

画像処理を用いた微細気泡の定量計測

中山 正明*¹⁾ 町谷 勝幸*²⁾ 森田 規矩士*³⁾

1. はじめに

気泡とは、気体が液体や固体、またはそれらの薄膜で覆われた状態のものであり、気液接触や気体溶解のための重要手段として活用され、物理化学作用、生物反応に利用されている。そのため、従来から各種の気泡生成装置が考案され¹⁾、多くの用途に活躍している。用途によって、気泡径は大きくてもよいが大量の気液溶解を必要とするもの、気泡径が微細であることが必要条件になっているものなど、様々な条件を満足させる必要があるが、気泡径と気体の溶解量は重要なパラメータとなっている。

気泡生成については、無数の微細孔に通気する方法、激しい気液混合により気体を溶解させ剪断により気泡化する方法、液体中で攪拌などにより気体を剪断して気泡化する方法、加圧下で気体を溶解させ減圧して過剰となった溶解気体が気泡となって析出する方法などが代表的手法である。

当社独自の気泡水生成技術であるGALF™ (Gas Liquid Foam) システム²⁾は、激しく気液混合させた後、加圧下で十分に気液溶解させ、減圧して気泡の析出を行う加圧溶解減圧析出方式(以下、溶解析出方式という)を採用しており、各種排水処理、湖沼浄化、オゾン水製造、水耕栽培など環境保護や環境保全を主とした様々な用途での展開を進めてきている。それらは大別すると(a)浮上分離と(b)気液溶解の2つの物理現象による作用のいずれかを用いている。

(a)浮上分離は、液中に浮遊する油分やアオコなどを気泡の浮力により水面に浮上させる³⁾ことで後処理を容易にする。例えば、排水処理や湖沼浄化などにおいてはフロックやアオコに多数の気泡をどのように付着させるかが課題とされており、浮上分離の性能評価には気泡径と単位体積当たりの気泡数(以下、気泡数濃度という)が重要な要素となっている。

一方、(b)気液溶解は気体が酸素であれば水中の溶存酸素の向上に、また気体がオゾンであれば脱色や脱臭のほ

か酸化分解や殺菌にも効果がある。例えば後者の場合、オゾンの水への溶解効率を評価する指数として総括物質移動容量係数 K_{La} があり、少ないエネルギーで効率よくオゾン水を水に溶かす技術が検討されており⁴⁾、ここでも気泡径と気泡数濃度が重要な要素となっている。

そこで、今回それら気泡に関するデータを明らかにするために気泡そのものに着目し、気泡を定量的に評価できる画像処理ベースの計測システムを構築し、GALFシステムと他の気泡生成方式による気泡径と気泡数濃度の計測を行い、比較検討した。比較対象として、散気板、エジェクタ、攪拌混合装置、ならびに従来より加圧浮上分離装置において一般的に用いられている加圧溶解槽を選定した。

計測項目としては気泡径や気泡数濃度を中心としているが、GALFシステムの優れた特徴である起動時の速応性やポンプ圧送圧の変動時における気泡径および気泡数濃度への影響も調べ、ユーザから好評を頂いているGALFシステムの特徴をデータから裏付けることも重要な目的のひとつである。

以下、気泡生成方式、計測システム、計測方法、計測結果などについて簡単に説明し、GALFシステムのデータと比較検討を行った結果を報告する。

またその結果、気泡径、気泡数濃度とも溶解析出方式が優っており、同じ溶解析出方式でも従来の加圧溶解槽とGALFシステムを比較した結果、気泡径、気泡数濃度、システムの操作性などあらゆる面でGALFシステムの優位性が確認されたので併せて報告する。

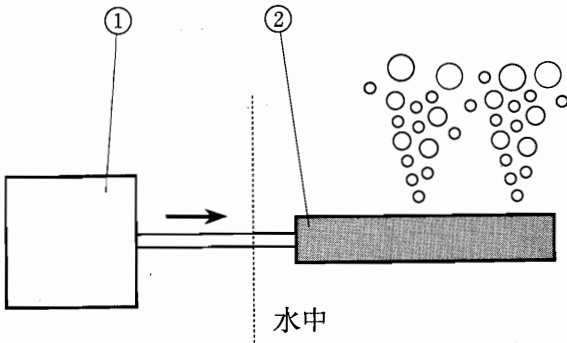

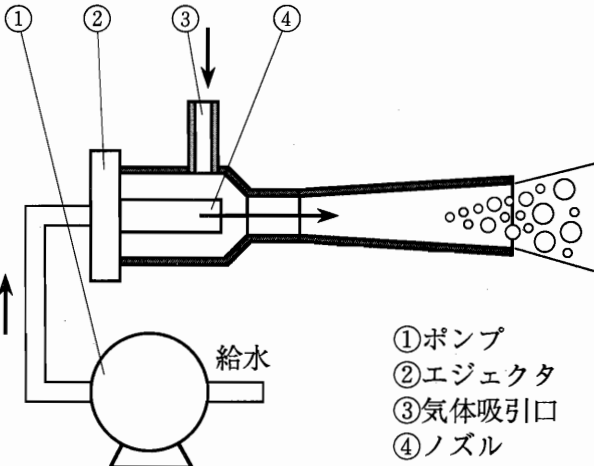
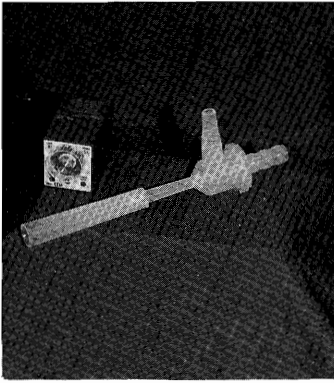
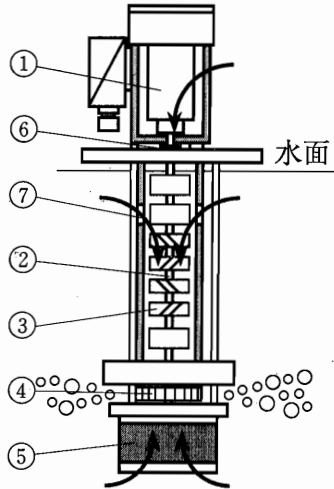
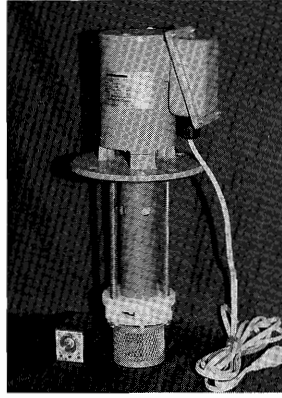
2. 各種気泡生成装置と気泡生成方法

