

# 形状設計可能な紙バネ構造の簡易製造手法

工藤 大樹\* 山岡 潤一\*

**概要.** 折り紙や切り紙は、工学や数学、物理学をはじめ幅広い分野で研究されており、我々の生活に様々な技術や製品として応用されている。しかし、提案されている多くの折り方は複雑で、折り工程の自動化が難しい等の課題を有している。本研究では、2本の帯状の紙を互い違いに折り込むことで、容易に立体形状を製作できる紙バネ構造に着目した。紙バネ構造は、連続した垂直・水平方向への折り込みによって制作されるため、製造の自動化に適している。本提案では、2本のL字状の帯からなる紙バネ構造（L字紙バネ構造）を製造する手法を開発した。L字紙バネ構造の製作時に、帯幅や折り込む回数、折り込む密度を変えることで、展張時の形状や方向、ねじれを制御できる。また通常の紙バネと異なり、展張時にねじれにくい特性を有しており、センサやアクチュエータ等への応用可能性も見られた。本稿では、L字紙バネ構造の原理や製作手法、応用可能性について述べる。

## 1 はじめに

折り紙や切り紙は、1枚の平面材料から立体を構築できる点や、パターンによって軽量で強靱な構造を実現できる点などで注目されている。折り紙の特性や形成される形状の応用は多岐に渡り、著名な折り方としてミウラ折りが挙げられる。ミウラ折りは1994年に打ち上げられた観測衛星に搭載された太陽光パネルの折り畳み・展開に用いられた[1]。折り構造は建築や衣服の設計にも用いられ、代表的な例として高輪ゲートウェイ駅の天井部の設計や、平面から立体になる衣服を展開する「132 5. ISSEY MIYAKE」の衣服が挙げられる[2]。

また切り紙や折り紙の構造や特性に着目したハプティックデバイスへの応用[3]やソフトロボットの実現に向けた電子回路の印刷・組み立て手法[4]なども提案されており、デバイスやアクチュエータへの応用も期待されている。このように様々な製品や建築への応用が期待されており、複雑な立体形状を一枚の紙から製造するために、コンピュータを用いて設計方法が研究されている。一方で、多くの折り工程が複雑であるため、製造の自動化への障壁となっている。

本稿では、折り工程の設計・製造の自動化に向けて、最適な折り方を提案する。自動化を見据えて直線的かつ単純な折り込みが連続する紙バネ構造を発展させたL字紙バネ構造を開発した。一般的な紙バネは、2つの帯を交互に折り重ねていくことで構築され、螺旋状にねじれながら伸縮する[5]。一方、L字紙バネ構造は、2本のL字状の帯からなる紙バネ構造である。展張時に複雑な形状を構築でき、折り

工程の一部を変更することで特定の方向へ屈曲した伸長も可能である。図1は、紙バネ構造の製作や展張の様子、提案手法により構築できる構造の一例、用途の想定を示したものである。後述の手法を用いることで形状設計が可能となるため、図1に示した膨らみのある構造も構築でき、ソフトロボットへの応用や意匠に配慮した展張も期待される。

将来的には、本手法を用いることで、簡易に設計・製造できるセンサ・アクチュエータや、紙バネ構造をモジュールとして組み合わせた家具、建築資材への応用を目指す。

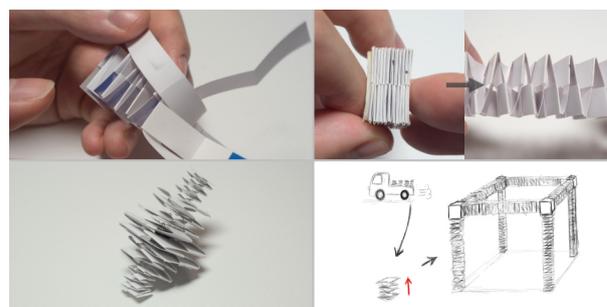


図1. L字紙バネ構造の製作や挙動・形状の例

## 2 提案手法

### 2.1 L字紙バネ構造の基本原則

紙バネは通常、帯状の紙を2本互い違いに折り込むことによって構成されている（以後、これを基本構造と呼ぶ）。本稿ではL字状の帯2本を折り込む手法を提案する（図2）。製作手順は図2に示したように、まずL字状の帯を重ね合わせる（図2b）。続いて、東西に伸びる帯をそれぞれ中心に向かって入れ違うように折り込む（図2c）。同様に残った南北に伸びる帯を入れ違うように折り込む（図2d）。

Copyright is held by the author(s). This paper is non-refereed and non-archival. Hence it may later appear in any journals, conferences, symposia, etc.

