

令和 3 年 6 月 25 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03880

研究課題名（和文）光学面精密創成用小径イオンビーム加工技術の開発

研究課題名（英文）Development of fabrication technique using small-diameter ion beam for high-precision optics

研究代表者

瀧野 日出雄（Takino, Hideo）

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：70633238

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、光学面の精密創成に適した小径イオンビームの生成技術の開発を目的に実施した。カウフマン型イオンガンおよびその制御システムを設計、製作し、Arイオンビームの生成を達成した。このイオンビームを収束させるために、永久磁石を用いた四重極磁気レンズを設計した。設計では、磁場ならびにイオンビーム軌道の計算により永久磁石の配置を最適化した。つぎに、ネオジウム磁石を用いた磁気レンズを試作し、それをイオンビーム加工装置に装着して、ビームのプロファイル計測を行った。その結果、四重極磁石を3段とした磁気レンズにより、ビームが良好に収束し、光学面の精密創成に適したビームが生成できることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、最先端の光学素子（レンズ、ミラー）にはナノメートル以下の極めて高い精度が求められている。本研究では、このような高精度の光学素子を加工するために、イオンビーム加工技術の開発を行った。特に小型の光学素子を精密に加工するために、簡便な装置によりイオンビームを収束させる技術を検討した。近年、民生分野では高精細な画像が、また産業分野でも光学機器には高い解像度が要求されている。本研究は、このような要求を実現するのに有効な技術であり、社会的に意義深い。また、小径のイオンビームを得るために、永久磁石を用いた四重極磁気レンズを検討し、その最適化を図ったことは学術的にも意義がある。

研究成果の概要（英文）：The present study was performed to develop the generation method of small-diameter ion beam for high-precision optical fabrication. Kaufman-type ion gun and its controller were designed and manufactured, which generated a broad Ar ion-beam. To converge the ion beam, a magnetic lens with quadrupole magnets using permanent magnets was designed. To optimize the construction of the magnetic lens, the trajectories of the ion beam and the ion particle distribution on a workpiece surface were simulated. On the basis of the simulation results, magnetic lenses with quadrupole magnets using neodymium magnets were manufactured. The magnetic lenses were installed in an ion beam figuring device with the Kaufman-type ion gun to evaluate their characteristics of the converging of ion beams. As a result, it was demonstrated that the triplet magnetic lens can converge the ion beam to a small area enough to figure small or medium-size optical surfaces.

研究分野：精密加工学

キーワード：イオンビーム イオンガン イオンビーム集束 四重極磁気レンズ 永久磁石 光学面 光学素子 精密加工

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、画像機器や光学機器にはさらなる高解像度化が求められており、そこで用いられる光学素子にはナノメートルまたはそれ以下の極めて高い精度が要求されている。このような要求から、精密加工技術としてイオンビーム加工に注目が集まっている。

イオンビームによる表面除去は、表面へのイオン衝突によるスパッタリング現象に基づくものである。スパッタリング現象を利用しているため、表面を原子オーダーで除去することが可能である。一方、イオンビーム加工は加工速度が遅いため、研磨面の仕上げ加工に適用するのが一般的である。すなわち、イオンビーム加工は、高速に研磨された面の形状誤差を除去して、高精度面を得るために用いられる。研磨面の形状誤差はさまざまな空間波長の誤差成分から成るが、一般に、直径の $1/2 \sim 1/10$ の空間波長の誤差成分が支配的である。したがって、このような誤差成分を除去すれば大幅な高精度化が達成できる。このために、光学面直径の $1/4 \sim 1/20$ のビーム径のイオンビームが使われることが多い。

これまでに、イオンビームによる光学面の加工技術については、国内外の研究者によってある程度の実績が上げられている。たとえば、イオンビーム加工は加工面に荷重がかからないという特徴を利用して、1990年代には人工衛星に搭載可能な軽量化ハニカムミラーの加工に適用されて、大きな成功を収めた。近年では、半導体 IC の製造に用いられる半導体縮小露光装置の光学素子の加工に利用されるようになってきた。半導体 IC の線幅は近年、著しく狭くなっているおり、そのような精細な線幅を解像するため、半導体露光装置用光学素子の光学面精度も 0.1nmRMS オーダーが求められるようになった。このような高精度光学素子の加工にイオンビーム加工が利用され始めたのである。

