

別刷

設計工学

公益社団法人 日本設計工学会誌

2017年 第52巻 第5号

(P. 275 ~ P. 285)

ファインバブル生成の基本原理と生成装置の特性

青木克巳, 加藤克紀, 奥津俊哉, 篠原尚也

Basic Principle of Fine Bubble Generation and
Characteristics of Generator

Katsumi AOKI, Katsunori KATO, Toshiya OKUTSU and
Naoya SHINOHARA

jsde

公益社団法人 日本設計工学会

解説

ファインバブル生成の基本原理と生成装置の特性*

Basic Principle of Fine Bubble Generation and Characteristics of Generator

青木 克巳^{*1}

(Katsumi AOKI)

加藤 克紀^{*2}

(Katsunori KATO)

奥津 俊哉^{*2}

(Toshiya OKUTSU)

篠原 尚也^{*2}

(Naoya SHINOHARA)

Key Words : fine bubble, ultrafine bubble, generation mechanism, characteristics

1. はじめに

気泡を微細な状態にすると通常の気泡とは異なった性質が現れることが明らかになってきた。これらは単にバブルのサイズの問題だけではなく、マイクロバブルやナノバブルという名前で呼ばれている。

1995年に旋回流形マイクロバブル発生装置が開発され、カキ、ホタテ、真珠貝の二枚貝等の大量斃死問題に対し適用したところ「マイクロバブル」が生物活用作用を示し、顕著な成長促進作用を示すことが明らかにされた¹⁾。これを契機に、水産、農業・植物栽培、環境分野、洗浄、水処理、食品・飲料水、医療・薬品、化粧品、化学等に至る広範囲な分野に展開してきた。マイクロバブルという名称はこれまで、取り扱う分野により基準が異なり大きさに差異が生じていた。これらは、物理・化学的にその性質がまだ完全に明らかにされていないことに起因するものと考える。近年これらの名称とバブルのサイズに関して、第2回ファインバブル国際会議(2013.12京都)で、マイクロバブル(micro bubble :MB)、ナノバブルを総称しファインバブル(微細気泡)と、特にナノバブルを指すときはウルトラファインバブル(超微細気泡)と称することが決議され、その後、世界の産業会の標準化を司る国際標準化機構(ISO)で、ファインバブル(Fine bubble: FB)と定義された名称としてのマイクロバブルの直径は $1\mu\text{m}$ 以上 $100\mu\text{m}$ 未満、また、ウルトラファインバブル(Ultrafine bubble: UFB)の直径は $1\mu\text{m}$ 未満と定義することが合

意されている⁴⁾。ファインバブルはバブル生成法によりバブル径も異なり物理化学的特性も異なるともいわれている²⁾。このように、ファインバブルの物理・化学的な未解明のある中、バブルの特徴ある性質を利用し、応用研究が先行する形で水産、農業・植物栽培、環境分野、洗浄、水処理、食品・飲料水、医療・薬品、化粧品、化学、新機能材料製造、エネルギー分野等の広範囲な分野に展開されている。

本稿ではファインバブル生成の基本原理と生成装置の特性並びにファインバブル生成時のバブル挙動に関して紹介する。

2. ファインバブルの特性³⁾

ファインバブル(FB)やウルトラファインバブル(UFB)を従来のミリバブルと比較すると、以下の特性があげられる。

2.1 物理的特性

2.1.1 気泡径が小さい

図1はUFB、MB及び非FBのサイズによる分類を示す。これより、FBと定義された名称としてのマイクロバブルの直径は $1\sim100\mu\text{m}$ 、また、UFBの直径は $1\mu\text{m}$ 未満である⁴⁾。

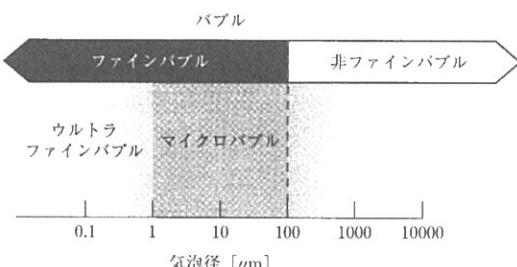


図1 バブルの呼称とサイズの分類
[文献4)より転載]

* 原稿受付 2017年2月7日

*1 大生工業株式会社顧問

(〒170-8428 豊島区南大塚3-58-11 今井ビル6F)

*2 大生工業株式会社FB事業部

(〒170-8428 豊島区南大塚3-58-11 今井ビル6F)

図2は水中においてバブルが浮上しているときのFBと非FBの挙動の相違を示している。通常の気泡すなわち非FBは、水中を浮上するに従い非円形状に変形し、静止水中をジグザグ運動をしながら浮上し、水深があまり深くない場合は、自由水面まで浮上したのち破裂して大気に混ざる。また、MBはゆっくりした浮上でバブルは徐々に縮小し、ついには消滅(溶解)する。UFBはMBの急速収縮後に誕生すると考えられているが消滅時のメカニズムはまだ明確にされていない。数十ミクロンの気泡径のFBの場合は、気泡が散乱体となるため「液体が白濁」することで存在が認識できる。しかしながら、さらに小さいナノサイズの気泡径になると、光の波長よりも小さくなるため視認することができなくなり液体は透明になる。この極めて小さな気泡がUFBと言われている⁶⁾。

2.1.2 水中の上昇速度(終端浮上速度とも言う)が遅い

通常の気泡は、水液中を上昇し最終的に液面で破裂する。しかし、FBは気泡体積が微細であるため、上昇速度が遅く、水液中に長く滞在し続ける。この上昇速度は次のStokesの式で説明できる。図3は微細気泡径に対する上昇速度を示している。例えば、直径 $10\mu\text{m}$ の気泡は一分間に3mm程度の上昇しかない。

$$u = \rho g d^2 / 18\mu \quad (1)$$

ここで u : 上昇速度、 d : バブルの直径、 ρ : 液体密度、 μ : 液の粘性係数、 g : 重力の加速度である。

2.1.3 大きな対体積表面積

気液界面積が大きい単位体積($V=\pi d^3/6$)当たりの気液界面積($A=\pi d^2$)との比(A/V)は次式で表される。すなわち、気泡の総体積が同じであれば直径が小さいほど総表面積が大きくなり、ガス溶解量に大きく寄与する(界面を通しての優れた反応性、輸送現象)。

