

マイクロバブル、
キャビテーション気泡噴流の流動解析

(研究課題番号：18360088)

平成 18 年度～平成 19 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (B))

研究成果報告書

平成 20 年 3 月

研究代表者 社河内 敏彦
Shakouchi Toshihiko

(三重大学大学院工学研究科教授)

はしがき

本報告は、平成18年度～平成19年度までの2年間にわたり文部科学省研究費補助金（基盤研究（B））により、表記の研究課題を実施した結果について纏めたものである。

研究課題、研究組織、研究経過および研究発表状況などは以下の通りである。

研究課題： マイクロバブル、キャビテーション気泡噴流の流動解析

課題番号： 1836088

標 題： 平成18年度～平成19年度科学研究費補助金
（基盤研究（B））

研究組織：

研究代表者： 社河内 敏彦（三重大学大学院工学研究科 教授）

研究分担者： 辻本 公一（三重大学大学院工学研究科准教授）

研究分担者： 安藤 俊剛（三重大学大学院工学研究科 助教）

研究経費：

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成18年度	13,000,000	3,900,000	16,900,000
平成19年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	14,300,000	4,290,000	<u>18,590,000</u>

研究成果

研究発表状況（公表論文，など）

1. 社河内敏彦・松本正・西尾昌洋・辻本公一・安藤俊剛，マイクロバブル気泡噴流の流動とエアレーション特性，日本混相流学会，論文精選集 2，2007，pp.33-38.
(資料番号 1)
2. T.Shakouchi, T.Matsumoto, M.Nishio, M.Uchiyama, K.Tsujimoto and T.Ando, Flow Analysis of Micro Bubble Jet Flow by Flow Visualization, *Proc. of 6th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, PSFVIP-6*, CD-ROM, 2007, 5p.
(資料番号 2)
3. 社河内敏彦，新・マイクロバブル生成ノズルとそのエアレーション特性，環境再生技術集，財 三重県産業支援センター，2007，pp.149-155.
(資料番号 3)
4. 社河内敏彦・西尾昌洋・松本正・辻本公一・安藤俊剛，マイクロバブル噴流の流動とエアレーション特性，日本混相流学会年会講演会 2006，講演論文集，2007，pp.86-87.
(資料番号 4)
5. 社河内敏彦・西尾昌洋・内山道之・辻本公一・安藤俊剛，マイクロバブル，キャビテーション気泡噴流に関する研究，日本機械学会東海支部第 56 期総会講演会講演論文集，No.073-1，2007，pp.251-252.
(資料番号 5)
6. 社河内敏彦・高村純一・松本正・長末秀樹・辻本公一・安藤俊剛，廃コンクリートの再資源化 —CO₂マイクロバブル噴流の応用—，日本機械学会東海支部第 56 期総会講演会講演論文集，No.073-1，2007，pp.253-254.
(資料番号 6)
7. 社河内敏彦・内山道之・行方宏・辻本公一・安藤俊剛，マイクロバブル気泡塔に関する研究，日本機械学会東海支部第 57 期総会講演会講演論文集，No.083-1，2007，pp.215-216.
(資料番号 7)
8. 社河内敏彦・松本正・高村純一・辻本公一・安藤俊剛，廃コンクリートの再資源化とマイクロバブル気泡噴流によるCO₂の固定化，投稿予定（参考資料）。
(資料番号 8)

マイクロバブル，キャビテーション気泡噴流の流動解析

研究経過及び結果

1. まえがき

近年，河川・湖沼・内湾等の閉鎖性水域における水質汚染が深刻化し，底層での無酸素水塊の拡大や赤潮等の発生により水中生物の減少や養殖魚介類への被害などが問題となっている。これらの問題の改善策として，マイクロバブルを利用したエアレーションが注目されている。

また，このことは気体を液体中に効率的に拡散・混合・吸収させること，あるいは気泡噴流を使った洗浄操作，などにも通じ，工学および工業上，非常に重要である[1]～[3]。

本研究では，新たにマイクロバブル生成ノズル [比較的高速の水噴流の近傍 (低圧) に空気ノズルを設置し低圧の場に吸引された空気を水噴流の外側せん断層で微小化させる] を提案し，それによって生じた微小気泡噴流，いわゆるマイクロバブル，キャビテーション気泡噴流の流動特性を，可視化された気泡流の画像処理，及びパーティクルカウンターによる気泡径分布の測定，並びに LDA(Laser Doppler Velocimetry)，PIV(Particle Image Velocimetry)による気泡流の速度分布の測定，などから明らかにする。

