

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 11 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13917

研究課題名(和文) 微小場空間内における高エネルギー渦輪生成と輸送による機能創発

研究課題名(英文) Emerging functions of production and transportation of high-energy vortex ring in finite space

研究代表者

山西 陽子 (Yamanishi, Yoko)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：50384029

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では気泡噴出部材から噴出した微細な気泡を、親気泡に衝突させるといった新しい方法論を用いて渦輪の発生及びその機能創発について研究を行った。まず力計測光ピンセットにより、発生させた気泡の気液界面の付着力について評価を行い、電界誘起で発生させた気泡が他種気泡よりも気液界面の付着力が大きい結果を得ることができた。次にこのような高エネルギーを有する微小渦輪を有効利用するために複数の渦輪を2次元チップ上に多筒式に発生させ、より大面積の微細な壁面を高効率に洗浄・反応させる技術の構築を行った。この研究は微小空間内の高効率洗浄技術に繋がるだけにとどまらず、冷却技術や、新材料創成等に貢献すると考える。

研究成果の概要(英文)：This research is based on our proposed patent "Vortex ring generation by finite space". The vortex ring is generated by single high-speed bubbles which penetrate the previously generated larger mother bubble. This research has started to evaluate the adsorption force on the air-liquid interface of electrically induced bubbles. Force sensing optical tweezer has been employed to evaluate the adsorption force. The measurement results show the electrically-induced bubble has largest adsorption force compare to the other bubbles with same diameter. To increase the cleaning efficiency of vortex ring, multiple bubble generation chip has been fabricated by MEMS process. The several bubble generators have been successfully installed by limited space, and high density of bubble can be generated. This research contributes not only for high efficient cleaning technology but also cooling technology, high efficient reactive field and minimally-invasive 3D processing, and so on.

研究分野：Micro-nano engineering

キーワード：BioMEMS MicroTAS マイクロナノ工学

1. 研究開始当初の背景

近年、マイクロ流路が形成されたマイクロリアクター及び分析チップ、マイクロ流路・反応室・混合室等が形成されたマイクロTAS等、フォトリソグラフィ技術を利用した微細なチップの開発が進められている。フォトリソグラフィ技術の向上により、マイクロ流路・反応室・混合室等の大きさ(幅)は非常に小さくすることができるが、その一方で、液体の表面張力の影響や層流場が支配的な微細部位で試薬を均一に混合することが難しいという問題がある。更に、チップを再利用する場合、微細部位の壁面に付着した汚れの洗浄方法等についても有効な方法は知られていない。また、内視鏡等の生体内に挿入する医療用デバイスの分野においては、内蔵する精密機器の関係上、オートクレーブ等の高温高圧殺菌をすることができない機器がある。これら機器の殺菌方法としては、薬液に浸漬する方法が知られている。しかしながら、単に薬液に浸漬するのみでは、例えば、内視鏡の鉗子チャンネルや送液管等の細管の細部には薬液が浸透しにくい場合がある。上記問題点を解決する為、電解液の化学変化を利用して気泡を発生させ、発生した気泡で内視鏡の細管の内面を洗浄する装置が知られている。また、オゾンナノバブル水に超音波を放射してナノバブルが圧壊する際のエネルギーにより細管を洗浄する方法も知られている。このような方法は、発生した気泡を細管にあてて洗浄することや、気泡を破壊した際に発生するエネルギーにより、汚れ等を物理的に除去して洗浄している。しかしながら、この方法は、気泡を当てたり、圧壊エネルギーで汚れを単に落としているに過ぎず、例えば、気泡が回転する等、汚れを擦り落とす等の動きをするわけではない。微細部位での液体の攪拌や洗浄等のために、単に気泡を当てることによって圧壊するのみでなく、例えば、回転しながら移動する等、従来にはない動きをする気泡が攪拌・洗浄には好ましいと思われるが、現在のところ、そのような気泡の発生方法・手段は知られていない。申請者はこれまで先端にバブルリザーバを設けた特殊構造を持つマイクロガラス電極から指向性を持つ高速かつ単分散のマイクロ・ナノスケール気泡列(高速気泡ジェット)発生現象を発見した(特許第5526345号)。これを対象物に当てることによる圧壊現象(キャビテーション現象)により、これまで加工が困難であった大気圧液中下の高分子ポリマーや生体組織を低侵襲三次元加工することに成功している。申請者はこの発明を利用し気泡噴出部材から噴出した高速な微細な気泡を、事前にポンプ等で供給して用意した親気泡に衝突させることで、中空のリング状であって且つ回転している気体の輪である渦輪を微小空間場に発生できることを新たに見出した。(特願2014-201439、渦輪発生装置、該渦輪発生装置を含む洗浄装置、出願日

