

令和元年6月17日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06073

研究課題名(和文) 自励振動による単分散液滴列の生成と表面での液膜生成機構の解明

研究課題名(英文) Impingement of monodisperse droplet train and formed liquid film structure

研究代表者

真田 俊之 (Sanada, Toshiyuki)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：50403978

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：液滴列の照射による形成液膜について調査を行った。その結果、液滴列を照射することで、同流量の液ジェットと比較してより低流量のものから跳水が観察され、さらにより大きな跳水直径となるなど、異なる液膜構造が明らかになった。次にこの液滴列を先端の封じられた微細孔へと照射したところ、液体の侵入が促進されることが明らかになった。その侵入プロセスを高速度観察した結果、まず、液滴衝突時に微細孔内の気柱が振動し、この振動によって液滴が生成され、その液滴が堆積することで気柱が分裂した。その後、液滴衝突時の発生圧力によってこの過程が繰り返されることで気体が排出されることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水道から出た水などが衝突した表面で形成される、衝突部周囲のみで液膜が薄くなる跳水現象は、幅広い箇所で観察される。この跳水が液滴を列で衝突させることで、連続的に液体が衝突した場合に比べ液膜構造が大きく異なることを明らかにした。また微細な穴へに対しても、液体を液滴列で衝突させることで簡単に液体を侵入可能とすることが明らかになった。これらの結果によって、なぜ液滴の衝突によって洗浄が促進されるのかについての指針が得られた。またこれまで真空装置などを組み合わせて行っていた洗浄を大気圧下で、非常に簡便な装置で行える可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：We experimentally investigated behavior of liquid film which was formed by a droplet train impact. First, we focus on the diameter of hydraulic jump formed on a circular plate. As a result, the hydraulic jump was observed under the smaller water flow rate condition compare to the liquid column impact. And the jump diameters for the case of droplets impact were greater than that of liquid column impact. Second, we found that liquid infiltration into such small holes is promoted by the impingement of droplet train. Our observations illustrate the importance of the oscillation and deformation of the gas liquid interface inside the holes following droplet impingement. Intermittent droplet impingement causes small droplets or large interface deformations to form, and then the gas column inside the hole becomes separated. This separated gas column is then gradually ejected.

研究分野：機械工学

キーワード：液滴 液膜 液体侵入

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

半導体デバイス製造工程などにおいて、より短時間で、また様々な材料を洗浄するために、洗浄液の化学的作用のみならず、洗浄液そのものを高速で噴射して、その際に得られる物理的作用を援用する手法が一般的となってきた。一方で、表面損傷などを防ぐために、その物理的作用を制御する、すなわち、液滴の径や速度の制御が必要とされるようになった。また、これまでに行われた液滴を衝突させる研究は、そのほとんどが単一液滴を乾燥表面へと衝突させるものがほとんどで、実際の工程に見られるような液膜が存在した表面へ次々と液滴が衝突する条件とは大きく異なっていた。そのため、液滴群が衝突した際に形成される詳細液膜構造などはこれまでに明らかにされていない。さらに液体を使用した洗浄では、凹凸を有する表面を対象とする場合が頻繁にある。その場合には、まず、そのような先端が封じられた構造内へと液体を侵入させる必要があるが、液体が非周期的に衝突した場合に、どのような役割を果たすかは明らかにされていない。

2. 研究の目的

制御された液滴列を生成し、その液滴列を表面へと照射し、表面に形成される液膜構造を明らかにする。また先端が封じられた微細構造に、液滴列照射をした際の液体侵入特性について検討する。

3. 研究の方法

ノズルから噴出させた液体ジェットは、落下に伴いプラトーレイリー不安定性によって液滴列へと遷移する。この際、ノズルにある周波数範囲の振動を印加することで、液滴列を制御することが可能である。そのため、本研究では、ノズルと対象物との距離の変更および振動の付加によって、液滴列において周波数や液滴径の制御の有無や、液滴列と液ジェットとの比較を行った。まず、液滴列照射によって形成される液膜について調査した。ここでは、水とエタノールの液柱および液滴列が円形平板に衝突した場合について、その液体流量および衝突させる平板直径を変更し、形成される液膜構造、特に跳水直径の観察を行った。さらに、先端が封じられた微細構造への液体侵入を調査するため、液滴列および液ジェットを対象サンプルへと照射した際の侵入率の違いを明らかにした。実験装置の概念図および対象サンプルの例を図1に示す。

