

## PaperPrinting

### —紙のデジタルファブリケーションとデザイン—

伊達 亘\*, 西原 由実\*\*, 笥 康明\*\*

(2020.2.29 受理)

## PaperPrinting

### —Digital Fabrication of Paper and Design Applications—

Wataru DATE\*, Yumi NISHIHARA\*\*, and Yasuaki KAKEHI\*\*

Paper is a material that is used for a variety of applications such as fabrication and documentation. In recent years, there have been many researches that have added new features to paper by applying printing and processing technologies. However, in most of these cases, ink is printed on the surface of commercially available paper, which makes it difficult for users to customize the paper. In this paper, we propose PaperPrinting, a fabrication system that applies the 3D printing method to printing paper itself. In our method, we turn regular paper into a gelatinous material and use a XY plotter for fabricating sheets of paper. With this method, users are able to fabricate customized paper by choosing the materials, designing the shape of the printed paper, and partially changing the materials, which is difficult to achieve by using the existing papermaking method. In this paper, we describe the overview and implementation of PaperPrinting and present several fabricated paper prototypes.

**Keywords** : Digital Fabrication, Paper, Papermaking, Prototyping, design

紙は造形や記録など、幅広い用途で使われている素材である。近年、印刷や加工技術を応用することにより、紙の上に新たな機能を付与する研究が盛んに行われている。これらの多くは、市販されている紙の表面にインクなどを用いて加工を施す方法であり、ユーザが紙そのものの性状を設計することは難しい。本研究では、3Dプリンティングの手法を応用し、紙そのものを素材からデザイン・出力するファブリケーションシステム PaperPrinting を提案する。これは、既存の紙を原料としたスラリー状の素材を、XYプロッタにより出力し紙を造形する手法である。本研究によって、ユーザは欲しい紙を設計するために原料となる紙の選択や、出力される形状をデザインすることと合わせて、部分的に素材を切り替えるといった既存の製紙手法では実現が難しい紙の造作が可能になる。本論では、PaperPrintingの位置付け、実装、およびプロトタイプした成果物としての紙について述べる。

**キーワード** : デジタルファブリケーション, 紙, 製紙, プロトタイピング, デザイン

## 1. はじめに

紙は人類の歴史の中でも重要な発明品のひとつと言える<sup>1)</sup>。紙は色や厚み、サイズなど用途に合わせて様々な種類が開発・販売されており、安価で入手や加工がしやすく、我々の日常生

活にとって欠かせない素材でありツールである。手触りの良さや強度など素材としての紙の改良や開発が続けられていることに加え、近年の竹尾ペーパーショーなどに見られるように<sup>2)</sup>、印刷・加工・素材技術などを駆使して紙の上に、回路や変形・動きなど新たな機能を埋め込む取り組みも活発に行われている<sup>3)</sup>。

本研究のもう一つの背景として、デジタルファブリケーションならびにパーソナルファブリケーションの隆盛がある。3Dプリンタやレーザーカッタなど工作機器の普及や高機能化に伴い、専門家のみならず、より多くの人々がものづくりに関わり、必要なものを必要なだけ作るという多品種適量生産の流れに注目が集まっている<sup>4)</sup>。紙に関しては、これまで既製品を選択・

\* 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科  
〒252-0882 神奈川県藤沢市遠藤 5322  
5322, Endo Fujisawa-shi, Kanagawa 252-0882, Japan

\*\* 東京大学大学院情報学環  
〒113-0033 文京区本郷 7-3-1  
7-3-1, Hongo Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

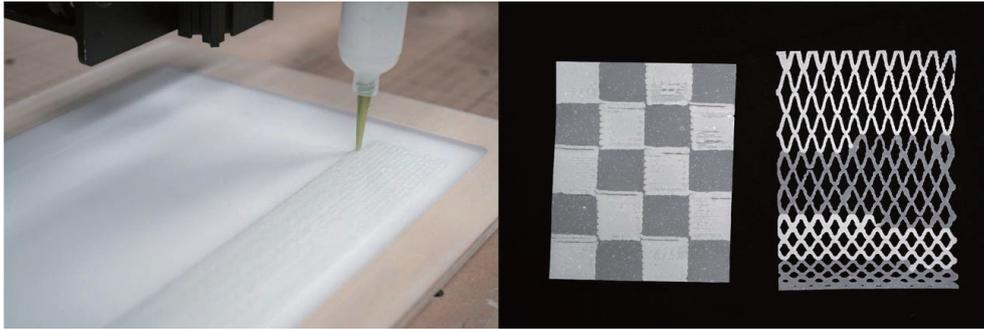


Fig. 1 PaperPrinting's output process and output examples.

購入し、印刷等で加工することが一般的であったのに対して、パーソナルファブリケーションの考え方を援用し、個人が嗜好やニーズに応じて一点ものの紙を作成できる環境の構築について考える。

今回具体的に筆者らは、XYプロッタ (XY Plotter) とディスプレイ (Dispenser) を組み合わせたファブリケーション装置により、ユーザ自身が紙の特性や意匠を設計し、素材の選択から造形までを行うシステム PaperPrinting を提案する (Fig. 1)。ユーザは、コンピュータを介して紙の形状や厚みを設計・試作することができる。以後本論では、まず、関連研究を参照した上で本研究の位置づけについて述べる。次に提案システムについて詳細を説明し、最後にシステムを利用して出力した紙を用いて、折り紙や郵送など日常生活における紙の用途として使用することや、システムを利用したワークショップでユーザがデザインした紙について述べ、体験者からのフィードバックを踏まえた議論についてまとめる。また、本文に記載のシステム名や製品名は、各社の商標あるいは登録商標である。