なお，従来，水中に噴出される高速水噴流の流動特性はあまり明らかにされておらず，またMBJの流動特性については全く明らかにされていない。

また，それを用いたエアレーション特性を溶存酸素量の測定から明らかにする。

さらに，マクロバブル気泡噴流の応用(廃コンクリートの再資源化とCO₂の固定化[9]，[10]，マイクロバブル気泡塔[11]，[12]，など)についても検討する。

2. 実験装置と方法

(1) マイクロバブル生成ノズル

図-1に，新たに提案したマイクロバブル生成ノズルのヘッド部の詳細を示す [4]～[8]。ノズルヘッド部中央に，出口直径 $d=4.0\text{mm}$ ，絞り面積比 $A/A_0=0.25$ のオリフィス形状の水用ノズルが，そこから 6.0mm 離れた十字方向4カ所に直径 $d_s=1.0\text{mm}$ の空気用ノズル(本実験で使用)が，またそのうち1方向に 2mm 間隔で3カ所に設けられている。使用する空気ノズル本数 n は調節可能である。

なお，ノズルヘッドはポンプに繋がる貯水チャンバに，空気ノズルはコンプレッサーに繋がる貯気槽に接続されている。

実験は，水噴流流量 $Q_w=6.0, 15.0, 20.0$ [l/min] (ノズル出口流速はそれぞれ， $U_w=8.0, 19.9$,

26.53 [m/s]), 空気流量 $Q_a=0.1$ [l/min]_{n=1}, 空気ノズル本数は $n=4$ で行った。

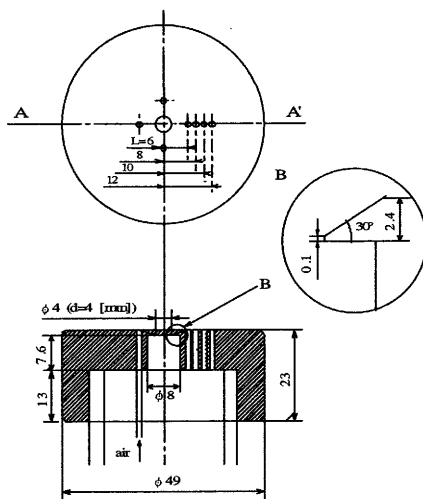


図-1 新・マイクロバブル生成ノズル (ノズルヘッド部)

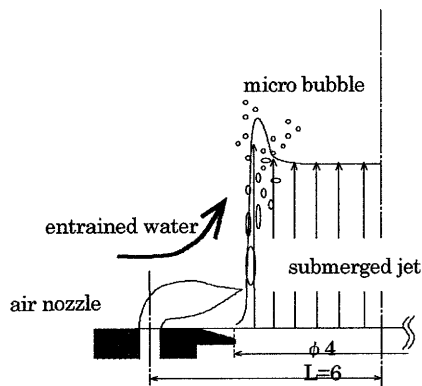


図-2 マイクロバブルの生成 (メカニズム)

3. マイクロバブルの生成メカニズム

図-2に、本ノズルによるマイクロバブルの生成メカニズムを示す。図には、現象が軸対称なためノズル部と円形噴流の半径方向の半分の領域のみが示されている。

水中で比較的高速の水噴流を噴出させその近傍に空気ノズルを設置すると、水噴流と周囲の静水との間の速度差と粘性のため、水噴流は周囲の水とともに空気泡を速度勾配の大きなせん断層に誘引する。その際、空気泡は大きなせん断力を受けせん断・微細化される。

なお、ノズル出口で大きな速度勾配を実現するため本ノズルは絞り面積比 $A/A_0=0.25$ のオリフィス形状のものとした。なお、絞り面積比が小さくなるほどノズル出口での速度勾配 $\Delta U = [(U/U_c)/(y/d)]$, (U_c :ノズル出口での中心流速) は増加し、生成される気泡径は減少する(図-3,-4, 参照)。

