

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 13 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820055

研究課題名(和文)ベンチュリ管内気液二相流における界面輸送現象の利活用

研究課題名(英文)Utilization of transport phenomena through interface of gas-liquid two-phase flow in venturi tube

研究代表者

金子 暁子(Kaneko, Akiko)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：40396940

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はベンチュリ管式微細気泡発生装置を化学反応器として利用し、有害物質の分解反応およびベンチレーションフィルタの実用化への基礎的知見の獲得を目的としている。

ベンチュリ管内でCH₄気泡の急激な気泡崩壊が起きる条件でpH値が顕著に減少し、ベンチュリ管内の気泡崩壊により、pHを低下させる化学反応が生じている可能性が示された。定電流法を用いたボイド率計測法の開発では、Maxwellの理論を適用することで分散気泡流へのボイド率計測を可能とした。ベンチュリスクラバーの運転には最適な流入条件が存在することが示唆された。分散系に相流の音速について圧力波の伝播挙動はボイド率の影響を受けることが示された。

研究成果の概要(英文)：This study focused on a venture-type microbubble generator utilized as a chemical reactor. The purpose is to obtain fundamental knowledge on degradation of harmful material in a venture tube and utilization of ventilation filter system with venture scrubber (VS).

The chemical reaction was examined from both pH and gas concentration measurement. It was indicated that bubble breakup phenomena in a venture tube initiated a chemical reaction. Void fraction measurement system with a constant electric current method for bubbly flow was developed with applying Maxwell's theory. In a certain higher gas flow rate, the VS lapses into suspension mode of the self-priming by reach to the sonic velocity in the throat part and pressure increasing in the VS. Pressure propagation phenomenon in a venturi tube was investigated. The propagation speed decreased with an increase of the void fraction. An attenuation value of the pressure wave also decreased with the increase of the void fraction.

研究分野：混相流工学

キーワード：気液二相流 ベンチュリ管式微細気泡発生装置 物質輸送 化学反応 音速

1. 研究開始当初の背景

近年、マイクロバブルの利用が国内外で注目され、幅広い分野においてマイクロスケール、ナノスケール気泡の利用が展開されている。並行して種々の微細気泡発生技術の研究開発が進められている。さらに国内ではナノバブル国際標準化に向け、社会的に認知された微細気泡発生手法とマイクロ、ナノバブルの利用技術の確立が望まれている。

これらを受けて著者らのグループでは拡大・縮小部を有すベンチュリ管を用いたマイクロバブル発生装置を開発し提案している。マイクロバブル発生過程における気液二相流の過渡現象を、化学反応デバイスとして利用することが期待される。

応用対象の一つとして、ケミカルリアクターとしての利用が考えられる。気泡の圧壊やプラズマ光反応を利用したケミカルリアクターが高効率化および低環境負荷を目指して研究されている。中でも気泡の圧壊による化学的作用は、操作が簡単かつ低環境負荷という利点から排水や排気処理で注目されている。しかし、超音波や衝撃波管を用いた気泡の圧壊は、反応領域が一部分でありスケールアップが困難であるため、反応領域の広い装置が求められている。

今一つは、先の震災時に原子力発電所のベンチレーションで大きな問題となった放射性物質の大気解放への解決策となる、ベンチレーションフィルタとしての利用である。欧州ではベンチュリスクラバーをフィルタとして利用しているのに対し、日本ではフィルタそのものの設置が進んでいないため、この要素技術の確立が急務である。

一方、ベンチュリ管内流動現象のおおよそのメカニズムは実験的に明らかにされたものの、分散系気液二相流の音速についての議論は尽きず、現在、喉部における音速の見積もりを均質流と仮定していることの妥当性の検証が不十分であるという問題がある。

2. 研究の目的

(1) ベンチュリ管式微細気泡生成装置のケミカルリアクターとしての可能性を明らかにする。種々のガスに対し、ベンチュリ管内の可視化ならびに使用流体の pH、溶存ガス濃度の計測を行い、管内流動場に対する化学反応の影響を調べる。また、研究に関連する要素技術として、定電流法を用いたボイド率計測法の開発を行う。

