

東京湾三番瀬における微細気泡発生装置を用いた 青潮水改善効果の数値的検討

佐々木 淳*・小出摩耶子**・長田 正行***
柴山 知也****・磯部 雅彦*****

近年、貧酸素水改善技術として注目されつつある微細気泡発生装置の現地適用性を検討するため、実験による酸素溶解過程の考察と定量化を行った。その結果、本研究で採用した装置では気層を液層にせん断により溶解させるせん断装置内での瞬間的な酸素溶解が主であり、環境中に放出される微細気泡による酸素溶解効果は小さいことが明らかとなった。本装置の効果予測には拡散モデルに溶存酸素のソース項を付加した数値モデルが有効であり、モデルを用いて東京湾三番瀬に青潮水が進入した際の本装置の適用性を検討したところ、移流効果の小さい浦安側遮蔽域での有効性が示唆された。

1. はじめに

東京湾をはじめとする閉鎖性内湾では富栄養化による貧酸素水の発生が深刻な問題となっている。特に象徴的なのは硫化物を含む無酸素水塊の湧昇現象である青潮であり、東京湾三番瀬においてはしばしば青潮水の侵入によってアサリ等の底生動物のへい死が見られるのは周知の事実である。その根本的な解決には湾全体の富栄養状態の改善が必要だが、流入負荷の大幅な削減や汚濁した底質の改善は短期的にはきわめて困難である。これに対し、貧酸素状態にある海域に強制的に酸素を供給して貧酸素を改善する方策として、微細気泡技術が注目を集めつつある。微細気泡は体積あたりの表面積の割合が大きいため水中での滞留時間が長い。そのため、一般的なエアレーションと比較して、底層水に効率的に酸素を溶解させることが可能と考えられている。その上、成層破壊等の水塊構造を変化させる作用が弱く、負の影響を含めた環境影響に対する懸念材料がほとんどない点も魅力である。このような背景から近年、室内実験や貯水池での現場実験に基づく検討が開始されつつある（道奥ら、2000）。

そこで本研究では微細気泡発生装置の現地適用を念頭に置き、まず、装置の有効性を検討するために不可欠な定量的な情報を蓄積するため、水槽実験による酸素溶解特性の検討を行った。次に得られた情報を基に溶存酸素濃度に着目した数値予測モデルを構築し、東京湾の青潮発生時における三番瀬防護の可能性について検討した。

2. 酸素溶解実験

（1）目的

微細気泡装置にはいくつかの製品が存在するが、その基本原理は気液混層流のせん断作用によって微細気泡を発生させるというものであり、発生した気泡サイズの微細さに注目が集まっている。さらに、微細気泡の酸素溶解過程は発生した気泡が水中を浮遊するうちに徐々に溶解していくものと解釈される場合が多い。これに対して装置内で気液混層流にせん断をかけた際に瞬時に酸素が溶解する効果が主であり、環境水中に放出された微細気泡による酸素溶解効果は小さいとの指摘もある（植松、2001）。これら両者のどちらが主であるかによって酸素溶解過程予測のための数値モデル構築の考え方が異なってくると考えられる。すなわち、前者の場合は気泡が環境水中で溶解していく過程をラグランジュ的に追跡していくのが現象に忠実なモデル化となる。一方、後者の場合は拡散方程式を用いた酸素濃度予測モデルに微細気泡発生装置の設置位置に溶存酸素のソースを加えることで予測が可能になると考えられる。そこでこれらの内どちらが支配的であるかについても考察を加えることとする。

（2）実験装置

本研究では市販されている微細気泡発生装置の中から協和エンジニアリング(株)製の「マイクロバブル発生装置」を用いたシステムを採用し、横浜国立大学水理実験棟において実験を行った。本装置は「世界最小のマイクロバブル発生装置」を謳っており、カタログによれば発生する気泡のサイズは数 μm から十数 μm という非常に微細なものである。本装置は図-1 に示すように、キャビテーションポンプ、空気流量調整器、旋回加速器、分散器、水槽(20 cm×20 cm×100 cm)、およびそれぞれを接続する管から構成される。キャビテーションポンプの1次側から気体が吸い込まれて、水と空気の混合流体が作られ、旋回加速器においては遠心力の原理により安定した混合比率で水流断面の中心部に空気が形成されるようになる。この状態のまま分散器によるせん断作用で微細気泡が発生する。

