

---

# 超高圧・高温対応パルスジェットヘッドとその応用

## Ultra-High Pressure and High Temperature-Compatible Pulse Jet Head and Its Applications

---

後藤 勇喜\*  
Yuki GOTO

西村 秀明\*\*  
Hideaki NISHIMURA

小番 昭宏\*\*\*  
Akihiro KOTSUGAI

朝比奈 大輔\*  
Daisuke ASAHINA

---

### 要 旨

---

従来のインクジェットヘッドは、インクタンクにかかる水頭差によってメニスカスを保持し、ピエゾアクチュエーターによる液室の変形によって液滴を打ち出す構成を取っている。そのため、飛ばすことのできる液体には粘度・表面張力共に制約がある。これに対してリコーではGELART JETヘッドと呼ばれるバルブジェット型のインクジェットヘッドを開発しており、ピエゾアクチュエーターによるニードルの開閉により、インクタンク内で加圧されたインクをノズルから噴射する構成によって、0.5 MPaに及ぶ圧力で駆動可能となっている。これによって、高粘度液体の吐出、印字ギャップの拡大を可能にしている。我々はこのバルブジェット型のインクジェットヘッドを更に発展させ、高温、高圧条件（最大圧力40 MPa、最高温度250℃）で、インクに限らず液体・気体・超臨界流体など、多様な流体を安定吐出できる新規なヘッド「パルスジェットヘッド」を開発した。本論文では、その技術内容と、パルスジェットヘッドによって従来吐出制御が困難であった圧縮性流体と熔融樹脂を吐出制御した成果を報告する。

### ABSTRACT

---

Conventional inkjet heads maintain the meniscus by applying the hydrostatic pressure difference to the ink tank and ejecting droplets by deforming the ink chamber using a piezo actuator. However, this results in limitations on both the viscosity and surface tension of the liquids that can be ejected. To overcome this, Ricoh has developed a valve jet-type inkjet head called the GELART JET head, which ejects pressurized ink from the ink tank through the nozzle by opening and closing a needle with a piezo actuator. This configuration enables operation at pressures up to 0.5 MPa, allowing for the ejection of high-viscosity liquids and an increased printing gap. We have further developed this valve jet-type inkjet technology into a pulse jet head that can operate under even higher pressure and temperature conditions. The maximum supported pressure is 40 MPa, and the maximum temperature is 250°C. In this paper, we report on the technical details of this development and present the results demonstrating that the pulse jet head enables controlled ejection of compressible fluids and molten resins, which were previously difficult to control with conventional ejection methods.

---

\* 技術統括部 先端技術研究所 IDPS研究センター  
Industrial Digital Printing System Institute, Advanced Technology R&D Division, Technology Management Division

\*\* 技術統括部 先端技術研究所 CoE  
Center of Excellence, Advanced Technology R&D Division, Technology Management Division

\*\*\* 技術統括部 先端技術研究所 技術経営センター  
Management of Technology Center, Advanced Technology R&D Division, Technology Management Division

# 1. 背景と目的

従来のインクジェットヘッドは、インクタンクにかかる水頭差によってメニスカスを保持し、ピエゾアクチュエーターによる液室の変形によって液滴を打ち出す構成を取っている<sup>1)</sup>。そのため、飛ばすことのできる液体には粘度・表面張力共に制約がある。

これに対してリコーではGELART JETヘッドと呼ばれるバルブジェット型のインクジェットヘッドを開発している<sup>2)</sup>。バルブジェット型は、ノズルをニードルによって直接封止することで流体を制御する仕組みを持っており、流体制御用のバルブと似た構造であることからこの名前が付けられている。ピエゾアクチュエーターによりニードルを開閉することで、最大0.5 MPaの圧力の流体をノズルから噴射、吐出制御できる。これによって、高粘度液体の吐出、印字ギャップの拡大を可能にしている。両形式のヘッドの吐出方法についてFig. 1に示した。

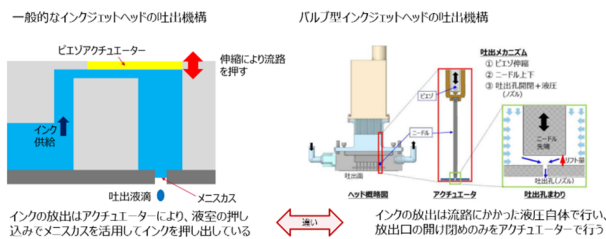


Fig. 1 Comparison of Head Jetting Methods<sup>3)</sup>.

