

レーザーカットによるぜんまいばね製作と その性能評価

大場 直史^{†1} 宮下 芳明^{†1}

概要: これまでにレーザーカッターで立体物や可動部を作りやすくする研究が行われてきた。筆者らはそれらに動力として組み込めるぜんまいを提案する。レーザーカットで他の部品と同素材のぜんまいを製作できれば、別出力する時間とコストの削減に繋がる。ユーザがばねの性能を設計できることが望ましいが、金属のぜんまいばね製作に利用されていた式を適用できるかは分かっていない。本論文ではレーザーカッターに広く利用される MDF とアクリル板でぜんまいばねを製作し、ある程度の誤差の範囲内で設計式の利用及び性能制御が可能であることを示した。

Making Spring with Laser Cutting and Performance Evaluation

Ooba Naoshi^{†1} Miyashita Homei^{†1}

Abstract: A study to make it easy to create 3D object and moving part with a laser cutter has been performed so far. We suggest a spring to incorporate in them as power. Making spring with the same material that configure other parts can reduce the time to make separately and cost. It is desirable that a user can design the performance to use it, but does not know whether design equation can use as in the case of metal. In this paper, we made a spring of MDF and acrylic board which is used as material of the laser cutting, and could control the spring performance including some error by the equation.

1. はじめに

レーザーカッターは企業だけでなく個人レベルでのファブ리케이션ツールとしても注目されている。その理由はアクリルなど樹脂素材や木材を利用できることで、安価ながらもクオリティの高い製作を可能としている点が挙げられる。またこれまでレーザーカッターを用いて立体物や可動部を一度で作り出すことは難しいとされてきたが、様々な解決への試みがなされてきた。

例えばカットのパターンや深さによって加工対象を曲げやすくする方法がある [1][2][3]。これによって曲面を持つ箱や蝶番といった、しなやかな構造が製作可能になった。より発展的な研究として Mueller らの研究が挙げられる [4]。これは炙りによる折り曲げで、組み立てることなく

ペンスタンドや名刺入れといった立体物を製作する方法を提案した。他には切断と溶接を行うことで可動部を組み立て無しに製作する Umapathi らの研究がある [5]。

ところで、レーザーカッターや 3D プリンタで可動部を持つ物体を製作するとき、動力を取り付けたい場合がある。その場合モーターを利用することが多いが、電源の供給が必要であることや組み立てのサイズから適さない場合がある。例えばキーリールのワイヤー巻取り動作にモーターを使うのは大げさである。そこで筆者らはモーターを使わない動力としてぜんまいに着目した (図 1)。ぜんまいは巻き上げの力をエネルギーとして保持し、再び取り出すことのできる機構である。レーザーカッターで製作を行う際に、このぜんまいを他のパーツと同時に切り出して利用できると考えた。動力となるぜんまいを他の部品と同じ素材から作れることは製作時間とコストの削減に繋がるうえに、Umapathi らの研究と合わせることでより複雑な可動部を組み立て工程無しに製作できると考えている。

^{†1} 現在, 明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科
Presently with Department of Frontier Media Science, Faculty of Interdisciplinary Mathematical Sciences at Meiji University



図 1 ぜんまいばねの試作
Fig. 1 A prototype of spring.

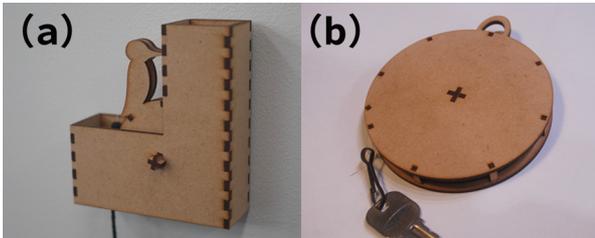


図 2 ぜんまいばねを組み込むことで製作できる物体の例
(a) ドアノッカー (b) キーリール.

Fig. 2 Examples using spring (a)knocker (b)key reel.