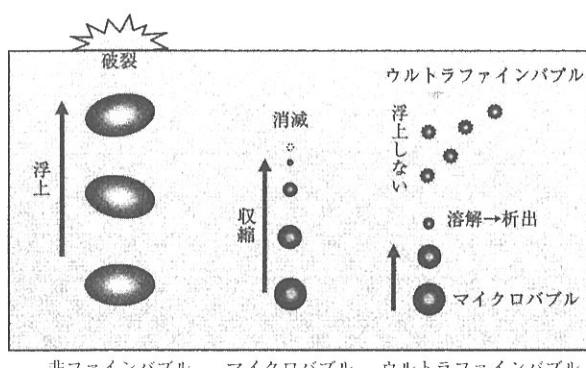


図2 ファインバブルと非ファインバブルの挙動
[文献4)より転載]

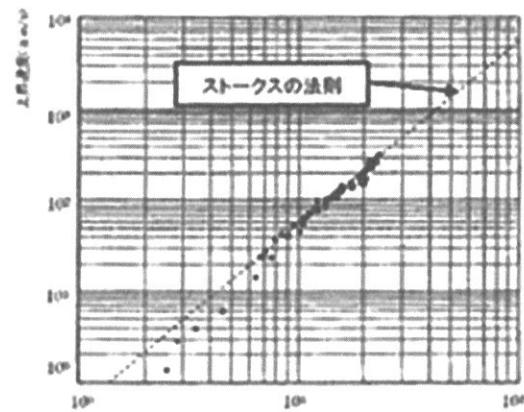


図3 マイクロバブルの上昇速度
[文献5)より転載]

$$A/V = 6/d \quad (2)$$

2.1.4 気泡内圧力が高い(自己加圧効果)

気液界面の曲率を維持のための力学的平行条件から、気泡内圧力と気泡周囲との圧力差による力=表面張力より、次のYoung-Laplaceの式より気泡内圧力が推定できる。

$$\Delta P = 4\sigma/d \quad (3)$$

ここで、 d : 気泡径、 σ : 表面張力である。

気泡は周囲液体より加圧された状態にあり、気泡径が小さいほど ΔP は増大する。従って、気泡が収縮すると気体溶解成分の分圧、すなわち溶解の推進力が増大しガスが溶解しやすくなる(ヘンリーの法則)。

2.1.5 摩擦抵抗を低減

図4は気泡平均径が $40\mu\text{m}$ 、気泡の数密度が 2×10^5 個/ cm^3 のMBを含むミルク状の水を内径 20mm の垂直管内に流し、また、MBの体積分率(ボイド率)

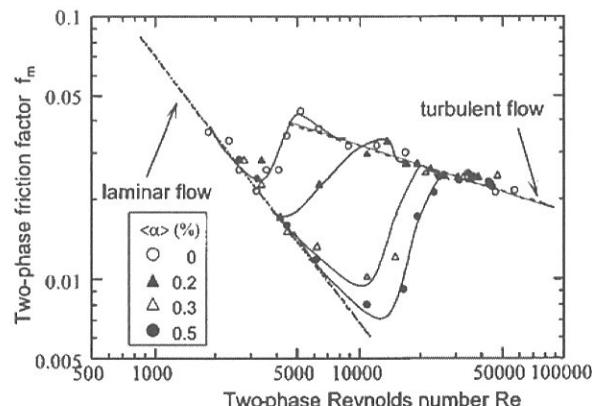


図4 マイクロバブルによる摩擦係数の低減
[文献6)より転載]

α を0~0.5までえたときの2相流のレイノルズ数(Re)に対する摩擦係数の関係を示したものである。これより、遷移領域は、 α が大きくなるほど高Re側へと移行し、管摩擦係数は低減することを明らかにした⁶⁾。

2.1.6 溶解性に富む

溶解は気体側から液体側に気液界面を気体が通過する現象であり、対体積表面積が大きい程溶解度は増す。力学的平衡条件から内圧が高いのでヘンリイーの法則が成り立つ。

2.1.7 帯電作用がある

MBは電荷を帯びており、MB同士は反発し合体や吸収が起こりにくい性質を持っている。このため気泡が結合することなく、小さい状態のままを保ち、均一に液中に分散する。それにより非常に高濃密な気泡を作ることができる。

2.1.8 気泡間相互作用

気泡同士が近づくと反発する。

2.1.9 音響特性

優れた超音波産卵特性、外部からの繰り返し振動付与で共鳴振動、高温・高圧場の形成、衝撃波、発光現象などの特性を有する。

2.2 化学的特性

2.2.1 圧壊によるフリーラジカルの生成

ベンチュリー管の流れのように、陰圧で発生したキャビテーション気泡が陽圧の時に急激に縮小圧壊され、圧力が急激に上昇する。この現象がマイクロ秒の短時間で生じると、断熱圧縮により気泡内の温度も急上昇する。このような高圧、高温のホットスポットができると、OHラジカルが生成され、水溶液中の化学物質を分解できると言われている³⁾。

2.2.2 界面吸着特性

水は極性流体であるため界面活性剤を界面で吸着、界面上に表面張力が分布し、力学的境界条件が変化する。

2.3 生理学的特性

2.3.1 生理活性効果

生育促進、血流促進、除菌等の効果がある。

3. マイクロバブル・ナノバブルの発生機構と生成装置

近年、「マイクロバブル発生装置」と名づけられた装置が多く市販されてきているが装置は未だに進化している。この装置の利用は水産養殖、湖水淨

化、排水処理、洗浄、植物栽培及び医療などの各分野では実用化もかなり進んでいている。しかしながら、MBの生成法は種々の方法があるが、その提案された装置毎のMBの生成メカニズムは異なっているようである。また、同一の装置であってもシステム、操作条件によっても性能が著しく変化する。ここでは主な気泡生成法に関して紹介する。MB生成法を大別すると表1のように(1)乱流または剪断流による法、(2)キャビテーション、崩壊、圧壊並びに衝撃波による法、(3)加圧溶解法による法の3種類に分けられる。しかし発生方法は1つの原理によるもの、または複数の原理の組み合わせによるものがある。ここで、気泡生成に使用されている原理の、SF、SW、CO、CA、SWは基本原理(1)~(3)のイニシャルであり、(主)は気泡生成時の主な生成原理である。例えば旋回流式の微細気泡発生法は、(1)~(a)の使用されている複数原理は、主(SF)+(CA)+(SW)であり、発生原理は主として流れの剪断力(SF)により気泡は微細化され、且つ、キャビテーション(CA)、場合によれば衝撃波(SW)をも伴う構造の場合もあり、このような考え方でMBが生成されると考えていただきたい。

ここでは、代表的なMBの発生法について、基本的な構造とバブル特性について紹介する。マイクロバブル生成原理の分類を表1に示す。現在、MBマイクロバブル発生器を販売しているメーカーのほとんどが、これらの原理のうち1つまたは複数の原理を用いてMBを製造している。バブルの生成原理が異なると生成されたFBの特徴、特性も異なる。したがって、それぞれの分野に必要な仕様を確認し、それにあったMBの特性が得られる原理の製品を選ぶことが重要である。次に代表的な使用原理を紹介する。

