

誰でもできる 用途要件・塗布材料に合わせた「カスタマイズ IJ プリントヘッド」作り

Making Customized Your Own Inkjet Print-heads in the Maker Age of Plastic

平林 純

Jun HIRABAYASHI

山形大学

Yamagata University

【要約】

液体材料の塗布・印刷を必要とするアプリケーション実現のため、インクジェット(IJ)技術が使われることは多い。従来、ニッチなアプリケーション向けに専用 IJ プリントヘッドが作られることはなく、既存品の流用が前提とされた。その結果、既存品での液滴飛翔が可能なように、アプリケーションの主役たる液体材料側に特性調整が求められることが多く、アプリケーション価値を損なうこともあった。本研究は、「IJ プリントヘッドに液体材料の特性を合わせる」のではなく、「アプリケーション要件にカスタマイズした IJ プリントヘッドの設計と製作を行うアプローチ」を提案し、安価な電気部品・3D プリンタ・デジタルツールを使い、カスタマイズした IJ プリントヘッドを自作するアプローチの実現性を実証する。
キーワード: インクジェット, プリントヘッド, 3D プリンタ, 立体表面, 加飾印刷

【Abstract】

This research proposes a new design and fabrication approach for ink jet (IJ) printing applications. This report proposes and demonstrates how we can optimize general designs of customized IJ print heads for each own application (and each own ink material characteristic) and how easily we can digital-fabricate IJ print heads by using common 3D printers and digital software tools. For niche applications, the approach is suitable than the ordinary process, in which mass-produced IJ print heads are supposed to be used and adjustments of ink properties will be needed.

Keywords: 3D, inkjet, print-head, 3D printer, 3D-surface, decorative print

1. 大量生産 IJ プリントヘッドはニッチ用途に優しくない

オンデマンドのデジタル・ファブリケーションにおける代表技術のひとつがインクジェット・プリント技術(IJ 技術)である。従来、IJ 技術の核とされる IJ プリントヘッドは、大量生産により提供される既存品が前提とされてきた。そのため、アプリケーション(用途)実現の主役である液体材料に対して特性調整が求められることも多く、実現されるアプリケーション性能が低下することがあった。

本研究は、既成 IJ プリントヘッドに頼るのではなく、「アプリケーション要件に対して最適化した IJ プリントヘッド仕様の導出」を行い、安価・簡易なハードウェアやオープンソフトウェアを用いて「自分たちが欲しいカスタマイズ IJ プリントヘッドを、自ら製作する」アプローチを提案・実証する。

2. 「自分が欲しい IJ プリントヘッド」は「自分が作る」

以下、実現するアプリケーション題材を設定し、その題材をユースケース例として、アプリケーション要件に最適化したカスタマイズ IJ プリントヘッドの設計・作成を行う。アプリケーション題材として設定するのは、立体物表面に対する非接触加飾である。

まず、最も重要な主要件として、塗布・印刷する液体材料の特性(粘性や表面張力)を踏まえた「IJ 成立性の保証」がある。これは、どんなアプリ題材

でも、IJ 技術を使う場合、大きな基本要件となる。

それに加えて、今回の題材、立体物表面への非接触加飾が目的であれば、対象物とプリントヘッド間の接触を防ぐために、対象物とプリントヘッドの形状・大きさ等に応じた「対象物・プリントヘッド間の距離(液滴飛翔距離)」も、衝突回避などのために重要な要件である。以上、「IJ 成立性の保証」「液滴飛翔距離の保証」を 2 大基本要件として、IJ プリントヘッドの設計と製作を行う。

なお、一般的な既存 IJ プリントヘッドが備えるが、本題材では不要な機能もある。たとえば、1 次元に多数のノズルが並べられた複数ノズル機能は、曲率を持つ 3 次元曲面への印刷ではメリットが少ない。さらに、複数多ノズルのプリントヘッドは、対象物に近づく際の衝突を生じやすく、むしろデメリットである。そこで、本題材では、単ノズルのカスタマイズ IJ プリントヘッドを設計・製作していく。

3. 粘性材料を数十 mm 離れて印刷する IJ ヘッドを作る

ヘッド仕様を見積もるための材料・アプリ要件は、

- ・(液体材料特性に応じた) IJ 成立性の保証
- ・液滴飛翔距離の保証

である。本題材では、液体材料として食用油(オリーブ油)を設定し、

- ・粘性係数: $0.06 \text{ (Pa}\cdot\text{s)}$
- ・表面張力: 0.03 (N/m)
- ・比重: $0.9 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

