

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 10 日現在

機関番号：51303

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010 ～ 2011

課題番号：22740263

研究課題名（和文） 固体のダイナミックな濡れの現象論とモデリング

研究課題名（英文） Phenomenology and Modeling for dynamical wettability

研究代表者

永弘 進一郎（NAGAIRO SHIN-ICHIRO）

仙台高等専門学校・機械システム工学科・准教授

研究者番号：20419154

研究成果の概要（和文）：ダイナミックな濡れが支配する現象としてアクリル円筒の内側を流れ落ちる細流の振る舞いを実験的に調べた。流量がしきい値を超えると、細流の経路が自発的に螺旋形の秩序構造を形成する事を見いだした。流量とパイプ内径をパラメータとし、細流の振る舞いに対する状態図を実験的に明らかにした。水平方向へ流れる細流は、“キンク”を形成して、流れの方向を変える。キンクは、表面張力と慣性力に支配され運動する。細流の振る舞いを解明するためには、このキンクの運動を理解する必要がある。

研究成果の概要（英文）：We have investigated the behavior of a rivulet flows down inside a cylinder, in which dynamic wettability plays an important role. We found that the path of the flow spontaneously creates spiral pattern in the case that the flow rate exceeds a critical value. We constructed a dynamical phase diagram for the behavior of rivulet with two control parameters: flow rate and inner diameter of cylinder. If the flow rate is sufficiently large, it is observed that fluid flows horizontal direction and forms a “kink”. Surface tension force and inertia mainly influences the kink. We consider the motion of the kink decides the pattern of rivulet.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理物性基礎

キーワード：流体物理

## 1. 研究開始当初の背景

雨の日、窓外を伝う雨水が集まり、ガラス面の上に小さな流れを形づくることある。

その細流が、川の流れのように規則的な波模様を描く現象は、細流の蛇行不安定性の問題として数十年前から研究がなされている。

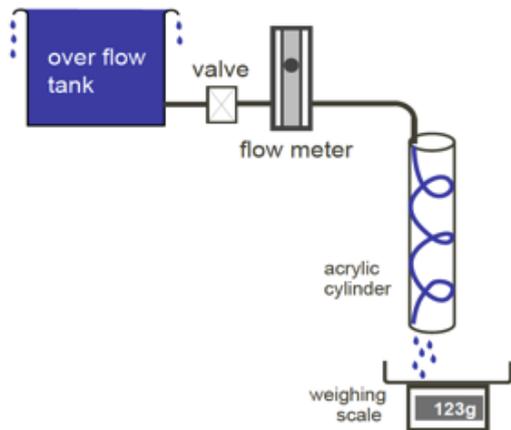


図1、実験装置概略

河川は、土壌を浸食し、地形の変化の影響を受けながら、下流へと流れる。しかし窓ガラスの例のような、浸食の起きないほぼ完全に滑らかな平板上においても、流れは蛇行や振動を示すことが実験的に知られている。流量  $Q$  が小さい場合、斜面を流れ落ちる細流は、ほぼまっすぐである。しかし  $Q$  が閾値 ( $\equiv Q_1$ ) を超えると、流れの形状は不安定化し、蛇行する。それらの閾値が、斜面の傾斜角にたいして、単純なスケーリング則に従うことなどが知られていた。

理論的には、流れの法線方向への成長率の曲率依存性や、蛇行の波長とウェーバー数の関係などが予言されている。しかしこれらの理論的成果は、流量が閾値  $Q_1$  よりもわずかに大きい領域での、線形安定性解析に限られている。実験的には、 $Q_1$  よりも大きいもう一つの閾値  $Q_2$  が存在することが知られていて、 $Q > Q_2$  では蛇行パターンが一定の形に定まらず、流れの軌道は不規則で動的に変化する。この領域での細流の挙動は、未だに open problem であった。

## 2. 研究の目的

本研究は、 $Q > Q_2$  領域での細流の動的な振る舞いの解明を目的とする。問題となる流れのレイノルズ数は  $10^2 \sim 10^3$  程度であり、細流の振る舞いを支配するのは重力、慣性力、表面張力である。表面張力は、細流の三重線（流体・固体・気体の境界線）の張力として表れるが、動的に変化する細流の三重線に対して、

