

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760723

研究課題名(和文)イオンビーム描画による3次元微細加工技術に関する研究

研究課題名(英文)Study on three-dimensional microfabrication using proton beam writing

研究代表者

大久保 猛(Ohkubo, Takeru)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・高崎量子応用研究所・放射線高度利用施設部・研究職

研究者番号：40446456

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：三次元プロトンビーム描画(3D-PBW:Proton Beam Writing)による微細加工では、ビームのエネルギーを連続的に変えて加工深度が滑らかに変化する三次元構造を作製できる小型装置の開発とその広い普及が切望されている。加速レンズ系は各電極への印加電圧の比(加速比)が一定であれば焦点距離も近似的に一定であることから、ビーム焦点が加工試料表面からずれることなく連続的にビームのエネルギーを変化させることが可能である。実験及びシミュレーションによって、100keVから1MeVの範囲におけるどのエネルギーでもビームの焦点が固定されることを実証し、上記のエネルギー連続可変技術を確立した。

研究成果の概要(英文)：A compact focused gaseous ion beam system (gas-FIB) has been developed to form proton microbeams of a few hundreds of keV with a penetration depth of micrometer range in 3D proton beam writing. Proton microbeams with kinetic energies of 100-140 keV were experimentally formed. The experimental results indicate that the beam diameters were measured at the same point to be almost constant at approximately 6  $\mu\text{m}$  with the kinetic energy range at a constant ratio of the kinetic energy of the object side to that of the image side. In addition, these characteristics of the system were also numerically demonstrated in a kinetic energy range of 100-1000 keV to be maintained as long as the ratio was constant. It was concluded that the gas-FIB has feasibility as a tool for 3D proton beam writing.

研究分野：イオンビーム工学

キーワード：イオンビーム マイクロビーム プロトンビーム 加速レンズ PBW

## 1. 研究開始当初の背景

近年、通信機能の発展と情報量の大幅な増大によって数 $\mu\text{m}$  から数  $10\mu\text{m}$  領域の微細な構造を持つ光通信デバイスが注目を集めている。現在は材料にマスクを被せて光リソグラフィによって加工しているため、基本的には二次元構造しか製作できていない。そこで、イオンビームが新たなツールとして期待されている。MeV 級の軽イオンのビームは直進性が高く飛程も長いいため直接描画による三次元加工に有用である。最近では  $1\mu\text{m}$  程度のビーム径を持つイオンビーム、いわゆるイオンマイクロビームが、静電加速器で加速されたガスイオンのビームを集束して形成され、微細な加工・分析等に利用されている。しかし、このようにイオンを加速した後に集束する従来方式では、縮小率をなるべく大きく(数 10 倍)するためにレンズ系の物点距離を可能な限り長く(数 m 以上)とる必要がある、工場で使用する等の応用に向けた装置の小型化は困難である。また、集束を四重極電磁石で行うため、ビーム進行軸(z 軸)に垂直な平面内の x 軸方向及び y 軸方向それぞれで同時に集束条件を満たす磁場パラメータを探す必要があり、1 回のビーム集束作業に数十分以上を費やす。深さ方向(z 軸)の加工深度を制御する(飛程を制御する)ためにビームのエネルギーを変えるとビーム集束条件が変わるため、その都度ビームを再集束するのは膨大な時間を要し、三次元の微細加工を行うことは現実的ではないのが現状である。

## 2. 研究の目的

ガスイオンマイクロビームによる微細加工では、ビームのエネルギーを連続的に変えて加工深度が滑らかに変化する先端的三次元構造を作製できる小型装置の開発とその広い普及が切望されている。研究の全体構想は、小型装置によるガスイオンマイクロビームを用いた三次元微細加工の実現に向けて、ビームの加速・集束を同時に行う加速レンズによって、三次元微細加工用 MeV 級小型装置を開発することである。本研究では、図 1 に示す実証機である 300kV 小型マイクロビーム装置を用いて、加速レンズ系でビームのエネルギーを連続的に変えてもビーム集束を保持できる技術を開発する。

## 3. 研究の方法

加速レンズのビーム集束において、焦点距離  $f$  は

$$f = 4L \cdot \left( \frac{\varepsilon_{\text{im}}}{\varepsilon_{\text{ob}}} - 1 \right)^{-1} \quad (1)$$