表1 気泡発生の基本原理と発生方式

気泡発生の基本原理	発生方式	気泡生成に使用されている原理
(1)流れの剪断力を利用 (Shearing Force : SF)	旋回流式	(a) 主(SF)+(CA)+(SW)
	ベンチュリー方式	(b) 主(SF)+(CO)+(SW)
	エジェクター方式	(c) 主(SF)+{(CA)+(CO)}
	スタティックミキサー方式	(d) 主(SF)+(CA)+(SW)
	機械的剪断方式	(e) 主(SF)+(CA)
(2)キャビテーション (気液二相流) (Cavitation : CA) 圧壊(Collapse : CO) 衝撃波(Shock Wave : SW)	エジェクター方式	(a) (CA)+(SF)+{(CO)+(SW)}
	ベンチュリー方式	(b) 主(CA)+(CO+SW)
(3)気体溶解法 (Dissolution method : DM)	加圧溶解式	

3.1 気泡発生の基本原理

3.1.1 乱流または流れの剪断力の利用による法
気体と水が共存する状態の気体を剪断力機構によ
り剪断するようにして気泡として分離させる。乱流
場における気泡の分裂は、気泡に作用する流れに基
づく局所的な動圧変動 τ と、表面張力 σ と気泡直径
 d にもとづく表面圧(σ/d)との比であるウエーバー数
($We=\tau d/\sigma$)が、ある限界値 We_c を超えたときに起
くる⁷⁾。これから、いかに動的変動を効率的に気泡
に与えるかということが重要である。このような機
械的剪断を主として利用する工業的気泡発生装置と
しては、ノズルを利用するものの、高速旋回流を利用
するもの、回転搅拌機を利用するものなどがある。
ノズルを利用するものにもさまざまあり、ベンチュ
リー、エジェクター、インジェクターなどがある。

3.1.2 キャビテーション、圧壊、崩壊、衝撃波 を利用する法

ある流れ場においてガスを少しも吸収、溶解して
いない水の絶対圧力 P が水の温度に相当する蒸気圧
力 Ps に等しいか低くなれば、すなわち、 $P < Ps$ なら
ば、その水は沸騰し、蒸気で満たされた無数の気泡、
すなわちキャビテーションを生じる。それゆえ、流
速 u の流れの中にある物体表面の圧力が局部的に周
囲の静圧 P より、 $K \rho u^2/2$ だけ低くなるとすれば

$$P - K \rho u^2/2 \leq Ps \quad (4)$$

の時気泡が発生する。上式の両辺を等しいとおいた
ときの K 、すなわち気泡が発生し始める場合の K の
値を K_c とすれば

$$K_c = (P - Ps) / \rho u^2/2 \quad (5)$$

をキャビテーション発生係数といふ。実際には液体
には種々のガスが溶解しているから、圧力が Ps ま
で下がらない前にガスを分離してキャビティが生じ
る。また、その分離圧 P_c もガスの溶解量によって
異なるので、上式より、 K_c の値によって物体の形
がキャビテーションを発生しやすいか(K_c が大きい
場合)発生し難いか(K_c が小さい場合)を判定する。

例えば、図7(a)のベンチュリー管構造の流れにお
いて、くびれ部(収縮部)では速度が非常に早くな
り、その圧力が液体の飽和蒸気圧力(Ps)以下にな
ると、液は瞬間に沸騰して気泡となり、空洞を発
生する。この現象をキャビテーション(cavitation)
といふ。このとき、液体中には、圧力に比例した量の
気体が溶け込んでいる[Henry Daltonの法則]ので、
液体の圧力が低下すると飽和蒸気圧になる前に溶解
している気体が分離して気泡になる。これらの気泡
がより圧力の高い下流部分に運ばれて急激に押しつ

ぶされるとき(圧壊)異常な高圧を発すると共に気泡
は更に微細化される(このとき、気泡内部の高温状
態を利用して有害物質を除去にも利用されている)。
そしてその際、騒音と振動を伴い、その付近の表面
は壊食(erosion)を受け、針でついたような直径の小
さい比較的深い孔が空く。これらの現象を総合して
広義のキャビテーションといふ。また、エジェクタ
ー及び強い旋回流、静止液体中で羽を付けた搅拌機
を高速で回転することにより、羽先端でキャビテー
ションは発生する。

崩壊: 気泡の崩壊現象を利用したMBの生成は、キ
ャビテーション気泡を生成して崩壊させないのでな
く、通常の数mm程度の気泡に対して減圧により膨
張させた後、急激な圧力上昇を加え激しく崩壊さ
せる。減圧と加圧の方法にはいくつか考えられるが、
液相の流動現象を利用するものとしては、ベンチュ
リー管、エジェクターのように、急縮小—急拡大の
形状をしたノズルの場合、圧力分布が変化、すなわ
ち超音速流れに遷移し、拡大部で急激な圧力上昇が
発生し気泡が急激に崩壊することでマイクロバブル
が発生する。このようにノズルを利用した手法は、
100μm程度の気泡を大量に生成するには適した手
法といえる⁸⁾。また、気泡の流れ場における気泡形
状の変化、崩壊、衝撃波に至るまでの関係を紹介し
ておく。

衝撃波: 図5はキャビテーション気泡が周辺流体の
圧力上昇によって固体壁の近くで崩壊した様子を示
している。気泡が固体壁近くで崩壊すると気泡壁に
不安定性が生じ、これが発達してマイクロジェット
になる。この壁の近くに2個の気泡がある場合には
これらの相互作用によりジェットの向きが変わる。
また、気泡崩壊時には衝撃波が発生し、これが固体
内部を応力波として伝わっていく。固体壁面の損傷
はこのジェットか衝撃波のいずれかによると言われ
ている⁹⁾。次に、図6は液中に半球体の気泡が壁に
付着した場合、あるいは気液2相流のジェット流が
ディフューザのような漸次広がり管(増圧方向に移
動)内を移動している場合、壁面に垂直に近づいて
いく場合の気泡挙動と崩壊に関し、Robert T. Knapp
らは高速度観察写真から下記のようにスケッチでま
とめ紹介している¹⁰⁾。

