紙の吸水効果を利用した時間計測ディスプレイの提案

掛札 悠満 *　山岡潤一 *

概要. 近年，電子機器を内包せず，センシングや入出力を行うメディアに対する関心が，コストの低下や柔軟性の高さから高まっている．しかしそれらには, 加工プロセスの複雑性や耐久性の点で課題がある．一方で，紙は水に浸けると毛細管現象により，界面が動的に変化する．そのため本研究では，ろ紙の形状を加工することで，任意の時間を計測するアナログなディスプレイとしての利用を提案する．そのために，形状変化に伴う吸水時間の界面変化と，乾燥して再利用した場合の吸水時間の界面変化を計測し，濡れ時間と長さの関係性を調査した．実際に計測したデータより，サイジングを行っていないろ紙を材料としてレーザーカッターで切断して，時間を計測できるタイマーを試作した．また応用例として，抽出時間を表示するティーバッグ紐などのプロダクトや押すことで給水するインタラクティブ性を兼ね揃えた機構などを試作した．本稿では，原理と実験による検証，プロトタイプの実装と評価，今後の展望について述べる．

1　はじめに

近年，電子機器を内包せず，センシングや入出力を行うメディアに対する関心が高まっている．これらは電子機器を利用した場合と比較すると, コストの低下や柔軟性の高さが特徴である．例えばマイクロ流体力学を応用することで，水などの身近な液体を用いたディスプレイやインタフェースも提案されている [1]．しかし, 未だ加工プロセスの複雑さ，液漏れなどの耐久性や素材コストで課題がある．

一方で，生活空間に日常的に使用する素材の１つに紙がある．情報提示の観点で紙を用いる場合は，筆記や印刷を紙に施す場合が一般的であるが，これによって提示される情報は動的に変化しない．しかしながら，紙に水が染み込む過程は動的に変化する現象であるため，本論文ではこれを制御することで紙を動的に変化する情報提示ディスプレイとして提案する．

紙が吸水する原理は，毛細管現象に起因している．毛細管現象は，水と空気のような互いに溶け合わない２つの流体が固体の表面で接触する場合に発生する現象である．これら２つの流体の濡れ特性の差から，毛細管圧力と呼ばれる圧力差が生じ，この圧力差だけ界面が移動する．

なお，本研究ではインクなどの液体の浸透性を抑え，裏移りや滲みを防ぐためにサイズ剤を塗布するサイジングと呼ばれる加工 [2] を施していない紙が適当であるため，これに該当するろ紙を用いる．

本研究ではこれを利用して図 1 に示すろ紙を用いたアンビエントディスプレイ [3] を設計し，コンピュータを内包せず，安価で動的な情報提示機能を示す．具体的には，ろ紙を適当な大きさに切断したり切り込みを入れたりすることで，濡れる領域の時間変化を制御する．ユーザは，色水などに加工した紙を漬けることで時間を表示するタイマーや，抽出時間を表示するティーバッグ紐などのプロダクトへ応用することが出来る．

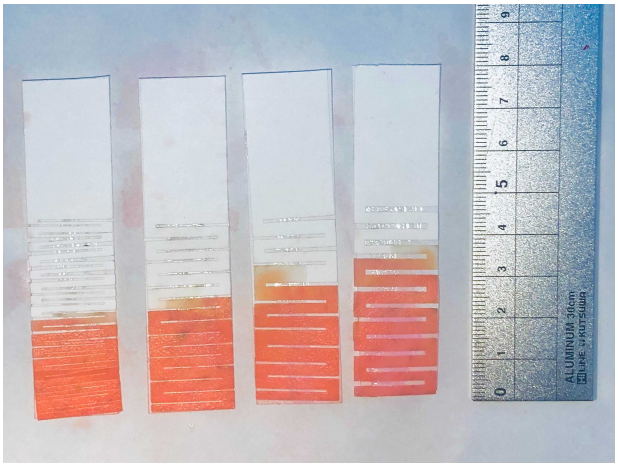

図 1. 時間計測ディスプレイ

これらの応用の実現に向けて，本研究では，吸水時間を制御するために，紙の長さと時間の関係性を調査した．実験結果から，いくつかのサンプルを製作して有用性について検証した．本稿では，原理と実験による検証，プロトタイプの実装と評価，今後の展望について述べる．

2　関連研究

紙は安価で加工が容易なため，これまで他の材料と組み合わせて特性を付与する研究や，折り紙や切り紙の技術で外形を変化させる手法が提案されてき

Copyright is held by the author(s). This paper is non-refereed and non-archival. Hence it may later appear in any journals, conferences, symposia, etc.

