
一般セッション(口頭講演)| インクジェット

[IJ1] インクジェット(1) プロセス Inkjet (1) Process

2018年6月19日(火) 14:00 ~ 15:00 大ホール (けやき会館 一階)

[IJ1-02] 新規高粘度インク吐出装置の開発

The new system for generating microjets for highly viscous ink

*大貫 甫¹、前嶋 麻緒¹、田川 義之¹ (1. 東京農工大学)

*Hajime Onuki¹, Mao Maeshima¹, Yoshiyuki Tagawa¹ (1. Tokyo University of Agriculture and Technology)

インク吐出技術は、インクジェットプリンタなど印刷技術において、そのクオリティを決定し得る重要な技術である。しかしこれまでの主な吐出技術では、低粘度（10 cP程度）のインクのための射出に限定されていた。そこで我々は、高粘度（1000 cP）液体を吐出する技術を新たに開発した。吐出の駆動力として、液体容器に打撃を加える手法を採用した。これに加え、液体容器内に細管を挿入し、細管内外の液面差をつける工夫を施した。これらの工夫により高粘度インクの吐出が可能になる。本研究では、開発したインク吐出技術のメカニズムについて実験・数値計算を用いて議論する。

This study proposed the new technology for generating microjets for highly viscous ink. The present technology can eject only low viscous ink. In our technology, the jet is induced inside a thin tube partially submerged in a liquid. The meniscus inside the tube is kept deeper than that outside the tube. An impulsive force added at the bottom of a liquid container leads ejection of the microjets with high viscosity up to 1,000 cP. This study experimentally and numerically reveals the mechanism of our method.

新規高粘度インク吐出装置の開発

大貫 甫*, 前嶋 麻緒*, 田川 義之*

*東京農工大学 大学院工学府 機械システム工学専攻

The new system for generating microjets for highly viscous ink

Hajime Onuki*, Mao Maeshima*, and Yoshiyuki Tagawa*

* Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

This study newly proposed a device for generating microjets for highly viscous ink. The present technology can eject only low viscous ink. In our technology, the jet is induced inside a thin tube partially submerged in a liquid container. The meniscus inside the tube is kept deeper than that outside the tube. An impulsive force added at the bottom of the container leads ejection of the microjets with high viscosity up to 1,000 cP, which is same viscosity as honey. This study experimentally and numerically reveals the viscous effect on the liquid jet induced by the proposed device.

1. 緒言

液体ジェットは、インクジェット印刷技術¹⁾など幅広い分野で利用されている。これまでの液体ジェット技術の多くは、液体を微細な穴から押し出すことで液体を射出しているが、低粘度(10 cP程度)のインクのみでの射出に限定される。粘度の制限は、吐出時の液体の飛散や塗布後の滲みの問題となって現れる。この問題の解決のため、我々は高粘度液体も射出可能な装置を開発した²⁾。本技術では、駆動力として打撃を採用している。さらに本装置では細管を挿入し、細管内側の気液界面位置を細管外側より深くする工夫を施した。これにより従来では射出困難であった高粘度インク(1,000 cP)の射出を可能にした。本装置はインクジェット技術の発展のみならず、3Dプリンタや金属配線、細胞印刷など次世代技術への応用が期待できる。

本研究では、開発した液体射出技術のメカニズムの解明を目的とする。射出メカニズムの解明のため、タイムスケールが異なる二つの現象に着目した。それぞれの現象について、実験および数値計算を行い、粘性の寄与を明らかにすることで射出メカニズムの把握を目指す。

2. 装置概要

本装置の概要を Fig.1(a)に示す。本装置では、まず液体を充填した試験管に濡れ性の良い細管を挿入する。細管の濡れ性により細管内側の気液界面は、下に凸の形状を有する。次に細管内側の気液界面を容器底部へ押し下げ、細管内外の液面差を作る。なお細管内外の液面差は、細管外側の気相を減圧することで作る。この状態を維持したまま、容器底部に打

撃を与える。これらに工夫により、細管内側より液体ジェットが射出される。実際に蜂蜜(1,000 cP程度)を射出した様子を Fig.1(b)に示す。蜂蜜のような高粘度の液体もジェットとして射出されている。

