

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04903

研究課題名（和文）液滴と固体表面との衝突における接触面での圧力及びせん断力分布の直接計測

研究課題名（英文）Direct measurement of pressure and shear stress distribution on the contact area of a droplet impacting a solid surface

研究代表者

グエン タン・ヴィン（Nguyen, Thanh-Vinh）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究員

研究者番号：20773427

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 17,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、MEMSピエゾ抵抗型カンチレバーアレイを用いて微小液滴と固体表面との衝突において液滴の接触面に発生する圧力分布を直接計測できる手法を実現した。計測結果から衝突速度と液滴のサイズが液滴衝突における接触面の最大圧力に及ぼす影響を明らかにした。また、提案したセンサの信号から液滴の衝突におけるバブル発生の検知及びバブルのサイズの推定が可能であることを示した。さらに、液滴と超撥水性のブレードとの衝突の計測と液滴融合の計測も行った。液滴融合の計測結果から、センサの出力から液滴粘性と表面張力が推定できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、液滴衝突における接触面の力分布が定量的に明らかになり、従来の理論モデル及び数値解析の結果を検証できるので、液滴衝突のメカニズムの解明に貢献できたといえる。また、計測結果から液滴衝突におけるバブルの発生の検知方法及びバブル発生防止の手法が確立され、インクジェットプリンティングや液滴パターニング等の分野への応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have developed a method to directly measure the pressure distribution at the contact area of a droplet impacting a solid surface using a MEMS piezoresistive cantilever array. From the measurement results, the effects of the impact velocity and the droplet size on the maximum pressure at the contact area in the impact are clarified. It is also shown that the proposed sensor signal can be used to detect bubble entrapment and estimate the bubble size during droplet impact. We also measured the impact of droplets with a superhydrophobic blade and droplet merging. From the measurement results of droplet merging, it is shown that the viscosity and surface tension of the droplet can be estimated from the sensor output.

研究分野：流体計測

キーワード：液滴 衝突 超撥水 圧力分布 MEMS 力センサ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

液滴と固体表面との衝突は、自然界ではよく見られる現象であり、また、インクジェットプリンティング、3D バイオプリンティング、スプレー各種、無針注射、噴流洗浄といった様々な産業にも深い関連がある。このため、液滴と固体表面との衝突メカニズムの解明は学術的に意味深いだけでなく、産業・工学応用としても期待されている。液滴衝突は、衝突速度・角度、液滴の表面張力・粘性や固体表面の濡れ性といった様々な要因が関連する複雑な現象である。

液滴が固体表面に衝突する際、最初の段階において液滴の下部が接触面でせき止められるため、接触面に圧力が発生する。同時に、せき止められて行き場を失った液体が横に流れるため、接触面が横に広がると共に、その広がりを妨げる方向にせん断力が発生する。接触面が最大になった後、表面張力によって液体が液滴の中央に引っ張られ、液滴内部では広がり段階とは逆の方向の流れが発生し、接触面のせん断力の方向も逆になる。このように、液滴と固体表面との衝突の全過程において、液滴の運動の境界条件は両者の接触面に働く圧力及びせん断力であるので、衝突挙動を解明するためには、接触面での圧力及びせん断力の分布を定量的に明らかにすることが重要である。しかし、液滴の接触面は数 mm^2 以下といった非常に狭い面積に限られるため、その力の分布を直接計測することは困難であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、液滴と固体表面との衝突における接触面での力の分布の直接計測を実現することで、液滴が固体表面に衝突する際の力学モデルを構築することである。また、衝突速度、液体のサイズ等のパラメータを変えて計測を行うことで、接触面の力分布と液滴の挙動との関係を明らかにする。

3. 研究の方法

固体表面に微小な MEMS (MicroElectroMechanical Systems) をベースにしたピエゾ抵抗型力センサアレイを密に形成し、微小液滴が基板に衝突する際、液滴の接触面の圧力分布の直接計測を可能とする。また、力計測と同時に高速度カメラを用いて液滴の振る舞いの観察を行い、液滴の接触面に発生する力の分布と液滴の振る舞いとの関係を明らかにする。

