
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。そこで針のいらない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。

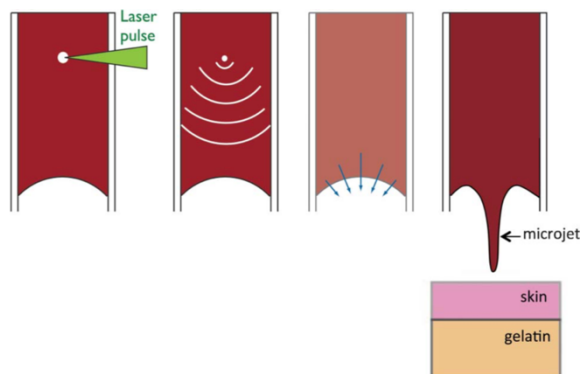


Fig.1 Illustration for the microjet generation process and the injection experiment²⁾. (a) A focused laser pulse is illuminated into a capillary tube filled with a water-based liquid. (b) A shock wave propagates towards the air-liquid interface. (c) Kinematic flow focusing occurs due to the concave shape 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.

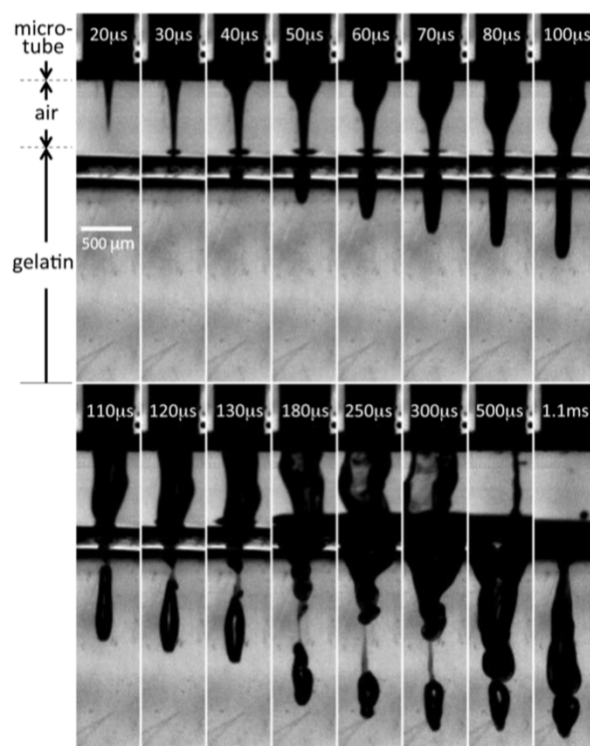


Fig. 2 Temporal evolution of the jet penetration into the soft material measured using a high-speed camera²⁾. The sequential images show the jet injection process at the designated times (The laser is shot at 0 ms). The microtube diameter is 500 μm .

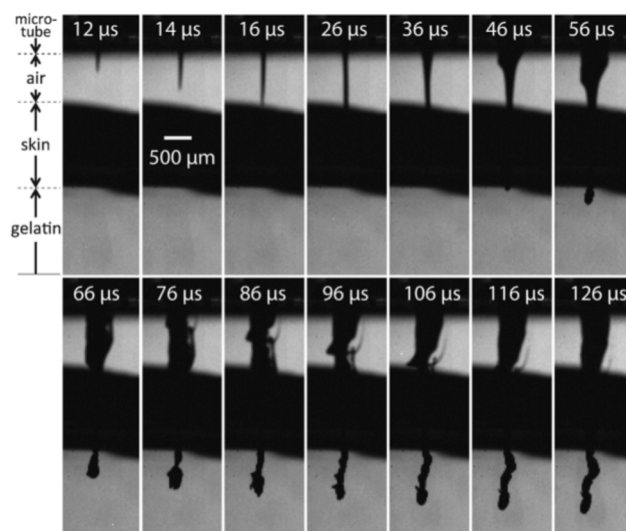


Fig. 3 Temporal evolution of the jet penetration with 160 m/s of impacting jet velocity into an artificial human skin placed on top of the soft material²⁾. As the skin curls up on the sides of the cuvette, the dark region of the skin in the images is thicker than the actual thickness of the skin.

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。

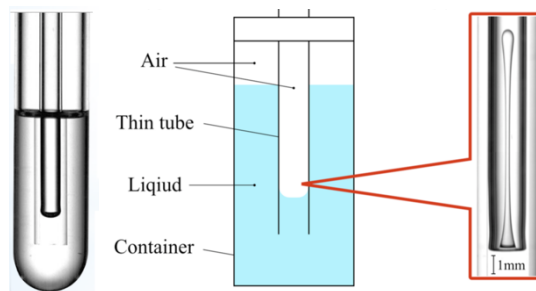


Fig. 4 Schematic of a highly viscous microjet generator⁷⁾. The liquid level inside the thin tube is kept deeper than that outside the tube by decompressing the air outside the tube. The viscous microjet is generated inside the thin tube.

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。

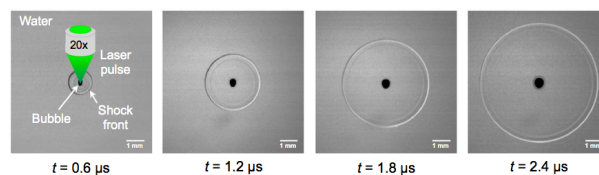


Fig. 5 The spatiotemporal evolution of the laser-induced shock wave after the laser pulse beam being fired⁹⁾. The laser pulse beam is illuminated from the top of these images.

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。

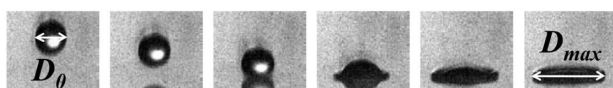


Fig. 6 Droplet impacting on a solid surface. Impacting velocity is 7.7 m/s, $D_0 = 71 \mu\text{m}$, and the time lag between the frames is $8 \mu\text{s}$ ¹¹⁾.

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場合には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。

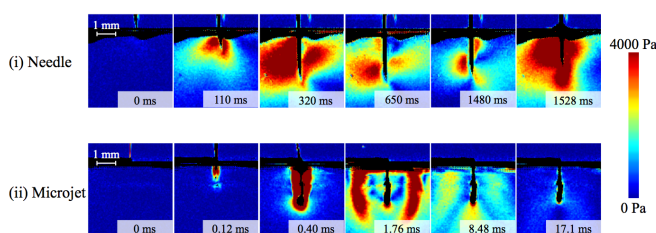


Fig. 7 Sequence images of stress fields induced by (i) needle penetration and (ii) microjet injection¹²⁾.

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).