

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420113

研究課題名(和文) 二次元界面形状測定技術を応用した落下液膜の指状不安定化現象の実験的解明

研究課題名(英文) Experimental study on the fingering instability on an incline with two-dimensional measurement technique for film surface geometry

研究代表者

伊藤 高啓 (Ito, Takahiro)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00345951

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、液膜の二次元界面形状測定手法である勾配色情報法を改良し、傾斜平板上を落下する液膜先端の形状の決定プロセスの実験的な解明に適用した。その結果、数値計算に基づく先行研究において提案されたキャピラリー(Ca)数(=粘性応力と表面張力の比)でスケールされた接触勾配を用いることで、実験における形成パターンがおおむねまとめられることが実験的にも確認された。また、不安定化時の波状接触線の根元部分の膜厚が接触勾配やCa数の影響によって変化し、そこでの接触線速度が変化することが形成パターンに大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, Color Coding Method, a simultaneous two-dimensional measurement system for the surface geometry of liquid film, was developed and applied for the investigation of the evolution process of the contact line of a liquid film falling down on an incline. It is shown that the contact slope parameter scaled by Ca number, previously proposed based on the numerical simulation, is applicable also to the present experimental condition. The formed shape of the contact line was found to be affected by film thickness at the root region of the wavy contact line, which depends on the contact slope and the Ca number.

研究分野：流体工学

キーワード：界面 接触角 接触線 指状 光学測定

1. 研究開始当初の背景

2つの流体間界面(気-液もしくは液-液界面)と固体表面の交線である接触線(図1)が固体面上を運動する際、接触線の運動が自身の進行方向に対して不安定化して接触線が指状形状となることがある。このような現象は fingering 現象(指状化現象)と呼ばれ、エネルギー機器の冷却や半導体製造プロセスにおけるコーティングの品質などに重大な影響を及ぼす。

これまでに液体の固体面への濡れ性が良いときには比較的指の付け根部が運動しやすく、全面が濡れやすいことは実験的にも知られている[1]が、そのプロセスは未だ明確にはなっておらず、指状界面の発達の予測には困難が伴っていた。

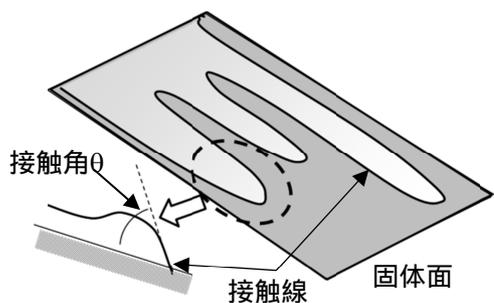


図1 落下液膜の fingering

2. 研究の目的

上記の背景から、本研究ではこれまでの実験では定性的にしか示されてこなかった指状界面の発達パターンへの影響を数値計算にて提案されているモデルに基づいて定量的に実証するとともに、パターンが決定されるメカニズムを実験的に明確にすることを目的として行った。

3. 研究の方法

(1) 概要

実験は、幅 60cm、長さ 100cm の透明アクリル流路を用いて行った。流路最上流部にはリザーバタンクを設け、タンク出口に設けたゲートを開放することによりリザーバの試験液体が流路表面を流下する。ゲート出口部分には 3mm ないし 0.5mm のギャップをもつ整流板を設け、ゲートを開く際の乱れの影響を抑えた。また、流路は表面に透明なコーティングを施すことにより、同一寸法で濡れ性の異なるものを3種類準備した。傾斜角は 4°~20°の範囲で行った。

試料液体にはエチレングリコール(EG)、グリセリン(GL)およびそれらと水の混合液体とシリコンオイル(SO)を用いた。以後、EG および GL については水との混合体積割合を、SO については動粘度をそれぞれの名称の直後につけて液種を示す。

表1には各コート条件下における流路面での上記の液体の接触角の例を示す。

測定は異なる撮影方法の2つの可視化手

法を用いて行った。ひとつは、指状化する液膜先端部の全体形状を把握ための流路上方から流路全体を撮影する。もうひとつは勾配色情報変換法を用いて界面形状を詳細に測定するものである。

