

動的濡れと脱濡れにおける三重線の移動抵抗係数への注入・吸引流量の影響

Effect of Injection Rate on Coefficient of Contact Line Friction in Dynamic Wetting and Dewetting

鳥取大・工（学）*斎藤 千夏 鳥取大・工（正）石川 功

長野高専・工（正）柳澤 憲史 鳥取大・工（正）松岡 広成

Chinatsu Saito*, Takumi Ishikawa*, Kenji Yanagisawa**, Hiroshige Matsuoka*

*Tottori University, ** National Institute of Technology, Nagano College

1. はじめに

固体表面の濡れ性は、日常生活や産業界に関わる重要な性質である。濡れ性は平衡接触角で評価され、平衡接触角が 90° より小さい表面は親水性表面、 90° より大きい表面は疎水性表面に分類される。液体による固体表面の濡れの制御のためには、固体表面上の液滴の静的挙動だけでなく動的挙動も理解する必要がある。

固体表面上の液滴の動的挙動には、液滴の三重線の移動特性が影響する。三重線の移動特性は、主に液体による濡れと脱濡れの観察を行うことによって研究されてきた。濡れと脱濡れの理論として、三重線の移動が、三重線上の液体分子の吸着と脱離によって生じると仮定した分子運動論がある¹⁾。分子運動論では、移動抵抗係数が三重線の移動特性を示すパラメータである。

著者らは、疎水性表面の濡れと脱濡れを模擬した拡張・収縮実験を行い、三重線の変位と動的接触角（前進接触角と後退接触角）を測定した。三重線の変位を時間で除することで得られた三重線の速度と平衡接触角と動的接触角の余弦の差から移動抵抗係数を求めた²⁾。分子運動論を用いた、液滴の拡張・収縮実験に対する理論を構築し、三重線の半径と速度、および動的接触角の数値計算を行った。疎水性表面における液滴の拡張・収縮実験の計算結果と実験結果は定量的に一致し、分子運動論が疎水性表面の拡張・収縮実験にも適用可能であることを報告した³⁾。また、その理論を用いて移動抵抗係数を同定する手法を構築した⁴⁾。しかし、三重線の移動抵抗係数に対する注入・吸引流量の影響については報告されていない。

本研究では、液体の注入・吸引流量を変化させて液滴の拡張・収縮実験を行った。得られた三重線の半径の測定結果から移動抵抗係数を算出し、注入・吸引流量が三重線の移動抵抗係数に与える影響を明らかにした。

2. 実験方法

接触角計（FTA1000, First Ten Angstroms, Inc）を用いて、液滴の濡れと脱濡れを模擬した拡張（以下、濡れと表記）・収縮（以下、脱濡れと表記）実験を行い、三重線の半径を測定した。濡れの実験（Fig. 1 (a)）では、 $1.0 \mu\text{L}$ の液滴を疎水性表面に置いた後、 $30 \mu\text{L}$ まで一定の流量で液体を注入した。脱濡れの実験（Fig. 1 (b)）では、疎水性表面に置かれた $30 \mu\text{L}$ の液滴から $1.0 \mu\text{L}$ になるまで一定の流量で液体を吸引した。本研究では、液体の注入・吸引流量は $0.2 \sim 1.0 \mu\text{L/s}$ とし、各流量で各過程 10 回ずつ実験を行った。三重線の半径は、動画解析ソフトウェア（DIPP-Motion, DITECT Co., Ltd.）を用いて測定した。本研究では、疎水性表面としてシリコンフィルム、液滴として蒸留水（FUJIFILM Wako Pure Chemical Corporation）を用いた。

3. 移動抵抗係数の同定手法

本研究では、数値計算で得られた三重線の半径を拡張・収縮実験で得られた三重線の半径に最小二乗法を用いてフィッティングすることで、移動抵抗係数を同定した。同定手法の詳細は文献⁴⁾に記載されている。