\* 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

その後は c, d の手順を繰り返し行うことで紙バネ構造が形成される。

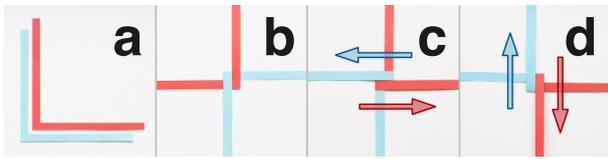


図 2. L字型構造の折り方

また単純に展張するだけでなく、L字紙バネ構造は展張時、複雑な形状に変形できる。具体的には、折り方の手順を変えることで、図1左下のような複雑な形状を構築することができる。今回は、複雑な形状を設計するために、曲げ・帯幅・ねじれに着目した。この3つの要素を組み合わせ、予め設計することで、展張時に複雑な形状にすることができる。それぞれの形状変化と製作手法に関して述べる。

## 2.2 曲げ

L字紙バネ構造は、折り方を工夫することで伸長時に曲げることが可能となる。図3 a-hに折り方を示した。a-cは図2で示した手順と同様である。dで北側にある帯のみを折り返す。e-fの工程では東西に伸びる帯を入れ違いうように折っていく。g-hのように折り返すことにより端部を処理する。

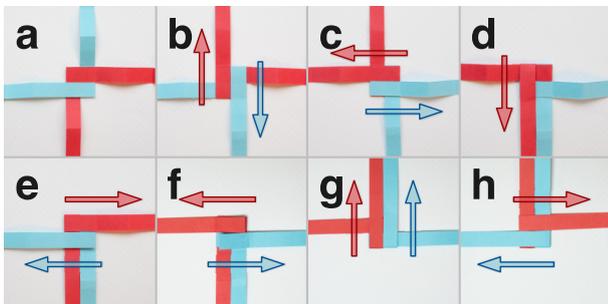


図 3. L字型構造を曲げる折り方

図2と図3に示した折り方を組み合わせ、構造の一部が曲がるようにしたものを図4に示した。上面と底面を除く4方位に曲げることが可能である。

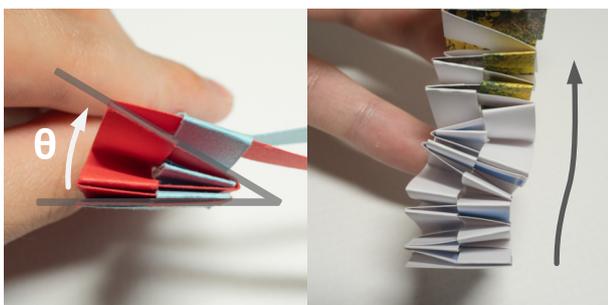


図 4. 曲げる折り方を導入したL字型構造

図3で示した工程で構築される構造を、曲げの生じ

るひとつのユニットとする。つまり、このユニットを増やすことで、大きく曲げることが出来る。ひとつのユニットがどの程度の角度に曲がるのかを算出するため、図3のユニットを3種類作製し、それぞれ側面から撮影した画像を元に角度 $\theta$ を算出した(図4)。3種類の平均値は約 $26^\circ$ となった。ただし、この角度は構造の大きさや重さによる変化やバネ特有の弾性的な挙動による変化が懸念されるため、現状、精度の高い設計には不向きであると考えられる。また構造を構築する素材を現在使用している紙類から剛性のある樹脂や金属に変更することで、個々の構造における角度の振れ幅は小さくなると考えられるが、展張を繰り返すことで設計した値からずれることが懸念される。

## 2.3 帯幅

完成した構造の外観形状を決定する要因は、帯幅とL字の形状である。図5に示した $x, y$ はそれぞれの帯幅を表しており、構造の底面積 $z$ は以下の式1で決定できる。