## 2. 関連研究

まず、紙のファブリケーションについて関連研究をまとめる。乾式オフィス製紙機 PaperLab (セイコーエプソン)<sup>5)</sup> や小型製紙装置 RECOTiO (デュプロ精工)<sup>6)</sup> など、既存の紙から再生紙を作製する装置は市販されている。しかし、これらは装置が大規模であるという制約があると共に、作製される紙に対してユーザが設計を施すことは考慮されていない。また、PEP (3D Printed Electronics Papercrafts)<sup>7)</sup> は、市販されている紙を素材として立体的な物体を造形する装置である。3Dプリンタの機構を用いて紙の切断と紙同士の糊付けを行うことによって立体物を造形することができる。しかし、紙の切断を伴う造形は、多くの端材が出てしまうというデメリットが存在する。これらに対して、本研究では積層造形を利用しているため廃材が少なく、素材を再利用することもできるという利点も挙げられる。

次に、紙への機能付与を行う研究についてまとめる。辻らによる ANABIOSIS<sup>8)</sup> は、紙に感温インクなどを多層的に塗布することで、触れた場所の色変化が起きるインタラクティブな表現を行なっている。三澤らの動紙<sup>9)</sup> では、磁性体が漉き込まれた紙を用いて、磁石の移動パターンと紙の形状に応じた多様な振る舞いを生み出す。このように、紙は表面へのインク塗布や

漉き込みによって機能を付け加えることができる。しかし、印刷は表面での意匠や機能の付与に留まり、紙の性状そのものへの加工は難しい。紙漉きによる製紙方法は、大きく丈夫な紙を制作する事が容易であるものの、点や線など局所的に紙の特性を変えることは難しく、また手漉き和紙の制作には大量の水や巨大な桶などの設備が必要となる。これに対して、本研究では3Dプリンタの機構をもとにして机の上で紙を出力する。これにより、少量でのプロトタイプ制作や、ユーザが素材の配分や素材の吐出量を自ら設定する事による厚みや透過度の変更や、素材にさらに異なる原料を混ぜるといった紙の性状の変更を可能にする。

また、紙は平面的な形状のみならず折り曲げることで様々な立体的な形状を作ることができるという点も特徴である。加藤らによる OrigamiSpeaker<sup>10)</sup> は導電性インクを用いて紙に回路を設計し、さらに折ることでホーンアンテナ型やセミ型のスピーカーを作製できる。Guberan の Hydro-Fold<sup>11)</sup> はインクジェットプリンタを用いて薄い紙に水のパターンを印刷することによって、その後の乾燥による収縮で紙の形状変化を行う事例である。また、Ion らの Metamaterial Textures<sup>12)</sup> はプリント技術を利用し、今までの造形手法や素材の利用方法ではできなかった製品の用途を提案している。本研究では XYプロッタを利用した平面な紙の出力を行うが、出力に用いるデータで紙に折り線をデザインすることや、部分的に異なる性状に切り替えて出力することを組み合わせることで、後の変形や造形を前提として既存の手法では難しい構造をもった紙の作成にも取り組む。

## 3. PaperPrinting の提案と設計

### 3.1 提案

既存の紙を原料として利用する紙のファブリケーションシステム PaperPrinting を提案する。本研究の特徴は2つあげられる。出力する素材からユーザが作ることによる紙の性状の設計と、積層造形手法によって異なる性状や機能を紙そのものに組み込むことである。

原料となる紙は、既に印刷され利用された紙や、トレーシングペーパー、ウエスなど流通している紙をリサイクルして使用することができる。ユーザは自らの必要な色や厚み、透過度などの紙の性状を素材から設計する。同時に、原料となる紙から作製したスラリー (Slurry) 状の素材を出力する手法によ

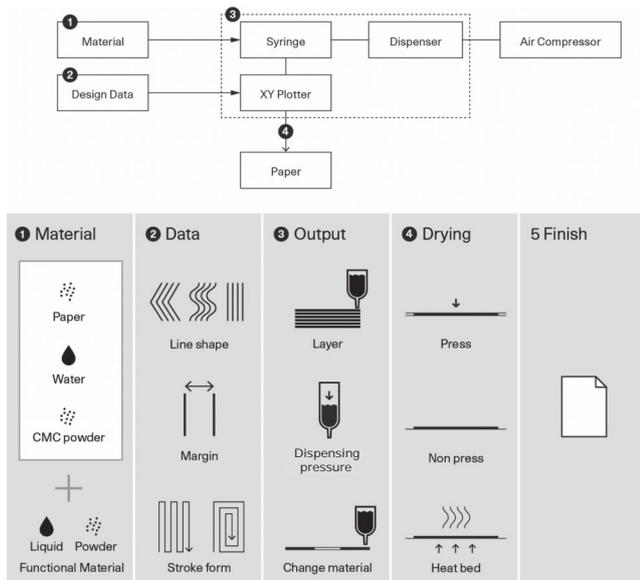


Fig. 2 PaperPrinting's system configuration and fabrication process.

て、局所的な素材の切り替えや、吐出圧を変更しながら造形することによる性状が一枚の中で異なる紙の造形ができるようになる。印刷やエンボスにみられる加工技術を用いて情報を記述することで、2次元的なインターフェースとして機能してきた紙は、紙内部への機能付与によって、より物質的な目的を持った情報伝達の素材として利用されることが期待される。

下記、市販されている紙や既に使われた紙を原料として素材を作製し、紙の出力をおこない、出力した紙が既存の紙とどのような差や近似的な要素を持つのかを明らかにするために、厚み、透過度、算術平均粗さについて計測する。また、既存の紙と同様の使い方を利用してすることで実用途の代替としての利用を検証するとともに、異なる素材の配置や、出力による形状の特徴を利用した特殊な紙の制作について述べる。

### 3.2 システム構成

PaperPrintingのシステム構成とプロセスをFig. 2に示す。ハードウェアはXYプロッタ (Inventables, X-Carve 750 mm)、ディスペンサ (Nordson, Ultimius V)、エアコンプレッサ (Air compressor: タミヤ, エアブラシシステム No. 41) で構成される。素材はシリンジ (Syringe: Nordson EFD, 55 ml) に入れて、XYプロッタに固定し出力する。吐出量はディスペンサの吐出圧 (Dispensing pressure (psi)) によって変更する。具体的には、70 gの素材を連続的に出力することで200×150 mmの四角形の紙を1枚出力できる。使用する素材やデザインデータ以外にも、ユーザが介入して紙の造形を決定しうる要因がいくつか存在する。例えば、出力時の吐出圧を高くすることによって、素材の吐出量が多くなるため、紙は厚みを増し、透過度も変化する。ユーザは最終的な紙の造形を想像しながら素材の混合比率や吐出圧などのパラメータや、デザインデータの形状を決定する必要がある。以下、PaperPrintingの素材の作製から出力、乾燥までの工程について詳細を述べる。