申請者はこれまでに固体表面に力センサアレイを配置し、固体表面での微小液滴の運動を直接計測できる手法を初めて実現した。製作した力センサの大きさは数十 μm 程度と非常に小さいため、微小液滴の接触面に密に配置することが可能となった。2 軸力センサはマイクロピラーとそれを支えるシリコン構造から構成されている。計測原理はマイクロピラーに働く圧力及びせん断力はシリコン構造に形成された 2 つピエゾ抵抗の抵抗値の変化率から求めることができる。また、センサの計測分解能は数 nN 程度であり、液滴の振動や滑りにおける接触面の力分布の計測に十分な感度を持つことを実証した。さらに、センサ構造の設計を変えれば、センサの感度及びダイナミックレンジの変更が可能であるので、MEMS 力センサを用いた計測手法は液滴の振動や滑りに留まらず、より速い現象である液滴衝突の計測にも適用できる。

4. 研究成果

●液滴衝突における接触面の圧力分布

液滴の接触面に発生する圧力の分布を計測するためにピエゾ抵抗型カンチレバーアレイを試作した (図 1)。センサのサイズと厚みはそれぞれ $30\mu\text{m}$ と 300nm であった。試作したセンサアレイを用いて液滴衝突における接触面の圧力の分布の計測を行った。液滴とセンサ基板との衝突速度を 0.2 m/s から 2 m/s までの範囲に調整し液滴の接触面における圧力分布の計測を行い、圧力の最大値と衝突速度との関係を検証した。例えば、液滴の直径が 1.3mm で衝突速度が 1m/s の場合の計測結果を図 1(b) に示す。計測結果から衝突において、液滴が基板と接触した直後に圧力が接触面の中央において最大になることが分かった。また、図 1(c) に示すように、液滴と固体表面との衝突において接触面に発生する圧力の最大値は衝突速度の二乗に比例することがわかった。この関係は動圧と一致するが、衝突による最大圧力は動圧より十倍程度大きかったことがわかった。さらに、同じ衝突速度について、液滴のサイズが大きくなると衝突による接触面の最大圧力が大きくなることがわかった。この傾向をさらに検証するために液滴を超撥水メッシュに衝突させ、液体がメッシュに通過する最小の速度を計測した。計測結果から、液滴のサイズが大きくなると、その最小速度が小さくなることが明らかになり、衝突における接触面の最大圧力が液滴のサイズに依存することを示した。

