

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 4 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630360

研究課題名(和文)高密度イオンを前駆体とした三次元物体の創成

研究課題名(英文)Development of three-dimensional fabrication method using high-density ion beam

研究代表者

大竹 尚登(Ohtake, Naoto)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：40213756

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：イオンを用いた次世代の三次元創成技術の開発を目指した。アーク放電により高密度のプラズマを生成し、イオンのみを抽出し、さらに静電レンズを用いてイオンビームを収束できる堆積装置を開発して、Si基板上に炭素の堆積を試みた。有限差分法により静電レンズ付近の電場を算出し、荷電粒子の軌跡を予測した。そのシミュレーション結果を基に静電レンズを設計・製作して堆積装置内に設置し、イオンビーム(面積1100mm²)の収束実験を行った。その結果コイル電流0.1 Aの時、イオンビームを166 mm²まで収束させて硬質炭素膜を堆積させることに成功し、高密度イオンを用いた三次元創成が可能であることを示唆した。

研究成果の概要(英文)：Purpose of this research is development of next generation three-dimensional fabrication technology using high-density ion beam. High-density plasma was generated by arc discharge, carbon ions are extracted from plasma, further to develop a deposition apparatus capable of converging ion beam by using electrostatic lens. Carbon was deposited on Si substrate. By calculating electric field in the vicinity of the electrostatic lens by the finite difference method, trajectory of the charged particles were predicted successfully. Based on the simulation results, electrostatic lens was designed, manufactured, and placed in a deposition apparatus. Ion beam (area 1100mm² in initial condition) was converged up to 166 mm² when coil current was 0.1 A. Hard carbon film was deposited at irradiated area of the ion beam. These results led us to the suggestions that it is possible to creation three-dimensional shape using high-density ions.

研究分野：材料工学

キーワード：材料加工・処理 構造・機能材料 プラズマ加工 機械材料・材料力学 機械工作・生産工学

1. 研究開始当初の背景

(1) 東日本大震災を経験した我々科学技術者は、日本の復興と将来の発展に資する科学技術を生み出す責務がある。特にものつくりの観点からは、革新的プロセス技術及び生産システム技術の確立、材料創製と加工を一体化した技術の開発の研究開発が希求されている。本研究は前者の革新的製造プロセス技術に該当する。

(2) 三次元形状創成技術の進展は目を見張るものがあるが、鉄鋼材料を始めとする、実際の工業材料を用いた実際の切削加工の精度での三次元形状創成は、まだ実用例のない黎明期の課題であり、材料組織制御のために入射イオンエネルギーを制御しながら金属材料・炭素材料を高精度・高速で三次元形状創成することは、ものつくりに新たな潮流を与えるものとして、材料科学・材料工学の観点から大きい意義を持つ。

2. 研究の目的

本研究は、革新的製造プロセスとして、高密度イオンを用いた高精度三次元部材創成法の開発を目的とするものである。そのために、アーク放電技術を駆使してグラファイト原料固体のプラズマを制御し、固体原料からの高密度イオン生成と磁気フィルタによるイオンのみの抽出を実現すること、高密度イオン生成プラズマ源と選択堆積法を具備した三次元部材創成装置を開発すること、開発装置を用いて炭素部材および鉄鋼部材を 15 μm 精度で作製することを研究目標とする。

3. 研究の方法

(1) 本研究は、高密度イオンを用いた、実材料の高精度三次元部材創成法を開発することを目的とするもので、研究計画は以下のステップから成る。

アーク放電技術を駆使して原料の高密度イオン流を生成するためのイオン源を開発し、グラファイト原料固体のプラズマを制御し、固体原料からの高密度イオン生成と磁気フィルタによるイオンのみの抽出を実現する。

高密度イオン生成プラズマ源とイオン収束レンズを具備した三次元部材創成装置を開発する。

4. 研究成果

(1) 炭素の高密度イオン流を得るためのイオン源を試作する。イオン源は、高密度のイオンを得るためにアーク放電プラズマを用いることとして、炭素の原材料ターゲットを陰極とし、ターゲットを回転させながらターゲットと電極間でアーク放電を発生させて、イオンを生成させた。真空アーク発生部の概略を図1に示す。真空アーク放電では金属や炭素をアーク源として用い、使用可能な元素は Li, C, Mg, Al, Si など 50 種類以上に及び。

カソードスポット付近のプラズマ密度は 10^{26}m^{-3} に及び、電圧はターゲットに依存するがおよそ 15 ~ 35 V、電流は 30 ~ 300 A である。

