

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420102

研究課題名(和文) 数値流体力学と分子気体力学的手法のカップリングによる液面-液滴非合体现象の解明

研究課題名(英文) Investigation of non-coalescence phenomenon between a liquid drop and a liquid surface by coupling molecular gas dynamics approach with computational fluid dynamics

研究代表者

米村 茂 (Yonemura, Shigeru)

東北大学・流体科学研究所・准教授

研究者番号：00282004

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：コーヒーをドリップすると、液滴が液面上で浮遊する現象が観察される。この現象は水などの同種液体の間でも見られるが、同種の液滴と液面が合体しないという事実は驚くべきことである。この現象は学術的に興味深いだけでなく、工業的にも重要である。およそ140年にわたり研究されて来たが、そのメカニズムは明確ではない。数値シミュレーションによりこの現象を再現し、そのメカニズムを解明することが本研究の目的である。本研究では液滴と液面間の気体膜に注目し、液滴を振動液面に落とした場合、接触の直前に気体膜に高圧が発生し、両面の接触を妨げ、振動面の下降に合わせて液滴が跳ねて非合体が安定的に継続することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：When you drip coffee, you may often see one of the drops land on the surface and remain intact. This phenomenon can be seen between a drop and a surface of the same liquid, like water. It is a surprising fact that a drop and a surface of the same liquid do not coalesce immediately. This phenomenon is not only academically interesting but also industrially important. Although it has been investigated for more than a century, its mechanism is still unclear. The objective of the present study is to investigate its mechanism by reproducing this phenomenon in numerical simulations. We focused on the role of molecular gas film between the drop and the liquid surface, and clarified that when the drop is just about to land on the vibrating liquid surface, high pressure appears in the molecular gas film which prevents both liquid surfaces from contacting. It was also found that the drop bounces to the rhythm of the descent of liquid surface, so that the non-coalescence is maintained stably.

研究分野：流体工学

キーワード：液滴 マイクロ・ナノ気体流れ 分子気体潤滑膜 分子気体力学 数値流体力学

## 1. 研究開始当初の背景

コーヒーマーカーを使ってコーヒをドリップすると、コーヒの液滴がポットの中のコーヒの液面と一体化しないで、1秒か2秒の間、表面の上に乗って浮遊する現象が観察できる。この液滴の非合体现象はコーヒに限ったことではなく、他の液体でも、また同じ液体の間でも、観察できる。同じ液体の液滴と液面はファンデルワールス力により引きつけ合い、接触するや否や表面張力が表面積を小さくするように働き、直ちに合体するはずであり、同じ液体の液滴と液面が合体しないという事実は驚くべきことである。

二つの液滴が衝突の際に反発することを1879年にレイリー[1]が初めて報告している。またレイノルズ[2]は、水面に水しぶきを飛ばす実験を行い、最初の水しぶきでは水滴の浮遊は見られず、2,3度繰り返すうちに水滴が浮かぶようになることから、初めの動作で水面が清浄になり、この現象は水面の清浄さに依存し、温度や空気には関係ないと1881年に報告している。この現象の研究はその後100年進展が無かったが、1978年にWalker[3]が洗剤を加えた溶液の液面に鉛直な振動を加えることにより、安定的に液滴を液面上で維持することに成功している。近年になって、Dell'Aversanaら[4]は数十度の温度差を加えたシリコンオイルの液滴同士を接触させても、合体しないことに注目し、この現象は温度差を持った液滴同士が近づくことで、液滴の中で接触点とその周囲で温度差が生じ、それにより界面張力に差が生じて液滴表面にマランゴニ対流が生じ、この流れによって、液滴間の薄い気体膜の領域に外から空気が詰め込まれ高圧力が発生し、合体を妨げると説明した。しかし、温度差がない場合にも液滴の浮上は観察されるので、温度差のみからは説明できない。

この現象は学術的に非常に興味深い。また、液滴の合体は自然界においても、産業界においても数多くの場面で発生しており、液滴の合体、非合体现象のメカニズムを理解することは学術的にも、工業的にも非常に重要である。多くの研究がなされて来たが、そのメカニズムが明瞭に説明されたとは言えない。

[1] L. Rayleigh, Philos. Mag. 48, 321 (1899).