本装置による液体ジェットは、タイムスケールの違いにより二つの過程に分けることができる。一つ目の過程は、打撃による急加速過程である(衝突過程と呼ぶ)。液体容器に打撃が加わるとき、液体は短時間で急激な加速度を得る。本過程は、液体ジェット射出全体のタイムスケール(~10 ms オーダー程度)に比べて非常に短い(0.1 ms オーダー以下)。二つ目の過程は、気液界面での流れの集束過程である(集束過程と呼ぶ)。衝突過程に速度を得た気液界面は、液体ジェットとして射出される。このとき凹面形状を持つ気液界面付近では、速度は界面中心軸方向に向く。この現象は流れの集束と呼ばれ、細管径より細い液体ジェット射出を引き起こす。この集束過程のタイムスケールは、衝突過程に比べて非常に大きい(0.1 ms 以上)。本装置で射出される液体ジェットは、1)衝突過程により速度を得て、2)集束過程により液体ジェットとして射出される。以下にそれぞれの過程で起こる現象について説明する。

まず衝突過程について着目する。打撃により液体が急加速されるとき、液体の運動は剛体運動と同様に瞬間的な運動をとらえることができる。打撃により液体は鉛直方向 z に速度 U_0 を持つとする。このとき Navier-Stokes 方程式より液中の速度 U_0 は、

$$U_0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \Pi}{\partial z} \quad (1)$$

と表される。なお、 ρ は液体の密度である。ここで Π は圧力力積と呼ばれる値であり、打撃付与時間における圧力の積分値である。式(1)より、液中の速度 U_0 は圧力力積勾配 $\partial \Pi / \partial z$ に比例する。

* 〒184-0002 東京都小金井市中町 2-24-16

* 2-24-16 Naka-cho, Koganei, Tokyo, 184-0002, Japan

e-mail: h_onuki@cc.tuat.ac.jp

ここで細管内側の圧力力積に着目する。細管内側の圧力力積勾配 $\partial\Pi'/\partial z$ は、細管外側の圧力力積勾配 $\partial\Pi/\partial z$ に比べて大きくなる (Fig.2)。ここで、細管外側の気液界面から細管内側の気液界面までの距離を l_{top} 、細管内側の気液界面から細管端面までの距離を l_{middle} と定義する。幾何関係より細管内側の圧力力積勾配 $\partial\Pi'/\partial z$ は、

$$\frac{\partial\Pi'}{\partial z} = \left(\frac{l_{top}}{l_{middle}} + 1 \right) \frac{\partial\Pi}{\partial z} \quad (2)$$

と表される。また、細管内側の速度 U' は、式(1)と同様の関係を持つ。したがって式(1)および式(2)より、細管内側の速度 U' は、

$$U' = \left(\frac{l_{top}}{l_{middle}} + 1 \right) U_0 \quad (3)$$

と表される。式(3)より細管内側の速度 U' は、細管内側の液面位置に関する二つのパラメータ l_{top} 、 l_{middle} により、大幅に増速可能である。

次に集束過程に着目する。打撃により速度 U を得た気液界面は流れの集束により液体ジェットとして

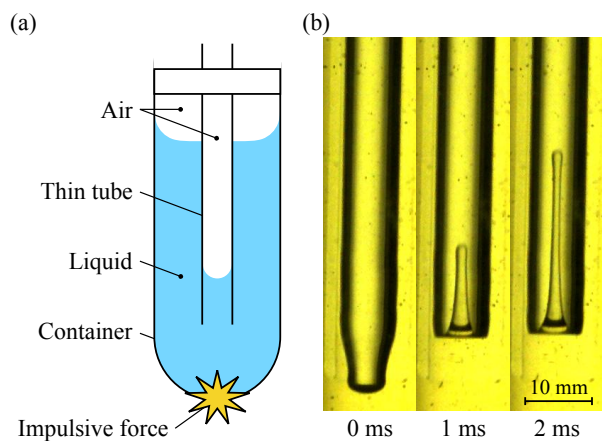


Fig.1 (a) Schematic image of the viscous microjet generator. (b) Generation of liquid jet with honey.

