

トレーシングペーパーへの防水加工による吸湿変形の制御と表現

A Control Hygroscopic-morphing and Expression of Tracing Paper by Waterproofing

高橋 明日香, 西條 瞳, 渡邊恵太

Asuka TAKAHASHI¹, Hitomi NISHIJO, Keita WATANABE

明治大学

Meiji University

【要約】

トレーシングペーパーは湿気を吸収しやすく、湿気を吸収すると膨張し丸まる吸湿変形特性がある。本研究では、トレーシングペーパーの吸湿変形特性を用いた、動的なディスプレイ表現手法を探索する。トレーシングペーパーの変形は比較的単純であるため、防水加工を施すことによりその変形の制御を試みる。本稿では防水加工を複数パターン施し、湿度との関係性から変形の大きさや丸まり方の違いなどを検証し、制御性やアプリケーション例、そして制御のためのエディタについて議論する。

キーワード: トレーシングペーパー, 防水加工, 吸湿変形, ディスプレイ, 表現

【Abstract】

Tracing paper has a hygroscopic-morphing characteristic, which means that it absorbs moisture easily and curl up by the expansion of it. In this study, we explore a dynamic display method using the characteristic. Since the morphing of tracing paper has a limited range of expression, we attempt to control it by waterproofing. Here, we examined how the amount of the morphing and the form of curvature change with humidity depending on multiple waterproofing patterns and discuss the controllability, application examples, and the editor to control it.

Keywords: tracing paper, waterproofing, hygroscopic-morphing, display, expression

1. はじめに

トレーシングペーパーは湿気を非常に吸収しやすい。湿気を吸収すると、吸収しやすい面が膨張し、丸まるように変形する。元々木材繊維製の紙には吸湿・放湿によって伸縮する性質があるが、トレーシングペーパーは一般上質紙に比べてより大きく伸縮する[6]。また、一度変形しても、放湿すればまた同じように変形できる。

この性質により、掌など放湿するものの上に置くだけで、数十秒でトレーシングペーパーを変形させられる(図 1a,b)。これを活用すれば、例えば台紙に切り込みを入れたトレーシングペーパーを貼ることで、掌の上で徐々に立ち上がるポップアップカードを作成できる(図 1c)。また、切り込みの入れ方次第で様々な表現が可能である。しかし、切り込みの入れ方だけでは変形の大きさや速さを変えられないため、表現の幅が不十分である。

本論文では、吸湿量との関係性に関する簡易的な実験を行い、防水加工パターンによって表現の幅を広げる提案と評価を行った。その結果を元に、応用表現やエディタについて議論する。



図 1. (a) 掌に置いた直後 (b) 約 30 秒後 (c) 特性を使った例

2. 関連研究

デジタル工作機器の発展とともに、加工する素材に

着目し、造形物に新たな性質を付与するマテリアル研究が盛んである。中でも、Tibbits[5]によって提唱された、時間経過に伴い熱や光などの条件によって形状を変化させる 4D Printing に関する研究が多く報告されている。

Geら[4]は、マルチマテリアル 3D プリンタによって、関節部分に形状記憶ポリマを使用した加熱による自己折り畳みシートを作成した。An[1]らは、熱可塑性樹脂を使用し、任意の角度での曲面的な自己折り畳みを可能にした。Yaoら[3]は、相対温度に応じて膨張・収縮する納豆菌の性質を利用したバイオフィルムを提案している。

これらは、2 次元の紙状物体を 3 次元形状に変形させるため、コスト削減やプロトタイプ高速化に繋がるだけでなく、変形の動きを利用した表現メディアにもなり得る。本研究では、マテリアルを紙状に造形せず、紙本来の性質による変形を試み、表現への応用を目指した。

3. 吸湿量との関係性調査

トレーシングペーパーの変形と吸湿量の関係性を調査するために、簡易的な実験を行った。吸湿量を直接計測・制御するのは難しいと判断したため、今回は異なる温度の湯の蒸気を当てて実験した。本論文の実験では、全て KOKUYO のインクジェット用トレーシングペーパー(75g/m²)を用いた。

3.1. 実験環境・方法

70mm 四方のトレーシングペーパーに、伸縮しやすい向きに立ち上がるように一辺を残して 50mm 三辺の切

り込みを入れ、外周を70mm四方の台紙と貼り合わせた(図 2a)。そして、湯を張った鍋の上にガーゼを張り、その上に台紙付きのトレーシングペーパーを置いた(図 2b)。湯の温度は低温調理器で制御し、40℃・45℃・50℃の3条件をそれぞれ3枚回ずつ、変形の違いを観察した。また、真横から水平に実験中の動画を撮影し、後ほど動画を分析することによって、40秒間10秒ごとの切り込み部分の高さと横幅を計測した(図 2a)。実験中の室温は約24.1℃で相対湿度は約57.9%であった。

