

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010 ~ 2012

課題番号：22560163

研究課題名（和文）

渦輪による気泡群の捕集および輸送に関する研究

研究課題名（英文）

Entrainment and transport of air bubbles by vortex ring

研究代表者

内山 知実 (UCHIYAMA TOMOMI)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授

研究者番号：90193911

研究成果の概要（和文）：

渦輪による気泡群の捕集と輸送に関する知見を得るため、シリンダとピストンからなる渦輪射出装置を底面に備えた水槽を用いて実験を行った。シリンダ出口端に設置した細管から気泡を渦輪の射出とともに連続的に水中に注入する実験である。シリンダの内径は42.5 mm、ストロークは100 mmである。渦輪の循環は20000以下であり、層流渦輪に相当する。気泡の平均直径は3.2 mm以下である。

渦輪の挙動と気泡の運動を調べた結果、以下の結論が得られた。

1. 渦輪に対する気泡の相対的な運動は、渦輪射出速度すなわち渦輪強度と気泡注入流量に応じて4種類 (Pattern 1, Pattern 2, Pattern 3, Pattern 4) に分類できる。
2. 渦輪強度が低い Pattern 1 では、気泡は渦輪に巻込まれずに上昇する。
3. 渦輪強度が増した Pattern 2 では、注入開始時を除き、前半に注入された気泡は渦核内部に巻込まれながら上昇する。巻込まれた気泡は渦核中心に沿って周方向に分布する。注入後半部の気泡は巻込まれずに上昇する。渦輪の上昇につれて、巻込まれていた気泡が上部へ離脱する。
4. 渦輪強度がさらに増した Pattern 3 では、注入開始時を除くすべての気泡が巻込まれ、渦核中心に沿って周方向に分布する。巻込まれた気泡は渦輪とともに上昇する。
5. 渦輪強度は Pattern 3 と同じであるが気泡流量が小さい Pattern 4 では、すべての気泡が巻込まれる。一部の気泡が上方へ離脱するが、多くの気泡は渦輪とともに上昇する。
6. 気泡は渦輪変位に影響をほとんど及ぼさない。
7. 巻込まれた気泡は、局所的に渦輪の半径をやや増大させる。

研究成果の概要（英文）：

The entrainment and transport of air bubbles by a vortex ring are experimentally investigated. A vortex ring launcher, composed of a cylinder and a piston, is mounted on the bottom of a water tank. The cylinder diameter  $D_0$  and the piston stroke  $L_0$  are 42.5 mm and 100 mm respectively. The launched vortex ring, of which circulation is less than 20000, is of a laminar type. Air bubbles are injected from a needle, which is attached on the cylinder surface, into the vortex ring. The mean bubble diameter is 3.2 mm.

The bubble motions relative to the vortex ring are found to be classified according to the strength of the vortex ring and the bubble flow rate. When the strength of the vortex ring is low, the bubbles are less affected by the vortex ring. With increasing the strength, the bubbles are favorably entrained into the vortex ring. The entrained bubbles distribute around the center of the vortex core. They are transported by the vortex ring when the strength of the vortex ring is large. The entrained bubbles hardly change the convection of the vortex ring. The radius of the vortex ring becomes larger at the position where a number of bubbles are entrained.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：流体工学

キーワード：渦輪，気泡，混相流

1. 研究開始当初の背景

微小な気泡を含む乱流は，化学プラントや熱交換器など様々な工業装置で観察される。流動の精密な予測には渦と気泡の相互作用の知見が不可欠と考えられ，いくつかの数値解析が実施されている。一様等方性乱流中の気泡運動が直接数値解析され，渦度が高い領域に気泡が選択的に集中することが明らかにされた。また，大規模な渦を対象に直接数値解析が実行され，高渦度領域に気泡が選択的に集中すること，その集中が渦度を低下させることなどが示された。さらに，気泡を含む噴流が解析され，ノズル出口部で生じた大規模渦が気泡を巻き込み輸送する現象が明らかにされた。以上の知見は，渦による気泡運動の操縦の可能性を示唆するものである。