[2] O. Reynolds, Chem. News 44, 211 (1881).

[3] J. Walker, Sci. Am. June 1978, p. 123.

[4] P. Dell'Aversana et al., Phys. Fluids 8, 15 (1996).

## 2. 研究の目的

この現象の解明が困難なのは、液滴の非合体から合体への移行が極めて小さい空間スケールで極めて短い時間の間に発生するため、液滴内部、気体膜内部で発生している流れや圧力を計測することが困難であるから

である。このような状況の中で数値シミュレーションによって、この現象を再現出来れば、現象のメカニズムを解明することができるであろう。本研究は数値シミュレーションによりこの現象を再現し、そのメカニズムを明らかにすることを目的としている。

## 3. 研究の方法

液滴-液面間の気体流れは1ミクロン以下のマイクロ気体流れであり、分子気体力学的に解析する必要がある。本研究では、気体膜周囲の液滴、液槽、空気の流動を数値流体力学で解き、液滴-液面間の気体膜を分子気体力学的手法で解き、カップリングして現象の再現し、そのメカニズムを調べる。

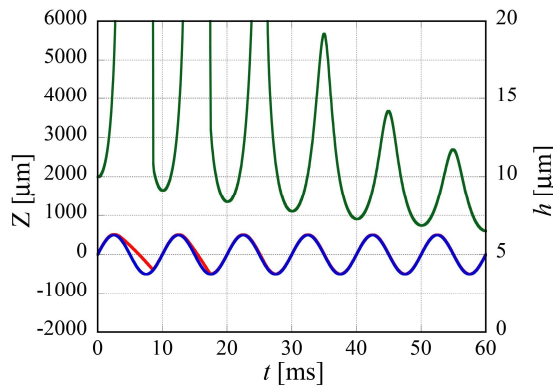
## 4. 研究成果

過去の実験において、振動する液面上に同一種類の液滴を滴下した場合に長時間にわたって液滴が液面と合体せずに、液面上で維持される現象が報告されている。本研究ではまず、液滴を円形の平板、液面を無限平板で模擬し、液滴を振動液面に落下させて、液滴-液面間の気体膜における圧力発生と液滴の運動を同時に追跡して、その現象を調べた。図1に典型的な浮上失敗と浮上成功の例を示す。青色の線が液面位置、赤色の線が液滴の底の位置の時間変化を表し、緑色の線が両面間距離 $h$ の時間変化を示している。両ケースとも同じ周波数であるが、液面振動の振幅の大きさが異なり、振幅の小さい(a)のケースでは両面間の距離が徐々に減衰し、いずれは接触してしまうが、一方で、振幅の大きな(b)のケースでは毎周期ごとに液滴は液面から離れ、再び接近し、また離れる、という繰り返しにより安定して浮上しつづけている。この様子はハイスピードカメラで観察された実際の液滴の運動と同じである。