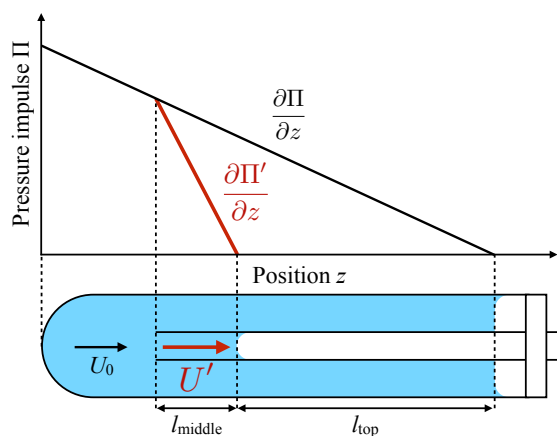


Fig.2 Model based on a pressure impulse approach during the impact interval.

射出される。このときジェット速度 V'_{jet} は気液界面が得る速度 (初期速度 U') に比例することがわかっている。これと式(3)より、ジェット速度 V'_{jet} は、

$$V'_{jet} = \beta \left(\frac{l_{top}}{l_{middle}} + 1 \right) U_0 \quad (4)$$

と表される。式(4)よりジェット速度 V'_{jet} は、液面位置により大幅に増速できる。なお式(4)における β は、初期速度 U' に対するジェット速度 V'_{jet} の増速率であり、界面形状および粘度に関するパラメータである。

3. 実験・計算概要

3.1 実験概要

実験装置を Fig.3 に示す。本実験では、容器として試験管 (A-10, マルエム, 内径 8.0 mm)、液体としてシリコンオイル (KF-96, 信越化学, silicone oil, Sigma Aldrich) を用いる。液体を充填した試験管にガラス管 (FPT-80, Fujiston, 内径 0.5 mm) を挿入する。液面差はシリンジにより細管外側の気相を減圧することで作る。打撃はコイルガンにより鉄心 (SS400) を鉛直上部に射出し、容器底部と衝突させることで与える。打撃後、細管内側の気液界面よりマイクロジェットが生成される。実験の様子は、二台の高速度カメラ (FASTCAM SA-X, Photron) および白色光源 (White Led Backlight, Phlox) で撮影する。撮影速度はそれぞれ、ジェット生成を撮影するものを 50,000 fps, 容器全体の移動を撮影するものを 12,500 fps とする。なお、二台の高速度カメラはパルスジェネレータ (Model 575 Digital Delay/Pulse Generator, BNC) で同期されている。本実験では、液体の動粘度 ν 、 l_{top} 、 l_{middle} および初期速度 U_0 を $\nu = 1\text{-}500$ cSt, $l_{top} = 39.7\text{-}61.7$ mm, $l_{middle} = 1.6\text{-}10.0$ mm, $U_0 = 0.3\text{-}0.5$ m/s の範囲で変化させる。マイクロジェットの速度 V'_{jet} は、ジェット先端が三相接触点を初めて超えた瞬間から 0.2 ms までのジェット先端の移動距離から算出する。初期速度 U_0 は同時刻から 0.8 ms までの容器底部の移動距離から算出する。

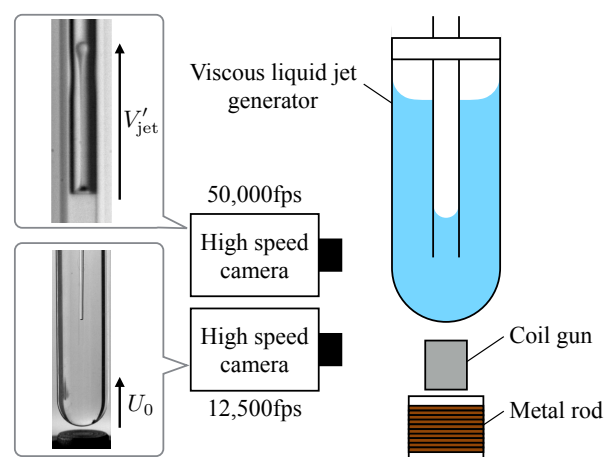


Fig.3 Experimental setup.