今回比較の対象とした気泡生成装置を、図1に示す。これらは、気泡生成に一般によく用いられているもの、および当社のGALFシステムと類似性が高い装置などである。従来の気泡生成装置²⁾の他に、可動型混合方式のひとつである攪拌混合装置も計測対象に加えた。溶解析出方式の気泡生成装置は、一般に微細な気泡を生成するといわれているが、他の生成方式と比較して実際にどの程度異なるのかを確認するためである。

*¹⁾ 研究部

*²⁾ 研究部

*³⁾ 研究部

名称	概略	装置外観
散気板	 <p style="text-align: center;">水中</p> <p style="text-align: right;">①コンプレッサ ②散気板</p>	
方式		
多孔板		
特徴		
簡便 ポンプ不要 取扱い容易 気泡径 大きい 気泡数 少ない		
名称	概略	装置外観
エジェクタ	 <p style="text-align: right;">①ポンプ ②エジェクタ ③気体吸引口 ④ノズル</p>	
方式		
静止型混合		
特徴		
噴流が得られる 液流量大 取扱い容易 気泡径 大きい 気泡数 少ない		
名称	概略	装置外観
攪拌混合装置	 <p style="text-align: center;">水面</p> <p style="text-align: right;">①電動機 ②回転軸 ③攪拌混合羽根車 ④拡散用羽根車 ⑤ストレーナ ⑥気体吸込口 ⑦液体吸込口</p>	
方式		
可動型混合		
特徴		
攪拌効果大 一般に通気量大 取扱い容易 気泡径 大きい 気泡数 少ない		

名称		概略	装置外観
(d)	加圧溶解槽		
	方式		
	溶解析出		
	特徴		
	浮上分離で汎用 気泡径 小さい 気泡径 均一 気泡数 多い		
(e)	GALFシステム		
	方式		
	溶解析出 連続加圧管路		
	特徴		
	取扱い容易 気泡径 微細 気泡径 均一 気泡数 多い		

図1 各種気泡生成装置の分類

2.1 散気板の気泡生成方法と計測上の留意点

散気板として、市販のエアストーンKA-20 (M社製 外形寸法: □20×150mm, 孔径: 80μm) を用い、コンプレッサの圧縮空気流量を約3ℓ/分に設定し連続運転した。

圧縮空気量の調節により気泡数量は変化するが、気泡の変形が著しくならない程度に設定した。

液を循環する必要がないのでポンプが不要であることや、構造が簡単なので気液接触のための装置として用いられる。

2.2 エジェクタの気泡生成方法と計測上の留意点

エジェクタとして、市販のポリアスピレータ (K社製

全長: 190mm) を用い、ポンプ圧送圧を約0.1MPa (1MPa=1×10⁶Pa) に設定し連続運転した。

気体吸引量の調節により気泡径や気泡数量が変化するが、今回の計測では無調節とした。

構造が簡単で水流による攪拌効果もあるので、気液接触のための装置として用いられる。

2.3 攪拌混合装置の気泡生成方法と計測上の留意点

攪拌混合装置として、市販のVKF031P (F社製) を使用し、羽根車部を水没して連続運転した。気泡吐出口は2箇所あるが、一方から生成される気泡の密集している箇所を選んで計測した。

本体のみで気泡の生成が可能で、水流による攪拌効果もある。

2.4 加圧溶解槽の気泡生成方法と計測上の留意点

溶解析出方式のひとつで、従来から用いられてきた装置として加圧溶解槽がある。通常、加圧浮上分離装置に用いられるのは、連続的処理を行う加圧溶解槽であるが、ここでは回分式の加圧溶解槽を用いた。

加圧溶解槽としては、市販のフローテーションテスト(M社製 MS9000型)を使用した。計測用に使用するため、フローテーションテストからガラス試料管を取り外し、計測エリアへの加圧水の注入を容易にするホース(加圧水吐出バルブ出口からホース出口までの長さは約15cm)を取り付けた。

フィールドで使用されている加圧浮上分離装置よりも好条件かつ充分余裕を持って気体を溶解しているの、析出される気泡は一般の装置よりも微細かつ多量であると判断する。

何度か設定条件を変え加圧水の白濁状態を確認した結果、気泡生成方法は以下に行った。

- ① 加圧溶解槽に水道水を約1.5ℓ入れ、フタを閉め密閉する。
- ② コンプレッサから圧縮空気を送入し、ゲージ圧で0.5MPaまで加圧する。
- ③ ゲージ圧で0.5MPaを保持したまま圧力調節バルブを開き、10分以上エアレーションを行う(1時間以上の場合と白濁状態に差は無かった)。このとき加圧溶解槽内部で空気と水を充分攪拌接触させるため、気体流量が12ℓ/分以上となるよう圧力調節バルブを調節する。これにより、空気の理論溶解度のグラフ⁵⁾から推定して、約0.4MPaの加圧下で飽和させた空気の析出量と同等となる。
- ④ 圧力調節バルブを閉め、約1分程度加圧状態を保持する。
- ⑤ 加圧水吐出バルブを開き、加圧水を大気圧下へ吐出する。このとき加圧溶解槽の内圧が減少すると溶解槽内部の加圧水にも気泡が析出するので、加圧水吐出時も加圧溶解槽の内圧がゲージ圧で0.5MPaを維持するよう加圧空気を吹き込み続ける。

2.5 GALFシステムの気泡生成方法と計測上の留意点

GALFシステムは、02形気泡水製造装置(FZ1A-02)を用いた²⁾。

この方式は、圧送された液体で気体を吸引し、その下流の管路を用いて気体が液体に加圧溶解され、さらに下流において一気に減圧されることにより微細気泡を生成するもので、この間、気体吸引ならびに加圧のための外

部エネルギーを用いることなく、一貫した流れの中で管路の特性だけを用いている。また、気体吸引ならびに加圧は、GALFを構成する各要素の形状だけで決定できるようになっており、調整要素を含まないものである。