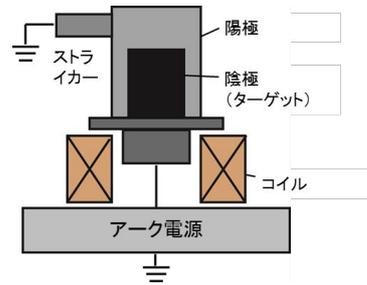


図1 真空アーク発生部の概略図

(2) アーク放電時には、プラズマの発生と同時に、ターゲットの一部が固体や液体のまま粒子となって飛散する。これらはマイクロパーティクルと呼ばれ、成膜面への付着により膜質の低下をもたらす。そのマイクロパーティクルを取り除く方法の一つに、曲線形状のダクトに磁気を印加した磁気フィルタがよく用いられている。磁気フィルタ中では、マイクロパーティクルは電荷を持たないため慣性力により直進し、ダクト壁に衝突することにより除去される。それに対し、イオンなど荷電粒子は、磁場によりローレンツ力を受けダクト内を輸送されるため、イオンのみを取り出すことができる。磁気フィルタは、トーラス状のダクトの周囲にガイドコイルが巻かれており、軸方向の磁界が発生している。また、ダクト自体は電気的に接続されおらずフロート状態となっている。荷電粒子は磁力線に沿って移動する。この時のラーマ半径 r_L は

$$r_L = \frac{mv_{\perp}}{qB} \quad (2.1)$$

で得られ、 m は粒子の質量、 v_{\perp} は軸に対して垂直方向の粒子速度、 q は粒子の価数、 B は磁場の大きさである。

一方、磁場により螺旋運動している荷電粒子に力 F が働く時、回転中心は

$$\vec{v} = \frac{\vec{F} \times \vec{B}}{qB^2} \quad (2.2)$$

のドリフト運動を行う。トーラス型のように磁場が湾曲している場合は、螺旋運動しながら磁力線に沿って運動する荷電粒子に遠心力 F_c

$$\vec{F}_c = m \left(\frac{v_{\parallel}^2}{R_c^2} \right) \vec{R}_c \quad (2.3)$$

が働く。ここで \vec{R}_c は曲率半径ベクトル、 v_{\parallel} は軸に対して平行方向の粒子速度である。

また、磁場の大きさは磁力線の曲率半径に

反比例する．荷電粒子が螺旋運動しているとき，ダクトの内側ではダクトの外側へ，ダクトの外側では内側への力を受け，磁場の強い内側のほうが受ける力は大きくなるので，荷電粒子は外側へ力 $\vec{F}_{\nabla R}$

$$\vec{F}_{\nabla B} = \frac{m}{2} \left(\frac{v_{\perp}^2}{R_C^2} \right) \vec{R}_C \quad (2.4)$$

を受ける．これらを式(2.2)に代入してドリフト速度 v_d

$$\vec{v}_d = \left(\frac{m}{q} \right) \left[\frac{(\vec{R}_C \times \vec{B})}{B^2 R_C^2} \right] \left[v_{\parallel}^2 + \left(\frac{v_{\perp}^2}{2} \right) \right] \quad (2.5)$$

を得る．

(3) 荷電粒子がダクトを通過する条件は，ラーマ半径とダクトを通過するまでのドリフト速度によるずれが，ダクト半径より十分小さいことである．本研究で用いる実験装置において

$$R_C = 300\text{mm}, B = 10\text{mT}, v = 2.1\text{m/s},$$

$$v_{\parallel} = v/\sqrt{2}, v_{\perp} = v/\sqrt{2}, q = 1.60 \cdot 10^{-19}\text{C},$$

$$\text{炭素イオンの質量 } m_C = 1.99 \times 10^{-26}\text{kg},$$

$$\text{電子の質量 } m_e = 9.11 \times 10^{-31}\text{kg} \text{ として概}$$

算すると，ダクト半径 200 mm に対して，炭素イオンのラーマ半径は 150 mm，電子のラーマ半径は 3 mm である．また，電子のドリフト量は 9 mm となった．電子は容易に磁力線に沿って螺旋運動するが，イオンはそうでないことがわかる．しかし，ダクトによって輸送されるのは電子やイオンの単体ではなく，プラズマである．

(4) そこで，次にプラズマの動きについて考える．ただし，カソードスポットはダクトの中心軸上に存在するとする．カソードスポットから発生した電子は磁力線に沿って運動する．そのため軸対称かつ軸中心において電子の密度分布が高くなる．一方でイオンは磁場の影響を比較的受けないため，カソードスポットから自由膨張する．その結果，軸中心付近に分布する電子と自由膨張するイオンとの間に電場が発生し，イオンは電子に引き寄せられる．そのためイオンと電子はダクトに対して軸対称な $E \times B$ ドリフトを起こし，プラズマはダクトの軸を中心として回転しながら輸送される．このため式(2.5)による中心からのずれはあ

