

Title	Computational Origami Spring : 簡易に設計・試作可能な紙バネ造形手法の提案
Sub Title	Computational Origami Spring : proposal of an easily designed and prototyped paper spring modeling method
Author	工藤, 大樹(Kudo, Daiki) 山岡, 潤一(Yamaoka, Jun'ichi)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2021
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2021年度メディアデザイン学 第915号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002021-0915">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002021-0915</a>

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文 2021 年度

Computational Origami Spring:  
簡易に設計・試作可能な紙バネ造形手法の提案



慶應義塾大学  
大学院メディアデザイン研究科

工藤 大樹

本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に  
修士(メディアデザイン学)授与の要件として提出した修士論文である。

工藤 大樹

研究指導委員会：

山岡 潤一 専任講師 (主指導教員)

南澤 孝太 教授 (副指導教員)

論文審査委員会：

山岡 潤一 専任講師 (主査)

南澤 孝太 教授 (副査)

杉浦 一徳 教授 (副査)

修士論文 2021 年度

Computational Origami Spring:  
簡易に設計・試作可能な紙バネ造形手法の提案

カテゴリ：デザイン

論文要旨

パーソナル・ファブリケーションは急速な技術の進歩により、身近なものとなってきた。ファブリケーションは新しい教育の現場でも注目されており、今後は一般家庭から社会までより拡大する分野と考えられる。一方、現在、広まりを見せるファブリケーションの手法や機具は一定の知識や技術を必要としており、その習得にも時間を要する。これは教育現場に導入する際にも敷居の高いものとなる。そこで本研究では、一般的に普及している身近な素材や道具を用いて実現できるファブリケーションの新たな手法を提案することを目的とした。提案する手法では、年代を問わず最も馴染み深く、入手しやすい素材である紙に着目した。その紙から容易に立体を構築できる紙バネを拡張させ、本研究では Computational Origami Spring を提案した。この論文では、形状を設計できる新たな紙バネおよび形状に応じて展開図を自動で出力するソフトウェアの開発、これらの手法を用いたワークショップでの評価を行なった。加えて、提案手法の有用性や今後の展望について検討を行なった。

キーワード：

折り紙，材料，ファブリケーション，ワークショップ，教育

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

工藤 大樹

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2021

Computational Origami Spring: Proposal of an Easily  
Designed and Prototyped Paper Spring Modeling Method

Category: Design

Summary

Personal fabrication is becoming increasingly accessible due to rapid advances in technology. Furthermore, it is attracting attention in new educational fields and, in the future, is expected to expand from households and further into society. However, current methods and tools for fabrication—which are becoming more widespread—require specific fundamental skills and knowledge. These methods and tools take time to learn, making it difficult to introduce them to the educational field. In response, this study proposes a fabrication method that utilizes a readily available material—paper. I introduced the “Computational Origami Spring” in this study which expands upon the paper spring to construct 3D objects. This paper presents a new software for developing paper springs. The desired shape design is input into the software. The software then produces a development diagram of the desired shape. The evaluation of this method and software was through workshops. In conclusion, this paper considers the usefulness and prospects of the proposed fabrication method.

Keywords:

origami, material, fabrication, workshop, education

Keio University Graduate School of Media Design

Daiki Kudo

# 目 次

<b>第 1 章 序論</b>	<b>1</b>
1.1. ファブリケーションと現代社会 . . . . .	1
1.2. ファブリケーションと教育 . . . . .	2
1.2.1 機材の整備と先行事例 . . . . .	2
1.2.2 ファブリケーションを促す教材やツール . . . . .	3
1.2.3 教育者の養成 . . . . .	4
1.3. 研究目的 . . . . .	4
1.3.1 紙に着目したファブリケーション . . . . .	4
1.4. 論文の構成 . . . . .	5
<b>第 2 章 関連研究・事例</b>	<b>6</b>
2.1. 高速なファブリケーション手法 . . . . .	6
2.1.1 Developable Metamaterials . . . . .	6
2.1.2 FoldTronics . . . . .	7
2.1.3 Animated Paper . . . . .	7
2.2. 教育におけるファブリケーション手法 . . . . .	8
2.2.1 電子回路を活用したファブリケーションツール . . . . .	8
2.2.2 教育現場での活用を見据えたツール . . . . .	10
2.2.3 初等教育におけるデジタルファブリケーション . . . . .	11
2.3. 折り紙の応用 . . . . .	12
2.3.1 ファブリケーションと紙 . . . . .	12
2.3.2 教育との関係 . . . . .	15
2.3.3 産業的な利用 . . . . .	15

---

<b>第3章</b>	<b>コンセプトデザイン</b>	<b>18</b>
3.1.	仮説 . . . . .	18
3.2.	提案手法の検討 . . . . .	19
3.2.1	手法に組み込む要素 . . . . .	19
3.2.2	対象となる年代と提案手法の立ち位置 . . . . .	19
3.2.3	想定される体験 . . . . .	20
3.3.	材料・手法 . . . . .	21
3.3.1	材料の検討 . . . . .	21
3.3.2	紙による立体表現 . . . . .	22
3.3.3	紙バネ . . . . .	23
3.4.	紙バネを用いた手法の検討 . . . . .	24
3.4.1	既存の紙バネ . . . . .	24
3.4.2	試作から得られた紙バネの特性 . . . . .	27
3.5.	Computational Origami Spring . . . . .	28
3.5.1	提案手法とその基本仕様 . . . . .	28
3.5.2	形状設計 . . . . .	29
3.5.3	展開図の自動生成 . . . . .	34
3.6.	COS で可能なファブリケーション . . . . .	38
3.7.	本章の総括 . . . . .	41
<b>第4章</b>	<b>検証</b>	<b>42</b>
4.1.	対面での実施 . . . . .	42
4.1.1	ワークショップの流れ . . . . .	42
4.1.2	観察方法 . . . . .	44
4.1.3	児童・生徒のモノづくりの経験とコンピュータの使用状況 . . . . .	44
4.1.4	収録した映像とインタビューによる分析 . . . . .	45
4.1.5	作品 . . . . .	46
4.1.6	事後のアンケート . . . . .	51
4.2.	オンラインでの実施 . . . . .	52
4.2.1	ワークショップの流れ . . . . .	52

---

4.2.2	観察方法 . . . . .	53
4.2.3	児童・生徒のモノづくりの経験とコンピュータの使用状況	55
4.2.4	収録した映像とワークシートの分析 . . . . .	55
4.2.5	作品 . . . . .	56
4.2.6	事後のアンケート . . . . .	59
4.2.7	スタッフ（教育者）からのフィードバック . . . . .	60
4.3.	COS を用いたファブリケーションの総括 . . . . .	61
4.3.1	作品における COS 独自の特徴と制約 . . . . .	61
4.3.2	COS を体験した参加者の変化 . . . . .	62
4.3.3	教育者の視点における COS . . . . .	63
<b>第 5 章</b>	<b>結論</b>	<b>66</b>
5.1.	総括 . . . . .	66
	<b>謝辞</b>	<b>69</b>
	<b>参考文献</b>	<b>71</b>
	<b>付録</b>	<b>77</b>
A.	対面のワークショップで使ったワークシート . . . . .	77
B.	オンラインワークショップで使った資料 . . . . .	80
B.1	ワークシート . . . . .	80
B.2	紙バネの展開図 . . . . .	81

# 目 次

1.1	Arduino (左) と Tinkercad (右) . . . . .	3
1.2	本研究のコンセプトと提案手法の活用事例 . . . . .	5
2.1	Developable Metamaterials で提案されている立体構造の構築手法	7
2.2	littleBits に含まれるモジュール化された部品 . . . . .	9
2.3	ORIGAMI SIMULATOR 上で鶴の展開図 (左) から完成形 (右) をシミュレーションした様子 . . . . .	14
2.4	畳まれた 132 5. ISSEY MIYAKE の衣服 (左) と展開された状態 (右) . . . . .	16
2.5	IN-EI ISSEY MIYAKE の照明「MENDORI」(左) と Steam Stretch によるプリーツ表現 (中・右) . . . . .	17
3.1	工作からファブリケーションへの流れ . . . . .	20
3.2	提案手法により期待できる効果と対象者の反応 . . . . .	21
3.3	紙で立体をつくる際に用いる展開図の例 . . . . .	22
3.4	2つの帯状の素材からバネを製作する手順 . . . . .	23
3.5	3本の帯素材から製作した底面が正六角形となる紙バネ . . . . .	24
3.6	底面が正六角形の紙バネおよびその展張 . . . . .	25
3.7	2本の帯から十字に交差させて折り方の手順を変更した例 . . . . .	25
3.8	L字とI字の帯素材を組み合わせて折り方の手順を変更した例 . . . . .	26
3.9	L字型構造の折り方 . . . . .	28
3.10	L字型構造を曲げる折り方 . . . . .	29
3.11	曲げる折り方を導入したL字型構造 . . . . .	30
3.12	底面積と線幅の関係 . . . . .	31

3.13	帯幅を変更して構築できる構造例とその展開図 . . . . .	31
3.14	COS による中空の構造 . . . . .	32
3.15	基本構造（左）と L 字紙バネ構造（上）とのねじれ比較 . . . . .	32
3.16	弱い捻れを生じる構造の折り方 . . . . .	33
3.17	強い捻れを生じる構造の折り方 . . . . .	33
3.18	手動で設計した場合とツールを用いて設計した場合の流れの比較	34
3.19	Illustrator から Grasshopper を経て COS が完成するまでの流れ .	35
3.20	COS の層の数を Grasshopper で変更する場合 . . . . .	36
3.21	素材の厚さを Grasshopper で展開図に反映させる場合 . . . . .	37
3.22	レーザー加工を用いた照明器具 . . . . .	39
3.23	銅箔で回路を成形することでできるスイッチ . . . . .	40
3.24	COS の両端を接合することでできる無限に回転する輪構造 . . . .	40
3.25	COS を用いた指輪型のアクセサリ . . . . .	41
4.1	コンピュータで製作のサポートをする様子 . . . . .	43
4.2	対面のワークショップで使用したワークシート . . . . .	44
4.3	Rhinoceros (Grasshopper) から出力される展開図 . . . . .	46
4.4	参加者のワークシートと作品 . . . . .	47
4.5	参加者が設計した形状の種類 . . . . .	48
4.6	参加者 E の作品「バネコ」の設計から完成までの流れ . . . . .	48
4.7	参加者 F の猿から着想を得たマグネットのアイデア . . . . .	49
4.8	失敗から生まれた中央に異なる素材を用いた作品 . . . . .	49
4.9	スイッチを製作・試用する参加者たち . . . . .	51
4.10	Zoom 上での会話（左）とスライドを用いた説明の様子（右） .	53
4.11	使用した 2 つのワークシート . . . . .	54
4.12	児童らに配布した展開図の例 . . . . .	54
4.13	印刷・配布した 5 種類の展開図（左）と製作の様子（右） . . . .	55
4.14	参加者が設計した形状の種類 . . . . .	56
4.15	参加者が COS を用いて作製した作品 . . . . .	57
4.16	バネ構造のみを活用した作品 . . . . .	58

4.17	COS の形状を活用した作品 . . . . .	58
4.18	COS の形状から着想を得た作品 . . . . .	59
4.19	簡易的なマニュアルの試作 . . . . .	64
4.20	展開図の改善案 . . . . .	65

# 目 次

3.1	紙による立体表現との比較 . . . . .	38
4.1	対面におけるワークショップの実施内容 . . . . .	43
4.2	オンラインにおけるワークショップの実施内容 . . . . .	52

# 第 1 章 序

# 論

## 1.1. ファブリケーションと現代社会

近年、ファブリケーションの手法は世界中で数多く提案されている。ここで指すファブリケーションとは、Neil Gershenfeld や Patrick Baudisch が提唱する Personal Fabrication (パーソナル・ファブリケーション) のことである [1]。Neil Gershenfeld は、パーソナル・ファブリケーションを「家電および工具を組み合わせた機械を使って自宅で自身の製品を設計・製造する能力」と表現している。つまり、コンピュータや 3D プリンタ、電動ノコギリなどで個人的にモノづくりをすることである。Patrick Baudisch はこれに加えて「現在、パーソナル・ファブリケーションは一部の技術愛好家に好まれている段階であり、一般消費者に普及するかどうかが大きな課題だ」と述べている [2]。ファブリケーションを一般消費者まで普及させるのであれば、現代の出版や動画制作のようにハードウェアやソフトウェア、その他の手法で消費者に不足するスキルを補う必要があるとも論じている。

ファブリケーションは大人に向けたものだけでなく教育にも取り入れられ始めている。特に STEAM 教育のような次世代の教育ではその一環としてモノづくりも含まれる。また、これまで日本では教師から一方的に情報を伝える授業が一般的であったが、近年は主体性や共創を促すアクティブラーニングやグループワーク、課題解決型学習も広まりを見せている [3]。このような学習でもプロトタイプングを通じてファブリケーションは導入されている。

しかし、教育現場にファブリケーションを取り入れるには課題もある。導入の筆頭として挙がる 3D プリンタや 3D モデリングでは、生徒・学生が操作方法の習得に時間の大部分を割かなければならない [4]。また教員は新たに導入する教材の

扱い方や魅力を十分に理解する必要もある [5]。さらに COVID-19 で対面での活動は世界的に制限され、モノづくりの分野でも多大な影響を及ぼしたのは記憶に新しい。COVID-19 は経済・産業への影響はもちろんのこと、教育の分野にも影響を与えている。特に前述した手を動かしながら学ぶような教育において、生徒・学生はオンラインへ活動の場を移行し、使用できていた工作機械は施設の閉鎖などにより使用が制限された。また学ぶ場がオンラインへ移行したことで使用できる工作ツールは個人に委ねられる状況である。今後のファブリケーション分野では、個人の環境に依存しない手法や教育現場への導入を見据えた手法が必要なのではないかと考えられる。

## 1.2. ファブリケーションと教育

ファブリケーションの導入に向け先進的な取り組みをしている国や学校もある。また既に活用されている事例もある。既存のファブリケーションの手法や教材を教育に取り入れるためには、機材や教員のスキルなども必要となってくる。国や企業の資金補助、次世代教育のための教員養成などの取り組みも始まりつつあるが、利用人数の制限や前項で挙げた様々な課題も残されたままである。

### 1.2.1 機材の整備と先行事例

経済産業省による平成 26 年の報告によれば、米国では 1000 校の高校に 3D プリンタを含む工作機械やそれを活用したプログラムを整備するとされ、民間企業の協力で小・中学校を含む公立校にも同様の設備を整備するとされている [6]。また、初等教育から立体認知能力や創造力を育むため、米国に準じて日本でも将来を見据えた人材の育成・教育プログラムの実施を検討するとされている。文部科学省の報告 [7] でも、科学技術系人材を育成する取り組みも進められている。

広尾学園中学校・高等学校<sup>1</sup>では 7 台の 3D プリンタを導入して、生徒が自主的に活用している [8]。また美術・技術の授業での活用にも期待を寄せている一方で、

---

1 <https://www.hiroogakuen.ed.jp>

利用者が20名弱と少ないことも課題として挙げている。

フィンランドでは既に小学校の授業でファブリケーションが取り入れられている。この事例から単に機材を導入するだけでは、児童学習の向上には結び付かずメーカーマインドセットの導入も重要であることが報告されている [4]。

### 1.2.2 ファブリケーションを促す教材やツール

大型で高価かつ初心者には扱いづらい機材を導入せず、モノづくりを行うことは可能である。身の回りの材料や市販のキット・ツールを活用すれば、ラピッドプロトタイピングの幅も広がる。材料としては安価で入手・加工も容易な紙や造形の柔軟性が高い粘土も有用である。製作物に動きを与えるツールとして littleBits [9] や Arduino [10] (図 1.1 左) は、電子回路やプログラミングの学習も行える初学者でも比較的敷居の低いものである。加えて、これらを用いるとモータや LED などと組み合わせることで動きのあるモノの製作が可能となる。また図 1.1 右に示した Tinkercad [11] など無料のソフトウェアも Web で扱うことができる。

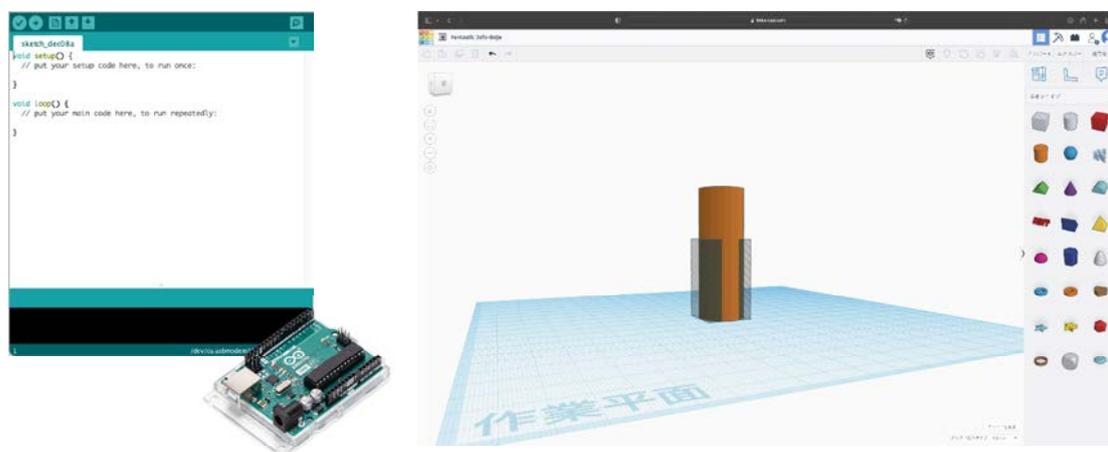


図 1.1 Arduino [12] (左) と Tinkercad (右)

### 1.2.3 教育者の養成

新学習指導要領ではデジタルファブリケーションの要素も盛り込まれている。これに合わせて一部の大学などでは教育学部と付属する小・中学校が連携してデジタルファブリケーションを扱える教員の養成 [13] を行なっている。学習で用いる機材は大学と一部共用している。一方で、一般的な公立校では教員の養成や機材の導入も進みづらいという課題がある。

## 1.3. 研究目的

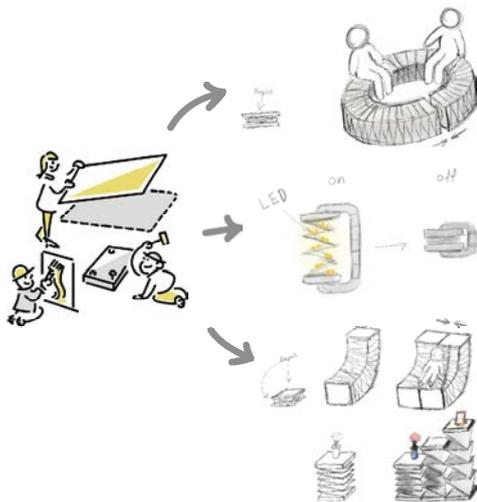
このように、ファブリケーションを活用した教育の需要は世界的に高まりつつある。またそれらをサポートする機材やツールも年々増加しており、低価格で導入できるものもある。一方、教育機関への導入は一部に留まっているのも現状であり、教育者の養成も追いついていない。加えて、生徒の技術習得で授業が終わってしまったり、COVID-19の影響で学習環境の差も浮き彫りとなった。そこで本研究では、環境に依存せず短時間で設計から製作まで行えるファブリケーションの新たな手法を提案し、学習者および教育者の双方が抱える課題の解決および創造的な活動をサポートすることを目的とする。

### 1.3.1 紙に着目したファブリケーション

紙は最も身近な素材と考えられ、入手や加工、強度と多様な観点からファブリケーションにも活用されている。加工に関してはカッティングにより自由な形状を生み出せるほか [14]、折り紙の技法などで平面から立体を構築できる。加えて、ハニカム構造などにより強度を持たせることも可能である [15]。総合的な観点から本研究では紙という素材、および紙から発展した手法に注目した。