GALFシステムは、気体吸引部、加圧ミキシング部、吐出部から構成されており、それぞれ独立した機能を持ちながら、(1)式および(2)式の関係を保つことによって安定した気泡生成を実現している。

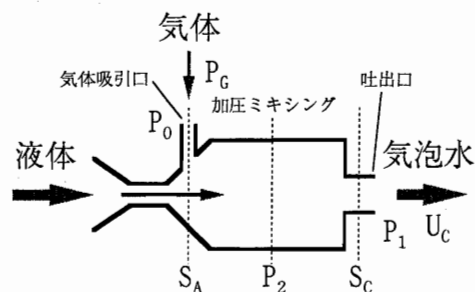


図2 GALFシステムの理論モデル

図2において、気体吸引条件PGは、

$$P_G > (1 - S_C^2 / S_A^2) P_0 + S_C^2 / S_A^2 (\delta P + P_1) \dots (1)$$

ここで、

- PG : 気体の静圧
- SA : 気体吸引口の断面積
- SC : 吐出口の断面積
- P0 : 気体吸引口の総圧
- P1 : 吐出口放出部の静圧
- δP : 圧力損失

一方、加圧P2は、

$$P_2 = \rho U_c^2 / 2 \dots (2)$$

ここで、

- P2 : ミキシング部加圧
- Uc : 吐出口の平均流速
- ρ : 液体の密度

2.4で述べた加圧溶解槽が飽和溶解のため加圧気体を供給し、調整制御しなければならないのに対し、GALFシステムは加圧状態を流体力学的な原理によって自己生成しているのが特徴である。

溶解析出方式のGALFシステムの詳細は、気泡水製造装置の開発²⁾に述べられている。

今回は、気泡水吐出バルブ出口からホース出口までの長さを約15cmとし、加圧溶解槽と条件を一致させた。

また、運転条件はポンプ圧送圧を1.0MPa、ミキシングボックス加圧を0.35MPaとした。

3. 計測システムの概要

液中に存在する気泡径の計測方法は、レーザ応用⁶⁾、写真撮影⁷⁾、CCDイメージセンサ⁸⁾⁹⁾など、既に多くの研究が発表されている。

GALFシステムが生成する気泡の性能評価では、次の6項目が重要と考えられる。

- (1) 気泡径分布
- (2) 気泡数濃度
- (3) 微小径への対応
- (4) 流れの追従性
- (5) 計測のリアルタイム性
- (6) 測定精度

気体の溶解度はHenryの法則に従うが、Henry定数は水温によって変化するため、温度条件には注意を払った。

3.1 計測装置

上記の課題を解決するため、CCDカメラと画像処理技術を用いた計測システムを構築した。

図3に微細気泡定量計測システムの概略とセッティングの状況を示す。

気泡は20ℓの水槽中で生成させ、水槽外部に設置したハロゲンランプの光を光ファイバ束を用いて水槽の内側から壁面近傍の気泡を照らす。計測エリアを透過した光は、気泡の有無により気泡の影を作り、ズームレンズと補助レンズを付けたCCDカメラに電気信号として取り込まれる。さらにその信号をパソコンに増設したビデオキャプチャボードを経由して、画像処理ソフトウェアで表示計測し、統計処理を行う。

3.2 計測エリアと計測精度

気泡生成装置により平均気泡径が大きく異なるので、

レンズ倍率は可変であることが必要となる。今回はズームレンズの倍率を最小の0.75倍と最大の4.5倍に固定し、また補助レンズの有無の組み合わせで光学的には4種類の倍率を用意した。

実際の計測を行う前に、画像処理ソフトウェアでの計測時に必要となる各レンズ倍率での基準寸法の認識（以下、キャリブレーションという）を行った。このとき既知の寸法として、照明用に用いた1本の直径が50μmの光ファイバやマイクロメータで測定したゲージブロックを利用した。これにより、各倍率で取り込んだ画像フレームの横と縦方向の長さを測定し、このフレームサイズより小さくて区切りのよい寸法の領域を2次元の気泡径計測範囲である計測エリアとした。

さらに、奥行き方向の計測エリアであるレンズの焦点深度を気泡輪郭のボヤケ具合により求めた。

図4は、ズームレンズの倍率が4.5倍、補助レンズの倍率が3倍のとき、光ファイバ支持ブロックに固定した透明板に気泡を付着させ、支持ブロックごとレンズより離れたところからレンズ側に50μm間隔で移動させたときの画像例である。図4(c)に示すように気泡に焦点が合っているところを境に、図4(b)や(a)のように距離が離れるほど二重化した輪郭の内側と外側の差が大きくなり、図4(a)に至っては全く気泡の特徴的なリング状の形すら判別できなくなる。

図5にその移動距離と各輪郭径の関係を示す。移動距離が0.5~0.7mmの範囲内では、両輪郭径の差が小さく判別可能な輪郭であったので、奥行き方向の気泡径計測範囲を0.2mmとし、前述の横と縦方向のデータと合わせて3次元の計測エリアとした。他のレンズ倍率についても同様に計測エリアを求めた。