(2) ベンチュリスクラバーによる放射性粉塵除去技術の確立のための基礎実験を行い、適切な運転を実現するための流動条件を明らかにする。

(3) 分散系気液二相流の音速について、気泡流中の圧力波の伝播挙動を、詳細可視化および圧力波計測を通し詳細に調べることで、分散系気泡流の音速について検討する。

3. 研究の方法

(1) 化学反応技術

基本的な pH 変化の確認のため、静止水中に各ガスをバブリングした。液相に水道水を、混入ガスとして N₂、CH₄、CO₂ を用いた。水温一定において水槽に流量 1.5 L/min でバブリングさせる。そのときの pH 変化を pH 計 (HORIBA 製 D-54) で 2.5 s 間隔で測定した。

図 1 にベンチュリ管式マイクロバブル発生装置およびベンチュリ管寸法を示す。ベンチュリ管に流入させる水の入り口見かけ流速 J_{lin} は 1.66 m/s、2.49 m/s とし、混入するガスの体積流量比 β は 0.01~0.015 とした。気液分離槽で pH 計を用いて気体と分離された液体の pH 値を測定した。ガスは CH₄、N₂ を使用している。また、高速度ビデオカメラ (Vision Research 社製 Phantom V12.1) を用いてバックライト法にてベンチュリ管内の流動挙動を詳細に観察した。

理論的な溶存 CO₂ 量の算出は、pH および CO₂ 量と関係が深い炭酸塩硬度 KH を試薬 (テトラジャパン社製) を用いて測定し、以下の式を用いて求めた。

$$CO_2 = KH \times 10^{(pH)} \times 3.72 \times 10^7 \quad (1)$$

ここで CO₂ は二酸化炭素量 [mg/L] であり、水道水の炭酸塩硬度 KH は 4 [°dH] であった。

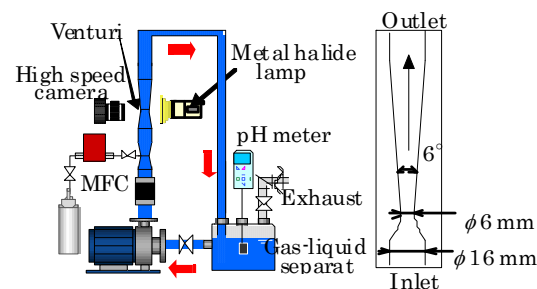


図 1 ベンチュリ管を介した化学反应用装置

(2) ベンチュリスクラバーによる放射性粉塵除去技術

フィルタードベント時に想定される汚染ガスの流入量は大きな幅を持ち、ベンチュリスクラバー (以下、VS) の喉部で気中音速に達する高速気流となる可能性がある。VS 内の可視化観測と圧力分布計測を行い、その関

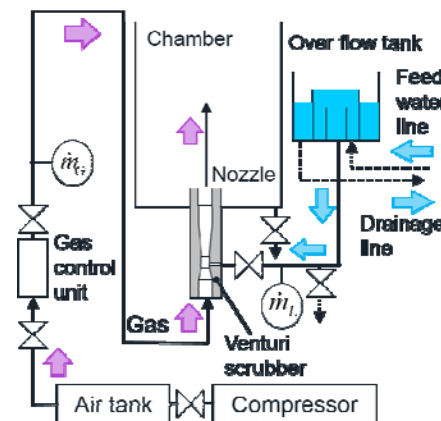


図 2 ベンチュリスクラバー実験装置概略図

係について検討した。

実験装置の概略を図 2 に示す。実験では、全長約 220 mm、入口部と喉部の断面積比 4.24 の、矩形形状 VS を用いた。この VS にコンプレッサー内の高圧空気を開放し空気を、オーバーヘッドタンクを直径 1 mm の自吸口と接続することで水を、それぞれ流入させた。喉部での見かけ気相質量流速 $\rho_G^{(th)} \dot{j}_G^{(th)}$ をパラメータとし、自吸口にかかる水頭 H は 100 mm とした。ハイスピードビデオカメラ (Photron 社製 FASTCAM-MAX 120K) とメタルハライドランプを用いたバックライト法により可視化し、圧力分布および液相流入量 (自吸量) を計測した。実験条件および自吸量に基づくクオリティを表 1 に示す。

表 1 実験条件およびクオリティ

Case	$\rho_G^{(th)} \dot{j}_G^{(th)}$ [kg/m ² ·s]	$x[-]$
1	215.4	0.76
2	318.4	0.91
3	424.9	1.0