* 正 会 員 博(工) 横浜国立大学助教授 大学院工学研究院システムの創生部門
** 修(工) 前横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム学専攻
*** 学生会員 横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム学専攻
**** フェロー 工 博 横浜国立大学教授 大学院工学研究院システムの創生部門
***** フェロー 工 博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

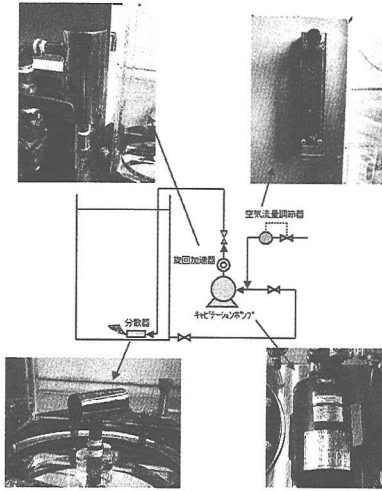


図-1 微細気泡発生装置

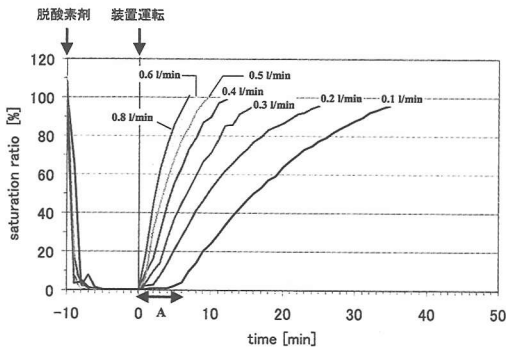


図-2 循環式実験における酸素溶解過程の時系列

(3) 実験方法

本実験の基本的な手順は水槽中に無酸素水を作製し、微細気泡を用いたエアレーションを行っている間の溶存酸素濃度の時系列を計測するというものである。実験には水道水とマリンテック社製の人工海水ミックス「SEALIFE」を用いて様々な塩分の人工海水を調合し用いた。調合した人工海水に亜硫酸ナトリウムを適量溶解させることで無酸素水を調製した。この化学反応は式(1)に従うことに留意し、加えるべき亜硫酸ナトリウム量を決定した。



ただし、塩分0(水道水のみ)の場合にはこの化学反応は極めて緩慢に進むため、塩化コバルトを触媒として用いた。溶存酸素(DO)濃度と水温、塩分の計測には自記式のDO計と塩分計(アレック電子(株)製ADOW-CMPおよびACT-HR)を用いた。これらを水槽につり下げ、水槽中の濃度場が一様になるよう攪拌しながら計測した。なお、計測値に対する気泡の影響が懸念されるた

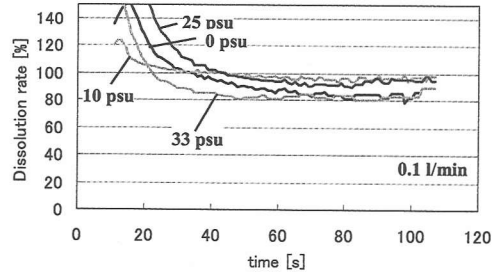


図-3 One path 実験における酸素溶解効率に対する空気流量の影響(11秒移動平均値)

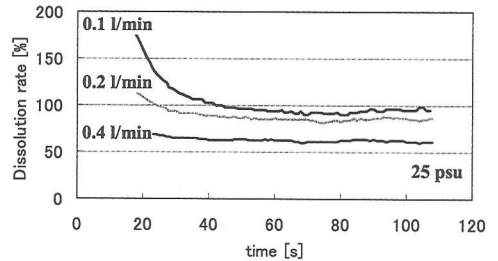


図-4 One path 実験における酸素溶解効率に対する塩分の影響(11秒移動平均値)

め、装置の運転停止後気泡が消散していく際の計測値の変化を確認したところ、値の変化はほとんど見られなかった。よって、気泡の計測値に与える影響は無視できるものとした。

