

布を用いた折り紙に向けた樹脂パターンの配置手法

藤次 徹也^{1,a)} 野間 裕太^{1,b)} 鳴海 紘也^{1,c)} 齊藤 一哉^{2,d)} 川原 圭博^{1,e)}

概要:近年、折りを数理的に解析する計算折り紙は学問分野として急速に発展しつつあり、剛体パネルとヒンジを組み合わせた剛体折り紙をはじめとして、理論から応用まで盛んに研究されている。しかし、既存の折り紙構造に関する研究は剛体パネルや紙を用いたものがほとんどで、産業上有用な布を用いた折り紙は深く研究されていない。本研究では、折り紙構造を布でも実現し、布の柔軟性を保ちつつも折り紙のような複雑な変形を可能とすることを目指した。具体的には、FDM方式の3Dプリンタを用いて布にPLA樹脂を塗布することで、柔らかさを保ちつつも山折り谷折りの方向づけがなされた折り目を布に施し、布を用いた折り紙構造を完成させた。また、本稿ではこの構造を用いた、意匠性や実用性に優れた複数の例を示す。

1. はじめに

近年折り紙は学問分野として急速に発展しつつあり、理論から応用まで盛んに研究されている。特に、剛体でできたパネルと回転の自由度のみを持つ蝶番を接続して構成された剛体折り紙は、幾何的な拘束条件が強いことにより変形の自由度が低く、簡単に展開や折りたたみの動作を行うことができる [1]。また、「剛体」折り紙とは言ってもその折りパターン自体は紙でも作製でき、変形の自由度が低い簡易な展開と折りたたみの動作を簡単に実現できる [2]。このような変形自由度の低さやある程度の造形の簡単さを利用すれば、設置や収納の動作が簡単に行える家具や建築を作製できる [3] ため、剛体折り紙は研究分野で大きな注目を集めている。

一方で、剛体パネルや紙以外の素材、特に**布を用いた折り紙**の利用は産業分野が中心となっている。布は伸縮性と耐久性とを兼ね備えており、服飾や住居など多様な用途で用いられてきた重要な素材である。そのため、折り紙のデザイン性に着目し、折り紙の折りパターンを施した服 [4] やバッグ [5] も発表されるなど、布を用いた折り紙の需要は近年ますます高まっている。しかし、剛体折り紙パターンの特長である自由度の低さと布のしなやかさを両立するような手法は研究されてこなかった。

布で低自由度な折り紙の変形を実現するためには2つの課題がある：

- (1) **折り目付けの困難さ**。剛体ヒンジや紙の場合は、一度作った折り目が永続的に保たれる一方で、布はただ折るだけでは折り目を保つことができない。
- (2) **面のたわみ**。仮に布に永続的な折り目を付けられたとしても、折りたたみ動作時には布のたわみにより折り線以外の部分も折れてしまうため、スムーズに折りたたむことができない。

そこで本稿ではこれらの課題を解決するため、**布の表面に格子状の樹脂パターンを塗布する手法**を提案する。後述する本手法の樹脂パターンは折り目付近に間隙を設けており、折り動作の際にはこの間隙が永続的な折り目として動作する。また本手法で用いた樹脂は一定の剛性と布に対する粘着力を持つため、布に塗布すれば布が一定の剛性を得て折り目以外のたわみを軽減できる。

布への樹脂パターンの塗布によるスムーズな折りたたみ動作の実現のため、本稿ではまず樹脂パターンの配置と塗布方法を論じた。本手法で塗布する樹脂パターンは布の表裏で異なっており、これにより選択した山折り/谷折りの方向にのみ曲げられる永続的な折り目を作ることができる。また、樹脂パターンは一般に広く流通している熱溶解積層 (FDM) 方式の3Dプリンタで塗布でき、特殊な機械を必要としない。

本手法により作製した布の折り紙は、塗布する樹脂の量を増やせば剛性を高められる一方で、アプリケーションによっては剛性よりも布らしいしなやかさが求められるものも多い。そこで本稿では、樹脂の塗布量と剛性の関係性を

