

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15419

研究課題名（和文）大気圧プラズマジェットの高精度位置決めによる自由曲面微細加工法

研究課題名（英文）Micromachining for freeform generation by atmospheric pressure plasma jet and precision positioning

研究代表者

中澤 謙太（Nakazawa, Kenta）

静岡大学・工学部・助教

研究者番号：50824520

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では局在化した大気圧プラズマジェットを走査型プローブ顕微鏡技術を用いて高精度位置決めし、エッチングすることにより実現する自由曲面微細加工法を目指し、微細加工装置を開発した。大気圧プラズマジェットを高精度に位置決めするために、走査型プローブ顕微鏡技術を応用した。先鋭化したノズルを用いて大気圧プラズマを局在化し、さらに位置決めのためのプローブとしても用いた。微細加工装置と制御プログラムを開発し、多段階のエッチングを実施した。ノズルを20 nmの精度で位置決めし、18 μmの加工幅を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Microelectromechanical Systems (MEMS) の基盤技術は加工法であり、加工法の発展によってMEMSは発展してきた。大気圧プラズマは反応性ガスを材料と反応させて局所的に除去できるため従来は低圧下で困難であったマスクレスエッチングが可能になる。本研究は自由曲面形状を製作するプラットフォームを開発する中核技術となるため、発展性に優れていると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, a micromachining system for freeform generation was developed, which is realized by etching a localized atmospheric pressure plasma jet with high-precision positioning using a scanning probe microscope technology. The scanning probe microscope technique was applied to position the atmospheric pressure plasma jet with high accuracy. The atmospheric pressure plasma jet was localized using a sharpened nozzle which was also used as a probe for positioning. The micromachining system and a control software were developed to perform multi-step etching. The nozzle was positioned with an accuracy of 20 nm, and a processing width of 18 μm was achieved.

研究分野：微細加工学，精密工学

キーワード：マイクロマシニング 大気圧プラズマジェット 精密位置決め

1. 研究開始当初の背景

Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) とは、電子回路だけではなく、センサやアクチュエータなどの機械要素を一体化させたマイクロシステムのことである。MEMS は、小型、低消費電力、大量生産が可能という特徴を持ち、家電、輸送機器、情報・通信、医療・バイオなどの幅広い分野への応用が期待されている。さらに Internet of Things の発展に伴い MEMS の応用規模の拡大が予想されており、MEMS 並びに半導体プロセスは重要な技術として認識されている。近年、新規のプロセス技術として大気圧プラズマの研究が盛んに行われている。なかでも大気圧プラズマを用いた微細加工法の開発が注目されている。プラズマを局在化することで、反応性ガスを材料と反応させて局所的に除去できるため従来は低圧下で困難であったマスクレスエッチングが可能になる。

2. 研究の目的

本研究では自由曲面微細加工法の実現を目指し、局在化した大気圧マイクロプラズマジェットをプローブ顕微鏡技術を用いて精密に位置決めし、3 次元的に走査することで実現するマスクレス微細加工法を開発する。

3. 研究の方法

大気圧プラズマジェットは動作ガスの流れるマクロナズル内部の針電極、接地電極、誘電体を用いることで生成する。プラズマは動作ガス上に生成されるため、マクロナズルでガス流を絞ることによりマイクロメートルオーダーのプラズマを生成できる。大気圧プラズマジェットによるフォトレジストやポリマーなどのエッチング原理を図 1 に示す。マクロナズルから照射された大気圧プラズマジェットが周辺空気を励起・電離させる。このとき、空気中の酸素や水から酸素ラジカルやヒドロキシルラジカルが生成される。これら酸素ラジカルが表面に吸着し、フォトレジストの炭素原子や水素原子と化学反応を起こす。反応生成物の揮発性により空气中に脱離することで微細加工が行われる。

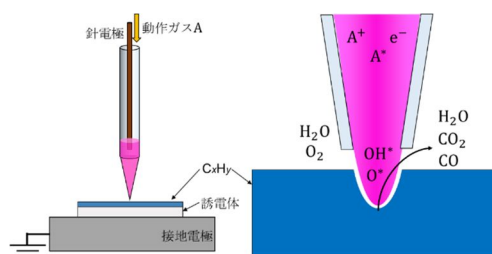


図 1 エッチング原理

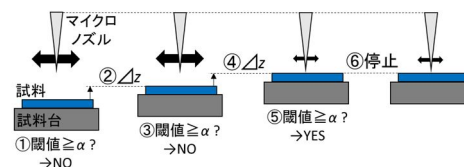


図 2 位置決めプロセス

深さ方向への位置決めにはマクロナズルと試料表面の接触によるノズル先端の振動振幅減衰を利用したタッチセンサを用いる。マクロナズルの位置決め制御のプロセスを図 2 に示す。ノズル先端の振動振幅を電気信号である振幅信号に変換し、プログラム上で設定する電圧閾値と比較する。測定された振幅信号 α が閾値より大きい場合、試料台を試料深さ方向に z だけ上昇させる。ノズルと試料表面の接触により振幅信号が閾値以下となった場合に試料台を停止させることで位置決めが完了する。

