

## トピックス

## 気泡水の生成と利用

## —GALF (気泡の研究) について—

町谷 勝幸\*<sup>1)</sup> 平沢 公雄\*<sup>2)</sup> 堀 登紀男\*<sup>3)</sup> 柏 雅一\*<sup>4)</sup>

## 1. はじめに

気泡の生成、挙動の解析ならびにその利用技術などに関する研究は、産業界をはじめ大学などの研究機関で広く行われている。一般に泡と称するものも、内部に気体を含んだ一種の気泡としてみなす<sup>(1)</sup>と、液体中に生成・存在する気泡は、気泡の合一・分裂・崩壊、浮上あるいは微細気泡の集合体としての比表面積の増大などの諸現象を持ち、その特性を用途に応じて有効に利用することは古くから知られている。

気泡の有効利用においては、その気泡径はミクロン単位の微細気泡を取り扱うことが多く、微細な気泡の生成手段の提供は、例えば各種製造プロセスエンジニアリングなどの革新につながることもあって、産業界では待望されているものである。一方、ポンプのキャビテーション気泡による羽車の損傷、プラスチック製品に見られる空洞欠陥(気泡)、微小重力場での気泡除去法の研究など、気泡が介在する各種の障害に対処する脱泡、省泡技術の研究も盛んである。

GALF (Gas Liquid Foam) は、単に微細気泡の発生技術だけでなく、気泡の有効利用として気液の加圧溶解、混合、分散、反応、分離などに関わる気泡の諸特性を包含した気液混相技術およびシステム装置の総称であり、当社ではGALFにより生成された気液の混相状態を「気泡水」と名付け、装置として「気泡水製造装置」の研究を進めてきた。気泡水の生成手段として独自に考案した加圧剪断方式について、また利用技術として浮上分離、オゾン水処理などのシステムについて、研究の成果を得たので報告する。

## 2. 気泡水製造原理とその効用

## 2.1 ガス溶解理論

水に対する気体の溶解は、次式のヘンリーの法則に従うことがよく知られている。

$$P = H\chi \quad (1)$$

ただし

H：ヘンリー一定数 (atm/モル濃度)

P：ガス分圧 (atm)

 $\chi$ ：溶解ガスのモル濃度

ここで、 $\chi$  をガス分圧 P における飽和濃度  $C^*$  で表すと、(1)式は

$$C^* = \left[ \frac{1}{H} \right] P \quad (2)$$

と書き直すことができる。また、空気の理論溶解度のグラフを図1<sup>(2)</sup>に示す。これらのことは、温度が一定であれば、空気の飽和濃度は圧力に比例することを示している。

## 2.2 過飽和水における気泡析出

加圧下で気体溶解を飽和させた後、大気圧に解放することによって、その水は過飽和水となり過飽和分の気体放出が起こるが、その理論式は以下の形で表される<sup>(2)</sup>。

$$V_G = C^*_1 (P - 1) \quad (3)$$

 $C^*_1$ ：大気圧下における飽和濃度 $V_G$ ：放出気体量

この時の気体放出は、液相に均一に分散していた溶解

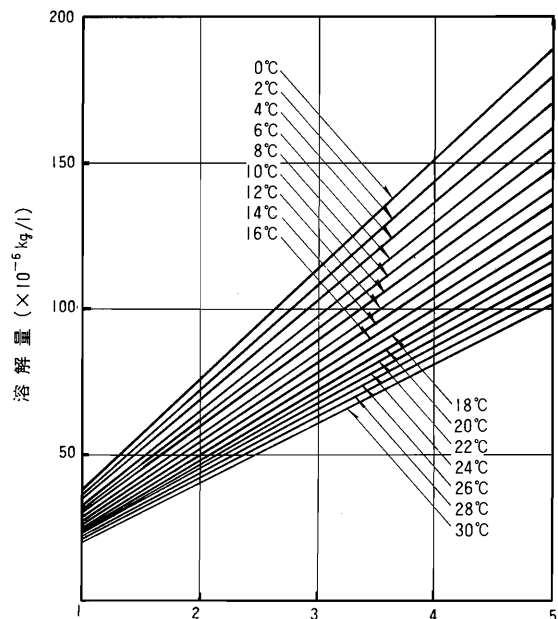


図1 空気の理論溶解度

\* 1) 研究開発部 GALF プロジェクト  
 \* 2) 研究開発部 GALF プロジェクト  
 \* 3) 研究開発部 GALF プロジェクト  
 \* 4) 研究開発部 GALF プロジェクト

表1. 従来の気泡発生方法と問題点

方式	① 散気板	② エゼクタ	③ 加圧タンク
気泡径	数100 $\mu$ m～数mm	1mm～数mm	数 $\mu$ m～数10 $\mu$ m
圧送流体	気体	液体	気液両方
問題点	<ul style="list-style-type: none"> <li>目づまりがおきやすい</li> <li>気泡径が大きい</li> <li>連続処理が困難</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>気泡径が大きい</li> <li>気液比の制御が困難</li> <li>エネルギー効率が低い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>装置が大きくなる</li> <li>気液両方の圧送が必要</li> <li>連続処理が困難</li> </ul>

