

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03860

研究課題名（和文）摩擦学に基づく固体-液体間の濡れ現象の解明

研究課題名（英文）Study on wetting phenomena between solid and liquid on the basis of tribological concept

研究代表者

米本 幸弘 (Yonemoto, Yukihiro)

熊本大学・大学院先端科学研究部（工）・准教授

研究者番号：70516418

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、液体と固体間の付着性を幾何形状ではなく、固体-固体間に働く摩擦力の概念に着目した新たな観点に基づく濡れ性モデルの構築を試みた。平行平板間の液滴の押し込み実験を行うことで、液滴の濡れ挙動の観察を行った。その際、基板にフォースゲージセンサーを取り付けることで、液滴に作用している力の計測を行った。実験結果を基に、理論検討を行い、液滴のラプラス圧や接触線に作用する表面張力の影響が重要であることが分かった。特に、接触線の運動は、力がある値に到達するまでは静止した状態を示し、摩擦に似た挙動を観察することができ、新たな観点から濡れ性を検討する必要性が明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体面上液体の濡れ挙動は主に接触角により特徴づけられ、特に接触線の運動を伴うような動的濡れ性では、接触線の移動速度と接触角を関係づけた経験的な式を用いることが多いため、その用途も限定的となる。本研究から、接触線と固体面上の相互作用には摩擦現象で見られるような挙動の重要性が明らかとなった。接触線の移動速度を摩擦の概念を取り入れた力学的な観点から決定することで、動的濡れ挙動の理解のための新たな解釈が可能となるため、学術的に意義深いものと考えられる。また、得られた知見を、表面が粗い物体などに発展させることで、工業的な用途も広がるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research, the development of dynamic wetting phenomena was tried on the basis of tribological concept aiming for the understanding the wettability without geometrical approach. Droplet wetting behavior between parallel plated was experimentally observed. In the experiment, force exerted on the droplet was measured using force gauge sensor. The theoretical consideration was also performed on the basis of the experimental results. It was found that the Laplace pressure and the surface tension at the contact line were important factor to understand the wetting behavior. Especially, it was revealed that the contact line remained stationary condition until the force reached a certain value, which was similar to the behavior where the friction exists. From the present research, it was found that not only the conventional geometrical concept but also new concept was needed for further understanding the wetting behavior.

研究分野：混相流

キーワード：濡れ性 表面粗さ 液滴 動的濡れ性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

固体表面上を濡れ拡がる液体の動的濡れ性は、接触線(固体と液体表面が接触する線)の移動に伴い変化する接触角(動的接触角)で特徴づけられ、工学的には、主に接触線の移動速度と動的接触角を一对一に関係づけた半経験的な取り扱いが多い。本来、接触角は液体と固体表面間の付着力、液体内の流体力、液体自身が丸くなるとうする表面張力間のバランスにより決められるべきだが、接触角の値を直接用いた付着力の評価が現状となっている。そこで、本研究では、液体と固体間の付着性を、接触角のような幾何学的情報ではなく、固体-固体間に働く摩擦力の概念に着目した新たな観点に基づいて濡れ現象を理解し、より汎用性のある濡れ性モデルの構築を試みることを目的としている。固体面上液滴の複雑な濡れ現象の把握は、インクジェットプリントの品質向上、半導体プロセスでの薄膜形成や熱交換器内の二相流動の抵抗低減等の理解に重要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、動的濡れ性の解析において従来よく用いられる、接触角と接触線の移動速度を一对一に関連づける半経験的な手法ではなく、固体-固体間に働く摩擦力の概念に倣い、接触線に作用する力のバランスを考慮した新たな観点に基づく濡れ性モデルの構築を、実験・理論等の観点から行うことである。

3. 研究の方法

本研究では、固体面上液滴の複雑な濡れ性を、固体-固体間に働く摩擦力の概念から説明しうるモデルの構築を目的としている。特に、液滴に作用する力と接触線の挙動の把握は重要であるため、基礎的な実験を行うことで、液滴の動的濡れ挙動のデータを取得し、得られた実験結果を基にモデル構築の検討を行う。

例えば、固体面に衝突する液滴を想像した場合、固体面に衝突した液滴は、一旦濡れ広がった後に、液滴形状変化に伴う表面張力の影響で、再び丸くなるような運動を示す。濡れ広がる過程では、接触線が乾いた固体面を進んで行き、衝突後丸くなる過程では、接触線は液側に向かって進む。前者を前進濡れ、後者を後退濡れと呼び、それぞれ接触線や接触角の挙動は複雑である。本研究では、この前進濡れと後退濡れを再現するため、平行平板間の液滴の濡れ挙動に着目した実験を行った。具体的には、上部基板に超撥水基板を用い、下部基板に実験対象とする基板を用いた。液体には純水を用いた。図1に実験の流れを示す。上部基板は自動ステージに取り付けられており、下部基板はフォースゲージの上に設置した。図1(a)のように、下部基板表面に付着させた純水の液滴を、上部基板を下降させることで押しつぶす。所定の高さまで押しつぶした後に、しばらくの時間停止した(図1(b))。その後、図1(c)のように、上部基板を上昇させ、液滴に作用する力を解放した。この一連の流れを高速度カメラ(株式会社ナックイメーজテクノロジー製MEMRECAMHX-5)により撮影した。撮影速度は500fpsとした。