という液体材料特性のもと、IJ プリントヘッドの基本仕様(ノズル径と液滴吐出速度)範囲を決定する。また、保証する液滴飛翔距離は、20~40mm 程度を目安とする。

3.1. 液滴飛翔を実現するための「ノズル径」上限・下限

IJ プリントヘッドのノズルから吐出された液滴が、飛翔中も液滴として保持されるための条件として、Weber 数と Reynolds 数から定まる Ohnesorge 数 (Eq.1)を 0.1 以上(噴霧状のサテライト液滴にならない)、かつ、1 以下(液滴吐出が粘性散逸に妨げられない)の範囲に収める必要がある[1]。Ohnesorge 数は、液体材料特性項と液滴直径(≡ノズル径 L)間の関係式として表されるため、式変形により、ノズル径 L の上・下限が定まる(Eq.2)。

$$\text{Ohnesorge数}(Oh) = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho\sigma L}} \quad (\text{Eq.1})$$

$$\text{Weber数}(We) = \frac{\rho L v^2}{\sigma}, \quad \text{Reynolds数}(Re) = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu} \quad (\text{Eq.2})$$

- ・ μ : 粘性係数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$, $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$, $\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$)
- ・ ρ : 密度 (kg/m^3)
- ・ σ : 表面張力 (N/m)
- ・ L : 代表長 (m) (液滴直径)
- ・ v : 代表速度 (m/s)
- ・ ν : 動粘性係数 (動粘度) ($\nu = \frac{\mu}{\rho}$) (m^2/s)

$$L = \left[\frac{\mu^2}{Oh^2 \rho \sigma} \right] \quad (1 > Oh > 0.1) \quad (\text{Eq.2})$$

3.2. 液滴吐出を実現する「ノズル径・吐出速度」下限

次に、ノズルから液体材料を液滴吐出するため、液滴の表面張力を慣性力が上回る条件「Weber 数が約 4 を越える(Eq. 3)」を満たす必要がある[2][1]。Weber 数は、液体材料特性項と液滴直径(≡ノズル径 L)や液滴吐出速度 v 間の関係式であるから、ノズル径 L と液滴吐出速度 v 間の値制約が定まる(ノズル径 L に依存した形で、液滴吐出速度 v に対する下限が定まる)。

$$v^2 L = \frac{We \sigma}{\rho}, \quad v = \sqrt{\frac{We \sigma}{L \rho}} \quad (We > 4) \quad (\text{Eq.3})$$

3.3. 着弾飛散を防ぐ「ノズル径・吐出速度」上限

最後に、着弾時の液滴飛散を防ぐ制約条件「対象物表面特性と Reynolds 数と Weber 数に対する制約式(Eq. 4)」を用いて[1]、「着弾時の吐出速度≡液滴吐出速度」と仮定した上で、IJ プリントヘッドの「ノズル径」「液滴吐出速度」上限を算出する。

$$We^{1/2} Re^{1/4} < f(\text{Roughness}) \simeq 50$$

$$\left(\frac{\rho L v^2}{\sigma} \right)^{1/2} \left(\frac{v L}{\nu} \right)^{1/4} < f(\text{Roughness}) \simeq 50$$

$$v^{5/4} L^{3/4} \left(\frac{\rho}{\sigma} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{\nu} \right)^{1/4} < f(\text{Roughness}) \simeq 50 \quad (\text{Eq.4})$$

