J. Inst. Electrostat. Jpn. 論 文

パルスアーク放電プラズマ法による 酸化亜鉛ナノ粒子の生成における放電パラメータの影響 高木 駿*,龍 輝優*,里 佳彦**,王 斗艶***,浪平 隆男***.1 (2021年9月21日受付:2021年11月29日受理)

Effect of Discharge Parameters on the Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles by the Pulsed Arc Discharge Plasma Shun TAKAKI^{*}, Terumasa RYU^{*}, Yoshihiko SATO^{**}, Douyan WANG^{***} and Takao NAMIHIRA^{***,1}

(Received September 21, 2021; Accepted November 29, 2021)

Zinc oxide nanoparticles are nanomaterials that are expected to be applied in a wide range of fields such as solar cells, gas sensors and UV absorbers. It is known that various properties of nanoparticles depend on their size, shape and composition. Therefore, the synthesis method of nanoparticles is attracting attention. In this paper, we attempted to synthesize zinc oxide nanoparticles by the pulsed arc discharge plasma. We also investigated the effect of discharge parameters (frequency, pulse width, current value) on synthesized particles. Synthesized particles were characterized by scanning electron microscopy (SEM), and X-ray diffraction (XRD). As a result, it was found that the composition of the zinc oxide nanoparticles was affected by the pulse width and current value. In addition, AZO nanoparticles were synthesized using Zn and Al as electrodes. As a result, gahnite nanoparticles were synthesized instead of AZO nanoparticles. It was suggested that this is related to the temperature of the arc discharge plasma.

1. はじめに

酸化亜鉛(ZnO)は 3.37 eV のバンドギャップと,60 meV の大きな励起子結合エネルギーを持つ半導体であり、室温でも有効な紫外発光を呈する.また、ZnO をナノサイズまで小さくすると、発光効率が向上することが知られている¹³⁾.ZnO をナノサイズ化した ZnO ナノ粒子は優れた電気的特性、光触媒特性及び紫外線吸収特性を持つ^{4,5)}.そのため、太陽電池⁶⁾、ガスセンサー⁷⁾、紫外線吸収剤⁸⁾といった多岐にわたる産業分野で応用がなされている.ナノ粒子の諸特性はその粒子径,粒子形状、組成などに依存する⁴⁶⁾.そのため、使用目的に適した大きさや形の粒子を製造することが求められ、ナノ粒子の生成に関する研究は大きな注目を集めている.

ナノ粒子の生成方法は、固体に機械的なエネルギーを 加えて細分化する粉砕法と、原子、分子の集合体を合体、 成長させていく成長法に大別される.前者は、生成プロ セスが単純で低コストであるが、粒子径や粒子形状の制

キーワード:パルス放電,アーク放電,ナノ粒子,プラ ズマ温度,酸化亜鉛

「熊本大学産業ナノマテリアル研究所

(〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1)

Institute of Industrial Nanomaterials, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, Japan namihira@cs.kumamoto-u.ac.jp DOI: https://doi.org/10.34342/iesj.2022.46.1.26 御に限界がある.後者は,後で粒子となる原材料の初期 の状態により,気相プロセス,液相プロセス及び固相プ ロセスに分類される.成長法における固相法には固体の 熱分解法,固相反応法,還元法などが挙げられる.いず れの場合も気相,液相及び固相プロセスなどで生成され た微粒子を原料粉末として用いることが多い.そのため, 固相プロセスでの小粒径化は数百 nm が限界である.さ らに,気相プロセスは液相プロセスに比べて,生成場の 点から不純物が少ない.そのため,高純度で微細な粒子 の生成には気相プロセスが有効である⁹⁻¹²⁾.そこで我々 は、ナノ粒子の生成方法としてパルスアーク放電プラズ マ法を採用した.

