

塗料の乾燥パターン

工藤和恵¹, 牛嶋麗夏^{2*}

¹ お茶の水女子大学基幹研究院, ² お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科

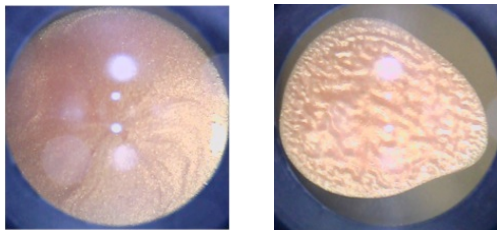
1 はじめに

塗料には用途に応じて様々な種類があるが、均一に塗布することが課題となる。乾燥後の均質な塗膜を作るためには、不均一な塗膜ができる原因を調べる必要がある。その点で、塗料の乾燥による非一様なパターン形成の研究は重要な役割を担う。

本研究では、身近な塗料の一つであるマニキュアをとりあげる。マニキュア液滴の乾燥後の表面の様子を、単純な数理モデルを用いて再現する。これをもとに、非一様なパターンの出現条件を議論する。

2 簡単な実験と観察

簡単な実験として、マニキュアの液滴をガラス基板とプラスチック(ポリスチレン)基板にそれぞれ落とし、2日間自然乾燥させた。乾燥後の表面を観察したのが図1である。液滴は乾燥するにつれて体積が減少するが、乾燥後の表面の様子は基板によって異なっていた。ガラス基板の場合は表面はなめらかだが、プラスチック基板の場合はシワができていた。



(a) ガラス基板 (b) プラスチック基板

図1: マニキュアの液滴の乾燥後の表面: (a) ガラス基板, (b) プラスチック(ポリスチレン)基板. それぞれ視野径6 mm程度.

3 モデル

簡単な実験で観察されたような乾燥パターンを再現するために、できるだけ単純な数理モデルを考える。マニキュアは高分子溶液と考えられるので、高分子液滴の乾燥シミュレーションで用いられているモデル¹⁾を参考にする。そのモデルは、無次元化された形では次のように書ける。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + Ca^{-1} \nabla \cdot (hv) = -J \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\phi h)}{\partial t} + Ca^{-1} \nabla \cdot (\phi hv) = Pe^{-1} \nabla \cdot (h \nabla \phi) \quad (2)$$

ここで、 h は基板から液滴表面までの高さ、 v は基板に平行な溶媒の流れの速さ、 ϕ は高分子の体積分率である。変数は全て空間2次元である。また、 Ca はキャピラリー数、 Pe はペクレ数に対応する。 J は蒸発率で、その典型的な値を J_0 とする。式(1), (2)は、長さの単位を液滴の半径 R 、時間の単位を R/J_0 としてスケールされている。潤滑近似のもとで無次元化された v は次のように近似される。

$$v = \frac{h^2}{3\tilde{\eta}} \nabla \nabla^2 h, \quad \tilde{\eta} = \left[1 - \frac{\phi}{\phi_g}\right]^{-4} \quad (3)$$

ここで ϕ_g はゲル化したときの体積分率である。

通常の高分子液滴の乾燥過程では、蒸発率 J は気相での溶媒の数密度に依存して変化する。しかし、マニキュアの場合には表面がゲル化する。これを表面の膜と見なし、蒸発率 J は膜の内外にかかる圧力差 p に比例する²⁾と仮定して次のように与える。

$$J = \begin{cases} 1 + \kappa p & \phi < \phi_g \\ 0 & \phi \geq \phi_g \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 κ は比例係数である。 p は膜にかかる応力から導出され、近似的に次のように表される。

$$p = \nabla^4 h + \Gamma \nabla^2 h \quad (5)$$

ただし、 Γ は張力に対応するパラメタである。

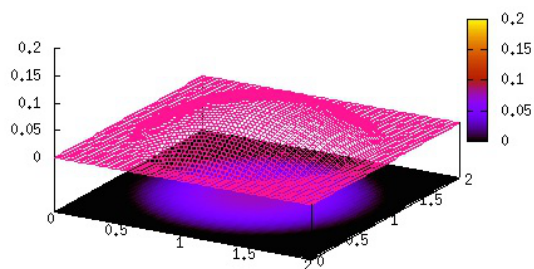
4 数値シミュレーション

実験で観察されたガラス基板とプラスチック基板による違いは、基板と溶液の関係によるものと考えられる。ここでは、モデル中の関連するパラメタとしてキャピラリー数 Ca に注目する。式(1), (2)で Ca は移流項にかかっていることから、流れの效果に影響していることがわかる。 Ca が小さければ流れの效果が強く、大きければ流れの效果が弱いと考えられる。 Ca 以外のパラメタを、 $\kappa = 1.0 \times 10^{-5}$, $\Gamma = 2.0 \times 10^3$, $Pe = 5.0$, $\phi_g = 1.0$ に固定して数値シミュレーションを行った結果を図2に示す。

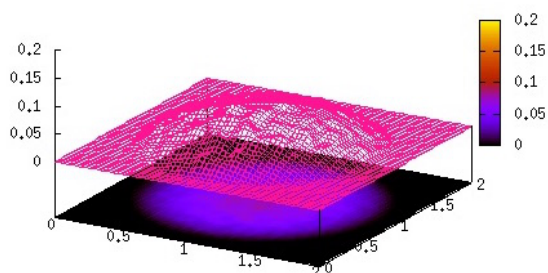
図2(a)では表面はほぼなめらかである。一方、図2(b)では、シワのようなパターンが現れている。つまり、 Ca が小さいとシワができにくく、大きいとできやすい傾向が確認された。これは、 Ca が小さい場合は流れの效果が強く、表面をなめらかにするにはたらいっていると解釈できる。逆に Ca が大きい場合は

*2016年3月に修士課程終了

流れの効果が弱いため、非一様なパターン(シワ)の成長を妨げないと考えられる。



(a) $Ca = 0.01$



(b) $Ca = 5.0$

図 2: 液滴の乾燥後の表面のシミュレーション結果:
(a) $Ca = 0.01$, (b) $Ca = 5.0$.

5 まとめと議論

本研究では塗料の乾燥パターンを、単純な数理モデルを用いて数値シミュレーションした。キャピラリー数が小さいとシワができにくく、大きいとできやすい傾向があることが確認された。

しかしながら、実験に使った試料を後日よく確認したところ、プラスチック基板の場合はマニキュアによって基板が少し溶けていることが判明した。液滴の表面に現れたシワは、基板と液滴の接触面にできたパターンと強い相関が見られた。今後は基板が溶けないような材質を用いて、非一様なパターンの観察とモデルの改良を行う予定である。

参考文献

- [1] M. Kobayashi, M. Makino, T. Okuzono, and M. Doi, J. Phys. Soc. Jpn. **79**, 044802 (2010).
- [2] M. J. Blount, M. J. Miksis, and S. H. Davis, Phys. Rev. E **85**, 016330 (2012).