さらに、VS 内で生成される液滴径評価に対する、抜山-棚沢の式^[1]および臨界 We 数理論の適用性を、可視化観測結果により検討した。

(3) 分散系気液二相流の音速

実験装置の概略図と使用したベンチュリ管の寸法を図 3 に示す。ベンチュリ管内の圧力計測を行うため、ベンチュリ管スロートを $z=0$ mm とし、流動方向を正として $z=37$ 、47 mm の位置に圧力センサ (Kulite 製 XTL-190-100SG) を取り付けました。サンプリング周波数は 100 kHz で 1.14 s 間計測した。

作動流体には気相には空気を、液相には水道水を用いた。水道水の温度は 23 ± 3 °C、導電率は $320 \pm 1 \mu\text{S/cm}$ 、溶存酸素は 8 ± 1 mg/L であった。流動条件はベンチュリ管入口の液相の見かけ速度を $\dot{j}_{lin} = 2.49$ m/s に固定し、気相の見かけ速度を $\dot{j}_{gin} = 0 - 0.207$ m/s と

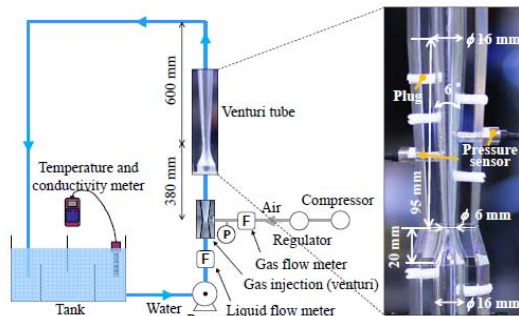


図 3 ベンチュリ管内の圧力伝播計測

した。また、矩形水槽底面に超音波振動子 (NEC トーキョー製 TBM50-200-8LA) を設置し、水槽内を多孔質体から発生した微細気泡で満たした状態における超音波の伝播挙動を調べた。超音波の発振周波数は 200 KHz であり、RF パワーアンプ (E&I 製 1020L) により増幅している。振動子より 230 mm 上部の水面に音波計 (本多電子株式会社製

HUS-3) を設置し、音波を計測した。

4. 研究成果

(1) 化学反応技術

① バブリングおよびベンチュリ管式微細気泡発生装置による pH 変化

N_2 、 CH_4 のバブリングでは pH 値は上昇し、最大値は等しくなった。これはヘンリーの法則に従い、 N_2 または CH_4 のバブリングによって CO_2 の分圧が低下し、水道水中に溶存していた CO_2 が脱気したと考えられる。一方、 CO_2 をバブリングさせると、pH は 5 分程度で急激に減少して一定値になった。

見かけ流速 $J_{lin} = 1.66$ m/s、体積流量比 $\beta = 0.015$ における CH_4 気泡の崩壊挙動は、発生した液中ジェットが気泡下部から上部へ貫通して 0.498 ms 後に気泡の分裂が確認された。一方、 $J_{lin} = 2.49$ m/s、 $\beta = 0.01$ の CH_4 および N_2 の気泡挙動は、膨張気泡が急激に収縮して、マイクロバブルが生成されることが確認された。この崩壊現象は拡大部での圧力回復に起因すると考えられる^[2]。

気液分離槽における pH 変化を図 4 に示す。 N_2 気泡の急激な崩壊が起きる条件(c)では、バブリング実験と同様に pH は上昇した。これに対し、 CH_4 気泡の急激な崩壊が起きない条件(a)では、 N_2 気泡の急激な崩壊が起きている条件に比べて pH 値が低い値になった。さらに、(b)の CH_4 の急激な気泡圧壊が起きる条件では、より顕著に pH 値が下がる結果が得られた。

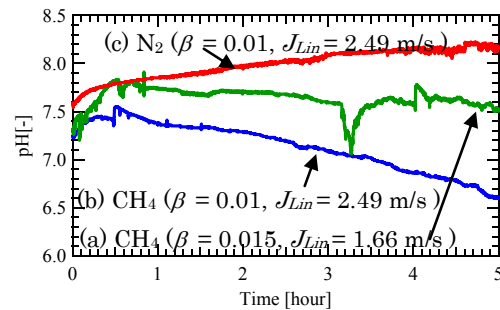


図 4 pH の時間変化

また溶存 CO_2 量の変化を図 5 に示す。(b) の CH_4 気泡の急激な崩壊が起きる条件で、溶存 CO_2 量は 40 mg/L 程度に増加する。しかし、(a)の急激な気泡崩壊が起きない条件では、溶存 CO_2 量の増加量は小さい。さらに、(c) の N_2 気泡の急激な崩壊が起きる条件では、溶存 CO_2 量が減少する結果が得られた。以上より、図 4(b)で pH 値が下がったのはベンチュリ管内の急激な気泡崩壊により CH_4 が水と反応 ($\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$) して CO_2 が発生し、水に溶解したことが一因であると考えられる。このことから、 CH_4 気泡のベンチュリ管内気泡崩壊現象により CO_2 が発生して、pH 値を低下させる作用が生じていることが示唆された。