$$z = (x + y)^2 \quad (1)$$

また、 $x, y$ の幅を途中で変更することで、外観形状を変更することができる。

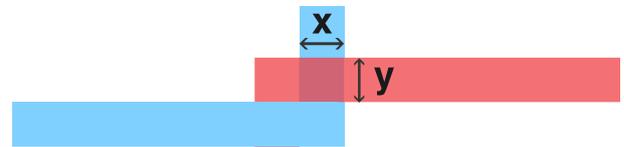


図 5. 底面積と線幅の関係

帯幅を変えて試作した構造の一例とその展開図を図6に示した。帯幅を段状に広げていくことで式1における $z$ も大きくなり、展張時に膨らみのある形状を実現できる。

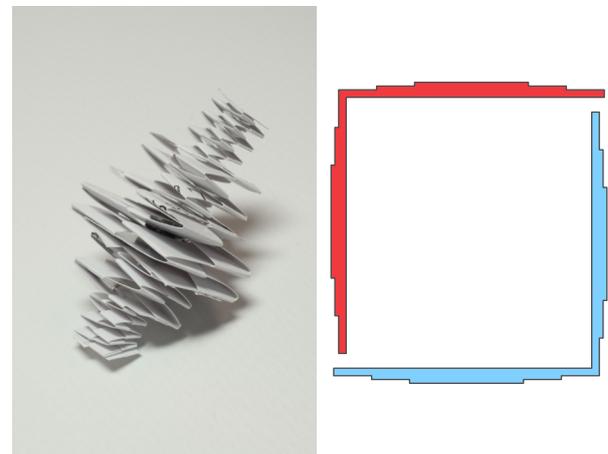


図 6. 帯幅を変更して構築できる構造例とその展開図

## 2.4 ねじれ

通常の紙バネは螺旋状にねじれて伸長するが、L字紙バネ構造では伸長時にねじれが生じない。通常の紙バネとの比較を図7に示した。

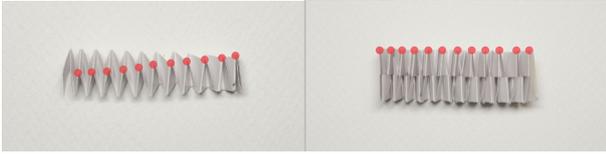


図7. 基本構造(左)とL字紙バネ構造(右)とのねじれ比較

### 2.4.1 折り方とねじれ具合

基本構造から一部折り方を変更することで、ねじれを生じさせることができる。図8に、ねじれが比較的弱い構造を製作する手順を示した。

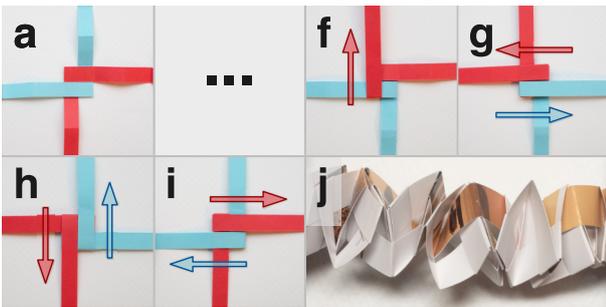


図8. 弱いねじれを生じる構造の折り方

図8 a-eは図2と同様で、fで南側左の帯のみ折り返す。gで再度、東西の帯を折り込みhでは南北を、iでは東西を折り込みひとつのサイクルが完了する。その後はd-iの手順を繰り返すことで、ねじれを有する構造が完成する。特徴としては南北で折り返す帯の折り込み回数に差を設けている点で、この差異によりねじれが生じるものと考えられる。

図9は、ねじれが比較的強い構造を製作する手順である。図8 a-eは図8と同様の手順で、fで南側に伸びる右の帯を北側に折り返し、gで東西に伸びる帯を折り込む。その後はgがcに対応すると考え、d-gの手順を繰り返していきことにより構造が完成する。

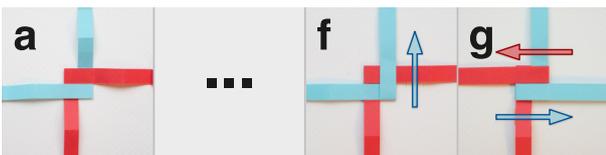


図9. 強いねじれを生じる構造の折り方

続いて、図8、9に示したねじれを生じさせる折り方で製作した構造と図2の手順を繰り返して製作し

たねじれの生じないL字紙バネ構造を用いて、ねじれ具合を比較する測定実験を行った。測定および解析は以下の手順で行った。

1. 各構造の一端を安定した支柱に固定
2. もう一端を日本電産シンポ製デジタルフォースゲージ (FGJN-5) を用いて一定の力 (0.07 N) で引張 (図10)
3. 真俯瞰で撮影した画像から支柱側より3番目の節角をマーク
4. 支柱側に固定した端部の角とマークした箇所とのずれから、角度を算出

