

オンデマンド金属堆積に向けたマイクロプラズマバブルの生成/制御

山下, 優

<https://hdl.handle.net/2324/6787601>

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 山下 優

論 文 名 : オンデマンド金属堆積に向けたマイクロプラズマバブルの生成/制御

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

近年の 3 次元製造技術の発展に伴い、複雑な形状を有する 3 次元構造体の作製が可能になり、その構造的特性を用いた研究が盛んに行われている。これらの機能をより深化させる有望な方法の一つは、3 次元的な金属堆積により、優れたセンサーやアクチュエータを内蔵、集積することである。しかしながら、従来の金属堆積技術は、それぞれのプロセスに起因する導電性、耐熱性等の材質の制限や、パターニングのための技術的課題を有しており、特にハイドロゲルなどのウェット材料に対して、任意の金属種を堆積可能な技術は未だない。本論文は、電界集中によって電解質溶液中に生成可能なマイクロプラズマバブルに着目し、その生成/制御メカニズムを明らかにするとともに、上記課題を解決する新たな金属堆積技術の確立を目指したものである。

第 1 章では、様々な材料表面上への金属堆積という観点において、従来の金属堆積技術の課題を示し、その解決方策としての液中プラズマの生成手法および反応メカニズムについて概説した。次に、マイクロプラズマバブルの生成技術と、その時空間制御によるオンデマンド金属堆積コンセプトを概説して、本論文の目的を明らかにした。

第 2 章では、ハイスピードカメラを用いて、各条件におけるマイクロプラズマバブルの観測実験を行った。その結果、マイクロプラズマバブルが、バブルインジェクター先端のガラス部分より生成されること、および生成時に印加された電気量が、電気分解によって生成されると仮定した際の 500 分の 1 程度である事を明らかにした。さらに、パルスを印加してから気泡が生成されるまでの応答時間は、溶液の導電率および印加電圧が高くなるほど短くなった。また、印加エネルギーが 0.5 mJ 以上の範囲において、マイクロプラズマバブルの最大膨張体積は、水の気化もしくは分解と仮定した際の体積と一致した。これによりマイクロプラズマバブルの生成メカニズムが溶液の気化と、その分解によるものであると考察した。また、マイクロプラズマバブルの生成モードを、印加するパルス条件によって以下に示す 3 つのモードに分類した。(1)印加したすべてのパルスで一つのマイクロプラズマバブルが形成されるモード、(2)印加した複数のパルスで一つのマイクロプラズマバブルが形成されるモード、(3)印加した単一パルスごとに一つのマイクロプラズマバブルが形成されるモードである。さらに、それぞれのモードが、印加エネルギーとパルス周期を用いることで制御可能であることを明らかにした。

第 3 章では、シュリーレン光学系を用いて、パルス印加時のバブルインジェクター先端における溶液の屈折率変化を可視化する実験を行った。その結果、気泡生成時においてバブルインジェクター先端の溶液の屈折率に変化が生じることを明らかにし、その変化が生じた領域が、パルス印加中に広がり、印加後に縮小したことから、実験結果が、溶液の温度上昇に伴う密度の低下に起因する結果であると考察した。これにより、マイクロプラズマバブルの初生メカニズムが、パルス印加に伴う溶液の温度上昇による気化である可能性を示した。

第4章では分光光度計を用いて、マイクロプラズマバブル生成時の発光スペクトルの計測を、パルス条件を変化させて測定した。その結果、マイクロプラズマバブルの発光は、主に OH(309 nm), Na(589 nm), H α (656 nm)に起因するスペクトルが検出された。ここで、窒素のスペクトルが観測されなかったこと、および二酸化炭素である可能性のあるスペクトル強度が OH および H α と比較しても小さかったことより、気泡内ガスが、水分子の分解によって構成されたものであると考察した。水の分解反応が起きうることは、二線強度法により算出したプラズマ温度が熱分解に必要な温度付近である約 4000 K であったことから示唆された。さらに、短いパルス周期および大きい印加エネルギーにおいて、発光強度が大きくなることを明らかにし、これらのパラメータによって制御できることを示した。

第5章では、電界に伴うジュール加熱と電気流体動力学現象を考慮した有限要素モデルを構築し、その妥当性を実験と比較することで検証したのちに、マイクロプラズマバブルの生成メカニズムについて検討を行った。その結果、解析モデルが実験結果を概ね再現することを確認し、パルス印加時の、体積当たりのエネルギー割合は、98.5%以上を熱が占めていたことから、気泡生成が沸騰現象によって開始されることを示した。また、ほとんどの条件において、電界は気体の絶縁耐力である 3 MV/m を超えており、気泡は生成されると直ちに絶縁破壊によって分解されることが示唆された。これらの結果と第2-4章の結果より、マイクロプラズマバブル生成において重要なパラメータは、溶液の導電率および電界であることが示され、これらのパラメータを考慮したデバイス設計によって蒸気気泡とプラズマ気泡を制御可能であることが示唆された。

第6章では2つのその場観察/堆積システムを用いて、金属堆積に向けたマイクロプラズマバブル生成条件の検討と金属堆積デモンストレーションを行った。その結果、APSBモードとなる条件が金属堆積に適した条件であることを明らかにし、ガラス基板での実験において、100-400 μm 程度の解像度で堆積可能であることを確認した。また、ハイドロゲルを含む複数種の基板への金属堆積および溶液の交換による任意の金属種堆積を達成し、本技術の優位点を示した。さらに、任意形状のパターニングに成功し、本手法の実現可能性を示した。

第7章では、本論文の総括を行った。