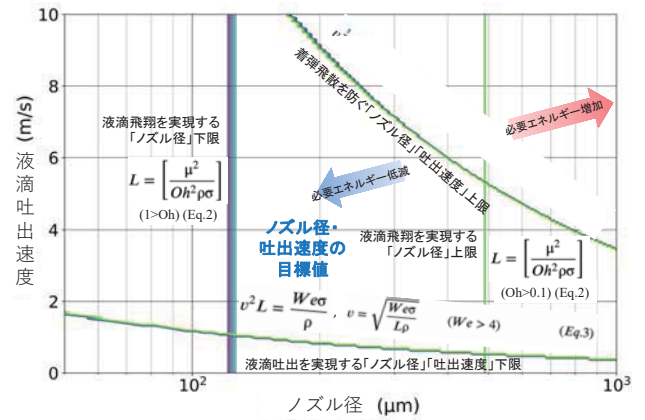


図 1. 材料・アプリ要件に応じた IJ プリントヘッド成立範囲

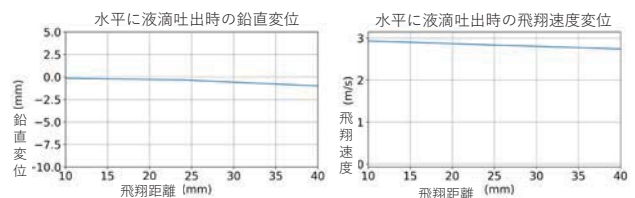
「着弾時の吐出速度≡液滴吐出速度」という仮定は、(3.4 で導出された)液滴直径(≡ノズル径)と吐出速度を用いた際の飛翔液滴回りの Reynolds 数見積りから、飛翔液滴周辺の空気流は層流条件となり、滴飛翔距離が数十 mm 程度までは、飛翔速度の低下は 10%程度(飛翔経路も直線に近い)という計算にもとづく。この仮定については、OpenFOAM による IJ シミュレーションを用いた解析結果でも、同様の結果を得ている(図.2)。

3.4. IJ プリントヘッド「ノズル径・吐出速度」仕様範囲

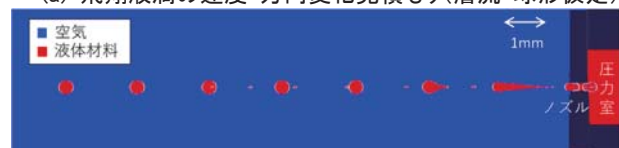
ここまでで導出された、要件(液体材料特性用途)から決まる「ノズル径・液滴吐出速度」の範囲を図示したものが、図 1 である。4 本線に囲まれた領域が、本題材用途にカスタマイズする IJ プリントヘッドの成立範囲となる。

以上の「IJ プリントヘッド仕様の成立範囲導出」は、従来の「既存ヘッド仕様を前提とした液体材料特性仕様の導出」の逆アプローチである。本研究の提案を端的に書くと、「従来とは逆に、目的に対しては順に考える」である。

なお、IJ プリント・ヘッドが液滴に与える運動エネルギーのオーダーは $L^3 v^2$ となり、横軸に対し 3 乗、縦軸には 2 乗の関係で、右上に向かうほど必要エネルギーが大きくなる。そこで、回路簡素化や電気・メカ的なダメージ低減のために、成立領域の左下部分を「ノズル径・吐出速度」の目標値とする。



(a) 飛翔液滴の速度・方向変化見積り(層流・球形仮定)



(b) OpenFOAM による飛翔吐出・速度見積り

図 2. 飛翔液滴の速度変化見積り

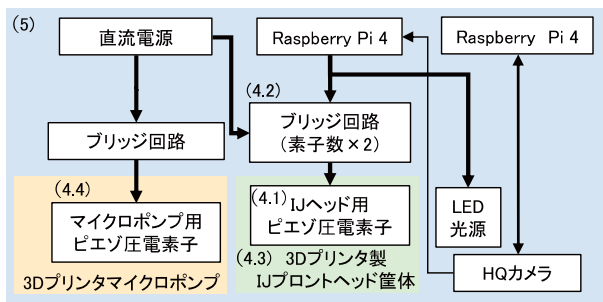
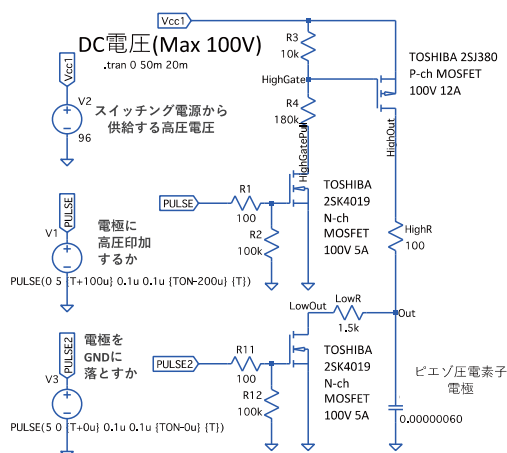
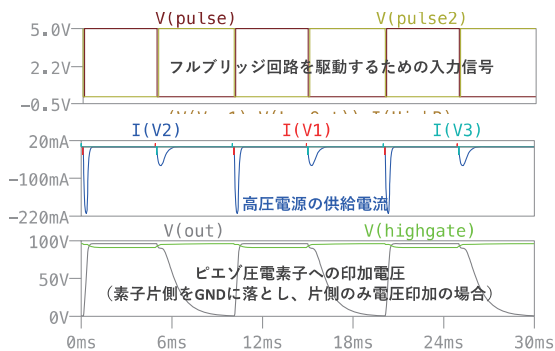