- (a) 壁面に付着された半球状の気泡の崩壊
- (b) 圧力增加方向に流れる気泡の流れの崩壊
- (c) 壁面近傍に近づき崩壊する気泡

即ち、非FB、FBは増圧方向へ流れる場合、壁面に
近づくに従い気泡は球形から扁平上に変化し、崩

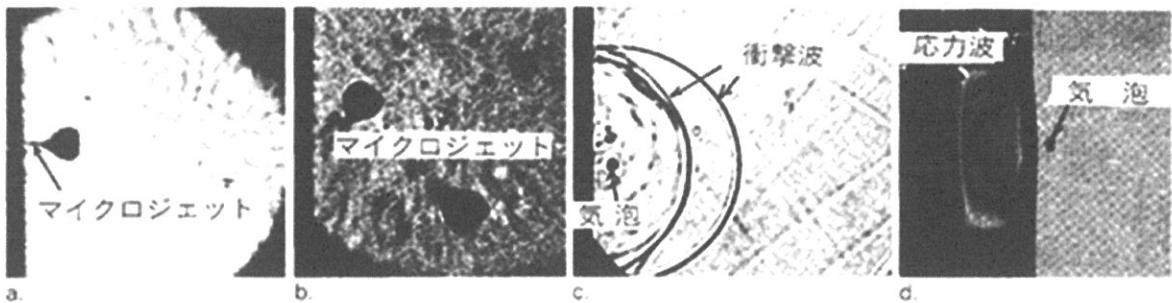


図5 キャビテーション崩壊の機構
[文献9]より転載]

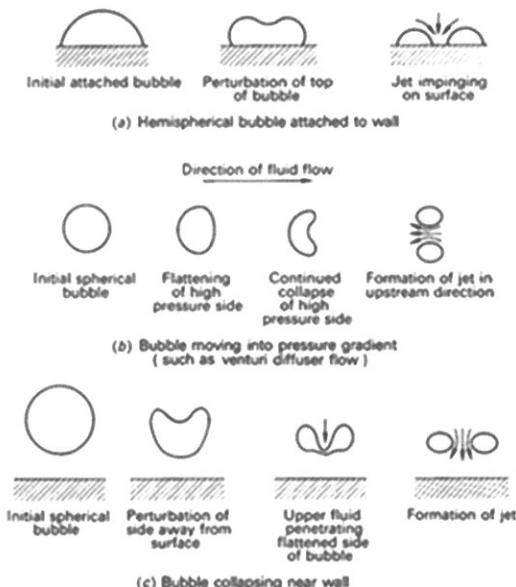


図6 気液バブルジェット崩壊モデル
[文献10]より転載]

壊する。崩壊時には強いマイクロジェットが生成される。また、壁面近傍での崩壊ではマイクロジェットにより高圧になる。文献14)では水中噴射距離100mmに設置された平板の表面の衝突圧力を可視化測定している。MBの存在により、無い場合と比較し表面の衝突圧力は数百から数千倍も大きい圧力であった。

3.2 液中ガス溶解度変化による法⁴⁾

この方法には大きく分けて、加圧溶解式と加温析出式がある。前者の加圧式は、液中のガスの溶解度の圧力依存性を利用した物理化学的なマイクロバブル発生方法であり、気体の種類によりその溶解量に違いはあるが、基本的な特性として圧力に比例して気体の溶解量も増加する。加圧溶解型のマイクロバブル生成法はこの生成法を利用したもので、液中の不純物などが気泡核となる。この方式は発生ある

程度の高圧で十分な量の気体を水中に溶解させた後圧力を開放してやることで溶解した気体の過飽和条件を作りだす。気体を過飽和状態にした水を急激に圧力低下させることで大量の微細気泡を発生させる。減圧以外にも乱流を発生させるか、温度変化や電気分解などでも発生させることができる。この際、装置の構造とシステムの調和により、良質なマイクロバブル、ナノバブルの生成製造が可能である。これに対し、後者の加温析出式は前者と同様にガスの液体への溶解度の変化を利用する方法で、溶解度の温度変化を利用している。生成されるマイクロバブル量は加圧溶解式の方がかなり大きい。

3.3 気泡生成の発生方式

3.3.1 ベンチュリー式(ベルヌーイの法則)

図7に示すように、このベンチュリー管ではガスの供給はない。しかし流体中に溶け込んでいる気泡はくびれ部(最小収縮部)で流速が加速し、圧力が急に減圧(圧力が液体の飽和蒸気圧以下になるとキャビテーションが発生する)されるため気泡は一旦膨張するが、その下流の拡大部では急激な圧力上昇により崩壊(圧壊)し、気泡は微細化される。

これに対し図7(b)はくびれでの負圧効果を利用して、自吸により気体を吸引し、水と剪断・乱流混合しながら気泡は微細化され、流れは増速しながらバブル径を膨らませ、また減速し、加圧を受けながら収縮し、その下流で気泡は崩壊(圧壊)し、再度微細化する。微細気泡の生成は水の駆動流量に対する吸引空気量との比により大きく異なり、駆動圧力約0.2MPaで流量比0~5%程度ならバブル平均粒径20~35μm付近にピークを持つ分布が得られる。図7(C)はGALF社から市販されているFB発生器のシステム基本原理であり、静圧分布はベルヌーイの法則に沿っており、最小圧付近でキャビティ気泡と気体の自吸が行われる、その下流でバブル径は膨張し

