

Origamic I/O device : 機能性インクを用いた色彩制御可能な折り紙

海宝竜也^{†1} 脇田玲^{†1}

Origamic I/O device は、日本の伝統的造形活動である折り紙とコンピューティングを融合することで、従来の折り紙作品の持つ静的で繊細な造形表現に加えて、動的な色彩表現を可能とした折り紙である。本研究は、固い電子部品を含まず、サーモインクや導電性インクといった機能性インクを用いている。それによって、誰でも自由に作品制作を行う事ができるという折り紙の特性を保持したまま色彩制御機能を実現している。折り紙の制作過程から大きく逸脱することなく、電気を用いた色彩変化を可能としている。これによって、従来の折り紙にはない動的な色彩表現を持つ作品を制作することができる。本論文では、色彩制御可能な折り紙の設計とそれら折り紙を用いて創作された作品群について述べる。加えて、電子工作の経験のないユーザーを対象にしたワークショップの様子とそこから得た知見について述べる。

Origamic I/O device : The color controllable origami using functional ink

TATSUYA KAIHO^{†1} AKIRA WAKITA^{†1}

'Origami I/O device' allowed Origami, a traditional Japanese creative activity, and computer engineering to fuse together to create a new type of Origami that holds not only the original exquisite and static feature, but also a kinetic feature, which lets the paper change colors. This Origami does not use solid, conventional electric parts, but uses Thermochromic ink and conductive ink, keeping the original trait of Origami of being able to be easily handled by anyone. Thus, this color-changing Origami can offer a creative experience that is different from the ones gained from a conventional type of Origami, without having to learn extremely difficult steps. In this thesis, we would like to refer to the details of this Origami, work using this type of Origami, and a workshop held using this Origami, and our view on this research.

1. はじめに

折り紙は、紙を折る事で動植物や建造物などさまざまな形を作る日本の伝統的な創作活動の1つである。現在でも、願い事の際に千羽の鶴を糸で綴じて束ねた千羽鶴などは一般的に作られており、折り紙は多くの人から親しまれている。

折り紙は、元は礼法の1つであった。14世紀から15世紀にかけて、小笠原家や伊勢家が様々な礼法を整えた。その1つとして、紙包みの礼法が整えられ、礼法としての儀礼折り紙が生まれた。それが礼法を離れ、折り方そのものを楽しむようになったものが遊戯折り紙である。その後、紙の生産量の増加に伴い、折り紙は庶民にいつそう親しまれるようになった。1797年には世界最古の遊戯折り紙の本『秘傳千羽鶴折形』が出版されている。その後、各国の折り紙作家を中心に1950年に国際的な折り紙サークルが設立された。日本語であった折り紙は「origami」として、現在では世界共通語として使われている[1]。

折り紙が親しまれている理由として、折り紙は他の創作活動と比べて前提となる知識や道具、時間の制限が少ないことが挙げられる。紙の薄さを利用し、特別な道具を使う

ことなく自分の手のみで造形を行う。そのため、加工機器に関する知識は必要としないので、折り方の知識のみで作品制作を行える。本やインターネットを用いれば、多くの作品は簡単に折り方を知ることができる。作品の精密さや折り方の難しさによって異なるが、多くの一般的な折り紙作品は10分程度の時間で制作することが可能である。