図3. 電子ブザー用ピエゾ圧電素子を加圧源として、3DプリンタやRaspberry Piなどで作成したIJプリントヘッドと液滴吐出挙動の計測治具概要



(a) 電圧印加のためのフルブリッジ回路(素子片側あたり)



(b) LTspiceを用いた部品仕様・出力波形見積り

図4. ピエゾ圧電素子への電圧印加回路(片側あたり)

4. 材料自由度が高い「ピエゾIJプリントヘッド」を作る

IJプリントヘッドの一般的な方式としては、電熱による加熱発泡で液滴吐出を行うサーマルIJや、印加電圧に応じて変形するピエゾ圧電素子による加圧で液滴吐出を行うピエゾIJがある。本研究では、材料やアプリケーション自由度がより高いピエゾIJを採用する。サーマルIJ方式を採用した場合、発泡加圧のために水性材料が必須となり、材料・アプリケーション自由度が少なくなってしまうからである。

以下、作成したピエゾIJプリントヘッド、および、飛翔液滴の挙動観察装置を説明する(全体概要は図.3)。

4.1 100円で買える「電子ブザー用ピエゾ圧電素子」



(a) 直径20φ素子を使った片面加圧・側面吐出形態



(b) 直径41φ素子利用の両面加圧・側面吐出形態



(c) 直径41φ素子利用の片面加圧・背面吐出形態

図5. FDM方式およびSLA方式の3Dプリンタ出力を用いて製作した、構成の異なるIJプリントヘッド筐体の例

誰でも安価・簡易に入手することができるピエゾ圧電素子として、電子ブザー用のピエゾ圧電素子がある。近所の電気屋やオンラインの電子部品ショップに行けば、直径10mm～50mm程度の大きさのものが1個100円以下で売られている。そこで、(MonomorphもしくはUnimorph型などと呼ばれる)電子ブザー用のピエゾ圧電素子を使ったピエゾIJプリントヘッドを作成する[3][4]。なお、電子ブザー用の円形ピエゾ圧電素子を電界印加により変形させる場合、直径が大きな方が「ピエゾ圧電素子の(円平面と直交する方向の)変形長」も「圧力室の体積変化」も大きい[5]。そこで、ノズル径も吐出速度も大きい本題材例では、大直径のピエゾ圧電素子を用いてIJプリントヘッドを作成する。

4.2 ピエゾIJヘッドの「駆動回路」と「電子部品構成」

液滴吐出のために行うピエゾ圧電素子への電圧印加は、安価に作成もしくは購入可能なMOSFETフルブリッジ回路を介して、Raspberry Piから制御する。フルブリッジ回路で電圧切り替えを行うことで、極性反転を含む3レベルを組み合わせた電圧波形を、ピエゾ圧電素子に対して与える。駆動回路構成や部品仕様は、駆動周波数・印加電圧を踏まえ、下記のように設定した。

まず、駆動周波数については、印加電圧の切り替え時間(≒吐出時間 t)が、

$$\text{リガメント(ligament)長} \div \text{吐出時間}(t) \times \text{速度}(v)$$

という関係と、液滴直径(≒ノズル径 L)のオーダーがリガメント(ligament)長と同程度となる関係を用いて、

$$\text{吐出時間}(t) \div \text{ノズル径}(L) / \text{速度}(v)$$

と見積もることができる。本題材の場合、吐出パルス周期は100μs(周波数:10kHz)前後となる。

次に、印加電圧については、本題材で液滴に与える

運動エネルギーが大きく、 piezo 圧電素子の変形量は、ほぼ印加電界に比例することから[5]、片側 100V を印加可能な仕様とした。図.4 は、無料使用が可能な、アナログ・デバイセス社提供のアナログ回路シミュレータ LTspice を用いて部品選定・回路検証を行った例である。

4.3 3D プリンタで出力した「piezo IJ プrintヘッド管体」

piezo 圧電素子を取り付け、液体材料を吐出する IJ プrintヘッドの管体は、3D プリンタ(FDM 方式の FLASHFORGE Adventure 3 Lite と SLA 方式の ANYCUBIC PHOTON MONO)で作成した。ノズル部は、3D プリンタ出力の精度では不十分なため、加熱した金属針による熔融やマイクロドリル穿孔により作成した。