この提案でまず問題となることはぜんまいの設計である。JIS 規格 (日本工業規格)[6] と JSMA 規格 (日本ばね工業会規格)[7] にはぜんまいばねの設計式や注意点が纏められているが、これらは主に鉄鋼を用いた場合を想定しており、樹脂や木材といった素材については言及されていない。これらの素材も切り出した大きさや断面積によって性能が変わると考えられ、ユーザが必要なものを製作できることが必要である。制御が可能であれば、図 2 に示した可動部を持つ物体を自らの手でデザインし利用することができる。

本論文ではレーザーカット用の素材として広く使われる MDF 板 (中密度繊維板) とアクリル板を用いてぜんまいばねを製作した。これらが金属の場合と同様に設計式を用いて性能の制御が可能であるかと、繰り返し利用した場合の変化を調査した。

2. ぜんまいばねの説明

2.1 部品の名称

機構全体を指して「ぜんまい」とする 경우가多いが、ばねを収めた入れ物は香箱 (こうばこ) と呼ばれる。ぜんまい式の時計では、ばねが取り付けられた香箱の中心軸、香箱真を巻き上げることで香箱を回転させている。またこれとは逆に香箱そのものを巻き上げる場合や、巻き上げた香箱真を解放することで逆回転の力を得る場合もある。

2.2 設計規格

JIS 規格 [6] 及び JSMA 規格 [7] では金属製薄板ばねを設計する方法が定められている。この薄板ばねのうち、らせん状に設計したものを渦巻きばね、あるいはぜんまいばねと呼ぶ。またこのぜんまいばねも隣接したコイルが常に接触しているものを接触型、そうでないものを非接触型と区

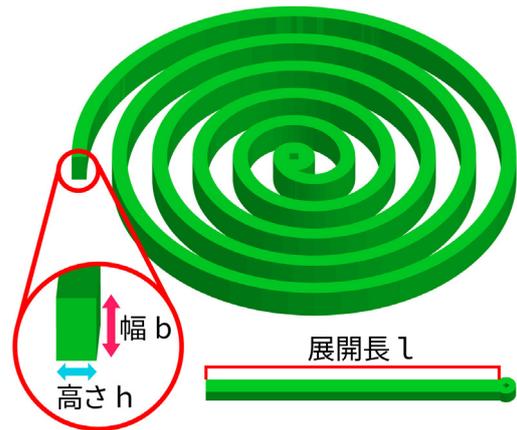


図 3 非接触型ぜんまいばね.
Fig. 3 Noncontact type spiral spring.

別する。図 3 は非接触型ぜんまいばねの概形である。レーザーカットという加工の特性から、接触型のばねを製作することは難しい。そのため本論文では非接触型のぜんまいばね製作を行う。

ばねの外端を動かぬよう固定して利用する場合、トルクと変位角の関係は式 (1) で、物体の変形や破壊の検討に用いる応力は式 (2) で与えられる。

$$M = k\phi = \frac{EI}{l}\phi \quad (1)$$

$$\sigma = M \times \frac{6}{bh^2} = \frac{6M}{bh^2} \quad (2)$$

このとき M はトルク [N・mm], k はばね定数 [N・mm/rad], ϕ は変位角 [rad], E は縦弾性係数 (ヤング率) [MPa], I は断面 2 次モーメント [mm⁴], l はぜんまいばねの展開長 [mm], σ は応力 [N/mm²], b はばねの幅 [mm], h はばねの高さ [mm] である。

断面 2 次モーメント I は断面係数と重心の距離から求めることができる。今回作成するぜんまいばねの断面は長方形であるから式 (3) で表せる。

$$I = \frac{bh^2}{6} \times \frac{h}{2} = \frac{bh^3}{12} \quad (3)$$

3. 実験 1 : トルク M と変位角 ϕ の関係

はじめにぜんまいばねに与えた力 (トルク) M と変位角 ϕ の関係を調査する。この関係は蓄えることのできるエネルギーを示す基本的なばねの評価基準となる。実験では断面 2 次モーメント I に含まれる幅 b と高さ h を変化させた場合と、展開長 l を変化させた場合の 2 つを見ていく。