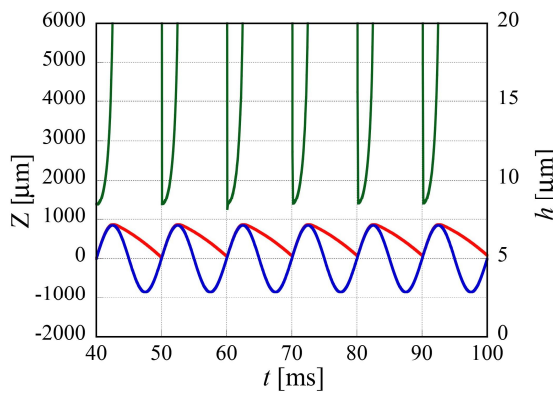
上記の液滴の落下・衝突・浮上の運動の理論的な考察から、安定的に浮上を繰り返すために必要な液面振動の加速度の最小限の振幅 $A\omega^2$ は振動数 $f$ に比例すると予測された。図2中の破線はその予測値を表している。図2は初期面間距離 $h_0$ 、液滴の質量、大きさが共通である条件の下で、周波数 $f$ および振動の振幅 $A$ を変化させてシミュレーションを行い、それぞれの試行で液滴が浮上したか失敗したかを記録したものである。赤色の×印は浮上に失敗したものの、青色の○印は安定的に浮上したものの、緑色の△印は運動開始後しばらくは安定的に浮上したもののその後、面間距離が減衰して最終的には接触したものであるが、実質的には浮上に成功したと考えるとよい。この図から、この理論が液滴の浮上に関して良い予測を与えていることがわかり、我々の理解がおおよそ妥当であることがわかる。

図3,4に、直径2倍の液滴、直径半分の液滴の場合の浮上の成否の結果を示している。異なる大きさの液滴についても、浮上の失敗

と成功の境い目は、前述の理論的な予測値と一致しており、この理論の妥当性が確かめられた。



(a) 浮上失敗



(b) 浮上成功

図 1 液滴底面（赤）と液面（青）の位置の時間変化と両面間距離  $h$ （緑）の時間変化

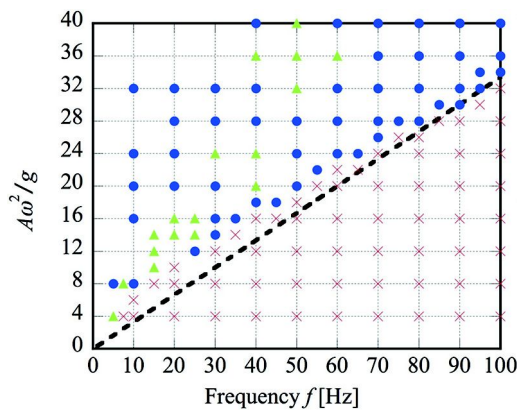


図 2 浮上に必要な加速度と周波数の関係（標準ケース）

以上の結果は、液滴と液面の変形を無視した単純化したモデルを用いて得られた。より現実に近い現象を再現するために、気体膜の圧力および流動の計算と、液滴、液面および周囲気体の流動の計算とを連成させるカップリング手法を考案した。液滴-液面間の気体膜のマイクロ・ナノ気体流れの支配方程式がボルツマン方程式であるのに対し、周囲流

体の流れの支配方程式はナビエ・ストークス方程式である。さらに気体膜領域が周囲流体領域に内包され、かつ、流動により変形してしまうために特別な取り扱いが必要となるのである。

