ESナノファイバインプリント犠牲樹脂型ナノ粉末印刷による
マイクロ構造体の作製西藪 和明^{*1}, 川上 慈朗^{*2}Fabrication of micro-structured parts by nanopowder printing
using ES-nanofiber imprinting plastic moldKazuaki NISHIYABU^{*1} and Jiro KAWAKAMI^{*2}^{*1,*2} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Engineering, Kinki University
3-4-1 Kowakae, Higashiosaka-shi, Osaka 577-8502, Japan

Received 12 November 2014

Abstract

This study aims to develop an eco-friendly fabrication method for micro-structured parts with high aspect ratio. To achieve this purpose, nanopowder printing (nPP) process was adopted to the plastic mold with microstructures produced by electrospinning nanofiber imprinting (ES-NFI) method. A novel method named as ES-NFI sacrificial plastic mold nanopowder printing (ES-NFI/nPP) was proposed and demonstrated in this study. Micro plastic molds were prepared by ES-NFI method using Si forms that have various micro-structures including line and space (L/S) pattern, multi-pillars and holes. The effects of aspect ratio in microstructure on the shape transcription were investigated by changing Si forms from 1μm to 50μm wide for 10μm high. Also the composition of paste materials made from TiO₂ nano-sized powder and PEG water-soluble binder was varied for the optimization. It was shown from the experimental results that the sintered part with microstructures of 50μm wide for 10μm high could be formed soundly, and it was also desirable to use the paste materials with lower content of binder polymer in keeping adequate viscosity. It was confirmed that ES-NFI/nPP method was a useful method for fabricating the micro-structured parts in the mass production.

Key words : Micro-structured part, Electrospinning nanofiber, Plastic mold, Nanopowder, Titanium oxide, Sintering, Viscosity, Transcription

1. 緒 言

金属粉末射出成形 (Metal Injection Molding, MIM) は、粉末冶金 (Powder Metallurgy, P/M) の圧粉焼結技術とプラスチック射出成形 (Plastic Injection Molding, PIM) を組み合わせた複合の製造技術である (German, 1984, German and Bose, 1997). これは、金属粉末と大量のバインダを混練することによりペレットを調製し、バインダの熔融温度まで加熱させて射出成形し、所望の形状の成形体を得た後、溶媒抽出または加熱分解によりバインダを除去し、高温で加熱することにより焼結部品が得られる。そのため、MIM は高融点および高硬な機械加工困難な材料をテーラーメイド組成で、複雑な三次元形状の金属部品を高い寸法精度で量産できる。さらに精密金型を用いたマイクロサイズの金属部品を製造するマイクロ金属粉末射出成形 (Micro metal injection molding, μ-MIM) は有用性の高い製造技術である (Löhe and Haußelt, 2005, Piotter, 2012). しかしながら、MIM の製品や構造のサイズが 1mm 以下のスケールに近づくほど様々な技術課題がある (Nishiyabu, 2012). MIM の成形工程を考えると、

マイクロスケールに近づくほど金属粉末の分散状態の均一性が求められる。また、金型のキャビティのサイズに比べて粉末サイズが大きくなるため、数 μm 程度の微小粒径の粉末を用いることにより金型への転写性が改善されると考えられるが、粉末間の抵抗が大きくなる。製品が複雑になると、成形時や脱脂・焼結時に変形や亀裂などの欠陥が生じやすくなり、寸法が微小であると寸法誤差が大きくなる。MIMのマイクロ化の技術は進んでいるが、 $\mu\text{-MIM}$ の高品質化については検討すべき課題がある。それらの問題を解決するため、マイクロ犠牲樹脂型インサート金属粉末射出成形 (Micro Sacrificial Plastic Mold Insert MIM, $\mu\text{-SPiMIM}$) が開発された (西藪他, 2010a, 2010b, 2011, 2013)。この $\mu\text{-SPiMIM}$ プロセスの特徴は、金型の代わりに樹脂型を用いることである。作製対象物を反転させた樹脂型を金型内へインサートし、そこに MIM 原料を射出成形した後、MIM 成形体と樹脂型を一体で離型し、そのまま脱脂・焼結を行う。脱脂時に樹脂型を除去するため離型の必要がなく、取扱性も向上する。 $\mu\text{-SPiMIM}$ プロセスの適用により、金型を用いた MIM プロセスでは製造困難であった複雑な形状部品の作製も可能になった。しかしながら、射出成形は薄いシート状の部品の成形が困難であり、加圧および加熱による環境負荷が少なくない。一方、粉末からなるペーストを用いた印刷により、大量かつ高速に電子部品や機器を製造するプリントドエレクトロニクス (Printed Electronics, PE) 技術が注目されている (管沼, 2010)。この PE 技術は配線だけでなく、表示デバイスやソーラーパネル、さらに微細部品の低コスト製造も期待されている。