るものの，本設計により，試作装置ではほぼ軸対称で中心のイオン密度が高いプラズマの輸送が可能となる．

(5) 本研究では，生成した炭素イオンを収束させるために，磁界レンズを用いた．磁界レンズは，電子顕微鏡用のレンズとして広く用いられており，収差は小さいが，電流値の変動で焦点距離が大きく変化するため，安定した電源を用いる必要がある．コイルを高い透磁率を持つ純鉄製のハウジングで囲み，一部分に切り欠きを設けることによってコイルで発生した磁界を集中させ，強磁界を発生させる．この切り欠きはポールピースと呼ばれ，このとき切り欠き部分に作られた回転対称な磁界によってイオンを収束させる．

(6) 磁界レンズの設計をするにあたって，ポールピースにおける磁界の強さと分布を仮定する必要がある．そこで，電子顕微鏡用磁界レンズの設を参考に，磁界分布を求めた．磁界レンズ中の磁界分布は，軌道方程式を解くことにより焦点距離の計算が簡便になることから

$$B = \frac{B_m}{1 + \left(\frac{z}{a} \right)^2} \quad (6.1)$$

によって仮定されることが多い．ここで z は軸方向距離， B_m は磁界強さの最大値， a は磁界強さが $B_m/2$ となるレンズ中心からの距離である．この B_m ， a を求める必要がある．

(7) まず，実際のレンズの形状の概略図を図2に，寸法および座標を，ポールピースを真横から見た図である図3に示す．ポールピーススリット間の距離を d ，ポールピース半径を r とし，磁界分布は左右対称であることから 図3において赤で囲った半面のみを考え， B_m ， a を見積もった．

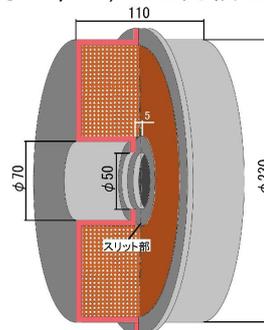


図2 磁界レンズの断面図

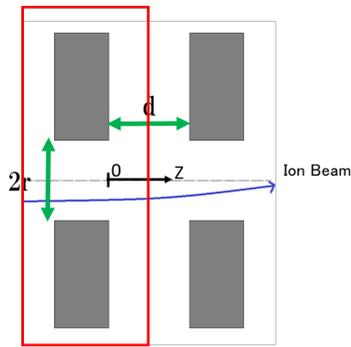


図3 ポールピースの概略図

(8) 本研究では、スリット幅を狭く保ったまま、ポールピース穴径をなるべく大きくして通過できるイオン量を増やしたかったため、 $d = 5 \text{ mm}$, $2r = 50 \text{ mm}$ とし、 $d / 2r = 0.1$ となることから Wang の手法を用いた。このとき、 $B_m = 0.136B_0$, $a = 3.25d$ となる。磁界レンズの焦点距離は、これらを用いると

$$f = \frac{a}{\sin \frac{\pi}{\sqrt{1+K}}} \quad (8.1)$$

$$K = \frac{q(aB_0)^2}{8mV_0} \quad (8.2)$$

で得られる。ここで、 q はイオンの電荷、 m はイオンの質量、 V_0 はイオンの加速電圧である。次にイオンの加速電圧を求める。炭素イオンの速度は $2.1 \times 10^4 \text{ m/s}$ 付近にピークがある。加速電圧とイオンの速度は

$$v = 1.38 \times 10^4 \sqrt{\frac{ZV_0}{M}} \quad (8.3)$$

の関係式で表され、この式より加速電圧を求める。ここで Z はイオンの価数、 M はイオンの質量数である。以上により焦点距離を求めることができる。表 1 に製作した磁界レンズの仕様を示す。

表 1 磁界レンズの仕様

巻き数 [回]	5000
導線直径 [mm]	1
コイル外径 [mm]	200
コイル内径 [mm]	80
抵抗 [Ω]	48.4
コイル電流 [A]	0.1
焦点距離 [mm]	170

(9) 以上の設計を基に磁界レンズを試作した。フランジ部の外径は 248 mm、中心の穴径は 50 mm である。素材はコイル鉄心に用いられている電磁純鉄 (ME1F) を用いた。図 4 に

磁界レンズを設置した堆積装置の図を示す。磁気フィルターから出てきた炭素イオンは直径 40 mm の穴を通り、磁界レンズの中心を通過し基板に衝突する。磁界レンズ中心と基板間の距離は 170 mm である。

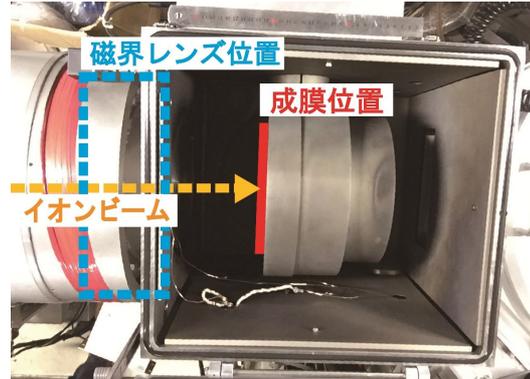


図 4 磁界レンズと成膜位置との関係

(10) 真空チャンバー内部に磁界レンズを設置した FCVA 装置を用いて、炭素イオンビームの収束実験を行った。基板バイアスは -100 V とした。磁界レンズの電流値を変化させ、炭素膜の成膜面積の変化を調査、分析した。