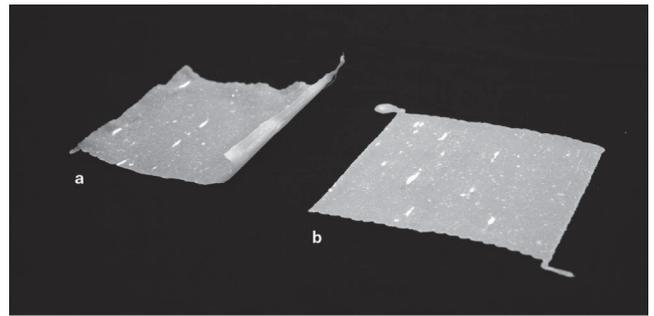


Fig. 3 The effect of different drying process on the printed paper. (a) Dried without pressing. (b) Dried while pressing an additional bed on top.

### 3.3 素材作製

出力に用いる素材は、綿状に加工した紙と溶液をそれぞれ作製して混合する。原料となる紙を、粉碎機 (ラボネクスト, HS-15) を利用して1分程度処理して綿状にする。溶液は、精製水とカルボキシメチルセルロース (Carboxymethyl cellulose. 以下、CMCと記す)・ベントナイト・クエン酸の3種類の粉末を、スターラ (Stirrer: アズワン, HS-50E) を利用して攪拌しながら作製する。その後、紙と溶液を混合してスラリー状の素材を作製する。紙と水のみで素材を作製した場合、シリンジに入れて圧力を加えても紙が吐出できないため、粘性を与えるためにCMC、強度を上げるためにベントナイト・クエン酸を加える。

### 3.4 デザインデータ

今回の実装では、システムに入力するデータはAdobe Illustrator等のグラフィックソフトウェアを用いて作成し、SVG (Scalable Vector Graphics) フォーマットを利用する。例えば、1.6 mmのノズル径を用いて100 mm<sup>2</sup>の正方形を出力するためのデータは、2.5 mmの間隔をもつ41本の線を並列させたデータとなる。また、直線だけでなく波線のような線の形状や、出力ルートも最終的な紙の造形に影響を与える。

### 3.5 出力

造形物は、一般的な3Dプリンタのようにベッドの上に出力する。木材や金属、アクリルなどの平滑な素材の上に出力することができる。出力直後の造形物は水分を含んでおり、触れたり、ベッドから移動させると造形が崩れてしまう。そのため、ベッドは出力後に別の出力をおこなうために、出力後にベッドごと移動できることが望ましい。

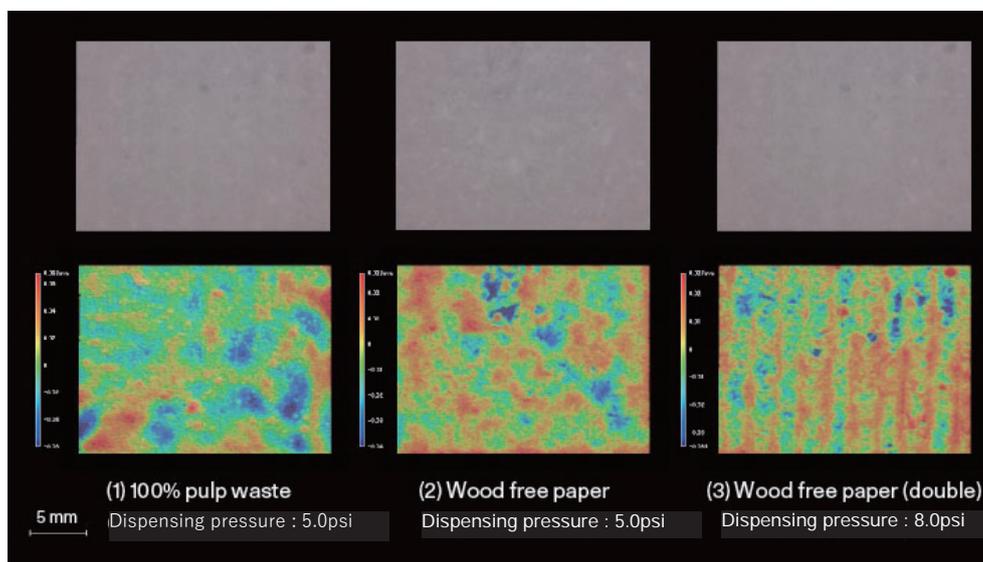
本論では、造形物の両面から乾燥させることを目的として、150メッシュのポリエステル繊維の布を利用する。布そのままでは安定して出力することができないため、布を木枠に固定したものをベッドとした。また、出力時、ベッドの下部に素材の水分を吸収することを目的として、メラミンスポンジを敷いた。出力時間は100 mm<sup>2</sup>の正方形で5分程度要する。また、出力中や出力直後に造形物が気に入らない場合には、シリンジに素材を戻すことで再度出力ができる。

### 3.6 造形物の乾燥工程

造形物は水分を含むため、乾燥させる工程が必要である。出

**Table 1** The printing material's mixing ratio and, viscosity.

	Mixing ratio (Water : Paper : CMC : Bentonite : Citric acid) (wt%)	Viscosity (dPa · s)
(1) 100% pulp waste	90.5 : 4.5 : 3.2 : 0.9 : 0.9	13.54
(2) Wood free paper	90.5 : 4.5 : 3.2 : 0.9 : 0.9	18.92
(3) Wood free paper (double)	86.5 : 8.7 : 3.0 : 0.9 : 0.9	19.08

**Fig. 4** 3D analysis of the printed paper. (top) Enlarged image of the printed paper. (bottom) 3D analysis image.

力後, 23℃の室内でサーキュレータを利用し10時間程度乾燥させた. 出力物の上部を固定せずに乾燥させると Fig. 3 (a)のように乾燥による収縮で歪みが発生するため, ベッドと同じものを使用して上下から挟んで乾燥させたものが Fig. 3 (b)となる.

