

剛体に対してカーフベンディングを施したヨシムラ円筒の剛性 Rigidity of Yoshimura cylinders with kerf-bending against a rigid body.

○荒井 勇哉^{*1}, 山田悟史^{*2}
Yuya ARAI^{*1}, Satoshi YAMADA^{*2}

^{*1} 立命館大学 理工学研究科 建築都市デザイン学科

Graduate School, Department. of Architecture and Urban Design, Ritsumeikan University.

^{*2} 立命館大学 理工学部 建築都市デザイン学科 准教授・博士 (工学)

Associate Professor. of Architecture and Urban Design, Ritsumeikan University. Dr.Eng

キーワード：カーフベンディング; 折紙工学; 構法; 形態創生

Keywords: Kerf bending; Origami Engineering; Digital Fabrication; Morphogenesis

1. はじめに

折紙は様々な分野で研究・提案がなされており、工学的な試みが顕著である。とりわけヨシムラパターンやクレスリングパターン(図 1)を代表とする折り畳み可能/展開可能な 3 次元構造は建築分野と親和性が高く、応用が期待されている。しかし、工学的な実践・提案を考慮すると、厚みや剛性を持つ素材での検討は必須である。ここでさらに着目する技術の進歩と普及にデジタルファブリケーションがある。近年では実践事例が数多く発表されている。それらでは、コンピュータ上だけに留まらない高い自由度を持つ設計や、新たな構法が提案され、その応用可能性に社会的な着目が高まりつつある。

上記の社会背景から本研究は、レーザーカッターを用いた木材の加工技術の一つであるカーフベンディング(以下、KB)加工に着目する。これは木などの比較的硬い板材から柔軟な曲面形状を作り出す加工技術である。板材に対して蛇腹状にスリットカットを施すことで図2のように高い変形性能を与えられることが知られている。このようなデジタルファブリケーション技術を活用した折紙構造モデルの実践・提案は、折紙工学と建築学の両者において学術的・工学的な意義が見出されており、数例の類似事例がある。とりわけ Ron Resch Pattern が挙げられる¹⁾。平坦折り可能かつ即時展開可能な形態であるが、金物によって 4 つのボックスがピン接合されている。その他にも着目に値する類似事例は多数あるが、単一部材で構成された事例は極めて少ない。KB 技術を用いた単一部材での作成の可能性があると考えられるが、研究が少ないのが現状である。

上記を踏まえ本研究では、ヨシムラ円筒の折線部に KB 加工を施した円筒モデルを提案する。提案においては、①造形性、②平坦化、③セルフロックに着目する。③は折紙構造が外力無しに安定する現象のことである。三者を制御可能に木材にて提案することができれば、紙と比して高い耐力が期待される。これは物質として制作する上で重要な性能であるため、工学的な展開に資する提案になると



図 1. ヨシムラパターン(左) クレスリングパターン(中央)

考えられる。以上のことから本研究は、ヨシムラ円筒の折線部に KB 加工を施した円筒モデルを提案し、KB 加工のスリットパラメータと①造形性、②平坦化、③セルフロックの関係性について実験的に把握することを目的とする。具体的には①は円筒モデルとして造形可能であるか、②は平坦折が可能であるか、③は荷重時の座屈挙動である。なお上記は本研究の新規性に該当する。

2. 概要

本研究は下記の 3 段階で取り組む。

- 辺・折線部に KB 加工を施すためのプラグイン構築：
対象部分に後述するスリットパラメータに応じた KB スリットを自動生成するプラグインを構築する。
- 変形角実験：
一般的に KB 加工は板材に変形性能を与える一方で、剛性を低下させる。そこでスリットパラメータと変形角の関係性を観察する。
- 鉛直載荷実験：
スリットパラメータと座屈の関係性を観察する。

B) C) の観察対象に関して、実験を用いた帰納法でアプローチするのは、接合部の KB が半剛接合とみなせるため、理論的アプローチが容易ではないと判断したためである。

3. 各研究課題の手法

3.1. KB を生成するアルゴリズム構築

構築には、Rhino/Grasshopper/Crane を用いる。KB 加工にはカーブパターンが多数あるが、本研究では平行な線で構成される最も単純なパターンを採用する。これは単一曲率の KB で最も強度と柔軟性に優れていると考えられているためである²⁾。同様にスリットパラメータも数多く存在しているが、大嶋らの論文³⁾を参照して設定した。⁴⁾。なお汎用性の観点から様々な平面形状に適応可能とする。

