

研究種目： 基盤研究(C)  
 研究期間： 2006～2008  
 課題番号： 18540367  
 研究課題名（和文） 液滴生成時の界面分裂現象のスケーリング則とその遷移過程の解明  
 研究課題名（英文） Scaling and Its Transition of Rupturing Interfaces during the Formation of Liquid Drops  
 研究代表者  
 本間俊司(HOMMA SHUNJI)  
 埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授  
 研究者番号： 90219246

研究成果の概要：液滴の生成は自然現象として観察されるだけでなく、燃焼や蒸発など産業のあらゆる分野で応用されている。この現象は表面張力の作用によるが、その生成機構は完全に理解されているわけではない。例えば、生成する液滴は人為的に制御しない限り幅広い液滴径分布をもつが、何がその分布を決定するかを明らかにすることは一般に容易ではない。本研究では、界面が断裂して液滴が生成する直前の界面形状のダイナミクスに注目し、そのスケーリング則の遷移過程を数値シミュレーションによって検討した。また、二つの液滴生成機構、Dripping と Jetting の遷移過程についても同様に検討した。その結果、有限 Re 数のスケーリング則は  $Re \rightarrow 0$  のスケーリング則に遷移することを確認した。また、Dripping と Jetting の遷移は、We 数と Ca 数で整理できることを確認した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	500,000	0	500,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	510,000	2,710,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：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

液滴が生成する現象は日常至るところで観察される。自然界においては、滝や海岸に打寄せる波による飛沫、家庭においては、蛇口から滴る水滴がその例である。また、液滴生成現象は産業界においても非常に重要な役割を果たしている。燃焼装置における液体燃料の噴射、農薬の散布、インクジェットプリンターなどがその応用例である。

液滴の生成は表面張力の作用によるが、その生成機構は完全に理解されているわけ

はない。例えば、生成する液滴は人為的に制御しない限り幅広い液滴径分布をもつが、何がその分布を決定するかを明らかにすることは一般に容易ではない。最も単純な液滴生成は、軸対称なジェットから分裂する場合であるが、この場合でもサテライトと呼ばれる小さな液滴が大きな液滴の間に生成し、その生成機構は未だ完全に解明されていない。

図1に液滴分裂時の界面形状の模式図を示す。分裂点を境に対称な界面形状は非現実的であり(図1左)、実際は分裂する液滴側

が平坦である非対称な形状を示す (図1 右)。そのため、液滴後方に細長い液糸が生じ、その両端が分裂することによってサテライトが生成する。これまでの研究から分裂点近傍の界面形状は自己相似的に運動することが明らかとなっており、界面位置および移動速度に関してスケーリング則が見出されている。



図1 液滴生成時の界面形状  
左：対称な分裂 (観察されない)  
右：非対称な分裂 (観察される)

## 2. 研究の目的

本研究では、軸対称のジェットから液滴が分裂する場合に注目し、特に分裂点近傍の界面運動のダイナミクスを明らかにすることを目的とする。対象とする系は不混和性の二流体系で、分裂点近傍の界面の運動を詳細に解析し、スケーリング則の遷移過程の解明を目指す。また、液滴生成機構の遷移過程、特に **Dripping** と **Jetting** の遷移過程についても明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

### 3-1 スケーリング則の遷移過程

図2に界面の運動を数値的に再現するための計算領域を模式図として示す。あらかじめ伸張させた密度 $\rho_a$ 、粘度 $\mu_d$ の液柱を密度 $\rho_c$ 、粘度 $\mu_c$ の静止流体中に置き、液柱先端の界面張力によって自発的に収縮する様子を直接シミュレーションで再現する。液柱は円筒座標系の対称軸に配置し、その重心を境に左半分のみを計算する。一流体モデルによる支配方程式は連続の式および運動方程式である：

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) =$$

$$-\nabla P + \text{Oh}^2 \nabla \cdot \mu (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) + \int_f \kappa \bar{n}_f \delta(\bar{x} - \bar{x}_f) dA_f. \quad (2)$$

