

# 3Dプリンタ造形物の衝撃強度向上に向けた 高粘度インク吐出可能なインクジェットヘッド開発

Greatly Improved Strength for High Viscosity Inkjet 3D Printers

阿部 敬行  
Takayuki Abe

熊澤 謙太郎  
Kentarō Kumazawa

榎本 敦  
Atsushi Makimoto

入江 一伸  
Kazunobu Irie

豊福 洋介  
Yosuke Toyofuku

堀尾 英明  
Hideaki Horio

## 要 旨

3Dプリンタはアジャイル型開発に有効な手段の1つとなる。3Dプリンタ方式のなかでも当社の商品・デバイスに求められる形状精度を満たすためにはインクジェット方式が適している。しかし、この方式は成形品の衝撃強度が低いことが問題であった。これは、インクジェットヘッドで高粘度インクの吐出が可能となれば解決できる。そこで、新たなインクジェットヘッドの構造として、高温かつ温度ばらつきが少ない(60℃±2.0℃)ヒータ構造の設計、およびインクの吐出波形の制御により高粘度インク(30 mPa·s)の吐出を可能とした。本開発の結果、衝撃強度は従来比の3倍となる113 J/mとなった。これにより今後、インクジェット方式の3Dプリンタにより造形されるプロトタイプにおいて、形状見本としてだけではなく、商品の設計評価へ適用を拡大できる。

## Abstract

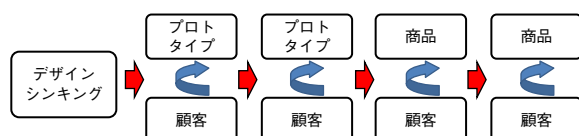
Using a 3D printer is one of the effective tools to create prototype idea in agile development. Our inkjet are suitable for high accuracy products and devices. In a 3D printer, there is an inkjet 3D printing method that excels in high-detail modeling. However, the problem is that the mechanical strength of the shaped product is low. There is a prospect that mechanical properties can be greatly improved if high-viscosity jetting is possible. We report the design of heater structure with high temperature, less temperature variation and the new jetting waveform control made it possible to use high viscosity ink. By the combination of above original technique the mechanical strength was 113J/m, which was three times high compared with the conventional one. This is a product with high utility value as a means to realize wider product design.

## 1. はじめに

市場の要求は多様化しており、顧客の要望を満たす商品を実現するモノづくりが必要となる。顧客の声を聞きながら仕様の完成度を上げる手段として、工程の各段階で計画、設計、試作、評価のサイクルを回すアジャイル型開発(第1図)を取り入れている。

アジャイル開発では商品の設計コンセプトを検証するため、金型を必要としない3Dプリンタを活用し、プロトタイプを作製する。しかし、3Dプリンタで活用できる樹脂は、金型を用いる射出成形樹脂と比較して、アイゾット衝撃強度<sup>(注1)</sup>(以下、衝撃強度)が低い。そのため、落下時および使用時の耐久性の検証などができない。

本稿では、アジャイル型開発に求められる成形品の衝



第1図 アジャイル型開発  
Fig. 1 Agile development

撃強度を満たす3Dプリンタ用のインクジェットヘッドの開発について述べる。

## 2. 3Dプリンタの概要

### 2.1 3Dプリンタの方式

アジャイル開発において、プロトタイプに要求される事項を以下に示す。

- 微細な形状精度 (例えば、100 μm以下の微細構造)
- 複数の材料構成 (例えば、複数色のデザイン見本)
- 商品設計と衝撃強度の相関を事前に検証

第1表に樹脂用3Dプリンタ方式と上記要求の実現可否を判定した結果を示す。

FDM (Fused Deposition Modeling) は、熱可塑性材料を200℃以上の高温で溶融させて成形する工法である。そのため、ノズル径は加熱により形状が維持できるように100 μm以上と大きく、微細形状の造形には不向きとなる。