本論は、 $\mu\text{-SPiMIM}$ プロセスの成形性と環境適合性を改善するため、著者らが開発したエレクトロスピンニング (Electrospinning, 以後 ES と称す) ナノファイバインプリント (ES-NFI) 樹脂型 (西藪, 川上, 2015) を粉末印刷に適用することを提案する。このプロセスを ES ナノファイバインプリント犠牲樹脂型ナノ粉末印刷 (ES-nanofiber Imprinting Sacrificial Plastic Mold Nanopowder Printing, ES-NFI/nPP) と称し、マイクロ構造体の新たな製造法の開発を目的とした。本実験では、水溶性バインダと H_2O の配合割合を変化させてナノサイズの TiO_2 粒子ペーストを調製し、これを ES-NFI 樹脂型にコンタクト印刷して成形体を得た後、脱脂・焼結を得て焼結体を作製した。この際、3 種類のマイクロ構造を有する ES-NFI 樹脂型のサイズを種々変化させ、それらの形状転写性を評価した。

2. 製造方法および実験条件

2・1 ES ナノファイバインプリント犠牲樹脂型ナノ粉末印刷法

本研究で提案した ES-NFI/nPP 法の工程を図 1 に示す。本法は、図 1(a)エレクトロスピンニング法により作製したナノファイバシートをインプリントにより樹脂型を作製し、図 1(b)ナノ粒子とバインダにより調合したペーストを樹脂型にコンタクト印刷し、図 1(c)溶媒脱脂により樹脂型を除去し、図 1(d)成形体を脱脂・焼結を経て、高アスペクト比のマイクロ構造体を有する焼結体を得る製造プロセスである。

Fig.1 Flow of ES-NFI/nPP process.

従来のインプリント法の技術水準を上回るための解決策として、インプリントに使用する樹脂フィルムを ES ナノファイバにより作製することを考案した。これは、ナノファイバ特有のマイクロフィブリル構造から由来する ES-NFI 樹脂型への転写性効果を発現させることにより、微細な構造体を得られることを特徴としている。

2・2 エレクトロスピンングナノファイバ樹脂型の作製法

ナノファイバは、直径数 nm から数百 nm 以下の極細繊維であり、比表面積が大きく、特殊な表面機能を有するため、様々な分野への利用が期待されている。とりわけ、ES 法は、溶媒で溶解できるならば様々な材料に適用可能であり、その紡糸溶液が細いノズルから押出される際に数十 kV 程度の高い電圧を印加させてナノファイバが作製される。電気引力が紡糸溶液の表面張力を超え、紡糸溶液のジェットがコレクターに向けて噴射する際にジェット中の溶媒が徐々に揮発し、コレクターにシート状の不織布や一方向材が得られる。印加電圧、紡糸溶液の樹脂濃度や送出し量などの紡糸条件を変化させることにより、種々の直径のナノファイバを作製できる (Ramakrishna, 2005, 山下, 2007, Wendorff, et al., 2012)。