気泡径は時間経過とともに変化し、またその変化率も気泡径により異なるので、焦点深度は径変化の小さい安定した気泡径を選び計測した。以上の結果をまとめて表1に示す。

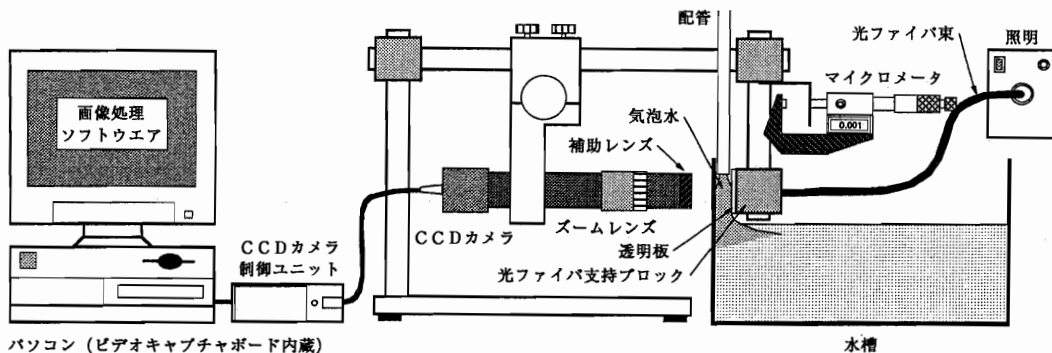


図3 微細気泡定量計測システム

3.3 計測データの処理

得られた計測データは、次のような処理を行った。

- (1) 全測定気泡の気泡径を一定寸法範囲毎に分け、その寸法範囲毎の累積個数から単位体積中に存在する気泡の度数分布を、気泡径と気泡数濃度のグラフとして作成。

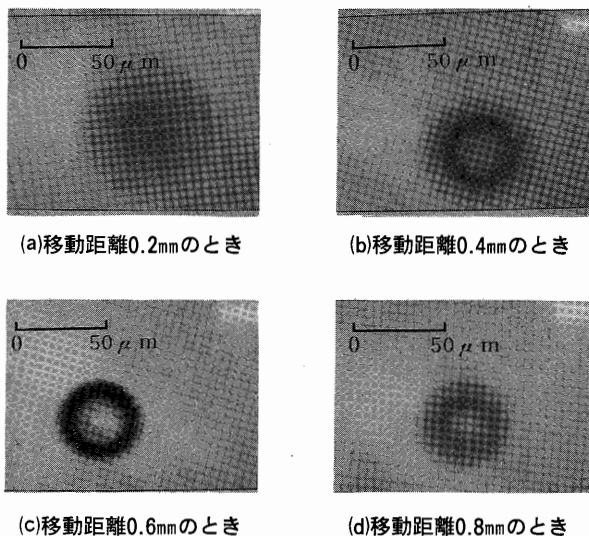


図4 焦点深度と気泡画像

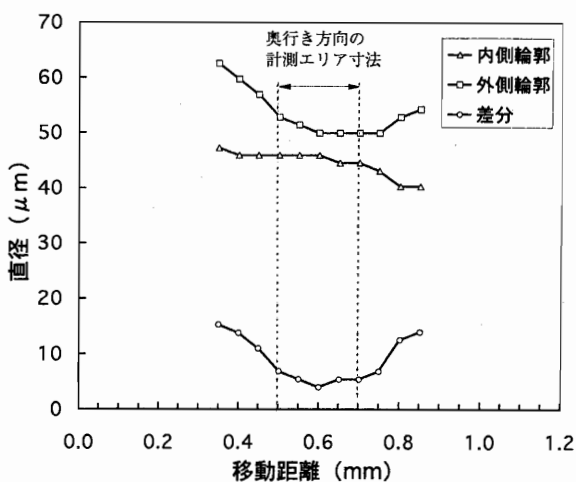


図5 移動距離と気泡輪郭径

- (2) 測定気泡画像単位で平均気泡径と気泡数濃度を求め、50画像分を気泡径と気泡数濃度のグラフとして作成。
- (3) 全測定気泡径から、累積個数と累積体積による平均気泡径を算出する。なお、累積体積による平均気泡径 d_{av} の算出には、次の一般的な処理に従った¹⁰⁾。

$$d_{av} = (\sum N_{b_j} d_{b_j}^3 / \sum N_{b_j})^{1/3} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 N_{b_j} は気泡直径 d_{b_j} に対する気泡数である。

3.4 GALFシステムに対する特別な計測

GALFシステムは、通常の加圧溶解槽を用いた気泡生成方式と比較して、非常にスタートアップが速いのが特徴である¹¹⁾。これは、気体吸引→気液混合→気液溶解/気液分離→減圧/気泡析出を連続した加圧管路で行うため実現されていると考えられる。

また、GALFシステムを浮上分離に適用した場合、浮上槽に流入する排水流量が変動しても、一定範囲ならば気体吸引量が排水流量の変動に追従して気液比が一定となるように自己調節するため、変動に対して比較的ロバストな状態を維持する。

従って、このようなGALFシステムの特徴を気泡計測から確認するため、GALFシステムに対しては次の2つの計測項目を追加した。

- (1) ポンプ圧送圧低下時の計測
- (2) GALFシステム起動時の速応性

これらの計測は、日常経験しているGALFシステムの優れた特徴が、計測データにどのように反映されるかを確認する重要な計測と考えられる。

表1 レンズ倍率と計測エリアの関係

倍率	ズームレンズ倍率	補助レンズ倍率	計測エリア(mm ³)	気泡径計測範囲(mm)	画素寸法(μm/pixel)
I	4.5	3	0.4×0.3×0.2	0.002~0.3	0.746
II	4.5	なし	1.1×0.8×0.5	0.006~0.8	2.162
III	0.75	3	2.5×2.0×1.3	0.015~2.0	4.970
IV	0.75	なし	8.0×6.0×4.0	0.048~6.0	16.125

4. 計測結果とその考察

ここでは各種の気泡生成装置による気泡形状、気泡径、気泡数濃度などについて報告を行う。また、3.4の(1)、(2)で計画された、GALFシステム特有の計測項目についての結果も報告する。

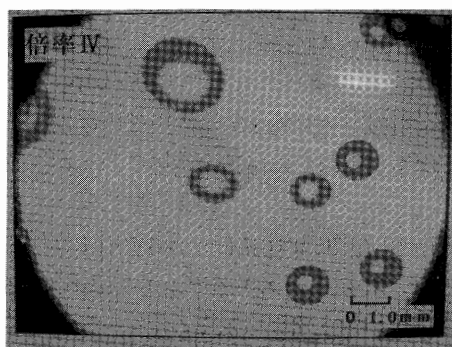
4.1 各種気泡生成装置による気泡画像

図6に各種気泡生成装置によって生成された気泡画像例を示す。気泡生成装置により選定したレンズ倍率が各々異なっており、GALFシステムは最大の倍率Iで、以下加圧溶解槽が倍率II、攪拌混合装置が倍率III、エジェクタと散気板が倍率IVであった。

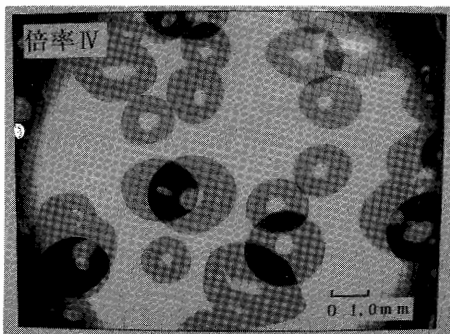
GALFシステムと加圧溶解槽によって生成された気泡画像は類似した画像となっているが、その他の方式による気泡画像は異なっていることが分かる。