●液滴衝突における気泡の発生

次に、試作したセンサアレイを用いて、液滴衝突における気泡の発生メカニズムを解析した

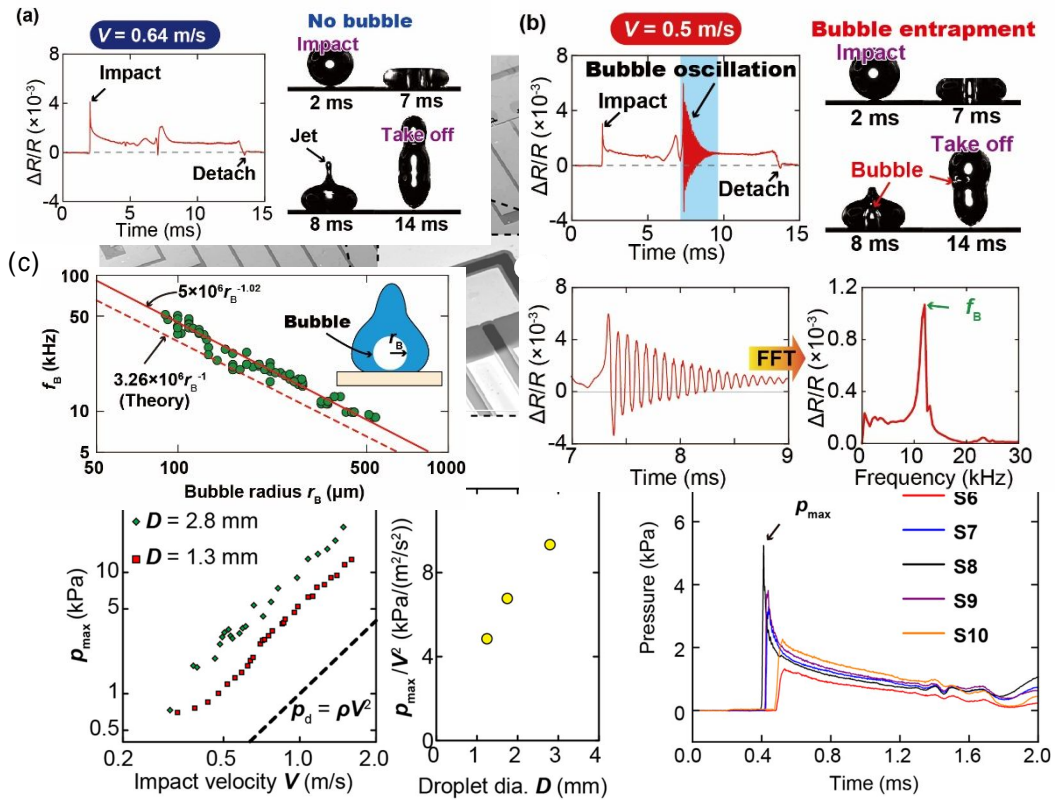


図 1：液滴衝突における接触面における圧力の分布の計測

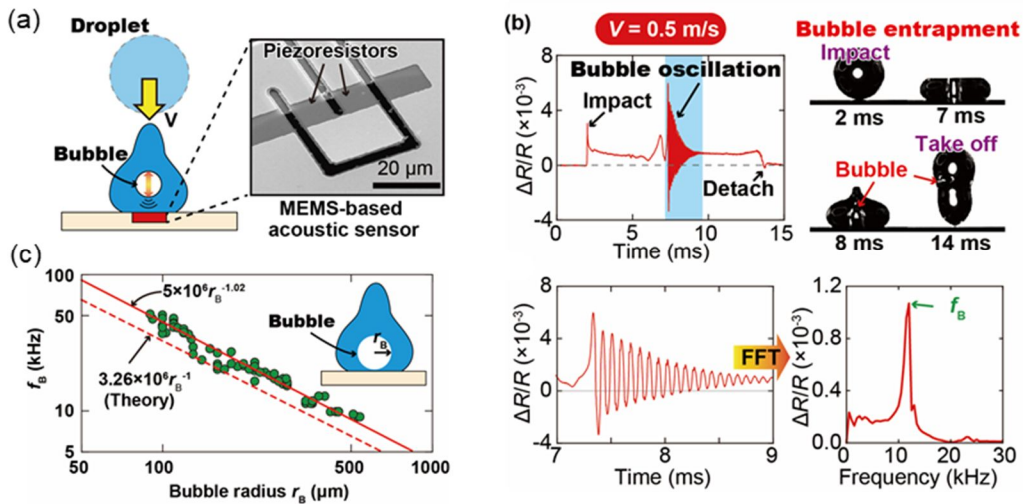


図 2：液滴衝突におけるバブルの発生の計測

(図 2(a))。上記の実験において、微小液滴が超撥水表面に衝突する際、ある範囲の Weber number において、衝突の過程で液滴の内部に泡は閉じ込められた現象を発見した。この現象を力センサで計測することで、現象の発生メカニズムを解析し、また、超撥水表面の微細構造の寸法を変え、計測を行うことで、微細構造のサイズが現象の発生に及ぼす影響を調べた。計測結果から、Weber number が 6-12 範囲において液滴衝突の spreading phase (衝突後に液体が表面に広がる段階) では、液滴の表面に表面張力波 (capillary wave) が発生し、その結果、液滴が完全に広がった時点において液滴の中央が凹んだ形状となり、場合によってはセンサに働く力が 0 になったため、液体が下の表面から完全に離脱したと推定できる。また、高速度カメラを用いた観察結果から液体が中央に戻る段階において、液滴の上部の液体が液滴の下部より速く戻るにより、液滴の中央に気泡が閉じ込められたことがわかった。その時、気泡の直下のセンサの出力に高い周波数の振動が確認でき、振動の周波数が気泡のサイズと反比例することがわかった。この結果から、試作した MEMS 力センサで液滴衝突における気泡の発生を検知でき、また、気泡のサイズを推定できることを示した。さらに、表面の微細構造の高さや間隔が大きくなると、気泡が発生しなくなったことを確認した。接触面の観察の結果から、その原因は微細構造が高さや間隔が大きくなると、中央に閉じ込められた空気が接触面に逃げられたため、気泡の発生を防ぐことができることを示した。この研究成果に関する論文が *microsystems & nanoengineering* 誌に掲載された。