(注1) 試験片に振り子式打撃ハンマーを当て、破壊に要したエネルギーを試験片の幅で割って求める。応力を集中させるため試験片にノッチ(切り欠き)を設ける場合もある。

第1表 樹脂用3Dプリンタ方式比較

Table 1 Comparison of 3D printer methods for resin

項目	方式	FDM (Fused Deposition Modeling)		DLP (Digital Light Processing)		インクジェット	
		ノズル 熱可塑性樹脂 ステージ	ステージ	ステージ 光硬化型 液体材料 プロジェクタ	UVランプ IJヘッド UVインク ステージ	UVランプ IJヘッド UVインク ステージ	UVランプ IJヘッド UVインク ステージ
形状精度 [ $\mu\text{m}$ ]	$\leq 100$	×	$\geq 100$	○	14	○	30
材料	複合	×	単一	○	複合	×	単一
衝撃強度 [ $\text{J/m}$ ]	$\geq 100$	×	93	×	35	×	61
メリット	-	・ 衝撃強度が高い		・ 造形速度が速い ・ サポート材が不要		・ 形状精度が高い ・ 硬化収縮が小さい	
デメリット	-	・ 形状精度が低い ・ 積層界面の強度が低い		・ 硬化収縮が大きい		・ 衝撃強度が低い	

DLP (Digital Light Processing) 方式は、光硬化型液体材料を充填した浴槽の液面を光照射し、界面を硬化する工法である。そのため、2種類以上の材料を使用できない。

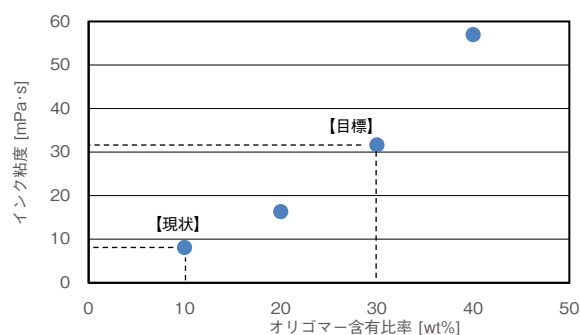
インクジェット (以下、IJ) 方式は一般的に $50\ \mu\text{m}$ 以下の小径ノズルを使用して紫外線硬化型インク (以下、UVインク) を吐出し、高さ方向に積層を繰り返して造形する。そのため、微細形状の形成には適していることがわかるが、衝撃強度は低い。

この結果より、前述の3つの項目すべてを満たす方式は、現在、市販されているシステムでは存在しないことがわかる。しかし、そのなかで、IJ方式は衝撃強度の課題を解決することができれば、すべての要求項目を満たす可能性がある。そこで、IJ方式による成形品の衝撃強度の目標値を射出成形樹脂として広く使われているABS (アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン) 樹脂の下限値である $100\ \text{J/m}$ 以上とした。

## 2.2 IJヘッドとUVインク粘度の関係

IJ方式が他の3Dプリンタ方式と比較して衝撃強度が低い理由は、吐出可能なインクの粘度に限界があるためである。UVインクはIJヘッドで吐出可能な粘度 ( $10\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ ) 以下となるように高分子量体 (以下、オリゴマー) の含有率を下げ、低分子量体 (以下、モノマー) の含有率を高くしている。60°Cにおける、オリゴマー含有比率とインク粘度の関係の測定値を第2図に示す。

一方、成形品の衝撃強度は、オリゴマー含有率が高いほど分子間の結合性が強くなるため大きくなる。化学的には、オリゴマー含有率と強靱 (きょうじん) 性は比例関係にあるとされている。そのため、オリゴマー含有比率を3倍にすることで衝撃強度が現状の3倍になると仮



第2図 オリゴマー含有比率とインク粘度の相関

Fig. 2 Relationship between oligomer content and ink viscosity

定し、 $30\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ の高粘度インクを吐出できることを目標とした。