¹ 東京大学

² 九州大学

a) toji@akg.t.u-tokyo.ac.jp

b) noma@akg.t.u-tokyo.ac.jp

c) narumi@akg.t.u-tokyo.ac.jp

d) k-saito@design.kyushu-u.ac.jp

e) kawahara@akg.t.u-tokyo.ac.jp

調査するため、パターンパラメータ（樹脂パターンの大きさ）を変えた時の面内圧縮強度を測定した。この結果から、一定の剛性を得るために必要な樹脂の量を知ることができる。

本稿の貢献は以下の通りである：

- 布の樹脂パターンの塗布によるスムーズな折りたたみ動作の実現のため、樹脂パターンの配置と FDM 方式の 3D プリンタによる塗布方法を提案した。
- 提案構造の樹脂パターンのパラメータを変化させた時の面内圧縮強度を測定した。
- 本手法により作製した布による折り紙プロダクトを提示した。

2. 関連研究

2.1 折り紙研究の動向

2.1.1 折り紙を利用したアプリケーション

ロボティクス・宇宙・医療などの分野では、既存の折り紙パターンを応用しアプリケーションに組み込む研究が多く存在する。例えば、Felton ら [6] により提案されたロボットは、折り目が熱収縮により折りたたまれることで自動組み立てを実現するロボットである。また、無限に敷き詰め可能なユニットをパターンに用いるテッセレーション折り紙は、幾何学的な拘束条件により低自由度での展開・折りたたみを実現しているものも多く、その性質を生かしたアプリケーションが多く提案されている。一自由度変形が可能な折り紙パターンであるミウラ折りによるソーラーパネル [7] や、曲率を任意に変化させることのできるナマコ折りを利用した医療用ステント [8] はその好例である。

このように、折り紙パターンを工学的に応用したアプリケーションは多く存在するが、そのほとんどは面が剛体でできている。本研究は、これまで剛体に限られていた折り紙の応用を布にも広げるものである。

2.1.2 折り紙シミュレータ

また、コンピュータでの計算によって折り紙のシミュレーションを行う研究も多数存在する。例えば、Rigid Origami Simulator [9]、ORI-REF [10]、Freeform Origami [11] などどれも折り紙の折りのシミュレーションを行っている。Rigid Origami Simulator [9] では剛体折り紙の平面状態から立体状態までの連続的な変化をシミュレーションできる。また、ORI-REF [10] では、折り目を軸とした鏡映反転をもとしたアルゴリズムにより、曲線折りを含む展開図からの立体構造の作成が可能である [10]。さらに、Freeform Origami [11] では、画面上に折り紙の展開図と立体形状が両方表示されており、片方を変化させた場合のもう片方の変化をリアルタイムに確認できる。その他、Origami Simulator [12] は剛体折りパターンに限らず様々な折り紙の折りのシミュレーションが可能であり、さらに各面にかかる力もリアルタイムに表示できる。

このように、折り紙の展開図や立体形状を可視化するインタフェースは多数存在し、折り紙の各面にかかる力を計算する方法も存在する。本研究では布を利用した折り紙ファブリケーションに着目しているが、必要に応じてこれらのソフトウェアを組み合わせることも可能だと考えられる。

2.2 布ファブリケーション

2.2.1 布ファブリケーションに関する研究事例

本稿では 3D プリンタを用いて樹脂を塗布することで折り目構造を実現した。そこで、布を用いてファブリケーションを行う他の研究事例を以下に示す。Self-folding Knit [13] ではニットの編み目模様の細かさでヤング率を局所的に調整し、ミウラ折り構造などを作ることで布の自動的な折りたたみを行っている、しかし、布のたわみの問題で作製可能な折り紙テッセレーションの範囲は限られる。

また、3D プリンタで布の上にパターンを付与することで布に所望の性質を与える研究もいくつか存在し、Auxetic Forms on Fabric [14] では、負のポアソン比を持つ構造をニット生地印刷し、生地の剛性を調整している。Embedded Textiles [15] ではフェルトに 3D プリントで作製した部品と糸を組み合わせることで、アクチュエーションを実現している。布に樹脂を塗布することで新たな性質を与えるという点で、これらの研究は本稿と最も関連が深い。しかしこれらの研究では、低自由度での布の簡易な展開/格納など、剛体折り紙に特有の性質には着目していない。