## 1.4. 論文の構成

第1章では、現代におけるファブリケーション技術の普及とその課題、および教育との関わりや導入について述べた。これらの問題を解決するため、身近にある一般的な素材やプリンタ、文具をはじめ Web 上で提供されている様々なソフトウェアに焦点を当て、短時間で設計から製作まで行えるファブリケーションの新たな手法を開発することを目的とした。第2章では、これまで提案されてきたファブリケーションの手法や教育における導入の事例について述べる。また先行事例の調査で有用と考えられ、立体表現や入手が容易な素材である紙に関しても調査を行なった。第3章では、本研究で提案する手法の対象や目的を整理し、コンセプトの設計と注目した紙バネという技術に関して述べる。さらにコンセプトから手法の検討・試作および新たな手法の提案を行う (図 1.2:a)。図 1.2:b のように本研究の手法を用いて製作できるアプリケーションに関しても第3章に記している。第4章では、開発した手法をワークショップ形式の学習に導入し、作品や教育者のフィードバックなどから手法の検証を行う。第5章では、本研究全体の総括を行う。



(a) 身近な素材や道具からモノづくり



(b) 提案手法の活用

図 1.2 本研究のコンセプトと提案手法の活用事例

## 第 2 章

# 関連研究・事例

### 2.1. 高速なファブリケーション手法

#### 2.1.1 Developable Metamaterials

Madlaina Signer らの Developable Metamaterials は，シート状の素材とレーザ加工技術を組み合わせて立体を構築する手法である [16]。この研究の利点は，素材以外に部品を使わずに立体を構築できる点や 3D プリンタより早く組み上がる点が挙げられている。この提案では，シート状の素材を丸めて筒状にすると耐久性や弾性が生まれる点に着目している。シート状の素材を蛇行させ（このひとつひとつの輪をフリルと呼ぶ），带状のシートにレーザ加工で切り込みを入れ接合部分を設けることで平面素材を立体へと変化させる（図 2.1）。したがって，組み立ての際には接着剤や他の部品が必要ない。また専用の設計ツールも同時に開発されている。ユーザーが設計ツールにモデルのデータを読み込むと，自動的にシートからそのモデルを構築するための演算が行われる。演算後はそのモデルをフリルでどのように構築するか視覚的に表示される。アプリケーションとしてはぬいぐるみや照明器具，緩衝材，成形用の型としての利用を提案している。これらの成形にはロール素材を加工できる工業用プロッタと組み立てに用いる 2 台のロボットアームが必要としている。また使用できる素材は薄いシート状で脆くないものであれば可能ではないかと述べている。今後の課題としては，フリルを用いたより複雑な曲面の表現を挙げており，想定される用途は事業者による大量生産を視野に入れているようである。

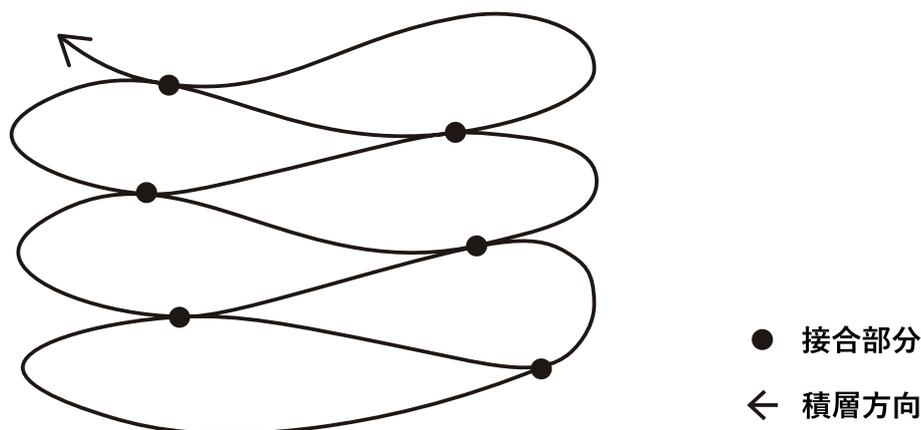


図 2.1 Developable Metamaterials で提案されている立体構造の構築手法

### 2.1.2 FoldTronics

Junichi Yamaoka らが提案している FoldTronics [15] は、ハニカム構造に着目した平面材料から立体構造を実現するファブリケーション技術である。これらは電子回路を組み合わせることで折り畳み可能なデバイスを製作できる。平面材料からカッティングプロッタなどでハニカム構造を構築するための部材を切り出し、そこに電子回路を構築する。その後、立体に組み上げることで折り畳み可能なデバイスを高速に実現できる。提案された手法では折り畳み、回路、絶縁に必要なレイヤーを自動的に生成するソフトウェアも開発しており、統合した設計が可能となっている。アプリケーションとしてはスマートウォッチや試験管ケース、形状が変わるコントローラなどを示している。課題としてはレイヤー数の削減や折り畳み時に回路の短絡してしまう箇所を自動で回避できるアルゴリズムの開発などを挙げている。

### 2.1.3 Animated Paper

Naoya Koizumi らが提案している Animated Paper は、紙という柔軟な素材に着目したラピッドプロトタイピングの新しい手法である [17]。Animated Paper は紙、形状記憶合金 (SMA)、回帰反射材、銅箔を組み合わせ普通紙から動く玩具を作ることができる。このシステムの利点として、日常の薄い素材を遠隔操作で

動かすことが可能であることを挙げている。遠隔操作では、レーザー光による加熱でSMAを駆動させるため、紙製の動作体に電源を搭載する必要がない。ユーザースタディでは、デザイナーから新製品で予想される動きを実際に動かして提示できる重要性が指摘されており、プロトタイピングの際に有効ではないかと考察している。一方で、提案しているシステムでは動作にレーザーを使用するため、安全上の理由から一般的な使用が難しい。またSMAの特性上の制約もあり、今後、手法の改善が必要としている。

坂本らのAnimated Paper 2では上記の課題を解決した提案がされている [18]。Animated Paper 2では、レーザー光を用いないことから実際に触れて工作が可能である。この提案ではレーザー光の代替として二次元通信シートを用いている。このシート上にSMAや回路を配した紙を載せるとシートから供給された電力によりSMAが収縮し、紙を動かすことができる。提案された構造では動きの制御がON・OFFに限定されてしまう課題がある。今後の課題として、より工作の幅を広げるためのモジュールや構造の改良が必要であると考察している。

## 2.2. 教育におけるファブリケーション手法

### 2.2.1 電子回路を活用したファブリケーションツール

プログラミングスクールやDIY、デザイン思考型ワークショップ、高等教育機関に至るまで、現在は幅広い分野のファブリケーションの一部として電子工作（および付随するプログラミング）が取り入れられている。電子工作で様々な動作を可能にすることからプロトタイピングで用いられることの多いArduino [10]は、イタリアで生まれたワンボードマイコンとそのプログラムをコーディングする統合開発環境である。大小様々なボードとサードパーティ製のデバイス、電子部品と組み合わせることで世界中のラピッドプロトタイピングをサポートしている。Autodesk社が無償で提供しているTinkercad [11]ではArduinoを使った回路をWeb上で組むことができる。加えてTinkercadは、3DモデリングやArduinoのコーディングも複合的に学習することができる。

littleBits [9] もまた、ファブリケーションや電子回路・プログラミングの学習を対象としたオープンソースのライブラリである。Arduino は電子部品をブレッドボード上で回路としたものに接続して動作させるのが一般的であるが、littleBits は予め構成された動作モジュールを磁石で繋ぎ合わせることで電子回路を実現できる。それゆえ、低年齢の子どもや専門知識の乏しい人々でも容易に学習できる。開発初期のワークショップでも電子工作に興味のない人や感電を恐れていた人も身の回りにある材料を用いて、簡単にアイデアを形にしている。このような点で STEAM 教育にも取り入れられている。



図 2.2 littleBits に含まれるモジュール化された部品 [19]

### 2.2.2 教育現場での活用を見据えたツール

Topobo は、物理的な動きを記録・再生できる組み立て式の玩具である [20]。静的な部品と動的な部品を組み合わせて動きのある構造物を製作でき、尚且つその構造物に動きを与える（記録・再生）ことが可能である。Amanda Parkes らは学習用タンジブルインターフェースである Topobo が教育現場等に投入された際、どのような問題が生じるか調査するため、Topobo を教育者やデザイナーに配布し長期的な評価を行なっている [5]。この調査の特徴は、学習教材の調査で多く見られる児童・生徒を観察するだけでなく、教育者側の観察も行なっている点である。また、教育技術の向上に意欲的でない人々にその学習機会を与え、学習に対する要求や行動を誘発する目的もある。教育者らに配布されるキットには設計・技術の詳細やプログラミング・組み立ての手順、作品例なども含まれている。調査は欧米の教育者を対象に1年半という期間で行われ、インタビュー形式でデータの収集を行なっている。この調査から以下の点が明らかとなっている。

- 10代を対象とした科学の学習に使用したところ、Topobo の機能が魅力的で学習自体うまくいかなかった
- 授業計画や教育指針と Topobo がマッチしているかどうかという問題がある
- 工作キットとしては、より長い時間をかけて取り組むことができる状況で優れている
- 一般的に低年齢の子どもたちは年齢の高い子どもたちに比べ、より多くの時間をキットと一緒に過ごしたいと考えており（年齢に関係なく）短い時間のインタラクションでは、より制約のある活動が求められる
- 教育者が自信を持ってキットを活用するには、事前にこのキットを使った経験が必要である
- 教育者はより充実した教育支援資料を望んでいる

### 2.2.3 初等教育におけるデジタルファブリケーション

Teemu Leinonen らは、フィンランドの小学校におけるデジタルファブリケーションの導入について調査している [4]。この調査では、デザイナーや研究者が子どもを対象としてワークショップを行うのではなく、教師が自然と学習活動に 3D モデリングやプリンタを導入している状況で観察を行なっている。観察の対象は小学 4 年生から 6 年生の児童 64 人と教師で、フィールド観察や非公式のインタビュー、アンケートなどエスノグラフィックな研究手法で行われている。期間は 2ヶ月で毎週 2 回、45 分のセッションを行なっている。この研究では以下の主張や結果が挙げられている。

- ファブリケーションの機材を学校に導入するだけでは学習の向上には繋がらず、コラボレーションや失敗する経験などのメーカーマインドセットも導入することが大切である
- 生徒には授業の初期段階で関心を持たせるような 3D プリントの例を提示している
- 3D プリントのプロジェクトは生徒の能力を高める可能性を示唆している
- モデリングソフトやプリンタの使い方などの習得に時間がかかるため、アイデア出しやスケッチ、試作の時間が足りない
- 現状、他の体験型学習技術でも同様の成果を得ることができるため、創造性やデザイン思考スキルの学習を強化するには、学校での 3D 活動を適宜計画する必要がある

森岡らの報告によれば日本国内においても小・中学校でデジタルファブリケーションを導入するため教育環境の整備が行われつつある [13]。山口大学では附属校と連携してデジタルファブリケーションを扱える技術科教員の養成も行なっており、その一環で 3D プリンタや CNC 加工機を導入している。教員や児童・生徒向けの講習会も行なっており、半日から 1 日かけて 3D CAD の扱い方や製図、設計した部品の出力方法を学ぶというものである。この講習会などを通じて小・中学生がデジタルファブリケーションに大きな関心を寄せていることも報告されて

いる。今後は付属校のみならず周辺の公立校と連携してモノづくり環境を整備すると述べている。

## 2.3. 折り紙の応用

### 2.3.1 ファブリケーションと紙

#### Kirigami Haptic Swatches

Chang Zekun らの研究では、切り紙や折り紙の構造や特性に着目し簡単な切り出しと組み立てでハプティックデバイスを製作できる手法 [14] を提案している。この研究は、エンジニアや工学的知見を持たないデザイナーなどが迅速かつ自由に触覚ボタン類を試作できる手法として提案されている。切り紙と折り紙から4つのハプティック構造を提案しており、それぞれのクリック感や特性についての検証もされている。各構造の設計やパラメータの設定には Rhinoceros 6 と Grasshopper を用いている。設計したデータは2Dの切り絵パターンとして出力でき、レーザーカッターやカッティングプロッタにより切り出しが可能である。またこれらの工作機械がない場合は、プリンタで切り絵のパターンを印刷し、ハサミなどで切り出すことも可能とされている。アプリケーションとしては、キーボードや回転スイッチ、玩具、携帯端末のアクセサリなどを挙げている。課題としては手作業のため大量生産には現状、向いていないこと、小型のボタンを組み立てる際に手先の器用さが要求されることなどを挙げている。

#### Self-Folding Printable Elastic Electric Devices

Shuhe Miyashita らは、抵抗器やインダクタ、コンデンサといった電子部品に折り紙の要素を加えセンサやアクチュエータ、ソフトロボット向けの柔軟な回路を提案している [21]。提案手法では、金属ポリエステルフィルムの材料特性を利用して折り畳み可能で柔軟な電子回路を実現している。この材料は導電性を有するアルミコート面と抵抗性を有するポリエステルの面から構成されており、シートの切り出す面積を変えることで抵抗値を変化させることが可能である。またシー

ト材料からデバイスを製作するプロセスは、熱を加えることでシートが折り畳まれ、三次元の電気デバイスが完成するというセルフフォールディング式となっている。

### Kirigami-Inspired Inflatables with Programmable Shapes

Lishuai Jin らは、切り紙の原理を利用して膨張させると目的の形状へと変化させることのできるシステムを提案している [22]。このシステムはエラストマーとそれに埋め込まれた切り紙シートで構成されている。設計では、切り紙のパターンを変えることにより、膨張時の形状変化を決定している。一例を挙げると、壺型を構築したいのであれば、壺の最も太い部分は切り抜きの大きさを太く大きく、最も細い部分は切り抜きの大きさを細かく密にして膨張の具合を制御している。切り紙パターンは最適化アルゴリズムを適用することで求まる。この提案は再構成可能な構造体の設計や医療器具、アクチュエータへの応用が期待されている。

### ソフトウェア

ORIGAMI SIMULATOR<sup>1</sup>は Web 上で折り紙の折り方をシミュレーションできるツールである。これはコンピュータの GPU を用いてシミュレーション [23] され、視覚的に展開図から折り畳まれる様子を確認することができる。サイト上で用意された構造をシミュレーションできるほか、SVG 形式のファイルを読み込むことで独自の折り方もシミュレーションすることができる。シミュレーションの際、山折り・谷折りは線の色で区別される。

---

1 <https://origamisimulator.org>

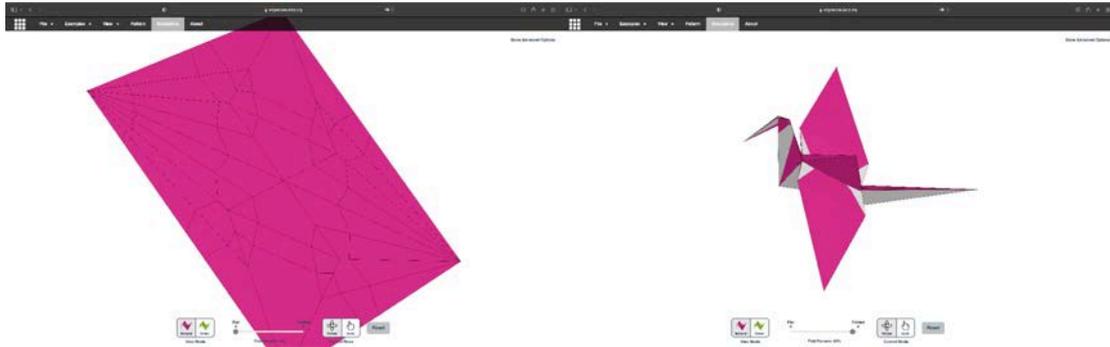


図 2.3 ORIGAMI SIMULATOR 上で鶴の展開図（左）から完成形（右）をシミュレーションした様子

折り方の考案を補助するソフトウェアとしては、筑波大学の三谷らが開発した ORI-REVO<sup>2</sup> [24] がある。ORI-REVO は中心軸のある座標平面に点をプロットして線を描画していくことで軸対称な折り構造の立体を構築する展開図を生成する。また 3次元モデリングソフトである Rhinoceros とそのプラグインである Grasshopper を用いて折り構造を構築・シミュレーションする Crane [25] も存在する。

ペパクラデザイナーは、3次元のデータからペーパークラフトの展開図を作成できる [26]。3D CG ソフトなどのデータを読み込み展開ボタンを押すことで、のりしろが付いた展開図を生成できる。多面体のデータは Web でも公開されており、誰でもダウンロードして使用することができる。

---

2 [http://mitani.cs.tsukuba.ac.jp/ori\\_revo/](http://mitani.cs.tsukuba.ac.jp/ori_revo/)

### 2.3.2 教育との関係

#### 教育現場における折り紙の使用

瀬尾知子らの教具に関する報告 [27] によれば、幼児のいる家庭での折り紙の常備率は 94.2%，また幼稚園・保育所において折り紙を用いた遊びの実施率は 99.7%とされている。その一方で、一般的な折り紙遊びは折り方の模倣であることから、現代の創造性や自由を尊重する教育には適していないとする報告もされている。

数学の学習において折り紙を使うと効果的なのではないかという報告もある [28]。Davut Köğce らは中学校の数学で折り紙をどのように活用できるか検討し、現職教員から聞き取りを行なっている。ここではスパイラルキューブとスクエアプリズムという折り方が用いられている。この折り方は、平面から立体に変化する構造をつくることができる。このような折り方は、数学の学習において、単位立方体から任意の体積を持つ異なる直方体を作製し、体積は底面積と高さの乗算であることを体験しながら学ぶのに適していると評価されている。数学の学習に折り紙を取り入れることで視覚や触覚と協調して学べる点も利点として挙げられている。

### 2.3.3 産業的な利用

#### ミウラ折り

三浦らが提案したミウラ折り [29] は、小さく折り畳まれた状態から 1 点を引っ張ることで展張・収納が可能である。この点が評価され 1994 年に打ち上げられた観測衛星の太陽光パネルの折り畳み・展開に用いられた。同じく三浦らの研究で、円筒構造の剛性が高まる折りのパターンも発見された [30]。このパターンは、円筒構造の上面から圧力を加えると表れる座屈の模様から生まれている。これらの応用は飲料缶のデザインにも採用されているため、我々が目にする機会も多い。

#### Peti Peto

100 PERCENT が展開している Peti Peto は、眼鏡や液晶画面の汚れを拭き取る布製クリーナーである [31]。Peti Peto の特徴はクリーナーとして使用した後、

宙に数回軽く放り投げるだけで、折り紙で折った鶴や富士山、キリンなどの形状に変化する<sup>3</sup>という点である。Peti Petoの素材はポリエステルで、素材の熱可塑性を利用していくつかの折り目がつけられている。これにより形状記憶の効果が得られるため、クリーナーとして使用した後も折り込まれた形状に自然と戻すことができる。

## ISSEY MIYAKE

日本を代表する服飾ブランドである ISSEY MIYAKE では、長きに渡り折り紙の技術を取り入れた製品を展開している。2010年に発表された 132 5. ISSEY MIYAKE には折りに着目した製品が数多く存在する。代表的な製品は、折り畳まれた状態では幾何学的な平面図形であるにも関わらず、持ち上げると立体的な衣服(図 2.4)や鞆に変形するというものである [32]。これらは筑波大で折り紙の研究を行なっている三谷らの協力や帝人フロンティア社との素材開発により実現している。

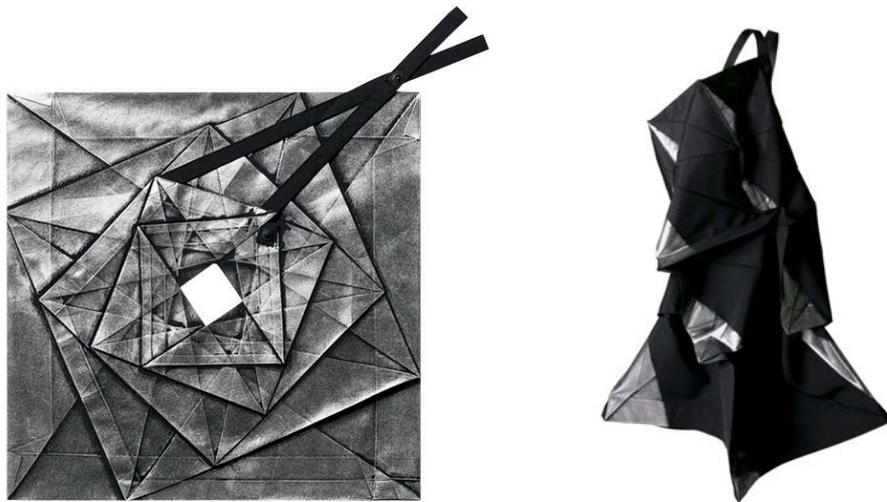


図 2.4 畳まれた 132 5. ISSEY MIYAKE の衣服 (左) と展開された状態 (右) [33]