このバルブジェット型のインクジェットヘッドは従来のインクジェットヘッドに比べると、吐出OFF時に液面が露出しないため、高い液圧で使用可能であるが、その液の内圧は~0.5 MPa程度、温度領域も35°C程度であるため、使用できる液体の粘度に100 mPa·sまでといった制限があった。しかし、市場では更なる高粘度流体や粒子を含む流体の制限を問わない吐出が求められている。そこでリコーでは、熔融樹脂や、圧縮性流体の一種である超臨界流体も扱うことが可能な超高压・高温下で使用できるヘッドの開発を行った。今回開発したパルスジェット

ヘッドの温度圧力領域、対応粘度領域をリコーの産業用インクジェットヘッドと比較したものがTable 1である<sup>4)</sup>。

Table 1 Pressure, Temperature and Viscosity Range Supported by Each Head<sup>4)</sup>.

ヘッド	最大圧力	最大温度	対応粘度
MH5420	~0.1 MPa	~60 °C	~12 mPa·s
GELART JET	~0.5 MPa	~35 °C	~30 mPa·s
パルスジェット	~40 MPa	~250 °C	~100,000 mPa·s

今回開発したパルスジェットヘッドは最大圧力が40 MPa、最大温度が250°Cであり、現時点で吐出が確認できている最大粘度は100,000 mPa·sの熔融ポリエステルで、従来ヘッドと比べてはるかに大きい。インクジェット以外の吐出機構としてディスペンサーやスプレーガンが挙げられるが、それらと共にパルスジェットヘッドの圧力と温度の対応領域をFig. 2に示した。

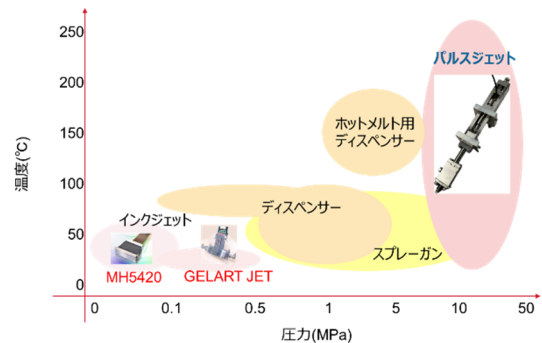


Fig. 2 Supported Range of Each Discharge Mechanism<sup>5)</sup>.

パルスジェットヘッドは、従来の吐出機構で対応することが困難な領域をカバーしている。圧力領域が数十MPaを扱うことが可能であるので、従来吐出制御が困難であった超臨界流体といった圧縮性の流体も扱うことが可能である。

本報では、リコーのヘッドや流体シミュレーション技術を用いることにより、超高压・高温に対応可能なヘッドを設計したこと、また、パルスジェットヘッドを用いることによって吐出制御が可能な熔融樹脂、超臨界流体への応用について報告する。

## 2. パルスジェットヘッドの設計

### 2-1 ヘッドの基本構成

パルスジェットヘッドはGELART JETヘッドと同じくバルブ式を採用している。Fig. 3に示すようにアクチュエーターにはピエゾアクチュエーターを採用し、アクチュエーターに電圧をかけた際の伸縮によって、接続されたニードル先端が移動する。これによって、ニードル先端が弁座（タブレット内の流路）をふさぐことで、吐出・封止を切り替えている。パルスジェットヘッドはその構成に加えて、弁座とニードルの初期位置を調整するためのピエゾ位置調整・固定機構とセラミックスペーサーを保持している。スペーサー、ニードル、タブレット、アクチュエーター、シール部材を除き、大部分をSUS部材の機械的な接続で作成しており、耐圧性を高めている。

初期位置を適切に設定することで弁座とニードルの接触位置が担保され、セラミックスペーサーによってアクチュエーターが流体の熱から守られる。

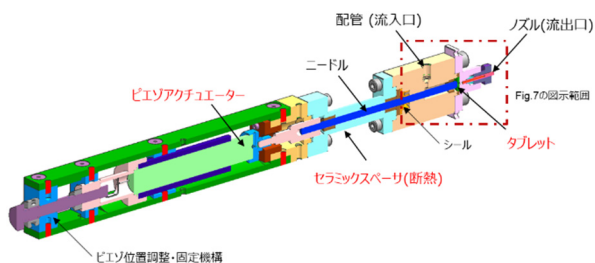


Fig. 3 Basic Structure of the Pulse Jet Head.

