

## 鳴海 紘也 Narumi Koya

慶應義塾大学 理工学部 情報工学科 准教授  
2018年～22年 ACT-I 研究代表者

熱収縮性シートに折り紙のパターンを印刷し、そのシートをお湯に浸す。すると、5秒もしないうちにシートが縮み、立体の形が出来上がる。この複雑な多面体を自動的に折り上げる技術「Inkjet 4D Print」を発明したのは、慶應義塾大学理工学部情報工学科の鳴海紘也准教授だ。その他にも、電気的に自己修復する素材も開発している。ファッション業界を始めとした、ものづくりの世界に新たな方法論を加えた鳴海さんの発想の秘密や試行錯誤の過程、新技術の可能性などを聞いた。

特集  
OVERVIEW 2

# 複雑な多面体を瞬時に作る技術を発明 電気的に自己修復する素材も開発

## 70度のお湯に浸すだけ 自動で目的の立体形状に

人間が考えたことを、どう実現するか。その方法は技術の進展とともに変化してきた。特にデジタル技術が急速に発展してからは、これまで作れなかった複雑で精密なモノも造形できるようになった。グラフィックソフトやCADソフトなどを用いて作成したデジタルデータに基づき、創造物を製作する技術である「デジタルファブリケーション」は、ものづくりの現場では一般的な手法になっている。

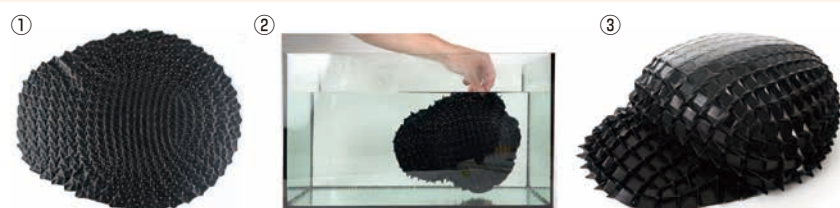
代表的なところでは、3Dプリンターやレーザーカッターなどの機器に、この技術が利用されている。

慶應義塾大学理工学部情報工学科の鳴海紘也准教授が開発した「Inkjet 4D Print」は、従来はCGのシミュレーションでしか折れなかった形を現実の世界に出現させる新しいデジタルファブリケーションだ。細い線

が無数に描かれた薄いシートを約70度のお湯に浸す。すると、線の部分が自動的に折れ曲がり、あっという間に帽子の形が出来上がった(図1)。冷やすと硬くなって形状が定着するが、温めながら構造を引っ張って冷ますと、立体は再び平面状のシートに戻る。

鳴海さんは、パソコン上で設計し

図1 Inkjet 4D Printによる自動折り紙



プリントした平面のシート(①)をお湯につける(②)と、わずか数秒で自動的に立体的な帽子の形状(③)になる。

こちらから動画が見られます。

<https://youtu.be/2rY-XNBnTW4?si=fsSM1TuV88xUWPCe>



図2 背の高いモノを3Dプリントする時の問題



背の高いモノを印刷する際は、長時間かかることや多くのサポート材を消費すること、収納性が悪い点に問題があった。そのため、3Dプリントするモノは、一般に小さい方が好まれた。

た非常に複雑な形が自分の思い通りに簡単に作れる点が、デジタルファブリケーションの魅力だと語る。「これまで計算上でのみ可能だった“架空の形”を実際に作れることが面白くて研究をしています」と笑顔で語る鳴海さんは、もともと「Human Computer Interaction (HCI)」を研究していた。全ての情報を0と1で処理するコンピューターと、自然言語を話す人間がよりうまく相互作用するための望ましい方法を開発する研究だ。

モノを自動的に動かそうとする時、HCIやロボティクスの分野ではセンサーやアクチュエーターを用いることが多い。だが、先ほどの鳴海さんの自動折り紙には、それらの装置は一切使われていない。熱収縮するシート状の素材に、一般的なUVプリンターで折り紙のパターンを印刷するだけだ。そのシートを加熱すれば、自動で目的の立体形状になる。既存のデジタルファブリケーションツールを用いるのではなく「自動折り紙」という製造手法自体を創出したところに、鳴海さんの研究の斬新さがある。

### 時間・素材を節約、運搬も楽にサステナブルなものづくりへ

鳴海さんが自動折り紙技術の開発を目指した理由は2つある。1つは、3Dプリンターは平面を出力する場合に比べて、高さを積み上げるには、長い時間を要するためだ。例えば、一般的な3Dプリンターだと、図1の帽子を印刷するのに10時間以上が必