式(1)および(2)は液柱の半径 ( $a_0$ ) および粘性速度 ( $v_{\mu} = \sigma / \mu_d$ ) で無次元化されている。ここに、 $\sigma$ は界面張力、 $\text{Oh}$ は Ohnesorge 数 [ $\text{Oh} (= \text{Re}^{-1/2}) = \mu_d / (2a_0 \rho_d \sigma)^{1/2}$ ] である。式(1)および(2)は有限差分法で解き、界面の運動はフロントトラッキング法で追跡する。

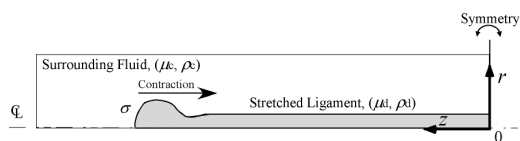


図2 計算領域の模式図 (スケーリング則)

### 3-2 液滴生成機構の遷移過程

図3に液滴生成機構の遷移過程を研究するために使用した計算領域の概略図を示す。粘度 $\mu_{\text{out}}$ 、密度 $\rho_{\text{out}}$ の流動させた連続相中に粘度 $\mu_{\text{in}}$ 、密度 $\rho_{\text{in}}$ の別の不混和流体(分散相)を半径 $R_{\text{in}}$ ノズルから速度 $u_{\text{in}}$ で注入する。同時にノズル外側にも流体を速度 $u_{\text{out}}$ で注入する。支配方程式は式(1)および(2)を使用した。

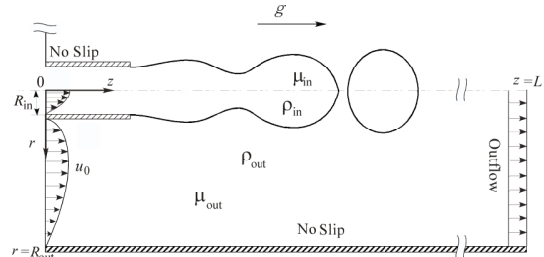


図3 計算領域の模式図 (液滴生成機構)

## 4. 研究成果

### 4-1 スケーリング則の遷移過程

図4にピンチオフ近傍の界面の様子を示す。計算条件は $\text{Oh} = 4.2 \times 10^{-2}$  ( $\text{Re} = 567$ )、 $\mu_c / \mu_d = 1$ 、 $\rho_c / \rho_d = 1.25$ とした。液柱が液滴へと分裂する直前、細い液糸が液滴と液柱の間に生成し、分裂点となる最小半径を示す点 ( $h_{\text{min}}$ ) を境に二つの円錐状の形を示す。円錐斜面の傾きは分裂点を境に異なり、液糸側が小さく ( $s_-$ )、液柱側が大きき ( $s_+$ )。

図5に $s_-$ および $s_+$ の時間変化を示す。横軸 $\tau$ は分裂に至るまでの時間 ( $t^* - t$ ) である。図より $s_-$ および $s_+$ とも一定であることから、界面形状は自己相似的に変化していることがわかる。

図6に $h_{\text{min}} / v_{\mu}$ と $\tau$ の関係をmsの単位に換算して示す。グラフ(a)の傾きより、 $h_{\text{min}}$ は時間の二乗に比例して減少することがわかる。グラフ(b)よりその減少速度は0.0359で、これは Stokes 流体の実験結果の0.0335にほぼ等しい。以上より、有限のレイノルズ数領域における液柱の分裂も、最終的には Stokes 流体のスケーリング則に従って起こることを確認した。

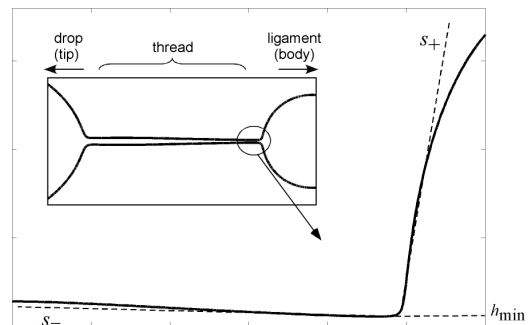


図4 ピンチオフ近傍の界面の様子

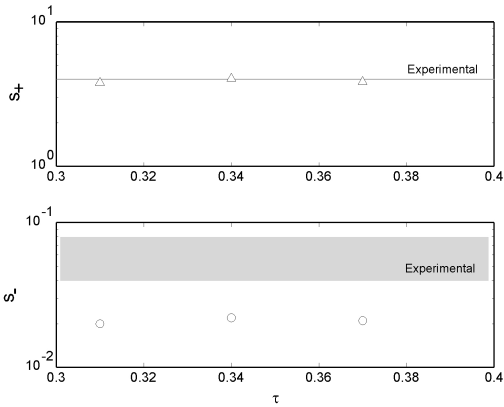


図5 円錐斜面の傾きの時間変化：  
液系側 ( $s_+$ )、液柱側 ( $s_-$ )