#### 4. 特性評価

出力した紙の特性を評価するために, 実際に異なる原料を元とした紙を出力し, 厚み・透過度・算術平均粗さに関する計測し, 既存の数種類の紙との比較をおこなった. さらに, 原料の種類や素材の混合比率がどの程度の吐出圧で出力できるかを明確にするために素材の粘度を計測した. 本評価においては, 出力する紙のサイズは100 mm<sup>2</sup>の正方形に統一した.

##### 4.1 素材粘度

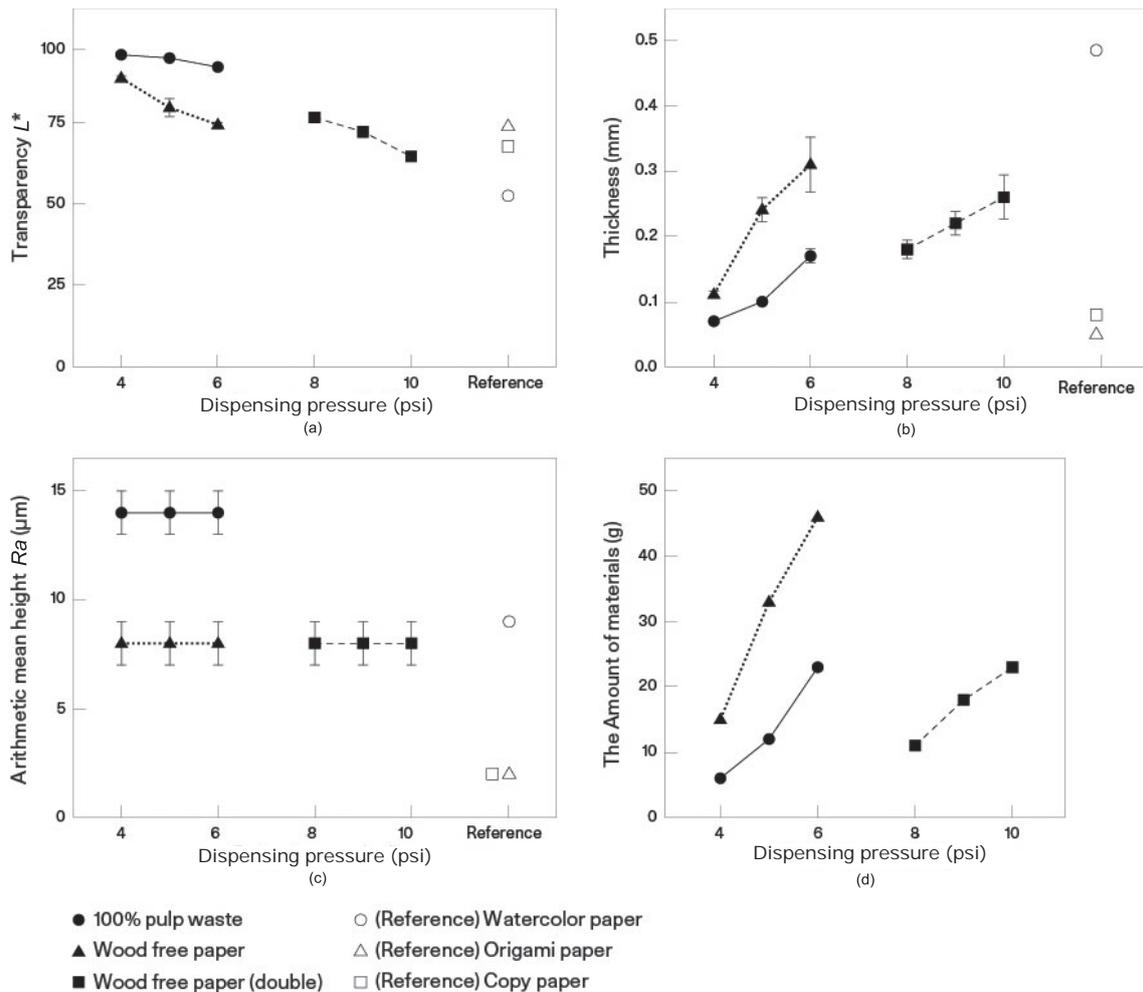
まず, 4.2節の予備実験として素材の粘度について計測をおこなった. 素材はパルプ100%のウエス(100% pulp waste)と上質紙(Wood free paper)を原料として, (1)パルプ100%のウエス, (2)上質紙(洋白紙110 kg), (3)上質紙の溶液との混合比率を2倍に変更したものの3種類の素材を作製した. それぞれの素材の粘度は, ビスコメータ(Viscometer: アズワン, CL-1)を用いて室温24℃, 湿度40%の環境のもと, 200 gの素材を素材温度22℃の環境条件で計測した(Table 1).

##### 4.2 厚み・透過度・算術平均粗さ

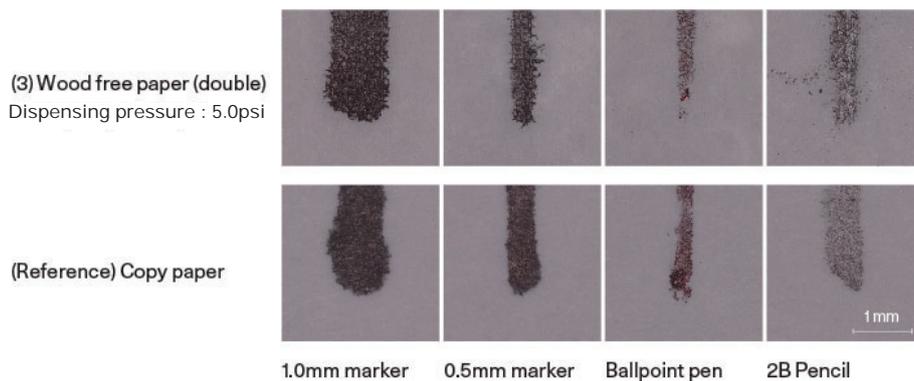
原料の紙や混合比率を変更した場合に, 造形物にどのような物理的な変化があるのかを明らかにすることを目的として, 出力した紙の厚み・透過度・算術平均粗さを計測した. 使用した素材は, 4.1節で作製した3種類を用いた. また, それぞれ吐出圧を段階的に変更して素材の吐出量を変更した.