* 慶應義塾大学 メディアデザイン研究科

た．紙をアクチュエータとして機能させるため，導電性樹脂インクを紙に印刷する方法 [4] や，磁性流体を紙に染み込ませる方法が提案されている [5]．また，特性のある材料を用いて加工せず，　切り紙加工によって触覚フィードバックを与えるスイッチを作成する方法も提案されている [6]．

さらに外形だけでなく，内部の構造も変化させることで特性を変化させたり，特定の動作機構を実現したりするメタマテリアルが研究されている [7]．これに合わせて折り紙の技術を用いることで，材料の特質と幾何学的な構造の変化を利用したメタマテリアルのモジュールも提案されている [8]．今回，紙の毛細管現象に注目して，時間経過を表示するディスプレイとしての応用する．

材料が吸水する特性を活かした方法としては，吸湿性のフィルムが湿気によって膨張と収縮を繰り返して運動するマイクロロボット [10] やハイドロゲルをテキスタイルに 3D プリントした，水に応答するアクチュエータがある．また，トレーシングペーパーが丸まる変形特性を活かした動的なディスプレイ表現手法が提案されている [11]．本提案では主に吸水による紙の変形ではなく，色の変化に着目する．

また，液体の流れをディスプレイとして利用する方法として，外部の電源や電子機器を内包しない動的なシステムとしてマイクロ流体力学が利用される．Venous Materials[1] は PDMS を基盤に採用し，レーザーカッターで加工して貼り合わせることで複数のパターンの流路を製作している．また，紙を用いたマイクロ流体デバイスの製作手法として，疎水性のワックスを塗布して流路を制御する方法が提案されている [9]．これらは加工に組み立てが必要であったり，液体漏れなどの耐久性の問題がある．本提案では，紙の切込みだけでディスプレイの表現を行う．

3　吸水時間と界面の高さの調査

本研究では紙を用いて時間の表現が可能なディスプレイを提案する．吸水時間を制御するために，本研究では紙の長さによる吸水時間の変化に注目した．

そこで，ろ紙に水を染み込ませた時に得られる粗い界面成長と時間変化との関係性を調査するために実験を行った．本実験では，ろ紙は東洋ろ紙株式会社の定量ろ紙 No.3 を用いた．ろ紙の厚さは 0.23 mm，細長いろ紙を 20°C の水中に立てたときに 10 分間に上昇する水の高さを示す吸水度は 7.5 cm である．

3.1　実験方法

ろ紙を長辺 8.0 cm, 短辺 (a) 1.0 cm，(b) 2.0 cm，(c)3.0 cm，(d) 4.0 cm の長方形にカッターナイフで切断した．これを試料と呼ぶ．試料と実験の様子は図 2 に示す．試料の長辺が水面と垂直方向になるように水に下部の 2.0 cm 浸け，試料を固定する．ビデオカメラで試料を撮影し，　録画から水面から界面までの高さを解析した．ただし，紙における界面成長は粗く一様でないため，同時刻で界面の 3 点を適当にとり，各点の水面からの高さを計測し，その平均値をその時刻における界面の高さとした．