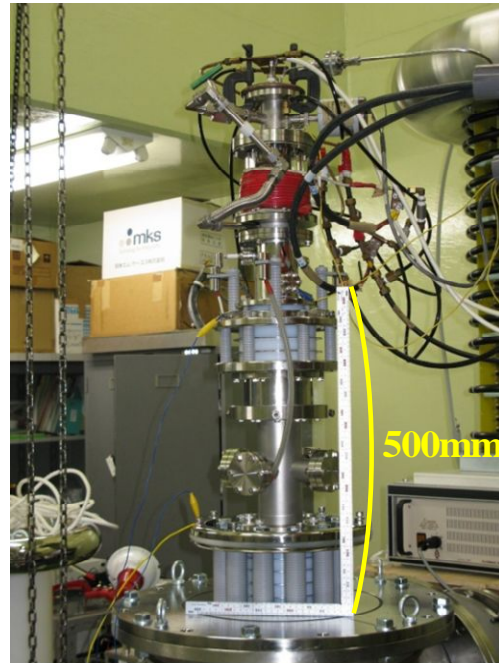


図 1 : 300kV 小型マイクロビーム装置

で表される。ここで、 $\varepsilon_{\text{ob}}$  は加速前のエネルギー、 $\varepsilon_{\text{im}}$  は加速後のエネルギー、 $L$  は電極間距離であり、焦点距離は加速比( $\varepsilon_{\text{im}}/\varepsilon_{\text{ob}}$ )と電極間距離にのみ依存する。電極間距離は装置を組み上げれば不変であるため、加速比を一定に保ちさえすれば加速後のエネルギー  $\varepsilon_{\text{im}}$  を変えても試料上にビームの焦点が固定され、連続的にエネルギーを変えながらのマイクロビームの照射が可能になる(エネルギー連続可変性)。これにより、これまでの静電加速器では不可能な加工深度の自在な変化を迅速に実現できる。このエネルギー連続可変性を以下の方法によって実験及びシミュレーションにより実証した。

300kV 小型マイクロビーム装置で放電が起こらず安定なプロトンマイクロビーム形成が可能である  $100\text{keV} \sim 140\text{keV}$  の範囲でエネルギーを変えた時の第三加速レンズ(4.での後述参照)の加速比とビーム径との関係を実測した。

最終目標である MeV 級小型マイクロビーム装置を想定して、 $100\text{keV} \sim 1\text{MeV}$  の範囲でプロトンビームのエネルギーを変えた時の加速比と焦点位置の関係をイオン光学シミュレーションによって求めた。

## 4. 研究成果

図 2 に 300keV 小型マイクロビーム装置の概略図を示す。加速レンズ系は三段の加速レンズで構成されており、厳密にはそれぞれの加速レンズにおける加速比が全て一定の場合に(1)式で示すように焦点位置が固定

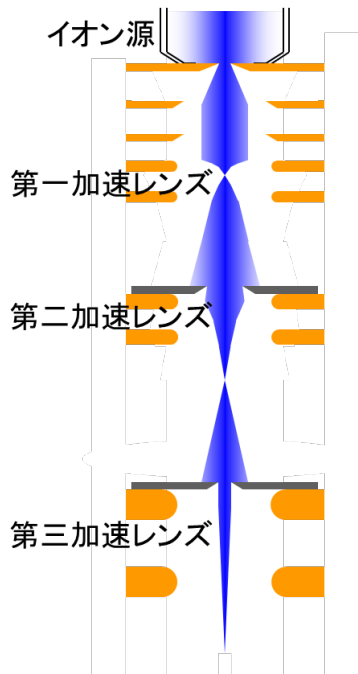


図2：300kV 小型マイクロビーム装置の概略図

される。本研究では、ビーム電流の安定性と実験条件の簡略化を検討した結果、第三加速レンズにおける加速比のみを考慮しても十分にエネルギー連続可変性を示せるという見通しを得た。そこで、図1に示す現有の装置を使ったマイクロビーム形成実験において放電を避けて安定に装置を運転できるビームのエネルギー範囲100keVから140keVまでにおいて、加速比を一定にした時のビーム進行軸上の定点におけるビーム径を計測した。その結果を図3に示す。ビーム径が極小値となる場合が、定点とビームの焦点が一致した時である。どのエネルギーにおいても、

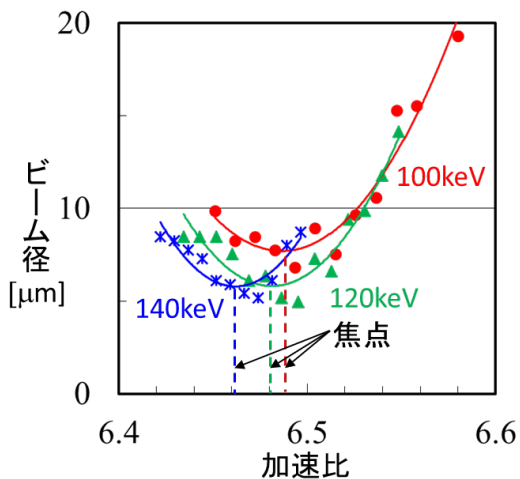


図3：第三加速レンズの加速比と定点で計測したビーム径  
(実線は実測点のフィッティング曲線)