4.2 気泡径度数分布

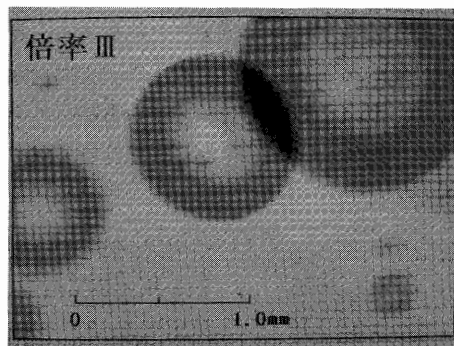
図7は、全気泡生成装置で計測された全気泡データをもとに、各気泡径範囲の累積気泡数をグラフ表示したものである。グラフ化の手順は、計測されたデータから、単位体積中に存在する気泡の直径を、散気板とエジェクタは0.2mm間隔、攪拌混合装置は20 μ m間隔、加圧溶解槽は5 μ m間隔、そしてGALFシステムは2 μ m間隔で



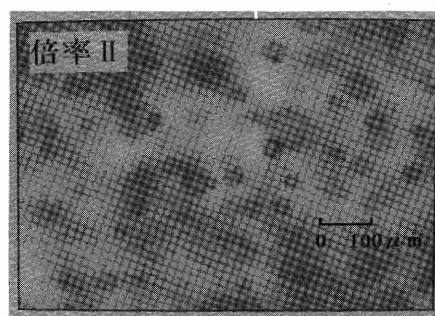
(a)散気板



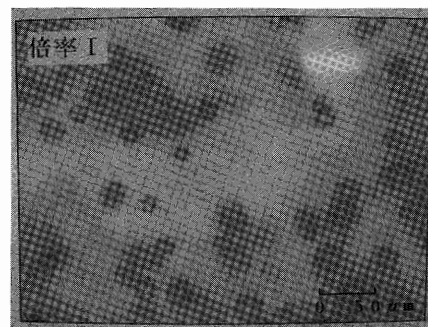
(b)エジェクタ



(c)攪拌混合装置



(d)加圧溶解槽



(e)GALFシステム

図6 各気泡生成装置の気泡画像例

区切ってまとめ、各気泡径範囲の累積気泡数をグラフ表示したものである。

縦軸のスケールは各気泡生成装置の度数分布に併せ各々異なっており、GALFシステムが最も大きく0~100000 (個/cm³)、以下加圧溶解槽が0~20000 (個/cm³)、攪拌混合装置が0~200 (個/cm³)、そして散気板とエジェクタが0~10 (個/cm³)の順になっている。

GALFシステムの場合、気泡径が最も小さく、しかもそのバラツキが少ないこと、また気泡数濃度が圧倒的に高いことが定量的に確認できる。

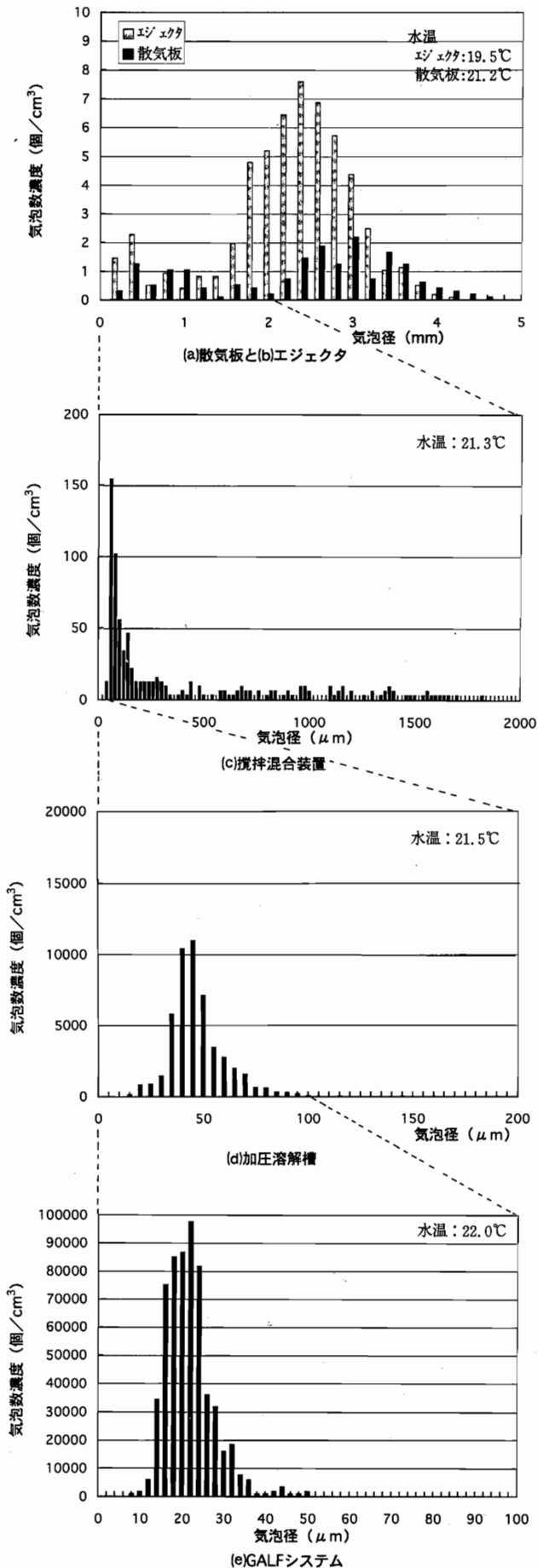


図7 各気泡生成装置の気泡径度数分布

加圧溶解槽はGALFシステムに次いで気泡数濃度が高いが、ただかGALFシステムの1/10以下にしか過ぎない。また、平均気泡径もGALFシステムの約2倍となっている。さらに、攪拌混合装置やエジェクタおよび散気板は、加圧溶解槽よりも気泡径が大きく、気泡数も極端に少ないことが分かる。

また、攪拌混合装置の気泡は、50 μmから2 mmまでの広範囲に渡って分布しており、バラツキが大きい。

エジェクタと散気板のヒストグラムの形は二山形となっており、2種類の性質の異なった気泡が存在するように見える。これは、ひとつの気泡生成装置に複数の気泡生成作用があったものと推測する。

