

Thu. Jun 21, 2018

11:30 AM - 11:50 AM

Conference Room

Oral presentation | Inkjet

**[IJ5.1] Inkjet (5-1) Applications/3D Printing/ Bio
Printing**

Session Chair: Hirotochi Eguchi, Shinichi Nishi (Japan Advanced
Printed Electronics Technology Research Association)

9:30 AM - 10:30 AM Conference Room (2nd Floor, Engineering
Research Building II)

**[IJ5.1-01] Study on Lamination Process of Inkjet 3D
Printer**

*Chiaki Tanuma¹, Yutaka Tanaka¹, Gaku Minorikawa¹
(1. Hosei University)

9:30 AM - 9:50 AM

[IJ5.1-02] Development of Full Color 3D Printer

*Kunio Hakkaku¹, Hiroyoshi Ohi¹, Kenta Imai¹ (1.
MIMAKI ENGINEERING CO.,LTD)

9:50 AM - 10:10 AM

**[IJ5.1-03] Investigation of Release Agent Coating Method
Using Electrostatically Extracted Ink Jet System**

Kazuhisa Matsuo¹, *Yui Ayasiro¹, Yuzou Yamasaki¹
(1. Fukuoka Institute of Technology)

10:10 AM - 10:30 AM

Oral presentation | Inkjet

**[IJ5.2] Inkjet (5-2) Applications/3D Printing/Bio
Printing**

Session Chair: Takeshi Miyato, Koei Suzuki (Ricoh Company, Ltd.)

10:50 AM - 11:50 AM Conference Room (2nd Floor, Engineering
Research Building II)

**[IJ5.2-01] Study on Edible Ink Coating Method Using
Electrostatically Ink Jet Method**

Kazuhisa Matsuo¹, *Minori Okabe¹, Yuzou Yamasaki¹
(1. Fukuoka Institute of Technology)

10:50 AM - 11:10 AM

**[IJ5.2-02] Development of a Bioprinting Technique by
Combining Inkjetting Technology and Enzyme-
mediated Hydrogelation**

*Shinji Sakai¹, Makoto Nakamura² (1. Osaka
University, 2. University of Toyama)

11:10 AM - 11:30 AM

**[IJ5.2-03] Challenging Research on Organ Engineering by
Inkjet Bioprinting**

*Makoto Nakamura¹, Shintaroh Iwanaga¹, Yuta
Hamada¹, Taketoshi Kurooka¹, Shinji Sakai² (1.
University of Toyama, 2. Osaka University)

Oral presentation | Inkjet

[IJ5.1] Inkjet (5-1) Applications/3D Printing/ Bio Printing

Session Chair: Hirotochi Eguchi, Shinichi Nishi (Japan Advanced Printed Electronics Technology Research Association)

Thu. Jun 21, 2018 9:30 AM - 10:30 AM Conference Room (2nd Floor, Engineering Research Building II)

[IJ5.1-01] Study on Lamination Process of Inkjet 3D Printer

*Chiaki Tanuma¹, Yutaka Tanaka¹, Gaku Minorikawa¹ (1. Hosei University)

9:30 AM - 9:50 AM

[IJ5.1-02] Development of Full Color 3D Printer

*Kunio Hakkaku¹, Hiroyoshi Ohi¹, Kenta Imai¹ (1. MIMAKI ENGINEERING CO.,LTD)

9:50 AM - 10:10 AM

[IJ5.1-03] Investigation of Release Agent Coating Method Using Electrostatically Extracted Ink Jet System

Kazuhisa Matsuo¹, *Yui Ayasiro¹, Yuzou Yamasaki¹ (1. Fukuoka Institute of Technology)

10:10 AM - 10:30 AM

一般セッション(口頭講演)| インクジェット

[IJ5.1] インクジェット(5-1) 応用/3Dプリンティング/バイオプリンティング

Inkjet (5-1) Applications/3D Printing/ Bio Printing

2018年6月21日(木) 09:30 ~ 10:30 コンファレンスルーム (工学系総合研究棟 2 二階)

[IJ5.1-01] インクジェット3Dプリンタの積層プロセスの検討 Study on Lamination Process of Inkjet 3D Printer

*田沼 千秋¹、田中 豊¹、御法川 学¹ (1. 法政大学)

*Chiaki Tanuma¹, Yutaka Tanaka¹, Gaku Minorikawa¹ (1. Hosei University)

インクジェット方式3Dプリンタは、低コスト、高精度、サポートレスで生産性の高い技術として、積層造形法の有望な選択肢の一つにあげられている。紫外線(UV)硬化樹脂材料を用いたインクジェット方式により、自立する微細な円柱の造形のための積層プロセスの検討を行ってきた。

本報告は、UV硬化樹脂材料を用いたインクジェットシステムにおける高速化、高精度化のための積層造形プロセスについて、インクの吐出と積層過程の検討を行った結果について述べる。

インクジェット 3D プリンタの積層プロセスの検討

田沼 千秋*, 田中 豊**, 御法川 学***

*法政大学 マイクロ・ナノテクノロジー研究センター

**法政大学 デザイン工学部システムデザイン学科

***法政大学 理工学部機械工学科

Study on Lamination Process of Inkjet 3D Printer

Chiaki Tanuma*, Yutaka Tanaka**, and Gaku Minorikawa***

*Research Center for Micro-nano Technology, Hosei University of Japan

** Department of Art and Technology, Faculty of Engineering and Design, Hosei University of Japan

*** Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Engineering, Hosei University of Japan

By studying the ink lamination process of ink-jet 3D printer using ultraviolet curable ink, we succeeded in forming a fine column. We found that by controlling the ink volume of an ink drop ejected from an ink-jet head, the ink volume of an ink layer, and the time of UV irradiation, it is possible to control the thickness of the fine column. In addition, optimization of the above-mentioned parameters showed that it is possible to control the time for fine column formation. fine cylinder whose diameters were 0.22mm and 0.55mm were formed by using the ink-jet print head that ejected an ink drop of 6pL.

1. はじめに

積層造形技術による 3D プリンタは、製造における試作・評価工程で利用されてきたが、製品に採用するためには、廃棄物の低減(サポートレス), 高精度化(表面の平滑性), 高温耐性の向上, 複合化, 付加造形などが課題として挙げられる。これらの課題を解決する技術として、インクジェット方式が期待されている。インクジェット方式の 3D プリンタは、多様な材料を用いて高精度な積層造形が可能であるが、サポートレス化を含めた低コスト化と生産性の向上が課題である¹⁾²⁾。

インクジェット方式の多くは、紫外線硬化型(UV 硬化型)のインクを用いる。インク液滴の吐出と UV 光照射を繰り返すことで積層造形を行うが、造形物の形状維持のために、サポート材を用いる。つまり、造形と同時にサポート材と一緒に形成する必要がある。一方、造形物の形成に要する時間は、インク液滴の吐出時間と UV 光照射時間の和となる。高速に造形するためには、一層を形成するインク液滴量を増やし、UV 光照射回数を減らすことが必要となる。また、サポートレスの造形により高速化が可能と考えられる。

著者ら³⁾は、カチオン重合型インクを用いて立体の造形を試み、自立する直径 0.55mm, 高さ 5mm の

円柱の形成に成功した。しかし、その造形の過程については詳細な検討がなされていなかった。

本報告は、微細な円柱が形成される過程について高速ビデオカメラによる観察などを行い、サポートレスでかつ高速な造形の可能性を検討した結果について述べる。

2. 実験

2.1 実験装置の概要

Fig.1 に、実験に用いた装置の概略構成図を示す。また、Fig.2 に、実験装置の写真を示す。実験装置は、3D インクジェットプリンタ、高速ビデオカメラとカメラ用 LED 光源で構成した。

3D インクジェットプリンタは、東芝テック社製ピエゾ型インクジェットヘッド CA3A, UV-LED, X-Y ステージとこれらを制御する駆動制御回路から構成され、PC を介して所望の制御を行った。インクの粘度の最適化のため、インクの温度制御をおこなった。

インクは、ダイセル社製 LED カチオン硬化型インクジェットインク VEX-12001(開発品)を用いた。UV-LED は、中心波長が 365nm で最大出力が 2300mW の素子をパルス制御して用いた。

高速ビデオカメラは、フोटロン社製 FASTCAM SA-Z を用いた。レンズは、ライカ社製 Z16-APO を用いた。高速ビデオカメラ用の LED 光源は、ユーテックテクノロジー社製 UFLS-75 を用いた。インク液滴の飛翔状態の撮影のための装置構成は、インク液滴が投影されるように、LED 光源、インクジェットヘッド、高速ビデオカメラの順に配置した。

* 〒184-0003 東京都小金井市緑町 3-11-15

* 3-11-15 Midori-cho, Koganei-shi, Tokyo 184-0003, Japan

e-mail: chiaki.tanuma.45@hosei.ac.jp

2. 2 実験方法

実験は、インクジェットヘッド駆動条件の最適化、インクの硬化条件の確認、円柱の形成の順に行った。インクジェットヘッドの駆動条件の最適化は、吐出体積、サテライトの発生を高速ビデオカメラで観察して、駆動電圧などの最適化を行った。インクの硬化条件は、インクの流動が停止する最小限のエネルギーを求め、積層造形的高速化を目指した。

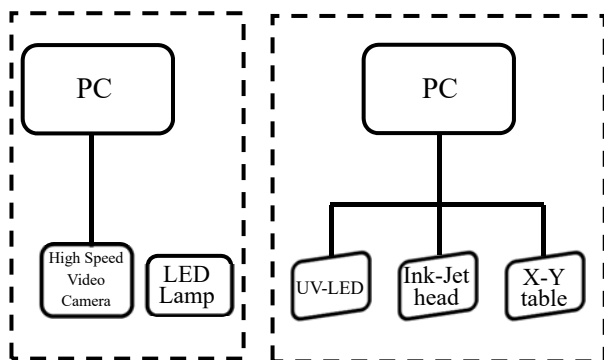


Fig.1 Schematic of experimental facility for laminating process in Ink-Jet 3D printer

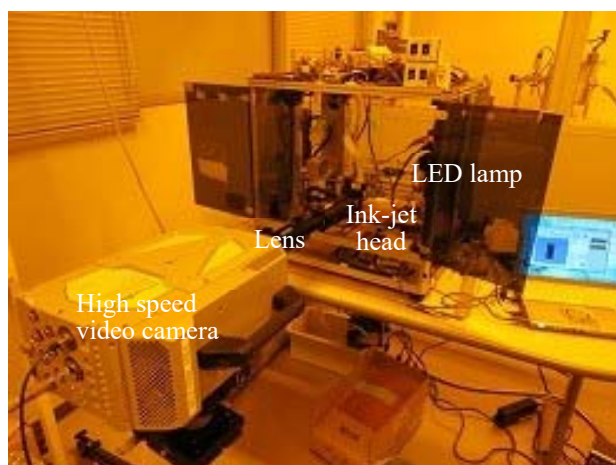


Fig.2 Photograph of experimental facility for laminating process in Ink-Jet 3D printer.