厚みの計測にはデジタルマイクロメータ(シンワ測定, デジタルマイクロメータ0~25 mm)を用いて紙の9箇所を計測し平均値を算出した. 透過度は分光測色計(コニカミノルタ, CM-5)を用いた測定により得られた $L^*a^*b^*$ 表色系における $L^*$ の値(明るさ)を透過度の指標とした. 算術平均粗さは3次元形状測定器(キーエンス, VR-3000)を用いて, 12倍の拡大率で24×18 mmの範囲の表面の算術平均粗さ $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )の値を測定した. また, それぞれの表面と3D測定した画像が Fig. 4となる. また, 出力した紙との比較として, 市販されている折り紙, コピー用紙, 水彩紙(muse, ホワイトワトソン300 kg)の厚み・透過度・算術平均粗さについてもそれぞれ測定した. 計測結果と, 出力で利用した素材の量について表にプロットし, 吐出圧の変更による推移について線で結んで示す(Fig. 5).

それぞれ出力に用いた素材は同じでも吐出圧を変更して出力することで, 厚みと透過度が段階的に変化した. 既製の紙に比べると透過度はどの出力物も高く, 水彩紙程度の数値に近づけ



**Fig. 5** Comparison of the fabricated paper, watercolor paper, origami paper and copy paper. (a) Changes in Dispensing pressure and Transparency. (b) Changes in Dispensing pressure and Thickness. (c) Changes in Dispensing pressure and arithmetic mean height. (d) Changes in Dispensing pressure and the amount of the material.



**Fig. 6** Comparison of the fabricated paper with the reference paper by drawing with different writing utensils. (top) (3) Wood free paper (double). (bottom) (Reference) Copy paper.

るためには、原料の紙と溶液の混合比率を変更し、素材の紙の量をより増やすことと、素材の吐出量を上げて厚みを上げることが想定される。しかし、紙の量を増やすと粘度が上がり、現

状のディスペンサの構成では出力できなくなるため、ノズル径の変更や、デザインデータの線の間隔を変更するなどの調整が必要になると考えられる。算術平均粗さについては素材の量や

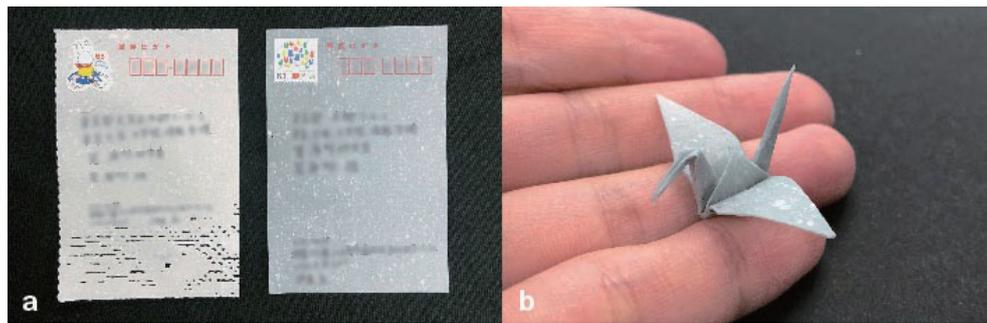


Fig. 7 Use of the fabricated papers. (a) Fabricated postcards that were sent and received. (b) The folded crane.

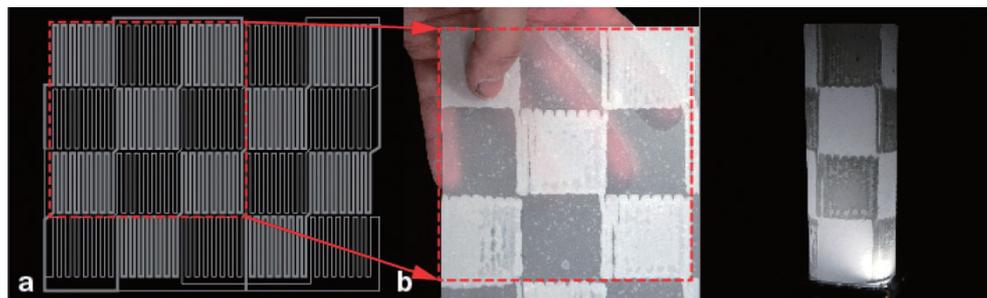


Fig. 8 Printing paper using different materials. (a) Design data. (b) The fabricated check pattern paper and lampshade example.

吐出圧の変化に大きく影響されなかった。理由として、上下のベッドの影響を受けていることも予想される。

### 4.3 描画

表面形状や性状についてより具体的に検証するために、複数の文房具を利用して線を引き、その拡大図を観察した。出力した紙と既製のコピー用紙に4種類の文房具を用いて線を引き、その拡大図を観察した。筆記用具は1.0 mm 油性ペン・0.5 mm 油性ペン・ボール径0.7 mmのボールペン・2B鉛筆の4種類を使用した。拡大写真は3次元形状測定器（キーエンス製性、VR-3000）を用いて40倍の拡大率で撮影した（Fig. 6）。出力した紙では、特に油性ペンでベッドに利用したメッシュの格子が確認された。

## 5. 紙の造形と利用

### 5.1 市販の紙との差異の検証

市販の紙との耐久性や使用感の差異の検証を目的として、異なる厚みや用途をもつ葉書と折り紙の2種類を選び、それぞれ近くなるように素材や吐出圧を設定して紙の出力をおこない、実際に利用した。