このように、本マイクロバブル生成ノズルは極めて簡単な構造を有す。

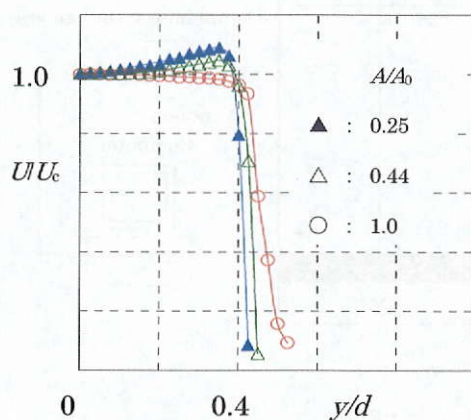


図-3 ノズル出口速度分布

($A/A_0=0.25\sim 1.0$, $U_w=8.0\text{m/s}$)

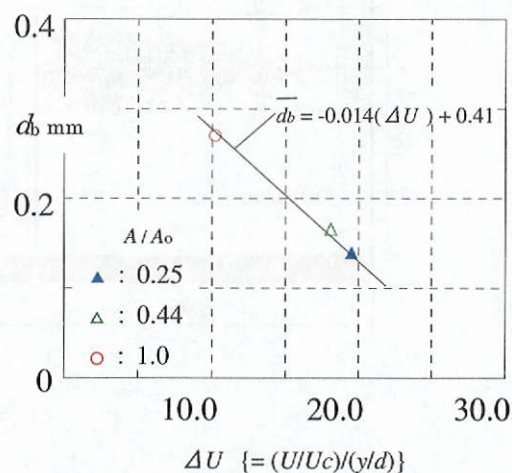


図-4 気泡径と速度勾配

4. 実験装置と方法

図-5に、実験装置の概略図を示す。ポンプによって加圧された貯水槽 [2500×1250×1070 mm, 水位=1000mm (一定)] からの水は、流量調節弁、電磁流量計を経た後、水槽側壁面の底から $h_p=500$ mm の位置に水平に設置されたマイクロバブル生成ノズル(図-1)の水用ノズルから貯水槽内に噴出される。空気は空気圧縮機から気体用浮子式流量計を経てノズルの近傍に設けられた空気ノズルから噴出される。座標系は、ノズル出口中心を原点0としノズル軸(流れ)方向を x 軸, その直角方向を y, z 軸とした。

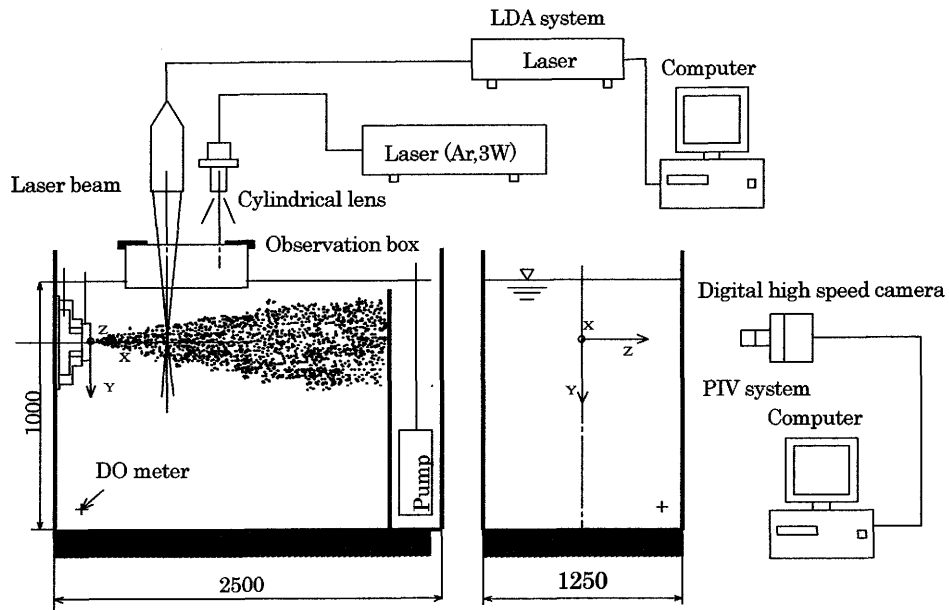


図-5 実験装置 (全体図)

MBJ の挙動 (気泡径, 気泡噴流の広がり, など) は, マイクロバブルによって可視化された流れを観察するとともに高速デジタルビデオカメラにより撮影しその画像から測定した。

なお, マイクロバブルの気泡径 d_b は, $x/d_b=30$ の MBJ 内で, ストロボにより流れを可視化しカメラによって撮影した画像を拡大しその中の気泡径を目視できる範囲で測定した (測定可能な最小気泡径は約 $30\mu\text{m}$ である)。また, パーティクルカウンターを使い噴流外縁での気泡径分布も測定した。

