

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：37112

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17723

研究課題名(和文) 滴の変形現象に関する実験的研究-非平衡系での界面現象の理解を目指して-

研究課題名(英文) Experimental study of a deformation of a droplet

研究代表者

下川 倫子 (SHIMOKAWA, MICHIKO)

福岡工業大学・工学部・助教

研究者番号：80554419

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)：粘性流体中を沈降する液滴は沈降過程で自発的に分裂する。誰でも簡単にできる身近な現象であるにもかかわらず、沈降しながら形や大きさが変化する非定常系であるため取り扱いが困難であり、分裂を促す機構は明らかになっていなかった。我々は液滴の分裂を促す渦輪の不安定性の起源を知るため、不安定化波長を実験で測定した。この不安定化波長はレイリー・テイラー不安定性の成長率が最大になる波長とよく一致していたため、レイリー・テイラー不安定性が渦輪の不安定化において重要な役割を果たすことが分かった。

研究成果の概要(英文)：When a droplet falls into a viscous solution, the droplet breaks up spontaneously in the falling process. It was reported that the droplet deformed to a vortex ring and the instability of the vortex ring led to the breakup of the droplet. The origin of the instability, however, had not been clarified. In order to know the origin of the vortex instability, we investigated wavelengths of the instability in experiments. The wavelengths agreed with the wavelengths of Rayleigh Taylor instability, obtained from a numerical simulation. Thus, we considered that Rayleigh Taylor instability played an important role for the instability of the vortex ring.

研究分野：パターン形成

キーワード：レイリーテイラー不安定性 渦輪 分裂回数 モード選択

1. 研究開始当初の背景

空を見上げると見える周期的な波状の雲やみそ汁の表面にあらわれる対流構造、雨の日にゆるい斜面を流れる水の先端の段々模様といった流体の不安定性に起因した現象は身近にあふれている。流体の不安定性に関する研究は、基礎物理はもちろんのこと、大気や海洋の流れなどの地球物理分野や機械・化学工学といった工学分野など多岐に渡る。多くの分野で流体の不安定性に起因した現象が共通して研究されていることから、流体の不安定性は自然現象を理解する上で重要な位置を占めている。

二流体の界面で起こる不安定現象の代表的な例として、レイリー・テイラー不安定性が挙げられる。レイリー・テイラー不安定性とは、密度の異なる二流体が層構造になっているとき、上層にある流体の密度が下層の流体より大きい場合において二流体の界面で擾乱が起こり、界面が不安定化する現象のことを言う。天井に濡れた水の層がくっついてある時に水の層と空気層の界面で起こる不安定現象は身近に観察されるレイリー・テイラー不安定性の例である。天井にくっついてある水は重力によって地面に向かって落ちようとする一方、空気と水の界面での表面張力によって鉛直下向きの揺らぎは抑えられる。重力によって水が落ちようとする挙動と落ちるのを抑制する表面張力の効果の競合により、水と空気の界面のゆらぎに関して成長率が最大になる波数モード k_c が存在し、ゆらぎが発生した直後においては k_c のモードを持つ界面の擾乱が選択される。このような揺らぎ発生直後の界面の不安定性に関しては線形安定化解析によって、界面不安定性を特徴づける不安定化波数 k_c などが導かれる。一方、時間が経つと、二流体界面の形状は大変形を起こす。このような非定常な非平衡状態における二流体界面での不安定現象は取り扱いが難しく、非平衡界面現象を取り扱うための統一的手法の確立が望まれている。

2. 研究の目的

我々は密度の異なる二種類の可溶性粘性流体を用い、重力不安定性に起因した滴の分裂現象についての実験的研究を行った。高密度かつ高粘度の流体の液滴を低密度かつ低粘度流体の中で沈降させると、沈降過程で液滴は渦輪に変形し、自発的に分裂する。この現象は100年以上前に報告されており、液滴の分裂は渦輪の不安定性によることが観察事実から考えられてきた。だれでも簡単にできる実験ではあるが、100年以上たった今も、液滴の分裂を促す渦輪の不安定性の起源や液滴の分裂個数を決定づける物理量は明らかになっておらず、未解決な問題が多く残されている。その理由として、液滴の大きさ、形、沈降速度が変化する非定常な沈降過程での不安定化現象であることが挙げられる。

非定常な系で起こる渦輪の不安定化の起

源を実験的研究から示し、いまだ解決していない液滴の分裂現象のダイナミクスを明らかにすることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