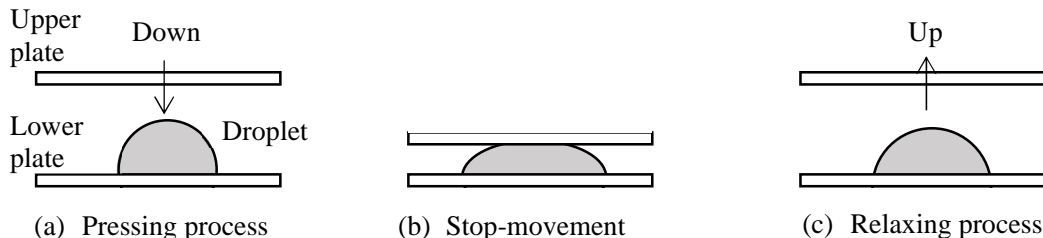


Fig.1 Experimental procedure for observation of droplet dynamic wettability using parallel plates

液滴を押しつぶし量に関しては、初期液滴の高さを基準に以下の式で定義した。

$$\alpha = \frac{h_0 - h(t)}{h_0} \quad (1)$$

式中、 h_0 は液滴の初期高さを表しており、 $h(t)$ は実験実施中の液滴高さを表す。上部基板と液滴頂点が接触した状態では、平行平板間の距離と等しくなる。

4. 研究成果

図2は下部固体基板にポリカーボネート基板(PC基板)を用いた際の押しつぶし時の様子を一例として示す。純水の体積は48.0 μ Lである。式(1)で定義される押しつぶし量 α は0.75である。上部基板の下降速度は200 μ m/sである。図3は、液滴の下部基板との接触面直径の時系列変化を表している。図3中の(a)-(d)は図2中の各状態を示している。(a)は押しつぶし開始時、(d)は上部基板の動きが停止した時である。図2より、時間の経過と共に、液滴の形状が部分球から扁平状に変化し、押しつぶされている様子がわかる。また、図3より、押しつぶし過程では液滴の接触面直径は時間に対して非線形的に増加していることがわかる。なお、(d)の状態からしばらく