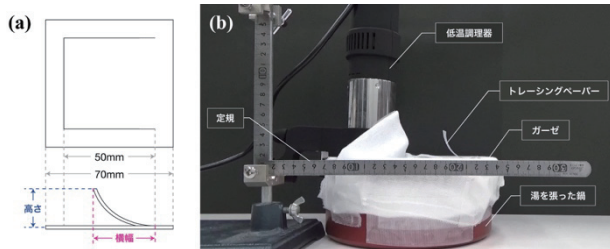


図 2. (a)切り込みと高さ・横幅の関係 (b)実験の様子

3.2. 実験結果・考察

湯の温度ごとの平均の高さと横幅を図 3・図 4 に示す。また、湯の温度ごとの詳細なグラフは図 5 に示す。

高さの結果を見ると、湯の温度が高い方が高さも高くなる傾向があった。横幅の結果を見ても、湯の温度が高い方が横幅が小さくなっている。高さと横幅の湯の温度ごとの差を比べると、横幅の方が高さよりも差が大きい。これは、トレーシングペーパーが平らなまま立ち上がり、丸まるように立ち上がるため、大きく立ち上がっても高さが出にくいと推測する。50℃ のときには切り込みの根本を超えて立ち上がり、横幅の値がマイナスになることもあった。また、40℃ と 50℃ では 40 秒時点、45℃ では 30 秒時点で、横幅の値が増加している。観察より、これは最大まで立ち上がった後に少し元に戻る動きをしていたからであった。さらに、実験全体を通して、トレーシングペーパーはひらひらと上下を繰り返しながら変形していたのが特徴的だった。

実験の結果より、湯の温度を調整することで、変形の高さをある程度制御できることがわかった。また、ひらひらと動きながら変形するため、生物的な表現が可能であると考えられる。しかし、標準偏差が大きいこと、そしてサンプル数が少ないことには注意が必要である。

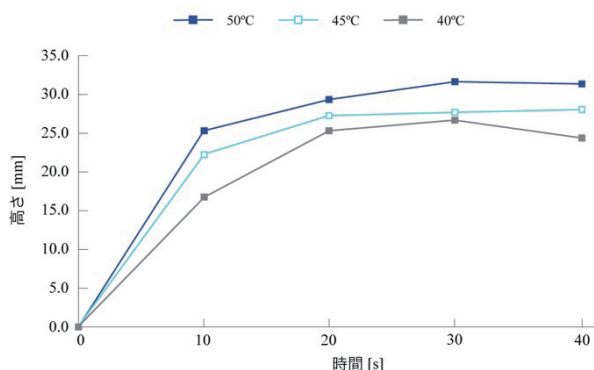


図 3. 湯の温度ごとの高さの推移

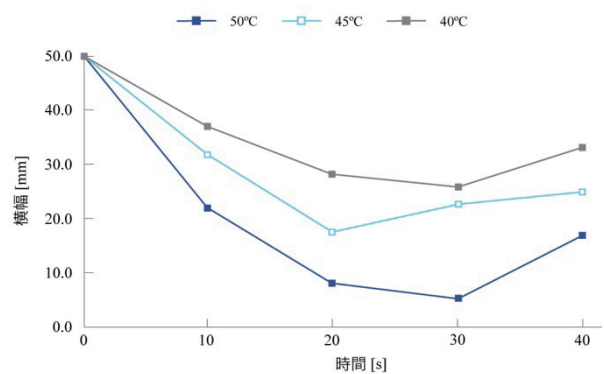


図 4. 湯の温度ごとの横幅の推移

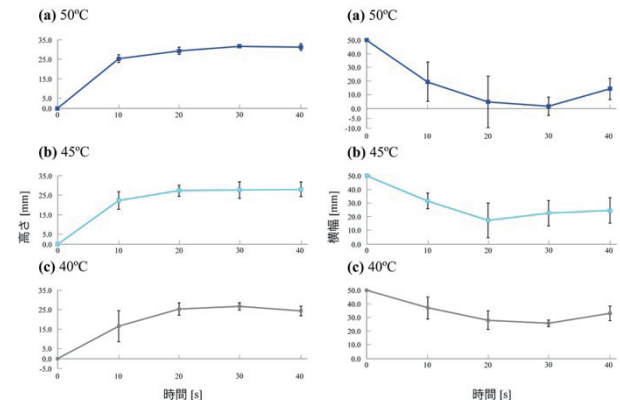


図 5. 湯の温度ごとの高さ・横幅推移詳細

4. 防水加工

前章の実験により、湯の温度が高いほど切り込みが立ち上がり、大きく変形することがわかった。しかし、複数のトレーシングペーパーの一つ一つの変形の大きさを変えたい場合、それぞれ異なる蒸気を当て分ける必要がある。また、切り込みを入れた部分は全て丸まってしまうため、丸めたくない部分があるような表現は難しい。