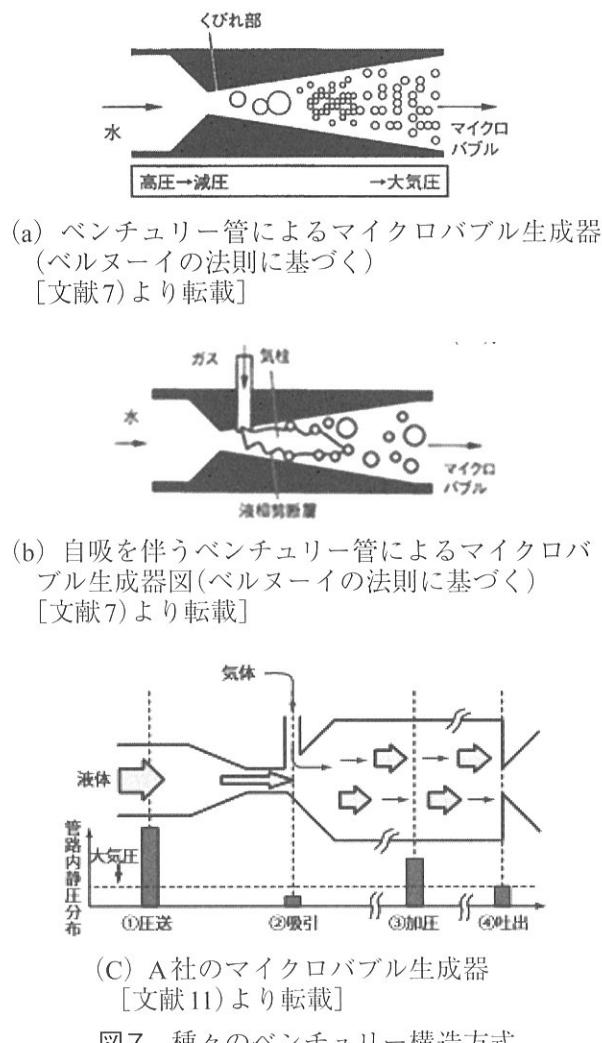


図7 種々のベンチュリー構造方式

すぐに減速・増圧のため圧壊・崩壊が行われ微細化される。このマイクロバブルの粒径分布のピーク値は約 $20\mu\text{m}$ にある。

3.3.2 ベンチュリー管式(気液2相流)⁷⁾

気液2相流体の流れでは収縮部で流速が加速し圧力が減圧するため気泡は膨張し、その下流での拡大部ではさらに超音速状態になり、さらなる減圧により気泡は膨張する。しかしその下流の拡大部では圧力が急激に増加し気泡の収縮・圧壊及び衝撃波も形成されマイクロバブルが生成される。図8のベンチュリー管の流入、流出部は直径8mm、くびれ部は3mm、ディフューザ部の開き角は 6° と小さく、剥離が起きにくくなっている。この装置は流入部において液体と気体を流すところである。ベンチュリー管内部の気泡微細化の様子を高速カメラ(27000fps)で撮影した様子を図の右側に示す。喉部付近(図中A領域)における減圧により気泡が膨張し、その後、気体の塊がノズル内を移動するにつれてB領域の部

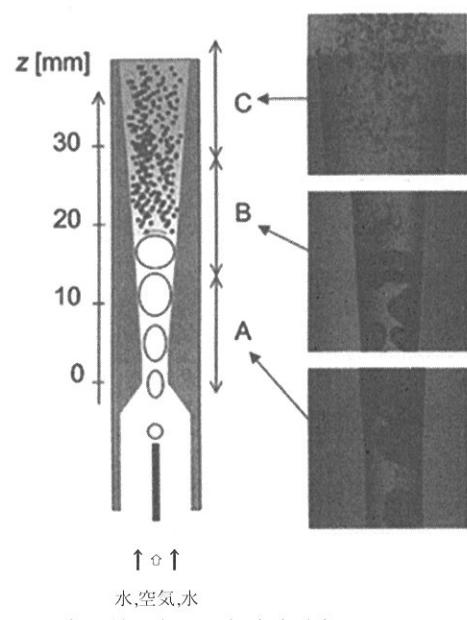
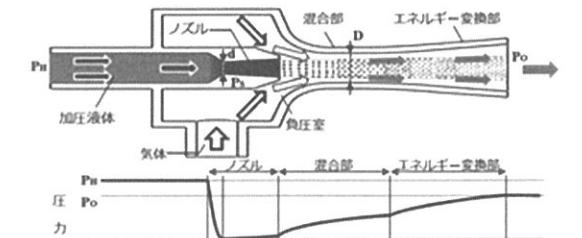


図8 気液2相流ベンチュリー管内部の気泡微細化の様子
[文献8)より転載]

分で急激に崩壊して、一挙に気泡の微細化が起こっている様子を表している。出口C部では、すでに微細化した気泡がノズル出口から流出している様子が分かる。すなわち、この微細気泡の発生装置では、キャビテーション気泡の崩壊現象のように、気泡が崩壊するときの界面不安定を利用して微細化を行っている。気泡の微細化性能を發揮するにはベンチュリー管くびれ部での十分な圧力減少に伴う気泡の膨張と、その後、激しい崩壊を導く急激な圧力回復が必要であり、そのためには入口部で流速が十分早いことが要求される。また、効率よく微細化を起こすためには、ある流量を超えることが重要となることを示唆している。

3.3.3 エジェクター式

この方式の基本構造は、図9(a)に示すように、基本的にはノズル、負圧室、混合室及びエネルギー変換部からなり、ノズルからの液体高速ジェットにより最大負圧となる負圧室に気体が誘引され、その時飽和蒸気圧以下に減圧された場合はキャビテーションも発生し、気・液混合しながら混合室に導かれ、ここで大きな剪断作用により乱流混合しながら圧力回復し、微細気泡化され、気液混相流としてエネルギー変換部へ誘導され、微細気泡は収縮・膨張・崩壊あるいは圧壊し(キャビティ崩壊に伴い衝撃波を伴う場合もある)MBが生成される。このとき、効



(a) エジェクター方式(水ジェットによるガス自吸)

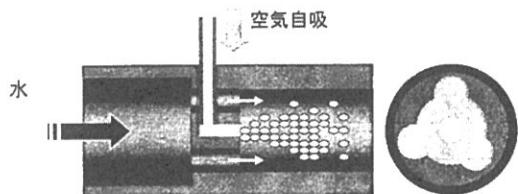
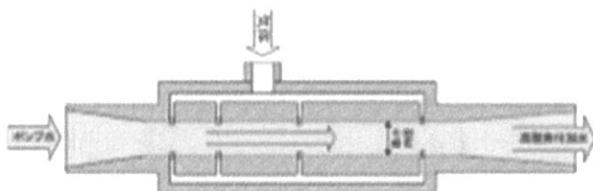
(b) B社製方式(水ジェットによるガス自吸)
[文献12)より転載](c) C社製方式(水ジェットによるガス自吸)
[文献13)より転載]

図9 種々のエジェクター方式

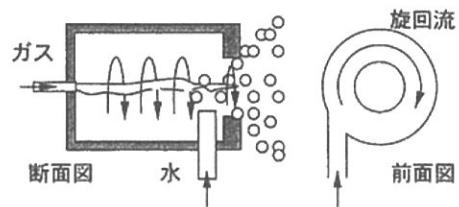
果的に微細気泡を生成させるためには、ノズル径(d)と混合室の径(D)とが精度よく中心軸状-にあり、(d/D)の比、ノズルと負圧室の構造、並びにエネルギー変換部等の構造バランスが重要である。これらの構造により微細気泡特性も異なる。また、構造を旋回流形MB生成ジェット装置にしている場合もある¹⁴⁾。図9(b)、(c)は市販されている種々のマイクロバブル生成器の一例を示す。図9の種々のエジェクター方式によるMB生成器、図9(b)はB社方式エジェクター¹²⁾、図9(c)はC社のノズルである¹³⁾。これらの構造により微細気泡特性も異なる。

3.3.4 旋回流式

この方式は図10に示す構造のように、高速水流を円筒容器の接戦方向に高速旋回させることにより容器中心部に大きな負圧を発生させ、気体を吸引・巻き込み流れの剪断作用により乱流を起こし、気体を微細化させる方法である。旋回流方式の構造によつては圧壊、衝撃波を伴い更なる微細気泡を生成する。