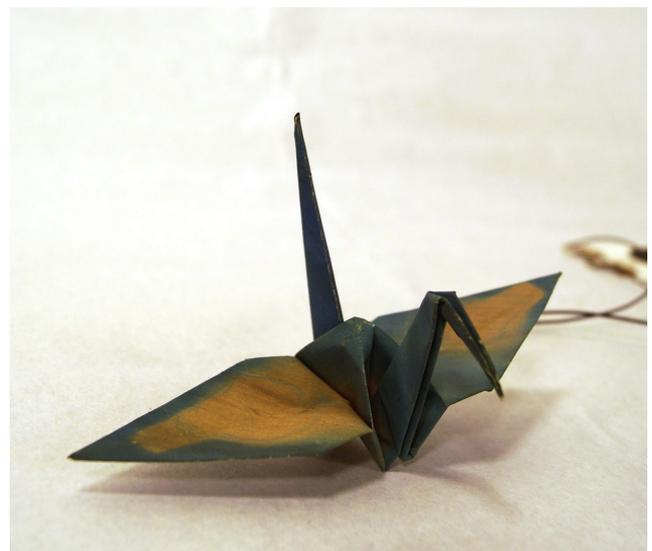


図1 Origamic I/O devices 折り鶴の羽の部分が緑色から黄色に変化している様子。

^{†1} 慶応義塾大学 環境情報学部
Keio University Faculty of Environment and Information Studies

近年では、折り紙の芸術的な側面が再評価され、各国で伝承されていた折り方だけではなく、日々新しい折り方が考案され続けている。さらに現在研究が進められている **Paper Computing** [2] のように **LED** やバイオメタル、またはセンサーなどの電子部品を用いた折り紙作品も発表されている。それによって、伝統的な折り紙作品に発光や動きなどの新たな表現を持つ作品の制作を可能としている。

しかし、それらの折り紙は固い電子部品を含む。そのため、折り紙は自分の手で自由に折り曲げることができる特性が損なわれてしまう。そこで紙の特性を失うことなく電子折り紙を制作する方法として、サーモクロミックインクや導電性インクなどの機能性インクを用いることを考えた。我々は機能性のインクを用いることで、折り紙の特性を失うことなく、図1のような色彩制御を可能とする折り紙の制作方法を提案する。

Origamic I/O devices は、折り紙の持つ創作の簡易さを損なわず、色彩制御機能を持つ電子回路を制作することを可能とするツールである。機能性のインクを用いて、両面に変色層と発熱層を制作する。しかし、新たに色彩制御を可能にすることで折り紙作品は動的な表現を持つ。その動的な表現が折り紙の作品制作にどのような影響を及ぼすか調査するために、この折り紙を用いたワークショップを行った。そこでの評価から、本研究は利用者に従来の折り紙作品とは異なった色彩表現を持つ作品の制作、色彩変化を含む事による創作活動可能としていることが示唆された。

2. 関連研究

紙面上に電子部品を設置し、従来の紙が持ち得なかった機能を付与する研究が数多く行われている。David ら[3]の導電性のインクを用いて線を描くことで、紙の表面に回路を作成した研究が挙げられる。Buechley ら[4]は描いたその回路の中に電子部品と紙を融合した素材を設置することで紙の機能を拡張する方法を提案している。紙面上での回路作成方法を利用したアプリケーションとして **Electronic Popables**[5]がある。紙面上に電子部品を配置し、回路を繋げて電気を用いた表現を可能とした飛び出す絵本を提案している。既存の飛び出す絵本のインターフェイスを保持しつつ、電気を用いたインタラクティブ性を付与した。Coelho ら[6]は導電性繊維を含む紙を作成し、回路として紙の中に埋め込み電子部品によるインタラクションを可能とした **Pulp-Based Computing** という手法を提案している。

また、紙と色を変化させる事ができるインクであるクロミックインクを合わせた研究が行われている。山田ら[7]は紫外線に反応するインクを用いて、空の色が変化するなどの絵画作品を作成した。サーモクロミックインクを用いたものとして、紙に触る事で蝶の羽に色が赤から緑、そして青と変化していく **Anabiosis** [8]がある。また本研究と同

じように伝統的な造形活動に電子部品を加えた作品の例として **TRANSIENCE**[9]が挙げられる。この作品は書道とコンピューティングを融合した作品である。サーモクロミックインクによって書かれた文字の色彩を変化させている。サーモクロミックインクの使用は、今までの書道では出来なかった動的な表現を可能とした。