3.2 計算概要

本計算は、汎用シミュレーションソフトウェア (COMSOL Multiphysics, 計測エンジニアリング) による有限要素法で行う。計算の支配方程式として、非圧縮の Navier-Stokes 方程式および連続の式を用いる。気液界面の追跡方法として Level-Set 法を採用する。Level-Set 法では、Level-Set 関数 ϕ を定義し、 $\phi = 1$ を液体、 $\phi = 0$ を気体とし、 $0 < \phi < 1$ を液体気体の混合体として二相流を計算する。本計算では、 $\phi = 0.5$ を気液界面として追跡する。本計算では、衝突過程と集束過程の二つの異なるタイムスケールの過程について、それぞれ独立した計算を行う。なお、液体の物性は実験に合わせて設定している。

衝突過程での計算対象を Fig.4(a) に示す。本過程では、細管を含む容器全体を計算対象とする。打撃として計算対象の底部および側部に時刻 $t = 0 - 10^{-6}$ s で U_0 まで加速する境界条件を与える。本計算では、細管内半径 $r = 2.5 \times 10^{-1}$ mm, 初期速度 $U_0 = 0.4$ m/s と一定とし、動粘度 ν , l_{top} および l_{middle} をそれぞれ $\nu = 1-500$ cSt, $l_{top} = 40.0-47.5$ mm, $l_{middle} = 2.5-10.0$ mm の範囲で変化させる。

集束過程計算での計算対象を Fig.4(b) に示す。本過程では、計算負荷軽減のため、細管内側の気液のみを計算対象とする。打撃として計算対象底部に時刻 $t = 0 - 10^{-6}$ s の間に圧力が急激に変化する境界条件を与える。本計算では、細管内半径 $r = 2.5 \times 10^{-1}$ mm を一定とし、動粘度 ν および細管内側の速度 U をそれぞれ、 $\nu = 1-500$ cSt, $U = 2.0-20.0$ m/s の範囲で変化させる。

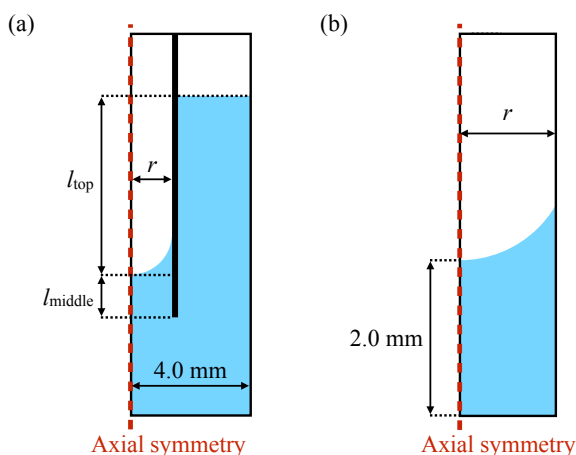


Fig.4 Geometry for calculating (a) liquid acceleration during the impact interval and (b) generation of the liquid jet during the focusing interval.

4. 結果・考察

4.1 衝突過程における粘性の影響

計算より求めた圧力力積分布を Fig.5 に示す。なお、各位置における圧力力積 Π は、容器底部の圧力力積で除することで無次元化し、管軸方向距離 z は

細管外側の気液界面位置で除することで無次元化している。数値計算により求めた圧力力積分布を破線で、モデル (式(2)) を実線でそれぞれ示す。数値計算がモデルと良く一致している。したがって、式(2)により本現象を記述可能である。また、各動粘度 ν および各 $(l_{top}/l_{middle}+1)$ における圧力力積勾配および細管内側の流速を Table 1 に示す。なお、Table 1 における細管内側の圧力力積勾配 $\partial\Pi/\partial z$ は、細管外側の圧力力積勾配 $\partial\Pi/\partial z$ で無次元化しており、細管内側の流速 U は、細管外側の流速 U_0 で無次元化している。各 $(l_{top}/l_{middle}+1)$ において、無次元化圧力力積勾配 $\partial\Pi^*/\partial z^*$ と無次元化速度 U^* が $(l_{top}/l_{middle}+1)$ とおおよそ一致している。これは式(2)および式(3)と一致する傾向である。したがって本装置では、液面差 $(l_{top}/l_{middle}+1)$ により圧力力積勾配 $\partial\Pi^*/\partial z^*$, 速度 U^* を容易に調節できる。また動粘度 ν に関わらず、圧力力積勾配 $\partial\Pi^*/\partial z^*$ と速度 U^* はほぼ一定である。これより衝突過程では、粘度の影響は小さく無視できる。