式 (1)(3) を整理すると次の式になる。

$$\phi = \frac{1}{k}M = \frac{12l}{Ebh^3}M \quad (4)$$

b と h の増加で ϕ の減少、また l の増加で ϕ の増加がみられる場合は、縦弾性係数 E を含めたばね定数 k としてよ

り深い関係を探る。

k を構成する値のうち、 E は通常与えられているものとして扱うが、今回利用する MDF の正確な E の値は分かっていない。オンライン上や規格書には様々な素材の E のデータが纏められている [8][9] が、MDF とアクリルいずれも密度や製法によって E の値が大きく変わるため、参考値として利用する。

具体的な値として E を測定する方法は大きく分けて 2 通りある。超音波等の振動を与える動的試験と引っ張りや振じりから求める静的試験に分けられる。後者は応力とひずみの関係が線形とみなせなくなる、非線形挙動や加工精度による測定誤差が生じることに注意しなければならない。しかし比較的容易に測定結果から値を求めることができるため、この方法を参考にする。

今回 M と ϕ が線形の関係である場合は式 (4) を変形し、 E を推定できる。この E も各条件ごとにデータを纏めて考察に利用する。

$$E = \frac{12lM}{bh^3\phi} \quad (5)$$

3.1 共通する実験環境

3.1.1 測定方法

専用の測定装置として香箱型分度器を作成した。テグスの一端を香箱に取り付けた後、円周を数回転するように巻き取っていく。もう片方をばねばかりに取り付け、静かに引き上げることで回転する力をぜんまいに与える仕組みになっている。また香箱に彫刻されている目盛りと、軸固定を兼ねた指針用の板から角度を読み取ることができる。テグスの弛みが無く、はかりが振れない状態を基準の値とし、そこから 10g 毎に回転した角度を写真記録及び目視で読み取った。

1 回の測定はぜんまいばねの破断が起こるか、はかりの最大測定値 500g に達した場合に終了した。それぞれの条件で数回ずつ測定を行うが、毎回新しいぜんまいばねに交換した。また計算に用いるトルク M は軸からばねを固定する外端までの長さ $r = 50\text{mm}$ とばねばかりの目盛り $m[\text{g}]$ を用いて

$$M = r \times F = 50 \times m \times 9.8 \times 10^{-3} \quad (6)$$

である。

3.1.2 利用した素材と機器

MDF 板は厚さ 2.5mm と 4.0mm の 2 種類を、アクリル板は厚さ 2.0mm のものを用意した。この厚さがぜんまいばねの幅 b のパラメータとして決定される。なお実験のセット毎に板と切断位置と向きを変えている。

設計には Adobe Illustrator CC2015 を使い切断パスは 0.001mm で指定、出力するレーザカッターは trotec speedy 100 を利用した。切断の出力調整は素材とその厚さごとに調

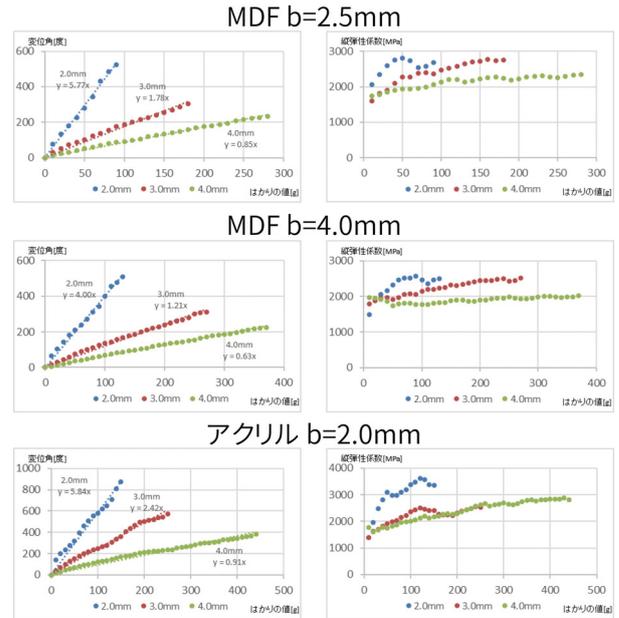


図 4 実験 1-1 : 幅 b と高さ h を変化させた場合の変化。
Fig. 4 Experiment1-1 : the case of changing b and h .