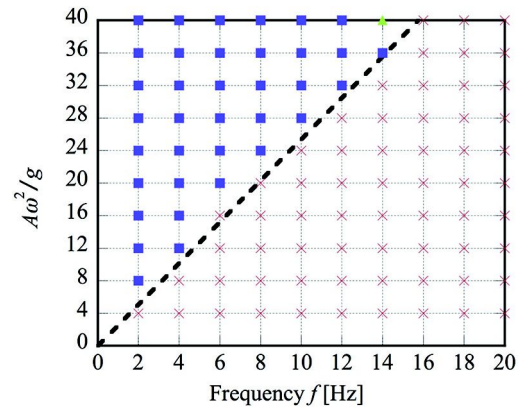


図 3 浮上に必要な加速度と周波数の関係（2倍の液滴）

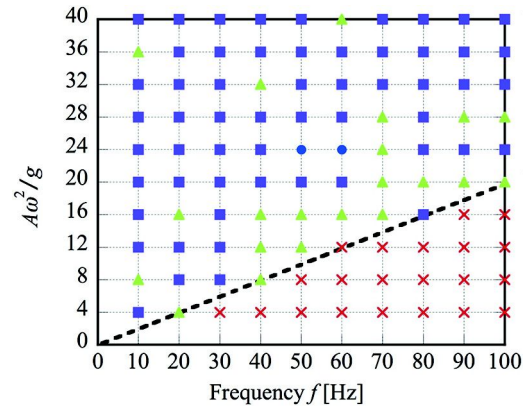


図 4 浮上に必要な加速度と周波数の関係（半分の液滴）

本研究では、まず、界面活性剤が吸着した液滴が液面上で浮遊する系をシミュレートするため、移動界面を追跡する Front-tracking 法と液滴-液面間の狭い隙間に格子点を効率的に配置するアダプティブメッシュを用いた手法を検討した。図 5 に示すように、浮遊することは再現出来たが、図 6 に示すように、液滴-液面間の隙間の大きさが計算格子の解像度に依存してしまう結果となった。解像度に依らない結果を得るため、気体膜を気体潤滑理論モデルで補う手法を検討した。高解像度のシミュレーションデータから得られるデータを気体潤滑理論モデルの入力として用いて、妥当な結果が得られるか検討した。上下速度データを入力として圧力が再現できるかを検討したところ、速度のみでは不十分であることが分かった。圧力を入力としてマランゴニ応力が再現できるか（図 7）、マランゴニ応力を入力として圧力を再現できるか（図 8）を確認した。これらはどちらも概ね再現でき、CFD に潤滑モデ

ルをカップリングさせて妥当な結果が得られることが分かった。この潤滑モデルをボルツマン方程式に基づく分子気体潤滑理論モデルに置き換えることを考えていたが、現状のデータを詳細に検討したところ、Front-tracking 法では界面張力の効果を数格子幅でぼかして表現するため、狭い間隙の流れを表現するには別の手法を用いる必要があると判断するに至った。そこで、Front-tracking 法で界面を追跡しつつ、界面張力の効果をぼかさず表現する ghost fluid 法に基づくシャープインターフェース型 Front-tracking 法を開発した。この手法に、上述の分子気体潤滑計算を組み込めば、気体膜が 1 格子幅以下になっても妥当な結果が得られることが期待される。現在、学会発表に向けてデータを検討中である。

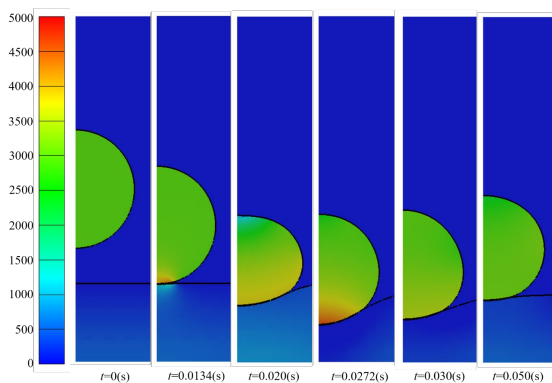


図 5 アダプティブメッシュを用いたシミュレーションによる液滴と液面の衝突の様子

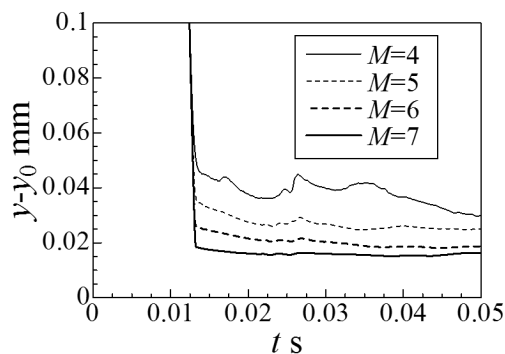


図 6 アダプティブメッシュを用いたシミュレーションによる液滴と液面間の距離の時間変化(M は格子解像度で 1 つ増えると格子幅が半分となる)