3.2. スリットパラメータと変形角の関係性

重力による自然変形の変位を測定し、変形角を観察する。本実験では MDF(100×100×2.5) を試験片とし、その中心部に KB 加工を施した(図 3)。構築したアルゴリズムが持つスリットパラメータの中でも特に変形角に寄与する下記 2 つのパラメータを対象とし作成する。

(a)水平方向のスリットの間隔(1mm/2mm)

(b)直交方向スリット長さ(直交方向の 10%~90%)

実験風景を図 4 に示す。計測部分は厚さ方向の角度 α とし、板材の端を小型万力で固定する。また撮影は固定カメラで行う。レーザーカッターによる施工精度のばらつきを考慮し、各パラメータの試験片を複数作成する^{注1)}。

3.3. 提案モデルの作成

ヨシムラ円筒のモデルを作成する(図 5)。接合部は継手加工を施し、意図する立体とするために補助的に接着剤を用いる形式とする(図 6)。断面欠損と MDF 以外の材料の使用を極力減らすためである。なおヨシムラ円筒も同様に様々な変数が存在するが、本稿では円周方向のダイヤパターン数が 3 と 4(以下、三角形と四角形)のモデルとする。四角形モデルは形状の対称性から平坦折が可能である。三角形と四角形の外接円の直径は同一とし、各辺をそれぞれ 12.2cm と 10cm とする。その他パラメータに関しては固定とする。3.2 に示したスリットパラメータと組み合わせたパターンを図 7 に示す。

KB の変形性能により(b)が小さいパラメータでは破断角度<造形角度であったため、造形不可であった。加えて、(b)が大きいパラメータは KB の交差部分が切削段階で破断した。これは(a)=2 以上の場合でも同様であった。従って、鉛直載荷実験を行うのは図 8 である。方法に関する記述であるが、研究目的①に対する結果である。

3.4. 座屈試験

実験は分銅を用いた鉛直方向の荷重実験を採用した(図 9)。観測対象は、鉛直方向の座屈変位と破断時の荷重である。荷重単位は 100g、最大荷重は 6000g である。KB 部分のいずれかが破断した段階で、剛性限界とみなす。実験においては、均等に荷重をかけるための治具として、荷重位



図 3. 試験片

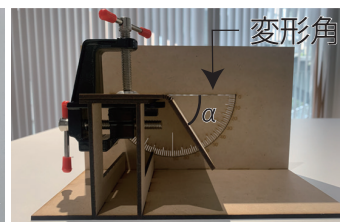


図 4. 実験風景-変形角

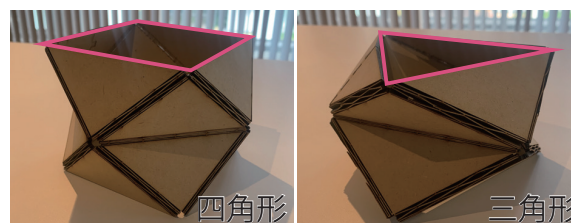


図 5. 四角形モデル(左)と三角形モデル(右)

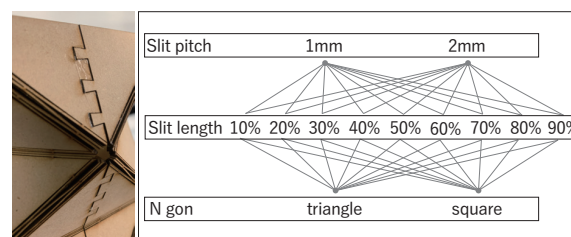


図 6. 継手

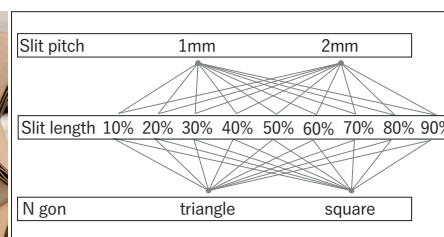


図 7. 全体のパラメータ

N gon	スリットパラメータ									
	a	1mm								
四角形	b	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
	a	2mm								
	b	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
三角形	a	1mm								
	b	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
	a	2mm								
	b	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%