2014年9月30日)。

本研究期間内において微細空間に作成した気泡を、超高速な気泡ジェットにより打ちぬく構造の最適化を行い、これまで困難であった微細な空間場でより過度の高い安定した渦輪生成とその輸送方法を明らかにする。さらにはこのような高エネルギーを有する微小渦輪を有効利用するために複数の渦輪を2次元チップ上に多筒式に発生させ、より大面積の微細な壁面を高効率に洗浄・反応させる技術の構築を行う。

本研究は、これまでわからなかった微小空間内反応場生成による新材料創成など新しい科学的発見が十分期待できる研究であり、高効率洗浄技術・3次元加工・材料創成分野において新しい学際領域創成に貢献できる技術である。

2. 研究の目的

本課題では代表者が発明し特許を申請している「微小空間内渦輪生成技術(特願2014-201439)」のシーズを活用し、気泡噴出部材から噴出した微細な気泡を、親気泡に衝突させるといった新しい方法論を用いて中空のリング状であって且つ回転している気体の輪である渦輪を微小空間場に発生させ安定に輸送することを目標とする。この電界誘起で発生した気泡は、静電気を帯びており、界面の静電吸着力によって汚れや反応試薬を吸着することができる大きな利点を有しており、(1)本研究ではまずその評価を行う。次に(2)このような高エネルギーを有する微小渦輪を有効利用するために複数の渦輪を2次元チップ上に多筒式に発生させ、より大面積の微細な壁面を高効率に洗浄・反応させる技術の構築を行う。この研究は微小空間内の高効率洗浄技術に繋がるだけにとどまらず、温度差を利用した微小空間内の冷却技術や、微小空間内反応場生成による新材料創成、渦輪界面上のせん断流れを利用した低侵襲3次元加工技術などへの実用化に繋がる道筋をつけ、革新的な微小空間内機能性界面生成技術の構築を目標とするものである。

3. 研究の方法

初年度は電界による高速発射気泡技術を向上させ、安定かつ持続的な渦輪を発生させ、微細流路後流部に至るまで輸送させる技術を完成させる。渦輪回りに発生する回転流れは、マイクロ流路壁面上に強力なせん断流体力を発生させ従来困難とされていた壁面洗浄を大幅に向上する可能性があるため、初年度は渦輪回りに発生する流体力や過度、せん断力などを計測・解析・評価し、洗浄・反応効果の確認を行う。その評価結果とともに流路や電極構造設計を最適化し、より高効率で強力な渦輪を発生させるデバイスを完成させ、現在数百 μm の直径を有する渦輪の最大直径を数 μm ~数十 μm 程度にスケールダウンを目指し、これまでになかった強力なエネ

ルギーを有する渦輪を輸送することを目標とする。また、より効果的な洗浄能力向上を達成するために、気泡の気液界面の付着力の評価についても行うものとする。具体的には電界放電気泡と通常気泡との気泡界面の静電吸着力の差について、力計測機能を有する光ピンセット等を用いて実測し、界面吸着力の向上のための電圧設定についての評価についても行うものとする。また、砥粒や化学薬品とともに渦輪を生成させることによる洗浄や反応性向上の検証実験を進める。

次に、流体力を計測・解析・評価した結果を元に最適化された渦輪生成デバイスを用いて、広く産業応用できる実用化への実験を行うものとする。まず渦輪発生デバイスを2次元チップ上にパターンニングすることにより、多筒式として複数の渦輪を発生させ、より大面積の微細な壁面を短時間で高効率に洗浄・反応させる技術の構築を行う。

4. 研究成果

(1) 気液界面の吸着力の評価

電界誘起気泡インジェクタによって打ち出された気泡の気液界面に発生する、静電的な力により誘引される関係について基礎的な評価を行った。基礎評価実験の実験セットアップ図を図1に示す。力センシング機能付きの光ピンセット等(Nanotracker2, JPK Instruments)を用いて、誘引力の評価を行った。光ピンセットは光の放射圧によってレーザに当たっている微小体をトラップすることができる。そして、レーザの電位的なずれをフォトダイオードで検出することによりその微小体にかかる力の測定を行うことができる。この研究ではキャピテーションによって発生した気泡や電気分解によって発生した気泡などとタンパク質結晶との間にどのような力が働いているのか評価するものである。