アーク放電プラズマ法とは、平板対平板電極間に高温 のアーク放電を発生させることで、電極材料を気化させ てナノ粒子を生成する気相法の一つである.電極間に発 生したプラズマにより電極金属は蒸発し気化する.こう して発生した過飽和の金属蒸気は雰囲気ガスと反応をし ながら冷却され、ナノ粒子まで成長する.アーク放電プ ラズマ法は生成機構及び装置構成が単純であり、金属蒸 気からの成長法であるため、ナノサイズの粒子を生成す ることができる.さらに、出発原料である電極材料、雰 囲気ガス及びその他条件を変えることにより、金属酸化 物、窒化物、さらには複合金属化合物といった多種の粒 子を生成することができる.電源に直流を用いる手法は 直流アークプラズマ法と呼ばれる. これに対して, パルス 電源を用いるものをパルスアーク放電プラズマ法という. 後者はパルス形成回路が必要となるが, エネルギーに対 する生成効率が直流よりも高いといった報告がある¹³⁾. ま た, 断続的な放電であるため, 粒子生成時の冷却機構を 制御可能であるといった特徴がある. さらに, 放電パラ メータ(放電周波数, パルス幅, 電流値)を変更するこ とで, 生成粒子の特性がより精密に制御されることが期 待できる. しかし, 本手法によるナノ粒子生成に関する 研究例は少ない. そこで, 本実験ではパルスアーク放電 プラズマ法により ZnO ナノ粒子を生成し, 各放電パラ メータが生成粒子に与える影響について調査した. また, 本手法の利点を検証するため, 異素材の電極を用いて, 複合金属化合物ナノ粒子の生成を試みた.

2. 実験方法

2.1 実験装置

図1に本実験で使用した(a)ナノ粒子生成装置及び(b)実験回路図を示す. 粒子生成リアクタ内部に \$30 mmの亜鉛(Zn)製円柱電極を対向させた平行平板電極を設置し,パルスパワーを用いた高電圧を印加して絶縁破壊を起こさせることで,電極間にアーク放電プラズマを形成した.使用した亜鉛(Zn)は三井金属製であり,その純度は 99.7%以上となる.主な不純物としてはアルミニウム(Al)を含む.なお,リアクタ内部は真空引きした後,酸素をゲージ内圧力 0.2 MPa で封入し,電極間距離は 1 mm とした.電極材料には Zn もしくは Al を使



図1 本実験で使用した(a)ナノ粒子生成装置概略図及び(b) BPFN

Fig.1 Experimental (a) Diagram of NPs synthesizer and (b) circuit diagram of BPFN.

路(BPFN)を用いた.一般的なパルス形成回路(PFN) では出力電圧が充電電圧の半分であるのに対し,BPFN では充電電圧と等しい波高値の電圧が得られる.以下に 回路の特性インピーダンス Z_0 及び出力される電圧のパ ルス幅 Δt の導出式を示す^{14,15)}.

$$Z_0 = 2\sqrt{L/C} \tag{1}$$

$$\Delta t = 2N\sqrt{LC} \tag{2}$$

ここで、Nは並列に接続された2個のLと2個のCか らなる回路を1段としたときの直列接続の段数である. パルス幅による影響調査のため、段数の変更によるパル ス幅の変動は1段あたり100 nsとした.よって段数N が10段の時のパルス幅 Δt を1 μs, 特性インピーダンス の設計値を 50 Ωとし、静電容量 C 及びインダクタンス はそれぞれ2nF, 1.25 μHとした. コンデンサは2nFの もの (DHS4E4G202MTXB, Murata Electronics) を使用し, コイルは塩ビ管と銅線を利用して製作した. 作製した BPFN の特性インピーダンスを調査するために、本回路 の短絡試験を行った、その際の充電電圧及び短絡電流は それぞれ 20 kV, 670 A であり、本回路の実際の特性イ ンピーダンスは約30Ωであった.そのため、放電電極 へ直列に、25Ωの無誘導抵抗を挿入することで、寄生イ ンダクタンスと併せた整合を取った.また、上段のコンデ ンサの充電のために、負荷と並列に300Ωの抵抗を設けて いる. コンデンサの充電は電流源(802L-30 kV-POS, TDK-Lambda) で行い, 短絡スイッチ素子としてサイラ トロンを用いた.