※斜線は立体として造形不可

図 8. 造形可能なパラメータ

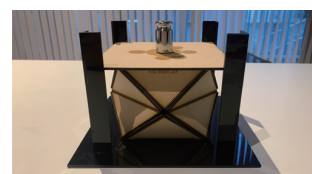


図 9. 実験風景-座屈

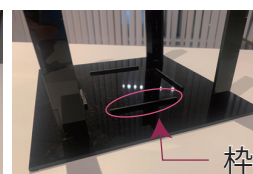


図 10. 治具と枠

置をマークした天板、天板の移動を鉛直方向にガイドする L 字の柱、円筒のずれを防止するための高さ 1cm の枠を作成した(図 10)。

4. 各研究課題の結果

4.1. KB を生成するアルゴリズム構築

簡略図を図 11 に示す。生成手順は形状によって異なる。平面形状に施す時は、対象線を Curve コンポーネントに設定することで KB が生成される。立体形状も同様に、Mesh コンポーネントに設定することでその展開図の折線部に KB を生成することが可能である。また、立体形状の角度

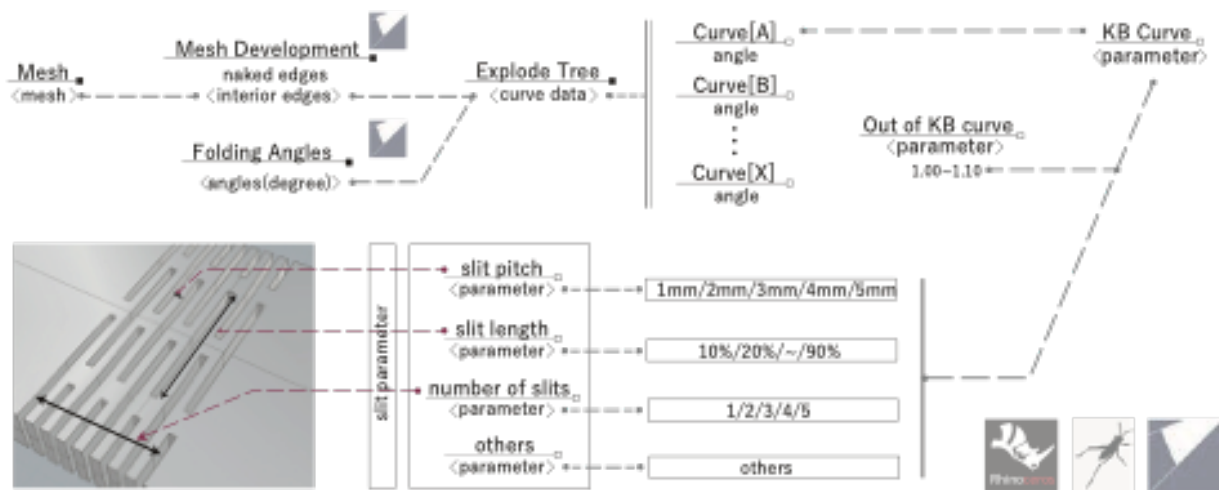


図 11. カーブベンディングを施すアルゴリズムの簡略図

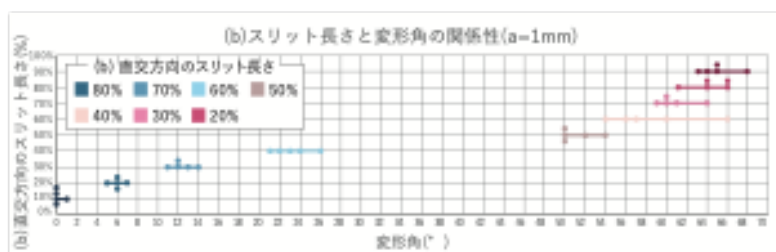


図 12. (a)=1mm の変形角の実験結果(ジッタープロット)

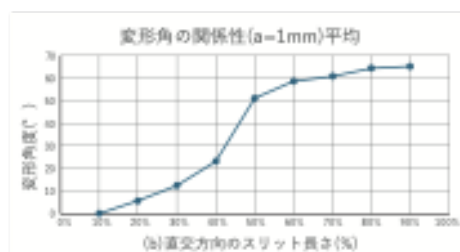


図 13. (a)=1mm の分析結果(平均)

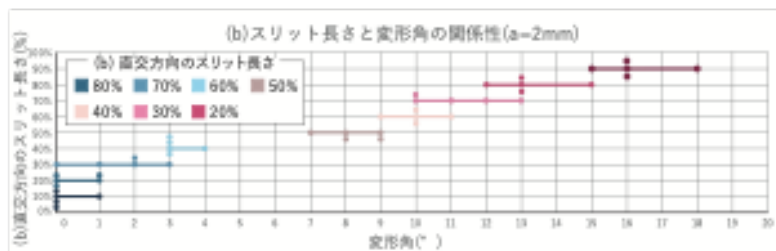


図 14. (a)=2mm の変形角の実験結果(ジッタープロット)