そこで、トレーシングペーパーに防水加工を施すことによって吸湿量を減少させ、変形の大きさや丸まり方を変化させる方法を提案する。予備実験として、ドットや波線など様々なパターンを掌の湿気で試した後、大きな差異があった縦縞状の防水加工について、縦縞の幅を変化させることでトレーシングペーパーの変形にどのような変化があるのかを観察する簡易的な実験を行った。

4.1. 実験環境・方法

図 6a のように、防水加工なし、切り込み全面防水加工、1mm おきの縦縞防水加工、5mm おきの縦縞防水加工、10mm おきの縦縞防水加工の全部で 5 パタンのトレーシングペーパーを 3 枚ずつ用意した。トレーシングペーパーや台紙、切り込みのサイズは前章の実験と同様である。防水加工には、和信ペイント株式会社の一般木工作用水性ニス（2 倍に希釈したもの）を用い、シリアル通信で制御可能なペンプロッター（AxiDraw V3）にベクターデータを送ることで制御を行った(図 6b)。通常のニス塗り工程に則り、防水加工は 2 度行った。そして、前章の実験と同様の実験装置を用い、低温調理器で

36°C に設定した状態で、各条件の変形の違いを観察した。また、こちらも前章の実験と同様に実験中の動画を撮影し、分析した。実験中の室温は約 22.8°C で相対湿度は約 40.0%であった。

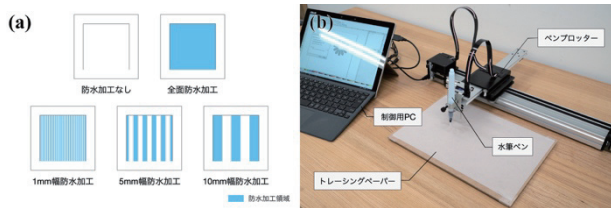


図 6. (a)防水加工パターン (b)防水加工の様子

4.2. 実験結果・考察

各パターンでの平均の高さと横幅を図 7・図 8 に示す。また、各パターンの詳細なグラフは図 9 に示す。

高さの結果を見ると、防水加工をしたものの方が、していないものに比べて常に高さが低いままである。変化量で比べると、防水加工をしていないものはグラフが上に凸に近い形だが、防水加工をしたものはグラフが下に凸に近い形をしているものが多い。これは、吸湿量の減少によって変形に背く力が、時間と共に小さくなるためだと推測する。また、30 秒時点までは防水加工幅が広がるほど値も小さくなるが、40 秒時点では 10mm 幅の値が 5mm 幅の値よりも大きくなっている。これは、防水加工による変形に背く力が小さくなったとき、10mm 幅の方が防水加工をしていない変形しやすい部分の 1 縞分の幅が広いからだと推測する。さらに、1mm 幅と 5mm 幅では防水加工をした総面積は等しいが、高さの値に大きな差があるため、防水加工面積の割合だけでなく、縦縞の幅や間隔が高さに関係していると言える。

横幅の結果を見ると、こちらも防水加工をしたものの方が、していないものに比べて常に横幅の値が大きく変形が小さい。5mm 幅、10mm 幅、全面加工の値の差は常に 3mm 以内に収まっており、高さの結果よりも差が小さい。これは、防水加工による吸湿量減少に加え、防水加工をした部分が硬くなり丸くなりにくくなっていため、防水加工をしていない部分の 1 縞分の幅が狭いほど高さが出やすかったからだと推測する。観察より、特に全面防水加工をしたものは、防水加工をしていないものに比べて、丸まりが小さく真っ直ぐと立ち上がる傾向にあった(図 10)。また、1mm 幅の値は防水加工をした他のものに比べて全体的に値が小さく、変形が大きい。高さの結果と同様に、防水加工面積の割合だけでなく、縦縞の幅や間隔が横幅に関係していると推測するが、5mm 以上の幅ではその傾向が小さかった。