BPFN の充電電圧及び電極への放電電流波形はそれぞ れ高電圧プローブ (PVM-5, North Star High Voltage), カレントトランスフォーマー (Model 110A, Pearson)



図2 放電時の充電電圧波形

Fig.2 Charging voltage waveform during discharg

を用いて測定し、オシロスコープ(WaveRunner 8404M, TELEDYNE LECROY)でモニタリングした. 図2に示 す BPFN 動作時の充電電圧波形より、充電電圧の立下り 時間は非常に短く、完全にゼロまで落ち切っていること がわかる.ナノ粒子生成実験においては放電電流のみを 測定した.

2.2 実験方法

2.2.1 各放電パラメータの影響調査

放電の周波数,パルス幅,電流値が生成される粒子に 及ぼす影響について調査を行うため,Zn電極及び酸素雰 囲気にてZnOナノ粒子の生成を試みた.表1に各パラメ ータの値を変化させた際の生成条件を示す.周波数はファ ンクションジェネレータ(WaveStation2012,TELEDYNE LECROY)によってサイラトロンを制御した.パルス幅 は BPFN の段数を調節,電流値は充電電圧を変化させる ことで制御した.図3に(a)パルス幅及び生成時間及 び(b)電流値を変化させた際の放電電流波形を示す. 図3より,目標のパルス幅及び電流値が得られているこ とが確認される.また,周波数は全ての条件で生成時間 全体における電極への通電電荷量が等しくなるように設 定した.なお,通電電荷量のは以下の式で算出した.

$$Q = \int_0^{\Delta t} I(t)dt \bullet f \bullet T \tag{3}$$

I, fは電流値及び放電周波数である.また, T はそれ ぞれの条件における生成時間である.なお,電流の積分 値は,オシロスコープの積分関数を用いて電流の値をパ ルス幅 Δt で積分することで求めた.





表1 各パラメータの影響調査における生成条件 Table 1 Synthesis conditions at the effect survey of various parameter.

2.2.2 複合金属化合物ナノ粒子の生成

ZnOにAlをドープしたAl₂O₃-ZnO(AZO)と呼ばれ る金属酸化物をナノサイズ化したものは,高い透明性と 優れた電気導電性を持つため,透明導電性膜への応用が 期待されている.現在,透明性導電膜には主に酸化イン ジウムスズ(ITO)が利用されているが,原材料のイン ジウム(In)は希少金属であり高価である.そのため, AZOはITOの代替品として注目を集めている¹⁶.

本実験では AZO ナノ粒子を生成するため、リアクタ 内部の平板電極に Zn と Al を設置して放電を行った.パ ルス幅は 1 µs に固定し、400、800 A の電流値で生成した. また、供給エネルギー及び生成時間を一定とするため、 周波数を変化させた.

2.2.3 プラズマ温度の計測

本手法において,アークプラズマ温度が生成される粒 子へ大きく影響すると考えられる.そこで,プラズマの 発光分光解析によって各電流値及びパルス幅におけるプ ラズマ温度の計測を行った.電極にはZnを用いた.プ ラズマ温度は,亜鉛の発光スペクトル線の絶対強度比法 (Boltz-mann Plot法)により算出した.発光スペクトル は PMA 分光器 (C10027-01,浜松ホトニクス株式会社) によって測定した.なお,駆動周波数及び露光時間は1 Hz, 100 ms とした.

2.3 評価方法

各条件で生成された粒子は組成調査と粒子形状観察に よって評価した. 粒子の組成は粉末X線回折装置(XRD) (Ultima IV,株式会社リガク)によって測定した. 粒子 形状は生成粒子にオスミウムコーティングを施した後, 走査型電子顕微鏡 (SEM) (JSM-6390LV,日本電子株 式会社)によって観察を行った.