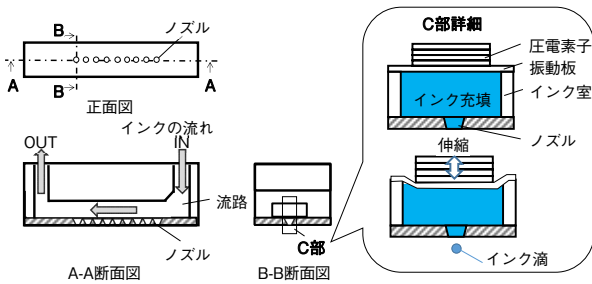
本開発では、オリゴマー含有比率を高くした高粘度インクを吐出可能とすることで、成形品の衝撃強度が高い3Dプリンタ造形を検証する。

## 2.3 IJヘッドの基本構成

IJヘッドの基本的な構造と動作原理を第3図に示す。IJヘッドには循環型IJヘッド、非循環型IJヘッドの2通りがある。

循環型IJヘッドは、インクがINから入り、流路を通過して複数のノズルへ供給される。インクは常に循環しており、ノズルから吐出するインク以外はOUTから回収されポンプなどの循環動力源により、再びINへ入る。一方、非循環型IJヘッドはOUTが塞がれており、インクがIJヘッド内を循環しない構造である。

IJヘッドを動作させる基本構成は第3図中のC部詳細に示すとおり、ノズル、インク室、振動板、圧電素子で形



第3図 インクジェットヘッドの基本概要

Fig. 3 Basic composition of the inkjet head

成される。圧電素子に電圧を印加することで圧電素子が伸縮し、ノズルからインク滴が吐出する。IJヘッドは一般的に100以上のノズルを有しており、安定した吐出をするためにはすべてのノズルにおいて粘度などのインク物性が均一であることが必要である。

当社製IJヘッドは600ノズルの循環型IJヘッドであり、ノズル表面でのインク乾燥によるノズル詰まり、および粒子含有インクの凝集・沈降を発生させずに吐出できることが特長である。

### 3. 循環型IJヘッドの高温均一加熱

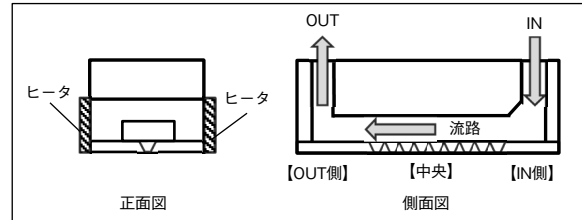
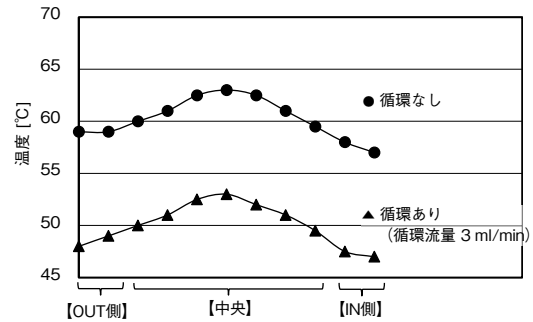
#### 3.1 循環型IJヘッドの温度分布

高粘度インクを吐出可能とするためには、インクを高温に加熱して吐出時の粘度を下げる方法がある。しかし、循環型IJに適用するには下記の2つの課題がある。

- インクの保温性が低く、IJヘッド全体の温度を高温に維持すること
- すべてのノズルで温度を均一にすること

循環型IJヘッドの加熱による温度分布を把握するため、「循環あり」、「循環なし」の違いによるIJヘッド内のインク温度をシミュレーションした結果を第4図に示す。シミュレーションモデルでは、IJヘッドの筐体(きょうたい)側壁に加熱用ヒータ(以下、ヒータ)を取り付けた。ヒータの設定温度は、IJヘッド内のインク温度が60℃となるように、狙い値より高い65℃とした。