しかし、イオンビーム加工は、 $\phi 10 \sim 50\text{mm}$ 程度の小～中口径の光学素子の加工にはほとんど活用されていない。この理由の一つは、実用的なイオン電流密度 (1mA/cm^2) において、小～中口径の光学面の加工に必要なとされる ϕ 数 $\text{mm} \sim 10\text{mm}$ の小径イオンビームが得にくいためである。このような背景から、小～中口径の光学素子を高精度に加工するのに適した小径イオンビームを簡便に生成する技術の実現が待たれていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、小型の四重極磁石による高電流密度のイオンビームの収束技術と、それによる精密加工技術を開発することである。これにより、イオンビーム加工による高精度小口径光学素子創成の基盤技術の確立を目指している。

本研究では、イオンビームの収束に四重極磁石による磁界の利用を検討する。四重極磁石は、4 個の磁石を 90° 間隔で円周上に設置したもので、N 極と S 極とが隣り合うように各磁石を配置したものである。この 4 個の磁石の中央に荷電粒子を通過させることにより、荷電粒子ビームを収束させようというものである。図 1 には、四重極磁石を搭載した磁気レンズ (以下、四重極磁気レンズ) の模式図とビーム収束の原理図を示す。同図(a)に示すように、イオンビームは、1 段目、2 段目の四重極磁石を通過後に真空チャンバに入射する。ここで、同図(b)に示すように、1 段目の四重極磁石に入射した正の電荷を持ったイオンビームは、y 方向に中心に向かう力を受けて収束する。つぎに、2 段目に入射すると、同様に z 方向に収束する。こうして、原理的にはイオンビーム径を小径化することが可能になる。たとえば、大型の電磁石で構成した四重極磁石は、粒子加速器における荷電粒子ビームの収束技術として実用化されている。

そこで、永久磁石で構成した四重極磁気レンズによりイオンビームが収束できれば、電磁石で構成するよりも装置が簡便かつコンパクト化でき、光学素子の製造に有用なイオンビーム加工装置が実現できると期待できる。すなわち、製造現場で利用しやすい簡素な装置で小径イオンビームが得られ、小～中口径の光学素子の高精度加工に有効と考えられる。なお、荷電粒子ビームを収束する方法としては、静電レンズによるものもあるが、これには電源とその制御装置も必要であり、この場合も装置規模が大きくなる。

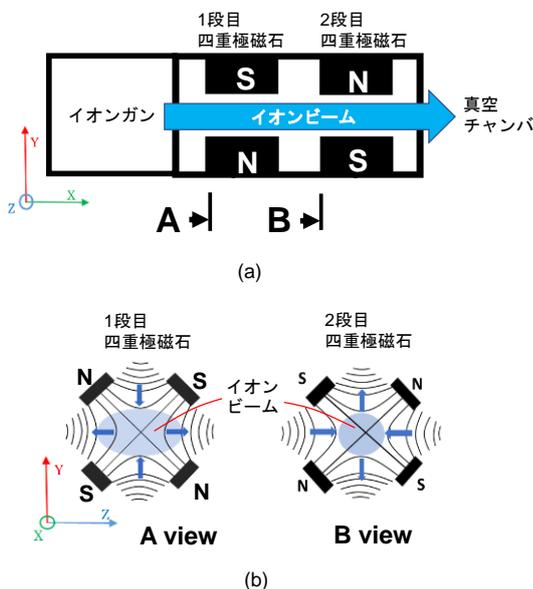


図 1 四重極磁石により構成された磁気レンズの模式図とビーム収束の原理図。(a)磁気レンズのビーム進行方向の断面図、(b)磁気レンズの半径方向の断面図とイオンビーム径の変化。