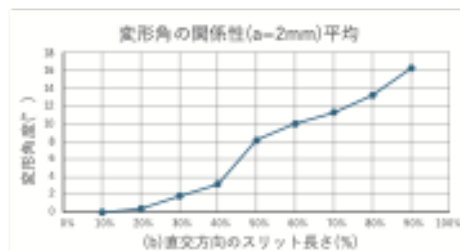


図 15. (a)=2mm の分析結果(平均)

ごとに辺を分類可能としたことで、各辺に異なるスリットパラメータを持つ KB 加工を施すことも可能である。

4.2. 変形角実験の結果

結果を図 12~15 に示す。(a)=1mm のとき(図 12)、(b)スリット長さが短い(%が低い)ほど結果のばらつきが小さく、長いほどばらつきが大きい。(b)と変形角の関係性について平均値を参照すると (b)=40%と 50%で変形角に大きな差が生じることがわかる(図 13)。これは MDF がこの値を閾値として物理的性質が変化していることが示唆される。閾値を超えると(b)が増加した時の変形の増分は大きくなり、その後小さくなる。次に(a)=2mm をみる(図 14)。(a)=1mm と比して(b)の各長さ内における結果のばらつきの差が小さい。(b)と変形角の関係性については、(a)=1mm と同様に(b)=40%と 50%で類似の傾きの傾向を示した (図 15)。この実験により、スリットパラメータの(b)と変形角の関係性及び閾値を分析することができた。

4.3. 鉛直荷重実験の結果

各モデルの結果をそれぞれ図 16、図 17 に示す。なお本実験では座屈とほぼ同時に KB 部分が曲げにより破断した。まず四角形モデルについて記述する。座屈時の耐荷重の傾向からは、(b)が増加するほど剛性が低下することがわかる(図 16 左)。(b)≤40%の時、最大荷重の 6000g をかけても座屈は見られなかった。とりわけ 40%≤(b)≤50%間で強度が大きく変化しているが、変形角実験においても同様の結果が見られた。変形角と耐荷重が 40%≤(b)≤50%で約 2 倍の変化が生じているため、共にこの範囲が物理的性質の閾値であることが明らかである。一方で、鉛直方向の変形推移は(b)の値によって 3 種類に分類することができる(図 16 右)。(b)=70%、80%では、1500~2000g 間で変形量が大きく増加していることから靱性破壊のような挙動を確認できた。(b)=50%、60%では、座屈時まで変形量は小さいため、

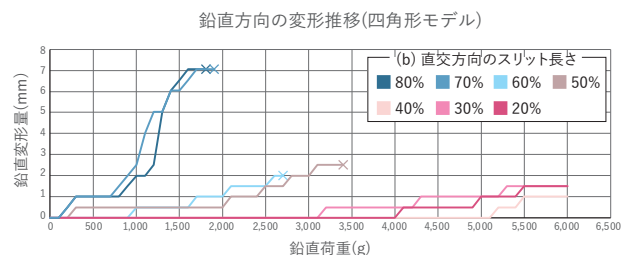
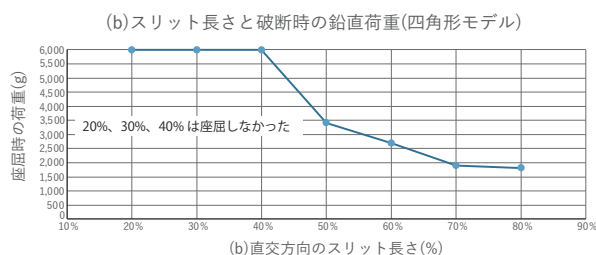


図 16. 四角形モデルの鉛直載荷実験結果

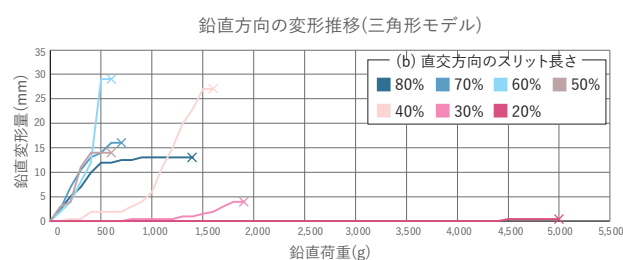
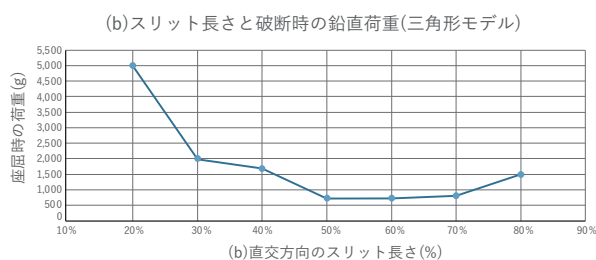