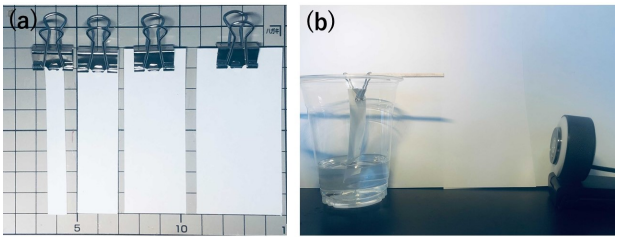

図 2. (a) 試料 (b) 実験の様子

3.2　実験結果

それぞれのろ紙における界面の高さの時間変化を図 3 に示す．

ろ紙の幅が小さくなるにしたがって界面成長は速くなる．また，いずれも 水面から距離が離れるほど高さの上昇率が小さくなっている傾向があった．したがって紙幅が細く，短いほど界面成長の速さは大きいと分かった．ただし，このとき十分長いろ紙を用いていないため，界面成長が止まる高さまでの観察ができていない．また複数回の実験を行ったが，分散が大きく，湿度などの影響を考慮していない点を留意する必要がある．

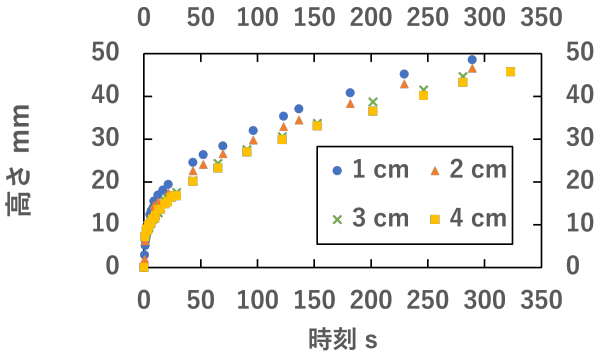

図 3.　短辺 (a) 1.0 cm，**(b)** 2.0 cm，**(c)** 3.0 cm，**(d)** 4.0 cm **の試料における界面の高さの時間変化**

レーザーカッターを用いて試料のろ紙を切断し，撥水紙に貼り付けたものをインクに浸けた (図 1)．撥水紙による吸水はろ紙と比較して十分小さく，ろ紙でできた経路に沿って水を吸う．短辺 2.0 cm の紙に対して水平方向に 1.6 cm の切り込みを入れた．切り込みの幅は，それぞれ 0.1 mm, 0.3 mm, 0.5 mm, 1.0 mm である．図 1 は 1.0 mm の深さのインクに

浸けて 10 分後に引き上げた差を示している．実験の結果から界面成長は紙幅が細く，短いほど界面成長が速いため，はじめ最も小さい幅の 0.1 mm の試料の高さが高かったが，引き上げたときは，単位高さあたりの経路が短い大きい幅 1.0 mm の試料の高さが最も高かった．

3.3 再利用性

紙は乾燥することで再び水を吸水する．濡れと乾燥を繰り返した場合の界面成長の高さを計測すると図 4 の通りである．ただし，乾燥は熱風や乾燥剤を用いず，24 時間以上自然乾燥を行った操作を乾燥として実験を行った．

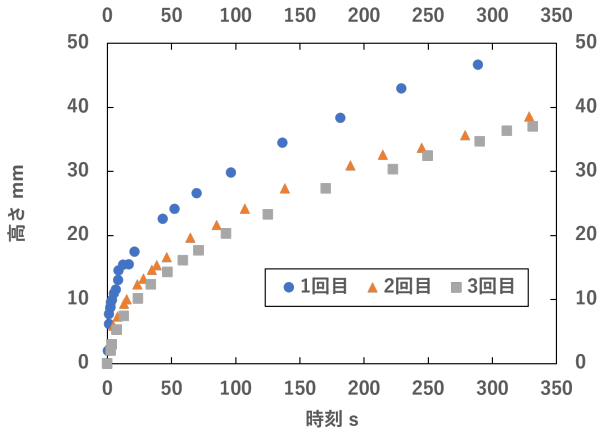

図 4. 短辺 2.0 cm,(a) 1 回目，(b) 2 回目，(c) 3 回目の試料における界面の高さの時間変化

最も界面の成長速度が速いのは 1 回目の試料で，2 回目，3 回目と回数につれて速度が減少する．ただし，1 回目と 2 回目の界面の成長速度の差と比較すると，2 回目と 3 回目の差は小さい．また，乾燥させた試料は変質して丸まり，面積が 1 回目と比較すると小さくなっていた．