後ほど詳細をFig. 7で図示するが、導入した流体は配管（流入口）からノズル（流出口）へ流れていき、セラミックスペーサーの先にあるシールによってアクチュエーター側へ流体が侵入しない構成である。

従来よりも高圧・高温に対応可能にするために形状など構造が大きく異なるため、シミュレーションを用いた検討を行い、断熱性・耐圧性を確かめた。その結果について報告する。

### 2-2 シミュレーションによる解析

パルスジェットヘッドにはアクチュエーターが使用されており、この部材が最も熱に対して弱いものであり、加熱されると電圧をかけた際にアクチュエーターの発生力が変化するため制御が困難になる。今回使用しているアクチュエーターは80℃以下での使用を想定されているものである。そこで、シミュレーションによって流路側が200℃に熱されている時のアクチュエーターへの影響を解析した。その他の部材の表面は、空気の熱伝達率（自然対流）を5 W/(mm<sup>2</sup>・K)として定常計算によって解析を実施した。Fig. 4が定常状態時の温度分布結果である。

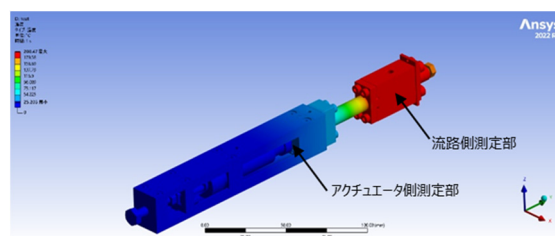


Fig. 4 Heat Transfer Simulation of the Head<sup>5)</sup>.

流路が200℃に加熱されてもスペーサーにより流体の熱がアクチュエーターまでほとんど到達していない。シミュレーションの結果からは30℃以下を保つことが可能であることが示されている。

この結果を元に実際に作成したヘッドの先端を加熱した際、Fig. 4に示す2点で温度を測定した結果をFig. 5に示す。流路側を250℃に60分以上加熱してもアクチュエーター側の温度が50℃程度で飽和することが分かった。

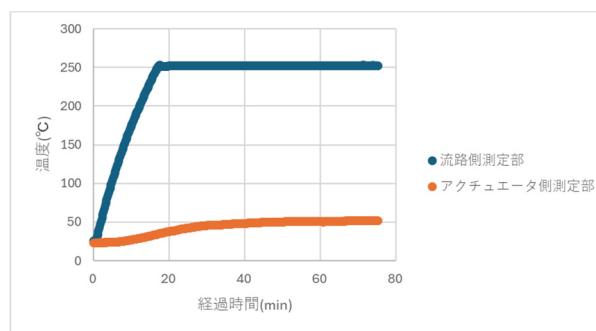


Fig. 5 Temperature Change of the Piezo Actuator When the Flow Channel Is Heated.

次に、従来のヘッドよりも大幅な高圧条件下での駆動を想定する。アクチュエーターの発生力は、弁座開閉時にニードルにかかる力 (Fig. 6) に対し、十分打ち勝てるものにする必要がある。

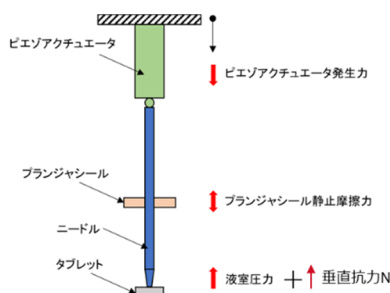


Fig. 6 Force Applied to the Needle.

ここで、アクチュエーターに電圧を印加しない時のタブレットとニードル先端の距離を $r$ 、ニードル先端の電圧をかけた際のアクチュエーター本来の伸び量を $x$ 、アクチュエーターの剛性を $T$ 、プランジャーシールとの静止摩擦力を $f$ 、液室の圧力を $P$ 、ニードルの断面積を $S$ とすると、

$$(x - r) \times T - P \cdot S - f = N$$

閉止できている際は垂直抗力 $N$ が0より大きいので、

$$x > \frac{(P \cdot S + f)}{T} + r$$

となる。 $P$ 、 $S$ 、 $f$ が与えられ、最低限必要な開度 $r$ が決まっている時、アクチュエーターの剛性 $T$ と、電圧を印加した時の最大伸び量 $x = x_{\text{Max}}$ の間に上記の式が成り立つアクチュエーターを採用すれば封止することが可能である。Table 2に条件を満たす一例を記す。

Table 2 A Condition Example of Successful Closure.

$P$	25 MPa
$S$	4 mm <sup>2</sup>
$f$	60 N
$r$	30 μm
$x_{\text{Max}}$	50 μm
$T$	30 N/μm

次に必要なニードルと弁座の開き (開度) について考えるにあたり、流体シミュレーションを行った結果をFig. 7に示す。流体が存在する位置をカラーで記載している。

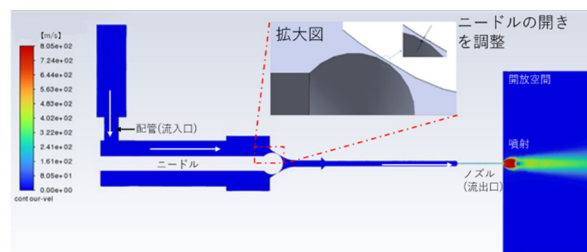


Fig. 7 Flow Velocity Simulation with Respect to Opening Degree.