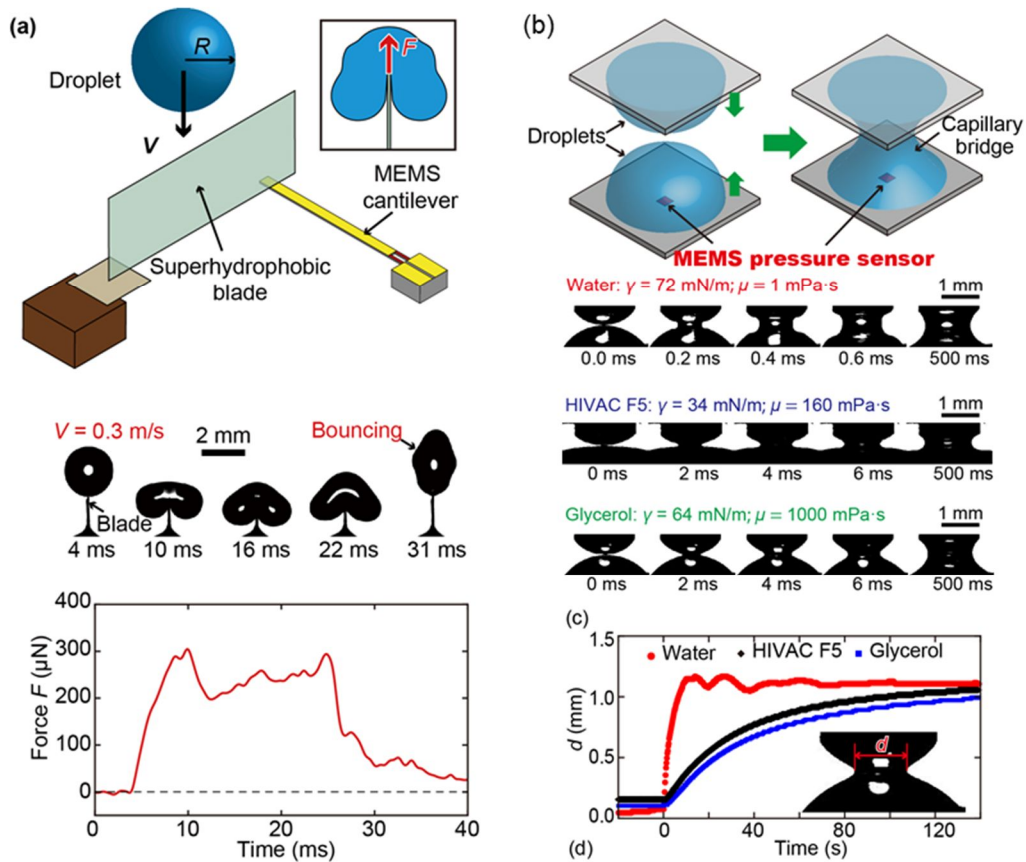


図 3 : 液滴と超撥水性のブレードとの衝突の計測及び液滴の融合の計測

●液滴と超撥水性のブレードとの衝突の計測及び液滴の融合の計測

また、試作した MEMS 力センサを用いて、液滴が超撥水性のブレードに衝突した時の力を直接に計測した (図 3(a))。計測結果から液滴がブレードにより cut される条件を表す理論式を確立し、実験の結果で式の妥当性を確認した。さらに、MEMS 力センサを用いて液滴同士が融合した時の液滴の内部の圧力変化の直接計測を行い、センサの出力から液滴の表面張力及び粘性係数を推定できることを示した (図 3(b))。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Thanh-Vinh Nguyen, Yuya Mizuki, Takuya Tsukagoshi, Tomoyuki Takahata, Masaaki Ichiki, and Isao Shimoyama	4. 巻 20
2. 論文標題 MEMS-Based Pulse Wave Sensor Utilizing a Piezoresistive Cantilever	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 1052-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s20041052	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 Thanh-Vinh Nguyen, Masaaki Ichiki	4. 巻 19
2. 論文標題 “ MEMS-Based Sensor for Simultaneous Measurement of Pulse Wave and Respiration Rate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 4942-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s19224942	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 Thanh-Vinh Nguyen, Masaaki Ichiki	4. 巻 1
2. 論文標題 Detection and Control of Bubble Entrapment During the Recoil Phase of Droplet Impact	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 IEEE 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)	6. 最初と最後の頁 46-49
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/MEMS46641.2020.9056445	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sinwoo Cho, Thanh-Vinh Nguyen, Norihisa Miki, Hidetoshi Takahashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Pipette Based Viscometer with Pressure Sensor Element	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 IEEE 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)	6. 最初と最後の頁 646-648
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/MEMS46641.2020.9056273	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Thanh-Vinh Nguyen, Masaaki Ichiki	4. 巻 1
2. 論文標題 Simultaneous Measurement of Pulse Wave and Respiration Using a Single Tube-Shaped MEMS-Based Pressure Sensor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 IEEE 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)	6. 最初と最後の頁 84-87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/MEMS46641.2020.9056372	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Thanh-Vinh Nguyen, Isao Shimoyama	4. 巻 1
2. 論文標題 Maximum Pressure Caused by Droplet Impact is Dependent on the Droplet Size	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII)	6. 最初と最後の頁 813-816
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808780	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 2.Thanh-Vinh Nguyen, Ryota Tanii, Tomoyuki Takahata, and Isao Shimoyama	4. 巻 285
2. 論文標題 Development of a single-chip elasticity sensor using MEMS-based piezoresistive cantilevers with different tactile properties	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A Physical	6. 最初と最後の頁 362-368
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2018.11.020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Timothee Mouterde, Thanh-Vinh Nguyen, Hidetoshi Takahashi, Christophe Clanet, Isao Shimoyama, and David Quere	4. 巻 3
2. 論文標題 How merging droplets jump off a superhydrophobic surface: Measurements and model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 112001-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.2.112001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Nguyen Thanh-Vinh
2. 発表標題 Mems-Based Piezoresistive Sensors for Healthcare and Infrastructure Monitoring