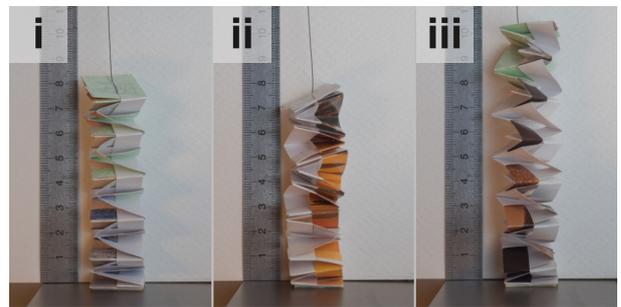


図10. ねじれない構造 (i), 弱いねじれが生じる構造 (ii), 強いねじれが生じる構造 (iii) を牽引している様子

測定の結果、図10 iの状態と比べ、iiでは約 $3^\circ$ 、iiiでは約 $6^\circ$ ねじれによる角度の差が見られた。

## 3 設計・製作工程

L字紙バネ構造の製作工程は大きく分けると以下のような手順となる。

1. 描画ソフト (Adobe Illustrator および Affinity Designer) でL字様の展開図を作製
2. GRAPHTEC 社 Silhouette Cameo 4 Plus (SILH-CAMEO-4-PLUS-J) で展開図に沿って切り出し
3. 切り出したL字様のパーツを組み合わせて折り込み
4. 構造の端部は接着剤などで処理

手順1と2に関しては、図11に示したような展開図を作図し、カッティングプロッタで出力している。作図の際、折り順を番号として付加したり、折り位置を記しておくことと手作業で折る際にも迷うことなく進めることが可能となる。今回製作した多くの構造は、一般的な壁掛けカレンダーに使用される厚さ約0.12 mmの紙を切り出している。3に関しては現在、手作業で行っているが、将来的には設計支援ツールと連携した形で、機械を用いて自動的に折り込む手法を検討している。

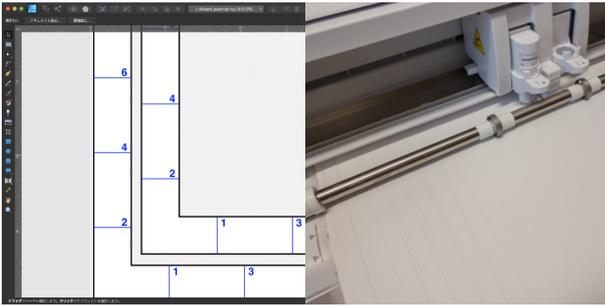


図 11. 展開図の描画と切り出しの様子

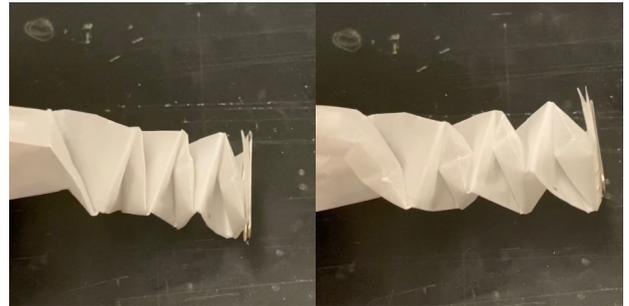


図 12. 空気で伸縮するアクチュエータの試作

## 4 考察と議論

### 4.1 L字型の利点

基本構造と比較してL字構造の優れている点は、2.4で述べたように、伸長時にねじれが生じにくいという点である。ねじれは意匠の一部として将来的に利用できる可能性はあるものの、恒常的に生じると設計の幅を狭めてしまうと考えられる。また、センサやアクチュエータへの応用を考えると直線的な伸縮を基本として設計できることが望ましい。それゆえ、ねじれの有無を選択できるL字構造は、基本構造より汎用性が高い。構造の作製過程においても、L字構造底面はL字を交差させているため、基本構造と違い接着が不要となる利点も挙げられる。

### 4.2 素材の選択と設計

本稿で提案した手法では、すべての構造製作に紙を用いている。紙は加工しやすく構造を検討する上で重宝する一方、角度やねじれ具合の測定を行う上では、プラスチック板などのより剛性のある素材が望ましいと考えられる。また、今後この構造の設計支援ツールを開発する上で、用途に応じた素材選択を可能にする必要がある。素材の厚みによって、折り込み位置・帯の長さも異なるため、開発の初期段階で対応する振れ幅も検討する必要がある。