(4) 実験結果と考察

まず最初に装置水槽から取水し再び装置内に気泡流を噴出させる循環式による実験を行った。実験を開始するとすぐに微細気泡が雲状に広がり、肉眼で見る限り極めて微細な気泡で水槽が充満していく様子が確認できた。一例として水道水を用い、空気流量を0.1 l/minから0.8 l/minの間の7ケースについて、DO飽和度の時系列を図一2に示す。実験開始後しばらくの間は過剰に存在した亜硫酸ナトリウムの酸化に酸素が使われるため溶存酸素濃度は0を維持するが(図中矢印A)、その後は急速に上昇し飽和値に漸近していく様子が明瞭に見られた。しかしながら循環式の実験であるため微細気泡中の酸素が水槽内で溶解する効果と分散器内で瞬間的に起こる酸素溶解との区別ができない。現地適用性を考えるためのモデルの構築にはこの両者の定量化が必要となる。そこで水槽を空にした後、本装置の外部に無酸素水で満たされたタンクを用意し、タンクから本装置に一方的に無酸素水を送り込む、いわゆる one path 実験を行った。

本実験により時々刻々の酸素溶解効率を算出した。空気流量を V_a (ml/min) とすると、本装置からの酸素供給速度 W_{O_2} (mg/min) は酸素の分子量が32であることか

ら、

$$W_{O_2} = 0.2 \times \frac{V_a}{1000} \times \frac{1}{22.4} \times 32 \dots\dots\dots (2)$$

となる。一方、ある時刻における水槽内の酸素量は、水槽中の水の体積とその時刻の DO 濃度の積となる。ただし、水槽内の DO 濃度は一様であると仮定した。これより水槽内の酸素量の時間変化 W_{DO} (mg/min) を求めると、各時刻における酸素溶解効率 W_{DO}/W_{O_2} で与えられる。図-3 に水流量を 16 (l/min)、塩分を 25 (psu) で一定としたとき、空気流量を 0.1 l/分から 0.4 (l/min) まで変化させた 3 ケースについての酸素溶解効率の時系列を示す。初期のうちは酸素溶解効率が 100% を越えているが、これは空間一様性が不十分、再ばっ気の影響等によると思われるが、今後の検討が必要である。本図から、酸素溶解効率はほぼ定常的であること、空気流量が増大するにつれ酸素溶解効率が低下すること、および空気と水の流量比を適切に保てば 80% 以上の溶解効率が得られることがわかる。酸素溶解効率が一定値に漸近し時間的に変化しなくなることから、水槽に送り込まれた噴流中に既に一定の割合で酸素が溶解していたものと考えられる。さらに、本装置を停止させた後、浮遊している微細気泡からの酸素溶解効果を見るため、しばらく溶存酸素濃度の計測を継続したが、濃度の変化は見られなかった。これらのことから本装置では分散器内での瞬間的な酸素溶解が支配的であり、水槽中を浮遊する微細気泡による酸素溶解効果は小さいことが明かとなった。

一方、水流量を 16 (l/min)、空気流量を 0.1 (l/min) の条件で、塩分を 0, 10, 25, 33 (psu) とした 4 ケースについての酸素溶解効率の時系列を図-4 にまとめた。他の実験ケースも参照した結果、酸素溶解効率に対する塩分の影響は小さいと推察されたが、さらに実験ケースを増やすなど検討が必要である。

3. 数値モデル

これまで見てきたように本研究で採用した微細気泡発生装置は主にせん断装置内での瞬間的な酸素溶解が主であることが明らかとなった。そのため、溶存酸素濃度の拡散方程式をベースに微細気泡発生装置の効果を酸素の生成項として組み込むことで概ね実現象の再現ができるものと考えられる。一方、本実験では水槽の容積が小さいために溶けきらなかった気泡も現地においては滞留時間が長いために溶解していく可能性がある。また、一般に微細気泡発生装置による酸素溶解過程は微細気泡が長時間にわたり滞留する結果であるとされる場合が多い。そこでこのような気泡が徐々に溶解していく過程についてはラグランジュ的なアプローチを採用した気泡追跡モデルを構築し検討する。

(1) 拡散モデル

拡散モデルは拡散方程式に微細気泡装置の効果を反映した生成項を付加したモデルであり、一般的な生態系モデルの枠組みと同様である。本研究で対象とする現象は青潮時の 1 週間程度の時間スケールであり、青潮発生直前の貧酸素水塊と青潮時の湧昇過程が再現できればよいので、計算負荷を減らすため佐々木ら (1998) をやや簡略化した生態系モデルをベースとして採用した。