整した。MDF2.5mm の加工は Power 40.00, Speed 0.40, 1000Hz であり、4.0mm の加工は Power 60.00, Speed 0.40, 1000Hz で行った。またアクリル 2.0mm の加工は Power 40.00, Speed 0.40, 1000Hz で行った。

3.2 実験 1-1 : 断面 2 次モーメント I を変化させた場合

共通するパラメータとして展開長 l を 928.2mm に設定する。断面 2 次モーメントに関するパラメータはばねの幅 b と高さ h の 2 要因である。MDF は b を 2 水準 (2.5mm, 4.0mm)、アクリルは 1 水準 (2.0mm) を用意した。 h はどちらも 3 水準 (2.0mm, 3.0mm, 4.0mm) 用意し、各条件 5 回ずつ測定を行った。データは最初に破断が起きたはかりの値までを利用し、分析にはそれぞれの測定から求めた近似式を利用する。図 4 は各条件の平均値をプロットしたグラフとそのときの E の値を導いたものである。

MDF について 2 要因の分散分析を行った結果、 b と h それぞれの主効果と交互作用が有意であった。 $(b$ による主効果, $F_{(1,29)} = 224.50, p < .01)$ (h による主効果, $F_{(2,29)} = 1862.10, p < .01)$ 。HSD 法を用いた多重分析によるといずれも h が 2.0mm, 3.0mm, 4.0mm の順に傾きが小さくなっていった ($b = 2.5\text{mm}$, $MSe = 0.027, p < .05$) ($b = 4.0\text{mm}$, $MSe = 0.027, p < .05$)。またアクリルについて分析を行った結果、 h による傾きの有意差が見られた。 $(F_{(2,14)} = 1379.1, p < .01)$ 。さらに多重分析を行った結果 MDF の場合と同様に h の値が大きくなるほど傾きが小さくなることが分かった ($MSe = 0.023, p < .05$)。

3.3 実験 1-2 : 展開長 l を変化させた場合

共通なパラメータとして高さ h を 3.0mm に固定し、ばね

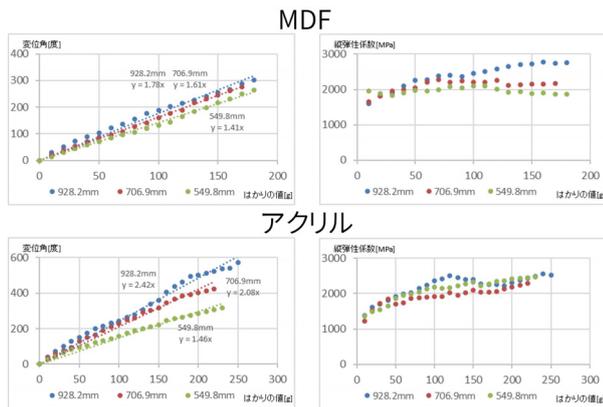


図5 実験1-2：展開長 l を変化した場合の変化。
Fig. 5 Experiment1-2: the case of changing l .

の幅 b を MDF の場合は 2.5mm, アクリルの場合は 2.0mm に設定した。水準である展開長 l は 3 水準 (928.2mm, 706.9mm, 549.8mm) 用意し, 実験 1 と同様に 5 回ずつの測定を行った。

測定結果は図 5 である。

測定結果より, MDF とアクリル両方に傾きの有意差があることが分散分析から分かった (MDF の場合, $F_{(2,14)} = 28.65$) (アクリルの場合, $p < .01$, $F_{(2,14)} = 62.25$, $p < .01$)。また l の値が大きくなるほど傾きも大きくなることが多重分析から分かった (MDF の場合, $MSe = 0.006$, $p < .05$) (アクリルの場合, $MSe = 0.019$, $p < .05$)。