表2. GALFクラッシュヤの分類

タイプ	タイプI	タイプII	タイプIII
気泡径	数 $\mu$ m～数10 $\mu$ m	10数 $\mu$ m～数100 $\mu$ m	数 $\mu$ m～数100 $\mu$ m
圧送流体	液体	液体	液体
圧送圧力	1.0MPa	0.3MPa	1.0MPa
気液比	0.02	1.00	0.15
処理液量	0.2～30 $\text{m}^3$ /時	0.2～6 $\text{m}^3$ /時	0.2～6 $\text{m}^3$ /時

$$\text{気液比} = \frac{\text{気泡としての気体流量}}{\text{液体流量}}$$

気体が、一斉に気泡として析出する形で行われるため、結果的に数 $\mu$ m～数10 $\mu$ mの微細で多量の気泡を含んだ「気泡水」が得られることになる。

### 2.3 加圧による気液反応の促進

気体が水に溶解するとき、溶存ガス濃度の変化速度を表す式として、次式が良く用いられる<sup>(3)(4)</sup>。

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C^* - C) \quad (4)$$

ただし、

C : 溶存ガス濃度

t : 時間

$K_L a$  : 総括物質移動容量係数

(4)式は、 $(C^* - C)$ すなわち飽和濃度との濃度差を濃度変化速度の推進力とし<sup>(4)</sup>、(2)式を考慮すると、加圧することにより飽和濃度を上げてやれば、推進力が増して濃度変化が加速されることを意味しており、これらは加圧溶解を進めることにより気液反応が促進されることを示している。

## 3. GALF気泡水製造装置の性能

### 3.1 従来の気泡発生技術

液体中に微細な気泡を生成する従来の方法は、主に次

の3つに大別される(特長比較を表1に示す)。

- ①非常に細かい孔の開いた散気板から気体を吹き出させる方法。
- ②ベンチュリ管での負圧を利用して気体を吸引する方法。
- ③加圧タンクを用いた加圧溶解法(2.2)。

表1に示すように、従来方法にはさまざまな問題点があることから、これら問題点の改善と手軽でより広い分布の気泡を作り出すことを目的に、「GALFクラッシュヤ」と名付けた気液混合方式を開発した。

### 3.2 概要および3タイプの解説

GALFクラッシュヤは加圧と吸引空気量のバランスの設定の変更により、3つのタイプの気泡発生装置が構成できる。その比較を表2に示す(表2の気泡径は、ビデオカメラ付きマイクロスコップでの実測値)。

表1ならびに表2をもとに、各タイプの特徴を解説する。

- 1) タイプIは、加圧溶解法(2.2)による析出気泡だけを生成する方法であり、3.1で述べた従来の方法③と同じ気泡分布を示すことがわかる。

気液比が0.02と小さい値をとっているが、これは気液比が気体の液体への溶解度に依存するためである。しかし、加圧タンクというバッチ槽を持たないため、コンパクトな装置にまとめることができ、連続処理を

行うことができる。また、この装置で加圧溶解の実験を行ったところ、吸引気体の95%以上を利用するという非常に高い利用率が得られた。

- 2) タイプIIは、ノズルでの剪断による気泡を重点的に発生させる方法で、タイプIに比べ気泡径は大きくなるが、低エネルギーで高い気液比が得られる。

ノズルからの吐出をジェット噴流にして勢いよく吐出させ、槽内の液を攪拌するような機能を持たせることができる。

- 3) タイプIIIは、上記タイプI、タイプIIの作用を同時に行い、数 $\mu\text{m}$ ～数 $100\mu\text{m}$ の幅広い気泡分布を一つの装置で実現することができるもので、この特長を生かした多彩な用途が考えられる。

### 3.3 気泡消失時間

タイプIで製造した「気泡水」を、高さ100mmの容器に満たし、気泡が浮上消失するまでの時間は約180秒であった。

### 3.4 気泡浮上速度

500mlメスシリンダに、タイプIで製造した「気泡水」を満たし、気泡の浮上消失に伴う清濁の境界線および微細気泡の存在線の移動距離の測定結果を図2に示す。境界線は気泡の析出および成長のため浮上速度が加速しているが、微細気泡は170秒までの間ではほぼ直線関係が得られ、この直線部より算出した値は32mm/分であった。

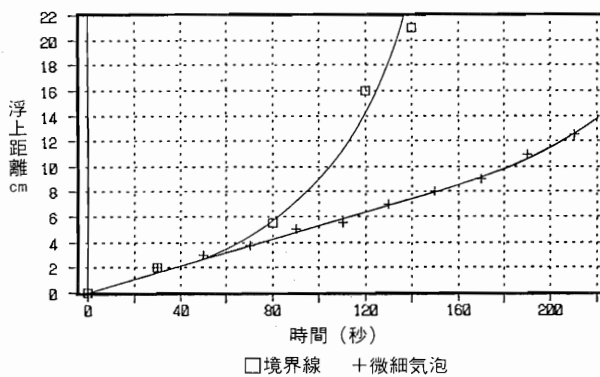


図2 気泡浮上速度線図

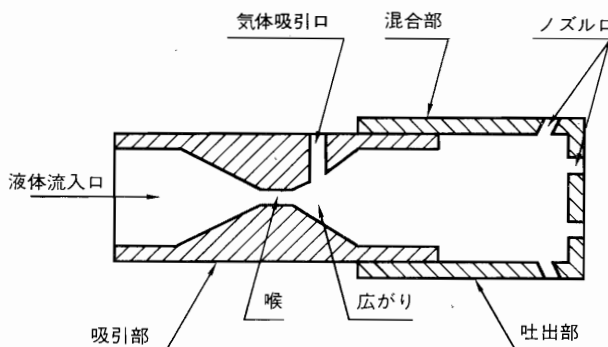
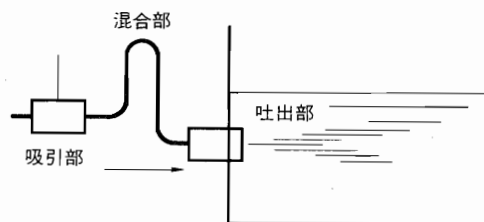