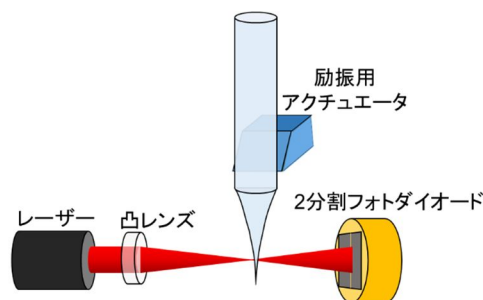


図 3 位置決め用光学系

ノズル先端の振動振幅検出系を図 3 に示す。凸レンズで集光したレーザー光をノズル先端に照射し、ノズルの影を 2 分割フォトダイオードに投影する。励振用アクチュエータの励振によりノズルが振動すると投影されたノズルの影も振動する。そのため、左右のフォトダイオードから正弦波状で逆位相の二つの電流信号が得られる。この信号を演算回路で処理することで直流電圧である振幅信号を得る。

開発した大気圧プラズマジェットを用いたエッチング装置概略図を図 4 に示す。本研究のエッチング装置は位置決め機構とプラズマ生成機構から構成される。位置決め光学系、演算回路に

ついて説明する．レーザー光は平凸レンズでマイクロノズルに集光される．レーザー光の照射位置や2分割フォトダイオードに投影されるマイクロノズルの影の位置は光学ステージによって調整することができる．レーザー光の照射位置は、光学顕微鏡で観察することで調整し、マイクロノズル先端から 0.2~0.5 mm の位置に照射した．マイクロノズルはアクリル樹脂の板パネで固定されている．励振用アクチュエータにはステージが備えられており、マイクロノズルとの接触力を調整可能である．2分割フォトダイオードの電流信号から振幅信号を算出する．IV 変換回路、計装アンプ回路、増幅回路、ローパスフィルタ回路などによって信号を調整し、最後に、RMS-DC 回路で交流信号を直流信号に変換することでマイクロノズルの振幅信号を得る．その信号を PC に読み込み、位置決め判断などを行った．大気圧プラズマジェット生成のために、マイクロノズル内にアルゴンガスを導入し、周波数が数十 kHz の高電圧をノズル内の針電極に印加する．

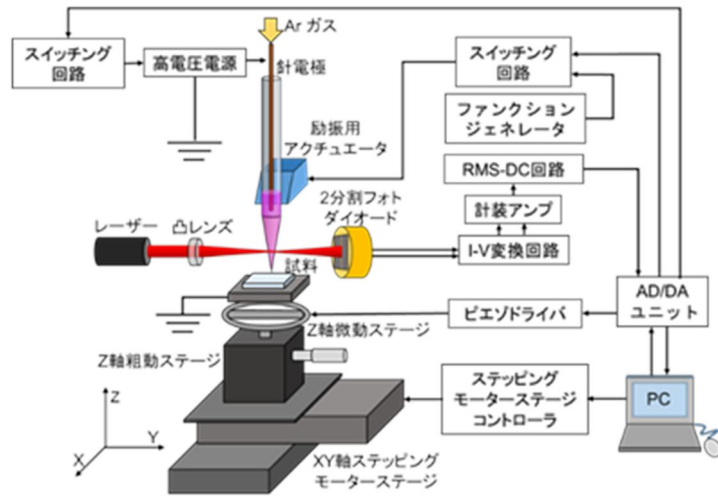


図 4 開発した装置概要

図 4 開発した装置概要

4. 研究成果

試料台に対してノズルの垂直位置決めの実験を行った．ノズル先端直径は $10\ \mu\text{m}$ で $16.03\ \text{kHz}$ にて共振振動させた．試料台を $100\ \text{ms}$ ごとに $15\ \text{nm}$ ずつ上昇させて試料台表面を接近させた．また、閾値は非接触時における振幅信号の 95% (5%の減衰) に設定した．位置決め前後の振動信号と振幅信号を図 5 に示す．共振振動時の振幅電圧から 57% 減衰していることがわかる．これについて、試料台の 1 ステップ移動距離が $15\ \text{nm}$ と大きいと、設定値よりも減衰率が大きくなったと考えられる．1 ステップの上昇距離を小さくすることで設定値と測定値の電圧減衰量の差は小さくなると考えられる．しかし、位置決め後に行う離脱距離はサブマイクロンオーダーであるため、この減衰量の差による数十 nm の位置決め誤差は問題ないと考えられる．