ES-NFI 法によるマイクロ樹脂型の製造法の模式図を図 1(a)に示す。使用材料は、ポリメタクリル酸メチル樹脂 (シグマアルドリッチ㈱, Polymethylmethacrylate, 以後 PMMA と称す) を N,N-ジメチルホルムアミド (キシダ化学㈱, N,N-dimethylmethanamide, 以後 DMF と称す) とクロロフォルム (キシダ化学㈱, Chloroform, 以後 CHCl_3 と称す) で溶解した紡糸溶液であり、樹脂濃度を 17mass%とした。この紡糸溶液を ES ナノファイバ装置 (㈱メック, NANON-01A) のシリンジに注入し、1.8ks 間電場を与えて紡糸し、図 2 に示すような Si 型の表面にナノファイバを製膜した。図 2(a)は Si 型の全体の形状を示し、図 2(b)L/S パターン、図 2(c)円柱および図 2(d)円孔に対して、高さ $h=10\mu\text{m}$ で幅 $w=1\sim 50\mu\text{m}$ に変化させた微細構造を有している。この Si 型上に製膜したナノファイバを熱風乾燥機 (いすゞ製作所, MRN-111) で 140°C , 1.8ks 間加熱し、室温まで冷却した。この段階でのナノファイバは薄膜であり取扱い性に乏しいため、ES ナノファイバの作製に使用した紡糸溶液をナノファイバの被膜の上に塗布し、 170°C に加熱後に室温まで冷却し、型から外して ES-NFI 樹脂型を得た。

Fig.2 Dimensions of Si forms used for ES-nanofiber imprinting.

2・3 使用材料および配合割合

粉末印刷に使用した原料は、図 3 に示すような平均粒径 200nm の酸化チタン粒子 (和光純薬工業㈱, TiO_2 , 試薬 CAS.NO 1317-80-2) に水溶性樹脂のポリエチレングリコール (PEG, 分子量 20,000, キシダ化学㈱, 試薬 CAS.NO 25322-68-3) を H_2O で溶解混合したペーストである。これは、自転・公転ミキサー (㈱THINKY, AR-100) を用いて室温で攪拌および脱泡して作製した。その際、ペーストの粘度は回転型粘度計 (ブルックフィールド, HBDV-II+PCP) にコーンスピンドル (ブルックフィールド, CPA-52Z) を用いて測定した。ペーストの粘度が低いほど微細な構造体への充填が容易になるが、粘度が低すぎるとペーストの流出や保形性の低下が生じ、形状安定性が劣る。そのため、高い形状精度と高密度の両方を満足する焼結体を得るには微細な型への充填性を確保しつつ、できるだけ粉末密度の高いペーストの配合割合を選定する必要がある。

本論では、成形性と形状転写性の観点から、表 1 に示すように TiO_2 粉末割合を 40mass%となるように、 TiO_2 粉末と PEG の配合量を一定として、 H_2O の添加量を種々変化させたところ、図 4 に示すようにペーストの粘度が大きく変化した。 TiO_2 粉末割合が 40mass%の 40-L, 40-M および 40-H で成形体を作製した結果、40-M のペース

トが適正であることが分かった。そのため、40-M のペーストの粘度を変化させずに PEG の配合量を減らし、より高密度な焼結体が得られると思われる TiO_2 粉末割合 56mass% の 56-M のペーストを用いて成形体および焼結体を作製して、これを評価対象とした。

Fig.3 SEM image of TiO_2 particle used.

Fig.4 Viscosity of pasts with various H_2O contents.

