九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

電界誘起気泡の生成技術と機能創発

市川, 啓太

https://hdl.handle.net/2324/4475121

出版情報：Kyushu University, 2020, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：Public access to the fulltext file is restricted for unavoidable reason (3)

KYUSHU UNIVERSITY

（様式２）

氏　　名　：市川　啓太

論 文 名　：電界誘起気泡の生成技術と機能創発

区　　分　：甲

論　文　内　容　の　要　旨

本研究は,従来にはない生成メカニズムおよび物理的･化学的特性を持つマイクロバブルである，電界誘起気泡に関する特性評価と機能創発に関する研究である．本研究の成果は，従来のマイクロバブルにおける生成手法および応用が行われていない領域の開拓に寄与するものであり，本論文は全６章で構成される．

第１章では,マイクロバブルに関する基礎研究と従来の生成技術および応用技術について述べた．さらに従来の気泡生成技術と応用技術について，対象スケールと使用する気泡数に関するまとめを行った．結果として，気泡数が 100 個以下程度の少数気泡による，マイクロスケールの領域を対象とした生成・応用技術の研究が不足していることを示唆した．そこで，電界誘起気泡による研究不足領域の解消によって，新たな知見を獲得することを目的とし，論文の構成について述べた．

第２章では，電界誘起気泡の生成メカニズムに関する議論を行った．気泡生成の要因として，電気分解・熱・電界について検討を行った．最初に，気泡生成に関する高速度カメラによる撮影の結果から，電界誘起気泡はデバイスの電極ではなく誘電体部から発生していることを発見し，電気分解による気泡ではないことを示した．次に有限要素法による熱の解析を行った．結果として，気泡生成場における温度上昇は１K 程度と微小であり,熱による気泡生成の可能性も低いことを示した．最後に有限要素法による電界の解析を行った結果，デバイス先端部に 10^6 V/m を超える電界が発生していることを確認した．溶液中に局所的な高電界が発生すると，溶液中のイオンが急激に加速され，イオン同士の衝突によって気泡核が形成される．さらに気泡核が絶縁破壊を生じることでマイクロバブルへ成長することが，電界誘起気泡の生成メカニズムの主因であることを示した．一般的なマイクロバブルの生成は電気分解や熱，乱流によるものが多く，生成のメカニズムが大きく異なることを示した．また従来のマイクロバブルにおける生成法は，気泡数と生成する場所の制御が困難であることが多い．そこで従来の気泡生成法に対する優位な点として，デバイス先端の電界によって気泡が生成される特徴から，気泡数の位置制御性と，同じ位置に気泡を繰り返し生成できる高い再現性を有する事を示した．

第３章では，電界誘起気泡の物理的・化学的な特性の評価を行った．最初に，電界誘起気泡を時間解像度１μs 以上で観察することができる超高速度観察系の構築を行った．次に構築した観察系を用いて「気泡径の制御性」「気泡の収縮挙動」「マイクロジェットの圧力」「放電現象」「デバイス前方の物体に対する物理的刺激」の５項目に関する評価を行った．結果は下記の通りである．