MBJ の気泡群の x 軸方向の速度分布 u_b/u_{w0} (u_{w0} : ノズル出口平均流速) は, マイクロバブルをトレーサとし PIV (Particle Image Velocimetry, FASTCAM-M3PIV5, Photron) [1] と LDA (Laser Doppler Anemometry, 65X/30 FlowLite, DANTEC) を使って測定した。同時に, 液相 (水) の速度分布 u_l/u_{w0} をピトー管を使って測定した。

また, 本 MBJ のエアレーション特性を水槽内の溶存酸素量 C の時間変化の測定結果から評価した。すなわち, まず初めに貯水槽内の水の溶存酸素を亜硫酸ソーダ法により除去し, その値が実験時における水温の飽和溶存酸素量 C_s の 10% となったところからエアレーションを開始しノズルを設置した側面側の水槽底部角部 (各側壁からそれぞれ 100mm の位置) での溶存酸素量の時間変化を測定した。

5. 結果と考察

(1) 流動状態

図-6 に一例として、水面下 500mm の位置に設置されたマイクロバブル生成ノズルからの水噴流の流速 $u_w=26.53\text{m/s}$ 、空気流量 $Q_a=0.1 [(1/\text{min})/n]$ 、空気ノズル本数 $n=4$ の場合の MBJ の流動状態を示す。図中、白く見えるのがマイクロバブルの気泡群で気泡が微細なためそれらが水噴流の流れに乗って下流 (x) および鉛直方向 ($\pm y$) 方向に拡散していく様子がわかる。なお、この際、水噴流のみを噴出させると噴流が極めて高速のためノズル出口直後の水噴流にキャビテーションが生起する。また、噴流外縁での大規模渦構造の変動する様子も見てとれる。



図-6 マイクロバブル，キャビテーション気泡噴流 ($U_w=26.53\text{m/s}$)

(2) 速度分布

図-7 に、 $A/A_0=0.25$ のオリフィス形状のノズルからの MBJ の気泡の速度分布 u_b/u_{w0} 、水の速度分布 u_l/u_{w0} 、および水単相のそれ u_w/u_{w0} を示す。分布形は軸対称であったので半径方向半分の領域のみを示す。気泡群の速度分布は PIV、または LDA による測定結果である。なお、 $x/d=10$ における PIV と LDA の測定結果の差異 (精度) は最大流速に対して約 $\pm 5\%$ であった。速度分布 u_b/u_{w0} の結果から気泡群は水噴流によって極めて短い区間で急加速され $x/d=2$ では水噴流の最大流速の約 0.8 倍になる。

また、下流に行くにつれ u_b と u_l との間の速度差 (slip velocity) $\Delta U'$ が存在する中心近傍の領域が減少する。なお、下流の $x/d=20$ でもかなりの速度差 $\Delta U'$ が存在する。

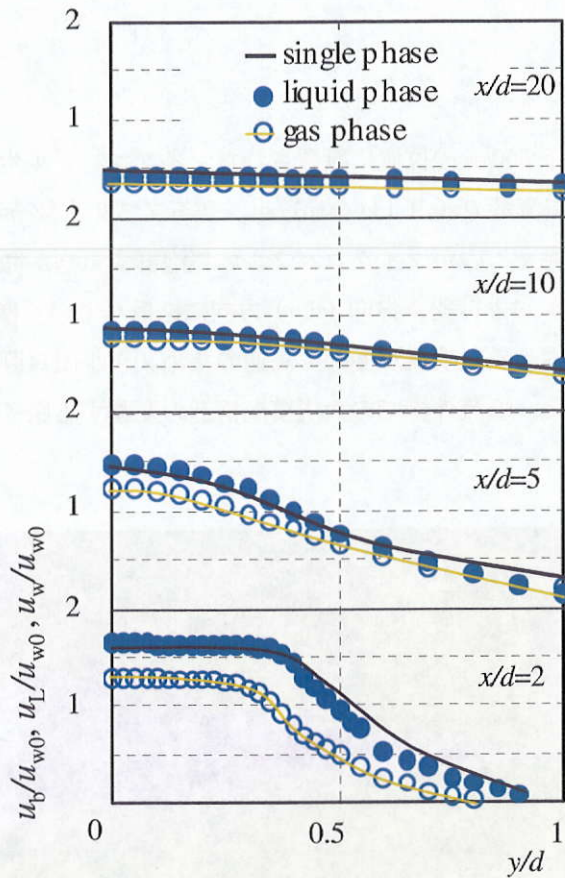


図-7 マイクロバブル気泡噴流の速度分布
($U_w=19.9\text{m/s}$)