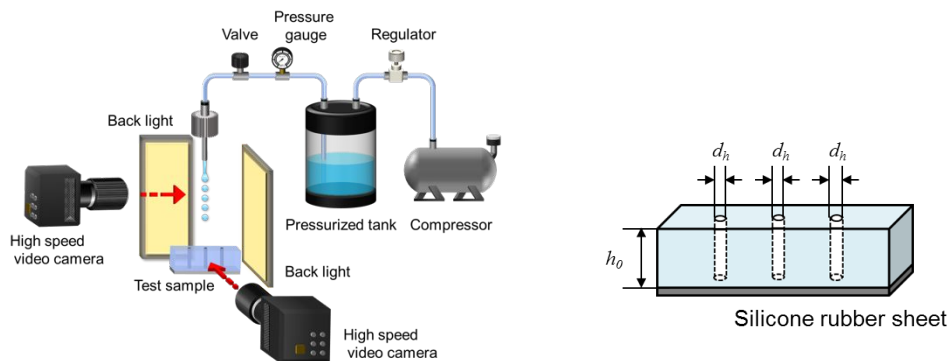


図1 実験装置概念図および使用したサンプル

4. 研究成果

まず液膜構造の観察結果について述べる。液滴列の衝突によっても液柱と同様に跳水が観察された。図2に示すようにその跳水直径は液柱の場合と比較して液滴列衝突の場合に、平板端からの影響のない場合には大きくなった。しかし、表面張力の小さな液体を使用した際には、高流量域において液柱と液滴列衝突による跳水直径の大きさが逆転し、液柱衝突時の方が大きな跳水が形成された。また平板直径を小さくすると、液柱衝突では平板端で液膜厚さが小さくなり、跳水直径が急激に増加した。一方で液滴列衝突の場合、常流の厚さは液柱衝突ほど薄くはならなかった。これらの結果は、液滴衝突時に液柱よりも高速水平方向流れが形成され、さらにその流れによって、液膜内に複雑な流れ構造が形成されたことや、スプラッシュの発生の有無が要因であると予想する。これらの知見は、液膜厚さによって表面のせん断応力分布が大きく異なるため、洗浄範囲に大きく関連すると予想する。

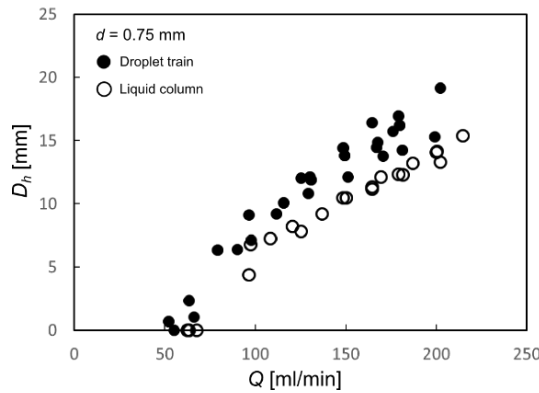


図2 液滴列と液柱によって形成された跳水直径の違い

次に液滴列を先端の封じられた微細構造へと照射した結果について述べる。その結果、1000ヘルツ程度の高周波数で液滴列を照射すると、微細構造内の気体を排出可能なことが示された。しかし液柱や低周波数の液滴列衝突ではそのような液体侵入は確認されなかった。図3に侵入率の違いについて示す。そこで、この液体侵入過程について、詳細に調査を行った。その結果、観察されたプロセスは以下のようなものであった。まず液滴列衝突時に発生した圧力変化によって気液界面が振動し、その界面の先端より液滴が発生した。その発生した液滴が管壁へ付着し、この過程が繰り返されることによって気柱が分離した。また高速液滴衝突時には、直接気液界面が変形することによる気柱分離プロセスも観察された。これらの過程が繰り返され、さらに気柱分離が進み、最終的に排出される気体排出機構が明らかになった。このように気液界面の変形が重要なため、表面張力に低い液体で行った実験の方が、同程度の衝突速度でも侵入率が高くなった。またこの様子は液柱衝突時には観察されなかった。次にこの液滴列による液体侵入促進効果の細管径の違いや液滴列の周波数による影響を調査した。その結果、液滴列による液体侵入促進効果は比較的大きな、すなわち1ミリメートル程度の細管で最も有効であり、0.1ミリメートル程度まで径が小さくなると巻き込み気泡の影響で、液体が侵入しても場合によっては気泡が再度細管内へと取り込まれ、液滴列照射の効果があまり無いことが示された。また加振機によって一定周波数の液滴列と、何も制御しない液滴列を比較して、同程度の衝突速度の液滴列を比較すると、液滴列の周波数を制御しない方が、液体侵入が促進されることが明らかになった。