近年では折り紙に電気部品を用いることで新たな表現を持つ電子折り紙作品も多く作られている。Qi と Buechley らは、バイオメタルを用いて、紙に動きを与える研究を行っている。その中のアプリケーションの1つとして、折り鶴と電子部品を組み合わせたものを制作している[10]。折り鶴の片方の羽を折り曲げる事で、もう片方の羽がその動きに合わせて曲がる作品である。Tessella[11]は折り目のついた紙にマトリクス状にセンサーと **LED** を設置する。折り目に合わせて折り紙をたたむ事でセンサーが反応し、その部分の **LED** が光る作品である。Gardiner ら[12]は折り紙とロボティクスを融合 **Oribotics** を提唱している。人の動きに反応して折り紙の花が広がり、そして閉じる動きを行い、それに合わせて **LED** の色も変化する作品がある。

機能性インクを用いることで素材性を損なう事なく、紙の表面に電子回路を制作することができる。さらに紙面上での色彩変化などの電氣的な制御が可能となっている。また、折り紙に **LED** などの電子部品を用いることで、いままでの折り紙にはない表現を可能とした作品が発表されている。

しかし、固い電子部品を用いた紙の作品はそれによって紙の特性であるしなやかさを損なうことが多い。中でも折り紙は、折る事によって作品制作を行う為に単なる紙の作品以上にしなやかさが求められる。さらに電子折り紙作品の多くは折り紙としての造形活動に制限を与え、電子工作の知識を必要とする。これらの研究は折り紙作品に新たな表現加える点に着目しているが、折り紙の特性である自由に作品制作を行うことができる点を損なってしまう。

本研究は機能性インクを用いて色彩制御機能を実現することで、紙の素材性や自由な創作性を保持した電子折り紙を提案する。また、本研究は電子工作の知識を持たない人も、普通の折り紙を扱うように電子折り紙作品の制作が可能となる。

3. Origamic I/O device の実装方法

Origamic I/O device を実現するために図3のように表面にサーモクロミックインク、裏面に導電性インクを塗布する。裏面に電極パーツを接続することで色彩制御機能を実現している。この構造を用いる事で、電子回路の存在を感じさせず、通常の折り紙とほとんど同じ感覚での作品制作が期待できる。この章では変色する折り紙の仕組みについて説明する。

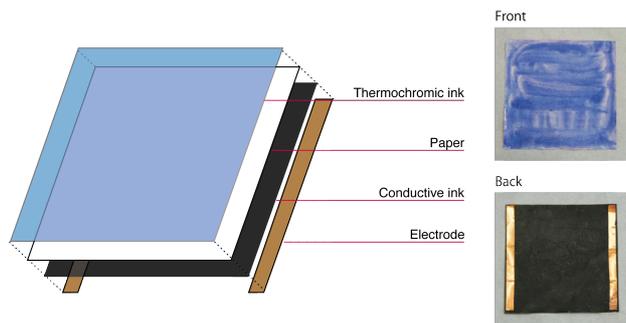


図 2 Origamic I/O device の構造 表面にサーモクロミックインク、裏面にカーボンペイストを塗布している。

3.1 変色面

折り紙を変色させる為に、サーモクロミックインクを折り紙の表面に塗布している。それによって LED など固い電子部品を用いて色彩制御を行う場合と比較して、紙の薄い特性や素材感を維持したままでの色彩制御が可能となる。このインクは可逆性のインクであるため、温度が高くなることで色が変わり、下がると元の色に戻る。このため、サーモクロミックインクを塗布した折り紙は何度でも色彩変化を行う事ができる。本研究ではサーモクロミックインクの中でも示温インクを用いている。

示温インクは感温変色性色素と顔料と食塩水を調合したインクである。感温変色性色素は、無色の染料と顕色剤の結合を温度によって制御することで、消色色を変化させる。それによって、消色時に顔料のみの色になることで色彩の変化が可能としている。本研究では示温インクの中でも比較的安価なサーモインクを用いている。

