印刷講座（第２講）
J. Jpn. Soc. Colour Mater., **94**〔4〕，112-116（2021）

インクジェット塗布の基礎現象

深井　潤*,†

*九州大学大学院工学研究院化学工学部門　福岡県福岡市西区元岡744（〒819-0395）
† Corresponding Author, E-mail: jfukai@chem-eng.kyushu-u.ac.jp

（2020年12月27日受付，2021年1月21日受理）

要　　旨

インクジェット液滴から生成する膜形状は，乾燥工程におけるバルク流れに支配される。そのバルク流れを発生させる三つの要因を表面変形の観点から解説する。その因子の一つであるマランゴニ対流は膜形状を制御するために重要な役割をもつ。そこで，マランゴニ対流の制御方法を説明した後，それを利用したいくつかの実験を紹介する。

キーワード：インクジェット，膜形状，バルク流れ，マランゴニ対流

1. はじめに

インクジェットによる電子デバイスの製造は今世紀になってから盛んに研究されるようになった。近年は，プリンテッドエレクトロニクスや3D印刷を発展させるための印刷法の一つとされている。著者も，2000年頃からインクジェットによる成膜研究を開始した。その研究は，特定のデバイス開発を目的とするのではなく，乾燥過程における液滴内の流動，物質移動，熱移動などの移動現象論に焦点を当てている。

薄膜形成と言えば，コーヒーステイン[1]の形成機構が有名である。簡潔には，コーヒーステインは外向きのバルク流れ（outward bulk flow）によって溶質が接触線部へ運ばれるために発生する。すなわち，薄膜形状はバルク流れの方向によって決まる。一方，文献1）で紹介されていないが，マランゴニ対流も溶質の移動に影響する。マランゴニ対流は蒸発液滴内ではほぼ間違いなく発生するが，その重要性はあまり認識されていないように感じている。

本稿では，薄膜形状を制御する際に重要となる三つのバルク流れを液滴の形状変化から解説し，マランゴニ対流を利用したバルク流れ方向制御と薄膜形成の実験例を紹介する。

2. 液滴内流れ

図-1に，接触線が固定（self-pinning）した状態で液滴が蒸発する際の内部流動分布の計算例を示す。流れは頭頂部から接触線部へ向かって流れる様子がわかる。液滴内にはこのような速度分布が発達しているが，溶質の偏りは，流体が水平方向のどちらへ流れるかで決まる。図の場合には，右方向（外向き）であることは一目瞭然であるが，それが不明瞭な場合には縦断面における積分平均速度（バルク平均速度）から判断できる。以下，この横方向の流れをバルク流れと呼ぶ。

バルク流れを発生させる要因は，不均一な蒸発速度分布と接触角変化である。さらに，図-1には反映されていないが，マランゴニ対流がある。これら3要因のメカニズムを説明する。以下，「接触角」とは「見かけ接触角」のことである。

2.1　基準とする蒸発過程

液滴は水平な基板上に置かれ，流れのない気相中に囲まれているとする。また，重力の影響を無視して，蒸発液滴面の形状は表面張力によって球面の一部（球冠，spherical cap）に保たれているとする。

基準状態として，均一な蒸発速度mかつ一定接触角Ψで接触線が後退する場合を考える。このとき，**図-2**(a)に示すように，時間tにおける球冠表面（破線）から，微小時間Δtで後退する距離（$m\Delta t$）は周方向に同じなので，時間$t+\Delta t$においても液滴面は球冠（実線）になる。このような相似的な変化では，流体に力は加わらないので流れは生じない。

2.2　不均一蒸発速度分布に起因する流れ（流れⅠ）

気相中に懸垂された球状液滴では，蒸気は表面の法線方向へ拡散し，その蒸発速度は均一である。一方，**図-3**に示すような基板上の液滴（$\Psi<90°$）を考えると，接触線から引いた法線（破

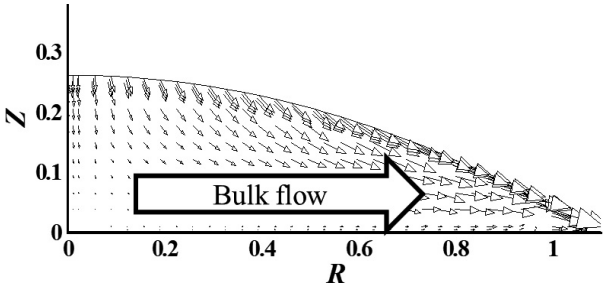

図-1　接触角固定における速度分布の計算例：接触角＝30°

〔氏名〕ふかい　じゅん
〔現職〕九州大学大学院工学研究院 教授
〔趣味〕ゴルフ
〔経歴〕1986年東北大学大学院工学研究科化学工学専攻博士課程後期修了，1986年東北大学工学部助手，1988年九州大学工学部助教授，2002年九州大学大学院工学研究院教授。専門：化学工学，熱工学，移動現象。

© 2021 Journal of the Japan Society of Colour Material