図 17. 三角形モデルの鉛直載荷実験結果

脆性破壊のような挙動を確認できた。また座屈時はモデルがせん断方向に折り畳む挙動を示し、対辺の 2 箇所の KB が破断する現象が多く見られた(図 18)。

次に三角形モデルについて記述する。20% $\leq$ (b) $\leq$ 30%間で耐荷重が大きく減少し、30% $\leq$ (b)は減少量は小さい。(b)=20%の時、剛性が最も高く、最大強度は 5000g であった(図 17 左)。三角形モデルの変形推移も四角形モデルと同様に 3 種類に分類できる(図 17 右)。(b)=40%、60%では靱性破壊のような挙動を示し、(b)=50%、70%、80%では脆性破壊のような挙動を示した。座屈時はモデルが鉛直方向に折り畳む挙動を示し、上部の KB 部分が破断する現象が多く見られた(図 18)。また 70% $\leq$ (b) $\leq$ 80%で耐荷重が僅かに増加している傾向も見られた。

4. まとめ

本研究では、ヨシムラ円筒の折線部分に KB 加工を施した立体モデルを提案し、スリットパラメータがモデルへ与える剛性の影響を示すことができた。しかし、本稿はコアなパラメータに焦点を当てたため、立体側の変数が与える影響に関しては検討不足である。また、前述した閾値は最大降伏点の近傍となる(b)であるが、不明確である。従って鉛直載荷実験の精密さ向上と試行回数の増加を今後の方針とする。その他にも平面形状のミウラ、ヨシムラパターンに KB 加工を施した(図 19)。また任意の同形状に異なるスリットパラメータの KB 加工を施すことで変形角度に差異を生じさせることができた(図 20)。これらは本研究の発展であり、KB 加工が様々な形状に適応可能であることを示唆している。本研究の深化で KB 加工を用いた実寸大の円柱としての応用が期待される。

[注釈]

注1) 試験片の施工回数を 30 回として施工精度のばらつきを検証



図 18. 破断の様子(左:四角形右:三角形)

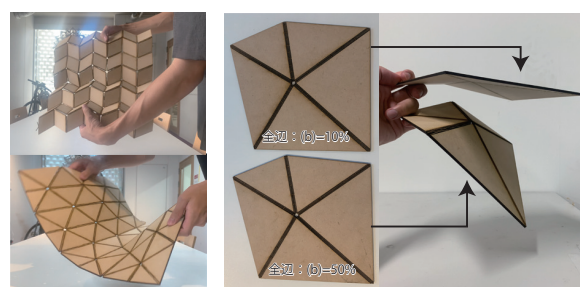


図 19. ミウラパターン(左上) 図 20. 同形状で異なるパラメータ(中央、右) ヨシムラパターン(左下)

したところ、ばらつきの値は $\pm 1.5^\circ$ 程度であり、概ね正規分布の傾向を示した。よって変形角実験においては施工回数を 5 回として検証を行う。

[参考文献]

- 1) Shingo Uzawa, Toshiharu Igarashi, Kazuki Takazawa, Nozomi Magome : Novel structure using quasirigid folding of voxel in Ron Resch pattern. Posters presentation for SIGGRAPH Asia 2018.
- 2) Orkan Zeynel Güzelci, Zeynep Bacinoğlu, Sema Alaçam, "Enhancing Flexibility of 2D Planar Materials By Applying Cut Patterns For Hands On Study Models", SIGRaDi 2016, XX Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics 9-11, November, 2016 - Buenos Aires, Argentina, 2016.
- 3) 大嶋泰介, 五十嵐健夫, 三谷純, 田中浩也 : Dukta の変形特性を用いた変形形状の対話的デザイン・制作システム-日本バーチャルリアリティ学会論文集, 18 巻 4 号 pp.507-516, 2013.
- 4) 荒井勇哉, 山田悟史 : カーフベンディングにおけるスリットパターンと変形性能の関係性-MDF 板材のデジタルファブリケーション加工を例に-, 日本建築学会大会(近畿)学術講演会梗概集(建築計画), pp561-562, 2023.9, 日本建築学会