

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360121

研究課題名(和文) 画像形成技術によるデジタルマイクロファブリケーション

研究課題名(英文) Digital Microfabrication Utilizing Imaging Technologies

研究代表者

川本 広行 (KAWAMOTO HIROYUKI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：50318763

研究成果の概要(和文)：メカトロニクスやエレクトロニクス、再生医療などの分野で、デジタルオンデマンドで2次元、3次元の微細構造を創成する技術に対する大きなニーズがある。このような要請にこたえるために、本研究では、これまでの科研費研究等で培ってきた画像形成やマイクロ工学に関する技術を、マスクレスの電子回路直接描写、マイクロ成膜、3次元マイクロラピッドプロトタイプング、および再生医療用3次元生体組織創成などに応用するための基礎的な研究を行った。

研究成果の概要(英文)：In the fields of mechatronics, electronics, and biological tissue engineering, there are significant needs for the digital on-demand micro manufacturing technology. A basic investigation has been conducted on mask-less direct printing of micro-circuit, micro-coating, three-dimensional macro rapid proto-typing and three-dimensional tissue engineering utilizing imaging technologies, such as electrostatic inkjet, electrophotography, and electromagnetic micro-manipulation of particles.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	11,700,000	3,510,000	15,210,000
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 知能機械学・機械システム

キーワード：精密機械システム、ナノ・マイクロ加工

## 1. 研究開始当初の背景

メカトロニクスやエレクトロニクス、さらには再生医療などの分野で、デジタルオンデマンドで2次元、3次元の微細構造を創成する技術に対する大きなニーズがある。このような要請にこたえるために、画像形成装置として目覚しい発展を遂げているインクジェットプリンタやレーザープリンタの技術を利用する研究が注目されている。

米国においては、2005年より毎年、Society for Imaging Science and Technology主催でDigital Fabricationに関する国際会議が開催されており、上記のような研究開発に携わっている、工学・材料・医学などの多岐に渡る研究者・技術者が一堂に介して、新しい技術を生み出す努力がなされている。特に再生医療の分野では、BioPrintingの名の下に、エキサイティングな研究が開始されている。

また韓国においては、Yonsei大学を中心に、韓国政府の支援による研究機関 Center for Adaptive Multiscale Manufacturing の設立が計画されている。

しかし、画像技術の分野で突出した技術力を有するわが国こそが、この新しい分野でも優位性を確保すべきであると考え。このような状況の下、研究代表者(川本)は、これまでの科研費研究等で培ってきた画像形成やマイクロ工学に関する技術を、(1) マスクレスの電子回路直接描写、(2) マイクロ成膜、(3) 3次元マイクロラピッドプロトタイプング、(4) 再生医療用3次元生体組織創成 に応用するための基礎的な研究を行った。

## 2. 研究の目的

本基盤研究は、上記のような予備研究を進展させ、新しい産業のシーズとなる技術を創生することを目的とする。具体的には、下記の4つの技術の開発をおこなうことを目的とする。

(1) マスクレスの電子回路直接描写：インクジェットで機能性の液体を滴下し、マスクなしで電気回路などのパターンを直接描画する技術はすでにある程度完成している。しかし、われわれが開発した静電インクジェットには、既存のピエゾ式やサーマル式では制限される高粘性液体でも吐出できるという特徴があるため、これを生かして、より高精細でかつ回路の導電性が確保できる描写技術を開発する。電子回路だけでなく、液晶ディスプレイの製造技術にも革新的な効果が期待される。目標とする線幅は、現状の40  $\mu\text{m}$  を凌駕する10  $\mu\text{m}$  とする。

(2) マイクロ成膜：静電インクジェットには、液滴だけでなく、条件によっては、霧状の極

微細なミストを噴霧できるという特徴がある。この特徴をナノ単位で厚さを制御することが可能なマイクロ成膜に利用する技術を開発する。また、当面の短期的なターゲットとして、現在ディップコーティングによって塗布されている電子写真の感光体膜を、この静電成膜法でコーティングする技術を開発する。これによって、ディップのための大量の液剤が不要となり、廃液処理などの点で、きわめて優れたプロセスが実現できる。目標とする制御可能な膜厚さは、50 nm とする。