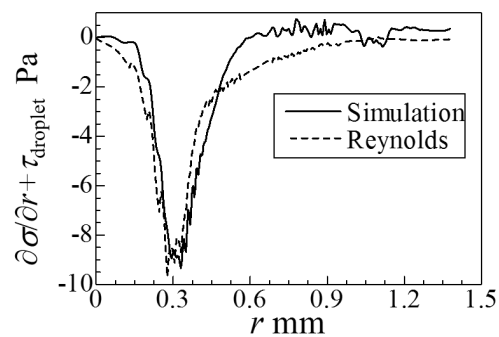


図 7 CFD で得られた圧力を潤滑モデルの入力として得られたマランゴニ応力分布

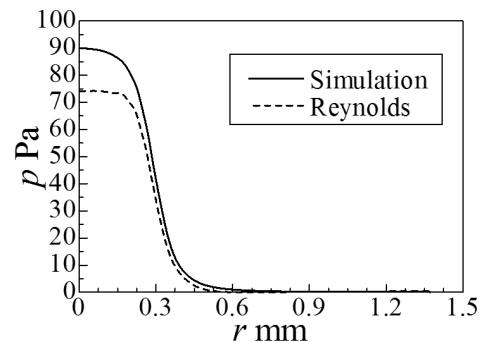


図 8 CFD で得られたマランゴニ応力を潤滑モデルの入力として得られた圧力分布

## 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)

〔学会発表〕(計 8 件)

大西雄太, 山本恭史, 大友涼子, 田地川勉, 板東潔, 固体壁面に衝突する液滴による濡れ挙動のシミュレーション 接触線移動モデルの検討, 日本機械学会関西学生会平成 28 年度学生員卒業研究発表講演会, 2017 年 3 月 11 日, 大阪大学 (大阪府・吹田市)

米村 茂, DSMC 法によるマイクロ・ナノスケールの気体流れの研究, 核融合科学研究所における特別講演, 2016 年 9 月 1 日, 核融合科学研究所(岐阜県・土岐市).

米村 茂, マイクロ・ナノスケールの気体流れに関する研究, 第 11 回工大・核融合研共同セミナー, 2016 年 8 月 8 日, 核融合科学研究所 (岐阜県・土岐市).

鈴木章大, 川越吉晃, 米村 茂, 山本恭史, 液滴と液面の非合体現象に関する研究, 日本機械学会東北支部第 51 期総会・講演会, 2016 年 3 月 11 日, 東北大学(宮城県・仙台市).

辻川晃弘, 山本恭史, 米村 茂, 大友涼子, 田地川勉, 板東潔, 液滴の液面上浮遊現象のシミュレーション-潤滑モデルの適用の検討-, 日本機械学会関西学生会平成 27 年度学生員卒業研究発表講演会, 2016 年 3 月 11 日, 大阪電気通信大学(大阪府・寝屋川市).

鈴木章大, 小田智也, 米村 茂, 液滴の同種液体表面における浮上現象に関する研究, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 2014 年 11 月 22 日, 岩手大学(岩手県・盛岡市).

Shota Suzuki, Tomoya Oda and Shigeru Yonemura, A Study on a Floating Drop on a Liquid Surface, Eleventh International Conference on Flow Dynamics, 2014 年 10 月 8 日, 仙台国際センター(宮城県・仙台市).

鈴木章大, 小田智也, 米村 茂, 液滴の同種液体表面における浮上現象に関する研究, 日本機械学会 2014 年度年次大会, 2014 年 9 月 8 日, 東京電機大学(東京都・足立区).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

米村 茂 (YONEMURA Shigeru)  
東北大学・流体科学研究所・准教授  
研究者番号: 00282004

### (2) 研究分担者

山本 恭史 (YAMAMOTO Yasufumi)  
関西大学・システム理工学部・教授  
研究者番号: 90330175