図3 GALFクラッシャ概念図

## 4. 気泡水製造装置の開発

### 4.1 GALFクラッシャの構成及び作用

GALFクラッシャは大別すると、吸引部、混合部、吐出部の3つの部分から構成される。図3に基づきGALFクラッシャの作用を説明する。

吸引部に液体を圧送し、吸引部のベンチュリの喉で液体が加速されて、いったん液体の静圧が低下し、ベンチュリの広がりでは流速が遅くなり再び静圧が増加する（ベルヌーイの定理より）。この時、気体吸引口は、喉のわずかに下流側に位置しており、この部分の静圧は相対的に負圧に設定してあることから、気体が流路中に流入し気液混合流を形成する。この気体吸引口を静圧の最も低くなると考えられる喉に配置しないのは、喉では気体の占めるべき流路が確保できず気体の吸引が悪く、流路が広がり始めた部分の方が効果よく気体を吸引するためである。

吸引部で形成されたこの気液混合流は、混合部に流入する。混合部の内で流路幅を十分に大きく取ってあるミキシングでは、静圧が高い状態となっている。この静圧

が高いミキシングで、気液反応や気液溶解を行わせる。

混合部は、吸引部から気泡放出装置である吐出部までの配管で代用することもでき、途中で自由に曲げたり分岐させたりしてもよい構造とし、フレキシブルに対応できるようにしている。

この後、気液混合流は吐出部に流入し、吐出部のノズル口から噴出される。その際にノズル口での乱れによって、それまで溶解しきれなかった気体が剪断され、10数 $\mu\text{m}$ ～数 $100\mu\text{m}$ に分布した気泡を形成する。またノズル口で液体が加速され、再び静圧が低下するために、混合部で溶解した気体が気泡の形で析出し、数 $\mu\text{m}$ ～数 $10\mu\text{m}$ に分布した微細な気泡を形成する。

4.2 GALFクラッシャの設定値

図4に示すモデルを用いてGALFクラッシャの設定を説明する。

ベルヌーイの定理より、各断面において次式が成立する。

$$P + \frac{\rho U^2}{2} + \Delta P = \text{CONST} \quad (5)$$

ただし

$\Delta P$  : その断面までの圧力損失 (ポテンシャルなどによる損失も含む)

$\rho$  : 流体の密度

$P$  : 静圧

$U$  : 平均流速

連続の式より

$$Q = \rho S U = \text{CONST} \quad (6)$$

ただし

$Q$  : 流量

$S$  : 断面積

ここで、GALFクラッシャが気体を自吸するには、

$$P_G > P_A \quad (7)$$

ただし

$P_A$  : 断面 A での静圧

$P_G$  : 気体の静圧

が成立すればよく、密度  $\rho$  の変化が小さく、断面 A と断面 C においてはほぼ一定値を取るものと考え、断面 A での静圧  $P_A$  は(5)式、(6)式より

$$P_A = \left( 1 - \frac{S_C^2}{S_A^2} \right) P_0 + \frac{S_C^2}{S_A^2} (\delta P + P_1) \quad (8)$$

ただし

$\rho$  : 液体の密度

$\delta P$  : 圧力損失

$P_0$  : 空気取り入れ口断面 A の総圧

$P_1$  : ノズル口放出面の静圧

$P_A$  : 空気取り入れ断面 A の静圧

$S_A$  : 空気取り入れ断面 A の断面積

$S_C$  : ノズル口断面 C の断面積

ゆえに(7)式、(8)式から吸引条件は、

$$P_G > \left( 1 - \frac{S_C^2}{S_A^2} \right) P_0 + \frac{S_C^2}{S_A^2} (\delta P + P_1) \quad (9)$$

となる。空気取り入れ口 A での総圧  $P_0$  は、圧送圧力からそこまでの圧力損失を引いたものであり、AC 間の圧力損失  $\delta P$  は AC 間の形状によって定まる定数になる。それゆえ圧送圧力と吐出部放出面の圧力が決定すれば、吸引条件は GALFクラッシャの形状にのみ依存することになる。

つぎに GALFクラッシャのミキシングでの加圧につ

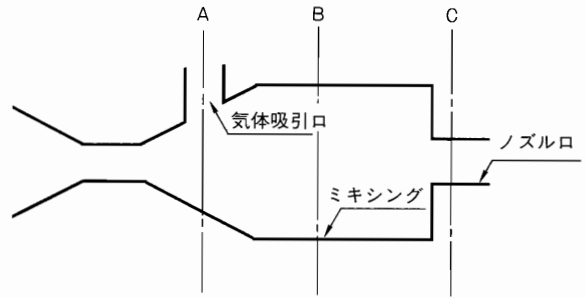


図4 GALFクラッシャモデル

いて考える。ミキシングでの静圧は、BC 間での断面積変化に比べ密度の変化が充分小さいと考えられるので、(5)式、(6)式より

$$P_B = P_C + \frac{\rho U_C^2}{2} \left( 1 - \frac{S_C^2}{S_B^2} \right) \quad (10)$$