開度を指定した際にノズルから噴射される流体の流速をカラースケールで表示した結果である。流体の温度と圧力から容器内の圧縮性流体の密度を算出することが可能であるので、流速と密度から、ノズルから噴出する重量を算出することができる。

これらの結果から、必要な吐出量より開度を決定することが可能である。

### 2-3 ニードル・タブレットの形状最適化

ニードルがタブレットと接触する際、下記のFig. 8のように軸ずれが発生すると封止が困難になりリークが発生する。超高圧を扱う際、封止に強い力が必要になったことに加え、断熱のセラミックスペーサーがあることで従来構成よりニードルが長くなったことで軸ずれが発生しやすくなっているが、このような構成は避ける必要があった。

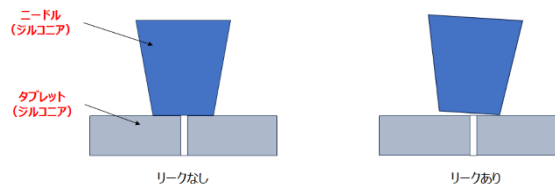


Fig. 8 Leakage Caused by Needle Misalignment.

特にジルコニアなどの硬いセラミックを使用する場合は封止により強い接触力が必要になってしまう。接触面をやわらかい部材に変更することも考えられるが、摩耗や潰れなどでリークが発生する課題があった。そこでFig. 9のように円錐状の穴に曲率のある形状のニードル先端を押し付けて封止を行うことで、より弱い力での封止が可能であるかシミュレーションで確認した。

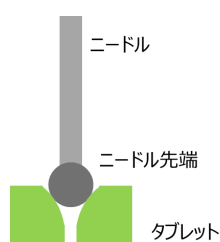


Fig. 9 Improvement of Needle and Tablet Shape.

軸ずれによりニードルの進入角が1°ある際の弁座との接触力シミュレーション結果を以下のFig. 10に示す。ニードルの周囲に円形の均一な接触力が発生していることが見て取れる。

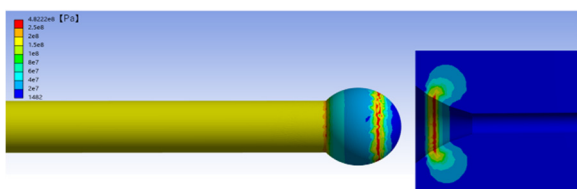


Fig. 10 Contact Force between Needle and Tablet.

ニードルの先端形状については平板（従来形状）、球形、円錐など様々なものが考えられる。代表的な3種類を作成し、押し付け力を振った際の漏洩が発生する圧力を実測した結果をFig. 11に示した。ニードルの先端を円錐もしくは球形にすることでより弱い押し付け力で漏洩を防止できることが分かった。

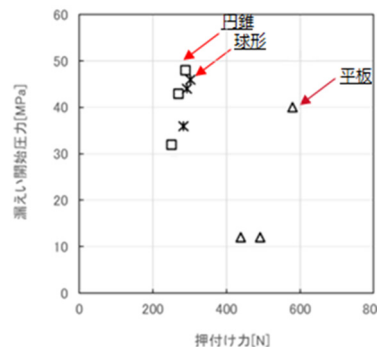


Fig. 11 Leakage Pressure Relative to Contact Force Depending on Needle Shape.

### 3. 吐出評価

#### 3-1 波形設計

印加可能な周波数を決定するために、アクチュエーターを故障させない基本波形を作成した。急峻に電圧値を上げることによって大きな電流を急に流してしまうとショートの原因になる。以下のFig. 12のように波形の波高値 $V$ 、開時のパルス幅 $P_w$ 、電圧立ち上げ時間 $T_r$ 、立ち下げ時間 $T_f$ 、クローズの保持時間 $T_H$ とする。

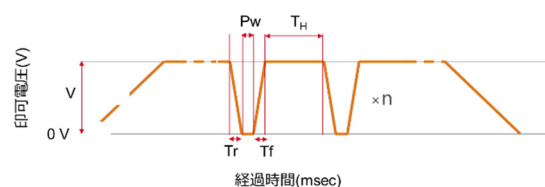


Fig. 12 Applied Voltage Waveform to the Actuator<sup>6)</sup>.