「循環あり」では、温度が最も高い中央でもヒータ設定温度に対して10℃以上低く、IN側とOUT側ではさらに5℃以上低温である。温度ばらつきは±3℃であった。



第4図 IJヘッド内のインク温度

Fig. 4 Ink temperature in the IJ head

#### 3.2 高温均一加熱が可能となる循環型IJヘッドの設計

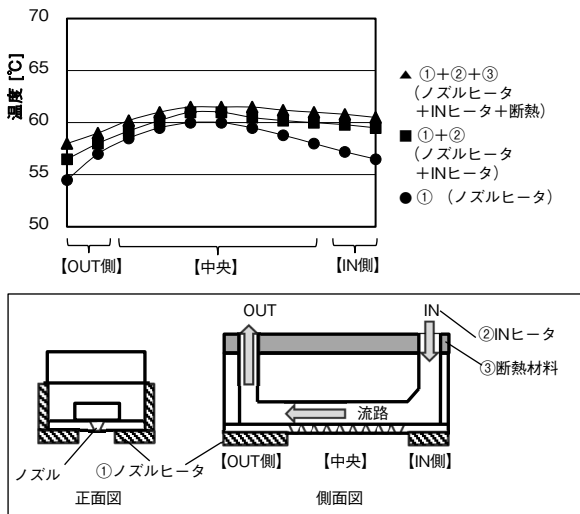
IJヘッドの加熱温度は、インクが揮発あるいは変質しない70℃以下で、かつ600個のノズルが安定して吐出できる必要がある。当社製IJヘッドにおいて、安定した吐出を実現するためには、インクの粘度ばらつきは±1.5 mPa・s以下であることが必要のため、ヘッド内温度の目標を60℃±2.0℃とした。これは、インクは1℃あたり粘度が0.6 mPa・s変化することに基づき設定した。1箇所ヒータ配置では温度分布が発生するため、新たに設計するIJヘッドは、複数かつ最少数のヒータを設けることとした。下記①～③の構成を各々1つずつ追加した場合の温度シミュレーションの結果を第5図のグラフに示す。下記の①～③は第5図のグラフおよび構成図と対応している。なお、循環流量は第4図と同じ3 ml/minとした。

- ① ノズル近傍の温度低下、温度ばらつきを抑制するため、ノズル表面へヒータを設ける。
- ② IN側の温度低下を防止するため、IN側のインク供給部にヒータを設ける。
- ③ 端部(IN, OUT側)の温度低下を妨げるため、セラミック材料で断熱性をもたせる。

第4図の循環ありのグラフと比較して、①条件では温度低下の抑制とIN側、中央、OUT側すべての温度ばらつきの抑制ができており、温度ばらつきは±2.8℃となる。また、①+②条件では、さらにIN側の温度低下が防止できており、温度ばらつきは±2.3℃となる。さらに③を追加した条件では、IN側とOUT側の温度低下が抑制され、温度は60℃±1.8℃となり、目標値を満たすことができる。

このモデル(①+②+③)が高温均一加熱に効果があることを確認し、シミュレーションモデルと同じ構成と

なる検証用IJヘッドを作製した。



第5図 新たに設計したIJヘッド内のインク温度  
Fig. 5 Ink temperature in the new design IJ head

#### 4. 圧電素子の高出力化

高粘度インクの吐出には高温均一加熱に加えて、駆動源となる圧電素子の高出力化が必要となる。当社製IJヘッドの圧電素子には積層型PZT (Pb (Zr, Ti) O<sub>3</sub>) を使用している。圧電素子の変位は下記の計算式で示され、積層数を増加することより変位量が増え、出力が高くなる。

$$\text{変位 } \lambda = \delta \cdot T \dots\dots\dots (1)$$

$\delta$ : 歪 (ひず) み,  $T$ : 積層数

しかし、積層数を増やすと吐出の応答性が下がる。そのため、過渡現象を考慮して、応答性の低下を最小限にする最大積層数を設計した。過渡現象とはコンデンサに電圧を印加した場合、一定時間が経過し定常状態に戻るまでの挙動のことである。過渡現象の長さを表す時定数  $\tau$  は一般的に下式で示される。