今回の計測では、各気泡生成装置の平均気泡径に併せて計測システムのレンズ倍率を選定しているため、散気板、エジェクタおよび攪拌混合装置などは気泡計測範囲外の小さな気泡も生成していると思われるが、その数量は絶対的に少量であり比較するまでには至らなかった。

4.3 気泡径と気泡数濃度

図8は、測定気泡画像単位で平均気泡径と気泡数濃度を求め、50画像分を気泡径と気泡数濃度のグラフに表示したものである。

図中左上に位置する方が高濃度で径の小さい気泡であることを表わしており、GALFシステムで生成する気泡が最も微細で高濃度であることが分かる。

逆に、右下に推移するに従い径が大きくて低濃度の気泡が生成されており、散気板とエジェクタがこれに相当する。

加圧浮上分離装置への適用という観点から従来の加圧溶解槽を基準値として考えると、気泡径の微細さと気泡数濃度の高さから判断して、GALFシステムは加圧溶解槽の代替装置としての条件を充分満足していると思われる。

一方、散気板やエジェクタおよび攪拌混合装置は、浮上分離装置用の気泡生成方式としては不適であるが、散気板は上水処理などで、またエジェクタはプールや公衆浴場など比較的小規模な水処理で気体溶解の手段として一般的に使われており、生成する気泡径が大きくてもそれぞれ特徴を生かした用途で使用されている。

4.4 GALFシステムのポンプ圧送圧低下時の計測

GALFシステムは、通常初回運転時にポンプ圧送圧とミキシングボックス加圧の2つの圧力を初期設定するが、何らかの影響でポンプ圧送圧が低下した場合を想定し、人為的なリリースバルブの調節により0.8MPaと0.6MPaに設定したときの生成気泡がどのように変化するかを計測した。

図9は、GALFシステムのポンプ圧送圧を段階的に低

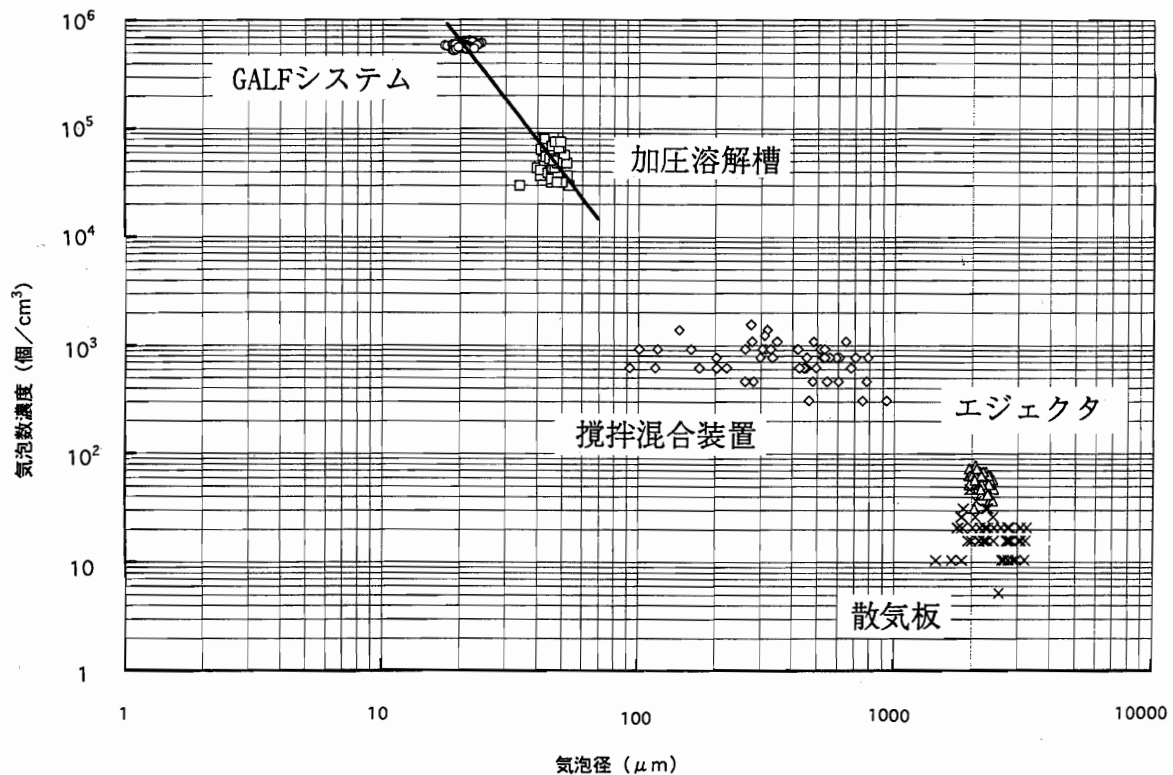


図8 各気泡生成装置の平均気泡径と気泡数濃度

下させたときの気泡データを、気泡径と気泡数濃度のグラフに表示したものである。

気泡数濃度は圧送圧の低下に従い低くなっており、これはヘンリーの法則による圧力に依存した溶解空気量（温度は一定）が析出空気量として減少した結果である。

一方、平均気泡径は圧送圧の低下に従い多少ばらつくものの、圧力変動にはほとんど影響を受けずに一定である。これは、GALFシステムが水温の変化にともなう水の粘度変化や電源の電圧変動などフィールドでの変動要素に対し、微細気泡を安定して生成可能なシステムであることを示している。

4.5 GALFシステム起動時の速応性

GALFシステム起動時の速応性の計測は、GALFシステムの起動から充分時間が経過したとき（以下、実使用時という）に生成される気泡と起動時の気泡データとの比較で行った。

ここで、次の2つの定義を行う。

(1) 気泡径の実使用時領域

GALFシステムの実使用時に生成される平均気泡径には範囲があり、図9のポンプ圧送圧が1.0MPa時の平均気泡径範囲を見ると約18~24 μ mとなっている。今、生成される気泡はいくら小さくても好ま