一方，シリンダから静止流体中に流れが瞬間的に噴出すると，噴出流体の先端にリング状の渦すなわら渦輪が発生する。渦輪は，断面が渦を形成しており，自己誘起速度により推進する。

以上より，渦輪の強度と規模を適切に制御すれば，渦輪は気泡を捕集し（巻き込み），所望の位置まで自己推進して気泡を輸送できると考えられる。これが，本研究の着想に至った経緯である。

2. 研究の目的

研究の目的は以下の3項目である。

- (1) 水中に分散した多数の微小な気泡に向けて渦輪を射出し，渦輪の渦運動による気泡の捕集（巻き込み）を解明する。
- (2) 気泡捕集後における，渦輪の並進運動による気泡の輸送を解明する。
- (3) 上記の知見に基づき，気泡を高効率で捕集し，所望の位置まで正確に輸送できる，渦輪による気泡操縦方法を開発する。

3. 研究の方法

実験装置の概略を図1に示す。透明アクリル製の矩形タンクに水が貯められている。タンクの寸法は，幅と奥行きが300 mm，高さが1000 mmである。タンクの上部は大気に開放

されている。シリンダとピストンからなる渦輪発射装置がタンク底面の中央に設置されている。ピストンの直径は $D_0$ である。シリンダ中心軸は鉛直軸と平行である。シリンダの先端近傍の外周に陰極線が巻かれ，タンクの内壁面に陽極が置かれ，直流電源から電圧が印加され，水の電気分解により円環状の陰極線から微小な水素気泡が発生する。気泡は浮力により上昇しながら周囲に水の流れを誘起し，気泡と水からなる気泡ブルームが生起する。

シリンダ内の水がピストンにより鉛直上向きに押出されることにより，渦輪が気泡ブルームの中心軸に沿って鉛直上向きに射出される。ピストンの押し上げは，ACサーボモータに直結されたスライダで行われる。ピストンの押し上げ速度とストロークは，パソコンで制御される。

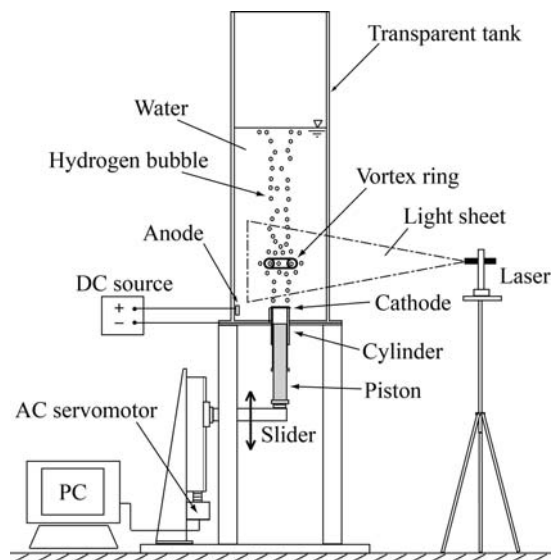


図1 実験装置の概略

渦輪と気泡の運動を可視化するため，タンク側面からレーザーライトシート（出力100 mW，波長532 nm，幅1 mm）をシリンダ中心軸（鉛

直軸)に平行に照射し、渦輪と気泡プルームの鉛直中央断面内の様子を高速カメラで撮影する。画像解像度は640×480 pixel、撮影速度は200 fps、シャッタースピードは1/200 sである。