(3) 3次元マイクロラピッドプロトタイプング：光造形などのラピッドプロトタイプングは、工業界で広く利用されており、製品開発の迅速化に大いに寄与している。本研究では、微細でかつ高粘性液体でも吐出できるという静電インクジェットの特徴を生かして、粒子含有率の高い液滴を重層する3次元マイクロ造形技術を開発する。目標とする解像度は1  $\mu\text{m}$  であり、3次元のアスペクト比は1以上とする。

(4) 再生医療用3次元生体組織創成：インクジェット技術を利用して再生医療用生体組織を作製する研究が盛んに行われている。しかし、これらは2次元、あるいは3次元でも均質な組織に限られており、血管や筋組織などを含む3次元でかつ非均質組織である臓器の生成には大きな壁がある。そこで本研究では、ゲルビーズに、細胞だけでなく磁性ナノ粒子も封入し、擬似磁性体となったゲルビーズを電子写真の磁性現像系の研究で培った粒子操作技術を応用して、3次元の非均質組織を作製する技術を開発する。目標とするゲルビーズの大きさは、細胞が封入可能な50  $\mu\text{m}$  程度とし、模擬組織の厚さは1 mm 以上とする。

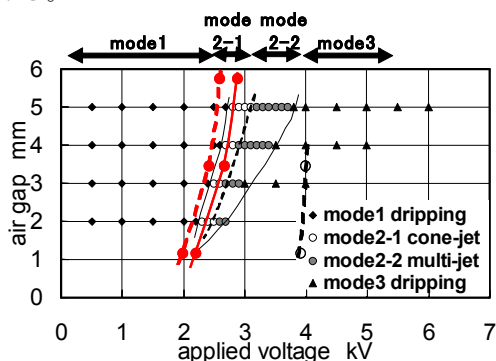
## 3. 研究の方法

これまでの科研費研究の成果と予備研究の結果を踏まえて、実験装置を製作し、まずパラメータ実験を行った。実験に当たっては、描画・生成結果などの積分量だけでなく、高速度マイクロスコープカメラによる現象の詳細観測や3次元計測などを行い、解析・計算結果と比較検討した。最後に、実用化を前提とした条件での詳細研究と実証実験を行った。

## 4. 研究成果

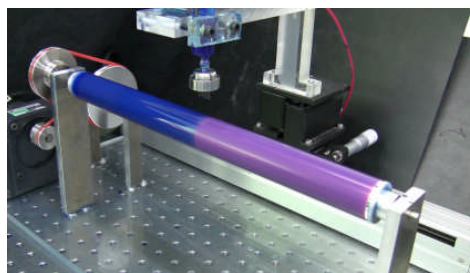
(0) 静電インクジェット現象の解明：個別研究に先立って、まず静電インクジェット現象そのものの学理を明らかにする研究を行った。実験装置を製作し、ノズル形状、ギャップ、パルス電圧、ペースト粘度・導電性など多岐に渡るパラメータと滴下する液滴の関

係を網羅的に把握した。また、観測された現象を理論的に明らかにするために、現象を静電場との連成問題ととらえた解析を行った。以上の実験・解析結果をまとめて、静電場における流体の挙動に関する体系的な理論を構築した。特に、実験結果との比較検討により、静電一表面張力のバランスを示す Young-Laplace の式をベースとする理論の妥当性を検証した。下図は、液滴形成モードの変化に関する実験値が上記の理論による計算結果(赤線)に一致することを示すものである。

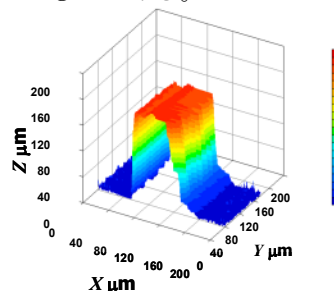


(1) マスクレスの電子回路直接描写：実験装置にステージ微動制御装置などを追設し、基板への導電性ペーストの滴下実験を行った。パルス電圧により、ドットの作成が制御できる条件を把握した。以上の基礎検討結果をもとにして、絶縁基板上に任意の電子回路をデジタルオンデマンドで直接描画できる技術を開発した。Dot-on-Demand でドット径 10 ミクロン以下の液滴形成が可能となっており、原理的には任意の回路描写は可能であるが、現実には、着弾精度、ペーストの乾燥、ノズルのつまりなどの工学的な問題があるため、これらへの対応も含めた開発を行った。

