

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04167

研究課題名（和文）音波照射による微細孔への液体侵入促進および液置換・乾燥技術への展開

研究課題名（英文）Enhancement of liquid infiltration into closed-end holes by irradiating an acoustic wave, and its application for liquid replacement and drying

研究代表者

真田 俊之（Sanada, Toshiyuki）

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：50403978

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）：先端の封じられた微細孔へ液体を完全に侵入させることは、洗浄や塗装、接着などにおいて重要となるが、液体の表面張力によって特に孔のアスペクト比が大きな場合に困難となる。本研究では、液体中で音波を照射することで、孔内の気体排出を実現した。孔の気柱固有振動数に着目し、複数の周波数の音波を使用することで、完全な気体排出に成功した。音波照射時の気液界面の振動現象や、分裂した気柱の接近、合体、排出現象についてその詳細なメカニズムを調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

液体中で周囲を壁面に囲まれた気体の音波照射時における振動現象について調査した。特に音波波長が気体体積よりも大きな場合の気泡の振動と移動について調査した点において学術的に意義がある。また従来真空チャンバーなどの付加的な装置が必要であった微細構造からの気体排出現象を、液体中において音波を照射するのみで可能とした点が工業的に優位な点といえる。ものづくりの製造プロセスにおける効率化へとつながる点で社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：Filling microstructures with liquid are required in processes such as cleaning, bonding, and painting. A small hole with one end closed, especially a high aspect case, is difficult to deform the gas-liquid interface due to its surface tension, making it difficult to fill with liquid. This study achieved complete gas ejection successfully by focusing on the natural frequency of the pore's gas column using acoustic waves of multiple frequencies. We investigated the detailed ejection process, such as the gas-liquid interface oscillation, gas column splitting, re-approaching, and coalescence of the split gas columns during sound wave irradiation.

研究分野：流体工学

キーワード：混相流 音波 気泡 気液界面

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) ものづくり基盤技術に指定されている洗浄は、製品の品質を保つために欠かすことのできない重要な工程である。不純物の付着力を低下させるため一般的に洗浄には液体を用いるが、微細構造内へ洗浄液などを侵入させることは液体の表面張力のため困難である。そのため真空洗浄など大掛かりな装置が必要になることがある。そこで、液体を微細構造へ容易に侵入させる技術が必要とされている。

(2) 研究代表者らは、微細構造への液体侵入に関してその際に必要な作用をオーダ評価し、微細孔内の気体を圧縮するために必要な力が支配的なことを示した(真田ら, 2016)。そして加圧容器を用いた圧力印加試験を行い、微細構造への液体侵入は、先端が封じられた構造が特に問題であること、また単に構造の大小ではなく、高アスペクト比の構造が問題であることを示した。そのため非常に小さな構造であれば、液滴衝突などの圧力を利用すれば気体は溶解し液体が表面を覆うことを示した。

(3) さらに研究代表者らは、液滴衝突における液体侵入技術の開発において、液柱と液滴列衝突を比較することで、液滴列衝突時に液体がより微細孔へ侵入することを見出した(山口市, 2017)。さらにその侵入メカニズムについて調査を行い、液滴衝突によって発生した圧力によって微細構造内の気体が振動し、それによって気柱が分裂、その後気泡が振動しながら排出することによって、液体が侵入することを示した(Sanada et al., 2018)。その結果を踏まえると、液滴を衝突させずに、液体中にて圧力を変動させれば、迅速に液体を微細構造内へと侵入させる可能性がある。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、液体中において、高アスペクト比の先端が封じられた微細孔へ音波を照射し、水中に設置した閉端円管からの完全な気体排出を達成することである。このとき、微細孔内の気体の固有振動数を見積り、この振動数と気体排出との関連や、その際に孔内部に生じる現象を解明する。

(2) 次に気体排出のメカニズムの解明を行う。気体排出に重要であった照射音波の周波数と孔内で発生した現象との関連を高速度撮影によって調査する。さらに液体の表面張力や微細孔の大きさ、表面濡れ性と気体排出率の関連について調査し、音波照射による気体排出過程を解明する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 気体排出試験

実験は、水で満たした水槽の中に水中スピーカーを設置し、スピーカーの前方 20 mm、水深 100 mm の位置に圧力センサまたは実験サンプルを固定し行った。水中スピーカーは、信号発生器で生成した電気信号を増幅器により増幅して駆動した。本実験で使用したサンプルは、プレートに貫通孔を施し、底部をシリコンラバーシートで封じることで閉端円管とした。気体排出に対する浮力の影響をなくすために、サンプルは孔が水平になるよう固定した。音波照射時の円管内部を観察するため、水槽外部に設置した高速度カメラとマクロレンズを用いて可視化観察を行った。撮影の際には、光源として面照明をバックライトとして用いた。