3. 結果と考察

Fig.3(a)(b)に、カチオン重合型 UV インクを用いて作成した円柱の写真を示す。

Fig.3(a)の円柱は、直径が 0.65mm で高さは、およそ 5mm である。円柱の作成は、25,200pL のインク液滴を吐出して、積算光量が $50\text{mJ}/\text{cm}^2$ となるように UV 光を照射した。この操作を 70 回繰り返して、円柱を形成した。

Fig.3(b)は、直径が 0.35mm で高さは、およそ 1.6mm の円柱である。4,200pL のインク液滴を吐出

して積算光量が $50\text{mJ}/\text{cm}^2$ となるように UV 光を照射した。この円柱の作成は、前記の操作を 30 回繰り返した。

二つの円柱の側面には、積層過程で形成された僅かな段差が観察された。また、積層した最上層は、わずかに盛り上がっており、ドーム形状となっている。

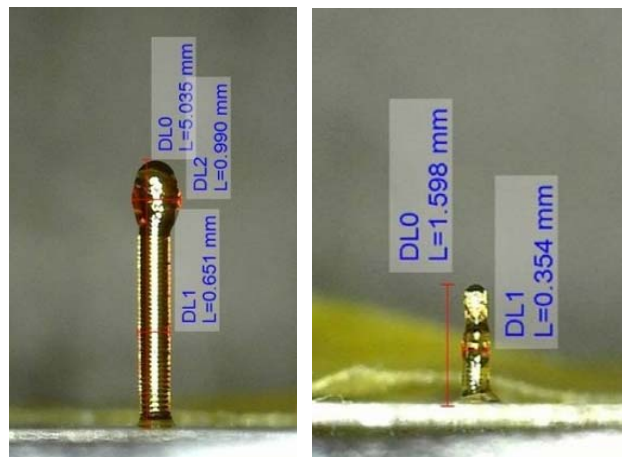


Fig.3 Photograph of fine cylinder using cationically polymerized ink.

(a) diameter 0.65mm, height 5mm

(b) diameter 0.35mm, height 1.6mm

Fig.4,5 に、インク液滴の積層数と円柱の形状変化を示す。

Fig.4 は、直径が 0.22mm の円柱を形成する際の積層過程を高速ビデオカメラで撮影し、積層数とその形状を静止画で示した。

4,200pL のインク液滴を吐出して、所定の積算光量の UV 光を照射した後に、同じ場所に同量のインク液滴を吐出して UV 光を照射し層を重ねた。

Fig.4 に示す(a)(b)(c)(d)は、インク液滴がそれぞれ 1 層、5 層、10 層、15 層した際の形状である。5 層目以降に積層されたインク液滴は、円柱の直径を決定する形状となっており、その後は、円柱が一定の直径で積層された。

Fig.5 は、直径が 0.55mm の円柱を形成する際の積層過程を高速ビデオカメラで撮影し、積層数とその形状を静止画で示した。

25,200pL のインク液滴を吐出して、所定の積算光量の UV 光を照射した後に、同じ場所に同量インク液滴を吐出して積層を行った。Fig.5 に示す(a)(b)(c)(d)は、それぞれ 1 層、5 層、10 層、15 層した際の形状である。5 層目から直径は一定となり、その後は、円柱が縦方向に成長した。

Fig.6,7 に積層数と円柱の高さの関係を示す。二つのグラフで円柱の高さは、5 層目以降で傾きが大きくなり、積層数に応じて円柱が高くなった。すなわち、5 層目までは、インク液滴は、着弾後に広がる傾

向であったが、インク液滴が一定の量まで積層されると円柱の直径は一定となり、比較的スムーズな側面の円柱が形成された。

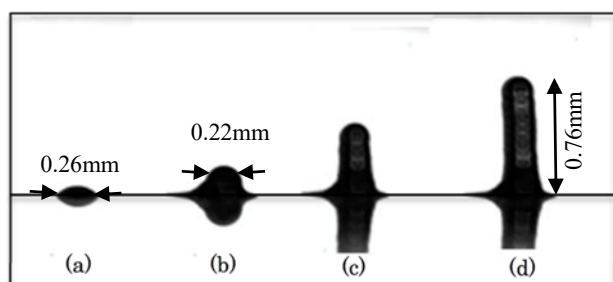


Fig.4 Formation process of fine cylinder.

- (a) Ink volume:4,200pL, Number of layer:1
- (b) Ink volume:4,200pL, Number of layer:5
- (c) Ink volume:4,200pL, Number of layer:10
- (d) Ink volume:4,200pL, Number of layer:15

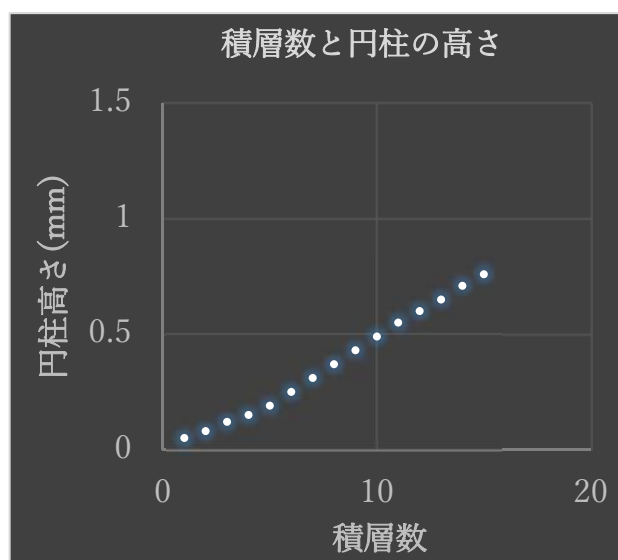


Fig.6 Relationship between number of layers and height of fine cylinder: Ink volume:4,200pL

Fig3-7 に示す結果から、インクジェット方式による微細な円柱の形成過程において、基板にインク液滴が着弾して、一定の範囲でインク液滴が硬化すると、円柱形成の土台となり、その後に着弾した液滴は、一定の直径で円柱が形成されるように見える。一回に吐出するインク液滴の量を増やすと円柱の直径が大きくなることから、インクの表面張力により直径が決定されていると推測される。つまり、インク液滴の量と表面張力のバランスにより、円柱が形成されると考えられる。

なお、Fig.3 と Fig4,5 の円柱の直径が異なるのは、造形を行うテーブルの振動が影響しているためと推察している。

4. まとめ

高速ビデオカメラによる観察などにより、微細な円柱が形成される過程について検討を行い、サポー

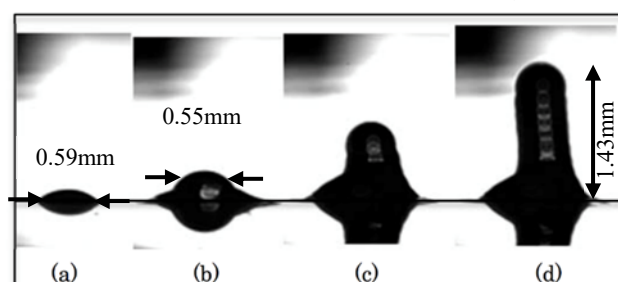


Fig.5 Formation process of fine cylinder.

- (a) Ink volume:25,200pL, Number of layer:1
- (b) Ink volume:25,200pL, Number of layer:5
- (c) Ink volume:25,200pL, Number of layer:10
- (d) Ink volume:25,200pL, Number of layer:15

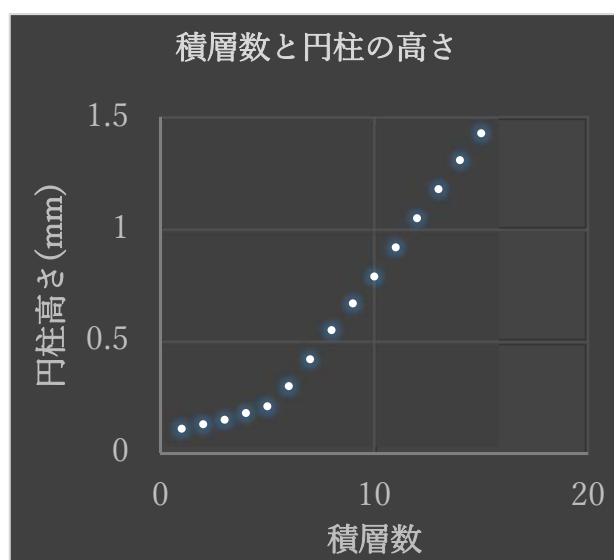


Fig.7 Relationship between number of layers and height of fine cylinder: Ink volume:25,200pL

トレスで高速な造形の可能性について検討した。

その結果、インク液滴の量と一回ごとに積層するインクの量を制御することで、円柱の直径と形成時間の最適化が可能であることが分かった。今後、インクの表面張力、噴射速度などのパラメータを加え、形成時の精度向上と時間短縮の可能性を明らかにする。

謝辞

本研究は、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「グリーンテクノロジーを支える次世代エネルギー変換システム」(文部科学省 2013~2017 年)の助成、および経済産業省・戦略的基盤技術高度化支援事業「工業製品製造に適した革新的な多次元

制御方式による 3D プリンタの技術開発」の助成を受けて実施された

本研究の遂行にあたり、インクジェットによる造形などに協力していただいた加藤 航 氏並びに関 智弥 氏(デザイン工学部 システムデザイン学科 田中 豊研究室 2018 年卒)の両名に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Barry Berman; Business Horizons, Vol.55, Issue 2, March-April 2012, Pages 155-162
- 2) Christopher Thomas Schmitt; Low Cost Inkjet Process for 3-D Printing, a thesis submitted in partial fulfillment of the honors requirements for the degree of Bachelor of Science in Mechanical Engineering, Univ. Arkansas May 2016
- 3) Chiaki Tanuma, Wataru Kato and Yutaka Tanaka; Visualization of ink laminating process in ink-jet 3D printer, Proceedings of Visualization Society of Japan, OS-5-3, Nov.2017

一般セッション(口頭講演)| インクジェット

[IJ5.1] インクジェット(5-1) 応用/3Dプリンティング/バイオプリンティング

Inkjet (5-1) Applications/3D Printing/ Bio Printing

2018年6月21日(木) 09:30 ~ 10:30 コンファレンスルーム (工学系総合研究棟 2 二階)

[IJ5.1-02] フルカラー 3 D プリンターの開発 Development of Full Color 3D Printer

*八角 邦夫¹、大井 弘義¹、今井 健太¹ (1. 株式会社 ミマキエンジニアリング)

*Kunio Hakkaku¹, Hiroyoshi Ohi¹, Kenta Imai¹ (1. MIMAKI ENGINEERING CO.,LTD)

フルカラー 3 D プリンターは、デザイン確認、スキャナーやドローン等の撮影データからの造形、C G 創造物の立体化等の用途が期待されています。著者らは昨年 1 1 月に世界初のフルカラー 3 D プリンター: 3 D U J - 5 5 3 を商品化しました。

基本技術としてUV硬化インクによる 2 D インクジェット方式を採用、3 D 自由曲面のフルカラー造形を実現する為、1 層での内部造形とカラー表面画像とを同時形成して、順次積層する方法としました。

本報告では、2 D のフルカラー技術を 3 D に拡張するために必要な、Z 軸走査、減法混色インクの配置、信頼性確保等の技術を報告します。

フルカラー3Dプリンターの開発

八角 邦夫，大井 弘義，今井 健太

株式会社ミマキエンジニアリング 技術本部

Development of Full color 3D printer

Kunio Hakkaku, Hiroyoshi Ohi, Kenta Imai

Development Division, Mimaki Engineering Co, Ltd.