3. 実験結果

3.1 周波数の影響

図4に異なる周波数で生成された粒子の(a) XRD パ ターン及び(b) SEM 画像を示す. 図4(a) より, ZnO のピークが鮮明に出現しており,一部, Zn や ZnO の前 駆体である Zn₅(OH)₈(NO₃)₂(H₂O)₂ のピーク¹⁷⁾ が確認さ れた.また,各周波数において組成に明らかな変化はな

Parameters of interest	Effect of frequency	Effect of pulse width	Effect of current
Current value	500 A	500 A	300, 500, 800 A
Pulse width	1 μs	300 ns, 500 ns, 1 µs	1 µs
Frequency	50, 100, 150 Hz	500, 250, 150 Hz	600, 150, 75 Hz
Synthesis time	3, 1.5, 1 h	1 h	1 h



図 4 各周波数で生成された粒子の(a) XRD パターン及び
(b) SEM 画像

Fig.4 (a) XRD pattern and (b) SEM images of synthesized particles when the frequency was changed.

いことが確認される.図4(b)からは、全条件におい て粒子径が100 nm以下の粒子が確認された。粒子の形 状には粒状と棒状の2種類が存在し、前者が大半を占め ている.また、全条件を比較しても粒子形状は大きく変 化していない.これらは周波数及び放電間隔は生成粒子 の組成及び形状に影響を与えないことを示している.

この結果はパルスアーク放電プラズマのプラズマ温度 の降温速度が原因であると考えられる.パルスアーク放 電プラズマは発生後に瞬間的に温度が1万K以上の超高 温となる.しかし,その後200 µs 程度で平温に戻る¹⁸. 今回用いた最大周波数は150 Hzで,その放電間隔は約 7 msであり,放電間にてプラズマにより気化されたZn が周囲の酸素と反応し,結晶化するまで十分な時間があ った.そのため生成粒子に影響を与えなかったと考えら れる.

3.2 パルス幅の影響

3.1節にて,放電周波数は生成される粒子に影響を与 えないことが判明した.そこで,周波数を調整してパル ス幅以外のパラメータを他の調査と統一した.

図5に異なるパルス幅で生成された粒子の(a) XRD パターン及び(b) SEM 画像を示す.図5(a)より, ZnOのピークが鮮明に大きく出現しており,その他に前 駆体とZnのピークが確認される.すべてのパルス幅に



図 5 各パルス幅で生成された粒子の(a) XRD パターン及 び(b) SEM 画像

Fig.5 (a) XRD pattern and (b) SEM images of synthesized particles when the pulse width was changed.

おいて ZnO のピークはほぼ変動していないが,パルス 幅の増加に伴って前駆体のピークは減少している.図5 (b)からはすべてのパルス幅において粒子径が100 nm 以下の粒状粒子が一様に分布しており,長さが200 nm 程度の棒状粒子が所々に散在していることが確認され る.なお,この結果に対する考察は次節で述べる.

3.3 電流値の影響

パルス幅の影響調査と同様に,周波数を調整して電流 値以外のパラメータを他の調査と統一した.

図6に異なる電流値で生成された粒子の(a) XRDパ ターン及び(b) SEM 画像を示す.図6(a) より ZnO のピークが鮮明に出現していることがわかる.その他に 前駆体,Znのピークが確認される.すべての電流値に おいて,ZnOのピークはほぼ変動していない.一方で, 前駆体のピークは電流値の上昇に伴い増加している.Zn は 300 A では確認されなかったが,500 及び 800 A では 確認された.図6(b)からは全ての電流値において 100 nm 以下の粒状粒子が一様に分布しており,長さが 200 nm 程度の棒状粒子が散在していることが確認され る.また,電流の増加に伴って粒状粒子に対する棒状粒 子の占有率が増加している.このことから SEM 画像内の 粒状粒子はZnO であり,棒状粒子は前駆体であると考え られる.なお,この結果に対する考察は次節で述べる.