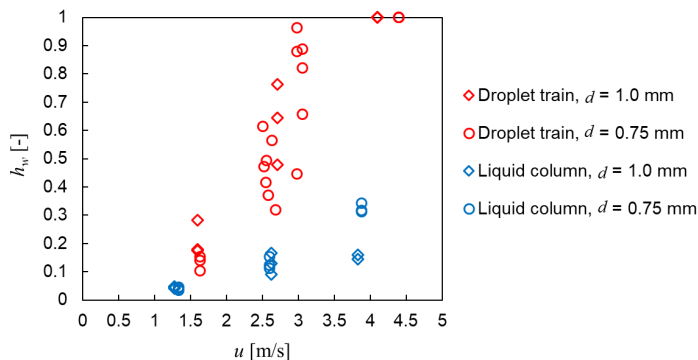


図3 液滴列と液柱による液体侵入率の違い

このように、当初の予想とは異なり、液滴列の制御によって侵入率が低下することが明らかになった。そのため、液滴列の制御では実現困難な、より複雑な圧力振動を印加させるために、音波を使用して水中にある気液界面の制御に挑戦し、微細孔への液体侵入促進について実験を試みた。まず、水中に設置された微細孔にトラップされた気体の固有振動数について、パネー質量系を用いたモデル化を行なった。質量としては孔中を移動する流体と孔から湧き出す流れをモデル化し、気体の圧縮による体積変化をパネとした際の比較から固有振動数を導いた。その結果、液滴列では侵入が困難だった1ミリメートル程度で高アスペクト比の微細孔では、図4に示すように数百ヘルツの固有振動数ということが見積もられた。次にこの見積もられた固有振動数の正当性について評価するために、水中スピーカーを用いて液体中で周波数の異なる音波を先端の封じられた微細孔へ照射し、界面振幅を調査した。その結果、概ね予測したモデル式と界面振幅が最大となる周波数が一致し、提案した固有振動数の正当性を示すことができた。次に、音波を用いて微細孔への液体侵入促進について検討を行った。その結果、固有振動数付近の音波で確かに液体侵入が促進されること、またその侵入機構は液滴列照射と酷似していることが明らかになった。一方で、液中での液体侵入では、気液界面からの液滴生成のみな

らず、孔付近での気泡生成も重要な要因であることが分かった。さらに、周波数掃引を用いることで、液体侵入がより促進されることが示された。

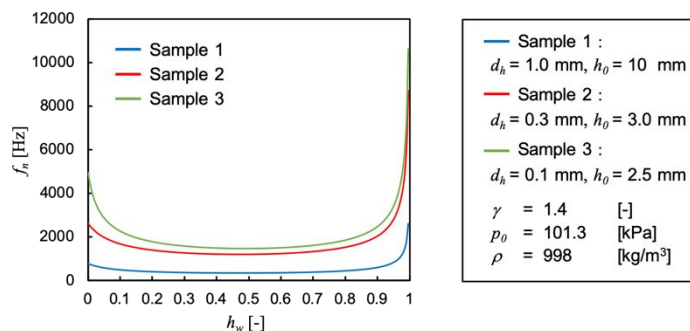


図4 気柱固有振動数の見積もり

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

T. Sanada, Y. Furuya, S. Muraki, M. Watanabe, Observation of liquid infiltration process into closed-end holes by droplet train impingement, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.13(3), JFST0012, 査読有 (2018).
DOI:10.1299/jfst.2018jfst0012

村木駿介、山本翔也、真田俊之、渡部正夫、円形平板への液滴列衝突による形成液膜の観察、日本機械学会論文集、Vol.83, No.848 p.17-47、査読有(2017).
DOI:10.1299/transjsme.17-00047

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、30 巻 5 号、511-518、査読有 (2017).
DOI: 10.3811/jjmf.30.511

〔学会発表〕(計 1 1 件)

古谷勇貴、真田俊之、渡部正夫、音波照射による閉端円管内への液体侵入、混相流シンポジウム 2018、2018 年 8 月 8 日、東北大学(宮城県仙台市)

S. Muraki, T. Sanada, Impingement of a droplet train enhance the liquid infiltration into closed-end holes, The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2017 年 10 月 30 日、沖縄コンベンションセンター(沖縄県宜野湾市)

E. Yamaguchi, H. Nozaki, T. Sanada, Liquid infiltration characteristics into closed end structures under the external pressure, 9th International Conference on Multiphase Flow, 2016 年 5 月 24 日、フィレンツエ(イタリア共和国)

他 9 件

6. 研究組織

- (1)研究分担者 なし
- (2)研究協力者 なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。