Full color 3D printer has been expected for many years. We have realized Full color 3D printer by UV inkjet technology and commercialized 3DUJ-553¹⁾ last year. There were some difficulties to achieve the surface color with modeling by 'layer by layer' method, but we enabled precision color by forming the color domain of the constant thickness along the normal direction from the free surface of the object. In this paper, we explain a Z-axis scanning technology and 3D surface color technologies by expanding 2D imaging to 3D imaging.

1. はじめに

近年、3Dプリンターの造形物は試作品から量産品にまで広がりを見せ始めている。中でもデザイン確認には造形物のカラー化が求められており、更に3Dスキャナーの進歩もあり、高画質なフルカラー方式が検討されている。^{2)~7)}

2. 2Dから3D

2. 1 着色

2D (平面印刷) から3Dへは、単純にはZ (縦) 軸が増えることにある。また、造形後に着色する方式⁸⁾では自由形状に対応できないので、造形と着色を同時に行うこととした。更に、弊社の技術ドメインから、積層法によるUV硬化インクジェット造形方式 (Fig.1) とした。

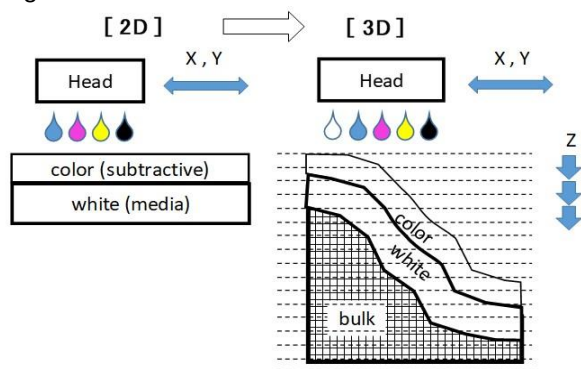


Fig.1 From 2D to 3D

また、全ての視認方向に着色を均一化する意味で
・着色層を表面の法線方向に一定の厚さ。

・2Dと同様に、反射(白)層も表面の法線方向に一定の厚さで形成し、その外(表面)側に減法混色で着色する。

とした (Fig.2)。

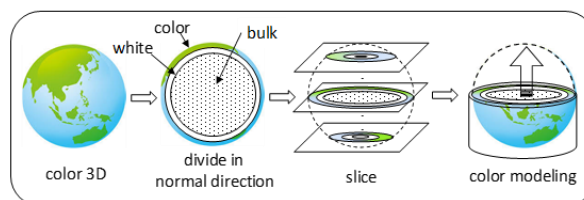


Fig.2 'Layer by layer' procedure

2. 2 走査

インクジェットヘッドとUV-LED、平坦化ローラーを搭載したキャリッジをX-Y走査し、造形テーブルをZ走査 (順次降下) とした。

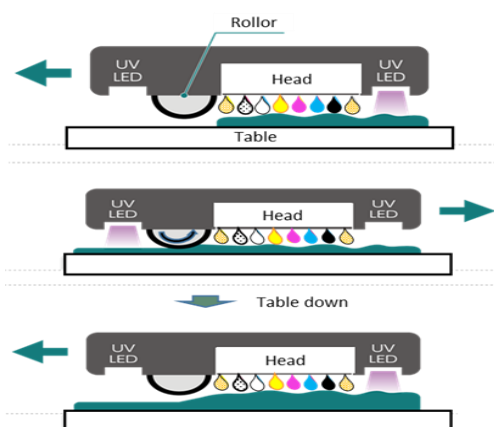


Fig.3 Scanning

3. 一層の厚さ (Z軸) 形成

積層の為のZ軸走査は、ボールネジで $\pm 2 \mu m$ 以下/層の送り精度で、造形台を順次降下して行っている。

* 〒389-0512 長野県東御市滋野乙 2182-3

* 2182-3 Shigeno-otsu, Tomi-shi, Nagano, 389-0512, Japan

* e-mail: kunio_hakkaku@mimaki.com

る。またヘッドの吐出(量)ムラ等に起因するインク層の凹凸に対応して、ローラーで平坦化し、一層の面の厚さの均一化を行っている。

3.1 平坦化機構

平坦化は Fig.4 の構成である。金属ローラーにインク上面の凹凸部分:Sを付着させて汲み上げ、ブレードで汲み上げたインクを除去する。

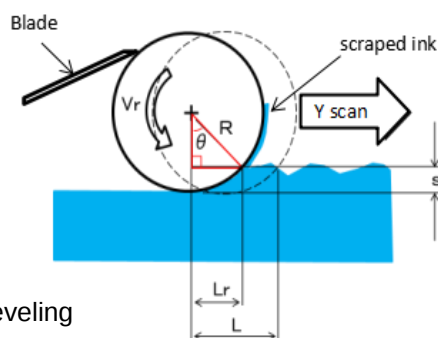


Fig.4 Leveling

3.2 平坦化能力

凹凸部分のインク:S($10\mu\text{m}$ 以下)を汲上げる能力を、ローラーの周速とローラー面上の汲み上げインク厚さで確認した結果を Fig.5 に示す。

要求される汲み上げ厚さ:sは $10\mu\text{m}$ 以下であるので、図から、 $100\sim 600\text{mm/sec}$ の走査速度の範囲で十分な能力(付着濡れ)があることが解る。

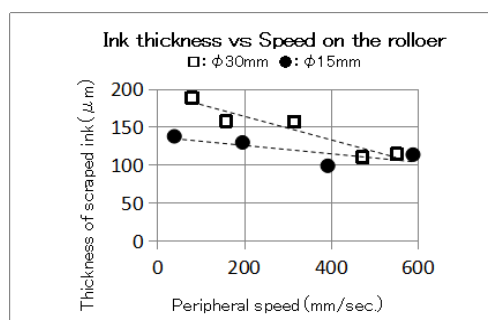


Fig.5 Thickness of scraped ink

4. 表面領域の構成

自由曲面の造形物の表面にカラー領域を形成するために、内部から順に、内部領域⇒光反射領域⇒分離領域⇒カラー領域⇒保護領域とした(Fig.6)。

ここで内部領域に白インクを用いるのであれば、光反射領域(白)と一体であって良い。内部領域に白以外のインクを含む場合は、光反射領域(白)の隠ぺい力が十分になるよう、領域の厚さや白色顔料の濃度を大きくすることが必要である。

さらに退色や擦れに対応する保護領域は、必要に応じて透明インクで形成しても良いし、造形後に透明な保護材料を塗布で形成しても良い。

なお、内部領域以外の領域は、色の均一性から表面の法線方向に均一な厚さであることが望ましい。

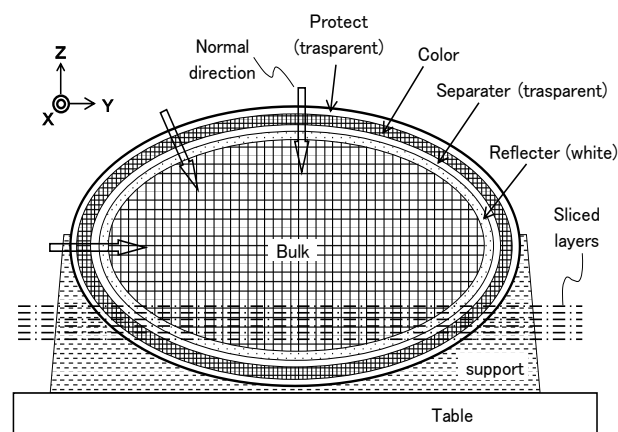


Fig.6 Cross section of the object

4.1 分離領域

特に造形物側面ではカラー領域と反射領域の voxel (立体要素) の混色があると視認性が劣化するので、2つの領域の間に一定厚さの光学的な分離(透明インク)領域を設けた。結果、Fig.7 から、造形物の視認角度による明度:Lの不安定さを改善できることが解った。

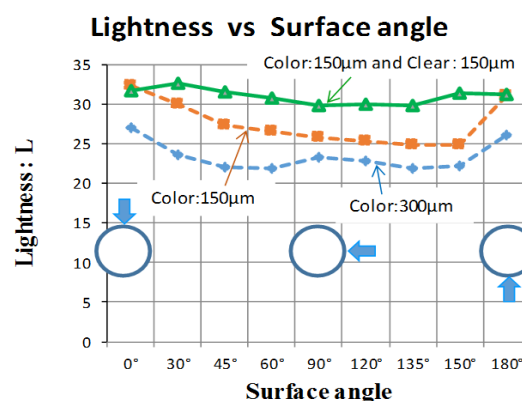


Fig.7 Lightness of various surface angle

4.2 カラー領域

Inkjet 方式ではインクの飛翔は上→下(Z)方向であり、1 voxel のX,Y:Zのアスペクト比が大きい(相対的にZが小さい)。従って Fig.7 の視認角度により voxel の構成が大きく異なってしまう。これに対応して、造形物表面(ポリゴン)に法線方向のカラー領域の厚さ(容積)を場所に依らず一定とした。結果、カラーテクスチャは法線方向に延在した厚みを有するカラー領域を形成する。

$\phi 15\text{mm}$ の円柱形状の表面を青色着色した造形物を円方向に切断した断面の撮影結果を Fig.8 に示す。カラー領域の法線方向の厚さを $350\mu\text{m}$ 、1層の厚さを $24\mu\text{m}$ としたので、このカラー領域で法線方向に入る voxel 数は上/下面では14~15個、またY方向の解像度は600dpi($42\mu\text{m}$ ピッチ)であるので、側面では8~9個となる。



4.3 カラー領域へのインク補填

bulk reflector separate color protect support

W Y W W T C I M T T S S Y

Y W Y W W T C I M T T S S Y

32 μ m 32 μ m 40 μ m

roller

surface

5. サポート領域

6. 吐出安定性

循環・脱気の経過時間によるインク中の溶存酸素の減少と、不吐出ノズルの減少を確認した結果を Fig.10 に示す. 20-30 分で溶存酸素が減少し、それに伴って不吐出の発生率が減少していることがわかる.