さらに派生して、オゾンガスを気相として、

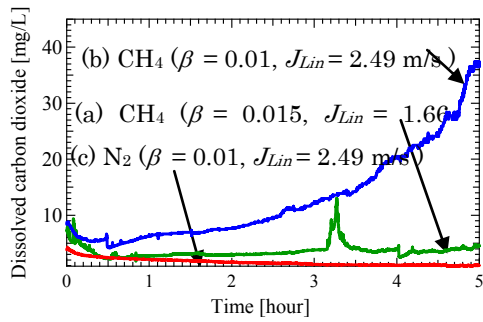


図5 溶存CO₂量の時間変化

ベンチュリ管式微細気泡を介してオゾン水の生成について検討を行った。ベンチュリ管出入口におけるオゾン水濃度を計測したところ、以下の結果を得た。 $J_{Lin} = 0.166$ m/s においては、ベンチュリ管出口でオゾン水濃度が入口濃度の1.7倍増加し3.36 mg/Lとなっているのに対し、 $J_{Lin} = 0.249$ m/s ではオゾン水濃度が入口の6倍増加し2.88 mg/Lとなった。ベンチュリ管出口のオゾン水濃度は、液相の見かけ速度が小さいと高いものの、オゾン水濃度の増加傾向は、液相の見かけ速度が大きい方が高く、気泡崩壊によるマイクロバブルの発生に起因すると考えられる。

②定電流法を用いたボイド率計測法の開発

定電流法はコンダクタンス法のひとつであり、気相と液相の導電率の違いを利用して計測している。気相と液相で導電率に大きな違いがあると流体の電気抵抗が気相の体積によって変化する。この電気抵抗を計測することによってボイド率 α を見積もる。この計測法は主に液膜厚さ計測や環状流のボイド率計測に用いられているが、本研究ではMaxwellの理論³⁾を応用した式(2)により、定電流法の適用範囲を気泡流まで拡張した。

$$\alpha = (\nu - 1) / (\nu + 0.5) \quad (2)$$

ここで、 ν は電圧比を表し、気液二相流で得られた電圧を液相单相流で得られた電圧で規格化した値となる。

電圧計測のサンプリング周波数は100 kHz、計測時間を0.5秒間として時間平均ボイド率を求めた。また、水の導電率や温度は定電流法に影響を与えるため、導電率計や測温抵抗体を用いてモニタリングし、補正を行った。

$J_{Lin} = 2.49$ m/sにおけるベンチュリ管内の圧力分布とボイド率分布を図6に示す。スロート部における圧力は低下し、その後、気泡崩壊位置まで圧力は一定となる。気泡崩壊位