計算法は基本的には佐々木ら (1998) と同様であるが、移流拡散計算と生成項の計算を分離して 2 段階で計算する fractional step 法を採用し、生成項の計算には 2 次の Runge-Kutta 法を用いた。

(2) 気泡追跡モデル

本モデルは気泡一つ一つの動きをラグランジュ的に追跡しながら、同時に気泡の溶解過程を計算するものであり、気泡溶解による溶存酸素量の増加は溶存酸素濃度に関する拡散方程式の生成項に反映される。Wuest ら (1992) は質量移動係数を用いた簡便な気泡追跡溶解モデルを提案しているが、溶解に対する気泡径の影響等が質量移動係数に集約されているため、各実験装置ごとに係数のチューニングが必要となる。しかしながら、本研究では浮遊する微細気泡による酸素溶解過程は検出できなかったため、より微視的過程に着目した竹村・矢部 (1998; 1999) によるモデルの適用を試みた。彼らは球形気泡のガス置換過程は気泡径変化が緩やかな場合には定常な溶解速度の積み重ねとして評価できることを示し、気泡の上昇速度、溶解速度、および気泡径の時間変化の計算法を提案している。

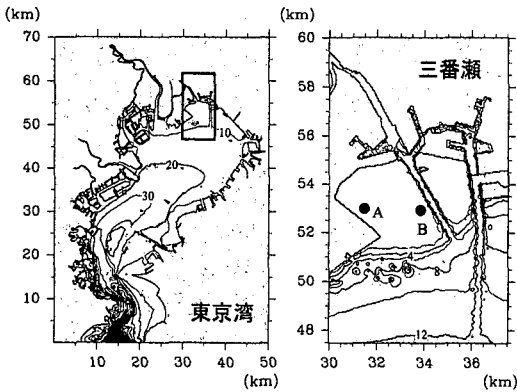
球形気泡の液体への溶解速度は Clift ら (1978) によればシャーウッド数 Sh によって評価され、シャーウッド数はレイノルズ数 Re 、シュミット数 Sc およびペクレ数 Pe のうちの二つを用いて整理される。その方法は次のようにまとめることができる。

- ・初期気泡半径、気泡上昇速度を用いて抵抗係数を求める。
- ・ペクレ数 Pe およびレイノルズ数 Re を求める。
- ・シャーウッド数 Sh を求める。
- ・ヘンリーの法則を用いて溶解質量速度を求める。
- ・気体の状態方程式を用いて気泡体積および気泡半径を求める。

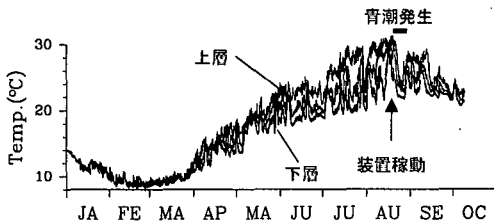
気泡のラグランジュ的な追跡には一般的なオイラー・ラグランジュ法を用いた (例えば、柳, 2001.)

4. 東京湾三番瀬へのモデル適用

東京湾三番瀬 (図-5) は東京湾湾奥に位置する浅瀬・干潟であり、アサリ漁場ともなっているが、夏季には青潮水の来襲によって多くの底生動物のへい死を引き起こ



図一五 東京湾三番瀬における微細気泡発生装置の設置位置



図一六 湾奥における上中下層の水温時系列

すことがある。その対策として様々な提案があるが、本研究では微細気泡発生装置による酸素濃度維持の可能性について検討する。

(1) 青潮の再現

まず生態系モデルによる青潮の再現を行った。用いた格子は水平 500 m、鉛直方向は σ 座標系を採用し 20 層とした。場が一様に近い冬季の 1994 年 1 月 1 日を計算開始とし、佐々木ら (1998) と同様に時々刻々の気象、河川流量、および開境界潮位を与え、青潮の発生が見られた 9 月末までの計算を行った。