3.3.5 スタティックミキサー式

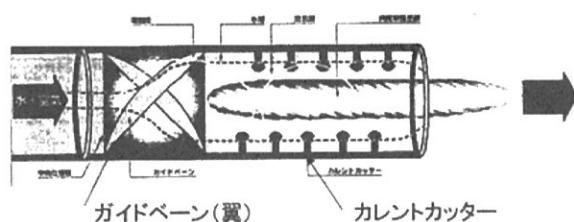
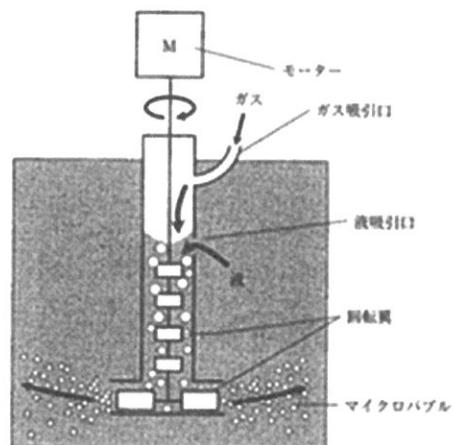
この方式は図11に示すような流路内において、

図10 旋回流方式(自吸)
[文献7)より転載]

流动している流体をガイド弁(翼状型旋回器)を介して通過させる高速旋回流が発生する。旋回流は管路の内壁より突起した物体に衝突し強い剪断作用により剥離、キャビテーションを発生する。高速旋回流の中では負圧域の再循環領域を形成し、突起物背後のキャビテーション、衝撃波により細分化され、これらの流れは再循環流れで気液2相流の乱流混合が促進され、微細気泡が生成される。

3.3.6 機械的剪断方式⁴⁾

スタティックミキサーの場合は流体自身が旋回流動することにより剪断流を作り微細気泡を生成したが、機械的剪断式は図12に示すようなマイクロバブル発生器の構造であり、円筒型ケーシング内に設

図11 S社製スタティックミキサー方式
[文献15)より転載]図12 機械的剪断式マイクロバブル発生器
[文献4)より転載]

置された回転羽を回転させることにより、ガスが吸引され、液と混合し、回転翼が回転することにより翼の剪断作用により攪拌されながら気泡は微細化され出口方向に放出される。この原理により製作されたH社製ファインバブル発生装置の性能(水深1m)のウルトラファインバブル数を一例として図13に示す¹⁶⁾。

図14はロータが回転することによって水を吸い込んでステータを通して吐き出し、ベルヌーイの法則で気体を吸引し、固定翼と回転翼2種の翼の作用で乱流を起こして気泡を剪断し微細化する。回転方式の特徴は、気液接触だけでなく、槽内の流れも強く制御が可能となるため、気液固3相反応層に適している点と言われている⁷⁾。

図15はX社製渦流ターボポンプによるターボミキサーで、自動吸引し減圧させた気体を吸引し一気に溶け込ませ、加圧と混合を同時に連続的に行うことができる。

3.3.7 加圧溶解法

この装置の基本的なシステム構成は図16に示したようなものである。加圧駆動が可能なポンプ(ポンプには吸い込み側と吐出側に圧力計を設置)を利用して水槽内の水を循環させる。このときにポンプの吸い込管路から気体を取り込む。気体を取り込む方法としては弁を付けて流路を絞ることにより負圧を発生させ気体を自吸できる。気体を取り込んだ水との気液混相流はポンプで攪拌され吐出管より溶解タンクで加圧され効果的に溶解させる。また、溶解し得なかった過剰分の気体は外気に放出される。

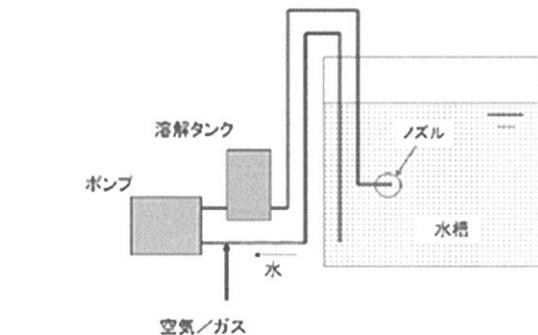


図16 加圧溶解型マイクロバブル発生装置の構成
[文献2)より転載]

用して水槽内の水を循環させる。このときにポンプの吸い込管路から気体を取り込む。気体を取り込む方法としては弁を付けて流路を絞ることにより負圧を発生させ気体を自吸できる。気体を取り込んだ水との気液混相流はポンプで攪拌され吐出管より溶解タンクで加圧され効果的に溶解させる。また、溶解し得なかった過剰分の気体は外気に放出される。

気体を十分溶解させた水はノズル部を通過時に大気圧に開放される。これにより溶解気体は過飽和となり、マイクロバブルとして再気泡化される。

図17はマイクロバブルを含む気液混相流の粒径分布の一例である。高濃度のマイクロバブル発生装置の特徴として粒径分布に2つのピークが確認できる。ひとつは直径が10μm程度を中心粒径としたものであり、他のひとつはややブロードな分布を示すピークである。気泡径の大きなピークは水質などの条件により分布を変化させる。2つのピークの間に全く気泡が存在しない領域がある。加圧溶解型のマイクロバブル発生装置の場合、50μm

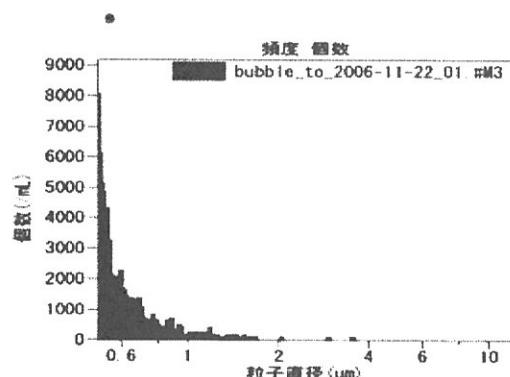


図13 H社製UFBのバブル径に対する個数
[文献16)より転載]

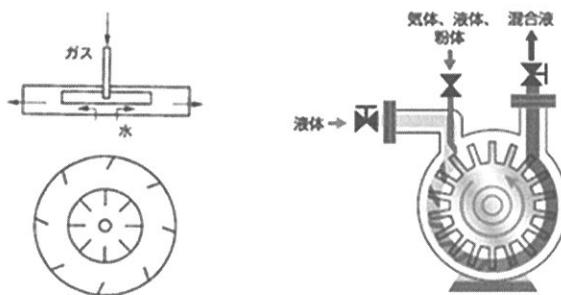


図14 回転翼自給型
気泡発生器
[文献7)より転載]

図15 X社製 渦流ターボ
キサー
[文献17)より転載]