加速比が 6.45 から 6.50 の間のほぼ同じ値の時に焦点が定点と一致するという結果を得た。ここで、焦点での加速比の値がわずかに異なっていることがビーム径に及ぼす影響について検証した結果、ビーム径の10%程度の拡大に収まることから、十分に影響は小さいと結論づけた。これにより、100keV～140keVの範囲において加速比を一定にすればビームのエネルギーを変えてもビームの焦点が固定されることを実証した。

全体構想の目的であるビームのエネルギー1MeVまでのエネルギー連続可変性を実証するため、イオン光学シミュレーションによって100keVから1MeVまでのエネルギーにおける焦点での加速比の値を計算した。その結果を上記の実験結果と合わせて図4に示す。100keVから140keVの範囲では計算結果と実験結果はほぼ一致しており、1MeVまでの計算結果における焦点での加速比の値はほぼ一定となった。これは、どのエネルギーにおいても加速比が同じ場合には焦点が動かないことを示す結果である。これにより、100keVから1MeVまでのエネルギー範囲においてもエネルギー連続可変性が成り立つことを実証した。

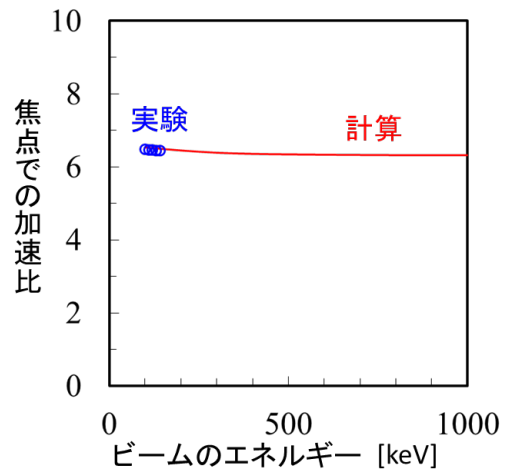


図4：ビームエネルギーと焦点での加速比のシミュレーション結果

以上、3年間の研究目標であった加速レンズ系でビームのエネルギーを連続的に変えてもビーム集束を保持できる技術をほぼ確立した。今後、この技術を用いて滑らかな三次元微細加工を行う予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

1. T. Ohkubo and Y. Ishii, "Proton microbeam formation with continuously variable kinetic energy using a compact system for three-dimensional proton beam writing", Review of Scientific Instruments, **86**, 036102, (2015). DOI:10.1063/1.4915319 査読有

2. T. Ohkubo, Y. Ishii, Y. Miyake and T. Kamiya, "Preliminary study on development of 300 kV compact focused gaseous ion beam system", AIP Conference Proceedings, **1525**, 370-374, (2013). DOI:10.1063/1.4802353 査読有

〔学会発表〕(計6件)

1. 大久保猛、石井保行、「小型マイクロビーム装置で形成されるプロトンビーム径の縮小化」、日本原子力学会 2014 年秋の大会、京都大学、9/9 (2014).

2. T. Ohkubo, Y. Ishii and T. Kamiya, "Preliminary study on formation of proton microbeam with continuously variable kinetic energy for 3-Dimensional proton lithography", 23rd International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry (CAARI 2014), Texas, USA, May 25-30 (2014).

3. 大久保猛、石井保行、齋藤勇一、「300kV 単ギャップ加速レンズを用いたイオンナノビーム形成小型装置開発」、日本原子力学会 2013 年秋の大会、八戸工業大学、9/5 (2013).

4. 大久保猛、石井保行、神谷富裕、「小型加速レンズ装置によるエネルギー連続可変ガスイオン集束ビーム」、日本原子力学会 2013 年春の年会、近畿大学、3/27 (2013).

5. 大久保猛、石井保行、神谷富裕、「小型加速レンズ装置によるガスイオンビーム集束」、日本原子力学会 2012 年秋の大会、広島大学、9/20 (2012).

6. T. Ohkubo, Y. Ishii, Y. Miyake and T. Kamiya, "Preliminary study to form 300 keV proton nanobeam on development of compact focused gaseous ion beam system", 22nd International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry (CAARI 2012), Texas, USA, Aug 5-10 (2012).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

名称：  
発明者：

権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大久保 猛 (OHKUBO TAKERU)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・高崎量子応用研究所・放射線高度利用施設部・研究職  
研究者番号：40446456

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：