実験の結果より、防水加工をする縦縞の幅や間隔を調整することで、10mm~20mm 程度の高さや横幅の制御ができる可能性がある。また、防水加工によってトレーシングペーパーの丸まりを抑えることができることがわかった。しかし、標準偏差が大きいパターンがあること、そしてサンプル数が少ないことには注意が必要である。

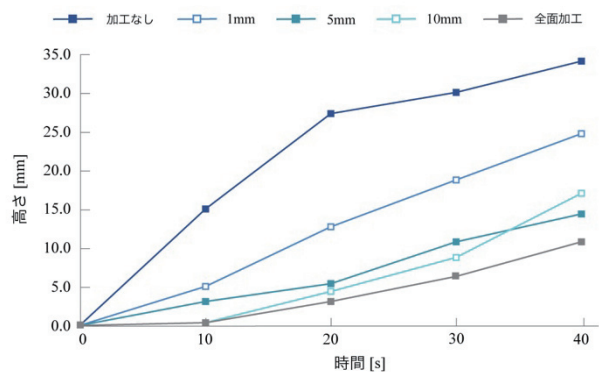


図 7. 防水加工パターンごとの高さの推移

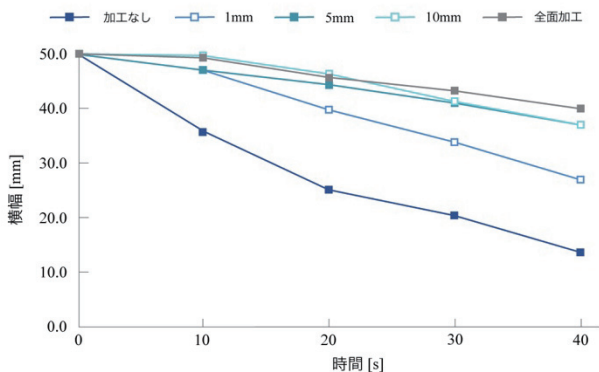


図 8. 防水加工パターンごとの横幅の推移

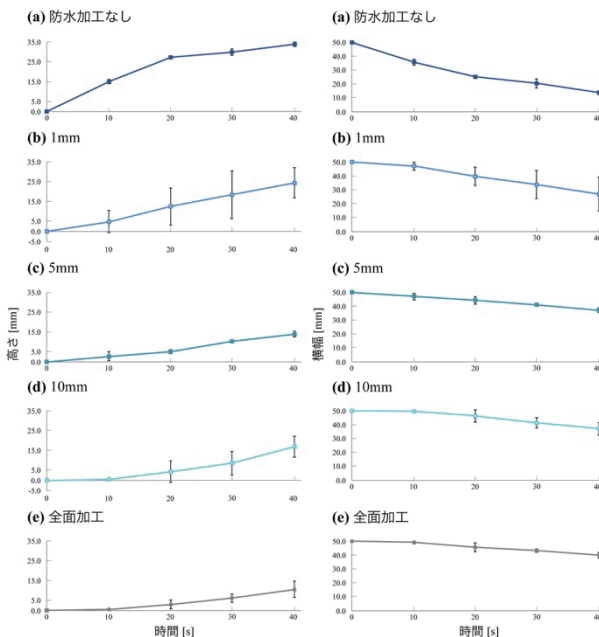


図 9. 防水加工パターンごとの高さと横幅遷移詳細

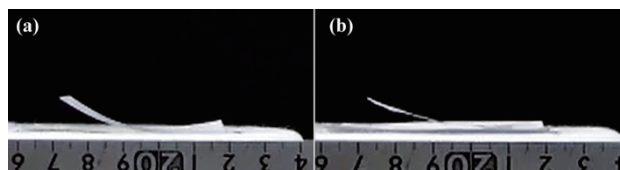


図 10. 丸まり方の違い (a)防水加工なし (b)全面防水加工

5. アプリケーション例

トレーシングペーパーの性質や防水加工による特性を活かした表現例を 3 つ紹介する。以下の例では絶対湿度や温度の制御はしていないが、現在これらを制御して魅せる表現ディスプレイとしての水槽型装置を作成中である。

5.1. 防水加工で立ち上がりに時間差をつけた表現

防水加工のパターンで立ち上がりの速さが変わることを利用し、インスタントラーメンの上に置くと、切り込みの立ち上がりで現在の麺の硬さの目安を提示する蓋を作成した。「Normal」には縞状に、「Firm」には全面に防水加工を行った(図 11a)。