#### 4. 研究成果

時間的に発達した気泡プルームの中心軸に沿って鉛直上向きに渦輪を射出したときの気泡の可視化画像を図2に示す。ただし、4つの渦輪変位 $z_v$ における鉛直中央断面の画像である。変位 $z_v/D_0=0.78$ では、シリンダ先端から発生したせん断層の巻き上がりにつれて、渦輪の上部の気泡が渦核に沿って渦輪背後に回り込み、渦核の内部に螺旋状に巻き込まれつつある。この変位は、ピストンが上死点に達した時刻のものである。変位 $z_v/D_0=2.77$ では、渦核内の螺旋の巻き数が増し、渦輪内部への気泡巻き込み量が増大する。後述するように、この変位において渦輪断面内の気泡体積率が極大となる。その後、変位 $z_v/D_0=4.1$ では、 $z_v/D_0=2.77$ の場合と比較して、中心軸の周囲で気泡が少なく、渦輪背後に多数の気泡が分布する。渦輪の強度が低下してせん断層の上がり弱まるため、渦輪背後へ回り込んだ気泡が渦輪内へ巻き込まれず、そのまま後方へ取り残されるからである。さらに渦輪が上昇した変位 $z_v/D_0=5.01$ では、水面近傍に堆積している気泡と渦輪が衝突するため、渦輪内部の気泡巻き込み量が再び増す。とくに、中心軸の周囲の気泡量が増大する。

渦輪変位 $z_v$ の時間変化を図3に示す。ただし、静止水中における変位と比較してある。気泡プルームにおける変位は、時刻 $tU_m/D_0 \leq 2.42$ では水中の結果とほぼ同じである。しかし、 $tU_m/D_0 > 2.42$ における変位は大きく、渦輪が高い上昇速度をもつことが判る。気泡プルームの中で生起している上昇水流の影響を渦輪が受けるからである。 $tU_m/D_0 > 2.42$ において、変位の時間変化はほぼ直線的であり、渦輪はほぼ一定の速度で上昇する。

図4は、渦輪変位 $z_v$ に対する直径 $D$ の変化を示す。渦輪の上昇につれて $D$ がやや低下する。このため、静止水中よりも $D$ が小さい。浮力噴流が生起しており、中心軸の周りに上昇水流が存在している。このため、プルーム内部へ周囲の水が巻き込まれ、この内向き流れが渦輪直径の低下をもたらす。

図5は、渦輪変位 $z_v$ に対するボイド率 $\alpha$ の変化を示す。 $0.78 \leq z_v/D_0 \leq 2.77$ の高度では、 $\alpha$ は単調に増大する。せん断層の巻き上がりにつれて気泡が渦輪内に巻き込まれるからである[図2(b)参照]。しかし、せん断層の強度が低下する $2.77 \leq z_v/D_0 \leq 4.1$ では $\alpha$ が減じる。気泡が渦輪背後に取り残されるからである[図2(c)]。 $z_v/D_0 > 4.1$ では、渦輪が水面に堆積している気泡に衝突して巻き込むため、

$\alpha$ が再び増大する[図2(d)]。 $z_v/D_0=2.77$ における $\alpha$ の極大値は、シリンダ出口近傍部( $z_v/D_0=0.78$ )の2.43倍である。