(2) マイクロ成膜：上記と同じ装置により、噴霧実験を行った。上記と同様にパラメータは多岐に渡るが、液剤の導電率に対する噴霧特性を把握した。これらの結果に基づいて、電子写真の感光体膜を、マイクロ成膜を利用してコーティングする技術を開発した。従来のデ IPP コーティングにかわる、最小限の塗布液剤でコーティングできる環境適性のよい技術の見通しが得られたため、さらにマルチノズル化などの実用化を目指した研究を行い、メーカーへ技術移管した。写真はレーザープリンタのドラムにマルチノズルによって感光体を成膜しているものである。



(3) 3次元マイクロラピッドプロトタイピング：上記と同じ装置により、ナノ粒子を含有した液の層形成実験を行った。下図は、アスペクト比3のラインが形成できることを実証したものである。



after 50 times buildup

(4) 再生医療用 3次元生体組織創成：当研究室で培ってきた電子写真の磁性現像系における磁性粒子ハンドリング技術を再生医療用 3次元生体組織創成に利用するために、アルギン酸によって合成したマイクロカプセルに磁性ナノ粒子を封入したゲルビーズを対象に、パターン形成に関する技術を開発した。下の写真は 6.6 mm 長の血管状のチューブをこの技術によって形成したものである。



## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 16 件)

- ① H. Kawamoto, H. Inoue and M. Nakamura, Three-Dimensional Formation of Magnetic Micro Gel-Beads for Tissue Engineering, *J. Appl. Phys.*, Vol. 105, 054701 査読有 (2009).
- Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology, Vol. 19, Issue 12 (2009).
- ② 川本, 平塚, 若井, レーザプリンタの2成分磁気ブラシ現像系におけるキャリア