さらに、3D プリンタの樹脂を用いて糸や布自体を作製する研究も近年報告されている [16]、[17]、[18]。例えば、Weft Knit [16] では高性能な粉末焼結積層 (SLS) により「編む」動作を模倣している。一方、3D Printed Fabrics [17] では安価な熱溶解積層 (FDM) 方式の 3D プリンタを用いて「織る」ことを実現している。経糸の代わりとなる円柱型の樹脂を印刷してから、各ポールの前後をプリンタヘッドが交互に通るように動かすことで緯糸を印刷し「織る」動作を模倣している。また、DefeXtiles [18] では樹脂を垂らしてからヘッドを動かす動作を何層にも渡って何度も繰り返すことで細い繊維で構成された布を作製している。しかし、構造全体をプラスチックだけで実現するこれらの手法では、折り目を加えることでヒンジ部分に塑性変形が生じ、いずれ疲労により折れてしまうため、可逆的な折り目生成は難しい。

このように 3D プリンタを用いて布に所望の性質を持たせる研究や、樹脂を用いて布を模倣する研究は存在するが、樹脂を用いて折り目を施すことにより、剛体折りパターンなどに見られるような低自由度の折りたたみを可能とする研究は存在しない。そこで本稿では、Auxetic Forms on Fabric [14] や Embedded Textiles [15] のように布に樹脂のパターン構造の塗布を行うことで布に剛性を持たせ、構造



図 1 リントラク加工の模式図. 布の折り目に樹脂を塗り付け (左), 折り曲げた後自然乾燥させる (右)

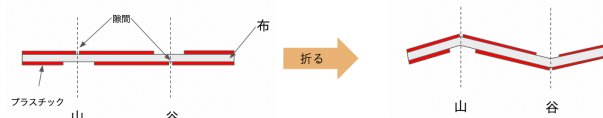


図 3 提案する構造を横から図示したもの

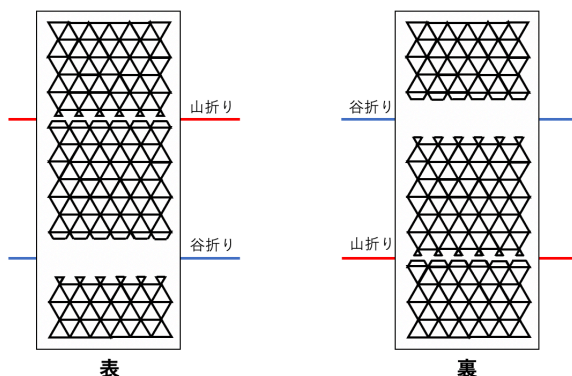


図 2 提案する構造の裏表を図示したもの

中に切れ目を設けることで折れ角を実現した。

2.2.2 折り目の産業的な製造方法

布に折り目を施す産業的な方法として、図 1 の模式図で表されるリントラク加工が挙げられる。リントラク加工は、スラックスやプリーツスカートなどの衣服に折り目をつける一般的な手法である。リントラク加工では、まず図 1 左のように布の折り目部分に沿って樹脂を塗りつける。その後、図 1 右のように折りたたんだ状態で自然乾燥させる。すると、シワがよったり布が開いたりしても、折り目が樹脂で固定されているので記憶されている折り目が回復する。しかし、この方法では全ての折り目に沿って何度も布を折り曲げ自然乾燥させる必要があり、多数の複雑な折り目を持つ折り紙には向かない。

3. 提案手法

3.1 概要

本研究では布に樹脂を塗布することで山折り/谷折りの方向付けされた折り目を布に施す。この方向付けされた折り目を可能とする樹脂の構造を図 2 に示した。折り目のない部分及び、表面から見た時の山折り部分・谷折り部分での樹脂の配置を以下のように定めた。

- **折り目のない部分** 布の両面に連続したパターン (図 2 では正三角形メッシュ) を塗布する。
- **山折り部分** 表面では折り線に沿って隙間を設け格子構造を配置し、裏面には樹脂を塗布しない。
- **谷折り部分** 表面には樹脂を塗布せず、裏面には折り線に沿った隙間を設けて樹脂構造を配置する。

上記構造を横から見たものと折り線に沿って折り曲げたものを図 3 に示す。この構造を用いることで折り目の順方向に折った時には隙間が広がるように折れ曲がる一方、逆方向に折った場合にはプラスチック同士が衝突することにより折れ曲がらない。これによって山折り/谷折りの方向づけされた折り目を実現した。この提案構造には以下のような利点が存在する。