Table 1 Composition of paste used for imprinting

Composition ID	Solid loading	TiO_2		PEG		H_2O		Viscosity η (cP)
	(mass%)	(g)	(mass%)	(g)	(mass%)	(g)	(mass%)	
(a) 40-L	40	2.0	12.9	3.0	19.4	10.5	67.7	1270
(b) 40-M			13.3		20.0	10.0	66.7	1746
(c) 40-H			13.8		20.7	9.5	65.5	1905
(d) 56-M	56	2.0	14.7	1.6	11.8	10.0	73.5	1746

2・4 成形体と焼結体の作製および評価方法

成形体の作製工程を図 5 に示す。図 5(a)のような手刷り卓上スクリーン印刷機（株ネオテックジャパン、NJ-15PHP）をコンタクト印刷仕様に改良し、図 5(b)および(c)に示すように ES-NFI 犠牲樹脂型の上に TiO_2 粉末のペーストをコンタクト印刷した。その TiO_2 成形体を Al_2O_3 板に置き、卓上マッフル炉（山田電機(株)、YF-120-PS）で、大気中で炉内温度 300°C で 1.8ks 間加熱脱脂した後、大気中で炉内温度 500°C で 1.8ks 間保持し、焼結体を得た。得られた成形体および焼結体の表面形態は走査電子顕微鏡（株日立ハイテクノロジーズ、SU1510）を用いて観察し、そのマイクロ構造体の断面形状はレーザ顕微鏡（オリンパス(株)、OLS4100）を用いて、ほぼ中央部の任意の個所を数点測定し、その代表的な断面形状からマイクロ構造体を作製するための最適条件を探索した。

Fig.5 Appearance of contact printing process.

3. 実験結果および考察

3・1 成形体と焼結体の形状転写性に及ぼす構造サイズの影響

図 6 は、マイクロ構造体の幅を $w=1\sim 50\mu\text{m}$ まで変化させた L/S パターンの Si 型を用いて作製した(i)ES-NFI 樹脂型、および TiO_2 粉末印刷により得られた(ii)成形体と(iii)焼結体の表面の SEM 像を示す。ES-NFI 法により作製したマイクロ樹脂型は、 $w=1\sim 50\mu\text{m}$ のどのサイズの構造体に対しても良好な転写性を示していることが分かる。(i)ES-NFI 樹脂型を溶媒で除去することにより、(ii)に示すような微細構造を表面に持つ成形体を得られた。図 6(a) $w=1\mu\text{m}$ の成形体には直線性の欠如や隣接する凸部との接触などの欠陥が見られるが、図 6(b) $w=5\mu\text{m}$ 以上では脱バインダによる微視的な亀裂が見られる程度であり、概ね(i)ES-NFI 樹脂型の形状通りに転写されている。一方、(iii)焼結体の場合、焼結収縮により成形体のサイズよりも線幅が小さくなっており、図 6(a) $w=1\mu\text{m}$ では線どうしが接触して線間の隙間が消失しているが、図 6(b) $w=5\mu\text{m}$ 以上では成形体の形状が健全に保持されている。ただし、印刷法では射出成形法のように高い成形圧力を付与できないため、成形体の密度を上げることは困難であり、高密度な焼結体を得ることは容易ではない。特に、図 6(a) $w=1\mu\text{m}$ では、焼結後に成形体の形状を保持させることが極めて困難なサイズであることが分かった。

Fig.6 SEM images of micro-structured parts with various sized line and space patterns.