#### 5.1.1 葉書としての利用

耐久性の検証を目的として、造形した紙を葉書として郵送した。葉書に利用する紙の規程は内国郵便約款<sup>13)</sup>に記載されており、今回は定形内郵便の規程を元にしてサイズ150×100 mm、重さ2 gの紙を指標とした。原料には4.1節の(2)上質紙と、印刷物をリサイクルした紙の2種類を用いて、同じ混合比率で素材を制作した。出力は5.0 psiでおこない、出力には14分要

した。表面の「郵便はがき」と「郵便欄」はレーザープリンタ（OKI, MC-843）を用いて出力し、その他情報は油性ペンを用いて記入した。郵送時にはシール状の切手を貼り、直接ポストへ投函した。実際に届いた紙は消印が押され、目立った破損もなく郵送先へ到着した（Fig. 7(a)）。

今回使用した紙は機能性を持たない紙を出力し郵送をおこなったが、出力時に一部印刷しない部分を作り往復葉書の切り取り線を作れるという用途に合わせた出力や、届いた葉書を原料として返信用の紙を作るという循環的な利用方法なども考えられる。

#### 5.1.2 折り紙としての利用

使用感の差異の検証を目的として、出力した紙を利用して3名の被験者に折り紙を折ってもらった（Fig. 7(b)）。紙は印刷物をリサイクルした紙を原料として、50 mm角の正方形で出力した紙を45 mm角の正方形に加工したものを利用した。出力は4.0 psiでおこない、出力には3分要した。出力した紙の厚みは市販されている折り紙の0.057 mmと比べて0.1 mmと厚みがあった。2名はつるを折り、1名はふうせんを折った。つるを折った体験者からは、折りが終盤になるにつれて、多少の折り辛さを感じたという意見を得た。また、素材の中にある粉碎しきれていない紙のダマが、折る部分に重なると折り辛さはあるものの、市販されている折り紙には無い模様であり、折り線部に干渉しないよう出力することで一般の紙では作りだせないテクスチャが作れるという意見を得た。ふうせんを折った体験者からは、厚みのせいか膨らませることができなかったという意見を得た。出力の改善として、素材の原料をウエスな

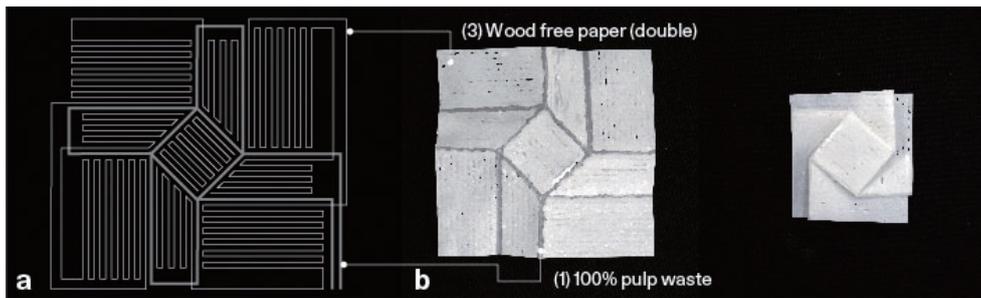


Fig. 9 Printing paper with a folded line. (a) Design data. (b) The fabricated twist fold paper and folded paper.

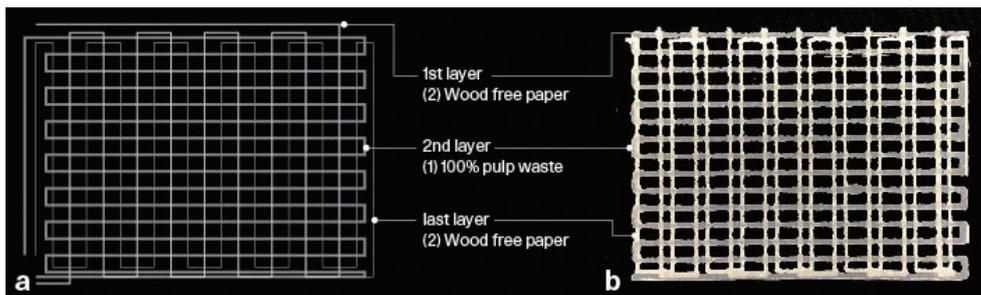


Fig. 10 Printing paper in a mesh pattern. (a) Design data. (b) The fabricated multi-layered mesh paper.

どに変更して素材の粘度を低くし、吐出圧を下げて出力することや、乾燥時に上部からプレスするなどの乾燥工程での工夫によって、使用した紙よりも薄い紙の出力が期待される。しかし、薄くなるにつれ透過度が上がってしまうため、折り紙のような薄く透過度が低い紙を出力するためには、原料となる紙の検討も必要である。

## 5.2 特殊な造形を有する紙の制作

一枚の面で紙を出力するだけでなく、異なる素材を1つの平面状に配置する事や、積層造形手法の特徴である線形状で紙を造形できる。4章で制作した素材の透過度や厚みを元にして、特殊な造形を有する紙の出力をおこなった。

### 5.2.1 異なる透過度を持つ紙

部分的に異なる透過度を持つ紙の制作を試みた。(1)パルプ100%のウエスと(3)上質紙の混合比率を2倍にした異なる透過度を持つ2種類を用いて、140×180 mmの市松柄の出力をおこなった。出力にデータは2種類準備し(Fig. 8(a))、それぞれ(1)5.0 psi、(3)8.0 psiとして、1つの素材の出力終了時にシリンジを変更し順番に出力をおこなった。全体の出力には20分程度要した。乾燥後の紙はトレーシングペーパーと上質紙を切り貼した印象となり、透ける箇所と透けない箇所が共存する紙を作ることが実現した(Fig. 8(b))。使用用途としては、模様などを変更できるランプシェードなどの光を利用した製品や、間仕切りなどに応用することが考えられる。

### 5.2.2 折り線を持つ紙

線形状の出力ができるという特徴を利用して、部分的に素材を変更し、厚みを変化させて曲がりやすい紙の制作を試みた。ねじり折り<sup>14)</sup>という一定方向にねじる構造の折りを再現する事を狙いとした。サイズは90 mm角の正方形として、折り線と