### 4.3 構造の応用例

L字紙バネ構造が将来的にどのように活用できるのか、想定される使用例の図とともに示した。まず、バネ構造を活かした事例としてセンサやアクチュエータへの応用が考えられる。図12は帯を袋状にすることで、空気を用いて伸縮する簡易的なアクチュエータを試作した様子である（図12は基本構造の様子）。この他、構造に電子接点を設けることで押しボタン式スイッチも容易に構築できる。

構造が伸縮する特性を活かした事例として、構造に電子回路や電子部品を実装したプロダクトへの応用も想定される（図13）。伸縮するプロダクトや折り紙に電子回路を実装する研究は先行して行われているが、本手法は簡易なプロセスで製造することが出来る。

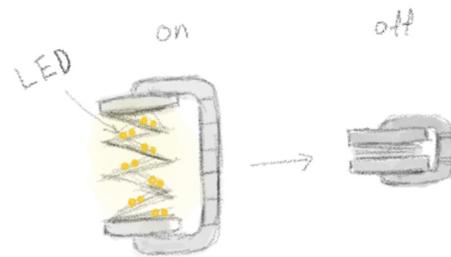


図 13. 電子部品を実装したプロダクトの想定

モジュールとして活かす方法も検討しており、図14のように建築資材やキャンプ用品、家具、自転車スタンドなど組み合わせることで手軽に拡張できる用途への展開も期待できる。

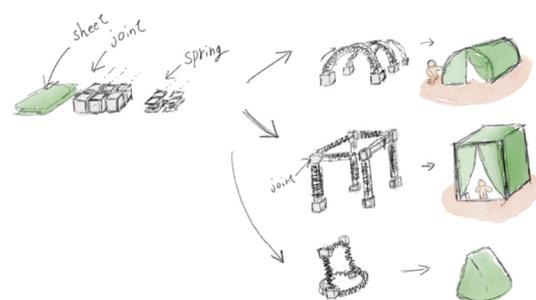


図 14. L字紙バネ構造をモジュールとして利用する例

## 5 まとめと今後の展望

本稿では、様々な分野で応用されている折り紙の設計・製造の自動化が困難であるという課題に注目し、設計支援・自動折り込みツールの開発を行う上で必要となる新たな折り方・構造の提案を行った。新たな折り方・構造としてL字型の帯を2つ組み合わせたL字紙バネ構造を提案し、この構造は以下の特性を有することが示唆された。

- 折り方の一部を変更することで構造に「曲げ」「ねじれ」の要素を加えることが可能
- 帯幅を変更することで外観形状を変更可能

「曲げ」の要素は、ひとつの折り工程を完成させることで一定範囲の角度で構造を曲げることができる。「ねじれ」の要素は、折り方によりねじれない状態・弱いねじれのある状態・強いねじれのある状態と3つの段階に分けることができる。これらのパラメータを取得したことで、設計支援ツールの開発に着手できる一方、より剛性のある素材で再度測定したほうが、より信頼性の高い値を取得できるという知見も得られた。今後は、設計の自動化に向けてRhinoCerosおよびGrasshopper等を用いて、ソフトウェアの開発を進めていく。

## 謝辞

本研究はJST ERATO川原万有情報網プロジェクト(JPMJER1501)の一環として実施されました。

## 参考文献

- [1] 公亮三浦. Method of packaging and development of large membranes in space, sep 1981.
- [2] Issey Miyake & Reality Lab. Creativity is Born 三宅一生 — 再生・再創造. パイインターナショナル, 2016.
- [3] Zekun Chang, Tung D. Ta, Koya Narumi, Heeju Kim, Fuminori Okuya, Dongchi Li, Kunihiko Kato, Jie Qi, Yoshinobu Miyamoto, Kazuya Saito, and Yoshihiro Kawahara. Kirigami haptic swatches: Design methods for cut-and-fold haptic feedback mechanisms. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, p. 112, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [4] S. Miyashita, L. Meeker, M. G. Ildi, Y. Kawahara, D. Rus. Self-folding printable elastic electric devices: Resistor, capacitor, and inductor. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1446–1453, 2014.
- [5] Taiju Yoneda, Daichi Matsumoto, and Hirofumi Wada. Structure, design, and mechanics of a paper spring. *Phys. Rev. E*, Vol. 100, p. 013003, Jul 2019.