3.4 実験 1 の考察

グラフからはほぼ線形でトルク M と変位角 ϕ が増加することが読み取れた。分析から, ばねの幅 b と高さ h の値が大きくなると M に対する ϕ が減少すること, 展開長 l の増加に追って M に対する ϕ が増加することが分かった。

金属の場合と同様であれば, h の値は 3 乗で変化することが式 (4) より読み取れる。つまり実験 1-1 における h が 2.0mm の傾きは 3.0mm の $(\frac{3}{2})^3 = 3.38$ 倍, 4.0mm の 8 倍であると考えられる。しかし MDF の $b = 2.5$ mm の場合は 3.24 倍と 6.76 倍という具合に, 全ての条件で予想よりも低い値であった。また l についての変化量は等倍であると予想していたが, これも実際の値は低かった。従ってばね定数 k を構成する値は金属の場合と完全には同じではないことが考えられる。

この k が予想通りの値ではなかったことから実験 1 で導いた E を分析した。特に MDF の場合は 2 つの場合を除き, E の値に有意な差があることが示された (実験 1-1: $b = 2.5$ mm, $F_{(2,72)} = 15.07$, $p < .01$) (実験 1-1: $b = 4.0$ mm, $F_{(2,101)} = 50.83$, $p < .01$) (実験 1-2, $F_{(2,52)} = 16.41$, $p < .01$)。 h が大きいほど E の値が小さく, l が大きくなると E の値も大きくなる傾向が分かった (実験 1-1: $b = 2.5$ mm, $MSe = 0.057$, $p < .05$) (実験 1-1: $b = 4.0$ mm, $MSe = 0.039$, $p < .05$) (実

験 1-2, $MSe = 0.039$, $p < .05$)。アクリルの場合は MDF ほど顕著ではないが, ややこれに近い傾向があることが読み取れた (実験 1-1, $F_{(2,83)} = 17.25$, $p < .01$, $MSe = 0.173$, $p < .05$) (実験 1-2, $F_{(2,69)} = 5.43$, $p < .01$, $MSe = 0.087$, $p < .05$)。この E の値が一意に定まらなかったことには, 素材ごとに固有の原因があると考えている。

まず MDF はレーザ切断面が硬化したためと考えている。焼杉に代表される, 木材の表面を炭化させることで耐久性を高める処理が存在する。これに関連する研究として超音波振動を利用して表面硬化及び炭化を試みた事例が挙げられる [10]。レーザカッターで切断を行う場合も, 面の炭化及び硬化が起きていることが考えられる。しかし今回実験からはどの程度硬化するかを導くことは出来なかった。MDF の分析からは h の減少で炭化した切断面が近くなること, l の増加で切断面の増加と捉えることで E の増加が説明出来る。

アクリルで製作した場合については, 熱による歪みで加工精度の低下が起きていると考えている。実験 1-1 で $h = 2.0$ mm の場合は最も太いところでも 1.4mm 程度, 最も細いところでは 1.0mm で切断されていた場合があった。アクリルは熱可塑性の樹脂であるため, 切断面が近い場合と切断長が大きくなる場合は変形の影響を受やすいのだと捉えた。

ここで金属製のばねに利用されてきた式で, 予測を行った場合の精度を確かめた。素材は MDF を利用し, 各パラメータは b を 2.5mm, h を 2.5mm, l を 1144.4mm で指定した。また E は実験 1-1 と 1-2 から得た値から推測し, 2500MPa を指定した。この条件では実測値から求めた近似式と比べ, 50g で 13.6 度の誤差が出ていることが分かった。

MDF とアクリルそれぞれの変化を考慮した式は, 様々なパラメータのばねを測定することで導くことができると想定している。だが, およその挙動を把握する場合には, これまでに利用されてきた式で十分であると考えている。