なる箇所と面の部分について2種類のデータを制作した。デザインデータでは四角の面の線の向きを谷折りの場合は水平、山折りの場合は垂直に接するように設計した(Fig. 9(a))。4章での厚みの計測を元にして、折り線の部分に厚みが薄くなる(1)パルプ100%のウエスを元にした素材を、面となる部分に(3)上質紙の混合比率を2倍にした素材を用いた。それぞれ(1)5.0 psi、(3)8.0 psiの値で出力し、全体の出力に10分程度要した。Fig. 9(b)の左に出力物、右に折った後の様子を示す。

折り方を事前に伝えた上で、出力した紙を10人の被験者に実際に折ってもらった。折り線として設定した部分が薄くなっていることと、素材の見え方が異なるためガイドの役割を果たすため折りやすくなったという意見を得た。また、同色の素材による折り線や谷折り山折りのような異なる方向への曲げ性の違いによる触覚的なガイドや、素材の混合比率や吐出圧のパラメータと乾燥工程を利用することで時間とともに変形して造形される出力物ができないかという意見を得た。

### 5.2.3 メッシュ状に出力した紙

線形状の出力を複数レイヤー重ねて出力することでメッシュ状の紙の出力を試みた(Fig. 10)。面ではなく、線通しの間隔をあけて出力することで、紙のもつ表と裏の関係性とは異なる構造を持った紙の制作を目的として設計した。3層で構成し、2層目の素材のみ異なる素材を利用した。原料には、(1)パルプ100%のウエス、(2)上質紙を利用した。150×100 mmの寸法の3種類のデザインデータを用いて、出力には10分を要した。造形した紙は、2層目や底面に出力した素材が部分的に最前面に現れるといった、布の縦糸と横糸のような構造をもつ。より細かなデザインデータによってテキスタイルに見られ



**Fig. 11** SIGGRAPH studio workshop venue and designed paper. (a) Workshop venue. (b) Design software. (c) Paper fabricated during the workshop. (d) Papers designed by the participants.

るレースのような構造の制作や、線のピッチを変化させることで触り心地などの触感を刺激する紙の設計について今後も検討を進めていく。

## 6. ワークショップと参加者からのフィードバック

2018年8月に開催された国際学会 SIGGRAPH2018 の Studio にて、その場で体験者に出力のデザインデータを制作してもらうワークショップと出力デモをおこなった (Fig. 11 (a))<sup>15)</sup>。

ワークショップではデザインデータの制作を簡単に行うために、Processing を利用して、43×43 のグリッドに分割された領域を塗りつぶしていくことで、紙の形状をデザインしたり、使用する素材の色を指定できるソフトウェアを開発した (Figs. 11 (b)–11 (c))。ソフトウェアの紙をデザインする要素は、白色画用紙を元にした素材・黒色の画用紙を元にした素材・印刷しない箇所の3種類とした。出力サイズは10 mm<sup>2</sup>の正方形を最大サイズとして、その場で出力・乾燥をおこなった。

複数の素材を利用するなど複雑なデザインをした場合に時間を要し、参加者がデザインに要する時間は最大で15分程度要した。4日間それぞれ7時間程度のワークショップの時間を設けて、デザインデータの制作と出力デモをおこなった。

デザインは抽象的な装飾などは少なく、動物や文字・アイコンなどの具体的なモチーフを持ったものが多く見られた。全体に白い素材を用いて、動物の目の部分を黒い素材に変更することや、印刷せずに抜けとなる部分を活用するなどの従来の紙では加工をしなければ実現が難しいアイデアを実現した (Fig. 11 (d))。

ワークショップを体験した参加者は、主にコンピュータグラフィクス領域の研究者やデジタルファブリケーションの専門家であった。多くあった反応として、表面の凹凸など紙の物質感を積極的にデザインに活用したブローチなどの製品を制作したいという意見が聞かれた。同様に、部分的に触り心地が異なるなどの触感やエンボスを利用した表現の可能性についてもフィードバックが多く得られた。また、3次元的な造形の可能性についての指摘も多くあり、平面的な造形を超える出力についても関心が集まった。

## 7. 議 論

本研究では、既存の紙を原料としてユーザ自らが使用する素材を作製し、デザインデータを元に出力して紙を作成する事を

実現した。また、素材を変更する事やデザインデータにとまなない、異なる性状を持つ紙の造形を可能にした。その中で、被験者やワークショップの参加者から、本研究を利用することによって実現する紙の新たな用途や価値について得られた意見を以下にまとめる。

まず、ワークショップや展示等を通して、紙のパーソナルファブリケーションについて、既存の紙を素材として利用できる点に価値を感じる意見を多く得た。具体的には、街の中で落ちていた複数の紙を原料としながら、落ちていた場所の位置情報や天気などの数値情報を元に紙のデザインを決定して出力するといった使用や、ラブレターを元にして婚姻届を出力するというアイデアが挙げられた。単なる素材の再利用ということにとどまらず、素材としての紙の持つ文脈や記憶を積極的に取り込む感性的なデザインへの応用可能性が示唆された。

また、現状は1枚の紙全体を出力する事を目的としていたが、他の紙や素材との接着を目的とすることや、小さな紙をパッチワークのように組み合わせて大きな紙を造形するなどの装置の新たな使い方についても意見を得た。異素材の接合としての PaperPrinting の可能性についても今後積極的に検討をおこないたい。

このほか、出力時に部分的に素材の吐出量を変化させる事で局所的に厚みや重さを変えることで、紙の中の重心を操作して、まわり花<sup>16)</sup>や紙飛行機などの製品を出力するという意見を得た。従来の紙の制作工程では圧搾することによって平滑な紙が作られているが、CNC (Computerized Numerical Control) の機構を利用することによる新しい紙の造形と用途についてはさらなる議論や検討が望まれる。