- 粒子の動力学, 機械学会論文集 C, Vol. 75, No. 750 査読有 (2009) pp.349-356.
- ③ 川本, 手島, 杉山, 三輪, 電子写真の磁性一成分現像システムにおけるトナー粒子の動特性, 機械学会論文集 C, Vol. 75, No. 752 査読有 (2009) pp.677-685.
- ④ 多田, 西浦, 川本, 静電場中で噴射・飛翔制御された微細液滴の重畳による薄膜成膜, 機械学会論文集 B, Vol. 75, No. 757 査読有 (2009) pp.1781-1789.
- ⑤ 川本, 平塚, 若井, レーザプリンタの2成分磁気ブラシ現像系におけるキャリアブラシの摩擦力, 機械学会論文集 C, Vol. 75, No. 752 査読有 (2009) pp.986-991.
- ⑥ H. Kawamoto, Manipulation of Single Particle Utilizing Electrostatic Force, *J. Electrostatics*, Vol. 67 査読有 (2009) pp.850-861.
- ⑦ 多田, 西浦, 川本, 静電場モデルによる針対平板電極系での液滴挙動の安定性解析, 機械学会論文集 B, Vol. 75, No. 752 (2009) pp.619-625.
- ⑧ 川本, 手島, 杉山, 三輪, 電子写真の磁性一成分現像システムにおけるトナー粒子の動特性, 機械学会論文集 C, Vol. 75, No. 752 査読有 (2009) pp.677-685.
- ⑨ 川本, 平塚, 若井, レーザプリンタの2成分磁気ブラシ現像系におけるキャリアブラシの摩擦力, 機械学会論文集 C, Vol. 75, No. 752 査読有 (2009) pp.986-991.
- ⑩ 多田, 西浦, 川本, 静電場中で噴射・飛翔制御された微細液滴の重畳による薄膜成膜, 機械学会論文集 B, Vol. 75, No. 757 査読有 (2009) pp.1781-1789.
- ⑪ H. Kawamoto and T. Hiratsuka, Statics and Dynamics of Carrier Particles in Two-Component Magnetic Development System in Electrophotography, *J. Imaging Science and Technology*, Vol. 53, No.6 査読有 (2009) pp.060201-1-10.
- ⑫ 仲野, 安藤, 川本, 電子写真の非磁性非接触 AC 反転現像におけるトナー挙動のシミュレーション, 日本画像学会誌, Vol. 49, No. 1 査読有 (2010) pp.3-13.
- ⑬ 多田, 西浦, 川本, 静電場中で噴射・飛翔制御された微細な高粘度液滴の重畳による厚膜成膜, 日本機械学会論文集 (B編), Vol. 76, No. 762 査読有 (2010) pp.298-305.
- ⑭ 川本, 静電インクジェット現象とそのマイクロ加工への応用, 繊維機械学会誌, Vol. 62, No. 4 査読有 (2009) pp.221-225.
- ⑮ 川本, 電磁粒体力学とその画像形成技術や月探査技術への応用, 精密工学会誌, Vol. 75, No. 9 査読無 (2009) pp.1069-1070.
- ⑯ 門永, 川本, 電子写真プロセスの最新シミュレーション技術", 日本画像学会誌, Vol. 49, No. 3 査読無 (2010) pp.160-166.
- [学会発表] (計 29 件)
- [1] S. Umezū, K. Katahira, H. Ohmori and H. Kawamoto, New Fabrication Techniques Utilizing Electrostatic Inkjet Phenomena, Proc. of the euspen International Conf., Zurich (2008) pp.443-447.
- [2] T. Miwa, M. Teshima, T. Sugiyama, Y. Ochiai and H. Kawamoto, Dynamics of Toner Particles in Magnetic Single-Component Development System, PPIC'08/Pan-Pacific Imaging Conf. '08, Tokyo (2008) pp.128-131.
- [3] H. Kawamoto (Key Note Speech) Numerical Simulation of Electrophotography Processes, NIP24: International Conf. on Digital Printing Technologies, Pittsburgh (2008) pp.10-13.
- [4] H. Kawamoto, Bead-Carry-Out Phenomenon in Two-Component Development System of Electrophotography, NIP24: International Conf. on Digital Printing Technologies, Pittsburgh (2008) pp.309-312.
- [5] H. Kawamoto, Direct Observation and Numerical Study on Dynamics of Toner Particles in Magnetic Single-Component Development System of Electrophotography, NIP24: International Conf. on Digital Printing Technologies, Pittsburgh (2008) pp.325-328.
- [6] H. Kawamoto, Three-Dimensional Formation of Magnetic Micro Gel-Beads for Tissue Engineering, DF2008: Digital Fabrication Processes Conference, Pittsburgh (2008) pp.476-479.
- [7] K. Tada and H. Kawamoto, Stability Analysis of a Drop Generation from a Nozzle in an Electric Field, DF2008: Digital Fabrication Processes Conference, Pittsburgh (2008) pp.291-294.
- [8] 原, 西浦, 田邊, 梅津, 多田, 川本, 静電インクジェット現象を利用したマイクロ成膜, 機械学会 2008 年度年次大会, 横浜国大 (2008) pp.271-272.
- [9] 川本, 電子写真技術, 機械学会 2008 年度年次大会, 横浜 (2008) pp.300-301.
- [10] 川本, 若井, 平塚, レーザプリンタの2成分磁気ブラシ現像系におけるキャリア粒子の動力学, 機械学会 機械力学・計測制御部門 講演会 DD2008, 日吉 (2008) pp.186.
- [11] 家坂, 川本, 足立, 村上, 電子写真の二成分磁気ブラシ現像系におけるキャリア現像, Imaging Conference JAPAN 2008 Fall Meeting, Kyoto (2008) pp.25-27.
- [12] 丸尾, 西浦, 原, 多田, 川本, 静電イン