その他、IN-EI ISSEY MIYAKE からは折り紙を応用した照明 [34] が発表され

---

3 <https://youtu.be/c5wGsfIIaU>

ており、世界的に高い評価を受けている（図 2.5 左）。2021 年時点では GOOD GOODS ISSEY MIYAKE<sup>4</sup> や A-POC ABLE ISSEY MIYAKE<sup>5</sup>、IM MEN<sup>6</sup>などから折り紙に着想を得た製品が展開されている。中でも A-POC ABLE ISSEY MIYAKE では宮前らによって開発された Steam Strech [35] という従来のプリーツ加工と異なる独自の特許技術を用いている。Steam Strech とは、ジャカード織りをベースに経糸と緯糸で異なる性質（Steam Strech では熱に反応するか否か）を持つ糸を組み合わせ、織り上がった布に蒸気かけることによりプリーツ加工を施す。これにより従来のプリーツ加工では難しかった柄や表現が可能となっている（図 2.5 中央と右）。このように、ISSEY MIYAKE では折り紙の技術を取り入れた素材・技術開発から製品開発・販売まで行なっている。



図 2.5 IN-EI ISSEY MIYAKE の照明「MENDORI」 [36]（左）と Steam Strech によるプリーツ表現 [37] [38]（中・右）

4 <https://www.isseymiyake.com/goodgoods/ja/>

5 <https://www.isseymiyake.com/ja/brands/apocable>

6 <https://www.isseymiyake.com/ja/brands/immen>

## 第 3 章

# コンセプトデザイン

### 3.1. 仮説

ファブリケーションに関する提案は特別な機材の使用を前提としたものや、対象から初学者を除いているものが多い。一方、身近な素材や道具を取り入れたファブリケーションの手法として紙を用いた手法や一部に一般的なプリンタを用いる例も見られた。教育現場ではファブリケーションの手法を学ぶことに時間が割かれ、創造力を育むような活動の時間が不足している。またファブリケーションの知識を有する教員も現状不足している。ただし、立体的なオブジェクトを製作するファブリケーションは、子どもの能力を高める可能性も示されており、教育現場でも取り入れが進められていた。以上から学習者と教育者が取り入れやすく、初学者でも学びやすいファブリケーションの手法が必要なのではないかと考えた。さらに三次元のオブジェクトを設計し、自身の手で組み立てるというプロセスを取り入れれば、創造力やメーカーマインドセットといったファブリケーションの学習で重要な要素を学びやすいのではないかと考えた。これらを踏まえて、取り入れやすく創造的な学習につながる手法はどのようなものなのか以降で検討を行った。

## 3.2. 提案手法の検討

### 3.2.1 手法に組み込む要素

先行事例を整理してコンセプトの設計を行なった。モデリングを含むファブリケーションで提案されている手法は多くの場合、高次のスキルや環境が求められる。ただし、材料の選択によっては手法を簡単にするだけでなく、高次的なファブリケーションの要素や教育的観点での応用の可能性も見られた。また教育におけるファブリケーションでは、三次元的な視点やメーカーマインドセットの重要性、授業時間等の制約があることも明らかとなっている。以上を整理すると子どもとその教育者に向けたファブリケーションでは、以下の点が必要ではないかと考えられた。

- 学びやすさ・教えやすさの点も加味し様々な立体形状を造形できる
- 学校や一般家庭にある道具・素材で完結し高次的なファブリケーションへの繋がりを持つ
- 単純な作業として構造を設計・作製するのではなく、メーカーマインドセットの導入や創造力の観点で成長が見込まれるもの
- 対面・非接触に関わらず体験できる

### 3.2.2 対象となる年代と提案手法の立ち位置

前項で示した要素に基づき、本研究では図3.1に示したように工作からの延長上にあるようなファブリケーションを検討した。工作からの延長上という点は、身近な素材を活かした工作の経験から徐々にファブリケーションの要素を取り入れていく段階が初等教育（国内では小学校に通う6歳から12歳までを指す）である場合が多いためである。対象を初等教育と仮定しているのは、初等教育から立体認知能力や創造性を育む方針を国が推進しているほか、中等教育段階では既に3Dプリンタの扱いが自主的に行われている事例もあるためである。

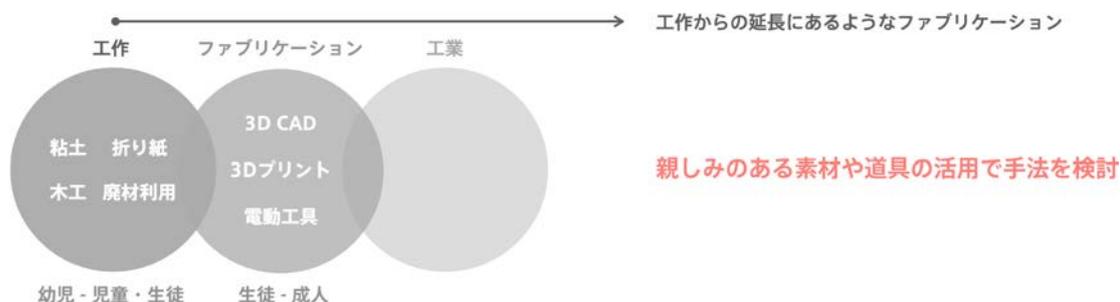


図 3.1 工作からファブリケーションへの流れ

### 3.2.3 想定される体験

図 3.2 に提案する手法を取り入れると対象者にどのような体験や反応を期待できるのかを示した。体験のシーンとして、学校教育における新しい図工の授業やワークショップを想定している。提案手法の対象者は、工作からの延長でファブリケーションを行うと考えられる 6 歳から 12 歳の子どもとその教育者とした。まず提案手法を取り入れたファブリケーション全体に起きる変化として、短時間でスキルを習得できるようにすることで「アイデア出しやコンセプトを検討する時間を確保できる」というファブリケーションにおいて重要な要素の体験が期待される。学習者である子どもには、工作から発展した自身で意図したものを「設計して製作する」というファブリケーションのフローを提供し、オリジナリティや一歩進んだモノづくりの高揚感が期待される。一方、教育者は学校や各家庭にあるようなものでファブリケーションが行えるため、ワークの設計や準備の負担が軽減される。同時にオンライン・オフラインといった環境の差も、使用する道具や学習の容易さから最小限にできると考えられる。副次的な要素として、多くの子どもや教育者が理解しやすい手法とすれば、ファブリケーションに自信のない子供でも、理解している子どもとの相互学習により学びを得ることができると考えている。さらに学習者・教育者ともに授業やワークショップ外でも提案手法を活用することで、新たな学びや体験が生まれるのではないかと考えた。

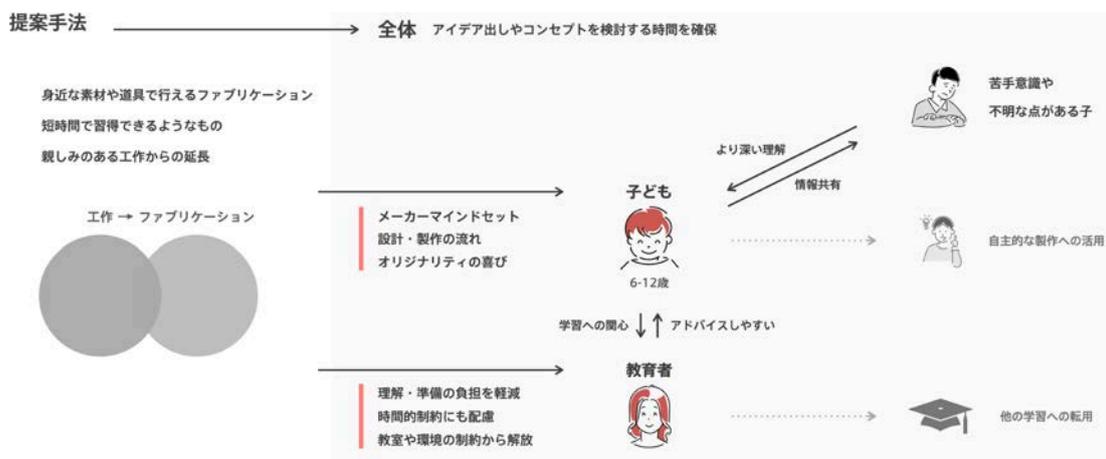


図 3.2 提案手法により期待できる効果と対象者の反応

### 3.3. 材料・手法

#### 3.3.1 材料の検討

材料の選定では、子どもが扱うことや教育者の準備など双方に配慮する必要がある。以下に挙げる点を考慮すべきと考えた。

**安全** 材料自体の安全性は元より，加工に使用する道具類の安全性にも配慮する

**簡便** 加工が容易であることに加え，材料の入手や廃棄の面も検討事項となる

**既知** 幼児教育や初等教育で触れたことのある素材であれば，扱い方やできることの理解が十分になされており教育者とのコミュニケーションも円滑に行える

以上より想起される材料は紙や粘土，木材，プラスチック板，モールがある。この中で加工の自由度や入手の面を加味すると，紙と粘土が子どもと親和性のある素材の筆頭として挙がる。さらに廃材としての入手のしやすさや接着等組み合わせの柔軟性，加工の過程で計算などの教育的側面も期待される [28] ことから，提案手法には紙を採用した。

### 紙類を利用した工作の経験

16名の小学校1年生から中学2年生を対象として、工作で利用したことのある素材を自由記述（複数回答可能）で調査したところ、最も多く挙げられた素材は紙類（折り紙、段ボール、紙コップなど）であった。この結果からも素材として紙を選択するしたことは想定と相違ないと考えられる。

#### 3.3.2 紙による立体表現

使用する素材を紙と定めると、一般的に立体を構築するには図3.3のような手順を経る。この方法は立方体や多面体を作るのに適している、しかし、複雑な形状になると予め展開図を用意していなければ、子どもおよび教育者にとって設計が難しいものとなる。また、これを折り紙の一部と捉えた場合、既存の折り紙で指摘されている手順の模倣で完結してしまうという課題 [27] を払拭できない。

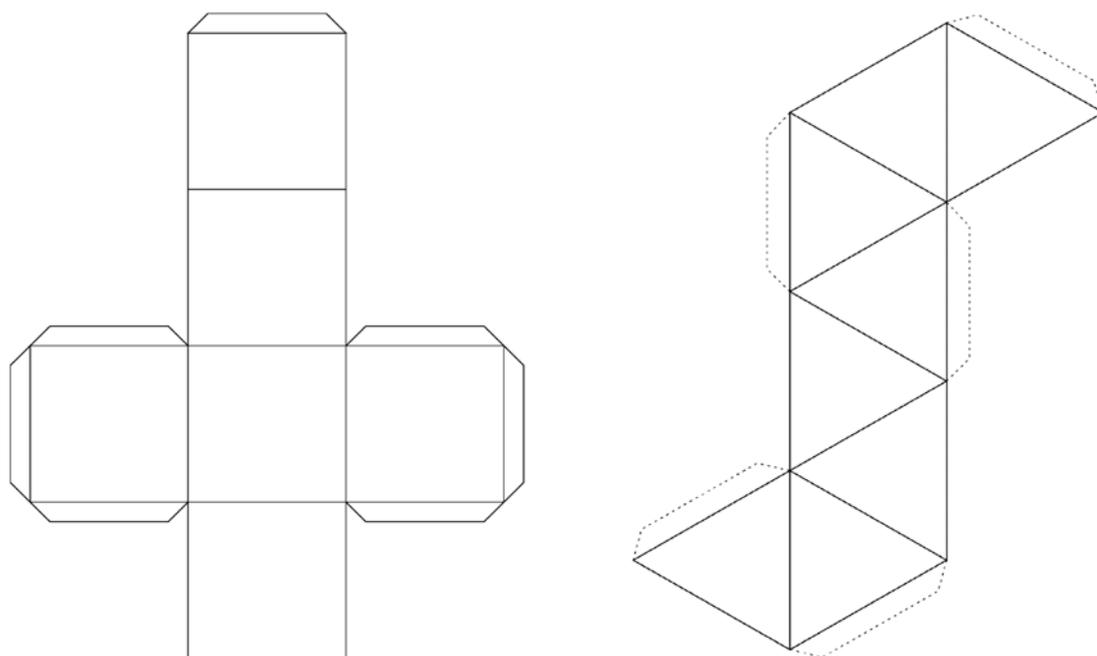


図 3.3 紙で立体をつくる際に用いる展開図の例

模倣ではなく自ら構造や折り方を考案する場合もある。これは2章の産業応用で述べたミウラ折りや ISSEY MIYAKE の製品にも使われているコンピュータを

駆使した手法だ。折り曲げの難しい素材を使う建築などでは剛体折りという手法も用いられており、折り目に蝶番などを代用している。これらで見られる折り方は公開されているものも多く、ツールを用いれば自身で折り方を考案したり、シミュレーションすることもできる [23] [24] [25]。ただし、これらの折り方やツールを駆使するのは成人でも難しい。また1つの構造を考案して製作するまで、かなりの時間を要し細かな作業が多くなるため初等教育には向かないと考えられる。

### 3.3.3 紙バネ

紙バネは、紙からバネを簡単に製作する手法として古くから存在する。図3.4のように帯状の紙を2つ用意し十字に交差させ、互い違いに折り込んでいくとバネになる。完成した紙バネは螺旋状に捻れながら伸張する点が特徴的である。

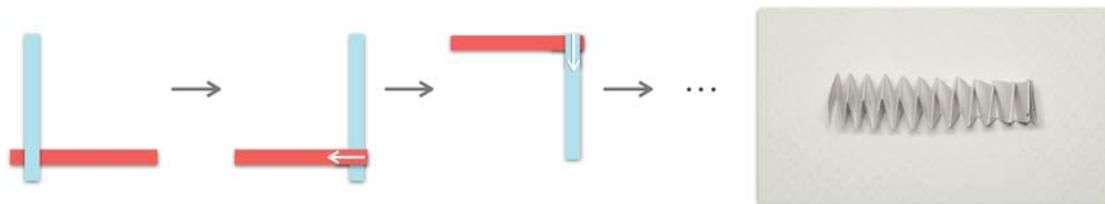


図 3.4 2つの帯状の素材からバネを製作する手順

図3.4に示した通り、紙バネを製作する手順は交互に重ねるという反復作業のため非常に簡単で理解しやすい。したがって、紙バネは子どもの工作や遊びで活用されることが多かったが、近年、学術的にその性質に注目した研究がある。Yonedaらは紙バネの持つ力学的特性などの解明のため、実験から定量化を行なっている [39]。その中で紙バネは、以下の特徴を持つことが示されていた。

- 単純な折り方から豊かな機械的・構造的挙動が現れる
- バネの展張中に全体的な捻れに対して剛性が高まる（非展張時は弛緩している）
- 構造体の両端にかかる力とモーメントを制御するだけで、回転運動と直線運動を可逆的に変換することが可能

以上から紙バネをより発展させることができれば、非常に単純な折り方から様々な構造を生み出せるのではないかと考えた。また紙のような薄い平面材料でも展開させることで剛性が高まる点もユニークである。バネ的な性質を活用した用途と構造物として活用した用途が考えられ、教育的観点でも取り入れやすい。それゆえ、紙バネを基本として本研究を進めることとした。

## 3.4. 紙バネを用いた手法の検討

### 3.4.1 既存の紙バネ

#### 帯数の変更

3章で示したように紙バネは2本の帯状の素材から製作することができる。これを発展させ、一般的に認知されているものとして底面を正多角形にする手法がある。図3.5に示したように3本に拡張すると底面が正六角形の紙バネを製作することができる。

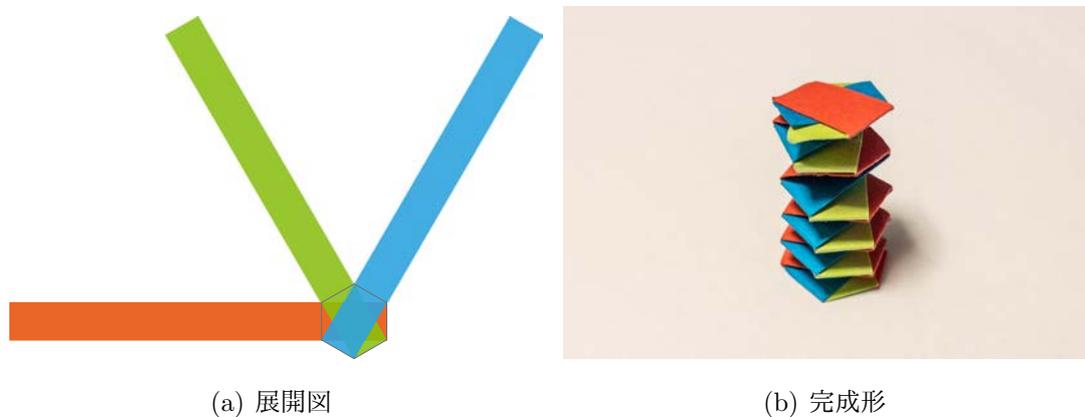


図 3.5 3本の帯素材から製作した底面が正六角形となる紙バネ

底面とする正多角形の辺の数が偶数の場合は、辺の数を2で除した帯数を用意することで作製できる。奇数の場合も重ね合わせる帯同士の角度を計算することで実現できる。このように帯の本数を変更してもバネ構造は成り立つことが既に分

かっている。ただし、この底辺を正多角形とする折り方は通常の紙バネと同様、螺旋状に伸縮するのみである（図3.6）。

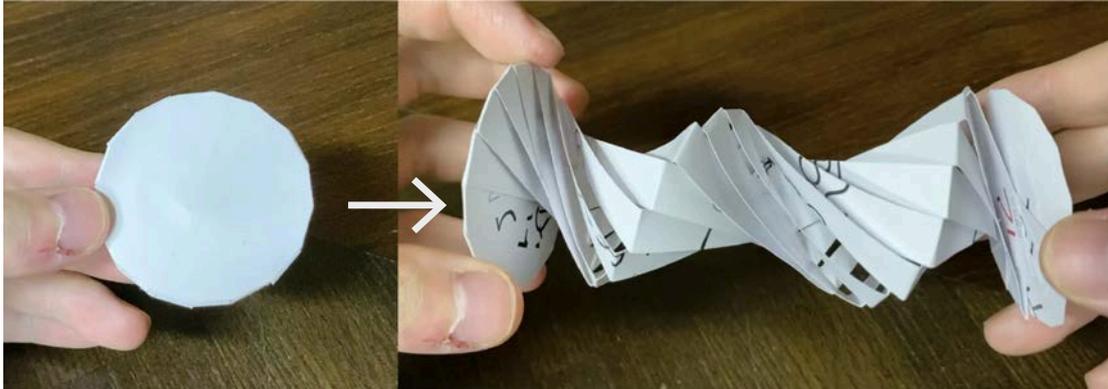


図 3.6 底面が正十六角形の紙バネおよびその展張

### 折り方の変更

2本で紙バネを作製する場合も折り方の一部を変更することで形状に特性を持たせることができる。図3.7は、2本の帯素材を十字に交差させ、折り方の手順を変えることで蛇行した展張を可能にした例である。