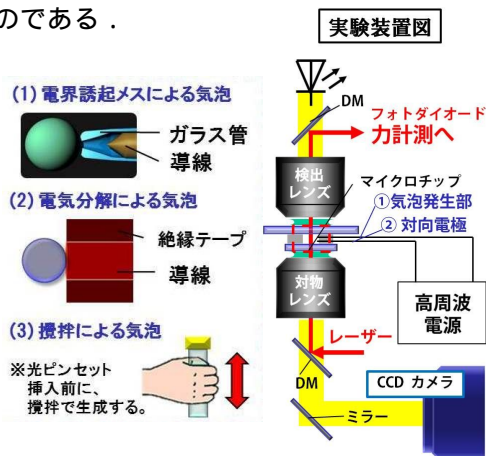


図1. 気泡による液中試薬輸送基礎実験

実験では攪拌によって作成した気泡、電極のみによる電気分解による気泡、ガラス絶縁管に覆われ先端に空隙のある電界誘起気泡メスより発射された気泡の3条件による気泡生成方法によって評価した。まずトラップ対

象物として透明かつ把持しやすいタンパク質結晶を用いて光トラップし、位置固定した気泡界面へ向かって往復運動をさせることにより(図2)、反力より誘引力を推定することとした。結果として3種の気泡による条件の違いについては図3に示す通り、攪拌で作成した気泡の誘引力に比較して、電気分解及び電界誘起気泡で作成した気泡の誘引力が遥かに大きいことがわかった。この詳細な要因について詳細な物理・科学的な測定実験を今後行っていく予定である。少なくとも本評価実験においては、電界を印加した気泡には誘引力があり、それは試薬等を附着させて液中を輸送する効果が期待できることがわかった。

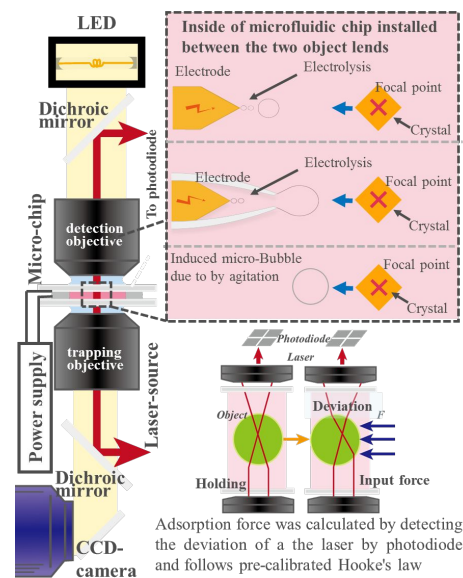


図2. 力センシング機能付き光ピンセットによる試薬と気泡界面の誘引力評価のための基礎実験セットアップ図

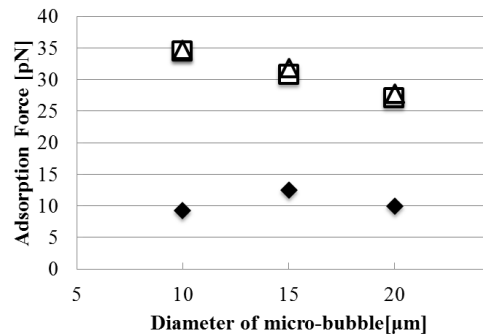


図3. 気泡径とマイクロ気泡直径との関係(○はコントロール(攪拌による気泡)、△はむき出しの電極、□はガラス絶縁管で覆われ先端に空隙のある電界誘起気泡メスから発射した気泡の条件)。

(2) 渦輪生成と多筒式発射機構について

図4に電界誘起気泡の発射概念図について示す。放電の威力を用いて微小空間内における新しい界面生成の原理を用いるものであり、気泡噴出部材から噴出した微細な気泡を、事前にポンプ等で供給して用意した親気泡に衝突させるといった新しい方法論の提案

を行うものである。(1)で評価したように電界誘起で発生した気泡は、静電気を帯びており、気液界面内部においては負に帯電していることより、界面の静電吸着力によって汚れや反応試薬を吸着することができる大きな利点を有している。