4. 実験 2：繰り返し負荷を掛けた場合の変化

金属製のぜんまいばねを繰り返し利用すると徐々に「へたたり」が生じる [11]。「へたたり」はぜんまいばねが徐々に変形していく現象で, 例えば時計に組み込まれたものでは正確な時を刻めなくなってしまうことが挙げられる [12]。ぜんまいの耐久性を考える際には破断だけでなくこの「へたたり」による劣化を含める必要がある。今回製作する MDF とアクリルについても繰り返し負荷をかけた場合の変化を調査する。

まずコイルばねについて纏められた規格では, 繰り返しの荷重があっても利用期間中に 1000 回以下であれば静荷重ばねとして扱うことになっている [13]。また鉄鋼材料の静荷重のぜんまいばねを利用する場合, 負荷は引っ張り強さの 70%であるのが望ましいとされている [6]。ぜんまい

ばねを繰り返し利用する場合の性能評価方法を見つけることができなかったが、これらの記述を参考に実験を設定する。

この実験では予め実験1における各条件で破断した値を利用し、耐えることのできた応力を導く。最大応力の7割に相当する負荷を100回与えた後に、ばねの変形した角度を確認する。この後トルク M と変位角 ϕ の関係を測定する。

4.1 共通する実験環境

測定装置と利用する素材、機器、ソフトウェアの条件は実験1と同様である。力を掛ける際は、ばねばかりが目標の値を指すまで静かに引き上げた。力を抜いてぜんまいを戻す際も、勢いがつかないように0gを指すまではかりを静かに下した。100回の引き上げを行った後、テグスの弛みが無く、はかりが振れない状態を基準の値として測定した。

4.2 応力の計算

応力は M , b , h を用いて式2で求めることができる。この応力は同一の素材であれば一定の値を示すはずであるが、実験1で分かった E の変化から、これもある程度の増減が起きていると予想する。この実験では負荷の目安に用いるため、計算結果を参考に最大応力を定める。

MDFの応力については実験1-1のデータから h による主効果が見られた (b による主効果: $F_{(1,29)} = 2.52$, n.s.) (h による主効果: $F_{(2,29)} = 60.89$, $p < .01$)。また多重分析から2.0mmと3.0mm, 2.0mmと4.0mmの間に有意な差があることが分かった ($MSe = 9.9298$, $p < .05$)。実験1-2からは有意差は見られなかった ($F_{(2,14)} = 1.49$, n.s.)。

アクリルについては前章で調査した E と似た傾向が得られ、実験1-2における928.2mmと549.8mmの間にも差があることが分かった (実験1-1, $F_{(2,14)} = 60.89$, $p < .01$, $MSe = 5.912$, 2.0mm > 3.0mm と 2.0mm > 4.0mm いずれも $p < .05$) (実験1-2, $F_{(2,14)} = 11.70$, $p < .01$, $MSe = 1.779$, 928.2mm > 706.9mm と 928.2mm > 549.8mm いずれも $p < .05$)。

予想の通り応力の値に増減が生じているが、計算に用いる最大応力をMDFは25N/mm², アクリルは40N/mm²とした。

4.3 繰り返しの負荷を掛けた場合の測定

測定に用いるばねの外径は100mm, 幅 b をMDFは2.5mm アクリルは2.0mm, 高さ h を3.0mm, 展開長 l を928.2mmとした。4.2章で求めた最大応力からMDFは130g, アクリルは160gを指すまで100回の負荷を与えた。

負荷を与えた後、測定の基準となる角度は全てのばねが未使用のもの比べて増加していた。角度の平均を纏めたものが表1である。

表1 実験2: 基準となる角度の変動。

Table 1 Experiment2: reference value of angle.

材質	未使用 [度]	負荷後 [度]	增加值 [度]
MDF	13.2	59.8	46.6
アクリル	12.6	43.0	31.6

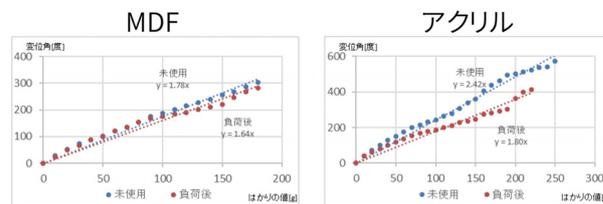


図6 実験2: 未使用の場合と繰り返し負荷を掛けた場合の比較。

Fig. 6 Experiment2: compare unused spring and used one.