表1 主な試料流体の各コート条件に対する接触角

	裸面	親水コート	撥油コート
EG	54°	14°	-
GL	37°	19°	-
SO	<3°	-	30°

(2) 界面形状測定法(勾配色情報変換法)

界面形状の詳細測定は Zhang ら[2]が提案し、申請者を含むグループで改良を行ってきた勾配色情報変換法を本研究に適した仕様にさらに改良を加えたものを用いた。勾配色情報変換法は図2に示すように流体底面からレンズ、カラーシート、白色光源を設置し、特にレンズとカラーシート間の距離をレンズの焦点距離と一致させることで界面の勾配と透過する光の色とを一対一対応させるものであり、得られた勾配を積分することにより界面形状の2次元同時測定が可能である。

本研究では大口径で短焦点のフレネルレンズを用いることで、表1に示した接触角に相当する界面勾配まで測定可能としつつ、形成が想定される finger の幅程度の測定領域を確保した。しかしながら、このような場合特に撮影領域の外周に近い領域でレンズの収差が大きな影響を及ぼす結果となった。そこで、本研究では撮影領域内の多点で複数のキャリブレーションデータを取得し、それらを補間することでキャリブレーション関数を撮影領域内の位置の関数とする手法を開発した。これにより、撮影全領域において良好な測定精度確保することが可能となった。図3に本手法により再構成された指状液膜界面先端部の例を示す。

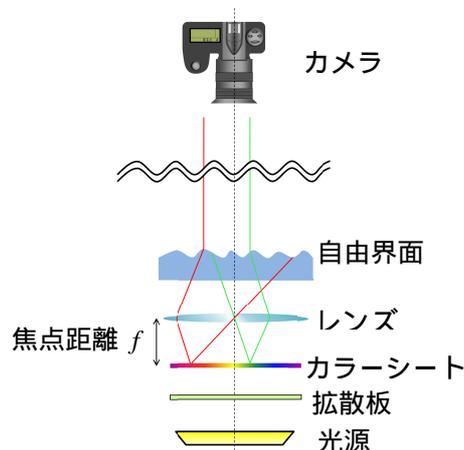


図2 勾配色情報変換法の概要

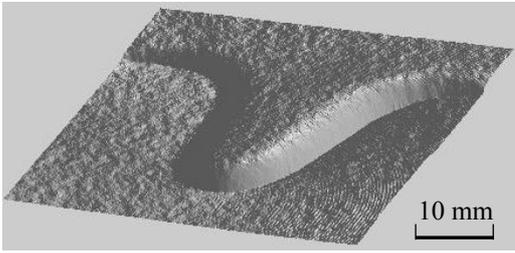


図3 再構成例

4. 研究成果

図4に観察された代表的な finger 形状を示す．流れの向きは写真中右から左へ向か打方向である．(a)はEGを用いて裸面にて観察されるもので，細い指状の流れが生じ，指の付け根部分はほとんど前進しない．一方(b)は親水面で観察されたもので，根元部分も前進する．以降(a)をリブタイプ，(b)を鋸刃タイプと称する．

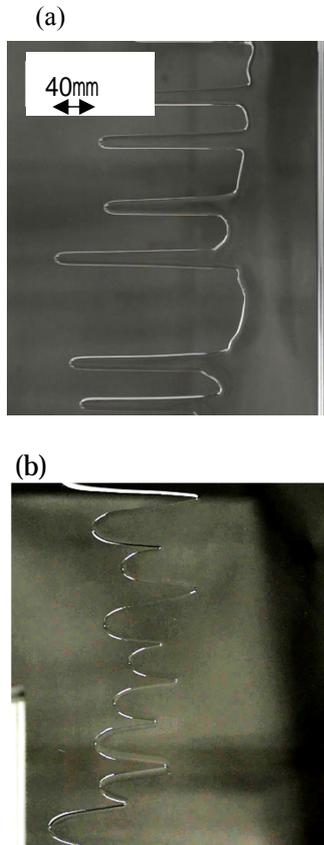


図4 指状化界面の例．液体：EG83．(a)リブタイプ（裸面） (b)鋸刃タイプ（親水コート面）

このときの液膜先端（接触線）の位置での速度の時間変化を指先端部分(Tip)と付け根部分(Trough)とで分けて示したのが図5である．なお，横軸(時間軸)の原点は界面先端が整流板を通過した瞬間とする．(a)，(b)の条件はそれぞれ図4(a)および(b)に対応する．先端速度はいずれのケースとも接触線速度は $t=1s$ ごろまで先端部，付け根部とも増加する．