図一六に湾奥における上中下層の水温の時系列を示す。青潮は底層無酸素水塊の湧昇現象であるので、水温や塩分の変動を監視することで青潮の来襲を判断することができる (例えば、佐々木ら, 1996)。すなわち、青潮が来襲すると、上層水温の低下や上層塩分の上昇が見られ、同時に上層の溶存酸素濃度が急激に低下することになる。そこで図を確認すると、8 月 22 日頃からこのような変動が認められ、青潮の発生が見られたと判断される。そこで、青潮発生直前の 8 月 22 日 0 時より微細気泡発生装置を稼働させ、底生動物の生存に最低限必要と考えられる溶存酸素濃度 2 mg/l を維持することの可能性を検討する。

(2) 微細気泡発生装置の適用

三番瀬に青潮水が進入する直前から微細気泡発生装置を稼働させた場合の底層溶存酸素濃度分布を把握するこ

とで、装置の有効性の検討を行った。ここでは微細気泡発生装置は酸素を瞬間的に溶かし込むものと仮定し、溶存酸素濃度に関する拡散方程式に酸素のソース項を組み込んだモデルによる計算結果を示す。様々なケースを検討した結果、移流効果の大きい領域では貧酸素水塊の移流効果にうち勝って底層溶存酸素濃度を維持することは極めて困難であることが判明した。典型的な例として、図一五の A 点または B 点に本装置を設置し、500 m × 500 m の領域の最下層に 20 g/m²/day の酸素を投入した場合の検討結果を示す。図一七には微細気泡発生装置を稼働させなかった場合、地点 A に設置し稼働させた場合 (ケース A)、および地点 B に設置した稼働させた場合 (ケース B) の 8 月 26 日における底層溶存酸素濃度分布を示す。装置を稼働させなかった場合は全領域で溶存酸素濃度が 2 mg/l を下回っていた。本装置を稼働させた場合のうち、ケース A は浦安側の遮蔽域に設置した場合であるが、このあたりは流れの滞留域となっており、投入された酸素が装置北西側にある程度留まっていることが見て取れる。このように、浦安側遮蔽域奥部は特に水底質の劣化が著しい海域であるが、滞留域であることが逆に幸いして微細気泡発生装置が比較的有效に機能する領域であると考えられる。一方、ケース B ではケース A ほどには効果は見られなかった。これは容易に予想されたように移流の効果が卓越するためと考えられる。図一八にこのときの残差流を示すが、浦安側遮蔽域が滞留域となっている様子や B 点付近では移流が卓越している様子が明瞭に示されている。

次に、微細気泡が海水中で徐々に溶解する場合の溶解効果を検討した。ここでは装置内での瞬間的な酸素溶解は存在しないものとし、空気流量から 20 μ m の気泡の生成数を算出し、その浮遊溶解過程を計算した。図一九にケース A の場合の計算結果を示す。先の図一七と比較すると、溶存酸素濃度の上昇はあまり見られず、全体に鈍った分布となっている。これはケース A の瞬間溶解と比較して、溶解の時間スケールが長くなること、および気泡の上昇によって底層への溶解効率が低下するためと考えられる。環境中に放出される気泡は浮力によって上昇流を引き起こすなど 2 次的な影響を引き起こす可能性があり、この点に関してはさらなる検討が必要である。

5. まとめ

近年、貧酸素水改善技術としての微細気泡発生装置が注目されつつあり、海域への適用も検討されつつある。本研究では微細気泡発生装置を用いた貧酸素水改善技術と効果予測手法の確立への第一歩として、水槽実験により微細気泡発生装置の酸素溶解特性の把握と溶解効率の定量化を行った。次に実験結果に基づき、溶存酸素濃度