- (1) **面の剛性.** 折り目のついた布を折りたたもうとする時、折り目以外の部分もたわんでしまう問題を、各面に樹脂を塗布することで解決した。
- (2) **折り目の方向づけされた永続的な折り目.** 一般的な剛体折り紙では折り目を施すために、ヒンジや素材の厚みに切り込みを入れるハーフカットやミン目を用いる [19]。本研究では格子に隙間を設けた提案構造を用いることで、レーザーカッターや様々な部品を使うことなく折り目を作製した。
- (3) **平面状態での安定.** 2.2.2 章で述べたリントラク構造のように布を折り畳んだ状態で接着剤を塗布し自然乾燥させると、折れ曲がった状態で布が安定してしまい、布を平坦にできないという問題点があった。提案構造では布に張力をかける部分が存在せず、平坦な状態で布が安定した。

なお、ここで示したような、表裏の間隙パターンに差をつけることで一方向のみへの折りを実現する手法自体は [6] などの 4D プリントに関連する分野で提案されているが、本研究では繰り返し折ることのできるヒンジとして提案している。

提案構造を実現するため、次節では樹脂の配置パターンと樹脂の塗布方法について論じる。

3.2 樹脂配置パターン

3.1 節では布に塗布する基本構造として正三角形メッシュを例に示したが、一般に、新たなパターンを印刷する際には次のような条件を満たすことが望ましい。

- (1) **一筆書きが可能であること.** 一筆書きできるパターンを導入する理由として、次の 2 点が挙げられる。

印刷時間の短縮. 一筆書きできるパターンを導入することで、プリンタヘッドの無駄な動きを減らせるため。

構造中の端点の数の最小化. 3D プリンタを用いて

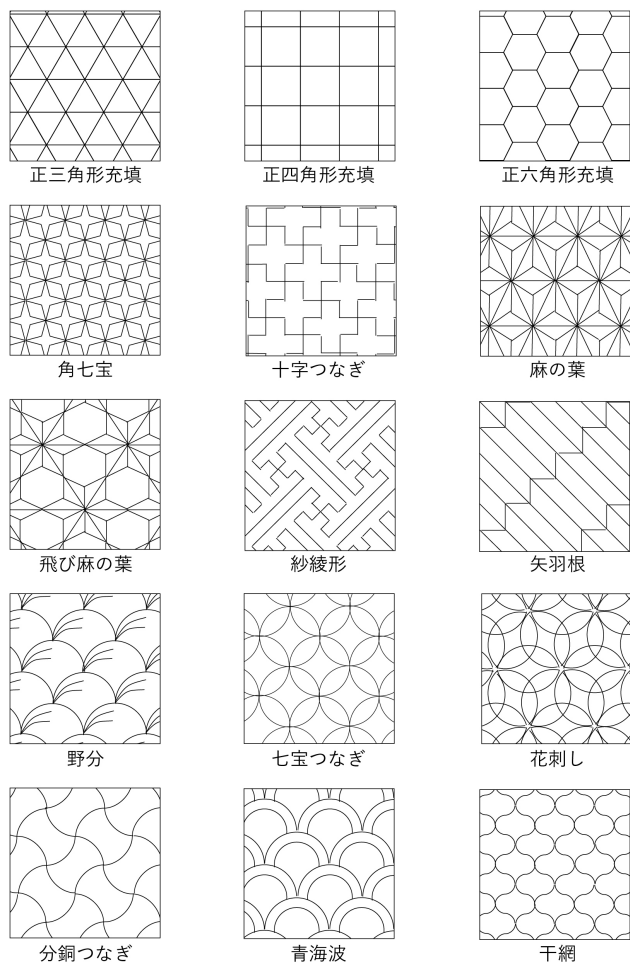


図 4 本研究で検討した樹脂配置パターン

パターンを印刷するにあたって、プリンタヘッドが次に印刷する箇所に向く際にフィラメントが思わぬ方向を向くことや、糸を引いて布に余分に樹脂を塗布してしまうことがある。このことを避けるため、印刷パターン中の端点の数を減らしてできる限り一筆書きでパターンを印刷できることが望ましい。