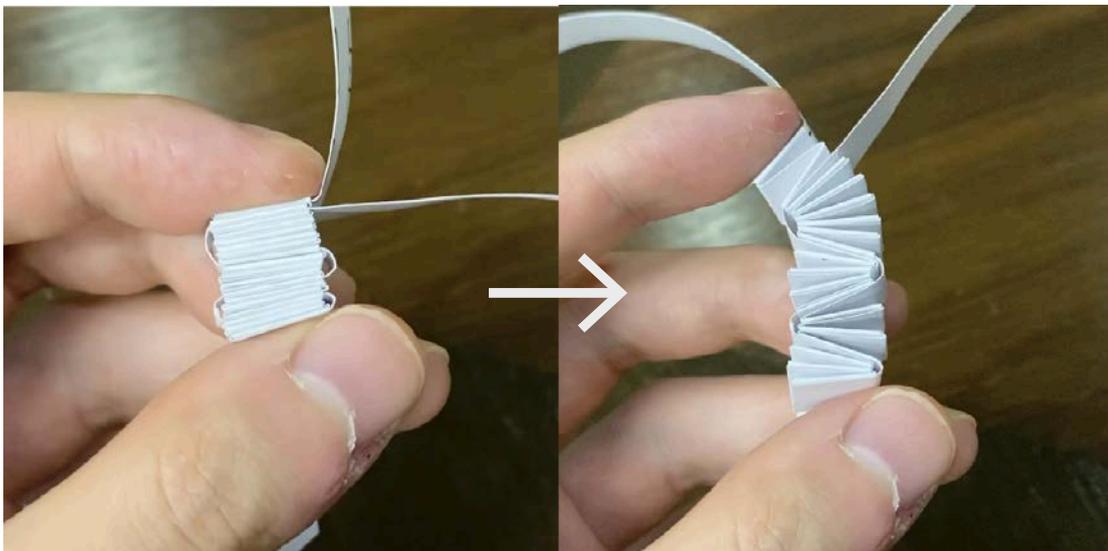


図 3.7 2本の帯から十字に交差させて折り方の手順を変更した例

図 3.8 は L 字と I 字の帯素材を組み合わせて折る手順の一部を変更することで曲がるようにした紙バネの試作である。L 字の帯に I 字の帯を重ね合わせ、並列する 2 本（図 3.8 の赤と青）を内包するように垂直に交わる 1 本を折り返す。その後、2 本の赤と青を折り返す。同様に垂直する 1 本と並行する 2 本を交互に折り込んでいくことでバネができる。ただし、図 3.8 右に示した形状では、2 と 3 を付した赤・青の折る手順を一部変更している。具体的には赤・青を同様に折り返していくのではなく、片方の手順を一部飛ばすなどしている。

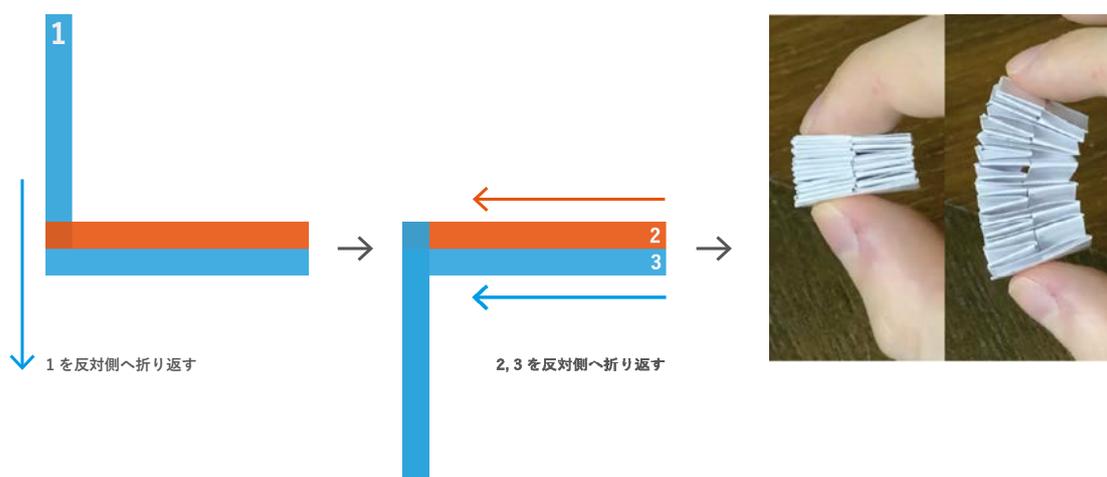


図 3.8 L 字と I 字の帯素材を組み合わせて折り方の手順を変更した例

図 3.7 や図 3.8 に示したとおり、折る手順を一部変えることで展張時に曲げることが可能であると分かった。加えて、手順に規則性を持たせることで曲げる方向や具合も調節できると考えられた。ただし、折る手順を変更しても展張時に捻れてしまう点に変化はなかった。

### 3.4.2 試作から得られた紙バネの特性

帯数を変更して正多角形の紙バネを作る既存の手法や折り方を工夫することで展張時の形状を変化させられることが判明した。同時にこれらは基本的な紙バネと同様、展張時に捻れが生じることも判明している。以下に紙バネの特性を整理したものを記した。

- 帯の本数を増加させても紙バネとして機能する
- 折り込みの手順を変更することでバネが展張する方向や角度を定めることが可能と考えられる
- 既存の紙バネや一部を拡張させた上記のような手法では捻れながら展張する特性が残る

以上の知見をもとに、形状の設計が可能な新たな紙バネの検討を行なった。

## 3.5. Computational Origami Spring

### 3.5.1 提案手法とその基本仕様

ここから新しい紙バネに関して述べる。提案する新しい紙バネは形状の設計が可能であることから Computational Origami Spring（以降、COS）と呼称する。COSはアナログ的な設計も可能であるがデジタル・ファブリケーションのようなコンピュータによる設計も可能としている。先述のとおり紙バネは通常、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。本研究ではL字状の帯2本を組み合わせて折り込む手法COSを提案する（図3.9）。製作手順は図3.9に示したように、まずL字状の帯を重ね合わせる（図3.9b）。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3.9c）。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3.9d）。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。

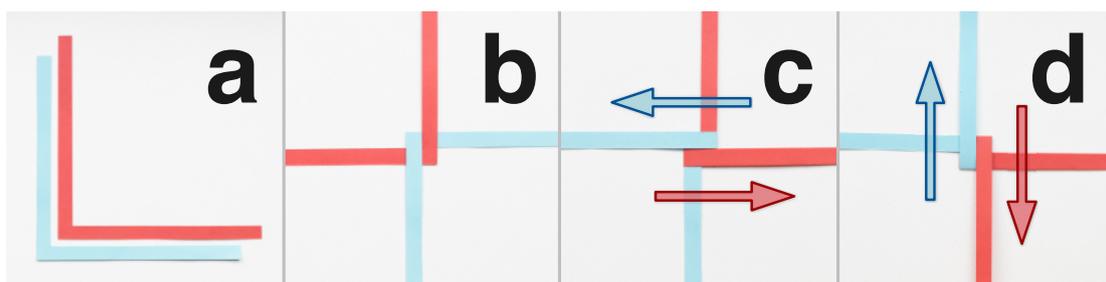


図 3.9 L字型構造の折り方

また単純に展張するだけではなく、COS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。以降で、それぞれの形状変化と製作手法に関して述べる。

### 3.5.2 形状設計

COSは折り方の手順や展開図を変更することで立体構造の形状を任意に決定することができる。

#### 曲げ

COS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3.10 a-hに折り方を示した。a-cは図3.9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。

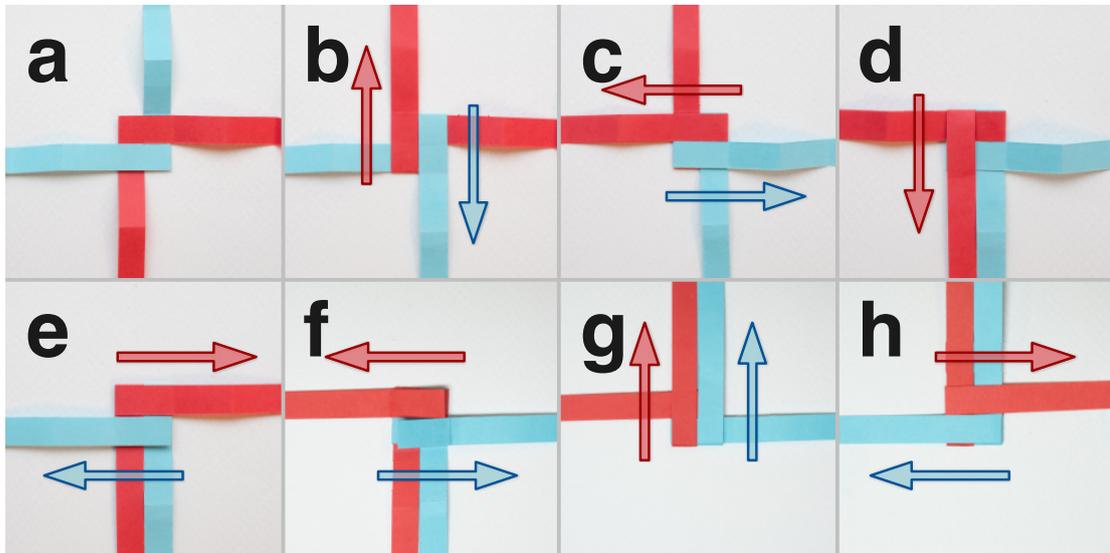


図 3.10 L字型構造を曲げる折り方

図3.9と図3.10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ゝを図3.11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 3.11 曲げる折り方を導入したL字型構造

図 3.10 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。ひとつのユニットでどの程度の角度に曲がるのかを算出するため、図 3.10 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 3.11)。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。

### 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 3.12 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 3.1 で決定できる。

$$z = (x + y)^2 \quad (3.1)$$

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。

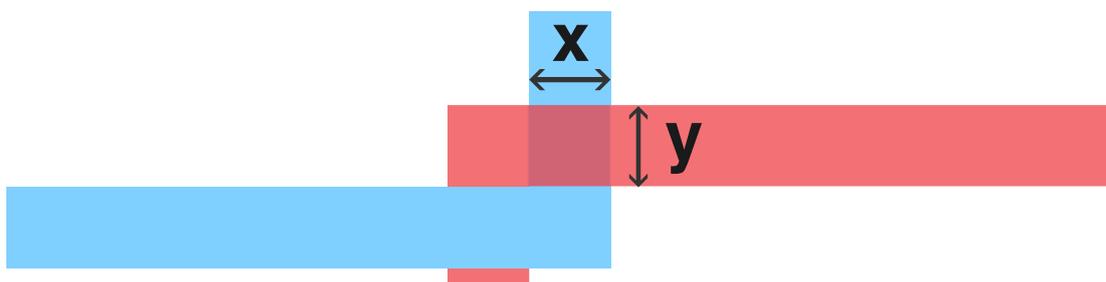


図 3.12 底面積と線幅の関係

帯幅を変えて試作した構造の一例とその展開図を図 3.13 に示した。帯幅を段状に広げていくことで式 3.1 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。

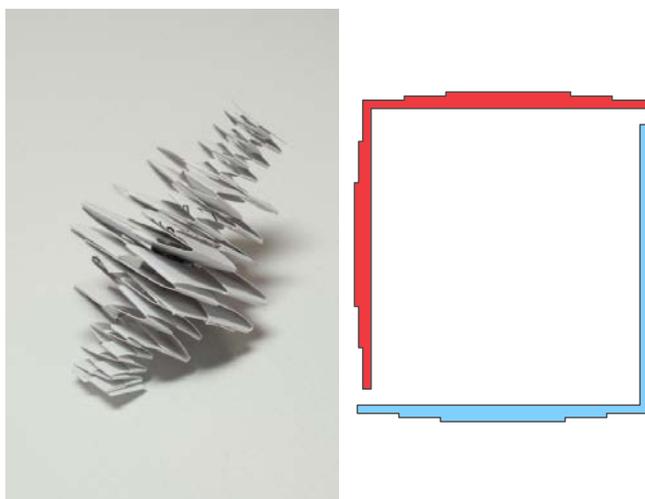


図 3.13 帯幅を変更して構築できる構造例とその展開図

また図 3.14 に示したように COS では中空にすることも可能である。



図 3.14 COS による中空の構造

### ねじれ

通常の紙バネは螺旋状に捻れながら展張するが、COSは展張時に捻れが生じない。通常の紙バネとの比較を図 3.15 に示した。

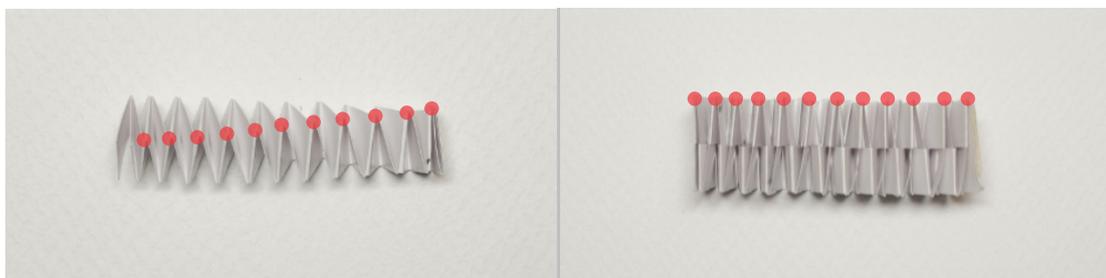


図 3.15 基本構造（左）と L 字紙バネ構造（上）とのねじれ比較

### 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、捻れを生じさせることができる。図 3.16 に、捻れが比較的弱い構造を製作する手順を示した。図 3.16 a-e は図 3.9

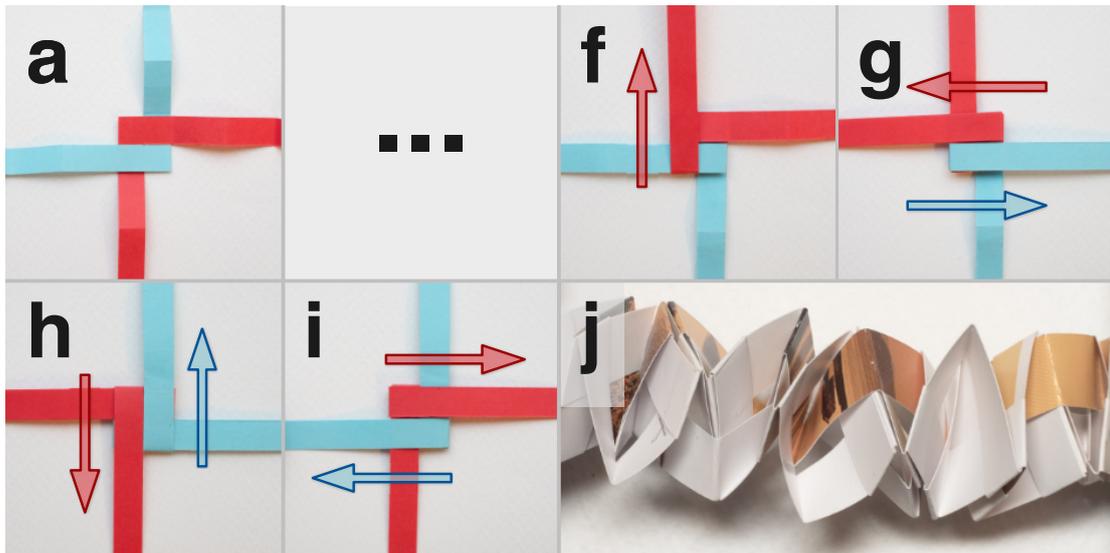


図 3.16 弱い捻れを生じる構造の折り方

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、この差異により捻れが生じるものと考えられる。

図 3.17 は、捻れが比較的強い構造を製作する手順である。図 3.16 a-e は図 3.16 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くことにより構造が完成する。

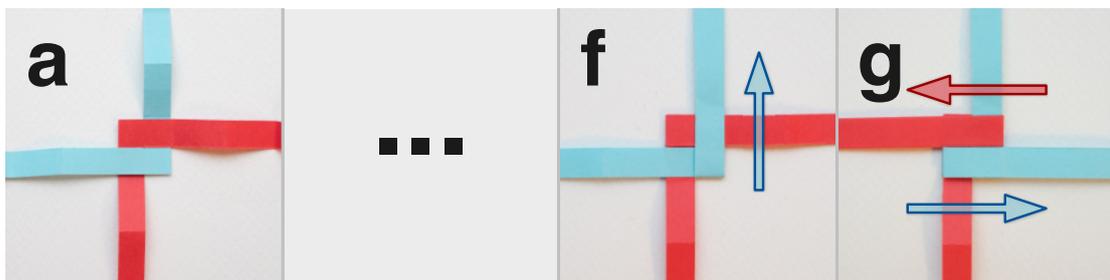


図 3.17 強い捻れを生じる構造の折り方

### 3.5.3 展開図の自動生成

形状設計の項で示したように、COSは展開図の帯幅を段階的に変化させることで、組み立て後の形状を設計できる。展開図を検討する過程は手動で素材に描くことでも十分に可能である。しかし、より効率的に展開図を描画するためには、コンピュータの活用が最適である。したがって、3D CADソフトのRhinoとそのプラグインであるGrasshopperを利用した紙バネの展開図生成ツールを製作した。

#### ツールを活用した設計の流れ

COSの形状を設計する上で、手動で設計した場合とツールを用いて設計した場合の流れの違いに関して図3.18に示した。図3.18のように手動で展開図を考える

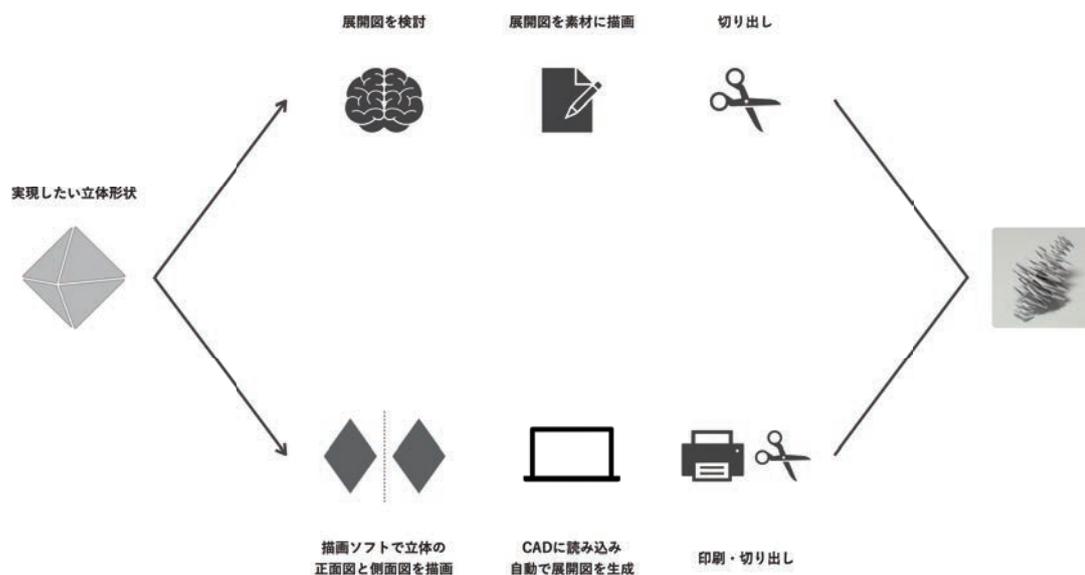


図 3.18 手動で設計した場合とツールを用いて設計した場合の流れの比較

場合は、COSの仕組みを熟知した上で、完成形を三次元から二次元に変換し予測

しながら描画する必要がある。一方、提案するツールを用いた流れでは、製作したい立体構造の前面・側面から捉えた図を用意し、図を読み込んだ Rhinoceros 上で Grasshopper を実行することで展開図が生成される。

#### ツールを活用した実際の製作フロー

図 3.19 にツールを用いた設計から製作までの流れを示した。図 3.19 a-c は、以下の内容を示している。

- a. 描画ソフト（ここでは Illustrator）で製作したい立体を正面・側面から捉えた際の図形を描いた様子
- b. a で描いた図形を Rhinoceros 上で垂直に交わるように配置し、図形を押し出した上でブール演算（積）を実行，その後 Grasshopper で展開図を生成した様子
- c. 生成した展開図を A4 用紙に印刷・切り出した後に組み上げた様子

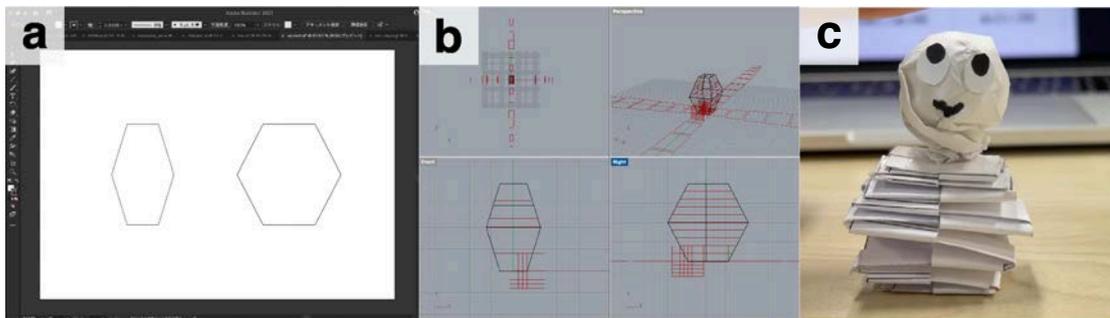


図 3.19 Illustrator から Grasshopper を経て COS が完成するまでの流れ

### Grasshopper における展開図の出力

Rhinoceros 上にある立体を紙バネの展開図とする際、プラグインである Grasshopper 上のプログラムを用いる。このプログラムでは展開図を生成する際、以下のパラメータを設定することができる。