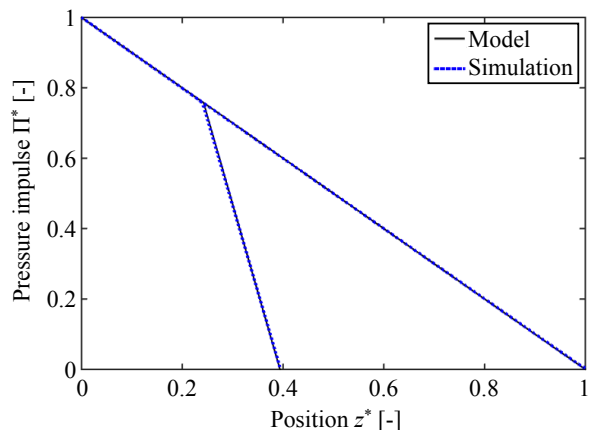


Fig.5 Relation between the pressure impulse Π^* and the vertical position z^* .

Table 1 Relation between $l_{top}/l_{middle}+1$, the normalized gradient of the pressure impulse $|\partial\Pi^*/\partial z^*|$ and the normalized liquid velocity inside the tube U^* .

$l_{top}/l_{middle}+1$	ν [cSt]	$ \partial\Pi^*/\partial z^* $	U^*
5	1	4.9	4.9
	10	4.9	4.9
	100	4.9	4.9
10	1	9.5	9.6
	10	9.5	9.4
	100	9.5	9.4
15	1	13.8	13.4
	10	13.8	13.4
	100	13.8	13.4
20	1	18.1	17.3
	10	18.0	17.3
	100	18.0	17.3

4.2 集束過程における粘性の影響

数値計算より求めた液体ジェット射出時における流速場を Fig.6 に示す. なお流速場は, 与えた初期速度 U で除し無次元化している. 各動粘度 ν において, 打撃付与直後 ($t = 1 \mu\text{s}$) では速度場はほぼ一定である. これは, 打撃付与中における粘度の影響は小さいことを意味し, 4.1 節と一致する傾向である. 一方, 低粘度流体 (10 cSt) の場合, 界面の変形に伴い, 界面中心の流速が初期速度 U の2倍程度になっている. これは, 流れの集束による増速効果であると考えられる. しかし, 高粘度流体 (100 cSt) の場合, 流れの集束による増速効果は観測されない. また高粘度流体では, 細管管壁付近の低い速度が観測される. この領域は境界層の発達によるものであると考えられる. ここで, 境界層の発達が流れの集束を阻害すると仮定し, 境界層の厚さに着目する.

一般的に境界層厚さ δ は, $\delta = (\nu t)^{1/2}$ で表される. 流れの集束は, 界面が凹面形状を有する間に起こり続け, その時間 t_f は,

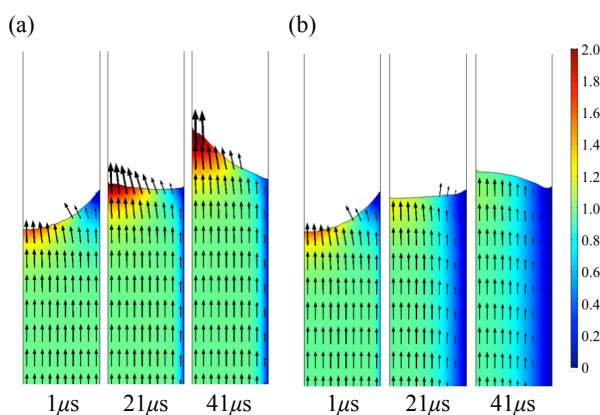


Fig.6 Velocity fields in the liquid during the focusing duration with (a) small viscous liquid ($\nu = 10 \text{ cSt}$) and (b) large viscosity one ($\nu = 100 \text{ cSt}$).