要となり、一般的にモノが大きくなるほどできあがるまでの時間がかかる。もう1つは、立体を出力する場合、中空に浮いている部分が崩れないように、造形中のモデルを支えるサポート材が必要になるからだ。モノができればサポート材を廃棄するため、環境負荷につながるという問題があった(図2)。

これに対し、鳴海さんは「まず平面で作り、後から立体に変化させることができれば、時間と素材を大きく節約でき、さらに運搬も楽になる。サステナブルなものづくりができると考えました」と振り返る。2017年に、東京大学の館知宏助教(現・教授)が「1枚の紙でどんな多面体でも折れること」を証明したことが発想のきっかけだ。任意の形のモデルを入れると、それを折るパターンを計算するソフトも開発していた。しかし、そのパターンに基づいて手作業で折ると、完成までに膨大な時間がかかる。そこで鳴海さんは、プロセスの全自動化に向けて模索を始めた。

2020年に「UVプリンター」の存

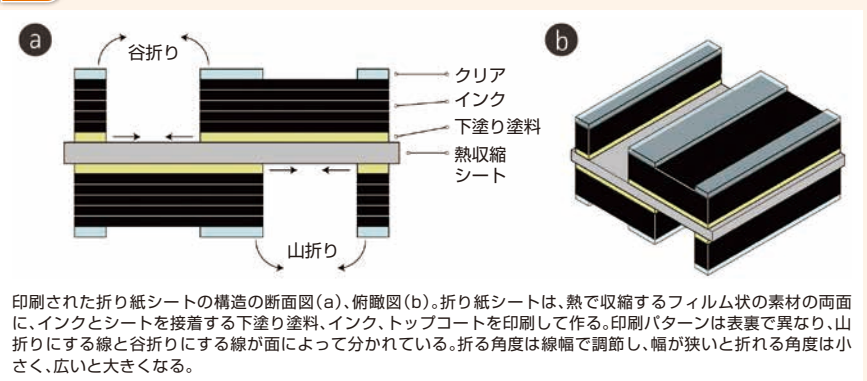
在を知ったことで、研究は大きく前進する。紫外線を照射すると硬化するUVインクをインクジェット印刷する装置であるUVプリンターには、印刷部分に厚みが出て硬くなるという特徴がある。これで折り紙が作れそうだと直感した鳴海さんは、早速、加熱すると縮むフィルム

の両面に、二つ折りのパターンを印刷してみた。折れ線部分にインクを乗せなければ、加熱時には露出しているフィルム部分だけが縮み、シートが折れ曲がると予想したのだ(図3)。実際に折れることが確認でき、そこからは適切に折るための印刷条件の追究が始まった。

### 設計ソフトウェアを論文化 パターンの計算が可能に

インクは柔らかすぎると縮む力に耐えきれない。一方、硬すぎると折れた時に剥がれてしまう。そのため、ある程度柔軟に伸縮可能なインクを探する必要があった。収縮に耐えつつ、印刷に時間がかかりすぎないインクの厚みはどの程度で、最も適したフィルムの素材は何か。線の太さと折れる角度の関係、加熱する温度の関係はどうなっているのか。そんな試行錯誤を繰り返し、安定的に思い通りに折れる条件を見いだせたのは、約1年後だったという。

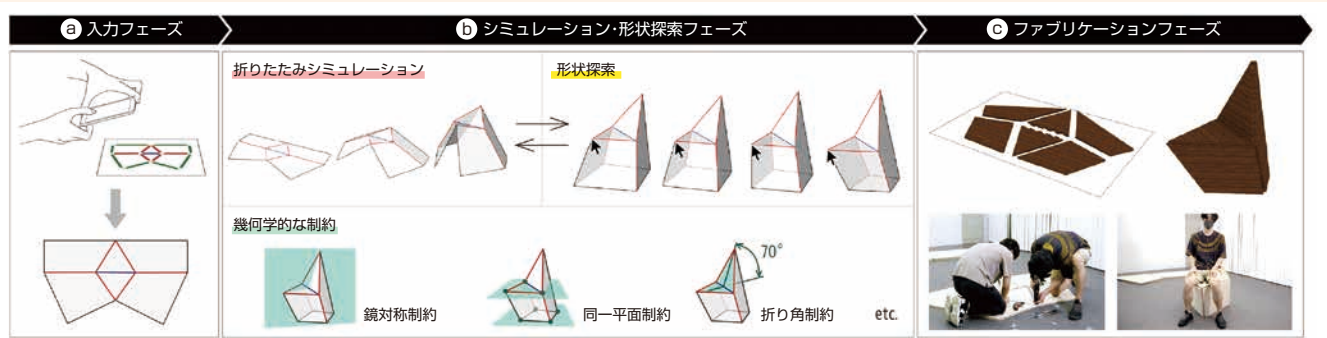
図3 折り紙シートの仕組み



印刷された折り紙シートの構造の断面図(a)、俯瞰図(b)。折り紙シートは、熱で収縮するフィルム状の素材の両面に、インクとシートを接着する下塗り塗料、インク、トップコート印刷して作る。印刷パターンは表裏で異なり、山折りにする線と谷折りにする線が面によって分かれている。折る角度は線幅で調節し、幅が狭いと折れる角度は小さく、広いと大きくなる。