図7は、マイクロ構造体の幅を $w=1\sim 50\mu\text{m}$ まで変化させた円柱の Si 型を用いて作製した(i)ES-NFI 樹脂型、および TiO_2 粉末印刷により得られた(ii)成形体と(iii)焼結体の SEM 像を示す。円柱の Si 型を用いているため、(i)ES-NFI 樹脂型には円孔が形成される。図7(a) $w=1\mu\text{m}$ の場合は Si 型の円柱径が微小であるため、(i)ES-NFI 樹脂型には明瞭な円孔が見られない。そのため、(ii)成形体および(iii)焼結体も円柱の形状が得られていない。図7(b) $w=5\mu\text{m}$ の場合は(i)ES-NFI 樹脂型には円孔が形成されているが、(ii)成形体には粉末が完全に充填されていないため、焼結体には不完全な円柱形状が表出している。一方、図7(c) $w=10\mu\text{m}$ の場合は(i)ES-NFI 樹脂型に応じた形状の成形体を得られているが、先端部でやや未充填な箇所も見られる。その結果として、(iii)焼結体の形状が不安定になった。図7(d) $w=50\mu\text{m}$ の場合、成形体は概ね良好に形状が保たれているが、脱バインダによると思われる大きな亀裂が見られ、(iii)焼結体では凸部にも多数の亀裂が発生した箇所が見られる。これは、より高温で焼結することにより焼結密度を向上させることも可能であるが、円柱の角縁部の形状を保持することは難しいため、成形体の粉末充填密度を向上させることにより改善することが望ましいと考える。しかし、ナノスケールの微粉末を用いた場合は、粉末間の接触抵抗が大きいため、粘度上昇を抑えて成形性の低下を抑制するにはバインダ量が必然的に多く配合することになり、成形体密度を上げることは困難であるため、さらに適正なペーストの調製と焼結条件の探究が必要である。

Fig.7 SEM images of micro-structured parts with various sized pillar patterns.

図8は、マイクロ構造体の幅を $w=1\sim 50\mu\text{m}$ まで変化させた円孔の Si 型を用いて作製した(i)ES-NFI 樹脂型、および TiO_2 粉末印刷により得られた(ii)成形体と(iii)焼結体の SEM 像を示す。円孔の Si 型を用いているため、(i)ES-NFI 樹脂型には円柱が形成される。図8(a) $w=1\mu\text{m}$ の場合、(i)ES-NFI 樹脂型にやや欠損している箇所が見られるが、総じて円孔の角縁部には鋭角な形状が転写されており、(i)ES-NFI 樹脂型には凸形状を良好に転写されている。しかし、(ii)成形体の一部および(iii)焼結体の全体に円孔が見られない箇所があり、幅 $1\mu\text{m}$ 、高さ $10\mu\text{m}$ の円孔が密に配置された間の狭い間隙に TiO_2 粉末ペーストが充填し難いことが分かった。図8(b) $w=5\mu\text{m}$ の場合、(i)ES-NFI 樹脂型には円柱が良好に形成されているが、(ii)成形体の一部に円孔が欠いている箇所も見られる。しかし、(iii)焼結体には成形体の円孔径よりも大きい内径の円孔が形成されている。これは、(ii)成形体にはバインダの偏在や浸み出しが生じていたが、脱脂によりバインダが除去され、さらに焼結により円孔の周囲のセル構造体が収縮したためであると思われる。試験片全体の焼結収縮により、内在する局所的な円孔の内径は減じると推察される。しかし、本焼結体に用いた粉末はナノサイズの微粒子であるため、成形性を確保するためバインダの配合割合が高く、また焼結度も高くないため、このような現象が生じたと推察される。このメカニズムについては、成形体密度を考慮した焼結収縮の解析等を用いて、より詳細な探究が必要であるため、今後の課題とする。一方、図8(c) $w=10\mu\text{m}$ および(d) $w=50\mu\text{m}$ の場合は、(ii)成形体の転写性は概ね良好であり、(iii)焼結体もその形状が良好に保持されている。これらの焼結体には微細な気孔が多数見られるが、これは焼結条件の適正化により改善することが可能であると思われる。

Fig.8 SEM images of micro-structured parts with various sized hole patterns.