M と ϕ の関係を纏めたグラフ (図6) と t 検定の結果 (MDF, $F_{(1,9)} = 5.03$, $p < .10$) (アクリル, $F_{(1,9)} = 56.40$, $p < .01$) からどちらも未使用の場合と比べて有意に傾きが小さくなっていることが分かった。

4.4 実験2の考察

100回の負荷を与えた後、基準となる角度が未使用のもの比べてMDFは約45度, アクリルは約30度増加していた。何もせずにはばねを取り付けた場合は、繰り返しの利用によって元の角度まで戻らなくなってしまう。「へたり」による弛みを軽減したい場合はこの角度の増加を考慮し、予め少し巻いておくといった対応が必要になる。

測定したデータからは、どちらも未使用のものよりグラフの傾きが小さくなっていることが分かった。与えた力に対して変異した角度が小さくなったということは、ばね定数 k 及び縦弾性係数 E が増加したことになる。実験1の各条件にて E の値がはかりの値の増加に伴って増える傾向が読み取れているが、繰り返し負荷の後に基準の角度が増加しているため E が増えたのだと捉えている。つまり絶対的な角度が未使用のもの比べて増加しているため E が増えたのだと考えている。

この実験の結果からも金属製と比べ強度が低く、寿命が早いことは推測できる。ある程度の使用回数をもって交換しなければならないことは、鉄鋼のばねと同様である。MDFやアクリルを加工することは金属よりも容易になりつつあるため、必要に応じてレーザーカットで交換する部品を作り出すことは大きな問題ではないと考える。

5. 作例と今後の利用について

およその挙動を制御できる例としてドアノッカーとキーリール (図7) を製作した。

ドアノッカーは引いた紐を離すと板を打ち鳴らす仕掛けを設計したが、その際に強い力を必要とせずに90度程度の回転を行いたいという想定をした。縦弾性係数 E を

2100MPaとしたとき、100度の回転に0.6Nの力が必要な計算になる。製作にかかった時間は、式計算を含む図面設計に1時間程度、出力は10分、接着を含む組み立ては15分であった。

キーリールを設計する際には鍵を吊り下げるときにワイヤーが緩んでしまわないことと、必要な長さまで壊れずに回転させることが必要である。予め90度回転させておき、「へたり」による変形が起こった後でも40度程度の引き戻しが常に掛かる構造にした。Eを2100MPaとした場合、50gまでの物体であればワイヤーが伸びない想定である。また耐えることのできる負荷は200g程度であり、7割である140gの負荷を掛けた場合は181.3度の回転が得られる。ワイヤーを巻き付けた香箱は90mmであるからおおよそ140mmの伸縮が可能な計算になる。完成したキーリール全体の大きさは100mmになり、製作にかかった時間は3時間程度（設計2.5時間、出力20分、組み立て20分）であった。実際に製作したものを12日間で13回程利用したが壊れることは無く、ワイヤーの弛みも感じられなかった。

製作で気付いた点としては、ばねが必要な条件を満たすか確認するために、完成時の大きさ及びばねの外径を最初に決定する必要がある。これはばねのパラメータを変更する度に、式の再計算をしなければならないからである。IonらのMetamaterial Mechanisms[14]や、McCraeらのFlatFitFab[15]では力を与えた際の動きや破壊されるポイントについてシミュレーションを行っている。数値の提示だけでなく挙動の予測といった、ユーザが設計しやすくなるための機能に今後は組まなければならない。

今回製作したぜんまいばねも、実験2で述べた通り最終的には壊れてしまう。だが3Dプリンタやレーザカッターといったツールが持っている強みは、自身の好みのデザインで製作できることだけでなく、交換する部品も自身の手で作り出せることだと考えている。この研究は求める性能を持つパーツを必要に応じて設計し、個々人に合わせて製作したモノを長く使うためのパーソナルファブリケーションにも貢献するだろうと考えている。