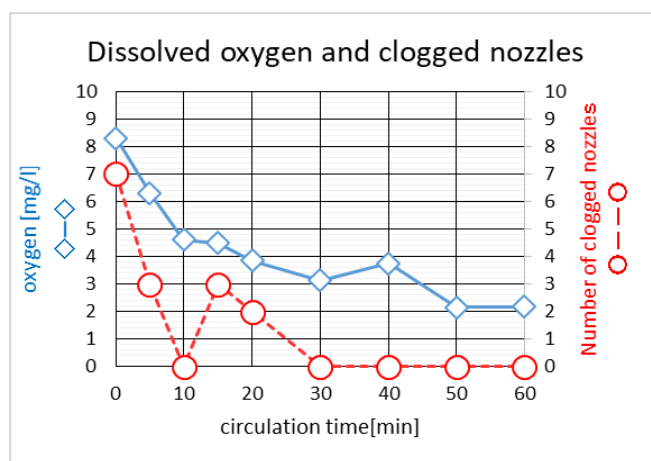


Fig.10 Ink degassing and clogged nozzles.

7. 結言

参考文献

- 1) “3DUJ-553” <http://mimaki.com/product/3d/3d-flat/3duj-553/>
- 2) Yamane et al. APPARATAS AND METHOD FOR FORMING THREE-DIMENSIONAL ARTICLE. U.S. Patent 5,059,266, Oct.22,1991

- 3) Tochimoto et al. THREE DIMENSIONAL OBJECT MOLDING APPARATUS. U.S.Patent 6,612,824. Sep.2,2003
- 4) Eliahu M Kritchman. METHOD AND SYSTEM FOR BUILDING PAINTED THREE-DIMENSIONAL OBJECTS. U.S.Patent 7,991,498. Aug.2,2011
- 5) 八角邦夫, 原浩文. 造形物およびその製造方法. 特許第6261363号. 2017. 12. 22
- 6) 大西勝. 立体造形物の製造方法. 特許第6305760号. 2018. 3. 16
- 7) Alan Brunton, Can Ates Arikan and Philipp Urban, “Pushing the Limits of 3D Color Printing: Error Diffusion with Translucent Materials”, Fraunhofer Institute arXiv:1506.02400v1 [cs.GR] 8 Jun 2015.
- 8) “SP-303”http://www.japanjournal.jp/tjje/show_art.php?INDyear=09&INDmon=01&artid=b54865f65e833acf186c335d73651e01

一般セッション(口頭講演)| インクジェット

[IJ5.1] インクジェット(5-1) 応用/3Dプリンティング/バイオプリンティング

Inkjet (5-1) Applications/3D Printing/ Bio Printing

2018年6月21日(木) 09:30 ~ 10:30 コンファレンスルーム (工学系総合研究棟 2 二階)

[IJ5.1-03] 静電誘引形インクジェット方式を利用した離型剤コーティング方法の検討

Investigation of Release Agent Coating Method Using Electrostatically Extracted Ink Jet System

松尾 一壽¹、*綾城 唯¹、山崎 雄三¹ (1. 福岡工業大学)

Kazuhisa Matsuo¹, *Yui Ayasiro¹, Yuzou Yamasaki¹ (1. Fukuoka Institute of Technology)

一般に、インクジェットは記録技術であると考えられているものと思われる。しかし現在、X、Y軸の2次元にZ軸を加えた3次元の立体物を造形する3Dプリンタや記録対象物体へ可食インクを付着させるフードプリンタも出現している。

我々は、静電誘引形インクジェット方式を利用した離型剤コーティング方法について検討を行っている。離型剤は型枠に入った造形物を取り出すとき型崩れ等を防止するために必要な技術である。この離型剤コーティング方法には、手塗りやスプレーなどの方法があるが、塗り斑や空間に飛散して周囲を汚すなどの課題がある。

本稿では、離型剤の飛翔特性やガラス基板に付着した状態などの基礎的な諸特性について報告する。

In general, inkjet is considered to be a recording technique. However, research is currently being conducted in many fields such as 3D printers and food related fields. We are investigating releasing agent coating method using electrostatically extracted inkjet method. A release agent is necessary when taking out a modeled object in a form. This is to prevent the shape of the model from collapsing. Methods for coating release agents include manual work and spraying. However, this method has problems such as scattering of the release agent into the space and contamination of the surroundings.

In this paper, we report various fundamental characteristics such as flight characteristics of release agent.

静電誘引形インクジェット方式を利用した離型剤コーティング方法の検討

綾城 唯*, 山崎 雄三*, 松尾 一壽*

*福岡工業大学 情報工学部 情報工学科

Investigation of Release Agent Coating Method using Electrostatically Extracted Ink Jet System

Yui AYASIRO*, Yuzo YAMASAKI*, and Kazuhisa MATSUO*

*Fukuoka Institute of Technology, Faculty of Information, Computer Science and Engineering

In general, inkjet is considered to be a recording technique. However, research is currently being conducted in many fields such as 3D printers and food related fields. We are investigating releasing agent coating method using electrostatically extracted inkjet method. A release agent is necessary when taking out a modeled object in a form. This is to prevent the shape of the model from collapsing. Methods for coating release agents include manual work and spraying. However, this method has problems such as scattering of the release agent into the space and contamination of the surroundings.

In this paper, we report various fundamental characteristics such as flight characteristics of release agent.

1. はじめに

一般に、離型剤は食品を焼く工程で金属の型枠から焼き上がり後に成形品である食品を取り出すとき剥離しやすくするために用いられる。また、離型剤の塗り斑は、成形品に焼き斑を生させる。従って、これらの型崩れや焼き斑を生じた成形品は品質に影響を与える。

現在、離型剤コーティング方法として、スプレーや手塗りによる手法で行われている。しかし、これら何れの手法も高価である離型剤が金属の型枠外や空間へ飛散すること、さらに塗り斑などが課題となっている。

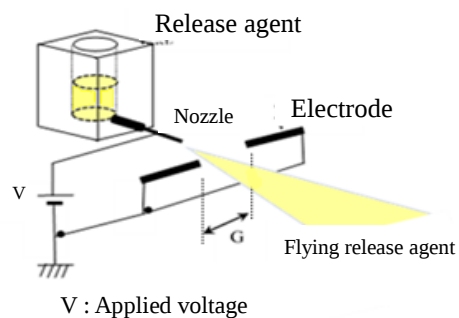
我々は、金属の形枠のみ均一に離型剤のコーティングする方法について検討を行っている¹⁾。

静電誘引形インクジェット方式は、ノズル先端から飛翔する離型剤が微粒子群となった状態をコーティングに適用することを念頭に置いている。本稿では、静電誘引形インクジェット方式による離型剤の飛翔状態の確認とその基礎的な諸特性について報告する。

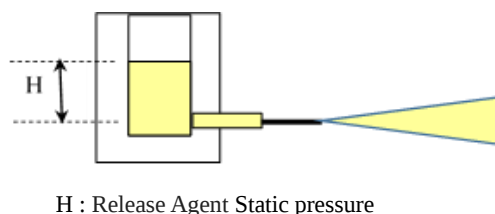
2. 実験装置の構成

図1に実験装置の構成を示す。なお、この図は離型剤を横方向へ飛翔させたときである。図(a)はノズルヘッド部と離型剤の飛翔状態の模式図である。ノズルは離型剤が入った壺に直接取り付けられている。ノズルの先端から2mm隔てて2本の対向電極が設けられている。2本の対向電極間の間隙 G は5mm

である。電圧はノズルと対向電極間に印加される。なお、ノズルは正極とし対向電極は接地している。離型剤は、ノズルと対向電極間に印加される電圧に基づいたクーロン力によって対向電極間の間隙を飛翔することになる。離型剤の飛翔観測は、ハロゲンランを光源として用いた。離型剤コーティングは、プレパラートに付着させた。このプレパラートと対向電極間の距離は10mmである。図(b)は、離型剤が入った壺の横視である。この静圧 H によりノズル先端にメニスカスを形成させる要因となる。



(a) Configuration of nozzle head part



(b) Side view

Fig.1 Nozzle head and flying release agent

* 〒811-0295 福岡市東区和白 3-30-1

3-30-1 Wajoro Higashi Higashi-ku Fukuoka, 811-0295, Japan

e-mail: s15a2003@bene.fit.ac.jp

3. 実験結果と議論

3.1 離型剤の飛翔状態

図2はノズル先端から飛翔する離型剤である。離型剤は、ノズル先端から細い糸状となって2本の棒状の対向電極の間隙を通過し、やがて“椰子の葉状”に広範囲に亘って飛散する様子が分かる。

得られた結果から、静電誘引形インクジェット方式によって離型剤の飛翔が可能であることが分かった。実験で用いたノズルの形状は、内径 $380\mu\text{m}$ 、外径 $480\mu\text{m}$ である。この方式の特徴の一つは、大きなノズル径が使用可能である。この時の実験条件は、印加電圧 $=3.8\text{kV}$ 、静圧 $H=5\text{mm}$ である。

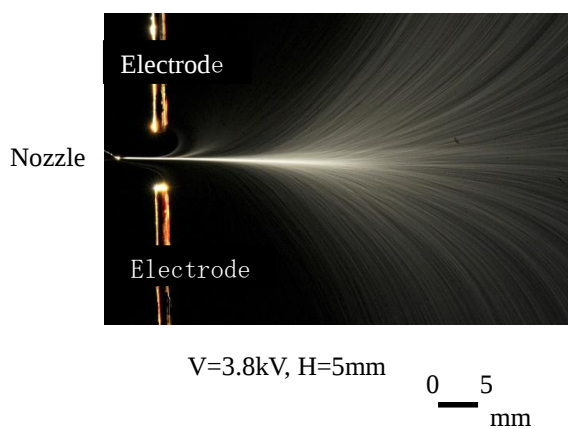


Fig.2 Flying release agent

離型剤の飛翔を確認した後、飛翔方向および飛翔の垂直方向の濃度差について検討を行った。図5に図4で示した飛翔観測例におけるノズル先端から電極方向へ飛翔する離型剤の濃度値と半値幅特性について調べた。

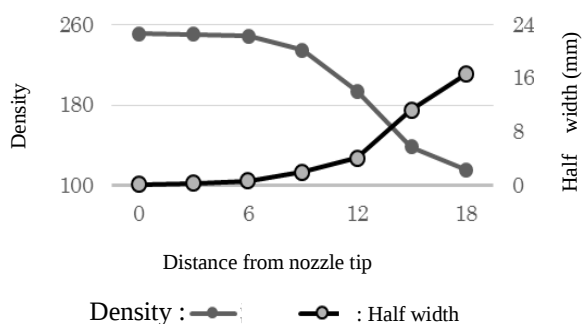


Fig.3 Characteristics of distribution and density, the distance from the nozzle tip

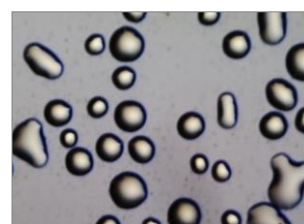
なお、離型剤の広がり具合については、半値幅で表している。濃度は無次元量であり、画像中黒い部分との差を 256 階調で表している。

得られた結果から、ノズル先端から飛翔する離型剤の濃度は徐々に低下していくことが分かった。ま

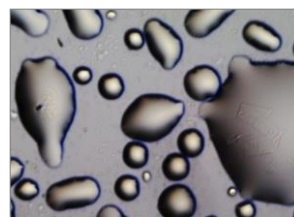
た、広がり具合は、ノズル先端では狭いが飛翔距離が離れるほど広がっている。離型剤のコーティングを考えた場合、広い空間に飛翔する領域を使用した方が有利であると思われる。