気体排出実験では、水中に設置した材質の異なるサンプルに対して音波を照射後の気体排出率を求めた。また、そのときに生じた音圧を圧力センサによって測定した。スピーカーを駆動する信号波形として、単一周波数の正弦波および周波数がスタート周波数からストップ周波数まで単調増加する正弦波の 2 種類を用いた。以下、それぞれ周波数一定波および周波数掃引波と呼ぶ。周波数一定波を照射した実験では周波数は 200 から 3000 Hz、周波数掃引波を照射した実験では、スタート周波数を 200 Hz、ストップ周波数を 2200 Hz とした。高速度カメラでの撮影条件は 20000 fps とし、照射音波の周波数より十分高く設定した。音波照射時間はともに 10 秒とした。

#### (2) 気体排出過程の観察

実験(1)と同様に水で満たした水槽内に水中スピーカーを設置し、その前方に実験サンプルまたは圧力センサを配置した。本実験では実験サンプル周囲の液体を変化させるため、小型容器を設置し、小型容器内を対象となる液体で満たし、その中に実験サンプルを設置した。本実験では孔の大きさの異なるサンプルを使用した。

本実験では三つの実験を行った。まず、二つの周波数を二段階で照射することにより短時間での完全な気体排出を試みた。第一段階の照射音波を 600 Hz に固定し 1 秒照射した後、第二段階の照射音波として 1000 から 1500 Hz まで 100 Hz ごとに変化させ 1 秒照射し、合計 2 秒で気体排出を試みた。この実験では 1 mm の外径を持つサンプルを使用し、周囲液体は水で実験を行っ

た。次の実験では第一段階の気体排出過程の詳細な観察を行った。気体で満たされた閉端孔に対し、周波数を 400 から 2000 Hz まで変化させ、それぞれ 1 秒ずつ照射した。この実験の結果からそれぞれの周波数での気体排出率の評価と気体排出過程の観察を行った。この実験では径や材質の異なる 3 つのサンプルを使用し、周囲液体は水またはエタノールで実験を行った。最後に、第二段階の気体排出過程の詳細な観察を行った。第一段階照射後の結果を模擬するためマイクロピペットを用いて孔内に液体を挿入することで分裂気泡を再現し、正弦波を照射した際の様子を観察した。ここでは照射周波数を 1100 Hz に固定して行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 気体排出試験

周波数一定波における正弦波を孔径 1 mm, 孔深さ 10 mm のアクリル樹脂製および石英ガラス製に対してそれぞれ 10 秒照射した場合の気体排出率を図 1 に示す。図 1 より, 600 Hz 程度の音波を照射した場合に最も多くの気体が排出され、またその倍周波数に近い 1400 Hz 付近でも高い気体排出を観察した。一方で, その他の周波数では気体はほとんど排出されなかった。サンプル内の気柱の固有振動数は気体排出率に依存するものの, おおよそ 400 から 800 Hz 程度と見積もられる。このことから, 600 Hz 程度の音波を照射した場合に孔内の共振によって気柱が体積振動し, 気体の排出が促進されたと予想する。しかし, 周波数一定波の照射によっては, いずれの周波数においても完全な気体排出が達成されることはなかった。これは, 排出に伴って気柱の固有振動数が変化するために, 一定の周波数の音波照射では完全な気体排出には至らなかったと考察した。そのため, 周波数が時間変化するような音波の照射が気体排出において有効であると予想した。なお, 濡れ性の良いガラス製のサンプルにおいて若干気体排出率が高い傾向が見られたが, 有意な材料依存性は確認されなかった。

孔径 1 mm, 孔深さ 10 mm のアクリル樹脂製サンプルに対して周波数掃引波を照射した場合の気体排出率を図 2 に示す。このとき, スタート周波数は 200 Hz とし周波数掃引時間は 0.1, 1 および 10 秒とした。図 2 より, 周波数掃引波を照射した場合に, 照射時間が 0.1 秒と極めて短い条件においても 1 から 2 割程度の気体が排出された。また, 1 秒の照射によって 600 Hz の周波数一定波を 10 秒照射した場合と同程度の気体排出が観察された。さらに 10 秒の音波照射によって, 条件によっては完全な気体排出が確認された。以上より, 閉端孔からの気体排出においては, 周波数を時間的に増加させる音波の照射が有効と言える。