実験で使用した溶液は硫化鉄()水溶液とグリセリン水溶液である。密度の大きな硫化鉄水溶液は滴溶液として、密度の小さなグリセリン水溶液はベース溶液として使用した。滴溶液の密度は硫化鉄()水溶液の溶解量を変えることでコントロールできる。実験装置を図1に示す。滴の半径はシリンジポンプに装着したチューブのサイズを変更することで、0.8mm から 2.0mm の範囲でコントロールした。粘度はポリエチレングリコールを加えることで、滴溶液とベース溶液の粘度が等しくなるようにし、実験を行った。溶液への混合によって、密度はほとんど変化しないが粘度は大きく変化する性質をポリエチレングリコールは持つ。内径 7.0cm、高さ 14cm のガラスビーカーはベース溶液(グリセリン水溶液)で満たされ、内部の流れがなくなるよう 10 分間放置し、ベース溶液の界面 8.0mm 上方から滴溶液を滴下する。ビーカーの下方にデジタルビデオカメラを設置し、滴の沈降過程での水平方向の変形を撮影した。

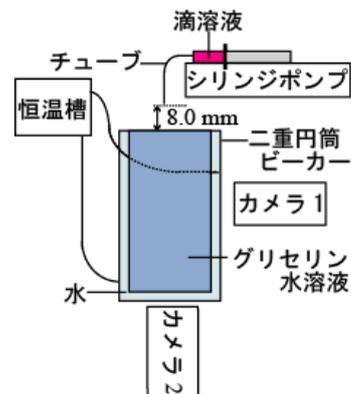


図1 実験概要

4. 研究成果

4.1 沈降する液滴の形状の時間変化

沈降する液滴の分裂に至るまでの時間変化の観察結果を示す。図 2(a)-(f)は実験容器側面(図 1:カメラ 1)から、図 2(a')-(h')は実験容器の底面(図 2:カメラ 2)からの撮影によって得られた画像であり、液滴の鉛直方向と水平方向の変形に関する時間変化を示している。初め、球形をしていた液滴は沈降過程で平らな形状に変形した後(図 2(a)-(c))、鉛直方向に垂れ下がる(図 2(d),(e))。この鉛直方向の垂れ下がりには渦輪の不安定性による結果であり、その後、液滴は分裂する(図 2(f))。

次に、水平方向の液滴の時間変化に着目する。初め、球形だった液滴は中央に穴のある円形リングに変形する(図 2(a')-(c'))。同時刻の液滴の鉛直方向の形状を示す図 2(c)と水平方向の形状を示す図 2(d)から、液滴は渦輪に変

形していると言える。渦輪の半径は時間とともに増加し、やがて円周方向の渦輪の変形が起こる(図 2(b')-(e'))。これらの渦輪の形状変化は液滴(渦輪)の鉛直方向の変形に伴うものであることが図 2(c)-(f)と図 2(d')-(g')の比較から分かる。時間とともに形状の揺らぎは増幅し(図 2(d')-(g'))、ほぼ同体積の二個の液滴に分裂する(図 2(h'))。これらの結果から渦輪の不安定化が液滴の分裂現象にとって重要であると言える。

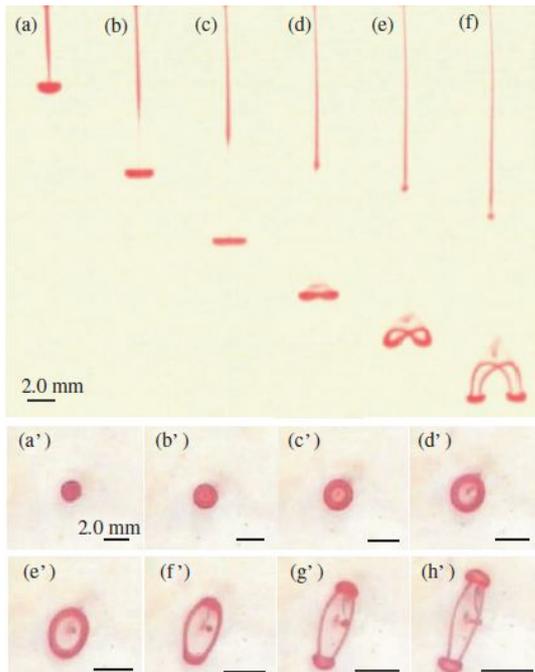


図 2 沈降する液滴の時間変化。(a)-(f)液滴の鉛直方向の変形と(a')-(h')水平方向の時間変化。液滴を滴下してから(a)1.0 s, (b)2.1 s, (c)3.1 s, (d)4.1 s, (e)5.0 s, (f)6.1 s, (a')0.5 s, (b')1.0 s, (c')2.0 s, (d')3.0 s, (e')4.0 s, (f')5.0 s, (g')6.0 s, (h')7.0 s のスナップショット。M. Shimokawa *et al.*, Phys. Rev. E **93**, 062214(1)-(6) (2016).から引用。