3.2 離型剤コーティング

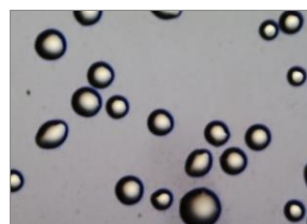
実際に離型剤をプレパラートにコーティングした状態を図4に示す。コーティング面の観察には光学式顕微鏡を用いた。このときの実験条件は、印加電圧 $V=4.0\text{kV}$ 、静圧 $H=40\text{mm}$ 、走査速度 $v=1\text{mm/s}$ 、走査回数は1回である。図5に付着した離型剤の観察を行った位置 A, B, D を示す。コーティングの中心から上下の距離に応じて、付着する離型剤の粒径や分布の状態がわかる。



(a) 5mm from center (B point)



(b) The central part of the release agent coating (A point)



(c) 10 mm from center (D point)

0 0.1 mm

Fig.4 Release agent attached to the preparation

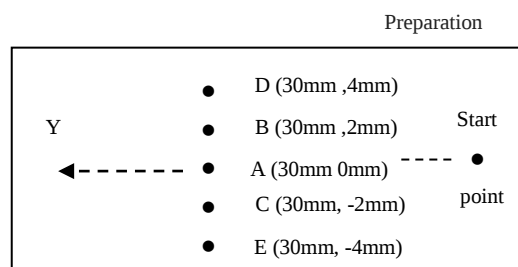


Fig.5 Measurement position

3. まとめ

得られた結果から、離型剤コーティングの中心部付近から離れるに従って付着する離型剤の密度が低下していくことが分かった。また、付着した離型剤の中心部から離れるほど、粒径は小さくなっている。

これは図 2 から離型剤飛翔の中心部分は密度が高く、中心部から離れるに従って低くなっていることがから推測される。さらに中心部では粒子がプレパレート上に付着した瞬間結合して大きくなる事も考えられる。残されている課題もあり、今後も継続して検討を進める予定である。

離型剤コーティングに関する研究の一部は、平成 27 年度 JST マッチングプランナープログラム「探索試験」の助成を受けて実施された。厚く感謝いたします。

参考文献

- 1) Yuzo Yamasaki, Takafumi Ienaga, Tomio Ohno, and Kazuhisa Matsuo, “Adhesion State of Mold Release” The 2017 ANNUAL MEETING OF THE INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS OF JAPAN, 3-013,(2017) [in Japanese]

Oral presentation | Inkjet

[IJ5.2] Inkjet (5-2) Applications/3D Printing/Bio Printing

Session Chair: Takeshi Miyato, Koei Suzuki (Ricoh Company, Ltd.)

Thu. Jun 21, 2018 10:50 AM - 11:50 AM Conference Room (2nd Floor, Engineering Research Building II)

[IJ5.2-01] Study on Edible Ink Coating Method Using Electrostatically Ink Jet Method

Kazuhisa Matsuo¹, *Minori Okabe¹, Yuzou Yamasaki¹ (1. Fukuoka Institute of Technology)

10:50 AM - 11:10 AM

[IJ5.2-02] Development of a Bioprinting Technique by Combining Inkjetting Technology and Enzyme-mediated Hydrogelation

*Shinji Sakai¹, Makoto Nakamura² (1. Osaka University, 2. University of Toyama)

11:10 AM - 11:30 AM

[IJ5.2-03] Challenging Research on Organ Engineering by Inkjet Bioprinting

*Makoto Nakamura¹, Shintaroh Iwanaga¹, Yuta Hamada¹, Taketoshi Kurooka¹, Shinji Sakai² (1. University of Toyama, 2. Osaka University)

11:30 AM - 11:50 AM

一般セッション(口頭講演)| インクジェット

[IJ5.2] インクジェット(5-2) 応用/3Dプリンティング/バイオプリンティング

Inkjet (5-2) Applications/3D Printing/Bio Printing

2018年6月21日(木) 10:50 ~ 11:50 コンファレンスルーム (工学系総合研究棟2二階)

[IJ5.2-01] 静電誘引形インクジェット方式を利用した可食インクコーティング方法の検討 Study on Edible Ink Coating Method Using Electrostatically Ink Jet Method

松尾 一壽¹、*岡部 美紀¹、山崎 雄三¹ (1. 福岡工業大学)

Kazuhisa Matsuo¹, *Minori Okabe¹, Yuzou Yamasaki¹ (1. Fukuoka Institute of Technology)

インクジェット技術は画像や文字等の記録方式として研究が主になされてきた。その研究成果として、文字はもちろん画像記録は写真画質を有するまでに至っている。さらに、最近インクジェット技術は記録対象物体が記録紙ではなく菓子類へキャラクターなど可食インクを用いて描画するものも現れている。ただし、記録対象物体として水分を含んだものは困難である。

我々は、可食インクを用いた静電誘引形インクジェット方式により水分を含んだ"すり身"などへのコーティングを目的に、その可能性について検討している。今回は、本方式により可食インクの基礎的な飛翔特性である印加電圧及びインク静圧の制御による振る舞いについて報告する。

Inkjet technology has been studied as a method of recording characters and images. As a result, not only letters but also image recording has reached photographic image quality. Furthermore, recently the inkjet technology has been drawn using edible ink not only on recording paper but also on candy characters and the like. However, recorded matter containing moisture is difficult. We are studying an electrostatic induction type inkjet method using edible ink. This aim is coating on moisture-containing "surimi" etc. This time, we will report on the fundamental study of edible ink by this method.

静電誘引形インクジェット方式を利用した可食インク コーティング方法の検討

岡部 美紀*, 山崎 雄三*, 松尾 一壽*

*福岡工業大学 情報工学部 情報工学科

Study on Edible Ink Coating Method using Electrostatically Extracted Ink Jet Method

Minori OkABE*, Yuzo YAMASAKI*, and Kazuhisa MATSUO*

*Fukuoka Institute of Technology, Faculty of Information, Computer Science and Engineering

Inkjet technology has been studied as a method of recording characters and images. As a result, not only letters but also image recording has reached photographic image quality. Furthermore, recently the inkjet technology has been drawn using edible ink not only on recording paper but also on candy characters and the like. However, recorded matter containing moisture is difficult. We are studying an electrostatic induction type inkjet method using edible ink. This aim is coating on moisture-containing "surimi" etc. This time, we will report on the fundamental study of edible ink by this method.

1. はじめに

近年、インクジェット技術は医療や食品製造機器さらに 3D プリンタなどの多種多様な分野で研究がなされている¹⁾。

筆者らは、新たなインクジェット技術の応用として食品製造機器への適用を試みている²⁾。具体的には、可食インクを用いてコーティングを行うものである。なお、インクジェット方式は静電誘引形である。静電誘引形インクジェット方式は、他の方式と異なり特有なインクの飛翔状態を示す。インクは、ノズル先端から連続流のインク液柱となり、やがて広い空間へ霧状態となって飛散している。

本稿では、可食インクが静電誘引方式による飛翔の可能性や、さらに可食インクに印加される電圧や静圧の変化による振る舞いについて検討したので報告する。なお、可食インクとしてパブリカ色素の飛翔を試みた。なお、可食インクの付着は“すり身”への着色の目的としているが今回は記録紙を用いた。

2. 実験装置の概要

図1にインクジェットを構成するノズルヘッド部を示す。図(a)は、可食インク壺を横方向から、対向電極は右方向へ少し変化を付けて見やすいようにしたものである。図(b)は可食インク壺、ノズル、対向電極を上から見たものである。

可食インクとして、パブリカ色素を用いた。ノズルヘッド部の構成は、可食インク壺に直接取り付けられたノズル、ノズル先端から 2mm 隔てて対向電極

を設けた。なお、この対向電極は2本の棒状で、その間隙 $G=5\text{mm}$ である。電圧をノズル対向電極間に印加すると可食インクは飛翔する。ここで H は可食インクの静圧である。この実験では大気圧を利用している。

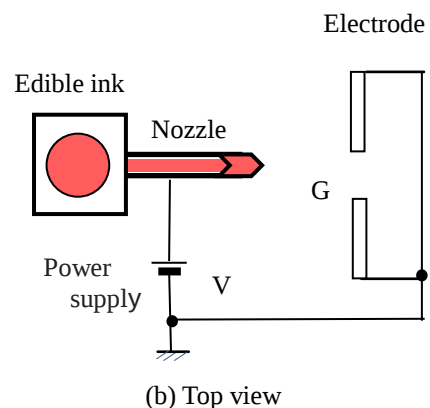
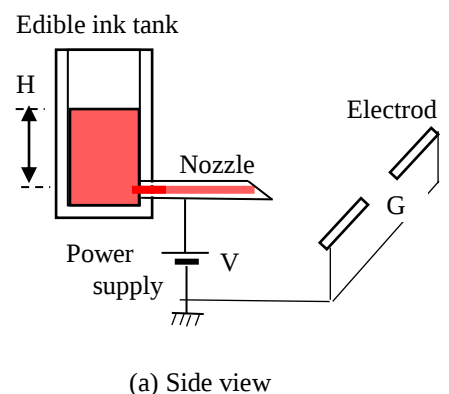


Fig. 1 Nozzle head

* 〒811-0295 福岡市東区和白東 3-30-1

3-30-1 Wajoro Higashi Higasi-ku Fukuoka, 811-0295, Japan

e-mail: s15a2013@bene.fit.ac.jp

3. 結果 と議論

3.1 可食インクの飛翔観測例

図2にノズル先端から飛翔する可食インクの飛翔状態を示す。この観測例は、印加電圧 $V=3.2\text{ kV}$ 、可食インク静圧 $H=5\text{ mm}$ 、シャッター速度 $\nu=1/30\text{ s}$ である。ノズル先端から飛翔する可食インクは対向電極の間隙 G の中心部分を通過する。この図から、ノズル先端の近傍から拡がりを見せ始めて対向電極を通過すると極めて更に広範に亘って飛散していく様子を観測することができる。静電誘引形方式で印刷用インクを飛翔させた場合に観測される飛翔状態とは、かなり異なっている。しかし、食品色素の飛翔においても本方式が有効であることが分かった。