3D プリンタを用いて、IJ プrintヘッド構造の出力を行うと、さまざまなPrintヘッド構成を容易に試すことが可能である。たとえば、図.5 は作成した IJ プrintヘッド例であり、(a)(c)のような電子ブザー用の piezo 圧電素子を駆動源として、Bend(たわみ)モードの片面加圧を行う構造例や、(b)のような (Shear モードではなく Bend モードを用いる点については異なるものの) Xaar 社の Shared Wall 構造のような両面加圧を行う構成など、要求特性に応じた構造を持つ IJ プrintヘッドの試作が可能である。

4.4 電子ブザーで「一定量供給マイクロポンプ」も作る

今回の題材、立体表面に対する非接触加飾では、液体材料を吐出する IJ プrintヘッドの鉛直高さや吐出方向は一定でない。そのため、IJ プrintヘッドの圧力室に一定圧力で液体供給を行うのではなく、ノズルからの液滴吐出と連動して液体供給を行うことで、圧力室内に一定量の液体を保持する機構とした。

圧力室への液体供給は、IJ プrintヘッドと同様に、電子ブザー用の piezo 圧電素子を駆動源とする (diaphragm と組み合わせた) マイクロポンプ(図.6)を 3D プリンタで作成し、吐出量に応じた供給を行った。

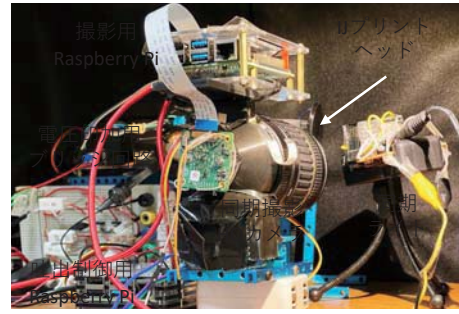


図 6. piezo 圧電素子にマイクロ流路制御とダイアフラムバルブを組み合わせたマイクロポンプ

5. Raspberry Pi で液滴吐出・同期撮影の制御を行う

IJ プrintヘッドや液体供給ポンプの制御は、安価なシングルボードコンピュータ Raspberry Pi が備える GPIO(General Purpose Input/Output)から MOSFET フルブリッジ回路を介して制御する。さらに、観察撮影用に別途用意した Raspberry Pi に HQ カメラを接続し、撮影 IJ プrintヘッドからの液滴吐出を同期させることで、吐出液滴の飛翔挙動の撮影・計測も行った(図.7)。

以上に説明したシステムで、液滴吐出や吐出挙動撮影を行った例が、図.7 である。ノズルから吐出された液滴が 100mm 程度も直線的に飛翔する過程や、飛翔速度などを確認することができる。このように、高速吐出



(a) Raspberry Pi による吐出・撮影の同期計測



(b) 単一液滴の吐出に同期した複数露光撮影例

図 7. 作成した IJ ヘッドで液滴飛翔過程を撮影した結果例

される液滴の観察なども、安価なマイコンやカメラモジュールなどを用いて実施することができた。

6. まとめ

3 次元非接触加飾を題材として、実現すべきアプリケーション・材料要件をもとに、最適化した IJ プrintヘッドの基本仕様設計と製作を行うアプローチを提案し、製作実証を行った。設計と試作に用いた道具や環境は、いずれも安価・容易に購入できる電子部品や 3D プリンタなどであり、少人数グループはもちろん個人レベルまで、「誰でも」実現可能なアプローチである。

残課題としては、メカ設計や製造作業において、試行錯誤を繰り返し必要としたことが挙げられる。今後、目的のアプリケーションを容易に素早く実現するために、試行錯誤を低減する道具立てや環境整備を行いたい。

参考文献

1. B. Derby. "Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution". Annual Review of Materials Research Vol 40(2010), pp.395-414.
2. P. C. Duineveld, et al. "Ink-Jet Printing of Polymer Light-Emitting Devices". MRS Online Proceeding Library Archive 624 (2000), pp.117-122.
3. M. Alden, "Heated Piezo for Jetting Wax", (2013), https://reprap.org/wiki/Heated_Piezo_for_Jetting_Wax
4. A. Bowyer, "Reprappable-inkjet", (2013), <https://reprap.org/wiki/Reprappable-inkjet>
6. A. Neto, et al. "Piezoelectric Buzzer Optimization for Micropumps", Proceedings of the 2012 COSMOL Conference in Boston (2012)