##### (2) 気体排出過程の観察

周波数掃引波照射では, 特に 2 つの周波数領域において顕著な気体の排出が観察された。その周波数帯を特定するため異なる周波数一定波を二段階にて照射した。図 3 に二段階照射の結果について示す。第一段階の  $f_1$  (600 Hz) 照射後に排出率は約 5 割となった。そして, 第二段階の  $f_2$  照射により気体排出率は増加し, 特に 1100 および 1200 Hz で高い気体排出率が得られた。この排出過程の可視化結果を図 4 に示す。完全な気体排出を達成した際には, 第一段階の照射により気体の一部が排出され, 気柱の分裂が生じた。次に, 第二段階では, 分裂した気泡が徐々に入口付近の気泡に近づき, 合体した。その後, 合体した気柱が振動して排出された。以上の結果より異なる周波数の音波を二段階で照射することで, 約 1.3 秒で完全な気体排出が達成されることを示した。

次に第一段階の照射後に気柱の分裂にはいくつかのパターンがあることを確認した。このパターンによって完全排出に至るかを調査したところ, (A) 二つの気泡が残る, 気泡と底壁の間に液

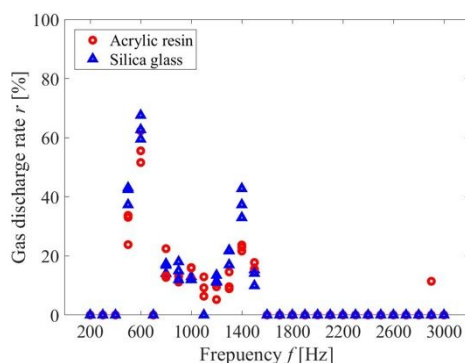


図 1 周波数一定波音波照射時における気体排出率

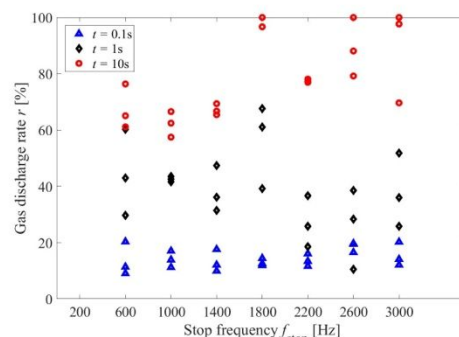


図 2 周波数掃引波照射時における気体排出率

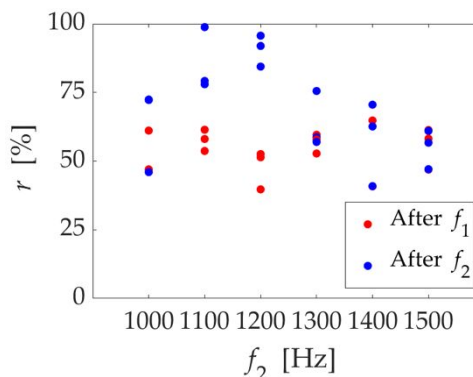


図 3 二段階照射における気体排出率

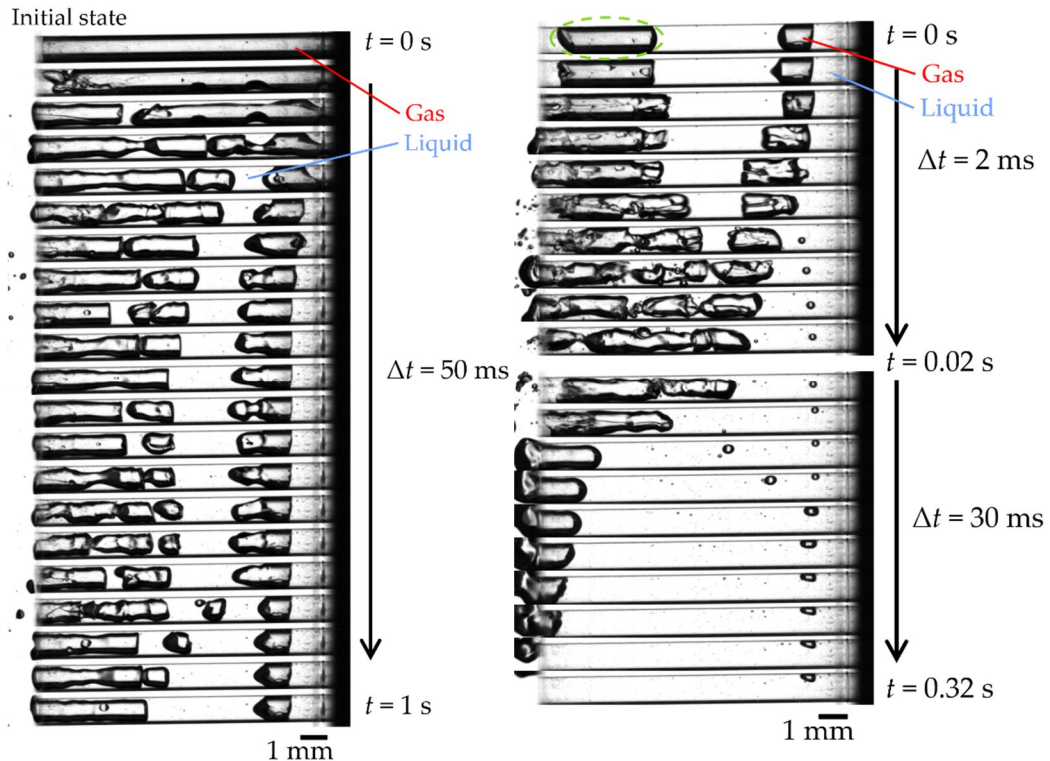


図4 二段階照射における気体排出過程（左：第一段階 600 Hz，右：第二段階 1100 Hz）

体が存在する場合，(B)二つの気泡が残り，気泡の一つが底壁と接触している場合（気泡と底壁の間に液体が存在しない），(C)三つの気泡が残った場合の3つに分けられることが分かった．このとき条件(A)では同様に二つの気泡が接近して合体し，その後排出される様子を確認した．条件(B)では入口付近の気泡は排出されたが，孔の底の気泡は排出されなかった．なおこの気泡は異なる周波数での追加の実験でも排出されなかった．さらに条件(C)では，気泡が底壁に接していても排出された．

これらの結果より，気柱の排出過程は以下の二段階の過程を経ることが分かった．まず，第一段階では気柱が大きく振動し，徐々に排出された．この時気柱は共振していたと予想する．これは液滴列照射による液体侵入（Sanada et al., 2018）と同様のメカニズムである．気柱が収縮する際に気液界面が変形し，液体がジェット流として孔に侵入した．さらに収縮が進むと，液体がちぎれ，液滴として孔内に侵入した．振動により気液界面が大きく変形することで，壁面と気体の間に液膜が形成される．これらの二つの要素により孔内に液体が堆積することで気柱の分裂が生じた．さらに，音波照射による気体排出のみで見られた要素として気泡分裂がある．気柱振動時に気体が孔外に膨張し，収縮時にネッキングが生じ，さらに収縮が進むとちぎれ，気泡として排出された．次に第二段階では孔内の気泡界面の振動周期を調査することにより，孔入口付近の気泡を振動させることが重要であることが示された．孔内の他の気泡は，入口付近の気泡振動によってその振動が誘起されていた．そのため孔内での気泡固有振動数付近の音波を照射することで完全な気体排出に成功した．

#### <参考文献>

- 真田俊之，野崎紘史，渡辺正夫，先端を封じた細管内への圧力による気体圧縮と溶解（微細構造への圧力による液体侵入特性），日本機械学会論文集 2016, Vol. 82, No. 838, p.16-00048.
- 山口えり，真田俊之，液滴列の衝突による微細孔への液体侵入，混相流，2017, Vol. 30, No. 5, pp. 511-518.
