

紙の自律構造形成メカニズムにおけるインク浸透の観察と評価

森脇 航[†] 重宗 宏毅[†]芝浦工業大学 工学部 電気工学科[†]

1. はじめに

我々のグループは紙とインクの物理化学反応による自律構造形成技術を確立した[1]。プリンタ・インク・紙というシンプルな装置構成と、プリンタの印刷部が折れ曲がることで直観的な設計を可能にするという特徴を持つが、詳細なメカニズムは報告されていない。今回、構造形成性能の向上と誤差減少を目的として、インク量に対する紙内への浸透の解析、折れ曲がりとの関連性について調査した。

紙に染色液を滴下し、浸透終了後の断面を光学顕微鏡で観察した写真がfig.1のものである。染色分布から厚み方向のインク含有率に違いがあることが見て取れる。この分布について解析を行う。



fig.1 インク浸透断面

2. 原理

2.1 Lucas-Washburn 式と Fick の法則

今回の液体浸透解析では、紙中浸透の古典的式である Lucas-Washburn 式と、多孔質媒体に対しての液体拡散で用いられる Fick の法則とした。この二つの式を組み合わせ、紙中のインク含有率分布の解析を行う。

Lucas-Washburn 式は毛細管に対して、表面張力を動力として浸透が進む理論式であり、次の式で表される。

$$l = \sqrt{\frac{r\gamma\cos\theta}{2\eta}t}$$

Observation and Evaluation of Ink Penetration in Mechanisms of Self-folding Paper

[†] Wataru Moriwaki, Hiroki Shigemune, Faculty of Engineering, Shibaura Institute of Technology.

l は浸透深さ、 r は細孔半径、 γ は液体の表面張力、 θ は接触角、 η は粘度、 t は時刻である。

対して Fick の法則は、濃度勾配に対しての拡散を表現する法則であり、次の式で表される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\text{div}J = D\nabla^2c$$

c は濃度、 J は流束、 D は拡散係数である。

fig.2に示すように、Lucas-Washburn 式は浸透先端までの距離が解析でき、Fick の法則ではそこまでの濃度分布が得られる。なお、紙に対するインクの濃度分布とは紙のインク含有率分布を示している。



fig.2 Lucas-Washburn 式と Fick の法則の対応

3 実験・考察

3.1 Fick の法則を用いた有限要素法解析

紙面内のインク浸透分布を解析するために、Fick の法則を用いて有限要素法解析を行った。解析ソフトには COMSOL Multiphysics ver5.5 を用いた。紙のジオメトリは、fig.3(a)に示すように厚み 100 μm にて設定し、縦横 1 μm 毎にメッシュ分割した。境界条件として紙上面から一定の流入を仮定した。解析結果は fig.3(b)のようになった。

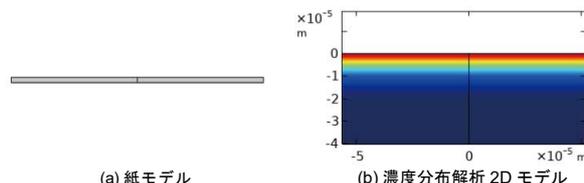


fig.3 有限要素法解析モデル

3.2 Lucas-Washburn 式と Fick の法則の比較

紙面厚み方向の拡散係数は、Lucas-Washburn 式とフィッティングすることで算出した。紙厚み方向の浸透の時間変化を実験的に観察することが難しいことに起因する。

Fick の法則と Lucas-Washburn の式はどちらも時間の平方根に依存して浸透が進むため、浸透

時間が短い場合、見かけ上の浸透深さは同じとなる [2]。浸透時間が長い場合は、Lucas-Washburn 式に対して抵抗力などの影響が高まり二つの式の差異が大きくなる。今回は浸透時間が短いと仮定し解析を行った。

fig. 4 のように浸透先端までの距離の値と、解析結果の経過時間による Lucas-Washburn の式解を比較し、解が合うように拡散係数をフィッティングすることで Fick の法則で用いる拡散係数を求めた [3]。本結果を有限要素法にフィードバックすることにより、実際の浸透深さと濃度分布を得られる。