4 実装と応用例

本章ではタイマーとしての実装とその応用例について説明する．

4.1 実装方法と評価

3 で得られた実験結果を元に短辺の長さごとに対数曲線で近似し，計測する時間に適当な長さをそれぞれ算出した．その長さと水に浸ける部分の長さを足し合わせて，図 2 に示した試料の形にろ紙を切断し，タイマーを作成した．

これを用いて時間計測を行い，吸水時間を確認した．このとき作成したタイマーは 30 秒から 210 秒まで，30 秒刻みの 7 種類である．実験の結果，高さ 3.0 cm 未満の 30 秒と 60 秒のタイマーの場合，30 秒以上の誤差が出る試料があった．高さ 3.0 cm 以上のタイマーは，いずれも誤差が 30 秒以内であったため，想定する計測時間が 90 秒以上かつ 1 分以上離れているタイマーであれば，何秒間を測定するタイマーか特定することが可能であるといえる．

また，撥水紙にろ紙を接着してインクに浸けることで図 5 の通り，経過した時刻を数値で表現することも可能である．

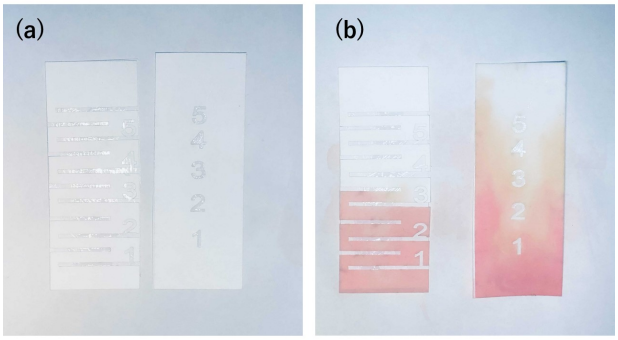

図 5. 経過時刻を数値で表示するタイマー (a) インクに浸ける前，(b) インクに浸けた後

実際に利用する場合を想定したアプリケーションの 2 例を次に示す．

4.2 抽出時間を示すティーバッグの紐

簡便に茶を淹れることが可能な装置としてティーバッグは普及しているが，適切な抽出時間を知るために外部のタイマーで規定の抽出時間を計測したり，茶の色を視覚的に判断したりする必要がある．そこでティーバッグを取り出すために付いている紐をろ紙に置き換え，図 6 に示すようなプロトタイプを作成した．これによってティーバッグと逆側の先端部分まで濡れることで抽出時間の目安を知らせる．

ろ紙は一方の先端をティーバッグに糊付けした．もう一方は長方形に切り取り，紐を置換した部分の紙幅をこの先端部分と比べて十分細くした．これによって界面の高さが速く上がるため，湯の高さが変化しても先端部分以外の界面成長にかかる時間は無視できる．ただし，ティーバッグを取り出すときの耐久性が弱く，破壊の可能性に留意する必要がある．図 6 のプロトタイプでは図 3 をもとに 4 分間で吸水する想定で 4.0 cm，の長さに切り取った．しかしながら実験の結果，4 分間経過したときの界面は 1.0 cm であった．また，30 分間経過したときの界面は 2.5 cm であった．水の高さが試料の計測よりも低い原因として，水の温度による界面の成長速度の差や，紐にあたる部分の乾燥，紅茶の濃度が時間変化することが可能性として考えられる．