- Sanada, T., Furuya, Y., Muraki, S. and Watanabe, M., Observation of liquid infiltration process into closed-end holes by droplet train impingement, Journal of Fluid Science and Technology, 2018, Vol.18, No.3, JFST0012.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Matsumoto Yuta, Mizushima Yuki, Sanada Toshiyuki	4. 巻 13
2. 論文標題 Removing Gas from a Closed-End Small Hole by Irradiating Acoustic Waves with Two Frequencies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 109 ~ 109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/mi13010109	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 古谷 勇貴, 水嶋 祐基, 渡部 正夫, 真田 俊之	4. 巻 34
2. 論文標題 音波照射による閉端円管からの気体排出促進	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 混相流	6. 最初と最後の頁 111-117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3811/jjmf.2020.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 松本 悠汰, 水嶋 祐基, 渡部 正夫, 真田 俊之
2. 発表標題 異なる周波数の音波照射による閉端孔からの気体排出
3. 学会等名 日本混相流シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本 悠汰, 水嶋 祐基, 渡部 正夫, 真田 俊之
2. 発表標題 音波照射による液体中での閉端孔内気体振動およびその排出現象
3. 学会等名 日本機械学会第99期流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 真田 俊之, 水嶋 祐基, 渡部 正夫
2. 発表標題 音波照射による液体中の気柱振動およびその排出現象
3. 学会等名 日本機械学会第98期流体工学部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Sanada, Y. Mizushima, M. Watanabe
2. 発表標題 Gas column oscillation inside a closed-end hole and its expelling by irradiating an acoustic wave
3. 学会等名 The 73rd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Furuya, Toshiyuki Sanada, Masao Watanabe
2. 発表標題 A model for gas column oscillation inside a hole by irradiating an acoustic wave
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME 2019 Joint Fluids Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古谷 勇貴, 水嶋 祐基, 渡部 正夫, 真田 俊之
2. 発表標題 音波照射による閉端円管からの気体排出促進
3. 学会等名 混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------