ただし

$P_B$  : ミキシング B の静圧

$P_C$  : ノズル口断面 C の静圧

$S_B$  : ミキシング B の断面積

$U_C$  : ノズル口断面 C での平均流速

で表される。ここで、ミキシングの断面積  $S_B$  がノズル口の断面積に比べ充分大きいとみなせる場合 (ミキシングの断面積がノズル口の断面積の 5 倍以上)、

$$1 - S_C^2/S_B^2 \approx 1$$

となり(10)式は、

$$P_B = P_C + \frac{\rho U_C^2}{2} \quad (11)$$

に近似できる。

ミキシング内での加圧は、大気圧下から吸引し、大気圧下に気液混合流を放出する場合、 $P_C$  と大気圧が等しいと見なせるので、

$$P_2 = \frac{\rho U_C^2}{2} \quad (12)$$

ただし

$P_2$  : ミキシングでの加圧

の加圧が得られることになる。

GALFクラッシャでは、自吸するための吸引条件である(9)式が成立し、(12)式によって所望の加圧が得られるならば、自由に管路を曲げることや混合・分散させることができ、吐出部ノズル口の径や数も自由に設定できる。

4.3 気液再分配器

GALFクラッシャは、一つの吸引部で形成した気液混合流を自由に集合・分散させることができる。また吐出部のノズル口の数も自由に設定できる。しかし、管路を複数に分散したときや、複数のノズル口から放出した

ときには、すべての部分で均等な気液の割合にはならない。そこで、図5に示すような、分散のための分岐点の手前や、複数のノズルの手前に、軽い絞りを持つ気液再分配器を挿入し、再分配器の絞りの部分で起こる噴流による気泡の拡散作用で、均等な気液の割合の分配を可能としている。

#### 4.4 ミキシングボックス (Mixing Box)

タイプIのGALFクラッシャの吸引空気量と、混合部内の加圧の関係を図6に示す。このグラフから気液比を上げるには加圧が下がり、逆に加圧を上げると気液比が下がることがわかる。一般に気液反応や気液溶解を行う場合、気液比が大きいほど、また加圧が高いほど反応や溶解が促進されることが知られている。しかし、図6に示された制限があるために、タイプI GALFクラッシャを用いて加圧下での高効率な気液反応や溶解を行うことが困難であることから、ミキシングボックスと称する箱形の混合部を考案した(図7)。

緩急を繰り返しながら、段階的に上から下に流れ落ちる流路をもつミキシングボックスに、タイプI GALFクラッシャからの気液混合流を流す。ミキシングボックス内では、

- 1) 流路上部に気体、流路下部に液体が流れる状態となり気液の高接触が得られる。
- 2) 気液混合流の入口より出口が低いいため、ミキシングボックス内に気液混合流が滞る形になる。
- 3) 密度の大きい液体の方が気体よりも流出が容易になるため、気体が液体よりもより長く滞る。

ことから、ミキシングボックス外部では低い気液比であっても、ミキシングボックス内では高い気液比が得られ、高効率な気液反応や気液溶解装置を作ることが可能とした。

## 5. GALFの用途分野

GALF気泡水製造技術を応用・利用する技術として、「加圧水」「微細気泡」「気液反応」「ガス吸収」「気液分散」が挙げられる。これらは、単独あるいは相互に関連を持ちながら機能を果たしている場合が多い(図8)。

利用技術の詳細は次のとおりである。

### 5.1 加圧水

タイプIで製造した微細気泡が、液体と固体との不連続界面に析出しやすい性質などを利用し、微細気泡を粒子に付着させて浮上させるもので、「浮上分離」「加圧浮上」「油水分離」として利用する技術である。用途として工場排水、生活排水、湖沼の浄化などがある。

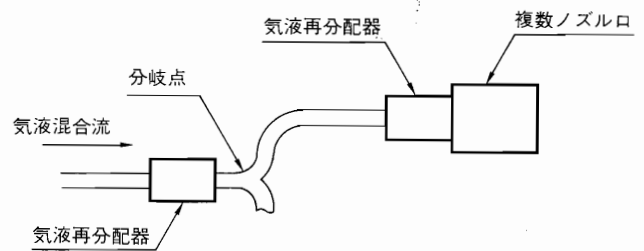


図5 気液再分配器

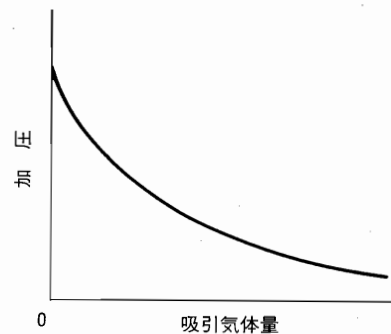


図6 吸引気体量と加圧の関係

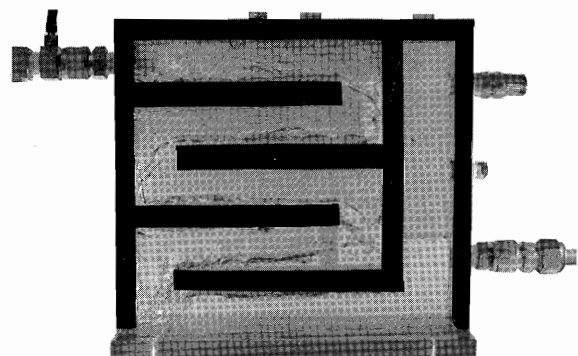


図7 ミキシングボックス

### 5.2 微細気泡

界面面積の拡大、気泡浮遊時間の延長など、微細な気泡の特性そのものに利点を見いだすもので、食品製造、発泡塗料、コーティングなどの「発泡」、養殖やいけす、菌の培養などの「溶存酸素供給」、ボイラ用冷却水、食品製造などの「不活性水製造供給」がある。GALFクラッシャは、タイプI～IIIがそれぞれ用途に応じて適用できる。