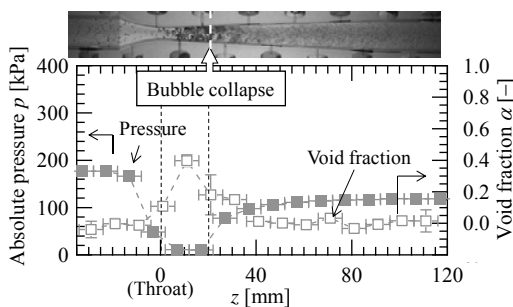


図6 ベンチュリ管内圧力・ボイド率分布

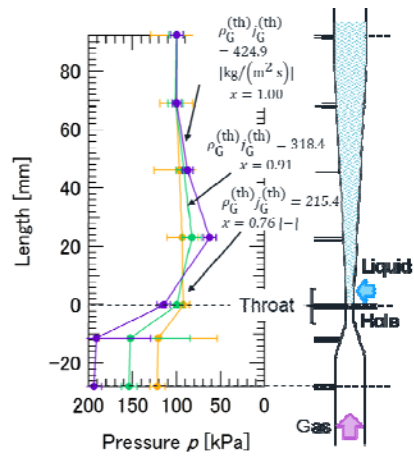


図7 ベンチュリスクラバー内の圧力分布

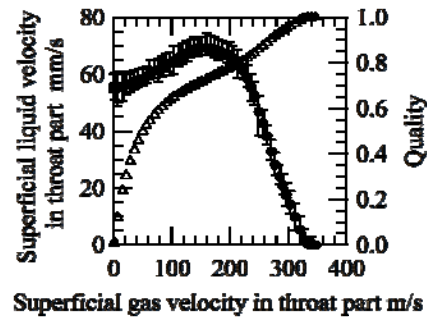


図8 液相流速およびクオリティの変化

置上流より、20 mm程度で大気圧まで圧力が回復する。対して、ボイド率はスロート下流より増大し始め、その増大は気泡崩壊位置前まで続き、0.4 [-]まで上昇した。気泡崩壊位置でボイド率は急激に減少し、管入口と同程度まで戻った。このように過渡的なボイド率変化を詳細に計測することが可能となった。

(2) ベンチュリスクラバーによる放射性粉塵除去技術

図7に流れ方向VS内部圧力分布を示す。Case 1では喉部が圧力最下点となるが、Case 2および3では圧力最下点は拡大部にある。非圧縮とみられる条件下では、Case 1のように拡大部における圧力は喉部よりも増加する。Case 2および3での圧力分布はラバルノズルにおける超音速流と相似であり、VS内部で超音速流が生じていると考えられる。拡大部での圧力の標準偏差は、Case 1では大きな変動があるのに対し、Case 2および3では小さくなる。これは低クオリティのCase 1では二相流の変動により圧力が変化するのに対し、高クオリティのCase 2や3では二相流による影響が小さいためと考えられる。

図8に、喉部での見かけ気相流速に対する、液相流入量とVS内のクオリティの変化を示す。気相流速の増加に伴い自吸量は増加するものの、気相流速が約200 m/sを境に、減少に転じ、これに対し、クオリティは上昇し続ける。液相の自給停止が生じることが示され、ベンチュリスクラバーの運転には最適な流入条件が存在することが示唆された。

発生気泡径を画像処理により計測した結

果を、抜山-棚沢の式および臨界 We 数理論から求めた径と比較した。可視化計測から求めた平均液滴径は $19 \mu\text{m}$ であり、抜山-棚沢の結果と良い一致を示した。

(3) 分散系気液二相流の音速

図9に気相速度 $j_{\text{gin}} = 0.058 \text{ m/s}$ の $z = 37$ 、 47 mm での圧力計測結果を示す。管内における気泡の急収縮により、下流では1、2のように急激な圧力の上昇が確認できる。その直前に上流側の圧力計測でも同様な圧力上昇が確認できることから、この圧力の上昇は圧力波の伝播を示していると考えられる。

図10にボイド率に対する圧力波の伝播速度を示す。伝播速度は、上流下流の計測間距離 10 mm を、図9で示すように上流と下流の p_{max} の時刻の差分 Δt で除算することで得た。また可視化計測から見積もられた伝播速度も合わせて示す。圧力計測と可視化から求めた伝播速度は一致しており、その圧力波の伝播速度はボイド率の増加とともに減少した。また、ボイド率 0.02 [-]以下では均質流モデルにおける音速の予測式とも一致しており、ベンチュリ管下流に伝播する圧力波の速度は均質流モデルの音速の予測式に従うことがわかる。しかし、ボイド率 0.04 [-]以上では予測式よりも大きい傾向が見られた。

ベンチュリ管内の圧力伝播および超音波素子を用いた実験より、圧力値の減衰量を調べた。最大圧力値の差が減少したことより、圧力波の伝播挙動はボイド率の影響を受けることが示された。

参考文献[1] 森島直正、吉田哲夫、化学工学、Vol.31、No.11、pp.1114-1119、1967. [2] 野村康通ら、日本機械学会流体工学部門講演会2010講演論文集 pp.125-126、2010.[3] Maxwell, J. C., Vol. 1, 435-441, Dover Publications, New York, 1954.