サーモインクに新たに色素を混ぜることで低温時の色と高温時の色を変化させることが可能である。図3のようにさまざまな色の折り紙を作成することができた。これらの折り紙は1度塗っただけであっても十分色の変化を確認することができる。しかし、2度以上塗ると発色がよくなるため、1度だけ塗ったものより、色彩の変化がわかりやすい。そのため、作品に応じて塗る回数を変更させることが有効である。

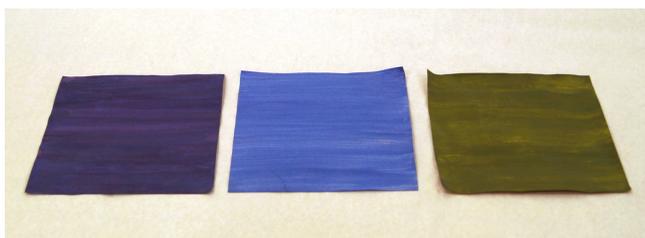


図 3 サーモインクと色素の混合による色の表現 左から赤の色素、サーモインクのみ、緑の色素を混ぜたものである。

3.2 発熱面

サーモインクを変色させるには、発熱機構が必要である。発熱機構にニクロム線やペルチェ素子などの既存の固い発熱体を用いると、紙はしなやかさを損なってしまう。このため、折り紙としての機能を損なう事なく、発熱機構を制作する必要があった。

実験の結果、折り紙の裏面に発熱材料として導電性インクを用いることが最適であると考えた。導電性インクの中でも安価で扱いやすいカーボンペイストを用いている。カーボンペイストは炭素をペースト状にしたものに接着材を混ぜたものである。乾いた後であっても紙のしなやかさを損なうことなく、紙の特性を保持したまま導電性の紙を制作することができる。カーボンペイストの抵抗値を調整し、折り紙の裏面全体に塗布する事によって紙面上で発熱機構を実現した。

3.3 電極パーツ

電極パーツはコードの両端にシール状の銅箔とクリップを接続している。銅箔は薄く、折る事もできるため、折り紙の特性を損なうことはない。電極パーツの貼り方は2つの方法がある。1つは折り紙の両端に貼付ける方法である。この方法を用いた場合、折り紙全体を徐々に暖めることができるため、作品全体の色の変化を楽しむことができる。あらかじめ折り紙の裏面に貼付けられている銅箔にコードを接続する。

もう1つの貼り方は銅箔のパーツを変色させたい部位に貼付ける方法である。この方法を用いると作品の中の意図した部位に暖めることができる。銅箔のパーツはシール状になっているため、折り終わった作品の導電性インクが塗布されている裏面であれば、どこにでも貼付けることができる。この2つの電極パーツの接続方法を用いて様々な変色を実現することができる。

そして、折り紙作品に電気をながすために、電極パーツのクリップ部分を図4のような紙のモジュールの銅箔部分に1つずつ接続する。クリップを用いることで、ハンダづけ等の作業を行う事なく、回路を接続することができる。そのモジュールの黒い円上のボタンに触ることで折り紙に電気が流れ、折り紙の作品の色が変化する。図4の紙のボタンは、裏面に銅箔を用いて静電容量センサーを作成することで実現している。ボタンを押すと Arduino[13]にセンサーの値が送られ、24V の外部電源をリレースイッチを用いて折り紙に与えることで色彩の変化を実現している。色の変化の様子は折り紙作品の形状や電極パーツの設置方法、室温のような環境によって異なる。変化が速いものでは紙のボタンを押した直後に色彩の変化が開始し、3秒後には作品の多くの部位の色彩が変化している。図4の部品から色が変わる折り紙は作られる。