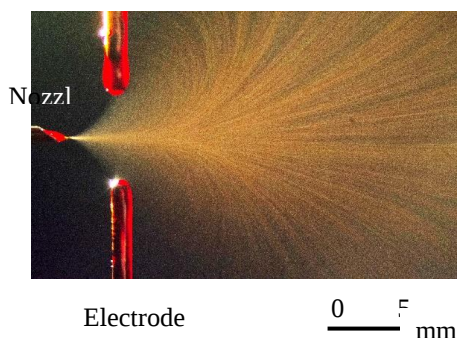


Fig. 2 Observation example

3.2 印加電圧の影響について

図2の予備実験によって食品着色料パブリカの飛翔が可能であることに基づいて、次の実験を実施した。ノズルの走査回数 $N=1$ 回、走査速度 $V=10\text{ mm/s}$ および静圧 $H=40\text{ mm}$ を、それぞれ一定として印加電圧 $V=3.2\text{ kV}$ 、 3.4 kV および 3.6 kV における結果を比較した。なお、最終的な本研究の目標は“すり身”などの練り製品などの食品への着色である。しかし、練り製品などは水分含有量も多く、コーティング特性の検証を行いにくいと考えられたため本研究では普通紙をコーティング対象に設定した。図3に普通紙にコーティングを行った例を示す。ここで、パブリカ色素のコーティング測定の色の数値化には、表色系を使用した。 L^* 、 a^* 、および b^* 色空間は物体の色を表すのによく使用されているものである。 L^* 、 a^* 、および b^* 色空間では、明度を L^* 、色相と彩度を示す色度 a^* 、および b^* で表す。図4に L^* 、 a^* 、および b^* 値の印加電圧ごとの変化を示す。 L^* 、 a^* 、および b^* 値の測定は、コーティングの開始位置から 10 mm の位置 (Fig.3の矢印) に統一して測定を行った。

図3、4から、印加電圧が高くなるに従い色味が高まり、また、コーティングできる幅が広がる傾向が見受けられる。これは、静電誘引力が高くなることにより、ノズルから誘引される着色料の流量が増加するものと考えられる。また、着色料の粒子に与

えられる運動量が大きくなり、より広く拡散するものと思われる。

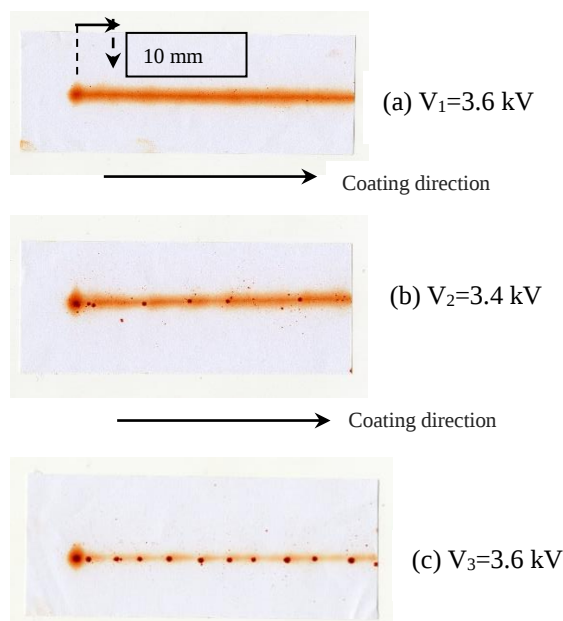


Fig.3 Coating Example

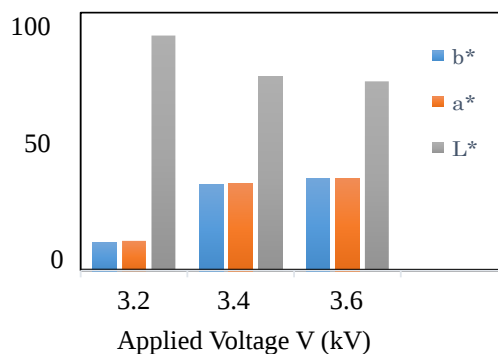


Fig.4 Characteristics of applied voltage - L^* , a^* , b^*
(1 scan, Scan speed=10mm/s, $H=40\text{ mm}$, Measure at 10mm from coating start position)

なお、コーティング面の左側に見られる大きな点状の付着痕は、走査および印加電圧の開始との時間差によるもので、一箇所にコーティングが集中したためである。得られた結果から、図3(c)に観測されているように印加電圧が低い場合は、飛翔が不安定になり、コーティング面に周期的な点が現れていることが観測された。この点は、均一なコーティングを行いたい場合は、印加電圧の適正な制御が重要である。また、逆に何かを模倣した練り製品の製造時の着色への応用を念頭に置いた場合、敢えてコーティングが不安定になるような印加電圧を設定して用いるという可能性もある。

3.3 走査速度の影響について

コーティング技術として評価する上で、ノズルの走査速度が与える影響は重要な課題である。そこで印加電圧 $V=3.6\text{ kV}$ 、静圧 $H=40\text{ mm}$ 、走査回数=1回と

して、ノズルの走査速度 $V=20, 30, 40, 50\text{mm/s}$ とした場合について結果を比較した。図 5 に L^* , a^* , および b^* 値の走査速度ごとの変化を示す。 L^* , a^* , および b^* 値の測定はコーティング開始から 10mm の位置に統一して行なった。また、図 6 は実際のコーティング面である。なお、同図においてコーティングは左から右方向に行なわれており、コーティングの開始部はノズルが停止したタイミングと電圧が印加されるタイミングとの差で、濃く着色されている。

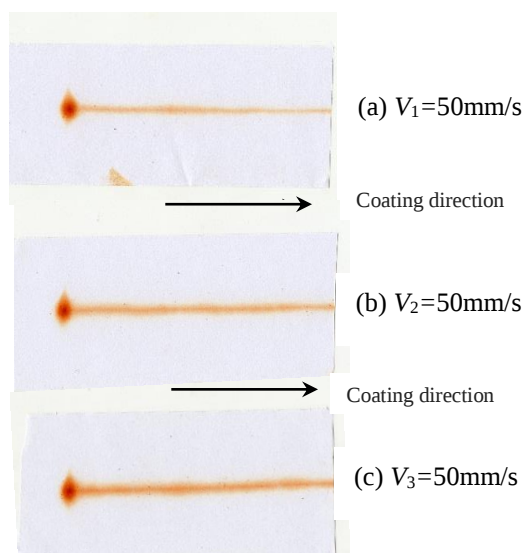


Fig.5 Coating Example

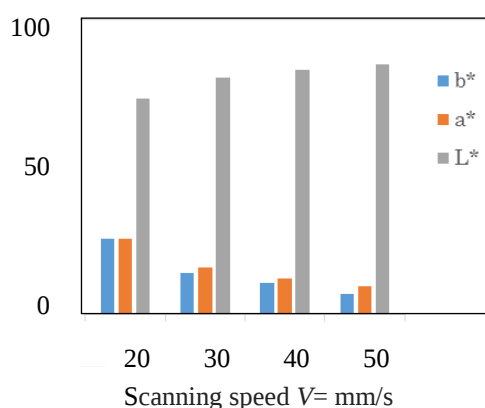


Fig.6 Characteristics of scanning speed – L^* , a^* , b^*
(1 scan, Applied voltage=3.6kV, $H=40\text{mm}$, Measure at 10mm from coating start position)

得られた結果から、走査速度を制御した場合では、速度が遅いほど濃く着色できる傾向が分かった。これは速度が変化することで同じ面積にコーティングされる着色料の密度が変化するためと考えられる。

3.4 走査回数の影響について

コーティング技術として走査回数 N の変化について検討した。これは、一般に重ね塗りのことである。これについては、印加電圧 $V=3.6\text{kV}$, 走査速度 $V=50\text{mm/s}$, 静圧 $H=40\text{mm}$ として走査回数 $N=1, 2,$

3, 4, 5 回とした場合について検討を行なった。図 12 に L^* , a^* , および b^* 値の走査回数ごとの変化を示す。 L^* , a^* , および b^* 値の測定はコーティング開始から 10mm の位置に統一して行なった。なお、図 7 に実際のコーティング結果を示す。得られた結果から、走査回数を増加させるに従って、色濃く着色されていることが分かる。所定の濃さが必要なときは、走査回数を制御することで対応が可能であるものと推測される。

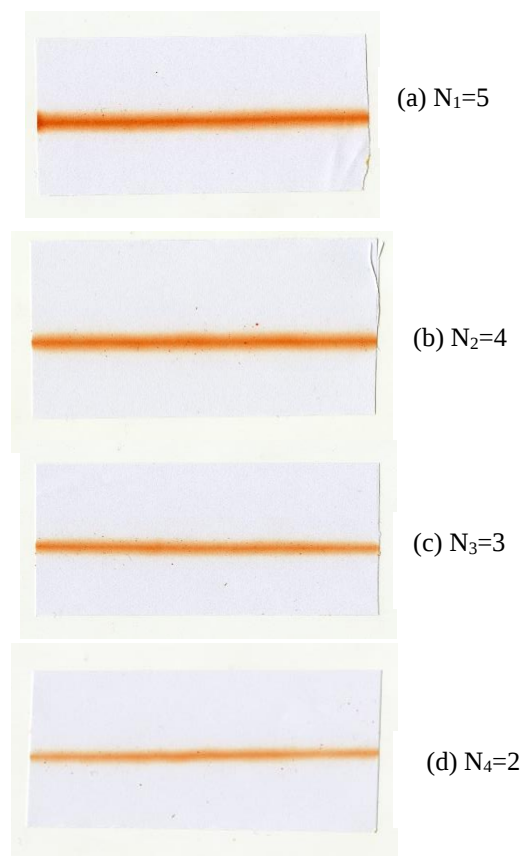


Fig.7 Coating Example

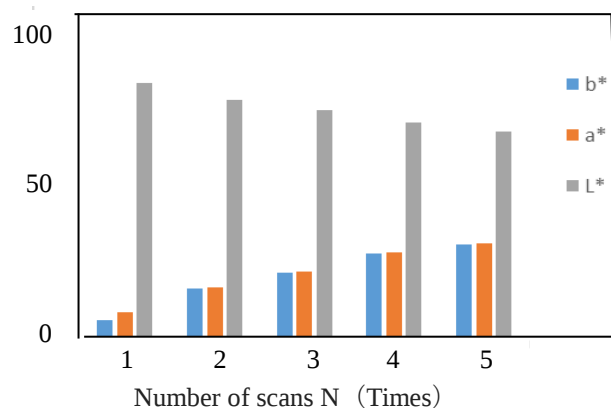


Fig.8 Characteristics of scanning number

4. まとめ

静電誘引形インクジェット方式による可食インクの飛翔が可能であることが分かった。可食インクは

印加される電圧や走査速度さらに回数によって記録状態が変化することが分かった。今後の課題として水分の含有率などによって飛翔・記録特性がどのように変化するかについて検討を行う。

可食インクコーティングに関する研究の一部は、平成 27 年度 JST マッチングプランナープログラム「探索試験」の助成を受けて実施された。厚く感謝いたします。

参考文献

- 1) Hiromi KOBAYASHI, “Latest 3D Printer on the Inkjet Technology”, Journal of the Imaging Society of Japan, **49**, 5, pp. 431-438 (2010) [in Japanese].
- 2) Itoko TOMOIKE, Yuzo YMASAKI, Kazuhisa MATSUO, “The Behavior of the Edible Ink Adhering to the Electrode, The 2017 ANNUAL WEETING OF THE INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS OF JAPAN, 3-086,(2016) [in Japanese]