図4 折り紙計算設計ソフト「Crane」による椅子の製造プロセス



Craneを用いた椅子の設計ワークフロー。折りパターンを入力するフェーズ(a)、入力されたパターンに基づき、システムで変形のシミュレーションや幾何学的な制約に基づく新たな形状探索を行うフェーズ(b)。これらが終わった後で、製造のためのデータを出力するフェーズ(c)。ユーザーの使用ツールに応じたモデルを作る。

印刷条件探しと並行して取り組んだのは、舘さんが開発した折り紙設計のアルゴリズムを、実際のものづくりに応用するためのソフトウェア「Crane」の論文だ。もともと、Craneは東京大学の大学院生だった須藤海さん・谷道鼓太郎さんによって開発されていた。紙のような平面の折り紙を設計するだけでなく、厚みを持つ折り紙プロダクトをCNC加工や3Dプリント、前述した折り紙の自動変形など、異なる作り方に合わせて設計するためのツールである。

例えば、折り紙の自動変形では、目指す形に折れるように線の幅を自動計算し、CNC加工では、厚みのある木の板などでも干渉せずに折れるよう、ヒンジを自動的に設計してくれる(図4)。伸縮可能なインクの最適条件とCraneのツール開発により、この技術を用いれば、どんな形状のモノでも自動で折ることができるようになった。先の帽子は、3426個の面から構成されているが、最大で8万個以上の面を持つ折り紙を自動で折れるという。作ることができる最小のサイズは一辺3ミリメートル程度。インクジェットなので、1枚ずつ異なる色柄で出力できる点も魅力だ。

### 合成樹脂にナノチューブ混入 感じる・壊れる・治るを再現

鳴海さんの顕著な研究成果は他にもある。その1つが、自己修復する素材を用いた「User Interface (UI)」

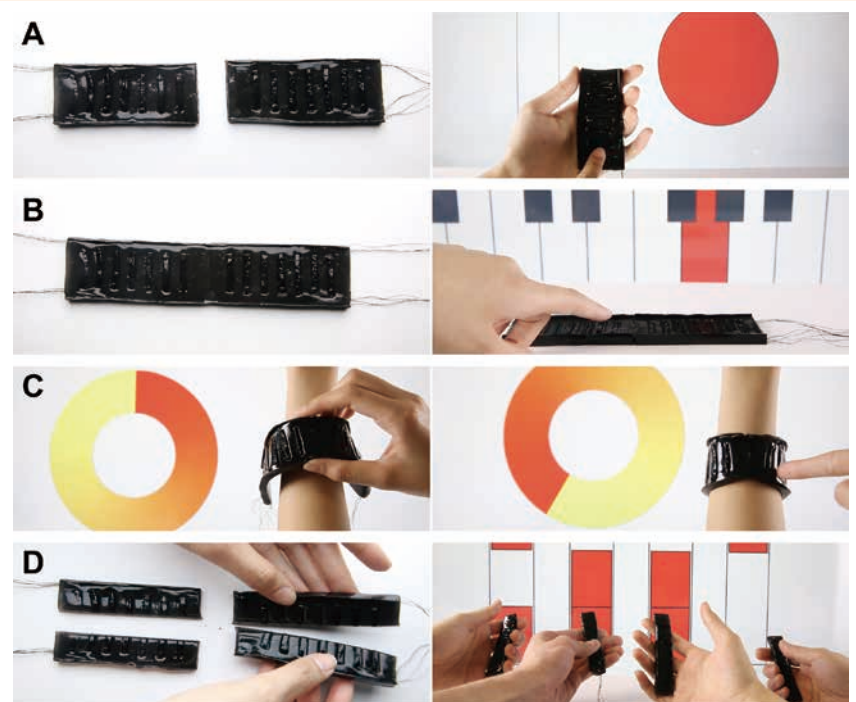
だ。米カーネギーメロン大学に留学していた際、鳴海さんは現地の指導教官に誘われ、マテリアル工学科に“変な素材”を見に行った。切り離しても密着させれば、数時間で構造が完全に修復する「合成樹脂(PBS)」だ。「これでいろいろできそうだ」と鳴海さんは思ったが、自己修復素材はすでに自動車やスマートフォンなどに使われており、傷が治るだけでは新規性はない。