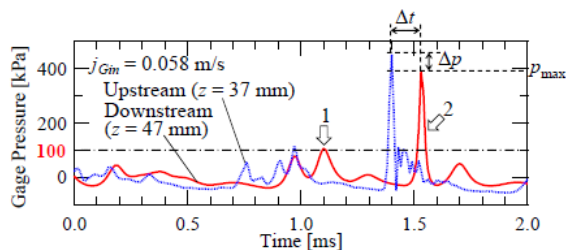


図9 $z=37$ および 47 mm における圧力変化

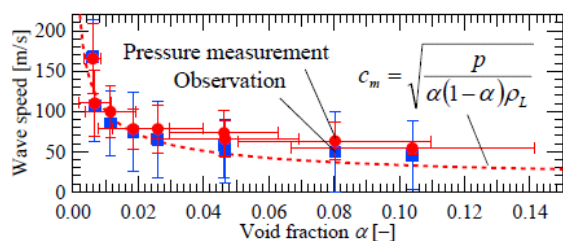


図10 圧力波の伝播速度およびボイド率の関係 ($p = 100 \text{ kPa}$ 、 $\rho_L = 997 \text{ kg/m}^3$)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- 1 Naoki Horiguchi, Hiroyuki Yoshida, Akiko Kaneko, Yutaka Abe, Relationship between self-priming and hydraulic behavior in Venturi Scrubber, Mechanical Engineering Journal, Vol. 1, No. 4, 2014, TEP0026, <http://dx.doi.org/10.1299/mej.2014tep0026>, 査読有
- 2 中林洋輔、金子暁子、上澤伸一郎、阿部豊、ベンチュリ管式マイクロバブル生成装置のガス処理技術への応用、混相流、27 巻、5 号、pp.599-606、2014、<http://dx.doi.org/10.3811/jjmf.27.599>、査読有
- 3 田村尚也、金子暁子、上澤伸一郎、阿部豊、池昌俊、ベンチュリ管を用いたノンケミカルマイクロバブル洗浄技術の開発、混相流、27 巻、5 号、pp.577-584、2014、<http://dx.doi.org/10.3811/jjmf.27.577>、査読有
- 4 上澤伸一郎、金子暁子、田村尚也、中林洋輔、阿部豊、ベンチュリ管内気泡微細化現象に伴う圧力波の伝播挙動、混相流、27 巻、5 号、pp.531-538、2014、<http://dx.doi.org/10.3811/jjmf.27.531>、査読有

[学会発表] (計 25 件)

- 1 Yoshihiro Arai, Development of Removal Technology Using Ozone Microbubble with a Venturi Tube, the ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015, AJK2015-FED, July 26-31, 2015, Seoul (Korea)
- 2 Naoki Horiguchi, Development of Evaluation method of Liquid Flow Rate by Self-priming Phenomena in Venturi Scrubber, the Ninth Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS9), November 16 - 19, 2014, Buyeo (Korea)
- 3 Naoki Horiguchi, Relationship Between Flow Pattern and Pressure Distribution in Venturi Scrubber, the 22nd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE22), July 7 - 11, 2014, Prague (Czech-Republic)
- 4 堀口直樹、ベンチュリースクラバーにおける液滴の可視化観測；(8) LIF による複雑構造物内でのジェットの落下挙動の計測、日本原子力学会 2015 年春の年会、2015. 3. 20-22、茨城大学 (茨城県日立市)
- 5 新井香裕、オゾンマイクロバブルを用いた気液二相洗浄に関する研究、日本機械学会関東支部 21 期 総会講演会 2015. 3. 20-21、横浜国立大学 (神奈川県横浜市)
- 6 堀口直樹、ベンチュリースクラバー内部の二相流動構造と圧力分布に関する実験