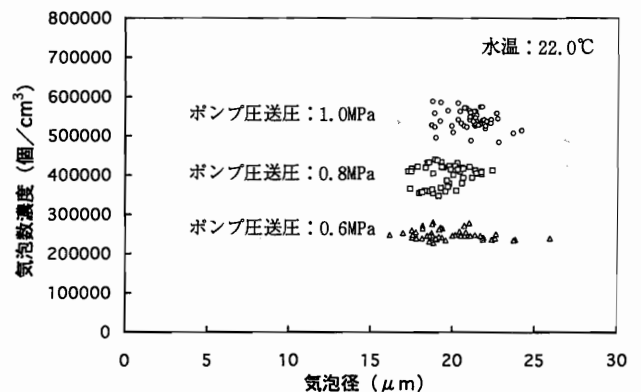


図9 ポンプ圧送圧低下時の気泡の変化

しい状況としてとらえ、生成される平均気泡径が24 μ m以下のときは実使用時で、24 μ mを越えたときは起動時などの状態にあるとする。

つまり、GALFシステムの起動時から実使用時の状態遷移時間を平均気泡径の計測により求める。

(2) 気泡数濃度の実使用時領域

GALFシステムの標準的な圧力の設定値は、ポンプ圧送圧を0.95MPa \pm 0.05MPaとしているが、こ

の設定値で生成される気泡特性を実使用時の気泡データとして取り扱う。つまり、図9よりHenryの法則から比例計算して求めたポンプ圧送圧が0.9MPa時の最小気泡数濃度である400000 (個/cm³) と、同じく1.0MPa時の最大気泡数濃度である600000 (個/cm³) との範囲を気泡数濃度における実使用時領域とする。

これにより、GALFシステムの起動時から実使用時への状態遷移時間を気泡数濃度の計測により求められる。

図10は、GALFシステムの起動時から一定時間間隔で計測した平均気泡径をグラフ表示したものである。GALFシステムの起動時直後に生成される気泡径は16 μmと小さく、その後実使用時領域を一度も越えることなく推移し、気泡径の変化はほぼ安定したことが分かる。

図11は、GALFシステムの起動時から一定時間間隔で計測した気泡数濃度をグラフ表示したものであり、起動時から下側実使用時領域への到達時間は約17秒であった。一旦実使用領域に入った気泡数濃度の値は、領域内から越えることなく推移していることが分かる。

GALFシステムの起動時に生成される気泡水の様子を見てみると、透明であった水が数秒後より白濁した気泡水に変化することが確認されるが、気泡径と気泡数濃度

の計測から定量的に判断して、GALFシステムの起動時の所要時間は約17秒と判断する。

また、制御系の観点からこの値について考察すると、原水の給水と気体吸引を入力とし、気泡水の吐出を出力としたGALFシステムをひとつの系としてとらえた場合、ステップ入力に対する応答時間は、むだ時間と時定数の和と考えられる。図11においてこの応答時間を求めると約20秒となり、前述の値とほぼ近い値であることが分かる。

4.6 計測結果のまとめと考察

(1) 各種気泡生成装置と計測結果

表2は、各種気泡生成装置の計測時水温、全測定気泡数、累積個数と累積体積の平均気泡径および相対気泡数濃度などを表示したものである。

この表から、全ての項目においてGALFシステムが生成する気泡は微細な気泡であり、高濃度であることが分かる。

攪拌混合装置の累積個数と累積体積の平均気泡径の差が、他の気泡生成装置と比較して大きいのは、気泡径度数分布のバラツキが大きいためであり、図7のグラフより確認できる。このバラツキの発生原因は、気体吸込口付近の水面が装置の攪拌作用により不安定となり、気体吸込量が変動したこと、また、羽根車により充分攪拌混合されなかった気泡がそのまま拡散されたためであると推測される。

また、今回用いた加圧溶解槽で生成された気泡は、丹保ら¹⁰⁾がフローテーションテストを用いて計測した気泡径より小さいことから、加圧溶解槽の有する性能を充分利用できた気泡生成条件であったと判断する。

(2) 浮上分離に有利な微細気泡

表2に示されているように、GALFシステムが生成する気泡の平均気泡径として20 μmを得た。

一般的に、溶解析出方式の気泡径は気泡生成の理論¹¹⁾から非常に微細な気泡径であることが予想されるが、各種の研究報告^{12) 13)}などを参考にすると、平均気泡径は40~60 μmと報告されている。勿論、気

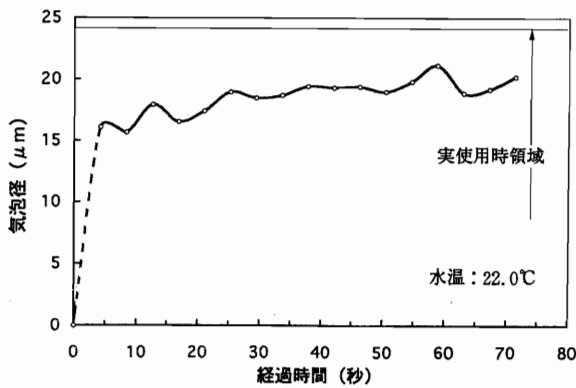


図10 起動時の所要時間 (気泡径)

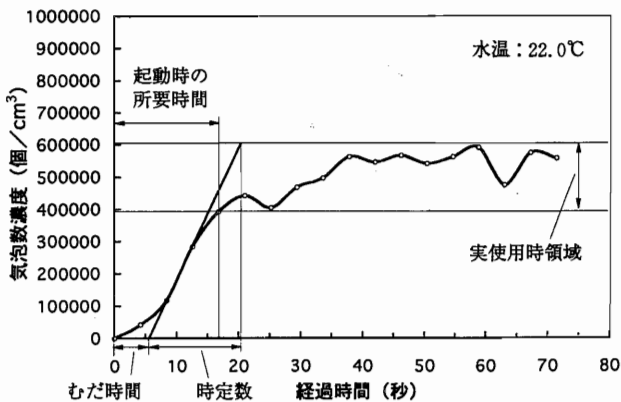


図11 起動時の所要時間 (気泡数濃度)