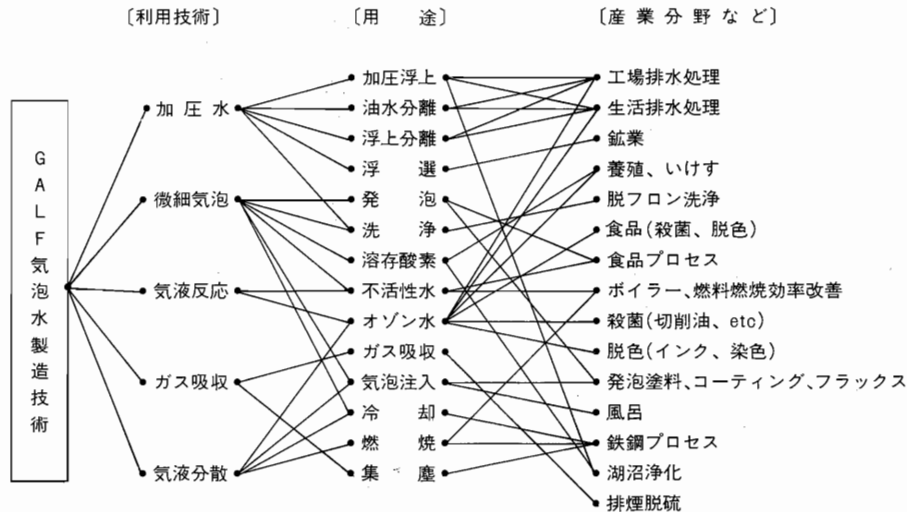


図8. 気泡水の用途分野

5.3 気液反応

気体と液体との反応を目的とした気液の接触方法には、微細気泡を利用する場合（接触面積の増大，反応槽など時間の拡大）と，気体に液滴を衝突させたり加圧溶解する方法がある。用途は「化学反応」，「オゾン水処理，オゾン水製造」，「発酵」などである。GALFクラッシュャはタイプI～IIIが適用される。

5.4 ガス吸収

気液反応の応用技術である。ある気体を液体中に吸収採取，除去することを目的としており，反応後の処理技術を含む。吸収した気体をバブリングにより再度取り出したり，さらに反応させ析出，中和などが行われる。「排煙脱硫」などのガス吸収や，鉄鋼プロセスなどでの集塵などの用途がある。容量などGALFとしては今後の課題である。

5.5 気液分散

液体中に気体を気泡化して注入する技術で，「発泡」「気泡カプセル化」に関する技術である。気泡化し大量の気体を液体中に保持させる場合などでは，界面活性剤などが併用される。用途として水溶液，薬品，燃料や食品，樹脂など高粘性液体への気泡注入，その他オゾン処理設備，鉄鋼プロセスでの冷却，燃焼などに利用できるもので，GALFの重点課題である。

6. 実施例

GALFシステムの応用実施例を紹介する。

6.1 アオコ浮上分離

1) 概要

アオコは藍藻類の Microcystis を中心とした植物性プラ

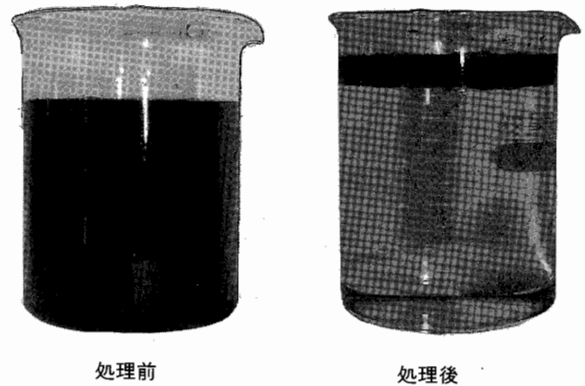


図9 アオコ浮上実験

ンクトンの総称であり<sup>6)</sup>，湖沼のアオコ汚染が社会的問題となっている。凝集技術をGALFに組み入れ，アオコ除去方法を考案し応用研究を行った。ジャーテストならびに20㎡の池での実機テストにおいて，ほとんど不透明であった「アオコ水」をほぼ清水に近い状態にすることが可能であることを確認した。

2) 実験方法および結果

900mlのアオコ水に，凝集剤600ppmと助剤を添加してアオコを凝集フロック化させ，その後，GALFの「気泡水」180mlを加えてフロックに微細気泡を付着させ浮上分離した。一般の大きな気泡ではフロックに付着させることができず，GALFの微細な気泡が有効であった。

ジャーテストの一例として，処理前後の様子を図9に，微細気泡の付着によって浮上するアオコの拡大写真を図10に，濁度除去のデータとして純水と比較した光透過度のグラフを図11に示す（島津製作所製：UV-3100Sにて測定）。アオコ水には波長780nm近辺にやや強い吸光が見られるが，赤色光の（吸光による）補色の青緑の呈色を示しているものと思われる。しかしアオコ自体はほとんど濁度成分であるため，処理後の水の光透過度は全波長にわたって大きく改善されていることから，ほぼ清水の状態まで浄化できたことが確認できる。