3. 学会等名 The 3rd International Workshop on MEMS and Sensor System 2019 (IWMS 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nguyen Thanh-Vinh
2. 発表標題 Bio-Inspired MEMS device
3. 学会等名 The Vietnam Japan Scientific Meeting (VJST2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nguyen Thanh-Vinh, Yuya Mizuki, Tomoyuki Takahata, and Isao Shimoyama
2. 発表標題 Highly Sensitive Pulse Wave Sensor using MEMS Piezoresistive Cantilever
3. 学会等名 第36回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nguyen Thanh-Vinh, and Isao Shimoyama
2. 発表標題 Probing droplet dynamics using MEMS tools
3. 学会等名 The 11th Vietnam Japan Scientific Exchange Meeting (VJSE2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nguyen Thanh-Vinh, and Isao Shimoyama
2. 発表標題 MEMS-based piezoresistive force sensors for measuring and controlling droplet dynamics
3. 学会等名 The 2nd International Workshop on MEMS and Sensor System 2018 (IWMS 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuya Mizuki, Thanh-Vinh Nguyen, Tomoyuki Takahata, and Isao Shimoyama,
2. 発表標題 Highly sensitive pulse wave sensor with a piezoresistive cantilever inside an air chamber
3. 学会等名 The 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nguyen Thanh-Vinh, and Isao Shimoyama
2. 発表標題 Controlling the Motion of Impacting Droplets using MEMS-based Force Sensors
3. 学会等名 The 35th SENSOR SYMPOSIUM on Sensors, Micromachines and Applied Systems
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Thanh-Vinh Nguyen and Isao Shimoyama
2. 発表標題 Reducing the contact time of droplet impact by active control of substrate motion
3. 学会等名 The 31th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryota Tanii, Thanh-Vinh Nguyen, Tomoyuki Takahata and Isao Shimoyama
2. 発表標題 Elasticity sensor using different tactile properties on one chip
3. 学会等名 The 31th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Thanh-Vinh Nguyen, Hidetoshi Takahashi, and Isao Shimoyama
2. 発表標題 Measuring droplet vibration using a mems-based pressure sensor
3. 学会等名 2017 ANNUAL Conference Flow17 for Microfluidic (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Timothee Mouterde, Thanh-Vinh Nguyen, Hidetoshi Takahashi, Christophe Clanet, Isao Shimoyama and David Quere
2. 発表標題 On the physics of jumping droplets
3. 学会等名 2017 ANNUAL Conference Flow17 for Microfluidic (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hidetoshi Takahashi, Norimasa Namioka, Thanh-Vinh Nguyen, Tomoyuki Takahata, Kiyoshi Matsumoto and Isao Shimoyama
2. 発表標題 Is there oscillation of ground reaction force during walk of small ants?
3. 学会等名 SEB Annual Main Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi Saito, Nguyen Thanh-Vinh and Isao Shimoyama
2. 発表標題 A gas sensor using capillary waves on ionic liquid droplet,
3. 学会等名 The 34th SENSOR SYMPOSIUM on Sensors, Micromachines and Applied Systems
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 気泡検出装置、気泡検出方法および そのプログラム	発明者 ゲンタンヴィン、 岡田浩尚、一木正 聡	権利者 国立研究開発法 人 産業技術総合 研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願 2019-228192	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 粘度計	発明者 ゲンタンヴィン、 岡田浩尚、他3名	権利者 国立研究開発法 人 産業技術総合 研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願 2019-238666	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

所属ユニット https://unit.aist.go.jp/ssrc/index.html http://www.leopard.t.u-tokyo.ac.jp/publication-international.html
--

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
---------	---------