今回、ヘッドは電圧印加保持によってクローズ状態として設計しており、開時は電圧を下げた時である。電圧の立ち上げ・立ち下げ時間 $T_r$ と $T_f$ はアクチュエーターへ流れる電流値上限によって、故障しない波形には以下の式の制約がある。

アクチュエーターに流れる電流の限界値を $I_{Max}$ 、アクチュエーターの電気容量を $C$ 、ある時間間隔 $t$ に置ける電圧変化を $\Delta V$ とする<sup>6)</sup>。

$$I_{\text{Max}} > \frac{C \cdot \Delta V}{t}$$

ここで、 $\Delta V = V$ 、 $t = T_r$ とすると、 $T_r$ の制約として以下の式が得られる。

$$T_r > \frac{C \cdot V}{I_{\text{Max}}}$$

$C$ と $I_{\text{Max}}$ はアクチュエーターの仕様値によって決まるため、電圧値 $V$ を決めることで $T_r$ の最小値が決定できる。 $T_r$ と $T_f$ については同様の条件で決定できるので、 $f_{\text{max}}$ は以下を満たす。

$$f_{\text{Max}} = \frac{1}{T_r + T_f + P_w + T_H} < \frac{1}{2T_r} < \frac{I_{\text{Max}}}{2C \cdot V}$$

以上の条件を考慮し、実際に吐出評価を行った。

### 3-2 吐出評価

前節でアクチュエーターを故障させないための条件を求めたが、実際に波形として使用するにはヘッドから吐出される材料の定量性が重要であり、直接的に吐出量に作用するニードルの開度を確認する必要がある。しかし、加圧された状態で開度を直接観測することが困難であったため、今回は純水を用いて吐出量を測定し、測定範囲内で吐出をコントロールできていることを確かめた。吐出評価はFig. 13に示す装置構成で行った。

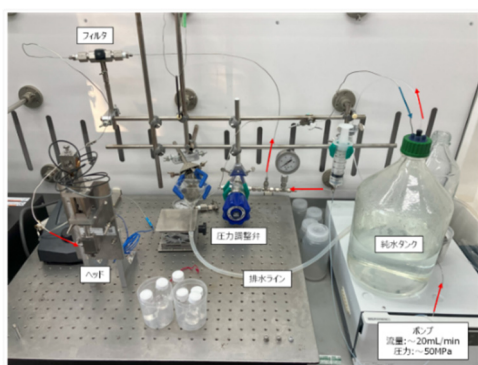


Fig. 13 Experimental Setup for Discharge Testing.

ポンプにはPU-4086 (JASCO製) のHPLC用ポンプを用いて送液限界20 mL/minで送液し、保圧弁でヘッドの流路圧を調整しながら吐出を行った。

40 MPa、常温条件下で10~250 Hzの一周期分の吐出量をプロットした結果をFig. 14に示す。入力波形は波高値 $V = 90$  V、立ち上げ時間 $T_r$ 、立ち下げ時間 $T_f$ 、パルス幅 $P_w$ は全て1 msecとした。

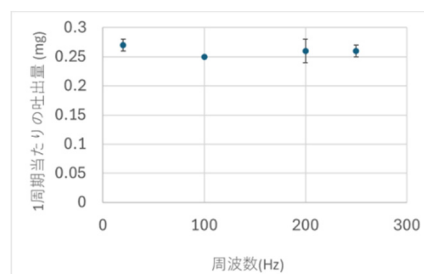


Fig. 14 Discharge Amount per Cycle as a Function of Frequency.

波形生成にはマルチファンクションジェネレータWF1973とHigh Speed Bipolar Amplifier HSA4052 (共にエヌエフ製)を用いた。各周波数で大きな変化がないことが確認できた。20~250 Hzにおいてニードルの開度・追従性には問題ないと考えられる。

### 3-3 耐久性の検証

後に記述する染色用途では、高圧下での連続使用が想定されるため、40 MPa下での連続駆動後にも液体の漏れやタブレットの割れなどが無いことを確認した。吐出試験と同様にFig. 13の実験系を用いて、 $1 \times 10^7$ 回の駆動を行った。これは1 Hz駆動での平均流量コントロールへの使用を想定したもので、8 h/日、1年での駆動を耐えるために必要となる回数である。温度200°C下で、試験の加速のために100 Hzでの駆動を行った。

$1 \times 10^7$ 回駆動後に、閉止時の圧力の低下がなく、タブレットの割れなども観測されなかった。 $1 \times 10^6$ 回ごとに吐出量の推移を確認した結果をFig. 15に示す。

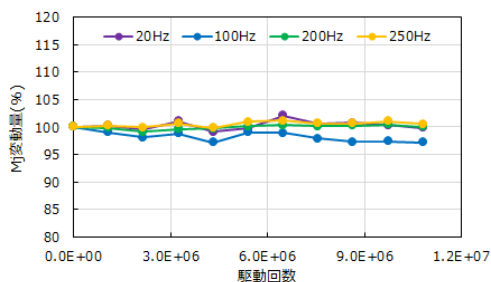


Fig. 15 Transition of Discharge Volume with Respect to Total Number of Discharges.

