earthrepure.co.jp)

上原 郁雄 (株式会社アース・リ・ピュア SepaTech 部門, i.uehara@earthrepure.co.jp)

Development of a microbubble generator and practical use of a contaminated water purification system: Technical report

Iwao Tamura (R&D Division, Earth RePure, Inc., Japan)

Ikuo Uehara (SepaTech Division, Earth RePure, Inc., Japan)

要約

河川や湖、地下水、大洋における水質汚染の問題を解決するため、マイクロバブルを利用した汚染水浄化システムを開発した。汚染水浄化システムは、微細気泡生成装置が汚染水から微細気泡を生成できるため、汚染水槽から流出される汚染水、微細気泡生成装置から排出される微細気泡を浮上分離槽に流入させる構成である。汚染水から微細気泡を生成できない微細気泡生成装置を用いた場合、汚染水と微細気泡とを別個に浮上分離槽に流入させる構成を採用しなければならないが、本システムではその必要がないため、システムの構造を簡略化できる特徴がある。

キーワード

マイクロバブル, 微細気泡生成装置, 加圧溶解方式, 汚染水浄化システム, フリーラジカル

1. はじめに

今日、世界各国で地球環境循環技術が議論されており、その中で、とりわけ水質汚染の問題解決がクローズアップされている。人類が生きていくためには水は必要不可欠なものであるが、実際に人類が使用できる水は地球上の全体水量の0.8%といわれている。開発途上国では、水供給設備と環境衛生が十分でないため、飲料水の汚染など水に関連した感染症が蔓延しており、国際連合(2003)の統計によると、病気および死亡の原因の中で水に起因する疾病がもっとも多い。東南アジアの一部では、都市の開発が進み、大都市に人口が集中したために水不足の問題も深刻化している。

また、都市化が進むことによって排出される生活排水や産業廃棄物による水質汚染が進んでいる。日本においては、高度経済成長期に企業の生産活動がもたらした水質汚染によって水俣病やイタイイタイ病などの水質公害が相次いで発生した。これを受けて、1971年に水質汚濁防止法が施行され、企業の取り組み・法規制によって工業排水量は大きく減少した

(細田衛士研究会, 2011)。しかし、現在の水質汚染の原因の約70%は、炊事、洗濯、入浴などの一般的な生活に伴って生じる生活排水であり、人間の行動によって引き起こされた河川や湖、地下水、大洋における水質汚染の対策が求められている。

そのようなことから、図1に示すように微細気泡が液体中において汚染物質などを付着させて浮上する性質を有することに着目し、微細気泡生成装置で生成した微細気泡(マイクロバブル)に汚染物質を付着させて浮上させ、汚染水を浄化することが試みられている。その中でも、微細気泡に汚染物質を効率よく付着させるために、微細気泡生成装置に直接汚染水を流し、汚染水から微細気泡を生成することが試みられている。高橋(2009)が中心に進めてきた研究では、マイクロバブル消滅後におけるフリーラジカルの発生とナノバブルの残存、そしてその特性にまで及んでいる。

筆者たちもこれまで、マイクロバブルを用いた研究に取り組んでおり、マイクロバブルの有効的な実用化を目指して、高濃度マイクロバブルを生成する加圧溶解方式に注目した水質浄化の研究や装置の開発を行ってきた。その結果、均一化されたマイクロバブルを安定して生成し、その生成能力も向上させることができ、かつシステムの簡素化も可能になった。

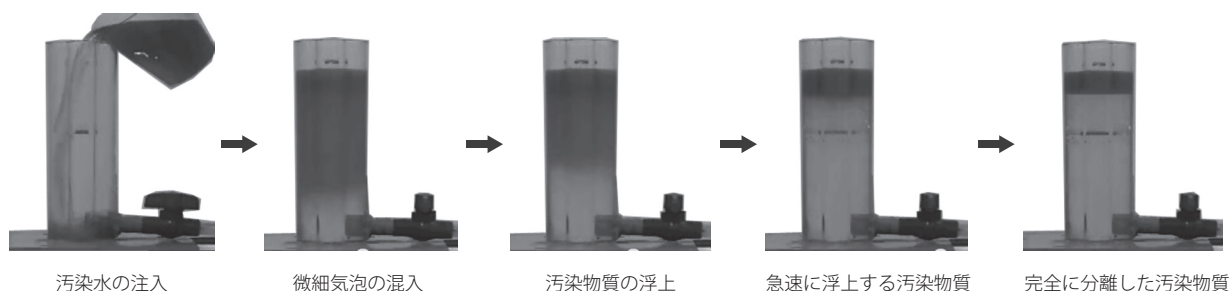


図1：汚染水の浮上分離の経過

新しく開発されたシステムによって、閉鎖水域や停滞水域の浄化、水族館の遊換水槽や養殖業の循環送水、海水の淡水化、エマルジョンオイル製造などの分野への技術応用の実用化が可能になると考える。