- クジェット現象を利用したマイクロ成膜, Imaging Conference JAPAN 2008 Fall Meeting, Kyoto (2008) pp.85-88.
- [13] 吉田, 西浦, 多田, 川本, 静電インクジェット現象を利用したマイクロ成膜, 機械学会 関東学生会 第48回学生員卒業研究発表講習会, 水戸 (2009) pp.117-118.
- [14] 川本, (依頼講演) 静電インクジェット現象とそのマイクロ加工への応用, 日本繊維機械学会 ナノファイバー研究会(第2回)研究例会, 大阪 (2008).
- [15] T. Miwa, T. Sugiyama, W. Furuichi and H. Kawamoto, Analysis of Non-Magnetic Single Component Development System in Electrophotography, IIP/ISPS Joint MIPE2009, Tsukuba (2009) pp.401-402.
- [16] N. Yoshida, M. Nishiura, K. Tada and H. Kawamoto, Electrostatic Inkjet for Micro-Film Formation, IIP/ISPS Joint MIPE2009, Tsukuba (2009) pp.403-404.
- [17] T. Murakami, S. Iesaka, T. Adachi and H. Kawamoto, Bead Carry-Out in Two-Component Magnetic Development System of Electrophotography, IIP/ISPS Joint MIPE2009, Tsukuba (2009) pp.405-406.
- [18] K. Tada, M. Nishiura, N. Hara, K. Maruo, N. Yoshida and H. Kawamoto, Electrostatic Inkjet for Micro-Film Formation by Spraying Viscous Liquid, IIP/ISPS Joint MIPE2009, Tsukuba (2009) pp.247-248.
- [19] H. Kawamoto and S. Iesaka, Dynamics of Toner and Carrier Particles in Two-Component Development System used in Electrophotography, NIP25: International Conf. on Digital Printing Technologies, Louisville (2009) pp.237-240.
- [20] K. Tada, M. Nishiura, N. Hara, K. Maruo, N. Yoshida and H. Kawamoto, Drops-on-Drops Micro-film Formation by Stable Electrostatic Jets, DF2009: Digital Fabrication 2009, Louisville (2009) pp.390-393.
- [21] 吉田, 多田, 川本, 静電インクジェット現象を利用したマイクロ成膜, Imaging Conference JAPAN 2009 Fall Meeting, Kyoto (2009) pp.45-48.
- [22] 家坂, 渡辺, 酒村, 村上, 川本, 電子写真の二成分磁気ブラシ現像におけるキャリア現像へのAC重畳電圧の影響, 機械学会 IIP2010 情報・知能・精密機器部門講演会、東京 (2010) pp.154-158.
- [23] 多田, 勝田, 遠藤, 吉田, 丸尾, 川本, マルチノズルより静電噴射された液滴によるマイクロ成膜, 機械学会 IIP2010 情報・知能・精密機器部門講演会、東京 (2010) pp.236-240.
- [24] H. Kawamoto, T. Sugiyama and W. Furuichi, Doctor Process of Toner Layer in Non-Magnetic Single-Component Development System in Electrophotography, NIP26: International Conf. on Digital Printing Technologies, Austin (2010) pp.213-215.
- [25] K. Tada, K. Maruo, N. Endo, N. Yoshida and H. Kawamoto, Micro-Film Formation by Multi-Nozzle Electrostatic Jets, DF2010: Digital Fabrication 2010, Austin (2010) pp.297-300.
- [26] 多田, 丸尾, 遠藤, 吉田, 川本, 静電インクジェット現象による機能性材料のマイクロ成膜, Imaging Conference JAPAN 2010 Fall Meeting, 京都 (2010) pp.89-92.
- [27] 渡辺, 室賀, 家坂, 川本, 電子写真の二成分磁気ブラシ現像システムにおけるEdge Effect 現象, Imaging Conference JAPAN 2010 Fall Meeting, 京都 (2010) pp.21-24.
- [28] 家坂, 川本, 電子写真の二成分磁気ブラシ現像システムのシミュレーション, 機械学会 IIP2011 情報・知能・精密機器部門講演会、東京 (2011).
- [29] 川本, 杉山, 古市, 電子写真の非磁性1成分現像系におけるトナー層のドクタープロセス, 機械学会 IIP2011 情報・知能・精密機器部門講演会、東京 (2011).

[図書] (計1件)

平倉・川本(編) 東京電機大学出版会、電子写真プロセスとシミュレーション(2009) 250.

[その他]

ホームページ等

<http://www.kawamoto.mech.waseda.ac.jp/kawa/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川本 広行 (KAWAMOTO HIROYUKI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 50318763