なお、一筆書きできるパターンは次の2つの条件のいずれかを満たす。

- すべての頂点につながる辺の数が偶数本。
- 全ての頂点のうち2つの頂点だけ、そこにつながる辺の数が奇数本であり、残りの頂点には偶数本の辺が繋がる。

(2) **再起的なパターンの配置**. パターンサイズを局所的かつ再帰的に変化させることができれば、布の剛性をある部分だけ調整することが可能となる。よって基本のセル構造のいくつかをまとめて大きなセルを作った際にも一筆書きが可能であることが望ましい。

上記(1)(2)の条件を満たすパターンを探していくにあたって、基本的な正 n 角形 ($n = 3, 4, 6$) による平面充填および布のデザインで使われる伝統的な刺繍技法である刺し子パターンを参考にした。具体的には、図 4 に挙げた 15

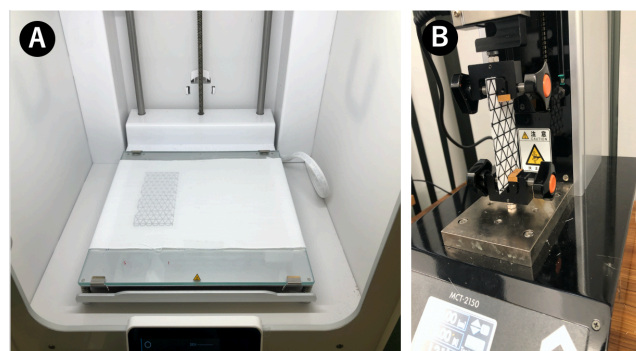


図 5 A: 3D プリンタを用いて布に樹脂を塗布している様子, B: 樹脂を塗布した布の面内圧縮強度の測定の様子。

種類のパターンの中から、上記 2 条件を満たすパターンを求めた結果、以下ようになった。

- (1) **一筆書きが不可能なもの**: 正六角形充填, 麻の葉, 飛び麻の葉, 野分, 青海波
- (2) **パターンが再起的でないもの**: まず、パターンが再起的でなく、サイズ調整ができないものとして、花刺し及び紗綾形が挙げられる。
 また、パターンサイズの調整を試みようとした場合に奇数本の辺が繋がった点生まれ一筆書きが不可能になってしまうパターンとして、正四角形充填, 十字つなぎ, 矢羽根, 分銅つなぎが挙げられる。
 他にも、サイズの調整を試みようとした場合にパターンが分裂してしまうものとして、七宝つなぎと干網がある。

(3) **上記条件を満たすもの**: 正三角形充填, 角七宝
 以上の考察から、面内圧縮強度の測定には 2 条件を満たしかつ単純な正三角形充填を用いた。なお、技術的な利点よりも装飾性を重視するならば図 4 の多くのパターンも利用することは可能である。

3.3 樹脂の塗布方法

実際に、3D プリンタである Ultimaker S3 を用いて、Tough PLA (Ultimaker 製) 樹脂を布 (ポリエステル 65%, 綿 35%, 厚み約 0.02 mm) に印刷した。その際、最終的な折りやすさを考慮し、以下のような条件で印刷した。

- 山折り部分では 1 mm の隙間を設け、谷折り部分は 10 mm 分樹脂塗布を行わなかった。これにより、図 3 に示されるような山折り/谷折りの方向付けされた折り目が実現される。
- 表面ではヘッドの高さを 0.27 mm として 3 層、裏面では 0.37 mm の高さで 2 層樹脂を塗布した。