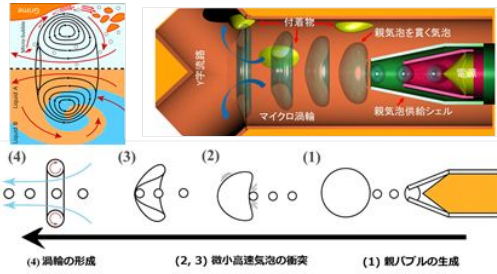


図 4. 高速発射微細気泡による渦輪生成概念図

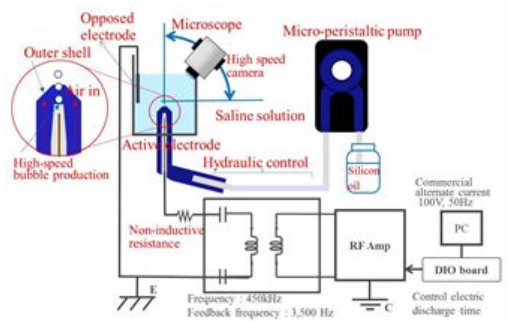


図 5. 高速発射微細気泡による渦輪生成観察実験セットアップ図

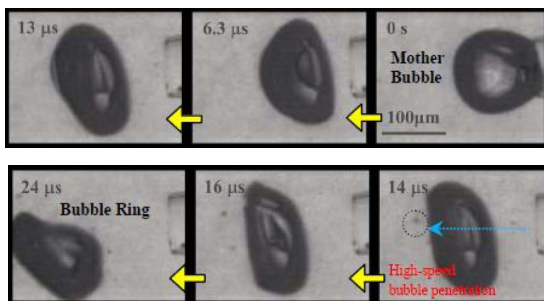


図 6. 微小空間内渦輪生成基礎実験結果 (高速度カメラによる撮影)

壁面からの距離X	300 μm	600 μm
壁面からの距離Y	170 μm	155 μm
最大流速	4.5 mm/s	2.5 mm/s
最大壁面せん断応力	0.015 N/m ²	0.004 N/m ²

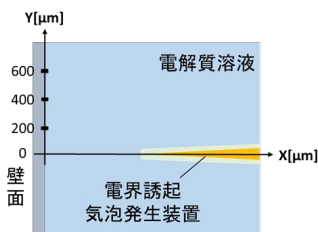


図 7. 電界誘起気泡による流体力評価

図 5 と図 6 に渦輪発生のためのセットアップ図並びに渦輪発生時の連続写真を示す。気泡

発射のタイミングをコントロールすることにより親気泡を撃ち抜く形で渦輪を発生することに成功した。またその洗浄能力等々を評価するために気泡発射時に気泡と気泡周りの流体に発生する流体力を計測した。図 7 に基本的な壁面せん断力を計測した結果を示す。

さらに、このような高エネルギーを有する微小渦輪を有効利用するために複数の渦輪を 2 次元チップ上に多筒式に発生させ、より大面積の微細な壁面を高効率に洗浄・反応させる技術の構築を行った。図 8 に示すのは 2 次元基板上に MEMS 技術を用いて作製した多筒式気泡生成チップの写真である。垂直上方へ打ち出すことにより、初案である従来 2 次元水平方向発射時よりも壁面への気泡付着を防ぎ、スムーズに発射できることを確認した。

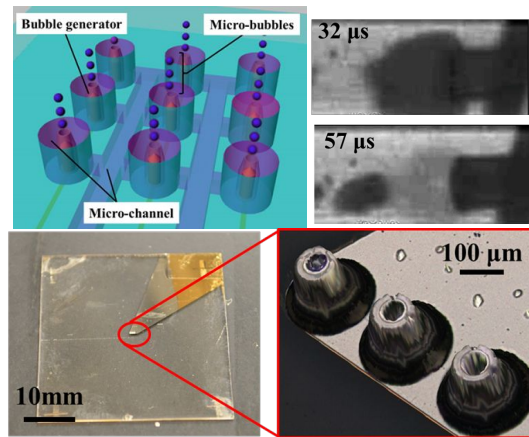


図 8. 2 次元多筒式気泡発射チップ

本研究は微小空間内の高効率洗浄技術に繋がる技術にとどまらず、温度差を利用した微小空間内の冷却技術や、微小空間内反応場生成による新材料創成、渦輪界面上のせん断流れを利用した低侵襲 3 次元加工技術などへの実用化に貢献すると考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Naoyuki Kurake, Hiromasa Tanaka, Kenji Ishikawa, Kae Nakamura, Hiroaki Kajiyama, Fumitaka Kikkawa, Masaaki Mizuno, Yoko Yamanishi, and Masaru Hori, “Synthesis of calcium oxalate crystals in culture medium irradiated with non-equilibrium atmospheric-pressure plasma”, Applied Physics Express 9, 096201, (2016).