2. マイクロバブルとは

マイクロバブルとは、気泡直径が50 μm以下の微細気泡であり、通常の気泡が上昇後表面で破裂し消滅するのに対し、上昇と共に縮小し水中で消滅する(図2)。マイクロバブルは、液体中のさまざまな物質を付着し浮上する性質がある。その性質を利用し、直接溶液を微細気泡生成装置に流し、汚染水から微細気泡を生成させることができる(図3)。しかし、微細気泡生成装置は一般的に、混合器に気体を供給する供給路が、混合器内の液体の流路を固定する壁面に、液体の流れに直交する孔を開けることにより形成される。そのため、微細気泡発生装置に汚染水を直接流入させると、気体を供給する供給路の出口付近に汚染物質が詰まり、すぐに微細気泡生成装置が使用できなくなるという問題が生じていた。マイクロバブルの特性と特徴的なことを表1にまとめた。

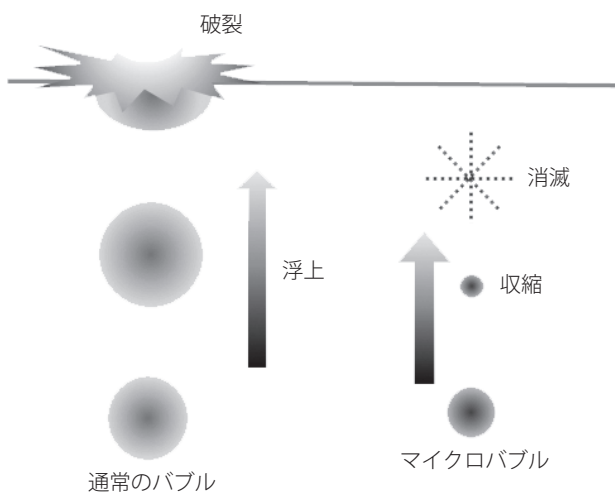


図2: マイクロバブルの特性

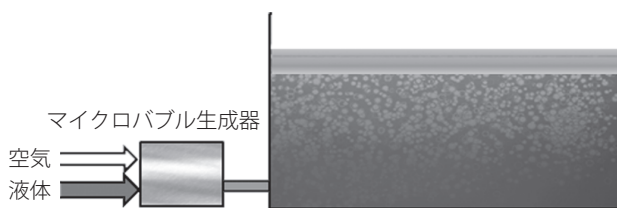


図3: マイクロバブルによる汚染水浄化システム

筆者たちは、マイクロバブルの実用化に向け上記の現象を解決することで、下記の3つの点を実現できると考えた。

- 均一化されたマイクロバブルを安定して生成すること
- マイクロバブルの生成能力を向上させること
- システムの簡素化

表1: マイクロバブルの特徴

項目	特徴
サイズ	サイズが小さいために、毛細血管やマイクロチャンネルなど狭い流路を通過することが可能。
面積	単位面積あたりの表面積が大きいので、液体中への気体吸収効率が高い。
浮力	浮力が小さいため、長時間液体中に停留する。
表面張力	表面張力の影響が大きい。そのため水平方向での拡散が容易である。すなわち、上昇が遅い。
その他	界面活性剤など水中の不純物の影響を受けやすい。そのため、水中の微粒子の吸着上昇速度の急減少(マランゴニ効果)。

この3点を実現することで、より多くの実用可能性を創造することができると確信している。マイクロバブルの生成には、加圧溶解方式と二相流旋回方式がある。一般的には二相流旋回方式が利用されているが、筆者たちはより高濃度マイクロバブルを生成する加圧溶解方式に着目した(図4)。その理由としては、以下の乱流の発生と圧力による溶解度の向上および気体の取り込み方法を新しくすることで解決するため、二相旋回方式の重要な部分である溶液のせん断であるが、以下のことによりその必要性を否定した。

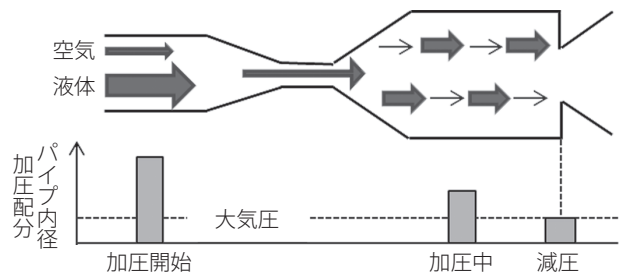


図4: 加圧溶解方式マイクロバブル生成装置

Reynoldsは水槽中のガラス管に細い色素を流し、流速の変化により、流れの状態が変化するのを発見した(中野徹, 2011)。そして、外的条件を一定に保つても、ある条件を境にして時間的にも空間的にも不規則な変動を伴う流れが発生し、この流れの状態の相違は、速度 U 、長さ L 、動粘性係数 $\nu(\mu/\rho)$ に関連し、この3つの量から作られた無次元数による。

$$\frac{\text{慣性項} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)}{\text{粘性項} (\nu \nabla^2 u)} = \frac{(U \cdot UL)}{(\nu U / L^2)} = \frac{UL}{\nu} = Re$$