4. 圧縮強度測定

布に樹脂を塗ることで剛性を高められる一方で、衣服やバッグなどをはじめとしたアプリケーションや、剛体折りが不可能な折り紙では、布の柔軟性を保持することが求め

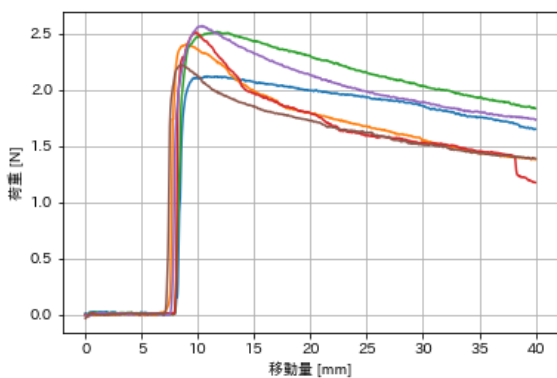
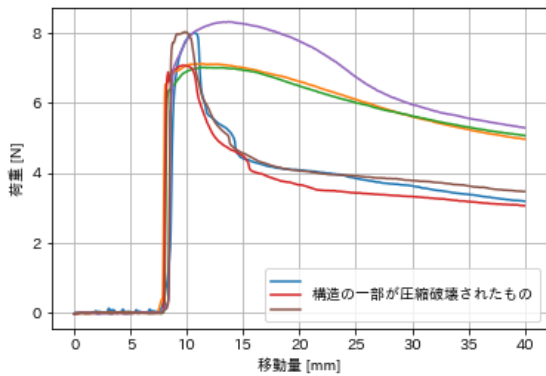


図 6 面内圧縮強度の測定の様子. $L = 6\text{mm}$ とした場合 (上) 及び $L = 14\text{mm}$ とした場合 (下)

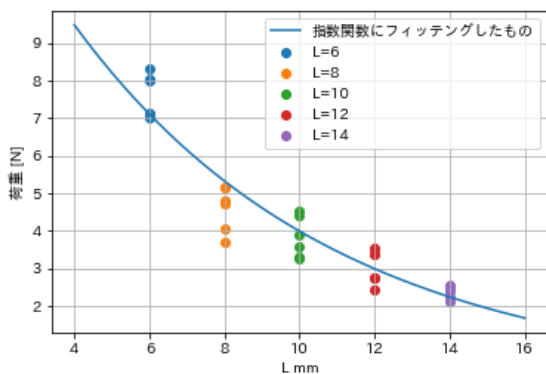


図 7 $L = 6, 8, 10, 12, 14$ としたときの荷重の最大値をプロットしたもの. また, 図中の曲線は各点を指数関数で近似したものである.

られる. そこで, 図 2 に挙げた三角形充填構造を布に印刷し, パターンのパラメータを変えたときの布の圧縮強度の測定を行った. 具体的な測定方法として, 面のたわみの度合いを調べるために三角形の一辺の長さ L [mm] を変化させた時の圧縮強度をフォーステスター (MCT-2150, エー・アンド・デイ) を用いて測定した. 実験の様子をそれぞれ図 5 に示した. 以下に実験の手順を示す.

(1) Ultimaker S3 を用いて横幅 5 cm, 縦幅 10 cm の布の表面に 3 層, 裏面に 2 層樹脂を塗布する. 樹脂配置パ

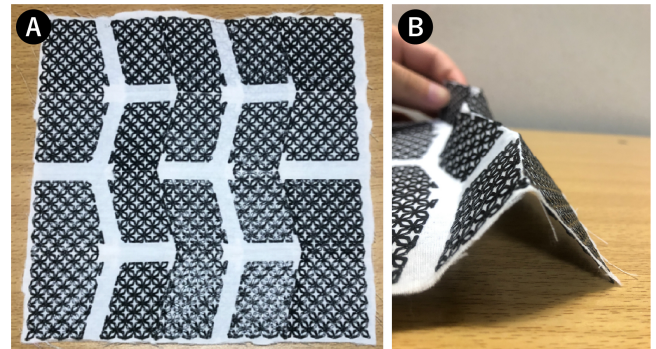


図 8 A: 実際に作製した布折り紙. ミウラ折り状に樹脂を塗布した. B: 折り曲げた際の様子. 永続的な折り目が確認できる

ターンの三角形の一辺の長さ $L = 6, 8, 10, 12, 14$ とし, それぞれ 6 個ずつ作製する.

- (2) 平行締付型ジョウを上下に固定したフォーステスターを用いて圧縮試験を行う. このとき, 布の上部を平行締付型ジョウを用いて固定し, 試験機下部の平行締付型ジョウには 3 mm ほどの隙間を空ける.
- (3) 上部の平行締付型ジョウが 40 mm 下がるまで圧縮試験を行う.

上記手順に従って, 三角形の一辺の長さ $L = 6, 8, 10, 12, 14$ としたときの面内圧縮強度をそれぞれ 6 回ずつ計測した. 図 6 には例として $L = 6, 14$ の場合を示した. 樹脂構造の細かい $L = 6$ の場合の方が $L = 14$ のものより圧縮に大きな荷重が必要であることがわかる. また, L が小さいほど構造の一部が圧縮破壊されることにより, 荷重が急激に下がる現象が起きやすいこともわかる.