濡れ・脱濡れ過程における液滴の形状が球の一部であると仮定し、液滴の体積は初期の液滴の体積 v_{L0} から液体の注入・吸引流量 q だけ毎秒変化するとすれば、時間 t 経過後においては以下の液滴の体積 $v_L(t)$ の関係式が得られる。

$$v_L(t) = \frac{1}{3}\pi R(t)^3 \frac{(1-\cos\theta_d(t))(\cos\theta_d(t)+2)}{(1+\cos\theta_d(t))\sqrt{1-\cos^2\theta_d(t)}} = v_{L0} + qt \quad (1)$$

ここで、 θ_d は動的接触角（前進接触角 θ_A および後退接触角 θ_R をまとめて動的接触角 θ_d と表す）、 R は三重線の半径である。式(1)をニュートン・ラフソン法による数値計算を行うことで時間 t 経過後における動的接触角 θ_d を求めた。

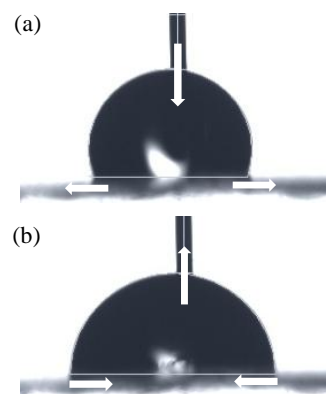


Fig. 1 Snapshots of a liquid droplet during (a) wetting and (b) dewetting in extension-contraction experiments.

液滴の濡れと脱濡れの理論である分子運動論⁹⁾では、液滴の三重線の速度 dR/dt と動的接触角 θ_d の関係は次式で与えられる。

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\gamma_L}{\zeta} (\cos \theta_0 - \cos \theta_d(t)) \quad (2)$$

ここで、 γ_L は液体の表面張力、 θ_0 は平衡接触角、 ζ は三重線の移動抵抗係数である。式(2)を差分化して式(1)から得られた時刻 t における動的接触角 $\theta_d(t)$ を代入し、時間 t をインクリメントしながら計算することで、三重線の半径 $R(t)$ を算出した。

数値計算で得られた三重線の半径を、拡張・収縮実験で得られた三重線の半径に最小二乗法を用いてフィッティングすることで、移動抵抗係数を同定した。

4. 結果

Figure 2 に濡れ過程での三重線の半径の実験結果と数値計算のフィッティング結果を示す。本研究では、実験の液滴の初期と最終地点での体積は全ての注入・吸引流量は同じであるため、注入・吸引流量が大きいほど時間は短い。

Figure 3 に(a)濡れ過程、(b)脱濡れ過程での各注入・吸引流量の移動抵抗係数の同定結果を示す。液体の表面張力 $\gamma_L = 72.75$ mN/m、前進の平衡接触角 $\theta_{A0} = 101.1^\circ$ 、後退の平衡接触角 $\theta_{R0} = 100.4^\circ$ とし、各注入・吸引流量での移動抵抗係数を同定した。移動抵抗係数の結果は各注入・吸引流量での 10 回分の平均値である。エラーバーは各注入・吸引流量での移動抵抗係数の最大値と最小値である。濡れ過程、脱濡れ過程ともに、液体の注入・吸引流量 $|q|$ が増加すると、移動抵抗係数は減少した。Blake¹⁾らは、液滴の自然濡れと二面間に存在する液滴の強制濡れの分子動力学シミュレーションを行い、両者の違いを検討した⁹⁾。その結果、強制濡れの方が自然な動的濡れよりも移動抵抗係数が小さくなった。本研究結果はこのシミュレーション結果を実験でも確認したものであると考えられる。液体内部の流れにより三重線の移動方向に力が加わるため、液体の注入・吸引流量が増加すると移動抵抗係数が減少すると考えられる。また、注入・吸引流量 $|q|$ が小さい場合、濡れ過程の移動抵抗係数と脱濡れ過程の移動抵抗係数の差は大きい、注入・吸引流量が増加すると、濡れ過程と脱濡れ過程の移動抵抗係数は同程度となった。