(3) マイクロバブル気泡噴流の中心線流速

図-8に、気泡群の中心線流速を示す。円形単相水噴流の場合、一般にコア領域は $x/d=5$ まで存在し下流では u_b/u_{wc} は $(x/d)^{-1.0}$ に比例して減衰するが、 $A/A_0=0.25$ のオリフィス気泡噴流の水噴流の流速では、コア領域は $x/d=4$ までと短かいが、下流 ($x/d>5$) での u_b/u_{wc} は円形単相水噴流の場合と同様 $(x/d)^{-1.0}$ に比例して減衰する。また、速度差 ΔU は先にも述べたように $x/d=20$ でもかなり存在する。

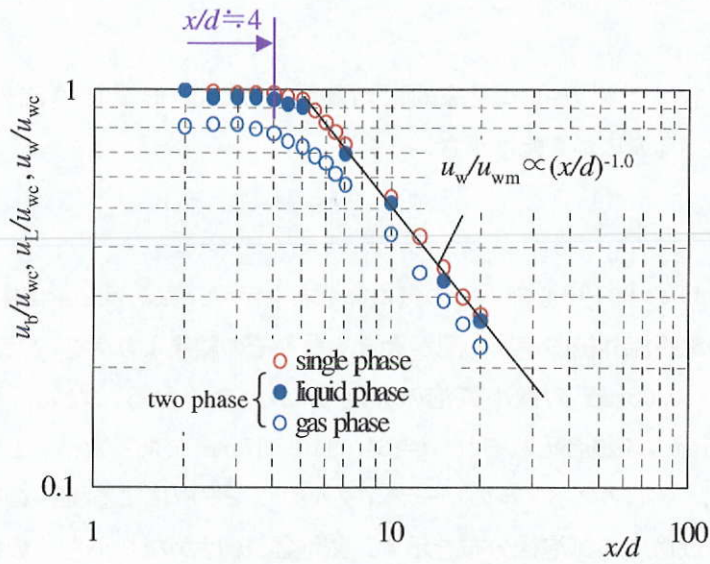


図-8 マイクロバブル気泡噴流の中心線流速
($U_w=19.9\text{m/s}$)

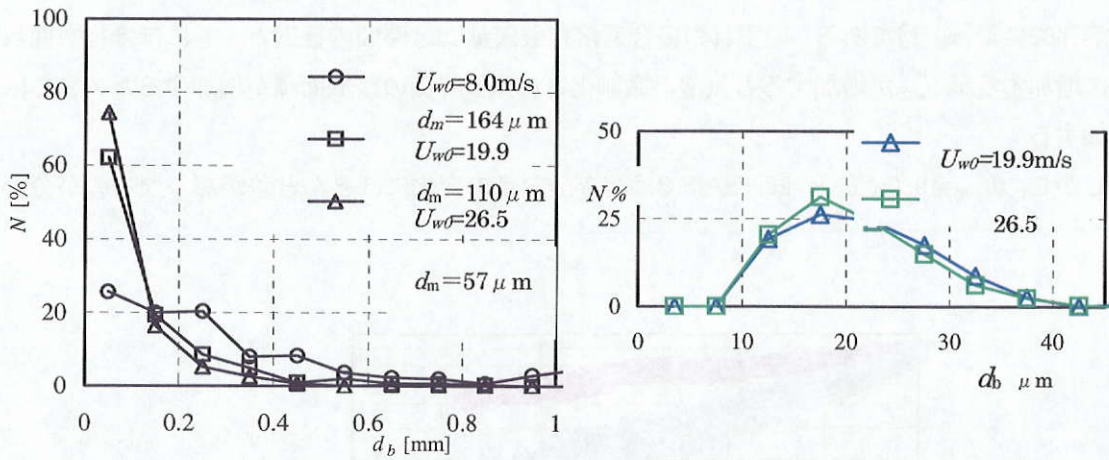


図-9 気泡径分布
($x/d \approx 30$ の中心近傍)

図-10 気泡径分布
(測定位置: $x=600, y=-150, z=0$ mm)