吐出後のタブレットをヘッドから取り外し、ニードルの接触位置に凹みがないかをワンショット3D形状測定機VR-5000（キーエンス製）を用いて測定した。測定結果をFig. 16に示した。ニードル接触位置を確認したが、凹凸プロファイルの結果を確認しても凹みは確認されなかった。連続駆動耐久性も担保できた。

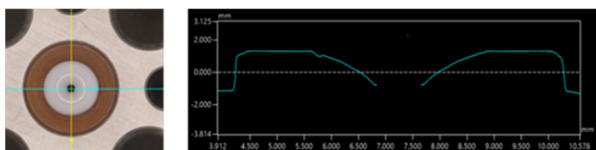


Fig. 16 Microscope Image and Surface Profile along the Blue Line.

## 4. アプリケーション例

### 4-1 高粘度樹脂の吐出制御

パルスジェットヘッドは、従来の高圧吐出装置に比べて、高温・高圧環境での吐出制御が可能である。その特徴を生かして、高粘度の溶融樹脂を吐出制御することが可能であることを確かめた。

Fig. 17に示す装置を用いて、高圧セル内にトナー用の非晶性ポリエステル（溶融粘度100,000 mPa・s）を封入し、ヘッドから吐出を行った。装置は、(1)CO<sub>2</sub>ボンベ、(2)ポンプ、(3)ヒータ、(4)高圧セル、(5)攪拌羽、(6)吐出用バルブ、(7)パルスジェットヘッド、(8)ノズル等で構成されている。高圧セル

は数十MPaの耐圧があり、高圧セル内部でポリエステル、CO<sub>2</sub>を加圧・加熱混合し、超臨界CO<sub>2</sub>によって可塑化された樹脂をノズルから吐出する構成である。高圧セルの温度を150℃、圧力を35 MPa、駆動電圧を125 V、 $P_W$ を5 ms、 $T_r$ 及び $T_f$ を1.5 msに設定し、20 Hzで駆動した。

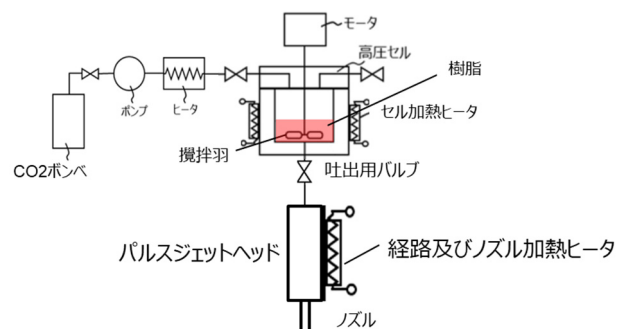


Fig. 17 Resin Discharge System.

樹脂が20 Hzで吐出と閉止を繰り返しノズルから噴射される様子を確認することができた。噴射時の様子を表したものがFig. 18である。スプレー状に樹脂を噴射している様子が見て取れる。

ノズルに撥水加工を行うなど液切れ性を向上させることによって、ジェットディスペンサ<sup>7)</sup>などの非接触による樹脂塗布（接着剤塗布等）に使用することが可能だと考えられる。

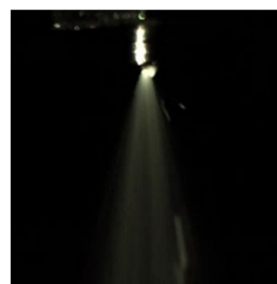


Fig. 18 Discharge State of Molten Resin.

## 4-2 機能性材料の乾式加工

次に、超臨界CO<sub>2</sub>の吐出制御が可能なことを生かして、いくつかの機能性材料を超臨界CO<sub>2</sub>に溶解し噴射することが可能か確認した。

Fig. 17の樹脂の代わりに下記の分散染料3種類とBCA（難燃剤）をそれぞれ個別に封入し、高压セルの温度を135℃まで加熱した上で、CO<sub>2</sub>を加圧混合した。超臨界CO<sub>2</sub>に溶解した機能剤を、圧力を変えてノズルから吐出し、ポリエステル布に一定時間付着させた。付着した機能剤をアセトンで抽出し、吸光度測定によって定量した結果をFig. 19に示した。