一般セッション(口頭講演)| インクジェット

[IJ5.2] インクジェット(5-2) 応用/3Dプリンティング/バイオプリンティング

Inkjet (5-2) Applications/3D Printing/Bio Printing

2018年6月21日(木) 10:50 ~ 11:50 コンファレンスルーム (工学系総合研究棟2二階)

[IJ5.2-02] 酵素架橋とインクジェットの融合による3Dバイオプリンティング技術の開発

Development of a Bioprinting Technique by Combining Inkjetting Technology and Enzyme-mediated Hydrogelation

*境 慎司¹、中村 真人² (1. 大阪大学、2. 富山大学)

*Shinji Sakai¹, Makoto Nakamura² (1. Osaka University, 2. University of Toyama)

3Dバイオプリンティングは、再生医療や組織工学分野で、その発展が期待されている。既存のプリンティング方式の中で、より機能的な組織体の構築につながるものとして期待されているのが、インクジェット方式によるものである。一方で、この方式の普及、発展を阻害しているのが、使用可能なインク材料が極めて限られていることである。我々はこれまでに、西洋わさび由来ペルオキシダーゼが触媒する架橋形成反応を利用して、高分子の水溶液からヒドロゲルを作製し利用することについて、様々な報告を行ってきた。本研究では、この酵素反応によるゲル形成を用いた、インクジェットバイオプリンティング技術の開発を行った。

酵素架橋とインクジェットの融合による 3D バイオプリンティング技術の開発

境 慎司*, 中村 真人**

*大阪大学 大学院基礎工学研究科

**富山大学 大学院理工研究部・教育部（工学）

Development of a Bioprinting Technique by Combining Inkjetting Technology and Enzyme-mediated Hydrogelation

Shinji Sakai*, and Makoto Nakamura**

*Graduate School of Engineering Science.

**Department of Applied Imaging Engineering, Graduate School of Engineering, Imaging University of Japan

An inkjet-based bioprinting approach that enables the use of varieties of bioinks to produce cell-laden hydrogels with a wide range of characteristics is strongly desired. We attempted to develop it by using the hydrogelation system mediated by horseradish peroxidase (HRP) for stabilizing bioinks. Cell-laden constructs could be obtained through the sequential dropping of a bioink containing polymer(s) cross-linkable through the enzymatic reaction and H_2O_2 onto droplets of another bioink containing the polymer, HRP, and cells. The viability of the enclosed cells was more than 95%.

1. はじめに

生体は、直径数十 μm の細胞の集合体であり、さまざまな種類の細胞が、適材適所で配置され機能を発現することにより、恒常性が維持されている。そして、それぞれの細胞の周囲には、その機能発現と密接に関係する細胞外マトリックスが存在している。組織工学は、1 つ 1 つの細胞から生体の組織を模倣構造体の作製を目指すものであり、生体と同様に、細胞周囲に配置される足場材料は、得られる構造体の機能に大きな影響を与える。

この組織工学において近年大きな注目を集めているのが、細胞を含む構造体をデジタルデータにもとづいて作製する 3D バイオプリンティングである。そして、複数存在するプリンティング方式の中で、より機能的な組織体の構築につながるものとして期待されているのが、インクジェット方式である。この方式では、細胞よりもわずかに大きなサイズのインク液滴を、設定した位置に 1 滴ずつ積み重ねながら造形を行う。したがって、さまざまな種類の細胞を、細胞種毎にその細胞に適した環境を提供する材料とともにカートリッジに充填し、別々のインクジェットノズルから吐出すれば、インク液滴 1 滴スケールで異なるゲルの特性や細胞を有する構造物を造形することができる。一方で、この方式の普及、発展を阻害しているのが、使用可能なインク材料が極めて限られていることである。具体的には、インク溶

液は、直径数十 μm のノズルから吐出できるよう、低粘度である必要があること、着液したインクは周囲に流れる前に極めて短時間にゲル化すること、またそのゲル化は細胞に悪影響を与えないことなどが必要なためである。しかし、これらを同時に満たすインクは極めて限られており、多くの細胞の増殖や機能化には適していないにも関わらず、 Ca^{2+} などの多価金属イオンとの接触により瞬時にゲル化するアルギン酸 Na を含んだ水溶液が広く用いられてきた。細胞毎に異なる環境を作り出すことのできる、さまざまな材料をインクとして利用できるようになれば、この方式を使った組織構築が大きく進展すると考えられる。

我々はこれまでに、西洋わさび由来ペルオキシダーゼ (HRP) が、微量の過酸化水素の存在下にて触媒するフェノール性水酸 (Ph) 基間の架橋形成反応 (Fig. 1) を利用して、細胞を含有するヒドロゲル構造体を作製し、各種用途に利用する検討を行ってきた。この方法の利点は、Ph 基を導入することができれば、異なる性質を有するさまざまな材料からヒドロゲルを作製できる点である。本研究では、この酵素反応によるゲル形成を、インクジェットノズル

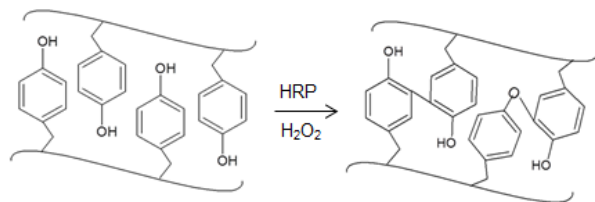


Fig. 1 Crosslinking of Ph moieties through HRP-catalyzed crosslinking.

* 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

* 1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, 560-8531, Japan

e-mail: sakai@cheng.es.osaka-u.ac.jp

から吐出されるインクのゲル化に用い、3D 構造物を造形する技術の開発を行った。

2. 実験方法

Ph 基を導入したアルギン酸 (Alg-Ph) とヒアルロン酸 (HA-Ph) は、それぞれの高分子中のカルボキシ基とチラミンのアミノ基を、水溶性カルボジイミドを用いて縮合させることにより作製した。また、Ph 基を導入したゼラチン (Gelatin-Ph) は、ゼラチンと 3-(4-ヒドロキシフェニル)プロピオン酸より同様の方法で作製した。これらの誘導体をリン酸緩衝生理食塩水 (PBS、pH7.4) に溶解させた溶液に、HRP もしくは過酸化水素を溶解させた。細胞を含む構造体は、HRP を含むインクに、マウス胎児由来線維芽細胞株 10T1/2 細胞を分散させたものから作製した。各インクを、直径 60 μm の吐出口を有するインクジェットノズルから 500 Hz にて吐出した。吐出したインクをゲル化・定着させるために、HRP を含むインクが滴下された直後に過酸化水素を含むインクを吐出するようにした (Fig. 2)。細胞への影響を調べるために、細胞を含有する構造物を作製した後、生存率を測定した。また、構造物中での細胞の伸展は、共焦点レーザー顕微鏡を用いた観察により評価した。

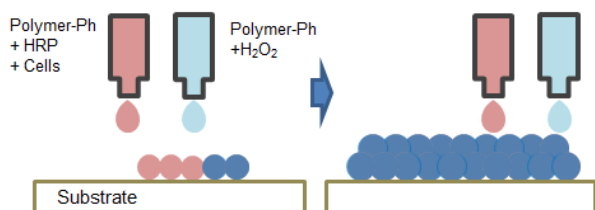


Fig. 2 Schematic of bioprinting of cell-laden hydrogel constructs using bioinks containing HRP + cells, and H_2O_2 .

3. 結果と考察

インクジェット方式のバイオプリンティングにおいて各種高分子を構成成分とするインクを利用するためには、安定して吐出可能な物性を明らかにする必要がある。このため、さまざまな濃度、種類の高分子水溶液を用い、インクジェットノズルからの安定した吐出可能性と、溶液の粘度、界面張力、曳糸性の関係を調べた。その結果にもとづいて調製した 0.75% Alg-Ph と 300 u/mL HRP および 0.75% Alg-Ph と 10 mM 過酸化水素を含む 2 種類のインクを用いてプリントを行った。その結果、Fig. 3a のような三角柱の構造体を作製することができた。

動物細胞を含んだ構造体をプリントする場合には、過酸化水素が細胞に悪影響を与えることが危惧される。このため、過酸化水素の濃度はできるだけ少ない方が望ましい。したがって、過酸化水素の濃度と造形性に関する検討、および作製した構造物中に残存する過酸化水素の濃度に関する検討を行った。過

酸化水素を 1 mM とした場合には 10 mM の場合と同様の構造物を作製できたが (Fig. 3b)、0.1 mM に低下させると、設計図と乖離したいびつな形の構造物が形成した (Fig. 3c)。これは、HRP による架橋形成反応に必要な過酸化水素が、十分量なかったためと考えられる。過酸化水素の残留濃度を、試験紙を用いて調べたところ、10 mM の過酸化水素を含むインクを用いた場合には、作製して 10 分後にも測定可能な値を大きく超える 1 mM 以上の過酸化水素が残留していた。一方で、1 mM の過酸化水素を含むインクを用いた場合には、作製して 10 分以内に、過酸化水素濃度は、検出限界 (0.015 mM) 以下になった。

以上の結果にもとづいて、10T1/2 細胞を含むインクを用いて Alg-Ph ゲルの構造体をプリントしたところ、細胞の生存率は約 90%であった。しかし、この構造物中では、数日間の培養後も細胞は伸展することにはなかった。一方で、同じ形状の構造体は、Gelatin-Ph と HA-Ph を含む水溶液からも作製でき、このゲル構造体に包括された 10T1/2 細胞は、培養開始から 1 日以内にゲル内部で伸展した。この結果より、本方法の細胞適合性の高いと、適切なインクを選定することで、細胞の挙動を制御できることが明らかになった。

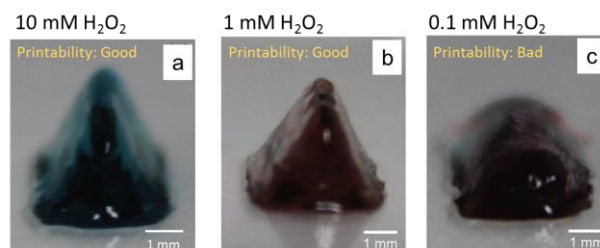


Fig. 3 Bioprinted hydrogel constructs obtained from bioinks difference in H_2O_2 content.²⁾

4. まとめ

本研究では、さまざまな材料をインクとして用いることができるインクジェット方式のバイオプリンティング技術の開発を行った。そして HRP によるゲル形成反応を用い、これを達成することができた。これまでに 20 種類程度の高分子について、同酵素反応よりゲル化させられるようになったことが報告されている。今後は、これらを使った複雑な造形に取り組みたい。

参考文献

- 1) Shinji Sakai and Masaki Nakahata, "Horseradish peroxidase-catalyzed hydrogelation for biomedical, biopharmaceutical, and biofabrication applications", *Chemistry: An Asian Journal*, **12**, pp. 3098-3109(2017).
- 2) Shinji Sakai, Kohei Ueda, Enkhtuul Gantumur, Masahito Taya and Makoto Nakamura, "Drop-on-drop multimaterial 3D bioprinting realized by peroxidase-mediated cross-linking, *Macromolecular Rapid Communications*", **39**, 1700534 (2018).