4.2 渦輪の不安定化波長の測定

時間 t での液滴の厚み $D(t)$ と液滴の幅 $L(t)$ を測定した。図 3(a)はカメラ 1(図 1)の位置から、図 3(b)はカメラ 2(図 1)から撮影した動画を解析して得られたものである。図 3(a)を見ると分かるように、 $D(t)$ は $t < t_c$ では減少し、 $t = t_c \sim 1.58$ s で最小値 $D(t_c) = D_c = 1.3$ mm をとる。その後、 $t > t_c$ で $D(t)$ は増加しつづけ、やがて液滴は分裂する。一方、水平方向の液滴の直径 $L(t)$ は時間とともに増加し続ける(図 3(b))。 t_c での渦輪の直径は $L(t_c) = L_c = 4.6$ mm であった。

次に、 $D(t)$ が最小値をとる t_c で何が起きているか確認するため、我々は水平方向の液滴形状の内接円と外接円の半径 R_{in} と R_{out} の比 $C(t) = R_{in}/R_{out}$ の時間変化を調べた。 $C(t) = 1$ は真円を、 $C(t) < 1$ は液滴が歪な形をしている

ことを意味する。図 3(c)を見ると分かるように、 $t \sim t_c$ で $C(t) \sim 1$ から減少し始める。これは、 $t \sim t_c$ での鉛直方向の渦輪の変形により、円周方向にも渦輪の変形が促されることを意味する。このことから、我々は t_c を不安定化が起き始めた時間と見なし、図 3(b)で得られた L_c と液滴の分裂個数 m を用い、渦輪の不安定化波長 λ を見積もった。これは分裂を引き起こす渦輪の鉛直方向の揺らぎの波長を意味している。

得られた λ と D_c の関係を示した結果が図 4 の+である。図 4 を見ると分かるように、 λ は D_c とともに増加しており、レイリー・テイラー不安定性の計算結果(及び実線)とよく一致していた。以上のことから、レイリー・テイラー不安定性が渦輪の不安定化において重要な役割を果たすことが分かった。