- 図 6 各電流値で生成された粒子の(a) XRD パターン及び (b) SEM 画像
- Fig.6 (a) XRD pattern and (b) SEM images of synthesized particles when the current value was changed.

3.4 AZOナノ粒子の生成

図7にZnおよびAlを用いた平板電極で生成された粒 子の(a) XRD パターン及び(b) SEM 画像を示す. 図 7(a)より, 両電流値とも ZnO のピークが鮮明に出現し, 次にアルミン酸亜鉛(ZnAl₂O₄)である Gahniteの組成 が確認される. その他には Zn 及び ZnO の前駆体の組成 が確認される.この結果より、目標物質のAZOではな く Gahnite が生成されていることが分かる. すべての電 流値において ZnO のピークはほぼ変動せず, Gahnite の ピーク、すなわち含有率は電流値の増加に伴い増加して いる. 図7(b)からは、すべての電流値において粒子 径が100 nm 以下の粒状粒子が分布していることが確認 される.これらの結果より、本手法において異種の電極 を用いることにより、複合金属酸化物ナノ粒子の生成が 可能であることが立証された。また、その生成割合は電 流値によって制御可能であることが示唆された. なお, この結果に対する考察は次節で述べる.

3.5 プラズマ温度

図8にパルス幅1µs, 電流値300Aでのプラズマの発 光スペクトルを示す.この発光波長の特徴から, 亜鉛の 発光スペクトルであることが確認される.各条件におい て図8に示す波長における発光強度を用いてプラズマ温 度の算出を行った.近接している発光ピークでは, 波形



図7 異なる素材の平板電極で生成された粒子の(a) XRD パターン及び(b) SEM 画像

Fig.7 (a) XRD pattern and (b) SEM images of AZO particles synthesized by flat electrode of a different materials.



図 8 亜鉛プラズマの発光スペクトル Fig.8 The emission spectrum of zinc plasma.

の重複による干渉が確認されたため,解析ソフト (PeakFit, SeaSolve Software)を用いてピーク分離を行 った.なお,計算に必要な各値は Shaikh らの文献¹⁹ に 記載された値を使用した.

図9にボルツマンプロット法により算出された各パル ス幅及び各電流値のプラズマ温度を示す.なお,図9(a) の電流値は500 A,(b)のパルス幅は1µsで一定である. この図より,ナノ粒子生成中のアーク放電プラズマの温 度は1万5千K程度まで到達していることが確認される. また,電流値及びパルス幅の増加に伴うプラズマ温度の 上昇も確認され,放電パラメータによるプラズマ温度の 制御が可能であることがわかる.



図9 ナノ粒子生成時のプラズマ温度と(a)パルス幅及び(b) 電流値の関係

Fig.9 Relationship between plasma temperature and (a) pulse width (b) current value.

4. 考察

4.1 パルス幅及び電流の影響

本節では、パルス幅及び電流が生成された粒子の組成 に与える影響について考察する.本稿では、生成された 粒子の組成調査により、ZnOのほかにZn及び前駆体で あるZns(OH)®(NO3)2(H2O)2の組成が確認された.また、 3.2節より、パルス幅の増加に伴い前駆体の含有量が減 少することが確認された.これはパルス幅の増加によっ て、気化された亜鉛の加熱時間が増加したためだと推察 される.前駆体とはその名の通り目標物質に至らなかっ た物質であり、加熱することによってZnOに変化する ことが報告されている¹⁷⁷.パルス幅はプラズマの維持時 間、すなわち高温維持時間を示しており、パルス幅の増 加によって亜鉛蒸気と雰囲気ガスである酸素との反応が 促進されたため、前駆体が減少したと考えられる.