山西陽子, “電界誘起気泡による針なし注射器”, 自動車技術, 69(4), pp.86-87, (2015).

〔学会発表〕(計 11 件)

神林 卓也, 濱野 洋平, 山西 陽子, “3 次元マイクロアレイ電極誘起気泡によるイン

ジェクションデバイス”,日本機械学会第7回マイクロ・ナノ工学シンポジウム(2015.10.28-30, 新潟), 29pm3-PN-031, 10月29日,2015.

嶋村 恭敏, 高澤 曹, 山西 陽子, “液中高速発射気泡を用いた微小渦輪生成”, ROBOMECH 2015 in Kyoto, (社)日本機械学会口ボメカ部門, (2A2-Q07), 京都,みやこめっせ, 5月19日, (2015)

神林 卓也, 濱野 洋平, 山西 陽子, “マイクロアレイ電極による多筒式インジェクション”, ROBOMECH 2015 in Kyoto, (社)日本機械学会口ボメカ部門, (2A2-Q08), 京都,みやこめっせ, 5月19日, (2015)

So Takasawa, Shun Hosoda, Yoko Yamanishi, “Evaluation of Attractive Force on Air-Liquid Interface for Protein Crystallization”, ISMM 2015, Kyoto, (0-01). (発表日: 2015.6.8)

Takudo Shu, Takasawa, Yoko Yamanishi, “Rounding of Protein Crystal by High-Speed Bubble Jet in Microfluidic Chip”, ISMM 2015, Kyoto, (PM-04). (発表日: 2015.6.8)

“Investigation of Molecular Condensation on Air-liquid Interface for Protein Crystallization”, So Takasawa, Shun Hosoda, Yoko Yamanishi, Transducers 2015, Anchorage, Alaska, (T3E.001), p.440-443. (発表日: 2015.6.23)

“電界誘起気泡メスによるマイクロ流路内タンパク質結晶加工”, 周 澤道, 高澤 曹, 山西 陽子, 田中秀明, 栗栖源嗣, 電気学会 E 部門総合研究会, (BMS - 15 - 039), (2015.7.3).

濱野 洋平, 神林 卓也, 山西 陽子, “高速発射気泡による多層界面輸送”, 第76回応用物理学会 秋季学術講演会(2015.9.13-16, 名古屋国際会議場), 16a-2K-7, 9月16日(2015)

Takuya Kambayashi, Yoko Yamanishi, “Fabrication of 3D-Electrode as Injector of Reagent-laden Bubbles”, Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-NanoTechnology 2016 (APCOT2016), Kanazawa, Japan, 26-29th June (発表日: 2016.6.29). p.257-258, 6c-6, Oral, 2016.

Yohei Hamano, Takuya Kambayashi, Yoko Yamanishi, “Multiple-reagent Layer Laden High-speed Micro-bubbles in Extended Two-dimensional Microchip”, 2015

International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS2015), pp.73-76, (2015). (発表日: 2015.11.23).

Yohei Hamano, Takuya Kambayashi, Yoko Yamanishi, “Transportation of Multiple-reagent Using Adsorption and Contraction Force of Micro-bubble”, ISMM 2015, Kyoto, (PM-05). (発表日: 2015.6.8)

〔図書〕(計 1 件)
“山西陽子, 書籍「材料表面の親水・親油の評価と制御設計」の4章 気泡の応用～電界誘起気泡メスについて～”, (石井淑夫 監修), (株)テクノシステム, pp.213-218, 2016年7月27日発行, 総577ページ.

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)
名称: 気泡噴出チップ、局所アブレーション装置及び局所アブレーション方法、並びにインジェクション装置及びインジェクション方法
発明者: 山西陽子, 神林卓也, 高橋和基
権利者: 芝浦工業大学
種類: 特許
番号: 特願 2015-205948
出願年月日: 2015年10月19日
国内外の別: 国内

取得状況(計 1 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
<http://bmf.mech.kyushu-u.ac.jp/>

6. 研究組織
(1)研究代表者
山西 陽子 (YAMANISHI, Yoko)
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 50384029

(2)研究分担者
該当なし
(3)連携研究者
該当なし
(4)研究協力者
該当なし