1. 紙バネの層（解像度）を変更する
2. 素材の厚さに応じて帯の長さを調整する

COS の高さ（非展張時と展張時）は、折り込んで COS を製作する際にできる層の数で変化する。また層の数を増やすことで完成する立体形状の解像度を高めることも可能である。図 3.20 は、Grasshopper 上に配置した層の数を決定するスライダとそれが反映された Rhinoceros 上の展開図である。スライダで値を 5 にすると層の数は 5 層となり、増やしていけば 10 とした場合のようになる。

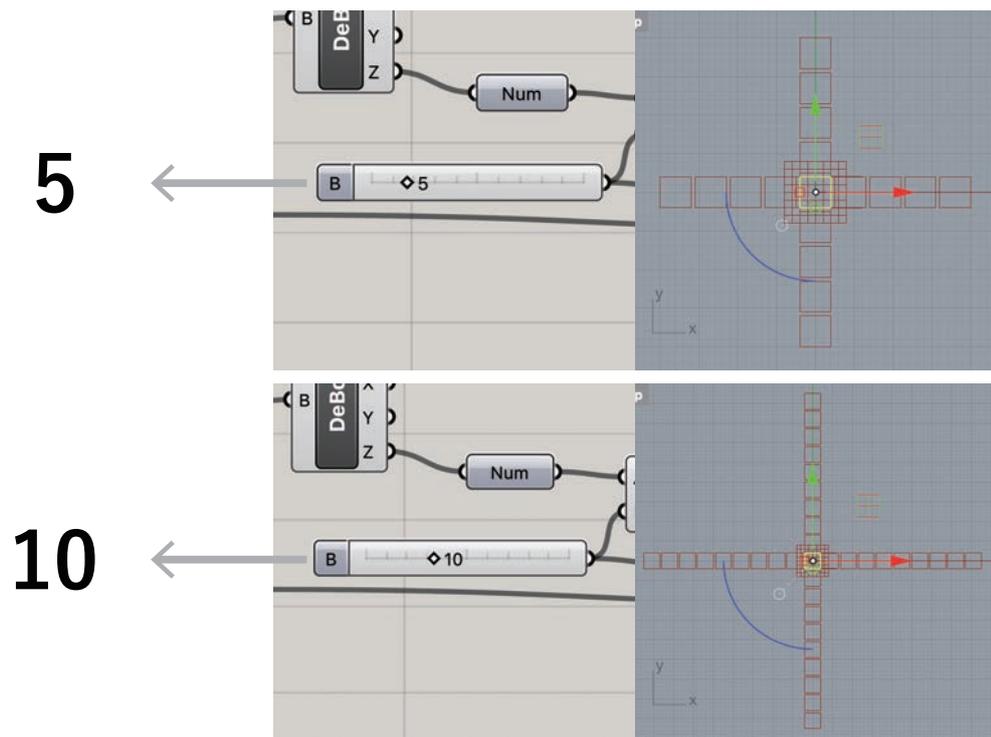


図 3.20 COS の層の数を Grasshopper で変更する場合

同様に Grasshopper 上のスライダで素材の厚みを反映させ、帯の長さを変更させることも可能である。厚みのある素材で繰り返し折り進めていくと、折り返しで生じる厚みにより想定していた折り位置で折ることができなくなる。これを防ぐため、素材の厚さを事前に展開図へ反映させておく必要がある。図3.21のように素材の厚さをスライダで変更することで、Rhinceros 上の展開図は厚み分を考慮したものとなる。

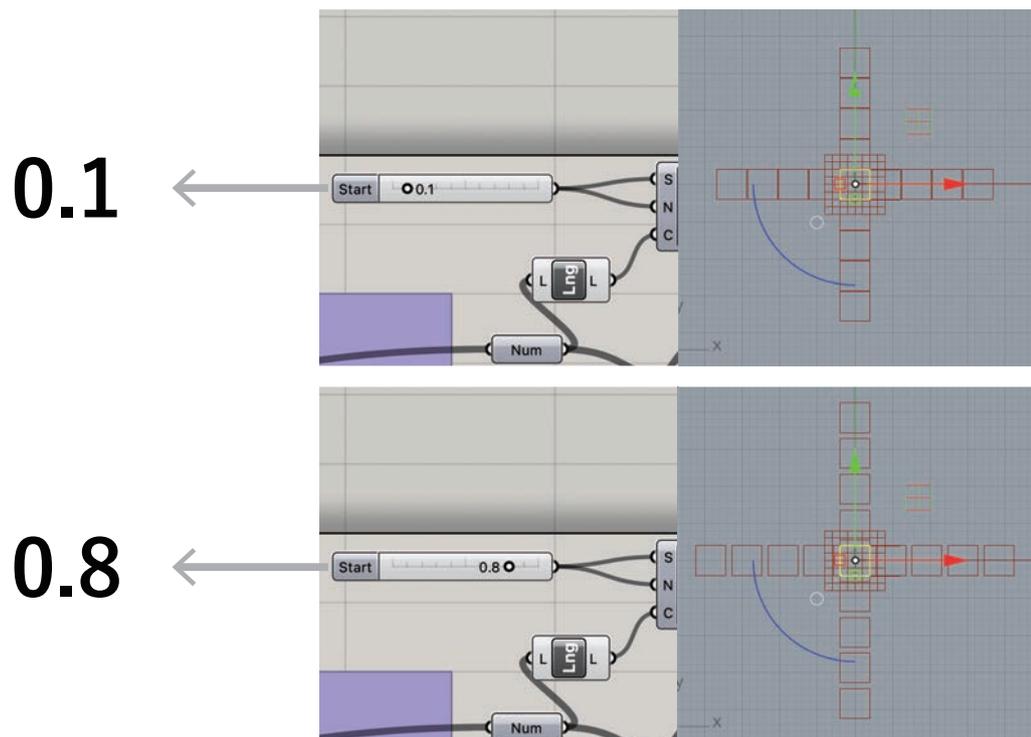


図 3.21 素材の厚さを Grasshopper で展開図に反映させる場合

### 3.6. COS で可能なファブリケーション

提案する COS は任意の形に設計できることをこれまで示した。既存の紙による立体表現と比較した場合、COS には表 3.1 に示したような特徴があると考えられる。折り紙やペーパークラフトは低年齢を対象としたものからコンピュータを用いた高次的なものまで含め比較した。COS は手動での設計とコンピュータによる設計の両方が可能であり、バネ構造により伸縮する動的な要素を製作物に与えることができる。また COS は製作に要する時間も比較的短時間である。ただし、COS では全く伸縮しない構造や球体のように曲線的な構造を完全に製作することはできない。

表 3.1 紙による立体表現との比較

	COS	紙バネ	折り紙	ペーパークラフト
形状の設計	○	×	△	△
動的な構造	○	○	△	△
非動的な構造	×	×	○	○
曲線的な構造	△	○	△	○
組み立ての容易さ	○	○	×	×

上記のような特徴を持つ COS から生み出される製作物の応用例を以下に示す。教育に取り入れる場合、単純なモデリングの手法だけでなく、用途を示すことで様々な学習に発展させることが期待できる。

### 照明機器

提案手法は特別な機材を用いずに使用できるが、レーザー加工などを用いることで表現の幅も広がる。図3.22はその一例として製作した照明機器である。Illustrator上で展開図を描画しているため、手動での設計が難しい角丸の形状を実現している。



図 3.22 レーザー加工を用いた照明器具

### 電子部品

図 3.23 は COS により製作したスイッチである。銅箔により回路を形成している。Arduino と組み合わせたことで LED の点灯やスピーカから音を再生するなど可能となった。STEAM 教育での活用や目的の形状に合わせたスイッチやセンサ、アクチュエータへの展開が期待される。

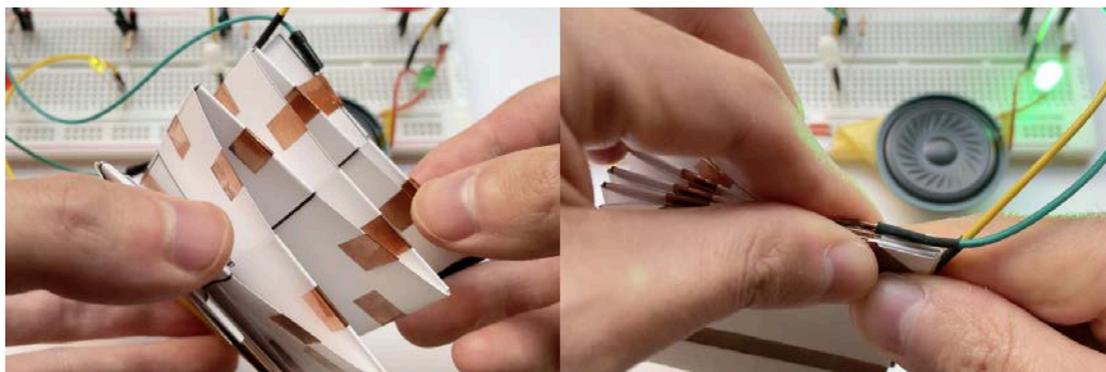


図 3.23 銅箔で回路を成形することでできるスイッチ

### 無限回転が可能な輪構造

図 3.24 は COS の両端を繋ぎ合わせ輪といたものである。駆動輪やスクリュー、風車としての活用も可能である。また図 3.24 のように中心から外縁部へ向けて回転する構造にもなる。

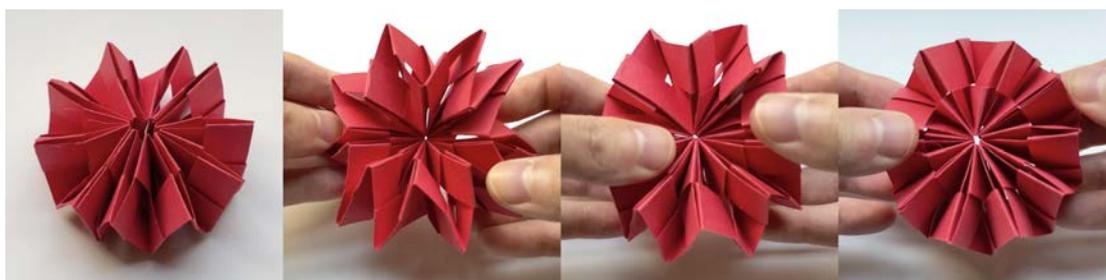


図 3.24 COS の両端を接合することでできる無限に回転する輪構造

### アクセサリ

図 3.25 は COS を用いた指輪型のアクセサリである。このように玩具のような使い方も可能である一方、素材を変更することで服飾雑貨への活用も考えられる。



図 3.25 COS を用いた指輪型のアクセサリ

## 3.7. 本章の総括

本章では、学習者と教育者が導入・学習しやすいファブリケーションの手法が必要と考え、創造力などファブリケーションの学習で重要な要素を学べるような手法の設計を行なった。提案手法として、工作からの延長上にあるようなファブリケーションの検討を行い、入手の容易さや親しみやすさの面から素材として紙を利用した手法を採用した。中でも紙バネに着目し、これを発展させた Computational Origami Spring を新たに開発した。COS は意図した立体形状を簡単に設計でき、紙バネ由来の組み立ての容易さから手早く構造を製作できる。今回提案する手法では、帯幅の変更による形状の設計を主に活用した。加えて、コンピュータによる設計支援も可能とした。

## 第 4 章

# 検 証

COS は、紙と身近な道具を用意するだけで立体的な構造を製作できることを既に述べた。したがって、この手法を児童・生徒および指導者に用いてもらうためワークショップ形式で観察し評価を行った。ワークショップは対面・オンラインで1回ずつ実施した。

### 4.1. 対面での実施

#### 4.1.1 ワークショップの流れ

提案手法の折り方と立体構築のためのツール、およびこれらを活用したファブリケーション・学習を体験してもらった。全体の流れは以下に示した。

**導入** 折り紙の経験の有無や産業における折り紙の用途をクイズ形式で説明した後、紙バネを紹介

**例示** COS でどのようなモノが製作できるのか実際に触れて体験

**学習** COS の基本的な折り方を実践

**立案** ワークシートに図や文を記入しながら製作物を立案

**製作** ワークシートに基づき必要なパーツの展開図をコンピュータとプリンタを用いて出力

**学習** COS を用いて電気回路の学習とスイッチの製作

**発表** 成果物を全体に向けて発表

また全体の内容は表 4.1 に示した。参加者の学年と人数に関しては、小学2年生が1名、3年生が3名、5年生が1名、6年生が3名の計8名である。参加した生徒の多くは、普段プログラミングスクールに通っている。8名の参加者はモノづくりの経験があり、その頻度は、日々行なっている者から年に数回の者まで分散している。

表 4.1 対面におけるワークショップの実施内容

実施場所	コミュニティふらっと阿佐ヶ谷 第3集会室
実施時間	3時間
参加人数	8人
参加者の学年	小学2, 3, 5, 6年生

ワークショップで使用した素材や道具類は以下の通りで、いずれも入手しやすく教育現場に常備されているものを活用した。

**素材** 写真印刷紙，画用紙

**道具** ハサミ，スティックのり，ボールペン，水性カラーペン

**機器** コンピュータ，家庭用プリンタ

製作の際、Illustrator と Rhinoceros (Grasshopper) を扱う工程では主にスタッフ2名がコンピュータの操作を行なった (図 4.1)。

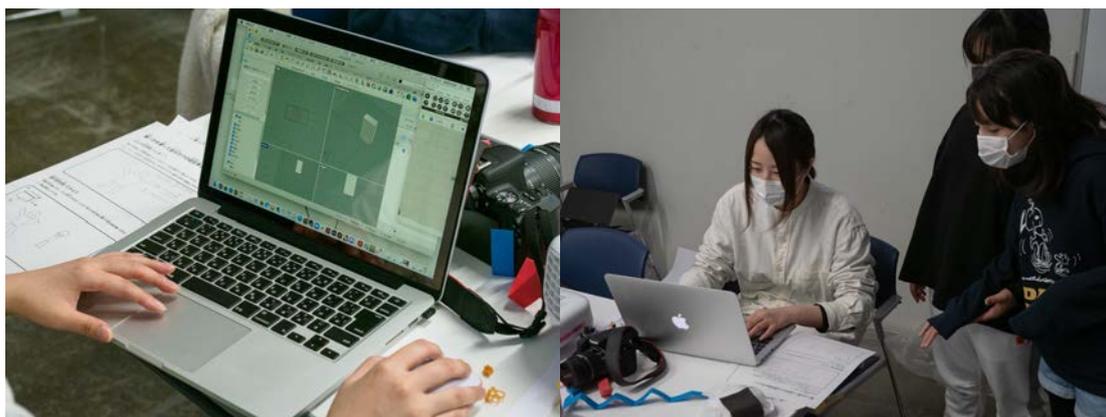


図 4.1 コンピュータで製作のサポートをする様子

### 4.1.2 観察方法

観察は参与観察の形式で行なった。分析には画像・映像の記録と実施中に対象者との会話から得た記録，ワークシート，アンケートによる聞き取りを用いている。ワークシートは図 4.2 に示した 3 枚を用いた。

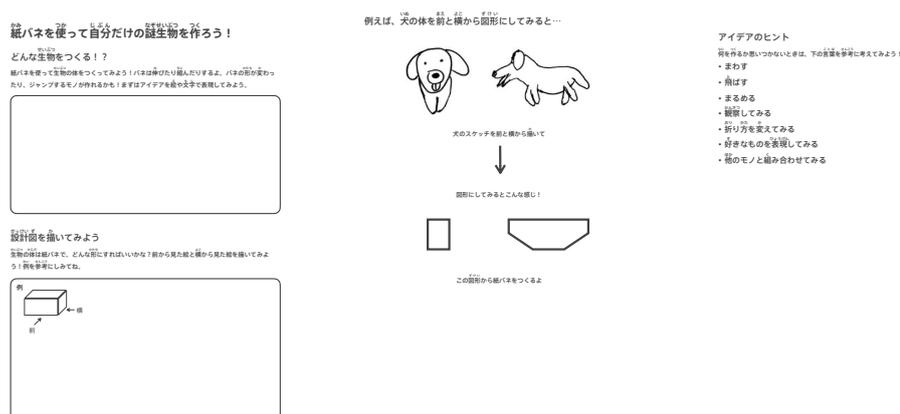


図 4.2 対面のワークショップで使用したワークシート

### 4.1.3 児童・生徒のモノづくりの経験とコンピュータの使用状況

事前のアンケートでは、モノづくりの経験とコンピュータの使用に関する調査を行なった。前述のとおり全員がモノづくりを経験しており、その頻度は毎日が 3 名，週 2,3 日程度が 1 名，月に数回が 2 名，年に数回が 1 名，未回答が 2 名であった。これらに図工など学校の授業が含まれているかは不明である。またモノづくりの際に扱う材料に関する聞き取りでは、紙類（紙，折り紙，段ボール）や粘土，プラスチック，テープが挙げられた。したがって，初等教育までに扱う材料の事前予測・認識との差異は見られない。

コンピュータ（スマートフォン・タブレットも含む）の使用に関しても全員が使用すると回答した。またその用途はプログラミング（スクラッチ）やオンライン授業，ゲーム，動画視聴が挙げられた。CAD のような設計ツールの使用はないが，スクラッチを用いたコーディングは行えるようである。

#### 4.1.4 収録した映像とインタビューによる分析

##### 手法の学習に要した時間

COSの基本的な折り方を参加者が習得するのに要した時間は約8分であった。この際、参加者には事前に切り分けた帯状の素材(20 mm × 420 mm)を1人4本配布し、それらを糊付けにより2つのL字形状としてもらった。その後、組み立てを行なっている。説明はスライドと大型のサンプルを示して行い、適宜スタッフが巡回しながら個別の質問に対応した。対応したスタッフは2名である(加えて撮影スタッフもいるが主な対応はしていない)。

##### ワークシートを使用した製作物の立案の工程

図4.2に示したワークシートを配布後、「紙バネを使って自分だけの謎生物を作ろう」という題目でアイデアの構想を始めた。構想に要した時間は最も早かった参加者で約8分であった。周囲の参加者とアイデアに関する会話が多く見受けられた。

##### 展開図の出力工程

ワークシートに描画した平面図をIllustrator・Rhinoceros(Grasshopper)とプリンタを用いて出力する工程である。この工程はIllustrator・Rhinoceros双方の取り扱いを習熟したスタッフ1名がコンピュータの操作を行い、参加者と設計に関する会話をしながら進行した。構造の複雑さや点数により時間の増減はあるものの、単純な構造(図4.3)では約8分で設計から出力まで完了した。ただし、出力工程を待つ参加者が列を成す場面もあり、別の取り組みを促すなど対処していた。したがって、スタッフ1名でこの工程に対応するには、ワーク自体の工夫やスタッフ数の調整、ソフトウェアの改良が必要である。