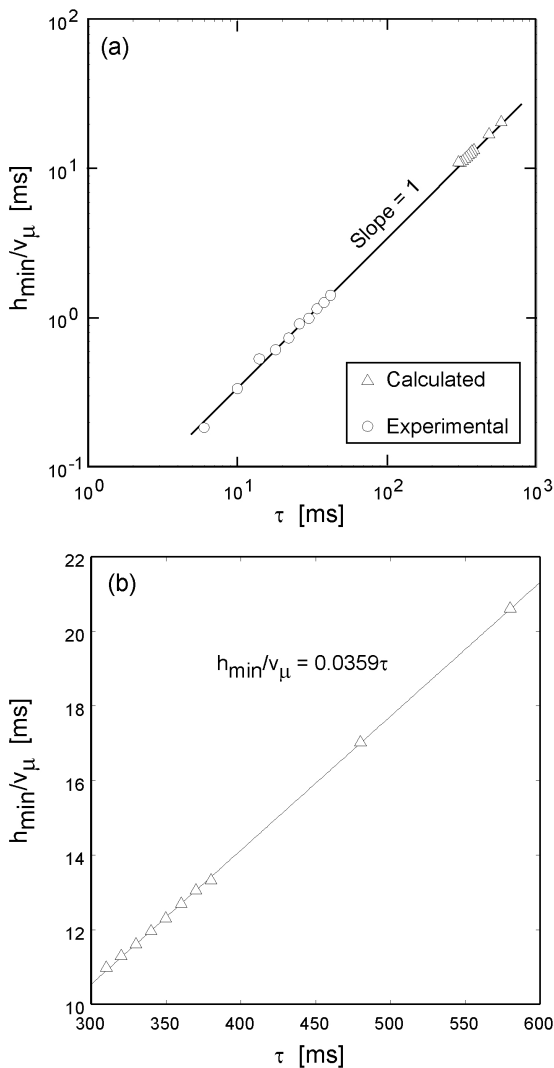


図6  $h_{\min}$ の時間変化

#### 4-2 液滴生成機構の遷移過程

液滴生成の様子を図7および図8に示す。  
各無次元数は  $Re_{in} = 2R_{in}u_{in}\rho_{in}/\mu_{in}$ 、 $Re_{out} = 2R_{in}u_{out}\rho_{out}/\mu_{out}$ 、 $We_{in} = 2R_{in}u_{in}^2\rho_{in}/\sigma$ 、 $We_{out} =$

$2R_{in}u_{out}^2\rho_{out}/\sigma$ である。図7のようにノズル近傍で液滴が生成する場合は **Dripping** モード、図8のようにノズルからジェットが生成し、そのジェット先端から液滴が生成する場合は **Jetting** モードと呼ぶ。Jetting モードでは生成する液滴径が Dripping モードより小さく、単分散の液滴が生成する。



図7 Dripping モードによる液滴生成  
[( $u_{out}/u_{in}$ ) = 8.8、 $Re_{in} = 0.2$ 、 $Re_{out} = 0.94$ 、 $We_{in} = 0.002$ 、 $We_{out} = 0.124$ ]



図8 jetting モードによる液滴生成  
[( $u_{out}/u_{in}$ ) = 20.0、 $Re_{in} = 0.2$ 、 $Re_{out} = 2.13$ 、 $We_{in} = 0.002$ 、 $We_{out} = 0.64$ ]