この比が限界を超えると乱流になる。層流と乱流を表す流れについて、一様に真直ぐな円管路の流れの解は、層流(低いReynolds数)はNavier-Stokes方程式の理論解であるHagen-Poiseuille flowが成立する。一方、乱流(高いReynolds数)では、層流解が成立しない。不規則変動により付加される応力効果(Reynolds応力)のため、層流の場合と大きく異なるからである。Reynolds応力を付加するように、Navier-Stokes方程式を

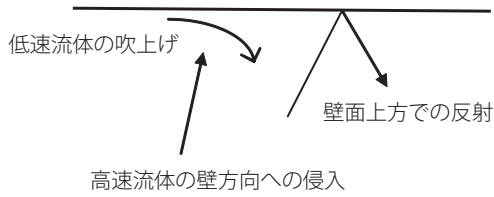


図5：層流と乱流

書き換えた Reynolds 方程式の表す流れが成立する。乱流を維持しているのは大規模な組織的運動であり、壁面近傍での乱流運動をバースティングと呼ぶ(図5)。

これらの運動が Reynolds 応力の発生、壁面からの熱や物質輸送の効果を高める役割になるのである。乱流になる水流の臨界速度は流れる液体の粘性に正比例し、液体の密度と管の直径に反比例し、管内壁から中心に向かって渦を巻きながら流れる(図6)。

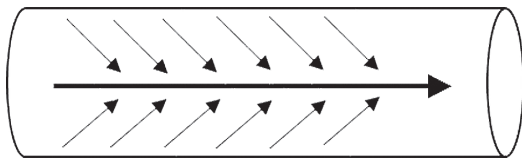


図6：Reynolds 応力の発生

その結果、管内の圧を上昇させ、ここで発生するせん断力を上げるにより二相旋回方式によるせん断技術は不要となり、さらに気体の取入れを工夫することで加圧溶解方式の利点である高濃度のマイクロバブルで、より多くの水流を得ることができると考えた。

2. マイクロバブル生成装置の構造と汚染水浄化システム

2.1 マイクロバブル生成装置の構造

現行では、混合器に気体を供給する供給路が、混合器内の液体の流路を固定する壁面に、液体の流れに直交する孔を開けることにより形成されており、汚染水を直接流入させると、気体を供給する供給路の出口付近に汚染物質が詰まるといった問題が生じていた(図7)。

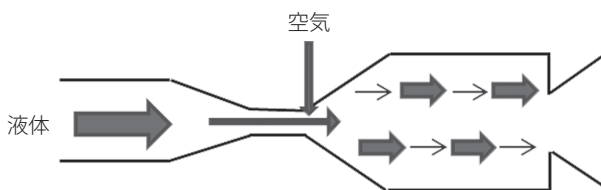


図7：現行のマイクロバブル生成装置

本研究開発では、微細気泡生成装置の加圧された液体が流入する液体流入路と、生成された微細気泡と液体とを排出する排出路を接続し、液体流入路および排出路より流路面積が狭いのど部内に気体を供給する気体供給路とを備えた。

新しく開発されたマイクロバブル生成装置は、気体を供給する気体供給路の出口端が図8に示す通り、液体の流れの下

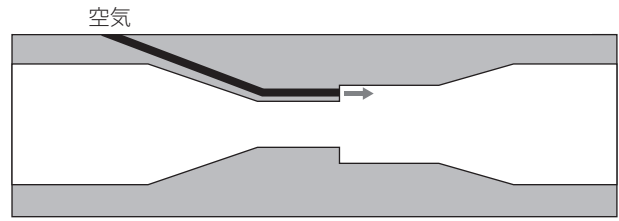


図8：セパテック・マイクロバブル生成装置

流側を向いて開口している。つまり、気体供給路は液体が逆流しないと、気体供給路内に液体が入り込み難い構造となっている。この構成を有することで、通常の液体の流れの中では、気体供給路に液体が流れ込み難くなる。これにより、液体として汚染物質を含む汚染水を流入させたとしても、汚染物質が気体供給路に入り込むことがなく、気体供給路が詰まることを防止することができる。その結果、微細気泡生成装置に直接汚染水を流し込んでも、汚染水から微細気泡を生成することができる。