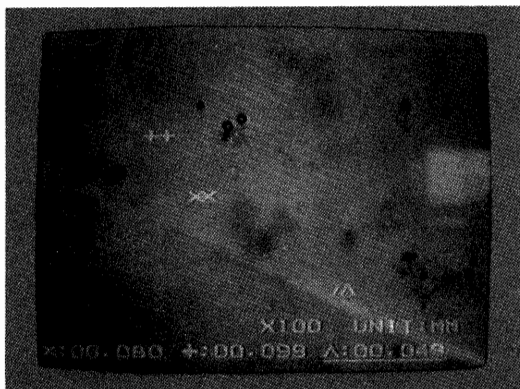


図10 アオコに付着し浮上する気泡

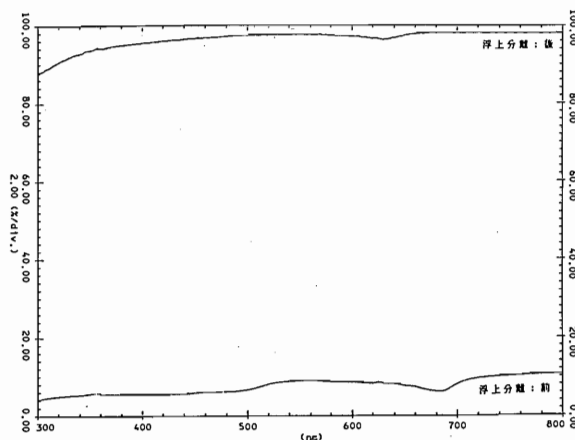


図11 アオコ水の光透過度

6.2 オゾン水処理 (殺菌)

1) 概要

酸素 (O<sub>2</sub>) の同素体であるオゾン (O<sub>3</sub>) は、ふっ素に次ぐ強い酸化還元電位を持った不安定な分子であり、この強力な酸化力と、分解後は酸素になるというクリーン性に注目し、従来の塩素や過酸化水素水による殺菌の代替として、近年食品業界などへの導入が盛んに試みられている<sup>(6)</sup>。GALFではその気液反応の良さを生かして、連続的に6ppmのオゾン水を供給できる「オゾン水処理装置」を開発し、オゾン水による菌類の殺菌処理への適用について有効な成果を確認した。

2) 実験方法および結果

「オゾン水製造装置」はステンレスおよびテフロン樹脂の材質で構成されるGALFシステムに、空冷式小型オゾナイザ (酸素流量: 2 l/分の時, オゾン発生量: 2 g/時) を組み込んだもので、6ppmのオゾン水を供給する能力を持つ (ただし原料気体: 純酸素800ml/分, 液量800ml/分)。そのオゾン水と、対照として脱イオン水をおのおの200mlビーカーにとり、酵母, 大腸菌群, 耐熱性菌の菌株懸濁液1mlをそれぞれに加え、一定時間ごとの生菌数を測定した。

表3に示すとおり, オゾン水1mlにつき10<sup>5</sup>~10<sup>6</sup>個の菌が1分以内に死滅していることが分かる。

比較的菌数の多い「もやし」および「切りごぼう」を対象にして、直接殺菌する実験も行った。対象物: オゾン水=1:10 (重量比) で混合処理した後, 対象物を取り出しスカッシュしたものをサンプルとして生菌数を調べたが, 殺菌の効果は確認されなかった。この原因はオゾン殺菌は対象物の表面だけに作用し, 内部までの浸透は困難であること<sup>(6)</sup>, オゾンの酸化攻撃は被殺菌物自体の有機物をも対象とするため, 殺菌効果を上げるにはオゾンの絶対量が不足していたなどが考えられ継続研究中である。

表3 殺菌実験の結果

成績通知書						
依頼者 富山県射水郡小杉町黒河新4846						食研第172号
和泉電気株式会社						平成4年7月4日
試料名 水						富山県食品研究所長 久保直
提出された試料の分析成績は次のとおりであるから通知します。						
	水 処 理 *1			オ ゾ ン 処 理 *1		
	1分	2分	5分	1分	2分	5分
酵 母	1.1×10 <sup>5</sup> **	1.5×10 <sup>5</sup>	2.3×10 <sup>5</sup>	10以下	10以下	10以下
大腸菌群	5.0×10 <sup>5</sup>	5.0×10 <sup>5</sup>	5.0×10 <sup>5</sup>	1×10	1×10	2×10
耐熱性菌	4.1×10 <sup>5</sup>	4.1×10 <sup>5</sup>	4.1×10 <sup>5</sup>	10以下	10以下	10以下

備考  
\*1: 菌懸濁液1mlと脱イオン水またはオゾン水200mlを混合し、一定時間毎の生菌数を測定  
\*2: 処理水1mlあたりの生菌数

6.3 オゾン水処理 (脱色)

1) 概要

わが国では、過去、水質汚濁防止法などにより水質汚染の改善防止を図ってきた。こうした法規制の下、現在問題視されているのが生活排水と着色排水である。GALFはこの着色排水問題に着目し、オゾンの強い酸化漂白力を利用した「着色排水処理装置」を試作し、ウーロン茶色素をターゲットとした脱色実験を行いその効果を確認した。

2) 実験方法および結果

「着色排水処理装置」は耐オゾン性を持った材質で製作されたGALFシステム (処理水量: 5 l/分) に、水冷式小型オゾナイザ (酸素流量: 3 l/分の時, オゾン発生量: 150mg/分) を組み込んだもので、オゾン注入率30mg/lでオゾン処理することができる。処理原水は市販ウーロン茶を20倍に希釈したものを用意し、原水ならびにオゾン処理を一回及び二回行ったものをサンプルとして光透過度を測定した。

図12に示すとおり、長波長側では大きな違いはないが、短波長側ではかなりの改善が見られ、ウーロン茶特有の黄色色素の脱色（分解）を示している。また、二回処理を行ったものはほとんど無色透明となった。

なお、オゾン利用率はオゾン処理実行時の排オゾンの測定から、85%という結果が得られた。

3) ウーロン茶の色素成分

ウーロン茶は不発酵茶（例えば緑茶）と発酵茶（例えば紅茶）の仲間である半発酵茶に分類される。元来、茶葉は活性の強い酸化酵素（ポリフェノールオキシダーゼ）を含んでおり、それが茶の苦み成分としてよく知られているタンニン的一种であるフラバン-3-オール類を酸化重合させることによってテアフラビン類という色素成分が生成される。その生成経路の一例を図13に示す<sup>(7)</sup>。