「人間が形を組み換え、またすぐ別の使い方ができるもの。あるいは自分が壊れたことを検知し、壊れたら

自己修復して、再び機能するものかどうか？」そんなふうに鳴海さんはアイデアを膨らませていった。その一方で、PBSはスライム状で時間が経つと変形するため、このままでは使い物にならないとも感じていた。まずは形を維持しながら自己修復できるようにしたいと、マテリアルの研究者と組んでPBSにカーボンナノチューブ(CNT)を混ぜ込んだ素材を開発した。

PBS中にCNTのネットワークを作ることにより、形が崩れなくなる。また、切り口にはPBSが露出して

図5 目的に応じて接続、変形、切断できるコントローラー



1つのコントローラーを2つに切断すると、それぞれが別のコントローラーとして使用できる(A)。切断したものをくっつけておくと修復し、大きな1つのコントローラーになる(B)。曲げたり(C)、さらに細かく切断したりすることも可能(D)。

るため、接続後数秒で軽い引っ張りに耐える程度には修復が始まり、6時間後にはほぼ完全に修復が完了する。「CNTには導電性があるので、この素材は機械的に修復されたら電気的にも修復されます。つまり、デバイスにした場合、切ったらオフに、付け直したらオンにするようなことができるのです」と鳴海さんは説明する。

この電気特性を利用し、壊れたことを検知するセンサー機能を付与。人間の肌が触れたり傷ついたりしたことを認識し、傷が自然と治っていくように「感じる・壊れる・治る」を再現したデバイスとなった。鳴海さんは応用例の1つとして、ユーザーの使い方に合わせ、つなぐ、曲げる、切るなどの方法で変形するコントローラーを提示した(図5)。切り離して使い、使用が終わればくっつけ、また切って使えるコントローラーは、明らかにこれまでにないUIである。

鳴海さんが考案した、この素材からデバイスを作る方法も画期的だ。当初は3Dプリンターを使おうとしたが、変形する素材と3Dプリンターの相性が悪く、なかなかうまくいかない。試行錯誤の末、自己修復する素材なので、シート状にした素材を積み重ねていくだけで一体化すると気づいたという。実際、このシンプルな方法でデバイスを作製できた。Inkjet 4D Printもそうだが、全く新しいモノを作るには、作り方自体を新たに生み出す必要があるということだ。

## HCIは総合力で勝負する分野 他分野とも積極的に共同研究

2023年に自動折り紙の技術を発表すると、産業界からも大きく注目され、印刷やファッション、広告業界から約40社が研究室へ見学に訪れた。以前から協業していたファッションブランドのA-POC ABLE ISSEY MIYAKEは、24年3月のパリファッションウィーク、通称パリコレ期間中にInkjet 4D Print技術を使ったバングルをインストー

ション形式で発表(図6)。耐久性が求められるため、鳴海さんは改めてフィルムやインクなどの素材を検討した。模索の末、ポリスチレンフィルムに富士フィルムの高輝度メタリック印刷を施すことで、耐久性と意匠性を両立させることに成功している。

HCIから出発してマテリアル開発まで手掛ける、その鳴海さんの関心の幅広さやフットワークの軽さはどこからくるのだろうか。「HCIはプログラミングや機械工学も理解している必要があり、基本的に総合力で勝負する分野です。それに、私はもともと文系で、大学2年生の時に理系に転じてからは常にわからないことを勉強するのに抵抗がないのです」と鳴海さんは説明する。

だからこそ、自己修復するデバイスを作りたいと思えば、専門外でもマテリアルの研究室に通って素材開

図6 A-POC ABLE ISSEY MIYAKEと協業して開発したバングル



粒子を正確に配列することで輝度の高いメタリック調印刷を可能としたインクジェット印刷技術「高輝度メタリックインクジェット技術」を施し、カラーを加えることで多彩な色合いと折り紙形状を同時に表現することに成功した。

発を行い、自動折り紙で立体を作りたいと考えれば、計算折り紙の研究者とタグを組むというわけだ。他分野とも積極的に共同研究していることについて「素人でいいと思っていますのおかげで、何でも吸収できるんです」とほほ笑む鳴海さん。今後は、3Dモデルをベースにした服づくりや、現在のInkjet 4D Printとは逆に、収縮しない素材に収縮するインクを乗せる手法なども試みていきたいという。これから先もまだまだ驚きと楽しみが広がっていきそうだ。

(TEXT: 桜井裕子、PHOTO: 石原秀樹)



研究は、自分の技術が最終的にどうなるかをイメージしながら進めるといいと思います。また、新しいことは遊びのようなところから生まれるので、教科書に書いてあること以外にも興味を持ってほしいです。