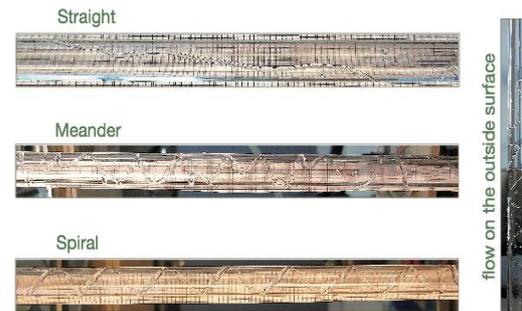


図2、シリンダ内面に生じる細流のパターン。それぞれの状態を Straight, Meander, Spiral と呼ぶことにする。重力は、図面の左から右方向。

これを予言する理論や、その現象論的な理解は、まだ知られていない。

(a)液体と基盤の接触面に働く摩擦力、および、変形する三重線の張力に対し、その現象論的な法則を探る。

(b)撥水面上での細流の動的な振る舞いを記述する一般的な数値モデルを構築し、細流の蛇行と、 $Q > Q_2$  領域での動的性質を説明する統一的な理論の創出を試みる。

## 3. 研究の方法

われわれは、動的な接触線が支配する特異な現象として、シリンダ内壁を流れ落ちる細流の振る舞いに着目した。垂直に設置したアクリルパイプ内に流量を一定値に制御した脱イオン水を注入する実験装置を開発し、細流の振る舞いを調べた。

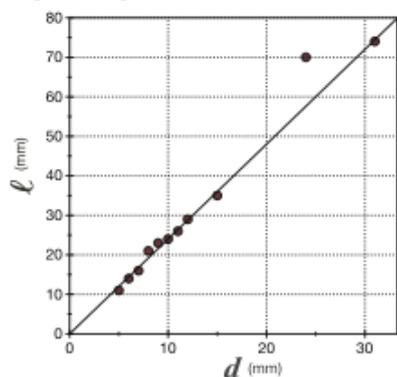
図1に実験装置の概略を示す。シリンダ上部にタンクを置き、常にあふれているように精製水を供給する。その静圧を用いて、一定流量の流れを実現する。細流の振る舞いは、シリンダ内壁の状態に非常に鋭敏であるため、実験では常に新品のアクリルパイプを用いた。

## 4. 研究成果

### (1) 三種の細流のパターン

シリンダの内壁に現れる細流のパターンを図2にしめす。流量が小さい場合は、細流はほぼまっすぐに流れ落ちるが、流量がおおきくなると、規則的な蛇行パターンが現れる。

### Spiral pitch vs Diameter



### state diagram

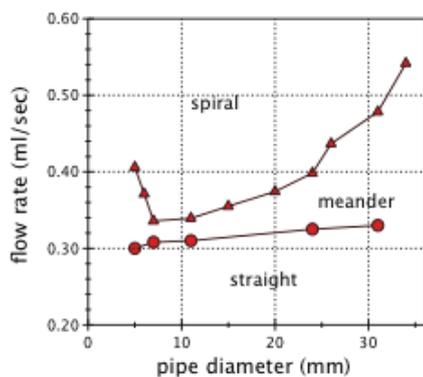


図3、スパイラルパターンのピッチとシリンダ内径の関係（上図）。流量とシリンダ内径を変化させた場合に現れる細流の相図（下図）。

さらにおおきな流量では、一定間隔の Spiral パターンが生じる。

シリンダの外側に細流を流すと、蛇行は生じるが、Spiral は洗われない事がわかった。よって、Spiral パターンの発生には、濡れと、内壁に垂直な方向に働く遠心力が重要な役割を担っている事が示唆された。

#### (2) 細流の相図

図3に Spiral パターンのピッチとシリンダ内径の関係をしめす。ピッチは内径に比例して増加する。よって、内壁を流れおちる細流は、つねに重力に対して一定の角度（この実験では40度）を保っていることが解る。