$\pi$ 結合は、オゾンの酸化攻撃を受け易い<sup>(8)</sup>という観点から、上記脱色はテアフラビン類のベンゼン環が開環することによる反応と予測されるが、インジゴやアゾ染料のように、オゾンによって容易に開裂するところの発色特有のオレフィン結合を持つもの<sup>(9)</sup>に比べれば、やや脱色されにくい特性を持つものと思われる。

6.4 DO値制御

1) 概要

気液間の物質移動や化学的な反応を伴う気液接触操作は、重要な化学プロセスである。従来は、気泡径の微小化の限界から、多量のガスの吹き込みや反応槽の高背大型化の必要性があった。気液を加圧することによって、気体の液中への移動（溶解）は加速される（2.3）ことから、GALFシステムで過飽和水を供給し、溶解ガス濃度をより速く上げる方法を検討した。散気板との性能比較を行い、使用実験システムの $K_La$ （総括物質移動容量係数）を算出した。

2) 実験方法および結果

一般水道水への窒素ガスおよび空気供給によるDO値変化の測定を行った。GALFならびに散気板を用いた実験システムを図14に示す。

窒素ガス供給の目的は溶存酸素の追い出しである。GALFの $K_La$ は、実験開始40分後に空気注入に切り替え、DO値上昇の具合を調査し算出した。また散気板実験は、ポンプによる同条件の液循環を行いながら、10~16 $\mu$ メッシュ・ $\phi$ 30mmの散気板を用いて窒素ガス供給を行った。DO値測定は300mlのビーカーで試料水をくみ取り測定し、そのあとサンプルをタンクへ戻す方法を繰り返した。

- 水容量 : 30 $\ell$
- ポンプ元圧 : 1.0MPa
- 循環水量 : 2.8 $\ell$ /min
- 水温 : 24 $^{\circ}$ C
- 注入ガス量 : 700ml/min (窒素, 空気ともに)

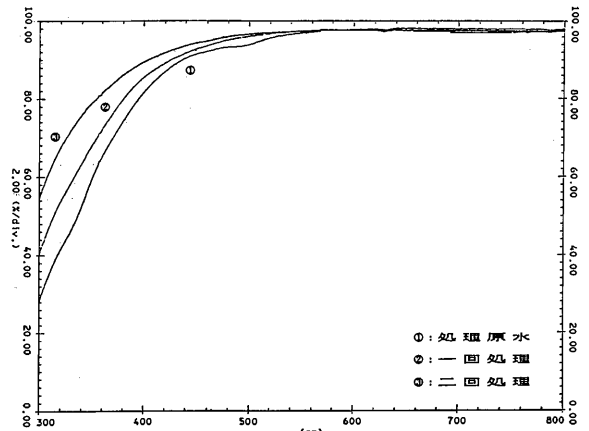


図12 着色排水光透過度(ウーロン茶)

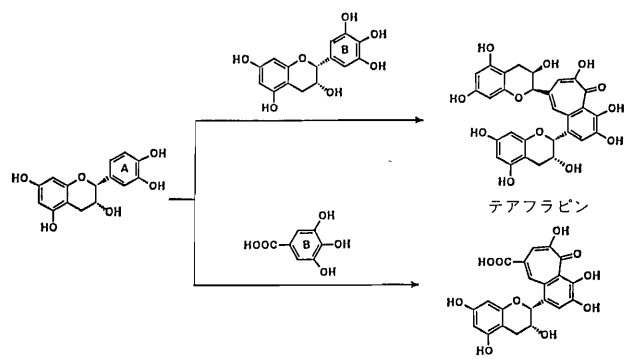


図13 色素成分の生成経路

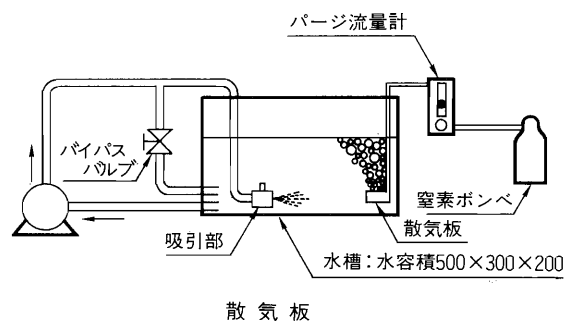
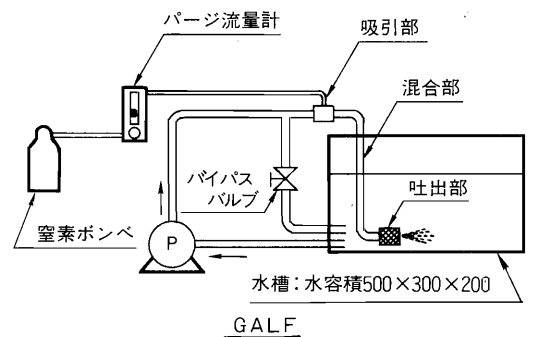