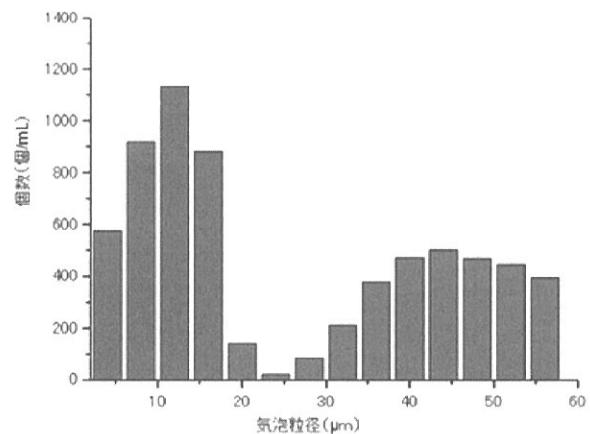


図17 加圧溶解型における気泡の粒形分布
(計測：光遮断型の液中パーティクルカウンタ)
[文献2)より転載]

以下の気泡個数は1mLあたり数千個となる²⁾。以上主だったファインバブルの生成法に関して述べてきたが、上記以外にも、微細孔(焼結体)を用いる法: 細い管やオリフィス、または微細な粒子を焼結させたもの、微量のマイクロバブルを作成する方法として振動法、超音波法、電気分解(化学反応)法がある。

4. ウルトラファインバブル(ナノバブル)の発生機構と生成装置

ウルトラファインバブル(UFB)の生成装置はいまだに開発が進んでいるものと思われる。ここでは、現時点でのUFB発生の基本原理と発生器の分類は概ね表2のように分類できる。

これまで、ウルトラファインバブルの生成並びに物理化学的性質は完全に解明されたわけではないが概ね以下のような基礎特性である。

4.1 ウルトラファインバブルの基礎特性

- (1) 水中または溶液中の安定性に優れ長寿命(数か月存在する)
- (2) ブラウン運動する
- (3) 優れた殺菌能力、整理活性効果を有する
- (4) 圧壊する
- (5) 水中の崩壊、圧壊後の溶解性に優れている
- (6) 溶解時のナノバブル水は透明である

4.2 ウルトラファインバブル生成装置の原理

以下に現状として使用されているウルトラファインバブル生成装置の原理を紹介する。

4.2.1 多孔質、微細孔、微細多孔膜による法

図18はSPG(Shirasu Porous Glass: シラス多孔質ガラス)膜型の微細孔方式のナノバブル発生装置である。南九州に広く堆積している火山灰シラスを主原料にした多孔質ガラスを用いて開発された微細孔式ナノバブル発生器であり、その細孔径はナノ単位からミクロン単位の広い範囲で製作可能である¹⁸⁾。

特にナノサイズ孔径のSPG膜を利用すれば数百ナノサイズのバブルの大きさを生成することが可能である¹⁸⁾。

表2 ウルトラファインバブルの生成法

1	強い流れの剪断場で気泡を微細化する方法
2	マイクロバブルの圧壊、崩壊による方法
3	加圧溶解法
4	多孔質体を用いて加圧気体を液中に吹き込む

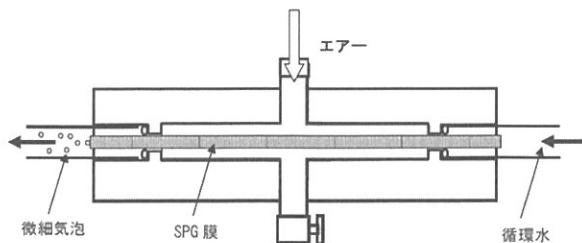


図18 微細孔式UFB発生法
[文献18]より転載]

4.2.2 強い流れの剪断場で気泡を微細化する法

図19は市販されているD製のUFB発生原理であり、原理的にはベンチュリー方式を有し、駆動流体の高速ジェットによりノズル出口で負圧を生じ、気体が誘引され、気液2相流の乱流混合となり、強い剪断力により気泡は微細化された後、流れは減速し急激な圧力上昇により気泡は圧壊あるいは崩壊により更に微細化が行われると同時に気液2相流体は加圧部で加圧溶解させる仕組みである。この気泡発生器の気泡分布は図20であり、この分布よりUFBのピーク値はおよそ100nmで気泡数密度は $1.4 \times 10^6 / ml$ である。

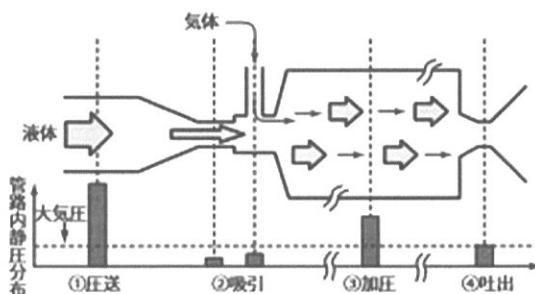


図19 D社加圧溶解式超微細気泡発生原理
[文献11]より転載]

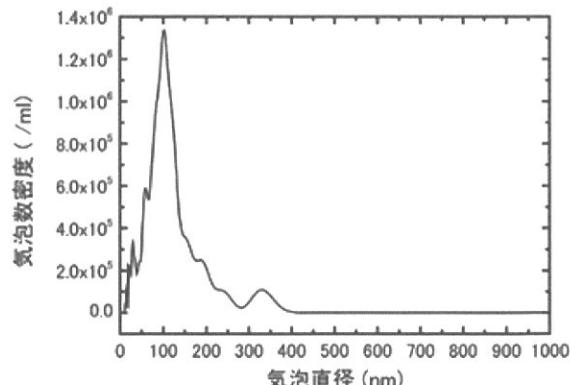


図20 D社製UFB生成器の気泡直径に対する気泡密度分布
[文献11]より転載]

図21は加圧溶解式UFB発生方法の基本システムの一例である。この装置は循環式で、装置により水に加圧溶解されなかったガスは余剰ガスとして排出される。加圧下でのガス溶解によって飽和した水はノズルで大気圧まで減圧されて溶解度が低下した分溶存ガスがマイクロバブルとなって水槽中に析出する。この水をポンプを介して数十回循環させる。その後水の循環を停止すると水槽内ウルトラファインバブル以外は浮上して水中から離脱し透明な水のみが残る。ここには水一空気系の場合約100nm程度の平均系を持つUFB群が浮上することなく滞留する。これをウルトラファインバブル水として、各種用途に利用する。次に、ファインバブル生成器の構造原理の違いによる、気泡経と気泡数密度の関係を図22に示す。加圧溶解法による気泡粒径群は粒度が最も小さく、気泡数密度(個/mL)は最も大きい。攪拌混合器法がこれに続き、エジェクター方式、散気坂法では気泡粒径が大きく、気泡数が小さいと報告