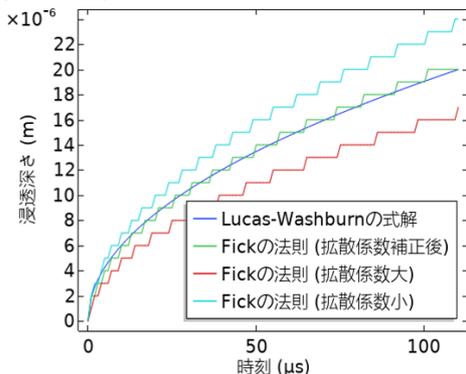


fig. 4 Lucas-Washburn 式と Fick の法則による拡散係数のフィッティング

3.3 吐出量と浸透・折り曲がり角度の関係

次に、インク浸透分布と折り曲がり角度の関係を調査した。Adobe Illustrator を用いて fig. 5(a) にあるように異なる黒濃度の印刷線を用意することで、プリンタからの吐出量を調整した。印刷線幅は 4 mm、紙連量は 39.5 kg を用いた。吐出量を変化した場合、fig. 5(b) のように折れ曲がり角は変化する。異なる黒濃度に対する吐出量は fig. 6 のように変化する。

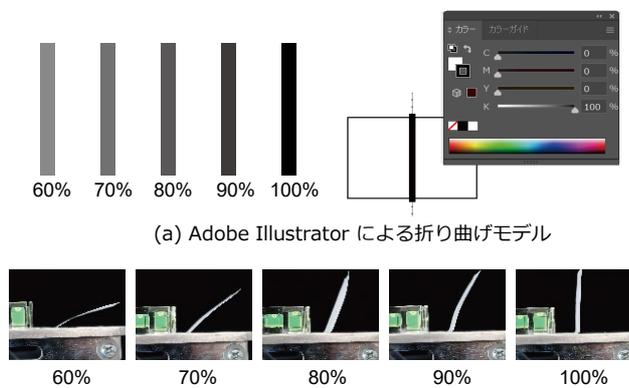


fig. 5 黒濃度と折り曲がり角度の関係

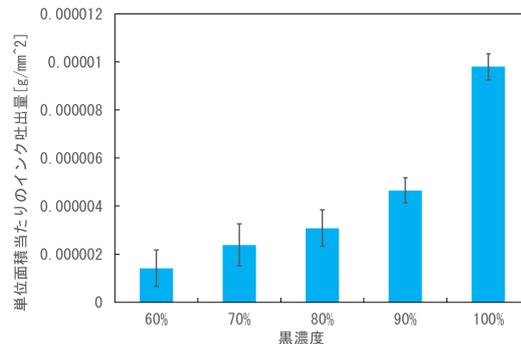


fig. 6 黒濃度に対するインク吐出量

各黒濃度に対する吐出量と解析による浸透量が一致する解を導き、解析結果から厚み方向に対するインク浸透分布を示すと fig. 7 のようになる。fig. 5 (b)、fig. 7 から浸透深さが大きいほど折れ曲がり角が大きくなり、黒濃度 90-100% 間のように浸透深さの変化量が大きい時に角度の変化量も大きくなることが確認された。

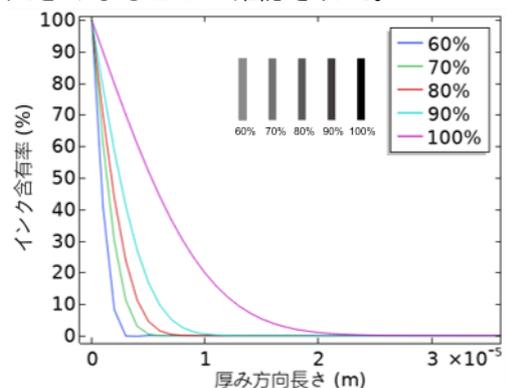


fig. 7 各黒濃度の厚み方向インク浸透分布

4. まとめ

印刷量に対するインク浸透分布を導出し、折り曲がり角度との関係を調査した。誤差減少だけでなく、小型かつ緻密な構造を簡易的に形成する手法の開発へと繋げる。

参考文献

[1] Shigemune, H., Maeda, S., Hara, Y., Hosoya, N., & Hashimoto, S. (2016). Origami robot: a self-folding paper robot with an electrothermal actuator created by printing. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21(6), 2746-2754.
 [2] 江前敏晴, 講座「紙の科学」紙の物性・構造の基礎と印刷適性, ホームページより引用.
 [3] Tirapu-Azpiroz, J.; Silva, A. F.; Ferreira, M. E.; Candela, W. F. L.; Bryant, P. W.; Ohta, R. L.; Engel, M.; Steiner, M. B. Modeling Fluid Transport in Two-Dimensional Paper Networks. *J. Micro/Nanolithogr., MEMS, MOEMS* 2018,17, No. 025003.