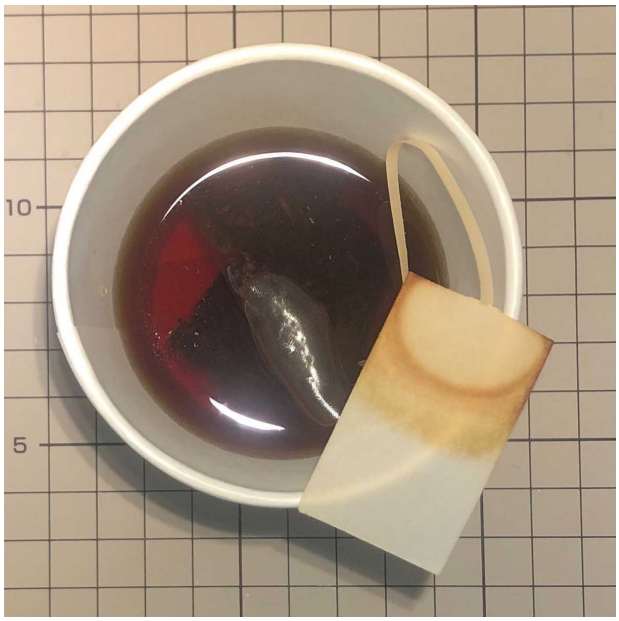

図 6. ティーバッグ紐のプロトタイプ

4.3 ラミネート加工した液体と一体型のタイマー

4.1 と 4.2 で作成したタイマーが機能するためには，何れも試料だけでなく，試料を浸ける液体が必要である．

したがって，その課題点を解消する液体を内包したタイマーを作成した．複数の材料を貼り合わせて積層させる工程をラミネート加工と呼ぶ．ろ紙と撥水紙を用いてビニルに封入したの液だまりを挟み，紙の各辺を糊づけすることで，ラミネート加工を施した．このとき紙の皺を避け，密着させるためにそれぞれの紙を同じ幅で折り，折り目の隙間の 1 つに液溜まりを挿入した． このとき，紙の上から指などで外力を加えてビニルを破壊することで液体が紙に染み出す．

ただし使用するときに指でビニルを破壊しているため，再利用できない点や，誤って破壊される可能性がある点，また，紙を介して付着した液体の量や外力の大きさによって界面の広がりが変化するため，その制御が課題である．装置全体をさらにプラスチックフィルムでラミネート加工すれば，液体が指や装置外部に漏れ出さないため，指や他の物体に液体が付着せず，携帯性も向上する．

5 まとめと展望

吸水するろ紙を用いて界面の時間変化から，任意の時間を表現する時間計測ディスプレイを提案した．吸水時間と長さの関係性を実験から明らかにして，実際に時間を計測できるプロトタイプを制作し，検証した．しかし，長い時間を計測するためには必然的にろ紙が長くなる．したがって小型化には，図 1 のように微細加工を施して経路を伸ばす方法や，折り紙の構造を用いて立体的に構成する必要がある．また，精度は改善する必要があり，今後温度や色水の濃度についても考慮して実験する必要がある．

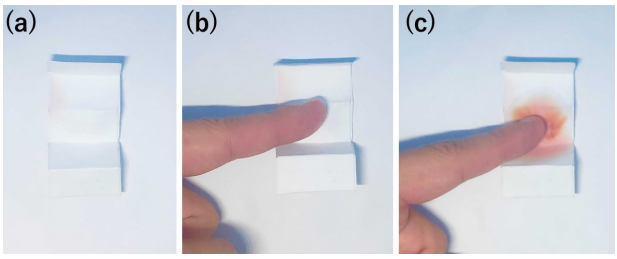

図 7. (a) ラミネート加工によるインク内包型のタイマー，(b) 指で液だまりを押す様子,(c) 液だまりを破壊してインクが広がる様子

さらに今回用いたろ紙は生活環境に普及しているものではないため，今後は入手や加工が容易な他の用紙や布，食品などの素材を検討する．また，ユーザに利用しやすいディスプレイにするため，ユーザが時間を設定すると最適な切込みと形状を設計するソフトウェアを開発する．

ところで，紙の濡れは視覚的だけでなく，触覚的にも変化している．従来のタイマーやアラームは目覚まし時計のように聴覚に作用していたが， 今後は試料に機能性材料を塗布するなどの加工を施して，触覚フィードバックを設計する．また，触覚フィードバックを含むことで砂時計のような既存の視覚的に時間情報を計測する装置とも異なる情報提示の方法の実現を試みる．濡れ以外に，4.3 で作成した液体を封入したタイマーは，さらに流路を制御することでマイクロ流体力学を利用した触覚的なインタラクションが可能である．