(4) マイクロバブル気泡噴流の拡散

速度分布の測定結果 (図-7) からマイクロバブル気泡噴流の噴流幅 y_8 と半値幅 $y_{0.5}$ を求め以下の関係を得た. なお, 噴流外縁は $u_b/u_{bc}=0.1$ の y の位置とした.

$$\begin{aligned}
 y_{\delta} / d &= 0.1 (x/d) + 0.64 \\
 y_{0.5} / d &= 0.07 (x/d) + 0.43
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

y_{δ} と $y_{0.5}$ はともに下流方向に直線的に増加するが、円形単相噴流の場合 [$y_{0.5}/d \propto 0.086(x/d)$] に比べその広がり幅は小さい。

(5) 気泡径分布

図-9に、 $x/d=30$ のMBJ中心部内での気泡径分布を示す。気泡は U_{w0} の増加にしたがってノズル出口近傍での水噴流外縁の速度勾配が大きくなりその結果より大きなせん断力を受けて一層微小化され $d_b < 0.05$ mm の微小気泡の頻度 N が大きくなる。なお、平均気泡径 d_m は $U_{w0}=8.0, 19.9, 26.5$ m/s の場合それぞれ $d_m=164, 110, 57 \mu\text{m}$ であった。

また、図-10に、マイクロバブルのパーティクルカウンターによるMBJの噴流外縁 ($x=600, y=-150, z=0$ mm) 近傍での気泡径分布を示す。気泡径 d_b はかなり小さく最大頻度の気泡径は $d_b < 20 \mu\text{m}$ である。

(6) エアレーション特性 (溶存酸素量)

図-11に、各流速における溶存酸素量 C の時間変化を示す。図中、 C_s は測定時の水温での飽和溶存酸素量 [mg/l] である。いずれの場合も溶存酸素量は、時間の経過とともにほぼ指数関数的に増加するが U_{w0} が増加すると気泡が微細化され気液界面の接触面積が増加するためさらに増加する。

しかし、 $U_{w0}=19.9\text{m/s}$ と 25.5m/s では溶存酸素量の変化にほとんど差が無くなるのが分かる。

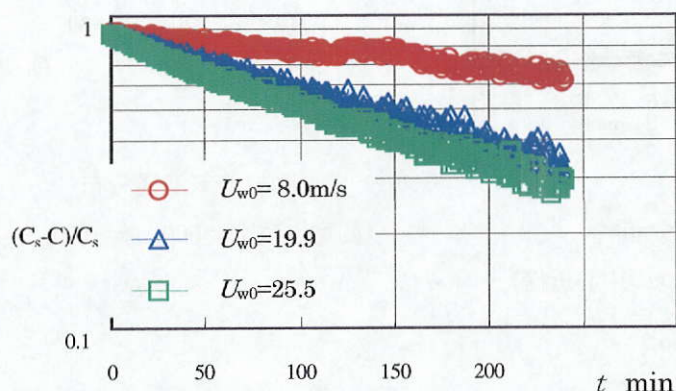


図-11 溶存酸素

6. マイクロバブル, キャビテーション気泡噴流の応用について

前記したように, 新たに提案したマイクロバブル生成ノズルは構造が極めて簡単なので, 例えばエアレーションなど気体を液体中に拡散, 混合, 吸収させる操作など, 種々の分野での使用が期待される.

本研究では, (1) 廃コンクリートの再資源化とCO₂の固定化, および(2) マイクロバブル気泡塔へのマイクロバブル, キャビテーション気泡噴流応用についての検討した.

(1) については, まず廃コンクリート(平均粒径: 約 0.5mm)を強酸性溶液中に浸しCaイオン(セメント成分)を溶出させ, それをイオン交換樹脂に吸着させる. 次に, NaCl水溶液中でイオン交換樹脂に吸着させたCaイオンをNaイオンと置換させCa水溶液を作成し, そこにCO₂マイクロバブル, キャビテーション気泡噴流を吹き込みCO₂をCaCO₃として固定化させる. その際, Caガスはマイクロバブルとして供給されるため気液の接触面積が極めて増加し高効率で固体化される. なお, Caガスマイクロバブル気泡噴流の流動特性は, LDA, PIV測定によって明らかにした[9], [10].

また, 強酸性溶液中でCa成分(セメント成分)を除去された砂粒子は再使用(砂粒子の再資源化)が可能となる.