参考文献

[1] Deferred Procrastination. Laser-cut Lattice Living Hinges. <http://www.deferredprocrastination.co.uk/blog/2011/laser-cut-lattice-living-hinges/>.(最終検索 2016/12/12)

[2] kofaktorlab. Super flexible double curvature surface - laser cut plywood. <http://www.instructables.com/id/Super-flexible-duble-curvature-surface-laser-cut-p/>.(最終検索 2016/12/12)

[3] Mina Konaković, Keenan Crane, Bailin Deng, Sofien Bouaziz, Daniel Piker Mark Pauly. Beyond Developable: Computational Design and Fabrication with Auxetic Materials. ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2016, volume 35 issue 4, 2016.

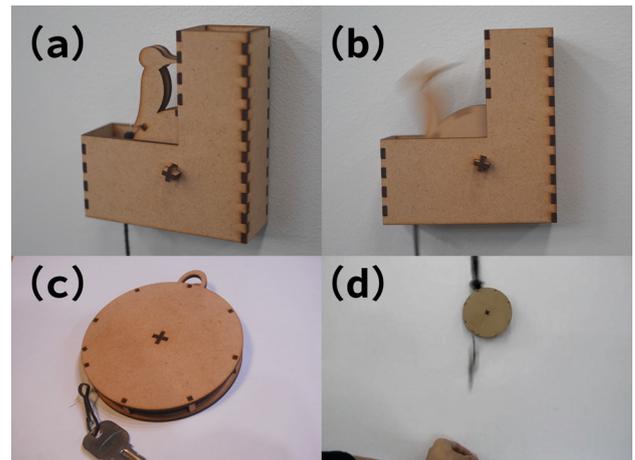


図7 ぜんまいばねを利用した作例 (a) ドアノッカー (b) 手を放すとキツツキが箱を叩く (c) キーリール (d) 手を放すと勢よく巻き戻す様子。

Fig. 7 Examples using spring (a)knocker (b)the woodpecker peck the box (c)key reel (d)the reel wind wire.

[4] Stefanie Mueller, Bastian Kruck, Patrick Baudisch. LaserOrigami: laser-cutting 3D objects. CHI '13 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.2585-2592, 2013.

[5] Udayan Umapathi, Hsiang-Ting Chen, Stefanie Mueller, Ludwig Wall, Anna Seufert, Patrick Baudisch. Laser-Stacker: Fabricating 3D Objects by Laser Cutting and Welding. UIST '15 Proceedings of the 28th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, pp.575-582, 2015.

[6] JIS B 2713:2009. 薄板ばねの設計計算式及び仕様の定め方.

[7] JSMA SC009:2013. ぜんまい設計基準.

[8] The Engineering ToolBox. Modulus of Elasticity or Young's Modulus - and Tensile Modulus for common Materials. http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html.(最終検索 2016/12/12)

[9] JIS A 5906:2003. 繊維板.

[10] 宮下健児, 阿部眞理, 渡辺裕二. 超音波振動による木材表面加工法開発のための基礎研究. 日本デザイン学会, vol.57 No.1, pp.9-16, 2010.

[11] JIS B 0103:2012. ばね用語.

[12] 佐藤二郎, 池田国男, 鎌田伸男. 腕時計用動力ゼンマイに要求される諸性質とその材料について. 生産研究, vol.11 No.11, pp.535-539, 1959.

[13] JIS B 2704-1:2009. コイルばね-第1部: 圧縮及び引張コイルばね基本計算方法.

[14] Alexandra Ion, Johannes Frohnhofen, Ludwig Wall, Robert Kovacs, Mirela Alistar, Jack Lindsay, Pedro Lopes, Hsiang-Ting Chen, Patrick Baudisch. Metamaterial Mechanisms. UIST '16 Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, pp.529-539, 2016.

[15] James McCrae, Nobuyuki Umetani, Karan Singh. Flat-FitFab: interactive modeling with planar sections. UIST '14 Proceedings of the 27th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, pp.13-22, 2014.