また本研究では水とインクのみを用いたが，試料に機能性のインクが染み込むように設計することで，導電性インクやサーモインクを用いて電気による動作や温度変化で着色が可能なスマートテキスタイルを利用したディスプレイの実現を目指す．

謝辞

本研究は JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) の一環として実施されました．

参考文献

[1] Hila Mor, Tianyu Yu, Ken Nakagaki, Benjamin Harvey Miller, Yichen Jia, and Hiroshi Ishii. 2020. Venous Materials: Towards Interactive Fluidic Mechanisms. In Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI ’20). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–14.

DOI:https://doi.org/10.1145/3313831.3376129.

[2] Akira Isogai, Mechanism of Paper Sizing, JAPAN TAPPI JOURNAL, 1998, Volume 52, Issue 12, Pages 1678-1686, Released November 19, 2009, Online ISSN 1881-1000, Print ISSN 0022-815X, https://doi.org/10.2524/jtappij.52.1678.

[3] C. Wisneski, H. Ishii, A. Dahley, M. Gorbet, S. Brave, B. Ullmer, and P. Yarin. 1998. Ambient displays: Turning architectural space into an interface between people and digital information. In Proceedings of Cooperative Buildings: Integrating Information, Organization, and Architecture, CoBuild 1998, pp. 22–32, Berlin, Heidelberg. Springer.

[4] Guanyun Wang, Tingyu Cheng, Youngwook Do, Humphrey Yang, Ye Tao, Jianzhe Gu, Byoungkwon An, and Lining Yao. 2018. Printed Paper Actuator: A Low-cost Reversible Actuation and Sensing Method for Shape Changing Interfaces. In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Paper 569, 1–12. DOI:https://doi.org/10.1145/3173574.3174143.

[5] Z. Ding, P. Wei, G. Chitnis and B. Ziaie, "Ferrofluid-Impregnated Paper Actuators," in Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 20, no. 1, pp. 59-64, Feb. 2011. DOI: https://doi.org/10.1109/JMEMS.2010.2100026.

[6] Zekun Chang, Tung D. Ta, Koya Narumi, Heeju Kim, Fuminori Okuya, Dongchi Li, Kunihiro Kato, Jie Qi, Yoshinobu Miyamoto, Kazuya Saito, and Yoshihiro Kawahara. 2020. 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). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–12. DOI:https://doi.org/10.1145/3313831.3376655.

[7] Alexandra Ion, Johannes Frohnhofen, Ludwig Wall, Robert Kovacs, Mirela Alistar, Jack Lindsay, Pedro Lopes, Hsiang-Ting Chen, and Patrick Baudisch. 2016. Metamaterial Mechanisms. In Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '16). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 529–539. DOI:https://doi.org/10.1145/2984511.2984540.

[8] Kamrava, S., Mousanezhad, D., Ebrahimi, H. et al. Origami-based cellular metamaterial with auxetic, bistable, and self-locking properties. Sci Rep 7, 46046 (2017). DOI:https://doi.org/10.1038/srep46046.

[9] Zhong, Z.W., Wang, Z.P. and Huang, G.X.D. Investigation of wax and paper materials for the fabrication of paper-based microfluidic devices. Microsyst Technol 18, 649–659 (2012). DOI:https://doi.org/10.1007/s00542-012-1469-1.

[10] BEOMJUNE SHIN, JONGHYUN HA, MINHEE LEE, KEUNHWAN PARK, GEE HO PARK, TAE HYUN CHOI, KYU-JIN CHO, and HO-YOUNG KIM. 2018. Hygrobot: A self-locomotive ratcheted actuator powered by environmental humidity. Science Robotics 24 Jan 2018. Vol. 3, Issue 14, eaar2629. DOI:https://doi.org/10.1126/scirobotics.aar2629.

[11] Asuka TAKAHASHI, Hitomi NISHIJO, and Keita WATANABE . 2020. A Control Hygroscopic-morphing and Expression of Tracing Paper by Waterproofing. In Conference on 4D and Functional Fabrication 2020.