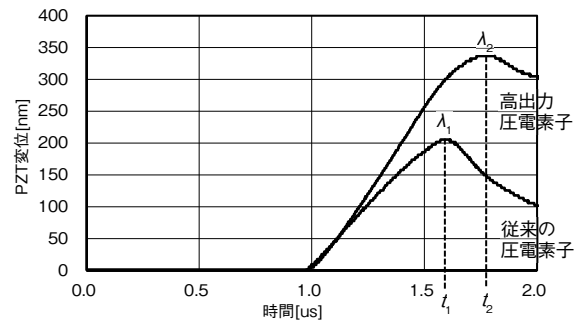
$$\tau = CR \dots\dots\dots (2)$$

$$R = 0.623E \dots\dots\dots (3)$$

$C$ : コンデンサ容量,  $R$ : 抵抗,  $E$ : 電圧

設計するための前提条件として、 $R=一定$ ,  $E \propto \lambda$ , 応答性の低下が10%以下となるよう設定した。従来の圧電素子のコンデンサ容量を $C_1$ , 変位を $\lambda_1$ , 高出力化する圧電素子のコンデンサ容量を $C_2$ , 変位を $\lambda_2$ とすると $C_2/C_1 = \lambda_2/\lambda_1 = 1.6$ となり、積層数は従来の圧電素子に比べて1.6倍に増やす必要がある。第6図に30Vの電圧を印加した従来の圧電素子および積層数を1.6倍に高出力化した圧電素子 (以下、高出力圧電素子) の変位を測定した結果を示す。

なお、図中では従来の圧電素子に電圧を印加した応答時間を $t_1$ , 高出力圧電素子の応答時間を $t_2$ と記しており、前提となる応答性低下10%以下の条件を満たしている。



第6図 圧電素子の変位測定結果  
Fig. 6 Measurement result of PZT

#### 5. 高粘度インクの吐出波形設計

##### 5.1 高粘度インクを吐出するための課題

高粘度インクを吐出するためには、インク滴の状態を制御する必要がある。インクは高粘度になるほど糸曳(ひ)きが長くなる傾向があり、これが空中で分解するとミストを発生させる。ミストは落下速度が遅く、空中を浮遊し、着弾が制御できなくなるため造形性を悪化させる原因になる。

糸曳き (以下、リガメント) と粘度は比例関係にあり、Maxwellモデルで表されることが知られている。

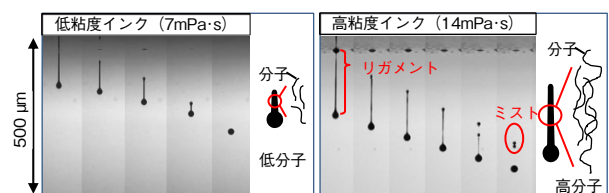
$$L \propto V \cdot \eta \cdot K \dots\dots\dots (4)$$

$L$ : リガメント長さ,  $V$ : 吐出速度,

$\eta$ : 粘度,  $K$ : 粘弾性

一般的に高分子インクはリガメントが長い傾向にある。その理由は、吐出時に互いの分子が絡み合い、分離しにくい傾向にあるためと考えられている。

第7図は、実験で低粘度インクと高粘度インクのリガメントを比較した結果を示す。低粘度インク (オリゴマー5wt%相当) に比べ、高粘度インク (オリゴマー15wt%相当) のリガメントが長いことが確認できた。