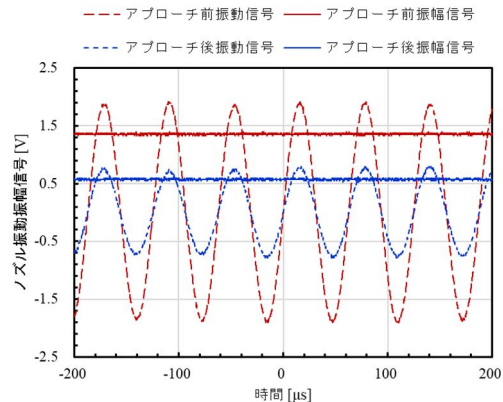


図 5 位置決め制御信号

エッチングプロセス回数 3 回、ノズル試料間距離 $3\ \mu\text{m}$ 、位置決め閾値 10%、APPJ 照射時間 $10\ \text{s}$ 、ノズル先端外径 $10\ \mu\text{m}$ 、針電極印加電圧 $4.5\ \text{kV}$ の実験条件にて厚膜レジストにエッチングを行った．原子間力顕微鏡 (VN-8010, キーエンス) による加工痕の観察を行った．原子間力顕微鏡による形状像を図 6 に示す．また、最大エッチング深さを含むラインプロファイルを図 7 に示す．図 7 から深さ $2.4\ \mu\text{m}$ 、半値幅 $17.6\ \mu\text{m}$ の加工痕が生成されていることがわかる．これにより、本装置を用いた多段階エッチング法の動作を確認できた．

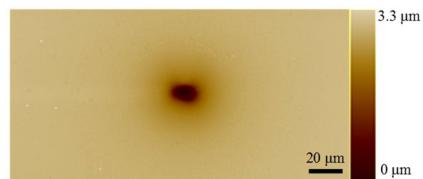


図 6 エッチング痕原子間力顕微鏡像

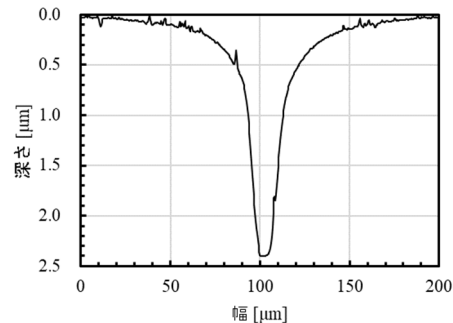


図 7 エッチング痕ラインプロファイル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kenta Nakazawa, Sho Yamamoto, Ei Nakagawa, Akihisa Ogino, Masaru Shimomura, and Futoshi Iwata	4. 巻 10
2. 論文標題 Atmospheric He/O ₂ plasma jet fine etching with a scanning probe microscope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 095103 ~ 095103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0017952	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 Shun Toda, Kenta Nakazawa, Akihisa Ogino, Masaru Shimomura, and Futoshi Iwata	4. 巻 31
2. 論文標題 Micromachining of polymers using atmospheric pressure inductively coupled helium plasma localized by a scanning nanopipette probe microscope	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Micromechanics and Microengineering	6. 最初と最後の頁 65008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6439/abf845	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 中澤 謙太, 山本 将, 中川 英, 荻野 明久, 下村 勝, 岩田 太
2. 発表標題 走査型プローブ顕微鏡を援用した酸素添加大気圧プラズマジェットによるPMMA膜のサブマイクロ加工
3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenta Nakazawa, Takumi Tanaka, Takeshi Uruma, and Futoshi Iwata
2. 発表標題 Evaluation of displacement and surface potential of a micro-piezoresistor by a Kelvin probe force microscope
3. 学会等名 ICSPM28 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Syun Toda, Kenta Nakazawa, and Futoshi Iwata
2. 発表標題 Scanning nanopipette probe microscope capable of local irradiation of inductively coupled plasma for surface fine processing
3. 学会等名 ICSPM28 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 戸田 竣, 中澤 謙太, 荻野 明久, 下村 勝, 岩田 太
2. 発表標題 大気圧誘導結合型プラズマを局所照射可能な走査型ナノピペットプローブ顕微鏡の開発と表面微細エッチングへの応用
3. 学会等名 2021年度第68回応用物理学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中澤 謙太, 岩田 太
2. 発表標題 大気圧プラズマ局所エッチングによるトリミング法の基礎検討
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

静岡大学教員データベース
<https://tdb.shizuoka.ac.jp/RDB/public/Default2.aspx?id=11255&l=0>

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