表2 各気泡生成装置の計測結果

気泡生成装置	散気板	エジェクタ	攪拌混合装置	加圧溶解槽	GALFシステム
レンズ倍率	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ
測定時水温 (°C)	21.2	19.5	21.3	21.5	22.0
全測定気泡数 (個)	179	536	253	1111	712
相対気泡数濃度	3.7E-4	1.1E-3	1.5E-2	1	11.7
累積個数の平均気泡径	2.57mm	2.26mm	0.13mm	42.5 μm	20.1 μm
累積体積の平均気泡径	3.28mm	2.67mm	1.38mm	56.4 μm	24.1 μm
気泡径	大きい	大きい	大きい	小さい	微細
気泡数濃度	低い	低い	低い	普通	高い

泡径の計測方法や計測手段および計測位置など計測全般事項の他、加圧力差や気泡水注入フローレート、吐出バルブの構造などによっても平均気泡径は変化すると考えられるが、今回の計測では初期析出時の流れや気泡の合泡などに充分注意を払って計測を行った。

溶解析出方式の気泡生成において、溶解されている気体の体積を一定とすると、平均気泡径が $1/2$ に変化すれば、気泡数濃度は8倍に変化すると算出され、これは図8のGALFシステムと加圧溶解槽のデータの中心を結ぶ直線の勾配とよく一致しており、気泡径と気泡数濃度の関係の妥当性が示されている。

浮上分離においては、気泡径が小さくなり、気泡数が多くなれば、気泡とフロック間での衝突機会が増大し、付着効率が増加すると予想される。

溶解析出方式の気泡は一旦生成されると比較的合泡が起こりにくい分散性のよい気泡と言われているため¹⁰、浮上分離には有利な気泡と考えられる。勿論、付着効率の向上は凝集剤やpHなどの影響が大きく気泡数の増加だけで充分とは言えないが、付着を促進するための必要条件であり、従って気泡径の微細化は浮上分離性能の向上にとって非常に有利な条件と考えられる。

- (3) GALFシステムのポンプ圧送圧低下時の計測結果
ポンプ圧送圧が低下した場合、圧力差に依存した溶解空気量の減少により気泡数は少なくなるが、平均気泡径はほとんど圧力変動の影響を受けないことが明らかとなった。

- (4) GALFシステム起動時の速応性の計測結果
GALFシステム起動時の所要時間は、約17秒であることが定量的に判明した。この結果は、日常的な経験値をデータから裏付けた形となり、例えば加圧溶解浮上装置によるスタートアップ時間を約20分と仮定して比較すれば、GALFシステムはその $1/70$ に相当し、格段に短縮された結果を示している。

- (5) 操作性の容易さ

今回の計測で使用した気泡生成装置の中で、加圧溶解槽のみ連続的に気泡生成を行えず、連続運転を可能にするには別途制御装置の付加と運転中の複雑な調節作業が必要となる。

しかし、GALFシステムの場合、加圧溶解槽よりも微細で高濃度の気泡生成を実現するにも関わらず、運転中のバルブ調節などの複雑な調節事項は一切不要としないので、操作性がよいことから計測は容易であった。

5. おわりに

各種気泡生成装置による気泡を定量的に計測し、比較評価した結果、GALFシステムで生成した気泡径が極めて微細で、かつ気泡数濃度が著しく高いことが明らかになった。これは、浮上分離や気液溶解を効率よく行う場合にGALFシステムが圧倒的に有利であることを示している。通常、加圧浮上に用いられる充慎槽を使用した連続的な加圧溶解装置では加圧調整、液面制御など複雑な制御が必要とされる。¹¹

それに比較して、GALFシステムは、起動時に要する時間が短時間であること、ポンプ圧送圧の変動に対して生成する気泡径は安定していることなどから、システムとしての操作性や安定性にも優れていることが判明した。

既にフィールドにおいては、加圧浮上分離へのGALFシステムの適用例¹²によるGALFシステムの優位性が立証されていたが、今回気泡の定量計測を行うことにより、気泡の特性面からもその優位性が明らかになった。

今後は計測システムの高精度化を図るとともに、GALFシステムの方式優位性の理論検証、また応用面における更なる展開をGALFチームとして推進する所存である。

最後に、今回の研究を進めるにあたり、研究部GALFメンバーを始め関係各位には多大なご協力を頂いたことをここに感謝し、謝意を表します。

参考文献

- 1) サンユー書房：新版オゾン利用の新技术，1993年
- 2) 堀登紀男，柏雅一，平沢公雄，町谷勝幸：
気泡水の生成と利用 GALF（気泡の研究）について，IDEC REVIEW 1993 p.8～16，1993年
- 3) 福士憲一，佐藤敦久，他：Microcystis sp.の凝集—浮上分離特性，水道協会雑誌 第64巻 第2号（第725号），1995年
- 4) 宗宮功編：オゾン利用水処理技術，公害対策技術同友会，1989年
- 5) 井出哲夫編：水処理工学，技報堂出版，1990年
- 6) 大場謙吉，磯田純一，田中大雅：位相ドップラー法による気泡流中の気泡径・気泡速度および液速度の同時測定，日本機械学会誌 No.900-64，1990年
- 7) 小野勇，他：渦流ポンプによる微細気泡の粒径とその分布の計測，配管技術 1990-9 p.63～68，1990年
- 8) 村上敏夫，他：CCDイメージセンサを用いた気泡径の動的計測，トライボロジスト 第35巻第6号，1990年
- 9) 林健一，曾我部秀幸：一次元CCDカメラによる気泡径の計測，住友重機械技報 Vol.38 No.113，

1990年

- 10) Takahashi T, Miyahara T, Mochizuki H:
Fundamental study of bubble formation in dissolved-air pressure flotation, J.chem. Engng Jap 12 No.4 p.275~280, 1979
- 11) 堀登紀男, 柏雅一, 平沢公雄, 町谷勝幸:
加圧浮上分離へのGALFシステムの適用について,
IDEC REVIEW 1994 p.11~17, 1994年
- 12) 丹保憲仁, 福士憲一, 太田等: フローテーションテ
スタによる溶解空気浮上法と沈降分離法の比較, 水道協会雑誌 第53巻 第12号 (第603号), 1984年
- 13) Sander E.de Rijk, Jaap H.J.M.van der Graaf,
Jan G.den Blanken: BUBBLE SIZE IN FLOTATION THICKENING, Wat.Res. Vol.28 No.2 p.465~473, 1994
- 14) 丹保憲仁, 五十嵐敏文, 清塚雅彦: 気泡付着フロック生成の電気泳動的な研究, 水道協会雑誌 第54巻 第1号 (第604号), 1984年