そこで本研究では、イオンビームの小径化をめざして、永久磁石を用いた四重極磁気レンズの検討を行った。本研究では、 $\phi 10\sim 50\text{mm}$ 程度の小～中口径の光学素子を加工対象に想定して、 ϕ 数 $\text{mm}\sim 10\text{mm}$ の小径イオンビームを得ることを目標とした。本研究では、このようなイオンビームが得られるように、多段の四重極磁気レンズの基本構造を検討し、その収束特性を数値シミュレーションで調べた。さらに、数値シミュレーションに基づいて、四重極磁気レンズを試作し収束特性を調べた。

3. 研究の方法

(1) ネオジウム磁石を用いて四重極磁気レンズを構成した場合について、磁石やイオンビーム通過領域近傍の磁界をシミュレーションした。これにより得られた磁束密度の値を用いて四重極磁気レンズのモデルを作成し、イオンビーム軌道や、仮想の被加工面へ入射するイオンビーム分布をシミュレーションした。シミュレーションには、荷電粒子の軌道計算ソフトウェア (SIMION) を用いた。シミュレーションは、四重極磁気レンズに入射するイオンのエミッタンス ϵ_{rms} が異なる場合について実施した。エミッタンス ϵ_{rms} は、四重極磁気レンズに入射するイオンの入射角度分布に対応する。すなわち、入射するイオンの入射角度分布が広い場合にエミッタンス ϵ_{rms} は大きく、反対に入射角度分布が狭い場合にエミッタンス ϵ_{rms} は小さくなる。本研究では、エミッタンス $\epsilon_{\text{rms}} = 8.6, 17.2 \pi \text{mm-mrad}$ について検討した。

(2) カウフマン型イオンガンおよびその電源制御システムの設計製作を行った。また、前記のシミュレーションの結果に基づいて、磁気レンズの試作を行った。これらの試作したイオンガンや磁気レンズを、図2に示すように既存の真空チャンバに取り付けた。真空チャンバ内には、被加工物走査用の数値制御が可能な XY ステージが設置されている。この XY ステージにファラデーカップを取り付けて、ビームプロファイルを計測した。

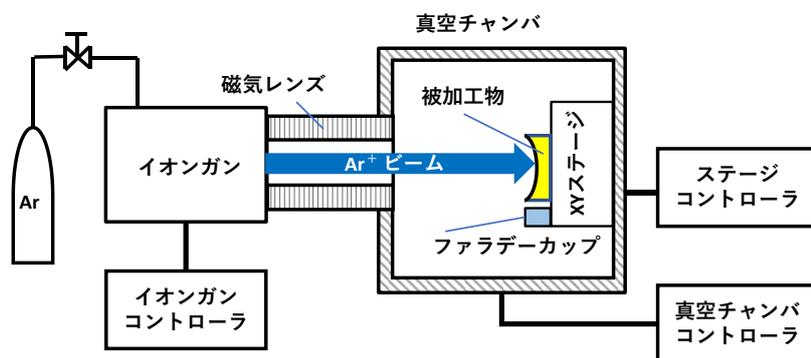


図2 磁気レンズを取り付けたイオンビーム装置.

4. 研究成果

(1) 四重極磁気レンズを使用せずにイオンガンを直接真空チャンバに接続した場合に、エミッタンス $\epsilon_{\text{rms}} = 8.6, 17.2 \pi \text{mm-mrad}$ の条件で被加工面に入射するイオンビーム分布を計算した。その結果、どちらのエミッタンス ϵ_{rms} の場合でもイオンビームは $30 \times 30\text{mm}$ 程度の領域に広がっていた。図3(a)には、計算結果の一例としてエミッタンス $\epsilon_{\text{rms}} = 17.2 \pi \text{mm-mrad}$ におけるイオンビーム分布を示す。

つぎに、2段の四重極磁石から構成される磁気レンズ (以下、2段磁気レンズ) を用いた場合のイオンビーム軌道と、被加工面に入射するイオンビーム分布をシミュレーションした。その結果、エミッタンス $\epsilon_{\text{rms}} = 8.6, 17.2 \pi \text{mm-mrad}$ において、被加工面上のイオンビーム分布は、それぞれ長辺方向 (z 方向) に 9.8mm と 27.2mm となった。