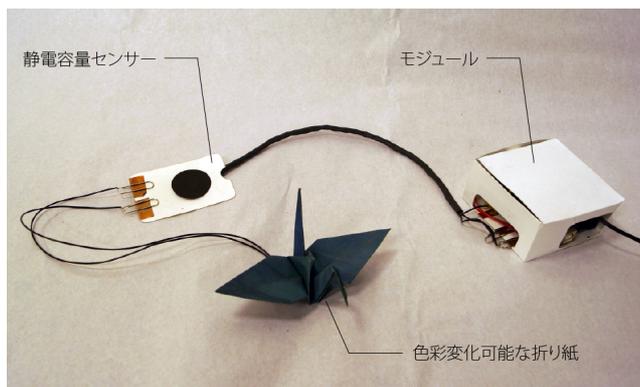


図 4 Origamic I/O device の全体像

4. Origamic I/O device を用いた作品

Origamic I/O device を用いた作品の見本として、制作の難易度が異なる 3 点の作品を制作した。本章では、「変色するドラゴン」、「睡蓮と太陽」、「薔薇の花束」についてそれぞれ説明する。

4.1 色が変わるドラゴン

まず、3つの作品の中でもっとも難易度の低い色が変わるドラゴンを作成した。ドラゴンは折り込みが多いため、完成した時に最初の折り紙のサイズから縮小されたサイズになってしまう。そのため、通常よりもやや大きい折り紙を使用した。色の変化する折り紙はある程度は大きくする事が可能である。しかし、大きくなると表面積が増えるためより多くの発熱量が必要となる。結果、色の変化に時間がかかるようになるので、その点の注意が必要である。

サーモインクは、くすんだ青からオレンジなるようにインクに色素を混ぜたものを使っている。電極パーツは、1つはドラゴンの首の下、もう1つはしっぽの付け根に設置している。こうすることで頭や羽、しっぽの先には熱が行きにくくなる。逆にドラゴンの胴体の中心の方は暖まりやすくなるため、ドラゴンの心臓部分から色が徐々に広がっているような表現を可能としている。それによってドラゴンが化石の状態から、生き返っている様子を表現している。図5のように変化するには約25度の環境で30秒程の時間を用いた。

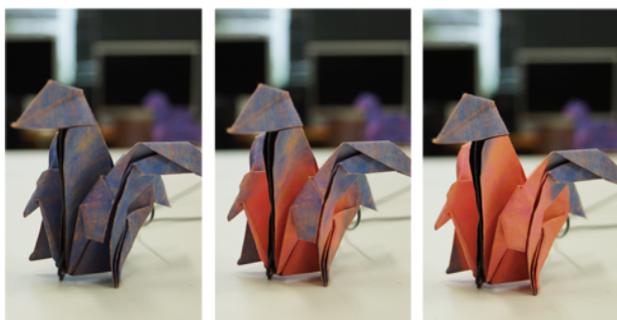


図 5 色が変わるドラゴンの変化の様子

4.2 睡蓮と太陽

この作品は2つの異なる種類の折り紙から成り立っている。色彩制御を可能とした折り紙（睡蓮）と導電性インクを用いたセンサーとしての機能を持つ折り紙（太陽）である。

まず、睡蓮は色彩制御を可能とした折り紙を用いる。暖まったときに花が色付くよう、青からピンクに色が変化するようにサーモインクを塗布している。電極シールは睡蓮の底面にできる正方形の両端に接続している。睡蓮に電気を流した時、底面に電気が流れ、花の中央から、全体に色付いていくように色彩が変化する。

太陽は、センサーとしての機能を持った折り紙を用いている。この機能を付加するために、裏面に導電性インクを塗布し、1つの電極パーツを貼付けた。それによって、この折り紙は静電容量センサーとして利用することができる。紙のモジュールについているセンサーと折り紙による太陽をつなぎかえることでセンサーを紙のボタンから折り紙の太陽に切り替えることができる。センサーとなった折り紙に触る事で、色彩が変化する折り紙に電気を流れる。その為、太陽にさわると睡蓮の色が変化する。睡蓮が太陽の力によって成長し、花に徐々に色付いていくストーリーが埋め込まれた作品である。このように複数の折り紙を用いることで、Origamic I/O device は作品の中にストーリーを持つ事ができる。