2.2 汚染水浄化システム

新しく開発された汚染水浄化システム(セパテックマイクロバブルシステム：特許申請済2013-219791)は、微細気泡生成装置が汚染水から微細気泡を生成できるため、汚染水槽から流出される汚染水(液体)、微細気泡生成装置から排出される微細気泡を浮上分離槽に流入させる構成を採用することができる。汚染水から微細気泡を生成できない微細気泡生成装置を用いた場合、汚染水と微細気泡とを別個に浮上分離槽に流入させる構成を採用しなければならないが、開発された汚染水浄化システムではその必要がなくなるため、汚染水浄化システムを簡略化することができた。

次に、本システムは、ベルマイの原理を用いて、一連の連続した配管の管路断面積を増減させることで、流速と静圧を制御し、気液混合、気体の液体への加圧溶解、減圧により溶解気体析出を行わせて微細気泡を生成する方法である。本システムは、次の吸引器部とミキシング部、バルブから構成される(図9)。

吸引器は、入口部、のど部、吸引部、気体入口部が一体的に構成されている。ミキシングボックスは、加圧部を形成する上から下に流れ落ちる配管によって構成されている。ミキシングボックス内部は、障害物のない短形配管構造で、短時間で高効率の気液溶解が行われるように配管の長さ、幅、水深が適切に設計されている。また、ミキシングボックスは、出口部に立ち上がり配管を設け、液体に溶解できなかった気体を排気する。バルブは減圧部に相当する。液体は、気泡を含まない加圧溶解した状態でバルブに流入し、バルブでの減圧によって気体の溶解度が低下し、溶解できなくなった気体が気泡の形で析出するバルブが配管でミキシングボックスから離れた位置に構成されている理由は、気泡が配管内を流れた場合に合泡により、気泡数が減少することを防ぐために微細気泡使用点付近で減圧による気泡生成を行うためである。

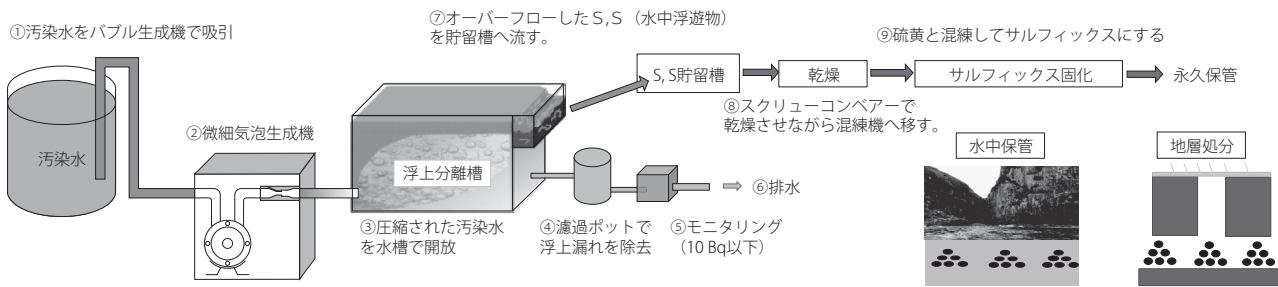


図9：セパテク汚染水浄化システム

3. まとめ

マイクロバブルの極めて特異な現象がフリーラジカルの発生である。気泡内の圧力は、気泡径に反比例して増加するため、急激な縮小(圧壊)は圧力の急上昇につながる。その速度が十分に速いと、断熱圧縮的な作用により気泡内の温度も急激に高くなり、その結果、消滅時には数千度で数千気圧の領域を形成する。この極限反応場(ホットスポット)は極めて微小な範囲であるものの、内部のガス分子を強制的に分解できるほど強力であるため、結果的に・OHなどのフリーラジカルを発生させる。この様な超高温度やフリーラジカルを利用することで、水中の様々な浮遊物質を浮上分離させることができることから、汚染水の浄化や海水の淡水化、重油や軽油と水の混合いわゆるエマルジョンエネルギーといった資源に関する手助けや、環境問題・発展途上国にも貢献できると考えている。

引用文献

- 国際連合(2003). 世界水発展報告書.
- 高橋正好(2009). マイクロバブルおよびナノバブルに関する研究. <http://unit.aist.go.jp/emtech-ri/26env-fluid/pdf/takahashi.pdf>.
- 細田衛士研究会(2011). 生活排水による水質汚染の軽減に向けて一汚水処理人口普及率の向上一.
- 中野徹(2011). 力学 パリティ物理学教科書シリーズ(2). 丸善.

(受稿：2013年10月24日 受理：2013年11月25日)