上記の2段磁気レンズでのシミュレーションの結果から、長辺方向に収束させることができれば、イオンビームはさらに小径化が可能と考えられる。そこで、四重極磁石を1段追加して、3段とした場合の収束特性を調べた。シミュレーションの結果、

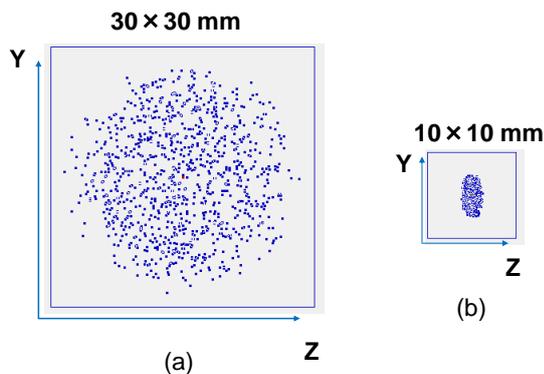


図3 磁気レンズによるイオンビームの収束効果。被加工面上のイオンビーム分布。エミッタンス $\epsilon_{\text{rms}} = 17.2 \pi \text{mm-mrad}$ 。(a) 磁気レンズのない場合、(b) 3段磁気レンズを用いた場合。

エミッタンス $\varepsilon_{\text{rms}}=8.6\pi\text{ mm-mrad}$ の場合、長辺方向 (z 方向) に 4.3mm, エミッタンス $17.2\pi\text{ mm-mrad}$ の場合、長辺方向 (y 方向) に 9.6mm に収束できることがわかった. 図 3(b) に、計算結果の一例としてエミッタンス $\varepsilon_{\text{rms}}=17.2\pi\text{ mm-mrad}$ におけるイオンビーム分布を示す.

(2) 上記のシミュレーション結果に基づき四重極磁気レンズの詳細設計を行った. 四重極磁気レンズの構造は、SUS 製円筒内に $\phi 25\text{ mm}$ の穴をあけたアルミニウム製の部材を設置し、同部材内の所定の位置にネオジウム製磁石を組み込んだものとした. 図 4 には、一例として 3 段磁気レンズの 3D 組立図を示す. こうして、詳細設計に基づいて 2 段磁気レンズと 3 段磁気レンズを製作した.

製作した四重極磁気レンズが設計値どおりの磁束密度を有しているか調べるために、ガウスメータを用いて磁束密度分布を測定した. 測定は、ガウスメータの測定プローブを四重極磁気レンズ中心の $\phi 25\text{ mm}$ の穴に差し込み、これを半径方向に移動させて行った. その結果、製作した四重極磁気レンズはほぼ設計値どおりの磁束密度を有していることがわかった.

つぎに、四重極磁気レンズをイオンビーム装置に搭載して、収束特性を調べた. 図 5 には、製作したイオンガンと四重極磁気レンズを、真空チャンバに取り付けた様子を示す. 真空チャンバ内に放出されたイオンビームのイオン電流プロファイルを XY ステージに取り付けたファラデーカップで測定した. その結果、距離 160mm におけるビーム照射領域は、四重極磁気レンズなしで $36\times 32\text{ mm}$ であったものが、2 段磁気レンズでは $38\times 10\text{ mm}$ に、3 段磁気レンズでは $3\times 14\text{ mm}$ に良好に収束されることがわかった. 図 6 には、磁気レンズなしと、3 段磁気レンズによるイオン電流プロファイルを示す. またピーク電流値は、3 段磁気レンズでは、四重極磁気レンズなしの場合に比べて 2.3 倍に向上していることがわかった. このようにピーク電流値が向上したのは、拡散したイオン粒子を良好に収束できたためと考えられる. さらに、得られたビームにより小径光学素子の高精度形状加工が可能かを数値計算で調べたところ、良好な結果が得られる見通しを得た.