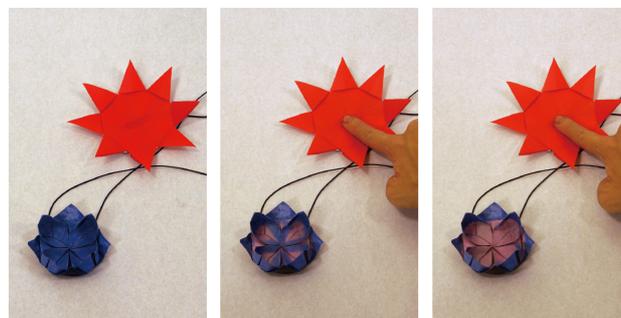


図 6 睡蓮と太陽の変化の様子 太陽が静電容量センサーになっており、太陽に触れる事で睡蓮に色が着く。

4.3 薔薇の花束

この作品は、複数の折り紙を用いて、薔薇の花、茎、花瓶を作成した。色が変わる折り紙で薔薇を折り、カーボン層のなるべく花の中央に近い部分に電極パーツを設置している。このようにすることで花の内側から色の変化を与えている。花から出たコードは茎の部分に巻き込んでいる。このため、折り紙で薔薇を折る、電極パーツを貼付ける、コードを巻き込んで茎を作るといった順番で制作する必要がある。そして、茎から出ているコードを紙で作った花瓶の後ろに空けた穴から出し、折り紙の薔薇とモジュールを接続している。この作品はインタラクティブなものではな

く、自動的に動き続けるように設定している。Arduino とリレースイッチを用いて、薔薇 1 本ずつに順番に電気を流し色を変化させている。温度が高くなって色が変化した薔薇は、他の薔薇が変化している間に温度が下がっていき、元の色に戻っていく。この作品で使用したインクは青からピンクに変わるものである。しかし、薔薇 1 本 1 本に含まれる赤の色素が少しずつ違うので微妙な色の違いを作っている。

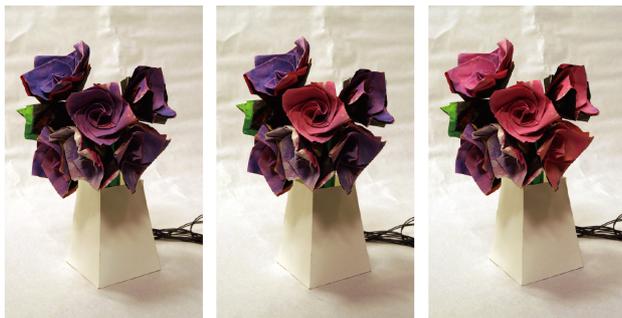


図 7 薔薇の花束の変化の様子

5. ワークショップ

Origamic I/O device を用いた作品の展示とワークショップを慶應義塾大学 SFC OPEN RESEARCH FORUM (2013 年 11 月 22 日, 23 日)にて図 8 のように行った。ワークショップには折り紙に対する興味や電子工作の知識の有無、年齢に関係なく参加してもらった。目的は、実際に使ってもらうことで参加者の反応を確かめることである。



図 8 ワークショップの様子

展示では、折り紙にコードが接続されている様子を見て、不思議に思った人々が興味を持ち、色の変化に驚く様子が多く伺えた。ワークショップでは、特に時間に制限を持たせず、参加者の好きなように作品制作を行ってもらった。Origamic I/O device を使った作品を 3 つ作成した参加者もみられた。

50 人の方がワークショップの参加した。平均年齢は 21.6 歳であり、最小年齢は 5 歳、最高年齢は 55 歳であった。年齢の低い参加者に比べて、年齢の高い参加者は普段から折り紙を行っていて、今までとは違った表現の可能性に興味を持つ人が多い印象を受けた。年齢の低い参加者は、折り紙への興味よりも色が変わることへ興味を持ち、自分にも作成可能だとわかるとワークショップに参加するケースがみられた。