図9に Dripping モードと Jetting モードにおける遷移点の調査結果を  $Ca_{out}$  数(=  $\mu_{out}u_{out}/\sigma$ ) と  $We_{in}$  数を用いて示す。 $Ca_{out}$  数は連続相の粘性力と界面張力との比が分散相の液滴生成に与える影響を、 $We_{in}$  数は分散相の慣性力と界面張力との比が液滴生成に与える影響をそれぞれ表している。Utada らの実験[*Phys. Rev. Letters*, **99**, 094502 (2007)]によれば  $Ca_{out}+We_{in} \sim O(1)$ が遷移の境界であると報告されている。本研究結果と Utada らの研究結果における遷移の境界をそれぞれ実線と破線で示す。本研究結果では  $We_{in} > 0.8$  のとき、および  $Ca_{out} > 0.1$  でジェットが生成しており、遷移の境界は  $Ca_{out}+We_{in} \sim O(0.1)$ となった。実験と計算が異なる原因としては、本解析における入口条件が Utada らの実験装置に比べて単純であることが考えられる。一般的に、ジェットの長さは流入口付近で発生する擾乱の大きさに依存すると言われている。すなわち、入口条件が単純な本研究の場合、入口付近の擾乱が比較的小さくジェットが安定に成長するため、Jetting mode の領域が広がったと考えられる。さらに、粘度比も液滴生成機構の遷移に影響することが考えられ、現在さらに調査中である。

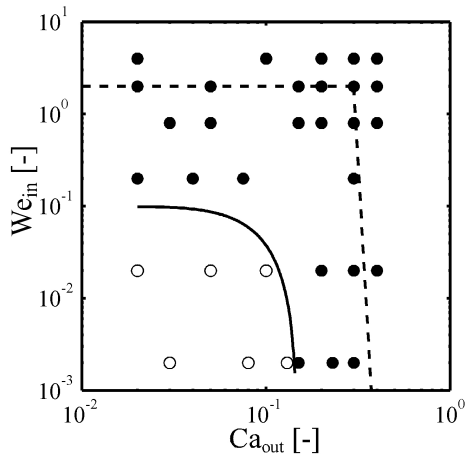


図9 Dripping モードと Jetting モードの遷移  
 [○: Dripping、●: Jetting、----: Utada らの遷移境界、—: 本研究]

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- ① Homma, S., Akimoto, K., Koga, J., Matsumoto, S., Computations of the Breakup of a Jet into Drops in Non-Newtonian Liquid-Liquid Systems, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 40, No. 11, pp. 920-927 (2007), 査読有.
- ② Homma, S., Koga, J., Transition of Scaling for Pinch-Off of an Axisymmetric Liquid Ligament in Another Immiscible Liquid, *Proceedings of 5th ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference*, ASME-FEDSM2007-37471 (2007), 査読無.
- ③ Yokotsuka, M., Homma, S., Koga, J., Formation of Jets and Drops in Co-Flowing Ambient Fluid, *Proceedings of International Workshop on Process Intensification in Fluid and Particle Engineering*, IWPI2008-B04, pp. 40-41 (2008), 査読無.
- ④ Yokotsuka, M., Homma, S., Koga, J., Front-Tracking Method for Three Immiscible Fluids, *Proceedings of 8th World Congress of Chemical Engineering* (2009), 査読有.

[学会発表] (計5件)

- ① 本間俊司, 降幡典幸, 古閑二郎, 二流体系における液柱のピンチオフ, 日本混相流学会年会講演会 2007, 札幌 (2007.6.12) .
- ② Homma, S., Koga, J., Transition of Scaling for Pinch-Off of an Axisymmetric Liquid Ligament in Another Immiscible Liquid, *5th ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference*, San Diego (2007.7.30).
- ③ 横塚宗之, 本間俊司, 古閑二郎, 外部流体の流れを利用したジェットおよび液滴の生成, 日本混相流学会年会講演会 2008,

会津若松 (2008.8.10) .

- ④ Yokotsuka, M., Homma, S., Koga, J., Formation of Jets and Drops in Co-Flowing Ambient Fluid, *International Workshop on Process Intensification in Fluid and Particle Engineering*, Tokyo (2008.10.17).
- ③ Homma, S., Yokotsuka, M., Koga, J., Computations of Drop Formation From a Micro Capillary in Co-Flowing Ambient Immiscible Liquid, *AIChE Annual Meeting*, Philadelphia (2008.11.19).