## 8. まとめと今後の課題

本論では、既存の紙を原料として利用する紙のファブリケーションシステム PaperPrinting を提案した。また、身近に手に入る紙を原料としながら紙を出力し、出力した紙と市販品の紙を比較しながら性能評価をおこなった。PaperPrinting は厚みや透過度などの機能の設計を素材の混合比率や吐出量の値を変更することで出力する紙の造形手法である。これにより、性状から設計した紙のプロトタイプ制作や、パーソナルな素材の循環的な利用を促すサステナブルなファブリケーションシステムとして価値があると考えられる。PaperPrinting を他の3Dプリンタのようにパーソナルなファブリケーションシステムとして普及させていく事が望まれる。そのための今後の展望と、そ

れらを実現するために必要な技術的課題を述べる。

はじめに、ポスターのような大きな紙の出力や複数素材を一度に出力する際のディスプレイシステムの検討である。現状のシステムでもシリンジを随時交換していくことによってそれぞれ可能であるが、シリンジへの素材供給を自動的におこなうことが出来れば、障子などの空間的に大きく利用する紙の利用展開が広がると考えている。次に、素材は一般的な3Dプリンタに使われるフィラメントと比較すると水分量の変化などを原因として、作製後に安定して出力できる期限が短い。そのため、保存法の改善やより簡易的な素材の作製方法が望まれる。

次の課題として、折り線だけでなく切り取り線などの加工を事前にした紙の出力をおこない、ペーパークラフトなどにみられるより立体的な紙の利用についても検討を続けていく。そのために、用途に合わせた素材の混合比率や吐出圧のパラメータをまとめること、また、加工する事を前提とした強度に関する評価の計測を考えている。

謝辞

本研究の一部は、JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) の支援を受けた。

## 参考文献

- 1) Edited by Ojiseishi, "Kami no Chishiki 100," TOKYO SHOSEKI (2009), 223 p. [in Japanese]. 王子製紙編, "紙の知識100", 東京書籍 (2009), 223 p.
- 2) TAKEO, "Kami no Tenrankai: Takeo pepa sho." [in Japanese]. <https://www.takeo.co.jp/exhibition/tps/>, (accessed 2020-02-25) [in Japanese].
- 3) G. Wang, T. Cheng, Y. Do, H. Yang, Y. Tao, J. Gu, B. An, and L. Yao, "Printed Paper Actuator: A Low-cost Reversible Actuation and Sensing Method for Shape Changing Interfaces," Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18), 569, pp. 1-12.
- 4) N. Gershenfeld, "Fab: The Coming Revolution on Your Desktop—from Personal Computers to Personal Fabrication," Basic Books (2007), 288 p.
- 5) T. Okamura, M. Nakamura, "Product Development of The Dry Fiber Paper Recycling Machine," Proceeding of the 123rd Annual Conference of the Imaging Society of Japan (Imaging Conference JAPAN 2019), IJ3-04, pp. 113-115 [in Japanese].
- 6) Duplo Seiko, "Kogata seishi sochi RECOTIO: Recotio," [in Japanese]. <https://www.duplo-seiko.co.jp/recotio/>, (accessed 2020-05-06)
- 7) H. Oh, T.D. Ta, R. Suzuki, M.D. Gross, Y. Kawahara, and L. Yao, "PEP (3D Printed Electronic Papercrafts): An Integrated Approach for 3D Sculpting Paper-Based Electronic Devices," Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18), 441, pp. 1-12.
- 8) K. Tsuji, A. Wakita, "Polychrome Paper Computing: A Dynamic Color-generating Technology Using Printing Technique and Functional Inks," IPSJ SIG Technical Reports, Human Computer Interaction (HCI), 2011-HCI-144 (20), pp. 1-6 [in Japanese].
- 9) Supervised by TAKEO, "Precision: Takeo Paper Show 2018: Seido o hete tachiagaru kami." TAKEO (2018), pp. 233-255 [in Japanese]. 竹尾監修, 中村水絵編集, "takeo paper show

2018: 精度を経て立ち上がる紙". 竹尾 (2018), pp. 233-255.

- 10) K. Kato, K. Saito, and Y. Kawahara, "OrigamiSpeaker: Handcrafted Paper Speaker with Silver Nano-Particle Ink," Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '19), LBW2211, pp. 1-6 (2019).
- 11) C. Guberan, "STUDIO GUBERAN: HYDRO-FOLD." <http://www.christopheguberan.ch/hydro-fold/>, (accessed 2020-02-25).
- 12) A. Ion, R. Kovacs, O.S. Schneider, P. Lopes, and P. Baudisch, "Metamaterial Textures," Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18), 336, pp. 1-12.
- 13) Japanpost, "Kakushu Yakkan," [in Japanese]. <https://www.post.japanpost.jp/about/yakkan/index.html>, (accessed 2020-02-21).
- 14) J. Mitani, "Graphic Science and Origami (1)," Journal of Graphic Science of Japan, 46 (2), pp. 19-22 (2012) [in Japanese].
- 15) W. Date and Y. Kakehi, "PaperPrinting: A machine for prototyping paper and its applications for graphic design," Proceedings of ACM SIGGRAPH 2018 Studio (SIGGRAPH '18), 8, pp. 1-2 (2018).
- 16) TAKEO, "Kami o meguru hanashi: collection no. 29: Kuchu de saku kami no hana, Koufukuji kondou, rakkei hoyo sange, Mawari Bana," [in Japanese]. <https://www.takeo.co.jp/reading/collection/29.html>, (Accessed 2020-02-25).



伊達 巨

2012年多摩美術大学大学院情報デザイン領域修了。2014年よりグラフィックデザイナーとして仕事と並行しながら慶應義塾大学大学院博士後期課程入学、現在に至る。素材の特徴を利用したデザイン手法などに関する研究に従事。



西原 由実

2013年慶應義塾大学環境情報学部卒業。2016年よりERATO川原万有情報網プロジェクト特任研究員。



寛 康明

2007年東京大学大学院学際情報学府博士課程修了。科学技術振興機構さきかけ研究員を経て、2008年より慶應義塾大学環境情報学部専任講師、同准教授。2018年より東京大学大学院情報学環准教授、現在に至る。マテリアルインタラクション、インタラクティブファブリケーション、メディアアートなどに関する研究に従事、博士(学際情報学)。