Origamic I/O device を用いた作品の制作中に 1 度折ったものをもう 1 度最初の状態に戻し、別の作品を作り始める行為や、はさみで形を変更するといった行為が見られた。これによって折れ目や切れ目がつく事によって電子回路の性能が損なわれるといった電子回路の持つ繊細な印象を意識させず、通常の折り紙作品を制作するのと同じように創作活動を行うことができていることがわかる。さらに、電極シールを切断し、作品の形体に合わせた状態で貼付けるといった行為を見られ、作品づくり全体で、折り紙の特性を維持し、自由に創作活動を行っていたことがわかる。

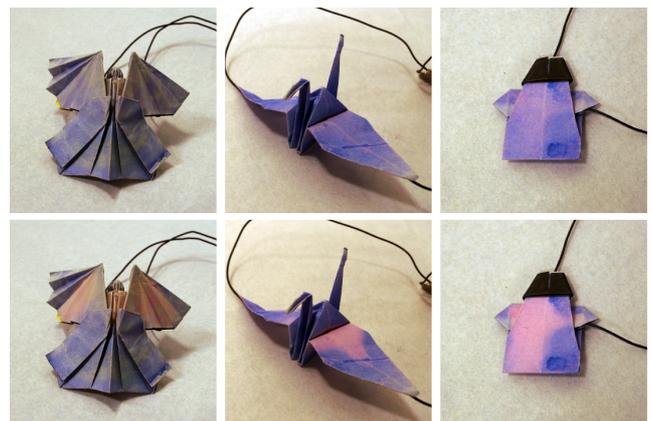


図 9 ワークショップ参加者の作品 左から「燃える墮天使」、「魔法の国の使者」、「電気リバーシブル」。

参加者の Origamic I/O device を用いた作品に対する印象を調査するために、参加者にできあがった作品に名前をつけさせた。そこでは、鶴や天使といったような形からのみ想像される名前をつける人は少なかった。図 9 の作品にはそれぞれ、「燃える墮天使」、「魔法の国の使者」、「電気リバーシブル」と名付けられた。いままでの折り紙が持ち得なかった色彩変化による表現がこの結果をもたらしていると考えられる。

例えば「燃える墮天使」は色の変化によって形だけではなく、様子という情報も加わった。従来の折り紙が持っていた形の情報に加え、作品から想起されるイメージが色彩の変化とともに変容する。この作品の場合、水色であった天使がピンクに変化する様子から燃えているという情報が付け加えられた。「魔法の国の使者」は色の変化を魔法と連想した。「燃える墮天使」とは異なり、この作品は色彩変化

の情報が先行して、名前が付けられている。「電気リバーシブル」は、この折り紙の仕組みである電気によって色の変化する情報からこの名前が連想されている。これら事から、作品の名前は折り紙の形による情報が名詞となり、色の変化による情報が形容詞などの修飾語になることが多いことがわかる。作品に名前を付けることで、この折り紙を用いた作品は通常の折り紙を用いた作品とは異なった印象を与えていることが伺える。

ワークショップ後にアンケート調査を行った。結果、通常の折り紙と比べて、作品制作の過程で極端な難易度の変化はなく、楽しさは普通の折り紙よりも向上していることがわかる。自由記述からは、折り紙が色彩制御を持つ事によって、通常の折り紙とは違った体験ができたという意見を多く得られた。これらの事から、従来の折り紙が持ち得なかった表現を持つ折り紙作品を制作できたということが示唆される。その一方、色の変化のバリエーションを増やしてほしいなどの意見もあった。今後は、インクのバリエーションを増やし、さらに無彩色から有彩色に変化するよう黒い感温変色性色素を用いたサーモインクの使用を検討していきたい。