次に, 三角形の一辺の長さ $L = 6, 8, 10, 12, 14$ とした布をそれぞれ 6 個用意し圧縮試験を行ない, それぞれの荷重の最大値を図 7 に示した. 樹脂塗布量は長さ L に従って指数関数的に減少していくので, 荷重も同様に指数関数で近似できると仮定し, 指数関数近似した曲線を図 7 中に示した. 指数関数の式として

$$\text{荷重 [N]} = 16.9e^{-0.144L} \quad (1)$$

が得られ, 樹脂塗布量と荷重の関係が定式化された.

5. 提案構造を用いた布折り紙

実際に, 提案した樹脂構造を塗布した布を用いた折り紙を作製した. 印刷したパターンとして, 図 4 の角七宝模様を選んだ. 図 8 では角七宝模様を用いてミウラ折り状に布に樹脂を塗布した様子を示した. また図 8-B では折り目に沿って折り曲げた際の様子を示した. 提案手法を用いた図 8 では以下の利点が確かめられる.

- **面の剛性が保たれている点.** 通常の布に折り目を付け折り曲げようとするとき, 自重で布がたわんでしまう. 本手法では面に樹脂を塗布することで面に剛性が保たれ, 布の折り目部分で折ることが可能となる.

- 方向付けされた折り目が印刷可能な点. ミウラ折りをはじめとした剛体折り紙は、山折り/谷折りの双方を含んだ複雑な折り目によって成立している、紙素材以外にこのような複雑な折り目をつける方法として、剛体板にヒンジを組み込む方法や、金属板につけたミシン目を空気圧を用いて折る方法 [20] などがあるが、どれも煩雑である。本手法では、隙間の大きさを変えて樹脂を塗布することで山折り/谷折りの区別された折り目を予め布に組み込んでいるので、折り目をつける煩雑な作業が省略される。

6. 今後の課題

本稿では、3D プリンタを用いて布に樹脂を塗布することで、布に部分的に剛性を与え、山折り/谷折りの方向づけされた折り目を布に施した。

今後は以下の研究課題にも取り組む予定である。

6.1 樹脂配置を最適化するソフトウェアの実装

Origami Simulator [12] を用いると、折り紙を折る際に各面にかかるひずみを求めることが可能となる。今後は、4章で求めた樹脂塗布量と圧縮強度の関係式 (1) をもとに樹脂塗布量と機械的特性の関係を更に精査し、Origami Simulator [12] で求められる折りたたみ過程で生じるひずみ分布を考慮して樹脂塗布量を最適化することを目指す。前述したように、提案した手法では、局所かつ再帰的にパターン密度を変更することが可能であるので、今後は塗布する樹脂量とパターン密度を最適化するソフトウェアの実装を行うことで、剛体折り紙以外の折り紙などにも本構造を適用する予定である。

6.2 更なるアプリケーションの開発

一般的に、布は耐久性や柔軟性、伸縮性をあわせ持つという利点から、服や装飾、建築物 [21] など多岐に渡って応用されている。本研究では、布に折り紙を模した折り目パターンをつけることで、剛体折り紙に見られるような低自由度な布の変形を可能とした。今後は衣服やカーテン、バッグ、テントなど、従来布を用いて作製されてきた構造に本構造を導入することで、低自由度な折り畳みが可能となった新たなアプリケーションの開発を目指す。また、他の剛体折り紙パターンを導入することで様々な機能性をもったプロダクトを開発していきたい。

7. おわりに

本稿では、熱溶解積層 (FDM) 方式の3D プリンタを使って樹脂を布に塗布することによって、折り紙に見られるような複雑な折り目を可能にした。具体的には、樹脂を各面に塗布することで折りに必要な剛性を保ち、樹脂構造の隙間を変えることで山折り/谷折りの方向付けされた折り

目を実現した。さらに、樹脂の配置パターンとして利用できる模様を分類し、一筆書き可能で再帰的なパターンによって構成されている正三角形メッシュや角七宝模様を用いて樹脂を塗布して布を作製した。本手法では、樹脂塗布量に応じて布の剛性が変化するため、樹脂塗布量に対する布の面内圧縮強度を測定し、その関係性をフィッティングにより示した。最後に、本手法の適用例として、角七宝模様によるミウラ折りの構造を示した。今後は Origami Simulator [12] などのソフトウェアと本手法を組み合わせることで樹脂塗布を最適化し、様々なアプリケーションに適用したい。

