

Title	液面に浮かぶ液滴とファラデー波について
Author(s)	田辺, 一葵
Citation	令和元(2019)年度学部学生による自主研究奨励事業 研究成果報告書. 2020
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/75990">https://hdl.handle.net/11094/75990</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

## 2019年度大阪大学未来基金【住野勇財団】学部学生による自主研究奨励事業研究成果報告書

ふりがな 氏名	たなべ かずき 田辺 一葵	学部 学科	工学部 電子情報工学科	学年	1年
ふりがな 共同 研究者氏名	おおいし さとし 大石 悟	学部 学科	工学部 応用自然工学科	学年	1年
	おおこし まさはる 大越 正治		工学部 応用自然工学科		1年
					年
アドバイザー教員 氏名	山口 康隆	所属	工学研究科		
研究課題名	液面に浮かぶ液滴とファラデー波について				
研究成果の概要	研究目的、研究計画、研究方法、研究経過、研究成果等について記述すること。必要に応じて用紙を追加してもよい。(先行する研究を引用する場合は、「阪大生のためのアカデミックライティング入門」に従い、盗作剽窃にならないように引用部分を明示し文末に参考文献リストをつけること。)				
<p>1. はじめに</p> <p>コーヒーをドリップしている様子を観察してみると、液面上に液滴が浮かんでいる様子が見取れる。直感的に考えれば、液滴と液面はファンデルワールス力により引き合い、接した瞬間に表面張力によって合体してしまうように思われるが、この現象を上手く再現すると液滴を数分間にも渡って浮かばせられる。私が高校生の時に行った自主研究で、この現象に液面の振動が大きく関係していることまでは分かったが、その時点では装置・知識の不足により深く研究することが出来ず、理論的な考察ができなかった。本研究はその続きとして、特に安定して液滴が浮く時の液面の様子を浅水波方程式の数値計算によってシミュレーションし、考察を深めた。</p> <p>2. 研究計画</p> <p>1. 先行研究を調査 Physical Review Letter などの学術誌で同様の研究を調べる。</p> <p>2. 実験系のシミュレーション Fortran での数値計算の手法を学ぶ。特に直交座標系と極座標系での二次元浅水波方程式を数値計算により解く。</p> <p>3. 実験と観察 シミュレーション結果と実際の液面の様子を比較する。</p> <p>3. 研究経過</p> <p>・過去に行った実験では石けん溶液が入った液槽を鉛直方向に加振してその上に同種の液滴を滴下し、液滴の寿命を計測していた。この際、ほとんどの周波数では平均寿命が10秒前後であったのに対し、ある特定の周波数の時のみ1分以上浮き続けるという結果を得ていたことから、これを詳細に検討することとした。</p>					

・関連する研究として、以下の二つの論文を精読した。概要を合わせて示す。

[1] Y. Couder *et al.*, “From Bouncing to Floating : Noncoalescence of Drops on a Fluid Bath,” **94**,177801(2005).

液滴と液面との間に空気の層が存在することで液滴が浮くというモデルが示され、潤滑理論により浮上力がモデル化されていた。シリコンオイルを用いた実験では、この層が  $0.2\mu\text{m}$ 以下になると液滴と液面が触れ合体するが、これがファンデルワールス力の作用であると考察されている。

[2] R. N. Valani *et al.*, “Superwalking Droplets,” **123**, 024503 (2019).

液面を振動数  $f$  と  $f/2$  で同時に加振することにより、単一の周波数で加振した場合と比べて、はるかに大きい液滴が維持され、かつこれが液面上を素早く動き回ることが示されている。

・実際に二次元波動方程式のシミュレーションをするにあたり、Fortran を用いた数値計算の手法を担当教授の御指導の下学んだ。3 次元の波面の運動は本来ナビエーストックス方程式で表されるが、波面の振幅が小さく、流れが無視できる場合には、2 次元の次の波動方程式に帰着できる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

ただし、 $u$  は液面の高さ、 $c$  は音速を表す。また、円形のシャーレ上で発生している浅水波の場合は、極座標系で表した以下の式を用いる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} \right)$$

