

Tue. Jun 19, 2018

Main Hall

Awarded presentation | Commemoration Lecture of the Paper Award 2016

**[PA] Commemoration Lecture of the Paper Award
2016**

Session Chair: Kazuki Nakamura (Chiba University), Tomohiro Mizuno (Fujifilm Corporation)

12:50 PM - 1:20 PM Main Hall (1st Floor, Keyaki Kaikan)

**[PA-01] Analysis of Wetting and Coalescing Behaviors of
Minute Ink Droplets by MPS Simulation and
Application for Prediction of Image Defects**

*Ryosuke Takahashi¹ (1. Fuji Xerox Co., Ltd.)

12:50 PM - 1:20 PM

Awarded presentation | Commemoration Lecture of the Konica Minolta
Science and Technology Foundation Research Encouraging Grant 2016

**[KM] Commemoration Lecture of Konica Minolta
Research Encouraging Grant 2016**

Session Chair: Makoto Omodani (Tokai University), Atsushi Tomotake (Konica Minolta, Inc.)

1:20 PM - 1:50 PM Main Hall (1st Floor, Keyaki Kaikan)

**[KM-01] Novel Microjet Generator for Supersonic and
Highly Viscous Liquids**

*Yoshiyuki Tagawa¹ (1. Tokyo University of Agriculture
and Technology)

1:20 PM - 1:50 PM

Awarded presentation | Commemoration Lecture of the Paper Award 2016

[PA] Commemoration Lecture of the Paper Award 2016

Session Chair: Kazuki Nakamura (Chiba University), Tomohiro Mizuno (Fujifilm Corporation)

Tue. Jun 19, 2018 12:50 PM - 1:20 PM Main Hall (1st Floor, Keyaki Kaikan)

[PA-01] Analysis of Wetting and Coalescing Behaviors of Minute Ink Droplets by MPS Simulation and Application for Prediction of Image Defects

*Ryosuke Takahashi¹ (1. Fuji Xerox Co., Ltd.)

12:50 PM - 1:20 PM

受賞記念講演 | 2016年度論文賞受賞記念講演**[PA] 2016年度論文賞受賞記念講演****Commemoration Lecture of the Paper Award 2016**2018年6月19日(火) 12:50 ~ 13:20 大ホール (けやき会館 一階)

[PA-01] MPS法による微細インク液滴の濡れ拡がり，合一挙動解析と画質欠陥予測への応用**Analysis of Wetting and Coalescing Behaviors of Minute Ink Droplets by MPS Simulation and Application for Prediction of Image Defects***高橋 良輔¹ (1. 富士ゼロックス株式会社)*Ryosuke Takahashi¹ (1. Fuji Xerox Co., Ltd.)

インクジェット方式による画像形成プロセスにおいて高品質な画像を得るためには，微細な液滴の濡れ拡がり，合一挙動を把握し制御することが重要であり，これらの挙動を予測するための数値解析技術の研究が進められている。本研究では，自由表面の解析に有利な粒子法のひとつであるMPS法に着目し，新規な界面張力ポテンシャルモデルと液滴表面の判定アルゴリズムを構築することにより，親水性から撥水性までの濡れ拡がり挙動および二液滴の合一挙動を定量的に再現した。また，構築した技術を用い，インクジェット方式で発生するライン画像の波うちなどの画質欠陥の発生を予測した。

To obtain high-quality image with an inkjet printing process, it is important to control wetting and coalescing behaviors of minute droplets. Therefore, development of a simulation technology to predict these behaviors has been demanded. In this study, we focused on MPS simulation method that has the advantage in free surface analysis, and implemented a newly developed potential model for surface tension and an algorithm for ink surface determination. By this MPS simulation, wetting and coalescing behavior from hydrophilicity to water repellency has been quantitatively reproduced, and the prediction of the image defects such as cyclic wavy line became possible.

MPS 法による微細インク液滴の濡れ拡がり，合一挙動解析と 画質欠陥予測への応用

高橋 良輔*

*富士ゼロックス株式会社 基盤技術研究所

Analysis of Wetting and Coalescing Behaviors of Minute Ink Droplets by MPS Simulation and Application for Prediction of Image Defects

Ryosuke Takahashi*

*Key Technology Laboratory, Fuji Xerox Co., Ltd.

To obtain high-quality image with an inkjet printing process, it is important to control wetting and coalescing behaviors of minute droplets. Therefore, establishment of a simulation technology to predict these behaviors has been demanded. In this study, we focused on MPS simulation method, and developed potential model of surface tension and algorithm to identify surface particles. By this method, quantitative calculation of the wetting and coalescing behavior of minute ink droplets has been accomplished, and the prediction of the image defects such as cyclic wavy line became possible

1. 緒言

近年，インクジェットプリンティング技術は，非接触かつ非加熱で印字が可能であるなどの利点から，印刷分野だけでなくプリントドエレクトロニクスやデジタルファブリケーションなどの工業分野への応用が進められている．工業的に高性能な製品を得るためには微細な画像構造を形成することが求められており，そのためには pl オーダーの微小液滴の挙動を把握し制御することが必須となる．インクジェット方式による画像形成プロセスでは，液滴が印刷媒体上に着弾することで形成されるドットが画像の基本単位であり，複数のドットが連続的に配置されることで最終的な画像構造が決定される．その際，液滴が微小になるほど界面張力の影響が支配的となるため，画像構造を予測するためには表面張力に起因する濡れ拡がりおよび合一挙動を十分に理解する必要がある．しかし液滴が pl オーダーと微小であることと，濡れ拡がりや合一といった現象は ms オーダー以下で推移する高速な現象であることから，これらの挙動を実験的に観察，把握することは容易ではない．また，濡れ性はインクと媒体の組み合わせによって決まる特性であり，これらの様々な組み合わせに対して汎用的に濡れ性を定量化する方法は確立されていない．