図14 DO値比較実験装置

DO値測定：堀場製作所製DOメータ DO-8F

3) 結果

測定結果のグラフを図15に示す。散気板に比べ、GALFはかなり速い速度で酸素追い出しが行われていることがわかる。



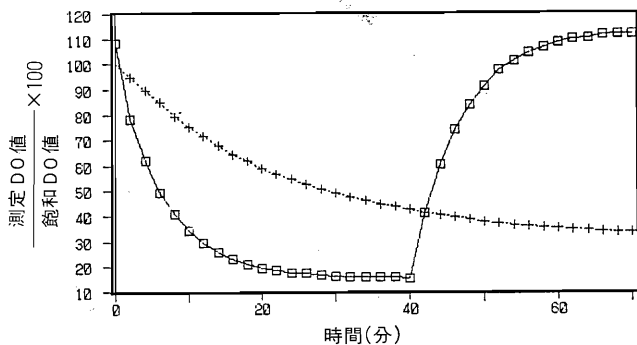


図15 DO値測定結果

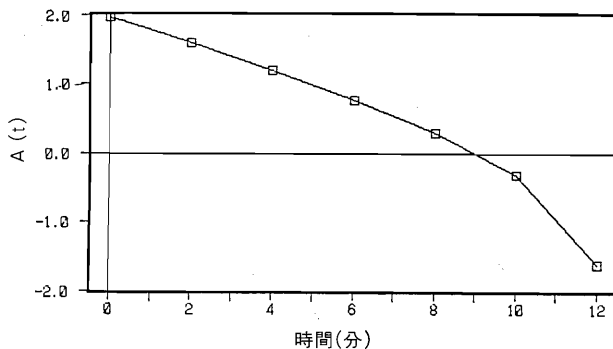


図16 A(t)-時間線図

同実験におけるガス空塔速度（供給気体量を反応槽の水平断面積で割ったものであり、この値が大きいほど処理水量に対してのガス吹込み量が多いという目安になる）は、0.28 (m/h) であった。この値を他のシステムと直接比較することはできないが、極めて小さい値であることは確かである。

実験開始40分以後のGALFのDO値上昇カーブから、WiseのStatic Methodによる $K_L a$ の算出<sup>(10)</sup>を行う。

(4)式を積分することにより、(13)式が得られる。

$$1 \ln (C^* - C) = -K_L a t \quad (13)$$

したがって、 $1 \ln (C^* - C) = A(t)$ としたときの計算値 $A(t)$ を、時間に対してプロットすることによって得られる直線の傾きが $-K_L a$ を与えることになる。 $A(t)$ を縦軸に、空気供給開始後の時間を横軸にとって得られたグラフを図16に示す。このグラフの直線部の傾きより $K_L a = 12.5 (1/h)$ が得られた。

文献<sup>(11)</sup>には、調査した $K_L a$ の実測値が掲載されているが、それを図17に示す。このグラフから、GALFは少ないガス注入量（ガス空塔速度：0.28m/h）でも $K_L a = 12.5 (1/h)$ と比較的速い速度でDO値向上が進んでいると判断できる。

### 7. おわりに

気泡水製造技術は、多様な用途が期待され、用途に応じた固有の技術を付加することにより専用技術へと展開できることから、さらに深く研究を進めていく所存である。

幸いにして、「気泡水製造装置」、および用途開発の「オゾン水処理装置」は市場にその価値を問うところとなった。個別技術分野への展開については、研究日数の浅いこともあって、まだまだ未熟な点があると思われ、各位のご教示をお願いする次第である。

最後に、研究推進にあたり何かとご配慮いただき、またご指導賜りました関係各位に対し感謝の意を表し厚くお礼申し上げます。

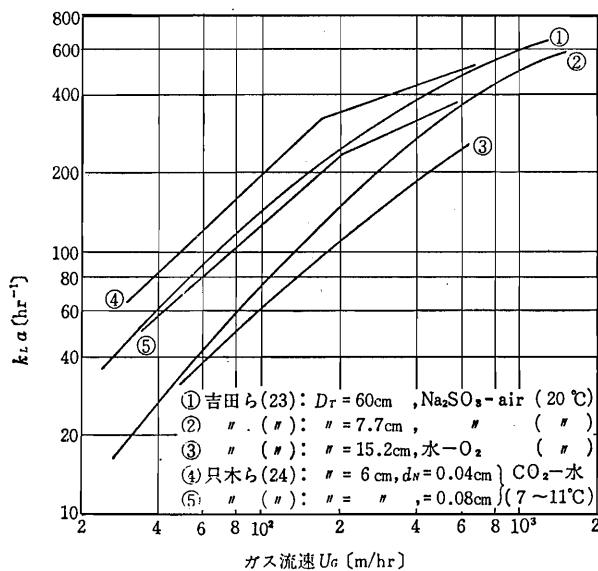


図17 気泡塔の液側容量係数

### 参考文献

- 1) 高橋平七郎：照射下でのバブルの奇妙なふるまい，バウンダリー，コンパス社（1989）5月号，P38
- 2) 井出哲夫編：水処理工学，技報堂出版（1990）
- 3) 宮原敏朗：加圧下での酸素の水への溶解，水処理技術，Vol.32 No.4 p.9-15（1991）
- 4) P. F. Stanbury：発酵工学の基礎，（株）学会出版センター（1988）
- 5) 奥井登美子編：アオコに挑んだ地球市民，北斗出版
- 6) 安藤顕：食品工場における殺菌剤としてのオゾン，食品と科学，4-1987，p98-102
- 7) 村松敬一郎編：茶の科学，朝倉書店（1991）
- 8) 太田静行編：オゾン利用の理論と実際，REALIZE-INC
- 9) 松居正樹：色素のオゾン退色，色材，64(1991)P.2933
- 10) P. F. Stanbury：発酵工学の基礎，（株）学会出版センター（1988）
- 11) 恩田格三朗監修：改訂ガス吸収，（株）化学工業社