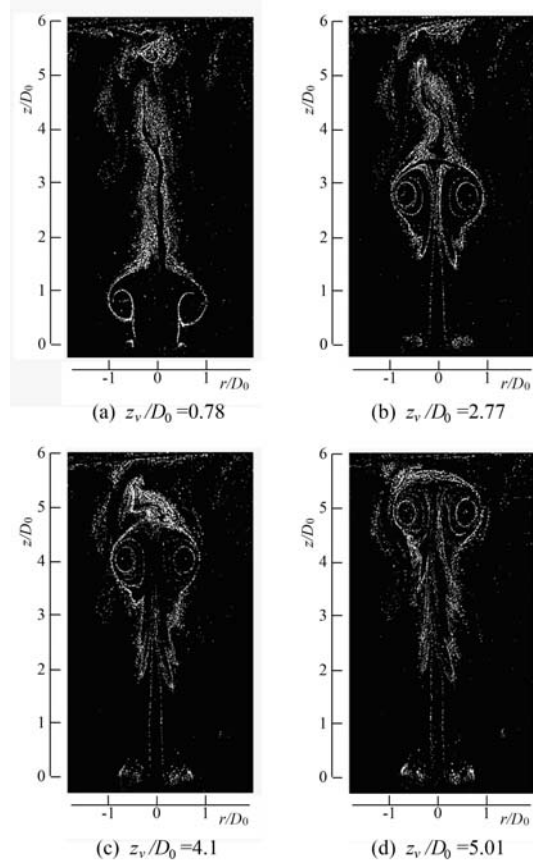


図2 気泡プルーム中に射出された渦輪

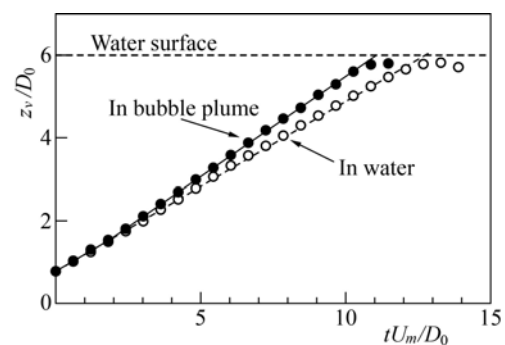


図3 渦輪の変位

図6は、水の軸(鉛直)方向速度の分布を示す。ただし、渦核中心を通過する水平線上の速度の分布であり、静止水中と気泡プルーム中の結果が比較してある。速度は、渦核中心間に相当する領域ではほぼ一定の高い値をとる。気泡プルーム中の値は静止水中よりもやや高い。上昇水流の影響を受けているからである。また、図4に示したように気泡プ

ルーム中の渦輪直径は静止水中よりも小さいが、速度がほぼ一定値をとる領域の幅が減っていることから確認できる。さらに、気泡プルームにおける渦核中心部の速度勾配が静止水中よりも小さい。