境界条件として、シャーレの縁は固体壁境界であるため、流体の境界面に対する平行方向の速度が 0 であることを課した。加振する場合は、境界上の  $u$  の値として適当な振幅と加振周波数を与える。また、極座標系については周方向に対し周期境界条件を用いた。数値計算に際し、近傍の点を用いた差分方程式を用いるが、極座標系では中心が特異点となるため、近傍の点の値によりこれを補間する。

#### 4. 実験方法

実験は図 1 に示すような装置で行った。

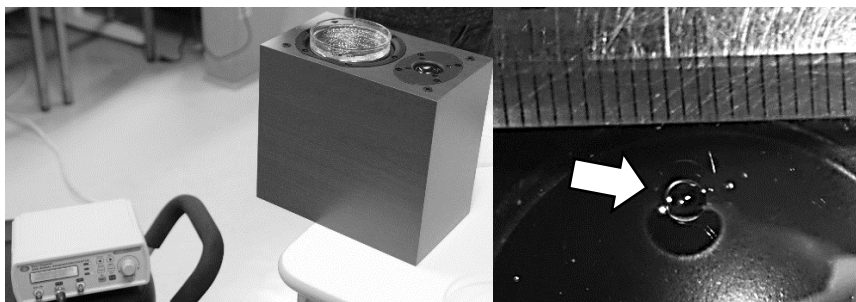


図 1: 低周波発信機とウーファー

図 2: 液面に浮かぶ液滴

深さ 10mm シャーレの内径 90mm

石ケン水の濃度 市販食器用洗剤を 1000 倍希釈

一定の加振の振動数で液面に定在波を形成した後、ピペットにより液滴を滴下する。

大きさは直径約 2.5mm。浮上時間を寿命として計測する (図 3)。

ウーファーに入力する正弦波の電圧の振幅は、15Hz, 30Hz の場合は溶液が零れる程激しく振動

してしまうため 5V とし、60Hz の場合は 10V、その他の周波数は 20V で計測した。

## 5. 実験結果

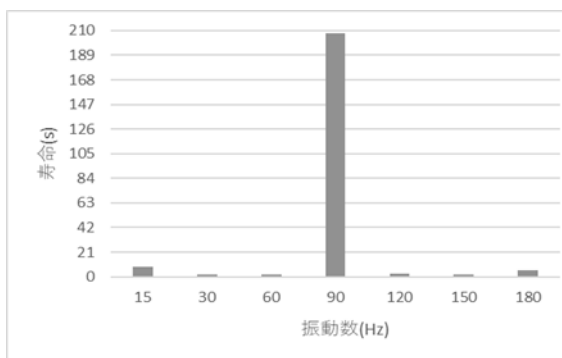


図 3：加振振動数と寿命

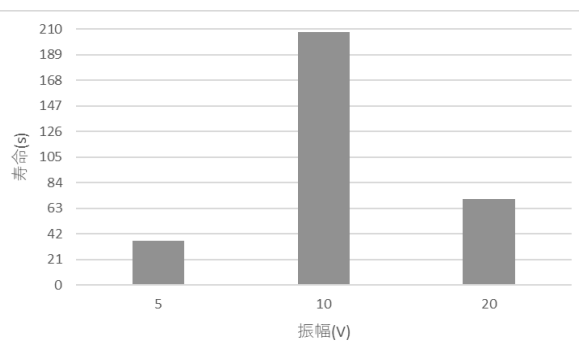


図 4：90Hz における振幅と寿命

図 3 に振動数に対して液滴の寿命を示した。これより、加振周波数が 90Hz では 10 分以上安定して浮き続ける液滴が観測された。そこで、この 90Hz の場合について、振幅の依存性を調べたものが図 4 である。いずれの場合も、かなりの時間にわたって浮上が維持されることが分かるが、振幅もまた重要なファクターであることがわかる。