このような表面張力に起因した現象を再現するために，数値シミュレーション技術の研究開発が進め

られている．これらの技術の中で，離散化された計算点をラグランジュ的に扱う粒子法は，有限要素法に代表されるオイラー法における原理上の課題である移流項起因の数値拡散の影響がないため，自由表面の変形を伴う現象を高精度に扱える技術として注目されている．粒子法のひとつである MPS 法¹⁾は，Navier-Stokes 方程式の圧力勾配項を数密度一定条件のもとに陰的に解くため，非圧縮性流体の解析精度に優れた手法である．MPS 法において，表面張力をポテンシャル関数として表現する方法が近藤らによって提案され²⁾，それを基にした研究が進められている．しかし液滴の動的な濡れ拡がり形状の時間変化や，特に接触角 30 度以下の親水条件での濡れ性の定量的な再現精度に課題があり，濡れ挙動を汎用的かつ高精度に予測できる数値解析モデルは確立されていなかった．

本研究では，表面張力の基本原理に基づいた新規な表面張力ポテンシャルモデルとともに，表面粒子を高精度に判定するためのアルゴリズムと三相界面での界面張力の釣り合いモデルを新規に考案し，濡れ拡がり挙動の定量的な検証を行った．また，構築したシミュレーション技術を用いて，インクジェット方式における代表的な画質欠陥の予測を試みた．

2. シミュレーションモデル

2.1 MPS 法

MPS 法では，式(1)，(2)で表される重み関数 w と粒子数密度 n を用いて，計算粒子間の相互作用力を計算する．

* 〒259-0157 神奈川県足柄上郡中井町境 430 グリーンテクなかい

* 430 Sakai, Nakai-machi, Ashigarakami-gun, Kanagawa 259-0157, Japan
e-mail: takahashi.ryosuke@fujixerox.co.jp

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (0 \leq r < r_e) \\ 0 & (r_e \leq r) \end{cases} \quad (1)$$

$$n_i = \sum w(|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|) \quad (2)$$

ここで、 r は粒子間距離、 r_e は相互作用計算時の有効距離、 $\mathbf{x}_i$, $\mathbf{x}_j$ は粒子 i および近傍粒子 j の位置ベクトルである。

また、任意の物理量 ϕ に対する勾配、ラプラシアンは、それぞれ以下の式で表される。

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{D}{n_i} \sum \left[\frac{\phi_j - \phi_i}{|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|^2} (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) w(|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|) \right] \quad (3)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2D}{\lambda n_i} \sum [(\phi_j - \phi_i) w(|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|)] \quad (4)$$

D は計算対象とする空間の次元数であり、 λ は (4) 式から求まる解を数値解と定量的に一致させるための係数で、以下の式で表される。

$$\lambda = \frac{\sum |\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|^2 w(|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|)}{\sum w(|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|)} \quad (5)$$

2.2 界面張力ポテンシャルモデル

近藤らによって提案されたポテンシャルモデルでは、式(6)に示したようにポテンシャル関数 $p(r)$ の空間微分を用いて粒子間距離 r に応じた表面張力 F を計算することを特徴とする。

$$F(r) = Kp'(r) \quad (6)$$

K はポテンシャルの大きさを表わす係数であり、表面張力の実測値から求めることができる。ポテンシャル関数の関数形は、表面積を最小化するという表面張力の原理と、粒子間距離を一定に保つというMPS法の制約を両立するため、一般的には粒子が離れている際は引力が、粒子が食い込んだ際は斥力がはたらくよう定義する。しかし従来のポテンシャル関数では、二粒子間での引力、斥力の関係しか考慮されておらず、多体問題を考慮した際に再近接粒子とオーバーラップした状態でも引力が働いてしまうことが課題であった。そこで本研究では、粒子の多体問題も考慮に含め、注目した計算粒子が最近接する粒子にわずかでもオーバーラップした状態になると、有効距離内の全粒子から受けるポテンシャル力の積分値が、最近接粒子に対する斥力になるよう、ポテンシャル関数を新たに定義した。

2.3 三相界面釣り合いモデル

液滴の濡れ挙動を再現するためには、固気液三相界面における界面張力の釣り合い状態を正確にモデル化しなければならない。三相界面における界面張力の釣り合いは、Fig.1 で示した概念図および Young の式(7)で表される。

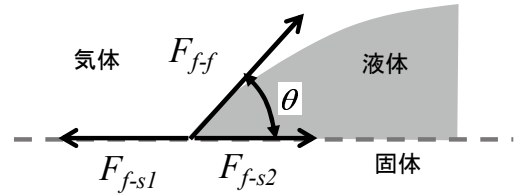


Fig.1 Balanced states of solid-liquid-gas interface.

$$F_{f-f} \cos \theta = F_{f-s1} - F_{f-s2} \quad (7)$$

ここで添え字の f は液体、 $s1$ は非濡れ状態の固体面、 $s2$ は濡れ状態の固体面である。本研究では式(8)で定義されるポテンシャル係数 K_{f-s1} と K_{f-s2} との差 ΔK_s を用い、非濡れ状態の固体と液体間でのみ、界面張力を計算することとした。

$$\Delta K_s = K_{f-s1} - K_{f-s2} \quad (8)$$

式(6)と(8)より、三相界面での釣り合い式は以下の(9)式で表すことができる。

$$K_{f-f} \cos \theta = \Delta K_s \quad (9)$$

従来のポテンシャルモデルでは、ポテンシャル力を対象粒子の有効半径内に存在する全粒子間で計算する方法が用いられてきた。しかし、その方法では接触角が小さくなるほど三相界面近傍の液体内の計算粒子が少なくなり、液液間のポテンシャル力は減少していく。一方で、固液間のポテンシャル力は一定値であるため、三相界面での界面張力が釣り合う状態が、計算解像度と液滴形状に依存し、再現精度が悪化すると考えられる。本研究では広範囲な液滴形状に対しても高精度に濡れ挙動を再現するために、液体および固体面の表面に存在する粒子間でのみ、界面張力を計算することとした。

