

塗料の乾燥パターン形成

牛嶋 麗夏 (指導教員：工藤和恵)

1 はじめに

近年ネイルサロン等でプロの手によってマニキュアを美しく塗る事が当たり前になっている。しかし、ネイルサロンに通うには費用などの問題がある。そのため、自分でマニキュアを塗ろうとする人も多くいるが、塗る際にはどうしてもムラが出来てしまうことがある。同じ人が塗っても、マニキュアによってムラになりやすいもの、反対に美しく塗る事が出来るものがあり、これは、色や品質によって異なるマニキュアの成分や、それによる乾き方の違いに関係があるのではないかと考えた。マニキュアの乾き方を理解し、美しく塗る方法を見つけるために、本研究では乾燥パターンのシミュレーションを行う。

2 実験と観察

2.1 実験方法

まず、マニキュアが乾燥する様子を観察するために実験を行った。3種類のマニキュアを用意し、プラスチック容器と、ガラス板の平らな表面に塗った。それぞれについて、塗った直後と比べて、2日後に乾燥したマニキュアの表面の様子を観察した。観察に使用した器具は光学顕微鏡で、倍率は20倍である。

2.2 観察結果

プラスチック容器に塗ったマニキュア3種類全ての表面に、図1のようなシワを確認する事が出来た。しかし、ガラス板ではこの現象は見られず、塗った直後と表面の様子に変化は見られなかった。

2.3 考察

プラスチックは気体の透過率がガラスに比べて非常に大きいことが知られている。また、ガラス板に塗ったマニキュア表面ではこのシワが見られなかったことから、液滴の表面からはあまり気体の蒸発が起こっていないと考えられる。このことを踏まえて、プラスチックに塗ったマニキュアの表面の模様をシミュレーションするためのモデルを考える。

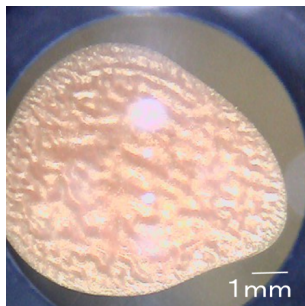


図 1: プラスチック容器に塗った2日後のマニキュア表面の様子

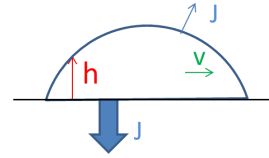


図 2: モデルの模式図

3 モデル

本研究では図2の様に1次元の断面図を考える。マニキュア(塗料)は高分子から出来ているため、高分子溶液の体積分率を考える必要がある。高分子の乾燥シミュレーションの文献[1]を参考にして、次のようなモデルを考える。

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

$$\frac{\partial(\phi h)}{\partial t} + Ca^{-1} \frac{\partial}{\partial x}(\phi hv) = Pe^{-1}(h \frac{\partial}{\partial x} \phi)$$

ここで、 v は基板に平行な溶液の流れの速さ、 h は基板から溶液表面の高さを表している。また、 ϕ は高分子の体積分率、 J は蒸発率、 Ca 、 Pe はそれぞれCapillary number、Péclet numberを意味する。 v は気液相の表面張力が一定のときに、潤滑近似(lubrication approximation)を用いて次の様に書く事が出来る。

$$v = \frac{h^2}{3\eta^{-1}} \frac{\partial^3}{\partial x^3} h$$

η は ϕ に依存する溶液のシア粘性であり、

$$\eta(\phi) = \eta_0 \left[1 - \frac{\phi(x,t)}{\phi_g} \right]^{-4}$$

と表せる。ここで η_0 は溶媒のみのときの粘性であり、 ϕ_g はゲル化したときの体積分率である。また蒸発率 J は、本来は

$$J \propto -\mathbf{n} \cdot \nabla c$$

で与えられる。 \mathbf{n} は溶液表面に対する単位法線、 c は気相での溶媒の数密度である。つまり、 J は気相での溶媒の数密度に依存するため、これを求めるには溶媒の数密度の方程式を解かなければならない。それは複雑になってしまうため、 J についての書き換えを文献[2]を参考に行う。表面からの蒸発がほとんどないことから、表面に膜が張っていると仮定する。また、蒸発のほとんどは基板から起こり、それは膜にかかる圧力に依存していると仮定して J を次の様に与える。

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

ここで、 κ は比例定数、 p は膜にかかる圧力を表している。圧力 p は近似的に、

$$p = \frac{\partial^4 h}{\partial x^4} + \Gamma \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$$