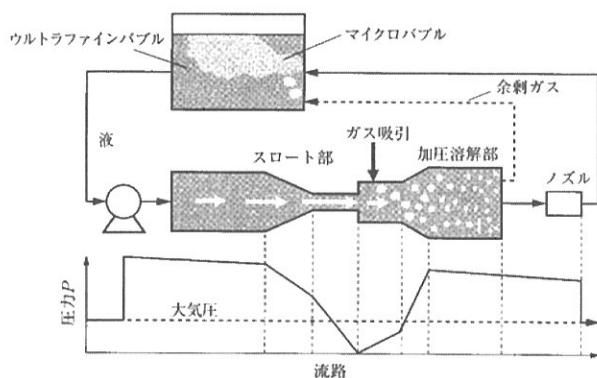


図21 加圧溶解式UFB発生法
[文献4)より転載]

している。粒径分布は同じ発生メカニズムにおいても、装置・運転条件によっても異なるので注意をする。しかしながら、現在、各社においてもUFB生成器が進化してきているので、バブル特性も変化してきている場合もあり、ここでは装置構造によるMB特性の参考にしていただきたい。マイクロ・ナノバブルの効果は、一般に気泡数と気泡発生量の相乗積によって決まる」とされる。

気泡径と気泡発生量は、二律背反的な傾向があり、気泡分布を小さくすると気泡発生量は減少するので、使用目的にもよるが、装置優劣を議論する場合、気泡径と気泡発生量に同時に注目する必要がある。したがって、使用分野の目的に応じて特性・特徴を十分に生かせる装置こそ効果が得られるであろうと考える。

5. まとめ

マイクロバブル、ナノバブルは未だこの研究が始まられてから今日まで時間経過の浅い研究領域で、物理化学的な性質も不明なところもただあるのにも関わらず、このマイクロ、ナノバブルの特徴ある性質を利用し、産業界を中心とした応用研究が先行する形で発展してきており、あらゆる面で可能性を秘めている。今後はマイクロ・ナノバブルの物理・化学的な性質の究明とともに、マイクロバブル、ナノバブルの更なる効果的な生成機構、特性、バブル挙動、生成機構と液物性の関係が明らかにされていくであろう。また、食品・環境改善・水処理・工業・農業・水産業・医療・殺菌・日常生活などの分野でのマイクロバブル・ナノバブルの利用の拡大が望まれる。

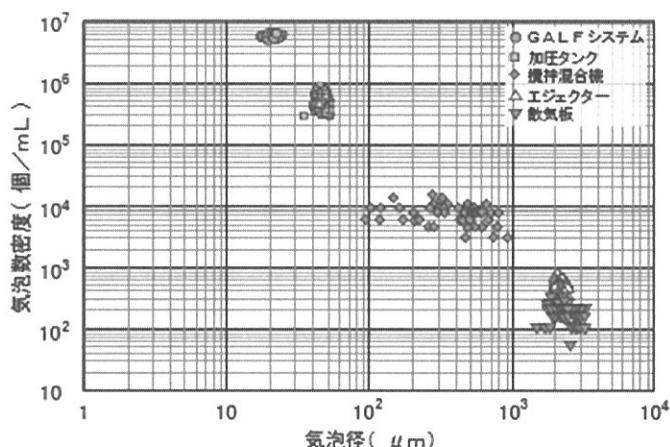


図22 ファインバブル生成器の構造原理の違いによる、気泡径と気泡数密度の関係
[文献14)より転載]

参考文献

- 1) 大成博文：マイクロバブルのすべて，日本実業出版(2006).
- 2) 高橋正好：マイクロバブルとナノバブルの基礎と工学的応用, マテリアルインテグレーション, 22, (2009), 2-19.
- 3) 柏植秀樹：マイクロバブル・ナノバブルの基礎, 日本海水学会誌, 64, 1(2010).
- 4) 寺坂宏一他：ファインバブル入門, ファインバブル学会連合, 日刊工業新聞社, (2016).
- 5) 大成博文：化学工学, 71, 3(2007).
- 6) 芹澤昭示, 乾智彦, 江口俊彦：“垂直円管内を上昇するマイクロバブルを含むミルク状空気—水系気泡流の流動特性と擬層流化現象”混相流, 19, (200), 335-343.
- 7) 上山智嗣, 宮本誠：マイクロバブルの世界(水と気体の織りなす力)森北出版株式会社, (2011), 42.
- 8) マイクロ・ナノ熱流体ハンドブック編集委員会編, マイクロ・ナノ熱流体ハンドブック, 第5節：高木周, (2006), 366.
- 9) 藤川重雄, 赤松映明：写真集 流れ, 日本機械学会編, 丸善株式会社, 114, (1988).
- 10) Robert T. Knapp, James W. Dally, Frederick G. Hammity,: CAVITATION, McGRAW-HILL BOOK COMPANY, (1970), 344.
- 11) IDEhttp://jp.idec.com/ja/technology/finebubble/aboutfinebubble.html
- 12) (株)オーラテック, http://aura-tec.com/story/
- 13) エンバイロビジョン(株), URL:http://enviro-vision.jp
- 14) 青木, 加藤, 奥津, 沖：旋回流型マイクロバブルジェッの特性と衝突圧力の可視化, 機構論, 流工流機, (2015-11).
- 15) OHR, http://www.ohr-labo.com/cp.html
- 16) 富貴製作所, http://www.fuki-ss.co.jp/
- 17) ニクニ, http://www.nikuni.co.jp/product/
- 18) SPGテクノ(株)http://www.spg-techno.co.jp/

青木 克巳



昭和44年3月 東海大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年4月 東海大學生産機械工学科助手・助教授、昭和61年 同学科・機械工学科・大学院工学研究科・教授を経て現在東海大学名誉教授、(社)向科学技術振興財團理事(平成11年)、平成23年 大生工業(株)顧問、現在に至る。

加藤 克紀



平成7年3月 東海大学工学部機械工学科卒業、同年4月 大生工業株式会社入社:熱交換器・オイルフィルタ・エアフィルタの技術開発及びオイル分析に従事。平成24年4月よりFB発生装置等の技術開発に従事・現在に至る。

奥津 俊哉



平成19年3月 横浜市立大学 理学部卒業、平成21年 同大学院国際総合科学研究科理学専攻博士前期課程修了。平成26年4月 大生工業株式会社入社、FB発生装置等の技術開発に従事・現在に至る。

篠原 尚也



平成21年3月 金沢大学理学部卒業、平成23年3月 筑波大学大学院数理物質科学研究科化学専攻博士前期課程修了。平成26年4月 大生工業株式会社入社、FB発生装置等の技術開発に従事・現在に至る。