第7図 インク粘度と吐出状態の比較  
Fig. 7 Comparison of ink viscosity and jetting status



今回の検証で用いるインクは60℃で粘度30 mPa・sとなり、リガメントが長くなることが想定される。そのため、吐出時のリガメントを抑制することが課題となる。

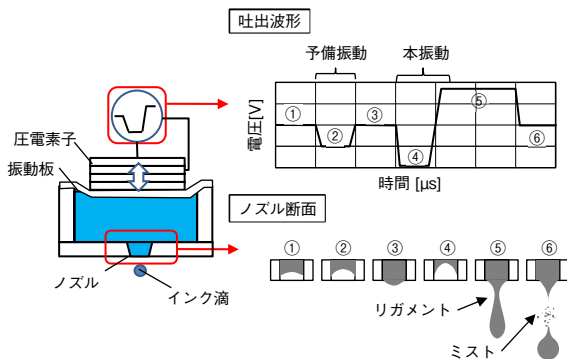
## 5.2 リガメントの抑制

ノズルから吐出されるインク滴を吐出波形で制御することによる、リガメントの抑制について検討した。

第8図に吐出波形（上段）とIJヘッドのノズル断面におけるインク挙動（下段）の相関を示す。ノズル断面のインクは表面張力によって保持されている。このインクの液面状態をメニスカスという。吐出波形は圧電素子に電圧が印加され、圧電素子の歪（ひず）みは振動板を介してインクに伝搬する。高電圧を印加すると圧電素子の伸びが大きくなり、振動板が押し込まれる量が増える。

インク吐出時にはノズル部でインクのせん断速度が $10^6 \text{ S}^{-1}$ オーダーとなり、粘度計測装置の測定限界である $10^4 \text{ S}^{-1}$ を超える。そのため、実際にインクの吐出状態を観察し、調整することが重要となる。

具体的には、圧電素子へ印加する電圧を変えながら圧電素子の伸縮量を調整し、これに伴うインク滴の吐出状態をカメラで観察し合わせ込んでいく。



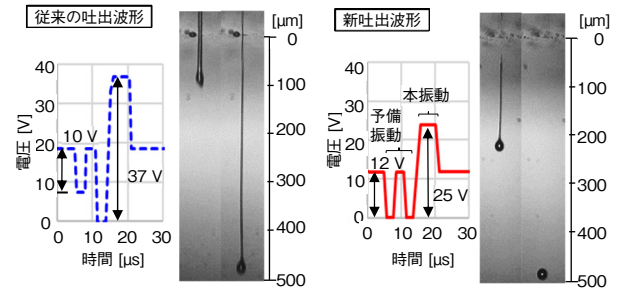
第8図 吐出波形とインク挙動の相関  
Fig. 8 Correlation between the jetting waveform and ink behavior

吐出波形は、基本的に予備振動と本振動から設計される。予備振動は小さなメニスカス挙動をつくり、本振動では予備振動と共振タイミングを合わせることで圧電素子の力を効率的にインクに伝え吐出させている。

オリゴマー含有比率30 wt%の高粘度インクは、従来の低粘度インクに使用している吐出波形で吐出するとリガメントは約500  $\mu\text{m}$ と長くなる。第9図に吐出波形とインクの吐出状態を観察した画像を示す。

高粘度インクを短リガメント化する手段として、リガメントに関係する(4)式の $V$ ,  $\eta$ ,  $K$ のなかで吐出時の $\eta$ を低粘度化する方針を採った。このインクは、流速が速いほど低粘度化する特性をもつ擬塑性流体であるため、

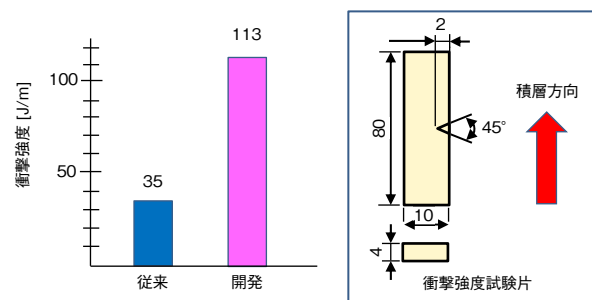
ノズル面のせん断速度を速くし、吐出時のインクを低粘度化した。予備振動の電圧を10Vから12Vに上げ、多段にすることで、リガメントは従来の吐出波形に比べ約1/2に短縮でき、ミストのない吐出状態が得られた。結果、2段の予備振動で、本振動は従来の印加電圧と比較して30%低減できた。これは、本波形設計により吐出時のインク粘度を低粘度化できたためと考察できる。