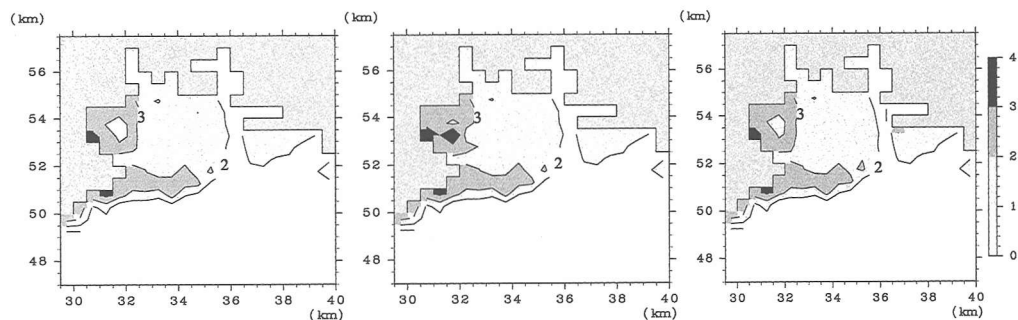


図-7 現状 (左), ケース A (中), およびケース B (右) における底層溶存酸素濃度分布

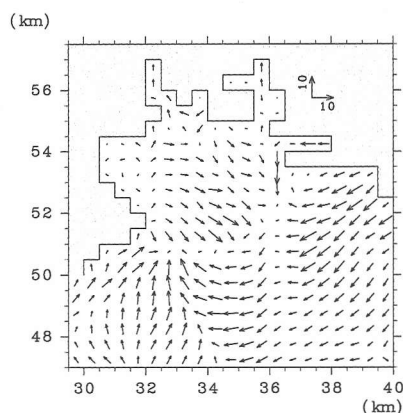


図-8 残差流ベクトル

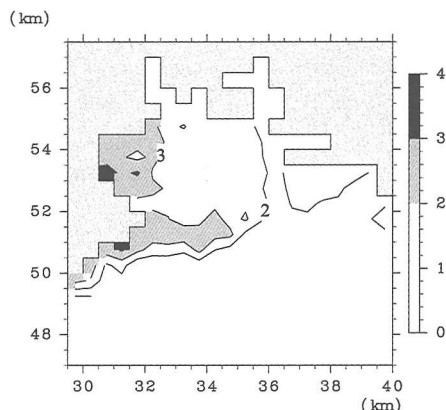


図-9 環境水中における微細気泡溶解による8月26日の底層溶存酸素濃度分布

予測モデルを構築し、東京湾三番瀬における青潮時の底層生物防護の可能性について検討した。主な成果を要約すると次の通りである。

- ・本研究で対象とした微細気泡発生装置ではせん断装置内での瞬間的な酸素溶解が支配的であり、環境水中に放出された微細気泡による酸素溶解は確認できなかった。

- ・実験結果を基に本装置の効果を溶存酸素濃度の拡散方程式中に生成項として組み込み、流動・生態系モデルと組み合わせた予測法を構築した。
- ・本モデルを東京湾三番瀬の青潮発生時に適用した結果、浦安側遮蔽域のような停滞水域への適用に有効性が認められた。
- ・微細気泡の環境水中での溶解効率に関する数値的検討を行った結果、浅海域においては十分な効果が期待できないことが判明した。

謝辞：微細気泡発生装置の one path 実験に関しては東亜建設工業(株)技術研究所水理環境研究室長の五明美智男博士および同研究員栗原明夫氏にご教示いただいた。本研究は国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所受託研究費(横浜国立大学)および日本学術振興会科学研究費基盤研究 S(課題番号 14102026)の補助によるものである。

参 考 文 献

- 植松秀人(2001): 単一パイプのみによる流体粒子の極限的微小化と活性化, 超音波 TECHNO, 5月号, pp. 2-6.
- 佐々木 淳・磯部雅彦・渡辺 晃・五明美智男(1996): 東京湾における青潮の発生規模に関する考察, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1111-1115.
- 佐々木 淳・佐賀 宏・磯部雅彦(1998): 東京湾における富栄養現象の再現計算, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1036-1040.
- 竹村文男・矢部 彰(1998): 上昇する球形気泡の溶解過程に関する研究, 日本機化学会論文集(B編), 64巻, 618号, pp. 121-129.
- 竹村文男・矢部 彰(1999): 水中における上昇球形気泡のガス置換過程に関する研究, 日本機化学会論文集(B編), 65巻, 631号, pp. 249-255.
- 道奥康治・神田 徹・大成博文・西川孝晴・松尾克美・木戸崇博(2000): マイクロバブル・エアレータによる貯水池の水質浄化実験, 水工学論文集, 第44巻, pp. 1119-1124.
- 柳 哲雄(2001): 沿岸海洋学, 第二版, 恒星社厚生閣, 153 pp.
- Clift, R., J. R. Grace and M. E. Weber(1978): Bubbles, Drops and Particles, Academic Press, 380 p.
- Wuest, A., N. Brooks and D. M. Imboden(1992): Bubble plume modeling for lake restoration, Water Resources Res., Vol. 28, No. 12, pp. 3235-3250.