(2) については, 気泡塔にマイクロバブルを使用し気体の液体への吸収が効率的に行なわれることを明らかにした[11], [12]. なお, 気泡塔内の流動特性はLDA, PIV測定により明らかにした.

7. まとめ

本研究では, 構造が極めて簡単なマイクロバブル生成ノズルを新たに示すとともに, マイクロバブルの生成メカニズム, マイクロバブル気泡噴流の流動特性などを気泡径分布, マイクロバブル気泡群および液相(水)の速度分布, 中心線流速, 噴流の拡がりなどの測定から, また, 本ノズルによるエアレーション特性を溶存酸素量の時間変化の測定から明らかにした.(資料番号1~8, 参照)

前記したように, 新たに提案したマイクロバブル生成ノズルは構造が極めて簡単なので, 例えばエアレーションなど気体を液体中に拡散, 混合, 吸収させる操作など, 種々の分野での使用が期待される.

すなわち, 河川・湖沼・内湾等の閉鎖性水域における水質汚染や, 底層での無酸素あるいは貧酸素水域の解消に対し本マイクロバブル生成ノズルによるエアレーションは, 汚染物質の生物的处理に(バクテリアなどの微生物を活性化させる)極めて有効であると考えられる. さらに, オゾン水による微生物の滅菌・殺菌に際しても, 本マイクロバブル生成ノズルによるオゾ

ン水の生成に極めて効率的であると考えられる。

また、廃コンクリートの再資源化とCO₂の固定化（資料番号6，8，参照），および，マイクロバブル気泡塔へのマイクロバブルの応用（資料番号7，参照）についても，その重要性を明らかにした。

すなわち，本研究では従来明らかにされていないマイクロバブルキャビテーション気泡（気液二相）噴流の流動特性，特に気相（マイクロバブル気泡群）と液相の速度分布を LDA，PIV 計測から明らかにし，さらに，このことが，工学的に貴重ばかりでなく工業的応用（例えば，気体を液体に効率的に吸収させる操作，など）にも重要であることを示した。

参考文献

- (1) 角川明・川島英幹・牧野雅彦，高密度マイクロバブル流れの PIV による計測，第 70 回船舶技術研究所発表会講演論文集，(1997)。
- (2) Serizawa, A., Flow characteristics and application of micro bubble containing bubbly two-phase flow, *Proc. of 16th Int. Conf. on Chemical and process engineering*, (2004), pp. 22-26.
- (3) 社河内敏彦・大池崇博・西山聡，微小気泡の生成とその応用に関する研究，日本混相流学会年会講演会 2002，講演論文集，(2002)，pp. 159-160.
- (4) 社河内敏彦，特許願 2005-028780，マイクロバブル発生ノズル，(2002)。
- (5) 社河内敏彦，噴流工学，森北出版，pp. 3-11，(2004)，pp. 167-176.
- (6) 社河内敏彦・松本正・西尾昌洋・辻本公一・安藤俊剛，マイクロバブル気泡噴流の流動とエアレーション特性，日本混相流学会論文精選集 2，(2007)，pp. 33-38.
- (7) 西尾昌洋，マイクロバブル，キャビテーション気泡噴流に関する研究，三重大学大学院工学研究科 平成 18 年度修士学位論文，(2007)。
- (8) Shakouchi, T., T. Matsumoto, M. Nishio, M. Uchiyama, K. Tsujimoto and T. Ando, Flow analysis of micro bubble jet flow by flow visualization, *Proc. of the 6th Symp. on Flow visualization and image processing*, CD-ROM, (2007), pp. 1-6.
- (9) 社河内敏彦・高村純一・松本正・長末秀樹・辻本公一・安藤俊剛，廃コンクリートの再資源化 —CO₂ マイクロバブル噴流の応用—，日本機械学会東海支部第 56 期総会講演会講演論文集，No. 073-1，(2007)，pp. 253-254.

- (10) 高村純一, 廃コンクリートの再資源化 (CO₂ マイクロバブル噴流の応用), 三重大学大学院工学研究科 平成 18 年度修士学位論文, (2007).
 - (11) 社河内敏彦・内山道之・行方宏・辻本公一・安藤俊剛, マイクロバブル気泡塔に関する研究, 日本機械学会東海支部第 57 期総会講演会講演論文集, No. 083-1, (2008), pp. 215-216.
 - (12) 内山道之, マイクロバブル気泡噴流の流動解析とその気泡塔への応用, 三重大学大学院工学研究科 平成 19 年度修士学位論文, (2008).
-