- 的研究、日本原子力学会 2014 年秋の大会、2014. 9. 8-10、京都大学（京都府京都市）
- 7 新井香裕、ベンチュリ管式オゾンマイクロバブルを用いたレジスト除去、日本混相流学会混相流シンポジウム 2014、2014. 7. 28-30、道民活動センター（北海道札幌市）
 - 8 堀口直樹、ベンチュリースクラバーの作動限界に対する気相流動の影響、日本原子力学会 2014 年春の大会、2014. 3. 26-28、東京都市大学（東京都世田谷区）
 - 9 新井香裕、高濃度オゾン水を用いた半導体レジスト除去に及ぼす円盤間流動構造の影響、日本機械学会関東学生会第 53 回学生員卒業研究発表講演会、2014. 3. 14、東京農工大学（東京都小金井市）
 - 10 新井香裕、回転円盤間高濃度オゾン流れを用いた半導体レジスト除去、日本分析化学会関東支部 第 10 回茨城地区分生技術交流会、2013. 11. 29、茨城大学（茨城県水戸市）
 - 11 田村尚也、ベンチュリ管を用いたオゾンマイクロバブル洗浄、日本分析化学会関東支部 第 10 回茨城地区分生技術交流会、2013. 11. 29、茨城大学（茨城県水戸市）
 - 12 田村尚也、機能的流体を用いたノンケミカルマイクロバブル洗浄技術に関する研究、日本機械学会流体工学部門講演会、2013. 11. 9-10、九州大学（福岡県福岡市）
 - 13 堀口直樹、ベンチュリースクラバーの内部流動構造と気液流入量の関係、日本機械学会 2013 年度年次大会、2013. 9. 8-11、岡山大学（岡山県、岡山市）
 - 14 田村尚也、ベンチュリ管を用いたノンケミカルマイクロバブル洗浄に関する研究、2013 年度年次大会、2013. 9. 8-11、岡山大学（岡山県岡山市）
 - 15 上澤伸一郎、静電容量検出型ボイド率計測における流動様式の影響、日本原子力学会 2013 年秋の年会、2013. 9. 3-5、八戸工業大学（青森県八戸市）
 - 16 堀口直樹、ベンチュリースクラバー内流動に及ぼす気相流量の影響、日本原子力学会 2013 年秋の年会、2013. 9. 3-5、八戸工業大学（青森県八戸市）
 - 17 田村尚也、ベンチュリ管を用いたノンケミカルマイクロバブル洗浄技術の開発、日本混相流学会混相流シンポジウム 2013、2013. 8. 9-11、信州大学（長野県長野市）
 - 18 中林洋輔、ベンチュリ管式マイクロバブル生成装置のガス処理技術への応用、日本混相流学会混相流シンポジウム 2013、2013. 8. 9-11、信州大学（長野県長野市）
 - 19 上澤伸一郎、ベンチュリ管内気泡微細化現象に伴う圧力波の伝播挙動、日本混相流学会混相流シンポジウム 2013、2013. 8. 9-11、信州大学（長野県長野市）
 - 20 Naoki Horiguchi, Research and Development of Self-Priming Venturi Scrubber for Filter Venting: Preliminary Analysis and Observation of Hydraulic Behavior in Venturi Scrubber, the 21 th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE21, 2013. 7. 29-8. 2, Chengdu (China)
 - 21 Shin-ichiro Uesawa, Estimation of Void Fraction in Dispersed Bubbly Flow With a Constant Electric Current Method, the 21 th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE21, 2013. 7. 29-8. 2, Chengdu (China)
 - 22 Naoya Tamura, Development of Non-chemical Washing Technology by the Micro-Bubble Generator with a Venturi Tube, 8th International Conference on Multiphase Flow, ICMF2013, 2013. 7. 26-31, Cheju (Korea)
 - 23 Shin-ichiro Uesawa, Study on Bubble Breakup and Micro-Bubble Generation Processes in a Venturi Tube, 8th International Conference on Multiphase Flow, ICMF2013, 2013. 7. 26-31, Cheju (Korea)
 - 24 Naoki Horiguchi, Visualization Observation of Flow Field with Jet in Venturi Scrubber, 8th International Conference on Multiphase Flow, ICMF 2013, 2013. 7. 26- 31, Cheju (Korea)
 - 25 Yosuke Nakabayashi, Study on the Applicability of Venturi type Microbubble Generator to Chemical Reactor, 8th International Conference on Multiphase Flow, ICMF 2013, 2013. 7. 26- 31, Cheju (Korea)
- 〔図書〕（計 2 件）
- 1 金子暁子、他、株式会社 NTS、微細気泡の最新技術 2、2014、pp. 13-21
 - 2 金子暁子、他、株式会社 情報機構、マイクロバブル(ファインバブル)のメカニズム・特性制御と実際応用のポイント、2014、pp. 27-36、pp. 268-276
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
金子 暁子 (KANEKO AKIKO)
筑波大学・システム情報系・准教授
研究者番号：40396940
 - (3) 研究協力者
上澤 伸一郎 (SHIN-ICHIRO UESAWA)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科
田村 尚也 (NAOYA TAMURA)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科
堀口 直樹 (NAOKI HORIGUCHI)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科
新井 香裕 (YOSHIHIRO ARAI)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科