で与える。 Γ は張力である。

4 シミュレーション

前節の数式モデルを元に4種類のシミュレーションを行った。表1はシミュレーション番号とパラメータの値をまとめたものである。他のパラメータは $Ca = 1.0$ 、 $Pe = 1.0 \times 10^{20}$ に固定した。

	(1)	(2)	(3)	(4)
κ	0	1.6×10^{-3}	1.6×10^{-3}	2.5×10^{-3}
Γ	4.0×10^2	4.0×10^2	3.0×10^2	4.0×10^2

表 1: 各シミュレーションのパラメータ

シミュレーション (1) の結果は、図 1 のようなシワを再現していないため、 κ がシワの再現に影響を与えていると予想される。実際にシミュレーション (2) の結果である図 4 と図 3 の比較により、 κ はシワの再現に影響すると分かる。また、シミュレーション (3) では κ の値はそのままに、 Γ の値を小さくしたところ図 5 の様にシワの数が減少した。シミュレーション (4) は他のものより、 κ の値が大きい。図 6 から分かる様にシワは再現出来るが、初期状態より最終状態の体積が大きくなり破たんしている。

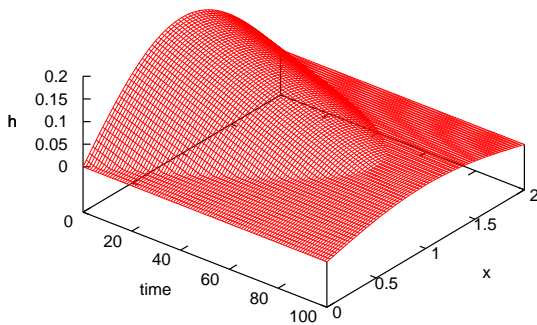


図 3: シミュレーション (1)

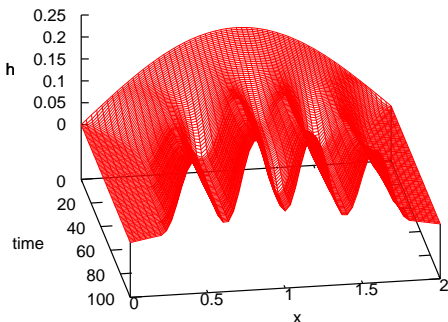


図 4: シミュレーション (2)

5 まとめ

$\kappa = 0$ で行ったシミュレーション結果にシワが見られず、 κ が 0 でないときはシワが出来たことから、膜の圧力がシワの形成に影響していると考えられる。また、 Γ の値が大きいほうがシワが多いことから、 Γ は

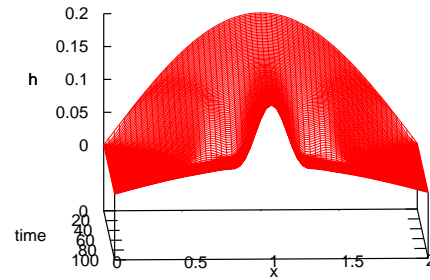


図 5: シミュレーション (3)

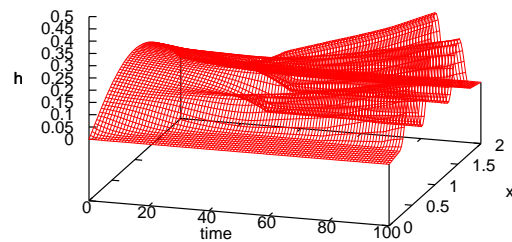


図 6: シミュレーション (4)

シワの数に影響を与えている。

表面がなめらかである方が、マニキュアを塗った際に美しくなるので、膜の圧力の影響を出来るだけ小さくする事が、マニキュアを美しく塗る事につながるだろう。膜の圧力が影響するのは、マニキュアを塗った基板からの蒸発が大きい場合である。また、観察結果から、マニキュアは表面からの蒸発は少ないという事が予想される。以上のことから、下からの蒸発を押さえるためにベースコートなどの下地を十分に塗る事が、マニキュアを美しく塗るためのコツの一つだと言える。

6 今後の課題

現段階の、1次元でのシミュレーションをもとにして、今後は2次元へと発展させる。また、基板からの蒸発のため膜の圧力の影響を考慮する必要があることが分かったので、蒸発率 J が、乾燥により生じる模様にもどのように影響を与えているのか、蒸発率に注目して研究を進める。

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)