2.4 表面粒子判定アルゴリズム

界面張力を液体および固体面の表面に存在する粒子のみで計算するためには、表面粒子の判定を正確に行う必要がある。MPS法では一般的に、式(2)の数密度が任意の閾値を下回った粒子を表面粒子として判定する方法が用いられている。しかし、この方法では流体表面の曲率に応じて、判定閾値や有効距離などの計算パラメータの最適値が異なる。つまり過渡的に流体の形状が変わる濡れ挙動の計算で表面粒子の判定を高精度に行うためには、これらの計算パラメータを動的に最適化する必要が生じ、最適化できたととしても、計算粒子の粗密状態のバラつきによる誤判定は避けられない。

そこで本研究では、数密度を用いない新たな表面粒子判定アルゴリズムを考案した。本アルゴリズムでは、Fig.2 に示した概要図のとおり、対象粒子から液滴表面方向のベクトルを特定し、そのベクトルにおける他粒子の存在状態を判定指標とする。その判

定手順の詳細は以下である．まず，対象粒子 i に対して，有効半径 r_e 内の近傍粒子の重心 G を求める．粒子 i が液滴の十分内部に存在する場合は重心 G の座標は対象粒子 i の座標とほぼ一致するが，有効半径内に液体の表面が含まれる場合は，重心 G は液体表面と逆側に位置することになる．したがって，粒子 i が表面近傍に存在する場合，重心 G から粒子 i に向かうベクトル $\mathbf{v}$ は，粒子 i から液滴表面に向かうベクトルとなる．次に，この表面に向かうベクトル $\mathbf{v}$ を中心軸，頂点を粒子 i の中心座標 $\mathbf{x}_i$ ，中心角を任意に定めた β とした， G と逆側に広がった円錐 c を定義する．そして円錐 c 内に存在する他粒子の数を算出し，その数が閾値以下であれば粒子 i を表面粒子と判定する．

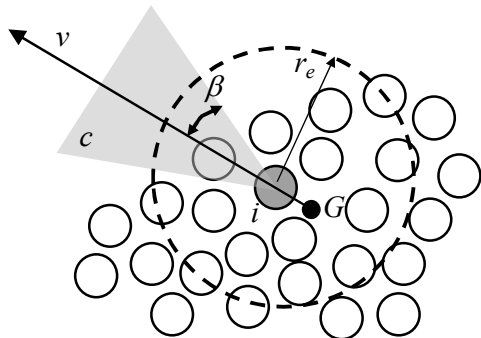


Fig.2 Schematic view of determination algorithm of particles on ink surface.

3. 検証

構築したシミュレーションモデルについて，濡れ挙動の再現性の検証を行った．はじめに濡れ拡がり収束した状態での液滴の接触角が，入力値を再現するかを検証した．計算条件を Table 1 に，検証結果を Fig.3 に示す．

Table 1 Validation conditions of droplet's shape

Factor	Parameter
Diameter of droplet (μm)	25.0
Jetting velocity (m/s)	5.1
Viscosity ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	10.1×10^{-3}
Surface tension (mN/mm)	34.4
Contact angle (degree)	From 7.0 to 120.0

Fig.3 より，本手法を用いることで親水から撥水条件までの広範囲の接触角に対して，液滴の濡れ拡がり形状を従来技術を上回る高い精度で再現できることを確認した．

検証結果の中で，特徴的な接触角 7 度および接触角 90 度の収束状態における液滴形状の計算結果を Fig.4 にそれぞれ示す．Fig.4 から接触角による液滴の濡れ拡がり形状の変化を適切に計算できることを確認した．

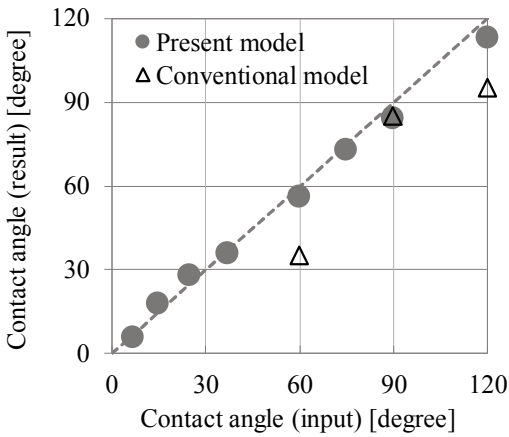
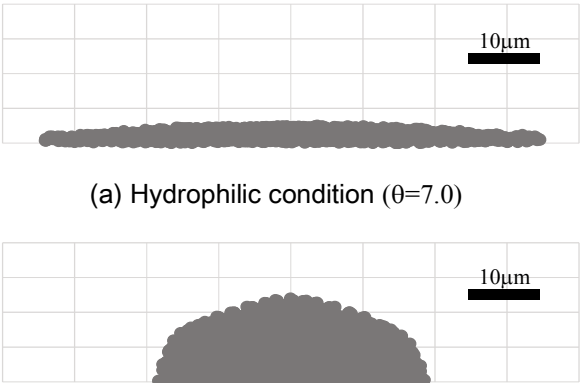


Fig.3 Validation result of wetting behaviors.



(a) Hydrophilic condition ($\theta=7.0$)
(b) Hydrophobic condition ($\theta=90.0$)

Fig.4 Calculation results of shape of wetted droplet.