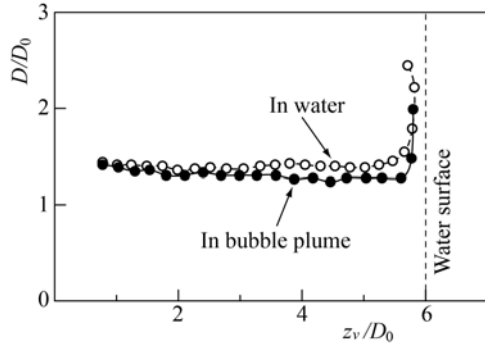


図4 渦輪の直径

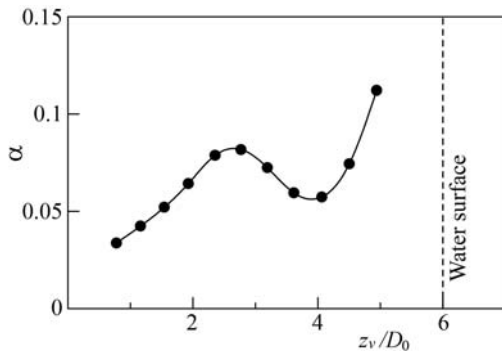


図5 渦輪断面内のボイド率

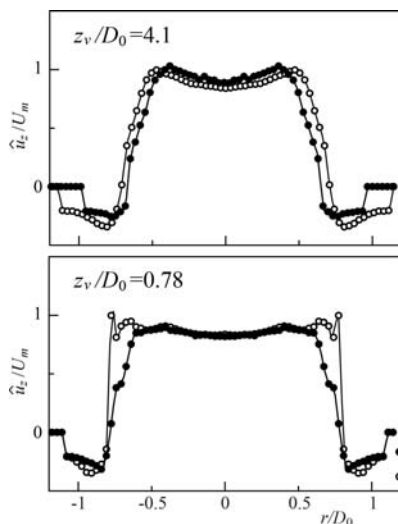


図6 渦輪断面内の水速度

図7は、渦核中心を通過する水平線上の渦度の分布を示す。ただし、4つの渦輪変位に対する結果である。渦度の絶対値は、渦核に

おいて大きく低下している。気泡の巻き込みにより、渦度分布が平坦化している。気泡による渦強度の低下を確認できる。

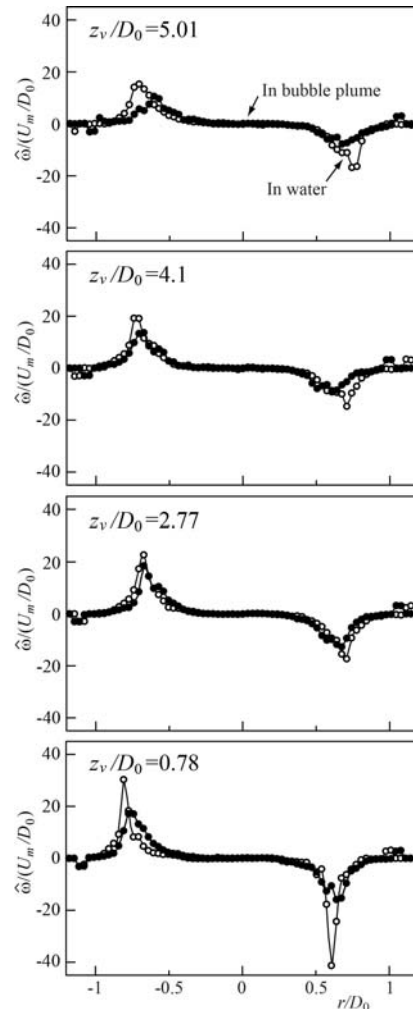


図7 渦輪断面内の渦度

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計9件)

- ① 内山知実・五十嵐一秀, 環状気泡プルームの内部に射出された渦輪と気泡の干渉, 日本混相流学会年会講演会, 2010. 7, (静岡県).
- ② 草道聡・濱田廣貴・内山知実, 環状気泡プルームの内部に射出された渦輪の挙動, 可視化情報全国講演会, 2010. 10, (鹿児島県).
- ③ 吉井佑太郎・内山知実, 渦輪による気泡群の巻き込みと輸送の渦法シミュレーション, 第24回数値流体力学シンポジウム, 2010. 12, (神奈川県).
- ④ Uchiyama, T., Vortex Simulation for Dispersed Gas-Liquid Two-Phase Flows,

5th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models, (Invited), 2010. 11, (イタリア).

- ⑤ 草道聡・内山知実, 気泡プルームの内部に射出された渦輪と気泡の相互作用, 日本混相流学会年会講演会, 2011. 8, (京都府).
- ⑥ Uchiyama, T., Numerical Simulation of Interaction between a Vortex Ring and Gas Bubbles, 6th Int. Berlin Workshop on Transport Phenomena with Moving Boundaries, 2011. 11, (ドイツ).
- ⑦ Uchiyama, T. and Yoshii, Y., Numerical Simulation of Entrainment and Transport of Gas Bubbles by Vortex in Cell Method, Proc. ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, (Invited), 2011. 7, (静岡県).
- ⑧ Uchiyama, T., Kusamichi, S., Degawa, T., Interaction of Bubbles with a Vortex Ring Launched into Bubble Plume, 11th Int. Conf. Fluid Control, Measurements and Visualization, 2011. 12, (台湾).
- ⑨ 内山知実・草道聡, 水中に射出された渦輪による気泡群の巻込みと輸送, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2012. 11, (京都府).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内山知実 (UCHIYAMA TOMOMI)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授

研究者番号 : 90193911

(2) 研究分担者なし

( )

研究者番号 :

(3) 連携研究者

( )

研究者番号 :