く上部基板を停止させ、その後、基板を上昇させたが、図 3 中、 $d_{low}(t)$ が急激に減少している箇所がその過程に相当する。

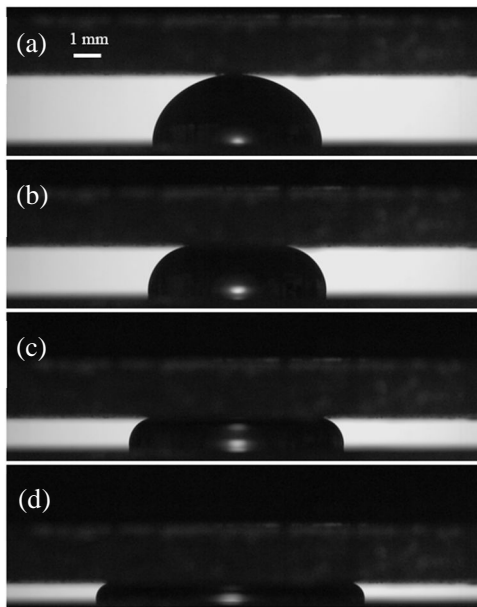


Fig. 2 Time series images of water droplet for pressing process

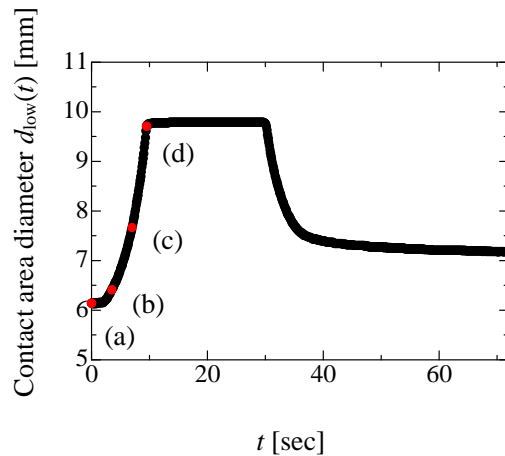


Fig. 3 Time evolution of contact area diameter on lower plate during experiment

図 4 は、式(1)で定義された液滴の押しつぶし量を変化させた際の、下部基板表面上での接触面直径の時系列変化を表している。なお、上部基板の移動開始時刻を 0 s としている。 α の値が小さいほど液滴の押しつぶし量が小さいため、接触面直径の増加割合は、 α が大きい条件に比べて、 α が小さい条件のほうが小さくなっていることがわかる。初期接触面直径に多少の違いはあるが、液滴押しつぶし時の接触面直径の増加過程は、どの条件もほぼ同じ挙動を示していることがわかる。注目すべきは、上部基板の移動開始後、しばらくした後に接触面直径の増加が始まっている点である。この挙動は、固体 - 固体間の摩擦の挙動のように、物体に作用する力がある閾値を超えるまでは運動が開始しない摩擦の物理と定性的に似ていることがわかる。また、液滴へ加えた力を緩和する過程（接触面直径が減少する過程）では、押しつぶし量の違いによって接触面直径の挙動に差が生じることがわかった。この挙動も、押しつぶし時と同様に、固体と液体間の相互作用に関して、その運動を決定づける力学的な閾値があるものと考えられる。

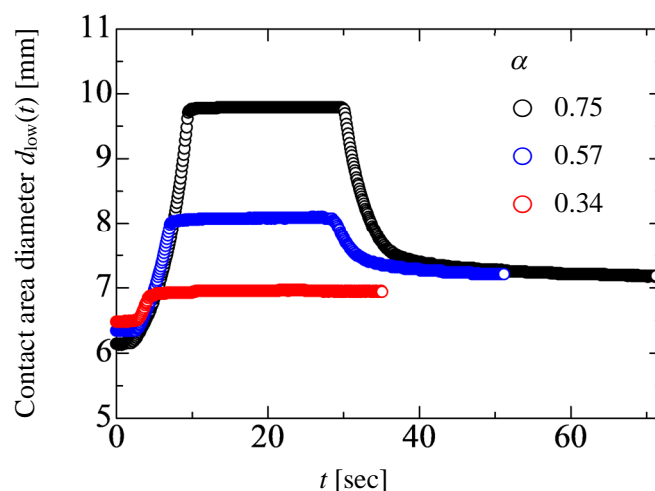


Fig. 4 Time evolution of contact area diameter on lower plate for each press condition

図 5 は、 α が 0.75 の条件における、ヤングの概念に基づいた単位接触線あたりの力を表している。黒丸及び赤丸はそれぞれ、水平方向 ($\sigma_{lg}\cos\theta$) 及び垂直方向 ($\sigma_{lg}\sin\theta$) 成分を表している。図より、水平方向成分は、0s 以降プラス値からマイナス値に変化した後、上部基板の動きが止ま

る 10s あたり以降からほぼ一定値をとっていることがわかる。一方、垂直方向成分はほぼ横ばいの値をとっていることがわかる。上部基板が上昇し始める 29s あたりでは、水平及び垂直方向どちらの成分も大きく値が変化しており、その後、液滴接触線の動きが止まるまでの過程での両者の挙動は似たものとなっていることがわかる。図 4 の接触面直径の動きと比べても、その挙動は単純ではないことから、接触角の挙動の予測は容易でないことがわかり、接触線の移動速度なども含め、より詳細な検討が必要であることがわかった。

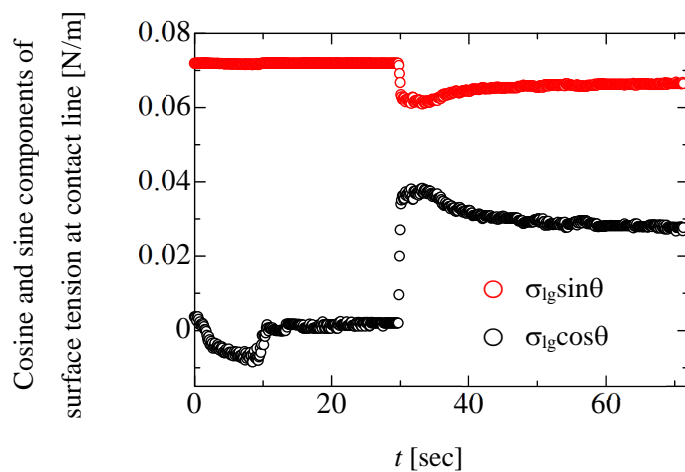


Fig. 5 Time evolution of cosine and sine components for surface tension at contact line

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yonemoto Yukihiro, Yamashita Minori, Tashiro Kanta, Kunugi Tomoaki	4. 巻 50
2. 論文標題 Estimating the number of fingers and size of ejected droplets in droplet impingement processes on solid substrates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Colloid and Interface Science Communications	6. 最初と最後の頁 100651 ~ 100651
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.colcom.2022.100651	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yonemoto Yukihiro, Tashiro Kanta, Shimizu Kazuki, Kunugi Tomoaki	4. 巻 12
2. 論文標題 Predicting the splash of a droplet impinging on solid substrates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-08852-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 増原進, 神野広樹, 米本幸弘
2. 発表標題 固体基板により押しつぶされた液滴の濡れ挙動に関する実験的研究
3. 学会等名 日本機械学会 九州学生会 学生員第42回卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------