図 2 炭素の堆積条件

圧力 [Pa]	$\leq 4.0 \times 10^{-4}$
基板バイアス [V]	-100
コイル電流 [A]	0, 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1
アーク電流 [A]	38
時間 [min]	10

(11) DLC 膜が製膜された面積を測定するにあたって、画像処理による手法を用いた。スキャナにより取り込んだ DLC 膜の画像を、画像編集ソフトによりグレースケールへ変換し、しきい値を定めモノクロ 2 階調へと変換した。本研究ではしきい値を 70 と定めた。

(12) 成膜した DLC 膜のラマンスペクトルを図 5 に示す。いずれも DLC に特有の 1550 cm^{-1} 付近の G バンドおよび D バンドを含んだピークが認められる。これより作製した膜がダイヤモンド状炭素膜であることが確認された。

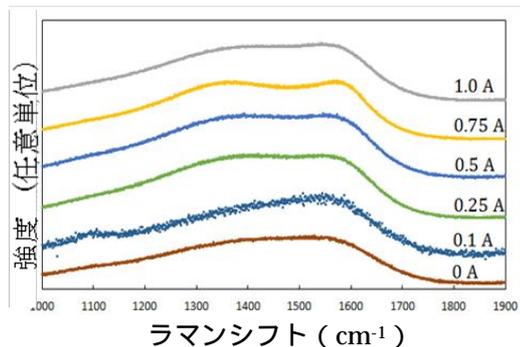


図 5 堆積物のラマンスペクトル

(13) コイル電流と DLC 膜の成膜面積との関係を図 6 に示す。コイル電流 0.25 A 以上では、電流値の増加に伴い、成膜面積が増加した。磁界レンズの焦点が、基板とレンズの間に位置し、焦点を通過したイオンビームが再拡張して成膜面積が増加したと考えられる。

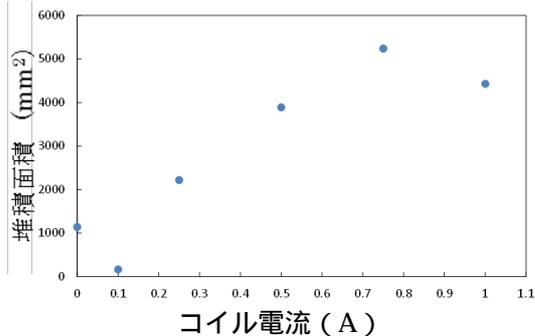


図 6 堆積面積と磁気フィルターコイルの印加電流との関係

(14) 磁界レンズの設計において収束すると予測したコイル電流 0.1 A の時、成膜面積は 0 A の時よりも減少しており、166 mm²まで収束した。これは成膜半径に換算すると 7.3 mm に相当する。しかし、目標とする μm オーダーの成膜半径には収束していなかった。その原因として、炭素イオンの速度の分布が考えられる。磁界レンズの設計において、炭素イオンの速度は $2.1 \times 10^4 \text{ m/s}$ であると仮定したが、ピークの半値幅となる速度分布は $1.7 \sim 2.5 \times 10^4 \text{ m/s}$ となる。そこで、炭素イオン速度 $1.7 \times 10^4 \text{ m/s}$ および $2.5 \times 10^4 \text{ m/s}$ における磁界レンズの焦点距離を求め、そこから基板上における誤差を求めた。炭素イオン速度が $1.7 \times 10^4 \text{ m/s}$ の時、基板上における成膜半径は 7.2 mm となる。これを基に成膜面積を計算すると、163 mm² となる。これは実験により得られた 166 mm² と近い値である。以上より、目標とする収束精度を得るためには、レンズを複数設置することにより一定速度の炭素イオンを抽出すればよいことがわかった。

(15) 以上の解析と実験を経て、本研究によりイオンビーム(面積 1100mm²)を 166 mm²まで収束させて硬質炭素膜を堆積させることに成功し、高密度イオンを用いた三次元創成が可能であることを示唆した。また、より高精度の堆積を実現するには、レンズを複数設置することにより一定速度のイオンを取り出せばよいことがわかった。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大竹 尚登 (OHTAKE, Naoto)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：4 0 2 1 3 7 5 6

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

赤坂 大樹 (AKASAKA, Hiroki)
稗田 純子 (HIEDA, Junko)
今野 敬士 (KONNO, Takashi)