3・2 ペーストの粘度が成形体の形状に及ぼす影響

TiO₂粉末割合が40mass%のペーストにH₂Oの添加量を種々変化させて、異なる粘度を持つペーストを調製した。これらのペーストを用いてコンタクト印刷して成形体を作製し、ペーストの粘度の違いが成形体の表面のマイクロ構造体の断面形状に及ぼす影響を調査した。断面形状は、ES-NFI樹脂型を加熱脱脂により除去した後の成形体の表面をレーザ顕微鏡により計測した。

図9は、幅 $w=10\mu\text{m}$ 、高さ $h=10\mu\text{m}$ のL/SパターンのES-NFI樹脂型、およびペーストの粘度を $\eta=1270\text{cP}$ 、 $\eta=1764\text{cP}$ および $\eta=1905\text{cP}$ の3種類に変化させた場合の成形体の代表的なマイクロ構造体の断面形状を示す。図9(a)のES-NFI樹脂型の断面形状はSi型の断面形状を良好に転写しているが、高さ方向に1~2 μm 程度伸長している。これは、ES-NFI樹脂型がSi型から離型する際に、型との接触抵抗により高さ方向に引き延ばされたことが原因と考えられる。幅方向は、樹脂の固化収縮量とSi型の拘束から開放された伸長量が相殺され、Si型の幅 $w=10\mu\text{m}$ と大差ない値が得られたと思われる。低粘度の図9(b) $\eta=1270\text{cP}$ の場合、先端部の形状が図9(a)ES-NFI樹脂型と大きく異なっており、ペーストが充填不足であることが分かる。これは先端の角縁部にH₂Oの浸み出しが生じ、離型後にH₂Oが揮発したためであると考えられる。一方、図9(c) $\eta=1764\text{cP}$ の場合、高さ方向への伸長が大きい、高さ方向への奥深い溝部分にペーストが充填されており、比較的良好な成形性を示していると言える。しかし、高粘度の図9(d) $\eta=1905\text{cP}$ の場合、凸部の高さが低く、先端部は平坦であり、溝深さ方向へのペーストの充填が不十分であることが明らかであるため、不適正な調製条件であると言える。

以上の実験結果から、幅 $w=10\mu\text{m}$ 、高さ $h=10\mu\text{m}$ のL/Sパターンにおいては、 $\eta=1764\text{cP}$ 程度の粘度のペーストを用いて樹脂型にコンタクト印刷を行うと、微細なマイクロ構造体に対しても形状転写性に優れた成形体を得られることが分かった。

Fig.9 Cross-sectional shapes of ES-NFI mold and green compacts fabricated using past with various viscosities.

3・3 バインダの配合割合が焼結体の形状に及ぼす影響

前節で得られた適正なペースト粘度である $\eta=1746\text{cP}$ で作製された成形体を焼結し、その断面形状を評価した。さらに、形状転写性の高い焼結体を得ることを目的に、PEG の配合割合を減少させ、粉末割合の高いペーストを調製し、同様に成形体および焼結体を作製し、その効果を調査した。

図 10 は、粉末割合が 40mass% のペーストを用いて作製した L/S パターンの成形体および焼結体の断面形状を示す。図 10(a)成形体では ES-NFI 樹脂型に近い角形の断面形状が得られたが、図 10(b)焼結体では先端の尖った形状になり、形状精度の低い結果が得られた。この理由は、成形体の先端部は断面形状では矩形であり、角縁部にはペーストが充填されているが、その角縁部はバインダが過剰の状態であるため、脱脂・焼結後にそれらのバインダが消失し、焼結収縮により先端の尖った形状になったと思われる。

図 11 は、粉末割合を 56mass% まで高めたペーストを用いて作製した L/S パターンの成形体および焼結体の断面形状を示す。この 56mass% を超える割合の高い粉末割合のペーストを用いて成形体の作製を試みたが、バインダである PEG の配合割合が小さいため、粉末間の結合力が乏しく、成形体の形状を保持することができなかった。図 11(a)の成形体と図 11(b)焼結体の形状は類似しており、突起形状が形成されており、図 11(b)焼結体の方が図 11(a)成形体よりも若干小さく、焼結収縮していることが分かる。

以上の実験結果から、幅 $w=10\mu\text{m}$ 、高さ $h=10\mu\text{m}$ の L/S パターンにおいては、前節の $\eta=1746\text{cP}$ 程度の粘度を保持したままバインダの配合割合をさらに減少させ、粉末割合を可能な限り高めたペーストを調製する。これを樹脂型にコンタクト印刷して成形体を作製し、脱脂・焼結を経てマイクロ構造を有する焼結体を製造することが可能であることが実証された。

Fig.10 Cross-sectional shapes of green compact and sintered part fabricated using past with 40mass% solid loading.