次にインクジェットヘッドから吐出され，非浸透媒体上に着弾した液滴の濡れ拡がり形状の時間変化を実測結果と比較した．接触角の実測値は高速度カメラにより撮影した画像を画像処理することで求めた．検証条件を Table 2 に，接触角 25.0 度および 76.5 度における接触角変化の比較結果を Fig.5 に示す．

Table 2 Validation conditions of wetting behavior

Factor	Parameter
Diameter of droplet (μm)	25.0
Jetting velocity (m/s)	5.1
Viscosity ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	10.1×10^{-3}
Surface tension (mN/mm)	34.4
Contact angle (degree))	(a)25.0 (b)76.5

Fig.5(a)に示した接触角 25.0 度の条件では，着弾から徐々に液滴が濡れ拡がる挙動に，Fig.5(b)に示した接触角 76.5 度の撥水条件では，着弾直後に液滴形状が収束する挙動になっており，どちらの挙動も計算で定量的に再現できていることが分かる．

これらの結果から，本手法により親水，撥水の両条件で着弾からの動的な濡れ挙動を定量的に再現できることを確認した．

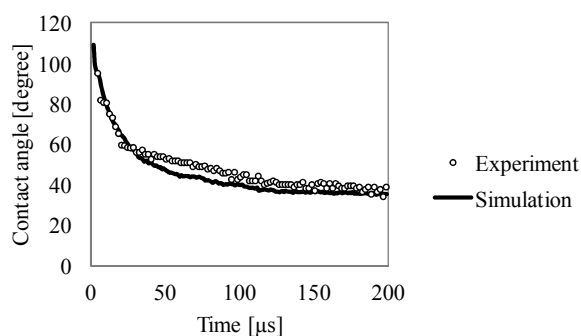
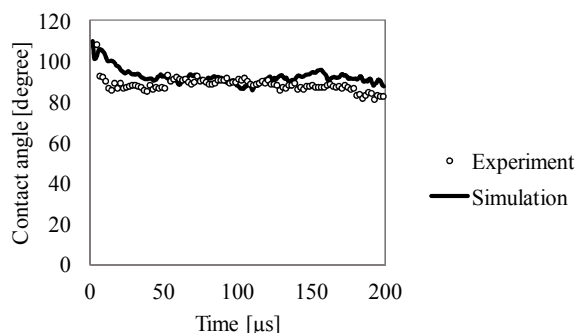
(a) Hydrophilic condition ($\theta=25.0$)(b) Hydrophobic condition ($\theta=76.5$)

Fig.5 Validation results of wetting behavior.

4. 画質欠陥予測への応用

インクジェット方式では、インクの濡れ挙動に応じて、最適な印字パラメータを設計する必要がある。Fig.6(a)に示したようなライン状の画像を出力する際に、インクのドット径に対して印字ピッチが過小だと Fig.6(b)に示したバルジと呼ばれる局所的なふくらみが、過大になるとジャギーと呼ばれる Fig.6(c)に示したような周期的な波うち状の画質欠陥が発生することが知られている。

本研究では、構築したモデルに潤滑理論をベースにした準静的モデルを組み合わせ、これらの画質欠陥の再現を試みた。解析では、5つの液滴の連続着弾と合一挙動を、流速が準静的と見なせる時点まで構築したモデルで計算した。その後、構築したモデルの最終ステップでの液滴形状を初期形状として準静的モデルでの解析を開始し、収束状態までの液滴挙動を計算した。

計算条件を Table 3 に、ライン形状の計算結果を Fig.6 に示す。計算の結果、印字ピッチが $30\mu\text{m}$ の条件(a)では、凹凸が少ない比較的滑らかなライン状の画像となった。それに対し、印字ピッチが $20\mu\text{m}$ と狭い条件(b)ではバルジ状の変形が、印字ピッチが $50\mu\text{m}$ と広い条件(c)ではジャギー状の変形が発生する結果が得られた。なお実験では5つ以上の液滴を同一ライン上に印字しているためバルジ部分に流れ込む液量が十分にあるのに対して、計算は5つの液

Table 3 Calculation condition of line image formation

Parameter	Parameter
Diameter of droplets (μm)	25.0
Number of droplets	5
Viscosity ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	10.1×10^{-3}
Surface tension (mN/mm)	34.4
Contact angle (degree)	25.0
Jet pitch (μm)	(a) 30.0 (b) 20.0 (c) 50.0
Jet frequency (kHz)	10.0

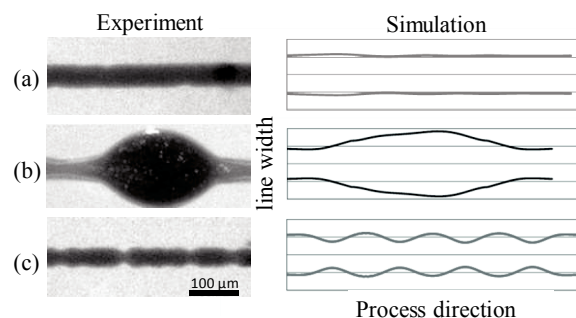


Fig.6 Verification results of line image formation.

滴での計算をしているため、バルジ状の変形はこれ以上大きくならず収束している。これらの計算結果は Fig.6 に示した実験結果と一致するものであり、ジャギー、バルジの発生と、印字ピッチの関係を定量的に予測できた。

また、本技術を用いることで着弾干渉に起因したスジ状の画質欠陥の予測も可能である³⁾。

5. 結言

本研究では、微小液滴の濡れ挙動を再現するため、新規な界面張力ポテンシャルモデルおよび表面粒子判定アルゴリズムを組み込んだ MPS 法シミュレーション技術を構築した。これにより親水性から撥水性の条件に対し、インクの動的な濡れ挙動を定量的に再現した。構築した MPS 法シミュレーションを用いることで、インクジェット方式で発生する画質欠陥の原因のひとつであるジャギーやバルジを定量的に予測することが可能となった。

参考文献

- 1) S.Koshizuka: Ryushi-Hou, (Maruzen, 2005) [in Japanese]
- 2) M.Kondo, S.Koshizuka, and M.Takimoto: Surface Tension Model Using Inter-Particle Potential Force in Moving Particle Semi-Implicit Method, Transactions of JSCES, Paper No.20070021 (2007)[in Japanese]
- 3) R.Takahashi and T.Ito: Development of MPS Simulation of Wetting Behavior in Hydrophilic Condition, Imaging Conference JAPAN 2016, pp 121-124 (2016)[in Japanese]

Awarded presentation | Commemoration Lecture of the Konica Minolta Science and Technology Foundation Research Encouraging Grant 2016

[KM] Commemoration Lecture of Konica Minolta Research Encouraging Grant 2016

Session Chair: Makoto Omodani (Tokai University), Atsushi Tomotake (Konica Minolta, Inc.)