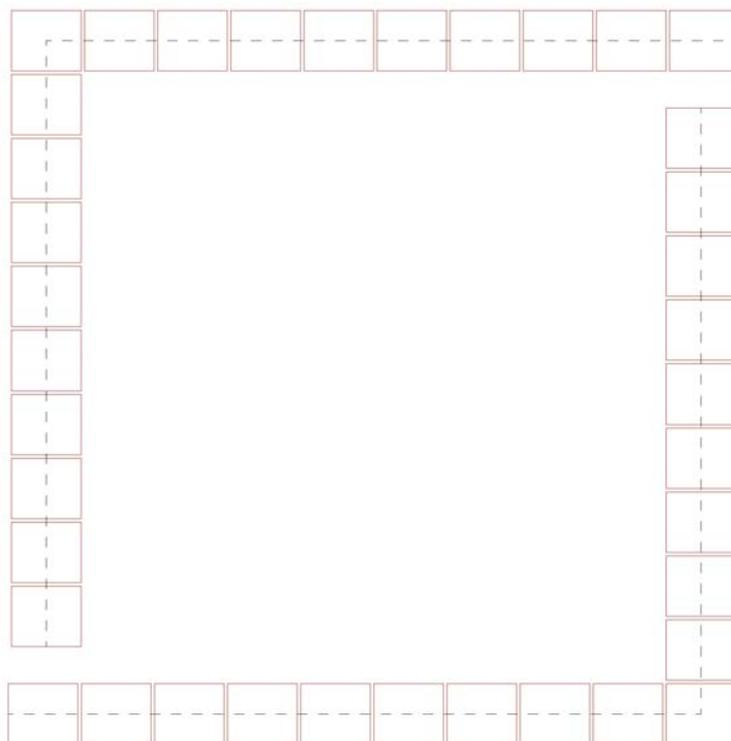


図 4.3 Rhinoceros (Grasshopper) から出力される展開図

### 製作の工程

製作の工程では主に以下の点が観察された。

- 製作中に「作品をより良くしたい」という意見や改良案が出ていた
- バネのパーツ点数が増えると、切り出し・組み立てが多くなることから面倒と感じる参加者もいた
- スタッフの不手際により、他者とは質感や色が異なる紙に展開図が印刷されてしまった参加者は、それを個性や特徴と捉え直し作品に活かしていた

### 4.1.5 作品

「紙バネを使って自分だけの謎生物をつくろう」というテーマに基づいて各参加者が記入したワークシートとその作品の一部を図4.4に示した。アイデアスケッ

チから COS で再現するための図面を描き、展開図を生成した後に切り出しや組み立てを行なって作品としている。

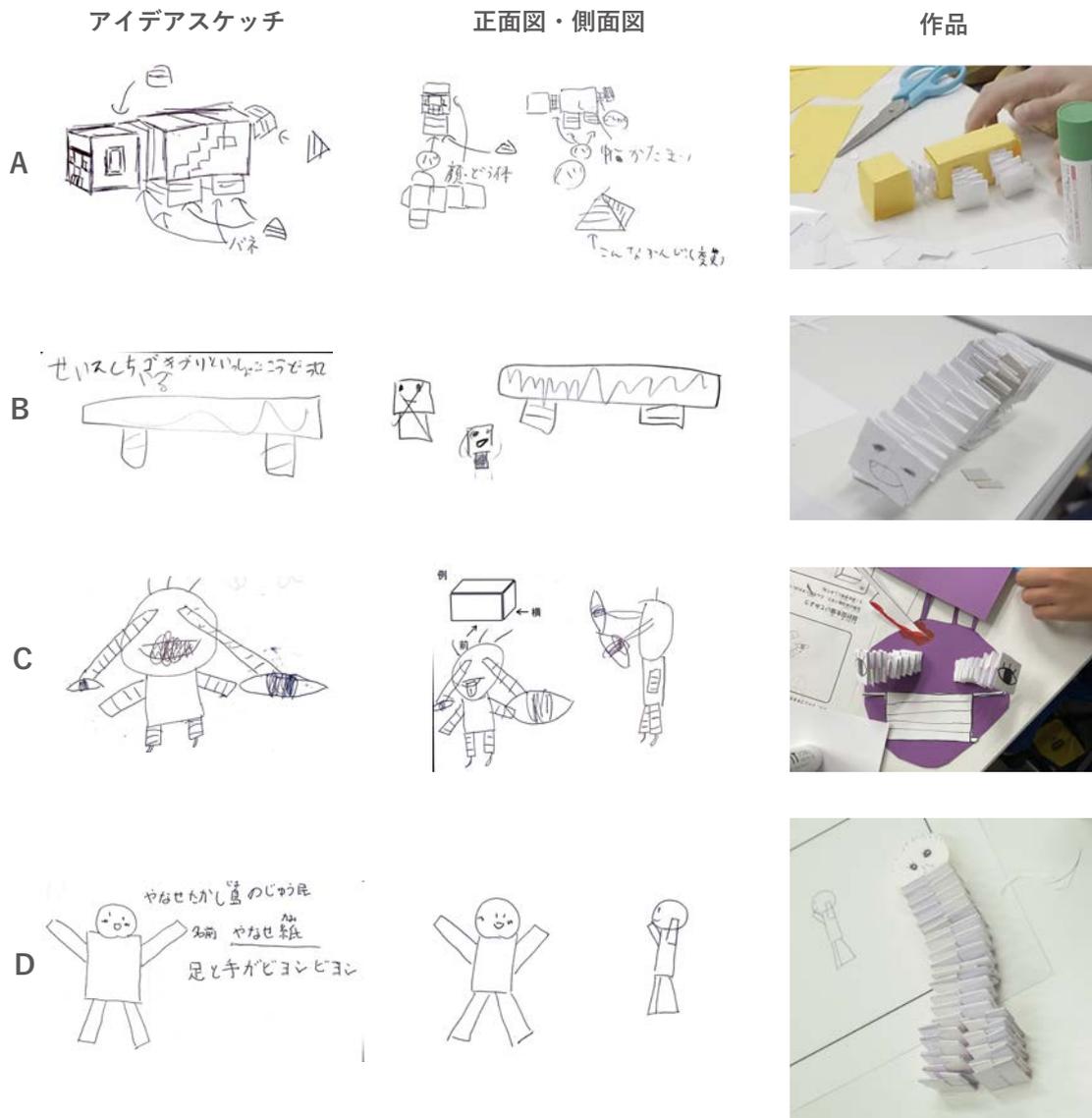


図 4.4 参加者のワークシートと作品

### COS の特徴を活かした形状

参加者が作品に用いるために設計した形状を整理すると図 4.5 に示した 3 つの形状が見られた。この中で台形型と判子型は従来の紙バネでは実現することができないため、COS を利用して生まれたものである。図 4.4 に示した参加者 A や D の作品は長方形型で設計した COS を関節や脚などに用いており、これらも稼働するような表現をしていた。参加者 C は、面のような作品として判子型を飛び出す眼球に利用していた。



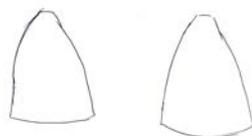
図 4.5 参加者が設計した形状の種類

参加者 E の作品である「バネコ」は、猫をモチーフにしたもので胴体に COS を用いている。胴体は図 4.5 の台形型で設計された。この作品は頭を前後左右に倒すことでお辞儀をしたり、震える動きを持たせている。

#### アイデアスケッチ



#### 正面図・側面図



#### 作品



図 4.6 参加者 E の作品「バネコ」の設計から完成までの流れ

参加者 F は時間の制約上、完成には至らなかったが猿をモチーフとした作品を検討していた（図 4.7）。最終的には COS で作成した手足に磁石を取り付け、猿が

木を渡るように伸縮可能なマグネットとすると述べていた。このように実用面を含めたアイデアで作品を検討している参加者も見られた。



図 4.7 参加者 F の猿から着想を得たマグネットのアイデア

以上のように作品に合わせた形状とバネ構造による動きを同時に持たせることのできる COS は、参加者に動きのある作品の製作を促した可能性がある。今回はテーマに生物というキーワードが含まれていたため、作品の動きは必然的に付加されたとも考えられる。ただし、マグネットのようなアイデアは COS を用いたことによる効果ではないかと推察された。

#### 失敗を特徴と捉え直した作品

スタッフの不手際により、他者とは質感や色が異なる紙に展開図が印刷されてしまった参加者の作品を図 4.8 に示した。



図 4.8 失敗から生まれた中央に異なる素材を用いた作品

参加者は製作の途中で紙が違うという異変に気づき、スタッフが相談を受けた。印刷のやり直しも可能であることを伝えたが、他の作品にはない個性や特徴と捉え直し図 4.8 のように一部色や剛性の異なる作品に仕上げていた。

### COS の制約と想定していなかった使用方法

COS は自由に形状を設計でき、バネ構造を利用した動的な表現が特徴と考えられたが、参加者の作品では1つの部品と捉えて使用している例が目立った。図 4.4 に示した参加者 A の作品は首や脚、尻尾に台形型や基本的な COS を用いている。また参加者 B や D は、大きさの異なる基本的な COS を積み重ねたり、側面に接着するなどしてアイデアを形にしていた。COS がこのような用途で用いられたのは、以下の点と考えられる。

- COS はバネ構造のため、アイデアに含まれる非動的な部分を再現するには不向きである
- COS は上下左右に柔軟に動き伸縮するため、意図して稼働させたい肢体の一部の使用に向いていた
- COS は通常の紙バネと異なり展張しても捻れず側面が平面となるため、側面に接着することを可能とした

### COS を用いた電気回路の学習

作品の製作以外に COS を用いた電気回路の学習も行なっている。スライドを用いて初歩的な電気回路の解説をした後、折り方を学ぶ際に作製した COS を再利用したスイッチの製作に取り組んでいる。進捗の関係上、スイッチ製作したのは2名の参加者に限られた。その他の参加者にも製作用の銅箔やジャンパ線は配布している。

参加者は自分で作製したスイッチをブレッドボードに接続し、用意された電子音や光を発して楽しんでいた (図 4.9)。また他の参加者に銅箔の貼り方を教えるなど自発的な活動も見られた。

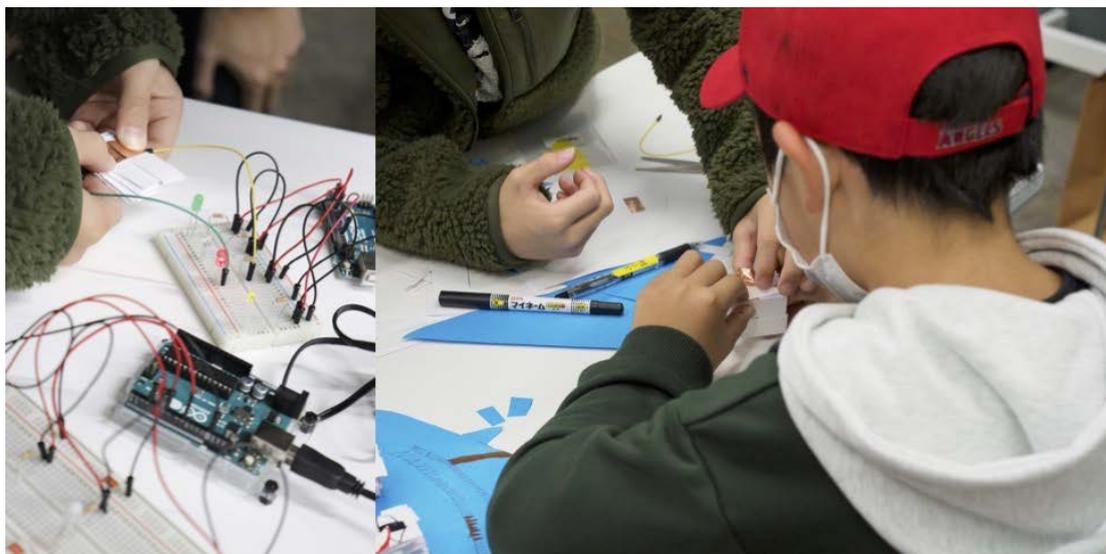


図 4.9 スイッチを製作・試用する参加者たち

このワークショップに参加していた外部のスタッフから「今回作製したスイッチは既存のプログラミングツールなどと組み合わせて活用できる」というフィードバックもあり、ファブリケーションから発展した学習への転用の可能性が示唆された。

#### 4.1.6 事後のアンケート

ワークショップ後のアンケート調査では、参加したワークショップの難易度に関する聞き取り等を行なった。アンケートは記入形式で行い、項目の選択および記述によって調査した。難易度は難しい・やや難しい・普通・簡単な4項目から選択してもらった。その結果は難しいが1名、やや難しいが2名、普通が2名、簡単が3名という回答結果であった。また難しい点としては、展開図を切り出し作業や折って組み上げる作業が挙げられた。このワークショップを通した発見としては、紙バネでも様々なモノを作れることやバネの面白さ、電気回路に関すること、素材に手を加えることで加工が楽になる点が挙げられていた。

## 4.2. オンラインでの実施

### 4.2.1 ワークショップの流れ

オンラインでは表 4.2 示した内容と以下に列挙した流れで実施した。基本的な折り方を学習する手順までは対面とほぼ同様であるが、設計ツールを用いた製作を行わない点が異なる。したがって、対面での内容と極力等しい内容を提供する必要があった。この点はツールを用いた設計の際、形状の完成形を予測するため、同様の体験ができる項目に置き換えている。大阪でのサポートはフリースクールなどを運営する特定非営利活動法人輝<sup>1</sup>の協力を得ている。参加者の学年と人数は、小学1年生が1名、2年生が4名、6年生が1名、中学1年生と2年生がそれぞれ1名の計8名である。

**導入** 折り紙の経験の有無や産業における折り紙の用途をクイズ形式で説明した後、紙バネを紹介

**例示** 紙バネでどのようなモノが製作できるのか映像を通して例示

**学習** 提案手法の COS の基本的な折り方を実践

**学習** 完成形を予測してスケッチした上で、実際に組み立てて予測と結果を比較

**立案** ワークシートに図や文を記入しながら製作物を立案

**製作** ワークシートに基づき余った展開図や端材から製作

**発表** 成果物を全体に向けて発表

表 4.2 オンラインにおけるワークショップの実施内容

実施場所	Zoom 上（児童らは大阪府八尾市，主催者は関東から接続）
実施時間	2時間40分
参加人数	8人
参加者の学年	小学1, 2, 6年生と中学1, 2年生

1 <https://npo-kagayaki.org>

用いる道具類は対面で実施したときと同様、一般的に入手や準備がしやすいものとした。展開図やワークシートは事前に輝のスタッフへ pdf データとして送付し、当日までに印刷したものを準備した。以下に使用した物品を示した。

素材 紙（展開図を印刷したもの）

道具 ハサミ，スティックのり（もしくは液体のり），サインペン

機器 コンピュータ（ビデオ通話で使用）

### 4.2.2 観察方法

ワークショップはオンライン会議ソフトウェアの Zoom を用いて大阪府八尾市の会場と東京・千葉などの拠点を繋ぎ実施した（図 4.10）。なお，作業中は携帯端末などで手元を映してもらい，発表はメインのコンピュータで会場全体を映しながら行なっている。観察は対面と同様 Zoom を介した参与観察の形式で行った。分析には画像・映像の記録と実施中に対象者との会話から得た記録，アンケートによる聞き取りを用いている。



図 4.10 Zoom 上での会話（左）とスライドを用いた説明の様子（右）

配布した 2 つのワークシートを図 4.11 に示した。左は予測した後に COS を組み立てる際に使用し，右はテーマに基づいた製作の際にアイデアやコンセプトを記入するために使用した。

図 4.12 は児童・生徒に配布した展開図の一例である。5 種類配布し，それぞれ 1 から 5 までの数字を付している（2 から 5 は付録に添付した）。組み上げ後は，全て異なる形状となる。展開図は一般的な印刷機で扱える A4 の大きさに収めるた

カタチを予測してみよう	選んだカタチの番号	アイデアを形に！プロトタイプをつくってみよう！	タイトル
<p>組み立てたらどんなカタチになるか想像して書いてみよう</p> <p>前から見たとき</p> <p>横から見たとき</p>	<p>組み立て終わったカタチはどうだった。結果を書いてみよう</p> <p>前から見たとき</p> <p>横から見たとき</p>	<p>アイデアをかんに書いてみよう</p>	<p>これはなに？ことばで書いてみよう</p> <p>これをつかうとだれが豊かになる？</p> <p>どこで、どのようにつかう？</p>

図 4.11 使用した2つのワークシート

め、帯状でレイアウトした。切り出し後に、のりしろに合わせて接着し上部の図を模したL字を2つ作製してもらい、組み上げを行う。図 4.13 は実際に大阪で印刷し配布した5種類の展開図と製作の様子である。

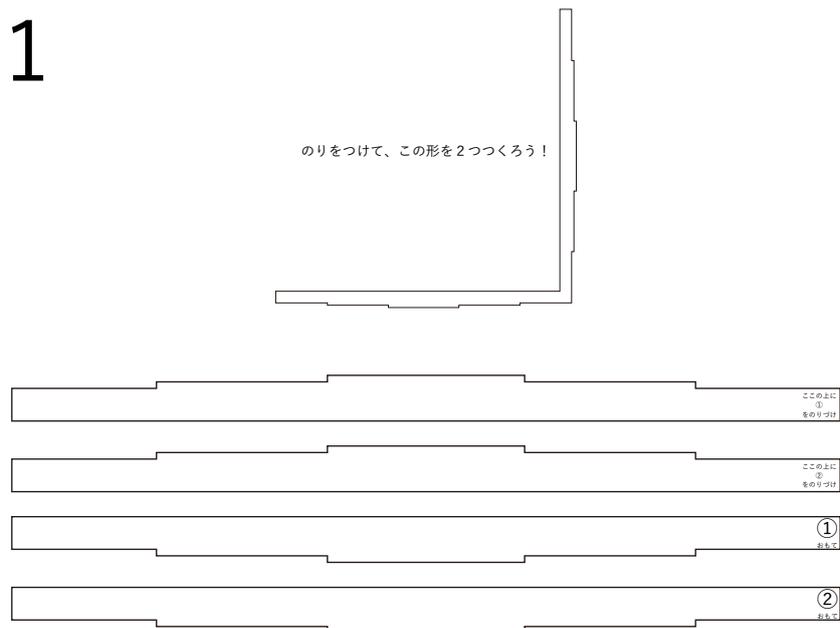


図 4.12 児童らに配布した展開図の例

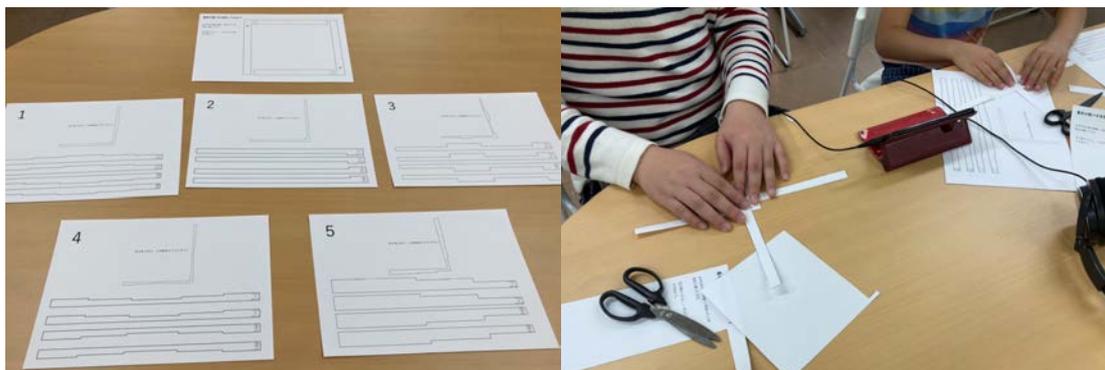


図 4.13 印刷・配布した5種類の展開図（左）と製作の様子（右）

### 4.2.3 児童・生徒のモノづくりの経験とコンピュータの使用状況

事前のアンケートでは、モノづくりの経験とコンピュータの使用に関する調査を行なった。モノづくりを経験があると回答した参加者は7名で、その頻度は週2,3日程度が6名、月に数回が1名であった。これらに図工など学校の授業が含まれているかは不明である。またモノづくりの際に扱う材料に関する聞き取りでは、紙類（折り紙、紙コップ、段ボール）や輪ゴム、電池が挙げられた。紙類は対面でも同様に多い傾向である。

コンピュータ（スマートフォン・タブレットも含む）の使用に関しても7名が使用すると回答した。またその用途はゲームが最も多く、次いでプログラミング、動画視聴、楽器（ピアノ）が挙げられた。

### 4.2.4 収録した映像とワークシートの分析

#### 手法の学習に要した時間

COSの基本的な折り方を参加者が習得するのに要した時間は約7分30秒であった。参加者には展開図を印刷したA4の紙（15 mm × 175 mmの帯をL字状にして2組1セットで印刷したもの）が当日配布され、切り出しから行なっている（対面では既に切り出してあった）。切り出しには全体で約8分要し、最も早い参加者で約3分で切り出しを行なっている。説明はスライドと大型のサンプルをZoom上で示して行い、適宜6名の会場スタッフが巡回しながら個別の質問に対応した。