謝辞

本研究は JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Tachi, T., Masubuchi, M. and Iwamoto, M.: Rigid origami structures with vacuumatics: Geometric considerations, *Proc. the IASS-APCS Seoul, Korea, 21-24 May* (2012).
- [2] Miura, K.: *Method of Packaging and Deployment of Large Membranes in Space* (1985).
- [3] Kai, Suto and Tachi, Tomohiro : Crane.
- [4] WOW Inc.: ISSEY MIYAKE Steam Stretch, <https://vimeo.com/108092253/> (Accessed: December 28, 2020).
- [5] ISSEY MIYAKE: BAO BAO, <https://www.baobaoisseymiyake.com/> (Accessed: December 28, 2020).
- [6] Felton, S., Tolley, M., Demaine, E., Rus, D. and Wood, R.: A method for building self-folding machines, *Science*, Vol. 345, No. 6197, pp. 644-646 (2014).
- [7] Miura, K.: Map fold a la Miura style, its physical characteristics and application to the space science, *Research of Pattern Formation*, pp. 77-90 (1994).
- [8] Kuribayashi, K., Tsuchiya, K., You, Z., Tomus, D., Umemoto, M., Ito, T. and Sasaki, M.: Self-deployable origami stent grafts as a biomedical application of Ni-rich TiNi shape memory alloy foil, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 419, No. 1-2, pp. 131-137 (2006).
- [9] Tachi, T.: Simulation of rigid origami, *Origami*, Vol. 4, No. 08, pp. 175-187 (2009).
- [10] Mitani, J. and Igarashi, T.: Interactive Design of Planar Curved Folding by Reflection, *PG*, The Eurographics Association (2011).
- [11] Tachi, T.: Generalization of rigid-foldable quadrilateral-mesh origami, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, Vol. 50, No. 3, pp. 173-179 (2009).
- [12] Ghassaei, A., Demaine, E. D. and Gershenfeld, N.: Fast, interactive origami simulation using GPU computation, *Origami*, Vol. 7, pp. 1151-1166 (2018).
- [13] Knittel, C. E., Nicholas, D. S., Street, R. M., Schauer, C. L. and Dion, G.: Self-folding textiles through manipulation of knit stitch architecture, *Fibers*, Vol. 3, No. 4, pp. 575-587 (2015).
- [14] Grimmelsmann, N., Meissner, H. and Ehrmann, A.: 3D printed auxetic forms on knitted fabrics for adjustable permeability and mechanical properties, *IOP*

- Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 137, p. 012011 (2016).
- [15] Rivera, M. L., Moukperian, M., Ashbrook, D., Mankoff, J. and Hudson, S. E.: Stretching the Bounds of 3D Printing with Embedded Textiles, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 497–508 (online), DOI: 10.1145/3025453.3025460 (2017).
- [16] Beecroft, M.: 3D printing of weft knitted textile based structures by selective laser sintering of nylon powder, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 137, IOP Publishing, p. 012017 (2016).
- [17] Takahashi, H. and Kim, J.: 3D Printed Fabric: Techniques for Design and 3D Weaving Programmable Textiles, *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 43–51 (online), DOI: 10.1145/3332165.3347896 (2019).
- [18] Forman, J., Dogan, M. D., Forsythe, H. and Ishii, H.: DefeXtiles: 3D Printing Quasi-Woven Fabric via Under-Extrusion, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 1222–1233 (2020).
- [19] Tachi, T.: Freeform origami tessellations by generalizing Resch's patterns, *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Vol. 55942, American Society of Mechanical Engineers, p. V06BT07A025 (2013).
- [20] Schenk, M., Allwood, J. and Guest, S.: Cold gas-pressure folding of Miura-ori sheets, *Steel Research International, Special Issue Proceedings of the International Conference on Technology of Plasticity (ICTP)*, Vol. 201, No. 1, pp. 459–464 (2011).
- [21] Quinn, B.: Textiles in architecture, *Architectural Design*, Vol. 76, No. 6, pp. 22–26 (2006).