同じく図3に、流量とシリンダ内径を変化させた場合の状態図を示した。流量が

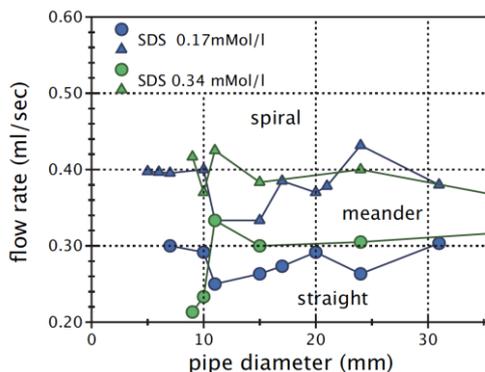


図4、界面活性剤を加えた場合の細流の相図。

0.3ml/sec. 以下の領域では、シリンダ内径に依存せず、生じる流れは直線的である。それより流量を上昇させると、蛇行パターンが現れる。Spiral パターンと Meandering パターンの境界は、シリンダ内径に依存して変化する。内径 10mm のときに、流量のしきい値がもっとも小さくなる事がわかった。

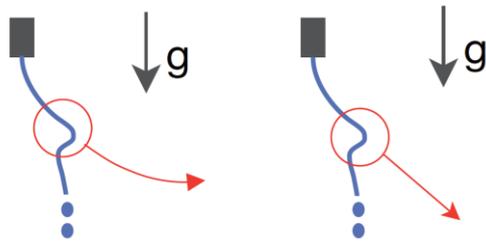
#### (3) 界面活性剤の影響

固体壁面を濡らす流体の前進接触角と後退接触角の値は、液体の表面張力によって変化する。そこで、液体にごく少量の界面活性剤を添加し、細流の相図に表れる影響をしらべた。図4に、精製水に対し、界面活性剤 SDS（ドデシル硫酸ナトリウム）をそれぞれ 0.17mMol/l と 0.34mMol/l 加えた流体の細流について、相図をしめした。

細流の状態が変化する流量の閾値について、精製水の場合でみられた内径依存性は消え、閾値はほぼ一定になった。精製水の結果と比べると、それぞれの状態の境界は、ばらつきが大きく、一定の傾向が見いだし難くなっている。これは、壁面に界面活性剤の分子が吸着する密度にばらつきが生じて、一定の傾向を持たない影響を細流に与えるためであろうと推測している。

#### (4) 細流パターンの形成過程

流量が十分に小さい場合、細流は、鉛直に流れ落ちる状態が安定である。しかし流量が上昇するにつれ、慣性力によって、細流軌道の小さなゆらぎや凹凸が成長し、細流の軌道



→は移動方向を表す

図5、円筒内壁における、細流のパターンの形成過程で生じる“kink”の振る舞い。流量が小さいときは左図のように曲線を描いて移動するが、流量が閾値より大きいときは、右のように直線的に移動する。

は複雑になる。細流の振る舞いを観察した結果、細流パターンの形成について、図5に示したような“キンク”が重要な役割を担っている事が解った。キンクの形成時には、その曲率小さく、遠心力をうけて徐々におおきくなりながら移動する。表面張力はキンクの曲率の成長を抑える方向に働くので、キンクの曲率は、ある一定値に達すると、それ以上大きくならない。しかし、流量が十分に大きい場合には、キンクは慣性力に駆動されて、運動をつづけ、下流方向へ移動していく。**Meandering** パターンが形成されるときは、キンクは、図5の左に示した曲線の方法に移動する。しかし、**Spiral** パターンが形成されるときは、キンクは直線的に移動する。この細流の振る舞いを解明するためには、このキンクの運動が、濡れの接触角や表面張力、細流の流量に対してどのように振る舞うかを理解する必要があると考えている。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件) 査読有り

- ① H.Nakanishi, S.Nagahiro, N.Mitarai, “Fluid Dynamics of a Dilatant Fluid” *Physical Review E*, **85**, 011401(2012)

[学会発表] (計4件)

- ① S.Nagahiro, “Instability of rivulet inside vertical pipe”, International

symposium on Complex systems (Dec. 2011)

- ② 永弘進一郎、中西秀、御手洗菜美子、ダイラタント流体の数値シミュレーション、日本 MRS 材料科学における非線形レオロジー (2011年12月)
- ③ 永弘進一郎、中西秀、御手洗菜美子ダイラタント流体の数値シミュレーション、日本物理学会秋季大会 (2011年9月)
- ④ 永弘進一郎、中西秀、御手洗菜美子ダイラタント流体の粒子法シミュレーション、日本物理学会秋季大会 (2010年9月)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

永弘進一郎 (NAGAIRO SHIN-ICHIRO)

仙台高等専門学校 機械システム工学科  
准教授

研究者番号 : 20419154