一方で、電流値の増加は前駆体の含有量を増加させる 結果となった.これは電流値の増加に伴い、気化する亜 鉛の量が増加したためであると考えられる.電流値の増 加は電流密度の増加であり、単位時間あたりに電極の金 属材料にエネルギーを与えるプラズマの量が増加するこ とを意味する.結果として、電流値の増加に伴い電極付 近における Zn の金属蒸気量が増加した.このことは図 7(a) において高い電流値で Zn のピークが出現してい ることからも示唆される.そのため、プラズマによる高 温領域内の Zn 蒸気量が増加し、反応できる酸素が不足 したため、前駆体の含有量が増加したと推察される.

4.2 複合金属化合物

4.1節と同様に熱の観点から、Zn 及び Al 電極を用い て放電を行った結果、AZO ではなく Gahnite が生成され た原因を考察する. AZO 及び Gahnite はともに粉体の ZnO と Al₂O₃ を混合し、焼結することで生成される.本 実験では、パルスアーク放電プラズマによって両電極で ZnO 及び Al₂O₂ が生成され、そのプラズマの降温過程に て Gahnite が生成されたと考えられる. 一般に AZO は 500℃以下の温度で作製され、温度が 800℃を超えると Gahnite の生成が開始される²⁰⁾. このことから、両電極で 発生した ZnO と Al₂O₃ の反応が 500℃を超える温度で行 われたことが示唆された. さらに、電流値の増加に伴い Gahnite の含有量が増加した. これは電流値の増加に伴っ てプラズマ温度が上昇したことが原因だと考えられる.

本手法においてナノ粒子はプラズマ発生後の降温過程 で金属蒸気が周囲ガスと反応し、その後結晶化すること で生成される.今回、プラズマ温度は1万Kを超え、そ れらの反応が500℃を超える時間領域で起こったため、 AZOが生成されなかったと考えられる.しかし、金属蒸 気及びガスの反応速度とアークプラズマの降温時間はと もにマイクロ秒オーダーである^{10,18)}.よって、今後、プラ ズマの低温化及びパルスアークの短時間化などで降温速 度を上げることができれば、反応時の温度を500℃以下 に制御でき、AZOの生成も可能となると考えられる.

5. まとめ

本稿では、パルスアーク放電プラズマ法によってナノ サイズの ZnO 粒子及び Gahnite 粒子が生成された. 生成 される ZnO ナノ粒子に対して、放電周波数は影響を与 えないことが確認された. 一方、パルス幅及び電流は、 生成される粒子の組成に影響を与えることが判明し、パ ルス幅を長く、電流値を低く設定することでより高純度 な ZnO ナノ粒子を生成可能であることが示唆された.

異なる素材を用いた平板電極での粒子生成において は、目標物質のAZOではなくGahniteが生成された. これは発生した金属蒸気の反応時の温度がAZOの焼成 温度よりも高かったことが原因である.しかし、異素材 の電極を用いることで複合金属化合物ナノ粒子を生成で きることが判明した.また、電流値を変化させることで Gahniteの生成割合を制御可能であることが示唆された.

今後は, AZO ナノ粒子の生成を目指してプラズマの

低電流化やパルスアークの短時間化が課題である. さら にアークプラズマの特性を活かして,生成時に高温が必 要となる金属窒化物²¹⁾や,温度に対する特性が大きく 異なる金属同士の化合物²²⁾といった多岐にわたるナノ 粒子の生成を試みたい.

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 19H05611 の助成を受け たものです.