そののちは先端部はさらに加速するが付け根部は減速する．特に(a)では $2s$ 以降は付け根部分の前進速度がゼロとなっており，完全に付け根部分が停止しているのがわかる．一方先端部は減速しながらも $10mm/s$ 程度の速度を持っており，指部分が時間とともに成長し続けていることがわかる．一方，(b)では $t=4s$ ごろ一旦加速し， $6s$ ごろには先端部と同じ速度となっている．このことは指部分の成長が止まっている，すなわち指先端から付け根部までの長さが変化していないことを示している．

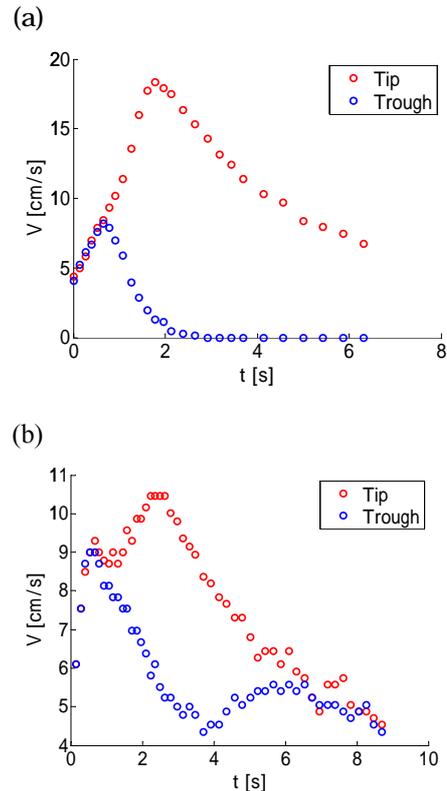


図5 代表的な接触線速度の時間変化 (a) 傾斜角 $\alpha=7^\circ$ ，EG83，裸面， $\dot{V}=250mL$ ，(b)傾斜角 $\alpha=7^\circ$ ，EG83，親水面， $\dot{V}=500ml$

このような液膜の成長過程をメカニズムを明確にするため，Moyleら[3]が数値計算に基づいて導いたモデルを用いてデータを整理した．Moyleらは接触線近傍部分において粘性応力が重力に対して支配的となる領域の長さでスケールされた接触勾配

$$C = \tan \theta / Ca^{1/3}$$

(θ ：接触角， $Ca = \mu V / \sigma$ (μ ：粘度， V ：不安定化直前の接触線速度， σ ：表面張力)) によって指状界面の先端と付け根部の速度（それぞれ V_{ti} ， V_{tr} とする）が関係づけられることを見出した．図6に本実験におけるさまざまな条件下で得られた C と $1 - (V_{ti}/V_{tr})$ の関係を示す．本実験では Moyle の数値計算結果 ($0.2 < C < 0.8$ の間で $1 - (V_{ti}/V_{tr})$ の値がゼロから 1 に変化) よりもやや大きな C の値で