## 6. シミュレーション結果



図 5：90Hz、深さ 0.5cm でのファラデー波

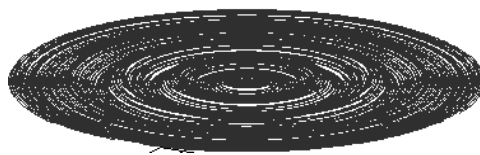


図 6：90Hz 深さ 0.5cm 円形の境界条件でのシミュレーション結果

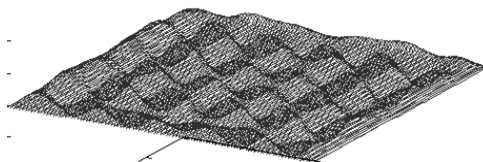


図 7：正方形の境界条件でのシミュレーション結果

図 5-図 7 にそれぞれ実験と、円形の境界条件、および正方形の境界条件で浅水波方程式を解いたシミュレーション結果の波面の形状を示す。実験の条件に近いと考えられる円形の境界条件では、軸対称の定在波のみが現れ、実験で得られるような非対称の細かい構造を有する定在波が得られなかった。この一つの原因として、本来はナビエ-ストークス方程式等で空気との境界も含めて考

え、ファラデー不安定性による乱れのために軸対称の条件が崩れる状態となるが、シミュレーションでは、境界から常に軸対称の振幅が与えられ、乱れが増幅しない条件となっていたためであると推測される。実際に正方形の境界条件で行ったシミュレーションの方が、シャーレの中央付近のパターンが図8と似ていることから、何らかの乱れを導入し、軸対称でない波が増幅するようにすれば、実験に近い波が現れるのではないかと推測される。

## 7. 考察

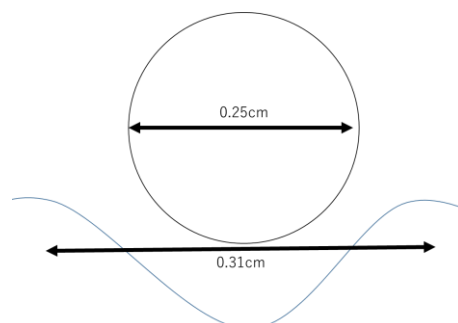


図8: 腹の間隔と液滴の大きさの比較

・実験的に得られる90Hzのファラデー波の中心付近における、対角線上に向かい合った腹と腹の間隔は0.31cm程だった。これは図8に示すように、丁度液滴が収まる大きさとなっている。3で示した論文[1]の内容を踏まえると、液滴の周囲に存在する腹の振動が液滴-液面間の空気層を更新し続けているという仮説を立てることが出来る。

## 8. おわりに

今回の研究では革新的な発見が出来なかったことが悔やまれる。しかし、今回の研究を通して、数値解析という、高校時代には扱えなかった手法を導入することで、この現象についてより一層理解が深まった。また、先行研究を調べてみると、液滴が液面上をゆっくりと動く場合について盛んに研究されているようだが、一点に留まり続ける場合の研究は比較的少ないように思われ、このような内容を掘り下げることで、新たな現象の発見につながる可能性もあると考えられる。

今後はナビエ-ストークス方程式の数値計算や界面での不安定性について学習して、より精密なファラデー波のシミュレーションしてみたい。また、今回の考察から得られた仮説である、「液滴の周囲に存在する腹の振動が液滴-液面間の空気層を更新し続けている」を検証するために、液滴-液面間の空気層の圧力変化等をシミュレーションすることを目標として、潤滑理論等を学んでいきたい。

## 9. 参考文献

- [1] Y. Couder *et al.*, "From Bouncing to Floating : Noncoalescence of Drops on a Fluid Bath," **94**,177801(2005).
- [2] R. N. Valani *et al.*, "Superwalking Droplets," **123**, 024503 (2019).
- [3] 偏微分方程式入門：金子 晃著：東京大学出版会
- [4] ファラデー水面波～カオス、ソリトンパターン形成～ (1997)梅木 誠
- [5] ファラデー共鳴の直接数値シミュレーション (1999)近野雅嗣、村上洋一