5.2. 防水加工での変形の違いを利用した表現

防水加工で変形の大きさや丸まり方が変わることを利用して、花卉の部分には丸く大きく変形し、がくの部分は花卉より変形が小さく丸まりが少ない花を作成した。台紙付きのがくの部分に防水加工が施されており、がくの真ん中に上から花卉の中心部を貼り付けた(図 11b)。

5.3. 一斉にひらひらと動かす表現

ひらひらと動きながら変形することを利用して、蒸気を当てると静まっていた蝶の群れ(図 10c)が一斉にはためき始める(図 10d)例を作成した。蝶の胴体の部分を台紙にピンで留めている。ディスプレイと組み合わせれば、日中になったら一斉に動き出すような表現にも応用できる。

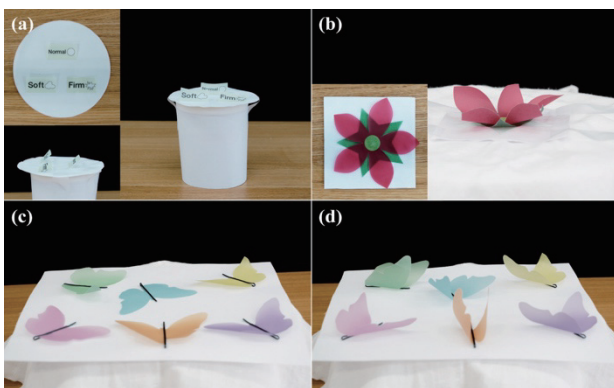


図 11. アプリケーション例

6. 議論

6.1. 制御性・精度

本論文で実施した簡易的な実験より、ひらひらと揺れながら変形する性質から標準偏差が大きく、厳密な制御には向かないことがわかった。しかし、湯の温度や防水加工パターンによってある程度の制御は可能なため、表現として利用するには問題ないと考えた。

また、3 章の実験において湯の温度条件を変更していたが、これに伴う変化の要因が絶対湿度なのか、そ

れとも温度なのか分離できていない。そのため、現在要因を分離するための実験を計画している。

6.2. エディタ

パーソナルファブリケーションの文脈において、専門的な知識や手作業での微調整を必要としなくても、誰でも簡単に変形をデザインできるようにする必要がある。そのため、将来的にはスケッチを描いて、シミュレーションしながらパラメータを変更するだけで、設計図が出力されるようなエディタが必要だと考えている。エディタ作成のためには、変形の要因の分離や詳細なパラメータ探索などが今後の課題となる。

7. おわりに

本論文では、トレーシングペーパーの吸湿変形特性に着目し、表現へ活用を目指して吸湿量との関係性調査や、防水加工の提案・評価を行った。また、これを踏まえて応用表現やエディタについて議論した。

今後は、変形の要因の分離をし、吸湿変形特性を表現にどのように応用できるのか、表現メディアとして使用する場合の要件の検討や可能性・限界を継続して模索していく予定である。また、水槽型装置を作成し、魅せる表現ディスプレイに応用することも目標としている。

参考文献

1. Byoungkwon An, Ye Tao, Jianzhe Gu, Tingyu Cheng, Xiang'Anthony' Chen, Xiaoxiao Zhang, Wei Zhao, Youngwook Do, Shigeo Takahashi, Hsiang-Yun Wu, Teng Zhang, and Lining Yao. 2019. "Thermorph: Democratizing 4D Printing of Self-Folding Materials and Interfaces." *In Proceedings of CHI'18*, No.260, pp.1-12.
2. E. Reyssat and L. Mahadevan. 2011. "How we paper curls." *EPL (Europhysics Letters)*, Vol.93, No.5, 54001.
3. Lining Yao, Jifei Ou, Chin-Yi Cheng, Helene Steiner, Wen Wang, Guanyun Wang, and Hiroshi Ishii. 2015. "BioLogic: natto cells as nanoactuators for shape changing interfaces." *In Proceedings of CHI'15*, pp.1-10.
4. Qi Ge, Conner K Dunn, H Jerry Qi, and Martin L Dunn. 2014. "Active origami by 4D printing." *Smart Materials and Structures*, Vol.23, No.9, 094007.
5. Skylar Tibbits. 2013. "The emergence of "4D printing"." *TED Talk*. Retrieved from [https://www.ted.com/talks/skylar_tibbits_the_emergence_of_4d_printing\(2020/09/14\)](https://www.ted.com/talks/skylar_tibbits_the_emergence_of_4d_printing(2020/09/14)).
6. 永井輝夫, 1979, 「トレーシングペーパー」, 『繊維学会誌』, Vol. 35, No.5, pp.140-143.