Tue. Jun 19, 2018 1:20 PM - 1:50 PM Main Hall (1st Floor, Keyaki Kaikan)

[KM-01] Novel Microjet Generator for Supersonic and Highly Viscous Liquids

*Yoshiyuki Tagawa¹ (1. Tokyo University of Agriculture and Technology)

1:20 PM - 1:50 PM

受賞記念講演 | 日本画像学会コニカミノルタ科学技術振興財団研究奨励賞受賞記念講演

[KM] 日本画像学会コニカミノルタ科学技術振興財団研究奨励賞受賞記念講演

Commemoration Lecture of Konica Minolta Research Encouraging Grant 2016

2018年6月19日(火) 13:20 ~ 13:50 大ホール (けやき会館 一階)

[KM-01] 新規超音速・高粘度液体吐出方式の開発

Novel Microjet Generator for Supersonic and Highly Viscous Liquids

*田川 義之¹ (1. 東京農工大学)

*Yoshiyuki Tagawa¹ (1. Tokyo University of Agriculture and Technology)

本研究室で開発中の新規な超音速液体吐出方式（インクジェット）について紹介する。本研究室では力学的アプローチにより問題解決を図る点に特徴がある。本手法では打撃を駆動力として用いることで、従来のインクジェット方式では吐出が困難であった超高速吐出や高粘度液体の吐出が可能となった。この方式により痛みや汚染を伴わずに皮膚に高速で液薬を注入する無針式の注射器への応用の研究等を進めており、新しい応用領域を切り開く可能性を議論する。さらに高粘度液体の吐出や着弾に関する高速度画像計測を中心とした新たな観察・評価方法について、インクジェット分野における新規解析手法としての将来性を展望する。

This presentation introduces a novel supersonic liquid ejection method under development in this laboratory. By using an impulsive force as a driving force, it has become possible to discharge ultra high speed microjets and high viscosity liquids which were difficult to discharge by the conventional ink jet system. We are studying the application of this method to a needle-free systems injecting liquid medicine at high speed into the skin with less pain or contamination. In addition, we look at the future observation and evaluation method mainly for high-speed image measurement as a novel analytical method in the inkjet field.

新規超音速・高粘度液体吐出方式の開発

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

Novel microjet generator for supersonic and highly viscous liquids

Yoshiyuki Tagawa*

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

This presentation introduces a novel method for generating supersonic microjets and highly viscous microjets under development in this laboratory. By using an impulsive force as a driving force, it has become possible to discharge ultra high speed microjets and highly viscous liquids which were difficult for the conventional ink jet system. We are studying the application of this method to a needle-free systems injecting liquid medicine at high speed into the skin with less pain or contamination. In addition, we look at the future observation and evaluation method mainly for high-speed image measurement as a novel analytical method in the inkjet field.

1. はじめに

インクジェット技術は、その応用先の豊富さと技術の急激な進歩から多くの研究が盛んに行われている。しかし流体力学的な視点に立つと、流路の長さスケール（ノズル径）が小さいことから、流体の運動方程式を支配する無次元数（レイノルズ数）が小さく、流体の粘性力の影響が大きい現象がほとんどである。そのため、マイクロジェットの高速吐出や高粘度液体のマイクロ液滴生成が困難であり、応用範囲を制約する大きな要因となっている。

そこで我々は、慣性力が卓越する特異なマイクロ流れである、超音速マイクロジェットおよび高粘度マイクロジェット吐出方式の新規開発に取り組んできた。本開発においては力学的アプローチにより問題解決を図る点に特徴がある。本手法ではレーザーパルスおよび打撃を駆動力として用いることで液体を急加速させる。これにより、超音速マイクロジェットの最高速度は 850 m/s (Mach 2 以上) に達する¹⁾。この現象は高レイノルズ数の現象であり、慣性力の影響が支配的である。そのため従来の粘性力支配のマイクロ流れと異なり、加工・洗浄など慣性力を積極的に用いた応用が期待される。

そこで本稿では本研究室で開発した新規技術および技術発展に不可欠な実験解析手法について紹介する。具体的には、まず新規吐出方式によるマイクロ流れの基礎的なメカニズムおよび流れの制御手法について紹介する。次に、この流れの応用として、超音速マイクロジェットを用いたワクチン/医薬品の無針注射器開発のための研究および新規高粘度液体インクジェット型印刷機の開発状況を示す。

2. 新規超音速液体マイクロジェット吐出方式

2. 1 吐出方式概要¹⁾

超音速マイクロジェットの生成プロセスを図 1 に示す。まずマイクロサイズのガラス管内に充填した液体に、集光したナノ秒パルスレーザーを照射し、液体に強い局所エネルギーを付与する。照射点からは衝撃波（圧力波）および気泡が発生する。衝撃波が液中を伝播し、やがて気液界面に達する。気液界面は液体の表面張力およびガラス内壁の濡れ性によって凹面形状となっている。これにより、衝撃波到達直後に急加速された気液界面付近の流体において流れの集束が生じ、高速の先細形状のジェットが生成される。なお、液体の急加速度が不十分である場合、流れの集束は生じないことに注意されたい。マイクロジェットの速度および大きさは、照射するレーザーのエネルギー、レーザー照射位置、マイクロ管のサイズ、管内壁の濡れ性（接触角）によって制御可能である。マイクロジェットのサイズは直径 10 μm 以下、最高速度は 850 m/s (Mach 2 以上) に達する。