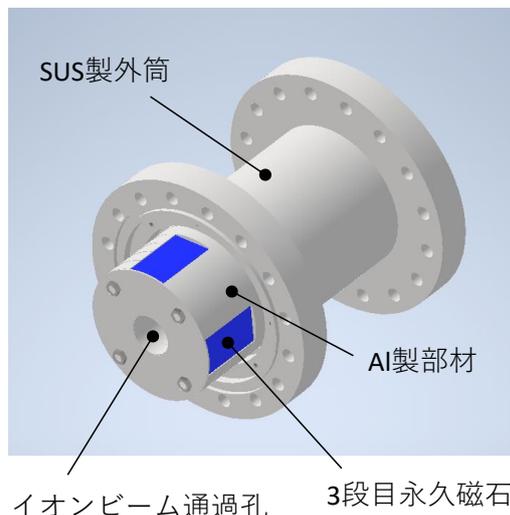


図 4 3 段磁気レンズの 3D 組立図.

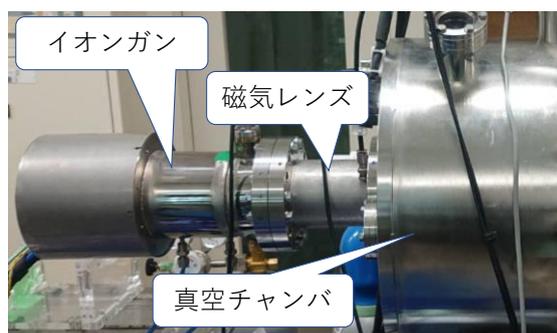


図 5 製作したイオンガンと四重極磁気レンズを真空チャンバに取り付けた様子.

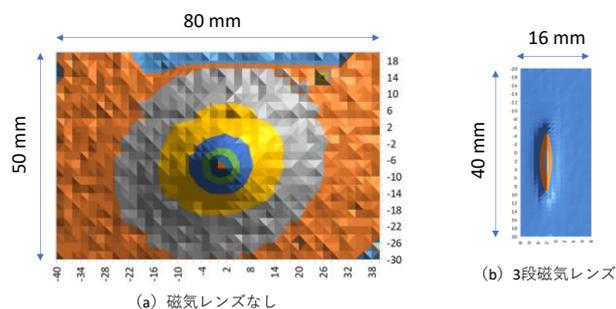


図 6 イオン電流プロファイルの測定結果. (a) 磁気レンズを用いない場合. (b) 3 段磁気レンズを用いた場合.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 瀧野日出雄	4. 巻 16
2. 論文標題 光学面精密創成用小径イオンビーム加工技術の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 千葉工業大学附属研究所 プロジェクト研究年報	6. 最初と最後の頁 49-50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 瀧野 日出雄, 矢上 裕晃, 国部 利寿	4. 巻 86
2. 論文標題 精密形状創成用小径イオンビーム生成技術の開発（数値シミュレーションによる永久磁石を用いた4極子磁気レンズの構造検討）	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 20-00217, 1 - 14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.20-00217	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 瀧野日出雄, 矢上裕晃, 国部利寿
2. 発表標題 精密形状創成用小径イオンビーム生成技術の開発（磁界型4極子レンズの構造検討）
3. 学会等名 日本機械学会第13回生産加工・工作機械部門講演会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢上裕晃, 柳下裕也, 瀧野日出雄, 国部利寿, 三浦孝治
2. 発表標題 イオンビームによる光学面精密加工技術の開発（磁界型4極子レンズを用いたビーム収束技術の検討）
3. 学会等名 日本設計工学会2019年度春季研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢上裕晃, 柳下裕也, 瀧野日出雄, 国部利寿, 三浦孝治
2. 発表標題 磁界型4極子レンズを用いた精密形状創成用小径イオンガンの開発
3. 学会等名 千葉県加工技術研究会, 第21回大学等委員による研究事例発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀧野日出雄
2. 発表標題 光学部品の精密加工
3. 学会等名 トライボロジー学会, 工作機械のトライボロジー研究会, 第15回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hideo TAKINO, Hiroki YAGAMI, and Toshijyu KUNIBE
2. 発表標題 Trajectory simulation of ion beams focused by magnetic lens for figuring small optics
3. 学会等名 20th International Conference of European Society of Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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