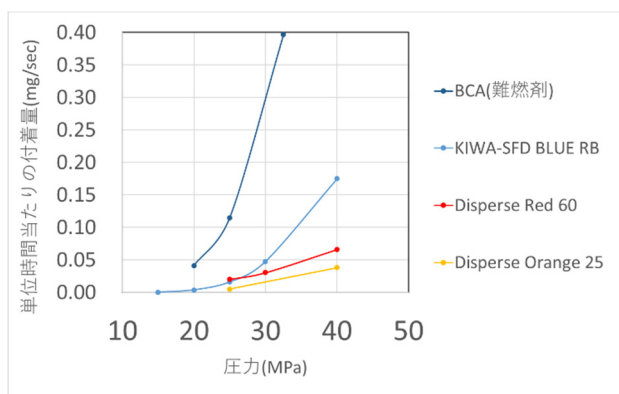


Fig. 19 Pressure Dependence of Deposition Amount per Unit Time for Each Functional Agent<sup>5)</sup>.

CO<sub>2</sub>への溶解のしやすさはそれぞれ異なるものの、高压下で単位時間当たりの吐出量が大きく増加していることが見て取れる。

分散染料についてはRTR47にて報告したように噴射後の布帛を150℃30分間の後加熱することで高い堅牢性を持った濃色での染色物を得ることができ、オレンジの分散染料Disperse Orange 25以外にも、青い染料であるKIWA-SFD BLUE RB、赤い染料であるDisperse Red 60で同様に堅牢性の高い染色物を得ることができた<sup>8)</sup>。乾摩擦堅牢試験のために得た濃色の染色物を示したのがFig. 20である。



Fig. 20 Polyester Fabric Dyed by Dry Heat Treatment after Discharge.

今回は機能剤であるBCA（難燃剤）とジंकピリチオン（抗菌剤）について、噴射後に同様の後加熱を実施したサンプルを得た。BCAやジंकピリチオンなどの機能材料は、無色であるため、染料のように洗浄前後での色変化による定着性評価ができない。

そこで、付着量を大きく振ることができたBCAに対し、TOF-SIMSを使用して繊維内部への浸透状態の断面測定を行った。従来の水系での加工においては吸着量が2.0 wt%程度で加工される。

測定に使用したサンプルは、Fig. 21に示した付着量で、機能材の吸着量が水系での加工品と同程度の濃度になっているものである。

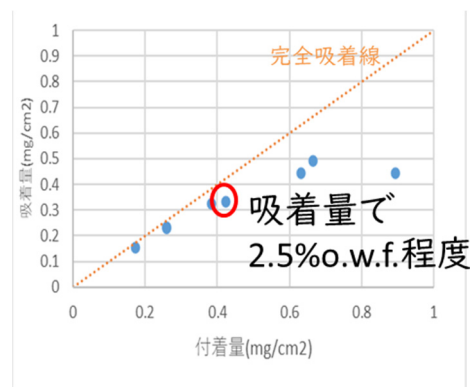


Fig. 21 Amount of Functional Agent Adsorbed on Samples Used for Measurement.

得られたサンプルをエポキシ樹脂で包埋し断面加工を行った。測定条件をTable 3に示した。

Table 3 Measurement Conditions for TOF-SIMS.

装置	TOF-SIMS.5 (ION-TOF社)
Ion Gun	Bi3++ 30kv spectrometry
イオンビーム径	0.5 μm
分析面積	50 μm角
Cycle time	100 μs
測定対象	ポリエステル及び、BCA由来の特徴二次イオンフラグメントピーク

今回は繊維内部からBCAを検出することを目的として、繊維位置（ポリエステル検出部）とBCAのピーク検出位置が一致するかを確認した。結果をFig. 22に示した。

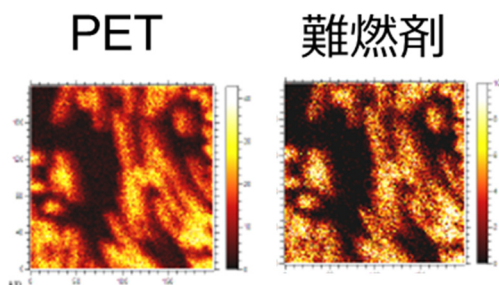


Fig. 22 Distribution Mapping of Fiber Cross-Section Obtained by TOF-SIMS.