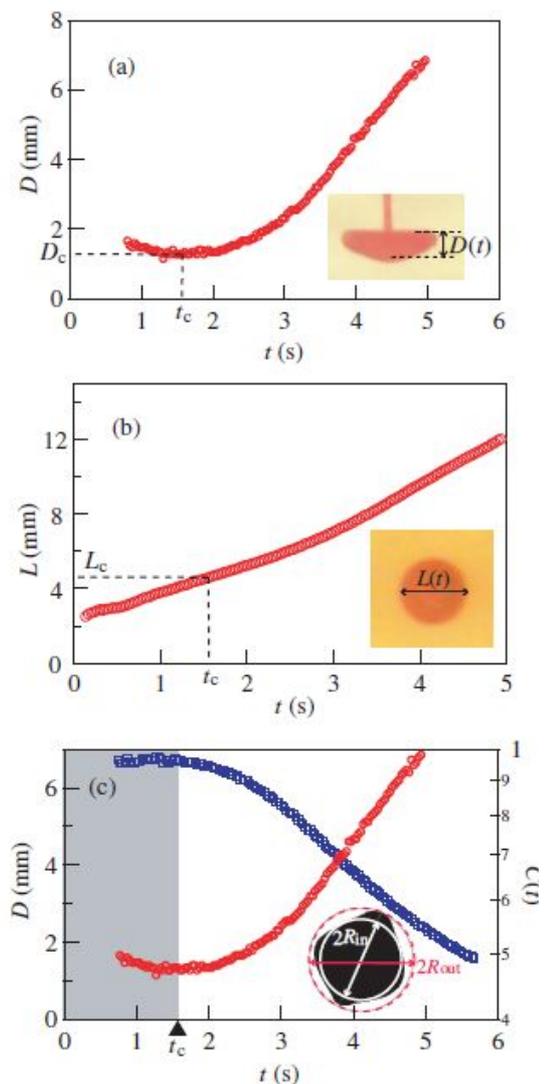


図 3 二流体の粘度 $10.2 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 、液滴半径 1.5 mm での実験で得られた(a)液滴の厚みの時間変化 $D(t)$ 、(b)液滴の直径の時間変化 $L(t)$ 、(c)水平方向の液滴の内接円 R_{in} と外接円 R_{out} の比 $C(t) = R_{in}/R_{out}$ の時間変化と $D(t)$ の関係。 $t = 0$ は液滴が沈み始めた時の時間。M. Shimokawa *et al.*, Phys. Rev. E **93**, 062214(1)-(6) (2016).から引用。

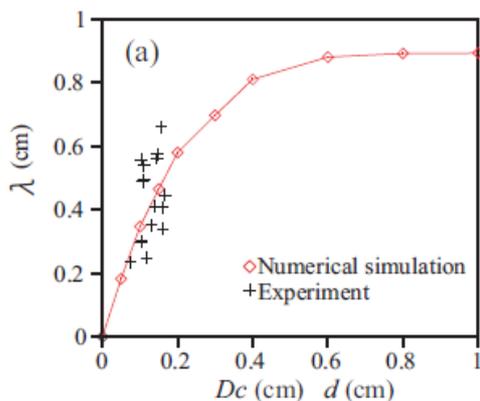


図4 渦輪の厚み D_c と渦輪の不安定化波長 λ の関係及びレイリー・テイラー不安定性での上層の高密度流体の厚み d と二流体界面でのゆらぎの波長 λ の関係. 実験結果は+で示し, 横軸は D_c に対応する. 計算結果は \diamond で示し, 横軸は d に対応する.

M. Shimokawa *et al.*, Phys. Rev. E **93**, 062214(1)-(6) (2016). から引用.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

1. 下川倫子

『自然がつくるラテ・アート』(査読無)
混相流, Vol. 32, No. 1, 2018.

2. 下川倫子, 坂口英継 (査読有)

『粘性流体中を沈降する液滴の分裂と変形』
日本物理学会誌, 第72巻 第8号 pp. 570-575, 2017.

3. Michiko Shimokawa, Hikaru Yoshida, Takumi Komatsu, Rena Omachi, and Kazue Kudo. (査読有)

『Emergence of wrinkles during the curing of coatings』
Gels—Open Access Journal of Physical and Chemical Gels—, Vol. 4, pp. 41 (1-13), 2018.

4. Michiko Shimokawa, Ryosei Mayumi, Taiki Nakamura, Toshiya Takami, and Hidetsugu Sakaguchi. (査読有)

『Breakup and deformation of a droplet falling in a miscible solution』
Physical Review E, The American physical society, Vol. 93, pp. 062214(1)-(6), 2016.

[学会発表](計7件)

1. 中島卓哉, 下川倫子, 坂口英継

『液滴が自発的に形成する二重渦輪』,
第27回非線形反応と協同現象研究会
(2017.12)

2. 中島卓哉, 下川倫子, 坂口英継, 『液滴の分裂を促す不安定化モード』 研究会「第4回非線形現象の捉え方」 (2017.11)

3. Michiko Shimokawa and Hidetsugu Sakaguchi.

『Breakup of a falling droplet in miscible viscous fluid』
IUMRS-ICAM 2017, (2017.8).

4. 下川倫子, 坂口英継

『粘性流体中を沈降する液滴の分裂モード』,
日本物理学会 (2016.9)

5. Michiko Shimokawa, Toshiya Takami, and Hidetsugu Sakaguchi.

『Origin of Instability derived from breakup and deformation of a droplet falling in miscible solution』
STATPHYS 26, July 18-22, 2016.

6. Michiko Shimokawa and Hidetsugu Sakaguchi.

『Breakup and deformation of a falling droplet in a miscible solution』
Mini-symposium on cooperative phenomena in nonequilibrium systems, March 4, 2016.

7. Michiko Shimokawa and Toshiya Takami.

『Deformation and breakup process of a droplet』
Daynamic days Europe (DDEU 2015),
September 6-10, 2015

[図書](計0件)

[産業財産権]

○出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

下川 倫子 (SHIMOKAWA MICHIKO)

福岡工業大学・工学部・助教

研究者番号：80554419

(2)研究分担者

なし ()

研究者番号：

(3)連携研究者

なし ()

研究者番号：

(4)研究協力者

なし ()