Fig.11 Cross-sectional shapes of green compact and sintered part fabricated using past with 56mass% solid loading.

4. 結 言

本論は、マイクロ構造体を高い生産効率、かつ低い環境負荷で製造することを目的に、エレクトロスピンニングナノファイバを Si 型に噴霧し、これを溶融および離型により得られたマイクロ樹脂型を作製する ES-NFI 法と、ナノ粒子とバインダにより調合したペーストを用いたナノ粉末印刷法を合わせた ES ナノファイバインプリント犠牲樹脂型ナノ粉末印刷 (ES-NFI/nPP) 法を提案した。

ナノサイズの TiO_2 粒子と水溶性バインダにより調製したペーストの配合割合を種々変化させ、ES-NFI 樹脂型に印刷して得られた成形体および、その焼結体の形状転写性を評価した。幅 $10\mu\text{m}$ 高さ $10\mu\text{m}$ の L/S パターンで、 H_2O の添加量を種々変化させ、断面形状を比較したところ、ペーストの粘度が 1746cP 程度で ES-NFI 樹脂型に良好に充填されることが分かった。また、 TiO_2 粉末割合を高くした場合、幅 $10\mu\text{m}$ 、高さ $10\mu\text{m}$ のマイクロ構造体では、成形体および焼結体の形状転写性に優れることが分かった。しかし、幅が数 μm のより微細なマイクロ構造体では、成形体の充填性が十分ではないために、焼結体では形状転写性の低下による形状不良や亀裂などの欠陥が見られた。

今後、さらなるバインダの成分の適正化や印刷時の圧力付与が可能になれば、幅が数 μm 程度のマイクロ構造体においても成形時の形状安定性に優れ、高密度な成形体が得られる。また、焼結体も成形体の形状品質が改善されれば幅が数 μm 程度のマイクロ構造体を持つ焼結体を得られる可能性がある。このような観点から、本論で提案した ES-NFI/nPP 法は実用性の高い優れたマイクロ構造体製造法であると結論付けられる。

謝 辞

本研究の一部は科研費 (26420031) および「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (平成 24 年～平成 26 年)」の助成を受けたものであることを記し、関係各位に深謝申し上げます。また、実験装置の提供にご協力を頂いた太盛工業(株)田中茂雄氏に感謝申し上げます。

文 献

- German, R. M., Powder metallurgy science, 2nd edition, Metal Powder Industries Federation (1984).
- German, R. M. and Bose, A., Injection molding of metals and ceramics, Metal Powder Industries Federation (1997).
- 管沼克昭, プリンテッドエレクトロニクス技術最前線, シーエムシー出版 (2010).
- Löhe, D. and Haußelt, J., Advanced micro & nanosystems Vol.3, Microengineering of metals and ceramics: Part I: Design, tooling, and injection molding (2005a), Wiley-VCH.
- Löhe, D. and Haußelt, J., Advanced micro & nanosystems Vol.4, Microengineering of metals and ceramics. Part II, Special replication techniques, automation, and properties (2005b), Wiley-VCH.
- 西簀和明, 柿下健一, 田中茂雄, レジスト薄膜インサート金属粉末射出成形によるマイクロ構造体の作製と粉末粒径の影響, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.76, No.761 (2010a), pp.75-80.
- 西簀和明, 柿下健一, 田中茂雄, 金属粉末射出成形により作製した銅焼結体の諸特性に及ぼすマイクロ/ナノ粉末割合の影響, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.76, No.767 (2010b), pp.996-1001.
- 西簀和明, 田邊大貴, 鹿子泰宏, 田中茂雄, ナノ銅粉末を用いた NIL 犠牲樹脂型インサート MIM によるマイクロ構造体の作製, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.77, No.780 (2011), pp.1378-1387.
- Nishiyabu, K., Micro metal powder injection molding, Some critical issues for injection molding, edited by Wang J., InTech, Chapter 5 (2012), pp.105-130.
- 西簀和明, 田邊大貴, 鹿子泰宏, 田中茂雄, マイクロおよびサブマイクロ銅粉末射出成形体の脱脂・焼結挙動, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.79, No.807 (2013), pp.1593-1603.
- 西簀和明, 川上慈朗, エレクトロスピンニングナノファイバによるマイクロインプリント樹脂型の複製, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.824 (2015), DOI:10.1299/transjsme.14-00571.
- Piotter, V., Micro Metal injection molding (MicroMIM), Handbook of metal injection molding, edited by Heaney D., Woodhead Publishing, Chapter 13 (2012), pp.307-337.