この超音速マイクロジェットは高速ゆえに慣性力が支配的となるマイクロ流れである。したがって、マイクロ工学的に新しい利用価値がある。そこで、超音速マイクロジェットを用いた無針注射器の開発に取り組む。

2. 2 無針注射への応用²⁾

注射は人々の健康を保ち、世界中の病気の蔓延を防ぐために極めて重要である。しかし通常用いられる注射針は感染症や痛み、処分方法に関して多くの問題をかかえており、早急な改善が必要である。そこで針のいらぬ注射システムについて研究が行われてきた。これまでの無針注射システムはジェットの先端形状が時間とともに拡大し着地領域が広がる

* 〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

* 2-24-16 Naka-cho, Koganei, Tokyo, 184-8588, Japan

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

ため侵襲性が高い。これに対して本マイクロジェットは集束形状を持つため着地領域増加がない。これを人体へ適用した場合、皮膚に生じる穴は蚊の口吻より小さいため、痛みを大幅に軽減できると期待される。

実際に超音速マイクロジェットを用いた無針注射器の実現可能性を試験するため、軟質材料(濃度5%のゼラチン材料)への衝突実験を行った。実験の様子を図2に示す。人体組織と同程度の硬さのゼラチンに超音速マイクロジェットを衝突させたところ、ジェットは飛散なく材料内に貫入した。また貫通穴は円筒形となり、材料内の傷を最小限に抑えられることを示した。この実験に加え、移植にも使用可能な人工皮膚をゼラチンの表面に接着し、衝突実験を行った(図3参照)。その結果、超音速マイクロジェットは皮膚を貫通し、かつ貫通穴もほぼ円筒形を保つことを明らかにした。

以上の結果より、超音速マイクロジェットを用いた無針注射の可能性を示した²⁾。本研究結果はアメリカ物理学会誌(APS)のオンライン版(Physics Today)やマサチューセッツ工科大学のサイトで取り上げられるなど、注目を集めている。

現在、エネルギー利用効率が高いジェット生成のためのマイクロ流路の構築³⁾、マイクロジェットの体積制御に関する研究⁴⁾などを進めている。

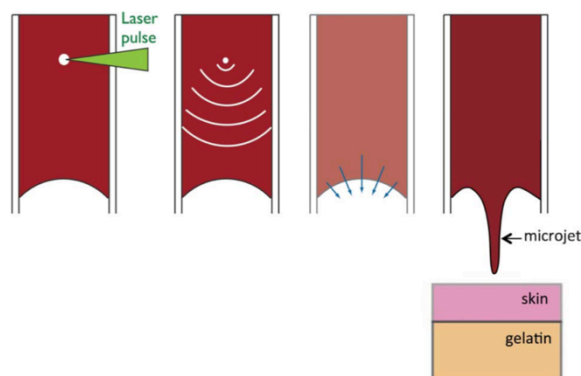


Fig.1 Illustration for the microjet generation process and the injection experiment²⁾. (a) A focused laser pulse is illuminated into a capillary tube filled with a water-based liquid. (b) A shock wave propagates towards the air-liquid interface. (c) Kinematic flow focusing occurs due to the concave shape of the air-liquid interface, which causes a focused high-speed microjet. (d) In injection experiments, the microjet impacts the soft material, comprising of pure gelatin 5 wt% or skin layer on top of the gelatin.

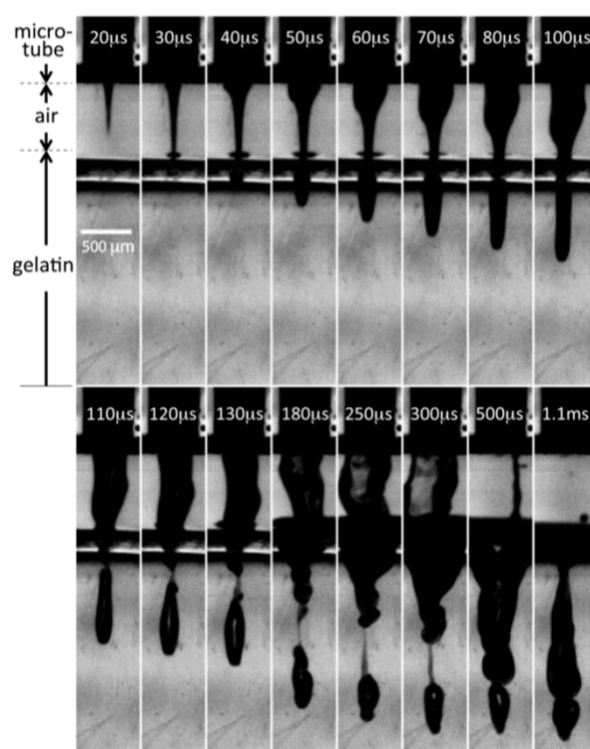


Fig. 2 Temporal evolution of the jet penetration into the soft material measured using a high-speed camera²⁾. The sequential images show the jet injection process at the designated times (The laser is shot at 0 ms). The microtube diameter is 500 μm .

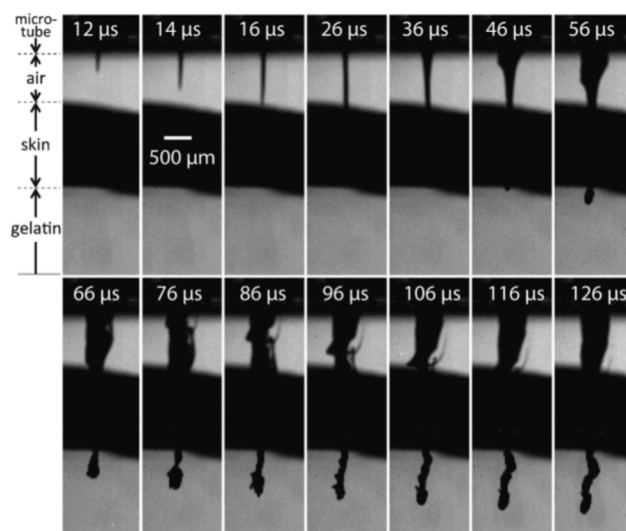


Fig. 3 Temporal evolution of the jet penetration with 160 m/s of impacting jet velocity into an artificial human skin placed on top of the soft material²⁾. As the skin curls up on the sides of the cuvette, the dark region of the skin in the images is thicker than the actual thickness of the skin.