### ワークシートを活用した予測と結果の体験

図 4.11 に示したワークシートを配布後、「カタチを予測してみよう」という題目で形状予測のワークを行なった。図 4.13 に示した 5 種類の展開図から好きなものを選び、展開図の形状から完成形を予測するというものである。このワークは説明・休憩を含み約 40 分であった。回収したワークシートから以下のことが言える。

- 最も選択された展開図は 5 番であり、次いで 2 番と 3 番であった（展開図は付録を参照）。
- 8 名のうちワークの内容を理解して実行できたのは 6 名であった。うち 1 名は記入の途中でワークを中断している。
- 組み立て後の模写は学年を問わず正しく描けている場合が多い（上記 6 名のうち 5 名）。

### 4.2.5 作品

図 4.11 に示したワークシートを配布後、図 4.13 に示した 5 種類の展開図を自由に活用して「生活が豊かになるもの」という題目でアイデアの構想と作品の製作を行なった。図 4.13 の展開図を組み立てると、図 4.14 のような形状を組み上げることができる。このワークは説明・発表を含み約 50 分（そのうち構想と製作は 40 分程度）であった。

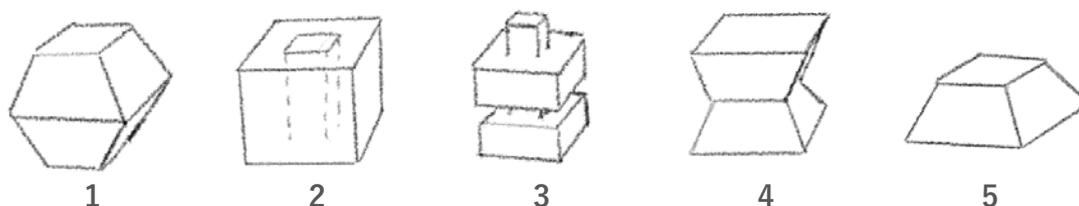


図 4.14 参加者が設計した形状の種類

図 4.15 に作品の一部を示した。1 名は製作途中のため、ワークシートを用いて発表を行なった。作品はチェスの駒や提灯鮫鱈のように額に貼る植物、ウイルスを可視化したもの、地球外生命体、象、馬、跳ねる竹馬のような遊具など多岐にわたる。1 人で複数製作した参加者もいた。



図 4.15 参加者が COS を用いて作製した作品

#### 作品として選ばれたモチーフ

「生活が豊かになるもの」という題に対して、動植物をモチーフにしたアイデアが多かった。完成した作品の扱い方を見ると、COS の伸縮したり前後左右に揺れるという点を楽しんでいるようであった。したがって、動植物のように柔軟に動くモチーフが多く選ばれたのではないかと推察される。

#### 既存の展開図から生まれた作品の特徴

オンラインでは前述のとおり、自ら設計するという項目を設けていない（結果予測・比較のプロセスで代用）。したがって、予め配布した5種類の COS 構造を用いて作品を作製するという流れとなった。それゆえ、アイデアや作品のバリエーションにも差異が見られた。

「生活が豊かになるもの」という題で製作に取り組んでもらったところ、既出の図 4.15 のような作品が生まれた。これらは大きく分けて以下の3つに分類できる。

1. バネ構造のみを活用した作品
2. COS の形状を活用した作品
3. COS の形状から着想を得た作品

1 に関しては、図 4.16 に示したように作品の手足や土台として用いている。土台として用いている場合は、アイデアの大部分を絵で表している。



図 4.16 バネ構造のみを活用した作品

2は自身のアイデアに配布した既存の形状を上手く取り入れている作品であり，図4.17に示したものである．ゾウの鼻には図4.14の5番のように先端に向かって細くなるものを使用したり，馬の体には1番の中央が膨らむものを使用し，各生物の特徴を捉え再現している．図4.17のオリジナルのキャラクターを作製した参加者は，飛び出る勢いを表現するため5番を用いていた．



図 4.17 COSの形状を活用した作品

3はCOSの形状から着想を得て作られたと考えられるものであり，図4.18に示した．図4.14の2番を用いたもので中空構造を活用し，竹馬のように足を乗せて飛び跳ねる遊具を製作していた．図4.18中にある人体の絵も足がCOSに合わせて描かれている．



図 4.18 COS の形状から着想を得た作品

このほか、試作には至らなかったものの「折りたたみ可能な住居」という提案があった。建設の手間やそのまま引っ越せるなど実用的な観点から創造していた。

以上のように既存の展開図を用いて作品の製作を行なった場合でも、形状の特徴を活かしたり、発想につなげる様子が見られた。ただし、バネ構造のみを活用したまでの作品も目立ち、COSで立体的に表現できる部分も図柄で済ませてしまう場合が多かった。これはワークショップで設計の工程を省いた点も影響していると考えられるため、提案するファブリケーションにおいてCOSを設計する工程の重要性が示された。

#### 4.2.6 事後のアンケート

ワークショップ後のアンケート調査では、対面と同様参加したワークショップの難易度に関する聞き取りを行なった。アンケートは記入形式で行い、項目の選択および記述によって調査した。難易度は難しい・やや難しい・普通・簡単な4項目から選択してもらった。その結果は難しいが1名、やや難しいが4名、普通が2名、簡単が1名という回答結果であった。また難しい点としては、展開図を切り出し作業やプロトタイプの構想、折って組み上げる作業が挙げられた。このワー

クシヨップを通した発見としては、自分では思いつかない発想を得られたことや新たな紙の使い方、生活に活かせる点が挙げられていた。

#### 4.2.7 スタッフ（教育者）からのフィードバック

大阪の会場でカメラの操作や子どもの製作をサポートしたスタッフからのフィードバックを以下に示した。これらのフィードバックは後日、文書で収集しており筆者とスタッフの面識はない。

- 準備は比較的簡単であると感じた。バネを作ったことがある子がおり、やり方が1回で理解できどんどん折っていた。紙の余分なところがあれば、自由に切っていた。教えやすいと感じた。
- 配布した展開図は色分けされておらず、色で説明されては理解が難しい（主催者が説明の際、色分けしたL字パーツを用いていたため）。パーツ同士が接続してあると手間が省けると感じた。
- Zoomの画面が反転しており、説明を聞く際、少し混乱した。「バネ作り」のワーク的には単純ではあるものの、いろいろなバージョンで完成がどうなるか想像することを子どもたちが楽しんでおり良かった。
- 折り方が分かる子どもは良いと思う。折り方が不安な子が画面を見ると青と赤が自分の折っているものとどう対応しているか分からない子がいた。配布する紙も色付きにするなどしたほうが優しいと思った。またワークシートにある前と横という表現はスタッフでも分かりづらいので言い方を変える必要があると感じた。
- 紙バネに関して番号だけでは分かりにくいので、色を付けると子ども自身が「次はどこに折るべきか」分かりやすくなると感じた。カラー印刷はお金がかかると思うので、斜線等を入れるなど、とにかく見分けがつくといいと思う。準備とは異なるがテーマとして出てきた「豊かになる」という表現は小学生には難しいと感じた。もう少し簡単な表現にしてもらえるとワークシートに書きやすい（考えやすい）と思う。

- 小学1年生にとっては、もう少し大きい方が（中が太い方がよい）切ったり折ったりするのにやりやすかったかと思う。3年生以上は大丈夫だと思う。いろんなバネの形ができて楽しそうだった。予想一作る一工夫するの行程が素晴らしいと感じた。

フィードバックから指摘されている点は配布した展開図の改善に関する点、オンラインでの説明に関する点、ワークショップにおける言語表現である。事前準備や折り方のサポートは容易であるという点や様々な形状を簡単に作製できる点での評価が高かった。

### 4.3. COS を用いたファブリケーションの総括

#### 4.3.1 作品における COS 独自の特徴と制約

2回のワークショップでは「紙バネを使って自分だけの謎生物をつくろう」「生活が豊かになるもの」という比較的具体的な題と抽象的な題でそれぞれ作品の製作を行なった。これらの作品は4.1.5および4.2.5で示しており、そこから観察されたCOS独自の特徴を以下に整理した。

- COSによりアイデアの形状に合わせてバネ構造を設計できるため、作品にあらゆる形状で動的な要素を付加することを可能とした
- COSは動植物など柔軟に動くモチーフに使用されることが多く関節や特徴的な機構（ゾウの鼻や飛び出す眼球など）という部分的な要素として用いられることが多い
- 「折り畳める」という点に着目し作品と磁石を組み合わせる新たなマグネットを検討したり、実現の可能性を無視した建築など独創的な作品のアイデアも見られた

以上のように参加者はCOSのバネ構造という特徴を活かし動きのある作品を展開しやすくなるため、動きを意識した製作が可能となった。また動的な機構とそれを覆う外観形状を一体で成形できる点も、意図した形状や動作を可能にしてい

るのではないかと考えられる。伸縮するという特徴から製作物を検討することもできるため、形状と動作という2つの視点から創造することも可能である。一方、COSは細かな表現（例えば、顔のパーツや曲線表現）に向いていない。それゆえ、今回のワークショップで用意した画用紙やペン類など身の回りの素材・道具と組み合わせることでより幅広い表現が可能となる。

### 4.3.2 COS を体験した参加者の変化

ワークショップでは、失敗と思われた事態を作品の特徴と捉え直したり、材料を工夫して使うことでファブリケーションの幅が広がるといった気づきを得た参加者がいた。またCOSを活用した作品を時間の許す限り複数製作する参加者も見られた。加えて、事後のアンケートでは16名中15名がまたモノづくりをしたいという前向きな回答をしていた。このようにファブリケーションならではの知見はメーカーマインドセットの習得やその後の思考に影響を与える可能性がある。本研究では、ワークショップ後の参加者の変化について調査を行っていない。それゆえ、引き続き調査するのであれば以下のような視点で行うべきと考える。

- 実際に手を動かして設計・製作を行うCOSを体験した後、参加した子どものモノづくりの頻度や考え方、作品の変化（立体的な要素や視点を組み込む等）があるかどうか
- ワorkshopへの参加によりモノづくりに興味のなかった参加者やCOSという新しいことに挑戦した経験などから精神面にどのような影響（意識の変化や自信に繋がる等）を及ぼしたのか

### 4.3.3 教育者の視点における COS

#### COS の運用

COS は使用する機材や道具、材料が身の回りにあるもので行えるよう設計した。実際に COS を用いるワークショップの準備を初めて行なってもらったスタッフから「素材や道具の準備は比較的楽であると感じた」というフィードバックがあった。また COS を子どもに教える際も教育者側から「教えやすい」という意見があった。COS の基本的な折り方や構造を教えたり、子どもが理解するのに要する時間は 8 分から 15 分程度であるため、授業やワークショップを計画する際にも取り入れやすいと考えられる。以上より COS を用いたファブリケーションは、準備から実施するまでの運用面において優位であると考えられる。

#### 資料や応用例などの提示

オンラインで実施したワークショップの際、会場で COS を子どもに教えた教育者から「手法の説明や展開図は明瞭で分かりやすいよう言語的・視覚的配慮が必要」というフィードバックがあった。また今回実施した 2 回のワークショップは COS の開発者が立ち会っているため、不測の事態にも対応できる状態であった。これらを踏まえて、COS を授業やワークショップに取り入れる場合には、誰でも COS を運用できるような体制を整備する必要がある。その解決策として、COS に関するマニュアルを同時に配布したり、Web 上で動画などと共に示す方法が挙げられる。オンラインで実施したワークショップでは、COS の基本的な折り方を学習する際に「画面が反転している」「言い回しが分かりづらい」などという点が学習の障壁となった。これらは図 4.19 のようなマニュアルや動画投稿サイトを活用した映像配信で解決されることが考えられる。

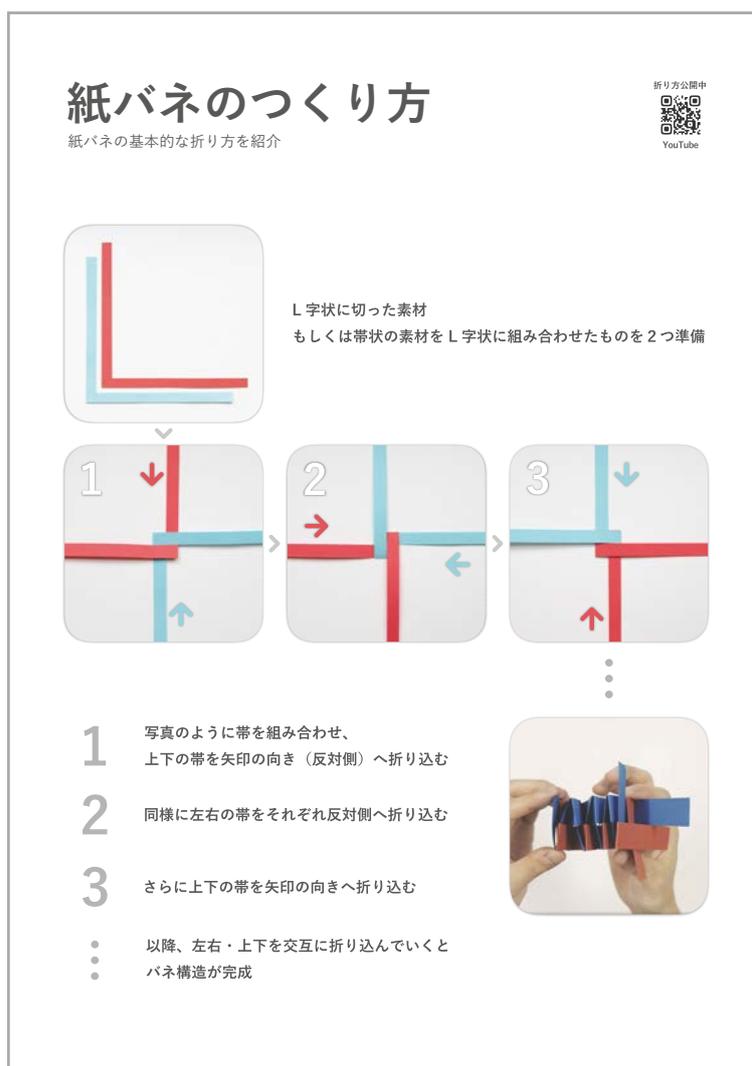


図 4.19 簡易的なマニュアルの試作

またワークショップで使用した展開図に関して「低学年向けの展開図は帯幅をより太くすると組み上げやすい」というフィードバックや「L字を重ねる位置やのり付けする位置を明瞭にしてほしい」という意見があった。したがって、図 4.20 のような改善も必要である。

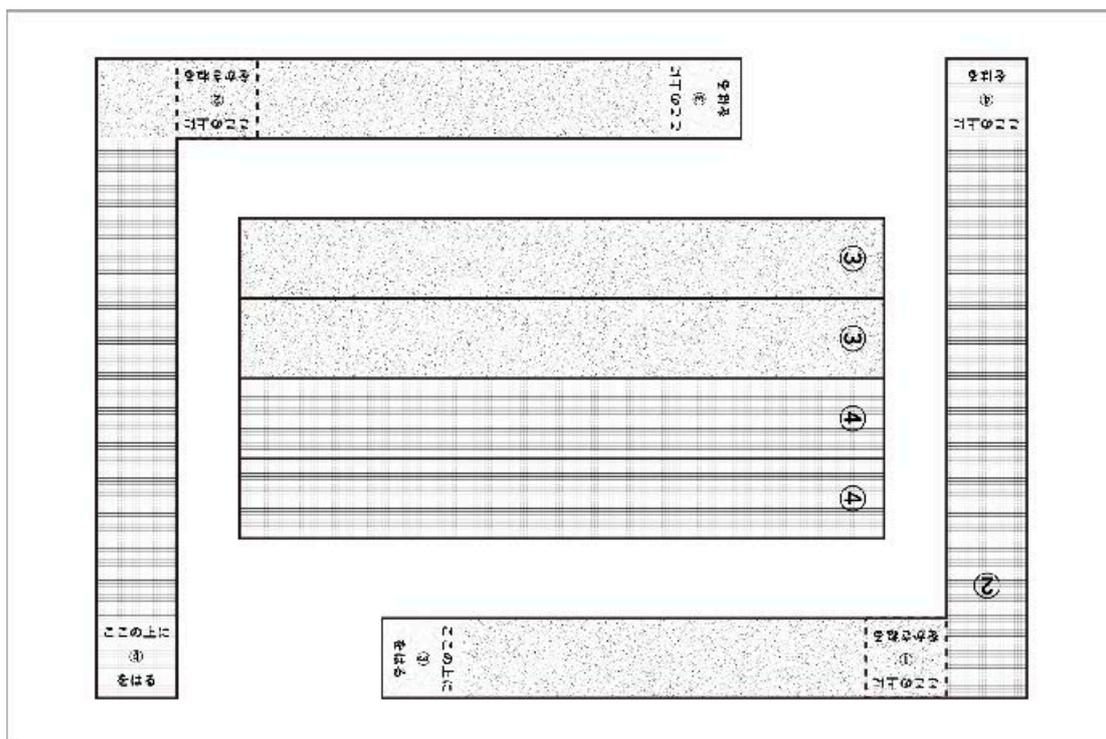


図 4.20 展開図の改善案

これらに加え，3章で示した応用例などを示すことでCOSの運用や活用方法が明確になり，導入が促されるのではないかと考えられる。

## 第 5 章

# 結 論

### 5.1. 総括

本論文では、機材や素材など周囲の環境に依存せず短時間で設計から製作まで容易に行える創造的なファブリケーションの新たな手法として紙バネ構造を用いた Computational Origami Spring を提案した。ファブリケーションの現状と教育的側面に焦点を当て、身近な素材である紙を活かした立体表現として折り紙・紙バネに着目しコンセプトの設計、および手法の開発とワークショップで検証を行った。各章は以下のように総括される。

第 1 章では、パーソナル・ファブリケーションの現状と教育におけるモノづくりの導入、その際の課題について述べた。パーソナル・ファブリケーションは自宅で自身の製品を設計・製作することを指す一方で現状、一部の技術愛好家が行なっているモノづくりに留まっている。他方、ファブリケーションはその過程で行う思考や能動的な学習が注目され、教育分野にも活用され始めている。ただし、知識のある教育者の不足や手順の習得で学習時間が満たされてしまう点、一般的には機材が導入されていない点など、様々な事例から課題が浮き彫りとなっていることをこの章では述べた。したがって、この研究の目的は上記の課題を解決でき、習得が容易かつ創造的な活動が行えるファブリケーションの手法を提案することであると述べた。

第 2 章では、ファブリケーションに関連した研究・事例の調査に関して述べた。身近な素材を活用して高速にファブリケーションを行える手法や教育現場で活用されている製品やソフトウェア、ファブリケーションを取り入れている教育機関の事例に関して述べている。また第 3 章に先行して紙を用いたファブリケーショ

ンの手法や応用例，教育との関係性についても述べている．これらの事例から提案されているファブリケーションの手法は，3Dプリンタやレーザー加工機の使用を前提としている場合が多いことや，ファブリケーションを学習する場所が限定されていること，機材や知識の観点から対象とする年齢層が比較的高いことが考えられた．これらを踏まえて，次章のコンセプトデザインを行なった．

第3章では，先行事例を整理して学習者と教育者が導入・学習しやすいファブリケーションの手法が必要である考え，創造力などファブリケーションの学習で重要な要素を機材や時間に制限されず学べるような手法の設計を行なった．提案する手法の対象は，工作からの延長でファブリケーションを学ぶ初等教育段階の子どもおよびその教育者とし，ユーザーの体験に関して期待される効果や反応を検討した．具体的な手法の設計では，材料の入手の容易さや親しみやすさの面から素材として紙を利用した手法を採用した．中でも紙バネに着目し，既存の紙バネの調査に基づきプロトタイプを製作した．これらの観察から得た知見に基づき，新たに考案した Computational Origami Spring を提案手法として採用した．COS は，L字状の素材を組み合わせることで，紙バネ特有の捻れは見られなくなる一方，折り方の手順を規則的に変えることで展張時の曲がり方を設計できることが示唆された．同様に折り方の手順を変更することで捻れも生じさせることが可能であった．またL字の帯幅を段階的に変化させることで展張時の形状が変化するため，このパラメータを変更することで形状の設計が可能であることを図を交えて述べた．以上を踏まえて，Rhinoceros (Grasshopper) を用いた紙バネ構造の設計ツールも試作し，コンピュータによる設計の可能性も示唆された．加えて，COS を用いた照明器具やスイッチ，動的な構造等の応用例も示した．