一般セッション(口頭講演)| インクジェット

[IJ5.2] インクジェット(5-2) 応用/3Dプリンティング/バイオプリンティング

Inkjet (5-2) Applications/3D Printing/Bio Printing

2018年6月21日(木) 10:50 ~ 11:50 コンファレンスルーム (工学系総合研究棟 2 二階)

[IJ5.2-03] インクジェットバイオプリンティングによる臓器づくりのための挑戦的研究

Challenging Research on Organ Engineering by Inkjet Bioprinting

*中村 真人¹、岩永 進太郎¹、浜田 裕太¹、黒岡 武俊¹、境 慎司² (1. 富山大学、2. 大阪大学)

*Makoto Nakamura¹, Shintaroh Iwanaga¹, Yuta Hamada¹, Taketoshi Kurooka¹, Shinji Sakai² (1. University of Toyama, 2. Osaka University)

日本でも世界でも多くの人が臓器を待っている。移植臓器は科学の力で作るべく、生きた細胞から生きた臓器を作る組織工学の研究が始まってはや25年が経とうとしている。従来の組織工学の課題を解決して限界を超えるために、『機械で臓器を作れるか?』の挑戦を始めた。インクジェットのポテンシャルを知り、世界に先駆けて生きた細胞を3次元で配置するインクジェット式3Dバイオプリンターを開発した。インクジェットの導入は、再生医療・組織工学の領域において、様々なブレイクをもたらす可能性がある。インクジェットバイオプリンティングによる臓器作りの自験例を概説するとともに、様々な挑戦的要素について概説する。

Many people are waiting for organs. Such organs for transplant should be provided by science and technology, reasonably. It has passed 25 years since the researches on tissue engineering were started. We also started the challenging researches “Can human produce organs by using machine’s hands?” in order to overcome several limitations of conventional tissue engineering. Considering to the advantages of inkjet, we have developed a custom-made inkjet 3D Bioprinter, with which several types of living cells can be positioned in three dimension, respectively. Applying inkjet bioprinting, various drastic challenges will be brought about in tissue and organ engineering.

インクジェットバイオプリンティングによる臓器づくりのための挑戦的研究

中村 真人*, 岩永進太郎*, 浜田裕太*, 黒岡武俊*, 境 慎司**

*富山大学 大学院理工学研究部・教育部(工学)、

**大阪大学 大学院基礎工学研究科

Challenging research on organ engineering by inkjet bioprinting

Makoto Nakamura*, Shintaroh Iwanaga*, Yuta Hamada*, Taketoshi Kurooka*, and Shinji Sakai**

*Graduate School of Sciences and Engineering for Research/Education, University of Toyama.

** Graduate School of Engineering Science, Osaka University

Many people are waiting for organs. Such organs for transplant should be provided by science and technology, reasonably. It has passed 25 years since the researches on tissue engineering were started. We also started the challenging researches "Can human produce organs by using machine's hands?" in order to overcome several limitations of conventional tissue engineering. Considering to the advantages of inkjet, we have developed a custom-made inkjet 3D Bioprinter, with which several types of living cells can be positioned in three dimension, respectively. Applying inkjet bioprinting, various drastic challenges will be brought about in tissue and organ engineering.

1. はじめに

いろいろな原因で臓器が障害され、機能不全に陥った場合を臓器不全という。その最後の砦となる治療法が臓器移植だが、それには健康な臓器が必要である。現状、臓器は誰かの死を待つか、健康なボランティアから受けることになるが、他人の犠牲の上に成り立つ治療法は決して理想的ではない。世界的にもドナー臓器不足の問題は深刻化している。そこで、移植臓器は科学の力で作るべく、人工臓器や生きた細胞から生きた臓器を作る組織工学（再生医工学）の研究が始まった。

2. 組織工学（再生医工学）

失われた臓器機能を取り戻すために、生きた細胞、生体材料、増殖因子などを駆使して生きた臓器の代替物を作る目的で組織工学が提案されて、四半世紀が経つ。その間、ES細胞やiPS細胞、ヒトゲノム解読などの凄まじい進歩があったが、組織工学で作られた実用レベルの組織や臓器は、未だ皮膚や軟骨などの薄く単純な無構造のものしかない。その原因は、①細胞の分布制御、②多種細胞の構成制御、③3次元構造の制御、④増殖因子の濃度勾配制御、そして⑤毛細血管の誘導と十分な血流確保、という重要課題は解決されておらず、今なお大きな障壁となっているからである。

3. 『機械(プリンター)で臓器を作れるか?』の挑戦

そこで、我々はこれらの課題を解決して従来の組織工学の限界を超えるために、今までにない作り方で臓器を作ろうと思い立った。それは、生きた細胞ごと3次元積層して作ろうという発想で、今で言う、Additive manufacturing（付加的製造法）の手法である。しかし、そもそも、組織や臓器は受精卵から発生学的に発生して形成されるものである。その工程を無視して、最終形の臓器を、構成物を並べて積み上げて造るのは、確かに神への挑戦でもある。しかし、臓器不全患者の治療には、このような無謀が必要である。それは臓器不全の患者さんは大人サイズの臓器に育つまで何年も待てないからである。

そして、本気でこの作り方を実現しようと奮い立ったのは、インクジェットのポテンシャルを知った時からである。

4. インクジェットのポテンシャルと挑戦

1) ミクロのインクドットでの印刷：

細胞、組織や臓器の重要構造は、顕微鏡で見て初めてその存在や特殊な構造が分かる。肉眼では見えない。一方、インクジェットプリンターはヘッドにある多数のノズルからインクを打ち出し描画する。写真画質印刷ができるようになった現在、もはやインクのドットは目に見えない。そこで、写真印刷したものを顕微鏡で確認すると、ドットの大きさは個々の細胞サイズに匹敵することが分かった。インクジェットには、個々の細胞を適材適所並べられる

* 〒930-8555 富山市五福 3190

* 3190 Gofuku, Toyama city, Toyama930-8555, Japan

e-mail: maknaka@eng.u-toyama.ac.jp

ポテンシャルがある。ヒトの手作業で細胞を播くだけの組織工学から細胞レベルで細胞を並べての微細構造構築への挑戦が可能になる。

2) カラー印刷：多種材料での複合組織構築への挑戦
カラー写真の印刷は、CMYBの4色のインクを打ち出して印刷する。一方、生体組織、臓器では多種細胞が特殊構造を作っている。細胞を混ぜてば撒く組織工学から、異なる材料での複合組織の構築が可能になる。

3) 大量のドット印刷：

1 cm³ (1g) の生体組織には、約 10 億個の細胞が存在する。一方、720dpi×1440dpi の市販インクジェットプリンターでは A4 サイズの用紙に目いっぱい印刷すると、ドットの数はおよそ 1 億個で、それがわずか 1 分足らずで印刷している。さらに、すべてのドットの位置、密度、色、配合をコンピュータが制御している。このインクジェットの技術なら、10 億個の細胞すべての位置をコンピュータ制御して作ることさえ実現できるポテンシャルがある。

5. インクジェット 3D バイオプリンターの開発

その他、非接触での吐出、生体材料、増殖因子などを配置する、など、組織・臓器作りにブレークスルーをもたらすポテンシャルがある。これらを踏まえて、我々は 4 色で印刷可能なインクジェット 3D バイオプリンターを開発してきた(図 1)。

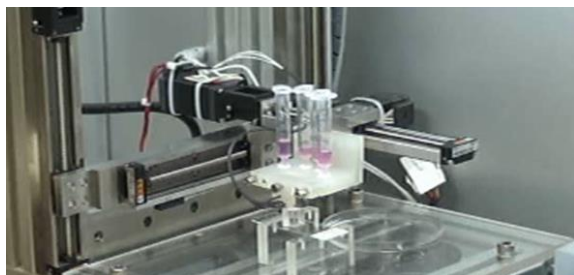


図 1、開発したインクジェット 3D Bioprinter

5. バイオインクの開発

インクジェットプリンターの進歩には、プリンター装置の進歩とともに、インクの進歩が大きな役割を果たしてきた。バイオインクの開発は本手法の進歩のための重要要素の一つである。バイオインクの開発においては、次の二つの特性が重要である[1]。

1) 造形性：3 次元積層造形のためには、作りやすく構造が維持されやすい特性が必要である。我々は、これまで、2 液混合でゲル化するアルギン酸ゲルを中心に利用してきた。瞬時にゲル化し、構造維持にも優れた特性がある。

フィブリンゲルは軟らかく、構造維持、ハンドリングが非常に困難で、造形性は明らかに悪かった。しかし、細胞はゲルに接着し伸展し、ゲル上を自在に遊走するのも観察された。組織形成能に優れている。

これらの経験をもとに、1) と 2) について、両ゲルの特性と開発の方向性を示した(図 2)。

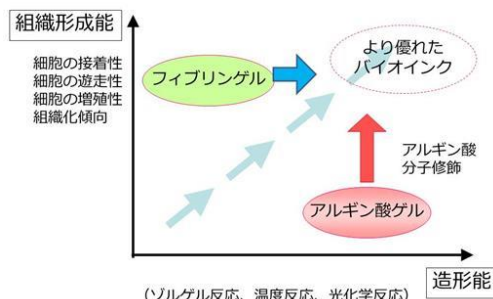


図 2、バイオインクの開発[1]

この考えのもとに、境らの材料に着目し、共同研究を開始した[2]。フェノール基の分子修飾、酵素架橋反応で、造形能に優れたアルギン酸のゲル化能を残したまま、細胞接着に優れたゼラチンとのゲル化を可能にした。このバイオインクで造形した構造には細胞が接着し組織化が進むことも確認できた(図 3)。今後、いろいろな細胞での 3 次元構造物が作れることが期待できる。

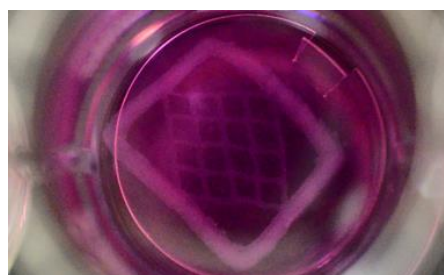


図 3、心筋細胞が接着し増殖し拍動する造形物

6. まとめ

世界に先駆けて生きた細胞を 3 次元で配置するインクジェット式 3D バイオプリンターを開発した。インクジェットには、様々なブレークをもたらす可能性がある。インクジェットバイオプリンティングをさらに発展させ、様々な臓器作りに対する挑戦を進めていきたい。日本でも世界でも多くの人が臓器を待っている。

参考文献

- 1) Nakamura M, et.al, Biomaterials and biomaterials for future developments of bioprinting and biofabrication. Biofabrication 2: 014110-6, 2010.
- 2) Sakai S, et.al. Drop-On-Drop Multimaterial 3D Bioprinting Realized by Peroxidase-Mediated Cross-Linking. Macromol Rapid Commun. 2018 Feb;39(3). doi: 10.1002/marc.201700534. Epub 2017 Dec 11.