3. 新規高粘度液体マイクロジェット吐出方式概要

液体の急加速現象は、前述の高速ジェットを生じさせるだけでなく、高粘度の液体を駆動する際にも利用できる。なぜなら、短時間での流体加速現象を流体の運動方程式に基づき解析すると、急加速された流体は主に圧力により駆動され、粘性力の影響は抑えられるためである⁵⁾。そこで高粘度マイクロジェット現象に関する研究を行い、流体の急加速現象を利用した高粘度液体マイクロジェット射出装置を開発した。この装置により超高粘度（水の10,000倍まで）の液体の射出に成功した⁶⁾。本装置によって高粘度液体の微量局所塗布が可能となる。また、速度は100 m/sにまで達するため、上方向への射出が可能となる。そのため、上下左右さまざまな方向から凹凸面への非接触プリントなどが実現できる。以上より本装置は、次世代液体ジェット射出技術の核として様々な応用が期待される。本装置の詳細・最新の成果については、本学会発表（発表番号[IJ1-02]、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）に譲り、ここでは吐出方式の概要を紹介する。

液体を充填した容器に、濡れ性の良い細管を挿入する。細管外側の空気を減圧することにより細管内側の気液界面を容器底部へ近づける。細管内側の気液界面は細管の濡れ性により凹面形状を有する。容器底部に打撃を与えると、液体が急加速され、凹面形状による流れの集束が生じた結果、細管内側で液体ジェットが生成される。打撃による急加速を行う際に細管を利用する効果は絶大であり、打撃を加えるだけの場合に比べ30倍以上の速度を液体ジェットに付与することができる。

本装置に対しては、流体の運動方程式に基づく理論解析（圧力力積に基づく理論解析）および数値計算を行い、実験と良好な一致を得ている⁷⁾。したがって、吐出原理についての理論基盤は構築済みである。この理論基盤に基づき、細管を複数本挿入した場合の影響や、吐出可能な液体の性質の見積もりなどを精度良く行うことができる。

現在、この装置により、蜂蜜やマニキュアといった材料を吐出することに成功している。さらに非ニュートン性を有する流体の吐出実験を進めている。非ニュートン流体に関しては、その物性計測自体にも特殊な装置・解析が必要であり、学術的にも興味深い成果が期待される。さらに、打撃により生じる場合のあるキャビテーションの影響についての研究⁸⁾を進めている。

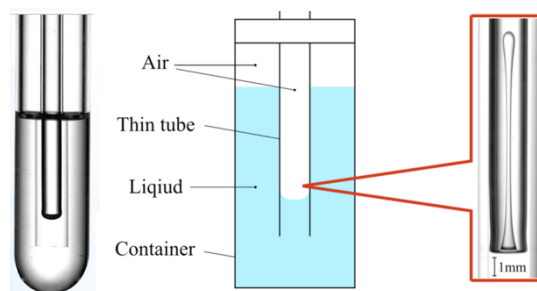


Fig. 4 Schematic of a highly viscous microjet generator⁷⁾. The liquid level inside the thin tube is kept deeper than that outside the tube by decompressing the air outside the tube. The viscous microjet is generated inside the thin tube.

4. 高速度画像計測による現象の新規評価方法

これまで紹介してきたレーザーパルスや打撃による流体の急加速においては、流体の解析手法として高速度画像計測が有効な場合が多い。ここではインクジェット技術にも有用と思われる高速度画像計測手法について当研究室の成果を紹介する。

4. 1 Background Oriented Schlieren 法

レーザーパルスを水中に照射した場合、液体が急加速される。液体が急加速される前後では衝撃波（圧力波）が見られ、この衝撃波の挙動を理解することが効率の良い液体加速手法の開発に重要である。そこで我々はBackground Oriented Schlieren法（BOS法）と呼ばれる手法により水中衝撃波の画像計測に世界で初めて成功した。BOS法は光学的計測手法であり、カメラ、背景および光源のみを用い、非接触に密度勾配場を定量化する手法である^{9) 10)}。参照画像と対象画像とを相互相関法で解析することで、背景ドットの局所変位量を計測する。この情報と流体の状態方程式等の関係式を用いることにより、液体の急加速過程を高時間解像度で非接触計測することができる。図5に水中衝撃波を高速度カメラ（Kirana, Specialized Imaging Co., UK, 撮影速度: 500万フレーム毎秒）で撮影した結果を示す。球形衝撃波が水中を高速（約1,500 m/s）で伝播している様子を捉えることに成功した。

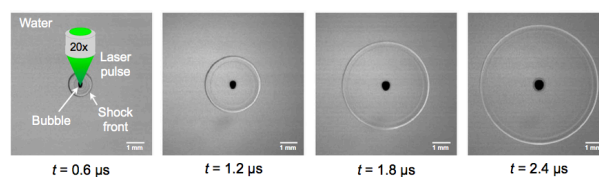


Fig. 5 The spatiotemporal evolution of the laser-induced shock wave after the laser pulse beam being fired⁹⁾. The laser pulse beam is illuminated from the top of these images.