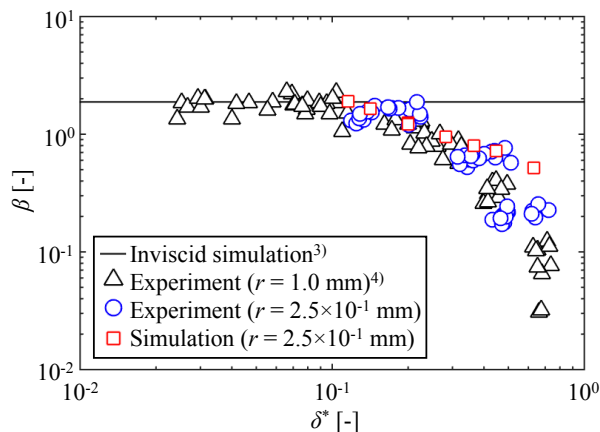


Fig.6 The increment ratio of the jet velocity β vs. the normalized thickness of boundary layer δ^* .

$$t_f \sim \frac{2r}{U} \quad (5)$$

と見積もられる. 式(5)より, 流れの集束直後の無次元化境界層厚さ δ^* は,

$$\delta^* = \frac{\delta|_{t=t_f}}{r} = \sqrt{\frac{2}{\text{Re}}} \quad (6)$$

と表される. なおレイノルズ数 Re は, $\text{Re} = U'r/\nu$ で定義される. 式(6)より無次元化境界層厚さ δ^* は, レイノルズ数 Re の関数である. 液体ジェットの増速率 β と無次元化境界層厚さ δ^* の関係を Fig.7 に示す. なお増速率 β は, 式(4)を用いて求めている. 先行研究による非粘性の数値計算³⁾を Fig.7 に実線で示す. また, 先行研究による細管内半径 $r = 1.0 \text{ mm}$ の実験⁴⁾を Fig.7 に三角プロットで示す. 細管内半径 r , 初期速度 U および動粘度 ν が変化した場合でも境界層厚さ δ^* により増速率 β の傾向を統一的に記述できる. 境界層厚さ δ^* が小さい場合, 本結果が非粘性の数値計算³⁾と良く一致している. この範囲では, 粘性の影響は小さく無視できる. 一方, 境界層厚さ δ^* が大きい場合, δ^* の増加に伴い増速率 β は低下する. これより, この範囲では粘度の影響は顕著に現れ, 粘度は増速率 β の低下に寄与する.

5. 結言

本研究では, 従来では射出が困難であった高粘度液体を射出可能な装置を開発した. 本装置における粘性の影響を明らかにするため, 1)打撃による衝突過程, 2)流れの集束による集束過程, の異なるタイムスケールに分け, それぞれの過程について粘性の影響を調査した. 衝突過程では, 圧力力積に着目したモデルを提案し, 数値計算と良い一致を得た. さらに衝突過程では, 粘性の影響は小さく無視できることがわかった. 一方, 集束過程では, 粘性の影響は大きく現れ, 境界層の発達に着目することで粘性の影響を統一的に記述できた.

参考文献

- 1) M. Fuji, "Series Digital Printing technology 'Inkjet'", Tokyo-denki University Press (2008) [in Japanese].
- 2) H. Onuki, Y. Oi and Y. Tagawa, "Microjet generator for highly viscous fluids", Physical Review Applied, **9**, 014035 (2018).
- 3) I. R. Peters, Y. Tagawa, N. Oudalov, C. Sun, A. Prosperetti, D. Lohse, and D. van der Meer, "Highly focused supersonic microjets: Numerical simulations", Journal of Fluid Mechanics, **719**, pp. 587-605 (2013).
- 4) H. Onuki and Y. Tagawa, "A highly-viscous liquid jet generator", Trans. J. Multiphase Flow, **29**, pp. 335-342 (2015) [in Japanese].