第9図 吐出波形とインク吐出の状態  
Fig. 9 Jetting waveform and ink jetting state

## 6. 高粘度UVインクの衝撃強度評価結果

上述の高粘度インクを吐出可能とするIJヘッドを搭載した3Dプリンタを用いてオリゴマー含有比率30 wt%のUVインクで評価試験片を作製し、衝撃強度を測定した。評価数は5個である。第10図に測定結果の平均値を示す。衝撃強度は113 J/mとなり、目標値を達成することができた。



第10図 開発試作の衝撃強度結果  
Fig. 10 Izod strength results of prototype models

## 7. まとめ

樹脂用IJ方式3Dプリンタの成形品の衝撃強度の課題に対して、高粘度インクが吐出可能となるIJヘッドを作製することで、プロトタイプ衝撃強度を従来比の3倍にできることを検証できた。従来は射出成形品で衝撃強度を

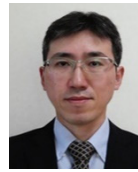
評価していた工程が、II方式3Dプリンタによるプロトタイプで評価できるようになった。金型を必要としない理想のアジャイル開発ができるようになり、落下試験などの評価結果を設計にフィードバックすることで、設計開発サイクルの短縮を図っていく。

また、吐出可能となるインクの粘度範囲を拡大できたことは、インク的设计自由度が広がることになる。例えば、オリゴマー含有率の高いインクを使用できることで、引張強度、曲げ弾性率などの機械特性も従来以上に向上させることが期待できる。

### 参考文献

- [1] 柳生浄勲, 3Dモノづくり, 井水治博 (編), 日刊工業新聞社, 東京, 2017.
- [2] 山口修一, 産業用3Dプリンターの最新技術と先進分野への応用, 高薄一弘 (編), 技術情報協会, 東京, 2018.
- [3] 細野聡, 最新インクジェット技術ノウハウ集, 高薄一弘 (編), 技術情報協会, 東京, 2005.
- [4] 酒井真理, インクジェット, 藤井雅彦 (編), 東京電機大学出版局, 東京, 2008.

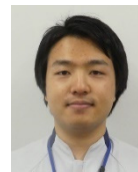
### 執筆者紹介



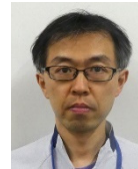
阿部 敬行 Takayuki Abe  
 マニファクチャリングイノベーション本部  
 高度生産システム開発センター  
 Advanced Production System Development Center,  
 Manufacturing Innovation Div.



熊澤 謙太郎 Kentaro Kumazawa  
 マニファクチャリングイノベーション本部  
 高度生産システム開発センター  
 Advanced Production System Development Center,  
 Manufacturing Innovation Div.



楨本 敦 Atsushi Makimoto  
 マニファクチャリングイノベーション本部  
 高度生産システム開発センター  
 Advanced Production System Development Center,  
 Manufacturing Innovation Div.



入江 一伸 Kazunobu Irie  
 マニファクチャリングイノベーション本部  
 高度生産システム開発センター  
 Advanced Production System Development Center,  
 Manufacturing Innovation Div.



豊福 洋介 Yosuke Toyofuku  
 マニファクチャリングイノベーション本部  
 高度生産システム開発センター  
 Advanced Production System Development Center,  
 Manufacturing Innovation Div.



堀尾 英明 Hideaki Horio  
 マニファクチャリングイノベーション本部  
 マニファクチャリングソリューションセンター  
 Manufacturing Solution Center,  
 Manufacturing Innovation Div.