4. 2 液滴衝突挙動の高速度画像計測

液滴の壁面への衝突・着弾挙動はインクジェット技術上、極めて重要な現象である。近年、液滴衝突挙動に関しては衝突直前の液滴の変形および液滴と壁面との間の数 μm の空気薄膜のダイナミクスが液滴の飛散現象に対して大きな影響があることが発見され、高速度詳細計測の必要性が指摘されている。そこで我々は高速マイクロジェット生成装置により発生したマイクロ液滴の衝突挙動を速度カメラ (Shimadzu HPV-1) により画像計測した (図 6¹¹⁾)。その結果、直径 D_0 の液滴が壁面衝突後に有する最大直径 D_{max} はミリサイズの液滴とは大きく異なる結果を示すことを明らかにした。

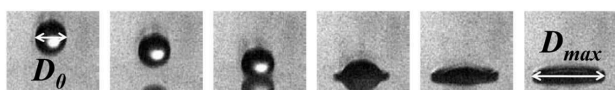


Fig. 6 Droplet impacting on a solid surface. Impacting velocity is 7.7 m/s, $D_0 = 71 \mu\text{m}$, and the time lag between the frames is $8 \mu\text{s}$ ¹¹⁾.

4. 3 生体模擬材料内の応力場の可視化

無針注射において、ジェット貫入時に生体に働く力学的負荷を定量的に把握することは、安全な運用のために有用である。しかし高速マイクロジェットの貫入現象を把握するためには一般的な応力計測には時間分解能が不足している。そこで我々は、高速度偏光カメラ (CRYSTA) を用いた計測を行った¹²⁾。これにより、時間分解能 $10 \mu\text{s}$ での応力場の可視化に成功した。図 7 は生体模擬材料に注射針を貫入した場合とマイクロジェットを貫入した場合との応力場の時間発展の比較である。注射針の場合には応力が広範囲に長時間働いているのに対し、マイクロジェットの 경우에는 応力が応力波として短時間に拡散・減衰していることが明らかとなった。

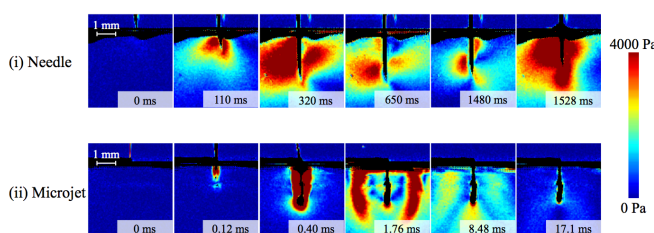


Fig. 7 Sequence images of stress fields induced by (i) needle penetration and (ii) microjet injection¹²⁾.

5. おわりに

本稿では新規な超音速液体吐出方式 (インクジェット) について紹介した。本開発においては力学的アプローチにより問題解決を図る点に特徴がある。本手法ではレーザーパルスおよび打撃を駆動力として用いることで液体を急加速させる。これにより、

従来のインクジェット方式では吐出が困難であった超高速吐出や高粘度液体の吐出が可能となった。この方式により痛みを伴わずに皮膚に高速で液薬を注入する無針式の注射器への応用等の研究を進めており、新しい応用領域を切り開く可能性について議論した。さらにインクジェット分野に有用な高速度画像計測法について紹介した。

本研究に対して日本画像学会コニカミノルタ科学技術振興財団研究奨励賞を賜り、大変光栄に感じるとともに研究の発展に取り組んで参る所存である。

参考文献

- 1) Tagawa, Y., Oudalov, N., Visser, C.W., Peters, I., van der Meer, D., Sun, C., Prosperetti, A., and Lohse, D., "Highly focused supersonic microjet", *Physical Review X*, 2, 031002. (2012).
- 2) Tagawa, Y., Oudalov, N., Ghalbzouri, A. El, Sun, C., and Lohse, D., "Needle-free injection into skin and soft matter with highly focused microjets", *Lab on a Chip*, 13, pp. 1357-1363. (2013).
- 3) Kawamoto, S., Hayasaka, K., Noguchi, Y., and Tagawa, Y., "Volume of a laser-induced microjet", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 82, No. 838, pp. 16-00094, (2016) [in Japanese].
- 4) Hayasaka, K., Kiyama, A., and Tagawa, Y., "Effects of pressure impulse and peak pressure of a shockwave on microjet velocity in a microchannel", *Microfluidics and Nanofluidics*, 21:166 (2017).
- 5) Kiyama, A., Noguchi, Y., and Tagawa, Y., "The generation of a liquid jet induced by a pressure impulse", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 80, No.814, FE0151 (2014) [in Japanese].
- 6) Onuki, H., and Tagawa, Y., "A highly-viscous liquid jet generator", *Transactions of Journal of Multiphase Flow (in Japanese)* 29, pp. 335-342 (2015) [in Japanese].
- 7) Onuki, H., Oi, Y., Tagawa, Y., "Microjet generator for highly viscous fluids", *Physical Review Applied*, 9, 014035 (2018).
- 8) Kiyama, A., Tagawa, Y., Ando, K., and Kameda, M., "Effects of water hammer and cavitation on jet formation in a test tube", *Journal of Fluid Mechanics*, 787, pp. 224-236 (2016).
- 9) Yamamoto, S., Tagawa, Y., and Kameda, M., "Application of background-oriented schlieren (BOS) technique to a laser-induced underwater shock wave", *Experiments in Fluids*, 56, No. 5, 93 (2015).
- 10) Hayasaka, K., Tagawa, Y., Liu, T., and Kameda, M., "Optical-flow-based background-oriented schlieren technique for measuring a laser-induced underwater shock wave", *Experiments in Fluids*, 57:179 (2016).
- 11) Visser, C.W., Tagawa, Y., Sun, C., and Lohse, D., "Microdroplet impact at high velocity", *Soft Matter*, 8, pp.10732-10737. (2012).
- 12) Miyazaki, Y., Endo, N., Kawamoto, S., Kiyama, A., and Tagawa, Y., "High-speed measurement of stress fields in soft material impacted by highly-focused microjets using photoelastic technique", *Proc. 19th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, (2018).