ポリエステルのピークが検出される位置から難燃剤のピークが検知されており、断面内に拡散していることを確認することができた。これによって分散染料だけでなく、BCAのような、超臨界CO<sub>2</sub>に溶解しやすい機能性材料を、水や化学物質を使用せず、乾熱加工できる可能性が示唆された。

今回実験に使用したノズルはストレートノズルだが、ラバルノズル<sup>9)</sup>や広幅ノズルなど、ノズル形状を工夫することで噴射範囲を狭める、もしくは広げることも可能である。

## 5. まとめ

超高压・高温下で使用できるヘッドの開発を行うことで、従来の吐出機構では取り扱うことが困難であった熔融樹脂や、超臨界流体を吐出制御することを可能にした。

ヘッドにはバルブジェット型の吐出機構を採用している。断熱性の高いセラミックスペーサーを用いて熱に弱いアクチュエーターを流路の熱より保護することで高温下での使用を可能にし、ニードルとタブレット形状の工夫によって小さい接触力においても高圧力を封止可能な性能を実現した。実際にヘッドを使用し、40 MPa下での純水の吐出において、20～250 Hzの周波数領域で吐出量を制御可能であること、1×10<sup>7</sup>回の連続駆動でも漏れや破損が起きないことを確かめた。

本ヘッドの使用アプリケーションとして、高粘度の熔融樹脂の吐出が可能かを検証し、100,000 mPa・sの高粘度樹脂をCO<sub>2</sub>によって可塑化吐出することが可能であることを確認することができた。加えて分散染料と難燃剤を超臨界CO<sub>2</sub>へ溶解させて噴射可能であり、乾熱プロセスによって水や化学物質を使用しない染色や機能加工が可能であることが分かった。

実用化に向けた課題として、ヘッドの閉止時の押し付け量の一定化や、ニードル位置検知による開度コントロール、吐出波形の最適化などが想定される。

本ヘッドは高压下においても多様な流体を制御することで、これまで実現できなかった高粘度液体の微量塗布や、超臨界流体の制御を可能にできると考えられる。また、高压流体のデジタル制御によって、ムリ・ムダ・ムラを排除することによるコストや環境汚染の低減、作業環境安全性の向上を図り、持続可能な社会の実現に貢献できる技術である。

## 謝辞

---

本成果におきまして、株式会社日華化学様には、評価用のポリエステルニット及び、染色・機能剤試料を提供いただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

---

- 1) 安藤汐視: 加飾・装飾におけるインクジェットヘッド技術, 日本画像学会誌, Vol. 61, No. 5, pp. 502-507 (2022).
- 2) リコー: 高粘度・大粒径含有インクを大液滴で吐出する次世代インクジェット「GELART JETヘッド」, [https://jp.ricoh.com/technology/tech/130\\_gelart\\_jet\\_printhead](https://jp.ricoh.com/technology/tech/130_gelart_jet_printhead) (2024).
- 3) 杉浦貴彦, 玉井崇詞: GELART JETヘッドを用いた自動車塗装品質課題と対策, [https://jp.ricoh.com/-/Media/Ricoh/Sites/jp\\_ricoh/technology/techreport/47/pdf/RTR47a07.pdf](https://jp.ricoh.com/-/Media/Ricoh/Sites/jp_ricoh/technology/techreport/47/pdf/RTR47a07.pdf) (参照2025-09-18).
- 4) リコー: 超高压対応パルスジェットヘッド, [https://jp.ricoh.com/technology/tech/139\\_ultra-high\\_pressure\\_pulse\\_jet\\_printhead](https://jp.ricoh.com/technology/tech/139_ultra-high_pressure_pulse_jet_printhead) (参照2025-09-18).
- 5) 後藤勇喜ほか: 化学工学会第56回秋季大会講演要旨集PA215, 化学工学会 (2025).
- 6) ピーアイ・ジャパン: ピエゾアクチュエータの電気的操作, <https://www.pi-japan.jp/ja/expertise/technology/piezo-technology/properties-piezo-actuators/electrical-operation> (参照2025-09-18).
- 7) Nordson: ジェットディスペンサとは, <https://nordson-web.jp/column/detail03> (参照2025-09-18).
- 8) 後藤勇喜ほか: 超臨界CO<sub>2</sub>を用いたジェットイングによるポリエステル繊維の無水染色技術, [https://jp.ricoh.com/-/Media/Ricoh/Sites/jp\\_ricoh/technology/techreport/47/pdf/RTR47a13.pdf](https://jp.ricoh.com/-/Media/Ricoh/Sites/jp_ricoh/technology/techreport/47/pdf/RTR47a13.pdf) (参照2025-09-18).
- 9) 株式会社計算力学研究センター: ラバルノズルを通過する流れ, [https://www.rccm.co.jp/icem/rccm\\_fluid/posts/laval\\_nozzle/](https://www.rccm.co.jp/icem/rccm_fluid/posts/laval_nozzle/) (参照2025-12-16).