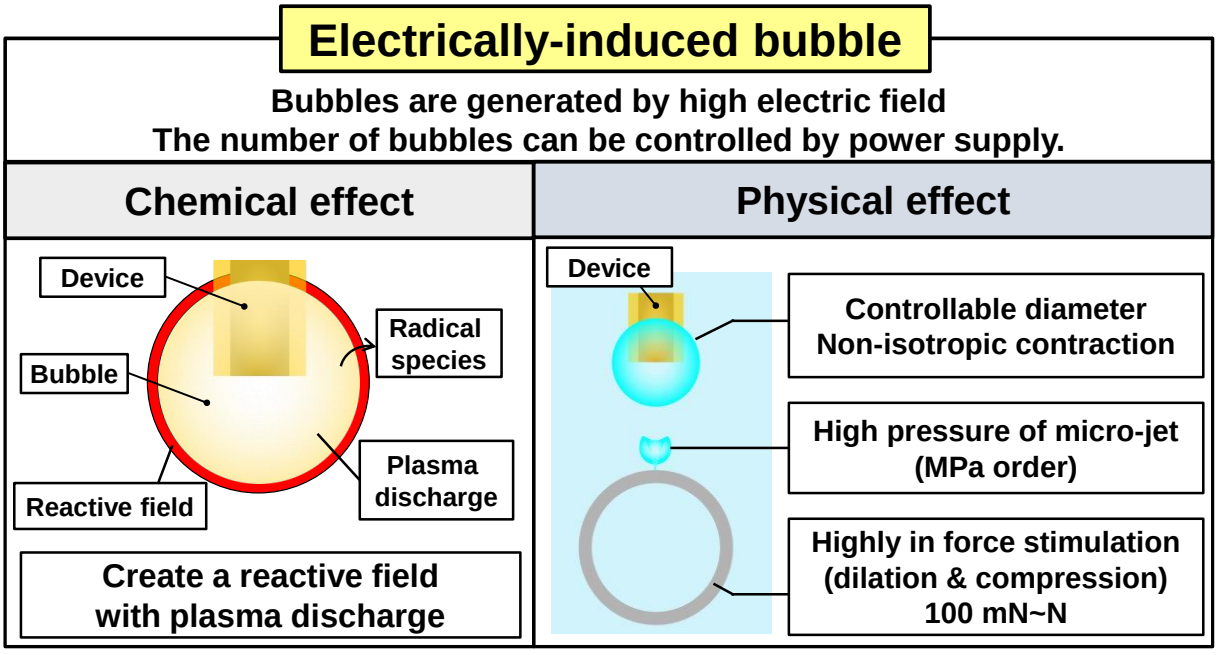
- 気泡径の制御性に関する評価では，設定電圧と出力時間に応じて気泡径が増加する傾向が確認された．これは気泡生成時の初期エネルギーと気泡内の加熱によって生じた結果であることを考察し，電源条件のみで気泡径を 180 μm ~ 1600 μm まで制御可能であることを示した．
- 気泡の収縮挙動に関する評価では，電界誘起気泡がデバイスの前方方向へ異方的に収縮することを示した．この挙動は気泡生成場に存在するデバイスによって生じるものであること考察し，一

般的なマイクロバブルの等方的な膨張・収縮運動とは大きく異なることについて述べた.

- マイクロジェットの圧力に関する評価では，異方的な収縮の結果として発生する高圧水流の圧力計算を行った. 結果として, 局所的に数 MPa 以上の高い圧力が発生していることを明らかにし，さらに気泡径によって圧力の制御が可能であることを示した.
- 放電現象に関する評価では，出力電圧を高くすることで気泡が絶縁破壊を生じ，放電が発生する映像の撮影に成功した．さらに溶液中における気体の絶縁破壊に関する文献調査より，気泡表面に化学的な反応場が形成されることについて考察を行った.
- 物理的刺激に関する評価では，気泡によるシリコンチューブの変形から，周囲に発生する力の推定を行った．観察の結果より，物体に対して，気泡の膨張とマイクロジェットによって圧縮方向に 100 mN~2 N, 気泡の収縮によって引張方向に, 100 mN~2N の力が発生することを確認した．また，デバイスとチューブの距離と，気泡径によって発生する力が変化することを発見し，気泡膨張, 気泡収縮およびマイクロジェットの各段階において, 力が最大となる条件を明らかにした.

3 章の最後に，本研究で明らかとなった電界誘起気泡の特性を，気泡生成，化学的作用および物理的作用の項目について下記図のようにまとめ，従来のマイクロバブルとの差異について評価した.

第 4 章では，電界誘起気泡の物理的な特性である引張と圧縮力を利用した，微小領域における医療応用の実験について述べた．本研究では，眼内の網膜上に存在する静脈部に発生した血栓を血管外部から気泡による力を加えることで除去する手法の提案を行った. さらに実現可能性を示すため，豚眼を用いた動物実験を実施し，実際に眼内で作製した血栓の除去を達成した．これにより，電界誘起気泡の医療分野への応用が可能であることを明示した.

第 5 章では，電界誘起気泡の化学的な特性である気泡表面近傍の反応場を利用した，酸化還元反応による微細加工分野への応用について述べた．最初に還元能力の評価として，バルク溶液中の金イオンの還元を行い，電界誘起気泡の強い還元力を明示した．この知見から，対象近傍で局所的な金属イオンの還元を行う微小成膜技術のコンセプトを提案した．最後にコンセプトの実現可能性を確認するため，シリコンウェハ，PDMS および鶏ささみ肉に対して金属成膜を行い，金属の析出を達成した．これにより，気泡を用いた微小領域の金属成膜という，新技術の可能性を示唆した.

第 6 章では，各章の内容と，今後の電界誘起気泡現象に関する研究の展望について記述し，論文のまとめとした.