5. おわりに

本研究では、固体表面上に存在する液滴の動的挙動を理解するために、液体の注入・吸引流量を変化させて液滴の拡張・収縮実験を行い、各注入・吸引流量での移動抵抗係数を算出した。濡れ過程、脱濡れ過程ともに、液体の注入・吸引流量が増加すると、三重線の移動抵抗係数が減少した。液体を注入・吸引することで発生する液体内部の流動の影響により、液体の注入・吸引流量が増加すると、三重線の移動抵抗係数が減少すると考えられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 24K07289, 24K00794 の支援を受けたものである。

文献

- 1) T. D. Blake & J. M. Haynes: Kinetics of Liquid/Liquid Displacement, *Journal of Colloid Interface Science*, 30, 3 (1969) 421.
- 2) C. Saito, S. Nishimoto, T. Ishikawa, K. Yanagisawa & H. Matsuoka: Characteristics of Contact Line in Dynamic Wetting and Dewetting Processes on a Hydrophobic Surface, *Tribology Online*, 18, 2 (2023) 78.
- 3) C. Saito, T. Ishikawa, K. Yanagisawa & H. Matsuoka: Analysis of Dynamic Wetting and Dewetting on a Hydrophobic Surface Using Molecular Kinetic Theory, *Tribology Online*, 19, 4 (2024) 308.
- 4) 斎藤・石川・柳澤・松岡：固・液・気三重線の移動抵抗係数の新しい同定手法の提案，日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2024 春 東京 予稿集 (2024)。
- 5) T. D. Blake, G. Doyen, J.-C. Fernandez-Toledano & J. De Coninck: Forced Wetting and Hydrodynamic Assist, *Physics of Fluids*, 27, 11 (2015) 112101.

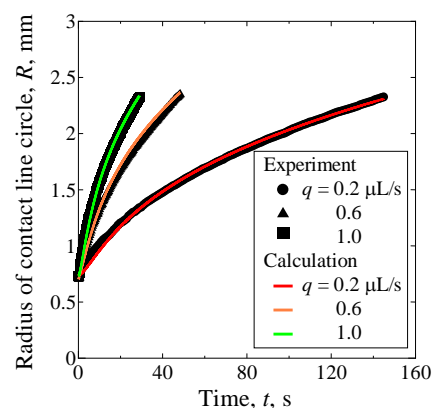


Fig. 2 Fitting result of radius of contact line circle during wetting.

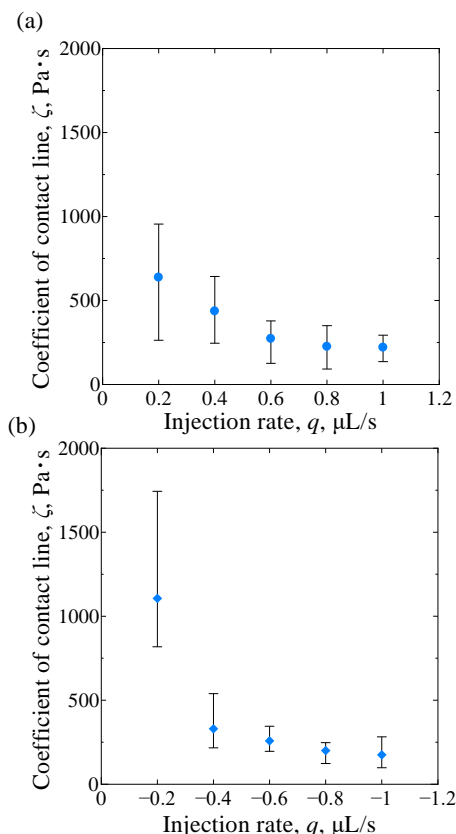


Fig. 3 Results of coefficient of contact line friction for each injection rate during (a) wetting and (b) dewetting