6. 結論

本稿では、折り紙の特性を最大限残した状態で色彩変化の機能を持たせ、今までの折り紙が持ち得なかった表現や体験を与えることを目的とする **Origamic I/O device** について述べた。ワークショップ参加者の評価からも、折り紙の特性をほとんど損なう事なく、今までの折り紙とは異なった作品制作の体験を与えられたことがわかった。

今後の課題として、折り紙の色彩表現の発展と電子的な表現を増やすことが挙げられる。まず、参加者からの評価にもあったように、色彩の変化の種類はまだ限定されてしまっている。インクのバリエーションを増やし、無彩色の状態から色が付いていくといったような折り紙を制作しようと考えている。それを実現するには、感温変色性色素が黒や白であるか、または温度が高くなる事によって無色から色が付くインクを用いることで可能となる。

さらに、形状記憶合金やバイオメタルといった、柔軟性が高い極細の線状アクチュエータを電極パーツと同様に、モーションパーツとして **Origamic I/O device** に取り入れることを検討している。**Origamic I/O device** の機能に、色彩変化だけでなく折曲げや変形といった形状変化を追加することでより大きなストーリーをもった折り紙作品を制作する事ができる。色彩変化や形状変化を実現した折り紙は、これまでの観賞用に徹した静的な芸術作品としての歴史的趨勢を超え、ダイナミックペーパーアートの先駆けとなるだろう。

参考文献

- 1) 日本折り紙協会
<http://www.origami-noa.jp/>.
- 2) Fred?ric Kaplan, Patrick Jermann: PaperComp 2010: rst international workshop on paper computing, Proceedings of the 12th ACM international conference adjunct papers on Ubiquitous computing - Adjunct, 2010.
- 3) David A. Mellis, Sam Jacoby, Leah Buechley, Hannah Perner-Wilson, Jie Qi :Microcontrollers as material: crafting circuits with paper, conductive ink, electronic components, and an "untoolkit" . Proceedings of the TEI '13 the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction, 83-90.
- 4) Buechley, L., Hendrix, S., and Eisenberg, M.:Paints,paperand programs: first steps toward the computational sketchbook. Proceedings of the TEI 2009, ACM Press (2009), 9-12.
- 5) Qi, J., and Buechley, L. Electronic popables: exploring paper-based omputing through an interactive pop-up book. In Proceedings of the fourth international conference on Tangible, embedded, and embodiedinteraction, TEI '10, ACM (New York, NY, USA, 2010), 121-128..
- 6) Coelho, M., Hall, L., Berzowska, J., and Maes, P.:Pulp-based computing: a framework for building computers out of paper. In Proceedings of the 27thinternational conference extended abstracts on Human factors in computing systems, CHI EA '09, ACM (New York, NY, USA, 2009), 3527-3528 .
- 7) Hiroki Yamada, Tomohiro Tanikawa, Kunihiro Nishimura, Michitaka Hi rosePaint color control system with infrared photothermal conversion Proceedings of the ACE '11 Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology Article No. 64.
- 8) Kohei Tsuji, Akira Wakita. Anabiosis: An InteractivePictorial Art Based on Polychrome Paper Computing.In Proceedings of ACE '2011, Creative Showcase andInteractive Art, Article No. 80, 2011
- 9) Kohei Tsuji, Akira Wakita. Transience: aesthetics of dynamic colors inside Japanese calligraphy. Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction Pages 387-388
- 10) Billy Cheng, Maxine Kim, Henry Lin, Sarah Fung, Zac Bush, Jinsil Hwaryoung Seo Tessella: interactive origami light.Proceeding TEI '12 Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction(2012), 317-318.
- 11) Qi, J., and Buechley, L. Animating paper using shape memory alloys. In Proc. of CHI 2012, ACM Press (2012), 749-752.
- 12) Matthew Gardiner, Ray Gardiner. The functional aesthetic of folding, self-similar interactions. Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction Pages 387-388
- 13) Arduino. www.arduino.cc