

## 沈降する液滴の分裂個数に関するモード選択

下川倫子<sup>1</sup>, 坂口英継<sup>2</sup>

<sup>1</sup>福岡工業大学工学部, <sup>2</sup>九州大学総合理工学府

### 1. はじめに

空から降ってくる雨粒は空気中を落下する中で複数個の小さな雨粒に自発的に分裂する。界面張力差に起因した圧力変化により、滴の変形が促され、分裂することから、界面張力の存在が雨粒の分裂においては重要であることが報告されている<sup>1)</sup>。

一方、界面張力が存在しない可溶性の二流体を使った実験においても、粘性流体中を沈降する滴は自発的に分裂する<sup>2,4)</sup>。二流体間の界面張力は存在しないものの、沈降過程で形成された渦輪は重力不安定性により不安定化し、滴の分裂が起こる<sup>5)</sup>。分裂を引き起こす要因については様々な条件で研究されているものの滴の分裂個数に関しては二流体の粘性が異なる特殊な条件での実験のみが報告されており、普遍的な理解は十分になされていない。そこで、我々は様々な条件下での分裂個数の確率密度分布を調べ、得られた実験結果から、分裂個数を決定する物理要因を議論する。

### 2. 実験方法

実験で使用した溶液は硫化鉄(III)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(III)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<sup>6)</sup>。内径 7.0cm、高さ 14cm の

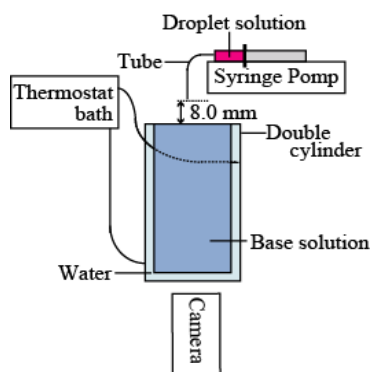


図1 実験設定

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。

### 3. 実験結果

滴の水平方向の変形をビーカー下方から観察したところ、分裂過程で特異点を持つ多角形に滴が自発的に変形する様子が観察された(図2)。多角形の角数は滴の分裂個数と一致している。分裂の個数を以下ではモード  $m$  と呼ぶ。モード数は滴の体積が大きくなれば増加傾向を示し、粘性が高くなれば減少傾向を示す。また、二流体の密度差の増加とともにモード数は増加した。次に、 $r = 2.0 \text{ mm}$ ,  $\mu = 10.2 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  の 50 回の実験で得られた出現確率密度分布  $p(m)$  を図3に示す。図4を見ると分かるように、ピーク値は  $m = 5$  であるが、出現モードは  $2 \leq m \leq 8$  の広範囲に分布する。そこで、出現確率密度分布から得られるモード数の平均値  $\langle m \rangle$  を用いて、実験結果を整理する。

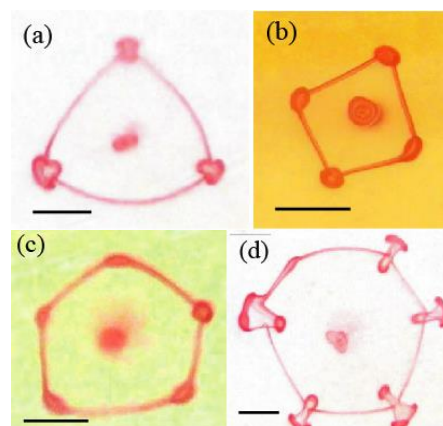


図2 水平方向の変形

(a)  $m = 3$ , (b)  $m = 4$ , (c)  $m = 5$ , (d)  $m = 6$

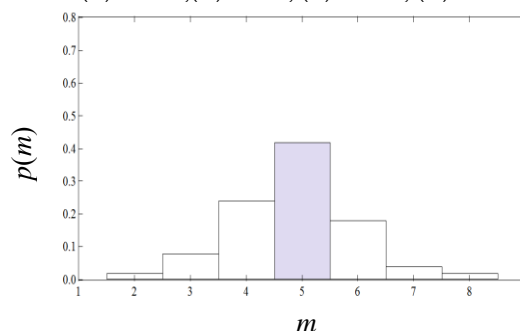


図3 モード数  $m$  に関する出現確率密度分布  $p(m)$

#### 4. 考察

分裂個数のモード選択について考える。本実験の現象はブシネスク近似を仮定すると、以下の連立偏微分方程式で表現できる<sup>5)</sup>。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla)U = -\frac{1}{\rho_0} \nabla P + \nu \nabla^2 U - \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} g e_z. \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (U \cdot \nabla)\rho = D \nabla^2 \rho. \quad (2)$$