- Ramakrishna, S., An Introduction to electrospinning and nanofibers (2005), World Scientific Publishing Company.
山下義裕, エレクトロスピンニング最前線—ナノファイバー創製への挑戦—, 繊維社 (2007).
Wendorff, J.H., Agarwal, S. and Greiner, A., Electrospinning: materials, processing, and applications (2012), Wiley-VCH.

References

- German, R. M., Powder metallurgy science, 2nd edition, Metal Powder Industries Federation (1984).
German, R. M. and Bose, A., Injection molding of metals and ceramics, Metal Powder Industries Federation (1997).
Kannuma, K., Advanced printed electronics, CMC publishing (2010) (in Japanese).
Löhe, D. and Haußelt, J., Advanced micro & nanosystems Vol.3, Microengineering of metals and ceramics: Part I: Design, tooling, and injection molding (2005a), Wiley-VCH.
Löhe, D. and Haußelt, J., Advanced micro & nanosystems Vol.4, Microengineering of metals and ceramics. Part II, Special replication techniques, automation, and properties (2005b), Wiley-VCH.
Nishiyabu, K., Kakishita, K. and Tanaka, S., Fabrication of micro-structured parts by resist-film insert metal injection molding and effects of particle size, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.76, No.761 (2010a) pp.75-80 (in Japanese).
Nishiyabu, K., Kakishita, K. and Tanaka, S., Effect of micro/nano powder ratio on the properties of copper sintered parts produced by metal injection molding, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.76, No.767 (2010b) pp.996-1001 (in Japanese).
Nishiyabu, K., Kakishita, K. and Tanaka, S., Fabrication of micro-structured parts by nano-imprint lithography sacrificial plastic mold insert MIM using nano-sized copper powder, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.77, No.780 (2011) pp.1378-1387 (in Japanese).
Nishiyabu, K., Micro metal powder injection molding, Some critical issues for injection molding, edited by Wang J., InTech, Chapter 5 (2012), pp.105-130.
Nishiyabu, K., Tanabe, D., Kanoko, Y. and Tanaka, S., Behavior of debinding and sintering in micron and submicron-sized copper powder injection molded parts, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.79, No.807 (2013) pp.1593-1603 (in Japanese).
Nishiyabu, K. and Kawakami, J., Replication of micro-structured imprint plastic mold via electro-spinning nanofiber process, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.81, No.824 (2015), DOI:10.1299/transjsme.14-00571.
Piotter, V., Micro Metal injection molding (MicroMIM), Handbook of metal injection molding, edited by Heaney D., Woodhead Publishing, Chapter 13 (2012), pp.307-337.
Ramakrishna, S., An introduction to electrospinning and nanofibers (2005), World Scientific Publishing Company.
Yamashita, Y., Electrospinning the latest in nanotechnology –The creative of nanofibers–, SEN-I SHA (2007) (in Japanese).
Wendorff, J.H., Agarwal, S. and Greiner, A., Electrospinning: materials, processing, and applications (2012), Wiley-VCH.