1 - (V_{ti}/V_{tr})の変化が見られたが、定性的には

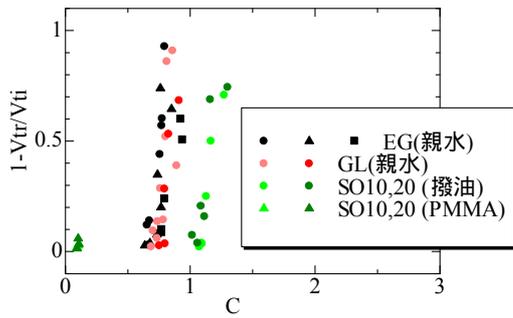


図6 接触勾配 C と接触線速度の関係。

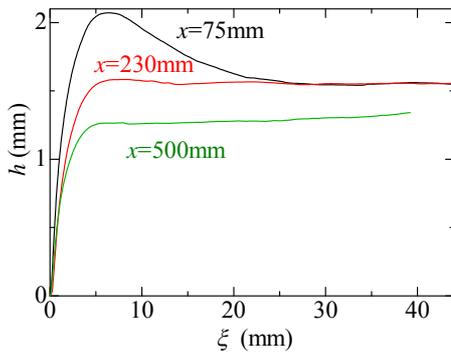


図7 代表的な谷部断面形状。xi軸は流れに平行で上流へ向かう方向，x は整流板出口からの距離。

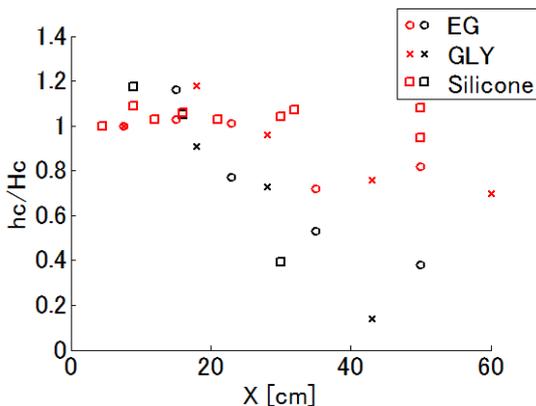


図8 リッジ後部の一定高さ部分の界面高さ。黒は 1 - V_{tr}/V_{ti} > 0.6，赤は 1 - V_{tr}/V_{ti} < 0.1 に対応。

同様の結果が得られ、接触角が小さいほど鋸刃タイプに近づくことが示された。このような液膜形状の変化に与えるメカニズムを液面厚さ変化の観点から調べた。指の先端部分では図7に示す例のように先端近傍に盛り上がり（リッジ）が形成されることがあり、一般にこのリッジが不安定化（直線状の接触線が波状並びに指状になること）に寄与しているといわれている。また、Ledesma-Aguilarらは[4]数値計算結果に基づいてリッジの大きさが形状パターンに影響を与えていると主張している。

そこで、これらのリッジとその後形成される形状パターンとの関連を調べたが、それらには関連がみられなかった。一方、付け根部の膜厚について調べたところ、図8に示すように 1 - V_{tr}/V_{ti} の値（すなわち形状パターン）との相関がみられた。接触線近傍の膜厚は接触角および Ca 数の関数であるから、図6に示した C の値は特に付け根部分の膜厚への影響を通じて界面形状パターンに影響を与えていることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- (1)伊藤高啓, 蛭田将司ら, 動的接触角に与える接触線加速度運動の影響の実験的解明, 日本機械学会論文集, Vol.80(809), FE0004 (2014). (査読有)
- (2)大宮彰, 山下雅稔, 伊藤高啓, 辻義之, 勾配色情報変換法を用いた接触線近傍界面の測定, 混相流研究の進展, 27(5), 639 (2014). (査読有)
- (3)Kato, K., Wakimoto, T., Yamamoto, Y., Ito, T., Dynamic Wetting Behavior of a Triple-phase Contact Line in Several Experimental Systems, Exp. Thermal Fluid Sci., Vol. 60, 354 (2015) (査読有)

〔学会発表〕(計3件)

- (1)Ito, T., Ohmiya, A. et al., Dynamic contact angle along a moving contact line of a liquid film, Proc. 16th Int. Symp. Flow Vis. (June/26/2014, 那覇).
- (2)Yamashita, M., Ito, T. et al., Influence of the contact line velocity on the finger formation of the liquid film expanding on an inclined plate, 68th APS-DPD meeting (November/23/2015, Boston, United States of America).
- (3)Ito, T., Yamashita, M., Nakagawa, K., Tsuji, Y., Study on the Development of Surface Geometry under Fingering Instability, ICMF-2016 (May/25/2016, Firenze (Italy))

6. 研究組織

(1)研究代表者

伊藤 高啓 (ITO, Takahiro)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00345951

参考文献

- [1]Silvi, N. and Duosan V., E. B., Phis. Fluids 28, 5 (1985).
- [2]Zhang, S., Rev. Sci. Instrum. 67, 1858 (1996).
- [3]Moyle, D. T., Int. J. Multiphase Flow 25, 1243(1999)
- [4]R. Ledesma-Aguilar et al., Phis. Fluids 20, 072101 (2008)