参考文献

- P. Ranjan, L. S. Kumar, H. Suematsu, S. R. Chakravarthy, R. Jayaganthan and R. Sarathi: Thermodynamic analysis of ZnO nanoparticle formation by wire explosion process and characterization. Ceram. Int., 43 (2017) 6709
- H. Usui, Y. Shimizu, T. Sasaki and N. Koshizaki: Photoluminescence of ZnO Nanoparticles Prepared by Laser Ablation in Different Surfactant Solutions. J. Phys. Chem. B, 109 (2005) 120
- S. S. Su, I. H. Chang, W. C. H. Kuo, D. Price, Z. Pikramenou and J. Lead: Pulsed electrical discharge synthesis of red photoluminescence zinc oxide nanoparticles. J Nanopart Res, 16 (2014) 2611
- P. Ranjan, R. K. Singh, H. Suematsu, L. Phillip and R. Sarathi: Synthesis of nano-ZnO by wire explosion process and its photocatalytic activity. J. Environ. Chem. Eng., 5 (2017) 1676
- D. Raoufi: Synthesis and microstructural properties of ZnO nanoparticles prepared by precipitation method. Renew. Eneg., 50 (2013) 932
- G. R. Neupane, A. Kaple and P. Hari: Microwave-assisted Fedoped ZnO nanoparticles for enhancement of silicon solar cell efficiency. Sol. Energy Mater Sol. Cells, **201** (2019) 110073
- H. R. Yousefi, B. Hashemi, A. Mirzaei, H. Roshan and M. H. Sheikhi: Effect of Ag on the ZnO nanoparticles properties as an ethanol vapor sensor. Mater Sci Semicond Process, 117 (2020) 105172
- J. Salla, K. K. Pandey and K. Srinivas: Improvement of UV resistance of wood surface by using ZnO nanoparticles. Polym. Degrad. Stab., 97 (2012) 592
- 9)椿淳一郎,鈴木道隆,神田良照:入門 粒子・粉体工学,p. 47,日刊工業新聞社 (2002)

- 10) 粉体工学会:粉体工学叢書第2巻 粉体の生成, p. 67, 日刊工業新聞社 (2005)
- 11)明石和夫,陶山容子:超微粒子ハンドブック,斎藤進六,p. 192,株式会社フジ・テクノシステム (1990)
- 渡辺 晃,藤井元治,河原正佳,福井武久,野城 清: DCプラズマを用いた化学気相法による酸化物ナノ粒子の作成と粒子径制御.粉体工学会誌,44 (2007)447
- J. Suehiro, K. Imasaka, Y. Ohshiro, G. Zhou, M. Hara and N. Sano: Production of Carbon Nanoparticles Using Pulsed Arc Discharge Triggered by Dielectric Breakdown in Water, Jpn. J. Appl. Phys., 42 (2003) 1483
- 14)秋山秀典:高電圧パルスパワー工学, p. 85,株式会社オ ーム社 (2003)
- 15) 札元泰輔, 浪平隆男, 勝木 敦, 秋山秀典, 今久保知史, 真島隆司:大容量水中パルスストリーマ放電を用いた大 腸菌の殺菌. 電気学会論文誌 A, **126** (2006)669
- 16) N. Boonyopakorn, R. Rangkupan and T. Osotchan: Preparation of aluminum doped zinc oxide targets and RF magnetron sputter thin films with various aluminum doping concentrations. Songklanakarin J. Sci. Technol., 40 (2018) 824
- 17) C. Pholnak, C. Sirisathitkul, S. Suwanboon and D. J. Harding: Effects of Precursor Concentration and Reaction Time on Sonochemically Synthesized ZnO Nanoparticles. Mater. Res., 17 (2014) 405
- 18) T. Namihira, S. Sakai, M. Matsuda, D. Wang, T. Kiyan, H. Akiyama, K. Okamoto and K. Toda: Temperature and Nitric Oxide Generation in a Pulsed Arc Discharge Plasma. Plasma Sci Technol., 9 (2007) 747
- 19) N. M. Shaikh, B. Rashid, S. Haffez, Y. Jamil and M. A. Baig: Measurement of electron density and temperature of a laserinduced zinc plasma. J. Phys. D, **39** (2006) 1384
- 20) W. S. Hong, L. C. D. Jonghel, X. Yang and M. N. Rahman: Reaction Sintering of ZnO-Al₂O₃. J. Am. Ceram. Soc., 78 (1995) 3217
- 渡辺隆行:プラズマによるナノ粒子の創製.エアロゾル研究, 21 [3] (2006) 201
- T. Watanabe and H. Okuyama: Formation mechanism of slicide nanoparticles by induction thermal plasmas. Sci. Technol. Adv. Mater., 5 (2004) 639