第4章ではCOSを取り入れたファブリケーションのワークショップを行い，その結果と考察を述べた．ワークショップは学習環境の異なる対面とオンラインで実施し，事前準備や参加者・スタッフのフィードバック，映像の観察により評価した．COSは手法の習得や組み上げが容易な手法であることから，環境を問わず参加者は短時間でCOSの扱い方を学習し，実践していることが確認された．COSはバネ構造という特徴から，参加者に動きを意識した立体構造物の設計・製作を提供した．また動的な機構とそれを覆う外観形状を一体で成形できる点も，参加者が

意図した形状や動作を作品に付与することを可能としている。このように COS では形状と動作という2つの視点から創造することができる。同時に COS は単体での使用より端材や他の材料との組み合わせに向いているとも述べた。今後、COS を体験した参加者にファブリケーションや精神面でどのような変化があるか調査する必要がある。教育者側に視点としては、COS を導入することによって比較的簡単にファブリケーションの準備が行えると同時に、手法の分かりやすさから教えやすいということが分かった。ただし、本格的に COS を導入する場合には、マニュアルや COS の応用例などの整備が必要となる。したがって、教育者のフィードバックに基づきその試作を行ない、今後の展開について考察した。

# 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、山岡潤一専任講師，南澤孝太教授，秘書の羽當英果様をはじめ，慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の皆様には大変お世話になりました。心から感謝いたします。Future Crafts Project の立ち上げメンバーとして在籍できたこと，エンジニアリングの分野で学んできた自分自身に新たな価値観や視点を与えてくださったこと，その他数えきれない知見を得たことは貴重な財産となりました。

共用施設を使用するにあたり，快く迎え入れてくださいました JST ERATO 川原万有情報網プロジェクトの皆様にも，この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

折り紙や紙バネに関する相談をさせていただきました九州大学大学院芸術工学研究院の齊藤一哉講師，立命館大学大学院理工学研究科の米田大樹様，その他学会やイベントでご助言を賜りました皆様にも心より感謝いたします。

ワークショップを実施するにあたりご尽力いただいた小林英恵様，ワークショップの実施をサポートしていただいた特定非営利活動法人輝の皆様，パナソニッククリエイティブミュージアム AkeruE および Loftwork Inc. の皆様にも，この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

COVID-19 の影響で横の繋がりが希薄であった入学初年度，講義をきっかけに声をかけていただき，その後，大学院生活の面から私的交際までサポート・お付き合いいただいた先輩方にも，この場をお借りして厚く御礼申し上げます。発表の直前も相談に乗っていただき，大変心強かったです。充実した大学院生活となりました。

Future Crafts Project のメンバーをはじめとした同期の皆様，困難な状況下で共に歩んだ2年間は貴重な経験となりました。皆様から多くのことを学びました。本当に感謝しています。

最後に在宅での研究場所の提供，および日々の生活を支えてくれた家族にも感謝いたします。そして，修士論文最終発表会の直前に他界した祖母に哀悼の意を表すとともに，24年間の感謝を捧げます。共に暮らした24年はとても楽しいものとなりました。皆様，本当にありがとうございました。

## 参 考 文 献

- [1] Neil Gershenfeld. *Fab: The Coming Revolution on Your Desktop—from Personal Computers to Personal Fabrication*. Basic Books, 2008.
- [2] Patrick Baudisch and Stefanie Mueller. Personal fabrication. *Foundations and Trends® in Human–Computer Interaction*, Vol. 10, No. 3–4, pp. 165–293, 2017. URL: <http://dx.doi.org/10.1561/11000000055>, doi:10.1561/11000000055.
- [3] 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科電気電子工学コース. 協同学習 ～ チームで学び合う授業を実施 (全学年) ～. <https://www2.metro-cit.ac.jp/~ee/About3EC/cooperative.html>, 2021年12月8日参照.
- [4] Teemu Leinonen, Marjo Virnes, Iida Hietala, and Jaana Brinck. 3d printing in the wild: Adopting digital fabrication in elementary school education. *International Journal of Art & Design Education*, Vol. 39, No. 3, pp. 600–615, 2020. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jade.12310>, arXiv:<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/jade.12310>, doi:<https://doi.org/10.1111/jade.12310>.
- [5] Amanda J. Parkes, Hayes Solos Raffle, and Hiroshi Ishii. Topobo in the wild: Longitudinal evaluations of educators appropriating a tangible interface. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '08, p. 1129–1138, New York, NY, USA, 2008. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/1357054.1357232>, doi:10.1145/1357054.1357232.

- [6] 経済産業省. p.69 3D プリンタを活用した初等・中等教育段階におけるものづくり, 第3章求められる取組, 新ものづくり研究会 報告書. [https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/seisan/new\\_mono/pdf/report01\\_02.pdf](https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/seisan/new_mono/pdf/report01_02.pdf), 2021年11月17日参照.
- [7] 文部科学省. 第4章 初等中等教育の充実, 第2部 文教・科学技術施策の動向と展開, 令和2年度 文部科学白書. [https://www.mext.go.jp/content/20210720-mxt\\_oseisk01-000016965\\_2-4.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20210720-mxt_oseisk01-000016965_2-4.pdf), 2021年11月17日参照.
- [8] XYZprinting Inc. ダヴィンチ 1.0 x ダヴィンチ 1.0 AiO x 広尾学園中学校・高等学校. <https://www.xyzprinting.com/ja-JP/stories/making-ICT-lessons-fun-again-with-3D-printing-and-CAD-at-hiroo-gakuen-school>, 2021年12月8日参照.
- [9] Ayah Bdeir. Electronics as material: Littlebits. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, TEI '09, p. 397–400, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/1517664.1517743>, doi:10.1145/1517664.1517743.
- [10] Arduino. What is Arduino? <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>, 2021年12月3日参照.
- [11] Autodesk Inc. Tinkercad. <https://www.tinkercad.com>, 2021年12月4日参照.
- [12] Arduino. Arduino Uno Rev3. <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3/>, 2021年12月3日参照.
- [13] 森岡弘, 平田直樹, 瀬尾優治, 原田正憲, 青山克輝, 柏木将大, 阿濱茂樹, 岡村吉永. デジタルファブリケーション技術を用いたものづくり教育を担当できる技術科教員の養成. 山口大学教育学部附属教育実践総合センター, 2020. URL: <https://ci.nii.ac.jp/ncid/AA11250344>.

- [14] Zekun Chang, Tung D. Ta, Koya Narumi, Heeju Kim, Fuminori Okuya, Dongchi Li, Kunihiro 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. 1–12, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/3313831.3376655>, doi:10.1145/3313831.3376655.
- [15] Junichi Yamaoka, Mustafa Doga Dogan, Katarina Bulovic, Kazuya Saito, Yoshihiro Kawahara, Yasuaki Kakehi, and Stefanie Mueller. *FoldTronics: Creating 3D Objects with Integrated Electronics Using Foldable Honeycomb Structures*, pp. 1–14. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2019. URL: <https://doi.org/10.1145/3290605.3300858>.
- [16] Madlaina Signer, Alexandra Ion, and Olga Sorkine-Hornung. *Developable Metamaterials: Mass-Fabricable Metamaterials by Laser-Cutting Elastic Structures*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2021. URL: <https://doi.org/10.1145/3411764.3445666>.
- [17] Naoya Koizumi, Kentaro Yasu, Angela Liu, Maki Sugimoto, and Masahiko Inami. Animated paper: A toolkit for building moving toys. *Comput. Entertain.*, Vol. 8, No. 2, dec 2011. URL: <https://doi.org/10.1145/1899687.1899689>, doi:10.1145/1899687.1899689.
- [18] 坂本菜月, 安謙太郎, 牧野泰才, 稲見昌彦. Animated paper 2: 二次元通信を用いたテーブル上を動く紙. 2013.
- [19] littleBits Electronics Inc. littleBits とは? <https://www.littlebits-jp.com/how-it-works>, 2021 年 12 月 8 日参照.
- [20] Hiroshi Ishii, Dávid Lakatos, Leonardo Bonanni, and Jean-Baptiste Labrune. Radical atoms: Beyond tangible bits, toward transformable materials. *Inter-*

- actions*, Vol. 19, No. 1, p. 38–51, jan 2012. URL: <https://doi.org/10.1145/2065327.2065337>, doi:10.1145/2065327.2065337.
- [21] S. Miyashita, L. Meeker, M. Gołdi, 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. doi:10.1109/ICRA.2014.6907042.
- [22] Lishuai Jin, Antonio Elia Forte, Bolei Deng, Ahmad Rafsanjani, and Katia Bertoldi. Kirigami-inspired inflatables with programmable shapes. *Advanced Materials*, p. 2001863, 2020.
- [23] Amanda Ghassaei, Erik D. Demaine, and Neil A. Gershenfeld. Fast , interactive origami simulation using gpu computation. 2018.
- [24] Jun Mitani. A design method for 3d origami based on rotational sweep. *Computer-Aided Design and Applications*, Vol. 6, No. 1, pp. 69–79, 2009. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3722/cadaps.2009.69-79>, arXiv:<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3722/cadaps.2009.69-79>, doi:10.3722/cadaps.2009.69-79.
- [25] Kai Suto. CRANE (by SutoKai), food4Rhino. <https://www.food4rhino.com/app/crane>, 2021 年 12 月 5 日参照.
- [26] Tama Software Ltd. ペパクラデザイナー. <https://www.tamasoft.co.jp/pepakura/productinfo/index.html>, 2021 年 12 月 8 日参照.
- [27] 知子瀬尾, 佳子戸次, 佳子沢井, Tomoko SENOO, Yoshiko BEKKI, Yoshiko SAWAI. 2, 3 歳児の折り紙を用いた形構成の過程 —乳幼児の創造性を育む教具の提案—. 秋田大学教育文化学部研究紀要 教育科学 = MEMOIRS OF FACULTY OF EDUCATION AND HUMAN STUDIES AKITA UNIVERSITY EDUCATIONAL SCIENCES, No. 72, pp. 51–55, mar 2017. URL: <https://ci.nii.ac.jp/naid/120006312507/>.

- [28] Davut Köğce. Use of origami in mathematics teaching: An exemplary activity. *Asian Journal of Education and Training*, Vol. 6, No. 2, pp. 284–296, May 2020. URL: <http://asianonlinejournals.com/index.php/EDU/article/view/1651>, doi:10.20448/journal.522.2020.62.284.296.
- [29] Koryo Miura. Method of packaging and development of large membranes in space, sep 1981.
- [30] Discontinuity in buckle pattern tessellation of cylindrical shells of variable curvature, mar 1971.
- [31] 100 PERCENT INC. Peti Peto. <https://100per.com/product/peti-peto>, 2021年12月1日参照.
- [32] 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.
- [33] ISSEY MIYAKE INC. 132 5. ISSEY MIYAKE. <https://www.isseymiyake.com/1325/standard/>, 2021年12月8日参照.
- [34] 【陰翳 IN-EI ISSEY MIYAKE】 折りだけで立体を作る、服から生まれた照明器具. 日経デザイン, No. 360H, pp. 55–55, 2017.
- [35] 【ISSEY MIYAKE】 研究の手を緩めず、“ひだ”の表現を追求. 日経デザイン, No. 360H, pp. 32–37, 2017.
- [36] ISSEY MIYAKE INC. IN-EI ISSEY MIYAKE. <https://www.isseymiyake.com/ja/brands/in-ei/items>, 2021年12月8日参照.
- [37] ISSEY MIYAKE INC. AUTUMN WINTER 2015, ISSEY MIYAKE. <https://www.isseymiyake.com/ja/brands/isseymiyake/collections/211>, 2021年12月8日参照.

- [38] ISSEY MIYAKE INC. TYPE-O-001, A-POC ABLE ISSEY MIYAKE, ISSEY MIYAKE ONLINE STORE. [https://store.isseymiyake.com/c/at\\_all\\_all/AT11FC711#&gid=1&pid=8](https://store.isseymiyake.com/c/at_all_all/AT11FC711#&gid=1&pid=8), 2021 年 12 月 8 日参照.
- [39] Taiju Yoneda, Daichi Matsumoto, and Hirofumi Wada. Structure, design, and mechanics of a paper spring. *Phys. Rev. E*, Vol. 100, p. 013003, Jul 2019. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.100.013003>, doi:10.1103/PhysRevE.100.013003.

# 付 録

## A. 対面のワークショップで使用したワークシート

かみ 紙 バネ を つか っ て じ ぶ ん な な ぞ せ い ぶ つ を つ く  
紙バネを使って自分だけの謎生物を作ろう！

ど ん な せ い ぶ つ を つ く る ！ ？

紙バネを使って生物の体をつくってみよう！バネは伸びたり縮んだりするよ。バネの形が変わったり、ジャンプするモノが作れるかも！まずはアイデアを絵や文字で表現してみよう。

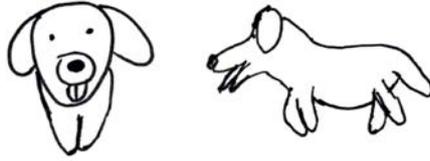


せ っ け い ず 設 計 図 を 描 い て み よ う

せ い ぶ つ の 体 は 紙 バ ネ で 、 ど ん な 形 に す れ ば い い か な ？ 前 から 見 た 絵 と 横 から 見 た 絵 を 描 い て み よ う ！ 例 を 参 考 に し て み て ね 。



例えば、<sup>いぬ</sup>犬の<sup>まえ</sup>体を前と<sup>よこ</sup>横から<sup>ずけい</sup>図形にしてみると…



犬のスケッチを前と横から描いて



図形にしてみるとこんな感じ！



この図形から紙ハネをつくるよ

### アイデアのヒント

なに なに つく つく か思 か っ っ つか つか ない ない と と き き は は、下 した の ことば 言 ことば 葉 を 参 参 考 考 に かんごう 考 考 え え て て み み よ よう ！

- まわす
- 飛ばす
- まるめる
- 観察 かんさつ してみる
- 折り方 おりかた を か 変 か え え て て み み る
- 好きな す も も の ひょうげん を を 表 ひょうげん 現 現 して して み み る
- 他 ほか の モノ と く 組 く み く 合 あ わ わ せ せ て て み み る

## B. オンラインワークショップで使用した資料

### B.1 ワークシート

カタチを予測してみよう

選んだカタチの番号 \_\_\_\_\_

組み立てたらどんなカタチになるか想像して描いてみよう

前から見たとき
横から見たとき

組み立て終わったカタチはどうだった？結果を描いてみよう

前から見たとき
横から見たとき

アイデアを形に！プロトタイプをつくってみよう！

タイトル \_\_\_\_\_

アイデアをかたんに描いてみよう

--

これはなに？ことばで書いてみよう

--

これをつかうとだれが豊かになる？

--

どこで、どのようにつかう？

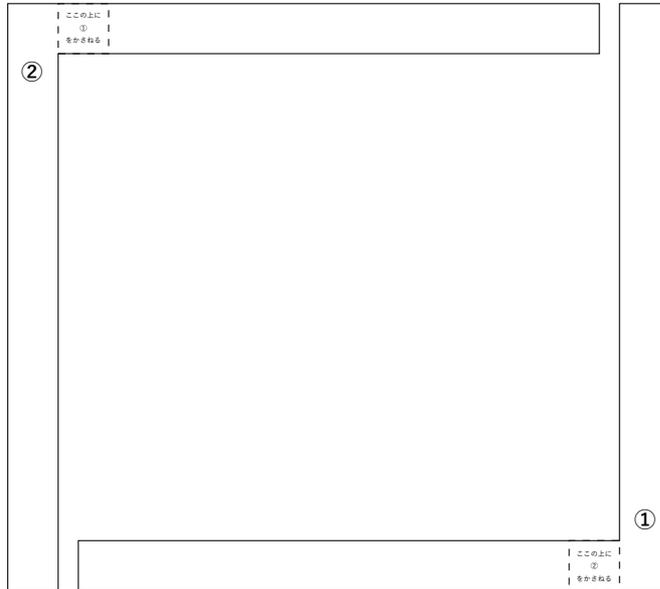
--

## B.2 紙バネの展開図

### 基本の紙バネを折ってみよう

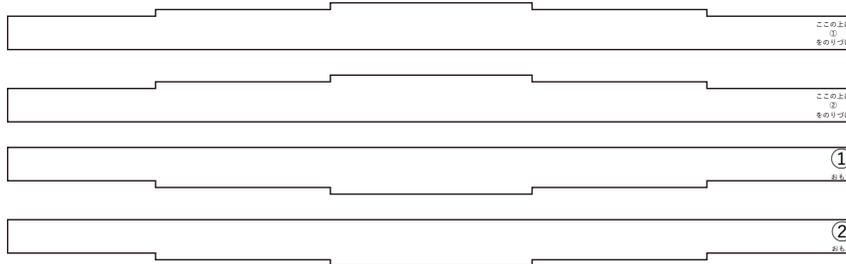
まずは左の図の実線 — を切ってLの形を2個つくろう。

切り終わったら、---の上に①と②をかさねよう。



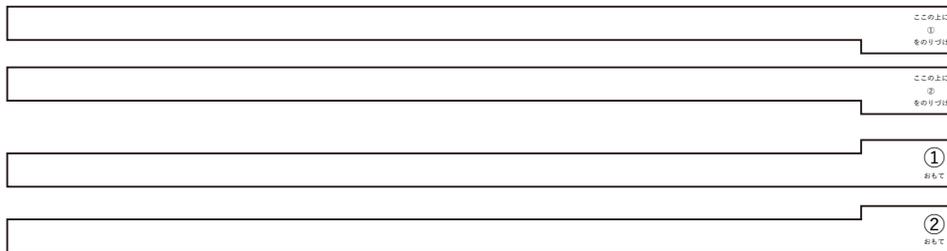
# 1

のりをつけて、この形を2つつくろう！



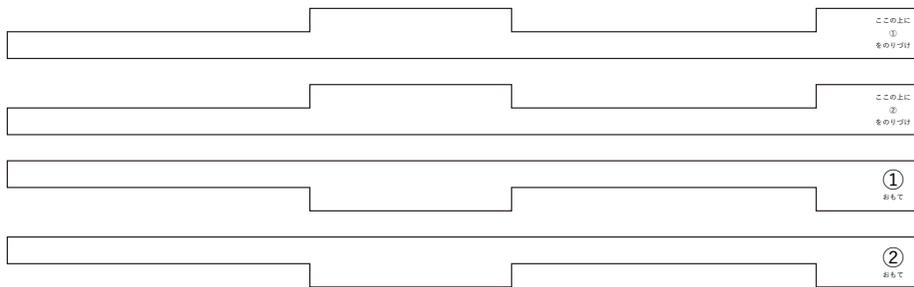
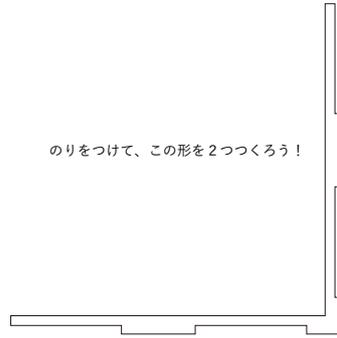
# 2

のりをつけて、この形を2つつくろう！



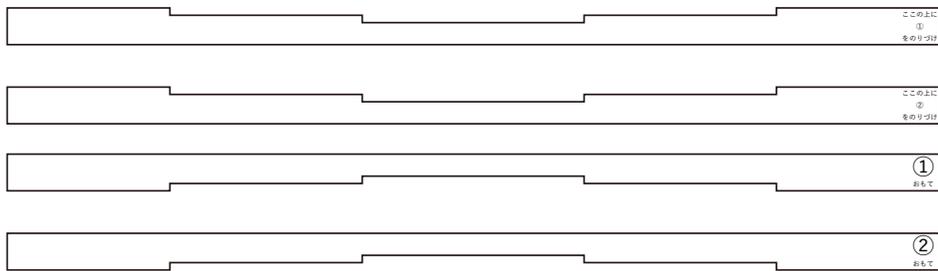
3

のりをつけて、この形を2つつくろう！



4

のりをつけて、この形を2つつくろう！



5

のりをつけて、この形を2つつくろう！