$U$ は速度、 $\nu$ は動粘度、 $\rho_0$ はベース溶液の密度、 $\rho$ は任意の位置での流体の密度、 $P$ は圧力、 $D$ は拡散係数を示す。位置  $x$ 、速度  $U$ 、時間  $t$ 、圧力  $P$  に関して、以下のルールに従い、(1)と(2)を無次元化する。;

$x/r \rightarrow x'$ ,  $Ur/\nu \rightarrow U'$ ,  $t/(r^2/\nu) \rightarrow t'$ ,  $P/\rho_0(\nu/r)^2 \rightarrow P'$   
無次元化によって得られた式が(3), (4)である。

$$\frac{\partial U'}{\partial t'} + (U' \cdot \nabla')U' = -\nabla' P' + \nabla'^2 U' - G \rho e_z. \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t'} + (U' \cdot \nabla')\rho = \frac{1}{S} \nabla'^2 \rho. \quad (4)$$

(3), (4)式の  $G$  と  $S$  は  $G = (\Delta\rho/\rho_0)(r^3/\nu^2)g$ ,

$S = \nu/D$  を意味する。ここで、 $\Delta\rho$ は二流体の密度差を示す。物理量  $G$  を用いて、分裂モードの平均値  $\langle m \rangle$  を整理する。 $\langle m \rangle$  は出現確率密度分布(図 3)から見積もった。

図 4 は  $G$  と  $\langle m \rangle$  の関係を示し、二流体の密度差  $\Delta\rho$ 、粘度  $\eta$ 、滴の半径  $r$  に対する依存性、また二流体の粘度が異なる場合の実験結果を重ねて、プロットし

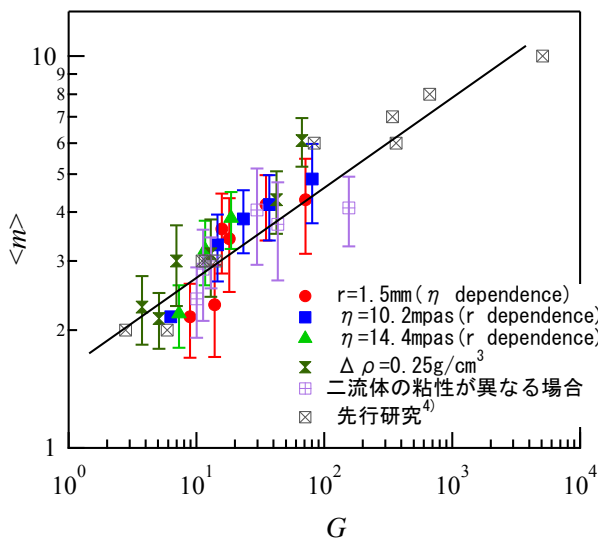


図 4  $G$  と  $\langle m \rangle$  の関係

たものである。図 4 を見るとわかるように、二流体の粘度、密度差、滴の体積、二流体間の粘度差に依存せず、分裂モード  $\langle m \rangle$  は  $G$  でスケールされている。

ここで、 $G$  の意味について考えてみよう。前述したように、 $G$  は  $(\Delta\rho/\rho_0)(r^3/\nu^2)g$  であり、重力による駆動力と粘性散逸の比である。以上のことから、重力による滴の沈降現象と沈降中の流体間の粘性散逸の競合が分裂モードの決定において重要であるといえる。

#### 5. まとめ

本研究は滴の分裂現象における分裂モードを決定する物理要因を知ることを目的とし、分裂モードに関する出現確率密度分布を実験で定量的に調べた。分布から得られる分裂モードの平均値を

$G = (\Delta\rho/\rho_0)(r^3/\nu^2)g$  で整理したところ、密度依存性、滴半径依存性、粘度依存性の実験結果において、よく一致していた。このことから、重力による滴の沈降現象と沈降中の流体間の粘性散逸の競合が分裂の個数を決定しているといえる。

本実験では(3)式が与える物理量  $G$  を用いて、分裂個数のモードについて議論した。しかし、(4)式が与える無次元量  $S$  に関する議論がなされていない。拡散が分裂モードの選択に与える影響について議論することが今後の課題である。

#### 参考文献

- 1) E. Villermaux and B. Bossa, Nature Physics **5**, 697 (2009).
- 2) J. J. Thomson and H. F. Newall, Proc. R. Soc. London **39**, 417 (1885).
- 3) F. T. Arcchi, *et al.*, Europhys. Lett **9**, 333 (1989).
- 4) S. Residori, *et al.*, Eur. Phys. J.: Spec. Top **146**, 357–374 (2007).
- 5) M. Shimokawa, *et al.*, Submitted to PRE.
- 6) M. Shimokawa and S. Takami, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 44001 (2014).